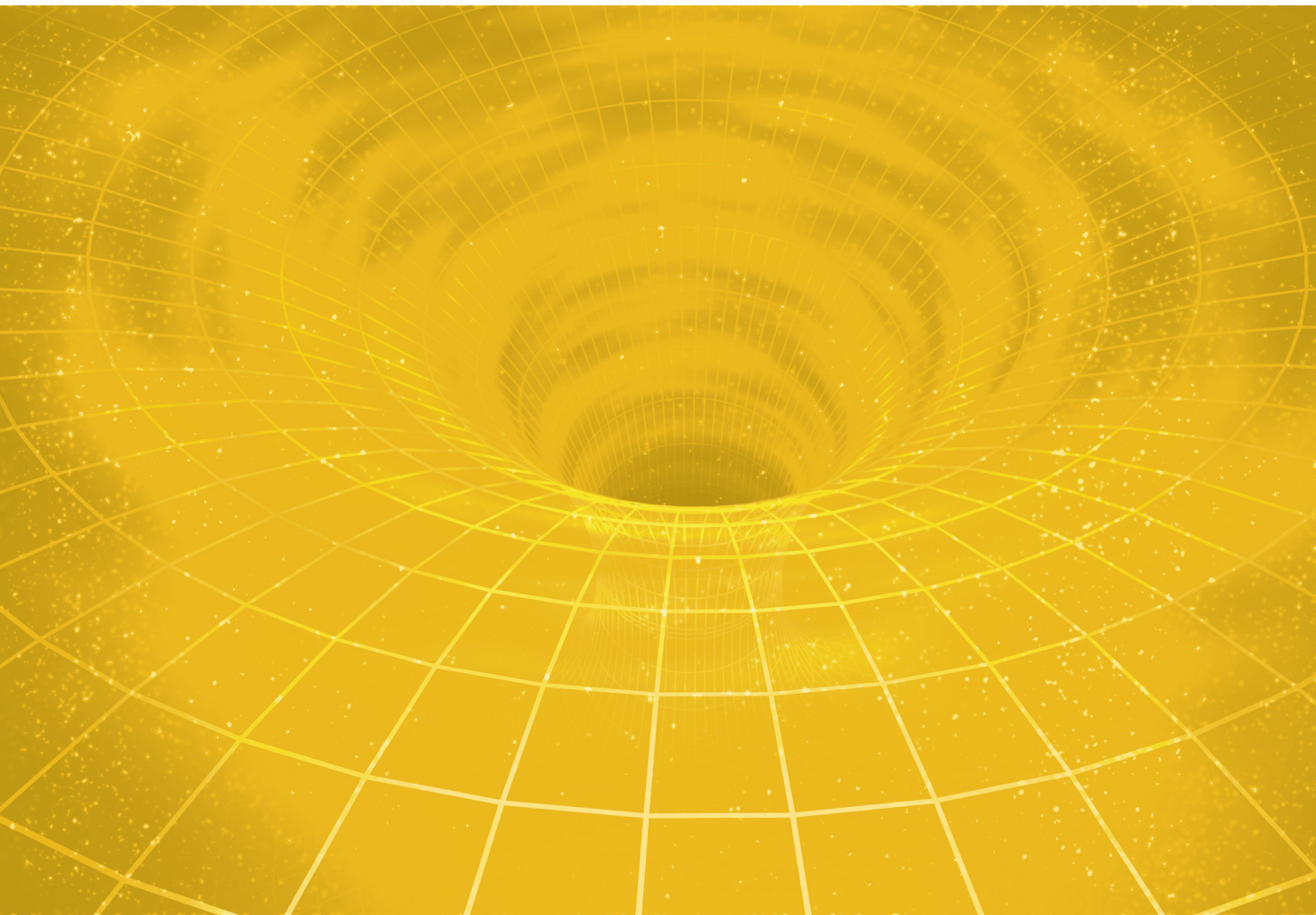


მერაბ ტულუში, თეიმურაზ შენგელია,
თემურ შენგელია, ოთარ ლონდაძე

ფიზიკა

მოსწავლის წიგნი

12



გამომცემლობა „საქართველოს მაცნე“

მერაბ ტულუში, თეიმურაზ შენგელია,
თემურ შენგელია, ოთარ ღონღაძე

ფიზიკა

მოსწავლის წიგნი

12



გამომცემლობა „საქართველოს მაცნე“

ფიზიკა 12

მოსწავლის წიგნი

ავტორები:

მერაბ ტულუში, შპს „მეექვსე საავტორო სკოლის“ ფიზიკის მასწავლებელი;

თეიმურაზ შენგელია, კერძო სკოლა „მერმისის“ ფიზიკის მასწავლებელი;

თემურ შენგელია, ქართულ-ამერიკული სკოლის ფიზიკის მასწავლებელი;

ოთარ ღონღაძე, ვ. კომაროვის სახელობის თბილისის ფიზიკა-მათემატიკის 199-ე
საჯარო სკოლის ფიზიკის მასწავლებელი

ავტორები მადლობას უხდებიან ილიას უნივერსიტეტის პროფესორს,
ბატონ **ანდრია როგავას**, სახელმძღვანელოს მესამე თავის რედაქტირებისა
და მონოდეზიგნის შენიშვნებისათვის.

დიზაინერ-დამკაბადონებელი **ლია მოსეშვილი**

გამომცემლობა „საქართველოს მაცნე“

მის: ქ. თბილისი, ე. მაღალაშვილის ქ. №5

ტელ: 568 10 54 67; 574 40 08 57

ელ. ფოსტა: sakmacne@gmail.com, saqartvelosmatsne@gmail.com

www.saqmatsne.ge

© გამომცემლობა „საქართველოს მაცნე“

© მერაბ ტულუში, თეიმურაზ შენგელია, თემურ შენგელია, ოთარ ღონღაძე

I გამოცემა, 2024 წელი

ISBN 978-9941-16-917-5

სარჩევი

თავი I. მოლეკულური ფიზიკა და თერმოდინამიკა.....	7
§ 1.1 მოლეკულურ-კინეტიკური თეორიის ძირითადი დებულებები.....	8
§ 1.2 ატომებისა და მოლეკულების ზომები, მასა და რაოდენობა.....	10
§ 1.3 ბროუნის მოძრაობა.....	14
§ 1.4 მოლეკულების ურთიერთქმედება.....	16
§ 1.5 იდეალური აირი. მოლეკულურ-კინეტიკური თეორიის ძირითადი განტოლება.....	19
§ 1.6 ტემპერატურა და მისი გაზომვა.....	25
§ 1.7 აირის მოლეკულების სიჩქარე. შტერნის ცდა.....	32
§ 1.8 იდეალური აირის მდგომარეობის განტოლება.....	36
§ 1.9 აირის კანონები.....	40
§ 1.10 იდეალური აირის შინაგანი ენერჯია.....	46
§ 1.11 მუშაობა თერმოდინამიკაში.....	50
§ 1.12 თერმოდინამიკის პირველი კანონი.....	55
§ 1.13 თერმოდინამიკის პირველი კანონის გამოყენება იზოპროცესებში.....	59
§ 1.14 პროცესების შეუქცევადობა ბუნებაში.....	63
§ 1.15 სითბური ძრავები. კარნოს ციკლი.....	67
§ 1.16 შიგანვის ძრავა და სამაცივრე დანადგარი.....	71
§ 1.17 ფაზური გადასვლა ორთქლი-სითხე.....	75
§ 1.18 ნაჯერი ორთქლის წნევა. დუღილი.....	78
§ 1.19 ჰაერის ტენიანობა. ნამის წერტილი.....	81
§ 1.20 სითხის ზედაპირული დაჭიმულობა.....	87
§ 1.21 კაპილარული მოვლენები.....	91
§ 1.22 სითხის სიბლანტე.....	96
I თავის შემაჯამებელი ამოცანები.....	98
თავი II. ატომური, ბირთვული და კვანტური ფიზიკის საწყისები.....	101
§ 2.1 სითბური გამოსხივება. პლანკის ჰიპოთეზა.....	102
§ 2.2 ფოტოეფექტი. ფოტოეფექტის კანონები.....	106
§ 2.3 ფოტონი. აინშტაინის განტოლება ფოტოეფექტისათვის.....	111
§ 2.4 სინათლის წნევა. სინათლის დუალიზმი.....	116
§ 2.5 რეზერფორდის ცდა. ატომის ბირთვული მოდელი.....	119
§ 2.6 ბორის პოსტულატები.....	122
§ 2.7 ატომის ბირთვის აგებულება.....	127
§ 2.8 ბირთვული რეაქციები.....	130
§ 2.9 ბმის ენერჯია.....	134
§ 2.10 რადიოაქტივობა.....	138
§ 2.11 რადიოაქტიური დაშლის კანონი.....	144

§ 2.12 ჯაჭვური ბირთვული რეაქციები	148
§ 2.13 ბირთვული რეაქტორი.....	153
§ 2.14 თერმობირთვული სინთეზი	156
§ 2.15 ელემენტარული ნაწილაკები	160
მეორე თავის შემაჯამებელი ამოცანები.....	163
თავი III. ასტროფიზიკის საფუძვლები	165
§ 3.1 რას შეისწავლის ასტროფიზიკა.....	166
§ 3.2 წლიური პარალაქსი და მანძილი ვარსკვლავებამდე	168
§ 3.3 ხილული და აბსოლუტური ვარსკვლავური სიდიდე. ვარსკვლავის ნათობა.....	171
§ 3.4 ვარსკვლავის ზომა. ვარსკვლავის მასა.....	173
§ 3.5 ვარსკვლავთა გამოსხივების სპექტრები და სპექტრული კლასები. ვარსკვლავთა მიმდევრობები	176
§ 3.6 ვარსკვლავების ევოლუცია.....	179
§ 3.7 ცეფეიდები. ახალი და ზეახალი ვარსკვლავები.....	182
§ 3.8 პულსარები. შავი ხვრელები	185
§ 3.9 ირმის ნახტომი	188
§ 3.10 გალაქტიკები	191
§ 3.11 ჰაბლის კანონი. დიდი აფეთქების თეორია	194
§ 3.12 სამყაროს ბნელი მატერია და ბნელი ენერჯია	196
§ 3.13 მზის სისტემა. პლანეტები	198
§ 3.14 ჯუჯა პლანეტები და მზის სისტემის მცირე სხეულები	205
მესამე თავის ამოცანები.....	210
ზოგიერთი ნივთიერების სიმკვრივე.....	211
საგნობრივი საძიებელი.....	212
პასუხები	215

პირობითი ნიშნები



— ცდა



— ამოხსენით ამოცანები



— გაიხსენეთ



— ერთად ამოვხსნათ ამოცანა



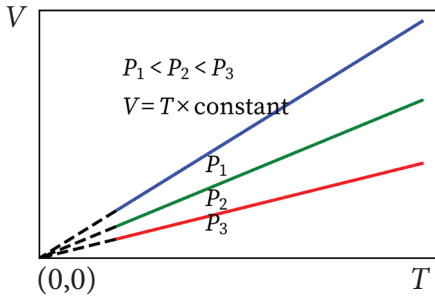
— დაფიქრდით



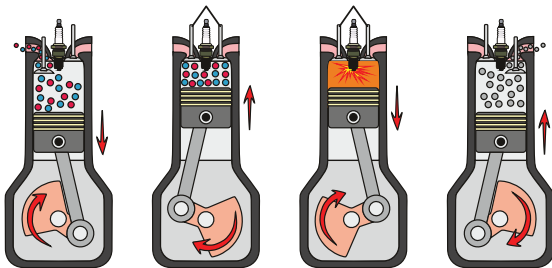
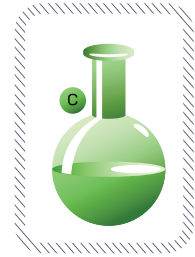
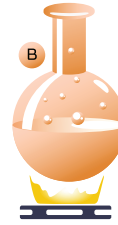
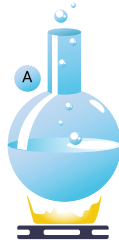
— აქტივობა

თავი I

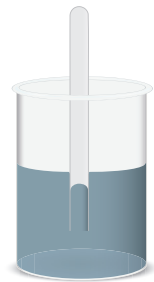
მოლეკულური ფიზიკა და თერმოდინამიკა



$$\Delta U = Q - A'$$



H₂O



Hg

ამ თავში თქვენ გაეცნობით:

- ნივთიერების აგებულების მოლეკულურ-კინეტიკურ თეორიას;
- მოლეკულურ-კინეტიკური თეორიის ძირითად განტოლებას;
- აბსოლუტურ ტემპერატურას;
- იდეალურ აირს და მის კანონებს;
- თერმოდინამიკას და თერმოდინამიკის კანონებს;
- სითბურ ძრავებს;
- ჰაერის ტენიანობას და ნამის წარმოქმნას;
- სითხის ზედაპირულ დაჭიმულობას და კაპილარულ მოვლენებს.

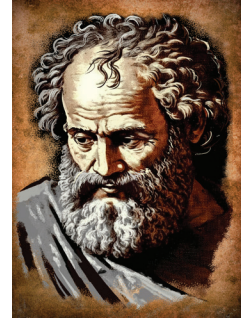
§ 1.1 მოლეკულურ-კინეტიკური თეორიის ძირითადი დებულებები

როგორია ნივთიერების შინაგანი აგებულება? მთლიანი თუ დისკრეტულია ნივთიერება? რა განსაზღვრავს მის ამა თუ იმ თვისებას და რატომ განსხვავდება ერთმანეთისაგან ნივთიერებები?



ლავუაიე
(ძვ.წ. V საუკუნე)

მოსაზრება, რომ ნებისმიერი ნივთიერება უმცირესი განუყოფელი ნაწილაკებისაგან – ატომებისაგან შედგება (ἄτομος – ძვ. ბერძ. განუყოფელი), გამოთქმულ იყო ძველი ბერძენი ფილოსოფოსების, ლევიკიპესა და დემოკრიტეს მიერ. მათი ვარაუდით, ყველა სხეული ატომების შეერთების შედეგად წარმოიქმნებოდა. სხეულთა თვისებებს კი ისინი განსხვავებული ატომების შემადგენლობით, ან ამ ატომების სხვადასხვაგვარად შეერთებით ხსნიდნენ.



დემოკრიტე
ძვ.წ. 460-370 წწ

შემდგომში ნივთიერების შედგენილობის ატომისტური შეხედულებები დიდი ხნით იქნა დავინყებული. მხოლოდ XVII საუკუნის მეორე ნახევარში, ინგლისელმა ქიმიკოსმა და ფიზიკოსმა რობერტ ბოილმა წიგნში „სკეპტიკოსი ქიმიკოსი“, „ქიმიურ ელემენტს“ ახალი, თანამედროვე წარმოდგენებთან მიახლოებული აზრი მიანიჭა. მისი ჰიპოთეზით მატერია შედგება მოძრავი ატომებისა და ატომების კლასტერებისაგან. ამასთან, სხეულებში მიმდინარე ყოველი მოვლენა მოძრავი ნაწილაკების დაჯახების შედეგია. ამ და სხვა ფუნდამენტური შრომების გამო, ბოილი თანამედროვე ქიმიის ფუძემდებლად აღიარებული.



რობერტ ბოილი
(1627-1691)

ნივთიერების დისკრეტულ აგებულებას ასევე აღიარებდნენ გალილეო გალილეი, რენე დეკარტი, ისააკ ნიუტონი. ისინი მიიჩნევდნენ, რომ ნივთიერება შედგება უმცირესი განუყოფელი ნაწილაკებისაგან, რომლებსაც **კორპუსკულებს** უწოდებდნენ, თუმცა მათ ნაშრომებში ატომების არსებობა მკაცრად არ იყო დასაბუთებული.

ატომისტური თეორია რაოდენობრივად დასაბუთებულ იქნა ჯონ დალტონის, ჟოზეფ ლუი გეი-ლუსაკის და ამადეო ავოგადროს შრომებში.

1803 წელს ინგლისელმა მეცნიერმა დალტონმა აღმოაჩინა ჯერად ფარდობათა კანონი: თუ ორი ელემენტი ერთმანეთთან რამდენიმე ქიმიურ ნაერთს ქმნის, მაშინ ამ ნაერთებში ერთ-ერთი ელემენტის ერთსა და იმავე მასასთან დაკავშირებული მეორე ელემენტის მასები ისე შეეფარდება ერთმანეთს, როგორც მცირე მთელი რიცხვები. მაგალითად, ნაერთებში CO და CO₂ ნახშირბადის ერთსა და იმავე მასასთან დაკავშირებული ჟანგბადის მასათა ფარდობაა 1:2.



ჯონ დალტონი
1766-1844 წწ

1808 წელს ფრანგმა მეცნიერმა გეი-ლუსაკმა ექსპერიმენტულად დაადგინა მოცულობითი ფარდობების კანონი: ერთნაირ ფიზიკურ პირობებში (ერთნაირ წნევასა და ტემპერატურაზე) რეაქციაში შესულ აირთა მოცულობები ისე შეეფარდებიან ერთმანეთს და რეაქციის შედეგად მიღებულ აირთა მოცულობებს,



ჯოზეფ ლუი გეი-ლუსაკი
(1778-1850)

როგორც მცირე მთელი რიცხვები. მაგალითად, წყალბადსა და ჟანგბადს შორის მიმდინარე რეაქციის დროს 2 მოცულობა წყალბადი ურთიერთქმედებს 1 მოცულობა ჟანგბადთან და 2 მოცულობა წყლის ორთქლი წარმოიქმნება. ამ კანონიდან გამომდინარეობდა, რომ ერთნაირი პირობების შემთხვევაში სხვადასხვა აირის ერთნაირ მოცულობებში ნაწილაკთა ერთი და იგივე რაოდენობაა, თუმცა ზოგიერთი



ამადეო ავოგადრო
(1776-1856)

ცდის შედეგებს ეს კანონი ვერ ხსნიდა. მაგალითად, ერთი მოცულობა ქლორის ერთ მოცულობა წყალბადთან შეერთებისას მიიღება არა ერთი მოცულობა წყალბადის ქლორიდი, არამედ ორი მოცულობა. ეს წინააღმდეგობა გადალახულ იქნა იტალიელი მეცნიერის ავოგადროს მიერ. 1811 წელს, მან ჩააყალიბა ორი დებულება:

1. ყველა ნივთიერება შედგება მოლეკულებისაგან, მოლეკულები კი – ატომებისაგან;

2. სხვადასხვა აირის ტოლი მოცულობები ერთნაირ ფიზიკურ პირობებში მოლეკულათა ტოლ რიცხვს შეიცავს.

ამ უკანასკნელ დებულებას ავოგადროს კანონს უწოდებენ.

ამ და სხვა მეცნიერების (ლუდვიგ ბოლცმანის, ჯეიმს მაქსველის, ავგუსტ კრიონინგის და სხვების) ნაშრომებმა განავითარა ატომისტური შეხედულება და ჩამოაყალიბა ის სამეცნიერო თეორიად, რომელსაც მოლეკულურ-კინეტიკური თეორია ეწოდა.

მოლეკულურ-კინეტიკური თეორია ეფუძნება სამ ძირითად დებულებას:

1. ნივთიერებას გააჩნია დისკრეტული აგებულება – შედგება უმცირესი ნაწილაკებისაგან;

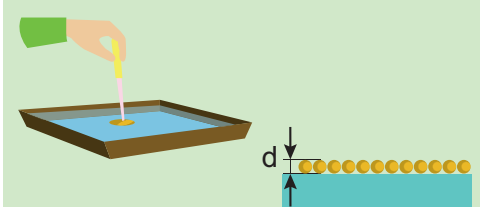
2. ნივთიერების შემადგენელი ნაწილაკები ქაოსურად მოძრაობენ;

3. ნივთიერების შემადგენელი ნაწილაკები ურთიერთქმედებენ.

თითოეულ დებულებას შემდეგ პარაგრაფებში განვიხილავთ.

§ 1.2 ატომებისა და მოლეკულების ზომები, მასა და რაოდენობა

როგორც თქვენთვის ცნობილია, ატომებისა და მოლეკულების ზომები ძალიან მცირეა. მაინც რამდენად მცირეა ისინი? როგორია ატომების და მოლეკულების მასა და მათი რაოდენობა სხეულში? როგორ შეიძლება მათი შეფასება?



სურ. 1.1

განვიხილოთ მოლეკულათა ზომების შეფასების ძალიან მარტივი მეთოდი. თუ წყლის ზედაპირზე ზეთს დავანვეთებთ, ის გარკვეულ ფართობზე განითხევა. როდესაც ჭურჭლის ზომები დიდია, მაშინ ზეთის წვეთი ვერ დაიკავებს წყლის მთელ ზედაპირს (სურ. 1.1). დადგენილია, რომ 1 მმ³ მოცულობის ზეთის წვეთი შეუძლებელია 0,6 მ²-ზე მეტ ფართობზე გაიშალოს. შესაბამისად, შეიძლება ვივარაუდოთ,

რომ ზეთის წვეთის მაქსიმალურ ფართობზე განთხევისას მიღებული ფენის სისქე მხოლოდ ერთი მოლეკულის ზომისაა. მაშასადამე, ამ სისქის დადგენით შევძლებთ ზეთის მოლეკულის ზომის შეფასებას.

მართლაც, ზეთის მოცულობა მისი ზედაპირის S ფართობისა და ფენის d სისქის ნამრავლის ტოლია: $V=Sd$. შესაბამისად, ზეთის მოლეკულის ზომისათვის მივიღებთ:

$$d = \frac{1 \text{ მმ}^3}{0,6 \text{ მ}^2} = \frac{0,001 \text{ სმ}^3}{6000 \text{ სმ}^2} \approx 1,7 \cdot 10^{-7} \text{ სმ.}$$

მოლეკულების ზომები ატომების ზომებზე დიდია. ატომების დიამეტრი დაახლოებით 10^{-8} სმ-ის რიგისაა, რაც წარმოსადგენნადაც კი ძნელია.

მოლეკულების მცირე ზომების გამო, ნებისმიერ სხეულში მათი რაოდენობა ძალიან დიდია. მაგალითად, გამოვთვალოთ 1 სმ³ მოცულობის წყალში მოლეკულების რაოდენობა. ცნობილია, რომ წყლის მოლეკულის დიამეტრი დაახლოებით $3 \cdot 10^{-8}$ სმ-ის ტოლია. თუ მივიჩნევთ, რომ წყლის ყოველი მოლეკულა იკავებს $(3 \cdot 10^{-8})^3$ სმ³ მოცულობას და ისინი ერთმანეთთან მჭიდროდაა განლაგებული, მაშინ 1 სმ³ მოცულობის წყალში მოლეკულების რაოდენობა ტოლი იქნება:

$$N = \frac{1 \text{ სმ}^3}{(3 \cdot 10^{-8})^3 \text{ სმ}^3} \approx 3,7 \cdot 10^{22}.$$

რადგან 1 სმ³ მოცულობის წყლის მასა 1 გ-ის ტოლია, ამიტომ ერთი მოლეკულის მასისათვის მივიღებთ:

$$m_{\text{H}_2\text{O}} \approx \frac{1 \text{ გ}}{3,7 \cdot 10^{22}} \approx 2,7 \cdot 10^{-23} \text{ გ.}$$

გრამებში და კილოგრამებში გამოსახული ყველა მოლეკულის მასა, მათ შორის ცილების გიგანტი მოლეკულებისა, ძალიან მცირე სიდიდეა. ცხადია, გამოთვლებისას ამ ერთეულების გამოყენება მოუხერხებელია. სწორედ ამიტომ, დალტონმა წამოაყენა იდეა ატომების მასის ერთეულად მიჩნეული ყოფილიყო წყალბადის ერთი ატომის მასა, ხოლო ნებისმიერი სხვა ელემენტის მასა დადგენილიყო ამ ელემენტის წყალბადთან შეერთების რეაქციით მიღებული ნივთიერების მასის წყალბადის მასასთან შედარებით.

თანამედროვე ფიზიკასა და ქიმიაში ატომებისა და მოლეკულების მასას ადარებენ ნახშირბადის ¹²C იზოტოპის მასის 1/12-ს, რადგან ამ შემთხვევაში ატომთა მასები უფრო ახლოსაა მთელ რიცხვებთან. ამ ერთეულს **მასის ატომურ ერთეულს (მ. ა. ე.)** უწოდებენ. მაშასადამე,

$$1 \text{ მ.ა.ე.} = \frac{1}{12} m_{\text{OC}} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ კგ.}$$

მასის ატომურ ერთეულებში გამოსახულ ატომის (მოლეკულის) მასას **ფარდობით ატომურ (მოლეკულურ) მასას** უწოდებენ და აღნიშნავენ M_r -ით. ფარდობითი ატომური (მოლეკულური) მასა გვიჩვენებს რამდენჯერ მეტია ატომის (მოლეკულის) m_0 მასა მასის ატომურ ერთეულზე:

$$M_r = \frac{m_0}{\frac{1}{12} m_{\text{OC}}} \quad (1)$$

ქიმიური ელემენტების პერიოდულ სისტემაში ელემენტების სიმბოლოსთან ნაჩვენებია მათი ფარდობითი ატომური მასაც. გამოთვლებისას, უმეტეს შემთხვევაში ფარდობით ატომურ მასას მთელ რიცხვამდე ამრგვალებენ. მაგალითად, ნყალბადის ფარდობითი ატომური მასაა 1, აზოტისა –14, ჟანგბადის კი –16.

ნივთიერების მოლეკულაში შემავალი ატომების ფარდობითი ატომური მასების შეკრებით მიიღება ნივთიერების ფარდობითი მოლეკულური მასა. მაგალითად, რადგან ნახშირბადის ფარდობითი ატომური მასაა 12, ჟანგბადისა კი – 16, ამიტომ CO_2 -ის (ნახშირორჟანგის) ფარდობითი მოლეკულური მასა ტოლია: $12+2 \cdot 16=44$.

ბუნებრივი იქნებოდა სხეულში შემავალი ნივთიერების რაოდენობა გაგვეზომა მასში შემავალი ატომების (მოლეკულების) რაოდენობით, მაგრამ ის იმდენად დიდია, რომ გამოთვლებისას იყენებენ ატომების (მოლეკულების) არა აბსოლუტურ, არამედ ფარდობით რაოდენობას. მიღებულია, რომ სხეულის ატომების (მოლეკულების) რაოდენობა შეადარონ 0,012 კგ ნახშირბადში ატომების რიცხვს. სწორედ ამის საფუძველზე შემოღებულ იქნა ნივთიერების რაოდენობის SI ერთეული – 1 **მოლი**.

ერთი მოლი არის ნივთიერების რაოდენობა, რომელიც შეიცავს იმდენ ატომს (მოლეკულას), რამდენ ატომსაც შეიცავს 0,012 კგ ნახშირბადი.

მოლის განმარტებიდან გამომდინარეობს, რომ ნებისმიერი ნივთიერების 1 მოლი შეიცავს ატომების (მოლეკულების) ერთნაირ რაოდენობას. ამ რიცხვს N_A -თი აღნიშნავენ და **ავოგადროს მუდმივას** უწოდებენ. მისი განსაზღვრისათვის უნდა ვიცოდეთ ნახშირბადის ერთი ატომის მასა. დადგენილია, რომ:

$$m_{\text{OC}} = 1,995 \cdot 10^{-26} \text{ კგ.}$$

ავოგადროს მუდმივას რიცხვით მნიშვნელობას მივიღებთ, თუ 1 მოლი ნახშირბადის მასას გავყოფთ მისი ერთი ატომის მასაზე:

$$N_A = \frac{0,012 \text{ კგ/მოლი}}{m_{\text{OC}}} = \frac{0,012 \text{ კგ/მოლი}}{1,995 \cdot 10^{-26} \text{ კგ}} \approx 6,02 \cdot 10^{23} \text{ მოლი}^{-1}. \quad (2)$$

ნივთიერების რაოდენობას აღნიშნავენ ν ასოთი. მაგალითად, თუ რაიმე სხეული შეიცავს ნივთიერების 2 მოლს ($\nu=2$), ეს ნიშნავს, რომ ის $N=\nu \cdot N_A \approx 1,2 \cdot 10^{24}$ რაოდენობის ატომს (მოლეკულას) შეიცავს. აქედან გამომდინარეობს, რომ ნივთიერების რაოდენობა ტოლია სხეულში ატომების (მოლეკულების) შეფარდებისა ავოგადროს მუდმივასთან:

$$\nu = \frac{N}{N_A} \quad (3)$$

ფარდობით ატომურ მასასთან ერთად იყენებენ ნივთიერების მოლურ მასას.

ერთი მოლი რაოდენობის ნივთიერების მასას, მოლური მასა ეწოდება. მოლურ მასას M -ით აღნიშნავენ. მისი განმარტებიდან გამომდინარეობს, რომ

$$M = m_0 \cdot N_A \quad (4)$$

SI-ში მოლური მასის ერთეულია **1 კგ/მოლი**. თუ (4) ფორმულაში (1) და (2) ფორმულებიდან განსაზღვრულ m_0 -ისა და N_A -ს გამოსახულებებს შევიტანთ, მივიღებთ:

$$M = M_r \cdot 10^{-3} \text{კგ/მოლი} \quad (5)$$

ცხადია, ნებისმიერი სხეულის მასა შეიძლება გამოვთვალოთ ფორმულით:

$$m = m_0 \cdot N \quad (6)$$

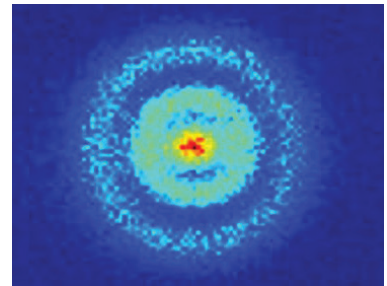
(3), (4) და (6) ფორმულების გათვალისწინებით მივიღებთ:

$$v = \frac{m}{M} \quad (7)$$

(3) და (7) ფორმულებიდან კი ნებისმიერ სხეულში ატომების (მოლეკულების) რაოდენობა ტოლი იქნება:

$$N = N_A \frac{m}{M} \quad (8)$$

თანამედროვე ტექნოლოგიების გამოყენებით დიდი სიზუსტით დადგენილია თითოეული ატომისა და მოლეკულის ზომა და მასა. ელექტრონული და იონური მიკროსკოპების საშუალებით გადაღებულია მათი ფოტოგრაფიები (სურ. 1.2).



სურ. 1.2

დასკვნები:

- ატომების დიამეტრი დაახლოებით 10^{-8} სმ-ის რიგისაა;
- ნახშირბადის $^{12}_6\text{C}$ ატომის მასის $1/12$ -ს მასის ატომური ერთეული (მ.ა.ე.) ეწოდება;
- მასის ატომურ ერთეულებში გამოსახულ ატომის (მოლეკულის) მასას ფარდობით ატომურ (მოლეკულურ) მასას უწოდებენ. $M_r = \frac{m_0}{\frac{1}{12} m_{0C}}$;
- ერთი მოლი არის ნივთიერების რაოდენობა, რომელიც შეიცავს იმდენ ატომს (მოლეკულას), რამდენ ატომსაც შეიცავს **0,012 კგ** ნახშირბადი;
- ნებისმიერი ნივთიერების **1 მოლი** შეიცავს ატომების (მოლეკულების) ერთნაირ რაოდენობას, რომელსაც ავოგადროს მუდმივას უწოდებენ. $N_A \approx 6,02 \cdot 10^{23}$ მოლი⁻¹;
- ნივთიერების რაოდენობა ტოლია სხეულში ატომების (მოლეკულების) რაოდენობის შეფარდებისა ავოგადროს მუდმივასთან: $v = \frac{N}{N_A}$;
- ერთი მოლი რაოდენობის ნივთიერების მასას მოლური მასა ეწოდება $M = m_0 N_A$;
- ნივთიერების მოლური და ფარდობითი ატომური (მოლეკულური) მასა დაკავშირებულია ფორმულით: $M = M_r \cdot 10^{-3}$ კგ/მოლი;
- ნივთიერების რაოდენობა სხეულში მისი მასისა და მოლური მასის შეფარდების ტოლია: $v = \frac{m}{M}$;
- ნებისმიერ სხეულში ატომების (მოლეკულების) რაოდენობა ტოლია: $N = N_A \frac{m}{M}$.

საკონტროლო კითხვები:

1. დაახლოებით რამდენი მოლეკულაა 1 სმ^3 მოცულობის წყალში?
2. რისი ტოლია წყლის ერთი მოლეკულის მასა?
3. რამდენია კილოგრამებში 1 მ.ა.ე. ?
4. რატომ გამოსახავენ ატომის (მოლეკულის) მასას ფარდობით ერთეულებში?
5. გ/მოლი ერთეულში გამოსახული მოლური მასა რიცხობრივად რისი ტოლია?



ერთად ამოვხსნათ ამოცანა

$5,55 \cdot 10^6 \text{ მ}^3$ მოცულობის ტბაში ჩაყარეს 24 გ სუფრის მარილი. მიიჩნით, რომ მარილი გახსნისას მთელ ტბაში თანაბრად განაწილდა და გამოთვალეთ მარილის რამდენი მოლეკულა ამოყვება ტბიდან ამოღებულ 4 სმ^3 მოცულობის წყალს.

მოცემულია: $V=5,55 \cdot 10^6 \text{ მ}^3$; $m=24 \text{ გ} = 24 \cdot 10^{-3} \text{ კგ}$; $V_1= 4 \text{ სმ}^3=4 \cdot 10^{-6} \text{ მ}^3$. $N_1=?$

ამოხსნა: ჯერ გამოვთვალოთ რამდენი მოლეკულაა 24 გ სუფრის მარილში. ამისათვის გამოვიყენოთ ნივთიერებაში მოლეკულების რაოდენობის განმსაზღვრელი $N = N_A \frac{m}{M}$ ფორმულა. სუფრის მარილის (NaCl) მოლური მასა $M = (23 + 35) \cdot 10^{-3} \text{ კგ/მოლი} = 58 \cdot 10^{-3} \text{ კგ/მოლი}$. შესაბამისად,

$N = 6,02 \cdot 10^{23} / \text{მოლი} \cdot \frac{24 \cdot 10^{-3} \text{ კგ}}{58 \cdot 10^{-3} \text{ კგ/მოლი}} \approx 2,5 \cdot 10^{23}$. ტბიდან ამოღებულ V_1 მოცულობის წყალში

მოლეკულების N_1 რაოდენობას კი ვიპოვიტ პროპორციიდან: $\frac{N_1}{N} = \frac{V_1}{V}$. საიდანაც,

$$N_1 = \frac{N \cdot V_1}{V} = \frac{2,5 \cdot 10^{23} \cdot 4 \cdot 10^{-6} \text{ მ}^3}{5,55 \cdot 10^6 \text{ მ}^3} \approx 1,8 \cdot 10^{11} \text{ მოლეკულა.}$$

პასუხი: ტბიდან ამოღებულ 4 სმ^3 მოცულობის წყალს მარილის $1,8 \cdot 10^{11}$ მოლეკულა ამოყვება.



ამოხსენით ამოცანები:

1. რამდენ მოლეკულას შეიცავს 4 მოლი ნივთიერება?
2. რამდენი მოლეკულით მეტს შეიცავს $3,5$ მოლი ჟანგბადი, 2 მოლ აზოტთან შედარებით?
3. გამოთვალეთ წყლის ფარდობითი მოლეკულური მასა.
4. განსაზღვრეთ სუფრის მარილის ფარდობითი მოლეკულური მასა.
5. რამდენ მოლ ნივთიერების რაოდენობას მივიღებთ, თუ $1,2$ მოლი ჟანგბადი მთლიანად ატომურ მდგომარეობაში გადავა?
6. რისი ტოლი იქნება 27 გ/მოლი მოლური მასის მქონე ნივთიერების ერთი მოლეკულის მასა?
7. განსაზღვრეთ რამდენ ატომს შეიცავს 5 გ სპილენძი.
8. რამდენ ნაწილაკს შეიცავს 20 გ ჟანგბადისა და 25 გ აზოტის ნარევი?
9. რამდენ მოლეკულას შეიცავს კუბის ფორმის ყინულის ნაჭერი, თუ მისი წიბოს სიგრძე 1 მმ-ია ?
10. თეფშზე დასხმული 60 გ წყალი დღე-ღამის განმავლობაში მთლიანად აორთქლდა. მიიჩნით, რომ აორთქლებული არცერთი მოლეკულა წყალში არ დაბრუნებულა და იპოვეთ საშუალოდ რამდენი მოლეკულა ამოდიოდა წყლის ზედაპირიდან ერთი საათის განმავლობაში.

§ 1.3 ბროუნის მოძრაობა

რა ფიზიკური მოვლენებით შეიძლება მოლეკულურ-კინეტიკური თეორიის მეორე ძირითადი დებულების დასაბუთება?

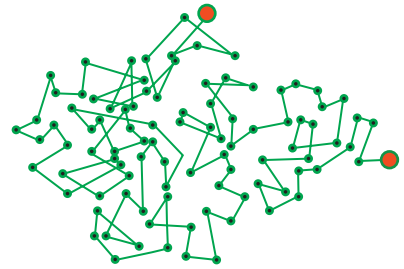


რ. ბროუნი
(1773-1858)

1827 წელს, ინგლისელი ბოტანიკოსი რობერტ ბროუნი მიკროსკოპით აკვირდებოდა რა წყალში შეტივტივებულ ყვავილის მტვრის ნაწილაკებს, შეამჩნია, რომ ისინი ქაოსურად მოძრაობდნენ და ეს მოძრაობა არ წყდებოდა. ვინაიდან გარემოში მოძრავი ნებისმიერი სხეული, ადრე თუ გვიან ჩერდება, ბროუნმა მიიჩნია, რომ ყვავილის მტვრის ნაწილაკები ავლენდნენ სიცოცხლის ნიშნებს, ანუ ამგვარი მოძრაობა მათი ორგანული წარმომავლობით იყო განპირობებული. თუმცა, მოგვიანებით ჩატარებულმა მრავალმა ექსპერიმენტმა ძალიან მცირე ზომის სხვადასხვა, მათ შორის არაორგანულ ნაწილაკებზე, აჩვენა ამ მოძრაობის უნივერსალური ხასიათი. შემდეგში მას **ბროუნის მოძრაობა** ეწოდა, ხოლო ნაწი-

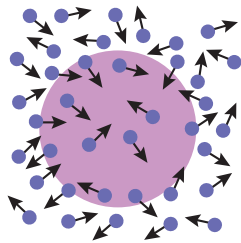
ლაკებს – **ბროუნის ნაწილაკები**.

ბროუნის მოძრაობა სითბური მოძრაობაა და ის არ წყდება. გარემოს ტემპერატურის მომატებისას მისი ინტენსივობა იზრდება. სურ. 1.3-ზე ნაჩვენებია ბროუნის ნაწილაკის მოძრაობის გამარტივებული ტრაექტორია. წერტილებით აღნიშნულია მისი მდებარეობები დროის ტოლი შუალედების (1 წმ) შემდეგ. სინამდვილეში ნაწილაკის ტრაექტორია ბევრად რთულია.



სურ. 1.3

ბროუნის მოძრაობას შეიძლება აირეზებოდა დავაკვირდეთ. მაგალითად, ჰაერში შეწონილი ბოლის ან მტვრის ნაწილაკები ასეთივე მოძრაობას ასრულებს.



სურ. 1.4

რა არის ბროუნის მოძრაობის მიზეზი? ამ კითხვას პასუხი გაეცა მხოლოდ მე-19 საუკუნის 70-იან წლებში, როდესაც ბროუნის ნაწილაკის მოძრაობა სითხის ან აირის ნაწილაკების ქაოსურ მოძრაობას დაუკავშირეს. ქაოსური მოძრაობის გამო, გარემოს მოლეკულები განუწყვეტლივ ეჯახებიან მასში შეტივტივებულ „მაკრონაწილაკს“ (სურ. 1.4). თუ სხვადასხვა მხრიდან ამ ნაწილაკზე დარტყმების ჯამური ძალები ერთმანეთს არ გააბათილებს, მაშინ ბროუნის ნაწილაკი ამ ძალების ტოლქმედის მიმართულებით ამოძრავდება. ვინაიდან ბროუნის ნაწილაკის მოძრაობა ქაოსურია, ეს ნიშნავს, რომ ძალების

ტოლქმედის მიმართულებაც ქაოსურად იცვლება, რაც გარემოს მოლეკულების (ატომების) ქაოსური მოძრაობითაა განპირობებული.



ახსენით, რატომ იმატებს ბროუნის მოძრაობის ინტენსივობა ტემპერატურის ზრდისას?

ბროუნის ნაწილაკის მოძრაობის ინტენსიურობა იზრდება ამ ნაწილაკის ზომის შემცირებასას. ეს გასაგებიცაა: რაც უფრო მცირეა ნაწილაკის ზედაპირის ფართობი, მით საგრძნობია ამ ფართობზე მოქმედი წნევის ძალის ცვლილება. როდესაც ნაწილაკის ზომები მოლეკულის რამდენიმე დიამეტრის თანრიგისაა, მაშინ გარემოს მოლეკულის დაჯახებისას ნაწილაკზე მოქმედი წნევის ძალა ნულიდან გარკვეულ მნიშვნელობამდე ნახტომისებურად იზრდება.

ბროუნის მოძრაობის მოლეკულურ-კინეტიკური თეორია შექმნა ა. აინშტაინმა 1905 წელს. თავის ნაშრომში მან აჩვენა, რომ ბროუნის ნაწილაკები გარემოს ნაწილაკებთან ერთად სითბურ მოძრაობაში მონაწილეობენ და მათი კინეტიკური ენერჯის

მნიშვნელობა საშუალოდ ისეთივეა, როგორც გარემოს ნაწილაკების. ბროუნის ნაწილაკის მასა ბევრად მეტია გარემოს მოლეკულის (ატომის) მასაზე, ამიტომ მისი სიჩქარე მოლეკულის (ატომის) სიჩქარეზე ბევრად ნაკლებია. აინშტაინმა დაამტკიცა, რომ ბროუნის ნაწილაკის წანაცვლება მისი სანყის მდებარეობიდან ემორჩილება შემდეგ კანონს:

$$\overline{\Delta x^2} = kt,$$

რომელშიც $\overline{\Delta x^2}$ – ნებისმიერ დერძზე ბროუნის ნაწილაკის t დროში წანაცვლების პროექციის კვადრატის საშუალოა. k კოეფიციენტი დამოკიდებულია გარემოს ფიზიკურ თვისებებზე ტემპერატურასა და ბროუნის ნაწილაკის ზომებზე.

როგორც იცით, თანაბარი მოძრაობისას, სხეულის წანაცვლება $\Delta x = v_x t$ კანონით იცვლება, თანაბარჩქარეული მოძრაობისათვის კი $\Delta x = v_{0x} t + \frac{a_x t^2}{2}$ კანონით. შესაბამისად, ბროუნის მოძრაობა არც თანაბარია და არც თანაბარჩქარეული.

ნივთიერების შემადგენელი ნაწილაკების ქაოსურ მოძრაობას ამტკიცებს თქვენთვის უკვე ცნობილი **დიფუზიის მოვლენაც**.



ნივთიერებების ერთმანეთში თავისთავად შერევის მოვლენას დიფუზია ეწოდება. ამ მოვლენის დროს ერთი ნივთიერების შემადგენელი მოლეკულები (ატომები) განუწყვეტელი ქაოსური მოძრაობის შედეგად აღწევენ და ნაწილდებიან სხვა ნივთიერების მოლეკულებს (ატომებს) შორის.

დასკვნები:

- სითხეში ან აირში შეტივტივებული ნაწილაკების სითბურ მოძრაობას ბროუნის მოძრაობა ეწოდება;
- ბროუნის მოძრაობის ინტენსივობა მატულობს ნაწილაკის ზომის შემცირებისას და გარემოს ტემპერატურის გაზრდისას.

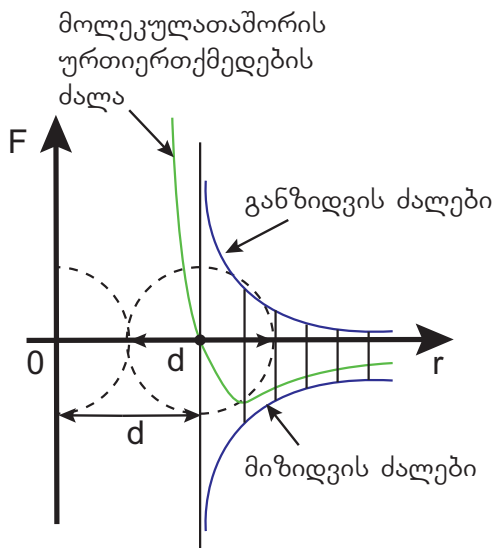
საკონტროლო კითხვები:

1. რა ექსპერიმენტებმა აჩვენა ბროუნის მოძრაობის უნივერსალური ხასიათი?
2. რა ინვეს ბროუნის ნაწილაკის მოძრაობას?
3. რატომ მოძრაობს ბროუნის ნაწილაკი ქაოსურად?

§ 1.4 მოლეკულების ურთიერთქმედება

როგორც უკვე იცით, ყველა ნივთიერება ცალკეული ნაწილაკებისაგან შედგება. მაშ, რატომ არის ასე ძნელი ფოლადის მავთულის განწყვეტა ან ქვის გატეხვა? რატომ არის ძალიან ძნელი წყლის შეკუმშვა, ჰაერის შეკუმშვა კი – ადვილი?

მოლეკულურ-კინეტიკური თეორიის თანახმად, ნივთიერების შემადგენელი ნაწილაკები ურთიერთქმედებენ: **მოლეკულებს (ატომებს) შორის მოქმედებს როგორც მიზიდვის, ასევე განზიდვის ძალები**. მათი არსებობის ძირითადი მიზეზი ატომის შემადგენლობაში შემავალ დამუხტულ ნაწილაკებს შორის ელექტრული მიზიდვა და განზიდვაა – დადებითად დამუხტული ატომის ბირთვი იზიდავს მეზობელი ატომის ელექტრონულ ღრუბელს, ამავე დროს ატომების ბირთვები და ელექტრონული ღრუბლები ერთმანეთს განიზიდავენ.



სურ. 1.5

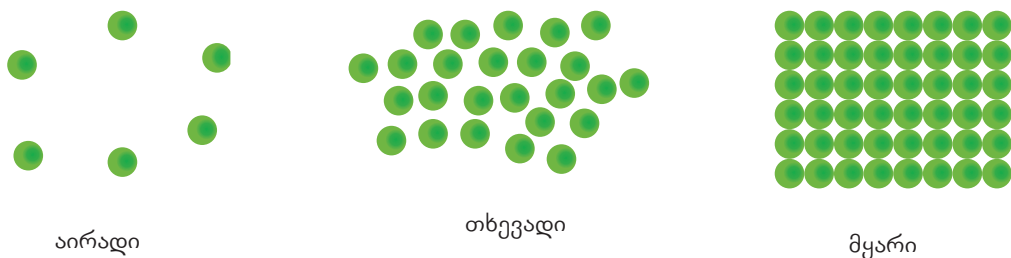
თუ მოლეკულების (ატომების) ცენტრებს შორის r მანძილი მოლეკულების (ატომების) d ზომაზე ნაკლებია ($r < d$), მაშინ განზიდვის ძალა მოდულით აჭარბებს მიზიდვის ძალას და მოლეკულები (ატომები) ერთმანეთს განიზიდავს (სურ. 1.5). r მანძილის ზრდასთან ერთად მცირდება როგორც მიზიდვის, ასევე განზიდვის ძალის მოდული, მაგრამ განზიდვის ძალა მცირდება უფრო სწრაფად. როდესაც $r = d$, მოლეკულებს (ატომებს) შორის მიზიდვისა და განზიდვის ძალები ერთმანეთს ანონასწორებს. მანძილის შემდგომი ზრდისას ($r > d$) უკვე მიზიდვის ძალა მოდულით აჭარბებს განზიდვის ძალას და მოლეკულები (ატომები) ერთმანეთს მიიზიდავს. ამრიგად, $r = d$, მანძილზე მოლეკულები (ატომები) იმყოფებიან მდგრადი ნონასწორობის მდგომარეობაში – ამ მდგომარეობიდან მოლეკულის (ატომის) გადახრისას მოლეკულათაშორისი ძალები

ცდილობენ დააბრუნონ ის ნონასწორობის მდგომარეობაში. სურ. 1.5-ზე გამოსახულია მიზიდვისა და განზიდვის ძალების გვეგმილის დამოკიდებულება მოლეკულებს შორის მანძილზე. მოლეკულათაშორისი ძალა გამოითვლება მიზიდვისა და განზიდვის ძალების გვეგმილების ალგებრული ჯამით.

მოლეკულურ-კინეტიკური თეორია საშუალებას იძლევა ავხსნათ, რატომ შეიძლება ერთი და იგივე ნივთიერება იმყოფებოდეს მყარ, თხევად და აირად მდგომარეობაში. ნივთიერების სხვადასხვა აგრეგატული მდგომარეობა განპირობებულია მოლეკულების ურთიერთგანლაგებით, მათი მოძრაობის ხასიათით და ურთიერთქმედებით, რომლებიც მნიშვნელოვნადაა დამოკიდებული გარეშე პირობებზე.

აირებში საშუალო მანძილი მოლეკულებს (ატომებს) შორის ბევრად აღემატება მათ ზომებს. მაგალითად, ნორმალური ატმოსფერული წნევისას ჭურჭლის მოცულობა ათეულ ათასჯერ აღემატება მასში არსებული აირის მოლეკულების მოცულობების ჯამს. სწორედ ამიტომ, აირები ადვილად იკუმშება – მცირდება მოლეკულებს შორის საშუალო მანძილი, თუმცა მოლეკულების ფორმა არ იცვლება.

აირის მოლეკულები სივრცეში დიდი სიჩქარით (რამდენიმე ასეული მეტრი წამში) მოძრაობენ. შეჯახებისას ისინი ერთმანეთისგან სხვადასხვა მიმართულებით აისხლიტებიან. აირის მოლეკულებს შორის სუსტი ურთიერთმიზიდვის გამო, ისინი ერთმანეთს ადვილად შორდებიან, ამიტომ აირებს უსაზღვროდ გაფართოება შეუძლია. ისინი ფორმასა და მოცულობას ვერ ინარჩუნებენ (სურ. 1.6).



სურ. 1.6

ჭურჭლის კედლებზე მოლეკულების დაჯახების შედეგად წარმოიქმნება აირის წნევა.



თუ აირებს უსაზღვროდ გაფართოება შეუძლია, რატომ აქვს დედამინას ატმოსფერო?

სითხის მოლეკულები ერთმანეთთან მჭიდროდ არის განლაგებული, ამიტომ ისინი აირის მოლეკულებისაგან განსხვავებულად „იქცევიან“. ახლო მანძილებზე, რომლებიც რამდენიმე მოლეკულის დიამეტრის ტოლია, სითხის მოლეკულების განლაგებაში მოქმედებს გარკვეული წესრიგი: მოლეკულა ირხევა თავისი წონასწორობის მდებარეობის მახლობლად, ეჯახება მეზობელ მოლეკულებს, ზოგჯერ კი ახორციელებს „ნახტომს“ და წონასწორობის ახალ მდებარეობაში გადადის. ოთახის ტემპერატურაზე წყლის მოლეკულის წონასწორობის მდებარეობაში ყოფნის საშუალო ხანგრძლივობა 10^{-11} წმ-ია, ტემპერატურის ზრდისას ეს დრო მცირდება.

სითხის მოლეკულების ამგვარი „ქცევით“ აიხსნება მისი დენადობა—სითხე ვერ ინარჩუნებს ფორმას. მართალია, გარე ძალა მოლეკულების „ნახტომების“ რიცხვს საგრძნობლად არ ცვლის, მაგრამ ისინი ძირითადად ამ ძალის მიმართულებით ხორციელდება.

რადგან სითხის მოლეკულები ერთმანეთთან მჭიდროდაა განლაგებული, მისი მოცულობის შემცირებისას მოლეკულათაშორისი განზიდვის ძალები ძალიან იზრდება, რითაც სითხის მცირე კუმშვადობა აიხსნება.

სითხეებისაგან განსხვავებით, მყარ სხეულებში მოლეკულები (ატომები) მხოლოდ წონასწორობის მდებარეობის მახლობლად ირხევიან და არ ახორციელებენ „ნახტომებს“. მათი ურთიერთქმედების პოტენციალური ენერგია ბევრად აღემატება კინეტიკურ ენერგიას. ამ მიზეზით მყარი სხეულები ინარჩუნებენ მოცულობასაც და ფორმასაც.

როგორც იცით, მყარი სხეულების დიდი ნაწილი კრისტალურ მდგომარეობაშია — მათ ატომებს და იონებს განსაზღვრული, მოწესრიგებული ურთიერთმდებარეობა აქვს სივრცეში. თუ მათ წონასწორულ მდებარეობათა ცენტრებს შევაერთებთ, მივიღებთ წესიერ სივრცულ მესერს, რომელსაც **კრისტალური მესერი** ეწოდება.

დასკვნები:

- ნივთიერების შემადგენელი ნაწილაკები ურთიერთქმედებენ: მოლეკულებს (ატომებს) შორის მოქმედებს როგორც მიზიდვის, ასევე განზიდვის ძალები;
- თუ მოლეკულების (ატომების) ცენტრებს შორის r მანძილი მოლეკულების (ატომების) d ზომაზე ნაკლებია ($r < d$), მაშინ ისინი ერთმანეთს განიზიდავს; როდესაც $r = d$, მოლეკულებს (ატომებს) შორის მიზიდვისა და განზიდვის ძალები ერთმანეთს აწონასწორებს, ხოლო როდესაც $r > d$, მოლეკულები (ატომები) ერთმანეთს მიიზიდავს.

საკონტროლო კითხვები:

1. ძირითადად რომელი ძალები განსაზღვრავს მოლეკულების (ატომების) ურთიერთქმედებას?
2. რატომაა აირის შეკუმშვა ადვილი, სითხისა და მყარი სხეულისა კი თითქმის შეუძლებელი?
3. რა განაპირობებს სითხის დენადობას?
4. როგორ არის განლაგებული ნაწილაკები მყარ კრისტალურ სხეულში? ამორფულში?

§ 1.5 იდეალური აირი. მოლეკულურ-კინეტიკური თეორიის ძირითადი განტოლება

წინა პარაგრაფებში მოლეკულურ-კინეტიკური თეორიის გამოყენებით ავხსენით ნივთიერების ძირითადი თვისებები. ისმის კითხვა: როგორ დავაკავშიროთ მოლეკულების თვისებები, მათი რაოდენობა და სიჩქარე სხეულის მოცულობასთან, წნევასთან, ტემპერატურასთან და სხვა ისეთ სიდიდეებთან, რომელთა გაზომვა ცდებითაა შესაძლებელი?

აირებში, ნორმალური ატმოსფერული წნევის დროს, მოლეკულებს შორის მანძილი მათ ზომებს ბევრად აღემატება. მიუხედავად იმისა, რომ მოლეკულების კინეტიკური ენერჯია მათი ურთიერთქმედების პოტენციალურ ენერჯიაზე ბევრად მეტია, მოლეკულებს შორის ურთიერთქმედებას საკმაოდ რთული ხასიათი აქვს. ამ სირთულის თავიდან ასაცილებლად საჭიროა შევქმნათ აირის ისეთი მოდელი, რომელიც ცდებით მიღებულ შედეგებს ახსნის.



მოდელი – რაიმე ობიექტის ან პროცესის გამარტივებული წარმოდგენა, რომლითაც შესაძლებელია მათი ზოგიერთი პარამეტრის უგულებელყოფა. მაგალითად, მექანიკის ძირითადი ამოცანის ამოხსნისას, ზოგიერთ შემთხვევაში უგულებელვყავით სხეულის ზომები და შევქმენით ნივთიერი წერტილის მოდელი, რამაც საკმაოდ რთული პროცესების აღწერა გაგვიადვილა.

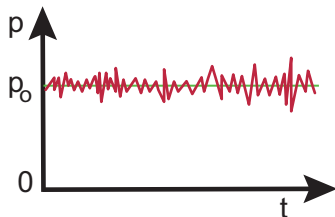
აირის მოლეკულები განვიხილოთ როგორც ნივთიერი წერტილები, ანუ უგულებელვყოთ მათი ზომები – მივიჩნიოთ, რომ მათი ჯამური მოცულობა ჭურჭლის მოცულობაზე გაცილებით მცირეა. შესაბამისად, რეალური აირის ნაცვლად განვიხილოთ მისი მოდელი – **იდეალური აირი**.

იდეალური აირის თვისებები შეიძლება ჩამოვაცალიბოთ შემდეგნაირად:

1. მოლეკულებს შორის მანძილი ბევრად მეტია მათ ზომებზე;
2. მოლეკულები დრეკადი ბირთვებია და მათი ზომები ძალიან მცირეა;
3. მოლეკულებს შორის მიზიდვის ძალები უსასრულოდ მცირეა;
4. მოლეკულები ურთიერთქმედებენ (განიზიდებიან) მხოლოდ დაჯახებისას;
5. მოლეკულები ქაოსურად მოძრაობენ;
6. მოლეკულების მოძრაობა ნიუტონის კანონებით აღიწერება.

რეალურ პირობებში იდეალური აირი არ გვხვდება, მაგრამ გაუხშობული აირი თითქმის ისევე იქცევა, როგორც იდეალური.

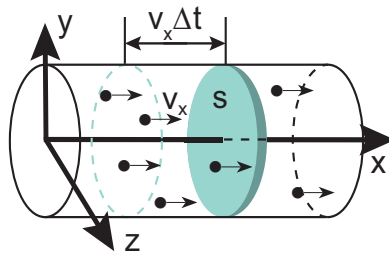
დავსვათ ამოცანა: მოლეკულურ-კინეტიკური თეორიის გამოყენებით განვსაზღვროთ იდეალური აირის მიერ წარმოებული წნევა ჭურჭლის კედლებზე. როგორ წარმოიქმნება ეს წნევა?



სურ. 1.7

აირის ყოველი მოლეკულა ჭურჭლის კედელზე დაჯახებისას, მცირე დროის განმავლობაში, მასზე გარკვეული ძალით მოქმედებს. კედელზე მოუწესრიგებელი დაჯახებების შედეგად წნევა სწრაფად იცვლება ისე, როგორც სურ. 1.7-ზე გამოსახული. თითოეული მოლეკულის დაჯახების შედეგად გამოწვეული მოქმედება ძალიან სუსტია და ჭურჭელზე მიმაგრებული მანომეტრი მასზე არ რეაგირებს. მანომეტრი ზომავს გარკვეულ დროში დიდი რაოდენობის მოლეკულის კედელზე დაჯახების საშუალო ძალას, რომელიც მისი მემბრანის ფართობის ერთეულზე მოქმედებს. რადგან კედელზე მოლეკულების დაჯახებების რაოდენობა ძალიან დიდია, მათი მასები კი – ძალიან მცირე, წნევის ცვლილება კედელზე უმნიშვნელოა და მისი საშუალო p_0 მნიშვნელობა პრაქტიკულად განსაზღვრული სიდიდეა.

გამოვიყვანოთ იდეალური აირის წნევის ფორმულა. სიმარტივისათვის განვიხილოთ ერთი სახის მოლეკულებისაგან შემდგარი იდეალური აირი, რომელიც დგუშიან ცილინდრულ ჭურჭელშია მოთავსებული (სურ. 1.8).



სურ. 1.8

თუ OX ღერძს დგუშის მართობულად მივმართავთ, მაშინ აირის წნევა მასზე ტოლია ამ ღერძის გასწვრივ მოქმედი F_x ძალის ფარდობისა დგუშის S ფართობთან:

$$p = \frac{F_x}{S}. \quad (1)$$

F_x ძალა წარმოადგენს მოლეკულების დგუშზე დაჯახების ჯამურ ძალას:

$$F_x = \bar{F}' \Delta N, \quad (2)$$

რომელშიც F' ერთი მოლეკულის დაჯახების ძალაა, ΔN – დგუშზე მოლეკულების დაჯახებების რიცხვი. ფორმულაში ხაზი თავზე აღნიშნავს მოლეკულების სიჩქარეების მიხედვით გასაშუალებულ ძალის მნიშვნელობას.

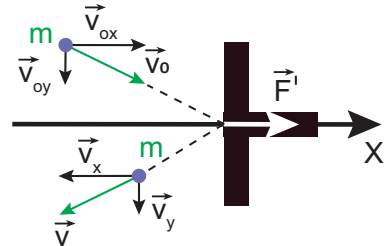
ჯერ განვიხილოთ დგუშზე ერთი მოლეკულის დაჯახების ძალა (სურ. 1.9). ნიუტონის მეორე კანონის თანახმად, მოლეკულაზე დგუშის მხრიდან მოქმედებს ძალა

$$\vec{F}'_e = m_0 \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t},$$

რომელშიც $\Delta \vec{v}$ მოლეკულის სიჩქარის ცვლილებაა, Δt დაჯახების დრო, ხოლო m_0 – მოლეკულის მასა.

ნიუტონის მესამე კანონის თანახმად, დგუშზე მოლეკულა მოქმედებს $\vec{F}' = -\vec{F}'_e$ ძალით, ანუ

$$\vec{F}' = -m_0 \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}.$$



სურ. 1.9

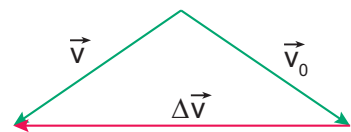
დრეკადი დაჯახების დროს მოლეკულის სიჩქარის მოდული არ იცვლება, იცვლება მხოლოდ მისი მიმართულება. შესაბამისად, სიჩქარის მდგენელი OX ღერძზე იცვლება სა-

პირისპიროთი, დანარჩენი მდგენელები კი უცვლელი რჩება (სურ. 1.10). დროის Δt შუალედში სიჩქარის ცვლილების მოდული ტოლი იქნება:

$$\Delta v = |\vec{v} - \vec{v}_0| = 2v_x,$$

რომელშიც \vec{v}_0 და \vec{v} მოლეკულის სიჩქარეებია, შესაბამისად დაჯახებამდე და დაჯახების შემდეგ, ხოლო v_x – სიჩქარის გეგმილია OX ღერძზე. ამრიგად, მივიღებთ:

$$F' = m_0 \frac{2v_x}{\Delta t}. \quad (3)$$



სურ. 1.10

ახლა გამოვთვალოთ Δt დროის შუალედში დგუშზე დაჯახებული მოლეკულების მთლიანი რაოდენობა. ცხადია, დგუშს მხოლოდ ის მოლეკულები დაეჯახებიან რომლებიც Δt დროის შუალედში ასწრებენ მასთან მისვლას. ეს მოლეკულები მოთავსებულია V მოცულობის ცილინდრში, რომლის ფუძის ფართობია S, სიმაღლე კი – $v_x \Delta t$.

მოძრაობის ქაოსურობის გამო, შეგვიძლია მივიჩნიოთ, რომ OX ღერძის დადებითი და უარყოფითი მიმართულებით მოლეკულათა ერთნაირი რაოდენობა მოძრაობს, ამიტომ დგუშზე მოლეკულების დაჯახებების რიცხვი ტოლი იქნება:

$$\Delta N = \frac{1}{2}nV = \frac{1}{2}nSv_x\Delta t, \quad (4)$$

რომელშიც n მოლეკულების კონცენტრაციაა.

(1), (2), (3) და (4) ფორმულების გათვალისწინებით, საშუალო წნევისთვის მივიღებთ:

$$p = \frac{1}{2} \frac{nSv_x\Delta t 2m_0v_x}{S\Delta t} = nm_0 \overline{v_x^2}. \quad (5)$$

აირის თითოეულ ნაწილაკს თავისი სიჩქარე აქვს. მოლეკულების სიმრავლისა და მათი მოძრაობის სირთულის გამო, ყოველი ნაწილაკის მოძრაობას ვერ დავაკვირდებით. ეს არც არის საჭირო, ვინაიდან წნევის საშუალო მნიშვნელობის განსაზღვრისათვის საჭიროა ვიცოდეთ მოლეკულების საშუალო არითმეტიკული სიჩქარე, რომელიც ტოლია ყველა მოლეკულის სიჩქარეთა მოდულების ჯამის ფარდობისა ამ მოლეკულათა რიცხვთან. ურთიერთდაჯახებების გამო მოლეკულების მოძრაობის სიჩქარის მიმართულება და მოდული განუწყვეტილად იცვლება, მიუხედავად ამისა, მათი მოძრაობის საშუალო არითმეტიკული სიჩქარე განსაზღვრული სიდიდეა.

როგორც (5) ფორმულიდან ჩანს, ჩვენ გვჭირდება არა მოლეკულების მოძრაობის საშუალო არითმეტიკული სიჩქარე, არამედ სიჩქარის კვადრატის საშუალო მნიშვნელობა, რომლითაც მოლეკულების საშუალო კინეტიკური ენერგია განისაზღვრება. მოლეკულების სიჩქარის კვადრატის საშუალო მნიშვნელობა გამოითვლება ფორმულით:

$$\overline{v^2} = \frac{v_1^2 + v_2^2 + v_3^2 + \dots + v_N^2}{N}, \quad (6)$$

რომელშიც $v_1, v_2, v_3, \dots, v_N$, აირის ცალკეული მოლეკულების სიჩქარეთა მოდულებია, N კი – მოლეკულათა რაოდენობა.

როგორც ცნობილია, ნებისმიერი ვექტორის მოდულის კვადრატი მისი OX, OY, OZ საკოორდინატო ღერძებზე გეგმილების კვადრატების ჯამის ტოლია:

$$v^2 = v_x^2 + v_y^2 + v_z^2.$$

(6)-ის ანალოგიური ფორმულები შეიძლება დავწეროთ სიჩქარის თითოეული გეგმილის კვადრატის საშუალო მნიშვნელობისათვის. მაგალითად:

$$\overline{v_x^2} = \frac{v_{1x}^2 + v_{2x}^2 + v_{3x}^2 + \dots + v_{Nx}^2}{N}.$$

შესაბამისად, სიჩქარის კვადრატის საშუალო მნიშვნელობისათვის მივიღებთ:

$$\overline{v^2} = \overline{v_x^2} + \overline{v_y^2} + \overline{v_z^2}. \quad (7)$$

რადგან მოძრაობა ქაოსურია, ამიტომ OX, OY და OZ ღერძების მიმართულებებით იგი თანაბარალობათურია და შეგვიძლია დავწეროთ:

$$\overline{v_x^2} = \overline{v_y^2} = \overline{v_z^2}.$$

შესაბამისად, (7)-ს თანახმად გვექნება:

$$\overline{v_x^2} = \frac{1}{3} \overline{v^2}. \quad (8)$$

თანამამრავლი $\frac{1}{3}$ გაჩნდა იმის გამო, რომ ჩვენი სივრცე სამგანზომილებიანია და ნებისმიერ ვექტორს სამი გეგმილი აქვს.

(5) და (8) ფორმულების გათვალისწინებით იდეალური აირის წნევისათვის გვექნება:

$$p = \frac{1}{3} n m_0 \overline{v^2}. \quad (9)$$

მიღებულ განტოლებას იდეალური აირის **მოლეკულურ-კინეტიკური თეორიის ძირითადი განტოლება** ეწოდება. ის ერთმანეთთან აკავშირებს იდეალური აირის მაკროპარამეტრ წნევას მის მიკროპარამეტრებთან – კონცენტრაციასა და მოლეკულების სიჩქარის კვადრატის საშუალო მნიშვნელობასთან.

თუ მიღებული ტოლობის მარჯვენა ნაწილს გავამრავლებთ და გავყოფთ 2-ზე, ამასთან გავითვალისწინებთ, რომ $\frac{m_0 \overline{v^2}}{2} = \overline{E}_j$ მოლეკულების ქაოსური მოძრაობის საშუალო კინეტიკური ენერჯიაა, მივიღებთ:

$$p = \frac{2}{3} n \overline{E}_j. \quad (10)$$

როგორ გამოითვლება იმ აირის წნევა, რომელიც სხვადასხვა აირთა ნარევის წარმოადგენს? მაგალითად, როგორ განვსაზღვროთ ჰაერის წნევა, რომელიც აზოტის, ჟანგბადის, ნახშირორჟანგის და სხვა აირთა ნარევი?

1801 წელს, ინგლისელმა მეცნიერმა ჯონ დალტონმა ექსპერიმენტულად დაადგინა, რომ იდეალურ აირთა ნარევის წნევა, მასში შემავალი აირების **პარციალური წნევების** ჯამის ტოლია. პარციალური ეწოდება აირის წნევას, რომელსაც შექმნიდა ნარევი შემავალი აირი, თუ მხოლოდ ის დაიკავებდა მთლიან მოცულობას, რომელიც ნარევის უკავია. ამრიგად,

$$p_{\text{ნარ.}} = p_1 + p_2 + p_3 + \dots p_n,$$

რომელშიც $p_1, p_2, p_3 \dots p_n$ ნარევი შემავალი აირების პარციალური წნევებია, რომელთაგან თითოეულის განსაზღვრა (9) და (10) ფორმულებით შეიძლება.

დასკვნები:

- იდეალური აირი რეალური აირის მოდელს წარმოადგენს;
- აირის წნევა რაიმე ზედაპირზე მასზე მოლეკულების დაჯახებითაა გამოწვეული;
- მოლეკულურ-კინეტიკური თეორიის ძირითადი განტოლებაა: $p = \frac{1}{3} n m_0 \overline{v^2}$;
- იდეალური აირის წნევა მოლეკულების საშუალო კინეტიკურ ენერჯიასთან დაკავშირებულია ფორმულით: $p = \frac{2}{3} n \overline{E}_j$;
- იდეალურ აირთა ნარევის წნევა, მასში შემავალი აირების პარციალური წნევების ჯამის ტოლია: $p_{\text{ნარ.}} = p_1 + p_2 + p_3 + \dots p_n$.

საკონტროლო კითხვები:

1. რა თვისებებით დაახასიათებდი იდეალურ აირს?
2. რა პირობებში შეიძლება რეალური აირი იდეალურად მივიჩნიოთ?
3. მოლეკულის სიჩქარის რომელი მდგენელი იცვლება საპირისპიროთი, კედელთან მისი შეჯახებისას?
4. როგორ გამოითვლება მოლეკულების სიჩქარის კვადრატის საშუალო მნიშვნელობა?
5. რა არის პარციალური წნევა?



ერთად ამოვხსნათ ამოცანა

ორი ჭურჭლიდან ერთ-ერთის მოცულობა და მასში მოთავსებული აირის წნევა, შესაბამისად $2V_0$ და $3p_0$ -ია. მეორე ჭურჭლის მოცულობა და მასში მოთავსებული აირის წნევა კი $0,5V_0$ და $8p_0$. რა წნევა დამყარდება ჭურჭლებში, თუ მათ წვრილი მილით შევაერთებთ? მიიჩნიეთ, რომ აირის ნაწილაკების საშუალო კვადრატული სიჩქარე ამ პროცესში არ იცვლება.

მოცემულია: $p_1 = 3p_0$; $V_1 = 2V_0$; $p_2 = 8p_0$; $V_2 = 0,5V_0$. $p = ?$

ამოხსნა: ვინაიდან აირის ნაწილაკების საშუალო კვადრატული სიჩქარე უცვლელია, ეს ნიშნავს, რომ უცვლელია მათი საშუალო კინეტიკური ენერგიაც. $p = \frac{2}{3}n\bar{E}_k$ ფორმულის თანახმად, აირთაწნევის ცვლილება ონკანის გახსნის შემდეგ ნაწილაკთა კონცენტრაციის ცვლილებითაა გამოწვეული. აირთა შერევის შემდეგ ნარევის წნევა თითოეული აირის პარციალური წნევების ჯამის ტოლია. ჯერ გამოვთვალოთ p' წნევა, რომელსაც შექმნის პირველ ჭურჭელში მოთავსებული აირი, როდესაც ის ორივე ჭურჭელში განთავსდება. რადგან ონკანის გახსნის შემდეგ პირველ ჭურჭელში მოთავსებული აირის მოცულობა $1,25$ -ჯერ იზრდება, მისი კონცენტრაცია და, შესაბამისად წნევაც ამდენჯერვე შემცირდება. ამიტომ $p' = \frac{3 p_0}{1,25} = 2,4 p_0$. ანალოგიურად, ვინაიდან ონკანის გახსნის გამო, მეორე ჭურჭელში მოთავსებული აირის მოცულობა 5 -ჯერ იზრდება, ამიტომ მისი კონცენტრაცია და, შესაბამისად წნევა 5 -ჯერ შემცირდება: $p'' = \frac{8 p_0}{5} = 1,6 p_0$. ნარევის საბოლოო წნევისათვის კი მივიღებთ: $p = p' + p'' = 4p_0$.

პასუხი: ჭურჭლების წვრილი მილით შეერთების შემდეგ მათში წნევა $4p_0$ -ის ტოლი იქნება.



ამოხსენით ამოცანები:

1. ჭურჭელში მოთავსებული ჟანგბადის წარმოებული წნევა 10^{-2} პა-ია, ხოლო მისი მოლეკულების კონცენტრაცია 10^{12} მ⁻³. გამოთვალეთ მოლეკულების საშუალო კვადრატული სიჩქარე.
2. განსაზღვრეთ ჭურჭელში მოთავსებული აირის სიმკვრივე, თუ მისი წარმოებული წნევა და მოლეკულების საშუალო კვადრატული სიჩქარე, შესაბამისად 10^4 პა და $0,5$ კმ/წმ-ია.
3. როგორ შეიცვლება იდეალური აირის წნევა ჭურჭელში, თუ მისგან აირის ნახევარს ამოვტუმბავთ? მიიჩნიეთ, რომ ნაწილაკების საშუალო კვადრატული სიჩქარე უცვლელია.

4. ჭურჭელში მოთავსებული აირის წნევა ნორმალური ატმოსფერული წნევის ტოლია. რამდენით შეიცვლება წნევა ჭურჭელში, თუ ნაწილაკების კონცენტრაცია და საშუალო კვადრატული სიჩქარე განახევრდება?
5. დგუშიან ცილინდრულ ჭურჭელში მოთავსებული აირის გაცხელების გამო მისი ნაწილაკების საშუალო კვადრატული სიჩქარე 2-ჯერ გაიზარდა. როგორ უნდა შეიცვალოს აირის მოცულობა, რომ მისი წნევა უცვლელი დარჩეს?
6. დგუშიან ცილინდრულ ჭურჭელში მოთავსებული იდეალური აირის წნევა 1,5 კპა-ია. დგუშის გადაადგილებით აირის მოცულობა 200 სმ³-ით გაიზარდა. რა მოცულობა ჰქონდა აირს თავდაპირველად, თუ მისი წნევა 0,5 კპ-მდე შემცირდა. მიიჩნიეთ, რომ ნაწილაკების საშუალო კვადრატული სიჩქარე უცვლელია.
7. განსაზღვრეთ იდეალური აირის ნაწილაკების კონცენტრაცია, თუ წნევის 5 კპა-ით გაზრდა ნაწილაკების საშუალო კინეტიკურ ენერგიას $1,25 \cdot 10^{-7}$ ჯ-ით ზრდას იწვევს.
8. 300 სმ³ მოცულობის ქილაში აირის $1,2 \cdot 10^8$ მოლეკულაა. გამოთვალეთ მოლეკულების საშუალო კინეტიკური ენერგია, თუ ჭურჭელში აირის წნევა 10 კპ-ის ტოლია.
9. ბუშტი ჰელიუმისა და ჟანგბადის ნარევითაა გაბერილი. იპოვეთ ჰელიუმის პარციალური წნევა, თუ ბუშტში წნევა ნორმალური ატმოსფერული წნევის ტოლია, ხოლო ჟანგბადის პარციალური წნევა ჰელიუმისას 3-ჯერ აღემატება.
10. ორი ჭურჭელი ერთმანეთთან წვრილი მილითაა შეერთებული, რომელიც თავდაპირველად ონკანითაა ჩაკეტილი. ერთი ჭურჭლის მოცულობა და მასში მოთავსებული აირის წნევა, შესაბამისად 3 ლ და 12 კპა-ია. მეორე ჭურჭლის მოცულობა და მასში მოთავსებული აირის წნევა კი – 1 ლ და 28 კპა. გამოთვალეთ წნევა ჭურჭლებში ონკანის გახსნის შემდეგ. მიიჩნიეთ, რომ ნაწილაკების საშუალო კვადრატული სიჩქარე უცვლელია.

§ 1.6 ტემპერატურა და მისი გაზომვა

დილით, სკოლაში წასვლამდე, ბევრი თქვენგანი ეცნობა ამინდის პროგნოზს და ნავარაუდები ტემპერატურის მიხედვით ირჩევს ტანსაცმელს. იბადება კითხვა: რას ახასიათებს ტემპერატურა?

შეხებით ადვილად ვანსხვავებთ ერთმანეთისაგან ცივ და ცხელ სხეულებს. მაგალითად, სხვადასხვა ჭურჭელში ჩასხმულ თბილ და ცივ წყალში ხელის ჩაყოფით ვიგებთ, რომელი მათგანის ტემპერატურაა უფრო მაღალი. ამრიგად, ტემპერატურა სხეულის „გაცხელების“ ხარისხის მახასიათებელია.



მე-8 კლასის ფიზიკის კურსიდან იცით, რომ ტემპერატურას თერმომეტრით ზომავენ. ყველა თერმომეტრის მოქმედება ტემპერატურის შეცვლისას სხეულის



ანდრეს ცელსიუსი
(1701-1744)

თვისებების ცვლილებაზეა დაფუძნებული. 1742 წელს შვედმა ასტრონომმა და ფიზიკოსმა ა. ცელსიუსმა გამოთქვა მოსაზრება, რომ ტემპერატურის გასაზომად გამოეყენებინათ სხეულების სითბური გაფართოების თვისება. მან შექმნა ხელსაწყო – თერმომეტრი, რომელიც შედგებოდა სითხით (სპირტი ან ვერცხლისწყალი) გავსებული პატარა კოლბა-რეზერვუარისა და მასთან მიერთებული წვრილი მილისაგან. მის გასწვრივ აღნიშნული იყო ტემპერატურის სკალა. ცელსიუსმა სკალაზე „0“ იქ მონიშნა, სადაც დადგა სითხე მილში ყინულის დნობის ტემპერატურაზე, „100“ კი – წყლის დუღილის ტემპერატურაზე ნორმალური ატმოსფერული წნევის დროს. მიღებული მონაკვეთი მან 100 ტოლ ნაწილად დაყო და მიიღო თერმომეტრის სკალა. ამ სკალით მიღებულ ერთეულს ა. ცელსიუსის

პატივსაცემად დაერქვა 1°C (1 გრადუსი ცელსიუსის სკალით) (სურ. 1.11). 0°C -ზე მეტი ტემპერატურა დადებითია, მასზე ნაკლები კი – უარყოფითი.

სითხიანი თერმომეტრით სხეულის ტემპერატურის გაზომვისას აუცილებელია მისი კოლბა-რეზერვუარისა და სხეულის მჭიდრო კონტაქტი. ამასთან, ტემპერატურის ანათვალა უნდა ავიღოთ გაზომვის დაწყებიდან გარკვეული დროის შემდეგ, რათა თერმომეტრსა და სხეულს შორის დამყარდეს სითბური წონასწორობა, რომლის დროსაც მათი ტემპერატურები ერთმანეთს გაუტოლდება.

დროის განმავლობაში სითბური წონასწორობა მყარდება განსხვავებული ტემპერატურის მქონე, შეხებაში მყოფ ნებისმიერ სხეულებს შორის. თუ ყინულის ნაჭერს ჭიქაში ჩავდებთ და ოთახში შემოვიტანთ, ის ჯერ გათბება, შემდეგ დნობას დაიწყებს და დროთა განმავლობაში მიღებული წლის ტემპერატურა ოთახის ტემპერატურას გაუთანაბრდება. ამის შემდეგ ჭიქაში არაფერი შეიცვლება.

უცვლელი გარეშე პირობების დროს ნებისმიერი მაკროსკოპული სხეული ან ასეთ სხეულთა სისტემა თავისთავად გადადის სითბური წონასწორობის მდგომარეობაში.

სხეულთა ისეთ მდგომარეობას, როდესაც მათი ყველა მაკროსკოპული პარამეტრი განუსაზღვრელად დიდხანს რჩება უცვლელი, სითბური წონასწორობა ეწოდება. ამ მდგომარეობაში მყოფ სისტემაში არც მოცულობა, არც წნევა და არც ტემპერატურა არ იცვლება, არ მიმდინარეობს სითბოცვლა, აირების, სითხეებისა და მყარი სხეულების ურთიერთგარდაქმნა. აღსანიშნავია, რომ სითბური წონასწორობისას სხეულში მიმდინარე მიკროპროცესები არ წყდება – იცვლება მოლეკულების სიჩქარეები დაჯახებისას და მათი ურთიერთგანლაგება. სითბური წონასწორობისას სისტემაში შემავალი მაკროსკოპული სხეულების ტემპერატურა



სურ. 1.11

ყოველთვის ერთნაირია, თუმცა მათი სხვა პარამეტრები შეიძლება განსხვავებული იყოს. მაგალითად, დახურულ ავტოფერეხში მდგომი მანქანის საბურავსა და შენობაში არსებულ ჰაერს ერთნაირი ტემპერატურა აქვს, მაგრამ საბურავში ჰაერის წნევა უფრო მეტია, ვიდრე ავტოფარეხში.

ტემპერატურა ახასიათებს სისტემაში შემავალ სხეულთა სითბური წონასწორობის მდგომარეობას – სითბურ წონასწორობაში მყოფ სხეულებს ერთნაირი ტემპერატურა აქვს.

ერთნაირი ტემპერატურის სხეულებს შორის სითბოცვლა არ მიმდინარეობს. თუ სხეულების ტემპერატურა განსხვავებულია, მაშინ მათ შორის სითბური კონტაქტის დამყარების შემდეგ, ენერგია მაღალი ტემპერატურის მქონე სხეულიდან დაბალი ტემპერატურის მქონე სხეულს გადაეცემა, ვიდრე მათი ტემპერატურები არ გათანაბრდება.

გათბობისას სხვადასხვა სითხე განსხვავებულად ფართოვდება, ამიტომ სითხიანი თერმომეტრის სკალა სითხის თვისებებზე იქნება დამოკიდებული. მაგალითად, ვერცხლისწყლიანი თერმომეტრისა და სპირტიანი თერმომეტრის გრაფუსი სკალაზე ერთმანეთისაგან განსხვავდება. როგორ შეიძლება ამის თავიდან არიდება?

დადგენილ იქნა, რომ გაიშვიათებული აირები (წყალბადი, ჰელიუმი, ჟანგბადი) გათბობისას ერთნაირად ფართოვდება და ტემპერატურის ცვლილებისას ერთნაირად ეცვლებათ წნევა. სწორედ ამიტომ, ტემპერატურული სკალის შესაქმნელად გამოიყენება გარკვეული რაოდენობის გაიშვიათებული აირის წნევის ცვლილება მუდმივი მოცულობის პირობებში, ან აირის მოცულობის ცვლილება მუდმივი წნევისას.

ავილოთ თბოგამტარი ტიხრით შუაზე გაყოფილი ჭურჭელი. ერთ ნახევარში მოვათავსოთ წყალბადი, მეორე ნახევარში – განსხვავებული ტემპერატურის მქონე ჟანგბადი. გარკვეული დროის შემდეგ წყალბადსა და ჟანგბადს შორის სითბური წონასწორობა დამყარდება – მათი ტემპერატურები გათანაბრდება. კიდევ რომელი ფიზიკური სიდიდე ექნებათ ამ აირებს ერთნაირი?

წინა წლების ფიზიკის კურსიდან იცით, რომ რაც მეტია სხეულის მოლეკულების საშუალო სიჩქარე, მით მაღალია ამ სხეულის ტემპერატურა. ამასთან, დახშულ ჭურჭელში აირის გათბობისას, მისი წნევა მატულობს. მოლეკულურ-კინეტიკური თეორიის ძირითადი განტოლების თანახმად, აირის წნევა მოლეკულების მოძრაობის საშუალო კინეტიკური ენერგიის პირდაპირპროპორციულია. თუ მოცემული მასის აირის წნევა და მოცულობა არ იცვლება, სითბური წონასწორობის პირობებში აირის მოლეკულების საშუალო კინეტიკურ ენერგიას, ისევე როგორც ტემპერატურას, მკაცრად განსაზღვრული მნიშვნელობა უნდა ჰქონდეს.

გამოვსახოთ აირის მოლეკულების საშუალო კინეტიკური ენერგია მაკროპარამეტრებით. თუ გავითვალისწინებთ, რომ მოლეკულების კონცენტრაცია $n = \frac{N}{V}$ ფორმულით გამოითვლება, მოლეკულურ-კინეტიკური თეორიის ძირითადი განტოლება შემდეგ სახეს მიიღებს:

$$p = \frac{2}{3} n \bar{E},$$

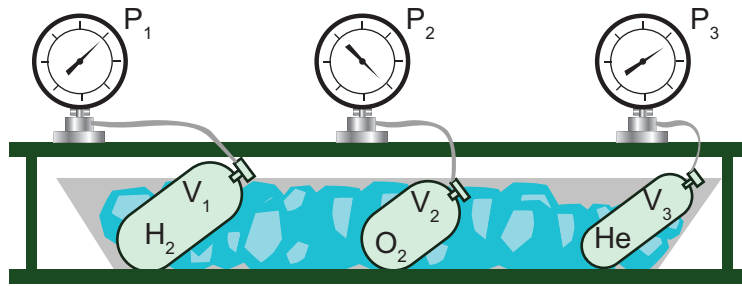
ანუ

$$p \frac{V}{N} = \frac{2}{3} \bar{E}. \quad (1)$$

ამ ფორმულაში შემავალი სიდიდეებიდან, აირის წნევა და მოცულობა შეიძლება უშუალოდ გაიზომოს, ხოლო მოცემული მასის აირის მოლეკულათა რაოდენობა გამოვთვალოთ ფორმულით:

$$N = \frac{m}{M} N_A. \quad (2)$$

თუ სითბური წონასწორობისას აირების საშუალო კინეტიკური ენერგია ერთნაირია, მაშინ მათი წნევებიც ტოლია. ამის დასაბუთება შეიძლება ცდით.



სურ. 1.12

ავილოთ რამდენიმე ჭურჭელი, რომლებშიც სხვადასხვა აირია, მაგალითად წყალბადი, ჰელიუმი და ჟანგბადი. ჭურჭლებს აქვს გარკვეული მოცულობა და აირის წნევის გასაზომად მათზე მიერთებულია მანომეტრები. ცნობილია ამ აირების მასები და უკანასკნელი ფორმულის გამოყენებით შეგვიძლია გამოვთვალოთ მოლეკულების რაოდენობა თითოეულ ჭურჭელში.

სითბური წონასწორობის დასამყარებლად ჭურჭლები დნობის ტემპერატურის მქონე ყინულში მოვათავსოთ და დაველოდოთ, სანამ აირების წნევები შეწყვეტს ცვლილებას (სურ. 1.12). ამ დროს თითოეული აირის ტემპერატურა 0°C იქნება. აირების წნევები, მოცულობები და მოლეკულების რაოდენობები ერთმანეთისაგან განსხვავდება.

დადგენილია, რომ 1 მ^3 მოცულობის მქონე 1 მოლი წყალბადის წნევა 0°C ტემპერატურისას, $2,265 \cdot 10^4$ პა-ის ტოლია. შესაბამისად, $\frac{pV}{N}$ სიდიდე წყალბადისათვის ტოლი იქნება:

$$\frac{p_{\text{H}_2} V_{\text{H}_2}}{N_{\text{A}}} = \frac{2,265 \cdot 10^4 \text{ პა} \cdot 1 \text{ მ}^3}{6,02 \cdot 10^{23}} = 3,76 \cdot 10^{-21} \text{ ჯ.}$$

ასეთივე შედეგები მიიღება დანარჩენი აირებისთვისაც. თუ ამ თანაფარდობას Θ_0 -ით აღვნიშნავთ, მაშინ

$$\frac{p_{\text{H}_2} V_{\text{H}_2}}{N_{\text{H}_2}} = \frac{p_{\text{He}} V_{\text{He}}}{N_{\text{He}}} = \frac{p_{\text{O}_2} V_{\text{O}_2}}{N_{\text{O}_2}} = \Theta_0. \quad (3)$$

აღსანიშნავია, რომ ეს თანაფარდობა სრულდება აირებისთვის, რომლებიც შეიძლება მივიჩნიოთ იდეალურად.

თუ ჭურჭლებს მდულარე წყალში მოვათავსებთ, აღნიშნული თანაფარდობა ყველა აირისათვის კვლავ ერთნაირი იქნება, თუმცა მისი მნიშვნელობა იქნება უფრო მეტი, ვიდრე წინა შემთხვევაში. ცდებით დადგენილია, რომ $\Theta_{100} = 5,14 \cdot 10^{-21}$ ჯ.

აქედან შეიძლება დავასკვნათ, რომ აირის ტემპერატურის ზრდისას Θ სიდიდეც იზრდება და გარდა ტემპერატურისა ის სხვა მაკროპარამეტრებზე დამოკიდებული არ არის. ამის გამო Θ სიდიდე ტემპერატურის ბუნებრივ საზომად შეგვიძლო მიგვეჩნია, მაგრამ ამ შემთხვევაში ის ჯოულებში გაიზომებოდა, რაც არ იქნებოდა პრაქტიკული: მაგალითად 100°C ტემპერატურას 10^{-21} ჯოული თანრიგის სიდიდე შეესაბამება. ამასთან, ტრადიციულად, ტემპერატურას გრადუსებით ზომავენ.

Θ სიდიდე გრადუსებით გაზომილი ტემპერატურის პროპორციულად მივიჩნიოთ. აღვნიშნოთ ტემპერატურა T -თი, მაშინ

$$\Theta = kT, \quad (4)$$

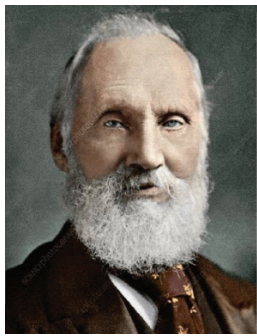
რომელშიც k პროპორციულობის კოეფიციენტია. თუ Θ სიდიდის განმარტებას გავითვალისწინებთ, მივიღებთ:

$$\frac{pV}{N} = kT. \quad (5)$$

ამ ფორმულით განსაზღვრულ ტემპერატურას **აბსოლუტური ტემპერატურა** ეწოდება. ის არ შეიძლება უარყოფითი იყოს, რადგან (5) ფორმულის მარცხენა მხარეს ყველა სიდიდე არაუარყოფითია. აქედან გამომდინარე, აბსოლუტური ტემპერატურის უმცირესი მნიშვნელობაა $T = 0$, როდესაც აირის წნევა, ან მოცულობა ნულის ტოლია.

ტემპერატურას, რომლის დროსაც იდეალური აირის წნევა ფიქსირებული მოცულობის დროს ნულს უტოლდება, ან მისი მოცულობა მუდმივი წნევისას ნულისაკენ მიისწრაფვის, ტემპერატურის აბსოლუტური ნული ეწოდება.

1848 წელს ინგლისელმა ფიზიკოსმა უილიამ ტომსონმა (ლორდი კელვინი) შემოიტანა **ტემპერატურის აბსოლუტური სკალა**, რომელსაც **თერმოდინამიკურ სკალასაც** უწოდებენ. ამ სკალის აგებისას ის თერმოდინამიკური კანონებით



უილიამ ტომსონი
(ლორდი კელვინი)
(1824-1907)

ხელმძღვანელობდა. აბსოლუტური სკალით ტემპერატურის ნულოვანი მნიშვნელობა შეესაბამება აბსოლუტურ ნულს. SI-ში აბსოლუტური ტემპერატურის ერთეულია **1 კელვინი (1 K)**, რომელიც ცელსიუსის სკალის ერთი გრადუსის ტოლია. აქედან გამომდინარეობს, რომ ტემპერატურის ცვლილება ათვლილი კელვინისა და ცელსიუსის სკალებზე ერთმანეთის ტოლია: $\Delta T = \Delta t$.

განვსაზღვროთ k კოეფიციენტის მნიშვნელობა იმ პირობიდან, რომ $1 \text{ K} = 1^\circ\text{C}$.

0°C -ის შესაბამისი აბსოლუტური ტემპერატურა T_1 -ით აღვნიშნოთ, 100°C -ის კი – T_2 -ით. (4) ფორმულის, აგრეთვე Θ_{100} -ის და Θ_0 -ის მნიშვნელობების გათვალისწინებით, მივიღებთ: $\Theta_{100} - \Theta_0 = k(T_2 - T_1)$.

მეორეს მხრივ, $k(T_2 - T_1) = k \cdot 100\text{K}$ და $\Theta_{100} - \Theta_0 = 5,14 \cdot 10^{-21} \text{ ჯ} - 3,76 \cdot 10^{-21} \text{ ჯ}$, ამიტომ

$$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ ჯ/K.}$$

k კოეფიციენტს **ბოლცმანის მუდმივას** უწოდებენ, აირების მოლეკულურ-კინეტიკური თეორიის ერთ-ერთი ფუძემდებლის, ავსტრიელი ფიზიკოსის ლუდვიგ ბოლცმანის პატივსაცემად.



ლუდვიგ ბოლცმანი
(1844-1906)

ბოლცმანის მუდმივა ენერგეტიკული ერთეულებით გამოსახულ ტემპერატურას კელვინებით გამოსახულ ტემპერატურასთან აკავშირებს.

ბოლცმანის მუდმივას გამოყენებით დავადგინოთ ტემპერატურის რა მნიშვნელობა შეესაბამება აბსოლუტურ ნულს ცელსიუსის სკალაზე.

0°C -ის დროს $kT_1 = 3,76 \cdot 10^{-21} \text{ ჯ}$, ამიტომ

$$T_1 = \frac{3,76 \cdot 10^{-21} \text{ ჯ}}{1,38 \cdot 10^{-23} \text{ ჯ/K}} \approx 273,15 \text{ K.}$$

ვინაიდან 0°C -ს შეესაბამება $273,15 \text{ K}$, ამიტომ **აბსოლუტურ ნულს ცელსიუსის სკალაზე შეესაბამება $-273,15 \text{ K}$** . კავშირი კელვინისა და ცელსიუსის სკალებზე ათვლილ ერთსა და იმავე ტემპერატურებს შორის იქნება:

$$T = t + 273. \quad (6)$$

სურ. 1.13-ზე ეს კავშირია გამოსახული.

აბსოლუტური ნული ტემპერატურის ქვედა ზღვარია. ექსპერიმენტულად მისი მიღწევა შეუძლებელია – რაც უფრო უახლოვდება სხეულის ტემპერატურა აბსოლუტურ ნულს, მით უფრო ძნელდება მისი შემდგომი გაცივება. ამჟამად, საკმაოდ რთული მეთოდებით მიღწეულია 0,0001 K ტემპერატურა.

თუ (1) და (5) ტოლობების მარჯვენა მხარეებს ერთმანეთს გავუტოლებთ, მივიღებთ:

$$\bar{E} = \frac{3}{2}kT. \quad (7)$$

ამრიგად, აირის მოლეკულების ქაოსური მოძრაობის საშუალო კინეტიკური ენერგია აბსოლუტური ტემპერატურის პროპორციულია.

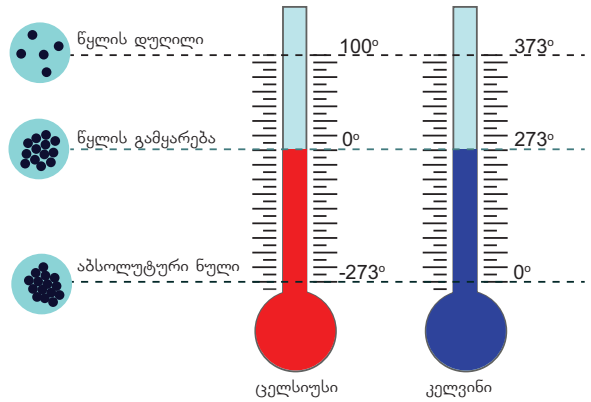
ეს დებულება იდეალური აირებისთვის მივიღეთ, მაგრამ ის მართებულია ნებისმიერი აირისათვის, რომლის ატომების ან მოლეკულების მოძრაობა ნიუტონის კანონებს ექვემდებარება. ის მართებულია აგრეთვე სითხეებისა და მყარი სხეულებისთვისაც, რომელთა ატომები კრისტალური მესრის კვანძებში, წონასწორობის მდებარეობის მახლობლად ირხევიან.

(7) ფორმულის თანახმად, ტემპერატურის აბსოლუტურ ნულთან მიახლოებისას მოლეკულების სითბური მოძრაობის ენერგიაც ნულს უახლოვდება.

თუ (5)-ში გავითვალისწინებთ, რომ $\frac{N}{V} = n$, მივიღებთ:

$$p = nkT. \quad (8)$$

ამ ფორმულიდან გამომდინარეობს, რომ ერთნაირი წნევისა და ტემპერატურის პირობებში ყველა აირის მოლეკულების კონცენტრაცია ერთნაირია, ანუ ერთნაირი ტემპერატურისა და წნევის პირობებში ყველა აირის ტოლ მოცულობებში მოლეკულების ერთნაირი რაოდენობაა. ამ კანონს ავოგადროს კანონს უწოდებენ.



სურ. 1.13

დასკვნები:

- სხეულთა ისეთ მდგომარეობას, როდესაც მათი ყველა მაკროსკოპული პარამეტრი განუსაზღვრელად დიდხანს რჩება უცვლელი, სითბური წონასწორობა ეწოდება;
- ტემპერატურა ახასიათებს სისტემაში შემავალ სხეულთა სითბური წონასწორობის მდგომარეობას – სითბურ წონასწორობაში მყოფ სხეულებს ერთნაირი ტემპერატურა აქვს;
- ტემპერატურას, რომლის დროსაც იდეალური აირის წნევა ფიქსირებული მოცულობის დროს ნულს უტოლდება, ან მისი მოცულობა მუდმივი წნევისას ნულისაკენ მიისწრაფვის, ტემპერატურის აბსოლუტური ნული ეწოდება;
- ბოლცმანის მუდმივა ენერგეტიკული ერთეულებით გამოსახულ ტემპერატურას კელვინებით გამოსახულ ტემპერატურასთან აკავშირებს:

$$\Theta = kT, \quad k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ ჯ/|K};$$

- კავშირი კელვინისა და ცელსიუსის სკალებზე ათვლილ ერთსა და იმავე ტემპერატურებს შორის გამოისახება ფორმულით: $T = t + 273$;
- აირის მოლეკულების ქაოსური მოძრაობის საშუალო კინეტიკური ენერგია აბსოლუტური ტემპერატურის პროპორციულია: $\bar{E} = \frac{3}{2}kT$;
- იდეალური აირის წნევა აბსოლუტური ტემპერატურისა და აირის მოლეკულების კონცენტრაციის პროპორციულია: $p = nkT$;
- ავოგადროს კანონი: ერთნაირი ტემპერატურისა და წნევის პირობებში ყველა აირის ტოლ მოცულობებში მოლეკულების ერთნაირი რაოდენობაა.

საკონტროლო კითხვები:

1. რა შემთხვევაში მიმდინარეობს სითბოცვლა ორ სხეულს შორის?
2. რამდენი გრადუსია ცელსიუსის სკალაზე აბსოლუტური ნული?
3. რატომ აქვს ცელსიუსის და კელვინის სკალაზე ტემპერატურის ცვლილებას ერთნაირი მნიშვნელობა?
4. კელვინის სკალით, ჩვეულებრივ რა ტემპერატურაზე დულს წყალი?



ერთად ამოვხსნათ ამოცანა

2,5 ლ მოცულობის დახშულ ჭურჭელში 22°C ტემპერატურის 16 გ ჰელიუმისა და 48 გ ჟანგბადის ნარევი. ჭურჭელი მოათავსეს მაცივარში, რომელშიც ტემპერატურა -13°C -ია და დიდხანს გააჩერეს. რამდენით შეიცვლება წნევა ჭურჭელში?

მოცემულია: $V_1=2,5 \cdot 10^{-3} \text{ მ}^3$; $T_1=295 \text{ K}$; $T_2=260 \text{ K}$; $m_1=16 \text{ გ}$; $m_2=48 \text{ გ}$. $\Delta p=?$

ამოხსნა: ჭურჭელში წნევა მასში მოთავსებული აირების პარციალური წნევების ჯამის ტოლია. იმისათვის, რომ გამოვთვალოთ წნევის ცვლილება ჭურჭელში, განვსაზღვროთ თითოეულ ტემპერატურაზე აირების წარმოებული წნევა და შემდეგ ვიპოვოთ მათი სხვაობა. წნევის საპოვნელად გამოვიყენოთ ფორმულა: $p=nkT$, მაგრამ ჯერ დავადგინოთ აირებში ნაწილაკების კონცენტრაცია: $N = \frac{m}{M} N_A$, $n = \frac{N}{V}$. ჰელიუმის მოლე-

რი მასა $M_1=4 \text{ გ/მოლი}$, ხოლო ჟანგბადის – $M_2=32 \text{ გ/მოლი}$. $p_1=n_1kT_1+n_2kT_1=kT_1(n_1+n_2)$,

რომელშიც $n_1 = \frac{m_1 N_A}{M_1 V}$, $n_2 = \frac{m_2 N_A}{M_2 V}$. შესაბამისად, T_2 ტემპერატურაზე გვექნება:

$p_2 = n_1kT_2 + n_2kT_2 = kT_2(n_1 + n_2)$; $\Delta p = p_2 - p_1$ გამოსახულებაში რიცხვითი მნიშვნელობების

ჩასმით მივიღებთ: $\Delta p = (29,7 - 33,7) \text{ პა}$. $\Delta p = -4 \text{ პა}$.

პასუხი: წნევა ჭურჭელში შემცირდა 4 პა-ით.



ამოხსენით ამოცანები:

1. რისი ტოლია ნორმალურ პირობებში წყლის დუღილის ტემპერატურა კელვინის სკალის მიხედვით?
2. კელვინის სკალის მიხედვით აირის ტემპერატურა ორჯერ გაზარდეს. გამოთვალეთ გათბობის შემდეგ აირის ტემპერატურა ცელსიუსებში, თუ მისი ტემპერატურა გათბობამდე -173°C იყო.
3. განსაზღვრეთ აირის მოლეკულების საშუალო კინეტიკური ენერგია 0°C -ზე.
4. რამდენჯერ გაიზარდება სხეულის შემადგენელი ნაწილაკების საშუალო კინეტიკური ენერგია, თუ სხეულის ტემპერატურას 27°C -დან 423°C -მდე გავზრდით?
5. დახშულ ჭურჭელში მოთავსებული აირის წნევა ნორმალური ატმოსფერული წნევის ტოლია. რამდენით შეიცვლება წნევა ჭურჭელში, თუ აირის აბსოლუტურ ტემპერატურას 3-ჯერ შევამცირებთ?
6. დახშულ ჭურჭელში მოთავსებული აირის წნევა $2 \cdot 10^5$ პა-ია. ტუმბოს მეშვეობით ჭურჭელში ნაწილაკების რაოდენობა 4-ჯერ გაზარდეს. იპოვეთ წნევა ჭურჭელში აირის ჩატუმბვის შემდეგ. მიიჩნიეთ, რომ ჩატუმბვისას აირის ტემპერატურა უცვლელი იყო.
7. დგუშიან ცილინდრულ ჭურჭელში მოთავსებული აირის თავდაპირველი მოცულობა 150 სმ³-ია. დგუშის გადაადგილებით აირი 30 სმ³-მდე შეკუმშეს. განსაზღვრეთ აირის სანყის ტემპერატურა, თუ შეკუმშვის შემდეგ მისი წნევა 10 -ჯერ გაიზარდა, ტემპერატურა კი 600 K-ია.
8. რა ტემპერატურამდე უნდა გავათბოთ დგუშიან ცილინდრულ ჭურჭელში ნორმალურ პირობებში მყოფი აირი, რომ მისი მოცულობის 2-ჯერ გაზრდისას აირის წნევა $1,5$ ატმ ტოლი გახდეს?
9. 10 ლ მოცულობის თავდახურულ რეზერვუარში 2 გ ჟანგბადისა და 3 გ ჰელიუმის ნარეგია. განსაზღვრეთ წნევა რეზერვუარში, თუ ნარევის ტემპერატურა 27°C -ია.
10. დახშულ ჭურჭელში მოთავსებული ორატომიანი აირის ტემპერატურა 27°C -ია, ხოლო წნევა 10 კპა. აირის ტემპერატურის 1500 K-მდე გაზრდისას ის მთლიანად დაიშალა ატომებად. იპოვეთ აირის საბოლოო წნევა ჭურჭელში.

§1.7 აირის მოლეკულების სიჩქარე. შტერნის ცდა

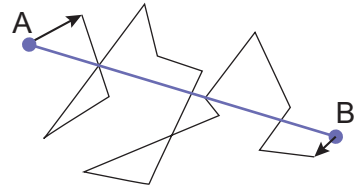
აირებში მიმდინარე პროცესების აღწერისათვის მნიშვნელოვანია ვიცოდეთ მისი მოლეკულების ქაოსური მოძრაობის საშუალო სიჩქარე. თუ მოლეკულების ქაოსური მოძრაობის საშუალო კინეტიკური ენერჯიის გამოსათვლელ $\bar{E} = \frac{3}{2}kT$ ფორმულაში შევიტანთ $\bar{E} = \frac{m_0\bar{v}^2}{2}$ გამოსახულებას, საშუალო კვადრატული სიჩქარისათვის მივიღებთ:

$$\bar{v}^2 = \frac{3kT}{m_0}, \quad (1)$$

საიდანაც

$$\bar{v} = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}}. \quad (2)$$

ამ ფორმულით შესაძლებელია გამოვთვალოთ მოცემული აირის მოლეკულების საშუალო სიჩქარე გარკვეულ ტემპერატურაზე. მაგალითად, $T = 273 \text{ K}$ ტემპერატურაზე წყალბადის მოლეკულებისათვის $\bar{v} \approx 1800 \frac{\text{მ}}{\text{წმ}}$ -ს. ასეთივე თანრიგისაა სხვა აირების მოლეკულების საშუალო სიჩქარეც. ეს საკმაოდ დიდი სიჩქარეა და ის ბევრად აღემატება აირებში დიფუზიის სიჩქარეს (მაგალითად, ოთახში სუნამოს სუნის გავრცელების სიჩქარეს). ამ ფაქტის ახსნა ადვილია, თუ გავითვალისწინებთ, რომ მრავალრიცხოვანი დაჯახებების გამო, აირის ყოველი მოლეკულის ტრაექტორია ტეხილს წარმოადგენს (სურ. 1.14). დიდი სიჩქარით მოლეკულა მოძრაობს მხოლოდ ტეხილის სწორხაზოვან მონაკვეთებზე (დაჯახებიდან დაჯახებამდე), ხოლო რაიმე მიმართულებით მოლეკულის გადაადგილება რამდენიმე წუთის განმავლობაშიც კი მცირეა. მოლეკულის მოძრაობისას A წერტილიდან B წერტილში გავლილი მანძილი ბევრად აღემატება მისი გადაადგილების მოდულს.



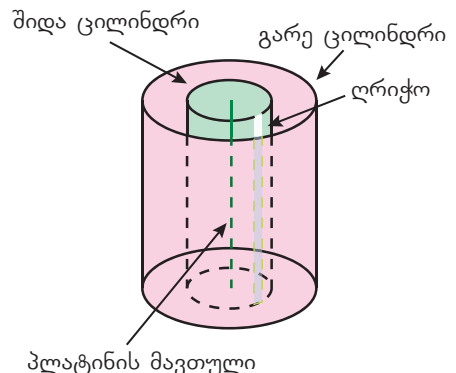
სურ. 1.14

(2) ფორმულის სისწორე მოლეკულის სიჩქარის ექსპერიმენტული გაზომვებით დაადასტურეს. ერთ-ერთი ასეთი ცდა 1920 წელს გერმანელმა მეცნიერმა ოტო შტერნმა ჩაატარა.



ოტო შტერნი
(1888-1969)

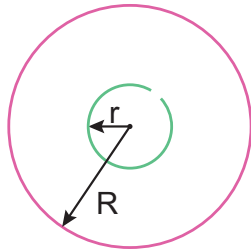
შტერნის დანადგარი შედგებოდა ერთმანეთთან მყარად დამაგრებული ორი კოაქსიალური ცილინდრისაგან (სურ. 1.15). შიდა ცილინდრში ღერძის გასწვრივ გაჭიმული იყო ვერცხლის ფენით დაფარული წვრილი პლატინის მავთული. მასში დენის გავლისას მავთული ვერცხლის დნობის ტემპერატურამდე ცხელდებოდა ($T_{\text{დ}} = 1234 \text{ K}$) და ვერცხლი იწყებდა აორთქლებას. ცილინდრებს შეეძლოთ ბრუნვა ღერძის გარშემო მუდმივი კუთხური სიჩქარით. შიდა ცილინდრის ზედაპირზე



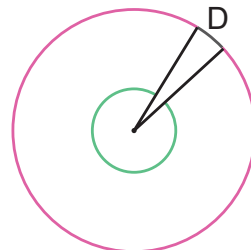
სურ. 1.15

მავთულის გასწვრივ ამოჭრილი იყო ვიწრო ზოლი (ლრიჭო). ცილინდრების შიგნით შექმნილი იყო ვაკუუმი. გარე ცილინდრს უნარჩუნებდნენ ოთახის ტემპერატურას.

ვთქვათ, შიდა და გარე ცილინდრების რადიუსებია, შესაბამისად r და R (სურ. 1.16 ა). თავიდან ცილინდრები უძრავია. პლატინის მავთულიდან აორთქლებული ვერცხლის ატომები ავსებენ შიდა ცილინდრს. ზოგიერთი ატომი გაივლის ღრიჭოს და გარე ცილინდრის შიდა ზედაპირზე მილნევისას მასზე დაილექება. შედეგად, ღრიჭოს გასწვრივ წარმოიქმნება ვერცხლის ვიწრო D ზოლი (სურ. 1.16 ბ).

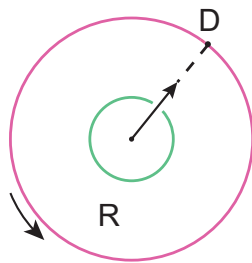


სურ. 1.16 ა

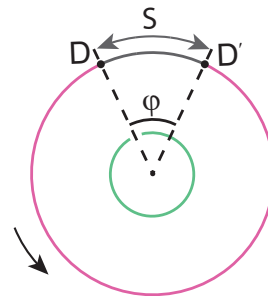


სურ. 1.16 ბ

შემდეგ ცილინდრები მოყავთ ბრუნვით მოძრაობაში დიდი $n \approx 1500$ ჰც სიხშირით. t დროში, რომელშიც ვერცხლის ატომი $R - r$ მანძილს გაივლის, ცილინდრები რაღაც φ კუთხით შემობრუნდებიან. ამის გამო, მუდმივი სიჩქარით მოძრავი ვერცხლის ატომები დიდი ცილინდრის ზედაპირზე ღრიჭოს გასწვრივ D ზოლში ველარ დაილექებიან (სურ. 1.16 გ). ისინი დაილექებიან ღრიჭოს შუანერტილზე გამავალი რადიუსის ბოლოდან გარკვეულ s მანძილზე დაშორებულ D' ზოლში (სურ. 1.16 დ).



სურ. 1.16 გ



სურ. 1.16 დ

აღვნიშნოთ $v_{\text{ც}}$ -თი გარე ცილინდრის ბრუნვის წირითი სიჩქარე, მაშინ

$$s = v_{\text{ც}} t = 2\pi n R t . \quad (3)$$

სინამდვილეში ვერცხლის ყველა ატომს ერთნაირი სიჩქარე არ აქვს, რის გამოც s მანძილი მათთვის განსხვავებული იქნება. s მანძილში უნდა ვიგულისხმოთ მანძილი D და D' ზოლებზე ვერცხლის მაქსიმალური კონცენტრაციის უბნებს შორის.

ვინაიდან იმავე t დროში ვერცხლის ატომები $R - r$ მანძილს გადის, მათი საშუალო სიჩქარე ტოლია:

$$\bar{v} = \frac{R - r}{t} . \quad (4)$$

თუ ფორმულა (3)-დან t დროს გამოვსახავთ და (4)-ში ჩავსვამთ, მივიღებთ:

$$\bar{v} = \frac{2\pi n(R-r)}{s} R. \quad (5)$$

მიღებული ფორმულიდან შესაძლებელია ვერცხლის ატომების საშუალო სიჩქარის პოვნა. შტერნის ექსპერიმენტში გაზომილი ვერცხლის ატომების სიჩქარე 584 მ/წმ-ის ტოლი აღმოჩნდა, რაც თეორიულად გამოთვლილ სიჩქარის საშუალო მნიშვნელობებს დაემთხვა. ეს ფაქტი ფორმულა (2)-ის მართებულობის ექსპერიმენტული დასაბუთებაა.

დასკვნები:

- აირის მოლეკულების ქაოსური მოძრაობის საშუალო სიჩქარე გამოითვლება ფორმულით: $\bar{v} = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}}$;
- აირის მოლეკულების ქაოსური მოძრაობის საშუალო სიჩქარე ოთახის ტემპერატურაზე რამდენიმე ასეული მეტრია წამში.

საკონტროლო კითხვები:

1. რატომაა დიფუზიის სიჩქარე ბევრად მცირე აირის მოლეკულების საშუალო სიჩქარეზე?
2. რატომ არ მიიღება შტერნის ცდაში ცილინდრების ბრუნვისას ვერცხლის ზოლი ღრიჭოს პირდაპირ?
3. რატომაა აუცილებელი შტერნის ცდაში ცილინდრების შიგნით ვაკუუმის არსებობა?
4. რასიდიდეების გაზომვასა და სიჩქარის ექსპერიმენტით აირის მოლეკულების საშუალო სიჩქარის გამოსათვლელად?



ერთად ამოვხსნათ ამოცანა

5 მოლი ერთატომიანი აირის მასა 100 გ-ია. დაადგინეთ ნივთიერების გვარობა და გამოთვალეთ ამ აირის ნაწილაკების საშუალო სიჩქარე მისი დუღილის ტემპერატურაზე.

მოცემულია: $\nu=5$ მოლი; $m=100$ გ; $k=1,38 \cdot 10^{-23}$ ჯ/კ; $\bar{v}=?$

ამოხსნა: პირველ რიგში დავადგინოთ აირის მოლური მასა, ამისთვის გამოვიყენოთ ნივთიერების რაოდენობის განმსაზღვრელი ფორმულა $\nu = \frac{m}{M}$, საიდანაც $M = \frac{m}{\nu} = 20$ გ/მოლი. რადგან აირი ერთატომიანია, გ/მოლი-ით განსაზღვრული მისი მოლური მასა რიცხობრივად ფარდობით ატომურ მასას ემთხვევა. შესაბამისად, ეს აირი არის ნეონი, რომლის დუღილის ტემპერატურა 27 K-ია. ნეონის ერთი ატომის მასის საპოვნელად მისი მოლური მასა გავყოთ ერთ მოლში ნაწილაკების რაოდენობაზე: $m_0 = \frac{M}{N_A} \approx 3,3 \cdot 10^{-26}$ კგ. თუ დადგენილ მნიშვნელობებს $\bar{v} = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}}$ ფორმულაში შევიტანთ, მივიღებთ $\bar{v} \approx 184$ მ/წმ.

პასუხი: მოცემული ერთატომიანი აირი ნეონია, რომლის ატომების საშუალო სიჩქარე მისი დუღილის ტემპერატურაზე მიახლოებით 184 მ/წმ-ია.



ამოხსენით ამოცანები:

1. როგორ იცვლება აირის მოლეკულების საშუალო სიჩქარე ტემპერატურის მატებისას? პასუხი დაასაბუთეთ.
2. რატომ იზრდება დიფუზიის სიჩქარე აირის ტემპერატურის ზრდისას?
3. როგორ და რამდენჯერ შეიცვლება აირის ნაწილაკების საშუალო სიჩქარე, თუ მის ტემპერატურას 27°C -დან -123°C -მდე შევამცირებთ?
4. გამოთვალეთ წყლის ორთქლის მოლეკულების საშუალო სიჩქარე 27°C -ზე.
5. წყალბადის მოლეკულების საშუალო სიჩქარე 1800 მ/წმ-ია. რისი ტოლი იქნება იმავე ტემპერატურის ჰელიუმის მოლეკულების საშუალო სიჩქარე?
6. შეადარეთ ერთმანეთს ატმოსფეროში ჟანგბადისა და აზოტის მოლეკულების საშუალო სიჩქარე.
7. რამდენ ბრუნს შეასრულებს $0,1$ წმ-ში შტერნის დანადგარის ცილინდრი, თუ მისი ბრუნვის პერიოდი $5 \cdot 10^{-4}$ წმ-ია? რისი ტოლია ამ ცილინდრის ბრუნვის კუთხური სიჩქარე?
8. გამოთვალეთ შტერნის დანადგარის გარე ცილინდრის ბრუნვის წირითი სიჩქარე, თუ მისი ბრუნვის სიხშირე 1500 ჰც-ია, ცილინდრის დიამეტრი კი – 40 სმ.
9. შტერნის დანადგარის შიდა ცილინდრის დიამეტრი 8 სმ-ია, გარე ცილინდრისა კი – 44 სმ. გარე ცილინდრის ბრუნვის სიხშირე 1200 ჰც-ია. რა მანძილით წაინაცვლებს ღრიჭოს მოპირდაპირე ადგილიდან ვერცხლის ლაქა გარე ცილინდრის ზედაპირზე, თუ ვერცხლის ატომების სიჩქარე 1800 მ/წმ-ის ტოლია?
10. შტერნის დანადგარის შიდა ცილინდრის დიამეტრი 5 სმ-ია, გარე ცილინდრისა კი – 20 სმ. გარე ცილინდრის წირითი სიჩქარე 1884 მ/წმ-ია. განსაზღვრეთ ვერცხლის აირის ატომების საშუალო სიჩქარე, თუ ვერცხლის ლაქა გარე ცილინდრის ზედაპირზე ღრიჭოს მოპირდაპირე ადგილიდან 64 მმ-ით არის წაინაცვლებული.

§ 1.8 იდეალური აირის მდგომარეობის განტოლება

მოცემული მასის იდეალური აირის მდგომარეობა შეიძლება დავახასიათოთ მისი p წნევით, V მოცულობით და T ტემპერატურით. ერთი მათგანის ცვლილება დანარჩენი ორი პარამეტრიდან ერთ-ერთის შეცვლას მაინც იწვევს. ჩვენი მიზანია დავადგინოთ კავშირი აირის ამ მაკროპარამეტრებს შორის.

გავიხსენოთ აირის მოლეკულების რაოდენობის გამოსათვლელი ფორმულა:

$$N = \frac{m}{M} N_A, \quad (1)$$

რომელშიც m აირის მასაა, M – მისი მოლური მასა, N_A – ავოგადროს მუდმივა.

(1) ფორმულის გათვალისწინებით აირის მოლეკულების კონცენტრაცია ტოლი იქნება:

$$n = \frac{N}{V} = \frac{1}{V} \frac{m}{M} N_A. \quad (2)$$

თუ კონცენტრაციის ამ გამოსახულებას $p = nkT$ ტოლობაში ჩავსავამთ, მივიღებთ:

$$pV = \frac{m}{M} k N_A T. \quad (3)$$

ბოლცმანის k მუდმივას ნამრავლს ავოგადროს N_A მუდმივაზე აირის უნივერსალურ მუდმივას უწოდებენ და R ასოთი აღნიშნავენ:

$$R = k N_A = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ჯ/კ} \cdot 6,02 \cdot 10^{23} \text{მოლი}^{-1} = 8,31 \text{ჯ/(მოლი} \cdot \text{კ)}.$$

აირის უნივერსალური მუდმივას გამოყენებით (3) ტოლობა შემდეგნაირად ჩაიწერება:

$$pV = \frac{m}{M} RT. \quad (4)$$

ამ ტოლობას **იდეალური აირის მდგომარეობის განტოლებას** უწოდებენ. ერთადერთი სიდიდე, რომელიც ამ ფორმულაში აირის გვარობაზეა დამოკიდებული, მისი მოლური მასაა.

ვთქვათ, ერთ მდგომარეობაში იდეალური აირის წნევა, მოცულობა და ტემპერატურა, შესაბამისად p_1 , V_1 და T_1 -ია, ხოლო მეორე მდგომარეობაში – p_2 , V_2 და T_2 . მაშინ, მოცემული მასის აირისათვის შეგვიძლია დავწეროთ:

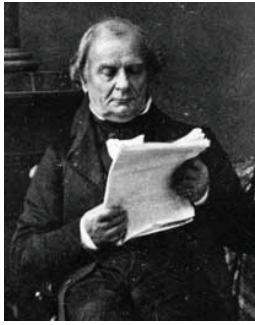
$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{m}{M} R \quad \text{და} \quad \frac{p_2 V_2}{T_2} = \frac{m}{M} R,$$

საიდანაც

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}, \quad \text{ანუ} \quad \frac{pV}{T} = \text{const}. \quad (5)$$

მაშასადამე, **მოცემული მასის იდეალური აირის წნევისა და მოცულობის ნამრავლის ფარდობა აბსოლუტურ ტემპერატურასთან მუდმივია.**

განტოლება, რომელიც ერთმანეთთან აკავშირებს აირის წნევას, მოცულობას და



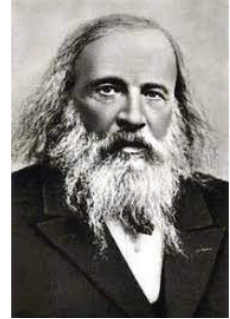
ბენუა კლაპეირონი
(1799-1864)

ტემპერატურას, (5) სახით პირველად მიიღო ფრანგმა ფიზიკოსმა ბენუა კლაპეირონმა. მის პატივსაცემად ამ განტოლებას **კლაპეირონის განტოლება** უწოდეს.

(4) განტოლება ერთი მოლი აირისათვის პირველად მიიღო რუსმა მეცნიერმა დიმიტრი მენდელეევი, ამიტომ მას **მენდელეევი-კლაპეირონის განტოლება** ეწოდება.

მდგომარეობის განტოლების მართებულობაში შეგვიძლია დავრწმუნდეთ ცდით: გოფრირებულ, ჰერმეტიულად დახურულ ჭურჭელთან, სილფონთან, მიერთებულია მანომეტრი 1 (სურ. 1.17), რომლითაც ჭურ-

ჭელში აირის წნევას ზომავენ. აირის მოცულობას გამოითვლიან სახაზავი 2-ის დახმარებით. ტემპერატურა ჭურჭელში ტოლია გარემოს ტემპერატურის და შეიძლება თერმომეტრით გაიზომოს.



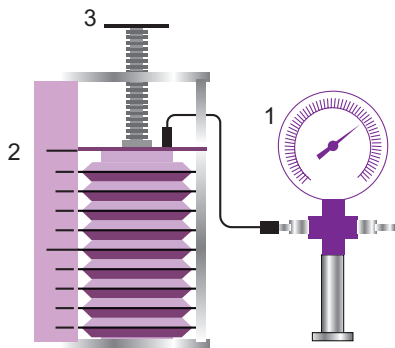
დიმიტრი მენდელეევი
(1834-1907)

საწყისი მდგომარეობის p_1, V_1, T_1 პარამეტრების გაზომვის

შემდეგ გამოითვლიან $\frac{p_1 V_1}{T_1}$ -ის მნიშვნელობას. შემდეგ სილფონს ათავსებენ ცხელ

წყალში და ხრახნი 3-ის ბრუნვით ცვლიან ჭურჭლის მოცულობას. ამ დროს აირის ტემპერატურა, წნევა და მოცულობა იცვლება. აირის ახალ მდგომარეობაში p_2 წნევის

და T_2 ტემპერატურის გაზომვით, ასევე V_2 მოცულობის გამოთვლით, პოულობენ $\frac{p_2 V_2}{T_2}$ -ის მნიშვნელობას. გამოთვლების შედეგები აჩვენებს, რომ ცდის ცდომილების



სურ. 1.17

ფარგლებში (5) ტოლობა სრულდება.

(5) განტოლება შეიძლება გამოყენებულ იქნას აირებისთვის, როდესაც: ა) აირის მოლეკულების საკუთარი ჯამური მოცულობა ჭურჭლის მოცულობასთან შედარებით მცირეა (შედარებით მცირე წნევების დროს); ბ) მოლეკულების ურთიერთქმედების პოტენციალური ენერგია ბევრად მცირეა მათი მოძრაობის კინეტიკურ ენერგიაზე (აირის ტემპერატურის არც ძალიან მცირე, არც ძალიან დიდი მნიშვნელობებისთვის).

მდგომარეობის განტოლება საშუალებას გვაძლევს განვსაზღვროთ მოცემული მასის აირის მდგომარეობის მახასიათებელი ერთი მაკროპარამეტრი, თუ დანარჩენი

ორი ცნობილია. მისი გამოყენებით ასევე შეიძლება აღვწეროთ გარკვეულ პირობებში სისტემაში მიმდინარე პროცესები.

დასკვნები:

- ბოლცმანის k მუდმივას ნამრავლს ავოგადროს N_A მუდმივაზე აირის უნივერსალურ მუდმივას უწოდებენ და R ასოთი აღნიშნავენ:
 $R = 8,31$ ჯ/(მოლი · K);
- $pV = \frac{m}{M}RT$ ტოლობას იდეალური აირის მდგომარეობის განტოლება ეწოდება;
- მოცემული მასის იდეალური აირის წნევისა და მოცულობის ნამრავლის ფარდობა მის აბსოლუტურ ტემპერატურასთან მუდმივია: $\frac{pV}{T} = \text{const.}$

საკონტროლო კითხვები:

1. რა სახეს მიიღებს (4) განტოლება, თუ გამოვიყენებთ ნივთიერების რაოდენობას?
2. რა სახეს მიიღებს (4) განტოლება, თუ მას აირის სიმკვრივის გამოყენებით ჩვენერთ?



ერთად ამოვხსნათ ამოცანა

2 სმ² განივკვეთის ფართობის მქონე გრძელ, ვერტიკალურ ცილინდრულ მილში არსებული 30 სმ სიმაღლის აირის სვეტი ზემოდან ჩაკეტილია 15 სმ სიმაღლის ვერცხლისწყლის სვეტით. რამდენით შეიცვლება აირის სვეტის სიმაღლე, თუ მილში 272 გ ვერცხლისწყალს დავამატებთ? ატმოსფერული წნევა 745 მმ.ვწყ.სვ-ის ტოლად მიიჩნეთ. აირის ტემპერატურა უცვლელია.

მოცემულია: $S=2$ სმ²; $h_1=30$ სმ; $l_1=150$ მმ; $m=272$ გ; $p_0=745$ მმ.ვწყ.სვ. $\Delta h=?$

ამოხსნა: ვინაიდან აირის ტემპერატურა უცვლელია $\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}$ გამოსახულებიდან

მივიღებთ: $p_1 V_1 = p_2 V_2$. აირის წნევა ჭურჭელში ატმოსფერულ წნევისა და ვერცხლისწყლის სვეტის წარმოებული წნევის ჯამის ტოლია: $p_1 = p_0 + \rho g l_1$; ვერცხლისწყლის დამატების

შემდეგ კი აირის წნევა ტოლი იქნება: $p_2 = p_0 + \rho g l_1 + \frac{mg}{S}$; $V_1 = S h_1$; $V_2 = S h_2$. $p_1 V_1 = p_2 V_2$

ტოლობაში ამ გამოსახულებების ჩასმით მიიღებთ: $(p_0 + \rho g l_1) \cdot S h_1 = (p_0 + \rho g l_1 + \frac{mg}{S}) \cdot S h_2$.

საიდანაც ვიპოვით h_2 -ის რიცხვითი მნიშვნელობას. $h_2 = 27$ სმ, აირის სვეტის სიმაღლის ცვლილება კი ტოლი იქნება: $\Delta h = -3$ სმ.

პასუხი: აირის სვეტის სიმაღლე მილში 3 სმ-ით შემცირდება.



ამოხსენით ამოცანები:

1. გამოთვალეთ 1 გ აირის მოლური მასა, თუ ნორმალურ პირობებში მისი მოცულობა 0,5 ლიტრია.
2. 3 ლ მოცულობის ჭურჭელში მოთავსებული აზოტის ტემპერატურა და წნევა, შესაბამისად 22 °C და 50 კპა-ია. რისი ტოლია ამ პირობებში აზოტის სიმკვრივე?
3. განსაზღვრეთ 2 მოლი აირის მოცულობა, თუ მისი წნევა და ტემპერატურა, შესაბამისად 1,5 ატმ და 67 °C-ია.
4. დახშულ ჭურჭელში მოთავსებული 20 გ ნეონის წნევა 25 კპა-ია. რა წნევა დამყარდება ჭურჭელში, თუ მასში 16 გ ჰელიუმს ჩავტუმბავთ? მიიჩნიეთ, რომ აირების ტემპერატურა ერთნაირია და ჩატუმბვისას არ იცვლება.
5. როგორ შეიცვლება მოცემული მასის აირის წნევა, თუ მის აბსოლუტურ ტემპერატურას 2-ჯერ გავზრდით, ხოლო მოცულობას 75%-ით შევამცირებთ?
6. დახშულ ჭურჭელში მოთავსებული აირის 40 გრადუსით გათბობისას მისი წნევა 10%-ით გაიზარდა. გამოთვალეთ აირის სანყისი ტემპერატურა.
7. ბურთს ბერავენ აირტუმბოთი, რომელიც ატმოსფეროდან ყოველ წამში 20 სმ³ მოცულობის ჰაერს ტუმბავს. განსაზღვრეთ აირის წნევა ბურთში 16 წმ-ის შემდეგ, თუ მისი თავდაპირველი მოცულობა 280 სმ³ იყო, ჰაერის წნევა – 100 კპა, ხოლო გაბერილი ბურთის მოცულობა – 300 სმ³. მიიჩნიეთ, რომ ბურთის გაბერვისას ჰაერის ტემპერატურა უცვლელია.
8. წყალში, 15 მ სიღრმეზე ჰაერის ბუშტის მოცულობა 18 სმ³-ია. რა მოცულობა ექნება ამ ბუშტს წყლის ზედაპირთან, თუ სანყის მდებარეობაში ტემპერატურა 7 °C-ია ზედაპირთან კი – 12 °C. ატმოსფერული წნევა ნორმალურია.
9. 50 სმ² განივკვეთის ფართობის ვერტიკალურ ცილინდრულ მილში თავისუფლად მოძრავი მცირე მასის დგუშით ჩაკეტილია 60 სმ სიმაღლის აირის სვეტი. დგუშს ზევიდან დაადეს 20 კგ მასის სანონი. რა მოცულობა ექნება აირს შეკუმშვის შემდეგ, თუ მისი ტემპერატურა შეკუმშვისას 2%-ით გაიზარდა? ატმოსფერული წნევა 750 მმ.ვწყ.სვ.-ის ტოლია.
10. ვერტიკალურ ცილინდრულ მილში 40 სმ სიმაღლის ჰაერის სვეტი ზემოდან ჩაკეტილია 240 მმ სიმაღლის ვერცხლისწყლის სვეტით. ჰაერის სანყისი ტემპერატურა 27 °C-ია. გათბობით ჰაერის სვეტის სიმაღლე 55 სმ გახდა, ვერცხლისწყლის ნახევარი კი მილიდან გადმოიღვარა. რა ტემპერატურამდე გათბა ჰაერი მილში? ატმოსფერული წნევა 760 მმ.ვწყ.სვ.-ის ტოლად მიიჩნიეთ.

§ 1.9 აირის კანონები

იდეალური აირის მდგომარეობის განტოლების გამოყენებით შეგვიძლია შევისწავლოთ პროცესები, რომლებშიც აირის მასა და ერთ-ერთი მაკროპარამეტრი – ტემპერატურა, წნევა ან მოცულობა – უცვლელი რჩება.

პროცესებს, რომლის დროსაც გარკვეული მასის მოცემული აირის ერთ-ერთი მაკროპარამეტრი უცვლელია, იზოპროცესები ეწოდება.

გარე ფაქტორების გამო, რეალურ პირობებში აირის ტემპერატურის, წნევის ან მოცულობის უცვლელობის შენარჩუნება პრაქტიკულად შეუძლებელია. შესაბამისად, იზოპროცესი მხოლოდ რეალური პროცესის მოდელია, რომელიც მიახლოებით აღწერს მას.

იზოთერმული პროცესი. მუდმივი ტემპერატურის პირობებში ($T = \text{const}$) ფიზიკური სისტემის მდგომარეობის ცვლილებას იზოთერმული პროცესი ეწოდება. აირის ტემპერატურის შენარჩუნებისათვის საჭიროა, რომ მას შეეძლოს სითბოცვლა ისეთ სხეულთან (სისტემასთან), რომლის ტემპერატურა ცდის განმავლობაში არ იცვლება, მაგალითად ატმოსფერულ ჰაერთან. წინააღმდეგ შემთხვევაში აირის შეკუმშვის ან გაფართოების დროს მისი ტემპერატურა შეიცვლება.

იდეალური აირის მდგომარეობის განტოლებიდან გამომდინარეობს:

$$pV = \frac{m}{M}RT = \text{const}, \text{ ან } p = \frac{\text{const}}{V}. \quad (1)$$

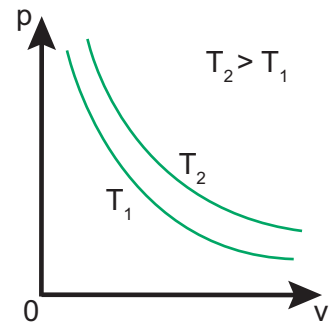
მუდმივი ტემპერატურის პირობებში მოცემული მასის აირის წნევა მისი მოცულობის უკუპროპორციულია.

ეს კანონი 1662 წელს ექსპერიმენტულად დაადგინა ინგლისელმა მეცნიერმა რობერტ ბოილმა, მოგვიანებით კი – 1676 წელს, ფრანგმა მეცნიერმა ედმ მარიოტმა, ამიტომ მას **ბოილ-მარიოტის კანონს** უწოდებენ.



ედმ მარიოტი
(1620-1684)

იზოთერმული პროცესის გრაფიკულ გამოსახულებას **იზოთერმა** ეწოდება. თუ მართკუთხა კოორდინატა სისტემაში აბსცისათა ღერძზე გადავზომავთ აირის მოცულობას, ხოლო ორდინატა ღერძზე – მის წნევას, $p(V)$ დამოკიდებულება ჰიპერბოლით გამოისახება (სურ. 1.18). აირის სხვადასხვა ტემპერატურას სხვადასხვა იზოთერმა შეესაბამება. (1) თანაფარდობების მიხედვით, მოცემული აირის ერთნაირი მოცულობებისათვის რაც მეტია ტემპერატურა, მით მეტია წნევა, ამიტომ მეტი ტემპერატურის



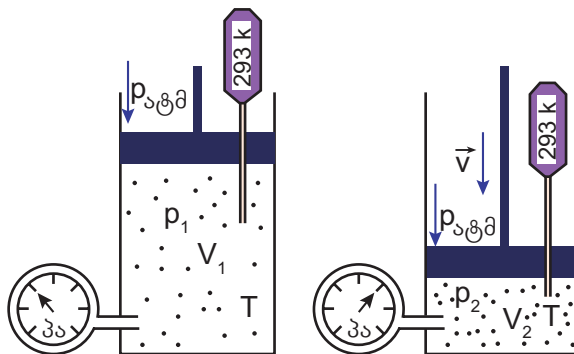
სურ. 1.18

შესაბამისი იზოთერმა უფრო მაღლა მდებარეობს.

ბოილ-მარიოტის კანონის შესამოწმებლად შეგვიძლია გამოვიყენოთ მარტივი დანადგარი, რომელიც სურ. 1.19-ზეა გამოსახული.

თუ დგუშს ძალიან ნელა დავწევთ, მის ქვეშ მოთავსებული აირის ტემპერატურა არ შეიცვლება და გარემოს ტემპერატურის ტოლი იქნება. ამ დროს აირის წნევა გაიზრდება ისე, რომ შესრულდება პირობა:

$$p_1 V_1 = p_2 V_2$$



სურ. 1.19

მრავალრიცხოვანი ცდებით დადგინდა, რომ ბოილ-მარიოტის კანონი აგრეთვე მართებულია ნებისმიერი აირისათვის და აირთა ნარევებისათვის. კანონიდან გადახრა მხოლოდ მაღალი წნევის (ატმოსფერულზე რამდენიმე ასეულჯერ მეტი) პირობებშია საგრძნობი.

იზობარული პროცესი. მუდმივი წნევის პირობებში ($p = \text{const}$) აირის მდგომარეობის ცვლილებას იზობარული პროცესი ეწოდება.

მენდელეევი-კლაპეირონის განტოლებიდან აირის მოცულობა გამოისახება ფორმულით:

$$V = \frac{mR}{pM} T.$$

როდესაც ერთი მდგომარეობიდან მეორეში გადასვლისას მოცემული აირის წნევა და მასა არ იცვლება, მაშინ

$$\frac{mR}{pM} = \text{const}, \quad \text{ანუ } V = \text{const} \cdot T. \quad (2)$$

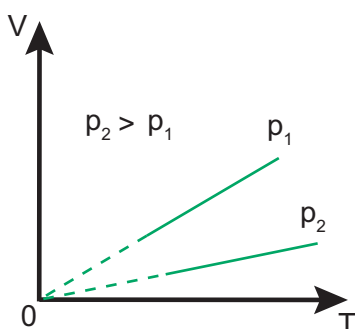
ამრიგად, მუდმივი წნევის პირობებში მოცემული მასის აირის მოცულობა მისი აბსოლუტური ტემპერატურის პირდაპირპროპორციულია.

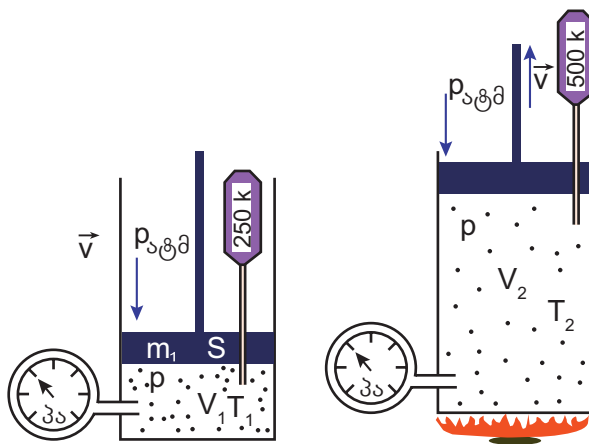
ეს კანონი 1802 წელს ექსპერიმენტულად დაადგინა ფრანგმა მეცნიერმა ჟოზეფ ლუი გეი-ლუსაკმა, ამიტომ მას **გეი-ლუსაკის კანონს** უწოდებენ.

იზობარული პროცესის გრაფიკულ გამოსახულებას **იზობარა** ეწოდება. თუ მართკუთხა კოორდინატა სისტემაში აბსცისათა ღერძზე აბსოლუტურ ტემპერატურას გადავზომავთ, ხოლო ორდინატა ღერძზე – მის მოცულობას, მაშინ $V(T)$ დამოკიდებულება გამოისახება წრფით, რომელიც კოორდინატა სათავეზე გადის (სურ. 1.20). მოცემული აირის სხვადასხვა წნევას სხვადასხვა იზობარა შეესაბამება. ბოილ-მარიოტის კანონის თანახმად, მუდმივი ტემპერატურის პირობებში აირის წნევის ზრდისას მისი მოცულობა მცირდება, ამიტომ ნაკლები წნევის შესაბამისი იზობარა უფრო მაღლა მდებარეობს.

მართალია, აირების იზობარა ტემპერატურის აბსოლუტურ ნულზე გადის, მაგრამ რეალურად ის არ შეიძლება ტემპერატურის ნულოვან მნიშვნელობამდე გაგრძელდეს (გრაფიკზე პუნქტირი). საქმე ისაა, რომ დაბალ ტემპერატურებზე აირები საგრძნობლად განსხვავდება „იდეალური აირის“ მოდელისაგან და ტემპერატურის შემდგომი შემცირებისას სითხედ გადაიქცევიან.

სურ. 1.20





სურ. 1.21

ვთქვათ, აირი იმყოფება m_1 მასისა და S ფართობის მქონე მძიმე დგუშის ქვეშ (სურ. 1.21), რომელსაც ხახუნის გარეშე შეუძლია გადაადგილება. აირის ტემპერატურის ზრდისას მისი მოცულობა დაიწყებს ზრდას, აირის წნევა კი დარჩება უცვლელი და ტოლი იქნება:

$$p = p_{ატმ} + \frac{m_1 g}{S}.$$

აირის ტემპერატურის შეცვლისას მისი მოცულობა ისე შეიცვლება, რომ სრულდება პირობა:

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}.$$

იზოქორული პროცესი. მუდმივი მოცულობის პირობებში ($V = \text{const}$) აირის მდგომარეობის ცვლილებას იზოქორული პროცესი ეწოდება.

მენდელეევი-კლაპეირონის განტოლებიდან აირის წნევა გამოისახება ფორმულით:

$$p = \frac{mR}{VM} T.$$

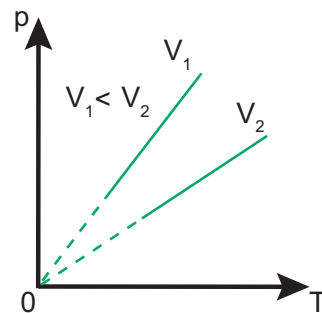
როდესაც ერთი მდგომარეობიდან მეორეში გადასვლისას მოცემული აირის მოცულობა და მასა არ იცვლება, მაშინ

$$\frac{mR}{VM} = \text{const}, \quad \text{ანუ} \quad p = \text{const} \cdot T. \quad (3)$$

ამრიგად, მუდმივი მოცულობის პირობებში მოცემული მასის აირის წნევა მისი აბსოლუტური ტემპერატურის პირდაპირპროპორციულია.

ეს კანონი 1787 წელს ექსპერიმენტულად დაადგინა ფრანგმა მეცნიერმა ჟაკ შარლიმ, ამიტომ მას **შარლის კანონს** უწოდებენ.

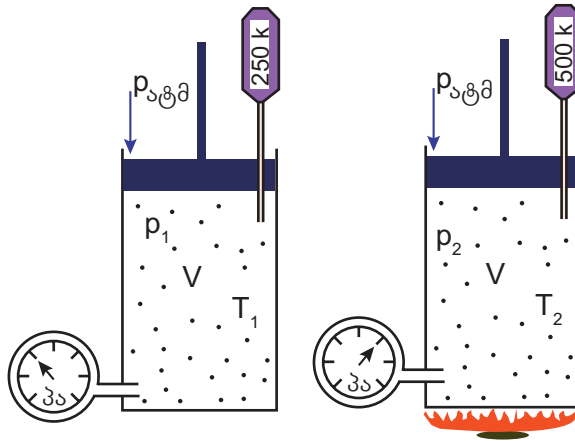
იზოქორული პროცესის გრაფიკულ გამოსახულებას **იზოქორა** ეწოდება. თუ მართკუთხა კოორდინატთა სისტემაში აბსცისათა ღერძზე აბსოლუტურ ტემპერატურას გადავზომავთ, ხოლო ორდინატთა ღერძზე – მის წნევას,



სურ. 1.22

მაშინ $p(T)$ დამოკიდებულება გამოისახება წრფით, რომელიც კოორდინატთა სათავეზე გადის (სურ. 1. 22). მოცემული აირის სხვადასხვა მოცულობას სხვადასხვა იზოქორა შეესაბამება. ბოილ-მარიოტის კანონის თანახმად, მუდმივი ტემპერატურის პირობებში აირის მოცულობის ზრდისას მისი წნევა მცირდება, ამიტომ ნაკლები მოცულობის შესაბამისი იზოქორა უფრო მაღლა მდებარეობს.

იზობარული პროცესის მსგავსად, აირების იზოქორა არ შეიძლება გაგრძელდეს ტემპერატურის ნულოვან მნიშვნელობამდე.



სურ. 1.23

თუ აირს მოვათავსებთ ცილინდრულ ჭურჭელში, რომლის დგუში დამაგრებულია (სურ. 1.23), მაშინ ტემპერატურის შეცვლისას მისი წნევა ისე შეიცვლება, რომ სრულდება პირობა:

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}.$$

დასკვნები:

- მუდმივი ტემპერატურის პირობებში მოცემული მასის აირის წნევა მისი მოცულობის უკუპროპორციულია: $p = \frac{\text{const}}{V}$, $p_1V_1 = p_2V_2$;
- მუდმივი წნევის პირობებში მოცემული მასის აირის მოცულობა მისი აბსოლუტური ტემპერატურის პირდაპირპროპორციულია: $V = \text{const} \cdot T$, $\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$;
- მუდმივი მოცულობის პირობებში მოცემული მასის აირის წნევა მისი აბსოლუტური ტემპერატურის პირდაპირპროპორციულია: $p = \text{const} \cdot T$, $\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}$.

საკონტროლო კითხვები:

1. რა წირს წარმოადგენს იზოთერმული პროცესის შესაბამისი $p(V)$ გრაფიკი?
2. $p(V)$ დიაგრამაზე რომელი ტემპერატურის შესაბამისი იზოთერმა მდებარეობს უფრო დაბლა?
3. $p(T)$ და $V(T)$ დიაგრამებზე რეალურად რატომ არ გრძელდება გრაფიკები ტემპერატურის აბსოლუტურ ნულამდე?



ერთად ამოვხსნათ ამოცანა

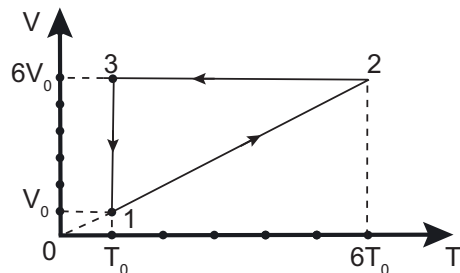
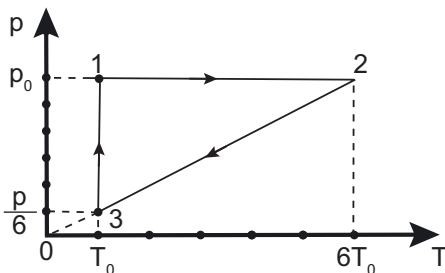
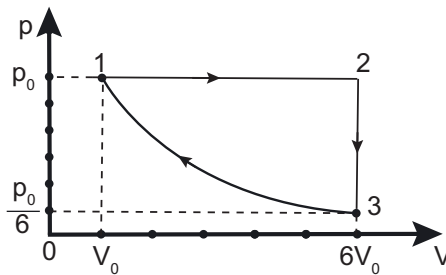
აირი, რომლის ტემპერატურაა T_0 , მოცულობა V_0 , ხოლო წნევა p_0 , ჯერ იზობარულად გაფართოვდა $6V_0$ მოცულობამდე, შემდეგ იზოქორულად გაცივდა T_0 ტემპერატურამდე და ბოლოს იზოთერმულად დაუბრუნდა საწყის მდგომარეობას. დახაზეთ ამ პროცესის შესაბამისი $p(V)$, $p(T)$ და $V(T)$ დიაგრამები.

ამოხსნა: გრაფიკების ასაგებად საჭიროა ყოველი ახალი მდგომარეობის შესაბამისი თერმოდინამიკური პარამეტრები საწყისი პარამეტრებით გამოვსახოთ. პირველი გადასვლისათვის გვექნება: $\frac{p_0 V_0}{T_0} = \frac{p_2 6V_0}{T_2}$. აქედან მივიღებთ: $T_2 = 6 T_0$.

ანალოგიურად, მეორე გადასვლისათვის $\frac{p_0 6V_0}{6T_0} = \frac{p_3 V_0}{T_0}$, საიდანაც $p_3 = \frac{1}{6} p_0$.

ბოლოს კი, $p_3 = p_0$, $V_3 = V_0$ და $T_3 = T_0$.

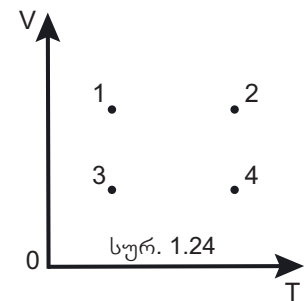
თუ ამ მონაცემებს საკოორდინატო სიბრტყეზე გადავიტანთ, მივიღებთ ქვემოთ მოცემულ სურათებზე გამოსახულ გრაფიკებს:





ამოხსენით ამოცანები:

1. აირის იზოთერმული შეკუმშვისას მოცულობის 3-ჯერ შემცირებამ მისი წნევა 64 კპა-ით გაზარდა. იპოვეთ აირის საწყისი წნევა.
2. იზობარული პროცესის დროს რამდენი გრადუსით გაიზარდება 27 °C-იანი აირის ტემპერატურა, თუ მისი მოცულობა 6 ლ-დან 8 ლ-მდე მოიმატებს?
3. დახშულ ჭურჭელში მოთავსებული აირი ნორმალურ პირობებშია. რისი ტოლი გახდება აირის წნევა ჭურჭელში, თუ მას 546 K-მდე გავათბობთ?
4. საპნის ბუშტი მოთავსებულია ჭურჭელში, რომელშიც წნევა და ტემპერატურა, შესაბამისად 48 კპა და 27 °C-ია. ჭურჭელში ტემპერატურა 227 °C-მდე გაზარდეს. რისი ტოლი უნდა გახადონ წნევა ჭურჭელში, რომ ბუშტის მოცულობა არ შეიცვალოს?
5. ცილინდრულ ჭურჭელში თავისუფლად მოძრავი დღუშით ჩაკეტილი 15 °C-იანი აირის მოცულობა 350 სმ³-ია. რამდენით შეიცვლება აირის მოცულობა, თუ მას 159 °C-მდე გავაცხელებთ?
6. 25 სმ² განივკვეთის ფართობის ჰორიზონტალურ ცილინდრულ მილში თავისუფლად მოძრავი დღუშით ჩაკეტილია აირი, რომლის სვეტის სიგრძე 80 სმ-ია. ჰორიზონტალური მიმართულების რა მაქსიმალური ძალით უნდა ვიმოქმედოთ დღუშზე, რომ აირის სვეტის სიგრძე 30 სმ-ით შევამციროთ? ატმოსფერული წნევა 100 კპა-ის ტოლად მიიჩნეთ, პროცესი კი – იზოთერმულად.
7. სურ. 1.24-ზე მოცემულ დიაგრამაზე ნაჩვენებია მუდმივი მასის აირის სხვადასხვა მდგომარეობის შესაბამისი წერტილები. რომელი წერტილები შეესაბამება ერთნაირ ტემპერატურებს? ერთნაირ წნევებს?
8. 10 ლ მოცულობის ჭურჭელში მოთავსებული აირის წნევა 750 მმ.ვწყ.სვ-ია. 5 ლ მოცულობის ჭურჭელში მოთავსებული აირის წნევა კი 1250 მმ.ვწყ.სვ. ჭურჭლები შეერთებულია წვრილი მილით, რომელზეც დაყენებული ონკანი ჩაკეტილია. რა წნევა დამყარდება ჭურჭლებში, თუ ონკანს გავხსნით? მიიჩნეთ, რომ აირის ტემპერატურები ერთნაირია და ონკანის გახსნისას არ იცვლება.
9. აირი, რომლის ტემპერატურაა T_0 , მოცულობა V_0 , ხოლო წნევა p_0 , იზობარულად გაფართოვდა $4V_0$ მოცულობამდე, შემდეგ იზოქორულად გაცივდა 2-ჯერ ნაკლებ ტემპერატურამდე და ბოლოს იზოთერმულად დაუბრუნდა საწყის მდგომარეობას. დახაზეთ ამ პროცესის შესაბამისი $p(V)$ დიაგრამა.
10. აირი, რომლის ტემპერატურაა 150 K, მოცულობა 2 ლ, ხოლო წნევა 10 კპა, იზობარულად გაფართოვდა 12 ლ მოცულობამდე, შემდეგ იზოქორულად გაცივდა 450 K-ით და ბოლოს იზოთერმულად დაუბრუნდა საწყის მდგომარეობას. დახაზეთ ამ პროცესის შესაბამისი $p(V)$, $p(T)$ და $V(T)$ დიაგრამები.



§ 1.10 იდეალური აირის შინაგანი ენერგია

საუკუნეების განმავლობაში ადამიანი მექანიკური მუშაობის შესასრულებლად, ძირითადად თავისი ან ცხოველის კუნთების ძალას იყენებდა. მარტივი მექანიზმების, ქარისა და წყლის ენერჯის გამოყენებამ მექანიკური მუშაობის შესრულება უფრო გაამარტივა. კაცობრიობის განვითარებასთან ერთად იზრდებოდა მოხმარებული ენერჯის რაოდენობაც, ამიტომ სამეცნიერო-ტექნიკურმა პროგრესმა დღის წესრიგში დააყენა მექანიკურ ენერჯისთან ერთად შინაგანი ენერჯის გამოყენება.

მექანიკური მუშაობის შესასრულებლად სხეულების შინაგანი ენერჯის გამოყენებას შეისწავლის ფიზიკის ნაწილი – **თერმოდინამიკა**.

ფიზიკური სისტემის სრული ენერჯია, მისი შემადგენელი სხეულების მექანიკური ენერჯისა და მათი შინაგანი ენერჯის ალგებრულ ჯამს წარმოადგენს. რიგ შემთხვევებში სისტემის მექანიკური ენერჯია თავისთავად გადადის სხეულების შინაგან ენერჯიაში და იკლებს. მაგალითად, მჭრელი იარაღის ლესვისას ის საგრძნობლად ცხელდება, მოთხილამურის მთიდან დაშვებისას თხილამურების ქვეშ თოვლი დნება. ამ მაგალითებში სხეულები ხახუნის გამო ცხელდება და მათი შემადგენელი ატომების (მოლეკულების) სითბური მოძრაობის ინტენსივობა იზრდება, რაც სხეულების შინაგანი ენერჯის მატებას იწვევს.

რა იგულისხმება თერმოდინამიკურ სისტემაში? როგორ განვმარტოთ ამ სისტემის შინაგანი ენერჯია?

თერმოდინამიკაში ფიზიკურ სხეულებს და მათ მოდელს **თერმოდინამიკურ სისტემებს** უწოდებენ. მათი აღწერისათვის იყენებენ სისტემის მაკროპარამეტრებს – წნევას, მოცულობას და ტემპერატურას, რომლებიც შეიძლება უშუალოდ გავზომოთ ხელსაწყოებით, ან გამოვსახოთ ცდებით გაზომილი სხვა სიდიდეებით.

თუ თერმოდინამიკურ სისტემაში შემავალ სხეულებსა და გარემოს შორის ენერჯის ან ნივთიერების ურთიერთგაცვლა არ მიმდინარეობს, მას **ჩაკეტილი (იზოლირებული) თერმოდინამიკური სისტემა** ეწოდება.

მაკროსხეულის სრული ენერჯის განხილვისას, მის მექანიკურ ენერჯისთან ერთად, გასათვალისწინებელია სხეულში „ჩამალული“ შინაგანი ენერჯაც.

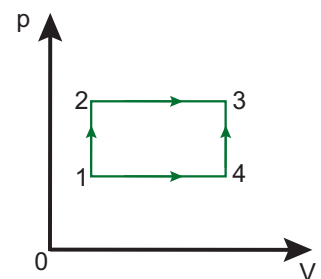
სხეულის შემადგენელი ნაწილაკების (ატომების ან მოლეკულების) ქაოსური სითბური მოძრაობის კინეტიკური და მათი ურთიერთქმედების პოტენციალური ენერჯიების ჯამს სხეულის შინაგანი ენერჯია ეწოდება.

თერმოდინამიკური სისტემის შინაგანი ენერჯია სისტემაში შემავალ სხეულთა შინაგანი ენერჯიების ჯამს წარმოადგენს.

თერმოდინამიკაში საინტერესოა არა თვით შინაგანი ენერჯის მნიშვნელობა, არამედ მისი ცვლილება, ამიტომ ყურადღება უნდა გავამახვილოთ შინაგანი ენერჯის შემადგენელ იმ ნაწილზე, რომელიც განსახილველ პროცესებში იცვლება.

განვიხილოთ გარკვეული მასის იდეალური აირის გადასვლა U_1 შინაგანი ენერჯის მქონე 1 მდგომარეობიდან U_3 შინაგანი ენერჯის მქონე 3 მდგომარეობაში (სურ. 1.25). გამოვყოთ მდგომარეობის ცვლილების ორი გზა: ა) ჯერ აირის იზოქორული გათბობით და შემდგომ იზობარული გაფართოებით (1–2–3); ბ) ჯერ იზობარული გაფართოებით და შემდგომ იზოქორული გათბობით (1–4–3). ორივე შემთხვევაში შინაგანი ენერჯის ნაზრდი ერთნაირია:

$$\Delta U_{123} = \Delta U_{143} = U_3 - U_1.$$



სისტემის შინაგანი ენერჯია დამოკიდებულია მის კონკრეტულ მდგომარეობაზე. ეს იმას ნიშნავს, რომ ერთი მდგომარეობიდან მეორეში გადასვლისას თერმოდინამიკური სისტემის შინაგანი ენერჯის ცვლილება დამოკიდებულია მხოლოდ ამ მდგომარეობების მახასიათებელი პარამეტრების მნიშვნელობებზე და არ არის დამოკიდებული გადასვლის გზაზე.

როგორც იცით, იდეალური აირის ნაწილაკების ურთიერთქმედების პოტენციალური ენერგია მათ კინეტიკურ ენერგიასთან შედარებით გაცილებით მცირეა, ამიტომ იდეალური აირის შინაგანი ენერგია განისაზღვრება მისი ნაწილაკების მხოლოდ კინეტიკური ენერგიით.

გავიხსენოთ, რომ ერთი ატომის საშუალო კინეტიკური ენერგია გამოითვლება ფორმულით:

$$\bar{\epsilon} = \frac{3}{2}kT.$$

ნაწილაკთა ქაოსური მოძრაობის გამო, X, Y, და Z ღერძების მიმართულებით ნაწილაკთა საშუალო კინეტიკური ენერგია ერთნაირია და $\frac{kT}{2}$ -ის ტოლია. ამ შემთხვევაში ამბობენ, რომ ერთატომიანი აირის (He, Ne, Ar, Kr და სხვა) თავისუფლების ხარისხი 3-ის ტოლია.

N ატომისაგან შემდგარი ერთატომიანი იდეალური აირის შინაგანი ენერგია ტოლი იქნება:

$$U = \frac{3}{2}NkT.$$

თუ ამ ტოლობის მარჯვენა მხარეს გავამრავლებთ და გავყოფთ აირის $M = m_0N_A$ მოლურ მასაზე, ასევე გავითვალისწინებთ, რომ $kN_A=R$, მივიღებთ:

$$U = \frac{3}{2} \frac{m}{M} RT. \quad (1)$$

ამრიგად, **მოცემული მასის იდეალური აირის შინაგანი ენერგია დამოკიდებულია მხოლოდ ერთ მაკროსკოპულ პარამეტრზე – ტემპერატურაზე.**

მენდელეევი-კლაპეირონის განტოლების გამოყენებით ერთატომიანი იდეალური აირის შინაგანი ენერგიის ფორმულა შეიძლება ჩავწეროთ შემდეგნაირად:

$$U = \frac{3}{2}pV. \quad (2)$$

ახლა განვიხილოთ ორატომიანი იდეალური აირი (აირი, რომლის მოლეკულა ორი ატომისაგან შედგება). ყოველი ატომის თავისუფლების ხარისხი სამია, ამიტომ მოლეკულის მოძრაობის შესაძლო მიმართულებების საერთო რაოდენობა ექვსი უნდა იყოს, მაგრამ მოლეკულის ატომებს შორის კავშირი თავისუფლების ხარისხს ერთით ამცირებს. შესაბამისად, ორატომიანი მოლეკულის თავისუფლების ხარისხი ხუთის ტოლია, ამიტომ მისი შინაგანი ენერგია შეიძლება გამოვითვალოთ შემდეგი ფორმულით:

$$U = \frac{5}{2} \frac{m}{M} RT, \quad (3) \quad \text{ან} \quad U = \frac{5}{2}pV. \quad (4)$$

თუ ამ ფორმულებს განვაზოგადებთ, იდეალური აირის შინაგანი ენერგიისთვის გვექნება:

$$U = \frac{i}{2} \frac{m}{M} RT, \quad \text{ან} \quad U = \frac{i}{2}pV,$$

რომელშიც i აირის მოლეკულის თავისუფლების ხარისხია.

რეალური აირების, სითხეებისა და მყარი სხეულების შინაგანი ენერგიის განსაზღვრისას აუცილებელია გავითვალისწინოთ ნაწილაკების ურთიერთქმედების პოტენციალური ენერგიაც, რომელიც ნაწილაკებს შორის მანძილზეა დამოკიდებული. ამიტომ, ზოგად შემთხვევაში, მაკროსხეულების შინაგანი ენერგია დამოკიდებულია აბსოლუტურ ტემპერატურასა და მოცულობაზე.

დასკვნები:

- ფიზიკის ნაწილს, რომელიც მექანიკური მუშაობის შესასრულებლად სხეულების შინაგანი ენერჯიის გამოყენებას შეისწავლის, თერმოდინამიკა ეწოდება;
- თერმოდინამიკაში ფიზიკურ სხეულებს და მათ მოდელს თერმოდინამიკურ სისტემებს უწოდებენ;
- ჩაკეტილ (იზოლირებულ) თერმოდინამიკურ სისტემაში შემავალ სხეულებსა და გარემოს შორის ენერჯიის ან ნივთიერების ურთიერთგაცვლა არ მიმდინარეობს;
- სხეულის შემადგენელი ნაწილაკების (ატომების ან მოლეკულების) ქაოსური სითბური მოძრაობის კინეტიკური და მათი ურთიერთქმედების პოტენციალური ენერჯიების ჯამს სხეულის შინაგანი ენერჯია ეწოდება;
- მოცემული მასის იდეალური აირის შინაგანი ენერჯია დამოკიდებულია მხოლოდ ტემპერატურაზე;
- ერთატომიანი იდეალური აირის შინაგანი ენერჯია გამოითვლება ფორმულებით:

$$U = \frac{3}{2} m R \text{ და } U = \frac{3}{2} pV;$$

- ორატომიანი იდეალური აირის შინაგანი ენერჯია გამოითვლება ფორმულებით:

$$U = \frac{5}{2} m R T \text{ და } U = \frac{5}{2} pV.$$

საკონტროლო კითხვები:

1. რომელი მაკროპარამეტრებით აღწერენ თერმოდინამიკური სისტემის მდგომარეობას?
2. რატომ არის იდეალური აირის შინაგანი ენერჯია დამოკიდებული მხოლოდ მის ტემპერატურაზე?
3. რა საშუალო კინეტიკური ენერჯია მოდის ერთატომიანი იდეალური აირის თავისუფლების ყოველ ხარისხზე?



ერთად ამოვხსნათ ამოცანა

გამოთვალეთ 2 ლ მოცულობის დიზელის დაწვისას გამოყოფილი სითბოს რაოდენობა და ნორმალურ პირობებში მყოფი იმავე მოცულობის წყალბადის შინაგანი ენერჯია. რომელია მეტი და რამდენით?

მოცემულია: $V_1=2 \cdot 10^{-3} \text{ მ}^3$; $\rho=800 \text{ კგ/მ}^3$; $q=4,3 \cdot 10^7 \text{ ჯ/კგ}$; $p=10^5 \text{ პა}$; $T=273 \text{ K}$;

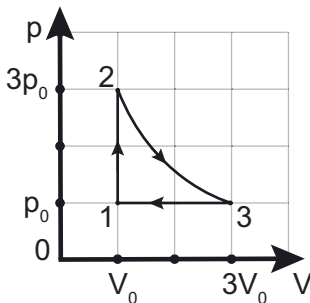
ამოხსნა: რადგან წყალბადი ორატომიანი აირია, მისი შინაგანი ენერჯია განისაზღვრება ფორმულით: $U = \frac{5}{2} pV = 500 \text{ ჯ}$. მერვე კლასის კურსიდან თქვენთვის ცნობილია, რომ სანვავის დაწვისას გამოყოფილი ენერჯია გამოითვლება $Q=qm$ ფორმულით. ვინაიდან სანვავის მასა $m= \rho V$, მივიღებთ: $Q = \rho V q = 6,88 \cdot 10^7 \text{ ჯ}$.

პასუხი: დიზელის სანვავის დაწვისას გამოყოფილი სითბოს რაოდენობა 68 799 500 ჯ-ით აღემატება ნორმალურ პირობებში მყოფი იმავე მოცულობის წყალბადის შინაგანი ენერჯიას.

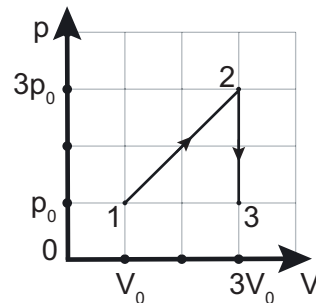


ამოხსენით ამოცანები:

- როგორ შეიცვლება დახშულ ჭურჭელში მოთავსებული იდეალური აირის შინაგანი ენერგია, თუ ჭურჭლიდან მის ნახევარს ამოვტუმბავთ? მიიჩნიეთ, რომ ამოტუმბვისას აირის ტემპერატურა არ იცვლება.
- რამდენი პროცენტით შეიცვლება ბუშტში მოთავსებული იდეალური აირის შინაგანი ენერგია, თუ მისი მოცულობა 240 სმ^3 -დან 360 სმ^3 -მდე იზობარულად გაიზრდება?
- 100 სმ^3 მოცულობის ჭურჭელში მოთავსებული ჟანგბადის წნევა $0,2 \text{ კპა}$ -ია. მიიჩნიეთ, რომ ჟანგბადი იდეალური აირია და განსაზღვრეთ მისი შინაგანი ენერგია.
- გამოთვალეთ 1 მოლი იდეალური ერთატომიანი აირის შინაგანი ენერგია $20 \text{ }^\circ\text{C}$ -ზე.
- იპოვეთ 1 გ აზოტის შინაგანი ენერგია $-173 \text{ }^\circ\text{C}$ -ზე. აზოტი იდეალურ აირად მიიჩნიეთ.
- რამდენით შეიცვლება 4 მოლი იდეალური ორატომიანი აირის შინაგანი ენერგია, თუ მის ტემპერატურას $67 \text{ }^\circ\text{C}$ -დან $-13 \text{ }^\circ\text{C}$ -მდე შევამცირებთ?
- 120 გ ჰელიუმის საწყისი ტემპერატურა $7 \text{ }^\circ\text{C}$ -ია. რამდენით შეიცვლება მისი შინაგანი ენერგია, თუ მისი მოცულობა იზობარულად 4 -ჯერ გაიზრდება?
- სურ. 1.26-ზე გამოსახულია იდეალური ერთატომიანი აირის მდგომარეობის ცვლილების $p(V)$ დიაგრამა. გამოსახეთ აირის შინაგანი ენერგია 1 , 2 და 3 მდგომარეობებში V_0 -ითა და p_0 -ით.
- სურ. 1.27-ზე გამოსახულია იდეალური ორატომიანი აირის მდგომარეობის ცვლილების $p(V)$ დიაგრამა. გამოსახეთ აირის შინაგანი ენერგიის ცვლილება $1-2$ და $2-3$ პროცენტებისას V_0 -ითა და p_0 -ით.



სურ. 1.26



სურ. 1.27

- კალორიმეტრში მოთავსებულია 40 გ გაუხშობელი ნეონი. რამდენით შეიცვლება აირის ტემპერატურა, თუ კალორიმეტრში დავწვავთ 5 გ სპირტს? სანვავის დანვისას გამოყოფილი ენერგიის 8% ჭურჭლის გათბობას ხმარდება.

§ 1.11 მუშაობა თერმოდინამიკაში

მე-9 კლასის ფიზიკის კურსიდან იცით, რომ სხეულზე ენერჯის გადაცემა მასზე მუშაობის შესრულების გზით ხორციელდება. ამ მუშაობას ასრულებენ ძალები, რომლებითაც ეს სხეული დანარჩენ (გარეშე) სხეულებთან ურთიერთქმედებს. ამასთან, სხეულზე მუშაობის შესრულებამ შეიძლება შეცვალოს სხეულის არა მარტო მექანიკური, არამედ შინაგანი ენერჯიაც. XVIII საუკუნის ბოლოს ინგლისელი ფიზიკოსი ბენჯამინ ტომპსონი (გრაფი რუმფორდი) აკვირდებოდა რა ბრინჯაოს ქვემეხების ბურღვის პროცესს, შეამჩნია, რომ ამ დროს ქვემეხის ლულა ძალიან ცხელდებოდა. სანამ ცხენებს ბურღი მოძრაობაში მოჰყავდათ, რუმფორდი ასწრებდა ქვემეხზე მოთავსებულ ქვაბში წყლის ადუღებას. ამ შემთხვევაში ცხენების მიერ შესრულებული მუშაობის ხარჯზე ბურღის მექანიკური ენერჯია გარდაიქმნებოდა ბრინჯაოსა და წყლის მოლეკულების ქაოსური მოძრაობის ენერჯიაში, ანუ მათ შინაგან ენერჯიაში.

მექანიკური მუშაობა სისტემის შინაგანი ენერჯის ცვლილების ერთ-ერთი ხერხია.

რისი ტოლია აირის შეკუმშვის და გაფართოების დროს შესრულებული მუშაობა?

მექანიკიდან იცით, რომ მოძრავ სხეულზე მოქმედი ძალის მუშაობა სხეულის კინეტიკური ენერჯის ცვლილების ტოლია. თერმოდინამიკაში შეისწავლება არა მთლიანი სხეულის მოძრაობა, არამედ მისი შემადგენელი ნაწილაკების გადაადგილება ერთმანეთის მიმართ, რომლის დროსაც შეიძლება შეიცვალოს სხეულის მოცულობა. თერმოდინამიკაში, ისევე როგორც მექანიკაში, მუშაობა $A = F \cos \alpha$ ფორმულით გამოითვლება, ოღონდ ის არა სხეულის კინეტიკური ენერჯის ცვლილების, არამედ სხეულის შინაგანი ენერჯის ცვლილების ტოლია.

რატომ იცვლება აირის შინაგანი ენერჯია მისი შეკუმშვის ან გაფართოების დროს? მაგალითად, რატომ ცხელდება ბურთში ჰაერი გაბერვისას? რატომ ცივდება გაზიანი სასმელი თავსახურის მოხსნისას?

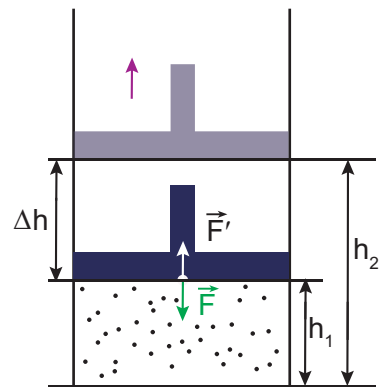
აირის ტემპერატურის ცვლილების მიზეზი მის მოლეკულებთან მოძრავი დგუშის დრეკადი დაჯახებაა. აირის შეკუმშვისას დგუში უახლოვდება მის მოლეკულებს და დაჯახებისას გადასცემს თავისი მექანიკური ენერჯის ნაწილს. შედეგად, მოლეკულების საშუალო კინეტიკური ენერჯია იზრდება – აირი ცხელდება. აირის გაფართოებისას კი პირიქით: დგუში აირის მოლეკულებს შორდება, ამიტომ დგუშთან დაჯახების შემდეგ მათი სიჩქარე და, შესაბამისად, საშუალო კინეტიკური ენერჯია იკლებს – აირი ცივდება.

ორივე შემთხვევაში მოლეკულებს შორის საშუალო მანძილი იცვლება, რაც მათი ურთიერთქმედების პოტენციალური ენერჯის ცვლილებას იწვევს.

განვიხილოთ აირი, რომელიც მოთავსებულია ცილინდრში დგუშის ქვეშ (სურ. 1.28 ა). ვთქვათ, გარეშე სხეული (დგუში) აირზე მოქმედებს \vec{F} ძალით, მაშინ აირი დგუშზე იმოქმედებს \vec{F}' წნევის ძალით. ნიუტონის მესამე კანონის თანახმად, $\vec{F}' = -\vec{F}$. თუ აირის წნევა p -ს ტოლია, ხოლო დგუშის ფართობი – S -ის, მაშინ აირის მხრიდან დგუშზე მოქმედი ძალის მოდული ტოლი იქნება:

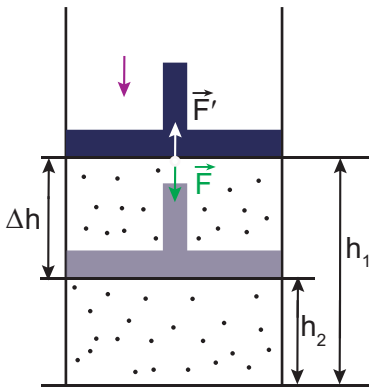
$$F' = pS.$$

დავუშვათ, რომ აირი იზობარულად გაფართოვდა და დგუში \vec{F}' ძალის მიმართულებით $\Delta h = h_2 - h_1$ მცირე მანძილით გადაადგილდა. რადგან აირის წნევა მუდმივია, ამიტომ აირის მიერ შესრულებული მუშაობა შეგვიძლია გამოვთვალოთ ფორმულით:



სურ. 1.28 ა

$$A' = F'\Delta h = pS(h_2 - h_1) = p(Sh_2 - Sh_1). \quad (1)$$



სურ. 1.28 ბ

თუ გავითვალისწინებთ, რომ $Sh_1 = V_1$ აირის საწყისი მოცულობაა, ხოლო $Sh_2 = V_2$ – საბოლოო მოცულობა, მაშინ (1) ტოლობა შემდეგნაირად ჩაინერება:

$$A' = p(V_2 - V_1) = p\Delta V, \quad (2)$$

რომელშიც $\Delta V = V_2 - V_1$ აირის მოცულობის ცვლილებაა. გაფართოებისას აირის წნევის ძალისა და დგუშის გადაადგილების მიმართულებები თანხვედრილია, ამიტომ აირი დადებით მუშაობას ასრულებს.

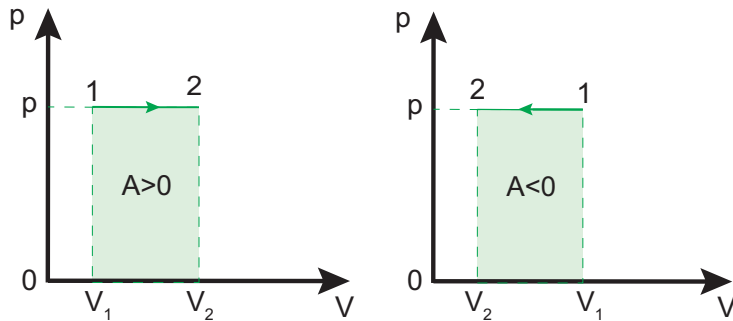
აირის შეკუმშვისას ($V_2 < V_1$), მის მიერ შესრულებული მუშაობა უარყოფითია ($A' < 0$) (სურ. 1.28 ბ).

გარეშე \vec{F} ძალის მიერ შესრულებული A მუშაობა აირის მუშაობისაგან მხოლოდ ნიშნით განსხვავდება:

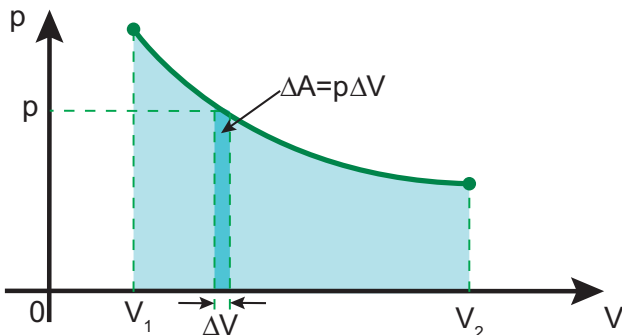
$$A = -A' = -p\Delta V. \quad (3)$$

ამ ტოლობიდან გამომდინარეობს, რომ აირის გაფართოებისას გარეშე ძალები უარყოფით მუშაობას ასრულებს, შეკუმშვისას კი – დადებით მუშაობას.

აირის მუშაობას იზობარული გაფართოებისას (ან შეკუმშვისას) შეიძლება მიეცეს მარტივი გეომეტრიული აზრი: აირის მუშაობა რიცხობრივად ტოლია $p(V)$ დამოკიდებულების გრაფიკის ქვეშ მოთავსებული მართკუთხედის ფართობის (სურ. 1.29).



სურ. 1.29

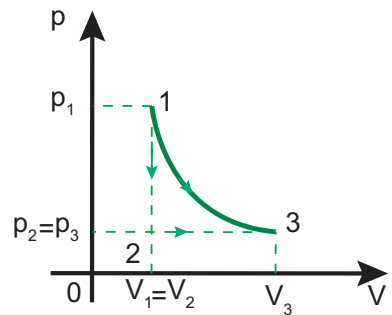


სურ. 1.30

ზოგადად, აირის მოცულობის ცვლილებისას მისი წნევა მუდმივი არ რჩება. ამ შემთხვევაში რისი ტოლია რიცხობრივად აირის მიერ შესრულებული მუშაობა?

ვთქვათ, რაიმე აირი მდგომარეობა 1-დან გადადის მდგომარეობა 2-ში (სურ. 1.30). აირის მოცულობის ცვლილება V_1 -დან V_2 -მდე დავყოთ იმდენად მცირე ΔV ინტერვალებად, რომ თითოეულ მათგანზე შეგვეძლოს წნევა მუდმივად მივიჩნიოთ. ასეთ

ინტერვალზე მუშაობა რიცხობრივად ტოლი იქნება სურათზე გამოყოფილი ზოლის (მართკუთხედის) ფართობის. აირის მთლიანი მუშაობა კი ტოლი იქნება ყველა ასეთი ზოლის ფართობის ჯამის, ანუ $p(V)$ დამოკიდებულების გრაფიკის ქვეშ მოთავსებული მრუდწირული ტრაპეციის ფართობის.



სურ. 1.31

ერთი მდგომარეობიდან მეორეში აირის გადასვლისას, მის მიერ შესრულებული მუშაობა დამოკიდებულია არა მხოლოდ სანყის და საბოლოო მდგომარეობებზე, არამედ გადასვლის პროცესის სახეზეც. მაგალითად, მდგომარეობა 1-დან მდგომარეობა 3-ში აირი შეიძლება პირდაპირ იზოთერმული გაფართოებით გადავიყვანოთ, ან თავიდან იზოქორულად შევამციროთ მისი წნევა $p_2=p_3$ მნიშვნელობამდე, ხოლო შემდგომ იზობარულად გავადიდოთ მისი მოცულობა V_3 -მდე (სურ. 1.31). მუშაობის გეომეტრიული აზრის გათვალისწინებით ცხადია, რომ პირველ შემთხვევაში აირის მიერ შესრულებული მუშაობა მეტია, ვიდრე მეორე შემთხვევაში.

დასკვნები:

- მექანიკური მუშაობა სისტემის შინაგანი ენერჯის ცვლილების ერთ-ერთი ხერხია;
- იზობარული პროცესის დროს აირის შესრულებული მუშაობა გამოითვლება ფორმულით: $A' = p(V_2 - V_1) = p\Delta V$;
- გაფართოებისას აირი დადებით მუშაობას ასრულებს, შეკუმშვისას – უარყოფითს;
- გაფართოებისას გარეზე ძალა უარყოფით მუშაობას ასრულებს, შეკუმშვისას – დადებითს;
- ერთი მდგომარეობიდან მეორეში აირის გადასვლისას, მის მიერ შესრულებული მუშაობა დამოკიდებულია არა მხოლოდ სანყის და საბოლოო მდგომარეობებზე, არამედ გადასვლის პროცესის სახეზეც.

საკონტროლო კითხვები:

1. რატომ ასრულებს აირი გაფართოებისას დადებით მუშაობას?
2. რატომ იზრდება აირის შინაგანი ენერჯია იზობარული შეკუმშვისას?
3. რიცხობრივად რისი ტოლია აირის მიერ შესრულებული მუშაობა იზობარული გაფართოების დროს? არაიზობარული გაფართოების დროს?

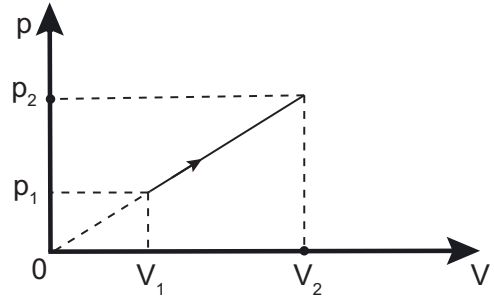


ერთად ამოვხსნათ ამოცანა

-3°C ტემპერატურის 2 მოლი აირი ფართოვდება $P=\alpha V$ კანონით (α პროპორციულობის კოეფიციენტი). გამოთვალეთ აირის მიერ შესრულებული მუშაობა 3 ლ-დან 5 ლ-მდე გაფართოებისას.

მოცემულია: $\nu=2$ მოლი; $T_1=270\text{ K}$; $V_1=3\cdot 10^{-3}\text{ მ}^3$; $V_2=5\cdot 10^{-3}\text{ მ}^3$; $A'=?$

ამოხსნა: ვინაიდან აირის წნევა მის V მოცულობაზე პირდაპირპროპორციულადაა დამოკიდებული, ამიტომ მის გრაფიკს ექნება სურათზე მოცემული სახე. როგორც ცნობილია, აირის მოცულობის V_1 -დან V_2 -მდე გაზრდისას მისი შესრულებული მუშაობა რიცხობრივად სურათზე გამოსახული ტრაპეციის ფართობის ტოლია. ტრაპეციის შუახაზი რიცხობრივად $\frac{p_1+p_2}{2}$ -ის ტოლია, სიმაღლე კი (V_2-V_1) -ის.



შესაბამისად, $A'=\frac{p_1+p_2}{2}(V_2-V_1)$, რომელშიც

$$p_1=\alpha V_1, p_2=\alpha V_2, \Rightarrow A'=\frac{\alpha}{2}(V_2+V_1)(V_2-V_1)=\frac{\alpha V_2^2-\alpha V_1^2}{2}=\frac{p_2 V_2-p_1 V_1}{2}=\frac{\nu RT_2-\nu RT_1}{2}. \text{ ვინაიდან}$$

$$\frac{p_1 V_1}{T_1}=\frac{p_2 V_2}{T_2}, \text{ ამიტომ } \frac{\alpha V_1^2}{T_1}=\frac{\alpha V_2^2}{T_2}, \text{ საიდანაც } T_2=750\text{ K}. \text{ საბოლოოდ მივიღებთ } A'=7977,6\text{ ჯ.}$$

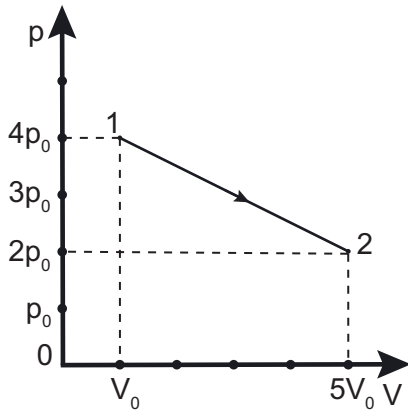
პასუხი: აირის მიერ შესრულებული მუშაობა 7977,6 ჯ-ია.



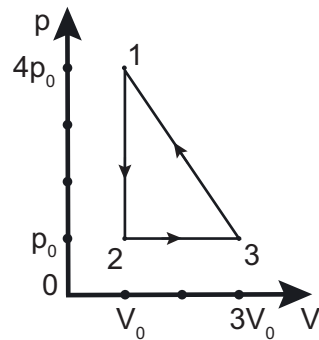
ამოხსენით ამოცანები:

- 200 სმ³ მოცულობის აირი, რომლის წნევა $2\cdot 10^4$ პასკალია, იზობარულად გაფართოვდა 350 სმ³ მოცულობამდე. იპოვეთ აირის მიერ შესრულებული მუშაობა.
- 0,5 ლ მოცულობის ჭურჭელში მოთავსებული აირის წნევა 30 კპა-ია. რა მუშაობას შეასრულებს აირი, თუ მისი ტემპერატურა იზობარულად 2-ჯერ გაიზრდება?
- თავისუფლად მოძრავ დგუშიან ცილინდრულ ჭურჭელში მოთავსებული აირის მოცულობა 3 ლიტრია, ხოლო ტემპერატურა 27°C . განსაზღვრეთ აირის მიერ შესრულებული მუშაობა მისი ტემპერატურის 227°C -მდე გაზრდისას. მიიჩნიეთ, რომ ატმოსფერული წნევა ნორმალურია.
- 77°C ტემპერატურის აირით გაბერილი ბუშტის მოცულობა 85 სმ³-ია. რა მუშაობას შეასრულებს ბუშტზე გარედან მოქმედი ძალა, თუ აირის ტემპერატურა 7°C -მდე დაეცემა? ბუშტის გარსის ზემოქმედებას მასში მოთავსებულ აირზე მხედველობაში ნუ მიიღებთ.
- თავისუფლად მოძრავ დგუშიან ცილინდრულ ჭურჭელში 40 გ მასის აზოტია მოთავსებული. იპოვეთ აზოტის მიერ შესრულებული მუშაობა მისი ტემპერატურის 15°C -ით იზობარული შემცირებისას.
- აირის ტემპერატურის იზობარულად 200°C -ით გასაზრდელად 4986 ჯ მუშაობა შესრულდა. განსაზღვრეთ აირის რაოდენობა მოლებით.
- 18°C ტემპერატურის 2 კგ მასის ჟანგბადის იზობარულად გასათბობად 15,6 კჯ მუშაობა შესრულდა. დაადგინეთ აირის საბოლოო ტემპერატურა.

8. $127\text{ }^{\circ}\text{C}$ ტემპერატურისა და $0,4\text{ ლ}$ მოცულობის აირის $0,6\text{ ლ}$ მოცულობამდე იზობარულად გაფართოებისას აირის შესრულებული მუშაობა 7479 ჯ-ია . განსაზღვრეთ აირში ნაწილაკების რაოდენობა.
9. სურ. 1.32-ზე გამოსახულია იდეალური აირის მდგომარეობის ცვლილების $p(V)$ დიაგრამა. გამოსახეთ აირის მიერ შესრულებული მუშაობა ამ პროცესისას V_0 -ითა და p_0 -ით.
10. სურ. 1.33-ზე გამოსახულია იდეალური ერთატომიანი აირის მდგომარეობის ცვლილების $p(V)$ დიაგრამა. გამოსახეთ აირის მიერ შესრულებული მუშაობა და შინაგანი ენერგიის ცვლილება 1-2; 2-3; 3-1 პროცესებისას V_0 -ითა და p_0 -ით.



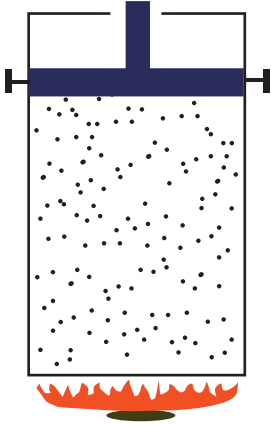
სურ. 1.32



სურ. 1.33

§ 1.12 თერმოდინამიკის პირველი კანონი

შესაძლებელია თუ არა სისტემის შინაგანი ენერჯიის ცვლილება მექანიკური მუშაობის შესრულების გარეშე?



სურ. 1.34

თუ ცილინდრულ ჭურჭელში დგუშს დავამაგრებთ, მაშინ დგუშის ქვეშ მოთავსებული აირის გათბობისას მისი მოცულობა არ შეიცვლება (სურ. 1.34). შესაბამისად, მუშაობაც არ შესრულდება. თუმცა, აირის ტემპერატურა მოიმატებს და მისი შინაგანი ენერჯია გაიზრდება.

მე-8 კლასის ფიზიკის კურსიდან თქვენ იცით, რომ მექანიკური მუშაობის შესრულების გარეშე შინაგანი ენერჯიის შეცვლის ხერხს **თბოგადაცემა** ეწოდება, ხოლო ენერჯიას, რომელსაც სხეული იღებს ან გასცემს თბოგადაცემისას – **სითბოს რაოდენობა**.

ასევე, c კუთრი სითბოტევადობის ნივთიერებისაგან დამზადებული m მასის სხეულის ტემპერატურის T_1 -დან T_2 -მდე გასაზრდელად საჭირო სითბოს რაოდენობა გამოითვლება ფორმულით:

$$Q = cm(T_2 - T_1).$$

სხეულის გაცივებისას მისი საბოლოო T_2 ტემპერატურა სანყის T_1 ტემპერატურაზე ნაკლებია, ამიტომ სხეულის მიერ გაცემული სითბოს რაოდენობა უარყოფითია.

ერთი და იმავე ნივთიერების კუთრი სითბოტევადობის მნიშვნელობა დამოკიდებულია იმაზე, თუ რომელი პროცესის დროს მიმდინარეობს თბოგადაცემა. მაგალითად, მუდმივი მოცულობის პირობებში აირის გარკვეული ტემპერატურით გასათბობად გადაცემული სითბოს რაოდენობა უფრო ნაკლებია, ვიდრე იმავე აირის მუდმივი წნევის პირობებში იმავე ტემპერატურით გასათბობად საჭირო სითბოს რაოდენობა. შესაბამისად, $c_V < c_p$. ეს გასაგებიცაა: აირის მუდმივი წნევის პირობებში გათბობისას ის თბება, თანაც ფართოვდება და ასრულებს მუშაობას, მუდმივი მოცულობის პირობებში კი – მხოლოდ თბება.

თხევადი და მყარი სხეულები გათბობისას უმნიშვნელოდ ფართოვდება, ამიტომ მათი კუთრი სითბოტევადობები მუდმივი მოცულობისა და მუდმივი წნევის დროს ერთმანეთისაგან მცირედ განსხვავდება.

გავიხსენოთ, დნობის (კრისტალიზაციის) და ორთქლაქცევის (კონდენსაციის) პროცესებიც.

კრისტალური სხეულის დნობისას მისი ტემპერატურა და, შესაბამისად, მოლეკულების საშუალო კინეტიკური ენერჯია არ იცვლება, ამიტომ გადაცემული სითბოს რაოდენობა მთლიანად ხმარდება მოლეკულების პოტენციალური ენერჯიის ზრდას.

იმისათვის რომ დნობის ტემპერატურის მქონე m მასის კრისტალური სხეული გავადნოთ, საჭიროა მას გადავცეთ $Q_{დნ} = \lambda m$ სითბოს რაოდენობა, რომელშიც λ ნივთიერების დნობის კუთრი სითბოა.

სხეულის კრისტალიზაციის დროს გამოიყოფა იგივე რაოდენობის სითბო: $Q_{კრ} = -\lambda m$.

დუღილის დროს სითხის ორთქლად გადაქცევისთვის საჭიროა მას გადავცეთ სითბოს გარკვეული რაოდენობა. სითხის ტემპერატურა დუღილისას მუდმივია, ამიტომ აორთქლებისას მოლეკულების კინეტიკური ენერჯია არ იცვლება, მაგრამ იზრდება მათი ურთიერთქმედების პოტენციალური ენერჯია.

მუდმივ ტემპერატურაზე m მასის სითხის ასაორთქლებლად საჭიროა მას გადავცეთ $Q_{ორთქ} = Lm$ სითბოს რაოდენობა, რომელშიც L ნივთიერების ორთქლაქცევის კუთრი სითბოა.

ორთქლის კონდენსაციისას გამოიყოფა იგივე რაოდენობის სითბო: $Q_{\text{კონდ}} = -Lm$. ამრიგად, გათბობისა და გაცივების, დნობისა და კრისტალიზაციის, ორთქლადქცევისა და კონდენსაციის დროს სხეულის შინაგანი ენერგია იცვლება.

ზოგადად, სისტემის შინაგანი ენერგია შეიძლება შეიცვალოს როგორც თბოგადაცემის, ასევე გარეშე ძალების მიერ შესრულებული მუშაობის შედეგად.

თერმოდინამიკური სისტემის შინაგანი ენერგიის ΔU ცვლილება სისტემაზე გადაცემული Q სითბოს რაოდენობისა და გარეშე ძალების მიერ სისტემაზე შესრულებული A მუშაობის ჯამის ტოლია:

$$\Delta U = Q + A.$$

ეს ენერგიის შენახვისა და გარდაქმნის კანონის განზოგადებაა თერმოდინამიკური სისტემისათვის. ამ დებულებას **თერმოდინამიკის პირველი კანონი** ეწოდება.

თერმოდინამიკის პირველი კანონის აზრი მდგომარეობს შემდეგში: სხვა სხეულებთან ურთიერთქმედებაში მყოფი სხეულის შინაგანი ენერგია იცვლება ორი გზით – თბოგადაცემით და გარეშე ძალების მუშაობით. სხეულის შინაგანი ენერგიის ნებისმიერ ზრდას მასთან ურთიერთქმედებაში მყოფი სხეულების ენერგიის იგივე სიდიდით შემცირება მოყვება.

ხშირად გარეშე ძალების მიერ შესრულებული A მუშაობის ნაცვლად, ხელსაყრელია გამოვიყენოთ თერმოდინამიკური სისტემის მიერ გარეშე სხეულებზე შესრულებული A' მუშაობა. რადგან ეს მუშაობები მხოლოდ ნიშნით განსხვავდება ($A = -A'$), ამიტომ თერმოდინამიკის პირველი კანონი შეიძლება ჩაიწეროს შემდეგნაირად:

$$\Delta U = Q - A'.$$

თერმოდინამიკური სისტემის შინაგანი ენერგიის ცვლილება ტოლია სისტემაზე გადაცემული სითბოს რაოდენობისა და სისტემის მიერ შესრულებული მუშაობის სხვაობის. სხეულისთვის სითბოს გადაცემისას მისი შინაგანი ენერგია შეიძლება გაიზარდოს, შემცირდეს ან დარჩეს უცვლელი იმის მიხედვით, თუ რა მუშაობა შეასრულა სისტემამ გარეშე სხეულებზე.

თერმოდინამიკის პირველი კანონი გამორიცხავს შეიქმნას ისეთი მექანიზმი, რომელიც სასარგებლო მუშაობას შეასრულებს ენერგიის მოხმარების ან თვით მექანიზმში ცვლილებების გარეშე. კანონიდან გამომდინარე მექანიზმის მიერ შესრულებული მუშაობა ტოლია:

$$A' = Q - \Delta U.$$

ნებისმიერ მექანიზმს შეუძლია გარეშე სხეულებზე შეასრულოს მუშაობა მხოლოდ გარედან მიღებული სითბოს რაოდენობის ან შინაგანი ენერგიის შემცირების ხარჯზე. თუ სისტემას სითბოს რაოდენობა არ გადაეცემა ($Q = 0$), მაშინ A' მუშაობა შესრულდება შინაგანი ენერგიის შემცირების ხარჯზე ($A' = -\Delta U$). როგორც კი შინაგანი ენერგიის მარაგი ამოიწურება, ძრავა მუშაობას შეწყვეტს.

დასკვნები:

- თერმოდინამიკური სისტემის შინაგანი ენერგიის ΔU ცვლილება სისტემაზე გადაცემული Q სითბოს რაოდენობისა და გარეშე ძალების მიერ სისტემაზე შესრულებული A მუშაობის ჯამის ტოლია: $\Delta U = Q + A$;
- თერმოდინამიკური სისტემის შინაგანი ენერგიის ცვლილება ტოლია სისტემაზე გადაცემული სითბოს რაოდენობისა და სისტემის მიერ შესრულებული მუშაობის სხვაობის: $\Delta U = Q - A'$.

საკონტროლო კითხვები:

1. რა შემთხვევაში მოიმატებს აუცილებლად სისტემის შინაგანი ენერგია?
2. რა შემთხვევაში შემცირდება აუცილებლად სისტემის შინაგანი ენერგია?
3. რატომაა შეუძლებელი ისეთი მექანიზმის შექმნა, რომელიც შეასრულებს მუშაობას სანჯავის დაუხარჯავად?



ერთად ამოვხსნათ ამოცანა

გამოთვალეთ ჰელიუმის კუთრი სითბოტევადობა მუდმივი წნევის პირობებში მიმდინარე პროცესისას.

მოცემულია: $M=4 \cdot 10^{-3}$ კგ/მოლი; $\Delta T=1$ K; $R=8.31$ ჯ/კ·მოლი; $c_p=?$

ამოხსნა: თერმოდინამიკის პირველი კანონის თანახმად, $Q= A'+\Delta U$, რომელშიც

$Q=cm\Delta T$, $\Delta U=\frac{3}{2} \frac{m}{M} R\Delta T$ და $A'=\frac{m}{M} R\Delta T$. მოცემული გამოსახულებების გამოყენებით

მივიღებთ, რომ $cm\Delta T=\frac{3}{2} \frac{m}{M} R\Delta T + \frac{m}{M} R\Delta T$. ამ ტოლობაში მასისა და ტემპერატურის

ცვლილების შეკვეცის შემდეგ მივიღებთ: $c_p=\frac{5}{2} \frac{R}{M} \approx 5194$ ჯ/მოლი · K.

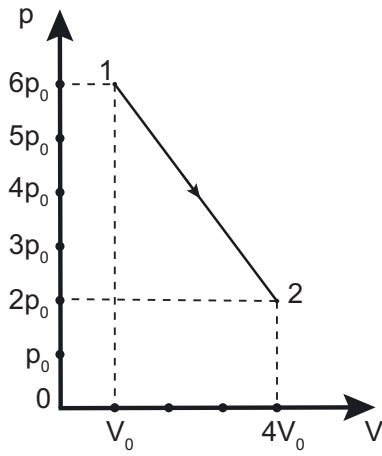
პასუხი: ჰელიუმის კუთრი სითბოტევადობა მუდმივი წნევის პირობებში მიმდინარე პროცესისას 5194 ჯ/მოლი · K-ის ტოლია.



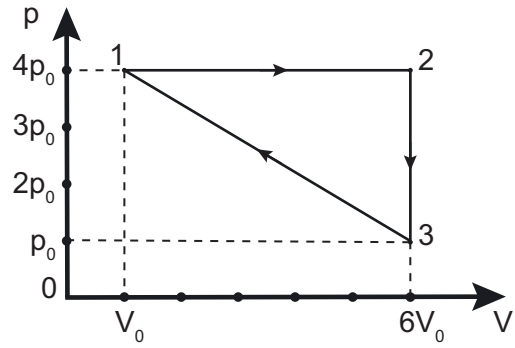
ამოხსენით ამოცანები:

1. განსაზღვრეთ აირზე გადაცემული სითბოს რაოდენობა, თუ მის მიერ შესრულებული მუშაობა 1 კჯ-ია, ხოლო აირის შინაგანი ენერგიის ცვლილება $2,4$ კჯ.
2. განსაზღვრეთ აირზე გადაცემული სითბოს რაოდენობა, თუ მასზე გარე ძალების მიერ შესრულებული მუშაობა $3,2$ კჯ, ხოლო აირის შინაგანი ენერგიის ცვლილება $4,1$ კჯ-ია.
3. როგორ შეიცვლება ჟანგბადის შინაგანი ენერგია, თუ მასზე გადაცემული $3,6$ კჯ სითბოს რაოდენობის მესამედი აირის მიერ მუშაობის შესრულებას მოხმარდა?
4. აირზე გადაცემული სითბოს რაოდენობა $7,5 \cdot 10^4$ ჯ-ია. გამოთვალეთ აირის მიერ შესრულებული მუშაობა, თუ ცნობილია, რომ შინაგანი ენერგიის ცვლილება მას $1,5$ -ჯერ აღემატება.
5. აირზე გადაცემული სითბოს რაოდენობა ტოლია იმ სითბოს რაოდენობის, რომელიც საჭიროა დნობის ტემპერატურის მქონე 10 გ მასის ყინულის გასადნობად. გამოთვალეთ აირის მიერ შესრულებული მუშაობა და მისი შინაგანი ენერგიის ნაზრდი, თუ ის გადაცემული სითბოს რაოდენობის 20% -ია.
6. განსაზღვრეთ აირის სითბოტევადობა იმ პროცესში, რომელშიც აირზე $9,6$ კჯ სითბოს რაოდენობის გადაცემა მისი ტემპერატურის 16 °C-ით ზრდას იწვევს.
7. 2 კჯ/კ სითბოტევადობის ორატომიანი 10 მოლი აირის ტემპერატურა 40 °C-ით გაიზარდა. გამოთვალეთ აირის შესრულებული მუშაობა.
8. 16 გ ჰელიუმის ტემპერატურის 22 °C-დან 47 °C-მდე გაზრდისას გარე ძალების მიერ შესრულებული მუშაობა 874 ჯ-ია. იპოვეთ ჰელიუმის კუთრი სითბოტევადობა ამ პროცესში.
9. სურ. 1.35-ზე გამოსახულია იდეალური ერთატომიანი აირის მდგომარეობის ცვლილების $p(V)$ დიაგრამა. გამოთვალეთ აირზე გადაცემული სითბოს რაოდენობა ამ პროცესში.

10. სურ. 1.36-ზე გამოსახულია იდეალური ორატომიანი აირის მდგომარეობის ცვლილების $p(V)$ დიაგრამა. გამოსახეთ აირზე გადაცემული სითბოს რაოდენობა 1-2 და 2-3 პროცესებში V_0 -ითა და p_0 -ით.



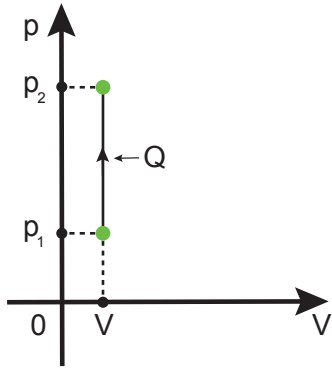
სურ. 1.35



სურ. 1.36

§ 1.13 თერმოდინამიკის პირველი კანონის გამოყენება იზოპროცესებში

თერმოდინამიკის პირველი კანონის გამოყენებით განვიხილოთ სხვადასხვა პროცესი, რომელშიც ერთ-ერთი ფიზიკური სიდიდე უცვლელია. სიმარტივისათვის თერმოდინამიკურ სისტემად ავიღოთ მუდმივი მასის იდეალური აირი.



სურ. 1.37

1. **იზოქორული პროცესის** დროს აირის მოცულობა არ იცვლება ($\Delta V = 0$), ამიტომ ის მუშაობას არ ასრულებს ($A' = 0$). ამ შემთხვევაში თერმოდინამიკის პირველი კანონი ჩაინერება შემდეგნაირად:

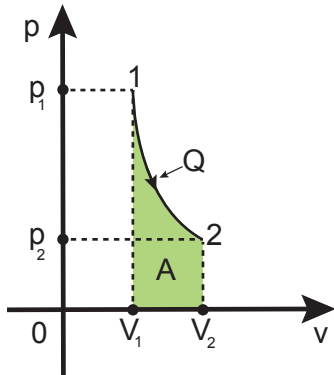
$$Q = \Delta U.$$

იზოქორული პროცესის დროს აირისათვის გადაცემული სითბოს რაოდენობა ხმარდება მისი შინაგანი ენერჯიის ზრდას. სურ. 1.37-ზე აირის იზოქორული გათბობის დიაგრამაა გამოსახული.

როდესაც აირი იზოქორულად ცივდება ($Q < 0$), მისი შინაგანი ენერჯია მცირდება ($\Delta U < 0$).

თუ იდეალური აირი ერთატომიანია, მაშინ მისთვის გადაცემული სითბოს რაოდენობა ტოლი იქნება:

$$Q = \Delta U = \frac{3}{2} \frac{m}{M} R \Delta T = \frac{3}{2} V \Delta p.$$



სურ. 1.38

2. **იზოთერმული პროცესის** მიმდინარეობისას აირის ტემპერატურა უცვლელია ($\Delta T = 0$), ამიტომ მისი შინაგანი ენერჯიაც არ იცვლება ($\Delta U = 0$). ამ შემთხვევაში თერმოდინამიკის პირველი კანონი ასეთ სახეს მიიღებს:

$$Q = A'.$$

იზოთერმული პროცესის დროს აირისთვის გადაცემული სითბოს რაოდენობა მთლიანად აირის მიერ მექანიკური მუშაობის შესრულებას ხმარდება. სურ. 1.38-ზე აირის იზოთერმული გაფართოების დიაგრამაა გამოსახული.

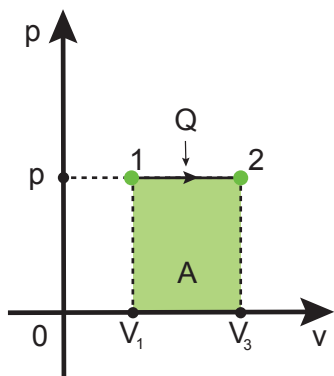
როდესაც აირი სითბოს რაოდენობას გარემომცველ გარემოს გადაცემს ($Q < 0$), მაშინ ის უარყოფით მუშაობას ასრულებს ($A' < 0$). ამ შემთხვევაში გარე ძალების მუშაობა დადებითია.

3. **იზობარული პროცესის** დროს იცვლება აირის შინაგანი ენერჯია და სრულდება მუშაობაც მუდმივი წნევის პირობებში:

$$Q = \Delta U + A'.$$

იზობარული პროცესის დროს აირისათვის გადაცემული სითბოს რაოდენობა ხმარდება მისი შინაგანი ენერჯიის ზრდას და აირის მიერ მექანიკური მუშაობის შესრულებას. სურ. 1.39-ზე აირის იზობარული გათბობის დიაგრამაა გამოსახული.

როდესაც აირი იზობარულად ცივდება ($Q < 0$), მაშინ ის იკუმშება, ასრულებს უარყოფით მუშაობას ($A' < 0$) და მისი შინაგანი ენერჯია მცირდება ($\Delta U < 0$).



სურ. 1.39

თუ იდეალური აირი ერთატომიანია, მაშინ შინაგანი ენერჯიის ცვლილება $\Delta U = \frac{3}{2}p\Delta V$, ხოლო შესრულებული მუშაობა $-A' = p\Delta V$. შესაბამისად, გადაცემული სითბოს რაოდენობისათვის მივიღებთ:

$$Q = \frac{3}{2}p\Delta V + p\Delta V = \frac{5}{2}p\Delta V.$$

4. ახლა განვიხილოთ პროცესი, რომელიც გარემოსთან თბოგადაცემის გარეშე მიმდინარეობს.

პროცესს, რომელიც თბოიზოლირებულ სისტემაში მიმდინარეობს, ადიაბატური პროცესი ეწოდება.

ადიაბატური პროცესისას სისტემისათვის გადაცემული (გაცემული) სითბოს რაოდენობა ნულის ტოლია, ამიტომ თერმოდინამიკის პირველი კანონი შემდეგნაირად ჩაინერება:

$$\Delta U = -A'.$$

სისტემასა და გარემოს შორის სითბოცვლა შეიძლება მინიმუმამდე დავიყვანოთ, თუ აირს კარგი თბოიზოლაცია ექნება. ადიაბატურ პროცესად შეიძლება მივიჩნიოთ აირის სწრაფი გაფართოება ან შეკუმშვა თბოიზოლაციის გარეშე. ამისათვის საჭიროა აირის გაფართოებისა და შეკუმშვის დროის შუალედი ბევრად ნაკლები იყოს დროის იმ შუალედზე, რომლის განმავლობაშიც აირსა და გარემომცველ სხეულებს შორის სითბური წონასწორობა მყარდება.

ადიაბატური გაფართოებისას აირი დადებით მუშაობას ასრულებს შინაგანი ენერჯიის შემცირების ხარჯზე, ამიტომ აირის ტემპერატურა მცირდება. ამაში

შეგვიძლია მარტივი ცდით დავრწმუნდეთ: თუ საცობიან ბოთლში ჰაერს ჩავტუმბავთ, გარკვეულ წნევის მიღწევისას საცობი ამოვარდება და ბოთლში ნისლი წარმოიქმნება (სურ. 1.40). აირის მიერ მუშაობის შესრულება და მისი შინაგანი ენერჯიის შემცირება იმდენად მცირე დროში ხდება, რომ სითბოცვლა გარეშე სხეულებთან ვერ ესწრება. ნისლის წვეთების წარმოქმნა ასაბუთებს, რომ ადიაბატური გაფართოებისას ჰაერის ტემპერატურა შემცირდა.



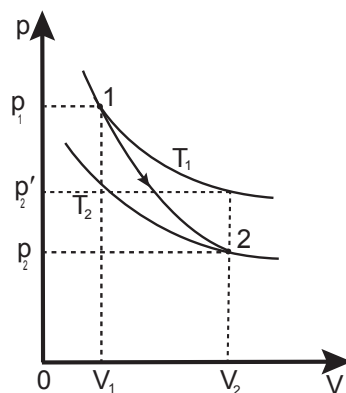
სურ. 1.40

აირის ადიაბატური გაფართოებისას ტემპერატურის შემცირება იწვევს მისი წნევის უფრო მნიშვნელოვან შემცირებას, ვიდრე იზოთერმული გაფართოების დროს. ამაში შეიძლება დავრწმუნდეთ სურ. 1.41-ზე ნაჩვენები ადიაბატური გაფართოების 1-2 დიაგრამით, რომელიც ორ იზოთერმას შორის გადის. დიაგრამაზე p_1 , T_1 და p_2 , T_2 აირის წნევა და

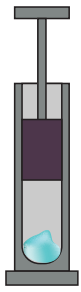
ტემპერატურაა, შესაბამისად გაფართოებამდე და გაფართოების შემდეგ.

ადიაბატა 1-2-ის ქვემოთ მოთავსებული ფიგურის ფართობი რიცხობრივად იმ მუშაობის ტოლია, რომელსაც აირი ასრულებს ადიაბატური გაფართოებისას V_1 -დან V_2 მოცულობამდე. აირი იზოთერმულად რომ გაფართოებულყო, მისი საბოლოო p' წნევა მეტი იქნებოდა p_2 -ზე.

ადიაბატური შეკუმშვისას აირი უარყოფით მუშაობას ასრულებს, მისი შინაგანი ენერჯია იზრდება, შესაბამისად იზრდება აირის ტემპერატურა. მაგალითად, თუ ცილნდრულ ჭურჭელში დგუშის ქვეშ ეთერში დასველებულ ბამბას მოვა-



სურ. 1.41



სურ. 1.42

თავსებთ და დგუმზე სწრაფი დანოლით ჰაერს შევკუმშავთ, ბამბა ააღდება (სურ. 1.42).

ცხადია, აირის ადიაბატური შეკუმშვისას მისი წნევა უფრო მეტად გაიზრდება, ვიდრე იზოთერმული შეკუმშვის დროს.

აირის სწრაფი შეკუმშვისას, ტემპერატურის ზრდის გამო, სანვავი ნარევის თავისთავად აალება გამოიყენება დიზელის ძრავებში, რომლებშიც აალების სისტემა არ არის.

აირების სწრაფი გაფართოებისას ტემპერატურის შემცირება აირების გასათხევადებელ მანქანებში გამოიყენება.

აირის ადიაბატური გაფართოება ძალიან დიდი მასშტაბით მიმდინარეობს ატმოსფეროში. გაცხელებული ჰაერი ადის მაღლა, სადაც ატმოსფერული წნევა მცირეა და ფართოვდება. ჰაერის გაფართოებას თან ახლავს მისი ტემპერატურის საგრძნობი კლება. შედეგად, წყლის ორთქლი კონდენსირდება და წარმოიქმნება ღრუბლები.

დასკვნები:

- იზოქორული პროცესის დროს აირისათვის გადაცემული სითბოს რაოდენობა ხმარდება მისი შინაგანი ენერჯის ზრდას. აირის იზოქორულად გაცივებისას მისი შინაგანი ენერჯია მცირდება;
- იზოთერმული პროცესის დროს აირისთვის გადაცემული სითბოს რაოდენობა მთლიანად აირის მიერ მექანიკური მუშაობის შესრულებას ხმარდება. როდესაც აირი სითბოს რაოდენობას გარემომცველ გარემოს გადაცემს, მაშინ ის უარყოფით მუშაობას ასრულებს;
- იზობარული პროცესის დროს აირისათვის გადაცემული სითბოს რაოდენობა ხმარდება მისი შინაგანი ენერჯის ზრდას და აირის მიერ მექანიკური მუშაობის შესრულებას. როდესაც აირი იზობარულად ცივდება, მაშინ ის იკუმშება, ასრულებს უარყოფით მუშაობას და მისი შინაგანი ენერჯია მცირდება;
- პროცესს, რომელიც თბოიზოლირებულ სისტემაში მიმდინარეობს, ადიაბატური პროცესი ეწოდება;
- ადიაბატური გაფართოებისას აირი დადებით მუშაობას ასრულებს შინაგანი ენერჯის შემცირების ხარჯზე, აირის ტემპერატურა მცირდება;
- ადიაბატური შეკუმშვისას აირი უარყოფით მუშაობას ასრულებს, მისი შინაგანი ენერჯია იზრდება, იზრდება აირის ტემპერატურა.

საკონტროლო კითხვები:

1. რა ფორმულით გამოისახება ერთატომიანი იდეალური აირისათვის იზოქორული პროცესის დროს გადაცემული სითბოს რაოდენობა?
2. რა ფორმულით გამოისახება ერთატომიანი იდეალური აირისათვის იზობარული პროცესის დროს გადაცემული სითბოს რაოდენობა?
3. როგორი პროცესი შეიძლება მივიჩნიოთ ადიაბატურად?
4. აირის ადიაბატური გაფართოებისას რატომ მცირდება წნევა უფრო მნიშვნელოვნად, ვიდრე იზოთერმული გაფართოებისას?
5. რა ინვესს სანვავი ნარევის თავისთავად აალებას დიზელის ძრავაში?



ერთად ამოვხსნათ ამოცანა

დაადგინეთ რამდენით მეტია 15 გ/მოლი მოლური მასის მქონე აირის კუთრი სითბოტევადობა იზობარული პროცესისას, იმავე აირის კუთრ სითბოტევადობაზე იზოქორული პროცესის დროს.

მოცემულია: $M=0,015$ კგ/მოლი; $R=8,31$ ჯ/მოლი · K; $c_p-c_v=?$

ამოხსნა: იზოქორული პროცესისას აირზე გადაცემული სითბოს რაოდენობა მთლიანად შინაგანი ენერგიის გაზრდას ხმარდება ($Q_v=\Delta U$), იზობარული პროცესისას კი – როგორც შინაგანი ენერგიის ზრდას, ასევე აირის მიერ შესრულებულ მუშაობას ($Q_p=A+\Delta U$). რადგან შინაგანი ენერგიის ცვლილება ორივე შემთხვევაში ერთნაირია,

გვექნება: $Q_v=Q_p-A$. ჩავწეროთ ეს გამოსახულება სხვა სახით: $c_v m \Delta T = c_p m \Delta T - \frac{m}{M} R \Delta T$. ამ ტოლობის ორივე მხარე გავყოთ $m \Delta T$ -ზე, მივიღებთ: $c_p - c_v = \frac{R}{M}$ (ამ ფორმულას მაიერის განტოლება ეწოდება). ამ გამოსახულებაში მონაცემების შეტანით მივიღებთ: $c_p - c_v = 554$ ჯ/კგ · K.

პასუხი: 15 გ/მოლი მოლური მასის აირის კუთრი სითბოტევადობა იზობარული პროცესისას, 554 ჯ/კგ · K-ით მეტია იზოქორული პროცესის დროს იმავე აირის კუთრ სითბოტევადობაზე.



ამოხსენით ამოცანები:

- როგორ შეიცვლება დახშულ ბალონში მოთავსებული აირის შინაგანი ენერგია, თუ მას 3,6 კჯ სითბოს რაოდენობას გადავცემთ?
- იზოთერმული გაფართოებისას აირს მთლიანად გადაეცა სითბოს ის რაოდენობა, რომელიც გამოიყო 50 გ სპირტის სრული დაწვისას. განსაზღვრეთ აირის მიერ შესრულებული მუშაობა ამ პროცესში.
- გამოთვალეთ ერთატომიანი იდეალური აირის მიერ შესრულებული მუშაობა იზობარული გაფართოებისას, თუ მისი შინაგანი ენერგია ამ პროცესში $9 \cdot 10^4$ ჯ-ით გაიზარდა.
- რამდენჯერ აღემატება შინაგანი ენერგიის ცვლილება შესრულებულ მუშაობას ერთატომიანი იდეალური აირის იზობარული გაფართოებისას?
- განსაზღვრეთ ორატომიანი იდეალურ აირზე გადაცემული სითბოს რაოდენობა იზობარული პროცესისას, თუ მისი შინაგანი ენერგია 7 კჯ-ით გაიზარდა.
- ორატომიანი იდეალური აირის იზობარული გაფართოებისას მასზე გადაცემული ენერგიის რა ნაწილი ხმარდება აირის მიერ მუშაობის შესრულებას და რა ნაწილი შინაგანი ენერგიის ცვლილებას?
- 2,5 მოლი ორატომიანი იდეალური აირის ტემპერატურა იზობარული შეკუმშვისას 100°C -ით გაიზარდა. გამოთვალეთ აირის შინაგანი ენერგიის ნაზრდი და გარემოზე გადაცემული სითბოს რაოდენობა.
- 4 მოლი ერთატომიანი იდეალური აირის ადიაბატური გაფართოებისას მის მიერ შესრულებული მუშაობა 7479 ჯ-ია. იპოვეთ აირის ტემპერატურის ცვლილება.
- თავისუფლად მოძრავ დეგუშიან ცილინდრულ ჭურჭელში 12 გ ჟანგბადია მოთავსებული. დეგუშის სწრაფი გადაადგილებით ჟანგბადის ტემპერატურა 5°C -ით გაიზარდა. გამოთვალეთ დეგუშის გადაადგილებაზე შესრულებული მუშაობა.
- გამოთვალეთ ჰაერის კუთრი სითბოტევადობა იზოქორული პროცესისას, თუ იზობარული პროცესისას მისი კუთრი სითბოტევადობა $c_p=10^3$ ჯ/კგ · K-ია.

§ 1.14 პროცესების შეუქცევადობა ბუნებაში

ლამაზი სანახაობაა თხილამურებით ტრამპლინიდან ხტომა – მხტომელი მისრიალებს ტრამპლინზე, მოწყდება მას, მიფრინავს (სურ. 1.43), ეშვება თოვლზე და ამუხრუჭებს. ამ დროს მხტომელის მექანიკური ენერგია გარდაიქმნება თვით მხტომელის, ტრამპლინის, ფერდობის, თოვლისა და გარემომცველი ჰაერის შინაგან ენერგიად – მათი ტემპერატურა ოდნავ მოიმატებს. ენერგეტიკულად შესაძლებელია შებრუნებული პროცესიც: მხტომელი ტრამპლინზე უკან აფრინდეს მისი, ტრამპლინის, ფერდობის, თოვლისა და გარემომცველი ჰაერის მომატებული შინაგანი ენერგიის ხარჯზე. თუმცა, სინამდვილეში ასეთი პროცესი არ მიმდინარეობს. მექანიკური ენერგია თავისთავად გარდაიქმნება შინაგან ენერგიად, პირიქით კი – არა.



სურ. 1.43

განვიხილოთ სხვა მაგალითიც. ოთახში შე-
მოტანილი ცხელი ჩაიდან დაიწყებს გაცივებას,
ის თავისთავად გადაცემს თავის შინაგან ენერ-
გიას შედარებით ცივ გარემომცველ სხეულებს.
შებრუნებული პროცესი – ცივი სხეულებიდან
ცხელ სხეულზე სითბოს გადაცემა არ ენი-
ნააღდეგება ენერგიის მუდმივობის კანონს
(თუ სითბოს რაოდენობა რომელსაც ცივი
სხეული გასცემს, ტოლია სითბოს რაოდენობის,
რომელსაც ცხელი სხეული მიიღებს), მაგრამ
ასეთი პროცესი თავისთავად არასოდეს მიმ-
დინარეობს.

ეს და მრავალი სხვა მაგალითი გვარწმუნებს,
რომ ბუნებაში ყველა მაკროსკოპული პროცესი
მხოლოდ განსაზღვრული მიმართულებით მიმ-

დინარეობს. შექცეული მიმართულებით პროცესი თავისთავად არ შესრულდება.

პროცესებს, რომლებიც თავისთავად მხოლოდ ერთი მიმართულებით მიმდინარეობს, შეუქცევადი პროცესები ეწოდება. შექცეული მიმართულებით ისინი მხოლოდ გარე ზემოქმედებით შეიძლება წარიმართოს.

რატომ არის შეუქცევადი ბუნებაში მიმდინარე პროცესები? მაგალითისთვის განვიხილოთ უმარტივესი სისტემა – იდეალური აირი. დავუშვათ, აირი ტიხრით გაყოფილი ჭურჭლის პირველ ნახევარშია მოთავსებული, მეორეში კი ვაკუუმი. თუ ტიხარს მოვაშორებთ, აირი ჭურჭლის მთელ მოცულობას დაიკავებს, მისი წნევა და ტემპერატურა ყველგან გათანაბრდება. აირის მოლეკულები იმოდრავებენ მთელ მოცულობაში, ჭურჭლის კედლებთან და ერთმანეთთან დაჯახებისას შეიცვლიან სიჩქარეს, თუმცა სისტემის მაკროსკოპული პარამეტრები აღარ შეიცვლება.

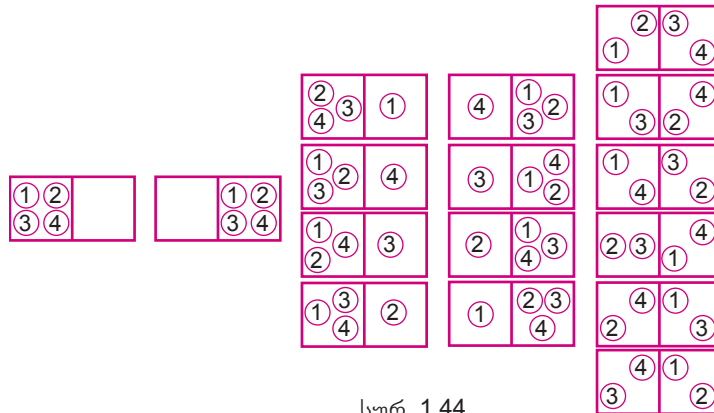
პრაქტიკულად არ დაფიქსირდება აირის ისეთი მდგომარეობა, რომლის დროსაც მისი ყველა მოლეკულა კვლავ ჭურჭლის პირველ ნახევარში აღმოჩნდება. ზუსტად ამიტომ, აირის თავისთავადი გაფართოება ვაკუუმში შეუქცევადი პროცესია.

რატომ არის პრაქტიკულად შეუძლებელი მოლეკულების ჭურჭლის ერთ ნახევარში თავისთავადი განთავსება? ამის მიზეზი აირში მოლეკულების ძალიან დიდი რაოდენობაა. რა მოხდებოდა, ჭურჭელში ნაწილაკების რაოდენობა მცირე რომ ყოფოლიყო?

თუ ჭურჭელში ერთი მოლეკულაა ($n = 1$), მაშინ ის შეიძლება იმყოფებოდეს ჭურ-
ჭლის ან ერთ ნახევარში, ან მეორეში. ჭურჭლის ნახევრებს შორის მისი განაწილების
რაოდენობა $N = 2$ -ის ტოლია. თუ ჭურჭელში ორი მოლეკულაა ($n = 2$), მაშინ შესაძლო
განაწილების რაოდენობა $N = 4 = 2^2$ -ის ტოლია, მათგან ერთი შეესაბამება შემთხვევას,
როდესაც ორივე მოლეკულა ჭურჭლის პირველ ნახევარში აღმოჩნდება ($K = 1$), ორი
შემთხვევა ($K = 2$), როდესაც მოლეკულები ჭურჭლის მხარეებს შორის თანაბრად

განაწილებული და კიდევ ერთი შემთხვევა ($K=1$), როდესაც ორივე მოლეკულა ჭურჭლის მეორე ნახევარშია.

თუ ჭურჭელში ოთხი მოლეკულაა ($n=4$), მაშინ ნახევრებს შორის შესაძლო განაწილების რაოდენობა იქნება $N=16=2^4$ (სურ.1. 44). მათგან მხოლოდ ერთი შემთხვევაა ($K=1$), როდესაც ყველა ნაწილაკი ჭურჭლის პირველ ნახევარში აღმოჩნდება. შემთხვევების რაოდენობა, როდესაც პირველ ნახევარში აღმოჩნდება სამი ნაწილაკი და მეორეში ერთი, ოთხის ტოლია ($K = 4$). ასევე ოთხის ტოლია ($K = 4$) იმ შემთხვევების რაოდენობა, როდესაც პირველ ნახევარში ერთი მოლეკულაა, მეორეში კი – სამი. შემთხვევების ყველაზე დიდი რაოდენობა – ექვსი ($K = 6$) შეესაბამება მდგომარეობას, როდესაც ნაწილაკები ჭურჭლის მხარეებს შორის თანაბრადაა განაწილებული.



სურ. 1.44

10 მოლეკულის შემთხვევაში ($n = 10$) ჭურჭლის მხარეებს შორის შესაძლო განაწილების რაოდენობა იქნება $N = 1024 = 2^{10}$. მათგან, მხოლოდ ერთი შემთხვევაა ($K = 1$), როდესაც ყველა ნაწილაკი იმყოფება ჭურჭლის პირველ ნახევარში, ყველაზე მეტი – 252 შემთხვევა ($K = 252$), როდესაც ნაწილაკები ჭურჭლის მხარეებს შორის თანაბრადაა განაწილებული.

განხილული შემთხვევების განზოგადებით შეგვიძლია დავასკვნათ, რომ ნაწილაკების ნებისმიერი n რაოდენობისთვის ჭურჭლის ნახევრებს შორის ნაწილაკების განთავსების საერთო რაოდენობა იქნება $N = 2^n$. მათგან მხოლოდ ერთი შემთხვევა იქნება ისეთი, როდესაც მოლეკულები განთავსდებიან ჭურჭლის პირველ ნახევარში. შემთხვევების რაოდენობა, როდესაც ნაწილაკები თანაბრადაა განაწილებული ჭურჭლის ორივე მხარეს, ნაწილაკების რაოდენობის ზრდასთან ერთად იზრდება, ამასთან მით უფრო სწრაფად, რაც დიდია მათი რაოდენობა.

მათემატიკის კურსიდან თქვენთვის ცნობილია, რომ თუ ცდას ტოლშესაძლებელი ხდომილობების სასრული რაოდენობა აქვს, მაშინ რაიმე ხდომილობის P ალბათობა ტოლია მისი ხელშემწყობი ხდომილობების K რაოდენობის შეფარდებისა ყველა შესაძლო ხდომილობების N რაოდენობასთან:

$$P = \frac{K}{N}.$$

პირველ მაგალითში ($n = 1$), ამიტომ ალბათობა იმისა, რომ სისტემა თავისთავად დაუბრუნდება საწყის მდგომარეობას ტოლია $1/2$ -ის, მეორე მაგალითში კი – $1/4$ -ის. მესამე მაგალითში ყველაზე ალბათური მდგომარეობაა ჭურჭლის ნახევრებს შორის მოლეკულების თანაბარი განაწილების შემთხვევა – $6/16 = 3/8$; ალბათობა იმისა, რომ პირველ ნახევარში აღმოჩნდება სამი ნაწილაკი და მეორეში ერთი, ტოლია $4/16 = 1/4$ -ის; ალბათობა იმისა, რომ სისტემა თავისთავად დაუბრუნდება საწყის მდგომარეობას $1/16$ -ის ტოლია. მეოთხე მაგალითში მოლეკულების თანაბარი განაწილების ალბათობაა $252/1024 = 63/256$, ხოლო საწყის მდგომარეობაში დაბრუნების ალბათობა – $1/1024$.

ამრიგად, ნაწილაკების მცირე რაოდენობის შემთხვევაში, არც ისე მცირეა ალბათობა, რომ აირის გაფართოების პროცესი შექცევადი იყოს. თუ ავიღებთ აირის ნაწილაკების დიდ რაოდენობას, მაგალითად რაიმე ნივთიერების ერთ მოლს ($6 \cdot 10^{23}$ ნაწილაკს), მაშინ ჭურჭლის ნახევრებს შორის მათი გადანაწილების საერთო რაოდენობა იქნება: $N = 2^n = 2^{6 \cdot 10^{23}}$. ამ რაოდენობიდან მხოლოდ ერთი შემთხვევაა, როდესაც ყველა ნაწილაკი ისევ ჭურჭლის პირველ ნახევარში აღმოჩნდება, ანუ ასეთი ხდომილობის ალბათობა იქნება:

$$P_0 = \frac{1}{N} = \frac{1}{2^{6 \cdot 10^{23}}} \approx 0.$$

მაშასადამე, სწორედ ნაწილაკების დიდი რაოდენობის გამო, ბუნებრივ მაკრო-სისტემებში მიმდინარე პროცესები პრაქტიკულად შეუქცევადია. $N=2^{6 \cdot 10^{23}}$ რაოდენობის შემთხვევიდან უმეტესი ჭურჭლის ორივე მხარეში ნაწილაკების თანაბარ, ან თანაბართან ძალიან მიახლოებულ განაწილებას შეესაბამება. ზუსტად ამიტომ, აირი ჭურჭლის პირველ ნახევარში თავისთავად პრაქტიკულად არასდროს შეგროვდება – ეს იქნებოდა აირის თავისთავადი გადასვლა, მეტად ალბათური მდგომარეობიდან მნიშვნელოვნად მცირე ალბათობის შესაბამის მდგომარეობაში, რაც პრაქტიკულად შეუძლებელია.



რუდოლფ კლაუზიუსი
(1822-1888)

ბუნებაში პროცესების შეუქცევადობას აღწერს **თერმოდინამიკის მეორე კანონი**, რომელსაც რამდენიმე ექვივალენტური ფორმულირება აქვს. გერმანელმა მათემატიკოსმა და ფიზიკოსმა რუდოლფ კლაუზიუსმა ეს კანონი ჩამოაყალიბა შემდეგნაირად:

შეუძლებელია პროცესი, რომლის ერთადერთი შედეგია სითბოს სახით ენერჯიის გადაცემა ნაკლებად გახურებული სხეულიდან მეტად გახურებული სხეულისკენ.

სითბოს რაოდენობა მეტად გახურებული სხეულიდან ნაკლებად გახურებულ სხეულს თავისთავად გადაეცემა და ამ დროს სხვა სხეულები ცვლილებას არ განიცდის. შესაძლებელია შებრუნებული პროცესიც, მაგრამ ის დაკავშირებულია ცვლილებებთან სისტემაში ან გარემომცველ სხეულებში. მაგალითად, მაცივარში სითბო გადაეცემა ნაკლები ტემპერატურის სამაცივრო კამერიდან მეტი ტემპერატურის ჰაერს, მაგრამ ამისათვის იხარჯება ელექტროენერჯია.

ინგლისელმა ფიზიკოსმა უილიამ ტომსონმა (ლორდ კელვინი) თერმოდინამიკის მეორე კანონი ასე ჩამოაყალიბა:

შეუძლებელია პერიოდული პროცესი, რომლის ერთადერთი შედეგი სხეულის მიერ მექანიკური მუშაობის შესრულებაა მისი შინაგანი ენერჯიის შემცირების ხარჯზე.

ასეთი პროცესის განხორციელება შესაძლებელი რომ ყოფილიყო, მაშინ რაიმე მანქანა შეძლებდა ოკეანესთვის სითბოს წართმევას და მის მთლიანად მუშაობაში გარდაქმნას.

თერმოდინამიკის მეორე კანონის გამოყენებას თავისი საზღვრები აქვს. მაკროსისტემებში შექცევადი პროცესის განხორციელების ალბათობა პრაქტიკულად ნულის ტოლია, მაგრამ მცირე მოცულობებში, რომლებიც ნაწილაკების მცირე რაოდენობას შეიცავს, წონასწორული მდგომარეობიდან გადახრის ალბათობა საგრძნობი ხდება. ასეთ შემთხვევით გადახრებს **ფლუქტუაციები** ეწოდება. ბროუნის მოძრაობის მიზეზი სწორედ მცირე მოცულობებში წნევის ფლუქტუაციაა.

თერმოდინამიკის მეორე კანონი მხოლოდ იმ სისტემებისათვის სრულდება, რომლებიც ნაწილაკების ძალიან დიდ რაოდენობას შეიცავს.

დასკვნები:


- პროცესებს, რომლებიც თავისთავად მხოლოდ ერთი მიმართულებით მიმდინარეობს, შეუქცევადი პროცესები ეწოდება. შექცეული მიმართულებით ისინი მხოლოდ გარე ზემოქმედებით შეიძლება წარიმართოს;
- შეუძლებელია პროცესი, რომლის ერთადერთი შედეგია სითბოს სახით ენერჯის გადაცემა ნაკლებად გახურებული სხეულიდან მეტად გახურებული სხეულისკენ;
- შეუძლებელია პერიოდული პროცესი, რომლის ერთადერთი შედეგი სხეულის მიერ მექანიკური მუშაობის შესრულებაა მისი შინაგანი ენერჯის შემცირების ხარჯზე;
- თერმოდინამიკის მეორე კანონი მხოლოდ იმ სისტემებისათვის სრულდება, რომლებიც ნაწილაკების ძალიან დიდ რაოდენობას შეიცავს.

საკონტროლო კითხვები:

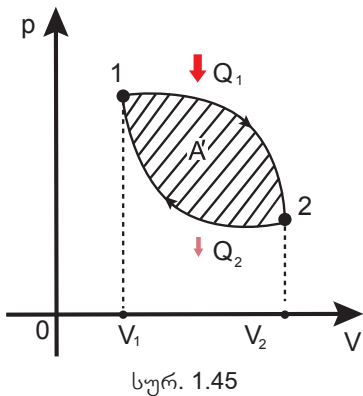
1. რატომაა შესაძლებელი ენერგეტიკული თვალსაზრისით შექცეული პროცესი?
2. როგორ სისტემაში აქვს ადგილი ფლუქტუაციებს?

§ 1.15 სითბური ძრავები. კარნოს ციკლი

VIII კლასში თქვენ გაეცანით სითბური ძრავას მოქმედების პრინციპს.

 სითბური ძრავა ციკლურად მომუშავე მანქანაა, რომელიც სანვავის შინაგან ენერგიას მექანიკურ ენერგიად გარდაქმნის.

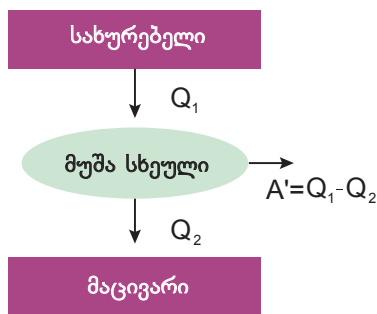
სითბურ ძრავაში მუშაობას ასრულებს აირი, რომელიც გაფართოებისას აწვება დგუმს ან ტურბინის ფრთებს. აირს, რომელიც მექანიკურ მუშაობას ასრულებს, **მუშა სხეული** ეწოდება.



იმისათვის, რომ აირმა დგუმს, ან ტურბინის ფრთებს უბიძგოს, საჭიროა მისი წნევა დგუმის ქვეშ ან ტურბინის ფრთის ერთ მხარეს გარემოს წნევაზე მეტი იყოს. ეს კი მიიღწევა მუშა სხეულის ტემპერატურის ზრდით. მოწყობილობას, რომლისგანაც მუშა სხეული იღებს სითბოს რაოდენობას, **სახურებელი** ეწოდება. სახურებელი სანვავის წვის შედეგად გამოყოფილ ენერგიას იღებს.

ცხადია, მუშა სხეული მუდმივად ვერ გაფართოვდება. ძრავას ციკლური მუშაობისათვის საჭიროა, რომ დგუმი პერიოდულად სანყის მდგომარეობას უბრუნდებოდეს. ამ დროს მუშა სხეული შეიკუმშება და უარყოფით მუშაობას შეასრულებს. იმისათვის, რომ ერთი ციკლის

განმავლობაში აირის შესრულებლი მუშაობა დადებითი იყოს, აუცილებელია მისი წნევა და ტემპერატურა შეკუმშვის დროს უფრო ნაკლები იყოს, ვიდრე გაფართოებისას. ამისათვის კი საჭიროა შეკუმშვისას აირი გავაცივოთ. ობიექტს, რომელსაც მუშა სხეული გარკვეულ სითბოს რაოდენობას გადასცემს, **მაცივარი** ეწოდება. სურ. 1.45-ზე გამოსახულია სითბური ძრავას მუშა სხეულის წნევის მოცულობაზე დამოკიდებულების დიაგრამა. ერთი ციკლის დროს შესრულებულ მუშაობას დამტრიხული ფიგურის ფართობი შეესაბამება.



სურ. 1.46

სურ. 1.46-ზე სქემატურადაა ნაჩვენები სითბური ძრავას მუშაობის პრინციპი: მუშა სხეული სახურებელიდან იღებს Q_1 სითბოს რაოდენობას, ასრულებს A' მუშაობას და Q_2 სითბოს რაოდენობას მაცივარს გადასცემს. ენერგიის მუდმივობის კანონის თანახმად, სითბური ძრავას მიერ შესრულებული მუშაობა ტოლია:

$$A' = Q_1 - Q_2.$$

ნებისმიერი სითბური ძრავა სახურებელიდან მიღებული ენერგიის მხოლოდ მცირე ნაწილს გარდაქმნის მექანიკურ ენერგიად. სანვავის ენერგიის დიდი ნაწილი გადაეცემა მაცივარს და გარემოში იკარგება. ეს განპირობებულია ბუნებაში პროცესების

შეუქცევადობით: მაცივრიდან სახურებელზე სითბოს რაოდენობის თავისთავად გადაცემა შესაძლებელი რომ ყოფილიყო, მაშინ ნებისმიერ სითბურ ძრავაში შინაგანი ენერგია მთლიანად გარდაიქმნებოდა სასარგებლო მუშაობად.

მნიშვნელოვანია ვიცოდეთ, რამდენად ეკონომიურია ძრავა – სანვავის წვის შედეგად გამოყოფილი ენერგიის რა ნაწილს შეადგენს სასარგებლო მუშაობა. რაც მეტია ეს ნაწილი, მით ნაკლები სანვავი დაიხარჯება მოცემული სამუშაოს შესასრულებლად. ძრავას ეკონომიურობას ახასიათებენ მისი მარგი ქმედების კოეფიციენტი.

სითბური ძრავას მარგი ქმედების კოეფიციენტი (მქკ) ფიზიკური სიდიდეა,

რომელიც გვიჩვენებს სანვავის დანვისას გამოყოფილი ენერჯიის რა ნაწილი გარდაიქმნება სასარგებლო მუშაობად:

$$\eta = \frac{A'}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1},$$

ან პროცენტებში

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \cdot 100\%.$$

ვინაიდან სითბური ძრავას მუშაობისას ენერჯიის გარკვეული ნაწილი აუცილებლად გადაეცემა მაცივარს, ამიტომ მისი მქკ ყოველთვის ნაკლებია 100%-ზე. ჩვეულებრივ, სითბური ძრავების მქკ 20% ÷ 40% ფარგლებშია.



სადი კარნო
(1796-1832)

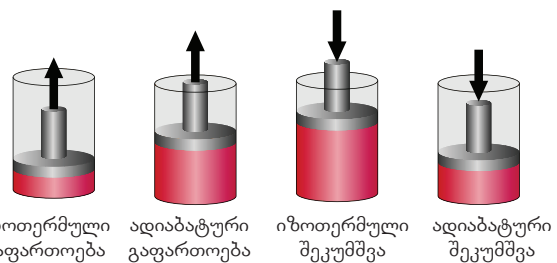
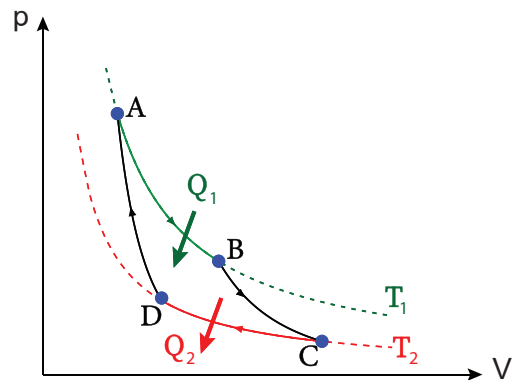
თერმოდინამიკის კანონების გაანალიზებით, ფრანგმა მეცნიერმა და ინჟინერმა სადი კარნომ გამოთვალა სითბური ძრავას შესაძლო მაქსიმალური მქკ. მისი სითბური ძრავას მუშა სხეულს იდეალური აირი წარმოადგენდა. კარნომ განიხილა ციკლი, რომელიც ორი იზოთერმული და ორი ადიაბატური პროცესისაგან შედგებოდა: იზოთერმული გაფართოებისას აირი მუშაობას ასრულებს სახურებლიდან მიღებული შინაგანი ენერჯიის ხარჯზე, ხოლო ადიაბატური გაფართოებისას – აირის შინაგანი ენერჯიის ხარჯზე. ამ ციკლში განსხვავებული ტემპერატურის მქონე სხეულების კონტაქტს ადგილი არ აქვს, რაც გამორიცხავს სითბოცვლას მუშაობის შესრულების გარეშე.

თანმიმდევრობით განვიხილოთ ამ ციკლის თერმოდინამიკური პროცესები (სურ. 1.47). თავდაპირველად ჭურჭელი, რომელშიც აირია მოთავსებული,

კონტაქტში მოჰყავთ სახურებელთან, რომლის ტემპერატურაა T_1 . აირი იზოთერმულად ფართოვდება ამ ტემპერატურაზე და ასრულებს დადებით მუშაობას – უბანი AB. ამ დროს აირი სახურებლისგან იღებს Q_1 სითბოს რაოდენობას: $A_{AB} = Q_1$. შემდეგ თბოიზოლირებულ ჭურჭელში მოთავსებული აირი უკვე ადიაბატურად ფართოვდება – უბანი BC. ამ დროს აირის ტემპერატურა მცირდება მაცივრის T_2 ტემპერატურამდე. შინაგანი ენერჯიის ცვლილება ΔU_{BC} მთლიანად მექანიკურ მუშაობად გარდაიქმნება ($Q = 0$):

$$A_{BC} = -\Delta U_{BC}.$$

ამის შემდეგ აირი კონტაქტში მოჰყავთ მაცივართან და T_2 ტემპერატურაზე იზოთერმული შეკუმშვისას ის მაცივარს Q_2 სითბოს რაოდენობას გადასცემს – უბანი CD:



იზოთერმული გაფართოება ადიაბატური გაფართოება იზოთერმული შეკუმშვა ადიაბატური შეკუმშვა

სურ. 1.47

$$A_{CD} = Q_2.$$

ციკლის ბოლო ეტაპზე თბოიზოლირებულ ჭურჭელში მოთავსებული აირი ადიაბატურად იკუმშება და უბრუნდება საწყის მდგომარეობას – უბანი DA.

ასეთი სითბური მანქანის მქკ-თვის კარნომ მიიღო შემდეგი ფორმულა:

$$\eta_{\text{მაქს.}} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}.$$

T_1 ტემპერატურის სახურებლისა და T_2 ტემპერატურის მაცივრის მქონე ნებისმიერ რეალურ სითბურ მანქანას შეუძლებელია ჰქონდეს მქკ, რომელიც იდეალური სითბური მანქანის მქკ-ზე მეტი იქნება:

$$\frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \leq \frac{T_1 - T_2}{T_1}.$$

ამ ფორმულიდან ჩანს, რომ სითბური მანქანის მქკ-ის გასაზრდელად საჭიროა მაცივრის ტემპერატურის შემცირება და (ან) სახურებლის ტემპერატურის მომატება. მაცივრის ტემპერატურის შემცირება გარემოს ტემპერატურაზე დაბლა, პრაქტიკულად შეუძლებელია, სახურებლის ტემპერატურის მატება კი შეზღუდულია იმ ნივთიერების თბომდეგობით, რომლისგანაც სითბური მანქანის ნაწილებია დამზადებული. ამჟამად მეცნიერების და ინჟინრების ძალისხმევა იქეთაა მიმართული, რომ ძრავას მქკ გაზარდონ მის ნაწილებს შორის ხახუნისა და სანვავის არასრული წვით გამოწვეული დანაკარგების შემცირების ხარჯზე.

დასკვნები:

- სითბური ძრავა ციკლურად მომუშავე მანქანაა, რომელიც სანვავის შინაგან ენერგიას მექანიკურ ენერგიად გარდაქმნის;
- სითბური ძრავას მარგი ქმედების კოეფიციენტი (მქკ) ფიზიკური სიდიდეა, რომელიც გვიჩვენებს სანვავის დანვისას გამოყოფილი ენერგიის რა ნაწილი

გარდაიქმნება სასარგებლო მუშაობად: $\eta = \frac{A'}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}$;

- T_1 ტემპერატურის სახურებლისა და T_2 ტემპერატურის მაცივრის მქონე ნებისმიერ რეალურ სითბურ მანქანას შეუძლებელია ჰქონდეს მქკ, რომელიც

იდეალური სითბური მანქანის მქკ-ზე მეტი იქნება: $\frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \leq \frac{T_1 - T_2}{T_1}$.

საკონტროლო კითხვები:

1. რომელი ძირითადი ელემენტებისაგან შედგება სითბური მანქანა?
2. როგორი პროცესები განიხილება კარნოს ციკლში?
3. რატომაა შეუძლებელი სითბური ძრავას მქკ 100%-ის ტოლი იყოს?
4. რა ფორმულით გამოითვლება იდეალური სითბური ძრავას მქკ?



ერთად ამოვხსნათ ამოცანა

იდეალური სითბურ ძრავას სახურებელში 2 ლ ბენზინის დანვისას გამოყოფილი სითბოს რაოდენობა მთლიანად მუშა სხეულს გადაეცა, რომელმაც სითბოს რაოდენობის გარკვეული ნაწილი 47°C ტემპერატურის მაცივარს გადასცა. განსაზღვრეთ სახურებლის ტემპერატურა და სითბური ძრავას სასარგებლო მუშაობა, თუ მუშა სხეულის

მიერ მაცივარზე გადაცემული სითბოს რაოდენობა მის მიერ შესრულებულ მუშაობაზე 2-ჯერ მეტია.

მოცემულია: $\rho=710 \text{ კგ/მ}^3$; $V=2 \cdot 10^{-3} \text{ მ}^3$; $q=4,6 \cdot 10^7 \text{ ჯ/კგ}$; $T_2=320 \text{ K}$; $Q_2=2A'$. $T_1=?$

ამოხსნა: ჯერ განვსაზღვროთ სითბური ძრავას მქკ: $\eta = \frac{A'}{Q_1} = \frac{A'}{A' + Q_2} = \frac{1}{3}$;

ვიცით, რომ სანვავის დანვის შედეგად გამოყოფილი სითბოს რაოდენობა გამოითვლება ფორმულით: $Q_1=q \cdot m=q \cdot \rho V=6,532 \cdot 10^7 \text{ ჯ}$. შესაბამისად, $A' = \frac{Q_1}{3} \approx 2,2 \cdot 10^7 \text{ ჯ}$. რადგან ძრავა იდეალურია, მისი მქკ-ს ჩანერა შესაძლებელია ასევე სახურებლისა და

მაცივრის აბსოლუტური ტემპერატურებით: $\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$. ამ გამოსახულებაში რიცხვითი მნიშვნელობების ჩასმით მივიღებთ: $T_1=480 \text{ K}$.

პასუხი: სითბური ძრავას სასარგებლო მუშაობა $\approx 2,2 \cdot 10^7 \text{ ჯ}$ -ია, ხოლო სახურებლის ტემპერატურა 480 K .



ამოხსენით ამოცანები:

1. სითბურ ძრავაში სახურებლის მიერ მუშა სხეულზე გადაცემული სითბოს რაოდენობა 4-ჯერ აღემატება სითბური ძრავას მიერ შესრულებულ მუშაობას. განსაზღვრეთ სითბური ძრავის მქკ.
2. გამოთვალეთ სითბური ძრავას სასარგებლო სიმძლავრე, თუ ძრავაში 2 წთ-ში 50 გ დიზელი დაინვა, ხოლო ძრავას მქკ 38 %-ის ტოლია.
3. რამდენით მეტია სახურებლის მიერ მუშა სხეულზე გადაცემული სითბოს რაოდენობა მუშა სხეულის მიერ მაცივარზე გადაცემულ სითბოს რაოდენობაზე, თუ სითბურ ძრავას მქკ 32 %-ია, სასარგებლო მუშაობა კი – 125 კჯ.
4. სითბურ ძრავაში სახურებლის მიერ მუშა სხეულზე გადაცემული სითბოს რაოდენობა 1,2-ჯერ აღემატება მუშა სხეულის მიერ მაცივარზე გადაცემულ სითბოს რაოდენობას. გამოთვალეთ ამ ძრავას მქკ.
5. რისი ტოლია სითბური ძრავას მარგი ქმედების კოეფიციენტი, თუ მუშა სხეულის მიერ შესრულებული მუშაობა მაცივარზე გადაცემული სითბოს რაოდენობის 3/7 ნაწილია?
6. სითბურ ძრავაში სანვავის წვის შედეგად გამოყოფილი ენერგია $9 \cdot 10^7 \text{ ჯ}$ -ია. მაცივარზე გადაცემული სითბოს რაოდენობა კი მისი 3/4 ნაწილია. გამოთვალეთ სასარგებლო მუშაობა და ძრავას მქკ.
7. იდეალურ სითბური ძრავას სახურებლის ტემპერატურა $627 \text{ }^\circ\text{C}$ -ია, ხოლო მქკ – 35 %. დაადგინეთ მაცივრის ტემპერატურა.
8. განსაზღვრეთ იდეალური სითბური ძრავას სახურებლის ტემპერატურა, თუ ცნობილია, რომ სანვავის დანვის შედეგად გამოყოფილი სითბოს რაოდენობის 4/6 ნაწილი $17 \text{ }^\circ\text{C}$ ტემპერატურის მაცივარს გადაეცა.
9. იდეალური სითბური ძრავას სახურებლის ტემპერატურა $712 \text{ }^\circ\text{C}$ -ია, მაცივრისა კი – 685 K . ცნობილია, რომ სახურებელმა მუშა სხეულს 13,8 მგჯ სითბოს რაოდენობა გადასცა. განსაზღვრეთ რამდენით ნაკლებია მუშა სხეულის მიერ შესრულებული მუშაობა მაცივარზე გადაცემულ სითბოს რაოდენობაზე.
10. იდეალური სითბურ ძრავას სახურებლის ტემპერატურა 750 K -ია, მაცივრისა კი – 450 K . იპოვეთ მუშა სხეულის მიერ შესრულებული მუშაობა, თუ ცნობილია, რომ ძრავაში 5 ლ ბენზინი სრულად დაინვა.

§ 1.16 შიგანვის ძრავა და სამაცივრე დანადგარი

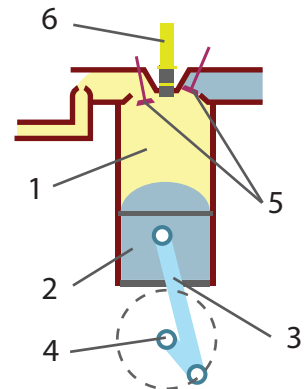
სითბურ ძრავებს დიდი ადგილი უჭირავს თანამედროვე ყოფა-ცხოვრებასა და ტექნიკაში. VIII კლასში თქვენ გაეცანით ერთ-ერთი სითბური მანქანის – ორთქლის ტურბინის მოქმედების პრინციპს. ახლა კიდევ რამდენიმე სითბური ძრავა განვიხილოთ.



ნიკოლაუს აუგუსტ ოტო
(1832-1891)

ერთ-ერთი ყველაზე გავრცელებული სითბური მანქანა **ოთხტაქტიანი შიგანვის ძრავაა**, რომელიც 1878 წელს შექმნა გერმანელმა მეცნიერმა და გამომგონებელმა ნიკოლაუს აუგუსტ ოტომ. ორთქლის ტურბინისაგან განსხვავებით, შიგანვის ძრავაში საწვავი უშუალოდ მის ცილინდრებში იწვეს.

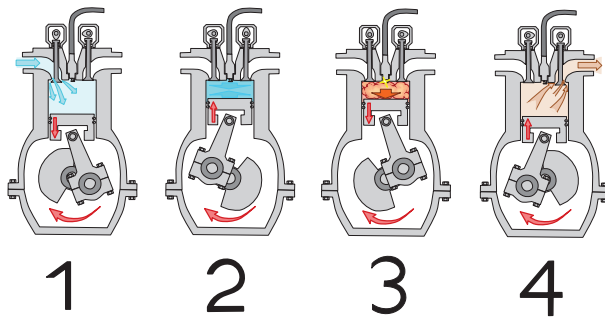
შიგანვის ძრავა სქემატურად სურ. 1.48-ზეა ნაჩვენები. ის შედგება შემდეგი ნაწილებისაგან: ცილინდრი 1, რომელშიც მჭიდროდ მორგებული დგუში 2 მოძრაობს; ბარბაცა 3, რომელიც დგუშს მუხლა ლილვთან 4 აკავშირებს და მის ბრუნვას იწვევს.



სურ. 1.48

მუხლა ლილვის ბრუნვა სხვადასხვა მუშაობის შესასრულებლად გამოიყენება; ცილინდრის ზედა ნაწილში გაკეთებულია ორი არხი, რომლებიც იხსნება და იკეტება სარქველებით 5. შემშვები სარქველი საწვავი ნარევი მიეწოდება ცილინდრში, ხოლო გამშვები სარქველი ცილინდრიდან ნამუშევარი აირები გამოიღვენება. ოტოს ძრავაში ცილინდრის ზედა ნაწილში განთავსებულია საწვავი ნარევის აალების მოწყობილობა – აალების სანთელი 6, რომელიც ელექტრულ ნაპერწკალს იძლევა.

განვიხილოთ ელექტრული აალების მქონე ოთხტაქტიანი შიგანვის ძრავის მუშა ციკლი (სურ. 1.49).



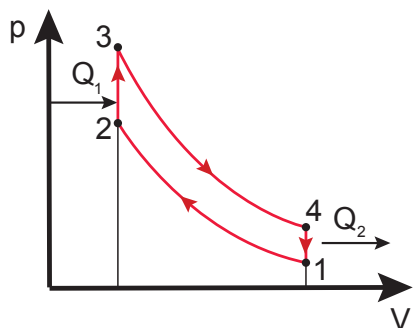
სურ. 1.49

პირველი ტაქტი – შეწოვა. დგუში მოძრაობს ქვევით, რის გამოც ცილინდრში წნევა მცირდება. ამ დროს იხსნება შემშვები სარქველი და ცილინდრში საწვავი ნარევი შეიწოვება. შეწოვის დასრულებისას შემშვები სარქველი იკეტება.

მეორე ტაქტი – შეკუმშვა. ამ ტაქტის განმავლობაში ორივე სარქველი დაკეტილია. დგუში მოძრაობს ზევით და საწვავ ნარევის კუმშავს. როდესაც დგუში კიდურა ზედა მდგომარეობას მიაღწევს, აალების სანთელში წარმოიქმნება ნაპერწკალი, რომელიც საწვავი ნარევის აფეთქებას იწვევს.

მესამე ტაქტი – მუშა სვლა. საწვავის დაწვისას მისი ტემპერატურა მკვეთრად მატულობს, რაც იწვევს წნევის გაზრდას. შედეგად, აირი ფართოვდება და დგუში მოძრაობს ქვევით. ეს მოძრაობა გადაეცემა ბარბაცას, რომელიც უბიძგებს მუხლა

ლილვს და აიძულებს მას იბრუნოს – სრულდება სასარგებლო მუშაობა. ტაქტის ბოლოს გამშვები სარქველი იხსნება.



სურ. 1.50

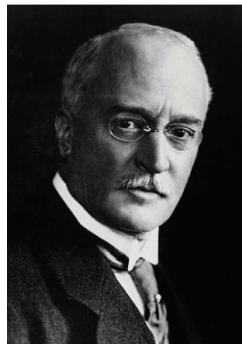
მეოთხე ტაქტი – განოვა. დგუში მოძრაობს ზევით და გამშვები სარქველიდან ნამუშევარი აირები ატმოსფეროში გამოიდევენება. სითბოს გარკვეული რაოდენობა გარემოში გაიფანტება. ტაქტის ბოლოს გამშვები სარქველი დაიკეტება.

ახლა განვიხილოთ ცალკეულ ტაქტებში მიმდინარე თერმოდინამიკური პროცესები. სანვავი ნარევი, რომლის სანყისი პარამეტრებია p_1, V_1 და T_1 , იკუმშება ადიაბატურად. სურ. 1. 50-ზე მას 1-2 უბანი შეესაბამება. იზოქორულ პროცესში (უბანი 2-3) მუშა სხეულს Q_1 სითბოს რაოდენობა გადაეცემა. ადიაბატურ პროცესში (უბანი 3-4) მუშა სხეული ფართოვდება

სანყის $V_4=V_1$ მოცულობამდე. იზოქორულ პროცესში (უბანი 4-1) მუშა სხეული გადასცემს მაცივარს Q_2 სითბოს რაოდენობას და უბრუნდება სანყის მდგომარეობას.

შიგანვის ძრავას მუშა ციკლს ახასიათებენ **შეკუმშვის ხარისხით** – $\varepsilon = \frac{V_1}{V_2}$ და **წნევის ზრდის ხარისხით** – $\lambda = \frac{p_3}{p_2}$.

ამ ციკლის შემადგენელი თერმოდინამიკური პროცესების ანალიზით დადგინდა, რომ შეკუმშვის ხარისხის ზრდით იზრდება ციკლის მქკ. ამის მიზეზი ისაა, რომ შეკუმშვის ხარისხის ზრდით იზრდება შეკუმშვის ტაქტის ბოლოს სანვავი ნარევის სანყისი ტემპერატურა, რაც მის უფრო სრულ დანვას უწყობს ხელს. შეკუმშვის ხარისხს აქვს ზედა ზღვარი, რადგან მისი დიდი მნიშვნელობისას სანვავი აირი თვითააღდება მანამ, ვიდრე დგუში ზედა წერტილს მიაღწევს. თვითააღება ძრავის რღვევას, სიმძლავრისა და მქკ-ის შემცირებას გამოიწვევდა. თანამედროვე ძრავებში შეკუმშვის ხარისხის მნიშვნელობა ჩვეულებრივ 8-9-ს შეადგენს.



რუდოლფ ქრისტოან დიზელი (1858-1913)

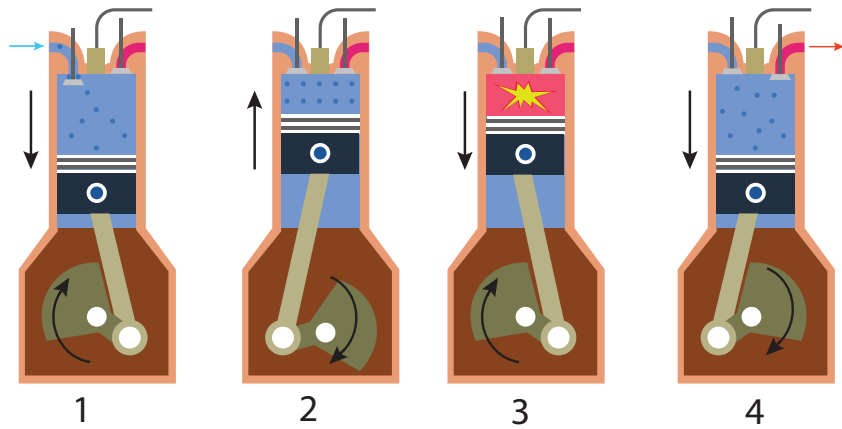
შიგანვის ძრავებში გამოიყენება როგორც თხევადი სანვავი (მაგალითად, ბენზინი), ასევე აირადი სანვავი (მაგალითად, ბუნებრივი აირი).

ოტოს ძრავას პირველი ნიმუშის მქკ 22% იყო, რაც იმ დროისათვის დიდ მიღწევად მიიჩნეოდა. როგორ შეიძლება გავზარდოთ მქკ და მოვიხმაროთ ნებისმიერი იაფი თხევადი სანვავი – ნავთობი, მახუთი და ა.შ.?

1892 წელს გერმანელმა ინჟინერმა და გამომგონებელმა რუდოლფ დიზელმა შექმნა ძრავა, რომელშიც მუშა სხეულის შეკუმშვის ხარისხი კიდევ უფრო მაღალი იყო და მას სითბოს რაოდენობა მუდმივი წნევის პირობებში მიეწოდებოდა. თვითააღების გარეშე შეკუმშვის ხარისხის მაღალი მნიშვნელობა იმით მიიღწევა, რომ ამ ძრავაში იკუმშება არა სანვავი ნარევი, არამედ ჰაერი. შეკუმშვის პროცესის დამთავრების შემდეგ ცილინდრში შეიფრქვევა სანვავი. ზემოგანხილული შიგანვის ძრავასგან განსხვავებით, სანვავის ასაფეთქებლად ნაპერწკალი საჭირო არ არის, რადგან მაღალი ხარისხით ადიაბატურად შეკუმშვისას ჰაერის ტემპერატურა 600-700°C-მდე მატულობს. სანვავი, რომელიც ტუმბოთი შეიფრქვევა, გავარვარებულ ჰაერთან შეხებისას ააღდება.

განვიხილოთ ოთხტაქტიანი **დიზელის ძრავას** მუშა ციკლი (სურ. 1.51).

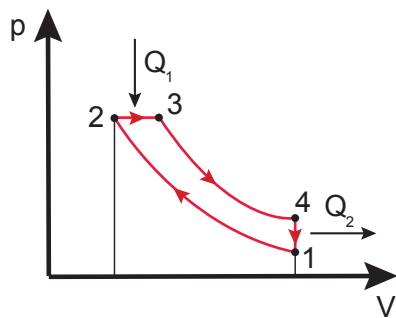
პირველი ტაქტი – დგუში მოძრაობს ქვევით, ღია შემშვები სარქველიდან ცილინდრში ჰაერი შეიწოვება.



სურ. 1.51

მეორე ტაქტი – ორივე სარქველი დაკეტილია, დგუში მოძრაობს ზევით. ძლიერი შეკუმშვის გამო ჰაერი 700°C -ზე მეტ ტემპერატურამდე ცხელდება.

მესამე ტაქტი – ცილინდრში შეიფრქვევა დიზელის სანვავი. სანვავისა და გახურებული ჰაერის ნარევი აალებს, ფართოვდება და უბიძგებს დგუშს – სრულდება მუშაობა.



სურ. 1.52

მეოთხე ტაქტი – დგუში ადის მაღლა და გამშვები სარქველიდან ნამუშევარი აირები გაიღვენება ატმოსფეროში. ტაქტის ბოლოს გამშვები სარქველი დაიკეტება. სითბოს გარკვეული რაოდენობა გაიფანტება გარემოში.

აღვწერთ ამ დროს მიმდინარე თერმოდინამიკური პროცესები. თავიდან აირი, რომლის სანყისი პარამეტრებია p_1, V_1 და T_1 ადიაბატურად იკუმშება. სურ. 1.52-ზე მას 1-2 უბანი შეესაბამება. იზობარულ პროცესში (უბანი 2-3) მუშა სხეულს გარე წყაროდან Q_1 სითბოს რაოდენობა გადაეცემა. ადიაბატური გაფართოებისას (უბანი 3-4) მუშა

სხეული სანყის მოცულობას უბრუნდება ($V_4=V_1$). იზოქორულ პროცესში (უბანი 4-1) მუშა სხეული მაცივარს Q_2 სითბოს რაოდენობას გადასცემს და სანყის მდგომარეობას უბრუნდება.

დიზელის ძრავას მუშა ციკლს ახასიათებენ შეკუმშვის ხარისხით – $\varepsilon = \frac{V_1}{V_2}$ და

წინასწარი გაფართოების ხარისხით – $\rho = \frac{V_3}{V_2}$.

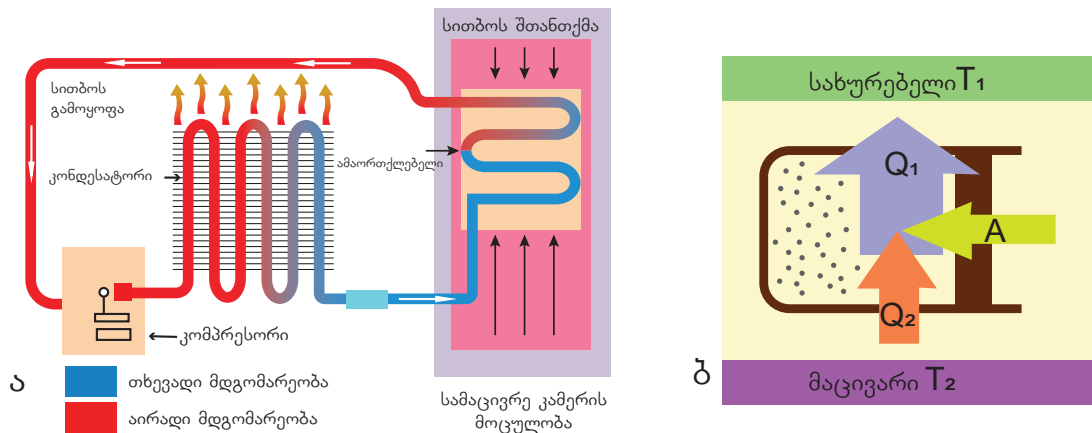
ამ ციკლის შემადგენელი თერმოდინამიკური პროცესების ანალიზით დადგინდა, რომ შეკუმშვის ხარისხის ზრდით ციკლის მქე იზრდება, ხოლო წინასწარი გაფართოების ხარისხის ზრდით – მცირდება.

თანამედროვე დიზელის ძრავების შეკუმშვის ხარისხი 16-21-ის ფარგლებში იცვლება, მქე კი დაახლოებით 40%-ია.

განვიხილოთ კიდევ ერთი სითბური ძრავა – სამაცივრე მანქანა.

სამაცივრე მანქანა ციკლური მოქმედების დანადგარია, რომელიც სამაცივრე კამერაში გარემოსთან შედარებით უფრო დაბალ ტემპერატურას ქმნის და ინარჩუნებს.

სამაცივრე მოწყობილობის მუშაობის პრინციპი ნაჩვენებია სურ. სურ. 1.53 ა-სა და ბ-ზე. მუშა სხეულს სამაცივრო დანადგარში წარმოადგენს ადვილად აქროლადი სითხის – რეფრაგენტის ორთქლი, რომელიც იკუმშება და კონდენსირდება. კონდენსაციის დროს გამოიყოფა დიდი სითბოს რაოდენობა Q_1 , რომელიც რადია-



სურ. 1.53

ტორის (კონდენსატორის) მეშვეობით გარემოს გადაეცემა. ორთქლის შეკუმშვა ხორციელდება კომპრესორით, რომელიც ელექტროენერჯის ხარჯზე A მექანიკურ მუშაობას ასრულებს.

ამაორთქლებელში რეფრაგენტი ორთქლდება და ამ დროს სამაცივრე კამერიდან შთანთქავს Q_2 სითბოს რაოდენობას. რადგან ორთქლის შეკუმშვა მიმდინარეობს უფრო დიდი წნევის პირობებში, ვიდრე გაფართოება, ამიტომ აირის მუშაობა $A' = Q_2 - Q_1 < 0$. გარე ძალების მიერ შესრულებული მუშაობა კი ციკლის განმავლობაში დადებითი იქნება $A = Q_1 - Q_2 > 0$. ე.ი. ასეთი ციკლის დროს **სამაცივრე დანადგარი იღებს სითბოს რაოდენობას სამაცივრე კამერიდან და მას გარემოს გადასცემს.**

სამაცივრე დანადგარის მუშაობის ეფექტურობას ახასიათებენ **გაცივების კოეფიციენტი**, რომელიც ტოლია სამაცივრე კამერიდან მიღებული სითბოს რაოდენობის ფარდობისა გარე ძალების მიერ შესრულებულ მუშაობასთან:

$$k = \frac{Q_2}{A} = \frac{Q_2}{Q_1 - Q_2}.$$

k კოეფიციენტის მნიშვნელობა შეიძლება ერთზე მეტი იყოს. გაცივების კოეფიციენტის მაქსიმალური მნიშვნელობა ტოლი იქნება:

$$k_{\text{მაქს}} = \frac{T_2}{T_1 - T_2}.$$

თუ რადიატორს შენობის გარეთ გავიტანთ, ხოლო სამაცივრე კამერას შენობაში განვათავსებთ, მივიღებთ **კონდიციონერს** – სამაცივრე დანადგარს, რომელიც ართმევს სითბოს რაოდენობას შენობაში არსებულ ჰაერს და გარემოს გადასცემს. კონდიციონერი გამოიყენება შენობაში ჰაერის გაგრილებისთვის.

შენობის გათბობისთვის რადიატორი უნდა დავტოვოთ შენობაში, ხოლო სამაცივრე კამერა გავიტანოთ მის ფარგლებს გარეთ. მივიღებთ **თბოტუმბოს**, რომელიც სითბოს წაართმევს გარემოს და გადასცემს მას შენობაში არსებულ ჰაერს. თბოტუმბო უფრო ეფექტურია, ვიდრე ჩვეულებრივი ელექტროგათბობელი, რადგან $Q_2 > A$ ($Q_2 = A + Q_1$). თანამედროვე კონდიციონერებს აქვს მუშაობის ორი რეჟიმი: გაცივებისა და გათბობის.

§ 1.17 ფაზური გადასვლა ორთქლი-სითხე

მოლეკულურ-კინეტიკურ თეორიაზე დაყრდნობით შეგვიძლია ავხსნათ რატომ არის შესაძლებელი ნივთიერება იმყოფებოდეს აირად, თხევად და მყარ მდგომარეობაში, ასევე აღინეროს ერთი აგრეგატული მდგომარეობიდან მეორეში გადასვლის პროცესი.

აირებსა და სითხეებში ნივთიერების შემადგენელი ნაწილაკები უწყვეტად განლაგებული, კრისტალებში კი პირიქით – მკაცრი წესრიგით. მათი მონესრიგებული განლაგება ქმნის კრისტალურ სივრცულ მესერს. ერთი და იგივე ქიმიური ელემენტის მიერ წარმოქმნილ სხვადასხვა მარტივ ნივთიერებას შეიძლება რამდენიმე განსხვავებული ტიპის მესერი ჰქონდეს. შესაბამისად, შესაძლებელია არსებობდეს კრისტალის სხვადასხვა მოდიფიკაცია, რომლებსაც განსხვავებული ფიზიკური თვისებები აქვს. ამის მაგალითია ნახშირბადის ორი კრისტალური მოდიფიკაცია – გრაფიტი და ალმასი. ბუნებაში გვხვდება ყინულის ხუთი მოდიფიკაციის კრისტალი, ხელოვნურად კი მიღებულია უფრო მეტი.

სწორედ ამიტომ, ფიზიკაში აგრეგატული მდგომარეობის ცნებასთან ერთად, შემოღებულია ფაზის ცნება. **ფაზა ნივთიერების წონასწორული მდგომარეობაა, რომელიც იმავე ნივთიერების სხვა მდგომარეობებისაგან ფიზიკური თვისებებით განსხვავდება.** ნივთიერებას აირად და თხევად ფაზებთან ერთად, ერთი ან რამდენიმე კრისტალური ფაზა აქვს.

ნივთიერების ერთი ფაზიდან სხვა ფაზაში გადასვლას ფაზური გადასვლა ეწოდება.

ფაზური გადასვლებისას იცვლება ნივთიერების მექანიკური, სითბური, ელექტრული და მაგნიტური თვისებები.

დავადგინოთ რა პირობებშია შესაძლებელი ნივთიერების თხევად და აირად ფაზებს შორის გადასვლა.

გაიშვიათებულ აირში ნაწილაკებს შორის მანძილი ბევრად აღემატება მათ ზომებს, ამიტომ მათ შორის მიზიდვის ძალა მცირეა, რაც საკმარისი არ არის ნაწილაკების უფრო დიდ სტრუქტურებში გასაერთიანებლად. ამ გაერთიანებას ნაწილაკების დიდი კინეტიკური ენერგიაც უშლის ხელს.

იდეალურ აირში ნაწილაკებს შორის ურთიერთქმედების საშუალო პოტენციალური ენერგია ბევრად ნაკლებია მათ საშუალო კინეტიკურ ენერგიაზე:

$$|E_{\text{პოტ}}| \ll \frac{3}{2}kT.$$

აირიდან სითხის წარმოქმნისათვის კი საჭიროა ნაწილაკებს შორის მიზიდვა იმდენად მნიშვნელოვანი იყოს, რომ მათი ურთიერთქმედების საშუალო პოტენციალური ენერგია საშუალო კინეტიკურ ენერგიას აღემატებოდეს:

$$|E_{\text{პოტ}}| \geq \frac{3}{2}kT.$$

მოყვანილი მსჯელობიდან შეგვიძლია დავასკვნით, რომ აირადიდან თხევად მდგომარეობაში გადასვლა შესაძლებელია მხოლოდ ისეთ ტემპერატურაზე, რომელიც გარკვეულ კრიტიკულ ტემპერატურაზე ნაკლებია:

$$T < T_{\text{კრ.}} = \frac{2}{3} \frac{|E_{\text{პოტ}}|}{k}.$$

თუ აირის ტემპერატურა კრიტიკულზე მეტია ($T > T_{\text{კრ.}}$), მას თხევად მდგომარეობაში ვერ გადავიყვანთ.

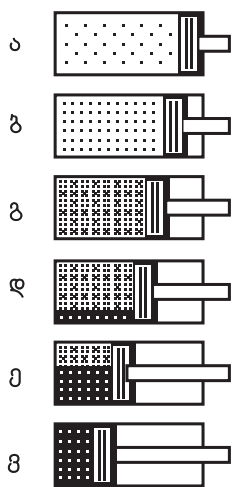
აირად მდგომარეობაში მყოფ ნივთიერებას, რომლის ტემპერატურა ნაკლებია

კრიტიკულ ტემპერატურაზე, ამ ნივთიერების ორთქლი ეწოდება. ორთქლის გადაყვანა თხევად მდგომარეობაში შესაძლებელია.

კრიტიკული ტემპერატურა დამოკიდებულია ნაწილაკების ურთიერთქმედების პოტენციალურ ენერგიაზე. ვინაიდან სხვადასხვა ნივთიერების შემადგენელ ნაწილაკებს შორის ურთიერთქმედების ძალები განსხვავებულია, მათი კრიტიკული ტემპერატურებიც განსხვავებული იქნება.

კრიტიკული ტემპერატურა ის მაქსიმალური ტემპერატურაა, რომელზეც შესაძლებელია ორთქლის სითხედ გადაქცევა.

მოვიყვანოთ მაგალითი: წყლის მოლეკულებს შორის ურთიერთქმედება ძლიერია, ამიტომ წყლის ორთქლი სითხედ შეიძლება გადავაქციოთ **647K** ტემპერატურაზეც კი. ჰელიუმის ატომებს შორის ურთიერთქმედება ძალიან სუსტია, ამიტომ მისი გათხევადება შესაძლებელია ტემპერატურაზე, რომლის მნიშვნელობა **5,2 K** არ აღემატება.



სურ. 1.54

მეორე მაკროსკოპული პარამეტრი, რომელიც გავლენას ახდენს ორთქლი-სითხე გადასვლაზე, ორთქლის წნევაა. კერძოდ, აირის შეკუმშვის დროს გარე წნევის ზრდა ნაწილაკებს შორის საშუალო მანძილის შემცირებას იწვევს, რაც მათ შორის ურთიერთქმედების საშუალო პოტენციალური ენერგიის მოდულს ზრდის.

თანმიმდევრულად განვიხილოთ დგუშიან ცილინდრში მოთავსებული კრიტიკულზე ნაკლები ტემპერატურის ($T < T_{კრ.}$) ორთქლის გათხევადების პროცესი (სურ. 1.54 ა).

ორთქლის იზოთერმული შეკუმშვისას ($T = \text{const}$) ნაწილაკების კონცენტრაცია იზრდება, შესაბამისად მატულობს ორთქლის წნევა (სურ. 1.54 ბ), მაგრამ ნაწილაკების საშუალო პოტენციალური ენერგია მცირეა და მიზდვის ძალა მათი გაერთიანებისთვის ჯერ საკმარისი არ არის. ორთქლის მოცულობის შემდგომი შემცირებისას ნაწილაკებს შორის საშუალო მანძილი იმდენად მცირდება, რომ მათი ურთიერთმიზიდვის შედეგად წარმოიქმნება სითხის წვეთები, იწყება კონდენსაცია (სურ. 1.54 გ).



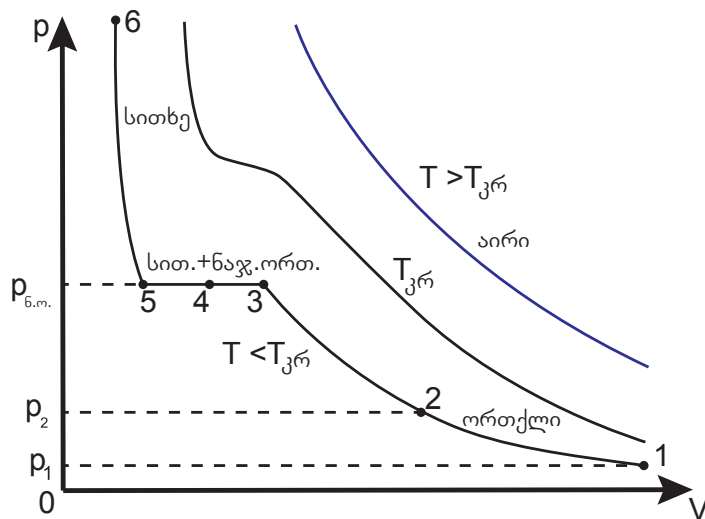
ორთქლის გადასვლას აირადიდან თხევად მდგომარეობაში კონდენსაცია ეწოდება.

სითხის თავისუფალი ზედაპირიდან ორთქლად-ქცევის პროცესს აორთქლება ეწოდება.

თუ კონდენსაციისას მოცულობას არ შევცვლით, წარმოქმნილი სითხის მასა არ შეიცვლება. ამის მიზეზი კონდენსაციისა და აორთქლების პროცესებს შორის **დინამიკური წონასწორობის** დამყარებაა – დროის რაიმე შუალედში ორთქლის კონდენსირებული მოლეკულების რაოდენობა იმავე დროში სითხიდან აორთქლებული მოლეკულების რაოდენობას უტოლდება.

ორთქლს, რომელიც დინამიკურ წონასწორობაშია თავის სითხესთან, ნაჯერი ორთქლი ეწოდება.

სითხისა და მისი ნაჯერი ორთქლის შემდგომი შეკუმშვით იზრდება კონდენსირებული სითხის მასა და, შესაბამისად, მცირდება ნაჯერი ორთქლის მასა (სურ. 1.54 დ, ე). ამ დროს რამდენჯერაც მცირდება ორთქლის მოცულობა, იმდენჯერ მცირდება ნაწილაკების რაოდენობა მასში, ამიტომ ნაწილაკების კონცენტრაცია რჩება მუდმივი. შესაბამისად, როდესაც ცილინდრში არის სითხეც და მისი ნაჯერი ორთქლიც, $p = nkT$ ფორმულის თანახმად, ორთქლის წნევა მუდმივი რჩება. ორთქლის მთლიანი კონდენსაციის შემდეგ სითხის მხოლოდ უმნიშვნელო შეკუმშვაა შესაძლებელი (სურ. 1.54 ვ). სითხის შეკუმშვისათვის საჭირო წნევის მკვეთრი ზრდა მისი მცირე კუმშვადობით აიხსნება.



სურ. 1.55

სურ. 1.55-ზე გამოსახულია აირის გათხევადების იზოთერმა, რომელზეც აღნიშნული 1-დან 6-მდე წერტილები სურ. 1.54 -ზე ნაჩვენებ ორთქლის მდგომარეობებს შეესაბამება. ამ სურათზე ასევე გამოსახულია კრიტიკული და კრიტიკულზე მეტი ტემპერატურების შესაბამისი იზოთერმები.

დასკვნები:

- ფაზა ნივთიერების წონასწორული მდგომარეობაა, რომელიც იმავე ნივთიერების სხვა მდგომარეობებისაგან ფიზიკური თვისებებით განსხვავდება;
- ნივთიერების ერთი ფაზიდან სხვა ფაზაში გადასვლას ფაზური გადასვლა ეწოდება;
- აირადიდან თხევად მდგომარეობაში გადასვლა შესაძლებელია მხოლოდ ისეთ ტემპერატურაზე, რომელიც გარკვეულ კრიტიკულ ტემპერატურაზე ნაკლებია:

$$T < T_{კრ.} = \frac{2}{3} \frac{|E_{კოტ}|}{k};$$

- კრიტიკული ტემპერატურა ის მაქსიმალური ტემპერატურაა, რომელზეც შესაძლებელია ორთქლის სითხედ გადაქცევა;
- აირად მდგომარეობაში მყოფ ნივთიერებას, რომლის ტემპერატურა ნაკლებია კრიტიკულ ტემპერატურაზე, ამ ნივთიერების ორთქლი ეწოდება;
- ორთქლს, რომელიც დინამიკურ წონასწორობაშია თავის სითხესთან, ნაჯერი ორთქლი ეწოდება.

საკონტროლო კითხვები:

1. ნივთიერების რომელი თვისებები იცვლება ფაზური გადასვლებისას?
2. რატომაა ჰელიუმის გათხევადების ტემპერატურა ძალიან დაბალი?
3. რას ნიშნავს სითხისა და მისი ნაჯერი ორთქლის დინამიკური წონასწორობა?

§ 1.18 ნაჯერი ორთქლის წნევა. დუღილი



სურ. 1.56

სითხიან დახშულ ჭურჭელში ორთქლის მოლეკულების კონცენტრაციას მაქსიმალური მნიშვნელობა მაშინ აქვს, როდესაც ორთქლი ნაჯერია, ანუ როდესაც გარკვეული დროში კონდენსირებული მოლეკულების რაოდენობა იმავე დროში აორთქლებული მოლეკულების რაოდენობის ტოლია (სურ. 1.56).

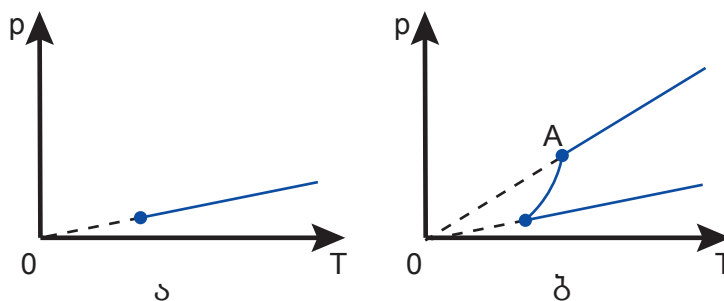
ვინაიდან ნაჯერი ორთქლის წნევა მოლეკულების კონცენტრაციის პროპორციულია, ამიტომ მოცემულ ტემპერატურაზე ორთქლის წნევა ამავე ტემპერატურის ნაჯერი ორთქლის წნევაზე მეტი არ შეიძლება იყოს.

მაშასადამე, **სითხის ნაჯერი ორთქლის წნევა არის მაქსიმალური წნევა, რომელიც შეიძლება წარმოქმნას ამ სითხის ორთქლმა მოცემულ ტემპერატურაზე.**

ნაჯერი ორთქლის კონცენტრაცია დამოკიდებულია სითხის გვარობაზე: რაც უფრო ძლიერია სითხის მოლეკულებს შორის ურთიერთქმედება, მით ნაკლებია მისი ნაჯერი ორთქლის კონცენტრაცია და, შესაბამისად, წნევაც. ცხრილში მოცემულია სხვადასხვა ნივთიერების ნაჯერი ორთქლის წნევა 20°C ტემპერატურაზე:

ნივთიერება	წნევა მმ.ვწყ.სვ.	ნივთიერება	წნევა მმ.ვწყ.სვ.
ვერცხლისწყალი	0,0013	ეთერი	442,4
წყალი	17,36	ქლორი	5798
ქლოროფორმი	160,5	ამიაკი	6384

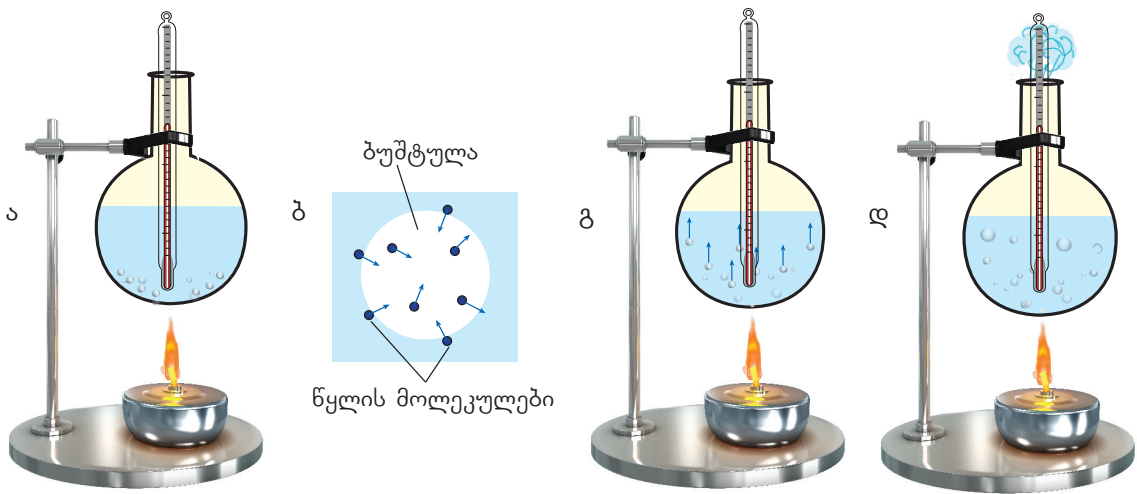
ცხადია, დახშულ ჭურჭელში ნაჯერი ორთქლის წნევა ტემპერატურაზეცაა დამოკიდებული, მაგრამ ის განსხვავდება იდეალური აირის წნევის ტემპერატურაზე დამოკიდებულებისაგან (სურ. 1.57 ა). ნაჯერი ორთქლის წნევა ტემპერატურის ზრდისას გაცილებით სწრაფად იმატებს (სურ. 1.57 ბ). ამის მიზეზი ისაა, რომ ტემპერატურის ზრდასთან ერთად ნაჯერი ორთქლის მოლეკულების კონცენტრაცია იზრდება, იდეალურ აირში კი კონცენტრაცია უცვლელია. თუ ტემპერატურას იმდენად გავზრდით, რომ სითხე მთლიანად აორთქლდება, ორთქლი გახდება არანაჯერი და მისი წნევა ტემპერატურაზე უკვე წრფივად დამოკიდებული გახდება (სურათზე A წერტილი შეესაბამება სითხის მთლიან აორთქლებას).



სურ. 1.57



ჩავატაროთ ცდა. ცეცხლგამძლე მინის ჭურჭელში ჩავასხათ წყალი და ჩავამაგროთ შტატივის თათში. დავინყოთ სპირტქურით მისი გათბობა (სურ. 1.58). წყალში ჩაშვებული თერმომეტრით დავაკვირდეთ მისი ტემპერატურის ცვლილებას. თავდაპირველად წყლის ტემპერატურა გაიზრდება და ჭურჭლის ფსკერზე და კედლებზე



სურ. 1.58

დაიწყება დიდი რაოდენობის პატარა ბუშტულების წარმოქმნა (სურ. 1.58 ა). ეს წყალში გახსნილი ჰაერის ბუშტულებია – რაც უფრო ცივია წყალი, მით მეტი ჰაერია მასში გახსნილი, ამიტომ წყლის გათბობისას ჭარბი ჰაერი ბუშტულების სახით გამოიყოფა. ეს ბუშტულები ჰაერთან ერთად შეიცავს წყლის ნაჯერ ორთქლს, რადგან აორთქლება ბუშტულებშიც მიმდინარეობს (სურ. 1.58 ბ). ტემპერატურის ზრდისას აირის მოლეკულების საშუალო კინეტიკური ენერგია იზრდება, რაც ბუშტულებში წნევის მომატებას იწვევს. როდესაც ბუშტულას შიგნით ნაჯერი ორთქლის წნევა გარე წნევას გადააჭარბებს, მისი მოცულობა ზრდას დაიწყებს. გარკვეული მოცულობის მიღწევისას ბუშტულაზე მოქმედი ამომგდები ძალა მოწყვეტს მას ფსკერიდან და ბუშტულა ზევით ამოძრავდება (სურ. 1.58 გ). ვიდრე სითხის ზედა ფენები შედარებით ცივია, აქ მოხვედრილ ბუშტულებში ორთქლი კონდენსირდება და მათი მოცულობა მკვეთრად მცირდება. ბუშტულების მოცულობის ასეთი კლება პროცესის დამახასიათებელი ხდით – შიშინით მიმდინარეობს. ამ დროს წყალი ხდება არაგამჭირვალე. როდესაც წყლის ზედა ფენებიც გაცხელდება, ბუშტულების მოცულობა ზედა ფენებში მოხვედრისას აღარ შემცირდება, პირიქით – გაიზრდება. წნევა ბუშტულებში უფრო მეტია, ვიდრე – წყლის ზედაპირზე, ამიტომ ისინი სკდება. მათში არსებული წყლის ნაჯერი ორთქლი ატმოსფეროში ამოიფრქვევა – წყალი დუღს და შიშინი წყდება (სურ. 1.58 დ). წყლის უწყვეტ დუღილს განაპირობებს ის, რომ ბუშტულას მოწყვეტის ადგილზე რჩება ჰაერის მცირე რაოდენობა, რომლიდანაც ახალი ბუშტულა წარმოიქმნება. თერმომეტრის ჩვენება დუღილისას დაახლოებით 100°C იქნება.

დუღილი სითხის მთელ მოცულობაში მიმდინარე ინტენსიური ორთქლადქცევის პროცესია, რომელსაც თან ახლავს ორთქლის ბუშტულების წარმოქმნა, ზრდა, ზედაპირზე ამოსვლა და გასკდომა.

დუღილის პროცესზე დაკვირვება გვიჩვენებს, რომ თერმომეტრის ჩვენება – 100°C არ იცვლება, მიუხედავად იმისა, რომ მდულარე წყალი სპირტურიდან კვლავ იღებს ენერგიას. ამ დროს წყალზე გადაცემული სითბოს რაოდენობა მთლიანად ხმარდება წყლის მოლეკულების ურთიერთმიზიდვის ძალების დაძლევის და მათ შორის მანძილის ზრდას. სწორედ ამიტომ, **დუღილის დროს სითხის ტემპერატურა არ იცვლება.**

ტემპერატურას, რომელზეც სითხე დუღს, დუღილის ტემპერატურა ეწოდება.

კიდევ რაზეა დამოკიდებული სითხის დუღილის ტემპერატურა? დუღილის პროცესის აღწერისას ვნახეთ, რომ ბუშტულა სკდება მაშინ, როდესაც ნაჯერი ორთქლის წნევა მის შიგნით მეტია, ვიდრე წნევა სითხის ზედაპირზე (გარე წნევა). ვინაიდან ტემპერატურის გაზრდისას ნაჯერი ორთქლის წნევა მატულობს, ამიტომ

რაც მეტია გარე წნევა, მით მაღალია სითხის დუღილის ტემპერატურა და პირიქით, გარე წნევის შემცირება დუღილის ტემპერატურის კლებას იწვევს.

დუღილის ტემპერატურა აგრეთვე სითხეებში გახსნილი აირის რაოდენობაზეა დამოკიდებული. თუ წყალს დიდი ხნის განმავლობაში ვადუღებთ, მასში გახსნილი აირი წყალს მოშორდება და ნორმალური წნევის პირობებში ის შესაძლებელია ხელმეორედ გავაცხელოთ 100°C -ზე მეტ ტემპერატურამდე. ასეთ წყალს **გადახურებულს** ეძახიან.

ერთნაირ პირობებში სხვადასხვა სითხის დუღილის ტემპერატურა განსხვავებულია. ამის მიზეზი ისაა, რომ მათი ნაჯერი ორთქლის წნევა ტემპერატურაზე სხვადასხვაგვარად არის დამოკიდებული. მოცემულ ტემპერატურაზე რომელი სითხის ნაჯერი ორთქლის წნევაც მეტია, ის სითხე უფრო დაბალ ტემპერატურაზე დუღს.

დასკვნები:

- სითხის ნაჯერი ორთქლის წნევა არის მაქსიმალური წნევა, რომელიც შეიძლება წარმოქმნას ამ სითხის ორთქლმა მოცემულ ტემპერატურაზე;
- დუღილი სითხის მთელ მოცულობაში მიმდინარე ინტენსიური ორთქლადქცევის პროცესია, რომელსაც თან ახლავს ორთქლის ბუშტულების წარმოქმნა, ზრდა, ზედაპირზე ამოსვლა და გასკდომა;
- დუღილის დროს სითხის ტემპერატურა არ იცვლება;
- ტემპერატურას, რომელზეც სითხე დუღს, დუღილის ტემპერატურა ეწოდება;
- გარე წნევის გაზრდით სითხის დუღილის ტემპერატურა იზრდება;
- სხვადასხვა სითხე განსხვავებულ ტემპერატურაზე დუღს.

საკონტროლო კითხვები:

1. რატომ იზრდება ტემპერატურის ზრდისას ნაჯერი ორთქლის წნევა უფრო სწრაფად, ვიდრე იდეალური აირისა?
2. ცივ თუ ცხელ წყალშია უფრო მეტი ჰაერი გახსნილი?
3. ჰაერის გარდა რა არის ბუშტულებში?
4. რატომ იმატებს ბუშტულების ზომა წყლის გათბობისას?
5. რატომ არ იცვლება სითხის ტემპერატურა დუღილისას?
6. როგორ შეიძლება გავზარდოთ (შევამციროთ) სითხის დუღილის ტემპერატურა?

§ 1.19 ჰაერის ტენიანობა. ნამის წერტილი

ოკეანეების, ზღვების, ტბების, მდინარეებისა და ყინულის საფარის საერთო ფართობი დედამიწის ზედაპირის დაახლოებით 71%-ს შეადგენს. ჩვენ პლანეტაზე სულ დაახლოებით 1400 მილიონი კმ³ მოცულობის წყალია. მცენარეები და ცოცხალი ორგანიზმები საშუალოდ 50% წყალს შეიცავს. აორთქლების შედეგად ატმოსფეროში წვეთების, თოვლის კრისტალებისა და წყლის ორთქლის სახით დაახლოებით 13-15 ათასი კმ³ წყალია. ატმოსფეროში შემავალი წყლის ორთქლი ზეგავლენას ახდენს კლიმატსა და ამინდზე, შესაბამისად, ადამიანის სასიცოცხლო აქტივობაზე. რა ფიზიკური სიდიდეებით ხასიათდება ატმოსფეროში არსებული წყლის ორთქლი?

ჰაერს, რომელიც წყლის ორთქლს შეიცავს, **ტენიან ჰაერს** უწოდებენ. მისი ძირითადი რაოდენობრივი მახასიათებლებია აბსოლუტური და ფარდობითი ტენიანობა.

აბსოლუტური ტენიანობა ეწოდება ფიზიკურ სიდიდეს, რომელიც ახასიათებს ჰაერში წყლის ორთქლის შემცველობას და რიცხობრივად ჰაერის მოცულობის ერთეულში შემავალი წყლის ორთქლის მასის ტოლია. მას $\rho_{\text{ორთქ}}$ -ით აღნიშნავენ:

$$\rho_{\text{ორთქ}} = \frac{m_{\text{H}_2\text{O}}}{V}. \quad (1)$$

SI-ში აბსოლუტური ტენიანობის ერთეულია კგ/მ³.

ჩვეულებრივ, აბსოლუტურ ტენიანობას გ/მ³-ში ზომავენ. ეკვატორის სიახლოვეს აბსოლუტური ტენიანობის მნიშვნელობამ შეიძლება 30 გ/მ³-ს მიაღწიოს, პოლუსებთან კი – 0,1 გ/მ³-ს.

აბსოლუტური ტენიანობის განმარტებიდან გამომდინარეობს, რომ ის მოცემულ პირობებში ჰაერში არსებული წყლის ორთქლის სიმკვრივის ტოლია.

რადგან ჰაერი სხვადასხვა აირებისა და წყლის ორთქლის ნარევაა, ამიტომ ატმოსფერული წნევა ამ აირებისა და წყლის ორთქლის პარციალური წნევების ჯამის ტოლია. მენდელეევი-კლაპეირონის განტოლების გამოყენებით, ორთქლის სიმკვრივე შეიძლება მისი პარციალური წნევით გამოვსახოთ:

$$\rho_{\text{ორთქ}} = \frac{pM}{RT}, \quad (2)$$

რომელშიც $M=18$ გ/მოლი წყლის მოლური მასაა, T – ჰაერის აბსოლუტური ტემპერატურა.

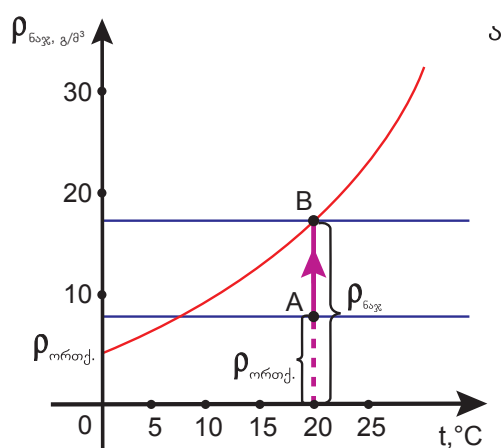
როდესაც ჰაერში არსებული წყლის ორთქლი ნაჯერია, ადამიანის სხეულიდან სითხე პრაქტიკულად არ ორთქლდება, რაც ორგანიზმის თერმორეგულაციას აძნელებს. რეალურად, წყლის ორთქლი ატმოსფეროში იშვიათადაა ნაჯერი – ჰაერის მასების განუწყვეტელი გადაადგილების გამო, დედამიწის ზოგიერთ ადგილას აორთქლება სჭარბობს კონდენსაციას, ზოგან კი კონდენსაცია – აორთქლებას. ერთსა და იმავე ტემპერატურაზე ჰაერში წყლის ორთქლის შემცველობა შეიძლება იცვლებოდეს ნულიდან (აბსოლუტურად მშრალი ჰაერი) მაქსიმალურ ტენიანობამდე (ნაჯერი ორთქლი). იმისთვის, რომ ვიცოდეთ, თუ რამდენად შორსაა მოცემულ ტემპერატურაზე წყლის ორთქლი ნაჯერობიდან, შემოიღეს ჰაერის ტენიანობის მეორე მახასიათებელი – **ფარდობითი ტენიანობა.**

ჰაერის ფარდობითი ტენიანობა ეწოდება ფიზიკურ სიდიდეს, რომელიც რიცხობრივად ტოლია აბსოლუტური ტენიანობის ფარდობისა ამ ტემპერატურაზე წყლის ნაჯერი ორთქლის სიმკვრივესთან. მას φ აოსთი აღნიშნავენ და ჩვეულებრივ, პროცენტებში გამოსახავენ:

$$\varphi = \frac{\rho_{\text{ორთქ}}}{\rho_{\text{ნაჯ}}}} \cdot 100\%. \quad (3)$$

მოცემულ ტემპერატურაზე ნაჯერი ორთქლის სიმკვრივეს და წნევას განსაზღვრული მნიშვნელობები აქვს. ისინი მოცემულია ცხრილში:

t, °C	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30
p _{ნაჯ.} კპა	0,61	0,71	0,81	0,93	1,07	1,23	1,40	1,60	1,81	2,07	2,33	2,64	2,99	3,36	3,79	4,24
ρ _{ნაჯ.} გ/მ ³	4,8	5,6	6,4	7,3	8,3	9,4	10,7	12,1	13,6	15,4	17,3	19,4	21,8	24,4	27,2	30,3

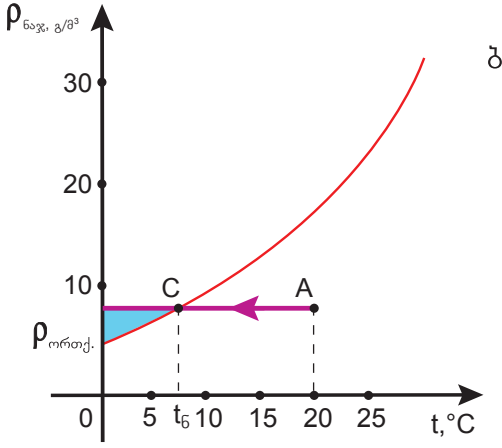


ა რაც უფრო დაბალია ჰაერის ფარდობითი ტენიანობა, წყლის აორთქლება უფრო ინტენსიურია. როდესაც წყლის ორთქლი ნაჯერია, მაშინ $\varphi = 100\%$, აორთქლებისა და კონდენსაციის პროცესები ერთნაირი სისწრაფით მიმდინარეობს.

(2) და (3) ტოლობების გამოყენებით მივიღებთ:

$$\varphi = \frac{p_{\text{ორთქ}}}{p_{\text{ნაჯ.}}} \cdot 100\%, \quad (4)$$

რომელშიც $p_{\text{ორთქ}}$ წყლის ორთქლის პარციალური წნევაა, $p_{\text{ნაჯ.}}$ – იმავე ტემპერატურაზე ნაჯერი ორთქლის წნევა.



ბ ამრიგად, ფარდობითი ტენიანობა დამოკიდებულია არა მხოლოდ აბსოლუტურ ტენიანობაზე, არამედ ტემპერატურაზეც.

თუ წყლის ორთქლის სიმკვრივე იმავე ტემპერატურაზე ნაჯერი ორთქლის სიმკვრივეს აღემატება, მაშინ ჰაერში ორთქლი გადაჯერებულია. ასეთი მდგომარეობა არამდგრადია და თან ახლავს ინტენსიური კონდენსაცია.

განვიხილოთ ნაჯერი ორთქლის სიმკვრივის ტემპერატურაზე დამოკიდებულების გრაფიკი (სურ. 1,59 ა, ბ). ა გრაფიკიდან ჩანს, რომ ჰაერის ფარდობითი ტენიანობა შეიძლება გავზარდოთ აბსოლუტური ტენი-

სურ. 1.59

ანობის გაზრდით, ანუ ჰაერში წყლის ორთქლის მასის მომატებით. მაგალითად, თუ სამზარეულოში წყალს დიდხანს ვადულებთ, ფარდობითი ტენიანობა შეიძლება გახდეს 100% და ლითონის, მინის ან კერამიკული ზედაპირები ნამის წვეთებით დაიფარება (გრაფიკზე წერტილი B).

ფარდობითი ტენიანობის გაზრდის მეორე გზას მუდმივი წნევის პირობებში ჰაერის ტემპერატურის შემცირება წარმოადგენს (გრაფიკი ბ). t_6 ტემპერატურამდე გაცივებისას (გრაფიკზე წერტილი C) ორთქლი ნაჯერი ხდება. ტემპერატურის შემდგომი, უმნიშვნელო შემცირებაც კი „ზედმეტი“ ორთქლის კონდენსაციას გამოიწვევს და ნამი ან ნისლი წარმოიქმნება.

t_f ტემპერატურას, რომლის დროსაც წყლის ორთქლი იზობარული გაცივებისას ნაჯერი ხდება, ნამის წერტილი ეწოდება.

თუ ვიცით ნამის წერტილი, შეგვიძლია ვიპოვოთ ჰაერის აბსოლუტური და ფარდობითი ტენიანობა. მოვიყვანოთ მაგალითი: ვთქვათ, შენობაში სადაც ტემპერატურა 26°C -ია, ლითონის ჩაიდან ნამით 18°C -ზე იფარება, ანუ ამ ტემპერატურაზე ორთქლი ნაჯერი ხდება – $t_f=18^{\circ}\text{C}$. ზემოთმოყვანილი ცხრილის გამოყენებით მივიღებთ: $\rho_{\text{ორთქ}} = \rho_{\text{ნაჯ}}(18^{\circ}\text{C})=15,4 \text{ გ/მ}^3$; $\rho_{\text{ნაჯ}}(26^{\circ}\text{C})=24,4 \text{ გ/მ}^3$. ტოლობა (3)-ით გამოვთვლით ჰაერის ფარდობით ტენიანობას:

$$\varphi = \frac{\rho_{\text{ორთქ}}}{\rho_{\text{ნაჯ}}} \cdot 100\% = \frac{15,4}{24,4} \cdot 100\% = 0.63 \cdot 100\% = 63\%.$$

თუ ფარდობითი ტენიანობა 100%-ზე ნაკლებია, მაშინ ნამის წერტილი ყოველთვის ნაკლებია ჰაერის ტემპერატურაზე. ეს სხვაობა მით მეტია, რაც უფრო მცირეა ფარდობითი ტენიანობა.

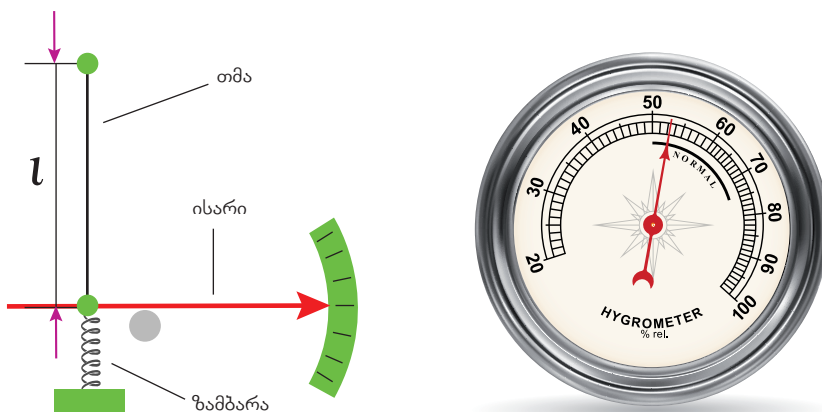
მცენარეები და ცოცხალი ორგანიზმები ჰაერის ფარდობითი ტენიანობის მიმართ საკმაოდ მგრძობიარენი არიან. ადამიანი თავს კარგად გრძობს, როდესაც ჰაერის ფარდობითი ტენიანობა 50-65%-ის ფარგლებშია. ცხელ დღეებში მაღალი ტენიანობისას სხეულის ზედაპირიდან სითხის აორთქლება გაძნელებულია, რის გამოც ირღვევა სხეულის ტემპერატურის რეგულირება.

დაბალი ტენიანობისას, ინტენსიური აორთქლების გამო, ადამიანი სწრაფად იღლება, უშრება ყელი, ტუჩები, კანი. ამ დროს მატულობს აორთქლება მცენარეების ფოთლებიდან, ისინი შეიძლება დაჟენეს და გახმეს. მშრალ ჰაერში დიდი რაოდენობითაა მტვერი, რომელიც დაკავშირებული არ არის წყლის წვეთებთან.

ჰაერის ტენიანობა გასათვალისწინებელია სხვადასხვა ტექნოლოგიურ პროცესისას: მეტალურგიაში, საკონდიტრო და საფეიქრო წარმოებისას და სხვა. მას ითვალისწინებენ წიგნებისა და ნახატების შენახვისას, ზოგიერთი ავადმყოფობის მკურნალობისას და ა.შ.

ჰაერის ტენიანობას დიდი მნიშვნელობა აქვს მეტეოროლოგიაში ამინდის პროგნოზირებისათვის. მაგალითად, თუ დედამიწის ზედაპირთან ჰაერის ტემპერატურა ნამის წერტილზე დაბლა დაეცა, შეიძლება წარმოიქმნას ნისლი.

ხელსაწყო, რომლითაც იზომება ჰაერის ფარდობითი ტენიანობა, **ჰიგრომეტრი** ეწოდება. უფრო ხშირად გამოიყენება ორი ტიპის ჰიგრომეტრი – **თმიანი და ფსიქრომეტრული**.



სურ. 1.60

თმიან ჰიგრომეტრში (სურ.1.60) გამოიყენებულია ადამიანის ნატურალური უცხიმო თმის თვისება – შეიცვალოს სიგრძე ფარდობითი ტენიანობის ცვლილებისას. ეს

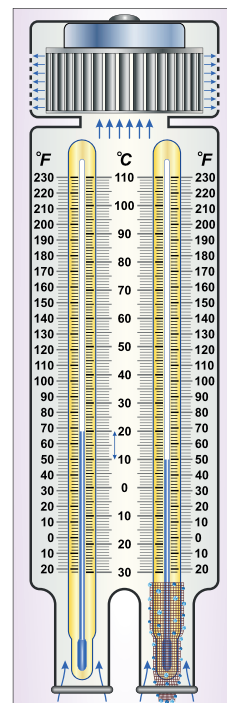
ცვლილება გადაეცემა ისარს და შედეგი გამოისახება სკალაზე. თმინ ჰიგრომეტრს შეუძლია გაზომოს ფარდობითი ტენიანობა 30%±100% დიაპაზონში.

ფსიქრომეტრული ჰიგრომეტრის – ფსიქრომეტრის მოქმედების პრინციპი დაფუძნებულია იმ ფაქტზე, რომ აორთქლებისას სითხე ცივდება და აორთქლების სიჩქარე მით მეტია, რაც უფრო მცირეა ჰაერის ფარდობითი ტენიანობა.

ფსიქრომეტრი შედგება ორი – მშრალი და სველი თერმომეტრისაგან (სურ. 1.61). მშრალი თერმომეტრი გვიჩვენებს ჰაერის ტემპერატურას. სველი თერმომეტრის რეზერვუარზე შემოხვეულია ქსოვილის ნაჭერი, რომელიც ჩაშვებულია წყალში. სველი ქსოვილიდან წყალი ორთქლდება და თერმომეტრი ცივდება. რაც უფრო მცირეა ფარდობითი ტენიანობა, წყალი უფრო სწრაფად ორთქლდება და სველი თერმომეტრის ჩვენება მით უფრო დაბალია. ჰაერის მაღალი ფარდობითი ტენიანობისას კი სველი თერმომეტრი უმნიშვნელოდ ცივდება.

მშრალი და სველი თერმომეტრების ერთნაირი ჩვენება ნიშნავს, რომ ფარდობითი ტენიანობა 100%-ია.

მშრალი და სველი თერმომეტრების ჩვენებათა სხვაობით სპეციალური ფსიქრომეტრული ცხრილის გამოყენებით განვსაზღვრავთ ჰაერის ფარდობით ტენიანობას:



სურ. 1.61

მშრალი თერმომეტრის ჩვენება °C	მშრალი და სველი თერმომეტრების ჩვენებების სხვაობა, °C										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	ფარდობითი ტენიანობა, %										
0	100	81	63	45	28	11	–	–	–	–	–
2	100	84	68	51	35	20	–	–	–	–	–
4	100	85	70	56	42	28	14	–	–	–	–
6	100	86	73	60	47	35	23	10	–	–	–
8	100	87	75	63	51	40	28	18	7	–	–
10	100	88	76	65	54	44	34	24	14	5	–
12	100	89	78	68	57	48	38	29	20	11	–
14	100	89	79	70	60	51	42	34	25	17	9
16	100	90	81	71	62	54	45	37	30	22	15
18	100	91	82	73	65	56	49	41	34	27	20
20	100	91	83	74	66	59	51	44	37	30	24
22	100	92	83	76	68	61	54	47	40	31	28
24	100	92	84	77	69	62	56	49	43	37	31
26	100	92	85	78	70	64	58	51	46	40	34
28	100	93	85	78	72	65	59	53	48	42	37
30	100	93	86	79	73	67	61	55	50	44	39



სურ. 1.62

დღესდღეობით ფართოდ გამოიყენება ციფრული ჰიგრომეტრები (სურ. 1.62), რომლებიც ჰაერის ფარდობითი ტენიანობის მნიშვნელობას პირდაპირ ეკრანზე გვიჩვენებს.

დასკვნები:

- აბსოლუტური ტენიანობა ეწოდება ფიზიკურ სიდიდეს, რომელიც ახასიათებს ჰაერში წყლის ორთქლის შემცველობას და რიცხობრივად ჰაერის მოცულობის ერთეულში შემაგალი წყლის ორთქლის მასის ტოლია: $\rho_{\text{ორთქ}} = \frac{m_{\text{H}_2\text{O}}}{V}$;
- ჰაერის ფარდობითი ტენიანობა ეწოდება ფიზიკურ სიდიდეს, რომელიც რიცხობრივად ტოლია აბსოლუტური ტენიანობის ფარდობისა ამ ტემპერატურაზე წყლის ნაჯერი ორთქლის სიმკვრივესთან: $\varphi = \frac{\rho_{\text{ორთქ}}}{\rho_{\text{ნაჯ}} \cdot 100\%$;
- $t_{\text{წ}} \text{ ტემპერატურას, რომლის დროსაც წყლის ორთქლი იზობარული გაცივებისას ნაჯერი ხდება, ნამის წერტილი ეწოდება;$
- ჰაერის ფარდობით ტენიანობას ზომავენ თმიანი, ფსიქრომეტრული და ციფრული ჰიგრომეტრებით.

საკონტროლო კითხვები:

1. როგორ ჰაერს უწოდებენ ტენიანს?
2. აბსოლუტური ტენიანობის გარდა რაზეა დამოკიდებული ჰაერის ფარდობითი ტენიანობა?
3. როგორ ვიპოვოთ ჰაერის აბსოლუტური ტენიანობა მოცემულ ტემპერატურაზე, თუ ვიცით ნამის წერტილი?
4. როგორ განვსაზღვრავთ ფსიქრომეტრის გამოყენებით ჰაერის ფარდობით ტენიანობას?



ერთად ამოვხსნათ ამოცანა

24 °C ტემპერატურისა და 80 % ფარდობითი ტენიანობის ჰაერს 100 სმ³ მოცულობის დგუმიანი ტუმბოთი 5 ლ მოცულობის ცარიელ ჭურჭელში ტუმბავენ. რამდენი გრამი წყალი გამოიყოფა ჭურჭელში ჰაერის 200 ჩატუმბვის შემდეგ? მიიჩნიეთ, რომ ჩატუმბვისას ჰაერის ტემპერატურა უცვლელია და კონდენსირებული წყლის მიერ დაკავებულ მოცულობას ნუ გაითვალისწინებთ.

მოცემულია: $V_1=10^{-4} \text{ მ}^3$; $V_2=5 \cdot 10^{-4} \text{ მ}^3$; $N=200$; $\varphi=80 \text{ \%}=0,8$; $\rho_{\text{ნაჯ}(24^\circ\text{C})}=21,8 \text{ გ/მ}^3$.

ამოხსნა: ჭურჭელში ჩატუმბულ ჰაერს ჩატუმბვამდე ეკავა $V=V_1 \cdot N=0,02 \text{ მ}^3$ მოცულობა. ამ ჰაერის აბსოლუტური ტენიანობა იყო $\rho=\varphi \cdot \rho_{\text{ნაჯ}(24^\circ\text{C})}=17,44 \text{ გ/მ}^3$, ხოლო მასში წყლის ორთქლის მასა – $m_{\text{წყ}}=\rho \cdot V=0,3488 \text{ გ}$. წყლის ორთქლის მაქსიმალური მასა, რომელსაც შეიძლება შეიცავდეს 24 °C-იანი ჰაერი $V_2=5 \text{ ლ}=0,005 \text{ მ}^3$ მოცულობის ჭურჭელში, ტოლია: $m_{\text{მაქს}}=\rho_{\text{ნაჯ}(24^\circ\text{C})} \cdot V_2=0,109 \text{ გ}$. შესაბამისად, ჭურჭელში გამოიყოფა $m=0,3488 \text{ გ} - 0,109 \text{ გ}=0,2398 \text{ გ}$ წყალი.

პასუხი: ჭურჭელში $m=0,2398 \text{ გ}$ მასის წყალი გამოიყოფა.



ამოხსენით ამოცანები:


1. 60 მ³ მოცულობის ოთახში არსებული ჰაერი 720 გ წყლის ორთქლის შეიცავს. განსაზღვრეთ ოთახში ჰაერის აბსოლუტური ტენიანობა.
2. 1,5 მ³ მოცულობის ქვევრში აბსოლუტური ტენიანობა 8 გ/მ³-ია. რამდენი გრამი წყლის ორთქლი უნდა შეინოვოს ქვევრში გამოსაშრობად მოთავსებულმა ნივთიერებამ, რომ მასში ჰაერი სრულიად გამოაშროს?
3. ოთახში 20 °C ტემპერატურის ჰაერის აბსოლუტური ტენიანობა 6,92 გ/მ³-ია. გამოთვალეთ ჰაერის ფარდობითი ტენიანობა.
4. ჰაერის ტემპერატურა 28 °C-ია, ნამის წერტილი კი 12 °C. იპოვეთ ჰაერის ფარდობითი ტენიანობა.
5. სარდაფში არსებული ჰაერის ნამის წერტილი 14 °C-ია. მოულოდნელად ტემპერატურა 8 °C-მდე შემცირდა. რამდენი გრამი წყალი გამოიყოფა ჰაერის ყოველი მ³ მოცულობიდან?
6. ზღვის ნაპირზე მზის ჩასვლისას 25 °C ტემპერატურის ჰაერის ფარდობითი ტენიანობა 64 %-ია. გამთენიისას ჰაერის ტემპერატურა 17 °C-მდე შემცირდა. გამოიყოფა თუ არა ნამი?
7. იპოვეთ ჰაერში არსებული წყლის ორთქლის პარციალური წნევა, თუ 16 °C-ზე ჰაერის ფარდობითი ტენიანობა 58 %-ია.
8. რამდენჯერ გაიზრდება ჰაერში წყლის ორთქლის კონცენტრაცია, თუ ტემპერატურის შეუცვლელად ფარდობითი ტენიანობა 24%-დან 84 %-მდე მოიმატებს?
9. 36 მ³ მოცულობის დახურულ სამზარეულოში 22 °C ტემპერატურის ჰაერის ფარდობითი ტენიანობა 45 %-ია. როდესაც ჩაიდანში წყალმა დუღილი დაიწყო, ჰაერის ფარდობითი ტენიანობა 80 % გახდა. რა მასის წყალი აორთქლებულა დუღილისას? (ოთახში ჰაერის ტემპერატურა უცვლელია)
10. 12 ლ მოცულობის ჭურჭელში 28 °C ტემპერატურისა და 60% ფარდობითი ტენიანობის ჰაერია. რამდენი გრამი წყალი კონდენსირდება ჭურჭელში, თუ მის მოცულობას იზოთერმულად 4 ლ-მდე შევამცირებთ?

§ 1.20 სითხის ზედაპირული დაჭიმულობა

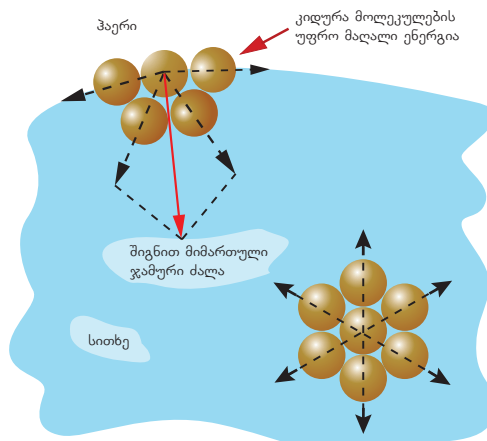
წყალმზომელა და ობობის ზოგიერთი სახეობა ისე გადაადგილდება წყლის ზედაპირზე, თითქოს ეს ზედაპირი თხელი აპკითაა დაფარული; წყლის ზედაპირზე ფრთხილად დადებული ქინძისთავი ოდნავ ჩალუნავს მას და არ ჩაიძირება; მშვენიერი სანახავია ნამის პატარა წვეთები, რომლებიც მცენარეების ფოთლებზე თითქმის სფერულ ფორმებს იღებს; ჩამოკიდებული წყლის წვეთი არ ვარდება მიუხედავად იმისა, რომ მასზე სიმძიმის ძალა მოქმედებს (სურ. 1.63). რა ძალა არის ყველა ჩამოთვლილი მოვლენის მიზეზი?



სურ. 1.63

 აირის ტემპერატურის შემცირება და წნევის გაზრდა მისი შემადგენელი მოლეკულების მოძრაობის სიჩქარისა და მათ შორის საშუალო მანძილის შემცირებას იწვევს. მოლეკულებს შორის მიზიდვის ძალები საგრძნობ მნიშვნელობას მაშინ იღებს, როდესაც მათ შორის ურთიერთქმედების საშუალო პოტენციალური და საშუალო კინეტიკურ ენერგია ერთმანეთს თანრიგით გაუტოლდება. ურთიერთმიზიდვის შედეგად მოლეკულები ერთდებიან და წარმოქმნიან სითხეს. თუ აირი ჭურჭელს მთლიანად ავსებდა, მისგან წარმოქმნილი სითხე ჭურჭლის მხოლოდ ნაწილს დაიკავებს. მოლეკულების ძლიერი ურთიერთმიზიდვის გამო სითხე ინარჩუნებს მოცულობას. აირთან საზღვარზე სითხე წარმოქმნის თავისუფალ ზედაპირს.

თავისუფალ ზედაპირზე მყოფი სითხის მოლეკულები მის შიგნით მყოფი მოლეკულებისაგან განსხვავებულ პირობებში იმყოფება. განვიხილოთ ორი მოლეკულა, რომელთაგან ერთი იმყოფება სითხის ზედაპირზე, ხოლო მეორე მის შიგნით (სურ. 1.64). სითხის შიგნით მყოფი მოლეკულა ყოველი მხრიდან თანაბრადაა გარშემორტყმული სითხის მოლეკულებით, ამიტომ მასზე მოქმედი მოლეკულათშორისი ძალები ერთმანეთს აკომპენსირებს და მათი ტოლქმედი ნულის ტოლია.



სურ. 1.64

სითხის ზედაპირზე მყოფი მოლეკულა ერთი მხრიდან გარშემორტყმულია სითხის მოლეკულებით, მეორე მხრიდან კი – აირის მოლეკულებით. სითხის მხრიდან მასზე მოქმედებს გაცილებით მეტი მოლეკულა, ვიდრე აირის მხრიდან, ამიტომ

მოლეკულათშორისი ძალების ტოლქმედი მიმართული იქნება სითხის შიგნით. იმისათვის, რომ მოლეკულა სითხის შიგნიდან მოხვდეს ზედაპირზე, საჭიროა შესრულდეს მუშაობა მოლეკულათშორისი ძალების სანიანალმდეგოდ. შესაბამისად, ზედაპირზე მყოფ მოლეკულებს აქვს უფრო მაღალი ენერგია სითხის შიგნით მყოფ მოლეკულებთან შედარებით. ეს ჭარბი ენერგია არის სითხის შინაგანი ენერგიის ნაწილი და მას **ზედაპირულ ენერგიას** უწოდებენ.

ზედაპირული ენერგია – სითხის ზედაპირული ფენის მოლეკულების ჭარბი პოტენციალური ენერგია.

ცხადია, რაც უფრო დიდი იქნება სითხის ზედაპირი, მით მეტი იქნება ჭარბი ენერგიის მქონე მოლეკულების რაოდენობაც. ამ დასკვნამდე შეიძლება მაკროსკოპული მიდგომითაც მივიდეთ. იმისათვის, რომ სითხის წვეთი ორ ნაწილად (ორ წვეთად) გავეყოთ, საჭიროა შევასრულოთ მუშაობა მოლეკულების ურთიერთმიზიდულობის დასაძლევად. ვთქვათ, თავდაპირველად, წვეთს ჰქონდა R რადიუსის ბირთვის ფორმა, ხოლო მიღებული წვეთები r რადიუსის ბირთვებია. საწყისი წვეთის მოცულობა და მიღებული წვეთების მოცულობების ჯამი ერთნაირი იქნება. თუ გავუტოლებთ ერთმანეთს ამ მოცულობებს, მივიღებთ:

$$R = r\sqrt[3]{2}$$

რადიუსებს შორის ამ თანაფარდობის გათვალისწინებით აღმოჩნდება, რომ ორი წვეთის ზედაპირის ფართობების ჯამი $1,26$ -ჯერ მეტია საწყისი წვეთის ზედაპირის ფართობზე (სფეროს ზედაპირის ფართობი – $S = 4\pi R^2$). ეს ასაბუთებს ჩვენ მოსაზრებას – რაც უფრო დიდია ზედაპირის ფართობი, მით მეტია მისი ზედაპირული ენერგია.

რადგან ზედაპირული ენერგია ზედაპირის ფართობის პროპორციულია, ამიტომ შეიძლება დავწეროთ:

$$W_{\text{ზედ}} = \sigma S,$$

რომელშიც σ პროპორციულობის კოეფიციენტია. მას **სითხის ზედაპირულ დაჭიმულობას** უწოდებენ.

სითხის ზედაპირული დაჭიმულობა მისი მახასიათებელი ფიზიკური სიდიდეა, რომელიც რიცხობრივად სითხის ზედაპირის ერთეული ფართობის ზედაპირული ენერგიის ტოლია:

$$\sigma = \frac{W_{\text{ზედ}}}{S}.$$

SI-ში სითხის ზედაპირული დაჭიმულობის ერთეულია **ნ/მ** (ნიუტონი/მეტრი):

$$1\text{ჯ/მ}^2 = 16 \cdot \text{მ/მ}^2 = 16/\text{მ}.$$

რადგან სითხის ზედაპირული დაჭიმულობა მოლეკულათშორისი ურთიერთქმედების ძალებით განისაზღვრება, ამიტომ ის დამოკიდებულია სითხის გვარობაზე, მის ტემპერატურაზე, სითხეში ზედაპირულად აქტიური ნივთიერებების არსებობაზე (ზედაპირულად აქტიური ნივთიერებები ამცირებენ ზედაპირულ დაჭიმულობას), აგრეთვე იმ აირების თვისებებზე, რომელსაც სითხე ესაზღვრება.

აქროლადი სითხეების (ეთერი, ბენზინი, სპირტი) ზედაპირული დაჭიმულობა ნაკლებია, ვიდრე არააქროლადი სითხეების (თხევადი ლითონები).

სითხის ზედაპირული დაჭიმულობის მინარევებზე დამოკიდებულებაში რომ დავრწმუნდეთ, ჩავატაროთ ცდა. მუყაოსგან დამზადებული „რაკეტა“ დავდოთ სითხის ზედაპირზე (სურ. 1.65). როდესაც მრგვალ ხვრელში ჩავანვეთებთ საპნის ხსნარს, „რაკეტა“ ამოდრავდება. ეს იმით აიხსნება, რომ „რაკეტის“ საქმენთან ზედაპირული დაჭიმულობა ნაკლებია, ვიდრე წინა ნაწილთან. შესაბამისად, სითხე ამოდრავდება იქეთ, სადაც ზედაპირული დაჭიმულობა მეტია და „რაკეტას“ წარიტაცებს.



სურ. 1.65

სხვადასხვა სითხის ზედაპირული დაჭიმულობის მნიშვნელობები ჰაერთან საზღვრის შემთხვევაში მოცემულია ცხრილში:

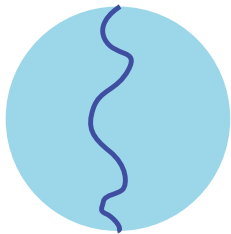
ნივთიერება	t, °C	σ, მნ/მ	ნივთიერება	t, °C	σ, მნ/მ
წყალი	0	75,6	გლიცერინი	20	63
წყალი	20	72,8	ვერცხლისწყალი	20	465
საპნის ხსნარი	20	40	ალუმინი	700	540
სპირტი	20	22,8	ოქრო	1130	1102
ეთერი	25	16,9	აზოტი	-183	6,2
აცეტონი	20	24	წყალბადი	-253	2,1

ცნობილია, რომ ნებისმიერი სისტემა მიისწრაფვის ისეთი მდგომარეობისკენ, სადაც მისი პოტენციალური ენერგია მინიმალურია. რადგან სითხის ზედაპირულ ფენას აქვს ჭარბი პოტენციალური ენერგია, ამიტომ მისი თავისუფალი ზედაპირი ცდილობს შეამციროს თავისი ფართობი, ანუ შეიკუმშოს. ე.ი. სითხის ზედაპირის გასწვრივ მოქმედებს ძალები, რომლებიც ცდილობს შეკუმშონ ეს ზედაპირი.

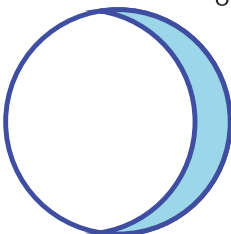
ძალებს, რომლებიც მართობულია სითხის შემომსაზღვრელი წირის, მიმართულია სითხის ზედაპირის მხების გასწვრივ და ცდილობს მისი ზედაპირის ფართობი შეამციროს მინიმუმამდე, ზედაპირული დაჭიმულობის ძალები ეწოდება.

სითხის ზედაპირული დაჭიმულობის ძალების არსებობის გამო, მისი ზედაპირი დაჭიმული რეზინის აპკის მსგავსია, მაგრამ რეზინის აპკში აღძრული დრეკადობის ძალები დამოკიდებულია ზედაპირის ფართობზე, სითხის ზედაპირული დაჭიმულობის

ა ძალები კი სითხის ზედაპირის ფართობზე დამოკიდებული არ არის.



ბ

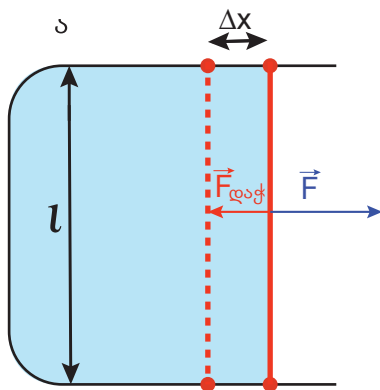


სურ. 1.66

სითხის ზედაპირული დაჭიმულობის ძალების არსებობა შეიძლება დავამტკიცოთ შემდეგი ცდით. ავიღოთ მავთულისაგან დამზადებული რგოლი, რომლის ორ მოპირდაპირე წერტილზე მიბმულია დაუჭიმავი ძაფი. თუ რგოლს საპნის ხსნარში ჩავუშვებთ და შემდეგ ამოვიღებთ, რგოლზე წარმოიქმნება საპნის აპკი, ძაფი კი თავისუფალ ფორმას მიიღებს (სურ. 1.66 ა). ძაფის ერთ მხარეს ნემსით გავხეთქოთ აპკი. დავინახვთ, რომ მეორე მხარეს დარჩენილი აპკი დაჭიმავს ძაფს (სურ. 1.66 ბ). ე.ი. ძაფზე აპკის მხრიდან იმოქმედა ძალებმა, რომლებიც ცდილობს შეამციროს სითხის ზედაპირის ფართობი.

ჩავატაროთ კიდევ ერთი მსგავსი ცდა. საპნის ხსნარში ჩავუშვათ მავთულისაგან დამზადებული ჩარჩო, რომლის ერთ გვერდს შეუძლია მოძრაობა. ხსნარიდან ამოღების შემდეგ ჩარჩოზე წარმოიქმნება საპნის აპკი. მოძრავ გვერდზე ვიმოქმედოთ რაღაც \vec{F} ძალით და ნელ-ნელა გავჭიმოთ აპკი

(სურ. 1.67 ა). თუ ამ ძალის მოქმედებით მოძრავი გვერდი Δx მანძილით გადაადგილდა, მაშინ მის მიერ შესრულებული მუშაობა იქნება:



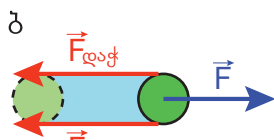
$$A = F\Delta x. \quad (1)$$

ამ დროს აპკის ორივე მხარეს აღძრული დაჭიმულობის ძალების ჯამი მოდულით ტოლი იქნება F -ის (სურ. 1.67 ბ):

$$2F_{\text{დაჭ}} = F.$$

შესაბამისად, (1) ტოლობა შემდეგნაირად გადაიწერება:

$$A = 2F_{\text{დაჭ}}\Delta x. \quad (2)$$



სურ. 1.67

ამ მუშაობის შესრულების ხარჯზე გაიზრდება აპკის ზედაპირული ენერგია:

$$A = \Delta W_{\text{ზედ}} = \sigma \Delta S = \sigma 2l \Delta x, \quad (3)$$

რომელშიც $\Delta S = 2l \Delta x$ საპნის ორივე ზედაპირის ფართობის ცვლილებაა. გავუტოლოთ ერთმანეთს (2) და (3), მივიღებთ:

$$F_{\text{დაჭ}} = \sigma l.$$

ახლა შესაძლებელია პარაგრაფის დასაწყისში მოყვანილი მოვლენების ახსნა: სითხის ზედაპირული დაჭიმულობის ძალის წყალობით შესაძლებელია წყლის ზედაპირზე მსუბუქი სხეულების შეჩერება (წყალმზომელა, ობობები, ქინძისთავი); სითხის მისწრაფებით შეამციროს ზედაპირის ფართობი აიხსნება ზოგიერთ შემთხვევაში წყლის წვეთის სფერული ფორმა – მოცემული მოცულობის შემთხვევაში ყველაზე მცირე ზედაპირის ფართობი აქვს ბირთვის; წყლის წვეთი არ ჩამოვარდება მანამ, ვიდრე სიმძიმის ძალა არ გადააჭარბებს ზედაპირული დაჭიმულობის ძალას.

დასკვნები:

- ზედაპირული ენერგია სითხის ზედაპირული ფენის მოლეკულების ჭარბი პოტენციალური ენერგიაა;
- სითხის ზედაპირული დაჭიმულობა მისი მახასიათებელი ფიზიკური სიდიდეა, რომელიც რიცხობრივად სითხის ზედაპირის ერთეული ფართობის ზედაპირული ენერგიის ტოლია: $\sigma = \frac{W_{\text{ზედ}}}{S}$;
- ძალებს, რომლებიც მართობულია სითხის შემომსაზღვრელი წირის, მიმართულია სითხის ზედაპირის მხეზის გასწვრივ და ცდილობს მისი ზედაპირის ფართობი შეამციროს მინიმუმამდე, ზედაპირული დაჭიმულობის ძალები ეწოდება.

საკონტროლო კითხვები:

1. რატომ აქვს სითხის ზედაპირზე მყოფ მოლეკულებს ჭარბი ენერგია?
2. რა ერთეულებში იზომება სითხის ზედაპირული დაჭიმულობა?
3. რაზეა დამოკიდებული სითხის ზედაპირული დაჭიმულობა?

§ 1.21 კაპილარული მოვლენები

ადამიანი ზღვიდან ამოსვლისას სველია – ტანზე მიკრული აქვს წყლის თხელი ფენა, იხვი კი წყლიდან მშრალი ამოდის (სურ. 1.68). ანალოგიურად, თუ წყლიან ჭიქაში მინისა და პარაფინის ფირფიტებს მოვათავსებთ, წყლიდან ამოღების შემდეგ მინის ფირფიტა წყლის ფენით იქნება დაფარული, პარაფინისა კი – არა. ე.ი. ზოგი სხეული სველდება მოცემული სითხით, ზოგი – არა.



სურ. 1.68

შევეცადოთ ეს მოვლენები მოლეკულურ-კინეტიკური თეორიით ავხსნათ. განვიხილოთ სითხისა და მყარი სხეულის საზღვარზე მათ მოლეკულებს შორის ურთიერთქმედება. ამ განხილვისას შეიძლება გამოვყოთ ორი შემთხვევა:

1) როდესაც სითხის მოლეკულებს შორის ურთიერთქმედების ძალები ნაკლებია სითხისა და მყარი სხეულის მოლეკულებს შორის ურთიერთქმედების ძალებზე, მაშინ სითხე ასველებს მყარი სხეულის ზედაპირს. ამ შემთხვევაში სითხის წვეთი მიისწრაფვის განირობეს მყარი სხეულის ზედაპირზე, მაგალითად, წყლის წვეთი მინაზე (სურ. 1. 69 ა);

2) როდესაც სითხის მოლეკულებს შორის ურთიერთქმედების ძალები მეტია სითხისა და მყარი სხეულის მოლეკულებს შორის ურთიერთქმედების ძალებზე, მაშინ სითხე არ ასველებს მყარი სხეულის ზედაპირს. ამ შემთხვევაში სითხის წვეთი მიისწრაფვის მიიღოს ბირთვის ფორმა, მაგრამ მყარ ზედაპირზე ის დეფორმირდება (სურ. 1.69 ბ).

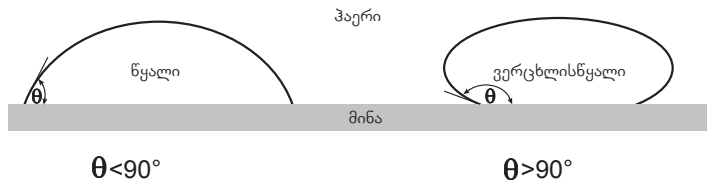


სურ. 1.69

სითხის მიერ მყარი სხეულების დასველების ერთ-ერთი მახასიათებელია დასველების კუთხე.

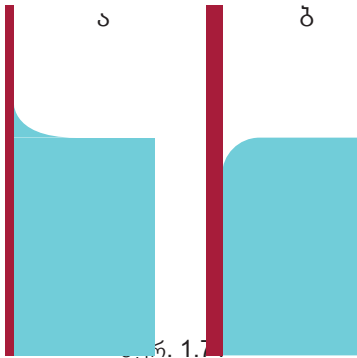
კუთხეს სითხის ზედაპირის მხებ სიბრტყესა და მყარი სხეულის ზედაპირს შორის, დასველების კუთხეს უწოდებენ. ის ყოველთვის აითვლება სითხის შიგნით, მყარი სხეულისა და სითხის საზღვარზე.

დამასველებელი სითხისათვის დასველების კუთხე მახვილია ($\theta < 90^\circ$) ხოლო არადამასველებელი სითხისთვის – ბლაგვი ($\theta > 90^\circ$) (სურ. 1.70).



სურ. 1.70

სითხის მიერ მყარი სხეულების დასველების კიდევ ერთი მაჩვენებელია **მენისკი**.



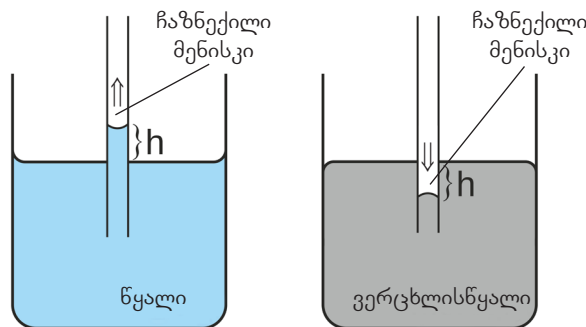
სურ. 1.71

ჭურჭლის გვერდის მახლობლად სითხის ზედაპირის ფორმას, მენისკს უწოდებენ. მენისკი იმაზეა დამოკიდებული, ასველებს თუ არა სითხე ჭურჭლის გვერდებს. სურ.1.71 ა-ზე გამოსახულია დამასველებელი სითხის მენისკი, ხოლო სურ. 1.71 ბ-ზე – არადამასველებელი სითხისა.

რადგან მყარი სხეულისა და სითხის მოლეკულებს შორის მიზიდულობის ძალები მცირე მანძილზე მოქმედებს, ამიტომ განიერ ჭურჭელში მენისკი მხოლოდ სითხის ზედაპირის უმნიშვნელო ნაწილში ყალიბდება, მისი მნიშვნელოვანი ნაწილი კი ჰორიზონტალურია.

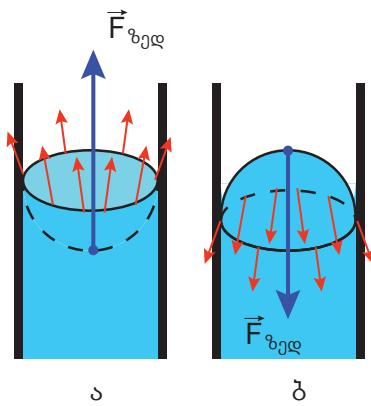
ვინრო ჭურჭელში სითხის მასა მცირეა, ამიტომ სითხის მოლეკულებს შორის და სითხისა და მყარი სხეულის მოლეკულებს შორის მოქმედი ძალების განსხვავება საინტერესო მოვლენების მიზეზი ხდება. ბუნებაში მრავლადაა ისეთი სხეულები, რომლებიც გამსჭვალულია ვინრო, თავისუფალი ფორმის მქონე არხებით – **კაპილარებით**. ასეთი სტრუქტურა აქვს ხეს, ქალაღს, ნიადაგს, აგურებს, ქსოვილებს და ა. შ.

სითხეში ჩაშვებულ კაპილარებში დამასველებელი სითხე ადის მაღლა, ჩაზნექილი მენისკის წარმოქმნით, ხოლო არადამასველებელი სითხე ჩადის დაბლა, ამოზნექილი მენისკის წარმოქმნით (სურ. 1.72). ამ მოვლენებს **კაპილარული მოვლენები** ეწოდება.



სურ. 1.72

დავადგინოთ კაპილარული მოვლენების მიზეზი. კაპილარებში მენისკს სფეროს ნაწილის ფორმა აქვს. სითხის ზედაპირი ყოველთვის ისეთი ფორმისაა, რამდენიმე მინიმალურია. სითხის გამრუდებულ ზედაპირს კაპილარის განივკვეთის ფართობთან შედარებით დიდი ფართობი აქვს, ამიტომ სითხის ზედაპირი ცდილობს გასწორდეს. ამ დროს სითხის გამრუდებული ზედაპირის ზევით და მის ქვევით, სითხეში წნევათა სხვაობის გამო წარმოიქმნება ჭარბი, დადებითი ან უარყოფითი წნევა. მას **ლაპლასის წნევას** უწოდებენ.



სურ. 1.73

დამასველებელი სითხის ჩაზნექილი ზედაპირის ქვეშ ლაპლასის წნევა უარყოფითია და ამიტომ სითხე კაპილარში შეინოვება (სურ. 1.73 ა). არადამასველებელი სითხის ამოზნექილი ზედაპირის შემთხვევაში ლაპლასის წნევა დადებითია და სითხე კაპილარში ქვევით დაინევს (სურ. 1.73 ბ).

რაზეა დამოკიდებული კაპილარში სითხის აწევის (დაწევის) სიმაღლე?

დავუშვათ, სითხე r რადიუსის კაპილარს მთლიანად ასველებს ($\theta=0$), მაშინ მყარ სხეულთან სითხის შეხების ხაზის სიგრძე $2\pi r$ -ის ტოლია (სურ. 1.74) სითხის მხრიდან კაპილარის კედელზე მოქმედი ქვევით მიმართული ზედაპირული დაჭიმულობის ძალის მოდული, ტოლი იქნება:

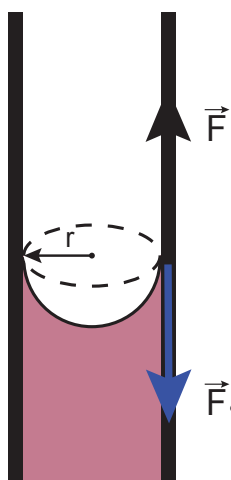
$$F_{ზედ} = 2\pi r\sigma,$$

რომელშიც σ სითხის ზედაპირული დაჭიმულობაა. ნიუტონის მესამე კანონის თანახმად, კაპილარის კედლის მხრიდან სითხეზე იმოქმედებს იმავე მოდულის ზევით მიმართული \vec{F} ძალა. სწორედ ამ ძალის მოქმედებით აწევს სითხე კაპილარში გარკვეულ h სიმაღლეზე. სითხის ასვლა კაპილარში მაშინ შეწყდება, როდესაც სითხის სვეტზე მოქმედი სიმძიმის ძალის მოდული \vec{F} ძალის მოდულს, ანუ დაჭიმულობის ძალის მოდულს გაუტოლდება:

$$mg = 2\pi r\sigma.$$

კაპილარში აწეული წყლის მასა $m = \rho V = \rho\pi r^2 h$, რომელშიც ρ სითხის სიმკვრივეა, V – აწეული სითხის მოცულობა. მასის გამოსახულების გათვალისწინებით მივიღებთ:

$$\rho\pi r^2 hg = 2\pi r\sigma,$$



სურ. 1.74

საიდანაც

$$h = \frac{2\sigma}{\rho g r}.$$

მიღებული ფორმულიდან ჩანს, რომ კაპილარში სითხის აწევის სიმაღლე მით მეტია, რაც უფრო მცირეა კაპილარის რადიუსი. გარდა ამისა, აწევის სიმაღლე დამოკიდებულია სითხის თვისებებზე – სიმკვრივესა და ზედაპირულ დაჭიმულობაზე.

არადამასველებელი სითხის დაწევის სიღრმე კაპილარში იმავე ფორმულით გამოითვლება.

კაპილარებით ადის სითხე და საკვები ნივთიერებები მცენარეების ღეროებში, სპირტი – სპირტქურას ფითილში. კაპილარული მოვლენები განაპირობებს ხელსახოცებისა და ქსოვილების მიერ სითხის შეწოვას და სხვა. ნიადაგში არსებული წყალი შეიძლება კაპილარული არხებით შენობის კედლებში მოხვდეს, ამიტომ კედლების ნესტისგან დასაცავად შენობის საძირკველს კედლებისგან გამოყოფენ ჰიდროსაიზოლაციო მასალით, რომელსაც წყალი არ ასველებს.

დასკვნები:

- როდესაც სითხის მოლეკულებს შორის ურთიერთქმედების ძალები ნაკლებია სითხისა და მყარი სხეულის მოლეკულებს შორის ურთიერთქმედების ძალებზე, მაშინ სითხე ასველებს მყარი სხეულის ზედაპირს;
- როდესაც სითხის მოლეკულებს შორის ურთიერთქმედების ძალები მეტია სითხისა და მყარი სხეულის მოლეკულებს შორის ურთიერთქმედების ძალებზე, მაშინ სითხე არ ასველებს მყარი სხეულის ზედაპირს;
- კუთხეს სითხის ზედაპირის მხებ სიბრტყესა და მყარი სხეულის ზედაპირს შორის, დასველების კუთხეს უწოდებენ;
- სითხეში ჩაშვებულ კაპილარებში დამასველებელი სითხე ადის მაღლა, ჩაზნექილი მენისკის წარმოქმნით, ხოლო არადამასველებელი სითხე ჩადის დაბლა, ამოზნექილი მენისკის წარმოქმნით;
- მთლიანი დასველებისას (არდასველებისას) კაპილარში სითხის აწევის (დანევის) სიმაღლე გამოითვლება ფორმულით: $h = \frac{2\sigma}{\rho g r}$.

საკონტროლო კითხვები:

1. როგორია დასველების კუთხე არადამასველებელი სითხისათვის?
2. რას უწოდებენ მენისკს?
3. რა არის ლაპლასის წნევა?
4. როდის შეწყდება კაპილარში სითხის აწევა?



ერთად ამოვხსნათ ამოცანა

გამოთვალეთ პიპეტის ხვრელის დიამეტრი, თუ ვერტიკალურად მოთავსებული პიპეტიდან ჩამოვარდნილი წყლის წვეთის უმცირესი რადიუსი 2 მმ-ის ტოლია.

მოცემულია: $r=2$ მმ= $0,002$ მ; $\rho=1000$ კგ/მ³; $\sigma=72,8 \cdot 10^{-3}$ ნ/მ.

ამოხსნა: წყლის წვეთი პიპეტის ხვრელს მაშინ მოწყდება, როდესაც წვეთზე მოქმედი სიმძიმის ძალა მოდულით ზედაპირული დაჭიმულობის ძალას გაუტოლდება: $F_{\text{დაჭ}}=mg$.

თუ გავითვალისწინებთ, რომ $F_{\text{დაჭ}}=\sigma\pi d$, $mg=\rho Vg$ და $V=\frac{4}{3}\pi r^3$, გვექნება:

$\sigma\pi d = \frac{4}{3}\pi r^3\rho g$, საიდანაც $d = \frac{4r^3\rho g}{3\sigma} \approx 0,0015$ მ= $1,5$ მმ.

პასუხი: პიპეტის ხვრელის დიამეტრი 1,5 მმ-ის ტოლია.



ამოხსენით ამოცანები:

1. ცივი წყლით უფრო ადვილად მოვიშორებთ ჭუჭყს ხელებიდან, თუ თბილი წყლით? პასუხი განამტკიცეთ მსჯელობით.
2. დასვრილი მაისურიდან ლაქების ამოსაყვანად სპეციალურ სარეცხ საშუალებებს იყენებენ. როგორ ახსნით ამას?
3. გამოთვალეთ 2 მმ დიამეტრის სფერული ფორმის ვერცხლისწყლის წვეთის ზედაპირული ენერგია.
4. სფეროს ფორმის სითხის წვეთის ზედაპირული ენერგია 1,2 მკჯ-ია. რა მუშაობა უნდა შესრულდეს, რომ მოცემული წვეთი სამ ტოლ წვეთად გავეყოთ? მუშაობა სრულდება მხოლოდ სითხის მოლეკულათაშორისი ურთიერთქმედის ძალების დაძლევაზე.
5. განსაზღვრეთ ზედაპირული დაჭიმულობის ძალა, რომლითაც საპნის ხსნარის აპკი მოქმედებს 4 სმ დიამეტრის რგოლზე.
6. დაადგინეთ 0,1 მმ რადიუსის კაპილარულ მილში დამასველებელი სითხის ანევის სიმაღლე, თუ მისი ზედაპირული დაჭიმულობა და სიმკვრივე, შესაბამისად 50 მნ/მ და 750 კგ/მ³-ია.
7. კაპილარულ მილში არადამასველებელი სითხის დანევის სიღრმე 144 მმ-ია. რამდენით შეიცვლება ის, თუ სითხის გათბობის შედეგად მისი ზედაპირული დაჭიმულობა 10%-ით შემცირდება?
8. კაპილარულ მილში არადამასველებელი სითხის დანევის სიღრმე 2,4 სმ-ია. რამდენით შეიცვლება ის, თუ სითხეში ზედაპირულად აქტიური ნივთიერების შეტანით მისი ზედაპირული დაჭიმულობა განახევრდა და ამასთან, სითხე დამასველებელი გახდა? (სითხის სიმკვრივის ცვლილებას ნუ გაითვალისწინებთ)
9. ორ ერთნაირ კაპილარულ მილში სხვადასხვა დამასველებელი სითხეა. პირველ მილში სითხის ანევის სიმაღლეა h_1 . იპოვეთ სითხის ანევის სიმაღლე მეორე მილში, თუ ცნობილია, რომ სითხეების სიმკვრივეები და ზედაპირული დაჭიმულობები, შესაბამისად ρ_1 , ρ_2 , σ_1 და σ_2 -ია.
10. 0,04 მმ დიამეტრის ხვრელის მქონე პიპეტში აცეტონია. გამოთვალეთ, რა მინიმალური მოცულობა უნდა ჰქონდეს აცეტონის წვეთს, რომ ის ვერტიკალურად მოთავსებულ პიპეტს მოწყდეს.

I თავის შემაჯამებელი ამოცანები

1. სუფრის მარილის რამდენ მოლეკულას შეიცავს 1 ლ 5%-იანი მარილწყალი?
2. 100 °C ტემპერატურის 2 ლ წყალს გადასცეს 0,2 მგჯ სითბოს რაოდენობა. წყლის რამდენი მოლეკულა აორთქლდება დუღილისას?
3. ჭურჭელში ორი იდეალური აირის ნარევი. აირების ნაწილაკების საშუალო კვადრატული სიჩქარე და კონცენტრაცია ერთნაირია. გამოთვალეთ თითოეული აირის პარციალური წნევა ჭურჭელში, თუ ერთი აირის მოლეკულის მასა მეორე აირის მოლეკულის მასას 4/3-ჯერ აღემატება, ხოლო აირების მიერ წარმოებული წნევა 4,2 ატმოსფეროს ტოლია.
4. განსაზღვრეთ 200 სმ³ მოცულობის ჭურჭელში მოთავსებული 0,5 მოლი იდეალური აირის ნაწილაკების საშუალო კინეტიკური ენერგია, თუ აირის მიერ წარმოებული წნევა 4 კპა-ია.
5. რამდენჯერ გაიზრდება აირის მოლეკულების საშუალო კინეტიკური ენერგია, თუ მის ტემპერატურას -53 °C-დან 827 °C-მდე გავზრდით?
6. დასხულ ჭურჭელში მოთავსებული აირის წნევა $3,6 \cdot 10^5$ პა-ის ტოლია. ტუმბოს მეშვეობით ჭურჭელში ნაწილაკების რაოდენობა გააორმაგეს. იპოვეთ ჭურჭელში აირის წნევა ჩატუმბვის შემდეგ, თუ ჩატუმბვის პროცესში აირის ტემპერატურა 27 °C-დან 127 °C-მდე გაიზარდა.
7. რამდენი პროცენტით გაიზარდა იდეალური აირის მოცულობა, თუ მისი აბსოლუტური ტემპერატურის 25%-ით გაზრდისას აირის მიერ წარმოებული წნევა 20%-ით შემცირდა?
8. გამოთვალეთ წყლის ორთქლის სიმკვრივე 12 °C ტემპერატურისა და 10^5 პა წნევის პირობებში. წყლის ორთქლი იდეალურ აირად მიიჩნიეთ.
9. 50 სმ³ მოცულობის ტუმბოთი 2 ლ მოცულობის ცარიელ ჭურჭელში ატმოსფეროდან ჰაერს ტუმბავენ. 96 ჩატუმბვის შემდეგ ჭურჭელში ჰაერის წნევა და ტემპერატურა, შესაბამისად 12 ატმ და 217 °C-ია. გამოთვალეთ ატმოსფეროს ჰაერის ტემპერატურა, თუ ატმოსფერული წნევა ნორმალურია.
10. ჭურჭელში დგუშის ქვეშ მოთავსებული აირის მოცულობის 2,5 ლ-ით გაზრდამ მისი წნევა 40%-ით შეამცირა. იპოვეთ აირის თავდაპირველი მოცულობა, თუ პროცესი იზოთერმულია.
11. 12 სმ სიმაღლის ამოტრიალებული ცილინდრული ფორმის ჭიქა ვერტიკალურად ჩაუშვეს წყალში ისე, რომ მისი ძირი წყლის ზედაპირს გაუსწორდა. რამდენი გრამი წყალი აღმოჩნდება ჭიქაში, რომლის ფუძის ფართობი 16 სმ²-ია. ატმოსფერული წნევა 10^5 პა-ის ტოლია. მიიჩნიეთ, რომ ჰაერის ტემპერატურა არ იცვლება.
12. ცილინდრში თავისუფლად მოძრავი დგუშის ქვეშ, რომელიც ფსკერიდან 17 სანტიმეტრითაა დაშორებული, მოთავსებულია 250 K ტემპერატურის იდეალური აირი. რამდენით გადაინაცვლებს დგუში, თუ აირს 750 K ტემპერატურამდე გავაცხელებთ?
13. ორი ჭურჭლიდან ერთ-ერთის მოცულობა და მასში მოთავსებული აირის წნევა, შესაბამისად $6V_0$ და $5P_0$ -ია. მეორე ჭურჭლის მოცულობა და მასში მოთავსებული აირის წნევა კი $-4V_0$ და $8P_0$. რა წნევა დამყარდება ჭურჭლებში, თუ მათ წვრილი მილით შევაერთებთ? პროცესი იზოთერმულად მიიჩნიეთ.
14. 400 სმ³ მოცულობის რეზინის ბუმბუკში 22 °C ტემპერატურის 0,8 გ მასის აირია. სულ მცირე რა ტემპერატურამდე უნდა გავათბოთ აირი, რომ ბუმბუკი ზევით

ამოძრავდეს? მიიჩნით, რომ ატმოსფერული ჰაერის სიმკვრივე $1,25 \text{ გ/ლ-ია}$. ბუშტის მასას და მასში აღძრულ დრეკადობის ძალას მხედველობაში ნუ მიიღებთ.

15. დახშულ ჭურჭელში მოთავსებული აირის წნევა და ტემპერატურა, შესაბამისად $0,75 \text{ ატმ}$ და $2 \text{ }^{\circ}\text{C-ია}$. რამდენი გრადუსით უნდა გავზარდოთ აირის ტემპერატურა, რომ წნევა ჭურჭელში $1,8 \text{ ატმ}$ გახდეს?

16. ბუნებრივი აირის ბალონი გათვლილია $3 \cdot 10^6 \text{ პა}$ წნევაზე. ბალონში წნევა $3,75 \cdot 10^5 \text{ პა-ია}$, ტემპერატურა კი $-12 \text{ }^{\circ}\text{C}$. რა ტემპერატურამდე შეიძლება გავაცხელოთ ბალონი, რომ მასში აირის წნევამ დასაშვებს არ გადააჭარბოს?

17. გამოთვალეთ 2 ლ მოცულობისა და 750 მმ.ვწყ.სვ. წნევის მქონე ერთატომიანი იდეალური აირის შინაგანი ენერგია.

18. $2,5 \text{ ლ}$ მოცულობის დახშულ ჭურჭელში მოთავსებული იდეალური ორატომიანი აირის წნევა და ტემპერატურა, შესაბამისად 600 მმ.ვწყ.სვ. და $27 \text{ }^{\circ}\text{C-ია}$. რამდენით შეიცვლება მისი შინაგანი ენერგია, თუ ტემპერატურას $177 \text{ }^{\circ}\text{C-მდე}$ გავზრდით?

19. რამდენჯერ შეიცვლება დახშულ ჭურჭელში მოთავსებული ორატომიანი იდეალური აირის შინაგანი ენერგია, თუ ჭურჭლიდან მის ნახევარს ამოვტუმბავთ, ხოლო ტემპერატურას $102 \text{ }^{\circ}\text{C-დან}$ $-148 \text{ }^{\circ}\text{C-მდე}$ შევამცირებთ?

20. მუდმივი მასის იდეალური ერთ ატომიანი აირი ფართოვდება $pV^2 = \text{const}$ კანონით. როგორ იცვლება მისი შინაგანი ენერგია ამ პროცესისას?

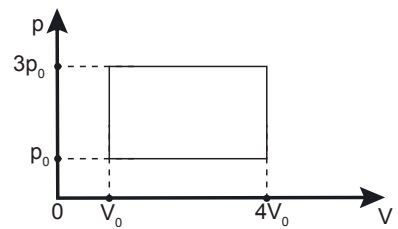
21. 1 მოლი იდეალური აირი იზობარულად გათბა $100 \text{ }^{\circ}\text{C-ით}$. გამოთვალეთ აირის მიერ შესრულებული მუშაობა.

22. ცილინდრში დგუშის ქვეშ მოთავსებულია 600 სმ^3 მოცულობისა და 800 მმ ვწყ.სვ. წნევის მქონე იდეალური აირი. გამოთვალეთ აირზე მოქმედი გარე ძალების მიერ შესრულებული მუშაობა, თუ აირის მოცულობას იზობარულად 480 სმ^3 -მდე შევამცირებთ.

23. სურ. 1.76-ზე გამოსახულია იდეალური აირის მდგომარეობის ცვლილების $p(V)$ დიაგრამა. გამოთვალეთ აირის მიერ შესრულებული სრული მუშაობა.

24. 500 ჯ/კ სითბოტევადობის 4 მოლი ერთატომიანი აირის ტემპერატურის ცვლილება $24 \text{ }^{\circ}\text{C-ია}$. გამოთვალეთ აირის მიერ შესრულებული მუშაობა.

25. იზობარული გაფართოებისას ერთატომიან აირზე გადაცემული სითბოს რაოდენობის რა ნაწილი ხმარდება აირის მიერ მუშაობის შესრულებას და რა ნაწილი შინაგანი ენერგიის ცვლილებას?



სურ. 1.76

26. იზობარული გაფართოებისას ორატომიან აირზე გადაცემული სითბოს რაოდენობა $5,6 \text{ კჯ-ია}$. გამოთვალეთ აირის მიერ შესრულებულ მუშაობა და მისი შინაგანი ენერგიის ცვლილება.

27. გამოთვალეთ ჟანგბადის კუთრი სითბოტევადობა მუდმივი მოცულობის პირობებში, თუ მისი კუთრი სითბოტევადობა მუდმივი წნევის პირობებში $c_p = 0,9 \cdot 10^3 \text{ ჯ/კვ} \cdot \text{K-ია}$.

28. გამოთვალეთ სითბური ძრავას სასარგებლო სიმძლავრე, თუ 3 წთ-ის განმავლობაში მასში 60 გ ბენზინი დაინვა, ხოლო ძრავას მქკ 36 \% -ია .

29. დაადგინეთ იდეალური სითბური ძრავას სახურებლის ტემპერატურა, თუ მაცივრის ტემპერატურა $27 \text{ }^{\circ}\text{C-ია}$, ხოლო ძრავას მქკ 35 \% -ის ტოლია.

30. იდეალურ სითბურ ძრავაში 6 ლ დიზელი სრულად დაინვა. იპოვეთ მუშა სხეულის მიერ შესრულებული მუშაობა, თუ სახურებლისა და მაცივრის ტემპერატურები, შესაბამისად $477 \text{ }^{\circ}\text{C}$ და $177 \text{ }^{\circ}\text{C-ია}$.

31. დაადგინეთ 12°C ტემპერატურის ჰაერში არსებული წყლის ორთქლის პარციალური წნევა, თუ ჰაერის ფარდობითი ტენიანობა 52 %-ია.

32. სალამოს 22°C ტემპერატურის ჰაერის ფარდობითი ტენიანობა 72%-ია. გამთენიისას ჰაერის ტემპერატურა 14°C -მდე შემცირდა. წარმოიქმნება თუ არა ნამი?

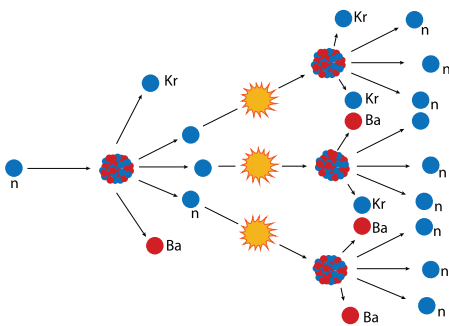
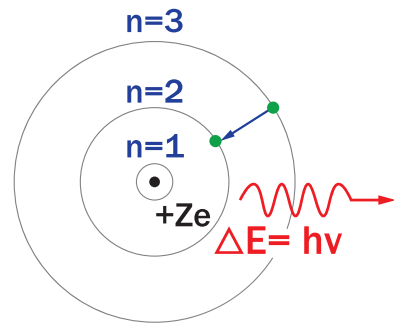
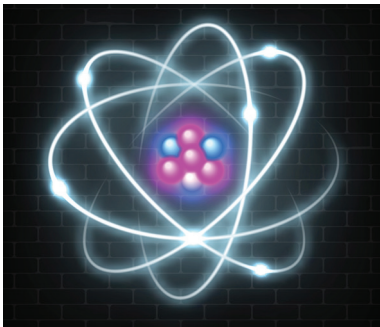
33. ცილინდრის ფორმის დგუშიან ჭურჭელში 9 ლ მოცულობის, 22°C ტემპერატურისა და 76% ფარდობითი ტენიანობის ჰაერია მოთავსებული. რამდენი გრამი წყალი კონდენსირდება ჭურჭელში თუ მის მოცულობას იზოთერმულად 3 ლ-მდე შევამცირებთ?

34. კაპილარულ მილში დამასველებელი სითხის ანევის სიმაღლე 72 მმ-ია. რამდენით შეიცვლება ეს სიმაღლე, თუ სითხის გათბობის შედეგად მისი ზედაპირული დაჭიმულობა 20%-ით შემცირდება?

35. პიპეტის ხვრელის დიამეტრი 0,05მმ-ია. გამოთვალეთ ვერტიკალურად მოთავსებული პიპეტიდან ჩამოვარდნილი საპნიანი წყლის წვეთის მინიმალური რადიუსი და მასა.

თავი II

ატომური, ბირთვული და კვანტური ფიზიკის საწყისები



ამ თავში თქვენ გაეცნობით:

- სითბურ გამოსხივებას და ფოტოეფექტის მოვლენას;
- პლანკის ჰიპოთეზას და გამოსხივების კვანტურ ბუნებას;
- აინშტაინის განტოლებას;
- ატომის პლანეტარულ მოდელს და ბორის პოსტულატებს;
- ატომის ბირთვის აღნაგობას და ძლიერ ურთიერთქმედებას;
- ჯაჭვურ ბირთვულ რეაქციებს;
- ენერგიის მიღებას ბირთვული რეაქციების განხორციელებისას;
- ელემენტარულ ნაწილაკებს.

§ 2.1 სითბური გამოსხივება. პლანკის ჰიპოთეზა

XIX საუკუნის ბოლოსთვის მეცნიერებმა მიიჩნიეს, რომ სამყაროს ფიზიკური შესწავლა დასრულდა – მექანიკის კანონები და მსოფლიო მიზიდულობის თეორია უკვე დიდი ხნის წინ იყო დადგენილი. ამასთან, ამ პერიოდისთვის განვითარდა და საყოველთაო აღიარება მოიპოვა ჯ. მაქსველის ელექტრომაგნიტური ველის თეორიამ. თუმცა, XX საუკუნის დასაწყისისთვის წარმოიქმნა წინააღმდეგობა, რომელიც დაკავშირებული იყო ნივთიერების გამოსხივებისა და ფიზიკური ბუნების ახსნასთან. კერძოდ, კლასიკური ფიზიკა ვერ ხსნიდა იმ ექსპერიმენტების შედეგებს, რომლებიც ეხებოდა ატომების მიერ სინათლის გამოსხივებისა და შთანთქმის მოვლენებს, გახურებული სხეულის მიერ ელექტრომაგნიტური გამოსხივების კანონზომიერებებს, ფოტოეფექტის მოვლენას და სხვა.

ამ წინააღმდეგობის ანალიზმა ფიზიკოსები მიიყვანა სამეცნიერო რევოლუციამდე, რომელმაც ძირეულად შეცვალა მეცნიერების წარმოდგენები მიკროსამყაროზე. შედეგად, წარმოიქმნა ორი ახალი ფუნდამენტური თეორია – ფარდობითობისა და კვანტური. ისტორიულად, კვანტური თეორია სითბური გამოსხივების შესწავლისას წარმოიშვა.

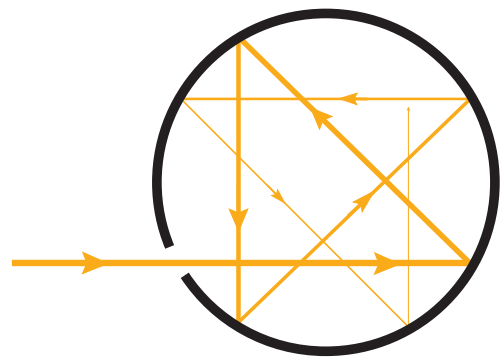
სითბური გამოსხივება ეწოდება გახურებული სხეულის მიერ ელექტრომაგნიტური ტალღების გამოსხივებას.

უნდა აღინიშნოს, რომ სითბური გამოსხივებისათვის არ არის აუცილებელი სხეულს მაღალი ტემპერატურა ჰქონდეს. ის ოთახის ტემპერატურაზეც მიმდინარეობს, თუმცა ტემპერატურის კლებისას გამოსხივების ინტენსივობა მცირდება და მისი სპექტრული შედგენილობა იცვლება. სხეულის მიერ ხილული სინათლის გამოსხივება დაახლოებით 800°C ტემპერატურაზე იწყება.

ყველა სხეულს შეუძლია არა მარტო სითბური გამოსხივება, არამედ შთანთქმაც. ამასთან, ცდებმა აჩვენა: გარკვეულ ტემპერატურაზე რაც უფრო მეტ ენერგიას ასხივებს სხეული, მით უფრო ძლიერად შთანთქავს ის იმავე სპექტრული შემადგენლობის გამოსხივებას იმავე ტემპერატურაზე.

სხეულს, რომელიც ნებისმიერ ტემპერატურაზე მთლიანად შთანთქავს მასზე დაცემული ნებისმიერი სიხშირის ელექტრომაგნიტური გამოსხივების ენერგიას, აბსოლუტურად შავი სხეული ეწოდება.

აბსოლუტურად შავი სხეულის მოდელი შეიძლება განვიხილოთ მცირე ზომის ნახვრეტის მქონე სფეროს მაგალითზე (სურ. 2.1). სინათლე, რომელიც ნახვრეტიდან შედის სფეროში, სანამ გარეთ გამოვა მრავალჯერ აირეკლება კედლებიდან. ყოველი არეკვლისას სინათლის ნაწილი შთანთქმდება. მრავალჯერადი არეკვლის შედეგად გამოსხივება პრაქტიკულად მთლიანად შთანთქმდება, რის გამოც ნახვრეტი გარედან მთლიანად შავად გამოჩნდება. ზუსტად ამიტომ, გაღებული ფანჯრები დღისით გარედან შავად გვეჩვენება, თუმცა ოთახი განათებულია კედლებიდან არეკლილი დღის სინათლით.



სურ. 2.1

ერთსა და იმავე ტემპერატურაზე აბსოლუტურად შავი სხეული ზედაპირის ფართობის ერთეულიდან დროის ერთეულში ასხივებს მეტ ენერგიას, ვიდრე ნებისმიერი სხვა სხეული. ამაში ადვილად დავრწმუნდებით ცდით: ავიღოთ კუბის ფორმის მქონე ჭურჭელი, რომლის ორი მოპირდაპირე გვერდითი წახნაგი შეღებილია შავად, ხოლო დანარჩენები – თეთრად. ჩავასხათ მასში ცხელი წყალი. თეთრი და შავი

წახნაგებიდან ერთნაირ მანძილზე დავაყენოთ გამოსხივების მიმღებები. დავინახავთ, რომ შავი ფერის წახნაგის ერთეული ფართობიდან გამოსხივების სიმძლავრე უფრო მეტია, ვიდრე – თეთრი ფერის წახნაგიდან.

როგორ არის დამოკიდებული აბსოლუტურად შავი სხეულის გამოსხივების ინტენსივობა მის ტემპერატურაზე?

ამ კითხვაზე პასუხის გასაცემად შემოვიღოთ ორი ახალი ფიზიკური სიდიდე:

1. სხეულის **ინტეგრალური ნათება** ეწოდება ნათების სიმძლავრის ფარდობას გამომსხივებლის ზედაპირის ფართობთან:

$$R = \frac{P}{S}.$$

2. სხეულის **სპექტრული ნათება** λ -დან $(\lambda + \Delta\lambda)$ -მდე ტალღის სიგრძის შუალედში ეწოდება ამ დიაპაზონში ინტეგრალური ნათების შეფარდებას დიაპაზონის სიგანესთან:

$$r_\lambda = \frac{\Delta R}{\Delta \lambda}.$$

ცდები აჩვენებს, რომ როგორც ინტეგრალური, ასევე სპექტრული ნათებაც გამომსხივებლის ტემპერატურაზეა დამოკიდებული.



ოტო ვეგ სტეფანი
(1835-1893)

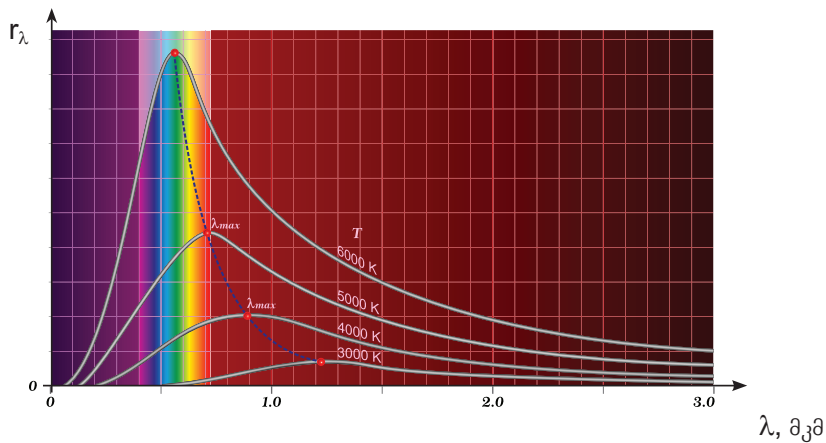
1879 წელს ავსტრიელმა ფიზიკოსმა იოზეფ სტეფანმა ექსპერიმენტულად დაადგინა, ხოლო 1884 წელს ავსტრიელმა ფიზიკოსმა ლუდვიგ ბოლცმანმა თეორიულად დაამტკიცა, რომ **აბსოლუტურად შავი სხეულის ინტეგრალური ნათება პროპორციულია აბსოლუტური ტემპერატურის მეოთხე ხარისხის:**

$$R = \sigma T^4.$$

ამ დამოკიდებულებას **სტეფან-ბოლცმანის კანონი** ეწოდება, σ პროპორციულობის კოეფიციენტს კი – სტეფან-ბოლცმანის მუდმივს. $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ ვტ/(მ²·K⁴).

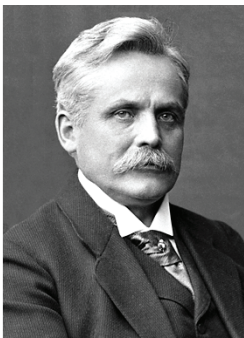
ამ ტოლობიდან გამომდინარეობს, რომ აბსოლუტურად შავი სხეულის გამოსხივება მხოლოდ მის ტემპერატურაზეა დამოკიდებული.

ცხელი სხეულის შემადგენელი ატომები წარმოადგენს ელექტრომაგნიტური გამოსხივების წყაროს. რადგან სხვადასხვა ატომის რხევის სიხშირე განსხვავებულია, ამიტომ გახურებული სხეულის გამოსხივება შეიცავს ყველა შესაძლებელი სიხშირის (ტალღის სიგრძის) ელექტრომაგნიტურ ტალღებს. აბსოლუტურად შავი სხეულის გამოსხივების ენერჯიის განაწილება ტალღის სიგრძის მიხედვით შესწავლილ იქნა ცდებით. სურ. 2.2-ზე გამოსახული მრუდები ახასიათებს აბსოლუტურად შავი სხეულის გამოსხივების სპექტრში ენერჯიის განაწილებას სხვადასხვა ტემპერატურაზე. თუ მათ ყურადღებით დავაკვირდებით, დავინახავთ, რომ ყველა გრაფიკს აქვს მაქსიმუმი, რომელიც ტემპერატურის ზრდასთან ერთად უფრო მოკლე ტალღებისაკენ წაინაცვლებს, ანუ გამოსხივებული ენერჯიის დიდი ნაწილი უფრო მოკლე ტალღებისკენ წაინაცვლებს. ყველა ტემპერატურისათვის არსებობს ისეთი $\lambda_{\text{მაქს}}$ ტალღის სიგრძე, რომელზეც აბსოლუტურად შავი სხეულის მიერ გამოსხივებული ენერჯიის უდიდესი ნაწილი მოდის. ტემპერატურის ზრდასას $\lambda_{\text{მაქს}}$ მცირდება, ზუსტად ამიტომ სხეული გახურებისას ჯერ ნითლდება, მერე იღებს ნარინჯისფერს, ხოლო ბოლოს – მოთეთრო ყვითელს.



სურ. 2.2

1893 წელს გერმანელმა ფიზიკოსმა ვილჰელმ ვინმა დაამტკიცა, რომ **ტალლის სიგრძე, რომელზეც მოდის აბსოლუტურად შავი სხეულის გამოსხივების მაქსიმუმი, აბსოლუტური ტემპერატურის უკუპროპორციულია:**



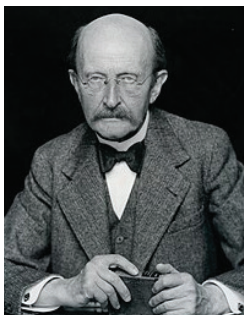
ვილჰელმ ვინი
(1864-1928)

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T}$$

ამ დებულებას **ვინის წანაცვლების კანონი** ეწოდა. b კოეფიციენტს ვინის მუდმივას უწოდებენ. მისი მნიშვნელობაა:

$$b = 2,898 \cdot 10^{-3} \text{ მ} \cdot \text{K}.$$

სტეფან-ბოლცმანის და ვინის კანონებმა ვერ ახსნა გამოსხივების ინტენსივობის მკვეთრი ვარდნა ულტრაიისფერ დიაპაზონში. ამ მოვლენას ფიზიკოსებმა „ულტრაიისფერი კატასტროფა“ უწოდეს. პრობლემის გადაწყვეტა შეძლო გერმანელმა ფიზიკოსმა მაქს პლანკმა.



მაქს პლანკი
(1858-1947)

კლასიკური ფიზიკით სინათლის წყაროს გამოსხივება უწყვეტად მიმდინარეობს. ითვლებოდა, რომ გამომსხივებელი სხეულიდან სივრცეში ვრცელდება ელექტრომაგნიტური ტალღები და ამის გამო მისი ენერგია უწყვეტად მცირდება. ანალოგიურად განიხილებოდა ტალღების შთანთქმის პროცესიც. პლანკმა ნივთიერება განიხილა როგორც რეზონატორების ნაკრები, რომლებიც შთანთქავენ და გამოასხივებენ ν სიხშირის ტალღებს. მან დაუშვა, რომ რეზონატორს შეიძლება ჰქონდეს ენერგია, რომელიც **ენერგიის ელემენტარული პორციის** ჯერადია. ერთი ელემენტარული პორციის ენერგია ტოლია:

$$E = h\nu, \quad (5)$$

რომელშიც $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ ჯ·წმ, **პლანკის მუდმივაა.**

პლანკის ჰიპოთეზის არსი იმაში მდგომარეობდა, რომ ატომები და მოლეკულები ელექტრომაგნიტურ ენერგიას ასხივებენ არა უწყვეტად, არამედ დისკრეტულად – პორციებით. პლანკმა ყოველ პორციას „**კვანტი**“ უწოდა (quantum – ლათინურად „რაოდენობა“). გამოსხივების ინტენსივობის მკვეთრი ვარდნა ულტრაიისფერ დიაპაზონში აიხსნებოდა ნივთიერებაში ულტრაიისფერი სიხშირის რეზონატორების არარსებობით.

პლანკის დაშვება, რომ ელექტრომაგნიტურ გამოსხივებას დისკრეტული ბუნება აქვს, საკმარისი აღმოჩნდა სითბური გამოსხივების ასახსნელად.

ვინის კანონისა და პლანკის ფორმულის საშუალებით შეგვიძლია ავხსნათ, რატომ არის ვარვარების ნათურის მქკ ძალიან მცირე. ვოლფრამის ძაფის ვარვარების ტემპერატურაზე გამოსხივების მაქსიმუმი ინფრანითელი გამოსხივების დიაპაზონში მდებარეობს, ხოლო სპექტრის ხილულ ნაწილზე მთლიანი გამოსხივების დაახლოებით 5% მოდის. თანამედროვე შუქდიოდურ ნათურებში კი გამოსხივების მაქსიმუმი ხილული გამოსხივების არეშია. შუქდიოდური ნათურა „ცივი“ ნათების მაგალითია.

დასკვნები:

- სითბური გამოსხივება ეწოდება გახურებული სხეულის მიერ ელექტრომაგნიტური ტალღების გამოსხივებას;
- სხეულს, რომელიც ნებისმიერ ტემპერატურაზე მთლიანად შთანთქავს მასზე დაცემული ნებისმიერი სიხშირის ელექტრომაგნიტური გამოსხივების ენერგიას, აბსოლუტურად შავი სხეული ეწოდება;
- სხეულის ინტეგრალური ნათება ეწოდება ნათების სიმძლავრის ფარდობას გამომსხივებლის ზედაპირის ფართობთან: $R = \frac{P}{S}$;
- სხეულის სპექტრული ნათება λ -დან $(\lambda + \Delta\lambda)$ -მდე ტალღის სიგრძის შუალედში ეწოდება ამ დიაპაზონში ინტეგრალური ნათების შეფარდებას დიაპაზონის სიგანესთან: $r_\lambda = \frac{\Delta R}{\Delta \lambda}$;
- აბსოლუტურად შავი სხეულის ინტეგრალური ნათება პროპორციულია აბსოლუტური ტემპერატურის მეოთხე ხარისხის: $R = \sigma T^4$;
- ტალღის სიგრძე, რომელზეც მოდის აბსოლუტურად შავი სხეულის გამოსხივების მაქსიმუმი, აბსოლუტური ტემპერატურის უკუპროპორციულია: $\lambda_{\max} = \frac{b}{T}$;
- გამოსხივებული (შთანთქმული) ელემენტარული პორციის ენერგია ტოლია: $E = h\nu$.

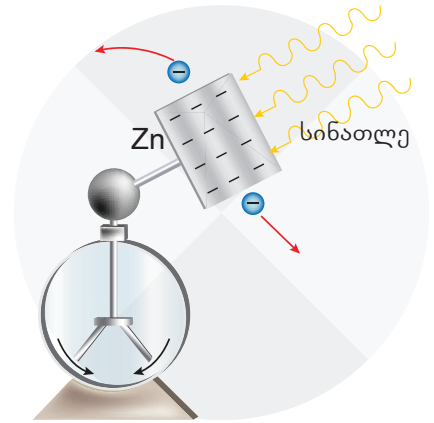
საკონტროლო კითხვები:

1. მოცემულ ტემპერატურაზე რომელი სპექტრული შედგენილობის ენერგიას შთანთქავს სხეული ყველაზე ძლიერად?
2. საით წაინაცვლებს გამოსხივებული ენერგიის მაქსიმუმი სხეულის ტემპერატურის ზრდისას?
3. რაში მდგომარეობს „ულტრაიისფერი“ კატასტროფა?
4. რაში მდგომარეობს პლანკის ჰიპოთეზა?
5. რას უწოდა პლანკმა „კვანტი“?

§ 2.2 ფოტოეფექტი. ფოტოეფექტის კანონები

ნივთიერებაზე სინათლის ზემოქმედების შესწავლამ მეცნიერები ისეთი კანონზომიერებების აღმოჩენამდე მიიყვანა, რომლებმაც ძირეულად შეცვალა სინათლის ბუნების შესახებ მანამდე არსებული წარმოდგენა.

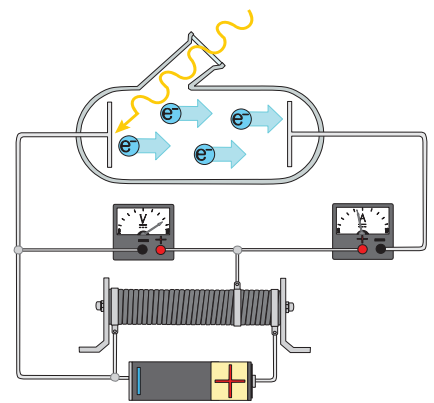
1887 წელს გერმანელმა ფიზიკოსმა ჰენრიხ ჰერცმა აღმოაჩინა, რომ თუ ნაპერწკლური განმუხტვის დროს უარყოფით ელექტროდს ულტრაიისფერ გამოსხივებას დავანათებთ, მაშინ ჰაერის ფენის გარღვევა მოხდება უფრო დაბალ ძაბვაზე, ვიდრე ხდებოდა დასხივების გარეშე (გაიხსენეთ მე-10 კლასის სახელმძღვანელოდან „არათავისთავადი და თავისთავადი განმუხტვა“). შემდგომმა ცდებმა აჩვენა, რომ უარყოფითად დამუხტული თუთიის ფირფიტა განიმუხტება მასზე ულტრაიისფერი სინათლის დანათებისას (სურ. 2.3). ჰერცმა ვერ შეძლო ამ მოვლენების სწორი ახსნა. შემდგომმა ექსპერიმენტებმა (რუსი ფიზიკოსი ა. სტოლეტოვი, გერმანელი ფიზიკოსები ვ. ჰალვაკსი და ფ. ლენარდი, იტალიელი ფიზიკოსი ა. რიგი) მეცნიერებს საშუალება მისცა ჩანვლოდნენ ამ მოვლენების არსს: ლითონის კათოდზე სინათლის დასხივებისას მისგან ამოიტყორცნება უარყოფითად დამუხტული ნაწილაკები. მათი კუთრი მუხტის გაზომვით დადგინდა, რომ ეს ნაწილაკები ელექტრონებია.



სურ. 2.3

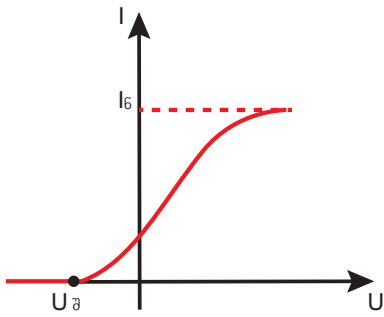
სინათლის ზემოქმედებით ნივთიერებიდან ელექტრონის ამოტყორცნის მოვლენას ფოტოეფექტი ეწოდება, ხოლო ასეთი გზით ამოტყორცნილ ელექტრონებს – ფოტოელექტრონები.

ფოტოეფექტის შესასწავლად საჭიროა გავარკვიოთ, რაზეა დამოკიდებული ფოტოელექტრონების რაოდენობა და მათი კინეტიკური ენერგია. სურ. 2.4-ზე გამოსახულია დანადგარის სქემა, რომლითაც შესაძლებელია ფოტოეფექტის შესწავლა. ვაკუუმურ მილში მოთავსებულია ორი ელექტროდი – საკვლევი ლითონისგან დამზადებული კათოდი და ანოდი, რომლებიც მიერთებულია დენის წყაროსთან (პირველ ცდებში ანოდს წარმოადგენდა სპილენძის ბადე). ელექტროდებს შორის ძაბვა იზომება ვოლტმეტრით, ხოლო დენის ძალა წრედში – ამპერმეტრით. კათოდის განათების გარეშე წრედში დენი არ გადის, რადგან ვაკუუმში მუხტის გადამტანები არ არის. განათებისას კათოდიდან ამოტყორცნილი ელექტრონები ელექტრული ველის მოქმედებით აჩქარებით ამოდრავდებიან ანოდისაკენ. წრედში გაივლის დენი, რომელსაც **ფოტოდენს** უწოდებენ. ფოტოდენი წარმოიქმნება მაშინაც, როდესაც კათოდსა და ანოდს შორის ძაბვა ნულის ტოლია. ამის მიზეზი ის ფოტოელექტრონებია, რომლებიც კინეტიკური ენერგიის ხარჯზე ნულოვან ძაბვაზეც კი აღწევენ ანოდს.



სურ. 2.4

სინათლის ინტენსივობის შეუცვლელად ელექტროდებს შორის პოტენციალთა სხვაობის გაზრდისას ფოტოდენის ძალა ჯერ იზრდება, შემდეგ კი აღწევს სინათლის მოცემული ინტენსივობისთვის მაქსიმალურ მნიშვნელობას და აღარ იცვლება. დენის ძალის ამ მნიშვნელობას **ნაჯერობის დენს** (I_0) უწოდებენ. დენი ნაჯერობას



სურ. 2.5

მაშინ აღწევს, როდესაც სინათლის დასხივების შედეგად ამოტყორცნილი ყველა ელექტრონი აღწევს ანოდს. საკვლევი ლითონის უარყოფით პოლუსთან შეერთებისას დენის ძალის დაბლაზე დამოკიდებულებას გამოსახავს სურ. 2.5-ზე ორდინატთა ღერძის მარჯვნივ მდებარე გრაფიკის ნაწილი.

თუ მილაკის ელექტროდებზე დენის წყაროს პოლუსებს შევცვლით, მაშინ ელექტრული ველი დაამუხრუჭებს ფოტოელექტრონებს. ამ შემთხვევაში ფოტოდენის ძალა დაბვის მოდულის ზრდასთან ერთად მცირდება, რადგან ელექტრონების ნაწილი

ელექტრული ველის მოქმედებით საკვლევი მასალისგან დამზადებულ ელექტროდზე ბრუნდება. ამ პროცესს სურ. 2.5-ზე ორდინატთა ღერძის მარცხენა მხარეს მდებარე გრაფიკის ნაწილი შეესაბამება. ფოტოელექტრონი ელექტროდზე იმ შემთხვევაში ბრუნდება, თუ ამოტყორცნილი ელექტრონის კინეტიკური ენერგია ელექტრული ველის დამამუხრუჭებელი ქმედების დასაძლევად საკმარისი არ არის. დაბვის გარკვეულ მნიშვნელობაზე ვერცერთი ფოტოელექტრონი ვერ აღწევს მეორე ელექტროდს, ბრუნდება უკან და ფოტოდენის ძალა ნულის ტოლი ხდება. ამ დაბვას **შემაკავებელი დაბვა ($U_ა$)** ეწოდება.

კინეტიკური ენერგიის შესახებ თეორემის თანახმად, შეგვიძლია დავწეროთ:

$$eU_ა = E_{კინ.მაქს},$$

საიდანაც შესაძლებელია შემაკავებელი დაბვის გამოთვლა:

$$U_ა = \frac{E_{კინ.მაქს}}{e} = \frac{mv_{მაქს}^2}{2e},$$

რომელშიც $E_{კინ.მაქს}$ ფოტოელექტრონების მაქსიმალური კინეტიკური ენერგიაა.

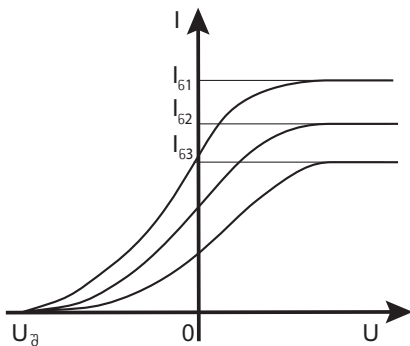
ექსპერიმენტულად დადგენილია ფოტოეფექტის შემდეგი კანონები:

ფოტოეფექტის პირველი კანონი – ნაჯერობის ფოტოდენის ძალა დაცემული სინათლის ინტენსივობის პირდაპირპროპორციულია.

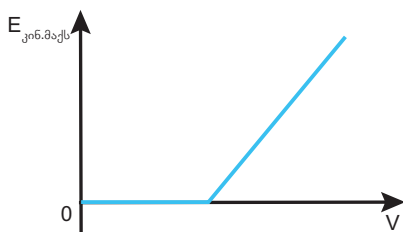
სურ. 2.6-ზე ნაჩვენებია ფოტოეფექტის ვოლტ-ამპერული მახასიათებლები მოცემული სიხშირის სინათლის სხვადასხვა ინტენსივობის დროს. ამ კანონიდან გამომდინარეობს, რომ ფოტოდენის ძალა ნულის ტოლია როდესაც კათოდი განათებული არ არის. ფოტოეფექტი დაიბიძრება სინათლის ძალიან მცირე ინტენსივობის შემთხვევაშიც და ინტენსივობის ზრდასთან ერთად ფოტოდენის ძალის მნიშვნელობაც იზრდება.

ფოტოეფექტის მეორე კანონი – ფოტოელექტრონების მაქსიმალური კინეტიკური ენერგია ($E_{კინ.მაქს}$) არ არის დამოკიდებული დაცემული გამოსხივების ინტენსივობაზე და წრფივად იზრდება დაცემული გამოსხივების სიხშირის (ν) ზრდისას.

უნდა აღინიშნოს, რომ ფოტოელექტრონების კინეტიკური ენერგია ერთნაირი არ არის და



სურ. 2.6



სურ. 2.7

$0 \leq E_{კინ} \leq E_{კინ.მაქს}$ დიაპაზონში იცვლება. ამის მიზეზი ისაა, რომ სინათლის გამოსხივებიდან მიღებული ენერჯიის ნაწილს ფოტოელექტრონები ნივთიერების შემადგენელ ნაწილაკებს გადასცემენ.

სურ. 2.7-ზე ნაჩვენებია ფოტოელექტრონების მაქსიმალური კინეტიკური ენერჯიის ($E_{კინ.მაქს}$) დამოკიდებულება დაცემული გამოსხივების სიხშირეზე.

ფოტოეფექტის მესამე კანონი – ყველა ნივთიერებისათვის არსებობს სინათლის გამოსხივების ($\nu_{აი6}$) მინიმალური სიხშირე, რომელზეც ჯერ კიდევ შესაძლებელია ფოტოეფექტი.

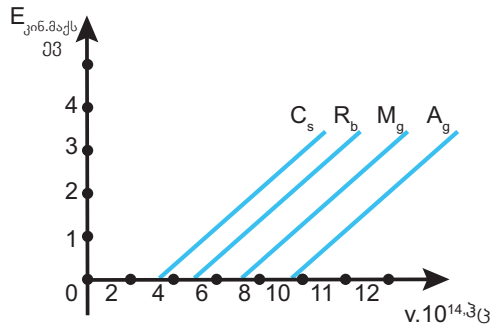
ამ მინიმალურ სიხშირეს ფოტოეფექტის **წითელ საზღვარს** უწოდებენ. თუ დაცემული გამოსხივების სიხშირე წითელ საზღვარზე ნაკლებია ($\nu < \nu_{აი6}$), ფოტოეფექტს ადგილი არ აქვს.

ასეთი სახელი დაკავშირებულია იმასთან, რომ სინათლის ხილულ დიაპაზონში მინიმალური სიხშირე აქვს წითელ ფერს. თუმცა, არ არის აუცილებელი, რომ ყველა ნივთიერების ფოტოეფექტის წითელი საზღვარი წითელ ფერს შეესაბამებოდეს. მაგალითად, თუთიისათვის წითელი საზღვარი ულტრაიისფერი ნათებაა, რუბიდიუმისთვის – ყვითელი ნათება, კალციუმისთვის – ცისფერი ნათება და ა.შ. სურ. 2.8-ზე ნაჩვენებია სხვადასხვა ნივთიერებისთვის ფოტოელექტრონების მაქსიმალური კინეტიკური ენერჯიის დამოკიდებულება დაცემული გამოსხივების სიხშირეზე. მიღებული წრფეები ერთმანეთის პარალელურია, სიხშირეთა ღერძთან გადაკვეთის წერტილები კი თითოეული ნივთიერების ფოტოეფექტის წითელ საზღვარს შეესაბამება.

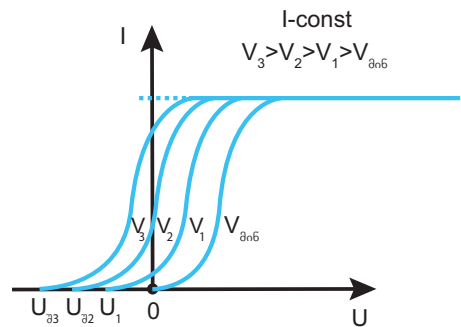
სხვადასხვა სიხშირის, მაგრამ ერთნაირი ინტენსივობის გამოსხივების ვოლტ-ამპერული მახასიათებლები ნაჩვენებია სურ. 2.9-ზე. როგორც ამ გრაფიკებიდან ჩანს, შემაკავებელი ძაბვის მოდული სიხშირის კლებასთან ერთად მცირდება და $\nu_{აი6}$ სიხშირეზე ნულს უტოლდება.

ამასთან, დადგენილია ფოტოეფექტის არაინერციულობა – ის დასხივების მომენტიდან, თითქმის მყისიერად ($10^{-9} - 10^{-10}$ წმ-ში) იწყება.

ფოტოეფექტის კანონების ახსნას და ფოტოეფექტის გამოყენებას შემდეგ პარაგრაფებში განვიხილავთ.



სურ. 2.8



სურ. 2.9

დასკვნები:

- სინათლის ზემოქმედებით ნივთიერებიდან ელექტრონის ამოტყორცნის მოვლენას ფოტოეფექტი ეწოდება, ხოლო ასეთი გზით ამოტყორცნილ ელექტრონებს – ფოტოელექტრონები;
- ფოტოეფექტის პირველი კანონი – ნაჯერობის ფოტოდენის ძალა დაცემული სინათლის ინტენსივობის პირდაპირპროპორციულია;
- ფოტოეფექტის მეორე კანონი – ფოტოელექტრონების მაქსიმალური კინეტიკური ენერგია $E_{\text{კინ.მაქს}}$ არ არის დამოკიდებული დაცემული გამოსხივების ინტენსივობაზე და წრფივად იზრდება დაცემული გამოსხივების ν სიხშირის ზრდისას;
- ფოტოეფექტის მესამე კანონი – ყველა ნივთიერებისათვის არსებობს სინათლის გამოსხივების მინიმალური სიხშირე ($\nu_{\text{მინ}}$), რომელზეც ჯერ კიდევ შესაძლებელია ფოტოეფექტი;
- სინათლის იმ მინიმალურ სიხშირეს, რომელზეც ფოტოეფექტი ჯერ კიდევ შესაძლებელია, ფოტოეფექტის წითელი საზღვარი ეწოდება.

საკონტროლო კითხვები:

1. რას უწოდებენ ნაჯერობის ფოტოდენს?
2. რა არის შემაკავებელი დაბვა?
3. რას განსაზღვრავს შემაკავებელი დაბვის მოდული?
4. რატომ არ არის ყველა ფოტოელექტრონის კინეტიკური ენერგია ერთნაირი?
5. როგორ იცვლება შემაკავებელი დაბვის მოდული სინათლის სიხშირის ზრდასთან ერთად?



ერთად ამოხსნათ ამოცანა

რისი ტოლია ვაკუუმურ მილში ნაჯერობის ფოტოდენის ძალა, თუ კათოდიდან ყოველ წამში $5 \cdot 10^{10}$ ელექტრონი ამოიტყორცნება. შემაკავებელი დაბვის რამნიშვნელობისათვის შეწყდება დენი მილში, თუ ფოტოელექტრონების მაქსიმალური სიჩქარე $4 \cdot 10^5$ მ/წმ-ია?

მოცემულია: $t=1$ წმ; $e=1,6 \cdot 10^{-19}$ კ; $m=9,1 \cdot 10^{-31}$ კგ; $v_{\text{მაქს}}=4 \cdot 10^5$ მ/წმ, $N=5 \cdot 10^{10}$. $I=?$, $U=?$

ამოხსნა: ფოტოდენის ნაჯერობა ნიშნავს, რომ დაბვის შემდგომი ზრდა დენის ძალის მნიშვნელობის გაზრდას აღარ გამოიწვევს. ეს იმითაა განპირობებული, რომ კათოდიდან ამოტყორცნილი ყველა ფოტოელექტრონი მიაღწევს ანოდს. შესაბამისად,

ვაკუუმურ მილში გამავალი დენის ძალა ტოლი იქნება: $I = \frac{q}{t} = \frac{N \cdot e}{t} = 8 \cdot 10^{-9}$ ა.

როგორც ვიცით, შემაკავებელი დაბვა ფოტოელექტრონების მაქსიმალურ კინეტიკურ ენერგიასთან დაკავშირებულია ფორმულით: $U_{\text{ა}} = \frac{E_{\text{კინ.მაქს}}}{e} = \frac{mv_{\text{მაქს}}^2}{2e}$. ამ

ფორმულაში რიცხვითი მნიშვნელობების შეტანით მივიღებთ: $U_{\text{ა}}=0,455$ ვ.

პასუხი: ნაჯერობის დენის ძალა $8 \cdot 10^{-9}$ ა-ის ტოლია, შემაკავებელი დაბვა კი 0,455 ვ-ია.



ამოხსენით ამოცანები:

1. ვაკუუმურ მილაკში ელექტროდებს შორის მანძილი 4 სმ-ია, განსაზღვრეთ ელექტრული ველის დაძაბულობა, თუ ელექტროდებს შორის დაბვა 12 ვ-ია.
2. რა ძალით მოქმედებს 5 კვ/მ დაძაბულობის ელექტრული ველი მასში მოძრავ ელექტრონზე?
3. იპოვეთ ფოტოელექტრონის მაქსიმალური კინეტიკური ენერგია, თუ ანოდთან მიღწევისას მისი სიჩქარე $2 \cdot 10^4$ მ/წმ-ია.
4. გამოთვალეთ კინეტიკური ენერგია, რომელსაც შეიძენს ფოტოელექტრონი 10 ვ პოტენციალთა სხვაობის გავლისას. მიიჩნიეთ, რომ ფოტოელექტრონის სიჩქარე კათოდიდან ამოვარდნისას ნულის ტოლია.
5. რა პოტენციალთა სხვაობის გავლისას გაჩერდება $2,4 \cdot 10^{-19}$ ჯ კინეტიკური ენერგიის მქონე ფოტოელექტრონი?
6. ფოტოელექტრონების შემაკავებელი დაბვა 32 ვ-ია. რამდენით უნდა შევცვალოთ ეს დაბვა, თუ ამოტყორცნილი ელექტრონების მაქსიმალური სიჩქარე 2-ჯერ გაიზარდა?
7. დაადგინეთ ენერგია, რომელსაც შეიძენს ფოტოელექტრონი 2,5 კვ/მ დაძაბულობის ერთგვაროვან ველში ძალწირის გასწვრივ 1 სმ მანძილზე გადაადგილებისას.
8. ვაკუუმურ მილაკში ნაჯერობის დენის ძალა 15 მა-ია. რამდენი ელექტრონი ამოიტყორცნება კათოდიდან ყოველ წამში?
9. ნაჯერობის ფოტოდენი მილში 5,4 მა-ია. რამდენით შეიცვლება ნაჯერობის დენი, თუ დროის ერთეულში კათოდიდან ამოტყორცნილი ელექტრონების რაოდენობა 3-ჯერ შემცირდება?
10. ვაკუუმურ მილაკში ელექტრული ველის დაძაბულობა 6 კვ-ია. რა მანძილის გავლის შემდეგ გაჩერდება ველის ძალწირის მიმართულებით მოძრავი $2,4 \cdot 10^{-17}$ ჯ კინეტიკური ენერგიის მქონე ელექტრონი?

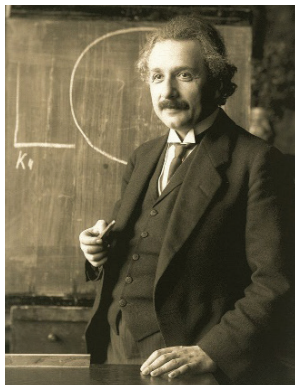
§ 2.3 ფოტონი. აინშტაინის განტოლება ფოტოეფექტისათვის

ცდების შედეგად მიღებული ფოტოეფექტის კანონების დადგენის შემდეგ, მეცნიერები შეეცადნენ აეხსნათ ეს კანონები სინათლის ელექტრომაგნიტურ თეორიაზე დაყრდნობით. ამ თეორიით მხოლოდ ფოტოეფექტის პირველი კანონის ახსნა შესაძლებელი – ბუნებრივია, რაც უფრო დიდია დაცემული სინათლის ენერგია, მით მეტი ელექტრონი ამოიფრქვევა ნივთიერებიდან. სინათლის ტალღის ცვლად ელექტრულ ველში ელექტრონი იწყებს რხევას და თუ ამ რხევის ენერგია საკმარისი იქნება, ელექტრონი ამოიტყორცნება ნივთიერებიდან. თავისუფალი ელექტრონის შემთხვევაში სინათლის ენერგია საჭიროა იმისთვის, რომ ელექტრონმა დაძლიოს ლითონის კრისტალური მესრის დადებითი იონების მიზიდულობა, ხოლო ატომში მყოფი ელექტრონის შემთხვევაში – ატომის ბირთვთან კავშირი. მინიმალურ ენერგიას, რომელიც უნდა ჰქონდეს ელექტრონს ნივთიერებიდან გამოსვლისათვის, **გამოსვლის მუშაობა** ეწოდება. მას $A_{გამ}$ -ით აღნიშნავენ. გამოსვლის მუშაობა ნივთიერების გვარობაზეა დამოკიდებული.

ფოტოეფექტის მეორე და მესამე კანონების ახსნა სინათლის ელექტრომაგნიტური თეორიით შეუძლებელია. ამ თეორიით გაუგებარია, რატომ არ არის ამოტყორცნილი ელექტრონების კინეტიკური ენერგია დამოკიდებული გამოსხივების ინტენსივობაზე. თითქოს, სინათლის ინტენსივობის ზრდასთან ერთად მატულობს ელექტრული ველის დაძაბულობა ელექტრომაგნიტურ ტალღაში, შესაბამისად, იზრდება ელექტრონზე მოქმედი ძალა და ის უფრო დიდი სიჩქარით უნდა ამოიტყორცნოს ნივთიერებიდან. თუმცა, ექსპერიმენტმა აჩვენა, რომ ეს ასე არ არის.

ამ თეორიით ასევე ვერ იხსნება ფოტოეფექტის წითელი საზღვრის არსებობაც. გაუგებარია, რატომ ვერ იწვევს ფოტოეფექტს განსაზღვრულ სიხშირეზე ნაკლები სიხშირის სინათლე, თუნდაც მისი ინტენსივობა ძალიან მაღალი იყოს. თითქოს, გამოსხივების ინტენსივობის ზრდისას ელექტრონზე მოქმედი ძალა მატულობს, ამიტომ დაბალი სიხშირის გამოსხივების შემთხვევაშიც კი ის უნდა ამოიტყორცნოს ნივთიერებიდან.

და ბოლოს, გაუგებარია ფოტოეფექტის არაინერციულობა – თუ $v > v_{ან}$, ფოტოეფექტი თითქმის მყისიერად იწყება კათოდის დაბალი ინტენსივობის სინათლის დასხივების შემთხვევაშიც კი. თითქოს, ელექტრონებს გარკვეული დრო უნდა სჭირდებოდეს კავშირების დაძლევისათვის და ეს დრო უნდა იყოს მით მეტი, რაც უფრო დაბალია გამოსხივების ინტენსივობა.



ალბერტ აინშტაინი
(1879-1955)

ამ წინააღმდეგობებიდან გამოსავალი იპოვა ალბერტ აინშტაინმა 1905 წელს. აინშტაინის იდეა იმაში მდგომარეობდა, რომ ფოტოეფექტის ახსნისას მან უარი თქვა კლასიკურ ელექტროდინამიკაზე და გამოიყენა მაქს პლანკის ჰიპოთეზა კვანტების შესახებ.

როგორც წინა პარაგრაფიდან იცით, მაქს პლანკმა სითბური გამოსხივების კანონები ელექტრომაგნიტური ტალღების გამოსხივებისა და შთანთქმის დისკრეტულობით ახსნა. თუმცა, ის თვლიდა, რომ სინათლის გავრცელება უწყვეტი პროცესია. პლანკისაგან განსხვავებით, აინშტაინმა დაუშვა, რომ არამარტო გამოსხივება და შთანთქმა, არამედ სინათლის გავრცელებაც ცალკეული პორციებით, ანუ კვანტებით ხდება. სინათლის კვანტებს შემდგომში **ფოტონები** უწოდეს.

მაშასადამე, აინშტაინის ჰიპოთეზით გარკვეული v სიხშირის ელექტრომაგნიტურ გამოსხივებას აქვს არამარტო ტალღური, არამედ ნაწილაკების ნაკადის თვისებებიც. თითოეული ასეთი ნაწილაკი – ფოტონი მოძრაობს სინათლის სიჩქარით და აქვს $E = hv$

ენერჯიის კვანტი. ფოტონი „უცნაური“ ნაწილაკია: ის არსებობს მხოლოდ მოძრაობისას; მას არ გააჩნია „უძრაობის“ მასა (უმასო ნაწილაკია); ელექტრულად ნეიტრალურია. ფოტონის ენერჯია შეიძლება გამოვსახოთ ტალღის სიგრძის მეშვეობითაც:

$$E = h \frac{c}{\lambda}.$$

ახლა ავხსნათ ფოტოეფექტის კანონები სინათლის კვანტურ თეორიაზე დაყრდნობით. ნივთიერებაზე დასხივებისას ფოტონები ნივთიერების ელექტრონებთან ურთიერთქმედებს. ურთიერთქმედებაში იგულისხმება ფოტონისა და ელექტრონის არადრეკადი დაჯახება, რომლის დროსაც შთანთქმული ფოტონის ენერჯია მთლიანად გადაეცემა ელექტრონს. თუ ელექტრონზე გადაეცემული ენერჯია გამოსვლის მუშაობაზე მეტია ($E > A_{\text{გამ}}$), მაშინ ელექტრონს შეუძლია დატოვოს ნივთიერება. ენერჯიის მუდმივობის კანონის გამოყენებით შეგვიძლია დავწეროთ:

$$E = A_{\text{გამ}} + \frac{mv_{\text{მაქს}}^2}{2},$$

ანუ

$$h\nu = A_{\text{გამ}} + \frac{mv_{\text{მაქს}}^2}{2},$$

რომელშიც $\frac{mv_{\text{მაქს}}^2}{2}$ ფოტოელექტრონის მაქსიმალური კინეტიკური ენერჯიაა. ამ ტოლობას უწოდებენ **აინშტაინის განტოლებას ფოტოეფექტისათვის**.

გავანალიზოთ ფოტოეფექტის კანონები აინშტაინის განტოლების გამოყენებით:

I. ნაჯერობის ფოტოდენის ძალა პროპორციულია ნივთიერების ზედაპირიდან დროის ერთეულში ამოტყორცნილი ფოტოელექტრონების რაოდენობის, რომელიც იმავე დროში ნივთიერების ზედაპირზე დაცემული ფოტონების რიცხვის პროპორციულია. შესაბამისად, სინათლის ინტენსივობის, ანუ ფოტონების რაოდენობის ზრდა, ნაჯერობის ფოტოდენის ძალის მატებას გამოიწვევს. აღსანიშნავია, რომ ფოტოელექტრონების რაოდენობა შესაძლოა არ ემთხვეოდეს ზედაპირზე დაცემული ფოტონების რაოდენობას. მაგალითად, ლითონებზე დაცემული ფოტონების გარკვეულ რაოდენობას კრისტალური მესრის იონები შთანთქმავს;

II. აინშტაინის განტოლებიდან გამომდინარეობს, რომ ფოტოელექტრონის მაქსიმალური კინეტიკური ენერჯია წრფივად იზრდება გამოსხივების ν სიხშირის ზრდასთან ერთად, დამოკიდებულია $A_{\text{გამ}}$ გამოსვლის მუშაობაზე და არ არის დამოკიდებული გამოსხივების ინტენსივობაზე;

III. იმისათვის, რომ ფოტოეფექტი დაიწყოს, ფოტონის ენერჯია საკმარისი უნდა იყოს გამოსვლის მუშაობის შესრულებისთვის: $h\nu \geq A_{\text{გამ}}$. მინიმალური სიხშირე, რომელიც $h\nu_{\text{მინ}} = A_{\text{გამ}}$ ტოლობიდან განისაზღვრება, წარმოადგენს ფოტოეფექტის წითელ საზღვარს. როგორც ვხედავთ, ფოტოეფექტის წითელი საზღვარი დამოკიდებულია მხოლოდ გამოსვლის მუშაობაზე, ანუ ნივთიერების გვარობაზე:

$$\nu_{\text{მინ}} = \frac{A_{\text{გამ}}}{h}.$$

თუ $\nu < \nu_{\text{მინ}}$, მაშინ დროის ერთეულში დაცემული ფოტონების რაოდენობის მიუხედავად, ფოტოეფექტს ადგილი არ ექნება. შესაბამისად, ფოტოეფექტისათვის გამოსხივების ინტენსივობა მნიშვნელოვანი არ არის, მთავარია ფოტონის საკმარისი ენერჯია ჰქონდეს.

ვინაიდან სინათლის ტალღის სიგრძე $\lambda = \frac{c}{\nu}$, ამიტომ მინიმალურ $\nu_{\text{მინ}}$ სიხშირეს მაქსიმალური $\lambda_{\text{მაქს}}$ ტალღის სიგრძე შეესაბამება: $\lambda_{\text{მაქს}} = \frac{c}{\nu_{\text{მინ}}}$. ცხადია, ფოტოეფექტს ადგილი მაშინ ექნება, თუ $\lambda \leq \lambda_{\text{მაქს}}$. ამის გამო, $\lambda_{\text{მაქს}}$ ტალღის სიგრძეს **ფოტოეფექტის გრძელტალღოვან საზღვარს** უწოდებენ.

ფოტოეფექტის კანონების ახსნისათვის, 1921 წელს აინშტაინს ნობელის პრემია მიენიჭა.

ცხრილში მოყვანილია ზოგიერთი ნივთიერების გამოსვლის მუშაობისა და წითელი საზღვრის მნიშვნელობები:

ნივთიერება	$A_{\text{გამ}}, \text{ ევ}$	$\nu_{\text{მინ}} 10^{14} \text{ ჰც}$
ცეზიუმი	1,8	4,53
კალიუმი	2,2	5,56
ალუმინი	3,7	9,03
თუთია	4,2	10,2
ვერცხლი	4,3	97,1
ვოლფრამი	4,5	10,8
პლატინა	5,3	13,7

დღევანდელი ცხოვრება წარმოუდგენელია ისეთი მოწყობილობების გარეშე, რომლებიც სინათლის სიგნალებს ელექტრულ სიგნალებში გარდაქმნის. ასეთ მოწყობილებებს **ფოტოელემენტებს** უწოდებენ (სურ. 2. 10).

ფოტოელემენტები გამოიყენება მეტროში მგზავრთა ნაკადის დასარეგულირებლად, სამრეწველო პროცესების მართვისათვის, უსაფრთხოების სისტემებში და ა.შ. ინფრანითელი გამოსხივების ფოტოელემენტები ფართოდ გამოიყენება საყოფაცხოვრებო ტექნიკის დისტანციური მართვის პულტებში. თანამედროვე ენერგეტიკაში, მზის ენერჯის ელექტრულ ენერჯიაში გარდასაქმნელად გამოიყენება ნახევარგამტარული ფოტოელემენტები.



სურ. 2.10

დასკვნები:

- მინიმალურ ენერგიას, რომელიც უნდა ჰქონდეს ელექტრონს ნივთიერებიდან გამოსვლისათვის, გამოსვლის მუშაობა ეწოდება. გამოსვლის მუშაობა ნივთიერების გვარობაზეა დამოკიდებული;
- სინათლის გამოსხივება, შთანთქმა და გავრცელება ხდება ცალკეული პორციებით, ანუ სინათლის კვანტებით, რომლებსაც ფოტონები ეწოდება;
- ფოტონის ენერგია ხმარდება ნივთიერებიდან გამოსვლის მუშაობის შესრულებასა და ფოტოელექტრონისათვის კინეტიკური ენერგიის მინიჭებას:

$$h\nu = A_{\text{გამ}} + \frac{mv_{\text{მაქს}}^2}{2};$$

- ფოტოეფექტის ნითელი საზღვარი ნივთიერებისათვის გამოითვლება ფორმულით: $v_{\text{min}} = \frac{A_{\text{გამ}}}{h}$.

საკონტროლო კითხვები:

1. რა განსხვავებაა სინათლის ელექტრომაგნიტურ და კვანტურ თეორიებს შორის?
2. სინათლის კვანტური თეორიით რას ნიშნავს სინათლის ინტენსივობის ზრდა?
3. რატომაა შეუძლებელი ფოტოეფექტის მეორე და მესამე კანონების ახსნა სინათლის ელექტრომაგნიტური თეორიით?



ერთად ამოვხსნათ ამოცანა

ლითონის ფირფიტას ჯერ $1,2 \cdot 10^{15}$ ჰც სიხშირის, შემდეგ კი $1,8 \cdot 10^{15}$ ჰც სიხშირის ელექტრომაგნიტური ტალღები დაასხივებს. გამოთვალეთ ფირფიტიდან ელექტრონის გამოსვლის მუშაობა, თუ ფოტოელექტრონების მაქსიმალური კინეტიკური ენერგია მეორე შემთხვევაში 2-ჯერ მეტია, ვიდრე პირველში.

მოცემულია: $h=6,626 \cdot 10^{-34}$ ჯ·წმ, $\nu_1=1,2 \cdot 10^{15}$ ჰც, $\nu_2=1,8 \cdot 10^{15}$ ჰც, $A_{j2} = 2 A_{j1}$. $A_{\text{გამ}}?$

ამოხსნა: დავწეროთ აინშტაინის განტოლება ფოტოეფექტისათვის თითოეულ შემთხვევაში: $h\nu_1 = A_{\text{გამ}} + A_{j1}$, $h\nu_2 = A_{\text{გამ}} + A_{j2}$, $h\nu_1 - A_{\text{გამ}} = E_{j1}$, $h\nu_2 - A_{\text{გამ}} = E_{j2}$. ვინაიდან კინეტიკური ენერგია მეორე შემთხვევაში 2-ჯერ მეტია, ვიდრე პირველში მივიღებთ:

$$2(h\nu_1 - A_{\text{გამ}}) = h\nu_2 - A_{\text{გამ}} \text{ საიდანაც, } A_{\text{გამ}} = 2h\nu_1 - h\nu_2 = h(2\nu_1 - \nu_2) \approx 4 \cdot 10^{-19} \text{ ჯ.}$$

პასუხი: ლითონის ფირფიტიდან ელექტრონის გამოსვლის მუშაობა $4 \cdot 10^{-19}$ ჯ-ის ტოლია.



ამოხსენით ამოცანები:

1. გამოთვალეთ ფოტოეფექტის გრელტალღოვანი საზღვარი (ტალღის სიგრძის მაქსიმალური მნიშვნელობა) ლითიუმისთვის, თუ ელექტრონის გამოსვლის მუშაობა 2,4 ევ-ის ტოლია.

2. იპოვეთ იმ ელექტრომაგნიტური ტალღის სიხშირე, რომლის კვანტის ენერგია 8,4 ვ პოტენციალთა სხვაობით აჩქარებული ელექტრონის კინეტიკური ენერგიის ტოლია.
3. იპოვეთ ფოტოეფექტის წითელი საზღვარი პლატინისათვის.
4. ექნება თუ არა ადგილი ფოტოეფექტს, თუ ვოლფრამის ფირფიტას 0,44 მკმ ტალღის სიგრძის ელექტრომაგნიტური გამოსხივება დაეცემა?
5. როგორ უნდა შევცვალოთ ვაკუუმურ მილში ფოტოელექტრონების შემაკავებელი ძაბვა, თუ მათი მაქსიმალური სიჩქარე 1,2-ჯერ გაიზარდა?
6. გამოთვალეთ შემაკავებელი ძაბვა იმ ფოტოელექტრონებისათვის, რომელთა მაქსიმალური სიჩქარე $9,3 \cdot 10^5$ მ/წმ-ია.
7. იპოვეთ ფოტოელექტრონების მაქსიმალური სიჩქარე, თუ შემაკავებელი ძაბვა 24 ვ-ია.
8. 25 ვტ სიმძლავრის ნათურა 2 წთ-ში $1,5 \cdot 10^{21}$ ფოტონს ასხივებს. განსაზღვრეთ გამოსხივებული სინათლის ტალღის საშუალო სიხშირე.
9. რამდენჯერ მეტია ლითონის ფირფიტაზე დასხივებული ტალღის სიხშირე ამავე ლითონისათვის ფოტოეფექტის წითელ საზღვარზე, თუ ფოტოელექტრონების მაქსიმალური კინეტიკური ენერგია 3-ჯერ მეტია გამოსვლის მუშაობაზე.
10. რამდენჯერ ნაკლებია ლითონის ფირფიტაზე დასხივებული ტალღის სიგრძე ამავე ლითონისათვის ფოტოეფექტის წითელ საზღვარზე, თუ ფოტოელექტრონების მაქსიმალური კინეტიკური ენერგია 4-ჯერ ნაკლებია გამოსვლის მუშაობაზე?

§ 2.4 სინათლის წნევა. სინათლის დუალიზმი

ცნობილი ინგლისელი მწერალი-ფანტასტი არტურ კლარკი (1917–2008) თავის ნაწარმოებში „მზის ქარი“ („The wind from the sun“), მოგვითხრობს კოსმოსურ რეგატაზე – კოსმოსური ხომალდების შეჯიბრზე, რომლებიც მოძრაობენ „ორი კვადრატული მილი“-ს ფართობის გიგანტური აფრების გამოყენებით. ის წერს: „... კვადრატული მილის მასა მხოლოდ ერთი ტონაა, ხოლო სინათლის წნევა ამ ფართობზე აღწევს ხუთ ფუნტს. აფრა ამოძრავდება და ჩვენც გაგვეჩაჩავს...“. იზადება კითხვა: შესაძლებელია სინათლემ რაიმე ზედაპირზე წნევა აწარმოოს?

სინათლის ელექტრომაგნიტურ თეორიაზე დაყრდნობით მაქსველმა ივარაუდა, რომ ზედაპირზე დაცემისას სინათლემ მასზე წნევა უნდა აწარმოოს. მართლაც, სხეულზე, მაგალითად, ლითონზე დაცემული სინათლის ტალღის ელექტრული ველის მოქმედებით თავისუფალი ელექტრონი ამოძრავდება ელექტრული ველის დაძაბულობის \vec{E} ვექტორის საპირისპირო მიმართულებით (სურ. 11). მოძრავ ელექტრონზე კი მაგნიტური ველის მხრიდან იმოქმედებს ლორენცის \vec{F}_L ძალა, რომელსაც ტალღის გავრცელების მიმართულება ექნება. ელექტრონებზე მოქმედი სწორედ ამ ძალების ჯამი განსაზღვრავს სინათლის წნევის ძალას.

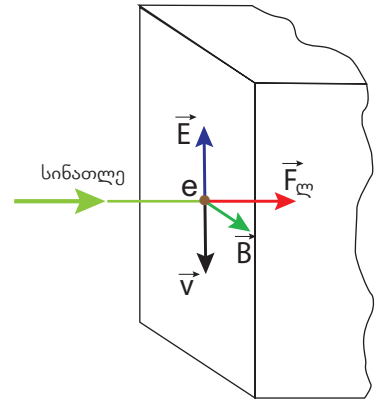
მაქსველმა დაადგინა, რომ ელექტრომაგნიტური ტალღის წნევა განისაზღვრება ფორმულით:

$$p = (1 + R)w_{საშ.} \quad (1)$$

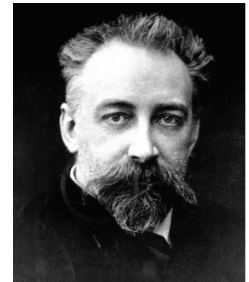
რომელშიც $w_{საშ.}$ სინათლის ტალღის ენერჯიის საშუალო სიმკვრივეა (ენერჯია მოცულობის ერთეულში), ხოლო R – არეკვლის კოეფიციენტი, რომელიც გვიჩვენებს ზედაპირზე დაცემული სინათლის რანაწილი აირეკლება მისგან. სარკული ზედაპირისთვის $R = 1$ და $p = 2w_{საშ.}$. შავი ზედაპირისთვის, რომელიც მთლიანად შთანთქავს გამოსხივებას, $R = 0$ და $p = w_{საშ.}$.

მაქსველის ვარაუდის დასამტკიცებლად საჭირო იყო გაეზომათ სინათლის წნევა, რასაც მისი სიმცირის გამო ბევრი ფიზიკოსი ვერ ახერხებდა – კაპკაშა მზის შემთხვევაში სინათლის წნევა დაახლოებით $4 \cdot 10^{-6}$ პა-ის ტოლია. წნევა, რომელსაც აწარმოებს სინათლე მყარი სხეულის ზედაპირზე, პირველად რუსმა ფიზიკოსმა პეტრე ლებედევმა 1900 წელს გაზომა. მან შექმნა მრძნობიარე გრეხითი სასწორი, რომლის მოძრავ ნაწილს წარმოადგენდა მინის თხელ ძაფზე დაკიდებული მსუბუქი ღერო (სურ. 2.12). ღეროს ბოლოებზე დამაგრებული იყო ლითონის თხელი კილიტისაგან (ფურცლისაგან) დამზადებული დისკოები – ღეროს ერთ მხარეს გაშავებული, მეორე მხარეს კი სარკული ზედაპირით. ღერო მოთავსებული იყო ჭურჭელში, რომელშიც შექმნილი იყო ვაკუუმი.

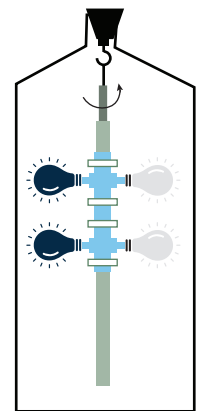
დაცემული სინათლის წნევა სარკული ზედაპირის მქონე დისკოზე მეტი იქნებოდა, ვიდრე გაშავებულ დისკოზე. ამის გამო წარმოიქმნებოდა ძალთა მომენტი, რომელიც შემოატრიალებდა ღეროს და დაგრებდა ძაფს. ძაფის დაგრების კუთხის გაზომვით ლებედევმა გამოთვალა ძალების მომენტები, რომელთა საშუალებით



სურ. 2.11



პეტრე ლებედევი
(1866-1912)



სურ. 2.12

განსაზღვრა სინათლის წნევა. მიღებული ექსპერიმენტული შედეგები თეორიულად გამოთვლილს დაემთხვა.

სინათლის კვანტურმა თეორიამ სინათლის წნევის არსებობა უფრო მარტივად ახსნა. სინათლის წნევის ბუნებას ადვილად გავიგებთ, თუ შემოვიღებთ ფოტონის იმპულსის ცნებას. აინშტაინმა დაადგინა, რომ ფოტონის იმპულსის მოდული მისი ენერჯიის სიჩქარის მოდულთან შეფარდების ტოლია, ამიტომ:

$$p_{\text{ფ}} = \frac{E}{c} = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}.$$

ფოტონის იმპულსი საგრძობლად განსხვავდება სხვა ელემენტარული ნაწილაკებისა და მაკროსხეულების იმპულსისაგან. ეს განსხვავება განპირობებულია იმით, რომ ფოტონს უძრაობის მასა არ აქვს, ანუ არ აქვს უძრაობის ენერჯია – უძრავი ფოტონი არ არსებობს.

ფოტონის იმპულსის არსებობა საშუალებას გვაძლევს ავხსნათ სინათლის წნევა ნაწილაკების ნაკადის წნევის ანალოგიით. ვთქვათ, სხეულის ზედაპირს მართობულად ეცემა სინათლე და ზედაპირის ფართობის ერთეულს დროის ერთეულში n ფოტონი ეცემა. მათი ნაწილი შთანთქმება და თითოეული შთანთქმული ფოტონი ზედაპირს

$p_{\text{ა.ფ}} = \frac{h\nu}{c}$ იმპულსს გადასცემს (არადრეკადი დაჯახება). ფოტონების ნაწილი აირეკლება, ამოძრავდება საპირისპირო მიმართულებით და თითოეული არეკლილი მათგანი ზედაპირს გადასცემს იმპულსს, რომელიც ფოტონის იმპულსის ცვლილების

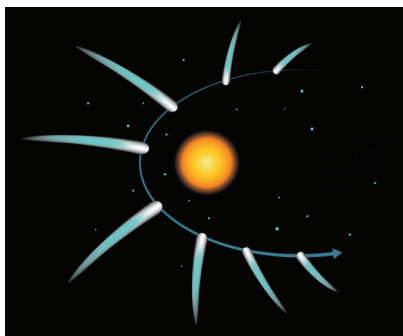
ტოლია: $\Delta p_{\text{ა.ფ}} = p_{\text{ა.ფ}} - (-p_{\text{ა.ფ}}) = 2p_{\text{ა.ფ}} = 2 \frac{h\nu}{c}$ (დრეკადი დაჯახება). სინათლის წნევა მთელ ზედაპირზე რიცხობრივად ტოლი იქნება ფართობის ერთეულზე დროის ერთეულში n ფოტონის მიერ გადაცემული იმპულსის. თუ R ზედაპირის არეკვლის კოეფიციენტი, მაშინ არეკლილი ფოტონების რაოდენობა იქნება nR , შთანთქმული ფოტონებისა კი – $n(1 - R)$. შესაბამისად, სინათლის წნევისათვის მივიღებთ:

$$p = \frac{2nRh\nu}{c} + \frac{(1 - R)n h\nu}{c} = (1 + R) \frac{n h\nu}{c}. \quad (2)$$

თუ გავითვალისწინებთ, რომ $n h\nu$ არის დროის ერთეულში ფართობის ერთეულზე დაცემული ყველა ფოტონის ჯამური ენერჯია, შესაბამისად $\frac{n h\nu}{c} = w_{\text{საშ}}$ და ფორმულა (2)-დან მაქსველის (1) ფორმულა მიიღება.

ამრიგად, სინათლის წნევის არსებობა შესაძლებელია ავხსნათ როგორც მაქსველის კლასიკური ელექტროდინამიკით, ასევე სინათლის კვანტური თეორიით.

სინათლის წნევის არსებობას ადასტურებს კომეტის კუდის მიმართულებაც: კომეტის კუდი ყოველთვის მიმართულია მზიდან (სურ. 13).



სურ. 2.13

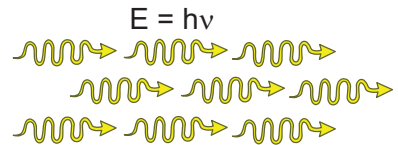
მე-11 კლასში თქვენ შეისწავლეთ სინათლის ნრფივი გავრცელება, გაეცანით სინათლის დისპერსიის, ტალღების ინტერფერენციისა და დიფრაქციის მოვლენებს. ამ თავში განვიხილეთ სითბური გამოსხივება, ფოტოეფექტი და სინათლის წნევა. ამ და სხვა მრავალი მოვლენის საფუძველზე ბუნებრივად იბადება კითხვა: რას წარმოადგენს სინათლე – ელექტრომაგნიტურ ტალღას, თუ ფოტონების ნაკადს?

XVII საუკუნიდან დაწყებული სინათლის ბუნებაზე წარმოდგენები ერთმანეთს ეწინააღმდეგებოდა. მეცნიერების გარკვეული ნაწილი ემხრობოდა

ნიუტონის მოსაზრებას, რომ სინათლე წარმოადგენს ნაწილაკების – კორპუსკულების ნაკადს, სხვები კი იზიარებდნენ ჰიუგენსის აზრს, რომ სინათლე ტალღაა.

XIX საუკუნის დასაწყისამდე მეტ-ნაკლები წარმატებით ორივე შეხედულება იყო გაბატონებული. ისეთი მოვლენები, როგორცაა ერთგვაროვან გარემოში სინათლის წრფივი გავრცელება და ჩრდილების წარმოქმნა, კარგად იხსნებოდა სინათლის კორპუსკულური თეორიით. სინათლის ინტერფერენციისა და დიფრაქციის მოვლენები კი – მისი ტალღური ბუნებით.

XX საუკუნის დასაწყისისთვის, ფოტოეფექტის მოვლენის აღმოჩენის შემდეგ დადგინდა, რომ სინათლე იქცევა როგორც გარკვეული ენერჯისა და იმპულსის მქონე ნაწილაკების ნაკადი. საბოლოოდ, ამ მოვლენების ანალიზით მეცნიერებმა დაასკვნეს, რომ სინათლეს ორმაგი ბუნება აქვს – ტალღური და კორპუსკულური. სინათლის ამ ორმაგ თვისებას **კორპუსკულურ-ტალღური დუალიზმი** ეწოდა. სინათლის კვანტი არის ელექტრომაგნიტური ტალღის პორცია, სინათლე კი ამ პორციების ნაკადია (სურ. 2.14) ზოგიერთი მოვლენისას მეტად ვლინდება სინათლის ტალღური ბუნება, ზოგიერთი მოვლენისას კი – კორპუსკულური. თუმცა, სინათლის ორმაგი თვისება მეცნიერებში გარკვეულ გაუგებრობას მაინც იწვევდა.



სურ. 2.14

მხოლოდ კვანტური თეორიის შექმნის შემდეგ დადგინდა, რომ **სინათლის ორმაგი ბუნება კანონზომიერია და დუალიზმი მთელი მიკროსამყაროს ფუნდამენტურ თვისებას წარმოადგენს**. 1923 წელს ფრანგმა ფიზიკოსმა ლუი დე ბროილმა გამოთქვა თამამი ჰიპოთეზა, რომ კორპუსკულურ-ტალღური დუალიზმი ახასიათებს ყველა მიკროობიექტს: ელექტრონს, პროტონს და სხვა. დე ბროილის ეს ჰიპოთეზა შემდგომ წლებში მრავალი ექსპერიმენტით დასაბუთდა.


დასკვნები:

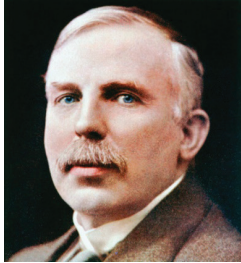
- სინათლე ზედაპირზე დაცემისას მასზე წნევას აწარმოებს;
- ელექტრომაგნიტური ტალღის წნევა განისაზღვრება ფორმულით: $p = (1 + R)w_{საშ}$; ფოტონის იმპულსის მოდული მისი ენერჯის სიჩქარის მოდულთან შეფარდების ტოლია და განისაზღვრება ფორმულებით: $p_{ფ} = \frac{E}{c} = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}$;
- რაიმე ზედაპირზე დაცემული ფოტონების მიერ წარმოებული წნევა ტოლია: $p = (1 + R) \frac{nh\nu}{c}$;
- სინათლეს ორმაგი ბუნება აქვს – ტალღური და კორპუსკულური, რომელსაც კორპუსკულურ-ტალღური დუალიზმი ეწოდა.

საკონტროლო კითხვები:

1. რომელი მოვლენები ადასტურებს სინათლის ტალღურ ბუნებას?
2. მაქსველის ელექტრომაგნიტური თეორიის თანახმად, როგორ აწარმოებს სინათლე რაიმე ზედაპირზე დაცემისას წნევას?
3. სინათლის კვანტური თეორიის თანახმად, როგორ აწარმოებს სინათლე რაიმე ზედაპირზე დაცემისას წნევას?
4. ზედაპირიდან არეკვლილი თუ შთანთქმული ფოტონი გადასცემს მას მეტი იმპულსს?
5. რაში მდგომარეობდა დე ბროილის ჰიპოთეზა?

§ 2.5 რეზერფორდის ცდა. ატომის ბირთვული მოდელი

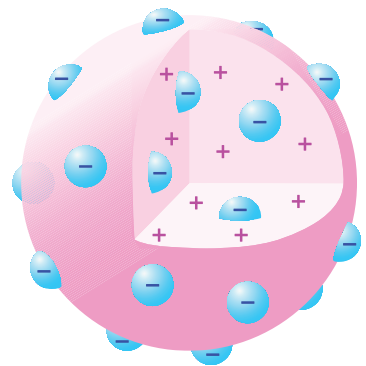
 დაახლოებით 2500 წლის წინ ძველმა ბერძენმა ფილოსოფოსმა დემოკრიტემ პირველმა გამოთქვა მოსაზრება, რომ მატერია, რომელიც მთლიანი და უწყვეტი გვეჩვენება, სინამდვილეში დიდი რაოდენობის უმცირესი, თვალთ უხილავი ნაწილაკებისაგან შედგება. ამ ნაწილაკებს ატომები უწოდეს. სიტყვა **ატომი** (ძვ. ბერძ. **ατομος**) განუყოფელს ნიშნავს.



ერნესტ რეზერფორდი
(1871-1937)

ატომი განუყოფლად ძალიან დიდხანს მიაჩნდათ, ვიდრე 1897 წელს ინგლისელმა ფიზიკოსმა ჯოზეფ ჯონ **ტომსონმა** საწინააღმდეგო არ დაამტკიცა. გარკვეულ პირობებში ლითონებიდან მიღებულ გამოსხივებას ტომსონი ატარებდა საპირისპირო ნიშნით დამუხტულ ორ პარალელურ ფირფიტას შორის. მან შეამჩნია, რომ გამოსხივება გადაიხრებოდა დადებითად დამუხტული ფირფიტისაკენ. აქედან ტომსონმა დაასკვნა, რომ სხივები უნდა წარმოადგენდეს უარყოფითად დამუხტული ნაწილაკების ნაკადს. ტომსონმა დაადგინა, რომ ნაკადის თითოეული ნაწილაკი წყალბადის ატომზე 2000-ჯერ მსუბუქია და მას ყველა ნივთიერების ატომი შეიცავს. ამ ნაწილაკს **ელექტრონი** უწოდეს. ელექტრონის აღმოაჩენამ დაამტკიცა, რომ ატომი განუყოფელი არ არის. ამ ნაშრომისთვის 1906 წელს ტომსონს ნობელის პრემია მიენიჭა.

თავისივე აღმოჩენაზე დაყრდნობით, 1904 წელს ტომსონმა შექმნა ატომის მოდელი, რომელსაც „ატომის პუდინგის მოდელი“ დაარქვეს. ეს მოდელი ატომს წარმოგვიდგენდა სფეროდ, რომელშიც დადებითი მუხტი განაწილებული იყო თანაბრად, ხოლო ელექტრონები მასში იყვნენ მიმოფანტულნი (როგორც პუდინგში ქიშმიში) (სურ. 2.15). ატომის დადებითი და უარყოფითი მუხტი მოდულით ერთმანეთის ტოლია, ამიტომ ატომი ელექტრულად ნეიტრალურია.



სურ. 2.15

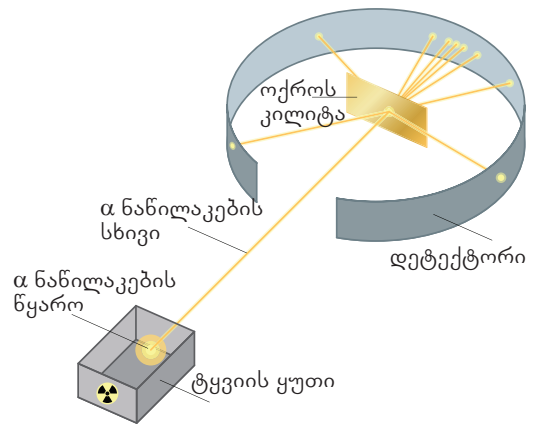
ტომსონის ატომის მოდელი მალე უარყო მისმა მოსწავლემ – ინგლისელმა ფიზიკოსმა ერნესტ რეზერფორდმა. მანჩესტერის უნივერსიტეტში მუშაობისას ის ატარებდა ცდებს რადიოაქტიური გამოსხივების შესასწავლად.

რეზერფორდის ცდა შემდეგში მდგომარეობდა: დაახლოებით 400 ნმ სისქის თხელ ოქროს კილიტაზე მიმართავდნენ რადიოაქტიური წყაროს მიერ გამოსხივებულ α ნაწილაკების ნაკადს. α ნაწილაკი წარმოადგენს დადებითად დამუხტულ ჰელიუმის ატომის ბირთვს, რომლის მასა დაახლოებით 8000-ჯერ მეტია ელექტრონის მასაზე. ბუნებრივია, ელექტრონებს არ შეუძლია α ნაწილაკის ტრაექტორიის შესამჩნევი შეცვლა, ამიტომ ამ ნაწილაკების გაბნევა შეიძლება გამოიწვიოს მხოლოდ ატომის დადებითად დამუხტულმა ნაწილმა.

კილიტას ატომებთან ურთიერთქმედების შემდეგ α ნაწილაკები ხვდებოდა დეტექტორზე, რომელიც დაფარული იყო გოგირდოვანი თუთიის (ZnS) ფენით. დეტექტორთან დაჯახებისას α ნაწილაკები სინათლის სუსტ ციმციმს იწვევდა. იმ α ნაწილაკების რაოდენობა, რომლებსაც კილიტა განსაზღვრული კუთხით გადახრიდა, შეიძლებოდა დადგენილიყო ციმციმების რაოდენობით (სურ 2.16).

ტომსონის მოდელის მიხედვით ატომის დადებითი მუხტი თანაბრადაა განაწილებული მის მთელ მოცულობაში, ამიტომ მოსალოდნელი იყო, რომ ატომებთან α ნაწილაკების დაჯახების შემდეგ ისინი თითქმის თავისუფლად გაივლიდნენ კილიტას და უმნიშვნელოდ გადაიხრებოდნენ წრფივი ტრაექტორიიდან.

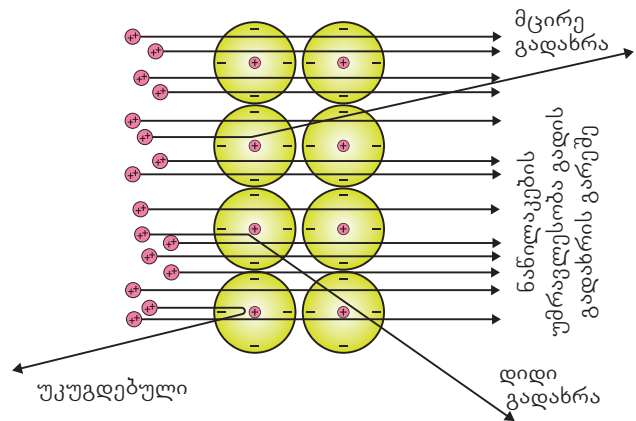
რეზერვუდის ცდებით მიღებული შედეგები კისრულია დენინალმდეგებოდა ტომსონის მოდელის მიხედვით მოსალოდნელ სურათს: α ნაწილაკების მნიშვნელოვანი ნაწილი მართლაც ან საერთოდ არ იცვლიდა მოძრაობის მიმართულებას, ან გადაიხრებოდა მცირე კუთხით ($0^\circ \leq \varphi \leq 6^\circ$), მაგრამ აღმოჩნდა ისეთი ნაწილაკებიც, რომლებიც გადაიხრებოდა 90° -ზე მეტი კუთხით ან საერთოდ უკუგდებული იყო (2.17). რეზერვორდი წერდა: „ეს ისევე დაუფერებელი იყო, როგორც 15 დიუმისანი ჭურვი გვესროლა ქაღალდის ფურცლისათვის და ჭურვი უკუგდებით ისევ თქვენ მოგხვედროდათ“.



სურ. 2.16

2000 α ნაწილაკიდან დაახლოებით ერთი ნაწილაკი გადაიხრებოდა 90° -ზე მეტი კუთხით, 4000 α ნაწილაკიდან დაახლოებით ერთი – 120° -ზე მეტი კუთხით და 7000 α ნაწილაკიდან დაახლოებით ერთი – 150° -ზე მეტი კუთხით.

ცდების შედეგებიდან გამომდინარეობდა, რომ ატომის შიგნით არსებობს ძალიან ძლიერი ელექტრული ველი. ეს ველი იქმნება **დადებითი მუხტით, რომელიც ატომის ძალიან მცირე მოცულობაშია კონცენტრირებული**. მას რეზერვორდმა **ატომის ბირთვი** უწოდა. ატომის ბირთვის ზომა თავად ატომის ზომასთან შედარებით ძალიან მცირეა, მაგრამ მასშია თავმოყრილი პრაქტიკულად ატომის მთელი მასა. კულონის კანონის თანახმად, ბირთვთან დადებითად დამუხტული α ნაწილაკის მიახლოებისას, მათ შორის აღიძვრება განზიდვის დიდი ძალა, რომელიც საგრძნობლად ცვლის მის ტრაექტორიას.



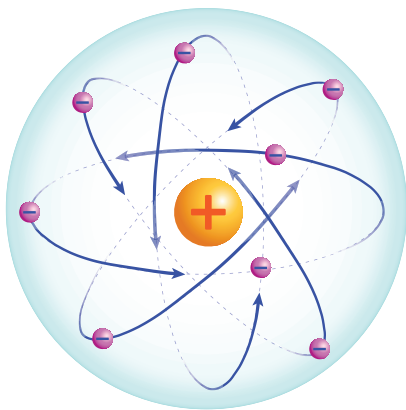
სურ. 2.17

ატომის ტომსონის მოდელში დადებითი მუხტის შექმნილი ელექტრული ველი შეესაბამება თანაბრად დამუხტული ბირთვის ველს, ამიტომ ატომის ცენტრთან მიახლოებისას მისი დაძაბულობის მოდული ნულის ტოლი გახდებოდა. შესაბამისად, არ გვექნებოდა დიდი კუთხით გადახრილი α ნაწილაკებიც.

ცდების შედეგებზე დაყრდნობით 1911 წელს რეზერვორდმა წარმოადგინა **ატომის ბირთვული მოდელი** (სურ. 2.18), რომლის ძირითადი დებულებებია:

1. ატომის ცენტრში მოთავსებულია ბირთვი, რომლის ზომა $d \leq 10^{-14}$ მ, ხოლო მისი მუხტი $q = +Ze$, რომელშიც Z ელემენტის რიგითი ნომერია ელემენტთა პერიოდულ სისტემაში;
2. ატომის თითქმის მთელი მასა (99,96%) თავმოყრილია დადებითად დამუხტულ ატომის ბირთვში;
3. ბირთვი გარშემორტყმულია Z რაოდენობის ელექტრონით, რომლებიც ქმნის ატომის ელექტრონულ გარსს. ელექტრონების ჯამური მუხტი $q = -Ze$, ამიტომ ატომი მთლიანობაში ელექტრონეიტრალურია.

აღსანიშნავია, რომ ატომში ელექტრონები არ შეიძლება უძრავად იყვნენ, ვინაიდან ბირთვთან ელექტრული მიზიდულობის გამო ისინი ბირთვს დაეცემოდა. შესაბამისად, ელექტრონები ატომის ბირთვის გარშემო განსაზღვრულ ორბიტებზე ბრუნავს.



სურ. 2.18

რეზერფორდის ატომის მოდელს ასევე **პლანეტარულ მოდელსაც** უწოდებენ, რადგან ის მოგვაგონებს ჩვენ მზის სისტემას, რომელშიც პლანეტები მზის გარშემო განსაზღვრულ ორბიტებზე ბრუნავს

მართალია, ატომის ბირთვულმა მოდელმა ახსნა α ნაწილაკების გაბნევის მიზეზი, მაგრამ ეს მოდელი ეწინააღმდეგებოდა კლასიკური მექანიკისა და ელექტროდინამიკის კანონებს, ვინაიდან ვერ ხსნიდა ატომის სტაბილური არსებობის ფაქტს. კერძოდ, მაქსველის კლასიკური ელექტროდინამიკის კანონების თანახმად, ბირთვის გარშემო აჩქარებულად მოძრავი ელექტრონი უწყვეტად უნდა ასხივებდეს ელექტრომაგნიტურ ტალღებს, რომელთა სიხშირე

ბირთვის გარშემო ელექტრონის ბრუნვის სიხშირეს უნდა ემთხვეოდეს. გამოსხივების გამო, ელექტრონები უნდა კარგავდეს ენერგიას და დროის ძალიან მცირე ინტერვალში (10^{-13} წმ-ის რიგის) უნდა დაეცეს ბირთვს, ე.ი. ატომი უნდა წყვეტდეს არსებობას. ამ შემთხვევაში ელექტრონები იქნებოდა არამდგრადი, სიცოცხლის ძალიან მცირე ხანგრძლივობით. სინამდვილეში კი მსგავსი არაფერი ხდება.

ამრიგად, ნიუტონის მექანიკა და მაქსველის ელექტროდინამიკა სრულად ვერ ხსნის ატომის აგებულებასა და თვისებებს. მათ შემდეგ პარაგრაფებში განვიხილავთ.

დასკვნები:

- ატომის ბირთვი ეწოდება მის ცენტრში მოთავსებულ ძალიან მცირე ნაწილს, რომელშიც ატომის მთელი დადებითი მუხტი და თითქმის მთელი მასაა თავმოყრილი;
- ატომის ბირთვის ზომა 10^{-14} მ-ის რიგისაა, ხოლო მისი მუხტი $q = +Ze$;
- რეზერფორდის ატომის მოდელს ასევე პლანეტარულ მოდელსაც უწოდებენ.

საკონტროლო კითხვები:

1. როგორი იყო ატომის აგებულება ტომსონის მოდელის მიხედვით?
2. რატომ აირჩია რეზერფორდმა ატომების ბომბარდირებისათვის α ნაწილაკები?
3. დაახლოებით რამდენი თანრიგითაა ნაკლები ატომის ბირთვის ზომა ატომის ზომაზე?
4. რატომ აღმოჩნდა რეზერფორდის პლანეტარული მოდელი წინააღმდეგობაში კლასიკურ ელექტროდინამიკასთან?

§ 2.6 ბორის პოსტულატები



ნილს ბორი
(1885-1962)

როგორც წინა პარაგრაფში აღვნიშნეთ, ატომის პლანეტარული მოდელი სრულად ხსნიდა რეზერფორდის ცდის შედეგებს, მაგრამ ეწინააღმდეგებოდა კლასიკური მექანიკისა და ელექტროდინამიკის კანონებს. ამ წინააღმდეგობების დასაძლევად დანიელმა ფიზიკოსმა ნილს ბორმა 1913 წელს შემოგვთავაზა ატომის კვანტური მოდელი. ეს მოდელი ეფუძნებოდა მისსავე ჩამოყალიბებულ ორ პოსტულატს, რომელთა თანამედროვე ინტერპრეტაცია ასეთია:

ბორის პირველი პოსტულატი – ატომს შეუძლია იმყოფებოდეს განსაკუთრებულ სტაციონარულ, ანუ კვანტურ მდგომარეობებში, რომელთაგანაც თითოეულს შეესაბამება გარკვეული ენერგია. სტაციონარულ მდგომარეობაში ატომი არ ასხივებს.

სტაციონარული მდგომარეობები შეიძლება გადავნიშნოთ რიგითი ნომრის მინიჭებით: $n = 1, 2, 3, \dots$, თანაც ყოველ მდგომარეობას შეესაბამება ენერგიის განსაზღვრული E_n მნიშვნელობა, ანუ ატომის ენერგიას მხოლოდ დისკრეტული მნიშვნელობების მიღება შეუძლია.

ბორის მოდელის თანახმად, ატომის სტაციონარულ მდგომარეობებს შეესაბამება განსაზღვრული, ნებადართული ორბიტები, რომლებზეც მოძრაობენ ელექტრონები ბირთვის გარშემო.

პირველი პოსტულატი ეწინააღმდეგება კლასიკური მექანიკის კანონებს, რომლის მიხედვითაც მოძრავ ელექტრონებს შეიძლება გააჩნდეთ ნებისმიერი (და არა დისკრეტული) ენერგია. ის ასევე ეწინააღმდეგება კლასიკური ელექტროდინამიკის კანონებს, რადგან უშვებს ელექტრონების აჩქარებულ მოძრაობას ელექტრომაგნიტური ტალღების გამოსხივების გარეშე.

ბორის მეორე პოსტულატი – ატომს შეუძლია გადასვლა ერთი სტაციონარული მდგომარეობიდან მეორეში. ამ გადასვლისას გამოსხივდება ან შთაინთქმევა ელექტრომაგნიტური ენერგიის კვანტი, რომლის სიხშირე განისაზღვრება ამ მდგომარეობებში ატომის ენერგიების სხვაობით:

$$\nu_{kn} = \frac{E_k - E_n}{h}, \quad (1)$$

რომელშიც ν_{kn} გამოსხივებული ან შთაინთქმული კვანტის სიხშირეა, E_k და E_n – ატომის ენერგია, შესაბამისად k და n სტაციონარულ მდგომარეობებში, h – პლანკის მუდმივა.

თუ $E_k > E_n$, მაშინ გადასვლისას ენერგია გამოსხივდება, თუ $E_k < E_n$, ენერგია შთაინთქმევა.

ატომის მდგომარეობას, რომელსაც მინიმალური ენერგია შეესაბამება, ძირითად მდგომარეობას უწოდებენ, ხოლო მდგომარეობებს მეტი ენერგიით – აღვზნებულ მდგომარეობებს. ძირითად ენერგეტიკულ მდგომარეობაში ატომი შეიძლება იმყოფებოდეს განუსაზღვრელად დიდხანს, ხოლო სხვა სტაციონარულ მდგომარეობებში $\sim 10^{-8}$ წმ-ის განმავლობაში.

ატომის ერთი სტაციონარული მდგომარეობიდან მეორეში გადასვლისას გამოსხივებული ელექტრომაგნიტური ტალღის სიგრძე ტოლი იქნება:

$$\lambda_{kn} = \frac{c}{\nu_{kn}} = \frac{hc}{E_k - E_n}. \quad (2)$$

ამრიგად, ბორის პოსტულატებით ახსნილი იქნა ატომის ენერჯიის მნიშვნელობების დისკრეტულობა და ატომის სპექტრის ხაზოვანი სტრუქტურა.

ბორმა ასევე დაადგინა ელექტრონების დაშვებული წრიული ორბიტების რადიუსების საპოვნელი დაკვანტვის რაოდენობრივი პირობა:

$$r_n = n \frac{h}{2\pi m_e v_n}, \quad (3)$$

რომელშიც $n = 1, 2, 3, \dots$ ორბიტის ნომერია, m_e – ელექტრონის მასა, v_n – n -ურ ორბიტაზე მოძრავი ელექტრონის სიჩქარის მოდული, r_n – n -ური ორბიტის რადიუსი.

ბორის პოსტულატებიდან და ორბიტების დაკვანტვის პირობიდან გამომდინარე შეიძლება აიხსნას უმარტივესი ატომის, წყალბადის ენერგეტიკული დონეების სტრუქტურა. წყალბადის ატომი შედგება ატომბირთვისა და მის გარშემო მბრუნავი ელექტრონისგან.

ბორმა წყალბადის ატომის ენერჯიისთვის მიიღო შემდეგი დამოკიდებულება:

$$E_n = -R \cdot \frac{1}{n^2}, \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \quad (4)$$

რომელშიც $R = \frac{m_e e^4}{8\epsilon_0^2 h^3}$ მუდმივი სიდიდეა (e – ელექტრონის მუხტი, ϵ_0 – ელექტრული მუდმივა). ფორმულაში რიცხვითი მნიშვნელობების შეტანით მივიღებთ $R = 13,6$ ევ. ამ დამოკიდებულებიდან ჩანს, რომ წყალბადის ატომის ენერჯია მხოლოდ ელექტრონის ორბიტის ნომრით განისაზღვრება.

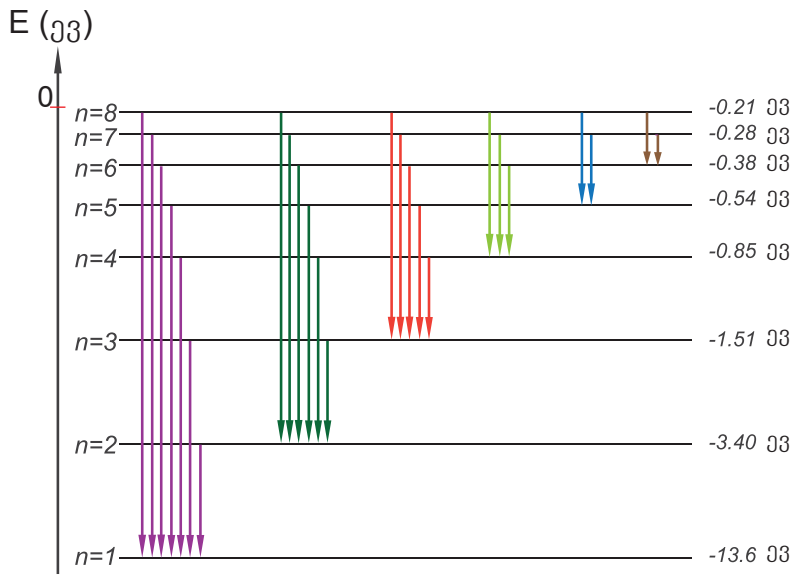
(4) ფორმულის თანახმად, წყალბადის ატომის ენერჯია ძირითად ($n = 1$) მდგომარეობაში $E_1 = -13,6$ ევ-ის ტოლია, იონიზებულ მდგომარეობაში კი, როდესაც ელექტრონი უსასრულოდ შორსაა ბირთვიდან ($n = \infty$), $E_\infty = 0$. როდესაც $n = 2$, $E_2 = \frac{E_1}{4} = -3,40$ ევ, როდესაც $n = 3$, $E_3 = \frac{E_1}{9} = -1,51$ ევ და ა.შ. წყალბადის ატომის ენერჯია ნებისმიერ მდგომარეობაში შეიძლება განისაზღვროს ფორმულით:

$$E_n = -\frac{13,6}{n^2} \text{ ევ}. \quad (5)$$

რადგან წყალბადის ატომის ენერჯიას შეუძლია მიიღოს მხოლოდ დისკრეტული მნიშვნელობები, ამბობენ, რომ ის **დაკვანტულია**. ატომის სტაციონარული ენერგეტიკული მდგომარეობების თვალსაჩინოდ წარმოდგენისათვის გამოიყენება ენერგეტიკული დიაგრამა (სურ. 2.19). დიაგრამაზე ისრებით ატომის მაღალი ენერგეტიკული მდგომარეობიდან დაბალ ენერგეტიკულ მდგომარეობაზე გადასვლაა ნაჩვენები.

ატომიდან ელექტრონის მოშორების პროცესს იონიზაცია ეწოდება. ძირითად მდგომარეობაში მყოფი წყალბადის ატომიდან ელექტრონის მოსაშორებლად საჭიროა ატომს მიენიჭოს $E_\infty - E_1 = 13,6$ ევ ენერჯია. ეს წყალბადის ატომის იონიზაციის ენერჯიაა. შესაბამისად, იონიზაციის ენერჯია ტოლია იმ მუშაობისა, რომელიც გარე ძალებმა უნდა შეასრულოს ელექტრონის ძირითადი მდგომარეობიდან უსასრულოდ შორს გადასატანად, ანუ ისეთ მანძილზე დასაშორებლად, რომელზეც ბირთვსა და ელექტრონს შორის ურთიერთქმედება შეიძლება უგულვებელყოთ.

აღსანიშნავია, რომ $n = \infty$ მეტ დონეზე ელექტრონი უკვე თავისუფალია და შეიძლება ჰქონდეს ნებისმიერი ენერჯია.

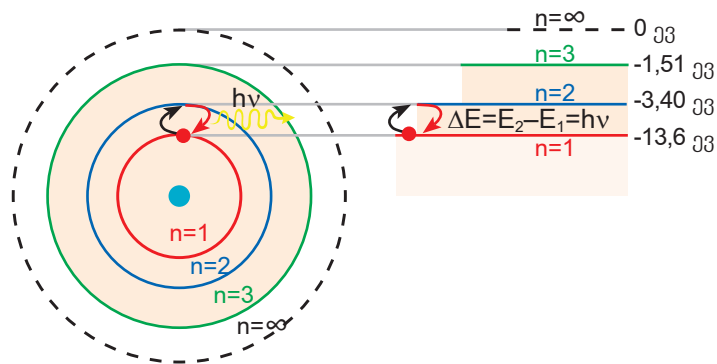


სურ. 2.19

$E_{\infty} = E_1 - E_{\infty} = -13,6$ ევ, წყალბადის ატომში ელექტრონის ბმის ენერჯიაა.

ბმის ენერჯია განისაზღვრება ნაწილაკებს შორის ელექტრომაგნიტური ურთიერთქმედებით. იმის გამო, რომ ატომის შექმნის დროს ენერჯია გამოიყოფა, ბმის ენერჯია უარყოფითია.

ატომის ალგზნებისას ელექტრონის ორბიტა იზრდება, ამიტომ ელექტრონის გარე ორბიტიდან შიგა ორბიტაზე გადასვლისას ატომი ენერჯიას ასხივებს (სურ. 2.20). ამ სურათზე წყალბადის ატომის ალგზნებულ მდგომარეობაში გადასვლა შავი ისრებითაა ნაჩვენები, გამოსხივებისა კი – წითელით.



სურ. 2.20

ბორის ატომის მოდელი საშუალებას იძლევა აღინეროს არა მარტო წყალბადის ატომი, არამედ სხვა ელემენტების იონიზებული ატომებიც, რომელთა ბირთვის გარშემო მხოლოდ ერთი ელექტრონი ბრუნავს, მაგ. He^+ , Li^{++} და ა. შ.

ბორის ატომის მოდელით აიხსნა წყალბადის ატომის სპექტრის კანონზომიერებები, მაგრამ ამ მოდელის საფუძველზე ვერ მოხერხდა ჰელიუმის ატომის სპექტრის კანონზომიერების დადგენა, მიუხედავად იმისა, რომ ის მხოლოდ ორ ელექტრონს

შეიცავს. შესაბამისად, ვერ მოხერხდა უფრო რთული ელემენტების გამოსხივების სპექტრის კანონზომიერების დადგენაც.

დასკვნები:

- ატომს შეუძლია იმყოფებოდეს განსაკუთრებულ სტაციონარულ, ანუ კვანტურ მდგომარეობებში, რომელთაგანაც თითოეულს შეესაბამება გარკვეული ენერგია. სტაციონარულ მდგომარეობაში ატომი არ ასხივებს;
- ატომს შეუძლია გადასვლა ერთი სტაციონარული მდგომარეობიდან მეორეში. ამ გადასვლისას გამოსხივდება ან შთაინთქმევა ელექტრომაგნიტური ენერგიის კვანტი, რომლის სიხშირე განისაზღვრება ამ მდგომარეობებში ატომის ენერგიების სხვაობით:
$$v_{kn} = \frac{E_k - E_n}{h};$$
- ატომის მდგომარეობას, რომელსაც მინიმალური ენერგია შეესაბამება, ძირითად მდგომარეობას უწოდებენ, ხოლო მდგომარეობებს მეტი ენერგიით – ალგზნებულ მდგომარეობებს;
- წყალბადის ატომის ენერგია ელექტრონის ორბიტის ნომრის მიხედვით, გამოითვლება ფორმულით: $E_n = -R \cdot \frac{1}{n^2}$, რომელშიც $R=13,6$ ევ.

საკონტროლო კითხვები:

1. რითი ეწინააღმდეგება ბორის პირველი პოსტულატი კლასიკურ მექანიკას? კლასიკურ ელექტროდინამიკას?
2. რა შემთხვევაში ასხივებს ატომი ელექტრომაგნიტური ტალღის კვანტს?
3. რა დროის განმავლობაში შეიძლება იმყოფებოდეს ატომი ძირითად მდგომარეობაში? ალგზნებულ მდგომარეობაში?
4. რატომაა წყალბადის ატომში ელექტრონის ბმის ენერგია უარყოფითი?



ერთად ამოვხსნათ ამოცანა

დაადგინეთ წყალბადის ატომში სრული ენერგიის რა ნაწილს შეადგენს ელექტრონის კინეტიკური და ბირთვთან მისი ურთიერთქმედების პოტენციალური ენერგია.

მოცემულია: $q_1 = e$; $q_2 = -e$;

ამოხსნა: როგორც მეათე კლასის ფიზიკის კურსიდან იცით, დამუხტულ ნაწილაკებს შორის ურთიერთქმედების პოტენციალური ენერგია განისაზღვრება ფორმულით:

$E_{\text{პოტ}} = k \frac{q_1 q_2}{r}$. ჩვენ შემთხვევაში გვექნება: $E_{\text{პოტ}} = -k \frac{e^2}{r}$, ხოლო $E_{\text{კინ}} = \frac{mv^2}{2}$. ელექტრონი ბირთვის გარშემო მოძრაობს ცენტრისკენული აჩქარებით, რომელსაც მას ბირთვთან მიზიდულობის კულონური ძალა ანიჭებს. შესაბამისად, შეგვიძლია დავწეროთ: $k \frac{e^2}{r^2} = \frac{mv^2}{r}$. ამ და წინა ფორმულის გათვალისწინებით, გვექნება $E_{\text{კინ}} = k \frac{e^2}{2r}$.

$E_{სრ} = E_{კინ} + E_{პოტ} = k\frac{e^2}{2r} - k\frac{e^2}{r} = -k\frac{e^2}{2r}$. ამოცანების ამოხსნისას გაითვალისწინეთ ენერგიების ნიშნები.

პასუხი: $E_{კინ} = |E_{სრ}|$; $E_{პოტ} = 2E_{სრ}$.



ამოხსენით ამოცანები:

1. იპოვეთ ძირითად მდგომარეობაში მყოფ წყალბადის ატომში ელექტრონის ბირთვთან ურთიერთქმედების პოტენციალური ენერგია მოდულით რამდენით აღემატება ელექტრონის კინეტიკურ ენერგიას.
2. იპოვეთ ბირთვისა და ელექტრონის ურთიერთქმედების პოტენციალური ენერგია წყალბადის ატომში.
3. როგორ და რამდენჯერ შეიცვლება წყალბადის ატომში ელექტრონის ბირთვთან ურთიერთქმედების პოტენციალური ენერგია, თუ ელექტრონი ძირითადი ენერგეტიკული დონიდან მესამეზე გადავა?
4. განსაზღვრეთ წყალბადის ატომში ელექტრონის კინეტიკური ენერგია.
5. რამდენით შეიცვლება წყალბადის ატომში ელექტრონის კინეტიკური ენერგია, თუ ელექტრონი მეორე ენერგეტიკული დონიდან ძირითადზე დაბრუნდება?
6. შთაინთქმევა თუ გამოსხივდება ენერგია, როდესაც წყალბადის ატომში ელექტრონი მეორე ენერგეტიკული დონიდან მესამეზე გადავა? პასუხი განამტკიცეთ მსჯელობით.
7. რისი ტოლია წყალბადის ატომის ენერგია მეოთხე ენერგეტიკულ დონეზე?
8. რა სიხშირის კვანტი გამოსხივდება, როდესაც წყალბადის ატომში ელექტრონი გადადის მეოთხე ენერგეტიკული დონიდან მეორეზე?
9. რამდენი განსხვავებული სიხშირის კვანტის გამოსხივებაა შესაძლებელი, თუ წყალბადის ატომში ელექტრონი იმყოფება მეოთხე ენერგეტიკულ დონეზე?
10. როგორ შეიცვლება ელექტრონის იმპულსი წყალბადის ატომში, თუ ელექტრონი დაბალი ენერგეტიკული დონიდან მაღალ ენერგეტიკულ დონეზე გადავა? პასუხი დაასაბუთეთ.

§ 2.7 ატომის ბირთვის აგებულება

ატომის პლანეტარული მოდელის შექმნის შემდეგ დაიბადა კითხვა: აქვს თუ არა ატომის ბირთვს რაიმე სტრუქტურა, და თუ აქვს, როგორია ის?

1919 წელს რეზერფორდმა და მისმა მოსწავლეებმა ჩაატარეს ცდები, რომლებშიც N, B, F, Na, P, Ne, Mg-სა და სხვა ელემენტების ბომბარდირება ხდებოდა α ნაწილაკებით. ამ დროს ატომის ბირთვებიდან დადებითად დამუხტული ნაწილაკები ამოიტყორცნებოდა. ამ ნაწილაკების მუხტი მოდულით ელექტრონის მუხტის ტოლი აღმოჩნდა, ხოლო მასა – ელექტრონის მასაზე დაახლოებით 2000-ჯერ მეტი. ამ ბომბარდირებისას ნივთიერების ბირთვი იცვლებოდა სხვა ნივთიერების ბირთვით. მაგალითად, აზოტის ბირთვი ჟანგბადის ბირთვით იცვლებოდა. დადებითად დამუხტული ნაწილაკი აღმოჩნდა წყალბადის ატომბირთვი, რომელსაც **პროტონი** (ბერძ. $\pi\rho\omega\text{-}\tau\omicron\varsigma$ – პირველი, პირველადი) ეწოდა. პროტონი აღნიშნება p ასოთი, მისი მასაა $m_p = 1,6726 \cdot 10^{-27}$ კგ = $1,007276$ მ.ა.ე., მუხტი კი – $q_p = 1,6 \cdot 10^{-19}$ კ.



ჯეიმს ჩედვიკი
(1891-1974)

სწავლობდნენ რა α ნაწილაკებით ბერილიუმის ბომბარდირებისას მიმდინარე რეაქციებს, 1930 წელს გერმანელმა მეცნიერებმა ვალტერ ბოტემ და ჰანს ბეკერმა, აღმოაჩინეს ძალიან დიდი შეღწევის უნარის მქონე ახალი გამოსხივება. თავიდან მას ბერილიუმის სხივები უწოდეს. 1932 წელს ინგლისელმა ფიზიკოსმა ჯეიმს ჩედვიკმა ჩაატარა ცდები ამ გამოსხივების თვისებების შესასწავლად და დაადგინა, რომ ბერილიუმის სხივები შედგება ელექტრულად ნეიტრალური ნაწილაკებისაგან, რომელთა მასა ახლოს იყო პროტონის მასასთან. ამ ნაწილაკებს მან **ნეიტრონები** უწოდა (ინგ. neutral – არც ერთი და არც მეორე, ნეიტრალური). ნეიტრონს n ასოთი აღნიშნავენ. თავისუფალი ნეიტრონის მასაა $m_n = 1,6726 \cdot 10^{-27}$ კგ = $1,008668$ მ.ა.ე., რომელიც პროტონის მასას 2,5 ელექტრონის მასით აღემატება. რადგან ნეიტრონს

ელექტრული მუხტი არ აქვს, ის სუსტად ურთიერთქმედებს ნივთიერებასთან. ნეიტრონი არამდგრადი ნაწილაკია, ის საკმაოდ ჩქარა თავისთავად იშლება. ნეიტრონის სიცოცხლის საშუალო ხანგრძლიობა 886 ნმ-ია, ამიტომ დედამიწის პირობებში თავისუფალ მდგომარეობაში ის პრაქტიკულად არ გვხვდება.

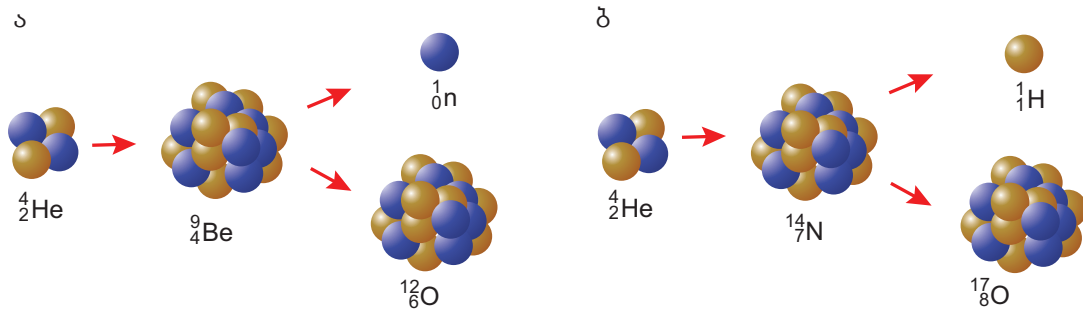
ბირთვულ ფიზიკაში პროტონი და ნეიტრონი წარმოადგენს ერთი და იგივე ნაწილაკის – **ნუკლონის** (ლათ. Nucleus – ბირთვი) ორ მდგომარეობას. თუ ნუკლონს ელექტრული მუხტი არ აქვს ($q = 0$), ის წარმოადგენს ნეიტრონს, ხოლო როდესაც დადებითი ელექტრული მუხტი აქვს ($q = e$), წარმოადგენს პროტონს.

ბირთვში პროტონების რაოდენობას უწოდებენ **მუხტის რიცხვს** (ატომურ ნომერს) და აღნიშნავენ Z ასოთი. მუხტის რიცხვი ელემენტთა პერიოდულ სისტემაში ქიმიური ელემენტის რიგით ნომერს ემთხვევა. ნუკლონების ჯამურ რაოდენობას **მასურ რიცხვს** უწოდებენ და A ასოთი აღნიშნავენ. მასური რიცხვი ტოლია მთელ რიცხვამდე დამრგვალებული ელემენტის ატომური მასის. პროტონისა და ნეიტრონის მასური რიცხვია $A = 1$, ხოლო ელექტრონის – $A = 0$. ცხადია, ბირთვში ნეიტრონების რაოდენობა ტოლია: $N = A - Z$.

ბირთვის დახასიათებისათვის საკმარისია Z მუხტის რიცხვისა და A მასური რიცხვის ცოდნა. ქიმიური ელემენტის ატომის ბირთვის აღნიშვნისათვის იმავე ელემენტის სიმბოლო გამოიყენება – A_ZX . მაგალითად, $\text{He} \rightarrow {}^4_2\text{He}$ (α ნაწილაკი); $\text{N} \rightarrow {}^{14}_7\text{N}$; $\text{Be} \rightarrow {}^9_4\text{Be}$. ამ აღნიშვნებით ელემენტარული ნაწილაკები ასე ჩაიწერება: პროტონი $\rightarrow {}^1_1(\text{p})$; ნეიტრონი $\rightarrow {}^1_0\text{n}$; ელექტრონი $\rightarrow {}^0_{-1}\text{e}$.

განსაზღვრული Z მუხტის რიცხვისა და A მასური რიცხვის მქონე ატომს **ნუკლიდს** უწოდებენ.

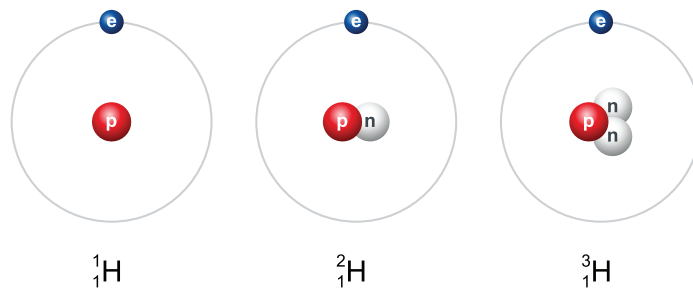
პარაგრაფის დასაწყისში აღწერილი აზოტისა და ბერილიუმის ბირთვების α ნაწილაკებით ბომბარდირების ორი ცდა სქემატურად, შესაბამისად სურ. 2.21 ა-სა და სურ. 2.21 ბ-ზეა ნაჩვენები.



სურ. 2.21

ერთი და იგივე ქიმიური ელემენტის ბირთვები ყოველთვის პროტონების ერთნაირ რაოდენობას შეიცავს, ხოლო ნეიტრონების რაოდენობა შეიძლება განსხვავდებოდეს.

ატომებს, რომლებიც პროტონების ერთნაირ, მაგრამ ნეიტრონების განსხვავებულ რაოდენობას შეიცავს, მოცემული ქიმიური ელემენტის იზოტოპები ეწოდება. მაგალითად, კარგად ცნობილია წყალბადის იზოტოპები – დეიტერიუმი ${}^2_1\text{H}$ და ტრიტიუმი ${}^3_1\text{H}$ (სურ. 2.22).



სურ. 2.22

ბირთვის პროტონულ-ნეიტრონული მოდელიდან გამომდინარე, იბადება კითხვა მისი მდგრადობის შესახებ.

მართლაც, ბირთვში $r = 10^{-14}$ მ მანძილზე მყოფ ორ პროტონს შორის მოქმედი ელექტროსტატიკური განზიდვის ძალა ტოლია:

$$F = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r^2} \approx 2,3 \text{ ნ},$$

მათ შორის გრავიტაციული მიზიდულობის ძალა კი –

$$F = G \frac{m_p^2}{r^2} \approx 1,9 \cdot 10^{-36} \text{ ნ}.$$

როგორც ვხედავთ, პროტონებს შორის განზიდვის ძალა ბევრად მეტია მათ შორის გრავიტაციული მიზიდულობის ძალაზე. მაშ, რატომ არ იშლება ატომის ბირთვი? რით აიხსნება მისი მდგრადობა?

ბირთვის მდგრადობის მიზეზი ისაა, რომ პროტონებს (ნუკლონებს) შორის ელექტროსტატიკური განზიდვის ძალების გარდა მოქმედებს მიზიდვის **ბირთვული ძალები**. ეს ძალები თავისი ბუნებით განსხვავდება როგორც ელექტრომაგნიტური, ასევე გრავიტაციული ძალებისაგან. ბირთვული ძალები განპირობებულია ნუკლონებს შორის ურთიერთქმედების ახალი ტიპით, რომელსაც **ძლიერი ურთიერთქმედება** ეწოდება.

ბირთვულ ძალებს აქვს რიგი თვისებები:

ბირთვის ზომების თანრიგის მანძილებზე ეს ძალები სიდიდით დაახლოებით **100-ჯერ** აღემატება კულონური განზიდვის ძალებს;

ვლინდება მხოლოდ ბირთვის ზომის თანრიგის მანძილებზე ($10^{-14} - 10^{-15}$ მ), ანუ წარმოადგენს ახლოქმედ ძალებს;

არ არის დამოკიდებული ურთიერთმოქმედ ნუკლონების მუხტზე – ყველა ნუკლონს შორის მოქმედი ბირთვული ძალები ერთნაირია;

აქვს გაჯერების თვისება – ბირთვში ნუკლონს შეუძლია მხოლოდ უახლოეს მეზობელ ნუკლონთან ურთიერთქმედება;

არ არის ცენტრალური ძალები – ურთიერთმოქმედი ნუკლონების ცენტრების შემაერთებელი წრფეების გასწვრივ არ არის მიმართული.

ატომის ბირთვის სიმკვრივე ძალიან დიდია – $\rho \sim 10^{17}$ კგ/მ³, ბირთვული ნივთიერების ერთი კუბური სანტიმეტრის მასა კი **180** მილიონი ტონაა.

დასკვნები:

- ატომის ბირთვი შედგება ნუკლონებისაგან – პროტონებისა და ნეიტრონებისაგან;
- ბირთვში პროტონების რაოდენობას მუხტის რიცხვს (ატომურ ნომერს) უწოდებენ და აღნიშნავენ **Z** ასოთი;
- ნუკლონების ჯამურ რაოდენობას მასურ რიცხვს უწოდებენ და **A** ასოთი აღნიშნავენ. მასური რიცხვი ტოლია მთელ რიცხვამდე დამრგვალებული ელემენტის ატომური მასის;
- ატომის ბირთვის მდგრადობას ნუკლონებს შორის მოქმედი ბირთვული ძალები განაპირობებს;
- ატომებს, რომლებიც პროტონების ერთნაირ, მაგრამ ნეიტრონების განსხვავებულ რაოდენობას შეიცავს, მოცემული ქიმიური ელემენტის იზოტოპები ეწოდება.

საკონტროლო კითხვები:

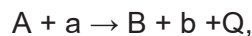
1. როგორ გამოვთვალოთ ნეიტრონების რაოდენობა ბირთვში?
2. როგორ აღნიშნავენ ატომის ბირთვს?
3. რომელი ელემენტის ატომის ბირთვია პროტონი?
4. რა თანრიგის მანძილებზე ვლინდება ბირთვული ძალები?
5. როგორი ტიპის ურთიერთქმედებაა ნუკლონებს შორის?

§ 2.8 ბირთვული რეაქციები

ქიმიური რეაქციების დროს ხდება ნივთიერებათა გარდაქმნა და ახალი ნივთიერება მიიღება. ატომის ბირთვის სხვა ბირთვთან ან ელემენტარულ ნაწილაკთან ურთიერთქმედებისას კი შეიძლება მივიღოთ ახალი ბირთვი, ანუ შეიძლება მოვახდინოთ ახალი ქიმიური ელემენტის სინთეზირება და მივიღოთ ენერგია. რა კანონზომიერებებს ემორჩილება ბირთვული რეაქციები? რა სარგებელი შეიძლება მივიღოთ მათი განხორციელებით?

ბირთვული რეაქცია ეწოდება ფიზიკურ პროცესს, რომლის დროსაც ატომის ბირთვი ურთიერთქმედებს სხვა ბირთვთან ან ელემენტარულ ნაწილაკთან, რასაც შეიძლება მოყვეს ბირთვის შემადგენლობისა და აგებულების ცვლილება. ბირთვული რეაქციების განსახორციელებლად საჭიროა ნაწილაკების დაახლოება ბირთვული ძალების მოქმედების მანძილებამდე.

ბირთვული რეაქციები სიმბოლურად შეიძლება ჩაიწეროს შემდეგი სახით:



რომელშიც A სანყისი ბირთვია, a – ნაწილაკი, რომლითაც ბირთვის ბომბარდირება მიმდინარეობს, B – რეაქციის შედეგად მიღებული ბირთვი, b – გამოტყორცნილი ნაწილაკი, Q – რეაქციის ენერგია.

ჩვეულებრივ, ბირთვის ბომბარდირებისათვის იყენებენ პროტონებს, ნეიტრონებს, ფოტონებს, დეიტრონებს (დეიტერიუმის ატომის ბირთვებს), α ნაწილაკებს. დადებითად დამუხტულმა ნაწილაკმა ბირთვში შესაღწევად უნდა დაძლიოს ელექტრული განზიდვის ძალები, ამიტომ ბირთვული რეაქციები პროტონების, დეიტრონებისა და α ნაწილაკების გამოყენებით შესაძლებელია იმ შემთხვევაში, როდესაც მათი ენერგია რამდენიმე მგევა-ია. სშირად, მაღალი ენერგიის მქონე დამუხტული ნაწილაკების მისაღებად ამაჩქარებლები გამოიყენება. ბომბარდირებისთვის მძიმე ბირთვები იშვიათად გამოიყენება, რადგან ბირთვის მუხტის ზრდასთან ერთად ელექტრული განზიდვის ძალებიც იზრდება. მათგან განსხვავებით, მუხტის არქონის გამო, ნეიტრონებს შეუძლია ბირთვში შეღწევა და სხვადასხვა ბირთვული გარდაქმნების გამოწვევა მაშინაც კი, როდესაც მათი კინეტიკური ენერგია საკმაოდ მცირეა – ~ 1 ევ.

ნებისმიერი ბირთვული რეაქციის დროს სრულდება ენერგიის, იმპულსისა და მუხტის შენახვის კანონები.

ბირთვულ რეაქციაში შემავალი ბირთვებისა და ნაწილაკების მუხტებისა და მასური რიცხვების ჯამი, რეაქციის შედეგად მიღებული ბირთვებისა და ნაწილაკების მუხტებისა და მასური რიცხვების ჯამის ტოლია.

განვიხილოთ ენერგეტიკული ბალანსი ორკომპონენტიანი ბირთვული რეაქციის მაგალითზე. ამ ბალანსის აღწერისათვის საჭიროა გამოვიყენოთ აინშტაინის ცნობილი დამოკიდებულება სხეულის ენერგიასა და მის მასას შორის: $E = mc^2$.

ვინაიდან, როგორც რეაქციის დაწყებამდე, ასევე დამთავრების შემდეგ ნაწილაკები ერთმანეთთან არ ურთიერთქმედებს, ამიტომ მათი სრული ენერგია ტოლი იქნება კინეტიკური და უძრაობის ენერგიების ჯამის: $E = E_{\text{კინ}} + mc^2$, რომელშიც m სხეულის უძრაობის მასაა, ხოლო c – სინათლის სიჩქარე.

ენერგიის მუდმივობის კანონის გათვალისწინებით შეიძლება დავწეროთ:

$$E_A + E_a = E_B + E_b + Q, \quad (1)$$

რომელშიც E_A, E_a, E_B, E_b ნაწილაკების ენერგიებია, შესაბამისად რეაქციამდე და რეაქციის შემდეგ.

ნაწილაკის სრული ენერგიის ფორმულის გამოყენებით (1) ტოლობა შეიძლება შემდეგნაირად ჩაიწეროს:

$$m_A c^2 + E_{კინA} + m_a c^2 + E_{კინa} = m_B c^2 + E_{კინB} + m_b c^2 + E_{კინb} + Q, \quad (2)$$

რომელშიც m_A, m_a, m_B, m_b არის ნაწილაკთა მასები, ხოლო $E_{კინA}, E_{კინa}, E_{კინB}, E_{კინb}$ – მათი კინეტიკური ენერგიები, შესაბამისად რეაქციამდე და რეაქციის შემდეგ.

სისტემის კინეტიკური ენერგია რეაქციამდე ტოლია $E_{კინ} = E_{კინA} + E_{კინa}$, ხოლო რეაქციის შემდეგ – $E_{კინ} = E_{კინB} + E_{კინb}$. ამ აღნიშვნების გამოყენებით (2) ტოლობიდან რეაქციის ენერგიისათვის მივიღებთ:

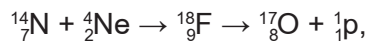
$$Q = E_{კინ} - E_{კინ} + (m_A + m_a - (m_B + m_b))c^2, \quad (3)$$

ნაწილაკების მცირე სიჩქარეების შემთხვევაში ($E_{კინ} \approx 0, E_{კინ} \approx 0$), რეაქციის ენერგია ტოლი იქნება რეაქციაში მონაწილე ნაწილაკების სანყისი და საბოლოო უძრაობის ენერგიების სხვაობის.

თუ ბირთვული რეაქცია მიმდინარეობს ენერგიის გამოყოფით ($Q > 0$), მას **ეგზოენერგეტიკული რეაქცია** ეწოდება, თუ მიმდინარეობს ენერგიის შთანთქმით ($Q < 0$) – **ენდოენერგეტიკული რეაქცია**.

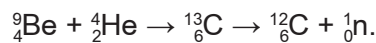
ბირთვული რეაქციის დროს გამოთავისუფლებულ ენერგიას ბირთვული რეაქციის **ენერგეტიკული გამოსავალი** ეწოდება. ზოგიერთი ბირთვული რეაქციის ენერგეტიკული გამოსავალი შეიძლება ასეულობით მეგაელექტრონვოლტს აღწევდეს.

α ნაწილაკებით განხორციელებულ პირველ ბირთვულ რეაქციად ითვლება რეზერფორდის მიერ ჩატარებული რეაქცია, რომლითაც აღმოჩენილ იქნა პროტონი:

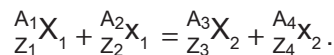


რომელშიც ${}^{18}_9\text{F}$ რეაქციის შუალედური ელემენტია – აღგზნებულ მდგომარეობაში მყოფი ფთორის ბირთვი.

ნეიტრონის აღმოჩენისას განხორციელდა ბირთვული რეაქცია, რომლის დროს ბერილიუმის ბირთვი გადაიქცა ნახშირბადის იზოტოპად:



ბირთვული რეაქციები ჩაინერება ქიმიური რეაქციების ანალოგიურად – მარცხენა მხარეს იწერება თავდაპირველი ნაწილაკების ჯამი, მარჯვენა მხარეს – რეაქციის შედეგად მიღებული ნაწილაკებისა:



განვიხილოთ მუხტის რიცხვებისა და მასური რიცხვების ჯამის მუდმივობა პროტონის აღმოჩენის ბირთვული რეაქციის მაგალითზე:

$$A_1 + A_2 = A_3 + A_4 \Rightarrow 14 + 4 = 17 + 1;$$

$$Z_1 + Z_2 = Z_3 + Z_4 \Rightarrow 7 + 2 = 8 + 1.$$

ამრიგად, შენახვის კანონების მოქმედება ერთი მხრივ ზღუდავს ბირთვული რეაქციის შედეგის შესაძლო ვარიანტებს, მაგრამ მეორე მხრივ, საშუალებას გვაძლევს ვინინასწარმეტყველოთ შესაძლო ბირთვული გარდაქმნები.

სიდიდეს, რომელიც ტოლია რეაქციამდე და რეაქციის შემდეგ ნაწილაკების უძრაობის მასათა ჯამის სხვაობის, **ბირთვული რეაქციის მასის დეფექტი** ეწოდება:

$$\Delta m = m_B + m_b - (m_A + m_a).$$

თუ $\Delta m < 0$, მაშინ $Q = -\Delta mc^2 > 0$ და რეაქცია ეგზოენერგეტიკულია. თუ $\Delta m > 0$, მაშინ $Q = -\Delta mc^2 < 0$ და რეაქცია ენდოენერგეტიკულია.

დასკვნები:

- ბირთვული რეაქცია ეწოდება ფიზიკურ პროცესს, რომლის დროსაც ატომის ბირთვი ურთიერთქმედებს სხვა ბირთვთან ან ელემენტარულ ნაწილაკთან, რასაც შეიძლება მოყვეს ბირთვის შემადგენლობისა და აგებულების ცვლილება;
- ნებისმიერი ბირთვული რეაქციის დროს სრულდება ენერგიის, იმპულსისა და მუხტის შენახვის კანონები;
- ბირთვულ რეაქციაში შემავალი ბირთვებისა და ნაწილაკების მუხტებისა და მასური რიცხვების ჯამი, რეაქციის შედეგად მიღებული ბირთვებისა და ნაწილაკების მუხტებისა და მასური რიცხვების ჯამის ტოლია;
- ბირთვული რეაქციის ენერგეტიკული ბალანსის ფორმულაა:
 $m_A c^2 + E_{კინA} + m_a c^2 + E_{კინa} = m_B c^2 + E_{კინB} + m_b c^2 + E_{კინb} + Q$;
- ნაწილაკების მცირე სიჩქარეების შემთხვევაში ($E_{კინ0} \approx 0$, $E_{კინ} \approx 0$), რეაქციის ენერგია ტოლი იქნება რეაქციაში მონაწილე ნაწილაკების სანწყისი და საბოლოო უძრაობის ენერგიების სხვაობის: $Q = (m_A + m_a - (m_B + m_b))c^2$;
- ბირთვული რეაქციის დროს გამოთავისუფლებულ ენერგიას ბირთვული რეაქციის ენერგეტიკული გამოსავალი ეწოდება;
- სიდიდეს, რომელიც ტოლია რეაქციამდე და რეაქციის შემდეგ ნაწილაკების უძრაობის მასათა ჯამის სხვაობის, ბირთვული რეაქციის მასის დეფექტი ეწოდება: $\Delta m = m_B + m_b - (m_A + m_a)$.

საკონტროლო კითხვები:

1. რატომ არის ბირთვული რეაქციების განხორციელება ნეიტრონებით უფრო ადვილი?
2. რა შემთხვევაშია ბირთვული რეაქცია ეგზოენერგეტიკული? ენდოენერგეტიკული?



ერთად ამოვხსნათ ამოცანა

რა მინიმალურ მანძილზე მიუახლოვდება m მასისა და q მუხტის მქონე პროტონი α ნაწილაკს ცენტრული შეხლისას, თუ თავდაპირველად პროტონი α ნაწილაკისაგან ძალიან დიდი მანძილითაა დაშორებული და მისი სიჩქარე v -ს ტოლია? ცნობილია, რომ $m_\alpha = 4m_p$; $q_\alpha = 2q_p$. პროტონის მიახლოებისას α ნაწილაკი უძრავად მიიჩნეთ.

მოცემულია: $m_p = m$; $m_\alpha = 4m$; $q_p = q$; $q_\alpha = 2q$; $v_1 = v$; $v_2 = 0$; $R_{გ06} = ?$

ამოხსნა: ვინაიდან თავდაპირველად ნაწილაკებს შორის მანძილი ძალიან დიდია, მათი ურთიერთქმედების პოტენციალური ენერგია ნულის ტოლია, ამიტომ სისტემის

სრული ენერგია $E_1 = \frac{mv^2}{2}$. α ნაწილაკთან მინიმალურ მანძილზე მიახლოებისას პროტონის სიჩქარე ნულის ტოლი გახდება და სისტემის სრული ენერგია მხოლოდ ნაწილაკების ურთიერთქმედების პოტენციალური ენერგიით განისაზღვრება:

$$E_2 = k \frac{q_1 q_2}{r} = k \frac{2q^2}{R_{\text{მინ}}}. \text{ ენერგიის მუდმივობის კანონის თანახმად, } E_1 = E_2, \text{ ანუ } \frac{mv^2}{2} = k \frac{2q^2}{R_{\text{მინ}}},$$

$$\text{საიდანაც } R_{\text{მინ}} = \frac{4kq^2}{mv^2}.$$

პასუხი: პროტონი α ნაწილაკს $R_{\text{მინ}} = \frac{4kq^2}{mv^2}$ მანძილზე მიუახლოვდება.



ამოხსენით ამოცანები:

1. ელემენტების პერიოდული სისტემის გამოყენებით დაადგინეთ რამდენ ნუკლონს შეიცავს ნახშირბადის ბირთვი.
2. რისი ტოლი იქნება იმ ქიმიური ელემენტის მასური რიცხვი, რომელიც 25 პროტონს და 30 ნეიტრონს შეიცავს?
3. ელემენტების პერიოდული სისტემის გამოყენებით დაადგინეთ რამდენ პროტონს და ნეიტრონს შეიცავს ოქროს ბირთვი.
4. რამდენით მეტ ნეიტრონს შეიცავს ვერცხლის ბირთვი, ვიდრე სპილენძის ბირთვი?
5. როგორია ნეონის იზოტოპების ${}_{10}^{20}\text{Ne}$ -ისა და ${}_{10}^{22}\text{Ne}$ -ის ბირთვების აგებულება?
6. როგორ იცვლება ელემენტის მასური რიცხვი და რიგითი ნომერი ბირთვიდან: ა) ნეიტრონის ამოტყორცნისას? ბ) პროტონის ამოტყორცნისას?
7. როგორ შეიცვლება ელემენტის მასური რიცხვი და რიგითი ნომერი ბირთვის მიერ α ნაწილაკის ჩაჭერისას?
8. ${}_{5}^{11}\text{B}$ ბორის იზოტოპის ნეიტრონებით ბომბარდირებისას ბირთვიდან α ნაწილაკი ამოიტყორცნება. დაწერეთ შესაბამისი ბირთვული რეაქცია.
9. ალუმინის α ნაწილაკებით ბომბარდირებისას ბირთვული რეაქცია პროტონის გამოტყორცნით მიმდინარეობს. დაწერეთ შესაბამისი ბირთვული რეაქცია.
10. გამოთვალეთ ნეიტრონის უძრაობის ენერგია ჯოულებით და ელექტრონვოლტებით.

§ 2.9 ბმის ენერგია

წინა პარაგრაფში განვიხილეთ ატომის ბირთვის გარდაქმნა მასზე ნაწილაკის დაჯახებით. იბადება კითხვა: შესაძლებელია თუ არა ატომის ბირთვის დაშლის რეაქცია? თუ შესაძლებელია, რა პირობებში შეიძლება განხორციელდეს ის?

ვთქვათ, რაიმე ატომის ბირთვი მთლიანად დაიშალა შემადგენელ ნუკლონებად, მაშინ ამ რეაქციის ენერგია ტოლი იქნება:

$$Q = [m_{\text{ბირ}} - (Zm_p + (A - Z)m_n)]c^2.$$

მაგალითად, ნახშირბადის ატომის ^{12}C ბირთვი შეიცავს $Z = 6$ პროტონს და $N = A - Z = 6$ ნეიტრონს. მათი ჯამური მასა* ტოლი იქნება:

$$m = Zm_p + (A - Z)m_n = 6m_p + 6m_n = 12,095646 \text{ მ.ა.ე.}$$

რადგან ^{12}C ბირთვის მასა $m_c = 12,000000$ მ.ა.ე.-ია, ამიტომ ბირთვის შემადგენელი ნუკლონების მასათა ჯამსა და ბირთვის მასას შორის სხვაობა (მასის ცვლილება) ტოლი იქნება:

$$\Delta m = m - m_c = 12,095646 \text{ მ.ა.ე.} - 12,000000 \text{ მ.ა.ე.} = 0,095646 \text{ მ.ა.ე.} > 0.$$

ამრიგად, ცალკეული ნაწილაკების ჯამური მასა მეტია, ვიდრე მათგან შედგენილი ბირთვის მასა. მასათა ამ სხვაობას **მასის დეფექტი** ეწოდება:

$$\Delta m = Zm_p + (A - Z)m_n - m_{\text{ბირ}}.$$

ნუკლონებისაგან ^{12}C ბირთვის შექმნისას მასის ფარდობითი ცვლილება იქნება:

$$\frac{\Delta m}{Zm_p + (A - Z)m_n} \cdot 100\% = \frac{0,095646}{12,095646} \cdot 100\% = 0,79\%.$$

$\Delta E = \Delta mc^2$ ფორმულის მიხედვით, სხეულის შინაგანი ენერგიის ცვლილებას ყოველთვის თან სდევს მისი მასის ცვლილებაც. სითბური პროცესებისას მასის ფარდობითი ცვლილება ძალიან მცირეა. მაგალითად, m მასის 0°C -იანი ყინულის გადნობის შემდეგ ეს ცვლილება ტოლია:

$$\frac{\Delta m}{m} = 3,7 \cdot 10^{-12}.$$

როგორც ზემოთ ვნახეთ, ბირთვული რეაქციებისას მასის ფარდობითი ცვლილება –

$$\frac{\Delta m}{m} \sim 10^{-3}.$$

ბირთვების მასების ზუსტმა გაზომვამ აჩვენა, რომ **ნებისმიერი ბირთვის მასა (წყალბადის გარდა) ნაკლებია მისი შემადგენელი ნუკლონების მასათა ჯამზე. ამასთან, რაც უფრო მეტი ნუკლონია ბირთვში, მით უფრო დიდია მისი მასის დეფექტი.**

* აქ და სხვაგან მასაში უძრაობის მასა იგულისხმება.

ზედმეტი მასა გარდაიქმნება ენერგიად, რომელიც გამოიყოფა ნუკლონების ბირთვად გაერთიანებისას. ამრიგად, ^{12}C ნახშირბადის ბირთვის შექმნისას ნუკლონების ჯამური მასის თითქმის 1% ენერგიად გარდაიქმნება. შესაბამისად, ნახშირბადის ბირთვის ცალკეულ ნუკლონებად დასაშლელად ენერგია საჭიროა.

ნუკლონის ბირთვიდან მოსაშორებლად, ბირთვული მიზიდულობის ძალების დასაძლევად მუშაობის შესრულებაა საჭირო. ამის გამო, სისტემის – „მოშორებული ნუკლონი – დარჩენილი ბირთვი“, ენერგია იმატებს.

ატომის ბირთვის ნუკლონებად დაშლისათვის საჭირო მინიმალურ ენერგიას ბირთვის ბმის ენერგია ეწოდება:

$$E_{\text{ბმ}} = (Zm_p + (A - Z)m_n - m_{\text{ბირ}})c^2 > 0.$$

თუ მასას გამოვსახავთ მ.ა.ე.-ში, ხოლო ბმის ენერგიას – მგევ-ში, მაშინ მივიღებთ:

$$|E_{\text{ბმ}}| = 931,5(Zm_p + (A - Z)m_n - m_{\text{ბირ}})(\text{მგევ}).$$

მაგალითად, ნახშირბადის ატომის ბირთვის ბმის ენერგია ტოლია:

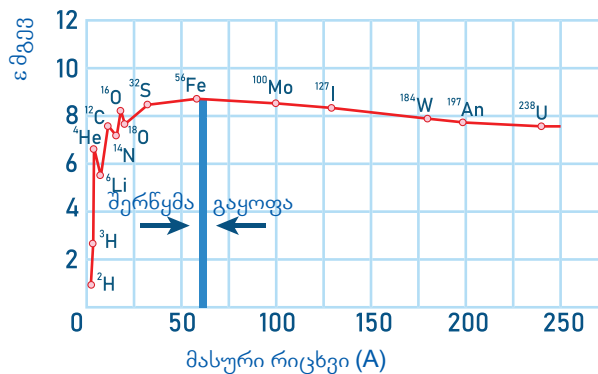
$$|E_{\text{ბმ}}| = 931,5 \text{ მგევ/მ.ა.ე.} \cdot 0,095646 \text{ მ.ა.ე.} = 89,1 \text{ მგევ.}$$

ატომის ბირთვის მდგომარეობას მინიმალური ენერგიით, რომელიც სიდიდით ბმის ენერგიის ტოლია, **ძირითადი მდგომარეობა** ეწოდება, ხოლო მეტი ენერგიით – **აღზნებული მდგომარეობა**.

ბირთვის მდგრადობის მახასიათებელი უფრო მნიშვნელოვანი სიდიდეა **ბირთვის ბმის კუთრი ენერგია**, ანუ ერთ ნუკლონზე მოსული ბმის ენერგია. ბირთვის ბმის კუთრი ენერგია აღინიშნება ϵ ასოთი:

$$\epsilon = \frac{|E_{\text{ბმ}}|}{A}.$$

შესაბამისად, რაც უფრო დიდია ბირთვის ბმის კუთრი ენერგია, მით უფრო ძლიერად არის თითოეული ნუკლონი დაკავშირებული თავის მეზობელთან და მით უფრო მდგრადია ბირთვი. სურ. 2.23-ზე ნაჩვენებია ბმის კუთრი ენერგიის მასურ რიცხვზე დამოკიდებულების გრაფიკი, რომელზეც ჩანს, რომ მრუდს გამოკვეთილი მაქსიმუმი აქვს. თავიდან $\epsilon(A)$ მკვეთრად იზრდება: $\epsilon = 1$ მგევ-დან ($A = 1$), $\epsilon = 8$ მგევ-მდე ($A = 16$). ბმის კუთრი ენერგიის მაქსიმუმი $\epsilon_{\text{max}} = 8,8$ მგევ მიიღწევა $A \approx 56$ -თვის, რაც რკინის $^{56}_{26}\text{Fe}$ ბირთვს შეესაბამება. შემდეგ ბირთვის ბმის კუთრი ენერგია მდორედ მცირდება $\epsilon = 7,6$ მგევ-მდე (ურანისათვის). ამის გამო, ყველაზე მდგრადი ის ელემენტებია, რომელთა მასური რიცხვი $A = 12$ -დან $A = 60$ -მდე შუალედშია.



სურ. 2.23

ამრიგად, $\varepsilon(A)$ გრაფიკის ცენტრალური ნაწილისაკენ წანაცვლებისას ბმის კუთრი ენერგია იზრდება. შესაბამისად, ნებისმიერი ბირთვული რეაქცია, რომლის შედეგად ასეთი წანაცვლება მოხდება, ენერგეტიკულად ხელსაყრელია. გრაფიკიდან ჩანს, რომ ეს შესაძლებელია მსუბუქი ბირთვების შეერთებისას (A დაახლოებით 0-დან 50-მდე იცვლება) და მძიმე ელემენტების გაყოფისას (A დაახლოებით 250-დან 50-მდე იცვლება). რადგან გრაფიკზე ზრდა მიმდინარეობს უფრო მკვეთრად, ვიდრე შემდგომი შემცირება, ამიტომ სინთეზის რეაქცია უნდა მიმდინარეობდეს ენერგიის უფრო დიდი გამოსავალით, ვიდრე მძიმე ბირთვების გაყოფისა.

დასკვნები:

- ბირთვის შემადგენელი ცალკეული ნუკლონების ჯამური მასისა და თავად ბირთვის მასის სხვაობას მასის დეფექტი ეწოდება;
- ნებისმიერი ბირთვის მასა (წყალბადის გარდა) ნაკლებია მისი შემადგენელი ნუკლონების მასათა ჯამზე. ამასთან, რაც უფრო მეტი ნუკლონია ბირთვში, მით უფრო დიდია მისი მასის დეფექტი;
- ატომის ბირთვის ნუკლონებად დაშლისათვის საჭირო მინიმალურ ენერგიას ბირთვის ბმის ენერგია ეწოდება: $E_{\text{ბმ}} = (Zm_p + (A - Z)m_n - m_{\text{ბირ}})c^2 > 0$;
- ბირთვის ერთ ნუკლონზე მოსულ ბმის ენერგიას, ბმის კუთრი ენერგია ეწოდება:

$$\varepsilon = \frac{|E_{\text{ბმ}}|}{A}$$

საკონტროლო კითხვები:

1. სითბური პროცესის თუ ბირთვული რეაქციის დროს არის მასის ფარდობითი ცვლილება გაცილებით უფრო მნიშვნელოვანი?
2. რა მასური რიცხვის მქონე ელემენტების ბირთვებს აქვს მაქსიმალური ბმის კუთრი ენერგია?
3. რატომ უნდა გამოიყოს მსუბუქი ბირთვების სინთეზისას მეტი ენერგია, ვიდრე მძიმე ბირთვების გაყოფისას?



ერთად ამოვხსნათ ამოცანა

გამოთვალეთ რა ენერგია მიიღება ნუკლონებისაგან 1 გ $^{12}_8\text{O}$ ჟანგბადის წარმოქმნისას.

მოცემულია: $m_p = 1,007276$ მ.ა.ე.; $m_n = 1,008668$ მ.ა.ე.; $m_{\text{ბირ}} = 15,99$ მ.ა.ე.; $Z = 8$; $Q = ?$
 $N = A - Z = 8$; $M = 16 \cdot 10^{-3} \frac{\text{კგ}}{\text{მოლ}}$; $N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{მოლ}^{-1}$.

ამოხსნა: პირველ რიგში გამოვთვალოთ ჟანგბადის ბირთვის ნუკლონების მასათა ჯამი:

$m = Zm_p + (A - Z)m_n = 8m_p + 8m_n = 16,127552$ მ.ა.ე.; მასის დეფექტი ვიპოვოთ ფორმულით:

$\Delta m = m - m_{\text{ბირ}} = 16,127552 - 15,99 = 0,137552$ (მ.ა.ე.) $= 2,28 \cdot 10^{-23} \text{მოლ}^{-1}$.

შესაბამისად, ჟანგბადის ერთი ბირთვის ბმის ენერგია ტოლი იქნება:

$$E_{\text{გგ}} = \Delta m \cdot c^2 = 2,28 \cdot 10^{-28} \cdot 9 \cdot 10^{16} = 2,052 \cdot 10^{-11} (\text{ჯ}).$$

1 გ ჟანგბადში მოლეკულათა რაოდენობა გამოვითვალოთ ცნობილი ფორმულით:

$$N = N_A \frac{m}{M} = 6,02 \cdot 10^{23} \cdot \frac{10^{-3}}{16 \cdot 10^{-3}} = 3,76 \cdot 10^{22}.$$

ჟანგბადის ატომების და, შესაბამისად ბირთვების რაოდენობა ორჯერ მეტი იქნება მოლეკულების რაოდენობაზე: $N_1 = 2N = 7,52 \cdot 10^{22}$. ამრიგად, 1 გ ^{16}O ჟანგბადის წარმოქმნისას მიღებული ენერგია ტოლი იქნება:

$$Q = 7,52 \cdot 10^{22} \cdot 2,052 \cdot 10^{-11} = 1,543 \cdot 10^{11} (\text{ჯ}).$$

პასუხი: 1 გ ^{16}O ჟანგბადის წარმოქმნისას $1,543 \cdot 10^{11}$ ჯოული ენერგია მიიღება.

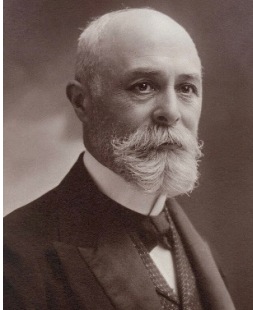


ამოხსენით ამოცანები:

1. გამოთვალეთ პროტონის უძრაობის ენერგია.
2. შეადარეთ ერთმანეთს ჰელიუმისა და ლითიუმის ბირთვების უძრაობის ენერგიები.
3. იპოვეთ კალციუმის ბირთვში პროტონებისა და ნეიტრონების ჯამური მასები.
4. იპოვეთ ტიტანის ბირთვის მასის დეფექტი.
5. შეადარეთ აზოტის და ჟანგბადის ბირთვების მასის დეფექტები ერთმანეთს.
6. გამოთვალეთ დეიტერიუმის ბირთვის ბმის ენერგია.
7. რა მინიმალური ენერგიაა საჭირო ^{14}N აზოტის ბირთვის ნუკლონებად დასაშლელად.
8. 100 გ ნივთიერების გაცივებისას მისი მასა საწყისი მასის $5 \cdot 10^{-12}$ ნაწილით შემცირდა. განსაზღვრეთ გამოყოფილი ენერგია.
9. იპოვეთ ჟანგბადის ^{16}O ბირთვის ბმის კუთრი ენერგია.
10. რა ენერგია გამოიყოფა 4 გ ჰელიუმის წარმოქმნისას?

§ 2.10 რადიოაქტივობა

ზოგიერთ ბირთვის თავისთავადი დაშლის უნარი აქვს, რასაც თან სდევს ბირთვის ფიზიკური სტრუქტურისა და, შესაბამისად, ატომის ქიმიური თვისებების ცვლილებაც. როგორია ასეთი თავისთავადი დაშლის კანონზომიერებები? რატომ მიმდინარეობს ეს პროცესი?



ანტუან ანრი ბეკერელი (1852-1908)

1896 წელს ფრანგმა ფიზიკოსმა ანტუან ანრი ბეკერელმა აღმოაჩინა, რომ ურანის მარილები გარე ზემოქმედების გარეშეც ინვევდნენ ფოტოფირფიტის გაშავებას, ანუ ისინი თავისთავად ასხივებდნენ რაღაც უცნობ სხივებს. ამ ახალ მოვლენას **რადიოაქტივობა** ეწოდა (ლათ. radio – ვასხივებ, action – ქმედითი).

ერთი ბირთვის მეორე ბირთვად თავისთავად გარდაქმნას, რომელსაც თან ახლავს ნაწილაკების ან ბირთვების გამოტყორცნა და მიკროტალღური გამოსხივება, რადიოაქტივობა ეწოდება.

ელემენტებს, რომელთა ბირთვებს ასეთი გამოსხივება ახასიათებს, რადიოაქტიური ელემენტები ეწოდება.



პიერ კიური (1859-1906)

1898 წელს პიერ კიურიმ და მარია სკლადოვსკაია-კიურიმ, იკვლევდნენ რა რადიოაქტივობის მოვლენას, აღმოაჩინეს ახალი რადიოაქტიური ქიმიური ელემენტები – რადიუმი $^{226}_{88}\text{Ra}$ და პოლონიუმი $^{210}_{84}\text{Po}$.

რადიოაქტიური ელემენტების აღმოჩენის შემდეგ დაიწყო მათი გამოსხივების ბუნების აქტიური შესწავლა. რეზერფორდმა აღმოაჩინა, რომ რადიოაქტიურ გამოსხივებას

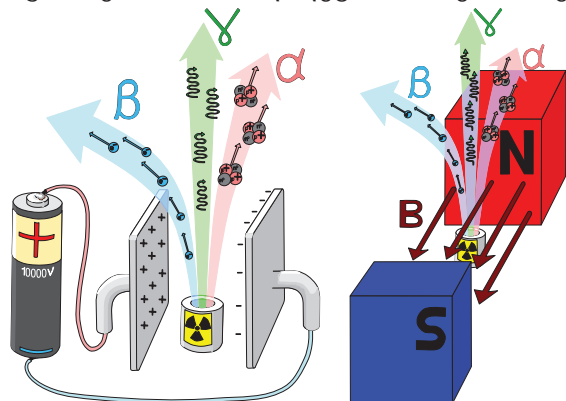


მარია სკლადოვსკაია-კიური (1867-1934)

რთული შემადგენლობა აქვს. მისი ცდა შემდეგში მდგომარეობდა: რადიოაქტიური ელემენტი (რადიუმი) თავსდებოდა ტყვიის ცილინდრის ვიწრო არხში, რომლის მოპირდაპირე მხარეს მოთავსებული იყო ფოტოფირფიტა. არხიდან გამოსულ გამოსხივებაზე მოქმედებდა მაგნიტური (ელექტრული) ველი. მთელი დანადგარი ვაკუუმში იყო მოთავსებული.

მაგნიტურ (ელექტრულ) ველში კონა სამ ნაწილად იყოფოდა (სურ. 2.24). გამოსხივების ორი შემადგენელი ნაწილი ურთიერთსაწინააღმდეგო მხარეს იხრებოდა, რაც იმაზე მიუთითებდა, რომ მათ საპირისპირო ნიშნის ელექტრული მუხტები ჰქონდა. გამოსხივების მესამე შემადგენელი ნაწილი კი მიმართულების შეუცვლელად წრფივად ვრცელდებოდა.

გამოსხივებას, რომელიც შედგებოდა დადებითად დამუხტული ნაწილაკებისაგან, **α სხივები** უწოდეს, უარყოფითად დამუხტული ნაწილაკების ნაკადს – **β სხივები**, ხოლო იმ ნაწილს, რომელიც არ გადაიხრებოდა – **γ სხივები**.



სურ. 2.24

რეზერვორდმა დაადგინა, რომ α სხივები ჰელიუმის ატომის ბირთვებს (α ნაწილაკებს) წარმოადგენს. ბეკერელმა კი დაადგინა, რომ β სხივები ელექტრონების ნაკადია. 1900 წელს ფრანგმა ფიზიკოსმა პოლ ვილარმა შეისწავლა γ სხივები და დაადგინა, რომ γ სხივები დიდი ენერჯიის მქონე მოკლელტალღოვან ელექტრომაგნიტურ გამოსხივებას წარმოადგენს. ძალიან მცირე ტალღის სიგრძის გამო ($\lambda < 10^{-8}$ სმ), γ გამოსხივებას მკვეთრად გამოხატული კორპუსკულური თვისებები აქვს.

1903 წელს რეზერვორდმა და ინგლისელმა ქიმიკოსმა ფრედერიკ სოდიმ შეიმუშავეს რადიოაქტიური დაშლის თეორია, რომლის მიხედვითაც რადიოაქტივობის მოვლენას თან სდევს ერთი ქიმიური ელემენტის მეორე ქიმიურ ელემენტად გარდაქმნა ენერჯიის გამოყოფით. ამ თეორიის მიხედვით, რადიოაქტიური გამოსხივება წარმოიქმნება ბირთვების დაშლის შედეგად.

განასხვავებენ ბუნებრივ და ხელოვნურ რადიოაქტივობას:

ბუნებრივი რადიოაქტივობა – რადიოაქტივობა, რომელიც ახასიათებს ბუნებაში არსებულ არასტაბილურ იზოტოპებს;

ხელოვნური რადიოაქტივობა – რადიოაქტივობა, რომელიც ახასიათებს ბირთვული რეაქციების მიმდინარეობისას მიღებულ ხელოვნურ იზოტოპებს.

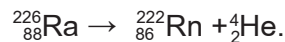
განვიხილოთ თითოეული რადიოაქტიური გამოსხივება ცალ-ცალკე.

A_ZX საწყისი ბირთვის α დაშლის პროცესის შედეგს წარმოადგენს Y იზოტოპი $Z - 2$ პროტონების რიცხვით და $A - 4$ მასური რიცხვით:



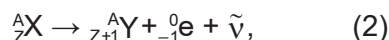
α დაშლა დაიბზირება როგორც ბუნებრივ ბირთვებში (რომელთა $Z > 83$), ასევე ხელოვნურ იზოტოპებში (რომელთა $Z < 83$), რადგან ამ შემთხვევებში α ნაწილაკის გამოსხივება ენერგეტიკულად გამართლებულია. ბირთვიდან გამოტყორცნილი α ნაწილაკის ენერჯია იცვლება $11,1 \div 11,8$ მგევე ფარგლებში. ამ ნაწილაკებს ენერჯიის მნიშვნელობების დისკრეტული სპექტრი აქვს.

α ნაწილაკების წყაროდ ხშირად იყენებენ რადიუმს, რომელიც დაშლისას რადონად გარდაიქმნება:



არსებობს β დაშლის ორი სახეობა: β^- და β^+ .

A_ZX ბირთვის β^- დაშლის შედეგად წარმოიქმნება ნუკლიდი $Z + 1$ ატომის ნომრით და იგივე მასური რიცხვით. β^- დაშლის რეაქცია შეიძლება შემდეგნაირად ჩავწეროთ:



რომელშიც $\tilde{\nu}$ ამ გამოსხივების აღმოჩენის დროისათვის უცნობი ნაწილაკი იყო. მისი მუხტის და მასური რიცხვები ნულის ტოლია.

β^- დაშლას ადგილი აქვს იმ ბირთვებში, რომლებშიც ზედმეტი ნეიტრონია. გამოტყორცნილ ელექტრონებს გააჩნია კინეტიკური ენერჯიის მნიშვნელობების უწყვეტი სპექტრი, რომლის მაქსიმუმი დამოკიდებულია იმ ბირთვის სახეობაზე, რომელიც იშლება.

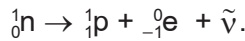
β^- დაშლის მაგალითია ${}^{14}_6\text{C}$ ნახშირბადის ატომის ბირთვის გარდაქმნა ${}^{14}_7\text{N}$ აზოტის ბირთვად:



საიდან მიიღება ელექტრონები β^- დაშლისას ბირთვიდან, რომელიც მხოლოდ ნეიტრონებისა და პროტონებისაგან შედგება? რა ნაწილაკია $\tilde{\nu}$?

1934 წელს იტალიელმა ფიზიკოსმა ენრიკო ფერმიმ შეიმუშავა β^- დაშლის კვანტური თეორია, რომლის თანახმად, ბირთვის დაშლის მომენტში მის შიგნით ნეიტრონი

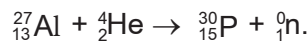
პროტონად გარდაიქმნება. ელექტრონული მუხტისა და ენერგიის მუდმივობის კანონების თანახმად, ამ პროცესის დროს უნდა წარმოიქმნას ორი ნაწილაკი – ელექტრონი და ნაწილაკი, რომლის მუხტის და მასური რიცხვები ნულის ტოლია. ნეიტრონის პროტონად გარდაქმნის რეაქციას აქვს შემდეგი სახე:



ელექტრონთან ერთად $\tilde{\nu}$ -ს გამოსხივება იწვევს სწორედ იმას, რომ β^- დაშლის დროს ელექტრონს შეიძლება ჰქონდეს ნებისმიერი ენერგია ნულიდან თავის მაქსიმალურ მნიშვნელობამდე.

α და β^- დაშლების აღმწერი კანონზომიერებების (1) და (2) ფორმულებს **წანაცვლების წესებს** უწოდებენ.

ერთ-ერთი ყველაზე ცნობილი ბირთვული რეაქციაა რადიოაქტიური ფოსფორის მიღების რეაქცია:

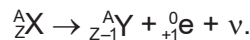


შემდეგ, ${}^{30}_{15}\text{P}$ იზოტოპი გადაიქცევა ${}^{30}_{14}\text{Si}$ იზოტოპად. რადგან მასური რიცხვი არ იცვლება და მუხტის რიცხვი 1-ით იკლებს, ეს ნიშნავს, რომ ამ რადიოაქტიური დაშლის დროს უნდა გამოიტყორცნოს ნაწილაკი, რომლის მასური რიცხვი 0-ის ტოლია, ხოლო მუხტის რიცხვი – +1. ამ ნაწილაკს აქვს ელექტრონის ყველა თვისება (მასა, მუხტის სიდიდე და ა. შ.), მხოლოდ მუხტის ნიშნით განსხვავდება ელექტრონისაგან. მას **პოზიტრონი** უწოდებენ და ${}^0_{+1}e$ სიმბოლოთი აღნიშნავენ. **პოზიტრონი ელექტრონის ანტინაწილაკია.** გამოტყორცნილი პოზიტრონის ენერგიის უწყვეტი სპექტრის გამო, მასთან ერთად უნდა გამოიტყორცნოს ნაწილაკი, რომლის მუხტის და მასური რიცხვები 0-ის ტოლია. დაშლის რეაქცია შემდეგნაირია:



ასეთ რადიოაქტიურ გარდაქმნას β^+ დაშლა ეწოდა.

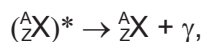
${}^A_Z\text{X}$ ბირთვის β^+ დაშლის შედეგად წარმოიქმნება ნუკლიდი $Z - 1$ ატომის ნომრით და იგივე მასური რიცხვით. β^+ დაშლის რეაქცია შეიძლება შემდეგნაირად ჩავწეროთ:



β^+ დაშლის დროს პოზიტრონთან ერთად გამოყოფილ ν ნაწილაკს **ნეიტრინო** უწოდეს (იტ. *Neutrino* – პატარა ნეიტრონი), ხოლო β^- დაშლის დროს გამოყოფილ $\tilde{\nu}$ ნაწილაკს – **ანტინეიტრინო**.

ნეიტრინოს საკვირველი თვისებები აქვს: ელექტრონული მუხტის არქონისა და ძალიან მცირე მასის გამო, ნეიტრინო ნივთიერებასთან თითქმის არ ურთიერთქმედებს. ნებისმიერ ნივთიერებაში ის ისე იქცევა, თითქოს ეს ნივთიერება ფაქტიურად არ არის. მაგალითად, ნეიტრინოს ტყვიანში რომ ემოძრავა, მისი შეღწევისუნარიანობა 10^{18} მ-ის თანრიგის ტოლი იქნებოდა. შესაბამისად, ნეიტრინო კოსმოსურ სივრცეში მოძრაობისას თავისუფლად გადის დედამიწაში, მზეში და სხვა ციურ სხეულებში.

α და β დაშლებისაგან განსხვავებით, γ გამოსხივება არ იწვევს ელემენტების გარდაქმნას:



რომელშიც ვარსკვლავი ადგზნებულ მდგომარეობას აღნიშნავს.

γ გამოსხივება მოკლელტალღოვანი ელექტრომაგნიტური გამოსხივებაა, რომლის ტალღის სიგრძე $\lambda \sim 10^{-10} \div 10^{-13}$ მ-ის რიგისაა. მისი სპექტრი უწყვეტია, ენერგია კი ~ 1 მეგე-დან ~ 10 მეგე-მდე იცვლება.

ჩვეულებრივ, γ გამოსხივება თან სდევს α და β დაშლის რადიოაქტიურ გარდაქმნებს, რადგან ბირთვული რეაქციებისას მიღებული ბირთვები აღმოჩნდებიან რა ალგზნებულ მდგომარეობაში, ძირითად მდგომარეობაში გადასვლისას γ კვანტებს ასხივებენ.

ყველა რადიოაქტიური დაშლა მიმდინარეობს ენერგიის გამოყოფით, ანუ პროცესი ეგზოენერგეტიკულია. ეს იმით აიხსნება, რომ რადიოაქტიური ბირთვის მასა დაშლის პროდუქტების ბირთვების მასათა ჯამზე მეტია.

როგორ ავხსნათ ზოგიერთი ბირთვის სტაბილურობა და სხვა ბირთვების არა-სტაბილურობა? ბირთვების სტაბილურობისათვის აუცილებელია მასში პროტონებისა და ნეიტრონების რაოდენობებს შორის არსებობდეს ბალანსი. მცირე რიგითი ნომრის მქონე ელემენტების სტაბილური ბირთვები შედგება ტოლი, ან თითქმის ტოლი რაოდენობის პროტონებისა და ნეიტრონებისაგან. მაგალითად, ჰელიუმის ${}^4_2\text{He}$ ბირთვი შეიცავს 2 პროტონსა და 2 ნეიტრონს, ჟანგბადის ${}^{16}_8\text{O}$ ბირთვი – 8 პროტონსა და 8 ნეიტრონს, კალციუმის ${}^{40}_{20}\text{Ca}$ ბირთვი – 20 პროტონსა და 20 ნეიტრონს. ამ ბირთვებში ნეიტრონებისა და პროტონების რაოდენობა ტოლია და თანაფარდობა $N/Z = 1$. მათში ბირთვული მიზიდულობის ძალები კულონური განზიდვის ძალებითაა განონასწორებული.

კალციუმზე მძიმე ყველა სხვა სტაბილური ელემენტის ბირთვი შეიცავს უფრო მეტ ნეიტრონს, ვიდრე პროტონს. Z ატომური რიცხვის ზრდასთან ერთად იზრდება პროტონების რაოდენობაც, რაც მათი კულონური განზიდვის ძალების ზრდას და, შესაბამისად, ბირთვის ბმის ენერგიის კლებას იწვევს. ბირთვული ძალების ახლოქმედების გამო ($\sim 10^{-14}$ მ), ბირთვების სტაბილურობისათვის საჭიროა მეტი ნეიტრონი, ვიდრე პროტონი. მაგალითად, რკინის ${}^{56}_{26}\text{Fe}$ იზოტოპი შედგება 26 პროტონისა და 30 ნეიტრონისგან, ანუ $N/Z = 1,15$. ურანის ${}^{238}_{92}\text{U}$ ბირთვისათვის – $N/Z = 1,59$. ამრიგად, **რაც უფრო მეტ პროტონს შეიცავს ბირთვი, მით უფრო მეტი ზედმეტი ნეიტრონია საჭირო ბირთვის სტაბილურობის შესანარჩუნებლად.** ამავე დროს, ნეიტრონების სიჭარბე ბირთვის ზომების ზრდას და, შესაბამისად, ბმის ენერგიის კლებას იწვევს. სწორედ ამიტომ, იმ ელემენტებისთვის, რომელთა რიგითი ნომერი 83-ზე მეტია, ნეიტრონების რაოდენობის ზრდის მიუხედავად, სტაბილურობის მიღწევა შეუძლებელია.

${}^{238}_{92}\text{U}$ -მდე რადიოაქტიური ბირთვები ბუნებაში არსებობს, ხოლო $Z > 92$ რიგითი ნომრის ელემენტები ხელოვნურადაა მიღებული.

არამდგრადია როგორც ბირთვები, რომლებშიც პროტონების რაოდენობა გაცილებით მეტია ნეიტრონების რაოდენობაზე, ასევე ბირთვები, რომლებშიც ნეიტრონების რაოდენობა გაცილებით მეტია პროტონების რაოდენობაზე. ჭარბი ნეიტრონების შემცველ ბირთვებს ხშირად β⁻ რადიოაქტივობა ახასიათებს.

განსაზღვრული ნუკლიდის სტაბილურობა დამოკიდებულია აგრეთვე ამ ნუკლიდის ენერგიაზე სხვა ნუკლიდების მიმართ, რომლებიც ნუკლონების იგივე რაოდენობას შეიცავს. მაგალითად, ${}^{24}_{12}\text{Mg}$ და ${}^{24}_{11}\text{Na}$ ნუკლონების ერთნაირ რაოდენობას შეიცავს, მაგრამ ნეიტრონებისა და პროტონების თანაფარდობა განსხვავებულია: პირველში $N/Z = 1$, ხოლო მეორეში $N/Z = 1,18$, ამიტომ ${}^{24}_{11}\text{Na}$ -ის ბირთვი განიცდის β⁻ დაშლას და გადაიქცევა ${}^{24}_{12}\text{Mg}$ -ის ბირთვად.

გამოსხივების სამივე სახეობა ერთმანეთისგან შელწვეუნარიანობითაც განსხვავდება. α გამოსხივება ქალაღის ფურცელშიც კი ვერ გადის, β გამოსხივებას რამდენიმე მმ სისქის ალუმინის ფირფიტა აჩერებს, γ სხივებისათვის კი რამდენიმე სანტიმეტრი სისქის ტყვიის ფენაც არ წარმოადგენს დაბრკოლებას.

დასკვნები:

- ერთი ბირთვის მეორე ბირთვად თავისთავად გარდაქმნას, რომელსაც თან ახლავს ნაწილაკების ან ბირთვების გამოტყორცნა და მიკროტალღური გამოსხივება, რადიოაქტივობა ეწოდება;
- რადიოაქტივობას, რომელიც ბუნებაში არსებულ არასტაბილურ იზოტოპებს ახასიათებს, ბუნებრივი რადიოაქტივობა ეწოდება;
- რადიოაქტივობას, რომელიც ბირთვული რეაქციების მიმდინარეობისას მიღებულ ხელოვნურ იზოტოპებს ახასიათებს, ხელოვნური რადიოაქტივობა ეწოდება;
- α დაშლის შედეგად წარმოიქმნება იზოტოპი $Z - 2$ პროტონების რიცხვით და $A - 4$ მასური რიცხვით: ${}^A_ZX \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2}Y + {}^4_2\text{He}$;
- ბირთვის β^- დაშლისას მის შიგნით ნეიტრონი პროტონად გარდაიქმნება, წარმოიქმნება იზოტოპი $Z + 1$ პროტონების რიცხვით, გამოსხივდება ელექტრონი და ანტინეიტრინო: ${}^A_ZX \rightarrow {}^A_{Z+1}Y + {}^0_{-1}e + \bar{\nu}$;
- ბირთვის β^+ დაშლისას წარმოიქმნება ნუკლიდი $Z - 1$ პროტონების რიცხვით, გამოსხივდება პოზიტრონი და ნეიტრინო: ${}^A_ZX \rightarrow {}^A_{Z-1}Y + {}^0_{+1}e + \nu$;
- γ გამოსხივება მოკლელტალღოვანი ელექტრომაგნიტური გამოსხივებაა, რომლის ტალღის სიგრძე $\lambda \sim 10^{-10} \div 10^{-13}$ მ-ის რიგისაა;
- რაც უფრო მეტ პროტონს შეიცავს ბირთვი, მით უფრო მეტი ზედმეტი ნეიტრონია მასში სტაბილურობის შესანარჩუნებლად.

საკონტროლო კითხვები:

1. რა სახის გამოსხივებებით ხასიათდება რადიოაქტივობა?
2. რა არის პოზიტრონი?
3. რატომ არის საჭირო ბირთვის სტაბილურობის შესანარჩუნებლად, მასში პროტონების რაოდენობის ზრდასთან ერთად ნეიტრონების რაოდენობის ზრდაც?
4. როგორი შედენვეის უნარი აქვს α ნაწილაკს, β^- გამოსხივებას, γ გამოსხივებას, ნეიტრინოს?



ერთად ამოვხსნათ ამოცანა

რამდენიმე α და β^- დაშლის შედეგად ${}^{210}_{84}\text{Po}$ ბირთვი გარდაიქმნა ოსმიუმის ${}^{190}_{76}\text{Os}$ ბირთვად. რამდენი β^- დაშლა მოხდა?

ამოხსნა: ვინაიდან β^- დაშლა მასური რიცხვის ცვლილებას არ იწვევს, მასური რიცხვის ჯამური ცვლილება კი 20-ის ტოლია, ეს ნიშნავს, რომ განხორციელებულა ხუთი α დაშლა: ${}^{210}_{84}\text{Po} \rightarrow 5 \cdot {}^4_2\text{He} + {}^{190}_{74}\text{X}$. აქედან ჩანს, რომ ${}^{190}_{74}\text{X}$ ბირთვიდან ${}^{190}_{76}\text{Os}$ მისაღებად ორი β^- დაშლა არის საჭირო. მართლაც, ${}^{190}_{74}\text{X} \rightarrow 2 \cdot {}^0_{-1}e + {}^{190}_{76}\text{Os}$.

პასუხი: ${}^{210}_{84}\text{Po}$ ბირთვი ${}^{190}_{76}\text{Os}$ ბირთვად რომ გარდაიქმნას, ორი β^- დაშლა უნდა განხორციელდეს.



ამოხსენით ამოცანები:

1. ატომის ბირთვის ზომის ზრდა რატომ იწვევს მის არასტაბილურობას?
2. რადიოაქტიური β^- გამოსხივებისას ბირთვიდან ელექტრონები გამოიტყორცნება. როგორ „აღმოჩნდნენ“ ბირთვში ელექტრონები?
3. რადიოაქტიური β^+ გამოსხივებისას ბირთვიდან პოზიტრონები გამოიტყორცნება. როგორ „აღმოჩნდნენ“ ბირთვში ანტიელექტრონები?
4. ${}_{11}^{23}\text{Na}$ ნატრიუმის როგორი სახის რადიოაქტიური დაშლისას მიიღება ${}_{12}^{23}\text{Mg}$?
5. როგორი სახის რადიოაქტიური დაშლის შედეგად გარდაიქმნება პლუტონიუმის ${}_{94}^{243}\text{Pu}$ ბირთვი ურანის ${}_{92}^{239}\text{Pu}$ ბირთვად?
6. როგორი სახის რადიოაქტიური დაშლის შედეგად გარდაიქმნება კიურიუმის ${}_{96}^{247}\text{Cm}$ ბირთვი პროტაქტინიუმის ${}_{91}^{231}\text{Pa}$ ბირთვად?
7. რომელი ბირთვი მიიღება რადიუმის ${}_{88}^{226}\text{Ra}$ ბირთვის ოთხი α და ოთხი β^- დაშლის შედეგად?
8. რომელი ბირთვი მიიღება ბერკლიუმის ${}_{97}^{247}\text{Bk}$ ბირთვის ორი α და β^+ დაშლის შედეგად?
9. რომელი ბირთვი მიიღება რადიუმის ${}_{88}^{226}\text{Ra}$ ბირთვის ხუთი α , ოთხი β^- და γ დაშლის შედეგად?
10. რამდენიმე α და β^- დაშლის შედეგად ურანის ${}_{92}^{239}\text{U}$ ბირთვი გარდაიქმნა ტყვიის ${}_{82}^{207}\text{Pb}$ ბირთვად. რამდენი β^- დაშლა მოხდა?

§ 2.11 რადიოაქტიური დაშლის კანონი

ბირთვების თავისთავადი დაშლის რეაქციები მრავალფეროვანია, თუმცა მათში იკვეთება საერთო კანონზომიერებაც. შევეცადოთ დაშლის რეაქციები მათემატიკურად აღვწეროთ.

რადიოაქტიური დაშლის შედეგად ქიმიური ელემენტების იზოტოპების უმრავლესობა უფრო მდგრად იზოტოპად გადაიქცევა. რადიოაქტიური დაშლა სტატისტიკურად აღინერება. მართალია, შეუძლებელია განისაზღვროს გარკვეულ დროის შუალედში რადიოაქტიური ნიმუშის კონკრეტულად რომელი ატომები დაიშლება, მაგრამ შეიძლება ვინინასწარმეტყველოთ რამდენი ატომი დაიშლება ერთმანეთისგან დამოუკიდებლად ამ დროში. ამის განსაზღვრა იმიტომაცა შესაძლებელი, რომ ყველა რადიოაქტიური ელემენტი მხოლოდ მისთვის დამახასიათებელი სიჩქარით იშლება. მაგალითად, იოდის $^{131}_{53}\text{I}$ ბირთვების ნახევარი 8,04 დღე-ღამეში დაიშლება. რაც უფრო დიდია ატომების სანყის N_0 რაოდენობა, მით უფრო ზუსტად შესრულდება ეს ალბათური წინასწარმეტყველება.

დროის შუალედს, რომლის განმავლობაშიც რადიოაქტიური ბირთვების რაოდენობის ნახევარი დაიშლება, ამ ბირთვების ნახევრად დაშლის პერიოდი ეწოდება.

აღსანიშნავია, რომ ნახევრად დაშლის პერიოდი არ არის დამოკიდებული იმაზე, თუ რომელ აგრეგატულ მდგომარეობაშია ნივთიერება – მყარში, თხევადში თუ აირადში. გარდა ამისა, ნივთიერების ნახევრად დაშლის პერიოდი არ არის დამოკიდებული ნივთიერების რაოდენობაზე, დროზე, ადგილზე და პირობებზე, რომელშიც ის იმყოფება. შესაბამისად, რადიოაქტიური ბირთვების რაოდენობა „მაშინ“ (N_1) და „ახლა“ (N_2), უშუალოდ განსაზღვრავს დროის $\tau = t_2 - t_1$ შუალედს, რომელიც გავიდა ბირთვების N_1 -დან N_2 რაოდენობამდე შემცირებისას.

დავადგინოთ რადიოაქტიური დაშლის კანონი, ანუ ვიპოვოთ დაუშლელი ბირთვების N რაოდენობა დროის ნებისმიერ t მომენტში. დავუშვათ, რომ დროის სანყის მომენტში ($t = 0$) ნიმუში შეიცავს N_0 რაოდენობის ბირთვს. მაშინ ნახევრად დაშლის პერიოდის ($t = T_{1/2}$) გასვლის შემდეგ დაუშლელი დარჩება $N_0/2$ ბირთვი. კიდევ ერთი ნახევარ-პერიოდის გასვლის შემდეგ ($t = 2T_{1/2}$) დაუშლელი ბირთვების რაოდენობა იქნება:

$$\frac{N_0}{2} \cdot \frac{1}{2} = \frac{N_0}{2^2}.$$

n ნახევრად დაშლის პერიოდის გასვლის შემდეგ, $t = nT_{1/2}$ მომენტისათვის, დაუშლელი ბირთვების რაოდენობა ტოლი იქნება:

$$N = \frac{N_0}{2^n}.$$

თუ გავითვალისწინებთ, რომ $n = t/T_{1/2}$, მივიღებთ რადიოაქტიური დაშლის კანონს:

$$N = N_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T_{1/2}}}.$$

ზოგიერთი რადიოაქტიური იზოტოპის ნახევრად დაშლის პერიოდი მოცემულია ცხრილში:

ნივთიერება	ნახევრად დაშლის პერიოდი	ნივთიერება	ნახევრად დაშლის პერიოდი
$^{222}_{87}\text{Rn}$	3,8 დღე-ღამე	$^{226}_{86}\text{Ra}$	1600 წელი
$^{131}_{53}\text{I}$	8,04 დღე-ღამე	$^{239}_{94}\text{Pu}$	24 390 წელი
$^{60}_{27}\text{Co}$	5,3 წელი	$^{235}_{92}\text{U}$	700 მილიონი წელი
$^{137}_{55}\text{Cs}$	30,17 წელი	$^{238}_{92}\text{U}$	4,5 მილიარდი წელი

სურ. 25-ზე მოცემულია $T_{1/2}$ ნახევრად დაშლის პერიოდის მქონე რადიოაქტიური იზოტოპის დაუშლელი ბირთვების რაოდენობის დროზე დამოკიდებულების გრაფიკი. ეს გრაფიკი ექსპონენტურია.

რადიოაქტიური დაშლის სიჩქარე ხასიათდება რადიოაქტიური ნივთიერების აქტივობით.

რადიოაქტიური ნივთიერების აქტივობა ეწოდება 1 წმ-ში დაშლილი რადიოაქტიური ბირთვების რაოდენობას. აქტივობას A ასოთი აღნიშნავენ.

SI-ში აქტივობის ერთეულია **ბეკერელი (ბკ).**

1 ბეკერელი ისეთი რადიოაქტიური ნივთიერების აქტივობაა, რომელშიც 1 წმ-ში 1 ბირთვი დაიშლება.

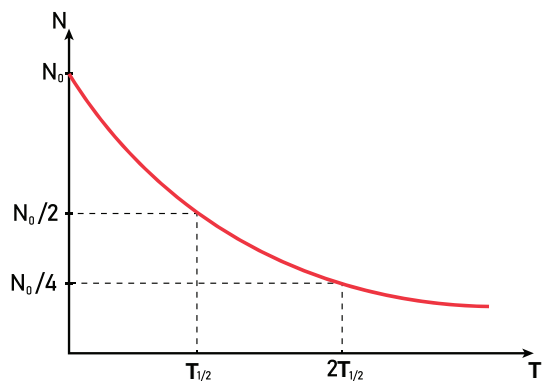
აქტივობა პროპორციულია დაუშლელი ატომების რაოდენობის, რომელიც დროის განმავლობაში მცირდება. შესაბამისად, რადიოაქტიური ნივთიერების აქტივობა დროის განმავლობაში მცირდება. რაც უფრო სწრაფად იშლება ბირთვები, მით უფრო მცირეა ნახევრად დაშლის პერიოდი და, შესაბამისად, უფრო დიდია ნივთიერების აქტივობა. 1 გ რადიუმის აქტივობა $3,7 \cdot 10^{10}$ ბეკერელია. ამ სიდიდით განისაზღვრება აქტივობის სისტემის გარეშე ერთეული – **კიური (კი)**. 1 კი = $3,7 \cdot 10^{10}$ ბკ.

აქტივობის გამოსათვლელად გამოიყენება შემდეგი ფორმულა:

$$A = \frac{N}{1,44T_{1/2}}$$

$t = 1,44T_{1/2}$ დროის შუალედი არის რადიოაქტიური იზოტოპის **სიცოცხლის საშუალო დრო.**

რადიოაქტიური დაშლის მოვლენა გამოიყენება **იზოტოპულ ქრონოლოგიაში** – ^{14}C ნახშირბადის იზოტოპის ნახევრად დაშლის პერიოდის ცოდნით და ნარჩენებში მისი პროცენტული რაოდენობის განსაზღვრით ადგენენ ნარჩენების ასაკს. ასეა



სურ. 2.25

დადგენილი, მაგალითად, დინოზავრების ძვლების ასაკი. ეს მეთოდი ფართოდ გამოიყენება თანამედროვე არქეოლოგიაში.

დასკვნები:

- დროის შუალედს, რომლის განმავლობაშიც რადიოაქტიური ბირთვების რაოდენობის ნახევარი დაიშლება, ამ ბირთვების ნახევრად დაშლის პერიოდი ეწოდება;
- რადიოაქტიური დაშლის კანონი აღინიშნება ფორმულით: $N = N_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T_{1/2}}}$;
- რადიოაქტიური ნივთიერების აქტივობა ეწოდება 1 ნმ-ში დაშლილი რადიოაქტიური ბირთვების რაოდენობას.

საკონტროლო კითხვები:

1. რა ფაქტორებზე არ არის დამოკიდებული ნახევრად დაშლის პერიოდი?
2. როგორი რადიოაქტიური ნივთიერების აქტივობაა 1 ბეკერელი?
3. როგორ გამოისახება რადიოაქტიური იზოტოპის სიცოცხლის საშუალო დრო?



ერთად ამოვხსნათ ამოცანა

2 გ $^{131}_{53}\text{I}$ იოდის რამდენი ბირთვი დარჩება დასაშლელი 64 დღე-ღამის შემდეგ, თუ ცნობილია, რომ რადიოაქტიური იოდისათვის ნახევრად დაშლის პერიოდი 8 დღე-ღამეა.

მოცემულია: $m = 2 \text{ გ} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ კგ}$; $M = 131 \cdot 10^{-3} \frac{\text{კგ}}{\text{მოლი}}$; $t = 64 \text{ დღე-ღამე}$; $T_{1/2} = 8 \text{ დღე-ღამე}$; $N = ?$

ამოხსნა: პირველ რიგში განვსაზღვროთ რამდენ ატომი (ბირთვი) არის 2 გ იოდში. ამისათვის გამოვიყენოთ ცნობილი ფორმულა:

$$N_0 = N_A \frac{m}{M} = 6,02 \cdot 10^{23} \cdot \frac{2 \cdot 10^{-3}}{131 \cdot 10^{-3}} = 9,2 \cdot 10^{21}, \text{ დაუშლელი ბირთვების რაოდენობა კი}$$

ვიპოვოთ ფორმულით: $N = N_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T_{1/2}}}$. მასში რიცხვითი მნიშვნელობების ჩასმით მივიღებთ:

$$N = N_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T_{1/2}}} = 9,2 \cdot 10^{21} \cdot 2^{-\frac{64}{8}} = 9,2 \cdot 10^{21} \cdot \frac{1}{256} \approx 3,6 \cdot 10^{19}$$

პასუხი: 64 დღე-ღამის შემდეგ დაუშლელი დარჩება იოდის $3,6 \cdot 10^{19}$ ბირთვი.



ამოხსენით ამოცანები:

1. სამართლიანია თუ არა მტკიცება, რომ ორი რადიოაქტიური ბირთვიდან რომელთა ნახევრად დაშლის პერიოდი 8 წთ-ია, ამ დროის გასვლის შემდეგ ერთ-ერთი აუცილებლად დაიშლება? პასუხი დაასაბუთეთ.

2. ოთხი რადიოაქტიური ბირთვიდან 36 ნმ-ის განმავლობაში ოთხივე დაიშალა. მართებულია თუ არა მოსაზრება, რომ ამ ნივთიერების ნახევრად დაშლის პერიოდი 12 ნმ-ია? პასუხი განამტკიცეთ მსჯელობით.
3. 24 საათის შემდეგ რადიოაქტიური ბირთვების $\frac{1}{4}$ ნაწილი დაუშლელი დარჩა. იპოვეთ ნივთიერების ნახევრად დაშლის პერიოდი.
4. რადიოაქტიური ბირთვების $\frac{7}{8}$ ნაწილი 150 დღეში დაიშალა. რისი ტოლია ამ ნივთიერების ნახევრად დაშლის პერიოდი?
5. რადიოაქტიური ნივთიერების ბირთვების ნახევრად დაშლის პერიოდი 30 სთ-ია. ბირთვების რა ნაწილი დაიშლება 120 საათის განმავლობაში?
6. რადიოაქტიური ბირთვების რა ნაწილი დაიშლება ნახევრად დაშლის პერიოდის ნახევრის განმავლობაში?
7. $^{60}_{27}\text{Co}$ ბირთვების ნახევრად დაშლის პერიოდი 5,3 წელიწადია. რამდენჯერ შეიცვლება ამავე ნივთიერების რადიოაქტიური აქტივობა 26,5 წლის შემდეგ?
8. რადიოაქტიური ელემენტის აქტივობა 192 სთ-ში 16-ჯერ შემცირდა. იპოვეთ მოცემული ელემენტის ნახევრად დაშლის პერიოდი.
9. დაადგინეთ იმ რადიოაქტიური ელემენტის სიცოცხლის საშუალო ხანგრძლივობა, რომლის ნახევრად დაშლის პერიოდი 50 წელიწადია.
10. 1 გ $^{226}_{88}\text{Ra}$ რადიუმის რამდენი ბირთვი დაიშლება 48 საუკუნის განმავლობაში?

§ 2.12 ჯაჭვური ბირთვული რეაქციები

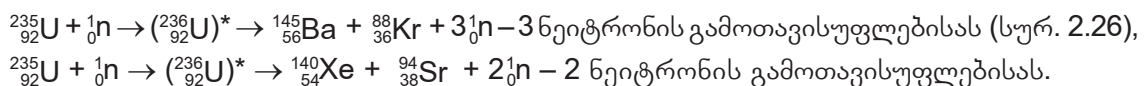
ბირთვული რეაქციების განსაკუთრებული სახეა მძიმე ელემენტების დაშლის რეაქციები, რომელთა დროს ძალიან დიდი ენერგია გამოიყოფა. რა არის ამის მიზეზი?

მძიმე ელემენტების, მაგალითად $^{235}_{92}\text{U}$ -ის, ბმის კუთრი ენერგია 7,6 მგეე-ია. დაშლის შედეგად მძიმე ელემენტებისაგან მიიღება საშუალო სიმძიმის ელემენტები, რომელთათვისაც ერთ ნუკლონზე მოსული ბმის ენერგია ~ 8,8 მგეე-ია.

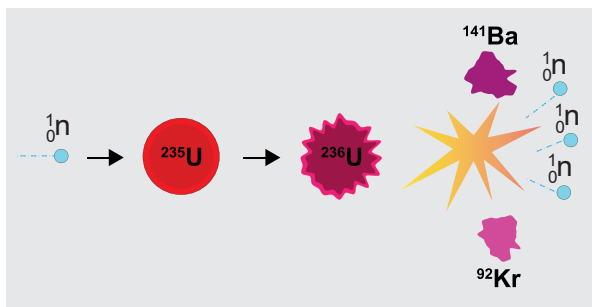
ამრიგად, მძიმე ბირთვის 2 – 3 შედარებით მსუბუქ ნაწილად დაშლისას, ერთ ნუკლონზე მოსული ბმის ენერგია საშუალოდ 1 მგეე-ით იზრდება. ენერგიის მუდმივობის კანონის თანახმად, ასეთი ბირთვული რეაქციის მიმდინარეობისას ენერგია გამოიყოფა. $^{235}_{92}\text{U}$ -ის ბირთვში ნუკლონების რაოდენობა 235-ია, ანუ ერთი ბირთვის დაშლის შედეგად დაახლოებით 200 მგეე ენერგია გამოიყოფა. შესაძლო დანაკარგების გათვალისწინებითაც კი, მიღებული ენერგია საკმაოდ დიდი ენერგიაა.

ამის ექსპერიმენტული დადასტურება XX საუკუნის პირველ ნახევარში განხორციელდა. ექსპერიმენტის ძირითადი პრობლემა მდგომარეობდა შემდეგში: როგორ აეძულებინათ ბირთვი, რომ დაშლა დაენყო? ამ მიზნით, პროტონებით ან α ნაწილაკებით ბირთვის ბომბარდირება არაეფექტური იქნებოდა, რადგან ისინი ბირთვისგან ძლიერ განიზიდება. არაეფექტური იქნებოდა ელექტრონებით ბომბარდირებაც, რადგან მათი მასა ძალიან მცირეა. ლოგიკურია, რომ ბირთვის დასაშლელად გამოყენებული ყოფილიყო ელექტრულად ნეიტრალური და შედარებით დიდი მასის მქონე ნაწილაკები. ასეთი ნაწილაკები კი ნეიტრონებია, რომლებიც დაუბრკოლებლად მიაღწევენ სამიზნე ბირთვს და ბირთვული ძალების მოქმედების სფეროში მოხვედრისას ადვილად შეაღწევენ მასში. 1938 წელს გერმანელმა რადიოქიმიკოსებმა ოტო ჰანმა, ფრიც შტრასმანმა, ლიზე მეიტნერმა და ოტტო ფრიშმა პირველად განახორციელეს $^{235}_{92}\text{U}$ -ის დაშლა ნეიტრონებით.

მძიმე ბირთვების დაშლის შედეგად შეიძლება განსხვავებული რადიოაქტიური იზოტოპები წარმოიქმნას. უმეტეს შემთხვევაში ბირთვი იშლება ორ არათანაბარ „ნამსხვრედ“, რომელთაგან დიდი ბირთვის მასური რიცხვი $135 \div 145$ ფარგლებში იცვლება, მცირე ბირთვისა კი – $90 \div 100$ ფარგლებში. ურანის ბირთვის დაშლის თითოეული აქტის დროს 2–3 ნეიტრონი გამოთავისუფლდება:



ურანის დაშლის რეაქციისას ერთი ნეიტრონი ერთი ბირთვის გაყოფას იწვევს. დაშლის ორი „ნამსხვრევი“ უკვე ახლო მანძილებზე მოქმედი ძლიერი ბირთვული ძალებით



სურ. 2.26

დაკავშირებული აღარ არის, ამიტომ ელექტრული განზიდვის ძალების მოქმედებით ისინი დიდი სიჩქარით დაშორდება ერთმანეთს. „ნამსხვრევების“ ჯამური კინეტიკური ენერგია ($E \approx 170$ მგეე) ბირთვის გაყოფის შედეგად გამოთავისუფლებული ენერგიის ძირითადი ნაწილია.

რატომ გამოიტყორცნება ბირთვის გაყოფისას ნეიტრონები? როგორც იცით, ატომური ნომრის

ზრდისას, სტაბილური ბირთვების ნეიტრონების რაოდენობის ფარდობა პროტონების რაოდენობასთან იზრდება, სწორედ ამიტომ, გაყოფის შედეგად მიღებულ

„ნამსხვრევებში“ ნეიტრონების ხვედრითი წილი უფრო მეტი აღმოჩნდება, ვიდრე ეს დასაშვებია პერიოდული სისტემის შუაში მყოფი ელემენტების ბირთვებისთვის. შედეგად, დაშლის პროცესში რამდენიმე ნეიტრონი გამოთავისუფლდება.

ბირთვის გაყოფის შედეგად წარმოქმნილი „ნამსხვრევები“ ძლიერ რადიოაქტიურია, რადგან შეიცავენ ნეიტრონების ჭარბ რაოდენობას. თუმცა, რამდენიმე თანმიმდევრული β^- დაშლის შედეგად ისინი სტაბილურ იზოტოპებად გარდაიქმნებიან. ხშირად საბოლოო იზოტოპი ალგზნებულ მდგომარეობაში აღმოჩნდება და γ კვანტების გამოსხივების შედეგად ძირითად ენერგეტიკულ მდგომარეობაში გადადის.

1940 წელს საბჭოთა ფიზიკოსებმა გიორგი ფლიოროვმა და კონსტანტინე პეტრუჟაკმა აღმოაჩინეს რადიოაქტიური გარდაქმნების ახალი სახეობა – $^{235}_{92}\text{U}$ -ის ბირთვების სპონტანური დაშლა. დაშლის პროცესში წარმოიქმნება იზოტოპები ატომური ნომრიდან 34 ($^{74}_{34}\text{Se}$), ატომურ ნომრამდე 67 ($^{167}_{67}\text{Ho}$).

ბირთვის დაშლის შედეგად გამოტყორცნილ ნებისმიერ ნეიტრონს თავის მხრივ შეუძლია დაშალოს მეზობელი ბირთვი, რომელიც აგრეთვე გამოტყორცნის ნეიტრონებს. ამ ნეიტრონებს შეუძლია სხვა ბირთვები დაშალონ და ა.შ. შედეგად, დაშლილი ბირთვების რაოდენობა ძალიან სწრაფად იზრდება – ხორციელდება **ჯაჭვური რეაქცია**.

რეაქციას, რომლის გამომწვევი ნაწილაკები (ნეიტრონები) წამოიქმნებიან როგორც ამ რეაქციის პროდუქტები, ჯაჭვური რეაქცია ეწოდება.

ჯაჭვურ რეაქციას თან სდევს ძალიან დიდი ენერგიის გამოყოფა. თუ $^{235}_{92}\text{U}$ -ის ერთი ბირთვის დაშლისას დაახლოებით 200 მგევ ენერგია გამოიყოფა, 1 კგ ამ ნივთიერებაში შემავალი ყველა ბირთვის დაშლისას დაახლოებით $8 \cdot 10^{13}$ ჯ ენერგია გამოიყოფა.

ჯაჭვური რეაქციის განსახორციელებლად არ გამოდგება ყველა ბირთვი, რომელიც ნეიტრონების მოქმედებით იშლება. რიგი მიზეზების გამო **ბუნებაში არსებული ბირთვებიდან ჯაჭვური რეაქციის წარმართვისათვის მხოლოდ $^{235}_{92}\text{U}$ ბირთვებია გამოსადეგი.**

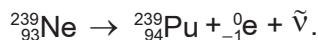
ბუნებრივი ურანი ძირითადად შედგება ორი იზოტოპისაგან: $^{235}_{92}\text{U}$ და $^{238}_{92}\text{U}$. თუმცა, $^{235}_{92}\text{U}$ იზოტოპი ბუნებაში უფრო გავრცელებული $^{238}_{92}\text{U}$ იზოტოპის მხოლოდ 1/140 ნაწილს შეადგენს.

$^{235}_{92}\text{U}$ იშლება როგორც ჩქარი, ასევე ნელი ნეიტრონებით. ამასთან, ნელი ნეიტრონებით ის უფრო ეფექტურად იშლება. $^{238}_{92}\text{U}$ -ის ბირთვები კი იშლება მხოლოდ 1 მგევ-ზე მეტი ენერგიის მქონე ნეიტრონებით. ასეთი ენერგია აქვს დაშლის შედეგად წარმოქმნილი ნეიტრონების დაახლოებით 3/5 ნაწილს, მაგრამ ხუთი ნეიტრონიდან დაახლოებით მხოლოდ ერთი იწვევს $^{238}_{92}\text{U}$ -ის დაშლას. დანარჩენ ნეიტრონებს ეს იზოტოპი ჩაიჭერს, მაგრამ არ დაიშლება. სწორედ ამიტომ, ჯაჭვური რეაქცია ურანით, რომელიც მხოლოდ $^{238}_{92}\text{U}$ იზოტოპს შეიცავს, შეუძლებელია.

$^{238}_{92}\text{U}$ იზოტოპის ბირთვების მიერ ნეიტრონის ჩაჭერის შემდეგ მიიღება $^{239}_{92}\text{U}$ იზოტოპი, რომლის ნახევრად დაშლის პერიოდი 23 წთ-ია. ამ დაშლის შედეგად წარმოიქმნება პირველი ტრანსურანული ელემენტი – ნეპტუნიუმი, გამოსხივდება ელექტრონი და ანტინეიტრონი:



ნეპტუნიუმი β^- რადიოაქტიურია ორი დღე-ღამის ტოლი ნახევრად დაშლის პერიოდით. დაშლის პროცესში წარმოიქმნება შემდეგი ტრანსურანული ელემენტი – პლუტონიუმი:



პლუტონიუმი შედარებით სტაბილურია, მისი ნახევრად დაშლის პერიოდი 24 390

ნელი. პლუტონიუმის მნიშვნელოვანი თვისება ისაა, რომ ის ნელი ნეიტრონების მოქმედებით იშლება. ამის გამო, პლუტონიუმითაც არის შესაძლებელი ჯაჭვური რეაქციის განხორციელება.

კიდევ რა პირობებია აუცილებელი ჯაჭვური რეაქციის განსახორციელებლად?

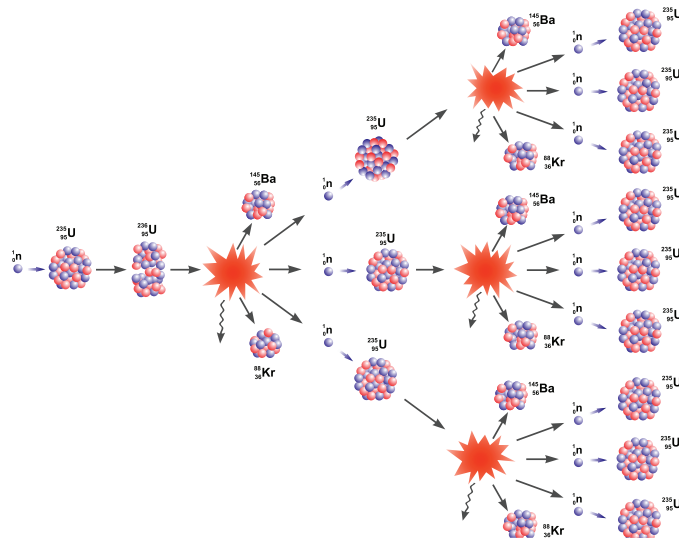
დასაშლელი ნივთიერების სასრული ზომებისა და ნეიტრონების დიდი შელწვევის უნარის გამო, ბევრი ნეიტრონი ისე ტოვებს ზონას, რომ ჯაჭვურ რეაქციას არ ახორციელებს. ზონის ზომებს ჯაჭვური რეაქციის განხორციელებისათვის განმსაზღვრელი მნიშვნელობა აქვს. ზონას, სადაც ჯაჭვური რეაქცია მიმდინარეობს, **აქტიურ ზონას** უწოდებენ. აქტიური ზონის მინიმალურ ზომებს, რომლის დროსაც ჯაჭვური რეაქციის განხორციელებაა შესაძლებელი, **კრიტიკული ზომები** ეწოდება.

კრიტიკული ზომები დამოკიდებულია დასაშლელ ნივთიერებაზე და მის ფორმაზე. რაც უფრო დიდია აქტიური ზონის ზომები, მით მეტია ამ ზონაში ნეიტრონების მიერ ბირთვების გაყოფის ალბათობა.

კრიტიკული ზომები შემცირდება, თუ აქტიური ზონის გარშემო ნეიტრონების შემანელებელს (წყალი, გრაფიტი) განათავსებენ. ზონიდან გამოტყორცნილი ნეიტრონები აირეკლებიან შემანელებლისაგან და კვლავ ზონაში დაბრუნდებიან. ნეიტრონების არეკვლის ეფექტურობა მნიშვნელოვნად გაიზრდება, თუ ამრეკლის სისქე მეტი იქნება მასში ნეიტრონის თავისუფალი განარბენის სიგრძეზე.

შევაფასოთ ასეთ ზონაში მოთავსებული დასაშლელი ნივთიერების მინიმალური მასა — **კრიტიკული მასა**. იმისათვის, რომ აქტიური ზონიდან რაც შეიძლება ნაკლები ნეიტრონი გამოიტყორცნოს, საჭიროა აქტიური ზონის ზედაპირის ფართობი მინიმალური იყოს. როგორც ვიცით სხეულის ზედაპირის ფართობის შეფარდება მოცულობასთან მინიმალურია ბირთვის ფორმის სხეულისათვის. შესაბამისად, მოცემული ნივთიერებისათვის უმცირესი მასა ბირთვის ფორმის სხეულს ექნება. ბირთვის რადიუსი მეტი უნდა იყოს, ვიდრე ბირთვთან დაჯახებამდე ნეიტრონის განარბენის სიგრძე. ამ მონაცემებით შეიძლება შეფასდეს კრიტიკული მასა. $^{235}_{92}\text{U}$ -ისათვის ის დაახლოებით 48 კგ-ის ტოლია, $^{239}_{94}\text{Pu}$ იზოტოპისათვის კი – 17 კგ.

დაშლის ბირთვული რეაქციის შედეგად ახლად წარმოქმნილი 2-3 ნეიტრონი თავად გამოიწვევს დაშლის დამატებით აქტებს და პროცესი ზვავისებურად წარიმართება (სურ. 2.27).



სურ. 2.27

ნეიტრონების რაოდენობას, რომელიც დაშლის ერთ აქტში გამოიტყორცნება, **ნეიტრონების თაობას** უწოდებენ.

ჯაჭვური რეაქციის რაოდენობრივი მახასიათებელია **ნეიტრონების გამრავლების კოეფიციენტი**, რომელიც მოცემულ თაობაში ნეიტრონების n_2 რაოდენობის წინა თაობაში ნეიტრონების n_1 რაოდენობასთან შეფარდების ტოლია:

$$k = \frac{n_2}{n_1}.$$

თუ ნეიტრონების გამრავლების კოეფიციენტი $k = 1$, მაშინ ნეიტრონების რიცხვი დროის განმავლობაში არ იცვლება. თუ $k > 1$, ნეიტრონების საერთო რიცხვი დროის განმავლობაში იზრდება და მათი უკონტროლო გამრავლება შესაძლებელია. როდესაც $k < 1$, ნეიტრონების რიცხვი მცირდება და რეაქცია დროის განმავლობაში შეწყდება.

რეაქციისას ნეიტრონებმა შეიძლება დატოვონ აქტიური ზონა, შთაინთქან სხვადასხვა მინარევების მიერ, დაკარგონ თავისი ენერგია დიდი რაოდენობის გაბნევის აქტების გამო. ყველა ამ დანაკარგის გათვალისწინებით, ჯაჭვური რეაქციის განხორციელებისთვის ნეიტრონების გამრავლების კოეფიციენტი ერთზე მეტი უნდა იყოს.

ჯაჭვური ბირთვული რეაქცია იქნება თვითშენარჩუნებადი, თუ ნეიტრონების რაოდენობა ყოველ შემდგომ თაობაში არ შემცირდება.

ჯაჭვური რეაქციის არამართვად განვითარებას მოკლე დროში კოლოსალური ენერგიის გათავისუფლება მოყვება. ზუსტად ასეთი პროცესი მიმდინარეობს ბირთვული აფეთქებისას, რაც ადამიანებმა, სამხუხაროდ, არაერთხელ განახორციელეს.

დასკვნები:

- რეაქციას, რომლის გამომწვევი ნაწილაკები (ნეიტრონები) წამოიქმნებიან როგორც ამ რეაქციის პროდუქტები, ჯაჭვური რეაქცია ეწოდება;
- ბუნებაში არსებული ბირთვებიდან ჯაჭვური რეაქციის წარმართვისათვის მხოლოდ ^{235}U ბირთვებია გამოსადეგი;
- ზონას, სადაც ჯაჭვური რეაქცია მიმდინარეობს, აქტიურ ზონას უწოდებენ;
- აქტიური ზონის მინიმალურ ზომებს, რომლის დროსაც ჯაჭვური რეაქციის განხორციელება შესაძლებელია, კრიტიკული ზომები ეწოდება;
- მოცემულ თაობაში ნეიტრონების n_2 რაოდენობის წინა თაობაში ნეიტრონების n_1 რაოდენობასთან შეფარდებას ნეიტრონების გამრავლების კოეფიციენტი ეწოდება: $k = \frac{n_2}{n_1}$.

საკონტროლო კითხვები:

1. რატომ გამოიყოფა ენერგია მძიმე ბირთვის მსუბუქ ბირთვებად დაშლის დროს?
2. რატომ გამოიტყორცნება ნეიტრონები მძიმე ბირთვის მსუბუქ ბირთვებად დაშლის დროს?
3. რატომ ვერ განხორციელდება ჯაჭვური რეაქცია მხოლოდ ^{238}U ბირთვებით?
4. დაახლოებით რა ენერგია გამოიყოფა ^{235}U იზოტოპის ერთი ბირთვის დაშლისას?
5. რისი ტოლი უნდა იყოს ნეიტრონების გამრავლების კოეფიციენტი ჯაჭვური ბირთვული რეაქციის სტაბილური მიმდინარეობისათვის?



ერთად ამოვხსნათ ამოცანა

ავიამზიდ “ჯერალდ ფორდის” რეაქტორების ჯამური სასარგებლო სიმძლავრე 600 მგვტ-ია. რამდენ ხანს ეყოფა მის ბორტზე განთავსებული 50 კგ $^{235}_{92}\text{U}$ საწვავად რეაქტორს, თუ მისი მქვ 45%-ია? მიიჩნიეთ, რომ რეაქციისას ურანის ყველა ბირთვი იყოფა.

მოცემულია: $N_{\text{სას}} = 600 \text{ მგვტ} = 6 \cdot 10^8 \text{ ვტ}$; $m = 50 \text{ კგ}$; $M = 0,235 \text{ კგ/მოლი}$; $\eta = 45\% = 0,45$. $t = ?$

ამოხსნა: პირველ რიგში განვსაზღვროთ რამდენი ატომია (ბირთვია) 50 კგ $^{235}_{92}\text{U}$ -ში.

ვისარგებლოთ ფორმულით: $N = \frac{m}{M} \cdot N_A = \frac{50}{0,235} \cdot 6,02 \cdot 10^{23} \approx 1,28 \cdot 10^{26}$. როგორც ვიცით,

$^{235}_{92}\text{U}$ -ის ერთი ბირთვის დაშლისას 200 მგევ ენერგია გამოიყოფა, ამიტომ ურანის ყველა ბირთვის დაშლისას გამოყოფილი ენერგია მგევ-ში ტოლი იქნება:

$E_{\text{სრ}} = 1,28 \cdot 10^{26} \cdot 200 \text{ მგევ} = 2,56 \cdot 10^{28} \text{ მგევ} = 2,56 \cdot 10^{34} \text{ ევ}$. ვინაიდან $1 \text{ ევ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ ჯ}$, ამიტომ $E_{\text{სრ}} = 2,56 \cdot 10^{34} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ ჯ} = 4,1 \cdot 10^{15} \text{ ჯ}$. ახლა ვიპოვოთ რეაქტორის შესრულებული სასარგებლო მუშაობა:

$A_{\text{სას}} = \eta \cdot E_{\text{სრ}} = 0,45 \cdot 4,1 \cdot 10^{15} \text{ ჯ} \approx 1,85 \cdot 10^{15} \text{ ჯ}$. ეს ენერგია

რეაქტორს ეყოფა $t = \frac{A_{\text{სას}}}{N_{\text{სას}}} = \frac{1,85 \cdot 10^{15}}{6 \cdot 10^8} \approx 3 \cdot 10^6 (\text{წმ}) \approx 11 \text{ დღე-ღამე}$.

პასუხი: ავიამზიდს ეს საწვავი დაახლოებით 11 დღე-ღამე ეყოფა.



ამოხსენით ამოცანები:

1. რამდენი $^{235}_{92}\text{U}$ ბირთვის გახლეჩისას გამოიყოფა $8 \cdot 10^{11}$ ევ ენერგია?
2. როგორც ცნობილია $^{235}_{92}\text{U}$ ბირთვის გახლეჩისას 200 მგევ ენერგია გამოიყოფა. რა ენერგია გამოიყოფა 2 გ $^{235}_{92}\text{U}$ -ის ბირთვების გახლეჩისას?
3. როგორც ცნობილია $^{235}_{92}\text{U}$ ბირთვის გახლეჩისას 200 მგევ ენერგია გამოიყოფა. რა ენერგია გამოიყოფა 9 გ $^{235}_{92}\text{U}$ -ისაგან, თუ მისი ბირთვების მხოლოდ 70 % გაიხლეჩა?
4. რატომ იყენებენ თანამედროვე ავიამზიდები და წყალქვეშა ნავეები ძირითადად ბირთვულ ენერგიას?
5. რამდენით მეტი ენერგია გამოიყოფა 10 გ $^{235}_{92}\text{U}$ -ის ბირთვების დაშლისას, ვიდრე 1 ტ დიზელის საწვავის დანვისას?
6. ბირთვულ რეაქტორში „დაიწვა“ 1 გ $^{235}_{92}\text{U}$. რა რაოდენობის ქვანახშირი უნდა დაიწვას, რომ იგივე ენერგია გამოიყოს?
7. რა რაოდენობის სასარგებლო ენერგიას მივიღებთ 4 გ $^{235}_{92}\text{U}$ -ის „დანვისას“, თუ ბირთვული რეაქტორის მქვ 55%-ია?
8. განსაზღვრეთ წყალქვეშა ნავის ატომური რეაქტორის სასარგებლო სიმძლავრე, თუ დღე-ღამეში იხარჯება 100 გ $^{235}_{92}\text{U}$ და რეაქტორის მქვ 25%-ია.
9. რამდენი გრამი $^{235}_{92}\text{U}$ დაიხარჯება დღე-ღამის განმავლობაში ატომურ ელექტროსადგურში, თუ მისი სასარგებლო სიმძლავრე 4000 მგვტ-ია, ხოლო მქვ 50%.
10. კორის ატომური ელექტროსადგურის ერთ-ერთი რეაქტორის სიმძლავრე 640 მგვტ-ია. რა მასის $^{235}_{92}\text{U}$ დაიხარჯება ამ რეაქტორზე წელიწადში (365 დღე-ღამე), თუ მისი მქვ 48%-ია?

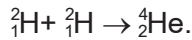
§ 2.14 თერმობირთვული სინთეზი

დედამინის მზარდი მოსახლეობა სულ უფრო მეტ ენერგიას მოიხმარს. მომავალში ენერჯის დეფიციტი შეიძლება შეივსოს მართვადი თერმობირთვული სინთეზით, რომელშიც „სანვავად“ გამოყენებულ იქნება მსოფლიო ოკეანის წყლები.

თერმობირთვულ სინთეზს მსუბუქი ელემენტების ბირთვების შეერთების რეაქციას უწოდებენ. ეს რეაქცია ეფექტურად მიმდინარეობს ძალიან მაღალ $T \sim 10^9 \text{ K}$ ტემპერატურებზე და გამოიყოფა დიდი ენერგია. როგორც § 2.9-ში ვნახეთ, თერმობირთვული სინთეზისას ენერგია იმიტომ გამოიყოფა, რომ მსუბუქი ელემენტების ბირთვების ზმის კუთრი ენერგია უფრო ნაკლებია, ვიდრე მათი შეერთებით მიღებული შედარებით მძიმე ბირთვებისა.

ორი მსუბუქი ბირთვის უძრაობის მასათა ჯამი მეტია მათი შეერთებით მიღებული ბირთვის უძრაობის მასაზე, ამიტომ მსუბუქი ბირთვების სინთეზისას მასის ცვლილების შესაბამისი $Q = \Delta mc^2$ ენერგია უნდა გამოიყოს.

განვიხილოთ დეიტერიუმის ორი ${}^2_1\text{H}$ ბირთვის ჰელიუმის ${}^4_2\text{He}$ ბირთვად სინთეზის რეაქცია:



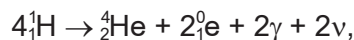
დეიტერიუმის მასური რიცხვი $m_{{}^2_1\text{H}} = 2,01355$ მ.ა.ე., ჰელიუმის მასური რიცხვი კი $m_{{}^4_2\text{He}} = 4,00150$ მ.ა.ე. ამ რეაქციის მასის დეფექტი ტოლი იქნება:

$$\Delta m = m_{{}^4_2\text{He}} - 2m_{{}^2_1\text{H}} = -0,0256 \text{ მ.ა.ე.}$$

ეს დეფექტი დეიტერიუმის ბირთვების საერთო მასის 0,63%-ია, მაშინ, როდესაც ურანის დაშლისას იგივე მაჩვენებელი მხოლოდ 0,056%-ის ტოლია. შესაბამისად, ნივთიერებების ერთნაირი მასის შემთხვევაში, ბირთვული სინთეზისას გამოიყოფა დაახლოებით 10-ჯერ მეტი ენერგია, ვიდრე მძიმე ბირთვის დაშლისას.

ასევე გასათვალისწინებელია, რომ დაშლის რეაქციის დროს გამოყენებული რადიოაქტიური სანვავის მარაგი დედამინაზე შეზღუდულია, წყალბადის მარაგი კი პრაქტიკულად უღევია. ძალიან ხელსაყრელი იქნებოდა თერმობირთვული სინთეზისას გამოყენებული ყოფილიყო ყველაზე გავრცელებული ჩვეულებრივი წყალბადის ${}^1_1\text{H}$ ბირთვები, მაგრამ ამ შემთხვევაში სინთეზის რეაქციის განსახორციელებლად საჭირო იქნებოდა კოლოსალურად მაღალი ტემპერატურა. დეიტერიუმი სინთეზის რეაქციაში შედის უფრო დაბალ ტემპერატურებზე, ვიდრე ჩვეულებრივი წყალბადი, ხოლო ტრიტიუმი ${}^3_1\text{H}$ – კიდევ უფრო დაბალ ტემპერატურებზე. თუმცა, ტრიტიუმი არასტაბილურია, ამიტომ სინთეზის რეაქციისათვის ძირითადად გამოიყენება დეიტერიუმი, რომლის მარაგი მსოფლიო ოკეანეში ძალიან დიდია. ეს კაცობრიობას პრაქტიკულად ენერჯის უღევ წყაროს მისცემს.

მზეზე ძირითადად ენერგია გამოიყოფა რეაქციით, რომლის დროს ოთხი პროტონი შეერთდება ჰელიუმის ბირთვად:

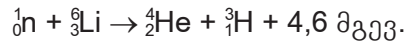


ამ რეაქციისას 26,72 მგევე ენერგია გამოიყოფა.

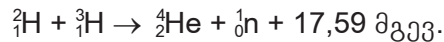
ბუნებრივ პირობებში თერმობირთვული სინთეზი მიმდინარეობს მხოლოდ ვარსკვლავების ნიაღში, სადაც კოლოსალურად დიდი ტემპერატურაა. დედამინაზე მათი განხორციელებისთვის საჭიროა ნივთიერება ძლიერ გავაცხელოთ. ეს შესაძლებელია ან ბირთვული აფეთქებით, ან მძლავრი აირადი განმუხტვით, ან ლაზერული გამოსხივების უძლიერესი იმპულსით, ან ნაწილაკების უძლიერესი ნაკადით ბომბარდირებით.

ჯერ-ჯერობით დედამინაზე მხოლოდ უმართავი თერმობირთვული სინთეზის

რეაქცია განხორციელდა. ეს წყალბადის ჭურვის აფეთქებას მოყვა. თავდაპირველად წყალბადის ჭურვში მასში განთავსებული ბირთვული ქობინი ფეთქდება. ამის შედეგად ტემპერატურა $2 \cdot 10^7$ K-მდე მკვეთრად იზრდება, წარმოიქმნება ნეიტრონების ნაკადი და ელექტრომაგნიტური გამოსხივება. ნეიტრონები რეაქციაში შედის ჭურვში მოთავსებულ ლითიუმის იზოტოპთან ჰელიუმისა და ტრიტიუმის წარმოქმნით:

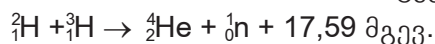
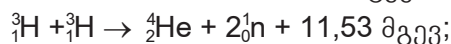
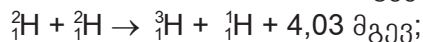
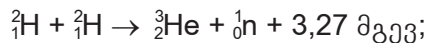


ტემპერატურის გაზრდას და ტრიტიუმის რაოდენობის მატებას მოყვება თერმობირთვული რეაქციის დაწყება:




ამ რეაქციისას გამოყოფილი ენერჯის უმეტესი ნაწილი (70%) მიაქვს ჩქარ ნეიტრონებს და ჰელიუმის ბირთვებს (20 %).

მართვადი სინთეზის რეაქციების განსახორციელებლად საჭიროა შეიქმნას თერმობირთვული რეაქტორი. ყველაზე მეტად ალბათურია რეაქტორის მუშაობა მიმდინარეობდეს შემდეგ რეაქციებზე:



მათგან, რეაქციის განხორციელებისთვის საჭირო ტემპერატურითა და ენერგეტიკული გამოსავალით ყველაზე ხელსაყრელი ბოლო რეაქციაა. ამ დროს ერთ ნუკლონზე გამოყოფილი ენერჯია 3,5 მგევ-ია, მაშინ, როდესაც მძიმე ბირთვების დაშლისას ეს ენერჯია 1 მგევ-ია. იმისათვის, რომ დეიტერიუმმა ტრიტიუმთან კულონური განზიდვის ძალა დაძლიოს, საჭიროა მას ჰქონდეს 1 მგევ კინეტიკური ენერჯია. გამოვთვალოთ ტემპერატურა, რომელზეც დეიტერიუმს ეს ენერჯია ექნება.

 იდეალურ აირში ნაწილაკის საშუალო კინეტიკური ენერჯია გამოითვლება ფორმულით:

$$E = \frac{3}{2} kT,$$

საიდანაც

$$T = \frac{2E}{3k} = 7,7 \cdot 10^9 \text{ K.}$$

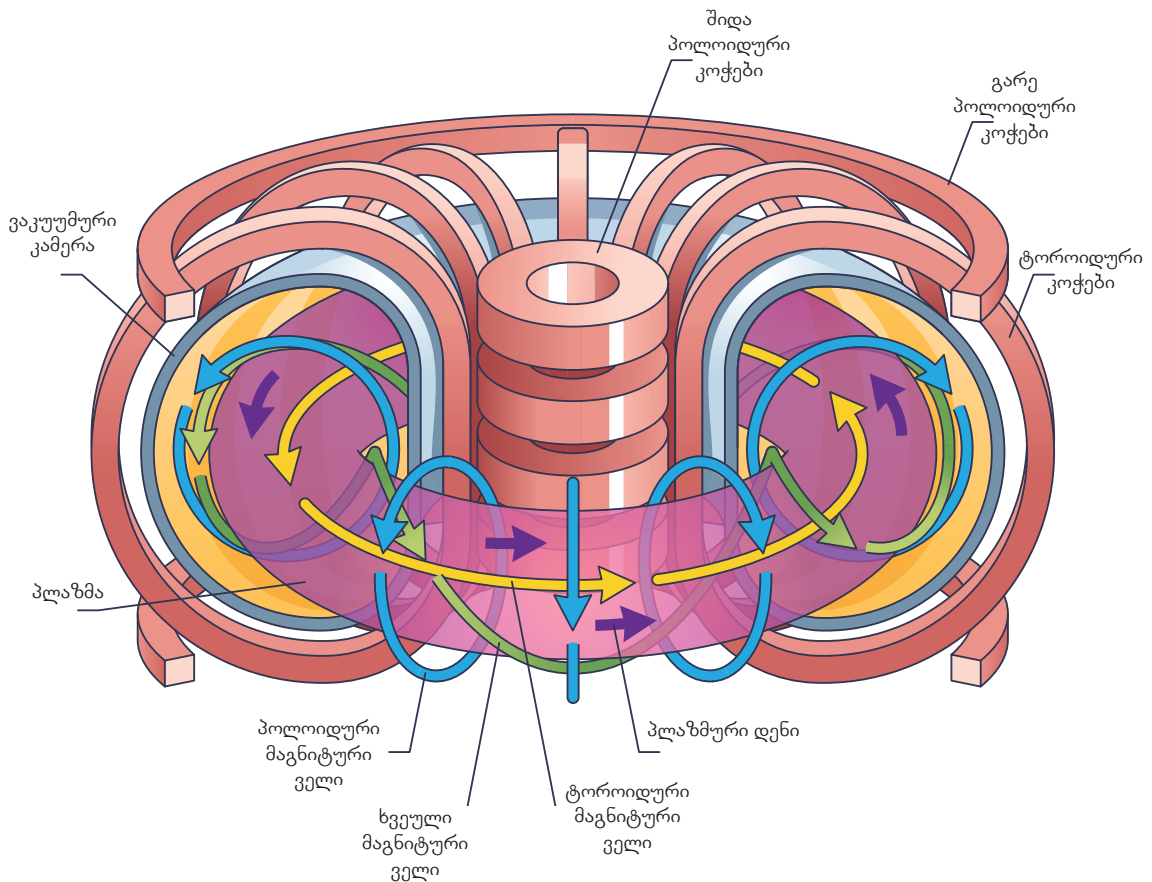
დეიტერიუმის მიღება შესაძლებელია მსოფლიო ოკეანედან, რომელშიც მრავალი ათასი წლის საკმარისი მძიმე წყლის მარაგია. ტრიტიუმის მიღება შეიძლება თვით რეაქტორში ისეთივე რეაქციით, რომელიც მიმდინარეობს თერმობირთვული აფეთქებისას – ნეიტრონების ნაკადით ${}^6_3\text{Li}$ -ის ბომბარდირებისას. ლითიუმის მარაგიც დედამიწაზე საკმაოდ დიდია.

მაშასადამე, მართვადი თერმობირთვული რეაქციის განსახორციელებლად პრობლემად რჩება იმ პირობების შექმნა, რომლებიც უზრუნველყოფს მაღალტემპერატურული პლაზმის შენარჩუნებას თბოიზოლირებულ მდგომარეობაში. ამ მიზნის მისაღწევად გაჩნდა იდეა გამოეყენებინათ მძლავრი მაგნიტური ველები.

აირის მაღალ ტემპერატურამდე გახურებისას ($\sim 10^7$) წყალბადის ატომები იონიზდება, ამიტომ თუ პლაზმას ამარჩარებელ ელექტრულ ველში მოვათავსებთ,

მისი იონები საკმარის კინეტიკურ ენერგიას შეიძენს. 1 კვ პოტენციალთა სხვაობა დეიტერიუმისა და ტრიტიუმის ბირთვებს მიანეჭებს 1 კევ ენერგიას, რომელსაც $1,16 \cdot 10^7 \text{ K}$ ტემპერატურა შეესაბამება. ცხადია, ასეთ ტემპერატურას ვერანაირი გარსი ვერ გაუძლებს, მაგრამ ჩაკეტილ მოცულობაში მოძრავი პლაზმის შენარჩუნება შესაძლებელია მაგნიტური ველით.

პლაზმის ცილინდრულ მოცულობაში დამუხტული ნაწილაკების მოძრაობისას წარმოიქმნება ელექტრული დენი. დენის გარშემო იქმნება მაგნიტური ველი, რომლის ინდუქციის ძაღნირები კონცენტრული წრეწირებია. ამ მაგნიტური ველის მხრიდან დენზე მოქმედებს ამპერის ძალა, რომელიც კუმშავს პლაზმას და აკავებს მას ცილინდრულ მოცულობაში. მაგნიტური ველის არაერთგვაროვნების გამო, პლაზმის შეკუმშვის ძალა მის სხვადასხვა კვეთაში განსხვავებული იქნება, ამიტომ ირღვევა პლაზმური სვეტის კონფიგურაცია და ის არამდგრადი ხდება. სივრცული არაერთგვაროვნების შესამცირებლად გამოყენებულ იქნა პლაზმის ტოროიდული კონფიგურაცია. მის შესაქმნელად საჭირო გახდა დამატებითი მაგნიტური ველების გამოყენება. სურ. 2.30-ზე გამოსახულია მაღალტემპერატურული პლაზმის შენარჩუნებისათვის შექმნილი ერთ-ერთი დანადგარის სქემა.



სურ. 2.30

სამწუხაროდ, თერმობირთვული სინთეზის რეაქციის წარმოებისათვის საჭირო დროის განმავლობაში შექმნილი პლაზმის შენარჩუნება ჯერ-ჯერობით ვერ მოხერხდა. ამ პრობლემის გადასაჭრელად ევროკავშირში, აშშ-ში, იაპონიასა და ჩინეთში ინტენსიური სამუშაოები მიმდინარეობს. მათი წარმატებით დასრულება კაცობრიობას მისცემს საშუალებას აწარმოოს მართავადი თერმობირთვული სინთეზი.

დასკვნები:

- თერმობირთვული სინთეზი მსუბუქი ელემენტების ბირთვების შეერთების რეაქციაა;
- ნივთიერებების ერთნაირი მასის შემთხვევაში, ბირთვული სინთეზისას გამოიყოფა დაახლოებით 10-ჯერ მეტი ენერგია, ვიდრე მძიმე ბირთვის დაშლისას;
- თერმობირთვული სინთეზის განსახორციელებლად კოლოსალურად მაღალი ტემპერატურაა საჭირო;
- მართვადი თერმობირთვული სინთეზის განხორციელება ჯერ-ჯერობით ვერ ხერხდება.

საკონტროლო კითხვები:

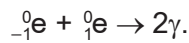
1. რატომ გამოიყოფა ენერგია მსუბუქი ბირთვების შეერთების შედეგად?
2. გარდა ენერგეტიკული ეფექტისა, კიდევ რა უპირატესობა შეიძლება ჰქონდეს მართვადი თერმობირთვული სინთეზის რეაქციას, დაშლის რეაქციასთან შედარებით?
3. რა მთავარი პრობლემაა გადასაწყვეტი მართვადი თერმობირთვული სინთეზის განსახორციელებლად?

§ 2.15 ელემენტარული ნაწილაკები

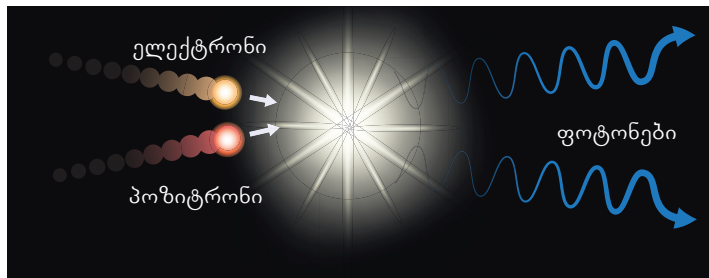
მეცნიერები ოდითგანვე ცდილობდნენ აღმოეჩინათ მატერიის ყველაზე მცირე „აგურები“, რომელთა დახმარებით შესაძლებელი იქნებოდა ნივთიერების აგებულების გააზრება. XIX საუკუნის დასასრულამდე ასეთ განუყოფელ „აგურებად“ ატომებს მიიჩნევდნენ, მაგრამ XIX საუკუნის ბოლოს და XX საუკუნის დასაწყისში დაადგინეს ატომის რთული აგებულება და მისი ბირთვის სტრუქტურაც. აღმოჩენილ იქნა ახალი ნაწილაკები – ელექტრონები, ფოტონები, პროტონები და ნეიტრონები, რომლებიც ატომებისა და ბირთვების თვისებებს, ასევე მათ ურთიერთქმედებას განსაზღვრავს. სწორედ მათ და არა ატომებს, მიიჩნევდნენ უმარტივეს განუყოფელ ნაწილაკებად.

1932 წელს აღმოჩენილ იქნა პირველი ანტინაწილაკი – პოზიტრონი. პოზიტრონი ელექტრონის „ორეულია“, ოღონდ მისგან განსხვავებით, დადებითი მუხტი აქვს. ის კოსმოსური სხივების კვლევისას დააფიქსირა ამერიკელმა ფიზიკოსმა კარლ ანდერსონმა. 1955 წელს კალიფორნიის ბერკლის უნივერსიტეტში პროტონების ამაჩქარებელზე ჩატარებული ცდებისას აღმოაჩინეს ანტიპროტონი. ეს ნაწილაკი დიდი ენერჯის მქონე ნუკლონების დაჯახებისას ჩნდებოდა. ანტიპროტონს მოდულით პროტონის ტოლი უარყოფითი მუხტი აქვს, მაგრამ ყველა სხვა მახასიათებელი ისეთივეა, როგორც პროტონისა. 1956 წელს აღმოაჩინეს ნეიტრონის ანტინაწილაკი – ანტინეიტრონი. ის ამაჩქარებელ ბევატრონზე პროტონისა და ანტიპროტონის დაჯახებისას დაფიქსირდა.

რა ემართება ნაწილაკსა და ანტინაწილაკს დაჯახებისას? ეს პოზიტრონისა და ელექტრონის ურთიერთქმედების მაგალითზე განვიხილოთ. ნელა მოძრავი ელექტრონისა და პოზიტრონის დაჯახებისას ისინი ანიჰილირებენ, ანუ ქრებიან (ლათ. nihil – არაფერი) და ჩვეულებრივ, ორი ფოტონი წარმოიქმნება (სურ. 2.31):

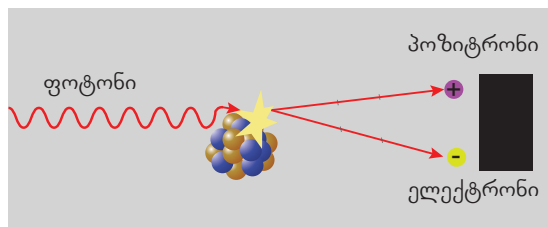
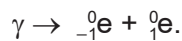


ანიჰილაციის დროს ორი ფოტონის წარმოქმნა წარმოადგენს იმპულსისა და ენერჯის მუდმივობის კანონების შედეგს.



სურ. 2.31

შესაძლებელია უკუ პროცესიც – ბირთვის ველში ფოტონის ენერჯის ხარჯზე ელექტრონ-პოზიტრონის წყვილის გაჩენა (სურ. 2.32):



სურ. 2.32

ანტინაწილაკების აღმოჩენიდან მალევე ჩამოაყალიბეს **დამუხტული ნაწილაკების დაწყვილების პრინციპი: ყველა დამუხტულ ნაწილაკს გააჩნია ანტინაწილაკი**. ეს პრინციპი ასევე ვრცელდება ნეიტრალურ ნაწილაკებზეც – ნეიტრონზე და ნეიტრინოზე. შესაბამისად, ფაქტიურად ყველა ელემენტარული ნაწილაკის ნახევარს ანტინაწილაკები წარმოადგენს.

1932 წელს აღმოაჩინეს კიდევ ერთი ნაწილაკი. კერძოდ, β^{\pm} დაშლის შესწავლისას მეცნიერებმა დააფიქსირეს ნეიტრინოს არსებობა. ამ დაშლისა და ნეიტრინოს (ანტინეიტრინოს) თვისებების კვლევისას პირველად იქნა დამზერილი ფუნდამენტური ურთიერთქმედების ახალი სახე – **სუსტი ურთიერთქმედება**. ამ ურთიერთქმედებას ადგილი აქვს ელემენტარული ნაწილაკების ურთიერთგარდაქმნისას და ვლინდება ძალიან მცირე – $\sim 10^{-18}$ სმ მანძილებზე. სუსტი ურთიერთქმედება გრძელდება $10^{-7} \div 10^{-14}$ ნმ-ის განმავლობაში (შედარებისათვის: ელექტრომაგნიტური ურთიერთქმედების ხანგრძლივობა – $10^{-15} \div 10^{-21}$ ნმ-ია, ძლიერი ურთიერთქმედებისა – 10^{-23} ნმ).

სუსტი ურთიერთქმედების დასახასიათებლად შემოღებულ იქნა ახალი კვანტური რიცხვი – **ლეპტონური რიცხვი**, რომელსაც L ასოთი აღნიშნავენ. ყველა მოვლენისთვის სრულდება ლეპტონური რიცხვის მუდმივობის კანონი: ლეპტონური რიცხვების ჯამი ურთიერთქმედებამდე და ურთიერთქმედების შემდეგ მუდმივია. ლეპტონური რიცხვი წარმოადგენს სიდიდეს განზომილების გარეშე და მისი მნიშვნელობები შეიძლება იყოს $L=0; \pm 1$. ნაწილაკებს, რომელთა ლეპტონური რიცხვი ნულისგან განსხვავებულია **ლეპტონები** ეწოდება (მაგ. ნეიტრინო, ელექტრონი და ა.შ.). თუ ნაწილაკის ლეპტონური რიცხვი დადებითია, ის ჩვეულებრივი ნაწილაკია, თუ უარყოფითია – ანტინაწილაკი.

დანარჩენი ნაწილაკებისთვის, რომლებიც ლეპტონები არ არის (მაგ. ნუკლონები) ლეპტონური რიცხვი $L=0$.

მაგალითისათვის განვიხილოთ β^{-} დაშლის რეაქცია. ნეიტრონის დაშლის $n \rightarrow p + e^{-} + \bar{\nu}_e$ რეაქციისათვის, ლეპტონური რიცხვის მუდმივობის კანონიდან გამომდინარეობს: $0=0+1+L$. საიდანაც ჩანს, რომ $L=-1$. შესაბამისად, ამ რეაქციაში ნეიტრინოს ლეპტონური რიცხვი უარყოფითია. ე.ი. β^{-} დაშლის დროს წარმოიქმნება არა ნეიტრინო, არამედ ანტინეიტრინო.

ახლა დავსვათ კითხვა: რა იგულისხმება ელემენტარული ნაწილაკის ცნებაში?

ელემენტარულ ნაწილაკებს უწოდებენ იმ ნაწილაკებს, რომლებიც ფიზიკის განვითარების თანამედროვე დონეზე შეიძლება დაუშლელ ნაწილაკებად მივიჩნიოთ და რომლებითაც აშენებულია მატერია. ნაწილაკის დაუშლელობა არ ნიშნავს, რომ მას შინაგანი სტრუქტურა არ გააჩნია. ელემენტარულ ნაწილაკებს შეუძლია ერთმანეთთან ურთიერთქმედება. ყველა ელემენტარულ ნაწილაკს სხვა ნაწილაკებთან ურთიერთქმედებისას წარმოქმნისა და შთანთქმის უნარი ახასიათებს. მაგალითად, ნეიტრონი არ შედგება პროტონის, ელექტრონისა და ანტინეიტრინოსაგან, მაგრამ ურთიერთქმედებისას მას შეუძლია გარდაიქმნას ჩამოთვლილ ნაწილაკებად.

ყველა ელემენტარული ნაწილაკის საერთო მახასიათებელია მასა, სიცოცხლის საშუალო ხანგრძლივობა, ელექტრული მუხტი და სპინი. მათგან მხოლოდ პირველი სამი მახასიათებელი განვიხილოთ.

ელემენტარული ნაწილაკების მასებში განსხვავება აისახა მათ დასახელებებში: **ლეპტონები** (ბერძ. λεπτον – მსუბუქი), **მეზონები** (ბერძ. μεσον – საშუალო), **ბარიონები** (ბერძ. βαρυον – მძიმე).

გასული საუკუნის 50-იან წლებში ამაჩქარებლებში დეტექტირების ტექნიკის განვითარების შედეგად დადგინდა: როდესაც ბირთვული რეაქციებისას ბომბარდირება საკმარისი ენერგიის ნაწილაკებით ხდება, შეიძლება ნაწილაკების ახალი სახეობები გაჩნდეს. კვლევების შედეგად, იმ დროისათვის დაფიქსირებული ელემენტარული ნაწილაკების რაოდენობა მკვეთრად გაიზარდა და 100-ს გადააჭარბა.

სიცოცხლის ხანგრძლივობის მიხედვით ელემენტარული ნაწილაკები იყოფა სტაბილურ, კვაზისტაბილურ და არასტაბილურ (რეზონანსულ) ნაწილაკებად.

თუ დაშლა განპირობებულია ძლიერი ურთიერთქმედებით, მაშინ ნაწილაკების სიცოცხლის ხანგრძლივობა ძალიან მცირეა და მათ არასტაბილურ (ისტორიულად რეზონანსულ) ნაწილაკებს უწოდებენ.

თუ დაშლა ხდება ელექტრომაგნიტური ან სუსტი ურთიერთქმედებით, წარმოქმნილ ნაწილაკებს კვაზისტაბილურებს უწოდებენ.

სტაბილური ნაწილაკებია ელექტრონი, პროტონი, ფოტონი და ნეიტრონი.

შემდგომ წლებში მაღალი ენერგიების (~10 გიგაევ) მქონე ელემენტარული ნაწილაკების კვლევამ აჩვენა, რომ ლეპტონებს რაიმე სტრუქტურა არ აქვს, ანუ ისინი ნამდვილად ელემენტარულ ნაწილაკებს წარმოადგენს. ამავ დროს, ძლიერ ურთიერთქმედებაში მონაწილე ნაწილაკებმა – **ადრონებმა** გამოავლინეს თვისებები, რომლებიც მიუთითებს, რომ მათ გარკვეული სტრუქტურა გააჩნია და რამდენიმე „უფრო ელემენტარული“ ნაწილაკისაგან შედგება. 1964 წელს ამერიკელმა მეცნიერებმა მ. გელ-მანმა და ჯ. ცუეიგმა ერთმანეთისაგან დამოუკიდებლად გამოთქვეს მოსაზრება, რომ ყველა ადრონი შეიძლება წარმოადგენილ იქნას როგორც სამი **კვარკის** კომბინაცია (ბარიონებისთვის) ან კვარკისა და ანტიკვარკისა (მეზონებისთვის). პირველ სამ კვარკს მიანიჭეს სახელები: **u, d, s**.

შემდგომში გაირკვა, რომ სამი კვარკის საშუალებით ელემენტარული ნაწილაკების მთელი მრავალფეროვნების ახსნა შეუძლებელია, ამიტომ დამატებულ იქნა კიდევ სამი კვარკი – **c, b, t**. ექვსი კვარკისა და მათი ანტიკვარკების ერთობლიობა დღეისათვის ცნობილი ყველა ადრონის რთული სტრუქტურის ახსნის საშუალებას იძლეოდა.

კვარკების სახელები წარმოიქმნა ინგლისური სიტყვებისაგან: **up** – ზევით, **down** – ქვევით, **strange** – უცნაური, **charm** – მომხიბლავი, **beauty** – ლამაზი, **truth** – ჭეშმარიტი.

ამ დროისათვის ცნობილი ელემენტარული ნაწილაკების რაოდენობა ოთხასს უახლოვდება. მათი აღმოჩენა და შესწავლა ძირითადად თანამედროვე ამაჩქარებლებზე მიმდინარეობს. მაგალითად, შვეიცარიაში CERN-ის **დიდ ადრონულ კოლაიდერზე** დაფიქსირებულ იქნა ე.წ. „ღვთიური“ ნაწილაკი – ჰინგსის ნაწილაკი, რომელიც იყო პირველი ნაწილაკი დიდი აფეთქების შემდეგ.

დასკვნები:

- დამუხტული ნაწილაკების დანყვილების პრინციპია: ყველა დამუხტულ ნაწილაკს გააჩნია ანტინაწილაკი;
- ელემენტარული ნაწილაკების ურთიერთგარდაქმნისას ადგილი აქვს სუსტ ურთიერთქმედებას. სუსტ ურთიერთქმედებას ახასიათებენ ლეპტონური რიცხვით;
- ელემენტარულ ნაწილაკებს უწოდებენ იმ ნაწილაკებს, რომლებიც ფიზიკის განვითარების თანამედროვე დონეზე შეიძლება დაუშლელ ნაწილაკებად მივიჩნიოთ და რომლებითაც აშენებულია მატერია;
- ელემენტარული ნაწილაკები მასების მიხედვით დაყოფილია ლეპტონებად, მეზონებად და ბარიონებად;
- სიცოცხლის ხანგრძლივობის მიხედვით ელემენტარული ნაწილაკები იყოფა სტაბილურ, კვაზისტაბილურ და არასტაბილურ (რეზონანსულ) ნაწილაკებად;
- ელექტრონი, პროტონი, ფოტონი და ნეიტრონი სტაბილური ნაწილაკებია.

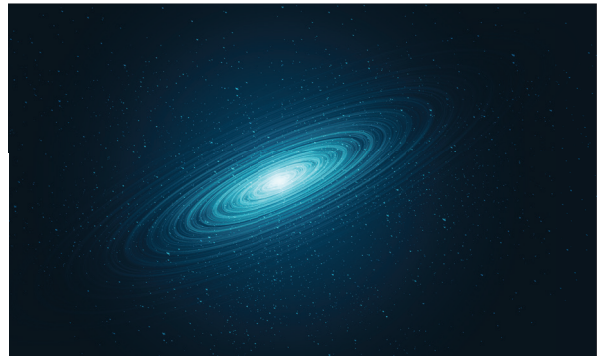
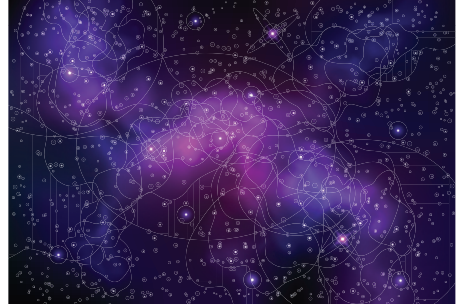
მეორე თავის შემაჯამებელი ამოცანები:

1. თეთრი და შავი ბუშტი თბილი ჰაერითაა გაბერილია. რომელი უფრო სწრაფად დაიჩუტება, თუ მათ გრილ ოთახში შევიტანთ? პასუხი განამტკიცეთ მსჯელობით.
2. გამოთვალეთ იმ ფოტონის ენერგია, რომლის ტალღის სიგრძე $0,25$ მკმ-ია.
3. იცვლება თუ არა ფოტონის ენერგია სინათლის სხივის გარდატეხისას? პასუხი განამტკიცეთ მსჯელობით.
4. რამდენი პროცენტით უნდა შეიცვალოს გამომსხივებლის ზედაპირის ფართობი, რომ ნათების სიმძლავრის 50% -ით შემცირებისას ინტეგრალური ნათება 50% -ით გაიზარდოს?
5. განსაზღვრეთ აბსოლუტურად შავი სხეულის ინტეგრალური ნათება 127°C -ზე.
6. რისი ტოლია ტალღის სიგრძე, რომელზეც 17°C -ზე მოდის აბსოლუტურად შავი სხეულის გამოსხივების მაქსიმუმი.
7. გამოთვალეთ ფოტოეფექტის წითელი საზღვარი ლითიუმისათვის, თუ ელექტრონის გამოსვლის მუშაობა ამ ნივთიერებისათვის $2,4$ ევ-ის ტოლია.
8. დაადგინეთ იმ ელექტრომაგნიტური ტალღის სიგრძე, რომლის კვანტის ენერგია $4,2$ ვ პოტენციალთა სხვაობით აჩქარებული ელექტრონის ენერგიის ტოლია.
9. რამაქსიმალური სიგრძე უნდა ჰქონდეს ტალღას, რომლის პლატინაზე დასხივებისას ფოტოეფექტს აქვს ადგილი.
10. მოხდება თუ არა ფოტოეფექტი, როდესაც ვერცხლის ფირფიტას $0,45$ მკმ ტალღის სიგრძის სინათლეს დავასხივებთ?
11. გამოიანგარიშეთ ფოტოელექტრონების მაქსიმალური სიჩქარე, თუ შემაკავებელი ძაბვა 6 ვ-ია.
12. 50 ვტ სიმძლავრის ნათურა 1 წთ-ში $15 \cdot 10^{20}$ ფოტონს ასხივებს. განსაზღვრეთ გამოსხივებული ტალღის სიგრძის საშუალო მნიშვნელობა.
13. რამდენჯერ მეტია ლითონის ფირფიტაზე დასხივებული სინათლის ტალღის სიგრძე ფოტოეფექტის წითელ საზღვარზე, თუ ფოტოელექტრონების კინეტიკური ენერგია ლითონიდან ელექტრონის გამოსვლის მუშაობას 2 -ჯერ აღემატება.
14. რამდენჯერ მეტია ლითონის ფირფიტაზე დასხივებული სინათლის ტალღის სიგრძე ფოტოეფექტის წითელ საზღვარზე, თუ ფოტოელექტრონების კინეტიკური ენერგია 3 -ჯერ ნაკლებია ლითონიდან ელექტრონის გამოსვლის მუშაობაზე.
15. რა სიხშირის ტალღა უნდა დავასხივოთ ვოლფრამის ფირფიტაზე, რომ მისგან ამოტყორცნილი ფოტოელექტრონების მაქსიმალური სიჩქარე 2000 კმ/წმ-ის ტოლი იყოს?
16. იპოვეთ $3,5 \cdot 10^{-19}$ ჯ ენერგიის მქონე ფოტონის იმპულსი.
17. გამოთვალეთ იმ ფოტონის იმპულსი, რომელიც $10,8 \cdot 10^{15}$ ჰც სიხშირის სინათლის კვანტს წარმოადგენს.
18. როგორ შეიცვლება სინათლის წნევა რაიმე ზედაპირზე, თუ მისი ფართობი განახევრდება, ხოლო მასზე დაცემული ფოტონების რიცხვი გაორმაგდება?
19. ერთმანეთს შეადარეთ სინათლის წნევა აბსოლუტურად შავ და სარკულ ზედაპირზე, თუ ყველა სხვა პირობა ერთნაირია.
20. გამოთვალეთ 1 წმ-ში 1 სმ² ფართობზე დაცემული ფოტონების რაოდენობა, თუ $50 \cdot 10^{16}$ ჰც სიხშირის ელექტრომაგნიტური ტალღა ამ ზედაპირზე $2,2 \cdot 10^{-6}$ პა წნევას ქმნის. ზედაპირის არეკვლის კოეფიციენტი $0,8$ -ის ტოლად მიიჩნით.
21. რამდენით შეიცვლება წყალბადის ატომში ელექტრონის ბირთვთან ურთიერთ-ქმედების პოტენციალური ენერგია, თუ ელექტრონი მეორე ენერგეტიკული დონიდან მესამეზე გადავა?

22. რა სიხშირის კვანტი გამოსხივდება, როდესაც წყალბადის ატომში ელექტრონი მეოთხე ენერგეტიკული დონიდან ძირითად ენერგეტიკულ დონეზე?
23. რამდენი განსხვავებული სიხშირის კვანტის გამოსხივებაა შესაძლებელი, თუ წყალბადის ატომში ელექტრონი მეხუთე ენერგეტიკულ დონეზე იმყოფება?
24. რამდენით ნაკლებ ნეიტრონს შეიცავს ალუმინის ბირთვი ნიკელის ბირთვთან შედარებით?
25. როგორ იცვლება ელემენტის მასური რიცხვი და რიგითი ნომერი: ა) ნეიტრონის ჩაჭერისას? ბ) α ნაწილაკის ამოტყორცნისას?
26. განსაზღვრეთ ელექტრონის უძრაობის ენერგია მგეე-ში.
27. დაასრულეთ ბირთვული რეაქციები: ა) ${}_{13}^{27}\text{Al} + {}_1^1\text{H} \rightarrow ? + {}_2^4\text{He}$; ბ) ${}_{25}^{55}\text{Mn} + ? \rightarrow {}_{26}^{55}\text{Fe} + {}_0^1\text{n}$.
28. რა მინიმალურ მანძილზე მიუახლოვდება m მასისა და q მუხტის მქონე პროტონი უძრავ α ნაწილაკს ცენტრალური შეხლისას, თუ თავდაპირველად დიდი მანძილით დაშორებული პროტონის სიჩქარეა v . ცნობილია $m_\alpha = 4m_p$; $q_\alpha = 2q_p$. გაითვალისწინეთ, რომ α ნაწილაკი ურთიერთქმედების გამო მოძრაობას იწყებს.
29. გამოთვალეთ ფოსფორის ბირთვის მასის დეფექტი.
30. რა მინიმალური ენერგიაა საჭირო ჟანგბადის ${}^{16}_8\text{O}$ ბირთვის ნუკლონებად დასაშლელად?
31. იპოვეთ აზოტის ${}^{14}_7\text{N}$ ბირთვის ბმის კუთრი ენერგია.
32. რამდენიმე α და β^- დაშლის შედეგად ურანის ${}^{238}_{92}\text{U}$ ბირთვი რადიუმის ${}^{226}_{88}\text{Ra}$ ბირთვად გარდაიქმნა. რამდები β^- დაშლა განხორციელდა?
33. 64 დღე-ღამის შემდეგ რადიოაქტიური ბირთვების $1/16$ ნაწილი დაუშლელი დარჩა. იპოვეთ ამ ნივთიერების ნახევრად დაშლის პერიოდი.
34. $2 \cdot 10^6$ რაოდენობის რადიოაქტიური ბირთვიდან რამდენი დაიშლება ნახევრად დაშლის პერიოდისა და კიდევ ნახევარი ნახევრად დაშლის პერიოდის გასვლის შემდეგ?
35. იპოვეთ რადიოაქტიური ელემენტის ნახევრად დაშლის პერიოდი, თუ მისი სიცოცხლის საშუალო ხანგრძლივობა 288 წელიწადია.

თავი III

ასტროფიზიკის საფუძვლები

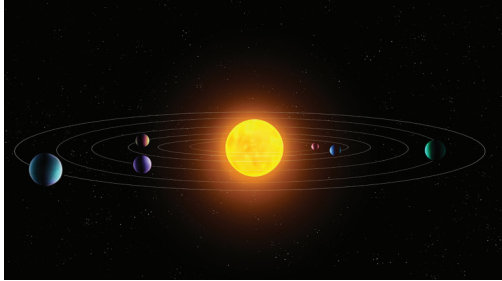


ამ თავში თქვენ გაეცნობით:

- მანძილის ასტრონომიულ ერთეულებს;
- მზის სისტემას;
- ვარსკვლავთა კლასებს, მათ ზომასა და მასას;
- პულსარებსა და შავ ხვრელებს;
- გალაქტიკებს;
- დიდი აფეთქების თეორიას;
- ბნელ მატერიას და ბნელ ენერგიას სამყაროში.

§ 3.2 წლიური პარალაქსი და მანძილი ვარსკვლავებამდე

კოსმოსურ ობიექტამდე მანძილი წარმოადგენს ამ ობიექტის ერთ-ერთ ძირითად მახასიათებელს, რომელიც ასტრონომიული დაკვირვებებით განისაზღვრება. თანამედროვე ასტროფიზიკაში მანძილების გასაზომად სხვადასხვა სისტემისგარეშე ერთეული გამოიყენება.

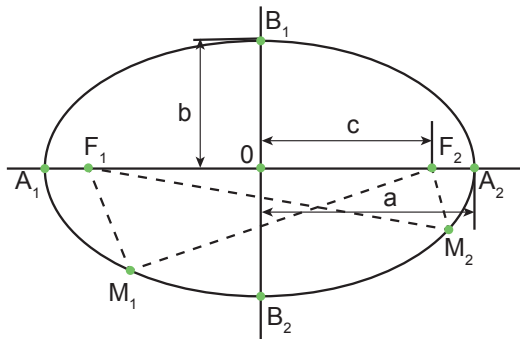


სურ. 3.1

ძირითადი მახასიათებლების მიხედვით, როგორცაა: მანძილი, სიკაშკაშე, ფერი, ზომა, მასა, ასაკი და შემადგენლობა.

ალსანიშნავია, რომ მზის სისტემის პლანეტები მოძრაობენ ორბიტებზე, რომლებიც ელიფსებს წარმოადგენს (სურ. 3.2).

გავიხსენოთ: ელიფსი არის შეკრული ბრტყელი წირი, რომლის ყოველი წერტილიდან ამ სიბრტყის მოცემულ F_1 და F_2 წერტილებამდე მანძილების ჯამი მოცემული მუდმივი სიდიდეა:



სურ. 3.2

$$F_1M_1 + F_2M_1 = F_1M_2 + F_2M_2 = A_1A_2 = \text{const}$$

F_1 და F_2 წერტილებს ელიფსის ფოკუსები ეწოდება.

ელიფსს ახასიათებენ შემდეგი სიდიდეებით:

$$A_1A_2 = 2a - \text{ელიფსის დიდი ღერძი;}$$

$$B_1B_2 = 2b - \text{ელიფსის მცირე ღერძი;}$$

$$a - \text{ელიფსის დიდი ნახევარღერძი;}$$

$$b - \text{ელიფსის მცირე ნახევარღერძი;}$$

$$c - \text{ელიფსის ფოკალური მანძილი (} c = F_1F_2/2 \text{);}$$

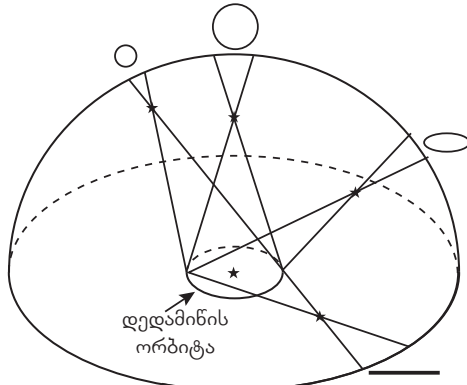
$e = \frac{c}{a} \sqrt{1 - \left(\frac{b}{a}\right)^2}$ – ელიფსის ექსცენტრისიტეტი ეწოდება. ის ყოველთვის ნაკლებია ერთზე და ელიფსის გაჭიმულობას ახასიათებს.

მზის სისტემაში მანძილის ბუნებრივი საზომია ასტრონომიული ერთეული (1 ა.ე.), რომელიც დედამიწის ორბიტის დიდი ნახევარღერძის სიგრძის ტოლია: 1 ა.ე. = $1.5 \cdot 10^{11}$ მ.

ჩვენი გალაქტიკის ვარსკვლავებამდე მანძილის განსაზღვრა დაკავშირებულია ფიზიკურ მოვლენასთან, რომელსაც პარალაქსი ეწოდება. განვიხილოთ ეს მოვლენა. მზის გარშემო დედამიწის ორბიტული მოძრაობის გამო, ცის თაღზე ვარსკვლავის მდებარეობა დედამიწაზე მყოფი დამკვირვებლის მიმართ იცვლება.

ვარსკვლავის წლიური პარალაქსი ტოლია იმ კუთხის, რომლითაც გამოჩნდებოდა ამ ვარსკვლავიდან დედამიწის ორბიტის დიდი ნახევარღერძი.

ვარსკვლავებამდე დიდი მანძილების გამო, ახლო ვარსკვლავების წლიური პარალაქსი კი ერთ კუთხურ სეკუნდს არ აღემატება. რაც უფრო შორს არის ვარსკვლავი, მით უფრო მცირეა მისი პარალაქსი. წლის განმავლობაში ცის თაღზე ვარსკვლავი პარალაქსურად წაინაცვლებს მცირე ელიფსის გასწვრივ, რომლის დიდი ნახევარღერძი ეკლიპტიკის სიბრტყის პარალელურია. (ეკლიპტიკის სიბრტყე – სიბრტყე, რომელშიც მდებარეობს პლანეტის ორბიტა, ამ შემთხვევაში დედამიწის ორბიტა).



ეკლიპტიკა
სურ. 3.3

სურ. 3.3-ზე ნაჩვენებია ეკლიპტიკური სიბრტყიდან სხვადასხვა მანძილით დაშორებული ვარსკვლავების პარალაქსური ელიფსები.

თუ ვარსკვლავი დაიმზირება ეკლიპტიკის მახლობლად (სურ. 3.4), მაშინ პარალაქსური კუთხე გამოითვლება შემდეგი ფორმულით:

$$\sin p = \frac{a}{D},$$

რომელშიც a დედამიწის ორბიტის დიდი ნახევარღერძია, ხოლო D – მანძილი მზიდან ვარსკვლავამდე.

თუ ვარსკვლავი დაიმზირება ეკლიპტიკის პოლუსის მახლობლად (სურ. 3.5), მაშინ პარალაქსური კუთხე ტოლი იქნება:

$$\operatorname{tg} p = \frac{a}{D}.$$

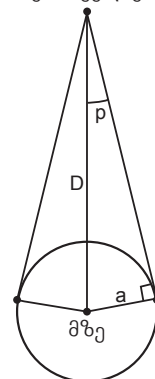
რადგან ვარსკვლავების წლიური პარალაქსების მნიშვნელობები ძალიან მცირეა, ამიტომ p კუთხის სინუსი და ტანგენსი დაახლოებით რადიანებში გამოსახული კუთხის მნიშვნელობების ტოლია. თუ გავითვალისწინებთ, რომ $a = 1$ ა.ე. და კუთხეებს გავზომავთ სეკუნდებში (1 რად= $206\ 265''$), მაშინ მივიღებთ:

$$D = \frac{206\ 265''}{p} \text{ ა.ე.}$$

მაგალითად, უახლოეს ვარსკვლავამდე – α კენტაურამდე მანძილი ტოლია:

$$D = \frac{206\ 265''}{0,75''} \text{ ა.ე.} \approx 275\ 000 \text{ ა.ე.}$$

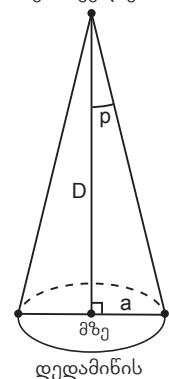
ვარსკვლავი



დედამიწის ორბიტა

სურ. 3.4

ვარსკვლავი



დედამიწის ორბიტა

სურ. 3.5

სინათლე ამ მანძილს დაახლოებით 4 წელიწადში გადის, მაშინ როდესაც მზიდან დედამიწამდე მოსვლას ის მხოლოდ 8 წთ-ს ანდომებს.

მანძილს, რომელსაც სინათლე ვაკუუმში ერთი წლის განმავლობაში გადის, სინათლის წელიწადი ეწოდება (სინ. წ.), ე.ი. მანძილი α კენტაურამდე ტოლია $D \approx 4$ სინ. წ.



იანგარიშეთ, დაახლოებით რამდენი კმ-ია 1 სინათლის წელიწადი.

ასტრონომიაში ხელსაყრელია გამოვიყენოთ სიგრძის კიდევ ერთი ერთეული – პარსეკი (დასახელება შედგენილია სიტყვებისაგან *parallax* და *second*).

1 პარსეკი (1 პს) არის მანძილი იმ ობიექტამდე, რომლის წლიური პარალაქსი ტოლია ერთი კუთხური სეკუნდის.

$$1 \text{ პს} = 3,26 \text{ სინ.წ.} = 206 \text{ 265 ა.ე.} \approx 3 \cdot 10^{13} \text{ კმ.}$$

წლიური პარალაქსით შეიძლება დავადგინოთ მანძილი იმ ვარსკვლავებამდე, რომლებიც დაშორებულნი არიან არა უმეტეს 100 პარსეკისა.

დასკვნები:

- ერთი ასტრონომიული ერთეული (1 ა.ე.) დედამიწის ორბიტის დიდი ნახევარღერძის სიგრძის ტოლია: $1 \text{ ა.ე.} = 1,5 \cdot 10^{11} \text{ მ}$;
- ვარსკვლავის წლიური პარალაქსი ტოლია იმ კუთხის, რომლითაც გამოჩნდებოდა ამ ვარსკვლავიდან დედამიწის ორბიტის დიდი ნახევარღერძი;
- მანძილს, რომელსაც სინათლე ვაკუუმში ერთი წლის განმავლობაში გადის, სინათლის წელიწადი ეწოდება;
- 1 პარსეკი არის მანძილი იმ ობიექტამდე, რომლის წლიური პარალაქსი ტოლია ერთი კუთხური სეკუნდის: $1 \text{ პს} \approx 3 \cdot 10^{13} \text{ კმ}$.

§ 3.3 ხილული და აბსოლუტური ვარსკვლავური სიდიდე. ვარსკვლავის ნათობა



სურ. 3.6

თუ უმთვარო ღამეს შეუიარაღებელი თვალით ცის თაღს დავაკვირდებით, დავინახავთ რამდენიმე ათას ვარსკვლავს. ისინი ერთმანეთისგან განსხვავდებიან **ხილული სიკაშკაშით** (სურ. 3.6). ვარსკვლავების ხილული სიკაშკაშით შედარებისთვის ძველმა ბერძენმა ასტრონომმა ჰიპარქემ (ძვ. წელთაღრიცხვის II საუკუნე) ვარსკვლავები ექვს ჯგუფად დაყო. ყველაზე კაშკაშა ვარსკვლავებს მან პირველი სიდიდის ვარსკვლავები უწოდა, ყველაზე სუსტ, თვალით ოდნავ შესამჩნევს – მეექვსე სიდიდისა. ვარსკვლავების ასეთი დაყოფა დღემდე გამოიყენება.

მიღებულია, რომ პირველი ხილული სიდიდის ვარსკვლავის განათებულობა 100-ჯერ მეტია, ვიდრე მეექვსე სიდიდის ვარსკვლავისა. რადგან $(2,512)^5 \approx 100$, ამიტომ m ხილული სიდიდის ვარსკვლავიდან განათებულობა 2,512-ჯერ მეტია, ვიდრე $(m + 1)$ ხილული სიდიდის ვარსკვლავისა. შესაბამისად, ორი ვარსკვლავის ხილული განათებულობის შეფარდების დამოკიდებულება მათი ხილული სიდიდეების სხვაობასთან შემდეგ სახის იქნება:

$$\frac{I_1}{I_2} = 2,512^{m_2 - m_1}, \quad (1)$$

რომელშიც I_1 და I_2 , შესაბამისად m_1 და m_2 სიდიდის ვარსკვლავების განათებულობაა.

ხილული სიკაშკაშით ვარსკვლავები ერთმანეთისგან განსხვავდებიან არა მხოლოდ ჩვენგან სხვადასხვა დაშორების, არამედ მათი განსხვავებული **ნათობის** გამოც.



ჰიპარქე

ვარსკვლავის ნათობა (L) მის მიერ გამოსხივებული ენერჯიის სიმძლავრეა.

ნათობა იზომება ვატებში ან მზის ნათობის ერთეულებში. მზის ნათობა $3,86 \cdot 10^{26}$ ვტ-ის ტოლია.

თუ ორ ვარსკვლავს ერთნაირი ნათობა აქვს, მაშინ ნაკლები იქნება იმ ვარსკვლავის ხილული სიკაშკაშე, რომელიც ჩვენგან უფრო შორსაა.

ვარსკვლავების გამოსხივებული ენერჯიის სიმძლავრის ობიექტური შეფასებისთვის უნდა წარმოვიდგინოთ, რომ ისინი დედამიწიდან ერთნაირი მანძილითაა დაშორებული. ასეთ მანძილად მიღებულია 10 პს.

ხილულ ვარსკვლავურ სიდიდეს, რომელიც ექნებოდა ვარსკვლავს, თუ ის ჩვენგან 10 პს მანძილით იქნებოდა დაშორებული, აბსოლუტური ვარსკვლავური სიდიდე (M) ეწოდება.

გამოვიყენოთ ფორმულა (1) და ჩავწეროთ ერთი და იგივე ვარსკვლავის განათებულობის ფარდობა D მანძილზე და $D_0 = 10$ პს მანძილზე:

$$\frac{I}{I_0} = 2,512^{M - m}. \quad (2)$$

ვარსკვლავის გამოსხივების ინტენსივობა უკუპროპორციულია ჩვენგან მისი დაშორების კვადრატის, ამიტომ:

$$\frac{I}{I_0} = \frac{D_0^2}{D^2} \quad (3)$$

თუ (2) და (3) განტოლებებით შემდგარ სისტემას ამოვხსნით, მივიღებთ:

$$M = m + 5 - 5 \lg D \quad (4)$$

ვინაიდან $a = 1$ ა.ე. $D = \frac{1}{p}$, (4) ფორმულიდან გვექნება:

$$M = m + 5 + 5 \lg p$$

მზისთვის $M \approx 5$, შესაბამისად, 10 პს მანძილზე მზე გამოჩნდებოდა როგორც 5 სიდიდის ვარსკვლავი.

აბსოლუტური ვარსკვლავური სიდიდის გამოყენებით შეიძლება გამოვთვალოთ ვარსკვლავის ნათობა მზის ნათობის ერთეულებში:

$$L = 2,512^{5-M}$$

ვარსკვლავების შესწავლამ აჩვენა, რომ ნათობის მიხედვით ისინი შეიძლება განსხვავდებოდნენ ათეულ მილიარდჯერ. ვარსკვლავურ სიდიდეებში ეს განსხვავება 26 ერთეულს აღწევს.

ყველაზე მცირე გამოსხივების სიმძლავრე **ჯუჯა ვარსკვლავებს** აქვს. მათი აბსოლუტური ვარსკვლავური სიდიდეა $M = +17$, ნათობა კი $L = 1,3 \cdot 10^{-5}$ მზის ნათობისა.

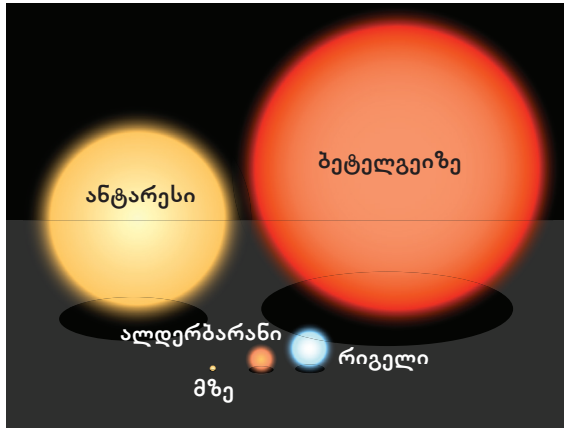
ძალიან მაღალი ნათობის მქონე ვარსკვლავების აბსოლუტური ვარსკვლავური სიდიდე უარყოფითია და შეიძლება $M = -9$ მნიშვნელობას აღწევდეს. მათ **გიგანტი** ან **ზეგიგანტი ვარსკვლავები** ეწოდება. მაგალითად, ოქროს თევზის **S** ვარსკვლავის ნათობა $L = 5 \cdot 10^5$ მზის ნათობის ტოლია.

დასკვნები:

- ორი ვარსკვლავის ხილული განათებულობის შეფარდება მათი ხილული სიდიდეების სხვაობაზე გამოისახება ფორმულით: $\frac{I_1}{I_2} = 2,512^{m_2 - m_1}$;
- ვარსკვლავის ნათობა (**L**) მის მიერ გამოსხივებული ენერჯიის სიმძლავრეა;
- ხილულ ვარსკვლავურ სიდიდეს, რომელიც ექნებოდა ვარსკვლავს, თუ ის ჩვენგან 10 პს მანძილით იქნებოდა დაშორებული, აბსოლუტური ვარსკვლავური სიდიდე (**M**) ეწოდება.

§ 3.4 ვარსკვლავის ზომა. ვარსკვლავის მასა

გარდა ნათებისა, ვარსკვლავები ერთმანეთისაგან ზომითაც განსხვავდება. არსებობს გიგანტი ვარსკვლავები, მაგალითად ორიონის თანავარსკვლავედის ვარსკვლავი ბეტელგეიზე, რომლის რადიუსი მზის რადიუსს 1000-ჯერ აღემატება (სურ. 3.7).



სურ. 3.7

თუმცა, უფრო სჭარბობს ჯუჯა ვარსკვლავები, რომელთა ზომა მზის ზომაზე ნაკლებია. ყველაზე მცირე ზომის ვარსკვლავების რადიუსები დედამიწის რადიუსის რიგისაა.

ვარსკვლავების რადიუსების დადგენისას მეცნიერებს დიდი სირთულეები შეექმნათ. 1890 წელს ამერიკელმა ფიზიკოსმა ალბერტ მაიკელსონმა გამოთქვა მოსაზრება, რომ ასტრონომიული მიზნებისათვის შეიძლებოდა გამოეყენებინათ ინტერფერომეტრი – საზომი ხელსაწყო, რომლის მოქმედება დაფუძნებულია ტალღების

ინტერფერენციის მოვლენაზე. 1920 წელს ინტერფერომეტრის გამოყენებით მან ბეტელგეიზეს რადიუსი გაზომა. გაზომვის პრინციპი შემდეგში მდგომარეობდა: ვარსკვლავიდან წამოსული სინათლე, გაივლის რა ორ ხვრელს, ეკრანზე წარმოქმნის ინტერფერენციულ სურათს; თუ სინათლის წყაროს საკმარისი კუთხური ზომა აქვს, მაშინ ხვრელებს შორის გარკვეული დამორებისას ინტერფერენციული სურათი არ მიიღება; ხვრელებს შორის ამ მანძილითა და სინათლის ტალღის სიგრძით შეიძლება შეფასდეს ვარსკვლავის კუთხური ზომა, შემდეგ კი ვარსკვლავამდე ცნობილი მანძილისა და ტრიგონომეტრიული თანაფარდობების გამოყენებით განისაზღვროს ვარსკვლავის რადიუსი.

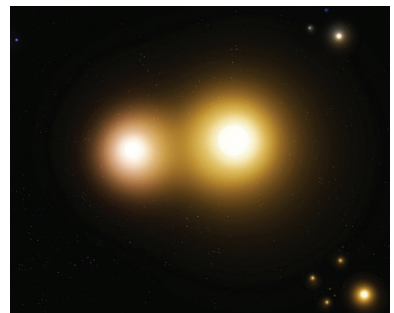


ალბერტ მაიკელსონი (1852-1913)

თუ ცნობილია მანძილი ვარსკვლავამდე, მისი რადიუსის დასადგენად არსებობს კიდევ ერთი გზა. ამ მეთოდში გამოიყენება დედამიწის ბუნებრივი თანამგზავრი მთვარე, რომელიც პერიოდულად სხვავდასხვა ვარსკვლავს ეფარება. მთვარე ვარსკვლავს მყისიერად არ ფარავს, მას წამის რამდენიმე მეათასედს ან დომებს. თუმცა, ასტრონომებისათვის ეს დრო საკმარისია რათა დაადგინონ ვარსკვლავის კუთხური ზომა, რომლის გამოყენებით

განსაზღვრავენ მის რადიუსს.

უფრო მარტივია იმ ვარსკვლავის ზომების დადგენა, რომელიც ორმაგი ვარსკვლავის სისტემაში შედის. ორმაგი ვარსკვლავური სისტემა შედგება ერთმანეთთან გრავიტაციული ურთიერთქმედებით დაკავშირებული ორი ვარსკვლავისაგან, რომლებიც ჩაკეტილ ორბიტაზე მათი საერთო მასათა ცენტრის გარშემო მოძრაობენ (სურ. 3.8). ორმაგი ვარსკვლავები სამყაროში საკმაოდ გავრცელებული ობიექტებია. ვარსკვლავის ზომის დადგენა შესაძლებელია, თუ ორმაგ ვარსკვლავურ სისტემაში შემავალი ვარსკვლავები ერთმანეთს პერიოდულად აბნელებს. თუ ვიცით ვარსკვლავების ორბიტალური სიჩქარე და დაბნელების ხანგრძლივობა, ადვილად გამოითვლება მათი რადიუსები. ამ მეთოდის უპირატესობა იმაში მდგომარეობს, რომ ვარსკვლავამდე მანძილის ცოდნა საჭირო არ არის.



სურ. 3.8

აღვნიშნოთ, რომ თეორიულად ვარსკვლავის ზომების გამოთვლა შესაძლებელია სტეფან-ბოლცმანის კანონის გამოყენებით. ამ კანონიდან გამომდინარეობს, რომ ვარსკვლავის ნათობა მისი აბსოლუტური ტემპერატურის მეოთხე ხარისხის პროპორციულია. თუ გავითვალისწინებთ, რომ სფეროს ზედაპირის ფართობი $S = 4\pi R^2$, მაშინ ვარსკვლავის ნათობისათვის გვექნება $L = 4\pi R^2 \sigma T^4$. ნათობის გამოსახულებიდან ვარსკვლავის რადიუსისათვის მივიღებთ:

$$R = \frac{1}{2T^2} \sqrt{\frac{L}{\pi \sigma}}$$

ვარსკვლავის მასა მისი ერთ-ერთი მნიშვნელოვანი მახასიათებელია. მასის მიხედვით შეიძლება ზუსტად დადგინდეს ვარსკვლავის ასაკი და მომავალი. გარდა ამისა, მნათობის მასა განსაზღვრავს მისი გრავიტაციული შეკუმშვის ძალას – ძირითად პირობას რათა ვარსკვლავის ბირთვი „აინთოს“ თერმობირთვულ რეაქციაში და დაიწყოს ენერჯის გამოსხივება. მსუბუქი ობიექტები, როგორცაა **ყავისფერი ჯუჯები**, კარგად ვერ ასხივებს, ხოლო ძალიან მძიმეები ხასიათდება ძლიერი გამოსხივებით და გადადის ექსტრემალური ობიექტების კატეგორიაში.

ვარსკვლავის მასის დადგენა საკმაოდ რთულია. ერთადერთი ვარსკვლავი, რომლის მასაც ზუსტადაა ცნობილი, ჩვენი მზეა. ასეთი სიზუსტე მიღწეულ იქნა დედამიწისა და მზის გრავიტაციული ურთიერთქმედების აღწერით. დედამიწის მასისა და მზის გარშემო მისი მოძრაობის სიჩქარის ცოდნით შესაძლებელია თვით მზის მასის გამოთვლა. გერმანელმა მათემატიკოსმა და ასტრონომმა იოჰან კეპლერმა დაადგინა კავშირი პლანეტასა და ვარსკვლავს შორის მანძილსა და პლანეტის ბრუნვის პერიოდს შორის, ხოლო ისააკ ნიუტონმა შეავსო ეს ფორმულა პლანეტისა და ვარსკვლავის მასებით. ასტრონომები ხშირად იყენებენ ნიუტონის მიერ მოდიფიცირებულ ფორმულას იმ კოსმოსური ობიექტებისათვის, რომლებიც ქმნიან გრავიტაციულ სისტემას. ორმაგი ვარსკვლავებისათვის ეს ფორმულა შემდეგი სახისაა:

$$(m+M) = \frac{T^2}{a^3} = \frac{4\pi^2}{G}$$

რომელშიც T — m და M მასის სხეულების საერთო მასათა ცენტრის გარშემო ბრუნვის პერიოდია, a კი – სხეულებს შორის საშუალო მანძილი.

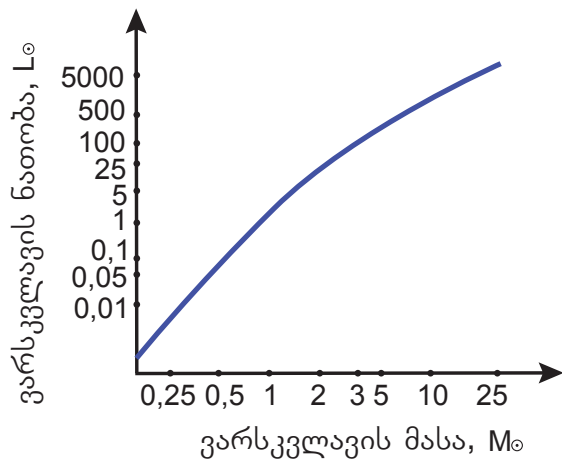
ამ ფორმულით შეიძლება გამოთვლილ იქნას ორმაგი ვარსკვლავის კომპონენტების მასათა ჯამი, ხოლო ვარსკვლავების ორბიტების მიხედვით სისტემის მასათა ცენტრის განსაზღვრის შემდეგ, შეიძლება თითოეული ვარსკვლავის მასის პოვნა. გამოთვლის შედეგები საკმაოდ საინტერესო აღმოჩნდა: ყველაზე მასიური ვარსკვლავებისა და მზის მოცულობებს შორის 10^{18} -ჯერ განსხვავებისას, მათი მასა მხოლოდ რამდენიმე ათეულჯერ მეტია მზის მასაზე, ხოლო დაახლოებით 0,01 მზის მასაზე ნაკლები მასის ვარსკვლავები ბუნებაში არ არსებობს.

ეს ფაქტი იმით აიხსნება, რომ **ვარსკვლავები ერთმანეთისაგან მნიშვნელოვნად განსხვავდება სიმკვრივეებით**. გიგანტი ვარსკვლავების საშუალო სიმკვრივე ძალიან მცირეა – $\sim 10^{-3}$ კგ/მ³; მზის საშუალო სიმკვრივე $1,4 \cdot 10^{-3}$ კგ/მ³-ის ტოლია, ხოლო ნეიტრონული ვარსკვლავისა – დაახლოებით 10^{18} კგ/მ³.

თეორიული გამოთვლებითა და ექსპერიმენტული კვლევებით დადგინდა კავშირი ვარსკვლავის მასასა და ნათობას შორის: **ვარსკვლავის მასის n -ჯერ ზრდა მისი ნათობის n^3 -ჯერ მატებას იწვევს**. სურ. 3.9-ზე ნაჩვენებია ვარსკვლავის ნათობის მის მასაზე დამოკიდებულების გრაფიკი. ნათობის ერთეულად აღებულია მზის ნათობა,



იოჰან კეპლერი
(1571-1630)



სურ. 3.9

ობიექტები, ასტრონომები მიდიან კომპრომისზე – მიღებულია, რომ ერთი სპექტრული კლასის ვარსკვლავების მასები ერთნაირია (სპექტრულ კლასებზე შემდეგ პარაგრაფებში ვისაუბრებთ). მეცნიერებს ასევე ეხმარება ვარსკვლავის მასის კავშირი მის ნათობასთან ან ტემპერატურასთან, რადგან ეს ორივე მახასიათებელი დამოკიდებულია ბირთვული რეაქციების ძალასა და ვარსკვლავის ზომებზე – მასის უშუალო ინდიკატორებზე.

მასის ერთეულად კი – მზის მასა. აბსცისათა და ორდინატთა ღერძებზე მას-შტაბი ლოგარითმულია*.

ვარსკვლავის მასასა და ნათობას შორის ასეთი სახის დამოკიდებულების გამო, იმ ვარსკვლავის ნათობა, რომლის მასა 50 მზის მასის ტოლია, დაახლოებით 100000-ჯერ აღემატება მზის ნათობას. ენერჯის ასეთი ინტენსიური გამოყოფისას ვარსკვლავი გარემომცველ სივრცეში ნივთიერების საგრძნობ რაოდენობას გამოტყორცნის და წონასწორობის ზღვარზეა. უფრო მასიური ვარსკვლავები საკუთარი გამოსხივების შედეგად იშლება.

იმ ვარსკვლავების მასის დადგენისას, რომელთა მახლობლად არ არის ხილული

დასკვნები:

- 0,01 მზის მასაზე ნაკლები მასის ვარსკვლავები ბუნებაში არ არსებობს;
- ვარსკვლავები ერთმანეთისაგან მნიშვნელოვნად განსხვავდება სიმკვრივეებით;
- ვარსკვლავის მასის n -ჯერ ზრდა მისი ნათობის n^3 -ჯერ მატებას იწვევს.

* ლოგარითმული ენოდება სკალას, რომლის დანაყოფის სიგრძე პროპორციულია ამ დანაყოფის ბოლოებზე აღნიშნული სიდიდეების ფარდობის ლოგარითმისა.

§ 3.5 ვარსკვლავთა გამოსხივების სპექტრები და სპექტრული კლასები. ვარსკვლავთა მიმდევრობები

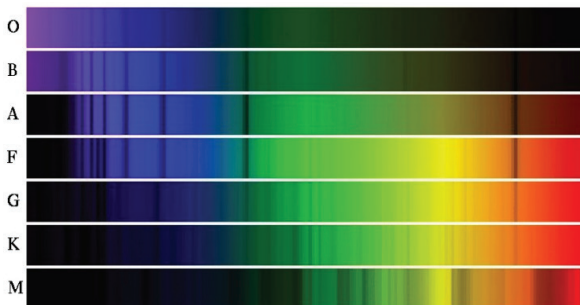
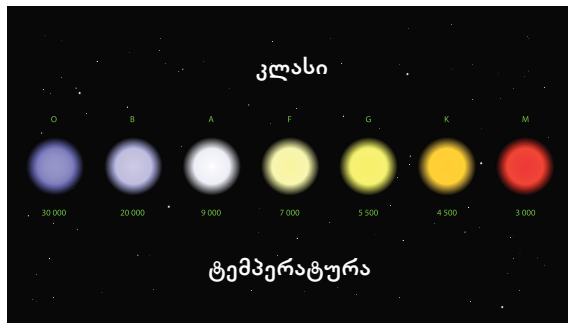
ვარსკვლავებზე დაკვირვებისას შევამჩნევთ მათ განსხვავებულ შეფერილობას, რაც ნიშნავს, რომ მათ მიერ გამოსხივებული ელექტრომაგნიტური ტალღების სპექტრი განსხვავებულია. გამოსხივების სპექტრის შესწავლით შესაძლებელია კოსმოსურ ობიექტზე მივიღოთ ისეთი მნიშვნელოვანი ინფორმაცია, როგორიცაა მისი ზედა ფენების ტემპერატურა და წნევა, ქიმიური შემადგენლობა, ბრუნვის სიჩქარე და სხვა.

ჩვეულებრივ, გამოსხივების სპექტრის მისაღებად ობიექტის მიერ გამოსხივებულ სინათლეს ატარებენ ვინრო ხვრელში, რომლის უკან სამკუთხა პრიზმაა განთავსებული. ის გარდატეხს სინათლეს, რომელიც შემდეგ ეცემა ეკრანს. შედეგად, ეკრანზე მიიღება **უნყვეტი სპექტრი**, იისფერიდან წითელ ფერამდე. ასეთი სურათი მაშინ დაიშორება, როდესაც სინათლეს მყარი ან თხევადი სხეული ასხივებს.

განსხვავებული სპექტრული სურათი მიიღება აირების შემთხვევაში. ბუნებრივი აირის სანათურის ალში მცირე რაოდენობის სუფრის მარილი მოვათავსოთ. ამ დროს ალში მკვეთრ ყვითელ ფერს შევამჩნევთ. თუ ამ პროცესს სპექტროსკოპით დავაკვირდებით, დავინახავთ მკვეთრ ყვითელ ზოლს. ეს იმას ნიშნავს, რომ გახურებული ნატრიუმის ორთქლი ასხივებს ყვითელი ფერის შესაბამის ტალღის სიგრძის სინათლეს. **ნებისმიერი ნივთიერება აირად მდგომარეობაში ასხივებს მისთვის დამახასიათებელ ტალღის სიგრძის სინათლეს.**

გერმანელმა ოპტიკოსმა იოზეფ ფრაუნჰოფერმა მზის გამოსხივებაზე დაკვირვებისას, მისი გამოსხივების უწყვეტ სპექტრში წვრილი შავი ხაზები შეამჩნია. მოგვიანებით გუსტავ კირხოფმა დაადგინა, რომ გაიშვიათებული აირი იმ ტალღის სიგრძეების სინათლეს შთანთქავს, რომელსაც გამოსხივებისას თავად ასხივებს. უწყვეტ სპექტრში მიღებულ შავ ხაზებს **შთანთქმის ხაზები** უწოდეს. მათი შესწავლით მეცნიერებმა შეძლეს ვარსკვლავის ატმოსფეროს ქიმიური შემადგენლობის დადგენა.

შემადგენლობის, შთანთქმის ხაზების რაოდენობის და უწყვეტ სპექტრში ენერგიის განაწილების მიხედვით ვარსკვლავები ძალიან მრავალფეროვანია. ვინის წანაცვლების კანონის მიხედვით, ვარსკვლავის გამოსხივების მაქსიმუმი მისი ზედაპირის ტემპერატურით განისაზღვრება. ის ვარსკვლავები, რომელთა ზედაპირის ტემპერატურა დაახლოებით 30 000 K-ია, ანათებს ცისფრად, 6000 K ზედაპირის ტემპერატურით – ყვითლად, 3000 K ზედაპირის ტემპერატურით – წითლად. გვხვდება გამოსხივების უწყვეტი სპექტრები წყალბადისა და ჰელიუმის შთანთქმის ხაზების მცირე რაოდენობით, ასევე სპექტრები სხვადასხვა ლითონის შთანთქმის ხაზებით და სპექტრები მოლეკულური შენაერთების შთანთქმის ხაზებით.



სურ. 3.10

რატურით განისაზღვრება. ის ვარსკვლავები, რომელთა ზედაპირის ტემპერატურა დაახლოებით 30 000 K-ია, ანათებს ცისფრად, 6000 K ზედაპირის ტემპერატურით – ყვითლად, 3000 K ზედაპირის ტემპერატურით – წითლად. გვხვდება გამოსხივების უწყვეტი სპექტრები წყალბადისა და ჰელიუმის შთანთქმის ხაზების მცირე რაოდენობით, ასევე სპექტრები სხვადასხვა ლითონის შთანთქმის ხაზებით და სპექტრები მოლეკულური შენაერთების შთანთქმის ხაზებით.

XIX და XX საუკუნეების მიჯნაზე ჰარვარდის ობსერვატორიის ასტრონომებმა ვარსკვლავების სპექტრების მიხედვით შექმნეს შვიდი სპექტრული კლასი – O, B, A, F, G, K, M. ვარსკვლავების ეს კლასიფიკაცია დღესაც გამოიყენება. სურ. 3.10-ზე ნაჩვენებია სხვადასხვა სპექტრულ კლასში შემავალი ვარსკვლავების სპექტრები.

სხვადასხვა სპექტრული კლასის ვარსკვლავების შთანთქმის ხაზების ნაკრებები ერთმანეთისაგან საგრძნობლად განსხვავდება. ამის გამო შეიძლება ვივარაუდოთ, რომ სხვადასხვა კლასის ვარსკვლავების ქიმიური შემადგენლობა მნიშვნელოვნად განსხვავდება, მაგრამ ასეთი ვარაუდი მცდარია. სინამდვილეში ვარსკვლავთა უმეტესობა ქიმიური შემადგენლობით ახლოს არის მზესთან – ძირითადად ისინი წყალბადისა და ჰელიუმისაგან შედგება. ერთნაირი ქიმიური შემადგენლობისას გამოსხივებისა და შთანთქმის სპექტრების განსხვავება მათი ტემპერატურების განსხვავებით აიხსნება.

ცხრილში მოყვანილია ვარსკვლავების კლასიფიკაცია სპექტრულ კლასში კუთვნილების, ზედაპირის ტემპერატურისა და ფერის მიხედვით:

სპექტრული კლასი	ტემპერატურა, K	ფერი
O	26 000–35 000	ცისფერი
B	12 000–25 000	მოთეთრო-ცისფერი
A	8000–11 000	თეთრი
F	6200–7900	მოთეთრო-ყვითელი
G	5000–6100	ყვითელი
K	3500–4900	ნარინჯისფერი
M	2600–3400	წითელი

სპექტრის ხასიათისა და ტემპერატურის მიხედვით, ჩვენი მზე G კლასს მიეკუთვნება.

ვარსკვლავების კიდევ ერთი კლასიფიკაცია შექმნეს ამერიკელმა ასტრონომმა ჰენრი ნორის რასელმა და დანიელმა ასტრონომმა ეინარ ჰერცსპრუნგმა. მათი იდეა შემდეგში მდგომარეობდა: რა მოხდება, თუ ვარსკვლავებს განვალაგებთ ერთ საკოორდინატო სისტემაში, რომელშიც მათ მდებარეობას ვერტიკალური ღერძის გასწვრივ განსაზღვრავს ნათობა, ხოლო ჰორიზონტალური ღერძის გასწვრივ – ტემპერატურა? თუ ვარსკვლავები საკოორდინატო სისტემაზე თანაბრად განაწილდებოდნენ, ამაში ახალი არაფერი იქნებოდა. ამ განაწილებიდან ნებისმიერი გადახრა კი მიანიშნებდა მნათობთა აგებულებასა და მოწყობაში გარკვეულ კანონზომიერებებზე, რომელიც ბევრ კითხვას გასცემდა პასუხს.

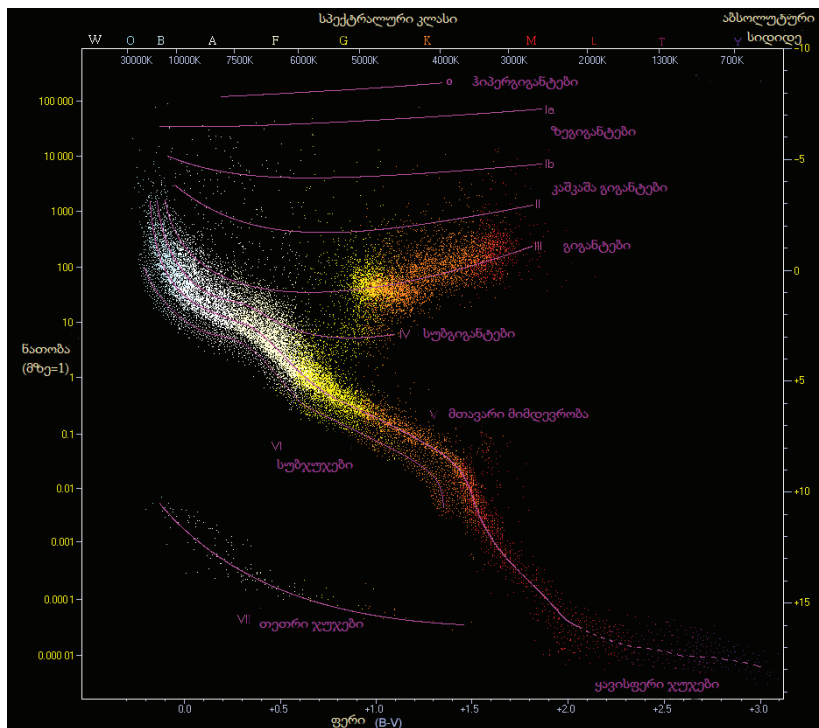
თუ კოორდინატთა ღერძზე ნათობა გაიზრდება ქვევიდან ზევით, ხოლო აბსცისათა ღერძზე ტემპერატურა – მარჯვნიდან მარცხნივ, მაშინ ვარსკვლავები დაიყოფა მკვეთრად გამოსატულ სამ ჯგუფად – სამ მიმდევრობად, როგორც მათ ასტროფიზიკოსები უწოდებენ (სურ. 3.11).

შუაში, ზედა მარცხენა კუთხიდან ქვედა მარჯვენა კუთხისკენ, განთავსებულია ჩვეულებრივი მცირე ვარსკვლავების მიმდევრობა, რომლებიც სამყაროს ვარსკვლავთა 90%-ს შეადგენს. ამ მიმდევრობას **მთავარი მიმდევრობა** ეწოდა. ამ ვარსკვლავთა ტემპერატურა ნათობის პირდაპირპროპორციულია – რაც უფრო ცხელია ვარსკვლავი, მით მეტად ანათებს ის. მთავარ მიმდევრობას მიეკუთვნება მზეც.

მარჯვენა ზედა კუთხეში განთავსდა ძალიან კაშკაშა, მაგრამ შედარებით ცივი ვარსკვლავები. მათ „დაბალ“ ტემპერატურაზე მეტყველებს ნათობის წითელი ფერი. ამ მიმდევრობას შეადგენენ გიგანტი და ზეგიგანტი ვარსკვლავები.

მთავარი მიმდევრობის ქვევით და მარცხნივ მდებარეობს ვარსკვლავები, რომლებიც გახურებულია ცისფერ და თეთრ ფერამდე, მაგრამ მათი ნათობა დაბალია. ეს თეთრი ჯუჯებია.

რასელ-ჰერცსპრუნგის დიაგრამამ აჩვენა ვარსკვლავის ენერგიასა და მის ნათობას შორის კანონზომიერება, რომელიც დამოკიდებულია ვარსკვლავის შიგნით მიმდინარე თერმობირთვულ რეაქციაზე. ეს კანონზომიერება ამავე დროს გახდა სამყაროს ყველაზე თვალსაჩინო დინამიკის – ვარსკვლავების ევოლუციის ილუსტრაცია. ვარსკვლავების ევოლუციას შემდეგ პარაგრაფებში განვიხილავთ.



სურ. 3.11

დასკვნები:

- მყარი ან თხევადი სხეულების გამოსხივების სპექტრი უწყვეტია;
- ნებისმიერი ნივთიერება აირად მდგომარეობაში ასხივებს მისთვის დამახასიათებელ ტალღის სიგრძის სინათლეს;
- უწყვეტ სპექტრში მიღებულ შავ ხაზებს შთანთქმის ხაზები ეწოდება;
- ვარსკვლავების სპექტრების მიხედვით შვიდი სპექტრული კლასი არსებობს – O,B,A,F,G,K,M.

§ 3.6 ვარსკვლავების ევოლუცია



სურ. 3.12

ვარსკვლავები მარადიული არ არის: ისინი „იბადებიან“, დროთა განმავლობაში იცვლებიან და „კვდებიან“. მსგავსად ადამიანებისა, ვარსკვლავების „ცხოვრება“ არ არის ერთნაირი. ვარსკვლავისათვის ყველაზე მნიშვნელოვანი პარამეტრი მისი მასაა, უფრო ზუსტად ის მასა, რომელიც მას ბირთვში წყალბადის სინთეზის დაწყებისას აქვს. როდესაც ვარსკვლავის ბირთვს წყალბადი ამოეწურება, ის რიგ ცვლილებებს განიცდის, სანამ არ „მოკვდება“. მთელ ამ პროცესს ძალიან დიდი დრო სჭირდება, მაგრამ ეს დრო ასევე ვარსკვლავის მასაზეა დამოკიდებული.

თუმცა, მოდით დავინწყით თავიდან...

თანამედროვე წარმოდგენებით ვარსკვლავები, ჩვეულებრივ, წარმოიქმნება ჯგუფებად ან გროვებად გაბნეული აირადი ნისლეულებისაგან, რომლებიც ძირითადად წყალბადისაგან შედგება (სურ. 3.12). ნისლეულობა საკუთარი გრავიტაციით ჯერ კოლაფსირდება და გაიშლება ათობით ან ასობით შედარებით პატარა გროვად – ღრუბლად, რომელთაგანაც წარმოიქმნება **პროტოვარსკვლავები**. შემდეგ კი, პროტოვარსკვლავში ნივთიერების კონდენსაციისას, გრავიტაციული მიზიდვის ძალების გამო აირი იკუმშება და მისი ტემპერატურა მატულობს.

პროტოვარსკვლავი – ვარსკვლავის განვითარების სტადია, რომელიც ხასიათდება შეკუმშვით. პროტოვარსკვლავს ჯერ არ აქვს ენერჯის თერმობირთვული წყარო.

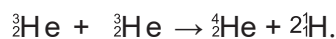
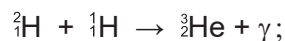
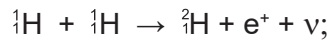
$1M_{\odot}$ -ის ტოლი მასის (სიმბოლო \odot ნიშნავს მზეს) პროტოვარსკვლავის ევოლუცია შეიძლება დავყოთ სამ ფაზად:

მახასიათებლები	ფაზა 1 ფორმირება	ფაზა 2 სწრაფი შეკუმშვა	ფაზა 3 ნელი შეკუმშვა
ზომა	$10^{18} - 10^{15}$ მ 1000 – 1ა.ე.	$10^{15} - 10^{10}$ მ 1ა.ე. – $10 R_{\odot}$	$10^{10} - 10^9$ მ $10 R_{\odot} - 1R_{\odot}$
სიმკვრივე, კგ/მ ³	$10^{-19} - 10^{-16}$ გ	$10^{-16} - 1$	$1 - 10^3$
ტემპერატურა ცენტრში, K	10	$10 - 10^6$	$10^6 - 10^7$
ხანგრძლივობა, წელიწადი	10^7	10^5	$5 \cdot 10^7$
გამოსხივების დიაპაზონი	რადიოდიაპაზონი	ინფრანითელი დიაპაზონი	ოპტიკური დიაპაზონი
მიმდინარე პროცესი	გრავიტაციული არამდგრადობის დაწყება	სწრაფი შეკუმშვა, ნივთიერების პრაქტიკულად თავისუფალი ვარდნა ღრუბლის ცენტრისკენ	პროტოვარსკვლავი ხდება გაუმჭირვალე საკუთარი სითბური გამოსხივებისთვის; ტემპერატურა და წნევა იზრდება, შეკუმშვა ნელდება.

თუ პროტოვარსკვლავის მასა მეტია $0,01M_{\odot}$ -ზე, მაშინ შეკუმშვის გარკვეულ ფაზაზე მის ცენტრალურ ნაწილში ტემპერატურა და წნევა აღწევს ისეთ მნიშვნელობებს, რომლის დროსაც იწყება წყალბადის ბირთვების სინთეზი და ჰელიუმის წარმოქმნა. პროტოვარსკვლავის ცენტრალურ ნაწილში აირის წნევა და ტემპერატურა გაიზრდება იქამდე, ვიდრე შიდა და გარე წნევის ძალებს შორის წონასწორობა არ დამყარდება. ამ დროს გრავიტაციული ძალებით პროტოვარსკვლავის შეკუმშვა შეწყდება და ის გადაი-

ქცევა ვარსკვლავად, რომელიც ანათებს თერმობირთვული სინთეზის ენერჯის ხარჯზე. ასეთი ვარსკვლავების სიცოცხლის ხანგრძლივობა დიდად არის მის მასაზე დამოკიდებული. თუ ვარსკვლავის მასა რამდენიმე ათეულჯერ აღემატება მზის მასას, მაშინ თერმობირთვული სინთეზი საკმაოდ ინტენსიურად მიმდინარეობს, ის ძალიან კაშკაშაა და წყალბადის მთელ მარაგს რამდენიმე ათეულ მილიონ წელიწადში გახარჯავს. მცირე მასის ვარსკვლავებისათვის კი წყალბადის მარაგის გახარჯვის პროცესი რამდენიმე ათეული მილიარდი წელიწადი გრძელდება.

ვარსკვლავი, რომლის მასა დაახლოებით მზის მასის ტოლია, თავის სიცოცხლეს დაბალი სიმკვრივის მქონე **წითელი ვარსკვლავის** სახით იწყებს. თავდაპირველად ის აირის გრავიტაციული შეკუმშვის ხარჯზე ასხივებს. რამდენიმე მილიონი წლის განმავლობაში პროტოვარსკვლავი იკუმშება დაახლოებით მზის ზომამდე და მის წიაღში იწყება თერმობირთვული სინთეზი. რასელ-ჰერცშპრუნგის დიაგრამაზე ის გადადის თითქმის პორიზონტალურ ხაზზე და მთავარ მიმდევრობაში თავსდება (იხ. სურ. 3.11). პრაქტიკული ცვლილებების გარეშე ვარსკვლავი თითქმის 10 მილიარდი წელი ამ მიმდევრობაშია. ყველაზე ალბათური რეაქციების ჯაჭვი, რომელიც ამ დროს ვარსკვლავის ბირთვში მიმდინარეობს, შემდეგია:



ამ რეაქციათა ჯაჭვს **პროტონ-პროტონული ციკლი** ეწოდება.

მოვიყვანოთ მაგალითი: მზე 1 წმ-ში გამოყოფს $4 \cdot 10^{26}$ ჯ ენერჯიას, რისთვისაც მის წიაღში უნდა განხორციელდეს 600 მილიონი ტონა წყალბადის სინთეზი ჰელიუმში. 4,6 მილიარდი წლის განმავლობაში გაიხარჯებოდა $m \approx 6 \cdot 10^{11}$ კგ/წმ $\cdot 3 \cdot 10^7 \cdot 4,6 \cdot 10^9$ წმ $\approx 9 \cdot 10^{28}$ კგ წყალბადი, რაც მზის მასის 5 %-ს შეადგენს. შესაბამისად, მზეს შეუძლია კიდევ მრავალი მილიარდი წელი ანათოს.

ობიექტებს, რომელთა მასა 0,01% – 0,08 M_{\odot} შუალედშია მოთავსებული, **ყავისფერ ჯუჯებს** უწოდებენ. მათი აღმოჩენა საკმაოდ რთულია, რადგან ისინი ძალიან სუსტად ასხივებენ.

რა მოხდება, როდესაც ვარსკვლავური „საწვავი“ – წყალბადი მთლიანად „დაიწვება“?

როდესაც ვარსკვლავის ცენტრალურ ნაწილში წყალბადის რაოდენობა არა უმეტეს 1%-ისა დარჩება, სინთეზის თერმობირთვული რეაქციები მინელდება და ცენტრალური ნაწილი შეიკუმშება არც ისე დიდ მკვრივ ბირთვამდე, რომელიც სუფთა ჰელიუმისაგან შედგება. ამ ბირთვის რადიუსი ვარსკვლავის რადიუსის დაახლოებით 0,1%-ს შეადგენს, ხოლო სიმკვრივე დაახლოებით $3,5 \cdot 10^8$ კგ/მ³-ია.

ასეთი სიმკვრივისას მანძილი ატომის ბირთვებს შორის ელექტრონების გარსების რადიუსებზე მცირეა. ელექტრონების კავშირი ჰელიუმის ბირთვებთან წყდება და ნივთიერება გადადის განსაკუთრებულ მდგომარეობაში, რომლის დროსაც წნევას ძირითადად ელექტრონული აირი განსაზღვრავს. „დამწვარი“ ვარსკვლავური ბირთვის გარშემო წარმოიქმნება თხელი ფენა, რომლის სისქე ვარსკვლავის რადიუსის 0,1%-ს შეადგენს, ხოლო ტემპერატურა $2,5 \cdot 10^7 - 4 \cdot 10^7$ K-ია. ამ ფენაში გრძელდება თერმობირთვული სინთეზის პროცესი. ვარსკვლავის დანარჩენი ნაწილი უბრალოდ გადასცემს გამოყოფილ ენერჯიას გარემოს. წყალბადის გახარჯვასთან და ვარსკვლავის ბირთვის მასის ზრდასთან ერთად მატულობს ვარსკვლავის რადიუსი, საშუალო სიმკვრივე მცირდება, ზედაპირის ტემპერატურა კლებულობს. რასელ-ჰერცშპრუნგის დიაგრამაზე ვარსკვლავი გადადის მთავარი მიმდევრობიდან მარჯვნივ, წითელ გიგანტებთან.

თუ ვარსკვლავის მასა საკმარისად დიდია, წყალბადის მარაგის ამონურვის შემდეგ ვარსკვლავის ცენტრალურ ნაწილებში ტემპერატურა იკლებს, წნევა მცირდება და ველარ ანონასნორებს გარეთა ფენების წნევას. გარე გარსი იწყებს ვარდნას ვარსკვლავის

ცენტრისკენ და კუმშავს შიდა უბნებში არსებულ ნივთიერებას. ახალი შეკუმშვის გამო ტემპერატურა და წნევა კვლავ იზრდება იმ მნიშვნელობებამდე, რომლის დროსაც შესაძ-



სურ. 3.13

ლებელი ხდება ჰელიუმის თერმობირთვული სინთეზი ნახშირბადში. ასეთი პროცესები მეორდება რკინის ბირთვების სინთეზამდე. შემდგომში თერმობირთვული სინთეზი ველ-არ უზრუნველყოფს ვარსკვლავის არსებობას, რადგან რკინაზე უფრო მძიმე ბირთვების სინთეზისას ენერგია კი არ გამოიყოფა, არამედ შთანთქმდება. ასეთ დროს ვარსკვლავი ან კაშკაშად „კვდება“, ან ნელა ჩაქრება.

თუ ვარსკვლავის ცენტრალური ნაწილის მასა დაახლოებით $1,4 M_{\odot}$ -ს არ აღემატება, „დამწვარი“ ვარსკვლავის ბირთვის შეკუმშვა

მაშინ შეწყდება, როდესაც ნივთიერების სიმკვრივე 10^9კგ/მ^3 თანრიგს მიაღწევს. ვარსკვლავი გადაიქცევა **თეთრ ჯუჯად**, რომლის ნათობა მზისაზე 1000-ჯერ ნაკლებია, ხოლო ზომა დაახლოებით დედამიწის ზომის ტოლია. თეთრ ჯუჯად გადაქცეული ვარსკვლავების აირადი გარსის ნარჩენებს **პლანეტურ ნისლეულს** უწოდებენ (სურ. 3.13).

თუ „დამწვარი“ ვარსკვლავის ბირთვის მასა $2-3 M_{\odot}$ -ს არ აღემატება, მაშინ მისი ბირთვის შეკუმშვა მიმდინარეობს წნევის ისეთ მნიშვნელობამდე, რომელზეც ვარსკვლავის ნივთიერების სიმკვრივე ბირთვული ნივთიერების სიმკვრივეს მიაღწევს – ვარსკვლავი გადაიქცევა **ნეიტრონულ ვარსკვლავად**. ნეიტრონული ვარსკვლავის რადიუსი დაახლოებით 10 კმ-ია.

იმ შემთხვევაში, როდესაც „დამწვარი“ ვარსკვლავის ბირთვის მასა $2-3 M_{\odot}$ -ზე მეტია, ბირთვული საწვავის ამონურვის შემდეგ გრავიტაციული ძალების მოქმედებას ვერცერთი სხვა ძალა ვერ დაუპირისპიდება და მოხდება ე.წ. **გრავიტაციული კოლაფსი**. ამ დროს შეკუმშვის პროცესი შეუკავებელი და შეუქცევადია. ადგილს, რომელშიც ხდება გრავიტაციული კოლაფსი, **შავ ხვრელს** უწოდებენ. ყველაფერი, რაც შავი ხვრელის გრავიტაციულ ველში ხვდება, მასში უკვალოდ ქრება. სინათლესაც კი არ შეუძლია შავი ხვრელიდან „თავის დაღწევა“.

ვარსკვლავთა კონკრეტულ ტიპებს და მათ ევოლუციას შემდეგ პარაგრაფებში განვიხილავთ.

დასკვნები:

- პროტოვარსკვლავი ვარსკვლავის განვითარების სტადიაა, რომელიც ხასიათდება შეკუმშვით. პროტოვარსკვლავს ჯერ არ აქვს ენერგიის თერმობირთვული წყარო;
- თუ პროტოვარსკვლავის მასა მეტია $0,01 M_{\odot}$ -ზე, მაშინ შეკუმშვის გარკვეულ ფაზაზე იწყება წყალბადის ბირთვების სინთეზი და ჰელიუმის წარმოქმნა;
- თუ ვარსკვლავის მასა რამდენიმე ათეულჯერ აღემატება მზის მასას, მაშინ თერმობირთვული სინთეზი საკმაოდ ინტენსიურად მიმდინარეობს და წყალბადის მთელ მარაგს რამდენიმე ათეულ მილიონ წელიწადში გახარჯავს. მცირე მასის ვარსკვლავებისათვის კი წყალბადის მარაგის გახარჯვის პროცესი რამდენიმე ათეული მილიარდი წელიწადი გრძელდება;
- ვარსკვლავზე მიმდინარე თერმობირთვულ რეაქციათა ჯაჭვს, პროტონ-პროტონული ციკლი ეწოდება;
- თუ „დამწვარი“ ვარსკვლავის ბირთვის მასა $1,4 M_{\odot}$ -ს არ აღემატება, ვარსკვლავი თეთრ ჯუჯად გადაიქცევა; თუ $2-3 M_{\odot}$ -ს არ აღემატება, მაშინ – ნეიტრონულ ვარსკვლავად; თუ $2-3 M_{\odot}$ -ზე მეტია, მოხდება ე.წ. გრავიტაციული კოლაფსი და შავი ხვრელი წარმოიქმნება.

§ 3.7 ცეფეიდები. ახალი და ზეახალი ვარსკვლავები

ერთ-ერთი უსიამოვნება, რომელიც მოლაშქრეს ტყეში ან მთაში ელის, გზის აბნევაა. სწორი გზის პოვნის რამდენიმე ხერხი არსებობს. უმჯობესია, თუ ყველა მათგანს



სურ. 3.14

ათვისებთ, რადგან წინასწარ არ იცით რომელი გამოგადგებათ. გამოცდილმა მოლაშქრეებმა იციან ნავიგაცია კომპასით, ბუნებრივი ნიშნებით და მზით. ოდითგანვე მოგზაურებს ვარსკვლავებიც ეხმარებოდნენ. ჩრდილოეთ ნახევარსფეროში ყველაზე გავრცელებული ორიენტირია **პოლარული ვარსკვლავი**. ცის თაღზე მისი მდებარეობით ადვილია ჩრდილოეთის მიმართულების დადგენა და იმის გაგება, თუ რომელი მიმართულებით განაგრძოთ გადაადგილება.

რატომაა კარგი ორიენტირი პოლარული ვარსკვლავი?

როგორც იცით, ჩვენი პლანეტა თავისი ღერძის გარშემო ბრუნავს, ამიტომ გვეჩვენება, რომ ღამით ვარსკვლავებით მოჭედილი ცა ბრუნავს. თუ ცის თაღს ხანგრძლივად დააკვირდებით, შეამჩნევთ, რომ ვარსკვლავები გარკვეული ცენტრის გარშემო მოძრაობენ. ამ ცენტრს **ციურ პოლუსს** უწოდებენ. სწორედ იქ მდებარეობს პოლარული ვარსკვლავი (სურ. 3.14). ჩვენ მიმართ ის პრაქტიკულად არ მოძრაობს და ყოველთვის ჩრდილოეთისკენაა მიმართული.

პოლარული ვარსკვლავის სიკაშკაშე პერიოდულად იცვლება. ასეთ ვარსკვლავებს **ცვალებადი ვარსკვლავები** უწოდეს. ფიზიკურად ცვალებადი ვარსკვლავები საინტერესოა მათში მიმდინარე ფიზიკური პროცესების გამო. მათი სიკაშკაშის ცვლილება გამოწვეულია ამ ვარსკვლავების ზედა გარსებში მიმდინარე პერიოდული ფიზიკური პროცესებით, რომლებსაც თან სდევს მოცულობისა და ტემპერატურის ცვლილება. ერთ-ერთი ასეთი ვარსკვლავია δ ცეფეა, ამიტომ ფიზიკურად ცვალებად ვარსკვლავებს **ცეფეიდები** უწოდეს.

ცეფეიდებში მიმდინარე პროცესების მიზეზი საბოლოოდ ისაა, რომ ვარსკვლავის ზედა გარსი პერიოდულად ფართოვდება და იკუმშება. გაფართოებისას მისი ზედაპირი ცივდება, ხოლო შეკუმშვისას გარსის ტემპერატურა მატულობს. ვარსკვლავის გარსის პულსაცია გამოწვეულია იმით, რომ მასში გროვდება ვარსკვლავის წიაღიდან წამოსული ენერჯია. შედეგად, გარსის ტემპერატურა და წნევა იზრდება, რაც გარსის გაფართოებას იწვევს. გაფართოებისას აირი ცივდება, მისი წნევა იკლებს და გრავიტაციული ძალების მოქმედებით გარსი იკუმშება. ასეთი პულსაცია მეორდება პერიოდით, რომლის მნიშვნელობა შეიძლება იცვლებოდეს რამდენიმე საათიდან რამდენიმე ათეულ დღე-ღამემდე.

როგორც წესი, ცეფეიდები გიგანტები ან ზეგიგანტებია, რომლებიც მიეკუთვნება **F** და **G** სპექტრულ კლასს, თუმცა, გვხვდება ცეფეიდებიც, რომელთა მასა $M_{\odot}/4$ -ის ტოლია. ამ ვარსკვლავების ნათობა რამდენიმე ათასჯერ მეტია მზის ნათობაზე. ხშირად ცეფეიდებს შორის გვხვდება ორმაგი ვარსკვლავები, თუმცა არსებობს ცეფეიდები, რომლის მახლობლად არ არის ხილული ობიექტები.

ცეფეიდების სიკაშკაშის ცვლილებასა და მის ნათობას შორის არსებობს კავშირი. თუ გავზომავთ ცეფეიდის სიკაშკაშის ცვლილების პერიოდს, შეიძლება დავადგინოთ მისი აბსოლუტური ვარსკვლავური სიდიდე. შემდეგ კი, ხილული და აბსოლუტური ვარსკვლავური სიდიდეების შედარებით, შევძლებთ განვსაზღვროთ მანძილი ცეფეიდამდე. რადგან ცეფეიდები ძალიან კაშკაშა ვარსკვლავებია, ამიტომ მათი საშუალებით

შესაძლებელი გახდა ისეთი მანძილების გაზომვა, რომლებიც რამდენიმე მილიონჯერ აღემატება წლიური პარალაქსით განსაზღვრულ მანძილებს. ზუსტად ამიტომ, ცეფეიდებს „სამყაროს შუქურებს“ ეძახიან.

ცვალებადი ვარსკვლავების განსაკუთრებული კლასია ახალი და ზეახალი (supernova) ვარსკვლავები. **ახალ ვარსკვლავს** უწოდებენ ისეთ ვარსკვლავს, რომელიც აღმოაჩინეს ცის თალის იმ ადგილში, სადაც მანამდე ვარსკვლავი არ დაიმზირებოდა. ყველა აღმოჩენილი ახალი ვარსკვლავის სიკაშკაშე ნელ-ნელა იკლებდა და რამდენიმე კვირაში ან თვეში ცის თალიდან ქრებოდა. თანამედროვე გამოკვლევებით დაადგინეს, რომ არცერთი ახალი ვარსკვლავი ცარიელ ადგილზე არ ჩნდებოდა და არც უკვალოდ ქრებოდა. ახალი ვარსკვლავის გაჩენამდე იმ ადგილზე დაიმზირება ძალიან სუსტი ვარსკვლავი, რომლის სიკაშკაშე შემდგომ ათასჯერ ან მილიონჯერაც კი იმატებს.

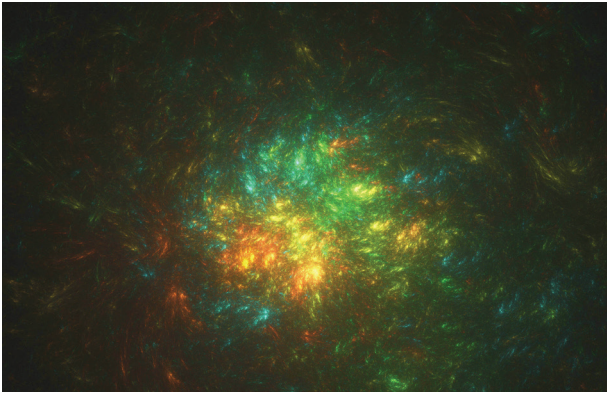
დადგინდა, რომ ახალი ვარსკვლავი წარმოიქმნება ახლომდებარე ორმაგი ვარსკვლავების სისტემაში. მასში ერთი მათგანი არის თეთრი ჯუჯა, ხოლო მეორე, როგორც წესი, მთავარი მიმდევრობის **K** ან **M** სპექტრული კლასის ჩვეულებრივი ვარსკვლავია. ჯუჯა ვარსკვლავი, რომელმაც წყალბადის მარაგი უკვე გახარჯა, თავისი ძლიერი გრავიტაციული ველის ზემოქმედებით ახდენს ახლომდებარე მეზობელი ვარსკვლავის დეფორმაციას და იქედან აირის გადმოქაჩვას იწყებს. გადმოქაჩული აირი, რომელშიც წყალბადის მაღალი კონცენტრაციაა, თეთრი ჯუჯას გარშემო ნელ-ნელა გროვდება და მკვრივდება. წარმოქმნილ გარსში ნნევა და ტემპერატურა მატულობს და კრიტიკული მნიშვნელობის მიღწევას იწყება წყალბადის ჰელიუმში სინთეზის თერმობირთვული რეაქცია. მცირე დროის განმავლობაში ეს რეაქცია მთელ გარსზე გავრცელდება და მოხდება გიგანტური თერმობირთვული აფეთქება, რომელიც დაიმზირება როგორც ახალი ვარსკვლავის გაჩენა. ყველაზე კაშკაშა ახალი ვარსკვლავების აფეთქებისას 10^{39} ჯ ენერჯიამდე თვისუფლდება. დაკვირვებებმა აჩვენა, რომ აფეთქებისას ნივთიერება ვარსკვლავიდან გაიფრქვევა 1000 ± 2500 კმ/წმ სიჩქარით, ხოლო გაფრქვეული აირის მასა დაახლოებით ტოლია $0,01 M_{\odot}$ -ის, რაც ვარსკვლავის მასასთან შედარებით უმნიშვნელოა. აფეთქების შემდეგ ვარსკვლავი დროთა განმავლობაში უბრუნდება საწყის მდგომარეობას.

ახალი ვარსკვლავის აფეთქება ნივთიერების მომწოდებელ ვარსკვლავს არ „ავნებს“, ამიტომ ერთი და იგივე ორმაგი ვარსკვლავის სისტემაში ახალი ვარსკვლავის წარმოქმნა შეიძლება გამეორდეს. ჩვენ გალაქტიკაში ახალი ვარსკვლავების წარმოქმნა საკმაოდ ხშირი მოვლენაა.

თუ ახლომდებარე ვარსკვლავური წყვილიდან ერთი თეთრი ჯუჯა კი არა, არამედ ნეიტრონული ვარსკვლავია, მაშინ თერმობირთვული აფეთქებისას, დაგროვილი გარსის დიდი სიმკვრივის გამო, გამოსხივებული ენერჯიის უდიდესი ნაწილი რენტგენულ დიაპაზონშია. ასეთ ახალ ვარსკვლავებს **რენტგენული ბარსტერები** ეწოდება.

ზოგიერთი ვარსკვლავის წიაღში ხანდახან ხდება კოლოსალური სიმძლავრის აფეთქებები, რომლებსაც **ზეახალ (supernova) ვარსკვლავებს** უწოდებენ. თუ აფეთქებისას ახალი ვარსკვლავი თავისი მასის მესამედ ნაწილებს კარგავს, ზეახალის აფეთქებისას მისი თითქმის მთელი ნივთიერება გაიტყორცნება გარემოში, დარჩენილი ნივთიერება კი კოლაფსირდება ნეიტრონულ ვარსკვლავში ან შავ ხვრელში. ზეახალი ვარსკვლავის აფეთქებისას გამოიყოფა 10^{46} ჯ თანრიგის ენერჯია, აფეთქების ადგილას წარმოიქმნება გრანდიოზული აირადი ნისლეული, რომელიც დაახლოებით $10\ 000$ კმ/წმ სიჩქარით ფართოვდება. ასეთია კიბორჩხალას ნისლეული კუროს თანავარსკვლავედში (სურ. 3.15). ის წარმოიქმნა ზეახალის აფეთქების შედეგად, რომელიც ჩინეთში 1054 წელს დაიმზირა.

ემუქრება თუ არა ასეთი აფეთქება ჩვენ მზეს? კვლევებმა აჩვენა, რომ ფეთქდება არა ყველა, არამედ განსაკუთრებული სტრუქტურის ვარსკვლავები თავისი არსებობის ბოლო ეტაპზე. მზე ასეთ ვარსკვლავებს არ მიეკუთვნება, ამიტომ მას აფეთქება არ ემუქრება.



სურ. 3.15

ასხვავებენ ზეახალი ვარსკვლავების ორ ძირითად ტიპს. პირველი ტიპის ზეახალი ვარსკვლავის ფეთქდება ორმაგ ვარსკვლავურ სისტემაში შემავალი თეთრი ჯუჯა. როგორც ახალი ვარსკვლავისათვის, აქაც ნივთიერება ჩვეულებრივი ვარსკვლავიდან თეთრ ჯუჯაში გადაიქაჩება. ოღონდ, ამ შემთხვევაში თეთრ ჯუჯას ზღვრულ მასასთან მიახლოებული მასა აქვს და ამიტომ სულ მცირე მასის ნივთიერებაა საკმარისი ვარსკვლავში ნონასნორობის დარღვევისათვის. თეთრი

ჯუჯა სწრაფად კოლაფსირდება ნეიტრონული ვარსკვლავის ზომებამდე. რამდენიმე წამის განმავლობაში გამოიყოფა გრანდიოზული ენერგია (გრავიტაციული), რომელიც გადადის სითბურ და აფეთქების კინეტიკურ ენერგიაში.

მეორე ტიპი ზეახალი ვარსკვლავის დროს ფეთქდება გიგანტისა და ზეგიგანტის სტადიაში მყოფი ვარსკვლავი, რომლის ბირთვის მასა ზღვრულ მნიშვნელობას მიაღწევს. ბირთვის კოლაფსირების შედეგად გამოიყოფა უდიდესი ენერგია, რომელიც ვარსკვლავის ნაწილებს გარემოში გატყორცნის რამდენიმე ათასი კმ/წმ სიჩქარით. სიკაშკაშის ცვლილების მიხედვით ადგენენ, თუ რომელი ტიპის ზეახალი ვარსკვლავი აფეთქდა.

ზეახალის გამოსხივების მაქსიმუმში სიმძლავრე იმდენად დიდია, რომ ის გალაქტიკის ყველა ვარსკვლავის გამოსხივების ჯამურ სიმძლავრეს შეიძლება შევადაროთ.

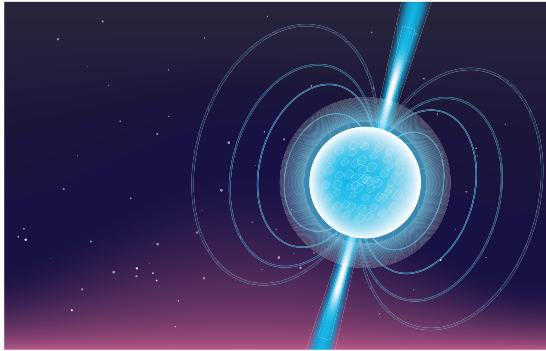
აღსანიშნავია, რომ ზეახალის აფეთქებისას წარმოიქმნება რკინაზე მძიმე ქიმიური ელემენტები.

დასკვნები:

- ცის თალზე ვარსკვლავები ჩვენ მიმართ მოძრაობენ გარკვეული ცენტრის გარშემო, რომელსაც ციურ პოლუსს უწოდებენ;
- ციურ პოლუსში მდებარე ვარსკვლავს, რომელიც ჩვენ მიმართ პრაქტიკულად არ მოძრაობს და ჩრდილოეთის მიმართულებას გვიჩვენებს, პოლარულ ვარსკვლავს უწოდებენ;
- ვარსკვლავებს, რომელთა სიკაშკაშე პერიოდულად იცვლება, ცვალებად ვარსკვლავებს უწოდებენ. პოლარული ვარსკვლავი ცვალებადი ვარსკვლავია;
- ფიზიკურად ცვლად ვარსკვლავებს ცეფეიდები ეწოდება;
- ახალ ვარსკვლავს ისეთ ვარსკვლავს უწოდებენ, რომელიც აღმოაჩინეს ცის თალის იმ ადგილში, სადაც მანამდე ვარსკვლავი არ დაიმზირებოდა;
- რენტგენული ბარსტერები ეწოდება ისეთ ვარსკვლავებს, რომელთა გამოსხივებული ენერგიის უდიდესი ნაწილი რენტგენულ დიაპაზონშია;
- ვარსკვლავებს, რომელთა წიაღში ხანდახან კოლოსალური სიმძლავრის აფეთქებები ხდება, ზეახალ ვარსკვლავებს უწოდებენ.

§ 3.8 პულსარები. შავი ხვრელები

გასული საუკუნის სამოციან წლებში როგორც სამეცნიერო, ასევე არასამეცნიერო საზოგადოება გატაცებული იყო უცხოპლანეტური ცივილიზაციების ძიებით. 1968 წლის თებერვალში, ჟურნალ "Nature"-ში გამოქვეყნდა ინფორმაცია სამყაროს სიღრმეებიდან რადიოსიგნალების მიღების შესახებ. თავდაპირველად აღმოჩენილ იქნა იმპულსები, რომლებიც გასაოცარი პერიოდულობით (1,377 წმ) მეორდებოდა. "Nature"-ში გამოქვეყნების დროისთვის უკვე დაფიქსირებული იყო პულსირების 4 წყარო. ამ წყაროებს **პულსარები** (ინგ. Pulsating source of radio emission) ეწოდება.



სურ. 3.16

პულსარებთან დაკავშირებით გამოთქმულ იქნა სხვადასხვა მოსაზრება. ერთ-ერთი მათგანი იმაში მდგომარეობდა, რომ იმპულსებს ასხივებენ ნეიტრონული ვარსკვლავები, რომლებსაც შეუძლიათ ძალიან დიდი სიჩქარით ბრუნვა (1000 ბრ/წმ). სინამდვილეში ეს ვარსკვლავები არ პულსირებენ, ანუ მათ „ჩართვას“ და „გამორთვას“, როგორც ეს დედამიწიდან გვეჩვენება, ადგილი არა აქვს – პულსარები უწყვეტად, ვინროდ მიმართული ნაკადით ასხივებენ.

ამ გამოსხივების მიზეზი ნეიტრონული ვარსკვლავის უძლიერესი მაგნიტური ველია, რომლის ინდუქციის მნიშვნელობა ზედაპირზე 10^8 ტესლას აღწევს. ამ ველის ძალწირების გასწვრივ მოძრავი პროტონებისა და ელექტრონების სიჩქარე პოლუსებთან ძალიან დიდ მნიშვნელობებს აღწევს, რის შედეგადაც სხვადასხვა დიაპაზონის მძლავრი გამოსხივების ნაკადი ფორმირდება. თუ მაგნიტური ველის პოლუსები პულსარის ბრუნვის ღერძზე არ მდებარეობს, მაშინ ვარსკვლავის ბრუნვის შედეგად გამოსხივების ნაკადები სხვადასხვა მიმართულებით მოძრაობს (სურ. 3.16). გარკვეული პერიოდულობით ნაკადი მიმართულია დედამიწისკენ, რაც პულსარის იმპულსებად აღიქმება.

ნეიტრონული ვარსკვლავის „ქცევა“ განისაზღვრება გრავიტაციული და ელექტრო-მაგნიტური ძალების თანაფარდობით, რაც თავის მხრივ, დამოკიდებულია საკუთარი ღერძის გარშემო ნეიტრონული ვარსკვლავის ბრუნვის პერიოდზე, მაგნიტური ველის ინდუქციის სიდიდეზე და ბრუნვის ღერძის ორიენტაციაზე მაგნიტური დიპოლის ღერძის მიმართ.

თუ ნეიტრონული ვარსკვლავის გარშემო სხვა კოსმოსური ობიექტი არ არის, მაშინ ის იქცევა როგორც პულსარი, რომელიც ასხივებს რადიოდიაპაზონში და მისი ბრუნვის სიჩქარე ნელ-ნელა იკლებს.



პიერ სიმონ ლაპლასი (1749-1827)

თუ ნეიტრონული ვარსკვლავი შედის ორმაგ ვარსკვლავურ სისტემაში, მაშინ ის ასხივებს რენტგენულ დიაპაზონში და მისი ბრუნვის სიჩქარე იზრდება.

ეყრდნობოდა რა ნიუტონის გრავიტაციის თეორიას, XVIII საუკუნის ბოლოს, ჯერ ინგლისელმა მეცნიერმა ჯონ მიტჩელმა, ხოლო 12 წლის შემდეგ ფრანგმა მათემატიკოსმა, ფიზიკოსმა და ასტრონომმა პიერ ლაპლასმა, თავის ნაშრომში „სამყაროს სისტემა“, იწინასწარმეტყველა უჩვეულო ობიექტების არსებობა.

ცნობილია, რომ M მასისა და R რადიუსის კოსმოსური ობიექტის მიზიდულობის დასაძლევად სხეულს უნდა გააჩნდეს მეორე კოსმოსური სიჩქარე:

$$v_{II} = \sqrt{\frac{2GM}{R^2}}$$

თუ სხეულის სიჩქარე მეტი იქნება ამ სიჩქარეზე, ის სამუდამოდ დატოვებს კოსმოსურ ობიექტს. დედამიწისათვის მეორე კოსმოსური სიჩქარე 11,2 კმ/წმ-ია. მზის მასის მქონე ნეიტრონული ვარსკვლავისათვის, რომლის რადიუსი 10 კმ-ია, მეორე კოსმოსური სიჩქარე 170 000 კმ/წმ-ის ტოლია. იმისთვის, რომ მეორე კოსმოსური სიჩქარე სინათლის c სიჩქარეს უდრიდეს, საჭიროა კოსმოსური სხეულის რადიუსი ტოლი იყოს:

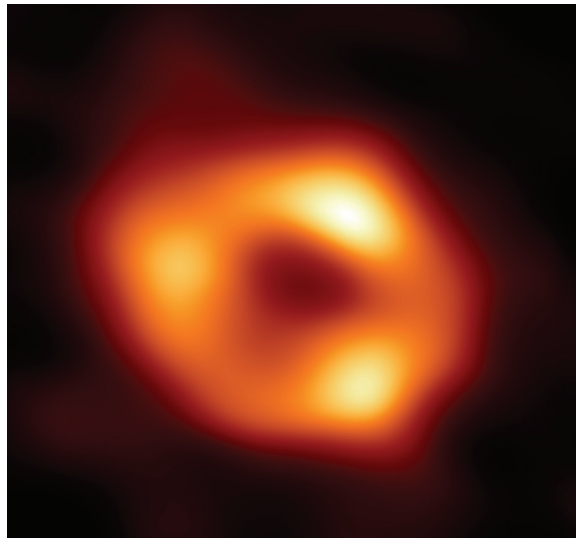
$$R = \frac{2GM}{c^2}$$

კოსმოსური ობიექტის უფრო მცირე რადიუსის შემთხვევაში, მეორე კოსმოსური სიჩქარე აღმოჩნდება სინათლის სიჩქარეზე მეტი, რაც ნიშნავს, რომ თვით სინათლაც კი ვერ დატოვებს კოსმოსურ სხეულს.

1969 წელს ამერიკელმა ფიზიკოს-თეორეტიკოსმა ჯონ უილერმა ასეთი ობიექტებისათვის შემოიღო ტერმინი „შავი ხვრელი“.

ვარსკვლავური მასის შავი ხვრელი წარმოიქმნება ან ორმაგ ვარსკვლავურ სისტემაში შემაჯავალი ნეიტრონული ვარსკვლავის კოლაფსის დროს, ან მასიური (>20-40 M_{\odot}) მარტოხელა ვარსკვლავების ბირთვების კოლაფსისას.

ფიზიკურად შავი ხვრელი სივრცე-დროის არეა, რომელიც შემოსაზღვრულია მოვლენათა ჰორიზონტით – პირობითი ზედაპირით, რომლიდანაც ვერანაირი ინფორმაცია გარეთ ვერ აღწევს.



სურ. 3.17

ბრუნვადი შავი ხვრელი. ამ აღმოჩენამ საბოლოოდ დაამტკიცა შავი ხვრელების არსებობა.

რენტგენულ და გამა დიაპაზონებში მომუშავე ტელესკოპებით აღმოჩენილ იქნა საკმაოდ ბევრი შავი ხვრელი. ასე მაგალითად, ჩვენი გალაქტიკის ცენტრში აღმოჩენილია ზემასიური შავი ხვრელი, რომლის მასა რამდენიმე მილიონჯერ მეტია მზის მასაზე (სურ. 3.17).

შავ ხვრელზე წარმოდგენის შესაქმნელად აღვნიშნოთ, რომ დედამიწის მასისა და ზომის კოსმოსური ობიექტი შავ ხვრელად რომ გადაიქცეს, საჭიროა ის 9 მმ რადიუსის ბირთვამდე შეიკუმშოს.

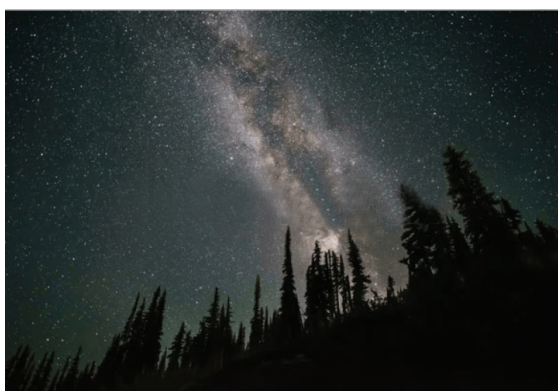
შავი ხვრელის აღმოჩენა ასტრონომიული დაკვირვებით ადვილი არ არის: მარტოხელა შავი ხვრელი ენერგიას არ ასხივებს. თუმცა, თუ შავი ხვრელი ორმაგ ვარსკვლავურ სისტემაში შედის, მეზობელი ვარსკვლავიდან ნივთიერების გადადინებისას შავი ხვრელის გარშემო წარმოიქმნება დისკო. ამ დროს ნივთიერება ხურდება მაღალ ტემპურატურებამდე და შეიძლება დამზერილ იქნას როგორც ძლიერი რენტგენული გამოსხივების წყარო.

2016 წლის თებერვალში გამოცხადდა, რომ 2015 წლის ბოლოს პირველად დაფიქსირდა გრავიტაციული ტალღები. ფიზიკოსები მივიდნენ დასკვნამდე, რომ ისინი წარმოიქმნა ორი შავი ხვრელის შერწყმის ბოლო წამებში. შერწყმის შედეგად წარმოიქმნა ერთი, უფრო მასიური,

დასკვნები:

- პულსარი არის წყარო რადიო, ოპტიკური, რენტგენული, გამა გამოსხივებისა, რომლებიც დედამიწაზე პერიოდული იმპულსების სახით აღწევს;
- პულსარები ძლიერი მაგნიტური ველის მქონე, დიდი სიჩარით მბრუნავი ნეიტრონული ვარსკვლავებია, რომელთა ბრუნვის ღერძი მაგნიტური დიპოლის ღერძს არ ემთხვევა;
- თუ კოსმოსური ობიექტის რადიუსი $R = \frac{2GM}{c^2}$ -დან გამოთვლილზე ნაკლებია, თვით სინათლეს კი ვერ დატოვებს კოსმოსურ სხეულს. ასეთ ობიექტს შავ ხვრელს უწოდებენ;
- შავი ხვრელი სივრცე-დროის არეა, რომელიც შემოსაზღვრულია მოვლენათა ჰორიზონტით – პირობითი ზედაპირით, რომლიდანაც ვერანაირი ინფორმაცია გარეთ ვერ აღწევს.

§ 3.9 ირმის ნახტომი



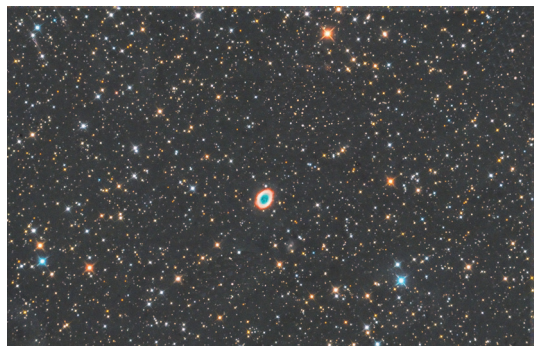
სურ. 3.18

ბნელ ღამეს, მონმენდილ ცის თაღზე დაკვირვებისას კარგად ჩანს განიერი მნათი ზოლი (სურ. 3.18). ეს **ირმის ნახტომია**, რომელსაც აგრეთვე **რძიანი გზას** ეძახიან. აკვირდებოდა რა ირმის ნახტომს ტელესკოპით, გალილეო გალილეიმ დაასკვნა, რომ ის შედგება ვარსკვლავების კოლოსალური რაოდენობისაგან. ირმის ნახტომი მნათი ზოლის სახით გადაჭიმულია ორივე ნახევარსფეროში და ქმნის ვარსკვლავურ რგოლს. ეს ვარსკვლავები ქმნიან უდიდეს ვარსკვლავურ სისტემას, რომელსაც **გალაქტიკა** ეწოდა.

გალაქტიკა (ძვ. ბერძნულიდან γαλαξίας — რძიანი) ვარსკვლავებისაგან და ვარსკვლავების გროვებისგან, ვარსკვლავთშორისი აირისა და მტვრისაგან, აგრეთვე ბნელი მატერიისგან შემდგარი გრავიტაციულად დაკავშირებული სისტემაა.

ჩვენი მზის სისტემა ირმის ნახტომის გალაქტიკაში შედის.

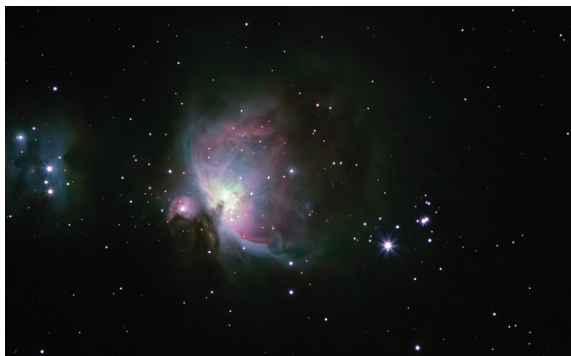
გედის თანავარსკვლავედიდან (ცის ჩრდილოეთ ნახევარსფერო) კენტავრის თანავარსკვლავედამდე (ცის სამხრეთ ნახევარსფერო), ირმის ნახტომში ვარსკვლავები არ დაიმზირება. საქმე ისაა, რომ გალაქტიკის სიბრტყესთან მდებარე სივრცის ამ ნაწილში კონცენტრირებულია გაიშვიათებული მტვრისა და აირისგან შემდგარი მატერია, რომელიც შთანთქავს და ასუსტებს შორეული ვარსკვლავების ნათებას.



სურ. 3.19

გაიშვიათებული მტვრის ღრუბლების გარდა დაიმზირება მტვრის მკვრივი ღრუბლები. ისინი ირეკლავენ კაშკაშა ვარსკვლავების ნათებას და ცის თაღზე **ამრეკლი ნისლეული** დაიმზირება. თუ ღრუბლის

სიახლოვეს ცხელი ვარსკვლავია, მაშინ აირი ალიგზნება და ნათებას დაიწყებს. ასეთ შემთხვევაში მიიღება **გაფანტული ნისლეული**. გაფანტული ნისლეულის მაგალითია **ორიონის ნისლეული**, რომელიც შედარებით ახლოს – დაახლოებით 1344 სინათლის წელიწად მანძილზე მდებარეობს და შეუიარაღბელი თვალითაც კარგად ჩანს (სურ. 3.19).



სურ. 3.20

გაფანტული ნისლეულის განსაკუთრებულ ტიპს წარმოადგენს **პლანეტური ნისლეულები**. ეს სახელი მათ იმიტომ უწოდეს, რომ ტელესკოპში ისე ჩანან როგორც პლანეტის დისკოები. პლანეტური ნისლეულის მაგალითია რგოლოვანი ნისლეული ქნარის თანავარსკვლავედში (სურ. 3.20).

ვარსკვლავების, მტვრისა და აირის განაწილების შესწავლით დადგინდა, რომ ირმის ნახტომი **სპირალურ გალაქტიკა**



სურ. 3.21

ას ნარმოადგენს (სურ. 3.21). მასში დაახლოებით ასი მილიარდი ვარსკვლავია. ვარსკვლავებს შორის საშუალო მანძილი დაახლოებით 5 სინ.წ-ს ტოლია, თუმცა, გალაქტიკის ცენტრისაკენ ეს მანძილი იკლებს. გალაქტიკის ცენტრი ხილულ დიაპაზონში ჩვენგან დამალულია აირისა და მტვრის დიდი რაოდენობით, მაგრამ ინფრანითელ დიაპაზონში ის კარგად ჩანს. ცენტრის გარშემო განთავსებულია ოთხი ვარსკვლავური მკლავი.

მზის სისტემა მდებარეობს ირმის ნახტომის სიბრტყის მახლობლად, რომელსაც გალაქტიკურ სიბრტყეს უწოდებენ. გალაქტიკა გადაჭიმულია ამ სიბრტყის გასწვრივ 100 000 სინ.წ. მანძილზე. მზის სისტემის მართობული მიმართულებით მისი სისქე 1000 სინათლის წელიწადია.

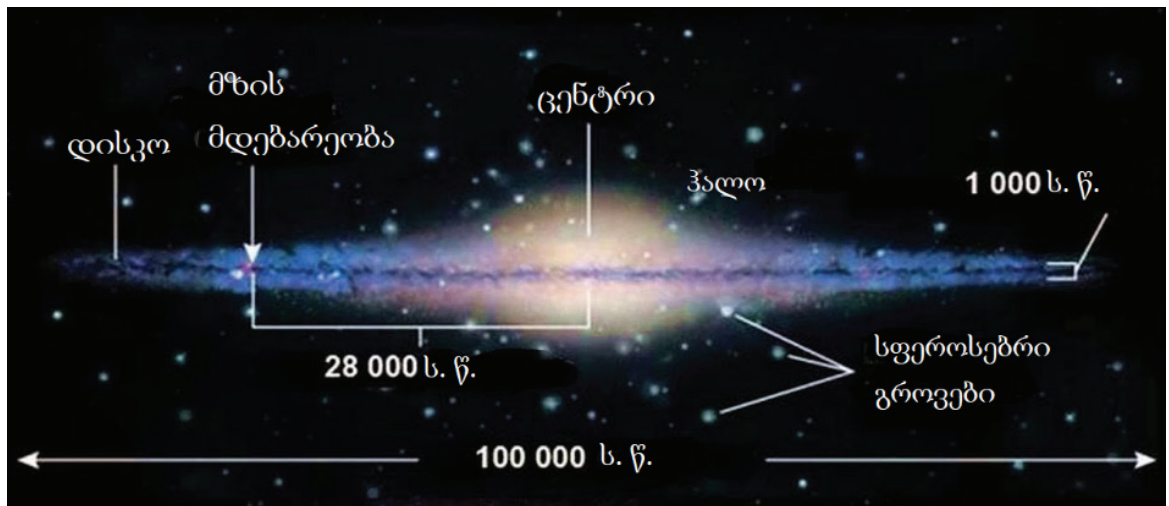
გალაქტიკა შეიცავს ორ ძირითად ქვესისტემას: ჰალო და ვარსკვლავური დისკო (სურ. 3.22).

ჰალოს ცენტრში ნივთიერების სიმკვრივე დიდია და მისგან დაშორებით სწრაფად მცირდება.

ვარსკვლავურ დისკოში სპირალურ მკლავებს შორის მდებარეობს მზე. ის გალაქტიკის ცენტრიდან დაშორებულია 8 კპს-ით, ანუ დაახლოებით 28 000 სინ.წ.-ით.

გალაქტიკა ბრუნავს. ჰალოსთან შედარებით დისკო გაცილებით სწრაფად მოძრაობს. მზე გალაქტიკის ცენტრის გარშემო დაახლოებით 220 კმ/წმ სიჩქარით მოძრაობს და ერთ სრულ ბრუნს თითქმის 200 მილიონ წელიწადს ანდომებს.

ირმის ნახტომის სრული მასა შეფასებულია როგორც რამდენიმე ასეული მილიარდი მზის მასისა. ახლა მიმდინარეობს ჩვენი გალაქტიკის ცენტრის დეტალური



სურ. 3.22

შესწავლა, რადგან მისი თვისებები და მასში მიმდინარე პროცესები, მთელი გალაქტიკის სტრუქტურას განსაზღვრავს. გალაქტიკის ცენტრის მახლობლად ვარსკვლავების მოძრაობის შესწავლით დადგინდა, რომ შედარებით მცირე სივრცეში, რომლის ზომებიც მზის სისტემის ზომების რიგისაა, თავმოყრილია უხილავი მატერია. მისი მასა მზის მასას ორ მილიონჯერ აღემატება. ეს კი გალაქტიკის ცენტრში მასიური შავი ხვრელის არსებობაზე მიუთითებს.

დისკოში მდებარეობს სპირალური განშტოებები – ვარსკვლავური მკლავები. ახალგაზრდა ვარსკვლავები და ვარსკვლავთწარმოქმნის კერები ძირითადად მკლავების გასწვრივაა განლაგებული. ჰალოს კი ქმნის ობიექტები, რომლებიც გალაქტიკის ევოლუციის სანყის ეტეპებზე წარმოიქმნა. მაგალითად, სფერული გროვების ვარსკვლავების ასაკი 12 მილიარდ წელიწადს აღემატება.

გარდა ვარსკვლავებისა, აირისა და მტვრისა, ჩვენი გალაქტიკა შეესებულია კოსმოსური სხივებით – თითქმის სინათლის სიჩქარით მოძრავი პროტონებით, ელექტრონებით და სხვადასხვა ელემენტების ატომბირთვებით (რელატივისტური ნაწილაკები).

ჩვენი გალაქტიკა შედის ე.წ. **ადგილობრივ ჯგუფში**, რომელიც მოიცავს დაახლოებით 40 გალაქტიკას. მათგან ყველაზე დიდებია ირმის ნახტომი და კიდევ უფრო დიდი **ანდრომედას ნისლეული**, რომელიც ბნელ ღამეს შეუიარაღებელი თვალით დაიმზირება.

დასკვნები:

- გალაქტიკა ვარსკვლავებისაგან და ვარსკვლავების გროვებისგან, ვარსკვლავთშორისი აირისა და მტვრისაგან, აგრეთვე შავი მატერიისგან შემდგარი გრავიტაციულად დაკავშირებული სისტემაა;
- მზის სიტემა ირმის ნახტომის გალაქტიკაში შედის;
- ირმის ნახტომი სპირალურ გალაქტიკას წარმოადგენს;
- გალაქტიკა შეიცავს ორ ძირითად ქვესისტემას: ჰალო და ვარსკვლავური დისკო;
- ირმის ნახტომის გალაქტიკური სიბრტყე 100 000 სინ. წ-ზეა გადაჭიმული.

§ 3.10 გალაქტიკები



შარლ მესიე
(1730-1817)

გასული საუკუნის დასაწყისში უკვე შეიქმნა ზოგადი წარმოდგენა ჩვენი გალაქტიკის აგებულებაზე. თუმცა, აღმოჩენილ იქნა ზოგიერთი ობიექტი, რომელთა ყოფნა ჩვენი გალაქტიკის შემადგენლობაში საეჭვო გახდა. ასეთ ობიექტებს მიეკუთვნებოდა ნისლეულები. მათი დაყოფა ვარსკვლავებად საკვლევი ხელსაწყობის მაშინდელი დონით ვერ ხერხდებოდა.

1774 წელს გრანგმა ასტრონომმა შარლ მესიემ შეადგინა პირველი კატალოგი 45 ნისლეული ობიექტისგან, რომლის დამზერაც მაშინ შესაძლებელი იყო. 1781 წელს გამოვიდა მეორე კატალოგი, რომელიც შეიცავდა 103 ობიექტს. თანამედროვე კატალოგი შეიცავს 110 ობიექტს, რომელთაგან მხოლოდ 11 არის აირადი ნისლეული, დანარჩენი კი სფერული და გაფანტული

გროვები და გალაქტიკებია (<http://www.ipac.caltech.edu/2mass/gallery/index.html>).

1920 წელს ამერიკელ ასტრონომებს ჰ. შუპლისა და ჰ. კიორტისის შორის მიმდინარეობდა მეცნიერული კამათი – კიორტისი ამტკიცებდა, რომ სპირალური ნისლეულები მდებარეობდა ირმის ნახტომისგან შორს და თავად წარმოადგენდნენ გალაქტიკებს, შუპლი კი თვლიდა, რომ ნისლეულები ეკუთვნოდა ჩვენ გალაქტიკას და მდებარეობდნენ მის პერიფერიაში.



ედვინ ჰაბლი
(1889-1953)

1924 წელს ამერიკელმა ასტროფიზიკოსმა ე. ჰაბლმა დაამტკიცა ჰ.კიორტისის მოსაზრების მართებულობა. მან აჩვენა, რომ ჩვენი გალაქტიკა არ არის მარტო და არსებობს სხვა მრავალი გალაქტიკა, რომლებიც ერთმანეთისაგან განსხვავდება ფორმით, ზომით და ნათობით. დაკვირვებების შედეგად ჰაბლმა გალაქტიკები დაყო სამ ძირითად ჯგუფად: ელიფსური (E), სპირალური (S) და ირეგულარული (Ir).

ელიფსურ ჯგუფს ის გალაქტიკები მიეკუთვნება, რომლებსაც წრის ან ელიფსის ფორმა აქვს. მათი ნათობა ცენტრიდან პერიფერიისკენ იკლებს. არანაირი ხილული თავისებურებები მათ არ აქვს. დაკვირვება აჩვენებს, რომ ეს გალაქტიკები არ ბრუნავს და მათში აირი და მტვერი ძალიან მცირე რაოდენობითაა. ელიფსური

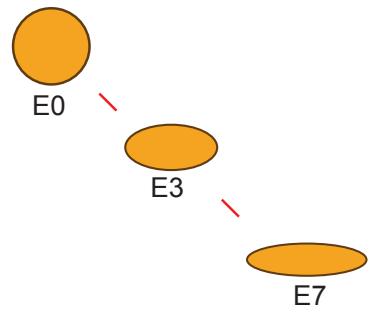
გალაქტიკები შვიდ ქვეტიპადაა დაყოფილი – E0-დან E7-ის ჩათვლით – წრიული ფორმიდან განვლილ ელიფსამდე (სურ. 3.23). ყველაზე დიდი ელიფსური გალაქტიკის მასა $10^{13} M_{\odot}$ -ს აღწევს.

სპირალური გალაქტიკები შედგება ბირთვისა და რამდენიმე მკლავისაგან. ჩვეულებრივ, სპირალურ გალაქტიკებში მკლავები გამოდის უშუალოდ ბირთვისგან. არსებობს სპირალური გალაქტიკები, რომელთა ბირთვი იკვეთება განივი ზოლით, რომელსაც ჯემპერს უწოდებენ. ჯემპერის ბოლოებიდან იწყება სპირალური მკლავები.

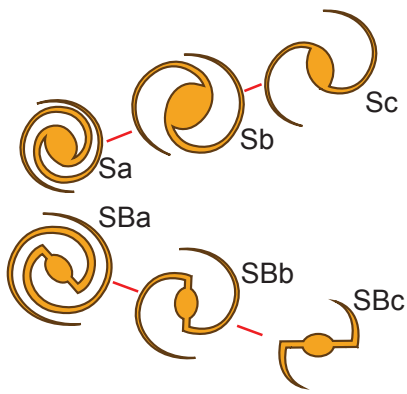
S-ით ჩვეულებრივ სპირალურ გალაქტიკებს აღნიშნავენ, SB-თი – სპირალურ გალაქტიკებს ჯემპერით. a, b და c გალაქტიკების ბირთვების აქტიურობას აღნიშნავენ (სურ. 3.24).

ჩვენთან უახლოესი ვარსკვლავური სისტემა – ანდრომედას ნისლეული, ჩვეულებრივი სპირალური გალაქტიკაა.

სპირალური გალაქტიკები ბრუნავს, მათში დიდი რაოდენობით აირი და მტვერია, რომლებიც კონცენტრირდება გალაქტიკის სიბრტყესთან და სპირალურ მკლავებში. მათში ბევრია O და B სპექტრული კლასის



სურ. 3.23



სურ. 3.24

ახალგაზრდა ცხელი ვარსკვლავი. ეს ვარსკვლავები ალაგზნებენ დიფუზიურ აირად ნისლეულებს, რომლებიც მტვრის ღრუბლებთან ერთად გაფანტულნი არიან სპირალური მკლავების გასწვრივ. მკლავებში მიმდინარეობს აქტიური ვარსკვლავთნარმოქმნის პროცესი. სპირალური გალაქტიკების მასა $10^{10} \div 10^{12} M_{\odot}$ რიგისაა.

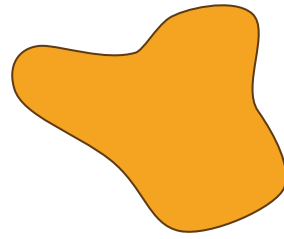
ირეგულარულ გალაქტიკებს მიეკუთვნება ის გალაქტიკები, რომლებსაც მკვეთრად გამოხატული ბირთვი არ აქვს და არ ფიქსირდება მათი ბრუნვითი სიმეტრია (სურ. 3.25). ასეთ გალაქტიკებს მიეკუთვნება დიდი მაგელანის ღრუბელი და პატარა მაგელანის ღრუბელი, რომლებიც შეუიარაღებელი თვალით დაი-

მზირება სამხრეთ ნახევარსფეროში. ეს ორი გალაქტიკა ჩვენი გალაქტიკის თანამგზავრია.

ზოგიერთი გალაქტიკის ბირთვში აქტიური პროცესები მიმდინარეობს. მათ **აქტიური** გალაქტიკები ეწოდებათ. მაგალითად, ქალწულის თანავარსკვლავედის **MB7** გალაქტიკაში ნივთიერების გამოტყორცნა დაახლოებით 3000 კმ/წმ სიჩქარით მიმდინარეობს, ხოლო ერთ წამში გამოტყორცნილი ნივთიერების მასაა $10^5 M_{\odot}$. ეს გალაქტიკა მძლავრი რადიოგამოსხივების წყაროა.

არსებობს ისეთი გალაქტიკებიც, რომელთა რადიოგამოსხივება ბევრად აჭარბებს მათ ოპტიკურ გამოსხივებას. ასეთ გალაქტიკებს **რადიოგალაქტიკები** ეწოდება.

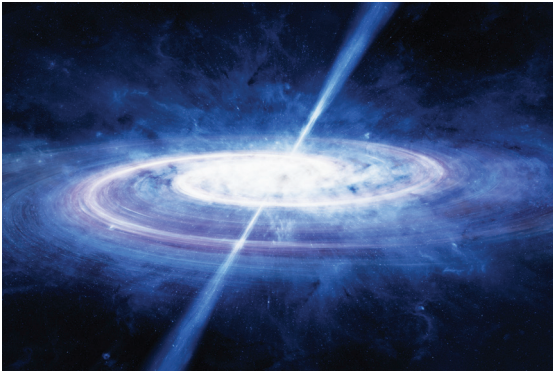
კიდევ უფრო მძლავრი რადიოგამოსხივების წყაროებია **კვაზარები** (ინგ. Quasar – Quasi stellar radio source). პირველი კვაზარი აღმოაჩინა ჰოლანდიელმა ასტრონომმა მარტენ შმიდტმა 1962 წლის 5 აგვისტოს. ბოლო 50 წლის განმავლობაში აღმოჩენილია 5000-ზე მეტი კვაზარი. ჩვენთან უახლოესი კვაზარია **C 273** ქალწულის თანავარსკვლავედში. მისი ნათობა აღწევს $10^{12} L_{\odot}$. კვაზარები ასევე ინფრანითელი, რენტგენისა და γ გამოსხივების მძლავრი წყაროებია. კვაზარი დიდი სიჩქარით გამოტყორცნის ელემენტარული ნაწილაკების ნაკადებს – კოსმოსურ სხივებს, რომლებიც მაგნიტურ ველში მოძრაობისას ქმნიან კვაზარის რადიოგამოსხივებას. ამ სხივების ნაკადები კვაზარიდან, ძირითადად, სხვადასხვა მიმართულებების ორი ჭავლის სახით გამოიტყორცნება, რომლებიც კვაზარის ურთიერთსაინააღმდეგო მხარეს ორ „რადიოღრუბელს“ ქმნის.



სურ. 3.25

დაკვირვებადი მოვლენების ახსნისათვის ყველაზე ალბათურად შეიძლება ასეთი მოდელი წარმოვიდგინოთ: ბრუნვადი აირადი დისკოს ცენტრში მდებარეობს მასიური კომპაქტური ობიექტი, სავარაუდოდ, შავი ხვრელი. მისი ცენტრალური ცხელი ნაწილი წარმოადგენს ელექტრომაგნიტური გამოსხივებისა და სწრაფი კოსმოსური ნაწილაკების წყაროს. გამოსხივებას შეუძლია გავრცელდეს მხოლოდ დისკოს ღერძის გასწვრივ (სურ. 3.26). ეს თეორია ერთადერთი არ არის, თუმცა თანამედროვე ასტროფიზიკაში ყველაზე მიღებულია.

ამ თეორიის მიხედვით კვაზარი ენერგიას იღებს მასიური შავი ხვრელის გრავიტაციული ველის ხარჯზე: შავი ხვრელი შლის და შთანთქავს მის მახლობლად მყოფ ვარსკვლავებს და, შესაძლებელია, გალაქტიკებსაც კი. ამ პროცესის დროს გაჩენილი აირი ფორმირდება დისკოდ, რომელიც გარშემოერთყმება შავ ხვრელს და დროთა განმავლობაში მისკენ მიიზიდება. შეკუმშვისა და დისკოს ცენტრალური ნაწილის სწრაფი ბრუნვის შედეგად ის ცხელდება და მძლავრ გამოსხივებას იძლევა. დისკოს ნივთიერებას ნაწილობრივ შავი ხვრელი შთანთქავს, ნაწილი კი ტოვებს კვაზარს ვიწროდ მიმართული აირადი ნაკადებისა და კოსმოსური სხივების სახით.



სურ. 3.26

კვაზარის ეს მოდელი ყველაზე დეტალურად შეისწავლება, მაგრამ ის ჯერ ვერ ხსნის კვაზარის ყველა დაკვირვებად მოვლენას. კვლავ დაუდგენელია კვაზარების ფორმირება და ევოლუცია.

ცნობილია, რომ ჩვენი გალაქტიკის დიამეტრი თითქმის 30 კპს-ია, ანდრომედას გალაქტიკისა კი – 40 კპს. მანძილი ჩვენგან ანდრომედას ნისლეულამდე 670 კპს-ს შეადგენს, რაც დიდი გალაქტიკების ზომებს თითქმის 20-ჯერ აღემატება. ვარსკვლავებს შორის მანძილი თითქმის ისეთივეა, როგორც მზესა და α კენტავრს შორის,

ანუ დაახლოებით 275 000 ა. ე. ამრიგად, სივრცეში გალაქტიკები ერთმანეთთან უფრო ახლოს არიან, ვიდრე ვარსკვლავები.

სივრცეში გალაქტიკების განაწილების კვლევამ აჩვენა, რომ ცალკეულ გალაქტიკებთან ერთად დაიმზირება გალაქტიკების გროვები (სურ. 3.27). მაგალითად, ჩვენი გალაქტიკა, ანდრომედას ნისლეული, დიდი და პატარა მაგელანის ღრუბლები და კიდევ რამდენიმე ვარსკვლავური სისტემა ქმნის ადგილობრივ ჯგუფს, რომელიც 35 გალაქტიკას შეიცავს.



სურ. 3.27

ადგილობრივი ჯგუფის გალაქტიკები დაკავშირებულნი არიან საერთო მიზიდულობით და საერთო მასათა ცენტრის მიმართ მოძრაობენ.

დღეისთვის დაახლოებით 4000 გალაქტიკათა გროვაა ცნობილი. გროვათა დიამეტრები დაახლოებით 8 მგპს-ის ტოლია.

ჩვენი ირმის ნახტომი გალაქტიკების ადგილობრივ ჯგუფთან ერთად იმყოფება გალაქტიკების გროვის კიდეში. ამ გროვის ცენტრი მდებარეობს ქალწულის თანავარსკვლავედში.

დასკვნები:

- გალაქტიკები სამ ძირითად ჯგუფად იყოფა: ელიფსური (E), სპირალური (S) და ირეგულარული (Ir);
- ელიფსურ ჯგუფს ის გალაქტიკები მიეკუთვნება, რომლებსაც წრის ან ელიფსის ფორმა აქვს;
- სპირალური გალაქტიკები შედგება ბირთვისა და რამდენიმე მკლავისაგან, რომლებიც ბირთვისაგან გამოდის;
- ირეგულარულ გალაქტიკებს მიეკუთვნება ის გალაქტიკები, რომლებსაც მკვეთრად გამოხატული ბირთვი არ აქვს და არ ფიქსირდება მათი ბრუნვითი სიმეტრია;
- ისეთი გალაქტიკებს, რომელთა რადიოგამოსხივება ბევრად აჭარბებს მათ ოპტიკურ გამოსხივებას, რადიოგალაქტიკები ეწოდება.

§ 3.11 ჰაბლის კანონი. დიდი აფეთქების თეორია

გალაქტიკიდან წამოსული სინათლე მილიარდობით ვარსკვლავისა და აირის მიერ გამოსხივებული სინათლის ჯამია. შესაბამისად, ამ სინათლეს მოაქვს უდიდესი ინფორმაცია, რომლის შესასწავლად ასტრონომები სპექტრული ანალიზის მეთოდებს იყენებენ.

კვლევებმა აჩვენა, რომ ყველა ცნობილი გალაქტიკის გამოსხივების სპექტრული ხაზები წანაცვლებულია სპექტრის ნითელი ბოლოსაკენ. ამ მოვლენას **ნითელი წანაცვლება** ეწოდა. აღმოჩნდა, რომ მოცემული გალაქტიკის **გამოსხივების სპექტრის ყველა ხაზისთვის** სპექტრული ხაზის $\lambda - \lambda_0$ წანაცვლების ფარდობა ტალღის λ_0 სიგრძესთან ერთი და იგივე სიდიდეა (λ_0 ლაბორატორიაში დაკვირვებადი სპექტრული ხაზის ტალღის სიგრძეა).

სწორედ ამ შეფარდებით –

$$z = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0}$$

ხასიათდება ნითელი წანაცვლების სიდიდე.

ნითელი წანაცვლება შეიძლება აიხსნას დოპლერის ეფექტით: სპექტრული ხაზების წანაცვლება გამოწვეულია ჩვენ მიმართ გალაქტიკის მოძრაობით (დაშორებით). მცირე ნითელი წანაცვლებისას ($z \ll 1$) გალაქტიკის სიჩქარე შეიძლება გამოვთვალოთ დოპლერის ფორმულის გამოყენებით:

$$v = c \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} = cz.$$

მას შემდეგ, რაც ნითელი წანაცვლებით გალაქტიკებამდე მანძილები გამოთვალეს, ე. შაბლმა დაადგინა დამოკიდებულება, რომელსაც **ჰაბლის კანონი** ეწოდა.

გალაქტიკების ჩვენგან დაშორების სიჩქარე ჩვენგან მათი დაშორების პირდაპირპროპორციულია:

$$v = HD,$$

რომელშიც D ჩვენგან გალაქტიკამდე მანძილია, H კი პროპორციულობის კოეფიციენტი, რომელსაც **ჰაბლის მუდმივა** ეწოდება.

ამრიგად, ჰაბლის კანონი გვიჩვენებს, რომ რაც უფრო შორს არის ჩვენგან ობიექტი, მით მეტი სიჩქარით გვშორდება ის, ანუ **სამყარო ფართოვდება**.

აღსანიშნავია, რომ ჰაბლის მუდმივას მნიშვნელობა დროის მოცემულ მომენტში სამყაროს ნებისმიერ წერტილში ერთნაირია, თუმცა, დროის მიხედვით ის იცვლება – შორეულ წარსულში სამყარო ფართოვდებოდა უფრო სწრაფად, ვიდრე დღეს და, შესაბამისად, ჰაბლის მუდმივას მნიშვნელობა უფრო მეტი იყო. მისი მნიშვნელობა დროთა განმავლობაში კორექტირდება: 2012 წლამდე სამყაროს ყველაზე დაშორებულ ობიექტებამდე მანძილის საპოვნელად იყენებდნენ $H = 73,8 \pm 2,1$ კმ/წმ · მგპს ($\approx 2,3 \cdot 10^{-18}$ · წმ⁻¹) მნიშვნელობას. 2018 წლის მდგომარეობით, ტელესკოპ „პლანკის“ გამოყენებით გამოთვლილი ჰაბლის მუდმივას მნიშვნელობაა $H = 67,4 \pm 0,5$ კმ/წმ · მგპს.

ჰაბლის მუდმივას შებრუნებული სიდიდე წარმოადგენს დროს, რომლის განმავლობაშიც დაკვირვებადი ობიექტი D მანძილს გაივლის.

ჰაბლის კანონიდან ასევე გამომდინარეობს, რომ შორეულ წარსულში ($1/H$ წლის წინ) დაკვირვებადი სამყაროს მთელი მატერია კონცენტრირებული იყო ერთ წერტილში, მოხდა **დიდი აფეთქება**, რაც სამყაროს ევოლუციის საწყისი იყო.

აუცილებლად გასათვალისწინებელია, რომ 10-15 მილიონი სინათლის წელიწადზე ნაკლები მანძილების განსაზღვრისას ჰაბლის კანონი იძლევა დიდ ცდომილებას. რადგან სინათლის სიჩქარე სასრულია, ამიტომ სამყაროს ასაკის სასრულ მნიშვნელობას შეესაბამება სამყაროს სასრული ნაწილი, რომლის დაკვირვებაც დღეს შეუძლებელია. უფრო მეტიც, სამყაროს ყველაზე შორეული დაკვირვებადი ნაწილები შეესაბამება მისი ევოლუციის ყველაზე ადრეულ მომენტებს.

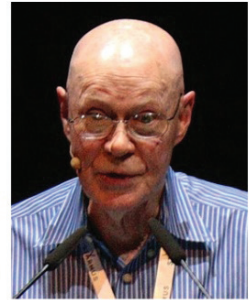
დიდი აფეთქების თეორიის მართებულობა მტკიცდება ორი მნიშვნელოვანი ფაქტით: კოსმოსური მიკროტალღური ფონით და მსუბუქი ელემენტების სიმრავლით.

1964 წელს ამერიკელმა ასტროფიზიკოსებმა არნო პენზიასმა და რობერტ ვილსონმა აღმოაჩინეს, რომ სამყარო „სავსეა“ მიკროტალღური დიაპაზონის ელექტრომაგნიტური



არნო პენზიასი
(1933-2024)

გამოსხივებით. მას **რელიქტური გამოსხივება** ეწოდა. შემდგომმა კვლევებმა აჩვენა, რომ ეს გამოსხივება ახასიათებს ობიექტებს, რომელთა ტემპერატურა დაახლოებით 3K-ის ტოლია. მიკროტალღური ფონის ანალოგიად შეიძლება მოვიყვანოთ ნაკვეთხლების სიმხურვალე ცეცხლის ჩაქრობის შემდეგ. რელიქტური გამოსხივების აღმოჩენამ სამყაროს შექმნის სხვადასხვა მოდელიდან უპირატესობა დიდი აფეთქების თეორიას მიანიჭა. სხვა თეორიები ხსნიდნენ სამყაროს გაფართოებას, მაგრამ ვერ ხსნიდნენ მიკროტალღური ფონის არსებობას.



რობერტ ვილსონი
(1936)

ადრეული სამყარო იყო ძალიან ცხელი. მაღალი ტემპერატურისა და წნევის პირობებში მიმდინარეობდა მსუბუქი ელემენტების ბირთვების სინთეზი. ყველა უფრო მასიური ბირთვები, რომლებიც წარმოიქმნენ პირველი სამი წუთის განმავლობაში, აუცილებლად დაიშლებოდნენ ურთიერთდაჯახების შედეგად. ადრეული სამყაროს შექმნის ისტორიაში ეს პერიოდი შევიდა როგორც „მსუბუქი ელემენტების შექმნის შესაძლებლობის ფანჯარა“, თუმცა ის ძალიან ხანმოკლე იყო. დიდი აფეთქებიდან პირველი სამი წუთის შემდეგ ნაწილაკები ერთმანეთისგან ისე შორს გაიფანტნენ, რომ მათ შორის დაჯახება ძალიან იშვიათი გახდა და თერმობირთვული სინთეზი შეწყდა. ამ ხანმოკლე პერიოდში წარმოიქმნა დეიტერიუმი, ჰელიუმი – 3, ჰელიუმი – 4 და ლითიუმი – 7. ყველა სხვა უფრო მძიმე ელემენტები წარმოიქმნა მოგვიანებით, ვარსკვლავების ფორმირებისას.

დიდი აფეთქების თეორიის საშუალებით განსაზღვრულ იქნა ადრეული სამყაროს ტემპერატურა, სხვადასხვა მსუბუქი ელემენტის ბირთვების რაოდენობის თანაფარდობა. თეორიული გათვლების შედარებამ მსუბუქი ელემენტების რეალურად დაკვირვებად თანაფარდობასთან დაასაბუთა დიდი აფეთქების ჰიპოთეზა.

დასკვნები:

- გალაქტიკის გამოსხივების სპექტრული ხაზები წანაცვლებულია სპექტრის ნითელი ბოლოსაკენ. ამ მოვლენას ნითელი წანაცვლება ეწოდება;
- გალაქტიკების ჩვენგან დაშორების სიჩქარე ჩვენგან მათი დაშორების პირდაპირპროპორციულია: $v=HD$ – ჰაბლის კანონი;
- რაც უფრო შორს არის ჩვენგან ობიექტი, მით მეტი სიჩქარით გვშორდება ის – სამყარო ფართოვდება;
- შორეულ წარსულში დაკვირვებადი სამყაროს მთელი მატერია კონცენტრირებული იყო ერთ წერტილში. დიდმა აფეთქებამ სანცისი მისცა სამყაროს ევოლუციას.

§ 3.12 სამყაროს ბნელი მატერია და ბნელი ენერჯია



ადამ რისი
(1969)

სამყაროს გაფართოების დადგენის შემდეგ დაიბადა კითხვები: რამ გამოიწვია სამყაროს გაფართოება? ის მუდამ გაგრძელდება, თუ გრავიტაციული მიზიდულობის ძალები დაამუხრუჭებს გაფართოებას და სამყაროს კვლავ ნერტილამდე შეკუმშავს? ამ ორი სცენარიდან ერთ-ერთის არჩევა დამოკიდებული იყო გრავიტაციული მიზიდულობის სიძლიერეზე, ანუ სამყაროს მასაზე. ვინაიდან ობიექტის მასასა და მის ნათობას შორის დამოკიდებულება ცნობილი იყო, ამიტომ მასის გამოთვლა შესაძლებელი იყო ობიექტების ნათობით. თუმცა, ეს მეთოდი საკმაოდ უხეში აღმოჩნდა, რადგან მასის შეფასებისას დიდ ცდომილებას იძლეოდა.

1937 წელს შვეიცარული წარმოშობის ამერიკელმა ასტროფიზიკოსმა ფრიც ცვიკიმ, იკვლევდა რა ვარსკვლავების მოძრაობას „ვერონიკას თმების“ ვარსკვლავურ გროვაში, გამოთვალა ამ გროვის მასა. ის 500-ჯერ მეტი აღმოჩნდა, ვიდრე ნათობით გამოთვლილი. ასე იქნა აღმოჩენილი ფარული მასა – **ბნელი მატერია**. მისი ბუნება დღემდე არ არის გამოკვლეული, ის არ ჩანს და მისი გამოვლენა შესაძლებელია მხოლოდ გრავიტაციით. შესაბამისად, მიჩნეულ იქნა, რომ სამყარო



სოლ პერლმუტერი
(1959)

უსასრულოდ არ გაფართოვდება და გალაქტიკების გაფანტვა შეიცვლება მათი დაახლოებით. შეიქმნება სინგულარობა, შემდეგ მოხდება აფეთქება და ყველაფერი თავიდან დაიწყება.

თუმცა, 1998 წელს სამმა ასტროფიზიკოსმა – ადამ რისმა, სოლ პერლმუტერმა და ბრაიან შმიდტმა, აკვირდებოდნენ რა ყველაზე მეტად დაშორებულ ზეახალ ვარსკვლავებს, აღმოაჩინეს, რომ **სამყარო უბრალოდ კი არ ფართოვდება, არამედ ფართოვდება აჩქარებულად**. ამ აღმოჩენისთვის მათ 2011 წელს ნობელის პრემია მიენიჭათ.

ზეახალი ვარსკვლავები, რომლებსაც აკვირდებოდნენ ეს ასტროფიზიკოსები, სამყაროს ევოლუციის ადრეულ ეტაპზე, რამდენიმე მილიარდი წლის წინ აფეთქდნენ. იცოდნენ რა ზეახალი ვარსკვლავის ნათობა, მათ განსაზღვრეს მანძილი ვარსკვლავამდე. სწორედ ამ დროს აღმოჩნდა, რომ ამ ობიექტების ნაწილი იმყოფება ბევრად უფრო შორს, ვიდრე თანამედროვე კოსმოლოგიური მოდელიდან გამომდინარეობდა. ეს კი ნიშნავს, რომ სამყარო ყოველთვის აჩქარებულად ფართოვდებოდა. ასეთი გა-

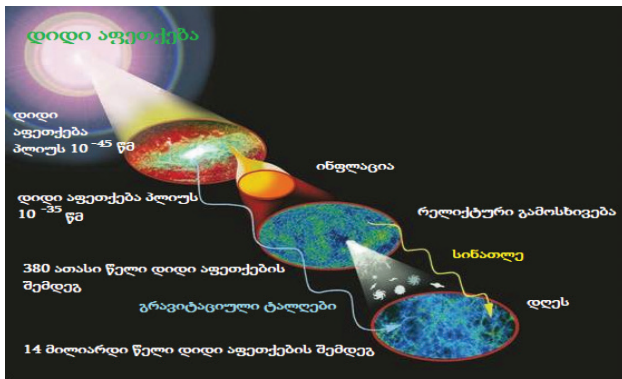


ბრაიან შმიდტი
(1967)

ფართოება მიმდინარეობს გრავიტაციულზე უფრო დიდი, რალაც ენერჯიის ხარჯზე, რომელსაც **ბნელი ენერჯია** უწოდეს. კოსმოლოგიაში ბნელი ენერჯია შემოღებულ იქნა, როგორც ენერჯიის ჰიპოთეტური სახე, სამყაროს მათემატიკურ მოდელში მისი დაკვირვებადი აჩქარებული გაფართოების გამო.

გალაქტიკათა გროვებში გრავიტაციული ძალების გაზომვით მეცნიერებს საშუალება მიეცათ გაეზომათ ბნელი მატერიის მასა როგორც ამ გროვებში, ასევე მთლიანად სამყაროში. აღმოჩნდა, რომ სამყაროს 80% ბნელი მატერიაა. ვარაუდობენ, რომ ბნელი მატერია შედგება ახალი, დედამიწის პირობებში ჯერ აღმოუჩენელი ელემენტარული ნაწილაკებისაგან, რომლებიც სუსტად ურთიერთქმედებენ ნივთიერებასთან, მაგრამ გრავიტაციულ ურთიერთქმედებაში მონაწილეობენ.

გაფართოების პროცესში სამყაროს სიმრუდე მცირდება. იმისათვის, რომ სამყაროს დაკვირვებადი გაფართოება დაკვირვებად სიმრუდეს შეესაბამებოდეს, საჭიროა შესწორებულ იქნას სამყაროს სიმრუდის რადიუსის მნიშვნელო-



სურ. 3.28

ობა წარსულში – დიდი აფეთქების შემდეგ 1 წმ-ში ის ტოლი უნდა ყოფილიყო მაშინდელი დაკვირვებადი სამყაროს მილიარდი რადიუსის. ასეთი შესწორების გარეშე დღეს სიმრუდე იქნებოდა ბევრი თანრიგით მეტი. ამ პრობლემის გადაწყვეტამ მეცნიერები მიიყვანა სამყაროს ევოლუციის **ინფლაციურ სტადიამდე**. ინფლაციური თეორიის თანახმად, სამყარომ თავისი განვითარების ყველაზე ადრეულ პერიოდში გაიარა ძალიან ჩქარი, ექსპონენტური გაფართოების ეტაპი – ინფლაცია (სურ. 3.28). მიუხედავად იმისა, რომ ინფლაციური სტადია წამის ძალიან მცირე ნაწილის განმავლობაში მიმდინარეობდა, ამ დროში სამყარო გაიწელა ათეულჯერ ან ასეულჯერ და სიმრუდე დაეცა პარაქტიკულად ნულოვან მნიშვნელობამდე – სამყარო გახდა ევკლიდური. ის, რომ სამგანზომილებიანი სამყაროს სიმრუდე ძალიან მცირეა, დასაბუთდა რელიქტური გამოსხივების რუკით.

ობა წარსულში – დიდი აფეთქების შემდეგ 1 წმ-ში ის ტოლი უნდა ყოფილიყო მაშინდელი დაკვირვებადი სამყაროს მილიარდი რადიუსის. ასეთი შესწორების გარეშე დღეს სიმრუდე იქნებოდა ბევრი თანრიგით მეტი. ამ პრობლემის გადაწყვეტამ მეცნიერები მიიყვანა სამყაროს ევოლუციის **ინფლაციურ სტადიამდე**. ინფლაციური თეორიის თანახმად, სამყარომ თავისი განვითარების ყველაზე ადრეულ პერიოდში გაიარა ძალიან ჩქარი, ექსპონენტური გაფართოების ეტაპი – ინფლაცია (სურ. 3.28). მიუხედავად იმისა, რომ ინფლაციური სტადია წამის ძალიან მცირე ნაწილის განმავლობაში მიმდინარეობდა, ამ დროში სამყარო გაიწელა ათეულჯერ ან ასეულჯერ და სიმრუდე დაეცა პარაქტიკულად ნულოვან მნიშვნელობამდე – სამყარო გახდა ევკლიდური. ის, რომ სამგანზომილებიანი სამყაროს სიმრუდე ძალიან მცირეა, დასაბუთდა რელიქტური გამოსხივების რუკით.

დასკვნები:

- სამყაროს 80% ბნელი მატერიაა. მისი ბუნება დღემდე გამოკვლეული არ არის, ის არ ჩანს და მისი გამოვლენა შესაძლებელია მხოლოდ გრავიტაციით;
- სამყარო აჩქარებულად ფართოვდება;
- ენერგიას, რომელიც სამყაროს აჩქარებულ გაფართოებას იწვევს, ბნელი ენერგია ეწოდება.

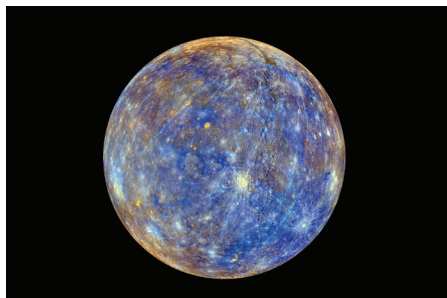
§ 3.13 მზის სისტემა. პლანეტები

წარმოვიდგინოთ, რომ შორეულ კოსმოსში ვუშვებთ ხომალდს და გვინდა მას ვატანოთ ინფორმაცია ჩვენი კოსმოსური მისამართით. ეს მისამართია: მზის სისტემა – პლანეტარული სისტემა გალაქტიკა ირმის ნახტომში, იმყოფება გალაქტიკის ცენტრიდან დაახლოებით 28 ათას სინათლის წელიწად მანძილზე ერთ-ერთ სპირალურ მკლავ ორიონში და გალაქტიკის ცენტრის გარშემო 250 კმ/წმ სიჩქარით ბრუნავს; მზის სისტემის ცენტრში მდებარეობს G2V ტიპის ვარსკვლავი – მზე; მზის სისტემის შემადგენლობაში შედის პლანეტები და მათი თანამგზავრები, ჯუჯა პლანეტები, მცირე სხეულები (ასტეროიდები, კომეტები, მეტეორიტები და მეტეორები), აგრეთვე პლანეტათაშორისი მტვერი, პლაზმა და გარკვეულ ფარგლებში ფიზიკური ველები; ჩვენ ვიმყოფებით მზიდან მესამე პლანეტაზე.

მზის სისტემის ფორმირება დაახლოებით 4,5 მილიარდი წლის წინ აირისა და მტვრისგან შემდგარი ღრუბლის გრავიტაციული კოლაფსის შედეგად მოხდა. აირის შეკუმშვას შესაძლოა უახლოეს ვარსკვლავურ გარემოცვაში ზეახალი ვარსკვლავის აფეთქებამ შეუწყო ხელი, რასაც მზის ნისლეულის – ნივთიერების ბრუნვადი დისკოს შექმნა მოჰყვა. გრავიტაციის ზეგავლენით მის ცენტრში თავს სულ უფრო მეტი და მეტი ნივთიერება იყრიდა. საბოლოოდ, ბირთვში წნევა იმდენად გაიზარდა, რომ წყალბადის ატომებმა დაიწყეს შეერთება, რასაც მოჰყვა თერმობირთვული რეაქცია ჰელიუმის წარმოქმნით. ასე „აინთო“ მზე, რომელშიც მზის სისტემის მატერიის 99,8%-ზე მეტია კონცენტრირებული. თერმობირთვული სითეზის პროცესი დღესაც მიმდინარეობს და გამოიყოფა უზარმაზარი ენერგია, რომელიც დედამიწას სხვადასხვა ტალღის სიგრძის ფოტონების, ნეიტრონის და კორპუსკულური რადიაციის სახით აღწევს. მზის ნისლეულის გარე უბნებში დარჩენილი მატერია გადაურჩა მზისაგან შთანთქმას და თავად დაიწყო შეერთება. ეს შეერთებული ნაწილები ეჯახებოდნენ ერთმანეთს და ერთიანდებოდნენ უფრო დიდ ობიექტებში. ამ ობიექტებიდან ზოგიერთმა, საკუთარი გრავიტაციის ხარჯზე, სფერული ფორმა მიიღო და ჩამოყალიბდა პლანეტად, მცირე პლანეტად ან მსხვილ მთვარედ.

პლანეტებისა და სხვა სხეულების განლაგების რიგი და წესი მზის სისტემაში მის ევოლუციაზეა დამოკიდებული. დისკოს შიგა ზონაში მსუბუქი ელემენტები სინათლის წნევის ზემოქმედებით პერიფერიისაკენ გადაადგილდებოდნენ, ამიტომ მზესთან ახლოს ჩამოყალიბდა მთლიანად ქვის მინერალებისა და ლითონის შენაერთებისაგან შემდგარი პლანეტები – **დედამიწის ჯგუფის პლანეტები**. წყლისა და აირის დიდი ნაწილი განთავსდა ახალგაზრდა მზის სისტემის გარეთა უბნებში. გრავიტაციის მოქმედებით ამ ნივთიერებებიდან ჩამოყალიბდნენ **აირადი გიგანტები** და მათი თანამგზავრები, აგრეთვე გამყარებული წყლის, ამიაკისა და მეთანისგან შემდგარი კომეტები კოიპერის სარტყელსა და ოორტის ღრუბელში.

პლანეტა გიგანტებისაგან განსხვავებით, დედამიწის ჯგუფის პლანეტებს აქვს უფრო მცირე ზომა და მასა, ნაკლები ბრუნვის სიჩქარე, მეტი სიმკვრივე, გაცილებით გაუხშობელი ატმოსფერო, თანამგზავრების მცირე რაოდენობა (ან საერთოდ არ აქვს თანამგზავრი).



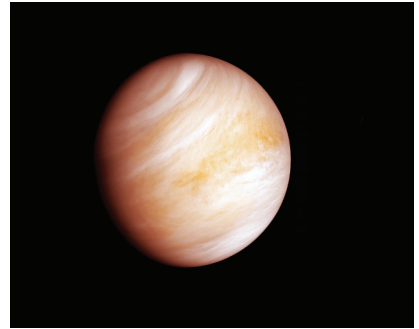
სურ. 3.29

მერკური – მზესთან უახლოესი პლანეტა, რომელიც მთვარეზე ოდნავ დიდია (სურ. 3.29). ამ პლანეტაზე მზის 1 დღე-ღამე დაახლოებით დედამიწის 176 დღე-ღამის ტოლია. ეს დრო მერკურის ორ წელიწადს უდრის, ვინაიდან ის მზის გარშემო ერთი ბრუნის შესრულებას დედამიწის 88 დღე-ღამეს ანდომებს. მერკურის დაშორება მზიდან დაახლოებით 57,9 მილიონი კილომეტრია, მისი მასა კი დედამიწის მასის 0,055 ნაწილს შეადგენს. მერკურის

ხილული ვარსკვლავური სიდიდე -1,9-დან 5,5-მდე მერყეობს. პლანეტას ბუნებრივი თანამგზავრები არ აქვს. მერკურის საშუალო სიმკვრივე 5,43 გ/სმ³ -ია. მისი ზედაპირი დაფარულია კრატერებით, ამიტომ სურათებზე მერკურის განსხვავება მთვარისაგან ძნელია. ისინი აგრეთვე სინათლის არეკვლის ხარისხითა და ზედაპირული ფენის თბოგამტარობით გვანან ერთმანეთს. მერკურზე მთვარესთან შედარებით ღრმულების მცირე რაოდენობაა.

მერკურს ატმოსფერო პრაქტიკულად არ აქვს. დღის ნახევარსფერო 400° C-ზე მეტად ცხელდება, ღამით კი ტემპერატურა -170° C-მდე ეცემა.

ვენერა მზიდან მეორე პლანეტაა (სურ. 3.30). რადიოლოკაციურმა დაკვირვებებმა გამოავლინა, რომ ვენერა თავისი ღერძის გარშემო სხვა პლანეტების ბრუნვის საწინააღმდეგო მიმართულებით ბრუნავს. მზის 1 დღე-ღამე მასზე დედამიწის 117 დღე-ღამის განმავლობაში გრძელდება. მზის გარშემო ერთი ბრუნვის შესრულებას ვენერა დაახლოებით დედამიწის 224,7 დღე-ღამეს ანდომებს. მზიდან მისი დაშორება დაახლოებით 108,2 მილიონი კილომეტრია, მასა კი დედამიწის მასის 0,815 ნაწილს შეადგენს. ვენერას ზედაპირზე აღმოჩენილია მთის ქედები და კრატერები. მის ზედაპირულ ქანებში რადიოაქტიური კალიუმის, ურანისა და თორიუმის შემცველობის ანალიზმა აჩვენა დედამიწის ბაზალტურ ქანებთან მათი მსგავსება. ვენერას ბრუნვის ღერძის ბრუნვის სიბრტყესთან დახრილობა თითქმის მართ კუთხეს შეადგენს, რის გამოც პლანეტის ჩრდილოეთ და სამხრეთ ნახევარსფეროები მზის მიერ ერთნაირადაა განათებული. ტემპერატურა პლანეტის ზედაპირზე 470° C – 480° C აღწევს და არ არის დამოკიდებული დღე-ღამის დროზე. ვენერას ზედაპირზე და ატმოსფეროს ქვედა ფენებში მაღალი ტემპერატურა განპირობებულია „სათბურის ეფექტით“*, რომლიც გამოწვეულია ატმოსფეროს დიდი სიმკვრივით და ქიმიური შემადგენლობით: ნახშირორჟანგი – 97%, აზოტი და ინერტული აირები – რამდენიმე პროცენტი, ჟანგბადი კი – დაახლოებით 0,1%. ვენერა დაფარულია მთლიანი თეთრი ღრუბლებით, რომლებსაც ფენოვანი სტრუქტურა აქვს. ისინი განთავსებულია 48 კმ-დან 70 კმ სიმაღლემდე და შეიცავს გოგირდმჟავას წვეთებს. ატმოსფეროში დაიმზირება ელვები. ატმოსფერული წნევა ვენერას ზედაპირზე დაახლოებით 100-ჯერ აღემატება დედამიწის ატმოსფერულ წნევას. სიმაღლესთან ერთად ტემპერატურა მცირდება და ვენერას სტრატოსფეროში ყინვაა.



სურ. 3.30

ვენერას ნელი ბრუნვის გამო, მისი მაგნიტური ველი ძალიან სუსტია.

დედამიწა მზის სისტემის რიგით მესამე პლანეტაა. კოსმოსიდან ჩვენი პლანეტა ჩანს, როგორც ლამაზი ცისფერი ბირთვი (სურ. 3.31). ღრუბლებს მიღმა შეიძლება დაიმზიროს ოკეანეები და კონტინენტები. ოკეანეებს დედამიწის ზედაპირის თითქმის 71% უკავია.



სურ. 3.31

დედამიწისა და დედამიწის ჯგუფის პლანეტების შინაგანი აგებულების მოდელი ერთმანეთს ძალიან ჰგავს. დადგენილ იქნა, რომ პლანეტის შინაგანი აგებულება ვერტიკალის გასწვრივ ფენოვანია.

ქიმიური შემადგენლობისა და ფიზიკური თვისებების მიხედვით გამოყოფენ სამ ძირითად სფერულ სარტყელს: მყარ ქერქს, მანტიასა და ბირთვს. მყარი ქერქი ყველაზე თხელი, გარეთა სარტყელია. მისი სისქე საშუალოდ 35 კმ-ის ტოლია (ოკეანური ქერქი

* „სათბურის ეფექტი“ არის პლანეტიდან არეკვლილი სითბური ენერჯის შეკავება პლანეტის ატმოსფეროში, რაც გამოწვეულია მასში დიდი რაოდენობის ნახშირორჟანგის არსებობით.

– 10 კმ, კონტინენტური ქერქი – 70 კმ). ქერქის ქიმიური შემადგენლობა შემდეგნაირია: ჟანგბადი (49,1%), სილიციუმი (26,0%), ალუმინი (7,5%), რკინა (4,2%), კალციუმი (3,3%) და სხვა ქიმიური ელემენტები. დედამიწის ქერქის მასა დედამიწის საერთო მასის 0,8%-ს შეადგენს.

დედამიწიდან მზემდე საშუალო მანძილია 149,6 მილიონი კილომეტრი. ეკვატორის დახრა ეკლიპტიკის სიბრტყესთან 23,4°-ს შეადგენს, რის გამოც პლანეტაზე ადგილი აქვს სეზონურ ცვლილებებს. მზის გარშემო ბრუნვის პერიოდი 365,26 დედამიწის დღე-ღამის ტოლია, ხოლო საკუთარი ღერძის გარშემო ბრუნვის პერიოდი – 23,93 სთ-ის. პლანეტის ეკვატორული დიამეტრია 12 756 კმ, მასა – $5,97 \cdot 10^{24}$ კგ, საშუალო სიმკვრივე – $5,52 \cdot 10^3$ კგ/მ³. დედამიწის ზედაპირზე ტემპერატურა – 89° C-დან 57° C-მდე მერყეობს.

დედამიწის მაგნიტური ველი გენერირდება მის გამდნარ ლითონის ბირთვში. ის შედგება რკინისაგან, რომელშიც მცირე რაოდენობის ნიკელისა და გოგირდის მინარევია. ბირთვის მასა პლანეტის მასის 30%-ს შეადგენს, რადიუსი კი – დედამიწის რადიუსის 55%-ს.

დედამიწის ატმოსფერო ძირითადად შედგება აზოტისა (78%) და ჟანგბადისაგან (21%).

დედამიწას ჰყავს ერთი ბუნებრივი თანამგზავრი – მთვარე (სურ. 3.32), რომელიც ბირთვის ფორმის სხეულია. მისი დიამეტრი 3476 კმ-ია, მასა 81-ჯერ ნაკლებია დედამიწის მასაზე, ხოლო საშუალო სიმკვრივე დედამიწის სიმკვრივის 0,6 ნაწილს შეადგენს. მზის დღე-ღამე მთვარეზე გრძელდება 29,5 დედამიწის დღე-ღამე – **სინოდური თვე**. ზუსტად იმავე დროში მთვარე ერთ სრულ ბრუნს ასრულებს დედამიწის გარშემო და, შესაბამისად, ის ჩვენკენ ყოველთვის ერთი მხარითაა მომართული. მთვარეზე წყალი თხევად მდგომარეობაში არ არის და მას პრაქტიკულად არ აქვს ატმოსფერო. დღისით ტემპერატურა +127° C-მდე მატულობს, ხოლო ღამით –173° C-მდე ეცემა. აირადი ატმოსფეროს არარსებობის გამო, მთვარე მუდმივად განიცდის მზის ყველა სახის ელექტრომაგნიტური გამოსხივების ზემოქმედებას. ასევე, მთვარის ზედაპირს ეცემა სხვადასხვა ზომის მეტეორები, რის გამოც მისი მთელი ზედაპირი დაფარულია დარტყმითი კრატერებით.



სურ. 3.32

ქიმიური შემადგენლობით მთვარის ქანები ძალიან ჰგავს დედამიწის ბაზალტურ ქანებს. მთვარის ზედაპირი დაფარულია ფხვიერი ნივთიერებით – რეგოლით, რომლის სისქე დაახლოებით 10 მეტრია.

1969 წლის 20 ივლისს ამერიკელმა ასტრონავტებმა, ნილ არმსტრონგმა და ედვინ ოლდრინმა, პირველებმა დადგეს ფეხი მთვარის ზედაპირზე.

მარსი – მზის სისტემის რიგით მეოთხე და დედამიწის ჯგუფის ბოლო პლანეტა (სურ. 3.33). დამკვირვებელი მას ნითელი კამკაშა მნათობის სახით ხედავს. წელიწადის ხანგრძლივობა თითქმის ორჯერ მეტია დედამიწის წელიწადზე – 1,88 დედამიწის წელიწადი. თავისი ღერძის გარშემო პლანეტა ერთ ბრუნს 24,62 სთ-ის განმავლობაში ასრულებს. მზიდან საშუალო დაშორებაა 227,9 მილიონი კილომეტრი. მარსის მასა დედამიწის მასის 0,107 ნაწილს შეადგენს. მისი ეკვატორული დიამეტრია 6792 კმ, საშუალო სიმკვრივე კი – $3,93 \cdot 10^3$ კგ/მ³. პლანეტის ბრუნვის ღერძის დახრა მის ორბიტასთან თითქმის ისეთივეა, როგორც დედამიწისა. შესაბამისად, მასზე ადგილი აქვს სეზონურ ცვლილებებს. მარსის ატმოსფეროში ხანდახან შეიძლება დამზერო იქნას თეთრი ღრუბლები და ნისლი, უფრო ხშირად პოლარულ ქუდებზე. პლანეტის ატმოსფერო საკმაოდ გაუხშობებულია, მისი წნევა დაახლოებით 100-ჯერ ნაკლებია დედამიწის ატმოსფერულ წნევაზე. ის ძირითადად შედგება ნახშირორჟანგისაგან, ჟანგბადი და წყლის ორთქლი მარსის ატმოსფეროში ძალიან ცოტაა. პლანეტაზე ტემპერატურა მერყეობს –153 °C-დან (პოლუსზე ზამთარში) +20 °C-მდე (ეკვატორზე ზაფხულში შუადღისას), საშუალო ტემპერატურაა – 50 °C. ამ



სურ. 3.33

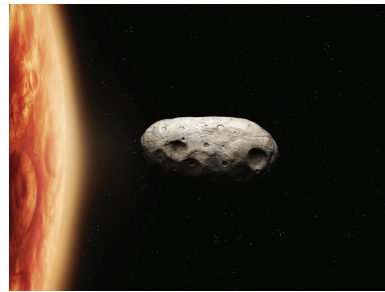
პირობებში იყინება ნახშირორჟანგი, რომელიც პოლუსებთან ქმნის თეთრ საფარს. 2008 წელს ნასას კოსმოსურ აპარატ „ფენიქსის“ მიერ მარსზე აღმოჩენილ იქნა წყალი ცინულის სახით. მარსი, მთვარისა და მერკურის მსგავსად, დაფარულია კრატერებით. მარსზე აღმოჩენილია რამდენიმე გიგანტური ჩამქრალი ვულკანი და კანიონები. ყველაზე მაღალი ვულკანის სიმაღლე 27 კმ-ია. კანიონები კი თავისი ფორმითა და მასშტაბებით დედამიწის დამშრალი მდინარეების კალაპოტებს ჰგვანან. მარსის ქანები დედამიწისა და მთვარის ქანების მსგავსია. პლანეტის მონითალო ფერი მასზე რკინის

ოქსიდების ჰიდრატების არსებობით აიხსნება. იშვიათად, მარსზე მძლავრი მტვრის ქარიშხლებია. მარსის მაგნიტური ველი დედამიწის მაგნიტურ ველზე გაცილებით სუსტია.

მარსს ჰყავს ორი ბუნებრივი თანამგზავრი – ფობოსი (სურ. 3.34) და დეიმოსი (სურ. 3.35).



სურ. 3.34



სურ. 3.35

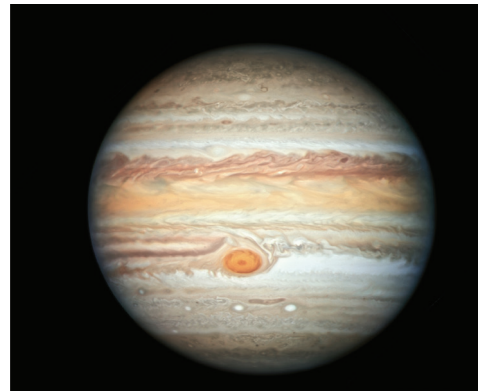
იუპიტერი – პლანეტა გიგანტებიდან ყველაზე დიდი (სურ.3.36). მისი მასა დაახლოებით 2,5-ჯერ მეტია მზის სისტემის სხვა პლანეტების მასათა ჯამზე. იუპიტერი წარმოადგენს ძლიერი ატმოსფეროს მქონე აირად სხეულს, რომელიც ძირითადად წყალბადისა და ჰელიუმისაგან შედგება, რაც ამ ჯგუფის ყველა პლანეტისათვის არის დამახასიათებელი. პლანეტის საშუალო სიმკვრივე $1,33 \cdot 10^3$ კგ/მ³-ია. საშუალო სიმკვრივით, წყალბადისა და ჰელიუმის დიდი რაოდენობით იუპიტერი ჰგავს ვარსკვლავს. დედამიწის ჯგუფის პლანეტებისაგან განსხვავებით, პლანეტა-გიგანტებს არ აქვს მყარი ზედაპირი. ის, რასაც ჩვენ ვაკვირდებით, ატმოსფეროში მცურავი ღრუბლების ზედა ნაწილებია. პლანეტა-გიგანტების ჩქარი ბრუნვისა და ძლიერი ქარების გამო, ღრუბლები იჭიმება ზოლებად, რომლებიც ეკვატორის პარალელურია. იუპიტერის ეკვატორული დიამეტრი 142 980 კმ-ია, საკუთარი ღერძის გარშემო ბრუნვის პერიოდი კი 9,92 სთ. მისი ღრუბლების შეფერილობას ამიაკის შენაერთების მინარევები, მეთანი და სხვა რთული შენაერთები განსაზღვრავს.

ეკვატორულ ზონაში (+9°-დან –9°-მდე) აირის დინება მიმართულია მკაცრად დასავლეთიდან აღმოსავლეთისაკენ. აირის მასების მოძრაობის სიჩქარე 180 მ/წმ-ს აღწევს. +20° და -20° განედების მახლობლად ნივთიერება სანინალმდეგო მხარეს, აღმოსავლეთიდან დასავლეთით, დაახლოებით 50 მ/წმ სიჩქარით მოძრაობს.

იუპიტერისათვის, ისევე როგორც სხვა პლანეტა-გიგანტებისათვის, დამახასიათებელია ღია და მუქი ოვალური ლაქები. მათგან ყველაზე ცნობილია დიდი წითელი ლაქა, რომელიც სამი საუკუნეა დაიმზირება. ეს ლაქა პლანეტაზე უდიდესი და ძალიან მდგრადი ქარიშხლის გამოსახულებაა.

იუპიტერის ატმოსფეროს სიღრმეში 1500 კმ-ზე იმყოფება თხევადი წყალბადის ფენა. შემდეგ ატმოსფერო გადადის განსაკუთრებულ აირად-თხევად მდგომარეობაში.

პლანეტის ცენტრიდან 0,77 რადიუსის დონეზე იწყება შრე, სადაც წყალბადი ლითონის თვისებებს იძენს. აქ ის იმდენად ძლიერად არის შეკუმშული ($4 \cdot 10^{12}$ პა), რომ ელექტრონები ტოვებს ატომებს და თავისუფლად გადაადგილდება. ეს აჩენს იუპიტერის მაგნიტურ ველს, რომლის ინდუქცია, ღრუბლების დონეზე, დედამიწის მაგნიტური ველის ინდუქციას 12-ჯერ აღემატება.



სურ. 3.36

იუპიტერის ცენტრში იმყოფება მყარი ბირთვი, რომელიც შედგება სილიციუმის ოქსიდებისაგან, მაგნიუმისა და რკინისაგან მინარევებით. შიდა ბირთვის რადიუსი დაახლოებით 25 ათასი კმ-ია, მის ცენტრში ტემპერატურა 23 000 K-ის ტოლია.

მზიდან იუპიტერის საშუალო დაშორება 778,5 მილიონი კილომეტრის ტოლია. პლანეტა მზის გარშემო ერთ ბრუნს 11,86 დედამიწის წელიწადში ასრულებს, მისი მასა 318-ჯერ მეტია დედამიწის მასაზე.

1979 წელს კოსმოსურმა აპარატებმა „ვოიაჯერ-1“-მა და „ვოიაჯერ-2“-მა აღმოაჩინა იუპიტერის რგოლები, რომლებიც შედგება მტვრის ძალიან წვრილი ნაწილაკებისაგან.

რგოლების გარდა იუპიტერს ჰყავს ბუნებრივი თანამგზავრები. 2023 წლის თებერვლისათვის ცნობილი იყო მისი 92 თანამგზავრი, მათგან ოთხი ყველაზე დიდი, ჯერ კიდევ გალილეო გალილეიმ აღმოაჩინა: იო, ევროპა, ჰანიმელი და კალისტო (სურ. 3.37).



სურ. 3.37

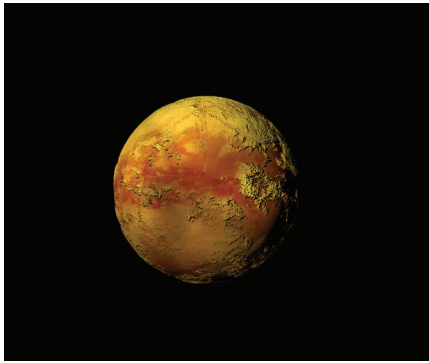
სატურნი – სიდიდით მეორე პლანეტა-გიგანტი, რომელიც გარშემორტყმულია რგოლებით (სურ. 3.38). პლანეტის დისკო პოლუსებთან საგრძნობლადაა შებრტყელებული. ეს იმიტაა გამოწვეული, რომ სატურნს მზის სისტემის პლანეტებს შორის ყველაზე დაბალი სიმკვრივე აქვს – საშუალო სიმკვრივე $0,69 \cdot 10^3$ კგ/მ³ -ის ტოლია.



სურ. 3.38

სატურნის რგოლები შემჩნეულ იქნა გალილეო გალილეს მიერ 1610 წელს. სპექტრულმა კვლევებმა აჩვენა, რომ რგოლები არ არის მონოლითური, ისინი ცალკეული მცირე სხეულებისაგან შედგება. „ვოიაჯერ-2“-ის მიერ გამოგზავნილმა ფოტოებმა აჩვენა, რომ რგოლების სისტემას ქმნის ათასობით ვიწრო რგოლი. თითოეული მათგანი შედგება უამრავი ყინულის ნამსხვრევისა (მათი ზომები მტვრის ნაწილაკების ზომიდან რამოდენიმე მეტრამდე) და სხვადასხვა მინერალისაგან. რგოლების სისქე 2 კმ-ს არ აღემატება.

რგოლების სიბრტყე მდებარეობს სატურნის ეკვატორულ სიბრტყეში, რომელიც ეკლიპტიკის



სურ. 3.39

სიბრტყესთან $26^{\circ}45'$ კუთხეს ადგენს. რგოლების საერთო მასა პლანეტის მასის $3 \cdot 10^{-8}$ ნაწილს შედგენს. მათი გარეთა დიამეტრი 272 000 კმ-ია, შიდა დიამეტრი კი – 144 ათასი კმ.

სატურნის საშუალო დაშორება მზიდან 1433 მილიონი კმ-ია, მზის გარშემო ბრუნვის პერიოდი 29,46 დედამიწის წელიწადია, საკუთარი ღერძის გარშემო ბრუნვის პერიოდი 10,57 სთ-ია, ეკვატორული დიამეტრი – 120 536 კმ. პლანეტის მასა დედამიწის მასაზე 95,2-ჯერ მეტია.

იუპიტერის მსგავსად, სატურნშიც არის შრე, რომელიც შედგება ლითონის თვისებების მქონე წყალბადისაგან, რაც მის მაგნიტურ ველს ქმნის. პლა-

ნეტის მაგნიტური ველის ინდუქცია თითქმის დედამიწის მაგნიტური ველის ინდუქციის ტოლია.

აღმოჩენილი თანამგზავრების რაოდენობის მიხედვით მზის სისტემაში სატურნს პირველი ადგილი უჭირავს – 2023 წლისათვის ცნობილია მისი 146 თანამგზავრი. მათგან ყველაზე დიდია ტიტანი (სურ. 3.39).

ურანი – სიდიდით მესამე პლანეტა-გიგანტი. მას მომწვანო-მოცისფრო შეფერილობა აქვს (სურ. 3.40), რაც გამოწვეულია ატმოსფეროს შემადგენლობითა და ტემპერატურით: 217°C ტემპერატურაზე ურანის წყალბად-ჰელიუმის ატმოსფეროში წარმოიქმნება მეთანის ნისლი, რომელიც კარგად შთანთქავს ნითელ სხივებს და ირეკლავს ცისფერსა და მწვანეს.



სურ. 3.40

1977 წელს აღმოჩენილ იქნა ურანის რგოლები, რაც დასაბუთდა 1986 წელს „ვოიაჯერ-2“-ის მიერ გადაღებული ფოტოსურათებით. ურანი გარშემორტყმულია თერთმეტი რგოლით, რომლებიც განლაგებულია ეკვატორულ სიბრტყეში პლანეტის ცენტრიდან 42-დან 51,4 ათას კმ-მდე. ურანის ეკვატორული დიამეტრია 51120 კმ. რგოლების ტიპიური სიგანე 1-დან 8 კმ-მდეა, მხოლოდ ყველაზე დიდი რგოლისა იცვლება 22-დან 93 კმ-მდე. რგოლების სისქე 1 კმ-ს არ აღემატება. ისინი შედგება წვრილი მტვრისაგან და მცირე ზომის მყარი, მუქი ნაწილაკებისაგან.

ურანის მანტია გაყინული წყლის, მეთანისა და ამიაკისაგან შედგება, მის ქვეშ კი ქვის ბირთვია. ურანის მასა დედამიწის მასას 14,5-ჯერ აღემატება, საშუალო სიმკვრივე კი $1,27 \cdot 10^3$ კგ/მ³-ის ტოლია.

პლანეტის საშუალო დაშორება მზიდან 2877 მილიონი კილომეტრია. მზის გარშემო მიმოქცევის პერიოდი 84 დედამიწის წელიწადია, ხოლო საკუთარი ღერძის გარშემო ბრუნვის პერიოდი – 17,24 სთ.

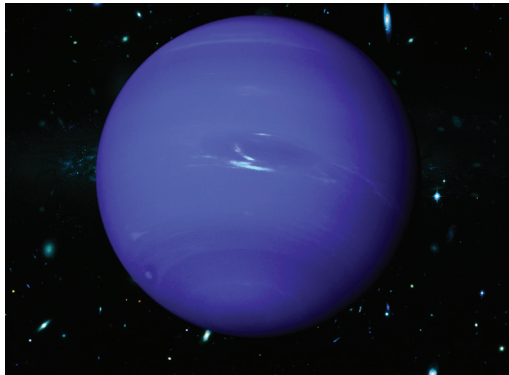


სურ. 3.41

ურანის მაგნიტურ ველს ერთი საინტერესო თავისებურება აქვს. პლანეტის ბრუნვის ღერძი თითქმის ეკლიპტიკის სიბრტყეშია. შესაბამისად, მაგნიტური ველის ძალწირები ურანის ბრუნვის გამო, პლანეტის უკან, გრძელ ხრახნშია დაგრეხილი. ურანის მაგნიტური ველის ინდუქცია დაახლოებით დედამიწის მაგნიტური ველის ინდუქციის ტოლია.

ურანს ჰყავს ბუნებრივი თანამგზავრები. 2024 წლის მდგომარეობით აღმოჩენილია 28 თანამგზავრი, რომელთა შორის ყველაზე დიდებია: პაკი, მირანდა, არიელი, უმბრიელი, ტიტანია და ობერონი (სურ. 3.41).

ნეპტუნი – მზის სისტემის ყველაზე პატარა გიგანტი-პლანეტა (სურ. 3.42). ის მზის სისტემის თითქმის კიდეში მდებარეობს – საშუალო დაშორება მზიდან 4503 მილიონი კილომეტრია. მიუხედავად იმისა, რომ პლანეტა მზისგან ძალიან ცოტა ენერგიას იღებს, ის ძალიან აქტიურია. სურათებზე კარგად ჩანს ღრუბლები, რომლებიც ჩნდება და ქრება ნეპტუნის ატმოსფეროში. ამ პლანეტის გამორჩეული დეტალია, დიდი მუქი ლაქა, რომელიც იუპიტერის დიდ წითელ ლაქას ჰგავს. ნეპტუნის ატმოსფეროში ქარის სიჩქარე რეკორდულ, 600 მ/წმ მნიშვნელობას აღწევს.



სურ. 3.42

ნეპტუნის წელიწადი 164,8 დედამიწის წელიწადს გრძელდება. საკუთარი ღერძის გარშემო პლანეტის ბრუნვის პერიოდი 15,97 საათია. ნეპტუნის მასა 17,1-ჯერ აღემატება დედამიწის მასას, ეკვატორული დიამეტრი 49528 კმ-ია, საშუალო სიმკვრივე – $1,64 \cdot 10^3$ კგ/მ³, ღრუბლების ზედა ფენების ტემპერატურა 200° C-ია.

წყალბადის, ჰელიუმისა და მეთანისაგან შემდგარი ატმოსფეროს ქვევით არის გაყინული

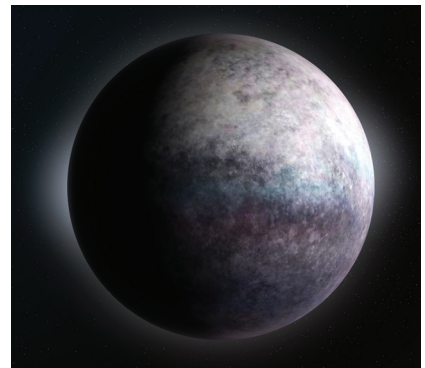
წყლის, ამიაკისა და მეთანის ფხვიერი ფენა. პლანეტას მყარი ქვის ბირთვი აქვს.

1984 წელს გამოთქმული იქნა ვარაუდი ნეპტუნის რგოლების არსებობის შესახებ. 1989 წელს „ვოიაჯერ-2“-ის მიერ გამოგზავნილ ფოტოსურათებზე გამოჩნდა სამი შეკრული და ერთი არასრული რგოლი. რგოლები მდებარეობს პლანეტის ცენტრიდან 1,7-დან 2,5-მდე რადიუსის დაშორებაზე, რგოლების სიგანე 15-დან 5000 კმ-მდეა. ისინი შედგება სილიკატის მცირე ნაწილაკებისაგან, რომლებიც მზის სინათლის 6%-ს აირეკლავს.

ნეპტუნის მაგნიტური ველის ინდუქცია დედამიწისაზე 3-ჯერ ნაკლებია.

2024 წლის მდგომარეობით ნეპტუნს ჰყავს 16 ბუნებრივი თანამგზავრი, რომელთაგან ყველაზე დიდია ტრიტონი (სურ. 3.43).

მზის სისტემის შემადგენლობაში მყოფ სხვა სხეულებზე შემდეგ პარაგრაფში ვისაუბრებთ.



სურ. 3.43

დასკვნები:

- მზის სისტემა არის პლანეტარული სისტემა გალაქტიკა ირმის ნახტომში, რომელიც გალაქტიკის ცენტრიდან დაახლოებით 28 ათას სინათლის წელიწად მანძილზე, ერთ-ერთ სპირალურ მკლავ ორიონში მდებარეობს და გალაქტიკის ცენტრის გარშემო 250 კმ/წმ სიჩქარით ბრუნავს;
- მზის სისტემის ცენტრში მდებარეობს G2V ტიპის ვარსკვლავი – მზე;
- დედამიწის ჯგუფის პლანეტებია: მერკური, ვენერა, დედამიწა და მარსი;
- გიგანტი-პლანეტებია: იუპიტერი, სატურნი, ურანი და ნეპტუნი.

§ 3.14 ჯუჯა პლანეტები და მზის სისტემის მცირე სხეულები

მას შემდეგ, რაც 1846 წელს აღმოაჩინეს პლანეტა ნეპტუნი, ასტრონომებმა დაიწყეს „ტრანსნეპტუნური“ პლანეტების ძებნა. მხოლოდ 1930 წელს, ნეპტუნის ორბიტის



სურ. 3.44

გარეთ, მზიდან დაახლოებით 40 ა.ე. მანძილზე აღმოჩენილ იქნა **პლუტონი** (სურ. 3.44). მასითა და ზომებით ის მთვარეზე მცირეა, ხოლო სიმკვრივით ორივე ჯგუფის პლანეტებისაგან განსხვავდება. 1978 წელს აღმოჩენილ იქნა პლუტონის საკმაოდ დიდი თანამგზავრი ქარონი. იმავე წლებში ასევე აღმოაჩინეს მრავალი მცირე სხეული იუპიტერისა და ნეპტუნის ორბიტებს შორის. შემდეგ, 1992 წელს ნეპტუნის ორბიტის გარეთ აღმოჩენილ იქნა ობიექტი, რომლის დიამეტრი მიახლოებით 280 კმ იყო. დღეისათვის

ცნობილია დაახლოებით 1500 ობიექტი, რომელიც მზის სისტემის მოცემულ ნაწილში მდებარეობს. მათი უმრავლესობის დიამეტრი 100-დან 1000 კმ-მდე მერყეობს. ზოგიერთ მათგანს აქვს თანამგზავრი. ამით დადასტურდა ამერიკელი ასტრონომის ჯ. კოიპერის ვარაუდი ნეპტუნის ორბიტის გარეთ მზიდან 35 – 50 ა.ე. მანძილზე მცირე ობიექტების სარტყელის არსებობის შესახებ. მას **კოიპერის სარტყელი** ეწოდა.

2006 წლის 24 აგვისტოს, საერთაშორისო ასტრონომიული კავშირის XXVI ასამბლეაზე პლუტონს ჩამოერთვა პლანეტის სტატუსი და შემოღებულ იქნა მზის სისტემის ობიექტების ახალი კლასი – **ჯუჯა პლანეტები**. ჯუჯა პლანეტა უნდა აკმაყოფილებდეს შემდეგ პირობებს:

- ბრუნავდეს მზის გარშემო;
- არ უნდა იყოს პლანეტის თანამგზავრი;
- უნდა ჰქონდეს საკმარისი მასა იმისთვის, რომ იმყოფებოდეს ჰიდროსტატიკური წონასწორობის მდგომარეობაში (ჰქონდეს სფერულთან მიახლოებული ფორმა);
- არ ჰქონდეს იმხელა მასა, რომ მისი ორბიტის მახლობლად მდებარე სივრცის მცირე სხეულებისაგან გასუფთავება შეეძლოს.

ამ კრიტერიუმებით პლუტონი ჯუჯა პლანეტებს მიაკუთვნეს. ამ კლასის ობიექტებიდან ყველაზე დიდია ერიდა (დიამეტრი 2400 კმ). ჯუჯა პლანეტები ჰაუმეა და მაკემაკე ასევე მიეკუთვნება კოიპერის სარტყელს. ცერერა მდებარეობს მარსისა და იუპიტერის ორბიტებს შორის (სურ. 3.45).

შესაძლებელია, რომ კოიპერის სარტყელი არის იმ პროტოპლანეტური ღრუბლის ნარჩენი, რომლისგანაც მოხდა მზის სისტემის ფორმირება.

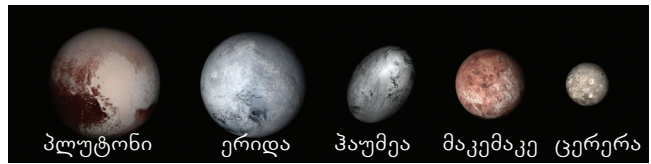
1801 წლის შემდეგ მარსისა და იუპიტერის ორბიტებს შორის აღმოჩენილ იქნა მრავალი **ასტეროიდი** – მზის სისტემის მცირე სხეული, რომელსაც აქვს არასწორი გეომეტრიული ფორმა და ჰელიოცენტრულ ორბიტაზე იმყოფება. XX საუკუნის დასაწყისისათვის აღმოჩენილ იქნა დაახლოებით 500 ასტეროიდი, რომელთა ზომა რამდენიმე ათეული მეტრი და მეტია. 2019 წლისათვის გადანომრილი ასტეროიდების კატალოგი 524 ათასზე მეტ დასახელებას შეიცავდა. მთლიანად აღმოჩენილია 900 ათასი ობიექტი, რომელთაგან საკუთარი სახელი მხოლოდ 4% აქვს მინიჭებული.



ჯერარდ კოიპერი
(1905-1973)

ასტეროიდების მნიშვნელოვანი ნაწილი (98%) მოძრაობს ეკლიპტიკასთან მახლობელ სიბრყევებში მცირე ექსცენტრისიტეტის მქონე ორბიტებზე და მდებარეობს მარსისა და იუპიტერის ორბიტებს შორის მზიდან $2,2 \div 4,5$ ა.ე. მანძილზე. მზის გარშემო ასტეროიდები მოძრაობს იმავე მიმართულებით, როგორც დიდი პლანეტები. მარსსა და იუპიტერს შორის სივრცის ნაწილს, სადაც ასტეროიდების უდიდესი ნაწილი მდებარეობს, **ასტეროიდების მთავარი სარტყელი** ეწოდება.

ჯუჯა პლანეტები



სურ. 3.45

ერთ-ერთი ჰიპოთეზის მიხედვით, ასტეროიდები მატერიის იმ ნაწილს წარმოადგენს, რომლისგანაც პლანეტები წარმოიქმნა. მათგან პლანეტის ფორმირება ოდესღაც შეჩერდა სწრაფად მბრუნავი პლანეტა-გიგანტის, იუპიტერის მიერ გამოწვეული შემფოთების გამო. პლანეტა-გიგანტების გრავიტაცია იწვევს ასტეროიდების ორბიტების შეცვლას, ისინი ეჯახება ერთმანეთს, პლანეტებს და მათ თანამგზავრებს. სხვა ვერსიით ასტეროიდები წარმოიშვა მარსსა და იუპიტერს შორის მდებარე ჰიპოტეტური პლანეტის განადგურების შედეგად.

ასტეროიდების დანარჩენი ნაწილი მდებარეობს ნეპტუნის ორბიტის გარეთ კოიპერის სარტყელში.

ასტეროიდების ზედაპირს პირველი ფოტოსურათები პლანეტათაშორისმა კოსმოსურმა აპარატმა „გალილეო“-მ გადაუღო. იუპიტერისაკენ ფრენისას მან აღბეჭდა ორი ასტეროიდი, გასპრა (სურ. 3.46) და იდა თავისი თანამგზავრით (სურ. 3.47).

ასტეროიდზე პირველი დაჯდომა განახორციელა კოსმოსურმა აპარატმა „ნეარ-12“-მა. 2001 წელს ის დაეშვა ასტეროიდ ეროსის (სურ. 3.48) ზედაპირზე, რომელიც აღმოჩნდა ქვის არასწორი ფორმის სხეული, ზომებით $33 \times 33 \times 13$ კმ, სიმკვრივე კი – $2,7 \cdot 10^3$ კგ/მ³.



სურ. 3.46



სურ. 3.47



სურ. 3.48

ვარაუდობენ, რომ მანძილზე, რომელიც არ აღემატება 100 ა.ე., მზის სისტემაში იმყოფება 1 მილიონი მცირე სხეული, რომელთა ზომა 1 კმ-ის ფარგლებშია. პლანეტა-გიგანტების მხრიდან მოქმედი გრავიტაციული ძალების გავლენით ასტეროიდების ორბიტების ექსცენტრისიტეტი იზრდება 0,8-მდე. ამის გამო ზოგიერთი ასტეროიდი აღწევს მარსის, დედამიწის და მერკურის ორბიტების შიგნით. მეცნიერთა შეფასებით, ასტეროიდების რაოდენობა, რომელთა დიამეტრი აღემატება 1 კმ-ს და კვეთს დედამიწის ორბიტას, დაახლოებით 6500-ია. ასეთი ციური სხეულები შესაძლებელია დედამიწას 20 მილიონ წელიწადში ერთხელ დაეჯახონ. არსებობს 100 მ და მეტი განივკვეთის მქონე არანაკლებ 200 ათასი ასტეროიდი, რომელთა ორბიტები დედამიწის ორბიტას კვეთს. ასეთ სხეულთან დედამიწის დაჯახების ალბათობა დაახლოებით ერთია 5 ათას წელიწადში. ამ დაჯახების შედეგად დედამიწაზე დაახლოებით 1 კმ დიამეტრის მქონე კრატერი წარმოიქმნება.

2008 წლის 29 იანვარს დედამიწას სახიფათო მანძილზე (600 ათას კმ) ჩაუფრინა 0,25 კმ ზომის ასტეროიდი. ზოგიერთ ქვეყანაში შექმნილია სპეციალური სამსახური იმ ასტეროიდების აღმოსაჩენად, რომლებიც დედამიწისათვის საშიშროებას წარმოად-

გენს. ხიფათის შემთხვევაში მიღებულ იქნება ზომები მათი ორბიტის შესაცვლელად ან გასანადგურებლად.

კომეტების, ანუ „კუდიანი ვარსკვლავების“ შესახებ, ოდითგანვე იყო ცნობილი. კომეტების შესახებ პირველი ჩანაწერები გვხვდება ჩინეთში და ჩვენ წელთაღრიცხვამდე მესამე ათასწლეულით თარიღდება. კამკაშა კომეტები შედარებით იშვიათად, საშუალოდ 10–15 წელიწადში ერთი კომეტა ჩნდება ცის თაღზე, სუსტი ნათების კომეტები კი უფრო ხშირად – წელიწადში რამდენიმე კომეტა.

კომეტების უმრავლესობა შედის ჩვენ მზის სისტემაში. მზის მიზიდულობის გამო ისინი ბრუნავენ მის გარშემო გაჭიმულ ელიფსურ ორბიტებზე საკმაოდ დიდი ექსცენტრისიტეტით. ყველაზე ცნობილი კომეტა არის ჰალეის კომეტა (სურ. 3.49), რომელსაც ეს სახელი კომეტების პირველი შემსწავლელის, ედმონ ჰალეის პატივსაცემად ეწოდა. ჰალეის კომეტა მოძრაობს ძალიან გაჭიმულ ელიფსურ ორბიტაზე ($e=0.967$). ის უახლოვდება მზეს 0,59 ა.ე. მანძილზე, ხოლო მაქსიმალური დაშორებაა 35,3 ა.ე.,



სურ. 3.49



სურ. 3.50

რაც ნეპტუნის ორბიტის გარეთაა. ბოლოს ეს კომეტა გამოჩნდა 1986 წელს. მზესთან ახლოს ჩავლის მომენტში მის შესასწავლად განხორციელდა ოთხი კოსმოსური აპარატის გაშვება. ჰალეის კომეტის ბირთვის ფოტოგრაფირება გახორციელდა 8000 კმ მანძილიდან. სურათებმა აჩვენა, რომ მას აქვს უსწორმასწორო ფორმა და მისი ზომებია 16X18X8 კმ (სურ. 3.50). ჰალეის კომეტის შემდეგი გამოჩენა მოხდება 2062 წელს.

მზიდან დიდ მანძილზე კომეტა წარმოადგენს მყარი ნივთიერების ლოდს, რომელიც შედგება ყინულის, ჩაყინული მეტეორული ნივთიერების, გამყარებული აირისა და მტვრისაგან. მზესთან მიახლოებისას ყინული იწყებს დნობას და აორთქლებას. ამის გამო, კომეტის ბირთვის გარშემო წარმოიქმნება ნაგრძელებული გარსი, რომელსაც **კომა** ეწოდება. კომას ზომები არ აღემატება ათეულ კილომეტრს. მზის ქარისა და სინათლის წნევის მოქმედებით კომას აირების ნაწილი გაიტყორცნება მზის საწინააღმდეგო მიმართულებით. იქმნება კუდი, რომელიც შეიძლება ძალიან დიდ მანძილზე გავრცელდეს. კომეტის მასა ფასდება 10^{15} – 10^{18} კგ-ით.

საბოლოოდ კომეტა კარგავს ნივთიერებას და იშლება ნაწილებად.

მეტეორები შეიძლება დავინახოთ პრაქტიკულად ნებისმიერ უღრუბლო ღამეს. მისი გამოჩენა გამოწვეულია მეტეორული სხეულებით, ანუ მეტეოროიდებით – პატარა კენჭებით ან ქვიშის ნაწილაკების ზომის სხეულებით, რომლებიც დედამიწის ატმოსფეროში ათეული კილომეტრი წამში სიჩქარით შემოფრინდება (სურ. 3.51). აფეთქებული მეტეორის სპექტრში დაიმზირება სილიციუმის, კალციუმის, რკინისა და სხვა ლითონების შესაბამისი ხაზები. ატმოსფეროში დამუხრუჭებისას მეტეოროიდები ხურდება, ორთქლდება და პრაქტიკულად მთლიანად იშლება. ისინი დედამიწის ზედაპირს ვეღარ აღწევს. ატმოსფეროში მოძრაობისას მეტეოროიდები ჰაერის მოლეკუ-

ლების იონიზაციას იწვევს. ამის გამო მეტეორის მნათი კვალი ირეკლავს რადიოტალღებს, რაც საშუალებას იძლევა რადიოლოკატორებით მეტეორებს დავაკვირდეთ არა მარტო ღამით, არამედ დღისითაც.

მეტეორი, რომელიც ეწევა დედამიწას, ატმოსფეროში არანაკლებ 11 კმ/წმ სიჩქარით შემოფრინდება, შემხვედრი მიმართულებით მოძრავი კი – 72 კმ/წმ-მდე სიჩქარით. მათი მასა მილიგრამებიდან რამდენიმე გრამამდეა. ამ სხეულების დაშლის შემდეგ დარჩენილი მტვერი კი ნელ-ნელა ილექება დედამიწის ზედაპირზე.

მეტეორის ნათება იწყება დედამიწის ზედაპირიდან 120 კმ სიმაღლეზე და ქრება 60-80 კმ სიმაღლეზე.



სურ. 3.51



სურ. 3.52

მეტეორები, რომლებიც ჩნდებიან წელიწადის გარკვეულ დროს და ერთი საათის განმავლობაში ათეულობით „ეცემა“, მიეკუთვნება **მეტეორულ ნაკადებს**. ის მაშინ დაიშორება, როდესაც დედამიწა „მეტეორული ხროვის“ ორბიტას გადაკვეთს. მეტეორულ ნაკადზე დაკვირვებისას ჩანს, რომ მეტეორები მოფრინავს ცის თალის ერთი უბნიდან, რომელსაც **რადიანტი** ეწოდება (სურ. 3.52).

მეტეორულ ნაკადს იმ თანავარსკვლავედის სახელი ჰქვია, რომელიც ჩვენგან რადიანტის მიმართულებით ჩანს. მაგალითად, დრაკონიდები, ორიონიდები და სხვა.

მეტეორულ ნაკადებს შორის გვხვდება ისეთები, რომელთა ინტენსივობა წლიდან წლამდე არ იცვლება. ეს ნიშნავს, რომ მეტეორული ნაწილაკები ხროვის ორბიტის გასწვრივ თითქმის თანაბრადაა განაწილებული. ყველაზე ცნობილ ასეთ ნაკადს წარმოადგენს „პერსეიდების ნაკადი“, რომელიც ყოველწლიურად აგვისტოში დაიშორება. ამ ხროვის ორბიტა სვიფტ-ტატლის კომეტის ორბიტას ემთხვევა. არის მეტეორული ნაკადები, რომელთა ინტენსივობა პერიოდულად იცვლება. ასეთ შემთხვევაში მეტეორული ნაწილაკები ხროვის ორბიტის გასწვრივ არათანაბრადაა განაწილებული. ასეთია „ლეონიდების ნაკადი“, რომლის რადიანტი ლომის თანავარსკვლავედშია. ამ ნაკადის ორბიტა ტემპელ-ტატლის კომეტის ორბიტას ემთხვევა. „ლეონიდების ნაკადის“ ინტენსივობა იზრდება მაშინ, როდესაც მისი წარმომშობი კომეტა მზეს უახლოვდება, რაც 33 წელიწადში ერთხელ ხდება.

ამრიგად, ზუსტად დადგენილია კავშირი მეტეორულ ნაკადებსა და კომეტებს შორის – კომეტა დაშლისას წარმოშობს მეტეორულ ნაკადს.

როდესაც კოსმოსური სივრციდან დედამიწის ატმოსფეროში მსხვილი სხეული ხვდება, დაიშორება მოვლენა, რომელსაც **ბოლიდი** ეწოდება. ბოლიდს გააჩნია ცეცხლოვანი ბირთვის სახე და გადაფრენის შემდეგ ტოვებს კვალს, რომელიც რამდენიმე წამის, ან იშვიათ შემთხვევაში რამდენიმე წუთის განმავლობაში რჩება.

ზოგიერთ შემთხვევაში სხეული, რომელმაც გამოიწვია ბოლიდის წარმოქმნა, ვერ ასწრებს ატმოსფეროში აორთქლებას და ეცემა დედამიწის ზედაპირს. ასეთ სხეულს **მეტეორიტი** ეწოდება.



სურ. 3.53

ქიმიური შემადგენლობით განასხვავებენ ქვის, რკინის და რკინაქვის მეტეორიტებს. დიდი მეტეორიტები დაცემის ადგილას წარმოქმნიან კრატერებს. ერთ-ერთი ასეთი ცნობილი კრატერია არიზონის მეტეორიტული კრატერი (აშშ) (სურ. 3.53). მისი დიამეტრი 1200 მ-ია, სიღრმე კი – 200 მ. მიიჩნევენ, რომ ეს კრატერი წარმოიქმნა 5000 წლის წინ. გამოთვლებმა აჩვენა, რომ ასეთი კრატერის წარმოქმნისათვის მეტეორიტული სხეულის მასა 100 ათას ტონაზე მეტი უნდა ყოფილიყო.

დასკვნები:

- ნეპტუნის ორბიტის გარეთ, მზიდან 35 – 50 ა.ე. მანძილზე არსებულ მცირე ობიექტების სარტყელს, კოიპერის სარტყელი ეწოდება;
- პლუტონი მზის სისტემის პლანეტად არაა მიჩნეული. ის ჯუჯა პლანეტებს მიეკუთვნება;
- ასტეროიდი მზის სისტემის მცირე სხეულია, რომელსაც აქვს არასწორი გეომეტრიული ფორმა და ჰელიოცენტრულ ორბიტაზე იმყოფება;
- მარსსა და იუპიტერს შორის სივრცის ნაწილს, სადაც ასტეროიდების უდიდესი ნაწილი მდებარეობს, ასტეროიდების მთავარი სარტყელი ეწოდება;
- მზიდან დიდ მანძილზე კომეტა წარმოადგენს მყარი ნივთიერების ლოდს, რომელიც შედგება ყინულის, ჩაყინული მეტეორული ნივთიერების, გამყარებული აირისა და მტვრისაგან. მზესთან მიახლოებისას კომეტის ბირთვის გარშემო წარმოიქმნება ნაგრძელებული გარსი, რომელსაც კომა ეწოდება;
- მეტეოროიდები პატარა კენჭები ან ქვიშის ნაწილაკების ზომის სხეულებია, რომლებიც დედამიწის ატმოსფეროში ათეული კილომეტრი წამში სიჩქარით შემოფრინდებიან.

მესამე თავის ამოცანები

1. ვარსკვლავის გარშემო ელიფსურ ორბიტაზე მოძრავი პლანეტის მაქსიმალური დაშორება ვარსკვლავის ცენტრიდან არის R , მინიმალური დაშორება კი $-r$. განსაზღვრეთ ორბიტის დიდი ნახევარღერძი.
2. ვარსკვლავის გარშემო ელიფსურ ორბიტაზე მოძრავი პლანეტის მაქსიმალური დაშორება ვარსკვლავის ცენტრიდან არის R , მინიმალური დაშორება კი $-r$. იპოვეთ ორბიტის მცირე ნახევარღერძი.
3. პლანეტა ვარსკვლავის გარშემო მოძრაობს ელიფსურ ორბიტაზე, რომლის დიდი ნახევარღერძია a , ხოლო მცირე ნახევარღერძია b . იპოვეთ ელიფსის ფოკალური მანძილი.
4. ჩვენი გალაქტიკის დიამეტრი დაახლოებით $3 \cdot 10^4$ პს-ია. განსაზღვრეთ ეს მანძილი სინათლის წელიწადებში.
5. ორიონის ნისლეული ჩვენგან დაახლოებით 1344 სინათლის წელიწადითაა დაშორებული. გამოთვალეთ ეს მანძილი პარსეკებში და ასტრონომიულ ერთეულებში.
6. უახლოესი ვარსკვლავი ჩვენგან დაახლოებით $4,02 \cdot 10^{13}$ კმ-ით არის დაშორებული. გამოთვალეთ რა დროში მოაღწევს სინათლის სხივი ამ ვარსკვლავიდან დედამიწამდე.
7. იპოვეთ იმ ვარსკვლავის პარალაქსური კუთხის სინუსი, რომელიც დაიმზირება ეკლიპტიკის მახლობლად, თუ ცნობილია, რომ მანძილი მზიდან ვარსკვლავამდე დაახლოებით 7,9 სინათლის წელიწადია.
8. გამოთვალეთ მზიდან 8,6 სინათლის წელიწადით დაშორებული ვარსკვლავის პარალაქსური კუთხის ტანგენსი, რომელიც დაიმზირება ეკლიპტიკის პოლუსის მახლობლად.
9. რამდენჯერ მეტია პირველი სიდიდის ვარსკვლავის ხილული განათებულობა მეოთხე სიდიდის ვარსკვლავის ხილულ განათებულობაზე?
10. რამდენჯერ აღემატება მესამე სიდიდის ვარსკვლავის ხილული განათებულობა მეხუთე სიდიდის ვარსკვლავის ხილულ განათებულობას?
11. ვარსკვლავის გარშემო პლანეტა მოძრაობს ელიფსურ ორბიტაზე. პერიპელიუმი 8-ჯერ მცირეა აფელიუმიზე. რამდენჯერ განსხვავდება ვარსკვლავის გამოსხივების ინტენსივობა პლანეტის ამ ორ მდებარეობაში?
12. რამდენჯერ ნაკლები იქნებოდა მზის გამოსხივების ინტენსივობა დედამიწაზე, თუ ჩვენი პლანეტა იმოძრავებდა $3 \cdot 10^8$ კმ რადიუსის წრიულ ორბიტაზე?
13. როგორც ცნობილია, რაც მეტია ვარსკვლავის მასა, მით მეტია მისი ნათობა. განამტკიცეთ მსჯელობით ეს მოსაზრება.
14. როგორ შეიცვლება ვარსკვლავის ნათობა, თუ მისი მასა 2-ჯერ გაიზრდება?
15. ვარსკვლავის ნათობა გარკვეული დროის შემდეგ 3,375-ჯერ შემცირდა. განსაზღვრეთ რამდენჯერ შემცირებულა ვარსკვლავის მასა.
16. გამოთვალეთ რამდენჯერ აღემატება ვარსკვლავის ნათობა მზისას, თუ ის წამში $7,72 \cdot 10^{28}$ ჯ ენერგიას ასხივებს.
17. რისი ტოლია იმ ვარსკვლავის ნათობა, რომლის აბსოლუტური ვარსკვლავური სიდიდეა $M=3$.
18. როგორც ცნობილია მეორე კოსმოსური სიჩქარე დედამიწისათვის 11,2 კმ/წმ-ია. რა იქნება მეორე კოსმოსური სიჩქარე იმ ვარსკვლავისათვის, რომლის მასა დედამიწის მასას 10^6 -ჯერ, ხოლო რადიუსი დედამიწის რადიუსს 20-ჯერ აღემატება?
19. როგორ შეიცვლება ორმაგი ვარსკვლავის ბრუნვის პერიოდი სისტემის მასათა ცენტრის გარშემო, თუ ვარსკვლავებს შორის მანძილი გრავიტაციული მიზიდვის გამო შემცირდება? პასუხი განამტკიცეთ მსჯელობით.
20. გამოთვალეთ რა სიჩქარით გვმორდება ანდრომედას გალაქტიკა დროის მოცემული მომენტისათვის (მიიჩნეთ, რომ $H=68$ კმ/წმ · მგპს).

ზოგიერთი ნივთიერების სიმკვრივე

ნივთიერება	ρ , კგ/მ ³	ρ , გ/სმ ³	ნივთიერება	ρ , კგ/მ ³	ρ , გ/სმ ³
მყარი ნივთიერება, 20 °C (გარდა ყინულისა)					
ოსმიუმი	22 600	22,6	მარმარილო	2 700	2,7
ირიდიუმი	22 400	22,4	ფანჯრის მინა	2 500	2,5
პლატინა	21 500	21,5	ფაიფური	2 300	2,3
ოქრო	19 300	19,3	ბეტონი	2 300	2,3
ტყვია	11 300	11,3	სუფრის მარილი	2 200	2,2
ვერცხლი	10 500	10,5	აგური	1 800	1,8
სპილენძი	8 900	8,9	პოლიეთილენი	920	0,92
ფოლადი, რკინა	7 800	7,8	პარაფინი	900	0,9
კალა	7 300	7,3	ყინული	900	0,9
თუთია	7 100	7,1	მუხა (მშრალი)	700	0,7
თუჯი	7 000	7	ფიჭვი (მშრალი)	400	0,4
ალუმინი	2 700	2,7	კორპი	240	0,24
თხევადი ნივთიერება, 20 °C					
ვერცხლისწყალი	13 600	13,6	ნავთი	800	0,8
გოგირდმჟავა	1 800	1,8	სპირტი	800	0,8
გლიცერინი	1 200	1,2	ნავთობი	800	0,8
ზღვის წყალი	1 030	1,03	აცეტონი	790	0,79
წყალი	1 000	1	ბენზინი	710	0,71
მზესუმზირის ზეთი	930	0,93	თხევადი კალა 400 °C	6 800	6,8
მანქანის ზეთი	900	0,9	თხევადი ჟანგბადი -194 °C	860	0,86
აირადი ნივთიერება, 0 °C (ნორმალური პირობებისას)					
ქლორი	3,21	0,00321	ბუნებრივი აირი	0,8	0,0008
ჟანგბადი	1,43	0,00143	წყლის ორთქლი 100 °C	0,59	0,00059
ჰაერი	1,29	0,00129	ჰელიუმი	0,18	0,00018
აზოტი	1,25	0,00125	წყალბადი	0,09	0,00009

საგნობრივი საძიებელი

- აბსოლუტურად შავი სხეული 102
აბსოლუტური ვარსკვლავური სიდიდე 173
აბსოლუტური ნული 28
აბსოლუტური სკალა 28
აბსოლუტური ტემპერატურა 28
აბსოლუტური ტენიანობა 81
ადიაბატური პროცესი 60
ადრონები 162
ადრონული კოლაიდერი 162
ავოგადროს კანონი 9
ავოგადროს მუდმივა 11
აირადი გიგანტები 198
აირის უნივერსალური მუდმივა 36
ამრეკლი ნისლეული 188
ანდრომედას ნისლეული 190
ანტინეიტრინო 140
აორთქლება 76
ასტეროიდი 205
ასტრონომიული ერთეული 168
ასტროფიზიკა 163
ატომი 119
აქტიური ზონა 150
აღზნებული მდგომარეობა 122
ახალი ვარსკვლავი 183
ბარიონი 161
ბეკერელი 145
ბირთვის ბმის კუთრი ენერგია 135
ბირთვული რეაქტორი 153
ბირთვული რეაქციები 130
ბირთვული რეაქციის მასის დეფექტი 131
ბირთვული ძალები 129
ბმის ენერგია 135
ბნელი ენერგია 196
ბნელი მატერია 196
ბოილ-მარიოტის კანონი 40
ბოლიდი 188
ბოლცმანის მუდმივა 28
ბორის პოსტულატები 122
ბროუნის მოძრაობა 14
ბუნებრივი რადიოაქტივობა 139
გადახურებული წყალი 79
გალაქტიკა 188
გამოსვლის მუშაობა 111
გაფანტული ნისლეული 188
გაცივების კოეფიციენტი 74
განოვა 72
გეი-ლუსაკის კანონი 41
გიგანტი ვარსკვლავები 172
გრავიტაციული კოლაფსი 181
გრავიტაციული ტალღები 186
დასველების კუთხე 91
დედამინა 199
დედამინის ჯგუფის პლანეტები 198
დეიმოსი 201
დიდი აფეთქება 194
დიზელის ძრავა 72
დინამიკური წონასწორობა 76
დიფუზია 15
დუღილი 79
ეგზოენერგეტიკული რეაქცია 131
ევოლუციის ინფლაციური სტადია 197
ელემენტარული ნაწილაკები 161
ელექტრონი 119
ელექტრონის ბმის ენერგია 124
ელიფსური გალაქტიკა 191
ენდოენერგეტიკული რეაქცია 131
ენერგეტიკული გამოსავალი 131
ვარსკვლავის ნათობა 171
ვარსკვლავური დისკო 189
ვარსკვლავური მკლავი 189
ვარსკვლავური სიბრტყე 189
ვენერა 199
ვინის წანაცვლების კანონი 104
ზეახალი ვარსკვლავი 183
ზეგიგანტი ვარსკვლავები 172
ზედაპირული ენერგია 88
თბოგამომყოფი ელემენტი 153
თბოტუმბო 74
თეთრი ჯუჯა 181
თერმოდინამიკა 46
თერმოდინამიკის მეორე კანონი 65
თერმოდინამიკის პირველი კანონი 56
თერმოდინამიკური სისტემა 46
თმიანი ჰიგრომეტრი 83
იდეალური აირი 19
იდეალური აირის მდგომარეობის განტოლება 36
იზობარა 41
იზობარული პროცესი 41
იზოთერმა 40
იზოთერმული პროცესი 40
იზოტოპი 128
იზოტროპული ქრონოლოგია 145
იზოქორა 42
იზოქორული კანონი 42
ინტეგრალური ნათება 103

ირეგულარული გალაქტიკა 194
ირმის ნახტომი 191
იუპიტერი 204
კაპილარული მოვლენები 92
კარნოს ციკლი 68
კვაზარი 195
კვანტი 105
კვარკები 163
კიური 146
კლაპეირონის განტოლება 38
კომეტა 210
კონდენსაცია 77
კონდიციონერი 75
კრისტალური მესერი 18
კრიტიკული მასა 151
კრიტიკული ტემპერატურა 77
ლაპლასის წნევა 94
ლექტონი 162
ლექტონური რიცხვი 162
მარეგულირებელი ღეროები 154
მართვადი თერმობირთვული სინთეზი 157
მართვადი ჯაჭვური რეაქცია 154
მარსი 203
მასის ატომური ერთეული 11
მასური რიცხვი 128
მაცივარი 68
მეზონი 162
მენდელეევ-კლაპეირონის განტოლება 38
მენისკი 93
მერკური 201
მეტეორი 210
მეტეორიტი 211
მეტეორული ნაკადი 211
მთავარი მიმდევრობა 180
მთვარე 203
მოვლენათა ჰორიზონტი 189
მოლეკულურ-კინეტიკური თეორია 10
მოლეკულურ-კინეტიკური თეორიის ძირითადი განტოლება 23
მოლი 12
მოლური მასა 12
მუშა სვლა 72
მუშა სხეული 68
მუხტის რიცხვი 128
ნამის წერტილი 83
ნახევრად დაშლის პერიოდი 145
ნაჯერი ორთქლი 77
ნაჯერობის დენი 107
ნეიტრინო 141
ნეიტრონების გამრავლების კოეფიციენტი 151
ნეიტრონების თაობა 151
ნეიტრონი 128
ნეიტრონული ვარსკვლავი 184
ნეპტუნი 207
ნიუტონის სითხეები 97
ნუკლიდი 129
ნუკლონი 128
ორიონის ნისლეული 191
პარსეკი 172
პარციალური წნევა 23
პლანეტარული მოდელი 122
პლანეტური ნისლეული 184
პლანკის მუდმივა 105
პოზიტრონი 141
პოლარული ვარსკვლავი 185
პროტოვარსკვლავები 182
პროტონი 128
პულსარი 188
პუტონი 208
რადიანტი 211
რადიაციული დაცვა 155
რადიოაქტივობა 139
რადიოაქტიური დაშლის კანონი 145
რადიოაქტიური ელემენტი 139
რადიოგალაქტიკა 195
რელიქტური გამოსხივება 198
რენტგენული ბარსტერები 186
რეფრაგენტი 74
სამაცივრე 74
სატურნი 205
სახურებელი 68
სიბლანტე 97
სიბლანტის კოეფიციენტი 97
სითბური გამოსხივება 103
სითბური ენერგიის გამომტანი 154
სითბური ძრავა 68
სითბური ძრავას მქკ 68
სითბური ნონასწორობა 26
სითხის ზედაპირული დაჭიმულობა 88
სინათლის კორპუსკულურ-ტალღური დუალიზმი 119
სინათლის ნელინადი 172
სინოდური თვე 203
სიცოცხლის საშუალო დრო 146
სპექტრული ნათება 104
სპირალური გალაქტიკა 192
სტეფან-ბოლცმანის კანონი 104
სუსტი ურთიერთქმედება 162

ტომსონის მოდელი 120
ურანი 203
ფაზური გადასვლა 75
ფარდობითი ატომური მასა 11
ფარდობითი ტენიანობა 81
ფლუქტუაციები 65
ფობოსი 201
ფოტოდენი 106
ფოტოელემენტი 113
ფოტოეფექტი 106
ფოტოეფექტის გრძელტალღოვანი
საზღვარი 113
ფოტოეფექტის კანონები 107
ფოტოეფექტის წითელი საზღვარი 108
ფოტონი 111
ფოტოქლექტრონი 106
ფსიქრომეტრი 83
ფსიქრომეტრული ცხრილი 84
ყავისფერი ჯუჯები 174
შავი ხვრელი 181
შარლის კანონი 42
შეკუმშვა 71
შეკუმშვის ხარისხი 72
შემაკავებელი ძაბვა 107
შემანელებელი 153

შეუქცევადი პროცესი 63
შენოვა 71
შიგანვის ძრავა 71
შინაგანი ენერჯია 46
შტერნის ცდა 32
ცეფეიდები 182
ციური პოლუსი 182
ძირითადი მდგომარეობა 122
ძლიერი ურთიერთქმედება 129
ნანაცვლების წესები 140
წითელი ვარსკვლავი 180
წითელი ნანაცვლება 194
წლიური პარალაქსი 168
ხელოვნური რადიოაქტივობა 139
ხილული სიკაშკაშე 171
ჯაჭვური ბირთვული რეაქცია 149
ჯუჯა ვარსკვლავები 172
ჯუჯა პლანეტები 205
ჰაბლის კანონი 194
ჰაბლის მუდმივა 194
ჰალო 189
α სხივები 138
β სხივები 138
γ სხივები 138

პასუხები

გაითვალისწინეთ, ხშირ შემთხვევაში პასუხები წერია მიახლოებით.

§ 1.2 1) $24,08 \cdot 10^{23}$; 2) $9,03 \cdot 10^{23}$; 3) 18; 4) 58,5; 5) 2,4; 6) $4,5 \cdot 10^{-23}$ გ; 7) $0,5 \cdot 10^{23}$; 8) $14,5 \cdot 10^{23}$; 9) $5,6 \cdot 10^{18}$; 10) $8,4 \cdot 10^{21}$

§ 1.5 1) $6 \cdot 10^{11}$ მ/წმ; 2) 60 გ/მ³; 3) 2-ჯერ შემცირდება; 4) 75 კპა-ით შემცირდება; 5) 2-ჯერ გაიზარდა; 6) 100 სმ³; 7) $6 \cdot 10^{10}$ მ⁻³; 8) $3,75 \cdot 10^{-7}$ ჯ; 9) 25 კპა; 10) 16 კპა

§ 1.6 1) 373 K; 2) 73 °C; 3) $5,7 \cdot 10^{-21}$ ჯ; 4) 2.32-ჯერ; 5) 3-ჯერ შემცირდება; 6) $8 \cdot 10^5$ პა; 7) 12 K; 8) 819 K; 9) $20,3 \cdot 10^4$ პა; 10) 100 კპა

§ 1.7 3) შემცირდება 2-ჯერ; 4) 615 მ/წმ; 5) 900 მ/წმ; 6) აზოტის 1,5-ჯერ; 7) 200, 4000π რად/წმ; 8) 1200π მ/წმ; 9) 528π სმ; 10) 4415,625 მ/წმ

§ 1.8 1) 45,4 გ/მოლი; 2) 28,6 გ/მ³; 3) 0,04 მ³; 4) 53,4 კპა; 5) 8-ჯერ გაიზარდება; 6) 400 K; 7) $2 \cdot 10^5$ პა; 8) 45,8 სმ³; 9) 2198 სმ³; 10) 90 °C

§ 1.9 1) 32 კპა; 2) 100 °C-ით; 3) $2 \cdot 10^5$ პა; 4) 80 კპა; 5) 525 სმ³; 6) 150 ნ; 7) $T_1=T_4$, $P_2=P_3$; 8) 916,7 მმ.ვწყ.სვ

§ 1.10 2) გაიზარდა 50%-ით; 3) 50 მჯ; 4) 3,7 კჯ; 5) 74,2 ჯ; 6) შემცირდება 6648 ჯ-ით; 7) გაიზარდა 314 კჯ-ით 8) $U_1=1.5P_0V_0$, $U_2=4.5P_0V_0$, $U_3=4.5P_0V_0$; 9) $\Delta U_{1-2}=20P_0V_0$, $\Delta U_{2-3}=-15P_0V_0$; 10) 650 °C-ით

§ 1.11 1) 3 ჯ; 2) 15 ჯ; 3) 200 ჯ; 4) 1,7 ჯ; 5) -178 ჯ; 6) 3 მოლი; 8) $4,5 \cdot N_A$; 9) $12P_0V_0$; 10) $A_{1-2}=0$, $A_{2-3}=2P_0V_0$, $A_{3-1}=-5P_0V_0$, $U_{1-2}=-4.5P_0V_0$, $U_{2-3}=3P_0V_0$, $U_{3-1}=1.5P_0V_0$

§ 1.12 1) 3,4 კჯ; 2) -2,1 კჯ; 3) გაიზარდა 2,4 კჯ-ით; 4) 30 კჯ; 5) $\Delta U=66$ კჯ, $A=264$ კჯ; 6) 600 ჯ/კგ·K; 7) 71690 ჯ; 8) 5301 ჯ/კგ·K; 9) $12P_0V_0$; 10) $70P_0V_0$, $-45P_0V_0$

§ 1.13 1) გაიზარდა 3,6 კჯ-ით; 2) 1350 კჯ; 3) 60 კჯ; 4) 1,5-ჯერ; 5) 9,8 კჯ; 6) 2/7 და 5/7; 7) 5,2 კჯ და 7,28 კჯ; 8) 149 ° C-ით შემცირდა; 9) 78 ჯ; 10) 713 ჯ/კგ·K

§ 1.15 1) 25%; 2) 6650 ვტ; 3) 125კჯ-ით; 4) 16,6%; 5) 30%; 6) $225 \cdot 10^5$ ჯ, 25%; 7) 312 °C; 8) 435 °C; 9) 5,4 მგჯ-ით; 10) 64,4 მგჯ

§ 1.19 1) 12 გ/მ³; 2) 12 გ; 3) 40%; 4) 10,7 გ/მ³; 5) 3,8 გ; 6) წარმოიქმნება; 7) 1,05 კპა; 8) 3,5-ჯერ; 9) 149,38 გ; 10) $87,04 \cdot 10^{-3}$ გ

§ 1.21 3) 23,4 მკჯ; 4) 2,52 მჯ; 5) 5 მნ; 6) 13 სმ; 7) 14,4 მმ-ით; 8) 3,6 სმ-ით; 9) $h_{\frac{\sigma_2 \rho_1}{\sigma_1 \rho_2}}$; 10) $7,7 \cdot 10^{-2}$ მმ³

I თავის შემჯამებელი ამოცანები

1) $5,4 \cdot 10^{23}$; 2) $29,1 \cdot 10^{23}$; 3) $2,4 \cdot 10^5$ პა და $1,8 \cdot 10^5$ პა; 4) $0,4 \cdot 10^{-22}$ ჯ; 5) გაიზარდა 5-ჯერ; 6) $9,6 \cdot 10^5$ პა; 7) გაიზარდა 56,25%-ით; 8) 0,76 კგ/მ³; 9) 98 K; 10) 3,75 ლ; 11) 16 გ; 12) 34 სმ; 13) $6,2P_0V_0$; 14) 199 °C; 15) 385 °C-ით; 16) 2007 °C; 17) 306 ჯ; 18) გაიზარდა 170 ჯ-ით; 19) შემცირდება 6-ჯერ; 20) მცირდება; 21) 831 ჯ; 22) 13056 ჯ; 23) $12P_0V_0$; 25) 2/5 მუშაობას 3/5 შინაგანი ენერჯის ცვლილებას; 26) 1,6 კჯ, 4 კჯ;

27) $0,6 \cdot 10^3$ ჯ/კგ·K; 28) 5,52 კვტ; 29) 400 K; 30) 31,6 მგჯ; 31) 0,73 კპა; 32) წარმოიქმნება; 33) 0,075 გ; 34) 14,4 მმ-ით შემცირდება; 35) 2,5 მმ

§ 2.3 1) $5,2 \cdot 10^{-5}$ მ; 2) $1,8 \cdot 10^{15}$ ჰც; 3) $0,8 \cdot 10^{15}$ ჰც; 4) არა; 5) გავზარდოთ 1,44-ჯერ; 6) 2,7 ვ; 7) $2,8 \cdot 10^6$ მ/წმ; 8) $0,9 \cdot 10^{15}$ ჰც; 9) 4-ჯერ; 10) 5/4-ჯერ

§ 2.6 1) 13,6 ევ-ით; 2) -27,2 ევ; 3) შემცირდება 9-ჯერ; 4) 13,6 ევ; 5) გაიზრდება 10,2 ევ-ით; 7) -0,85 ევ; 8) $6 \cdot 10^{14}$ ჰც; 9) 6

§ 2.8 1) 12; 2) 55; 3) 79 პროტონი და 118 ნეიტრონი; 4) 26-ით; 5) $10p+11n$; $10p+12n$; 6) A-1, Z-0; ბ) A-1; Z-1; 7) A+4; Z+2; 10) $81,1 \cdot 10^{-13}$ ჯ, $50,7 \cdot 10^6$ ევ

§ 2.9 1) $15,03 \cdot 10^{-11}$ ჯ; 2) ლითიუმის მეტია $4 \cdot 10^{-10}$ ჯ-ით; 3) $33,4 \cdot 10^{-27}$ კგ და $33,8 \cdot 10^{-27}$ კგ; 4) 10^{-27} კგ; 5) ჟანგბადის მეტია $0,04 \cdot 10^{-27}$ კგ-ით; 6) $0,63 \cdot 10^{-11}$ ჯ; 7) $2,52 \cdot 10^{-11}$ ჯ; 8) 9კჯ; 9) $0,18 \cdot 10^{-11}$ ჯ; 10) $0,43 \cdot 10^{13}$ ჯ

§ 2.10 4) გამოსხივდა β^- ; 5) გამოსხივდა α ; 6) გამოსხივდა 4α და $3\beta^-$; 7) ${}_{84}^{210}\text{Po}$; 8) ${}_{92}^{239}\text{U}$; 9) ${}_{82}^{206}\text{Pb}$; 10) 6

§ 2.11 3) 12 სთ; 4) 50 დღე-ღამე; 5) 15/16; 6) $\frac{1}{4}$; 7) შემცირდება 32-ჯერ; 8) 48 სთ; 9) 72 წელი; 10) $252 \cdot 10^{21}$

§ 2.12 1) 4000; 2) $16 \cdot 10^{10}$ ჯ; 3) $50,4 \cdot 10^{10}$; 5) $754 \cdot 10^9$ ჯ-ით; 6) 2,76 ტ; 7) $24 \cdot 10^{10}$ ჯ; 8) 23 მგვტ; 9) 8,64 კგ; 10) 252,3 კგ

II თავის შემავარსებელი ამოცანები

2) 0,5 ევ; 4) შემცირდეს 67%-ით; 5) $1451,5$ ვტ/მ²; 6) $9,99 \cdot 10^{-6}$ მ; 7) $5,8 \cdot 10^{14}$ ჰც; 8) 0,3 მკმ; 9) 0,23 მკმ; 10) არა; 11) $1,4 \cdot 10^6$ მ/წმ; 12) 0,27 მკმ; 13) 3-ჯერ; 14) 4/3-ჯერ; 15) $6,6 \cdot 10^{15}$ ჰც; 16) $1,2 \cdot 10^{-27}$ კგ·მ/წმ; 17) $2,4 \cdot 10^{-26}$ კგ·მ/წმ; 18) 4-ჯერ გაიზრდება; 19) სარკულ ზედაპირზე 2-ჯერ მეტია; 20) $2 \cdot 10^{10}$; 21) 3,8 ევ-ით; 22) $2,5 \cdot 10^{15}$ ჰც; 23) 11; 24) 17; 25) ა) A+1, Z+0 ბ) A-4, Z-2; 26) $81,9 \cdot 10^{-13}$ ჯ; 28) $\frac{10kq^2}{mv^2}$; 29) $6,3 \cdot 10^{-28}$ კგ; 30) $2,88 \cdot 10^{-9}$ ჯ; 31) $1,8 \cdot 10^{-10}$ ჯ; 32) 2; 33) 16 დღე-ღამე; 34) $1,5 \cdot 10^6$; 35) 200 წ

III თავის ამოცანები

1) $\frac{R+r}{2}$; 2) \sqrt{Rr} ; 3) $\frac{a-b}{2}$; 4) 97800 ს.წ; 5) 412,3 პს, $85 \cdot 10^6$ ა.ე; 6) 37222 სთ; 7) $2 \cdot 10^{-6}$; 8) $1,8 \cdot 10^{-6}$; 9) 15,9-ჯერ; 10) 6,3-ჯერ; 11) 64-ჯერ; 12) 4-ჯერ; 14) 8-ჯერ გაიზრდებოდა; 15) 1,5-ჯერ შემცირდა; 16) 200-ჯერ; 17) $24,4 \cdot 10^{26}$ ვტ; 17) 2504 კმ/წმ; 18) 2504 კმ/წმ; 20) 52,15 კმ/წმ