

ბ. ხარაშვილი

კრისტალოგრაფია და კრისტალთქიმია

საქართველოს სსრ უმაღლესი და საშუალო სპეციალური განათლების საშინისტროს მეურ დამტკიცებული და მხმარე სახელმძღვანელოდ უმაღლესი ტექნიკური სისწავლებლებისათვის

სახელმძღვანელო შედგენილია უმაღლესი სასწავლებლებსათვის კრისტალოგრაფიის და კრისტალოქიმიის კურსის პროგრამის საფუძველზე. ელემენტარული კრისტალოგრაფიის შესახებ მოხდება.

წიგნში განხილულია გომეტრიული კრისტალოგრაფიის ძირითადი კანონები და რეალურ კრისტალთა კრისტალოგრაფიული თვისებები, მოყვანილია კრისტალთა შინაგანი აღნაგობის საკონტრასტული და მათი სტრუქტურის შესწავლის მეთოდები. მოცემულია კრისტალურ სტრუქტურაში კიბითი ბმის სახეები და მარტივი და რთული ნივთიერებათა ძირითადი სტრუქტურული ტიპები.

სახელმძღვანელო განკუთვნილია ძირითადად უმაღლესი სასწავლებლების გეოლოგიური სპეციალობის სტუდენტებისათვის. იგი გამოადგება აგრეთვე ქირურგ-ტექნოლოგიურ და მკვლევარული სპეციალობის სტუდენტებს.

რეცენზენტები: ტენიკის მცნებებთან დოქტორი, პროფესორი
ა. შველაშვილი,
ტენიკის მცნებებთან კანდიდატი, დოცენტი
თ. ავალიანი

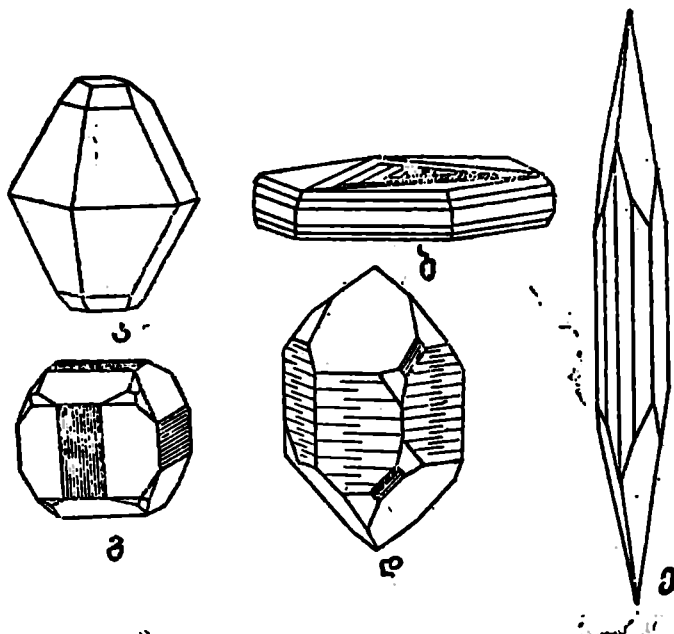
შ ე ს ა ვ ა ლ ი

კრისტალოგრაფია არას მცნიერება, რომელიც შეისწავლის კრისტალებს და ნივთიერების კრისტალურ მდგომარეობას. ცერმინი კრისტალოგრაფია, რ.მელიკ თანამედროვე გაგებით პირველად 1723 წელს გამოიყენა შვეიცარიელმა მეცნიერმა მ. კაპლერმა, შედგება ორი ბერძნული სიტყვისაგან „კრისტალოს“ და „გრაფო“. ძველ ბერძნულში სიტყვა „კრისტალო“ ეწოდებოდა ყინულს, შუა საუკუნეებში კი—მთის ბრლის კრისტალებს (ყინულთან გარეგანი მსგავსების გამო), ხოლო XVII საუკუნიდან ეს სახელი ეწოდა ყველა ბუნებრივ სხეულს, რომელსაც მრავალწახნაგას ფორმა აქვს. „გრაფო“ ნიშნავს წერაჲ; ამგვარად, „კრისტალოგრაფია“ კრისტალთა აღწერას ნიშნავს.

სხვადასხვა ნივთიერების კრისტალები წარმოიქმნება ან ბუნებრივად—დედამიწის ქერქსა და ზედა მანქიაში, ან ხელოვნურად—ლაბორატორიაში. ყოველი კრისტალური ერთგვაროვანი მყარი სხეულია, რომელსაც აქვს მრავალწახნაგას ფორმა. იგი შეიძფარგულია ბრტყელი წახნაგებით, რომლებიც ურთიერთიკვეთებიან წიბოების გასწვრივ, ხოლო წიბოები—კრისტალის წვეროებში.

1-ელ ნახაზზე ბოცეიულია გოგირდის (S), გრაფიტის (C), პირიტის (FeS_2), კვარცის (SiO_2) და ახუიმანტის (Sb_2S_3). კრისტალები სიმეტრიულად განლაგებული წახნაგებით წარმოდგენილი იდეალური ფორმის მარქაჲა ბუნებაში დამოკიდებულია, ერთი მხრივ, წარმოქმნის გადმოს ხელქმეჲებ პარაბეზე (წაქე, ტეჲერატუა, კომპონენტების კომქენრაცია და სხე.). თერე მხრივ—კრისტალის ამგე. ბი ქიმიური ელემენტების ატომების სივრცეი კანონზომიერად განლაგებაზე—კრისტალის სტრუქტურაზე. დადგენილია, რომ არგები ნაწილაკები კანონზომიერადაა განლაგებული არა მარტო კრისტალებში, არამედ მათ უსწორუპსწორო ნამსხვ რეებ ბი და მარცვლებ ბი. ეს საჭუალებას იძლევა განვივილოთ კრისტალზე უფრო ზოგადი კატეგორია-ნივთიერების კრისტალური მდგომარეობა. მე-2 ნახაზზე მოცეწულია სხვადასხვა ნივთიერების კრისტალური სტრუქტურები მისი შემადგენელი

ოონების შესაბამისი ზომის ბირთვების წყობით (მარცხნივ) ან ამ ბირთვების მხოლოდ ცენტრის ადგილის აღნიშვნით (მარჯვნივ). იმ შემთხვევაში კი, როდესაც ნივთიერების ამგები ნაწილაკები სივრცეში უწყესრიგოდაა განლაგებული, ნივთიერება ამორფულ მდგომარეობაშია. ამორფული ნივთიერებებია შინა, ლუქი და სხვ. დედამიწის ქერქის შედგენილობაში ნივთიერების დაახლოებით 95% კრისტალურ მდგომარეობაშია, 5% — ამორფულში. ნივთიერების ამორფული მდგომარეობა არამდგრადია (მეტასტაბილურია) და ამიტომ იგი ყოველ-

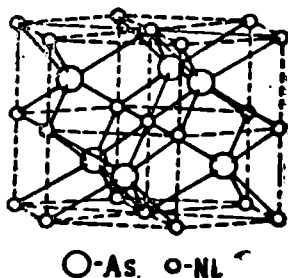
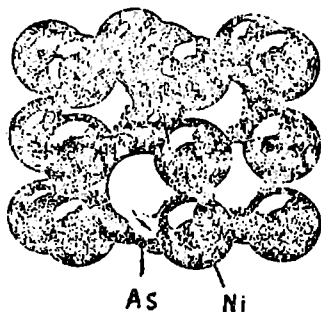
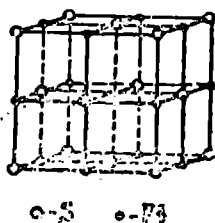
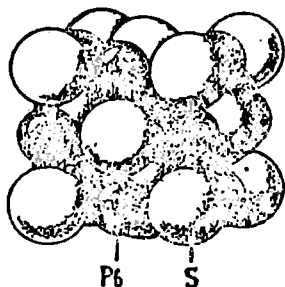


ნახ. 1. გოგირდის (ა), გრაფიტის (ბ), პიროიტის (გ), კვარცის (დ) და ანტიმონიტის (ე) კრისტალები.

თვის უფრო მდგრად-კრისტალურ. მდგომარეობაში გადასვლას ისწრაფვის.

ჩასახვისთანავე, დედამიწის შემსწავლელ მეცნიერებებს, მათ შორის პირველ რიგში მინერალოგიას, საქმე ჰქონდა კრისტალურ მდგომარეობაში მყოფ სხეულებთან და ამიტომ კრისტალოგრაფიული მასალა გროვდებოდა მინერალთა სამყაროს შესწავლასთან ერთად. დაახლოებით 300 წლის მანძილზე კრისტალოგრაფია ვითარდებოდა, როგორც გეოლოგიურა ციკლის მეცნიერება-

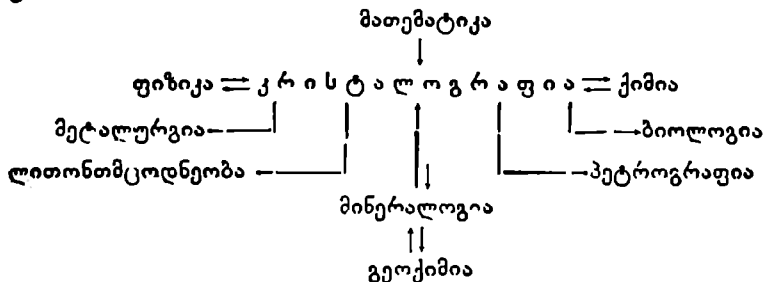
თანამედროვე მყარი სხეულის ფიზიკაში განავითარა ახალი შეხედულებანი სიმეტრიისა და ანტისიმეტრიის შესახებ, გაათართოვა მყარი სხეულის სტრუქტურის შესწავლის დიფრაქციული მეთოდები (ელექტრონოგრაფია და ნეიტრონოგრაფია), შეიმუშავა მაგნიტური რეზონანსის კვლევის მეთოდები, გააღრმავა ელექტრონული მიკროსკოპია და სხვ. კრისტალთფიზიკა. ემყარება რა კრისტალოგრაფიის შეხედულებებს მაკრო და მიკროსიმეტრიის შესახებ, აღგენს კრისტალების ახალ ახალ მნიშვნელოვან თვისებებს, რომლებსაც ფართოდ იყენებენ თანამედროვე კვანტურ ელექტრონიკაში (მაზერები და ლა-



ნახ. 2. გალენიტის (PbS) და ნიკელის (NiAs) კრისტალური სტრუქტურები.

ზერები), ტექნიკურ ოპტიკაში, რადიოტექნიკაში, ელექტრონულ გამომთვლელ მანქანებში და ნახევარგამტარულ ხელსაწყოთმშენებლობაში. განსაკუთრებით აღსანიშნავია კრისტალოგრაფიის მიღწევები ბიოლოგიური ობიექტების სტრუქტურის შესწავლის საქმეში. ამგვარად, თანამედროვე კრისტალოგრაფიის კვლევის საკანია არა მარტო მინერალი, არამედ ლითონები და მათი შენადნობები, პოლიმე-

რები და ბიოლოგიური წარმოშობის რთული ნივთიერებანი. აღნიშნულიდან ჩანს, რომ თანამედროვე კრისტალოგრაფიის ამოცანები შორს გასცდა მინერალოგიის საკითხებს. დღეისათვის კრისტალოგრაფიის დამოკიდებულება სხვა მეცნიერებებთან შეიძლება შემდეგი სქემით გამოისახოს:



როგორც აღვნიშნეთ, კრისტალოგრაფიას ხანგრძლივი და მტკიცე კავშირი აქვს გეოლოგიური ციკლის მეცნიერებებთან (მინერალოგია, პეტროგრაფია, გეოქიმია). ყოველი ცალკეული კრისტალი და მისი ინდივიდუალური დამახასიათებელი მოოფოლოგიური თვისებურებანი გეოლოგიის სპეციალური კვლევის საგანია. მოკლედ შევჩერდეთ კრისტალოგრაფიის განვითარების მთავარ ეტაპებზე.

მეცნიერულ კრისტალოგრაფიას საფუძველი ჩაეყარა 1669 წელს, როდესაც გამოქვეყნდა გამოჩენილი ბუნებისმეტყველის ნიკოლოზ სტენონოს (ნილს სჟენსენის) ნაშრომი „შეახებ მყარისა ბუნებრივად მყარო სახით არსებულისა“, რომელშიც თვისებების სახით ჩამოყალიბებულია ავტორის მეხეფულებანი პალეონტოლოგიის, გეოლოგიის, მინერალოგიისა და კრისტალოგრაფიის საკითხებზე. განსაკუთრებით საინტერესოა მთის ბროლსა (SiO_2) და ჰემატიტის (Fe_2O_3) კრისტალების დეტალური აღწერა, რის მედეგ დაც ავტორმა დაადგინა კუთხეების მუდრიეზის კანონი (იხ. § I. 4). აღსანიშნავია, რომ ეს კანონი გეომეტრიული კრისტალოგრაფიის შემდგომ განვითარებას საფუძვლად დაედო ნხოლოდ 1773 წლიდან, როდესაც იგი ხელმეორედ იქნა დადგენილი ფრანგი კრისტალოგრაფის რომე დელილის მიერ. კრისტალოგრაფიის ეს საკითხები განხილულია მ.ლომონოსოვის შრომებშიაც.

შემდეგი მნიშვნელოვანი ეტაპი კრისტალოგრაფიის განვითარებისა დაკავშირებულია ფრანგი მეცნიერის რენე ჟიუსტ აიუის გამოკვლევებთან. 1764 წელს მან დაადგინა კრისტალოგრაფიის ერთერთი ძირითადი კანონი, რომელიც პარამეტრების რაციონალური შეფარდების კანონის სახელითაა ცნობილი (იხ. § III. 1).

1867 წელს რუსმა აკადემიკოსმა ა. ვალუინმა მოგვცა სიმეტრი-

ის 32 სახის დადგენის ორიგინალური და მარტივი ხერხი (იხ. § IV.2). 1857 წელს ინგლისელმა ბუნებისმეტყველმა გ. სორბიმ ააგო პოლარიზაციული მიკროსკოპი, რამაც შესაძლებელი გახადა კრისტალთა ოპტიკური თვისებების შესწავლა.

1855 წელს ფრანგმა კრისტალოგრაფმა ოგიუსტ ბრავემ თეორიულად დაადგინა სივრცული ტრანსლაციური მესრის 14 სახეობა, რო-



ნ. სტენო
(1638-1686)



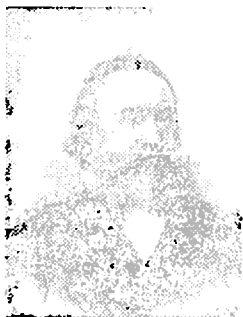
რომე დე ლილი
(1736-1792)

მლებსაც დღესაც არ დაუკარგავთ თავისი მნიშვნელობა კრისტალთა აგებულების შესწავლის საქმეში (იხ. § VI.2) 1890 წელს დიდმა რუსმა კრისტალოგრაფმა ე. ფეოდოროვმა თეორიულად დაადგინა სიმეტრიის 230 სივრცული ჯგუფი, ე. ი. კრისტალური ნივთიერების სივრცულ მესერში მატერიალური წერტილების (ატომების, იონების სივრცული განლაგების შესაძლებლობა (იხ. § VI.4). ამ გამოკვლევებით ფეოდოროვმა საფუძველი ჩაუყარა სტრუქტურული კრისტალოგრაფიის განვითარებას. მის სახელთანაა დაკავშირებული აგრეთვე ორწრიანი გონიომეტრის შექმნა, რამაც მნიშვნელოვნად გააუმჯობესა კრისტალთა გაზომვის მეთოდიკა, ხოლო მის მიერ პოლარიზაციული მიკროსკოპისათვის შექმნილმა „მაგიდამ“ (ამეამად მას „ფეოდოროვის მაგიდას“ უწოდებენ) ახალ საფეხურზე აიყვანა კრისტალთა ოპტიკური თვისებების კვლევის საქმე.

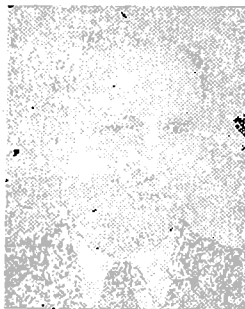
1912 წელს გერმანელმა ფიზიკოსმა მ. ლაუემ კრისტალში რენტგენის სხივების გატარების შედეგად აღმოაჩინა სხივების დიფრაქციის მოვლენები (იხ. § VII.3). ამ მნიშვნელოვანი აღმოჩენის შემდეგ ფართოდ ვითარდება კრისტალთა რენტგენოეტრია, რამაც მტკიცე

საფუძველი ჩაუყარა კრისტალთქიშიას. კვლევის ამ ეტაპზე პირველ რიგში უნდა აღინიშნოს რუსი კრისტალოგრაფი გ. ვულფი და ინგლისელი მკვლევარები მამა-შვილი ვ. და უ. ბრეკები. რენტგენული კვლევის გზით მიღებული მასალის დამუშავებამ კრისტალური ნივთიერების შესწავლა ახალ საფეხურზე აიყვანა.

კრისტალური ნივთიერების ქიმიურ შედგენილობასა და ფიზიკურ თვისებებს შორის კავშირის დადგენაში დიდი ღვაწლი მიუძღვით საბჭოთა კრისტალოგრაფებს. ა. შუბნიკოვის მიერ ახალი სტრუქტურ-



გ. ვოლფოვი
(1853-1919)



ა. შუბნიკოვი
(1837-1970)

რული კლასების და ჯგუფების რაოდენობის გამოყვანა საბჭოთა კრისტალოგრაფიული სკოლის დიდი მიღწევაა. შუბნიკოვის მიერ ჩატარებულმა კვლევებმა შესაძლებელი გახადა კრისტალთა მაგნიტური სტრუქტურის შესწავლა. იგი სამართლიანად ითვლება კრისტალთ-ფიზიკის ერთ-ერთ ფუძემდებლად. ი. შაკრანოვისკიმ მარტივი ფორმების სტრუქტურულ-კრისტალოგრაფიული სახესხვაობების დადგენით მნიშვნელოვნად განავითარა მინერალთა კრისტალომოლოგიური შესწავლა. საბჭოთა კრისტალოგრაფების მიღწევებმა საყოველთაო აღიარება პოვა 1966 წელს მოსკოვში ჩატარებულ კრისტალოგრაფთა VII მსოფლიო კონგრესზე, სადაც კრისტალოგრაფთა ჯაერთამორისო კავშირის პრეზიდენტად არჩეულ იქნა საბჭოთა კრისტალთქიმიური სკოლის მეთაური, აკადემიკოსი ნ. ბელოვი. 1973 წელს ნ. ბელოვს შეენიჭა ლენინური პრემია სხვადასხვა კრისტალურ ნივთიერებათა სტრუქტურების შესწავლისათვის.

კრისტალოგრაფიის კურსი იყოფა ოთხ ნაწილად: გეომეტრიულ,

სტრუქტურულ, ქიმიურ და ფიზიკურ კრისტალოგრაფიად.

I. გეომეტრიული კრისტალოგრაფია კურსის მთავარი ნაწილია. იგი იხილავს კრისტალთა (დასრულებულ მრავალწახნაგათა) გეომეტრიულ ფორმებსა და მათი სიმეტრიის კანონზომიერებას.

II. სტრუქტურული კრისტალოგრაფია სწავლობს კრისტალთა შინაგან აგებულებას, ე. ი. უსასრულო კრისტალური გარემოს სიმეტრიას და აღგენს მათი კვლევის მეთოდებს.

III ქიმიური კრისტალოგრაფია, ანუ კრისტალთქიმია სწავლობს კავშირს კრისტალური ნივთიერების სტრუქტურასა და მის ქიმიურ, ფიზიკურ და გეომეტრიულ თვისებებს შორის. კრისტალთქიმია იხილავს აგრეთვე მინერალოგიისა და ლითონთმცოდნეობის მიიშენელოვან საკითხებს პოლიმორფიზმისა და იზომორფიზმის შესახებ [1, 36].

IV. ფიზიკური კრისტალოგრაფია სწავლობს კრისტალთა სიმაგრესა და ტენივადობას; პიეზოელექტრონულ, დიელექტრულ, ოპტიკურ, მაგნიტულ და სავ ფიზიკურ თვისებებს [4]. იგი იჭიკრდა დაკავშირებული თანამედროვე ტექნიკის განვითარებასთან. კრისტალთა სხვადასხვა ფიზიკურ თვისებებს მორის ოპტიკური თვისებები კრისტალთა (ბიხერალთ.) დიაგნოსტიკის საშუალებას იძლევა. ამიტომ ოპტიკური თვისებების სწავლას გეოლოკიური სპეკიალობეზისათვის ცალკე კურსის—„კრისტალთა ოპტიკის“ სახით გამყოფენ.

ნ ა წ ი ლ ი პ ი რ ვ ე ლ ი გ ე ო მ ე ტ რ ი უ ლ ი კ რ ი ს ტ ა ლ ო ბ რ ა შ ი ა

თ ა შ ი I: ზ ო გ ა დ ი ც ნ ო ბ ა ზ ი

§ 1. 1. კ რ ი ს ტ ა ლ თ ა თ ვ ი ს ე ბ ა ზ ი

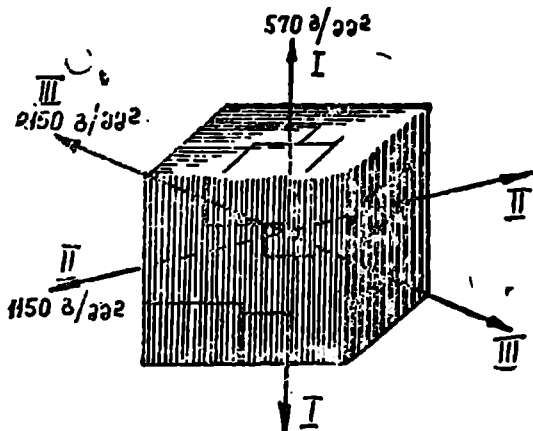
კ რ ი ს ტ ა ლ თ ა თ ვ ი ს ე ბ ე ბ ი მ ა თ კ ი მ ი უ რ შ ე დ გ ე ნ ი ლ ო ბ ა ს ა და ს ტ რ უ ქ - ტ უ რ ა ზ ე ა დ ა მ ო კ ი დ ე ბ უ ლ ი. ყ ო ვ ე ლ კ რ ი ს ტ ა ლ ს ა ხ ა ს ი ა თ ე ბ ს: ე რ თ გ ვ ა რ ო - ვ ნ ო ბ ა, ა ნ ი ზ ო ტ რ ო პ ი უ ლ ო ბ ა, შ ი ნ ი მ ა ლ უ რ ი შ ი გ ა ე ნ ე რ გ ი ა და ს ი მ ე ტ რ ო - უ ლ ო ბ ა.

ე რ თ გ ვ ა რ ო ვ ა ნ ი კ რ ი ს ტ ა ლ ი ს ნ ე ბ ი ს მ ი ე რ ნ ა წ ი ლ შ ი ე რ თ ნ ა ი რ ი ა კ ი - შ ი უ რ ი შ ე დ გ ე ნ ი ლ ო ბ ა, ს ი მ კ ვ რ ო ე ე, დ ნ ო ბ ი ს ტ ე მ ა ე რ ა ტ უ რ ა, ფ ე რ ი და ს ხ ე. კ რ ი ს ტ ა ლ თ ა ე რ თ გ ვ ა რ ო - ვ ნ ო ბ ა გ ა ნ პ ი რ ო ბ ე ბ უ ლ ი ა მ ა თ ი შ ი ნ ა გ ა ნ ი ა დ ნ ა გ ო ბ ი ს მ ე ს რ უ ლ ი ხ ა ს ი ა თ ი თ.

ნ ი ვ თ ი ე რ ე ბ ა შ ე ი ძ ლ ე ბ ა ი ყ ო ს ი ზ ო ტ რ ო პ ი უ ლ ი ა ნ ა ნ ი - ზ ო ტ რ ო პ ი უ ლ ი. ი ზ ო ტ რ ო პ ი უ ლ ი ა ი ს ე თ ი ნ ი ვ თ ი ე რ ე ბ ა, რ ო მ ე ლ შ ი ც ყ ვ ე ლ ა თ ვ ი ს ე ბ ა ე რ თ ნ ა ი რ ი ა ყ ვ ე ლ ა შ ი მ - რ თ უ ლ ე ბ ი თ, ა ს ე თ ი ა წ ყ ა ლ ო, მ ი - ნ ა და ს ხ ე. ე. ი., ი ს ე თ ი ს ხ ე უ ლ ე ბ ი, რ ო მ ე ლ თ ა შ ე მ ა დ გ ე ნ ე ლ ი ნ ა წ ი ლ ა კ ე - ბ ი (ა ტ ო მ ე ბ ი, ი ო ნ ე ბ ი ა ნ შ ო ლ ე კ ე უ ლ ე ბ ი) უ წ ე ს რ ი გ ო რ და ა გ ა ნ ლ ა გ ე ბ უ ლ ი: კ რ ი ს ტ ა ლ უ რ ი მ ე ს რ ი ს მ კ ო ნ ე ს ხ ე უ ლ ე ბ ი. კ ი ა ნ ი ზ ო ტ რ ო პ ი უ ლ ი ა. მ ა თ ა უ ც ი ლ ე ბ ლ ა დ ა ხ ა ს ი ა თ ე ბ თ ზ ო გ ი ე რ თ ი თ ვ ი ს ე ბ ი ს ც ვ ა ლ ე ბ ა დ ო ბ ა ა რ ა პ ა - რ ა ლ ც ლ უ რ ი მ ი მ ა რ თ უ ლ ე ბ ი თ. მ ა შ ა ს ა დ ა მ ე, ა ნ ი ზ ო ტ რ ო პ ი უ ლ ი ს ხ ე უ ლ ი ა რ ი ს ი ს ე თ ი ე რ თ გ ვ ა რ ო ვ ა ნ ი ს ხ ე უ ლ ი (კ რ ი ს ტ ა ლ ი), რ ო მ ე ლ შ ი ც გ ა რ კ ვ ე - უ ლ ი ფ ი ზ ი კ უ რ ი თ ვ ი ს ე ბ ე ბ ი ს ხ ვ ა დ ა ს ხ ვ ა მ ი მ ა რ თ უ ლ ე ბ ი თ გ ნ ს ხ ვ ე ბ ე ბ უ - ლ ი ა. ი ზ ო ტ რ ო პ ი უ ლ ს ხ ე უ ლ შ ი ს ი ნ ა თ ლ ბ ს ს ხ ი ვ ი ს გ ა ვ რ ც ე ლ ე ბ ი ს ს ი ჩ ქ - რ ე ყ ვ ე ლ ა მ ი მ ა რ თ უ ლ ე ბ ი თ ე რ თ ნ ა ი რ ი ა, ო პ ტ ი კ უ რ ა დ ა ნ ი ზ ო ტ რ ო პ ი უ ლ ს ხ ე უ ლ შ ი კ ი ე ს ს ი ჩ ქ ა რ ე ა რ ა პ ა რ ა ლ ე ლ უ რ ი მ ი მ ა რ თ უ ლ ე ბ ი თ ს ხ ვ ა დ ა ს ხ ვ ა ი ქ ნ ე ბ ა. მ ა გ რ ა მ. თ უ ა ნ ი ზ ო ტ რ ო პ ი უ ლ ს ხ ე უ ლ შ ი ს ი ნ ა თ ლ ბ ს ს ხ ი ვ ი ს გ ა ვ - რ ც ე ლ ე ბ ი ს ს ი ჩ ქ ა რ ე ყ ვ ე ლ ა მ ი მ ა რ თ უ ლ ე ბ ი თ ე რ თ ნ ა ი რ ი ა, მ ა შ ი ნ ე ს ს ხ ე - უ ლ ი (კ რ ი ს ტ ა ლ ი) ო პ ტ ი კ უ რ ა დ ი ზ ო ტ რ ო პ ი უ ლ ი ა და მ ა ს ა უ ც ი ლ ე ბ ლ ა დ ე ქ ნ ე ბ ა მ ი მ ა რ თ უ ლ ე ბ ი ს მ ი ხ დ ვ ი თ ც ვ ა ლ ე ბ ა დ ი ს ხ ვ ა თ ვ ი ს ე ბ ა. მ ა გ ა ლ ი - თ ა დ, ქ ე ვ ა მ ა რ ი ლ ს კ უ ბ ი ს ფ ო რ მ ბ ს კ რ ი ს ტ ა ლ ს, რ ო მ ე ლ ი ც თ უ შ ყ ო პ ტ ი - კ უ რ ა დ ი ზ ო ტ რ ო პ ი უ ლ ი ა, ა ხ ა ს ი ა თ ე ბ ს გ ა ხ ლ ე ზ ი ს ა დ ბ ი წ ი ნ ა ლ ო ბ ი ს ძ ა ლ ს ც ვ ა ლ ე ბ ა დ ო ბ ა ს ა მ ი ს ხ ვ ა დ ა ს ხ ვ ა მ ი მ ა რ თ უ ლ ე ბ ი თ (ნ ა ხ. I. 1.).

კ რ ი ს ტ ა ლ ი ს მ ი ნ ი მ ა ლ უ რ ი შ ი გ ა ე ნ ე რ გ ი ი ს დ ა ს ა დ - გ ე ნ ა დ მ ი ვ მ ა რ თ ო თ შ ე მ დ ე გ ც ლ ა ს: ა ვ ი ლ ო თ რ ა ი მ ე ნ ი ვ თ ი ე რ ე ბ ი ს კ რ ი ს -

ტალი და დავიწყით მისი გახურება. შევამჩნევთ, რომ ტემპერატურა გაიზრდება კრისტალის დნობის დაწყებამდე, დნობის დაწყების მომენტის დან კი შეჩერდება, სანამ მთელი კრისტალი არ გადნება. ეს მოვლენა



ნახ. I. 1. ქვამარილის კრისტალის გახლეჩისადმი წინაღობის ძალის ცვალებ დობა სამი სხვ.დასხვა ნიშანტულებით.

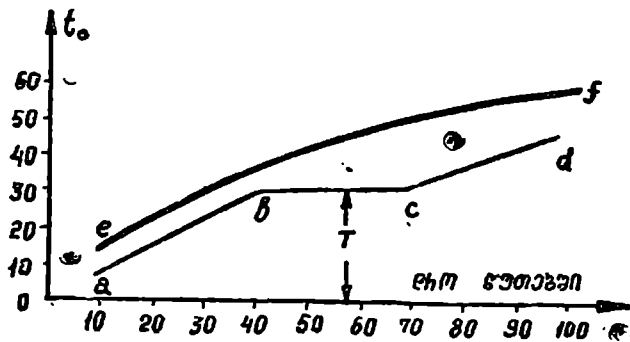
აიხსნება იმით, რომ ნივთიერება მყარი (კრისტალური) მდგომარეობიდან თხევადში გადასვლის დროს მთაიწქავეს სითბოს.

პირიქით რომ მოვიქცეთ, ე. ი. დავიწყით გამდნარი ნივთიერების გაცივება დავინახავთ, რომ სითბის ტემპერატურის დაცემას ადგილი ექება ნივთიერების თხევადი მდგომარეობიდან მყარ მდგომარეობაში გადასვლის დაწყებამდე. ე. ი. კრისტალიზაციის დაწყებამდე, შემდეგ კი, სანამ არ დათავრდება ნივთიერების მთლიანად დაკრისტალება, ტემპერატურა უცვლელი იქნება. ეს გვიჩვენებს, რომ სითხეში უწყსრიგოდ განლაგებული ნ.წილაკების გადაჯგუფებას—კრისტალური სტრუქტურის აგებას—თან სდევს სითბოს გამოყოფა.

ცდის მსვლელობისას დროისა და ტემპერატურის რეგისტრაცია საშუალებას მოგვცემს ავაგოთ შესაბამისი მრუდი (ნახ. I. 2). აქ მოცემულია ისეთი შემთხვევა, როდესაც კრისტალის გახურების შემდეგად მისი ტემპერატურა 40 წუთის განმავლობაში იზრდებოდა და მიაღწეა 30° (ანტერვალი $a b$), შემდეგ 33 წუთის განმავლობაში კრისტალი დნებოდა და ტემპერატურა აღარ იზრდებოდა (ინტერვალი $b c$), როცა კრისტალი მთლიანად გადნა, ნაღობის ტემპერატურის ზრდა გაგრძელდა (ინტერვალი $c d$), იგივე ცდა რომ ჩავატაროთ მყარ ამორფულ ნივთიერებაზე, დავინახავთ, რომ ტემპერატურის თანდათან

ზრდის დაყოფილებას ადგილი არ ექნება (მრუდი ef , ნახ. I,2).

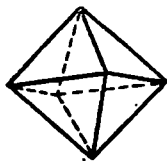
სითბოს, რომელიც გამოიყოფა ნივთიერების კრისტალიზაციის დროს ან რომელიც მთაინთქმება კრისტალის გადნობისას, დნობის ფარულ სითბოს უწოდებენ. აღწერილი ცდა გვიჩვენებს, რომ ნივ-



ნახ. I. 2. გახურების მრუდი, კრისტალური ($abcd$) და ამორფული (ef) ნივთიერებისათვის. T კრისტალური ნივთიერების დნობის ტემპერატურა.

თიერება კრისტალიზაციის დროს კარგავს ენერჯიის გარკვეულ რაოდენობას. თეორიული გაანგარიშება გვიჩვენებს, რომ კრისტალური მესრის წარმოქმნას თან სდევს ენერჯიის გამოყოფა. მაშასადამე გარკვეულ თერმოდინამიკურ პირობებში კრისტალურ მდგომარეობაში მყოფ ნივთიერებას აქვს მინიმალური შიგა ენერჯია ამ ნივთიერების სხვა აგრეგატული მდგომარეობის შიგა ენერჯიასთან შედარებით. აღნიშნულიდან გამომდინარეობს, რომ ნივთიერება ბყარ ამორფულ მდგომ-

არეობაში ენერგეტიკულად არამდგრადია და დროთა განმავლობაში გადადის უფრო სტაბილურ-კრისტალურ მდგომარეობაში, რომელშიც მას ექნება მინიმალური შიგა ენერჯია.



ნახ. I. 3 ოქტაედრი (რვაწახნაგა).

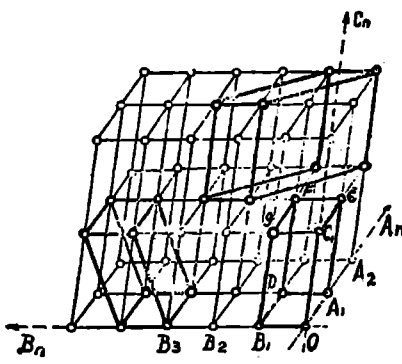
კრისტალთა სიმეტრიული ობიექტების გეომეტრიული კრისტალოგრაფიის შესწავლის ძირითადი საგანია (იხ. თავი II). კრისტალთა შემომთარგვლილი ელემენტების — წახნაგების, წვეროებისა და წიბოების რაოდენობას შორის არსებობს გარკვეული კავშირი: წახნაგების და წვეროების რიცხვის ჯამი უდრის წიბოების რიცხვს პლუს ორი (ეილერ-დეკარტის თეორემა). შევამოწმოთ ეს ტოლობა რამქონამე კრისტალის მაგალითზე: ავიღოთ რვაწახნაგა კრისტალი, რომლის ყოველი წახნაგი ტოლგვერდა სამკუთ-

ხედია; ამ ფორმას ოქტაედრი ეწოდება (ნახ. I. 3). მას 8 წახნაგი, 6 წვერო და 12 წიბო აქვს. ადვილად დავრწმუნდებით, რომ $8+6=12+2$.

§ 1. 2. სივრცული მესერი

ნივთიერების კრისტალურ მდგომარეობაში ყოფნისას მისი შეზღვეული ნაწილაკები (ატომები, იონები ან მოლეკულები) კანონზომიერადაა განლაგებული. ამ მატერიალურ ნაწილაკთა (წერტილთა) გარკვეული ჯგუფები კანონზომიერად ენაცვლებიან და წარმოქმნიან სივრცულ მესერს. ყოველი წერტილი სივრცული ანუ კრისტალური აესრის კვანძია. წრფის გასწვრივ განლაგებული კვანძების ერთობლიობას რიგი, ხოლო სხვადასხვა წრფეზე განლაგებულ სამ კვანძზე გამავალ სიბრტყეს ბადე ეწოდება. მესერში, პარალელური რიგების გასწვრივ კვანძებს შორის ზანძილი ერთნაირია. სივრცული მესერი უსასრულოა ყველა მიმართულებით.

I. 4 ნახაზზე მოცემულია OA_n , OB_n და OC_n რიგების მქონე სივრცული მესერი. ამ მესერში შეიძლება გამოვეყოთ გარკვეული $OA_1 DB_1 GC_1 EF$ პარალელებიპედი, რომლის პარალელური განხეორებით (ტრანსლაციით) აიგება მთელი მესერი. ასეთ პარალელებიპედს მესერის ელემენტარულ უჯრედს ეწოდებენ.



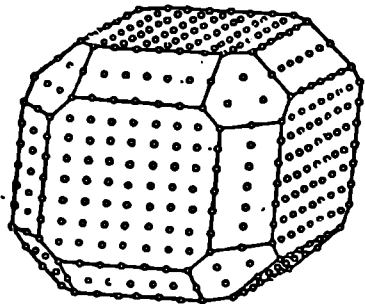
პარალელებიპედის ფორმა შეიძლება იყოს მრავალნაირი (I. 4 ნახაზზე გამოყოფილია სამნაირი უჯრედი). ელემენტარული უჯრედის შერჩევისას დაკმაყოფილებული უნდა იყოს შემდეგი მოთხოვნები: სხვა შესაძლებელ პარალელებიპედებთან შედარებით ამ პარალელებიპედის მოცულობა უნდა იყოს მინიმალური, თანაბარი წიბოების რიცხვი — მაქსიმალური და რაც შეიძლება მეტი იყოს მართი

ნახ. I. 4. სივრცული მესერი (სქელი ხაზებით გამოყოფილია სხვადასხვა ელემენტარული უჯრედი).

კუთხეების რიცხვი. დადგენილია, რომ სულ არსებობს კრისტალური

შესრის 14 ტიპი, რომლებიც ცნობილია ბრავეს შესრების სახელწოდებით (იხ. § VI. 2).

კრისტალის ფორმასა და მის შესრის შორის არსებობს შემდეგი დამოკიდებულება: შესრის ყოველი ბადის პარალელურად დასაშვებია კრისტალის წახნაგის არსებობა, ყოველი რიგის პარალელურად კი წიბო გაივლის; სივრცული შესრის ყოველი კვანძი კრისტალის შესაძლო წვეროა. ცხადია, რომ შესრში



ნახ. I. 5. კრისტალის სქემატური აგებულება.

სხვადასხვა მიმართულებით გაყვანილ ბრტყელ ბადეში კვანძების სიხშირე სხვადასხვა იქნება. ყოველი ბადის ფართობის ერთეულზე კვანძების რაოდენობას ბადის რეტრიკულურ სიმკვრივეს უწოდებენ.

I. 5. ნახაზზე მოცემულია სამი სხვადასხვა რეტრიკულური სიმკვრივის ბადის პარალელურად განეითარებული წახნაგები. მათ შორის უფრო დიდი ზომისაა ის წახნაგები, რომლებიც მეტი ბადის პარალელურია.

რეტრიკულური სიმკვრივის მქონე

§ I. 3. კრისტალთა წარმოქმნა და ზრდის მექანიზმი

ბუნებაში გვხვდება სხვადასხვა სიდიდის კრისტალები. ზოგიერთი მათგანი ისეთი იცირება, რომ მას სხოლოდ მიკროსკოპის საშუალებით თუ გავარჩევთ. ზოგი კი უტრო მახვილია და მათი ზომები შილიმეტრებით ან სანტიმეტრებით გამოისახება. გვხვდება აგრეთვე ისეთი ვიგანტი კრისტალები, რომელთა ზომები მეურობით გამოისახება, ხოლო წონა—ტონობით. ცნობილია, მაგალითად 6 მ³ წახნაგის მქონე ქარსის და 10-12 ტონიანი კვარცის კრისტალები და სხვ. ყველაჯური ე იმას ნიჰაუს, რომ ბუნებაში რაიმე ნივთაურების კრისტალები ჩაახვის შემდეგ იზრდება, რაც უდავოდ დამოკიდებულია შესაბამის გარეაოში კრისტალიზაციის ხელშეწყობი პირობების არსებობის ხანგრძლივობაზე. შეიძლება დავასახელოთ კრისტალური ნივთიერების წარმოქმნის სამი ძროითადი გზა:

1. ნივთიერეაის თხევადი მდგომარეობიდან მყარ მდგომარეობაში გადასვლა: ა) გაძნაროიდან მყარ მდგომარეობაში (გაძყარება), ბ) ხსნარიდან მყარ მდგომარეობაში (დალექვა);

2. ნივთიერების აირადი მდგომარეობიდან მყარ მდგომარეობაში გადასვლა (დესუბლიმაცია);

3. ნივთიერების ერთი მყარი ფაზური მდგომარეობიდან მეორეში გადასვლა.

კრისტალიზაციის ბუნებრივი პროცესებიდან ყველაზე გავრცელებულია პირველი გზა—კრისტალიზაცია გამდნარიდან ან ხსნარიდან. მაგალითად, გაცივებით წყლიდან ყინულის ან გაფარვარებული მაგმური ნაღნობიდან კრისტალური ქანის წარმოქმნა; დაღეჭვის შედეგადაა წარმოქმნილი სხვადასხვა მარილების შრეები მლაშე აუზების ფსკერზე და სხვ.

ხსნარი შეიძლება იყოს უჯერი, ნაჯერი და გადამეტნაჯერი. ავილოთ ქვამარილის (NaCl) კრისტალი და მოეთავსოთ იგი იმავე მარილის ხსნარში, კრისტალი ან გაიხსნება, ან გაიზრდება (განაგრძობს კრისტალიზაციას), ან დარჩება უცვლელი. პირველ შემთხვევაში ხსნარი უჯერია, მეორეში—გადამეტნაჯერი. ხოლო იესამე შემთხვევაში—ნაჯერი და კრისტალსა და ხსნარს ბორის წონასწორობაა დამყარებული. მამასადაძე, კრისტალიზაცია შესაძლებელია მხოლოდ გადამეტნაჯერ ხსნარში.

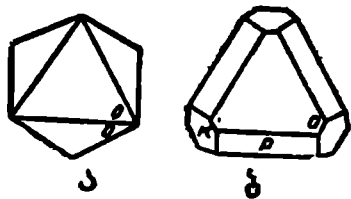
დისუბლიმაციის შედეგად კრისტალები ბუნებაში უფრო იშვიათად წარმოიქმნება, ვიდრე თხევადი მდგომარეობიდან. ნივთიერების აირადი მდგომარეობიდან ვულკანების კრატერებში ან სხვა პრალეებში წარმოიქმნება გოკირდის, იოდის, ნიჰალურის და სხვ. კრისტალები. ამავე გზით ჩნდება ატმოსფეროში წყლის ორთქლიდან თოვლის ფიფქები.

ნივთიერების არაკრისტალური მდგომარეობიდან მყარ, კრისტალურ მდგომარეობაში გარკვეული დროის განმავლობაში გადასვლის მაგალითია (ძესამე გზა) ბუნებრივი ვულკანური ძინის დაკრისტალბა. ამ შემთხვევაში ამორფული ძისის ნაცვლად წარმოიქმნება სხვადასხვა შედგენილობის კრისტალთა აგრეგატები ამავე გზით წარმოიქმნება წიიიდა მარცვლოვანი კირქვისაგან (CaCO_3) მსხვილმარცვლოვანი მარმარილო. კრისტალური ძარცვლები გამწვილება წიევისა და ტემპერატურის გავლენით ლითონებშიც მიძდინარეობს.

ნივთიერების კრისტალიზაციის დაწყებისათვის ხსნარში, ნაღნობში ან აირად გარემოში საჭიროა ჩაისაბოს კრისტალიზაციის ცენტრი, ხსნარში მოძრავი დადებითად და უარყოფითად დამუხტული იონები ტემპერატურის დაცემათან ერთად კარგავენ პოძრეობის ენერგიას და ამიტომ ერთმანეთთან დაჯახების დროს უფრო ადვილად მიიზიდებიან და ამით წარმოქმნიან გარკვეული კანონზომიერებით აშენებულ იონთა ჯგუფს, ანუ კრისტალის ჩანასახს, რომელსაც თანდათან მიემატება სხვა იონებიც და იწყება ნივთიერების კრისტალიზაცია.

აღნიშნული ჩანასახები უფრო ადვილად წარმოიქმნება გადამეტ-
ნაჯერ ხსნარში, ვიდრე ნაჯერ და მით უმეტეს — უჯერში, რადგან აქ არა
გვაქვს საკმაო რაოდენობა გახსნილი ნეფთიერებასა და იქმთხვევით
წარმოქმნილი იონთა ჯგუფები ადვილად იშლება.

კრისტალის ზრდის სიჩქარესა და მისი ფორმის განვითარებაზე



დიდ გავლენას ახდენს გარემოს
ფიზიკური და ქიმიური პირობები.
როგორცაა ხსნარის კონცენტრა-
ცია, ხსნარში შინარეების არსე-
ბობა, ტემპერატურა, წნევა, კრი-
სტალიზაციის ცენტრის ადგილმ-
დებარეობა და სხვ.

• კრისტალის ფორმაზე ხსნა-

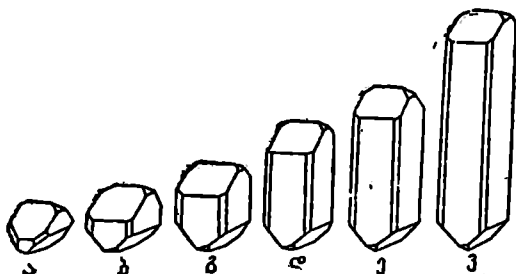
ნახ. 1. 6. ხსნარის კონცენტრაციის
გავლენა შაბის კრისტალების ფორმაზე: ა —
კრისტალი მეტად გადამეტნაჯერებულ
ხსნარიდან, ბ — ნაკლებად გადამეტნაჯერებ-
ული ხსნარიდან.

რის გადამეტნაჯერობის ხარისხის
ცვალებადობის გავლენის. საილუს-
ტრაციოდ მოვიყვანოთ შაბის კრი-
სტალების ზრდის ა. შუბნიკოვის
ცნობილი ცდა, რომლითაც დად-

გინდა, რომ რაც უფრო გადამეტნაჯერებულია ხსნარი, მით ნაკლებია
შაბის კრისტალებში წახნაგების რაოდენობა (ნახ. I. 6.).

სხვადასხვა ნივთიერების კრისტალიზაციაზე ხსნარში შინარევე-
ბის არსებობის გავლენა შეისწავლეს ლენინგრადის სახელმწიფო უნი-

ვერსიტეტის კრისტა-
ლოგრაფიის კათედრა-
ზე ვ. და ი. მოკიევსკე-
ბმა, რომელთა ცდების
საფუძველზე დადგინ-
და, რომ ეფსომიტის
($Mg SO_4 \cdot 7H_2O$) კრის-
ტალები მოკლდება
ხსნარში ბორაქსის
($Na_2 B_4 O_7 \cdot 10H_2O$) რა-
ოდენობის გადიდე-
ბით (ნახ. I. 7).



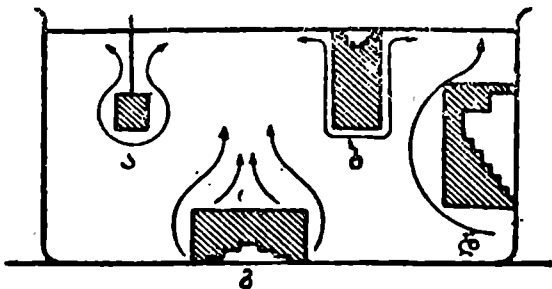
ნახ. I. 7. ეფსომიტის კრისტალების სახის შეცვ-
ლა ხსნარში ბორაქსის რაოდენობის შემცირებით.

ტემპერატურის

გადიდების გამო კრისტალების ზრდის სიჩქარე მატულობს და შესა-
ბამისად იცვლება მისი სახეც, რაც ალბათ დაკავშირებულია ხსნარში
ნაწილაკების მოძრაობის სიჩქარის ზრდაზე.

კრისტალიზაციის მსვლელობაზე და წახნაგების განვითარების

სიჩქარეზე დიდ გავლენას ახდენს კრისტალიზაციის ცენტრის ვანლაგება მკვებავი ხსნარის მოძრაობის მიმართულებისადმი. კრისტალი ყველა მიმართულებით თანაბრად ვითარდება და იდეალური ფორმა ექნება მაშინ, როდესაც ხსნარს საშუალება აქვს ყველა მხრიდან შეეხოს მას (ნახ. I. 8, ა), ხოლო კრისტალი ცალმხრივად განვითარდება, თუ მისი ცენტრი მდებარეობს კრისტალიზაციის მკვებავი ხსნარის ნა-



ნახ. I. 8. ხსნარის ნაკადების მიმართულება კრისტალის ზრდის დროს.

კადის მიმართ არასიმეტრიულად. მაგალითად, როცა იგი მიმაგრებულია ჭურჭლის კედელზე ან ფსკერზე, ან ხსნარის ზედაპირთანაა განლაგებული (ნახ. I. 8 დ, გ, ბ).

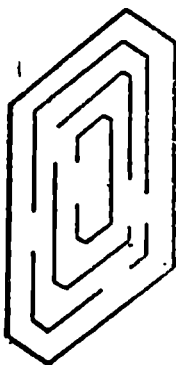
ბუნებაში იდეალური კრისტალების წარმოქმნის პირობები იშვიათია. იდეალურად განვითარებული კრისტალი წარმოიქმნება მხოლოდ მაშინ, როდესაც იგი ხსნარში ან მდნარში არ ჩაიძირება, თანაბრად იბრუნებს და, მაშასადამე, ყველა მისი წახნაგი ერთნაირ პირობებში იქნება უახლოესი გარეშოს მიმართ. ამის მაგალითია ყოველმხრივ განვითარებული ალმასის კრისტალები, რომლებიც დასაშვებია, რომ მაგმაში შეწონილ მდგომარეობაში იზრდებოდნენ. რეალური კრისტალების ფორმებს დარღვეული აქვს სიმეტრიულობა. როგორც შემდეგ დავინახავთ, ბუნებრივ, არაიდეალურ კრისტალებზე განვითარებული წახნაგების განლაგება კრისტალის რმ ფორმის აღდგენის სრულ საშუალებას იძლევა, რომელიც მას უნდა ჰქონოდა, იდეალურ პირობებში რომ დაკრისტალებულიყო.

ბუნებრივად და ხელოვნურად გაზრდილ კრისტალთა ზედაპირის დეტალურა შესწავლამ გვიჩვენა, რომ ორივე შემთხვევაში მათი ზრდა ერთნაირი გზით მიმდინარეობს, ექსპერიმენტის პირობებში შეიმჩნევა კრისტალებზე წახნაგების გადაადგილება ბრტყელი შრეების მიზრდით ან სპირალური შრეების განვითარების საშუალებით.

კრისტალის ზრდის დროს გარკვეული ფაქტორის შეცვლით შესაძლებელია მისი ერთგვაროვნობის (ფერის, შედგენილობის და სხვ.)

დარღვევა—შვილებთ ე. წ. ზონალური აგებულების კრისტალს (ნახ. I. 9).

ზონალური აგებულების კრისტალები ბუნებაში ძალიან გავრცელებულია. ასეთია, მაგალითად, ფლუორიტის (CaF_2) კრისტალები, რომელშიც ხშირად უფრო შრეები შორიგეობენ იისფრად და მწვანედ შეფერილ ზონებთან. ზონალური კრისტალების შეაწვლით დადგენილია, რომ მათი ზრდის დროს წახნაგები შრეების სახით გადაადგილდება ურთიერთპარალელურად. ეს მოვლენა განპირობებულია კრისტალური ნივთიერების მესრული აგებულებით და დასადგენია, თუ რა თანამიმდევრობით ხდება ნაწილაკები (ატომების, იონების ან მოლეკულების) განლაგება მზარდი კრისტალის ზედაპირზე. პროცესის მსვლელობის სქემატური გამოსახვისათვის ავიღოთ კუბური ფორმის მქონე მესრის კრისტალი (ნახ. I. 10). აქ ნაჩვენებია კრისტალის ზედა წახნაგის ზრდა, ე. ი. იონთა განლაგების შედეგად ახალი (ძველის პარალელური) შრის წარმოქმნა. შორიგი იონის განლაგების ყველა შესაძლებელ ადგილთა შორის უფრო „ხელსაყრელი“ ის ადგილია, სადაც იონის მოესთახ მიმაკრებისას გამოიყოფა მაქსიმალური ენერჯია. ამასთან დაკავშირებით, იონი პირველ რიგში განლაგდება სამწახნაგა შემავალ კუთხეში (ნახაზზე ეს ადგილი აღნიშნულია ციფრით 1), რადგან აქ იგი მიიზიდება სამი უახლოესი იონით. შემდეგი იონი იმავე მიმართულებით განაგრძობს განლაგებას, სანამ რაგი არ შეივსება. ამის შემდეგ ახალი იონი განლაგდება წერტილში 2 (ორ-

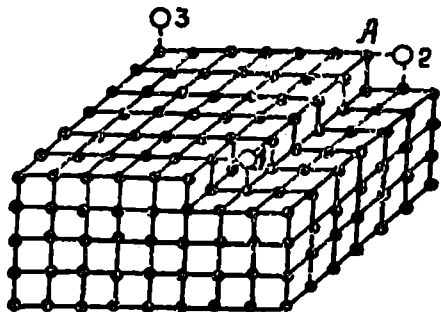


ნახ. I. 9. კრისტალის ზონალური აგებულების სქემატური კრილი (სხვადასხვა ზონაში ზოგიერთი თიხება განსხვავებულია).

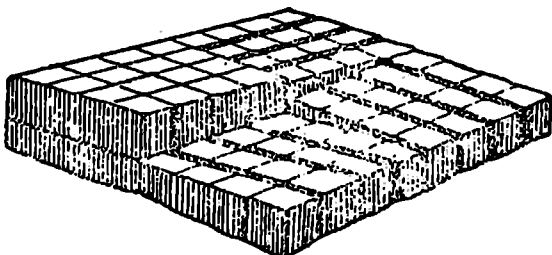
წახნაგა შემავალ კუთხეში), რადგან ამ მდგომარეობაში უფრო „ხელსაყრელი“ ადგილი არ მოინახება; შემდეგ შევსებას დაიწყებს ახალი რიგი; ხოლო როცა ამ გზით შეივსება მთელი შრე, ახალი იონი იძულებულია შეუერთდეს კრისტალს წერტილში 3. ასე განმეორდება შემდეგი შრის აგება. მაშასადამე, კრისტალის ზრდის დროს, უმეტეს შემთხვევაში, ახალი შრის აგება დაიწყება მხოლოდ მაშინ, როდესაც სრულად შეივსება წინა შრე, ხსნარიდან საჭირო ელემენტის შერჩევა ხდება მანიძალური ენერჯიის მქონე სტრუქტურის წარმოქმნის პრინციპის შესაბამისად. რ ფეიშანი ამ მოვლენას ხსნის მრავალი ატომის „მოსინჯვით“. მართლაც, ხსნარში იონები განუწყვეტლივ მოძრაობენ და ყოველი მათგანი წამში 10^{12} -ჯერ ეჯახება ერთმანეთს ან კრისტალის ზედაპირს. როდესაც „შესაფერისი“ ატომი (იონი) დაეჯახება თავის შესაბამის ადგილს, იქვე დარჩება, რადგან აქ იგი მაქ-

სიმალურად მიიზიდება, ენერგია კი ამ მდგომარეობაში მინიმალური ექნება. ასეთი შერჩევით მრავალი წლის მანძილზე იზრდება დიდი ზომის კრისტალები*.

დაახლოებით 25 წლის წინათ ჩამოყალიბდა კრისტალთა ზრდის ახალი, ე. წ. დისლოკაციური თეორია, რომლის მიხედვით კრისტალთა წახნაგების ზრდა სპირალური შრეების განვითარების გზით მიმდინარეობს. კრისტალში მინარევეების არსებობის გამო შიდა მესე-შე წარმოიქმნება დაძაბულობა, რომელიც იწვევს მესრის ტალკეული უბნების გადაადგილებას სხვადასხვა მიმართულებითა და აქვლიტუდით, რის შედეგადაც კრისტალის ზედაპირზე წარმოიქმნება ბრახნული ლერძის წესით განლაგებული ნაწილაკები (ნახ. I. 11) და წახნაგის ზედაპირზე გაჩნდება ორ- და სამწახნაგა კუთხეები, რომლებიც ხელსაყრელი პოზიციების თანამიმდევ-



ნახ. I. 10. წახნაგის ზრდის შედეგად შექმნილი მარტივი კუბური ფორმის შერჩეული მესრის შენთხვევაში.

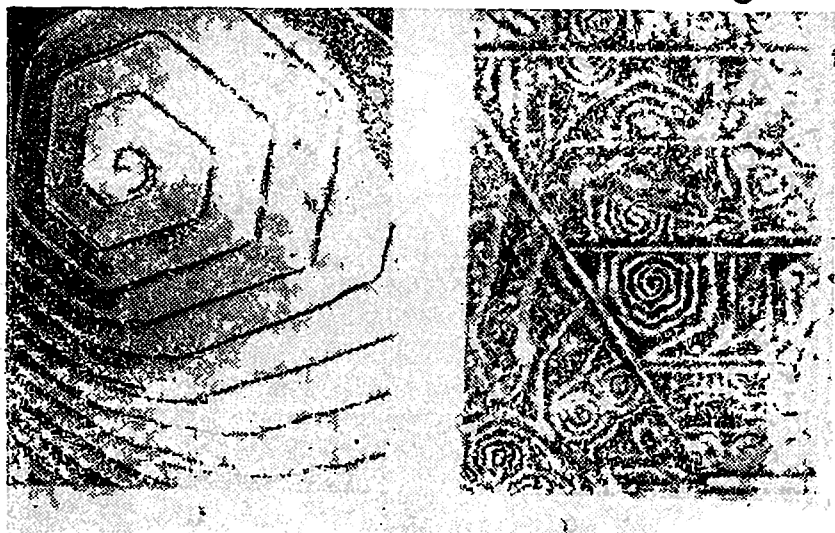


ნახ. I. 11. კრისტალთა ზრდა სპირალური შრის განვითარებით (დისლოკაციური თეორია)

რობის დაცვით განლაგდება, ახალი იონების და კრისტალის ზრდა სპირალური შრის განვითარებით მოხდება. სპირალური შეიძლება იყოს მარჯვენა და მარცხენა, პოლიგონური ან წრიული. ჩვეულებრივ, საფე-

* Р. Фейнман, Р. Лейтон. М. Селдс—Фейнмановские лекции по физике в. 7. (Физика сплошных сред).

ხურის სიმაღლე $\approx 5-10 \text{ \AA}$; მათი დანახვა უმეტეს შემთხვევაში შესაძლებელია მხოლოდ სპეციალური მეთოდების გამოყენებით, როგორცაა

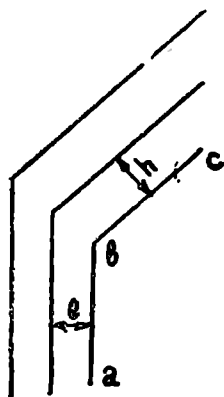


ნახ. I. 12. კრისტალის წახნაგების ზრდის სპირალების ფაზოკონტრასტული სურათები: ა-კარბორუნდის და ბ-სფალერიტის წახნაგებზე (ა. ვარმის მიხედვით).

ფაზოკონტრასტული მიკროსკოპია, ინტერფერომეტრული მეთოდი, გვერდითი განათება, კრისტალის ზედაპირის გადავერცხვლის მეთოდი და სხვ.

ზრდის სპირალები დადგენილია კვარცის (SiO_2), ალმასის (C), პემატიტის (Fe_2O_3), აპატიტის ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2\text{Cl}$) და სხვა კრისტალებზე. I. 12 ნახაზზე მოცემულია მარჯვენა სპირალები კარბორუნდის (SiC) და სფალერიტის (ZnS) კრისტალების წახნაგებზე.

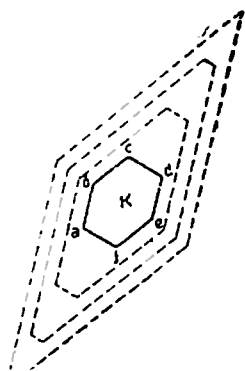
კრისტალი ზრდის დროს, მისი წახნაგების განვითარების სხვადასხვა ინტენსივობის გამო, ღებულობს სხვადასხვა ფორმას (ბრტყელფირფიტოვანი, პრიზმული, ნემსისებური, პირამიდეული და სხვ.). ფორმის ეს ევოლუცია მკიდროდ უკავშირდება გარემოს ფიზიკურ-ქიმიური პირობების ცვალებადობას, რაც თავის მხრივ აპირობებს სხვადასხვა წახნაგის ზრდის სიჩქარეს.



ნახ. I 13. ახ წახნაგის ზრდის სიჩქარეა l , ხოლო bc წახნაგისი — h .

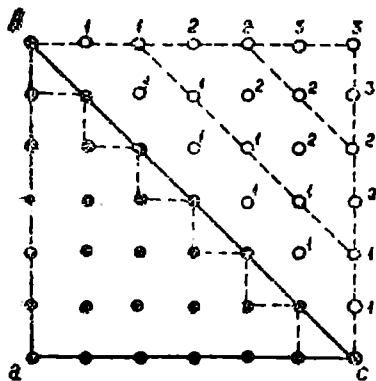
წახნაგის ზრდის სიჩქარე იზომება დროის ერთეულში მასზე მოზრდილი შრის სისქით. I. 13 ნახაზზე მოცემულია ab და bc წახნაგების ზრდის სიჩქარეები (l და h). ექსპერიმენტულად დადგენილია სხვადასხვა ნივთიერების კრისტალთა წახნაგების ზრდის სიჩქარე. მაგალითად, ქვამარილის ($NaCl$) კუბის წახნაგები დღე-ღამეში $0,28$ მმ-ით გადაადგილდება, ხოლო არაგონიტის ($CaCO_3$) კრისტალის ზოგი წახნაგი— $0,66$ მმ-ით.

I. 14 ნახაზზე გამოსახულია კრისტალი K , რომლის ab , bc , de და ef წახნაგების ზრდის სიჩქარე ნაკლებია, ვიდრე cd და af წახნაგებისა. ამასთან დაკავშირებით, cd და af წახნაგები თანდათან მცირდება და საბოლოოდ ქრება. მაშასადამე, კრისტალზე ვითარდება ზრდის ნაკლები სიჩქარის მქონე წახნაგები, ე. ი. კრისტალური მესრის მაქსიმალური რეტიკულური სიმკვრივის მქონე ბადეების პარალელური წახნაგები. აღნიშული დებულება ჯერ კიდევ XIX საუკუნეში შეიმუშავა ფრანგმა კრისტალოგრაფმა ო. ბრავემ.



ნახ. I. 14. კრისტალის ფორმის ცვლადობა წახნაგების ზრდის სიჩქარის მიხედვით.

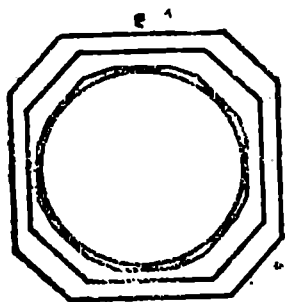
I. 15 ნახაზზე ვხედავთ, რომ ყველაზე მეტი რეტიკულური სიმკვრივეა კუბის ab და ac წახნაგების ბადეების პარალელურად. ამიტომ ეს წახნაგები უფრო ვითარდება, ვიდრე ნაკლები რეტიკულური სიმკვრივის მქონე დიაგონალური მიმართულების bc ბადის პარალელური წახნაგი, რომელიც თანდათან გაქრება. ციფრებით აღნიშნულია ნაწილაკების განლაგების თანამიმდევრობა. ბრავეს კანონი დადასტურებულია მრავალი ბუნებრივი და ხელოვნური კრისტალის შესწავლით. რომელიმე ნივთიერების კრისტალიდან ბირთვი რომ გამოვთალოთ და შოვავთავსოთ იმავე ნივთიერების გადა-



ნახ. I. 15. bc წახნაგს ნაკლები რეტიკულური სიმკვრივე აქვს და არ ვითარდება.

მეტნაჯერ ხსნარში, დავინახავთ როგორ დაიწყებს იგი კრისტალიზა-

ციას და შემოიფარგლება წახნაგებით. განვითარდება და საბოლოოდ ერთმანეთს შეუთავსდება ის წახნაგები, რომლებსაც რეტრკულურად სიმკვრივე მეტი ექნება და ბირთვის ნაცვლად ისევ კრისტალს მივლდებთ (ნახ. I. 16): ამ მოვლენას კრისტალთა რეგენერაციას უწოდებენ.



ნახ. I. 16. კრისტალიდან გამოთლილი ბირთვი ზრდის შედეგად ისევ კრისტალად იქცევა.

დაპირზე წარმოიქმნება მიკროსკოპული ზომის მრავალწახნაგოვანი ჩაღრმავებანი, რომლებსაც გახსნილი ან ამოქმდის ნაკვთებს უწოდებენ; მათ მეტად დიდი მნიშვნელობა აქვს კრისტალის სიმეტრიის კვლევისას.

საწინააღმდეგო მოვლენაა კრისტალთა გახსნა. გამხსნელში ან გაუჯერებელ ხსნარში მოთავსებული კრისტალი იწყებს გახსნას. პირველ რიგში იხსნება კრისტალის წვეროები და წიბოები. ეს მოვლენა აიხსნება იმით, რომ მესრის შემადგენელი ნაწილაკები უფრო ადვილად სცილდება კრისტალის წიბოებს და განსაკუთრებით წვეროებს, ვიდრე წახნაგებს; ბოლოს კრისტალი თითქმის მრგვალდება. კრისტალის წახნაგებზე ინტენსიური გამხსნელის მცირე ხნით იოქიეთების შედეგად მათ ზე-

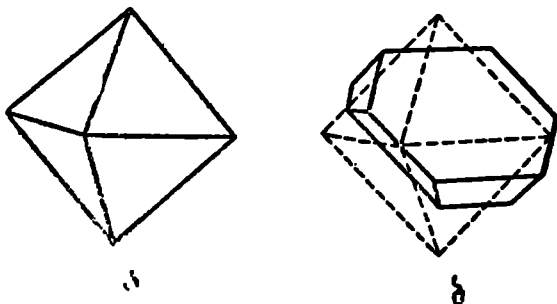
§ I. 4. კუთხეების მუდმივობის კანონი და კრისტალის გაფორმება

როგორც აღვნიშნეთ, ბუნებრივ პირობებში იდეალურა განვითარებული კრისტალები იშვიათად გვხვდება. უფრო ხშირია წახნაგების არათანაბარი განვითარებები გამო გაჩენილი დამახინჯებული ფორმები. იდეალურად განვითარებულ კრისტალებში ერთი და იგივე ფორმის ყველა წახნაგი კრისტალის ცენტრიდან თანაბრად უნდა იყოს დაშორებული. თუკი ეს მანძილები არათანაბარია, მაშინ კრისტალის ფორმა დამახინჯებულია.

I. 17 ნახაზზე მოცემულია იდეალურად განვითარებული ოქტაედრის წინა ოთხი წახნაგი (ა) და არათანაბრად განვითარებული იგივე წახნაგები დამახინჯებულ ოქტაედრზე (ბ). რადგან კრისტალის ზრდის დროს მისი წახნაგების გადაადგილება ხდება ურთიერთპარალელურად, კუთხეები ერთგვაროვან წახნაგებს შორის არ უნდა იცვლებოდეს—იდეალურად იქნება განვითარებული კრისტალის ფორმა თუ დამახინჯებულად გაზრდილი, დიდი იქნება კრისტალი თუ პატარა. ეს

დებულება გეომეტრიული კრისტალოგრაფიის ერთ-ერთი ძირითადი კანონია და ცნობილია როგორც კუთხეების მუდმივობის კანონი ერთი და იმავე ნივთიერების კრისტალების შესაბამის წახნაგებს შორის კუთხეები მუდმივია, რა ზომისა არ უნდა იყოს კრისტალი.

როგორც აღენიშნეთ, ეს კანონი დადგენილი იქნა 1669 წელს დაწილი ექიმისა და ბუნებისმეტყველის ნ. სტენოს მიერ. აღსანიშნავია,



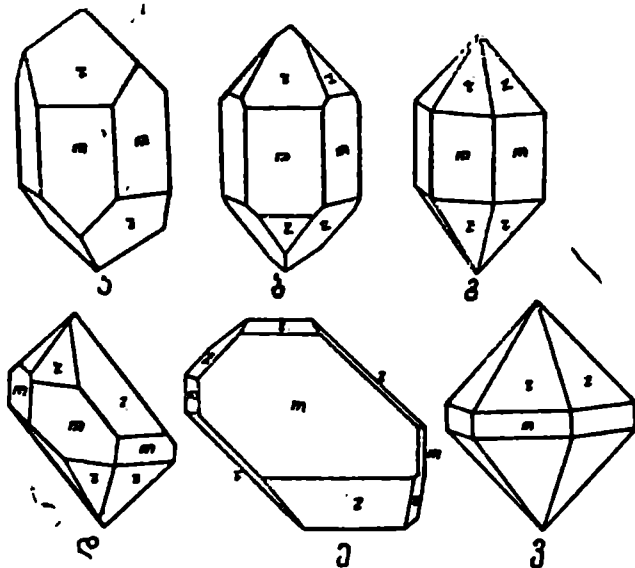
ნახ. I. 17. ა—იდეალური განვითარებული ტეტრაედრის ფორმის კრისტალი, ბ—ოქტაედრი არათანაბრად განვითარებული წახნაგებით.

რომ მის შრომაში მყარი სხეულის ბუნების შესახებ, რომელიც განზრახული დიდი ტრაქტატის მხოლოდ მოკლე თეზისებია, ეს კანონი მოცემულია შრომის არა ძირითად ტექსტში, არამედ მხოლოდ ნახაზის განმარტებაში. ალბათ ამით აიხსნება ის, რომ ნ სტენოს მიერ დადგენილი კანონი შეუმჩნეველი დარჩა იმდროინდელ მეცნიერებს და შემდგომში რამდენჯერმე იქნა დადგენილი (მაგალითად, 1749 წელს მ. ლომონოსოვის და საბოლოოდ 1773 წელს რომე დე ლილის მიერ). შესაბამის წახნაგებს შორის კუთხეების მუდმივობა შეიძლება აეხსნათ იმით, რომ ერთი და იმავე ნივთიერების კრისტალებს ერთნაირი კრისტალური სტრუქტურა აქვს. მაგრამ ცნობილია, რომ არსებობს ისეთი ნივთიერებებიც, რომლებიც სხვადასხვა თერმოდინამიკურ პირობებში იძლევიან ერთმანეთისაგან განსხვავებული სტრუქტურის მქონე კრისტალებს. ასეთ ნივთიერებებს მრავალფორმიანს ანუ პოლიმორფულს უწოდებენ. კუთხეების მუდმივობის კანონი ვრცელდება მხოლოდ ერთი და იმავე ნივთიერების ისეთ კრისტალებზე, რომლებიც ერთსა და იმავე პოლიმორფულ სახეობას განეკუთვნება.

I. 18. ნახაზზე მოცემულია კვარცის (SiO_2) ერთი და იმავე პო-

ლიმორფული სახეობის ექვსი სხვადასხვა სახის კრისტალი. ყოველი კრისტალის შესაბამისი წახნაგები აღნიშნულია ერთნაირი ასოებით. ამ წახნაგებს შორის კუთხეები ყველა კრისტალზე ერთნაირია, მიუხედავად განსაკუთრებით დამახინჯებულად განვითარებული ფორმებისა. „დ“ და „ე“ კრისტალებზე, მაგალითად, ვერტიკალური მიმართულების ყველა „მ“ წახნაგს შორის კუთხე ყველა კრისტალზე 120° -ის ტოლია, ხოლო „მ“ და „წ“ წახნაგებს შორის კუთხე 141° -ია.

ამრიგად, ცხადია, რომ კრისტალის აღრიცხვისათვის დიდი მნიშ-



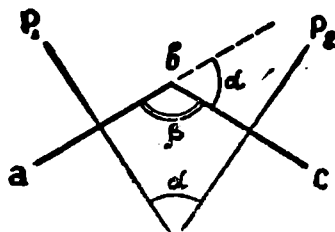
ნახ. I. 18. სხვადასხვა სახის მქონე კვარცის კრისტალები.

ვნელობა აქვს მასზე განვითარებულ წახნაგებს შორის კუთხეების გაზომვას. ეს გაზომვა ზოგ შემთხვევაში კრისტალის წარმოქმნის პირობების დადგენის საშუალებასაც გვაძლევს. კრისტალის წახნაგებს შორის კუთხეებს ზომავენ კუთხესაზომებით ანუ გონიომეტრებით („გონია“ ბერძნულად კუთხეა). ცნობილია გონიომეტრების ორი სახეობა: შეხებითი და არეკვლითი.

შეხებითი გონიომეტრი მარტივად ხელსაწყოა და წარმოადგენს ტრანსპორტირს, რომელზედაც მიმაგრებულია მბრუნავი თამასა (ნახ. I. 19). გასაზომი ორწახნაგა კუთხე უნდა მოვათავსოთ ტრანსპორტირსა და მოძრავ თამასას შორის ისე, რომ ამ წახნაგების გადაკვეთით წარმოქმნილი წიბო თამასის ბრუნვის ღერძის პარალელური იყოს.

ვიდან არეკლილ სხივს. ლიმბის ეს მდგომარეობაც უნდა აღინიშნოს ნონიუსის საშუალებით. ამრიგად, ლიმბზე ანათელების საშუალებით გავზომეთ ab და bc წახნაგების პერპენდიკულაუმს შორის არსებული კუთხე (ნახ. I. 21). ცხადია, რომ წახნაგებს შორის საძიებელი კუთხე $\beta = 180^\circ - \alpha$.

ამ პრინციპზე მოწყობილი გონიომეტრების სიზუსტე აღწევს I'-

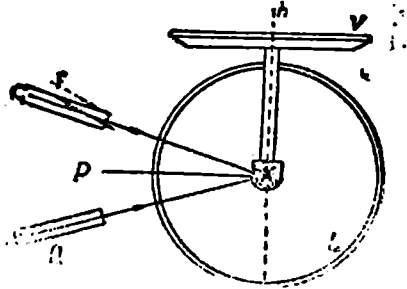


ნახ. I. 21. ab და bc წახნაგთა და მათ პერპენდიკულარებს შორის არსებული კუთხეების ურთიერთდამოკლებულობა.

-0.5°-ს; გაზომვისას კრისტალი უნდა დამაგრდეს ლიმბის ცენტრში ისე, რომ გასზომი ორწახნაგა კუთხის წიბო ბრუნვის ღერძის პარალელური იყოს. ბუნებრივია, რომ კუთხეების სხვადასხვა მიმართულებით გასზომად საჭირო იქნება შესაბამისი ორიენტაციით კრისტალის ლიმბზე ხელახლა დამაგრება. ამ უხერხულობის თავიდან ასაცილებლად ფიოდოროვის, ჩაპეკის და გოლდშმიტის მიერ თითქმის ერთდროულად კონსტრუირებულ იქნა ახალი ტიპის ამრეკ-

ლი გონიომეტრი. ამისათვის გამოყენებული იქნა თეოდოზიტის აგებულების პრინციპი; ეს გონიომეტრი ორი ერთწრიანი გონიომეტრია ლიმბების პორიზონტალური და ვერტიკალური ორიენტაციით, ამიტომ მას ორწრიანი ამრეკლ გონიომეტრს უწოდებენ (ნახ. I. 22).

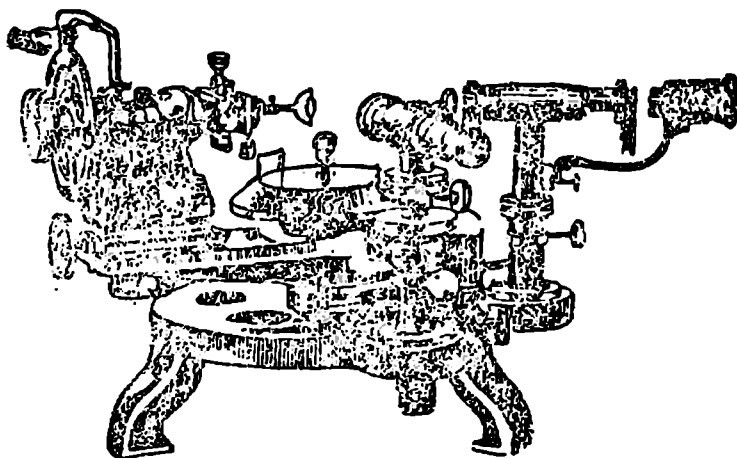
ამ გონიომეტრების საშუალებით შეიძლება კრისტალის ორწახნაგა კუთხეების ორი ურთიერთმართობი მიმართულებით გაზომვა მისი ხელახალი დამაგრების გარეშე. ამჟამად არსებობს ორწრიანი გონიომეტრების სხვადასხვა მოდელი, რომლებითაც შესაძლებელია კრისტალების გაზომვა სხვადასხვა ტემპერატურის დროს ან კრისტალის ზრდის პროცესში.



ნახ. I. 22. ორწრიანი ამრეკლი გონიომეტრის აგებულების სქ.ში. L-პორიზონტალური ლიმბი, F-ვერტიკალური ლიმბი. დანარჩენი აღნიშვნები იგივეა, რაც I. 20 ნახაზზე.

1. 23 ნახაზზე მოცემულია ფ. ფლინტის ორწრიანი გონიომეტრის მოდელი, რომელშიც ე. ფიოდოროვის მოდელთან შედარებით გაუმჯობესებულია კრისტალის დამაგრების წესი და განათების პრინციპი.

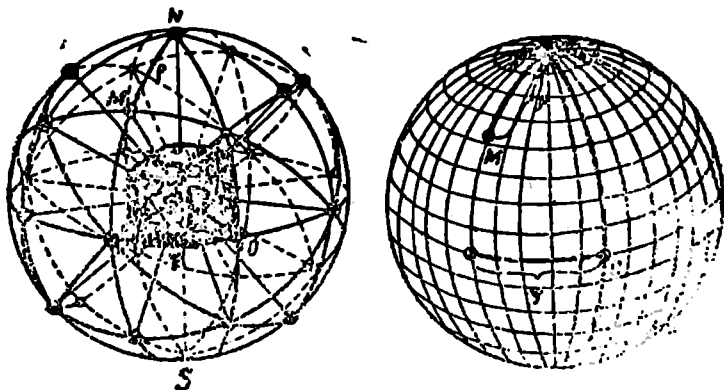
კრისტალის წახნავის განლაგების განსაზღვრა ხდება კრისტალის ცენტრიდან სათანადო წახნავზე დაშვებული მართობის სფერული კოორდინატების (φ და ρ) საშუალებით. ამ კუთხეებს განსაზღვროავენ გო-



ნახ. 1. 23. თანამედროვე ორწიანი გონიომეტრი (ე. ფონტის მოდელი).

ნომეტრის პორიზონტალურ და ვერტიკალურ ლიბებზე შესაბამისი ანათვლების ალებით.

კრისტალის ოთხელმე წახნავზე დაშვებული მართობის სფერუ-



ნახ. 1. 24. კრისტალის წახნავებზე დაშვებული მართობების სფერული კოორდინატები. გ შუაოფილია M პოლუსის φ და ρ კუთხეები.

ლი კოორდინატების სისაღებად უნდა წარმოვიდგინოთ კრისტალის გარშემო მისი ცენტრიდან შემოფარგლული სფეროს ზედაპირი (ნახ.

I.24). დავუშვათ ცენტრიდან კრისტალის წახნაგებზე მართობები და გავაგრძელოთ ისინი სფეროს ზედაპირის გადაკვეთამდე. მიღებული წერტილები წახნაგების პოლუსებია, რომელთა მდებარეობის განსაზღვრა ხდება შესაბამისი φ და ρ მნიშვნელობებით. φ გრძელია და იქონიება სფეროს ეკვატორზე რომელიმე ნულოვანი მერიდიანიდან, ხოლო ρ პოლარული მანძილია და უდრის კუთხურ მანძილს ჩრდილო პოლუსიდან ნებისმიერი მერიდიანის გასწვრივ; ცხადია, რომ ეკვატორის ყოველი წერტილის პოლარული მანძილი უდრის 90° -ს. წახნაგის პოლუსის სიბრტყეზე გადატანა შეიძლება დაგეგმილების სხვადასხვა მეთოდით, რომელთა შორის ყველაზე გავრცელებულია სტერეოგრაფიული მეთოდი (იხ. § III.3).

თავი II. კრისტალთა სიმეტრია

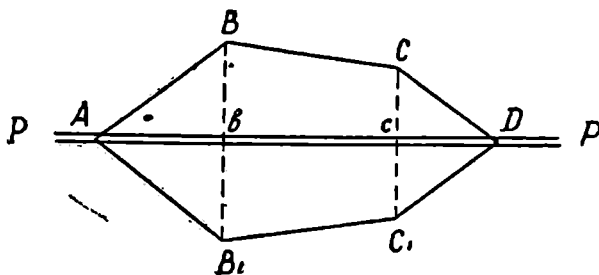
§ II. 1. სიმეტრიის ელემენტები

სიმეტრიის ცნებას აღამიანი გარე სამყაროს აღწერისას ხშირად იყენებს. სიმეტრიულობა ჩვენს გარშემო არსებულ ობიექტთა ერთ-ერთი დამახასიათებელი თვისებაა. ჩვენ ვმსჯელობთ ხოლმე ნაგებობათა, მცენარეთა ფოთლებისა თუ ყვავილების, ცხოველთა (ზღვის ვარსკვლავი, პეველა და სხვ.) და სხვ. სიმეტრიის შესახებ; სიმეტრია კრისტალთა და, საერთოდ, კრისტალური ნივთიერების ერთ-ერთი ძირითადი თვისებაა. ზოგადად სიმეტრია ბრტყელი ან სივრცული ნაკვეთის (მათ შორის კრისტალთა) ნაწილების ურთიერთკანონზომიერი განლაგება ნაკეთი სიმეტრიულია, თუ მისი ნაწილები წარმოდგენით შეიძლება შევეთავსოთ ერთმანეთს სიმეტრიული გარდაქმნების შედეგად. ეს გარდაქმნებია: არეკვლა რაიმე წარმოსახვით სიბრტყეში, ბრუნვა ცენტრზე გამავალი რომელიმე ღერძის გარშემო ან ინვერსირება ნაკვეთის გომეტრიულ ცენტრში მდებარე წერტილში. აღნიშნულ გომეტრიულ ერთეულებს—სიბრტყეს, ღერძს და წერტილს, სიმეტრიის ელემენტებს უწოდებენ.

სიმეტრიულობა თვალსაჩინოა მხოლოდ იდეალურად განვითარებულ კრისტალებზე, ვინაიდან რეალურ კრისტალებზე ხშირად წახნაგების არათანაბარი განვითარების გამო დამახასიათებელი სიმეტრიულობა დარღვეულია, ამიტომ კრისტალთა სიმეტრიის კანონზომიერების შესასწავლად სარგებლობენ არა ბუნებრივი კრისტალებით, არამედ მოდლებით, რომლებიც ასახევენ ბუნებაში არსებული მრავალწახნაგების იდეალურად განვითარებულ ფორმებს.

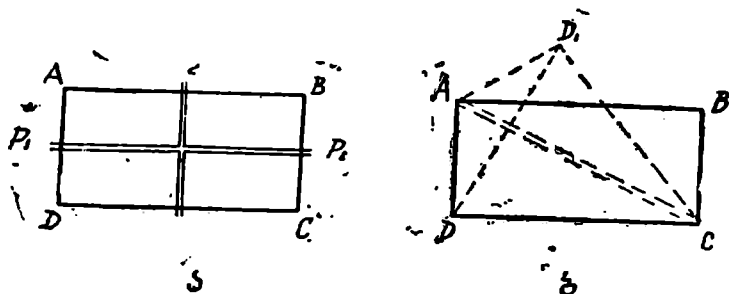
სიმეტრიის სიბრტყე ისეთი სიბრტყეა, რომელიც კრისტალს ორ ისეთ თანაბარ ნაწილად ყოფს, რომლებიც ერთიმეორის სარკისებრი ანარეკლია. ეს ნიშნავს, რომ მიღებული ორივე ნახევარი სიმეტრიის სიბრტყეში (ან ორმხრივ სარკეში) აირეკლოს. კრისტალი თავის თავს უნდა შეუთავსდეს.

ნაკეთის სარკისებრი გამოსახულების ასაგებად საჭიროა მისი ყოველი წერტილიდან სარკის სიბრტყემდე დაშვებულ იქნას მართობები (II. 1-ნახაზზე Bb და Cc მართობებია P სიბრტყისადმი), შემდეგ



ნახ. II. 1. $ABCD$ ნაკეთის შესწავლა სიბრტყეში.

ისინი უნდა გავაგრძელოთ მეორე მხარეს და გადავზომოთ $B_1b = Bb$ და $C_1c = Cc$ მანძილები. ამრიგად, B წერტილი აირეკლება B_1 წერტილში, ხოლო $C - C_1$ -ში; სიმეტრიის სიბრტყეზე მდებარე A და D წერტილები კი არ აირეკლება. ადვილი დასადგენია, რომ $AB = A_1B_1$



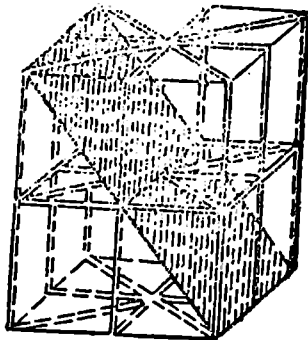
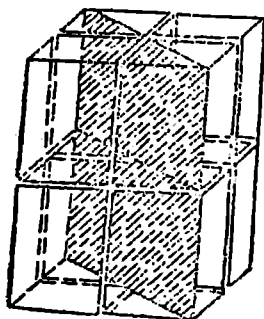
ნახ. II. 2. P_1 და P_2 არის მართკუთხედის სიმეტრიის სიბრტყეები (ა). AC მიმართულებით სიმეტრიის სიბრტყე არ გაივლის (ბ).

$BC = B_1C_1$ და $CD = C_1D_1$. მაშასადამე, $ABCD$ ნაკეთი P სიბრტყეში აირეკლით შეუთავსდება $AB_1C_1D_1$ ნაკეთს. პირიქით რომ გვემოკმედა, $AB_1C_1D_1$ ნაკეთი შეუთავსდებოდა $ABCD$ -ს, ე. ი. მთელი $ABCDC_1B_1$

შრავალწახნავა შეუთავსდება თავის თავს P სიბრტყეში არეკვლით, ე. ი. P სიბრტყე მთელი ნაკეთისათვის სიმეტრიის სიბრტყეა.

$ABCD$ მართკუთხედში (ნახ. II. 2. ა) წახნაგებს პარალელურად გაივლის სიმეტრიის ორი P_1 და P_2 სიბრტყე. დიაგონალური მიმართულებით (ნახ. II. 2. ბ) გატარებული სიბრტყე არ იქნება სიმეტრიის სიბრტყე, რადგან მასში არ ეკვლილი მართკუთხედის ნახევარი ADC შიილებს AD_1C მდებარეობას, ე. ი. არ შეუთავსდება მეორე ნახევარს და, მაქასადაამე, AC სიბრტყით შიილებული მართკუთხედის ნახევრებს არ წარმოადგენენ ერთმანეთის სარკისებრ ანარეკლს.

ავილოთ მართკუთხა პარალელები (ნახ. II. 3, ა) და გავატაროთ მასზე სიმეტრიის სიბრტყეები. ასეთი სიბრტყე საპი იქნება



ა

ბ

ნახ. II 3. მართკუთხა პარალელებიში გაივლის სიმეტრიის სამი ურთიერთ-მართობი სიბრტყე (ა), კვადრატულ პრიზმაში კი-სიმეტრიის ხუთი სიბრტყე (ბ). დატარებული სიბრტყე არ არის სიმეტრიის სიბრტყე.

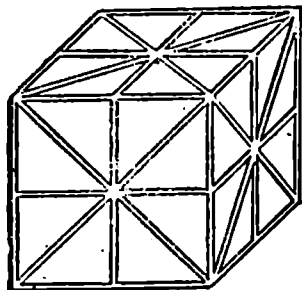
(ნახაზზე აღნიშნულია ორი-ორი ხაზით), მათ შორის ორი ვერტიკალური და ერთი ჰორიზონტალური მიმართულებების. დიაგონალური სიბრტყე არ იქნება სიმეტრიის სიბრტყე, რადგან მის მიერ წარმოქმნილი პარალელებიშის ნახევრები არაა ერთმანეთის სარკისებრი ანარეკლი. კვადრატული ფუძის მქონე პრიზმას, გარდა სიმეტრიის ანალოგიურ სამი ურთიერთმართობი სიბრტყისა, დაემატება კიდევ ორი ვერტიკალური (კვადრატის დიაგონალის გასწვრივ) სიბრტყე და შიილებთ სიმეტრიის ხუთ სიბრტყეს (ნახ. II. 3. ბ). დიაგონალური დახრილი სიბრტყე არ იქნება სიმეტრიის სიბრტყე, რადგან არ იძლევა ნახევრების სარკისებრ არეკვლას.

კუბში (ნახ. II. 4), აღნიშნული სიმეტრიის ხუთ სიბრტყეს დაემატება კიდევ ოთხი დახრილი დიაგონალური სიბრტყე და სულ

შივილებთ სიმეტრიის ცხრა სიმეტრიის-ოთხ-ოთხს ვერტიკალურს და
 ღახრილს და ერთს ჰორიზონტალურს.

სიმეტრიის სიმეტრიე აღინიშნება P ან π ასოებით. კოეფიციენტი
 კი სიმბოლოს წინ მათ რიცხვს გვიჩვენებს. მაგალითად, კუბში
 გაივლის $9P$.

სიმეტრიის ღერძი არის კრისტალის გეომეტრიულ
 ცენტრზე გამავალი. ისეთი წარმოსახვითი წრფე, რომლის
 გარშემო კრისტალის 360° -ით შემობრუნებით
 იგი შეუთავსდება თავის თავს ორჯერ ან მეტჯერაც.



ნახ. II. 4. კუბში გაივლის სიმეტრიის
 ცხრა სიმეტრიე.

რამდენჯერაც შეუთავსდება თავის-
 თავს, სიმეტრიის ღერძიც იმ რიგისა
 იქნება მაგალითისთვის ავიღოთ
 ისევ მართკუთხა პარალელპიპედს
 და გავტაროთ ღერძი დუქვების
 ცენტრში გავლით (ნახ. II. 5). ამ
 ღერძის გარშემო რომ ვაბრუნოთ
 კრისტალი 360° -ით, დავინახავთ,
 რომ იგი შეუთავსდება საწყის მდგომარეობას
 ორჯერ, ე. ი. ყოველი
 180° ით მობრუნების შემდეგ, მაშასადამე,
 აქ გვექნება მეორე რიგის სიმეტრიის
 ღერძი. კვადრატული

პრიზმის ფუძეების ცენტრში გაივლის მეოთხე
 რიგის სიმეტრიის ღერძი (ნახ. II. 5. გ), რადგან ამ
 ღერძის გარშემო კრისტალის 360° -ით
 შემობრუნებისას იგი ოთხჯერ შეუთავსდება
 თავის თავს, ე. ი. ყოველი 90° -ით
 ბრუნვას შემდეგ. სამწახნაგა პრიზმის
 ფუძის ცენტრში გამავალი ღერძი (ნახ. II. 5. ბ)
 იქნება მესამე რიგის სიმეტრიის ღერძი,
 ე. ი. იგი ყოველი 120° -ით მობრუნების
 შემდეგ გაიმეორებს საწყის მდგომარეობას.

მინიმალურ კუთხეს, რომლითაც უნდა მოვაბრუნოთ
 კრისტალი იმისათვის, რომ საწყისი მდგომარეობა
 გაიმეორდეს. მობრუნების ელემენტარულ
 კუთხეს უწოდებენ. სიმეტრიის ღერძის რიგი
 შეიძლება გამოისახოს ამგვარად: $n = \frac{360}{\alpha}$, სადაც α
 არის ელემენტარული

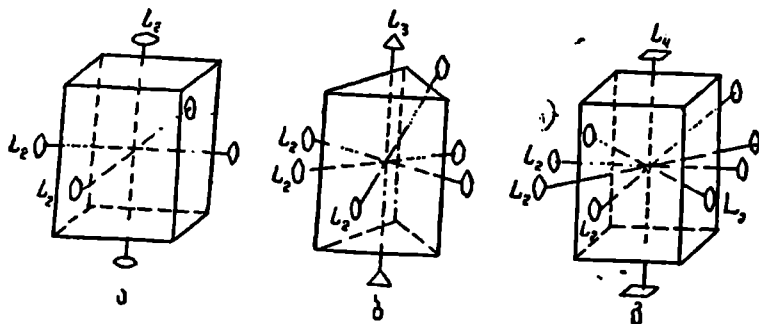
მობრუნების კუთხე, n —სიმეტრიის ღერძის რიგი.
 თუ $\alpha = 360^\circ$, მაშინ $n = 1$, ე. ი. გვექნება პირველი
 რიგის სიმეტრიის ღერძი. კრისტალი ამ ღერძის
 გარშემო 360° -ით რომ მოვაბრუნოთ,
 იგი უნდა შეუთავსდეს თავის თავს, მაგრამ
 ასეთი ღერძები ყოველ კრისტალში შეიძლება გავატაროთ
 უსასრულო რაოდენობით და ამიტომ მას,
 როგორც სიმეტრიის ელემენტს, მზედველობაში არ

ვიღებთ გარდა იმ კრისტალებისა, რომლებსაც სიმეტრიის სხვა ელემენტები არა აქვთ. თუ $\alpha = 180^\circ$, მივიღებთ მეორე რიგის სიმეტრიის ღერძს და ა. შ.

სიმეტრიის ღერძებს აღნიშნავენ L ან G ასოებით, ხოლო რიგის აღსანიშნავად ამ ასოებს მიუწერენ მარჯვნივ და ქვევით სათანადო ინდექსს, მაგალითად, L_3 ან G_3 ნიშნავს მესამე რიგის სიმეტრიის ღერძს. ჩვენ სიმეტრიის ღერძებს L -ით აღვნიშნავთ.

II. 6. ნახაზზე მოცემულია კუბის სიმეტრიის ღერძთა ერთობლიობა.

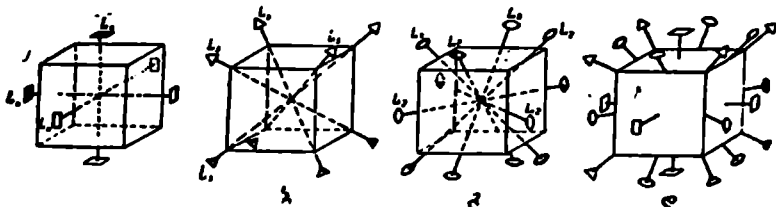
კუბის წახაზების ცენტრში გაივლის მეოთხე რიგის სიმეტრიის



ნახ. II. 5. სიმეტრიის ღერძების განლაგება: ა—მარტოეული პარალელები (3 L_2); ბ—სამწახაზა ტოლგვერდა პრიზმაში ($L_3, 3L_2$); გ—კვადრატული პრიზმაში ($L_4, 4L_2$); ღერძი სამი ურთიერთმართობი მიმართულებით —3 L_4 (ნახ. II. 6 ა); კუბის წვეროებში-მესამე რიგით ოთხი ღერძი —4 L_3 (ნახ. II. 6 ბ); წიბოების ცენტრში—მეორე რიგის სიმეტრიის ღერძი; ყოველ წვეილ წიბოზე თითო, ხოლო სულ კუბის 12 წიბოზე გაივლის 6 L_2 ღერძი (ნახ. II. 6 გ). კუბს აქვს სიმეტრიის 13 ღერძი—3 $L_4, 4L_3$ და 6 L_2 (ნახ. II. 6 დ).

კრისტალებში არსებობს მხოლოდ სიმეტრიის L_2, L_3, L_4 და L_6 ღერძები. დავამტკიცოთ, რომ L_5 ღერძი კრისტალურ სხეულებში არ არსებობს. ავიღოთ რაიმე კრისტალური მესრის რომელიმე წერტილი (კვანძი) და დავუშვათ, რომ აქ გადის მეხუთე რიგის სიმეტრიის ღერძი II. 7 ა ნახაზის სიბრტყის მართობულად. დავუშვათ, რომ უახლოესი კვანძი ამ წერტილისათვის ბაღზე a_1 წერტილია, მაშინ ასეთივე წერტილი უნდა იყოს L_5 ღერძის გარშემო ასევე უახლოესი მანძილით დაშორებულ ხუთ ადგილას (a_1, a_2, a_3, a_4 და a_5 , ნახ. II. 7 ა), რომლებიც ერთსა და იმავე ბაღს ეკუთვნებიან. მესრის, თვისებებიდან გამომ-

მდინარე ვიცი, რომ მის ყოველ ორ კვანძზე შეიძლება გავატაროთ მესრის რიგი და ყოველ კვანძზე—ნებისმიერი რიგის პარალელური რიგი, ამიტომ a_2, a_3 კვანძებზე გატარებული რიგის პარალელური რიგი შეიძლება გავატაროთ a_1 კვანძზედაც. ეხლა გავისეიოთ,



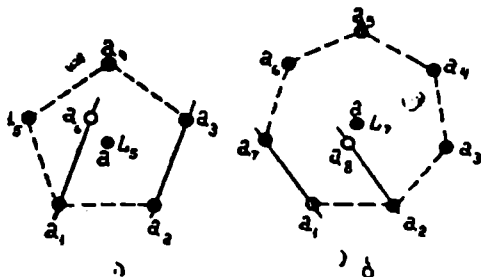
ნახ. II. 6. სიმეტრიის ღერძების განლაგება კუბში. ა- $3L_1$; ბ- $4L_2$; გ- $6L_3$; დ-ყველა ღერძი აღნიშნული ერთად.

რომ პარალელურ რიგებში კვანძებს შორის მანძილი ტოლია (§ I. 2), ამიტომ a_1 -ზე გატარებულ რიგში უნდა გვექონდეს a_6 კვანძი, რომელიც a კვანძთან უფრო ახლოს იქნება განლაგებული, ვიდრე a_1 , რომელიც პირობის თანახმად უახლოესია და, მაშასადამე, a_6 კვანძის არსებობა შეუძლებელია; რადგან ჩვენი მსჯელობა და აგება სწორია, აბსურდული შედეგი გვიჩვენებს, რომ L_6 ღერძის არსებობის დაშვება მცდარია. ამრიგად, მეხუთე რიგის სიმეტრიის ღერძის არსებობა შეუძლებელია, რადგან ეწინააღმდეგება სივრცული მესრის თვისებებს.

ამავე გზით შეიძლება დავრწმუნდეთ, რომ არ შეიძლება არსებობდეს მეექვსე რიგზე მაღალი რიგის სიმეტრიის ღერძი. II. 7 ბ ნახაზზე ნაჩვენებია, რომ არ შეიძლება მეშვიდე რიგის სიმეტრიის ღერძის არსებობის დაშვება.

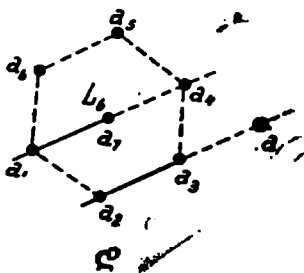
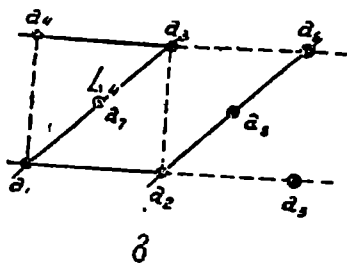
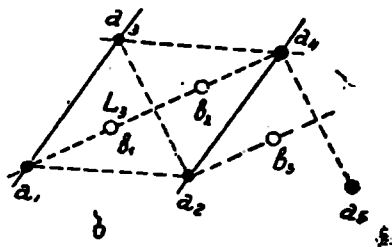
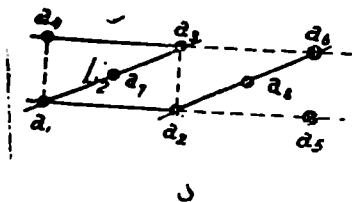
მეექვსე რიგის სიმეტრიის ღერძის არსებობა, როგორც ეს II. 8. დ ნახაზიდან ჩანს, არ ეწინააღმდეგება სივრცული მესრის თვისებებს, მესრის არსებობის პირობებს არ არღვევს მეორე, მესამე და მეოთხე რიგის სიმეტრიის ღერძებიც (ნახ. II. 8).

როგორც ვხედავთ, სიმეტრიის ღერძი აერთიანებს კრისტალში საწინააღმდეგოდ განლაგებულ ორ შემომოფარგველ ელემენტს. ეს 3. გ. ხარაშვილი



ნახ. II. 7. L_5 და $L_7 > 6$ სიმეტრიის ღერძები კრისტალებში არ არსებობს.

ელემენტები შეიძლება იყოს მსგავსი ან განსხვავებული. მსგავს ელემენტებს აერთიანებს კუბის ყველა სიმეტრიის ღერძი: L_4 აერთიანებს ერთნაირ წახნაგებს; L_2 -სამწახნაგა წვეროებს, ხოლო L_3 -ურთიერთპარა-

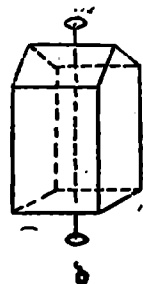
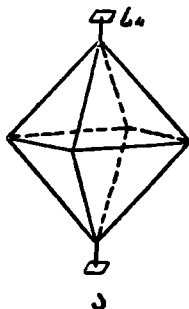


ნახ. II. 8. კრისტალუში ირსებობს მეორე (ა), მესამე (ბ), მეოთხე (გ) უღო შეეკვესე (დ რიგის სიმეტრიის ღერძები.

ლელორ წიბობებს. ასეთ ღერძებს უწოდებენ ბიპოლარულ ღერძებს ასეთია L_4 II 9. ა. ნახაზზე, რომელიც აერთებს ურთიერთმსგავს წვეროებს, თუ სიმეტრიის ღერძი აერთიანებს კრისტალის ზედაპირის განსხვავებულ ელემენტს, მაგალითად, წახნაგსა და წვეროს ან წიბოსა და წახნაგს (ნახ. II. 9, ბ). ასეთ ღერძს ბიპოლარულ ღერძს უწოდებენ.

სიმეტრიის ღერძს ზოგჯერ პირიოდებსაც („პიროს“ ბერძნულად ბრუნვას ნიშნავს) უწოდებენ.

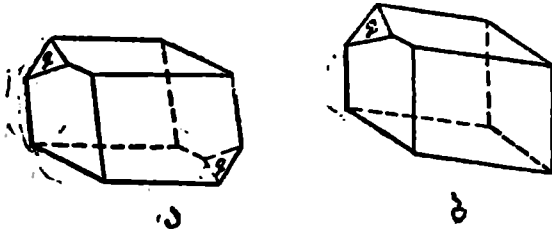
ინვერსიის ცენტრი ისეთი წერტილია კრისტალის შიგნით, რომლითაც შუაზე იკვეთება კრისტალის ზედაპირის ყველა შესაბამისი წერტილის შემაერთებელი წრფე. მაშასადა-



ნახ. II. 9. L_4 ბიპოლარული სიმეტრიის ღერძია (ა); L_2 -პოლარული სიმეტრიის ღერძი (ბ).

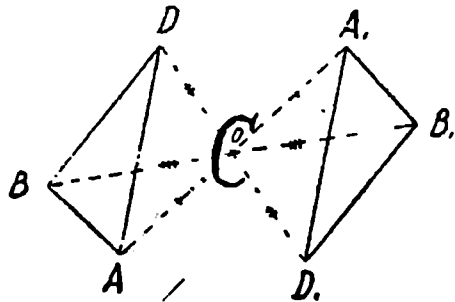
შე, თუ კრისტალს აქვს ინვერსიის ცენტრი, მაშინ მისი ზედაპირის ყოველ წერტილს უნდა ჰქონდეს შესაბამისი წეტილი, ე. ი. ყოველ წახნაგს უნდა ჰქონდეს შესაბამისი ტოლი და პარალელური წახნაგი (ნახ. II. 10). კრისტალს შეიძლება ჰქონდეს ან არ ჰქონდეს ინვერსიის ცენტრი, მაგალითად, II. 10 ბ ნახაზზე გამოსახულ კრისტალს ინვერსიის ცენტრი არა აქვს, რადგან q წახნაგს არა აქვს შესაბამისი ტოლი და პარალელური წახნაგი. ინვერსიის ცენტრი აღინიშნება O ასოთი.

კრისტალის რომელიმე წახნაგის ინვერსირების საილუსტრაციოდ



ნახ. II. 10. პრიზმული წახნაგი ინვერსიის ცენტრით (ა) და ინვერსიის ცენტრის არქონე (ბ).

აფილთ ABD წახნაგი (ნახ. II. 11), და მოვხაზინოთ მისი არეკვლა ინვერსიის ცენტრში (O წერტილში) ამისათვის წახნაგის რაიმე A წერტილიდან გავავლოთ სწორი ხაზი O წერტილამდე და შემდეგ მის გაგრძელებაზე გადავხაზოთ AO -ს ტოლი მონაკვეთი; მიღებული A_1 წერტილი იქნება A წერტილის შესაბამისი, რომელშიც იგი გადაადგილდება ინვერსირების შედეგად. ამავე გზით B წერტილი გადაადგილდება B_1 წერტილში, ხოლო D წერტილი D_1 ში. ამგვარად, ყველა დანარჩენი წერტილის O წერტილში არეკვის შედეგად მოხდება მთელი ABD წახნაგის ინვერსირება და იგი მიიღებს შებრუნებულ პარალელურ მდგომარეობას ($A_1 B_1 D_1$).

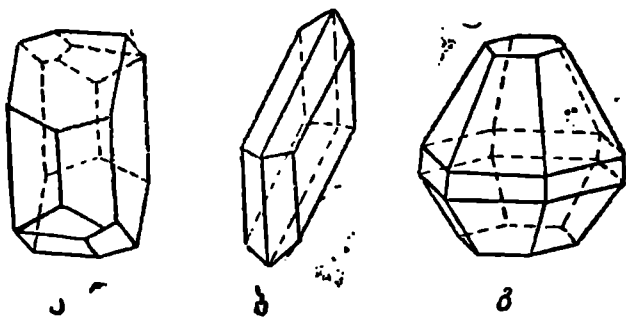


ნახ. II. 11. სიმკუთხედის ფორმის ორი წახნაგი, ურთიერთდაკავშირებული ინვერსიის ცენტრით.

II. 12 ნახაზზე მოცემულია ანორთიტის $Ca[Al_2Si_2O_8]$ და თაბაშირის $(CaSO_4 \cdot 2H_2O)$ კრ-

სტალები, რომლებსაც აქვს ინვერსიის ცენტრი, ე. ი. მათ ყოველ წახნაგს შეესაბამება ტოლი და პარალელური (შებრუნებული პარალელური) წახნაგი, ხოლო ნეფელინის ($\text{Na}[\text{AlSi}_3\text{O}_8]$) კრისტალს ინვერსიის ცენტრი არა აქვს (ნახ. II. 12 გ).

გარდა განხილული მარტივი სიმეტრიული გარდაქმნებისა (არეკვლა, ბრუნვა და ინვერსირება), კრისტალებში შესაძლებელია უფრო რთული, კომბინირებული სიმეტრიული გარდაქმნები, რომლებიც ორ მარტივი გარდაქმნის ერთდროულ მოქმედებას გულისხმობს. მაგალითად, მობრუნება რაიმე სიმეტრიის ღერძის გაოშემო და ინვერსირება ან მობრუნება და არეკვლა ღერძის მართობ სიბოტყეში. ამ გეომეტრიული გარდაქმნების შედეგად წაოშოიქმნება სიმეტრიის დაიკლებითი ელემენტები, რომლებსაც ინვერსიის და არეკვლის ღერძ-



ნახ. II. 12. ანორტიტის (ა) და თაბაშირის (ბ) კრისტალებში ინვერსიის ცენტრი აქვთ, ნეფელინის კრისტალს (გ) ინვერსიის ცენტრი არა აქვს.

ძებს უწოდებენ, ჩვეულებრივი სიმეტრიის ღერძების ანალოგიურად ეს ღერძებიც ელემენტარული მობრუნების კუთხის მიხედვით შეიძლება იყოს პირველი, მეორე, მესამე, მეოთხე და მეექვსე რიგის. განვიხილოთ ინვერსიის ღერძი.

ინვერსიის ღერძის გარშემო კრისტალი რომ მოვაბრუნოთ (გარკვეული კუთხით) და შემდეგ ავრეკლოთ ნაკვეთის გეომეტრიულ ცენტრში როგორც ინვერსიის ცენტრში, იგი შეუთავსდება საწყის (მობრუნებამდე) მდგომარეობას. რამდენჯერაც განმეორდება ასეთი შეთავსება კრისტალის 360° -ით მობრუნების შედეგად, იმ რიგისა ექნება ინვერსიის ღერძი.

ინვერსიის ღერძებს აღნიშნავენ იმავე ასოებით, როგორც სიმეტრიის ღერძებს, მხოლოდ უმატებენ i ინდექსს (ინვერსირება) L_i ან G_i . ადვილად რომ განვასხვავოთ ერთმანეთისაგან სიმეტრიის და ინვე-

რისი ლერძები, მივიღოთ აღნიშვნა G_i . ლერძის რიგს აღნიშნავენ შესაბამისი ციფრით მარჯვნივ და ქვევით, მაგალითად G_{11} , G_{12} და ა. შ.

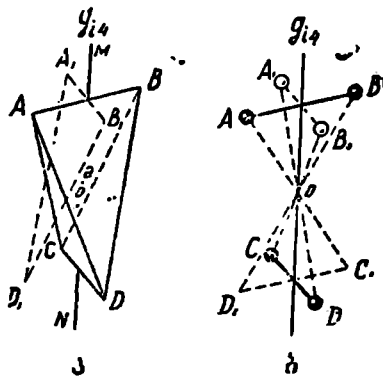
ზოგჯერ ამავე ლერძებს აღნიშნავენ რიგის შესაბამისი რიცხვით თავზე — "ნიშნით: $\overline{2.3}$ და სხვ.

განვიხილოთ II. 13 ნახაზზე მოცემული ოთხწახნაგა კრისტალის მოდელი. AB და CD წიბოებს ურთიერთაღმართობი მართობი მიმართულება აქვს. გავავლოთ მათ ცენტრებზე გამავალი MN ლერძი ადვილი გასაკვბია, რომ ეს ლერძი მე რე რიგის სიმეტრიის ლერძი (L_2) იქნება, რადგან მოდელი მის გარშემო რომ ვაბრუნოთ, ყოველი 180° -ით მობრუნების შემდეგ შეუ-

თავსდება თავის თავს, ოთხწახნაგა რომ შევოვაბ უნოთ აღნიშნული ლერძის გარშემო მხოლოდ 90° -ით, ცხადია იგი საწყის მდგომარეობას არ შეუთავსდება, რადგან AB წიბო გადაადგილდება A_1B_1 მდგომარეობაში და ABD წახნაგი მიიღებს $A_1B_1D_1$ ორიენტაციას, ხოლო C და D წერტილები გადაადგილდება C_1 და D_1 ადგილებში (ნახ. II. 13 ბ). ამ მობრუნების შემდეგ რომ მოვახდინოთ ოთხწახნაგას არეკვლა O წერტილში (როგორც ინვერსიის ცენტრში).

კრისტალი ისევ შეუთავსდება საწყის მდგომარეობას, რადგან A წერტილი, გადაადგილებული A_1 წერტილში, მობრუნებით ინვერსირების შედეგად საბოლოოდ გადავა D წერტილში, $B-C$ -ში, $C-A$ -ში, ხოლო $D-B$ -ში. მოდელი რომ მოვაბრუნოთ 90° ით და ავრეკლოთ O წერტილში, იგი ისევ შეუთავსდება წინა ორიენტაციას და, მაშასადამე, მოდელი, 360° -ით მობრუნებრს შედეგად ოთხჯეო გაიმეორებს წინა ორიენტაციას. მაშასადამე, ეს ლერძი მეოთხე რიგის ინვერსიისა (G_4) და ამავე დროს მეორე რიგის სიმეტრიის ლერძიც ყოფილა. განვიხილოთ ინვერსიის ლერძების მოქმედება რიგების თანამიმდევრობით:

პირველი რიგის ინვერსიის ლერძი (G_1) ისეთი ლერძია, რომლის გარშემო კრისტალი რომ შემოვებრუნოთ 360° -ით და შემდეგ მოვახდინოთ არეკვლა მის გეომეტრიულ ცენტრში (როგორც ინვერსიის ცენტრში), იგი შეუთავსდება საწყის ორიენტაციას. ცხადია, რომ ყველა მრავალწახნაგა 360° -ით მობრუნების შედეგად მიიღებს



ნახ. II. 13. შეოახე რიგის ინვერსიის ლერძი (G_i) ოთხწახნაგა კრისტალში.

საწყის მდგომარეობას, ე. ი. შემობრუნება კრისტალის მდგომარეობას არ ცვლის, ამის შემდეგ თუ ფიგურა ინვერსირებით უთავსდება თავის თავს, ეს იმას ნიშნავს, რომ მას აქვს ინვერსიის ცენტრი და, მაშაჲდამე, G_{i1} -ის მოქმედება იგივეა, რაც C -ს მოქმედება (ნახ. II. 14 ა).

მეორე რიგის ინვერსიის ღერძი (G_{i2}) შეიძლება შეიცვალოს მის მართობულად გავლებული სიმეტრიის სიბრტყით. II. 14 ბ ნახაზზე მოცემულ G_{i2} -ის მოქმედების შედეგად ჯერ A წერტილი გადაადგილდება A_1 მდგომარეობაში (180°-ით მობრუნების შედეგად), შემდეგ კი ცენტრში არეკვლით იგი A_2 წერტილს შეუთავსდება. იგივე

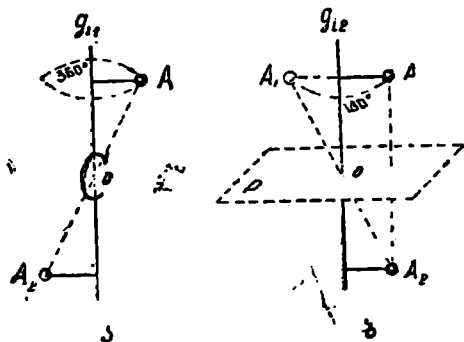
შედეგს მივიღებთ, თუ A წერტილს ავრეკლავთ P სიბრტყეში, რომელიც G_{i2} ღერძის მართობულია.

მესამე რიგის ინვერსიის ღერძის (G_{i3}) მოქმედება (ნახ. II. 15) შეიძლება შევცვალოთ მესამე რიგის სიმეტრიის ღერძისა და ინვერსიის ცენტრის თანამიმდევრული მოქმედებით. (L_3 -ის მიმართულება ემთხვევა G_{i3} -ის მიმართულებას). მართლაც, A წერტილს

L_3 ღერძის მოქმედებით გადაადგილდება B წერტილში და შემდეგ O წერტილში ინვერსირების შედეგად გადავა A_2 წერტილში. ამავე გზით B წერტილი გადავა B_2 -ში, $D - D_2$ -ში და მთელი სხეული შეუთავსდება თავის თავს

მეოთხე რიგის ინვერსიის ღერძი, როგორც დავინახეთ, არ შეიძლება შეიცვალოს სხვა რაიმე სიმეტრიული გარდაქმნით. ძრავალწახნაგას, რომელსაც აქვს მეოთხე რიგის ინვერსიის ღერძი, ინვერსიის ცენტრი არა აქვს, G_{i4} ღერძის მიმართულება ყოველთვის ემთხვევა L_2 -ს, მაგრამ ეს იმას არ ნიშნავს, რომ ყოველი L_2 იყოს ამავე დროს G_{i4} , თუნდაც მრავალწახნაგას არ ჰქონდეს ინვერსიის ცენტრი. მაგალითად, II. 9 ბ ნახაზზე მოცემულია კრისტალი, რომელსაც აქვს L_2 და არა აქვს არც ინვერსიის ცენტრი და არც ინვერსიის ღერძი.

მეექვსე რიგის ინვერსიის ღერძის მოქმედებით კრისტალი რომ თავის თავს შეუთავსდეს, ჯერ უნდა მოვაბრუნოთ იგი 60°-ით და შემდეგ ავრეკლოთ O წერტილში, როგორც ინვერსიის ცენტრში



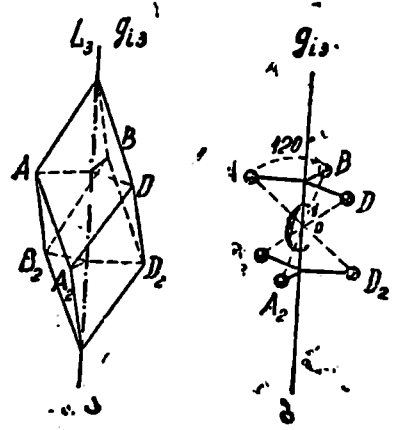
ნახ. II. 14. პირველი და მეორე რიგის ინვერსიის ღერძების მოქმედების სქემა

ნახ. II. 16 ბ). ამის შემდეგ A წერტილი ჯერ გადაადგილდება A_1 მდგომარეობაში და შემდეგ A_2 -ში, ამავე გზით B წერტილი გადავა B_2 -ში, $C-C_2$ -ში და ა. შ. იგივე შეთავსებას მივიღებთ, თუ სხეულს მოვაბრუნებთ არა 60° , არამედ 120° -ით და შემდეგ ავრეკლავთ სიმეტრიის ღერძის მართობ P სიბრტყეში. მაშასადამე, Gi_2 მოქმედება შეიძლება შეიყვაროს L_2 და P მოქმედებებით, სადაც $P \perp L_2$, შეექვსე რიგის ინვერსიის ღერძის მოქმედების საილუსტრაციოდ ავიღოთ სწორი სამწახნაგ პრიზმა (ნახ. II. 16 ა). ვერტიკალური ღერძის გარშემო პრიზმა 60° -ით რომ მოვაბრუნოთ, $A_2 D B D_2$ წახნაგი მიიღებს $D'_1 D_1 B_1 B'_1$ ორიენტაციას და O წერტილში არეკვლის შედეგად დაიკავეს $ABD_2 B_2$ მდგომარეობას. დანარჩენი წახნაგების შესაბამისი გადაადგილებით პრიზმა შეუთავსდება საწყის მდგომარეობას, კრისტალის 360° -ით შემობრუნების შედეგად. ასეთი გეომეტრიული გაოდაქმნები განხორციელება 6-ჯერ. მაშასადამე, ვერტიკალური ღერძი არის მეექვსე რიგის ინვერსიის ღერძი და შეიძლება შეიყვაროს L_2 ღერძითა (რომელიც ემთხვევა Gi_2) და P მართობი სიბრტყით.

აღსანიშნავია, რომ იმ კრისტალებს, რომლებსაც აქვთ ინვერსიის ღერძი, არა აქვთ ინვერსიის ცენტრი. ამგვარად, განხილული ინვერსიის ღერძები შეიძლება შეეცვალოს სიმეტრიის შემდეგი ელემენტებით:

$$\begin{array}{l|l} Gi_1 = C & Gi_2 \text{ არ შეიცვლება} \\ Gi_2 = P & Gi_2 = L_2 P (\text{სადაც } P \perp L_2) \\ Gi_3 = L_2 C & \end{array}$$

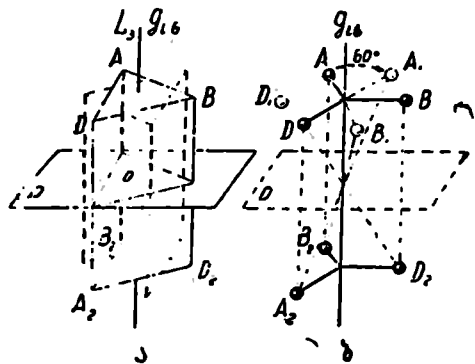
განვიხილოთ არეკვლის ღერძები, რომლებიც ინვერსიის ღერძების მსგავსად სიმეტრიის ორი ელემენტის შემაჯამებელი გარდაქმნის შესაბამისი ელემენტებია.



ნახ. II. 15 შესაშე რიგის ინვერსიის ღერძის (Gi_2) მოქმედება იჯეუა, რაც L_2 ღერძისა და ინვერსის ცენტრის თანამიმდევრული მოქმედება.

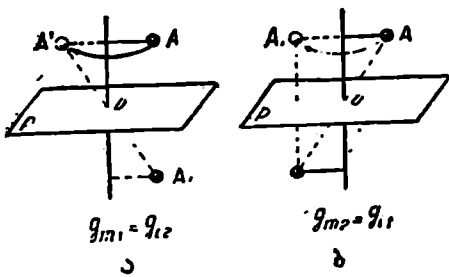
კრისტალი რომ არეკვლის ღერძის გარშემო მოვებრუნოთ (გარკვეული კუთხით) და შემდეგ ღერძის მართობ სიბრტყეში ავრეკლოთ, იგი შეუთავსდება თავის თავს.

არეკვლის ღერძი აღნიშნოთ G ასოთი და m ინდექსით (m სიმეტრიის სიბრტყეში არეკვლის მაჩვენებელია), ღერძის რიგი აღნიშნება შესაბამისი ციფრით. მაგალითად, Gm_2 არის მეორე რიგის არეკვლის ღერძი. (ზოგჯერ ამ ღერძებს აღნიშნავენ S ინდექსით ან ღერძის რიგის შესაბამისი ციფრით თავზე O ნიშნით, მაგალითად, G_2 ან $\bar{2}$).



ნახ. II. 16 მეექვსე რიგის ინვერსიის ღერძის (G_{16}) მოქმედება იკვეთა, რაც L_2 ღერძისა და სიმ ტრის სიბრტყის თანამიმდევრული მოქმედება.

ყოველი არეკვლის ღერძის მოქმედება შეიძლება შეიცვალოს ინვერსიის ღერძის მოქმედებით. მაგალითად, II. 17 ნახაზზე ვხედავთ პირველი რიგის არეკვლის ღერძის მოქმედების შეცვლას მეორე რიგის ინვერსიის ღერძის მოქმედებით, ხოლო მეორე რიგის არეკვლის ღერძის მოქმედების შეცვლას პირველი რიგის ინვერსიის ღერძის მოქმედებით. საბოლოოდ ყველა ღერძის შესაბამისი შეცვლა მოცემულია II. I ტაბულაში.



ნახ. II. 17. არეკვლის ღერძი Gm_1 (ა) და Gm_2 (ბ) შეცვალას G_{12} და G_{11} ინვერსიის ღერძებით.

რადგან არეკვლის ღერძები შეიძლება შევცვალოთ ინვერსიის ღერძებით, რომლებსაც შემდგომში სიმეტრიის სახეების დასადგენად გამოვიყენებთ, ამიტომ არეკვლის ღერძებზე აღარ შევჩერდებით.

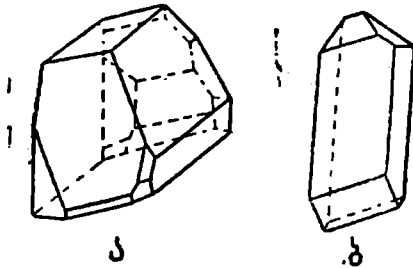
არეკელის ღერძები	შემცველი ინვერსიის ღერძები
Gm_1	$G'_1 = P$
Gm_2	$G'_2 = C$
Gm_3	$G'_3 = L_3 P$
Gm_4	G'_4
Gm_5	$G'_5 = L_2 C$

ამრიგად, დასრულებული მრავალწახანაგებისათვის ჩვენ გვაქვს სულ სიმეტრიის 7 სხვადასხვა ელემენტი: P, C, L_1, L_2, L_3, L_4 და Ci_4 . დაუსრულებელი ფიგურების სიმეტრიის ელემენტებს ქვემოთ განვიხილავთ.

აღნიშნულ სიმეტრიის ელემენტებს ყოფენ ორ ჯგუფად (გვარად): პირველი და მეორე გვარის სიმეტრიის ელემენტებად. პირველი გვარისაა ბრუნვის L_2, L_3, L_4 და L_5 ღერძები. მეორე გვარის ელემენტები კი სიმეტრიის სიბრტყე, ინვერსიის ცენტრი და სიმეტრიის რთული ღერძები (ინვერსიის და არეკელის ღერძები). პირველი გვარის სიმეტრიის ელემენტები აერთიანებენ კონგრუენტულად ტოლ ფორმებს (ან მათ ნაწილებს), ესე იგი ფიგურებს, რომლებიც ერთმანეთს უთაქსდებიან ზედდებით ან ჩადგმით, მაგალითად, ტოლი კუბებში, ტოლი პირამიდები და სხვ. მეორე გვარის სიმეტრიის ელემენტები აერთიანებენ სარკისებრ ტოლ — ენანტიომორფულ ფიგურებს (ან მათ ნაწილებს), ესე იგი ფიგურებს, რომლებიც ერთმანეთის სარკისებრ ანარეკლს წარმოადგენენ, რომლებიდანაც პირობით ერთერთს უწოდებენ „მარჯვენას“, მეორეს კი „მარცხენას“, მარჯვენა და მარცხენა ხელის მსგავსად. მაგალითად, „მარჯვენა“ და „მარცხენა“ ტრიგონური ტრაპეციოედი (ნახ. II. 20) ან მარჯვენა და მარცხენა რომბული ტეტრაედრი (ნახ. IV. 20). კრისტალთა გარდა, ენანტიომორფული ფორმები ხშირად გვხვდება მოლეკულეშიაც. თანამედროვე კრისტალოგრაფიის ერთ-ერთი საინტერესო პრობლემა ენანტიომორფიზმის პრობლემაა, რომელიც განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია ბიოლოგიისათვის. ბოლო წლებში რაიმე ობიექტის მარჯვენა ან მარცხენა ენანტიომორფული სახესხვაობის გამოსახვისათვის სარკებლობენ ტერმინით „ხირალობა“ (ბერძნულად „ხირა“ — ხელია). მაკალითად, მარჯვენა ხელთათმანი არეკელის შედეგად იცვლის „ხირალობას“ და გარდაიქმნება მარცხენა ხელთათმანად (12).

§ II. 2. ასიმეტრია და აქსიმეტრია

ასიმეტრია გულისხმობს ორ-ან-სამგანზომილებიანი სხეულის არასიმეტრიულობას; მრავალწახნაგა არასიმეტრიულია, როდესაც მას სიმეტრიის არც ერთი ელემენტი არა აქვს, გარდა პიოველი რიგის სიმეტრიის ლერძისა (ნახ. II. 18).

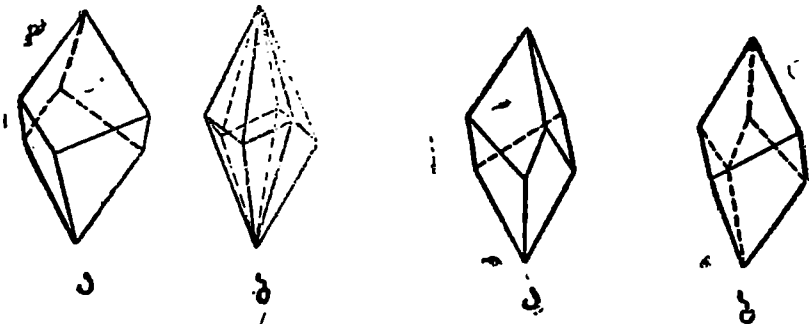


ასიმეტრიული სხეული არ გაიყოფა ისეთ ორ თანაბარ ნაწილად, რომლებიც შეუთავსდება ერთმანეთს სიმეტრიული გარდაქმნებით. დასაშვებია ისეთი სიმეტრიული მრავალწახნაგას არსებობა, რომელიც შედგება ასიმეტრიული წახნაგებისგან. ასეთ ნაკეთებს ან მხოლოდ სიმეტრიის ლერძები აქვს და არც ერთი სიმეტრიის სიბრტყე (ნახ. II. 19. ა).

ნახ. II. 18. ასიმეტრიული მრავალწახნაგები.

ან მხოლოდ კრისტალის წიბოებზე გამავალი სიმეტრიის სიბრტყეები (ნახ. II. 19 ბ).

ანტიასიმეტრიის ცნება შემოღებულია გამოჩენილი საბჭოთა



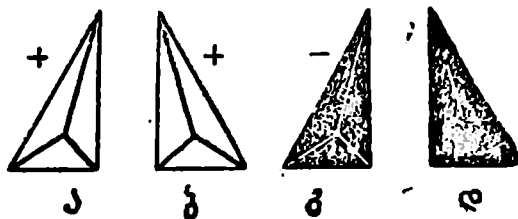
ნახ. II. 19. სიმეტრიული მრავალწახნაგები ასიმეტრიული წახნაგებით.

ნახ. II. 20. მარჯვენა (ბ) და მარცხენა (ა) ტრიგონური ტრაპეცოედრი.

კრისტალოგრაფის ა. შუბნიკოვის მიერ, რომელმაც განაზოგადა სიმეტრიის კლასიკური სწავლება სარკისებრ ტოლ სხეულებზე, ე. ი. იმ სხეულებზე, რომლებიც ერთმანეთის საწინააღმდეგო თვისებებით ხასიათდებიან (დადებით და უარყოფით ან თეთრ და შავ ტოლ სხეულებზე,

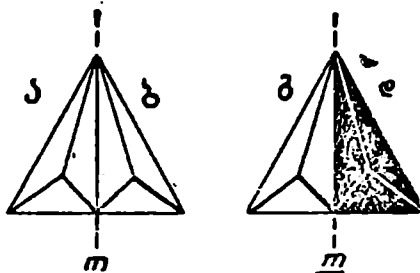
ნახ. II. 20). ანტიტოლი ობიექტების მაგალითად ა. შუბნიკოვს ზოპყავს წყლის წვეთი ჰაერში და მისი ტოლი ჰაერის ბუშტულა წყალში, ერთი და იგივე საგნის ნეგატიური და პოზიტიური ფოტოგამოსახულება, ჰანკიკისა და ჰანჩის ბრაზნი და სხვ. ანტისიმეტრიულობა გულისხმობს ნაკეთების ოთხგვარ ტოლობას და არა ორგვარს, რასაც უშვებს სიმეტრიის კლასიკური მოძღვრება.

შევადართ ერთმანეთს II. 21 ნახაზზე მოყვანილი ოთხი ნაკეთე. ყოველი მათგანი ღრუ სიმეტრიული ოთხწახანგაა (ტეტრაედრი), დაზ-



ნახ. II. 21. ოთხი ურთიერთტოლი ასიმეტრიული ტეტრაედრი.

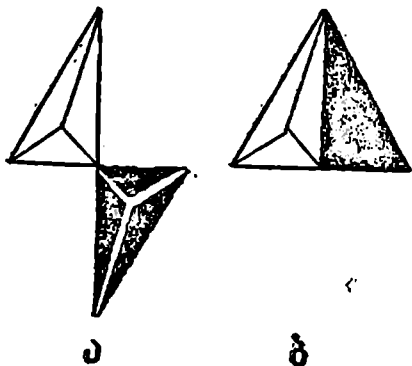
ზადებული ერთნაირი ზომის მუყაოსაგან, რომელიც ერთი მხრიდან თეთრი ფერისაა, ხოლო მეორე მხრიდან შავი, ე. ი. თეთრ ტეტრაედრებს (ა და ბ) აქვს შავი სარჩული, ხოლო შავ ტეტრაედრებს (გ და დ) — თეთრი. პირობითად თეთრი ტეტრაედრები ჩავთვალოთ დადებითად, ხოლო შავე — უარყოფითად. კლასიკური სიმეტრია არ გულისხმობს თეთრი და შავი ნაკეთების ტოლობას, მაშინ როდესაც სიმეტრიის განზოგადებული ცნებით დაშვებულია ანტიტოლობაც. ამასთან დაკავშირებით ჩვეულებრივ, სიმეტრიულ გარდაქმნებს უნდა დაეუმატოთ ანტი-



ნახ. II. 22. m სიმეტრიის სიბრტყეა, n სიმეტრიის ანტისიბრტყე. სიმეტრიული გარდაქმნები, რომლებიც გულისხმობს ბრუნვასა და არეკვლასთან ერთად ფიგურის ნიშნის შეცვლას. ასეთი სიმეტრიის ელემენტებია: სიმეტრიის ანტისიბრტყე და ანტიღერძი და ინვერსიის ანტიცენტრი.

სიმეტრიის ანტიიზობრტყე (m) ნაჩვენებია II. 22 ნახაზზე, ამ სიბრტყეში აოეკელის შედეგად უარყოფითი ტეტრაედრი (დ) შეუთავსდება დადებით ტეტრაედრს (გ); ე. ი. ნაკეთი არეკვლასთან ერთად იცვლის ნიშა:ს.

სიმეტრიის ანტილერძის არსებობა გულისხმობს ნაკეთის სათანადო კუთხით მობრუნებეს შედეგად შეთავსებას და ამავე დროს ნიშნის შეცვლას. II. 23 ნახაზზე მოცემულია მეორე რიგის სიმეტრიის ანტილერძის მოქმედება. ორი ასიმეტრიული და ანტიტოლი ტეტრაედრი რომ

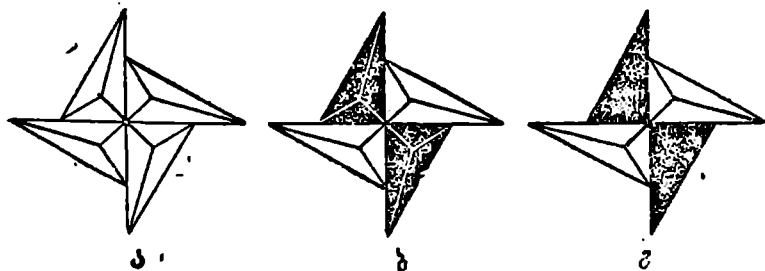


შეშოვაბოუნოთ 180°-ით (ნახაზის სიბრტყის მართობი (ა) ან მის სიბრტყეში (ბ) მდებარე ლერძის გარშემო), ისინი შეუთავსდებიან საწინააღმდეგო ნიშნის ტეტრაედრს.

II. 24 ნახაზზე მოცემულია მეოთხე რიგის სიმეტრიის ლერძის (ა), სიმეტრიის ანტილერძის (ბ) და სიმეტრიის სარკისებური ანტილერძის (გ) მოქმედება.

ნახ. II. 23. მეორე რიგის სიმეტრიის ანტილერძი. ა-ლერძი ცმართულია ნახაზის სიბრტყის მართობულად; ბ-ლერძი მდებარეობს ნახაზის სიბრტყეში.

ტეტრაედრები ყოველი 90°-ით მობრუნების შედეგად (ნახაზის სიბრტყის მართობი ლერძის გარშემო) უშუალოდ ერთხვევა ერთმანეთს (ნახ. II. 24 ა) ან ემთხვევა საწინააღმდეგო ნიშნით (ნახ. II. 24 ბ)

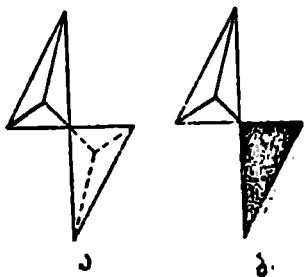


ნახ. II 24. ტეტრაედრების განლაგება მეოთხე რიგის სიმეტრიის ლერძების (ა- სიმეტრიის ლერძის, ბ-სიმეტრიის ანტილერძის, გ-სიმეტრიის სარკისებური ანტილერძის) შიშარად.

(მობრუნებისა და ბრუნვის ღერძის მართობ სიბრტყეში არეკვლის შედეგად ნიშნის შეცვლით. ეს კი იქნება სიმეტრიის სარკისებრი ანტი-ღერძის მოქმედება (ნახ. 24 გ).

ინვერსიის ანტიცენტრის არსებობა გულისხმობს სხეულის ინვერსიის ცენტრში არეკვლის შედეგად შეთავსებასთან ერთად ნიშნის შეცვლასაც (ნახ. II. 25 ბ).

ნახ. II. 25. ტეტრაედრების განლაგება: ა-სიმეტრიის ცენტრის მოქმედების შედეგად, ბ-სიმეტრიის ანტიცენტრის მოქმედების შესაბამისად.

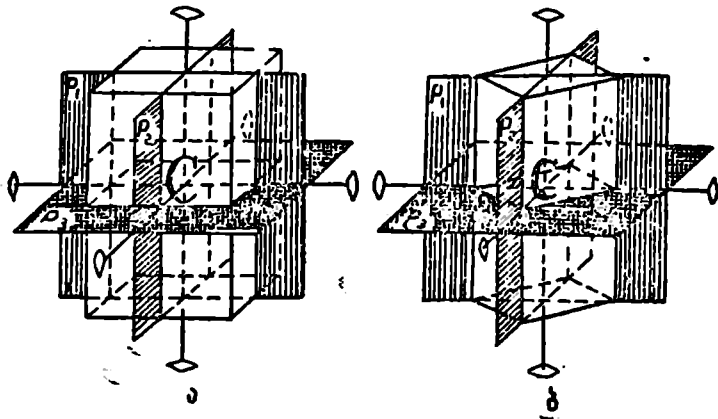


§ II. 2. სიმეტრიის ელემენტების მათემატიკა

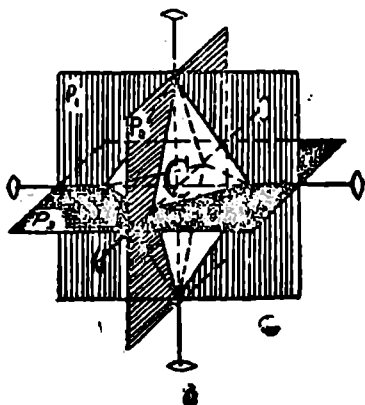
ყოველ კრისტალს ახასიათებს სიმეტრიის ელემენტთა გარკვეული ერთობლიობა. კრისტალში შეიძლება იყოს სიმეტრიის მხოლოდ ერთი რომელიმე ელემენტი ან რამდენიმე ერთად, ურთიერთდაკავშირებული გარკვეული გეომეტრიული კანონებით. მრავალწახნაგებს, მიუხედავად განსხვავებული ფორმებისა, შეიძლება ერთნაირი ხასიათის სიმეტრიის ელემენტების ერთი და იგივე რაოდენობა ჰქონდეს. მაგალითად, მართკუთხა პარალელეპიპედს, რომბული კვეთის პრიზმას და ასეთივე კვეთის მქონე ორმხრივ პირამიდას (ნახ. II 26) აქვს სიმეტრიის სამ-სამი სიბრტყე ($3P$), სამ-სამი მეორე რიგის სიმეტრიის ღერძი ($3L_2$) და ინვერსიის ცენტრი (C). მაშასადამე, მოყვანილ სამ მრავალწახნაგას (კრისტალს) აქვს სიმეტრიის ელემენტთა ერთნაირი ერთობლიობა, რასაც სიმეტრიის ხ ა რ ი ს ხ ს ან სიმეტრიის ს ა ხ ე ს უწოდებენ.

სიმეტრიის ერთნაირი ხარისხი აქვთ კუბს, ოქტაედრს და მრავალ სხვა კრისტალს. სიმეტრიის ელემენტთა ერთობლიობის მიხედვით ბუნებაში არსებული ყველა კრისტალი შეიძლება დაეჯგუფოთ და მივიღოთ 32 ჯგუფი ან კლასი, რომლებშიც გაერთიანებულია ერთნაირი

სახის სიმეტრიის მქონე შრავალწახნაგები. ბუნებაში ირსებული ყოველი კრისტალი სიმეტრიის ელემენტთა ერთობლიობის მიხედვით აუცილებლად მიეკუთვნება ერთ-ერთ კლასს ამ ოცდათორმეტთაგან.



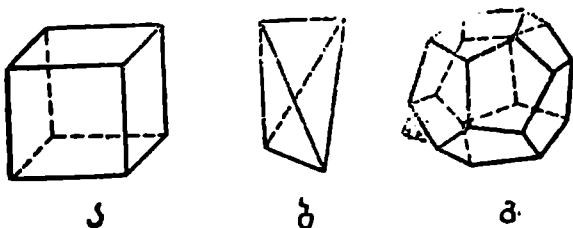
ნახ. II. 26. ერთი და იმავე სახის სიმეტრიის (3P, L, C) მქონე; სამი შრავალწახნაგი.



§ II. 4. შარბივი ფორმები და კოორდინაციები

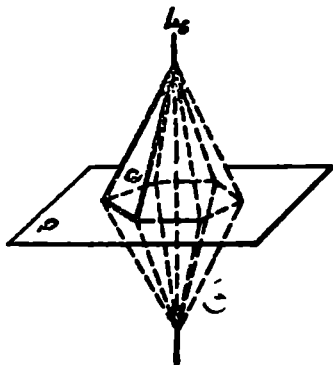
წახნაგთა ფორმების მიხედვით კრისტალები შეიძლება დავეყოთ ორ ჯგუფად: ერთ ჯგუფში შედის ისეთი შრავალწახნაგები, რომლებიც ერთნაირი ფორმისა და ზომის წახნაგებითაა შემოფარგლული, ხოლო მეორეში — სხვადასხვა ზომის წახნაგების მქონე კრისტალები. ბირველი ჯგუფის შრავალწახნაგათა სამი ნიმუში მოცემულია II. 27

ნახაზზე. ასეთებია: კუბი, რომელსაც კვადრატის ფორმის ექვსი ტოლი წახნაგი აქვს; ტეტრაედრი, რომელსაც ოთხი ტოლფერდა საკუთ ხედის ფორმის მქონე ტოლი წახნაგი აქვს და პენტაგონდოდეკაედრი, რომელიც წარმოდგენილია თორმეტი ტოლი ხუთკუთხედის ფორმის



ნახ. II. 27. დ:ხურული მარტივი ფორმები: ა-კუბი (კუბი), ბ-ტეტრაედრი, გ-პენტაგონდოდეკაედრი.

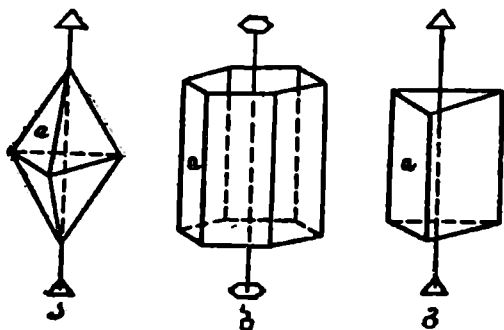
წახნაგებით. მეორე ჯგუფის მრავალწახნაგები მოცემულია II. 18, II. 26 და II. 36 ნახაზებზე. აქ გამოსახული მრავალწახნაგები წარმოდგენილია ერთნაირი წახნაგების რამდენიმე კომპლექტით. ასე, მაგალითად, II 26 ნახაზზე მოცემულია ორი ექვსწახნაგა კრისტალი (ა) და (ბ), მაგრამ პირველ შემთხვევაში ტოლია მხოლოდ მისი ურთიერთპოპი-დაპირე წახნაგები (ე. ი. გვიქვს სამი წყვილი ტოლი წახნაგებისა), ხოლო მეორე შემთხვევაში ოთხი ვერტიკალური წახნაგი და ორი პორიზონტალური. პირველი ჯგუფის მრავალწახნაგებს უწოდებენ მარტივ ფორმებს, მეორეს კი — მარტივი ფორმების კომპინაცია.



მარტივი ფორმა შედგება სიმეტრიის ელემენტებით ერთმანეთთან დაკავშირებული ტოლი წახნაგებისაგან. ეს ნიშნავს იმას, რომ, თუ მოცემულია მარტივი ფორმის მხოლოდ ერთი წახნაგი და ვიცით ამ ფორმის დამახასიათებელი სიმეტრიის ელემენტი ა ერთობლიობა, შეგვიძლია ავაგოთ მთელი მარტივი ფორმა ყველა შესაძლებელი წახნაგით. ასე, მაგალითად, მოცემულია შექვესე რიგის სიმეტრიის ღერძისა და მისი მართობი სიბრტყის მქო-

ნახ. II. 28. მარტივი ფორმის ყველა წახნაგის გამოყვანა, როდესაც მოცემულია წახნაგი და სიმეტრიის სახე (L_p და $\perp P$).

ნე მარტივი ფორმის ერთ-ერთი წახნაგი a (ნახ. II. 28). a წახნაგს აქვს ტოლფეოდა სამკუთხედის ფორმა და იგი დახრილია L_6 ღერძის მიმართ ისე, როგორც ეს აღნიშნულია II. 28 ნახაზზე. ცხადია, საძიებელი მარტივი ფორმა უნდა შედგებოდეს მოცემული a წახნაგის ტოლი წახნაგებისაგან, რომლებიც ერთმანეთთან უნდა იყვნენ და-



ნახ. II. 29, ა-სამწახნაგა ჰიპობრიმიდა, ბ-ექვსწახნაგა პირამიდა, გ-სამწახნაგა პირამიდა.

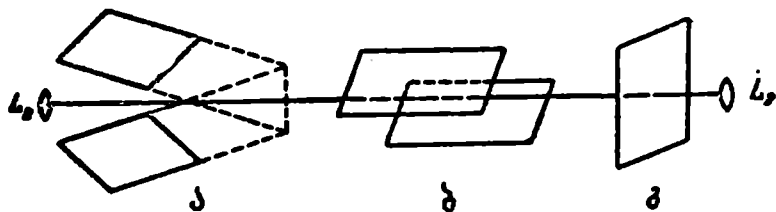
კავშირეიული მოცემული სიმეტრიის ელემენტებით (L_6 და P). მარტივი ფორმის ასაგებად ჩავატაროთ შექმნილი სიმეტრიული გარდაქმნები: რაკი არსებობს L_6 , ეს ნიშნავს, რომ მის გარშემო ყოველი 60° -ით მობრუნებისას საძიებელი ფორმა უნდა ემთხვეოდეს თავის თავს, ე. ი. 360° -ით მობრუნების შედეგად a წახნაგი ექვსჯერ უნდა შეუთავსდეს, საწყის მდგომარეობას, რაც მოგვცემს ექვსწახნაგა პირამიდას. მეორე მხრივ, რადგან ასაგებ მარტივ ფორმას უნდა ჰქონდეს კიდევ L_6 -ის მართობი სიმეტრიის P სიმბრტყე, ამიტომ უნდა არსებობდეს მეორე ექვსწახნაგა პირამიდა, მოთავსებული პირველი პირამიდის საწინააღმდეგო მიმართულებით. მაშასადამე, მივიღებთ თორმეტწახნაგა გაორებულ პირამიდას, რომელსაც ბიპირამიდას უწოდებენ.

L_6 ღერძის მაგივრად რომ ყოფილიყო მოცემული L_3 ღერძი, ანალოგიური მსჯელობის შედეგად მივიღებდით სამწახნაგა ბიპირამიდას (ნახ. II. 29 ა). მოცემული a წახნაგის მიმართულება რომ სიმეტრიის ღერძის პარალელური ყოფილიყო, იმავე მსჯელობით მივიღებდით პირველ შემთხვევაში ექვსწახნაგა პირამიდას, ხოლო მეორე შემთხვევაში — სამწახნაგა პირამიდას (ნახ. II. 29, ბ და გ).

მარტივ ფორმებს შეიძლება ჰქონდეს ერთი, ორი და მეტი წახნაგიც. წახნაგების რაოდენობა დამოკიდებულია კრისტალის სიმეტრიის ხარისხზე. მაგალითისათვის გავარჩიოთ ისეთი შემთხვევა, როდესაც მოცემულია მხოლოდ ერთი სიმეტრიის ელემენტი — L_2 . ამ შემთხვევაში შესაძლებელი მარტივი ფორმები იქნება ერთ- და ორწახნაგოვანი იმისდა მიხედვით, თუ როგორია მოცემული წახნაგის ორიენტაცია სიმეტრიის ღერძის მიმართ.

ზოგად შემთხვევაში წახნაგი ღერძის მიმართ შეიძლება განლა-

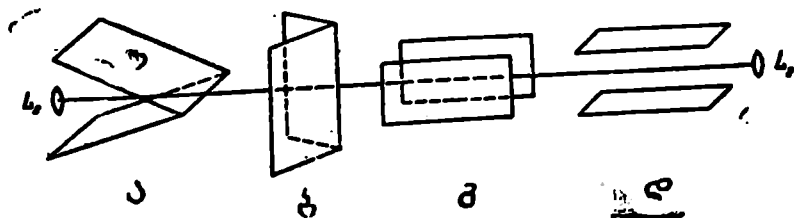
გებული იყოს მართობულად, პარალელურად ან დახრილად (ნახ. II. 30). L_2 ლერძის მოქმედების თანახმად, პირველ შემთხვევაში წახნაგო არ განხეორდება, იგი შეუთავსდება თავის თავს, ხოლო მეორე და მესამე შემთხვევაში უნდა დაეუშვათ მეორე წახნაგების არსებობაც ურ-



ნახ. II. 30. წახნაგების შესაძლებელი განლაგება ლერძის მიმართ: დახრილი (ა), პარალელური (ბ) და მართობი (გ).

თიერთპარალელურ ან ურთიერთდახრილ მდგომარეობაში.

ერთწახნაგა მარტივ ფორმას უწოდებენ მონოედრს (ბერძნული სიტყვიდან — მონო-ერთი, ხოლო ედრა — წახნაგი), ორწახნაგა კი დიედრს (დი-ორი); თუ წახნაგები ურთიერთპარალელურია, მა-



ნახ. II. 31. წახნაგების განლაგების შესაძლებელი კერძო შემთხვევები L_2 ლერძის მიმართ

შინ მათ ეწოდება პინაკოდი (პინაკს-ბერძნულად ფიცარი). გარდა ამ სამი ფორმისა, პარალელური და დახრილი წახნაგებისათვის დასაშვებია კიდევ ორ-ორი კერძო ორიენტაცია. ლერძის პარალელურ მდგომარეობაში წახნაგები შეიძლება იყოს ან ვერტიკალური, ან ჰორიზონტალური (ნახ. II. 31. გ და დ), ხოლო დახრილ მდგომარეობაში ამ წახნაგების გადაკვეთის წიბო კი ან ჰორიზონტალური, ან ვერტიკალური (ნახ. II. 31 ა და ბ).

ამგვარად, ჩვენ შეგვიძლია სიმეტრიის ელემენტების ერთობლიობის ყველა შემთხვევისათვის გამოვიყენოთ ყველა შესაძლებელი მარტივი ფორმა, რის შედეგადაც სულ მივიღებთ ერთმანეთისაგან განსხვავ. გ. ხარაშვილი

გეგულ 47 ფიგურას (იხ. ტაბულა II. 2). ამ ფორმების სახელები და მახასიათებლებს გაგვიადვილებს ბერძნულად თორმეტამდე თვლის ცოდნა და ქვემოთ მოყვანილი რამდენიმე ბერძნული სიტყვა:

ტაბულა II. 2

მარტივი ფორმების ტაბულა

	3	4	5	6	7	8	9			
								კუბოსედი	ტეტრაედრი	ოქტაედრი
								კუბოსედი-სედი	ტეტრაედრი-სედი	ოქტაედრი-სედი
								კუბოსედი-სედი	ტეტრაედრი-სედი	ოქტაედრი-სედი
								კუბოსედი-სედი	ტეტრაედრი-სედი	ოქტაედრი-სედი
								კუბოსედი-სედი	ტეტრაედრი-სედი	ოქტაედრი-სედი
								კუბოსედი-სედი	ტეტრაედრი-სედი	ოქტაედრი-სედი
								კუბოსედი-სედი	ტეტრაედრი-სედი	ოქტაედრი-სედი
								კუბოსედი-სედი	ტეტრაედრი-სედი	ოქტაედრი-სედი
								კუბოსედი-სედი	ტეტრაედრი-სედი	ოქტაედრი-სედი

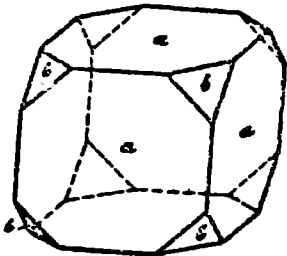
მონო	— ერთი	ელრა	— წახნავი
დი ან ბი	— ორი	გონია	— კუთხე
ტრი	— სამი	ბინაკს	— ფიცარი
ტეტრა	— ოთხი	ტრაპეცია	— ირიბკუთხა
პენტა	— ხუთი		ოთხკუთხედი
ჰექსა	— ექვსი		ორი მეზობელი
სეპტა	— შვიდი		ტოლი გვერდით
ოქტა	— რვა	სკალენა	— სხვადასხვაგვერდი
ნონა	— ცხრა		სამკუთხედი
დეკა	— ათი	კლინო	— დახრა
დოდეკა	— თორმეტი		

პირამიდების, ბიპირამიდების, პრიზმების, ტრაპეცოედრების, სკალენოედრების და ტეტრაედრების დასახელებისათვის საჭიროა სახელს წინ დავუმატოთ კვეთის ფორმა; მაგალითად, I ფორმა იქნება რომბული პირამიდა, მე-9—ტრიგონური ბიპირამიდა მე-17—დიტრიგონური პრიზმა, 24—ტეტრაგონური ტრაპეცოედრი, 29—დიტეტრაგონური სკალენოედრი და ა. შ. 12—წახნავა ფორმა იქნება დოდეკაედრი ან ტრიტეტრაედრი (სამჯერ ოთხწახნავა), მაგრამ რადგან ასეთები რამდენიმეა, ამიტომ მათ გასარჩევად წინ უნდა დავუმატოთ წახნავის ფორმის სახელი. მაგალითად, რომბოდოდეკაედრი (№ 35) და პენტაგონდოდეკაედრი (№ 36), ე. ი. რომბის ფორმის მქონე თორმეტწახნავა (№ 35) და ხუთკუთხედის ფორმის მქონე თორმეტწახნავა (№ 36); ან მაგალითად, ტრიგონტრიტეტრაედრი (№ 39), ტეტრაგონტრიტეტრაედრი (№ 40), პენტაგონტრიტეტრაედრი (№ 41) და ა. შ. მაქსიმალური რიცხვი წახნაგებისა არის 48 (№ 47) და მას უწოდებენ ჰექსაოქტაედრს (ექვსჯერ რვაწახნავას).

მარტივი ფორმები გვხვდება დახურული და ღია. დახურული მარტივი ფორმა თავისი წახნაგებით შემოფარგლავს სივრცეს ყველა მხრიდან. ასეთებია: ჰექსაედრი (კუბი), ოქტაედრი, ტეტრაედრები, ბიპირამიდები და სხვ. ღია მარტივი ფორმა თავის წახნაგებით არ შემოფარგლავს სივრცეს ყველა მხრიდან. ასეთებია: პირამიდები, პრიზმები, მონოედრი, დიედრი და პინაკოიდი. კონსტალი მხოლოდ ღია მარტივი ფორმისა არ შეიძლება იყოს. აქ აღუცილებელია სხვა მარტივი ფორმის ერთდროული განვითარებაც, ე. ი. ღია მარტივი ფორმები მონაწილეობას ლეზულობენ კონსტალის აგებულებაში მხოლოდ სხვა ფორმებთან. ასე, მაგალითად, პირამიდასთან აუცილებელია მონოედ-

რის განვითარება, პრიზმასთან უსათუოდ საჭიროა პინაკოიდი ან ბი-პირამიდა და სხვ.

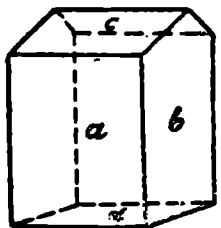
კომბინაციას უწოდებენ ორი ან მეტი მარტივი ფორმის ერთობლიობას ერთსა და იმავე კრისტალზე. ე. ი. ერთ კრისტალზე ერთდროულად ვითარდება რამდენიმე მარტივი ფორმის წახნაგი. იმისათვის, რომ გავიგოთ რამდენი მარტივი ფორმა მიწაწილეობს ამა თუ იმ კომბინაციაში, საჭიროა დავთვალოთ რამდენნაირი ფორმისაა წახნაგი. მაგალითად, II. 32 ნახაზზე მოცემულია ორი მარტივი ფორმის კომბინაცია, ერთ-ერთი მაშვანი შედგება ექვსი ტოლი წახნაგისაგან (ა), მეორე — რვა ერთნაირი წახნაგისაგან (ბ). II. 33 ნახაზზე მოცემულია ოთხი მარტივი ფორმის კომბინაცია, სამი მათგანი ორ-ორწახნაგა ფორმებია (ა, ბ და ც), ხოლო მეოთხე — ერთწახნაგა (დ). იმისათვის, რომ წარმოვიდგინოთ კომბინაციაში შემავალი მარტივი ფორმა დამოუკიდებლად, საჭიროა მისი წახნაგები წარმოსახვით გავაგრძელოთ ურთიერთგადაკვეთამდე



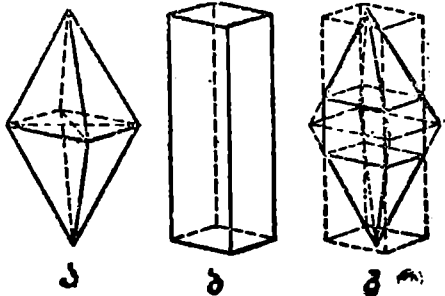
ნახ. II. 32. ორი მარტივი ფორმის კომბინაცია: ა-ჰექსაედრის წახნაგები, ბ-ოქტაედრის წახნაგები.

(ნახ. II. 34).

საჭიროა გვახსოვდეს, რომ კომბინაციაში მონაწილეობს მხოლოდ ის მარტივი ფორმები, რომლებიც ეკუთვნის ან ერთსა და იმავე სიმეტრიის კლასს, ე. ი. რომლებ-



ნახ. II. 33. ოთხი მარტივი ფორმის კომბინაცია: ა და ბ პინაკოიდებია, ც დიედრი, დ-მონოედრი.

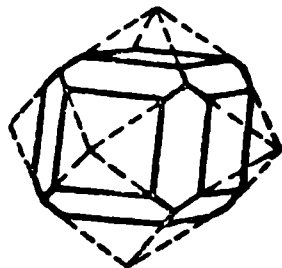


ნახ. II. 34. რომბული კვთის ბიპირამიდის (ა) და პრიზმის (ბ) კომბინაცია (გ).

საც აქვთ ერთნაირი სიმეტრიის ელემენტების ერთობლიობა. ეს დებულება ცნობილია, როგორც სიმეტრიის კანონი.

ნონი და გულისხმობს, რომ ნებისმიერ კრისტალზე შეიძლება წარმოიშვას მხოლოდ ისეთი მარტივი ფორმის წახნაგი, რომელიც არ დაარღვევს მისი სიმეტრიის ხარისხს. ასეთ წახნაგს შესაძლებელი წახნაგი ეწოდება, ხოლო მათი გადაკვეთის შედეგად შესაძლებელი წიბო წარმოიქმნება.

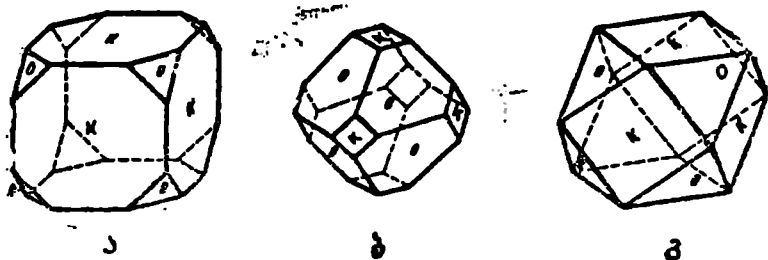
მხედველობიდან არ უნდა გამოგვრჩეს ის გარემოება, რომ კომბინაციაში მონაწილეობის შედეგად მარტივი ფორმის წახნაგი ხშირად კარგავს მისთვის დამახასიათებელ მოხაზულობას. მაგალითად, რომბოლოდრეკადრის წახნაგს ალარ ექნება რომაის ფორმა კუბთან კომბინაციაში მონაწილეობის შედეგად (ნახ. II. 35), თუმცა კუბის წახნაგები ინარჩუნებენ კვადრატულ ფორმას.



ნახ. II. 35 ჰექსაედრისა და რომბული დოდეკაედრის კომბინაცია.

კუბის წახნაგებმა შეიძლება რვაკუთხედის ფორმა მიიღოს, თუ მასზე განვითარდება ოქტაედრის წახნაგებიც (ნახ. II. 36 ა).

კომბინაციაში მონაწილე ფორმები შეიძლება სხვადასხვანაირად იყოს განვითარებული. იმ მარტე ფორმას, რომლის წახნაგებიც უფრო განვითარებულია, გაბატონებულ ფორმას უწოდებენ. ხო-

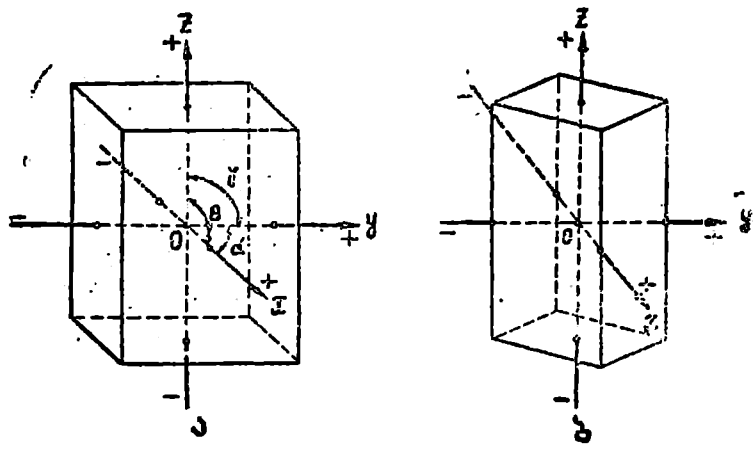


ნახ. II. 36. ჰექსაედრის (K) და ოქტაედრის (O) კომბინაციის სამი შემთხვევა.

ლო უფრო მცირე ზომის წახნაგების მქონე ფორმას — დამორჩილებულს (ნახ. II. 36 ბ). თუ ორივე ფორმა ერთნაირად არის განვითარებული, მაშინ ყველა წიბო ერთნაირი სიგრძის იქნება (ნახ. II. 36 გ).

თავი III კრისტალთა წახნაგების ინდექსები და გეგმილები
 § III. 1. პარამეტრების კასიონალური შემადგენის კანონი

კრისტალთა წახნაგების განლაგების განსაზღვრისათვის კრისტალოგრაფიაში გამოყენებულია ანალიზურ გეომეტრიაში მიღებულ დეკარტის საკოორდინაციო სისტემა. ამასთან დაკავშირებით საჭიროა კრისტალებში პირობით გავატაროთ სამი ღერძი კრისტალზე არსებული ან დასაშვები სამი ურთიერთგადამკვეთი წიბოს პარალელურად. ჩვეულებრივ, ასეთ მიმართულებად არჩევენ კრისტალზე მაქსიმალურად განვითარებული წახნაგების გადაკვეთით წარმოქმნილ წიბოებს, რომლებიც რიგ შემთხვევაში პარალელურია სიმეტრიის ღერძისა ან სიმეტრიის სიბრტყეთა მართობებისა. კრისტალის სახის შესაბამისად შერჩეული ღერძები შეიძლება იყოს ურთიერთდახრილი ან მართობი, მათ კრისტალოგრაფიულ ღერძებს უწოდებენ და აღნიშნავენ x, y, z , (ან a, b და c) ასოებით, ხოლო ღერძებს შორის სათანადო კუთხეებს აღნიშნავენ α, β γ -თი, როგორც ეს აღნიშნულია III. 1 ნახაზზე. ამ სამი ღერძიდან პირველი x ღერძი მიმართულია მყუ-



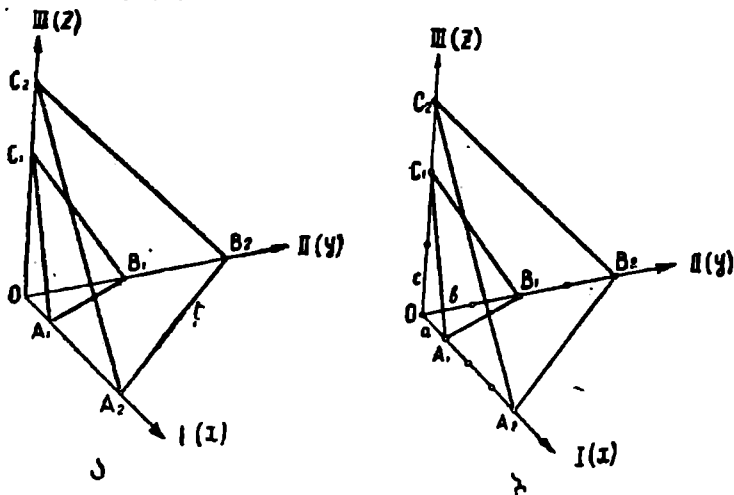
ნახ. III. 1. x, y და z კრისტალოგრაფიული ღერძები გაიჭრებოდა კრისტალზე არსებული (ა) ან შესაძლებელი (ბ) წიბოების პარალელურად.

რებლისაკენ. მეორე y ღერძი ვაიჯლის მარცხნიდან მარჯვნივ. ხოლო მესამე z ღერძი ვერტიკალურია. O წერტილი კრისტალოგრაფიულ ღერძთა ჯვარედინის საწყისია, შესაბამისად x ღერძზე ანათვლი წინ დადებითია, უკან—უარყოფითი, y ღერძზე მარჯვნივ დადებითია, მა-

რცხნევ — უარყოფითი და x ღერძზე — ზევით დადებითი, z კვეთით — უარყოფითი (ნახ. III. I).

კრისტალზე ირსებული წახნაგებიდან ზოგადი განლაგების წახნაგი გადაკვეთს სამივე კრისტალოგრაფიულ ღერძს, ხოლო კერძო შემთხვევაში წახნაგმა შეიძლება გადაკვეთოს მხოლოდ ორი რომელიმე ღერძი და მესამისა კი პარალელური იყოს ან გადაკვეთოს მხოლოდ ერთი ღერძი და დანარჩენებისა კი პარალელური იყოს (ნახ. III. 2).

დავუშვათ, რომ გვაქვს ისეთი კრისტალი, რომელშიც სამივე კრისტალოგრაფიული ღერძი ურთიერთდახრილია და მასზე განვითა-



ნახ. III. 2. კრისტალის ორი წახნაგის პარამეტრები. კრისტალოგრაფიული ღერძების მიმართ.

რებულია ორი წახნაგი — $A_1 B_1 C_1$ და $A_2 B_2 C_2$, რომლებიც z კვეთენ სამივე ღერძს (ნახ. III. 2 ა). პირველი წახნაგი $A_1 B_1 C_1$ ხასიათდება x ღერძის მიმართ OA_1 , y ღერძის მიმართ OB_1 და z ღერძის მიმართ OC_1 პარამეტრებით. მეორე წახნაგის შესაბამისი პარამეტრები იქნება OA_2 , OB_2 და OC_2 მონაკვეთები.

$OA_1 : OB_1 : OC_1$ ან $OA_2 : OB_2 : OC_2$ უწოდებენ წახნაგის პარამეტრულ შეფარდებას. ხოლო თუ გავითვალისწინებთ, რომ კრისტალის აგებულება მესრული ხასიათისაა და რომ მისი წახნაგები შესაბამისი ბალებების პარალელურად ვითარდება, უნდა დავუშვათ, რომ აღნიშნული პარამეტრების ურთიერთშეფარდება, მაგალითად $\frac{OA_2}{OA_1}$;

$\frac{OB_2}{OB_1}$ და $\frac{OC_2}{OC_1}$ ყოველთვის რაციონალური რიცხვით გამოისახება

(მთელის ან წილადის სახით). აღნიშნულ შემთხვევაში, თუ ყოველ ღერძისათვის შესაბამის სამასშტაბო ერთეულს შევარჩევთ, მაგალითად, x ღერძზე a , y ღერძზე — b და z ღერძზე c მონაკვეთებს, როგორც ერთეულ მონაკვეთებს (ნახ. III. 2 ბ), პარამეტრების აღნიშნული შეფარდებანი შემდეგნაირად გამოისახება:

$$\frac{OA_2}{OA_1} = \frac{4}{1} = 4, \frac{OB_2}{OB_1} = \frac{4}{2} = 2 \text{ და } \frac{OC_2}{OC_1} = \frac{3}{2}.$$

პარამეტრების ეს დამოკიდებულება საფუძვლად უდევს გეომეტრიული კრისტალოგრაფიის მესამე ძირითად კანონს, რომელიც ცნობილია პარამეტრების რაციონალური შეფარდების კანონის სახელით. ამ კანონს უწოდებენ აგრეთვე მთელი რიცხვების კანონს ან აიუის კანონს, ფრანგი კრისტალოგრაფის რენე ვიესტ აიუის პატივსაცემად, რომელმაც პირველმა მიაქცია ყურადღება პარამეტრული შეფარდების ამ თავისებურებას ჯერ კიდევ მაშინ, როდესაც სივრცული მესრის თეორია არ იყო ცნობილი.

პარამეტრების რაციონალური შეფარდების კანონი შეიძლება ასე ჩამოვყალიბოთ: კრისტალის ორი წახნაგის პარამეტრების ორმაგი შეფარდება გამოისახება სამი მთელი და მცირე რიცხვების შეფარდებით.

ჩვენს შიერ განილულ მაგალითისათვის ზოგადად ეს კანონი შეიძლება გამოვსახოთ შემდეგი შეფარდებით

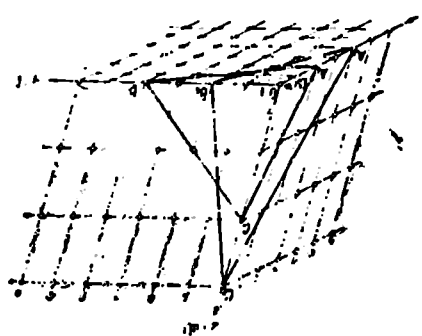
$$\frac{OA_2}{OA_1} : \frac{OB_2}{OB_1} : \frac{OC_2}{OC_1} = p : q : r,$$

სადაც p , q და r მთელი და მცირე რიცხვებია (ხშირად არ აღემატება 12 ს).

კრისტალის ყოველა წახნაგს პარამეტრული შეფარდების დასადგენად საჭიროა მისი რომელიმე წახნაგის პარამეტრები მივიჩნიოთ ერთეულ პარამეტრად (სამასშტაბო ერთეულად), რომელსაც შევეუფარდებთ დანარჩენი წახნაგების პარამეტრებს. იმ წახნაგს, რომლის პარამეტრებსაც ერთეულად მიიჩნევენ, უწოდებენ ერთეულ წახნაგს. ზოგი კრისტალისათვის სამასშტაბო ერთეულები ურთიერთარატოლ-ია, ხოლო ზოგისათვის შეიძლება ტოლიც იყოს.

აღნიშნული რომ უფრო გასაგები გახდეს, გავარჩიოთ შემდეგი მაგალითი: ავიღოთ კრისტალი, რომელშიც კრისტალოგრაფიული ღერძები განლაგებულია ისე, როგორც ეს მოცემულია III. 3 ნახაზზე (ღერძთა სასტემის საწყისი 0 წერტილია). რადგანაც ეს ღერძები არსებული (ან დასაშვები) წიბოების პარალელურია, ისინი წარმოადგენენ აღებული კრისტალური ნივთიერების შემადგენელი ატომების (ან

ონების) გარკვეულ რიგს. კრისტალური მესრის გარკვეულ კვანძებს შორის მანძილები პირველ ღერძზე შესაბამისად აღენიშნოთ a -თი, მეორეზე b -თი და მესამეზე c -თი. ეს მანძილები სამასმეტაბო ერთეულად მივიჩნიოთ. სამივე ერთეული ურთიერთ არატოლია, ე. ი. $a \neq b \neq c$ ზეგოთ xy , yz და xz სიბრტყეების გასწვრივ შესაბამისი ბალებზე. ჩვენი განმარტების თანახმად, ერთეული წახნავი იქნება ის წახნავი, რომლის პარამეტრული შეფარდება იქნება $a:b:c$ (ნახაზზე ეს წახნავი აღნიშნულია პენტაგონით). $A_1B_1C_1$ წახნავის პარამეტრული შეფარდება შესაბამისად გამოისახება $2a:4b:2c$, ხოლო მეორე $A_2B_2C_2$ წახნავის პარამეტრული შეფარდება იქნება $4a:2b:3c$. პარამეტრების რაციონალური შეფარდების კანონის თანახმად ამ წახნავების პარამეტრებს ორმაგი შეფარდება უნდა გამოისახოს სამი მთელი და მცირე რიცხვების შეფარდებით:



ნახ. III. 3. ორი წახნავის პარამეტრების ორმაგი შეფარდების მიზნულა არ იცლება ღერძთა ქვარდენის საწყისი წერტილს გადაადგილების შემთხვევაშიც.

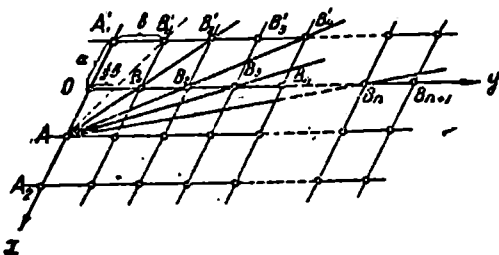
$$\frac{4a}{2a} : \frac{2b}{4b} : \frac{3c}{2c} = \frac{8}{4} : \frac{2}{4} : \frac{6}{4} = 4 : 1 : 3.$$

დავუშვათ, რომ აღებულ კრისტალში კრისტალოგრაფიული ღერძების საწყისი წერტილად აღებული იყო არა O , არამედ O_1 წერტილი, მაშინ იმავე წახნავების პარამეტრული შეფარდება გამოისახება სათანადო წყევების შეჯარებით. ასე, მაგალითად, $A_1B_1C_1$ წახნავისათვის პარამეტრული შეფარდება იქნება $1a:2b:1c$, ხოლო $A_2B_2C_2$ წახნავისათვის — $3a:1\frac{1}{2}b:2\frac{1}{4}c$. ამ პარამეტრების ორმაგი შეფარდებაც შეიძლების გაერთმნიშვნელობით და შეკვეცით იმავე ციფრებით გამოისახება

$$\frac{3a}{a} : \frac{\frac{3}{2}b}{2b} : \frac{\frac{9}{4}c}{c} = \frac{3}{1} : \frac{3}{4} : \frac{9}{4} = 4 : 1 : 3$$

მაშასადამე, წახნავის პარალელური გადაადგილების შემთხვევაში მისი პარამეტრული შეფარდება უცვლელი რჩება.

მაში დასარწმუნებლად, რომ კრისტალზე არ შეიძლება: ორთხეთი წახნაგის არსებობა, რომელთა პარამეტრები დიდი რიცხვით განსხვავდებიან, საკიროა გავიხსენოთ დებულება, რომლის თანახმად კრისტალზე მხოლოდ იმ წახნაგების განვითარებაა შესაძლებელი, რომლებიც პარალელურებია მაქსიმალური რეტიკულური სიმკვრივის შკონე ბადეებისა. III. 4 ნახაზზე მოცემულია შესაძლო წახნაგების კვალი oxy ბრტყელ ბადეზე. ასე, მაგ. შესაძლებელია წახნაგის არსე-

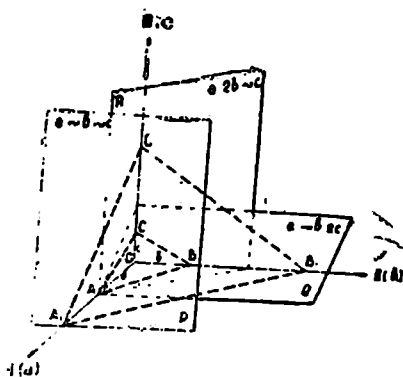


ნახ. III. 4. წახნაგთა შესაძლებელი განლაგება ბრტყელ ბადის მიმართ.

ბობა, რომელიც გაივლის A_1, B_1, B'_1 კვანძებზე. შესაძლებელია აგრეთვე წახნაგი განვითარდეს A_1, B_1, B'_1 ან A_1, B_2 და სხვ. კვანძებზე. ამ შესაძლებელ წახნაგებს შორის ის წახნაგი უფრო განვითარდება, რომელიც პარალელურია იმ ბადისა, სადაც რეტიკულური სიმკვრივით მეტია, ე. ი. A_1, B_1, B'_1 წახნაგი უფრო ადვილად განვითარდება, ვიდრე A_1, B_2, B'_1 , ხოლო A_1, B_2 წახნაგი უფრო ხშირად შეგვხვდება, ვიდრე A_1, B_3 და ა. შ. მაშასადამე, ABn კვანძებზე გამაგალი წახნაგის განვითარება შეუქლებელია, რადგან ამ ბადის რეტიკულური სიმკვრივით შესაძლებელ ბადეებს შორის მინიმალური იქნება. ეს გვიჩვენებს, რომ მაგალითად, oy ღერძის მიმართ შესაძლებელი წახნაგების პარამეტრები ერთეული პარამეტრის მიმართ 2-ჯერ, 3-ჯერ... და ა. შ. მეტი იქნება და არა n -ჯერ მეტი (n დიდი რიცხვია). შეიძლება ეს პარამეტრი ნახევარიც იყოს, მაგრამ მათი პარამეტრული შეფარდება მაინც გამოისახება მთელი და მცირე რიცხვით. მაგალითად, A_1, B_1' წახნაგის პარამეტრი y ღერძის გასწვრივ არის $1/2b$, მაგრამ შეფარდება $a : \frac{1}{2}b$ იგივეა, რაც $2a : b$, რასაც მივიღებთ, თუ გადავიტანთ A_1, B_1' წახნაგს თავის პარალელურად A_2 კვანძზე გავლით.

განხილული პარამეტრების რაციონალური შეფარდების კანონი საფუძვლად უდევს კრისტალის წახნაგების აღნიშვნას პარამეტრების ან ინდექსების საშუალებით.

კრისტალთა წახნაგების აღნიშვნისათვის სარგებლობენ სხვადასხვა ხერხებით. გერმანელმა კრისტალოგრაფმა ვაისმა შექოილო წახნაგების პარამეტრით აღნიშვნა. კრისტალზე შერჩეული უნდა იყოს რომელიმე წახნაგი, რომლის პარამეტრებსაც მივიჩნევთ ერთეულ პარამეტრებად და ყველა დანარჩენი წახნაგის პარამეტრულ შეფარდებას გამოვსახავთ შესაბამისი კოფიციენტებით, რომლებიც გვიჩვენებენ, თუ რამდენჯერ მეტია წახნაგის პარამეტრი ერთეულ პარამეტრზე ზოგადად პარამეტრული შეფარდება გამოისახება ასე: $ma : nb : pc$, სადაც m, n და p მთელი და მცირე რიცხვებია (ან როგორც ვუწოდებთ, რაციონალური რიცხვები). თუ წახნაგი რომელიმე ლერძის პარალელურია, მაშინ მისი პარამეტრი ამ ლერძისადმი უსასრულოა. მაგალითად, ვერტიკალური მიმართულების წახნაგის (ე. ი. x ლერძის პარალელური წახნაგის) პარამეტრული შეფარდება იქნება $a : b : \infty c$. III. 5 ხახაზზე მოცემულია რამდენიმე წახნაგის პარამეტრული შეფარდება: ABC წახნაგი იყოს ერთეული წახნაგი, ე. ი. მისი OA, OB და OC პარამეტრები მივიჩნიოთ მასშტაბის ერთეულებად (a, b და c). მაშინ $A_1B_1C_1$ წახნაგის პარამეტრები იქნება $2a : 3b : 4c$. R წახნაგი კვეთს I და II ლერძებს და III ლერძის პარალელურია. მისი პარამეტრი ზოგად შემთხვევაში $a : mb : \infty c$ იქნება; მოცემულ შემთხვევაში — $a : 2b : \infty c$. Q წახნაგის პარამეტრებია $a : \infty b : 2c$, რადგან იგი II ლერძის პარალელურია, ხოლო P წახნაგის პარამეტრი — $a : \infty b : \infty c$, რადგან იგი კვეთს მხოლოდ I ლერძს და II და III ლერძების პარალელურია. სადაც არ უნდა ჰკვეთდეს P წახნაგი I ლერძს, იგი შეიძლება გადავიტანოთ პარალელურ ორიენტაციაში A წერტილზე გავლით და მაშინ პარამეტრული შეფარდება იქნება $a : \infty b : \infty c$.



ნახ. III. 5. წახნაგთა პარამეტრული შეფარდებანათი სხვადასხვა ორიენტაციის შემთხვევაში.

მიუხედავად იმისა, რომ პარამეტრული შეფარდებით წახნაგების გამოსახვა საკმაოდ მარტივია და მიღებული ციფრები შესაძლებელია გამოვიყენოთ წახნაგის რიცხვით მახასიათებლად, კრისტალოგრაფიაში

გარკვეული მიზეზით მიღებულია წახნაგების განსაზღვრა პარამეტრების შებრუნებული სიდიდეების შეფარდებით. ე. წ. მილერის ინდექსებით. კრისტალის წახნაგის გამოსახეის ეს ხერხი მნიშვნელოვნად ამარტივებს სხვადასხვა გამოთვლებს.

უკვე აღვნიშეთ, რომ წახნაგის პარამეტრული შეფარდება შეიძლება გამოისახოს სამი მთელი და მცირე რიცხვის შეფარდებით

$$\frac{OA_1}{OA_1} : \frac{OB_1}{OB_1} : \frac{OC_1}{OC_1} = p : q : r$$

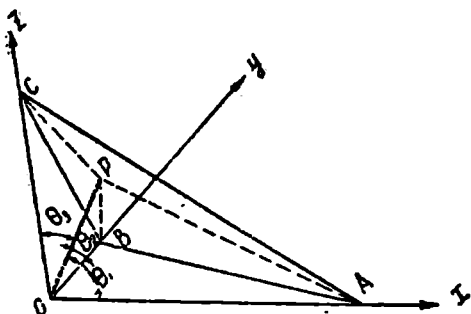
მაშასადამე, იგივე წახნაგი ინდექსების საშუალებით გამოისახება აღნიშნული პარამეტრების შებრუნებული სიდიდეების შეფარდებით

$$\frac{OA_1}{OA_2} : \frac{OB_1}{OB_2} : \frac{OC_1}{OC_2} = \frac{1}{p} : \frac{1}{q} : \frac{1}{r} = qr : pr : qp$$

რადგან p , q და r მთელი რიცხვებია, მათი ნამრავლიც მთელი რიცხვი იქნება.

მიღებულ რიცხვებს (ინდექსებს) ზოგადად აღნიშნავენ h , k და l ასოებით, მაშასადამე, $qr : pr : pq = h : k : l$ ანუ (hkl).

აღსანიშნავია, რომ წახნაგის სივრცეში განლაგება შეიძლება გამოვსახოთ არა მართო მის მიერ მოკვეთილი პარამეტრების სა-



ნახ. III 6. დამოკიდებულება წახნაგზე დაშვებულ მართობსა და კრისტალოგრაფიულ ღერძებს შორის.

შუალებით, არამედ მასზე კოორდინატთა სისტემის სათავიდან დაშვებული მართობისა და შესაბამის კრისტალოგრაფიულ ღერძებს შორის არსებული კუთხეების საშუალებით. ასე, მაგალითად, დავეუვათ OP მართობი ABC წახნაგზე (ნახ. III. 6). აღვნიშნოთ კუთხეები OP მართობსა და x , y და z კრისტალოგრაფიულ ღერძთა შორის შესაბამისად θ_1 , θ_2 და θ_3 -ით, მაშინ შესაბამისი მართკუთხა სამკუთხედებიდან მივიღებთ

$$\cos\theta_1 = \frac{OP}{OA}, \quad \cos\theta_2 = \frac{OP}{OB} \quad \text{და} \quad \cos\theta_3 = \frac{OP}{OC},$$

$$\text{მაშასადამე,} \quad \cos\theta_1 : \cos\theta_2 : \cos\theta_3 = \frac{1}{OA} : \frac{1}{OB} : \frac{1}{OC} = h : k : l.$$

ამრიგად, მივიღეთ შეფარდება, რომელიც პარამეტრების შებრუნებული სიდიდეების შეფარდებაა.

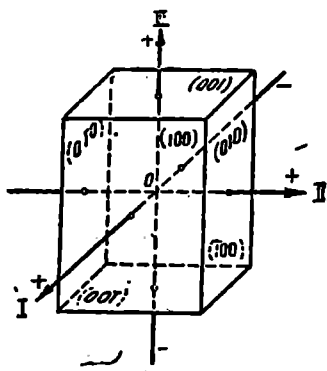
ამ რიცხვებს (ინდექსებს) ათავსებენ ფრჩხილებში და მათ შორის არ სვამენ არც შეფარდების ნიშანს და არც მძიმეს; (*hk'*). წახნაგთა ინდექსების ასეთ ერთობლიობას წახნაგის სიმბოლოს უწოდებენ.

III. 5 ნახაზზე აღნიშნული $A_1B_1C_1$ წახნაგის პარამეტრული შეფარდება გამოისახება შეფარდებით $2a : 3b : 4c$ იგივე წახნაგი მიღერის ინდექსების საშუალებით უნდა გამოისახოს შებრუნებული სიდიდე-

ბის შეფარდებით, ე. ი. $\frac{1}{2} : \frac{1}{3} : \frac{1}{4} = 6 : 4 : 3$.

მაშასადამე, $A_1B_1C_1$ წახნაგის სიმბოლო იქნება (643). იგი იკითხება ასე: ექვსი-ოთხი-სამი და არა ექვსას ორმოცდასამი, როდესაც წახნაგის ოპოზიტურ პარამეტრი უსასრულოა, მისი შესაბამისი ინდექსი, ცხადია, ნული იქნება. მაგალითად, R წახნაგის პარამეტრული შეფარდებაა $a : 2b : \infty c$ (ნახ. III. 5), მისი ინდექსები იქნება $\frac{1}{1} : \frac{1}{2} : \frac{1}{\infty} = 2 : 1 : 0$, ე. ი. (210) და იკითხება ორი-ერთი-ნული.

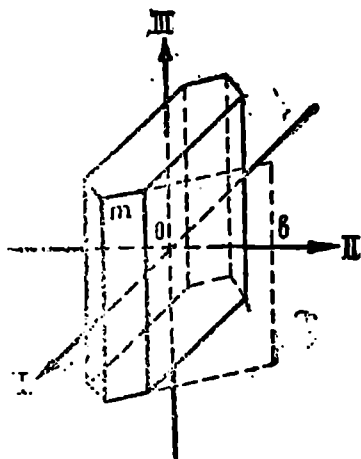
ზოგადად III ღერძის პარალელური წახნაგის სიმბოლო იქნება (*hko*)-
 $a : \infty b : \infty c$ პარამეტრების მქონე წახნაგის სიმბოლო იქნება (100), რომელიც იკითხება ასე: ერთი-ნული-ნული. რა მნიშვნელობაც არ უნდა ჰქონდეს a პარამეტრს, რომლის შესაბამისად ზოგად შემთხვევაში იქნება (*h00*). ეს გამოსახულება ყოველთვის შეიკვეცება h -ზე და მივიღებთ (100), (ნახ. III. 7). მოცემული კრისტალის მარჯვენა გვერდით ვერტიკალურ წახნაგის სიმბოლო იქნება (010) და მარტენასათვის —(010). ზედა და ქვედა პოროზონტალური წახნაგების სიმბოლოები შესაბამისად იქნება (001) და (00 $\bar{1}$).



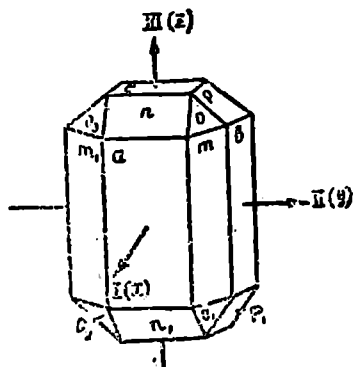
ნახ. III. 7. მართკუთხა პარალელუპიპედის წახნაგების სიმბოლოები.

როდესაც კრისტალზე გვაქვს მარტივი ფორმის მსეთი წახნაგი, რომელიც დახრილია რომელიმე კრისტალოგრაფიული ღერძის მიმართ, მაგრამ უშუალოდ მას არ კვეთს (ნახ. III. 8, წახნაგი m), მაშინ წარმოდგენით უნდა გავაგრძელოთ ეს წახნაგი ამ ღერძის გადაკვეთამდე (მაგალითად, m წახნაგის გაგრძელებით იგი გადაკვეთს მეორე კრისტალოგრაფიულ ღერძს b წერ-

ტილში). შესაბამისი გონიომეტრიული გაზომვების შედეგად შეიძლება ზუსტად დავადგინოთ მისი ინდექსები, მაგრამ გონიომეტრიული გაზომვების გარეშე შეიძლება m წახნაგის სიმბოლო ზოგადად გამოვსაზოთ (hkO)-ით. ასეთი მსჯელობით III. 9 ნახაზზე მოცემული კრისტ-



ნახ. III. 8. m წახნაგის ინდექსის დასადგენად საჭიროა II ღერძის გადაკეთება წარმოიდგინოთ მ-სა სათანადო გვირგვინი.



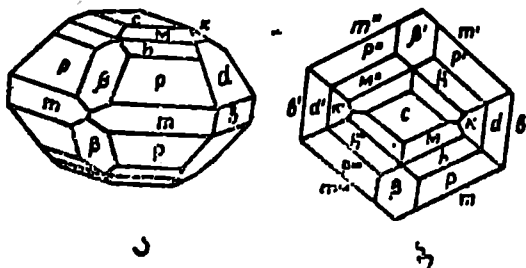
ნახ. III. 9 კრისტალი ერთი და იმავე მარტივი ჯორმას წახნაგები აღნიშნულია ერთნაირი ასოებით.

ილის წახნაგების სიმბოლოები შეიძლება გამოისახოს შემდეგნაირად:
 $a-(100)$; $b-(010)$; $c-(001)$; $m_1-(h\bar{k}O)$; $n_1-(hO\bar{l})$; $p_1-(Okl)$;
 $p_2-(Ok\bar{l})$; $O-(hkl)$; $O_1-(h\bar{k}\bar{l})$; $O_2-(h\bar{k}l)$; $O_3-(h\bar{k}\bar{l})$.

§ III. 3. კრისტალთა გეგმილები

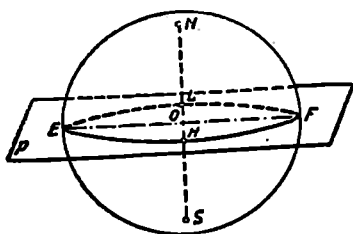
ცნობილია კრისტალთა გამოსახვის სხვადასხვი ხერხი. ასე, მაგალითად, კრისტალი შეიძლება გამოიხაზოს აქსონომეტრიული ორთოგონალური და სხვა გეგმილების საშუალებით (ნახ. III. 10). არსებული გეგმილებიდან კრისტალოგრაფიაში ყველაზე ხშირად ხმარობენ სტერეოგრაფიულ და გნომოსტერეოგრაფიულ გეგმილებს, რომლებიც საშუალებას იძლევიან დაცული იქნეს შესაბამისი, ელემენტთა შორის არსებული კუთხეების სიდიდეები, რასაც რიგი ამოცანების ამოხსნისათვის შეტად დიდი მნიშვნელობა აქვს. გვეცნოთ სტერეოგრაფიული გეგმილების აგების წესებს. ხაზის ან სიბრტყის სტერეოგრაფიული გეგმილის ასაგებად საჭიროა O წერტილიდან (გეგმილთა ცენტრიდან)

შემოგზავნით ნებისმიერი რადიუსის სფერო — გეგმილთა სფერო (ნახ. III. 11). გაკვეთით ეს სფერო ცენტრზე გამავალი პორიზონტალური P სიბრტყით. ეს სიბრტყე არის გეგმილთა სიბრტყე. იგი გაკვეთს გეგმილთა სფეროს დიდი წიგზის გასწვრივ, რომელიც სფეროს ეკვატორული $HELF$ წიგზი იქიება და რომლის ფარგლებშიც მოთავსდება ყველა გეგმილი. გავატაოთ გეგმილთა ცენტრში გეგმილთა სფერო



ნახ. III. 10. კრისტალის აქსონომეტრიული (ა) და ორთოგონალური (ბ) გეგმილები.

ზრტყის მართობი NS ხაზი, ე. წ. გეგმილთა ღერძი, იგი გაკვეთს გეგმილთა სფეროს N და S წერტილებში, რომლებიც გეგმილების მისაღები ხედვის წერტილებია. რაიმე ვექტორის (მიმართულების) სტერეოგრაფიული გეგმილის მისაღებად საჭირო ეს ვექტორი თავის პოლარულად გადავიტანოთ გეგმილთა ცენტრზე (O წერტილზე).



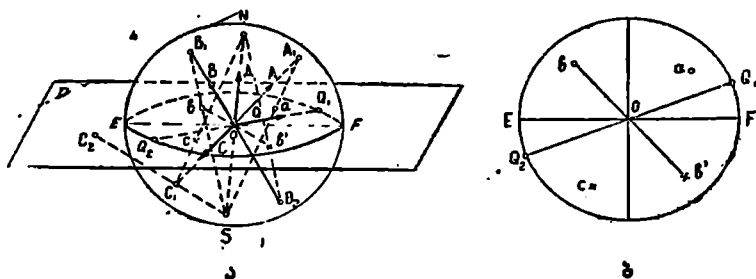
ნახ. III 11. სტერეოგრაფიული გეგმილების აგებას ელემენტები. O გეგმილთა ცენტრი, P გეგმილთა სიბრტყე, $HELF$ გეგმილთა სფეროს ეკვატორული კვეთი, N და S ხედვის წერტილები.

გალითად, OA ვექტორი (ნახ. III. 12. ა) გავაგრძელოთ გეგმილთა სფეროს გადაკვეთამდე. აღვნიშნოთ გადაკვეთის წერტილი A_1 ასოთი; შევაერთოთ ეს წერტილი S ხედვის წერტილთან სწორი ხაზით; შემაერთებელი ხაზი გადაკვეთს გეგმილთა სიბრტყეს a წერტილში. მიღებული a წერტილი იქნება OA ვექტორის სტერეოგრაფიული გეგმილი. მაშასადამე, ნებისმიერი ვექტორის (მიმართულების) სტერეოგრაფიული გეგმილი წერტილია.

ამავე გზით მიიღება OB ვექტორის b სტერეოგრაფიული გეგმილი იმ შემთხვევაში, თუ მოცემული მიმართულება P გეგმილთა სიბრტყის ქვევით არის მიმართული (მაგ. OC), მაშინ ამ ვექტორის და გეგმილთა სფეროს გადაკვეთის C_1 წერტილი

ტილი უნდა შევეუერთოთ N ხედვის წერტილს და მიღებულ c წერტილი იქნება OC ვექტორის საძიებელი სტერეოგრაფიული გეგმილი. C_2 წერტილი რომ შეგვეერთებინა S ხედვის წერტილთან, მაშინ შემაერთებელი ხაზი გადაკვეთდა გეგმილთა სიბრტყეს წრეხაზის გარეთ (წერტილი C_2). იმისათვის, რომ განვასხვავოთ P სიბრტყის ზევით ან ქვევით განლაგებული ვექტორების სტერეოგრაფიული გეგმილები, შეიძლება მივიღოთ სათანადო პირობითი ნიშნები: ოგოლით აღვნიშნოთ ზევით მიმართული ვექტორის გეგმილი, ხოლო ჯვრით — ქვევით მიმართული.

განვიხილოთ კერძო განლაგების ვექტორების სტერეოგრაფიული გეგმილები: ჰორიზონტალური ვექტორის (OQ) სტერეოგრაფიული გეგმილის ასაგებად საჭიროა გადავიტანოთ ეს მიმართულება O წერტილზე გავლით, მაგრამ რადგან OQ მიმართულება ჰორიზონტალურია, იგი დაემთხვევა P გეგმილთა სიბრტყეს და ცხადია, მისი გაგრძელება



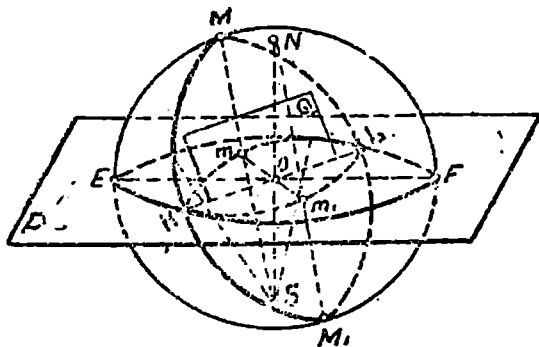
ნახ. III. 12. ვექტორის და ხაზის სტერეოგრაფიული გეგმილების აკუზა. ა-გეგმილი — თა სერო გადაკვეთილია ცენტრზე გასული ჰორიზონტალური სიბრტყით, ბ-იმ-ვე სფეროს ეკვატორული კვეთი შესაბამისი გეგმილების დატანით.

გადაკვეთს გეგმილთა სფეროს ეკვატორულ წრეხაზზე Q_1 წერტილში. ეს წერტილი რომ შევეუერთოთ S ან N ხედვის წერტილს, შემაერთებელი სწორი ხაზი გეგმილთა სიბრტყეს გადაკვეთს იმავე Q_1 წერტილში. ვერტიკალური ვექტორის სტერეოგრაფიული გეგმილის ასაგებად უნდა გადავიტანოთ იგი O წერტილზე გავლით და ცხადია შეუთავსდება გეგმილთა NS ღერძს. მაშასადამე, ვერტიკალური მიმართულების სტერეოგრაფიული გეგმილი მოთავსდება O წერტილში. ამრიგად, დახრილი ვექტორის სტერეოგრაფიული გეგმილი მდებარეობს წრეხაზის შიგნით, ჰორიზონტალური ვექტორია წრეხაზზე და ვერტიკალურია წრის ცენტრში. განხილული ვექტორების სტერეოგრაფიული გეგმილების განლაგება მოცემულია III 12. ნახაზზე.

სწორი ხაზის სტერეოგრაფიული გეგმილის ასაგებად (მაგალითად,

B_1B_2 ხაზის), უნდა გადავიტანოთ ეს ხაზი პარალელური ორიენტაციით O წერტილზე გავლით და ვიპოვოთ მისი ორივე ბოლოს გეგმილები. მიღებული b და b_1 წერტილები შევეერთოთ სწორი ხაზით; ეს იქნება საძიებელი გეგმილი. ცხადია, რომ ვერტიკალური სწორი ხაზის გეგმილი იქნება წერტილი წრეხაზის ცენტრში, პორიზონტალური ხაზის გეგმილი — წრეხაზის დიამეტრი, ხოლო დახრილი ხაზის სტერეოგრაფიული გეგმბი — ცენტრიდან სიმეტრიულად განლაგებული წრეხაზის დიამეტრის ნაწილი, რომელიც მით უფრო მოკლე იქნება, რაც უფრო მეტია მოკემული ხაზის დახრის კუთხე. ამ მონაკვეთის ყოველი ნახევარი შეესაბამება ხაზის ნაწილებს, რომლებიც გეგმილთა სიბრტყის ზედა და ქვედა ნახევარსფეროში მდებარეობენ. მაგალითად, B_1B_2 ხაზის bb' . გეგმილის Ob ნახევარი შეესაბამება ზედა ნაწილს, ხოლო Ob' — ქვედას (ნახ. III. 12 ა და ბ).

განვიხილოთ სიბრტყის სტერეოგრაფიული გეგმილის აგების წესი. მოცემულია რაიმე დახრილი Q სიბრტყე. გადაუტანოთ იგი პარალელურ მდებარეობაში გეგმილთა სფეროს ცენტრში გავლით (ნახ. III. 13) და გავაგრძელოთ გეგმილთსფეროს ზედაპირის გადაკვეთამდე.

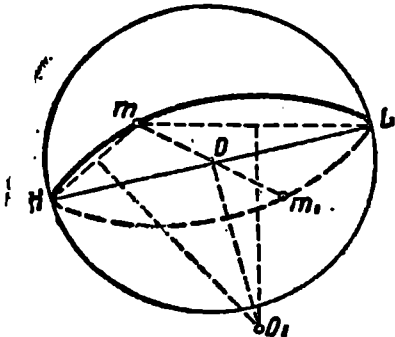


ნახ. III. 13. დახრილი სიბრტყის სტერეოგრაფიული გეგმილის აგება.

მივიღებთ Q სიბრტყის ზედა ნახევარსაფეროს HML დიდი წრეხაზის ნახევარს. ამ წრეხაზის ყოველი წერტილი რომ შევეუერთოთ ხედვის S წერტილს სწორი ხაზებით; მივიღებთ შემაერთებელი ხაზების P გეგმილთა სიბრტყესთან სათანადოდ გადაკვეთის წერტილებს. მიღებულ წერტილებზე რომ გავატაროთ შესაბამისი ხაზი, მივიღებთ HmL

ნ. ჯ. ხარაშვილი

რკალს, რომელიც იქნება Q დახრილი სიბრტყის სტერეოგრაფიული გეგმილი (გეგმილთა სიბრტყეზე ზევით მდებარე ნაწილისათვის). რადგან წრეხაზის სტერეოგრაფიული გეგმილი წრეხაზია, მაშასადამე HmL მრუდიც წრეხაზის ნაწილია, ომძლის რადიუსის მონახვა შეიძლება სათანადო აგების საშუალებით (ნახ. III. 14). მოცემულ სამ წერტილზე (H , m და L) წრეხაზის რკალის, გასატარებლად Hm და mL ხაზების შუა წერტილებიდან უნდა ავაგოთ შესაბამისი მართობები და



ნახ. III. 14. წრეხაზის რკალის, როგორც დახრილი სიბრტყის სტერეოგრაფიული გეგმილის აგება.

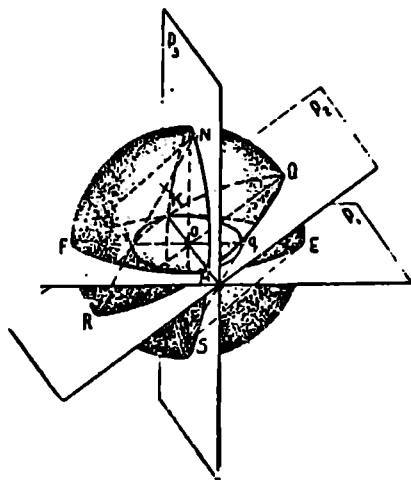
ფიული გეგმილი, როგორც III. 15 ნახაზიდან ჩანს, გეგმილთა სფეროს ეკვატორული $MFKE$ კვეთი იქნება. იმავე ნახაზიდან ვერტიკალური მიმართულების სიბრტყის (P_2) სტერეოგრაფიული გეგმილი იქნება MK სწორი ხაზი, რომელიც $MFKE$ წრეხაზის დიამეტრია. ამრიგად, დახრილი სიბრტყის სტერეოგრაფიული გეგმილი წრეხაზის რკალია (რაც უფრო მეტია სიბრტყის დახრის კუთხე ჰორიზონტალური სიბრტყისადმი, მით უფრო დიდია წრეხაზის რადიუსი), ჰორიზონტალური სიბრტყის გეგმილი — წრეხაზი (გეგმილთა სფეროს ეკვატორული კვეთი) და ვერტიკალური სიბრტყის გეგმილი ამ წრეხაზის დიამეტრია.

სტერეოგრაფიული გეგმილების საშუალებით გამოსახვევენ სიმეტრიის სიბრტყისა და სიმეტრიის ღერძების გეგმილებს, კრისტალის წახნაგებს კი — გნომოსტერეოგრაფიული გეგმილებით. „გნომო“ ნიშნავს მართობს და წახნაგის გნომოსტერეოგრაფიული გეგმილი არის კრისტალის ცენტრიდან წახნაგზე დაჭვებული მართობის სტერეოგრაფიული გეგმილი. მაშასადამე, წახნაგის (სიბრტყის) გნომოსტერეოგრაფიული გეგმილი წერტილია. ავიღოთ რაიმე კრისტალი და წარმოვიდგინოთ მის გარშემო გეგმილთ-

მათი გადაკვეთის წერტილი იქნება საძიებელი წრეხაზის O_1 ცენტრი, საიდანაც O_1H რადიუსით შემოვხაზავთ HmL რკალს. ანალოგიურად მივიღებთ Hm_1L რკალს, რომელიც Q დახრილი სიბრტყის სტერეოგრაფიული გეგმილი იქნება P სიბრტყის ქვევით მდებარე ნაწილისათვის (ნახ. III. 14).

განვიხილოთ სიბრტყის განლაგების კერძო შემთხვევები და ავაგოთ შესაბამისი სტერეოგრაფიული გეგმილები. ჰორიზონტალური სიბრტყის (P_1) სტერეოგრაფიული

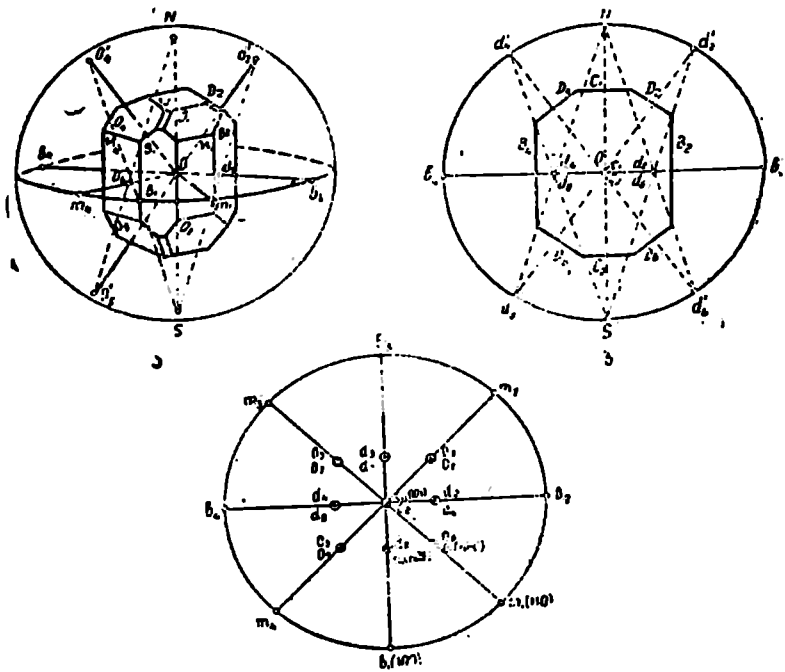
სფერო, რომლის ცენტრი ემთხვევა კრისტალის გეომეტრიულ ცენტრს (ნახ. III. 16). დაეშვათ სფეროს ცენტრიდან ყოველ წახნაგზე შესაბამისი მართობი და მოენახოთ ყოველი მიმართულების სტრუქტურული გეგმილი (ზევით განხილული წესით). მიღებული წერტილები იქნება სათანადო წახნაგის გნომოსტერეოგრაფიული გეგმილები. III. 16 ნახაზიდან ჩანს, რომ ყოველი ვეუტიკალური წახნაგის გნომოსტერეოგრაფიული გეგმილი მოთავსებულია ეკვატორულ წოხაზე (წერტილები b_2, m_1, b_1, m_2, b_3 და სხვ.), კოორდინატური წახნაგებისა (e_1 და e_2) ვიკამლთა ცენტრში (O წერტილში), ზედა წახნაგის (e_1) გეგმილი აღნიშნულია რგოლით, ხოლო ქვედასი — ფერით. ყოველი დახრილი წახნაგის გნომოსტერეოგრაფიული გეგმილი იქნება წრეხაზის შიგნით. ასე, მაგალითად, D_2 — წახნაგის გნომოსტერეოგრაფიული გეგმილის მოსანახად ამ წახნაგზე O წერტილიდან უნდა დაეშვათ Od_2 მართობი და გავაგრძელოთ იგი გეგმილთა სფეროს გადაკვეთამდე. ე. ი. d_2 წო-



ნახ. III. 15. პორ-ზენტალური (P_1), დახრილი (P_2) და ვერტიკალური (P_3) სიბრჯეუების სტერეოგრაფიული გეგმილების აგება

ტილამდე, შემდეგ გადაკვეთის წერტილი შევეურთოთ სამხრეთ ხედვის წერტილს (S). შემაერთებელი სწორი ხაზი გადაკვეთს გეგმილთა სიბრჯეუა d_2 წერტილში, რომელიც D_2 წახნაგის გნომოსტერეოგრაფიული გეგმილი იქნება (ნახ. III. 16 ა და ბ). ცაღია, ამავე წერტილში მოთავსდება გეგმილთა სიბრჯეუს ქვევით მდებარე D_3 წახნაგის გნომოსტერეოგრაფიული გეგმილი. ამ შემთხვევაში D_3 წახნაგზე დაშვებული მართობის და სფეროს გადაკვეთის d_3 წერტილში უნდა შევეურთოთ N ხედვის წერტილს. შემაერთებელი სწორი ხაზი გადაკვეთს გეგმილთა სიბრჯეუს იმავე d_3 წერტილში. III. 16 ნახაზზე მოცემულია განხილული კრისტალის ყველა წახნაგის გნომოსტერეოგრაფიული გეგმილი. რგოლებით აღნიშნულია იმ წახნაგების

გვეგილები, რომლებიც გვეგილთა სიბრტყის ზევით მდებარეობენ, ხოლო ჯვრით-გვეგილთა სიბრტყის ქვევით მდებარე. აღებულ კრისტალზე სულ გვაქვს ხუთი მარტივი ფორმის კომბინაცია. ორი მათგანი (M და B) შედგება ოთხ-ოთხი ვერტიკალური წახნაგისაგან — (M_1, M_2, M_3 და M_4) და (B_1, B_2, B_3 და B_4), O და D მარტივი ფორმები კი რვა-რვა დახრილი წახნაგისაგან (რომელთა შორის ოთხ-ოთხი ზედა ნახევა-სფეროშია და ოთხ-ოთხი ქვედაში) C ფორმა წარმოდგენილია ო-ი პორიზონტალური წახნაგით (C_1 და C_2). ხუთივე მარტივი ფორმის სათანადო წახნაგების (B_1, M_1, O_1, D_1 და C_1) ინდექსები



ნახ. III. 16. კრისტალის წახნაგების გნომოსტერეოგრაფიული გვეგილების აგება. — აქსონომეტრიული გვეგილი, ბ-ვერტიკალური კრილი, გ-ეკვატორული წრეხაზები.

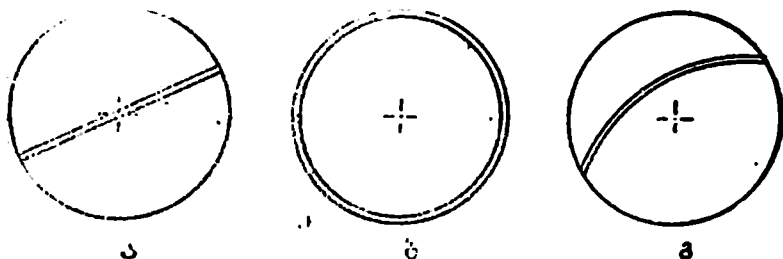
მოყვანილია მათ შესაბამის გვეგილებთან (ნახ. III. 16).

ჩვეულებრივ, სიმეტრიის სიბრტყის გვეგილებს გამოსახავენ ორ-ორი პარალელური ხაზით (ნახ. III. 17), ხოლო სიმეტრიის ღერძების აღსანიშნავად მიღებული პირობითი ნიშნები მოყვანილია III. I ტაბულაში.

მეგალითისათვის ავიღოთ ტეტრაგონური (წესიერი ოთხკუთხა)

პირამიდა, რომელსაც აქვს ვერტიკალური მიმართულების მეოთხე რიგის სიმეტრიის ლერძი (L_4) და მასზე გავლებული სიმეტრიის ოთხი სიბრტყე (ნახ. III. 18 ა).

ამ ელემენტების სტერეოგრაფიული გეგმილები წრებაზის ცენტრში სათანადო კვადრატით (ვერტიკალური L_4) და ოთხი დიაგეტ-



ნახ. III. 17. სხვადასხვა მიმართულების სიმეტრიის სიბრტყის სტერეოგრაფიული გეგმილი: ა ვერტიკალური, ბ პორიზონტალური, გ დახრილი მიმართულებებისათვის. რით (ვერტიკალური $4P$) გამოისახება (ნახ. III. 18 ბ). ამ გეგმილებზე უნდა დავიტანოთ პირამიდის ოთხი დახრილი წახნაგისა და მისი ფუძის (მონოედრის) გნომოსტერეოგრაფიული გეგმილები. ესენი პირა-

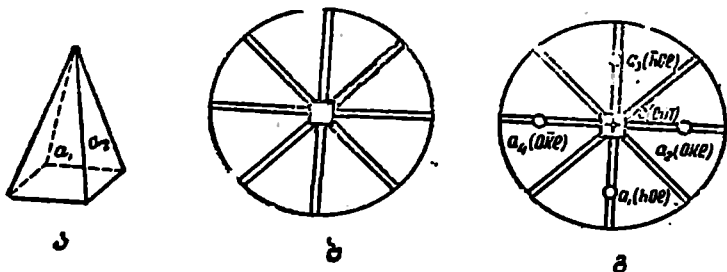
ხაზო III 1

სიმეტრიის ლერძები	L_2	L_3	L_4	L_6	q_{i_4}	q_{i_6}
პირამიდით ნიშნები						

მიდის წახნაგების გამომსახველი a_1 , a_2 , a_3 და a_4 წერტილები იქნება, ხოლო ცენტრში მდებარე e წერტილი მონოედრის შესაბამისია. ყოველი წახნაგის გეგმილს მიწერილი აქვს სათანადო ინდექსი (ნახ. III. 18 გ).

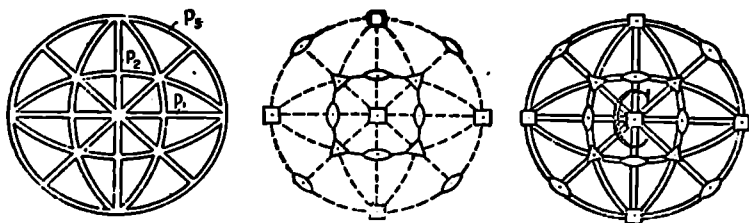
ავიღოთ სიმეტრიის მაქსიმალური ხარისხის მქონე მარტივი ფორმა, მაგალითად, კუბი და გამოვსახოთ ჯერ მისი სიმეტრიის ელემენტების სტერეოგრაფიული გეგმილები და შემდეგ დავიტანოთ ამ გეგმილებზე კუბის ექვსივე წახნაგის გნომოსტერეოგრაფიული გეგმილი. როგორც უკვე აღვნიშნეთ, კუბს ახასიათებს სიმეტრიის ცხრა სიბრტყე რომელთაგანაც ოთხი ვერტიკალურია, ოთხი — დახრილი, ერთი — პორიზონტალური (ნახ II.4) და აქვს სიმეტრიის ცამეტი ლერძი. რომელთაგან სამი მეოთხე რიგის, ოთხი მესამე რიგის და ექვსი მეორე

რიგისაა (ნახ. II. 6). კუბს აგრეთვე აქვს ინვერსიის ცენტრი. სიმეტრიის აღნიშნული ცხრა სიბრტყის სტერეოგრაფიული გეგმილი გამოსახება ისე, როგორც ეს მოცემულია III. 19 ა ნახაზზე, მათ შორის P_1 , P_2 და P_3 მთავარი სიბრტყეებია, პირველი ორი ვერტიკალურია,



ნახ. III. 18. ტეტრაედრის პირამიდის გეგმილი. ა-ტეტრაედრის პირამიდა, ბ-სიმეტრიის ელემენტების (L_1 და P) სტერეოგრაფიული გეგმილები, გ-საერთო გეგმილი. (დატანილია წახნაგების გნომოსტერეოგრაფიული გეგმილები).

შესაბამისობაშია, დანარჩენი ექვსი დიაგონალური სიბრტყეებია. სიმეტრიის ღერძების გეგმილთა აღგლეზის მოსანახად უნდა გავიხსენოთ, რომ L_1 გადის კუბის წახნაგის ცენტრში, ე. ი. ოთხ-ოთხე სიმეტრიის სიბრტყის გადაკვეთის წერტილებში. რადგან ორი ღერძი



ნახ. III. 19. კუბის სიმეტრიის ელემენტების სტერეოგრაფიული გეგმილები.

ჰორიზონტალური იქნება, ამიტომ მათი გეგმილები წრეხაზზე განლაგდა (ნახ. III. 19 ბ), ხოლო შესაბამის ვერტიკალურია და, მაშასადამე, ამ ღერძის ორივე ბოლოს გეგმილი განლაგდება წრეხაზის ცენტრში. შესაბამისი ღერძებს ($4L_1$) დახრილი მიმართულება აქვს და გადის კუბის წვეროებში, იქ სადაც იკვეთება დიაგონალური სიმეტრიის სამ-სამი სიბრტყე. ეს ადგილები გეგმილზე ოთხი წერტილით აღნიშნება (სამკუთხედები, ნახ. III. 19 ბ). რადგან ამ ღერძების ქვედა ნახევარსფეროს ბოლოებს გეგმილები შესაბამისად იმავე წერტილებს დაემ-

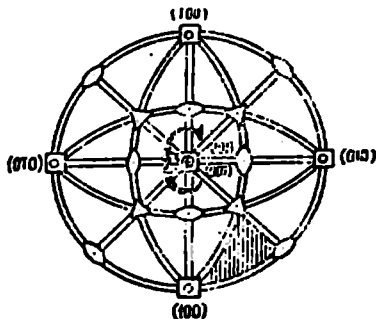
თხვევა. მეორე რიგის სიმეტრიის ლერძები ($6 L_2$) კუბის ერთმანეთის შობი-რდაპირე წიბოების ცენტრებში გადის, ე. ი. იმ წერტილებში, სადაც იკვეთება სიმეტრიის ორ-ორი სიბრტყე. ამ ლერძებიდან ორი ჰორიზონტალურია და, მაშასადამე. მათი გვეგმილები განლაგდება წრე-ხაზზე, ოთხი კი დახრილია, ე. ი. მათი გვეგმილები წრეხაზის შიგნით იქნება, იქ, სადაც იკვეთება სიმეტრიის ორ-ორი სიბრტყე (ნახ. III. 19 ბ).

III 19 ა და ბ ნახაზები ერთმანეთს რომ შეუუთავსოთ, მივიღებთ კუბის სიმეტრიის ელემენტების საერთო გვეგმილს (ნახ. III. 19 გ), რომელზედაც ინვერსიის ცენტრის არსებობის აღსანიშნავად უნდა დავიტანოთ ასო C. როლესაც კრისტალს ინვერსიის ცენტრი არა აქვს, C ასოს არ წევენ.

მიღებულ გვეგმილზე უნდა დავიტანოთ კუბის ექვსი წახნაგის გნომოსტერეოგრაფიული გვეგმილი. რადგან ოთხი მათგანი ვერტიკალურია, ამიტომ მათი გნომოსტერეოგრაფიული გვეგმილები სათანადო წერტილებს სახით განლაგდება წრეხაზზე, იქ, სადაც მეოთხე რიგის ლერძების გვეგმილებია (უნდა გვახსოვდეს, რომ L_4 ლერძები მართობულია კუბის წახნაგებისადმი), დანაოჩენი ორი ჰორიზონტალური, ზედა და ქვედა წახნაგის გნომოსტერეოგრაფიული გვეგმილები - წრეხაზის ცენტრში. ექვსივე წახნაგის შესაბამისი ინდექსი აღნიშნულია III. 20 ნახაზზე.

სიმარტივისათვის სახეებით საკმარისია აღნიშნული წახნაგების ნაცვლად ნახაზზე რავიტანოთ მხოლოდ ერთი რომელიმე მათგანი, რადგან დანაოჩენი წახნაგების რიცხვი და განლაგება შეიძლება გამოვიანგარიშოთ არსებული სიმეტრიის ელემენტების მოქმედებით. ასე. მაგალითად, რომ აღგვენიშნა მხოლოდ ერთი წახნაგი ინდექსით (100), არსებული ვერტიკალური მიმართულებით მეოთხე რიგის სიმეტრიის ლერძის მოქმედებით აუცილებელია კიდევ სამი ასეთი ვერტიკალური წახნაგის არსებობა, ხოლო ერთ-ერთი ჰორიზონტალური მიმართულების L_4 ლერძის მოქმედებით მივიღებთ კიდევ ორ მათ ტოლ ჰორიზონტალურ წახნაგს.

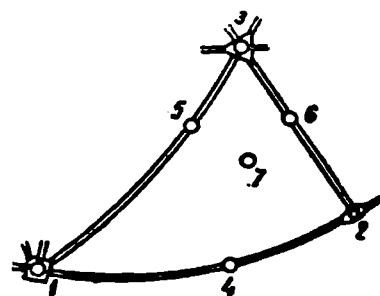
მაშასადამე, თუ არსებობს ერთი წახნაგი (100) სიმეტრიის გან-



ნახ III. 20. კუბის სიმეტრიის ელემენტების სტერეოგრაფიული და წახნაგების გნომოსტერეოგრაფიული გვეგმილები.

სახილველ პირობებში, ასეთი წახნაგი უნდა იყოს სულ ექვსი, ე. ი. მოცეპული წახნაგი ექნება ჰექსაედრის (კუბის) გამოძახებული წახნაგი. ამიტომ, რომ კრისტალოგრაფიაში მიღებულია ყოველი მარტივი ფორმის აღნიშვნა მხოლოდ მისი ერთი წახნაგის გვეგმილის დატანით და სახელდობო იმ წახნაგისა, რომელიც განლაგებულია გვეგმილთა სფეროს დადებით ოქტანტში და მისი გზომოსტეოგრაფიული გვეგმილი მოთავსებულია წინა, მარჯვენა, ზედა სვერულ სამკუთხედში. განხილულ მაგალითში ეს სამკუთხედი (ნახ. III. 20 და შტრახული სამკუთხედი) გვეგმილთა სფეროს ზედაპირის ერთი ორმოცდამეოთხედი. ამ სამკუთხედების ზომა და ფორმა დამოკიდებულია კრისტალოგრაფიულ ღერძთა ჯვარედინის ერთობლიობაზე და შეიძლება იყოს გვეგმილთა სფეროს ზედაპირის მერვედი, მეთექვსმეტედი ან ოცდამეოთხედი ნაწილი.

ყოველი წერტილი, რომელიც მოთავსებულია აღნიშნული სამკუთხედის ფარგლებში, შეიძლება წარმოუდგინოს როგორც შესაბამისი მარტივი ფორმის წახნაგის გზომოსტეოგრაფიული გვეგმილი, რომელთა რაოდენობაც ყოველი ფორმისათვის განისაზღვრება სიმეტრიის არსებული ხარისხის მიხედვით. მიუხედავად ამისა, რომ სამკუთხედში ბევრი ასეთი წერტილი მოთავსდება, მათი შესაბამისი მარტივი ფორმები მხოლოდ შეიძლება იქნება. მართლაც, ჩვენს მიერ გამოყოფილ სამკუთხედში (ნახ. III. 21) წერტილები შეიძლება განლაგდეს: ა) სამკუთხედის წერტილებში, ჩვენს შემთხვევაში სიმეტრიის ღერძების გამოსვლის წერტილებში (1, 2 და 3; ბ) სამკუთხედის გვერდებზე, სიმეტრიის სიბრტყეების გვეგმილების გასწვრივ (წერტილები 4 5 და 6) და გ) სამკუთხედის შიგნით, წახნაგის ზოგადი განლაგების შემთხვევა (წერტილი 7).



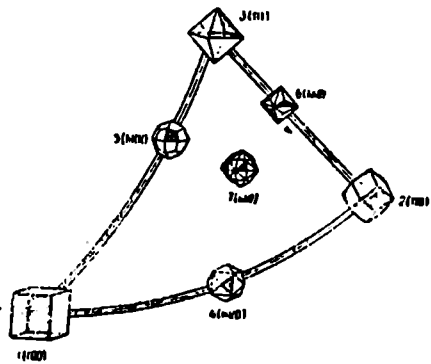
ნახ. III. 21. ნებისმიერი მარტივი ფორმის წახნაგის გზომოსტეოგრაფიული გვეგმილების განლაგების შეიძლება შესაძლებელი შემთხვევა.

წერტილი „მოდრაფია“, მაგრამ მიუხედავად ამისა, მათი ყოველი შესაძლებელი მდებარეობა (სამკუთხედის გვერდებსა და მის შიგნით) გამოსახავს ერთი და იმავე ტიპის მარტივ ფორმას.

- მავალითად, წერტილი 4 (ნახ. III. 21) მდებარეობს სამკუთხედის იმ გვერდზე, რომელიც ეკვატორული წოეხაზის ნაწილია და, მასადამე, მისი შესაბამისი მარტივი ფორმის ეს წახნაგი იქნება ვერტიკალური მიხართულების, სადაც არ უნდა იყოს მოთავსებული წერტილი 4 (1 და 2 წვეროებს შორის). შესაბამისი წახნაგი ყოველთვის ვერტიკალური მიხართულების იქნება და მისი ინდექსები ზოგადად შეიძლება გამოვსახოთ ($hklO$)-თი. სიმეტრიის მოცემული ელემენტების ერთობლიობის შესაბამისად ($9P, 3L_4, 4L_2, 6L_2$, ნახ. III. 20, ეს ფორმა იქნება ტეტრაჰედაკონი (ნახ. III. 22). შეიდიე შესაძლებელ მარტივ ფორმაზე დაშტრინებულია ის წახნაგი, რომლის გზომოსტერეოგრაფიული გეგმილი განლაგებულია აღებულ სფერული სამკუთხედის ფარგლებში. მოცემული თითო წახნაგის მიხედვით ყველა შესაძლებელი მარტივი ფორმის გასოყენა სიძეტრიის სხვადასხვა ხარისხის პირობებში უურო დაწერილებით განხილული იქნება IV თავში.

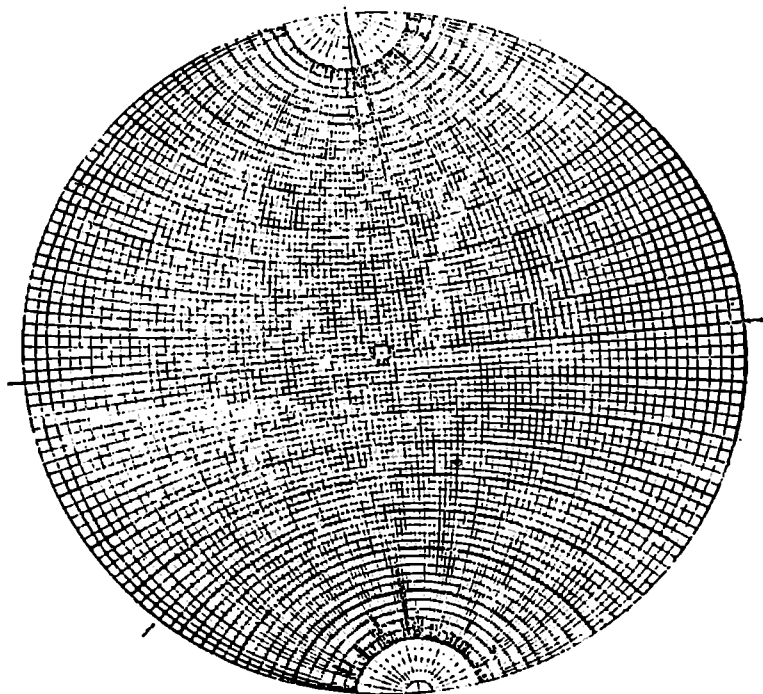
გონიომეტრებით კრისტალების გზომვით მიღებული შედეგების დამუშავებისათვის სარგებლობენ სტერეოგრაფიული ბადეებით, რომელთა შორის ყველაზე გავრცელებულია ე. წ. ვულფის ბადე (ნახ. III. 23). იგი შემოღებულია რუსი კრისტალოგრაფის გ. ვულფის მიერ 1897 წელს და სხვა ბადეების მსგავსად სფეროზე დატანილი მერიდიანებისა და პარალელების სტერეოგრაფიული გეკმილია, მაგრამ აგებულია განსხვავებული ხერხით.

ვულფის ბადის ასაგებად შემოვხაზოთ წრეხაზი 10 სმ რადიუსით და გაეატაროთ ორი ურთიერთხართობი დამეტრი AA_1 და BB_1 (ნახ. III. 24). დაეყოთ წრეხაზი 36 ტოლ ნაწალად, ე. ი. რკალის 10° -იან მორაკვეთებად. შემდეგ ყოველი მონაკვეთი დაეყოფა კიდევ ხუთ ნაწალად და მივიღებთ ბადის საბოლოო სახეს, სადაც ყოველი დანაყოფი 2° -ის ტოლია (ნახაზზე წრეხაზი დაყოფილია მიოლოდ 10°



ნახ. III. 72. წახნაგზე მოცემული შეიდი წერტილის შესაბამისი მარტივი ფორმები (დაშტრინებული წახნაგის გზომოსტერეოგრაფიული გეგმილი განლაგებულია აღებულ სფერულ სამკუთხედში).

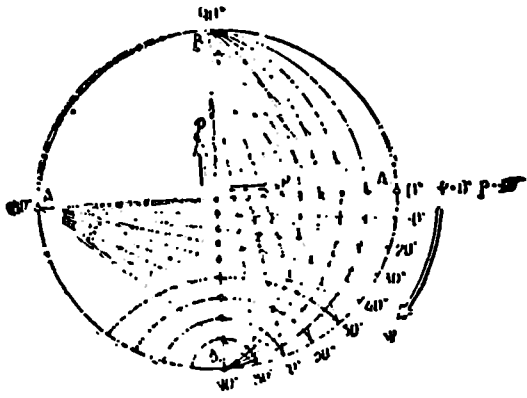
ინტერვალთ). მერიდიანების დასაგეგმილებლად ხედვის წერტილი შოვათავსოთ B წერტილში და დაეგეგმილოთ სათანადო დანაყოფები AA_1 დიამეტრზე (ნახაზის გამარტივებისათვის დატანილია ხოლოდ დანაყოფების მეოთხედი ნაწილი 0° -დან 90° -მდე), მივიღებთ წერტილთა რიგს, რომლებიც ერთმანეთისაგან არატოლი მანკილი იქნებიან დაცილებული. ყოველ წერტილზე უნდა გავატაროთ დიდი წრეხაზის რკალები B და B_1 პოლუსებზე გავლით (ნახაზზე გატარებულია მხოლოდ 4 ასეთი რკალი). პარალელების დასაგეგმილებლად გადავიტა-



ნახ. III. 23. გულფის ზადე.

ნოთ ხედვის წერტილი A წერტილში და წრეხაზის იგივე დანაყოფებში დაეგეგმილოთ ახლა BB_1 დიამეტრზე. მიღებულ წერტილებზე და წრეხაზზე მდებარე შესაბამის დანაყოფებზე, ე. ი. სამ წერტილზე უნდა გავატაროთ წრეხაზის რკალი, რომელიც იქნება სათანადო პარალელის სტერეოგრაფიული გეგმილი (ნახაზზე გატარებულია მხოლოდ 4 რკალი— 50° , 60° , 70° და 80° დანაყოფების შესაბამისი). ამ გზით მი-

ლებულ ბადეზე (ნახ. III. 23) ყოველი წერტილის მდებარეობა შეიძლება განისაზღვროს სფერული φ და ρ კოორდინატებით (φ კუთხის ანათვალაი აიღება წრებაზე, როგორც ხაჩვებებია III. 24 ნახაზე, ხოლო კუთხე ρ გაიზომება რადიუსების გასწვრივ). ვულფის ბადის უპიოატესობა სხვა სტერეოგრაფიულ ბადებთან შედარებით იმაში მდგომარეობს, რომ მისი საშუალებათ იზომება კუთხე ნები-სმიეწ მიმართულებათა შორის. შეიძლება დიდი წრებაის რკალის გატარება მოცემული მიმართულების სტრეოგრაფიულ გეგმილებზე და საერთოდ გაადვილდება კრისტალთა მორფოლოგიური და ოპტიკური თვისებების შესწავლასთან დაკავშირებული რიგი ამოცანების გრაფიკული ამოხსნა. ვულფის ბადეს, რომლის დიამეტრი 20 სმ-ია, ჩვეულებრივ, ხმარობენ როგორც ტრანსპარანტს. ამოცანების ამოხსნა ხდება გამჭვირვალე ქაღალდზე, რომელსაც აფარებენ ბადეს. იმისათვის, რომ ადვილად შეუთავსოთ გამჭვირვალე ნახაზი ბადეს შის საწყის ორიენტაციაში, საჭიროა ნახაზზე ბადის ცენტრის აღნიშვნასთან ერთად დავიტანოთ წრებაის 0° და 180° ანათვლები. ამ საკათხის დაწვრილებითი გაცნობა შესაძლებელია სპეციალური ლიტერატურით¹.



ნახ. III. 24. ვულფის ბადის აგების ხერხი.

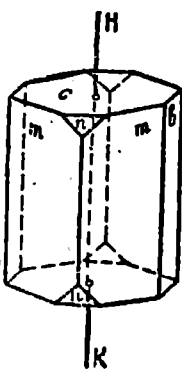
და ოპტიკური თვისებების შესწავლასთან დაკავშირებული რიგი ამოცანების გრაფიკული ამოხსნა. ვულფის ბადეს, რომლის დიამეტრი 20 სმ-ია, ჩვეულებრივ, ხმარობენ როგორც ტრანსპარანტს. ამოცანების ამოხსნა ხდება გამჭვირვალე ქაღალდზე, რომელსაც აფარებენ ბადეს. იმისათვის, რომ ადვილად შეუთავსოთ გამჭვირვალე ნახაზი ბადეს შის საწყის ორიენტაციაში, საჭიროა ნახაზზე ბადის ცენტრის აღნიშვნასთან ერთად დავიტანოთ წრებაის 0° და 180° ანათვლები. ამ საკათხის დაწვრილებითი გაცნობა შესაძლებელია სპეციალური ლიტერატურით¹.

§ III. 4. წახნაგთა წონეები

კრისტალზე იმ წახნაგთა ერთობლიობას, რომლებიც ერთმანეთს ურთიერთპარალელუ ი წიბოების გასწვრივ კვეთენ, ზონა (ანუ სარტყელი) ეწოდება. ასე, მაგალითად, III. 25 ნახაზე მოცემული კრისტალის m და b წახნაგები ერთმანეთს კვეთენ ვერტიკალური წიბოების

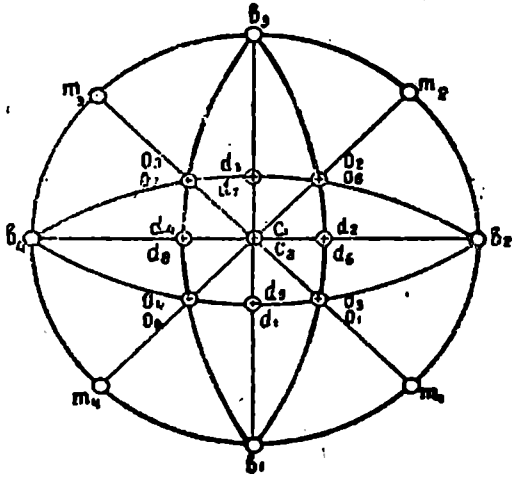
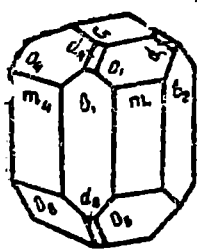
¹Г. В. ВУЛЬФ и А. В. ШУБН КОВ. Практический курс геометрической кристаллографии. Госиздат, 1924 Н. Е. РАЗУМОВСКИЙ—Стереорафические Проекции. Изд „Курс“ 1933 В. Е. ФЛИНГ—Циклическое руководство по геометрической кристаллографии, Госгеолназдат, 1928.

გასწვრივ და, მაშასადამე, ერთი ზონაა. კრისტალის ცენტრზე აღნიშნული წიბოების პარალელური გაკეცილი ძიპარტულეპას ზონის ღერძი ეწოდება, მაგალითად, HK მიმართულება (ნახ. III, 25). იმავე კრისტალზე ზონაა აგრეთვე c და b წახნაგების ერთობლიობა, რადგან ესენიც იკვეთებიან ურთიერთპარალელური წიბოების გასწვრივ.



ნახ. III. 25. კრისტალზე შეიძლება იყოს დამთავრებული (m mbm ...) და დამთავრებული (cmc ...) ზონები.

ზონა შეიძლება იყოს დამთავრებული, როცა მასში შეშავალი ყველა წახნაგი ურთიერთგადაშვევითაა. მაგალითად, ოთხი m და ორი b წახნაგებისაგან შემდგარი ზონა დამთავრებული ზონაა. იმ შემთხვევაში, როდესაც ზონაში შემავალი წახნაგებიდან რომელიმე აო იკვეთება (გადაიკვეთება მხოლოდ მათი გაგრძელების შედეგად), გვეჩვენება დაუმთავრებელი ზონა; მაგალითად, c და n წახნაგებისაგან შემდგარი ზონა, სადაც n წახნაგები ურთიერთგადაიკვეთება მხოლოდ მათი გაგრძელების შემთხვევაში. ამ ზონის ღერძის მიმართულება იქნება ჰორიზონტალური და გაივლის b წახნაგების ცენტრში.



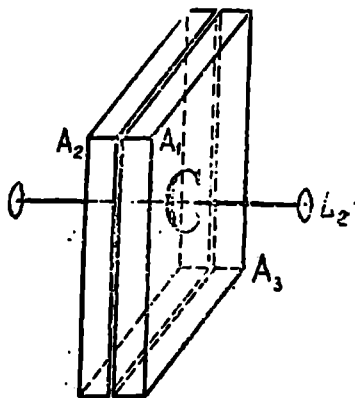
ნახ. III. 26. კრისტალის წახნაგების განლაგების მაგალი უბი ზონების მიხედვით, ა-ჰსონომეტრიული და ბ-სტერეოგრაფიული გვემჩვენება.

ერთ ზონაში შემაჯავალი წახნაგების გნომოსტერეოგრაფიული გეგმილები განლაგდება ერთ დიდ წრეხაზზე. როგორცაც მოცემული ზონის ლერძის მართობი სიბრტყის სტერეოგრაფიული გეგმილი შეესაბამება. ასე, მაგალითად, ვერტიკალური ნიშნითულების ლერძის მქონე ზონაში შემაჯავალი m და b წახნაგთა გნომოსტერეოგრაფიული გეგმილები განლაგდება ეკვატორულ წრეხაზზე (წერტილები $h_1, m_1, b_2, m_2, b_3, m_3, b_4$ და m_4 , ნახ. III. 26 ა და ბ). ყველა დანარჩენი ზონის წახნაგთა გეგმილები განლაგდება ან ვერტიკალურ (მაგ. გეგმილები $b_1, d_1, e_1 \dots$) ან დახრილ სიბრტყეზე (რკალი b_1, O_1, d_2, O_2 და ა. შ). მაშასადამე, ზონის სტერეოგრაფიული გეგმილი მისი ლერძის მართობი სიბრტყის სტერეოგრაფიული გეგმილია.

თავი IV სიმეტრიის კლასები და სინგონიები

§ IV. 1. სიმეტრიის ელემენტთა შიკრება

ყოველ კრისტალს ახასიათებს სიმეტრიის ელემენტთა გარკვეული ერთობლიობა. ელემენტთა ეს ერთობლიობა არ არის შემთხვევითი, იგი ემორჩილება გარკვეულ ყანონზომიერებებს. კრისტალს შეიძლება ჰქონდეს სიმეტრიის ერთი ან რამდენიმე ელემენტი, თუ კრისტალს ახასიათებს სიმეტრიის ორი ელემენტი, მასში უსათუოდ უნდა იყოს მესამე ელემენტიც, რომელიც ამ ორი ელემენტის მოქმედების ტოლფასი იქნება. მაშასადამე, კრისტალში მოცემული სიმეტრიის ორი ელემენტის თანამიმდევრული მოქმედებით მიღებულ გარდაქმნას მივიღებთ მხოლოდ ერთი, სიმეტრიის მესამე ელემენტის მოქმედებით. სიმეტრიის ასეთ შემაჯამებელ ელემენტს ტოლქმედ სიმეტრიის ელემენტს უწოდებენ. მაგალითისათვის ავიღოთ ისეთი პარალელებიპედი, რომელშიც ვერტიკალური მიმართულებით გაივლის სიმეტრიის სიბრტყე და რომელსაც აქვს ინვერსიის ცენტრი. (ნახ. IV. 1.) სიმეტრიის ამ ორი ელემენტის გარდა უსათუოდ უნდა იყოს მესამეც—სიმეტრიის მათი ტოლქმედი ელემენტი. ავიღოთ კრისტალის ზე-



ნახ. IV 1. L_1 სიმეტრიის სიბრტყისა და ინვერსიის ცენტრის მოქმედების ტოლქმედია.

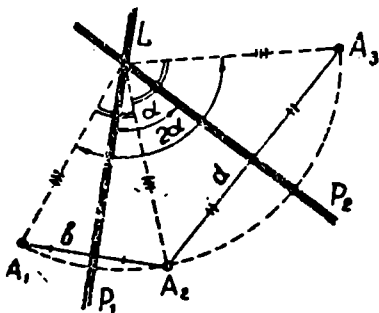
დაპირზე A_1 წერტილი. სიმეტრიის სიბრტყეში არეკვლის შედეგად იგი შეუთავსდება A_2 წერტილს. ხოლო ინვერსიის ცენტრის მოქმედებით ეს უკანასკნელი უნდა შეუთავსდეს A_3 წერტილს. მაშასადამე, ორი თანამძიმდევრული სიმეტრიული გარდაქმნის შედეგად A_1 წერტილი გადაადგილდა A_3 წერტილში. იგივე გადაადგილება განხორციელდება, თუ ამ კრისტალს შევოვებრუნებთ ჰორიზონტალური ლერძის გარშემო 180° ით. მაშასადამე, ამ მიმართულებით (სიმეტრიის სიბრტყის მართობულად) უნდა გადიოდეს მეორე რიგის სიმეტრიის ლერძი, რომლის მოქმედება მოცემული სიმეტრიის ორი ელემენტის მოქმედების ტოლფასია. სიმეტრიის ორი ელემენტის მიხედვით მესამის დადგენას სიმეტრიის ელემენტების შეკრებას უწოდებენ. მას დიდი მნიშვნელობა აქვს კრისტალზე სიმეტრიის ელემენტთა სრული ერთობლიობის დადგენისათვის. აღნიშნულიდან ცხადია, რომ კრისტალზე შეიძლება იყოს სიმეტრიის ან მხოლოდ ერთი, ან ორზე მეტი ელემენტი.

განვიხილოთ სიმეტრიის ელემენტთა შეკრების ის თეორემა, რომლებიც სამუალებას მოგვცემს დავადგინოთ კრისტალთა ყველა შესაძლებელ სიმეტრიის ელემენტთა ერთობლიობა.

თეორემა I. სიმეტრიის ორი სიბრტყის გადაკვეთის ხაზი არის სიმეტრიის ლერძი, რომლის ელემენტარული მობრუნების კუთხე ორჯერ მეტია, ვიდრე მოცემული სიმეტრიის სიბრტყეებს შორის კუთხე.

მოცემულია P_1 და P_2 სიმეტრიის სიბრტყეები, რომლებიც უ-

თიერთიკვეთებიან α კუთხით. გამოვხაზოთ ეს სიბრტყეები ისე, რომ მათი გადაკვეთის ხაზი ნახაზის სიბრტყის მართობი იყოს (ნახ. IV.2). დასამტკიცებელია, რომ L წერტილში გაივლის სიმეტრიის ლერძი, რომლის ელემენტარული მობრუნების კუთხე იქნება 2α და, მაშასადამე, იქნება ამ ორი სიბრტყის სიმეტრიის ტოლქმედი ელემენტი. ავიღოთ ნების-

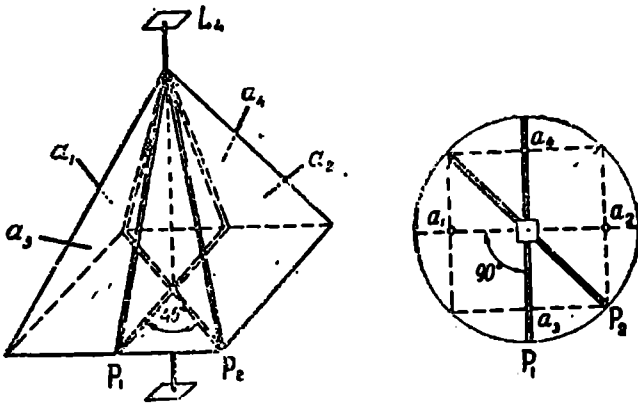


IV. 2. სიმეტრიის ორი სიბრტყის გადაკვეთის ხაზი სიმეტრიის ლერძია.

შეირი A_1 წერტილი და ავრეკლოთ იგი P_1 სიბრტყეში. ამისათვის A_1 წერტილიდან უნდა დავუშვათ P_1 სიბრტყეზე A_1b მართობი და გავეაგრძელოთ იგი ტოლი მანძილით ($A_1b = bA_2$). ამრიგად, A_2 წერტილი გადაადგილდება A_2 -ში. იმავე გზით P_2 სიბრტყის მოქმედებით A_2 გადაადგილდება A_3 -ში, ე. ი. $A_2d = dA_3$. იგივე გადაადგი-

ღება A_1 წერტილისა A_1 -ში შეიქმნება მივიღოთ A_1 წერტილის მობრუნებით L ღერძის გაზრეპო $A_1 L A_2$ კუთხით. დავამტყიცოთ, რომ ეს კუთხე უდრის 2α -ს.

მართკუთხა სამკუთხედში $A_1 b L = A_2 b L$, ხოლო $A_2 d L = A_3 d L$. ამიტომ წახნაგი $A_1 L = A_3 L$ და $\angle A_1 L A_2 = \angle A_1 L B + \angle B L A_2 + \angle A_2 L d + \angle d L A_3 = 2\alpha$ მაგალითისათვის ავიღოთ კვადრატული ფუძის მქონე პირამიდა (ნახ. IV. 3) და ვაუტაროთ სიმეტრიის ორი ვერტიკალური სიბრტყე P_1 და P_2 . მათ შო.ოის კუთხე $\alpha = 45^\circ$, ხოლო ვერტიკალური მიმართულებით გადაკვეთის ხაზი, განხილული თეოეემის თანახმად, უნდა იყოს მეოთხე რიგის სიხეტრუის ღერძი, რომლის ელემენტარული მობოუნების კუთხე $2\alpha = 90^\circ$. მართლაც, a_1 წახნაგი P_1 სიბრტყეში არაკველით გადაადგილდება a_2 მდგომარეობაში, ხოლო P_2 სიბრტყის მოქმედებით — a_3 მდგომარეობაში. ამ ორ სიბრტყეში არკველის მაკიერ შემოვადბრუნოთ პიოამიდა ვერტიკალური ღერძის გარშეკო 90° -ით, როგორც ეს ნახვენებია IV. 3 ბ ნახაზზე, a_1 წახნაგი შეუთავსდება a_3 -ს.



ნახ. IV 3. L_4 ტოლქმედი P_1 და P_2 სიბრტყეების მოქმედებისა. ა-აქსონომეტრიული და ბ-სტერეოგრაფიული ვეგმილებია.

გ. ი. L_4 ღერძი ტოლქმედია სიმეტრიის ორი სიბრტყისა.

არსებობს აღნიშნული თეოეემის შებოუჩებული თეოეემაც:

თუ სიმეტრიის ღერძზე გადის სიმეტრიის სიბრტყე, მაშინ ამ ღერძზე უნდა გადიოდეს მეორე სიბრტყეც, რომელიც პირველ სიბრტყესთან წარმოქმნის ორჯერ უფრო მკიარე კუთხეს, ვიდრე მოცემული ღერძის ელემენტარული მობრუნების კუთხეა. აღვიღო

დასადგენია, რომ სიმეტრიის მეორე სიბრტყე სიმეტრიის საწყისი ღერძის და სიბრტყის მოქმედების ტოლქმედია.

განხილული თეორემიდან გამოგვეყავს შემდეგი დებულება:

თუ კრისტალზე არის სიმეტრიის ღერძი, რომელზედაც გაივლის სიმეტრიის ერთი სიბრტყე მაინც, მაშინ ამ ღერძზე გაივლის სხვა სიბრტყეც, რომელთა საერთო რიცხვი ტოლია სიმეტრიის ღერძის რიგისა. ამ დებულების დასამტკიცებლად ავიღოთ L_n სიმეტრიის ღერძი,

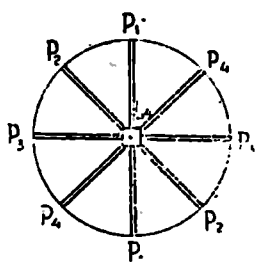
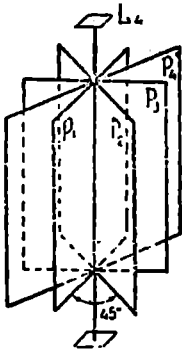
რომლის ელემენტარული მობრუნების კუთხე $\alpha = \frac{360^\circ}{n}$, ხოლო რი-

გი $n = \frac{360^\circ}{\alpha}$. თუ ამ ღერძზე გაივლის P_1 სიმეტრიის სიბრტყეც, რომელიც

ქმნის P_2 -თან $\frac{\alpha}{2}$ კუთხეს, P_2 -ს უნდა მოსდევდეს P_3 სიბრტყე,

რომლებიც ერთმანეთთან იმავე $\frac{\alpha}{2}$ კუთხეს ქმნიან და ა. შ. მაგრამ,

როგორც IV. 4 ნახაზიდან ჩანს, სიმეტრიის ღერძზე გავლილი ყოვე-



ნახ. IV. 4. L_4 ღერძზე გაივლის ოთხი სიმეტრიის სიბრტყე.

ლი სიბრტყე მეორდება 180° -ის შემდეგ, ე. ი. შესაძლებელი სიბრტყეების რაოდენობა იქნება $\frac{180^\circ}{\alpha/2} =$

$$= \frac{360^\circ}{\alpha} = n. \text{ მაშასადამე, შესაძლებელი სიბრტყეების რაოდენობა სიმეტრიის ღერძის რიგს უდრის.}$$

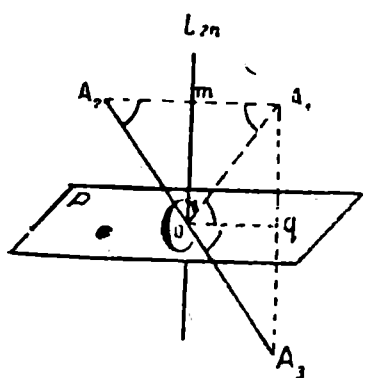
თეორემა II. თუ გვაქვს ერთ-ერთ რაოდენობა სიმეტრიის ღერძი (L_n) და ინვერსიის ცენტრი (C), მაშინ აუცილებლად უნდა არსებობდეს სიმეტრიის სიბრტყეც, რომელიც მოცემული ღერძის მართობულად გაივლის.

მოცემულია სიმეტრიის ლუწი რიგის L_n ღერძი (სადაც n მთელი რიცხვია) და ინვერსიის ცენტრი (ნახ. IV. 5). ნებისმიერი A_1 წერტილი 180° -ით მობრუნების შედეგად გადაადგილდება A_2 წერტილში (ელემენტარული მობრუნების კუთხე წყვილი რიგის სიმეტრიის).

მოცემულია სიმეტრიის ლუწი რიგის L_n ღერძი (სადაც n მთელი რიცხვია) და ინვერსიის ცენტრი (ნახ. IV. 5). ნებისმიერი A_1 წერტილი 180° -ით მობრუნების შედეგად გადაადგილდება A_2 წერტილში (ელემენტარული მობრუნების კუთხე წყვილი რიგის სიმეტრიის).

ღერძისა 180° -ის ჯერადია, $\alpha = \frac{360^\circ}{2n} = \frac{180^\circ}{n}$), ხოლო ინვერსიის ცენ-

ტრის მოქმედებით A_2 გადაადგილება A_1 მდგომარეობაში. დასამტკიცებელია, რომ იგივე გადაადგილება (A_1 -დან A_2 -ში) შესაძლებელია, თუ A_1 წერტილს ავრეკლავთ P სიბრტყეში, რომელიც გაივლის L_{2n} ღერძის მართობულად O წერტილში. $\triangle A_1Om = \triangle OA_2m$, რადგან



$A_1m = A_2m$ (აგებით) და Om საერთო გვერდია, ხოლო მათ შორის კუთხე $\angle A_1mO = \angle A_2mO = 90^\circ$ (აგებით). მაშასადამე, $\angle OA_1m = \angle OA_2m$ და $OA_1 = OA_2$. ახლა განვიხილოთ $\triangle OA_1q$ და $\triangle OA_2q$. გვერდი $OA_1 = OA_2$ (აგებით), გვერდი Oq საერთოა. $Oq \parallel A_1A_2$ რადგან ისინი სიმეტრიის ღერძის მართობებია. $\angle A_1Oq = \angle OA_1m$, როგორც ჯვარედინად მდებარე კუთხეები, ხოლო $\angle A_2Oq = \angle OA_2m$, როგორც მიმდებარე კუთხეები, რადგან $\angle OA_1m = \angle OA_2m$, ამიტომ $\angle A_1Oq = \angle A_2Oq$. მაშასადამე, $\triangle OA_1q = \triangle OA_2q$ (ორი გვერდისა და მათ შორის მდებარე კუთხეების ტოლობის

ნახ. IV. 5. ლუწი რიგის სიმეტრიის ღერძისა და ინვერსიის ცენტრის მოქმედების ტოლქმედის გამოყვანა.

გამო). აქედან კი $A_1q = A_2q$ და კუთხეები $OqA_1 = OqA_2 = 90^\circ$. მაშასადამე, L_{2n} ღერძის მართობი P სიბრტყე სიმეტრიის სიბრტყეა.

ამ თეორემის შებრუნებული თეორემა: თუ კრისტალს აქვს ინვერსიის ცენტრი და სიმეტრიის სიბრტყე, მაშინ ამ კრისტალში უნდა გადიოდეს სიმეტრიის სიბრტყის მართობულად სიმეტრიის ლუწი რიგის ღერძიც. ამ დებულების შემოწმება შესაძლებელია სხვადასხვა კრისტალებზე, მაგალითად, IV. I. ნახაზზე მოცემულ კრისტალზე ან კვადრატული კვეთის მქონე პრიზმაზე და სხვ.

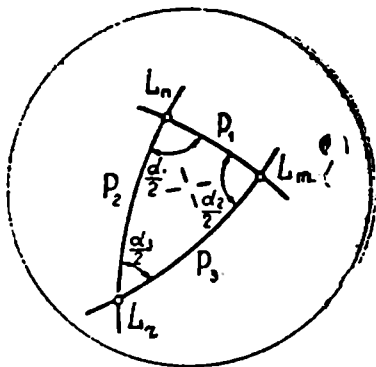
დიდი პრაქტიკული მნიშვნელობა აქვს მეორე თეორემიდან გამომდინარე შედეგს, რომელიც შეიძლება ასე ჩამოვაყალიბოთ:

თუ კრისტალზე არის ინვერსიის ცენტრი და სიმეტრიის ლუწი რიგის ღერძები, მაშინ ასეთ კრისტალში გაივლის სიმეტრიის იმდენი სიბრტყე, რამდენიცაა სიმეტრიის ღერძის რიგი.

მაგალითისათვის ავიღოთ ასანთის კოლოფის მსგავსი კრისტალი

(ნახ. II. 26 ა), რომელსაც აქვს $3L_2$, C და $3P$. კუბში, რომელშიც იარის ინვერსიის ცენტრი და გაივლის $3L_4$, $4L_2$ და $6L_2$, გაივლის სიმეტრიის 9 სიბრტყე, რადგან სიმეტრიის წყვილი რიგის ღერძების ჩაოდნობა 9-ის ტოლია (ნახ. II. 4 და II. 6).

თეორემა III. (ელიერის თეორემა) თუ მრავალწახნაგებს აქვს სიმეტრიის ორი ურთიერთგადაამკვეთი ღერძი მაშინ მას აუცილებლად უნდა ჰქონდეს მესამე, მათი ტოლქმედი სიმეტრიის ღერძი, რომელიც გაივლის მოცემული ღერძების გადაკვეთის წერტილზე.



ნახ. IV. 6. ელიერის თეორემა. L_2 ტოლქმედია L_1 და L_3 ღერძების მოქმედებისა.

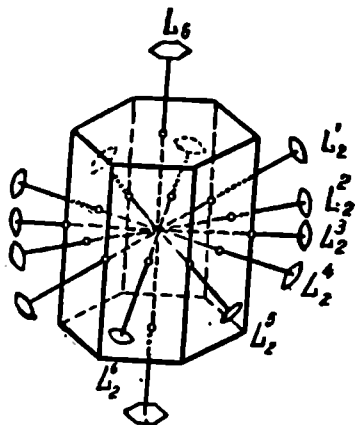
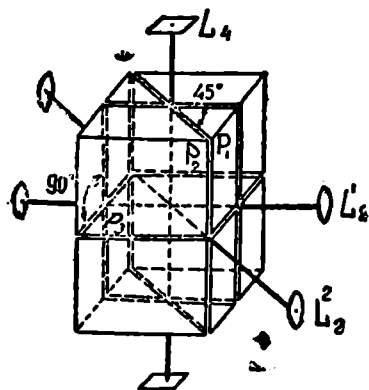
შემდეგ L_3 -ზე მეორე სიბრტყე (P_2), რომელიც P_1 -თან ქმნის $\alpha/2$ კუთხეს, მაშინ L_2 ღერძის მოქმედება შეიძლება შევცვალოთ P_1 და P_2 სიმეტრიის სიბრტყეების მოქმედებით.

L_2 ღერძის მოქმედება შევცვალოთ P_1 და P_2 სიბრტყეების მოქმედებით, რომელთა შორის კუთხე ტოლია $\alpha/2$; რადგან P_1 სიბრტყეში არეკლა ორჯერ ხდება, ეს იმას ნიშნავს, რომ მისი მოქმედება მხედველობაში არ არის მისაღები და, მაშასადამე, L_2 და L_3 ღერძების მოქმედება შეიძლება შეიცვალოს P_1 და P_2 სიბრტყეების მოქმედებით. ეს ორი სიბრტყე კი იკვეთება L_1 ღერძის გასწვრივ და ქმნის $\alpha/2$ კუთხეს (ნახ. IV. 6). პირველი თეორემის თანახმად სიმეტრიის ამ ორი სიბრტყის გადაკვეთის ხაზი იქნება სიმეტრიის L_1 ღერძი ელემენტარული ბუნვის α კუთხით, მაშასადამე, L_1 ტოლქმედია L_2 და L_3 ღერძების მოქმედებისა და ვადის მათი გადაკვეთის წერტილზე.

მაგალითისათვის ავიღოთ კვადრატული კუბის მქონე პრიზმა (ნახ. IV. 7) ვერტიკალური მიმართულებით აქ გაივლის მეოთხე რიგის სიმეტრიის ღერძი (L_1) და მის მართობულად მეორე რიგის ღერძი (L_2);

ამისათვის, რომ ვიპოვოთ მესამე ღერძი (მათი ტოლქმედი), მოცემულ ღერძებზე გავატაროთ P_1 სიბრტყე, შემდეგ L_4 -ზე ამ სიბრტყის მიმართ 45° -ით დახრილი მეორე სიბრტყე (P_2) რადგან L_4 ღერძის ელემენტარული მობრუნების კუთხე 90° -ია. შემდეგ უნდა გავატაროთ მესამე სიბრტყე (P_3), რომელიც გაივლის L'_1 ღერძზე და P_1 სიბრტყესთან წარმოქმნის 90° -იან კუთხეს. P_2 და P_3 სიბრტყეების გადაკვეთის ხაზი იქნება საძიებელი ტოლქმედი, — მესამე ღერძი L'_2 , რომელიც L'_1 ღერძთან ქმნის 45° -იან კუთხეს.

ამასთან დაკავშირებით შეიძლება მესამე თეორემის შებრუ-



ნახ. IV. 7. L_2^3 ტოლქმედი L_4 და L'_1 ღერძების მოქმედებისა.

ნახ. IV. 8. L_6 ღერძის მართობულად გაივლის $6L_2$.

ნებული თეორემა ჩამოვაყალიბოთ ასე: თუ კრისტალში გადის მეორე რიგის სიმეტრიის ორი ღერძი, რომელთა შორის არის α კუთხე, მაშინ მათი გადაკვეთის წერტილზე და მათ ღართობულად გაივლის n რიგის მესამე ღერძი ($4L_n$). რომლის ელემენტარული მობრუნების კუთხე იქნება 2α (ღა მასასადამე, რიგი იქნება $n = \frac{360^\circ}{2\alpha} = \frac{180^\circ}{\alpha}$). მოქმედება რომ გაგვეგრძელებინა L_4 და ახლად

მიღებული L_2^3 ღერძების მიმართ ტოლქმედი ღერძის მიმართულებით (ნახ. IV. 7), მივიღებდით კიდევ სიმეტრიის ორ ახალ L_2 ღერძს, ე. ი. სულ $4L_2$, რადგან დანარჩენი ახალი L_2 ღერძები გაიმეორებენ უკვე მიღებულ ღერძებს.

აღნიშნულის საფუძველზე შეიძლება ეილერის თეორემიდან გამო-

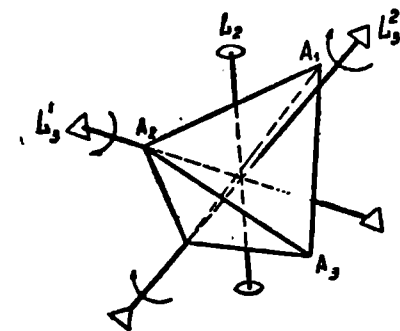
ვიტანოთ მეტად მნიშვნელოვანი დასკვნა: თუ კრისტალში გადის L_2 სიმეტრიის ღერძი და არსებობს მისი მართობი L_3 ღერძი, მაშინ უნდა არსებობდეს იმდენი L_1 რომელი რიგისაცაა მოცემული ღერძი (L_2 -ის მართობულად გაივლის L_3).

მაგალითისათვის ავიღოთ ჰექსაგონური პრიზმა (ნახ. IV. 8), სადაც ვერტიკალური მიმართულებით გადის L_3 , ხოლო მის მართობულად — $6L_2$ (იხილეთ ნახ. II. 5, სადაც L_2 -ის მართობულად გაივლის $2L_1$, L_2 -ის მართობულად $3L_3$ და ა. შ.)

ეილერის თეორემის მიხედვით დადგენილია, რომ კრისტალებში ერთნაირი რიგის სიმეტრიის ღერძებს შორის კუთხე შეიძლება იყოს მხოლოდ შემდეგი მნიშვნელობისა:

მეორე რიგის ღერძებს შორის	—60°, 90°, 120°, 180°,
მესამე " " "	—70°31'44'', 180°
მეოთხე " " "	90°, 180°
მეექვსე " " "	180°

ღერძებს შორის 180°-იანი კუთხის არსებობა ნიშნავს ორი პოლარული ღერძის შეთავსებას, ე. ი. ბიპოლარული ღერძების არსებობას.



ნახ. IV. 9. წესიერ ტეტრაედრში L_2 ღერძი ტოლქმედი ორი L_3 ღერძის შოკმელებისა.

08'' (ნახ. IV. 13). კრისტალებში შეუძლებელია ერთდროულად არა მარტო $2L_3$ არსებობა, არამედ, L_3 და L_4 ან L_3 და L_4 .

წესიერ ტეტრაედრში, სიმეტრიის ორი მესამე რიგის ღერძის ტოლქმედი არის L_3 (ნახ. IV. 9). L_3 ღერძებს შორის კუთხე უდრის 70° 31' 44'', ხოლო L_3 და L_2 შორის კუთხე ტოლია 50° 44' 08'',

სუფ ასეთ ტეტრაედრში გაივლის $4L_2$ და $3L_3$.

სიმეტრიის ელემენტების შეჯამების განხილული თეორემები და

მათი შედეგები გვიჩვენებს, რომ კრისტალებში ამ ელემენტების ერთობლიობა გარკვეულ კანონზომიერებებს ემორჩილება. ეს თეორემები საშუალებას გვაძლევს დავადგინოთ სიმეტრიის ელემენტთა ყველა შესაძლებელ ერთობლიობათა რიცხვი.

§ IV. (2) კრისტალთა სიმეტრიის კლასები

ბუნებაში არსებული კრისტალები მათთვის დამახასიათებელი სიმეტრიის სახის მიხედვით იყოფა სიმეტრიის კლასებად.

კრისტალური მრავალწახნაგას სიმეტრიის სახე არის მასში არსებულ სიმეტრიის ელემენტთა სრული ერთობლიობა. ასე, მაგალითად, კრისტალში მხოლოდ მეოთხე რიგის სიმეტრიის ღერძისა (L_4) და ინვერსიის ცენტრის (C) არსებობა არ გამოსახავს მისი სიმეტრიის სახეს, რადგან მეორე თეორემის თანახმად უნდა აოსებობდეს კიდევ სიმეტრიის სიბრტყე (P), რომელიც გაივლის სიმეტრიის ღერძის მართობულად (როგორც არსებული სიმეტრიის ელემენტების ტოლქმედი). მაშასადამე, აღებული კრისტალის სიმეტრიის სახეც იქნება L_4CP .

სიმეტრიის კლასი არის იმ კრისტალების ერთობლიობა, რომლებსაც ერთნაირი სიმეტრიის სახე აქვთ.

ყველა კლასს აქვს დასახელება და სიმეტრიის დამახასიათებელი ფორმულა. ცხადია, რომ სიმეტრიის კლასთა რაოდენობა იმდენივე იქნება, სიმეტრიის რამდენი სახის არსებობაცაა შესაძლებელი. როგორც უკვე აღვნიშნეთ, კრისტალოგრაფიაში დასაულებელი ფიგურებისათვის არსებობს სიმეტრიის 32 სახე. პირველად ეს რიცხვი დადგენილ იქნა 1830 წელს ფ. გესელის მიერ. ხოლო შექმდე სიმეტრიის 32 სახე დადგენილ იქნა სხვადასხვა ავტორის მიერ უკურო მარტივი ხერხით. ზოგიერთი გამარტივებით გავეცნოთ სიმეტრიის სახეების გამოყვანის იმ გზას, რომელიც მოგვცა ა. გადოლინმა 1867 წელს გესელის კვლევებისაგან დამოუკიდებლად.

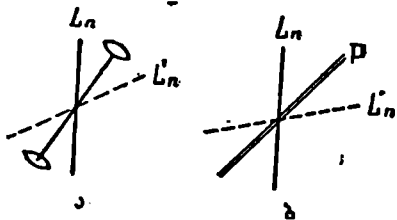
ყველა სასრულო მრავალწახნაგა შეიძლება გავყოთ ორ ჯგუფად: პირველ A ჯგუფში მოვათავსოთ ისეთი მრავალწახნაგები, რომელთა სიმეტრიის ელემენტთა შორის ან არ არის სიმეტრიის ღერძი მეორე რიგზე უკურო მაღალი რიგისა, ან თუ არის, მათი რაოდენობა არ უნდა იყოს ერთზე მეტი. მეორე B ჯგუფში კი ისეთი კრისტალები იქნება, რომლებსაც აქვთ რამდენიმე სიმეტრიის ღერძი L_n , სადაც $n > 2$.

პირველი ჯგუფის კრისტალებს აქვს ისეთი მიმართულება, რომელიც აო მეორდება, ე. წ. ერთადერთი მიმართულება. მაგა-

ლითად, ჰექსაგონურ პრიზმაში (ნახ. IV.8) ვერტიკალური მიმართულების ღერძი (რომელიც ემთხვევა L_6) ერთადერთი მიმართულებაა, მაშინ როდესაც ყველა დანარჩენი მიმართულება (პორიზონტალური ან დახრილი) კრისტალში მეორდება ექვს-ექვსჯერ და ე. წ. სიმეტრიულად ტოლი მიმართულებებია.

ტეტრაგონურ პირამიდაში (ნახ IV. 3) ერთადერთი მიმართულება L_4 ღერძის მიმართულებაა. ყველა დანარჩენი მიმართულება კი განმეორდება ან ოთხჯერ (თუ იგი დევს სიმეტრიის სიბრტყეში), ან რვაჯერ (თუ მიმართულება სიბრტყეებს შორის გაივლის).

კუბში არც ერთი მიმართულება არაა განუმეორებელი (ნახ. II.



ნახ. IV. 10. სიმეტრიის დახრილი ღერძი (ა) ან სიბრტყე (ბ) იწვევს ერთადერთი მიმართულების (L_n -ის) გამეორებას (L'_n).

მიმართულების გამეორებას (ნახ. IV. 10). კრისტალში ერთადერთი მიმართულება არსებებს მხოლოდ იმ შემთხვევაში, თუ ამ მიმართულების მართობულად არსებობს მეორე რიგის სიმეტრიის ღერძი (ან ღერძები) (ნახ. IV. 11 ა) ან სიმეტრიის სიბრტყე (ნახ. IV. 11 ბ). მოცემული მიმართულების გამეორებას არ იწვევს აგრეთვე მასზე გამავალი სიმეტრიის სიბრტყე (ან სიბრტყეები) და არც ინვერსიის ცენტრის არსებობა (ნახ. IV. 11 გ და დ).

მაშასადამე, აღნიშნული სიმეტრიის ელემენტების დამატება (ცალ-ცალკე ან ერთად) მოცემული რაიმე საწყისი მიმართულებისათვის, როგორც ერთადერთი მიმართულებებისათვის, დასაშვებია.

აღსანიშნავია, რომ რაც უფრო დაბალია კრისტალის სიმეტრიის სახე (ხარისხი), მით უფრო მეტია ერთადერთ მიმართულებათა რიცხვი.

B ჯგუფის კრისტალებში 'ერთადერთი' მიმართულებები არ არსებობს.

გამოვიყვანოთ სიმეტრიის შესაძლებელი სახეები A და B ჯგუფის კრისტალებისათვის ცალ-ცალკე.

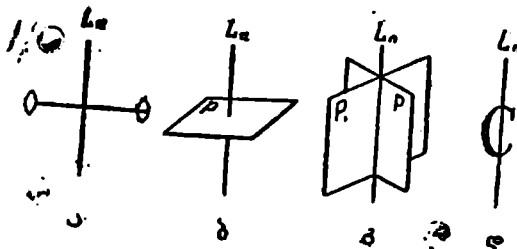
A ჯგუფის კრისტალების სიმეტრიის სახეების გამოყვანა. ამ ჯგუფ-

4. ჩაჯვარების კრიტერიუმების სიმეტრიის სახეები

№ ჩიგუე	სიმეტრიული წიგნდებანი	სიმეტრიის გლენუბების ერთობლობა					
		n=1	n=2	n=3	n=4	n=6	
1.	საწყისია სიმეტრიის ღერძი (L_1)	L_1	L_2	L_3	L_4	L_6	
2.	ემატება ანვერსის ცენტრი (O)	O	L_1CP	L_1O	L_1CP	L_1CP	
3.	ემატება ღერძზე გამავალი სიბრტყე ($\perp P$)	P	L_1^2P	L_1^3P	L_1^4P	L_1^6P	
4.	ემატება ღერძის მართობი სიბრტყე ($\perp P$)	P	L_1PC^*	L_1P^*	L_1PC^*	L_1PC^*	
5.	ემატება ღერძის მართობი L_1 ($\perp L_1$)	L_1^*	$\perp L_1$	$L_1^3L_1$	$L_1^4L_1$	$L_1^6L_1$	
6.	ერთობლოვლად ემატება $\parallel P$ და $\perp L_1$	L_1PC^*	$\perp L_1^3PO$	$L_1^3L_1^3PC$	$L_1^4L_1^5PC$	$L_1^6L_1^7PC$	
7.	საწყისია ანვერსის ღერძი (G_1)	$G_1=C^*$	$G_1^2=P^*$	$G_1^3=L_1C^*$	G_1^4	$G_1^6=L_1^2P$	
8.	ემატება ($\parallel P \perp L_1$)	-	-	-	$G_1^3L_1^2P$	$L_1^3L_1^4P$	

ვარსკვლავით აღნიშნულია სიმეტრიის ის სახეები, რომელიც მეორადია.

ფში შემავალ პრავალწახნაგებს მეორე რიგზე შალალი რიგის სიმეტრიის ღერძი არ უნდა ჰქონდეს ერთზე მეტი. ამიტომ ამ კრისტალებს სულ ცოტა ერთი მაინც უნდა ჰქონდეს ერთადერთი 'მიმართულება'. ასეთ საწყის მიმართულებად შეიძლება მივიჩნიოთ სხვადასხვა რიგის ან სიმეტრიის, ან ინვერსიის ღერძები და შემდეგ ყველა შესაძლებელი სიმეტრიის სახის დასადგენად ცალ-ცალკე უნდა მივეუმატოთ მათ ზემოთ განხილული დასაშვები სიმეტრიის ელემენტები, რომელთა არსებობაც არ მოსპობს ერთადერთ მიმართულებებს (ნახ. IV. 11). დასასრულს, უნდა დავუშვათ დამატებულ სიმეტრიის ელემენტთა ერთ-



ნახ. IV. 11. ერთადერთი მიმართულება (L_m) არ განწეობდება, თუ არსებობს $L_n \perp L_2$ (ა), $L_n \perp P$ (ბ) $L_n \parallel P$ (გ) და ინვერსიის ცენტრი.

დროული არსებობაც. საწყის მიმართულებად ჯერ სიმეტრიის ღერძები განვიხილოთ.

1) კრისტალებში, რომლებსაც აქვს მხოლოდ სიმეტრიის თითო ღერძი L_n (სადაც n შეიძლება იყოს 1, 2, 3, 4 და 6), სიმეტრიის საწყისი ელემენტის მქონე სიმეტ-

რიის პირველი ხუთი სახე იქნება L_1 , L_2 , L_3 , L_4 და L_6 სიმეტრიის ღერძის მქონე კრისტალები (იხილეთ ტაბულა IV. 1. პირველი სტრიქონი).

2) მივეუმატოთ აღებულ საწყის მიმართულებას ინვერსიის ცენტრი, მივღებთ სიმეტრიის კიდევ ხუთ ახალ სახეს. მაგრამ მეორე თეორემის თანახმად იმ კრისტალებში, სადაც ლუწი რიგის სიმეტრიის ღერძი გვაქვს და ვუმატებთ ინვერსიის ცენტრს, აუცილებლად უნდა არსებობდეს ღერძის მართობი მიმართულების სიმეტრიის სიბრტყეც; მაშასადამე, მივიღებთ კიდევ სიმეტრიის ხუთ ახალ სახეს: C , L_2CP , L_2C , L_4CP და L_6CP (იხ. ტაბულა IV. I, მეორე სტრიქონი). მესამე სვეტის მეორე სტრიქონში სიმეტრიის სახე წარმოდგენილია მხოლოდ სიმეტრიის ორი (L_2 და C) ელემენტით. ასეთ შემთხვევაში ჩვენ ვიცით, რომ უნდა არსებობდეს სიმეტრიის მესამე ელემენტიც — მათი ტოლქმედი. მართლაც, აქ არის კიდევ მესამე რიგის ინვერსიის ღერძი (G_2), რომელიც ემთხვევა L_2 ღერძს.

3) დავუმატოთ საწყის მიმართულებას მასზე გამავალი სიმეტრიის სიბრტყე. პირველი თეორემის შედეგის თანახმად, სიმეტრიის ყოველ ღერძზე გაივლის იმდენი სიმეტრიის სიბრტყე, რომელი რიგისაც

არის ლერძი. მაშასადამე, მივიღებთ სიმეტრიის კიდევ ხუთ ახალ სახეს: P_2L_22P , L_23P , L_44P , და L_66P (ტაბულა IV. I, შესამე სტრიქონი).

4) დავეუმატოთ საწყის მიმართულებას სიმეტრიის სიბრტყე ლერძის მართობი მიმართულებით. ამ მოქმედების შედეგად მიღებული სიმეტრიის ხუთი სახე იმეორებს უკვე მიღებულ სახეებს. რადგან ლუწი რიგის სიმეტრიის ლერძისა და მისი მართობი სიმეტრიის სიბრტყის ერთობლიობა განაპირობებს ინვერსიის ცენტრის არსებობასაც, რაც უკვე განვიხილეთ ინვერსიის ცენტრის დამატების შედეგად, ხოლო კენტი რიგის L_2 ლერძები მოგვცემს მხოლოდ P -ს არსებობას, რაც უკვე განვიხილეთ $n=1$ სვეტის შესამე სტრიქონში (იხ. ტაბულა IV. 1), L_2 ლერძი კი მოგვცემს სიმეტრიის L_2P სახეს, რომელიც როგორც უკვე ვიცით, იგივეა, რაც ინვერსიის ლერძი მეექვსე რიგისა (G_6); ამიტომ სიმეტრიის ამ სახეს განვიხილავთ ქვემოთ, როდესაც საწყის ელემენტებად მივიჩნევთ ინვერსიის ლერძებს (იხ. $n=6$ სვეტის მეშვიდე სტრიქონი). როგორც ვხედავთ, მართობი სიბრტყის დამატება შეიძლება არ მივიღოთ მხედველობაში.

5) საწყისი მიმართულების მართობულად დავეუმატოთ მეორე რიგის სიმეტრიის ლერძი, ვიღერის თეორემის შედეგის თანახმად. ასეთი ლერძი იქნება იმდენი, რამდენი რიგისაც გვექნება სიმეტრიის ლერძი. მივიღებთ კიდევ სიმეტრიის ხუთ სახეს: L_2 , $L_2+2L_2=3L_2$, L_23L_2 , L_4 , $4L_2$ და L_6 $6L_2$, სადაც L_2 იმეორებს ადრე მიღებულ სიმეტრიის სახეს ($n=1$ სვეტის I სტრიქონი), დანარჩენი ოთხი სახე კი ახალია.

6) ახლა განვიხილოთ სიმეტრიის შესაქლებელი სახეები, რომლებიც წარმოიქმნება ლერძზე გამავალი სიბრტყისა და მართობი L_2 ლერძის ერთდროული დამატებით, ამ მოქმედების შედეგად მივიღებთ კიდევ სიმეტრიის ხუთ სახეს: L_2PC , $3L_2PC$, L_23L_23PC , L_44L_25PC და L_66L_27PC , სადაც პირველი სახე იმეორებს IV. 1 ტაბულის $n=2$ სვეტის მეორე სტრიქონში აღნიშნული სიმეტრიის ელემენტთა ერთობლიობას და, მაშასადამე, მივიღებთ სიმეტრიის მხოლოდ ოთხ ახალ სახეს.

განვიხილოთ საწყისი მიმართულების სახით ინვერსიის ლერძები: G_{i_1} , G_{i_2} , G_{i_3} , G_{i_4} და G_{i_6} .

7) კრისტალები, რომლებსაც საწყის მიმართულებად ექნებათ მხოლოდ აღნიშნული ინვერსიის ლერძები, მოგვცემენ კიდევ სიმეტრიის ხუთ სახეს, მაგრამ როგორც უკვე ვიცით, ყველა ეს ლერძი, გარდა G_{i_4} , შეიძლება შეიხვედროს სიმეტრიის სხვა ელემენტებთან.

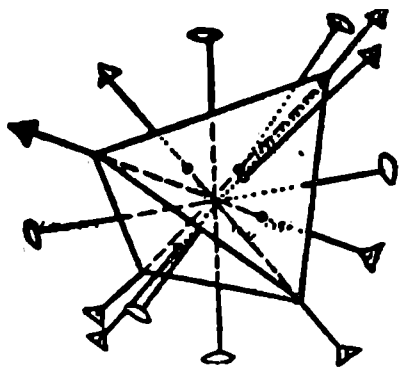
ასე, მაგალითად, $G_{i_1} = C$, $G_{i_2} = P$, $G_{i_3} = L_2C$ და $G_{i_6} = L_2P$. აქედან პირველი სამი სიუეტრიის სახე იმეორებს ადრე განხილულ შემთხვევებს და მივიღებთ მხოლოდ ორ ახალ სახეს G_{i_4} და G_{i_6} (ან L_2P).

8) ამ ორ ლერძს რომ მივეუმატოთ სიმეტრიის შესაბამისი ელ-

შენტები, მივიღებთ უკვე განხილულ სიმეტრიის სახეებს, გარდა იმ შემთხვევისა, როდესაც ერთდროულად ვუმატებთ ღერძზე გამავალ სიმეტრიის სიმეტრიებს ან მის მართობ ღერძებს. ამ მოქმედების შედეგად მივიღებთ სიმეტრიის კიდევ ორ ახალ სახეს: G_i , $2L_2$, $2P$ და $L_3, 3L_2, 4P$.

ამრიგად, მივიღებთ A ჯგუფის კრისტალებისათვის სიმეტრიის 27 სახის არსებობის შესაძლებლობა (ტაბულა IV. I).

B ჯგუფის კრისტალების სიმეტრიის სახეების გამოყვანა. განვიხილოთ ისეთი მრავალწახნაგები, რომლებსაც ექნებათ მეორე რიგის სიმეტრიის ღერძზე უფრო მაღალი რიგის ერთზე მეტი ღერძი, მათ შორის შეიძლება შეგვხვდეს კრისტალები, რომლებსაც ექნებათ რამდენიმე L_2 ან L_3 ღერძი და არ ჰქონდეს მეექვსე რიგის ღერძი. კუბში, მაგალითად, სიმეტრიის სხვა ელემენტებთან ერთად გვხვდება $3L_2$ და $4L_3$ (ნახ. II. 6), წესიერ ტეტრაედრში კი გვაქვს ერთდროულად $4L_2$ (ნახ. IV. 12). ამ ჯგუფის მრავალწახნაგებში არც ერთი მიმართულება არ იქნება ერთადერთი მიმართულება. კრისტალებში ყველა ღერძი ერთ წერტილში გადაიკვეთება და თითოეული მათგანი, ეილერის თეორემის თანახმად, შესაბამისი ორი ღერძის მოქმედების ტოლქმედია. ავაგოთ ყოველი ასეთი სამი ღერძის სტერეოგრაფიულ გეგმილი და ორ-ორ მათგანზე გავატაროთ დიდი წრეხაზის რეკალები, მივიღებთ სფერულ სამკუთხედს, რომლის სამივე კუთხე მათზე გამავალი სიმეტრიის ღერძის ელემენტარული მობრუნების კუთხის ნახევარია (თანახმად პირველი თეორემისა). B ჯგუფის მრავალწახნაგათა სიმეტრიის ღერძთა დასაშვები რაოდენობის მიხედვით ამ სფერული სამკუთხედის ორ წვეროში მაინც უნდა გადიოდეს მეორე რიგზე უფრო მაღალი რიგის სიმეტრიის ღერძები L_3 , L_4 და L_6 , ხოლო მესამე წვეროში იქნება L_2 ღერძის გამოსავალი. სულ შესაძლებელია არსებობდეს ამ ღერძების სამკუთხედის წვეროებში განლაგების ექვსი ვარიანტი (იხ. ტაბულა IV. 2).



ნახ. IV. 12. წესიერ ტეტრაედრს აქვს $3L_2$ და $4L_3$ ღერძები.

და თითოეული მათგანი, ეილერის თეორემის თანახმად, შესაბამისი ორი ღერძის მოქმედების ტოლქმედია. ავაგოთ ყოველი ასეთი სამი ღერძის სტერეოგრაფიულ გეგმილი და ორ-ორ მათგანზე გავატაროთ დიდი წრეხაზის რეკალები, მივიღებთ სფერულ სამკუთხედს, რომლის სამივე კუთხე მათზე გამავალი სიმეტრიის ღერძის ელემენტარული მობრუნების კუთხის ნახევარია (თანახმად პირველი თეორემისა).

B ჯგუფის მრავალწახნაგათა სიმეტრიის ღერძთა დასაშვები რაოდენობის მიხედვით ამ სფერული სამკუთხედის ორ წვეროში მაინც უნდა გადიოდეს მეორე რიგზე უფრო მაღალი რიგის სიმეტრიის ღერძები L_3 , L_4 და L_6 , ხოლო მესამე წვეროში იქნება L_2 ღერძის გამოსავალი. სულ შესაძლებელია არსებობდეს ამ ღერძების სამკუთხედის წვეროებში განლაგების ექვსი ვარიანტი (იხ. ტაბულა IV. 2).

რადგან სფერული სამკუთხედის კუთხეების ჯამი 180° -ზე მეტ უნდა იყოს, ამიტომ აღნიშნული სამკუთხედებიდან რეალურად შესაძლებელია მხოლოდ მესამე და მეექვსე სამკუთხედების არსებობა. ცხადია, რომ ამ სამკუთხედების შესაბამისი განმეორებით სფეროს ზედა

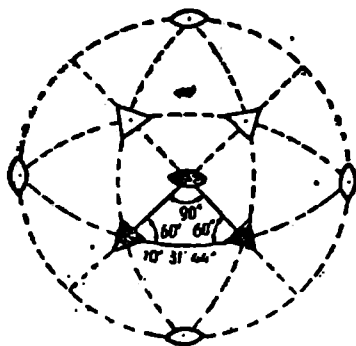
დაპირი მთლიანად უნდა იფარებოდეს, როგორც ეს IV. 13 ნახაზზე ნაჩვენებია. წინააღმდეგ შემთხვევაში ღერძებს შორის კუთხეები ყველგან ტოლი არ იქნება და, მაშასადამე, არსებული სიმეტრიაც დაირღვევა.

IV. 13 ნახაზზე მოცემულია ორივე შესაძლებელი სფერული სამკუთხედის სტერეოგრაფიული გეგმილი. პირველ შემთხვევაში (L_2, L_2, L_2) L_2 ღერძი ვერტიკალურია. L_3 ღერძებს შორის კუთხე არის $70^{\circ} 31' 44''$ და დიხრილია L_2 -ის მიმართ. მეორე რიგის სიმეტრიის ღერძის მოქმედება განაპირობებს სათანადო სიმეტრიული განლაგებით კი-

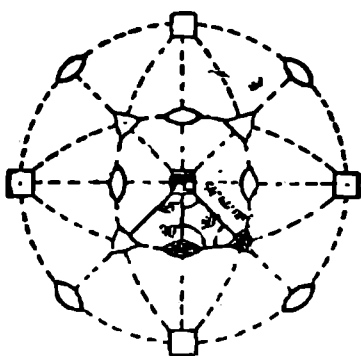
ტაბულა 4. 12

№№ რიგზე	სიმეტრიის ღერძთა ერთობლიობა	შესაბამისი სფერული სამკუთხედის კუთხეების ჯამი
1	L_2, L_2, L_2	$30^{\circ} + 30^{\circ} + 90^{\circ} = 150^{\circ}$
2	L_2, L_2, L_2	$45^{\circ} + 45^{\circ} + 90^{\circ} = 180^{\circ}$
3	L_2, L_2, L_2	$60^{\circ} + 60^{\circ} + 90^{\circ} = 210^{\circ}$
4	L_2, L_2, L_2	$30^{\circ} + 45^{\circ} + 90^{\circ} = 165^{\circ}$
5	L_2, L_2, L_2	$30^{\circ} + 60^{\circ} + 90^{\circ} = 180^{\circ}$
6	L_2, L_2, L_2	$45^{\circ} + 60^{\circ} + 90^{\circ} = 195^{\circ}$

3L₂, 4L₂



3L₂, 4L₂, 6L₂



ნახ. IV. 13. სიმეტრიის ღერძების გეგმილები: $3L_2, 4L_2$ (ა) და $3L_2, 4L_2, 6L_2$ (ბ)

დედ ორი L_2 ღერძის არსებობას, სულ იქნება $4L_2$. ყოველი L_2 ღერძის გარშემო კი, რაკი არსებობს ერთ L_2 , სიმეტრიულად განლაგებული უნდა იყოს კიდევ ორი L_2 ღერძის გამოსავალი. სულ იქნება $3L_2$, მათ შორის ორი განლაგებულია პორიზონტალურად (ნახ. IV. 13 ა). მაშასადამე, განხილულ შემთხვევაში სულ გვექნება $3L_2$ და $4L_2$ ღერძთა ერთობლიობა, რომლებიც წარმოქმნიან 24 სფერულ სამკუთხედს ($L_2 L_2 L_2$):

მეორე შემთხვევაში (ნახ. IV. 13 ბ) გვაქვს სფერული სამკუთხედი ($L_4 L_2 L_2$), L_4 განლაგებულია ვერტიკალურად, ხოლო L_2 და L_2 დახრილია ნახაზზე აღნიშნული კუთხეებით. L_4 ღერძის არსებობა მოითხოვს კიდევ სამი L_2 ღერძის სიმეტრიულ განლაგებას (ანალოგიურად პირველი შემთხვევისა), მივიღებთ სულ $4L_2$ და მის გარშემო კიდევ $3L_2$ ღერძებს. ყოველი L_2 ღერძის გარშემო სიმეტრიულად უნდა განლაგდეს L_4 და L_2 ღერძების სამ-სამი გამოსავალი. ამ აგებით საბოლოოდ მივიღებთ $3L_4$ და $6L_2$ ღერძს. მაშასადამე, ამ შემთხვევაში სულ გვექნება $4L_4$, $4L_2$ და $6L_2$ ღერძთა ერთობლიობა, რომელიც წარმოშობს 48 სფერულ სამკუთხედს.

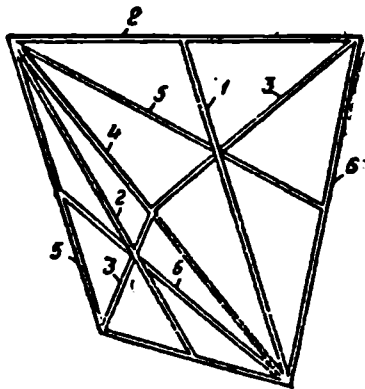
მიღებული სიმეტრიის ორი შესაძლებელი სახეობიდან სიმეტრიის საწყის ღერძებად მივიჩნით უფრო მარტივი ერთობლიობა $3L_2$, $4L_2$ და სიმეტრიის ყველა შესაძლებელი სახის გამოყვანისათვის მიუემატოთ მათ სიმეტრიის სათანადო ელემენტები ისე, როგორც მრავალწახნაგათა A ჯგუფის შემთხვევაში. მივიღებთ სიმეტრიის შექმნე სახეებს:

1) სიმეტრიის საწყისი სახე — $4L_2$, $3L_2$.

2) მიუემატოთ საწყის სიმეტრიას ინვერსიის ცენტრი. მივიღებთ სიმეტრიის ახალ სახეს — $4L_2$, $3L_2$ C3P. მეორე თეორემის თანახმად, მას სიმეტრიის სამი სიბრტყე ემატება, რადგან გვექონდა ლუწი რიგის სამი ღერძი, სიმეტრიის ყოველი სიბრტყე გაივლის L_2 ღერძის მართობულად.

3) მიუემატოთ საწყის სიმეტრიის ღერძებზე გამავალი სიმეტრიის სიბრტყეები. პირველი თეორემის შედეგის თანახმად ყოველ L_2 ღერძზე გაივლის სამ-სამი სიბრტყე, რომლებიც ამავე დროს გაივლიან ორ-ორ L_2 -ზე და მათ შორის მდებარე L_2 -ზე. სულ მივიღებთ სიმეტრიის 6 ასეთ სიბრტყეს და მივიღებთ სიმეტრიის ახალ სახეს — $4L_2$, $3L_2$ 6F. მაგალითისათვის ავიღოთ წესიერი ტეტრაედრი, რომელსაც, როგორც ვიცით, აქვს $4L_2$ და $3L_2$ (ნახ. IV. 12). აქ სიმეტრიის სიბრტყე გაივლის ორ-ორ L_2 -ზე და L_2 -ზე (მაგალითად, სიბრტყე I, ნახ. IV. 14), სულ 6P. მაშასადამე, ყოველი P გაივლის ტეტრაედრის ექვსივე წიბოზე, მოპიოდაპირედ მდებარე წიბოს მართობულად. აღსანიშნავია, რომ ყოველი L_2 ამავე დროს არის G_{i_4} .

4) მივეუმატოთ საწყის სიმეტრიის L_2 ღერძების მართობულად L_2 ღერძები (საწყისი L_2 ღერძების მართობულად უკვე არსებობს შესაბამისი L_2 ღერძები). ეილერის თეორემის თანახმად, ყოველი L_2 ღერძის მართობულად გაივლის $3L_2$. მაგრამ რადგანაც თითოეული მათგანი ერთდროულად მართობულია ორ-ორი L_2 ღერძისა, ამიტომ სულ გაივლის $6L_2$. ამ ღერძების დამატებით საწყისი $3L_2$ გადავა L_2 ღერძებში, რადგან ყოველ მათგანში მართობულად გაივლის ოთხ-ოთხი L_2 . საბოლოოდ მივიღებთ კიდევ სიმეტრიის ერთ ახალ სახეს $4L_2, 3L_2, 6L_2$. სიმეტრიის ღერძთა ეს ერთობლიობა ზევითაც გვქონდა მიღებული (ნახ. IV. 13 ბ).



ნახ. IV. 14. წესიერ ტეტრაედრზე გაივლის სიმეტრიის ექვსი სიბრტყე

5) განვიხილოთ შესაძლებელი სიმეტრიის სახე, რომელიც მიიღება საწყის ღერძებზე გამავალი სიმეტრიის სიბრტყეებისა და მათი მართობი L_2 -ის ერთდროული დამატებით. მივიღებთ სიმეტრიის ელემენტთა ერთობლიობას — $3L_2, 4L_2, 6L_2, 9PC$.

მაშასადამე, B ჯგუფის კრისტალებისათვის მივიღეთ სიმეტრიის ხუთი სახე, რომლებიც მოცემულია IV. 3 ტაბულაში.

ტაბულა IV. 3.

B ჯგუფის კრისტალო სიმეტრიის სახეები

№№ რიგზე	სიმეტრიული მოქმედებანი	სიმეტრიის ელემენტთა ერთობლიობა
1	სიმეტრიის საწყისი ღერძები	$3L_2, 4L_2$
2	ემატება ინვერსიის ცენტრი (C)	$3L_2, 4L_2, C, 3P$
3	ემატება ღერძებზე გამავალი სიმეტრიის სიბრტყე ($\parallel P$)	$3L_2, 4L_2, 6P$
4	ემატება ღერძების მართობი L_2	$3L_2, 4L_2, 6L_2$
5	ემატება ერთდროულად $\parallel P$ და $\perp L_2$	$3L_2, 4L_2, 6L_2, 9PC$

ამგვარად, დადგენილია, რომ A და B ჯგუფის კრისტალებისათვის შესაძლებელია სიმეტრიის 32 სახის არსებობა (27 და 5). ამგვარად უკვე დადგენილია სიმეტრიის ყველა ამ კლასის შესაბამისი კრისტალები და სათანადო მინერალთა წარმომადგენლები.

სიმეტრიის ყველა კლასს თავისი სახელი აქვს (იხ. ტაბულა IV. 7). მაგრამ ამავე დროს ცნობილია სიმეტრიის სახეების ისეთი ჯგუფური დასახელებაც, რომელიც ახასიათებს იმ სიმეტრიულ მოქმედებებს, რომლის თანამიმდევრული დაშვებით მივიღეთ სიმეტრიის ყველა შესაძლებელი კლასი. ასე, მაგალითად, პრიმიტიული სიმეტრიის სახეში გაერთიანებულია მხოლოდ სიმეტრიის საწყისი ღერძების მქონე კლასები. ცენტრალური სიმეტრიის სახეს კი ეკუთვნის ის კლასები, რომლებიც მიიღებიან საწყის მიმართულებებზე ინვერსიის. ცენტრის დამატებით. ასეთი იქნება სულ 6 კლასი (ტაბულა IV. 4). სიმეტრიის პლანარულ სახეში შედის ის კლასები, რომლებიც მიიღება საწყის მიმართულებებზე სიმეტრიის სიბრტყის გაყვანით (6 კლასი). აქსიალურ კლასებში დამატებულია სიმეტრიის საწყისი ღერძის მართობი L_2 ღერძების (5 კლასი). პლან-აქსიალური სახის კლასები მიიღება სიმეტრიის სიბრტყისა და მართობი L_2 სიმეტრიის ღერძის ერთდროული დამატებით (5 კლასი). ინვერსიულ-პრიმიტიული ეწოდება იმ კლასს, რომელშიც საწყისი მიმართულება ინვერსიის ღერძებია. როგორც უკვე ვიცით, ასეთია მხოლოდ ორი კლასი. სიმეტრიის ინვერსიულ-პლანარულ სახეში შედის ის კლასები, რომლებიც მიიღებიან ინვერსიის საწყის ღერძებზე გამავალი სიმეტრიის სიბრტყეების დამატებით (იხ. ტაბულა IV. 4).

ტ ა ბ უ ლ ა IV. 4

სიმეტრიის სახეების ჩამოთვლილი დასახელება	სიმეტრიის შესაბამისი კლასები					
პრიმიტიული	L_1	L_2	L_3	L_4	L_5	$3L_2+L_3$
ინვერსიულ-პრიმიტიული				G_4	$G_5(=L_3P)$	
ცენტრალური	C	L_2PC	L_3C	L_4PC	L_5PC	$3L_2+L_3+3PC$
პლანარული	P	L_2P	L_3P	L_4P	L_5P	$3L_2+L_3+3P$
ინვერსიულ-პლანარული				$G_4, 2L_2P$	$G_5, 3L_3P$	
აქსიალური		$3L_1$	$L_2, 3L_1$	L_4, L_2	$L_5, 6L_2$	$3L_2+L_3+6L_1$
პლან-აქსიალური		$3L_1+PC$	$L_2, 3L_2+PC$	L_4, L_2+PC	$L_5, 6L_2+PC$	$3L_2+L_3+6L_1+PC$

სიმეტრიის მიღებული 32 კლასი (სახე) დაყოფილია შეიძლება ჯგუფად, რომლებსაც სინგონიებს უწოდებენ. ყოველ სინგონიაში გაერთიანებულია სიმეტრიის ის კლასები, რომლებსაც ახასიათებს ერთი და იმავე რიგის სიმეტრიის ღერძების ერთნაირი რაოდენობა, ინვერსიის ღერძების ჩათვლით.

ასე, მაგალითად, IV. 3 ტაბულაში მოცემული სიმეტრიის ხუთეუ კლასი (სახე) შეიძლება გავაერთიანოთ ერთ სინგონიაში, რადგან ყველა მათგანს ახასიათებს ოთხ-ოთხი შესაბამისი რიგის სიმეტრიის ღერძების არსებობა ($4L_2$), ან კიდევ IV.I ტაბულაში $n=6$ სვეტში მოყვანილ სიმეტრიის ყველა სახეს აქვს მეექვსე რიგის თითო სიმეტრიის (ან ინვერსიის) ღერძი. ასეთი წესით სიმეტრიის კლასების გაერთიანებით მივიღებთ შეიღწაობა სინგონიას: ტრიკლინურს, მონოკლინურს, რომბულს, ტრიგონურს, ტეტრაგონურს, ჰექსაგონურსა და კუბურს (იხ. ტაბულა IV. 5).

ამავე დროს აღსანიშნავია, რომ ყოველ სინგონიას აქვს მხოლოდ მისთვის დამახასიათებელი კრისტალურ ღერძთა ჯგუფდინის განსაკუთრებული განლაგება. ეს გამოიხატება ერთეული წახნაგით მოკვეთილი სამი პარამეტრის (a , b და c) სიგრძეებით და მათ შორის წარმოშობილი, (α , β და γ) კუთხეებით (ნახ. IV. 15). მართლაც თუ ვიცით ექვსივე აღნიშნული სიდიდე, შეიძლება განვსაზღვროთ ელემენტარული პარალელები. ერთეულ პარამეტრებს (a , b , c) და ღერძულ კუთხეებს (α , β და γ) უწოდებენ აღებული კრისტალის გეომეტრიულ კონსტანტებს.

ელემენტარული პარალელები ფორმის მიხედვით შეიძლება დავახასიათოთ ზემოთ აღნიშნული შეიდივე სინგონია. მაშასადამე, სინგონია არის სიმეტრიის იმ კლასების ერთობლიობა, რომლებსაც აქვთ ელემენტარული პარალელები პედიის მსგავსი კონსტანტები. (სინგონია ბერძნულად ნიშნავს კუთხის მსგავსებას). აღნიშნული შეიდი სინგონია ხასიათდება შემდეგი კონსტანტებით:

სინგონიების სახელები დაკავშირებულია შემდეგ გარემოებასთან: ტრიკლინური სინგონიის კრისტალის ელემენტარული პარალელები პედიის სამივე წიბო (ღერძი) ურთიერთდახრილია. „კლინო“ ბერძნულად დახრას ნიშნავს, მაშასადამე სამივე წიბო დახრილი ტრიკლინური სინგონია იქნება.

მონოკლინური სინგონიის კრისტალებში ელემენტარული პარა-

1	ტრიკლინური	$a \neq b \neq c$	$\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$
2	მონოკლინური	$a \neq b \neq c$	$\alpha = \gamma = 90^\circ \neq \beta$
3	რომბული	$a \neq b \neq c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
4	ტრიგონური	$a = b \neq c$	$\alpha = 120^\circ \beta = \gamma = 90^\circ (C = L_3)$
5	ტეტრაგონური	$a = b \neq c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
6	ჰექსაგონური	$a = b \neq c$	$\alpha = 120^\circ \beta = \gamma = 90^\circ (CL_6 \text{ ან } G_2)$
7	კუბური	$a = b = c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$

ლელეპიპედის მხოლოდ ერთი წიბოა დახრილი, დანარჩენი ორი ურთიერთმართობია, ამიტომ უწოდებენ ერთდახრილ, ანუ მონოკლინურ სინგონიას.

რომბული სინგონიის კრისტალებში ხშირად L_3 ღერძის მართობულ კვეთას რომბის ფორმა აქვს.

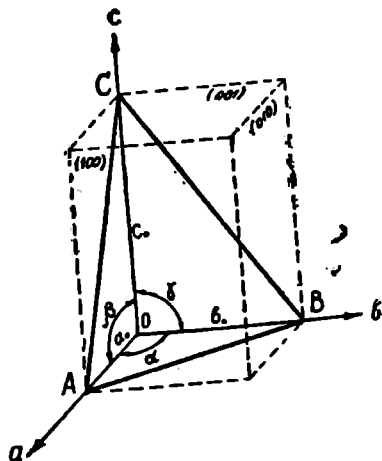
ტრიგონური, ტეტრაგონური და ჰექსაგონური სინგონიის სახელწოდება გამომდინარეობს იქიდან, რომ ამ კრისტალებში ვერტიკალური C ღერძის მიმართულებას ემთხვევა სათანადოდ მესამე, მეოთხე ან მეექვსე რიგის სიმეტრიის (ან ინვერსიის) ღერძი.

მეშვიდე სინგონიას კუბური იმ-იტომ ეწოდება, რომ აქ გაერთიანებული კრისტალების ელემენტარული პარალელეპიპედის სამივე წიბო ურთიერთმართობი და ტოლია და აქვს კუბის ფორმა.

სინგონიები დაყოფილია დაბალ, საშუალო და მაღალ კატეგორიებად.

დაბალ კატეგორიაში გაერთიანებულია ის სინგონიები, რომლებსაც მეორე რიგზე მაღალი სიმეტრიის ღერძი არა აქვს და ახასიათებს სამი ან მეტი ერთადერთი მიმართულების არსებობა. ასეთებია ტრიკლინური, მონოკლინური და რომბული სინგონიები.

საშუალო კატეგორიაში შედის სინგონიები, რომლებსაც აქვთ თითო მეორე რიგზე უფრო მაღალი რიგის სიმეტრიის ღერძი, ე. ი. ახასიათებს თითო ერთადერთი მიმართულების არსებობა. ასეთებია ტრიგონური, ტეტრაგონური და ჰექსაგონური სინგონიები.



ნახ. IV. 15. კრისტალის გეომეტრიული კონსტანტები.

სიმეტრიის 32 კლასის (სახის) დაჯგუფება სიმეტრიების მიხედვით

კატეგორია	სიმეტრია	სიმეტრიის კლასები (სახეები)								დამახასიათებელი სიმეტრიის (ან ინვერსიის) ლერეების არსებობა.
მბრუნვითი	ტრიკლანური	L_1	$C(G_{12})$							$L_1 (G_{12})$
	მონოკლანური	L_2	$P(G_{12})$	$L_4 PC$						$L_2 (G_{12})$
	რომბული	$L_2 2P$	$3L_2$	$3L_2 3PC$						$3L_2 (L_2, 2G_{12})$
საშუალო	ტრიკლანური	L_3	$L_4 C (G_{12})$	$L_3 3L_2$	$L_3 3P$	$L_3 3L_2 3PC$				L_3
	ტეტრაკლანური	L_4	$L_4 PC$	$L_4 4L_2$	$L_4 4P$	$L_4 4L_2 5PC$	G_{12}	$G_{12} 2L_2 2P$		$L_4 (G_{12})$
	სექსკლანური	L_6	$L_6 PC$	$L_6 6L_2$	$L_6 6P$	$L_6 6L_2 7PC$	$L_6 P (G_{12})$	$G_{12} 3L_2 3P$		$L_6 (G_{12})$
მბრუნვითი	კუბური	$3L_2 4L_2$	$3L_4 4L_2$	$3L_4 4L_2$	$3L_4 4L_2$	$3L_4 4L_2$	$3L_4 4L_2$	$3L_4 4L_2$	$3L_4 4L_2$	$4L_2$
			$3PO$	$6L_2$	$6P$	$6L_2 9PC$				

მაღალ კატეგორიას ეკუთვნის მხოლოდ კუბური სინგონ-
 აა. აქ გვაქვს რამდენიმე სიმეტრიის ღერძი მეორე რიგზე უფრო მაღ-
 ლი რიგისა. ამ კატეგორიის კრისტალებს არ ახასიათებს ერთადერ-
 თი მიმართულების არსებობა (იხ. ტაბულა IV. 6),

§ IV. 4. სიმეტრიის კლასების აღნიშვნები

სიმეტრიის ყოველ კლასს აქვს დასახელება, რომელიც შეესაბა-
 შება ამ კლასში ზოგადი განლაგების წახნაგების მქონე მარტივი ფო-
 რმის სახელს (იხ. ტაბულა IV. 7). გარდა ამისა, ყოველი კლასი შეე-
 ძლება დაეახასიათოთ სიმეტრიის იმ ელემენტთა ერთობლიობის აღნი-
 შვნით, რომლებიც აქ არსებობენ. ამ გამოსახულებებს უწოდებენ სი-
 მეტრიის ფორმულებს. მიუხედავად იმისა, რომ ეს ფორმულები თვალ-
 ხაზით ახასიათებენ სიმეტრიის ყოველ კლასის ხარისხს, ისინი თა-
 ვისი სიდიდისა და ძნელი გამოთქმის გამო ზოგიერთმა მკვლევარმა შე-
 ცვალა უფრო გამარტივებული აღნიშვნებით. ასეთ აღნიშვნებში მო-
 ცემულია სიმეტრიის ელემენტთან მხოლოდ ის მინიმალური რაოდე-
 ნობა, რომელთა ურთიე უთქმელება სიმეტრიის სრული ხარისხის და-
 დგენის საშუალებას იძლევა. ასეთი აღნიშვნები, ცხადია, მოითხოვს სი-
 მეტრიის ელემენტების შეკრების თეორემის ცოდნას, რათა მოცემულ
 საწყის ელემენტთა შეკრების საშუალებით წარმოვიდგინოთ სათანადო
 სიმეტრიის ტოლქმედი ელემენტის არსებობა.

ტაბულა IV. 6

სინგონიათა კატეგორიების დახასიათება

კატეგორიები	სინგონიები	ერთადერთ მიმართულებათა რაოდენობა
მაღალი	ტრიკლინური	ყველა
მეორე რიგზე მაღალი	მონოკლინური	უმრავლესობა
რიგის ღერძი არა აქვთ	რომბული	სამი
საშუალო	ტრიგონური	ერთი
აქვთ თითო ღერძი	ტეტრაგონური	ერთი
მეორე რიგზე უფრო მაღალი რიგისა	ჰექსაგონური	ერთი
მაღალი		
აქვთ რამდენიმე ღერძი მეორე რიგზე უფრო მაღალი რიგისა	კუბური	არც ერთი

ლიტერატურაში სხვა აღნიშვნებთან შედარებით უფრო ხშირად გვხვდება შუბნიკოვის, შენფლისის და გერმან-ჰოგენის აღნიშვნები. მოკლედ განვიხილოთ მათ მიერ მიღებული აღნიშვნების პრინციპები და ზოგიერთი პირობითი ნიშანი.

შენფლისის აღნიშვნები. სიმეტრიის ღერძებს შენფლისი აღნიშნავს C ასოთი (გერმ. სიტყვის *cylisch* (წრიული) პირველი ასო), ხოლო მის რიგს — სათანადო ციფრის მიწერით. მაგალითად, $C_4 = L_8$ და ა. შ. ღერძზე სიმეტრიის სიბრტყის შიშვლება გამოისახება ციფრითან V (Vertikal) ან h (horizontal) ასოების მიძატებით. ასე, მაგალითად, C_{4h} იქნება $L_4 PC$ სიმეტრიის სახის შესაბამისი ან $C_{4v} = L_8 6P$ სიმეტრიის გამომსახველი. D ასოთი (Dieder) აღინიშნება სიმეტრიის ის კლასები, რომლებსაც ახასიათებთ მხოლოდ სიმეტრიის ღერძები. მაგალითად, $D_3 = L_2 3L_2$ ან $D_6 = L_6 6L_2$, ხოლო სიმეტრიის $L_6 6L_2 7PC$ სახეს შენფლისი გამოსახავს ასე: D_{6h} . ე. ი. უმატებს ჰორიზონტალურ სიბრტყეს. ამასთან, ანალოგიურად D_{4h} იქნება სიმეტრიის $L_4 4L_2 5PC$ სახის შესაბამისი.

ინვერსიის ღერძებს შენფლისი აღნიშნავს სიმეტრიის არეკვლის ღერძების საშუალებით S ასოთი (სიტყვა *Spiegelaxe* პირველი ასო). მაშასადამე, S_4 იქნება G_{i_4} -ის, ხოლო $S_6 = G_{i_6}(L_2 C)$ ტოლი (იხ. ტაბულა III. I) იმ კლასებს, რომლებსაც აქვთ როგორც ინვერსიის ღერძი, ისე მისი მართობი მეორე რიგის სიმეტრიის ღერძიც, შენფლისი აღნიშნავს D_{nh} -თი. მაგალითად, $D_{3d} = G_{i_6} 2L_2 2P$.

კუბური სინგონიის სიმეტრიის კლასების აღნიშვნისათვის შენფლისმა გამოიყენა ასოები T (Tetraeder) O (Oktaeder), აგოეთვე h და d ასოების მიწერა. მაგალითად, $T = 3L_2 4L_2$, $O = 3L_4 4L_2 6L_2$, ხოლო O_h იქნება სიმეტრიის $3L_4 4L_2 6L_2 9PC$ სახის გამომსახველი (იხ. ტაბულა IV. 7).

შუბნიკოვის აღნიშვნები. სიმეტრიის ღერძებს ა. შუბნიკოვი აღნიშნავს მისი რიგის შესაბამისი ციფრით. მაგალითად, $2 = L_2$, $6 = L_6$ და სხვ. სიმეტრიის სიბრტყე აღინიშნება m ასოთი (mirrors ფრანგულად სარკეს აღნიშნავს). ღერძების მართობ მიმართულებას აღნიშნავენ ორი წერტილით (:), ხოლო ღერძზე გამავალი სიბრტყის მიმართულებას — ერთი წერტილით (.). მაგალითად, $2 : m$ შეესაბამება სიმეტრიის $L_2 PC$ სახეს, ხოლო $m : 6 : m$ შეესაბამება $L_6 6L_2 7PC$ კლასს. ინვერსიის ღერძები შენფლისის აღნიშვნების ანალოგიურად გამოისახება აოეკვლის ღერძებით, რომლებსაც შუბნიკოვი აღნიშნავს ომევე ციფრებით, როგორც სიმეტრიის ღერძებს, მხოლოდ ზემოდან ზახის გასმით. მაგალითად, $\overline{6} G_{i_6} = L_6 C$.

ურთიერთდახრილი ღერძების აღნიშვნისათვის შუბნიკოვი იტა-

რებს მათ შორის ნაწევრის გამომსახველ დახრილ ხაზს. მაგალითად, $3/2$ შეესაბამება $3L_2$ $4L_3$ სიმეტრიას (იხ. ტაბულა IV. 7).

გერმან — მოგენის აღნიშვნები. სიმეტრიის ღერძები და სიბრტყეები შუბნიკოვის გამოსახულების ანალოგიურია, მხოლოდ იმ განსხვავებით, რომ ნაწევრის გამომსახველი ხაზი აქ აღნიშნავს მართობ მამართულებას, ხოლო თუ სიმეტრიის სიბრტყე გადის ღერძზე, მაშინ აღნიშნული პირობითი ნიშნები იწერება ერთად. მაგალითად, $4/m$ შეესაბამება შუბნიკოვის $4 : m$ აღნიშვნას და გამოსახავს სიმეტრიის L_4PC სახეს, ხოლო $4mm$ (შუბნიკოვის მიხედვით $4 : m$) იქნება L_44P რომბული ბიპირამიდის სიმეტრიის კლასი ($3L_23PC$). აღინიშნება $2/m$ $2/m$ $2/m$, ჩვეულებრივად, ამ გამოსახულებას კიდევ ამარტივებენ და წერენ mmm (სამი ურთიერთმართობი სიმეტრიის სიბრტყე წარმოშობს სამ ურთიერთმართობ L_2 და C). ინვერსიის ღერძები აღინიშნება რიგის შესაბამისი ციფრით ზევიდან ხაზის გასმით. მაგალითად, $\bar{6} = G_i = L_2P$. კუბურ სინგონიაში 23 ნიშნავს $3L_2$ და $4L_3$ ღერძების არსებობას და სხვ. (იხ. ტაბულა IV. 7).

§ IV. 5) კრისტალთა ორიენტაცია და მატივი უკრძახის გამოყვანა

კრისტალის გასარჩევად, ანუ მისი სინგონიის, სიმეტრიის სახისა და მასზე განვითარებული მარტივი ფორმების წახნაგების დასადგენად, უპირველეს ყოვლისა, საჭიროა მისი სათანადო ორიენტაცია, რაც გულისხმობს მასზე კრისტალოგრაფიული ღერძების შერჩევას და ერთეული წახნაგის დადგენას. კრისტალოგრაფიულ ღერძებს ატარებენ კრისტალზე არსებული (ან შესაძლებელი) ურთიერთგადაძვეთი წიბოების პარალელურად, ე. ი. იმ მიმართულების პარალელურად, რომლებიც მოცემული კრისტალური მესრის რიგების პარალელურია იქ, სადაც ეს შესაძლებელია. უპირატესობას აძლევენ იმ წიბოების მიმართულებას, რომლებიც ემთხვევა სიმეტრიის ღერძებს ან სიმეტრიის სიბრტყის მართობულია. გატარებული ღერძებიდან არსებული წესების მიხედვით გამოვყოფთ პირველ (ა), მეორე (ბ) და მესამე (ც) ღერძებს. კრისტალს ყოველთვის იკერენ მეორე (ბ) ღერძით, რომელიც მიმართულია მაყურებლის პარალელურად, მესამე (ც) ღერძი ვერტიკალურია, ხოლო პირველი (ა) ღერძი მიმართულია მაყურებლისაკენ IV. 8 ტაბულაში მოკლედ და მოყვანილი შეიძლება სინგონიის კრისტალის ორიენტაციის წესები ყველა სახეს სიმეტრიის შემთხვევისათვის.

კრისტალის ორიენტაციის შემდეგ საჭიროა დავადგინოთ მასზე არსებულ სიმეტრიის ელემენტთა ერთობლიობა, რაც მოგვცემს სიმეტ-

ხიმეტრიის 32 კლასის აღნიშვნები

სიგონაი	სიმეტრიის კლასები		აღნიშვნები		
	დასახელება	სიმეტრიის ფორმულა	უბნიკოსის მიხედვით	გერმან-მოგენის მიხედვით	უნიფისის მიხედვით
1	2	3	4	5	6
ტრიკლენური	1. მონოკლენური 2. ბინაიკლიური	L C	1 2	1 I	C ₁ S ₁
მონოკლენური	3. დიედრულ-ლენური 4. ულენო-დედრული 5. პრიზმული	L ₁ P(G ₁) L ₂ PC	2 m 2:m	2 m 2,m	C _r C _{1h} C _{2h}
კომპლუ	6. რომბულ-ბიპრიმიდული 7. რომბულ-ტეტრაედრული 8. რომბულ-ბიპრიმიდული	L ₂ P 3L ₁ 3L ₂ PC	2:m 2:2 m 2:m	mm2 222 mmm	C _{2v} D ₂ D _{2h}
ცენტრონ-ური	9. ტეტრაგონურ-ბიპრიმიდული 10. ტეტრაგონურ-ბიპრიმიდული 11. ტეტრაგონურ-ტრაპეკედრული 12. დიტეტრაგონურ-ბიპრიმიდული 13. ლიტეტრაგონურ-ბიპრიმიდული 14. ტეტრაგონურ-ტეტრაედრული 15. ტეტრაგონურ-სკანოედრული	L ₁ L ₁ PC L ₁ 4L ₂ L ₁ 4P L ₁ 4L ₂ 5PC G ₁ G ₁ 2L ₂ 2P	4 4:m 4:2 4:m m 4:m 4:m	4 4/m 422 4mm 4mmm 4 4 2m	C _{4v} C _{4h} D ₄ C _{4h} D _{4h} S ₄ D _{2d}

1	2	3	4	5	6
<p>კვანური</p>	<p>16. ჰემიციონურ-პირამიდული</p>	<p>L_0 L_2PC $L_1, 6L_2$ $L_1, 6P$ $L_1, 6L_1, 7PC$ $L_1, P(G_1)$ $L_1, 3L_1, 4P, 6L_1, 3P$</p>	<p>6 $6 : m$ $6 : 2$ $6 : m$ $m : 6 : m$ $3 : m$ $m : 3 : m$</p>	<p>6 $6 : m$ $6 : 2$ $6 : m$ $6 : m$ $6 : m$ $6 : m$</p>	<p>C_4 C_{10} D_4 C_{10} D_{10} C_{10} D_{10}</p>
	<p>17. ჰემიციონურ ბიპირამიდული</p>				
	<p>18. ჰემიციონურ-ტრაპეციოიდული</p>				
	<p>19. ლამპროციონურ-ბიპირამიდული</p>				
	<p>20. ლამპროციონურ-ბიპირამიდული</p>				
	<p>21. ტრიგონულ-ბიპირამიდული</p>				
	<p>22. დიგონულ-ბიპირამიდული</p>				
<p>-ტრიონური</p>	<p>23. ტრიონურ-ბიპირამიდული</p>	<p>L_1 L_1C $L_2, 3L_2$ $L_3, 3P$ $L_3, 3L_3, 3PC$</p>	<p>3 6 $3 : 2$ $3 : m$ $6 : m$</p>	<p>3 3 32 $3m$ $3m$</p>	<p>C_3 S_6 D_6 C_{10} D_{10}</p>
	<p>24. რიზოედრული</p>				
	<p>25. ტრიგონურ-ტრაპეციოიდული</p>				
	<p>26. დიგონურ-ბიპირამიდული</p>				
	<p>27. დიგონურ-სკალენოედრული</p>				
<p>კუბური</p>	<p>28. პენტაგონ-ტრიკუბოედრული</p>	<p>$3L_1, 4L_1$ $3L_1, 4L_1, 3PC$ $3L_1, 4L_1, 6P$ $9L_1, 4L_1, 6L_1$ $3L_1, 4L_1, 6L_1, 9PC$</p>	<p>$3 : 2$ $6 : 2$ $3 : 4$ $3 : 4$ $6 : 4$</p>	<p>23 $m : 3$ $4 : 3m$ $4 : 32$ $m : 3m$</p>	<p>T T_6 T_6 O_6</p>
	<p>29. დიდოდეკაედრული</p>				
	<p>30. ჰემიციონურ-ტრაპეციოიდული</p>				
	<p>31. პენტაგონ-ტრიკუბოედრული</p>				
	<p>32. ჰემიციონურ-ტრაპეციოიდული</p>				

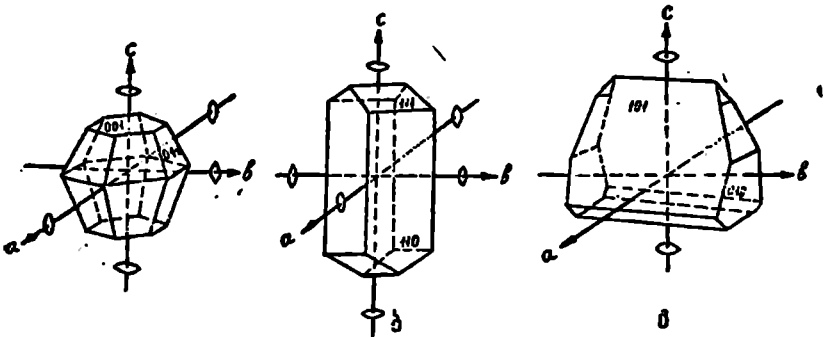
რის კლასისა და იმ მარტივი ფორმების განსაზღვრის საშუალებაა, რომლებიც განვითარებულა კრისტალზე.

ქვემოთ განხილულია კრისტალთა ორიენტაციის წესები ყველ სინგონიისათვის და გარჩეულია შესაძლებელი შვიდ-შვიდი მარტივი ფორმა სიმეტრიის ყველა კლასის მიხედვით.

დაბალი კატეგორიის სინგონიებია. დაბალ კატეგორიაში გაერთიანებულია ტრიკლინური, მონოკლინური და რომბული სინგონიები, რომლებშიც სამივე კრისტალოგრაფიული ღერძი ურთიერთპერპენდიკულარულია. ვერ გავარჩიოთ რომბული სინგონიის კრისტალები, რადგან კრისტალოგრაფიული ღერძები აქ ურთიერთმართობია და ამიტომ მათ სტერეოგრაფიული გეგმილების გამოხატვა შედარებით უფრო მარტაბია.

$$\text{რომბული სინგონია } a \neq b \neq c, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$$

რომბული სინგონიის სიმეტრიის სამივე კლასის კრისტალებში ყოველთვის არის სამ-სამი ერთადერთი მიმართულება, რომლებსაც თვლიან კრისტალოგრაფიული ღერძების მიმართულებად. ეს მიმართულებები ყოველთვის ემთხვევა ურთიერთმართობ L_2 ღერძებს, გარდა რომბულ-პირამიდული კლასის კრისტალებისა, სადაც მხოლოდ ერთი L_2 ღერძია და დანარჩენი ორი ღერძი ემთხვევა აქ არსებული სიმეტრიის სიბრტყეების მართობ მიმართულებებს. c ღერძად მიიჩნევენ ყვე-



ნახ. IV. 16. რომბული სინგონიის კრისტალებში კრისტალოგრაფიული ღერძები ან ემთხვევა $3L_2$ ღერძებს (ა, ბ), ან L_2 -ს და φ ს მართობ მიმართულებებს (გ).

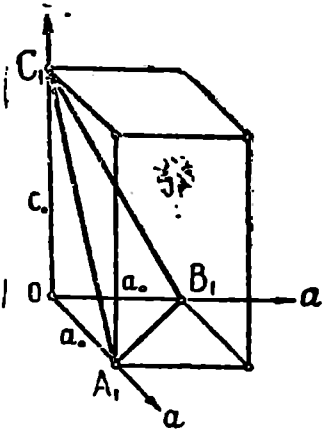
ლაზე გრძელი წიბოების პარალელურ სიმეტრიის ღერძს და აყენებენ ვერტიკალურად, b ღერძი იქნება საშუალო სიგრძის წიბოების პარალელური, რომლითაც იჭერენ კრისტალს და უმოკლესი წიბოების პარალელური ღერძი იქნება a ღერძი, მიმართული მაყურებლისაკენ (ნახ. IV. 16 ა და ბ). სიმეტრიის რომბულ-პირამიდულ კლასში c ვერტიკალური ღერძი ემთხვევა L_2 ღერძს, ხოლო $2P$ -ს მართობი მიმართულებ-

ბები ექნება a და b ღერძებს, რომელთაგანაც $a < b$ (ნახ. IV. 16 გ).

ერთეულ წახნაგად ირჩევენ ისეთ წახნაგს, რომელიც გადაკვეთს სამივე ღერძს. ეს იქნება რომბული პირამიდის, ტეტრაედრის ან ბიპირამიდის წახნაგი. რადგან რომბულ სინგონიაში კრისტალოგრაფიული ღერძები ამავე დროს ერთადერთი მიმართულებებშია, ამიტომ აქ არ შეიძლება ისეთი წახნაგის არსებობა, რომელიც მოკვეთს თანაბარ პარამეტრებს. მაშასადამე, ერთეული წახნაგის პარამეტრები $a_0 \neq b_0 \neq c_0$ (ნახ. IV. 17).

შესაძლებელი მარტივი ფორმების გამოსაყვანად გამოვიყენოთ სტერეოგრაფიული გეგმილები. ჯერ დავხაზოთ კრისტალოგრაფიული ღერძების გეგმილები (ნახ. IV. 18). c ვერტიკალური ღერძის სტერეოგრაფიული გეგმილი იქნება წრეხაზის ცენტრში, ხოლო მისი მართობი a და b პორიზონტალური ღერძების გეგმილები გამოისახება ურთიერთმართობი ორი დიამეტრის სახით. რომბული სინგონიის სიმეტრიის სამივე კლასის ყველა შესაძლებელი მარტივი ფორმის წინა, მარჯვენა, ზედა წახნაგის გნომოსტერეოგრაფიული გეკილი განლაგებული იქნება სფერული სამკუთხედის ფარგლებში, რომელიც IV. 18 ბ ნაიხაზე დაშტოხულია.

1. სიმეტრიის რომბულ-პირამიდულ კლასში არსებობს L_2 და მასზე გამავალი $2P$. სიმეტრიის მეორე რიგის ღერძი ვერტიკალურია და მას ემთხვევა c კრისტალოგრაფიული ღერძი. რადგან სიმეტრიის სიბრტყეს ვერტიკალური მიმართულება აქვს, მისი გეგმილები განლაგდება ურთიერთმართობი დიამეტრების სახით და, მაშასადამე, მათი მართობი a და b ღერძებიც დაემთხვევა სიმეტრიის სიბრტყეებს (ნახ. IV. 19).



ნახ. IV. 17. რომბულ შესერში ერთეული წახნაგის სამივე პარამეტრი სხვადასხვა ზომისაა.

პირველი შესაძლებელი მარტივი ფორმის დასადგენად განვიხილოთ სფერული სამკუთხედის შიგნით მდებარე წერტილი, რომლის შესაბამისი წახნაგი იქნება სამივე კრისტალოგრაფიული ღერძის მიმართ დახრილი ზოგადი ინდექსით (hkl) . არსებული სიმეტრიის ელემენტების მოქმედებით აღებული დახრილი წახნაგი უნდა განმეორდეს კიდევ სამჯერ და, მაშასადამე, მივიღებთ რომბულ პირამიდას, რომელიც შედგება ოთხი ასიმეტრიული წახნაგისაგან. წახნაგები ასიმეტრიულია იმიტომ, რომ მათზე არც ერთი სიმეტრიის

კრისტალთა ორიენტაცია

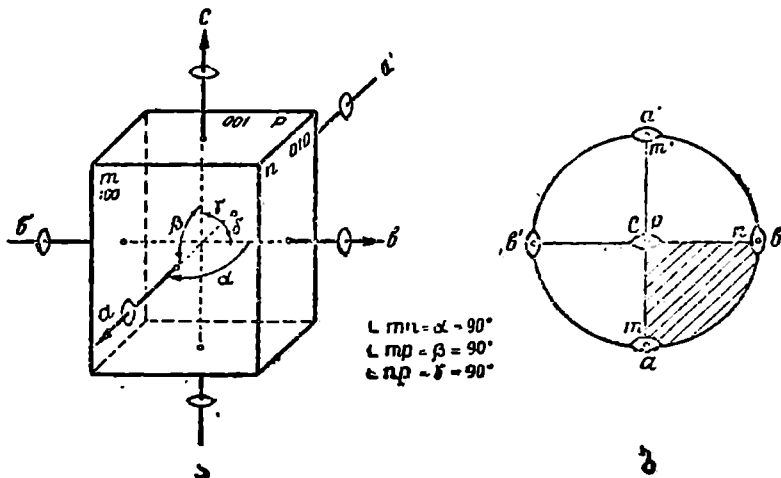
1	2	3
სინგონია და მისი გეომეტრიული კონსტანტები	სამეტრის კლ.ხი	კრისტალოგრაფიული ღერებების შეჩვენება
რომბული $a \neq b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	$L_2 P$ $3L_1$ $3L_1 PC$	<p>ე ღერო ემთხვევა L_2-ს, ვერტიკალურია, ა და ბ ღერები P სობრტის მართობულში, $a < b < c$.</p> <p>ა. ბ და ე ღერები ემთხვევა $3L_1$-ს, ე ვერტიკალურია, $a < b < c$.</p>
მონოკლინური $a \neq b \neq c$ $\alpha = \gamma = 90^\circ \neq \beta$	P L_1 $L_1 PC$	<p>ბ ღერო მართობია P სობრტის. ა და ე ღერები განლაგებულია P სობრტებში და პარალელურია. არსებული ან შექმნილია წიბოებისა. ე ღერო ვერტიკალურია, ა ღერო დაბოლია დამკვირვებლისაკენ.</p> <p>ბ ღერო ემთხვევა L_1-ს, ა და ე ღერო პარალელურია ბ ღერის მართობი წიბოებისა. ე ღერო დაბოლია მიუწვდომლობისკენ. ე ღერო ვერტიკალურია.</p>
ტრიკლინური $a \neq b \neq c$ $\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$	L_1 C	<p>ა. ბ და ე ღერები პარალელურია კრისტალზე არსებულ ან შესაძლებელი ურთიერთგადამკვეთი წიბოებისა. ე ღერო მკამბარულად განათარებელი წიბოს პარალელურია და მიმართულია ვერტიკალურად.</p>
ტეტრაგონური	L_1 $L_1 PC$	<p>ე ღერო ემთხვევა L_1-ს, ვერტიკალურია. ა და ბ ღერები პარალელურია L_1 ღერის მართობი წიბოებისა.</p>

1	3	3
<p>კატაგორი</p> <p>$a = b \neq c$</p> <p>$a = \beta = \gamma = 90^\circ$</p>	<p>$L_1 4P$</p> <hr/> <p>$L_1 4L_1$</p> <p>$L_1 4L_1 5PC$</p> <hr/> <p>G_1</p> <hr/> <p>$G_1 2L_2 P$</p>	<p>ე ღერძი ემთხვევა L_1-ს. ა და ბ პარაზონტალურია და მართობია წვეულ-წვეოლად ურთიერთმართობი P სიბრტყეებს (ორნაირი ორიენტაცია).</p> <p>ე ემთხვევა L_1-ს. ა და ბ ტოლი ღერძია. პარიპონტალურია და ემთხვევა ურთიერთმართობ წვეულ-წვეულ L_1 ღერძებს (ორნაირი ორიენტაცია).</p> <p>ე ღერძი ემთხვევა G_1-ს. ვერტიკალურია. ა და ბ ღერძები პარალელურია G_1-ის მიართობი შესაძლებელი წიბოებისა.</p> <p>ე ემთხვევა G_1-ს, ვერტიკალურია. ა და ბ ღერძები ემთხვევიან L_1 ღერძებს.</p>
<p>კეკონკრეტი</p> <p>$a = b = \alpha \neq c$</p> <p>$\alpha = 120^\circ$</p> <p>$\beta = \gamma = 90^\circ$</p>	<p>L_1</p> <p>$L_1 6P$</p> <hr/> <p>$L_1 6P$</p> <hr/> <p>$L_1 6L_1$</p> <p>$L_1 6L_1 7PC$</p> <hr/> <p>G_1</p> <hr/> <p>$G_1 3L_1 3P$</p>	<p>ე ღერძი ემთხვევა L_1-ს, ვერტიკალურია. ა, ბ და გ ღერძები პარალელურია L_1 ღერძის მართობი შესაძლებელი წიბოებისა.</p> <p>ე ღერძი ემთხვევა L_1-ს, ვერტიკალურია. ა, ბ და გ ღერძები მართობია ერთობი გამოვლევებით სამ-სამი P სიბრტყის (ორნაირი ორიენტაცია).</p> <p>ე ღერძი ემთხვევა L_1-ს, ვერტიკალურია. ა და ბ ღერძები ემთხვევიან ერთობი გამოვლევებით სამ-სამ L_1 ღერძს. (ორნაირი ორიენტაცია)</p> <p>ე ღერძი ემთხვევა G_1-ს. ვერტიკალურია. ა, ბ და გ ღერძები პარალელურია G_1 მართობი შესაძლებელი წიბოებისა.</p> <p>ე ღერძი ემთხვევა G_1-ს, ვერტიკალურია. ა, ბ და გ ღერძები ემთხვევიან $3L_1$ ღერძს. (დასაშვებია პარაზონტალური ღერძების გამოყვანი სიბრტყეების მართობი წიბოებისა)</p>

1	2	3
<p>ტრიკონური $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$</p>	<p>L_2 L_2C</p>	<p>ე ღერძი ემთხვევა L_2-ს, ვერტიკალურია. α, β და γ ღერძები პარალელურია L_2 ღერძს შესაძლებელი მართობი წიბოებისა.</p>
<p>ე ღერძი ემთხვევა L_2-ს</p>	<p>L_23P</p>	<p>ე ღერძი ემთხვევა L_2-ს, ვერტიკალურია. α, β და γ ღერძები ინ მართობია P ხაზზე, ან დევს P სფერტეკეში (ორნაირი ორიენტაცია).</p>
<p>ე ღერძი ემთხვევა L_2-ს</p>	<p>L_23L_2 L_23L_2PO</p>	<p>ე ღერძი ემთხვევა L_2-ს, ვერტიკალურია. α, β და γ ღერძები ემთხვევა L_2-ს.</p>
<p>მუბრი $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$</p>	<p>$3L_14L_2$ $3L_14L_23PC$</p>	<p>α, β და γ ღერძები ემთხვევა $3L_1$-ს.</p>
<p>მუბრი $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$</p>	<p>$3L_14L_26P$</p>	<p>α, β და γ ღერძები ემთხვევა $3L_1$-ს (ან $3G_1$-ს).</p>
<p>მუბრი $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$</p>	<p>$3L_14L_26L_2$ $3L_14L_26L_29PO$</p>	<p>α, β და γ ღერძები ემთხვევა $3L_1$-ს.</p>

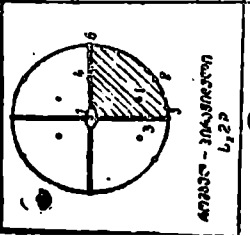
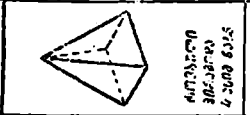






სიბრტყე არ გაივლის (ორივე P გაივლის პირამიდის წიბოებზე). ასეთი პირამიდა შეიძლება იყოს ორნაირი — ზედა (hkl) ან ქვედა ($h\bar{k}\bar{l}$).

შემდეგ გინვიხილოთ სფერული სამკუთხედის გვერდებზე მდებარე წერტილები. წერტილს 2, რომელიც განლაგებულია სამკუთხედის იმ გვერდზე, რომელიც ამავე დროს წრეხაზია, შეესაბამება ვერტიკალური წახნაგი ზოგადი ინდექსით (hko). სიკეტუის არსებული ელემენტების მოქმედებით მივიღებთ ვე რტიკალური მიმართულების III გვარის რომბულ პრიზმას (არ კვეთს მესამე ღერძს), იგი შედგება ოთხი ასიმეტრიული წახნაგისაგან. სამკუთხედის დანარჩენ გვერდებზე მდებარე წერტილებს (3 და 4) შეესაბამება ორწახნაგა ფორმები ე. წ. დიედრები. რაკი



ნახ. IV. 18. რომბული სინგონიის კრისტალოგრაფიული ღერძების სტერეოგრაფიული გეგმილი.

ეს წერტილები მდებარეობენ წრეხაზის შიგნით, მათ შეესაბამება დახრილი წახნაგები, რომლებიც ამავე დროს პარალელური იქნება შესაბამისად b (წერტილი 3) და a (წერტილი 4) ღერძებისა, რადგან განლაგებული არიან მათ მართობებზე. დიედრი (hol) II გვარისაა, ხოლო ($o\bar{k}l$) I გვარის, ისინი შედგებიან ორ-ორი მონოსიმეტრიულ წახნაგაგან (მათზე გადის სიმეტრიის თითო სიბრტყე). დანარჩენი სამი წერტილი (5, 6, 7) მდებარეობს სფერული სამკუთხედის წვეროებში. მეხუთე და შეექვსე ფორმები წარმოდგენილია ვერტიკალური მიმართულების ურთიუოთროლი და პარალელური წყვილი წახნაგებით, რომლებსაც ვუწოდებთ პინაკოიდებს. მათ შორის პირველი პინაკოიდი — ფორმა 5, კვეთს მხოლოდ a ღერძს (100), მეორე პინაკოიდი (010) კვეთს

<p>სივრცითი პროექციები</p>  <p>სივრცითი პროექციები</p>	<p>(H K L)</p>  <p>ბრუნული კონკავი 4-3-2-1-6-5</p>	<p>(h k l)</p>  <p>ბრუნული კონკავი 4-3-2-1-6-5</p>	<p>(h 0 l)</p>  <p>ბრუნული კონკავი 2-2-3-6-5-1</p>	<p>(0 k l)</p>  <p>ბრუნული კონკავი 2-2-3-6-5-1</p>	<p>(h 0 0)</p>  <p>ბრუნული კონკავი 2-2-3-6-5-1</p>	<p>(0 1 0)</p>  <p>ბრუნული კონკავი 2-2-3-6-5-1</p>	<p>(0 0 1)</p>  <p>ბრუნული კონკავი 2-2-3-6-5-1</p>	<p>ბრუნული კონკავი 2-2-3-6-5-1</p>
<p>ბრუნული კონკავი 2-2-3-6-5-1</p>	<p>ბრუნული კონკავი 2-2-3-6-5-1</p>	<p>ბრუნული კონკავი 2-2-3-6-5-1</p>	<p>ბრუნული კონკავი 2-2-3-6-5-1</p>	<p>ბრუნული კონკავი 2-2-3-6-5-1</p>	<p>ბრუნული კონკავი 2-2-3-6-5-1</p>	<p>ბრუნული კონკავი 2-2-3-6-5-1</p>	<p>ბრუნული კონკავი 2-2-3-6-5-1</p>	<p>ბრუნული კონკავი 2-2-3-6-5-1</p>
<p>ბრუნული კონკავი 2-2-3-6-5-1</p>	<p>ბრუნული კონკავი 2-2-3-6-5-1</p>	<p>ბრუნული კონკავი 2-2-3-6-5-1</p>	<p>ბრუნული კონკავი 2-2-3-6-5-1</p>	<p>ბრუნული კონკავი 2-2-3-6-5-1</p>	<p>ბრუნული კონკავი 2-2-3-6-5-1</p>	<p>ბრუნული კონკავი 2-2-3-6-5-1</p>	<p>ბრუნული კონკავი 2-2-3-6-5-1</p>	<p>ბრუნული კონკავი 2-2-3-6-5-1</p>
<p>ბრუნული კონკავი 2-2-3-6-5-1</p>	<p>ბრუნული კონკავი 2-2-3-6-5-1</p>	<p>ბრუნული კონკავი 2-2-3-6-5-1</p>	<p>ბრუნული კონკავი 2-2-3-6-5-1</p>	<p>ბრუნული კონკავი 2-2-3-6-5-1</p>	<p>ბრუნული კონკავი 2-2-3-6-5-1</p>	<p>ბრუნული კონკავი 2-2-3-6-5-1</p>	<p>ბრუნული კონკავი 2-2-3-6-5-1</p>	<p>ბრუნული კონკავი 2-2-3-6-5-1</p>

ნახ. IV. 19. რომელი სივრცითი სფეროს კლასების შესაძლებელი მართკუთხედები ფორმები (ციფრებით აღნიშნულია მართკუთხედების რაოდენობა).

მხოლოდ 2 ღერძს. მეშვიდე წერტილი სამკუთხედის მესამე წვეროზე და ამავე დროს წრებაზის ცენტრში, მისი შესაბამისი წახნაგი პორიზონტალურია (011) ინდექსით, სიმეტრიის ამ კლასში ეს მონოედრია, წარმოდგენილი დისიმეტრიული წახნაგით.

სიმეტრიის რომბულ-პირამიდული კლასის შესაბამისი მინერალებიდან განვიხილოთ კალამინი $Zn_3[S_2O_7](OH)_2 \cdot H_2O$, რომელზედაც ერთდროულად განვითარებულია შედივი მარტივი ფორმა.

2. სიმეტრიის რომბულ-ტეტრაედრულ კლასში არსებობს $3L_2$, რომლებსაც ემთხვევა კრისტალოგრაფიული ღერძები (ნახ. IV. 19). რადგან აქ სიმეტრიის არც ერთი სიმბრტყე არა გვაქვს, ყველა წახნაგი იქნება ასიმეტრიული. პირველი მარტივი ფორმა ზოგადი ინდექსებითა (hkl) რომელი ტეტრაედრია, რომელიც შედგება 4 ასიმეტრიული წახნაგისაგან (ზოგჯერ ამ ფორმას უწოდებენ აგრეთვე ბისფენოიდს). რომბული ტეტრაედრი გვაძლევს ორ ენანტიომორფულ (შეუთავსებელ, სარკისებრ ტოლ) ფორმას — მარჯვენას და მარცხენას (hkl) და ($hk\bar{l}$) ინდექსებით (ნახ. IV. 20).

შემდეგი სამი მარტივი ფორმა რომბული პრიზმებია, რომლებიც შედგებიან ოთხ-ოთხი ასიმეტრიული წახნაგისაგან და მიმართულია მესამე, მეორე ან პირველი კრისტალოგრაფიული ღერძის პარალელურად (ნახ. IV. 19); შესაბამისად გვექნება III გვარის (hko), II გვარის (hal) და I გვარის (okl) რომბული პრიზმა.

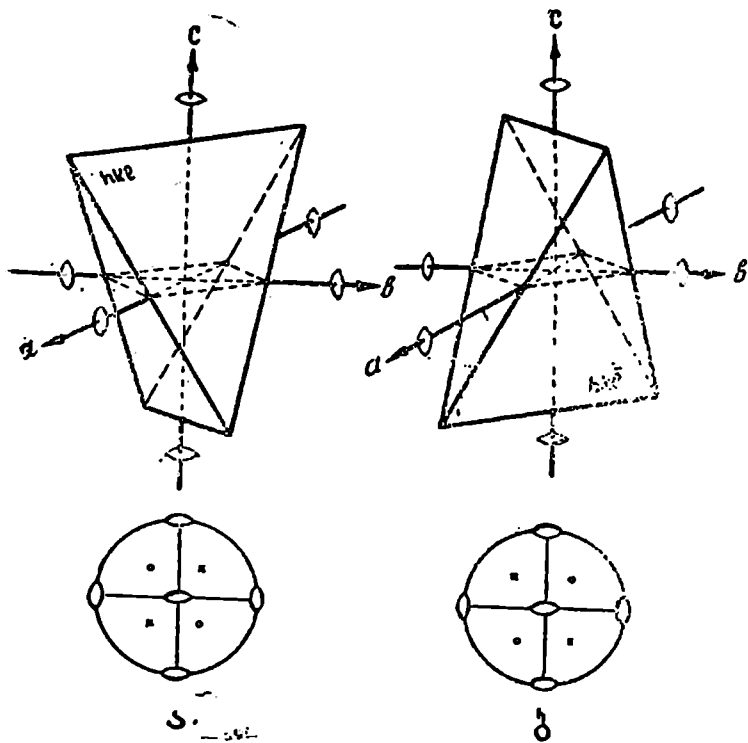
დანარჩენი სამი ფორმა პინაკოიდებია. ყოველ მათგანს აქვს წყვილი, პარალელური და ტოლი ასიმეტრიული წახნაგები, რომლებიც კვეთენ მხოლოდ თითო ღერძს. შესაბამისად გვექნება პირველი (100), მეორე (010) და მესამე პინაკოიდები (001).

IV. 19 ნახაზზე მოცემულია სიმეტრიის რომბულ-ტეტრაედრული სახის შესაბამისი მინერალის (ეფსომიტი- $MgSO_4 \cdot 7H_2O$) კრისტალი, რომელზედაც ერთდროულად განვითარებულია 1, 2, 5 და 6 ფორმა.

3. სიმეტრიის რომბულ-ბიპირამიდული კლასი ამ სინგონიის ყველაზე მაღალი სიმეტრიის კლასია მას აქვს $3L_2$, $3P$ და ინვერსიის ცენტრი, ამასთან დაკავშირებით, პირველი მარტივი ფორმა ზოგადი ინდექსით (hkl) აქ იქნება არა ოთხწახნაგა, არამედ რვაწახნაგა. ეს იქნება რომბული ბიპირამიდა, რომელიც შედგება რვა ასიმეტრიული წახნაგისაგან. სიმეტრიის სამივე სიმბრტყე გაივლის მხოლოდ ბიპირამიდის წიბოებზე, მეორე, მესამე და მეოთხე მარტივი ფორმა, ანალოგიურად წინა კლასისა (სამივე გვარის), რომბული პრიზმებია, მაგრამ რომბული პრიზმები შედგება ოთხ-ოთხი მონოსიმეტრიული წახნაგისაგან. დანარჩენი სამი ფორმაც სამნაირი პინაკოიდია, წარმოდგენილი დისიმეტრიული წახნაგებით.

სიმეტრიის ამ კლასში კრისტალდება მრავალი ნივთიერება, რომელთა შორის აღსანიშნავია მინერალი ოლივინი ($MgFe_2(SiO_3)_2$). მის კრისტალზე ხშირად ერთდროულად განვითარებულია შეიდივე მარტივი ფორმა (ნახ. IV. 19).

რომბული სინგონიის განხილულ სამივე სიმეტრიის კლასში აღნიშნეთ სულ 21 მარტივი ფორმა, მაგრამ მათ შორის ბევრი გეომეტრიულად მეორდება და თუ მათ მხედველობაში არ მივიღებთ, გვექ-



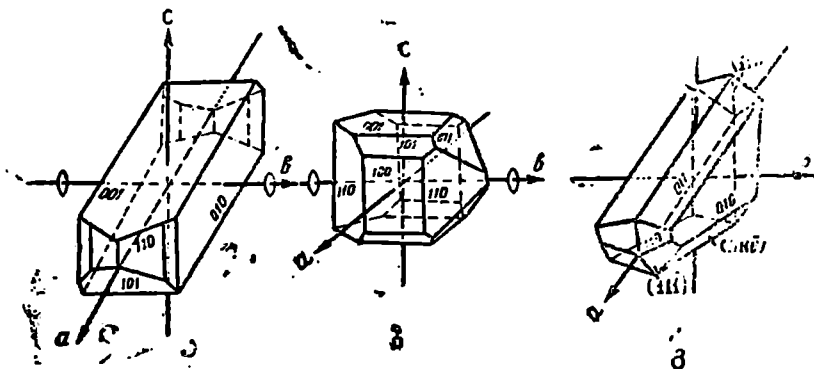
ნახ. IV. 20. შარჯენა (ა) და შარცენა (ბ) რომბული ტეტრაედრი გვეგვილებით.

წება ერთმანეთისაგან გეომეტრიულად განსხვავებული მხოლოდ შეიდი შარტივი ფორმა. ესენია: მონოედრი, დიედრი, პინაკოიდი, რომბული შრიზმა, ტეტრაედრი, პირამიდა და ბიპირამიდა.

მონოკლინური სინგონია $a \neq b \neq c \quad \alpha = \gamma = 90^\circ \neq \beta$

მონოკლინური სინგონიის კრისტალებში მეორე (ბ) კრისტალოგრაფიულ ღერძად ირჩევენ L_2 ღერძის მიმართულებას (ნახ. IV. 21 ა, ბ),

ხოლო უღერძო დიედრის სიმეტრიის კლასში — სიმეტრიის სიბრტყის მართობი მიმართულებას (ნახ. IV. 21 გ). პირველი და მესამე ღერძებში მდებარეობს b ღერძის მართობი სიბრტყეში არსებული (ან შესაძლებელი) წიბოების პარალელურად. მათ შორის მესამე ღერძი ვერტიკალური წიბოების პარალელურია, ხოლო პირველი ღერძი დახრილია ϵ ღერძისადმი. კრისტალი უნდა დაეჭიროთ b ღერძით ისე, რომ a ღერძი დახრილი იყოს დამკვირვებლისაკენ, c ღერძი კი — ვერტიკალური (ნახ. IV. 21). რომელი სინგონიისაგან განსხვავებით



ნახ. IV. 21 მონოკლინური სინგონიის კრისტალებში მეორე კრისტალოგრაფიული ღერძი ემთხვევა L_2 ღერძს (ა, ბ) ან მართობია სიმეტრიის სიბრტყისა (გ).

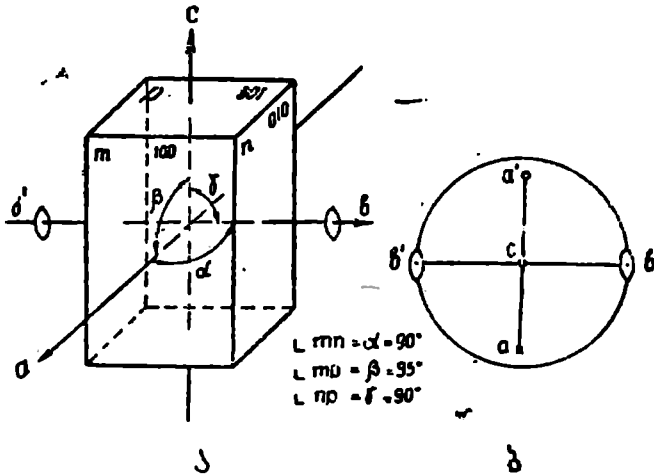
დასაშვებია, რომ a ღერძი იყოს უფრო გრძელი და დახრილი.

მონოკლინური სინგონიის კრისტალოგრაფიული ღერძების სტერეოგრაფიული გეგმილები მოცემულია IV. 22 ნახაზზე. c ღერძი ვერტიკალურია, მისი გეგმილი მდებარეობს წრეხაზის ცენტრში, b პორიზონტალური ღერძის გეგმილი იქნება წრეხაზის დიამეტრი (ემთხვევა L_2 ღერძის მიმართულებას), ხოლო a დახრილი ღერძის გეგმილი იქნება წრეხაზის შიგნით, მაგრამ b ღერძის მართობი მიმართულებით.

a ღერძის დახრის კუთხის დასადგენად უნდა გავზომოთ m და P წახანაგებს შორის კუთხეები და ვულფის ბადის საშუალებით ვიპოვოთ a და a' წერტილები, ამ წერტილების შემაერთებელი სწორი ხაზი პირველი ღერძის სტერეოგრაფიული გეგმილია.

მონოკლინური სინგონიის სიმეტრიის სამივე კლასის შესაძლებელი მარტივი ფორმების გამოსაყვანად საჭიროა გამოვიყენოთ კრისტალის ზონების ცნება და დებულება, რომ ერთი და იმავე ზონის წახანაგების გნომოსტერეოგრაფიული გეგმილები მისი ღერძის მართობი კვეთის დიდ წრეხაზზეა განლაგებული.

4. სიმეტრიის დიედრულ ღერძიან კლასში არსებობს სიმეტრიის მეორე რიგის მხოლოდ ერთი ღერძი (ნახ. IV. 23). ვერტიკალური ზონა შედგება m, r, n, r', m' და n' წახნაგებისაგან. რადგანაც მათი ღერძი ემთხვევა c ღერძს, ამიტომ აღნიშნული წახნაგების გნომოსტერეოგრაფიული გეგმილები განლაგდება (c ღერძის მართობ) ეკვატორულ წრებაზე. b ღერძის შესაბამისი ზონა შედგება m, z, p, m', z' და p' წახნაგებისაგან, რომელთა გნომოსტერეოგრაფიული გეგმილები განლაგდება b ღერძის მართობი კვეთის წრებაზე. მაგრამ, რადგან ეს კვეთი იქნება ვერტიკალური მიმართულების, ამიტომ მისი გეგმილი



ნახ. IV. 22. მონოკლინური სინგონიის კრისტალოგრაფიული ღერძების ხტერეოგრაფიული გეგმილი.

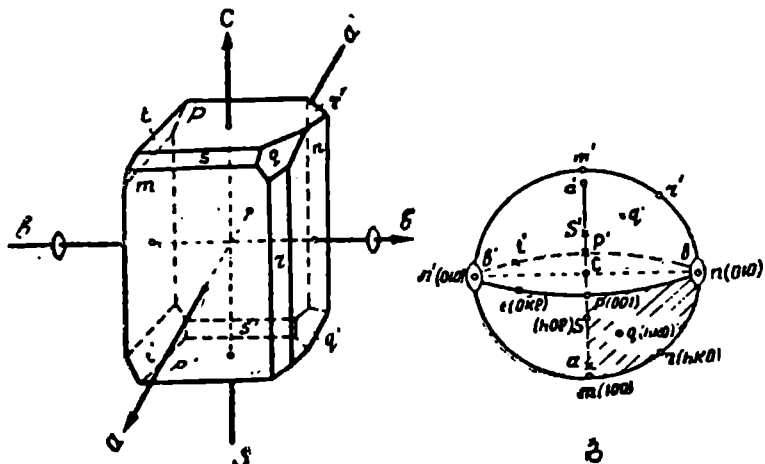
გაშლისახება mm' დიამეტრის სახით, რომელზედაც მოთავსდება აღნიშნული წახნაგების გეგმილები.

a ღერძის შესაბამისი ზონაში შედის m, p, z, m', z' და p' წახნაგები, მათი გნომოსტერეოგრაფიული გეგმილები განლაგდება a ღერძის მართობი კვეთის დიდ წრებაზე. ამ წრებაზე აღვიღად ივსავებთ ვულფის ბადის საშუალებით, თუ ვიცით β კუთხის სიდიდე (ნახ. IV. 23 ბ). უკანასკნელი ორი ზონის გადაკვეთის წერტილებში განლაგებული იქნება p და p' წახნაგების გნომოსტერეოგრაფიული გეგმილები, რადგან ისინი ერთდროულად ეკუთვნის ორევე ზონას. აგებული სამი კვეთი ჰყოფს სფეროს ზედაპირს რვა სფერულ სამკუთხედად, რომელთა შორის წინა, მარჯვენა ზედა კმნის mpn სამკუთხედს.

პირველი ზოგადი განლაგების ფორმა (hkl) ინდექსით იქნება g

მ. გ. ხარაშვილი 118

წახნაგი, მისი გეგმილი განლაგდება სფერული სამკუთხედის შიგნით. მაგრამ, რაკი აქ არსებობს სიმეტრიის მეორე რიგის ლერძი, აუცილებლად უნდა იყოს მისი ტოლი მეორე q' წახნაგიც (ნახ. IV. 23) და შივილებთ ე. წ. IV გვარის დიედრს. ასეთი დიედრი შეიძლება იყოს ოთხნაირი: მარჯვენა დადებითი (hkl) და უარყოფითი ($h\bar{k}l$) და მარცხენა დადებითი ($h\bar{k}l$) და უარყოფითი (hkl). მეორე, მესამე და მეოთხე ფორმა იქნება შესაბამისად III გვარის დიედრი მარჯვენა (hkl) ან მარცხენა ($h\bar{k}l$), II გვარის პინაკოიდი დადებითი (hOl) ან უარყოფითი ($h\bar{O}l$).



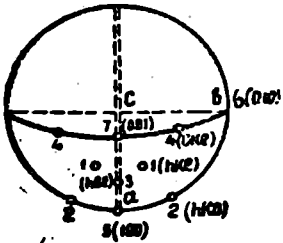
ნახ. IV. 23. სიმეტრიის დიედრულღერძიანი კლასის მრავალწახნაგი (ა) და მისი გეგმილი (ბ). qq' მარჯვენა დადებითი IV გვარის დიედრი, pp' მარჯვენა III გვარის დიედრი, ss' მეორე გვარის დადებითი პინაკოიდი, tt' მარცხენა I გვარის დიედრი, $uuuu$ მარჯველი პინაკოიდი, და vv მეორე მონოედრი (+ და -), PP' მესამე პინაკოიდი.

ფითი ($h\bar{O}l$) და I გვარის დიედრი მარჯვენა ($Ok\bar{l}$) ან მარცხენა ($O\bar{k}l$). შათი გეგმილები მოთავსდება სფერული სამკუთხედის გვერდებზე. დაზოლოს, მეხუთე, მეექვსე და მეშვიდე ფორმები, რომელთა გეგმილები სამკუთხედის წვეროებშია, შესაბამისად იქნებიან პირველი პინაკოიდი (100), მეორე მონოედრი — მარჯვენა (010) ან მარცხენა ($0\bar{1}0$) და მესამე პინაკოიდი (001) (ნახ. IV. 23).

IV. 21 ბ ნახაზზე მოცემულია სიმეტრიის დიედრულღერძიანი კლასის კრისტალი (ღვიწოშეკვა), რომელზედაც განვითარებულია პირველი (100) და მესამე (001) პინაკოიდები, III გვარის მარჯვენა (110) და მარცხენა ($1\bar{1}0$) დიედრი. II გვარის დადებითი (101) და უარყოფითი ($1\bar{0}1$) პინაკოიდი და I გვარის მარჯვენა დიედრი (011).

5. სიმეტრიის უღერძო დიედრულ კლასში არსებობს მხო-

ლოდ სიმეტრიის ერთი სიმბრტყე, რომელიც ვერტიკალურად უნდა მდებარეობდეს (ნახ. IV. 21 გ და IV. 24), ზოგადი განლაგების ფორმა იქნება IV გვარის დიედრი (იხ. ტაბულა IV. 9). იგი შეიძლება იყოს ოთხნაირი: ზედა დადებითი (hkl) ან უარყოფითი ($\bar{h}kl$) და ქვედა დადებითი ($hk\bar{l}$) ან უარყოფითი ($\bar{h}k\bar{l}$). IV. 21 გ ნახაზზე მოცემულ ჰილგარდიტის $C_2[B_2O_3]Cl_4 \cdot 4H_2O$ კრისტალზე განვითარებულია

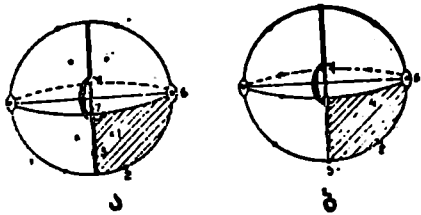
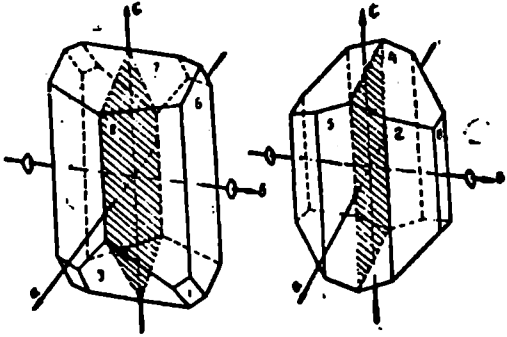


ორნაირი IV გვარის დიედრი: ქვედა დადებითი (lll) და ($hk\bar{l}$) და ზედა უარყოფითი (\bar{lll}). მეორე მართკუთხე ფორმა III გვარის დადებითი ($hk0$) ან უარყოფითი ($\bar{h}k0$) დიედრი. ჰილგარდიტის კონსტალზე III გვარის ორივეაიანი დიედროა (110), ($\bar{1}10$) — (ნახ. IV. 21 გ). მესამე მართკუთხე ფორმა II გვარის ძონოეცოა.

ნახ. IV. 24. სიმეტრიის უფრო დაბალი კლასის გვემილი.

სისი გვემილი მდებარეობს სიმეტრიის სიმბრტყეზე (ნახ. IV. 24). ამოთვე ფორმა იქნება I გვარის ზედა ან ქვედა დიედრი ჰილგარდიტის კონსტალზე ორის შხოლოდ I გვარის ზედა დიედრი (011). დანაოჩენი სამი ფორ-

შიდან (იხ. ტაბულა IV. 9, მეოთხე კლასი) შეხუთე და მეშვიდე შესაბამისად პირველი (100) და მესამე (001) შონოდრებია (მათი გვემილებიც დევს სიმეტრიის სიმბრტყეზე და, მაშასადამე, არ მეორდებაან), ხოლო მეექვსე მართკუთხე ფორმა — მეორე პინაკოილია (010), რომელიც აგრეთვე ჰილგარდიტის აღნიშნულ კრისტალზეცაა განვითარებული.



ბ რ ი ზ მ უ ლ ი კ ლ ა ს ი შონოკლონიური სინკონიის სიმეტრიის მაქსიმალური ხარისხის მქონე

ნახ. IV. 25. სიმეტრიის პრიზმული კლასის კრისტალზე და მათი გვემილები: ა-ორთოკლასი; ბ-ავიტი.

დავალი კატეგორიის სინოტივები

2

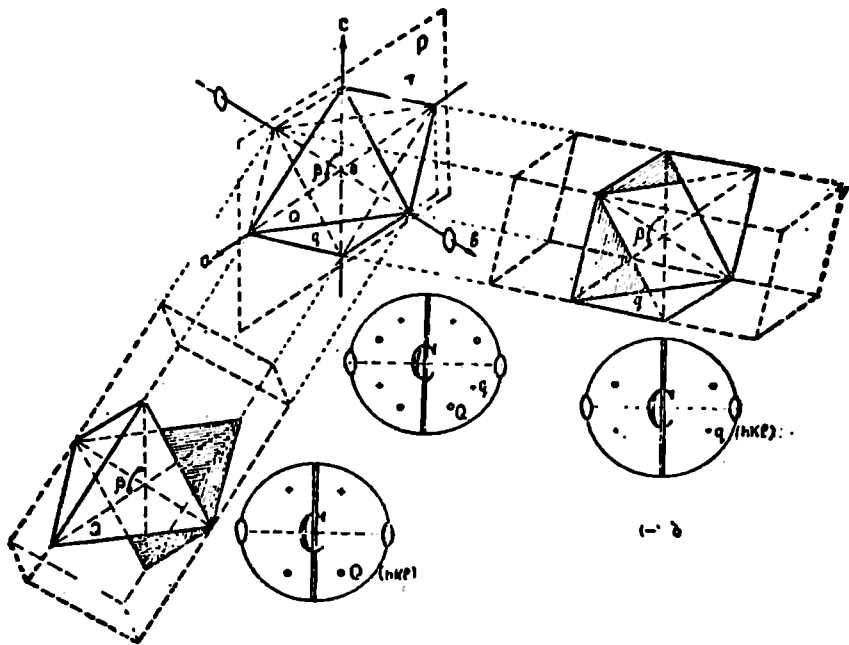
საბერძნო	სინოტივ და მოდული კატეგორია	სინოტივის ჯვარი და ფორმულა	სინოტივის ელემენტების და მატიმ. ურთიკვამ ბეჭედები	შესაძლებელი	
				1	2
				(ჩკქ)	(ხკი) -
ი ქ ღ ბ ა ღ	ბრინჯილინობრი მ, ნ, ც	1 მონოლოგი L ₁		მ-4 მხარე მონოლოგი $\angle AOP = \alpha$ $\angle POC = 2\alpha$	მ-3 მხარე მონოლოგი $\angle AOP = \alpha$ $\angle POC = 2\alpha$
		2 პინასიოლოგი C		მ-4 მხარე პინასიოლოგი $\angle AOP = \alpha$ $\angle POC = 2\alpha$	მ-3 მხარე პინასიოლოგი $\angle AOP = \alpha$ $\angle POC = 2\alpha$
	მინიხლენობრი მ, ნ, ც	3 დიოკლედიანი L ₂		მ-4 მხარე დიოკლედიანი $\angle AOP = \alpha$ $\angle POC = 2\alpha$	მ-3 მხარე დიოკლედიანი $\angle AOP = \alpha$ $\angle POC = 2\alpha$
		4 ელემენტი-დიოკლედიანი P (9i ₂)		მ-4 მხარე დიოკლედიანი $\angle AOP = \alpha$ $\angle POC = 2\alpha$	მ-3 მხარე დიოკლედიანი $\angle AOP = \alpha$ $\angle POC = 2\alpha$
		5 პრიმიტივი L ₁ P C		მ-4 მხარე პრიმიტივი $\angle AOP = \alpha$ $\angle POC = 2\alpha$	მ-3 მხარე პრიმიტივი $\angle AOP = \alpha$ $\angle POC = 2\alpha$
	ბრინჯილინობრი მ, ნ, ც	6 ბრინჯილი-პინასიოლოგი L ₂ 2P		ბრინჯილი პინასიოლოგი $\angle AOP = \alpha$ $\angle POC = 2\alpha$	მ-3 მხარე ბრინჯილი პინასიოლოგი $\angle AOP = \alpha$ $\angle POC = 2\alpha$
		7 ბრინჯილი-ბინასიოლოგი 3L ₂		ბრინჯილი ბინასიოლოგი $\angle AOP = \alpha$ $\angle POC = 2\alpha$	მ-3 მხარე ბრინჯილი პინასიოლოგი $\angle AOP = \alpha$ $\angle POC = 2\alpha$
		8 ბრინჯილი-ბინასიოლოგი 3L ₂ 3P C		ბრინჯილი ბინასიოლოგი $\angle AOP = \alpha$ $\angle POC = 2\alpha$	მ-3 მხარე ბრინჯილი პინასიოლოგი $\angle AOP = \alpha$ $\angle POC = 2\alpha$

მარტივი ფორმები

მარტივი ფორმების ინდექსები				
3	4	5	6	7
(აოქ)	(ოქქ)	(იოქ)	(ოიქ)	(ოიქ)
მ-2 მკაის მონოური 923 + 35 - 3323 + 36 -	1-თ მკაის მონოური 923 2733 36 24-6 3323 2433 36 25-3	პირველი მონოური +36 -	მეორე მონოური +36 -	მესამე მონოური +36 -
მ ა რ ტ ი უ ლ ი ნ ა ნ ნ ა მ ი თ				
მ-2 მკაის პინაუთი +35 -	1-თ მკაის პინაუთი 2433 36 24-6	პირველი პინაუთი	მეორე პინაუთი	მესამე პინაუთი
ა ს ი მ ა რ ტ ი უ ლ ი ნ ა ნ ნ ა მ ი თ				
მ-2 მკაის პინაუთი +35 -	1-თ მკაის დივანი 2433 36 24-6	პირველი პინაუთი	მეორე მონოური 2433 25 24-6 2 2603 36 24-6	მესამე პინაუთი 2 2603 36 24-6
ბ რ ი უ ლ ი ნ ა ნ ნ ა მ ი თ			1 2603 36 24-6	2 2603 36 24-6
მ-2 მკაის მონოური 923 + 35 - 3323 + 36 - 1 მონოური ნანახით	1-თ მკაის დივანი 923 24 3323 2 2603 36 24-6	პირველი მონოური +36 - 1 მონოური ნანახით	მეორე პინაუთი 2 2603 36 24-6	მესამე მონოური +36 - 1 მონოური ნანახით
მ-2 მკაის პინაუთი +36 - 2 მონოური ნანახით	1-თ მკაის რობული პრიზმა 4 2603 36 24-6	პირველი პინაუთი 2 მონოური ნანახით	მეორე პინაუთი 2 2603 36 24-6	მესამე პინაუთი 2 მონოური ნანახით
მ-2 მკაის დივანი +36 -	1-თ მკაის დივანი +35 -	პირველი პინაუთი	მეორე პინაუთი	მესამე მონოური +36 - 1 მონოური ნანახით
2-2 მონოური მარტივი ნანახით				
მ-2 მკაის რობული პრიზმა	1-თ მკაის რობული პრიზმა	პირველი პინაუთი	მეორე პინაუთი	მესამე პინაუთი
ნ ა ნ ნ ა მ ი თ		2-2 პინაუთი ნანახით		
მ-2 მკაის რობული პრიზმა	1-თ მკაის რობული პრიზმა	პირველი პინაუთი	მეორე პინაუთი	მესამე პინაუთი
მონოური ნანახით		2-2 პინაუთი ნანახით		

ნე კლასია. აქ ერთდროულად მოქმედებენ L , P და C (ნახ. IV. 25 და IV. 21 ა). ამასთან დაკავშირებით მარტივი ფორმები წარმოდგენილია ოთხწახნაგა რომბული პრიზმებითა (სამი გვაოსი) და ოთხნაირი პინაკოიდით.

ზოგადი განლაგების პირველი წახნავი მოგვცემს ოთხწახნაგა რომბულ პრიზმას, ოოძელიც საძივე ლუძს კვეთს და IV გვარისა იქნება. იგი შეიძლება იყოს დადებითი $Q(hkl)$ და უარყოფითი $q(hk\bar{l})$ ორიენტაციისა (ნახ. IV. 25). ოთაოკლახის $K[AlSi_3O_8]$ კოისტალზე განვითაოებულა უარყოფითი ორიენტაციის IV გვარის რომბული პრი-



ნახ. IV. 26. IV გვარის ორი რომბული პრიზმა, ა-დადებითი, ბ-უარყოფითი.

ზმის წახნავი (ნახ. IV. 25 ა).

მეორე მარტივი ფორმა ვერტიკალური მიმართულების ოთხწახნაგა პრიზმაა. ე. ი. III გვაოსისა (hkO) ინდექსებით (ნახ. IV. 25. მესამე ფორმის გვემილი მდებარეობს წრეხაზის შიგნით, მაგრამ სიმეტრიის სიბრტყის გვემილზე. მაშასადამე, წახნავი დაბრილია, კვეთს a და c ღერძებს და პოაალეღურიბა b ღერძისა. ინვერსიის ცენტრის ოქმედების გამო ამ წახნავს უნდა ჰქონდეს მისი ტოლი და პარალეღურიბ წახნავი. მაშასადამე, ეს იქნება II გვარის პინაკოიდი. იგი შეიძლება

ფოს დადებითი და უარყოფითი ორიენტაციისა. IV. 25 ა ნახაზე მოცემულია უარყოფითი ორიენტაციის II გვარის პინაკოიდი (წახნაგ 3). მეოთხე ფორმა მოთავსებულია a ღერძის შესაბამის ზონაში და, მაშასადამე, ოთხივე მისი წახნაგი a ღერძის პარალელურია. ეს იქნება I გვარის რომბული პრიზმა (OkI) ინდექსებით (წახნაგი 4, ნახ. IV. 25 ბ), დანა-ჩენი სამი ფორმა — შესაბამისად პირველი (100), მეორე (010) და მესამე (001) პინაკოიდები (ნახ. IV. 25, წახნაგები 5, 6 და 7).

მონოკლინური სინგონიის განხილულ სიმეტრიის სამივე კლასში წვენ შეგვხვდა ერთმანეთისაგან გეომეტრიულად განსხვავებული მხოლოდ ოთხი მარტივი ფორმა, ესენია: მონოედრი, პინაკოიდი, დიედრი და რომბული პრიზმა (იხ. ტაბულა IV. 9).

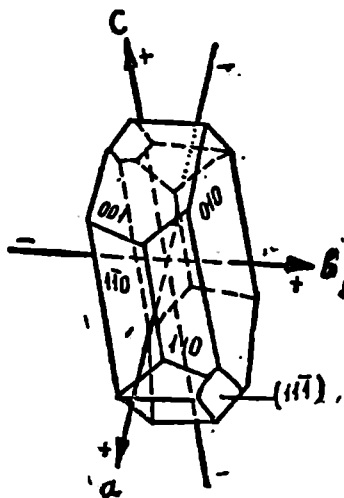
ტრიკლინური სინგონია $a \neq b \neq c, \alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$

ტრიკლინური სინგონიის კრისტალები სიმეტრიის ყველაზე და-

შალი კლასის მქონე კრისტალებია. მათ არა აქვთ არც სიმეტრიის ღერძი და არც სიმეტრიის სიბრტყე. კრისტალოგრაფიული ღერძები ვადის აოსებული (ან შესაძლებელი) წიბოების პარალელურად (ნახ. IV. 27), მესამე (c) ღერძი კი — ყველაზე განვითარებული ზონის წიბოების პარალელურად და დგება ვერტიკალურად. დანაჩენი ღერძებიდან b ის ღერძი იქნება, რომლითაც დავიჭერთ კრისტალს, a ღერძი კი დახრილი უნდა იყოს დამკვირვებლისაკენ (ნახ. IV. 27).

რადგან ტრიკლინური სინგონიის კრისტალურ მესერაში არ არსებობს ურთიერთმართობი რიგები, ამიტომ შერჩეულ ღერძებს შორის კუთხეებიც არ იქნება 90° . ერთეულ წახნაგად შეიძლება მივიჩნიოთ ნეკრსმიერი წახნაგი, რომელიც კვეთს სამივე კრისტალოგრაფიულ ღერძს. ეს იქნება ან მონოედრი, ან პინაკოიდი ერთეული პარამეტრებით $a_0 \neq b_0 \neq c_0$.

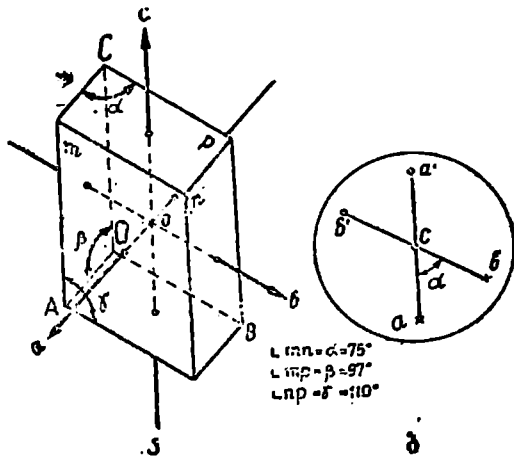
რადგან ტრიკლინურ სინგონიაში კრისტალოგრაფიული ღერძები ურთიერთდასრულია და მათი მიმართულებანი არ ემთხვევა სიმეტრიის რონგლიმე ელემენტს. ამიტომ ამ ღერძების სტერეოგრაფიულ გეგმილების გამოხატვა განსხვავდება სხვა სინგონიების ღერძების გა-



ნახ. IV. 27. ტრიკლინური სინგონიის კრისტალებში კრისტალოგრაფიული ღერძები წიბოების პარალელურია.

მონაზვისაგან. მაგალითისათვის ავიღოთ IV. 28 ნახაზზე მოცემული ტრიკლინური სინგონიის კრისტალი და გავატაროთ კრისტალოგრაფიული ლეოძები არსებული OA , OB და OC წიბოების პარალელურად. მივიღებთ სამ ურთიერთართოლ და დახრილ a , b და c ლერძებს (ნახ. IV. 28 ა). კრისტალი დავიჭიროთ b ლერძით ისე, რომ c ლერძი ვერტიკალური იყოს, ხოლო a ლერძი — დამკვივრებლისაკენ დახრილი. ლეოძებს შორის კუთხეების დასადგენად შეუებითი გონიომეტრით გავზომოთ წახაზავებს შორის კუთხეები (იხ. ნახ. IV. 28).

c ვერტიკალური ლეოძის გვემილი გამოისახება წერტილის სახით წრეხაზის ცენტრში (ნახ. IV. 28 ბ),



ნახ. IV. 28. ტრიკლინური სინგონიის კრისტალოგრაფიული ლერძების სტერეოგრაფიული გვემილება.

ტილებს. ამ წერტილებს შუაეჩიებული სწორი ხაზი იქნება a კრისტალოგრაფიული ლერძის სტერეოგრაფიული გვემილი.

b ლერძის მიმართულების დასადგენად a ლერძიდან უნდა გადავზომოთ კუთხე $\alpha = 75^\circ$ (m და n წახაზავებს შორის კუთხის შესაბამისად), შემდეგ ამ მიმართულებაზე მეორე ლერძის დახრის კუთხის შესაბამისი ანათვლების საშუალები (ჩვენს შემთხვევაში დახრის კუთხეა 20°) ვიპოვიოთ b და b' წერტილებს, რომელთა შემაერთებელი სწორი ხაზი მეორე ლერძის სტერეოგრაფიული გვემილი იქნება.

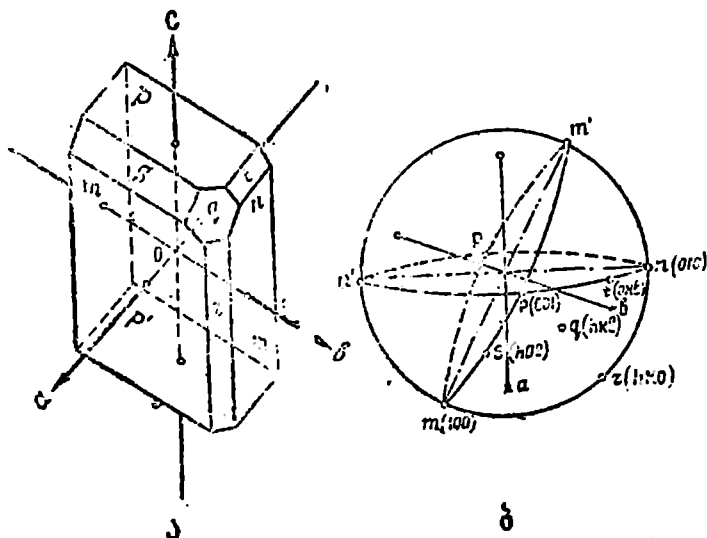
შესაძლებელი მარტივი ფორმების გამოსაყვანად, აქაც, ისე როგორც მონოკლინურ სინგონიაში, უნდა გამოვიყენოთ ზონების გვემილები.

7. სიმეტრიის მონოკლინური კლასი. ამ კლასის კრისტალებში სიმეტრიის არც ერთი ელემენტი არ არის, ამიტომ ნებისმიერი შესაძლებელი წახაზავი არაა სიმეტრიულად დაკავშირე-

ბული კრისტალის სხვა რომელიმე წახნაგთან, ამგვარად აქ გვექნება მხოლოდ მონოედრები, რომლებსაც ერთმანეთისაგან განსხვავებული შეიღნაირი ორიენტაცია ექნება (იხ. ტიბულა IV. 9, პირველი კლასი).

აეილოთ სიმეტრიის მონოედრული კლასის მრავალწახნაგა (ნახ. IV. 29 ა), არსებული წიბოების პარალელურად გავტაროთ a , b და c ღერძები. ვიპოვოთ სამივე ღერძის შესაბამისი ზონების გეგმილები. როგორც ვიცით, ყოველი ზონის შემადგენელი წახნაგების გნომოსტერეოგრაფიული გეგმილი მოთავსებულია ერთ დიდ წრეხაზზე, რომელიც ზონის ღერძის მართობი კვეთის სტერეოგრაფიული გეგმილია.

ვერტიკალური ღერძის შესაბამისი ზონა შედგება m , r , n , m' და



ნახ. IV. 29. სიმეტრიის მონოედრული კლასის მრავალწახნაგა (ა) და მისი გეგმილი (ბ).

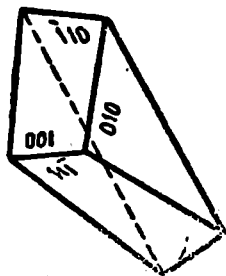
m' წახნაგებისაგან; მათი გნომოსტერეოგრაფიული გეგმილები განლაგდება ეკვატორულ წრეხაზზე (ნახ IV. 29 ბ). მეორე ღერძის შესაბამისი ზონა შედგება m , r , p , m' და p' წახნაგებისაგან, რომელთა გნომოსტერეოგრაფიული გეგმილები განლაგდება b ღერძის მართობი კვეთის დიდ წრეხაზზე a ღერძის შესაბამისი ზონაში შემაჯავლი n , l , p , n' და p' წახნაგების გეგმილები კი — a ღერძის მართობი კვეთის წრეხაზზე. გატარებული სამი ზონის გამომსახველი სიბრტყე კვეთს გეგმილთა სფეროს ზედაპირს რვა სფერულ სამკუთხედად, რომელთა შორის განსახილველია წინა, მარჯვენა ზედა სამკუთხედი (ნახაზზე სფერო).

სამკ. mpn), რომლის ფარგლებში განლაგდება შედივე შესაძლებელი მონოედრის გეგმეც.

პირველი მარტივი ფორმა იქნება ზოგადი განლაგების წახნაგე (მონოედრი), რომელიც სამივე ღერძს გადაკვეთს. მისი გნომოსტერეოგრაფიული გეგმილი მოთავსდება სამკუთხედის შიგნით, იგი IV გვარის მონოედრია. ჩვენს შემთხვევაში ეს იქნება q წახნაგი (hkl) ინდექსებით (ნახ. IV. 29). ამ ფორმას შეიძლება ჰქონდეს რეზანირი განლაგება: $1, (hkl), 1_2(\overline{h\overline{k}l}), 1_3(\overline{h\overline{k}l}), 1_4(\overline{h\overline{k}l}), 1_5(h\overline{k}\overline{l}), 1_6(h\overline{k}\overline{l}), 1_7(h\overline{k}\overline{l})$ და $1_8(\overline{h\overline{k}\overline{l})}$.

მეორე, მესამე და ჩოთხე მარტივი ფორმის გეგმილები უნდა მდებარეობდნენ mpn სფერული სამკუთხედის გვერდებზე. ყოველი მათგანი თითო ღერძის პარალელურია. ასეთებია $r(h, 0)$, $s(l, 0l)$ და $t(0kl)$ წახნაგები, რომლებიც სთანადოდ მესამე, მეორე და პირველ გვარის მონოედრებია. ყოველი მათგანი შეიძლება ოთხნაირად განლაგდეს (რახულა IV. 9). დანარჩენი სამი მარტივი ფორმის გეგმილები განლაგებულია სფერული სამკუთხედის წვეროებში და მაშასადამე, ეს წახნაგები კვეთენ მხოლოდ თითო ღერძს და ქმნიან მონოედრების ახალ ტიპს, რომლებსაც პირველ, მეორე და მესამე მონოედრს უწოდებენ. ასეთებია $m(100)$, $n(010)$ და $p(001)$ წახნაგები. აღსანიშნავია,

რომ უკაქასკენელი სამი ფორმის გეგმილები მდებარეობენ ზონების გამომსახველი წრეხაზების გადაკვეთაზე, ე. ი. ერთდროულად ორ-ორ ზონაში. სიმეტრიის ამ კლასის შესაბამისი მინერალებიდან აღვნიშნოთ ბორატების კლასის მინერალი პარაპილგარდიტი $Ca_2[B_6O_{11}]Cl \cdot 4H_2O$ (ნახ. VI. 30).



ნახ. IV. 30. პარაპილგარდიტის კრისტალი სიმეტრიის მონოედრული კლასი).

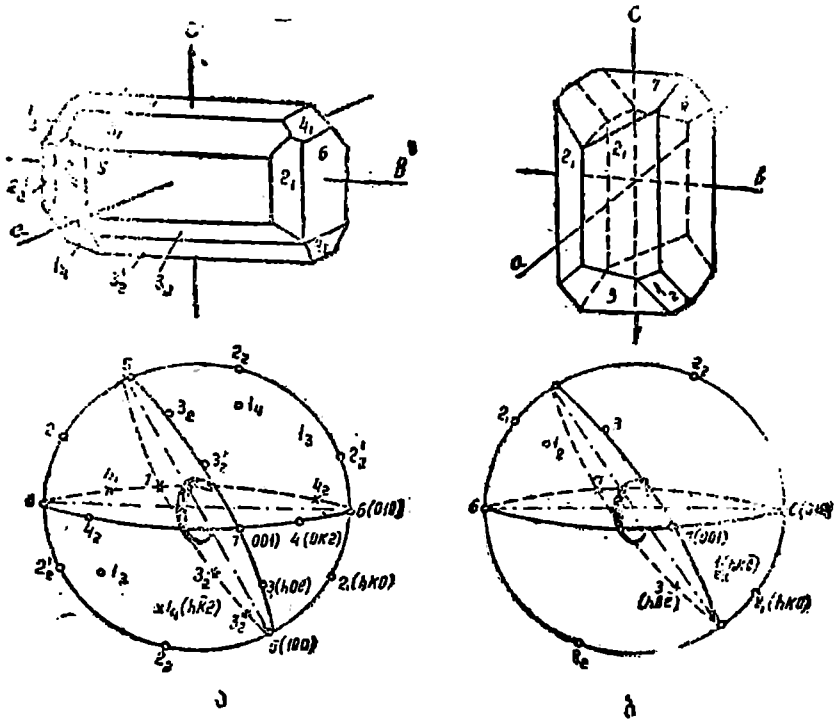
8. სიმეტრიის პინაკოიდურ კლასში გვაქვს მხოლოდ ინვერსიის ცენტრი, ამიტომ ამ კლასში შემავალ კრისტალებზე ყოველ წახნაგს უნდა ჰქონდეს შესაბამისი ტოლი და პარალელური წახნაგი. მაშასადამე, ყველა შესაძლებელი მარტივი ფორმა აქ პინაკოიდო უნდა იყოს. წინა კლასის მონოედრების

ანალოგიურად აქაც გვექნება სამი ტიპის პინაკოიდი: პინაკოიდები, რომლებიც სამივე ღერძს კვეთენ; პინაკოიდები, რომლებიც მხოლოდ ორ ღერძს კვეთენ და პინაკოიდები, რომლებიც მხოლოდ თითო ღერძს კვეთენ.

შესაძლო მარტივი ფორმების (პინაკოიდების) გასარჩევად ავიღოთ IV. 31-ნახაზზე მოცემული კრისტალები. პირველი — მარტივი

ფორმა იყოს ზოგადი ორიენტაციის წახნაგის ფორმა (hkl) [ინდექსით. ეს იქნება IV გვარის პინაკოიდი, რომელიც შეიძლება ოთხხაირად განლაგდეს: ორი ძა უჯვენა (დადებითი და უარყოფითი) და ორი მარცხენა (დადებითი და უარყოფითი) (ნახ. IV. ა2).

ვოლასტონიტის Ca_2SiO_6 კრისტალზე (ნახ. IV. 31 ა) განვითარებულია IV გვარის ორი პინაკოიდი — მარცხენა დადებითი, წახნაგ



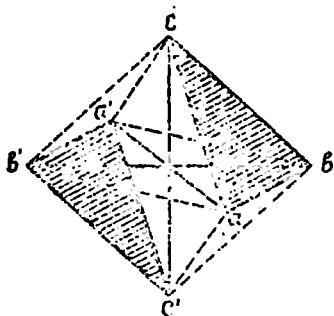
აზ. IV. 31. სიმეტრიის პინაკოიდური კლასის კრისტალები და მათი გვერდები α -ვოლასტონიტის, მ-ალბიტის.

1_3 — ($h\bar{k}l$) და მარცხენა უარყოფითი, წახნაგი $1_4(h\bar{k}\bar{l})$, ხოლო ალბიტის $\text{Na}[\text{AlSi}_3\text{O}_8]$ კრისტალზე (ნახ. IV. 31 ბ) გვაქვს მხოლოდ IV გვარის მარჯვენა უარყოფითი პინაკოიდი. წახნაგი $1_2(hk\bar{l})$.

შემდეგი სამი ფორმა იქნება მესამე, მეორე და პირველი გვარის პინაკოიდები ინდექსებით: (hkO), (hOl) და (Ok). ყოველი მათგან შეიძლება იყოს მარჯვენა ან მარცხენა განლაგებისა III და I გვარის პინაკოიდებისათვის და დადებითი ან უარყოფითი — II გვარისათვის (იხ. ტაბულა IV. 9, მეორე კლასი). ვოლასტონიტის კრისტალზე (ნახ. IV.

31) სამი III გვარის პინაკოიდი — ერთი მარჯვენა (წახნაგი 2.) და ორი მარცხენა (წახნაგები 2₂ და 2'₂). სამი II გვარის პინაკოიდი — ერთი დადებითი (წახნაგი 3₁) და ორი უარყოფითი (წახნაგები 3₂ და 3'₂) და I გვარის პინაკოიდი მარჯვენა (წახნაგი 4₁) და მარცხენა (წახნაგი 4₂). ალბიტის კონსტალზე კი განვითარებულია III გვარის პინაკოიდი მარჯვენა (წახნაგი 2₁) და მარცხენა (წახნაგი 2₂) და უარყოფითი II გვარის პინაკოიდი (წახნაგი 3).

დანარჩენი სამი ფორმა — მეზუმე, მეეჟსე და მეშვიდე სათანადოდ პირველი, მეორე და მესამე



პინაკოიდებია, ე. ი. პინაკოიდები, რომლებიც კვეთენ მხოლოდ თითო ღერძს. პირველი პინაკოიდის შესაბამისი ინდექსია (100), მეორისა — (010) და მესამისა — (001). ვოლასტონიტის კონსტალზე სამივე ტიპის პინაკოიდი გავითარებული (წახნაგები 5, 6 და 7), ხოლო ალბიტის კონსტალზე გვაქვს მხოლოდ მეორე (წახნ. 6) და მესამე (წახნ. 7) პინაკოიდები.

ნახ. IV. 32. IV გვარის პინაკოიდის ოთხნარკი განლაგება. დამტარებულია მარჯვენა დადებითი პინაკოიდი.

სიმეტრიის ამ კლასში კონსტალდება მრავალი მინერალი, მათ

შორის პლაგიოკლასები (მინდვრის შპატების დიდი ჯგუფია), სპილენძის შაბიამარი და სხვ.

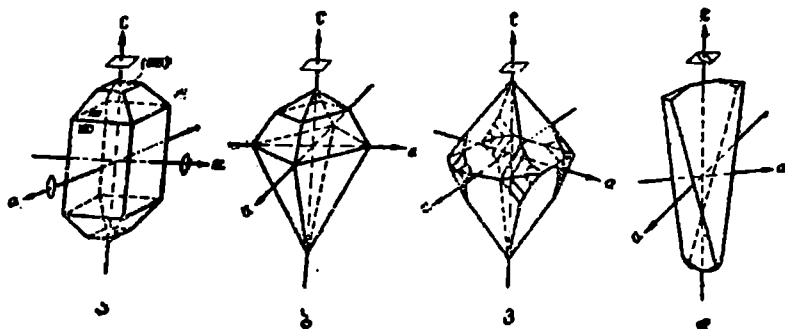
ამგვარად, ჩვენ განვიხილეთ დაბალი კატეგორიის სინგონიების სიმეტრიის 8 კლასის ძეგაძლებელი შვიდ შვიდი მარტივი ფორმა (იხ. ტაბულა IV. 9). სულ მივიღეთ მარტივი ფორმების 56 სახესხვაობა, ამათგან ერთმანეთისაგან გეომეტრიულად განსხვავებულია სულ 7 მარტივი ფორმა, ესენია: 1) მონოდრი, 2) დიედრი, 3) პინაკოიდი, 4) რომბული პრიზმა, 5) რომბული ტეტრაედრი, 6) რომბული პირამიდა და 7) რომბული ბიპირამიდა. უკანასკნელი სამი ფორმა გვხვდება განხილულ სიმეტრიის კლასებში თითოჯერ. დანარჩენები კი გეომეტრიულად მეორდებიან. ასე, მაგალითად, დიედრი მეორდება 8-ჯერ, რომბული პრიზმა — 10-ჯერ, მონოდრი — 12-ჯერ და პინაკოიდი — 23-ჯერ (იხ. ტაბულა IV. 9).

საშუალო კატეგორიის სინგონიები. საშუალო კატეგორიაში გავრთიანებულია ტეტრაგონური, ჰექსაგონური და ტრიგონური სინგონიები, რომლებშიც ორი კონსტალოგრაფიული ღერძი ურთიერთობლია, ხოლო მესამე ϵ ღერძი არატოლი, იგი შეიძლება იყოს პირველ

ორ ღერძზე უფრო მეტი ან ნაკლები სიგრძისა, მაგრამ ყოველთვის ვერტიკალურად უნდა იყოს მიმართული.

ტეტრაგონური სინგონია ($a = b \neq c, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$)

ტეტრაგონური სინგონიის კრისტალებში კრისტალოგრაფიულ ღერძებს ატარებენ ისე, რომ ვერტიკალური (მესამე) ღერძი ყოველთვის ემთხვეოდეს L_4 ან G_4 ღერძის მიმართულებას (ნახ. IV. 33). დანარჩენი ორი ტოლი ღერძი უთავსდება ან ურთიერთმართობ L_2 ღერძების მიმართულებას (ნახ. IV. 33 ა), ან L_4 -ზე გამავალი სიმეტრიის სიბრტყეების მართობ მიმართულებას (ნახ. IV. 33 ბ). როცა კრისტალს სიმეტრიის აღნიშნული ელემენტები არა აქვს, მაშინ ტოლ

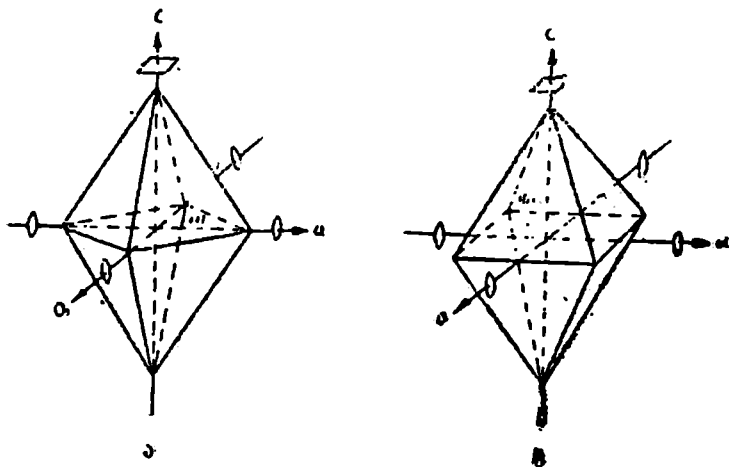


ნახ. IV. 33. ტეტრაგონური სინგონიის კრისტალებში კრისტალოგრაფიულ ღერძი ყოველთვის ემთხვევა L_4 ან G_4 .

კრისტალოგრაფიულ ღერძებს ატარებენ ჰორიზონტალური მიმართულების ურთიერთმართობი არსებული (ან შესაძლებელი) წიბოების პარალელურად (ნახ. IV. 33 გ). ამ ღერძებიდან ღერძი, რომლითაც კრისტალი გვიკავია პირობითად, მეორე ღერძად ჩაითვლება, პირველი ღერძი კი მაყურებლისაკენ იქნება მიმართული. კრისტალი ორიენტაციის აღნიშნული მოთხოვნილების დაკმაყოფილებით სიმეტრიის ზოგიერთი კლასის კრისტალები შეიძლება ორნაირად დავაყენოთ (ეს ვხედავ იმ კლასის კრისტალებს, სადაც გვაქვს $4L_2$). მაგალითად, IV. 34 ნახაზზე ნაჩვენებია ტეტრაგონური ბიპირამიდის ორნაირი ორიენტაცია. ორივე შემთხვევაში c ღერძი ემთხვევა L_4 მიმართულებას, ხოლო ტოლი ჰორიზონტალური ღერძები ხან ემთხვევა ბიპირამიდის წვეროებში გამავალ მიმართულებებს (ნახ. IV. 34 ა), ხან ბიპირამიდის წიბოებში გამავალ L_2 ღერძებს (ნახ. IV. 34 ბ). ერთი ორიენტაცია მეორის მიმართ შემობრუნებულია L_4 ღერძის გარშემო 45° -ით. ცხა-

დია, კრისტალის ორიენტაციის შეცვლასთან ერთად იცვლება მისი წახნაგის ინდექსებიც. ამიტომ განხილული სხვადასხვა ორიენტაციის ბიპირამიდებს ერთმანეთისაგან არჩევენ გვარების მიხედვით. პირველი ორიენტაციის ბიპირამიდის უწოდებენ I გვარისას (hkl) ინდექსით, ხოლო მეორე მდებარეობაში ბიპირამიდა იქნება II გვარისა (hOl) ინდექსით (ნახ. IV. 35). დასაშვებია ბიპირამიდის შესაშენადი (ირიზი) განლაგებაც, რომელიც შეესაბამება ე. წ. III გვარის ბიპირამიდას. ამ უკანასკნელის ორიენტაცია შეიძლება იყოს ან დადებითი, (hkl), ან უარყოფითი ($\bar{h}\bar{k}l$) (ნახ. IV. 35).

ახლოდგურთ ორიენტაცია ღერძების მიმართ შეიძლება დავუშ-



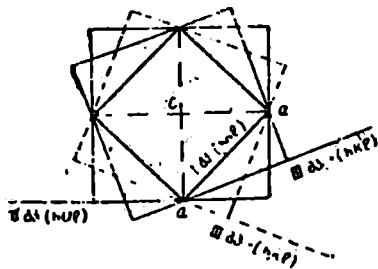
ნახ. IV. 34. ტეტრაგონური სინგონიის კრისტალების დასაშვები ორიენტაციები.

ვით ტეტრაგონური პირამიდისა და ტეტრაგონური პრიზმის წახნაგებისათვისაც.

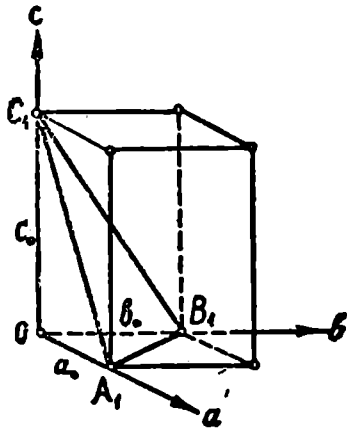
ტეტრაგონურ სინგონიაში ერთეულ წახნაგად ირჩევენ ისეთ წახნაგს, როსკუდაც a და b კრისტალოგრაფიულ ღერძებზე ტოლ პარამეტრებს გადაკვეთს (ნახ. IV. 36). მაშასადამე, $a_1 = b_1 \neq c_1$ ანუ $a_0 = a_0 \neq c_0$. ისეთი წახნაგი შეიძლება იყოს I გვარის ტეტრაგონური ბიპირამიდის წახნაგი. ტეტრაგონურ სინგონიაში შედის სიმეტრიის შეიდი კლასი. განვიხილოთ ყოველი კლასის შესაძლო მარტივი ფორმები (იხ. ტაბულა IV. 10).

9. სიმეტრიის ტეტრაგონური პირამიდის კლასს აქვს მხოლოდ შეოთხე რიგის სიმეტრიის ღერძი. ამიტომ, იმისდა მიხედვით, იღებ-

ული წახნაგი L_4 ღერძის მიმართ დახრილია თუ პარალელური, გვე-
 ჭნება ოთხწახნაგა პირამიდები ან პრიზმები. დასაშვებია სამწიფი პი-
 რამიდა: III გვარის დაღეიითა (hk') ან უარჯეთა ($h\bar{k}l$), II გვარ-
 ის (hOl) და I გვარის (hkl) (ნახ. IV. 35). სამივე პირამიდის წვერო
 შეიძლება მიმართული იყოს ზევით ან ქვევით და მივიღებთ სათანადო
 ზედა ან ქვედა პირამიდებს. პირამიდებ-
 ის ანალოგიურად ტეტრაგონური პრი-
 ზმებიც შეიძლება სამწიფი იყოს: III
 გვარის დაღებით (hkO) ან უარყოფი-



ნახ. IV. 35. ტეტრაგონური სინგონიის კვადრატულ კუთხის მქონე ფორმების განლაგების სქე-
 მა გვარების მიხედვით.



ნახ. IV. 36. ტეტრაგონურ სინგონიის ერთეული წახნაგის პირველი და მეორე პირამიდები ტოლია.

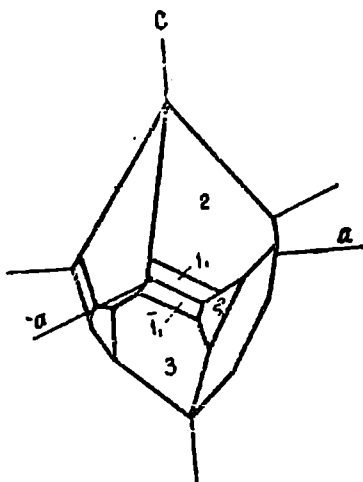
თი ($h\bar{k}o$), II გვარის (100) და I გვარის (110). მეშვიდე მარტივი ფორ-
 მბა იქნება წახნაგი, რომელიც მართობია L_4 ღერძისა. ეს იქნება ზე-
 და (001) და ქვედა ($0\bar{0}\bar{1}$) მონოედრი.

მაგალითისათვის განვიხილოთ IV. 37 ნახაზზე მოცემული მინე-
 რალის — ვულფენიტის $PbMoO_4$ კრისტალი, რომელიც სიძეთრის ამ
 სახეში კრისტალდება. ამ კრისტალზე განვითარებულია ზეოი ტეტრა-
 გონური პირამიდა: ორი პირველი გვარის — ზედა (hkl) (წახნაგი 2)
 და ქვედა ($h\bar{k}l$) (წახნაგი 2); ერთი II გვარის ქვედა (hOl) (წახნ. 3)
 და ორი III გვარის, მათ შორის ერთი ზედა (hkl) (წახნ. I). და ერ-
 თიც ქვედა ($h\bar{k}l$) (ნახ. IV. 37).

10. სიმეტრიის ტეტრაგონურ — ბიპირამიდულ კლასში ერთდრო-
 ულად ვხვდებით L_4 ღერძის, მისი მართობი სიმეტრიის სიბრტყის და
 ინვერსიის ცენტრის არსებობას, ამასთან დაკავშირებით, წინა კლას-
 ში არსებული სამი გვარის ტეტრაგონური პირამიდა აქ გადაეა იპავე
 სამი გვარის ტეტრაგონურ ბიპირამიდაში და იქნება რვა-რვა ასიმეტრი-
 ული წახნაგი: სამივე გვარის ტეტრაგონური პრიზმა აქ გეომეტრი-

ულად უცვლელი დარჩება. მაგრამ ექნება ოთხ-ოთხი მონოსიმეტრიული წახნაგი. მეშვიდე ფორმა იქნება არა მონოედრი, არამედ პინაკოიდი (001), რომელსაც ბახო-პინაკოიდს უწოდებენ (იხ. ტაბულა IV. 10).

სიმეტრიის განხილული კლასის ტიპობრივი წარმომადგენელია მინერალ შეელიტის (CaWO_4) კრისტალი (ნახ. IV. 38), რომელზედაც განვითარებულია II გვარის ტეტრაგონური ბიპირამიდა (hOl) — (წახნ. 3), ორი III გვარის ტეტრაგონური (წახნაგები I და I') და ერთი I გვარის (hhl) — (წახნაგი 2) ბიპირამიდები.

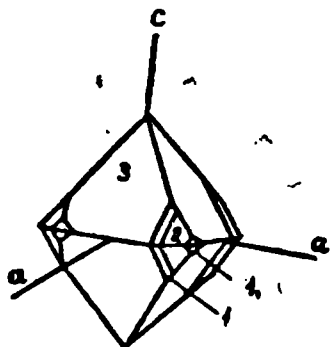


ნახ. IV. 37. ვულფენიტის კრისტალი (L_4 სიმეტრიის სახე).

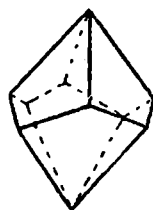
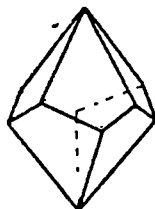
მხოლოდ ორი მეზობელი გვერდია ტოლი. L_4 ღერძები გადის ტრაპეცების არატოლ წიბოებში L_4 ღერძის მართობულად. შესაძლებელია

11. სიმეტრიის ტეტრაგონურ-ტრაპეცოედრულ კლასს აქვს L_4 და მისი მართობი $4L_2$ სიმეტრიის ღერძები. ზოგადი განლაგების წახნაგის მქონე მარტივი ფორმა აქ ტეტრაგონური ტრაპეცოედრია, რომელიც რვაწახნაგა დახურული მარტივი ფორმაა (ნახ. IV. 39).

მისი ყოველი წახნაგი — ტრაპეცა ოთხკუთხედი, რომლის



ნახ. IV. 38. შეელიტის კრისტალი (სიმეტრიის L_4PC სახე).

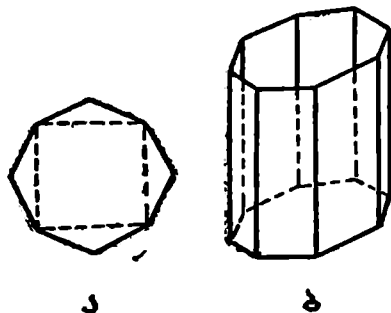


ნახ. IV. 39. ტეტრაგონური ტრაპეცოედრები: ა-მარჯვენა (hhl) და ბ-მარცხენა (hhl).

მარჯვენა (hkl) და მარცხენა ($kh\bar{l}$) ტეტრაგონური ტრაპეცოედრების არსებობა, რომლებიც ენანტიომორფული ფორმებია (ნახ. VI. 39).

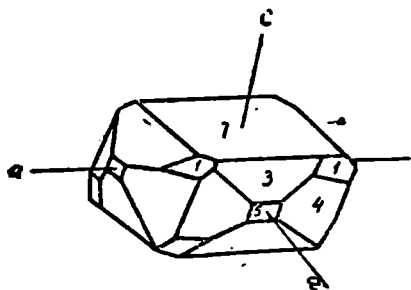
სიმეტრიის არსებული ხარისხი აპირობებს I და II გვარის ტეტრაგონური ბიპირამიდების არსებობას. მეოთხე ფორმა (hkO) ინდექსით იქნება დიტეტრაგონური პრიზმა 8 ასიმეტრიული ვერტიკალური წახნაგით (ნახ. IV. 40). გარდა ამისა, გვხვდება I და II გვარის ტეტრაგონური პრიზმები და ბაზოპინაკოიდი (იხ. ტაბულა IV. 10).

ამ სიმეტრიის მქონე კრისტალებიდან აღსანიშნავია მინვრალ ფოსგენიტის $Pb_{24}(CO_3)Cl_2$ კრისტალი (ნახ. IV. 41), რომელზედაც განვითარებულა ტეტრაგონური ტრაპეცოედრი (hkl) (წახნაგი I), II გვარის ტეტრაგონური ბიპირამიდა (hOl) (წახნაგი 3), დიტეტრაგონური პრიზმა (hkO) (წახნაგი 4), II გვარის ტეტრაგონური პრიზმა (100) (წახნაგი 5) და ბაზოპინაკოიდი (001) წახნაგი 7).



ნახ. IV. 40 ა-დიტეტრაგონი და ბ-დიტეტრაგონური პრიზმა (hkO).

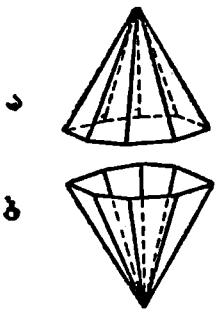
12. სიმეტრიის დიტეტრაგონურ-პირამიდულ კლასს აქვს L_4 ღერძი და მასზე გამავალი სიმეტრიის ოთხი სიბრტყე. რადგან ამ კლასში არ არის L_4 ღერძის მართობი არც სიმეტრიის სიბრტყე და არც მეორე რიგის სიმეტრიის ღერძი, ამიტომ სიმეტრიის ტეტრაგონურ-პირამიდული კლასის ანალოგიურად გვექნება არა ბიპირამიდები, არამედ პირამიდები ზედა ან ქვედა ორიენტაციით. ზოგადი განლაგების წახნაგის მქონე მარტივი ფორმა იქნება დიტეტრაგონური პირამიდა (ნახ. IV. 42). ზედა (hkl) და ქვედა ($hk\bar{l}$) ინდექსებით, 8 ასიმეტრიული წახნაგით. გარდა ამისა, აქ გვექნება I და II გვარის ტეტრაგონურ-პირამიდები, წარმოდგენილი ოთხ-ოთხი მონოსიმეტრიული წახნაგით.



ნახ. IV. 41. ფოსგენიტის კრისტალის სიმეტრიის L_4L_2 (სხე).

ნე მარტივი ფორმა იქნება დიტეტრაგონური პირამიდა (ნახ. IV. 42). ზედა (hkl) და ქვედა ($hk\bar{l}$) ინდექსებით, 8 ასიმეტრიული წახნაგით. გარდა ამისა, აქ გვექნება I და II გვარის ტეტრაგონურ-პირამიდები, წარმოდგენილი ოთხ-ოთხი მონოსიმეტრიული წახნაგით.

ვით. პრიზმები აქ გეომეტრიულად უცვლელი დარჩება სიმეტრიის; წინა კლასთან შედარებით, დიტეტრაგონური პრიზმა — 8 ასიმეტრიული წახნაგით და I და II გვარის ტეტრაგონური პრიზმებზე ოთხ-ოთხი მონოსიმეტრიული წახნაგით. მეშვიდე ფორმა იქნება მონოკლრი, ტეტრასიმეტრიული წახნაგით დადებითი (001) ან უარყოფითი (00 $\bar{1}$) განლაგებით (იხ. ტაბულა IV.10, მეთორმეტე კლასი).

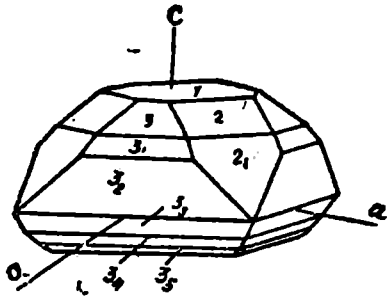


ნახ. IV. 42. დიტეტრაგონური პირამიდები. ა-ზედა (hk \bar{l}) და ბ-ქვედა (hk \bar{l})

5P და C. ზოგადი განლაგების მარტივი ფორმა (hk \bar{l}) ინდექსით აქ დიტეტრაგონური ბიპირამიდაა, რომელიც შედგება 16 ასიმეტრიული წახნაგისაგან. ესაა ტეტრაგონური სინგონიის მარტივ ფორმებში მაქსიმალური რაოდენობის წახნაგების მქონე მარტივი ფორმა, გარდა ამისა, აქ იქნება I და II გვარის ტეტრაგონური ბიპირამიდები ოვა-რვა მონოსიმეტრიული წახნაგით, დიტეტრაგონური პრიზმა 8 ვერტიკალური მონოსიმეტრიული წახნაგით. მეხუთე და მეექვსე ფორმა I და II გვარის ტეტრაგონური პრიზმებია, მეშვიდე — ბაზოკინეკოიდი (001), რომელიც შედგება ტეტრასიმეტრიული წახნაგებისაგან (იხ. ტაბულა IV.10).

სიმეტრიის ამ კლასის გასაცნობად შეიძლება დავასახელოთ მინერალი დიაბოლეიტო — $\text{Cu}(\text{OH})_2 \cdot 2\text{Pb}(\text{OH})\text{Cl}$ (ნახ. IV.43). მარტივ ფორმათა ამ კომბინაციაში გვხვდება ორი I გვარის ტეტრაგონური პირამიდა ზედა წახნაგებით (2 და 2 $_1$) და ექვსი II გვარის ტეტრაგონური პირამიდა, მათ შორის სამი ზედა პირამიდა (წახნაგები 3, 3 $_1$ და 3 $_2$) და სამი ქვედა — (წახნაგები 3 $_3$, 3 $_4$ და 3 $_5$).

13. სიმეტრიის დიტეტრაგონური ბიპირამიდული კლასი ტეტრაგონური სინგონიის მაქსიმალური სიმეტრიის მქონე კლასია. აქ ერთდროულად აოსებობს $L_4 4L_2$



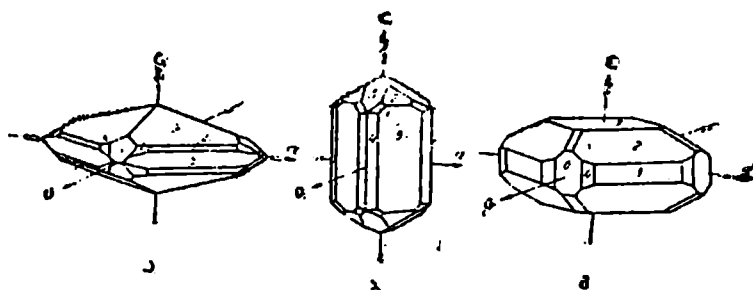
ნახ. IV. 43. დიაბოლეიტის კრისტალი (სიმეტრიის $L_4 4P$ სახე).

სიმეტრიის ტეტრაგონური ბიპირამიდის კლასში კრისტალდება შრავალი მინერალი, მათ შორის კალომელის (HgCl), რუტილის (TiO_2) და ვეზუვიანის ($\text{Ca}_2\text{Al}_2[\text{SiO}_4]_2(\text{OH})_2$) კრისტალები (ნახ. IV. 44).

კალომელის კრისტალზე არის ოთხი ბიპირამიდა და ერთი პრიზმა. ბიპირამიდებიდან ორი I გვარისაა (წახნაგი 2 და 2₁), ერთი II გვარის (წახნაგი 3), ერთი დიტეტრაგონური ბიპირამიდაა (წახნაგი 1); წახნაგი 5—I გვარის ტეტრაგონური პრიზმაა.

რუტილის კრისტალზე (ნახ. IV. 44 ბ) პრიზმის წახნაგები უფრო განვითარებულია, ვიდრე ბიპირამიდებისა. აქ გვაქვს დიტეტრაგონური (წახნაგი 4) და I გვარის (წახნაგი 5) პრიზმები. ბიპირამიდა: დიტეტრაგონური (წახნაგი 1), I (წახნაგი 2) და II გვარის (წახნაგი 3).

გეზუვიანის კრისტალზე, წინა მაგალითებისაგან განსხვავებით, განვითარებულია ბაზოპინაკოიდი (წახნაგი 7), აგრეთვე I გვარის ბიპირამიდა (წახნაგი 2). ნაკლებად განვითარებულია II გვარის ბიპირამი-



ნახ. IV. 44. დიტეტრაგონურ-ბიპირამიდის კლასის კრისტალები: ა-კალომელი, ბ-რუტილი და გ-გეზუვიანი. 1-(hkl), 2- hkl , 3- (hCl) , 4- (hkO) , 5-(110), 6(100) და 7-(001). და (წახნაგი 3). პრიზმებია: დიტეტრაგონური (წახნაგი 4), I გვარის (წახნაგი 5) და II გვარის (წახნაგი 6).

14. სიმეტრიის ტეტრაგონურ-ტეტრაედრულ კლასს აქვს მხოლოდ მეოთხე რიგის ინვერსიის ლერძი, ამიტომ ამ კლასში გვხვდება ერთმანეთისაგან გეომეტრიულად განსხვავებული მხოლოდ სამი მარტივი ფორმა: ტეტრაგონური ტეტრაედრი, ტეტრაგონური პრიზმა და ბაზოპინაკოიდი (იხ. ტაბულა IV.10, მეთოთხიეტე კლასი).

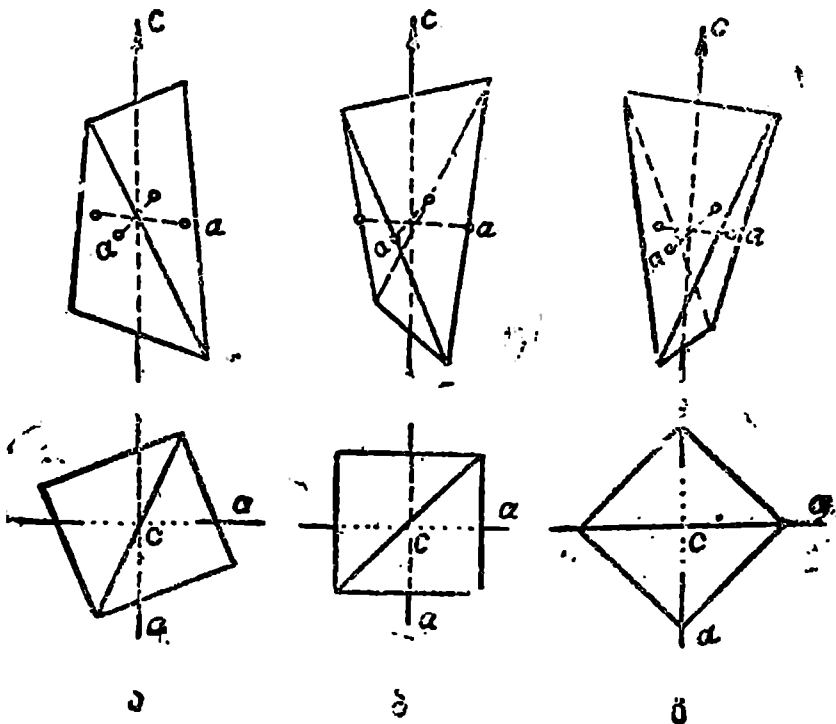
ტეტრაგონური ტეტრაედრი ოთხწახნაგა დახურული ფორმაა, რომლის ყოველი წახნაგი ტოლფერდა სამკუთხედიანია. კრისტალოგრაფული ლერძების შერჩევის მიხედვით შესაძლებელია სამი გვარის ტეტრაედრი (ნახ. IV. 45). I გვარის ტეტრაედრში ((hkl)) ტოლი ლერძები გაივლის გარკვეულ წიბოების ცენტრში (ნახ. IV.45 ბ). ტეტრაედრი II გვარისა იქნება, თუ ლერძები გაივლის წახნაგების ცენტრში (ნახ. IV.45 გ), ხოლო ლერძების ირიბი ორიენტაციის დროს ტეტრაედრი

ბებრავონური სივრცის

კატეგორია	სივრცის და ხარისხობითი პარამეტრები	სივრცის სახელი და ფორმულა	სივრცის ქვემონტაჟის და მატიკური ფორმულის გამოხატვა	შესაძლებელია	
				1 - (ჩკლ)	2 (ჩჩლ)
ბ ბ ბ ბ ბ	0-5 0-6 0-7 0-8 0-9	9 ბებრავონური - პირამიდული L ₄		მ-3 ბეჭდის ბებრავონური პირამიდა 0-3 0-4 0-5 0-6	1-0 ბეჭდის ბებრავონური პირამიდა 0-3 0-4 0-5 0-6
		10 ბებრავონური- ბიპირამიდული L ₄ P C		მ-3 ბეჭდის ბებრავონური ბიპირამიდა + 36	1-0 ბეჭდის ბებრავონური ბიპირამიდა
		11 ბებრავონური - ბრავონური L ₄ L ₄		ბებრავონური ბებრავონური 0-3 0-4 0-5 0-6	1-0 ბეჭდის ბებრავონური ბიპირამიდა
		12 ბებრავონური - პირამიდული L ₄ 4P		ბებრავონური პირამიდა 0-3 0-4 0-5 0-6	1-0 ბეჭდის ბებრავონური პირამიდა
		13 ბებრავონური - ბიპირამიდული L ₄ L ₄ 3P C		ბებრავონური ბიპირამიდა 0-3 0-4 0-5 0-6	1-0 ბეჭდის ბებრავონური ბიპირამიდა
ბ	0-9	14 ბებრავონური - ბებრავონური L ₄		მ-3 ბეჭდის ბებრავონური ბებრავონური 0-3 0-4 0-5 0-6	1-0 ბეჭდის ბებრავონური ბებრავონური + 36
ბ	0-9	15 ბებრავონური - ბებრავონური L ₄ 2L ₄ 2P		მ-3 ბეჭდის ბებრავონური ბებრავონური 0-3 0-4 0-5 0-6	1-0 ბეჭდის ბებრავონური ბებრავონური + 36

III გვარისაა, ინდექსით (hkl). აღსანიშნავია, რომ III გვარის ტეტრაგონურ ტეტრაედრს შეიძლება ჰქონდეს ოთხნაირი ორიენტაცია: მარჯვენა (+) ან (-) და მარცხენა (+) ან (-) (ნახ. IV.46), I და II გვარის ტეტრაედრებს კი ორნაირი.

ტეტრაგონური პრიზმები ტეტრაგონურ-პირამიდული კლასის ანალოგიურად III (hkO), II (100) და I გვარისაა (110). მეშვიდე მ-

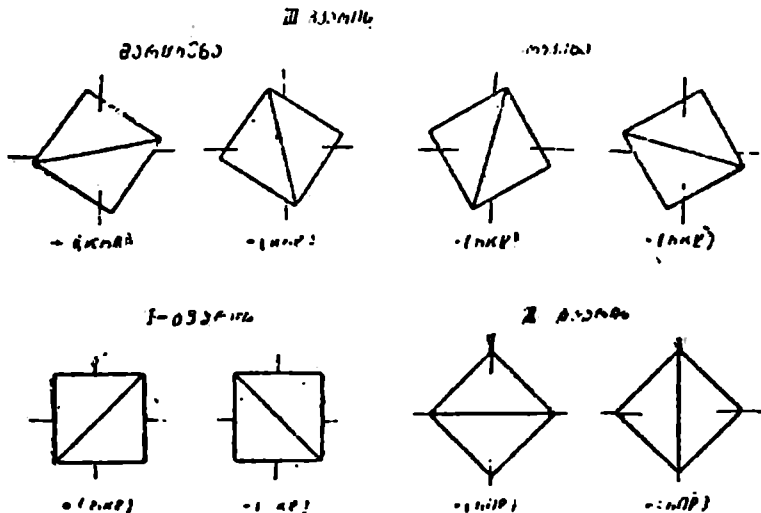


ნახ. IV. 45. ტეტრაგონური ტეტრაედრები: ა-III გვარის (hkl); ბ-I გვარის (hkl) და გ-II გვარის (hkO)

რტივი ფორმა ბაზოპინაკოიდი — (001), რომელიც შედგება ორი ასიმეტრიული წახნაგისაგან.

სიმეტრიის ტეტრაგონურ-ტეტრაედრულ კლასში კრისტალდება მინერალების მცირე რაოდენობა. მაგალითისათვის განვიხილოთ კანტის — $Ca_2B(AsO_4)(OH)_2O$ კრისტალი (ნახ. IV.47)). აქ განვითარებულია III გვარის მარჯვენა დადებითი (წახნაგი 1), I გვარის უარყოფითი (წახნაგი 2), II გვარის დადებითი ტეტრაედრები (წახნაგი 3) და ორი ტეტრაგონური პრიზმა — I (წახნაგი 5) და II გვარისა (წახნაგი 6).

15. სიმეტრიის ტეტრაგონურ-სკალენოედრულ კლასში ერთდროულადაა G_2 ხისი მართობი $2L_2$ და მათ შორის სიმეტრიის ორი ვერტიკალური სიბრტყე (იხ. ტაბულა IV. 10, მეთხუთმეტე კლასი). ზოგადი განლაგების წახნაგი ინდექსით (hkl) წარმოშობს ტეტრაგონურ სკალენოედრს, რომელიც 8 ასიმეტრიული სამკუთხედის ფორმის მქონე წახნაგისაგან შედგება. სკალენოედრი შეიძლება იყოს დაღებითი და უარყოფითი ორიენტაციისა (ნახ. IV. 48). მეორე მარტივ ფორმაა I გვარის ტეტრაგონური ტეტრაედრი, რომელიც წინა კლას-



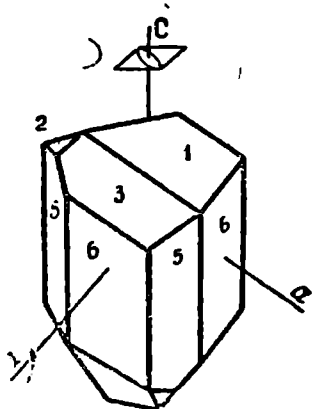
ნახ. IV. 46. I, II და III გვარის ტეტრაგონური ტეტრაედრის შესაძლო განლაგება კრისტალოგრაფიული ღერძების მიმართ.

ეს ტეტრაედრებისაგან განსხვავებით შედგება 4 მონოსიმეტრიული წახნაგისაგან. სიმეტრიის არსებული ხარისხი აპირობებს II გვარის ტეტრაგონური ბიპირამიდის არსებობას, რომელსაც 8 ასიმეტრიული წახნაგი ექნება. შემდეგი სამი ფორმა დიტეტრაგონური და I და II გვარის ტეტრაგონური პრიზმებია. მეშვიდე ფორმა ბაზოპინაკოიდი (იხ. ტაბულა IV. 10). ამ კლასში კრისტალდება სხვადასხვა მინერალი. გავარჩიოთ ქალკოპირიტის $-CuFeS_2$ კრისტალი (ნახ. IV. 49). აქ განვითარებულია II გვარის ორი ტეტრაგონური ბიპირამიდა (წახნაგები 3 და 3₁) ტეტრაგონური სკალენოედრი (წახნაგი 1), ტეტრაედრი (წახნაგი 2), I გვარის ტეტრაგონური პრიზმა (წახნაგი 5) და ბაზოპინაკოიდი (წახნაგი 7).

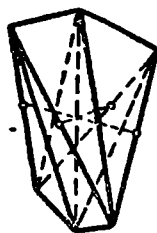
ამგვარად, ჩვენ განვიხილეთ ტეტრაგონური სინგონიის 7 სიმე-

ტრიის კლასი, მათ მარტივ ფორმათაგან ჩვენ შეგვხვდა ერთმანეთისაგან გეომეტრიულად განსხვავებული 9 ფორმა. ესენია:

1. დიტეტრაგონური ბიპირამიდა — 16 წახნაგი;
2. დიტეტრაგონური პირამიდა — 8 წახნაგი;
3. ტეტრაგონური ბიპირამიდა — 8 წახნაგი;
4. ტეტრაგონური პირამიდა — 4 წახნაგი;
5. დიტეტრაგონური პრიზმა — 8 წახნაგი;
6. ტეტრაგონური პრიზმა — 4 წახნაგი;
7. ტეტრაგონური ტრაპეკოედრი — 8 წახნაგი;
8. ტეტრაგონური სკალენოედრი — 8 წახნაგი;
9. ტეტრაგონური ტეტრაედრი — 4 წახნაგი.



ნახ. IV. 47. ენაიჯა კრისტალი (სა-მეტრიის G_2 სახე).



ა



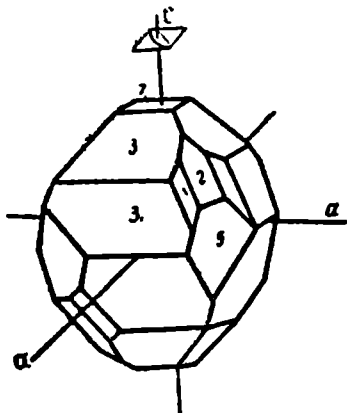
ბ

ნახ. IV. 49. ტეტრაგონური სკალენოედრი ა-დადებითი, ბ-უარყოფითი.

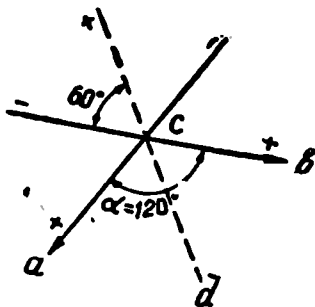
ჰექსაგონური სინგონია $a = b = \bar{d} \neq c$, $\alpha = 120^\circ$, $\beta = \gamma = 90^\circ$

ჰექსაგონურ სინგონიაში გვაქვს ოთხი კრისტალოგრაფიული ლერძი — პირიზონტალური ურთიერთტოლი a , b და d . ლერძები და მათი არაბოლი ვერტიკალური c ლერძი. თაზუხელი ლერძების ერთნიშნა მიმართულებათა შორის კუთხე 120° -ია (ნახ. IV. 50), a და b ლერძების დადებით მიმართულებათა შორის კუთხის ბისექტრისის მიმართულებით დამატებითი d ლერძი გადის. აის გამო, ჰექსაგონური სინგონიის მარტივი ფორმების წახნაგებს ექნება არა სამ-საბი, არაქუდ ოთხ-ოთხი ინდექსი. ახალი ლერძის შესაბამისი ინდექსი რიგით მესამე, ხოლო c ლერძის ინდექსი მეოთხე იქნება. ვინაიდან დამატებითი ლერძის დადებითი მიმართულება a და b ლერძების საწინააღმდეგოა (ნახ. IV. 50), ამიტომ ზოგადი განლაგების წახნაგის ინდექსს ექნება ($h k i l$) სახე.

ჰექსაგონურ სინგონიაში c კრისტალოგრაფიული ღერძი ყოველთვის ემთხვევა L_2 ან G_2 ღერძის მიმართულებას (ნახ. IV. 51), ხოლო დანარჩენი ღერძები განლაგებულია ან L_2 ღერძების გასწვრივ (ნახ. IV. 51 ა), ან ოცა მეოთხე ორგის სიქერძის ღერძები არ აოსებობს, სიმეტრიის ვეუტიკალური სიბრტყეების მართობი მიმართულებებს ემთხვევა (ნახ. IV. 51 ბ). თუ კრისტალს სიქერძის სიბრტყეები არა აქვს, მაშინ a და b ტოლი ღერძები გაქვართ არსებული (ან შესაძლებელი) ჰორიზონტალური წიბოების

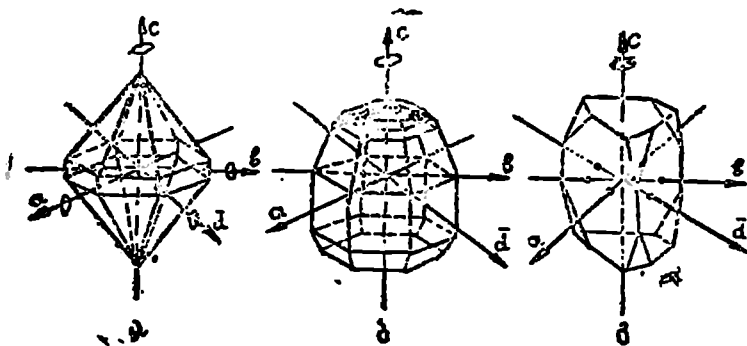


ნახ. IV. 49. ჰალკობირიტის კრისტალი (სიმეტრიის $G_2, 2L_2, 2P$ სხე).



[ნახ. IV. 50 ჰექსაგონურ სინგონიაში მეოთხე c კრისტალოგრაფიული ღერძი გაიღოს a კუთხის ბისექტრისის მიმართულებით. $a = b - c \neq c$.

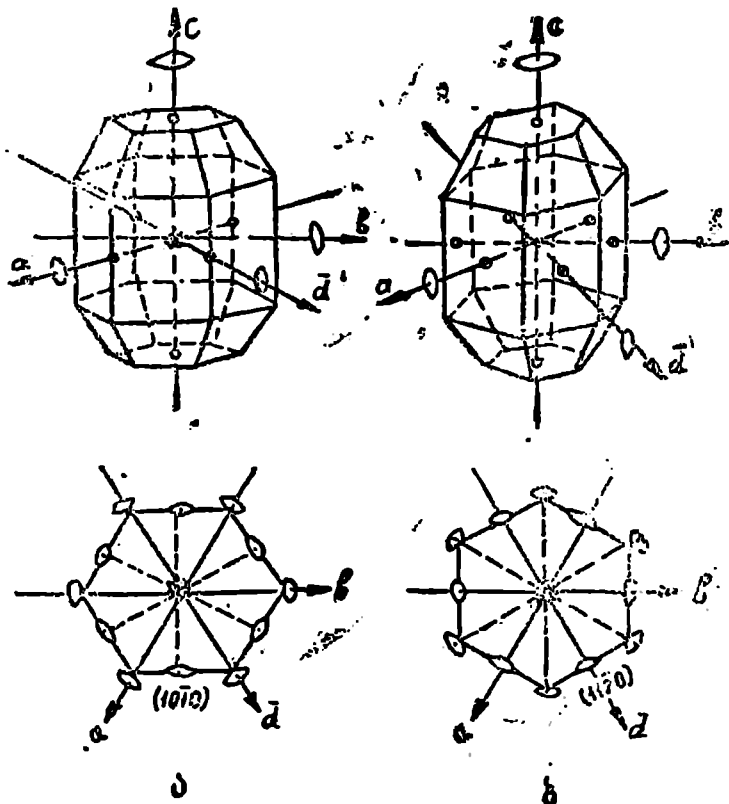
პარალელურად (ნახ. IV. 51 ბ). ჰექსაგონური სინგონიის იმ კრისტალებს, რომლებსაც აქვთ ექვსკუთხედი L_2 ან ვეუტიკალური სიმეტრიის



ნახ. IV. 51. ჰექსაგონურ სინგონიაში c კრისტალოგრაფიული ღერძი ყოველთვის ემთხვევა L_2 ან G_2 ღერძის მიმართულებას.

სიბრტყე. შეიძლება მივიჩიოთ ორნაირი ორიენტაცია. ორივე შემთხვევაში აღნიშნული მოთხოვნებიანი კრისტალოგრაფიული ღერძების შე-

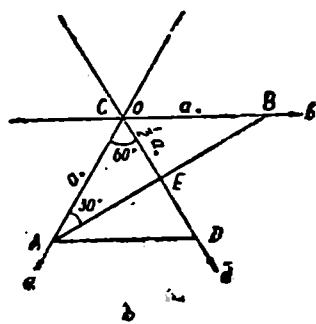
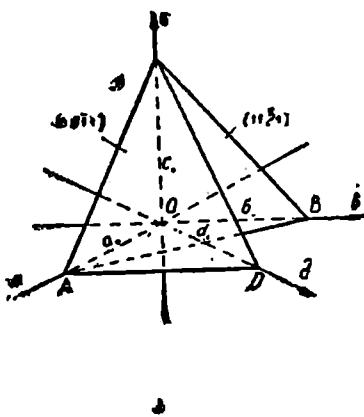
რჩევის შესახებ დაკმაყოფილებულია. ასე, მაგალითად, IV, 52 ნახაზზე ნაჩვენებია ჰექსაგონური სინგონიის კრისტალის ორნაირი ორიენტაცია. სადაც ტოლ ჰორიზონტალურ კრისტალოგრაფიულ ღერძებად აღებულია $6L_2$ ღერძიდან ერთის გამოშვებით ხან ერთი სამეული, ხან მეორე. ერთი ორიენტაცია მეორის მიმართ შემობრუნებულია ϵ ღერძის გარშემო 30° -ით (შეადარეთ ტეტრაგონური სინგონიის კრისტა-



ნახ. IV. 52. ჰექსაგონური სინგონიის კრისტალების დასაშვები ორნაირი ორიენტაცია.

ლების ორნაირ ორიენტაციას). ამგვარად, ჰორიზონტალურად განლაგებული სამი ტოლი ღერძიდან მეოთხე (b) ღერძი ის იქნება, როდითაც დაეიკავებთ კრისტალს და მისი მართობი სიბრტყის მარცხნივ განლაგდება პირველი (a) ღერძი, ხოლო მარჯვნივ-დამატებითი ღერძი (d). რიგით მეოთხე ϵ ღერძი ყოველთვის ვერტიკალურია.

ერთეულ წახნაგს ჰექსაგონურ სინგონიაში ვერ გავატარებთ ისე, რომ მან სამივე კრისტალოგრაფიულ ღერძზე ურთიერთტოლი პარამეტრები მოკვეთოს. ერთეული წახნაგი ან გადაკვეთს a და d ღერძებს ტოლ მანძილებზე და პარალელური იქნება b ღერძისა, ან ტოლ პარამეტრებს მოკვეთს a და b ღერძებზე, ხოლო დაძაბებით ღერძზე — ამ პარამეტრის ნახევარს. IV.53 ხახაზიდან ჩანს, რომ AD წახნაგი გადაკვეთს a და d ღერძებს ტოლი პარამეტრებით, ხოლო b ღერძს არ გადაკვეთს, ე. ი. მისი პარამეტრების შეფარდება ასე გამოისახება $a : ob : -a : c$. მაშასადამე, მისი ინდექსი იქნება $(10\bar{1}1)$. AB წახნაგი



ნახ. IV.53. ჰექსაგონური სინგონიის ერთეული წახნაგის შესაძლებელი ორიზონტი განლაგება: ა-აქსონომეტრიული ნახაზი; ბ-გვერდილი პორიზონტალურ სიბრტყეზე.

ჟი a და b ღერძებს კვეთს ტოლ მანძილებზე (ნახ. IV.53 ბ), ხოლო d ღერძის პარამეტრი $OE = \frac{1}{2} a_0$. რადგან $\triangle AOE$ მართკუთხა სამკუთხედი, რომელშიაც $\angle OAE = 30^\circ$ და ჰიპოტენუზა $OA = a_0$, ამიტომ AB' წახნაგის პარამეტრების შეფარდება იქნება $a_0 : a_0 : \frac{1}{2} a_0 : c_0$, ე. ი.

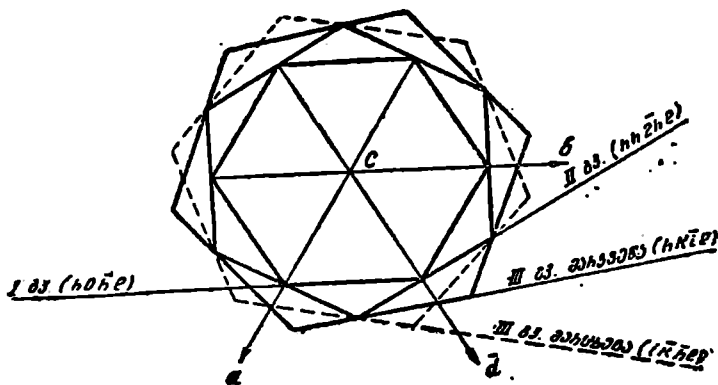
მისი ინდექსია $(11\bar{2}1)$ (ნახ. IV. 53). აღნიშნული წახნაგები შეიძლება იყოს ჰექსაგონური პირამიდის, ბიპირამიდის ან პრიზმისა. დასაშვებია ამ სხეულების მესამენაირი ორიენტაციაც კრისტალოგრაფიული ღერძების მიმართ, როდესაც მათი წახნაგები სამივე პორიზონტალურ ღერძს გადაკვეთს სხვადასხვა სიგრძის პარამეტრებით, ე. ი. ინდექსია $(hki\bar{l})$.

ამგვარად, ჰექსაგონური კვეთის მარტივი ფორმები შეგვიძლია

განვალაგოთ სამნაირად და მივიღებთ სამი გვარის ჰექსაგონურ პირამიდას, ბიპირამიდას და პრიზმას (ნახ. IV.54).

ჰექსაგონურ სინგონიაში შედის სიმეტრიის შეიდი კლასი. განვიხილოთ ყოველი კლასის შესაძლებელი მარტივი ფორმები (იხ. ტაბულა IV. 11).

16. სიმეტრიის ჰექსაგონურ-პირამიდულ კლასში არსებობს მხოლოდ შექცევ რიგის სიმეტრიის ღერძი (L_6). ამიტომ ამ კლასში გვექნება მხოლოდ ჰექსაგონური პირამიდები, ჰექსაგონური პრიზმები და მონოედრი. დასაშვებია სამი გვარის ზედა და ქვედა განლაგების პირამიდა. III გვარის (+) ($hk\bar{i}l$) ან (-) ($i\bar{k}hl$) (ნახ. IV.54 მაჩვენებია ან მარცხენა), II გვარის ($hh\bar{2}hl$) და I გვარის ($hO\bar{h}l$). შემდეგ სამი ფორ-



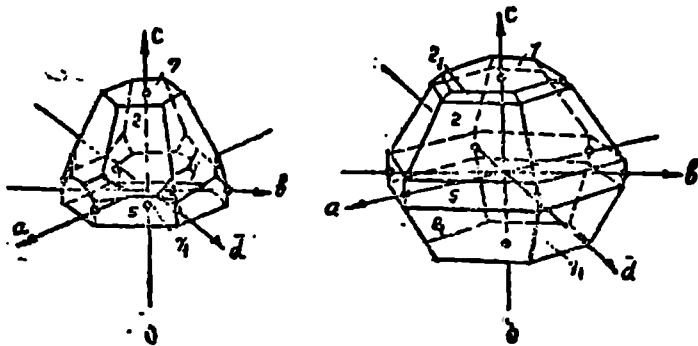
ნახ. IV. 54. ჰექსაგონური კვანძის კრიტალების განლაგების სქემა გვირაბის მიხედვით.

რმა სამნაირი გვარის ჰექსაგონური პრიზმა: III გვარისა (+) ($hk\bar{i}O$) ან (-) ($i\bar{k}hO$), II გვარისა ($1\bar{1}2O$) და I გვარისა ($10\bar{1}O$). შემდეგი ფორმა წარმოდგენილია დადებითი (0001) და უაყოფითი ($000\bar{1}$) მონოედრით (ტაბულა IV. II. მეთექვსმეტე კლასი)

სიმეტრიის ჰექსაგონურ-პირამიდული კლასიდან მაგალითისათვის განვიხილოთ ლითიუმისა და კალიუმის სულფატის ($LiK[SO_4]$) და ნეფელინის ($Na[AlSiO_4]$) კრისტალები (ნახ. IV. 55). პირველზე განვითარებულია I გვარის ზედა ჰექსაგონური პირამიდა ($10\bar{1}1$) (წახნაგი 2), III გვარის ზედა დადებითი პირამიდა ($hk\bar{i}l$) (წახნაგი 1), I გვარის ჰექსაგონური პრიზმა ($10\bar{1}O$) (წახნაგი 5) და ორი მონოედრი: დადე-

ბითი (0001) (წახნაგი 7) და უარყოფითი (00 $\bar{1}$) (წახნაგი 7₁). ნეფელინის კრისტალზე გვაქვს სამი I გვარის ჰექსაგონური პირამიდა, მათ შორის ორი ზედა (წახნაგები 2 და 2₂) და ერთი ქვედა (წახნაგი 2₁). ერთი I გვარის პრიზმა (წახნაგი 5) და ორი მონოედრი (წახნაგები 7 და 7₁).

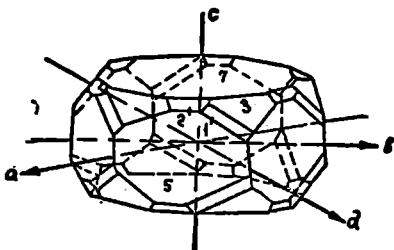
17. სიმეტრიის ჰექსაგონურ-ბიპირამიდულ კლასში გვაქვს L_6 , მისი მართობი სიმეტრიის სიბრტყე და ინვერსიის ცენტრი, სიმე-



ნახ. IV.55. ჰექსაგონურ-ბიპირამიდული კლასის კრისტალები: ა-ლითიუმისა და კალიუმის სელფატი, ბ-ნეფელინი.

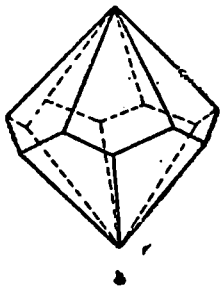
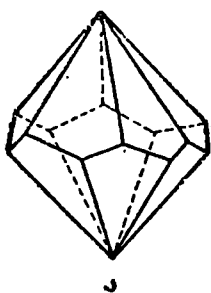
ტრიის სიბრტყის არსებობის გამო პირველი სამი მარტივი ფორმა წარმოდგენილი იქნება არა პირამიდებით, არამედ სამი გვარის ბიპირამიდით, მონოედრის მაგივრად აქ უნდა იყოს შესაბამისი პინაკოიდი (001) ანუ ბაზოპინაკოიდი, სამივე გვარის ჰექსაგონური პრიზმა, რომლებიც წინა კლასში გვეყენება, აქ გეომეტრიულად უცვლელი დარჩება, მხოლოდ მათი 6-6 წახნაგი იქნება მონოსიმეტრიული (იხ. ტაბელა IV.11).

ამ კლასის წარმომადგენელია მინერალი აპატიტი ($Ca_5(PO_4)_3Cl$), რომლის მოკლესეტოვანი კრისტალი მოცემულია IV. 56 ნახაზზე. აქ განვითარებულია I გვარის ჰექსაგონური პრიზმა (წახნაგი 5), ბაზოპინაკოიდი (წახნაგი 7) და სამივე გვარის ჰექსაგონური ბიპირამიდები: III (წახნაგი 1), II (წახნაგი 3) და I გვარისა (წახნაგი 2).



ნახ. VI.56. აპატიტის კრისტალი (სიმეტრიის L_6/C სახე).

18. სიმეტრიის ჰექსაგონურ-ტრაპეცოედრულ კლასს აქვს L_6 და მისი მართობი $6L_2$ სიმეტრიის ლერძები. აქ გვხვდება ორი ახალი მარტივი ფორმა (პირველი და მეოთხე), დანარჩენი კი გეომეტრიულად უცვლელი რჩება (იხ. ტაბულა IV. 11). ზოგადი განლაგების წახნაგი აქ მოგვეცემს ჰექსაგონურ ტრაპეცოედრს ($hk\bar{il}$) რომელიც

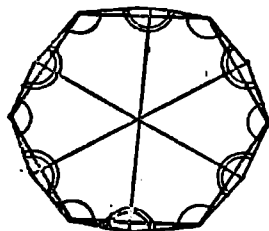


ნახ. IV.57. ჰექსაგონური ტრაპეცოედრები: ბ-მარჯვენა და ა-მარცხენა.

შედგება 12 ასიმეტრიული წახნაგისაგან, იგი გვხვდება ორი (მარჯვენა და მარცხენა) ენანტიომორფული ფორმის სახით (ნახ. IV.57). მეორე ახალი მარტივი ფორმაა დიჰექსაგონური პრიზმა, რომელიც შედგება 12 ვერტიკალური წახნაგისაგან (იხ. ტაბულა II. 2, ფორმა 21), აქ კუთხეები მეზ-

ობელ წახნაგებს შორის ტოლია ერთის გამოწვევით (ნახ. IV. 58). დიჰექსაგონური პრიზმა გეომეტრიულად უცვლელი მეორდება ჰექსაგონური სინგონიის სიმეტრიის კიდევ ორ კლასში.

სიმეტრიის ჰექსაგონურ-ტრაპეცოედრული კრისტალის მაგალითად შეიძლება განვიხილოთ კვარცის მალალტემპერატურული მოდიფიკაცია, ე. წ. β კვარცის კრისტალი (ნახ. IV. 59). აქ განვიხილავთ I გვარის ბიპირამიდა (წ. ხნაგი 2) და პრიზმა (წახნაგი 5). გარდა ამისა, გვხვდება მცირე ზომის წახნაგები: მარცხენა ჰექსაგონური ტრაპეცოედრისა (წახნაგი 7) და II გვარის ბიპირამიდისა (წახნაგი 3).



ნახ. IV.58. ჰექსაგონი და დიჰექსაგონი.

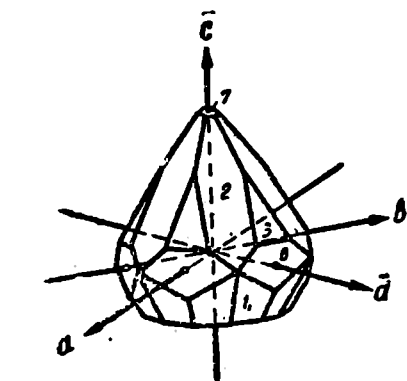
19. სიმეტრიის დიჰექსაგონურ-ბიპირამიდულ კლასში გვაქვს მეექვსე რიგის სიმეტრიის ლერძი და ზუსტად გამავალი 6 სიმეტრიის სიბრტყე, რადგან აქ არა გვაქვს L_6 ლერძის მართობი (პორიზონტალური) სიმეტრიის სიბრტყე და არც L_2 ლერძები, ბიპირამიდების ნაცვლად ამ კლასში გვექნება ზედა ან ქვედა განლაგების პირამიდები, ზოგადი განლაგების წახნაგი აქ მოგვეცემს დიჰექსაგონურ ბიპირამიდას, რომელსაც ექნება 12 ასიმეტრიული წახნაგი (იხ. ტაბულა II, 2, ფორმა 7). კუთხეები მეზობელ წახნაგებს შო-

რის-აქაც ტოლი იქნება ერთის გამოშვებით (ნახ. IV. 58). შემდეგ ფორმებია I და II გვარის ჰექსაგონური პირამიდები (ექვს-ექვსი მონოსიმეტრიული წახნაგით).

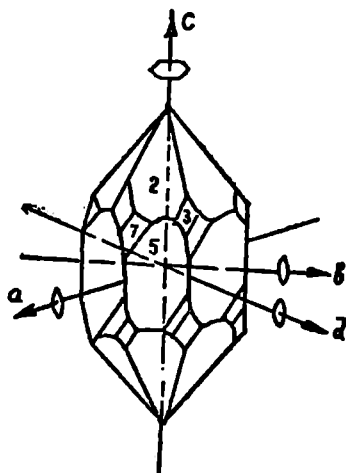
წინა კლასთან შედარებით პრიზმები აქაც გეომეტრიულად უცვლელს დაჩიბა. მეშვიდე მარტივი ფორმა დადებითი (0001) ან უარყოფითი (000 $\bar{1}$) მონოედრი იქნება.

დიჰექსაგონური პირამიდის კლასის კრისტალებიდან გავარჩიოთ ცინკიტის (ZnO) კრისტალი (ნახ. IV. 60). აქ გვაქვს ქვედა დიჰექსაგონური პირამიდა (წახნაგი I), ზედა I და II გვარის ჰექსაგონური პირამიდა (წახნაგები 2 და 3), II გვარის ჰექსაგონური პრიზმა (წახნაგი 6), ორი მონოედრი, რომელთა შორის უარყოფითი უფრო განვითარებულია, დადებითი მონოედრი (c001) (წახნაგი 7).

20. სიმეტრიის დიჰექსაგონურ-ბიპირამიდული კლასი ჰექსაგონური სინგონიის სიმეტრიის ჰველაზე მაღალი კლასია. აქ ერთდროულად გვაქვს $L_4, L_2, 7P$ და C. სიმეტრიის ელემენტთა ერთობლიობა ბიპირამიდების წარმოქმნას აპირობებს.



ნახ. IV.60. ცინკიტის კრისტალი (სიმეტრიის $L_4, 6P$ სახე).



ნახ. IV. 59. მალაქტეზიტის კრისტალი (სიმეტრიის $L_4, L_2, 7P$ სახე).

ზოგადი ხასიათის მარტივი ფორმა აქ დიჰექსაგონური ბიპირამიდაა, რომელსაც 24 ასიმეტრიული წახნაგი აქვს (იხ. ტაბულა 11. 2, ფორმა 14). შემდეგი ორი ფორმა I და II გვარის ჰექსაგონური ბიპირამიდები 12-12 მონოსიმეტრიული წახნაგებით. პრიზმები ამ კლასში გეომეტრიულად უცვლელია. ზოლო მეშვიდე ფორმა წინა კლასის მონოედრის ნაცვლად ბაზოპინაკოიდი იქნება (ტაბულა IV-11).

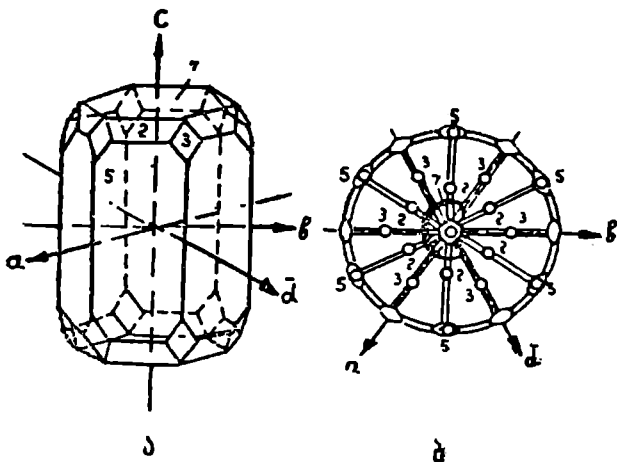
ხანგრძლივობა	სიგრძე და კუთხოვანი კუთხოვანი	სივრცითი ზედა და ფორმული	სივრცითი ელემენტების და მათი ფორმული აღნიშვნა	შესავლობური	
				1 (ჩრდ.)	2 (სამხ.)
მ ლ ა უ ნ ბ გ დ ე ვ ზ	n α=120° β=1-90°	16 კუბური- პირამიდული L.		მე-3 მუხის კუბური- პირამიდული L. 22-26 23-26-26	1-ლი მუხის კუბური- პირამიდული
		17 კუბური- ბიპირამიდული L. P C		მე-3 მუხის კუბური- ბიპირამიდული L. 22-26 23-26-26	1-ლი მუხის კუბური- ბიპირამიდული
		18 კუბური- ბიპირამიდული L. 6L.		12-12 ასიმეტრიული	1-ლი მუხის კუბური- ბიპირამიდული
		19 კუბური- პირამიდული L. 6P		კუბური- ბიპირამიდული L. 12 12 ასიმეტრიული	1-ლი მუხის კუბური- პირამიდული
		20 კუბური- ბიპირამიდული L. 6L 7P C		კუბური- ბიპირამიდული L. 12 12 ასიმეტრიული	1-ლი მუხის კუბური- ბიპირამიდული
		21 კუბური- ბიპირამიდული L. P (9L)		მე-3 მუხის ბიპირამიდული L. 22-26 23-26-26	1-ლი მუხის ბიპირამიდული L. 25-
		22 კუბური- ბიპირამიდული L. 3L 4P (9L 3L 3P)		6-6 ასიმეტრიული	1-ლი მუხის კუბური- ბიპირამიდული

მარტივი ფორმები

მარტივი ფორმების ინდექსები				
3	4	5	6	7
(ჩხჳჩჳ)	(ჩკ(ო)	(ო(ო)	(ო(ო)	(ო(ო(ო)
მ-2 მუაჩის შესაბამისი კონკრეტული	მ-3 მუაჩის შესაბამისი პროცენტი + 05-	1-ლი მუაჩის შესაბამისი პროცენტი	მ-2 მუაჩის შესაბამისი პროცენტი	შემოქმედნი + 05- 1 კონკრეტული ინდექსი
ი ვ ე ბ რ ი უ ლ ი ' ნ ა ხ ნ ა ბ ი თ				
მ-2 მუაჩის შესაბამისი ბრუნვა	მ-3 მუაჩის შესაბამისი პროცენტი + 05-	4-ლი მუაჩის შესაბამისი პროცენტი	მ-2 მუაჩის შესაბამისი პროცენტი	ბუნ- კონკრეტული
ნახნაბით 6-6 უმცირესობის ნახნაბით				
მ-2 მუაჩის შესაბამისი ბინომები	მ-3 მუაჩის შესაბამისი პროცენტი	1-ლი მუაჩის შესაბამისი პროცენტი	მ-2 მუაჩის შესაბამისი პროცენტი	ბუნ- კონკრეტული
ნახნაბით 6-6 უმცირესობის ნახნაბით				
მ-2 მუაჩის შესაბამისი კონკრეტული	მ-3 მუაჩის შესაბამისი პროცენტი	1-ლი მუაჩის შესაბამისი პროცენტი	მ-2 მუაჩის შესაბამისი პროცენტი	მონოქმედნი + 05- 1 მუაჩის ინდექსი
ნახნაბით 12 უმცირესობის ნახნაბით				
მ-2 მუაჩის შესაბამისი ბიკონკრეტული	მ-3 მუაჩის შესაბამისი პროცენტი	1-ლი მუაჩის შესაბამისი პროცენტი	მ-2 მუაჩის შესაბამისი პროცენტი	ბუნ- კონკრეტული
ნახნაბით 6-6 უმცირესობის ნახნაბით				
მ-2 მუაჩის ბინომები	მ-3 მუაჩის ბინომები	1-ლი მუაჩის ბინომები	მ-2 მუაჩის ბინომები	ბუნ- კონკრეტული
ნახნაბით 6-6 უმცირესობის ნახნაბით				
მ-2 მუაჩის ბინომები	მ-3 მუაჩის ბინომები	1-ლი მუაჩის ბინომები	მ-2 მუაჩის ბინომები	ბუნ- კონკრეტული
ნახნაბით 3-3 უმცირესობის ნახნაბით				
მ-2 მუაჩის ბინომები	მ-3 მუაჩის ბინომები	1-ლი მუაჩის ბინომები	მ-2 მუაჩის ბინომები	ბუნ- კონკრეტული
ნახნაბით 6-6 უმცირესობის ნახნაბით				
ნახნაბით 3 უმცირესობის ნახნაბით				

სიმეტრიის ამ კლასში კრისტალდება მრავალი მინერალი. მაგალითისათვის განვიხილოთ ბიერილის კრისტალი (ნახ. IV. 61). აქ გაბატონებული ფორმა I გვარის ჰექსაგონური პრიზმა ($10\bar{1}0$) (წახნაგ 5) და ბაზოპინაკოიდი (წახნაგი 7). ნაკლებგანვითარებულია I (წახნაგი 2) და II (წახნაგი 3) გვარის ჰექსაგონური ბიპირამიდები.

21 სიმეტრიის ტრიგონურ ბიპირამიდულ კლასში არსებობს მხოლოდ მეექვსე რიგის ინვერსიის ლერძი (G_i); ეს იგივეა, რაც L_6 და მისი მართობი სიმეტრიის სიბრტყე. ამის გამო გვექნება მხოლოდ სამი ერთმანეთისაგან განსხვავებული მარტივი ფორმა; ესენია: ტრიგონური ბიპირამიდა, ტრიგონური პრიზმა და ბაზოპინაკოიდი. ტრიგონური ბიპირამიდა (იხ. ტაბულა II, 2, ფორმა 9) შედგება ექვსი ასი-



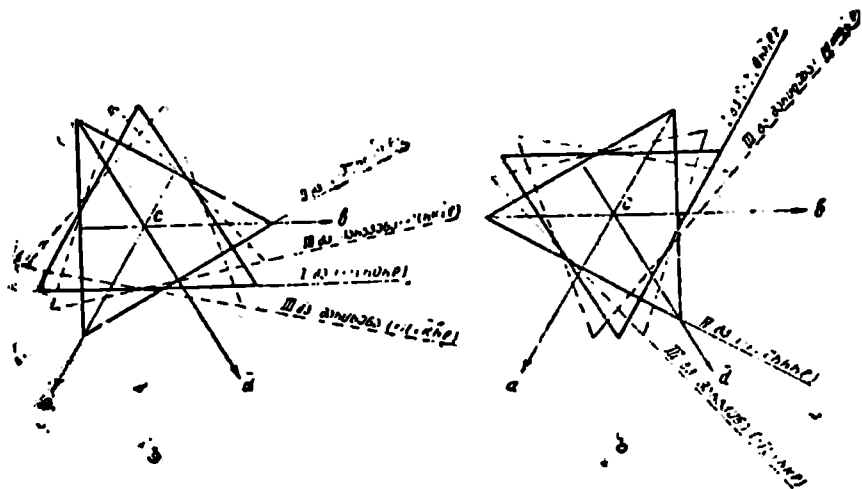
ნახ. IV. 61. ბიერილის კრისტალი (ა) (სიმეტრიის L_66L_27PC სახე) და მისი გვერდი (ბ).

მეტრიული წახნაგისაგან და მას შეიძლება ჰქონდეს საშუალო განლაგება კრისტალოგრაფიული ლერძების მიმართ (ნახ. IV.62). ზოგადი განლაგებისა იქნება III გვარის ბიპირამიდა, როდესაც მისი ყოველი წახნაგი გადაკვეთს სამივე ჰორიზონტალურ კრისტალოგრაფიულ ლერძს სხვადასხვა პარამეტრით. ამ შემთხვევაში დასაშვებია ოთხნაირი ორიენტაცია: მარჯვენა (+) და (-), ინდექსებით ($hk\bar{i}l$) და ($ih\bar{k}l$). მარცხენა (+) და (-), ინდექსებით ($i\bar{k}h\bar{l}$) და ($h\bar{k}i\bar{l}$). II გვარის ტრიგონური ბიპირამიდის ყოველი წახნაგი აღნიშნული სამი კრისტალოგრაფიული ლერძიდან ორს კვეთს ტოლი, ხოლო მესამეს—ორჯერ უფრო მოკლე პარამეტრებით. აქ შესაძლებელია (+) ($hh\bar{2}hl$) და (-) ($2h\bar{h}hl$)

ორიენტაციები. I გვარის ბიპირამიდის წახნაგები ტოლი ღერძებიდან ორს კვეთს ტოლ მანძილზე, ხოლო; მესამის პარალელურია, აქაც დასაშვებია (+) ($hO\bar{h}l$) და (-) ($Oh\bar{h}l$) ორიენტაციები.

ტრიგონური პრიზმებიც (ტაბულა II, 2; ფორმა 16) ტრიგონური ბიპირამიდების ანალოგიურად სამი გვარისა იქნება (რვანაირი ორიენტაციით), მხოლოდ იმ განსხვავებით, რომ მათი მეოთხე ინდექსი — ნულია. მეშვიდე მარტივი ფორმა ბაზოპინაკოიდეა, ინდექსით (0001), რომელსაც აქვს ორი ასიმეტრიული წახნაგი.

სიმეტრიის ამ სახეში კრისტალდება ვერცხლის ფოსფატი (Ag_2-

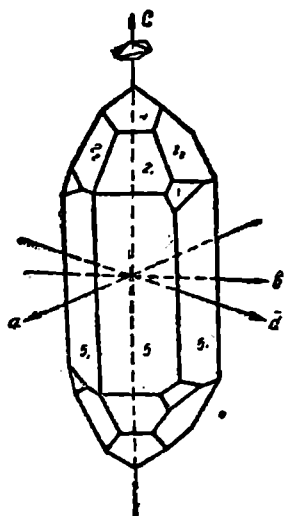


ნახ. IV.62. ტრიგონური კვეთის მქონე მარტივი ფორმების განლაგების სქემა გვარების მიხედვით. ა-დ ღებითი, ბ-უარყოფითი ორიენტაცია.

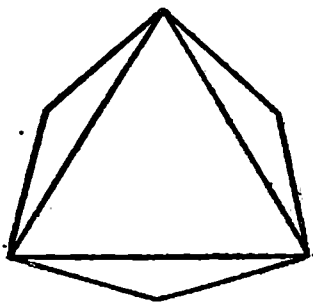
HPO_3) (ნახ. IV.63), რომლის კრისტალზე გვხვდება ტრიგონური პრიზმები და ბიპირამიდები. IV 63 ნახაზზე მოკეძულ კრისტალზე განვითარებულა, I გვარის დადებითი ($10\bar{1}0$) და უარყოფითი ($0\bar{1}10$) ტრიგონური პრიზმა (წახნაგები 5 და 5_1). სამი I გვარის ტრიგონური ბიპირამიდა, რომელთაგან ორი დადებითი ორიენტაციისაა (წახნაგები 4 და 2_1), ერთი უარყოფითი (წახნაგი $\cdot 2_2$) და ერთი III გვარის მარჯვენა დადებითი ტრიგონური ბიპირამიდა (წახნაგი 1).

22. სიმეტრიის დიტრიგონურ-ბიპირამიდულ კლასში ერთდროულად მოქმედებენ G_2 , $3L_2$ და $3P$ (L_2 - L_2 და $4P$). სამი პორიზონტალური კრისტალოგრაფიული ღერძის გაყვანა ორნაირად შეიძლება. ან განვალაგოთ სიმეტრიის სიმბრტყეებში, ე. ი. დავამთხვიოთ

მეორე რიგის სიმეტრიის ღერძებს, ან გავატაროთ სიმეტრიის სიბრტყეების მართობი მიმართულებით. ამ რიგ შესაძლებლობიდან შეეჩერადღეთ პირველ ვარიანტზე. ამ კლასში პირველად ვხვდებით დიტრიგონური კვეთის მარტივ ფორმებს.



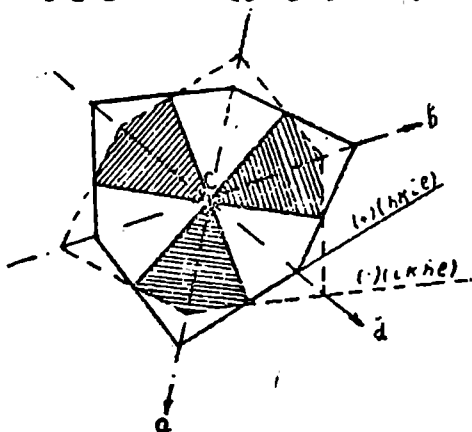
დიტრიგონი ექვსკუთხედიანია, რომელშიც კუთხეები ტოლია ერთის გამოშვებით (ნახ. IV.64) და ამით განსხვავდება ჰექსაგონისაგან დიტრიგონური კვეთისა გვექნება ბიპირამიდა და პრიზმა (იხ. ტაბულა II.2, ფორ-



ნახ. IV.63. მგვე ფოსფორმგვე ვერცხლის კრისტალი (სიმეტრიის $G_2 = L_2P$ სახე).

ნახ. IV.64. ტრიგონი და დიტრიგონი.

მები 10 და 17). მათ შეიძლება ჰქონდეს დადებითი და უარყოფითი ორიენტაცია, რომლებიც ერთმანეთისაგან განსხვავდებიან c ღერძის



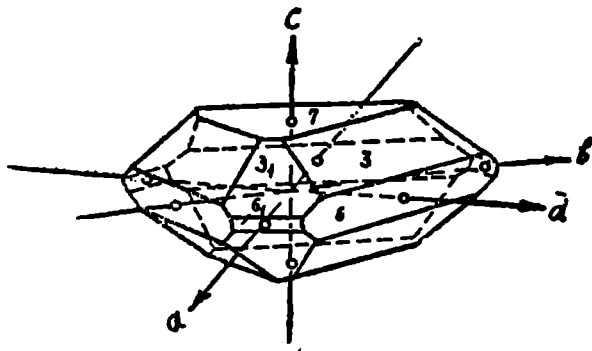
ნახ. IV. 65. დიტრიგონური კვეთის მკონე მარტივი ფორმების (+) და (-) ორიენტაცია.

გარშემო 60° -ით მობრუნებით (ნახ. IV.65). დანარჩენი ხუთი შესაძლო მარტივი ფორმა სიმეტრიის წინა კლასებში უკვე შეგვხვდა; ესენია: I გვარის ჰექსაგონური ბიპირამიდა ($hO\bar{h}l$), II გვარის ტრიგონური ბიპირამიდა — დადებითი ($hh\bar{2}hl$) ან უარყოფითი ($2h\bar{h}hl$), I გვარის ჰექსაგონური პრიზმა ($l0\bar{1}0$), II გვარის ტრიგონური პრიზმა — დადებ-

თი (1120) ან უარყოფითი (2110) და ბაზოპინაკოიდი (0001) (იხ. ტაბულა IV.11).

მაგალითისათვის განვიხილოთ ბენიტოიტის ($\text{ReTi}(\text{Si}_2\text{O}_6)$) კრისტალი (ნახ. IV.66), რომელზეც განვითარებულია ორი II გვარის ტრიგონური დადებითი (წახნაგ 3) და უარყოფითი (წახნაგი 3₁) ბიპირამიდა, ორი II გვარის დადებითი (წახნაგი 6) და უარყოფითი (წახნაგი 6₁) ტრიგონური პრიზმა და ბაზოპინაკოიდი (წახნაგი 7).

ამგვარად, ჩვენს მიერ განხილული ჰექსაგონური სინგონიის სიმ-



ნახ. IV.66. ბენიტოიტის კრისტალი (სიმეტრიის $L_6 3L_2 4P$ სახე).

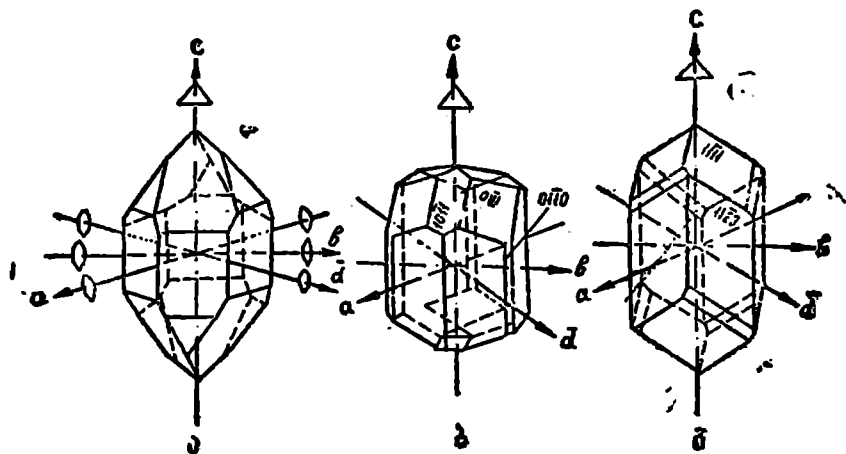
ეტრიის შვიდ კლასში შეგვხვდა ახალი, გეომეტრიულად ერთმანეთსაგან განსხვავებული მარტივი ფორმები: ორნაირი პირამიდა — ჰექსაგონური და დიჰექსაგონური; ოთხნაირი პირიმიდა — ჰექსაგონური, დიჰექსაგონური, ტრიგონური და დიტრიგონური; ოთხნაირი პრიზმა — ჰექსაგონური, დიჰექსაგონური, ტრიგონური და დიტრიგონური და ერთი ჰექსაგონური ტრაპეცოედრი.

ტრიგონური სინგონია $a = b = d \neq c$, $\alpha = 120^\circ$, $\beta = \gamma = 90^\circ$

ტრიგონური სინგონიის კრისტალების ორიენტაცია ჰექსაგონური სინგონიის კრისტალების ორიენტაციის ანალოგიუია. განსაკუთრებით მხოლოდ იმაშია, რომ c ვერტიკალური კრისტალოგრაფიული ღერძი აქ ემთხვევა სიმეტრიის L_6 ღერძს, ხოლო დანარჩენი ურთიერთობლი პორიზონტალური ღერძები მიმართულია ან L_2 ღერძების (ნახ. IV.67 ა). ან. როცა L_2 ღერძები არ არის — სიმეტრიის ვერტიკალური სიმეტრიების მართობი მიმართულების გასწვრივ (ნახ. IV.67 ბ), როცა კრისტალს აქვს ან L_2 და ან ვერტიკალური სიმეტრიის სიმეტრე, მაშინ პორიზონტალური ღერძები გააყავთ არსებული ან შესაძლებელი წიბოების პარალელურად (ნახ. IV.67 გ).

იმ შემთხვევაში, როდესაც კრისტალს აქვს სიმეტრიის $L_3 3P$ სახე (დირიკონული პირამიდული სიმეტრიის კლასი), მაშინ a , b და d ღერძები შეიძლება გავატაროთ მარტო სიმეტრიის სიბრტყის მართობულად, არამედ განვალაგოთ აღნიშნულ სიბრტყეებშიც (ნახ. IV. 68). კრისტალის მობრუნება ამ ორიენტაციებს შორის 30° -ით ხდება და, მაშასადამე, შესაბამისად შეიცვლება არიზმების და პირამიდების გეარები

ქვესაგონური სინგონიის ანალოგიურად ტრიგონური სინგონიის კრისტალების მარტივი ფორმის წახნაგების ინდექსები გამოისახება



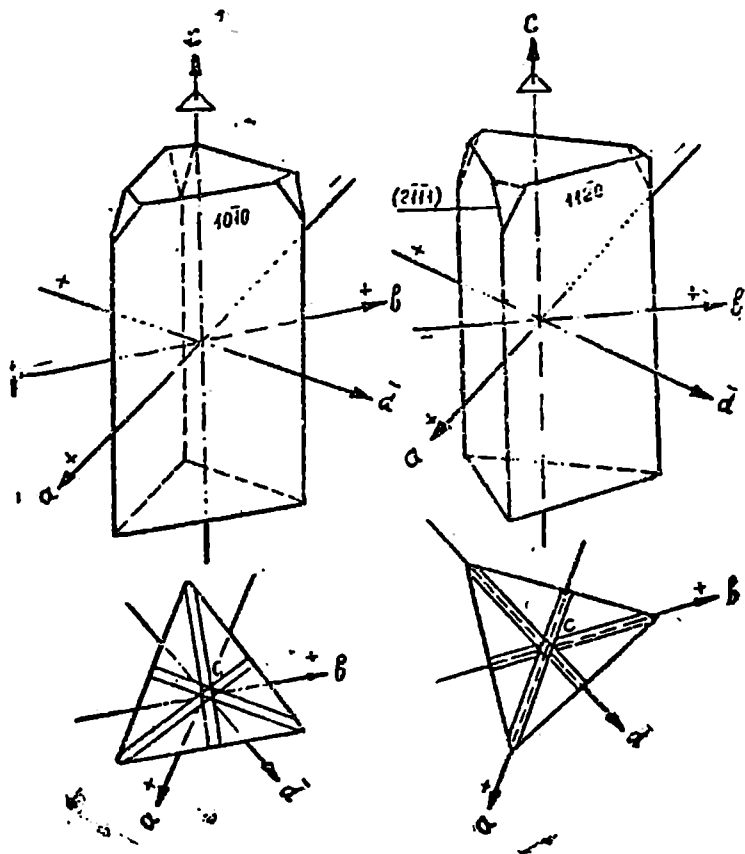
ნახ. IV.67. ტრიგონური სინგონიის კრისტალებში ვერტიკალური ღერძი ემთხვევა L_3 ღერძს.

ოთხ-ოთხი რიცხვით, ხოლო ერთეულ წახნაგს აქაც ორი — $(10\bar{1}1)$ ან $(11\bar{2}1)$ (ნახ. IV. 53) შესაძლებელი იმართულება აქვს.

ქვესაგონური და ტრიგონური სინგონიების კრისტალების აღნიშნული ორიენტაციის დროს ყოველი წახნაგის ინდექსში პიჯველი სამი ციფრის ჯამი უდრის ნულს. წახნაგის ინდექსის ზოგად შემთხვევაში $(hki) h+k+i=0$ აღნიშნული რიცხვები პორიზონტალური მიმართულების კრისტალოგრაფიული ღერძების შესაბამისი პარამეტრების შებოუნებული სიდიდეებია

IV.69 ნახაზზე მოცემულია a , b და d ღერძები; c ვერტიკალური ღერძი ნახაზის მართობულად გაივლის O წერტილში. გავავლოთ ნებისმიერი AB წახნაგი, რომელიც სამივე ღერძს გადაკვეთს (წახნაგმა შეიძლება გადაკვეთოს c ღერძიც ან მისი პარალელური იყოს, ამას

არა აქვს მნიშვნელობა). აღნიშნოთ გავლებული წახნაგის პარამეტრები შესაბამისად a_1 , a_2 და a_3 -ით, გავტაროთ B წერტილიდან d ღერძის პარალელურად EC სწორი ხაზი; მივიღებთ $O1C$ ტოლგვერდ სამკუთხედს, რადგან ამ სამკუთხედის სამივე კუთხე 60° -ია. ნახაზი-



ნახ. IV.68. ლიტრაფონური პირამიდის კლასის კრისტალების დანაშვები ორნიჩა ორიენტაცია.

დან ჩანს, რომ $\triangle AOD$ მსგავსია ACB სამკუთხედისა და, მაშასადამე,

$$\frac{AO}{OD} = \frac{AC}{CB}, \text{ ანუ } \frac{a_1}{a_2} = \frac{a_1 + a_2}{a_2}. \text{ გავყოთ ტოლობის ორივე ნაწილს}$$

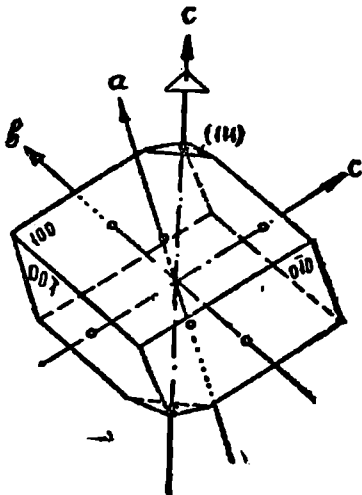
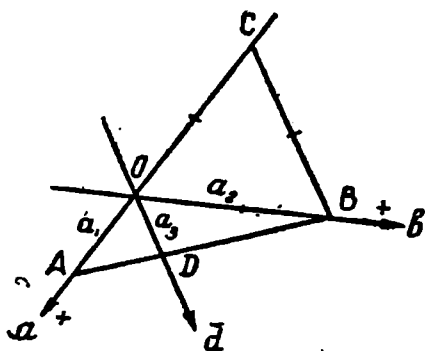
$$a_2 - \text{ზე, მივიღებთ } \frac{1}{a_2} = \frac{a_1 + a_2}{a_2 a_1} = \frac{a_1}{a_2 a_1} + \frac{a_2}{a_2 a_1}, \text{ აქედან } \frac{1}{a_2} =$$

$$\frac{1}{a_2} + \frac{1}{a_1} . \text{ მაშასადამე, } \bar{i} = k + h, \text{ ე. ი. } h + k + \bar{i} = 0, \text{ სადაც } h = \frac{1}{a_1},$$

$$k = \frac{1}{a_2} \text{ და } \bar{i} = \frac{1}{a_3} .$$

თუ ვიცით ტრიგონური ან ჰექსაგონური სინგონიის კრისტალოს რაიმე წახნაგის ინდექსის პირველი ორი რიცხვი (აღნიშნული თეორემის საფუძველზე), ყოველთვის შეკვიძლია გააოქიანგა რიმოთ მესამე რიცხვი, როგორც უაღრესი პირველი ორი რიცხვის ჯამისა შებრუნებული ნიშნით.

ზოგიერთი კრისტალოგრაფი



ნახ. IV.69. ტრიგონური და ჰექსაგონური სინგონიებში ყოველი წახნაგის ინდექსი $h + k + \bar{i} = 0$.

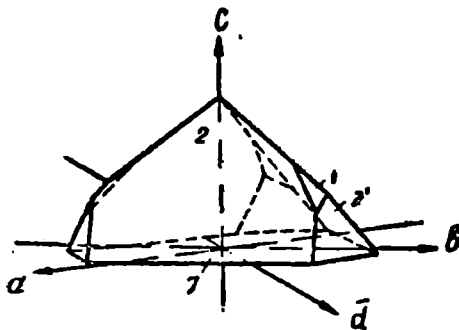
ნახ IV.70 ტრიგონური სინგონიის კრისტალის ორიენტაცია მილერის მიხედვით.

ტრიგონური სინგონიის (განსაკუთრებით რომბოედრული სახის მქონე) კრისტალების განსახილველად სარგებლობს მილერის მიერ შემოღებული ორიენტაციით. ამ შემთხვევაში კრისტალში ატარებენ არა ოთხ, არამედ სამ კრისტალოგრაფიულ ღერძს, რომლებიც გაივლიან რომბოედრის წიბოების პარალელურად (ნახ. IV.70). საპირველ ყოვზე ღერძებს შორის ურთიერთობლია და აუ უფრის 90°-ს. გარდა ამისა, სამივე ღერძი ერთნაირი კუთხითაა დახრილი ვერტიკალური ღერძის მიმართ.

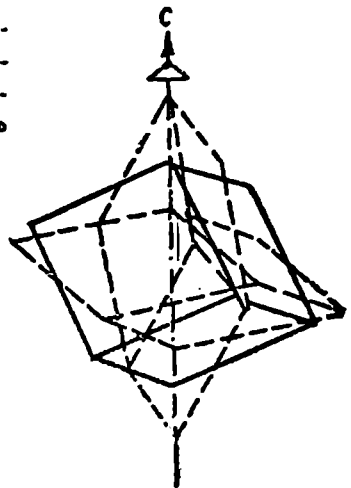
გეომეტრიული კონსტანტები ასეთი ორიენტაციის დროს ტრიგონური სინგონიისათვის იქნება: $a = b = c$, $\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$, ერთეული წახნაგი გაივლის L_2 ღერძის ძართობი მიმართულებით. იგი ან მონოედრია, ან პინაკოიდი ინდექსით (111).

განვიხილოთ ტრიგონური სინგონიის სიმეტრიის ხუთივე კლასის შესაძლო მარტივი ფორმები:

23. სიმეტრიის ტრიგონურ-პირამიდულ კლასში არსებობს მარტო L_3 , ამიტომ აქ შესაძლებელია გვექონდეს მხოლოდ სამწახნაგოვანი ტრიგონური პირამიდები ან პრიზმები, აგრეთვე მონოედრი (იხ. ტაბულა IV.12). ტრიგონური პირამიდა შეიძლება იყოს ზედა ან ქვედა მდებარეობისა. ყოველ მათგანს აქვს დადებითი ან უარყოფითი ორიენტაცია, ხოლო III გვარის პირამიდაში (და პრიზმაში) ორივე აგრეთვე მათ მარჯვენა და მარცხენა განლაგებას (იხ. IV.62). სიმეტრიის ამ კლასში კრისტალდება ნატრიუმის პერიოდატი ($\text{NaIO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$), რომლის კრისტალიც მოცემულია IV.71 ნახაზზე. აქ განვითარებულია უარყოფითი მონოედრი (წახნაგი 7), დადებითი და უარყოფითი ორიენტაციის I გვარის ტრიგონური პირამიდა (წახნაგი 2 და 2') და III გვარის მარჯვენა დადებითი ტრიგონური პირამიდა



ნახ. IV. 71. ნატრიუმის პერიოდატის კრისტალი (სიმეტრიის L_3 სახე).



ნახ. IV.72. რომბოედრი მიიღება კუბის დეფორმაციით.

(წახნაგი 1). სამივე პირამიდა ზედაა.

24. სიმეტრიის რომბოედრულ კლასს აქვს L_2 და C (ანუ G_{12}). მასში სამი გვარის რომბოედრი, სამი გვარის ჰექსაგონური პრიზმა და ბაზოზინაკოიდა (იხ. ტაბულა IV. 12). რომბოედრი ექვსწახნაგა დახურული მარტივი ფორმაა, რომლის ყოველ წახნაკს რომბის ფორმა აქვს (იხ. ტაბულა 11,2, ფორმა 30). რომბოედრი შეიძლება მივიღოთ ჰექსაედრის (კუბის) დეფორმაციით. დავაყენოთ კუბი ისე, რომ მისი ერთ-ერთი L , ღერძი იყოს ვერტიკალურად, თუ ამ ღერძის გასწვრივ კუბს გავჭიმავთ ან შეკეცუთ, მივიღებთ (ნახ. IV.72), შესაბამისად ძახილკეთა ან ბლაკვეთა რომბოედრს. კრისტალოგრაფული ღერძების განლაგების მიხედვით რომბოედრი შეიძლება იყოს I, II ან III გვარისა (ნახ. IV. 73).

კონსტრუქცია	სინგონიის ზღვა და ფორმულა	სინგონიის ელემენტების და მარტივი ფორმების მემბრები	შესაძლებელი	
			1 (h k l)	2 (h 0 l)
ბრიგონური სინგონიის კონსტრუქცია	23 ბრიგონური-პირამიდული L ₃		მ-3 მართი ბრიგონური პირამიდა 3-3	1-მ მართი ბრიგონური პირამიდა 3-3
	24 რომბოედრული L ₂ C		მ-3 მართი რომბოედრული 6-6	1-მ მართი რომბოედრული 3-3
	25 ბრიგონური-ტრაპეზოედრული L ₃ 3L ₂		ბრიგონური ტრაპეზოედრული 6-6	1-მ მართი რომბოედრული 3-3
	26 დიბრიგონური-პირამიდული L ₃ 3P		დიბრიგონური პირამიდა 6-6	1-მ მართი ბრიგონური პირამიდა 3-3
	27 დიბრიგონური-საქონოედრული L ₃ 3L ₂ 3P C		დიბრიგონური საქონოედრული 12	1-მ მართი რომბოედრული 6

გარდა ამისა, I და II გვარის რომბოედრს შეიძლება ჰქონდეს დიდებით ან უარყოფითი ორიენტაცია, ხოლო III გვარის რომბოედრს თხზნაირი ორიენტაცია (ნახ. IV.74).

რომბოედრული სინგონიის მქონე კრისტალებიდან მაგალითისათვის განვიხილოთ ილმენიტის (FeTiO₃) და ფენაკიტის (Be₂SiO₅) კრისტალები (ნახ. IV.75). ილმენიტის კრისტალს აქვს ფირფიტოვანი სახე, რადგან განვითარებულია ბაზოპინაკოიდის წახალავები (წახალავი 7).

მარტივი უორაგები

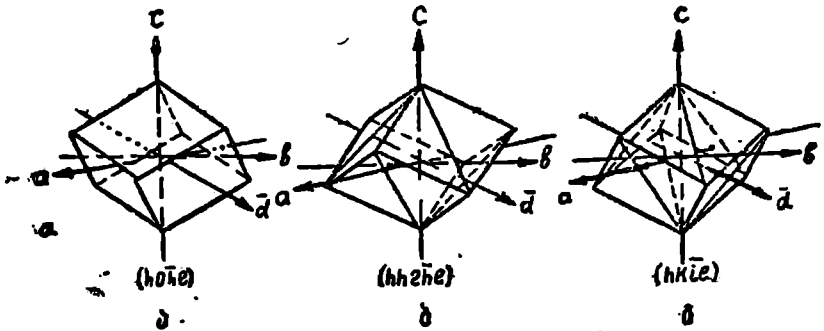
მარტივი უორაგების ინდექსები				
3	4	5	6	7
(ხხჳე)	(ხეო)	(იეო)	(იიჳო)	(ოოო)
მ-2 ბჳარის ბრიგონული პირადი	მ-3 ბჳარის ბრიგონული პირადი	1-ლი ბჳარის ბრიგონული პირადი	მ-2 ბჳარის ბრიგონული პირადი	მონოპოლი
2	3	1	2	1
ბ რ ი უ ე ი	ნ ა ხ ნ ა ბ ი თ	ნ ა ხ ნ ა ბ ი თ	ნ ა ხ ნ ა ბ ი თ	ნ ა ხ ნ ა ბ ი თ
მ-2 ბჳარის ბრიგონული პირადი	მ-3 ბჳარის ჰესაგონული პირადი	1-ლი ბჳარის ჰესაგონული პირადი	მ-2 ბჳარის ჰესაგონული პირადი	ბაგონ-პინაგონი
2	3	1	2	1
ბ რ ი უ ე ი	ნ ა ხ ნ ა ბ ი თ	ნ ა ხ ნ ა ბ ი თ	ნ ა ხ ნ ა ბ ი თ	ნ ა ხ ნ ა ბ ი თ
მ-2 ბჳარის ბრიგონული პირადი	1-ლი ბჳარის ბრიგონული პირადი	მ-2 ბჳარის ბრიგონული პირადი	მ-2 ბჳარის ბრიგონული პირადი	ბაგონ-პინაგონი
2	1	2	2	1
ბ რ ი უ ე ი	ნ ა ხ ნ ა ბ ი თ	ნ ა ხ ნ ა ბ ი თ	ნ ა ხ ნ ა ბ ი თ	ნ ა ხ ნ ა ბ ი თ
მ-2 ბჳარის ჰესაგონული პირადი	1-ლი ბჳარის ბრიგონული პირადი	მ-2 ბჳარის ჰესაგონული პირადი	მ-2 ბჳარის ჰესაგონული პირადი	მონოპოლი
2	1	2	2	1
ბ რ ი უ ე ი	ნ ა ხ ნ ა ბ ი თ	ნ ა ხ ნ ა ბ ი თ	ნ ა ხ ნ ა ბ ი თ	ნ ა ხ ნ ა ბ ი თ
მ-2 ბჳარის ჰესაგონული პირადი	1-ლი ბჳარის ჰესაგონული პირადი	მ-2 ბჳარის ჰესაგონული პირადი	მ-2 ბჳარის ჰესაგონული პირადი	ბაგონ-პინაგონი
2	1	2	2	1
ბ რ ი უ ე ი	ნ ა ხ ნ ა ბ ი თ	ნ ა ხ ნ ა ბ ი თ	ნ ა ხ ნ ა ბ ი თ	ნ ა ხ ნ ა ბ ი თ
12-12 ასიმბრიული ნახნაბი	6 მონოპოლი ნახნაბი	6 ასიმბრიული ნახნაბი	6 ასიმბრიული ნახნაბი	2 მონოპოლი ნახნაბი

ამ კლასში განვითარებულია ოთხი რომბოედრი: ორი I გვარის, დადებული და უარყოფითი (წახნაგები 2 და 2¹) და ორი II გვარის, დადებული და უარყოფითი (წახნაგები 3 და 3¹).

ფენაკიტის კრისტალზე განვითარებულია IV გვარის მარჯვენა დადებითი რომბოედრი (წახნაგი 1) და I და II გვარის ჰესაგონული პირადი (წახნაგები 5 და 6).

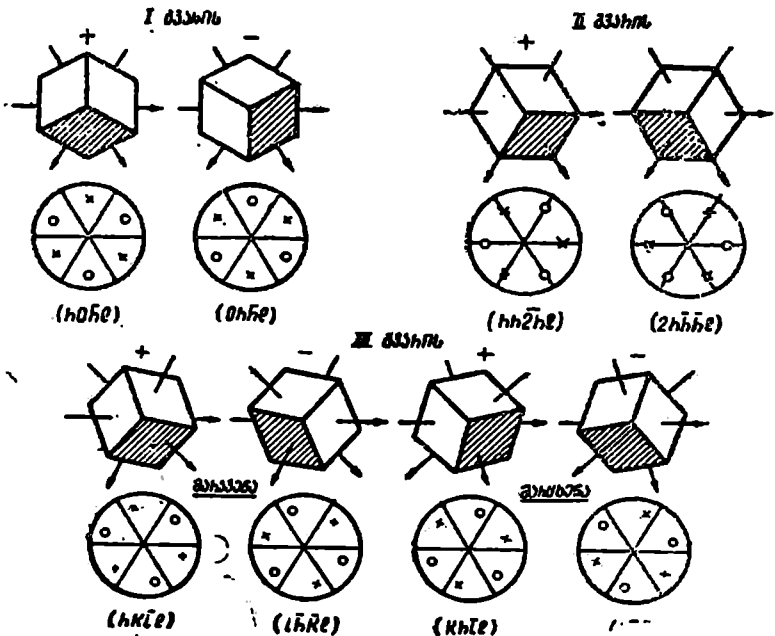
25. სიმეტრიის ტრიგონურ-ტრაპეცოედრულ კლასში

შხოლოდ სიმეტრიის ღერძებია — L_2 და მისი მართობი $3L_2$. აქ გვხვდება ზოგადი ვახლავების წახნავის შესაბამისი ახალი მარტივი ფორმა — ტრიგონური ტრაპეცოედრი (იხ. ტაბულა II.2, ფორმა 2ა). მას ექვს



ნახ. IV.73. პირველი (ა), მეორე (ბ) და მესამე (გ) ვარიანტის ტრაპეცოედრები.

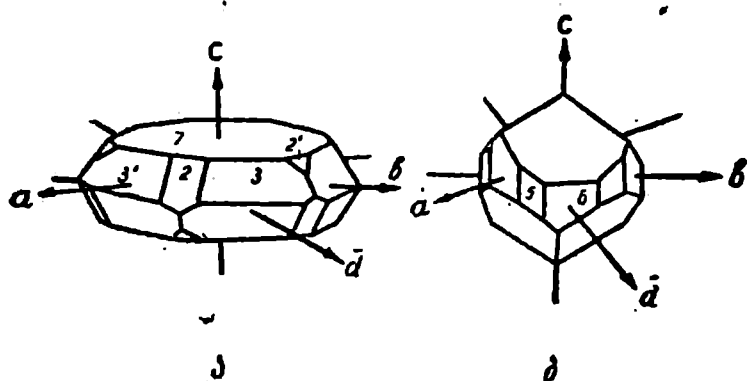
ტრაპეციის ფორმის ექვსი წახნავი და შეიძლება იყოს მარჯვენა ან მარცხენა განლაგებისა (იხ. IV. 76). ორივე ეს ფორმა ენა-



ნახ. IV. 74. ონობოედრის შესაძლო რენანიო ორიენტაცია გვეხლეებით; ინდექსები მოცემული დაშტრიხული წახნავებისათვის.

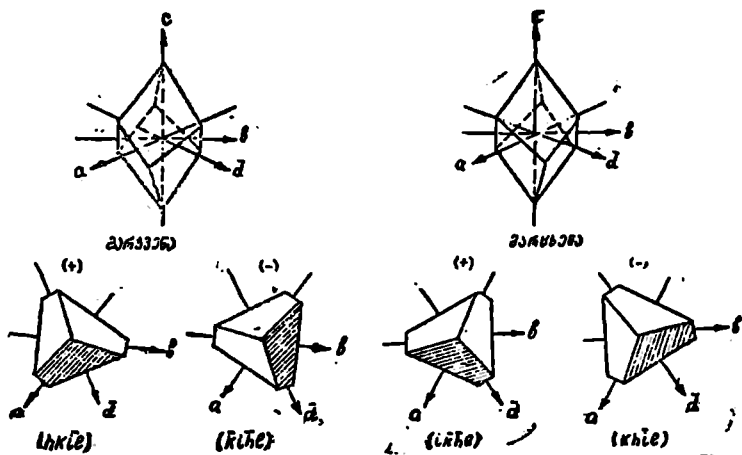
ანტიომორფულია, ხოლო ყოველ მათგანს შეიძლება ჰქონდეს დადებითი ან უარყოფითი ორიენტაცია.

გარდა ტრაპეცოედრისა, აქ გვხვდება: I გვარის რომბოედრი— დადებითი ($hOh\bar{1}$) და უარყოფითი ($Oh\bar{h}l$) ორიენტაციისა; II გვარის



ნახ. IV.75. ილმენიტის (ა) და ფენაქიტის (ბ) კრისტალები (სიმეტრიის L_2C ხსენ)

ტრიგონური ბიპირამიდი (+) — ($hh\bar{2}hl$ და (-) ($2h\bar{h}\bar{h}l$); დიტრიგონური პრიზმა ($hk\bar{3}O$) დადებითი და უარყოფითი ორიენტაციის; I გვარის ჰექსაგონური პრიზმა; II გვარის ტრიგონური პრიზმა (+).

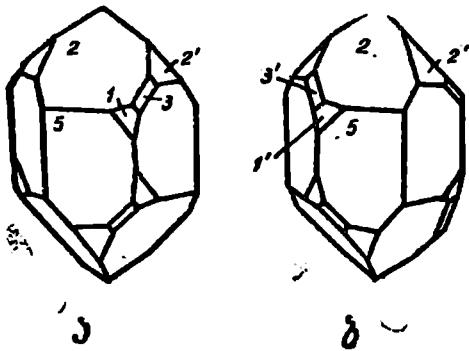


ნახ. IV. 76. მარჯვენა და მარცხენი ტრიგონური ტრაპეცოედრის ოთხნიობი განლაგება

ან (—) ორენჯაყიისა და ბაზოპინაკოიდი (ტაბულა IV. 12. სიმეტრიის 25-ე კლასი).

ამ სიმეტრიის მქონე კრისტალებიდან ყველაზე გავრცელებულია დაბალტემპერატურული კვარცის (SiO_2) და სინგურის (HgS) კრისტალები. IV.77 ნახზზე მოცემულია კვარცის მარჯვენა და მარცხენა კრისტალი. აქ განვითარებულია 1 გვარის ჰექსაგონური პრიზმა ($10\bar{1}0$) (წახნაგი 5); დადებითი ($10\bar{1}1$) და უარყოფითი ($01\bar{1}1$) რომბოედრი (წახნაგები 2 და 2'); მარჯვენა ან მარცხენა ტრიგონური ტრამეოედრი (წახნაგები 1 და 1') და დადებითი ან უარყოფითი ტრიგონური ბიპირამიდა (წახნაგები 3 და 3')

26. სიმეტრიის დიტრიგონურ-პირამიდულ კლასს აქვს შესაბამისი რიგის სიმეტრიის ღერძი და მასზე გამავალი სიმეტრიის სამი სიბრტყე. ჰორიზონტალური კრისტალოგრაფიული ღერძების გაყვანა ამ კლასში შეიძლება სამივე ტოლი ღერძის განლაგებით სიმეტრიის



სიბრტყეებში ან მათი სიმეტრიის სიბრტყეების მართობი მიმართულების გასწვრივ განლაგებით (ნახ. IV.78). შეყრდნობით ამ უკანასკნელ შესაქლებლობაზე. რადგან აქ ჰორიზონტალური მიმართულებით არა გვაქვს მეორე რიგის სიმეტრიის ღერძები (და არც ჰორიზონტალური სიმეტრიის სიბრტყე).

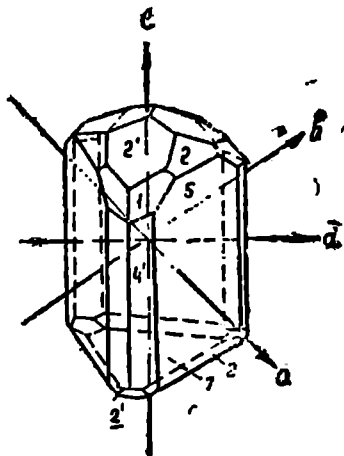
ნახ. IV.77. კვარცის კრისტალები. მარჯვენა და მარცხენა (სიმეტრიის L_3C_2 სახე).

ამ კლასში ბიპირამიდების ნაცვლად გვექნება პირამიდები, რომლებსაც ზედა და ქვედა განლაგება ექნებათ.

ზოგადი განლაგების წახნაგის შესაბამისი აქ იქნება დიტრიგონური პირამიდა, რომელიც შედგება ექვსი ასიმეტრიული წახნაგისგან (იხ. ტაბულა 11, 2, ფორმა 3). მას შეიძლება ჰქონდეს დადებითი და უარყოფითი ორიენტაცია (იხ. ნახ. IV. 64 და IV. 65). დანარჩენ მარტივ ფორმებს ჩვენ უკვე ვიცნობთ (ტრიგონური და ჰექსაგონური პირამიდები, დიტრიგონური, ტრიგონური და ჰექსაგონური პრიზმები და მონოედრი იხ. ტაბულა IV. 12). ვარსკვლავით აღნიშნული მარტივი ფორმები სათანადოდ შეიცვლება, თუ ჰორიზონტ-

ალურ კრისტალოგრაფიულ ღერძებს გავატარებთ მეორენაირად. ტრავნიური პირამიდა ან პრიზმა იქნება ჰექსაგონური ან პირიქით.

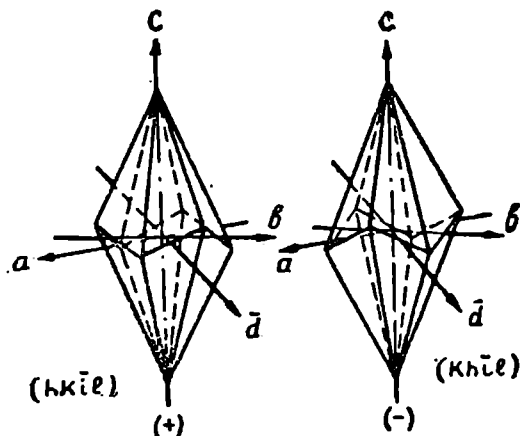
სიმეტრიის ამ კლასში კრისტალებიან ნიკელის და ვერცხლის სულფიდები და სხვა მინერალები. მაგალითისათვის განვიხილოთ ტერზალინის კრისტალი (ნახ. IV. 78). აქ განვითარებულია I გვარის უარყოფითი ტრიგონური პრიზმა (0110) (წახნაგი 5; დადებითი დიტრიგონური პრიზმა (წახნაგი 4); ზედა დადებითი დიტრიგონური პირამიდა (წახნაგი 1); ზედა და ქვედა I გვარის ტრიგონური პიოპიდეების წახნაგები: (2¹) ზედა დადებითი ($h\bar{0}hl$), (2²) ქვედა დადებითი ($h0\bar{h}\bar{l}$), (2) ზედა უარყოფითი ($Oh\bar{h}l$), (2) ქვედა უარყოფითი ($Oh\bar{h}\bar{l}$) და უარყოფითი მონოედრო (0001) (წახნაგი 7).



ნახ. IV.78. ტერზალინის კრისტალი (სეტვრის L_33P სხე).

27. სიმეტრიის დიტრიგონურ-სკალენოედრული კლასი ტრიგონური სინგონიის მაქსიმალური სიმეტრიის ბაოისხის მქონე კლასია. აქ ერთდროულად არის

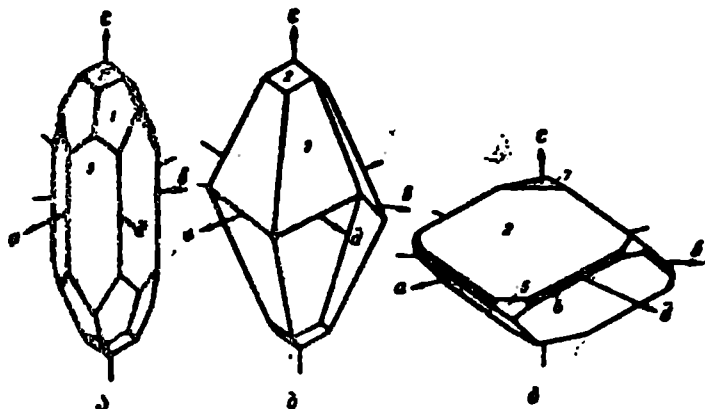
L_33L_23P და C . ვხვდებით კიდევ ერთ ახალ მარტივ ფორმას — დიტრიგონულ სკალენოედრს, რომელიც შედგება 12 ასიმეტრიული წახნაგისაგან (იხ. ტაბულა 11. 2, ფორმა 28). იგი შეესაბამება ზოგადი განლაგების მქონე წახნაგს და მას შეიძლება ჰქონდეს ორნაირი ორიენტაცია (ნახ. IV.79). დანარჩენი ექვსი შესაძლებელი მარტივი ფორმა ჩვენთვის



ნახ. IV.79. დიტრიგონური სკალენოედრები: დადებითი (+) და უარყოფითი (-) ორიენტაციის.

უკვე ნაცნობია; ესენია: I გვარის რომბოედრი დაღებთი ($hO\bar{h}l$) და უარყოფითი ($Oh\bar{h}l$) ორიენტაციის, II გვარის ჰექსაგონური ბიპირამიდა, დიჰექსაგონური და ორივე გვარის ჰექსაგონური პრიზმები და ბაზოპინაკოიდი (იხ. ტაბულა IV. 12). სიქეტრიის ამ კლასში კრისტალდება მრავალი მინერალი. მაგალითისათვის გავარჩიოთ კალციტის ($CaCO_3$) და მაგნეზიტის ($MgCO_3$) კრისტალები (ნახ. IV. 80)

კალციტის კრისტალებზე (ნახ. IV. 80 ა და ბ) განვითარებული დიტრიგონური სკალენოედრი ($h\bar{h}\bar{2}l$) (წახნაგი I), რომბოედრი ($hO\bar{h}l$) (წახნაგი 2) (ორივე ფორმა დაღებთი ორიენტაციისა) და I-გვარის



ნახ. IV. 80. კალციტის (ა, ბ) და მაგნეზიტის (გ) კრისტალები (სიმეტრიის L_2 , $3L_2$, $3P$, C სხე):

ჰექსაგონური პრიზმა ($10\bar{1}0$) (წახნაგი 5). მაგნეზიტის კრისტალზე (ნახ. IV. 80 გ) გაბატონებული ფორმაა რომბოედრი ($hO\bar{h}l$) (წახნაგი 2). ნაკლებად განვითარებულია I და II გვარის პრიზმები (წახნაგები 5 და 6) და ბაზოპინაკოიდი ($OC01$) (წახნაგი 7).

ამგვარად, ტრიგონური სინგონიის განხილული სიმეტრიის ხუთ კლასში ჩვენ შეგვხვდა გეომეტრიულად ერთმანეთისაგან განსხვავებული კიდეც ხუთი ახალი მარტივი ფორმა: ორნაირი პირამიდა — ტრიგონური და დიტრიგონური, რომბოედრი, ტრიგონური ტრაპეცოედრი და დიტრიგონური სკალენოედრი.

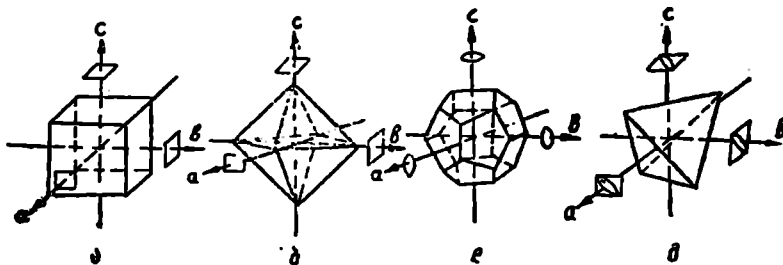
საშუალო კატეგორიის სამივე სინგონიაში განვიხილეთ სულ 25 მარტივი ფორმა: 9-ტეტრაგონურ სინგონიაში, 11-ჰექსაგონურ სინგონიაში და 5-ტრიგონურ სინგონიაში.

მაღალი კატეგორიის სინგონიები. მაღალ კატეგორიას მხოლოდ

ერთი კუბური სინგონია მიეკუთვნება, რომელშიც სამივე კრისტალოგრაფიული ღერძი ურთიერთტოლი და მართობია.

კუბური სინგონია $a=b=c$, $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$

კუბური სინგონიის სიმეტრიის ხუთივე კლასის კრისტალებში ყოველთვის არის სამი ურთიერთმართობი და ტოლი სიმეტრიის ღერძი $3L_4$ ან $3L_2$, რომლებსაც ირჩევენ კრისტალოგრაფიული ღერძების მიმართულებად (ნახ. IV.81), რადგან სამივე კრისტალოგრაფიული ღერძი ტოლია და ურთიერთმართობი, ამიტომ სულ ერთია რომელი მათგანი იქნება a , b ან c ღერძი, რომლითაც დავიკუთროთ კრისტალს, ის იქნება მეორე b ღერძი, დანარჩენი ორიდან ვერტიკალურად გაივლის მესამე c ღერძი, ხოლო დამკვირვებლისაკენ იქნება მიმართული პირველი a ღერძი. ერთეული წახნაგი სამივე კრისტალოგრაფიულ ღერძზე მოკვეთს ტოლ პარამეტრებს ე. ი. $a_0=b_0=c_0$. ეს იქნება ან ოქტაედრის (ნახ. IV.81 ბ). ან ტეტრაედრის (ნახ. IV.81 გ) წახნაგი.



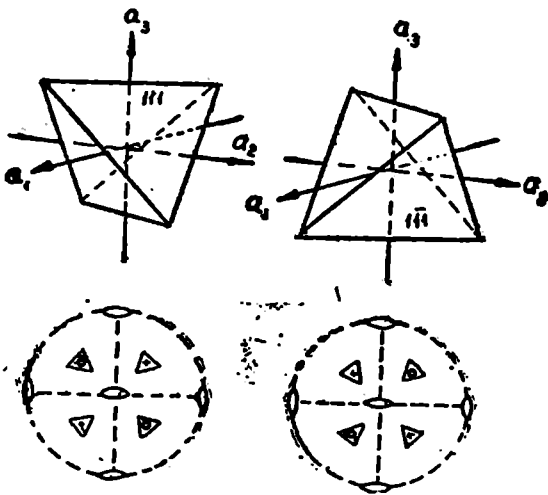
ნახ. IV.81. კუბური სინგონიის კრისტალებში სამივე კრისტალოგრაფიული ღერძი ემთხვევა $3L_4$ -ს (ა, ბ), ან $3L_2$ -ს (ღ), ან $3C_2$ -ს (გ).

კუბურ სინგონიაში შეგვხვდება 15 ახალი მარტივი ფორმა, რომლებიც მკვეთრად განსხვავდებიან უკვე განხილული ფორმებისაგან (იხ. ტაბულა II.2, ფორმები 33-დან 47-მდე). აქ სულ არ გვექნება მონოედრები, პინაკოიდები, ბიპირამიდები და პრიზმები. იქნება მხოლოდ დახურული მარტივი ფორმები წახნაგთა სხვადასხვა რაოდენობით — ოთხ, ექვს, რვა და ორმოცდარვაწახნაგოვანი ფორმები. მათი სახელებიც სათანადოდ იქნება: ტეტრაედრი, ჰექსაედრი, ოქტაედრი და ჰექსაოქტაედრი (ექვსჯერ რვაწახნაგა) (იხ. ტაბულა II. 2-ზე შესაბამისი ფორმები). (№ 38, 33, 43 და 47). თუ წახნაგთა ერთნაირი რაოდენობის მქონე ფორმები მეორდება, მაგალითად, დოდეკაედრები, ტრიტეტრაედრები, ან ტრიოქტაედრები, მაშინ მათი ერთმანეთისაგან გასარჩევად წინ უმატებენ წახნაგის ფორმის დასახელებას. მაგალითად, ტრიკონ-ტრიტეტრაედრი, ტეტრაკონ-ტრიტეტრაედრი და ბენტაკონ-ტრი-

ტეტრაედრი (სათანადოდ-სამკუთხედის, ოთხკუთხედის და ხუთკუთხედის, ფორმის მქონე სამკერ ოთხწახნაგა ფორმები) იხ. ტაბულა II.2-ზე შესაბამისი № 39, 40, 41 ფორმები.

განვიხილოთ კუბური სინგონიის მარტივი ფორმები სიმეტრიის კლასების მიხედვით (ტაბულა IV. 13 და IV. 14).

28. სიმეტრიის პენტაგონტრიტეტრაედრული კლასის კუბური სინგონიის ყველაზე დაბალი სიმეტრიის მქონე კლასია. მას ახასიათებს მხოლოდ საწყისი სიმეტრიის $3L_2$ და $4L_2$ ელემენტები: ერთეული წახნაგის (III) გნომოსტერეოგრაფიული გეგმილი ემთხვევა მესამე რიგის სიმეტრიის



ნახ. IV. 82. ტეტრაედრი, ა-დადებითი, ბ-უარყოფითი სათანადო გეგმილებით.

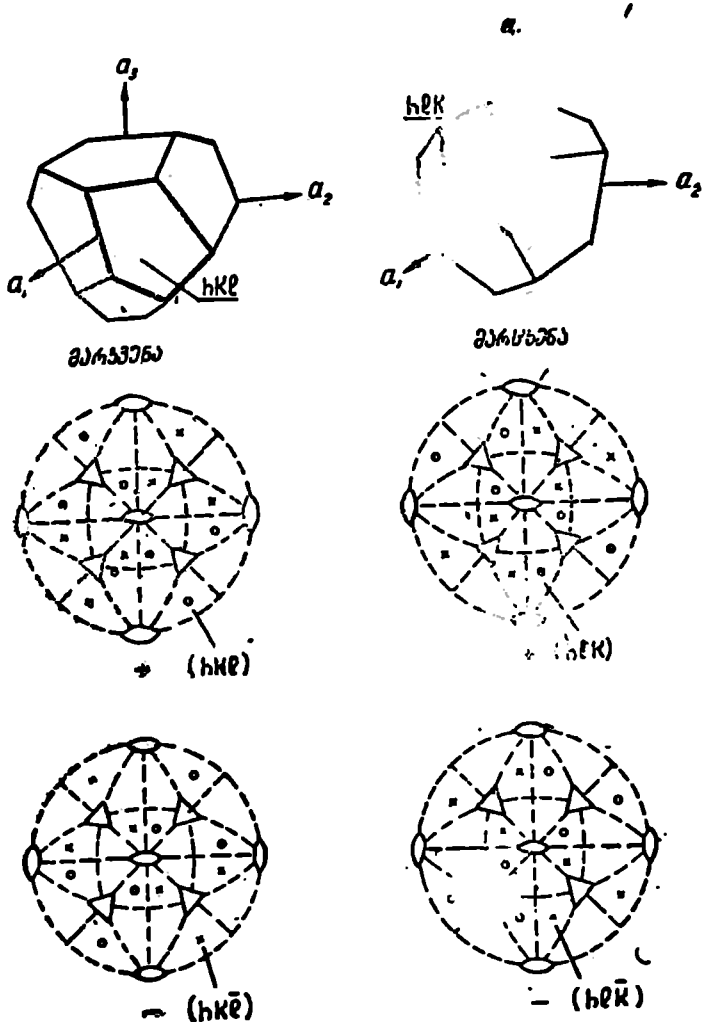
ოთხი მესამე რიგის სიმეტრიის ლერძი გაივლის ტეტრაედრის წვეროვებზე და მოპირდაპირე წახნაგის ცენტრში. ტეტრაედრს აქვს დადებითი (111) და უარყოფითი ($\bar{1}\bar{1}\bar{1}$) (ნახ. II. 82) ორიენტაცია.

ერთი ორიენტიცილიდან მეორეში გადასაყვანად საჭიროა კრისტალი მოვაბრუნოთ რომელიმე კრისტალოგრაფიული ლერძის გარშემო 90° -ით. დადებითი და უარყოფითი ორიენტაცია ამ კლასში აქვს აგრეთვე იმ მარტივ ფორმებს, რომლებიც ტეტრაედრის „საფუძველზე“ აგებული ფორმებია, ასეთებია: პენტაგონტრიტეტრაედრი (ნახ. IV. 83), ტრიგონტრიტეტრაედრი და ტეტრაგონტრიტეტრაედრი (ნახ. IV. 84).

პენტაგონტრიტეტრაედრი ზოგადი განლაგების წახნაგის მქონე ფორმაა. იგი შედგება 12 ასიმეტრიული წახნაგისაგან და შეიძლება ჰქონდეს ოთხნაირი განლაგება: მარჯვენა — დადებითი (lkl) და უარ-

ყოფითი ($hk\bar{l}$) და მარცხენა — დადებითი (hkl) და უარყოფითი ($h\bar{l}k$) (ნახ. IV.83).

მეორე და მესამე მარტივი ფორმებია 12-12 წახნაგა დადებითი (hkk) და უარყოფითი ($h\bar{k}\bar{k}$) ტრიგონალური ტეტრაედრი (ნახ. IV. 84 ა)



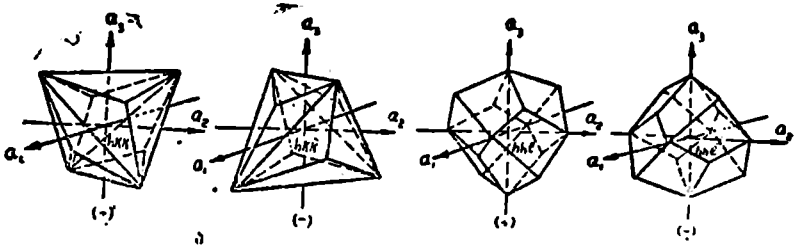
ნახ. IV. 83. მარცხენა და მარცხენა პენტაგონალური ტეტრაედრი და მათი შესაბამისი დადებითი და უარყოფითი ორიენტაციის ყველაფერები.

ქუაუარი სინფონიის მარტივი ჟღერები

სახელი		შესაბამებელი გარემო ურობებს იწვევს					
1	2	3	4	5	6	7	
სახელი	(ს.ს.)	(ს.ს.)	(ს.ს.)	(ს.ს.)	(ს.ს.)	(ს.ს.)	
26	3363000 ბრინჯაოს ბრინჯაოს	ბრინჯაოს ბრინჯაოს	ბრინჯაოს ბრინჯაოს	3363000 ბრინჯაოს	ბრინჯაოს ბრინჯაოს	ბრინჯაოს ბრინჯაოს	3363000 ბრინჯაოს
29	3363000 ბრინჯაოს	ბრინჯაოს ბრინჯაოს	ბრინჯაოს ბრინჯაოს	3363000 ბრინჯაოს	ბრინჯაოს ბრინჯაოს	ბრინჯაოს ბრინჯაოს	3363000 ბრინჯაოს
30	3363000 ბრინჯაოს	ბრინჯაოს ბრინჯაოს	ბრინჯაოს ბრინჯაოს	3363000 ბრინჯაოს	ბრინჯაოს ბრინჯაოს	ბრინჯაოს ბრინჯაოს	3363000 ბრინჯაოს
31	3363000 ბრინჯაოს	ბრინჯაოს ბრინჯაოს	ბრინჯაოს ბრინჯაოს	3363000 ბრინჯაოს	ბრინჯაოს ბრინჯაოს	ბრინჯაოს ბრინჯაოს	3363000 ბრინჯაოს
32	3363000 ბრინჯაოს	ბრინჯაოს ბრინჯაოს	ბრინჯაოს ბრინჯაოს	3363000 ბრინჯაოს	ბრინჯაოს ბრინჯაოს	ბრინჯაოს ბრინჯაოს	3363000 ბრინჯაოს
33	3363000 ბრინჯაოს	ბრინჯაოს ბრინჯაოს	ბრინჯაოს ბრინჯაოს	3363000 ბრინჯაოს	ბრინჯაოს ბრინჯაოს	ბრინჯაოს ბრინჯაოს	3363000 ბრინჯაოს

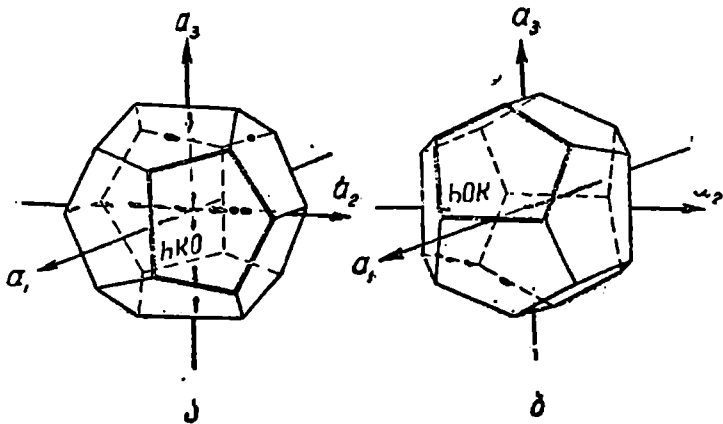
და დადებითი (hhl) და უარყოფითი ($h\bar{h}l$) (ნახ. IV.84 ბ) ტეტრაგონ-ტრიტეტრაედრი.

მკობზე ფორმა პენტაგონდოდეკაედრია, რომელსაც აგრეთვე შეიძლება ჰქონდეს დადებითი ($hikO$) და უარყოფითი (hOk) ორიენტაცია (ნახ. IV.85). რეზულტე მარტივი: ფორმაც თორმეტწახანაგოვანია, მხოლოდ მის ყოველწახანაგს აქვს წარა ხუთკუთხედის, არამედ რომბის



ნახ. IV.84. ა-დადებითი და უარყოფითი ტრიგონ-ტრიტეტრაედრი, ბ-დადებითი და უარყოფითი ტეტრაგონ-ტრიტეტრაედრი.

ფორმა და ამიტომ მას რომბოლოდეკაედრს უწოდებენ. მისი ინდექსია (110) (ნახ. IV.86 ა). მეშვიდე ფორმა ჰექსაედრია, რომლის ინდექსია (100) (ნახ. IV.86 ბ). აღსანიშნავია, რომ არც რომბოლოდეკაედრს

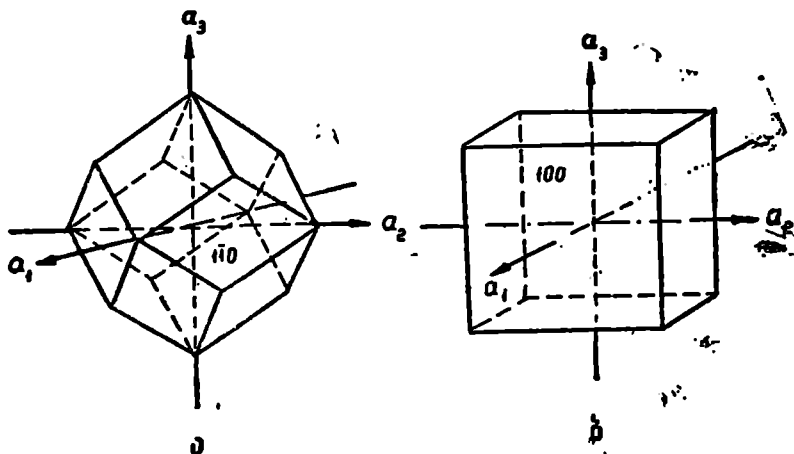


ნახ. V 85. პენტაგონდოდეკაედრი. ა-დადებითი, ბ-უარყოფითი

და არც ჰექსაედრს არა აქვს უარყოფითი ორიენტაცია და როგორც ამას ქვემოთაც დავიხაზავთ, ორივე ეს ფორმა გეოსტრუქტურულად უცვლელი რჩება, კუბუმი სინგონიის სიმეტრიის ხუთივე კლასში იცვლება მხოლოდ მათი წახანაგების სიმეტრიის ხასიათი (იხ. ტაბულა IV.14).

სიმეტრიის განხილული კლასის მქონე კრისტალის საილუსტრაციოდ განვიხილოთ ნატრიუმის ქლორიტის კრისტალი (NaClO_3) (ნახ. IV.87). აქ განვითარებულია პექსაედრი (წახნაგი 7). პენტაგონ-დოდეკაედრი (წახნაგი 4), რომბოდოდეკაედრი (წახნაგი 6) და უარყოფითი ტეტრაედრი (წახნაგი 6').

29. სიმეტრიის დოდეკაედრის კლასს აქვს სიმეტრიის $3L_2$, $3P$, $4L_3$ და C ელემენტები. წინა კლასთან შედარებით მას ემატება სიმეტრიის სახი სიბრტყე და ინვერსიის ცენტრი, ამიტომ აქ ელემენტარული წახნაგი (111) ზოგჯერ სტეტრაედრის ნაცვლად ოქტაედრს, რვაწახნაგა მარტივ ფორმას (ტაბულა. IV. 13, ფორმა მეექვსე). სათა-



ნახ. IV.86. ა-რომბოდოდეკაედრი, ბ-პექსაედრი.

ნადოდ ოქტაედრის „საფუძველზე“ აგებული მეორე და მესამე მარტივი ფორმები 24-24 წახნაგოვანი იქნება: ტეტრაგონტრიოქტაედრი (hkk) და ტრიგონტრიოქტაედრი (hhl) (ნახ. IV. 88).

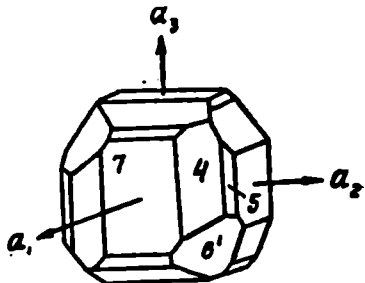
ზოგადი განლაგების წახნაგი (hkl) აქ წარმოშობს 24 წახნაგა დიდოდეკაედრს (ფორმა პირველი, ტაბულა IV.13), რომელსაც პენტაგონდოდეკაედრის ანალოგიურად შეიძლება ჰქონდეს დადებითი (hkl) და უარყოფითი ($h\bar{l}k$) (ნახ. IV.89) ორიენტაცია.

დანარჩენი სამი მარტივი ფორმა გეომეტრიულად უცვლელი რჩება. პენტაგონდოდეკაედრს და რომბოდოდეკაედრს 12-12 მონოსიმეტრიული წახნაგი ექნებათ. ხრლო პექსაედრს — ხექვსი დისიმეტრიული წახნაგი (იხ. ტაბულა IV.14). ამ სიმეტრიაში კრისტალდება ყველაზე გავრცელებული სულფიდი — პირიტი (FeS_2). კობალტინი

(CoAsS) და სხვა მინერალები. IV.90 ნახაზზე მოცემულია პირიტისა და კობალტინის კრისტალები, რომლებზედაც განვითარებულია ჰექსაედრი (წახნაგი 7), პენტაგონ-ლოდეკაედრი (წახნაგი 4), უარყოფითი დიდოდეკაედრი (წახნაგი I') და რომბოლოდეკაედრი (წახნაგი I).

ხშირად ამ მინერალების კრისტალებზე ერთდროულად ვითარდება პენტაგონლოდეკაედრისა და ოქტაედრის წახნაგები (ნახ. IV.91, წახნაგები 4 და 6). როდესაც მარტივი ფორმის ყველა წიბო ტოლია, მაშინ მივიღებთ 20 წახნაგა კომბინაციას, რომელსაც აგრეთვე ოკოსადერს უწოდებენ.

30. სიმეტრიის ჰექსატეტრაედრულ კლასში არსებობს ურთიერთმართობი სამი მეორე რიგის სიმეტრიის ღერძი (ეს ღერძები ამავე დროს მეოთხე რიგის ინვერსიის ღერძებია), ოთხი მესამე რიგის სიმეტრიის ღერძი და ექვსი დიაგონალური მიმართულების სიმეტრიის სიბრტყე, რომლებიდანაც ორი ვერტიკალურია და ოთხი დახრილი. ელემენტარული წახნაგის (111) შესაბამისი მარტივი ფორმა აქ ისევე ტეტრაედრია და პენტაგონტეტრაედრის კლასის ანალოგიურად გეომეტრიულად შეორდება ტრიგონტრიტეტრაედრი და ტეტრაგონტრიტეტრაედრიც (იხ. ტაბულა IV.14). გარდა ამისა, აქ არსებული სიმეტრია აპირობებს რომბოლოდეკაედრის და ჰექსაედრის არსებობასაც. ახალი მარტივი ფორმები აქ 24-24 წახნაგოვანი ჰექსატეტრაედრი და ტეტრაპექსაედრია. ჰექსატეტრაედრი (ნახ. IV. 92) ზოგადი განლაგების წახნაგის შესაბამისი ფორმისაა და შეიძლება ჰქონდეს დადებითი (hkl) და უარყოფითი ($h\bar{k}l$) ორიენტაცია.



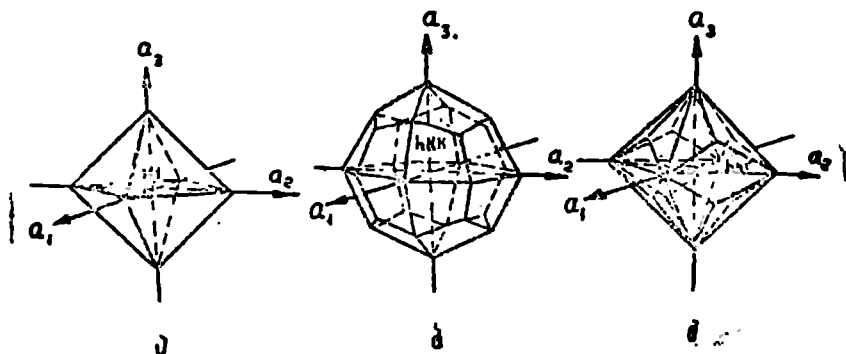
ნახ. IV. 87. ნარჩუმის ქლორიდის კრისტალი (სიმეტრიის $3L_2, 4L_3$ სახე).

ტეტრაპექსაედრი შედგება 24 ასიმეტრიული წახნაგისაგან, რადგან სიმეტრიის არსებული ექვსივე სიბრტყე გაივლის მხოლოდ მის წიბოებზე და არა წახნაგზე. ტეტრაპექსაედრს აქვს მხოლოდ ერთი ორიენტაცია, მისი ინდექსებია ($h\bar{k}0$) პენტაგონ ლოდეკაედრის ინდექსების ანალოგიურია.

სიმეტრიის განხილული ხარისხი ახასიათებს სფალერიტის (ZnS) კრისტალებს. IV.94 ნახაზზე მოცემულია სფალერიტის ორი კრისტალი. პირველზე (ა) განვითარებულია 3 მარტივი ფორმა, რომელთაგან უფრო განვითარებულია დადებითი ტეტრაედრი (111) (წახნაგი 6).

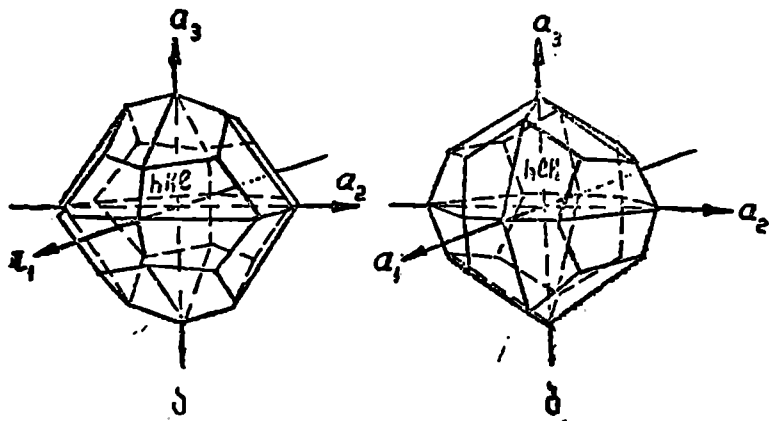
ნაკლებგანვითარებულია უარყოფითი ტეტრაედრი (111) (წახნაგი 6), და პექსაედრი (100) (წახნაგი 7). მეორე კრისტალზე (ნახ. IV.94 ბ) განვითარებულია დადებითი ორიენტაციის ტრიგონალური ტეტრაედრი (hkk) (წახნაგი 2) და ტეტრაედრი (111) წახნაგი 6).

31. სიმეტრიის პენტაგონტრიოქტაედრულ კლასს აქვს



ნახ. IV. 88. ა-ოქტაედრი, ბ-ტეტრაგონ-ტრიოქტაედრი, გ-ტრიგონ-ტრიოქტაედრი.

მხოლოდ სიმეტრიის $3L_4$, $4L_2$ და $6L_2$ ღერძები. აქ არ არის არც ერთი სიმეტრიის სიბრტყე. ზოგადი განლაგების წახნაგს შეესაბამება



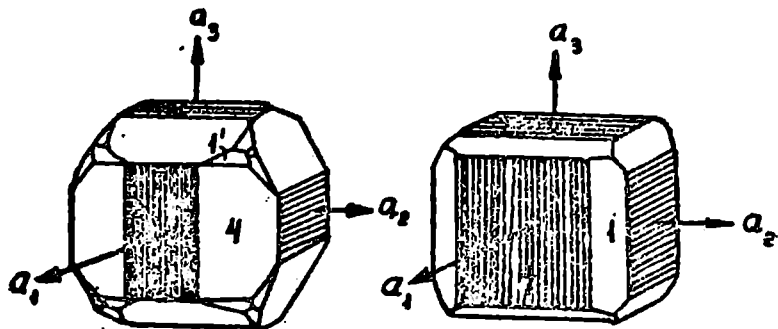
ნახ. IV. 89. დილოეკაედრი: ა-დადებითი, ბ-უარყოფითი.

ახალი მარტივი ფორმა პენტაგონტრიოქტაედრი, რომელსაც ორი ენანტიომორფული — მარჯვენა (hkl) და მარცხენა ($h\bar{l}k$) (ნახ. IV.95) ფორმა აქვს. იგი შედგება 24 ასიმეტრიული წახნაგისაგან, რომელსაც ზუთკუთხედის ფორმა აქვს. ორ-ორი ურთიერთგადამკვეთი ტოლი წი-

სინთეზის ქუჩა ყ ფურეულს		გეომეტრიული ფორმები და მათი ნახევრების სინთეზის მახასიათებელი						
		1 (სკე)	2 (სკკ)	3 (სკრ)	4 (სკო)	5 (სკი)	6 (სკი)	7 (სკო)
28	კუბიანი-პირამიდული 3L, 4L, 6P							
29	ცილინდრული 3L, 4L, 3PC							
30	კონუსული 3L, 4L, 6P							
31	კუბიანი-პირამიდული 3L, 4L, 6L, 2							
32	კუბიანი-პირამიდული 3L, 4L, 6L, 3PC							

ბოთი დანარჩენი ექვსი ფორმა ჩვენთვის უკვე ცნობილია: ტეტრაგონ-ტრიოქტაედრი (hkk) ტრიგონტრიოქტაედრი (hhl), ტეტრაპექსაედრო (hkO), რომბოდოდეკაედრი (110), ოქტაედრი (111) და ჰექსაედრო (100) (ტაბულა IV. 13 და IV.14).

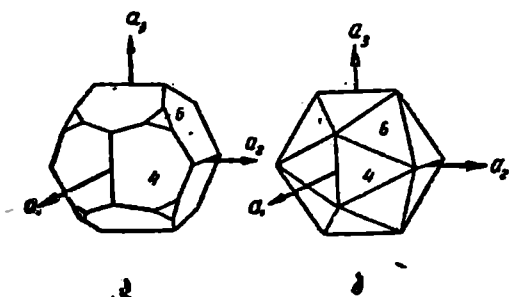
განვიხილოთ პენტაგონტრიოქტაედრული სიმეტრიის სახის კუბ-რიტის (Cu_2O) კრისტალი (ნახ. IV. 96). აქ განვითარებულია სამი



ნახ. IV. 50. ა-პირიტის, ბ-კობალტინის კრისტალები, (სიმეტრიის $3L_2, 4L_3, 2P.C.$ სახე).

მარტივი ფორმა, რომელთა შორის გაბატონებულია მარცხენა პენტაგონტრიოქტაედრი (წახნაგი 1), დანარჩენი ფორმებია ოქტაედრი (წახნაგი 6) და ჰექსაედრი (წახნაგი 7).

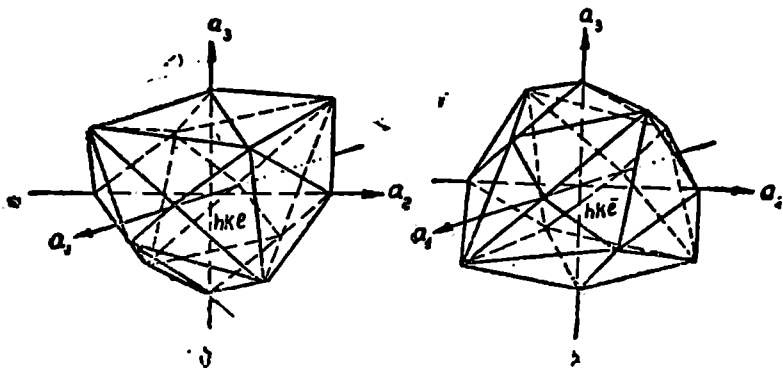
32. რისიმეტრიის ჰექსაოქტაედრული კლასი კუბური სინგონიის ყველაზე მაღალი სიმეტრიის მქონე კლასია. აქ ერთდროულად არსებობს $3L_4, 4L_3, 6L_2, 9P.C.$ კრისტალოგრაფიული ღერძები მეოთხე რიგის სიმეტრიის ღერძებს ემთხვევა. სიმეტრიის ცხრა სიბრტყე გეგმილთა სფეროს, ჰყოფს 48 სფერულ სამკუთხედად. IV.13 ტაბულაზე მოცემულ გეგმილზე-



ნახ. IV.91. ა-პენტაგონ-დოდეკაედრის (4) და ოქტაედრის (6) კომბინაცია, ბ-იგივე ფორმები, როდესაც ევოლუცია წიბო ტოლია (იკოსაედრი).

ნაჩვენებია მხოლოდ ზედა ნახევარსფეროს 24 სფერული სამკუთხედი-ზოგადი განლაგების წახნაგი (hkl), რომლის გნომოსტერეოგრაფიული

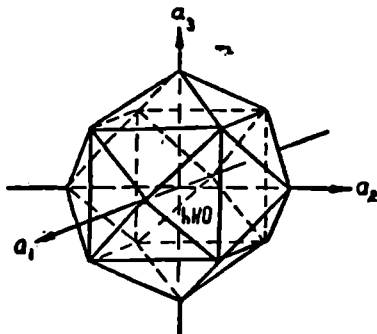
გეგმილი სფერულის სამკუთხედის შიგნით მდებარეობს, აღნიშნული სიმეტრიის პირობებში წარმოშობს 48 წახნაგიან მარტივ ფორმას—ჰექსოქტაედრს (ნახ. IV.97). ესაა წახნაგების მაქსიმალური რაოდენობის მქონე ფორმა და მისი ყოველი წახნაგი ასინეტრიული სამკუთხედიანა. დანარჩენი კერძო განლაგების წახნაგები, რომელთა გეგმილები სფერ-



ნახ. IV.92 ჰექსო-ტეტრაედრი, a_1 -დადებითი, a_2 -უარყოფითი.)

ული სამკუთხედის გვერდებზეა განლაგებული, მოგვეყვინ 24-24 მონოსიმეტრიულ წახნაგიან ფორმებს: ტეტრაგონტრიოქტაედრს ($hkck$) (ნახ. IV. 88 ბ), ტრიგონტრიოქტაედრს (hkl) (ნახ. IV. 88 გ) და ტეტრაჰექსაედრს (hkO) (ნახ. IV.93).

მეხუთე, მეექვსე და მეშვიდე მარტივი ფორმები, რომელთა საწყისი წახნაგების გეგმილები სფერული სამკუთხედის წვეროებშია განლაგებული, შესაბამისად იქნება (იხ. ტაბულა IV.13 და IV 14): რომბოლოედრაი (110) (გეგმილი L_2 ლერძის გამოსავალს ემთხვევა), რომელიც 12 დისიმე-

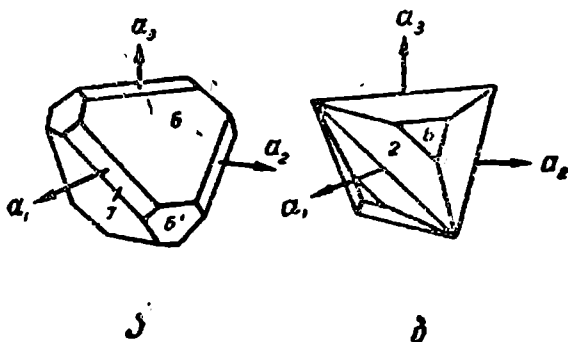


ნახ. IV 93. ტეტრა-ჰექსაედრი

ტრიული წახნაგისაგან შედგება, ოქტაედრი (111) (გეგმილი L_3 ლერძის გამოსავალს ემთხვევა), რომელიც შედგება 8 ტრისიმეტრიული წახნაგისაგან და ჰექსაედრი ($1CO$), (გეგმილი L_4 ლერძის გამოსავალს ემთხვევა), 6 ტეტრასიმეტრიული წახნაგით.

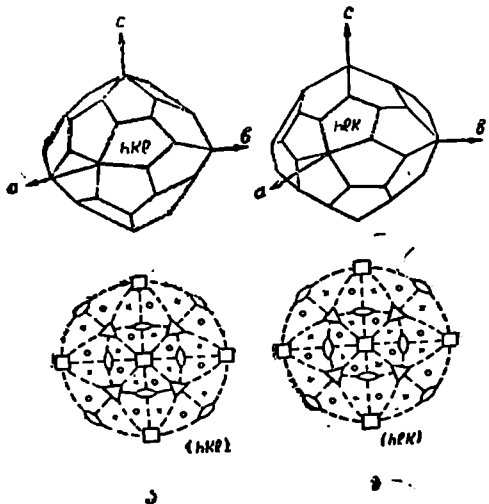
სიმეტრიის ამ კლასში კრისტალდება მრავალი მინერალი. მაგალითისაჲვის განვიხილოთ შპინელის ($MgAl_2SiO_5$) და გრანატის ($Ca_3Al_2[SiO_4]_3$) კრისტალები (ნახ. IV.98).

შპინელის კრისტალზე გვაქვს რომბოლოდეკაედრის (წახნაგი 5)



ნახ. IV.94. სფილერიტის კრისტალები. (სიმეტრიის $3L_2, 4L_3, 6P$ სახე).

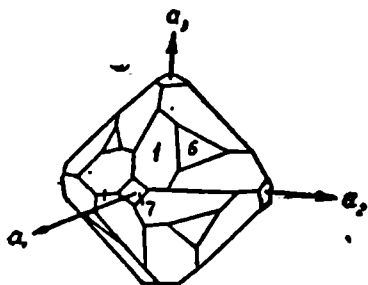
და ოქტაედრის (წახნაგი 6) კომბინაცია (ნახ. 98 ა). გრანატების კრისტალებზე ხშირად გვხვდება რომბოლოდეკაედრთან ერთად (წახნაგი 5) ან ჰექსაოქტაედრი (წახნაგის 1), ან ტეტრაგონ-ტრიოქტაედრი (წახნაგი 2) (ნახ. IV.98, ბ, გ).



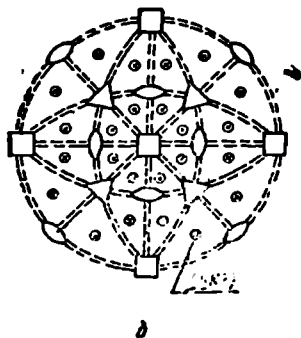
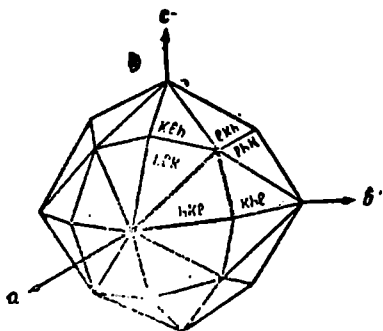
ნახ. IV.95. ტეტრაგონ-ტრიოქტაედრი. ა-მარჯვენა, ბ-მარცხენა შესაბამისი გეგმილებით.

IV. 13 ტაბულაში მოცემულ მარტივ ფორმათა რიგით ნომერს).

განხილულ სიმეტრიის კლასებს აჯგუფებენ აგრეთვე სიმეტრიის ხარისხის მიხედვით. მაგალითად, შეიძლება სინგონიის მაქსიმალური სიმეტრიის მქონე კლასებს პოლოედრულ (სრულწახნაგოვან) კლასებს უწოდებენ. თითოეულ ამ კლასიდან შეიძლება მივიღოთ შესაბამისი სინგონიის უფრო დაბალი სიმეტრიის კლასები, თუ სრულწახნაგო მარტივი ფორმების წახნაგთა რიცხვს 2-ჯერ ან 4-ჯერ შევამცირობთ. წახნაგთა რაოდენობის შემცირებას უწოდებენ მეროედრულ მოკმედებას (ბერძნულ სიტყვების „მეროს“ — ნაწილი და „ედრა“ — წახნაგის მიხედვით), მეროედრული მოკმედებით მიღებულ კლასებს კი — ჰემიედრულს (ნახევარწახნაგოვანს) და ტეტარტოედრულს (მეოთხედ-



ნახ. IV.56. კუბრტის კრისტალი (სიმეტრიის $3L_2, 4L_3, 6L_2$ სხე).



ნახ. IV.97. ჰექსაოქტაედრი (ა) და მისი გეგმილი (ბ).

წახნაგოვანს). „ჰემი“ ბერძნულად ნახევარს ნიშნავს, ხოლო „ტეტარტო“ — მეოთხედს (იხ. ტაბ. IV. 15).

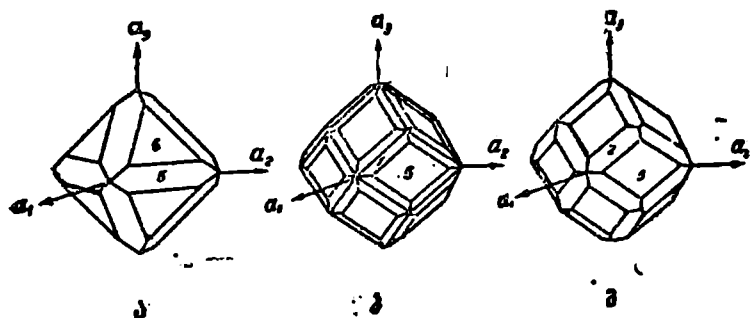
სრულწახნაგოვანი ფორმებიდან ნახევარ- ან მეოთხედწახნაგოვანი მარტივი ფორმების მიღების მაგალითად განვიხილოთ კუბური ზინგონიის პოლოედრის კლასის ჰექსაოქტაედრის (48 წახნაგოვანის)

გეროდერული მოქმედებების კლასები

კატეგორია	კვანძი	ტრიგონური	პეკსიონური	ტეტრაგონური	რომბული	პენტაგონური	ტრიკლინური
პოლიედრული	N32-O	N27-D _{1d}	N20-D _{6h}	N13-D _{3d}	N8-D _{3d}	N5-C _{3v}	N2-S ₂
ჰემიედრული	N31-O	N26-C _{3v}	N22-D _{3d}	N15-D _{3d}	N7-D _{3h}	N4-C _{3v}	N1-C ₁
	N30-T _d	N25-D _{2d}	N19-C _{2v}	N12-C _{2v}	N6-C _{2v}	N3-C ₂	
	N29-T _d	N24-S ₆	N18-D _{2d}	N11-D _{2d}			
			N17-C _{3v}	N10-C _{3v}			
ბიტრატორული	N28-T	N21-C _{2v}	N21-C _{3v}	N14-S ₆	-	-	-
			N16-C _{2v}	N9-C _{2v}			

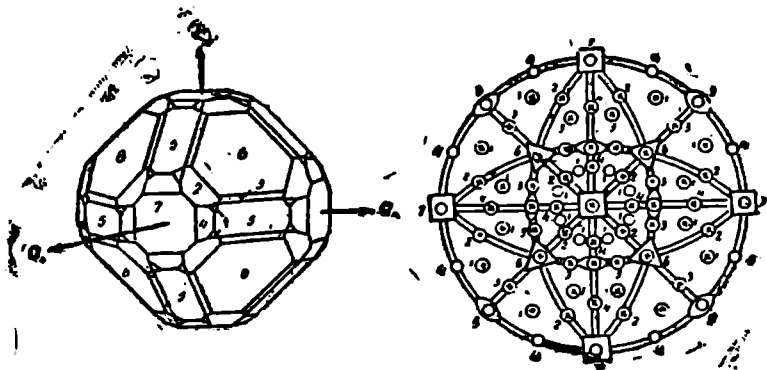
სიმეტრიის კლასები აღნიშნულია შენფელსის მიხედვით

წახნაგთა რიცხვის შემცირებით მიღებული ფორმები. ჰექსაოქტაედრზე ნახევარწახნაგთა სათანადო თანამიმდევრობით გაუქმებით (ხოლო დაჩენილ წახნაგთა გაგრძელებით ურთიერთგადაკვეთამდე) ჰემიედრულ



ნახ. IV.98. ა-შპინელის კრისტალი, ბ დეგ-გრანატის კრისტალზე (სიმეტრიის $3L_4, 4L_2, 6L_2, 9P, C$ სახე).

კლასებში მივიღებთ: ჰენტაგონტრიოქტაედრს, ჰექსაოქტაედრს ან დილოქეაედრს (ყველა 24 წახნაგოვანი). ამ ფორმის წახნაგების ურთიერთშემდგომი განახევრება მოგვცემს ჰენტაგონტრიოქტაედრს



ნახ. IV.99. ფლუორიტის კრისტალი (ა) და შისი გვეშილი (ბ) (სიმეტრიის $3L_4, 4L_2, 6L_2, 9P, C$ სახე).

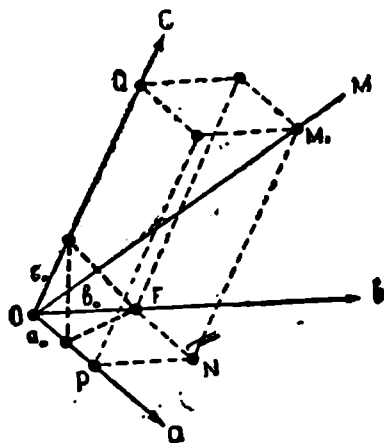
412 წახნაგას). ოქტაედრის ნახევარწახნაგოვანი ფორმა იქნება ტეტრაედრი, დიტრიგონული სკალენოედრის ჰემიედრული ფორმა — ტრიგონული ტრაპეცოედრი და სხვ.

მეროედრული მოქმედების შედეგად მიღებული მარტივი ფორმე-

ბი შეიძლება იყოს ან „დადებითი“ და „უარყოფითი,“ „მარჯვენა“ და „მარცხენა“. დადებითი და უარყოფითი მარტივი ფორმები შემობრუნებით ერთმანეთს უთავსდება და უწოდებენ კონგრუენტულ ფორმებს, მაგალითად, ტეტრაგონული და კუბური ტეტრაედრები. მარჯვენა და მარცხენა მარტივი ფორმები კი შემობრუნებით ერთმანეთს არ უთავსდება და მხოლოდ არეკვლით შეიძლება შეეუთავსოთ ერთმანეთს, მათ უწოდებენ ენანტიომორფულ ფორმებს, მაგალითად, სხვადასხვა ტრაპეცოდრები, რომელიც ტეტრაედრი და სხვ.

§ IV.6. წიბოს ინდექსი და მისი დამოკიდებულება წახნაგის ინდექსთან

ინდექსებით შეიძლება გამოვსახოთ კრისტალების არა მარტო წახნაგების განლაგება, არამედ მათი წიბოების ან ლერძების მიმართულებაც. წიბოს (ან ლერძის) ინდექსი მასზე აღებული ნებისმიერი წერტილის კოორდინატების პირდაპირი შეფარდებაა ერთეულ პარამეტრებთან. მაგალითისათვის ვიპოვოთ რაიმე არსებული OM წიბოს (ან ლერძის) ინდექსები.



IV. 100 ნახაზზე a , b და c მიმართულებანი გამოსახავენ მოცემული კრისტალის კრისტალოგრაფიულ ლერძებს, ხოლო a_0 , b_0 და c_0 მისი ერთეული პარამეტრებია. აღნიშნული OM წიბოს მიმართულება გადავიტანოთ მის პარალელურად კრისტალოგრაფულ ლერძთა საწყის O წერტილზე გავლათ. ავიღოთ ამ სახზე რომელიმე M_1 წერტილი და ვიპოვოთ მისი კოორდინატები. ამისათვის M_1 წერტილიდან C ლერძის პარალელურად უდა გავატაროთ M_1N მონაკვეთი aOb სიბრტყის გადაკვეთამდე. N წერტილიდან a და b ლერძების პარალელურად გავატაროთ NF და NP მონაკვეთები, მივიღებთ M_1 წერტილის კოორდინატებს: a ლერძზე OP , b ლერძზე OF და c ლერძზე OQ მონაკვეთებს (ნახაზიდან ადვილად ჩანს, რომ $OQ = M_1N$). ახლა განვსაზღვროთ

ნახ IV 100. OM წიბოს ინდექსის განსაზღვრის სქემა.

რამდენი ერთეული პარამეტრი მოთავსდება მიღებულ პარამეტრებში. ამისათვის უნდა გამოვიანგარიშოთ შემდეგი შეფარდება:

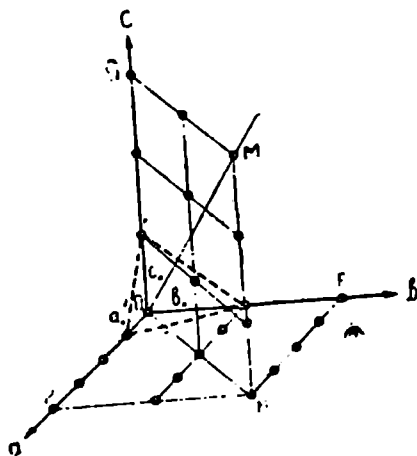
$$\frac{OP}{a_0} : \frac{OF}{b_0} : \frac{OQ}{c_0} = r : s : t$$

სადაც r , s და t მარტივი მთელი რიცხვებია, რომლებიც გამოხატავენ OM წიბოს ინდექსებს. ამ ინდექსების ერთობლიობას, ჩასმულს კვადრატულ ფრჩხილებში, უწოდებენ წიბოს სიმბოლოს და აღნიშნავენ $[rst]$. IV.101 ნახაზზე მოცემულია OM წიბოს მიმართულება და a_0 , b_0 და c_0 ერთეული პარამეტრები. ადვილი დასადგენია, რომ OM წიბოს ინდექსები იქნება

$$\frac{OP}{a_0} : \frac{OF}{b_0} : \frac{OQ}{c_0} = 4 : 2 : 3$$

ხოლო მისი სიმბოლო—[423].

იმ სინგონიებისათვის, რომლებშიც სამ-სამი კრისტალოგრაფიული ღერძია, პირველი a ღერძის და ყველა მისი პარალელური წიბოს სიმბოლო იქნება $[100]$, რადგან მისი ყოველი წერტილის კოორდინატები b და c ღერძებზე ნულის ტოლია, ანალოგიურად b ღერძის სიმბოლო იქნება $[010]$, ხოლო c ღერძისა — $[001]$.

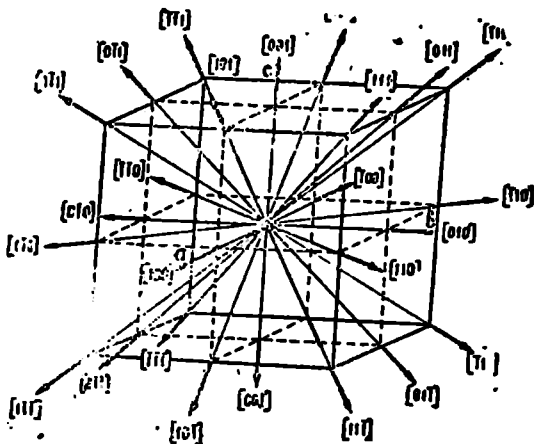


IV. 102 ნახაზზე მოცემულია კუბზე არსებული წიბოების სამივე მიმართულებისა და აგრეთვე ზოგიერთი დიაგონალური მიმართულების შესაძლო წიბოების (ან ღერძის) სიმბოლოები. ყოველი წიბოს (ღერძის) სიმბოლო შეიძლება გამოისახოს ურთიერთსაწინააღმდეგო ორი მიმართულებით. მაგალითად, $b0c$ სობრტყეში

ნახ. IV. 101. OM წიბოს სიმბოლოა [423]. განლაგებული დიაგონალური მიმართულება $[0\bar{1}1]$ ერთმხარეს და $[01\bar{1}]$, საწინააღმდეგო მიმართულებით, ერთი და იგივე წრფეა. ზოგადად $[rst]$ და $[\bar{r}\bar{s}\bar{t}]$ სიმბოლოები ერთსა და იმავე წიბოს გამოსახავს.

წიბოს ინდექსებსა და მასზე გამავალ წახნაგის ინდექსებს შორის არსებობს საყურადღებო დამოკიდებულება. თუ მოცემული გვაქვს 12. გ. სარაშვილი

რომელიმე $[rst]$ წიბო და ამ წიბოზე გამავალი (hkl) წახნაგი, მაშინ $rh+sk+tl=0$, ე. ი. წიბოს და მასზე გამავალი წახნაგის შესაბამისი ინდექსების ნამრავლის ჯამი უდრის ნულს. დამტკიცების გარეშე ჩვენ შეგვიძლია ამ დებულების სისწო-



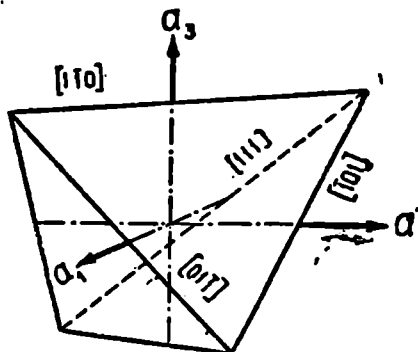
ნახ. IV. 102. კუბური სინგონიის ზოგიერთი შესაძლებელი წიბოს სიმბოლო.

რეში დავრწმუნდეთ ნებისმიერ კრისტალზე.

მაგალითისათვის განვიხილოთ ტეტრაედრი (ნახ. IV. 103); რომლის ყოველი წახნაგი შემოფარგლულია სამ-სამი სხვადასხვა მიმართულების წიბოთი. ავიღოთ წახნაგი $(11\bar{1})$ ინდექსით და ამ წახნაგის სიბრტყეში მდებარე წიბოების ინდექსები $[1\bar{1}0]$, $[01\bar{1}]$ და $[\bar{1}01]$.

როგორც ხედავთ, მოცემული წახნაგისა და ყოველი წიბოს შესაბამისი ინდექსების ნამრავლის ჯამი ნულის ტოლია: $(1\cdot 1)+(1\cdot \bar{1})+(1\cdot 0) = 0$ ან $(1\cdot 0)+(1\cdot \bar{1})+(1\cdot 1) = 0$ და სხვ.

წიბოსა და მასზე გამავალი წახნაგის ინდექსებს შორის აღნიშნული დამოკიდებულება ხშირ-



ნახ. 103. ტეტრაედრის წახნაგი $(11\bar{1})$ და მასზე მდებარე სამი წიბოს ინდექსი.

ად გვაძლევს კრისტალოგრაფიული ამოცანების ამოხსნის საშუალებას. მაგალითად, თუ ცნობილია კრისტალის ორი წახნაგის ინდექსები, შესაძლებელია მათ მიერ წარმოშობილი წიბოს ინდექსების გამოანგარიშება ან, პირიქით, მოცემული ორი წიბოს ინდექსებით გამოიყვანოს ამ წიბოებზე გამაული (ან მათი პარალელური) შესაძლებელი წახნაგის ინდექსები. დავეშვათ, რომ მოცემულია ორი წახნაგი, $(p_1 p_2 p_3)$ და $(q_1 q_2 q_3)$ სიმბოლოებით და საჭიროა ვიპოვოთ მისი საერთო წიბოს სიმბოლო $(r_1 r_2 r_3)$, რადგან საძიებელი წიბო დევს ორივე წახნაგზე, შეიძლება შევადგინოთ შემდეგი ორი განტოლება:

$$p_1 r_1 + p_2 r_2 + p_3 r_3 = 0;$$

$$q_1 r_1 + q_2 r_2 + q_3 r_3 = 0.$$

ამ განტოლების ამოხსნა გვაძლევს

$$r_1 : r_2 : r_3 = (p_2 q_3 - p_3 q_2) : (p_3 q_1 - p_1 q_3) : (p_1 q_2 - p_2 q_1).$$

აღნიშნული პასუხი შეიძლება ადვილად მივიღოთ შემდეგი მარტივი ხერხის დახსრებით:

1. დაეწეროთ მოცემული წახნაგების ინდექსები ორ-ორჯერ თითო პწკარში ერთიმეოთის ქვეშ და ორივე მხარეს მოვაცილოთ კიდურა ინდექსების სვეტები

$$\begin{array}{c|ccc|c} p_1 & p_2 & p_3 & p_1 & p_2 \\ q_1 & q_2 & q_3 & q_1 & q_2 \end{array}$$

დარჩენილი ინდექსები ჯვარედინად გადავამრავლოთ, ყოველ წყვილი სვეტის ნამრავლთა სხვაობა მოგვცემს საძიებელ ინდექსებს (გამრავლება იწყება ყოველ წყვილში მარცხნიდან)

$$\begin{array}{ccc} p_2 p_3 & p_1 p_3 & p_2 p_1 \\ \times & \times & \times \\ q_2 q_3 & q_1 q_3 & q_2 q_1 \end{array}$$

$$r_1 = (p_2 q_3 - p_3 q_2), \quad r_2 = (p_3 q_1 - p_1 q_3), \quad r_3 = (p_1 q_2 - p_2 q_1)$$

გავარჩიოთ მაგალითები.

მაგალითი I. მოცემულია (221) და (111) წახნაგები. ვიპოვოთ მათი გადაკვეთით წარმოშობილი წიბოს სიმბოლო $[r_1 r_2 r_3]$

$$\begin{array}{c|ccc|c} 2 & 2 & 1 & 2 & 2 & | & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & | & 1 \end{array}$$

$$r_1 = (2-1) = 1, \quad r_2 = (1-2) = -1, \quad r_3 = (2-2) = 0$$

პასუხი: $[1\bar{1}0]$.

მაგალითი. 2. მოცემულია [230] და [115] წიბოები. ვიპოვოთ მათზე გამავალი წახნაგის სიმბოლო (hkl)

$$\begin{array}{r|l} 2 & \overline{3} \ 0 \ 2 \ \overline{3} \ 0 \\ 1 & \overline{1} \ 5 \ \overline{1} \ 1 \ \overline{5} \end{array}$$

$$h = 15 - 0 = 15, \quad k = 0 - \overline{10} = 10, \quad l = 2 - \overline{3} = 5$$

შეკვეცის შემდეგ $h : k : l = 3 : 2 : 1$

პასუხი: (321).

ჰექსაგონური და ტრიგონური სინგონიის კრისტალებისათვის, რომლებიც გამოისახება ოთხ-ოთხი ინდექსით, წიბოსა და მასზე გამავალი წახნაგის ინდექსებს შორის დამოკიდებულება გამოისახება შემდეგი ფორმულით:

$$(p_1 - p_2) r_1' + (p_2 - p_3) r_2 + p_4 r_4 = 0.$$

მაშასადამე, ამ სინგონიებისათვის მოცემული ორი წახნაგის ინდექსებით რომ ვიპოვოთ მათი გადაკვეთით მიღებული წიბოს ინდექსები, ჯერ უნდა განვსაზღვროთ ფრჩხილებში მოცემული გამოსახულებანი (დამხმარე ინდექსები) და შემდეგ ვიმოქმედოთ ისე, როგორც წინა მაგალითებში და ვიპოვოთ საძიებელი ინდექსი r_1 , r_2 და r_4 . დამატებით ინდექსი (r_3) იქნება ორი პირველი ინდექსის ჯამი შებრუნებული ნიშნით.

მაგალითი 3. მოცემულია ($11\overline{2}0$) და ($01\overline{1}1$) წახნაგები. ვიპოვოთ მათი გადაკვეთით წარმოშობილი წიბოს $[r_1 r_2 r_3 r_4]$ სიმბოლო. გამოვსახოთ მოცემული წახნაგები დამხმარე ინდექსებით:

($11\overline{2}0$) წახნაგისათვის: $p_1 - p_2 = 1 - \overline{2} = 3, \quad p_2 - p_3 = 1 - \overline{2} = 3, \quad p_4 = 0$

($01\overline{1}1$) წახნაგისათვის: $p_1 - p_2 = 0 - \overline{1} = 1, \quad p_2 - p_3 = 1 - \overline{1} = 2, \quad p_4 = 1$

$$\begin{array}{r|l} 3 & 3 \ 0 \ 3 \ 3 \ 0 \\ 1 & 2 \ 1 \ 1 \ 2 \ 1 \end{array}$$

$$r_1 : r_2 : r_3 = (3 - 0) : (0 - 3) : (6 - 3) = 3 : \overline{3} : 3, \quad r_4 = 0$$

პასუხი: [$1\overline{1}01$].

მაგალითი 4. მოცემულია [0001] და [$\overline{1}100$] წიბოები. ვიპოვოთ მათზე გამავალი წახნაგის სიმბოლო.

მოცემული წიბოები ჯერ გამოვსახოთ დამხმარე ინდექსების საშუალებით, ეს იქნება [001] და [$\overline{1}10$], შემდეგ ცნობილი გზით ვიპოვოთ საძიებნი წახნაგის h , k და l ინდექსები

$$\begin{array}{c|ccc|c} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \end{array}$$

$$h=0-\bar{1}=1, \quad k=1-0=1, \quad l=0$$

$$i=-(h+k)=\bar{2}$$

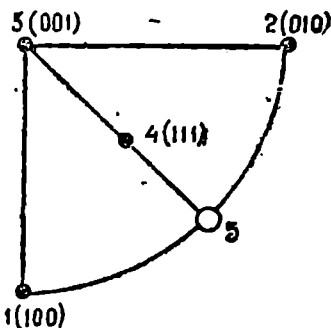
პასუხი: $(11\bar{2}0)$.

§ IV. 7. ზონათა კანონი

ჩვენ გავეცანით წახნაგთა ზონების ცნებას (თავი III. §4) და აღვნიშნეთ, რომ ზონის სტერეოგრაფიული გეკილი აოის ძისი ღერძის მართობი სიბრტყის სტერეოგრაფიული გეკილი (ნახ. III. 26), ე. ი. ერთ ზონაში შემავალი წახნაგების გნომოსტე უფოგრაფიული გეკილები განლაგებულია ერთ სიბრტყეში.

III. 26 ნახაზზე კარგად ჩანს, რომ კრისტალის ყოველი წახნაგი ერთდროულად ეკუთვნის რამდენიმე ზონას. ასე, მაგალითად, წახნაგები *m* და *d* ერთდროულად ეკუთვნის ოო-ორ ზონას, *O* წახნაგები — სამ-სამ ზონას, ხოლო *b* და *e* — ერთდროულად ოთხ-ოთხ ზონას. აღნიშნულიდან გამომდინარეობს, რომ კრისტალის ყოველი წახნაგი მდებარეობს ორი ან მეტი ზონის გადაკვეთაზე. ეს დაძოკიდებულება ზონებსა და წახნაგებს შორის პირველად 1804 წელს იყო აღნიშნული გერმანელი კრისტალოგრაფის ხ.უ. ვეისის მიერ და იგი ცნობილია როგორც ზინათა (ანუ ვეისის) კანონი. ამ კანონს შეიძლება მიეცეს შემდეგი ფორმულირება: კრისტალზე ნებისმიერი ორი ზონის გადაკვეთაზე წარმოშობილი სიბრტყე არის ამ კრისტალის შესაძლებელი წახნაგი. ეს კანონი საშუალებას გვაძლევს კრისტალზე არსებული ზონების საფუძველზე დავადგინოთ ყველა შესაძლო წახნაგის განლაგება.

მოცემულია ოთხი წახნაგის გეგმილი, რომელთა შორის ერთ ზონას ეკუთვნის მხოლოდ ორ-ორი წახნაგი (ნახ. IV. 104). საჭიროა



ნახ. IV.104. მებუთე წახნაგის სიმბოლო ექნება (110).

ვიპოვოთ მებუთე შესაძლო წახნაგის ინდექსები, რომელიც განლაგდება 1—2 და 3—4 ზონების გადაკვეთაზე. როგორც ვიცით, საძიე-

ბელი წახნაგი ერთდროულად უნდა ეკუთვნოდეს ორივე ზონას. ამ პირობის დასაკმაყოფილებლად წახნაგი 5 უნდა გადადიოდეს ორივე ზონის წიბოებზე.

ამასთან დაკავშირებით, საჭიროა ჯერ ვიპოვოთ 1—2 ზონის ღერძი ან წიბოს მიმართულება, რომელიც წარმოიშობა 1 და 2 წახნაგების გადაკვეთით, შემდეგ კი განვსაზღვროთ იგივე 3 და 4 წახნაგისათვის და მიღებულ ორ წიბოზე გავატაროთ საძიებელი წახნაგი 5 (ნახ. IV.104-ზე მოცემულია მთელი გეგმილის მეოთხედი (ნაწილი) 1 და 2 წახნაგების საერთო წიბო იქნება

$$\begin{array}{r|rrrr|r} 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ \hline & [001] & & & & \end{array}$$

3 და 4 წახნაგების საერთო წიბო

$$\begin{array}{r|rrrr|r} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ \hline & [\bar{1}10] & & & & \end{array}$$

წახნაგი, რომელიც გაივლის $[\bar{1}10]$ და $[001]$ წიბოებზე იქნება

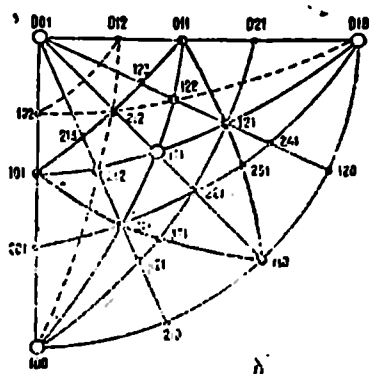
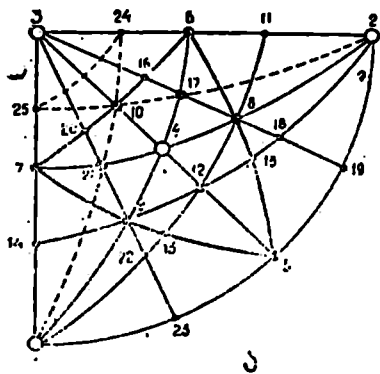
$$\begin{array}{r|rrrr|r} \bar{1} & 1 & 0 & \bar{1} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ \hline & (110) & & & & \end{array}$$

მაშასადამე, საძიებნი მე-5 წახნაგის სიმბოლო იქნება (110) . ამავე გზით შეიძლება ვიპოვოთ სხვა შესაძლებელი წახნაგებიც. თუ გავატარებთ ზონას 1 და 4 წახნაგებზე, შეიძლება განვსაზღვროთ წახნაგი 6, რომელიც მიიღება 1—4 და 2—3 ზონების გეგმილების გადაკვეთაზე (ნახ. IV.105). აღვნიშნავთ დასადგენია, რომ ამ ახალი წახნაგის ინდექსი იქნება (011) .

ანალოგიური გზით, თუ გავატარებთ ზონას 2 და 4 წახნაგებზე, ვიპოვოთ ახალ მე-7 წახნაგს ინდექსით (101) (იხ. ნახ. IV. 105 ბ) შემდეგი ციკლი წახნაგებისა (8, 9 და 10) შეიძლება გამოვითვალოთ, თუ გავატარებთ ზონებს შესაბამისად 5 და 6, 5 და 7, 6 და 7 წახნაგებზე.

შესაძლებელი წახნაგების ახალი ციკლი მიიღება, თუ გავატარებთ ზონებს 1 და 8 წახნაგებზე (გეგმილი 11,12, 13) ან 2 და 9 წახ-

ნაგებზე (გეგმილები 14, 15, 16). შემდეგი ზონები (3—8 და 3—9) წარმოშობენ კიდევ ახალ წახნაგებს (16, 17, 18, 19, 20, 21, 22 და 23) და ა. შ. დაუსრულებლად. ყველა ამ შესაძლო წახნაგიდან, თანახმად



ნახ. IV.105. შესაძლებელი წახნაგების განსაზღვრა ზონების განვითარების საშუალებით

ე. წ. ბრავეს წესისა, კრისტალზე ვითარდება მხოლოდ ის წახნაგები, რომლებიც პარალელურია მაქსიმალური რეტიკულური სიმკვრივის მქონე ბალებებისა.

თ ა მ ი (V)

მინერალოგიური კრისტალოგრაფიის საფუძვლები

§ V. (1) ზოგადი ცნობები

მინერალოგიური კრისტალოგრაფია არის კრისტალოგრაფიისა და მინერალოგიის მიჯნაზე წარმოშობილი დარგი, რომელიც შეისწავლის მინერალთა კრისტალების მორფოლოგიას, მათ კანონზომიერ შენაზარდებს და წარმოქმნის პროცესებს. მინერალოგიური კრისტალოგრაფიის კვლევის ობიექტია რეალური კრისტალი, რომელიც, განიხილება როგორც ორი გარემოს ურთიერთმოქმედების შედეგი: ერთია კრისტალის შინაგანი გარემო, მისი კრისტალური აგებულების შესაბამისი, ხოლო მეორე — გარეშე კრისტალწარმოქმნელი გარემო. ბუნებრივად ან ხელოვნურად წარმოქმნილ კრისტალებზე ჩვეულებრივ, მარტივი ფორმები არ არის იდეალურად განვითარებული, ე. ი. ერთი და იმავე მარტივი ფორმის ყველა წახნაგი არ არის ურთიერთმსგავსი და ტოლი. მინერალთა რეალური კრისტალები უმთავრესად დამახი-

ნეგებულია და მათი სიმეტრიის ხარისხი დაბალია იდეალურად განვითარებულ ფორმასთან შედარებით, ხოლო დეფექტები გამოსახავენ კრისტალოზომოქმნელი გაუმოს მოქმედების შედეგს.

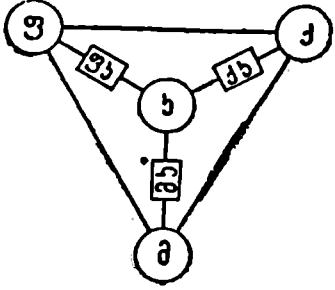
თანამედროვე ეტაპზე მინერალოგიური კრისტალოგრაფია არ გამოყოფილდება კრისტალთა გარეგანი ფორმების დეტალური აღწერით. უკანასკნელი ათეული წლის განმავლობაში კრისტალოგრაფიისა და მინერალოგიის დარგში ჩატარებულმა გამოკვლევებმა მოსკოვში (ა. შუბნიკოვი, ნ. ბელოვი), ლენინგრადში (ი. შატრანოვსკი, დ. გრიგორიევი, ლეოვში (ე. ლაზარენკო) და სხვაგან, საფუძველი ჩაუყარა მინერალოგიურ კრისტალოგრაფიას. ა. შუბნიკოვისა და მისი მრავალრიცხოვანი მოწაფეების ბრწყინვალე გამოკვლევებმა კლასიკური სიმეტრიის შესახებ ფართო გზა გაუხსნა კრისტალთა ინდივიდების გამოყენებას ახალი ტექნიკის მოთხოვნილების დასაკმაყოფილებლად. ნ. ბელოვმა და მისმა მოწაფეებმა შეისწავლეს რთული შედგენილობის მინერალთა შინაგანი აგებულება. ლენინგრადის სამთო ინსტიტუტის კრისტალოგრაფიის კათედრაზე ი. შატრანოვსკის ხელმძღვანელობით კრისტალთა მორფოლოგიის დარგში ჩატარებული კვლევების შედეგად დადგინდა, რომ მინერალთა რეალური მონოკრისტალების დამახინჯებული ფორმები შეიცავენ მნიშვნელოვან ინფორმაციას კრისტალოზომოქმნელი გარემოს სიმეტრიის შესახებ. დ. გრიგორიევის მიერ ჩატარებულმა ნაყოფიერმა კვლევებმა მინერალთა ინდივიდების ჩასახვის, ზრდისა და შეცვლის შესახებ, მათი წარმოქმნელი პირობების უფრო ზუსტად დადგენის საშუალება მოკვცეს. მნიშვნელოვანი ცენტრი ჩამოყალიბდა ლეოვის უნივერსიტეტში ე. ლაზარენკოს მეთაურობით, ცენტრმა გამოაქვეყნა საინტერესო მონოგრაფიები და კვლევების შედეგები მინერალოგიური კრისტალოგრაფიის დარგში.

ამგვარად, თანამედროვე გაგებით, მინერალოგიური კრისტალოგრაფია სწავლობს მინერალთა და მათ ხელოვნურ ანალოგთა კრისტალური ინდივიდებისა და აგრეგატების მორფოლოგიას, შინაგან აგებულებასა და წარმოქმნას. ეს ფორმულირება მიღებულია 1966 წლის ოქტომბერში ქ. ლეოვში მინერალოგიური კრისტალოგრაფიის პრობლემებისადმი მიძღვნილ პირველ საკავშირო საუწყებათა შორისო თათბირზე.

ნ. ბელოვმა კარგად გამოსახა კრისტალოგრაფიის დამოკიდებულება სხვა მეცნიერებებთან სამკუთხედის საშუალებით (ნახ. V. 1). სამკუთხედის ცენტრში მოათავსა კრისტალოგრაფია, ხოლო წვეროებში — სათანადოდ: ფიზიკა, ქიმია და მინერალოგია. ამ მეცნიერებათა კონტაქტში წარმოიქმნა შესაბამისი საგანი, როგორცაა ქიმიური, ფიზიკური და მინერალოგიური კრისტალოგრაფია.

ცხადია, რომ წარმოდგენილი სამკუთხედი რამდენადმე ამარტივებს კრისტალოგრაფიის დამოკიდებულებას სხვა მეცნიერებებთან, შეადარეთ, მაგალითად, ნახ. 3-თან. მასზე მოცემულია ახლად წარმოქმნილი საგნების ადგილი. რაც შეეხება მათემატიკას, ავტორი აღნიშნავს, რომ მთელი სამკუთხედი მტკიცედ დგას მათემატიკურ საფუძველზე.

მინერალოგიური კრისტალოგრაფიის სრული კურსი შეიცავს როგორც კრისტალოგრაფიული, ისე მინერალოგიური ხასიათის საკითხებს. ცხადია, რომ ზოგიერთი მათგანის განხილვას წინ უნდა უსწრებდეს მინერალოგიის კურსის შესწავლა. ქვემოთ განხილული იქნება მხოლოდ ის საკითხები, რომლებიც ითვალისწინებენ კრისტალოგრაფიის საფუძვლებს. ეს საკითხები ეხება უქთავერესად რეალურ კრისტალთა მორფოლოგიის თავისებურებას და მათ კანონზომიერ შენაზარდებს, მარტივი ფორმების კრისტალოგრაფიულ სახესხვაობებს და მინერალთა სამყაოს კრისტალთა განაწილებას სინჯონებისა და სიმეტრიის სახეობათა მიხედვით.



ნახ. V.1. ნ. ბელოვის სამკუთხედი. ქ-კრისტალოგრაფია; ფ-ფიზიკა; ქ-ქიმიკა; მ-მინერალოგია; ფქ-ფიზიკური კრისტალოგრაფია; ქმ-ქიმიკური კრისტალოგრაფია; მქ-მინერალოგიური კრისტალოგრაფია.

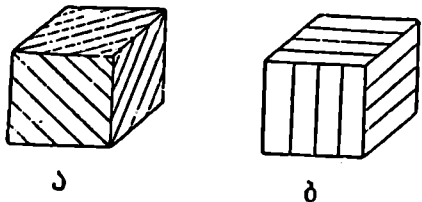
§ V. 2. რეალური კრისტალები და მათი მორფოლოგიური სახისხვაობანი

რეალური კრისტალების განხილვისას შევხვდებით მათზე განვითარებული მარტივი ფორმების სხვადასხვა სახის გართულებებს. მაგალითად, წახნაგების სიბრტყეებზე ხშირია ხაზები და სხვადასხვა ფორმის პატარა ჩაღრმავებანი, ან ბორცვები, ე.წ. ვიცი ნალური წარმონაქმნები, რომლებიც დაკავშირებულია კრისტალის ზრდის მექანიზმთან. გარდა ამისა, სხვადასხვა შედგენილობის კრისტალების ერთი და იგივე მარტივი ფორმა ხშირად სხვადასხვა სიმეტრიისაა. მაგალითად, სფალერიტის (ZnS) და პირიტის (FeS_2) კუბები სიმეტრიის სხვადასხვა კლასს ეკუთვნის, რასაც ხშირად მათ წახნაგებზე არსებული ხაზები (შტრიხები) ადასტურებენ (ნახ. V. 2). სფალერიტის კრისტალს აქვს სიმეტრიის $3L_2$, $4L_3$, $6P$, ხოლო პირიტის კუბს კი სიმეტრიის $3L_2$, $4L_3$, $3P_1C$ ელემენტთა ერთობლიობა. პირიტის კუბის სამ

წყვილ ურთიერთპარალელურ წახნაგებზე ჩშირად შტრიხები ერთმანეთის მართობია, როგორც ეს ნაჩვენებია V. 2 ბ ნახაზზე.

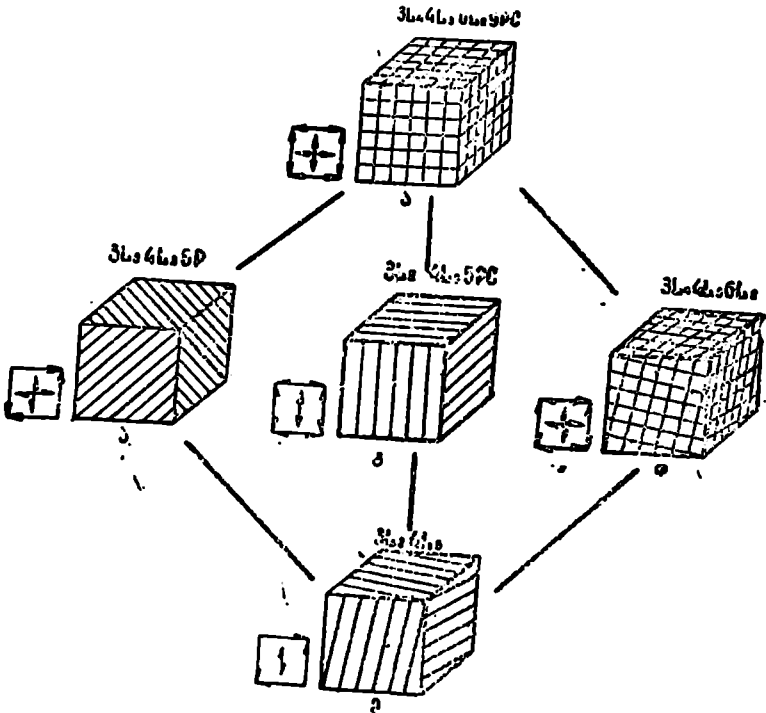
კუბური სინგონიის მარტივი ფორმების გარჩევისას უკვე აღვნიშნეთ, რომ ჰექსაედრი (კუბი) კუბური სინგონიის სიმეტრიის ხუთსავე

კლასში გეომეტრიულად უცვლელი რჩება (იხ. ტაბულა IV. 13 და V. 14) და იცვლება მხოლოდ მისი წახნაგის სიმეტრია. მაშასადამე, კრისტალოგრაფიულად არსებობს ხუთნაირი კუბი (ნახ. V. 3.), რომლებიც ერთმანეთისაგან განსხვავდებიან წახნაგების სიმეტრიით. IV.14 ტაბულაზე ზოცემულია ხუთივე ჰექსაედრის წახნაგების სიმეტრიის ხა-



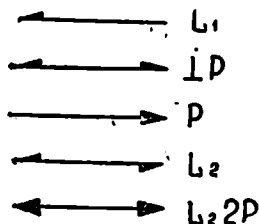
ნახ. V. 2. სხვადასხვა სიმეტრიის კუბები. ა-სფალერიტი; ბ-პირიტი.

ზოცემულია ხუთივე ჰექსაედრის წახნაგების სიმეტრიის ხა-



ნახ. V.3. კრისტალოგრაფიულად განსხვავებული ხუთნაირი ჰექსაედრი (ა. შუბნიკოვის მიხედვით).

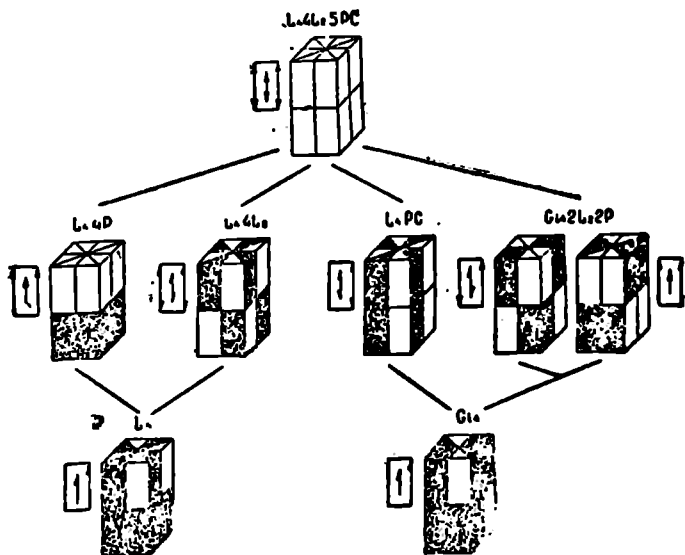
რისხი. იმავე წახნაგების სიმეტრია $V. 3$ ნახაზზე აღნიშნულია o . შუა-
 ზნიკოვის მიხედვით, o . შაფ-ანოვსკიმ ისრებით აღნიშნა წიბოს შესა-
 ძლო სიმეტრიის ხუთნაირი ს.ხე (ხახ. $V.4$). აღნიშნული კუბების წახ-
 ნაგების დათოზბულად გადის ერთ შემთხვევაში L_1 და $4P$ (კუბი ა), ან
 G_1 და $2P$ (კუბი ბ), ან L_2 და $2P$ (კუბი გ), აგრეთვე L_1 (კუბი დ) და L_2 (კუ-
 ბი ე).



ნახ. V 4. წიბოთა სიმეტრიის ხუთი ტიპი (o . შაფრანოვსკის მიხედვით).

კუბურ სინგონიაში ხუთნაირია აგრეთვე რომბული დოდეკაედრი. (იხ. ტაბულა IV. 13 და IV. 14). საერთოდ, გეომეტრიულად მეორდება ძრავალი მარტივი ფორმა როგორც კუბურ, ისე სხვა სინგონიებში; მაგალითად, ტეტრაგონური სინგონიის კრისტალოგრაფიულად განსხვავებული მოტივი ფოომების საილუსტრაციოდ

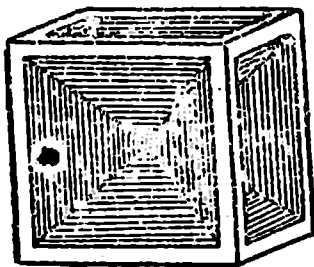
განვიხილოთ ტეტრაგონური პრიზმა. $V. 5$ ნახაზზე მოცემულია მისი რვანაირი კრისტალოგრაფიული სახესხვაობა სიმეტრიის შვიდი კლასის მიხედვით (იხ. ტაბულა IV.10). შაპი და თეთრი ფერით ნაჩვენებია



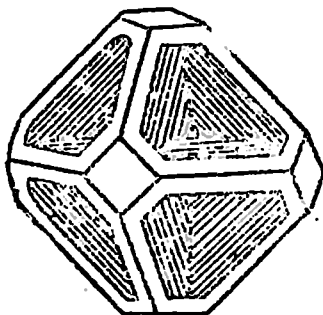
ნახ. V. 5 ტეტრაგონული პრიზმის რვანაირი კრისტალოგრაფიული სახესხვაობა და მისი წახნაგების სიმეტრიის სახე.

სრულწახნაგოვანი. ფორმების გადასვლა ნახევარწახნაგოვან სახეობაში (ა. შუბნიკოვის მიხედვით). შავი ფერით აღნიშნულია კრისტალის ანტიტოლი ნაწილები.

აღსანიშნავია, რომ სიმეტრიის ტეტრაგონური სკალენოედრის კლასში ($G_1, 2L_2, 2P$) ტეტრაგონური პრიზმა ორბაირია: ერთ შემთხვე-



ა



ბ

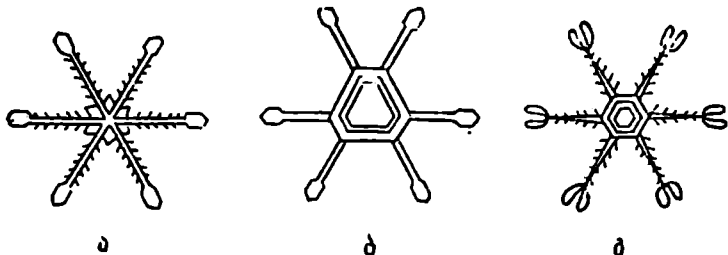
ნახ. V. 6. კრისტალთა ჩონჩხისებრი ფორმები. ა-კუბური, ბ-პირიტი.

ვაში მისი წახნაგების მართობულად გაივლის მეორე რიგის სიმეტრიის ღერძი, მეორე შემთხვევაში კი სიპეტუიის სიბრტყე. სიმეტრიის ტეტრაგონურ-პირამიდული და ტეტრაგონურ-ტეტრაედრული კლასების ტეტრაგონური პრიზმის წახნაგების სიმეტრია განსხვავდება იმით, რომ პირველ შემთხვევაში წახნაგი პარალელურია სიმეტრიის L_2 ღერძისა, ხოლო მეორე შემთხვევაში ინვერსიის G_1 ღერძისა. გ. ბოკის განსაზღვრით: „ორი ერთნაირი მარტივი ფორმა ფიზიკურად (კრისტალოგრაფიულად) განსხვავებულია, თუ ისინი განსხვავდება სიმეტრიის ელემენტების ერთობლიობით ან ამ ელემენტების განსხვავებული განლაგებით წახნაგების მიმართ“. ასეთი მიდგომის შედეგად გ. ბოკმა გამოიყვანა 47 მარტივი ფორმის 146 კრისტალოგრაფიული სახესხვაობა (ტაბულა V. 1), ხოლო თუ გავითვალისწინებთ კიდევ მარჯვენა და მარცხენა ენანტიომორფულ ფორმებს, სულ მივიღებთ 93 სახესხვაობას. ყველაზე დიდი ჩაოდენობა სიმეტრიის განსხვავებული სახეობებისა აქვს პინაკოიდებს, რომლებიც შეიძლება 21-ნაირი იყოს, (1—ტრიკლინური, 4—მონოკლინური, 3—რომბული, 5—ტეტრაგონური, 3—ტრიგონური და 5—ჰექსაგონური). როგორც მოცემული ტაბულიდან ჩანს, 19 მარტივ ფორმას კრისტალოგრაფიულად განსხვავებული სახესხვაობა არა აქვს.

ბუნებაში მინერალების კრისტალიზაციის ნორმალური პირობების ინტენსიური დარღვევების დროს მკვეთრად იცვლება წახნაგთა

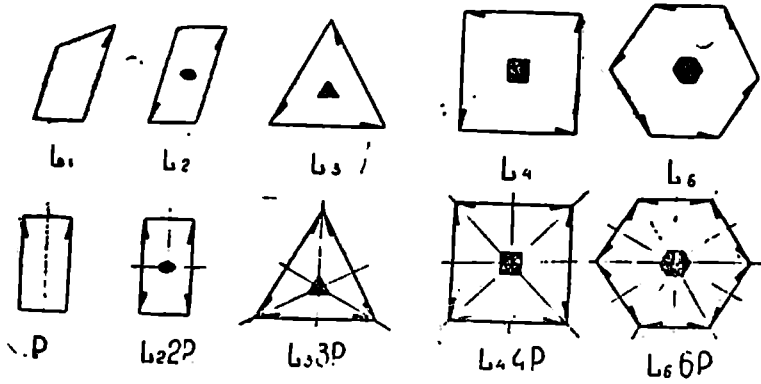
ზრდის სიჩქარე სხვადასხვა, მიმართულებებით და ამასთან დაკავშირებით იცვლება კრისტალის სახე, რიგ შემთხვევებში კრისტალებზე უფრო სწრაფად ვითარდება მისი ამოზნექილი ხაწილები (როგორცაა წვერო ან წიბო); ვიდრე თვით წახნაგი. ამიტომ წარმოიშობა კრისტალთა ე. წ. ჩონჩხისებური ფორმები (ნახ. V. 6).

o. შუტრანოვსკიმ გააფართოვა მოძღვრება კრისტალთა გართუ-



ნახ. V. 7. წვეროსეული და წიბოსეული ფორმების კომბინაცია თოვლის ფიფქებზე (o. შუტრანოვსკის მიხედვით).

ლებული ფორმების შესახებ და წახნაგისეულ ფორმებთან ერთად გამოჰყო წვეროსეული და წიბოსეული ფორმები, რომელთა შესწავლას დიდი მნიშვნელობა აქვს კრისტალთა წარმოქმნის პირობ-



ნახ. V. 8. სიმრტიით სიმეტრიის 10 სახე.

ის დასაზუსტებლად ან მათ წახნაგებზე სხვადასხვა ხასიათის შტრიხების ზრდის წარწოშობის დასადგენად და სხვა კრისტალმოზოლოგიური საკითხების გადასაწყვეტად.

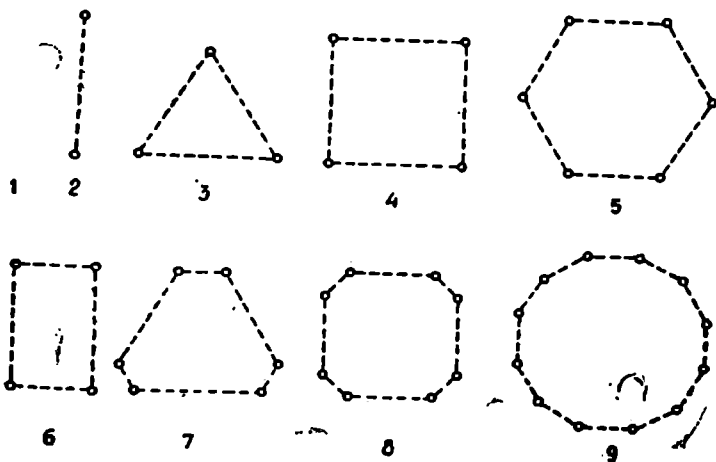
ჩონჩხისებური კრისტალები შეიძლება იყოს როგორც ბრტყელი, ისე სივრცული. ფორმის, ბრტყელი წვეროსეული და წიბოსეული ფორ-

47 მარტივი ფორმის კრიბტალოგრაფიული ხახეხვაობები (გ. ბოკას მიხედვით).

№ რიგზე	მარტივი ფორმები	კრიბტალოგრაფიულად განსჯადი ფორმების რაოდენობა	№ რიგზე	მარტივი ფორმები	კრიბტალოგრაფიულად განსჯადი ფორმების რაოდენობა
1.	მონოდრი	10	25.	პექსაგონური სკალენოდრი	1
2.	პინაკოიდი	21	26.	პექ' აგონურიპრიზმა	11
3.	დიედრი	3	27.	პექსაგონური პირამიდა	3
4.	რომბული პრიზმა	4	28.	პექ-აგონური ბიპირამიდა	5
5.	რომბული ტეტრაედრი	1	29.	პექსაგონური ტრაპეკოდრი	1
6.	რომბული პირამიდა	1	30.	დიპქსაგონური პრ. ზმა	4
7.	რომბული ბიპირამიდა	1	31.	დიპექსაგონურიპირამიდა	1
8.	ტეტრაგონური ტეტრაედრი	2	32.	დიპქსაგონური ბიპირამიდა	1
9.	ტეტრაგონური პრიზმა	8	33.	ტეტრაედრი	2
10.	ტეტრაგონური პირამიდა	2	34.	ტრიგონურიტეტრაედრი	2
11.	ტეტრაგონური ბიპირამიდა	4	35.	ტეტრაგონ-ტრიტეტრაედრი	2
12.	დიტეტრაგონური პრიზმა	4	36.	პექსაგონურიტეტრაედრი	1
13.	დიტეტრაგონური პირამიდა	1	37.	პექსატეტრაედრი	1
14.	დიტეტრაგონური ბიპირამიდა	1	38.	პექსაედრი	5
15.	ტეტრაგონური ტრაპეკოდრი	1	39.	ტეტრაპექსაედრი	3
16.	ტეტრაგონური სკალენოდრი	1	40.	ოქტედრი	3
17.	ტრიგონური პრიზმა	5	41.	ტრიგონურიოქტედრი	3
18.	ტრიგონური პირამიდა	2	42.	ტეტრაგონურიოქტაედრი	3
19.	ტრიგონური ბიპირამიდა	3	43.	ჰექტაგონურიოქტაედრი	3
20.	რომბოედრი	3	44.	პექსაოქტაედრი	1
21.	ტრიგონური ტრაპეკოდრი	1	45.	რომბოედრი	5
22.	დიტრიგონური პრიზმა	3	46.	ენტაგონოდრი	2
23.	დიტრაგონური პირამიდა	1	47.	დილოდ. კაედრი	1
24.	დიტრიგონური ბიპირამიდა	1			
				ს უ ლ	146

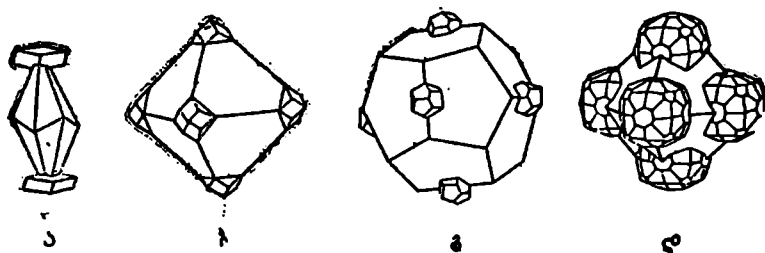
რმის კარგი მაგალითია თოვლის ფიფქი (ნახ. V. 7), რომელთა წიბო-
 ები განლაგებულია სიმეტრიის ხარისხის შესაბამისად, ხოლო მათ ბო-
 ლოებზე განლაგებულია წვეროსეული ფორმები.

წვეროსეული და წიბოსეული ყველა შესაძლო ფორმის გამოყვა-



ნახ. V. 9. ცხრა ბრტყელი წვეროსეული ფორმა.

ნა შეიძლება სიმეტრიის 32 კლასის სტერეოგრაფიული გეგმილების
 გამოყენებით. აქ განვიხილოთ მხოლოდ ბრტყელი ფორმები, რომელ-
 თა გამოყვანა დაკავშირებულია სიმეტრიის 10 სახეობას-



ნახ. V. 10. წვეროსეული ფორმები: ა-კალიტის პინაკოიდური, გ-პირიტის, ზ და დ-
 ფლუორიტის ჰექსაედრული ფორმები.

თან (ნახ. V. 8).

შესაძლო ბრტყელი წვეროსეული ფორმების გამოსაყვანად ყო-
 ველი წვერო პირობითი წერტილით აღვნიშნოთ და ვამრავლოთ მა-

თი რიცხვი სათანადო ათნაირო სიმბრტყითი სიმეტრიის ელემენტების საშუალებით, მივიღებთ 9 ფორმას (ნახ. V.9).

დაღგენილია, რომ სივრცული წვეროსეული დადებითი ფორმების რაოდენობა 47-ია და ამდენივეა უარყოფითი სახეობა. V. 10 ნახ-აზზე მოცემულია კალციტის, პირიტისა და ფლუორიტის კრისტალე-

უონები	1	11	2	3	4
	5	6	7	8	9
მაყვარი უონები	10	11	12	13	14
ჩახჩოუნები	15	16	17	18	19
	20	21	22	23	24
პასანა-გეანი	25	26	27	28	29
მსუაბრისი პასანაჯი	30	31	32	33	34

ნახ. V. 11. 27 ბრტყელი მარტივი წიბოსეული ფორმა.

ბზე განვითარებული ამავე მინერალების მეორე გენერაციის უფრო წვრილი კრისტალების წვეროსეული ფორმა. მაგალითად, V. 10 ნახ-აზზე გამოსახულია პირიტის პენტაგონ-დოდეკაედრზე განვითარებული მეორე გენერაციის ჰექსაედრული წვეროსეული ფორმა.

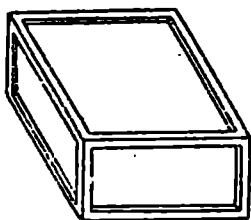
შესაძლო ბრტყელი წიბოსეული ფორმების გამოსაყვანად ავიღოთ მარტივი ფორმის რომელიმე წიბო წრფის მონაკვეთის სახით, რომელიც სიმბრტყეზე სხვადასხვანაირადაა ორიენტირებული უკვე ხსენებული ათნაირო სიმბრტყითი სიმეტრიის ელემენტებისადმი. ამ ელემენტებს სათანადო მოქმედებით მივიღებთ წიბოების კონებს, ჩარჩოებს ან ვარსკვლავებს. ყველა სიმბრტყითი სიმეტრიის ელემენტის მოქმედ-

გბთ მიიღება 27 ბრტყელი წიბოსეული ფორმა (ნახ. V. 11). სივრცობრივი წიბოსეული ფორმებიდან არჩევენ კარკასულ ფორმებს, რომელთა საერთო რაოდენობა აღწევს 303, მათ შორის დაბალი კატეგორიის სინგონიებისათვის დადგენილია 18, საშუალო კატეგორიისათვის — 142 და კუბური სინგონიისათვის — 143 კარკასული წიბოსეული ფორმა. ყველა ამ ფორმას აქვს როაორც დადებითი, ისე უარყოფითი სახესხვაობები. V. 12 ნახაზზე მოცემულია როდოქროზიტის ($MnCO_3$) რომბოედრი, რომლის წიბოების გასწვრივ განვითარებულია დოლომიტის ($CaMg(CO_3)_2$) წიბოსეული ფორმა.

წიბოსეული ფორმების ერთ-ერთი სახესხვაობაა ე. წ. დენდრიტები, რომლებსაც მცენარისებრი დატოტვილი ფორმა აქვს (ნახ. V. 13). დენდრიტები შეიძლება იყოს როგორც ბრტყელი, ისე სამგანზომილებიანი, ისინი დატოტვილია და წარმოადგენს პარალელურ ორიენტაციაში მყოფი კრისტალების შენაზარდს (ნახ. V. 14). მაგალითად, ხალასი სპილენძის დენდრიტები წარმოქმნილია კუბების მიზრდით ოქტაედრული მიმართულებით (ნახ. V. 14ბ).

§ V. 3. კრისტალთა კანონზომიერი შენაზარდები

ბუნებრივ პირობებში ინდივიდუალურად განვითარებული კრისტალები იშვიათად გვხვდება. უფრო ხშირია მათი ჯგუფური შენაზარდები, რომელთა შორის არჩევენ შემთხვევით (არაკანონზომიერ) და კანონზომიერ შენაზარდებს.



ნახ. V. 12. დოლომიტის წიბოსეული ფორმა როდოქროზიტის რომბოედრის წიბოების გასწვრივ (კ. ფრონდელის მიხედვით).

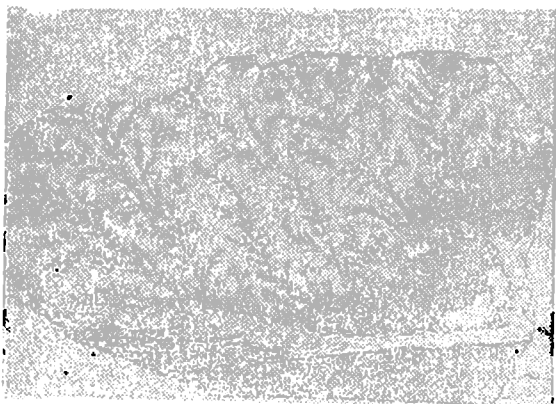
არაკანონზომიერი შენაზარდებიდან აღსანიშნავია დრუზები. დრუზა ერთ სიბრტყეზე განლაგებული ერთი და იმავე ნივთიერების კრისტალთა ერთმანეთთან არაკანონზომიერად მიზრდილი ერთობლიობაა, რომლებსაც ხშირად იძლევა კვარცი (მთის ბროლი), კალციტი, ბარიტი, მინდერის შპატი და სხვა მინერალები (ნახ. V. 15).

დადგენილია, რომ დრუზების ზრდის დროს დიდი მნიშვნელობა

აქვს კრისტალის ჩანასახის ორიენტაციას საწყისი ზედაპირის მიმართ. დ. გრიგორიევის მიხედვით მრავალი ჩანასახიდან გაზრდილ კრისტალებს შორის ხდება გეომეტრიული შერჩევა და ძირითადად ვითარდებიან 3. ხარაშვილი

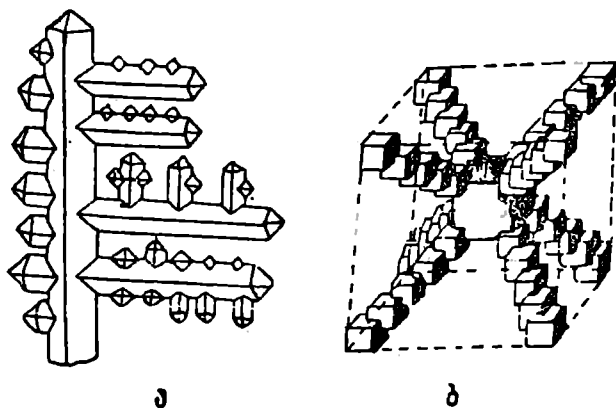
ბა ის ინდივიდი, რომლის მიმართულა მიზრდის სიბრტყის მართობა (ნახ. V. 16). ამით აიხსნება ისიც, თუ რატომაა კრისტალთა მაქსიმალური რაოდენობა დრუზის ქვედა ნაწილებში.

კანონზომიერი შენაზარდები შეიძლება იყოს ურთიერთპარალელ-



ნახ. V. 13. მანგანუმის ჯანგულის დეფრიტები.

ლური ან არაპარალელური. კრისტალთა პარალელურ შენაზარდებს ჯაგრისებულ უწოდებენ. შენაზარდები შეიძლება შედგებოდეს ერთ-



ნახ. V. 14. ხალასი სპილენძის დეფრიტები: ა-ბრტყელი, ბ-სამკანონო მრგვალებიანი.

თი და იმავე ნივთიერების კრისტალებისა ან სხვადასხვა მინერალები-საგან. ჯერ განვიხილოთ ერთი და იმავე მინერალს შენაზარდები

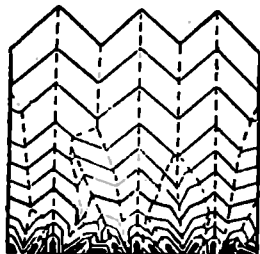
მათ შორის პირველ რიგში შაბი, კვარცი, ბარიტი, პირიტი და სხვ. (ნახ. V. 17).

პაოალელურ შენაზარდებში სხვადასხვა ზომის კრისტალების ერთი და იმავე ძარტივი ფორმის წახნაგები უათიეოთპაოალელურია და



ნახ. V. 15. შთის ბროლის კრისტალთა დრუზა.

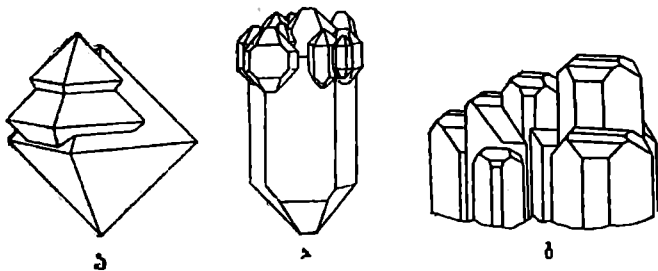
ყოველი კრისტალის სტრუქტურა თიოქოს ერთმანეთის უშუალო გაგრძელებაა. სხვადასხვა მიწვალის კანონზომიერ შენაზარდებს, რომელთაც ეპიტაქსიას უწოდებენ, განვიხილოთ ქვევით.



ნახ. V. 16 შთის ბროლის დრუზის განკოთარებუ სქემა (დ. გრაიგორიუვის მიხედვით).

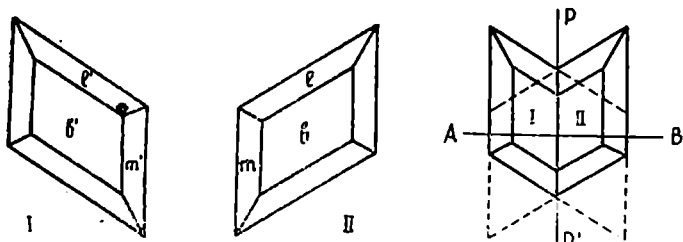
ორი ან რამდენიმე კრისტალის ურთიერთკანონზომიერად ორიენტირებულ შენაზარდს მრჩობლს უწოდებენ. მრჩობლი არის ერთი და იმავე ნივთიერების ორი კრისტალის ისეთი კანონზომიერი შენაზარდი, რომელშიც ერთი ინდივიდი შეიძლება შეეფუთავსოთ მეოგეს ან მისი 180°-ით შობრუნებით რომელიმე დერძის გარშემო, ან რომელიმე სიბრტყეში არაეკვლით. მაგალითისათვის ავიღოთ თაბა-

შორის ორი ერთნაირი კრისტალი, რომლებიც ეკუთვნიან მონოკლინური სინგონიის სიმეტრიის პრიზმულ კლასს (ნახ. V.18). ამ კრისტალებზე განვითარებულია პირველი გვარის l და l' (011), მესამე გვარის m და m' (110) პრიზმები და მეორე პინაკოიდი b და b' (010). II კრისტალი შემობრუნებულია I კრისტალის მიმართ 180° -ით ჰორიზონტალური ლერძის გარშემო, რომელიც განლაგებულია ნახაზის სიბრტყეში. ეს ორი კრისტალი აღნიშნულ ორიენტაციაში მეორე პინაკ-



ნახ. V. 17. კრისტალთა პარალელური შენაზარდები: ა-შაბი, ბ-კვარცი, გ-ბ. რიტი.

ოიდის მართობი სიბრტყის გასწვრივ ერთმანეთს რომ შეეზარდოს, მივიღებთ მრჩობლს (ნახ. V.18 ბ). ზემოთ აღნიშნული განმარტების თანახმად ამ მრჩობლში ერთი ინდივიდი AB ლერძის გარშემო რომ შემოვბრუნოთ 180° -ით, იგი შეუთავსდება მეორეს ან ერთი ინდივიდი რომ ავრეკლოთ PP' სიბრტყეში, შეუთავსდება მეორეს. როგორც



ნახ. V. 18. თაბაშირის მრჩობლის წარმოშობის სქემა.

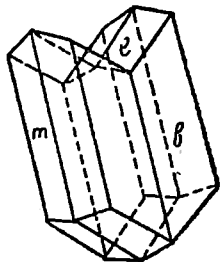
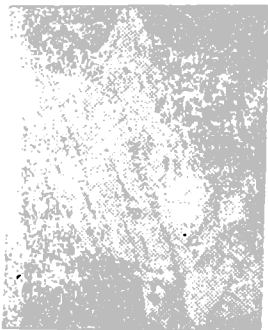
ნახაზიდან ჩანს, ჩვეულებრივი კრისტალებიდან განსხვავებით მრჩობლზე წარმოიქმნება ე. წ. შემავალი კუთხეები. თაბაშირში შემავალი კუთხეები წარმოქმნილია პირველი გვარის პრიზმის წახნაგებს შორის. აღსანიშნავია, რომ არსებობს ისეთი მრჩობლებიც, რომლებსაც არა აქვთ შემავალი კუთხეები (მაგალითად, კვარცის ზოგიერთი

მრჩობლი). თუ აღნიშნული კანონზომიერებით ერთმანეთთან შეზრდი-
ლია ორზე მეტი კრისტალი, მაშინ მათ სათანადოდ უწოდებენ: სამე-
ულს (სამკაგ მრჩობლს), ოთხეულს (ოთხმკაგ მრჩობლს) და ასე შე-
მდეგ (ნახ. V. 34 ბ და V. 41).

მრჩობლზე არჩევენ სამ ელემენტს: შემრჩობლების ღერძს,
შემრჩობლების სიბრტყეს და შეზრდის სიბრტყეს.

შემრჩობლების ღერძი წაუმოსახვითი ღერძია. მის გაოშემო
180°-ით რომ შექცეაბუნათ ერთი ინდივიდი, იგი შეუთავსდება მე-
ორე ინდივიდს. განხილულ მაგალითში ესაა AB ღერძი (ნახ. V. 18. ბ).
ცხადია, რომ ეს ღერძი არ შეიძლება დაეთუთაქეს კრისტალის წვეილი
რივის სიმეტრიის ღერძს, რადგან ინდივიდის 180°-ით ძობოქნების შე-
დგეა იგი ისევე შეუთავსდება საწყის მდგომაოეობას და ძოხობლის
მაგევრად მივიღებთ პარალელურ შენახაუღებს.

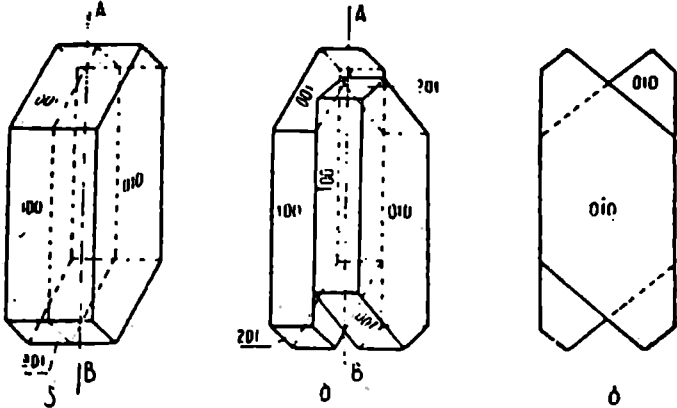
შემრჩობლების სიბრტყეში ომ ავრეკლოთ ძრჩობლის
ერთი ინდივიდი, იგი შეუთავსდება იეორეს. განხილულ მაგალითში
ესაა PP' სიაოტყე (ნახ. V. 18 ბ) ცხადია, რომ
ეს სიბრტყე არ შეიძ-
ლება ემთხეოღეს კოი-
სტალის სიმეტრიის სა-
წყის სიბრტყეს, რად-
გან მაშინ შემჩობლე-
ბას აღგალი არ ექე-
ბოდა. შემჩობლების
სიბრტყე ყოველთვის
შემრჩობლების ღერძ-
ის მათოთხია.



შეზრდის სიბ-
რტყის გასწვრივ მრჩო-
ბლის ორი ინდივიდი
ერთმანეთს ეხება. შე-
ზრდის სიბრტყე ჭოველთვის პარალელურია კრისტალზე არსებულ ომ
შესაძლო წახნავისა და ამ წახნავის ინდექსით ხასიათდება შემრჩობ-
ლების ხერხიცი. მრჩობლის რაიმე კეეოში შემრჩობლებული ინდივიდ-
ების კონტაქტი სწორი ხაზია, რომელსაც შემრჩობლების ნაკერს
უწოდებენ. შეზრდის სიბრტყე შეიძლება ემთხეოღეს ან არ ემთხეო-
ღეს შემოჩობლების სიბრტყეს. განხილულ მაგალითზე შეზრდის სიბ-
რტყე პარალელურია პირველი პინაკოიდისა, რომელაც ამ შემთხვევა-
ში არაა კრისტალზე განვითარებული. ასეთი თაბაშირის მრჩობლის
დასახასიათებლად უნდა აღვნიშნოთ, რომ კრისტალები შემრჩობლებ-

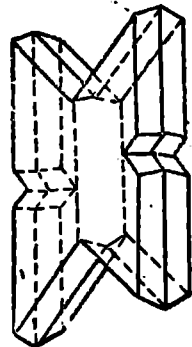
ნახ. V. 19. თაბაშირის მრჩობლი (100)-ის მიმართ. ა-მრჩობლის სურ.თია I:I (სპი-ს მინერალოგიური მუზე-
უმის ნიმუში) ბ-იმავე მრჩობლის ნახაზი.

ულია (100)-ის ანუ პირველი პინაკოიდის მიმართ (ნახ. V. 19). ამ მრჩობლში შეზრდის სიბრტყე ემთხვევა შემრჩობლების სიბრტყეს. აღნიშნული სიბრტყეების დაუმთხვეელობის მაგალითად განვიხილოთ კალიუმის მინდვრის შპატის (ორთოკლაზის) მრჩობლი (ნახ. V. 20). ამ მოცემულია მონოკლინური სინგონიის პრიზმული კლასის კრისტალები, რომელთა შორის, მარჯვენა შემობრუნებულია AB მრჩობლის ვერ-



ნახ. V. 20. ორთოკლაზის პარალელური მრჩობლის სქემა.

ტიკალური ღერძის გარშემო 80° -ით (ნახ. V. 20 ბ). ინდივიდები ერთმანეთთან მიზრდილია (010)-ის გასწვრივ, ხოლო შემრჩობლების სიბრტყე [001]-ის მართობია. ამ მრჩობლში შემრჩობლების ღერძი [001] მდებარეობს შეზრდის სიბრტყეში, ეს უკანასკნელი კი არ ემთხვევა შემრჩობლების სიბრტყეს. ასეთ მრჩობლებს პარალელური მრჩობლებს უწოდებენ წინათ განხილული ნორმალური (არაპარალელური) მრჩობლებისაგან განსხვავებით, სადაც შემრჩობლების ღერძი შეზრდის სიბრტყის მართობია. ნორმალური მრჩობლები უფრო ხშირად გვხვდება, ვიდრე პარალელური მრჩობლები.

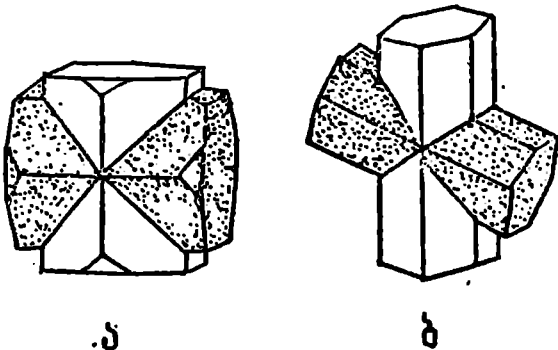


ნახ. V. 21. თამარის ჩაზრდის მრჩობლი.

გარდა აღწერილი მრჩობლებისა, რომლებშიც ორი ინდივიდი ერთმანეთთან მხოლოდ გარკვეული სიბრტყის გასწვრივაა მიზრდილი, არსებობს კიდევ ისეთი მრჩობლები, რომლებშიც ინდივიდები ერთმანეთშია ჩაზრდილი; ასეთ მრჩობლებს

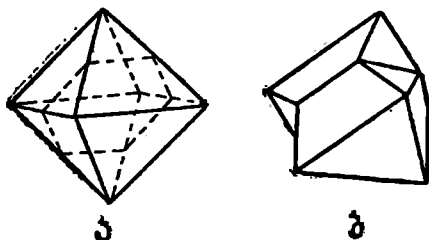
ჩაზრდის მრჩობლს უწოდებენ მაგალითად, ერთმანეთთან მიზრდილმა თაბაშირის ორმა კრისტალმა ზრდა რომ განაგრძოს, მივიღებთ ჩაზრდის მრჩობლს, რომელიც მოცემულია V. 21 ნახაზზე. ასეთივე მრჩობლს ხშირად იძლევა მინერალი სტავროლითი ($FeAl_3[SiO_4]_2O_2(OH)_3$) რომბული სინგონიის კრისტალებისაგან, როდესაც ისინი შემრჩობლებულია პირველი გვარის პრისმის მიმართ (ნახ. V.22).

კრისტალურ კანონზომიერებას, რომელიც განსაზღვრავს კრის-



ნახ. V. 22. სტავროლითის ჩაზრდის მრჩობლი.

ტალთა ინდივიდების ურთიერთდამოკიდებულებას მრჩობლში, უწოდებენ შემრჩობლების კანონს. იგი განისაზღვრება შემრჩობლების ღერძისა და შეზრდის სიბრტყის სიმბოლოებით და მათი ურთიერთგანლაგებით. ამ კანონებს უმთავრესად ან იმ მინერალის სახელს უწოდებენ, რომელზედაც პირველად იყო დადგენილი შემრჩობლების ხერხი, ან იმ ადგილის სახელს, სადაც პირველად იყო იგი აღწერილი. მაგალითად, მინერალ შპინელის ($MgAl_2O_4$) კრის-

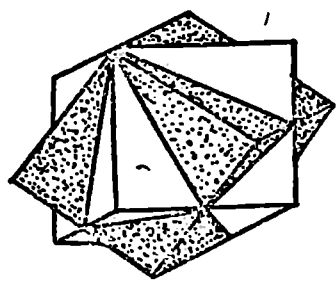


ნახ. V. 23. ოქტაედრების შემრჩობლების სქემა შპინელის კანონის მიხედვით: ა-ოქტაედრი, აღნიშნულია შემრჩობლების სიბრტყე, ბ-მრჩობლი.

ტალებისათვის დამახასიათებელია ორი ოქტაედრის შემრჩობლება ოქტაედრის წახნაგის მიმართ (ნახ. V. 23). შემრჩობლების ამ ხერხს უწოდებენ შპინელის კანონს. ასეთივე სახის მრჩობლები აქვს

სტალებისათვის დამახასიათებელია ორი ოქტაედრის შემრჩობლება ოქტაედრის წახნაგის მიმართ (ნახ. V. 23). შემრჩობლების ამ ხერხს უწოდებენ შპინელის კანონს. ასეთივე სახის მრჩობლები აქვს

აგრეთვე მაგნეტიტს ($FeFe_2O_4$) ფლუორიტს (CaF_2) და სხვა მინერალებს. ამ მრჩობლებს (ოქტაედრის მიმართ) შპინელის კანონის მიხედვით მრჩობლებს უწოდებენ. მაგალითად, V.24 ნახაზზე მოცემულია ფლუორიტის ორი ჰექსაედრის ჩაზრდის მრჩობლი იმავე შპინელის კანონის მიხედვით. შემრჩობლების ლერძი ორივე ჰექსაედრის საერთო მესამე რიგის სიმეტრიის ლერძია, ხოლო შემრჩობლების სიბრტყე კი (111)-ის პარალელურია და ემთხვევა შეზრდის სიბრტყეს.



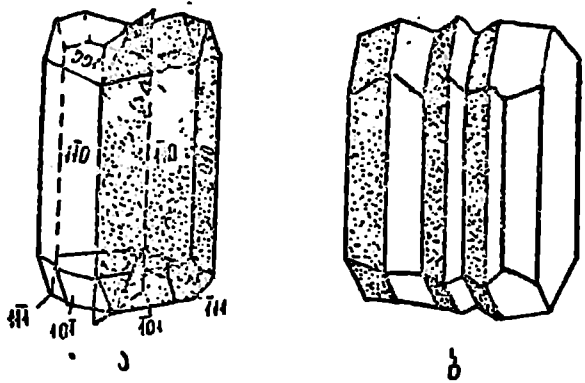
ნახ. V. 24. ფლუორიტის მრჩობლი შპინელის კანონის მიხედვით.

მინერალი ალბიტის ($Na[AlSi_3O_8]$), რომელიც კრისტალდება ტრიკლინურ სინგონიაში, ხშირად იძლევა შემრჩობლებას მეორე პინაკოიდის მიმართ (ნახ. V. 25). სადაც შემრჩობლების ლერძი მართობია (010) ისა, ხოლო შემრჩობლების სიბრტყე ემთხვევა შეზრდის სიბრტყეს და პარალელურია (010)-ისა. ამ მრჩობლებს ალბიტის კანონის მრჩობლებს უწოდებენ.

V. 25 ა ნახაზზე მოცემულია ორი ინდივიდის შემრჩობლება, სადაც ერთი ინდივიდი მობრუნებულია მეორის მიმართ 180° -ით პორ-

ბრტყე და პარალელურია (010)-ისა. ამ მრჩობლებს ალბიტის კანონის მრჩობლებს უწოდებენ.

V. 25 ა ნახაზზე მოცემულია ორი ინდივიდის შემრჩობლება, სადაც ერთი ინდივიდი მობრუნებულია მეორის მიმართ 180° -ით პორ-

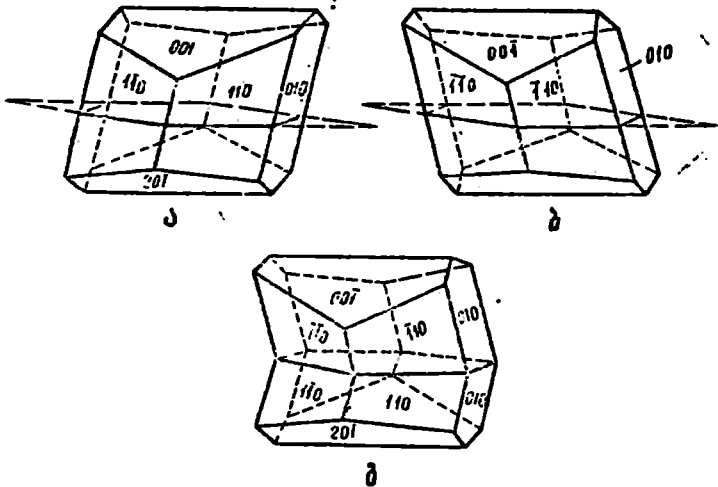


ნახ. V. 25. შემრჩობლება ალბიტის კანონის მიხედვით: ა-შემრჩობლებულია ორი ინდივიდი, ბ-პოლისიითეზური მრჩობლი.

იზონტალური ლერძის გარშემო. ალბიტის კრისტალებისათვის მეტად დამახასიათებელია ამავე კანონით რამდენიმეჯერ თანმიმდევრული შემრჩობლება (ნახ. V. 25 ბ). ერთი და იმავე წესით მრავალჯერ განმეორებულ მრჩობლს პოლისიითეზურს უწოდებენ. განვიხილოთ

გავრცელებული პარალელური მრჩობლების მაგალითები. ასეთებია პერიკლინური, ქარსის და კარლსბადის კანონები.

პერიკლინური კანონი გვხვდება ტრიკლინური სინგონიის კრისტალებზე და დამახასიათებელია შესაბამისი სინგონიის მინდვრის შპატებისათვის. ამ მრჩობლის აგებისათვის ავიღოთ ტრიკლინური სინგონიის ორი კრისტალი (ნახ. V. 26), რომლებზედაც განვითარებულია III გვარის პიზაა, მეორე და მესამე პინაკოიდი და II გვარის უარყოფითი პინაკოიდი ($20\bar{1}$) ერთი ამ კრისტალთაგანი შემოვებრუნოთ $[010]$ ღერძის გარშემო 180° -ით (ნახ. V. 26 ბ). ორივე ეს



ნახ. V. 26- პერიკლინური მრჩობლის სქემა. შეზღუდს სიბრტყე (hOl) რომელიც კვეთია, შემრჩობლების ღერძი $[010]$.

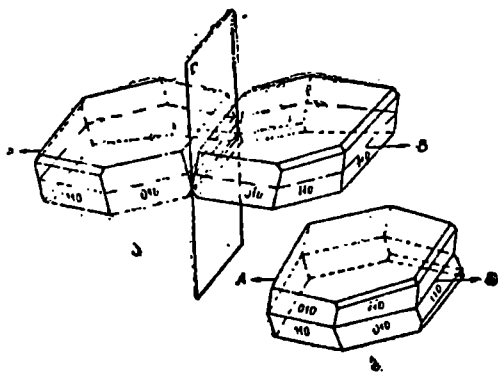
კრისტალი გავკვეთოთ დახრილი ზოვადი ინდექსის (hOl) მქონე სიბრტყით, რომელიც, როგორც ნახაზზეა ნაჩვენები, იძლევა რომელსე კვეთს. ესლა ა კრისტალის ქვედა ნახევარს შექუვადკათ ბ კრისტალის ზედა ნახევარი და მივიღებთ ე. წ. პერიკლინის მრჩობლს (ნახ. V. 26 გ), რომლის შეზღუდის სიბრტყე (hOl) რომელიც კვეთია. შემრჩობლების ღერძი $[010]$ დევს შეზღუდის სიბრტყეში, ხოლო შემრჩობლების სიბრტყე ვერტიკალურია და მართობია $[010]$ -ისა.

პერიკლინური კანონით ხშირად წარმოიქმნება პოლისინთეტური მრჩობლები. მინერალ მიკროკლინში ($K[AlSi_3O_8]$) ხშირია გართულებული მრჩობლებაც, რომლებშიც ინდივიდები ერთდროულადაა შემრჩობლებული ალპიტისა და პერიკლინის კანონის მიხედვით. რადგან ორივე შემრჩობლება პოლისინთეტური ხასიათისაა, ამიტომ აღნიშნული

გართულებული შემრჩობლების შედეგად მიიღება ე. წ. მიკროკლინის ზადე. გამოწვეული შესაბამისი შეზრდის სიბრტყეების ურთიერმართობი მიმართულებით.

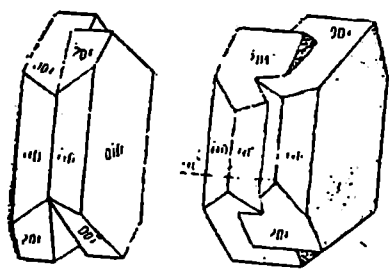
ქარსის კანონი დამახასიათებელია ქარსების მრჩობლებისათვის და მათი მსგავსი შრისებრი სტრუქტურის მქონე მინერალებისათვის, რომლებიც მონოკლინურ სინგონიაში კრისტალდებიან (ნახ. V. 27).

პერიკლინური მოჩობლის ანალოგიურად შემოჩობლების ასაგებად აქაც აღებულია მონოკლინური სინგონიისა და ფირფიტოვანი სახის ორი კრისტალი. ამ კრისტალებზე გაბატონებულია მესამე პინაკოიდი (ნახ. V. 27). ერთი ამ კრისტალთაგანი (ნახაზზე მარჯვენა) შემობრუნებულია მეორის მიმართ AB პორიზონტალური ღერძის გარშემო 180° -ით (ნახ. V. 27 ა). ორივე ინდივიდი გავკვეთთ



ნახ. V. 27. ქარსის მრჩობლის სქემა: AB შემრჩობლების ღერძია, P - შემრჩობლების სიბრტყე; შეზრდის სიბრტყეა ($00\bar{1}$).

($00\bar{1}$) წახნაგის პარალელური სიბრტყით. მრჩობლის მისაღებად მარცხენა კრისტალის ქვედა ნახევარს დაეადგათ მარჯვენა კრისტალის ზედა ნახევარი (ნახ. V. 27 ბ). შემრჩობლების ღერძი $[hkO]$ მდებარეობს შეზრდის სიბრტყეში ($00\bar{1}$). შემრჩობლების სიბრტყე ვერტიკალურია და მართობი $[hkO]$ -სი. ქარსის კანონის მიხედვით ხშირია პოლისინთეზური მრჩობლები.

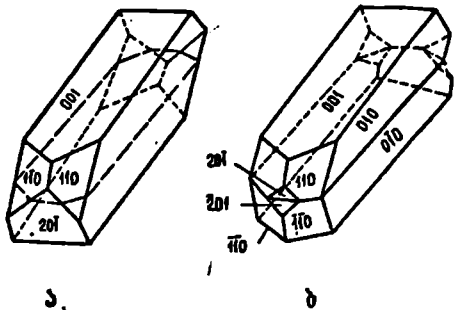


ნახ. V. 28. კარლსბადის მრჩობლი: ა-მარჯვენა მრჩობლი, ბ-ჩაზრდის მარცხენა მრჩობლი (ორთოკლაზი).

ქარლსბადის კანონი დამახასიათებელია მონოკლინური სინგონიის კალიუმის მინდვრის შპატებისათვის. ანალოგიური მრჩობლი უკვე განვიხილეთ (ნახ. V. 20). აქ შემრჩობლების ღერძია $[00\bar{1}]$ და მდებარეობს შეზრდის

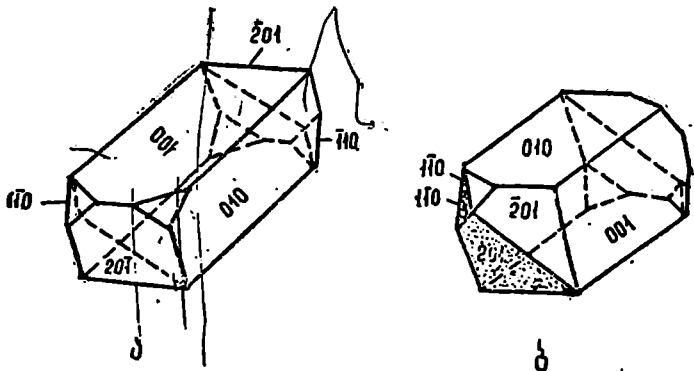
შემობრუნებული, არჩევენ კარლსბადის მარჯვენა და მარცხენა მრჩობლს. V 20 ბ ნახაზე ნაჩვენებია ჩაზრდის მარცხენა მრჩობლი ეს სახელი დაკავშირებულია ქ. კარლოვი-ვარის ძველ სახელთან, სადაც იქნა ნაპოვნი მისი პირველი ნიმუში.

V. 2 ტაბულაში მოყვანილია მინერალთა სამყაროში ყველაზე უფრო გავრცელებული მრჩობლები სინგონიების მიხედვით. დაბალი კატეგორიიდან. გაოდა ჯაკვი განხილული შემრჩობლების კანონებისა, აღვნიშნავთ კიდევ მანებახის, ბავენოს და არაგონიტის მრჩობლებს. პირველი ორი დ. მახასიათებელია ორთოკლასის a ღერძის გასწვრივ წაგრძელებული კრისტალებისათვის (ნახ. V. 29 და V. 30). a ღერძის მართობ კვეთში ხსენი თითქმის კვადრატულია. (001) და (010) წახნაგებს შორის კუთხე დაახლოებით 90° -ია. მანებახის მრჩობლში ინდივიდუბი შემრჩობლებულია (001)-ის მიმართ, სადაც მრჩობლის ერთი ნაწილი შემობრუნებულია მეორისაღნი მესამე. პინაკოიდის მართობი ღერძის გარშემო 180° -ით. ამ კანონის სახელი დაკავშირებულია მთა მანებახთან (ვდრ, თიუ-



ნახ. V. 29. მანებახის მრჩობლი: α -საწყისი კრისტალი ბ-მრჩობლი.

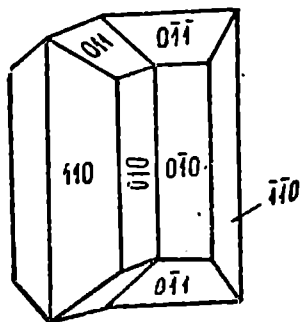
ლოა მეორისაღნი მესამე. პინაკოიდის მართობი ღერძის გარშემო 180° -ით. ამ კანონის სახელი დაკავშირებულია მთა მანებახთან (ვდრ, თიუ-



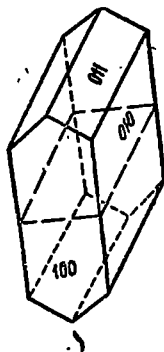
ნახ. V. 30. ბავენოს მრჩობლი: α -საწყისი კრისტალი, ბ-მრჩობლი.

რინჯია), სადაც პირველად იქნა ნაპოვნი ეს მრჩობლები. ბავენოს მრჩობლში შეზრდის სიბრტყეა (021) ან (021). ამის გა- 203

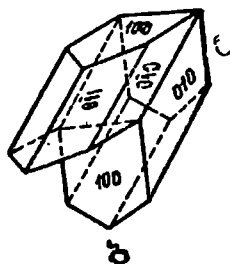
შო ბავენოს მრჩობლი შეიძლება იყოს მარჯვენა ან მარცხენა. იგი დამახასიათებელია ორთოკლახისათვის, პლაგიოკლახები ამ კანონის მიხედვით შეკრჩობლებას იშვიათად იძლევიან. შეძრჩობლების კანონის სახელბ დაკავშირებულია საბადო ბავენოსთან, რომელიც განლაგებულია ჩრდ. დასავლეთ იტალიაში — პიემონტეში, ტბა ლაგო-მაჯორეს-



ნახ. 31. არაგონიტის მრჩობლი (110)-ის მიმართ.



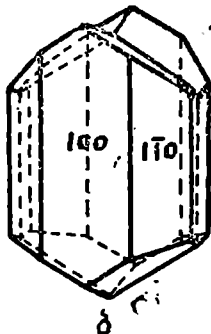
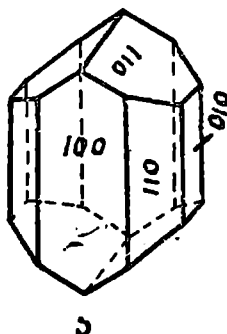
ნახ. V. 32. თაბ შირის მრჩობლი (001)-ის მიმართ: ა-საწყისი კრისტალი, ბ-მრჩობლი.



თან, სადაც პირველად იქნა ნაპოვნი აღნიშნული მრჩობლები.

არაგონიტის (CaCO_3) მრჩობლი ვითარდება III გვარის პრიზმის მიმართ (ნახ. V. 31). იგი კრისტალდება რომბულ სინგონიაში და ამ კანონის მიხედვით ხშირად იძლევა პოლისინთეზურ მრჩობლებს.

საშუალო კატეგორიის სინგონიებიდან აღვნიშნოთ მუხლისებური მრჩობლები, რომლებიც გვხვდება ტეტრაგონური სინგონიის კრისტალებზე (ნახ. V. 34 და V. 35). პაკალითად, რუთილის (TiO_2) ტეტრაგონური სინგონიის ნემსისებური კრისტალები, წაგრძელებული ღერძის გასწვრივ, რომლის ბოლოებში განვითარებულია ბიპირამიდები. ასეთი კრისტალის შემრჩობლება (hOl) ბიპირამიდის წახნაგის მიმართ იძლევა ე. წ. მუხლისებურ მრჩობლს (ნახ. V. 34 ა).



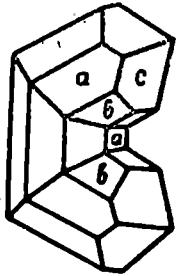
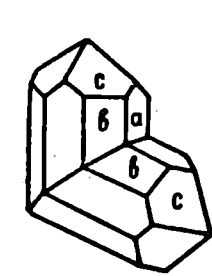
ნახ. V. 33. ანათაზის მრჩობლი (100)-ის მიმართ: ა-საწყისი კრისტალი, ბ-მრჩობლი.

მინერალთა ხამყაროში გავრცელებული მრჩობლების მაგალითები

შემრჩობლების კანონის დასახელება	რომელი მინერალებსათვის არის დამახასიათებელი	შეზრდის სიბრტყე	შემრჩობლების დონე	შემრჩობლების სიბრტყე	შენიშვნა
1	2	3	4	5	6
ტრიკლინური სინგონია					
ილბიტის	პლაგიოკლასები	(010)	\perp (010)	(010)	ხშირია პოლისინთეზური მრჩობლები ნახ. V. 2ა.
პერიკლინური	პლაგიოკლასები მიკროკლინი	რომბული კვეთი	[010]	\perp [010]	ნახ. V. 26.
მონოკლინური სინგონია					
კარლსბადის	ორთოკლასი	(010)	[001]	\perp [001]	მარჯვენა ან წარცხენა ნახ. V. 20 და V. 23.
მანებახის	" "	(001)	\perp (001)	(001)	ნახ. V. 29.
ბიუენოს	" "	(021) (02 1)	\perp (021)	(021)	ნახ. V. 30 მარჯვენა ან წარცხენა
პალეს	თაბაშირი	(100)	\perp (100)	(100)	უწოდებენ აგრეთვე "შერტლის კულის", ნახ. V. 18 და 10.
პარიზის	აფგიტი თაბაშირი	(001)	[001]	(001)	ნახ. V. 33
ქარსის	ქარსები ქლორიტები	(001)	[hk0]	\perp (001)	ნახ. V. 32 ხშირია პოლისინთეზური მრჩობლები ნახ. V. 27.
რომბული სინგონია					
ირაგონიტის სტავროლითის ჯვარი	ირგონიტი სტავროლითი	(110) (011) ან (032)	\perp (110) \perp (011) \perp (032)	(110) (011) (032)	ნახ. V. 31. ნახ. V. 22
ტრიკლინური სინგონია					
ბრაზილიის	კვარცი (მარჯვენა და წარცხენა ინდივიდი)	(11 $\bar{2}$ 0)	L_2	(0001)	შეშვალის კუთხეები არ არის (ნახ. V. 36 გ).
დოფინეს	კვარცი (ორი მარჯვენა ან ორი წარცხენა ინდივიდი)	უსწორმასწავლელი ან ორი წარცხენა ინდივიდი	L_2	(0001)	შემრჩობლების შედეგად L_2 გადადის L_6 -ში. ნახ. V. 36 ა და ბ.
ჰაბონის	კვარცი	(11 $\bar{2}$ 1)	\perp (11 $\bar{2}$ 1)	(11 $\bar{2}$ 1)	ინდივიდების [C001] ღერძებს შორის კუთხე 84° 34' (ნახ. V. 36 დ).

1	2	3	4	5	6
კალციტის	კალციტო ჰემიტები	(011 1) (0001)	\perp (011 1) L_2	(011 1) (0001,	ხშირად პოლისინთე- ზური მრჩობლებია ნახ. V. 33, ნახ. V. 37.
ტეტრაგონური სინგონია					
შესლისებური	რუტილი	(201)	\perp (201)	(201)	ნახ. V. 34
	კასიტერიტი	(101)	\perp (101)	(101)	ნახ. V. 35
კუბური სინგონია					
შპინელის	შპინერი	(III)	L_2	(III)	ნახ. V. 23
	ფლორიტი მაგნეტიტი				ნახ. V. 24
პირიტის	პირიტი	(110)	L_2	(III)	ნახ. V. 39
ალმასის	ალმასი	(100)	ინდივიდები ერიშნეტს უთავსდებიან უენტრალურ რეტრილში არაკე- ლით (ინვერსირებით). დადებით და უარყოფითი ტეტრაედრის შემრჩობლება (100, -ის მიხედვით, ნახ. V. 40.		

განმეორებითი შემრჩობლება მოგვეცემა „სამკელს“, რომელშიც კრისტალის ბოლოები შეიქმნება მიმათული იყ. ის ერთ მხაოეს (ნახ. V. 34 ბ) ან სხვადასხვა მხაოეს. (ნახაზზე a —(100) II გვარის პრიზმა, b —(110) I გვარის პრიზმა, c —(hkl) I გვარის ბიპირამიდა). ანალოგიურ მრჩობლებს იძლევა კასიტერიტიც (SnO_2), რომელსაც აქვს შემავალი კუთხეები ოგოგოც პრიზმის, ისე ბიპირამიდების წახნაგებს შორის (ნახ. V 35).

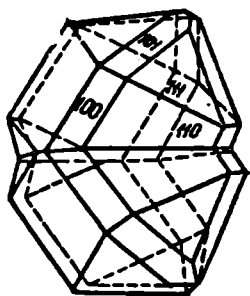


ნახ. V. 34. რუტილის მრჩობლი (201)-ის მიხედვით. ა-მუხლისებური მრჩობლი, ბ-სამკელი.

ის ჰექსაგონური პრიზმისა (1010) (წახნაგი a) და დადებითი და უარყოფითი რამპოედრისა წახნაგებისა (წახნ. 2 და 2') (იხ. ნახაზები IV. 77 და V. 36). ჩვეულებრივ მათ შორის დადებითი რომბოედრის

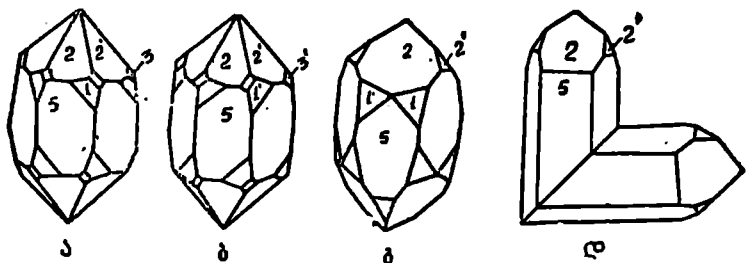
წახნაგი (101) უფრო განვითარებულია, ვიდრე უარყოფითისა. ხოლო იმისდა მიხედვით, თუ რომელი ტრიკონური ტრაპეცოედრის წახნაგია კრისტალზე წარმოქმნილი, სათანადოდ გვექნება მარჯვენა ან მარცხენა კვანძის კრისტალი (ნახ. IV. 77).

თუ ავიღებთ ორ მარჯვენა კრისტალს და ერთ-ერთ მათგანს L_1 ღერძის გარშემო შემოვებრუნებთ 180° -ით და შემდეგ ერთმანეთს შევუთავსებთ. მივიღებთ კვანძის ე. წ. დოფინეს მარჯვენა მრჩობლს (ნახ. V. 36 ა). ანალოგიურად მარცხენა მრჩობლა მიიღება კვანძის ორი მარცხენა კრისტალის შემრჩობლებით (ნახ. V. 35 ბ). აღანიშნავია, რომ დოფინეს მრჩობლა იქნის მოჩვენებითი სიბრტყის (L_1L_2) სახეს, აღწეული შემრჩობლებით კანონი დაძახასითობულია და აღქმულია უფრო კვანძისათვის. შეხედოს სიბრტყე დაკლავნილი ხედავთ, რომელიც კვანძის ღერძის მართობ კვეთში HF -ის მოქმედების შემდეგ.



ნახ. V. 35. კასტრიტის მუხლსებური მრჩობლი. (101)-ის მიმართ.

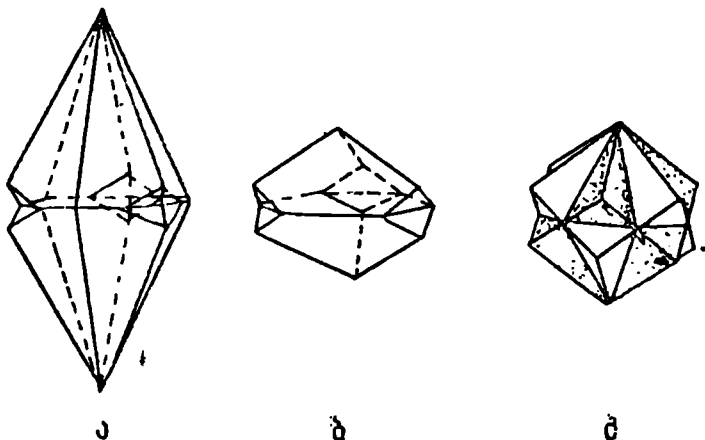
თუ კვანძის მარჯვენა და მარცხენა კრისტალებს ერთმანეთთან შევამრჩობლებთ, მივიღებთ ე. წ. ბრაზილიის მრჩობლს (ნახ. V. 36 გ), რომელიც ღებულობს სიბრტყის (L_1L_2PC) სახეს. ამ მრჩობლში შეზრდის სიბრტყე პარალელურია II გვირგვინის წახნაგებისა (1120).



ნახ. V. 36 კვანძის მრჩობლები: ა-მარჯვენა, ბ-მარცხენა-დოფინეს კანონით, გ-ბრაზილიის და დ-ბრაზილიის კანონით (წახნაგის აღიქმა ანალოგიურია IV. 77 ნახაზის აღნიშვნებისა).

განსხვავებით სხვა მრჩობლებისაგან, აღნიშნული კანონის მრჩობლებზე ჩაზნეკილი კუთხეები არ წარმოიშობა. აღსანიშნავია ის გაოცობაც, რომ თუ კრისტალზე არაა განვითარებული ტრიკონური ტრაპეცოედრის წახნაგები, შემრჩობლების დადგენა გართულებულია. გარდა ამ ორი მრჩობლისა, ბრაზილიის მაღაროებში

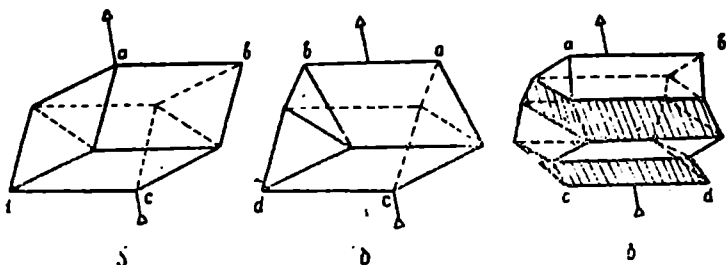
აღმოჩენილ იქნა კვარცის შემრჩობლების კიდევ ერთი სახე, სადაც ორი ინდივიდი ერთმანეთთან შემრჩობლებულია ტრიგონური ბიპირამიდის (1121)-ის მიმართ (ნახ. V. 36 დ). შემრჩობლების ამ ხერხს უწოდებენ იაპონიის კანონს. შემრჩობლებული ინდივიდების L_2 ღერ-



ნახ. V. 37. კალციტის მრჩობლები (0201)-ის მიმართ: ა-დიტრიგონული სკალენოედრის და ბ-რომბოედრის მრჩობლები; გ-ორი რომბოედრის ჩაზრდის მრჩობლი.

ძებს შორის კუთხე თითქმის მართია ($84^{\circ}34'$).

ძირითადად კალციტის ($CaCO_3$) კრისტალები იძლევიან ორგვარ მრჩობლს. ერთ მათგანს აქვს (0001)-ის პარალელური შეზრდის სიბრ-



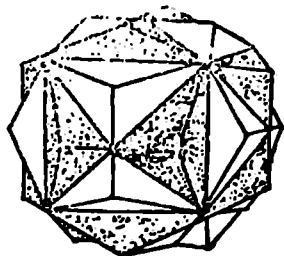
ნახ. V. 38. კალციტის მრჩობლები (0111)-ის მიმართ: ა-საწყისი კრისტალი (რომბოედრი), ბ-შემრჩობლებულია ორი ინდივიდი, გ-„ოთხეული“.

ტყე, რომელსაც ემთხვევა შემრჩობლების სიბრტყეც. V. 37 ა და ბ ნახაზებზე მოცემულია დიტრიგონური სკალენოედრისა და რომბოედრის მრჩობლები (0001)-ის მიმართ, რომლებზედაც „წარმოქმნილია“

კორინთონტალური სიმეტრიის სიბრტყე. გვხვდება. აგრეთვე ამ კანონით ჩაზრდის მრჩობლები (ნახ. V. 37 გ).

ხშირია კალციტის რომბოედრების მრჩობლები საწინააღმდეგო ნიშნის რომბოედრის მიმართ (ნახ. V. 38). აგრეთვე პოლისინთეზური მრჩობლები, რომლებიც შედგებიან სხვადასხვა სისქის ზოლებისაგან.

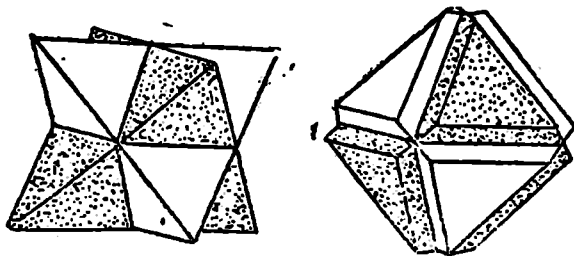
კუბური სინგონიის მრჩობლებიდან უკვე გაცხილული შპინელის კანონის გარდა განვიხილოთ აგრეთვე პირიტისა და ალმასის მრჩობლები: პირიტის (FeS_2) კრისტალები იძლევა ორ პენტაგონდოდეკაედრის ჩაზრდის მრჩობლს. V. 39 ნახაზზე მოცემულია დადებითი და უარყოფითი ორიენტაციის პენტაგონდოდეკაედრები, რომლებიც ერთმანეთშია ჩაზრდილი (110)-ის მიმართ.



ნახ. V. 39. პირიტის ჩაზრდის მრჩობლი (110)-ის მიმართ.

ალმასის კრისტალებისათვის დამახასიათებელია ტეტრაედრების ჩაზრდის მრჩობლები, რომელთა შეზრდის სიბრტყეები კუბის წახნაგების პარალელურია (სამი მიმართულედა). V. 40. ბ ნახაზზე მოცემულია ალმასის მრჩობლი, რომელიც იძლევა ფსევდოოქტაედრის ფორმას.

იმ შემრჩობლებას, რომელიც იწვევს დაბალი სიმეტრიის მქონე



ა

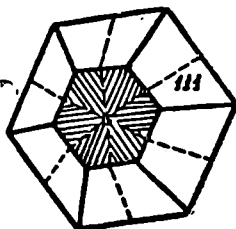
ბ

ნახ. V. 40. ალმასის ჩაზრდის მრჩობლი (100)-ის მიმართ. ა-დადებითი და უარყოფითი ტეტრაედრები, ბ-ყოველი ინდივიდი დადებითი და უარყოფითი ტეტრაედრის კომბინაციაა.

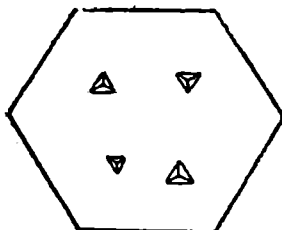
ინდივიდების ხარჯზე უფრო მაღალი სიმეტრიის მქონე კრისტალების წარმოშობის იმიტაციას, მიმეტურ მრჩობლებს უწოდებენ. ასეთი მრჩობლის კარგი მაგალითია ქრიზობერილიუმის ($BeAl_2O_4$) ჩაზრდის

მრჩობლი (სამეული) (031)-ის შიმართ (ნახ. V. 41), სადაც რომბული სინგონიის სამი ინდივიდის ჩაზრდით ვლებულობთ ფსევდოქექსაგონური სინგონიის კრისტალს. თუ ასეთ მრჩობლზე არ ვითაოდება შემავალი კუთხეები, შემრჩობლებაზე მიგვითითებს მხოლოდ პირველი პინაკოიდის წახნაგზე არსებული ღერძის პარალელური შტრიხების სხვადასხვა მიმართულება. ნახაზე წყვეტილი ხაზით აღნიშნულია ინდივიდთა საზღვრები.

შემრჩობლების წარმოქმნის მიზეზები მთლიანად არაა დადგენილი. ზოგიერთი ნივთიერებისათვის შემრჩობლება სულ არ არის ცნობილი, ზოგი კი უმთავრესად შემრჩობლებურ მდგომარეობაშია წარმოდგენილი. დადგენილია, რომ შემრჩობლება ძირითადად ხსნარში ან მდნარ-



ნახ. V. 41. ქ იზობერილიუმის ფსევდოქექსაგონული სამეული.



ნახ. V. 42. KJ-ის კუბების კანონზომიერი შინაზარდები მუსკოვიტის III პინაკოიდზე.

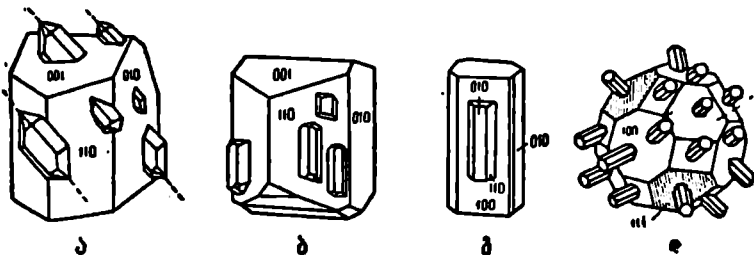
ში კრისტალიზაციის პროცესის დასაწყისში ხდება. ა. შუბნიკოვმა და აღგინა მრჩობლების წარმოქმნის ხუთი შემთხვევა:

1. კრისტალიზაციის დასაწყისში, ჯერ კიდევ მცირე ზომის კრისტალების შემთხვევით შემრჩობლებულ ორიენტაციაში შეხებით;
2. კრისტალის ჩასახვისას მისი შემადგენელი ნივთიერების მოლეკულების ურთიერთშემრჩობლებული ორიენტაციით განლაგებისა და მოლეკულების შემდგომი სათანადო დაშვების შედეგად;
3. გაზრდილი კრისტალის წახნაგზე მოლეკულების შემრჩობლებულ მდგომარეობაში განლაგებით;
4. ნივთიერების ერთი მოდიფიკაციიდან მეორე მოდიფიკაციაში გადასვლის შედეგად;
5. მექანიკური ზეგავლენით (მაგალითად, წნევის შედეგად).

შემრჩობლებებისა და პარალელური შენაზარდებისაგან განსხვავებით ბუნებაში გვხვდება აგრეთვე სხვადასხვა მინერალის კანონზომიერი შენაზარდები, რომლებსაც ეპიტაქსიურ შენაზარდებს ანუ ეპი-

ტაქსიას უწოდებენ. (ბერძნული სიტყვები: ები—ზემოდან, ტაქსი — წესიერად განლაგებული, დაყენებული). ამ შენაზარდებში ორივე მინერალს ძირითადს და მასზე მიზრდილს, უნდა ჰქონდეს უოთიერთ-პარალელური წახნაგის ან წიბოს მიმართულება. ეპიტაქსიურ შენაზარდებში მონაწილე ინდივიდებისათვის აუცილებელია კრისტალურ სტრუქტურაში შესატყვისი ბადეების არსებობა როგორც იონთა შედგენილობის, ისე მათი განლაგების (მსგავსი რიგების არსებობის) მხრივ. ამ მოვლენის საილუსტრაციოდ კარგი მაგალითია მონოკლინური ქარსის — მუსკოვიტის ($KA_2[AlSi_3O_{10}](OH)_2$) კრისტალის მესამე პინაკოიდის წახნაგზე იოდოვანი კალიუმის (KJ) პატარა კუბების მინაზარდები (ნახ. V. 42). KJ -ის კუბის L_3 ლერძი მართობია ქარსის (001)-ისადმი. ეს კანონზომიერება აიხსნება იმით, რომ როგორც ქარსს (მუსკოვიტს), (001)-ის მიმართულებით, ისე იოდოვანი კალიუმის (111)-ის მიმართულებით, თითქმის ერთნაირი ბადეები აქვს აგებული კალიუმის კატიონებით. მანძილი კალიუმის იონებს შორის ქარსში 5,18 Å, ხოლო იოდოვან კალიუმში 4,99 Å-ია.

ეპიტაქსია დასაშვებია არა მარტო სხვადასხვა შედგენილობის



ნახ. V. 43. ეპიტაქსიური შენაზარდები. ორთოკლაზე მიზრდილი კვარცი; ბ-კალიუმის მინდვრის შპატზე მიზრდილი ალბიტი; გ-დისთენის კრისტალზე მიზრდილი სტავროლითი და დ-სფალერიტის კრისტალზე მიზრდილი ცინკიტი.

მინერალებისათვის, არაქედ ერთი და იმავე შედგენილობის, მაგრამ სხვადასხვა სინგონიაში დაკრისტალებული პოლიმორფული მოდიფიკაციისათვისაც. მაკალაუად, ერთპანეთთან კანონზომიერად მიზრდილი FeS_2 -ის რომბული (მარკაზიტის) და კუბური (პირიტის) მოდიფიკაციების კრისტალები.

ბშირია კვარცისა და ორთოკლაზის კანონზომიერი შენაზარდები პეგმატიტურ ძაოლებში (ნახ. V. 43 ა) ამ შემთხვევაში კვარცის ორენტაცია განისაზღვრება იმით, რომ მის კრისტალებზე რომბოდრების მეზობელი წახნაგებით წარმოქმნილი წიბო $[12\bar{1}3]$ პარალელური უნდა იყოს ორთოკლაზის $[001]$ წიბოსი.

ეპიტაქსიური შენაზარდების ზოგიერთი მაგალითი

მინერალი საფუძველი		მინერალი მინაზარდი	
დასახელება და შედგენილობა	სინგონია	დასახელება და შედგენილობა	სინგონია
1	2	1	2
ორთოკლაზი— $K[AlSi_2O_6]$ კალუმის მინდვრის შპატი $K[AlSi_3O_8]$	მონოკლინური —	კვარცი SiO_2 ალბიტი— $Na[AlSi_3O_6]$	ტრიგონური ტრიკლინური
დისთენი— $Al_2[SiO_4]O$ სფალერიტი— ZnS მუსკოვიტი $KAl_2[AlSi_3O_{10}](OH)_2$	ტრიკლინური კუბური მონოკლინური	სტავროლიტი $FeAl_2[SiO_4]_2O_2(OH)_2$ ცინკიტი— ZnO იოდოვანი კალუმის KJ პირიტი— FeS_2 რუტოლი TiO_2 ილმენიტი $FeTiO_3$ ქალკამბირიტი $CuFeS_2$	რომბული ჰექსაგონური კუბური კუბური ტეტრაგონური ტრიგონური ტეტრაგონური
მარკაზიტი FeS_2 ჰემატიტი Fe_2O_3 ოლივინი— $(Mg,Fe)_2[SiO_4]$ ტეტრაედრიტი— $Cu_{12}Sb_4S_{13}$	რომბული ტრიგონური რომბული კუბური		

მინერალთა სამყაროში ყველაზე გავრცელებული ეპიტაქსიური შენაზარდები მოყვანილია V. 3 ტაბულაში. აქ მოყვანილი პირველი ოთხი მაგალითი მოცემულია V. 43 ნახაზზე. ეპიტაქსიას დიდი მნიშვნელობა აქვს მინერალთა წარმოშობის დასადგენად. გარდა ამისა, იგი ფართოდაა გამოყენებული სახალხო-მეურნეობის სხვადასხვა დარგში. მაგალითად, ნახევარგამტარების ტექნიკასა და მიკროელექტრონიკაში. სადაც მიკროსკოპების მუშა ელემენტი უნდა იყოს უდევფექტო, მონოკრისტალური აგებულების აფსკის სისქე არ უნდა აღემატებოდეს რამდენიმე ათეულ ანგსტრემს. ასეთ აფსკებს ამზადებენ სათანადოდ შერჩეული ნივთიერების ფუძე შრეზე საკირო მეტალის თხელი შრის მიზრდით ეპიტაქსიის კარიცების გამოყენებით

§ V. 4. ჰემატიტის სახეების გავრცელება მინერალთა სამყაროში

მინერალთა კრისტალების ფორმებისა და მათი სტრუქტურის შესწავლის შედეგად დაგროვილია მნიშვნელოვანი მასალა, რომელიც სიმეტრიის კლასების მიხედვით მინერალთა განაწილების საშუალებას იძლევა. ამ მიმართულებით საინტერესოა კ. შტრუნცის, ა. პოვარენიხის, ი. შაფრანოვსკის და სხვათა შრომები. მინერალთა განაწილება სინგონიებისა და სივრცობრივი ჯგუფების მიხედვით კრისტალოგრაფიული მინერალოგიის ერთ-ერთი მნიშვნელოვანი პრობლემაა. მინერალთა რიცხვი, რომელთათვის უკვე ზუსტადაა დადგენილი კრისტალური სტრუქტურები, დღეისათვის 1300-ს აღემატება. V. 4 ტა-

მინერალთა რაოდენობრივი განაწილება სინჯაწიელთა და სიმეტრიის სახეების მიხედვით (ი. შაფრანოვების მიხედვით)

ს-მეტრიის სახეები	პრიმიტიული	ცენტრალური	პლანარული	აქსიალური	პლან-აქსიალური	ინვერსული პრიმიტიული	ინვერსული პლანარული	მინერალთა ჯ.მი	%
სინგონიები	2	3	4	5	6	7	8	4	10
ტრიკლინური	12	76						88	65
მონოკლინური			23	14	351			393	300
რომბული			31	32	213			279	210
ტრიგონური	6	22	20	11	81			13	115
ტეტრაედრული	2	23	1	13	72	3	17	131	100
ჰექსაგონური	7	26	13	8	43	—	6	103	80
კუბური	5	30	33	1	102			171	130
სულ	32	177	129	79	865	3	23	1303	100
%/o	2.5	13.5	10	6	66	—	2	100	

ბულაში მოცემულია მათი რაოდენობრივი განაწილება სინგონიებისა და სიმეტრიის სახეების მიხედვით. ტაბულიდან კარგად ჩანს, რომ მინერალთა უმრავლესობა კრისტალდება სოლუსანაგოვანი სიმეტრიის კლასებში (სვეტი 1), ხოლო მინერალთა ყველაზე ნაკლები რიცხვი — პრიმიტიულ — საწყისი სიმეტრიის ძვირე კლასებში (სვეტი 2).

სინგონიებს შორის ყველაზე მეტი რიცხვი მინერალებისა აქვს მონოკლინურ სინგონიას — 30%, თუკა დასაშვებია, რომ ნაწილი ამ მინერალებისა ეკუთვნის ტრიკლინურ სინგონიას. მინერალები კატეგორიების მიხედვით რომ გავანაწილოთ, მივიღებთ შემდეგ. სულათს:

- დაბალი კატეგორია — 760 მინერალი — 57,5%
- საშუალო " 377 " — 29,5%
- მაღალი " 171 " — 13,0%

რადგან ბუნებაში რთული ქიმიური შედგენილობის მინერალები მეტია, ვიდრე მარტივი, ამიტომ მოყვანილ რიცხვთა თანამიმდევრობა ადასტურებს ფეოდოროვის და გროტის ემპირიულ კანონს, რომლის მიხედვითაც მარტივი ქიმიური შედგენილობის მინერალთა კრისტალები უფრო ხშირად მაღალსიმეტრიულია. მოყვანილი ტაბულა გვიჩვენებს იმასაც, რომ ბუნებაში მცირეა იმ მინერალთა რაოდენობა, რომლებიც მარჯვენა და მარცხენა ენანტიომორფულ ფორმებს იძლევა. ასეთი ფორმების წარმოშობა, როგორც ვიცით, დასაშვებია მხოლოდ მარტივი და აქსიალური სიმეტ-

ის მქონე კრისტალებისათვის (2 და 3 სვეტი), რომელთა რაოდენობა შესწავლილი მინერალების მხოლოდ 8,5%-ია. ამავე დროს უნდა გვახსოვდეს, რომ სიმეტრიის აქსიალურ სახეს ეკუთვნის ბუნებაში ყველაზე მეტად გავრცელებული მინერალი კვარცი. აქვე უნდა აღვნიშნოთ, რომ მინერალოგიური კრისტალოგრაფიის ერთ-ერთი მნიშვნელოვანი ამოცანაა მინერალის სიმეტრიასა და მისი წარმოქმნის პირობებს შორის კანონზომიერების დადგენა.

ნაწილი მეორე
სტრუქტურული კრისტალოგრაფია

თავი VI. კრისტალთა შინაგანი აგებულება

§ VI.1. მოკლე ისტორიული ცნობები

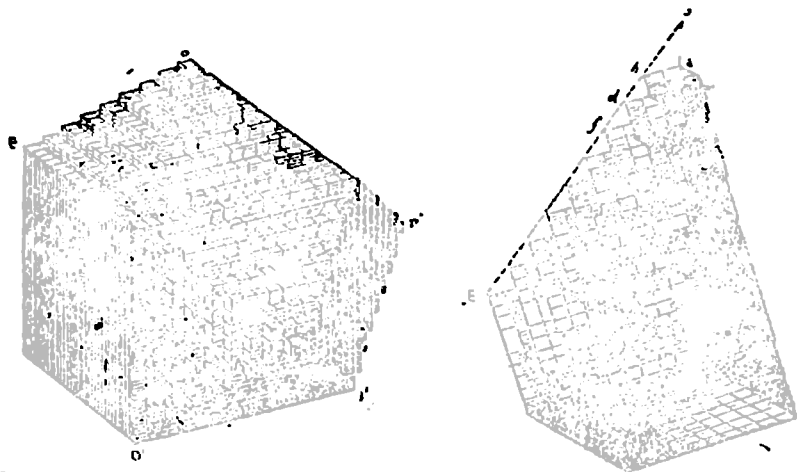
კრისტალთა წახნაგების სიმეტრიული განლაგების გამომწვევი მიზეზების დადგენას XVII საუკუნიდან სოყოლებული, მრავალი მკვლევარი ცდილობდა. საერთო მათ შეხედულებაში იყო ის მოსაზრება, რომ კრისტალთა კანონზომიერი სიმეტრიულობის ძირითადი მიზეზი მათ შინაგან აგებულებაშია. პირველი ჩამოყალიბებული თეორია ამ საკითხების შესახებ მოგვცა ფრანგმა კრისტალოგრაფმა რ. ჟ. აიუმმა XVIII საუკუნის მიწურულში. მისი აზრით ყოველი კრისტალის სტრუქტურული ერთეული შესაბამისი ფორმის პარალელპიპედი (მრავალწახნაგი). ამ „აგურების“ ურთიერთპარალელური ორიენტაციით, მაგრამ სხვადასხვა ხერხით დალაგების შედეგად შეიძლება ნებისმიერი ორიენტაციის წახნაგის მიღება. მაგალითად, კუბიდან რომბოდრეკაედრის მიღება ან რომბოდრეკიდან ტრიგონური სკალენოდრებისა (ნახ. VI. 1). ამავე დროს ელემენტარული მრავალწახნაგის ფორმა განაპირობებს კრისტალის ტექნადობის მიმართულებასაც.



რ. ჟ. აიუმი
(1743-1822)

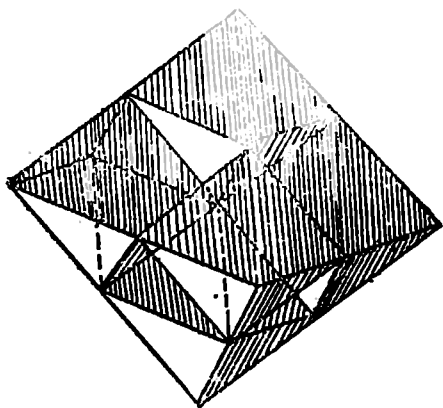
ეს თეორია ხსნის ქვამარილის (NaCl) ტექნადობას კუბის წახნაგების მიმართ ან კალციტის (CaCO_3) კრისტალების — რომბოდრის მიმართ, მაგრამ ვერ განმარტავს ფლუორიტის (CaF_2) ტექნადობას ოქტაედრის მიმართ, რადგან ოქტაედრებისაგან ვერ ავაშენებთ კრისტალს ისე, რომ ოქტაედრებმა სივრცე მთლიანად შეავსონ (ნახ. VI. 2). გარდა ამისა, აიუმის მიერ გამოთქმულ მოსაზრებას ეწინააღმდეგება ის ფაქტიც, რომ ბუნებრივი კრისტალები წნევის ზეგავლენით იკუმშება, ხოლო ერთმანეთთან მჭიდროდ მიდგმული ელემენტარ-

ული ნაწილაკები ამის საშუალებას არ იძლევა. შემდგომში ამ წინააღმდეგობების გადასაქრელად იხვლისელმა ფიზიკოსმა უ. უოლასტონმა 1813 წ. შეცვალა აიუის მრავალწახანაგები წერტილებით, რომლე-



ნახ. VI 1. კრისტალთა აგებულება აიუის მიხედვით: ა-ჰქს ე-რ ბით აგებული რომბოლოდეკედრი, ბ-რომბოედრებში აგებული ტრიკონეტრა სკალენოედრი.

ბიც მატერიალური ნაწილაკების სიძვირის ცენტრებია და ამით სათუძველი ჩაუყარა წარმოდგენას სივრცულ მესერზე. სივრცული მესერის ნებისმიერი ელემენტარული პარალელეპიპედის წვერო რომ წარმოვიდგინოთ საკოორდინაციო ღერძთა საწყისად (ნახ. VI. 3), მაშინ ამ უჯრედის პარალელური გადაადგილებით (ტრანსლაციით) სამივე ღერძის გასწვრივ მივიღებთ წერტილების (კვანძების) უსასრულო განლაგებას.

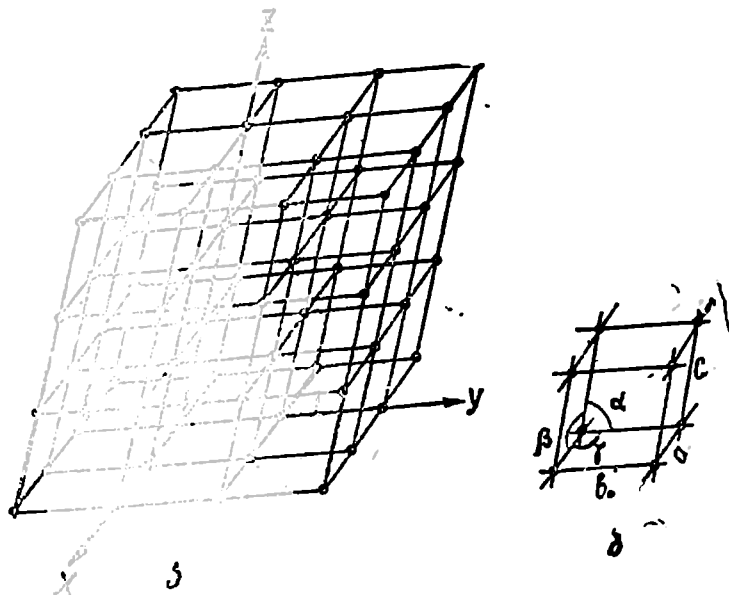


ნახ VI. 2. ოქტაედრები ურთიერთპარალელურ ორიენტაციაში სივრცის მთლიანად ვერ ივსებენ.

როგორც აღვნიშნეთ (§ 1. 2), სივრცულ მესერში ვარჩევთ კვანძებს, მათ რიგებსა და ბადეებს. სივრცული მესერის ყოველი კვანძი კრისტალის შესაძლო წვეროა, ყოველი რიგი შესაძლო წიბო და ყოველი ბადე კრისტალის შესა-

წიბო და ყოველი ბადე კრისტალის შესა-

ძლო წახნაგი. ფრანგმა მეცნიერმა ო. ბრავემ 1855 წელს დაადგინა ერთმანეთისაგან განსხვავებული სივრცული მესრის 14-ნაირი ტიპი. 1879 წელს გერმანელმა კრისტალოგრაფმა ლ. ზონკემ მიიღო 65 სივრცული ჯგუფი კრისტალურ სტრუქტურებში ნაწილაკების შესაძლო განლაგებისა, მაგრამ ვერ გაითვალისწინა უსასრულო სტრუქტურაში სიმეტრიის ელემენტთა ყველა შესაძლო ერთობლიობა. დიდმა რუსმა კრისტალოგრაფმა ე. ფიოდოროვმა გახავეითაა რა თეორიული კვლევები ამ მიმართულებით, 1890 წელს დაადგინა სიმეტრიის 230 სივრც-



ნახ. VI. 3. ტრიკლინური სინგონიის სივრცული მესერი და მისი შესაბამისი ელემენტარული უჯრედი.

ული ჯგუფის არსებობის შესაძლებლობა (ცოტა მოგვიანებით ამავე დასკვნამდე მივიღ გერმანელი მათემატიკოსი ა. შენფელსი). ე. ფიოდოროვის მიერ მიღებული ჯგუფები საყოველთაოდ აღიარებულ იქნა 1912 წელს, როდესაც კრისტალურ ნივთიერებათა სტრუქტურების შესწავლის რენტგენოსტრუქტურული კვლევის მეთოდი შემოიღეს. ამ მეთოდით დადგენილია, რომ ნებისმიერი კრისტალური ნივთიერების შემადგენელი ატომები (იონები) შეიძლება განლაგდეს მხოლოდ ერთ-ერთი ამ ჯგუფის შესაბამისად,

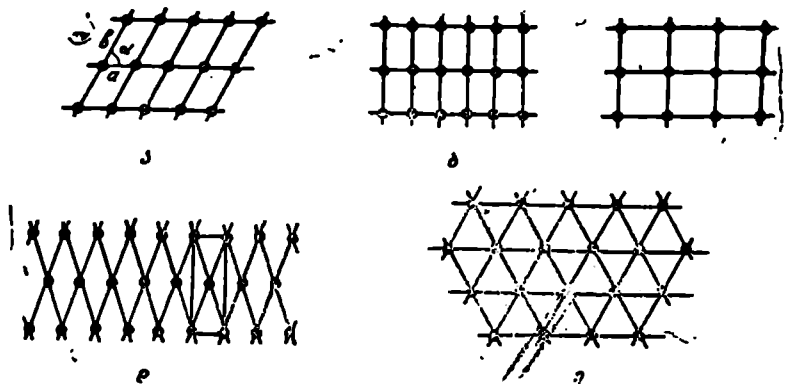
სივრცული მესერი უნდა წარმოვიდგინოთ როგორც წერტილების (კვანძების) უსასრულო სისტემა. წერტილები განლაგებულია 14-

ნაირი მესრული ტიპის მიხედვით, ბოლო კრისტალური სტრუქტურა გარკვეული ნივთიერების კრისტალში კონკრეტული. ქიმიური ელემენტის ატომების ან იონების კანონზომიერი განლაგებაა. კრისტალთა სტრუქტურული ტიპები მრავალგვარია.

§ VI. 2. ბრავეს 5 ბრტყელი ბადე და 14 სივრცული მუხარა

სივრცული მესერი არის წერტილთა უსასრულო ერთობლიობა, რომელიც წაომოიქმნება ელემენტარული პარალელებიპედის წვეროებში მოთავსებული წერტილების (კვანძების) უსასრულო გაყოფებით, სამი ერთმანეთის გადაშვეთი წიბოს მიმართულების გასწვრივ. გადაადგილება (ტრანსლაცია) ხდება უჯრედის ორიენტაციის შეუცვლელად. ცხადია, ასეთი გზით მიღებული ძესრები ერთმანეთისაგან კლემენტარული უჯრედის ფორმით და სიმეტრიით განსხვავდება.

განვიხილოთ ბრტყელ ბადეებზე კვანძების განლაგების შესაძ-



ნახ. VI. 4 ბრტყელი ბადის შესაძლო პარალელოგრამები.

ლო შემთხვევები (ნახ. VI. 4). ბადის შეზღვევული ყოველი პარალელოგრამი განისაზღვრება სამი სიდიდით: ორი გვერდით (a და b) და მათ შორის მდებარე კუთხით (α).

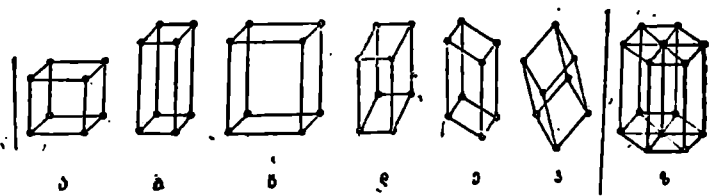
დასაშვებია შემდეგი კერძო შემთხვევები:

- 1) $a \neq b$, $\alpha \neq 90^\circ$ - პარალელოგრამის ცენტრში გაივლის L_2 (ნახ. VI.4 ა);
- 2) $a \neq b$, $\alpha = 90^\circ$ - მართკუთხედი, L_2 -ზე გაივლის $2P$ (ნახ. VI. 4 ბ);
- 3) $a = b$, $\alpha = 90^\circ$ - კვადრატი, L_4 -ზე გაივლის $4P$ (ნახ. VI. 4. გ);
- 4) $a = b$, $\alpha \neq 90^\circ$ - რომბი, L_2 -ზე გაივლის $2P$ (ნახ. VI. 4. დ);
- 5) $a = b$, $\alpha = 120^\circ$ - ექვსკუთხედში L_6 -ზე გაივლის $6P$
ან $\alpha = 60^\circ$ - სამკუთხედში L_3 -ზე გაივლის $3P$ (ნახ. VI. 4 ე).

ამრიგად, ბრტყელი ბადის ელემენტარულ უჯრედს აქვს პარალელოგრამის, მართკუთხედის, რომბის, ტოლგვერდა სამკუთხედის ან კვადრატის ფორმა. როგორც VI. 4 ნახაზიდან ჩანს, ელემენტარული უჯრედი შეიძლება იყოს მარტივი ან ცენტრირებული. ყოველ მარტივ პარალელოგრამზე მოდის ერთი კვანძი (რადგან მის წვეროზე მდებარე კვანძი ერთდროულად ემსახურება 4-4 ასეთსავე პარალელოგრამს), ხოლო ცენტრირებულ უჯრედზე—ორი (ცენტრში მჯდომი კვანძი მხოლოდ მას ეკუთვნის).

სივრცული მესრის ელემენტარული პარალელებიპედის ფორმას განსაზღვრავს 6 სიდიდე: a , b და c წიბოები და მათ შორის მოთავსებული α , β და γ კუთხეები (ნახ. VI. 3 ბ).

გამეორებითი პარალელებიპედი (ელემენტარული უჯრედი) ბრავეს წესის მიხედვით ისე უნდა შეირჩეს, რომ ჰქონდეს მთელი მესრის სიმეტრიის მსგავსი სიმეტრია, მართი კუთხეების ჩაოდენობა მაქსიმალური, ხოლო მოცულობა მინიმალური (იხ. §1.2). შეიდი სინგონიის შესაბამისად დასაშვებია 7-ნაირი ელემენტარული პარალელებიპედის არსებობა (ნახ. VI. 5).

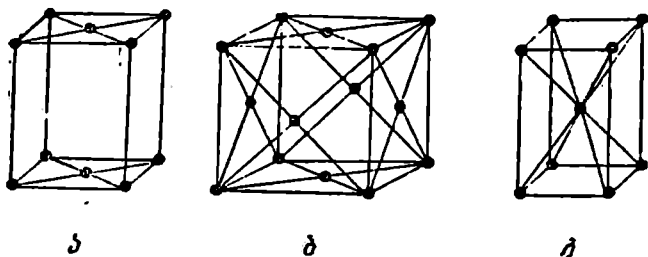


ნახ. VI.5. სივრცული მესრის ელემენტარული პარალელებიპედის ფორმები:

- ა—კუბური $a = b = c$, $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$;
 - ბ—ტეტრაგონური $a = b \neq c$, $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$;
 - გ—რომბული $a \neq b \neq c$, $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$;
 - დ—მონოკლინური $a \neq b \neq c$, $\alpha = \gamma = 90^\circ \neq \beta$;
 - ე—ტრიკლინური $a \neq b \neq c$, $\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$;
 - ვ—ტრიგონური $a = b = c$, $\alpha = \beta = \gamma = 120^\circ$;
 - ზ—ჰექსაგონური $a = b \neq c$, $\alpha = \beta = 90^\circ$, $\gamma = 120^\circ$;
- (გამოყოფილია ჰექსაგონური ფუბუნტარირებული პრიზმის ერთი მესხედი ნაწილი).

გარდა ამ შეიდი უჯრედისა, რომლებშიც კვანძები განლაგებულია მხოლოდ პარალელებიპედის წვეროებში (ბრავემ მათ პრიმიტიული (P) უჯრედები უწოდა), დასაშვებია უჯრედები, რომლებშიც ბრტყელი ბადის ცენტრირებული უჯრედის ანალოგიურად (ნახ. VI. 4. დ), აქვთ კვანძი როგორც პარალელებიპედის წახნაგების ცენტრში (ფუბუნებზე ან ყველა წახნაგზე), ისე სამგანზომილებიანი უჯრედის

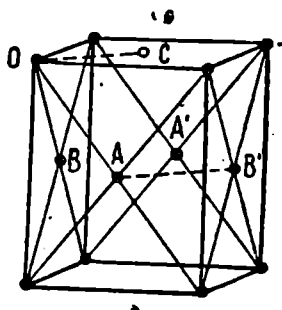
ცენტრში. ასეთ უჯრედებს შესაბამისად ფუძეცენტრირებული (C), წახნაგცენტრირებული (F) და სხეულცენტრირებული (I) უჯრედები ეწოდება (ნახ. VI.6). სხვა რომელიმე ვარიანტი ელემენტარულ უჯრედში კვანძების განლაგებისა, გამოირიცხება. დავეშვათ ისეთი ელემენტარული პარალელეპიპედის არსებობა, რომელშიც



ნახ. VI. 6. ა-ფუძეცენტრირებული (C), ბ-წახნაგცენტრირებული (F), გ-სხეულცენტრირებული (I) უჯრედები.




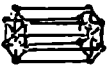








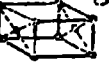

ცენტრირებულია არა ერთი, არამედ ორი წყვილი წახნაგებისა (ნახ. VI. 7.). მაშინ ამ უჯრედის შესაბამის მესერში AB' კვანძების რიგის მსკავესი პარალელური რიგები უნდა გადიოდეს სხვა კვანძებზეც. მაგალითად, O კვანძზე. შესაბამისად C წერტილში უნდა იყოს სათანადო კვანძი და ელემენტარული უჯრედი გახდებოდა უკვე ცნობილი წახნაგცენტრირებული (F) ტიპისა

ო. ბრავემ დაადგინა, რომ სამივე ამ დამატებითი ელემენტარული უჯრედის არსებობა დასაშვებია მხოლოდ რომელი სინგონიისათვის. დანარჩენი სინგონიებისათვის კი მხოლოდ ზოგიერთი მათგანი ან არც ერთი, ასე. მაგალითად, ტეტრაგონურ სინგონიაში პრიმიტიულის გარდა დასაშვებია აგრეთვე სხეულცენტრირებული ელემენტარული უჯრედის არსებობა. მონოკლინურ სინგონიაში დამატებით არსებობს ფუძეცენტრირებული უჯრედი, კუბურში კი წახნაგცენტრირებული და სხეულცენტრირებული უჯრედები. დანარჩენ სინგონიებში გვაქვს მხოლოდ პრიმიტიული უჯრედები. ამგვარად, ო. ბრავემ დაადგინა 14 სივრცული მესრის ტიპის არსებობა (ნახ. VI. 8).



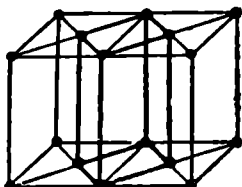
ნახ. VI. 7 ორი წყვილი წახნაგცენტრირებული უჯრედის არსებობა დაუშვებელია.

აღნიშნულის ნათელსაყოფად დაეუშვათ, რომ ტეტრაგონურ სიგონიაში არსებობს ფუტკენცტრირებული (C) და წახნაგცენტრირებული (F) ფჯრედები. მაგრამ, როგორც IV. 9-ის ნახაზიდან ჩანს,

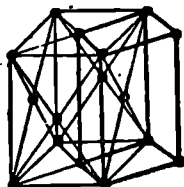
პარალელპიპედი	$2 \cdot \frac{1}{2} \cdot 1$ საღი სპი- სართლი სიღი (2-1-1-2-1-1)			
უბუჩი	 P		 G	 F
ქვადრატული სართლი	 P			
ბრიტანული	 R			
გაბრიტული სართლი	 P		 G	
სართლი	 P	 C	 G	 F
გრძობილი სართლი	 P	 C		
ბილიკული სართლი	 P			
სიგონი გარე ფეხი		პარალელპიპედი (F)	უბუჩი (C)	სართლი (G)
				სართლი (F)

ნახ. VI. 8. ბრევეს 14 მესრის ელემენტარული უჯრედი.

ფუძეცენტრირებული (C) უჯრედის შესაბამის სივრცულ მესერში საწყისი ელემენტარული უჯრედის სახით შეიძლება გამოვეყოთ ორჯერ ნაკლები მოცულობის ტეტრაგონური პრიმიტიული უჯრედი, წახნაგცენტრირებული უჯრედის შესაბამისი მესიდახ კი — ისევე ორჯერ უფრო ნაკლები მოცულობის სხეულცენტრირებული უჯრედი (ნახ. VI. 9, ბ). ამგვარად, ტეტრაგონურ სინგონიაში დასაშვებია მხოლოდ პრიმიტიული (P) და სხეულცენტრირებული (I) ბოავეს ელემენტარული უჯრედები.



ა

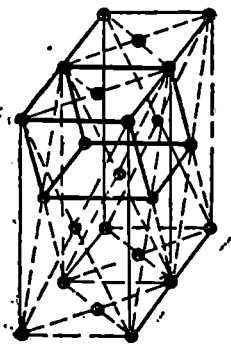


ბ

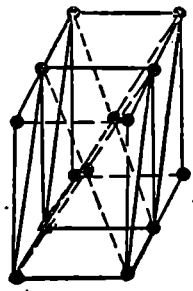
ნახ. VI. 9. ტეტრაგონური-სინგონიის ფუძე (ა) და წახნაგცენტრირებული (ბ) მესრის ვარიანტები სათანადოდ დიფერენციალური პრიმიტიული და სხეულცენტრირებულ მესრებში.

თუ დაეშვებით მონოკლინურ სინგონიაში (P) წახნაგ-და (I) სხეულცენტრირებული მესრებს არსებობას, მათ შესაბამის სივრცულ მესერში შეიძლება გამოვეყოთ ფუძეცენტრირებული ელემენტარული უჯრედი (ნახ. VI. 10). ეს ადასტურებს, რომ მონოკლინურ-სინგონიაში დასაშვებია ბრავეს მხოლოდ პრიმიტიული (P) და ფუძე-

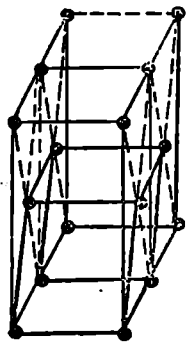
ცენტრირებული (C) უჯრედის არსებობა.



ა



ბ



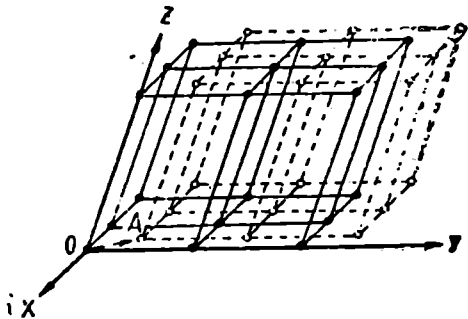
გ

ნახ. VI. 10 მონოკლინურ სინგონიაში წახნაგცენტრირებული ვარიანტი დიფერენციალური ფუძეცენტრირებულად (ა), სხეულცენტრირებული — A-გვერდცენტრირებულად (ბ) და B-გვერდცენტრირებული — პრიმიტიული მესრად (გ).

ცენტრირებული (C) უჯრედის არსებობა. კუბურ სინგონიაში ფუძეცენტრირებული უჯრედი არ არსებობს.

ამის დასამტკიცებლად დავუშვათ კვანძების არსებობა კუბის ორი მოპირდაპირე წახნაგის ცენტრში. მაშინ L_3 ლერძის არსებობის გამო აუცილებელია, რომ დანარჩენი ოთხი წახნაგიც ცენტრირებული იყოს და მივიღებთ წახნაგცენტრირებულ (F) უჯრედს. ამრიგად, კუბურ სინგონიაში დასაშვებია მხოლოდ პრიმიტიული (P), სხეულცენტრირებული (I) და წახნაგცენტრირებული (F) უჯრედები.

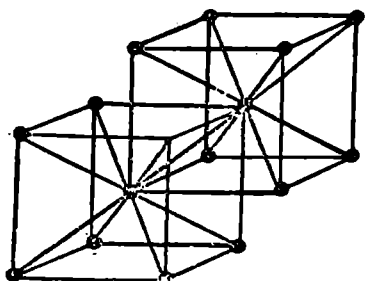
სივრცული მესერი, რომელიც აგებულია პრიმიტიული უჯრედის ტრანსლაციით, მარტივი მესერია. რთული მესერი კი წარმოიქმნება ისეთი უჯრედებისაგან, რომლებშიც კვანძები გარდა წვეროებისა, გან-



ნახ. VI. 11. ორი პრიმიტიული მესრით შედგენილი რთული სივრცული მესერი.

ლაგებულია აგრეთვე ან წახნაგებზე, ანდა უჯრედის შიგნით. რთული მესერი შეიქმნება მივიღოთ აგრეთვე ერთმანეთში ჩადგმული ბრავეს ორი ან მეტი მესრისაგან. VI. 11 ნახაზზე წარმოდგენილია რთული მესერი, რომელიც შედგენილია ერთ პრიმიტიულ მესერში (მუქი

რგოლები) მეორე პრიმიტიული მესრის (თეთრი რგოლები) ჩადგმით. მეორე მესრის კვანძები პირველის მიმართ გადაადგილებულია OA მანძილით.



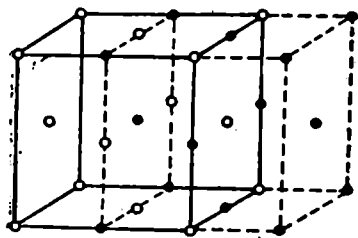
ნახ VI. 12. ორი P კუბური უჯრედი ერთმანეთშია ჩაძვარი კუბის დიაგონალის სიგრძის ნახევარ მანძილზე გადაადგილებით.

რამდენიმე ელემენტისაგან შედგენილი რეალური კრისტალის სტრუქტურა შეგვიძლია წარმოვიდგინოთ როგორც ერთმანეთში ჩადგმული ბრავეს მესრები. მაგალითად, თუ ორი კუბური პრიმიტიული უჯრედი ისეა ერთმანეთში ჩაძვარი, რომ კუბის დიაგონალის სიგრძის ნახევრითაა გადაადგილებული ერთმა-

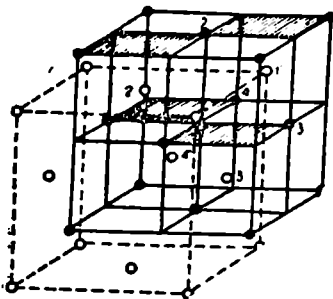
ნეთის მიმართ (ნახ. VI. 12). ასეთ შემთხვევაში მივიღებთ I კუბურ მესერს. როდესაც ორივე უჯრედი ვს კვანძები ერთნაირია, მაგალითად, წარმოდგენილია რკინის ატომებით, მივიღებთ αFe -ის კრისტალურ სტრუქტურას. ხოლო, თუ უჯრედის კვანძები ერთმანეთისაგან განს-

ხვადდება, მაგალითად, ერთი მათგანი Cl -ის იონებით არის წარმოდგენილი, ხოლო მეორე — Ca -ის იონებით, მივიღებთ $CaCl$ ის კრისტალურ სტრუქტურას; აქ ელემენტარული უჯრედი ჰექსაედრის ფორმისაა, რომლის ცენტრში Ca -ის კატიონია, ხოლო წვეროებში — Cl -ის ანიონები (ან-პირიქით) (იხ. ნახ. VI. 15 ა).

კრისტალური მესერი შეიძლება წარმოიქმნას ორი F -კუბური ელემენტარული უჯრედის ერთმანეთში სხვადასხვა ხერხით ჩადგმით. მაგალითად, ჩავდეთ ეს უჯრედები ერთიმეორეში ისე, რომ ერთი მათგანი წავენაცვლოთ მეორეს: ელემენტარული კუბის წიბოს სიგრძის



ა



ბ

ნახ. VI. 13. ორი F კუბური უჯრედი ერთმანეთში ჩადგმულია სხვადასხვა ხერხით: ა-უჯრედი გადაადგილებულია ელემენტარული კუბის წიბოს გასწვრივ, მისი სიგრძის ნახევარი მანძილით; ბ-უჯრედი გადაადგილებულია ელემენტარული კუბის დიაგონალის გასწვრივ მისი სიგრძის მეოთხედი მანძილით.

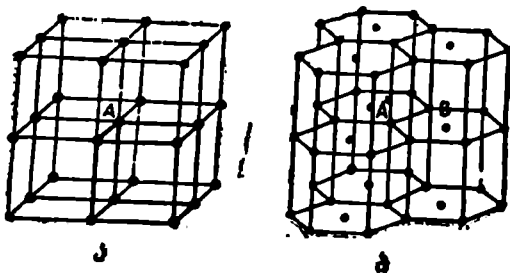
ნახევარი მანძილით (ნახ. VI. 13. ა). ასე მიღებული კუბური მესრის ყველა წიბოს გასწვრივ გვექნება თეთრი და შავი კვანძების მონაცვლეობა. ისინი ერთმანეთისაგან ტოლი მანძილით იქნება დაშორებული. თუ ერთი ფერის კვანძები (მაგალითად, თეთრი რგოლები) ქლორის ანიონები იქნება, ხოლო მეორე ფერის კვანძები (შავი რგოლები) — ნატრიუმის კატიონები, მივიღებთ ქვამარილის ($NaCl$) კრისტალურ სტრუქტურას (ნახ. VI. 15. ბ).

იგივე F ტიპის კუბური უჯრედების ერთმანეთში ისე ჩასმით, რომ ისინი ერთმანეთს დავაცილოთ კუბის დიაგონალის გასწვრივ მისი სიგრძის მეოთხედი მანძილით, მივიღებთ რთულ მესერს (ნახ. VI. 13. ბ). გადაადგილებული უჯრედის მხოლოდ ოთხი კვანძი ($1', 2', 3'$ და $4'$) მოყვება ძირითად უჯრედში, დანარჩენი კვანძები კი მის გარეშე განლაგდება. თუ ორივე უჯრედის კვანძები ერთი ქიმიური ელემენტისაგან შედგება, მაგალითად, ნახშირბადის ატომებისაგან, მივიღებთ ალმასის კრისტალურ სტრუქტურას, ხოლო თუ თითოეული

უჯრედის კვანძები სხვადასხვა ელემენტისაგან შედგება, მაგალითად, თუთიის კატიონებისა და გოგირდის ანიონებისაგან, მაშინ აღნიშნული გადაადგილებით მივიღებთ სფალერიტის (ZnS) კრისტალურ სტრუქტურას (ნახ. VI. 15 გ).

ამგვარად, რივ ნივთიერებათა კრისტალური სტრუქტურები შეიძლება წარმოვიდგინოთ როგორც ერთმანეთში სხვადასხვა ზერხით ჩადგმული ბრავეს მესრები, რომელთა კვანძები ერთნაირი ან სხვადასხვა ელემენტებისაგან შედგება.

კრისტალური სტრუქტურების ყველა შესაძლო სახესხვაობა გაერთიანებულია 230 სივრცულ ჯგუფში, რომლებიც დაადგინა ე. ფიო-



ნახ. VI. 14. მარტივი მესრის A კვანძი ერთდროულად ეკუთვნის 8 უჯრედს (ა), A' კვანძი ერთდროულად ემსახურება 6 ჰექსაედრულ პრიზმას, B კვანძი კი ორ პრიზმას (ბ).

დოროვემა დაუსრულებელი ფიგურების სიმეტრიის ელემენტთა ერთობლიობებისათვის.

იმისათვის, რომ გამოვიანგარიშოთ, რამდენი კვანძი მოდის ერთ ელემენტარულ უჯრედზე, საკმარისია გავითვალისწინოთ, რომ პარალელეპედის (კუბის) წვეროზე მდებარე კვანძი ერთდროულად ეკუთვნის 8 ასეთსავე უჯრედს და მაშასადამე, ერთ უჯრედს ეკუთვნის ამ კვანძის მხოლოდ $1/8$. პარალელეპედის რვავე წვეროზე განლაგებული კვანძებიდან უჯრედზე მოდის $8 \times 1/8 = 1$ კვანძი (ნახ. VI. 14, ა). ჰექსაგონური სინგონიის მარტივ უჯრედს აქვს ჰექსაგონური პრიზმის ფორმა, სადაც კვანძები განლაგებულია პრიზმის 12 წვეროში და ფუძეების (ბაზოპინაკოიდის) ცენტრში. ჰექსაგონური პრიზმის წვეროზე მდებარე კვანძი ერთდროულად ემსახურება 6, ხოლო ფუძეზე მდებარე — 2 პრიზმას (ნახ. VI. 14, ბ). ამგვარად, ჰექსაგონური სინგონიის

მარტივ უჯრედზე მოდის სამი კვანძი $\left(12 \times \frac{1}{6}\right) + \left(2 \times \frac{1}{2}\right) = 3$.

ცხადია, რომ, თუ აღნიშნულ ელემენტარულ უჯრედს წარმოვიდგენთ

შისი 1/3 ნაწილის სახით, მასზე მოვა მხოლოდ ერთი კვანძი.

რთული სტრუქტურის ელემენტარულ უჯრედში კვანძები, გარდა წვეროსა და წახნაგისა. შეიძლება განლაგდნენ აგრეთვე მის წიბოზე და უჯრედის შიგნით. ადვილი დასადგენია, რომ წიბოზე მოთავსებული კვანძი ერთდროულად ეკუთვნის 4 უჯრედს, ხოლო უჯრედის შიგნით მოთავსებული — მხოლოდ ამ უჯრედს. ამის გათვალისწინებით შეიძლება გამოვიანგარიშოთ კვანძთა რაოდენობა ნებისმიერი სტრუქტურის ელემენტარული უჯრედისათვის, ხოლო ბრავეს შერის ელემენტარული უჯრედებისათვის კვანძთა რაოდენობა იქნება:

$$\text{პრიმიტიულ უჯრედში } (P) - (8 \times 1/8) = 1$$

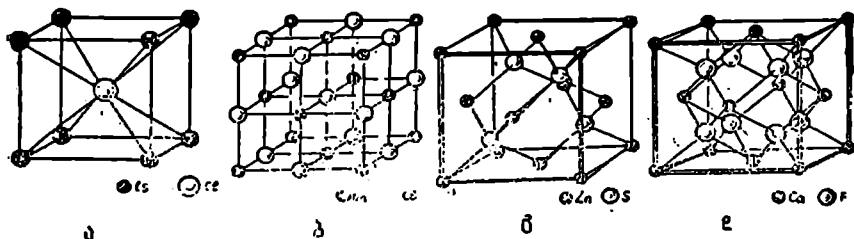
$$\text{ფუძეცენტრიებულ } (C) - (8 \times 1/8) + (2 \times 1/2) = 2$$

$$\text{სხეულცენტრიებულ } (I) - (8 \times 1/8) + 1 = 2$$

$$\text{წახნაგცენტრიებულ } (F) - (8 \times 1/8) + (6 \times 1/2) = 4$$

ანალოგიური გამოანგარიშებით შეიძლება გამოვითვალოთ ნებისმიერი სტრუქტურის ელემენტარულ უჯრედში შეყავალ ატომთა ონთა ან სხვა სტრუქტურულ ერთეულთა რაოდენობა. განვიხილოთ რამდენიმე მაგალითი:

მაგალითი 1. ცეზიუმის ქლორიდის (CsCl) ელემენტარულ უჯრედში (ნახ. VI. 15 ა) Cs-ის კატიონები განლაგებულია კუბის წვე-



ნახ. VI. 15. ა-ცეზიუმის ქლორიდის, ბ-ქვამარილის, გ-სფალერიტის და დ-ფლუორიტი სტრუქტურები.

რობებში და ამიტომ უჯრედზე მოდის ცეზიუმის მხოლოდ ერთი იონი ($8 \times 1/8 = 1$), ხოლო Cl-ის ერთადერთი იონი მოთავსებულია უჯრედის შიგნით და ეკუთვნის მხოლოდ ამ უჯრედს. ამრიგად, ელემენტარულ უჯრედში გვაქვს 1 (CsCl) ე. ი. $Z = 1$ (ამ შემთხვევაში Z -ით აღნიშნულია ფორმულური ერთეულის (CsCl) რიცხვი).

მაგალითი 2. ქვამარილის (N_2Cl) ელემენტარულ უჯრედში (ნახ. VI. 15. ბ) N_2 -ის კატიონები ქანიან კუბურ წახნაგცენტრიებულ უჯრედს და ამიტომ მათი რაოდენობა ოთხია ($8 \times 1/8) + (6 \times 1/2) = 4$.

Cl-ის ანიონების რიცხვიც ოთხია, რადგან თორმეტი მათგანი მოთავსებულია ელემენტარული კუბის წიბოებზე ($12 \times 1/4 = 3$) და ერთი უჯრედის შიგნით. ამგვარად, ელემენტარულ უჯრედში გვაქვს 4 (NaCl). ე. ი. $Z = 4$.

მაგალითი 3. სტალეიტის (ZnS) ელემენტარულ უჯრედში (ნახ. VI. 15. გ) თუთიის კუბის რაოდენობაა $(8 \times 1/8) + (6 \times 1/2) = 4$. ხოლო გოგირდის ოთხივე ანიონი მოთავსებულია უჯრედის შიგნით, ე. ი. გვაქვს Zn_4S_4 ან 4 (ZnS), მაშასადაე. $Z = 4$.

მაგალითი 4. ფლუორიტის შემთხვევაში (ნახ. VI. 15. დ) Ca-ის კატიონების რიცხვია $(8 \times 1/8) + (6 \times 1/2) = 4$, ხოლო F-ის ანიონების რიცხვი 8, რადგან რვავე მოთავსებულია უჯრედის შიგნით. მაშასადაე, გვაქვს Ca_4F_8 , ანუ $4CaF_2$.

§ VI. 3. კრისტალთა ხტრუტურების სიმეტრიის ელემენტები

გეომეტრიული კრისტალოგრაფიის კუბში კრისტალური მრავალწახნაგებისათვის (დასაულებელი ფიგურებისათვის) ჩვენ განვიხილეთ ოთხი სახის სიმეტრიის ელემენტი: სიმეტრიის სიბრტყე (P), სიმეტრიის ღერძი (L), ინვერსიის ცენტრი (C) და ინვერსიის ღერძი (G_i). სულ დასრულებულ ფიგურებში შეგვხვდა სიმეტრიის 7 სხვადასხვა ელემენტი — P, L_2, L_3, L_4, L_6, C და G_i (იხ. § II. 1) რომლებიც განსაზღვრავენ სიმეტრიის 32 კლასის არსებობას.

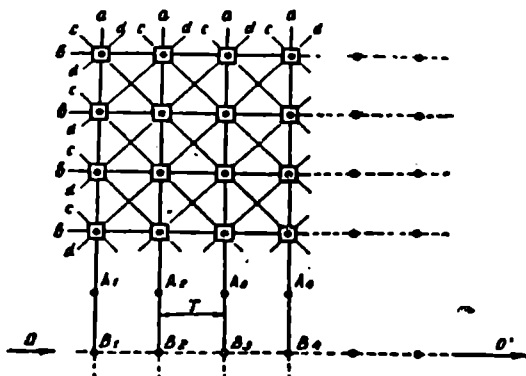
ჩამოთვლილი ელემენტები არსებობენ აგრეთვე კრისტალთა სტრუქტურებშიც. მაგრამ აქ წერტილთა განლაგება უსასრულოდ შეორდება ყველა მიმართულებით, ამიტომ ამ 7 ელემენტს ემატება სიმეტრიის სხვა ელემენტებიც, რომლებიც, უფრო რთულ სიმეტრიულ გარდაქმნებს მოიცავენ, როგორცაა ტრანსლაცია, სრიალი არეკვლა და ხრახნული ბრუნვა.

კრისტალთა სტრუქტურის სიმეტრიის ელემენტებს ხშირად უწოდებენ აგრეთვე უსასრულო ფაგუუების სიმეტრიის ელემენტებს. სასრულო ფაგუუების სიმეტრიას მაკროსიმეტრიას უწოდებენ, ხოლო უსასრულო ფიგურებისას — მიკროსიმეტრიას.

პირველ რიგში უნდა აღინიშნოს, რომ კრისტალურ მესერში (უსასრულო ფაგუუში) სიმეტრიის ყოველი ელემენტი უსასრულოდ მოქმედებს, ე. ი. აქვს უსასრულოდ ბევრი ასეთივე პარალელური ელემენტი. (ნახ. VI. 16).

კრისტალური სტრუქტურისა და მისი დამახასიათებელი სივრცული მესრის ძირითადი თვისებაა უსასრულო პერიოდულობა მაგალითად, მესრის ორი წერტილი შეიძლება შეუთავსდეს ერთმანეთს გარკვეული მიმართულებით გადაადგილების (ტრანსლაციის) საშუალებით.

ტრანსლაციის ღერძი არის ისეთი მიმართულება უსასრულო ფიგურაში, რომლის გასწვრივ განსაზღვრულ მანძილზე გადაადგილებით ფიგურა თავის თავს შეუთავსდება. მაგალითად, თუ A_2 კვანძს გადავაადგილებთ T მანძილით მარცხნიდან მარჯვნივ A_3 კვანძის ადგილას (ნახ. VI. 16). მაშინ, A_3 კვანძი შეუთავსდება A_4 ს, ხოლო A_2



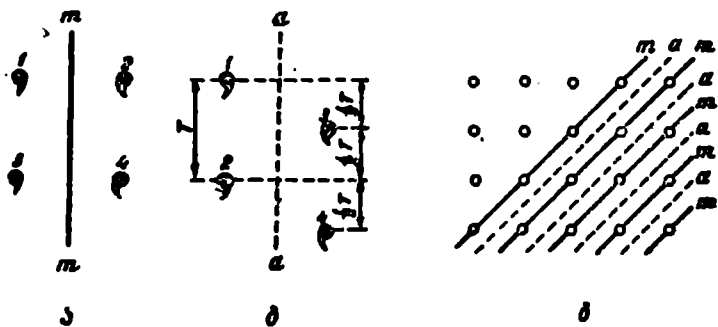
ნახ. VI. 16. ტეტრაგონური ტიპის მესრის (COI) წახნაგზე გაელის მეოთხე რკის სიმეტრიის მრავალი ღერძი და სიმეტრიის სიბრტყეები a , b , c . T —ტრანსლაციის პერიოდი.

კვანძის ადგილას მოთავსდება A_1 კვანძი. შემდეგ სათანადოდ გადაინაცვლებენ $B_1 \rightarrow B_2 \rightarrow B_3 \rightarrow B_4$ ში და ა. შ. საბოლოოდ მთელი მესერი გადაადგილდება T მანძილით და შეუთავსდება თავის თავს (ელემენტარული ტრანსლაცია). $O - O'$ მიმართულება იქნება ტრანსლაციის ღერძი. გადაადგილების მინიმალურ მანძილს ტრანსლაციის პერიოდს (ბიჯს) უწოდებენ. ცხადია, რომ მესერში ტრანსლაციის ღერძები სხვადასხვა მიმართულებით გაივლიან და გადაადგილების ბიჯი დამოკიდებულია მესრის ელემენტარული უჯრედის ფორმაზე.

მესრის გარკვეული ბიჯით ტრანსლაცია (გადაადგილება) შედის დაუსრულებელი ფიგურების სიმეტრიულ გარდაქმნებში. ტრანსლაციის შერწყმა სიმეტრიის სიბრტყეებისა და ღერძების მოქმედებასთან წარმოშობს სიმეტრიის ორ ახალ ელემენტს: სრიალა არეკვლის სიმეტრიის სიბრტყეს და ხრახნულ ღერძს.

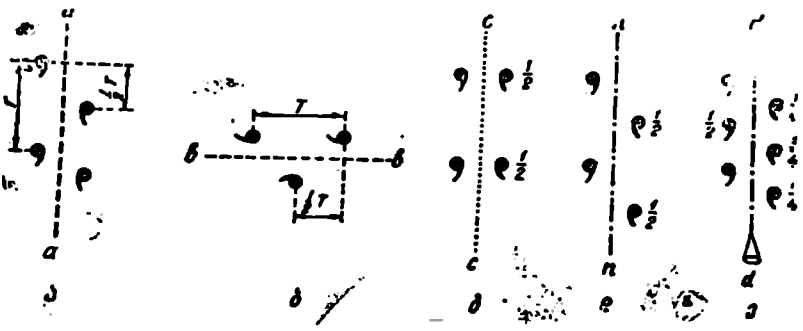
სრიალა არეკვლის სიბრტყე დაუსრულებელი ფიგურის ისეთი წარმოსახვითი სიბრტყეა, რომელშიც ფიგურის ერთი ხხარე არეკვლის შემდეგ მხოლოდ ამ სიბრტყის პარალელურად სათანადო ბიჯით გადაადგილებისას შეუთავსდება მეორე ხხარეს. VI. 17 ნახაზზე ნაჩვენებია კრისტალური მესრის სიმეტრიის ჩვეულებრივი არეკვლის სიბრტყე ($m - m$); კვანძები 1 და 3 (გამოსახული მძიმეებით) ამ სიბრტყეში არეკვლის შემდეგ შეუთავსდებიან 2 და 4 კვანძებს. VI. 17 ბ ნახაზზე კი ნაჩვენებია სრიალა არეკვლის სიბრტყე ($a - a$), რომელშიც არეკვლის შემდეგ 1 და 2 კვანძები უნდა გადაადგილდნენ.

($a-n$)-ს გასწვრივ $1/2 T$ ბიჯით და მაშინ შეუთავსდებიან 3 და 4 კვანძებს. VI. 17 გ ნახაზზე ნაჩვენებია მარტივი ტეტრაგონური მესრის ბადეზე არეკვლის სიმეტრიის სიბრტყეებისა (ძთლიანი ხაზები) და სრიალა არეკვლის სიბრტყეების (წყვეტილი ხაზები) მონაცულობა. სრიალა არეკვლის სიბრტყე შეიძლება იყოს ხუთნაირი. მათ შო-



ნახ. VI. 17. სიმეტრიის სიბრტყეები: ა-არეკვლის სიბრტყე ($m-m$), ბ-სრიალა არეკვლის სიბრტყე ($a-a$), გ-მარტივი ტეტრაგონური მესრის ბრტყელ ბადეზე m და a სიბრტყეების მონაცულობა.

რის სამში (a , b და c) სრიალის მიმართულება ემთხვევა სათანადოდ x , y და z კოორდინატთა ღერძების მიმართულებებს (ნახ. VI. 18, ა, ბ, გ). დანარჩენ ორში (n და d) გადაადგილება ხდება დიაგონალის

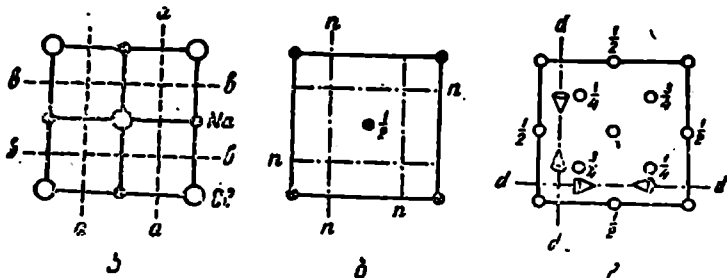


ნახ. VI. 18. ა. ბ. გ. n და d სრიალა არეკვლის სიბრტყეები (წილადებით აღნიშნულია ნაწილაკების გაწვავების სიმაღლე ნახაზის სიორტყის მართობი მიმართულებით და გამოისახება ელემენტარული უჯრედის მთელი სიმაღლის ნაწილით).

მიმართულებით: ელემენტარული უჯრედის წახნაგის დიაგონალის სიგრძის $1/2$ ან $1/4$ მანძილზე (ნახ. VI. 18 დ და ე). n სიბრტყე აღდი-

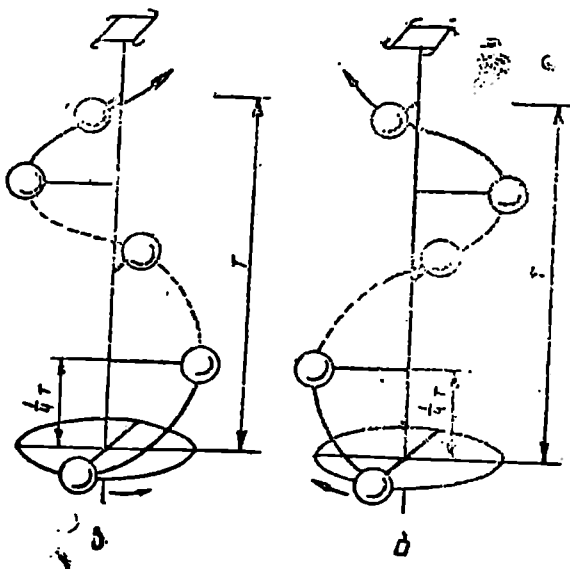
ლი დასადგენია J კუბური ტიპის მესრებში, ხოლო d სიბრტყე გაივლის ჰექაედრის წახნაგების პარალელურად ალმასის კრისტალური სტრუქტურის ელემენტარულ უჯრედში (ნახ. VI. 19. ბ და გ).

სიმეტრიის ხრახნული ღერძი არის უსასრულო ფიგურა



ნახ. VI. 19. ა-გ და ხ სრიალა არეკვლის სიბრტყეები NaCl -ის სტრუქტურაში. ბ-ნ: სრიალა არეკვლის სიბრტყე α -რკინის სტრუქტურაში. გ-დ სრიალა არეკვლის სიბრტყე ალმასის სტრუქტურაში.

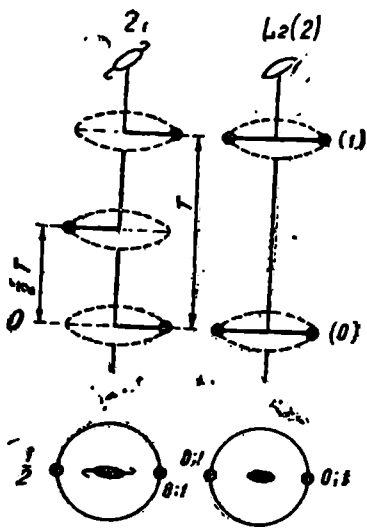
რაც ღერძი, რომლის გარშემოც დიფრაქცის გარკვეული კუთხით შემორუნებით და მისი ღერძის გასწვრივ სათანადო მანძილზე გადაადგილ-



ნახ. VI. 20. ა-მარჯვენა და ბ-მარცხენა მეოთხე რიგის ხრახნული ღერძები.

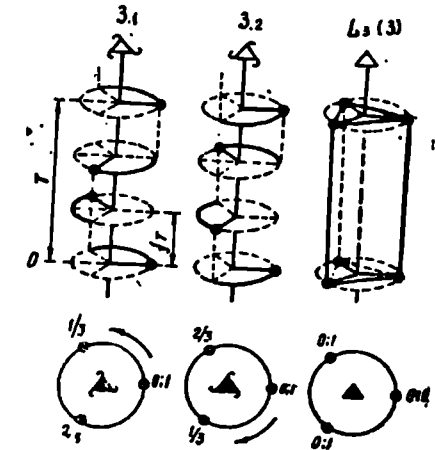
ებით ნაკეთი შეუთავსდება თავის თავს. სიმეტრიისა და ინვერსიის ლერძების ანალოგიურად, ხრახნული ლერძებიც შეიძლება იყოს მეორე მესამე, მეოთხე და მეექვსე რიგისა შესაბამისი ელემენტარული მობრუნების კუთხით. არჩევენ მარჯვენა და მარცხენა ხრახნულ ლერძებს: როცა ხრახნულ ლერძებს ვუყუებთ ტრანსლაციის მიმართულების გასწვრივ და კვანძები ღერძის გაჩემძო საათის ისრის მიმართულებით ბრუნავს, მაშინ ღერძი მარჯვენაა (ნახ. VI. 20. ა), საწინააღმდეგო შემთხვევაში ხრახნული ღერძი მარცხენა იქნება (ნახ. VI. 20. ბ). ხრახნულ ლერძებს არჩევენ აგრეთვე გადაადგილების ბიჯის სიდიდის მიხედვითაც — გადაადგილების ბიჯი შეიძლება იყოს ელემენტარული ტრანსლაციის ნახევარი, მესამედი, მეოთხედა ან ძვექვევი.

მეორე რიგის ხრახნული ღერძი (2_1) გულისხმობს კვანძების შემობრუნებას 180° -ით და მათ გადაადგილებას ელემენტარული ტრანსლაციის $1/2$ მანძილით (ნახ. VI. 21). რადგან ასეთ შემთხვევაში სულერთია, რა მიმართულებით შემობრუნდება კვანძები — საათის ისრის მიმართულებით, თუ საწინააღმდეგოდ, ამიტომ მეორე რიგის



ნახ. VI. 21. მეორე რიგის სიმეტრიის ლერძები: ხრახნული (2_1) და მობრუნების (L_2) ღერძი.

შემობრუნდება კვანძები — საათის ისრის მიმართულებით, თუ საწინააღმდეგოდ, ამიტომ მეორე რიგის



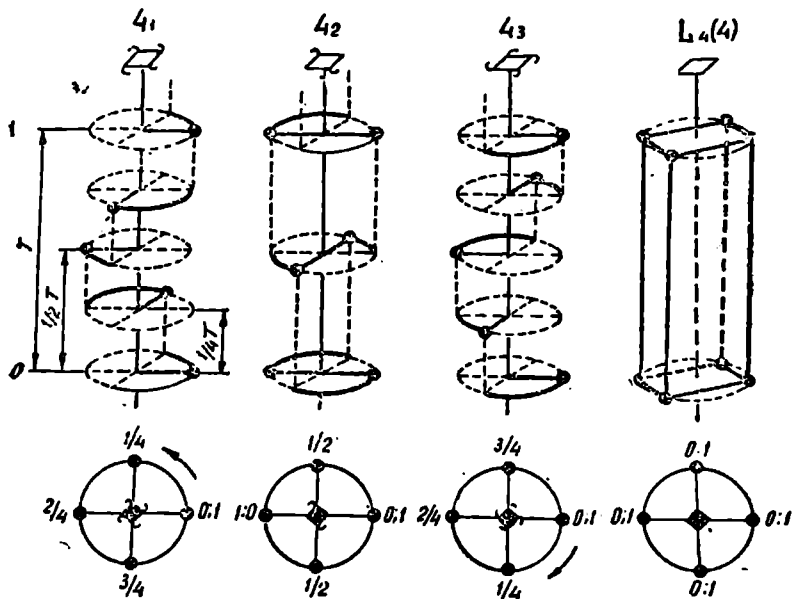
ნახ. VI. 22. სიმეტრიის მესამე რიგის ხრახნული ლერძები: მარჯვენა (3_1), მარცხენა (3_2) და მობრუნების ღერძი (L_3).

ხრახნული ღერძი მხოლოდ ერთია — ნეიტრალური. მას აღნიშნავენ 2_1 ნიშნით.

მესამე რიგის ხრახნული ღერძის ელემენტარული ბრუნვის კუთხე 120° -ია. ყოველი ბრუნვის შემდეგ კვანძები გადაადგილდება $1/3T$ მანძილით. აქ შესაძლებელია მარჯვენა (3_1) და მარცხენა

(3₂) ხრახნული ღერძები და აგრეთვე სიმეტრიის ჩვეულებრივი (მობრუნების) ღერძი (L_3) (ნახ. VI. 22).

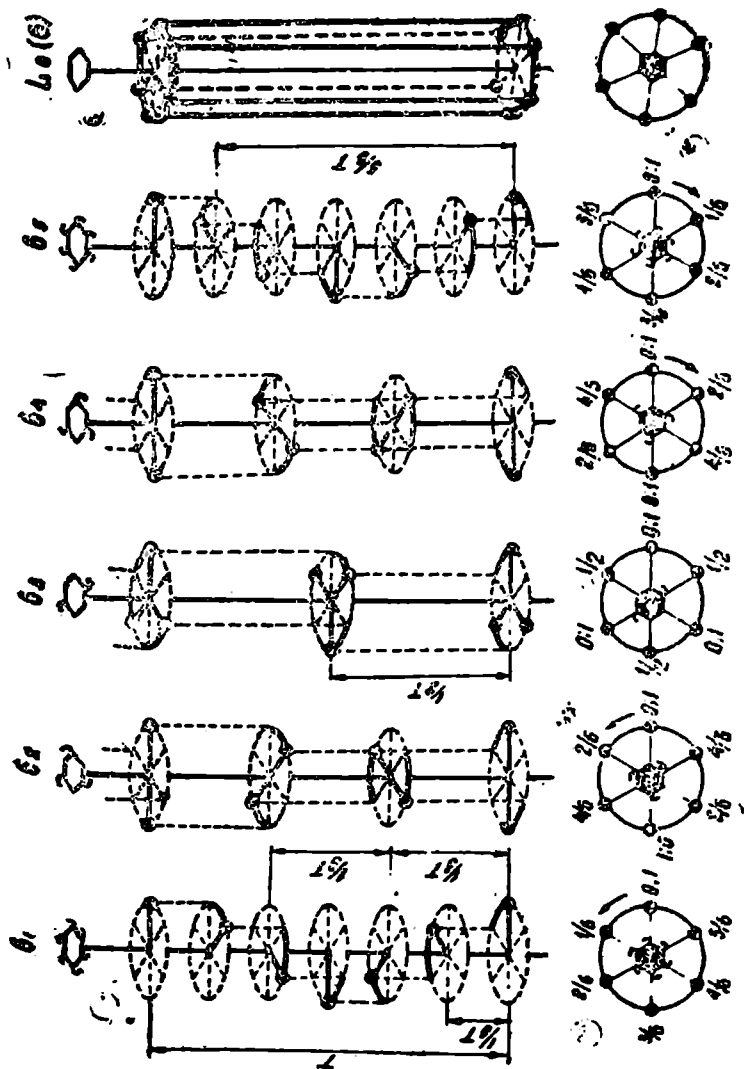
მეოთხე რიგის ხრახნულ ღერძებში ელემენტარული ბრუნვის კუთხე 90° -ია. კვანძები ყოველი ბრუნვის შემდეგ გადაადგილდება $1/4 T$ მანძილით (ნახ. VI. 23). გარდა მარჯვენა (4_1) და მარცხენა (4_3) ხრახნული ღერძებისა, დასაშვებია კიდევ ისეთი ხრახნული ღერძების არსებობა, რომლის გასწვრივ ყოველი ბრუნვის შემდეგ კვანძები გადაადგილდება $1/2 T$ მანძილზე და ანალოგიურად მეორე რიგის ხრახნული ღერძისა, ეს იქნება ნეიტრალური ღერძი (4_2). მის გარშემო 360° -ით ბრუნვის შემდეგ კვანძები გადაადგილდება $2T$ მანძილით.



ნახ. VI. 23 სიმეტრიის მეოთხე რიგის ხრახნული ღერძები: მარჯვენა (4_1), მარცხენა (4_3), ნეიტრალური (4_2) და მობრუნების (L_4) სიმეტრიის ღერძი.

მეექვსე რიგის ხრახნულ ღერძებში ელემენტარული ბრუნვის კუთხე 60° -ია. თუ ყოველი ბრუნვის შემდეგ კვანძები გადაადგილდება $1/6 T$ მანძილით, მივიღებთ მარჯვენა (6_1) და მარცხენა (6_2) ხრახნულ ღერძებს (ნახ. VI. 24), ხოლო თუ ყოველი 60° -ით ბრუნვის შედეგად კვანძები გადაადგილდება $2/6 T$ მანძილით, მივიღებთ კიდევ ორ ხრახნულ ღერძს — მარჯვენას (6_3) და მარცხენას (6_4). ამ ღერძების გარშემო კვანძი 360° -ით რომ შემოვაბრუნოთ, იგი გადა-

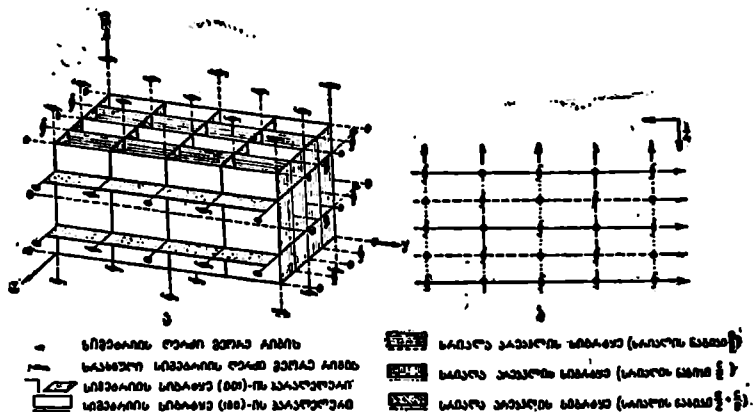
ადგილდება ღერძის მიმართულებით $2T$ მანძილით. გარდა ამ ოთხი ხრახნული ღერძისა, აქ დასაშვებია კიდევ. მეხუთე ხრახნული ღერძის არსებობა (6₅), რომლის გასწვრივ კვანძები ყოველი ელემენტარული



ნახ. VI. 24. სიმეტრიის მიქცეუ როგორ ხრახნული ღერძები: მარჯვნივ (6₁ და 6₂), მარცხენი (6₃ და 6₄), ნეიტრალური (6₅) და მობრუნების ღერძი (L₀).

ბრუნვის შემდეგ გადაადგილდება $3/6 T$ (ანუ $1/2 T$) მანძილით (ნახ. VI. 24. 6). ეს ღერძი ანალოგიურად 2_1 და 4_2 ისა, ნეიტრალურია და მის გარშემო კვანძი 360° -ით რომ შემოვებრუნოთ, იგი გადაადგილდება ღერძის მიმართულებით $3T$ მანძილით.

ამრიგად, მივიღეთ თერთმეტი ხრახნული ღერძი: $2_1, 3_1, 3_2, 4_1, 4_2, 4_3, 6_1, 6_2, 6_3, 6_4$ და 6_5 . პირველი ციფრით აღინიშნება ღერძის რიგი, ინდექსი კი მისი ხრახნულობის ნიშანია და გვიჩვენებს, საწყისი მდგომარეობიდან რა ბიჯით გადაადგილდება კვანძი ელემენტარული მობრუნების შედეგად. ამ შემთხვევაში იგულისხმება მობრუნება მხოლოდ საათის ისრის მიმართულებით. გადაადგილების ბიჯი აჯვარი დასადგენია, თუ ღერძის აღნიშვნიდან დავწერთ წილადს, რომლის ბრიცხველში დაიწერება ინდექსი, ხოლო მნიშვნელში — ღერძის რიგის მაჩვენებელი ციფრი. მაგალითად, თუ გვაქვს 6_3 ღერძი, მისი შესაბამისი წილადი იქნება $5/6$, რაც იმას ნიშნავს, რომ ნების-



ნახ. VI. 25. $Cmcm (D_{2h}^{12})$ სივრცობრივი უჯრუდის სიმეტრიის ელემენტების განლაგების სქემატური გამოსახულება: a -პერსპექტივა და b -გვერდი.

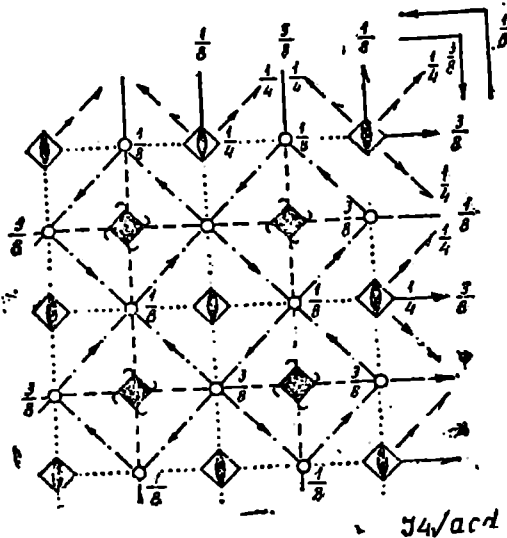
მიერი კვანძი ელემენტარული ბრუნვის შემდეგ (60° -ით) $5/6 T$ მანძილით უნდა იყოს გადაადგილებული. ეს ასეც იქნება, თუ უსასრულო ფიგურას 60° -ით მოვებრუნებთ საათის ისრის მიმართულებით (იხ. ნახ. VI. 24. 6), ადვილი გასაგებია, რომ ყოველი ხრახნული ღერძი, რომელიც ელემენტარული მობრუნების შემდეგ კვანძს გადაადგილებს $1/2 T$ მანძილით, ნეიტრალურია.

ამრიგად, უსასრულო ფიგურებისათვის, ადრე განხილული სიმე-

ტრიის ელემენტების გარდა, დამატებით მივიღეთ სრიალა არეკვლის 5-ნაირი სიმბრტყე და 11 ნაირი ხრახნული ლერჯი. VI. 1 ტაბულაში მოყვანილია სიმეტრიის ამ ელემენტების პირობითი ნიშნები, რომლებ-

ბითაც სარგებლობენ ფიოდოროვის სიმეტრიის ჯგუფების გამოსახვისათვის.

პირობითი ნიშნების გამოყენების საილუსტრაციოდ VI. 25 ნახაზზე მოცემულია რომბული ბიპირამიდის სიმეტრიის კლასში შემავალი 28 სივრცობრივი ჯგუფიდან (იხ. ტაბულა VI.2) ერთ-ერთის (C_{2v}) სიმეტრიის ელემენტების განლაგების სქემატური გამოსახულება (პერსპექტივაში და გეგმილის სახით), ხოლო VI. 26 ნახაზზე გამოსახულია ტეტრაგონური



J_4/acd

ნახ VI. 26. ტეტრაგონური სინგონიის J_4/acd სივრცული ჯგუფის გეგმილი.

სინგონიის დიტეტრაგონური ბიპირამიდის სიმეტრიის კლასის ერთ-ერთი სივრცობრივი ჯგუფის ელემენტარული უჯრედის გეგმილი.

§ VI. 4. სიმეტრიის 230 სივრცობრივი ჯგუფი

როგორც ვნახეთ, კრის ზალთა სტრუქტურების სიმეტრიას (მიკროსიმეტრიას) აქვს სიმეტრიის ელემენტთა გაცილებით მეტი სახესხვაობა, ვიდრე დასრულებული ფორმების სიმეტრიას (მაკროსიმეტრიას). თუ დასრულებული ფიგურების სიმეტრიის ელემენტთა ნაირგვარი ერთობლობა შეიძლება გამოისახოს სულ 32 სიმეტრიის კლასით, დაუსრულებელი ფიგურებისათვის სიმეტრიის ელემენტთა შესაძლო კომბინაციების რაოდენობა გაცილებით მეტია და 230-ს აღწევს.

სივრცობრივ მუქერში სიმეტრიის ელემენტები დაუსრულებლივ მეორდება ურთიერთპარალელური ორიენტაციით, მაშინ, როდესაც

*) ფიოდოროვის სივრცული ჯგუფებს ს აღნიშვნები იხილეთ ქვემოთ.

დასრულებულ ნაკვთებში სიმეტრიის ელემენტები ურთიერთიკვეთება კრისტალის შიგნით ერთ წერტილში. ეს წერტილი არ მეორდება სხვა-დასხვა სიმეტრიული გარდაქმნების შედეგად და ამიტომ დასრულებული მრავალწახნაგების სიმეტრიის 32 კლასს უწოდებენ წერტილოვან ჯგუფებს. საჭიროა აღინიშნოს, რომ სიმეტრიის სივრცული ჯგუფები განსაზღვრავს კრისტალთა სტრუქტურების სიმეტრიას ისე, როგორც სიმეტრიის წერტილოვანი ჯგუფები განსაზღვრავს კრისტალთა გარეგანი ფორმების სიმეტრიას.

ყოველ წერტილოვან ჯგუფს შეესაბამება სივრცობრივი ჯგუფების გარკვეული ერთობლიობა; ეს აიხსნება იმით, რომ ყოველ წერტილოვან ჯგუფში შეგვიძლია ჩვეულებრივი სიმეტრიის ელემენტი შევცვალოთ შესაბამისი ტრანსლაციური სიმეტრიის ელემენტით და მივიღოთ სიმეტრიის ელემენტთა ერთობლიობის სხვადასხვა შემთხვევა. მაგალითისათვის ავიღოთ რომმულ-პირამიდული კლასი (*mm2*). აქ შეიძლება, მაგალითად P — მესრულ ტიპში, ჯერ ერთ-ერთი სიმეტრიის სიმბრტყე შევცვალოთ m , c ან n სრიალა არეკვლის სიმბრტყით, შემდეგ კი სიმეტრიის ორივე სიმბრტყე შევცვალოთ nc , ca , na , ba , nm ან md სრიალა არეკვლის სიმბრტყით. სათანადოდ სიმეტრიის ლერძი 2 შეიცვლება ხრახნული ლერძით 2_1 . სულ მივიღებთ დასაწვებ სიმეტრიის ელემენტთა 9 ახალ ერთობლიობას (სივრცობრივ ჯგუფს). მათი რაოდენობა კიდევ უფრო გაიზრდება, თუ დაეუფებთ, რომ რომმული სინჯონისათვის გვაქვს არა მარტო პრიმიტიული ბრავეს მესერი, არამედ ფუძეცენტრირებული; წახნაგცენტრირებული და სხეულცენტრირებული მესრის ტიპებიც. სულ რომმულ-პირამიდულ კლასში 22 სივრცობრივი ჯგუფია, საიდანაც 10 ჯგუფი ეკუთვნის პრიმიტიულ მესერს, 7 ჯგუფი ფუძეცენტრირებულს, 2 წახნაგცენტრირებულს და 3 სხეულცენტრირებულ მესერს (იხ. ტაბულა VI.2).

ცხადია, აქ ვერ შევჩერდებით ყველა წერტილოვანი კლასის სივრცობრივი ჯგუფების გამოყვანაზე და მოვიყვანთ მხოლოდ შემაჯამებელ VI. 2 ტაბულას, რომელშიც მოცემულია ფიოდოროვის ყველა სივრცული ჯგუფის განაწილება სიმეტრიის კლასებისა და მესრის ტიპების მიხედვით. ფიოდოროვის ჯგუფების სრული გამოყვანა მოცემულია ნ. ბელოვის შრომაში: „Классный метод вывода пространственных групп симметрии“ Труды института Кристаллографии, в. 6, 1959.

§ VI. 5. წარტილთა წახიპრი სისტემები და წარტილთა ჯგრალობა

სიმეტრიის ყოველ სივრცულ ჯგუფში ნატერიალური წერტილების განლაგება დამოკიდებულია საწყისი წერტილის მდებარეობაზე არსებული სიმეტრიის ელემენტების მიმართ. VI. 27 ა ნახაზე მოყ-

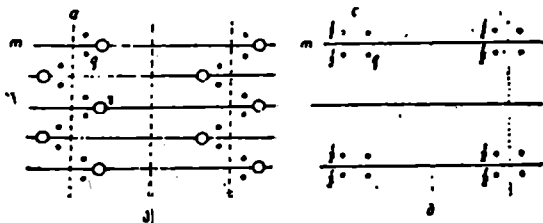
ტ ა ბ უ ლ ა VI. 2

სიმეტრიის 230 სივრცობრივი ჯგუფების განაწილება სინგონიების, სიმეტრიის კლასებისა და მესრის ტიპების მიხედვით

სინგონია	სიმეტრიის კლასი	ბრავეს მესრის ტიპები				ჯ ა მ ი
		P	C	F	J	
ტრიკლინური	1	1	—	—	—	1
	1	1	—	—	—	1
	სულ 2	2	—	—	—	2
მონოკლინური	2	2	1	—	—	3
	m	2	2	—	—	4
	2 m	4	2	—	—	6
	სულ 3	8	5	—	—	13
რომბული	m m 2	10	7	2	3	22
	2 2 2	4	2	1	2	9
	m m m	16	6	2	4	28
	სულ 3	30	15	5	9	59
ტეტრაგონური	4	4	—	—	2	6
	4 m	4	—	—	2	6
	4 2 2	8	—	—	2	10
	4 m m	8	—	—	5	12
	4, m m m	16	—	—	4	20
	4	1	—	—	1	2
	4 2 m	8	—	—	4	12
სულ 7	49	—	—	19	68	
ტრიგონური	3	4	—	—	—	4
	3	2	—	—	—	2
	3 2	7	—	—	—	7
	3 m	6	—	—	—	6
	3 m	6	—	—	—	6
სულ 5	25	—	—	—	25	
ჰექსაგონური	6	6	—	—	—	6
	6 m	2	—	—	—	2
	6 2 2	6	—	—	—	6
	6 m m	4	—	—	—	4
	6 m m m	4	—	—	—	4
	6	1	—	—	—	1
	6 m 2	4	—	—	—	4
სულ 7	27	—	—	—	27	

კუბური	23	2	—	1	2	5
	<i>m</i> 3	3	—	2	2	7
	$\bar{4}3m$	2	—	2	2	6
	432	4	—	2	2	8
	<i>m</i> 3 <i>m</i>	4	—	4	2	10
სულ	5	15	—	11	10	36
სიერთო ჯამი	32	156	20	16	38	230

ვანილია ისეთი მესრის ელემენტარული უჯრედი, რომელსაც აქვს სიმეტრიის *m* და სრიალა არეკლის *a* სიმბრტყეები. წარმოქმნილი გეორე რივის სიმეტრიის ღერძები სიმარტივისათვის ნახაზზე არაა აღნიშნული. დავუშვათ, რომ უჯრედის შიგნით ბოცემულია საწყისი *q* წერტილი, მაშინ *m* და *a* სიმბრტყეებით მეგე ძლია „გაეამრალოთ“ ეს წერტილი და მივიღოთ წარმოებულ წერტილთა გახლაგება (ნახ. VI. 27: ა). საწყისი წერტილი *r* რომ უოფილიყო, მაშინ, რადგან იგი სიმეტრიის *m* სიმბრტყეში მდებარეობს, „გაბრავლების“ შედეგად, იმავე *m* და *d* სიმბრტყეების მოქმედებით მივიღებდით წარმოებულ წერტი-



ნახ. VI. 27. წერტილთა წესიერი სისტემები: ა-*m* და ბ-*m* სივრცულ ჯგუფში

ლთა განსხვავებულ განლაგებას. ორივე შემთხვევაში მივიღებთ წერტილთა წესიერ სისტემას, რომელიც ერთსა და იმავე სივრცულ ჯგუფში შეიძლება წარმოიღვენილ იყოს სხვადასხვა ვარიანტით. ცხადია, რომ სიძე ჯრის ელემენტთა სხვა ერთობლიობაში წერტილთა წესიერი სისტემა სხვა იქნება. მაგალითად, განხილულ შემთხვევაში სრიალა არეკლის *a* სიმბრტყის შაკიერ რომ უოფილიყო *c* სიმბრტყე, მაშინ საწყისი *q* წერტილი სულ სხვანაირ წერტილთა წესიერ სისტემას მოგვცემდა (ნახ. VI. 27 ბ). მაშასადამე, წერტილთა წესიერ სისტემას უწოდებენ წერტილთა იმ ერთობლიობას, რომელიც მიიღება საწყისი წერტილის გამრავლებით სათანადო სივრცულ ჯგუფში შემავალი სიმეტრიის ელემენტების მოქმედებით.

საყურადღებოა, რომ სწორედ ყოველი სივრცობრივი ჯგუფის შესაბამისი წერტილების წესიერი სისტემა განსაზღვრავს კრისტალური ნივთიერების სტრუქტურული ერთეულების (ატომების, იონების) განლაგების სხვადასხვა გეომეტრიულ კანონზომიერებას.

ნივთიერების კრისტალური სტრუქტურის დაბასიათებისათვის საჭიროა დავადგინოთ, თუ რამდენი კვანძი (ატომი, იონი) მოდის ერთ ელემენტარულ უჯრედზე. წესიერი სისტემის წერტილთა რაოდენობას, რომელიც ერთ ელემენტარულ უჯრედზე მოდის, წერტილთა ჯერადობას უწოდებენ. ჯერადობა შეიძლება იყოს 1, 2, 3, 4, 6, 8, 12, 16, 24 და 48. ჩვენ მიერ განხილულ შეთხვევაში q წერტილის ჯერადობაა 8, ხოლო r წერტილისა — 4. m სივრცობრივ ჯგუფში q წერტილის ჯერადობაა 4 (ნახ. VI. 27 ა და ბ).

§ VI. 6. სივრცობრივი ჯგუფების აღნიშვნები

1935 წლიდან შემოღებულია სიმეტრიის სივრცობრივი ჯგუფების საერთაშორისო აღნიშვნები, მანამდე კი სარგებლობდნენ ფიოდოროვის ან შენფლისის აღნიშვნებით. საერთაშორისო აღნიშვნებში პირველ რიგში იწერება ბრავეს ტიპის მესრის შესაბამისი ინდექსი (P , C , F ან J), რომელიც საფუძვლად უდევს ამა თუ იმ ჯგუფს და გვიჩვენებს ტრანსლაციის შესაძლებლობას. შემდეგ იწერება საწყისი სიმეტრიის ელემენტთა ერთობლიობა (გამოყენებულია გერმან მოგენის აღნიშვნები) წერტილოვანი ჯგუფებისათვის, რომლებშიც სათანადოდ ჩანაცვლებულია დაუსრულებელი ფიგურების სიმეტრიის ელემენტები. მაგალითად, დიტეტრაგონურ პირამიდულ სიმეტრიის $4mm$ (L_4P) კლასში შეიძლება არსებობდეს 8 და 4 სივრცობრივი ჯგუფები შესაბამისად P და J ტეტრაგონური უჯრედების საფუძველზე. ამ უჯრედების საერთაშორისო აღნიშვნებია:

პრიმიტიული უჯრედის (P) საფუძველზე		სხეულცენტრიკული უჯრედი (J) საფუძველზე	
$P 4 mm$	$P 4 cc$	$J 4 mm$	$J 4_1 md$
$P 4 bm$	$P 4 nc$	$J 4 cm$	$J 4_1 cd$
$P 4_2 cm$	$P 4_2 mc$		
$P 4_2 nm$	$P 3_2 ba$		

ე. ფიოდოროვი იმისდა მიხედვით, თუ წერტილოვანი ჯგუფის სიმეტრიის ელემენტს რომელი ელემენტი ენაცვლება ტრანსლაციური მოქმედებებით (ხრახნული ღერძი, სხლეტვა-არეკვლის სიბრტყე თუ ორივე ერთად), სივრცულ ჯგუფებს ყოფდა სამ სახეობად:

ფიოდოროვის ჯგუფების აღნიშვნები. კუბური სისტემა

სიმეტრიის კლასი	საერთო-შორისი	ფიოდოროვის	შენიშვნის	სიმეტრიის კლასი	საერთო-შორისი	ფიოდოროვის	შენიშვნის
h 3	P23	59s	T ¹	432	P432	68s	O ¹
	F23	61s	T ²		P4,32	98a	O ²
	J23	60s	T ³		F4,32	70s	O ³
	I2,3	89a	T ⁴		I ¹ ,32	97a	O ⁴
	J2,3	90a	T ⁵		J432	69s	O ⁵
m 3	Pm3	62s	T _A ¹	m3m	P4,32	94a	O ⁶
	Pn3	49h	T _A ²		P4,32	95a	O ⁷
	Fm3	61s	T _A ³		J4,32	96a	O ⁸
	Fd3	50h	T _A ⁴		Pm3m	71s	O _A ¹
	Jm3	63s	T _A ⁵		Pn3n	53h	O _A ²
	Pa3	91a	T _A ⁶		Pm3n	102a	O _A ³
	Ja3	92a	T _A ⁷		Pn3u	103a	O _A ⁴
4 3m	P4 3m	65s	T _A ¹	Fm3m	73s	O _A ⁵	
	F43m	67s	T _A ²	Fm3c	54h	O _A ⁶	
	J43m	66s	T _A ³	Fd3m	100a	O _A ⁷	
	P43n	51h	T _A ⁴	Fd3c	101a	O _A ⁸	
	F43c	52h	T _A ⁵	Jm3m	72s	O _A ⁹	
	J43d	93a	T _A ⁶	Ja3d	99a	O _A ¹⁰	

1. სიმორფული ჯგუფები აღინიშნება *a* ასოთი
2. ჰემიმორფული " " " *h* "
3. ასიმორფული " " " *a* "

ე. ფიოდოროვი სივრცობრივი ჯგუფის აღსანიშნავად სათანადო სახეობის გამომსახველ ასოს წინ უწერდა ამ ჯგუფის რიგითი ნომრის შესაბამის რიცხვს, მაგალითად, 27*a* ნიშნავს ოცდამეშვიდე სიმორფულ ჯგუფს. სულ 230 სივრცული ჯგუფი შეიცავს 73 სიმორფულ, 54 ჰემიმორფულ და 103 ასიმორფულ ჯგუფებს.

სივრცული ჯგუფების აღნიშვნა შენფლისის მიხედვით ხდება წერტილოვანი ჯგუფების აღნიშვნების საშუალებით, რომლებსაც მარჯვნიდან ზემოთ მიუწერენ მის რიგით ნომერს სიმეტრიის კლასების ფა-

ოკლებში. მაგალითად, ქექსაგოხურ-ბიპირამიდულ კლასში (L₆PC) (შენფლისის მიხედვით C₆) არსებული ორი სივრცული ჯგუფი აღნიშნება C₆¹ და C₆².

ქვემოთ მოყვანილია კუბური სინგონიის ხუთი წერტილოვანო ჯგუფის შესაბამისი 36 სივრცობრივი ჯგუფის სამნაირი აღნიშვნა (იხ. ტაბულა VI, 3).

თავი VII

ჩენტგენო-სტრუქტურული ანალიზი

§ VII. 1. ჩენტგენის სხივების გუნება და მათი სპექტრები

ჩენტგენოსტრუქტურული ანალიზი (კრისტალთა ჩენტგენომეტრია) კრისტალურ ნივთიერებათა სტრუქტურების ჩენტგენის სხივების საშუალებით კვლევის ხეობაა.

1895 წელს ცნობილმა მეცნიერმა ვ. ჩენტგენმა კათოდურ სხივებზე ცდების ჩატარებისას შემთხვევით აღმოაჩინა მანამდე უცნობი სხივები, რომლებსაც აბოუტნობი ხასიათის გამო X-სხივები უწოდა. მხოლოდ 17 წლის შედეგ, 1912 წელს, გერმანელმა ფიზიკოსმა მაქს ლაუემ, ჩატარებული ექსპერიმენტების საფუძველზე გახადა შესაძლებელი ამ უხილავი სხივების ბუნების დადგენა, კერძოდ, აღმოჩნდა, რომ ჩენტგენის სხივები, ისევე, როგორც რადიოტალღების, ინფრაწითელი, ხილული სინათლისა და ულტრაიისფერი სხივებისა, ელექტრომაგნიტური ტალღებია.

ჩენტგენის სხივების ტალღის სიგრძეები გაცილებით მცირეა ხილული სინათლის ტალღის სიგრძეებზე და ელექტრომაგნიტურ ტალღათა სპექტრის ფართო მუკალეს შიგნით — ანგსტრემის მესამედიდან რამდენიმე ათეულ ანგსტრემამდე სწორედ კრისტალურ სტრუქტურებში ატომთა მანძილებთან ჩენტგენის სხივების ტალღის სიგრძეთა თანაზომიერება დაედო საფუძვლად ჩენტგენის სხივების დიფრაქციის აღმოჩენას. ლაუეს ცდაში ჩენტგენის სხივების კონა ეცემოდა სპეციალურ სადგამზე მოთავსებულ მონოკრისტალს. კრისტალურ შესერზე დიფრაქციული სხივები ინტერფერენციის შედეგად ნიშნის მიღმა, მოთავსებულ ფოტოფიზე იძლეოდა გარკვეული კანონზომიერებით განლაგებულ რეფლექსებს (ლაქებს). ამ რეფლექსების განლაგება შეესაბამება კრისტალის სიმეტრიის ელემენტთა გეომეტრიას. ლაუეს ცდამ, ერთი მხრივ, დაადგინა ჩენტგენის სხივების ბუნება და, მეორე მხრივ, დასახა კრისტალთა აღნაგობის შესწავლის ახალი საშ-

უაღრბა, რითაც საფუძველი ჩაუყარა რენტგენოსტრუქტურულ ანალიზს. ამემად ყელევის ეს იეთოდო წარმატებით გამოიყენებო მრავალ საბუნებისმეტყველო მეცნიერებაში: ფიზიკაში, მინერალოგიაში, ქიმიკაში, ბიოლოგიაში და სხვ.

დღეისათვის შესწავლილია რამდენიმე ათასი კრისტალური ნივთიერების სტრუქტურა. ამასთან, თითოეული მათგანის შესახებ სიფერტირია განეკუთვნება ფიოდოროვის მიერ 1890 წელს გამოყვანილ 230 შესაძლო სიმეტრიის სივრცული ჯგუფიდან ერთ ერთს.

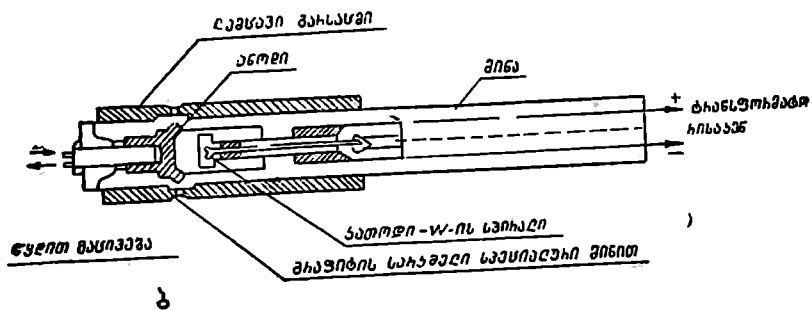
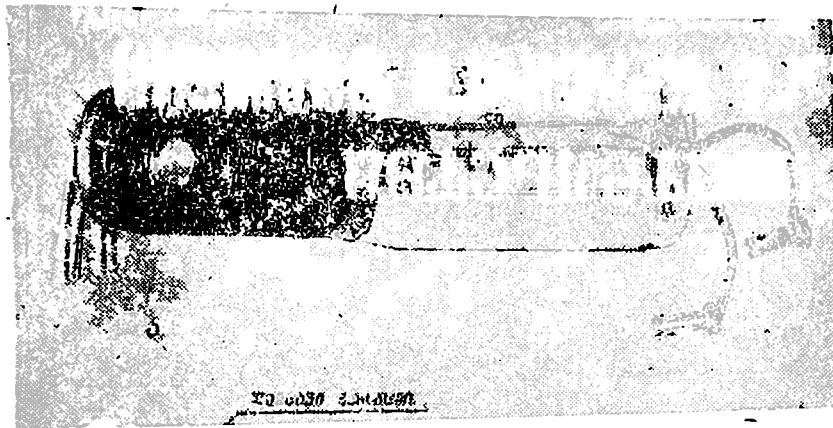
რეს უკეთესა გამოხივება ისევე როგორც ბილული სინათლე, არაერთგვაროვანია და მას ორგვარი სპექტრი აქვს — უწყვეტი და ხაზოვანი. უწყვეტი სპექტრის მქონე ოქუგენის გამოსხივებას „თეთრი“ გამოხსივებას უწოდებენ, ხოლო ხაზოვანი სპექტრის მქონეს — მახასიათებელს.

რენტგენის სხივების ძირითადი წყაროა რენტგენის მილაკი. რენტგენოსტრუქტურული ანალიზისათვის განეკუთვნები რენტგენის მილაკი უძეტესად წარმოადგებს მინის ცილინდრულ ბალონს, რომლიდაც აფორუმბულია ქაერი (წნევა ბალონში შეადგენს 10⁶–10⁷ მც. ვეო. წყ. სვ) და იასში ჩარჩილულია ორი ელექტროდი — ანოდი და კათოდი. კათოდად ხოლობენ ვოლფრამის თავთულსა და დახეულ სპიოალს, ხოლო ანოდად მალალი სითოგამტაობის მქონე ლითონისაგან დამზადებულ ნახვრადოუ მილს. VII. ნაიაზე გამოსახულია რენტგენოსტრუქტურული ანალიზისათვის განეკუთვნილი DCB-3 ტიპის რენტგენის მილაკი.

კათოდი 3-4 ა დენის ვატარებით იგი შეოდება ვავახუროთ მალალ ტემპერატურამდე (2000 C ზე მეტი). ამ დროს თემოელექტრონული ეთისიის მეფეად კათოდი ინუნისიუად აფექვეს ელექტრონებს. თუ კათოდსა და ანოდს შორის შეექნით პოტენციალთა სხვაობას, ეთ ელექტრონები ნაკადის სახით იმძრავებენ. მათი სჩქარე ამ გზაზე განეკუთვნილი მატელობს და რამდენიმე ათეული კილოვოლტი ამჩქარებელი ძბეია აირობებში 10⁸ კმ. წმ-ს აღწევს. ახოდათა ჰეგაებით სწოადი დაიუბრეკებისას ელექტრონების იერ ელექტრულ ველში შექილი კანტრეუოი ენეოგის უდიდესი ნაწილი გადადის სითიერ ენერგიაში და მხოლოდ 1% გამოხსივდება რეიტენის სხივების სახით. ანოდის გადახურების თავდან ასაცილებლად მას აკივებენ გაიდიარე წყლით. რენტგენის სხივების ინტენსიური კონის ბისაღეად მილაკის ცილინდრულ ზედაპირში დატანებულია სპეციალური კონის სარკმლები.

რენტგენის გამოსხივების ხასიათი დამოკიდებულია ანოდში ელექტრონების აგზნებაზე. ამჩქარებელი პოტენციალის მედარებით მძირე მნიშვნელობებზე ელექტრონების ნაკადის ენერგია არაა საქმარისი

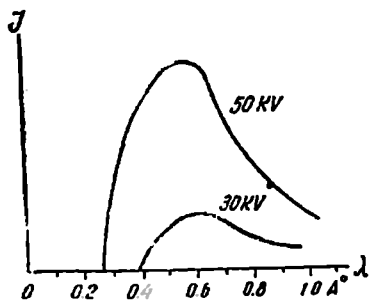
ანოდის შემადგენელ ატომებში ღრმა ელექტრონულ შრეებამდე შესა-
 ლწევად. ამ შენთხევაში ანოდი რენტგენის „თეთრ“ სხივებს გამოასხი-
 ვებს, რომლის უწყვეტი სპექტრი ნაჩვენებია VII. 2 ნახაზზე. აღვილი
 შესაჩნევია, რომ მილაკზე ნოდებუი ძაბვის ზრდისას იზრდება ინტ-



ნახ. VII. 1. ECB-3 ტიპის რენტგენის მილაკი, ა-საერთო ხელი, ბ-სქემატური კრილი-
 ენსივობის მაქსიმუმის მნიშვნელობა და ისევე, როგორც სპექტრის
 მოკლელტალლოვანი საზღვრისა, ხდება მისი წანაცვლება ტალლის სიგ-
 რძეთა ნაკლები მნიშვნელობებისაკენ. ძაბვის გარკვეულ მნიშვნელობ-
 ამდე გაზრდით, მიიღწევა უწყვეტი სპექტრის ფონზე მახასიათებელი
 გამოსხივების ხაზების ზედღება.

სხვადასხვა ელემენტის ხაზოვან სპექტრს განსხვავებული სახე-
 აქვს. VII. 3 ნახაზზე წარმოდგენილია მოლიბდენის მახასიათებელი

სპექტრი. აღსანიშნავია, რომ ამჩქარებელი ძაბვის გაზრდით მახასიათებელი ხაზების ტალღათა სიგრძე და ინტენსივობათა შეფარდება არ იცვლება. მაშასადამე, ძახასიათებელი გამოხატულება თეთრი გამოსხივებისაგან განსხვავებით დასოკიდებულია მხოლოდ ანოდის ნივთიერებაზე. რაც უფრო მძიმეა ელემენტი (დიდია მისი ატომური ნომერი), მით უფრო მცირეა მახასიათებელი გამოსხივების ტალღის სიგრძე. ყოველივე ამის საფუძველზე მიჩნეულია, რომ რენტგენის მახასიათებელი გამოსხივება შედგება ატომის შიდა შრეების ელექტრონთა აგზნებისა. ატომში ელექტრონების ენერჯის დისკრეტულობა გააძირობებს მახასიათებელი სპექტრის ხაზ ვან ხასიათს. კერძოდ, პირველი გარისის ელექტრონის აგზნებიას საქე გვაქვს K — სერიის გამოსხივებასთან, გარსზე ელექტრონების გადასვლა და ა. შ. ამა თუ იმ ელემენტის ხა-

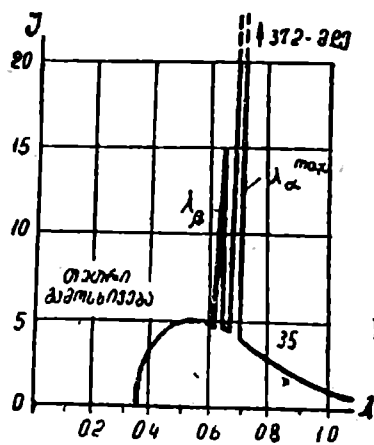


ნახ VII 2. რენტგენის თეთრი გამოსხივების უწყვეტი სპექტრი ამჩქარებელი ძაბვის სხივ სხვა იზომენტალისათვის J — ინტენსივობა ფორლაბით ერთეულებში, λ — ტალღის სიგრძე ანგსტრემით.

უფრო ზედა ორბიტებიდან მეორე იძლევა გამოსხივების L — სერიას ზოვანა სპექტრია მკვეთრი მაქსიმუმის შესაბამისა მონოქომატული ტალღის სიგრძის დადგენა სპეციალური ცხრილების საშუალებით ხდება. ასე, მაგალითად, K — სერიის გამოსხივებისას სპინდისათვის $\lambda = 1,5418 \text{ \AA}$, რკინისათვის $\lambda = 1,9373 \text{ \AA}$, ქრომისათვის $\lambda = 2,2907 \text{ \AA}$. როდესაც λ — მნიშვნელობანი გამოსახულია არა ანგსტრემებით, არამედ კალორიქსებით (kX), უნდა გაეთავალი-სწინოთ, რომ $1kX = 1,01202 \text{ \AA}$.

იმისდა მიხედვით, თუ რა ამოცანაა გადასაკრეული რენტგენოსტრუქტურული ანალიზით, გამოიყენება როგორც თეთრი, ასევე მონოქრომული გამოსხივება.

ნახ VII 3. მოლიბდენის მახასიათებელი გამოსხივების ხაზოვანი სპექტრი.

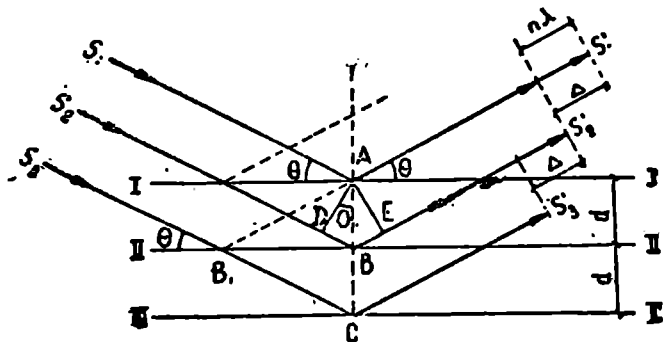


ნახ VII 3. მოლიბდენის მახასიათებელი გამოსხივების ხაზოვანი სპექტრი.

ჩენტგენის სხივებს დიდი გაქ-ღვის უნარი აქვს. ნივთიერებაში გავლიას მათი ზემოქმედებით ამ ნივთიერების შენადგენელ ატომთა ელექტრონები ასხივებენ იმავე სიხშირის ელექტრომაგნიტურ ტალღებს. ეს უკანასკნელნი ჩებრფერიკებენ ურთიერთშორის. კრისტალურ ნივთიერებაში ატომების განლაგების ხასიათი განაპირობებს ინტერფერენციის ისეთ კანონზონიერებებს, რომ შეგვიძლია ვილაპარაკოთ ჩენტგენის სხივების „არეკლაზე“ მესრის ბრტყელი ბადეებიდან ამგვარად, ჩენტგენოგრაფიული კვლევისას ჩენტგენის სხივების დიფრაქციას იხილავენ როგორც კრისტალოგრაფიული სიბრტყეებიდან შერჩევით არეკლას. დაცივისა და არეკლის კუთხეები ტოლია, მაგრამ ვასათვალისწინებელია, რომ არეკლას ადგილი აქვს მხოლოდ გარკვეული დაცივის კუთხეებისათვის, რომელთა მნიშვნელობა დამოკიდებულია როგორც მესრის ელემენტარული უჯრედის პარამეტრებზე, იე დაცივლი ჩენტგენის სხივის ტალღის სიგრძეზე. ცხადია, პარალელური სიბრტყეებიდან არეკლილი სხივები ინტერფერენციის შედეგად გააძლიერებენ ან შეასუსტებენ ერთმანეთს. იმისდა მიხედვით, თუ როგორია მათ შორის სვლათა სხვაობა. კრისტალიდან არეკლილი სხივების რეგისტრაციის მიხედვით, დიფრაქციისა და ინტერფერენციის კანონების გათვალისწინებით შეიძლება ვიმსჯელოთ კრისტალის სტრუქტურაზე.

მ. ლაუეს მიერ ჩატარებული ზემოაღნიშნული ცდის შემდეგ რუსმა კრისტალოგრაფმა გ. ვლდემარ და ინგლისელმა ფიზიკოსმა ვ. ბრეგმა ერთმანეთისაგან დამოუკიდებლად გამოიყენეს ფორმულა, რომელიც ადგენს კავშირს ჩენტგენის სხივის ტალღის სიგრძეს, კრისტალური მესრის პარალელურ ბადეებს შორის მანძილსა და არეკლის კუთხეს შორის ამ ფორმულის გამოსაყვანად დავუშვათ, რომ გვაქვს I-I, II-II, III-III და ა. შ პარალელური ბრტყელი ბადეები (ნახ. VII. 4). მანძილი უახლოეს ბადეებს შორის აღვნიშნოთ a -თი. ამ ბადეებზე ეცემა მახასიათებელი ჩენტგენის სხივები (x_1, x_2, x_3) ტალღის სიგრძით. დავუთვათ, რომ ეს სხივები ეცემა ბადეებს ისეთი კუთხით, რომ ადგილი აქვს არეკლას. მთი აღვნიშნოთ სხივების დაეიას კუთხის 90° -მდე შენავსებელი კუთხე. $x_1, x_2, x_3 \dots$ სხივებზე პარალელური ბადეებიდან $x'_1, x'_2, x'_3 \dots$ მიმართულებით აირეკლებიან. ინტერფერენციის კანონების შესაბამისად, არეკლილი სხივები ერთმანეთს აძლიერებენ იმ შემთხვევაში, თუ სხივებს შორის სვლათა სხვაობა (Δ) ტოლია ნახევარტალღათა ლუწი რიცხვისა $\Delta = 2\pi \frac{\lambda}{2} = n\lambda$ და, მაშასადამე, ტალღები ფაზებით ემთხვევიან ერთმანეთს.

A წერტილიდან გაველოთ s_2 და s_2' სხივების *AD* და *AE* მართობები. არეკლილ s_1' და s_1'' სხივებს შოისის სელათა სხვაობა შეიძლება გამოვსახოთ *DBE* მანძილით. *ADH* და *ABE* მართკუთხა სამკუთხედებიდან ჩანს, რომ $DB = BE = d \sin \theta$, იაშასადამე, არეკლის სხივების გაძლიერება შესაძლებელი იქნება იხოლოდ მაშინ, როდესაც $\Delta = n\lambda = 2d \sin \theta$, სადაც n არეკლის რიგია, რიიელიც მთელი რიცხვებით (1, 2, 3...) გამოისახება. ამ ფორმულას ვულფბრეგის ფორმულას უწოდებენ და იგი უენტგენოგოაფიის ძირითადი ფორმულაა. მისი სახელაით შეიძლება ექსპერიმენტული გზით განვსაზღვროთ



ნახ. VII. 4. ვულფ-ბრეგის ფორმულის გამოყენა.

სიბრტყეთშორისი მანძილი d , როცა ვიცით λ და θ .

VII. 4 ნახაზიდან ადვილი დასადგენია, რომ θ კუთხის გაზრდით იზრდება სელათა სხვაობაც. ვიანდან სელათა სხვაობის მნიშვნელობა λ -ს ჯერაღია, პირველი არეკლა მოცემული პარალელური სიბრტყეებიდან მოხდება იმ მინიმალური θ კუთხისათვის, როდლისთვისაც $\Delta = \lambda$. ეს იქნება პირველი ორიგის არეკლა. θ -ს შემდგომი გადრდებისას არეკლას ადგილი არ ექნება, სანამ იგი არ მიადწევს θ_2 ის მნიშვნელობას θ_2 კუთხისათვის $\Delta = 2\lambda$ და გვაქვს მეორე რიგის არეკლა. უფრო მაღალი რიგის არეკლები განხორციელდება $\theta_3, \theta_4 \dots$ კუთხეებზე.

ამგვარად, არეკლის თითოეული რიგისათვის შეგვიძლია დავწეროთ;

$$2d \sin \theta_1 = \lambda$$

$$2d \sin \theta_2 = 2\lambda$$

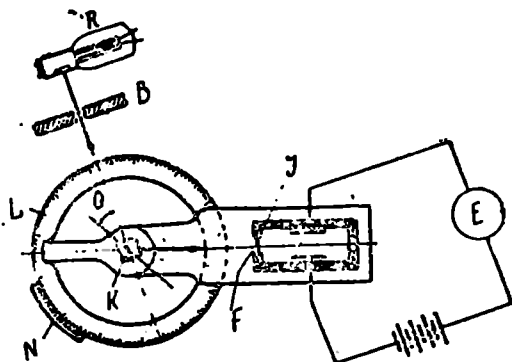
$$2d \sin \theta_3 = 3\lambda$$

ამ ტოლობების ერთმანეთზე გაყოფით მივიღებთ

$$\sin\theta_1 : \sin\theta_2 : \sin\theta_3 \dots = 1 : 2 : 3 \dots$$

მაშასადამე, რენტგენის სხივები კრისტალური შესრის ბადეებიდან აირეკლებიან მხოლოდ იმ კუთხეებით, რომელთან სინუსების შეფარდება გამოისახება ნატურალური რიცხვების ფარდობით. ესაა კრისტალოგრაფიული სიბრტყეებიდან (კრისტალთა წახნაგებიდან) რენტგენის სხივების არეკვლის კანონი.

არეკვლის კუთხეების ექსპერიმენტული დადგენა ადვილად შეიძლება ვ. გ. და ვ. ლ. ბრეგების მეთოდით (ნახ. VII. 5). ეს მეთოდი



ნახ. VII. 5. ბრეგების მეთოდის სქემა. *R*-რენტგენის მილაკი, *B*-ჭრიტე, *L*-ერთწრიანი გონიომეტრი, *J* იონიზაციის კამერა, *K*-კრისტალი, *F*-ალუზინის კილიტა, *E*-ელექტრომეტრი, *N*-ნონუსი.

გულისხმობს რენტგენის სპექტრომეტრის გამოყენებას. სპექტრომეტრი ერთწრიანი გონიომეტრისა და იონიზაციის კამერის ერთობლიობაა.

მილაკიდან გამოსული სხივები *B* ჭრიტის გავლით ვიწრო კონუსის სახით ეცემა *K* კრისტალს, რომელიც დამაგრებულია *L* გონიომეტრის მოძრავ ლიბზე. კრისტალიდან არეკვლილი სხივების რეგისტრაციისათვის გამოიყენება იონიზაციის კამერა (*J*), მას ბრუნვა შეუძლია მოძრავი ლიბის ბრუნვის ღერძის გარშემო. იონიზაციის კამერაში მოთავსებულ ელექტროდებს შორის არსებობს პოტენციალთა სხვაობა. *F* კილიტის გავლით იონიზაციის კამერაში შეღწეული სხივები იწვევენ გაზის იონიზაციას და წრედში დენი გაივლის, რასაც შევნიშნავთ *E*-ელექტრომეტრის ჩვენებით. მაშასადამე, რენტგენის სპექტრომეტრით შეიძლება დავაფიქსიროთ არეკვლის θ კუთხეები.

მაგალითისათვის ავიღოთ სიღვინის (KCl) კუბის ფორმის კრისტალი და დავამაგროთ იგი გონიომეტრზე ისე, რომ მისი ერთ-ერთი წიბო იყოს ლიშბის ბრუნვის ღერძის პარალელური. თუ გამოყენებული რენტგენის სხივის ტალღის სიგრძე $\lambda = 0,5876 \text{ \AA}$ (მილაკის ანოდი პალადიუმი), სიღვინის კრისტალური სტრუქტურის (100)-ის პარალელური ბადეებიდან პირველი სხივი აირეკლება მაშინ, თუ კუთხე $5^{\circ}23'$ -ია. ე. ი. $\theta_1 = 5^{\circ}23'$, მეორედ იაშინ, როცა $\theta_2 = 10^{\circ}49'$, მესამედ როცა $\theta_3 = 16^{\circ}20'$. ამ კუთხეების შესაბამისი სინუსების შეფარდება იქნება

$$\sin 5^{\circ}23' : \sin 10^{\circ}49' : \sin 16^{\circ}20' = 0,094 : 0,188 : 0,281 = 1 : 2 : 3.$$

§ VII. ა. კრისტალნოსტრუქტურული ანალიზის ძირითადი მეთოდები

კრისტალთა სტრუქტურების შესწავლის მიზნით ძირითადად სარგებლობენ რენტგენოატრექტურული ანალიზის სამი მთავარი მეთოდით: უქრავი კონტალის (ლაუეს მეთოდი), მბრუნავი კრისტალისა და ფხენილის (დებაი-შერერის) მეთოდებით. პირველი ორი მეთოდისათვის აუცილებელია შესასწავლი ნივთიერების შოზრდილი მონოკრისტალი, რაც მნიშვნელოვნად ზღუდავს ამ მეთოდების გამოყენების სფეროს. ფხენილის მეთოდი კი საშუალებას გვაძლევს შევისწავლოთ ნივთიერება, რომელიც წარმოდგენილია პატარა მარცვლების პოლიკრისტალური აგრეგატების სახით.

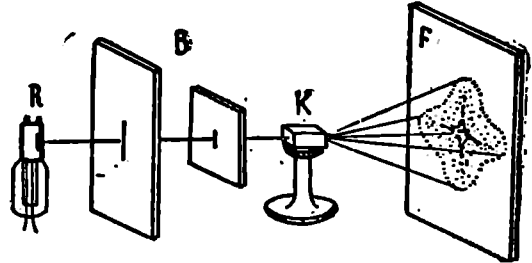
განვიხილოთ ლაუეს, ბრეკების, მბრუნავი კრისტალისა და დებაი-შერერის მეთოდები ფოტოგრაფიული რეგისტრაციის გამოყენებით. იმ რენტგენოსტრუქტურულ მეთოდებს, რომლებიც გულისხმობენ კონტალის ტრიალთან ერთად ფოტოფირის გადაადგილებასაც, აქ არ განვიხილავთ.

ა. ლაუეს მეთოდი

რენტგენოსტრუქტურული ანალიზის ჩასატარებლად საჭიროა პირველ რიგში ვიცოდეთ კრისტალის სიმეტრია და შეგვიძლოს კრიატალის საჭირო მდებარეობაში ორიენტირება. ამ საკითხების გადაწყვეტა შესაძლებელია ლაუეს მეთოდით, რომელიც გულისხმობს საჭირო ორიენტაციით კრისტალის უძოვად დამაგრებას რენტგენის სხივების გავრცელების მიმართულებისადმი.

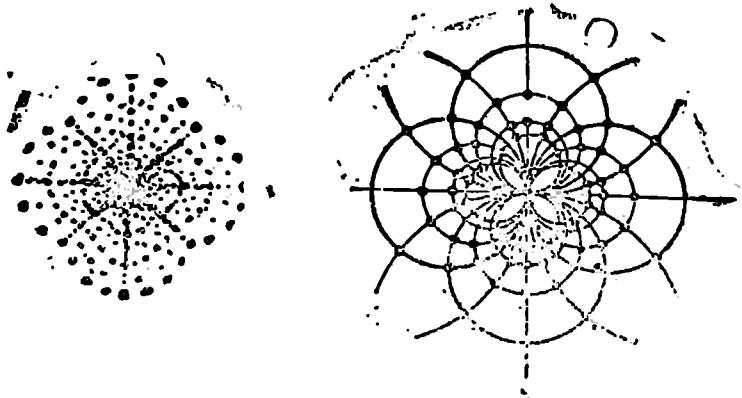
ლაუეგამის მისაღებად ხდარობენ რენტგენის თეთრ სხივებს. რადგან მათ შორის უსათუოდ მოინახება საჭირო ტალღის სიგრძის

რენტგენის ის სხივი, რომელიც დააკმაყოფილებს ვულფ-ბრევის ტოლობას და აირეკლება სათახაღო პარალელური ბადეებიდან (ნახ. VII. 6). ფირის ცენტრში განლაგებული შედარებით დიდი ლაქა წარმოქმნილია იმ სხივებით, რომლებიც კრისტალის გავლის შემდეგ არ იცვლიან მიმართულებას. დაბალია ვეოტილები კი მიიღება არჩვეული რენტგენის სხივების მოქმედებით ფოტოფირზე. ამ წერტილთა ეთობლიობა წარმოადგენს კრისტალის ლაუეგოამას. ზოგი წერტილი უფრო მკაფიოა (ინტენსიურად გაშვებული). უფრო მსხვილი და მკაფიო წერტილები მაქსიმალური რეტიკულური სპეკტრის მქონე წაღებებს შეესაბამება. ეს წერტილები ჯგუფდება ელიფსების, პარაბოლების, ჰიპერბოლებისა და წრეების გასწვრივ. დადგენილია, რომ ერთ



ნახ. VII. 6. ლაუეს მეთოდის სქემა.

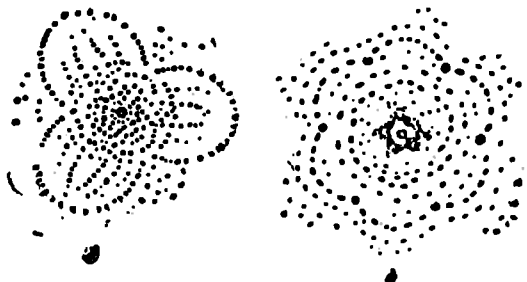
წერტილები მაქსიმალური რეტიკულური სპეკტრის მქონე წაღებებს შეესაბამება. ეს წერტილები ჯგუფდება ელიფსების, პარაბოლების, ჰიპერბოლებისა და წრეების გასწვრივ. დადგენილია, რომ ერთ



ნახ. VII. 7 ა-ქვაპირილის ლაუეგრძე J₁ ღრძის მიმართულებით, ბ-იგივე ზონების წრუდების დატანით.

მრუდზე განლაგდება ის წერტილები, რომლებიც შეესაბამებიან ერთი ზონის ბადეებს (ნახ. VII. 7.) ზონის მრუდის ფორმა დამოკიდებულია კრისტალზე დაკეშული რენტგენის სხივის მიმართულებაზე და ზონის ღერძის შორის კუთხეზე. ლაუეგრამაზე წერტილთა განლაგება გამოსახავს რენტგენის სხივის გავლის მიმართულებით კრისტალში არსებული სიმეტრიის ღერძის რიგს. მაგალითად VII. 8. ა ნახაზე

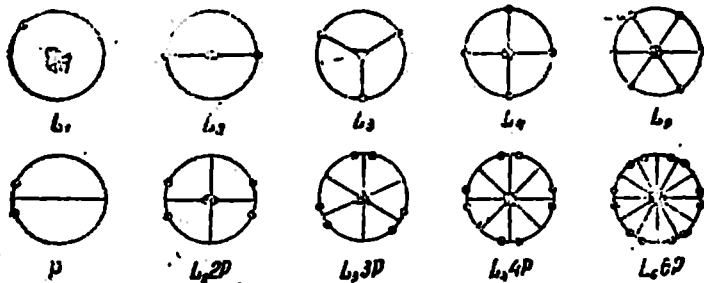
შოკეშულია ტრიგონური სინგონიის კრისტალის (კალციტი— CaCO_3)
 ლაუეგრამა, რომელშიც რენტგენის სხივები გადის L_2 ლერძის მიმარ-
 თულებით და წერტილების განაოგების ლაუეგრამას აქვს L_23P სიმე-
 ტრია. VII. 8. ბ ნახაზზე მოცემულია ჰექსაგონური სინგონიის კრის-
 ტალის (ბივირილი — $\text{Be}_3\text{Al}_2[\text{Si}_6\text{O}_{18}]$) ლაუეგრამა, როცელშიც რენტ-



ნახ. VII. 8. ლაუეგრამები: ა-კალციტისა L_2 ლერძის გასწვრივ,
 ბ-ბივირილისა L_6 ლერძის გასწვრივ.

გენის თეთრი სხივები გადის L_6 ლერძის გასწვრივ და სურათს აქვს
 L_63P სიმეტრია.

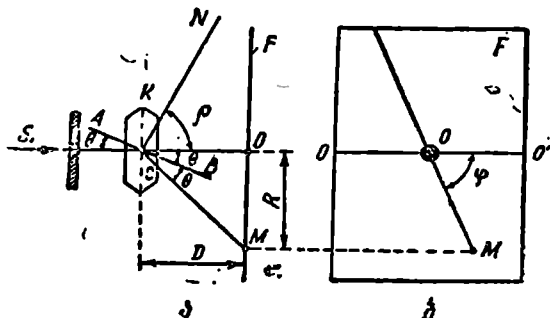
თუ გავითვალისწინებთ სიბრტყითი სემეტრიის 10 სახეობას,
 უნდა დაეუშვათ, რომ ლაუეგრამაზე შესაძლებელია წერტილთა (ლა-
 კების სულ ათნაირი განლაგება (ნახ. VII. 9 შეადარეთ ნახ. V. 8-ს).



ნახ. VII. 9. ლაუეგრამის სიმეტრიის ათი ტიპი.

ამგვარად, თუ რომელიმე კრისტალისათვის ლაუეგრამები გვექ-
 ნება ვრთ. ი ან ადამდენივე მიმართულებით. შეგვიძლია მსჯელობა მის
 სინგონიაზე, მაგრამ სინეტრის კლასის ზუსტად დადგენის საშუალებ-
 ა არ გვექნება, ჩადგან ლაუეგრამების საშუალებით ვერ დავადგენთ
 აქვს თუ არა კრისტალს ინვერსიის ცენტრი სიმეტრიის 32 კლასი-
 დან ინვერსიის ცენტრი აქვს მხოლოდ 11 კლასს. კრისტალის სიმეტრ-

რის განსაზღვრის და ზუსტი ორიენტაციისათვის საჭიროა ლაუეგრამების საშუალებით დაედგინათ შესასწაველი კრისტალის წახნაგების ან ბადეების გნომოსტერეოგრაფიული გეგმილები (ვიპოვოთ ამ წახნაგზე დაშვებული მართობის სფერული კოორდინატები). დაეუ ქვათ, რომ K კრისტალის AB ბადიდან (ნახ. VII. 10) აირეკლა s_0 თეთრი სხივის მდგენილობაში ძეფავალი Θ კუთხისათვის შესაბამისი ტალღის სიგრძის ოენტგენის სხივი, რომელმაც F ფოტოფირზე M წერტილი შოგვცა. ინისათვის, რომ ვიპოვოთ AB ბადის (ან მისი პარალელური წახნაგის) გნომოსტერეოგრაფიული გეგმილი, მის მართობულად უნდა



ნახ. VII. 10 AB ბადის ლაუეგრამასა და მის გნომოსტერეოგრაფიულ გეგმილს შორის კავშირი.

აღვმართოთ CN ხაზი და ვიპოვოთ მისი სფერული კოორდინატები (ρ და φ). თუ მივიღებთ S_0O მართობულებას გეგმილთა ღერძად, მაშინ საძიებელი კუთხე იქნება განვიღი — $\rho = 90^\circ - \theta$, θ კუთხე კი ადვილი დასადგენია OCM მართკუთხა სამკუთხედიდან — $\text{tg} 2\theta = \frac{R}{D}$, სადაც D

არის მანძილი K კრისტალსა და F ფოტოფირს შორის, ხოლო R — მანძილი M წერტილიდან OO' ხაზამდე და შეიძლება გავზომოთ ლაუეგრამაზე (ნახ. VII. 10. ბ). ენჯრალერა ლაქა O მიიღება იმ სხივების მოქმედებით, რომლებმაც კრისტალში გავლის შედეგად არ შეიცვალეს მიართულება. მეორე სფერული φ კოორდინატის დადგენა შეიძლება ლაუეგრამაზე VII. 10. ბ ნახაზზე ნაჩვენები კუთხის უშუალო გაზომვით. აღნიშნული გამოთვლები ხშირად საჭიროა კრისტალის ბრუნვის მეთოდით შესწავლიას, როდესაც საჭიროა კრისტალის ზუსტი ორიენტაცია. ლაუეს მეთოდი გამოიყენება აგრეთვე მეტალთა შინადაზომვებში კრისტალური სტრუქტურების დეტექტების დასადგენად. რიგ შეთხვევაში ლაუეს მეთოდის გამოყენება შეიძლება მონოკრის-

ტალის ნატეხებში სიმეტრიის ღერძების დასადგენად მაშინ, როდესაც ნატეხს არ შერჩა საკურო კრისტალოგრაფიული მიმართულებები.

ბ. ბრეგების მეთოდი

ბრეგების მეთოდით კრისტალთა სტრუქტურების განსაზღვრა ემყარება უახლოეს პარალელურ ბრტყელ ბადეებს შორის მანძილის ექსპერიმენტულ დადგენას და მიღებულ შედეგების შედარებას სხვადასხვა ტიპის მესრებისათვის ბადეებს შორის წინასწარ გამოანგარიშებულ მანძილთან. უახლოეს ბადეებს შორის მანძილს აღგენენ რენტგენის სპექტომეტრის საწულავებით (ნახ. VII. 5). მაგალითისათვის დავადგინოთ სპილენძის კრისტალური სტრუქტურა. ამისათვის უნდა განვსაზღვროთ მისი ელემენტარული უჯრედის ტიპი (პრიმიტიული, სხეულცენტრირებული თუ წახნაგცენტრირებული იგი): როგორც ვიცით, სპილენძის კრისტალი კუბური სიმეტრიისაა და ხშირად გვხვდება კუბის (100), რომბოლოდეკაედრის (110) და ოქტაედრის (111) წახნაგებით.

იონიზაციის კამერის გამოყენებით და გარკვეული ტალის სიგრძის მონოქრომატული რენტგენის სხივებით შეიძლება განვსაზღვროთ მინიმალური არეკვლის Θ_{100} , Θ_{110} და Θ_{111} კუთხეები შესაბამისად კუბის, რომბოლოდეკაედრის და ოქტაედრის წახნაგებისათვის. ზოიბდენიანი ანოდის მქონე რენტგენის წილაკის გამოყენების შემთხვევაში, რომლისთვისაც $\lambda = 0,7105 \text{ \AA}$, მიღებულია აღნიშნული კუთხეების შემდეგი მნიშვნელობები: $\Theta_{100} = 11^{\circ}23'$, $\Theta_{110} = 16^{\circ}13'$ და $\Theta_{111} = 9^{\circ}51'$, ვულფ-ბრეგის ფორმულის თანახმად, როდესაც $n=1$, გვექვება:

$$\lambda = 2d_{100}\sin\Theta_{100} \quad \text{საიდანაც} \quad \sin\Theta_{100} = \frac{\lambda}{2d_{100}};$$

$$\lambda = 2d_{110}\sin\Theta_{110} \quad \sin\Theta_{110} = \frac{\lambda}{2d_{110}};$$

$$\lambda = 2d_{111}\sin\Theta_{111} \quad \sin\Theta_{111} = \frac{\lambda}{2d_{111}};$$

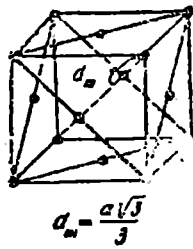
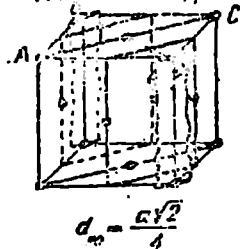
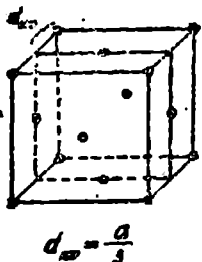
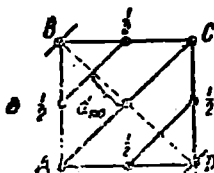
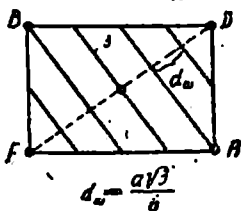
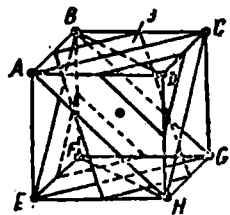
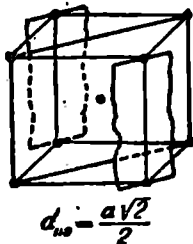
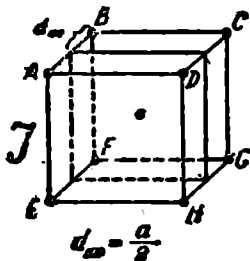
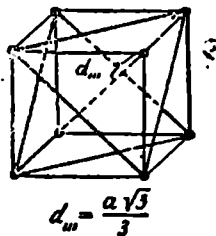
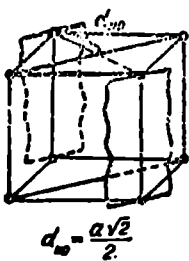
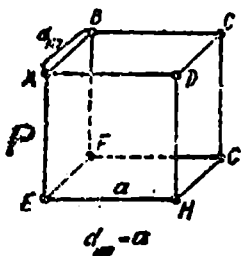
აქედან

$$\sin\Theta_{100} : \sin\Theta_{110} : \sin\Theta_{111} = \frac{1}{d_{100}} : \frac{1}{d_{110}} : \frac{1}{d_{111}}$$

თუ ჩავსვამთ გამოთვლილი Θ კუთხეების მნიშვნელობებს, მივიღებთ:

$$\sin 11^{\circ}23' : \sin 16^{\circ}13' : \sin 9^{\circ}51' = \frac{1}{d_{100}} : \frac{1}{d_{110}} : \frac{1}{d_{111}} = 0,1974 :$$

$$: 0,273 : 0,1711 = 1 : 1,41 : 0,87.$$



ნახ. VII. 11. კუბური სინგონის P J და F ტიპის მესრებში უახლოეს ბალებებს შორის მანძილი: ა-ბაღე (1 0 0), ბ-ბაღე (100).

მიღებული შეფარდება უნდა შევადაროთ თეორიულად გამოანგარიშებულ ანალოგიურ შეფარდებას. VII. 11 ნახაზზე მოცემულია კუბური სინგონის პოიმიტიული, სხეულ- და წახნაგცენტრირებულ უჯრედებში კუბის, რომბოლოდეკედრის და ოქტედრის წახნაგის 254

პარალელურად გაყვანილ ბადეებს შორის უახლოესი მანძილები. ამ მანძილების სათანადო შეფარდება მესრის ტიპების მიხედვით გამოი-
სახება შემდეგნაირად:

მესრის ტიპი	უახლოესი მანძილი			შეფარდება
	d_{100}	d_{110}	d_{111}	$\frac{1}{d_{100}} : \frac{1}{d_{110}} : \frac{1}{d_{111}}$
P	a	$\frac{a}{\sqrt{2}}$	$\frac{a}{\sqrt{3}}$	$1 : \sqrt{2} : \sqrt{3} = 1 : 1.41 : 1.73$
J	$\frac{a}{2}$	$\frac{a}{\sqrt{2}}$	$\frac{a}{2\sqrt{3}}$	$2 : \sqrt{2} : 2\sqrt{3} \quad 1 : 0.71 : 1.73$
F	$\frac{a}{2}$	$\frac{a}{2\sqrt{2}}$	$\frac{a}{\sqrt{3}}$	$2 : 2\sqrt{2} : \sqrt{3} \quad 1 : 1.41 : 0.87$

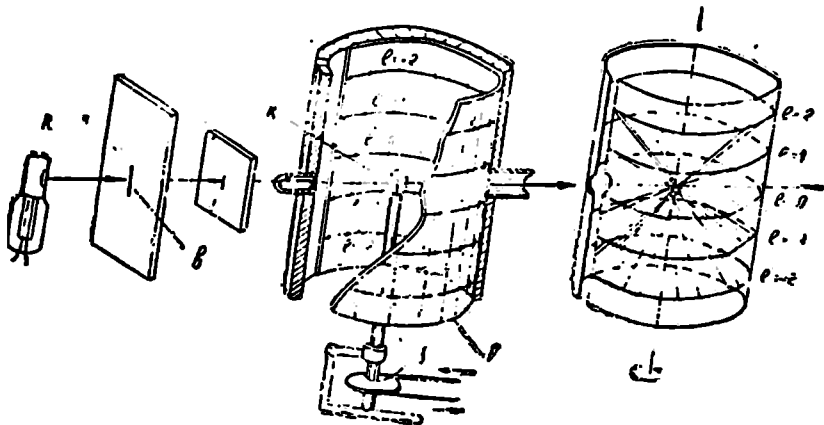
ამგვარად, სპილენძის კრისტალისათვის ექსპერიმენტულად მი-
ღებული შეფარდება ზუსტად შეესაბამება კუბური F ტიპის მესრის
შეფარდებას. მაშასადამე, სპილენძის კრისტალური სტრუქტურა კუ-
ბური წახნაგცენტრიოებული ტიპისაა.

გ. ბრუნვის მეთოდი

კრისტალთა სტრუქტურების დადგენა ბრუნვითი მეთოდით შემო-
იღეს შიბოლტიმ, პოლანცი და სხვებმა 1919-1922 წლებში. იგი ლაუეს
და ბრეგების მეთოდების კომბინაციაა მეთოდის ძირითადი პრინცი-
პი იმაში მდგომარეობს, რომ მესასწავლ კრისტალს გააუწყვეტლივ
აბრუნებენ რაიმე ღერძის გარშემო, როდელიც რენტგენის ძონოკოიმ-
იტული სხივების გავრკელების ძიმართულების მართობულია. კრისტა-
ლია გარშემო მოთავსებულია ცილინდრულად მოღუნული ფოტოფი-
რი, რომელზეც აღიბეჭდება ინტეოფერიოებელი სხივები, არევილილი
მესრის ბრუნვითი ბადეებიდან. ფოტოფირის ცილინდრის ღერძი კრი-
სტალის ბრუნვის ღერძის პარალელური უნდა იყოს (ნახ VII. 12).

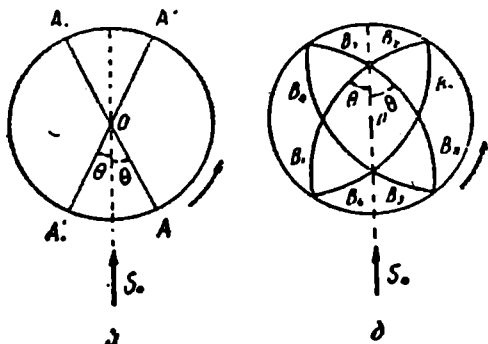
ფირზე აღიბეჭდება არევილილი სხივები არა მარტო ვერტიკალ-
ური (ბრუნვის ღერძის პარალელური ბადეებიდან), არამედ დაირილი
ბადეებიდანაც. კრისტალის ბრუნვის შედეგად მესრის ბრუნვითი ბად-
ეები განუწყვეტლივ იცვლის ორიენტაციას და 360°-ით შემობრუნების

შედგად რენტგენის სხივებთან რამდენჯერმე წარმოშობს Θ კუთხეს რომლის დროსაც ადგილი ექნება სხივის არეკვლას, ასე, მაგალითად, ვერტიკალური ბადეები oo —ორჯერ გაიმეორებენ S_2 მიმართლესასთან Θ კუთხით განლაგებას (AA , და $A'A'$, ხოლო დახრილი ბადეები 4—4



ნახ. VII. 12. ბრუნვის მეთოდის სქემა. R -რენტგენის მილაკი, B კვრიტვი, e -კაპერა, F ფოტოფირი, L -შრეხაზები, so -ექვატორული შრეხაზი, f -ბრუნვის მოწყობილობა.

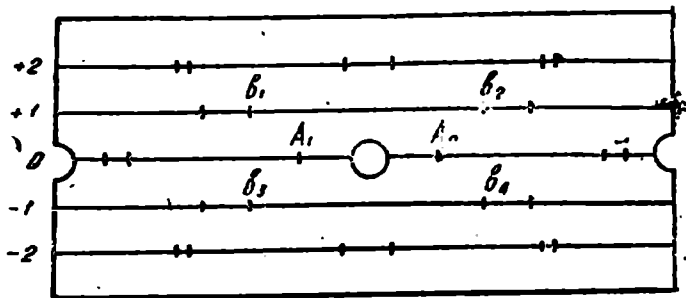
-ჯერ (ნახ. VII. 13. ა და ბ). ამასთან დაკავშირებით, ყოველი ვერტიკალური ბადე მოგვცემს არეკვლის 2 წერტილს ნულოვან (ექვატორულ) შრეხაზეზე (წერტილები A_1 და A_2), ხოლო ყოველი დახრილი ბადე — სიმეტრიულად განლაგებულ 4 წერტილს სათანადო შრეხაზეებზე (b_1, b_2, b_3, b_4 ნახ. VII. 14). როდესაც კრისტალს ვაბრუნებთ მისი c კრისტალოგრაფიული ღერძის გარშემო, ნულოვან (ექვატორულ) შრეხაზეზე განლაგდებიან წერტილები, რომლებიც აირეკლებიან (hkO) ბადეებიდან, პირველზე განლაგდებიან (hkl) ბადის შეს-



ნახ. VII. 13. ვერტიკალური (ა) და დახრილი (ბ) ბრტყილი ბადეების სტრუქტურული გეომეტრია, რომლებიდანაც სხივები აირეკლება საკუთრო Θ კუთხის შესაბამისად.

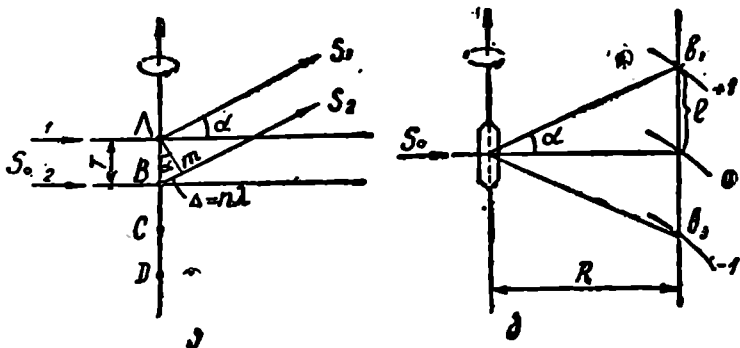
ამამისი არეკვლილი სხივების წერტილები, მეორეზე — (h_2)-ის შესაბამისი და ა. შ.

მანძილი შრეებს შორის (l) დამოკიდებულია იდენტურობის პერიოდზე, ე. ი. ბრუნვის ღერძის გასწვრივ ატომთა რიგის ტრანსლაციის ბიჯზე. მაგალითად, თუ კრისტალს ვაბრუნებთ c კრისტალ-



ნახ. VII. 14. ბრუნვის რენტგენოგრაფის სქემა.

ოგრაფიული ღერძის გარშემო (ნახ. VII. 15. ა), მაშინ კვანძების რიგი A, B, C, D, \dots ბრუნვის ღერძის ერთ-ერთი პარალელური რიგი იქნება; ხოლო კვანძებს შორის იდენტურობის პერიოდი — საძიებელი ელემენტარული უჯრედის a_0 პარამეტრი. იდენტურობის პერიოდის



ნახ. VII. 15. ბრუნვის მეთოდის ელემენტარული უჯრედის პარამეტრების გამოსაღწერილი ფორმულის გამოყვანა.

დასადგენი ფორმულის გამოსაყვანად s_2 სხივზე A წერტილიდან დაეწევათ Am მართობი, რომელიც α კუთხის შესაბამისადაა გადახრილი და ფირზე მოგვეცემს სათანადო b_1 წერტილს (ნახ. VII. 15. ა და ბ).

ნახაზიდან ჩანს სხივების სელათა სხვაობა $\Delta = Bm = n\lambda = T \sin \alpha$.

თუ ფოტოფირის ცილინდრის რადიუსს აღვნიშნავთ R -ით, ხოლო შრეებს შორის მანძილს l -ით, მივიღებთ $\text{ctg} \alpha = \frac{l}{R}$, ან ზოგადად

$\text{ctg} \alpha = \frac{ln}{R}$, სადაც ln არის მანძილი ნულოვანი შრეხაზიდან ნებისმიერ

შრეხაზამდე (n — შრეხაზის ნომერია). მაშასადამე, $n\lambda = T \sin \alpha \text{ctg} \frac{ln}{R}$,

საიდანაც

$$T = \frac{n\lambda}{\sin \alpha \text{ctg} \frac{ln}{R}}$$

თუ აღებულ კრისტალს ვაბრუნებთ b და შემდეგ a კრისტალოგრაფიული ღერძის გარშემო და განვსაზღვრავთ შესაბამისი იდენტურობის პერიოდებს, მივიღებთ ელემენტარული უჯრედის პარალელეპიპედის შესაბამის განზომილებებს. შეიძლება დავადგინოთ აგრეთვე ბრავეს მესრის ტიპიც.

როგორც ვხედავთ, ბრუნვის მეთოდის გამოყენებისათვის აუცილებელია საძიებელი ნივთიერების კარგად განვითარებული კრისტალის არსებობა, როგორც მისი ზუსტი ორიენტაციის საშუალებას უნდა იძლეოდეს.

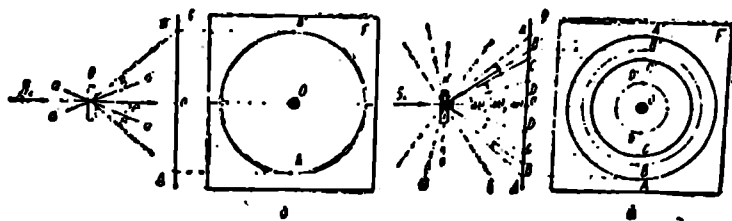
დ. ფხვნილის მეთოდი

1916 წელს დეზაიმ და შერერმა ვეტინგენში, ხოლო 1917 წელს, შათგან და მოუჯიღებლად აშშ-ში ჰელმა მიიღეს რენტგენის სხივების დიფრაქციის სუოათი, მათი კრისტალური ნივთიერების ფხვნილში გატარების შედეგად და ამით საფუძველი ჩაეყარა რენტგენოსტრუქტურული ანალიზის ფხვნილის მეთოდს. ზემოთ აღნიშნული მეთოდებისათვის აუცილებელია შესასწავლი ნივთიერების კარგად განვითარებული მონოკრისტალი და არააქვია. დეზაიმ-შერერის მეთოდში მონოკრისტალი შეცვლილია ნივთიერების ფხვნილით.

ფხვნილის მარცვლების ზომა ჩვეულებრივ არ უნდა აღემატებოდეს 0,001 მმ-ს, ხოლო მისგან დაწნეხილი ცილინდრის დიამეტრი — 0,5—1,0 მმ-ს. ეს სვეტი რენტგენის სხივების გავრცელების მიმართულების მართულია. სხივი აშუქებენ იესასწავლი ნივთიერების 0,25—2,0 მმ², სადაც მოთავსებულია ნაწილაკების დიდი რაოდენობა 10^4 — 10^7 -მდე

ფხვნილის მეთოდით (ნახ. VII. 16.) სტრუქტურის დადგენის დროს რენტგენის მონოკრომატული პარალელური S_0 სხივების კონა l ტალღის სიგრძით უცემა კრისტალური ნივთიერების ფხვნილის და-

წინეხილ K ცილინდრს, ნაწილი სხივებისა სვეტს გაივლის არეკვლის გარეშე და ფოტოფირზე წარმოიქმნება O ლაქა. სხვა სხივები კი აირეკლება კრისტალური ფენის იმ ბადეებიდან, რომლებიც განლაგებულია რენტგენის სხივების მიმართულებით ვულფ-ბრეგის ტოლობის დასაკმაყოფილებელი θ კუთხეებით. დაუშვათ, S , სხივთა კონუსი დახვდა რომელიმე მარცვლის aa ბრტყელი ბადე (hkl) ინდექსით და უახლოეს ბადეებს შორის d მანძილით), რომელიც მასთან ქინის θ კუთხეს (ნახ. VII. 16. ა). მაშინ სხივი მიიღებს KA მიმართულებას და F ფოტოფირზე აღნიშნავს A წერტილს. მარცვლებს შორის დასაშვებია ისეთი მარცვლის არსებობაც, რომელიც მოგვეცემს $a'a'$ ბრტყელ ბადეს საჭირო θ კუთხის ორიენტაციით და მივიღებთ A' წერტილს. ცხადია, რომ K სვეტში დაწინილი უამრავი მარცვლიდან ბევრი ისეთია, რომელშიც (hkl) ბადის საჭირო ორიენტაცია



ნახ. VII. 16. ფენილის მეთოდის სქემა.

გვექნება და მათგან არეკვილი სხივების ერთობლიობა წარმოაჩინებს კონუსს, რომლის ღერძი დაემთხვევა რენტგენის სხივების საწყის მიმართულებას, ხოლო მისი გამლის კუთხე იქნება 4θ . ეს სხივები ფოტოფირზე მოგვეციეს წრებას, რომლის ცენტრი იქნება O წერტილი.

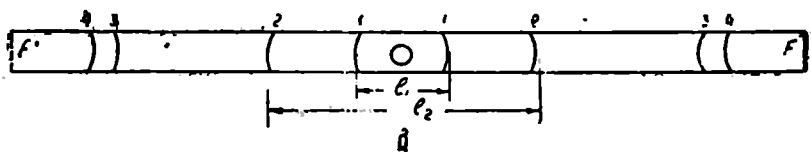
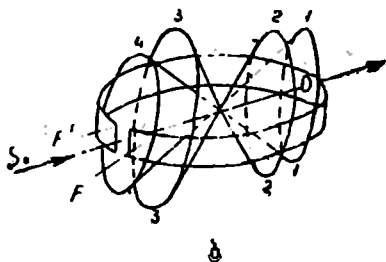
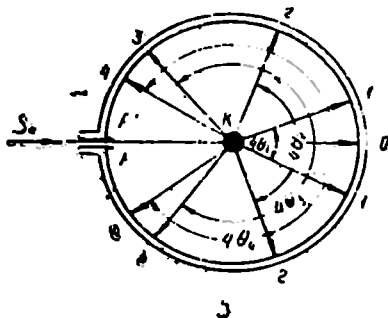
დაწინილი თხერი ლის სვეტში მოინახება სხვა ბრტყელი ბადეებიც ($h_n k_n l_n$) ინდექსით. როდესაც აგრეთვე მოგვეცემენ არეკვილი სხივთა კონუსებს $4\theta_1, 4\theta_2, 4\theta_3, 4\theta_4$ და ა. შ. გაშლის კუთხეებით. ეს კონუსები ფოტოფირზე მოგვეცემენ შესაბამის კონცენტრულ წრებადებს (ნახ. VII. 16. ბ). ზოგი მათგანი იქნება უფრო მკაფიო (უფრო გაშვებული). ბრტყელ ფოტოფირზე აღიბეჭდება იხლოდ იმ კონუსების შესაბამისი წრებადები, როდესაც გაშლის კუთხე 4θ ნაკლებია 180° -ზე, ე. ი. $\theta < 45^\circ$ -ზე. აქასთან დაკავშირებით, ფენილის მეთოდის გამოყენების დროს სრული რენტგენოგრაფიის მისაღებად მესასწავლ ობიექტს ფოტოფირს შეაოახვევენ იგი, როგორც ბრუნვის მეთოდის დროს (ნახ. VII. 17). ასეთ პირობებში F' ფოტოფირზე აღიბეჭდება ყველა წრებადის წყვილ-წყვილი მონაკვეთება, როგორც არეკვილი სხივების კო-

ნუსის და ფირის ცილინდრული ზედაპირის გადაკვეთის ხაზები. ასეთ რენტგენოგრაფას დეზაიგრაფას უწოდებენ. დიფრაქციული ხაზები ამოხსნილი მხარეებით მიმართულია ფირის ბოლოებისაკენ და შეესაბამება 45° -ზე ნაკლებ θ კუთხეებს, ხოლო როცა $\theta \geq 45^\circ$ -ზე, ხაზების ამოხსნილობა იმეზღებოდა.

θ კუთხის დასადგენად უნდა გაიზომოს მანძილი შესაბამის წყვილ-რკალეს შორის (l), რომლის მნიშვნელობაც უნდა ჩავსვათ ფორმულაში

$$\frac{4\theta}{360^\circ} = \frac{l}{2\pi R}, \text{ საიდანაც } \theta = \frac{45}{\pi R} l.$$

აქ R ცილინდრული კამერის რადიუსია, თუ აღენიშნავთ $\frac{45}{\pi R} = K$, მაშინ საბოლოოდ მივიღებთ $\theta = Kl$. როგორც ვხედავთ, K კოეფიციენტი



ნახ. VII. 17. ფენილის მეთოდი: ა-ღებავის კამერის სქემა, ბ-წრესხების ანაბეჭდები ფოტოფირზე, გ-ღებავიგრაფა.

დამოკიდებულია კამერის დიამეტრზე, მაგალითად, $K = \frac{1}{2}$, როდესაც კამერის დიამეტრი 57,3 მმ-ია.

უახლოეს ბადეებს შორის მანძილის დადგენა მოხდება ვულფ-ბრეგის ფორმულის საშუალებით

$$d = \frac{n\lambda}{2\epsilon \sin\theta}$$

კამერის საერთო ხედი მოცემულია VII. 18 ნახაზზე. ერთსა და იმავე კამერაში ერთი და იმავე ტალღის სიგრძის რენტგენის სხივე-

ბის გამოყენებით დებაიგრამაზე რკალების განლაგება დამოკიდებულია შესასწავლი კრისტალური ნივთიერების სტრუქტურაზე, ორი სხვადასხვა კრისტალური სტრუქტურის მქონე ნივთიერება მოგვეცემს ორ ერთმანეთისგან განსხვავებულ სურათს, ხოლო ერთნაირი ნივთიერება დებაიგრამები იქნება მსგავსი როგორც ხაზების (რკალების) განლაგებით, ისე მათი ინტენსიურობით, ამის გამო, კრისტალურ ნივთიერებათა დებაიგრამები შეიძლება გამოყენებულ იქნეს მათი შედარების (გაიგივების) მიზნით, ე. ი. ყოველი კრისტალური ნივთიერების პარალელურ დადევს შორის d მანძილი და ხაზების J ინტენსიურობა იქნება გარკვეული კონსტანტები (ეჩალონები), რომლებსაც შეიძლება შევადაროთ შესასწავლი ნივთიერების მიღებული სათანადო მახასიათებლები. ამ ხრიკ ფენილის მეთოდი გვაძლევს კრისტალური ნივთ-



ნახ. VII. 13. დებაისკამერის სურათი ხელი (წინა სახურავი მოხსნილია).

იერების დიფრაქციის საშუალებას, რაც უფართოდაა გამოყენებული მინერალოგიურ და ქიმიურ კვლევებში რენტგენოფიზიკური ანალიზის სახით.

ამ მზოვი აღსანიშნავია ვ. მიხევეის მიერ შედგენილი „მინერალთა რენტგენომეტრიული განმსაზღვრელი“, რომელშიც ავტორმა თავი მოუყარა 900-ზე მეტი სხვადასხვა მინერალის დებაიგრამების მახასიათ-

ებელ მონაცემებს (უახლოეს ბადეებს შორის მანძილს და ხაზების ინტენსიურობას). ამგამად რენტგენოფაზური ანალიზი ფართოდაა გამოყენებული არა მარტო მინერალოგებისა და კრისტალოგრაფების მიერ, არაეცდ მას წარმატებით იყენებენ ბეტალურგები, ქიმიკოსები და სხვ.

§ VII. 4. შებრუნებული მესერი.

კრისტალთა სტრუქტურის შესწავლაში დიფრაქციულ მეთოდებს ამგამად წამყვანი ადგილი უჭირავს. ამიტომ მეტად მნიშვნელოვანია დიფრაქციული სურათების ზუსტი და სწრაფი გაშიფვრა. ეს პროცესი (განსაკუთრებით რთული მესრის შემთხვევაში) აწყდება მთელ რიგ სიძნელეებს, რომელთა დაძლევა მნიშვნელოვნად მარტივდება დამხმარე საშუალების, ე. წ. შებრუნებული მესრის ცნების შემოტანით. შებრუნებული მესრის ყოველი კვანძი (წერტილი) hkl გამოსახავს პირდაპირი მესრის ნებისმიერ ბადეს (hkl). ეს კვანძი მოთავსებულია საკოორდინაციო ღერძთა საწყისიდან აღნიშნულ ბადეზე დაშვებულ მართობზე. მანძილი საწყისი წერტილიდან კვანძამდე აღებულ ბადეთა შორის უახლოესი მანძილის უკუპროპორციულია, ხოლო ამ კვანძების წრფივი რიგი აღნიშნული ნორმალის გასწვრივ გამოსახავს (hkl) ბადეთა მთელ ოჯახს (კვანძებს შორის მანძილი პირდაპირი მესრის უახლოეს ბადეთა შორის მანძილის (d_{hkl} -ის) შებრუნებული სიდიდეა). ჩვეულებრივ, შებრუნებული მესრის ელემენტებს აღნიშნავენ ვარსკვლავით, ასე, მაგალითად, შებრუნებული და პირდაპირი მესრების აღნიშნულ კვანძთა და ბადეთა შორის. მანძილების ურთიერთდამოკიდებულება შეიძლება გამოვსახოთ შემდეგნაირად: $d_{hkl}^* = \frac{1}{d_{hkl}}$;

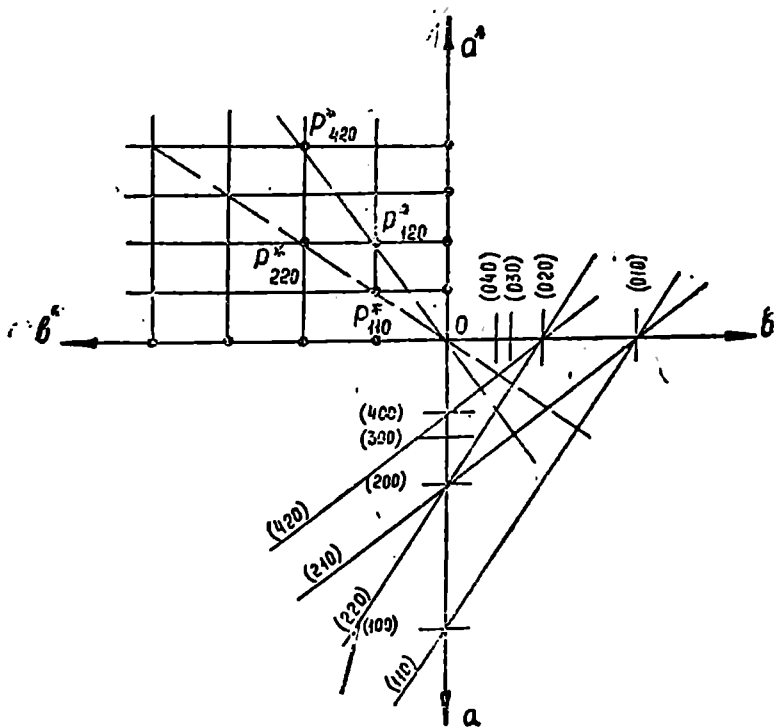
შებრუნებული მესრის ელემენტარული უჯრედის მოცულობა $v^* = \frac{1}{v}$ სადაც v პირდაპირი მესრის ელემენტარული უჯრედის მოცულობაა. შებრუნებული მესრის ღერძები აღინიშნება a^* , b^* , c^* -თი და განისაზღვრება როგორც ვექტორული ნამრავლები:

$$a^* = [b \times c], \quad b^* = [c \times a], \quad c^* = [a \times b].$$

პირდაპირი და შებრუნებული მესრები ყოველთვის ერთი და იგივე სინგონიაა. კუბურ, რომელ და ტეტრაგონურ სინგონიებში შებრუნებული მესრის a^* , b^* და c^* ღერძები ემთხვევა პირდაპირი მესრის ღერძების მიმართულებას, ხოლო დანარჩენ სინგონიებში, რომლე-

ბშიც არის არამართობი კრისტალოგრაფიული ლერძებიც, შებრუნებული მესრის ლერძების მიმართულება არ ემთხვევა პირდაპირი მესრის ლერძების მიმართულებას.

ამგვარად, პირდაპირი მესრის ყოველ ბადეს (hkl) შეესაბამება შებრუნებული მესრის $h^*k^*l^*$ კვანძი და კრისტალური მესრის ერთ რომელიმე ზონაში შემაჯალი ბადეების შესაბამისი კვანძები შებრუნე-

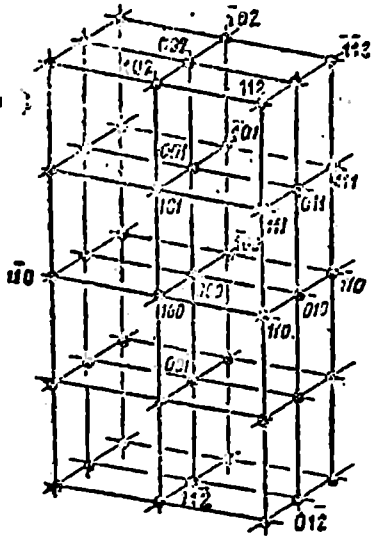


ნახ. VII. 19. რომელი მესრის $[001]$ ზონის ბადეები და მათი შესაბამისი კვანძები შებრუნებულ მესერში.

ბულ მესერში მოთავსდება ზონის ლერძის მართობ სიბრტყეში; მაგალითად, რომელი სინგონიის კრისტალური მესრის $[010]$ ლერძის მქონე ზონის ბადეები გამოისახება შებრუნებული მესრის კვანძებით, რომლებიც განლაგდებიან a^* და b^* ლერძთა სიბრტყეში.

VII. 19 ნახაზის ქვედა ნაწილში ინდექსების შესაბამისად მოცე-

მულია [001] ზონის რამდენიმე ბადის კვალი ($h00$), ($0k0$) და ($hk0$) (ეღერძი ნახაზის სიბრტყის მართობია). ნახაზის ზედა ნაწილში აგებულია ამ ბადეების შესაბამისი კვანძები შებრუნებულ მესერში. მაგალ-



ნახ. VII. 20. რომბული მესრის შებრუნებული მესერი

თად, პირდაპირი მესრის (420) ბადის შესაბამისი P^*_{420} კვანძი, რომელიც ამ ბადეზე დაშვებულ მართობზე მდებარეობს, ღერძთა საწყისი წერტილადან ორჯერ უფრო შორსაა, ვიდრე იმავე ბადეთა ოჯახში შემავალი (210) ბადის P^*_{210} კვანძი. ანალოგიურად მიიღება შებრუნებული მესრის P^*_{110} და P^*_{220} კვანძები პირდაპირი მესრის (110) და (220) ბადეების შესაბამისად.

რომბული სინგონიის შესაბამისი შებრუნებული მესერი სამივე განზომილებაში მოცეპულია VII. 20 ნახაზზე.

უფრო დაწვრილებით შებრუნებული მესრის გამოყენებას შეიძლება. გაეცნოთ სპეციალურ ლიტერატურაში (4, 22, 23, 28.)

§ VII. 5. ელექტრონოგრაფია და ნეიტრონოგრაფია

რენტგენოგრაფიულ მეთოდთან ერთად უკანასკნელ წლებში კრისტალური ნივთიერების სტრუქტურების დასადგენად იყენებენ აგრეთვე ელექტრონოგრაფიას და ნეიტრონოგრაფიას, რომლებიც ეფუარებიან სათანადოდ ელექტრონებისა და ნეიტრონების ტალღებისა და ნაწილაკების დიფრაქციის საერთო პრინციპებს კრისტალურ მესერზე. ამ მეთოდებს იყენებენ ისეთ შემთხვევებში, როდესაც რენტგენის სხივების საშუალებით სტრუქტურის დადგენა რთულდება. მიუხედავად იმისა, რომ სამივე მეთოდს (რენტგენოგრაფიას, ელექტრონოგრაფიასა და ნეიტრონოგრაფიას), როგორც დიფრაქციულ მეთოდებს, ბევრი აქვთ საერთო, ისინი ერთმანეთისაგან განსხვავდებიან გამოსხივების ნაკადებისა და კრისტალურ ნივთიერებათა ატომების ურთიერთქმედების ხასიათით.

რენტგენის სხივების (მოკლეტალღიანი ელექტრომაგნიტური აგ-

შოსხივების) დიფრაქცია დაზოკიდებულია ატომების ელექტრონულ გარსის შრეების ელექტრონთა აგზნებაზე, რაც თავის ცხრივ მეორეული გამოსხივების მიზეზია. ელექტრონაკადის დიფრაქცია ძირითადად განისაზღვრება მთელი ატომის ელექტრონთა ველით, რომელიც განპირობებულია ატომის დადებითი და ელექტრონული გარსის უარყოფითი მუხტის ურთიერთქმედებით, უდიდესი გაქოლივის უნარის მქონე ნეიტრონების ნაკადები კი განიზნევიან მხოლოდ ატომგულის მიქედებით.

აღნიშნულიდან გამომდინარეობს, რომ ერთნაირი ინტენსიურობის დიფრაქციული სურათის მისაღებად, გამოსხივების სათანადო სახის წესაბამისად, საჭიროა სხვადასხვა სისქის ნიშუმის ალება, მაგალითად, რენტგენოგრაფიისათვის ნიშუმის სისქე არ უნდა აღემატებოდეს 0,1 სმ-ს, ელექტრონოგრაფიული კვლევისათვის მეოყერბს 10^{-6} — 10^{-5} სმ ის, ხოლო ნეიტრონოგრაფიისათვის—0,1—0,5 სმ-ის ფარგლებში.

ელექტრონების დიფრაქცია დადგენილი იყო 1927 წელს. ამჟამად ელექტრონოგრაფიას ფართოდ იყენებენ ლითონებისა და მათი შენადნობების კრისტალური აგებულების დასადგენად. ელექტრონოგრაფიული კვლევების დროს შეიძლება ელექტრონოგრაფების მიღება როგორც კრისტალში გავლილი სხივის საშუალებით, ისე ელექტრონების აოეკლის შედეგად. ელექტრონოგრაფია იძლევა ნივთიერების წინდადისპერსიული აგრეგატების შესწავლის საშუალებას (მაგალითად, წმინდამარცვლიანი თხამინერალები, ქვარტლი და სხვ. რომელთა შესწავლა რენტგენოგრაფიული მეთოდით შეუძლებელია ნაწილაკების სიმკირის გამო), გარდა ამისა, ელექტრონოგრაფია გამოიყენება ამორფული მყარი სხეულებისა და სითხეების სტრუქტურების დასადგენად და აგრეთვე სხვადასხვა გაზის და ორთქლის მოლეკულების აგებულების კვლევის დროს. არეკვლის მეთოდის გამოყენებისას

ელექტრონები იჭრება შესასწავალი ნიშუმის შიგნით მხოლოდ 30—200 Å სიღომეზე, ამიტომ ამ მეთოდს ფართოდ იყენებენ ლითონთა ზედაპირის თხელი აკების შესასწავლად (მაგალითად, ლითონთა დაქანგვის ხასიათის დადგენა ან საერთოდ კოროზიული მოვლენების შესწავლა). უნდა აღინიშნოს, რომ ელექტრონოგრაფიისა და ნეიტრონოგრაფიის საშუალებით შესაძლებელია ზუსტად დავადგინოთ მსუბუქი ელემენტების მდებარეობა ნაერთის ელემენტარულ უჯრედში, რომელშიც შედის აგრეთვე მძიმე ელემენტები (მაგალითად, H, C, Cl; ან B, ანდა აზოტის ძდებარეობის განსაზღვრა Fe, Cr, Mn, W და სხვ. მძიმე ატომების შენაერთებში). აღსანაშნავია, რომ ელექტრონოგრაფიის ექსპოზიცია რამდენიმე წამია, მაშინ როდესაც რენტგენოგრაფის მიღება საათობით გრძელდება.

ნეიტრონოგრაფია როგორც სხვადასხვა ნივთიერების სტრუქტურათა შესწავლის მეთოდი, ვითარდება რეაქტორების მშენებლობის გავრცელების შესაბამისად, რადგან ბირთვული რეაქტორები ნეიტრონების მიღების წყაროა. ნეიტრონოგრაფიას იყენებენ წყალბადის შემცველი და ისეთი შენაერთების შესასწავლად, რომლებიც შედგებიან ან მკვეთრად განსხვავებული (WO_3 , Tl_2O_3 , PbS და სხვ.) ან ძალიან ახლო ატომური ნომრის ბჭონე ელემენტებისაგან ($FeCo$, $NiMn$ და სხვ.). ამ ბოლო წლებში ვითარდება ე. წ. მაგნიტური ნეიტრონოგრაფია, რომელიც კრისტალური ნივთიერების მაგნიტური სტრუქტურების განსაზღვრის სამუალებას გვაძლევს. ნეიტრონოგრაფიის გამოყენების სფერო თანდათან იზრდება (უფრო დაწვრილებით აღნიშნული მეთოდების შესახებ იხ. სპეციალურ ლიტერატურაში (10, 12)).

ნაწილი მესამე კრისტალთქიმია

თავი VIII.

ზოგადი ცნობები

§ VIII. 1. ზოგადი უნიფიკაცია

კრისტალთქიმია არის მეცნიერება, რომელიც შეისწავლის ატომთა (იონთა) განლაგებას კრისტალებში და ახდენს კავშირს ნივთიერების კრისტალურ სტრუქტურასა და მის ფიზიკურ და ქიმიურ თვისებებს შორის. კრისტალთქიმია განვითარდა ნივთიერების აგებულების შესწავლასთან ერთად. განსაკუთრებით რენტგენოსტრუქტურული მეთოდის შემოღების შემდეგ. ამ მიმართულებით ჩატარებული კვლევის შედეგად დაგროვილი ფაქტიური მასალის ძალიან დაგვიანდა, რომ კრისტალთა სტრუქტურების ნაირგვარობა დამოკიდებულია მათ შედგენილობაზე. სათანადო ატომების (იონების) ზომებსა და მათ შორის არსებული ბმის ხასიათზე.

თანამედროვე კრისტალთქიმია დამოუკიდებელი მეცნიერებაა რომლის კვლევის შედეგებს დიდი მნიშვნელობა აქვს ისეთი დარგებისათვის, როგორცაა მყარი ტანის ფიზიკა, ქიმია, მინეროლოგია, გეოქიმია, მეტალთმცოდნეობა და სხვ. კრისტალთქიმიის შემდგომი განვითარება საშუალებას მოგვცემს მივიღოთ წინასწარდასახული ფიზიკური თვისებების მქონე ნივთიერებანი.

§ VIII. 2 ქიმიური ზვის ტიპური კრისტალურ ხტარტტტტტტტტ

კრისტალის (მინერალის) სტრუქტურის აგების დროს ატომები ერთმანეთს უერთდება სხვადასხვა ტიპის ბმის საშუალებით. ატომების (იონების) ურთიერთდაკავშირების სხვადასხვა ბუნება განაპირობებს ნივთიერების ფიზიკურ და ქიმიურ თვისებებს. კრისტალურ სტრუქტურებში ძირითადად არჩევენ ქიმიური ბმის ოთხ ტიპს:

1. იონურს (ჰეტეროპოლარული, ელექტროვალენტური).
2. კოვალენტურს (ჰომოპოლარული),
3. მეტალურს (ელექტრონული),
4. ვან-დერ-ვაალსურს (მოლეკულური).

ქიმიური ბმა ხორციელდება სავალენტო ელექტრონების საშუალებით

ბით, რომლებიც განლაგებულა ატომთა ელექტრონული გარსის გარეთა შრეზე. ამ ელექტრონების განლაგების ხასიათს გადაწყვეტი მნიშვნელობა აქვს ბმის ტიპის განვითარებისათვის. რიგ სტრუქტურებში არსებობს მხოლოდ ერთი ტიპის ბმა, მაგრამ უფრო ხშირად სტრუქტურებში ერთდროულად მოქმედებს ორი ან მეტი ტიპის ქიმიური ბმის ძალები. კარისტალურ სტრუქტურებს, რომლებშიც მხოლოდ ერთი ტიპის ბმის ძალა მოქმედებს, ჰომოდისმური სტრუქტურები ეწოდება. მაგალითად, სპილენძის, ქვამარილის ან ალმასის სტრუქტურები; სტრუქტურებს, რომლებშიც სტრუქტურულ ერთეულებს შორის მოქმედებს განსხვავებული ტიპის ბმები, ჰეტეროდისმური ეწოდება. მაგალითად, გრაფიტის (C), სფალერიტის (ZnS), CO₂-ის და სხვა სტრუქტურები.

იონური ბმა

არაორგანიულ ნივთიერებებში ხშირად გვხვდება იონური ბმა. მისი არსი იმაში მდგომარეობს, რომ ურთიერთქმედების დროს ერთი ატომი მეორისაგან მიიზიდავს ერთ ან რამდენიმე ელექტრონს და გარდაიქმნება უარყოფითად დაჰეჯულ იონად—ანიონად, მაშინ როდესაც მეორე ატომი ელექტრონების გაცემის შედეგად გარდაიქმნება დადებითად დამუხტულ იონად—კატიონად. წარმოშობილ სხვადასხვა მუხტის მქონე იონებს შორის ვითარდება ელექტროსტატიკური კავშირი კულონის კანონის თანახმად.

აუგზნებელი (ნეიტრალური) ატომის ელექტრონული გარსიდან ერთი ელექტრონის მოსაწყვეტად საჭირო ენერჯიას იონიზაციის პოტენციის სახელით უწოდებენ, ხოლო ენერჯიის იმ რაოდენობას, რომელიც მიიღება (გამოიყვანა) ან დაიხარჯება (შთაინთქმება), ერთი ელექტრონის მიერთებით ნეიტრალური ატომის ანიონად გარდაქანისათვის, ელექტრონთან სწრაფვის ენერჯიას უწოდებენ.

იონიზაციის პოტენციული პერიოდულად იცვლება. ყოველ პერიოდში პოტენციულის მაქსიმალური მნიშვნელობა აქვს კეთილშობილ (ინერტულ) გაზებს. ეს გამოწვეულია იმით, რომ ატომს ყველაზე მდგრადი გარეთა ელექტრონული გარსი აქვს მაშინ, როდესაც იგი ელექტრონებით მთლიანადაა შევსებული. ელექტრონული გარსის „გასამდგრადებლად“, ე. ი. მათი გარეთა შრის ელექტრონებით შესავსებლად ხშირად საკმარისია ერთი (ან რამდენიმე) ელექტრონის დამატება ან გაცემა.

იმის დასადგენად, ქიმიური ელემენტების ატომი ელექტრონს უფრო ძლიერად დაკარგავს თუ მიიზიდავს; უნდა გავითვალისწინოთ ამ ელემ-

მენტის იონიზაციის პოტენციალისა და ელექტრონთან სწრაფვის სიდიდეების ჯამური მნიშვნელობა, რომელსაც პოლინგის მიხედვით ელექტროუარყოფითობას უწოდებენ. ამრიგად, ქიმიური ელემენტის ყოველი ატომი შეიძლება დაეახასიათოთ როგორც საკუთარი, ისე მიზიდული ელექტრონის შენარჩუნების უნარის მიხედვით. არსებობს ელემენტების ელექტროუარყოფითობის გამოანგარიშების სხვადასხვა მეთოდი, მათ შორის ყველაზე მარტივი და საკმაოდ ზუსტი მოგვცა ა. პოვარენისმა 1962 წელს. მან ელექტროუარყოფითობის განსაზღვრისათვის გამოიყენა ფორმულა

$$E = \frac{In}{n} + F,$$

სადაც In არის იონიზაციის პოტენციალი მისი გარკვეული ვალენტური მდგომარეობისათვის;

n —ატომის ვალენტობა;

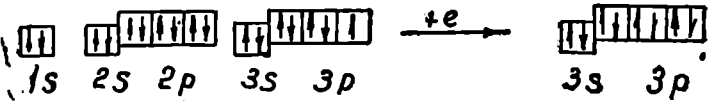
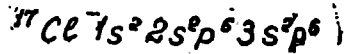
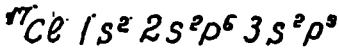
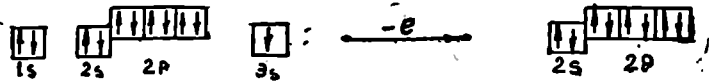
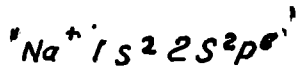
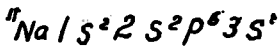
F —ელექტრონთან სწრაფვა;

E —ელექტროუარყოფითობა.

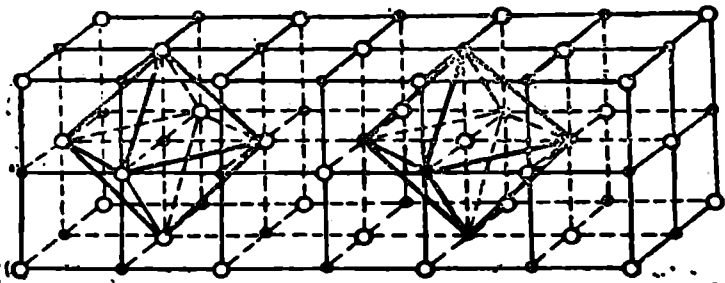
ამ ფორმულის საშუალებით გამოანგარიშებულია მრავალი ელემენტის ელექტროუარყოფითობა მათი სხვადასხვა ვალენტობის შესაბამისად (იხ. ტაბულა VIII. 1).

თუ ორი ურთიერთმოქმედი ქიმიური ელემენტის ატომებს ელექტროუარყოფითობა მკვეთრად განსხვავებული, მაშინ ის ელემენტი, რომლის ელექტროუარყოფითობაც მეტია, გადაიზიდავს ერთ ან მეტ ელექტრონს. მეორე ელემენტის ატომისაგან. აღსანიშნავია, რომ ურთიერთქმედებენ მხოლოდ ის ატომები, რომელთა გარეთა ელექტრონებო განსხვავებული ორიენტაციის (ნიშნის) სპინებით ხასიათდება.

მაგალითისათვის განვიხილოთ ქვამარილის (NaCl) სტრუქტურა, რომლისთვისაც დამახასიათებელია ტიპური იონური ბმა. ამ შენაერთში შემავალ ელემენტებს—ნატრიუმს და ქლორს—მკვეთრად განსხვავებული ელექტროუარყოფითობა აქვს ($\text{Na} - 11\text{eV}$ და $\text{Cl} - 450\text{eV}$) და ამიტომ მათი ატომებს ურთიერთქმედების დროს ქლორის ატომი გადაიზიდავს ნატრიუმის ატომიდან $3s'$ ელექტრონს, რის შედეგადაც ორივე ელემენტის იონი მიიღებს მდგრად 8 ელექტრონიან ($s^2 + p^6$) გარეთა შრეს ნეონისა და არგონის მსგავსად:



ვინაიდან იონურ ბმას არა აქვს მიმართულება (როგორც, მაგალითად კოვალენტურ ბმას, ამი უბო ყოველი იონი ცდილობს გარს შემოიკრას საწინააღმდეგო ნიშნის იონების მაქსიმალური რაოდენობა და თავისი მუხტი მათ თანაბრად გაუნაწილოს. მოცემულ მაგალითში ნატრიუმის კატიონის გარშემო. შეიძლება ერთდროულად მოთავსდეს ქლორის მხოლოდ ექვსი ანიონი და ელექტროსტატიკური წონასწორობის გამო ქლორის ყოველ ანიონს უნდა შეეხოს მხოლოდ ექვსი ნატრიუმი, მიუ-



ნახ. VIII. 1. იონთა განლაგება ქვამარილის (Na Cl) სტრუქტურაში, ყოველ ქლორს ახვრია ექვსი ნატრიუმი და ყველ ნატრიუმს ექვსი ქლორი (ბურთულებით აღნიშნულია იონთა ცენტრის ადგილები).

ხედავად იმისა, რომ მათა ზოიები საშუალებას იძლევა ქლორის ერთ ანიონს ერთდროულად შეეხოს ნატრიუმის 12-ზე მეტი კატიონი (ნახ. VIII. 1). მაშასადამე, იონის ვალენტობა მიგვიჩიბთებს მხოლოდ მისი მუხტის სიდიდებზე და არა მის გარშემო განლაგებულ იონთა

საოდნობაზე. ამგვარად, იონთა შენაერთებში ელემენტების დაჯგუფება მოლეკულურად (NaCl-ის სახით) შეუძლებელია და მთელი კრისტალი შეიძლება წარმოვიდგინოთ, როგორც უზარმაზარი მოლეკულა. რომელიც შედგება Na^+ და Cl^- იონების დაუსრულებელი რიცხვისაგან.

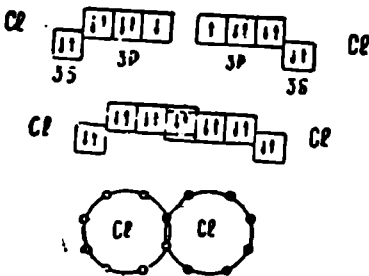
ტ ა ბ უ ლ ა VIII. 1.

ელემენტების ელექტროუარყოფითობა (კ. ჯოულ-მოლებით)
ა. პოვარენის მხედვეთ

ელემენტი	ელექტრო- უარყოფითობა	ელემენტი	ელექტრო- უარყოფი- თობა	ელემენტი	ელექტრო- უარყოფი- თობა
H ⁺	1320	Co ²⁺	816	Sb ³⁺	1235
Li ⁺	504	Ni ²⁺	879	Te ⁴⁺	1941
Be ²⁺	880	Cu ²⁺	984	J ⁷⁺	1571
B ³⁺	1215	Cu ⁺	750	Cs ⁺	377
C ⁴⁺	1550	Zn ²⁺	858	Bu ²⁺	481
N ⁵⁺	1883	Ga ³⁺	984	Lu ³⁺	628
O ⁶⁺	2219	Ge ⁴⁺	1109	Ce ⁷⁺	628
F ⁷⁻	2553	As ⁵⁺	1257	Hf ⁴⁺	753
Na ⁺	502	Se ⁶⁺	1466	Ta ⁵⁺	879
Mg ²⁺	733	Br ⁷⁺	1758	W ⁶⁺	984
Al ³⁺	921	Rb ⁺	3.8	Ru ⁷⁺	1088
Si ⁴⁺	1088	Si ²⁺	523	Os ⁷⁺	963
P ⁵⁺	1299	Y ³⁺	670	Tr ⁴⁺	941
S ⁶⁺	1571	Zr ⁴⁺	816	Pt ²⁺	900
Cl ⁷⁺	1925	Nb ⁵⁺	963	Au ⁺	879
K ⁺	419	Mo ⁶⁺	1088	Hg ²⁺	900
Ca ²⁺	905	Tu ⁷⁺	1299	Tl ²⁺	963
Sc ³⁺	795	Ru ³⁺	984	Pb ²⁺	733
Ti ⁴⁺	1045	Rh ³⁺	1046	Bi ³⁺	816
V ⁵⁺	1257	Pd ⁴⁺	1172	Po ⁶⁺	1172
Cr ⁶⁺	1466	Ag ⁺	73	Fr ⁺	377
Mn ⁷⁺	2219	Cd ²⁺	816	Ra ²⁺	481
Fe ²⁺	984	Jn ³⁺	900	Ac ³⁺	607
Fu ³⁺	774	Sn ⁴⁺	1100	Th ⁴⁺	691

კოვალენტური, ანუ, როგორც მას უწოდებენ, ჰომეოპოლარული ბმა; წარმოიშობა იმ ატომებს შორის, რომელთა ელექტროუარყოფითობა მცირედ განსხვავდება ერთმანეთისაგან და ამიტომ აქ იონები არ წარმოიშობა. კოვალენტური ბმის ბუნება ელექტრომაგნიტურია. ბმა ხდება მხოლოდ მაშინ, როდესაც ურთიერთმოქმედი ატომების ელექტრონულ გარსში არის გაუწყვილებელი (ცალთა) და საწინააღმდეგო ნიშნის სპინის მქონე ელექტრონები, რომლებიც შეწყვილდებიან და ერთდროულად იმოქმედებენ ორივე ატომის ელექტრონულ გარსზე. ატომების სწრაფვა ელექტრონების შეწყვილებისადმი გამოწვეულია იმავე მიზეზით, რომელიც იწვევდა მათ იონიზაციას. ეს არის ატომის ტენდენცია, მიიღოს ელექტრონების მდგრადი კონფიგურაცია, ე. ი. მიიღოს ელექტრონებით მთლიანად შევსებული გარეთა შრე და პირველ რიგში 8-ელექტრონიანი ($s^2 + p^6$) შრე კეთილშობილი გაზების მსგავსად.

ბმის ეს ტიპი დამახასიათებელია, მაგალითად, ქლორისათვის, რომლის ატომის გარეთა შრე შედგება 7 ელექტრონისაგან ($3s^2 p^5$). მას აქვია მხოლოდ ერთი p ელექტრონი, რომ მიიღოს კეთილშობილი გაზის—არგონის მსგავსი მდგრადი გარეთა შრე, რომელიც 8 ელექტრონისაგან ($3s^2 p^6$) იქნება შემდგარი (ნახ. VIII• 2). შეერთება მოხდება

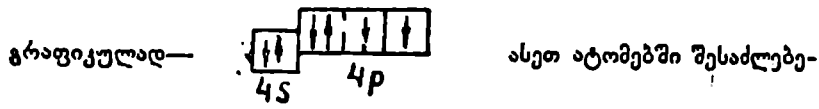


ნახ. VIII• 2. კოვალენტური ბმის სქემა ქლორის მოლეკულაში (Cl_2)

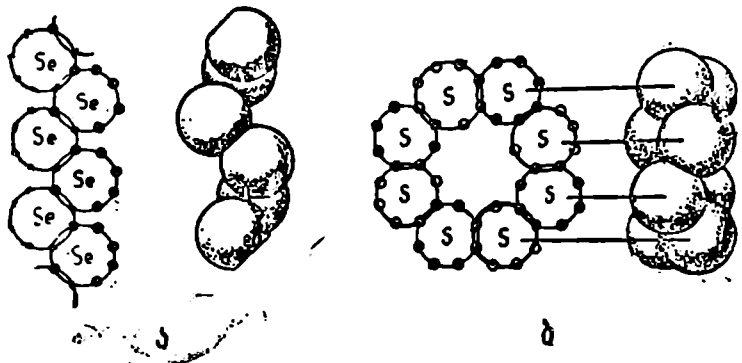
ქლორის იმ ატომებს შორის, რომლებსაც ექნება გაუწყვილებელი ელექტრონები სხვადასხვა ნიშნის სპინებით. ამგვარად, Cl_2 -ში მისუოველ ატომს აქვს არგონის ატომის ელექტრონული კონფიგურაცია. ცხადია, ატომთა რიცხვი ურთიერთშეერთებისას შეზღუდულია. მაგალითად, ქლორის მოლეკულაში შესაძლებელია მხოლოდ ორი ატომის დაკავშირება, რადგან მათ აქვთ მხოლოდ თითო-თითო გაუწყვილებელი ელექტრო-

ნი და შესაძლებელია ყოველი ატომისათვის მხოლოდ ერთი კოვალენტური ბმის განხორციელება.

სელენის (Se) ატომს აქვს ორ-ორი გაუწყვილებელი ელექტრონი და მათი გარეთა შრე წარმოადგენილია შემდეგნაირად: $4s^2 p^4$ | ან



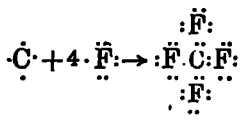
ლია ორ-ორი კოვალენტური ბმით განხორციელება, რადგან კრისტონის ატომისკ გარეთა შრის მსგავსი კონფიგურაციის მისაღებად საჭიროა ორი ელექტრონის აღმატება (სხვადასხვა მხრიდან), ე.ი. ერთ ასეთ ატომს შეუძლია სხვადასხვა მიმართულებით შეუერთდეს ორ ატომს და ქლორის იზოლირებული მოლეკულების ნაცვლად წარმოქმნას ან უსასრულო ქეცკები, ან მრავალატომიანი რგოლები (ნახ. VIII. ბ.) სელენის ყოველ ატომს შეუძლია შეუერთდეს მეზობელ ორ ატომს ისე, რომ შეერთების მიძართულებებს შორის კუთხე 105° იყოს, მიიღება დაკლანჩილი ქეცკი (ნახ. VIII. 3,ა), რომბული გოგირდი კი წარმოშობს რვა-რვა ატომიან რგოლებს ორსართულიანი აგებულებით (ნახ. VIII. 3,ბ). მოყვანილ ნახაზზე პირობით გამოხაზულია სელენის N შრე და გოგირდის M გარეთა შრეები. როგორც ვხედავთ, ერთვალენტიანი ელემენტები (Cl, Br, J) იძლევა იზოლირე-



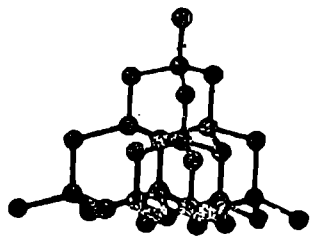
ნახ. VIII. 3. სელენისა და გოგირდის ატომებს შორის კოვალენტური ბმის პირობითი სქემები: ა-სელენის ატომებით აგებული აგებული უსასრულო ქეცკი, ბ-რომბული გოგირდის რგოლი.

ბულ ორატომიან მოლეკულებს. მათ კრისტალურ სტრუქტურებში ეს მოლეკულები სუსტადაა ურთიერთდაკავშირებული (ნახ. VIII. 4) და ამიტომ წყალში ადვილად იხსნება. ორვალენტიანი ელემენტები ქმნიან ან რგოლებს (რომბული გოგირდი), ან დაუსრულებელ ქეცკებს

ღებმა შესაძლებელია მხოლოდ იმ შემთხვევაში, როდესაც შემდგომი ბმის განხორციელების შედეგად მიღებული ენერჯით მთლიანად აქნება კომპენსირებული გადაადგილებაზე გაწეული ენერჯის ხარჯი. მაგალითად, ნახშირბადის აგზნებული ატომის (C_{II}) შეუძლია მიიერთოს ფთორის ოთხი ატომი, რომლებსაც თითო გაუწყვილებელი ელექტრონი აქვს ($2s^1 p^1$) ანუ $2(s^1 p_x^1 p_y^1 p_z^1)$:



ნახშირბადის აღნიშნულ ატომებს (C^{II}) შეუძლია აგრეთვე ერთმანეთთან შეერთება კოვალენტური ბითაც, რის შედეგადაც წარმოიშობა მალალი მდგრადობის ძქონე ალმასის კრისტალები, რომელთა სტრუქტურებში ნახშირბადის ყოველი ატომი დაკავშირებულია მის გარშემო ტეტრაედრულად განლაგებულ ოთხ-ოთხ ატომთან (ნახ. VIII ნ.). ნახაზზე შავი რგოლებით აღნიშნულია ნახშირბადის ატომების ცენტრის ადგილები.



ნახშირბადის ატომებში კოვალენტური ბმის პირობებში ისპობა განსხვავება $2s$ და $2p$ ელექტრონებს შორის. აქ ოთხივე ელექტრონი ($2s$ და $2p$) მოძრაობს საერთო (შერეული) ზედაპირის გასწვრივ. ამ მოვლენას ელექტრონების ჰიბრიდიზაცია უწოდებენ. ჰიბრიდულ sp ზედაპირებს შორის ბმა უფრო მდგრადია, ვიდრე ცალკეულ s და p ელექტრონულ ზედაპირებს (ორბიტალებს) შორის.

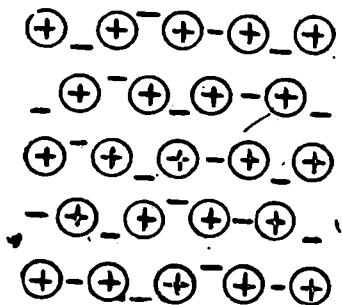
ნახ. VIII. 5 ნახშირბადის ატომების კოვალენტური ბმა ტეტრაედრული განლაგებით ალმასის სტრუქტურაში.

მეტალური ბმა

მეტალური (ლითონური) ბმა გვხვდება ერთდ და იმავე ელემენტის (უშუქესად ლითონების) ატომებში სტრუქტურაში. მისი არსი იმაში მდგომარეობს, რომ ატომები უზიეთებდაკავშირებისათვის იყენებენ სავალენტო ელექტრონებს, რომლებიც ვანდერვალსის ნაკადის სახით მოძრაობენ ერთმანეთთან ნეიდროდ განლაგებულ კატიონებს შორის. ამ ნაკადს „ელექტრონულ გაზს უწოდებენ“. აღნიშნული ბმის

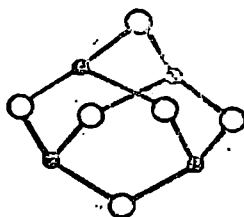
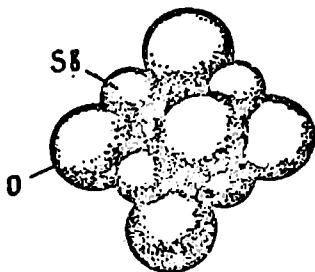
სქემა მოცემულია VIII. 6 ნახაზზე. როგორც ვხედავთ, ვალენტური ელექტრონები არ ეკუთვნის ერთ რომელიმე იონს და „საერთო“ სტრუქტურაში შემავალი ატომებისათვის. ამით აიხსნება ლითონთა მაღალი ელექტროდა თბოგამტარობა. კოვალენტური ბმისაგან განსხვავებით, მეტალურ ბმას არა აქვს მიმართულება და აბრუნდის ატომები ცდილობენ განლაგდნენ ძალიან მჭიდროდ და გარს შემოიკრან ატომთა მაქსიმალური რიცხვი. ამიტომაც, რომ მეტალურ სტრუქტურებში ერთ ატომს გარს ეკვრის ან 12 მეზობელი ატომი (მაგალითად, სპილენძი, თუთია, მაგნიუმი და სხვ.) ან 8, როგორც მოლიბდენის, ვოლფრამის და სხვა სტრუქტურებში (იხ. § IV. I).

ვან-დერ-ვალსური ბმა



ნახ. VIII. 6. მეტალური ბმის პრინციპული სქემა.

ვან-დერ-ვალსური, ანუ მოლეკულური ბმა გვხვდება ინერტული გაზების ატომურ სტრუქტურებში, რომელთა დაუმეხტავი ატომების გარეთა შიგნით მთლიანად ელექტრონებითაა შევსებული ან მოლეკულურ სტრუქტურებში, მაგალითად, სენარმონიტის (Sb_2O_3) კრისტალებში, სადაც Sb_2O_3 -ის მოლეკულები ერთმანეთთან მოლეკულური (ვან-დერ-ვალსური) ბმითაა დაკავშირებული, თუმცა თვით მოლეკულებში (ნახ. VIII. 7). სტიბიუმში და ჟანგბადი ერთმანეთს კოვალენტური ბმით უკავშირდება.



ა

ბ

ნახ. VIII. 7. Sb_2O_3 კომპლექსური მოლეკულა სენარმონიტის კრისტალების სტრუქტურული ერთეულია: ა-იონთა ზომების შესაბამისი ბირთვები; ბ-იგივე, იონთა ცენტრების აღნიშვნით.

მოლეკულური ბმის ძალები, ზემოთ აღწერილ ბმის ძალებთან შედარებით, გაცილებით სუსტია. მოლეკულური ბმა პირველად შესწავლილ იქნა 1873 წელს ჰოლანდიელი ფიზიკოსის ვენ-დერ-ვალსის მიერ და აპიტომ ძიილო ეს სახელწოდება. ეს ძალები სხვადასხვა ბუნებისაა და მოქმედებს მოლეკულებს შორის, რომელთა მიგნით შეიძლება განხორციელდეს კოვალენტური ან იონური ბმა. ვან-დერ-ვალსური ძალების სისუსტე აპირობებს შესაბამისი კრისტალური ნივთიერების ღლიობის დაბალ ტექპერატურას, სითბური გაჟაბოების მაღალ კოეფიციენტს, სირბილეს და სხვა ფიზიკურ თვისებებს.

დონორულ-აქცეპტორული ბმა

გარდა ზემოთ აღწერილი ოთხი ტიპის ბმისა, მინერალთა სტრუქტურებში გვხვდება უფრო რთული ბუნების ბმები, რომელთა შორის აღსანიშნავია დონორულ-აქცეპტორული ბმა (donor — ლათინურად „გჩქი“, acceptor — „მიღება“). ასეთი ბმის არსი იმაში მდგომარეობს, რომ ერთი ატომი გასცემს ელექტრონებს, ხოლო მეორე — მიიღებს. იონური ბმისაგან განსხვავებით, სადაც ელექტრონების გაცემა ატომებს შორის სამუდამოდ ხდებოდა, აქ გვაქვს „საზიარო“ ელექტრონები, რომლებიც მოძრაობენ ხან ერთი ატომის შრეში და ხან მეორეში. მინერალთა სტრუქტურებში აქცეპტორის სახით, ჩვეულებრივ, წარმოდგენილია იმ ქიმიური ელემენტების კატიონები, რომლებსაც არა აქვს შევსებული d ქვეონები და მიისწრაფვიან შექმნან 18-ელექტრონიანი შრეები, მაგალითად, Fe , Cr და სხვ. დონორის როლს ასრულებენ ელემენტები, რომლებსაც აქვთ დიდი ზომის და მცირე მუტის ანიონები მ-ელექტრონიანი გარეთა შრით (S^{2-} , As^{3-} , Cl^{-} F^{-} და სხვ.)

იშისათვის, რომ დონორულ-აქცეპტორული ბმის არსი უფრო ნათელი გახდეს, განვიხილოთ პირიტის (FeS_2) კრისტალურ მესერში რკინისა და გოგირდის იონებს შორის კავშირი. გოგირდის ატომის გარეთა შრე წარმოდგენილია 6 ელექტრონით ($3s^2p^4$), პირიტში გოგირდის ორი ორვალენტთან ანიონი შეწყვილებულია $[S_2]^{2-}$ რადიკალის სახით, რომელსაც 14 გარეთა ელექტრონი აქვს (6-6 ყოველი ატომის ხარჯზე და ორი ელექტრონი გადმოზიდულია რკინის ატომიდან) ამ ელექტრონების განაწილება შეიძლება გამოისახოს სქემით $[\ddot{S} : \ddot{S}]$, სადაც გოგირდის ყოველი იონის გარეთა შრეზე რვა-რვა ელექტრონია. გოგირდის ატომები დაკავშირებულია ორი ელექტრონით, დანარჩენი ოთრმეტი კავშირში არ მონაწილეობს.

რკინის ატომის გარეთა შრეზე გვაქვს 16 ელექტრონი ($3s^2p^6d^64s^2$)

(იხ. ტაბულა VIII. 2). ორვალენტიანი კატიონის მისაღებად რკინა ადვილად გასცემს ორ ელექტრონს ($4s^2$). მაგრამ ამის შემდეგ ვერ ღებულობს ელექტრონების განლაგების ხელსაყრელ სტრუქტურას, რადგან გარეთა შრეზე რჩება 14 ელექტრონი ($3s^2 3d^6$). იმისათვის, რომ Fz^{2+} მიიღოს ელექტრონების განაწილების ხელსაყრელი კონფიგურაცია, მაგალითად, 18-ელექტრონიანი გარეთა შრე, მას სჭირდება 4d ელექტრონის დამატება, რის გახსორციელებაც ამ შემთხვევაში შეუძლებელია, ხოლო იმისათვის, რომ მან მიიღოს Az ან Kz ტიპის გარე შრეები, საჭიროა ან ექვსივე d ელექტრონის მოწყვეტა, რასაც სჭირდება ძალიან დიდი ენერჯია, ან 12 ელექტრონის დამატება, რომელთაგან ოთხი დაიხარჯება 3d ქვედონის შესავსებად, ხოლო დანა-ჩენი რვა ელექტრონი წარმოშობს $4s^2 3d^6$ გარეთა შრეს კრიტიკონის ტიპის ელექტრონთა სტრუქტურის მსგავსად. უკანასკნელი პირობის განხორციელება შესაძლებელია, თუ გამოვიყენებთ ზემოთ აღნიშნულ 12 ელექტრონს, რომლებიც შეწყვილებულ გოგირდთანაა $[S_2]^{2-}$ განლაგებული. ცხადია, რკინის კატიონი ამ ელექტრონებს სულ ვერ დაისაკუთრებს და, ამდენად, პირიტის კრისტალურ სტრუქტურაში აღნიშნული 12 ელექტრონი მოძრაობს ხან შეწყვილებული გოგირდის გარსში, ხან რკინის იონის გარსში, ე. ი. აქ ადვილი აქვს დონორულ-აქცეპტორულ ბმას.

§ VIII. 3. ატომთა და იონთა რადიუსები

მინერალთა კრისტალების სტრუქტურების დადგენის დროს აუცილებელია ვიცოდეთ მათი ამგები ნაწილაკების (ატომების, იონების) ზომები. ნაწილაკების ზომები პირველ რიგში განაპირობებს მანძილს უახლოეს იონებსა და ატომებს შორის. ვინაიდან ჭიმოური ელემენტების ელექტრონული გარსები სხვადასხვა აგებულებისაა, ამიტომ შენაერთებში სხვადასხვანაირი იქნება მათი ურთიერთმოქმედებაც და იონთაშორისი მანძილიც. ამის გამო შეიძლება დავუშვათ, რომ ყოველი ატომის (იონის) გარშემო არსებობს გარკვეული მოქმედების არე, რომლის შიგნით ვერც ერთი სხვა იონები ვერ შეიჭრება. ამ მოქმედების არეს ატომის ან იონის სფეროს უწოდებენ, ხოლო მათ რადიუსებს—ატომის ან იონის რადიუსს, ე. ი. ატომის ან იონის რადიუსი არის ის მინიმალური მანძილი, რომლითაც კრისტალურ სტრუქტურაში ატომის ან იონის ცენტრი უახლოვდება მეზობელი ატომის ან იონის ზედაპირს.

სიმარტივისათვის დავუშვათ, რომ ატომს (იონს) აქვს სფეროს ფორმა. მისი რადიუსის ზომა პირველ რიგში დამოკიდებულია იმ ელექტრონების რაოდენობაზე, რომლებიც ატომულს გარშემო მოძრაობენ. ადვილი წარმოსადგენია, რომ ატომის ზომასთან შედარებით მისგან წარმოქმნილი შესაბამისი იონის ზომაც განსხვავებულ იქნება

ელექტრონების გაცემის ან შექმნის შესაბამისად—კატიონები უფრო მცირე და ანიონები—უფრო დიდი. მაგალითისათვის განვიხილოთ გოგირდის იონები, რომლებიც შეიძლება იყოს ან ექვსვალენტიანი კატიონი, ან ორვალენტიანი ანიონი:

გოგირდის ატომი და მისი იონები:

რადიუსის ზომები

S^{4+}	S^0	S^{2-}
0,30	1,04	1,86 Å

საყურადღებოა ის გარემოებაც, რომ ერთი და იმავე ელემენტის ატომს ან იონს, სხვადასხვა პოლიმორფულ მოდულიკაციაში ან ქიმიურ ნაერთში სხვადასხვა ბმის პირობებში, უნდა ჰქონდეს ერთმანეთისაგან განსხვავებული მოქმედების არე (სფერო), ე. ი. უნდა ჰქონდეს სხვადასხვა ეფექტური რადიუსი.

ატომთა და იონთა რადიუსების დადგენა შესაძლებელი გახდა რენტგენოსტრუქტურული ანალიზის შემოღების შემდეგ, რომელმაც კრისტალთა სტრუქტურებში ატომთა და იონთშორისი მანძილების განსაზღვრის საშუალება მოვცა, მარტივ ნივთიერებათა სტრუქტურებში, სადაც ატომთა სფეროები უშუალოდ ეხება ერთმანეთს, რადიუსი შეიძლება განესაზღვროთ ატომთშორისი მანძილის შუაზე გაყოფით. მაგალითად, ხალასი სპილენძის სტრუქტურაში (ნახ. VIII. 8)

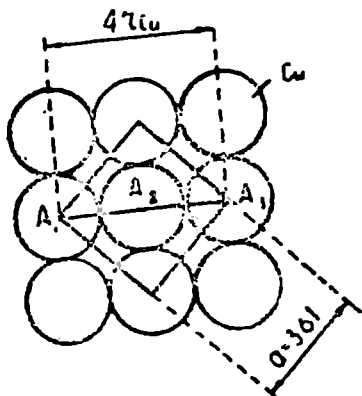
ელემენტარული კუბის წიბოს სიგრძე $a = 3,61 \text{ Å}$ (რენტგენოსტრუქტურული) მონაცემებით გამოვანგარიშოთ ატომთშორისი უმოკლესი მანძილი:

$$A_1 A_2 = \frac{A_1 A_3}{2} = \frac{a\sqrt{2}}{2} = 2,56 \text{ Å}$$

სპილენძის ატომის რადიუსი

$იონის რადიუსის განსაზღვრისათვის შევარჩიოთ ისეთი ბინარული შენაერთი, რომელშიც დიდი ზომის ანიონები წყობაში უშუალოდ შეეხება ერთმანეთს, პატარა კატიონები კი მოთავსდება ანიონთა შორის წარმოქმნილ სივარცელებში. მაგალითისათვის განვიხილოთ ლანდეს მიერ 1920 წელს ჩატარებული გაზომვები MgS -თვის (ნახ. VIII. 9). რენტგენოსტრუქტურული მეთოდის გამოყენებით ლანდემ დაადგინა, რომ$

Mg და S იონთშორისი მანძილი $x_1 k = 2,60 \text{ Å}$. როგორც ნახაზიდან ჩანს, $x_1 x_2$ მანძილი გოგირდის ორი ანიონის რადიუსის ($2r_2$) ტო-



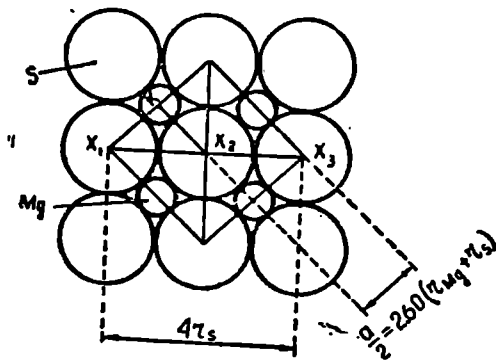
ნახ. VIII. 8. ატომის რადიუსის განსაზღვრის სქემა სპილენძის სტრუქტურაში (გეგმილი (100)-ზე)

ლია, ხოლო $x_1 k$ გოგირდის და მაგნიუმის იონთა რადიუსების ჯამია ($r_s + r_{Mg} = x_1 k$). გოგირდის რადიუსის დასადგენად დავწერთ ტოლობა

$$(x_1 x_2)^2 = 2(x_1 k)^2 \text{ ანუ } (2r_s)^2 = 2(2.60)^2, \text{ საიდანაც } r_s = \frac{2 \cdot 60}{\sqrt{2}} = 1,83 \text{ \AA}.$$

შესაბამისად კატიონის რადიუსი:

$$r_{Mg} = 2,60 - 1,83 = 0,77 \text{ \AA}.$$



ნახ. VIII. 9. იონის რადიუსის განს. ზღერის სქემა MgS სტრუქტურაში (გვერდილი (110)-ზე).

ამგვარად, რაკი ვიცით ერთი იონის რადიუსის ზომა, შეიძლება სხვა იონების რადიუსების განსაზღვრა. ამისათვის საჭიროა შევარჩიოთ ისეთი ნაერთი, რომელშიც ერთი იონის რადიუსი ცნობილია და შეიძლება გაიზომოს იონთშორისი უმოკლესი მანძილი. ასეთი გზით გამოთვლები აწარმოეს ლანდემ, გოლდშმიდტ-

მა, პოლინგმა და სხვა მეცნიერებმა. ამჟამად ცნობილია იონური რადიუსების სხვადასხვა ცხრილი უმნიშვნელოდ განსხვავებული მონაცემებით. VIII. 2 ტაბულაში მოცემულია გავრცელებული ელემენტების იონთა ზომები საბჭოთა მკვლევარების ბოკის და ბელოვის მიხედვით იონთა მუხტის სხვადასხვა მნიშვნელობისათვის. აღნიშნულმა მკვლევარებმა O^{2-} ანიონის რადიუსი მიიჩნიეს $1,36 \text{ \AA}$ -ის ტოლად, მაშინ, როდესაც გოლშმიდტის მიხედვით იგი უდრის $1,32 \text{ \AA}$, ხოლო პოლინგის მიხედვით — $1,40 \text{ \AA}$.

ქიმიურ ელემენტთა რადიუსების ცვალებადობა ემორჩილება შემდეგ კანონზომიერებებს: პერიოდული სისტემის ჰორიზონტალურ მწკრივში (პერიოდებში) იონთა რადიუსები მცირდება მათი მუხტის გადიდებასთან ერთად. მაგალითად, მეორე პერიოდის ელემენტების იონთა რადიუსებია; $K^+ = 1,33 \text{ \AA}$, $Ca^{2+} = 1,04 \text{ \AA}$, $Se^{3+} = 0,83 \text{ \AA}$, $Ti^{4+} = 0,64 \text{ \AA}$, $V^{5+} = 0,40 \text{ \AA}$, $Cr^{6+} = 0,35 \text{ \AA}$. ვერტიკალურ სვეტებში (ჯგუფებში) იონთა რადიუსები იზრდება ზემოდან ქვემოთ მათი რიგითი ნომრების ზრდასთან ერთად. მაგალითად, პირველი ჯგუფის ელემენ-

ზოჯიერთო კიმიური ელემენტის ატომური და იონური რადიუსებო

(ანგსტრემებოთ)

ელემენტი	ატომური რადიუსი	იონის მუხტი	იონის რადიუსი ზოკის დი ბელუკის შიხეღვით	ელემენტი	ატომური რადიუსი	იონის მუხტი	იონის რადიუსი ზოკის დი ბელუკის შიხეღვით
H	0.6	-1	1.36	Fe	1.26	+3	0.7
Li	1.55	+1	0.65			-2	0.90
Be	1.13	+2	0.34	Co	1.25	+2	0.78
B	0.91	+3	0.21	Ni	1.24	+2	0.74
C	0.77	+4	0.20	Cu	1.28	+2	0.80
N	0.71	+5	0.15	Zn	1.39	+2	0.83
O	-	-2	1.36	As	1.44	+5	0.47
F	-	-1	1.33			+3	0.65
Ne	1.60		-			-3	0.91
Na	1.89	+1	0.98	Er		-1	1.96
Mg	1.60	+2	0.71	Rb	2.93	+1	1.49
Al	1.43	+3	0.57	Mo	1.59	+4	0.63
Si	1.34	+4	0.39	Ag	1.44	+1	1.13
P	1.30	+3	0.45	Cd	1.56	+2	0.91
S	1.04	+4	0.39	Sn	1.58	+4	0.67
		-2	1.86	Sb	1.61	+3	0.90
Cl	-	+6	1.81	I	-	-1	2.20
Ar	1.92		-	Xe	2.18		-
K	2.36	+1	1.33	Cs	2.68	+1	1.65
Ca	1.97		1.01	Ba	2.21	+2	1.35
Ti	1.46	+4	0.64	W	1.40	+4	0.68
V	1.54	+5	0.40	Pt	1.39	+4	0.61
		+4	0.61	Au	1.44	+1	1.37
		+3	0.67	Hg	1.60	+2	1.12
		+3	0.72	Pb	1.75	+2	1.26
Cr	1.47	+3	0.64	Bi	1.82	-3	2.13
Mn	1.80	+4	0.52	U	1.53	+4	0.95
		+3	0.70				
		+2	0.91				

ტების იონთა რადიუსებია: ${}^3\text{Li}^+ = 0,68 \text{ \AA}$, ${}^{11}\text{Na}^+ = 0,98 \text{ \AA}$, ${}^{19}\text{K}^+ = 1,33 \text{ \AA}$,
 ${}^{37}\text{Rb}^+ = 1,49 \text{ \AA}$, ${}^{55}\text{Cs}^+ = 1,65 \text{ \AA}$ ერთის მხრივ და ${}^{20}\text{Cu}^+ = 0,98 \text{ \AA}$,
 ${}^{47}\text{Ag}^+ = 1,13 \text{ \AA}$ და ${}^{79}\text{Au}^+ = 1,37 \text{ \AA}$ მეორე მხრივ, გამოწვეულია იზვი-
 თი მიწების სამვალენტოანი ელემენტები № 57-დან № 71-მდე,
 სადაც რადიუსები მცირდება (რადიუსი ${}^{57}\text{La}^{3+} = 1,04 \text{ \AA}$ ხოლო ${}^{71}\text{Lu}^{3+}$
 $0,80 \text{ \AA}$) ამ მოვლენას ლანთანოიდურ შეკუმშვას უწოდებენ.
 ანალოგიური მოვლენა დადგენილია პერიოდული სისტემის ბოლო
 ელემენტებისათვისაც (დაწყებული № 89-დან) და მას აქტინო-
 იდურ შეკუმშვას უწოდებენ.

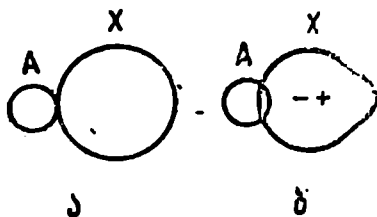
იონთა რადიუსების (ვალენტობის აღნიშნული კანონზომიერე-
 ბიდან გამომდინარეობს ე. წ. მენდელეევი-ფერსმანის დიაგო-
 ნალური რიგების წესი, რომლის მიხედვით პერიოდული სისტე-
 მის დიაგონალური მიმართულებით ზემოდან ქვემოთ მარჯვნივ ელემენ-
 ტებს აქვს დაახლოებით ერთნაირი რადიუსები და ამიტომ ისინი ხშირად
 ერთმანეთს იზომორფულად ენაცვლებიან კრისტალურ სტრუქტურებ-
 ში. მაგალითად $\text{Na}^+ = 0,98 \text{ \AA}$, $\text{Ce}^{2+} = 1,04 \text{ \AA}$, $\text{Y}^{3+} = 1,06 \text{ \AA}$ (იხ. ტაბულა
 VIII. 3.).

ტაბულა VIII.3

მენდელეევის ტაბულის დიაგონალური
 რიგების უზარალო ენაცვლითი

ტაბულა	I	II	III	IV	V	VI	VII
	Li 0,78	Be 0,34	B 0,45				
	Na 0,98	Mg 0,78	Al 0,57	Si 0,39			
	K 1,33	Ca 1,06	Sc 0,83	Ti 0,64			
	Rb 1,49	Sr 1,27	Y 1,06	Zr 0,87	Nb 0,69	Mo 0,68	
	Cs 2,65	Ba 1,43	Th 1,04-0,8	Hf 0,86	Ta 0,69	W 0,68	Re 0,63

იონთა პოლარიზაცია. კრისტალთა სტრუქტურების რთული სისტემის გამარტივების მიზნით დავუშვით, რომ ატომები (იონები) უკუშვადი სფეროებია, რომელთა ატომგულის სიმძიმის ცენტრს ემთხვევა ელექტრონული გარსის სიმძიმის ცენტრი. სინამდვილეში ეს ასე არაა ვინაიდან, როცა იონი იმყოფება ელექტრულ ველში, იგი კარგავს სფერულ ფორმას, რადგან დადებითი და უარყოფითი მუხტის სიმძიმის ცენტრები ერთმანეთს სცილდება და დიპოლი წარმოიშობა (ნახ. VIII. 10). ამ მოვლენას იონთა პოლარიზაციას უწოდებენ.



ნახ. VIII 10. კათონის (A) და ანიონის (X) ურთიერთმოქმედება: ა-პოლარიზაციის ნიშნები; მის ზედა ნაწილში, ბ-პოლარიზაციის მოქმედებით (დეფორმაცია გაზვიადებულია).

დადგენილია იონთა პოლარიზაციის გარკვეული კანონზომიერებები, რომლებიც ცნობილია ფაიანსის წესების სახელწოდებით. ესენია:

1. ანიონების პოლარიზაციის უნარი მით უფრო

მაღალია, რაც უფრო მეტია მისი რადიუსი. ეს აიხსნება იმით, რომ რაც მეტია იონის რადიუსი, მით ნაკლებია ელექტრონების კავშირის ატომგულთან და მით უფრო ადვილად განიცდის ასეთი შრე დეფორმაციას (პასიური პოლარიზაცია).

2. კატონების მაპლარიზებელი მოქმედება მით უფრო ინტენსიურია, რაც უფრო ნაკლებია მისი რადიუსი და მეტია მუხტი. ეს აიხსნება იმით, რომ პატარა ზომისა და დიდი მუხტის კატონებში გარეთა ელექტრონებსა და ატომგულს შორის მტკიცე კავშირის გამო იონი თითქმის სულ არ განიცდის დეფორმაციას (აქტიური პოლარიზაცია).

3. რაც უფრო მეტია შესაბამისად ატომის გარეთა შრის აგებულებასა და წინერთული გარსის ატომის მდგრადი შრის აგებულებას შორის, მით უფრო ნაკლებია ატომის პოლარიზაციის ეფექტი.

ერთი და იმავე ქიმიური ელემენტის იონი სხვადასხვა შენაერთში და ბმის სხვადასხვა პირობებში ამჟღავნებს პოლარიზაციის სხვადასხვა უნარს. პოლარიზაციის ინტენსივობის ზრდა კი იწვევს იონთშორისი მანძილის შემცირებას და სათანადოდ საკოორდინაციო რიცხვისა და სტრუქტურული ტიპის შეცვლას. ამის კარგი მაგალითია ვერცხლის ნაერთები სხვადასხვა პალოიდებთან (ტაბულა VIII. 4).

(ზომები. მოცემულია ანგისტრემებში)

ვერცხლის მალოგენიდ- ები	ანიონის რადიუსი	იონთა შორის შ.ნძილი		პოლარი- ზაციის %	საკოორ- დინაცო რაცხვი	სტრუქტურ- ული ტიპი
		გაზომილი	გამოთვ- ლილი			
AgF	1,33	2,46	2,46	0	6	NaCl
AgCl	1,81	2,77	2,94	5,8	6.	-
AgBr	1,96	2,88	3,09	6,8	6	"
AgI	2,20	2,99	3,33	10,3	4	ZnS (სულერიტი)

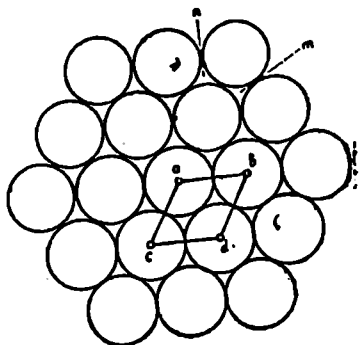
VIII. 4. ბირთვითა უმჯობესი წყობები

ნივთიერების კრისტალური მდგომარეობის ძირითადი დამახასიათებელი თვისებებია შიგა ენე უგის მიხიპალური რაოდენობა (იხ. § 1. I). ენე უგის შემცირების ერთ ერთი ფაქტორია კრისტალთა მესრის სტრუქტურული ერთეულების (ატომების, იონების) ერთმანეთთან მაქსიმალური ძიახლოება, ანუ ძათი უძკიდროესი განლაგება, რომლის დროსაც ყოველ ნაწილსაც კავშირი ექნება სხვა ნაწილაკების მაქსიმალურ რაოდენობასთან. ტენდენცია უძკიდროესი წყობისაკენ დამახასიათებელია კრისტალური სტრუქტურის ყველა ტიპისათვის, განსაკუთრებით კი იგი გამოისახება მეტალურ და იონურ სტრუქტურებში, რომლებშიც ბმებს არა აქვს მიპაოთქლება და ატომებისა და იონების ფორმა სფეროსებურია.

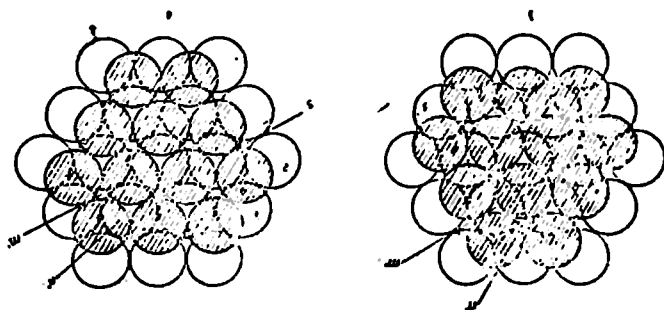
იმისათვის, რომ ძიახლოებით მოვანდინოთ კრისტალთა სტრუქტურებში ატომებისა და იონების განლაგების მოდელირება, ჯერ უნდა გავეცნოთ ბართუთა უქცედროესი წყობის კონცეპტებს, რისთვისაც ერთნაირი ზომის ბირთვები ისე უნდა დავალაგოთ, რომ მათ მაქსიმალურად შეავსონ სივრცე, ე. ი. სიცარიელეთა რაოდენობა იყოს მინიმალური. ბირთვების ასეთი უმჯობესი წყობის სიცარიელეებში შესაბამისი ზომის სხვა ძკირე ბირთვები რომ მოვათავსოთ რიგ კრისტალურ სტრუქტურებში, ანიონთა და კატიონთა განლაგების სურათს მივიღებთ.

ერთნაირი ზომის ბირთვებით სივრცის მაქსიმალურად შევსებისათვის ისინი ჯერ მკიდროდ უნდა დავალაგოთ პირველი შრის სახით და შემდეგ მასზე განვალაგოთ სხვა შრეები—მეორე, მესამე, მეოთხე და ა. შ. VIII. 11. ნახაზზე გამოსახულია ბირთვების უმჯობესი განლაგება ბრტყელ შრეში. ყოველი ბირთვი ეხება ექვს ბირთვს.

შრის მართობულად ბირთვის ცენტრში გაივლის სიპეტრიის 6 სიბრტყე, ხოლო ყოველ სიპარიელზე გაივლის 3*P*. შრის ელემენტარული *a b c d* უჯრედი რომბის ფორმისაა, რომლის გვერდი ბირთვების დიამეტრის ტოლია. ყოველ ბირთვს გარს ეკვრის სამკუთხედის ფორმის ექვსი სიპარიელე. მათ შორის სამ სამკუთხედს წვეროები ზევით აქვს მიმართული (*n* სიპარიელე), სამს—ქვევით (*m*, სიპარიელე), ერთი მათგანი დაემთხვევა მეორეს თუ ნახაზის სიბრტყეში ნას 60°-ით მოვაბრუნებთ. პირველი შრის² თავზე რომ განვალაგოთ ბირთვთა მეორე შრე უმჭიდროესი პრინციპის დაცვით, მეორე შრის ყოველი ბირთვი უნდა მოვათავსოთ *n* ან *m* სიპარიელეზე. მაგრამ, თუ მეორე¹ შრის პირველ ბირთვს მოვათავსებთ, მაგალითად, *n* ტიპის სიპარიელის თავზე (ნახ. VIII. 12ა), მაშინ ამ შრის ყველა ბირთვი მოთავსდება² ამ სიპარიელის თავზე. როგორც VIII. 12 ნახაზიდან ჩანს, ბირთვების განლაგების ორივე ხერხი (*n* თუ *m* სიპარიელეების შესაბამისად) ერთნაირ შედეგს იძლევა. თუ ერთ-ერთ მათგანს ნახაზის მართობულ დერძის გარშემო 60°-ით მოვაბრუნებთ, ორივე ვარიანტი ერთმანეთს

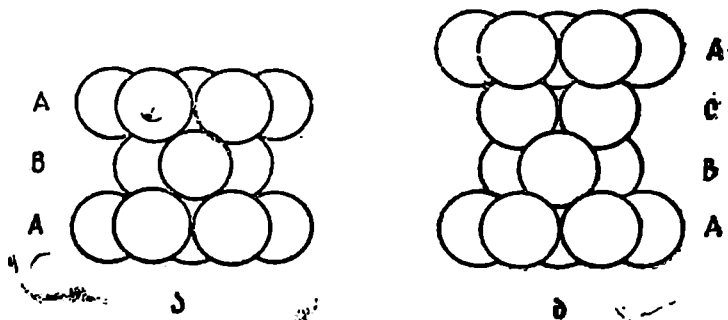


ნახ. VIII 11. ბირთვების უმჭიდროეს შრეში გ. მოყოფილია *a b c d* ელემენტარული უჯრედი.



ნახ. VIII. 12. მეორე შრის ბირთვების განლაგების ორი ხერხი (ბირთვები დაშტრობულია). ა-ბირთვები განლაგებულია *n* სიპარიელეზე, ბ-ბირთვები განლაგებულია *m* სიპარიელეზე.

დამთხვევა. მეორე შრის ბირთვებს შორის წარმოიქმნება n' და m' ტიპის სიციარიელები. საყურადღებოა, რომ n' სიციარიელე ემთხვევა პირველი შრის m სიციარიელეს, ხოლო მეორე შრის m' სიციარიელის ქვეშ განლაგდება პირველი შრის ბირთვის ცენტრი. ახალი, მესამე შრის ბირთვები შეიძლება განვალაგოთ n' ან m' სიციარიელების დაეზე, რის შემდეგაც მივიღებთ ბირთვთა ერთმანეთისაგან გასხვავებულ ორნაირ წყობას. თუ მესამე შრის ბირთვებს განვალაგებთ m' სიციარიელეზე, ძაშინ მესამე შრე გაიმეორებს პირველი შრის ბირთვთა წყობას, მეოთხე შრე—მეორე შრის ბირთვთა წყობას და ა. შ. ეს იქნება ორშრიანი ბიოთვთა წყობა (ნახ. VIII. 13 ა). თუ მესამე შრის ბირთვებს მოვათავსებთ n' სიციარიელის თავზე, რომლის ქვეშ პირველი შრის m სიციარიელეა, მაშინ ამ ახალი შრის ბირთვები არ



ნახ. VIII. 13. ბირთვთა უმკიდროესი წყობები: ა—ჰექსაგონური (ორშრიანი), ბ—კუბური (სამშრიანი).

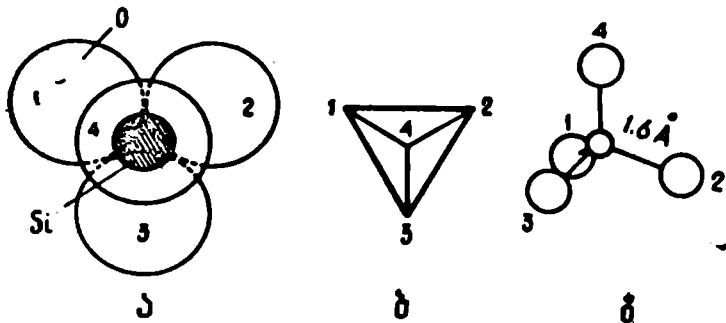
დამთხვევა წინა შრის ბირთვებს და მივიღებთ მესამე შრის განსხვავებულ განლაგებას. მხოლოდ შემდეგი მეოთხე შრე გაიმეორებს პირველს, მეხუთე—მეორეს და ა. შ. ამრიგად მივიღებთ ბირთვთა სამშრიანი წყობა. (ნახ VIII. 13. ბ). ორივე წყობა უმკიდროესი წყობაა ორშრიან ვარიანტს ჰექსაგონურ უმკიდროესი წყობას უწოდებენ (აქ ყოველი მესამე შრე მეორდება). სამშრიან წყობას კუბური უმკიდროესი წყობა ეწოდება (აქ ყოველი მეოთხე შრე მეორდება). თუ ბირთვთა წყობის შრეებს აღვნიშნავთ შესაბამისად A , B , და C ასოებით, მაშინ ჰექსაგონური უმკიდროესი წყობა შეიძლება ასე გამოვსახოთ:

$A B A B A B A B A B A$
 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11

ბირთვთა უმკიდროესი კუბური წყობა ამ წესით გამოისახება ასე:
 $A B C A B C A B C A B C$
 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12

სადაც პირველ შრეს იმეორებს მეოთხე, შემდეგ მეხუთე, მეათე

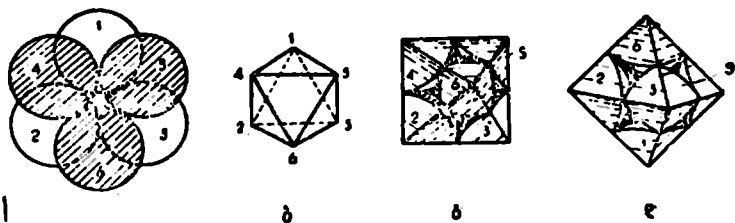
და ი. შ. ამ წყობაში არცერთი შრე არაა მოთავსებული ერთნაირი განლაგების შრეებს შორის, როგორც წინა შემთხვევაში. ორივე წყობაში ბირთვები სივრცეს 74,05%-ით ავსებს, ე. ი. სიციარიელებზე შოდის 25,95%. სიციარიელები ორი ტიპისაა: ერთი მათგანი უფრო პატარაა და მოთავსებულია ოთხ ბირთვს შორის (ნახ. VIII. 14 ა), რომელთაგან სამი განლაგებულია ერთ შრეში (1, 2 და 3), ხოლო მეოთხე უახლოესი შრიდანაა მოდგმული (ზევიდან ან ქვევიდან).



ნახ. VIII. 14. ტეტრაედრული სიციარიელ მოთავსებულია ოთხ ბირთვს შორის (ა), ბირთვების ცენტრების ტეტრაედრული განლაგება (ა და გ). ბირთვების აღნიშვნები შეადრეთ ნახ. VIII. 12 ბ-ს ნუმერაციის.

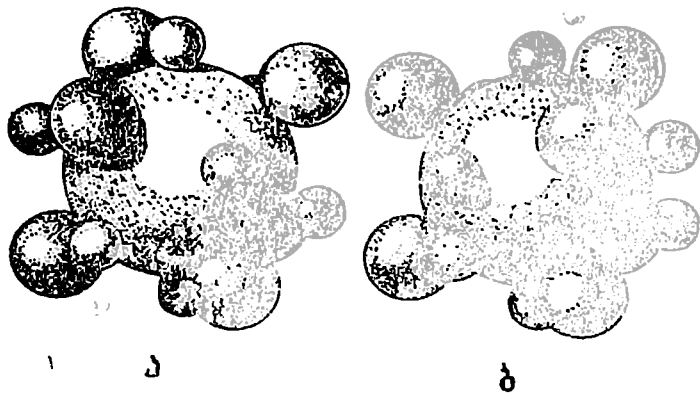
ამ ბირთვების ცენტრები განლაგებულია წესიერი ტეტრაედრის წვეროების შესაბამისად (ნახ. VIII. 14. ბ და გ) და აქტივობა ამ სიციარიელს ტეტრაედრულ სიციარიელს უწოდებენ, მას ყოველთვის ვაოს ექვოს ოთაი ბირთვი.

მეორე ტიპის სიციარიელე მოთავსებულია ექვს ბირთვს შორის (ნახ. VIII. 15 ა). სამი მათგანი (1, 2 და 3) განლაგებულია ერთ შრეში, დანაორენი სამი კი (4, 5 და 6) უახლოესი შრის ბირთვებია. ეს სამეულბი შრის სიბოტყეში ერთმანეთის იძმართ მობოუნნიეულია



ნახ. VIII 15. ოქტაედრული სიციარიელე მოთავსებულია ექვს ბირთვს შორის (ა), ბირთვების ცენტრებს ოქტაედრულ განლაგება აქვს (ბ. გ და დ). ბირთვების აღნიშვნები შეადრეთ VIII. 12. ა ნახაზის აღნიშვნებს.

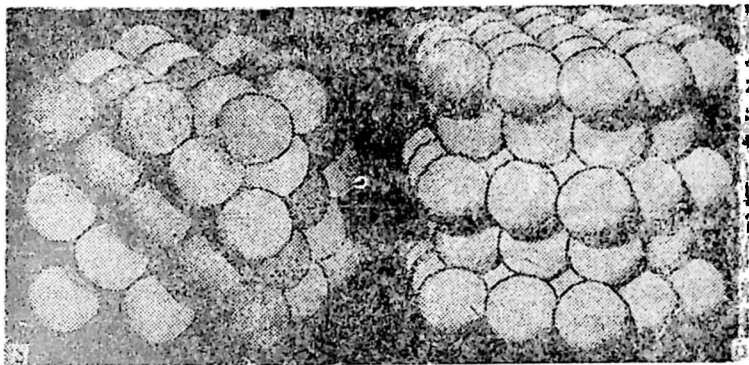
60°-ით. ექვსივე ბირთვის ცენტრები გალაგებულია ოქტაედრის წვეროების შესაბამისად და ამიტომ ამ სიციარიელეს ოქტაედრულ სიციარიელეს უწოდებენ, რომელიც ყოველთვის შემოფარგლულია ექვსივე ბირთვით. ოქტაედრული სიციარიელების რიცხვი უმჭიდროეს წყობაში მონაწილე ბირთვების რიცხვის ტოლია, ხოლო ტეტრაედრული სიციარიელების ოაოდენობა ოოჯგო მეთია. ტეტრაედრულ და ოქტაედრულ სიციარიელებში თავსდება სათანადო ზოპის კატიონის ბირთვები. თუ უმჭიდროესი წყობის ბირთვების რადიუსს მივიჩნევთ ერთის ტოლად, მაშინ ოქტაედრულ სიციარიელეში მოთავსდება ბირთვი რომლის რადიუსი იქნება ერთეული რადიუსის (2,41-ის) ტოლი და ტეტრაედრულ სიციარიელეში იქნება 0,22-ის ტოლი ბირთვი. უმჭიდროესი წყობის ყოველი ბირთვი შემოსაზღვრულია 6 ოქტაედრული და 8 ტეტრაედრული სიციარიელით, მაგრამ ძათი უოთიერთგანლაგება უმჭიდროესი წყობის შესაბამისად განსხვავებულია (ნახ. VIII. 16)



ნახ. VIII. 16. უმჭიდროესი წყობის ბირთვები და მის გარშემო განლაგებული ოქტაედრული და ტეტრაედრული სიციარიელების შესაბამისი სპულ და მცირე ზოპის ბირთვები უმჭიდროესი კუბური (ა) და უმჭიდროესი ჰექსაგონური (ბ) წყობიდან.

ჰექსაგონურ უმჭიდროეს წყობაში ოქტაედრული სიციარიელები განლაგებულია ერთმანეთის თავზე და იქნება გამკოლი სიციარიელომლის მიმართულება უმჭიდროესი შრეების მართობულია. კუბურ უმჭიდროეს წყობაში ეს სიციარიელები ერთმანეთს არ ემთხვევა (ნახ. VIII. 16. ა). VIII. 17 ნახაზზე წარმოდგენილია ბირთვთა განლაგება განხილულ უმჭიდროეს წყობათა შესაბამისად. კუბურ წყობაში უმჭიდროესი შრეები განლაგებულია ოქტაედრის (111) წახნაგების პარალელურად (ნახაზზე ერთ-ერთი ასეთი შრე გამოყოფილია შუქიფერით). ჰექსაგონურ წყობაში კი ეს შრეები განლაგებულია ბაზოპინაკოიდის (0001) პარალელურად. ორივე შემთხვევაში უმჭიდროესი შრეების მართობულად გადის მესამე რიგის სიმეტრიის ღერძი. უმ-

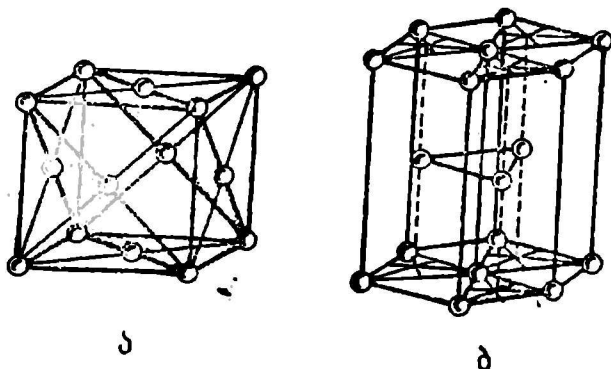
კიდროესი კუბური წყობის მქონე სტრუქტურის ელემენტარული უჯრედის წახნაგეუტირებელი კუბური ' მესერია, რომლის სივრცული ჯგუფია $Fm \bar{3}m$; ჰექსაგონური უმკიდროესი წყობის მქონე კრისტალური



ნახ. VIII. 17. ზირთუთა უმკიდროესი წყობა: ა—კუბური და ბ—ჰექსაგონური.

სტრუქტურების ელემენტარული უჯრედი $P6_3/mmc$ სივრცული ჯგუფისაა (ნახ. VIII. 18).

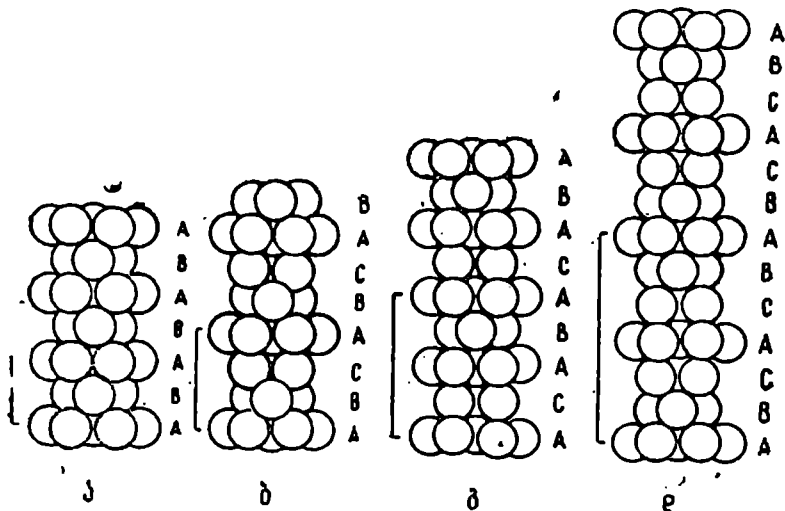
გარდა აღწერილ ორ- და სამშრიან ზირთუთა უმკიდროესი წყობისა, დასაშვებია უფრო მეტშრიანი უმკიდროესი წყობებიც, რომლებიც მიიღება A , B და C შრეების სხვადასხვა თანამიმდევრობით გან-



ნახ. VIII. 18. უმკიდროესი წყობის მქონე კრისტალური სტრუქტურების ელემენტარული უჯრედები: ა—კუბური (წერტილებით გამოყოფილია უმკიდროესი შრეები), ბ—ჰექსაგონური.

ლაგების შედეგად. მაგალითად, რომ განვალაგოთ შრეები $AB AC AB AC$. თანამიმდევრობით, მივიღებთ 4 შრიან წყობას, ხოლო თუ შრეებს დავალაგებთ $AB CA CB ABC ACB$... მივიღებთ 6 შრიან წყობას და ა. შ. (ნახ. VIII. 19, დ და გ).

ბევრ ნივთიერებას უნარია აქვს კრისტალიზაციის დროს წარმოშვას უმკიდროესი წყობის სტრუქტურები შრეთა სხვადასხვა რაოდენობით; სტრუქტურათა ელემენტარულ უჯრედებში a_0 და b_0 პარამეტრები ერთნაირია და იცვლება მხოლოდ მესამე c_0 პარამეტრი



ნახ VIII. 19. სხვადასხვა შრიან ბირთვთა უმკიდროესი წყობები: ა-ორშრიანი, ბ-სამშრიანი, გ-ოთხშრიანი და დ-ექვსშრიანი.

შრების რაოდენობის ცვალებადობასთან (პერიოდულობასთან) დაკავშირებით. ამ მოვლენას პოლიტიპიას უწოდებენ. ყოველ პოლიტიპი ერთმანეთისაგან ერთი და იმავე ტიპის შრის განსხვავებული თანამიმდევრობის განლაგებით განსხვავდება.

პოლიტიპიის კარგი მაგალითია სილიციუმის კარბიდის კრისტალიზაცია (ბუნებრივი SiC მუასონიტი, სინთეზური SiC კარბოზენდი), რომლისთვისაც დადგენილია 40-ზე მეტი პოლიტიპური მოდიფიკაცია. მათ შორის უფრო გავრცელებულია 4, 6 და 15-შრიანები. სივრცული ჯგუფია $P6_3/mc$, ხოლო ჰექსაგონური ელემენტარული უჯრედების პარამეტრებია $a_0 = b_0 = 3,078 \text{ \AA}$, $c_0 = n \times 2,518 \text{ \AA}$

ამრიგად, ელემენტარული უჯრედის ორი პარამეტრი (a_0 და b_0) ირ იცვლება და იზრდება მხოლოდ c_0 , შრეების რაოდენობის ვად-

დების შესაბამისად. იგი ყოველთვის შრეთა შორის მანძილს (ამ შემთხვევაში 2,518-ის) ჯერადი იქნება. n ილენტრობის პერიოდი. ამის გამოსაცხადი ელემენტარული უჯრედის C_0 პარამეტრი იცვლება დაახლოებით 5 μ -დან (2-შრიანი ჰექსაგონური პოლიტიპი) 1500 μ -მდე, რომელიც 594 შრიან პოლიტიპის „გიგანტურ“ ელემენტარულ უჯრედს შეესაბამება.

სტრუქტურების შრეთა რაოდენობის აღსანიშნავად რამდენიმე შრეების რაოდენობის მაჩვენებელ ოცხვს მიუწერა მესრის ელემენტარული უჯრედის ტიპის ძარვენებელი ასობები H (ჰექსაგონური) და R (რომბოედრული), მაგალითად. nH და mR და სხვ. nH შესაბამება n - შრიან სტრუქტურას (შრები ღერძის გასწვრივ მეორდება n პერიოდით), რომლის ელემენტარული უჯრედი პრიმიტიული-ჰექსაგონურია, ხოლო mR - m შრიან სტრუქტურას, რომლის ელემენტარული უჯრედი რომბოედრულია. კეპუი ელემენტარული უჯრედი აღინიშნება e ასოთი. ცნობილია თუთიის სულფიდის (ZnS) 10-ზე აქტი პოლიტიპი (3 e , 2 H , 6 H , 8 H , 10 H , 9 R , 12 R , 15 R და სხვ). პოლიტიპები აქვს აგრეთვე გრაფიტს (C), მოლიბდენიტსა (MoS_2) და სხვა ნაერთებს.

ერთი და იმავე ნივთიერების სხვადასხვა პოლიტიპს შეიძლება ჰქონდეს e_0 პარამეტრის ცვლილებაზე დამოკიდებული განსხვავებული ფიზიკური თვისებები (მაგ. სიჩვის ორმაგი გარდატეხის სიჩლიეე).

ძრავალშრიანი წყობების აღნიშვნის სხვადასხვა ხერხს შორის მნიშვნელოვანია ის ხერხი, რომელიც ითვალისწინებს ყველი შრის უახლოეს შრეთა (ზემოდან და ქვემოდან) განლაგების ხასიათს: შრე, რომელიც მოთავსებულია ერთნაირი განლაგების შრეებს შორის, აღინიშნება k ასოთი. მაგალითად. უქიძრუს ჰექსაგონურ $AB AB AB \dots$ წყობაში ყოველი m AB მოთავსებულია ან AB , ან BA შრეს შორის, ე. ი. ამ წყობაში ყოველი m AB შრეა. შრე, რომელიც მოთავსებულია სხვადასხვა განლაგების ორ შრეს შორის, აღინიშნება k ასოთი, მაგალითად. უქიძრუს კეპუ $ABC ABC ABC \dots$ წყობაში ყველა m შრე k შრეა. k და k ასოებით წყობათა ძრავალშრიანობა შეიძლება აღინიშნოს შემდეგნაირად:

	1	2	1	2	1	2	...	
2-შრიანი	A	B	A	B	A	B	A	B ...
	h	h	h	h	h	h	h	h
								ანუ (h)
	1	2	3	1	2	3	...	
3-შრიანი	A	B	C	A	B	C	A	B
	k	k	k	k	k	k	k	k ...
								ანუ (k)
	1	2	3	4	1	2	3	4
4-შრიანი	A	B	A	C	A	B	A	C
	k	h	k	h	k	h	k	h ...
								ანუ (kh)
	1	2	3	4	5	1	2	3
5-შრიანი	A	B	C	A	B	A	B	C
	h	k	k	k	h	h	k	k
								k
								ანუ ($hkkkh$)

1 2 3 4 5 6 1 2 3 4 5 6

6-შრიანი *A B C A C B A B C A C B A B C A C B . . .*

h k k h k k h k k h k k h k k h k k . . . ანუ $(hkk)_2$

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 1 2 3 4 . . .

12 შრიანი *A B C A B C A C B A C B A B C A .*

h k k k k k h k k k k k h k k k . . . ანუ $(hkkkk)_2$

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 1 2 3 4 5

15-შრიანი *A B C B A C A B A C B C A C B A B C B A .*

h k h k k h k h k k h k h k k h k h k k . . .

ანუ $(hkkkk)_2$, და ა.შ.

ცხადია, არ არსებობს ისეთი უმჭიდროესი წყობები, რომლებშიც ერთნაირი განლაგების შრეები უშუალოდ ერთმანეთს მიჰყვება: ბირთვები რომ უახლოეს შრეებში ერთმანეთის განლაგებას იმეორებდეს, ისინი უნდა მოთავსდნენ ერთმანეთის თავზე და არა n ან m ჩაღრმავებებში, რითაც დაიზღვეოდა უმჭიდროესი წყობის პრინციპი. განხილული წყობათა ვარიანტებიდან მხოლოდ სამშრიანი წყობაა ($n=3$) კუბური უმჭიდროესი წყობა. ყველა დანარჩენი შემთხვევა უმჭიდროესი ჰექსაგონური წყობის სხვადასხვა ვარიანტია.

საყურადღებოა, რომ განხილული აღნიშვნა ვერ განასხვავებს შემთხვევებს, როდესაც ერთნაირშრიან სტრუქტურებში შრეების თანამიმდევრობა მაინც განსხვავებულია. მაგალითად, 6-შრიანი წყობის

1 2 3 4 5 6 1 2 3 4 5 6

B A C B C A B A C B C A

h k k h k k h k k h k k

ვარიანტი აღინიშნება $(hkk)_2$ -ით. ეს ისეთივე აღნიშვნაა, რაც ზემოთ განხილულ 6-შრიან სხვა ვარიანტს ჰქონდა. ასეთ შემთხვევაში საჭიროა აღნიშვნებში დამატებითი ინდექსების შემოტანა.

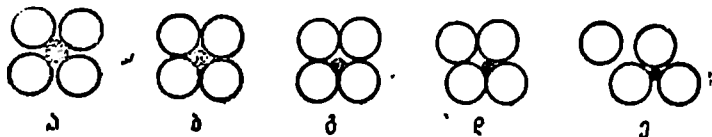
§ VIII 5. ხაკოროდინაციო რიცხვი და კოორდინაციული მრავალწახნაბები

სხვადასხვა ნაერთთა შედგენილობაში შემაჯავლი ელემენტის ატომს (იონს) გარს ეკვრის გარკვეული რაოდენობის „მეზობელი“ ატომები (იონები). რომლებიც ან უშუალოდ ეხებიან მას, ან გახლავდებიან მის გარშემო ერთნაირ მანძილზე. ასე, მაგალითად, თუ რომელიმე ელემენტის კატიონი მოთავსებულია ტეტრაედრულ სიციარიელში, მის გარშემო განლაგდება ოთხი ანიონი, ხოლო ოქტაედრულ სიციარიელში მოთავსებული იონის გარშემო—ექვსი იონი.

კრისტალურ სტრუქტურაში იონთან შეხებაში მყოფი საწინააღმდეგო ნიშნის იონთა რაოდენობას საკოორდინაციო რიცხვი (სრ) ეწოდება. მისი მნიშვნელობა დამოკიდებულია იონთა ზომებსა და

და ბმების მიმართულებაზე. საკოორდინაციო რიცხვის მნიშვნელობა იცვლება 2-დან 12-მდე, რადიუს-კატიონის (r_A) და რადიუს-ანიონის (r_x) შეფარდების ცვლილებასთან დაკავშირებით. მათ შორის უფრო გავრცელებულია საკოორდინაციო რიცხვები — 3, 4, 6, 8 და 12. ზოგიერთ სტრუქტურაში გვხვდება აგრეთვე 2, 5, 7 და 9.

როგორც აღვნიშნეთ, იონურ შენაერთებში კატიონების რადიუსები ნაკლებია ანიონების რადიუსებზე. იონური ბმა, რომელიც თავისი ბუნებით ელექტროსტატიკურია, მდგრად სტრუქტურებს გვაძლევს მარტო მაშინ, როდესაც იონი ეხება მალოდ საწინააღმდეგო ნიშნის იონს. VIII. 20 ა ნახაზზე სქემატურად ჩაჩვენებია კატიონის ირგვლივ ოთხი ანიონის განლაგების მდგრადი მსგოსაეუობა. ამ სტრუქტურისათვის იონთა ზღვრული განლაგება ნაჩვენებია VIII. 20 ბ ნახაზზე, როდესაც ანიონები კატიონებს ეხება და აქვე დროს მაქსიმალურად უახლოვდება ერთმანეთს. თუ კატიონი კიდევ უფრო მცირე ზომის იქნება, მაშინ წარმოიქმნება უკვე არამდგრადი მდგომარეობა (ნახ. VIII. 20 გ და დ) და ერთნაირი მუხტის იონების გათიშვის ძალის მოქმედებით მიიღება იონთა ახალი მდგრადი განლაგება სხვა საკოორდინაციო რიცხვით (ნახ. VIII. 20 ე).



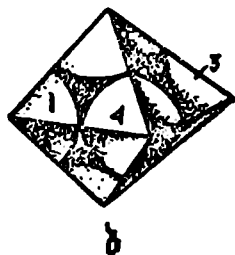
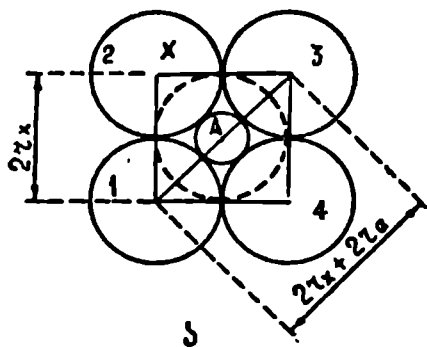
ნახ. VIII. 20. იონთა სტრუქტურების მდგრადობის სქემა (თითარი ბირთვები ანიონებია, შავი ბირთვები კატიონები).

1922 წელს მაგნესია დაადგინა სხვადასხვა სტრუქტურის მდგრადობის საზღვრები კატიონის და ანიონის რადიუსების შეფარდების დასაშვები ცვლილებების შესაბამისად. მდგრადობის საზღვრების გამოანგარიშებისათვის საკოორდინაციო რიცხვების ყველა მნიშვნელობისათვის უნდა გამოითვალოს იონთა რადიუსების შეფარდების ქვედა და ზედა საზღვრები. მაგალითად, 6 სრ-ის ქვედა საზღვრის დასადგენად გამოვსახოთ შესაბამის სტრუქტურებში იონთა განლაგების ზღვრული მდგომარეობა (ნახ. VIII 21. ა), რომელიც შეესაბამება ნახაზზე მოყვანილი ოქტაედრის კოორდინატული სიმეტრიის სიმბრტყის გასწვრივ კვეთს. როგორც ნახაზიდან ჩანს, იონთა ასეთი განლაგების დროს

$$2r_x + 2r_A = 2r_x\sqrt{2}, \text{ საიდანაც } \frac{r_A}{r_x} = \sqrt{2} - 1$$

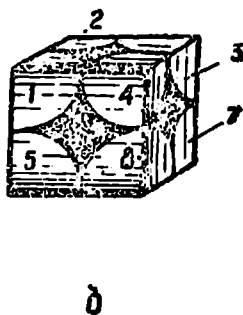
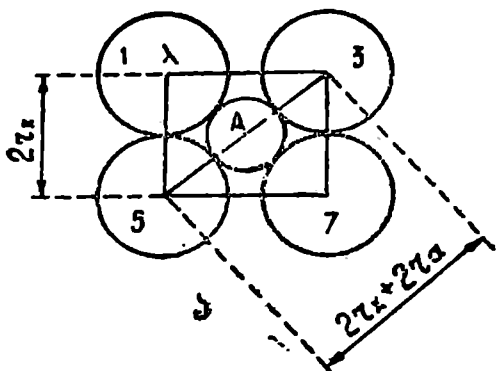
$$\text{ანუ } \frac{r_A}{r_x} = \sqrt{2} - 1 = 0.41.$$

ზედა საზღვრის მისაღებად უნდა დავადგინოთ მომდევნო მნიშვნელობის, ე. ი. 8 საკოორდინაციო რიცხვის მქონე სტრუქტურის მდგრადობის ქვედა საზღვარი. VIII. 22 ნახაზზე ნაჩვენებია იონთა



ნახ. VIII. 21. 6 სრ-ის მქონე სტრუქტურის მდგრადობის განსაზღვრა. ა—იონთა განლაგების სქემა; ბ—კოორდინაციული მრავალწახნაგა. X—ანიონი, A—კატიონი

განლაგება იმ სტრუქტურებისათვის, რომლებშიც ერთ კატიონს ეხებოდა ანიონი, მოყვანილ სქემაზე მოცემულია კატიონებისა და ანიონების განლაგება კუბის დიაგონალური კრილის გასწვრივ. ნახაზიდან ჩანს, რომ იონთა ასეთი განლაგების დროს ელემენტარული ჰექსაედრ-



ნახ. VIII. 22. 8 სრ-ის მქონე სტრუქტურის მდგრადობის განსაზღვრა. ა—იონთა განლაგების სქემა; ბ—კოორდინაციული მრავალწახნაგა.

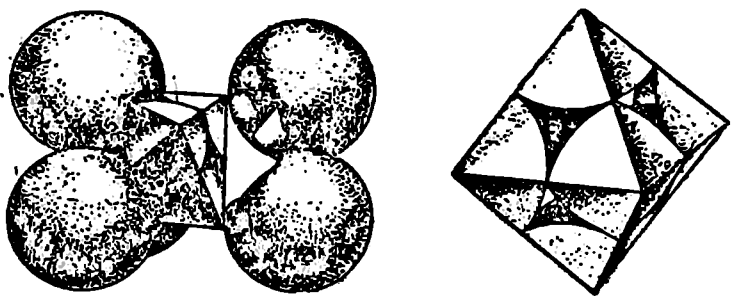
რის დიაგონალი ტოლია $2r_B + 2r_A = 2r_B \sqrt{3}$, საიდანაც $1 + \frac{r_A}{r_B} = \sqrt{3}$.

$$\text{ანუ } \frac{r_A}{r_B} = \sqrt{3} - 1 = 0,73$$



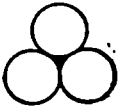





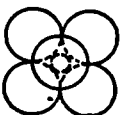
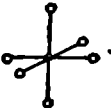

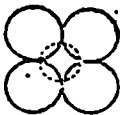


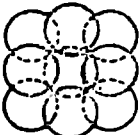
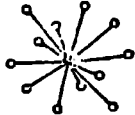

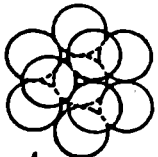
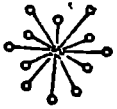

ამგვარად, დადგენილია, რომ 6 საკოორდინაციო რიცხვის მქონე სტრუქტურა მდგრადია ისეთი ზომის იონებისათვის, რომელთა რადიუსების შეფარდება $\frac{r_A}{r_B}$ 0,41-ზე მეტი და 0,73-ზე ნაკლებია. ანალოგიური გზით დადგენილ იქნა იონთა რადიუსების შეფარდების ზღვრული მნიშვნელობა სხვადასხვა საკოორდინაციო რიცხვისათვის, რომლებიც მოყვანილია მაგნუს-გოლდშმიტის მიხედვით.

$r_A : r_B$	0-0,15	0,15-0,22	0,22-0,41	0,41-0,73	0,73-1	1
საკოორდინაციო რიცხვი (ზრ)	2	3	4	6	8	12

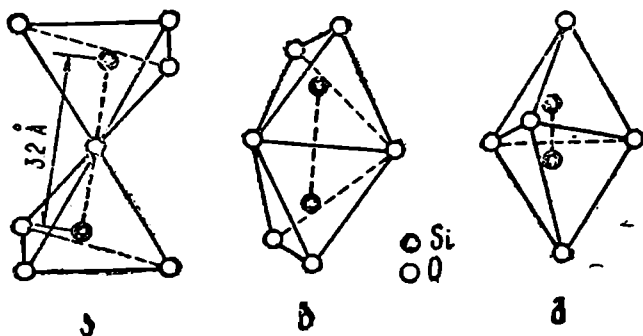
საკოორდინაციო რიცხვი შეიძლება გამოისახოს ლ. პოლინგის (Pauling) მიერ შემოღებული კოორდინაციული მრავალწახნაგების (კოორდინაციული პოლიედრების) საშუალებით, რომლებიც კატიონის გარშემო განლაგებული ანიონების ცენტრების შეერთების შედეგად მიღებული წარმოსახვითი მრავალწახნაგებია. მაგალითად, VIII. 14 ნახაზზე წარმოდგენილი ტეტრაედრი მიღებულია 4 ანიონის ცენტრების შეერთებით და წარმოადგენს 4 სრ-ის შესაბამის კოორდინაციულ მრავალწახნაგას. ანალოგიური გზითაა მიღებული VIII. 15 ნახაზზე გამოხატული კოორდინაციული მრავალწახნაგა ოქტაედრის სახით, რომლის 6 წვერო შეესაბამება 6 ანიონს და გამოსახავს ოქტაედრულ სივრცეში მოთავსებული კატიონის; საკოორდინაციო რიცხვს. VII. 23 ნახაზზე ნაჩვენებია იმავე ოქტაედრის მიღება მის გარშემო განლაგებული ექვსი ანიონიდან მეექვსედი ნაწილის „ამოკვეთით“.



ნახ. VIII. 23. ზრ 6-ის შესაბამისი კოორდინაციული მრავალწახნაგის იგება.

იონთა განლაპარაკება	იონთა სტრუქტურის განლაპარაკება	საერთო რიცხვი იონების	კოორდინაციული გადახვეწება	$\frac{R \cdot \Delta \rho}{R}$ $\frac{R \cdot \Delta \rho}{R}$
		2	2-ბრუნვი	< 0.155
		3	 3-ბრუნვი	$0.155 - 0.225$
		4	 4-ბრუნვი	$0.225 - 0.414$
		6	 5-ბრუნვი	$0.414 - 0.732$
		8	 6-ბრუნვი	$0.732 - 1.000$
		12	 12-ბრუნვი (12 მკვეთრი)	1.000
		12	 12-ბრუნვი (12 მკვეთრი)	1.000

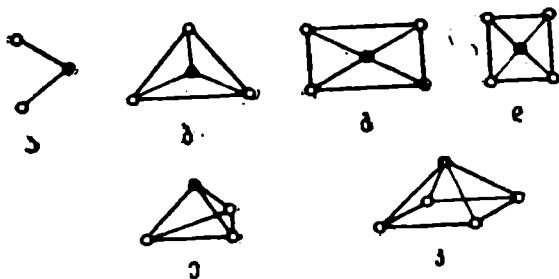
VIII. 5. ტაბულაში მოცემულია გავრცელებული საკოორდინაციო ოციკვების შესაბამისი იოისი ცენტრთა განლაგების სქემები და კოორდინაციული მრავალწახნაგები, ამ პოლიედრების საშუალებით ხშირად გამოსახავენ სხვადასხვა მინერალის სტრუქტურებს. ამ საკითხზე შეეჩირდებით ქვემოთ, როდესაც განვიხილავთ კრისტალთა ტიპიურ სტრუქტურებს, ახლა კი აღვნიშნოთ, რომ კოორდინაციული მრავალწახნაგები ერთმანეთს უერთდებიან ან საერთო წვეროების საშუალებით, ან წიბოების გასწვრივ. ან. უფრო იშვიათად, საერთო წახნაგების საშუალებით. ოპი პოლიედრის შეერთების შედეგად (წვეროს, წიბოს, თუ წახნაგის საშუალებით) მათ ცენტრებს შორის მანძილი სათანადოდ შემცირდება შეცვლილი შეფარდებით: 1:0,58:0,33. ერთნაირი მუხტის იონების ცენტრების გადაჭარბებული მიახლოება იწვევს განზიდვის ძალების წარმოშობას. ამის გამო ტეტრაედრის ფორმის პოლიედრები პრაქტიკულად არასოდეს არ უერთდებიან ერთმანეთს წახნაგების საშუალებით. ცნობილია, რომ სილიკატების სტრუქტურებში სილიციუმთანგაბადიანი ტეტრაედრების SiO_4^{4-} შეერთება ხდება მხოლოდ წვეროების საშუალებით, როდესაც კატიონებს შორის მანძილია 3,2 Å. სილიციუმების კატიონების უფრო მეტი მიახლოება დაუშვებელია (ნახ. VIII. 24). აღნიშნული კოორდინაციული მრავალწახნაგები ძირითადად გვხვდება იონურ და მეტალურ სტრუქტურებში და მათ კლასიკურ პოლიედრებს უწოდებენ. იმ სტრუქტურებში კი, რომლებშიც კოვალენტური ბმები მოქმედებს (ე. ი. ბმები), რომლებსაც გარკვეული მიმართულება ახასიათებს, განსაკუთრებით კი მაშინ, როდესაც



ნახ. VIII. 24. სილიციუმთანგაბადიანი ტეტრაედრების შეერთების ვარიანტები: \bullet —დასაშვები, წვეროების საშუალებით. ბ და გ—დაუშვებელი, წიბოს და წახნაგის საშუალებით.

ისინი განპირობებულია p , d და f ელექტრონების მონაწილეობით ან sp , dp , dsp და სხვ. ელექტრონების ჰიბრიდული ზედაპირების მო-

ქმედებით იონის რადიუსების ზომებთან ერთად საკოორდინაციო რიცხვების მთავარი განმსაზღვრელი ფაქტორია ბმის მიმართულება და მისი სიმტკიცე. ცნობილია, რომ რაც უფრო მტკიცეა ბმა, მით უფრო მცირეა საკოორდინაციო რიცხვი. კრისტალურ სტრუქტურებში, რომლებშიც მონაწილეობს მიმართულებიანი ბმები, საკოორდინაციო რიცხვის მნიშვნელობა შეიძლება იყოს 5 და 7, ხოლო კოორდინაციულ მრავალწახნაგას შეიძლება ჰქონდეს განსხვავებული და უზრორთული ფორმა. ასე, მაგალითად, 2 სრ-ის შემთხვევაში იონთა ხაზოვანი განლაგების — ჰანტელის ნაცვლად გვხვდება მათი კუთხოვანი განლაგება (ნახ. VIII. 25 ა). ბრტყელი კონფიგურაციებიდან სამკუთხედების და ოთხკუთხედების ნაცვლად შეიძლება წარმოიწვას ტრიგონური და ტეტრაგონური პირამიდები, რომელთა წვეროებში მოთავსებულია კატიონები (ნახ. VIII. 25 ე და ვ). 3 სრ-ის შემთხვევაში საკო-



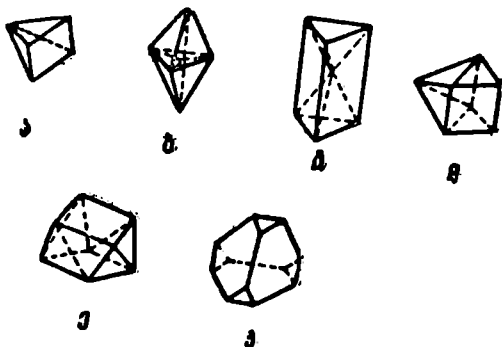
ნახ. VIII. 25. იონთა განლაგებას სხვადასხვა კონფიგურაციები კოვალენტური ბმის სტრუქტურებში: ა — ხაზოვანი, ბ, გ და დ — ბრტყელი კონფიგურაციები, ე და ვ — პირამიდების წვეროებში განლაგებული კატიონებით.

ორდინაციო მრავალწახნაგას ნახევაროქტაედრის ფორმა აქვს, რომლის ცენტრში კატიონია მოთავსებული (ნახ. VIII. 26 ა). მილერიტის (NiS) სტრუქტურის მსგავსად ზოგჯერ ამ მრავალწახნაგას შეიძლება ტრიგონური ბიპირამიდის ფორმაც ჰქონდეს (ნახ. VIII. 26 ბ).

6 სრ-ის შემთხვევაში ოქტაედრის გარდა საკოორდინაციო მრავალწახნაგას აქვს აგრეთვე ტრიგონური პრიზმის ფორმა (ნახ. VIII. 26 გ). მაგალითად, მოლიბდენიტის (MoS_2) სტრუქტურაში. 7 სრ-ის შემთხვევაში კოორდინაციული მრავალწახნაგა წარმოადგენს ტრიგონური პრიზმის და ტეტრაგონური პირამიდის ერთობლიობას (ნახ. VIII. 26 დ). მაგალითად, ანთიმონიტის (Sb_2S_3) სტრუქტურაში. საინტერესოა კოორდინაციული მრავალწახნაგა 8 სრ-ის შემთხვევაში, როდესაც ჰექსაედრის მაგივრად წარმოიქმნება ე. წ. ტომსონის კუბი, რომელიც მიიღება ჰექსაედრიდან, თუ მის ზედა კვადრატს ქვედას მიმართ 30° -ით მოვაბრუნებთ (ნახ. VIII. 26, ე). მაგალითად, ასეთი პოლიედ-

რი გვხვდება $CuAl_2$ -ის სტრუქტურაში. აღნიშნული კოორდინაციულ მრავალწახნაგები იდეალური ფორმით საკმაოდ იშვიათად გვხვდება და ჩვეულებრივ, რეალურ კრისტალებში ხშირად სხვადასხვა იხტენსივობითაა დამახინჯებული.

დასასრულს აღვნიშნავთ, რომ ზოგიერთ ქიმიურ ელემენტს აქვს საკოორდინაციო რიცხვი სხვადასხვა გარემოს თერმოდინამიკური პირობების ცვალებადობის შესაბამისად. დადგენილია, რომ ტემპერატურის შემცირება და წნევის გადიდება იწვევს საკოორდინაციო რი-



ნახ. VIII. 26 ნაკლებად გავრცელებულ კოორდინაციულ მრავალწახნაგებს.

ცხვის ზრდას. მაგალითად, Al^{3+} -ის სრ მალალი ტემპერატურის პირობებში 4-ია (მინდვრის შპატებში), უფრო ნაკლები ტემპერატურის პირობებში კი მას აქვს 6 საკოორდინაციო რიცხვი (მაგალითად, კოლინიში). საკოორდინაციო რიცხვის ცვალებადობა დადგენილია აგრეთვე ტიტანისათვის (Ti^{4+} სრ 8 ან 6) და ცირკონიუმისათვის (Zr^{4+} სრ 6 ან 4).

თავი IX. კ რ ი ს ტ ა ლ თ ა ს ტ რ უ ქ ტ უ რ ა

§ IX. I. ზოგადი ცნობები

ნივთიერების კრისტალთა სტრუქტურა გამოსახავს ნივთიერებაში შემავალი ქიმიური ელემენტების (მათი ატომების, იონების) სივრცულ განლაგებას. ყოველი სტრუქტურისათვის დადგენილია ელემენტარული უჯრედი და მისი სივრცული ჯგუფი. სტრუქტურა გამოისახება გარკვეულ მასშტაბში. სხვადასხვა ნივთიერებას შეიძლება მსგავსი სტრუქტურები ჰქონდეს, რომლებშიც ნაწილაკების სივრცული განლაგება იდენტურია და ეს სტრუქტურები ერთმანეთისაგან მხოლოდ

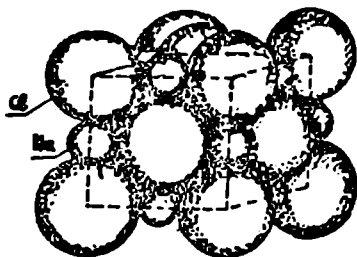
ზომებით (უბლოეს ბადეებს შორის მანქილით) განსხვავდება. ასეთ ნივთიერებებს იზოსტრუქტურული ეწოდება და ისინი მიეკუთვნება ერთ სტრუქტურულ ტიპს. ყოველ სტრუქტურულ ტიპს აქვს თავისი სახელი, მასში შემავალი იონების (ნივთიერების) შესაბამისად. მაგალითად, სპილენძის ტიპი, პირიტის ტიპი და სხვ. სხვადასხვა მინერალის ერთნაირი ტიპის სტრუქტურები განსხვავდება მხოლოდ ელემენტარული უჯრედის პარამეტრებით. მაგალითად, ჰალიტი ((NaCl)), გალენიტი ((PbS)) და პერიკლაზი ((MgO)) მიეკუთვნება ერთ სტრუქტურულ ტიპს (ჰალიტის ტიპს). მათი ელემენტარული უჯრედის სივრცული ჯგუფია $Fm\bar{3}m$ და განსხვავება მხოლოდ ელემენტარული კუბის წიბოს სიგრძეში:

	NaCl	PbS	MgO
a ₀	561	594	421

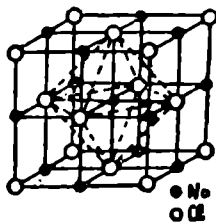
კრისტალთა სტრუქტურაში ატომებს (იონებს) შორის ბმის ძალა შეიძლება ერთნაირი ან განსხვავებული იყოს. სტრუქტურას, რომელშიც ყველა ატომთშორისი ბმის ძალა ტოლია, კოორდინაციულ სტრუქტურას უწოდებენ. მისთვის დამახასიათებელია დიდი საკოორდინაციო რიცხვები და წესიერი კოორდინაციული მზავალწახნაგები (მაგალითად, Cu , Mg ან NaCl -ია სტრუქტურები). სტრუქტურაში, რომელშიც ბმის ძალები განსხვავებულია, უფრო მტკიცე ბმით შეერთებულ იონთა ფორმის მიხედვით შეიძლება გამოვყოთ სტრუქტურების სხვადასხვა ვარიანტი (ჯგუფი). მაგალითად, ძეწკვისებრი, შონისებრი და კარკასული. რომლებშიც მტკიცე ბმებით დაკავშირებული ელემენტები განლაგებულია ხაზობრივად, ერთგანზომილებიანი მიმართულების გასწვრივ ან ეს ბმები ვრცელდება ორი მიმართულებით (სიგრძეზე და სიგანეზე) და წარმოქმნის შრეებს, ანდა ეს იონები აშენებს სამგანზომილებიან კარკასებს. გარდა ამ სამი ტიპის განლაგებისა, არსებობს მეოთხე ვარიანტიც, როდესაც უფრო მტკიცე ბმების მოქმედებით წარმოიქმნება ერთმანეთისაგან იზოლირებული იონთა ცალკეული კომპლექსები, რომლებიც „უნიძელების“ სახითაა გაფანტული მთელ სტრუქტურაში. აღნიშნული სტრუქტურული ვარიანტები გვხვდება მინერალთა ყველა კლასში, განსაკუთრებით მკაფიოდ კი სილიკატებში (იხ. § 1X. 3, c)

ზოგიერთი ატომის სტრუქტურების კლასიფიკაციას ახდენს მათში გავრცელებული ბმის ტიპების მიხედვით. მაგრამ ეს არაა გამართლებული, რადგან; როგორც ვიცით, კრისტალურ სტრუქტურებში ჰომოფენსური სტრუქტურები შედარებით იშვიათად გვხვდება, ზშირია ჰეტეროფენსური, რომლებშიც ერთდროულად ორი ან სამი ბმის ტიპი მოქმედებს და მათი მიკუთვნება ამა თუ იმ კლასისადმი ერთმნიშვნელოვნად არ გადაწყდება.

კრისტალური სტრუქტურის მოდელირება შეიძლება სხვადასხვა ხერხით: 1) იონთა ზომების შესაბამისად სხვადასხვა რადიუსის ბირთვების წყობით (ნახ. IX. I. ა), 2) ატომთა (იონთა) ცენტრის ადგილის აღნიშვნით სხვადასხვა ფერის ბურთულებით (იქვე, ბ) და 3) კოორდინაციული მრავალწახნაგების საშუალებით (იქვე, გ).



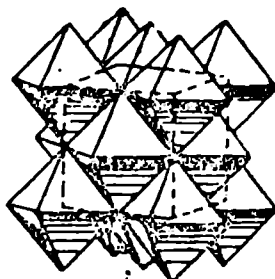
ა



ბ

ნახ. IX. I. ქვამარილის ($NaCl$) სტრუქტურის საინარი გამოსახულება:

ა- სხვადასხვა ზომის ბირთვების წყობით; ბ- იონთა ცენტრების აღნიშვნით და; გ- კოორდინაციული მრავალწახნაგებით.



გ

ქვემოთ განხილულია გავრცელებული სტრუქტურული ტიპები შემდეგი თანამიმდევრობით:

I. მარტივი ნივთიერებები:

- ა) ლითონები;
- ბ) არალითონები;
- გ) ლითონშორისი ნაერთები.

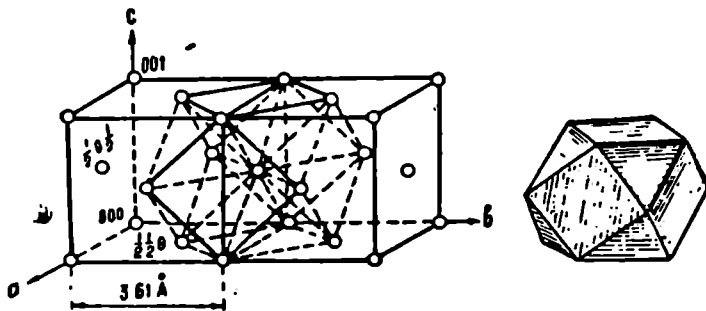
II. რთული ნივთიერებები:

- ა) მარტივი ანიონის მქონე ნაერთები;
- ბ) კომპლექსანიონის მქონე ნაერთები;
- გ) რთული კომპლექსანიონის მქონე ნაერთები.

მარტივი ნივთიერების სტრუქტურა წარმოდგენილია ატომთა წყობით, ე. ი. ერთნაირი ზომის ბიოთვების წყობით. ამის გამო ქიმიური ელემენტების უმრავლესობა კრისტალდება ან ბირთვთა უქვიდროესი წყობის პოინტების მიხედვით, ან სხეულციტირებულ კუბურ სტრუქტურათა სახით. მარტივი ნივთიერებათა მხოლოდ მცირე ნაწილი. მაგალითად, ნახშირბადი, გოგირდი და სხვ. იძლევა უფრო რთულ სტრუქტურულ ტიპებს. განვიხილოთ მარტივი ნივთიერებათა შთავაიო სტრუქტურული ტიპები.

სპილენძის სტრუქტურული ტიპი ბირთვთა უმჭიდროესი კუბური წყობის შესაბამისად განლაგებული ატომებია. მისი ელემენტარული უჯრედი ეკუთვნის $Fm\bar{3}m$ სივრცულ ჯგუფს და წარმოადგენს კუბურ წახნაგკუთრივებულ უჯრედს (ნახ. IX. 2), რომლის წიბოს სიგრძე $a_0 = 3,6 \text{ \AA}$. ერთ უჯრედზე მოდის სპილენძის 4 ატომი. ყოველ ატომს გარს ეკვრის 12 უახლოესი ატომი, ე. ი. სრ-12, კოორდინაციულ მრავალწახნაგას აქვს კუბოქტაედრის ფორმა (იხ. ტაბულა VIII. 5).

ანალოგიური სტრუქტურები აქვს: Au, Ag, Al, Pt, Co, Sc, Ni, Sr, Rh, Rr, Ce, Yb, In, Pb, Ac, Th, z-ცი. γ -Fe და სხვ., ისინი განსხვავდებიან მხოლოდ ელემენტარული კუბის წიბოს სიგრძით: ოქროს

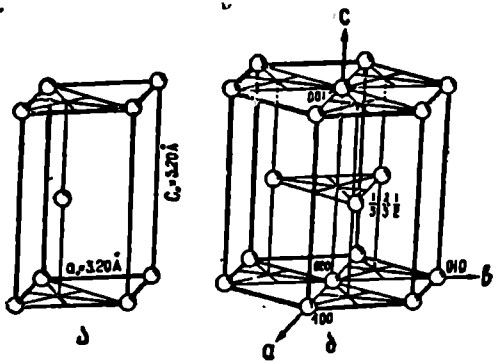


ნახ. IX. 2. სპილენძის სტრუქტურის ორ ელემენტარულ უჯრედში გამოყოფილი კოორდინაციული მრავალწახნაგა (კუბოქტაედრი).

$a_0 = 4,07 \text{ \AA}$. ვერცხლის $a_0 = 4,08 \text{ \AA}$, ალუმინის $a_0 = 4,04 \text{ \AA}$, პლატინის $a_0 = 3,92 \text{ \AA}$, და ა. შ. სპილენძის სტრუქტურული ტიპის სახით წარმოდგენილია აგრეთვე ლითონთა შენადნობები (AuSb, Au₂Bi, Cu₂Mg, Au₃, Pb და სხვ.).

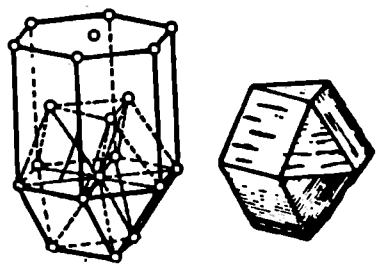
მაგნიუმის სტრუქტურული ტიპი წარმოადგენს ატომთა უმჭიდროეს ჰექსაგონურ წყობას. ელემენტარული უჯრედი მარტივი ჰექსაგონურია $P6_3/mmc$ სივრცული ჯგუფით (ნახ. IX. 3.) $a_0 = 3,20 \text{ \AA}$

$C_0 = 5,20 \text{ \AA}$, ელემენტალური უჯრედი ვერტიკალური სიბრტყით შეიძლება ორ ტრიგონურ პრიზმად გაიყოს, რომელთაგან ერთ-ერთი პრიზმის ცენტრში მოთავსებულია მაგნიუმის ატომი. როგორც IX 3 ბ. ნახაზიდან ჩანს. „ჩასახლებული“ ტრიგონური პრიზმები „მორიგეობენ“ ცარიელთან. ერთ ელემენტარულ უჯრედზე მოდის მაგნიუმის ორი ატომი (მთელ ჰექსაგონურ პრიზმაზე — 6 ატომი). ყოველ ატომს გარს ეკვრის 12 ატომი — ექვსი თავისივე შიდან და სამი სხვა-ლოესი შრეებიდან (ზევიდან და ქვევიდან) (ნახ. IX. 4). კოორდინაციულ მრავალწახნაგას აქვს კუბოქტაედრის ჰექსაგონური ანალოგის



ნახ IX. 3. მაგნიუმის სტრუქტურული ტიპი. ელემენტარულ უჯრედი, ჰექსაგონური პრიზმა სამი ელემენტარული უჯრედი.

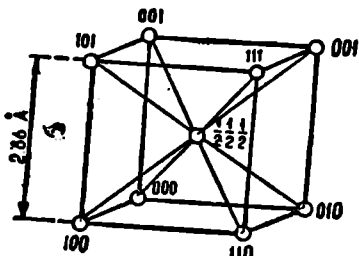
ფორმა. მაგნიუმის სტრუქტურული ტიპის სტრუქტურა აქვს Be, Ti, Cr, Zn, Y, Zr, Tc, Ru, Cd, La, TR, Hf, Re, Os და სხვ. ყველა ამ სტრუქტურაში შეფარდება $C_0 : a_0$ მერყეობს 1.57-დან 1,62 მდე. ლითონთა შენადნობებიდან ანალოგიურ სტრუქტურებს იძლევა $AgCd$, $AgCd_3$, $AuCd$, $AuCd_3$, $CuCd$, $AgZn$, $CuZn$, $NiMo$ და სხვ.



ნახ IX. 4. მაგნიუმის სტრუქტურული ტიპის კოორდინაციული მრავალწახნაგა სრ-12.

α Fe-ის სტრუქტურული ტიპი გამოსახულია IX. 5 ნახაზზე. მისი ელემენტარული უჯრედი არის სხეულცენტრირებული კუბური, რომლის წიბოა $2,86 \text{ \AA}$, და ეკუთვნის $Im\bar{3}m$ სივრცულ ჯგუფს. ელემენტარულ უჯრედზე მოდის 2 ატომი. ატომთა

ასეთი წყობა არ არის ბირთვთა უმქილროესი წყობა. ასე განლაგებული ატომები ავსებს სივრცის მხოლოდ 78%-ს და სრ.-მ. კოორდინაციული მრავალწახნაგა ჰექსაედრის ფორმისაა (იხ. ტაბულა VIII. 5 და ნახ. VIII. 22 ბ) ამ სტრუქტურულ ტიპში კრისტალდება ძნელდნობადი ლითონები (V, Cr, W, Mo, Nb, Ta, β -Co) ტურე და ტურე მიწათა ელემენტები (Li, Na, K, Rb, Cs, Sr, Ba და სხვ.). ლითონთა შენადნობებიდან α -Fe-ის სტრუქტურაში კრისტალდება AgZn, Cu_3Al , LiAg და სხვ. ჩამოთვლილი ეძიური ელემენტების ელემენტარული კუბის წიბოს ზომები იცვლება შეღდგენიარად: W-ის $a_0 = 3,16 \text{ \AA}$. Na-ის $a_0 = 4,28 \text{ \AA}$, K-ის $a_0 = 5,33 \text{ \AA}$, Ba-ის $a_0 = 5,01 \text{ \AA}$ და ა. შ. ზოგიერთი ავტორი ამ სტრუქტურულ ტიპს W-ის სტრუქტურულ ტიპს უწოდებს.



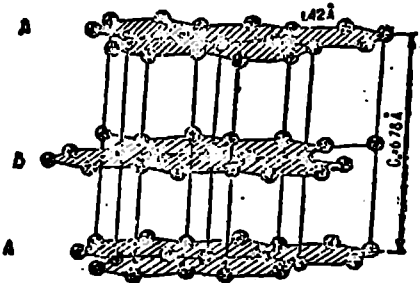
ნახ. IX. 5. α -Fe-ის სტრუქტურა. სრ.-მ.

ზოგიერთი კიმიური ელემენტი მათი ატომის ელექტრონული შრეების კონფიგურაციის თავისებურებების გამო წარმოქმნის განსხვავებულ და გართულებულ სტრუქტურულ ტიპებს, მაგალითად, C, Si, S, As, Ce, Hg,

Bi, B, α -Mn, β -W, α -Sn და სხვ. გარკვეული მიახლოებით მათი სტრუქტურები რომელიმე განხილული სტრუქტურული ტიპის მსგავსია, მაგრამ მაინც განსხვავდება ან საკოორდინაციო რიცხვის მნიშვნელობით, ან კოორდინაციული მრავალწახნაგას, რთული ფორმით

ასეთი სტრუქტურების მაგალითია სელენისა (უსასრულო ძეწკვებია) და გოგირდის (რგოლებია) სტრუქტურა (ნახ. VIII. 6)

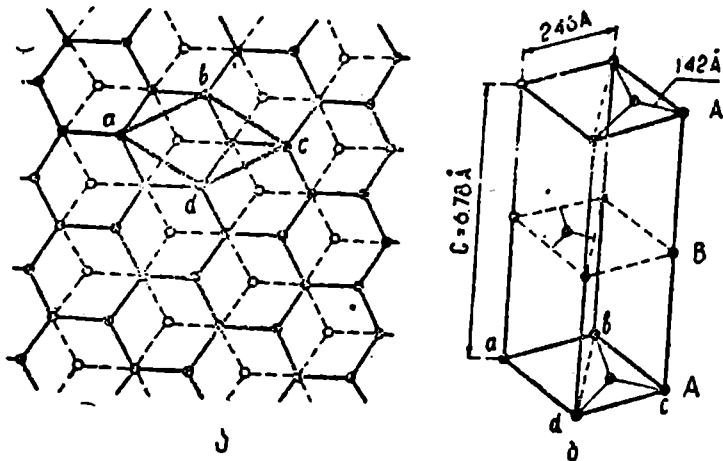
გრადიტის სტრუქტურული ტიპი ნახევნებია IX. 6 ნახაზზე, მას აქვს შრისებრი აგებულება და წარმოადგენს ნახშირბადის ჰექსაგონურ მოდიფიკაციას. შრეები განლაგებულია ერთმანეთის პარალელურად (0001)-ის მიმართულებით. ყოველი შრე აგებულია ჰექსაგონური უჯრედების სახით, რომელთა ცენტრები ცარიელია (ნახ. IX. 7 ა). ყოველი მომდევნო შრე (პუნქტიროთ აღნიშნული) გადაადგილებულია ჰექსაგონის დიაგონალის ნახევარი



ნახ. IX. 6 გრადიტის სტრუქტურული ტიპის მოდელი.

ლია ერთმანეთის პარალელურად (0001)-ის მიმართულებით. ყოველი შრე აგებულია ჰექსაგონური უჯრედების სახით, რომელთა ცენტრები ცარიელია (ნახ. IX. 7 ა). ყოველი მომდევნო შრე (პუნქტიროთ აღნიშნული) გადაადგილებულია ჰექსაგონის დიაგონალის ნახევარი

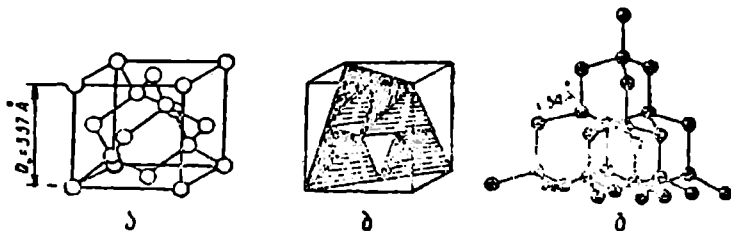
მანძილით, რის გამოც შრეები თითოს გამოშვებით მეორდება. ერთ ელემენტარულ უჯრედს შეესაბამება ნახშირბადის 4 ატომი და იგი ეკუთვნის $P6_3/mmc$ სივრცულ ჯგუფს, მისი პარამეტრები $a_0 = 2,46 \text{ \AA}$ და $c_0 = 6,70 \text{ \AA}$. უახლოესი მანძილი ატომებს შორის შრეების გასწვრივ



ნახ. IX. 7. ა-გრაფიტის სტრუქტურის (CC1) შრის სქემა, ელემენტარული უჯრედის ეფითონ-ელემენტარული უჯრედი.

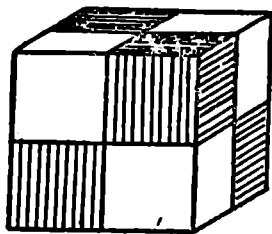
არის $1,42 \text{ \AA}$. გრაფიტის შრეებში ატომებს შორის ბმა კოვალენტურია, ხოლო შრეებს შორის მოქმედებს ვან-დერ-ვაალსის სუსტი ძალები. ამის გამო გრაფიტი კარგად იტკეობა (0001)-ის მიმართ. სრ-3 (ერთი შრის ფარგლებში) და კოორდინაციული მრავალწახნაგა ტოლგვერდა სამკუთხედი.

აღმასის სტრუქტურული ტიპი წარმოდგენილია IX. 8 ნახაზზე. მისი ელემენტარული უჯრედი კუბურია და ეკუთვნის $Fd3m$



ნახ. IX 8. ალმასის სტრუქტურული ტიპის მოდელი. ელემენტარული უჯრედი, ბ-იგივე კოორდინაციული მრავალწახნაგებით, გ-ნაშარბადის ატომების ცენტრების განლაგება, როდესაც (111) ბადე პოარიზონტალურია.

სივრცულ ჯგუფს. $a_0 = 3,57 \text{ \AA}$. ნახშირბადის ატომები ელემენტარულ უჯრედში, გარდა კუბის წვეროებისა და ყოველი წახნაგის ცენტრისა, განლაგებულია კიდევ მერვედი კუბების (ოქტანტების) ოთხ ცენტრში, დანარჩენი ოთხი ოქტანტი კი ცარიელია. „ჩასახლებული“ და ცარიელი ოქტანტები ერთმანეთთან „მორიგეობენ“ სამივე მიმართულებით („ჩასახლებული“ ოქტანტები დაშტრიბულია, ნახ. IX. 9). ყოველ ატომს გარს ეკვრის 4 ატომი, ე. ი. სრ 4, ხოლო კოორდინაციული მრავალწახნაგა ტეტრაედრია (ნახ. IX. 8. ბ). ბირთვთა უპკიდროესი პრინციპი აქ არ არის დაცული. ერთ ელემენტარულ უჯრედზე მოდის ნახშირბადის 8 ატომი: 4 წახნაგცენტრირებული უჯრედის შესაბამისად და 4—ოქტანტებში მოთავსებული ატომების ხარჯზე. უახლოესი ხანძილი ატომებს შორის $1,54 \text{ \AA}$. ატომები ერთმანეთთან დაკავშირებულია კოვალენტური ბმით (იხ. ნახ. VIII. 8).



ნახ IX. 9. ჰექსაედრის დაყოფა 8 პატარა კუბად.

ალმასის სტრუქტურულ ტიპში კრისტალდება IV ჯგუფის ელემენტები, როგორცაა სილიციუმი (Si), გერმანიუმი (Ge) და ნაცრისფერი კალა (α -Sn). მათი ელემენტარული უჯრედის წიბოს სიგრძე სათანადოდ იცვლება: $a_0 = 5,42 \text{ \AA}$ — სილიციუმისათვის, $a_0 = 5,65 \text{ \AA}$ —

გერმანიუმისათვის და $a_0 = 6,46 \text{ \AA}$ — ნაცრისფერი კალისათვის. ლითონთა შენადნობების სტრუქტურა ორი ან მეტი ლითონის შენადნობს ლითონის თვისებები ახასიათებს. რაც გამოწვეულია იმით, რომ მიღებულ ნაერთში მოქმედებს იგივე მეტალური ბმები. რომლებიც მოქმედებენ ცალკეულ კომპონენტებში შედგომამდე. სხვადასხვა ლითონიდან შენადნობის მიღება დამოკიდებულია მათი სტრუქტურული ტიპის მსგავსებაზე, ატომთა ზოიებასა და მათი ელექტრონული გარსების აგებულებაზე. შენადნობში ვლდებულობთ შერეულ კრისტალს, რომელთა აგებულებაში მონაწილეობენ ორივე კომპონენტის ატომები. მიღებული ნაერთის ძირითადი კომპონენტის, ე. ი. გამსხვავების სტრუქტურაში შედის გარკვეული რაოდენობის გახსნილი კომპონენტის ატომებიც და მას ქიმიური ნაერთისგან განსხვავებით მყარ ხსნარს უწოდებენ. ეს ხსნარი ორგვარია:

1. ჩანაცვლების მყარი ხსნარი, როდესაც ძირითად A ლითონში გახსნილია B კომპონენტი და ამ უკანასკნელს ატომები გამსხვავლის სტრუქტურაში ხაწილობრივ ენაცვლება A ატომებს (ნახ. IX. 10. ა).

2. შექრის მყარი ხსნარი, რომელშიც გახსნილი ნივთიერების ატომები თავსდება A ატომების წყობის სიცარიელებში (ნახ. IX. 10 ბ).

ჩანაცვლების მყარი ხსნარი მიიღება მეტალთა შემდეგი წყვილებით: Ag—Au, Mo—W, Zr—Hf, Co—Ni და სხვ. შეკრის ძვაო ხსნარი უმთავრესად გვხვდება ლითონთა და არალითონურ ელემენტთა ნაერთებში. აქ B კომპონენტის სახით უფრო ხშირად გვხვდება მცირე ზომის ატომების მქონე ელემენტები (H, B, C და N).

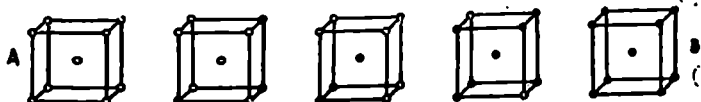


○ ბაზანაინის ატომები

● ბაზანინი კომპონენტის ატომები

ნახ. IX. 10. ატომთა განლაგება სქემები: ა—ჩანაცვლების და ბ—შეკრის მყარ ხსნარში (შავი რგოლები გახსნილი კომპონენტის ატომებია).

ჩანაცვლებას მყარი ხსნარი შეიძლება იყოს განუსაზღვრელი და განსაზღვრული. განუსაზღვრელი ხსნადობის დროს დასაშვებია ჩანაცვლებულ (A) და გახსნილ (B) კომპონენტთა ატომების ნებისაიერი რაოდენობა (ნახ. IX. 11). განუსაზღვრელი მყარი ხსნარი წარმოიშობა მხოლოდ იმ ლითონებით, რომლებსაც ერთნაირი კრისტალური სტრუქტურა და ატომთა ზომები აქვს. ყოველ შემთხვევაში მათი ოდენობის ზომათა სხვაობა არ უნდა აღემატებოდეს უდიდესი რადიუსის ზომის 10—12%-ს. გარდა ამისა, ორივე ელემენტს უნდა ჰქონდეს მსგავსი ქიმიური თვისებები, ე. ი. პერიოდულ სისტემაში ერთმანეთთან ახლოს უნდა იყვნენ განლაგებული. განუსაზღვრელ მყარ ხსნარს იძლევა Cu—Au, Cr—Fe, Ni—Pt და სხვა ლითონთა წყვილები.

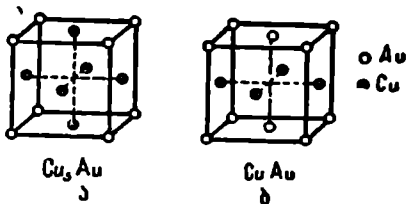


ნახ. IX. 11 ჩანაცვლების მყარი ხსნარის სტრუქტურები A და B კომპონენტების განუსაზღვრელი ხსნადობის შემთხვევაში.

როდესაც ლითონები ვერ აკმაყოფილებენ აღნიშნულ სამ პირობას. წარმოიშობა განსაზღვრული მყარი ხსნარი, ე. ი. ამ ელემენტების ერთმანეთში ხსნადობა. შეზღუდულ ფარგლებშია დასაშვები. მაგალითად, Li—Mg, Os—Pd, Ag—Hg და სხვ.

ჩვეულებრივ, მყარ ხსნარში გახსნილი ელემენტების ატომები გამხსნელის კრისტალურ სტრუქტურაში განლაგებულია უწყესრიგოდ. მაგრამ თუ შენადნობს ნულა გავაცივებთ, გახსნილი ატომები ელემენტარული უჯრედის გარკვეულ საკვანძო ადგილებში მოთავსდება და მოუწყესრიგებელი განლაგება გადადის მოწყესრიგებულში. ლითონთა მოწყესრიგებულ სტრუქტურებს ხშირად ზესტრუქტურებს უწოდებენ.

მაგალითისათვის განვიხილოთ Cu—Au შენადნობი. ორივე კომპონენტი ეკუთვნის კუბურ წახნაგცენტრიურებულ ტიპს. თუ ოქროს ატომები განლაგებულია ელემენტარული კუბის რვავე წვეროში, ხოლო სპილენძის ატომები—მისი წახნაგების ცენტრებში, მაშინ მივიღებთ $Cu:Au=3:1$. ეს ფაზა შეიძლება გამოისახოს Cu_3Au ფორმულით (ნახ. IX. 12. ა), ხოლო თუ სპილენძის ატომები მოთავსებულია მხოლოდ კუბის ოთხი წახნაგის ცენტრში და დანარჩენ საკვანძო ადგილებშია ოქრო, მაშინ ასეთი ნაერთის ფორმულა იქნება $CuAu$ (ნახ. IX. 12. ბ).



ნახ. IX. 12. სპილენძისა და ოქროს ატომების მოწყესრიგებული განლაგება Cu_3Au და $CuAu$ შენაკრთვებში.

სტრუქტურებში ატომთა 100% -იანი მოწყესრიგება იშვიათია. ჩვეულებრივ, ადგილი აქვს არასრულ მოწყესრიგებას, ე. ი. გახსნილი

კომპონენტის ატომთა ნაწილი განლაგდება სტრუქტურის გარკვეულ საკვანძო ადგილებში, ნაწილი კი მაინც რჩება უწყესრიგოდ გაფანტული. ამიტომ არსებობს სტრუქტურების „მოწყესრიგების ხარისხის“ ცნება. დასაშვებია, რომ სტრუქტურის მოწყესრიგების შედეგად შეიცვალოს ელემენტარული უჯრედის პარამეტრების და იმვითად სტრუქტურების ტიპიც კი.

§ IX. 3. რთულ ნივთიერებათა სტრუქტურა

ჩვენ განვიხილეთ მარტივი ნივთიერებების შესაბამისი ატომური სტრუქტურები. ბინარულ ან უფრო რთულ ნაერთებში, სადაც ადგილი აქვს ატომთა იონიზაციას, სხვადასხვა მუხტის იონებს შორის ელექტროსტატიკური მიზიდულობის შედეგად წარმოიშობა იონური ბმის სტრუქტურები. სტრუქტურულ ერთეულებად ატომების ნაცვლად აქ წარმოდგენილია ანიონები და კატიონები. ანიონები არის მარტი-

ვი და კომპლექსური. მარტივი ანიონები ერთელემენტანია, მაგალითად $[Cl]^-$, $[F]^-$, $[S]^{2-}$, $[O]^{2-}$ და სხვ. კომპლექსური ანიონები ორი ელემენტისაგან შედგება. მაგალითად, კარბონატებში $[CO_3]^{2-}$, სულფატებში $[SO_4]^{2-}$ და სხვ. გვხვდება აგრეთვე უფრო რთული აგებულების ანიონებიც, რომლებიც კომპლექსური ანიონების ურთიერთშეერთებით მიიღებიან, მაგალითად, $[BO_3]^{3-}$ -ის შეერთებით ბორატებთან ან სილიციუმთანგადაღიანი ტეტრაედრების $[SiO_4]^{4-}$ შეერთებით სილიკატებთან. გაივიხილოთ რთული ნაერთების რამდენიმე სტრუქტურული ტიპი ანიონთა გართულების თანამიმდევრობით.

A. მარტივი ანიონის მქონე ნაერთები

მარტივი ანიონების შემცველი ნაერთებია $NaCl$, CaF_2 , MoS_2 , Cu_2O , Al_2O_3 , $CaTiO_3$, $CuFeS_2$, $MgAl_2O_4$ და სხვ. ამ ნაერთთა მთავარი სტრუქტურული ტიპის საფუძველია ანიონთა უმქიდროესი კუბური ან კუბსაკონური წყობები. ოპელთა ოქტაედრულ და ტეტრაედრულ სიციარიელებში (ყველაში ან ნაწილობრივ) მოთავსებული უნდა იყოს მეორე ელემენტის კატიონები. საკოორდინაციო რიცხვი ამ სტრუქტურებში ჩვეულებრივ არის 4, 6 და 8. გარდა ამისა, აქ გვხვდება გართულებული სტრუქტურებიც, სადაც სრ-ია 5 და 7.

განხილული ნაერთები შეიძლება გამოვსახოთ ზოგადი აღნიშვნებით. ამისათვის ლითონები (კატიონები) აღვნიშნოთ ლათინური ანბანის საწყისი ასოებით (A , B , C . . .), ხოლო არალითონები (ანიონები)—ბოლო ასოებით (X , Y , Z). ასე, მაგალითად, AX აღნიშვნის შესაბამისი შენაერთები იქნება $NaCl$, $CsCl$, MgO , ZnS , $NiAs$ და სხვ.; AX_2 -ის შესაბამისი— CaF_2 , MoS_2 , TiO_2 , და სხვ.; A_2X -ის— Cu_2O , Ag_2S და სხვ.; A_2X_3 -ის— Al_2O_3 , Fe_2O_3 და სხვ.; ABX_2 -ის— $CuFeS_2$, $CuInS_2$ და სხვ.; ABX_3 -ის— $CaTiO_3$, $NaNbO_3$ და სხვ.; AB_2X_4 -ის— $MgAl_2O_4$, $FeCr_2O_4$ და სხვ.

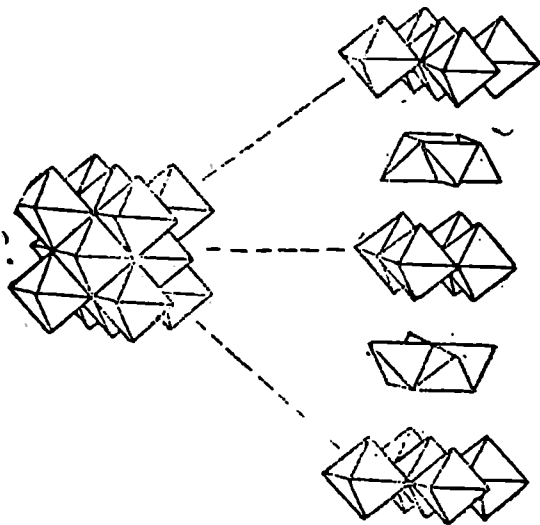
კომპლექსური ანიონის მქონე ნაერთის ზოგადი აღნიშვნა გამოსახება ასე: AXY_3 , რომელიც შეესაბამება $CaCO_3$ -ს ან $AXY_4—BaSO_4$ და სხვ. განვიხილოთ ზოგიერთი ნაერთის დამახასიათებელი სტრუქტურული ტიპები.

I. AX -ის ნაერთების სტრუქტურული ტიპები. ა) ქვამარილის ($NaCl$) სტრუქტურული ტიპი წარმოადგენს ქლორის ანიონების უმქიდროეს კუბურ წყობას, რომლის ყველა ოქტაედრულ სიციარიელში მოთავსებულია ნატრიუმის კატიონი (ნახ. IX. 1). ნატრიუმის ყოველ კატიონს ეხება ქლორის 6 ანიონი და ქლორის ყოველ ანიონს—ნატრიუმის 6 კატიონი, ე. ი. ორივე ელემენტის სრ არის 6 (ნახ. VIII. 1). სტრუქტურის ელემენტარული უჯრედი ეკუთვნის $Fm\bar{3}m$ სივრცულ ჯგუფს და მასზე მოდის ნატრიუმისა და ქლორის 4 ატომი,

ე. ი. ერთ ელემენტარულ უჯრედში არის 4 NaCl, რაც აღინიშნება ასე: $z=4$.

ქლორისა და ნატრიუმის იონები ცალ-ცალკე ქმნიან წახნაგ-ცენტრირებულ კუბურ მესერს და სტრუქტურაში ისინი ერთმანეთისაგან წანაცვლებულია ელემენტარული კუბის წიბოს სიგრძის ნახევარ მანძილით: $\frac{a}{2} = \frac{5,64}{2}$. NaCl-ის სტრუქტურა შეიძლება გამოისახოს აგრეთვე ოქტაედრის ფორმის კოორდინაციული მრავალწახნაგებით (ნახ. IX. 1. გ). ყოველი ოქტაედრის ცენტრში მოთავსებულია ნატრიუმი და წვეროებში კი ქლორი. IX. 13 ნახაზზე ნაჩვენებია ნატრიუმის წახნაგცენტრირებული ელემენტარული უჯრედი შესაბამის ოქტაედრებით, რომლებიც სამ შოედაა განლაგებული. მათ შორის წარმოიქმნება ცარიელი 8 ტეტრაედრი. ანალოგიური სტრუქტურისაა K-ის, Na-ის, Li-ის, Rb-ის. Ag-ის ჰალოგენები და PbS, MgO, FeO, TiO, NiO-ის სხვა ნაერთები.

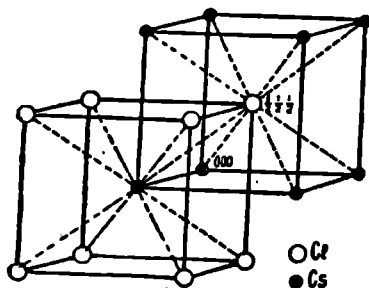
ბ) CsCl-ის სტრუქტურული ტიპის ელემენტარული უჯრედი წარმოადგენს $Pm\bar{3}m$ სივითულ ჯგუფს (ნახ. IX. 14) ერთ ელემენტარულ უჯრედზე მოდის ერთი CsCl, ე. ი. $z=1$. ყოველ ცუბუმს გარს ეკვრის 8 ქლორი და ყოველ ქლორს—8 ცუბუმი. ცალკე Cs და



ნახ. IX. 13. კოორდინაციული მრავალწახნაგებით გამოხატული NaCl-ის სტრუქტურა.

ცალკე Cl წარმოქმნის კუბურ პრიმიტიულ მესერს. მესერები „ჩადგმულია“ ერთმანეთში ელემენტარული კუბის დიაგონალის ნახევარ მან-

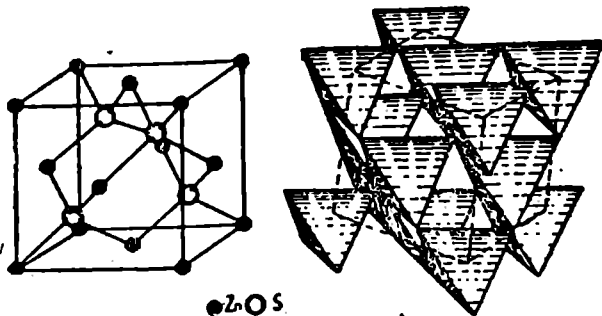
ძილზე გადანაცვლებით $a_0 = 4,110 \text{ \AA}$ (იხ. ნახ. IX. 14 და VI. 12).
 ქლორისა და ცეზიუმის იონების განლაგება ერთნაირია. თუ
 Cs-ის კატიონს მივიღებთ კრისტალოგრაფიულ ღერძთა ჯვარედინის
 ხაწყისად, ე. ი. მისი კოორდინატები იქნება (000), მაშინ ქლორის ან
 იონების კოორდინატები იქნება $(1/2 \ 1/2 \ 1/2)$ და პირიქით, თუ
 ღერძთა ჯვარედინის სათავე იქნება ქლორის ანიონი, მაშინ ცეზიუმის
 კოორდინატები იქნება $(1/2 \ 1/2 \ 1/2)$. CsCl-ის სტრუქტურაში კრის-
 ტალდება სხვადასხვა ნაერთი და მრავალი ლითონის ბინალური შენად-
 ნობები, კერძოდ, TiNi, FeCo, LaHg, CeZn, NiAu და სხვ.



ნახ. IX. 14. CsCl-ის სტრუქტურული ტიპი

გ) სფალერიტის (ZnS)-
 სტრუქტურული ტიპი.
 ZnS გვაძლევს ორ მოდიფიკა-
 ციას: კუბურსა (სფალერიტი)
 და ჰექსაგონურს (ვუოციტი).
 გარდა ამისა, გვხვდება მისი
 მრავალი გარდამავალი სტრუ-
 ქტურა პოლიტიპების სახით.
 სფალერიტში გოგირდის ანიონ-
 ები განლაგებულია უმკიდრო-
 ვისი კუბური წყობით (A B C
 A B C). ხოლო თუთიის
 კატიონები ავსებს ტეტრაედ-
 რული სიციარიელების ნახევარს (ნახ. IX. 15). ელემენტარული უჯრედ

ელემენტარული უჯრედის სიციარიელების ნახევარს (ნახ. IX. 15). ელემენტარული უჯრედ
 ეკუთვნის $F43m$ სივრცულ ჯგუფს $a_0 = 5,41 \text{ \AA}$, $z = 4$. სრ-4, ერთ
 თუთიას გარს ეკვრის 4 გოგირდი და ერთ გოგირდს — 4 თუთია.

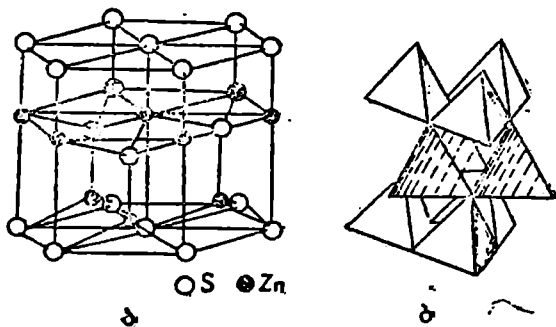


ნახ. IX. 15. სფალერიტის (ZnS) სტრუქტურული ტიპი: ა—იონთა ცენტრების
 აღნიშვნით; ბ—[ZnS] საკოორდინაციო ტეტრაედრებით გამოსახული.

XI. 15 ნახაზიდან ჩანს, რომ თუთიის კატიონები (ანალოგიურად გოგირდის ანიონები) განლაგებულია კუბური წახნაგცენტრირებული მესრის კვანძების ადგილებზე და მეორე ელემენტის იონები მოთავსებულია ელემენტარული კუბის მერვედი კუბების ოთხ ცენტრში (ცარიელი და „ჩასახლებული“ ოქტანტები „პოლიგეომენ“ სამივე მიმართულებით). აღსანიშნავია, რომ აღწერილ სტრუქტურაში იონების განლაგება ალმასის მესერში ნახშირბადის ატომების განლაგების მსგავსია (იხ. ნახ. IX. 8 და 9).

თუთიისა და გოგირდის იონები ქმნიან ბრავეს კუბურ წახნაგცენტრირებულ (F) მესრებს, რომლებიც ერთმანეთში „ჩადგმულია“ ელემენტარული კუბის დიაგონალის $1/4$ მანძილზე გადაადგილებით. ე. ი. დონები ერთმანეთის მიმართ გადაადგილდებიან ($\frac{a}{4} \frac{a}{4} \frac{a}{4}$) -ით (იხ. ნახ. VI. 13).

IX. 15 ბ ნახაზზე გამოსახულია სფალერიტის სტრუქტურა ტეტრაედრის საშუალებით. ყველა ტეტრაედრს აქვს ერთნაირი ორიენტაცია და მისი ყოველი წვერი საზიაროა 4 ტეტრაედრისათვის. სფალერიტის სტრუქტურული ტიპისაა აგრეთვე პერიოდული სისტემის (II და VI) და (III და V) ჯგუფის ელემენტთა ნაერთები (CdS , $CdSe$, $CdTe$, $GaAs$, GaP , $InSb$, AlP , $AlSb$ და სხვ.).



ნახ. IX. 16. ვურციტის (ZnS) სტრუქტურული ტიპი: ა - იონთა ცენტრების აღნიშვნით; ბ - $[ZnS_4]$ საკოორდინაციო ტეტრაედრების გამოსახვა.

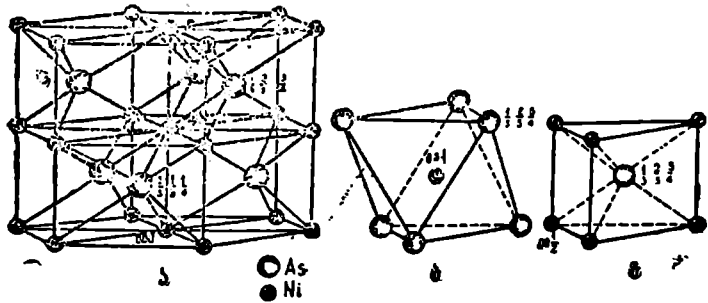
დ) ვურციტის (ZnS) სტრუქტურული ტიპი. ვურციტში გოგირდის ანიონები განლაგებულია უმკიდროესი ჰექსაგონური წყობის პრინციპით ($AB AB AB AB \dots$) და თუთიის კატიონები მოთავსებულია ტეტრაედრული სიცარიელების ნახევარში (ნახ. IX. 16). მისი სივრცული ჯგუფია $P6_3mc$. ელემენტარული უჯრედის ზომებია $a_0 = 312$

$=3,81\text{Å}$ და $c_0=6,23\text{Å}$. $z=2$, სრ სფალერიტის მსგავსად არის 4, როგორც თეთიისათვის, ისე გოგირდისათვის, კოორდინაციულ მრავალწახნაკას (ZnS_4) აქვს ტეტრაედრის ფორმა და მისი საშუალებით სტრუქტურა რომ გამოვსახოთ, საჭიროა ყოველ მეზობელ შოუში ტეტრაედრები მოვაბრუნოთ 60° -ით (ნახ. IX. 16. ბ). ამავე სტრუქტურაში კრისტალდება AgI , BeO , ZnO და სხვა ნაერთები.

ყველა განხილულ AX -ის ტიპის სტრუქტურაში, როგორც კატიონებისათვის, ისე ანიონებისათვის საკოორდინაციო რიცხვს აქვს ერთი და იგივე მნიშვნელობა და ერთნაირია კოორდინაციული მრავალწახნაგები. მაგალითად. ქვამარილის სტრუქტურაში ორივე მრავალწახნაგას $[NaCl_6]$ და $[ClNa_6]$ აქვს ოქტაედრის ფორმა, $CsCl$ ის სტრუქტურაში კოორდინაციულ მრავალწახნაგებს აქვს ჰექსაედრის ფორმა და ა. შ.

ახლა განვიხილოთ AX -ის ტიპის ისეთი სტრუქტურები, რომლებშიც მიუხედავად იმისა, რომ სრ ერთნაირია, კოორდინაციული მრავალწახნაგები მაინც განსხვავებულია, ასეთებია: $NiAs$, $TiBi$, $PbSb$, $MnAs$ და სხვ.

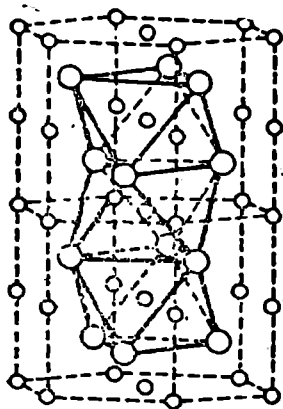
ე) ნიკელის ($NiAs$) სტრუქტურულ ტიპი წარმოადგენს დარიშხანის ანიონების უპირდროეს ჰექსაგონურ წყობას, რომლის ყველა ოქტაედრულ სივრცეში მოთავსებულია ნიკელის კატიონები. ამ სტრუქტურის ელემენტარული უჯრედი ($P6_3/mmc$ სივრცული ჯგუფი) ერთმანეთზე ფუჭეებით შეპდგაოი ჰექსაგონური პრიზმებისა, ოთხელთა წვეროებში და ფუჭეების ცენტრში მოთავსებულია ნიკელის კატიონები (ნახ. IX. 17 ა). ეს პრიზმები რომ დავყოთ 6 ტრი-



ნახ. IX. 17. ნიკელის ($NiAs$) სტრუქტურული ტიპი: ა- იონთა ცენტრების აღნიშვნით, ბ და გ-კოორდინაციული მრავალწახნაკები $[NiAs_6]$ ოქტაედრია, $[AsNi_6]$ - ტრიგონური პრიზმა.

გონურ პრიზმად და ორივე სათელზე სამ-სამი პრიზმის ცენტრში მოუათავსოთ დარიშხანის ანიონები, ისე რომ შეესებულები და ცარიელი პრიზმები „მორიგეობდნენ“ ყველა მიმართულებით, მივიღებთ ნიკელის სტრუქტურას. ყოველ ნიკელს გას ეყრის 6 დარიშხანი და ყოველ დარიშხანს 6 ნიკელი კოორდინაციული მრავალწახნაგები

[NiAs₂] ოქტაედრის ფორმისა და [AsNi₆] ტრიგონური პრიზმის სახე აქვს (ნახ. IX. 17, ბ და გ). ნიკელის სტრუქტურაში (NiAs₂) ოქტაედრების განლაგების სქემა მოცემულია IX. 18 ნახაზზე. ოქტაედრები ერთმანეთს ეერთდება წახნაგების საშუალებით C კრისტალოგრაფიული ღერძის გასწვრივ. ამგვარად, ნიკელის სტრუქტურაში დარიზხანისა და ბიკელის იონების განლაგების ადგილები (წერტილები) ერთმანეთს არ უთავსდება და იქმნება



○ As
○ Ni

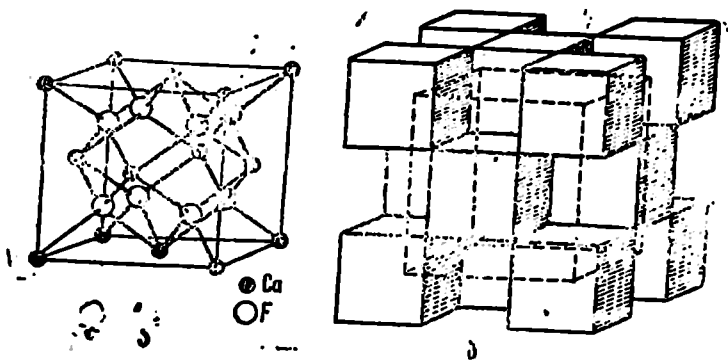
ნახ. IX. 18. [NiAs₂] ოქტაედრების განლაგების სქემა ნიკელის სტრუქტურულ ტიპში.

სხვადასხვა წერტილთა სწორი სისტემა. ანტომ IX. 17 ნახაზზე შავი ზურთულეებით აღნიშნულია ბოლოდ ნიკელი და თეთრი ზურთულეებით — ბოლოდ დარიზხანი; (CsCl-ის სტრუქტურულ ტიპში (ნახ. IX. 14.) ცეზიუმის და ქლორის აღნიშვნები რომ შეგვეცვლა, სტრუქტურის შინაარსი არ შეიცვლდება).

II. A_2X_3 -ის და A_2X -ის ნაერთების სტრუქტურული ტიპები. შენაერთებში, როგორც სტრუქტურების ელემენტარულ უჯრედებში კატიონებისა და ანიონების რაოდენობა განსხვავებულია, საკოორდინაციო რიცხვებსაც სხვადასხვა მნიშვნელობა აქვს. განვიხილოთ რამდენიმე მაგალითი.

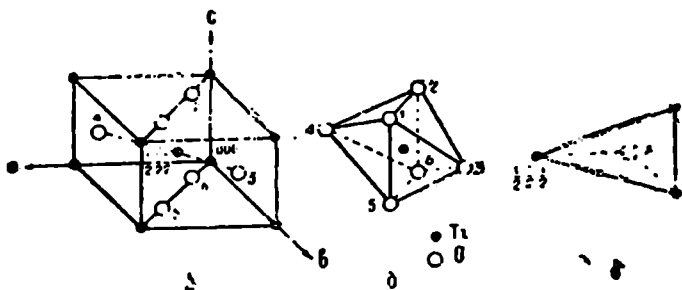
ა) ფლუორიტის (CaF_2) სტრუქტურული ტიპი შეიძლება წარმოვიდგინოთ როგორც კალციუმის კატიონების უბჭიდროესი კუბური წყობა, სადაც ყველა ტეტრაედრულ სიცარიელეში მოთავსებულია ფტორის ანიონები. ამასთან დაკავშირებით უახლოესი მანძილი კალციუმის კატიონებს შორის 3,148, ხოლო ფტორის ანიონებს შორის — 1,363 Å, ელემენტარულ უჯრედში კალციუმის კატიონები განლაგებულია კუბური წახნაგცენტრირებული. მესრის კვანძების ადგილებში, ხოლო ფტორის ანიონები მოთავსებულია მერვედი კუბის რვავე ცენტრში (ნახ. IX. 19. ა). ელემენტარული კუბის წიბო $a_0 = 5,45 \text{ \AA}$, სივრცული ჯგუფია $Fm\bar{3}m$, ერთ უჯრედზე მოდის ოთხი კალციუმი და რვა ფტორი ($4CaF_2$), ე. ი. $z=4$. ამრიგად, საკოორდინაციო რიცხვი კალციუმის იონებისათვის არის 8, ხოლო ფტორის იონებისათვის — 4. კოორდინაციული $[CaF_8]$ მრავალწახნაგა ჰექსაედრია და $[FCa_4]$ — ტეტრაედრი.

IX. 19. ბ ნახაზზე ნაჩვენებია ფლუორიტის ელემენტარული უჯრედი პოლიედრების საშუალებით, ყოველი ჰექსაედრი ერთმანეთს უკავშირდება წიბოებით. ამავე სტრუქტურულ ტიპში კრისტალდება SrF_2 , BaF_2 , HgF_2 , CeO_2 , ThO_2 და სხვა ნივთიერებები. არსებობს კიდევ ანტიფლუორიტული სტრუქტურული ტიპი იონთა ისეთივე



ნახ. IX. 19. ფლუორიტის (CaF_2) სტრუქტურული ტიპი: ა-იონთა ცენტრების აღნიშვნით; ბ-იგივე კოორდინაციული მრავალახანაგებით (ჰექსაედრებით (CaF_6)).

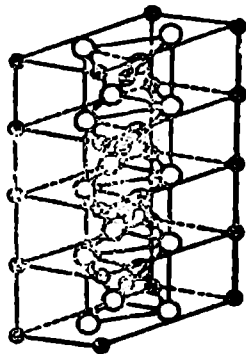
განლაგებით. მაგრამ კარბონების ადგილზე განლაგებულია ანიონები და ანიონებს ადგილზე—კატიონები. ასეთ სტრუქტურებს იძლევა Li_2O , Na_2O , Na_2S , Be_2C , Mg_2Si და სხვა ნაერთები.



ნახ. IX. 20. რუტილის (TiO_2) სტრუქტურული ტიპი: ა-ელემენტარული უჯრედი; ბ- $[TiO_6]$ ოქტაედრი; გ- $[TiO_3]$ სპეკტოზედი.

ბ რუტილის (TiO_2) სტრუქტურული ტიპი წარმოდგენილია TiO_2 -ის ერთ-ერთი მოდიფიკაციით, რომლის ელემენტარული უჯრედი ტიტანის კატიონებით აგებული ტეტრაავონური სხეულცენტრირებულ უჯრედი $a_0 = 4,59 \text{ \AA}$ და $c_0 = 2,96 \text{ \AA}$ პარამეტრებით (ნახ. IX. 20. ა).

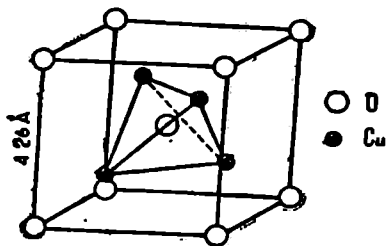
ელემენტარული უჯრედის ფუძეების ერთ-ერთი დიაგონალის გასწვრივ მოთავსებულია ქანგბადის 2 ანიონი და მის მართობულად გატარებული დიაგონალის გასწვრივ, რომელიც უჯრედის ცენტრზე გაივლის (001) სიბრტყის პარალელურად, კიდევ ქანგბადის ორი ანიონი. ოუტილის კრისტალური სტრუქტურა შეიძლება წარმოვიდგინოთ, როგორც ქანგბადის იონების განლაგება ნაწილობრივ დამახინჯებული უმჭიდროესი პექსაგონური წყობის სახით, რომელთა ოქტაედრული სიციარელების ნახევარში მოთავსებულია ტიტანის იონები. აღწერილი სტრუქტურა ეკუთვნის $P4_2/mnm$ სივრცულ ჯგუფს და მის ერთ უჯრედზე მოდის ტიტანის ორი და ქანგბადის ოთხი იონი ($2TiO_2$), ე. ი. $z=2$. ყოველ ტიტანს გარს ეკვრის ექვსი ქანგბადი და ყოველ ქანგბადს სამი ტიტანი (ნახ. IX. 20. ბ და გ). კოორდინაციული მრავალწახნაგა $[TiO_6]$ ოდნავ დამახინჯებული ოქტაედრია. ოქტაედრები ერთმანეთს უერთდებიან წიბოებით და წარმოქმნიან c ღერძის პარალელურ სვეტებს (ნახ. IX. 21).



ნახ. IX. 21. $[TiO_6]$ -ის სვეტი რუტლის სტრუქტურაში.

ამ ტიპის სტრუქტურებს იძლევა ბევრი მინერალი, მათ შორის MgO_2 , SuO_2 , MgF_2 , PbO , და სხვ. მაღალი წხვეის პირობებში ამავე სტრუქტურაში კრისტალდება კვაოცის ერთ ერთი მოდიფიკაცია — ბიშოფიტი (SiO_2).

გ) კუპრიტის (Cu_2O) სტრუქტურული ტიპი ეკუთვნის კუბურ სინგონიას. მისი ელემენტარული უჯრედი წარმოადგენს კუბურ სხეულცენტრირებულ მესერს, სადაც კუბის წვერებსა და ცენტრში განლაგებულია ქანგბადის ანიონები, ხოლო სპილენძის კატიონები მოთავსებულია ტეტრაედრულად, ელემენტარული კუბის ოქტანტების ოთხ ცენტრში (ნახ. IX. 22). სპილენძის ყოველ იონს ეხება ქანგბადის ორი იონი

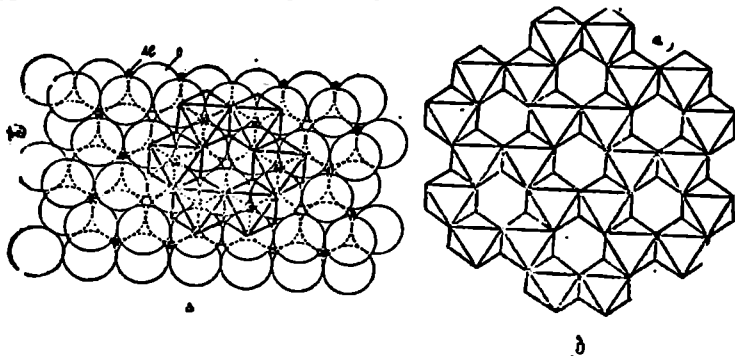


ნახ. IX. 22. კუპრიტის (Cu_2O) სტრუქტურა.

და ქანგბადის ყოველ იონს სპილენძის ოთხი კატიონი. $a = 2,13\text{\AA}$ სივრცული ჯგუფი $Pn\bar{3}m$ ერთ უჯრედზე მოდის ორი ქანგბადი და ოთხი სპილენძი, ე. ი. $z=2$. ამავე სტრუქტურებს იძლევა Ag_2O , Pb_2O და სხვ. III. A_2X_3 -ის ნაერთების სტრუქტურული ტიპები. A_2X_3 ის ნაერთები (Al_2O_3 , Fe_2O_3 , Ti_2O_3 , V_2O_3 , Cr_2O_3 და სხვ.) მიიღება მაშინ, როდესაც

ანიონების უმკიდროეს წყობაში კატიონები განლაგდება არა ყველა ოქტაედრულ სიციარიელეში, არამედ მხოლოდ 2/3-ში და 1/3 ცარიელი იქნება.

ა) კორუნდის (Al_2O_3) სტრუქტურული ტიპი წარმოადგენს ჟანგბადის ანიონების უმკიდროესი ჰექსაგონური წყობით განლაგებას. სადაც ალუმინის კატიონები ავსებენ ოქტაედრული სიციარიელეების ორ მესამედს (ნახ. IX. 23). ერთ ალუმინს გარს ეკვრის ექვსი ჟანგბადი, ერთ ჟანგბადს—ოთხი ალუმინი. $[AlO_6]$ ოქტაედრები განლაგებულია შრეების სახით L_3 ლერძის მართობულად და ქმნის ოქტაედრიან რგოლებს (ნახ. IX. 23. ბ). ოქტაედრების ნაწილი ერთმანეთს უერთდება



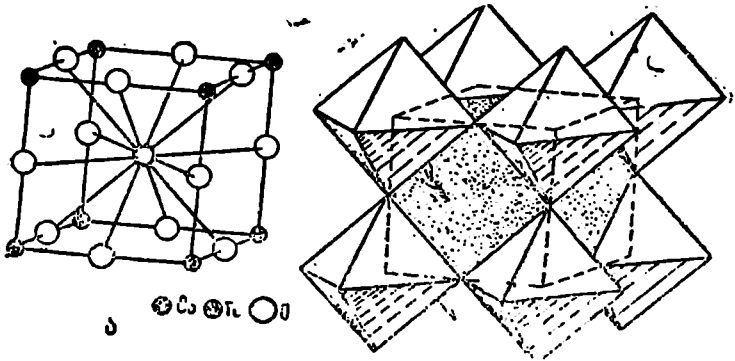
ნახ. IX 23. კორუნდის (Al_2O_3) სტრუქტურული ტიპი: ა- ჟანგბადის და ალუმინის იონების განლაგების სქემა (გვერდილი (000)-ზე) გ-ყოფილია (AlO_6) ოქტაედრების ერთი რგოლი, ბ $[AlO_6]$ ოქტაედრების შრის გვერდილი (001)-ზე.

წახნაგებით, ზოკი კი წიბოებით. სივრცული ჯგუფია $R3c$, $d_0 = 5,13A$. ერთ ელემენტარულ უჯრედზე მოდის 4 ალუმინი და 6 ჟანგბადი, $z=2$. ალუმინისა და ჟანგბადის იონებს შორის ძლიერი ელექტროსტატიკური მიზიდულობის გამო ჟანგბადის შრეები ნაწილობრივ უფრო დაახლოებულია, ვიდრე იდეალური ჰექსაგონური წყობის პირობებში და ამიტომ ოქტაედრებიც ზვირედ დეფორმირებულია. ძლიერი ელექტროსტატიკური მიზიდულობა კორუნდის სტრუქტურაში მას ანიჭებს სიმაგრეს (კორუნდზე მაგარი მხოლოდ ალმასია): ქიმიურად სუფთა Al_2O_3 უფეროა, სხვადასხვა მინარეები კი მას ფერს უცვლის, ასე, მაგალითად, რიტანის მინარევი ალურჯებს (საფირონი), ქრომი აწითლებს (წითელი იაგუნდი), რკინა და ნიკელი აყვითლებს და ა. შ. კორუნდის სტრუქტურულ ტიპში კრისტალდება Fe_2O_3 , Ti_2O_3 , V_2O_3 , Cr_2O_3 და სხვ.

სხვა უფრო რთული ქიმიური ნაერთებიდან (მაგალითად, ABX_3 -ის ტიპის ნაერთებიდან) განვიხილოთ $CaTiO_3$.

ბ) პეროვსკიტის ($CaTiO_3$) სტრუქტურული ტიპი დამახასიათებელია ისეთი შემთხვევისათვის, როდესაც A ელემენტი წარმოადგენს დიდი ზომის კატიონით და ზომით უასლოდდება ანიონის ზომას, ხოლო B კატიონებს შეუძლია მოთავსდეს ოქტაედრულ სივარცელებში.

პეროვსკიტის სტრუქტურის ელემენტარული უჯრედში პოზიტიული კვებურია, სივარცობრივი ჯგუფია $Pm\bar{3}m$. აქ ტიტანის კატიონები განლაგებულია ელემენტარული კუბის წვეროებში (ნახ. IX. 24. ა), ჟანგბადის ანიონები კი კუბის წიბოების ცენტრებში. კალციუმი მო-



ნახ. IX. 24. პეროვსკიტის სტრუქტურული ტიპი: ა. ელემენტარული უჯრედი, ბ-იგივე (TiO_6) კოორდინაციული ოქტაედრებით გამოსახული.

თავსებულია უჯრედის ცენტრში. ერთ ელემენტარულ უჯრედზე მოდის ერთი კალციუმი, ერთი ტიტანი ($8 \times 1/8$) და სამი ჟანგბადი ($12 \times 1/4$), მაშასადამე, $Z=1$. ერთ ტიტანს გარს ეკვრის 6 ჟანგბადი, ერთ ჟანგბადს—2 ტიტანი და ერთ კალციუმს—12 ჟანგბადი. კოორდინაციულ მრავალწახნაგას აქვს ორი ფორმა: კუბოქტაედრისა (სრ-12), რომლის ცენტრში მოთავსებულია კალციუმი, და ოქტაედრისა (სრ-6), რომლის ცენტრშია ტიტანი (ნახ. IX. 24. ბ). ოქტაედრები ერთმანეთს უერთდება მხოლოდ წვეროებით. ამგვარად, პეროვსკიტის სტრუქტურა შეიძლება წარმოვიდგინოთ როგორც ჟანგბადის და კალციუმის იონების უქადროუსი კუბური წუბა (შეფარდება: $O:Ca=3:1$), რომელთა ოქტაედრული სივარცელების $1/4$ შევსებულია ტიტანის იონებით, ყველა დანარჩენი სივარცელე კი შევსებულია. ამ სტრუქტურულ ტიპში კრისტალდება აგოეთვე $BaTiO_3$, $CaZrO_3$, $PbTiO_3$ და სხვ. ბევრი მათგანი საინტერესოა დიელექტრიკული თვისებების თავისებურების გამო.

კომპლექსანიონის მქონე ნაერთები

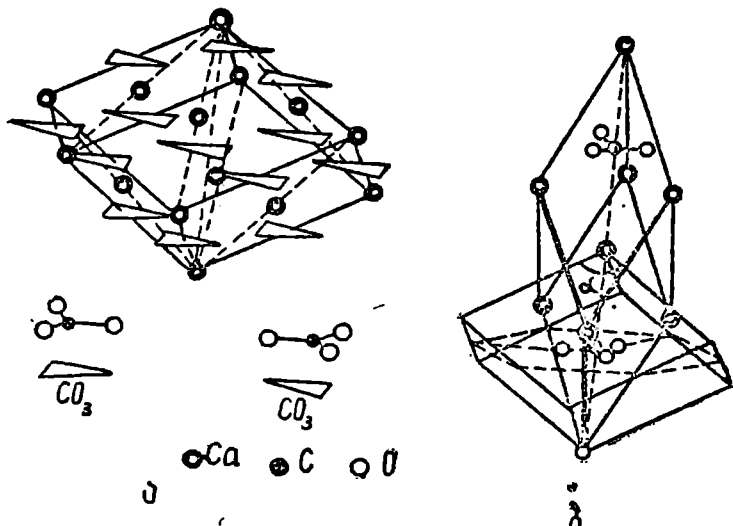
რიგ რთულ ნაერთთა იონურ სტრუქტურებში ანიონები წარმოდგენილია არა მარტივი სახით (Cl^- , F^- , O^{2-} , S^{2-} და სხვ.), არამედ კომპლექსანიონის (რალიკალის) სახით, რომელშიც ერთ კომპლექსში ენგბადის რამდენიმე ანიონია შეერთებული სათანადო კატიონის საშუალებით. მაგალითად, $[\text{SO}_4]^{2-}$, $[\text{CO}_3]^{2-}$, $[\text{NO}_3]^-$, $[\text{BO}_3]^{-3}$, $[\text{PO}_4]^{3-}$, $[\text{SiO}_4]^{4-}$ და სხვ. ასეთი კომპლექსების არსებობა დასაშვებია მხოლოდ მაშინ, როდესაც ენგბადის ანიონსა და კომპლექსის კატიონს შორის კავშირი უფრო მტკიცეა, ვიდრე ენგბადის ანიონსა და ნაერთში შემავალ „გარეშე“ კატიონს შორის, ასე მაგალითად, ბარიუმის სულფატის (BaSO_4), $[\text{S}^{6+} \text{O}_4]^{2-}$ კომპლექსანიონში შემავალი გოგირდის კატიონი ექვევალენტია და თავის მუხტს უნაწილებს ოთხ ენგბადს ($6:4 \equiv 1,5$), მაშასადამე, ყოველი ენგბადი თავისი მუხტის $3/4$ -ით დაკავშირებულია გოგირდთან და მხოლოდ $1/4$ -ით ბარიუმთან. კომპლექსანიონში შემავალი კატიონის მუხტის შეფარდება მის გარშემო განლაგებულ ენგბადთა ანიონების მუხტების ჯამთან წარმოადგენს ვალენტური ნაჯერობის კოეფიციენტს. რაც უფრო დიდია ამ უკანასკნელის მნიშვნელობა, მით უფრო მტკიცეა კომპლექსანიონი. ასეთი კომპლექსანიონებია სულფატებში, კარბონატებში, ნიტრატებში, ფოსფატებში და სხვა მაზილქებში: მათი ენგბადები დაკავშირებულია კატიონებთან საკუთარი მუხტის $1/2$ ზე მეტი სიმტკიცით. ასეთი ხაერთების სტრუქტურებს ანიზოდესმიურ სტრუქტურებს უწოდებენ. სტრუქტურებში, რომელთა კომპლექსანიონებში ვალენტური ნაჯერობის კოეფიციენტი ზუსტად $1/2$ -ია (მაგალითად, $[\text{Si}^{4+} \text{O}_4]^{2-}$ -ში, ან $[\text{B}^{3+} \text{O}_3]^-$ -ში), ატყილებელია კომპლექსების ერთმანეთთან შეერთება და რთული კომპლექსანიონების წარმოქმნა. ასეთ სტრუქტურებზე ქვემოთ ცალკე შევჩერდებით.

ჩვეულებრივ კომპლექსანიონებს წარმოქმნის მცირე ზომისა და მაღალი ვალენტობის კატიონები. კომპლექსებს უფრო ხშირად საკუთხედის ან ტეტრაედრის ფორმა აქვს და რაც უფრო მტკიცეა მათი შინაგანი კავშირი, მით უფრო ხშირად გვხვდება ისინი სტრუქტურებში იზოლირებული სახით. რიგ შემთხვევებში კი, როდესაც ეს კომპლექსები ერთმანეთს უერთდება, წარმოიქმნება სხვადასხვა კონფიგურაციის უფრო რთული კომპლექსები.

ანიზოაქსიური სტრუქტურით კომპლექსური ანიონებიდან განვიხილოთ $[\text{CO}_3]^{2-}$, როდესაც ბრტყელი სამკუთხედის ფორმა აქვს და გვხვდება კარბონატებში.

კალციტის (CaCO_3) სტრუქტურული ტიპი ნაჩვენებია IX. 25. ნახაზზე. იგი შეიქმნება მივიღოთ ქვამაზლის (NaCl) სტრუქტურიდან, თუ მასში Na -ის კატიონის ადგილებში მოვათავსებთ Ca -ის კატიონ-

ნებს, ხოლო Cl -ის ადგილებში — $[CO_3]$ კომპლექსანიონებს. ასეთი კუბის ფორმა უნდა დავამახინჯოთ მისი ერთ-ერთი მქსამე რიგის სიმეტრიის ღერძის მიმართულებით შეკუმშვით. შეკუმშვა უნდა ვაწარმოოთ მანამ, სანამ წახნაგებს შორის კუთხე არ გახდება $101^{\circ} 55'$. ამგვარად, მიღებული რომბოედრი ($10\bar{1}1$) წარმოადგენს კალციტის ელემენტარულ უჯრედს (ნახ. IX. 25. ა), რომლის ყველა წვეროში და წახნაგების ცენტრში მოთავსებულია კალციუმის იონები, ხოლო $[CO_3]$ -ის ბრტყელი სამკუთხედები განლაგებულია ყოველი წიბოს და რომბოედრის ცენტრში. ყველა კომპლექსანიონი განლაგებულია ერთმანეთის პარალელურად L_2 -ღერძის მართობ სიბრტყეში. ელემენტარული უჯრედი ძახვილკუთხა რომბოედრია, რომლის წახნაგებს შორის $45^{\circ} 07'$ -ია. კალციუმის იონები განლაგებულია უჯრედის ყველა წვეროში და მის ცენტრში კომპლექ-

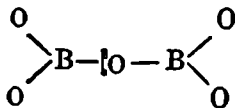


ნახ. IX. 25. კალციტის ($CaCO_3$) სტრუქტურული ტიპი: ა — (CO_3) კომპლექსანიონის განლაგების სქემა; ბ — ელემენტარული უჯრედი.

სანიონის სამკუთხედები მოთავსებულია L_2 ღერძის გასწვრივ ერთმანეთისადმი შებრუნებული ორიენტაციით (ნახ. IX. 25. გ). სივრცული ჯგუფია R^2c . კომპლექსანიონში ნახშირბადს აქვს შერეული ბმა — სამი კოვალენტური და ერთი იონური. მისი ჰიბრიდული მდგომარეობა შეიძლება გამოისახოს ასე: C^{IV} . ანალოგიური სტრუქტურისაა Mg -ის, Fe -ის, Zn -ის, Cd -ის და Mo -ის კარბონატები, Na -ის და Li -ის ნიტრატები და სხვა ნაერთები.

C. რთული კომპლექსანიონების მქონე ნაერთები

რთული კომპლექსანიონები უმთავრესად წარმოიქმნება იმ რადიკალების ხარჯზე, რომელთა ვალენტური ნაჯერობის კოეფიციენტი 1/2-ია. კომპლექსანიონში ეანგბადები გაჯერებულია მხოლოდ თითო მუხტით და მეორეთი უკავშირდება „გარეშე“ კატიონს. ასეთი კომპლექსანიონები გვხვდება სილიკატებში $[\text{SiO}_4]^{4-}$ ტეტრაედრების და ბორატებში $[\text{BO}_3]^{3-}$ სამკუთხედის სახით. ეანგბადის საკუთარ კატიონთან უფრო ძტკიცედ დაკავშირების მიზნით კომპლექსანიონები ერთმანეთს უერთდება ეანგბადის (ე. ი. მრავალწ. ხნაგას წვეროების) საშუალებით და ამიტომ ყოველი ორი სამკუთხედის თუ ტეტრაედრის შეერთებით „საერთო“ ეანგბადი მთლიანად იქნება გაჯერებული და იგი ველარ დაუკავშირდება სხვა კატიონს. მაგალითად, ორი $[\text{BO}_3]$ სამკუთხედის შეერთებით მივიღებთ შემდეგ სახის რთულ კომპლექსანიონს:



ან $[\text{B}_2\text{O}_6]^{4-}$, რომელშიც „საერთო“ ეანგბადს თავი-

სუფალი მუხტი აღარ ექნება. ასეთი შეერთება შეიძლება განხორციელდეს სხვადასხვა ვარიანტით. განვიხილოთ ზოგიერთი მათგანი სილიკატების მაგალითზე, რადგან მინერალთა ეს კლასი სხვა კლასებთან შედარებით უფრო კარგადაა შესწავლილი.

სილიკატების სტრუქტურული ვარიანტები. ყველა სილიკატის ძირითადი სტრუქტურული ელემენტი არის სილიციუმ-ეანგბადიანი ტეტრაედრი $[\text{SiO}_4]^{4-}$, რომელშიც სილიციუმის

და ეანგბადის რადიუსების შეფარდება $\frac{r_{\text{Si}}}{r_{\text{O}}} = \frac{0,39}{1,36} = 0,29$, რაც მიგ-

ვითითებს იმაზე, რომ ყოველ სილიციუმს გარს ეკვრის ეანგბადის 4 ანიონი (ნახ. IX. 26). ამ კომპლექსანიონში სილიციუმში უნაწილებს ყოველ ეანგბადს თითო დადებით მუხტს, ე. ი. ეანგბადი Si-თან დაკავშირებულია თავისი სრული მუხტის ნახევრით და ამით იგი წარმოადგენს ტიპურ მეზოდესმიურ ნაერთს. აღნიშნული სილიციუმ-ეანგბადიანი ტეტრაედრები ეანგბადის ანიონების „დასაკუთრების“ მიზნით ერთმანეთს უერთება ეჯუფებად, რომლებშიც გაერთიანებულია ტეტრაედრების გარკვეული დასრულებული (2, 3, 4, 6, ან 12 ტეტრაედრი) ან უსასრულო რაოდენობები. ამ პოლიმერიზაციის შედეგად წარმოიქმნება სხვადასხვა ძობაზულობის რთული კომპლექსანიონები, რომელთა შესაბამისად სილიკატების კლასის მინერალები იყოფა ხუთ ქვეკლასად.

სილიკატები სასრული კომპლექსანიონებით:

1 ქვეკლასი. კუნძულოვანი სილიკატები (რთული კომპლექსანიონი წარმოდგენილია ცალკეული ტეტრაედრებით).

2 ქვეკლასი. სილიკატები იზოლირებული ტეტრაედრული ჯგუფებით.

2¹—იზოლირებული შეწყვილებული ტეტრაედრებით (დიორთო-ჯგუფი).

2^{II}—რგოლებიანი სილიკატები.

(რთული კომპლექსანიონი წარმოდგენილია 3, 4, 6, და 12 ტეტრაედრიანი რგოლებით).

სილიკატები უსასრულო კომპლექსანიონებით.

3 ქვეკლასი. ძეწყვებიანი სილიკატები (რთული კომპლექსანიონები წარმოდგენილია დაუსრულებელი ერთგანზომილებიანი რიგებით):

ა) ერთმაგი ძეწყვებით;

ბ) ორმაგი ძეწყვებით (ბაფთები);

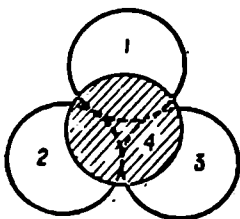
4 ქვეკლასი. შოისებრი სილიკატები (რთული კომპლექსანიონები წარმოდგენილია ორგანზომილებიანი შრეებით).

5 ქვეკლასი. კარკასული სილიკატები (რთული კომპლექსანიონი წარმოდგენილია სამგანზომილებიანი კარკასებით).

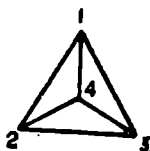
განვიხილოთ თითოეული ქვეკლასი ცალ-ცალკე. ა

1. კუნძულოვანი სილიკატები

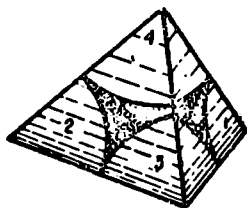
იზოლირებული $[\text{SiO}_4]^{4-}$ ტეტრაედრები (ნახ. IX. 26). გვხვდება ორთოსილიკატებში და წარჩინებულ გენს რთული კომპლექსანიონების კერძო შემთხვევას, როდესაც ტეტრაედრები სტრუქტურებში ერთმა-



ა



ბ



გ

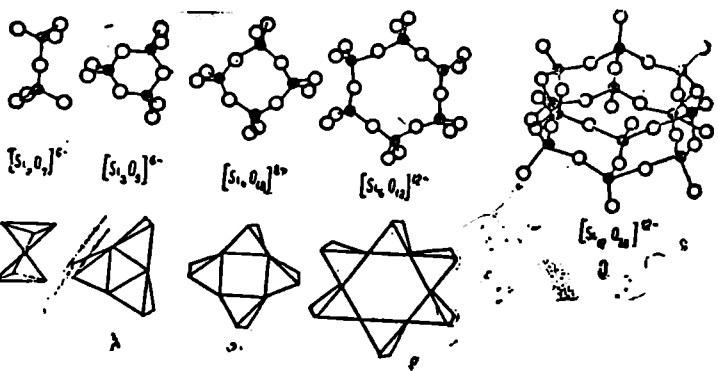
ნახ. IX. 26 სილიციუმენაგბადიანი ტეტრაედრი: ა-ენაგბადის იონების წილი. ბ-კოორდინაციული ტეტრაედრი. გ-იგივე ტეტრაედრი ენაგბადის იონების ცენტრების აღნიშვნით.

ნეთს უკავშირდება გარეშე კატიონების საშუალებით და არა უშუალო ურთიერთშეხებით. მაგალითად, ფორსტერიტში (Mg_2SiO_4) სილიციუმენაგბადიანი ტეტრაედრები ერთმანეთს უერთდება მაგნიუმის კა-

ტიონების საშუალებით, გროსულარში ($Ca_3Al_2 [SiO_4]_6$) ტეტრაედრებს აკავშირებს კალციუმისა (Ca^{2+}) და ალუმინის (Al^{3+}) კატიონები და ა. შ. საკოორდინაციო რიცხვი გარეშე კატიონებისათვის შეიძლება იყოს 6, 8 და 12. [ხედავით, ალუმინულქვიშეობაში სრ მანკიუმისათვის აიონი 6-ფორსტეიტში და ალუმინისათვის — გროსულარში]. კვხძე-ლოვან სილიკატებს უწოდებენ აგრეთვე ნეზოსილიკატებს („ხეზოს“ ბერძნულად კეძმელს ხიშხავს). ამ ტიპის მინერალებში სილიციუმისა და ჟანგბადის შეყაოდება ტოლია 1:4

2. სილიკატები იზოლირებულ ტეტრაედრულ ჯგუფებით

2'. სილიკატები, რომელთა რთული კომპლექსიანიონები წარმოდგენილია შეწყვეტილი ტეტრაედრებით $[Si_2O_7]^{4-}$. ეს დიოქსიდოჯგუფი მიიღება ორი სილიციუმჯანგბადიანი ტეტრაედრის შეერთებით (ხაი, IX. 27.ა). ორივე ტეტრაედრის აქვს ძოლოდ ერთი საერთო წვერო (ძოლოდ ერთი საერთო ჟანგბადი). ამ კომპლექსში სილიციუმების ცენტრებს შორის მანძილი 3,2 ა-ია (იხ. ნახ. VIII. 27). ამ შეერთების შედეგად საერთო ჟანგბადი ძოლიახად გაჯეოვილია და მიღებული კომპლექსის მკიდი ჟანგბადიდაი ძოლოდ ექვაი უქავძირღია გაოწე კატიონებს. სილიციუმისა და ჟანგბადის შეყაოდება იქიება 2:7. ასეთი სტრუქტურეაი აიასიათეას ტრაიტიციუს ($Si_2 [Si_2O_7]$), იღეაიტს



ნახ. IX. 27: სილიციუმჯანგბადიანი ტეტრაედრების დასრულებული ჯგუფები: ი-იზოლირებული ტეტრაედრული წევი ლა (Si_4O_{14})⁶⁻; ბ-სამტეტრაედრიანი რგოლო (Si_3O_{10})⁴⁻; გ-ოხტეტრაედრიანი რგოლი (Si_8O_{22})⁴⁻; დ-ექსტეტრაედრიანი რგოლი (Si_6O_{18})⁶⁻ და ე-ორსართულიანი 12 ტეტრაედრიანი რგოლი ($Si_{12}O_{30}$)¹²⁻

($CaFe_2 Fe \cdot [Si_2O_7][OH]$), კალამინს ($Zn_3[Si_2O_7](OH)_2 \cdot H_2O$ და სხე. ამ ქვეკლასის ზოგიერთ სილიკატში გვხვდება ისეთი სტრუქტურებიც, რომელთა შედგენილობაში ერთდროულად ორივე განხილული კომ-

პლექსია წარმოდგენილი, მაგალითად, ეპიდოტში $-Ca_2(Al, Fe)_2 [Si_2O_7]_2 [SiO_4]_2 (OH) \cdot O$.

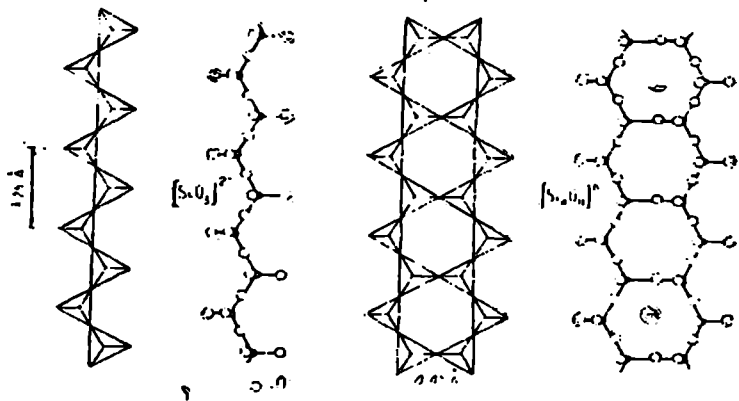
2'' რგოლებიანი სილიკატები

წრიული ფორმის რთული კომპლექსანიონები წარმოდგენილია IV. 27 ბ, გ, დ და ე ნახაზებზე: ყოველ ტეტრაედრს აქვს შეზობულ ტეტრაედრებთან საზიარო ორი წვერო (ქანგბადი) და მიიღება ჩაკეტილი რგოლები.

სამი ტეტრაედრით აგებულ რგოლში სამი ქანგბადი მთლიანად გაჯერებულია და ყოველ ტეტრაედრს აქვს ორი გაუჯერებელი (ერთმუხტიანი) ქანგბადის ახიოანი. ამრიგად, აღწერილ რგოლში შეფარდება $Si : O = 3 : 9$ და აქვს ექვსი უარყოფითი მუხტი: $[Si_3O_9]^{6-}$, ასეთი რგოლები არის მინერალ ბენიტონიტის $(BaTi(Si_3O_9))$ სტრუქტურაში.

ოთხტეტრაედრიანი რგოლები $[Si_4O_{12}]^{8-}$ უფრო ნაკლებადაა გავრცელებული, მაგალითად, ბოტიტი $(Ba_4(TiNb)_6O_{18}[Si_4O_{12}]Cl)$. ექვსტეტრაედრიანი რგოლის მქონე სტრუქტურის მაგალითად შეიძლება დავასახელოთ ბიერილი $-Be_3Al_2[Si_6O_{18}]$. ამ სტრუქტურაში რგოლები განლაგებულია ერთმანეთის თავზე სვეტების სახით და ერთმანეთს უერთდება Be^{2+} და Al^{3+} კატიონების საშუალებით. ყოველ ბერილიუმს გარს ეკვრის ოთხი ქანგბადი, ალუმინს კი ექვსი.

ორსართულიანი რგოლების კომპლექსანიონი $[Si_{12}O_{30}]^{12-}$ (ნახ. IX-27, ე) გვხვდება მილარიტის $KCa_2AlBe_3[Si_{12}O_{30}] \cdot 5H_2O$ სტრუქტურაში.



ნახ. IX. 28 ერთჯანზომილებიანი რთული კომპლექსანიონები: ა - ერთმაგი ძეწყვი $[SiO_3]^{2-}$ და ბორმაგი ძეწყვი (ბ-ფთა) $[Si_2O_7]^{2-}$ ძეწყვები გამოსახულია ტეტრაედრებით (მარცხნივ) და იონთა განლაგებას აღნიშვნით (მარჯვნივ)

ორსართულიანი რთული კომპლექსანიონი 12 ტეტრაედრისაგან შედგება, მას აქვს 18 მთლიანად გაჯერებული ქანგბადის იონი და 12 ერთმუხტიანი, სულ 30 ქანგბადი, ზოგ შემთხვევაში ქანგბადის ადგილის ნაწილს იკვრს $(OH)^-$.

3. ძეწკვიანი სილიკატები

ა) ერთგანზომილებიანი რთული კომპლექსანიონები შეიძლება შევიღოთ ტეტრაედრების ერთმანეთთან ერთი მიმართულებით შეერთებით (ნახ. IX. 28. ა). ახალი ტეტრაედრები ემატება მხოლოდ სიგრძეზე, ამიტომ ეს იქნება ერთგანზომილებიანი რთული კომპლექსანიონი. ძეწკვიან ყოველ ტეტრაედრს აქვს ორი საკუთარი ქანგბადი და ორი საზიარო. ყოველ ტეტრაედრში ქანგბადების რაოდენობა იქნება $2 + (2 \times \frac{1}{2}) = 3$ და შეფარდება $Si:O = 1:3$, ე. ი. ძეწკვიში შეპავალი

ტეტრაედრების ერთობლიობა შეიძლება გამოისახოს ასე: $[Si_3O_7]^{2-}$. ამავე დროს ამ ძეწკვეზში ტეტრაედრების თავისუფალი ქანგბადები მორაგებობითაა განლაგებული ხან მარჯვნივ და ხან მარცხნივ. ამიტომ იდენტურობის ჯეოლოგი აქ ორის ჯერადია და ძეწკვის ყოველი რგოლი განიოსაჯება $[Si_2O_6]^{4-}$ სახით. ასეთი ძეწკვების არსებობა დადგენილია პიროქსენების ჯგუფის მინერალთა სტრუქტურებში, სადაც ისინი განლაგებულია c კოისტალოგრაფიული ღერძის პარალელურად და ერთმანეთს უკავშირდებიან Mg^{2+} , Ca^{2+} , Fe^{2+} , Al^{3+} და სხვ. კატიონებით.

გარდა მოყვანილი ვარიანტისა, არსებობს კიდევ ძეწკვები სხვა ვარიანტებით შეერთებული ტეტრაედრებით. მაგალითად, საძის ჯერადი იდენტურობის პერიოდით*, ეკრეთ წოდებული ვოლასტონატური ძეწკვი $[Si_5O_{15}]^{10-}$ ან ხუთის ჯერადი—როდონიტური ძეწკვი $[Si_6O_{18}]^{12-}$ და სხვ. ამჟამად დადგენილია ძეწკვის 10-ზე მეტი სხვადასხვა ვარიანტი.

ბ) ერთგანზომილებიანი რთულ კომპლექსანიონს ეკუთვნის აგრეთვე ორმაგი ძეწკვები, ანუ ბაფთები (ნახ. IX. 28. ბ). სადაც ზოგ ტეტრაედრს სამი წვერო აქვს საზიარო, ზოგს—ორი. ახალი ტეტრაედრები ემატება მხოლოდ სიგრძეზე. ბაფთის ყოველი რგოლი შედგება 6 ტეტრაედრისაგან, რომელთაგან ორი ტეტრაედრი მარტო ამ რგოლს ეკუთვნის და ოთხი საზიაროა. ამრიგად, სილიციუმის რაოდენობა ყოველ რგოლში იქნება $2 + 2(2 \times \frac{1}{2}) = 4$, ხოლო ქანგბადისა— $8 + 2(3 \times$

$\frac{1}{2}) = 11$, ე. ი. ბაფთაში $Si:O = 4:11$ და რადიკალის გამოსახულებაა $[Si_4O_{11}]^{6-}$. ასეთი ბაფთების არსებობა დადგენილია აფიბოლების ჯგუფის მინერალების სტრუქტურაში, სადაც ისინი c ღერძის პარალელურადაა განლაგებული და ერთმანეთს უერთდებიან ორ-და სამ-

* უმოკლესი მანძილი ორ ერთნაირ წერტილს შორის სტრუქტურულ რიგში (ძეწკვიში), რომლის გასწვრივ დასაშვებია ვლუმერტარული ტრანსლაცია.

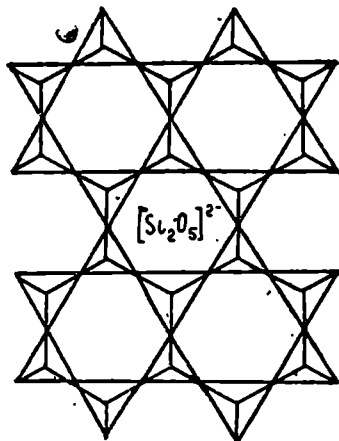
ვალენტოვანი კატიონების (Mg, Ca, Fe, Al და სხვ.) საშუალებით.

ანალოგიურად ერთმაგი ძეწკვებისა, აქამად დადგენილია ბაფ-
თების სხვა ვაზიანტებიც, მაგალითად. ეკოეთ წოდებული ქსონოტლი-
ტური ბაფთა რვატეტრაედრიანი რგოლებით. აქ სილიციუმისა და
ქანგბადის ძეწაოდებაა 6 : 17, და მთელ ოადიკალს კი აქვს შემდეგ
საიე $[Si_6O_{17}]^{10-}$.

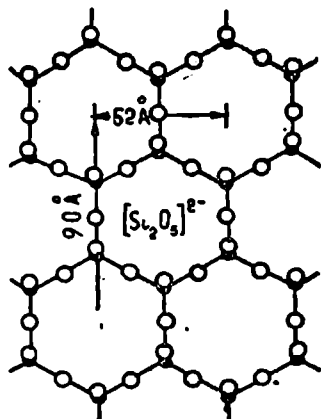
ძეწკვებსა და ბაფთებს შორის განსხვავებული კონფიგურაცია
იწვევს შესაბამისად განსხვავებულ თვისებებს პიროქსენებსა და ამფი-
ბოლებს შორის, როგორცაა შაგალითად, კოისტალების იერი, ტენი-
ვადობის მიმართულება და სხვ.

4. შრისებრი სილიკატები

შრისებრი (ოკაახზომილუიანი) რთული კომპლექსანიონები
წარმოიქმნება სილიციუმქანგბადიანი ტეტრაედრების ისეთი ძეწრებით,
როდესაც ყოველი ტეტრაედრის სამი წვეო საზიაროა (ნახ. IX. 29).
აბალი ტეტრაედრები ემატება როგოც სიგომეზე, ისე სიგანეზე და
მიიღება შუე ჰექსაკონური უჯრედებით. ყოველი უჯრედი წედგება
ექვსი ტეტრაედრისგან, ხოლო ყოველი ტეტრაედრი ეოთდროულად
ესახუოება სამ უჯრედს და თითოს ეკუთვხის ძისი ხესაშედი. ამგეა-
რად, ერთ უჯრედზე მოდის $6 \times \frac{1}{3} = 2$ სილიციუმი.



ა

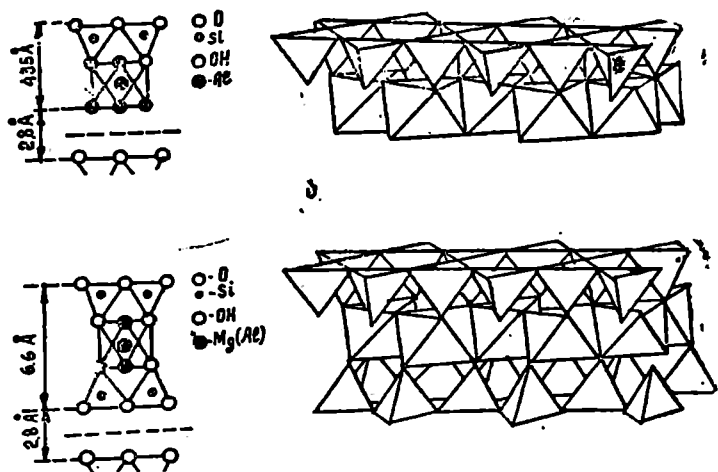


ბ

ნახ. IX. 29. სილიციუმქანგბადიანი ტეტრაედრების შუე $[Si_6O_6]^{2-}$ ტეტრაედრებით და ბ-იონთა განლაგების აღნიშვნით

უჯრედებში ორნაირი ქანგბადია: ერთი მათგანი ერთმუხტიანია და
შრის (ნახაზის) მართობულადაა განლაგებული, მეორე კი (საზიარო
იონები) მთლიანად გაჯერებულია. უჯრედში ორივე იონითაა წარ-

მოდენილი, მაგრამ რაკი გასაჯერებელი იონები ემსახურება სამ უჯრედს, ხოლო გაჯერებული—ორს, ჟანგბადის საერთო რაოდენობა თითო უჯრედში იქნება $(6 \times \frac{1}{3}) + (6 \times \frac{1}{2}) = 5$. მაშასადამე, $Si : O = 2 : 5$ და შრისებრი რადიკალის ფორმულა იქნება $[Si_2O_5]^{2-}$. აღწერილი შრეები განლაგებულია სტრუქტურებში ϵ დარძის ძარბოვლად, რომლებშიც გასაჯერებელი ჟანგბადი მოთავსებულია ან ყველა შრისათვის ერთსა და იმავე მხარეს (ზევით ან ქვევით), ან ისე, რომ მეზობელ შრეებში გასაჯერებელ ჟანგბადს საწინააღმდეგო მიმართულება ჰქონდეს. გასაჯერებელი ჟანგბადის მზიდან სილიციუმ-ჯანგბადიანი ტეტრაედრების შრეს მიჰყვება კატიონის შრე $(OH)^-$ დაბატებით ანიონებთან ერთად და მივიღებთ ჰიოველ შემთხვევაში ორშიან და მეორე შემთხვევაში სამშიან დასტებს (ნახ. IX. 30. ა და ბ). ეს დასტები ერთმანეთს უერთდება ან დიდი ზომის კატიონების საშუალებით, ან ვან-დერ-ვაალსის სუსტი ძალებით. შრისებრი ფორმის რთული კომპლექსანიონები აქვს ტალკს ($Mg_3[Si_2O_5](OH)_2$), კაოლინიტს ($Al_2[Si_2O_5](OH)_4$) და სხვა სილიკატებს.



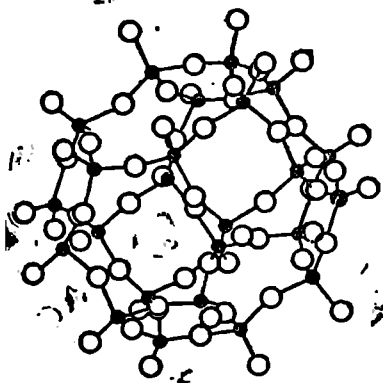
ნახ. IX. 30. ა-კაოლინიტის ორშიანი დასტა, ბ-ტალკის სამშიანი დასტა, მარცხნივ—იონთა განლაგების სქემა დასტებში.

შრისებრი სტრუქტურის მქონე ზოგიერთ სილიკატში სილიციუმ-ჯანგბადიანი ტეტრაედრის ცენტრში მოთავსებულ ოთხვალენტთან სილიციუმს ჩაენაცვლება სამვალენტიანი ალუმინი, რის შედეგად ანიონს მოემატება უარყოფითი მუხტი. ასეთ სილიკატებს ალუმინისილიკატებს უწოდებენ. მაგალითად, ფლოგოპიტი ($KMg_3[AlSi_3O_{10}](F,OH)_2$) მაგნეზიური ალუმინისილიკატია, მის სტრუქტურაში შემა-

ვალი ტეტრაედრების საერთო რიცხვის ერთ მეოთხედში სილიციუმები ჩანაცვლებულია ალუმინით, ხოლო კალიუმში მოთავსებულია სამშუიან დასტებს შორის და ალადგენს ელექტროსტატიკურ წონასწორობას, რომელიც დაირღვა ალუმინის ჩანაცვლების შედეგად.

5. კარკასული სილიკატები

კარკასული (სამგანზომილებიანი) რთული კომპლექსანიონი მიიღება მაშინ, როდესაც სილიციუმქანგბადიანი ტეტრაედრის ოთხივე წვერო საზიაროა (ნახ. IX. 31). ახალი ტეტრაედრები მიემატება სამი მიმართულებით. შეფარდება $Si:O = 1:2$, ე. ი. მივიღებთ $[SiO_4]_n$ ანუ კაქმიწას. ხოლო იმისათვის, რომ კარკასმა მიიღოს უარყოფითი მუხტი და სათანადო კატიონების ჩამატებით მივიღოთ სილიკატის



ნახ. IX. 31. სამგანზომილებიანი კარკასი, აგებული სილიციუმქანგბადიანი ტეტრაედრების უსასრულო წიგობით.

სტრუქტურა, აუცილებელია სილიციუმქანგბადიანი ტეტრაედრების ნაწილში სილიციუმს ჩაენაცვლოს განსხვავებული მუხტის კატიონი (უფრო ხშირად ალუმინი). ამრიგად, კარკასული კომპლექსანიონის ზოგადი ფორმულა იქნება $[Al_xSi_{n-x}O_{4n}]^-$ კომპლექსში შემავალი კატიონების და ანიონების შეფარდება $(Al + Si):O = 1:2$, ხოლო კომპლექსის მუხტი ჩანაცვლებული ალუმინის იონების რაოდენობის ტოლია. მაშასადამე, კარკასული სტრუქტურის სილი-

კატები ყოველთვის ალუმინსილიკატებია, მაგალითად, ორთოკლაზი ($K[AlSi_3O_8]$), ნეფელინი ($Na[AlSiO_4]$), ანორთიტი ($Ca[Al_2Si_2O_8]$) და სხვ.

სილიკატების სტრუქტურაში ყურადღებას იპყრობს ალუმინის კატიონის (Al^{3+}) ორგვარი მდებარეობა ჟანგბადის მიმართ, როგორც 4, ისე 6 კოორდინაციაში, ე.ი. სილიკატების სტრუქტურაში შეიძლება ალუმინი განლაგებული იყოს როგორც ტეტრაედრულ, ისე ოქტაედრულ სიციარიელეში, მაგალითად, მუსკოვიტის ($KAl_2[AlSi_3O_{10}](OH)_2$) სტრუქტურაში შეიავალი ალუმინის მთელი რაოდენობის $2/3$ განლაგებულია ოქტაედრულ სიციარიელეში, $1/3$ კი სილიციუმის ნაიკლად სილიციუმქანგბადიან ტეტრაედრებში.

ალუმინის ასეთი მდებარეობა აიხსნება მისი სამკალენტოანი კო-
ტიონის ზომით (0,57A), შეფარდება $\frac{r_{Al}}{r_o} = \frac{0,57}{1,36} = 0,42$, რაც ძალიან

ახლოა 0,414-თან, რომელიც რადიუსების ზღვარია საკოორდინაციო რიცხვებს (6 და 4) შორის (იხ. ტაბულა VI|| 7). ანტიკომ ეს იონი შეიძლება შეგვხვდეს ორივე კოორდინაციაში. სილიკატების საერთო კონსტრუქციული კლასიფიკაცია მოცემულია IX. 1. ტაბულაში.

ტაბულა IX. 1

რთული კომპლექსიონის სილიკატების კლასიფიკაცია

სილიკატთა ტიპები (ქეკლასები)	რთული კომპლექსიონის ფორმულა და მუხტი	მაგალითები
---------------------------------	--------------------------------------	------------

I. სილიკატები სახრული მოტივებით

1. კუნძულთვანი იზოლარებული სილიკატ- ენგბადიანი ტეტრაედრებით	[SiO ₄] ⁴⁻	ფორსტერიტი Mg ₂ [SiO ₄] გრინულარი Ca ₂ Al ₂ [SiO ₄] ₂
---	-----------------------------------	--

2. ბოლირებული ტეტრაედრული ჯგუფებით

2.1 შეწყველებული ტეტრაედრებით	[Si ₂ O ₇] ⁶⁻	კლამინი Zn ₄ [Si ₂ O ₇](OH) ₂ H ₂ O
-------------------------------	---	---

2.11 რგოლებიანი ა) საბეტრაედრიანი	[Si ₃ O ₉] ⁶⁻	ბენიტონიტი BaTi[Si ₂ O ₆]
--------------------------------------	---	--

ბ) ოთხტეტრაედრიანი	[Si ₄ O ₁₂] ⁶⁻	ბაოტიტი [Ba ₂ (Th,Nh) ₂ O ₄][Si ₄ O ₁₂]Cl
--------------------	--	--

გ) ექვსტეტრაედრიანი	[Si ₆ O ₁₈] ⁶⁻	ბიფრილი H ₂ Al ₂ [Si ₆ O ₁₈]
---------------------	--	---

დ) 12 ტეტრაედრიანი	[Si ₁₂ O ₃₆] ¹²⁻	მილარიტი K ₂ (Al ₂ Al ₂ Si ₁₂ O ₃₆) ₂ ·5H ₂ O
--------------------	--	--

II. სილიკატები უსახრული მოტივებით

3. ძეწყვებიანი (ერთჯანზომილებიანი) ა) ერთმაგი ძეწყვებით	[SiO ₃] ²⁻	დიფსიდი CaMg[SiO ₃] ₂
---	-----------------------------------	--

ბ) ორმაგი ძეწყვებით (ბაფთა)	[Si ₄ O ₁₁] ⁶⁻	ტრემოლიტი Ca ₂ Mg ₅ [Si ₄ O ₁₁](OH) ₂
--------------------------------	--	---

4. შრისებრი (ორჯანზომილებიანი) ორშრიანი დასტებით	[Si ₂ O ₆] ⁴⁻	კაოლინიტი Al ₂ [Si ₂ O ₆](OH) ₄
--	---	--

სამშრიანი დასტებით	[Si ₄ O ₁₀] ⁴⁻	ტალიტი Mg ₃ [Si ₄ O ₁₀](OH) ₂ მუსკოვიტი KAl ₂ [AlSi ₃ O ₁₀](OH) ₂
--------------------	--	--

5. კარკასული (სამჯანზომილებიანი) ალუმინოსილიკატები	[Al _x Si _{4-x} O ₃₀] ¹⁰⁻	ორთოკლასი K[AlSi ₃ O ₉] ანორთიტი Ca ₂ [Al ₂ Si ₂ O ₉] ნეფლინი Na[AlSi ₃ O ₉]
--	---	---

§ IX. 4. იზომორფიზმი და პოლიმორფიზმი

ბუნებაში მინერალები არასოდეს არ გვხვდება ფორმულის შე-
საბამისი, იდეალურად სუფთა ქიმიური ნაერთის სახით. მათში მეტ-
ნაკლები რაოდენობითაა სხვადასხვა ელემენტები მექანიკური ან სტრუ-
ქტურული მინარევების სახით. ამ მინარევების შედგენილობა და რა-
ოდენობა დამოკიდებულია ამ გარემო პირობებზე, რომელშიც ხდება
მინერალის წარმოშობა, ზრდა და შემდგომე ცვლილებები. ამავე პი-
რობებზეა დამოკიდებული აგრეთვე კრისტალის მიერ მიღებული სტრუ-
ქტურული ტიპებიც. ამგვარად, მინერალთა წარმოშობის პირობების
გასარკვევად აუცილებელია ზუსტად დადგინდეს მათი მინარევი ელ-
ემენტები და ნაერთის სტრუქტურული ტიპები (პოლიმორფული მოდი-
ფიკაციები).

სტრუქტურული, ანუ როგორც მათ უწოდებენ იზომორფული
მინარევები, გარკვეულ კანონზომიერებებს ემორჩილება, რასაც
იკვლევს და განაზოგადებს გეოქიმიის, ხოლო მინარევი ელემენტების
უშუალო კავშირს კონკრეტულ კრისტალურ სტრუქტურებთან იხილავს
და აღგენს კრისტალთქიმიის. ასეთი ხასიათის კვლევებს მეტად დიდ
პრაქტიკული მნიშვნელობა აქვს, რადგან ხშირად მინარევი ელემენტთა
შორის გვხვდება ისეთი მნიშვნელოვანი ელემენტები, როგორიცაა
გერმანიუმი, ჰაფნიუმი, რენიუმი, ნიობიუმი, ტანტალი, იშვიათი მიწე-
ბი და სხვ., რომლებიც ხშირად მათი მოპოვების ერთადერთი წყაროა,
მაგალითად, Ge, Ga და In მიიღება სფალერიტიდან, Hf—ციროკონი-
დან, Rf—მოლიბდენიტიდან და სხვ.

ა. იზომორფიზმი

1819 წელს ცნობილმა გერმანელმა ქიმიკოსმა მიტჩერლიხმა და-
ადგინა, რომ ქიმიურად მსგავსი ნივთიერებები, რომლებიც ერთნაირ
სიმეტრიის ხარისხს მქონე კრისტალებს იძლევა, წარმოშობს ამ ნივ-
თიერებების შერეული შედგენილობის კრისტალებს, მაგალითად,
KH₂PO₄ და KH₂AsO₄-ის საერთო ხსნარიდან გამოიყოფა ორივე მარო-
ლის სხვადასხვა რაოდენობის შემცველი კრისტალები. ამ მოვლენას
მან იზომორფიზმი უწოდა, რაც ტოლფორმიანობას ნიშნავს.

ანალოგიური მოვლენა დადგენილია აგრეთვე რიგი ორჭალენ-
ტიანი მეტალების კარბონატებისათვისაც, რომლებიც სიმეტრიის ერთ
კლასში კრისტალდებიან. მათი კრისტალური სტრუქტურების ელემენ-
ტარულ უჯრედს რომბოედრის ფორმა აქვს, რომლის წახნაგებს შო-
რის a კუთხე (იხ. ნახ. IX. 25) უმნიშვნელოდ იცვლება:

ნაერთი	CaCO ₃	CdCO ₃	MnCO ₃	FeCO ₃	MgCO ₃	ZnCO ₃
კუთხე რომბოედრის წახნაგებს შორის	101°55'	112°30'	102°56'	103°04'	103°21'	103°28'

ამგვარად, იზომორფიზმში თავდაპირველად გულისხმობდა ორ-
 ქიმიურად მონათესავე შედგენილობისა და მსგავსი კრისტალების მქო-
 ნე ნივთიერების ურთიერთშერევით ცვალებადი შედგენილობის ერთ-
 გვაროვანი კრისტალური ფაზების წარმოშობას. შემდგომში, თხევადო-
 სისტემების ანალოგიურად, პოლანდიელმა ქიმიკოსმა ვანტ ჰოფმა ამ
 ფაზებს მყარი ხსნარები უწოდა (1890 წ.). მაშასადამე, ტერმი-
 ნები „იზომორფიზმი“, „შერეული კრისტალი“ და „მყარი ხსნარი“
 (იგულისხმება ჩანაცვლების მყარი ხსნარი) ერთსა და იმავე მოვლენას
 აღნიშნავს თანამედროვე გაგებით, კრისტალთა შინაგანი აგებულების
 სტრუქტურულ-გეომეტრიული შესწავლის საფუძველზე, იზომორფიზმი
 შეიძლება განვმარტოთ, როგორც ქიმიური ელემენტების უნარი ჩაე-
 ნაცვლონ ერთმანეთს კრისტალურ სტრუქტურაში მათი
 აგებულების პრინციპული შეცვლის გარეშე. ეს იმას ნიშ-
 ნავს, რომ რომელიმე კრისტალის შედგენილობაში იზომორფული მი-
 ნარევის სახით შეიძლება მონაწილეობდეს „სტუმარი“ ელემენტი. რო-
 მელიც ჩაეჩაცვლება სტრუქტურის „მასპინძელ“ ელემენტს და დაიჭერს
 მის ადგილს, ასე, მაგალითად, მაგნეზიტის ($MgCO_3$) სტრუქტურაში
 მაგნიუმის კატიონებს, რომ ჩაენაცვლოს რკინის კატიონები, მივიღებთ
 $(Mg, Fe)CO_3$. ფრჩხილებში მოთავსებულია იზომორფული ელემენტები,
 მათ შორის მძიმე ნიშნავს, რომ Mg -ის კატიონების ნაწილი ჩანაც-
 ვლებულია Fe -ით და ამ უკანასკნელის რაოდენობა ნაკლებია, ვიდრე
 Mg -ის კატიონები. თუ ჩანაცვლებული რკინის რაოდენობა გადააჭარ-
 ბებს მაგნიუმისას, მაშინ მიღებული ნაერთის ფორმულა დაიწერება
 ასე: $(Fe, Mg)CO_3$.

ამრიგად, აღრიხედლმა წარმოდგენამ იზომორფიზმზე სტრუქტურ-
 რული კვლევების განვითარებასთან დაკავშირებით განიცადა ტრანს-
 ფორმაცია მორფოლოგიური კრისტალოგრაფიის პრობლემიდან-სტრუ-
 ქტურული კრისტალთქიმიის ერთ-ერთ აქტუალურ პრობლემად. თანა-
 მედროვე შეხედულება იზომორფიზმზე ემყარება ვ. გოლდშმიტის,
 ხ. გრიმის, ა. ფერსმანის, ვ. სობოლევის, ნ. ხლოპინის, ვ. ნიკიტინის
 და სხვ. შრომებს. მათი კვლევის თანახმად დადგენილია, რომ იზომორ-
 ფიზმისათვის საჭიროა ურთიერთჩანაცვლებელი ელემენტებს ჰქონდეს
 ერთნაირი ან თითქმის ერთნაირი ზომები და, გარდა ამისა, ახასია-
 თებდეს მსგავსი პოლარიზაციული თვისებები. ეს კი იმას ნიშნავს,
 რომ აღებულ სტრუქტურაში ორივეს ერთნაირი ხასიათის ბმა ჰქონ-
 დეს. იზომორფულ ელემენტთა „თითქმის ერთნაირი“ ზომები გულის-
 ხმობს, რომ მათი ატომების (იონების) რადიუსების სხვაობა (Δr) არ
 უნდა აღემატებოდეს უმცირესის ზომის 15 პროცენტს. ასეთ შემთხვე-
 ვაში ერთმანეთს ჩაენაცვლებიან ნებისმიერი რაოდენობის იონები და

ადგილი ექნება ე. წ. განუსაზღვრელ იზომორფიზმს, ხოლო თუ Δr 15%-ს აღემატება, მაშინ იზომორფიზმი შეზღუდულია და ადგილი ექნება განსაზღვრულ რაოდენობის ელემენტების ურთიერთინაცვლებას, ანდა ჩანაცვლებას მაღალი ტემპერატურის პირობებში და დაშლას ტემპერატურის დაწვევისას.

განუსაზღვრელი, ანუ სრული იზომორფიზმი გულისხმობს, რომ ორი ნივთიერება წარმოქმნის შეჩეული შედგენილობის კრისტალების უწყვეტ რიგს, მაგალითად Mg^{2+} -ის ($r=0.74 \text{ \AA}$) და Fe^{2+} -ის ($r=0.80 \text{ \AA}$) შემცველი ქიმიურად მსგავსი ნივთიერებები, როგორცაა მაგნეზიტი ($MgCO_3$) და სიდერიტი ($FeCO_3$) ან ფორსტერიტი ($Mg_2[SiO_4]$) და ფაიალიტი ($Fe_2[SiO_4]$). წარმოქმნიან უწყვეტი რიგის შერეულ კრისტალებს. მაგნეზიტი და სიდერიტი იზომორფული შერევის შედეგად გვაძლევს უწყვეტ ნაერთებს, რომელთაგან გამოყოფენ ექვს სახესხვაობას (იხ. ტაბულა IX. 2), ხოლო ფორსტერიტის და ფაიალიტის იზომორფიზმით მიიღება შენაერთების განუწყვეტელი რიგი $(Mg, Fe)_2[SiO_4]$ -დან $(Fe, Mg)_2[SiO_4]$ -მდე ოთხი სახესხვაობით. ესენია: 1) ფორსტერიტი, 2) ფლივინი, 3) ჰორტონოლიტი, 4) ფაიალიტი. ანალოგიური იზომორფიზმი ახასიათებს $PbS-PbSe.Nb$ და Ta ის შენაერთებს და სხვ.

შეზღუდული (არასრული) იზომორფიზმი ბუნებაში გაცილებით უფრო ხშირად გვხვდება, ვიდრე სრული იზომორფიზმი. ამ შემთხვევაში იზომორფული ნარევის კიდურა წევრებს არ შეუძლია წარმოქმნას ნარევის განუწყვეტელი რიგი და აღწევს გაოკეველ ზღვრულ შედგენილობამდე. ხშირად გახსნილი ნივთიერებების რაოდენობა არ აღემატება ერთეულ პროცენტებს ან პროცენტის მეთათედებს და იშვიათ შემთხვევაში აღწევს 50 %-ს. მაგალითად. რკინის იზომორფული მინარევები სფალერიტში (ZnS) არ აღემატება 20%-ს, ხოლო ვერცხლის მინარევები გალენიტში (PbS)—პროცენტის მეთათედებს.

ტაბულა №. IX. 2

მაგნეზიტის და სიდერიტის იზომორფული ნარევები

№ რიგ.	შენაერთის დასახელება	შედგენილობა, %	
		$MgCO_3$	$FeCO_3$
1.	მაგნეზიტი	100 - 95	0 - 5
2.	ბრეინერიტი	94 - 70	6 - 30
3.	მეზიტი	69 - 50	31 - 50
4.	პისტომეზიტი	49 - 30	51 - 70
5.	სიდეროპლეზიტი	29 - 5	71 - 95
6.	სიდერიტი	4 - 0	96 - 100

თუ იზომორფულ ელემენტებს აქვს ერთნაირი ვალენტობა, მაშინ გვექნება ე. წ. იზოვალენტური იზომორფიზმი, ხოლო როდესაც სხვადასხვა ვალენტობისაა, მაშინ ადგილი აქვს პეტეროვალენტური იზომორფიზმს.

იზოვალენტური იზომორფიზმის მაგალითებია:

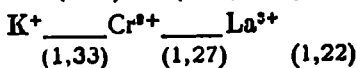
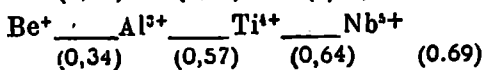
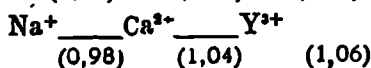
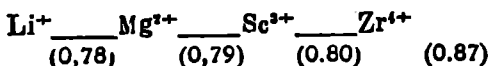
ერთვალენტური ელემენტებიდან K—Rb—Cs, Cu—Ag და სხვ.

ორვალენტური ელემენტებიდან Ca—Sr—Ba—Ra—Pb—, Zn—Cd; Mg—Fe, Mn—Ni—Co და სხვ.

სამვალენტური ელემენტებიდან Al—Fe—V—Ce—Mn, — As—Sb Bi და სხვ.

ოთხვალენტური ელემენტებიდან Zr—Hf—Th—U— და სხვ.

პეტეროვალენტური იზომორფიზმი ბუნებაში უფრო ხშირად გვხვდება. ვიდრე იზოვალენტური. ამის მაგალითად (პერიოდული სისტემის დიაგონალური რიგების მიხედვით) შეიძლება მოვიყვანოთ შემდეგი ელემენტები (ფრჩხილებში აღნიშნულია იონთა რადიუსები ანგსტრემებით):



პეტეროვალენტური იზომორფიზმის დროს, რაკი უფრო დიდი მუხტის კატიონი ჩაენაცვლება დაბალი მუხტის კატიონს, სტრუქტურის ელექტროსტატიკური წონაწილობა დაირღვევა და მისი აღდგენისათვის საჭირო გახდება შესაბამისი ჩანაცვლება ანიონის მუხტის გასაღიღებლად. ტიპური პეტეროვალენტური იზომორფიზმის მაგალითია პლაგიოკაზების უწყვეტი რიგი— $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ (ალბიტის) და $(\text{Ca}|\text{Al}, \text{Si}_2\text{O}_6)$ (ანოთიტის) იზომორფული ნარეგების სახით, აქ Na^+ -ს ჩაენაცვლება Ca^{2+} და ანიონის მუხტის შესაბამისად გადიდებისათვის კომპლექს-ანიონში Si^4 -ს უნდა ჩაენაცვლოს Al^{3+} , ე. ი. ადგილი აქვს ჯგუფურ ჩანაცვლებას: $\text{Na}^+\text{Si}^4 = \text{Ca}^{2+}\text{Al}^{3+}$, სადაც ყოველი ჯგუფის ჯამური მუხტი ტოლია. პეტეროვალენტური იზომორფიზმის დროს გვაქვს ელექტროსტატიკური წონაწილობის დაცვის სხვა შემთხვევებიც:

ა) გამომქეცების იზომორფიზმი. იზომორფიზმის ამ სახესხვაობას ადგილი აქვს მაშინ, როდესაც უფრო მაღალი ვალენტობის მქონე ჩამნაცვლებელი ელემენტი იწვევს ჩანაცვლებული ელემენტის

შეტი რაოდენობით გამოძევებას, მაგალითად, ვალენიტის (PbS) სტრუქტურაში, სადაც ორვალენტიანი ტყვიის კატიონები განლაგებულია ყველა ოქტაედრულ სივრცეში, უნდა ჩანაცვლოს საძვალენტიანი ბისმუტი შემდეგი სქემათ: $3Pb^{2+} \rightleftharpoons 2Bi^{3+}$. ამ ჩანაცვლების შედეგად იზომოფული ნაერთის ფორმულა გამოისახება ასე: $Pb_{1-x}Bi_{2x/3}S$, რადგან ყოველი ორი ბისმუტის ჩანაცვლების შედეგად თავისუფლდება თითო ოქტაედრული სივრცე. მიღებული სტრუქტურა დეფექტურია ვაკანტური ოქტაედრული სივრცეების წარმოადგინების გამო. ასეთივე სახისაა პიროტინის სტრუქტურა ($Fe_{1-x}S$), სადაც ნაწილი ორვალენტიანი რკინის კატიონებისა ჩანაცვლებულია სამვალენტიანი რკინის კატიონებით.

გ) იზომორფიზმი სივრცის შევსებით წარმოიქმნება მაშინ, როდესაც სტრუქტურაში თავისუფალი ადგილები იზომორფიზმის შედეგად შეივსება და ამის გამო კრისტალური ნივთიერების სივრცე უფრო მეტად ივსება. მაგალითისთვის განვიხილოთ $Y^{3+} \rightleftharpoons Ca^{2+}$ იზომორფიზმი ფლუორიტის (CaF_2) სტრუქტურაში. როგორც ვიცით, ამ სტრუქტურაში Ca -ის დიდი იონები განლაგებულია უმკიდრის კუბური წყობის მიხედვით და F -ის აბიონები მოთავსებულია ყველა ტეტრაედრულ სივრცეში, ოქტაედრული სივრცეები კი თავისუფალია. ყოველი ორვალენტიანი კალციუმის საძვალენტიანი იტრიუმით ჩანაცვლება იწვევს სტრუქტურაში დადებითი მუხტის ზოდანს და ელექტროსტატიკური წონასწორობის აღსადგენად საჭიროა სათანადოდ თითო F -ის დამატება, რომელიც შეიძლება მოთვალეს მხოლოდ თავისუფალ ოქტაედრულ სივრცეში და ადგილი ექნება კრისტალური სივრცის დამატებით შევსებას.

როგორც აღვნიშნეთ, იზომორფულ ელემენტებს (ჩანაცვლებელსა და ჩანაცვლებულს) უნდა ჰქონდეს დაახლოებით ერთნაირი ზომის რადიუსები და ასევე სპინური მომენტის თვისებები. ან, როგორც ხელა ამბობენ, მსაკისი კოორდინაცია და ქიმიური ბმის ტიპი. იმის საილუსტრაციოდ, რა მართა რადიუსების ტოლობა არ არის საშარისი იზომორფული ჩანაცვლებისათვის, განვიხილოთ Cu^{+} და Na^{+} იონები. მიუხედავად იმისა, რომ ერთვალენტიანი სპილენძისა და ნატრიუმის იონების რადიუსები ტოლია (ორივეს რადიუსია $0,98 \text{ \AA}$), ისინი ერთმანეთს არასოდეს იზომორფულად არ ენაცვლებიან იმიტომ, რომ ამ ნაერთების ქიმიური ბმები ეკუთვნის განსხვავებულს: ნატრიუმი იძლევა იონურ ნაერთებს (მაგალითად, $NaCl$). ხოლო სპილენძი — კოვალენტურს (მაგალითად, $CuCl$). გარდა ამისა, $NaCl$ -ის სტრუქტურაში ნატრიუმის $s_r = 6$, $CuCl$ -ში სპილენძის $s_r = 4$. ანალოგიურ მდგომარეობაშია $K(r=1,33 \text{ \AA})$ და $Pb(r=1,28 \text{ \AA})$ მიუხედავად იმისა, რომ მათი ნაერთები KCl და PbS ერთსა და იმავე სტრუქტურულ ტიპს ეკუთვნიან (ორივეს სივრცული გჯუვია $Fm\bar{3}m$) კალი-

უმი და ტყვია ერთმანეთს იზომორფულად არ ენაცვლებიან.

გოლდმშიდტის წესის თანახმად ქიმიურად მსგავსი ნაერთების იზომორფიზმი დასაშვებია მხოლოდ მაშინ, როდესაც მათი იონების რადიუსების სხვაობა არ აღემატება გარკვეულ საზღვრებს და მათი ბმის ტიპებიც მსგავსია. როდესაც მსგავს ნაერთებში ეს პირობა არ არის დაკული, მაგრამ გარკვეული ტემპერატურის და წნევის პირობების შესაბამისად ნივთიერებაში მაინც ხდება კატიონების ჩანაცვლება, მაშინ ასეთი ჩანაცვლების შედეგად იცვლება არსებული სტრუქტურული ტიპი. ამ შოკლენას მორფოტროპიას უწოდებენ.

ამგვარად, მორფოტროპია ნაშნავს რაიმე ნივთიერების კრისტალური სტრუქტურის მკვეთრ ცვლილებას მის შეგენილობაში შემავალი რომელიმე ქიმიურ ელემენტის სათანადო ჩანაცვლებით. ქლორიდებიდან ამის მაგალითია NaCl-ის სტრუქტურული ტიპის გადასვლა CsCl-ის სტრუქტურულ ტიპში იზოვალენტური ჩანაცვლების შედეგად: ქვამარილს (NaCl) სტრუქტურაში Na-ის კატიონი რომ შევცვალოთ უფრო დიდი ზომის K-ის კატიონით, სტრუქტურა არ შეიცვლება, მაგრამ თუ K-ის შევცვლით კიდევ უფრო დიდი Cs-ის კატიონით, მაშინ სტრუქტურული ტიპი შეიცვლება:

ნივთიერება	NaCl	KCl	CsCl
კატიონის რადუსი Å-ში	0.98	1.33	1.65
სტრუქტურული ტიპი	ნატრიუმქლორის		ცეზიუმქლორის
საკოორდინაციო რიცხვი	6		8

კარბონატებიდან მორფოტროპიის მაგალითია კალციტის სტრუქტურული ტიპის გადასვლა არაგონიტის სტრუქტურულ ტიპში, როდესაც მაგნეზიტში (MgCO₃) მაგნიუმის კატიონს თანდათან შევცვლით უფრო დიდი ზომის კატიონებით:



ამ შემთხვევაში კატიონების რადიუსების ზრდის საზღვარი გავივლის კალციტზე (CaCO₃):

ნივთიერება	MgCO ₃	FeCO ₃	ZnCO ₃	MnCO ₃	CaCO ₃	SrCO ₃	PbCO ₃	BaCO ₃
კატიონის რა- დიუსი \bar{A} -ში	0,74	0,80	0,83	0,91	1,01	1,20	1,26	1,38
სტრუქტურული ტიპი	კალციტის				საზღვარი	არაგონიტის		
საქოორდინაციო რიცევი	6					9		
სინგონია	ტრიგონური					რომბული		

როგორც ვხედავთ, აღნიშნული საზღვრის მარცხნივ კარბონატებს აქვს კალციტის სტრუქტურული ტიპი, ხოლო მარჯვნივ — არაგონიტის სტრუქტურული ტიპი. რადგან $CxCO_3$ -ს შეუძლია დაკრისტალდეს ორივე სტრუქტურულ ტიპში, იგი დიმორფული ნივთიერებაა.

ბ. პოლიმორფიზმი

პოლიმორფიზმი ეწოდება ნივთიერების უნარს, განსხვავებულ თერმოდინამიკურ პირობებში წარმოშვას სხვადასხვა სტრუქტურული ტიპი, ე. ი. არსებობს რამდენიმე კრისტალურ ფაზაში, რომლებიც ერთმანეთსაგან განსხვავდებიან როგორც სიჭეტირის სახით, ისე თვისებებით. ყოველ ფაზაა, რომელიც სტაბილურია გარკვეული ტემპერატურის და წნევის პირობებში, პოლიმორფულ მოდიფიკაციას უწოდებენ. ეს მოვლენა პირველად აღწერა მიტჩერლიზმა 1821 წელს. როდესაც ნივთიერებას ახასიათებს მხოლოდ ორი პოლიმორფული მოდიფიკაცია, უწოდებენ დიმორფულ ნივთიერებას. პოლიმორფული ნივთიერებებიდან მაგალითად შეიძლება დავასახელოთ შემდეგი ნაერთები:

ა) რკინის დისულფიდი (FeS_2), რომელიც იძლევა ორ მოდიფიკაციას: კუბურს $Pn\bar{3}$ სივრცული ჯგუფით (პირიტი) და რომბულს $Pnmm$ სივრცული ჯგუფით (მარკაზიტი);

ბ) გოგირდი (S), რომელიც იძლევა სამ მოდიფიკაციას: ერთს რომბულს $Fddd$ სივრცული ჯგუფით და ორს მონოკლინურს $P2_1/a$ და $P2/n$ სივრცული ჯგუფებით;

გ) ნახშირბადი (C) ორი პოლიმორფული მოდიფიკაციით: კუბური $Fd\bar{3}m$ სივრცული ჯგუფით (ალმასი) და ჰექსაგონური $P6_3/mmc$ სივრცული ჯგუფით (გრაფიტი);

დ) კაემიწა (SiO_2), რომელსაც რვა მოდიფიკაცია აქვს. მათ შორის ორი მოდიფიკაციაა კვარცის—დაბალტემპერატურული ტრიგონური (მარჯვენა— $P3_121$ და მარცხენა— $P3_221$) და მაღალტემპერატურული ჰექსაგონური (მარჯვენა— $P6_322$ და მარცხენა— $P6_622$). ორი მოდიფიკაცია ტრიდომიტის—დაბალტემპერატურული (სივრცული ჯგუფი არ არის დადგენილი) და მაღალტემპერატურული ჰექსაგონური ($P6_3/mmc$) ორნაირი კრისტობალიტი—ტეტრაგონური ($P4_22_12$) და კუბური ($Fm\bar{3}m$). დაბოლოს მაღალი წნევის პირობებში წარმოშობილი კიდევ ორი მოდიფიკაცია: მონოკლინური—კოესიტი (სივრცული ჯგუფი $C2'c$) და ტეტრაგონური—სტიშოვიტი, რომელიც კრისტალდება რუტილის ტიპის სტრუქტურაში ($P4_3/mmm$). პოლიმორფული ნივთიერებებია აგრეთვე HgS , ZnS , TiO_2 და სხვ. პოლიმორფულ მოდიფიკაციას, ჩვეულებრივ აღნიშნავენ ბერძნული ასოებით α , β , γ , δ ... და ა. შ. მიღებულია შედარებით უფრო დაბალტემპერატურული მოდიფიკაციების აღნიშვნა α -თი, ხოლო უფრო მაღალტემპერატურული მოდიფიკაციებისა— β , γ და ა.შ. მაგალითად, ტრიგონური მოდიფიკაციის კვარცი (α —კვარცი) მდგრადია 573°C ქვევით, ჰექსაგონური სინგონიის კვარცი (β —კვარცი) კი წარმოიშობა მხოლოდ 573° -ის ზევით: რომელიც გოგირდი (α —გოგირდი) მდგრადია $95,6^\circ$ ქვევით, ხოლო უფრო მაღალტემპერატურული გოგირდი (მონოკლინური მოდიფიკაციის სახით) აღინიშნება როგორც β -თი, ისე γ -თი.

უნდა აღინიშნოს, რომ მარტივ ნივთიერებათა (რკინის, ნახშირბადის, გოგირდის და სხვ.) პოლიმორფიზმს ხშირად აღოტროპიას უწოდებენ.

გარემოს თერმოდინამიკური პირობების შეცვლა იწვევს პოლიმორფული მოდიფიკაციების შესაბამის გარდაქმნებს. ნივთიერება არამდგრადი, ანუ მეტასტაბილური მდგომარეობიდან გადავა მდგრად, სტაბილურ მდგომარეობაში. ეს აიხსნება იმით, რომ ტემპერატურისა და წნევის შეცვლის დროს ნივთიერების ატომები (იონები) ცდილობენ ენერგეტიკულად მაქსიმალურად მომგებიანი პოზიციების დაკავებას. მაგრამ გარდაქმნები ხანდახან ისე ნელა მიმდინარეობს, რომ ნივთიერება ახალ (შეცვლილ გარემოში) საკმაოდ დიდხანს ინარჩუნებს ენერგეტიკულად ნაკლებად მდგრად მეტასტაბილურ მდგომარეობას. აღნიშნული გარდაქმნები ორი ბასიათისაა—ენანტიოტროპიული და მონოტროპიული.

ენანტიოტროპიული გარდაქმნა („ენანტოს“ ბერძნულად საწინააღმდეგოს და „ტროპოს“ შეცვლას ნიშნავს) არის მოდიფიკაციების ორმხრივი გარდაქმნა, ე. ი. სათანადო თერმოდინამიკური პირობების შესაბამისად მოდიფიკაციები შეიძლება ერთმეორეში გარდაიქმნას. მაგალითად, ტემპერატურის $95,6^\circ\text{C}$ -ზე გადიდებით ზევით დაბალტემპე-

რატურული რომბული გოგირდი გარდაიქმნება მაღალტემპერატურულ მონოკლინურ მოდიფიკაციად და პირიქით, ტემპერატურის დაწვევისას 95,6°-ზე დაბლა მონოკლინური გოგირდი გარდაიქმნება რომბულ მოდიფიკაციად. ეს აღინიშნება ასე: $\alpha - S \rightleftharpoons \beta - S$. ენატიოტროპიულია 95,6°C

აგრეთვე კვარცის მოდიფიკაციების გარდაქმნა, რომელიც გამოისახება ასე: $\alpha - \text{კვარცი} \rightleftharpoons \beta - \text{კვარცი}$.

573°C

მონოტროპიული გარდაქმნა გულისხმობს მოდიფიკაციების მხოლოდ ცალმხრივ გარდაქმნას—არამდგრადი მდგომარეობიდან მდგრად მდგომარეობაში გადასვლას. შებრუნებული ცვლილება აღარ ხდება, მაგალითად, რომბული FeS_2 -ის (მარკაზიტის) გადასვლა კუბურ FeS_2 -ში (პირიტში) ან $CaCO_3$ -ის რომბული მოდიფიკაციის (არაგონიტის) გადასვლა ტრიგონურ მოდიფიკაციაში (კალციტში). პოლიმორფული მოდიფიკაციების გარდაქმნისას ნივთიერების ფიზიკური თვისებებიც ცვლება ხახტომისებურად.

რიგ შემთხვევებში, როდესაც რაიმე ნივთიერების მაღალტემპერატურული მოდიფიკაცია გადადის დაბალტემპერატურულ მოდიფიკაციაში სინგონიის შეცვლით, იგი ინარჩუნებს არსებულ საწყის კრისტალურ ფორმას. რომელიც აღარ შეესაბამება ახალ სტრუქტურულ ტიპს. ასე მიიღება ე. წ. პარამორფოზები. მაგალითად, ჰექსაგონური ბიპირამიდული ფორნის კვარცის კრისტალი ნორძალურ ტემპერატურის დროს α კვარცის პარამორფოზაა β კვარცის მიმართ, ანდა კალციტის პარამორფოზა არაგონიტის მიმართ.

პოლიმორფული მოდიფიკაციების გაოდაქმნა მრავალფეროვანია. ზოგი მათგანი იწვევს სტრუქტურებში სულ უმნიშვნელო ცვლილებებს, ზოგი კი ისეთ მიიშენელოვან ცვლილებებს, როგორცაა საკოორდინაციო რიცხვებიც ან ბიის ხსიათის შეცვლა. არსებობს ისეთი გარდაქმნები, რომლებიც იწვევენ იონთა განლაგების რეორიგირებას. განვიხილოთ პოლიმორფული გარდაქმნის რამდენიმე დამახასიათებელი ტიპი.

გარდაქმნები, რომლებიც იწვევენ ხრ-ის შეცვლას. საკოორდინაციო რიცხვის შეცვლა ხდება ისეთი ნივთიერებების პოლიმორფულ მოდიფიკაციებში, რომელთა შემადგენელი კატიონების და ანიონების რადიუსების შეფარდება ახლოსაა საკოორდინაციო რიცხვების განმსაზღვრელ მნიშვნელობასთან, ასე, მაგალითად, $RbBr$

შენაერთისათვის Rb -ის და Br -ის რადიუსების შეფარდება $\frac{1,49}{1,96} = 0,724$, რაც ახლოა შეფარდების 0,732 მნიშვნელობასთან, რომელსაც VIII. 7 ტაბულის თანახმად ზღვრული მნიშვნელობა აქვს 6 და 8 სრ-ს შორის. ამასთან დაკავშირებით, დაბალტემპერატურული $RbBr$

კრისტალდება NaCl-ის სტრუქტურულ ტიპში და $\kappa = 6$, ხოლო 190°C -ზე გადადის CsCl-ის სტრუქტურულ ტიპში, რომლისთვისაც $\kappa = 8$. ანალოგიური ხასიათია ცვლილებას აქვს ადგილი რკინის პოლიმორფულ მოდიფიკაციებში: γFe კრისტალდება Cu-ის სტრუქტურულ ტიპში, ე. ი. ძის ელემენტარულ უჯრედს კუბური წახნაგეცენტრიონებული ფორმა აქვს, სადაც $\kappa = 12$, ხოლო $\alpha\text{-Fe}$ -ის სტრუქტურის ელემენტარული უჯრედი სხეულცენტრიონებული კუბური შესვოია, სადაც $\kappa = 8$ (ნახ. IX. 5).

გარდაქმნები, რომლებიც არ იწვევენ κ -ის შეცვლას. ამ გარდაქმნების მაგალითია TiO_2 -ი. სამი მოდიფიკაცია: ორი მათგანი ტეტრაგონული სინგონიისაა: რუტილი ($P4_2/mnm$ სივრცული ჯგუფი) და ანატაზი ($I4_2/am_1$ სივრცული ჯგუფი). ხოლო მესამე ომბული სინგონიისა — ბუეიტი ($Pbcd$ სივრცული ჯგუფით). სამივე პოლიმორფულ მოდიფიკაციაში ყოველ ტიტანის გარს ეკვრის 6 ჟანგბადი. კოორდინაციული ძაბაა წახნაგეცენტრიონების ფორმა აქვს (იხ. ნახ. IX. 20). გვხვდება სამივე სტრუქტურაში. განსხვავებულია მხოლოდ ამ ოქტაედრების შეერთების ხეობი: რუტილში ოქტაედრები ერთმანეთთან შეერთებულია ძვეწკვერად (ნახ. IX. 21), სადაც ყოველ ტეტრაგონულ ორთქმბო აქვს საერთო და წარმოიქმნება შუები. ხოლო ანატაზში ოქტაედრები 4 წიბოთი უერთდება ერთმანეთს და წარმოქმნის სამკანზოაილებიან კარკასებს.

ანალოგიური ხასიათის გარდაქმნებს ვხვდებით SiO_2 -ის პოლიმორფულ მოდიფიკაციებში. კეძოდ კვარცის, ტრიდიმიტის და კრისტობალიტის სტრუქტურებში. ენახტიოტრობიულ გარდაქმნებს აქ ადგილი აქვს შემდეგი სქემის მიხედვით:

573°C

870°C

1470°C

$\alpha\text{-კვარცი} = \beta\text{-კვარცი} = \beta\text{-ტრიდიმიტი} = \beta\text{-კრისტობალიტი}$

ტრიგონურ-ტრაპეცოედრული კლასი

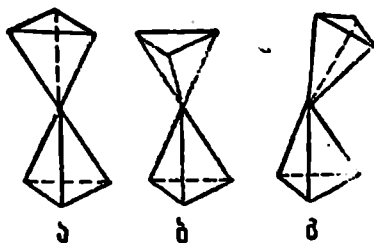
ჰექსაგონურ-ტრაპეცოედრული კლასი

დიჰექსაგონური ბიპირამიდული კლასი
|| 130°C .
 $\alpha\text{-ტრიდიმიტი}$
რომბული სიხგ.

ჰექსაოქტოედრული ან ჰექსაგონოდრული კლასი || 230°C
 $\alpha\text{-კრისტობალიტი}$
ტეტრაგონული

ძირითადი სტრუქტურული ელემენტი SiO_2 -ის ყველა მოდიფიკაციაში სილიციუჟანგბადიანი ტეტრაედრია, რომელიც ოთხივე წვეროთი უერთდება მეზობელ ტეტრაედრებს და წარმოქმნის სამკანზომილებიან კარკასებს. აღნიშნული პოლიმორფული მოდიფიკაციების

სტრუქტურების განსხვავება დამოკიდებულია მხოლოდ სტრუქტურებში ტეტრაედრების ურთიერთორიენტაციასზე (ნახ. IX. 32). კრისტობალიტში ტეტრაედრები ინვერსიულად არის განლაგებული, ტრილიმიტში მათი განლაგება საოკისებურია, ხოლო კვაოცში—ხრახნული, მარჯვენა ან მარცხენა ვარიანტით.



ნახ. IX. 32. სილიციუმანგზადიანი ტეტრაედრების შეკრების სხვადასხვა ვარიანტი SiO_2 -ის პოლიმორფულ მოდიფიკაციებში: ა - კრისტობალიტის, ბ - ტრილიმიტის და გ - კვაოცის სტრუქტურებში.

გარდაქმნები, რომლებიც იწვევენ სტრუქტურებში ბმის ძალებზე შეცვლას. ასეთი პოლიმორფული გარდაქმნის კარგი მაგალითია ნახშიობადის მოდიფიკაციები— ალმასი და გრაფიტი, რომლებშიც ბმის ძალებთან ერთად იცვლება საკოორდინაციო რიცხვიც. დედამიწის ზედაპირზე დაბალი წნევის და ტემპერატურის პირობებში გრაფიტი უფრო სტაბილური მოდიფიკაციაა, ვიდრე ალმასი, რომელიც სტაბილურია მაღალი წნევისა და ტემპერატურის პირობებში. გრაფიტში გადასვლის სიჩქარე მეტად მცირეა, ამიტომ გრაფიტი და ალმასი დედამიწის ზედაპირის პირობებში მდგრად მოდიფიკაციებად გვევლინება.

$1000^{\circ}C$ ტემპერატურის დროს ალმასი ადვილად გადადის გრაფიტში, რაგამ შებრუნებული გარდაქმნა შესაძლებელია მხოლოდ $3000^{\circ}C$ და 1000 ატმ. წნევის პირობებში. ამ გარდაქმნის დროს იცვლება საკოორდინაციო რიცხვები და ბმის ძალები ალმასში სრ-4, ხოლო გრაფიტში სრ-3. ალმასში მოქმედებს მხოლოდ კოვალენტური ბმა, გრაფიტში ბმა მოქმედებს მხოლოდ შოებებში, შრეებს შორის კი—ვან-დერ-ვალსის სუსტი ძალები. ამასთან, იცვლება სხვა თვისებებიც (იხ. ტაბულა IX. 3).

ტაბულა IX. 3

ნახშირბადის პოლიმორფული მოდიფიკაციების ზოგიერთი თვისება

დამახასიათებელი თვისებები	ალმასი	გრაფიტი
სინგონია	კუბური	ჰექსაგონური
ელემენტარული უჯრედის პარამეტრები	$a_0 = 3,570 \text{ \AA}$ $n = 8$	$a_0 = 2,462 \text{ \AA}$ $c_0 = 6,702 \text{ \AA}$ $n = 4$

სივრცული ჯგუფი	<i>Fd3m</i>	<i>P6₃/mmc</i>
საორდინაციო რიცხვი	4	3
ზმ-ს ხასიათი	კოვალენტური	მრეკბში-კოვალენტური, მრეკბს შორის-ვან- დერ-ვაალსის
ღერი	უმთავრესად უფერო	შავი
სიმკვრივე	10	1
სიკვრივე	351	2,23
გამჭვირვალობა	გამჭვირე ლე	გამჭვირი

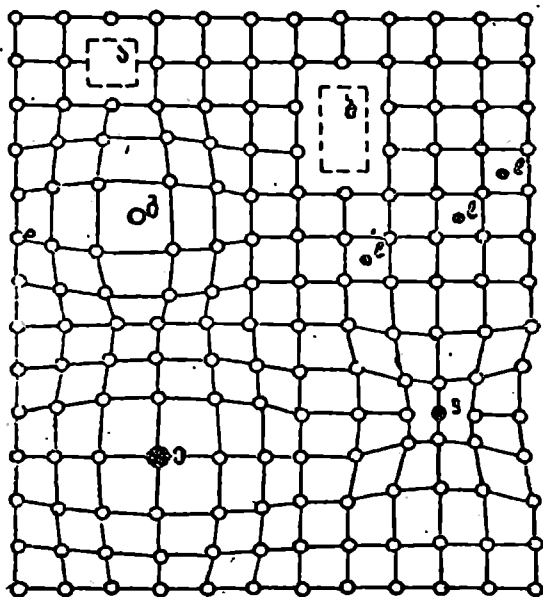
§1X. კრისტალთა სტრუქტურების დეფინიციები

ჩვენ განვიხილეთ იდეალური კრისტალების სტრუქტურები, რომლებშიც ატომები (იონები) თერჯოდინამიკური წონასწორობის პირობებში გააღებულა ზუსტი სამგანზომილებიანი პერიოდულობით და პარძონიულად ირჩევა აოსებული წნევისა და ტემპერატურის პირობების შესაბამისი ამპლიტუდით. სხვადასხვა იონების რაოდენობრთვი შეფარდება ასეთი სტრუქტურების ელემენტარულ უჯრედში სავსებით შეესაბამება ნივთიერების სტექიომეტრულ ფორმულას. მატერიალური ნაწილაკების რხევის ენერჯიის ზოდა დაკავშირებულია კრისტალის გახურებასთან. ლობის ტეპერატურაში გახურებით ატომთა რხევის ამპლიტუდა აღწევს ატომთშორისი მანძილის 10-12% დაბალი ტემპერატურის დროს სითბური გადაადგილება უმნიშვნელოა. რეალური კრისტალების სტრუქტურების შესწავლამ დაგვახსნა, რომ კრისტალებში ატომთა (იონთა) გახლაგების პერიოდულობა ირღვევა. კეძოდ იცვლება ატომთშორისი მანძილები. მატერიალური ნაწილაკები სავსაძე ადგილებიდან გადადის კვანძთაშორის სიცარიელებში. შეიმჩნევა მინარევი ელემენტები და სხვ. ყველა ეს დაღვევა ქმნის კრისტალთა სტრუქტურებში სხვადასხვა სახის დეფექტებს, რომლებიც თავის მარე მოქმედებენ ნივთიერების ელექტრულ, მაგნიტურ, სითბურ და სხვა თვისებებზე. კრისტალებში დეფექტების რაოდენობა და ხასიათი დამოკიდებულია როგორც კრისტალის ბუნებაზე. ისე გარემო პირობებზე კრისტალის ზრდის დროს.

უკანასკნელი სამი ათეული წლის მანძილზე გაიზარდა კრისტალთა სტრუქტურებში დეფექტების გამოძწვევი მიზნების შესწავლის ინტერესი. ეს კი ერთი მხრივ, აიხსნება იმით, რომ სოულყოვილი კრისტალების თეორია ვე- ხსნიდა დიელექტრიკული, ფოტოგამტარობის, ლუმინისცენციის, ოპტიკური და ელექტრონული თვისებების ცვალება-

დობას, მეორე მხრივ. მზარდი მონოკონილება ზესუფთა და სრულყოფილი სტრუქტურების კრისტალებზე საკიოებდა სტრუქტურული დეფექტების წარმოშობის მიზეზების დაზუსტებას, უდფექტო კონსტალების შექანისათვის.

1. წერტილოვანი დეფექტები კრისტალური სტრუქტურის ისეთი დეფექტებია, რომელთა გავრცელება საიივე მიმართულე ბით გაიზომება მხოლოდ რაიდენიმე ატომთშორისი მანძილით. მათ ეკუთვნის ვაკანსიები და კვანძთა შორისი ატომები. ვაკანსია წარმოადგენს სტრუქტურის „ცარიელ“ საკვანძე ადგილს, ე. ი. ატომი (იონი) არ აიის თავის ადგილზე და წარმოიქმება სიცაოილეუ შეიძლება ორი ვაკანსია ერთმანეთის მებობლად იყოს განლაგებული, მაშინ მივიღებთ დივაკანსიას (ნახ. IX. 33. ა და ბ). გაოდა აისსა, ატომი შეიძლება შეიკრას კვანძებს შორის სიცარიელეში. შეკრილი

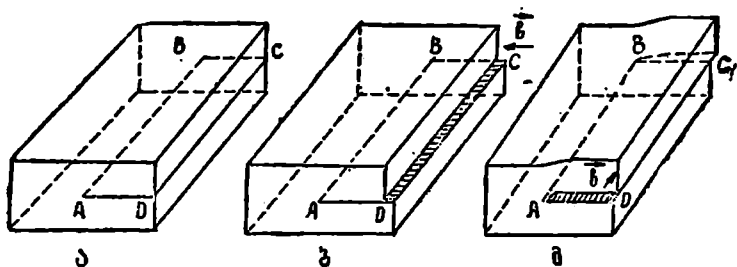


ნახ. IX. 33 მთავარი წერტილოვანი დეფექტების სქემატური გამოახულება: ა. ვაკანსია, ბ. დივაკანსია, გ. საკუთარი ატომის კვანძთშორისი შკრა, დ. მცირე ზომის მ-ნარევი ატომის კვანძთშორისი შეკრა. ე და ვ ჩანაღვლების სითანადო დიდი და მცირე ზომის მინარევი ატომები.

ატომი შეიძლება იყოს საკუთარი და გარეშე. ე. ი. განსხვავებულ ზომის (ნახ. IX. 33 ბ და დ). ცხადია, კვანძებს შორის შეკრა უფრო ადვილია მცირე ზომის ატომებისათვის, რომელიც მოთავსდება ტეტ-

შეჭრა სხვადასხვა კრისტალურ სტრუქტურაში იწყებს ფოსფორის-ცირებას, ზოგისა—ფლუორისცენციას.

2. დისლოკაციები კრისტალური სტრუქტურის ერთგანზომილებიანი დეფექტებია სწორხაზოვანი გავრცელებით. მათი განივი განზომილებები არ აღემატება რაზდენიშე ატომთშოის მანძილს, სიგრძე კი განისაზღვრება კრისტალის ზომებით. დისლოკაცია წარმოიშობა კრისტალის ნაწილის გადაადგილებით (გასივალებით) მეოთხე ნაწილის მიმართ. გადაადგილების მიმართულების ძიხედვით არჩევენ კიდეურ და ხრახნულ დისლოკაციებს. კიდეურ დისლოკაციებს შივილებთ, თუ კრისტალის ზედა ნაწილს გადავწევთ ქვედა ნაწილის მიმართ b ვექტორის მიმართულებით (ნახ. IX 35. ბ) $ABCD$ სიბრტყის გასწვრივ. ამ ძვრის შედეგად კრისტალის ზედა ნაწილში წარმოიქმნება მკუთხავი ძაბვები, ხილო ქვედა ნაწილი - გამკვირვავი ძაბვები. AB ხაზი საზღვარია სტრუქტურის საძრულ უბანსა და დაუქვრულ ხაწილს შოის და ეწოდება კიდეური დისლოკაცია, CD საფეხურია კრისტალის ზედაპირზე. კიდეური დისლოკაციის მიმართულება ძვრის ვექტორის პერპენდიკულარულია, ხრახნულ დისლოკაციას შივილებთ შაშინ, თუ კრისტალის ზედა ნაწილს იმავე $ABCD$ სიბრტყის გასწვრივ გადავწევთ b ვექტორის მიმართულებით (ნახ. IX. 35. გ). როგორც ვხედავთ, ხრახნული დისლოკაციის AB მიმართულება ძვრის ვექტო-



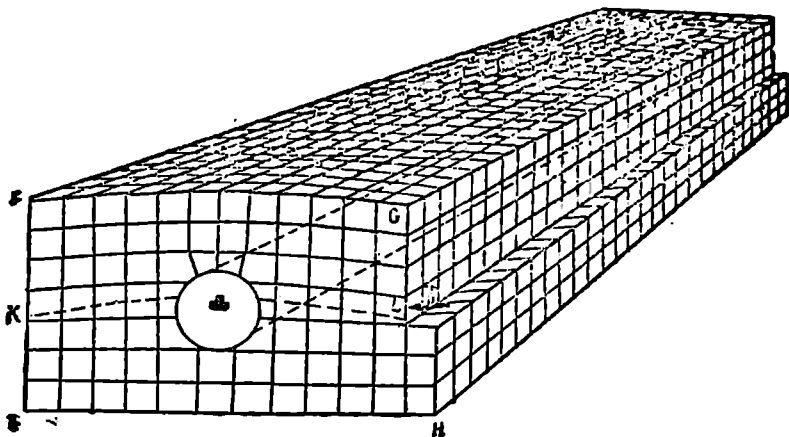
ნახ. IX 35. დისლოკაციების სქემატური გამოსახულება: ა-კრისტალის საწყისი მდგომარეობა, ბ-კიდეური დისლოკაცია, გ-ხრახნული დისლოკაცია.

რის პარალელურია. ირიბი მოჭრაობის დროს რეალურ კრისტალებში სტრუქტურის გადასრიალებულ ნაწილს აქვს პრუფხაზოვანი კონტური და ამ შემთხვევაში ადგილი ექნება ე. წ. შერეულ დისლოკაციას.

კიდეური დისლოკაცია შეიძლება წარმოვიდგინოთ, როგორც ძვრის სიბრტყის მართობულად განლაგებულ ატომთა შრეებიდან ერთ-ერთი შრის გწვევტა ხაზოვანი მიმართულებით (ნახ. IX. 36), რის შედეგადაც მიიღება ატომთა სიბრტყეების „ნონიუსური“ განლა-

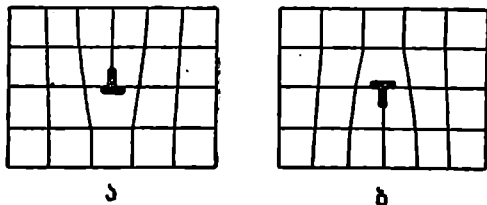
გება. ძვრის სიბრტყის ზევით ერთით მეტი ბადე იქნება, ვიდრე ქვევით. ეს უბანი IX. 36 ნახაზზე გაპოყოფილია წრებაზით. ამ უბნის მოშორებით ბადის დამახინჯება უწინშესნელაა. როგორც ქვემოთ დავინახავთ, დისლოკაციას შეუძლია კრისტალური სტრუქტურის ფარგლებში იმოძ.აოს ძვრის სიბრტყის გასწვრივ თანდათანობით გადაადგილებით.

კიდურ დისლოკაციებს ყოფენ დადებით და უარყოფით დისლოკაციებად სათანადო პირობითი ნიანებით (ნახ. IX. 37) კიდური დადებითი დისლოკაცია მიიღება იმ შექთხვევებში, როდესაც ატომთა ზედმეტი ნახევარში ძვრის სიბრტყის ზევით არის მოთავსებული,



ნახ. IX. 36. კიდური დისლოკაციის სქემა მარტივ კუბურ სტრუქტურაში, \vec{b} ძვრის ვექტორი, KL ძვრის სიბრტყე.

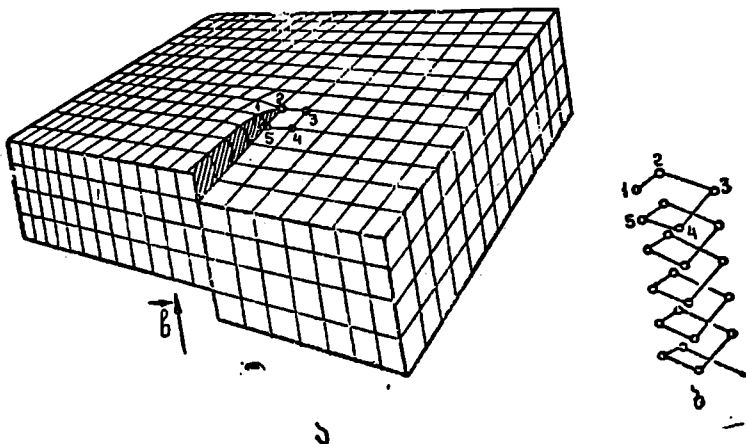
სადაც მკუქშავი ძაბვა მოქმედებს. ხოლო კიდური უარყოფითი დისლოკაცია—როდესაც ძვრის სიბრტყის ზევით მოქმედებს გამჭიმავი ძაბვა (ნახ. IX. 37 ბ). სხვადასხვა ნიშნის კიდური დისლოკაციები



ნახ. IX. 37. კიდური დისლოკაციები: ა-დადებითი და ბ-უარყოფითი.

ურთიერთმიზიდვით სკობენ ერთმანეთს და სტრუქტურის მთლიანობა აღდგება. ამ მოვლენას ანტიგლირებას უწოდებენ.

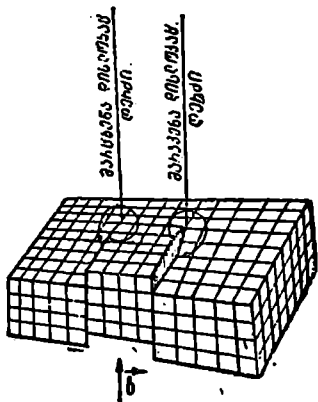
ბრაზნული დისლოკაციის მიმართულება კიდური დისლოკაციის მიმართულებისაგან განსხვავებით ძვრის ვექტორის პარალელურია (ნახ. IX 35 გ) და ატომთა გადაადგილება ბრაზნული კიბის საფეხურების განლაგების მსგავსია (ნახ. IX 38 ა და ბ). არჩევენ მარჯვენა და მარცხენა ბრაზნულ დისლოკაციებს (ნახ. IX. 39), რაც გუ-



ნახ. IX. 38. ა-ბრაზნული დისლოკაციის სქემა მარტივ კუბურ სტრუქტურაში. ბ-ატომთა გადაადგილება დისლოკაციის გასწვრივ.

ლისზმობს ატომთა (იონთა) გადაადგილებას საათის ისრის მიმართულებით (მარჯვენა) ან საწინააღმდეგოდ (მარცხენა). ორი მარჯვენა ან ორი მარცხენა ბრაზნული დისლოკაცია გაითიშება, ხოლო საწინააღმდეგო ნიშნის ბრაზნული დისლოკაციები მიიზიდავენ ერთმანეთს.

ბრაზნული დისლოკაცია კიდური დისლოკაციის ანალოგიურად არ შეიძლება შეწყდეს კრისტალის შიგნით. იგი ან უნდა გამოდიოდეს კრისტალის ზედაპირზე ამოუშენებელი საფეხურის სახით, ან წარმოშვას კრისტალის შიგნით ჩაკეტილი მრუდი. აღნიშნული საფეხური კრისტალის ზედაპირზე კრისტალის ზრდის დროს ჯერ მრუდდება და შემდეგ თანდათან ღებულობს სპირალის ფორმას (ნახ. I. 11, და I. 12).



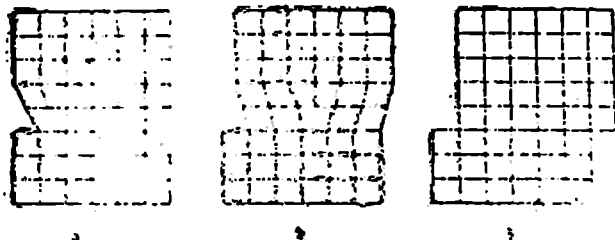
ნახ. IX. 39. მარჯვენა და მარცხენა ბრაზნული დისლოკაციები.

პლასტიკური დეფორმაციის დისლოკაციური თეორიის თანახმად

დადგენილია, რომ კრისტალურ სტრუქტურაში საწყისი ძვრა (სრიალი) წარმოიქმნება მხოლოდ მცირე რაოდენობის ატომურ ბადეებს შორის ერთ-ერთი მათგანის გაწყვეტით. შეიდეგ კი ეს დისლოკაცია (ნახევარ-შრე) გადაადგილდება კრისტალში ძვრის სიბრტყის გასწვრივ და შეიძლება მიაღწიოს კრისტალის ზედაპირს (ნახ. IX. 40).

კიდური დისლოკაციის მოძრაობის გათვალისწინებით ვსაგებია თუ რატომ არის საჭირო გაცილებით მეტი ძალა კრისტალის მთლიანი ძვრისათვის რომელიმე სიბრტყის გასწვრივ, ვიდრე იმავე მიმართულებით კიდური დისლოკაციის წარმოშობისათვის.

როგორც აღვიშნეთ, დისლოკაციების წარმოქმნის დროს კრისტალური სტრუქტურის ერთი ნაწილი ძვირია სიძაოთ უნდა გადაადგილდეს გარკვეული სიბრტყის გასწვრივ. ეს გადაადგილება შეიძლება დავანასათოო სათანადო მიმართულებით და სიდიდით, ე. ი.

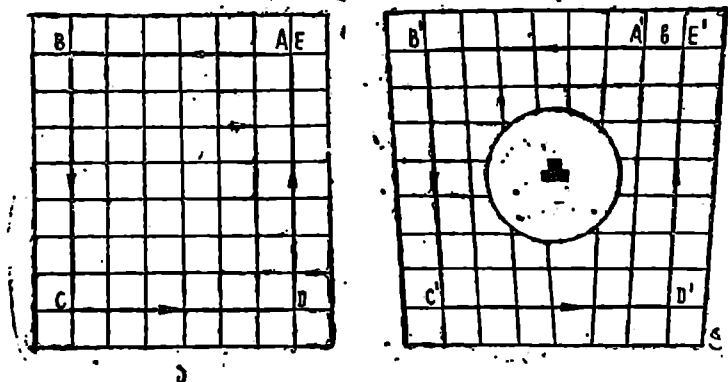


ნახ. IX 40. კიდურა დისლოკაციის გადაადგილებით გამოწვეული პლასტიკური დეფორმაციის სქემა

ვექტორით, რომელსაც b ასოთი აღნიშნავენ და უწოდებენ დისლოკაციის ბიურგერსის ვექტორს პოლანდიელი მეცნიერის ე. ბიურგერსის პატივსაცემად, რომელსაც დიდი ღვაწლი მიუძღვის დისლოკაციური თეორიის განვითარებაში.

წარმოვიდგინოთ იდეალური. ე. ი. უდეფექტო კრისტალის სტრუქტურა. თუ ამ კრისტალის რომელიმე ბადეზე ნებისმიერი A კვანძიდან (ნახ. IX. 41.ა) შემოვხაზავთ კონტურს ჯერ მარცხნივ n ატომთ-შორისი მანძილის (ბიჯის) გადათვლით (მონაკვეთი AH), შემდეგ ქვევით 7 ბიჯის (მონაკვეთი HC), C კვანძიდან მარჯვნივ ისევ— n ბიჯის (მონაკვეთი CD) და ბოლოს ზევით 7 ბიჯის გადათვლით (მონაკვეთი DE) მოვხვებით საწყის A წერტილში. ამრიგად, მივიღებთ ბურგერსის ჩაკეტილ კონტურს. თუ ავიღებთ რეალურ კრისტალს, რომელშიც ადგილი აქვს კიდურ დისლოკაციას და მისი კრისტალური სტრუქტურის რომელიმე ბადეზე შევიჩრევთ ისეთივე საწყის A' წერტილს (კვანძს)

(ნახ. IX, 41 ბ) და ზუსტად იმავე მიმართულებების და მანძილების (ნახიჯების) დაცვით აეაყებთ ბუგერსის კონტურს ($A'B' = 6$ ბიჯს, $B'C' = 7$ ბიჯს, $C'D' = 6$ ბიჯს და $D'E' = 7$ ბიჯს), დაინახავეთ რომ E' კვანძი არ დაემთხვევა A' კვანძს და მიღებული კონტურის ჩასაკეტად საჭირო გახდება $E'A'$ მანძილის გავლა, როქელიც ერთი ბიჯის (ატომთ-შორისი მანძილის) ტოლია, $E'A'$ ვექტორი ბუგერსის ვექტორია, რომელიც გამოსახავს დისლოკაციით გამოწვეულ მესრის დამახინჯების ზომას. წერტილოვანი დეფექტების დროს ბუგერსის ვექტორი ნუ-



ნახ. IX. 41. ბუგერსის კონტურა: ა-შეკრული კონტური იდეალურ (უდეფექტო) კრისტალში, ბ-ღია კონტური კიდური დისლოკაციის არსებობის დროს; ბ ბუგერსის ვექტორი,

ლის ტოლია. თუქ დისლოკაციების რაოდენობა კრისტალებში შერყეობს დიდ ფარგლებში, მაინც შეიძლება აღვნიშნოთ, რომ რეალური კრისტალის ბადის 1 სმ^2 ჩვეულებრივ შეიცავს 10^4 დისლოკაციას. უფრო დაწვრილებით კრისტალთა სტრუქტურების დეფექტებს შეიძლება გავეცნოთ ამ საკითხისადმი მიძღვნილ სპეციალურ ლიტერატურაში (19. 20).

ლიტერატურა

1. ბოკი გ. კრისტალოქიმია თსუ, 1968.
2. გვარამაძე დ. ზოგადი (არაორგანული) ქიმიის სახელმძღვანელო, ნაწილი I, „განათლება“, 1975.
3. ევანციკო თ. ქოიავა ვ. ზოგადი გეოქიმიის მოკლე კურსი, თსუ, 1972.
4. სანაძე ვ. კრისტალოფიზიკის საფუძვლები, „განათლება“, 1976.
5. თვალჭრელიძე ა. გეომეტრიული კრისტალოგრაფიის საფუძვლები, თსუ, 1922.
6. თვალჭრელიძე ა. კრისტალთა ოპტიკის შესავალი, თსუ, 1954.
7. ყიფშიძე ი. გეომეტრიული კრისტალოგრაფია, თსუ, 1935.
8. Аншелес О. М. Начало кристаллографии, ЛГУ, 1952.
9. Белов Н. В. Очерки по структурной минералогии, «Наука», 1976.
10. Бэкон Дж. Дифракции нейтронов, жностр. лит., 1957.
11. Васильев Д. М. Физическая кристаллография, «Металлургия», 1972.
12. Вайнштейн Б. К. Симметрия кристаллов. Методы структурной кристаллографии — Современная кристаллография, т. I, «Наука», 1979.
13. Годовиков А. А. Введение в минералогию, «Наука», 1973.
14. Григорьев Д. П., Жабин А. Г. Онтогенния минералов, «Наука», 1975.
15. Григорьев Д. П. Основы конституции минералов, «Госгеолтехиздат», 1962.
16. Дамаск и Диня Точечные дефекты в металлах, «Мир», 1966.
17. Загальская Ю. Г., Литвинская Г. П. Геометрическая кристаллография, МГУ, 1973.
18. Загальская Ю. Г., Литвинская Г. П. Геометрическая микрокристаллография, МГУ, 1976.
19. Кан Р. Физическое металловедение, в. 3, Дефекты кристаллического строения, «Мир», 1968.
20. Келли А., Грова Г. Кристаллография и дефекты в кристаллах, «Мир», 1968.
21. Костов И. Кристаллография, «Мир», 1965.
22. Леитвени Ф., Зоммер-Кулачевский Ш. Кристаллография, В. Ш, 1968.
23. Липсон Г., Стиля Г. Интерпретация порошковых рентгенограмм, «Мир», 1972.
24. Поваренных А. С. Кристаллохимическая классификация минеральных видов, «Научная думка», 1966.

25. Попов Г. М. Шафрановский И. И. Кристаллография, В. Ш., 1972.
26. Сиротин Ю. И., Шаскольская М. П. Основы кристаллофизики, «Наука», 1975.
27. Франк-Каммнецкий В. А., Природа структурных примесей в минералах ЛТУ, 1964.
28. Хирш П., Хови А., Никольсон Р., Пешля Д., Уэлан М. Электронная микроскопия тонких кристаллов, «Мир», 1964.
29. Флинт Е. Е. Начало кристаллографии, В. Ш., 1961.
30. Шаскольская М. П. Кристаллография, В. Ш., 1976.
31. Шафрановский И. И. Кристаллы минералов, «Госгеолтехиздат», 1961.
32. Шафрановский И. И. Лекции по кристалломорфологии, В. Ш., 1968.
33. Шафрановский И. И. Очерки по минералогической кристаллографии, «Наука», 1974.
34. Шубников А. В., Флинт Е. Е., Бокий Г. Б. Основы кристаллографии, АН СССР, 1940.
35. Шубников А. В. Симметрия и антисимметрия конечных фигур, АН СССР, 1961.
36. Эванс Р. Введение в кристаллохимию, «ГХИ», 1948.
37. Penkala T. Zarys Krystalografii, Panstwowe wydawnictwo naukowe Warszawa, 1972.

შესავალი

ნ ა წ ი ლ ი კ ი რ ვ ე ლ ი

გ ე ო მ ე ბ ა რ ი უ ლ ი კ რ ი ს ტ ა ლ ო გ რ ა ფ ი ა

თ ა ვ ი I. ზ ო გ ა დ ი ც ნ ო ბ ა ე ბ ი

§ I. 1. კრისტალთა თვისებები	10
§ I. 2. სივრცული შესერი	13
§ I. 3. კრისტალთა წარმოქმნა და ზრდის მექანიზმი	14
§ I. 4. კუთხეების მუდმივობის კანონი და კრისტალთა გაზომვა	22
თ ა ვ ი II. პ რ ი ს ტ ა ლ თ ა ხ ი მ ბ ა რ ი ა	
§ II. 1. სიმეტრიის ელემენტები	28
§ II. 2. ასიმეტრია და ანტისიმეტრია	42
§ II. 3. სიმეტრიის ელემენტთა ერთობლიობა	45
§ II. 4. მარტივი ფორმები და კომბინაციები	45
თ ა ვ ი III. პ რ ი ს ტ ა ლ თ ა წ ა ხ ნ ა გ ა ე ბ ი ო ნ დ ა მ ა ს ჰ ი დ ა გ ა მ ი ლ ა ბ ი	
§ III. 1. პარამეტრების რაციონალური შეფარდების კანონი	54
§ III. 2. წახნავის პარამეტრები და ინდექსები	59
§ III. 3. კრისტალთა გეგმილები	62
§ III. 4. წახნავთა ზონები	75

თ ა ვ ი IV. ხ ი მ ბ ა რ ი ს კ ლ ა ს ე ბ ი დ ა ხ ი ნ გ რ ო ნ ი ე ბ ი

§ IV. 1. სიმეტრიის ელემენტთა შეკრება	77
§ IV. 2. კრისტალთა სიმეტრიის კლასები	85
§ IV. 3. სინგონიები და კატეგორიები	95
§ IV. 4. სიმეტრიის კლასების აღნიშვნები	98
§ IV. 5. კრისტალთა ორიენტაცია და მარტივი ფორმების გამოყვანა დაბალი კატეგორიის სინგონიები	107
საშუალო კატეგორიის სინგონიები	103
მაღალი კატეგორიის სინგონიები	124
§ IV. 6. წიბოს ინდექსი და მისი დამოკიდებულება წახნავის ინდექსთან	160
§ IV. 7. ზონათა კანონი	176

თ ა ვ ი V. მ ი ნ მ რ ა ლ ო გ ი უ რ ი კ რ ი ს ტ ა ლ ო გ რ ა ფ ი ა ს ა ზ უ ა ვ ე ლ ა ბ ი

§ V. 1. ზოგადი ცნობები	183
§ V. 2. რეალური კრისტალები და მათი მორფოლოგიური სახესხვაობანი	185
§ V. 3. კრისტალთა განოზომიერია შენაზარდები	193
§ V. 4. სიმეტრიის სიხეების გავრცელება მინერალთა სამყაროში	212

ნ ა წ ი ლ ი მ ე ო რ ი

ს ტ რ უ მ ბ ტ რ უ ლ ი კ რ ი ს ტ ა ლ ო გ რ ა ფ ი ა

თ ა ვ ი VI. პ რ ი ს ტ ა ლ თ ა შ ი ნ ა გ ა ნ ი ა პ ა ვ ა უ ლ ა ბ ა

§ VI. 1. მოკლე ისტორიული ცნობები	215
§ VI. 2. ბრავეს 5 ბრტყელი ბადე და 14 სივრცული შესერი	218
§ VI. 3. კრისტალთა სტრუქტურების სიმეტრიის ელემენტები	227
§ VI. 4. სიმეტრიის 230 სივრცობრივი ჯგუფი	235
§ VI. 5. წერტილთა წესიერი სისტემები და წერტილთა ჯერადობა	237
§ VI. 6. სივრცული ჯგუფების აღნიშვნები	240
თ ა ვ ი VII. პ რ ი ს ტ ა ლ თ ა რ ე ნ ბ ე ნ ო ს ტ რ უ მ ბ ტ რ უ ლ ი ა ნ ა ლ ი ზ ი	

§ VII. 1. რეტგენის სხივების ბუნება და მათი სპექტრები	242
§ VII. 2. რეტგენის სხივების დიფრაქცია კრისტალურ შესერებზე	246
§ VII. 3. რენტგენოსტრუქტურული ანალიზის ძირითადი მეთოდები	249

ა. ლაუეს მეთოდი	249
ბ. ბრეგების მეთოდი	258
გ. ბრუნვის მეთოდი	255
დ. ფხვნილის მეთოდი	258
§ VII. 4. შებრუნებული მესერი	262
§ VII 5. ელექტრონოგრაფია და ნეიტრონოგრაფია	264
ნ ა წ ი ლ ი მ ი ს ა მ ი	
ქ რ ი ს ტ ა ლ თ ე მ ი მ ი ა	
თ ა ვ ი VIII. ზოგადი ცნობები	267
§ VIII. 1. ზოგადი შენიშვნები	267
§ VIII. 2. ქიმიური ბმის ტიპები კრისტალურ სტრუქტურებში	267
§ VIII. 3. ატომთა და იონთა რადიუსები	278
§ VIII. 4. ბირთვთა უმქიდროესი წყობები	284
§ VIII. 5. საკოორდინაციო რიცხვი და კოორდინაციული მრავალწახნაგები	292
თ ა ვ ი IX. კრისტალთა სტრუქტურა	299
§ IX. 1. ზოგადი ცნობები	299
§ IX. 2. მარტივ ნივთიერებათა სტრუქტურა	301
§ IX. 3. რთულ ნივთიერებათა სტრუქტურა	308
§ IX. 4. იზომორფიზმი და პოლიმორფიზმი	330
§ IX. 5. კრისტალთა სტრუქტურების დეფექტები	341
ლი ტ ე რ ა ტ უ რ ა	349

Харашвили Георгий Ильич
КРИСТАЛЛОГРАФИЯ И КРИСТАЛЛОХИМИЯ
 (на грузинском языке)

ИБ № 1644

რედაქტორი მ. დუდუშაური
 მხატვრული რედაქტორი თ. მესხია
 ტექნოლოგიური ნ. ძნელაძე
 უფრ. კორექტორი ლ. გაგნიძე
 კორექტორი ლ. გოგეშვილი
 გამომშვეები ლ. გაბარაშვილი

გადაეცა წარმოებას 6.09.82; ხელმოწერილია დასაბეჭდად 19.12.83;
 ქაღალდის ზომა 60×90 1/16; საბეჭდი ქაღალდი № 2; ნაბეჭდი თაბახი 22;
 სააღრიცხვო-საგამომცემლო თაბახი 20,03.

შპ 00507

ტირაჟი 2000
 ფასი 1 მან.

შეკვ 1296

გამომცემლობა „განათლება“, თბილისი, ორჯონიკიძის ქ. № 50
 Издательство «Ганатლება», Тбилиси, ул. Орджоникидзе № 50

1984