იმეცადინე, ისწავლე და ჩაჯაჭარე !

ლევან გლურჯიძე, აკაკი გიგინეიშვილი

ფ ი ზ ი კ ა

სგუ-ს ოთხ სემესტრიანი კურსის ლექციების კონსპექტი

ნაწილი IV

თბილისი 2016

•ფიზიკის ფართო (ოთხ სემესტრიანი) კურსი გათვლილია ტექნიკური უნივერსიტეტის ფიზიკური სპეციალობების სტუდენტებისთვის.

•ის მიზნად ისახავს: სტუდენტი არა მარტო გავარკვიოთ, შევასწავლოთ და შევაყვაროთ მრავალი საკაცობრიო აღმოჩენებით "განებივრებული", პერმანენტულად "გაახალგაზრდავების" გზაზე მდგომი, ასაკით უკვე 25 საუკუნის ბრძენი "მოხუცი" - **ფიზიკა**, არამედ, ასევე შევქმნათ სტუდენტის **ფიზიკური აზროვნების** **განვითარების** მტკიცე საფუძვლები. თუ მოხერხდა, ალბათ, ეს იქნება კურსის მთავარი დამსახურება!

•ვიმედოვნებთ, რომ სათანადო ძალისხმევის შემთხვევაში სტუდენტი წარმატებულად დაძლევს ტესტირების და გამოცდის პერიოდულ, ლოკალურ ჯებირებსაც.

•კონსპექტი, სტრუქტურულად, **ცალკეული ლექციების ერთობლიობაა** (თითოეულ ნაწილში 15 ლექციაა, ლექციაში 2-5 პარაგრაფი). ის ერთნაირად გამოსადეგია - სამეცადინოდ სტუდენტისთვის და სალექციო პრეზენტაციად პროფესორისთვის. ცხადია, ლექციები შესაბამისობაშია მოქმედ სილაბუსებთან.

•მასალის წარდგენა ეყრდნობა კრეატიული აზროვნების ცნობილ მეთოდებს: თემის, საკითხის მკაფიო სტრუქტურირება; მაქსიმალური ვიზუალიზაცია; ფერების ფართო გამოყენება.

•მიზანშეწონილად ჩავთვალეთ რთული მათემატიკური გარდაქმნების მაქსიმალურად შესაძლო მინიმალიზაცია და ყურადღების, ძირითადად, ფიზიკურ შინაარსზე გადატანა.

რედაქტორი:

იური პაპავა

სტუ-ს სრული პროფესორი, დოქტორი

რეცენზენტი:

ზაურ ჯაბუა

სტუ-ს სრული პროფესორი, ტექნიკის მეცნიერებათა დოქტორი

სარჩევი

ლექცია 1. *გეომეტრიული და ტალღური ოპტიკა* 006
1.გეომეტრიული ოპტიკის ძირითადი კანონზომიერებანი 007
2.სინათლის ტალღური თეორია - ინტერფერენცია და დიფრაქცია 011

ლექცია 2. *ოპტიკური მოვლენები & პროცესები* 016
1.სინათლის დისპერსია 017
2.სინათლის შთანთქმა 019
3.სინათლის გაბნევა 021
4.სინათლის პოლარიზაცია 024

ლექცია 3. *ფარდობითობის სპეციალური თეორია* {თ. I} 027
1.კლასიკური ფიზიკის და ფარდობითობის თეორიის დებულებები 028
2.დროის შუალედის ფარდობითობა 032

ლექცია 4. *ფარდობითობის სპეციალური თეორია* {თ. II} 037
1.წარსული, აწმყო, მომავალი 038
2.სიგრძის ფარდობითობა. ოთხგანზომილებიანი სივრცე-დრო 039
3.ლორენცის გარდაქმნები. სიჩქარეთა შეკრების რელატივისტური კანონი 042
4.რელატივისტური დინამიკა 044

ლექცია 5. *სითბური გამოსხივება და მისი კვანტური ხასიათი* 046
1.სითბური გამოსხივება. აბსოლუტურად შავი სხეული 047
2.აბსოლუტურად შავი სხეულის სპექტრები და კანონები 050
3.პლანკის {რევოლუციური} კვანტური ხედვა 052
4.სინათლის ფოტონური თეორია 054

ლექცია 6. *ფოტონური მოვლენები* 055
1.ფოტოეფექტი 056
2.ფოტოეფექტის აინშტაინის კანონი 060
3.კომპტონის ეფექტი 063

ლექცია 7. *ატომის აგებულება* 065
1.ატომის აგებულების ბირთვული მოდელი 066
2.ბირთვული მოდელის სიძნელეები. ბორის პოსტულატები 069
3.წყალბადის ატომის ბორის თეორია. სპექტრალური სერიები 072

ლექცია 8. *ატომის თეორიის წინსვლა* 074
1.მასური რიცხვი. იზოტოპები. რადიოაქტიურობა 075
2.რადიოაქტიური დაშლის კანონი. ნახევარდაშლის პერიოდი 076
3.ნივთიერების კვანტურ-ტალღური დუალიზმი 078
4.ჰაიზენბერგის განუზღვრელობის პრინციპი 080

ლექცია 9. *ატომის კვანტურ-ტალღური ხედვა* 082
1.შრედინგერის განტოლება 083
2.ატომის კვანტურმექანიკური თეორია 085
3.ნაწილაკების სპინი და პაულის აკრძალვის პრინციპი 089

ლექცია 10. *ბირთვული პროცესები* 091
1.ბირთვული ძალები. მასის დეფექტი. ბმის ენერგია 092
2.ბირთვის გაყოფა. გაყოფის ჯაჭვური რეაქცია 097
3.ბირთვების სინთეზის რეაქცია 101

ლექცია 11. *ფუნდამენტური ნაწილაკები & სტანდარტული მოდელი* 103
1.ნაწილაკები & ანტინაწილაკები 104
2.კვარკები და ლეპტონები 107

ლექცია 12. *ნაწილაკები & ფუნდამენტური ურთიერთქმედებები* 111
1.ნაწილაკთა იერარქია 113
2.შენახვის კანონები 114
3.ოთხი ფუნდამენტური ურთიერთქმედება 116

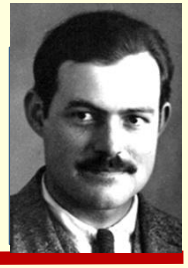
ლექცია 13. *ფიზიკური კანონები & სიმეტრია* 119
1.სიმეტრია და მისი დარღვევა 120
2.ანტიმატერიის ცნება 123

ლექცია 14. *მატერია-ანტიმატერიას შორის სიმეტრიის დარღვევა* 125
1.მატერია, ანტიმატერია და ფიზიკის კანონები 126
2.CP სიმეტრიის დარღვევის მნიშვნელობა 129

ლექცია 15. *დასკვნის სახით* 133
1.კითხვები & პრობლემები 134
2. ოპტიკის, ატომის და ბირთვის Mind Map 138

Appendix I 139
1.ინფორმაცია (ცხრილები), რომელიც გამოგადგებათ 139
Appendix II 143
1.გამოყენებული ლიტერატურა 143

“ისეთი რამ უნდა მონახო კაცმა, რასაც აღარასოდეს დაკარგავ.”
Ernest Hemingway



1899 - 1961

რამდენი უნდა იცოდე, რომ იცოდე რამე ?!

სტუ-ს ფიზიკის კურსის *(4 სემესტრი)* ლექციების კონსპექტი

ლექცია **1** | **თემა:** | სემესტრი **IV**

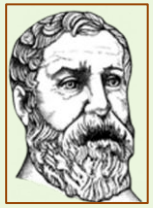
გეომეტრიული და ტალღური ოპტიკა

007 **1.გეომეტრიული ოპტიკის ძირითადი კანონზომიერებანი**

011 **2.სინათლის ტალღური თეორია - ინტერფერენცია და დიფრაქცია**

1.გეომეტრიული ოპტიკის ძირითადი კანონზომიერებანი

✓**ოპტიკა** - ფიზიკის ნაწილი, რომელიც შეისწავლის **სინათლის** {**ხილული**, **ინფრაწითელი** და **ულტრაიისფერი** გამოსხივების} **გავრცელებას** და ნივთიერებასთან **ურთიერთქმედებას**;



Hero of Alexsandria
10-70

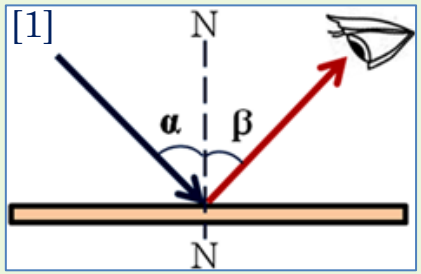
P.Fermat
1601-1665

▪სინათლის **ბუნებისგან** დამოუკიდებლად, მოსახერხებელია სინათლის *<u>გავრცელების</u>* განხილვა მარტივი თეორით - **გეომეტრიული ოპტიკით**. მას საფუძვლად უდევს **ფერმას პრინციპი** (იდეა **ჰერონს** ეკუთვნის):
ორ წერტილს შორის სინათლე ვრცელდება ისეთი გზით, რომელსაც მინიმალური დრო სჭირდება;
•ეს კი ნიშნავს, რომ ერთგვაროვან გარემოში სინათლე **უმოკლესი** გზით - **სწორხაზოვნად** ვრცელდება;
•ადამიანი მუდმივად რწმუნდებოდა, რომ სინათლე **სწორხაზოვნად ვრცელდება**. ამას ემყარებოდა მისი **ორიენტაციის სისტემაც**;
▪სინათლის **გავრცელების სწორხაზოვან ტრაექტორიებს** **სინათლის სხივებს** უწოდებენ. ეს არის **ხაზი**, რომლის **გასწვრივაც ვრცელდება სინათლის ენერგია**;

▪გეომეტრიული ოპტიკა **4 კანონს** ეფუძნება:
<u>1</u>.**ერთგვაროვან გარემოში სინათლე ყოველთვის სწორხაზოვნად ვრცელდება**;
<u>2</u>.**გადაკვეთისას სხივები არ ახდენენ ზეგავლენას ერთმანეთის გავრცელებაზე** {ანუ, გარემოში სინათლის გავრცელება საერთოდ არ არის დამოკიდებული იქ სინათლის სხვა კონების არსებობაზე};
▪ორი გარემოს **გამყოფ** ზედაპირზე დაცემისას ენერგიის ნაწილი:
<u>3</u>.**უკან** ბრუნდება პირველ გარემოში - **არეკვლის კანონი**;
<u>4</u>.**შეიცვლის** გავრცელების <u>მიმართულებას</u> და **გავრცელდება** მეორე გარემოში - **გარდატეხის კანონი**;

▪ნებისმიერ ობიექტს ვხედავთ **თუ** ის:
<u>1</u>.**ირეკლავს** **დაცემულ** სინათლეს;
<u>2</u>.**ასხივებს** {**სინათლის წყაროა**};
•გაუმჭვირვალე სხეულის **უკან** სინათლის სწორხაზოვანი გავრცელება **ქმნის ჩრდილს**;

▪სინათლის ენერგიის **წილობრივი განაწილება** <u>არეკვლილ</u> და მეორე გარემოში <u>გადასულ</u> სხივთა კონებს შორის დამოკიდებულია არა მარტო **ნივთიერებათა ოპტიკურ მახასიათებლებზე**, არამედ **სინათლის დაცემის კუთხეზეც**;



▪ორი გარემოს საზღვარზე დაცემული სხივი გავრცელდება **მეორე გარემოშიც** [2], თუ ის **გამჭვირვალეა** მოცემული **ტალღის სიგრძის** სხივებისთვის;

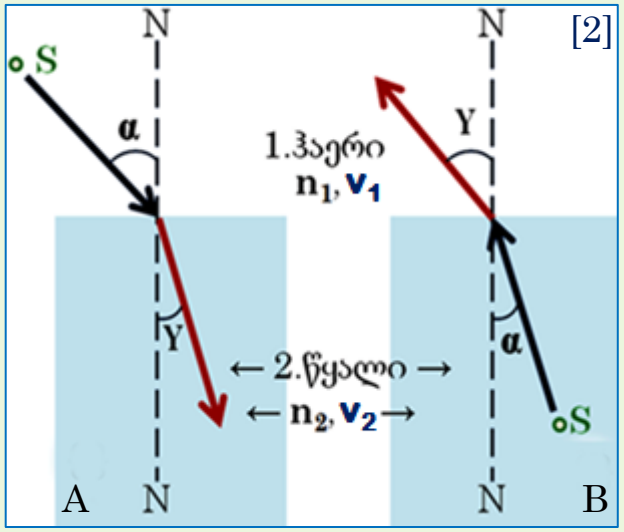
▪**გარდატეხის მოვლენას საფუძვლად** უდევს **ორ** **გარემოში** ელექტრომაგნიტური ტალღის **სიჩქარეთა სხვადასხვაობა**;

▪**ტოლი სიჩქარეებისას**, სხივი **მიმართულებას <u>არ</u> შეიცვლიდა**;

▪*<u>არეკვლის</u> <u>კანონი</u>* [1]:

<u>1</u>.დაცემული სხივი, არეკვლილი სხივი და დაცემის წერტილში აღმართული პერპენდიკულარი ერთ სიბრტყეში მდებარეობს;

<u>2</u>.არეკვლის კუთხე (β) დაცემის კუთხის (α) ტოლია β = α;



▪გარდატეხისას, სხივის **გადახრის ტენდენცია** (დაცემის წერტილში აღმართულ NN **მართობისკენ**, თუ პირიქით, **მისგან**) ამ ორ გარემოში სინათლის **სიჩქარეთა თანაფარდობით** განისაზღვრება;

▪*<u>გარდატეხილი</u>* სხივი **უახლოვდება** NN ნორმალს (დაცემის α კუთხე **მეტი იქნება** γ გარდატეხის კუთხეზე), **თუ** სხივი გადადის გარემოში [2A], რომელშიც სინათლის **სიჩქარე** შედარებით **მცირეა** ($v_2 < v_1$);

▪როდესაც სხივი გადადის გარემოში, სადაც [2B] სინათლის **სიჩქარე** შედარებით **დიდია** ($v_1 > v_2$), გარდატეხილი სხივი **შორდება** NN ნორმალს, ანუ γ>α;

▪გარდატეხის პროცესი აიწერება შეხებაში მყოფი **ორი გარემოს** მახასიათებელი მუდმივი სიდიდით - **n** **გარდატეხის ფარდობითი** **მაჩვენებლით** და ემორჩილება **გარდატეხის** კანონს:

$$\sin\alpha/\sin\gamma = n \quad (1.1)$$

W.Snell
1580-1626

R.Descartes
1596-1650

▪*<u>გარდატეხის</u> <u>კანონი</u>* [2]:

<u>1.</u>**დაცემული სხივი, გარდატეხილი სხივი და დაცემის წერტილში აღმართული პერპენდიკულარი ერთ სიბრტყეში მდებარეობს;**

<u>2.</u>**დაცემის კუთხის სინუსის ფარდობა გარდატეხის კუთხის სინუსთან მოცემული ორი გარემოსთვის მუდმივი სიდიდეა და მას ეწოდება მეორე გარემოს** (რომელშიც სხივი გადადის) **გარდატეხის მაჩვენებელი პირველი გარემოს** (საიდანაც სხივი ვრცელდება) **მიმართ**;

▪ამავე დროს, თითოეული გარემო ხასიათდება **გარდატეხის** n_i **აბსოლუტური** **მაჩვენებლით**. ის გვიჩვენებს **რამდენჯერ ნაკლებია ამ გარემოში სინათლის სიჩქარე ვაკუუმთან** შედარებით და მარტივ კავშირშია ნივთიერების ფარდობით **დიელექტრიკულ** ε და ფარდობით **მაგნიტურ** μ **შეღწევადობებთან**:

$$n_i = c/v = (\varepsilon\cdot\mu)^{1/2} \quad (1.2)$$

•გამჭვირვალე ნივთიერებათა უმრავლესობისთვის $\mu\approx1$, ე.ი.:

$$n_i = \varepsilon^{1/2} \quad (1.3)$$

•ზოგი გარემოს გარდატეხის **აბსოლუტური** მაჩვენებელი n_i:
ჰაერი=1; წყალი=1.33; სპირტი=1.36; მინა=1.5; ალმასი=2.4

▪მოცემული ორი გარემოს **აბსოლუტურ** გარდატეხის მაჩვენებელთა **შეფარდება** განსაზღვრავს მათ **n** **ფარდობით** გარდატეხის მაჩვენებელს

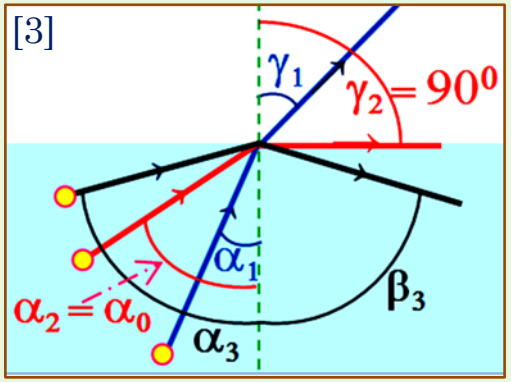
$$n_{21} = n_2/n_1 = v_1/v_2 \quad (1.4)$$

და

$$n_{12} = n_1/n_2 = v_2/v_1 \quad (1.5)$$

▪გარდატეხის კანონი $n_1\sin\alpha=n_2\sin\gamma$ (1.6) **სრული** სახით, პირველად {≈ ერთდროულად}, ჩაწერეს სნელიუსმა და დეკარტმა;
•(1.6) *<u>სნელიუსის</u>* კანონი სამართლიანია **სხვადასხვა ბუნების ტალღების** გარდატეხისას {მაგ.: ბგერითი ტალღების};

•*<u>გარდატეხილი</u>* სხივი **უახლოვდება** NN ნორმალს ($\gamma < \alpha$), თუ $V_2 < V_1$ {$n_2 > n_1$ - ოპტიკურად **მეტად მკვრივი** გარემო} [2A];
•*<u>გარდატეხილი</u>* სხივი **შორდება** NN ნორმალს ($\gamma > \alpha$), თუ $V_2 > V_1$ {$n_2 < n_1$ - ოპტიკურად **ნაკლებად მკვრივი** გარემო} [2B];

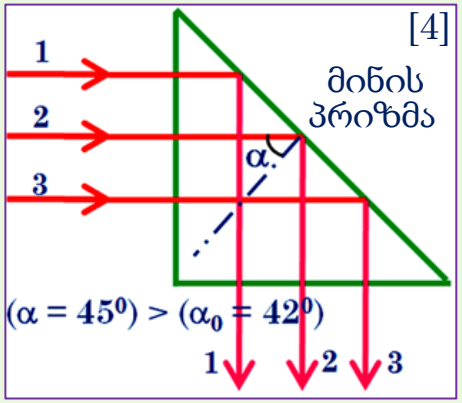


▪(1.6)-ის შესაბამისად, $n_1 \sin\alpha > n_2$ პირობის შესრულებისას {α_3,[3]}, გარდატეხილი სხივი <u>არ</u> არსებობს. დაცემული სხივის ენერგია **მთლიანად აირეკლება** ორი გარემოს **გამყოფი ზედაპირიდან** {β_3,[3]} და რჩება იმავე გარემოში. ადგილი აქვს **სრულ შინაგან არეკვლას**;
▪**მეტად** მკვრივიდან **ნაკლებად** მკვრივ გარემოში სხივის გადასვლისას, გარდატეხის კუთხე მეტია დაცემის კუთხეზე ($\gamma_2 > \alpha_2$), ანუ გარდატეხილი სხივი **შორდება მართობს** და **უახლოვდება ორი გარემოს გამყოფ საზღვარს** [3];

▪მაშასადამე, შეიძლება შეირჩეს ისეთი $\alpha < 90^0$ დაცემის კუთხე, რომლის დროსაც *<u>გარდატეხილი</u>* სხივი ზუსტად **გაჰყვება** გარემოთა გამყოფ **საზღვარს**;
▪კონკრეტული ორი გარემოსთვის, ეს - α_0 **სრული შინაგანი არეკვლის ზღვრული კუთხე** {(1.6) ➡} ტოლი იქნება [3]:

$$n_1 \sin\alpha_0 = n_2 \sin 90^0 \quad \text{და} \quad \sin\alpha_0 = n_2/n_1 \quad (1.7)$$

▪დაცემის კუთხის შემდგომი $\alpha > \alpha_0$ ზრდისას [3], მოხდება **სრული შინაგანი არეკვლა**;
•ზოგიერთი გამჭვირვალე ნივთიერების სრული შინაგანი არეკვლის *<u>ზღვრული</u>* კუთხე: 24^0 - ალმასი; 42^0 - მინა; 49^0-წყალი;



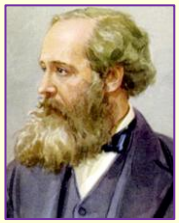
•სრული *<u>შინაგანი</u>* არეკვლა [4] გამოიყენება ოპტიკურ ხელსაწყოებში სხივის მოსაბრუნებლად;

2.სინათლის ტალღური თეორია – ინტერფერენცია და დიფრაქცია

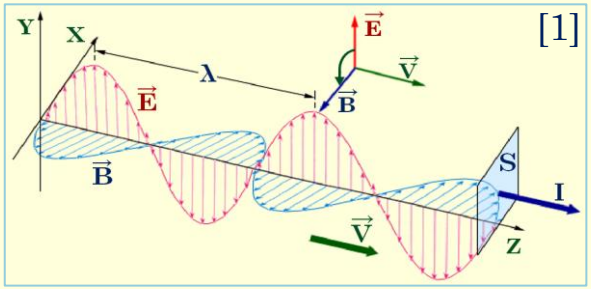
▪ფიზიკა {პროცესებიდან გამომდინარე} სინათლეს განიხილავს, ან როგორც **ელექტრომაგნიტურ ტალღას** [1], ან როგორც **ფოტონების** {ბერძ. φωτός- სინათლე} **ნაკადს**;

▪**ფოტონი**: *უმასო* და *უმუხტო*, მაგრამ **h/λ იმპულსის** მქონე და ვაკუუმში **c=3·10⁸** მ/წმ სიჩქარით მოძრავი **hν ენერგიის კვანტი** - **ელემენტარული ნაწილაკი** {ფოტონი სამყაროში ყველაზე გავრცელებული ნაწილაკია, 1 ნუკლონზე მოდის **2·10¹⁰** ფოტონი};

▪ფაქტიურად პოსტულირებულია სინათლის *ორგვარი ბუნება* - **სინათლის დუალიზმი** {სინათლის ერთიანი თეორია დღემდე არ არსებობს};



J.Maxwell
1831-1879



▪სინათლის **ტალღურმა თეორიამ** დასაბუთებული და სრულყოფილი სახე მიიღო **მაქსველის შრომებში** (III.15.1 - ელექტრომაგნიტური ტალღა [1]). თუმცა, ჯერ კიდევ XVII საუკუნეში, სინათლისადმი **ჰიუგენსის ტალღურმა** მიდგომამ შეძლო ნიუტონის კორპუსკულური {"კვაზი კვანტური"} თეორიის "დამარცხება";

T.Young
1773–1829

C.Huygens
1629-1695

A.Fresnel
1788-1827

▪სინათლის **ტალღური ბუნების** **დამამტკიცებელი** ცდა 1801 წ. ჩაატარა **იუნგმა**. მან გაანალიზა ორი ხვრელიდან გავრცელებული სინათლით შექმნილი **ინტერფერენციული** სურათი;

✓**სინათლის ინტერფერენცია** (როგორც, ზოგადად - **ტალღების ინტერფერენცია**) ეწოდება *ტალღების* **ზედდებისას** მათი **ურთიერთ გაძლიერება–შესუსტების** **მოვლენას** [2];

▪**მდგრადი ინტერფერენციული სურათის** მიღება შესაძლებელია **მხოლოდ კოჰერენტული** ტალღების გამოყენებისას;

▪**კოჰერენტულობას**, პირველ რიგში, **მონოქრომატული**, ანუ **ერთი კონკრეტული** და **მკაცრად მუდმივი სიხშირის** ტალღები უზრუნველყოფენ. თანაც, ამ ტალღების:

1.სიხშირე უნდა იყოს **ტოლი** {$\omega_1 = \omega_2$}; **2.ფაზათა სხვაობა** კი - **მუდმივი** {$\delta\varphi$=const};

▪ცდისთვის აუცილებელი **ორი** სხივის *კოჰერენტულობის* უტყუარობა - იუნგის მიერ *საწყისი* სინათლის **ერთი** კონის სახით გამოყენებაშია, რომელიც შემდგომ უბრალოდ **იყოფა** [3] **ორი ხვრელის** მქონე დიაფრაგმით;

▪ეკრანის ნებისმიერ წერტილში ტალღების **ზედდების შედეგი** [3] დამოკიდებულია ამ ტალღებს შორის Δ **სვლათა** ($r_2 - r_1$ გავლილ მანძილთა) **სხვაობაზე**:

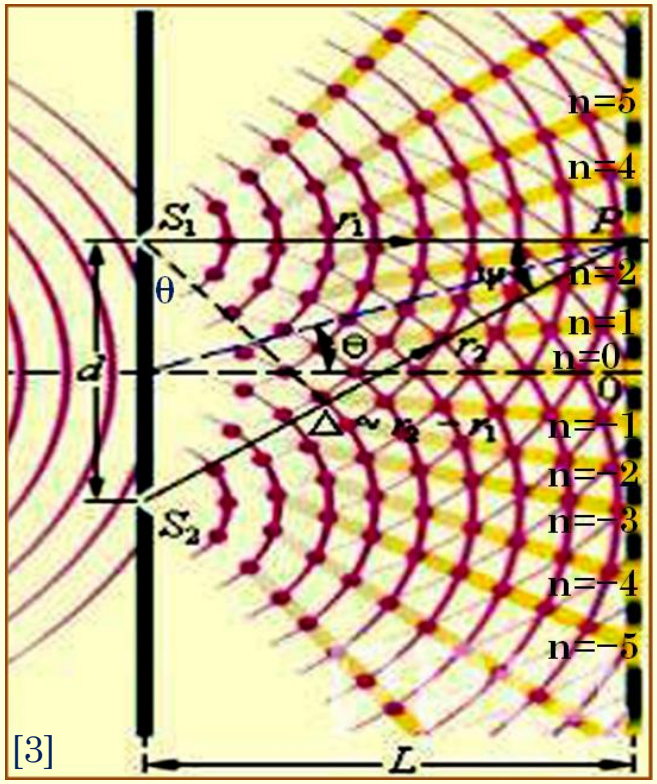
▪{მექანიკური ტალღების ზედდების (I.12) ანალოგიურად} სინათლის ინტენსიურობის **გამაძლიერებელი** ინტერფერენციული შედეგი მიიღება ეკრანის (სივრცის) **იმ წერტილებში**, რომლებისთვისაც ორი "სხივის" {ტალღურ ოპტიკაში ცნებას *სხივი* ფიზიკური დატვირთვა აღარ აქვს} Δ **სვლათა სხვაობა ერთ ტალღის სიგრძეს**, ან **λ**-ს ნებისმიერ **მთელ** რიცხვს უტოლდება {L>>d ➡ tg**θ**≈sin**θ**}

$$\Delta = d\sin\theta = n\lambda = 2n\lambda/2 \quad (1.1) \quad \{n=0,1,2,\ldots\}$$

n - ინტერფერენციული **ზოლის რიგია** [3];

▪სინათლის ინტენსიურობის **შემასუსტებელი** ინტერფერენციული შედეგი მიიღება ეკრანის იმ წერტილებში, რომლებისთვისაც ორი სხივის Δ **სვლათა სხვაობა λ**/2-ის **კენტი ჯერადია**

$$\Delta = d\sin\theta = (n+1/2)\lambda = (2n+1)\lambda/2 \quad (1.2) \quad \{n=0,1,2,\ldots\}$$



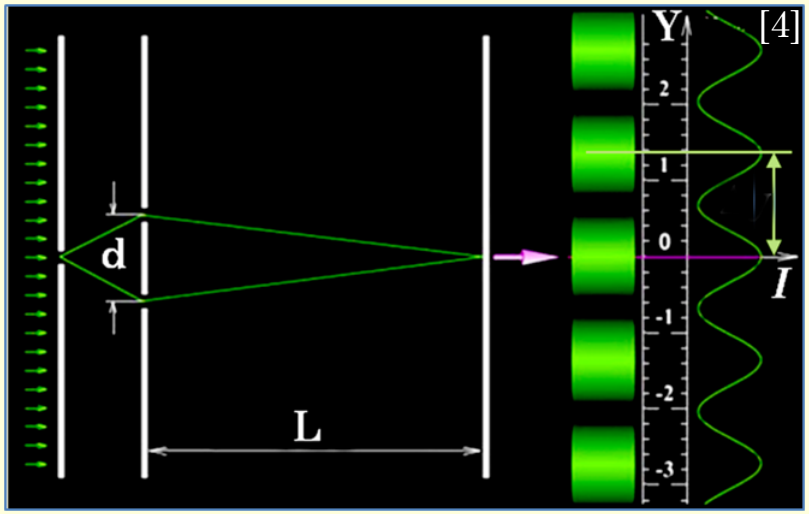
▪ინტერფერენციული სურათის მახასიათებელს, ასევე, წარმოადგენს **b ინტერფერენციული ზოლის სიგანე** - ორ **მეზობელ** *ნათელ*, ან ორ **მეზობელ** *ბნელ* ზოლს შორის [4] **მანძილი** (ან, **θ კუთხე**)

$$b = L\cdot\lambda/d \quad (1.3) \qquad \delta\theta=\lambda/d \quad (1.4)$$

▪სინათლის **I ინტენსიურობის განაწილება** სივრცეში მარტივად აიწერება, როდესაც ორივე ტალღის საწყისი ინტენსიურობები ტოლია ($I_1=I_2=I_0$)

$$I = 2I_0(1+\cos k\Delta) \quad (1.5)$$

და $k=2\pi/\lambda$ - ტალღური რიცხვია;

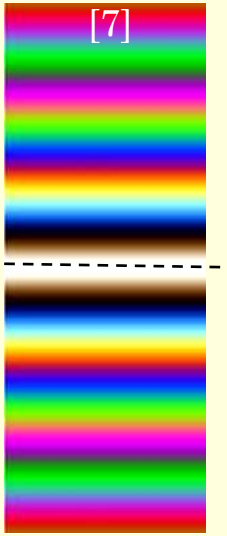


▪იუნგის ცდაში, გამოიყენებოდა რა **მონოქრომატური** სინათლე, ინტერფერენციული სურათის *ფერი* განისაზღვრებოდა ხვრელში გამავალი კონის **λ ტალღის სიგრძით**. მაგ.: *ლურჯი* ($\lambda_5 \approx 0.45$ მკმ) ინტერფერენციული სურათი [5] და *წითელი* ($\lambda_6 \approx 0.68$ მკმ) ინტერფერენციული სურათი [6];

▪**თეთრი** სინათლის გამოყენების შემთხვევაში, ინტერფერენციული სურათის [7] მხოლოდ **ცენტრალური** ზოლი **ინარჩუნებს** თეთრ (დაუშლელ) შეფერილობას;

▪ყველა დანარჩენი ნათელი ზოლი **იშლება სპექტრად**, რომელშიც იკვეთება თეთრი სინათლის შემადგენელი **შვიდივე ძირითადი** ფერის (იისფერიდან - წითლამდე) **მონაწილეობა**;

▪თანაც, **ცენტრის** მიმართ **ახლო** პოზიციას დაიკავებს **იისფერი** (მოკლეტალღოვანი) გამოსხივება, ხოლო **წითელი** (გრძელტალღოვანი) გამოსხივება ფერადი ზოლის კიდეებზე განთავსდება;



✓**ტალღების** **დიფრაქცია** (*diffractus* -*ლათ. გადატეხილი, შემოვლა*) *აღმოაჩინა* გრიმალდიმ. მოვლენის *ახსნა* ეკუთვნის იუნგსა და ფრენელს;

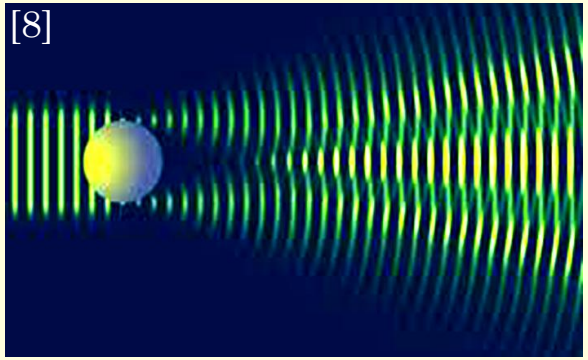
▪**ტალღების** {მათ შორის - სინათლის} *დიფრაქცია* - უნივერსალური **ტალღური მოვლენაა**, რომელიც **გეომეტრიული ოპტიკის**, **სწორხაზოვანი გავრცელების კანონებიდან** *გადახრაში* (მათ *დარღვევაში*) მდგომარეობს;

▪**დიფრაქცია** უკავშირდება (ძირითადად) მნიშვნელოვან **არაერთგვაროვნებებს** და ვლინდება მთელი რიგი **მოვლენებით**:

- •ტალღების **სივრცული სტრუქტურის** **გარდაქმნა**: დაბრკოლების **შემოვლა**, გავრცელების კუთხის **გაფართოება**, გარკვეული მიმართულებით **გადახრა**;
- •ტალღების **დაშლა** **სიხშირული სპექტრის** მიხედვით;
- •ტალღების **პოლარიზაციის** **ცვლილება**;
- •**გავლენა** ტალღების **ფაზების სტრუქტურაზე**;

▪დღეს საფუძვლიანადაა შესწავლილი **ელექტრომაგნიტური** (მათ შორის - **ოპტიკური**), **აკუსტიკური** და **გრავიტაციულ-კაპილარული** (ანუ, **სითხის ზედაპირული**) ტალღების **დიფრაქცია**;

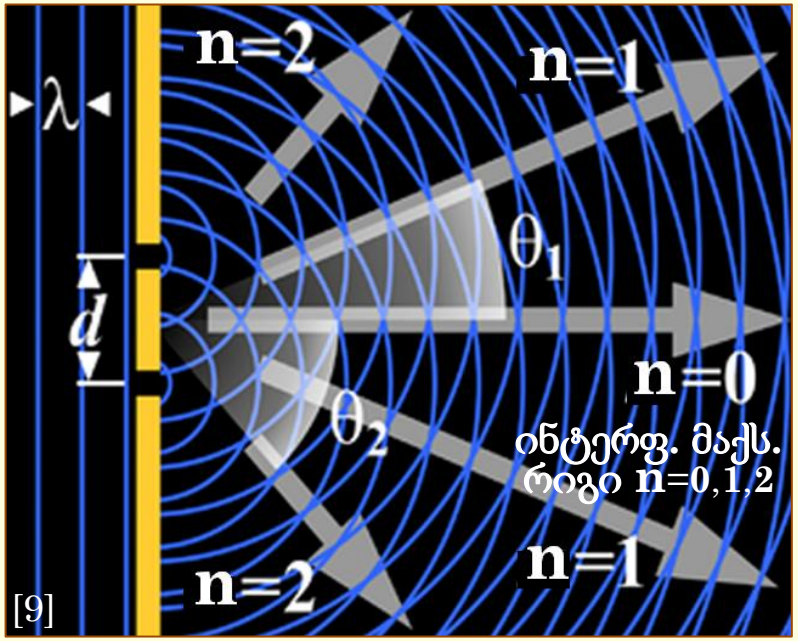
F.Grimaldi
1618-1663



▪**სინათლის** **დიფრაქცია** ხშირად ავლენს, მაგალითად, სინათლის მიერ **დაბრკოლების** **შემოვლის**, **გეომეტრიული ჩრდილის** **არეში** **შეაღწევის** **უნარს** [8];

▪**დიფრაქციას** ექნება ადგილი, თუ **დაბრკოლება**, **ღრეჩო** {ტალღის გავრცელების გზაზე} **ტალღის** **სიგრძეზე** **ნაკლები**, ან მისი **შესადარი ზომისაა** $d <,\approx \lambda$;

▪როდესაც $d >> \lambda$, სინათლის გავრცელება ემორჩილება **გეომეტრიული ოპტიკის** კანონებს;



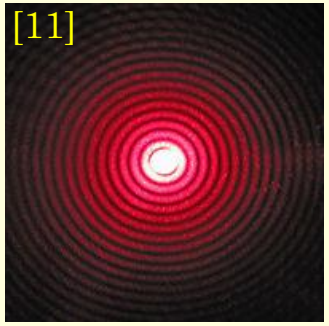
▪**დიფრაქციაზე** წარმოდგენები ეფუძნება **ჰიუგენს - ფრენელის პრინციპს**:

▪**ტალღის ფრონტის თითოეული ელემენტი** განიხილება **მეორადი აგზნების ცენტრად - მეორადი ტალღების წყაროდ,** ხოლო ამ **ტალღების ინტერფერენციული სურათი** [9] ასახავს **სინათლის შედეგობრივ განაწილებას სივრცის ყოველ წერტილში**;

•ე.ი., **ტალღური ზედაპირი** **აღარ** წარმოადგენს სფერული ტალღების **უბრალოდ მომვლებ** წირს {*ჰიუგენსის პრინციპი*}, არამედ ამ ტალღების **ინტერფერენციის** შედეგს {**ფრენელის ზონები**};

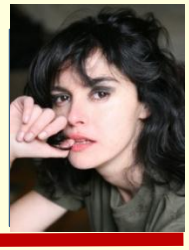
▪ფრენელის თეორიულ შეხედულებებთან სრულ თანხმობაშია დიფრაქციული სურათი, რომელიც მიიღება **გაუმჭვირვალი დისკოს** (მონეტის) ლაზერული სხივით განათებისას [10];

•დისკოს ჩრდილის **ცენტრში** ჩნდება **ნათელი ლაქა** (!), ხოლო ჩრდილის ირგვლივ - იმ ტალღების **ინტერფერენციული** რგოლები, რომლებიც **დიფრაგირებენ** დისკოს სხვადასხვა უბნებზე;



▪[11] - დიფრაქციული სურათი , რომელსაც ეკრანზე ქმნის ძალიან **მცირე**, **R**=0.1მმ **ხვრელში** გამავალი ინტენსიური **წითელი** (ლაზერული) გამოსხივების კონა. მკვეთრი ნათელი წრის გარდა, *ვლინდება* ერთმანეთში **გარდამავალი ნათელი და ბნელი რგოლების ერთობლიობა**;

“ცხოვრებაში ადგილის პოვნა ერთი წერტილიდან არ იწყება და არც რაღაც ასაკში მთავრდება. ეს დიდი პროცესია და სულ გრძელდება ... დრო ხომ ჩვენი მოგონილია!” *ოლგა ბაბლუანი*



1977

რამდენი უნდა იცოდე, რომ იცოდე რამე ?!

სტუ-ს ფიზიკის კურსის *(4 სემესტრი)* ლექციების კონსპექტი

ლექცია **2** | **თემა:** | სემესტრი **IV**

ოპტიკური მოვლენები & პროცესები

017 **1.სინათლის დისპერსია**

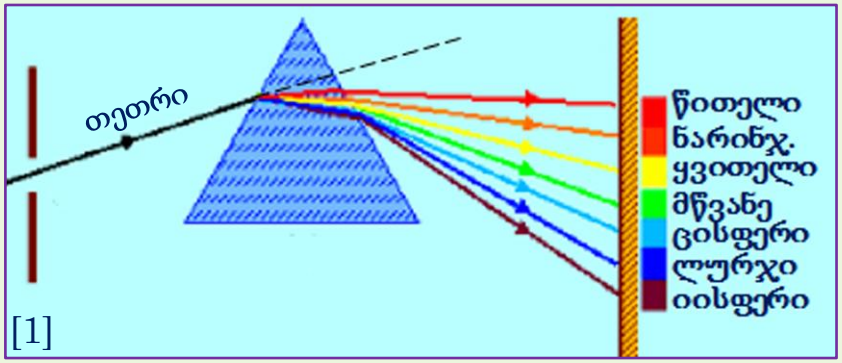
019 **2.სინათლის შთანთქმა**

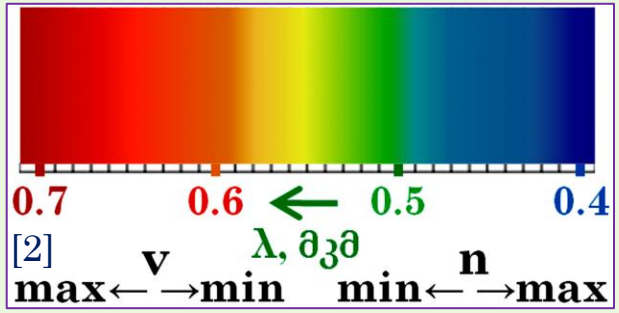
021 **3.სინათლის გაბნევა**

024 **4.სინათლის პოლარიზაცია**

1.სინათლის დისპერსია

▪ელექტრომაგნიტური ტალღების სკალაზე ხილულ სინათლეს ყველაზე მცირე დიაპაზონი ეკუთვნის (III.15.2). მაგრამ, იმის გამო, რომ ადამიანის მხედველობას მხოლოდ ამ სხივების (λ≈0.40–0.75 მკმ) აღქმა შეუძლია, ძირითად ყურადღებას სწორედ ეს დიაპაზონი იპყრობდა;





▪ნიუტონის ცდებმა ცხადყო, რომ მარტივი ოპტიკური ხელსაწყო - მინის **პრიზმა** არამარტო ცვლის სხივის გავრცელების მიმართულებას, არამედ **შლის თეთრ სინათლეს შემადგენელ ფერად სხივებად**;

▪ითვლება, რომ ფუძისკენ გადახრილ ფერად კონაში [1] დამაჯერებლად შესაძლებელია **7 ფერის** სხივის გამოყოფა: 1.წითელი, 2.ნარინჯისფერი, 3.ყვითელი, 4.მწვანე, 5.ცისფერი, 6.ლურჯი, 7.იისფერი;

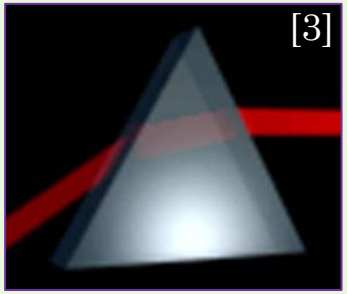
▪თეთრი სინათლის **სხვადასხვა λ ტალღის სიგრძის** (ფერის) სხივებად **დაშლას** ეწოდა **დისპერსია**, ხოლო დისპერსიით მიღებულ ფერად ზოლში [2], ერთმანეთში უწყვეტად გარდამავალ **ფერთა ერთობლიობას** - **სპექტრი**;

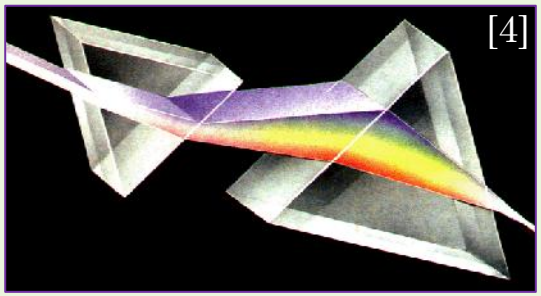
▪**დისპერსიის** მიზეზი - მოცემულ გარემოში **სხვადასხვა ტალღის სიგრძის** გამოსხივებისთვის **განსხვავებული** სიდიდის **v(λ) სიჩქარის**, ანუ **n(λ) გარდატეხის მაჩვენებლის** არსებობაა;

▪**λ**-ს **ზრდისას** შეიძლება გამოვლინდეს:

1.**n**-ის **შემცირება**, ეს **ნორმალური** **დისპერსიაა**; 2.**n**-ის **ზრდა** - **დისპერსია** **ანომალურია**;

▪სპექტრის ნებისმიერი **ერთი ფერის** პრიზმაში გატარებისას სხივი მხოლოდ გარდატეხას განიცდის, მაგრამ მეტად აღარ იშლება [3];
•180^0-ით შემობრუნებულ პრიზმაში **მთლიანი ფერადი ზოლის** გატარებისას კი, კვლავ **თეთრი** სინათლე მიიღება [4];





▪*<u>დასკვნა</u>*:
•თეთრი სინათლე **რთული აგებულებისაა** და ამიტომაა **შესაძლებელი** მისი **დაშლა** შემადგენელ ფერებად;
•**თითოეული** ფერის სხივი **ელემენტარულია**, მოცემულ გარემოში მას "პირადი" **გარდატეხის მაჩვენებელი** გააჩნია და შემდგომ **დაშლას აღარ ექვემდებარება**;
•სპექტრის **შემადგენელ** ფერთა **შეკრებისას** მიიღება საწყისი **თეთრი** სინათლე;

▪მზის სინათლე ინტენსიურად **განიბნევა** ატმოსფეროში და **ასე** აღწევს დედამიწას. **ატმოსფეროს შემადგენლობის** და **მზის მდებარეობის** მიხედვით განსხვავებულად **აღიქმება ცის შეფერილობა**;
•გაბნევის ინტენსიურობა ~$1/\lambda^4$. ამიტომ, ძირითადად, მცირე λ-ს მქონე **ცისფერი** და **ლურჯი** გამოსხივება [5] ფარავს დედამიწას **კარგ ამინდში** და **დღის საათებში** (ულტრაიისფერი - ნაკლებად, ვინაიდან მცირეა მისი წილი თვით მზის გამოსხივებაში);
•მზის ამოსვლა-ჩასვლისას სინათლე დედამიწის მიმართ **მხებად** ვრცელდება და ამ (მხების) მიმართულებით **განიბნევა**. დედამიწას კი **რჩება წითელი** სხივების მცირე ნაწილი [6];

2.სინათლის შთანთქმა

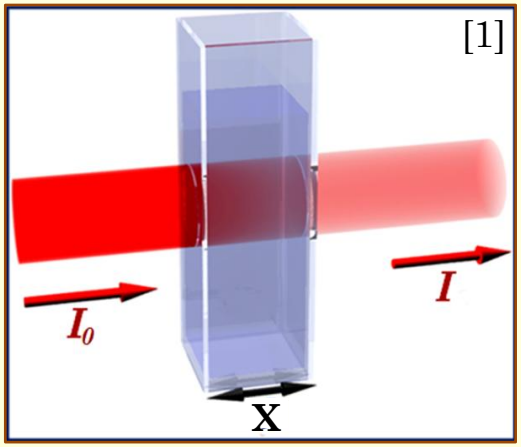
✓ნებისმიერ ნივთიერ გარემოში სინათლის გავრცელებისას, მისი ენერგიის ნაწილი რჩება ამ გარემოში - შთაინთქმება;

▪სხეულიდან გამოსული სინათლის **I** ინტენსიურობა ნაკლებია დაცემული სინათლის $\mathbf{I_0}$ ინტენსიურობაზე;

▪მშთანთქმელი ნივთიერების **X** **სისქის** ფენაში გასული **l**-ტალღის სიგრძის **მონოქრომატული** სინათლის ***I*** **ინტენსიურობას** განსაზღვრავს **ბუგერ-ლამბერტ-ბერის** კანონი

$$I = I_0 \exp(-k_l X) \qquad (2.1)$$

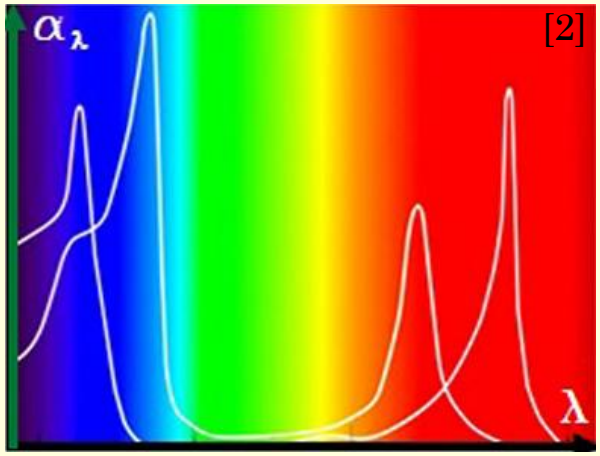
{1729 წ. კანონი **ექსპერიმენტალურად** დაადგინა ბუგერმა. 1760 წ. **თეორიულად** დაასაბუთა ლამბერტმა. 1852 წ. ბერიმ ის მიუსადაგა არამშთანთქმელ გამხსნელში მიღებული მშთანთქმელი ნივთიერების **ხსნარების შთანთქმის პროცესს**};



P.Bouguer
1698-1758

I.Lambert
1728-1777

A.Beer
1825-1863



▪k_λ- *<u>შთანთქმის</u>* *<u>მაჩვენებელი</u>* განსაზღვრავს თუ **λ-ტალღის სიგრძის დაცემული სინათლის ინტენსიურობის რა ნაწილს შთანთქავს ნივთიერების ერთეულოვანი სისქის ფენა:**

$$(2.1) \Rightarrow k_\lambda = |dI| / I_0\, dX \quad (2.2) \Rightarrow [k_\lambda] = 1\ м^{-1};$$

▪შთანთქმის k_λ მაჩვენებლის სინათლის λ-ტალღის სიგრძეზე დამოკიდებულებას **ნივთიერების შთანთქმის სპექტრი** [2] ეწოდება;

•*<u>ნივთიერების</u>* მახასიათებელ შთანთქმის **მაჩვენებელთან** ერთად, გამოიყენება [2] *<u>სხეულის</u>* მახასიათებელი α_λ შთანთქმის **კოეფიციენტიც**: $\alpha_\lambda = k_\lambda \cdot X$ (2.3)

▪ნივთიერებაში სინათლის ტალღის გავრცელებას თან ახლავს მისი *ინტენსიურობის* **შემცირება**, ვინაიდან **ელექტრომაგნიტური ენერგია გარდაიქმნება შინაგან ენერგიად** (გათბობა, ატომების აგზნება და იონიზაცია, ფოტოქიმიური რეაქციები), ან ინდუცირებულ **მეორადი გამოსხივების ენერგიად**;

▪k_λ **შთანთქმის** მაჩვენებლის **სიდიდეს**, შთანთქმული გამოსხივების **λ ტალღის სიგრძესთან** ერთად, განსაზღვრავს მშთანთქმელი ნივთიერების **გვარობა**, მისი **ფიზიკური მდგომარეობა**;
▪k_λ იმ **მანძილის შებრუნებული სიდიდეა**, **რომელზეც მონოქრომატული ტალღის ინტენსიურობა მცირდება e**=2.718 -ჯერ;

▪**ბუგერ-ლამბერტ-ბერის** კანონის ფიზიკური აზრი: **ფოტონების შთანთქმის პროცესი** სინათლის კონაში **ფოტონების სიმკვრივისგან** (ნივთიერებაში გასული **სინათლის ინტენსიურობისგან**) **დამოუკიდებელია**;
•ანუ, **მშთანთქმელი ცენტრების რაოდენობა ნივთიერების მახასიათებელი** პარამეტრია და **დაცემული ფოტონების რიცხვზე არაა დამოუკიდებული** {ეს დებულება შეიძლება დაირღვეს სინათლის ძალიან დიდი ინტენსიურობისას};

▪ბერის შესწორება მშთანთქმელი **ხსნარებისთვის**, შემდეგნაირად განსაზღვრავდა შთანთქმის მაჩვენებელს

$$k_\lambda = \varkappa_\lambda C \qquad (2.4)$$

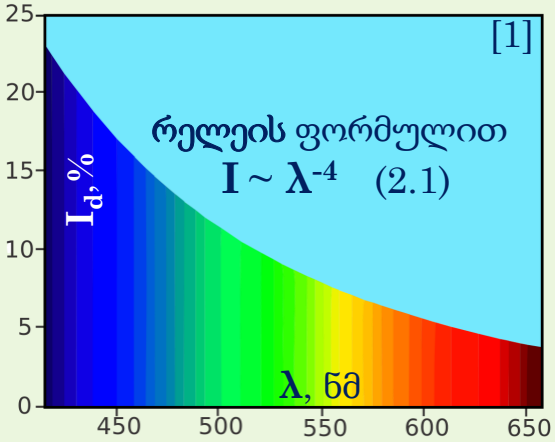
•**C** - გახსნილი ნივთიერების **კონცენტრაციაა**;
•$\varkappa_\lambda$ - **კონცენტრაციისგან დამოუკიდებელი** კოეფიციენტი, რომელიც ასახავს ნივთიერების *<u>მოლეკულის</u>* *"ურთიერთობას"* **λ** ტალღის სიგრძის **სინათლესთან** და ეს *<u>ურთიერთქმედება</u>* **გარემომცველი მოლეკულებისგან** **დამოუკიდებელია**;

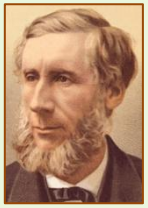
3.სინათლის გაბნევა

▪**ნივთიერებასთან ურთიერთქმედების** შედეგად, ოპტიკური გამოსხივების რომელიმე **მახასიათებლის ცვლილებას** უწოდებენ **სინათლის გაბნევას**;

▪**სინათლის გაბნევის** აქტი მოიცავს ნივთიერების ნაწილაკის მიერ **ფოტონის** {**ħω** ენერგიით, **ħk** იმპულსით, **μ** პოლარიზაციით} **შთანთქმას** და, *შემდგომ*, **ფოტონის** {**ħω'** ენერგიით, **ħk'** იმპულსით, **μ'** პოლარიზაციით} **გამოსხივებას**;

▪სრულყოფილად გაბნევის პროცესი აიწერება **კვანტური** თეორიით, მაგრამ ძირითადი დებულებები შეიძლება გაგებული იყოს სინათლის **ტალღური** თეორიის ფარგლებშიც;





J.Tyndall
1820-1893

J.Strutt
B-n Rayleigh
1842-1919

M.Smoluchowski
1872-1917

▪**ტალღური** თეორიის მიხედვით, სინათლის ტალღის **ელექტრული ველი** იწვევს ატომის შემადგენელი **ელექტრონების** **რხევას** და ისინი, ყველა მიმართულებით, ასხივებენ **მეორად სფერულ ტალღებს**;

▪**ტინდალის** ცდების შესაბამისად, სინათლის **გაბნევის ცენტრს** შეიძლება წარმოადგენდეს ნებისმიერი მიკრო, თუ მაკრო **არაერთგვაროვნება**;

▪გაბნევა ხორციელდება **მაღალი სისუფთავის** სითხეებსა და აირიბშიც. მიზეზი - მოლეკულების *სითბური* მოძრაობის **ქაოსურობის** გამო **სიმკვრივის** (ე.ი., **გარდატეხის მაჩვენებლის**) **ფლუქტუაციებია** {ეს - **მოლეკულური** გაბნევა - გამოავლინა სმოლუხოვსკიმ, 1908 წ.};

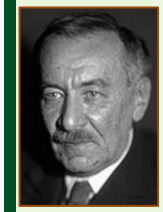
▪გაბნევა **დრეკადია**, თუ **ω = ω'** და **არადრეკადი** -, როდესაც **ω ≠ ω'**;

▪გამოყოფენ გაბნევის რამდენიმე მექანიზმს, სინათლის **λ ტალღის სიგრძესა** და გამბნევი ნაწილაკების **a ხაზოვან ზომებს** შორის **თანაფარდობის** მიხედვით:

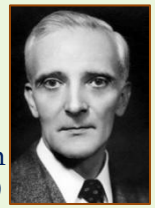
<u>1</u>.**რელეის** გაბნევა - გაბნევა ნაწილაკების მცირე ზომისას **a** ≤ **λ**/15;

G.Mie
1868-1957

<u>2</u>.**მი**-ს გაბნევა - გაბნევა ნაწილაკების **a** > **λ**/15 ზომისას;



L.Mandels-
htam
1879-1944



L.Brillouin
1889-1969

<u>3</u>. **მანდელშტამ-ბრილუენის** გაბნევა - კონდენსირებული მდგომარეობისთვის {მყარი სხეული, სითხე} დამახასიათებელი გაბნევა. მას ნივთიერების მოლეკულების დრეკად რხევასთან ოპტიკური გამოსხივების ურთიერთქმედება განაპირობებს;

•პროცესი **ვლინდება** გამოსხივების **სპექტრალური შემადგენლობის** (მახასიათებელ სიხშირეთა) **ცვლილებით**;

<u>4</u>.**რამანის** (**კომბინაციური**) გაბნევა - **ოპტიკური** გამოსხივების სპეციფიური, **არადრეკადი** გაბნევა აირებსა, სითხეებსა და კრისტალებში, რომელსაც (რელეის გაბნევისგან განსხვავებით) თან ახლავს **გაბნეული სინათლის** სპექტრში ისეთი **სიხშირის სპექტრალური ხაზების** **არსებობა**, რომლებიც სინათლის პირველად {ამგზნებ} სპექტრში **არ** **არსებობდნენ**;

•ამ გაჩენილი ხაზების **რაოდენობა** და სპექტრალური **მდებარეობა** {**კომბინაციები**} დამოკიდებულია **ნივთიერების მოლეკულურ აღნაგობაზე**;

•**რამანის სპექტროსკოპია** ქიმიური ანალიზის, ნივთიერების შემადგენლობის და აღნაგობის შესწავლის ეფექტური მეთოდოლოგიაა;

Ch.Raman
1888-1970

<u>5</u>.**მრავალჯერადი** გაბნევა - განიხილება როგორც **ერთჯერადი** გაბნევების **ჯამური** **შედეგი**;

✓**სინათლის გაბნევა კვლევის მძლავრი ინსტრუმენტია**. მის საფუძველზე IBM-ში განსაზღვრეს მუხტების განაწილება ნახშირბადის **ნანომილებში** {**nanotube**} [2] ;

▪მიკროსქემების უნიკალური მასალა - **ნანომილი** - **ნახშირბადის** ცილინდრული ფორმის [3] გრძივი **მოლეკულა**:

•L სიგრძით ათეულ სანტიმეტრამდე და მეტიც [4];

•D ≥ 2-40 ნმ დიამეტრით. ანუ, არსებობს D, რომელიც თმის დიამეტრზე ~10^3-ჯერ ნაკლებია;

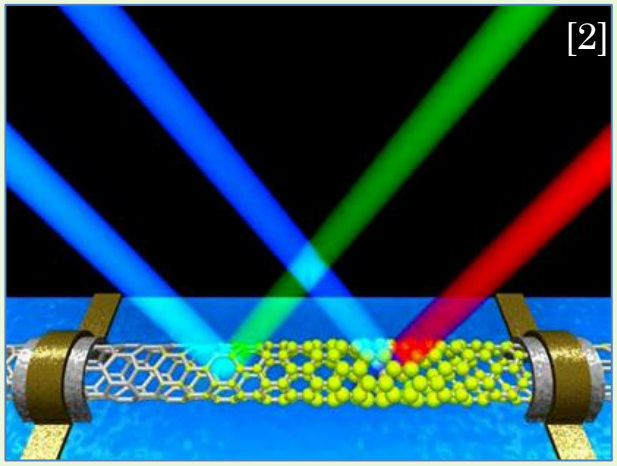
•**ფოლადზე მტკიცე**, მაგრამ მსუბუქი და მარტივად დეფორმირებადი (მცირე იუნგის მოდული);

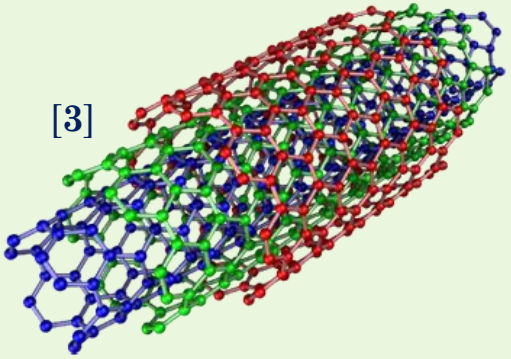
•**პირდაპირზონიანი ნახევრად გამტარი**, მაღალი ელექტროგამტარობით;

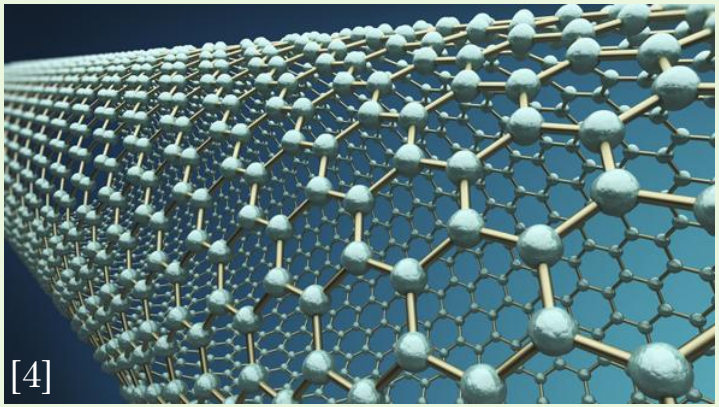
▪ტრანზისტორის კონტაქტის სიგრძე {მნიშვნელოვანი პრობლემა ნანოტექნოლოგიაში}:

•Si-ტექნოლოგიაში – **25** ნმ {Intel}. შემცირებისას - კონტაქტის წინაღობა მნიშვნელოვნად იზრდება;

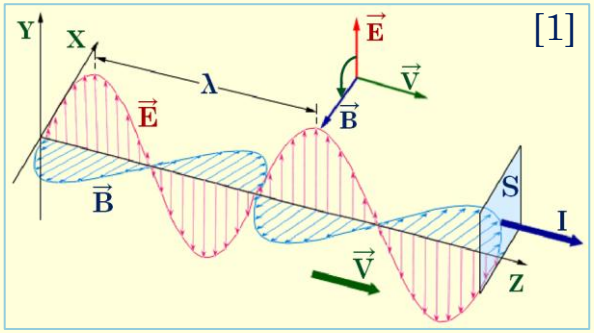
•**ნანომილებში** – **9** ნმ {IBM, X.2015}, თითქმის უცვლელი წინაღობით;


[2]


[3]


[4]

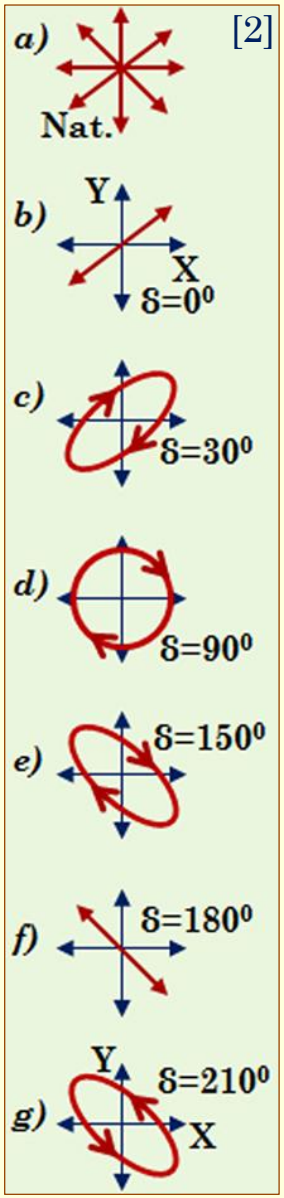
4.სინათლის პოლარიზაცია



▪**ტალღურ** მოვლენებს, ინტერფერენციასა და დიფრაქციასთან, ერთად მიეკუთვნება **პოლარიზაციაც**, მაგრამ ის **მხოლოდ განივი** [1] ტალღებისთვის არის დამახასიათებელი;
▪**სინათლის პოლარიზაცია** ასახავს ტალღის **განივ ანიზოტროპულობას**, ანუ სინათლის *<u>გავრცელებისადმი</u>* **მართობულ** სიბრტყეში **მიმართულებათა არაექვივალენტურობას**;

▪ცალკეული **ატომის (მოლეკულის)** გამოსხივება, თითოეულ აქტზე - **პოლარიზებულია**. მაგრამ, სინათლის მაკროსკოპული წყარო შეიცავს **უამრავ** მნათ ნაწილაკს და მათი ტალღათა ერთობლიობა $\vec{E}$-ს **რხევის მიმართულების** მიხედვით **მოუწესრიგებელია**;
▪ამდენად, **მზე** და ნებისმიერი სხვა **სინათლის წყარო** (**ლაზერის** გარდა) ასხივებს **არაპოლარიზებულ** {**ბუნებრივ**} სინათლეს [2**a**];

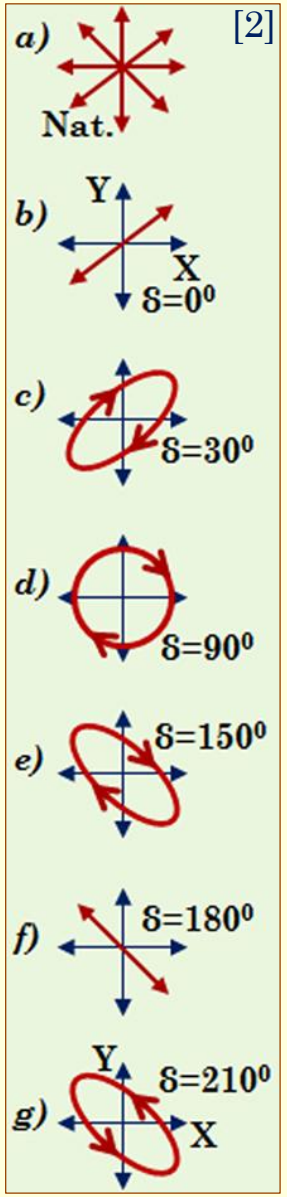
▪სინათლეს, რომელშიც $\vec{E}$ ვექტორის (მისი $\vec{E}_X$, $\vec{E}_Y$ კომპონენტების) **რხევათა მიმართულებები მოწესრიგებულია** ეწოდება **პოლარიზებული** სინათლე;
▪ $\vec{E}_X$, $\vec{E}_Y$ კომპონენტების რხევების **δφ ფაზათა სხვაობის** მიხედვით ვლინდება პოლარიზაციის სხვადასხვა **სახე** [2];
▪სინათლე **პოლარიზებულია**:
•[2**b,f**] **წრფივად (ბრტყლად)** - $\vec{E}$-ს რხევა ხდება *<u>ერთი</u>* *<u>წრფის</u>* გასწვრივ - **δφ**=0⁰, ან **δφ**=180⁰;

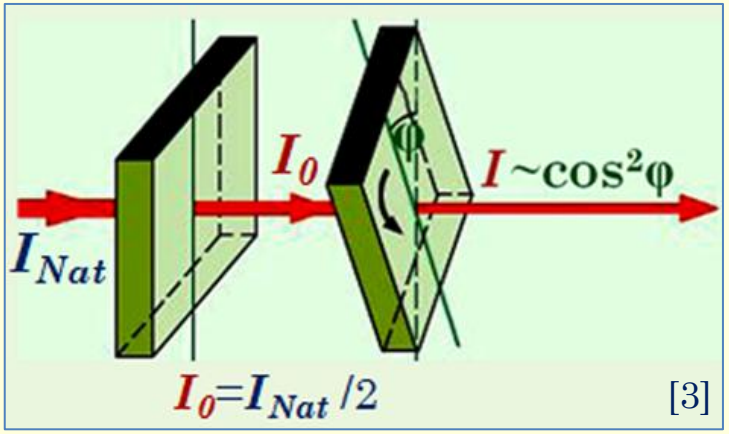


δφ-ფაზათა სხვაობა E_X-E_Y შორის

•[2c,e,g] ელიფსურად - $\vec{E}$-ს ბოლო შემოწერს ელიფსს {არსებობს **ერთი** *მიმართულების,* **ორ ურთიერთმართობ** სიბრტყეში პოლარიზებული $\vec{E}_X$, $\vec{E}_Y$ **მონოქრომატული** ტალღა, რომელთა ვექტორული ჯამი აყალიბებს გარკვეული *ორიენტაციის* **ელიფსურ** პოლარიზაციას: $\delta\varphi=0^0$, $\delta\varphi=150^0$, $\delta\varphi=210^0$;

•[2d] წრიულად - $E_x=E_y$, $\delta\varphi=90^0$. წრიული პოლარიზაცია **ელიფსურის** კერძო შემთხვევაა;





E.Malus
1775-1812

▪ *მალიუსმა* -

•განსაზღვრა ცნებები - **პოლარიზაციის სიბრტყე** და **წრფივი პოლარიზაცია**;

•გამოავლინა სინათლის **პოლარიზაცია არეკვლისას**;

•შეისწავლა კრისტალებში სინათლის **ორმაგი სხივთტეხა**;

•გამოიკვლია *ტურმალინის* 2 ფირფიტაში {*პოლარიზატორი*, *ანალიზატორი*} გასული სინათლის **ინტენსიურობის დამოკიდებულება** ფირფიტების **ურთიერთორიენტაციაზე** [3] და ჩამოაყალიბა **მალუსის კანონი**:

$$I = I_0\cos^2\varphi \quad (4.1)$$

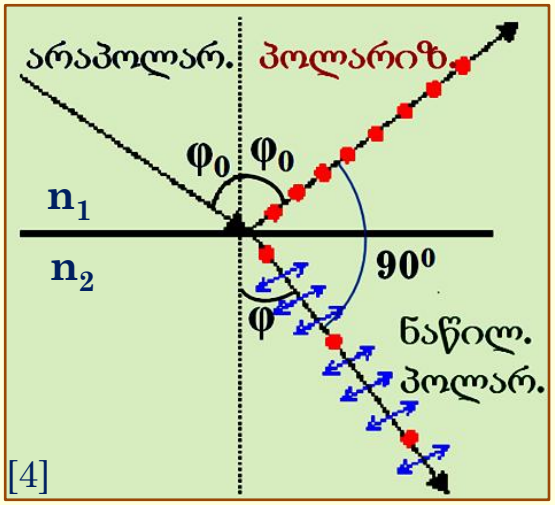
▪ორი დიელექტრიკის გამყოფ ზედაპირზე *არაპოლარიზებული* სინათლის **გარკვეული** (φ_0 - *ბრიუსტერის*) კუთხით დაცემისას შესაძლებელია მიღწეული იყოს **არეკვლილი** სხივის **სრული პოლარიზაცია** [4];

▪*ბრიუსტერის* კანონის თანახმად - **არეკვლილი სხივი სრულად მაშინ არის პოლარიზებული, როცა დაცემის კუთხის ტანგესი გარემოთა გარდატეხის ფარდობითი მაჩვენებლის ტოლია**

$$\mathbf{tg}\varphi_0 = \mathbf{n}_{21} = \mathbf{n}_2 / \mathbf{n}_1 \quad (4.2)$$

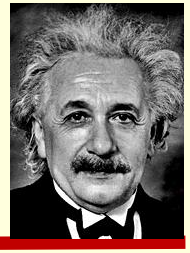
▪**ბრიუსტერის** **კუთხით დაცემისას არეკვლილი და გარდატეხილი სხივები ურთიერთმართობულნი არიან;**

E.Brewster
1781-1868



[4]

“ყველამ ბავშვობიდან იცის, რომ ესა თუ ის შეუძლებელია. მაგრამ, ყოველთვის გამოჩნდება უვიცი, რომელმაც ეს არ იცის. აი, სწორედ ის აკეთებს აღმოჩენას.” Albert Einstein



1879 - 1955

რამდენი უნდა იცოდე, რომ იცოდე რამე ?!

სტუ-ს ფიზიკის კურსის *(4 სემესტრი)* ლექციების კონსპექტი

ლექცია **3** | **თემა:** | სემესტრი **IV**

ფარდობითობის სპეციალური თეორია { თ. I }

028 **1.კლასიკური ფიზიკის და ფარდობითობის თეორიის დებულებები**

032 **2.დროის შუალედის ფარდობითობა**

1.კლასიკური ფიზიკის და ფარდობითობის თეორიის დებულებები

"გაუმართლებელია იმ ცნებების არაკრიტიკული გამოყენება, რომლებიც ყოველდღიური ცხოვრებიდან თუ კლასიკური ფიზიკიდან არიან აღებულნი."

Werner K. Heisenberg

▪**კლასიკური ფიზიკა - ეს არის ფიზიკა, რომელიც არსებობდა კვანტური ფიზიკის და ფარდობითობის თეორიის ჩამოყალიბებამდე;**

•**კლასიკური ფიზიკა** ეყრდნობა *აღორძინების* ეპოქის მოსაზრებებს და იდეებს;

▪**კლასიკური** ფიზიკის **განმსაზღვრელი** *პრინციპები*:

•**დეტერმინიზმი - მიზეზები ცალსახად განსაზღვრავენ შედეგებს;**

•**სივრცე** და **დრო - აბსოლუტური ცნებებია**, ანუ მათი გაზომვის შედეგები **არც ათვლის სისტემაზე** და **არც** ობიექტის დამკვირებლის *მიმართ* მოძრაობის **სიჩქარეზე** **დამოკიდებელი არ არის;**

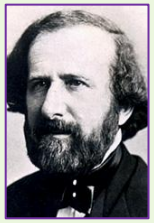
•**უწყვეტობა - ფიზიკური სისტემის** {ნებისმიერი} **სიდიდის** {ნებისმიერი} **ცვლილებისას**, ის თანმიმდევრულად **გაუტოლდება ყველა** {უსასრულო} **შუალედურ მნიშვნელობას** საწყისსა და საბოლოოს შორის;

▪**კლასიკური** ფიზიკის **ფუნდამენტური** *თეორიებია*:

•**კლასიკური მექანიკა** (გალილეი, ნიუტონი);

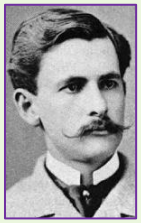
•**თერმოდინამიკა** და **სტატისტიკური ფიზიკა** (ბოლცმანი);

•**კლასიკური ელექტროდინამიკა** (მაქსველი);



H.Fizeau
1819–1896.

▪კლასიკური ფიზიკის გადახედვას ბიძგი მისცა *ფიზოს* (1851წ.) და *მაიკელსონის* (1881წ.) იმ ცდებმა, რომელთა შედეგებმა ფაქტიურად **უარყო ეთერის** {**მთელი სამყაროს მომცველი** და **ურთიერთქმედებათა შუამავალი** განსაკუთრებული **გარემოს**} არსებობა;



A.Michelson
1852–1931.
ნობელი -1921წ.

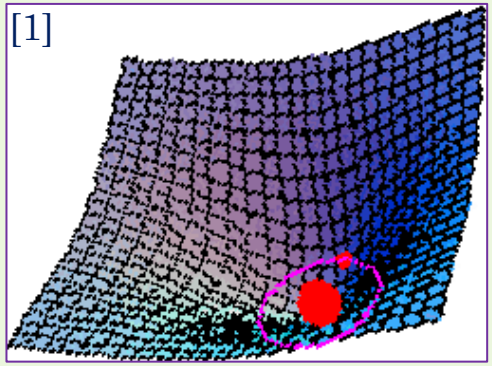
•{ცნების “αιυηρ - ეთერი, ცა” გამოყენება დაიწყეს ძველმა **ბერძნებმა**, 2500 წლის წინ};
•**დეკარტის** აზრით (1618წ.) - ეთერი ავსებს მთელ სივრცეს და **სინათლის მატერიალური გადამტანია;**
•ფიზიკურ პროცესებში ეთერის როლი განიხილება **ნიუტონის, ფრენელის, ლორენცის** მნიშვნელოვან შრომებში;
•**მაქსველმა** შექმნა **ეთერის საკუთარი მოდელი** და დაეყრდნო მას **ელექტროდინამიკის** ფუნდამენტური კანონების ჩამოყალიბებისას;
•**ფიზოს** და {განსაკუთრებით} **მაიკელსონის** ცდებმა **დაასრულეს** ეთერის ისტორია;

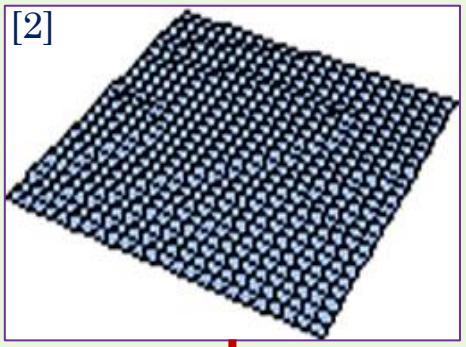
ა.აინშტაინი
1879–1955.

1905 წელი - **ფოტოეფექტის** (ნობელი -1921წ.) **და ფარდობითობის სპეციალური თეორიის** **წელი !**

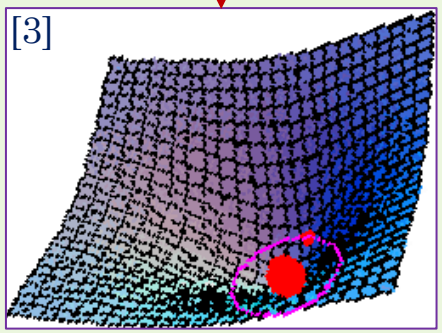
▪XX საუკუნის დასაწყისისთვის გამოაშკარავდა შეუთავსებლობა გალილეი-ნიუტონის **ფარდობითობის პრინციპსა** და **ელექტრომაგნეტიზმის** მაქსველის კანონებს შორის. პრობლემა წარმატებით გადაიჭრა **ა.აინშტაინის ფარდობითობის სპეციალური თეორიის ფარგლებში** (1905 წ.);
•თეორია “**სპეციალურია**” იმ გაგებით, რომ **იხილავს მხოლოდ** *<u>წრფივ</u>* და *<u>თანაბარ</u>* **მოძრაობას**;

▪*1916წ. აინშტაინმა შექმნა* ***ფარდობითობის ზოგადი თეორია****, რომელშიც პოსტულირებულია, რომ* ***გრავიტაციული პროცესები*** *განპირობებულია* ***არა*** ***სივრცე-დროში*** *არსებული <u>სხეულების</u> (<u>ველების</u>)* ***ძალური ურთიერთქმედებით****, არამედ* ***თვით სივრცე-დროის დეფორმაციით****, რომელიც უკავშირდება* ***მასა-ენერგიის არსებობას*** [1]. *დღეს ეს თეორია ყველაზე* ***წარმატებული*** *და* ***პრაქტიკულად გამოყენებადი*** ***გრავიტაციული თეორიაა*** *(მაგ.: ასტრონომიული დაკვირვებები, კოსმოსში ნავიგაციური სისტემები,...);*





▪ *მასა-ენერგიის გავლენით სივრცე-დროის [2]=>[3] დეფორმაციის გარკვეულ ანალოგად, გამოდგება ცირკის მსახიობების {გამიზნული, თუ შემთხვევითი} ვარდნისას (ასევე, მასა-ენერგიის გავლენით) დაჭიმული დამცავი ბადის მაფიქსირებელი ჩაღუნვა [4]=>[5];*



▪ ფარდობითობის *სპეციალური* თეორია ეყრდნობა ორ *პოსტულატს*: {I წარმოადგენს გალილეის პოსტულატის **განზოგადოებას** მთელ ფიზიკაზე; II აფიქსირებს და **მსოფლიო მუდმივას** **დონეზე** აჰყავს **ვაკუუმში სინათლის გავრცელების სიჩქარის** სიდიდე $\mathbf{c} = \mathbf{3 \cdot 10^8}$ მ/წმ}:

ფარდობითობის *სპეციალური* თეორია ორი *პრინციპი*:
I-ფარდობითობის პრინციპი: ფიზიკის კანონებს **ერთნაირი სახე** აქვს **ნებისმიერი** ინერციული ათვლის სისტემის მიმართ;
II-**სინალის სიჩქარის მუდმივობის** პრინციპი: **ცარიელ** სივრცეში **სინათლე ვრცელ-**დება **სავსებით განსაზღვრული c სიჩქარით**, **რომელიც** **არ არის** **დამოკიდებული** **წყაროს** **თუ** **დამკვირვებლის** **სიჩქარეზე**;

ამრიგად:

•(I) **ინერციული** სისტემები **ეკვივალენტურნი** არიან, ანუ არავითათარი **მნიშვნელობა** **არა** აქვს მათი **მოძრაობის სიჩქარეს** და არც იმას, რომელს მივიჩნევთ "მართლაც" **უძრავად**, ხოლო რომელს – მის მიმართ **მოძრავად**.
•ფიზიკამ **უარყო** **აბსოლუტური ათვლის სისტემის** (ეთერის) ცნება, ხოლო **ფარდობითობის** **თეორიის** საფუძველზე მოხერხდა მაქსველის ელექტრო-დინამიკასა {ოპტიკის ჩათვლით} და გალილეის კლასიკურ ფარდობითო-ბის პრინციპს შორის არსებული წინააღმდეგობის დაძლევა;

•(II) **გამორიცხულია** ბუნებაში $\mathbf{c} = 3 \cdot 10^8$ მ/წმ სიჩქარეზე **მეტი** სიჩქარის **არსებობა**. მაშასადამე, განურჩევლად **სინათლის** **წყაროსა** და **დამკვირ-ვებლის** **ურთიერთის მიმართ** **სიჩქარის** სიდიდისა, სინათლის სიჩქარე მაინც **დარჩება** **უცვლელად** **c**-ს ტოლი. ამდენად, გალილეი-ნიუტონის ("კლასიკური") ფარდობითობის პრინციპის შესაბამისი **სიჩქარეთა** **შეკ-რების** **კანონი**, **ასეთი** **დიდი** **სიჩქარეებისას**, **სამართლიანი** **აღარ** **არის**;

2.დროის შუალედის ფარდობითობა

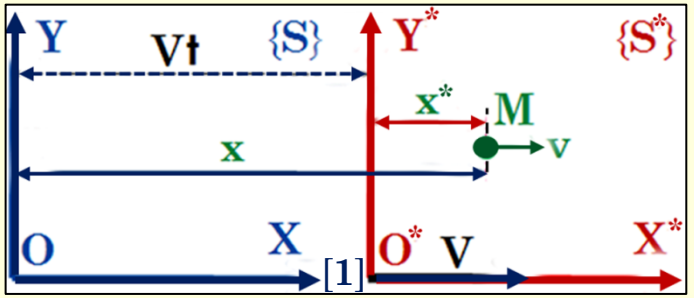
"ინტელექტუალი მუდამ მიკროსკოპით უყურებს სინამდვილეს."
Albert Einstein

▪მექანიკაში განხილული **გალილეის ფარდობითობის პრინციპის** თანახმად ფიზიკის *კანონები* ***ინვარიანტულნი*** არიან **ყველა *ინერციულ*** ათვლის სისტემაში;
•**პრინციპი** მარტივად აკავშირებს ერთმანეთთან **S**, **S*** სისტემებში [1] **M** სხეულის კოორდინატებსა და სიჩქარეებს

$$\{\mathbf{x} = \mathbf{x}^* + \mathbf{V}\mathbf{t}^*,\ \mathbf{y} = \mathbf{y}^*,\ \mathbf{z} = \mathbf{z}^*\} \qquad (2.1)$$

$$\{\mathbf{v}_x = \mathbf{v}^*_x + \mathbf{V},\ \mathbf{v}_y = \mathbf{v}^*_y,\ \mathbf{v}_z = \mathbf{v}^*_z\} \qquad (2.2)$$

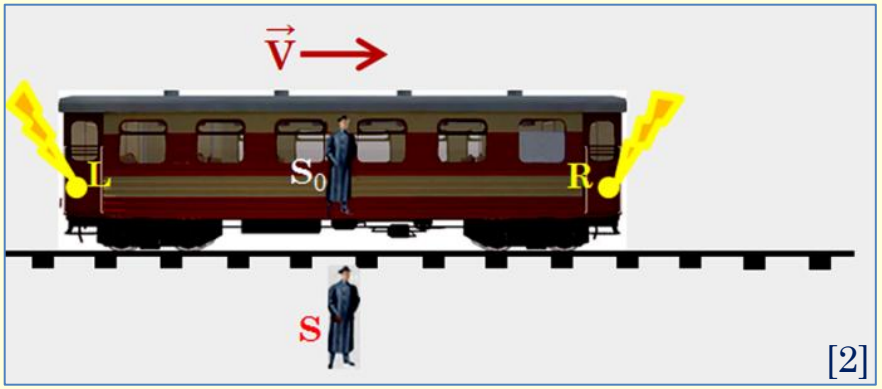
•**დრო** სისტემებში **ერთნაირად** მიედინება. ის კლასიკურ ფიზიკაში **აბსოლუტური სიდიდეა** $\mathbf{t} = \mathbf{t}^*$ (2.3);



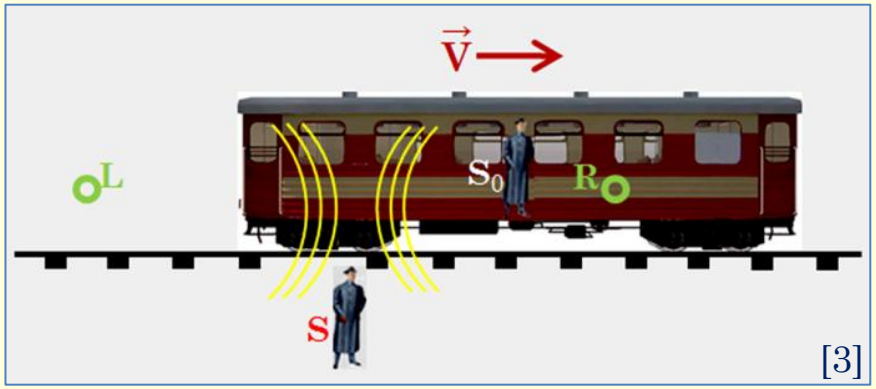
▪ფარდობითობის თეორიამ არა მარტო **უარყო** "ჭეშმარიტი" - **აბსოლუტური** ათვლის სისტემის (ეთერი) არსებობის შესაძლებლობა, არამედ **აბსოლუტურობა დროსაც წაართვა**;

▪**დროის შუალედის სიდიდე**, მოვლენათა **ერთდროულობის** და **თანმიმდევრობის** *<u>დაფიქსირება</u>* **დამკვირვებლის** მიერ შერჩეულ **ათვლის სისტემაზეა დამოკიდებული**. თუმცა, დროს **შენარჩუნებული** აქვს **შეუქცევადობა** და ის ყოველთვის **ერთი მიმართულებით** მიედინება;
•მოვლენების **ერთდროულობა** აშკარად მხოლოდ მაშინ ვლინდება, როდესაც ისინი დროის ერთსა და იმავე **მომენტში** და სივრცის ერთსა და იმავე **წერტილში** ხდება. მნიშვნელოვნად **დაშორებული** წერტილების შემთხვევაში შეიძლება გართულდეს პროცესების **თანმიმდევრობის** და **ერთდროულობის ცალსახა აღქმა**;

✓**დროის ფარდობითობაზე** მსჯელობა მოსახერხებელია **აინშტაინის** მიერ მოფიქრებული **აზრობრივი** ექსპერიმენტების საფუძველზე;



[2]



[3]

▪იმ მომენტში, როდესაც **V** სიჩქარით *თანაბარწრფივად* მოძრავი ვაგონის **შუა** წერტილი გაუსწორდა გარეთ მდგომ **S** დამკვირვებელს (ის **უძრავია** დედამიწასთან დაკავშირებულ ათვლის **ინერციულ** სისტემაში) ერთდროულად მოხდა ორი მოვლენა – ვაგონის **L** და **R** წერტილებს **დაეცა** მეხი [2];

▪**S** დამკვირვებელი, მისგან **ტოლი** მანძილით დაცილებული (**L**,**R**) წერტილებიდან გავრცელებულ სინათლეს **დროის ერთსა და იმავე მომენტში** ხედავს და მართებულად *<u>ასკვნის</u>* - *<u>ორივე</u>* მეხი ვაგონს **ერთდროულად** დაეცა;

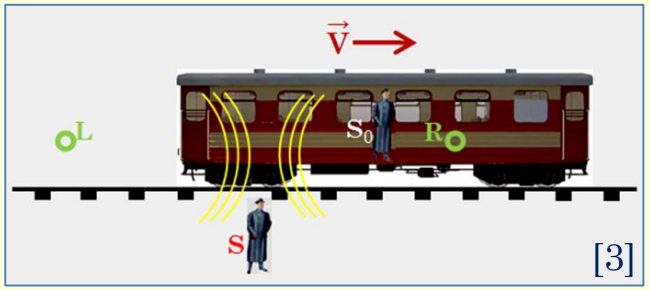
▪ამ მოვლენების მომსწრეა ვაგონის შუა წერტილში **მდგომი S_0** დამკვირვებელიც. **ვაგონთან** დაკავშირებული ათვლის **ინერციული** სისტემის **მიმართ** ის **უძრავია**;

▪ვაგონის მარცხნიდან მარჯვნივ **V** სიჩქარით მოძრაობის გათვალისწინებით, **S** დამკვირვებელი სამართლიანად მიიჩნევს, რომ **R** წერტილიდან გავრცელებული სინათლე **S_0** დამკვირვებელს **უფრო ადრე** მიაღწევს (ვაგონის და **S_0** დამკვირვებლის **სიჩქარის ამ მეხისადმი შემხვედრი მიმართულების** გათვალისწინებით), ვიდრე **L** წერტილიდან წამოსული სხივი [3];

▪**S_0** დამკვირვებელი მოვლენების მიმდინარეობას განსხვავებულად აღიქვამს:

•**<u>1</u>.იცის**, რომ **ტოლი მანძილითაა** დაცილებული მეხის დაცემის **ორივე** (**L**,**R**) წერტილიდან;

•2.ცხადია, S_0 დამკვირვებელი **დარწმუნებულია**, რომ **ორივე** წერტილიდან სინათლე **ტოლი** სიჩქარით ვრცელდება;
•ამავე დროს **ამჩნევს**, რომ **R** წერტილის გამოსხივება მას **უფრო ადრე აღწევს**, ვიდრე **L** წერტილიდან წამოსული [3];
•ამ **მონაცემებზე** დაყრდნობით აკეთებს *მისთვის* სწორ დასკვნას, რომ მეხი **ჯერ** დაეცა **R** წერტილს და მხოლოდ **შემდეგ L**-ს. ანუ, **მოვლენა R** წერტილში **წინ უძღოდა მოვლენას L** წერტილში;



[3]

▪ამრიგად, მოვლენები, რომლებიც **ერთ S** ინერციულ ათვლის სისტემაში **აღიქმებიან** როგორც **ერთდროულნი**, **არ არიან ერთდროულნი მეორე - S_0** ინერციულ ათვლის სისტემაში, და ამ **განსხვავებულ ხედვას** სისტემების **ერთმანეთის** მიმართ (**ფარდობითი**) **მოძრაობა** განაპირობებს;

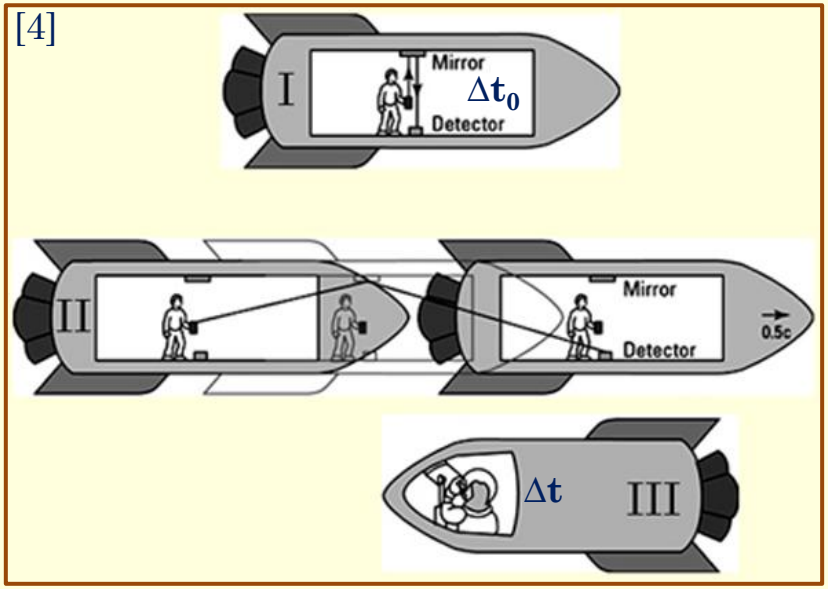
▪**S** და S_0 დამკვირვებლების მიერ *განსხვავებულად* აღიქმება მოვლენების **თანმიმდევრობაც**:
•**S** დამკვირვებელს **L** წერტილის ნათება **სულ ოდნავ** უფრო **ადრე** რომ დაენახა ვიდრე **R** წერტილის, ის **სამართლიანად დაასკვნიდა**, რომ მეხი **პირველად L** წერტილს **დაეცა**;
•მაგრამ, ასეთი მცირე წინსწრება რაიმე მნიშვნელოვან ზეგავლენას მოვლენების აღქმაზე S_0 ათვლის სისტემაში **ვერ მოახდენდა**. S_0 დამკვირვებლის დასკვნა **უცვლელი რჩება** - მოვლენა **R** წერტილში **უფრო ადრე მოხდა** ვიდრე **L**-ში;
•ამრიგად, **S** და S_0 დამკვირვებლები მოვლენებს *საპირისპირო* **თანმიმდევრობაში** ხედავენ. **მათთვის წარსული** და **მომავალი ერთმანეთს ენაცვლება**;
•ფარდობითობის თეორია **არ ანიჭებს უპირატესობას** *რომელიმე* სისტემას - **არ არსებობს "საუკეთესო"** სისტემა. ეს კი ნიშნავს, რომ **ორივე** დამკვირვებლის **დასკვნა** **თანასწორუფლებიანი** და **მართებულია**, "უბრალოდ" **ფარდობითია** თავად *ცნება* *ერთდროულობა*;

▪მნიშვნელოვანია, რომ თუმცა მოვლენათა **დროში** **თანმიმდევრობა** სხვადასხვა დამკვირვებლებისთვის **დამოკიდებულია** მათ **ფარდობით სიჩქარეზე**, ფარდობითობის თეორიაში **უცვლელადაა შენარჩუნებული მიზეზობრივ–შედეგობრივი** **კავშირის** **არსი**;

▪**ვერც ერთი** **დამკვირვებელი**, **როგორც** **არ** **უნდა** **მოძრაობდეს** **ის**, **ვერ** **დააფიქსირებს** **მოვლენებს** **ისეთ** **თანმიმდევრობაში**, **რომ** ***შედეგი წინ უსწრებდეს მიზეზს***;

▪ერთმანეთის მიმართ **c**-ს თანაზომადი სიჩქარით მოძრავ სისტემებში **დრო** **განსხვავებულად** **მიედინება** და განსხვავება შეიძლება გაანალიზდეს შემდეგი **აზრობრივი** ექსპერიმენტით:

[4]



▪**V**=0.5**c** სიჩქარით მოძრავ ხომალდში ლაზერის სხივი ეცემა ჭერზე დამაგრებულ სარკეს, აირეკლება და Δt_0 (“სისტემის **საკუთარ** **დროში**”) რეგისტრირდება დეტექტორით [4-I]. **დიდი** **სიჩქა- რე** **ამ** **პროცესზე** **არავითარ** **გავლენას** **არ** **ახდენს**;

▪**განსხვავებულად** აღიქვამს სხივთა სვლას **უმნიშვნელო** სიჩქარით მოძრავ ხომალდში მყოფი დამკვირვებელი [4-III]. მისთვის, სწრაფი ხომალდის დიდი სიჩქარის გამო, სხივის **ტრაექტორიის** **სიგრძე** გაცილებით **მეტია** [4-II] და, შესაბამისად, **მეტია** მის მიერ აღრიცხული **Δt** **დროც**;

▪ხომალდების აზრობრივი მაგალითის საფუძველზე **ფიქსირდება** შემდეგი:

•ვთქვათ, **მოძრავ სისტემაში** გარკვეულ პროცესზე, დამკვირვებლის ზუსტი **საათის** მიხედვით, დაიხარჯა დრო Δt_0. იქ **მყოფი** დამკვირვებლის ხედვით **დროის** შენელებას სულაც **არა აქვს ადგილი** და ყველაფერი *ჩვეულ რითმში* მიმდინარეობს;

•**დედამიწაზე მყოფი** დამკვირვებლის ზუსტი **საათის** მიხედვით კი, **ხომალდზე** პროცესის შესრულებამ მეტი დრო (Δt) მოითხოვა. ამ **ორ დროს** შორის კავშირი ხომალდის **V** და სინათლის **c სიჩქარეთა ფარდობით** $\beta = V/c$ (2.4) განისაზღვრება:

$$\Delta t = \Delta t_0 / (1 - \beta^2)^{1/2} \quad (2.5)$$

▪(2.5)-ის შესაბამისად:

•$V \ll c$ ➡ $\beta \to 0$ ➡ $\Delta t = \Delta t_0$ - კლასიკური მექანიკა;

•$V \approx c$ ➡ $\beta \neq 0$ ➡ $\Delta t_0 < \Delta t$ - მოძრავ სისტემაში დროის დინება შენელებულია;

•(2.5) მკაცრად სამართლიანია, თუ განიხილება ისეთი ინერციული ათვლის სისტემები, რომელთა მიმართ **დროის მონაკვეთების შესადარებლად გამოყენებული მოვლენა** ხდება სივრცის ერთსა და იმავე წერტილში;

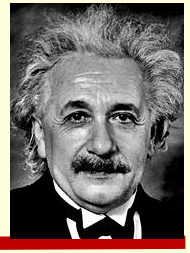
▪ნებისმიერ **მოძრავ ინერციულ** ათვლის სისტემაში **დრო** *შენელებულად* **მიედინება** თქვენს **საკუთარ ინერციულ** ათვლის სისტემასთან {თქვენი სისტემის საათთან!} **შედარებით** (დროის რელატივისტური შენელება);

▪დროის რელატივისტურ **შენელებას** უკავშირდება "ტყუპების პარადოქსი":

•*ერთი ტყუპი გაემგზავრა ხანგრძლივ კოსმოსურ მოგზაურობაში, მეორე დარჩა დედამიწაზე. მისი საათით, ხომალდზე დრო უფრო ნელა მიედინება;*

•*შედეგად, დაბრუნებული ტყუპი ძმა აღმოჩნდება დამხვედრილზე გაცილებით ახალგაზრდა;*

“ყოველი ფიზიკური თეორიის საწყისს წარმოადგენს არა ფორმულები, არამედ აზრები და იდეები.” Albert Einstein



1879 - 1955

რამდენი უნდა იცოდე, რომ იცოდე რამე ?!

სტუ-ს ფიზიკის კურსის *(4 სემესტრი)* ლექციების კონსპექტი

ლექცია 4 | **თემა:** | სემესტრი IV

ფარდობითობის სპეციალური თეორია { თ. II }

038 **1.წარსული, აწმყო, მომავალი**

039 **2.სიგრძის ფარდობითობა. ოთხგანზომილებიანი სივრცე-დრო**

042 **3.ლორენცის გარდაქმნები. სიჩქარეთა შეკრების რელატივისტური კანონი**

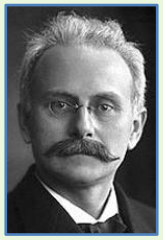
044 **4.რელატივისტური დინამიკა**

1.წარსული, აწმყო, მომავალი

"რაც უფრო მეტი აღმოჩენა ხდება, მით უფრო მტკიცედ ვიძენთ იმის ჩვევას, რომ გამოთქმა "ბუნების ახსნა" უფრო მოკრძალებული გამოთქმით - "ბუნების აღწერით" უნდა შევცვალოთ."

Werner Heisenberg

▪**დროის შუალედის ფარდობითობიდან** გამომდინარე, სხვადასხვა ათვლის სისტემაში **წარსულის** და **მომავლის** შესაძლო **საწინააღმდეგო აღქმის** გამო, ამ თითქოსდა ცხადი ცნებების (და, მით უფრო **აწმყოს** ცნების) განსაზღვრა გარკვეულ წინააღმდეგობას აწყდება. სიცხადის შეტანა სცადა ***ვერნერ ჰაიზენბერგმა*** :



W.Heisenberg
1901–1976.
ნობელი -1932 წ.

•"**წარსული**" - ამ ცნებით ყოველთვის ვგულისხმობთ იმ **მოვლენებს**, რომლებზეც ჩვენ შეგვიძლია რაღაც **ვიცოდეთ**, ან, ყოველ შემთხვევაში, შესაძლებელია რაღაც **ინფორმაციის მიღება**;

•"**მომავალი**" - მოიცავს ყველა იმ **მოვლენას**, რომლებზეც ჩვენ ჯერ კიდევ შეგვიძლია მოვახდინოთ გარკვეული **ზემოქმედება**, ან ერთგვარად **შევცვალოთ** ისინი, ან მათ **განხორციელებას** ხელი **შევუშალოთ**;

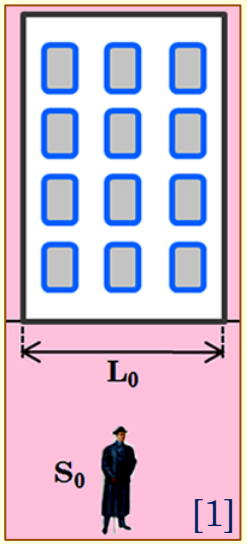
•"**აწმყო**" - ფარდობითობის თეორიაში **მომავალი წარსულისგან** დროის **სასრულო შუალედითაა** გამოყოფილი, რომლის ხანგრძლივობაც დამკვირვებლამდე არსებულ მანძილზეა დამოკიდებული. დამკვირვებელს **არ შეუძლია** რაიმე **იცოდეს**, ან რაიმე **ზემოქმედებას ახდენდეს** იმ მოვლენაზე, რომელიც სადღაც, შორეულ წერტილში ხდება დროის **ორ** სპეციფიკურ **მომენტს** შორის. **დროის** ამ **ორ წამს შორის მთელ სასრულო შუალედს** შეიძლება **დამკვირვებლისთვის** (დაკვირვების **მოცემულ მომენტში**) **აწმყო** ეწოდოს;

•ასევე, დროის ამ **ორ მომენტს შორის** მომხდარ **ნებისმიერ მოვლენას** შეიძლება **დაკვირვების აქტის მიმართ** "**ერთდროული**"ეწოდოს;

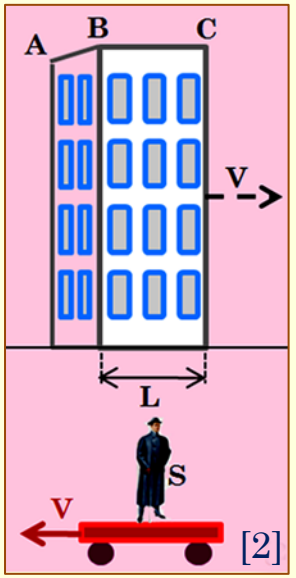
2.სიგრძის ფარდობითობა. ოთხგანზომილებიანი სივრცე-დრო

"გონება, რომელმაც ერთხელ გააფართოვა თავისი საზღვრები, არასოდეს აღარ დაუბრუნდება წინას." **Albert Einstein**

▪ფარდობითობის თეორიის შესაბამისად, **სხვადასხვა** ათვლის სისტემებში, ზოგადად, დროის ინტერვალებთან ერთად განსხვავებულია **სივრცული ინტერვალებიც** – სხეულის **სიგრძე**, სხეულებს შორის **მანძილი**;
▪**c** -ს **შესადარი V** ფარდობითი სიჩქარით **მოძრავი** სხეულის **სიგრძე ნაკ-ლებია იმ სიგრძეზე,** რომელიც მას **უძრავ მდგომარეობაში** აქვს;



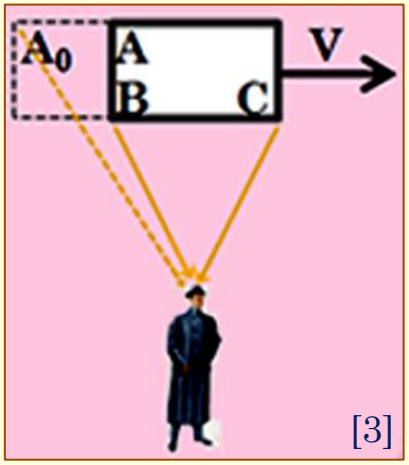
▪ერთსა და იმავე შენობას აკვირდება ჯერ **უძრავი** [1] დამკვირვე-ბელი (**S_0** ათვლის სისტემა), ხოლო შემდეგ **V** სიჩქარით **მოძრავი** [2] დამკვირვებელი (**S** ათვლის სისტემა);
•შენობის ზომები განისაზღვრა ორივე შემთხვევაში და მიღებული შედეგები **ერთმანეთს არ დაემთხვა**;
•**განსხვავება** გამოვლინდა მხოლოდ **სიჩქარის გასწვრივ განლაგე-ბული მონაკვეთებისთვის**. შენობა **დავიწროვდა** ($L < L_0$), თუმცა მისი **სიმაღლე** და **AB გვერდის** [2] **ზომა** დარჩა **უცვლელი**;



•**უძრავი დამკვირვებლის** მიერ **განსაზღვრულ** სხეულის **L_0 სიგრძეს** (ან, **მანძილს** ორ წერტილს შორის) უწოდებენ **საკუთარ სიგრძეს**;
•**მოძრაობის შედეგად** სხეულის **შემცირებული** სიგრძე **L** და მისი **საკუთარი L_0** სიგრძე მარტივ კავშირს ექვემდებარებიან:

$$L = L_0 (1 - \beta^2)^{1/2} \quad (2.1)$$

ცხადია, აქაც **β** სიჩქარეთა ფარდობას გამოსახავს (**$\beta = V / c$**);



▪მოყვანილ *აზრობრივ* მაგალითში, სინათლის სიჩქარის სასრულო მნიშვნელობის გამო, **სიგრძის ცვლილებასთან** ერთად გამოვლინდა **ხედვის "გაფართოებაც"**;

•**გავაჩეროთ** მარჯვნიდან მარცხნივ **V** სიჩქარით მოძრავი [2] **S** ათვლის სისტემა (დამკვირვებელი უძრავად იდგება შენობის ფასადის წინ). მაშინ, თავად შენობა **იმოძრავებს მის მიმართ V** სიჩქარით (**მარცხნიდან მარჯვნივ**) და დამკვირვებელი არა მარტო დააფიქსირებს ფასადის **დავიწროებას**, არამედ შენობის **გვერდით კედელსაც დაინახავს**, რომელსაც თავიდან [1] ვერ ხედავდა;

▪როდესაც შენობა **ძალიან სწრაფად** (**c**-ს შესადარი **V** სიჩქარით) მოძრაობს, ის **ველარ ფარავს** ყოველივეს, რაც ხდება მის უკან და დამკვირვებლამდე აღწევს **უკვე სამი სხივი**:

•ფასადის **B, C** წერტილებიდან არეკვლილი ორი სხივი;

•სხივი **A** წერტილის რამდენადმე უფრო ადრინდელი მდებარეობის ამსახველი $\mathbf{A_0}$ წერტილიდან [3], რომელსაც მოძრავი შენობა აღარ ეფარება. შედეგად, მხედველობა უკვე **გვერდით** კედელსაც **წვდება**;

▪უძრავი ათვლის სისტემის მიმართ **მოძრავ ინერციულ ათვლის** სისტემაში **დროის შენელების** და **სიგრძის შემცირების** ეფექტების **ერთიანობაში** განხილვა ცხადყოფს, რომ ისინი გარკვეულ წილად **აწონასწორებენ** თავიანთ **ზემოქმედებას** ამა თუ იმ **მოვლენის აღქმაზე**;

▪ამ შეხედულების განვითარებამ განაპირობა ცნების "**ოთხგანზომილებიანი სივრცე–დრო**" შემოტანა. ასეთ სისტემაში ნებისმიერი მოვლენა თუ სხეულის მდგომარეობა აიწერება **ოთხი** პარამეტრით. **სამი კოორდინატი** განსაზღვრავს **სივრცეში სად იმყოფება** სხეული {ან **ხდება** მოვლენა}, ხოლო **მეოთხე – დრო** აღწერს, თუ **ეს როდის ხდება**;

▪ **ოთხგანზომილებიანი სივრცე–დროის** შემოტანა გამართლებულია თუნდაც იმით, რომ სივრცე და დრო **არ არიან მკვეთრად გამიჯნული** ცნებები. **შეუძლებელია** სხეულის სივრცული **კოორდინატების** *განსაზღვრა* **დროისგან** დამოუკიდებლად, ხოლო **დროის – კოორდინატებისგან**;

▪ რაგინდ გასაკვირიც არ უნდა იყოს, ფარდობითობის თეორია უშვებს, **ათვლის ერთი სისტემიდან მეორეში გადასვლისას**, **სივრცის** და **დროის ერთმანეთში შერევას**, მათ ნაწილობრივ **ურთიერთშეცვლის** **შესაძლებლობას**;

3.ლორენცის გარდაქმნები. სიჩქარეთა შეკრების რელატივისტური კანონი

"მას შემდეგ, რაც ფარდობითობის თეორია ხელში მათემატიკოსებს ჩაუვარდათ, მე თვითონაც აღარ მესმის ის." ***Albert Einstein***

▪გალილეის კლასიკური გარდაქმნების გამოყენების არე შეზღუდულია. **კოორ-დინატების** და **დროის გარდაქმნის** თანაფარდობები, **რელატივისტური** სიჩქა-რეების შემთხვევისთვის, წარმოადგინა **ლორენცმა** 1904 წ.;

•**ლორენცის** თანფარდობები წინ უძღოდა ფარდობითობის თეორიას. შემდგომ, უკვე ფარდობითობის თეორიის საფუძველზე, ისინი გამოიყვანა **აინშტაინმა**;

▪ლორენცის გარდაქმნების {(3.1), (3.2)} თანაფარდობები ამყარებენ **S** ათვლის სისტემაში აღრიცხული **მოვლენის x,y,z კოორდინატების** და **t დროის მომენ-ტის** კავშირს, **S*** ათვლის სისტემაში აღრიცხულ **იგივე მოვლენის x*,y*,z* კო-ორდინატებსა** და **t*დროის მომენტს** მნიშვნელობებთან (**S** და **S*** ათვლის სისტემები მოძრაობენ **ერთმანეთის მიმართ V** სიჩქარით, X ღერძის გასწვრივ):

$$\{x = (x^*+Vt^*) / (1-\beta^2)^{1/2},\ y=y^*,\ z=z^*\} \quad (3.1) \qquad t=(t^*+Vx^*/c^2) / (1-\beta^2)^{1/2} \quad (3.2)$$

•(3.2) ასახავს როგორც **რელატივისტურ სიჩქარეზე** ($\beta=V/c$) **დროის დამოკიდე-ბულებას**, ასევე **სივრცითი** და **დროითი კოორდინატების გადახლართვას**;

▪ნივთიერი წერტილი მოძრაობს **S*** ათვლის სისტემაში **v** სიჩქარით, რომლის გეგმილებია v^*_x, v^*_y, v^*_z. ლორენცის (3.1), (3.2) გარდაქმნების საფუძველზე დგინდება **S** ათვლის სისტემაში v_x, v_y, v_z სიჩქარის გეგმილები:

$$\{v_x = (v^*_x + V) / (1 + \Xi),\quad v_y = v^*_y\,\gamma / (1 + \Xi),\quad v_z = v^*_z\,\gamma / (1 + \Xi)\} \quad (3.3)$$

(3.3)-ში გამოყენებულია აღნიშვნები:

$$\gamma=(1-\beta^2)^{1/2} \quad (3.4) \quad \text{და} \quad \Xi=Vv^*_x / c^2 \quad (3.5)$$

▪ლორენცის გარდაქმნებიდანაც **გამომდინარეობს** განხილული დროის შენელების და სიგრძის შემცირების რელატივისტური ეფექტები;
▪გარდაქმნების უმნიშვნელოვანესი შედეგი კი, ცნება **ერთდროულობის ფარდობითობის** დასაბუთებაში მდგომარეობს;

•ვთქვათ, $\mathbf{S^*}$ ათვლის სისტემის ორ წერტილში ($\mathbf{x_1^* \neq x_2^*}$), ამ სისტემის დამკვირვებლის თავლსაზრისით, **ერთდროულად** ($\mathbf{t_1^* = t_2^* = t^*}$) ხდება ორი მოვლენა;
•**S** სისტემის დამკვირვებელი (ლორენცის გარდაქმნების შესაბამისად) დაადგენს, რომ

$$\{\mathbf{x_1 = (x_1^* + Vt^*)/(1-\beta^2)^{1/2},\ \ x_2 = (x_2^* + Vt^*)/(1-\beta^2)^{1/2} \Rightarrow x_1 \neq x_2}\} \quad (3.6)$$

$$\{\mathbf{t_1 = (t^* + Vx_1^*/c^2)/(1-\beta^2)^{1/2},\ t_2 = (t^* + Vx_2^*/c^2)/(1-\beta^2)^{1/2} \Rightarrow t_1 \neq t_2}\} \quad (3.7)$$

▪ამრიგად, **S** ათვლის სისტემაში მოვლენები რჩებიან სივრცულად **განცალკევებულნი**, მაგრამ **კარგავენ ერთდროულობას**, ანუ **დროშიც განცალკევებულნი ხდებიან**;
▪მეტიც, {(3.6),(3.7)} ➡ დროში $\mathbf{t_2 - t_1}$ წანაცვლება განისაზღვრება $\mathbf{V(x_2^* - x_1^*)}$ გამოსახულებით, ე.ი. **მოვლენეთა თანმიმდევრობის აღქმა ხდება ათვლის სისტემაზე დამოკიდებუ- ლი** {ზოგში - I მოვლენა შეიძლება უსწრებდეს II მოვლენას, სხვაში - შეიძლება პირიქით};
▪ცხადია, ეს დასკვნა **არ ვრცელდება** მოვლენებზე, რომელთა შორის **არსებობს ფიზიკური მიზეზობრივ შედეგობრივი კავშირი**;

▪ყოველივე წარმოდგენილი, **კი არ უარყოფს** **გალილეის გარდაქმნებს** და, ე.ი., **ნიუტონის მექანიკას**, არამედ **განსაზღვრავს** მათი **კორექტულობის** **საზღვრებს**;
•ფაქტობრივად, კლასიკური ფიზიკა ვრცელდება სიჩქარეთა ვეებერთელა ($0 > \mathbf{V} < 0.1\mathbf{c}$) დიაპაზონზე. **ასეთი სიჩქარეებისას** $\boldsymbol{\beta \to 0}$, $\boldsymbol{\gamma = 1}$, $\boldsymbol{\Xi \to 0}$ და {(3.1),(3.2),(3.3)} თანაფარდობები იგივურად **უტოლდებიან** **გალილეის** ფორმულებს;

4.რელატივისტური დინამიკა

"არსებობს საოცარი საშუალება დავეუფლოთ საგანს მათემატიკურად ისე, რომ ვერც კი გავიგოთ მისი არსი." ***Albert Einstein***

▪ფარდობითობის თეორიამ, ლორენცის გარდაქმნების მიმართ **ინვარიანტულობის** უზრუნველსაყოფად, მოითხოვა {ნიუტონის} მექანიკის ზოგიერთი კანონის **დაზუსტება**;

▪კლასიკური იმპულსი $\vec{\mathbf{P}} = \mathbf{m}\,\vec{\mathbf{V}}$ შეიცვალა **რელატივისტური** იმპულსით

$$\vec{\mathbf{P}} = \mathbf{m}\vec{\mathbf{V}} / (1-\boldsymbol{\beta}^2)^{1/2} \quad (4.1) \qquad (\boldsymbol{\beta}=\mathbf{V}/\mathbf{c})$$

ე.ი., **რელატივისტური** იმპულსი **არ არის სიჩქარის პროპორციული**;

•**m** **მასა** ნაწილაკის <u>ფუნდამენტური</u> <u>მახასიათებელია</u>, რომელიც **არაა დამოკიდებული** **მოძრაობის სიჩქარეზე** და, ამდენად, **არც კონკრეტულ** **ათვლის სისტემაზე**;

•ამ განზოგადოებული **m** **მასის** "**წინამორბედი**" იყო {ეგრეთ წოდებული} $\mathbf{m_0}$ <u>*უძრაობის*</u> მასა. <u>*ტერმინოლოგიურად*</u> აღარაა ხმარებაში **სიჩქარეზე** **დამოკიდებული** $\mathbf{m_R}$ <u>*რელატივისტური*</u> მასაც;

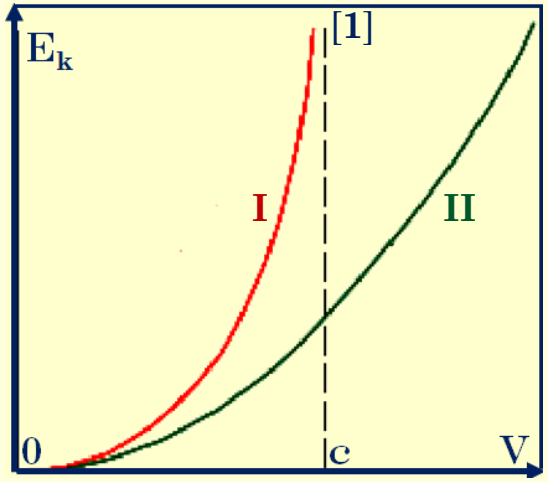
▪**რელატივისტური** **დინამიკის** **ძირითადი** **კანონი** ფორმალურად ასახავს ნიუტონის მეორე კანონს

$$\vec{\mathbf{F}} = d\vec{\mathbf{P}}/dt \quad (4.2)$$

•მაგრამ, ვინაიდან **P** **რელატივისტური** (4.1) **იმპულსი** **არ** არის ნაწილაკის სიჩქარის პროპორციული, მისი $d\mathbf{P}/d\mathbf{t}$ ცვლილებაც **არ** იქნება **a** აჩქარების <u>*პროპორციული*</u>. ამდენად, სიდიდით და მიმართულებით **მუდმივი** **ძალა** **აღარ** განაპირობებს **თანაბარაჩქარებულ** მოძრაობას;

▪ფარდობითობის თეორია, **V** სიჩქარით მოძრავი ნაწილაკის $\mathbf{E_k}$ **კინეტიკურ ენერგიას სხეულის E სრული** და $\mathbf{E_0}$ **უძრაობის ენერგიათა სხვაობით** განსაზღვრავს

$$\mathbf{E_k = E - E_0} \quad (4.3)$$



•**მოძრავი** ნაწილაკის **სრული ენერგია**

$$\mathbf{E = mc^2 / (1-\beta^2)^{1/2}} \quad (4.4) \quad (\beta = V/c)$$

•ნაწილაკის **უძრაობის ენერგია**

$$\mathbf{E_0 = mc^2} \quad (4.5)$$

•{(4.4),(4.5)} => (4.3) და კინეტიკური ენერგიისთვის მიიღება:

$$\mathbf{E_k = [mc^2 / (1-\beta^2)^{1/2}] - mc^2} \quad (4.6)$$

▪განსხვავება **რელატივისტური I** და კლასიკური **II** ნაწილაკების კინეტიკურ ენერგიათა შორის [1] მით უფრო აშკარაა, რაც უფრო **უახლოვდება V** მოძრაობის სიჩქარე სინათლის **c** სიჩქარეს;

▪როდესაც **V<<c** ორივე გრაფიკი ერთი კანონით აიწერება [1];

▪ფარდობითობის თეორიის **უდიდესი თეორიული და პრაქტიკული მნიშვნელობა** მდგომარეობს იმაში, რომ **უძრაობის მდგომარეობაშიც მყოფი m მასა ენერგიის ვეებერთელა მარაგის მატარებელია** {აინშტაინის ფორმულა (4.5)};

▪ამდენად, ნაწილაკის **მასის** $\Delta\mathbf{m}$-ით **შემცირებისას** უნდა **გამოიყოს** $\Delta\mathbf{E} = \Delta\mathbf{m}\cdot\mathbf{c^2}$ **ენერგია**;

▪ფარდობითობის თეორიით, ნაწილაკს შეიძლება **ჰქონდეს ენერგიაც** და **იმპულსიც**, მაგრამ **არ ჰქონდეს მასა m=0**, ანუ იყოს **უმასო ნაწილაკი** (მაგ., *ფოტონი*);

•**უმასო** ნაწილაკისთვის მარტივია კავშირი ენერგიასა და იმპულსს შორის

$$\mathbf{E = Pc} \quad (4.7)$$

“ჭკვიანი ისაა, ვინც გამოუვალი მდგომარეობიდან გამოსავალს მონახავს, ბრძენი კი ის, ვინც გამოუვალ მდგომარეობაში არასოდეს ვარდება.”?

რამდენი უნდა იცოდე, რომ იცოდე რამე ?!

სტუ-ს ფიზიკის კურსის *(4 სემესტრი)* ლექციების კონსპექტი

ლექცია 5 | თემა: | სემესტრი IV

სითბური გამოსხივება და მისი კვანტური ხასიათი

047 **1.სითბური გამოსხივება. აბსოლუტურად შავი სხეული**

050 **2.აბსოლუტურად შავი სხეულის გამოსხივების სპექტრები და კანონები**

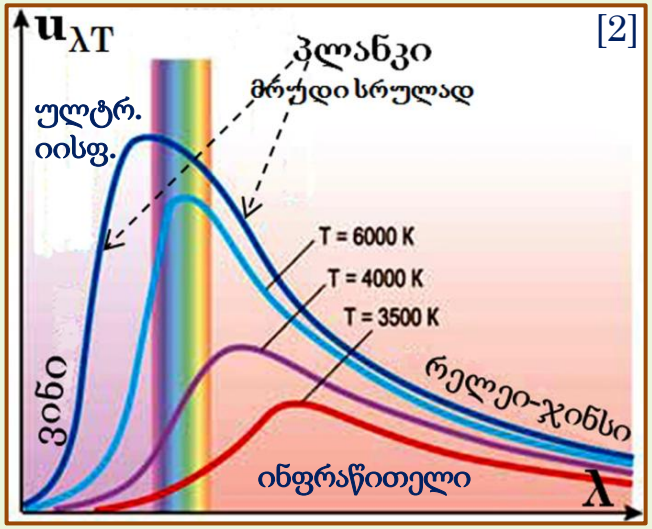
052 **3.პლანკის {რევოლუციური} კვანტური ხედვა**

054 **4.სინათლის ფოტონური თეორია**

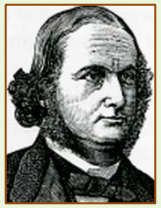
1.სითბური გამოსხივება. აბსოლუტურად შავი სხეული

✓**გამოსხივება**, ანუ ენერგიის სივრცეში გავრცელება, ცხადია, ყოველთვის **წყაროს ენერგიის შემცირებას** განაპირობებს;
▪გამოსხივების *შესანარჩუნებლად* წყაროს ენერგია განუწყვეტლივ უნდა **მიეწოდებოდეს**. თუ ენერგია **სითბოს გადაცემით** [1] ხორციელდება, **გამოსხივებას სითბური** ეწოდება;

▪**სითბური გამოსხივება** **თერმოდინამიკურ წონასწორობაშია** გამოსხივების წყაროსთან {ფაქტობრივად ის ერთადერთია ასეთი, რის გამოც ფართოდ შეისწავლებოდა XIX ს ბოლოს};



▪დადგინდა **სითბური გამოსხივების** **ძირითადი თვისებები**:
•**სითბური გამოსხივება** - **ელექტრომაგნიტური ტალღაა**. სხეულის **შინაგანი** (**სითბური**) ენერგია **გარდაიქმნება** **გამოსხივების** ენერგიად. სინათლის **შთანთქმისას** {შებრუნებული პროცესი} **სხივური** ენერგია სხეულის **სითბურ** ენერგიაში **გადადის**;
•სითბური გამოსხივება სხეულის **აგრეგატულ** მდგომარეობაზე დამოკიდებული **არ არის**;
•სითბური გამოსხივების **ინტენსივობა** დამოკიდებულია გამოსხივების **ω სიხშირეზე** და, როგორც წესი, **ω**-ს **გარკვეულ** მნიშვნელობაზე ვლინდება კარგად ჩამოყალიბებული მაქსიმუმიც [2] {**u(λ,T)** **გამოსხივების მოცულობითი სიმკვრივეა**};
•**T ტემპერატურის ზრდისას** გამოსხივების **ინტენსივობა** **იზრდება**, ხოლო მისი მაქსიმუმი **მეტი სიხშირისკენ** (ნაკლები ტალღის სიგრძისკენ) [2] წაინაცვლებს;



G.Kirchhoff
1824-1887

▪**კირხჰოფის** კანონი - **ნებისმიერი სხეულის r(ω,T) გამოსხივების უნარიანობის ფარდობა** მის **შთანთქმის α(ω,T) უნარიანობასთან**

$$r(\omega,T) / \alpha(\omega,T) = f(\omega,T) \quad (1.1)$$

მოცემულ ტემპერატურასა და **სიხშირეზე ყველა სხეულისთვის ერთნაირია**, ანუ **f(ω,T) არაა დამოკიდებული** სხეულის **გვარობასა** და **ფორმაზე**;

▪**სითბური** გამოსხივება ფართოდ შეისწავლებოდა თეორიულად XIX ს-ის ბოლოს, ცხადია, კლასიკური ფიზიკის (ძირითადად, თერმოდინამიკის) საფუძველზე;
▪სიმარტივისთვის, **მოდელად** გამოიყენებოდა სხეული, რომელიც **მთლიანად შთანთქავს დაცემულ** ელექტრომაგნიტურ გამოსხივებას {ე.ი., (1.1)-ში **α(ω,T)=1** (1.2)} და მას უწოდეს **"აბსოლუტურად" შავი სხეული**:
•**აბსოლუტურად შავი სხეული, ნებისმიერ ტემპერატურაზე, *მთლიანად* შთანთქავს მასზე დაცემული ნებისმიერი ტალღის სიგრძის სინათლის ენერგიას** {კირხჰოფი};
•{(1.1),(1.2)} ➧ **აბსოლუტურად შავი** სხეულისთვის **f(ω,T)** ფუნქციას უნდა განსაზღვრავდეს **მხოლოდ გამოსხივების უნარიანობის თავისებურებანი**;

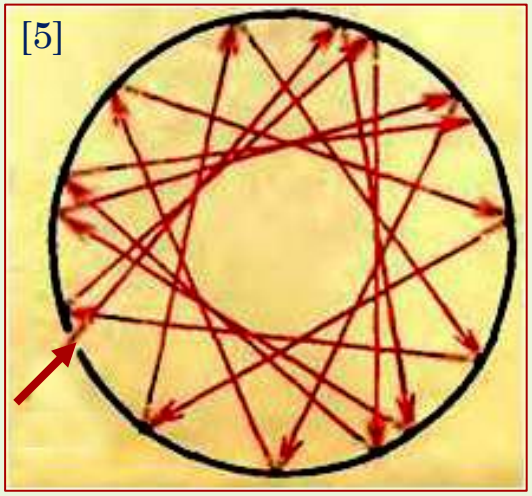
[3]

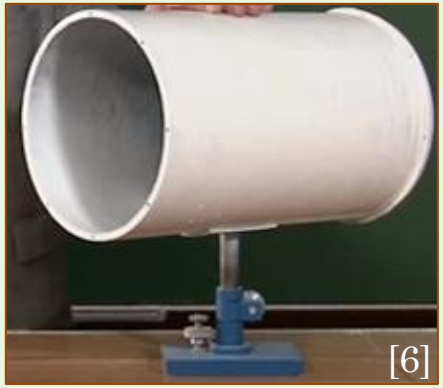
▪დღეს არსებული სხეულებიდან, 100% შთანთქმას მაქსიმალურად უახლოვდებიან **ჭვარტლი** (შთანთქავს **99%** [3]) და **Vantablack** (შთანთქავს **99.965%** [4]);

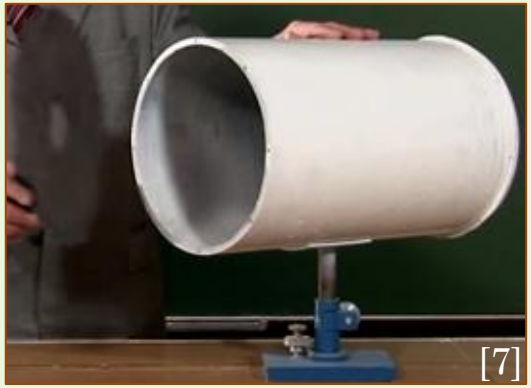
[4]

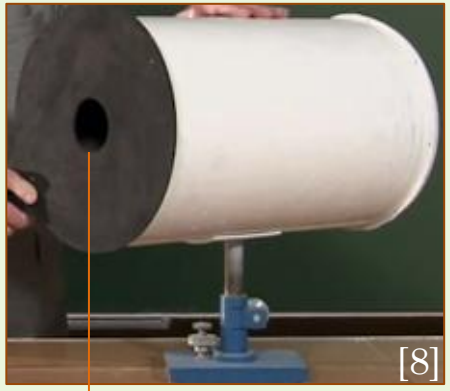
•**Vantablack** {**V**ertically **A**ligned **N**ano **T**ube **A**rrays (black) - ვერტიკალურად ორიენტირებული **ნანო მილების** მასივი (შავი)}, შეიქმნა 2014 წ., დიდი ბრიტანეთის ფიზიკურ ლაბორატორიაში. უკვე ჰპოვა მრავალმხრივი გამოყენება ტექნიკაში {ოპტიკური ხელსაწყოები (დედამიწაზე და კოსმოსში), სითბური ეკრანები და ბევრი სხვა (დეტალური ინფორმაცია გასაიდუმლოებულია)};

•არეკვლის ნულოვანი დონის გამო, ადამიანი აღიქვამს Vanta-black-ს როგორც **ორგანზომილებიან სიშავეს**, შავ ხვრელს . . .;
•არსებობს **აბსოლუტურად შავი სხეულის** *თვალსაჩინო* “მოდელიც”, რომელიც ეფუძნება სინათლის მრავალჯერად შინაგან არეკვლას [5];
•ჩვეულებრივი ამრეკლი სიღრუე [6], შერჩეული დიაფრაგმის [7] გამოყენებით, იქნება აღქმული **აბსოლუტურად შავ სხეულად (ხვრელად)** [8] - ენერგია პრაქტიკულად სრულად შთაინთქმება სიღრუით (**α**=0,99997);









2.აბსოლუტურად შავი სხეულის გამოსხივების სპექტრები და კანონები

▪(1.1)-ში **გამოსხივების უნარიანობა** **r(λ,T)** ასახავს გამოსხივებული ენერგიის **განაწილებას λ** ტალღის სიგრძის (**ω** სიხშირის) მიხედვით, გარკვეულ **T ტემპერატურაზე** [1];

▪**r(λ,T)** გამოსხივების უნარიანობა უტოლდება **სხეულის ერთეულოვანი ფართის მიერ, ტალღის სიგრძეთა ერთეულოვან დიაპაზონში გამისხივებულ სიმძლავრეს;**

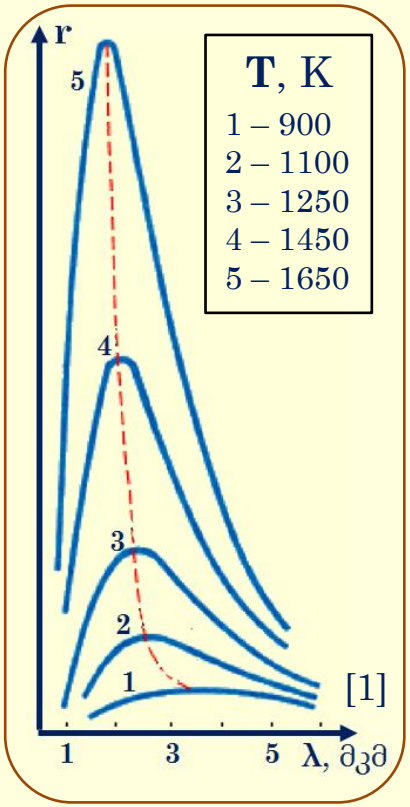
▪მაშინ, **T** ტემპერატურაზე **ინტეგრალური ნათება** - **ყველა ტალღის სიგრძეთა სიმძლავრის სრული R(T) ნაკადი** - ასე ჩაიწერება

$$\mathbf{R(T)} = \int_0^\infty \mathbf{r(\lambda,T)}d\lambda \qquad (2.1)$$

▪სტეფანმა {ცდებით} და ბოლცმანმა {თეორიულად} დაადგინეს, რომ **აბსოლუტურად შავი სხეულის R(T) ინტეგრალური ნათება** და **გამოსხივების u(λ,T) მოცულობითი სიმკვრივე აბსოლუტური ტემპერატურის მეოთხე ხარისხის პროპორციულია** {სტეფან-ბოლცმანის კანონი}:

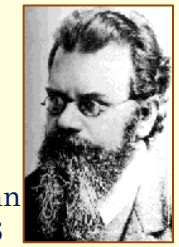
$$\mathbf{R} = \sigma \mathbf{T}^4 \qquad (2.2) \qquad\qquad \mathbf{u} = \alpha \mathbf{T}^4 \qquad (2.3)$$

•$\sigma = 5.670\cdot10^{-8}$ ვტ/(მ$^2\cdot$K^4) - **სტეფან-ბოლცმანის მუდმივაა**, ხოლო **α** - ნათების მახასიათებელი კონსტანტა;

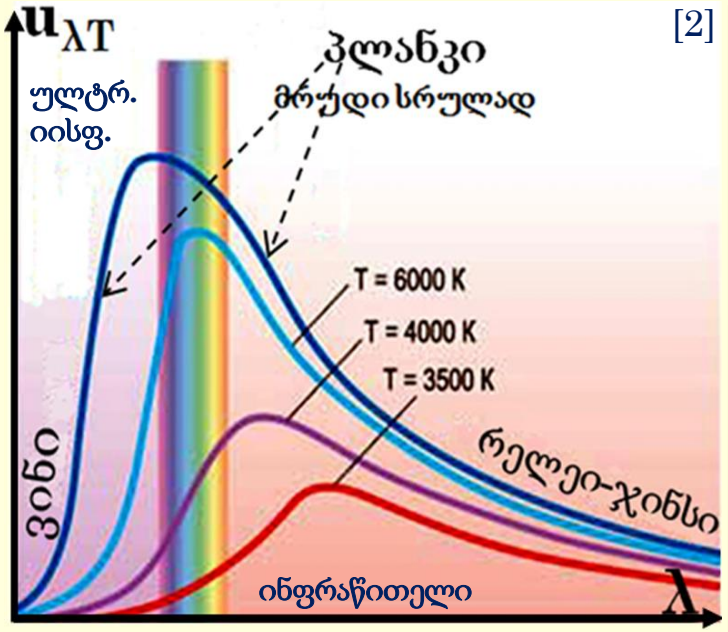


[1]

J.Stefan
1835-1893


L.Boltzmann
1844-1906

▪{ნებისმიერ ტემპერატურაზე} გამოსხივების სპექტრში არსებული, კარგად ჩამოყალიბებული **r**-ს და **u**-ს მაქსიმუმები განიცდიან თვალსაჩინო **მოკლეტალღოვან წანაცვლებას** ტემპერატურის **ზრდისას** [1], [2];



M.Planck
1858-1947

W.Wien
1864-1928

Rayleigh
1842-1919

J.Jeans
1877-1946

▪მაქსიმუმების წანაცვლების სიდიდისგან დამოუკიდებლად, ნებისმიერი მრუდისთვის [2] **T**-ს და **მაქსიმუმის შესაბამისი λ_m ტალღის სიგრძის ნამრავლი მუდმივი სიდიდეა** (ვინის *<u>წანცვლების</u>* კანონი):

$$\lambda_m T = b \quad (2.4) \Rightarrow \lambda_m = T/b \quad (2.5) \quad \text{და} \quad b = 2.898 \cdot 10^{-3}\ \text{მ}\cdot\text{K}$$

ენერგიის მაქსიმუმის შესაბამისი ტალღის სიგრძე ტემპერატურის უკუპროპორციულია;

▪შემდგომ იყო მცდელობა მიღწეულიყო **თეორიის თანხვედრა** ცდით დადგენილ **გამოსხივების სპექტრალურ დამოკიდებულებებთან** [2], მაგრამ:

<u>1</u>.გამოსხივებული ენერგიის სპექტრალური სიმკვრივის ვინის მოდელი

$$U_{\nu T} = k_1 \nu^3 \exp(-k_2 \nu/T) \quad (2.6) \quad \{k_1,\ k_2 \text{ - კონსტანტებია}\}$$

სამართლიანი აღმოჩნდა მხოლოდ **მაღალი სიხშირის** {**მცირე λ**-ს} არეში [2];

<u>2</u>. გამოსხივების რელეის და **ჯინსის** მოდელმა

$$U_{\omega T} = kT\omega^2/\pi^2 c^3 \quad (2.7)$$

პირიქით, **კარგი** შედეგი გამოავლინა მხოლოდ **დაბალი სიხშირის** {**დიდი λ**-ს} დიაპაზონში [2]:

✓ამრიგად, **კლასიკური** ფიზიკის ფარგლებში ვერც ერთმა თეორიულმა მოდელმა დამაჯერებლად **ვერ ახსნა აბსოლუტურად შავი სხეულის გამოსხივების სპექტრალური** დამოკიდებულება;

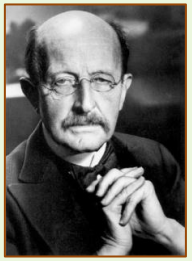
▪პრობლემა წარმატებით გადაწყვიტა **პლანკმა**, ფიზიკისთვის **ახალი, რევოლუციური - კვანტური მიდგომის** "შემოთავაზების" და **გამოყენების** საფუძველზე;

3.პლანკის {რევოლუციური} კვანტური ხედვა

▪სპექტრის **ფართო** დიაპაზონში ცდასა და თეორიას შორის *კარგ თანხმობას* მიაღწია პლანკმა, რომელიც დაეყრდნო **საკუთარ** *უმნიშვნელოვანეს* **იდეას**, რომ:

✓ნივთიერებაში მოლეკულური რხევების ენერგიის ცვლილება *უწყვეტი არაა*. ცვლილება ხდება ენერგიის გარკვეული **მცირე**, **განუყოფელი** {**მინიმალური**} **პორციებით** – *კვანტებით*, თანაც ამ **კვანტის E** *ენერგია* **რხევის** *სიხშირის* **ჯერადია** (3.1);

▪ეს კი ნიშნავს, რომ **გამოსხივებულ** ენერგიასაც **წყვეტილი**, **დის-კრეტული** - *კვანტური* სტრუქტურა გააჩნია;



M.Planck
1858-1947

$$E=nh\nu, \quad n=1,2,3,\ldots \quad (3.1)$$

პლანკის მუდმივები:

$h= 6.626\cdot10^{-34}$ ჯ·წმ

$\hbar=h/2\pi= 1.055\cdot10^{-34}$ ჯ·წმ

$$E=n\hbar\omega \quad (3.2)$$

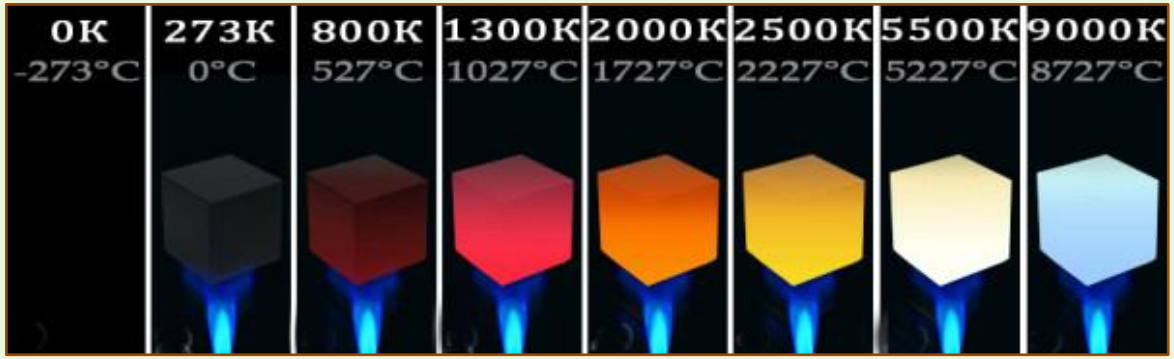
▪**h**,**ħ** - **პლანკის მუდმივა** (**ქმედების კვანტი**) - ფუნდამენტური ფიზიკური მუდმივაა. განსაზღვრავს ფიზიკურ მოვლენათა იმ ფართო წრეს, რომლისთვისაც **მნიშვნელოვანია სიდიდეთა დისკრეტულობა**;

•ითვლება, რომ **კვანტური მექანიკა** სწორედ **პლანკის იდეის ჩამოყალიბების** დღიდან {**14.XII.1900**} იღებს **დასაბამს**;

▪გამოსხივების და შთანთქმის **დისკრეტულობის** საფუძველზე, პლანკმა შემდეგი თანაფარდობებით განსაზღვრა **აბსოლუტურად შავი სხეულის** **გამოსხივების უნა-რიანობის** $r_{\nu T}$ და **გამოსხივების სიმძლავრის** $u_{\nu T}$ **სპექტრალური სიმკვრივეები**:

$$r_{\nu T} = 2h\nu^3c^{-2}\,[\exp(h\nu/kT)-1]^{-1} \quad (3.3) \qquad u_{\omega T} = \hbar\omega^3\pi^{-2}c^{-3}\,[\exp(\hbar\omega/kT)-1]^{-1} \quad (3.4)$$

▪აღსანიშნავია, რომ აბსოლუტურად შავი სხეული თანმიმდევრულად იცვლის ფერს ტემპერატურის ცვლილებასთან ერთად;



- **T**<1000**K** - წითელი;
- 1000-1500**K** - ნარინჯისფერი;
- 1500-5500**K** - ყვითელი;
- 5500-7000**K** - მოცისფრო-თეთრი;
- **T**>7000**K** - ცისფერი;

4.სინათლის ფოტონური თეორია

სინათლე :

გამოსხივება	სიხშირე ν, ჰერცი	ტალღის სიგრ. λ, ნმ
ხილული	$5 \cdot 10^{14}$	560
ულტრაიისფერი	$3 \cdot 10^{15}$	100
რენტგენის	$8 \cdot 10^{18}$	0.04
γ – სხივები	$3 \cdot 10^{20}$	$1 \cdot 10^{-3}$

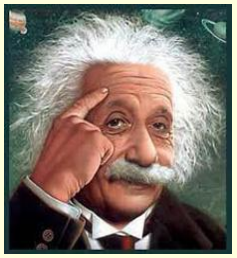
✓პლანკის იდეა განავითარა *აინშტაინმა* და ჩამოაყალიბა **სინათლის კვანტური** {**ფოტონური**} თეორია;

▪*ფოტონი* {ბერძ. φωτός - სინათლე} - მოცემული **სიხშირის სინათლის ენერგიის კვანტი**

$$E = h\nu = hc/\lambda \quad (4.1)$$

▪სინათლის **გამოსხივება, გავრცელება** და **ნივთიერებასთან ურთიერთქმედება** {*შთანთქმა*, *არეკვლა*, *გაბნევა*} ექვემდებარება **ფოტონურ** ენაზე აღწერას;

•ფოტოეფექტის *ახსნა* კი, *მხოლოდ* **ფოტონური თეორიით** **გახდა შესაძლებელი**;



A.Einstein
1879-1955
ნობელი
1921

ფოტონი

•**ვაკუუმში** ვრცელდება *გუნებაში* **მაქსიმალურად შესაძლო სიჩქარით**;

•ამრეკვლ ზედაპირზე დაცემისას **აწარმოებს წნევას**;

•**გააჩნია** გარკვეული **იმპულსი**

$$P = h\nu/c = h/\lambda \quad (4.2)$$

•**იმპულსი** **სინათლის სხივის გასწვრივაა მიმართული**;

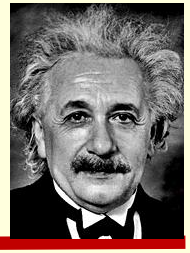
•**გაჩერებას არ ექვემდებარება**, შეიძლება მხოლოდ "გაქრეს" ნივთიერებით **შთანთქმის** შედეგად;

•თავის "*დოვლათს*" - **ენერგიას, იმპულსს** **გადასცემს მშთანთქმელ ნივთიერებას**;

•**უმასო ნაწილაკია** და **უძრავი არ არსებობს** , $c=3\cdot10^8$მ/წმ სიჩქარეს გაჩენისთავე იძენს;

•ექვემდებარება **უმასო** ნაწილაკისთვის დადგენილ კავშირს **ენერგიასა** და **იმპულსს** შორის {(4.1),(4.2)} ➧ $E = Pc \quad (4.3)$

“მეცნიერების მიზანს შეადგენს ის, რომ მოგვცეს ბუნების აღწერა ლოგიკური წინააღმდეგობების გარეშე.” Albert Einstein



1879 - 1955

რამდენი უნდა იცოდე, რომ იცოდე რამე ?!

სტუ-ს ფიზიკის კურსის *(4 სემესტრი)* ლექციების კონსპექტი

ლექცია **6** | **თემა:** | სემესტრი **IV**

ფოტონური მოვლენები

056 **1.ფოტოეფექტი**

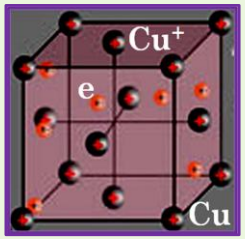
060 **2.ფოტოეფექტის აინშტაინის კანონი**

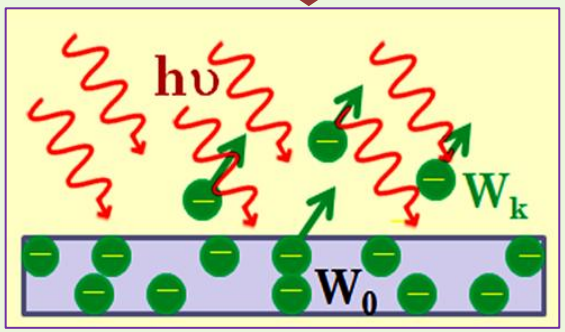
063 **3.კომპტონის ეფექტი**

1.ფოტოეფექტი

G.Hertz
1857-1894

აღმოჩენა
ჰერცი, 1887 წ.
ულტრაიისფერი, ხილული, ინფრაწითელი გამოსხივებით ლითონის {ან სხვა ნივთიერების} **ზედაპირიდან ელექტრონების** "**ამოგლეჯა**"[1];





▪სინათლით ლითონის ზედაპირიდან ელექტრონების ამოფრქვევა, **არ ეწინააღმდეგება სინათლის ელექტრომაგნიტურ თეორიას**. ტალღის ელექტრული ველი მოქმედებს ლითონში მყოფ ელექტრონებზე და გარკვეულ პირობებში განაპირობებს ზოგიერთი მათგანის ამოგდებას;
▪თუმცა, **ფიზიკურად მნიშვნელოვანი არაერთი ასპექტის** ახსნა **ტალღური თეორიის ფარგლებში ვერ მოხერხდა**;

ფოტოეფექტის თეორია
აინშტაინი,1905 წ.
<u>საფუძველი</u>: **სინათლის (კვანტური) ფოტონური თეორია**;
ნობელი, 1921 წ.

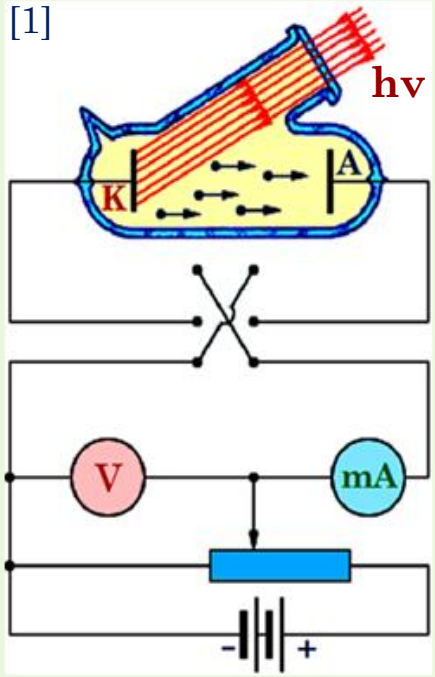
A.Einstein
1879-1955

✓სინათლე - **ფოტონების** ნაკადი;
▪**ფოტონი** - *ელემენტარული ნაწილაკი*, გარკვეული **სიხშირის** ელექტრომაგნიტური გამოსხივების **კვანტი** - **ენერგიის** უმცირესი პორცია;
▪ფოტონის ენერგია **W=hv** **განუყოფელია**;
▪შთაინთქმება მხოლოდ **მთლიანად**;
▪სინათლის **ინტენსიურობა** ფოტონების **რაოდენობის** **პროპორციულია**;

R.Milliken
1868-1953

თეორიის დამამტკიცებელი ცდები
მილიკენი, 1910-1927
▪**დაამტკიცა ფოტოეფექტის** თეორიის მართებულობა (თავად არ სჯეროდა);
▪**განსაზღვრა** *<u>ელექტრონის</u>* **მუხტი**;
ნობელი 1923 წ.

[1]



▪*ფოტოეფექტის შესასწავლი **ცდების** არსი:*

▪ვაკუუმში მოთავსებულ **A** ანოდსა და **K** კათოდს შორის [1] ძაბვა **U**≠0, მაგრამ **I**=0. მიზეზი - ვაკუუმში **არაა მუხტის გადამტანები**;

▪დენი შეიძლება **გაჩნდეს** გამჭვირვალე ფანჯრიდან **კათოდის** *<u>გარკვეული</u>* **სიხშირის** გამოსხივებით *<u>განათებისას</u>*;

▪აღძრული დენის სიდიდე **დამოკიდებულია**:

- •სინათლის **სიხშირეზე**;
- •სინათლის **ინტენსიურობაზე**;
- •მოდებულ **ძაბვაზე**;

▪დენი *<u>არ</u>* ჩნდება **ანოდის** დასხივებისას, ე.ი {**ფოტო**}*<u>ელექტრონები</u>* ქმნიან დენს;

▪*ცდების **ფაქტობრივი** მასალა:*

<u>1</u>.ნებისმიერი ნივთიერების ფოტომგრძნობიარე კათოდისთვის არსებობს **სიხშირის** $\mathbf{v_0}$ **მინიმალური** მნიშვნელობა, რომელზეც ფოტოეფექტი წყდება;

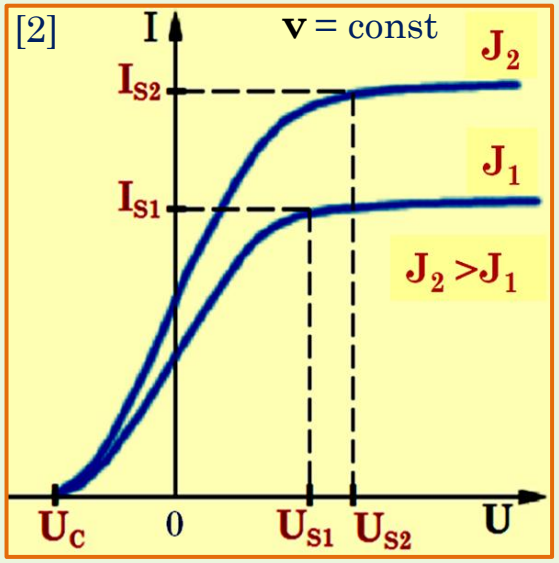
<u>2</u>.დენის ზრდა **ძაბვათა** მხოლოდ **გარკვეულ** დიაპაზონში ხდება;

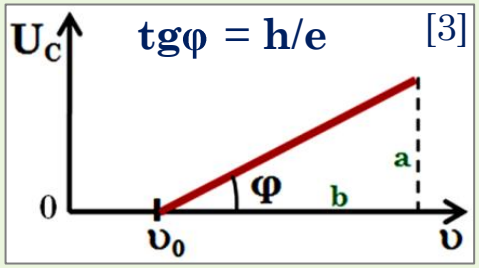
<u>3</u>.კათოდის სხვადასხვა ($\mathbf{J_1}$, $\mathbf{J_2}$) განათებულობებისთვის არსებობს ძაბვის ისეთი ($\mathbf{U_{S1}}$, $\mathbf{U_{S2}}$) მნიშვნელობები [2], რომელთა გადაჭარბებით დენის ძალა **აღარ იზრდება** ($\mathbf{I_{S1}}$, $\mathbf{I_{S2}}$ **ნაჯერობის** დენები);

<u>4</u>.ძაბვის პოლარობის შეცვლით შესაძლებელი ხდება ისეთი $\mathbf{U_C}$ **ჩამკეტი ძაბვის** შერჩევა [2], რომელზეც ფოტოეფექტი **წყდება**;

<u>5</u>.ჩამკეტი ძაბვის სიდიდე **ერთნაირია** **მოცემული სიხშირის** სინათლის **ნებისმიერი** ინტენსიურობისას [2];

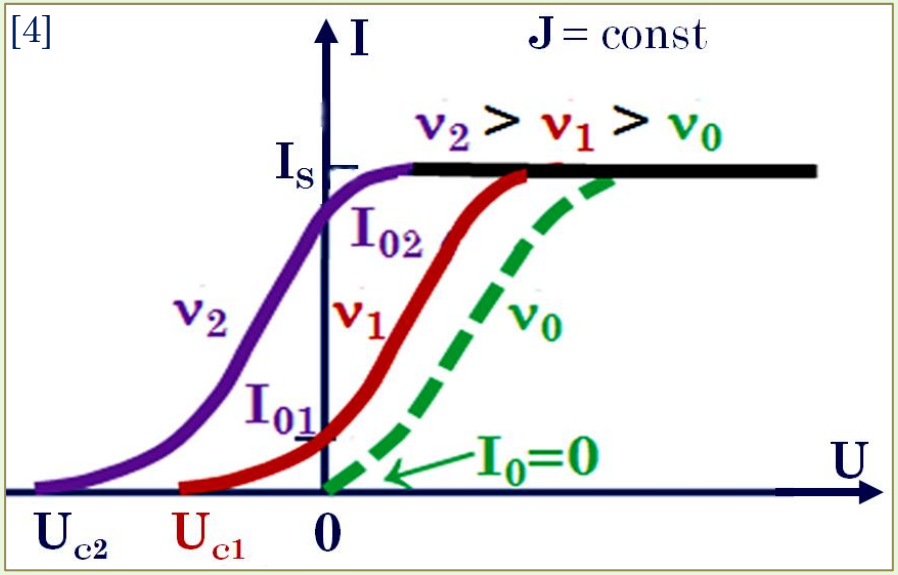
[2]





6.U_C ჩამკეტი ძაბვის სიდიდე წრფივად იზრდება ფოტოეფექტის გამომწვევი სინათლის სიხშირის მატებისას [3];
7.ნულოვანი ძაბვისას (U=0), დენი იარსებებს (I_0>0) მხოლოდ მინიმალურზე მეტი სიხშირისას ($v>v_0$) და $I_0=0$, თუ სინათლის სიხშირე მინიმალურზე ნაკლებია $v \leq v_0$ [4];

•8.რაც მეტია v, მით მეტია დენი ნულოვანი ძაბვისას ($I_{02} > I_{01}$, ვინაიდან $v_2 > v_1$) [4];
•მაგრამ, ყველა სიხშირისთვის ერთნაირია I_S ნაჯერობის დენი (უცვლელი ინტენსიურობისას J=const) [4];



▪*ცდების საფუძველზე ჩამოყალიბდა ფოტოეფეტის კანონები* :

I.ნაჯერი ფოტოდენის სიდიდე პირდაპირპროპორციულია კათოდზე დაცემული სინათლის ნაკადის ინტენსიურობის;
II.კათოდიდან ამოტყორცნილი ელექტრონების მაქსიმალური კინეტიკური ენერგია პროპორციულია მასზე დაცენული სინათლის სიხშირის;
III.არსებობს სინათლის მინიმალური სიხშირე v_0 ("ფოტოეფექტის წითელი საზღვარი"), რომლის ქვევითაც ფოტოეფექტს ადგილი აღარ ექნება, რანაირი მძლავრი სინათლის ნაკადიც არ უნდა დაეცეს კათოდს;

▪ცდის **ზოგიერთი შედეგი** (მაგ.: [4],[6],[7],[8]) არამარტო **არ ექვემდებარება ახსნას ტალღური თეორიის** საფუძველზე, არამედ **ეწინააღმდეგება** მას;

▪ამავე დროს, **ფოტოეფექტის არსი** და მისი **ყველა თავისებურება** ხდება გასაგები აინშტაინის, ერთი შეხედვით, საკმაოდ მარტივი, მაგრამ **ფიზიკური შინაარსით** მეტად დატვირთული **კანონის** გამოყენებით;

2.ფოტოეფექტის აინშტაინის კანონი

✓ ფოტოეფექტის მრავალფეროვანი გამოვლინებანი **სრულად** აიწერება **აინშტაინის ფორმულით:**

$$h\nu = W_0 + W_k \quad (2.1)$$

▪ $h\nu$ სინათლის კვანტის (ფოტონის) ენერგია;

▪ W_0 - **გამოსვლის მუშაობა**, ანუ ის **ენერგია**, რომელიც სჭირდება **ელექ-ტრონს** კათოდის **მესერთან კავში-რის გასაწყვეტად**;

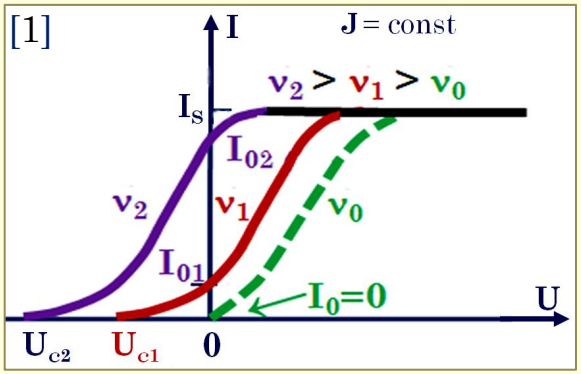
▪ W_k - ამოვარდნილი ელექტრონის *შესაძლო* **კინეტიკური ენერგია**;

▪(2.1) ეყრდნობა და ასახავს სინათლეზე **კვანტურ (ფოტონურ) შეხედულებას**:

▪ *მონოქრომატული* სინათლის კონის **ინტენსიურობა** მასში **ფოტონების რიცხვის** პროპორციულია;

▪ კონაში **თითოეულ ფოტონს** ერთნაირი $h\nu$ ენერგია გააჩნია და ეს ენერგია მხოლოდ **მთლიანად** შეიძლე-ბა იყოს **შთანთქმული ერთი ელექტრონით**;

▪ **ნებისმიერი** ფოტონი (**ნებისმიერი** სიხშირის გა-მოსხივება) ამ პროცესებისთვის საჭირო ენერგიით **ელექტრონს ვერ** უზრუნველყოფს;



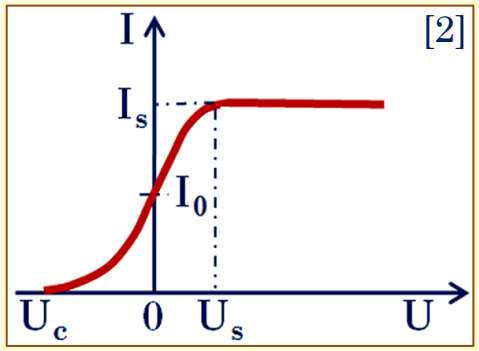
▪ **ფოტოეფექტის** აღძვრისთვის **კათოდს** უნდა ეცემოდეს მისი ნივთიერებისთვის დამახასიათებელი, W_0 **გამოსვლის მუშა-ობის შესაბამისი მინიმალური**

$$\nu_0 = W_0/h \quad (2.2)$$

ან **მეტი** $\{\nu \geq \nu_0\}$ **სიხშირის** ფოტონი [1];

•ისტორიულად, ფოტონის **ენერგიის** ამ მინიმალურ **სიხში-რეს ფოტოეფექტის** "**წითელი საზღვარი**"ეწოდა;

▪ ვინაიდან ელექტრონს მხოლოდ ფოტონის **მთელი ენერგიის** ათვისება შეუძლია, $h\nu > W_0$ ფოტონის შთანთქმისას, **ჭარბი** ენერგია ელექტრონს W_k **კინეტიკური** ენერგიის სახით **ექნება შენარჩუნებული**. ენერგიის **განაწილების** ეს **კანონზომიერებაა** ასახული კანონში (2.1);



▪რაც მეტია **hv**, უფრო დიდია ელექტრონის **კინეტიკური ენერგია**

$$W_k = hv - W_0 \quad (2.3)$$

•W_k შეიძლება იყოს იმდენად დიდი, რომ ზოგიერთი ელექტრონი **ანოდს** მხოლოდ საკუთარი **კინეტიკური** ენერგიის ხარჯზე, **ნულოვან ძაბვაზეც** აღწევს {**U=0**, მაგრამ $I_0>0$ [2]};

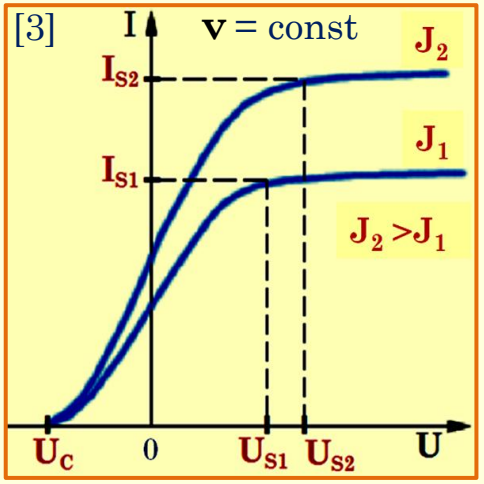
▪რაც **მეტია ძაბვა**, მით უფრო აჩქარდება ელექტრულ ველში ელექტრონი, ანუ **გარკვეულ დროში** კათოდიდან ამოგლეჯილი ელექტრონების **მეტი რაოდენობა** ასწრებს **ამ დროშივე** ანოდამდე მისვლას და **ძაბვის** *ზრდას*, თითქმის პროპორციულად, **დენის** *ზრდაც* ახლავს თან [2];

▪მაგრამ, ძაბვის გარკვეულ U_S მნიშვნელობაზე, რაღაც დროში ამოფრქვეული **ყველა** ელექტრონი **უკვე ასწრებს** იმავე დროში **ანოდამდე მისვლას** და ძაბვის შემდგომი მატება დენს **ვეღარ ცვლის** [2]. დენი I_S **ნაჯერ** მნიშვნელობას აღწევს;

▪რაც მეტია სინათლის **J ინტენსიურობა** ($J_2 > J_1$ [3]), მით **მეტი ფოტონი** ეცემა კათოდს დროის ერთეულში, ამიტომ:

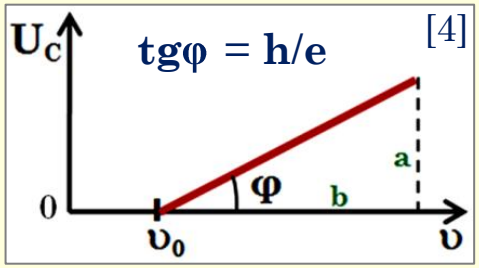
1.**მეტი** ელექტრონი *ამოიფრქვევა* კათოდიდან და *მიაღწევს* ანოდს. ამიტომ, **გაიზრდება I დენის** სიდიდე *ნებისმიერი* [3], მათ შორის **ნულოვანი** ძაბვისას;

2.ფოტოელექტრონების **დამატებითი რაოდენობა** ცვლის **I(U) დამოკიდებულების** რაოდენობრივ მაახასიათებლებს და დენის ნაჯერობა მიიღწევა ძაბვის (დენის) უკვე **გაზრდილი სიდიდეებისას** ($U_{S2} > U_{S1}$, $I_{S2} > I_{S1}$) [3];



▪**უარყოფითი ძაბვისას** [3], ანოდამდე მიღწეული ელექტრონების რაოდენობა (ე.ი., დენის სიდიდეც) **მცირდება**, ვინაიდან ელექტრონების **სულ უფრო ნაკლებ** რაოდენობას აქვს ისეთი **კინეტიკური ენერგია**, რომელიც მისცემს მათ საშუალებას დაძლიონ ამჯერად უკვე მოძრაობის **დამამუხრუჭებელი** ელექტრული ველის მოქმედება;

▪უარყოფითი ძაბვის გარკვეული სიდიდისას (U_C **ჩამკეტი ძაბვა**), **ვერც ერთი** ელექტრონი ვეღარ მიაღწევს ანოდს და დენი **ნულს** გაუტოლდება {[2],[3]};



▪**ჩამკეტი ძაბვის** სიდიდე არაა დამოკიდებული მონოქრომატული სინათლის **J** ინტენსიურობაზე, ვინაიდან სხვადასხვა **ინტენსიურობა** მხოლოდ დაცემული **ფოტონების რაოდენობას** ცვლის და არავითარ **გავლენას არ ახდენს** ელექტრონის **კინეტიკურ** ენერგიაზე (2.1), რომელიც **განსაზღვრავს** U_C-ს რიცხვით მნიშვნელობას;

▪სამაგიეროდ, ჩამკეტი ძაბვა **წრფივად** იზრდება [4] სინათლის **სიხშირის** მატებისას, რადგან **ნამატი უჩნდება** მხოლოდ W_k-ს (W_0= const), ანუ:

$$eU_C = W_k = h\nu - W_0 \quad (2.4)$$

▪ამავე დროს, $U_C = f(\nu)$ დამოკიდებულების **დახრის კუთხე** [4] საერთოდ **არ არის** დამოკიდებული ფოტოეფექტის მახასიათებელ **რომელიმე პარამეტრზე** და მხოლოდ მსოფლიო მუდმივების ფარდობით განისაზღვრება:

[4] ➧ $tg\varphi = a/b = U_C/(\nu-\nu_0)$ (2.5) {(2.1)-(2.4)} ➧ $U_C = h(\nu-\nu_0)/e$ (2.6)

(2.6) => (2.5) ➧ $tg\varphi = h/e$ (2.7)

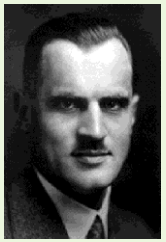
▪ამრიგად, ფოტოეფექტის მოვლენა **სრულად აიხსნა** აინშტაინის **ფოტონური** თეორიით და (2.1) **კანონით**;

3.კომპტონის ეფექტი

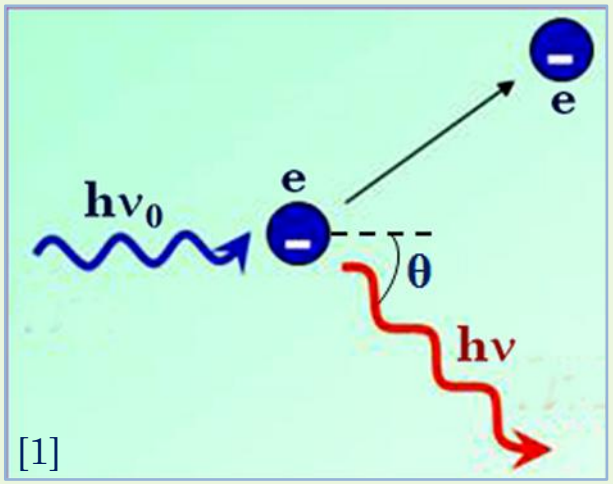
✓**კომპტონის** {1923 წელს ცდით აღმოჩენილი} **ეფექ-ტის** არსი მდგომარეობს შემდეგში:

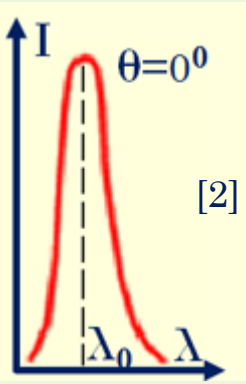
▪მაღალი სიხშირის ფოტონებით {რენტგენის ან γ სხივებით} ნივთიერებების დასხივებისას, **გაბნეული სინათლის ν სიხშირე ნაკლებია ν_0 დაცემული ფოტონების სიხშირეზე** ($\nu < \nu_0$, $\lambda > \lambda_0$), ვინაიდან **თავისუფალ ელექტრონთან** **დრეკადი** {იმპულსის და ენერგიის მუდმივობის კანონების დაცვით} **დაჯახებისას ფოტონის ენერგიის ნაწილი ელექტრონს გადაეცემა** [1];

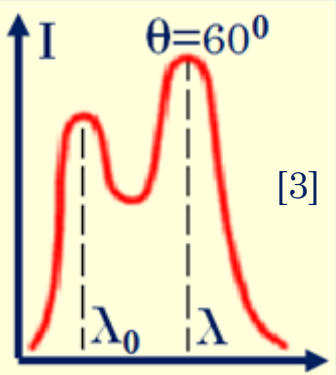
•კომპტონის ეფექტი სინათლის **ფოტონური** თეორიის **დამამტკიცებელი** მოვლენაა, ვინაიდან ტალღური თეორიით საერთოდ **დაუშვებელია გაბნევისას** ფოტონის **სიხშირის ცვლილება**;

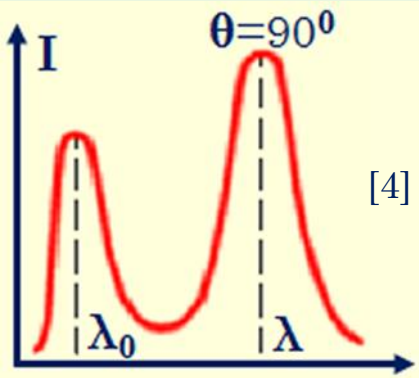


A.Compton
1892-1962
ნობელი 1927









•**გაბნეული** გამოსხივების **სიხშირის შემცირება** {ტალღის სიგრძის $\Delta\lambda$ **ნაზრდი**} **მხოლოდ გაბნევის θ კუთხით** [1] განისაზღვრება [2],[3],[4]:

$$\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0 = 2\Lambda_C \sin^2(\theta/2) \quad (3.1)$$

•მუდმივა Λ_C {<u>*კომპტონის ტალღის სიგრძე*</u>} **ნივთიერების გვარობაზე არ არის დამოკიდებული** და **ელექტრონისთვის** ტოლია

$$\Lambda_C = h/(m_e c) = 2.426 \cdot 10^{-3} \text{ ნმ} \quad (3.2)$$

▪არსებობს **კომპტონის შებრუნებული ეფექტიც**, როდესაც **რელატივისტურ V≈c** (ფოტონის ენერგიაზე მეტი ენერგიის) **ელექტრონებზე** გაბნევისას **ელექტრონის ენერგია ფოტონებს გადაეცემა**;

•{ანუ,} **შებრუნებული ეფექტისას**, გაბნევის შედეგად **ფოტონის ენერგია იზრდება** $E>E_0$;

$$E = (4/3)E_0E_k/(m_ec^2) \quad (3.3)$$

E_k - ელექტრონის კინეტიკური ენერგიაა;

▪**კომპტონის შებრუნებული ეფექტის** გამო არსებობს:

•**გალაქტიკურ** წყაროთა **რენტგენის** გამოსხივება;

•**რელიქტური** ფონური გამოსხივების **რენტგენული** მდგენელი;

•**პლაზმური** ტალღების გარდაქმნა მაღალი სიხშირის **ელექტრომაგნიტურ** ტალღებად;

“ყოველთვის, სანამ რაიმე ახალი შეიქმნება, უნდა შეირყეს უკვე არსებულის ავტორიტეტი.” Stefan Zweig

1881 - 1942

რამდენი უნდა იცოდე, რომ იცოდე რამე ?!

სტუ-ს ფიზიკის კურსის *(4 სემესტრი)* ლექციების კონსპექტი

ლექცია 7 | **თემა:** | სემესტრი IV

ატომის აგებულება

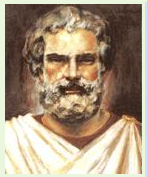
066 1.ატომის აგებულების ბირთვული მოდელი

069 2.ბირთვული მოდელის სიძნელეები. ბორის პოსტულატები

072 3.წყალბადის ატომის ბორის თეორია. სპექტრალური სერიები

1.ატომის აგებულების ბირთვული მოდელი

▪ანტიკური ფილოსოფიური სკოლა მუდმივად ცდილობდა მოვლენებსა და მატერიალურ სტრუქტურებში მოეძებნა **სამყაროს მარტივი საწყისი** - "**ერთი**", სამყაროს "ერთობა", "აგური";
▪თანდათანობით ჩამოყალიბდა რწმენა, რომ "ერთი" ცეცხლთან, წყალთან, გეომეტრიულ ფორმებთან [1] კი არ უნდა იყოს გაიგივებული, არამედ **ატომთან**;

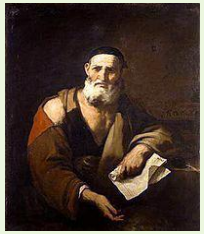

Thales
624-543

Heraclitus
544-483

Plato 428-348

Aristoteles 384-322

[1]


Leucippos
V ს.ჩ.წ.

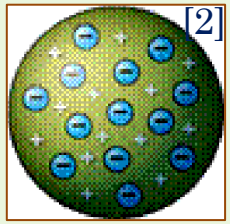
Demokitus
460-370

▪**ატომი** - უმცირესი, განუყოფელი ("გაუტეხავი"), მატერიალური ელემენტარული სტრუქტურული ერთეული. ეს მოსაზრება **24** საუკუნის განმავლობაში ეჭვს არ იწვევდა;
▪**ატომიზმის** ჩასახვა ხდება V-IV ს.ჩ.წ. მისი ფუძემდებლები იყვნენ ლევკიპი და დემოკრიტე;

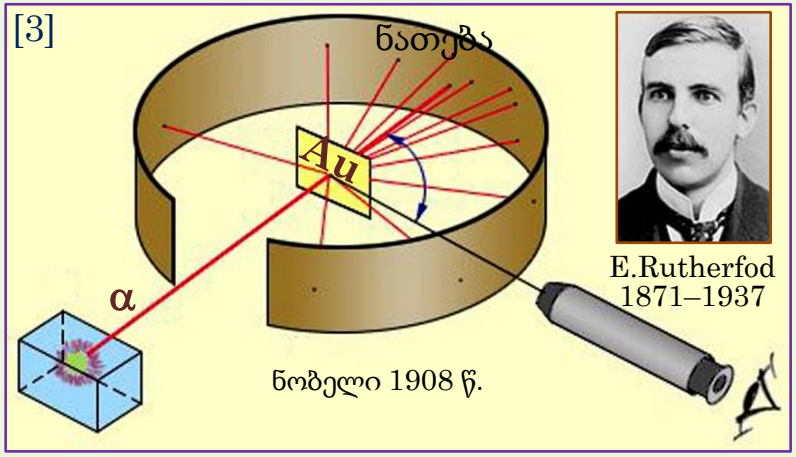
▪პირველად ატომის შინაგან სტრუქტურაზე მსჯელობა დაიწყო ტომსონმა, რომელმაც **აღმოაჩინა** (1901 წ) **ელექტრონი**. მისი ხედვით, ატომი **დადებითად დამუხტული სფეროა**, მასში **მიმობნეული** ელექტრონებით [2];
▪ატომი **ელექტრონეიტრალურია**, ვინაიდან ელექტრონების ჯამურ **უარყოფით** მუხტს **აკომპენსირებს** ატომის **დადებითი** მუხტი ($-Ne = +Q_A$);

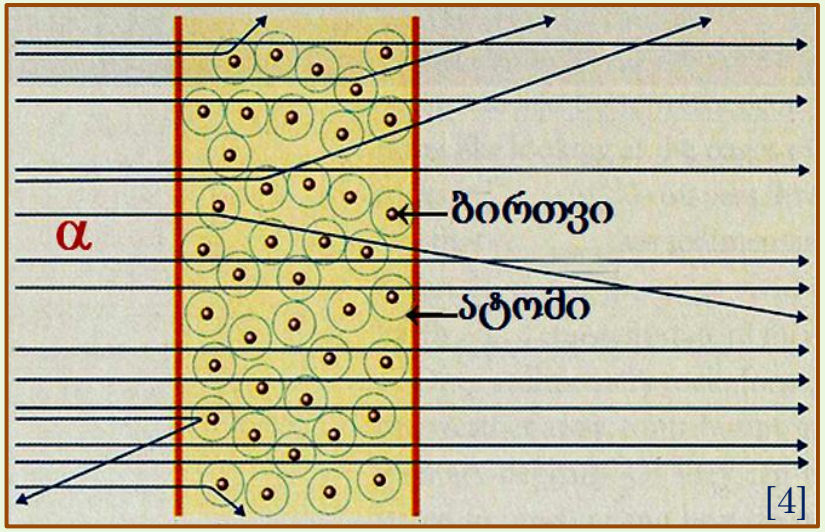
J.J.Thomson
1856-1940
ნობელი 1904 წ.

•ატომის შედარებით დამაჯერებელი მოდელი 1911 წელს წარმოადგინა რეზერფორდმა. თავის მრავალრიცხოვან ცდებში [3] იგი ოქროს კილიტას უშენდა დადებითად დამუხტულ ნაწილაკებს {**α** -რადიოაქტიურ ნაწილაკებს} და აკვირდებოდა **მათ გაბნევას**;


[2]

▪**რეზერფორდის ცდა** [3]:
<u>რადიოაქტიური</u> **α** გამოსხივება {**V**=10^7 მ/წმ სიჩქარით მოძრავი **He**-ის ბირთვები} ეცემოდა **ოქროს** კილიტას. კილიტაში გასული **α** ნაწილაკები ეკრანზე დაცემისას იწვევდნენ მის ნათებას;

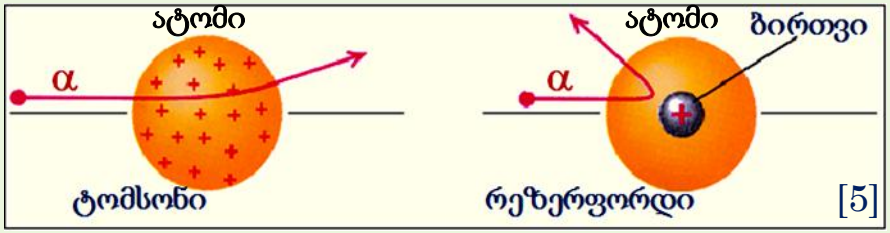




▪*<u>ცდებმა ცხადყო</u>*: **α**-ნაწილაკების *<u>უმრავლესობა</u>* **არ იხრებოდა ატომში გავლისას** [3],[4];
•**მცირე** ნაწილი **უმნიშვნელოდ** (<**30**^{0}) იხრებოდა;
•რამდენიმე **ათასიდან** მხოლოდ *<u>ერთის</u>* **გაბნევის კუთხე** წარმოუდგენლად დიდი იყო (>**140**^{0});

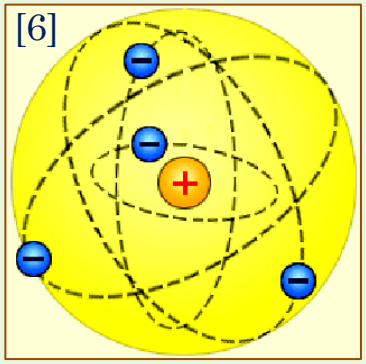
▪ცდების საფუძველზე რეზერფორდმა **დაასკვნა**:
•**α**–ნაწილაკების **უმრავლესობა** კილიტაში **დაუბრკოლებლად გადის**, ე.ი. ატომის **უდიდესი ნაწილი**, უბრალოდ, **სიცარიელეა**;
•**დადებითად** დამუხტული **α**–ნაწილაკის **შემოსაბრუნებლად ძლიერი კულონური განზიდვაა** საჭირო;

•ასეთი **ძალა** **იარსებებს**, თუ ატომის **მთელი დადებითი მუხტი** (ე.ი., თითქმის **მთელი მასაც** - 99.9%) თავმოყრილია **ატომის მცირე ნაწილში.** მას რეზერფორდმა **ატომის** **ბირთვი** უწოდა და **ატომის** **ცენტრში** განალაგა [5];

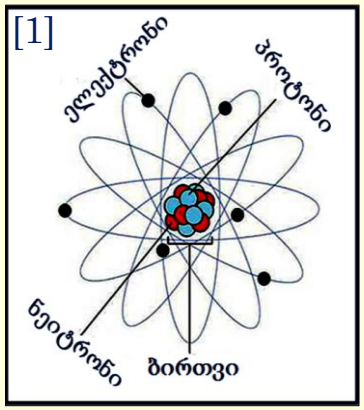


▪**ბირთვის** ზომა (რადიუსი) მხოლოდ $\mathbf{R_N} = 10^{-15}$–10^{-14} მ-ია, მაშინ როდესაც ატომის – $\mathbf{R_A}=10^{-10}$ მ-ის რიგისაა;

▪რეზერფორდის ამ მოდელს **ატომის პლანეტარული მოდელი** ეწოდა [6], ვინაიდან **ელექტრონები ბრუნავენ ბირთვის** ირგვლივ წრიულ (რეალურად - ელიფსურ) ორბიტებზე ისე, როგორც **პლანეტები მზის** ირგვლივ (ელექტრონის გარე ორბიტის რადიუსი, ფაქტიურად ატომის რადიუსს ემთხვევა);



2.ბირთვული მოდელის სიძნელეები. ბორის პოსტულატები



▪რეზერფორდის ვარაუდობდა, რომ **ბირთვი ორ განსხვავებულ** ნაწილაკს (**ნუკლონს**) უნდა შეიცავდეს:

•**დადებითად** დამუხტულს ***პროტონს*** **+e**=1.6·10^{-19} კ;

•ოდნავ უფრო **მძიმე**, **უმუხტო** ნაწილაკ ***ნეიტრონს*** ;

▪**პროტონის** მასა **1836**–ჯერ აღემატება **ელექტრონის** მასას:

$\mathbf{m_p}$ = 1.6726·10^{-27}კგ; $\mathbf{m_n}$ = 1.6750·10^{-27}კგ; $\mathbf{m_e}$ = 9.1095·10^{-31}კგ;

პლანეტარული მოდელი **პრინციპულად შეუთავსებელია** ***კლასიკურ ფიზიკასთან***

I ***სირთულე*** უკავშირდებოდა ატომიწ ***მდგრადობას*** ორბიტაზე **ელექტრონის ბრუნვისას**:

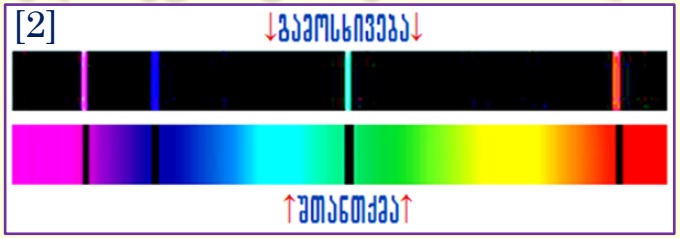
▪წრეწირზე **ბრუნვის** შედეგად ელექტრონის მოძრაობა **აჩქარებულია**. აჩქარებულად მოძრავი **ელექტრონი** {დამუხტული ნაწილაკი} უნდა ***ასხივებდეს*** **ელექტრომაგნიტურ ტალღას**;

•***გამოსხივებისას*** ელექტრონი უნდა ***კარგავდეს*** **ენერგიას**, მისი **სიჩქარე** უნდა ***მცირდებოდეს***;

•ე.ი., ელექტრონი იმოძრავებს ***ვარდნის*** **სპირალურ** ტრაექტორიაზე და ბირთვზე ***დაეცემა***;

II ***სირთულე*** – **ატომის გამოსხივების** (და **შთანთქმის**) **სპექტრის** ***დისკრეტული*** (ხაზოვანი) ხასიათი [2];

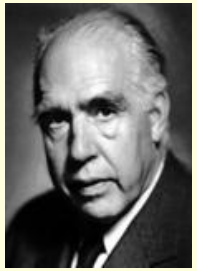
▪**კლასიკური ფიზიკის** თანახმად მბრუნავი ელექტრონის **სიჩქარე** **ნებისმიერი** შეიძლება იყოს;



•ე.ი., **გამოსხივებული ტალღის სიხშირეც** არაფრით ***არ*** უნდა იყოს **შეზღუდული**;

•ანუ, ატომი **უწყვეტ** (და **არა** **დისკრეტულ**) **სპექტრს** **უნდა ასხივებედეს**;

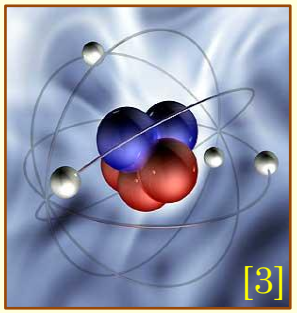
რეზერფორდმა თავისი მოდელის მართებულობა ვერ დაამტკიცა



N.Bohr
1885–1962

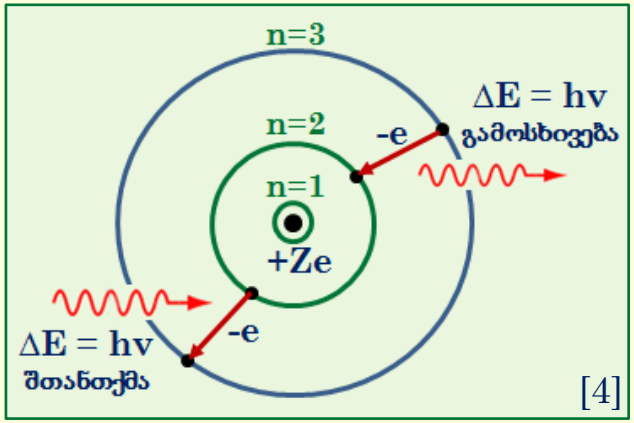
▪პლანეტარული მოდელის “გადარჩენის” ორიგინალური გზა აირჩია **ბორმა**:
- მან “უბრალოდ”(!) **შეზღუდა** **კლასიკური ფიზიკის** გამოყენების **ფარგლები**;
- პლანკ-აინშტაინის დებულებები სინათლის *გამოსხივების*, *გავრცელების* და *შთანთქმის* **კვანტური ხასიათის** შესახებ, ბორმა **გაავრცელა** მოძრავი *ელექტრონის ენერგიის ცვლილებაზეც*;

▪ბირთვულ მოდელს **კვანტური საფუძვლები** მან *სამი* **პოსტულატის** *დაფიქსირებით* შესძინა:
- **ატომს** *ძირითად* თვისებად - **სტაბილურობა** დაუწესა;
- **ელექტრონებს** კი, მხოლოდ **გარკვეულ** (“*დაშვებულ*”) **ორბიტებზე** [3],[4] ბრუნვის *ნება* (ანუ, **გარკვეული ენერგიების** ფლობის უფლება) დართო;



I პოსტულატი – ატომი შეიძლება იყოს მკაცრად განსაზღვრული ენერგიის გარკვეულ სტაციონარულ მდგომარეობაში. ამ მდგომარეობაში ატომი არ ასხივებს;
▪ამრიგად, “დაკანონებულია” ელექტრონის ორბიტაზე ბრუნვის უფლება **ენერგიის შეუცვლელად**, ანუ **აღარ** არსებობს მისი ბირთვზე **დაცემის** *მიზეზი*;

II პოსტულატი – ატომის მიერ ენერგიის გამოსხივება ან შთანთქმა დაკავშირებულია ატომის გადასვლასთან ერთი სტაციონარული მდგომარეობიდან მეორეში [4];
- ატომის სტაციონარული მდგომარეობის შეცვლა **ელექტრონის** ერთი **ორბიტიდან** მეორე **ორბიტაზე** **გადასვლით** არის განპირობებული [4];

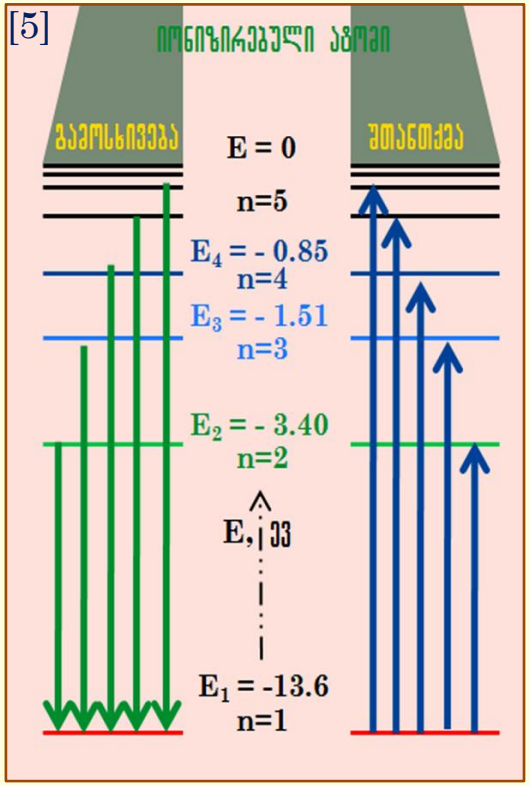


▪ელექტრონის **ენერგიის ცვლილება** ელექტრონის *საბოლოო* E_f (f= 1,2,3, …) და *საწყის* E_i (i= 1,2,3, …) ორბიტებზე **ენერგიათა სხვაობით** განისაზღვრება $\Delta E = E_f - E_i$;

•ელექტრონის **მეტი** ენერგიის სტაციონარული მდგომარეობიდან (**მაღალი** ორბიტიდან) **ნაკლები** ენერგიის სტაციონარულ მდგომარეობაში (**დაბალ** ორბიტაზე) გადასვლისას ადგილი აქვს **ენერგიის** - სინათლის **კვანტის (ფოტონის)** *გამოსხივებას* [5];

•ელექტრონის **დაბალიდან მაღალ** ორბიტაზე გადასვლა **ენერგიის - ფოტონის** *შთანთქმისას* ხდება [5];

•**თითოეული** გადასვლისას *გამოსხივდება* ან *შთაინთქმება* $h\nu = E_f - E_i$ *ენერგიის*, ანუ $\nu = (E_f - E_i)/h$ **სიხშირის** *ერთი* **ფოტონი**;



III **პოსტულატი** – **სტაციონალურია** ის ორბიტა, რომლისთვისაც **ელექტრონის** **იმპულსის მომენტი** - $h/2\pi$–ის **ჯერადია**: $L = mvr = n\hbar$;

•**n** - **მთავარი** **კვანტური** **რიცხვია** (**n** = 1, 2, 3, . . .);

3.წყალბადის ატომის ბორის თეორია. სპექტრალური სერიები

▪უმარტივესი აგებულება აქვს წყალბადის ატომს. ბორმაც თავისი პოსტულატების საფუძველზე ჩამოყალიბებული თეორიის "ტესტირებისას" წყალბადის ატომის ცდისეულ მონაცემებს დაეყრდნო (ცხადია, იხილავდა წრიულ ორბიტებს) და საუკეთესო შედეგებიც მიიღო;

▪ბორის მიხედვით, ელექტრონის **სტაციონალური წრიული ორბიტების** **რადიუსი** [1] და ამ ორბიტებზე ელექტრონის **ენერგია** [2] გამოითვლება შემდეგი თანაფარდობებით:

$$r_n = n^2 [h^2 e_0 / \pi e^2 m_e] \quad (3.1)$$

$$E_n = -(1/n^2) [e^4 m_e / 8 h^2 e_0^2] \quad (3.2)$$

n=1,2,3,4… **მთავარი კვანტური რიცხვია** და, ამდენად, r_n და E_n სიდიდეები *დაკვანტულია*;

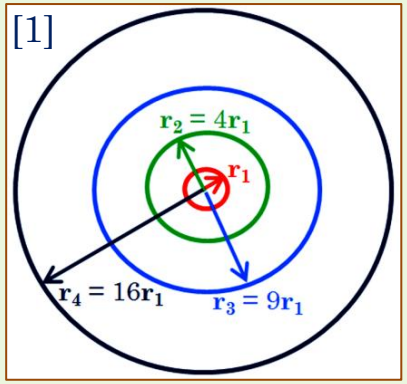
•(3.1) ➡ ბირთვის უახლოესი (პირველი, n=1) ორბიტის რადიუსი r_1, რომელსაც **ბორის** **რადიუსი** ეწოდა, ტოლია $r_1 = 0.529 \cdot 10^{-10}$ მ, ხოლო მისი შესაბამისი $E_1 = -13.6$ ევ ენერგია განსაზღვრავს წყალბადის ატომის **იონიზაციის** ენერგიას ;

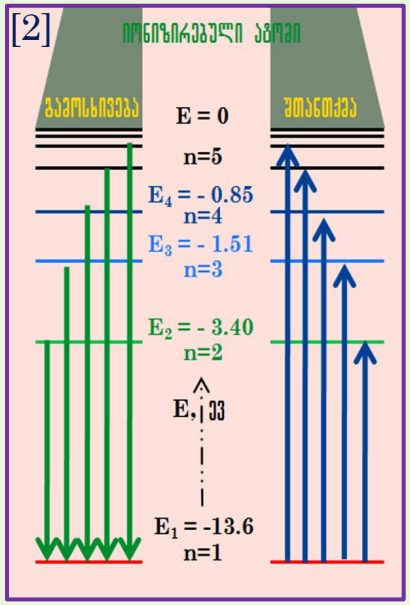
•E_1 ენერგიის ენერგეტიკულ დონეს **ძირითად მდგომარეობას** უწოდებენ, ყველა დანარჩენ დონეებს – **აგზნებული მდგომარეობები**;

•ენერგიის **ნულოვანი** დონე (E =0) შეესაბამება n=∞ [2], ანუ *ნულოვანი ენერგია* აქვს ელექტრონს, რომელიც განთავისუფლდა და *ატომთან* *დაკავშირებული* *აღარ არის* (ატომი **იონიზირებულია**, ანუ **დადებით** **იონად** გადაიქცა);

▪**ელექტრონის** ერთი ენერგეტიკული დონიდან მეორეზე გადასვლისას [2] ადგილი აქვს ენერგიის **კვანტის** **შთანთქმას** ან **გამოსხივებას**

$$h\nu = E_m - E_n \quad (3.3)$$





▪(3.3) ➡ და ბორის II პოსტულატის შესაბამისად გამოსხივების სიხშირე

$$\nu_{mn} = (m_e e^4/8\varepsilon_0 h^3)\cdot[(1/n^2) - (1/n'^2)] \quad (3.4)$$

•(3.4)-ში კოეფიციენტების თანამამრავლი სრულ თანხმობაშია **რიდბერგის** ემპირიულ ფორმულასთან და მის მიერ შემოტანილ მუდმივასთან (**რიდბერგის** მუდმივა)

$$R = 3.29\cdot 10^{15}\ ჰც \quad \{= m_e e^4/8\varepsilon_0 h^3\}$$

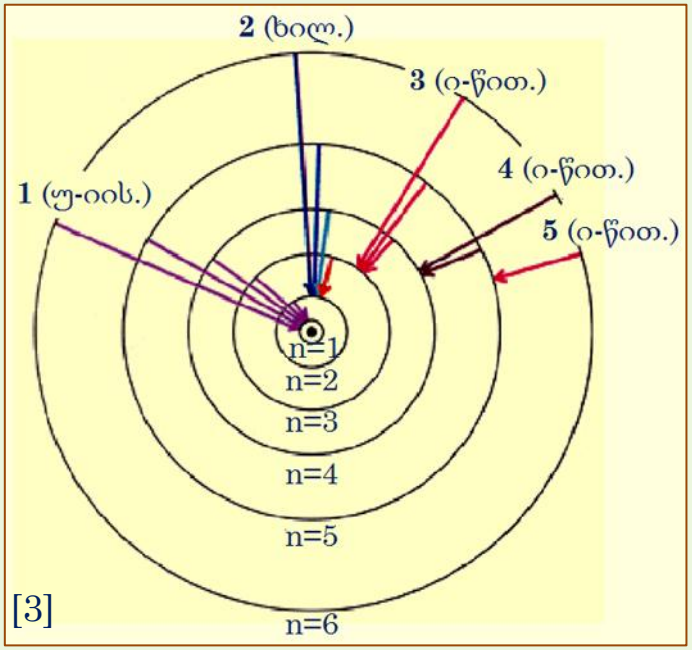
▪ელექტრონის შესაძლო გადასვლათა სიმრავლე (ენერგიის გამონთავისუფლებით) [3] აყალიბებს წყალბადის ატომის **გამოსხივების სპექტრში ხაზების ერთობლიობებს** (**სერიებს**) [4], რომელთა **სახელწოდებები** უკავშირდება მათ აღმომჩენებს;

წყალბადის ატომის გამოსხივების სერიები.

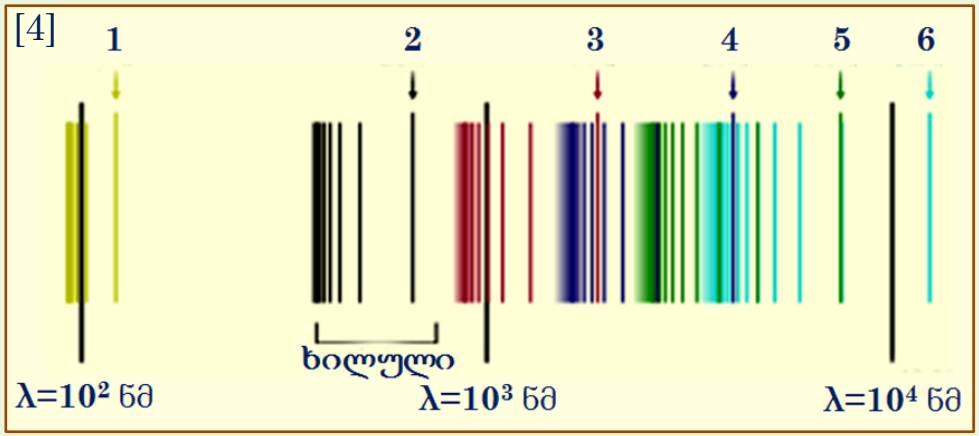
სერიის შესაბამისი **n** **საბოლოო** და **n′** **საწყისი** მდგომარეობები, მკვეთრი ხაზის **λ_i ტალღის სიგრძე**

1. ლაიმანის **n**=1, **n′**=2,3... λ_1=1216Å
2. ბალმერის **n**=2, **n′**=3,4... λ_2=6565Å
3. პაშენის **n**=3, **n′**=4,5... λ_3=18756Å
4. ბრეკეტის **n**=4, **n′**=5,6... λ_4=40522Å
5. პფუნდის **n**=5, **n′**=6,7... λ_5=74598Å
6. ჰემფრის **n**=6, **n′**=7, 8... λ_6=123718Å

J.Rydberg
1854-1919



[3]



“რაგინდ ნათელიც უნდა ჩანდეს ნებისმიერი სიტყვა ან ცნება, მათი ხმარების სფერო მაინც შემოსაზღვრულია.” Werner K. Heisenberg

1901 - 1976

რამდენი უნდა იცოდე, რომ იცოდე რამე ?!

სტუ-ს ფიზიკის კურსის *(4 სემესტრი)* ლექციების კონსპექტი

ლექცია 8 | **თემა:** | სემესტრი IV

ატომის თეორიის წინსვლა

075 **1.მასური რიცხვი. იზოტოპები. რადიოაქტიურობა**

076 **2.რადიოაქტიური დაშლის კანონი. ნახევარდაშლის პერიოდი**

078 **3.ნივთიერების კვანტურ-ტალღური დუალიზმი**

080 **4.ჰაიზენბერგის განუზღვრელობის პრინციპი**

1.მასური რიცხვი. იზოტოპები. რადიოაქტიურობა

▪ბირთვში **პროტონების Z რაოდენობა**, ანუ ატომის *<u>რიგობრივი</u> <u>ნომერი</u>*) უტოლ-დება გარსებზე მბრუნავი **ელექტრონების რიცხვს**;

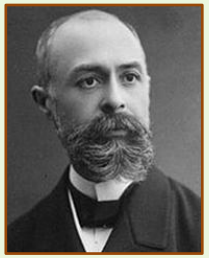
▪პროტონების (**Z**) და ნეიტრონების (**N**) **ჯამურ რაოდენობას A მასურ რიცხვს** უწოდებენ

$$A = Z + N \quad (1.1)$$

•ვინაიდან (1.1) ➡ $N=A-Z$ (1.2), **X** ბირთ-ვისთვის საკმარისია ორი (**Z, A**) რიცხვის ${}_{Z}X^{A}$ მითითება;

▪ქიმიური ელემენტის ბირთვში **პროტო-ნების უცვლელი** რაოდენობისას, **ნეიტ-რონების** რიცხვი შეიძლება **განსხვავებუ-ლი** აღმოჩნდეს;

▪**N**-ის **სხვადასხვა შემცველობის ერთი ელემენტის ბირთვებს იზოტოპები** ეწო-და. მაგ.: ${}_{92}U^{235}$, ${}_{92}U^{238}$, ${}_{92}U^{239}$ (პროტო-ნების ერთნაირი **Z**=92 რაოდენობისას, განსხვავებულია ნეიტრონების რიცხვი **N**=143, **N**=146, **N**=147);

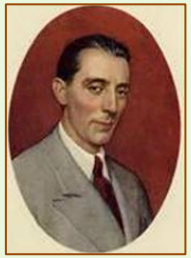


A.Becquerel
1852–1908
ნობელი
1903 ფიზ.

M.Curie
1867–1934
ნობელი
1903ფიზ. 1911ქიმ.

P.Curie
1859–1906
ნობელი
1903 ფიზ.

I.Joliot-Curie
1897–1956
ნობელი
1935 ქიმ.



J.Joliot-Curie
1900–1958
ნობელი
1935 ქიმ.

✓**რადიოაქტიურობა** - არამდგრადი ბირთვის სხვა **ბირთვებად გარდაქმნის** (*<u>დაშლის</u>*), ან ბირ-თვში **ნუკლონების გადაჯგუფების** შედეგი {აღმო-აჩინეს და შეისწავლეს ბეკერელმა და კიურებმა};

▪{ბირთვიდან} რადიოაქტიური გამოსხივების **სა-მი სახე არსებობს**:

<u>1</u>.α - **ჰელიუმის** (${}_{2}He^{4}$) ბირთვების (**2p,2n**) ნაკადი

$${}_{Z}X^{A} \rightarrow {}_{2}He^{4} + {}_{Z-2}Y^{A-4}$$

მაგ.: რადიუმი =>რადონი ${}_{88}Ra^{226} \rightarrow {}_{2}He^{4} + {}_{86}Rn^{222}$

<u>2</u>.β - **ელექტრონების** ${}_{-1}e^{0}$ ნაკადი **ბირთვიდან** {ბირთვში ნეიტრონის პროტონად და ელექტრო-ნად დაშლის შედეგი}

$${}_{0}n^{1} \rightarrow {}_{1}p^{1} + {}_{-1}e^{0} + \overline{\nu}_{e} \quad \text{ანუ} \quad {}_{Z}X^{A} \rightarrow {}_{-1}e^{0} + {}_{Z+1}Y^{A}$$

მაგ.: ნახშირბადი => აზოტი ${}_{6}C^{14} \rightarrow {}_{-1}e^{0} + {}_{7}N^{14}$

<u>3</u>.γ – **ფოტონების** ნაკადი (**ემ ტალღა**, ხილულზე ბევრად მეტი სიხშირით $\nu_{\gamma} >> \nu_{V}$);

2.რადიოაქტიური დაშლის კანონი. ნახევარდაშლის პერიოდი

▪*<u>რადიოაქტიურობას</u>* **ბირთვული** **პროცესები** განაპირობებენ:

•არამდგრადი ბირთვის სხვა **ბირთვებად** **დაშლა** - **გარდაქმნა** {მაგალითად, **α**–გამოსხივება, $_2\mathbf{He}^4$ ბირთვების ნაკადი};

•ბირთვში **ნუკლონების** (პროტონების და ნეიტრონების) **რიცხობრივი** **გადანაწილება** {**β**–გამოსხივება, **ელექტრონების** ნაკადი - **ნეიტრონის** **პროტონად** **და** **ელექტრონად** დაშლის შედეგად};

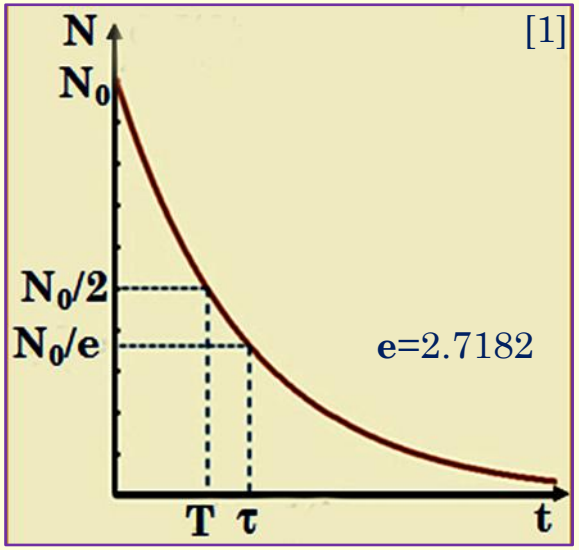
•**γ**–გამოსხივება **არ** **ცვლის** ბირთვს {ფოტონს არც მუხტი და არც მასა არა აქვს}. თუმცა, **მცირდება** ატომის **ენერგია**;

▪<u>რადიოაქტიურობა</u> გამოსხივების წყაროს მიხედვით არის:

•**ბუნებრივი**. წყარო – **დედამიწაზე** არსებული **არასტაბილური** (არამდგარადი) ბირთვებია;

•**ხელოვნური**. წყარო – ბირთვული **რეაქციებისას** **მიღებული** **გამოსხივების** **უნარის** **მქონე** ბირთვებია {მაგალითად, მარია და პიერ <u>კიურის</u> მიერ ახლად გამოყოფილი ელემენტები, რომლებსაც მათ **პოლონიუმი** $_{84}\mathbf{Po}^{209}$ და **რადიუმი** $_{88}\mathbf{Ra}^{226}$ უწოდეს};

▪რადიოაქტიური ქიმიური ელემენტები ბუნებრივად **არ** **იარსებებდნენ**, შესაძლებელი რომ ყოფილიყო რადიოაქტიური სხეულის უამრავ ატომთა ბირთვების **ერთდროული** **დაშლა** - *"კოლექტიური"* **გამოსხივება**;



▪დროის **Δt** შუალედში რადიოაქტიური სხეულის ბირთვების **გარკვეული** **ΔN** რიცხვი **განიცდის** დაშლას.ა ეს რაოდენობა **ნივთიერების** **გვარობაზე** (**λ**-**დაშლის** **მუდმივა**) და სხეულში ჯერ კიდევ **დაუშლელი** **ბირთვების** **N** **რიცხვზეა** დამოკიდებული [1];

•ძალიან მცირე **dt** დროში **დაშლილი** ბირთვების რაოდენობა

$$dN=-\lambda N dt \quad \Rightarrow \quad dN/N=-\lambda dt \qquad (2.1)$$

•(2.1)-დან დგინდება დროის **t** მომენტში **N** დაუშლელი ბირთვების რიცხვი: $\ln(N/N_0)=-\lambda t$ და $N=N_0 \exp(-\lambda t)$ (2.2)

▪*თითოეული* **რადიოაქტიური** *ნივთიერება* ხასიათდება **კონკრეტული დროის შუალედით - ნახევარდაშლის პერიოდით**

$$T = (\ln 2)/\lambda \quad (2.3),$$

ნახევარდაშლის პერიოდი ეს არის დრო, **რომლის განმავლობაში დაშლას განიცდის ჯერ კიდევ დაუშლელად არსებული რადიოაქტიური ბირთვების** *ნახევარი*.

▪**დაშლის მუდმივა λ** გვიჩვენებს, თუ **მოცემული ბირთვების რა ნაწილი იშლება დროის ერთეულში**, ანუ განსაზღვრავს **ბირთვის დაშლის ალბათობას დროის ერთეულში**;

•**λ** ბირთვის მახასიათებელი სიდიდეა და არ არის დამოკიდებული გარეშე პირობებზე;

▪რადიოაქტიური ბირთვების დაშლის პროცესის სისწრაფეს ახასიათებენ აგრეთვე ბირთვის **τ სიცოცხლის საშუალო ხანგრძლივობით** (დროით, **წარმოქმნის მომენტიდან დაშლის მომენტამდე**)

$$\tau = 1/\lambda \quad (2.4)$$

{(2.3), (2,4)} ⇨ $\tau \approx 1.44T$;

▪**რადიოაქტიური** ნივთიერების **სხვადასხვა** **იზოტოპის T ნახევარდაშლის პერიოდი** {როგორც წესი} მკვეთრად **განსხვავებულია** [2]. მაგალითად: ურანის იზოტოპების **T** შეადგენს: $4.5 \cdot 10^9$ წ. ($_{92}U^{238}$); $7 \cdot 10^8$ **წ.** ($_{92}U^{235}$); 58 **წთ.** ($_{92}U^{229}$); 23.5 **წთ.** ($_{92}U^{239}$);

ელემენტი	იზოტოპი	დაშლის სახე	[2] პერიოდი
კრიპტონი	$_{36}Kr^{94}$	β	1.4 წმ
სპილენძი	$_{29}Cu^{66}$	β	5 წთ
ურანი	$_{92}U^{229}$	α	58 წთ
კობალტი	$_{27}Co^{60}$	β	5.3 წ.
პლუტონიუმი	$_{94}Pu^{239}$	α	100 წ.
ნახშირბადი	$_{6}C^{14}$	β	5568 წ.
თორიუმი	$_{90}Th^{232}$	α	$1.4\ 10^{10}$ წ.

3.ნივთიერების კვანტურ-ტალღური დუალიზმი

L. de Brogilie
1892-1987
ნობელი 1929

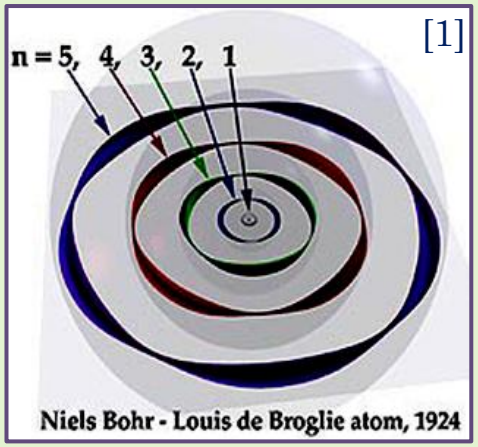
✓ *სინათლის* **კვანტურ-ტალღურ** ბუნებაზე დაყრდნობით, დე ბროილმა ჩამოაყალიბა ჰიპოთეზა:

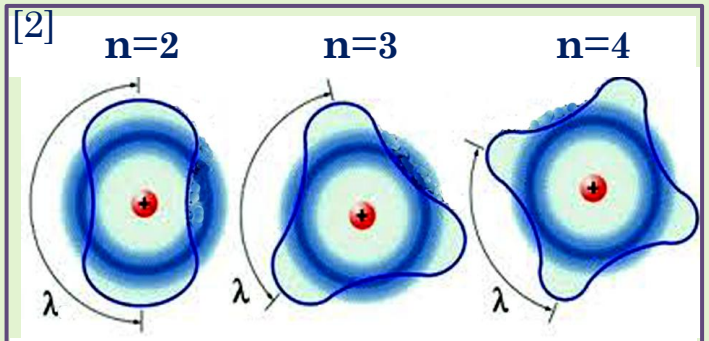
▪**კვანტურ-ტალღური დუალიზმი უნივერსალური ხასიათისაა** და **იმპულსის მატარებელ ყველა ნაწილაკს** {კერძოდ, ელექტრონსაც} **ტალღური თვისებებიც უნდა გააჩნდეს**;

▪ამდენად, ელექტრონის (და ნებისმიერი სხვა ნაწილაკის) **მოძრაობას** უნდა უკავშირდებოდეს გარკვეული **ტალღური პროცესი**, რომლის **λ ტალღის სიგრძე** *ნაწილაკის* **P იმპულსით** განისაზღვრება **λ = h/P** (3.1);

•დე ბროილის ფორმულა (3.1) უკავშირებს ერთმანეთს ნაწილაკის **კვანტურ** მახასიათებელ **P** *იმპულსს* და **ტალღურ** მახასიათებელ **λ** *ტალღის სიგრძეს*, ანუ **V სიჩქარით მოძრავ m მასის თითოეულ ნაწილაკს** შეესაბამება **დე ბროილის მდგარი, წრიული, შეკრული ტალღა** [1], [2], ტალღის სიგრძით

$$\lambda = h/mV \quad (3.2)$$





ელექტრონის ტალღის ამპლიტუდის განაწილების სამი მაგალითი

▪ტალღა იქნება **შეკრული**, ე.ი. **იარსებებს** (**არ მიილევა**), თუ მისი **λ ტალღის** სიგრძისა და წრიული **ორბიტის L** სიგრძისთვის სრულდება თანაფარდობა:

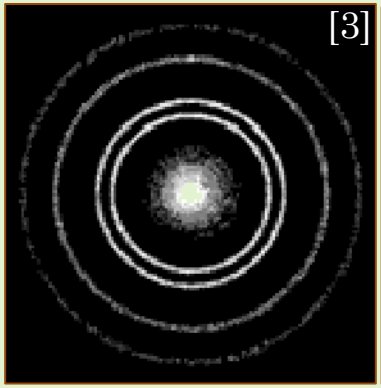
$$L / \lambda = n \quad (3.3) \quad n = 1,2,3,...$$

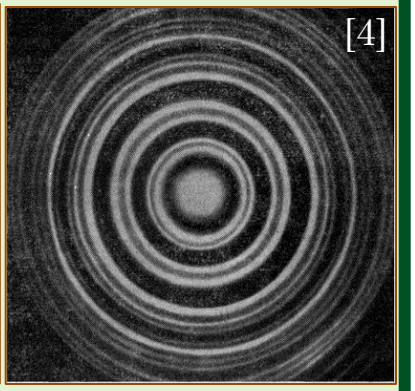
▪{(3.3), (3.2)} ➡ $L = n\lambda = nh/mV$ ➡ $2\pi r_n = nh/mV$ ➡ $mVr_n = n\hbar$ (3.4), რაც ამტკიცებს ბორის **III პოსტულატს**;

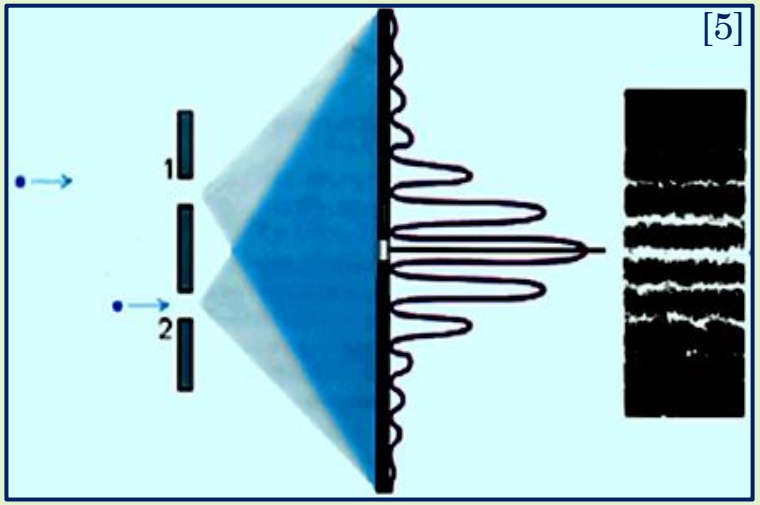
▪გარდა ბორის პოსტულატის დასაბუთებისა, დე ბროილის იდეამ დამტკიცება ჰპოვა **ელექტრონის დიფრაქციის** უნარის გამოვლენის ექსპერიმენტებში (1927-1961 წწ.), როგორც კრისტალის ზედაპირიდან **არეკვლის**, ასევე კრისტალში **გავლის** შედეგად [3],[4];

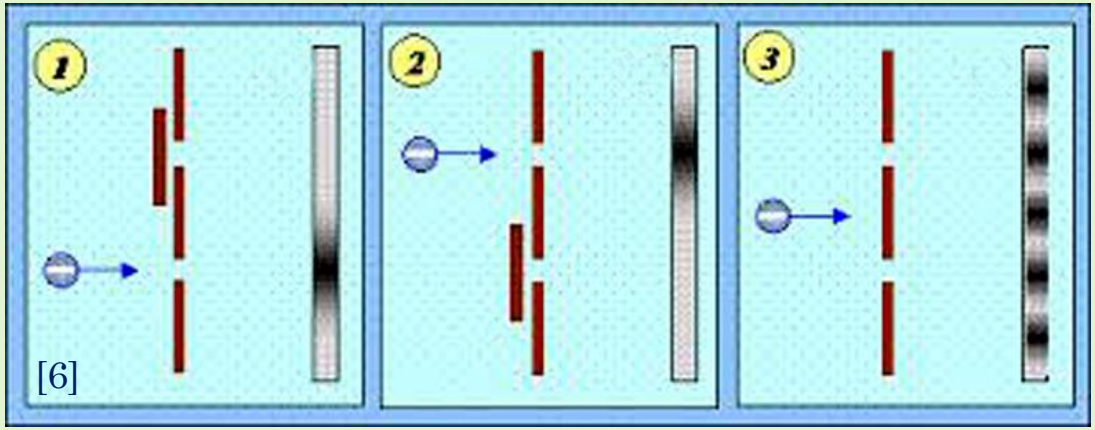
▪შემდგომში, ანალოგიური ტალღური მახასიათებ-ლები გამოავლინეს **პროტონებმა**, **ნეიტრონებმა** და **სხვა ნაწილაკებმა**;

▪უნიკალური ექსპერიმენტი ჩატარდა 1961 წელს, რომელშიც დაფიქსირდა **ინტერფერენციული** სურა-თი {წმინდა **ტალღური** მოვლენა} **ელექტრონების** [5] (ან, სულაც, **გამხოლოებული ელექტრონის** [6]) **ორ ხვრელში გატარებისას**;

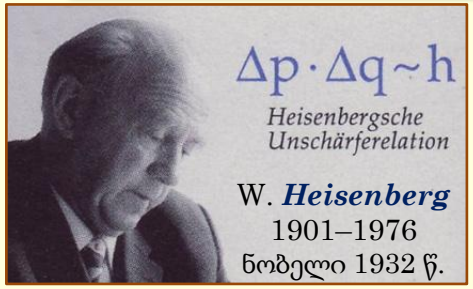






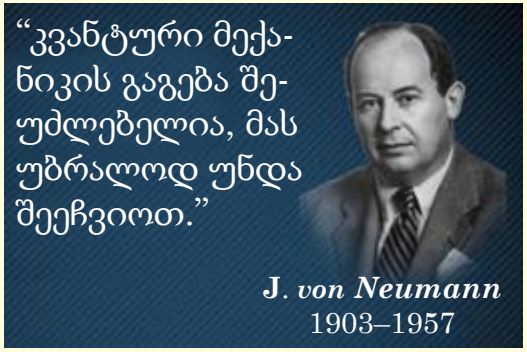


4.ჰაიზენბერგის განუზღვრელობის პრინციპი



✓**კლასიკურ ფიზიკაში** სხეულის მოძრაობა **სრულად** აიწერება დროის ნებისმიერ მომენტში: **აწმყოსა, წარსულსა** და **მომავალში**;
▪კვანტური მექანიკა, **ჰაიზენბერგის განუზღვრელობის პრინციპის** თანახმად (1927 წ.), **ზღუდავს** ნაწილაკის მახასიათებლების **დადგენის სიზუსტეს**;

▪**განუზღვრელობის** {ფუნდამენტური} **პრინციპი** **აფიქსირებს** **კვანტური სისტემის მახასიათებელი წყვილის ერთდროული განსაზღვრის სიზუსტის ზღვარს** (მაგ.: კოორდინატი & იმპულსი; ენერგია & დრო . . .);
•**რაც უფრო ზუსტად იზომება ნაწილაკის ერთი მახასიათებელი, მით ნაკლები იქნება მეორე მახასიათებლის განსაზღვრის სიზუსტე. შეუძლებელია ორივე სიდიდე ერთდროულად** და **ნებისმიერი სიზუსტით დავადგინოთ**;



▪ორი განუზღვრელობის ნამრავლი <u>არ</u> შეიძლება <u>ნაკლები</u> **იყოს ħ** **პლანკის მუდმივაზე**;
▪ვთქვათ, ნაწილაკის **კოორდინატის** გაზომვის **სიზუსტის** (ΔX_i) და **იმპულსის** (ΔP_i) {ანუ **სიჩქარის** (ΔV_i)} გაზომვის **სიზუსტის** ნამრავლი **განუზღვრელობის პრინციპის** **თანახმად** შემდეგი <u>*თანაფარდობით*</u> განისაზღვრება:

$$\{\Delta X \Delta P_x \geq \hbar/2; \quad \Delta Y \Delta P_y \geq \hbar/2; \quad \Delta Z \Delta P_z \geq \hbar/2;\} \quad (4.1)$$

•**რაც უფრო ვზრდით** <u>*კოორდინატის*</u> **გაზომვის სიზუსტეს**, მით **უფრო იზრდება განუზღვრელობა იმპულსის** დადგენაში. <u>*იმპულსის*</u> **"აბსოლუტური"** სიზუსტით დადგენისას, ნაწილაკის <u>*მდებარეობა*</u> დარჩება საერთოდ **დაუდგენელი**;

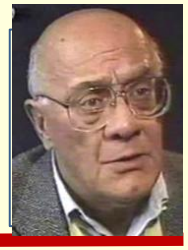
▪**განუზღვრელობის** პრინციპს ექვემდებარება დროისა და ენერგიის გაზომვა

$$\Delta E \Delta t \geq \hbar \qquad (3.2)$$

•ნაწილაკის **ენერგია** შეიძლება იყოს **განუსაზღვრელი**, ან სულაც **არ ინახებოდეს** ΔE სიდიდით Δt **დროის განმავლობაში**;

▪**ჰაიზენბერგის პრინციპი** მარტივად ასაბუთებს, თუ **რატომ არ ეცემა ელექტრონი ბირთვს**:
•**დაცემისას**, ელექტრონის **კოორდინატიც** და **იმპულსიც ერთდროულად** იქნებოდა **ზუსტად განსაზღვრული**, რაც **შეუძლებელია!**

“ყველაზე დიდი ტყუილი, ნათქვამი ისეთ სიტუაციაში, როდესაც მისი დაჯერება შეუძლებელია, შეიძლება ზუსტად სიმართლე აღმოჩნდეს. ” მერაბ მამარდაშვილი



1930 - 1990

რამდენი უნდა იცოდე, რომ იცოდე რამე ?!

სტუ-ს ფიზიკის კურსის *(4 სემესტრი)* ლექციების კონსპექტი

ლექცია **9** | **თემა:** | სემესტრი **IV**

ატომის კვანტურ-ტალღური ხედვა

083 **1.შრედინგერის განტოლება**

085 **2.ატომის კვანტურმექანიკური თეორია**

089 **3.ნაწილაკების სპინი და პაულის აკრძალვის პრინციპი**

1.შრედინგერის განტოლება

E. Schrödinger
1887–1961
ნობელი 1933 წ

ψ

ψ

M. Born
1882–1970
ნობელი 1954 წ

▪ვინაიდან **ყველა ნაწილაკს** {ვთქვათ, ელექტრონს} ტალღური თვისებებიც გააჩნია, მას, როგორც ტალღას, გარკვეული **A** *ამპლიტუდა* და **I** *ინტენსიურობა* შეიძლება დაუკავშირდეს (**I~A**^{2});

▪ე.**შრედინგერმა** ელექტრონული ტალღის **ამპლიტუდა** აღწერა **ψ** ტალღური ფუნქციით, რომლის **კვადრატი ψ**^{2} (**ბორნის** ინტერპრეტაციით) განსაზღვრავს **სივრცის მოცემულ წერტილში** ელექტრონის, როგორც ნაწილაკის, მოხვედრის *ალბათობას* ;

•ამდენად, სივრცის {**dxdydz**} ელემენტში **ნაწილაკის** მოხვედრის **dw** ალბათობა ტოლია:

$$dw = \psi^2 dxdydz \quad (1.1)$$

•*სრულ* **V** მოცულობაში **ნაწილაკი** ყოველთვის *იძებნება*, ანუ ფუნქცია **ნორმირებულია**:

$$dw = \int_V dw = \int_V \psi^2 dV = 1 \quad (1.2)$$

▪**ψ** ტალღური *ფუნქციის* **გამოსათვლელად** (მისი კონკრეტული სახის დასადგენად), შრედინგერმა ჩაწერა {"გამოიგონა"} განტოლება - **შრედინგერის განტოლება**:

$$\Delta\psi + 8\pi^2 mh^{-2}(E-U)\psi = 0 \quad (1.3)$$

Δ – ლაპლასის ოპერატორია

$$\Delta = (\partial^2/\partial x^2) + (\partial^2/\partial y^2) + (\partial^2/\partial z^2)$$

▪(1.3) განტოლების **დროზე** **დამოუკიდებელი** - **სტაციონარული** სახეა. ის ჩაწერილია **m** მასის და **E** ენერგიის ნაწილაკისთვის, რომელიც მოძრაობს **U**(x,y,z) **პოტენციურ ველში** (მაგ.: ელექტრონი კრისტალურ ველში);

▪**დროზე დამოკიდებულებისას** და **ერთგანზომილებიანი** (**x**-კოორდინატი) სახით **შრედინგერის განტოლება** შეიძლება ასე იყოს ჩაწერილი:

$$-(\hbar^2/2m)\cdot[\partial^2\psi(x,t)/\partial x^2] + U(x)\psi(x,t) = i\hbar\cdot[\partial\psi(x,t)/\partial t] \quad (1.4)$$

აქ, $i=(-1)^{1/2}$

▪შრედინგერის განტოლება - ნაწილაკის **კვანტურმექანიკური მოძრაობის** განტოლებაა, რომელიც {მცირე მოდიფიცირებით} გამოიყენება ნაწილაკთა მრავალი კონკრეტული სისტემის გასაანალიზებლად, მაგრამ **იზღუდება**, თუ:

1. არსებობს ნაწილაკების **რელატივისტური** **სიჩქარეებით** მოძრაობის შესაძლებლობა;

2.სისტემაში ნაწილაკების რაოდენობა **მუდმივი** არ **არის** (ისინი ჩნდებიან, ან ქრებიან);

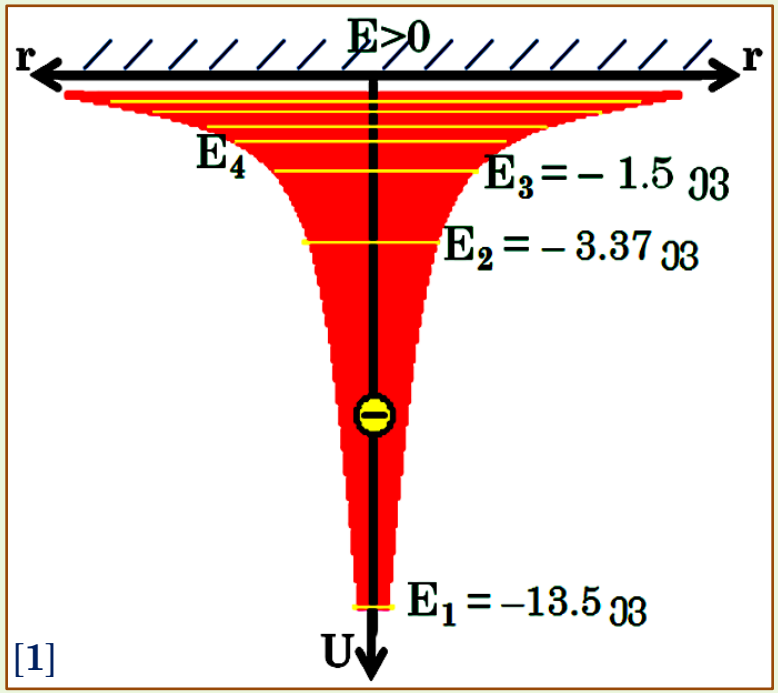
▪შრედინგერის განტოლებით განისაზღვრა ელექტრონის ენერგიათა $\mathbf{E_n}$ მნიშვნელობები **წყალბადის** ატომში $\{\mathbf{u = -e^2/4\pi\varepsilon_0 r}\}$:

$$\Delta\psi + 8\pi^2 m h^{-2}(E + e^2/4\pi\varepsilon_0 r)\psi = 0 \quad (1.4)$$

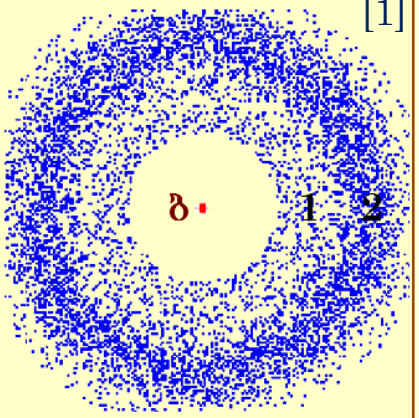
•მიღებული რიცხობრივი შედეგები

$$E_n = -(1/n^2)\,(me^4/8h^2\varepsilon_0^2) \quad (1.5)$$

საუკეთესო თანხმობაში არიან ბორის მონაცემებთან [1];



2.ატომის კვანტურმექანიკური თეორია



1- დაბალი; 2 - მაღალი;
წყალბადის ატომი

▪ატომის **კვანტურმექანიკურმა** თეორიამ {**ბორის** მოდელის შემდგომი განზოგადოებით და **კვანტურ-ტალღურ** დუალიზმზე, **შრედინგერის განტოლებაზე** დაყრდნობით} ცხადყო, რომ სივრცის მოცემულ **წერტილში** ელექტრონის (როგორც ნაწილაკის) **არსებობა** მხოლოდ **გარკვეული ალბათობით** შეიძლება შეფასდეს;

▪კვანტური თეორიის მიხედვით **არ არსებობენ** ელექტრონის მკაცრად **განსაზღვრული** წრიული ორბიტები. **ტალღური ბუნების** გამო ელექტრონი "გაითითხნა" სივრცეში [1] **უარყოფითი მუხტის "ღრუბელის"** სახით;

▪ღრუბელის **სიმკვრივე** (და, ე.ი. **ელექტრონის** იქ არსებობის **ალბათობაც**) მაქსიმალურია ბირთვიდან $0.53 \cdot 10^{-10}$ მ მანძილზე, რაც სრულ თანხმობაშია **ბორის რადიუსთან**. მაგრამ, ბორის მოდელისგან განსხვავებით, ელექტრონი **დროის** **ნებისმიერ** **მომენტში** შეიძლება აღმოჩნდეს **ბირთვთან** როგორც უფრო **ახლოს**, ასევე უფრო **შორს**;

▪ამდენად, არც **ელექტრონულ** *ღრუბელს* და არც **ატომს** **ზუსტი საზღვრები არ გააჩნიათ** და ატომის **დიდი** ნაწილი **აღარ** **წარმოადგენს** სრულებით **ცარიელ** **სივრცეს**;

▪აღსანიშნავია, რომ ელექტრონი "უცაბედად" შეიძლება **აღმოჩნდეს** ძალიან **დაბალი ალბათობის** წერტილებშიც;

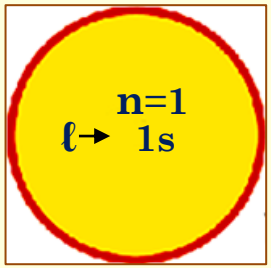
▪ **შეუძლებელია** ელექტრონის **მოძრაობის ტრაექტორიის** და, ასევე, დროის რაღაც **მომენტისთვის** მისი **მდებარეობის** **წინასწარ** **განსაზღვრა**;

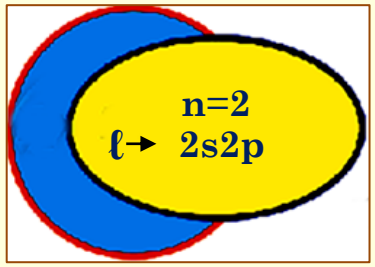
▪**ბორის მოდელი** ელექტრონული მდგომარეობების აღსაწერად **ერთ** (**n**) კვანტურ რიცხვს იყენებს. **კვანტურ ფიზიკაში** კი ასეთი რიცხვი **ოთხია**: **n**, **ℓ**, **m**, $\mathbf{m_s}$;

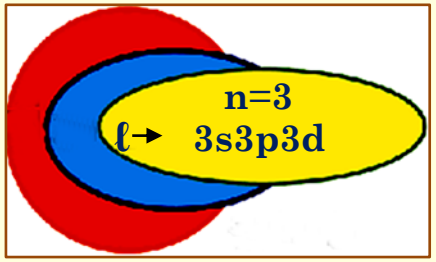
✓ *ელექტრონული მდგომარეობების სისტემატიკა ეფუძნება*

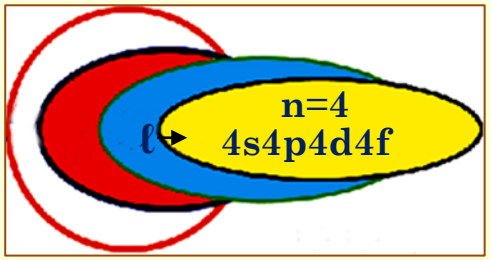
კვანტური რიცხვების მნიშვნელობათა ერთობლიობას

(აქ, განხილვა ხდება წყალბადის (**1** ელექტრონიანი) ატომის მაგალითზე):





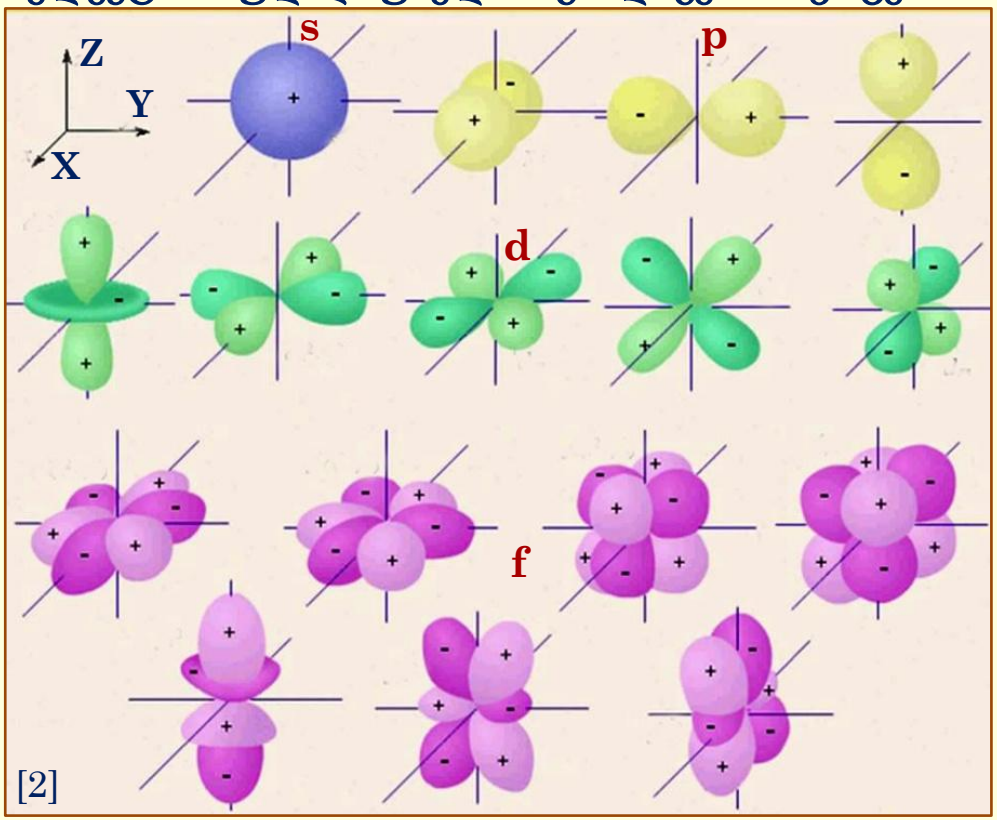


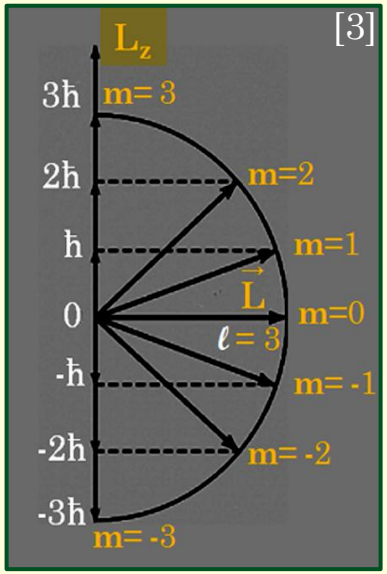


1.n–მთავარი კვანტური რიცხვი:
n=1,2,3,4,…∞ (შესაბამისი აღნიშვნა K, L, M, N,…) განსაზღვრავს ელექტრონის **ორბიტის რადიუსსა** და **ენერგიას**;

2.ℓ–ორბიტალური კვანტური რიცხვი:
•კავშირშია ელექტრონის იმპულსის **L** მომენტთან $\mathbf{L}=[\ell(\ell+1)]^{1/2}\hbar$;
•**ℓ** = 0,1,2,3,…,**n**−1 (შესაბამისი აღნიშვნა s, p, d, f,…) განსაზღვრავს **ელექტრონული ღრუბლის** (**ორბიტალის**) ფორმას [2];
•თუ ატომში **ერთზე მეტი** ელექტრონია, **ენერგია n**-თან ერთად **ℓ**-ზეც ხდება დამოკიდებული;

ელექტრონულ ღრუბელთა განლაგება სივრცეში





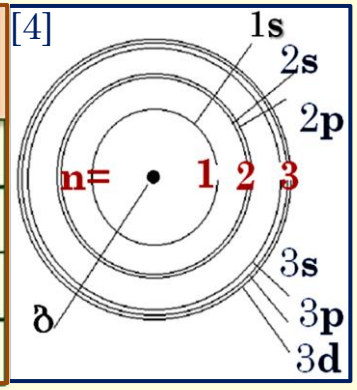
3.**m**–**მაგნიტური კვანტური რიცხვი**: **m=ℓ**, **ℓ**-1, **ℓ**-2,…,0,…,-(**ℓ**-2),-(**ℓ**-1), **-ℓ**, განსაზღვრავს იმპულსის **L** მომენტის ორიენტაციას სივრცეში (მაგ., **Z** ღერძის მიმართ [3]): $\mathbf{L_z = m\hbar}$;

4.$\mathbf{m_s}$–**სპინური კვანტური რიცხვი**: განსაზღვრავს **სპინის** **პროექციის** სიდიდეს და ნიშანს $\mathbf{S_{zs}=m_s\hbar}$;

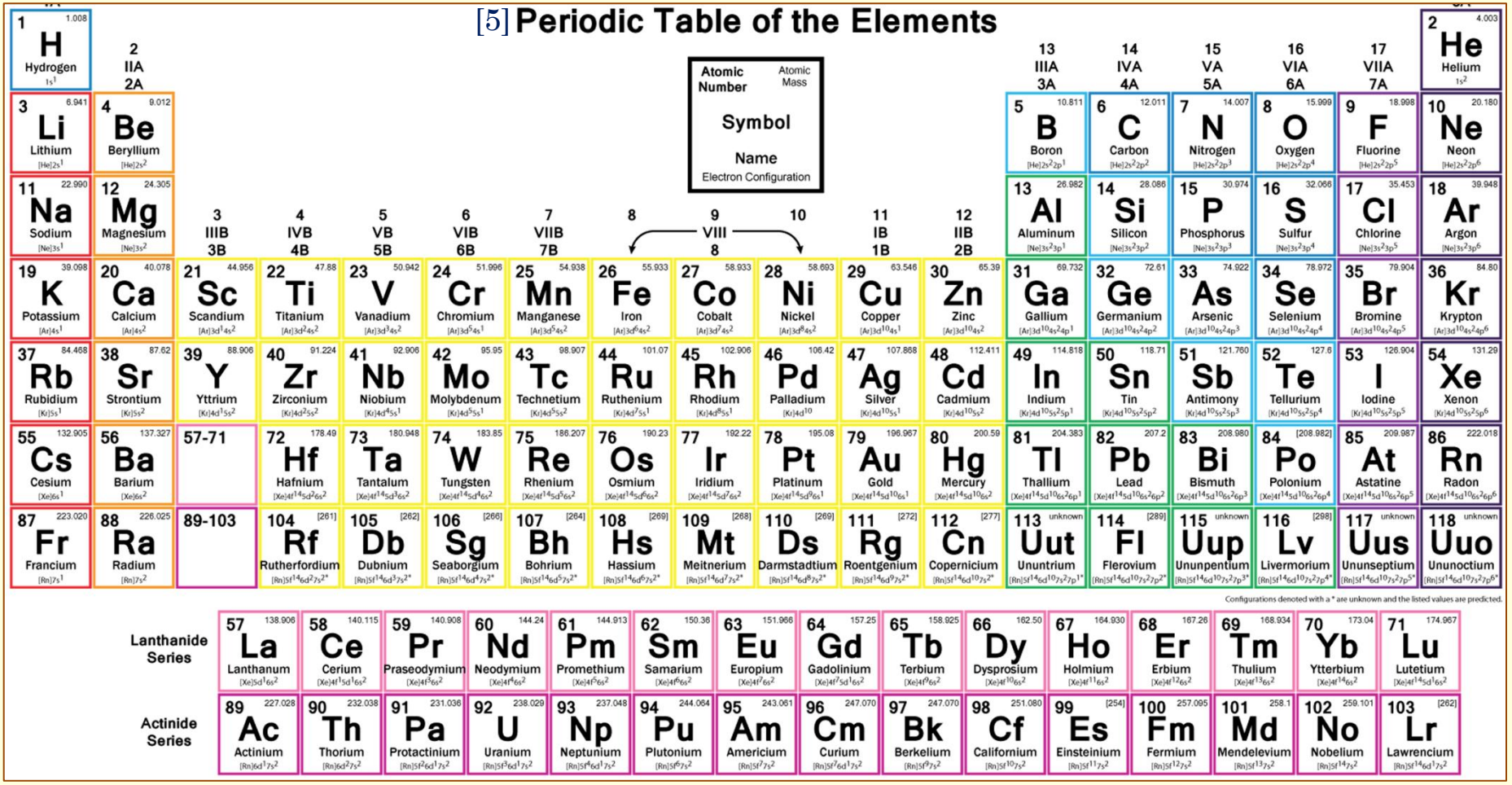
▪**სპინი** - ნაწილაკების **საკუთარი იმპულსის მომენტი**, რომელიც **არ არის** **დაკავშირებული** ნაწილაკის, როგორც მთელის, **გადაადგილებასთან**;

▪**ℓ ორბიტალური კვანტური რიცხვის** მნიშვნელობები განსაზღვრავენ **ორბიტალების** (ელექტრონულ ღრუბელთა) **რაოდენობას** და **განლაგებას** სივრცეში და ზღუდავენ **m** **მაგნიტური კვანტური რიცხვის** შესაძლო მნიშვნელობათა რაოდენობას [4];

ℓ ორბიტალური კვ.რ.	m მაგნიტური კვ.რ.	N=(2 ℓ +1) ორბიტალების რიცხ.
0 (s)	0	1
1 (p)	-1, 0, +1	3
2 (d)	-2, -1, 0, +1, +2	5
3 (f)	-3, -2, -1, 0, +1, +2, +3	7



▪ბუნებაზე კვანტურმექანიკურმა ხედვამ, კვანტური რიცხვების საფუძველზე **ელექტრონული მდგომარეობების** სისტემატიკამ, **გარსების კონფიგურაციამ**, ამ კონფიგურაციების **განმეორებადობამ**, **პაულის აკრძალვის პრინციპმა** მყარ და ზუსტ საფუძველზე დაამკვიდრა მენდელეევის პერიოდული კანონი [5];



3.ნაწილაკების სპინი და პაულის აკრძალვის პრინციპი

▪**კვანტურმა მექანიკამ** დააფიქსირა, რომ ელექტრონს (და, საერთოდ, ნებისმიერ კვანტური ნაწილაკს) უკავშირდება **ორი იმპულსის მომენტი**:

1.სივრცეში **მოძრაობით** განპირობებული მომენტი $\vec{L}$;

2.**პაულის** მიერ (1924 წ) შემოტანილი "*საკუთარი*" მომენტი - **სპინი** $\vec{S}$;

▪**სპინი** წმინდად **კვანტური** ცნებაა და **ქრება** კლასიკურ ფიზიკაში;

▪**ელექტრონის სპინს** უკავშირებდნენ მის ბრუნვას საკუთარი ღერძის ირგვლივ {spin-ბრუნვა}. შემდგომ დადგინდა, რომ ამ ბრუნვაში ელექტრონი არ მონაწილეობს. თუმცა, **სპინი** დარჩა ნაწილაკის აუცილებელ კვანტურ მახასიათებლად;

▪სპინის პროექცია იზომება $\hbar$ პლანკის მუდმივას ერთეულებში $S_{zs}=m_s\hbar$ და m_s იღებს, როგორც მთელ, ასევე ნახევრად მთელ რიცხვით მნიშვნელობებს;

ელემენტარული ნაწილაკების სპინი

სპინი	ნაწილაკების ტიპი	ნაწილაკები	კლასიფიკაცია	სტატისტიკა
0	სკალარული	მეზონები {π, K} ჰიგსის ბოზონი ...	ბოზონები	ბოზე-აინშტაინის
1/2	სპინორული	e, p, n, კვარკები ...	ფერმიონები	ფერმი-დირაკის
1	ვექტორული	ფოტონი, გლუონი, მეზონები {ვექტორული} ...	ბოზონები	ბოზე-აინშტაინის
3/2	სპინ-ვექტორული	Δ იზობარები	ფერმიონები	ფერმი-დირაკის
2	ტენზორული	გრავიტონი, მეზონები {ტენზორული} ...	ბოზონები	ბოზე-აინშტაინის

W.Pauli
1900–1958
ნობელი 1945

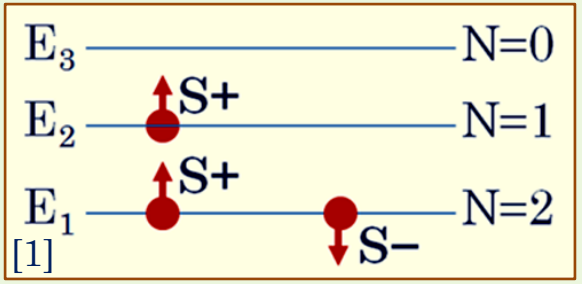
▪1925 წელს პაულიმ ჩამოაყალიბა ბუნების ფუნდამენტური კანონი - **პაულის (აკრძალვის) პრინციპი**, რომლის თანახმად:

▪**შეუძლებელია 1-ზე მეტი ფერმიონი** (ნაწილაკი სპინით 1/2) **იმყოფებოდეს ერთსა და იმავე კვანტურ მდგომარეობაში** (**იდენტური n, l, m, s**);

▪ამდენად, **ელექტრონისთვისაც** იზღუდება ენერგეტიკული მდგომარეობების **დაკავების** შესაძლებლობები;

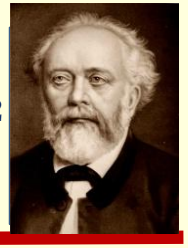
•**ატომში 1** ენერგეტიკულ **დონეზე მაქსიმალურად 2 ელექტრონი** თუ განლაგ-დება და, თანაც, **საპირისპირო მიმართულების სპინით** [1] **!**

▪მატერიალური სამყაროს მრავალი თავისებურება, მათ შორის - ნივთიერების სტაბილურობა, ქიმიური ბმა, ფერო-მაგნეტიზმი - უშუალო კავშირშია პაულის პრინციპთან;



[1]

“მხოლოდ ისაა თვისუფალი, ვინც დამოუკიდებლად აზროვნებს და არ იმეორებს სხვის სიტყვებს, რომელთა აზრი მას არ გაეგება.” Berthold Auerbach



1812 - 1882

რამდენი უნდა იცოდე, რომ იცოდე რამე ?!

სტუ-ს ფიზიკის კურსის *(4 სემესტრი)* ლექციების კონსპექტი

ლექცია **10** | **თემა:** | სემესტრი **IV**

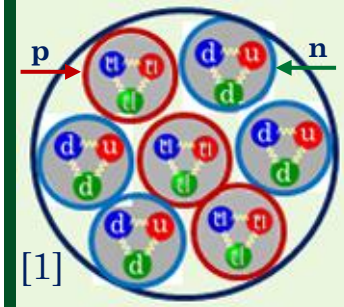
ბირთვული პროცესები

092 **1.ბირთვული ძალები. მასის დეფექტი. ბმის ენერგია**

097 **2.ბირთვის გაყოფა. გაყოფის ჯაჭვური რეაქცია**

101 **3.ბირთვების სინთეზის რეაქცია**

1.ბირთვული ძალები. მასის დეფექტი. ბმის ენერგია



[1]

▪საწყის სტადიაზე ბირთვული ფიზიკის პრობლემას წარმოადგენდა **ბირთვის** მდგრადობის მექანიზმის განსზღვრა. საჭირო გახდა ახალი ტიპის **ურთიერთქმედების** (**ძლიერი**) და **ძალის** (**ბირთვული**) დაფიქსირება;

▪მათ მოქმედებას უნდა **გაებათილებინა** კულონური ძალის "დამანგრეველი" ზემოქმედება და მტკიცედ **შეეკავშირებინა ყველა** (დამუხტული, თუ უმუხტო) **ნუკლონი ერთმანეთთან**;

✓**ბირთვული ძალები**:

▪*ახლოქმედია* – ვლინდება, თუ ნუკლონებს შორის მანძილი < 10^{-15} მ;

▪*მუხტისგან დამოუკიდებელია*, ≈**ტოლი** ძალები მოქმედებენ

- **პროტონსა** და **პროტონს**;
- **ნეიტრონსა** და **ნეიტრონს**;
- **პროტონსა** და **ნეიტრონს** შორის;

▪ცნობილ ძალებს შორის **ყველაზე მძლავრი ძალებია**;

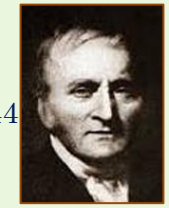
▪ახასიათებთ **ნაჯერობის უნარი** – ნებისმიერი ნუკლონი ურთიერთქმედებაშია *გარემომცველი* ნუკლონების **გარკვეულ რიცხვთან**. *ამ წრის* **გარეთ მყოფი** ნუკლონები უკვე **ვერ გრძნობენ** "ალყაში მყოფის" **ზემოქმედებას**;

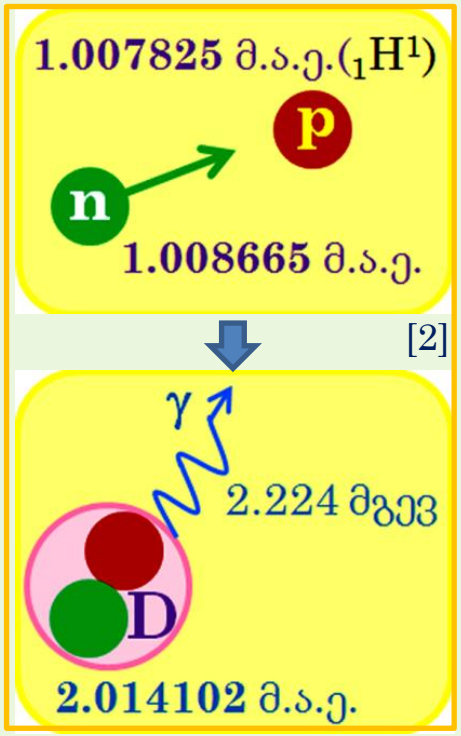
▪ბირთვის **მდგრადობის ხარისხი** დამოკიდებულია **პროტონების რაოდენობაზე** (**Z**) და **ერთ პროტონზე** გათვლილ **ნეიტრონების ფარდობით რიცხვზე**. რაც მეტია **Z**, მით **მეტი ჭარბი ნეიტრონია** საჭირო პროტონებს შორის **კულონური განზიდვის კომპენსირებისთვის**;

▪ნუკლონების **დაბალანსებული** რაოდენობიდან **გადახრისას** ძლიერი ურთიერთქმედება **სუსტება**, ბირთვი **არასტაბილური** ხდება და **რადიოაქტიური დაშლის** შედეგად **სხვა** (*სტაბილურ*) **ბირთვად** გარდაიქმნება;

▪მიუხედავად იმისა, რომ ძლიერი ურთიერთქმედების სრულყოფილი რაოდენობრივი თეორია არ არის ჩამოყალიბებული, **ბირთვების გარდაქმნაში** გარკვევა ხერხდება **ბმის (სრული** და **კუთრი)** **ენერგიის**, **მასის დეფექტის** ცნებებზე დაყრდნობით;

J.Dalton
1766-1844





▪{მაგალითად } **უძრავმა პროტონმა** **ჩაიჭირა** **ნელა** მოძრავი ($E_k \approx 0$) **ნეიტრონი**. შეიქმნება **დეიტრონის** (წყალბადის იზოტოპის) **ბირთვი** $D \equiv {}_1H^2$ და **გამოსხივდება** E_B=2.224 მგევ ენერგიის γ კვანტი [2]. {**მ.ა.ე.**- მასის ატომური ერთეული, ანუ 1**Da** (დალტონი)=$1.6605402 \cdot 10^{-24}$ გ};

▪გამოსხივების შედეგად სისტემა **კარგავს** **ენერგიას**, მაგრამ ის მას **არც გააჩნდა**;

▪მაშინ, აინშტაინის მასასა და ენერგიას შორის კავშირის {$E=mc^2$} მიხედვით, ადგილი უნდა ჰქონდეს სისტემის ჯამური მასის შემცირებას $m_D < [m_n+m_p]$, ანუ უნდა არსებობდეს **ΔM მასის დეფექტი**

$$\Delta M = [(m_n + m_p) - m_D] \quad (1.1)$$

▪**მასის დეფექტის შესაბამისი ბირთვის** E_B **ბმის ენერგია** ტოლია

$$E_B = \Delta M c^2 = [(m_n + m_p) - m_D]c^2 \quad (1.2)$$

▪E_B **ბმის ენერგია** - ის **ენერგიაა, რომელიც** **გამოიყოფა** {აკლდება სისტემას} **ნუკლონებიდან** {პროტონები, ნეიტრონები) **ბირთვის** **შექმნისას**;

▪ასევე, E_B **ბმის ენერგია** **იმ მუშაობის ტოლია, რომელიც** **უნდა** **დაიხარჯოს** **ბირთვის** **დასაშლელად** (**მის** **შემადგენელ** **ნუკლონებად**);

▪E_0 **ბმის** **კუთრი** **ენერგია** **კი, ერთ** **ნუკლონზე** გადათვლილი **ბმის ენერგიაა**

$$E_0 = E_B / A \quad (1.3) \quad \{A=Z+N \text{ მასური რიცხვია}\}$$

▪ ბუნებაში სხვადასვა დონის **ბმული** **მდგომარეობები** და მათი **მდგრადობის** განმსაზღვრელი **ურთიერთქმედებები** გამოვლინდა;
•*<u>სხეულის</u>* (მისი ნივთიერების), *<u>ცოცხალი</u>* არსების **მდგრადობას** **ურთიერთქმედი** **შემადგენელი** მოლეკულები, ატომები განაპირობებენ;
•*<u>ატომის</u>* **მდგრადობას** ელექტრონების და ბირთვის, ხოლო *<u>ბირთვის</u>* – მასში შემავალი ნუკლონების **ურთიერქმედებები** განსაზღვრავენ {*<u>ადამიანი</u>* შეიცავს $2\cdot10^{28}$ **პროტონს** და ოდნავ მეტ **ნეიტრონს**};

▪**ყველა ბმული მდგომარეობა**
სხეული -> მოლეკულა -> ატომი -> ბირთვი -> ნუკლონები
გარკვეული $\mathbf{E_B}$ **ბმის ენერგიით** ხასიათდება:

$$\mathbf{E_B} = \sum_{i=1}^{N} \mathbf{E_i} - \mathbf{E} \qquad (1.4)$$

▪$\mathbf{E_B}$ **ბმის ენერგია** ეწოდება **ენერგიას**, რომელიც **გამოიყოფა** **სტრუქტურული** **ელემენტებისგან** **სისტემის** **ჩამოყალიბებისას**, ანუ, რომელიც **უნდა** **დაიხარჯოს** **სისტემის** **სტრუქტურულ** **ელემენტებად** **დასაშლელად**;
•(1.4)-ში $\mathbf{E}$ - **ბმული** სისტემის სრული ენერგიაა, $\mathbf{E_i}$ - სისტემის შემადგენელი განცალკევებული i-კომპონენტის ენერგიაა და $\sum\mathbf{E_i}$ **ყოველთვის** ***<u>მეტია</u>*** $\mathbf{E}$-ზე;
▪$\mathbf{E_B}$ **ბმის ენერგიას** {აინშტაინის $\mathbf{E = mc^2}$ ფორმულით} **სისტემის** **მასის** **დეფექტი** $\Delta\mathbf{m}$ (*<u>დანაკლისი</u>* ან *<u>ნამატი</u>*) **განსაზღვრავს**

$$\mathbf{E_B} = \Delta\mathbf{mc^2} \qquad (1.5)$$

▪ნებისმიერი მასშტაბის **შედგენილი** სხეულის, თუ ნაწილაკის **მასა** **ნაკლებია** **შემადგენელთა** **მასათა** **ჯამზე** (**თუ** **არა** - ის **მთელი** **ვერ** **იქნება, დაიშლება!**);

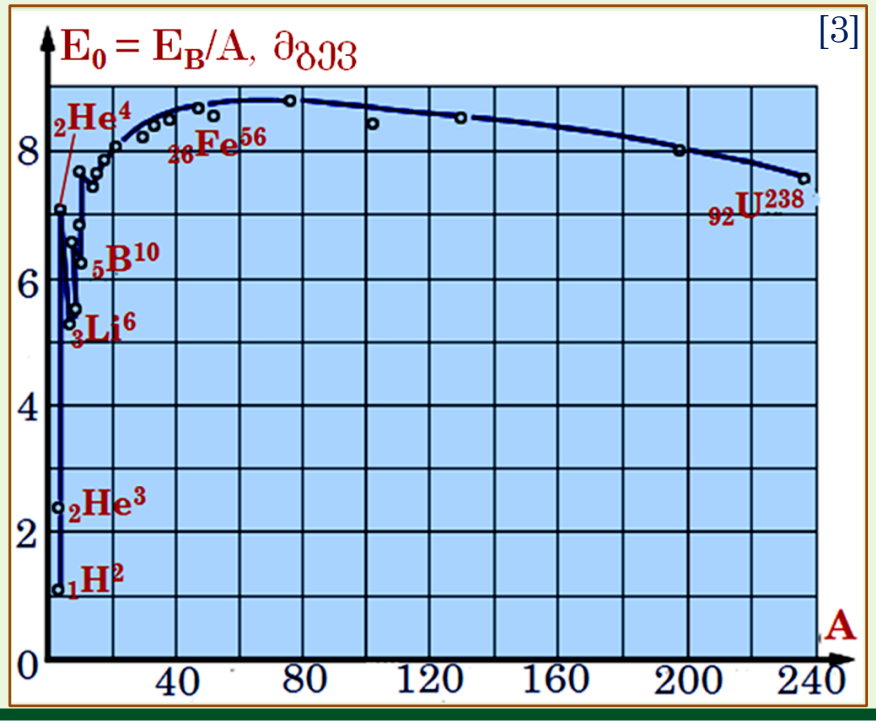
ნაწილაკი	ბმული მდგომარეობა	ბმის ენერგია	მასის დეფექტი $\Delta m/m$
მოლეკულა	**ატომების**	~1 ევ	$\sim 10^{-9}$
ატომი	**ელექტრონების** და **ბირთვების**	~10 ევ	$\sim 10^{-8}$
ბირთვი	**პროტონების** და **ნეიტრონების**	~10 მგევ	$\sim 10^{-3}$
პროტონი, ნეიტრონი	**კვარკების**	???	???

ბმული მდგომარეობის E_B და Δm

1მგევ $/c^2 = 1.0735441 \cdot 10^{-3}$ Da

- ▪ ბირთვის **მდგრადობისთვის აუცილებელია**, რომ მისი **მასა ნაკლები** იყოს შემადგენელი ნუკლონების **მასათა ჯამზე**;
- ▪ რაც უფრო **დიდია ეს სხვაობა**, მით მეტია **ბმის ენერგია** და მით **უფრო დიდი ენერგია დაიხარჯება** მის შესაძლო **დაშლაზე**;
- ▪ ბირთვის და ნუკლონების **ჯამური მასები ტოლი** რომ ყოფილიყო, **ბირთვი თავისთავად** (ენერგიის მოხმარების გარეშე) **დაიშლებოდა ნუკლონებად**;
- ▪ კვარკებიდან ნუკლონების შექმნა **ვერ თავსდება** აღნიშნულ კანონზომიერებებში და ამ ეტაპზე რჩება **გაუგებარი**;

- ▪ ბირთვული პროცესების საფუძველზე **ენერგიის მიღების შესაძლებლობას** განსაზღვრავს **E_0 ბმის კუთრი ენერგიის A მასურ რიცხვზე** დამოკიდებულება [3];
- ▪ **E_0 ბმის კუთრი ენერგიის მაქსიმუმი**, ანუ **ერთ ნუკლონზე გადათვლილი *<u>ბირთვის</u> ბმის ენერ-გიის* მინიმუმი**, შეესაბამება **A**=50-60 მასური რიცხვის ელენენტებს [3]. ამდენად, ეს {Fe და მისი მახლობელი} ბირთვები **ყველაზე მდგრადი** ბირთვებია;



▪გრაფიკიდან [3] გამომდინარეობს, რომ **ენერგეტიკულად მომგებიანი** იქნება **A**≈40-80 მასური რიცხვის ბირთვების მიღების შემდეგი ორი გზა:

•**უფრო მძიმე ბირთვების გაყოფით** {**გაყოფის** ბირთვული რეაქცია};

•**მსუბუქი ბირთვების შეერთებით** {**სინთეზის** ბირთვული რეაქცია};

▪**მძიმე** ბირთვებისთვის $\mathbf{E_0}$ ბმის კუთრი ენერგიის **შემცირების** ტენდენცია ბირთვულ ძალებზე პროტონებს შორის **კულონური განზიდვის** გავლენის **მატებასთან** არის დაკავშირებული;

▪**მსუბუქი** ბირთვებისთვის $\mathbf{E_0}$-ის **A** მასურ რიცხვთან **შებრუნებული** ხასიათის კავშირი **ზედაპირის გავლენით** აიხსნება. ბირთვის **ზედაპირის მახლობლად** არსებული ნუკლონი, **ბირთვული ძალების ახლოქმედების** გამო, შედარებით **ნაკლები რაოდენობის** ნუკლონებთან **ურთიერთქმედებს**, ვიდრე ბირთვის "შუაგულში" მყოფი ნუკლონი;

2.ბირთვის გაყოფა. გაყოფის ჯაჭვური რეაქცია

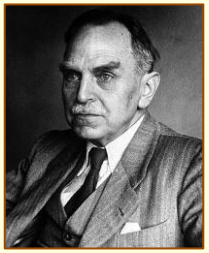
▪ბირთვული **რეაქციები** ეწოდება ბირთვების **გარდაქმნას** მათი **ერთმანეთთან**, ან **ნაწილაკებთან** (**n**, **p**, **γ**) ურთიერთქმედებისას;

▪ამ რეაქციებმა განსაკუთრებული ყურადღება მიიქციეს მას შემდეგ, რაც 1932-39 წლებში, ძირითადად, იტალიელი ენრიკო **ფერმის** და გერმანელების - ოტო **ჰანის**, ლიზა **მეიტნერის**, ფრიც **შტრასმანის** შრომებმა ცხადყო, რომ **ნეიტრონი ბირთვული პროცესების ინიციირების ეფექტიანი ინსტრუმენტია**. მეტიც, შესაძლებელი ხდება **U ბირთვის გაყოფა** და **ენერგიის გამოთავისუფლება**;

▪ბირთვში **ნეიტრონის შეღწევა** (პროტონისა, ან **α**-ნაწილაკისგან განსხვავებით) შედარებით **მარტივია**, ვინაიდან ის **არაა მუხტის მატარებელი** და მის "მიღებას" ბირთვის შემადგენელი **პროტონები არ ეწინააღმდეგებიან**;

•**ელექტრონს** კი **უარყოფითი** მუხტიც არ შველის და ის **ბირთვულ რეაქციებს ვერ განაპირობებს**, ვინაიდან საერთოდ **არ არის ძლიერი ურთიერთქმედების** თანამონაწილე;

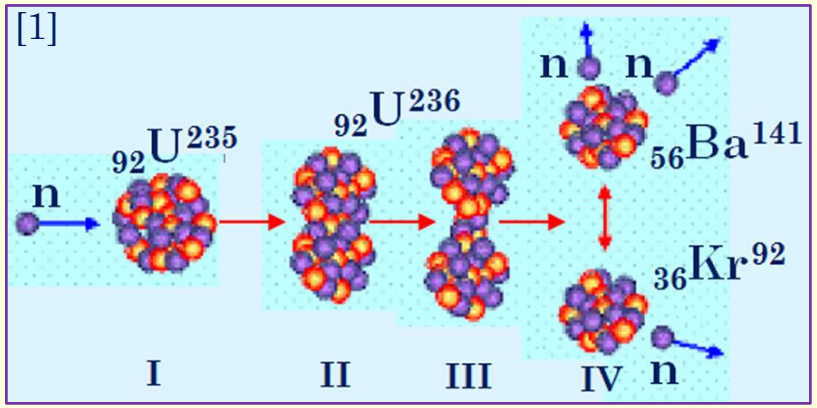
E.Fermi
1901-1954
ნობელი 1938



F.Strasmann
1902-1980

O.Hahn
1879-1968
ნობელი 1944

L.Meitner
1878-1968



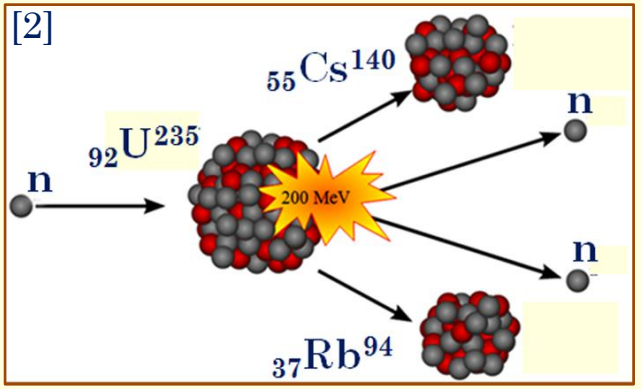
▪აღმოჩნდა, რომ ურანის იზოტოპებს შორის **გაყოფის უნარით** გამორჩეულია $_{92}U^{235}$ და არა ბუნებაში ძირითადად გავრცელებული $_{92}U^{238}$;

▪**ურანის გაყოფის** პროცესის ახსნა ეყრდნობა ბირთვის **წვეთურ მოდელს** [1]:

<u>I</u>.ნეიტრონის **შთანთქმის** შედეგად, **იზრდება** ბირთვის **შინაგანი ენერგია**;

<u>II</u>.იქმნება ბირთვის **შუალედური** იზოტოპი $_{92}U^{236}$;

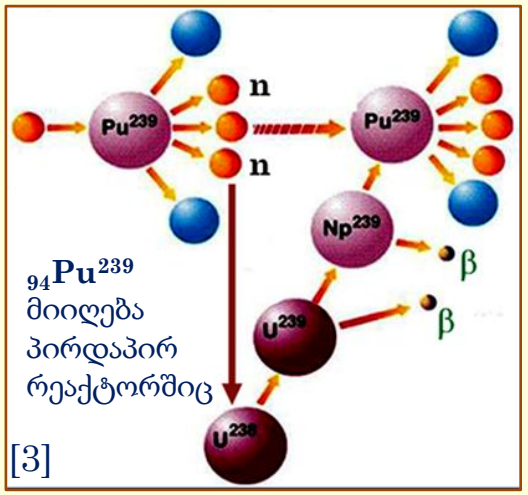
III.ენერგიის დანამატი განაპირობებს აგზნებული ბირთვის **ზოგიერთი** ნუკლონის მოძრაობის ინტენსიურობის **ზრდას** და ბირთვის **ფორმა წაგრძელებული** ხდება;
IV.ნუკლონებს შორის **მანძილის ზრდა ასუსტებს ახლოქმედ ბირთვულ ძალებს** და **დომინირებს ელექტროსტატიკური განზიდვა**, რომელიც შედარებით **უმნიშვნელოდ** მცირდება;
I-IV პროცესების გავლენით **ურანის** ბირთვი **იყოფა ორ** "**ნამ-სხრევად**" - **ორ განსხვავებულ ბირთვად**;



▪*გამოყენების* თვალსაზრისით გაყოფის რეაქციებმა გამოავლინა რამდენიმე **მნიშვნელოვანი გარემოება**:
1.n-ის ზემოქმედებით გაყოფისას მიიღება **მეტი ბმის კუთრი ენერგიის** (ანუ, **ნაკლები ენერგიის**) მქონე ბირთვები. ამდენად, პროცესი ენერგეტიკულად ხელსაყრელია (**თითოეული** გაყოფის **აქტი იძლევა** ≈ **200 მგევ** ენერგიას);
2.ბირთვული წარმოშობის ეს ენერგია ძირითადად მიაქვს "ნამსხვრევებს", საკუთარი **კინეტიკური** ენერგიის სახით;

3.თითოეული ბირთვის გაყოფას თან ახლავს **სამი** [1], ან **ორი** [2] *ნეიტრონის* **გამოთავისუფლება**;
4.ბუნებაში **ძირითადად** გავრცელებული (97%) ურანის იზოტოპი $_{92}U^{238}$ ბირთვულ საწვავად **არ გამოდგება**. თუმცა, სამ საფეხურანი რეაქციით [3] შესაძლებელია მისი *გარდაქმნა* **გაყოფისადმი** ასევე "კარგად განწყობილ" $_{94}Pu^{239}$ **პლუტონიუმად**:

I. $_{0}n^{1} + {}_{92}U^{238} \rightarrow {}_{92}U^{239}$ {$_{92}U^{239}$ β - რადიოაქტიურია}
II. $_{92}U^{239} \rightarrow {}_{-1}e^{0} + {}_{93}Np^{239}$ {$_{93}Np^{239}$ β - რადიოაქტიურია}
III. $_{93}Np^{239} \rightarrow {}_{-1}e^{0} + {}_{94}Pu^{239}$ {$_{94}Pu^{239}$ სტაბილურია}



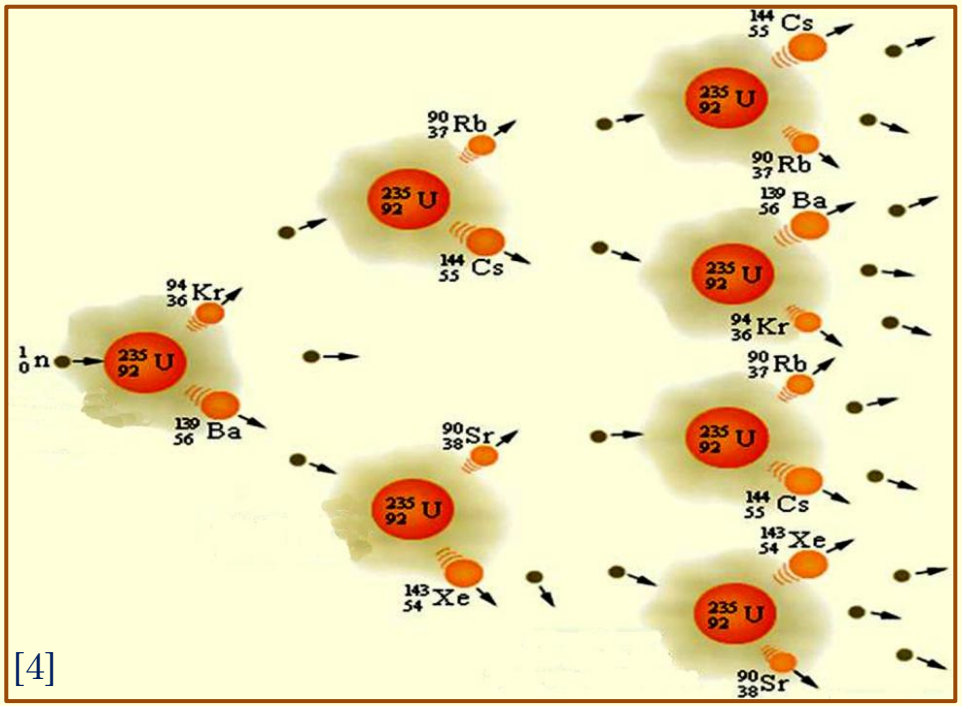
▪ცხადია, ახლად გაჩენილ ნეიტრონებს გაყოფის პროცესში **U**-ის (თუ **Pu**-ის) დანარჩენი ბირთვების ჩართვის შესაძლებლობა გააჩნიათ;

•თუმცა, ამისთვის საჭიროა **ნეიტრონების შენელება** - გასაყოფ ბირთვებს **ნელი ნეიტრონები** "მოსწონთ".

•გაყოფაში მონაწილე ბირთვების რაოდენობა **განუწყვეტლივ იზრდება** და პროცესი **ჯაჭვური რეაქციის** სახეს იღებს [4];

▪**გაყოფის** პროცესის **უწყვეტობისთვის** აუცილებელია ბირთვის გაყოფისას გამოთავისუფლებული **1 ნეიტრონის მაინც გაყოფის ახალ** პროცესში ჩაბმას (**გამრავლების კოეფიციენტი k**≥1);

▪**k** ტოლია მოცემული და წინა "თაობების" ნეიტრონთა რიცხვთა ფარდობის;



[4]

•**k**<1 ნეიტრონების რიცხვი **მცირდება**, რეაქცია **ქვეკრიტიკულია** და ის **წყდება**;

•**k**≈1 ნეიტრონების რაოდენობა დროში {საშუალოდ} **უცვლელია**, რეაქცია **კრიტიკულია**, თუმცა **მართვადი**;

•**k**>1 ნეიტრონების რაოდენობა იზრდება - **ზეკრიტიკული** რეჟიმი {**აფეთქების** საშიშროება};

•რეაქტორში **გაყოფის პროცესის აქტივობის** **რეგულირება** და ავარიული **დაცვა** ხდება ბირთვულ საწვავთან ერთად განთავსებული **ნეიტრონების მშთანთქმელი Cd**-ის მრავალი **ღეროს ამოწევით** ან **ჩაწევით**;

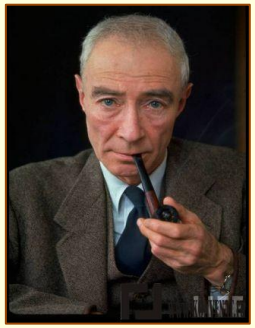
▪**ჯაჭვური რეაქცია** შეიძლება წარიმართოს **უკონტროლოდაც** (**აფეთქება**), თუ ერთად თავმოყრილი იქნება **ურანის** გარკვეული, $\mathbf{m_c}$ **კრიტიკული მასა**;

▪$_{92}U^{235}$ -ის ქიმიური **სისუფთვის ხარისხის** მიხედვით $\mathbf{m_c}$ = (45 - 0.82) კგ;

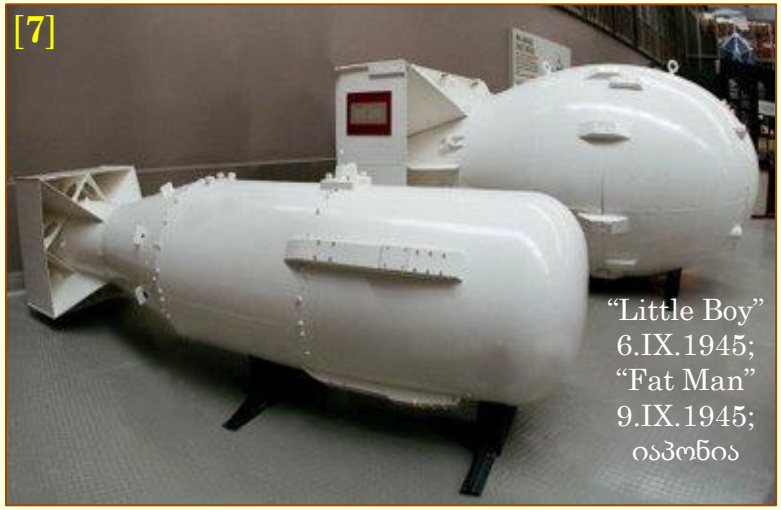
▪ ფერმიმ *თეორიულად* დაასაბუთა (1930-38, რომი) და *რეალურად* განახორციელა (02.XII.1942, ჩიკაგოს უნივერსიტეტი) $_{92}U^{235}$ ურანზე **I ჯაჭვური რეაქცია, პირველად აგებულ რეაქტორში** [5];

▪ დღეს რეაქტორები ძირითადად **Pu**-ზე მუშაობენ. რეაქტორში იტვირთება $_{92}U^{238}$, რომელიც იქ $_{92}Pu^{239}$ გარდაიქმნება {**რეაქტორი მუშაობს და თან იმარაგებს საწვავს**};

▪ ამერიკის ატომური პროექტის მიღწევათა **პრაქტიკული ამოქმედება** განხორციელდა 1945 წელს [6],[7];

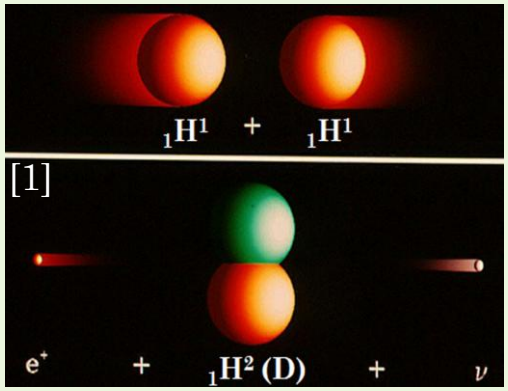


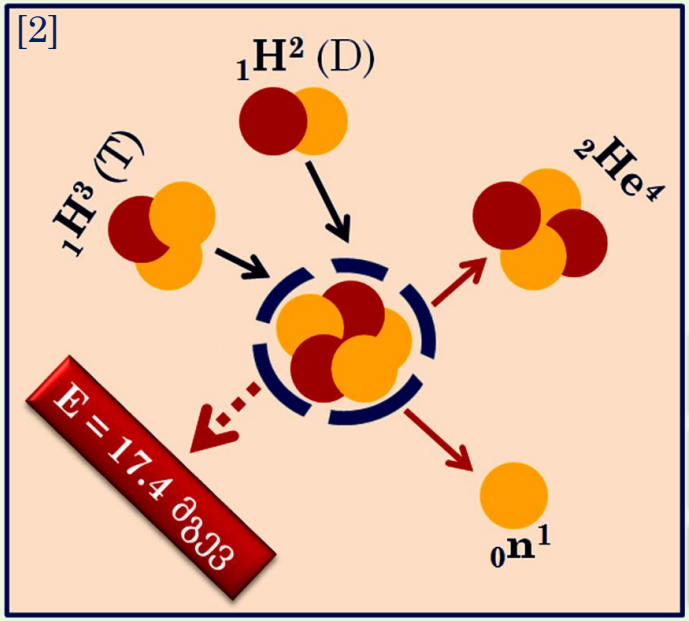
R.Oppenheimer 1904-1967
"Father of the Atomic Bomb"
Los Alamos Manhattan Project



3.ბირთვების სინთეზის რეაქცია

✓ყველა ქიმიური ელემენტი {თავის დროზე} შეიქმნა **სინთეზის რეაქციების** შედეგად, **დიდი ენერგიის გამოყოფის** თანხლებით. მაგ.: [1] დეითერიუმის ბირთვის სინთეზი $_1H^1 + _1H^1 = _1H^2(D)$ + 2.22 მგევ;





▪მზეზე, ვარსკლავებზე დღესაც მიმდინარეობს **წყალბადიდან ჰელიუმის** $_2He^4$ **სინთეზის რეაქცია** [2];

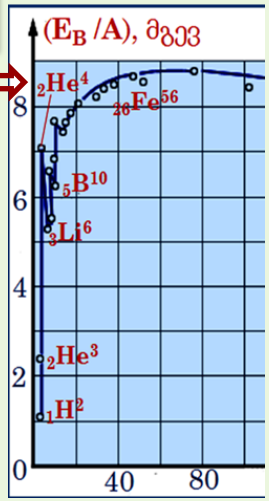
▪შესაძლო რეაქციებს შორის **ენერგეტიკულად ხელსაყრელია** $_1H^2$ **დეითერიუმის** და $_1H^3$ **თრითიუმის** შეერთება [2];

$_1H^2 + _1H^2 = _2He^3 + _0n^1$ => **3.27** მგევ

$_1H^2 + _1H^2 = _1H^3 + _1H^1$ => **4.03** მგევ

$_1H^3 + _1H^3 = _2He^4 + 2_0n^1$ => **11.33** მგევ

$_1H^2 + _1H^3 = _2He^4 + _0n^1$ => **17.49** მგევ



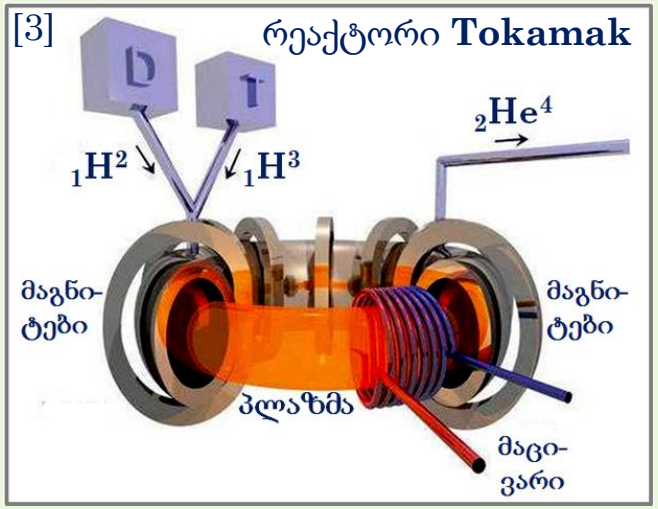
▪რეაქციები **წყალბადის** იზოტოპების მონაწილეობით **ენერგეტიკულად მომგებიანია ვინაიდან**: მიიღება შედარებით *მძიმე*, მაგრამ **მეტი** ΔM **მასის დეფექტის** (**ბმის** ენერგიის) მქონე ბირთვი და მასის ეს დანაკარგი **გამოთავისუფლებულ ენერგიად გარდაიქმნება**;

▪სინთეზის რეაქციისას, **საწვავის მასის ერთეულზე** მოდის **მეტი** გამოთავისუფლებული ენერგია ვიდრე მძიმე ბირთვების **გაყოფისას**;

▪**თერმობირთვული** (სინთეზის) რეაქცია მოითხოვს **ძალიან მაღალ T**-ს (10^7-10^9)**K**, რაც აუცილებელია, რათა *<u>პროტონებმა</u>* **დაძლიონ კულონური განზიდვის ძალა**;

▪მაღალი **T**-ს **შენარჩუნების** პრობლემის გამო, ჯერ **ვერ** ხერხდება **თერმობირთვული რეაქტორის** [3] ამოქმედება, თუმცა შეიქმნა **წყალბადის ბომბი** [4],[5];

ბომბის "ამერიკელი მამა"
E.Teller 1908-2003

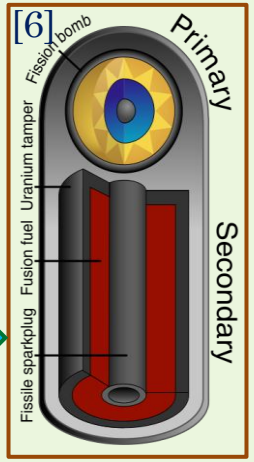


•I **საცდელი** აფეთქება, აშშ 1.XI.1952;

•I **ბომბის** აფეთქება, სსრკ 12.VIII.1953;

ბომბის "რუსი მამა"
ა.სახაროვი
1921-1989

•ბომბში "პატარა" ატომური აფეთქება (**ზრდის T**-ს) **წინ უსწრებს თერმობირთვულს** [6];



“მეცნიერება ორგანიზებული ცოდნაა, ხოლო სიბრძნე - კარგად ორგანიზებული ცხოვრება.” Immanuel Kant

1724 - 1809

რამდენი უნდა იცოდე, რომ იცოდე რამე ?!

სტუ-ს ფიზიკის კურსის *(4 სემესტრი)* ლექციების კონსპექტი

ლექცია **11** | **თემა:** | სემესტრი **IV**

ფუნდამენტური ნაწილაკები & სტანდარტული მოდელი

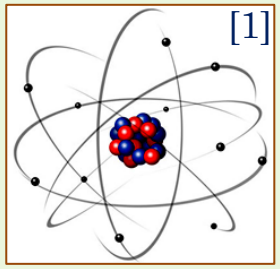
104 **1.ნაწილაკები & ანტინაწილაკები**

107 **2.კვარკები და ლეპტონები**

1.ნაწილაკები & ანტინაწილაკები

▪ბერძნულ-ანტიკური ფილოსოფიურ-ფიზიკური სკოლების რწმენა, რომ **სამყაროს აგურს ატომი** წარმოადგენს, მეცნიერების განვითარების **25 საუკუნოვან** ისტორიას უმტკივნეულოდ შეერწყა.

▪XX საუკუნის პირველ ნახევარში ცხადი გახდა, რომ **ატომი არ წარმოადგენს ფუნდამენტურ** ნაწილაკს. ატომი **შედგენილი** [1] **სტრუქტურისაა** – იგი **ელექტრონების**, **პროტონების** და **ნეიტრონებისგან** შედგება. შემდგომი 30 წლის განმავლობაში **ფუნდამენტურებს** უკვე **ეს სამი ნაწილაკი** მიეკუთვნებოდა;



H.Yukawa
1907-1981
ნობელი 1949

▪ამავე პერიოდში, იუკავამ საფუძველი ჩაუყარა **ელემენტარული ნაწილაკების ფიზიკას**, ივარაუდა რა ახალი ტიპის ნაწილაკების - **მეზონების** არსებობა. სახელწოდება **მეზონი** - *"შუალედური"* - შეარჩია იმ მოსაზრებით, რომ მისი მასა ელექტრონის და პროტონის **მასებს შორის** უნდა ყოფილიყო (რაც ცდებით დამტკიცდა);

▪შედარებით მოკლე დროში **ელემენტარულ ნაწილაკთა** აღმოჩენილმა რაოდენობამ 300-ს მიაღწია. მათგან საკმაოდ დიდი ნაწილი **არაა სტაბილური** - არსებობს ძალიან მცირე დროის განმავლობაში ($\tau \sim 10^{-20}$ წმ). ცხადი გახდა, რომ **ელემენტარულ ნაწილაკები** სამყაროს აგურს **არ წარმოადგენენ**;

▪**ელემენტარული ნაწილაკები** - **კრებითი ტერმინია**, ის აერთიანებს ბირთვული მასშტაბის **შედგენილ მიკროობიექტებს**, რომელთა **შემადგენელ ნაწილებად დაშლა შეუძლებელია**;

▪**ფუნდამენტური ნაწილაკები** (სამყაროს აგურები) - **უსტრუქტურო ელემენტარული ნაწილაკებია**, რომელთა **აღწერა**, როგორც **შედგენილის ამ დრომდე ვერ ხერხდება**;

▪დღევანდელი ხედვით **არ გააჩნიათ შინაგანი სტრუქტურა** და **ფუნდამენტურ ნაწილაკებად** განიხილებიან: ელექტრონები, კვარკები, ნეიტრინოები ...;

▪მრავალი სხვა (მათ შორის - **პროტონი**, **ნეიტრონი**) რთული შინაგანი სტრუქტურის **შედგენილი - ელემენტარული** ნაწილაკებია (ანუ, **მათი ნაწილებად დაშლა შეუძლებელია**);

▪ელექტრონის აღმოჩენიდან 35 წლის შემდეგ, ***ანდერსონმა*** კოსმოსურ სხივებში აღმოაჩინა **ზუსტად ისეთივე** სიდიდის **მასის** და **მუხტის** მქონე, ოღონდ **დადებითად** დამუხტული ნაწილაკი. თავდაპირველად (1928 წ.), ასეთი ნაწილაკის არსებობა ივარაუდა ***დირაკმა***;

▪**დადებითი** ელექტრონი (**პოზიტრონი**) e^{+1} და **უარყოფითი** პროტონი p^{-1} **ანტინაწილაკების** **კლასში** გააერთიანეს;

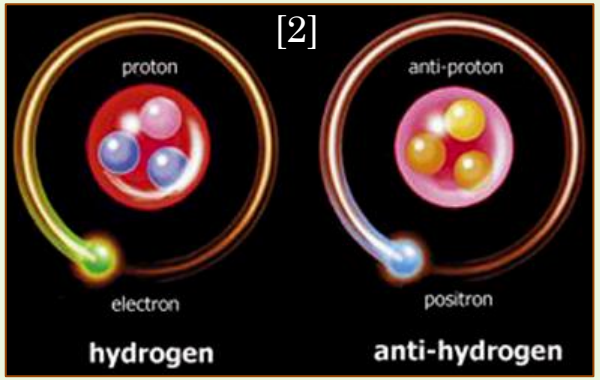
•დღეს იგულისხმება, რომ **ყველა** **ელემენტარულ** **ნაწილაკს** "თავისი" **ანტინაწილაკი** გააჩნია;

•**ანტიპროტონებმა** და **პოზიტრონებმა** შეიძლება **ანტიატომიც** შექმნან {მაგ., ანტიწყალბადი [2]};

▪ნაწილაკს და ანტინაწილაკს **განსაკუთრებული** **სახის** და ბუნებაში ერთ-ერთი ყველაზე **აქტიური** **ურთიერთქმედება** - **ანიჰილაცია** ახასიათებთ, რომლის შედეგად **ორივე** **ნაწილაკი** **ქრება**. მათი ჯამური სრული მასა **ენერგიად** (სხვა ნაწილაკებად) გარდაიქმნება (მაგ.: **ელექტრონის** **და** **პოზიტრონის** **ანიჰილაციისას** **ჩნდება** **ორი** **ფოტონი**);

P.Dirac
1902-1984
ნობელი 1933

C.Anderson
1891-1974
ნობელი 1936



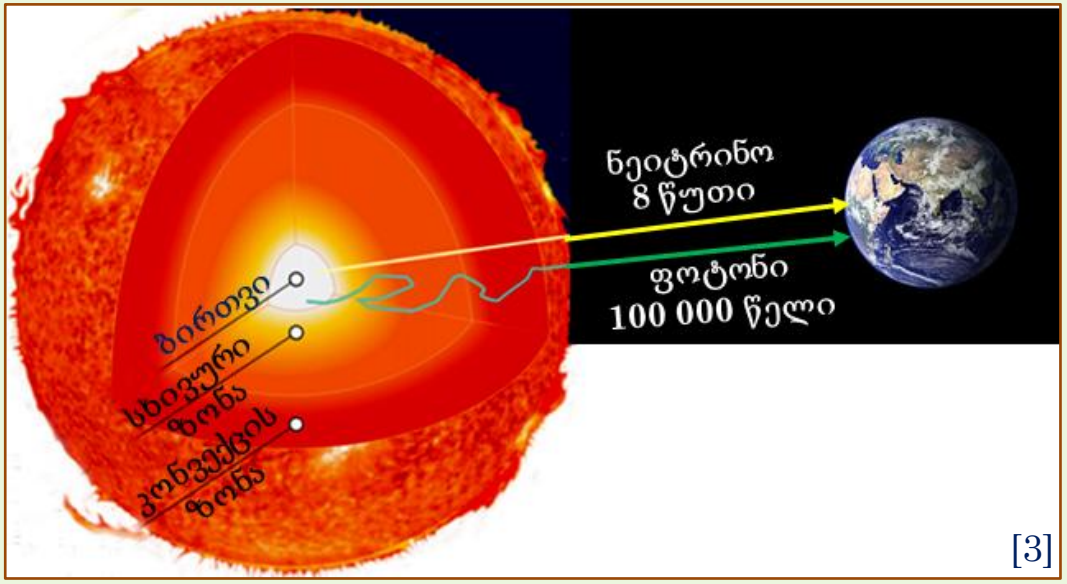
F.Reines
1918-1998
ნობელი 1995

▪საინტერესო, "უჩინარ", თითქმის **უმასო** {$m_\nu \approx$ 0.28 ევ), **უმუხტო** და ფანტასტიური **შეღწევის** **უნარის** მქონე {თავისუფალი განარბენის სიგრძე 10^{18} მ ≈**100** სინათლის წელი} ნაწილაკს წარმოადგენს **ν ნეიტრინო**. ცდით აღმოაჩინა **რაინესმა** (1955 წ);

▪**ნეიტრინო** სამყაროში ყველაზე გავცელებულ ნაწილაკებს შორის **მეორეა**, **ფოტონის** შემდეგ;

▪**ნეიტრინოს** 3 ნაირსახეობა არსებობს და, შესაბამისად, 3 **ანტინეიტრინოც** {β-დაშლის **ელექტრონულ** რეაქციებში ჩართულია **ანტინეიტრინო**, ხოლო **პოზიტრონულში** - **ნეიტრინო**};

•**გავრცელებისას**, **ნეიტრინოები** ავლენენ **ურთიერთგარდაქმნის** (**ოცსილაციების**) უნარს;



[3]

▪**ყოველ წამს** დედამიწის **1 სმ²** ფართობს, მზის მიერ გამოსხივებული **6·10¹⁰** ნეიტრინო განჭოლავს და თანაც უვნებლად;

•**ნივთიერებასთან** (მატერიასთან, მზის შიგნითაც) თითქმის **ნულოვანი ურთიერთქმედების** გამო, მზის ბირთვიდან დედამიწამდე **მანძილის გავლას ნეიტრინო** მხოლოდ **8 წუთს** (!) ანდომებს, მაშინ როდესაც **ფოტონი** ხარჯავს **10⁵ წელს** [3];

▪როგორც ჩანს, ისეთი ნეიტრინოც არსებობს, რომელიც საერთოდ **არავისთან არ ურთიერთქმედებს**, მას **სტერილურ** ნეიტრინოს უწოდებენ;

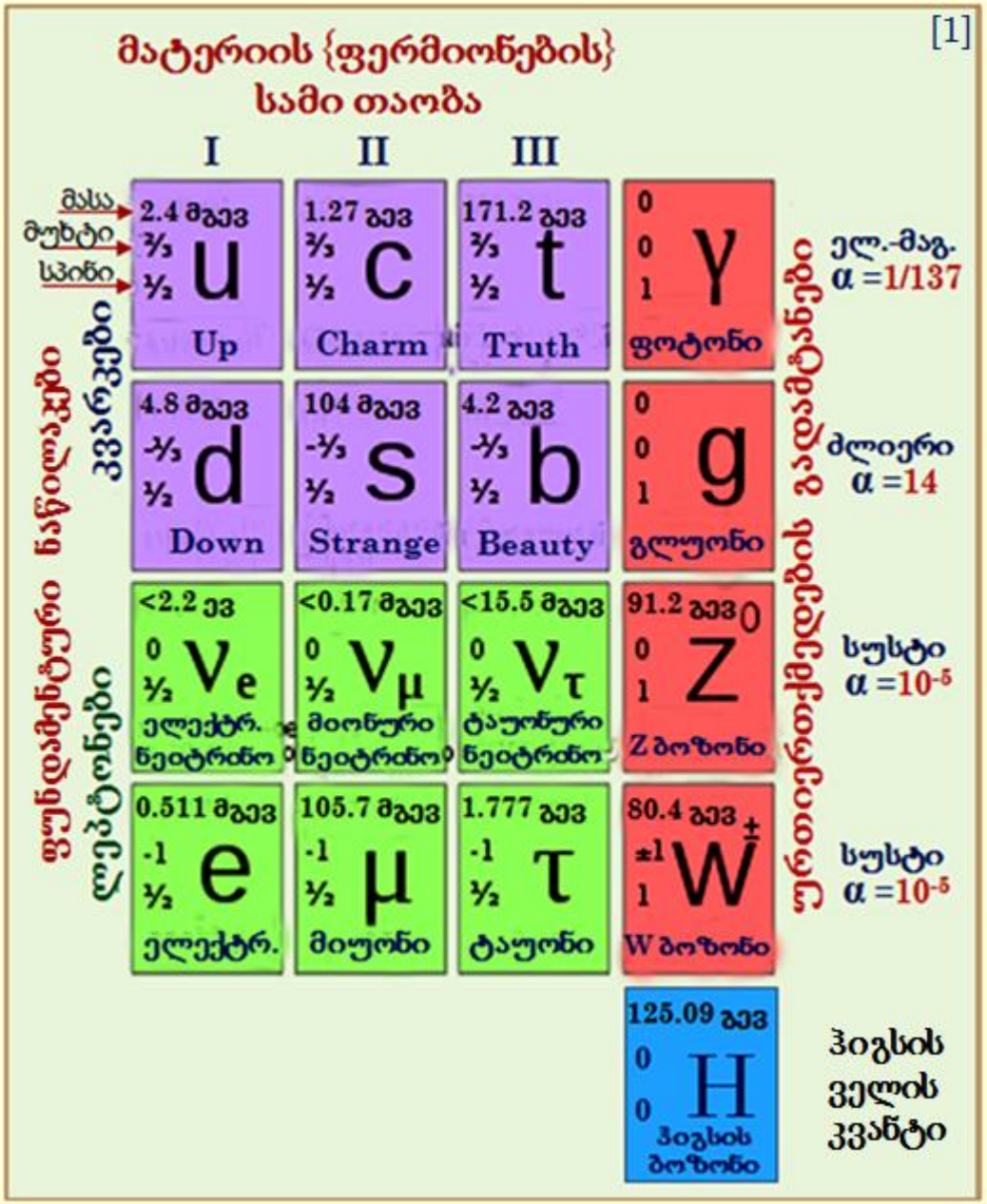
▪ნეიტრინოს მრავალფეროვნების შესასწავლად გამოკვლევები დღესაც გრძელდება. **2015** წლის **ნობელი** დაიმსახურა სწორედ **ნეიტრინოს ოსცილაციების და მასის არსებობის** ცდით **დამტკიცებამ** {T.Kajita, B.McDonald};

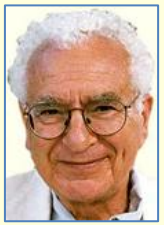
▪{XX საუკუნის პირველ ნახევარში} **პროტონი** და **ნეიტრონი ფუნდამენტურ** ნაწილაკებად განიხილებოდნენ. მათი **ანტინაწილაკების არსებობაც** დასაბუთებული იყო;

▪შემდგომში აღმოჩნდა - **ნუკლონები საკუთარი სტრუქტურის მქონე შედგენილი** (ელემენტარული) **ნაწილაკებია** და, ამდენად, **სამყაროს აგურს** (“ერთს”) **არ წარმოადგენენ**;

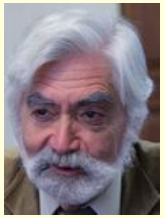
ნაწილაკი	მასა, მგევ	მუხტი, ემე	სპინი
e	0.5109989	-1 { 1.60217 ·10⁻¹⁹ კ}	1/2
p	938.27208	1	1/2
n	939.56541	0	1/2

2.კვარკები და ლეპტონები





M.Gell-Mann
1929
ნობელი 1969



G.Zweig
1937

- 1964 წელს, ორმა ამერიკელმა ფიზიკოსმა {M.Gell-Mann, G.Zweig}, დამოუკიდებლად, წამოაყენეს ჰიპოთეზა, რომ **ბუნებაში არსებული მძიმე ნაწილაკები – ადრონები** (მათ შორის, **პროტონი** და **ნეიტრონი**) **არ არიან ელემენტარულები**, ვინაიდან შედგებიან **სრულებით განსხვავებული**, აქამდე წარმოუდგენელი მახასიათებლების მატარებელი **ფუნდამენტური ნაწილაკებისგან**, რომლებიც გელ–მანმა **კვარკებად** მონათლა;
- თავდაპირველად 2 **კვარკი** იყო შემოტანილი, შემდგომ მათმა რიცხვმა **6**-ს მიაღწია [1] (**სამი თაობა**, **ორ-ორი კვარკით თაობაში**);
- **სხვა კვარკები არ არსებობენ** და მათი რაოდენობის **ცვლილებაც არ არის** მოსალოდნელი;

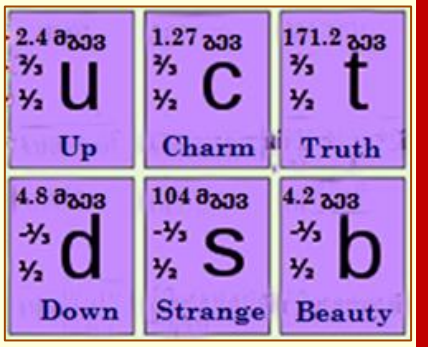
▪**სამყაროს აგებულებაზე** ახლად ჩამოყალიბებულმა შეხედულებებმა კონცენტრირებული ასახვა ჰპოვა "**სტანდარტულ მოდელში**" [1], სამყაროს **საწყის** "**მასალაზე**" არსებული წარ-მოდგენების **გამაერთიანებელ** თეორიაში;

▪**სტანდარტული მოდელი** აღწერს, თუ როგორ **იქმნება ფუნდამენტური ნაწილაკებიდან მატერია** და ამ **ნაწილაკების ურთიერთქმედების მექანიზმებს**;

▪**კვარკები** *ჩერტილოვანი* ნაწილაკებია, მათი ზომა ($\approx 0.5 \cdot 10^{-19}$ მ) პროტო-ნისასზე $2 \cdot 10^4$ -ჯერ მცირეა, მუხტი კი – **ელემენტარული მუხტის 1/3-ის ჯერადია** !

▪**თითოეულ თაობაში ერთი კვარკის** მუხტია **+2/3** (**u**-, **c**-, **t**-კვარ- კები), ხოლო **მეორის** მუხტია **-1/3** (**d**-,**s**-, **b**- კვარკები). **ანტიკვარკების მუხტი** შესაბამისად **საპირისპიროა**;

▪შეირყა რწმენა, რომ **ბუნებაში ელექტრონის მუხტი უმცირესია** და მისი **ცვლილების უმცირესი ბიჯიც e-ს მუხტის ტოლია**. თუმცა, ვინაიდან **თავისუფალ** (**არაბმულ**) **მდგომარეობაში კვარკის** და, ამდენად, **1/3 თუ 2/3 მუხტის გამოვლინება არ მოხერხდა**, ფიზიკას აქვს უფლება **e**-ს **ელემენტარული** მუხტის სახელწოდება შეუნარჩუნოს {ჯერჯერობით?};



▪კვარკები ერთმანეთისგან *რიგი* **მახასიათებლებით** განსხვავდებიან, რომლებსაც გელ-მანმა ორიგინალური წარმოშობის სახელები შეურჩია:

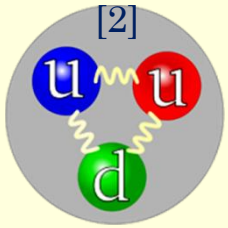
•**კვარკების ნაირსახეობის** {u,d… }განმსაზღვრელი პარამეტრია "**არომატი**" (***Flavour***);

•**კვარკის** კიდევ ერთ **შინაგან** მახასიათებელს კი სახელად **ფერი** ეწოდა;

▪**თითეული არომატის კვარკი სამი** შესაძლო **ფერის** (პირობითად: "*წითელი*", "*მწვანე*", "*ლურჯი*") "*სამოსში*", ანუ **მდგომარეობში** შეიძლება არსებობდეს;

▪კვარკის არსებობის დაფიქსირებით და გააზრებით ფიზიკამ **მატერიის** კიდევ უფრო **ღრმა ფენაში შეაღწია** და *კვანტური ქრომოდინამიკის* საფუძველზე **ნუკლონების შედგენილობის,** იქ **მოქმედი ურთიერთქმედების ანალიზს** შეუდგა;

პროტონი



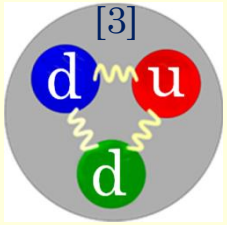
▪**p** *პროტონი* [2] და **n** *ნეიტრონი* [3] **სამ-სამი კვარკისგან** შედგება:

p = u + u + d და **n = d + d + u**

•*ნუკლონში* **კვარკები** **აუცილებლად განსხვავდებიან ფერით**;

•თითოეულ ნუკლონში **სამივე** ფერის კვარკი **არსებობს**;

ნეიტრონი



▪ნუკლონები შედგენილი ნაწილაკებია, მაგრამ მათი დაშლა, ანუ *ცალკეული* **ფერის კვარკის გამოყოფა** და მისი **დამოუკიდებელი არსებობა** *შეუძლებელია*;

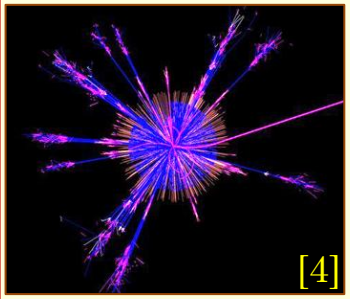
▪ამის მიზეზი "კონფაინმენტია" {***Color confinement*** - *ფერადი დატყვევება*} - *კვანტური ქრომოდინამიკის* **ეფექტი**, რომლის არსი მდგომარეობს იმაში, რომ **კვარკებს** და მათ *დამაკავშირებელ* **გლუონებს** **არსებობა** **მხოლოდ** **ბმულ მდგომარეობაში**, **ადრონის შიგნით** [4] შეუძლიათ;

•{***ადრონი*** - *ძლიერ ურთიერთქმედებაში მონაწილე, შედგენილი ელემენტარული ნაწილაკი. ცხადია,* ***პროტონი*** *და* ***ნეიტრონი*** *ასევე* ***ადრონებს*** *წარმოადგენენ*};

▪ადრონში კვარკების **შემაკავშირებელი ძალა** {მიკროსამყაროსთვის} **ვეებერთელა** სიდიდეს $\approx 14 \cdot 10^4$ **ნ** აღწევს და **მანძილის ზრდასთან** ერთად კი **არ იკლებს**, არამედ *იზრდება* **!** ამდენად, "**ციხიდან გაქცევა**" და განცალკევებული არსებობა **კვარკისთვის** **გამორიცხულია**;

•**ადრონებს** შორის კი, ასეთი **წონიანი მახასიათებლების მქონე ძალები** უკვე **არ მოქმედებენ**, ვინაიდან ადრონები საკმაოდ **იზოლირებულად** არსებობენ;

ადრონი

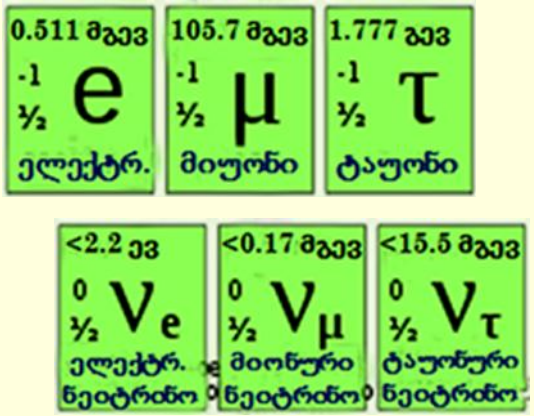


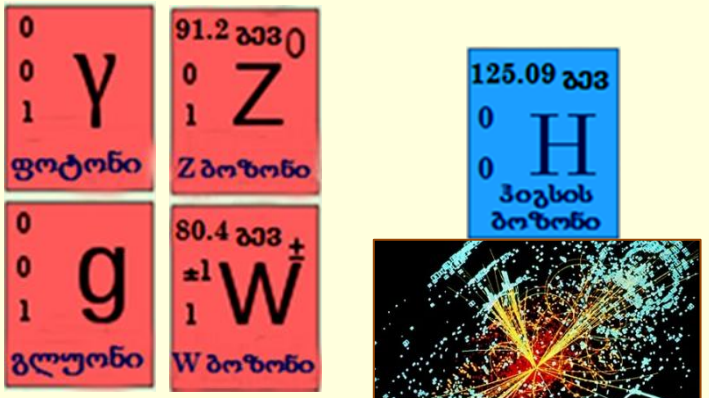
▪**სამყაროს საფუძველს, კვარკებთან** ერთად, ქმნის **ფუნდამენტურ** ნაწილაკთა მეორე ჯგუფი - **ლეპტონები** (**ელექტრონები** და **ნეიტ-რინოები**);

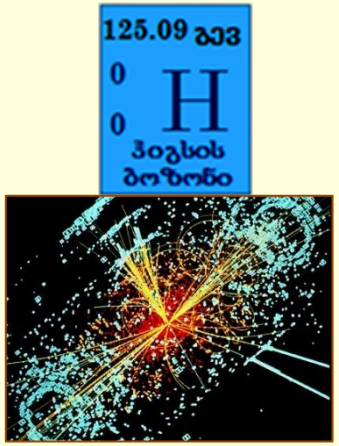
▪**ლეპტონიც ექვსია:**

•***ელექტრონის*** **სამი** ასლი: **მსუბუქი** - **ელექტრონი** (**e**) და **მძიმე** - **მიუონი** (**μ**), **ტაუონი** (**tau** or **tauon τ**), რომლებიც **ელექტრომაგ-ნიტურ** და **სუსტ** ურთიერთქმედებაში მონაწილეობენ;

•ელექტრონების "კუთვნილი", **სუსტ** ურთიერთქმედებაში მონა-წილე **სამი ნეიტრინო** (შესაბამისად, ν_e , ν_μ , ν_τ);







▪**ურთიერთქმედების გადამტანები** {**საკალიბრებელი, ვექტორული ბოზონები**}:

•**γ -ფოტონები** {ელექტრომაგნიტური ურთიერთქმედება};

•**g -გლუონები** 1...8 {ძლიერი ურთიერთქმედება};

•**Z,W-ბოზონები** {სუსტი ურთიერთქმედება};

▪ელემენტარულ ნაწილაკთა **მასაზე** **პასუხისმგებელი ჰიგსის ველის კვანტი**:

•**H - ჰიგსის ბოზონი;**

▪**ვერ მოხვდა** სტანდარტულ მოდელში**:**

G-გრავიტონი {გრავიტაციული ურთიერთქმედება}?;

ამრიგად, **სტანდარტული მოდელი** ოპერირებს:

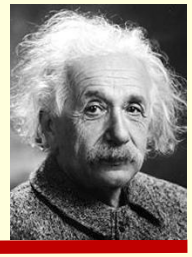
I. 6 სახეობის **კვარკით** {**u**, **d**, **c**, **s**, **t**, **b**};

II. 6 სახეობის **ლეპტონით** {**e**, **μ**, **τ**, ν_e, ν_μ, ν_τ};

III. 5 სახეობის **შუალედური ბოზონით** {**γ**, **g**, W^+, W^-, Z^0};

IV. ჰიგსის ბოზონით (**H**), რომელიც **პასუხისმგებელია** ნაწილაკების **მასაზე**;

“ერთადერთი მიზეზი დროის არსებობისთვის - რომ ყველაფერი ერთდროულად არ მოხდეს.” Albert Einstein



1879 - 1955

რამდენი უნდა იცოდე, რომ იცოდე რამე ?!

სტუ-ს ფიზიკის კურსის *(4 სემესტრი)* ლექციების კონსპექტი

ლექცია **12** | **თემა:** | სემესტრი **IV**

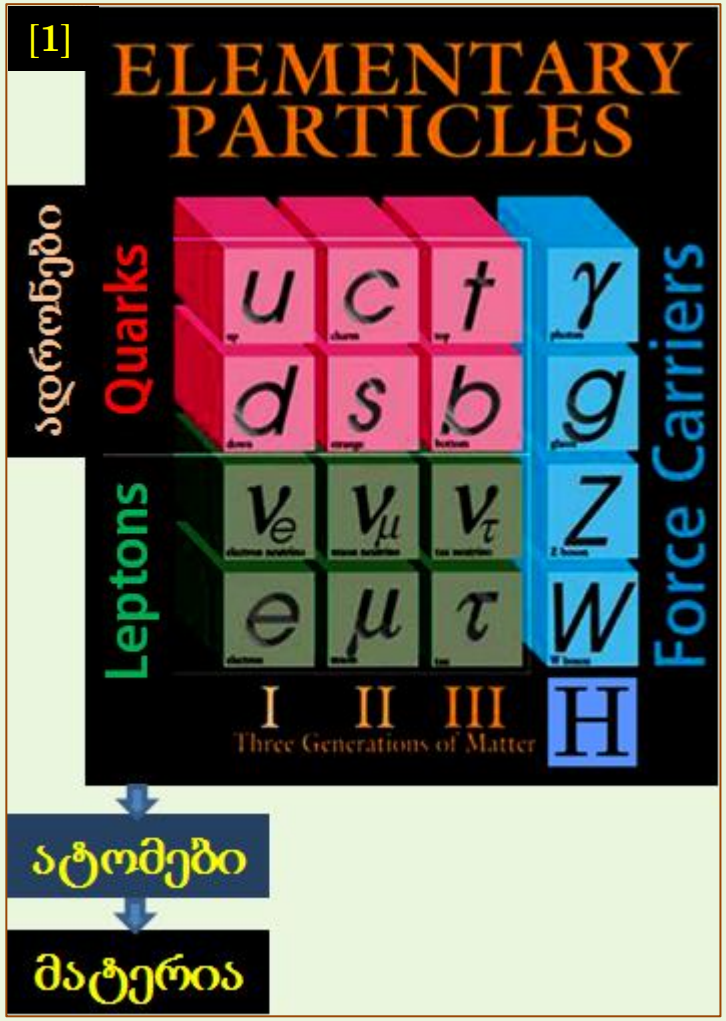
ნაწილაკები & ფუნდამენტური ურთიერთქმედებები

112 **1.ნაწილაკთა იერარქია**

114 **2.შენახვის კანონები**

116 **3.ოთხი ფუნდამენტური ურთიერთქმედება**

1.ნაწილაკთა იერარქია



▪**სტანდარტული მოდელის** შესაბამისად [1], ითვლება დასაბუთებულად 29 **ფუნდამენტური ნაწილაკის** არსებობა, *ანტინაწილაკების* და *ჰიგსის* ბოზონის ჩათვლით: $6\mathbf{q}+6\bar{\mathbf{q}}+3\mathbf{e}+3\bar{\mathbf{e}}+3\mathbf{v}+3\bar{\mathbf{v}}+4\mathbf{b}+1\mathbf{h}=29$;

▪გამოვლენილი **ელემენტარული** ნაწილაკების "ისტორიას" **ადრონებში** გაერთიანებული **კვარკები** ქმნიან;

▪კვარკული შედგენილობის [2] მიხედვით ანსხვავებენ **ადრონების ორ** ჯგუფს - **ბარიონები** (**სამი** სხვადასხვა **ფერის** კვარკის **უფერო** კომბინაცია) და **მეზონები** (**თითო კვარკი** და **ანტიკვარკი**);

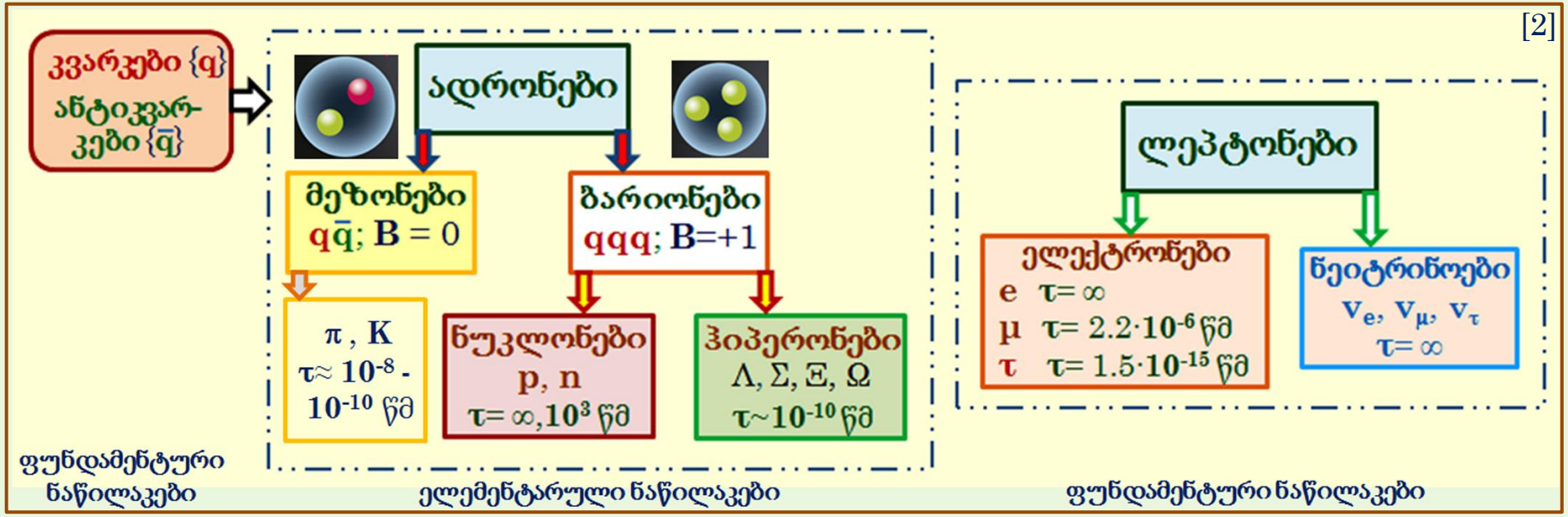
▪**კვარკები** და **ლეპტონები** შეადგენენ **ფუნდამენტური ნაწილაკების** ჯგუფს, ხოლო **ბარიონების** და **მეზონების** მრავალრიცხოვანი წევრები, მათ შორის **ნუკლონებიც**, ელემენტარულ ნაწილაკებს წარმოადგენენ;

▪**გამოვლენილი ელემენტარული** ნაწილაკების სიცოცხლის დრო ფართო საზღვრებში იცვლება [2];

•$\tau\approx\infty$, **სტაბილური** ნაწილაკები: **პროტონი** $\tau>2.9\cdot10^{29}$ წ, **ელექტრონი** $\tau>2.9\cdot10^{21}$ წ, **ნეიტრინო, ფოტონი**;

•$\tau>10^{-20}$ წმ, **კვაზისტაბილური** – იშლებიან ელექტრომაგნიტური და სუსტი ურთიერთქმედებებით;

•$\tau\approx10^{-22}$-10^{-24} წმ, **რეზონანსები** – იშლებიან ძლიერი ურთიერთქმედებით;



▪*ნივთიერების* **არსებობისთვის** მეტად მნიშვნელოვანია, რომ *გუნებამ* დაუწესა **სტაბილურობა** **პროტონს**, **ელექტრონს** და **ხანგრძლივი** სიცოცხლის დრო $\tau \approx 10^3$ წმ "აჩუქა" **ნეიტრონს**;
•დაშლის შემთხვევაში **ნეიტრონი** {და **ყველა სხვა ბარიონიც**} **პროტონად** გარდაიქმნება;

▪**პროტონის** და **ელექტრონის** **სტაბილურობა** ჩვენი **სამყაროს** **არსებობის საფუძველია**!

2.შენახვის კანონები

▪მატერიის შემადგენელი ორივე მნიშვნელოვანი ჯგუფი - **ადრონები** და **ლეპტონები**, სხვადასხვა **რეაქციებში ჩართულობისას**, გარდა ჩვეული *ენერგიის*, *იმპულსის*, *იმპულსის მომენტის* **მუდმივობის კანონებისა**, ემორჩილებიან **შენახვის** კიდევ ორ კანონს - **ბარიონული რიცხვის** და **ლეპტონური რიცხვის** **მუდმივობის კანონებს**;

▪**B ბარიონული რიცხვი** ელემენტარული ნაწილაკების ფიზიკის **კვანტური რიცხვია**, რომელსაც ადრონში **კვარკების** N_q და **ანტიკვარკების** N_{-q} **რაოდენობათა სხვაობა** (ანუ **ყველა კვარკის ალგებრული ჯამი**) განსაზღვრავს და ეს ჯამი **სამის ჯერადია ყოველთვის**:

$$B = (N_q - N_{-q})/3 \quad (2.1)$$

•ყველა **ბარიონი** (პროტონი, ნეიტრონი, ...) **სამ** სხვადასხვა ფერის კვარკს შეიცავს. ე.ი., (2.1) ⇨ მათი **ბარიონული რიცხვი** $B = +1$. ანალოგიურად, ყველა **ანტიბარიონის** (სამი ანტიკვარკი) $B = -1$;

•ყველა **მეზონში თითო** კვარკი და ანტიკვარკია ($N_q = N_{-q}$), ამიტომ მეზონების $B = 0$;

•ცხადია, **ლეპტონების** და, ასევე, **ფოტონის**, **Z,W,H ბოზონების ბარიონული რიცხვი** $B=0$, ვინაიდან ისინი **კვარკებს საერთოდ არ შეიცავენ**;

▪**ბარიონული რიცხვის** **მუდმივობის კანონი** არც ერთი არსებული თეორიიდან არ გამომდინარეობს, მაგრამ **ზუსტად სრულდება ნებისმიერი** {სტანდარტული მოდელის შესაბამისი} **ურთიერთქმედებებისას**;

▪**პროტონი** თავისთავად **დაშლას** საერთოდ **არ ექვემდებარება**. **პროტონის** და **ელექტრონის სტაბილურობა** ჩვენი **სამყაროს** არსებობის საფუძველია!

▪**L ლეპტონური რიცხვი - ლეპტონების**, “მსუბუქი” (ბერძნ. *leptos* - მსუბუქი) ელემენტარული ნაწილაკების, მახასიათებელი **კვანტური რიცხვია**;

•**ლეპტონების** $\{e, \mu, \tau, \nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau\}$ => $L = +1$;

•**ანტილეპტონების** $\{e^+, \mu^+, \tau^+, \bar{\nu}_e, \bar{\nu}_\mu, \bar{\nu}_\tau\}$ => $L = -1$;

•ყველა სხვა ნაწილაკების {ბარიონების, მეზონების} $L=0$;

▪ცდებით მტკიცდება, რომ ნებისმიერად რთული რეაქციების მიმდინარეობისაც კი, **ლეპტონური რიცხვების ალგებრული ჯამი რჩება მუდმივი**;

▪ზოგიერთი რეაქციებისას მოსახერხებელია **სამი ტიპის** ელექტრონისთვის **საკუთარი** {**ფლეივორნული**} L_e, L_μ, L_τ **ლეპტონური** რიცხვის გამოყენება, უცვლელი შესაძლო მნიშვნელობებუთ {+1, −1, 0}:

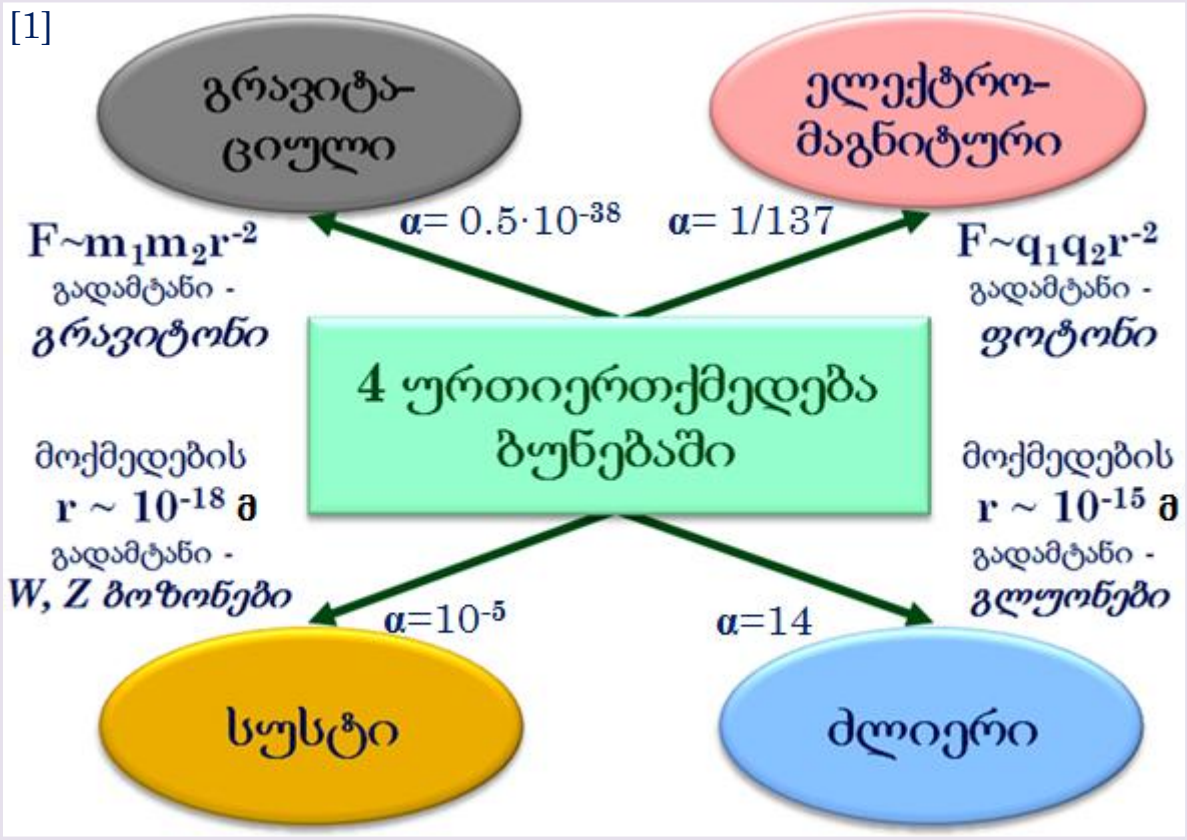
• (e, ν_e) - $L_e = +1$; $(e^+, \bar{\nu}_e)$ - $L_e = -1$;

•(μ, ν_μ) - $L_\mu = +1$; $(\mu^+, \bar{\nu}_\mu)$ - $L_\mu = -1$;

•(τ, ν_τ) - $L_\tau = +1$; $(\tau^+, \bar{\nu}_\tau)$ - $L_\tau = -1$;

3.ოთხი ფუნდამენტური ურთიერთქმედება

▪*მიუხედავად* -
•**ჰიგსის ველის** დასაბუთებული არსებობისა;
•ელექტრომაგნიტური და სუსტი ურთიერთქმედებების ერთიანი **ელექტროსუსტი ურთიერთქმედების** ცალკეულ გამოვლინებებად განხილვისა;
▪{დღეს} *ფიქსირდება* - **ფუნდამენტური ოთხი ურთიერთქმედება** [1]:
•ძლიერი;
•ელექტრომაგნიტური;
•სუსტი;
•გრავიტაციული;



▪**ძლიერი** (*ბირთვული*, *ფერადი*) **ურთიერთქმედება** [1], რომელშიც მონაწილეობენ **კვარკები**, **გლუონები** და მათგან შედგენილი **ადრონები** (**ბარიონები**, **მეზონები**) [1.2];
•მოქმედებს **ბირთვის ზომის მასშტაბში** (**r** ~10^{-15} მ) და იმდენად **ძლიერია** (**α**=14), რომ აღარ ხდება საჭირო ბირთვში პროტონების კულონური განზიდვის არსებობის გათვალისწინება;
•უზრუნველყოფს **ნუკლონების სტაბილურობას** და, ამდენად, **მატერიის** ჩამოყალიბებასა და არსებობას;

▪ელექტრომაგნიტური ურთიერთქმედება [1] არსებობს და ვლინდება **დამუხტულ** ნაწილაკებს შორის. ხორციელდება **ელექტრომაგნიტური ველის** მეშვეობით (კლასიკური მიდგომა). ველის **კვანტური** თეორიის თანახმად, **ურთიერთქმედების გადატანა** ხდება **უმასო** და **უმუხტო ბოზონებით** - ფოტონებით;

▪ელექტრომაგნიტურ ურთიერთქმედებაში მონაწილეობენ **კვარკები**, **ელექტრონები** და **$W^{\pm}$ ბოზონები**. სტანდარტული მოდელის **დანარჩენი ფუნდამენტური** ნაწილაკები ელექტრონეიტრალურნი არიან;

•გამოირჩევა **შორსქმედებით** - **მოქმედების არე** **შეზღუდული არ არის** (**r** =∞). მიკროსამყაროში ქმედების ინტენსიურობით (**$\alpha = e^2/\hbar c \approx 1/137$**) ჩამორჩება მხოლოდ **ძლიერ** ურთიერთქმედებას

•უზრუნველყოფს **ატომის სტაბილურობას** (ბირთვის და ელექტრონების ურთიერთმიზიდვით), განსაზღვრავს ატომის ელექტრონული გარსების სტრუქტურას;

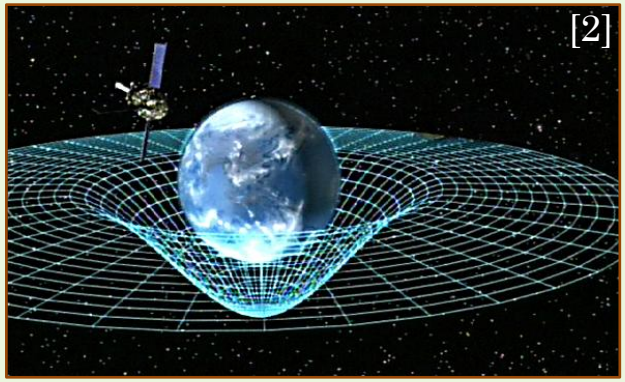
▪სუსტი ურთიერთქმედება [1]:

•*პასუხისმგებელია* მთელ რიგ მნიშვნელოვან პროცესებზე - **ბირთვების β-დაშლა**, **t(Truth)** კვარკის **დაშლა** **b(Beauty)** კვარკად და **W** ბოზონად, ფიზიკური კანონების **სიმეტრიის** **დარღვევა**;

•*ახლოქმედია* - მოქმედებს **ბირთვის ზომაზე** უფრო **მცირე** მანძილებზე (**r** $\approx 2\cdot 10^{-18}$ მ), მაგრამ მხოლოდ გრავიტაციულ ურთიერთქმედებაზეა ძლიერი (**$\alpha = 10^{-10} - 10^{-14}$**);

•ხასიათდება პროცესების მიმდინარეობის ~10^{-10} წმ დროთი. ანუ, შესაბამისი მოვლენები - მიკროსამყაროსთვის **უაღრესად ნელია**;

▪ურთიერქმედებები **$W^{\pm}$** ბოზონების მონაწილეობით განაპირობებენ ლეპტონების და კვარკების სხვა ლეპტონებად და კვარკებად გარდაქმნას. ხოლო, ურთიერქმედებაში **Z^0** (ნეიტრალური) ბოზონის ჩართულობისას ლეპტონების და კვარკების გარდაქმნა არ ხდება;



▪ბუნებაში არსებულ **4** ურთიერთქმედებას შორის [1] **უმ-ცირესია** **გრავიტაციული** ($\alpha=0.5\cdot10^{-38}$) - **უნივერსალური**, ყველა **მატერიალურ** სხეულებსა, თუ ნაწილაკებს შორის მოქმედი ურთიერთქმედება;

▪მისი სავარაუდო გადამტანის **G-გრავიტონის** (ნაწილაკი - უმასო, უმუხტო, 2-ს ტოლი სპინით) არსებობა დასაბუთე-ბას მოითხოვს, ხოლო **გრავიტაციის კვანტური თეორია** ჯერ-ჯერობით ჩამოყალიბებული არ არის;

▪ზოგადად, აიწერება აინშტაინის **ფარდობითობის ზოგა-დი თეორიით** [2];

▪ამრიგად, **მატერიის შექმნის** თვალსაზრისით, სამი ურთიერთქმედების წვლილი მარტივად იკვეთება:

•**ძლიერი** - კრავს კვარკებს და ქმნის **ნუკლონებს** (პროტონებს, ნეიტრონებს);

•**ძლიერი** {ასევე} – აერთიანებს ნუკლონებს და აყალიბებს **ბირთვებს**;

•**ელექტრომაგნიტური** – აერთიანებს ბირთვს და ელექტრონებს **ატომებში**;

•**გრავიტაციული** ეწინააღმდეგება მატერიის **თანაბარ განაწილებას** მთელ სამყაროზე;

•**სუსტი** - უშუალოდ არ მონაწილეობს;

ურთიერთქმედება	მოქმედი თეორია	"მუხტი"	ფარდობ.ძალა
გრავიტაციული	ფარდობითობის ზოგადი თეორია	მასა	1
სუსტი	ელექტროსუსტი ურთიერ.თეორია	სუსტი იზოსპინი	10^{25}
ელექტრომაგნიტ.	კვანტური ელექტროდინამიკა	ელექტრ.მუხტი	10^{36}
ძლიერი	კვანტური ქრომოდინამიკა	ფერადი მუხტი	10^{38}

“კვანტური მექანიკა გულისხმობს, რომ ბუნებისთვის წინასწარმეტყველება სულაც არ არის დამახასიათებელი.” Douglas Giancoli

19?? - ????

რამდენი უნდა იცოდე, რომ იცოდე რამე ?!

სტუ-ს ფიზიკის კურსის *(4 სემესტრი)* ლექციების კონსპექტი

ლექცია **13** | **თემა:** | სემესტრი **IV**

ფიზიკის კანონები & სიმეტრია

120 1.სუსტი ურთიერთქმედება და სიმეტრიის დარღვევა

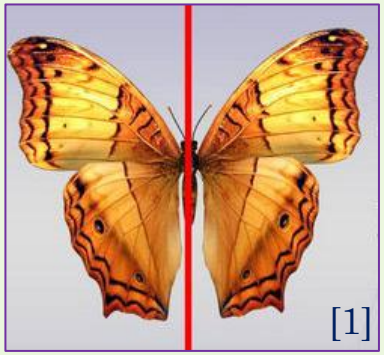
123 2.ანტიმატერიის ცნება

1.სუსტი ურთიერთქმედება და სიმეტრიის დარღვევა

✓**სიმეტრია** (ბერძ. συμμετρία = თანაზომადობა) - შესაბამისობა, შეუცვლელობა (ინვარიანტულობა), რომელიც ვლინდება გარკვეული ცვლილებებისას, გარდაქმნებისას (მაგ.: მდგომარეობის, ენერგიის და ა.შ. [1]);

▪აქ წარმოდგენილ საკითხთა კონტექსტში ყურადღება **ფიზიკის კანონების ფარგლებში არსებულ სიმეტრიაზე** არის გადატანილი;

▪თანაც, ამ კუთხით, საინტერესოა **არა თავად სიმეტრია**, არამედ ის, თუ **როგორ (რატომ) ირღვევა სიმეტრია**;



▪ბუნებაში **იდეალურად სიმეტრიული** მხოლოდ **სიცარიელეა** - როგორც არ უნდა ატრიალო, მისი არსი არ იცვლება;

▪მაგრამ, განსაკუთრებულ ყურადღებას იპყრობენ **არა უწყვეტი**, არამედ **დისკრეტული** სიმეტრიები და ასეთი **სამი სიმეტრიაა** (3 ოპერაცია):

1.სარკული არეკვლა - სივრცული ინვერსია - **P parity** {**x**,**y**,**z** =>-**x**, -**y**, -**z**};

2.დროის ისრის შემობრუნება (დრო შეიძლება მიღებულის საწინააღმდეგო მიმართულებით მიედინებოდეს) - **T parity** {**t** => -**t**};

•**T**-ს მიმართ **ლუწი** სიდიდეებია (არ იცვლიან ნიშანს): *მექანიკური* - **x**, **α**, **β**, **F**, **E**…; *ელექტრული* - **φ**, **U**, **E**, **D**, **P**…;

•**T**-ს მიმართ **კენტი** სიდიდეებია (იცვლიან ნიშანს): *მექანიკური* - **t**, **V**, **ω**, **P**, **L**, **N**; *ელექტრული* - **B**, **H**, **j**, **M**…;

3.მუხტის ნიშნის საპირისპიროზე შეცვლა - **C parity** {**Q** => -**Q**}.

▪ამ 3 სიმეტრიის სიზუსტეში, ათეული წლების განმავლობაში, ეჭვი არავის ეპარებოდა. შემდგომ კი ცხადი გახდა, რომ **გადაცდომები არსებობს**, ხოლო უზოსტობების **გავლენა სამყაროზე** - მეტად **მნიშვნელოვანი**;

▪**სუსტი ურთიერთქმედების** *დადებითი* **ფუნქცია** უკავშირდება მის პასუხიმგებლობას **ზოგიერთი ბირთვების დაშლაზე**, თანაც "აუჩქარებლად" - სუსტი ინტესივობით, რამაც განაპირობა კიდევაც სახელწოდება - **სუსტი**;

▪ამ "გართობისას" (ბირთვის დაშლისას) **სუსტი ურთიერთქმედება** ქმნის, გაურკვეველი მიზნით, ნაწილაკს **ნეიტრინოს**, რომელიც **არ მონაწილეობს** **არცერთ** **სხვა** {სტანდარტულ} **ურთიერთქმედებაში**;

▪ასევე გაირკვა, რომ მზე [2] ვერ შეასრულებდა თავის, ჩვენთვის უაღრესად მნიშვნელოვან, ფუნქციას (ბირთვულ რეაქციას **ენერგიის გამოყოფით**) **სუსტი ურთიერთქმედების** **გარეშე**

$$\mathbf{p + p = D + e^{+} + \nu_e} + \mathbf{0.4}\ \text{მგევ} \qquad (2.1)$$

▪კიდევ უფრო მნიშვნელოვანია, რომ **სუსტი ურთიერთქმედება** სულაც არ ემსახურება **მხოლოდ** მზის გამოსხივებას. **მისი არსებობა აუცილებელია**, რათა **შესაძლებელი** იყოს სამყაროში სხვადასხვა **სიმეტრიის** **დარღვევა**! ვინაიდან **დანარჩენი** **სამივე** **ურთიერთქმედება** **სიმეტრიის უნაკლო** **თაყვანისმცემელია**!

▪"საშინელებაა", მაგრამ **სუსტი ურთიერთქმედება** **არღვევს**:
- **სარკულ** (**P**) სიმეტრიას;
- **მუხტის ნიშნის შეცვლის** (**C**) სიმეტრიას;

▪კიდევ უფრო *დიდი* "საშინელებაა", რომ ის **არღვევს**:
- კომპლექსურ (**მუხტ-სარკულ**) სიმეტრიას (**CP**);
- **დროის ისრის შემობრუნების** (**T**) სიმეტრიას;
- ანუ, **ყველა** **დისკრეტულ** სიმეტრიას, გარდა (**CPT**) სიმეტრიის;

▪ასევე, მხოლოდ მან "იცის" და **შეუძლია** **კვარკების** **ერთი** **თაობიდან** **სხვა** **თაობაში** "*გადაყვანა*";

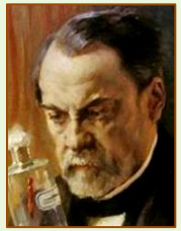
✓**აღმოჩნდა**, რომ **ყველა ამ დარღვევის გარეშე შეუძლებელი იქნებოდა ჩვენი სამყაროს აშენება !!!**

▪თუ სარკული სიმეტრია (**P**) სრულყოფილია, არ უნდა არსებობდეს ექსპერიმენტი, რომელიც **განასხვავებს სამყაროს** და მის **სარკულ ანარეკლს**. მაგრამ ასეთი ექსპერიმენტები არსებობს;

•მათგან ყველაზე ცნობილია ამერიკელი ფიზიკოსის Chien-Shiung Wu-ს (მადამ ვუ) ცდების შედეგები. **ახსნა დღესაც** (60 წლის შემდეგ) **არ არსებობს.** უბრალოდ **პოსტულირებულია**, რომ **სუსტი ურთიერთქმედება** იმდენად *უნიკალურია* (არსებული 4-დან) რომ **ანსხვავებს მარცხენას** და **მარჯვენას**!

•აღსანიშნავია ისიც, რომ ექსპერიმენტისას მადამ ვუმ მოახერხა Co-ს გაცივება **რეკორდულ** (1952 წლისთვის) **ნიშნულამდე 0.01K** ;

C-Sh.Wu
1912-1997



L.Pasteur
1822-1895

▪ჩვენ, საერთოდ ცოცხალი სამყარო, ყოველივე ხელოვნური, რასაც **ვქმნით** - თუ ის **დაგრეხილია**, ფაქტიურად **ასახავს სარკული სიმეტრიის დარღვევას**;

•მარცხნივ და მარჯვნივ დაგრეხილი ობიექტები **ტოლი რაოდენობით უნდა გვხვდებოდნენ**. ეს პირობა კი **არ სრულდება**:

1.ყველა **ამინომჟავა** (ჩვენი შემადგენელი) **L**-ტიპისაა (მარცხენა ტიპი);

2.მოლუსკების **ნიჟარა** ყოველთვის **საათის ისრის** მიმართულებით არის დახვეული [3];

3.**ღვინის მჟავაც** არღვევს სარკულ სიმეტრიას - ახდენს რა **სინათლის პოლარიზაციას** (გამოავლინა ლუი პასტერმა);

▪**L**-ტიპის პრიორიტეტი შემთხვევითობაა? თუ **სუსტმა ურთიერთქმედებამ გამოავლინა თავისი მონაწილეობა სიცოცხლის ფორმირებაში**? პასუხი ჯერ ვერ ჩამოყალიბდა;

2.ანტიმატერიის ცნება

✓ ანტიმატერია აღმოაჩინეს (უფრო ზუსტად - **მივიდნენ ანტიმატერიის ცნებამდე**) **სამჯერ**;

A.Schuster
1851-1934

▪პირველი იყო - ინგლისელი **შუსტერი** (ოპტიკოსი!), რომელიც ელექტრონის აღმოჩენის შემდეგ, აზრობრივი მიგნებების საფუძველზე, მივიდა **დადებითად დამუხტული ელექტრონის** ცნებამდე (მხოლოდ **სიმეტრიიდან** **გამომდინარე** - თუ **არსებობს მინუსი**, უნდა **მოიძებნოს პლუსიც**);

▪შუსტერმა შემოიტანა:

- ტერმინი "**ანტიმატერია**";
- ჰიპოთეზა **ანტიატომის**, მეტიც - **ანტიმატერიული მზის სიტემების** შესაძლო არსებობის შესახებ;
- **ენერგიის მიღების** შესაძლებლობა **მატერიის** და **ანტიმატერიის** **შეხებისას** (ანუ, ფაქტიურად იწინასწარმეტყველა მათი **ანიჰილაცია**);

▪მისი იდეების, რომლებიც რეალურად **მხოლოდ** **სიმეტრიის** **მოსაზრებებს** ეყრდნობოდა, 30 წლის განმავლობაში არავის სჯეროდა. შემდგომ კი ყოველივე **მართებული** **აღმოჩნდა**!

▪მეორედ **ანტიმატერი**ა წარმოადგინა (**გამოიყვანა**!) **დირაკმა** და ეს მოჰყვა მის მცდელობას **გაეერთიანებინა** ორი უმნიშვნელოვანესი თეორია - **კვანტური მექანიკა** და **ფარდობითობის** **თეორია** (მიზანი - **შრედინგერის** **განტოლების** **რელატივისტური** **ანალოგის** მიღება);

▪კვანტურ მექანიკაში, ცხადია, არსებობს ენერგიის **ნულოვანი** **დონე** და ენერგიის ყველა შესაძლო მნიშვნელობები მხოლოდ **ამ** **დონის** **ზემოთ** (**დადებითი** **სიდიდეების** სიმრავლის სახით) არიან განლაგებულნი;

▪გაერთიანების შედეგი **აღსაქმელად** **მძიმე** იყო. განტოლების თითოეულ **E**>0 ამონახსნს "გვერდს უმშვენებდა" **E**<0 ამონახსნი. შედეგი - **ენერგიათა** **უფსკრული**!!!

P.Drac
1902-1984
ნობელი 1945

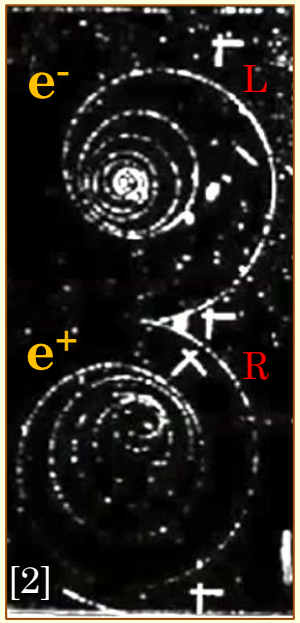
▪გამოსავალის ძიებაში დირაკი დაეყრდნო **პაულის პრინციპს**, რომლის თანახმად მხოლოდ **2 ელექტრონი** შეიძლება **მოთავსდეს ერთ ენერგეტიკულ დონეზე** (**ფლობდეს ერთ ენერგიას**), ამდენად, შესაძლებელია ამ უფსკრულის ელექტრონებით გავსება;
•“დირაკის ელექტრონული ზღვის” [1] შესავსებად საჭირო იქნება **ელექტრონების** უსასრულო რაოდენობა. მერე რა, ბუნება დაიხარჯება! სამაგიეროდ, შემდგომში იქ **“ვერავინ ” ვეღარ ჩავარდება**!

W.Pauli
1900-1958
ნობელი 1945

▪სხვა გარემოებაზეც გახდა საჭირო ყურადღების გამახვილება. სავსებით შესაძლებეილია, რაიმე **ზემოქმედებამ** (ვთქვათ ფოტონმა) ამ “ზღვიდან” **ელექტრონი ამოაგდოს**. შედეგად იქ გაჩნდება “ხვრელი” (როგორც ჰაერის ბუშტი წყალში) **უარყოფითი მუხტის ნაკლებობით**;
▪ დირაკმა დაადგინა, რომ ამ ხვრელს **ელექტრონისთვის დამახასიათებელი ყველა თვისება გააჩნია**, ოღონდ მუხტი აქვს **დადებითი**!
•ასე დაიბადა (მეორედ) **ანტიმატერია**, მაგრამ უკვე **მათემატიკური** “**რწმუნებულებებით**”;

C.Anderson
1905-1991
ნობელი 1936

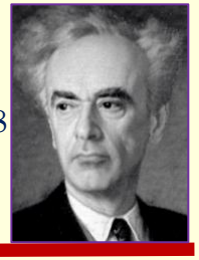
▪მესამედ და **საბოლოოდ**, **ცდით** [2] (კოსმურ სხივებზე დაკვირვებისას) **ანტიმატერია აღმოაჩინა ანდერსონმა**. მანვე შემოიტანა სახელწოდება **პოზიტრონი** (**e⁺**). დირაკს მოსწონდა - “ანტიელექტრონი”);
▪შემდგომში დადგინდა, რომ **ყველა ნაწილაკს** “**ჰყავს**” **თავისი ანტინაწილაკი**;



•“**მე მეჩვენება, რომ ანტიმატერიის აღმოჩენა იყო, ყველა დიდ აღმოჩენას შორის, ყველაზე უდიდესი გარღვევა XX საუკუნის ფიზიკაში.**”

W.Heisenberg

“ადამიანის გენიალურობის უდიდეს მიღწევას წარმოადგენს ის, რომ ადამიანს შეუძლია გაიგოს ისეთი რამ, რისი წარმოდგენაც კი არ შეუძლია.” Lev Landau



1908 - 1968

რამდენი უნდა იცოდე, რომ იცოდე რამე ?!

სტუ-ს ფიზიკის კურსის *(4 სემესტრი)* ლექციების კონსპექტი

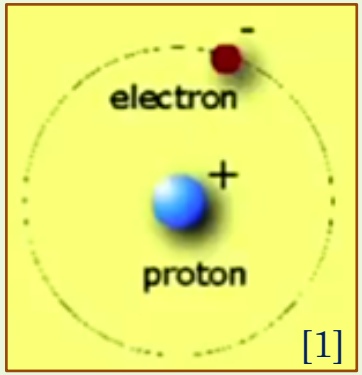
ლექცია **14** | **თემა:** | სემესტრი **IV**

მატერია-ანტიმატერიას შორის სიმეტრიის დარღვევა

126 **1.მატერია, ანტიმატერია და ფიზიკის კანონები**

129 **2.CP სიმეტრიის დარღვევის მნიშვნელობა**

1.მატერია, ანტიმატერია და ფიზიკის კანონები



[1]

[2]

▪ითვლებოდა, რომ სინამდვილეს შესაბამება: 1.**მატერიის** და **ანტიმატერიის** **სიმეტრიულობა**; 2.**ფიზიკის კანონები**, **ურთიერთქმედების კანონზომიერებანი** **ერთნაირია მატერიისა** და **ანტიმატერიისთვის** [1],[2];

▪დირაკს მიაჩნდა - **სიმეტრიულობა** და **კანონების იდენტურობა** ეჭვს არ იწვევს და {მის მიერვე} **ანტინაწილაკის** **შემოტანა კი ამ დებულებებიდან** უშუალოდ გამომდინარეობს;

▪ცდებით დამტკიცდა კიდევაც, რომ **ელექტრომაგნიტური** **ურთიერთქმედება არ არჩევს ერთმანეთისგან** ელექტრონსა და პოზიტრონს (მაგ.: გამოვლენილია მათი მაგნიტური მომენტის სიდიდეების დამთხვევა 10^{-12} სიზუსტით);

▪დირაკმა იწანასწარმეტყველა - რადგან **ასეთი სიმეტრია არსებობს** და ჩვენ ვცხოვრობთ **პროტონებით** და **ელექტრონებით** აწყობილ გალაქტიკაში, ე.ი. სადღაც სამყაროში **უნდა არსებობდეს ანტიმატერიაც!** შესაძლოა **ანტიმატერიით** არის შექმნილი გამოვლენილი **გალაქტიკებიდან** **ნახევარიც** კი. გამოსხივებით მათ ვერ ვანსხვავებთ, რადგან **სინათლეც** **სიმეტრიულია**, **ის არც მატერიაა** და **არც ანტიმატერია**;

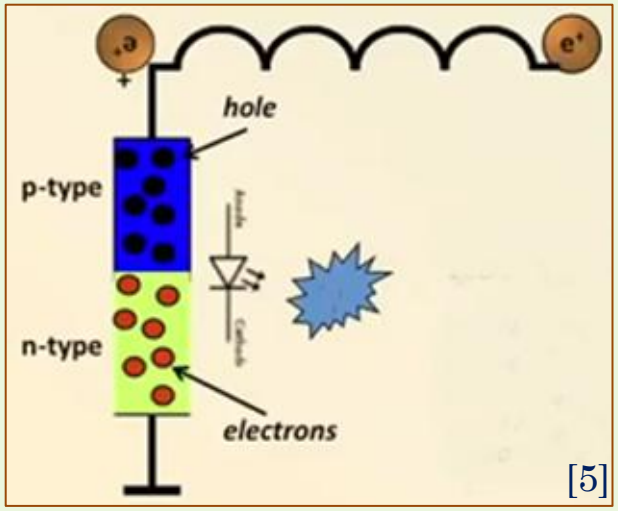
▪თუ ანტიმატერიის გალაქტიკა არსებობს, მიუხედავად იმისა, რომ ნივთიერება ძირითადად გალაქტიკების ცენტრშია თავმოყრილი, სადღაც პერიფერიაზე [3] **ადგილი უნდა ჰქონდეს ანიჰილაციას** და **შეიძლება მოხერხდეს** {მისი} **"კვალის" გამოვლინება**;

▪დაკვირვება (მათ შორის - კოსმოსური ხომალდებიდან) **მუდმივად მიმდინარეობს**;

[3]

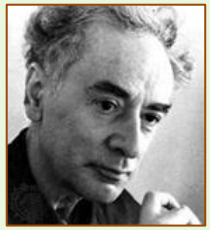
▪რეალურად, ანიჰილაციის დაფიქსირების ალბათობა (თავად ფიზიკის ხედვით) მცირეა და ამის მიზეზი **სუსტი ურთიერთქმედების სიმეტრიასთან** გართულებული "**ურთიერთობაა**" (ეს ცდებით გამომზეურდა);
▪**სუსტი ურთიერთქმედება** **არღვევს** სიმეტრიას **სარკულსაც** (**P**) და **მუხტურსაც** (**C**) და, ამდენად, **განასხვავებს** **მატერიას** და **ანტიმატერიას** [4];
▪ლანდაუმ მოიფიქრა, რომ მატერიასა და ანტიმატერიას შორის **სიმეტრიის აღდგენა** შესაძლებელია "**ორმაგი სარკის**" გამოყენებით, როდესაც **თანმიმდევრულად** (მაგრამ, **შუალედური მდგომარეობის გარეშე**) განხორციელდება ორმაგი გარდაქმნა - **მუხტური სარკის** (**C**-შეუღლება) და ორდინარული **სარკის** (**P** -შეუღლება) გამოყენებით;

[4]



[5]

▪ლანდაუმ ჩათვალა, რომ მოიფიქრა რთული, მაგრამ სწო- რი {ლამაზი, შესანიშნავი...} **CP** **სარკე**, რომელიც **ახერხებს** **მატერიასა და ანტიმატერიას შორის** **სიმეტრიის** {"სილამაზის"} **სრულ** **აღდგენას**;
•**CP** **სარკის** " რეალურობის" მაგალითი: ფოტოდიოდი, რომელიც **ასხივებს** მასში **ელექტრონების** მოძრაობისას [5]. მაგრამ, **პოზიტრონების** გამოყენების შემთხვევაში, დიოდი **იმუშავებს** მხოლოდ **მაშინ**, თუ პოზიტრონები **საპირისპირო მიმართულე-ბით** **იმოძრავებენ** (**CP**, **ორმაგი** გარდაქმნა - **მუხტის** **შეცვლა** **საპირისპიროზე** და **სარკეში** **არეკვლა**);


L.Landau
1908-1968
ნობელი 1962

▪თუმცა, 10 წლის შემდეგ გაირკვა, რომ **სრულად** **არც** **ამ** **მიდგომამ** "**გაამართლა**". და საბედნიეროდაც! ბუნებას ეს **ორმაგი** **გარდაქმნა** რომ **დაეშვა** - ***ვერავინ*** **დატკბებოდა** ამ **CP** **სარკის** სილამაზით **!!!**

✓ბევრი რამ გაირკვა ნავარაუდევ სხვადასხვა {თითქოსდა} **სიჭარბეზე**!

▪**სიჭარბე 1** - **სუსტი ურთიერთქმედება** თავიდან **ზედმეტ მონაწილედ** განიხილებოდა. თუმცა, შემდგომ მისი ფუნქცია ნელ-ნელა გამოიკვეთა;

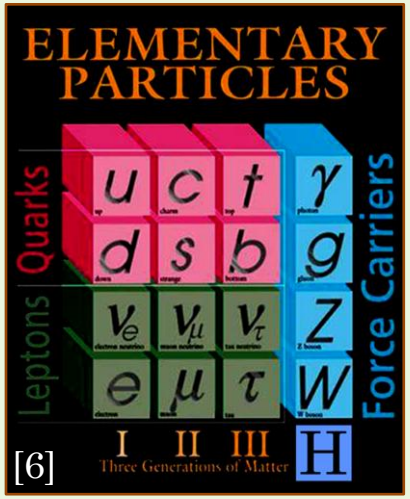
▪**სიჭარბე 2** - **ანტიმატერიაა**, ვინაიდან გაუგებარი იყო რისთვისაა საჭირო ეს **ანტიმატერია ?!**;

▪**სიჭარბე 3** -**კვარკების** და **ლეპტონების** **რამდენიმე** (**სამი**) **თაობა** [6]. გარდა იმ **კვარკებისა** (**u**, **d** - I თაობა) და **ლეპტონებისა** (**e**,ν_e -I თაობა), რომლებმაც **შექმნეს სამყარო**, არსებობენ შემდეგი "ზედმეტი" ნაწილაკებიც:

•**ელექტრონის** მონაცვლე (დუბლიორი) - **მიუონი** (**μ**), დიდი განსჯის საგანი გახდა - რისთვისაა ის საჭირო?!

•პროტონ-ნეიტრონის შემადგენლობაში შემავალ **d** **კვარკს** ჰყავს **მძიმე** ანალოგი - **s-Strange** ("უცნაური") კვარკი. პირველმა სწორედ **ამ კვარკმა** გამოიჩინა თავი **ლანდაუს სიმეტრიის** **დარღვევით**;

•**ნეიტრინო** სამი სახისაა და ძნელი გასარკვევი იყო, თუ რა განსხვავებაა **ელექტრონულ** (ν_e) და **მიუონურ** (ν_μ) ნეიტრინოებს შორის. მაგრამ, **დადგინეს** და ნობელიც მიიღეს (1988 წ. Lederman, Schwartz, Steinberger);



[6]

▪ბუნებამ **ყველა ნაწილაკს შეუქმნა** მცირე სიცოცხლის დროის **მძიმე** "**დუბლიორები**";

•თუმცა, აღმოჩნდა რომ: **I**.არა აქვს მნიშვნელობა **რამდენ ხანს ცხოვრობენ**; არა აქვს მნიშვნელობა **რას აკეთებენ**; არა აქვს მნიშვნელობა **რა ზეგავლენას ახდენენ ჩვენს ცხოვრებაზე**. **II**.სამაგიეროდ უაღრესად **მნიშვნელოვანია** თავად **ფაქტი მათი არსებობისა**, **ვინაიდან** **მათი არსებობა** **შესაძლებლად ხდის ჩვენ არსებობას!**

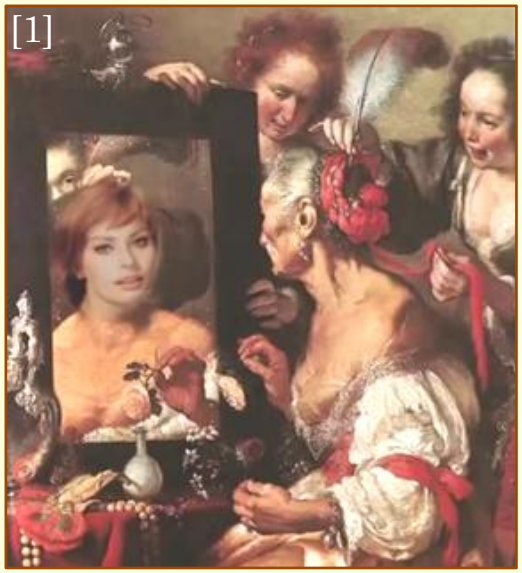
▪ასევე მნიშვნელოვანია, რომ ამ **შემცვლელების** **თაობათა** **რიცხვი** **იყოს** **ორი!** და ასეც არის! თითოეულ კვარკსა და ლეპტონს ჰყავს ორ-ორი შემცვლელი. ანუ, სულ **არსებობს** **ლეპტონების** **და** **კვარკების** **სამი** **თაობა** [6]. გაუგებარი იყო **მეორე** **თაობის** **დანიშნულება**, მაგრამ **მესამე** **თაობა** **ნამდვილად** **აუცილებელია**!

2.CP სიმეტრიის დარღვევის მნიშვნელობა

▪აღმოჩნდა, რომ **კომბინირებული CP სიმეტრია** (ლანდაუს **ორ-მაგი სარკე**) ყოველთვის **ზუსტად არ სრულდება** [1];

•"ცუდი ქცევა" გამოავლინდა $\mathbf{K^0}$ მეზონის **ორ სიმეტრიულ**, π მეზონის და *კვარკი* ($e^+\pi^-u$) - *ანტიკვარკის* ($e^-\pi^+\bar{u}$) შემცველობის საბოლოო მდგომარეობებად დაშლისას (**s**-Strange მეორე თაობის კვარკის მონაწილეობით). **დაშლის ალბათობები** ერთმანეთისგან **0.3 %**-ით **განსხვავდებოდა!!!**

▪მიუხედავად ასეთი **მცირე ცდომილებისა** (თანაც, ნაწილაკებისთვის, რომელთა **სიცოცხლის დრო** სულ რაღაც **50 ნანოწამია**), **თავად ცდომილების არსებობას** გააჩნდა ვეებერთელა მნიშვნელობა, რაც "გაშიფრა" **სახაროვმა**;


[1]

A.Sakharov
1921-1989

▪**სამყაროს არსებობისთვის აუცილებელია CP სიმეტრიის დარღვევა** (თუნდაც ძალიან მცირე);

▪**თავდაპირველად**, დიდი აფეთქების შედეგად, **სამყარო შეიცავდა მატერიას** და **ანტიმატერიას ტოლი რაოდენობით**. და, რომ **არ ჰქონოდა ადგილი რაოდენობრივი ტოლობის დარღვევას** (**მცირედით მაინც**), **ანიჰილაცია** {საბოლოოდ} **მოსპობდა მატერიასაც** და **ანტიმატერიასაც**!

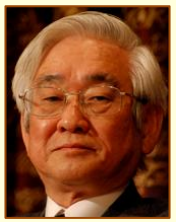
•**დარჩებოდა მხოლოდ რელიქტური გამოსხივება** (**ფოტონები**) და **არ შეიქმნებოდნენ ვარსკლავები, გალაქტიკები**, ... , **არ ვიქნებოდით ჩვენც!**

•*<u>საბედნიეროდ</u>*, **მილიარდი** (10^9) ნაწილაკიდან და ანტინაწილაკიდან ანიჰილირებას "ცოცხალად" გადაურჩა **1** "მებრძოლი" და ეს **ნაწილაკი** [2],[3] იყო **მატერია!!!**

[2]

▪როგორ მოხდა, რომ სამყაროში **არჩევანი** **მატერიის სასარგებლოდ** და ანტიმატერიის საზარალოდ გაკეთდა? ამის მიზეზი, როგორც ჩანს, სწრედ **სიმეტრიის დარღვევაა**, ანუ ფლუქტუაციები მატერიის საფუძვლების დონეზე.

M.Kobayashi
1944
ნობელი 2008



T.Maskawa
1940
ნობელი 2008

▪ბუნებამ უზრუნველყო **CP სიმეტრიის დარღვევა**, რათა **შენარჩუნებულიყო მატერია**. ეს კი, რეალურად, მხოლოდ **III თაობის ნაწილაკების არსებობის** შემთხვევაში განხორციელდებოდა;

•ნაწილაკთა მხოლოდ **ორი თაობით** ლანდაუს სიმეტრიის **დარღვევა** **შეუძლებელია**, აუცილებელია **სამი** თაობის **არსებობა** განაცხადეს **კობაიაშიმ** და **მასკავამ** {ჯერ კიდევ, როდესაც **II** თაობაც არ იყო სრულად ფორმირებული} და შექმნეს **მიკროსამყაროში სიმეტრიის სპონტანური დარღვევის მოდელი**;

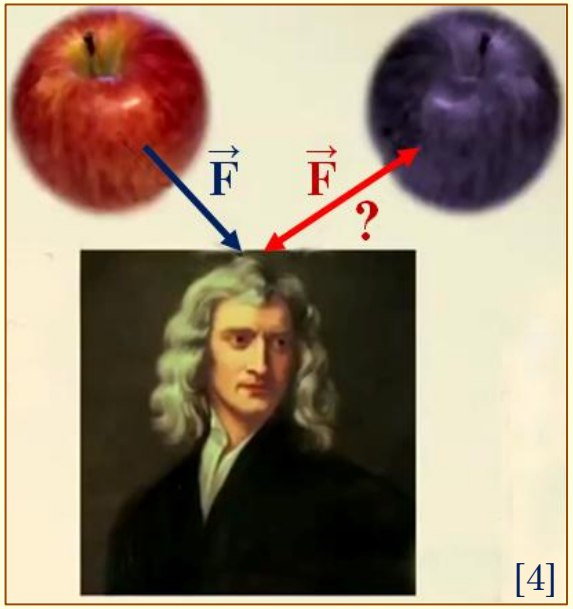
•მათ არ დაუჯერეს! 6 კვარკის არსებობა დამტკიცდა 20 წლის შემდეგ!

▪შემდგომ კი დადგინდა, რომ **III** თაობის კვარკის **b Beauty** მონაწილეობით **CP** სიმეტრიის დარღვევა 0.3% კი არა, არამედ **ლამის 1%**-ია;

▪ჩვენი სამყარო **თითქმის** **სიმეტრიულია** და ფიზიკაც საუბრობს **სიმეტრიის ენაზე**. ამიტომ, ხშირად, **სიმეტრიის დარღვევა ქმნის შემდგომი განვითარების გარკვეულ საფუძველს**;

•ერთადერთი დისკრეტული სიმეტრია კი, რომელიც ნამდვილად და ზუსტად სრულდება {ექსპერიმენტებმა ამაში ეჭვი ვერ შეიტანეს} არის CPT სიმეტრია: პროცესის სარკეში არეკვლის, დროის შემობრუნების და ყველა ნაწილაკის ანტინაწილაკებით შეცვლის შემდეგ მიიღება თავდაპირველის თანაალბათური პროცესი;

▪კობაიაში-მასკავას თეორიის გარდა, სიმეტრიის დარღვევის ვერც ერთი სხვა მექანიზმი დღემდე გამოვლენილი არ არის;
▪მაგრამ, სხვა მექანიზმები უნდა არსებობდნენ, ვინაიდან აუხსნელია კოსმოლოგიაში დაფიქსირებული *ასიმეტრია* მატერიასა და ანტიმატერიას შორის;
▪დასაზუსტებელ შესწავლას მოითხოვს ჰიგსის კონდენსატით (ჰიგსის ველით - ნულოვანი სპინის ჰიგსის ბოზონებით) მთელი სივრცის (სიცარიელის) შევსების მოდელი {ჰიგსის კონდენსატი "გარდაცვლილი ეთერის" შემცვლელი?!};



[4]

▪გასარკვევია, არსებობს თუ არა ანტიგრავიტაცია? {ფიზიკოსების უმრავლესობა ანტიგრავიტაციას სკეპტიკურად უყურებს! მაგრამ საჭიროა ცდის ჩატარება};
•როგორი ძალებით ურთიერთქმედებენ მატერია და ანტიმატერია? ანტიმატერია "ვარდება" ზევით, თუ ქვევით [4] ?
•ცდა ანტიმატერიის გამოყენებას მოითხოვს. ჯერჯერობით კი შესაძლებელია მხოლოდ ანტიატომების (ანტიწყალბადის) მიღება, თანაც ძალიან მცირე რაოდენობით;
•ანტიატომების მისაღებად აუცილებელია ანტიპროტონების 1.შენელება; 2.გაცივება; 3.შერევა ანტიელექტრონებთან (პოზიტრონებთან);

▪ცალკე პრობლემაა მიღებულის (**ანტიმატერიის**) **შენახვა**. ვინაიდან, “შესანახი” სივრცის კედლებთან (**მატერიასთან**) მისი ნებისმიერი შეხების შემთხვევაში **მყისიერად ხდება ანიჰილაცია**!

▪**ანტიმატერიის** შესაკავებლად (დასაცავად) გამოიყენება მაგნიტური ველი;

▪დღეს, CERN-ში რამდენიმე **ასეული ანტიატომის** (**ანტიწყალბადის**) შეკავება ხერხდება რამდენიმე **წუთის** განმავლობაში. არის ვარაუდი, რომ 10 წლის შემდეგ შესაძლებელი იქნება ≈**გრამის** რაოდენობის შენარჩუნება;

“სწრაფად - ეს ნელაა, ოღონდ შესვენებების გარეშე.” აპონური სიბრძნე

რამდენი უნდა იცოდე, რომ იცოდე რამე ?!

სტუ-ს ფიზიკის კურსის *(4 სემესტრი)* ლექციების კონსპექტი

ლექცია **15** | **თემა:** | სემესტრი **IV**

დასკვნის სახით

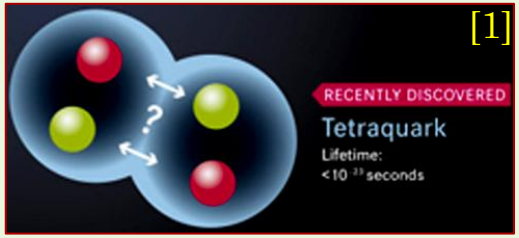
134 **1.კითხვები & პრობლემები**

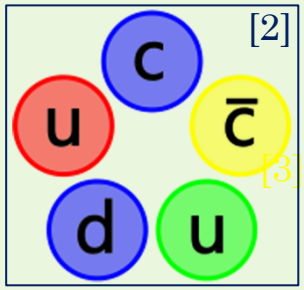
138 **ოპტიკის, ატომის და ბირთვის Mind Map**

1.კითხვები & პრობლემები

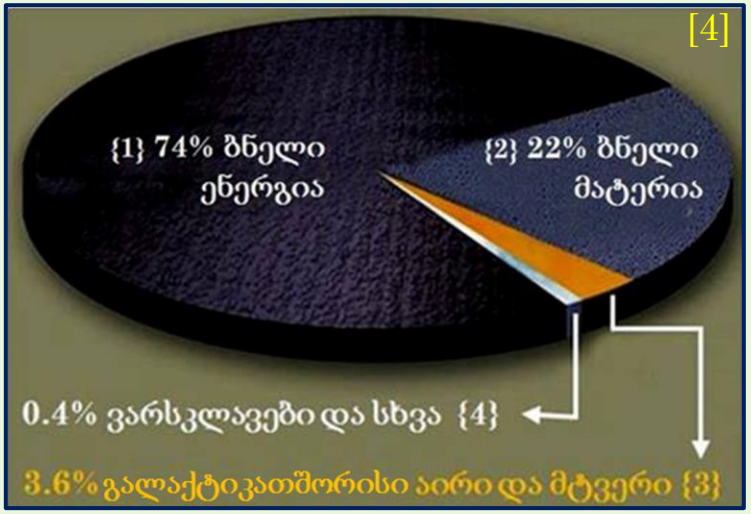
▪ფიზიკის განვითარების ნებისმიერ ეტაპზე, ხდება ამა თუ იმ თემის ინტერესის ცენტრად ჩამოყალიბება. დღეს, ალბათ, ასეთებად შეიძლება მივუთითოთ: **ფუნდამენტური ნაწილაკები** და **ანტიმატერია** {განსაკუთრებით კოსმოლოგიაში};

▪თითქოსდა **სტანდარტულმა მოდელმა** ყველაფერი გაარკვია, მაგრამ ფიზიკის მნიშვნელოვანმა წინსვლამ წონიანი კითხვების გენერირებაც განაპირობა:
1.საიდან **უჩნდებათ** კვარკებს **ასეთი** და **არა სხვა** **სიდიდის საწყისი მასები**?

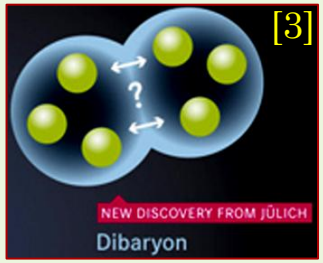




2.მეზონი - **ტეტრაკვარკის** [1] {2 კვარკი **u**,**b** და 2 ანტიკვარკი $\bar{d}$,$\bar{s}$, თანაც არასტანდარტულად აგებული - **ოთხივე** კვარკი **განსხვავებულია**}, ასევე ბარიონი - **პენტაკვარკის** [2] აღმოჩენა გამოიწვევს *კორექტივების* **შეტანას** თეორიაში?



3.**მტკიცდება**, თუ არა ექვსკვარკიანი {**uuddss**} **დიბარიონის** [3] არსებობა?
4.**უმძიმესი პრობლემაა** - რა არის **ბნელი** **მატერია** და **ენერგია** [4]?



▪**ბნელ მატერიაზე** **არაფერია ცნობილი!** თანაც, გაურკვეველია ის **მატერიაა**, თუ **ანტიმატერია**. შეიძლება ის სულაც **ნეიტრალურია** - ფოტონების მსგავსად. {ნაწილაკი **ფოტონი** **თავადაა საკუთარი** **თავის ანტინაწილაკიც**};

•თუმცა, ვლინდება **ბნელი მატერიის გრავიტაციული** ველი, რომელიც ეტყობა **ორივეს იზიდავს** (ანუ, **არ ანსხვავებს მატერიას** და **ანტიმატერიას**);

▪**ბნელი ენერგია** კი შესაძლოა უკავშირდება იმ ფაქტს, რომ სამყარო გარკვეული **აჩქარებით ფართოვდება**;
•ე.ი., მასში "ჩადებულია" **გარკვეული ძალა**, რომელიც მას **აჩქარების უნარს** ანიჭებს. თუმცა, **უცნობია რა არის ეს ძალა, რა წარმომავლობისაა** ის **ჭარბი ენერგია**, რომელიც მიდის **აჩქარებულ გაფართოებაზე**;

▪**დღეს შეუძლებელია ანტიგალაქტიკების არსებობის გამორიცხვა**. გრძელდება მათი ძიება, თუმცა **არ** გამოვლენილა;
▪ვინაიდან **სიმეტრია** მატერიასა და ანტიმატერიას შორის **დარღვეულია**, ფიზიკას ანტიმატერია მაინცდამაინც არც სჭირდება სამყაროს მთლიანობაში აღსაქმელად. ამჟამად, **არ არსებობენ მტკიცებულებანი ანტიგალაქტიკების არსებობა - არ არსებობის თაობაზე!**

▪ანტისამყაროში დროის დინებასთან დაკავშირებით, გასათვალისწინებელია, რომ **CPT** თეორემის შესაბამისად, **ანტინაწილაკი - ის ნაწილაკია**, რომელიც **დროში საპირისპირო მიმართულებით მიფრინავს** - **აწმყოში მომავლიდან**, მისთვის დრო **უკან** არის **მიმართული**;
•ანუ, **C**, **P**, **T** თანმიმდევრული გარდაქმნა, **ნაწილაკს ანტინაწილაკად** აქცევს;

▪სიმეტრიასთან დაკავშირებით ყურადღებას იპყრობს **თერმოდინამიკის II კანონი**, რომლის მიხედვით **დროის ისარი ისეთი მიმართულებისაა**, რომ **ენტროპია იზრდებოდეს**. ანუ, თუ **თავდაპირველად** აღებულია **მოწესრიგებული** სისტემა, **მოწესრიგება თანდათან შემცირდება**. კითხვა აქ უფრო იმაშია - **ვინ** **ააწყო**, **ვინ** **შექმნა** ეს **მოწესრიგებული** სისტემა?

• **II კანონის** **სარკული** **კანონიც** იარსებებს, თუ კი **სამყაროს არსებობის დასრულებისას** **ყველაფერი უნდა მოწესრიგდეს**. ანუ, კანონის **სარკულობა** უკავშირდება **დროის დინებას**. თუ რაღაც მიზეზის გამო, სამყარო ისურვებს **უკან ჩაკუმშვას**, ამისთვის საჭირო იქნება **მოწესრიგება** და იარსებებს თერმოდინამიკის **ანტი-II** კანონი;

▪აქტუალური ხდება მოსაზრება, რომ განზომილება **დრო** **არ** **არსებობს**. არის წამი წარსულსა და მომავალს შორის და სწორედ მას ვუწოდებთ ცხოვრებას!?

•მაგრამ, ფიზიკა იყენებს იმ კოორდინატებს, რომლებთანაც **მოსახერხებელია** **მუშაობა**. და, ამ მხრივ, **დრო** **საჭიროა**!

▪**ოთხივე** **ფუნდამენტური** **ურთიერთქმედება** აშკარად **ერთი** **იდეოლოგიით** არის აგებული. როდის მოხერხდება მათი **ერთიან** **თეორიაში** გაერთიანება?

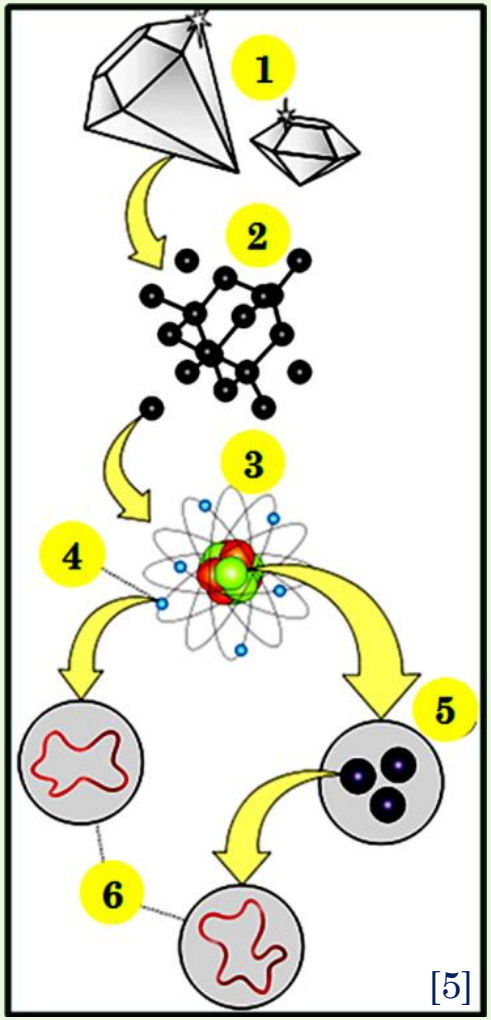
▪შესაძლოა ფიზიკა დიდი გამოწვევის წინაშე დგას და არ არის გამორიცხული, რომ **პრობლემების** **სიღრმისეულმა** **გაგებამ** **ენერგიის** **უდიდეს** **წყაროსკენ** **მიმავალი** **გზა** **გამოამზეურის**;

▪თეორიულ ფიზიკაში ჩამოყალიბდა მიმართულება - **სიმების** **თეორია** , რომელიც ეყრდნობა **არა** **წერტილოვანი** **ნაწილაკების**, არამედ **ერთგანზომილებიანი** **განფენილი** ობიექტების – **კვანტური** **სიმების** (ან **ორგანზომილებიანი** **მემბრანების**) დინამიკას და ურთიერთქმედებას;

▪სიმებთან დაკავშირებული პროცესები თამაშდება **ულტრამიკროს-კოპულ**, **პლანკის სიგრძეთა** (10^{-35} მ) მასშტაბში;
▪აქვს **გრავიტაციის კვანტური თეორიის** შექმნის პრეტენზია;
▪ **სიმების** **თეორია** {დღეს, **5 სუპერსიმების** **თეორია**} ცნობს **სამყაროს აგებულების არა 5**, არამედ **6 თანმიმდევრულ დონეს** [5]:

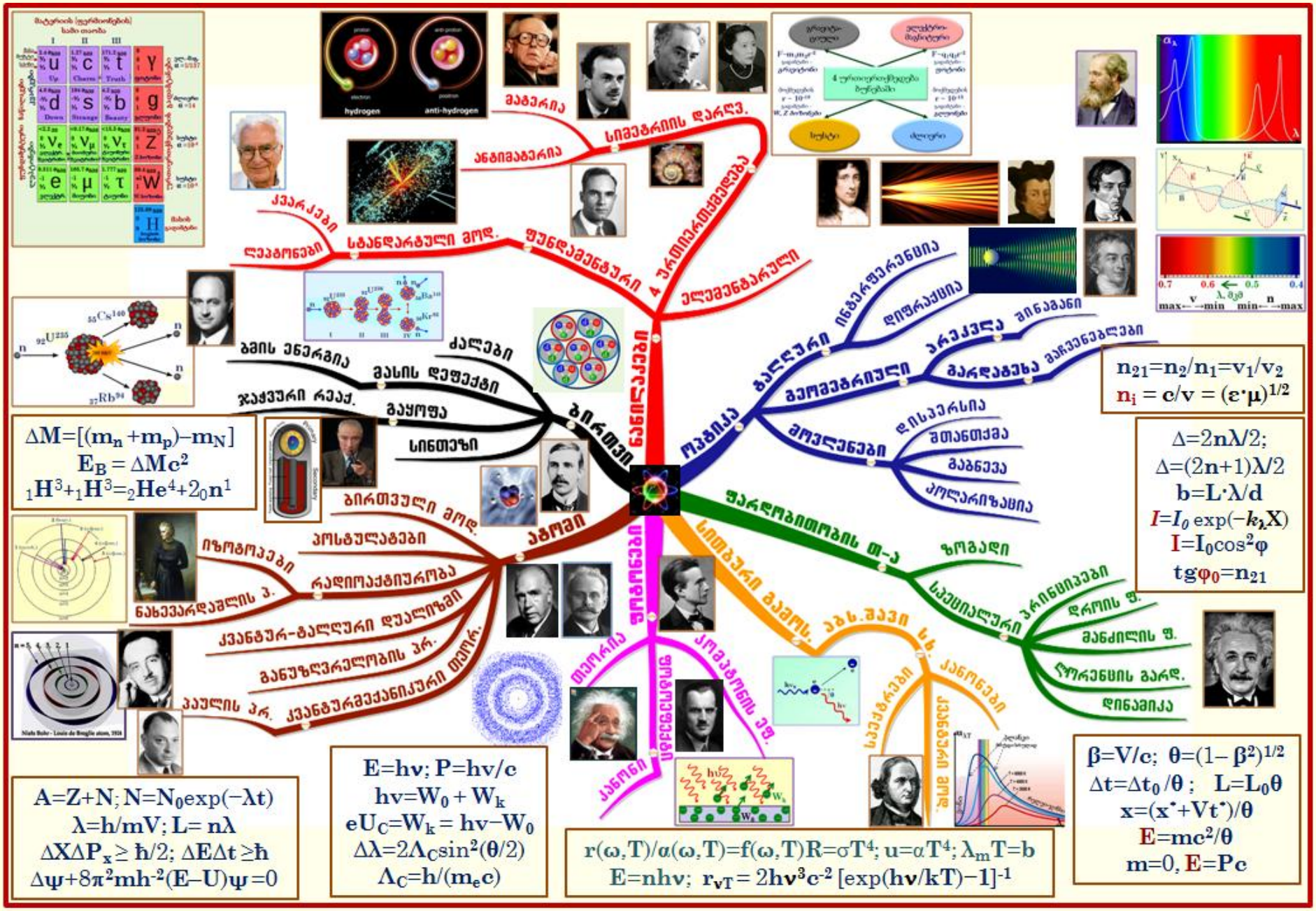
- **1.მაკროსკოპული** დონე – **ნივთიერება**;
- **2.მოლეკულური** დონე;
- **3.ატომური** დონე – **პროტონები**, **ნეიტრონები**, **ელექტრონები**;
- **4.სუბატომური** დონე – **ელექტრონი**;
- **5.სუბატომური** დონე – **კვარკები**;
- **6.სიმების** (**მემბრანების**) დონე;

▪**სიმების** კვანტური თეორიის შესატყვისი მოვლენები თამაშდება **მრავალგანზომილებიან** სივრცეში (**4-ზე მეტი**, დროის განზომილების ჩათვლით). დღეს **პრიორიტეტულ მაქსიმუმად** ითვლება **10-11** (ან სულაც **26**) **განზომილებიანი** **მულტისივრცე**;
▪**სიმების** **თეორიით**, შეიძლება ჩვენი სამყარო "დიდი არენის" **მულტისამყაროს** მხოლოდ **ერთ-ერთი** **ნაწილია**;



[5]

ოპტიკის, ატომის და ბირთვის Mind Map



Appendix I. ინფორმაცია (ცხრილები), რომელიც გამოგადგებათ

გამოყენებული ბერძნული სიმბოლოები

α	ალფა	η	ეზა	ν	ნიუ
β	ბეზა	Θ	თეზა	π	პი
γ	გამა	κ	კაპა	ρ	რო
Δ	დელზა	λ	ლამბდა	τ	ზაუ
ε	ეპსილონი	μ	მიუ	φ	ფი

ფიზიკურ სიდიდეთა ძირითადი ერთეულები

სიდიდე	განზომილება	ერთეული	აღნიშვნა
სიგრძე	L	მეტრი	მ
დრო	T	წამი	წმ
მასა	M	კილოგრამი	კგ
ტემპერატურა	Q	კელვინი	K
ნივთიერებ. რაოდ.	N	მოლი	მოლი
დენის ძალა	I	ამპერი	ა
სინათლის ძალა	J	კანდელა	კდ

ძირითადი ფიზიკური მუდმივები

მუდმივა	აღნიშ.	სიდიდე
ბორის რადიუსი	a	$5.292\ 10^{-11}$ მ
სინათლის სიჩქარე	c	$2.998\ 10^{8}$ მ / წმ
ელემენტარული მუხტი	e	$1.602\ 10^{-19}$ კ
ელექტრული მუდმივა	e_0	$8.854\ 10^{-12}$ ფ / მ
გრავიტაციული მუდმივა	G	$6.672\ 10^{-11}$ ნ $მ^2$ / $კგ^2$
თავის.ვარდნის აჩქარება	g	9.807 მ/$წმ^2$
პლანკის მუდმივა	h	$6.626\ 10^{-34}$ ჯ წმ
“ _”	ħ	$1.055\ 10^{-34}$ ჯ წმ
ბოლცმანის მუდმივა	k	$1.381\ 10^{-23}$ ჯ / K
კულონის მუდმივა	k_0	$8.988\ 10^{9}$ ნ $მ^2$ / $კ^2$
მასის ატომური ერთეული	მ.ა.ე.	$1.661\ 10^{-27}$ კგ
ელექტრონის მასა	m_e	$9.110\ 10^{-31}$ კგ
ნეიტრონის მასა	m_n	$1.675\ 10^{-27}$ კგ
პროტონის მასა	m_p	$1.673\ 10^{-27}$ კგ
მაგნიტური მუდმივა	μ_0	$4\pi 10^{-7}$ ჰნ / მ
ავოგადროს რიცხვი	N_A	$6.022\ 10^{23}$ $მოლი^{-1}$
ნორმალური ატმოსფ.წნევა	P_0	$1.013\ 10^{5}$ პა
აირის უნივერს.მუდმივა	R	8.314 ჯ /(K მოლი)
აბსოლუტური ნული	T_K	-273.16 ^{o}C

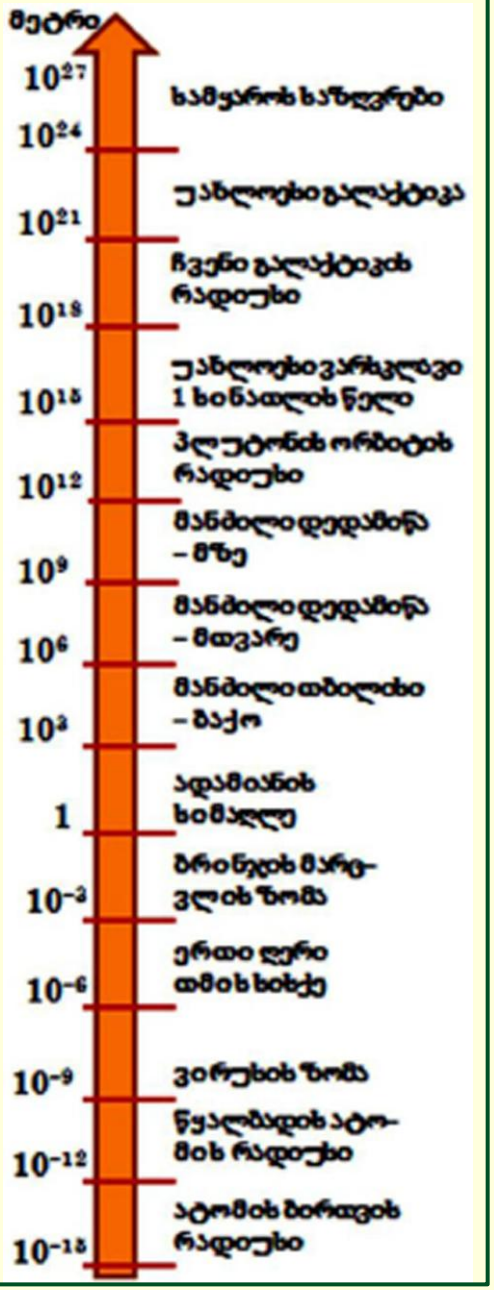
ერთეულთა თავსართები

მაგრავლი	თავსართი	აღნიშვნა
10^{1}	დეკა	და
10^{2}	ჰექტო	ჰ
10^{3}	კილო	კ
10^{6}	მეგა	მგ
10^{9}	გიგა	გ
10^{12}	ტერა	ტ
10^{15}	პეტა	პ
10^{18}	ექსა	ე
10^{-1}	დეცი	დ
10^{-2}	სანტი	ს
10^{-3}	მილი	მ
10^{-6}	მიკრო	მკ
10^{-9}	ნანო	ნ
10^{-12}	პიკო	პ
10^{-15}	ფემტო	ფ
10^{-18}	ატო	ა

ფიზიკურ სიდიდეთა ნარმოებული ერთეულები

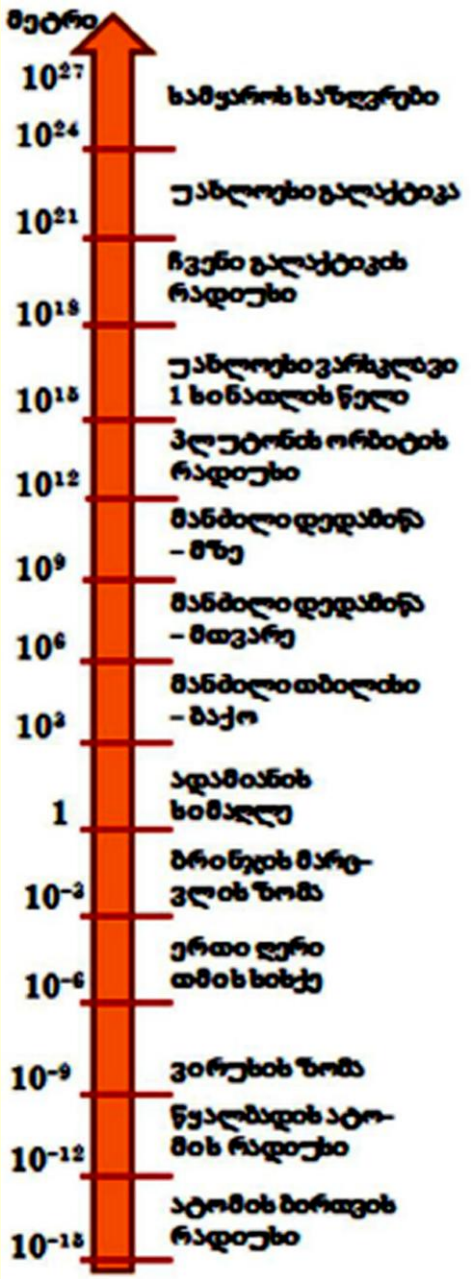
სიდიდე	აღნიშ.	ერთეული	აღნიშ.	სხვა ერთეულები
ფართობი	S	კვადრატული მეტრი	$მ^2$	$სმ^2 = 10^{-4}\ მ^2$
მოცულობა	V	კუბური მეტრი	$მ^3$	$ლ = 10^{-3}\ მ^3$
ბრტყელი კუთხე	φ	რადიანი	რად	გრად = 0.0175 რად
სივრცითი კუთხე	g	სტერადიანი	სტერ	
გადაადგილება, გზა	S, L	მეტრი	მ	$კმ = 10^{3}\ მ$
სიჩქარე	V	მეტრი წამთან	$მ\ წმ^{-1}$	$კმ\ სთ^{-1} = 0.278\ მ\ წმ^{-1}$
აჩქარება	a	მეტრი წამ კვადრატთან	$მ\ წმ^{-2}$	
კუთხური სიჩქარე	ω	რადიანი წამთან	$რად\ წმ^{-1}$	
სიხშირე	ν	ჰერცი	ჰც	$წმ^{-1} \equiv ჰც$
სიმკვრივე	r	კილოგრამი კუბურ მეტრთან	$კგ\ მ^{-3}$	$გ\ სმ^{-3} = 10^{3}\ კგ\ მ^{-3}$
ძალა	F	ნიუტონი	ნ	კგ.ძ = 9.8 ნ
იმპულსი	P	კილოგრამ-მეტრი წამთან	$კგ\ მ\ წმ^{-1}$	
ძალის იმპულსი	F t	ნიუტონი წამი	ნ წმ	
ძალის მომენტი	M	ნიუტონი მეტრი	ნ მ	
მუშაობა, ენერგია	A, E	ჯოული	ჯ	$ეV = 1.6\ 10^{-19}\ ჯ$
სიმძლავრე	N, P	ვატი	ვტ	ცხ.ძ = 735.5 ვტ
წნევა	P	პასკალი	პა	ვ.სვ.მმ = 133.3 პა
სითბოს რაოდენობა	Q	ჯოული	ჯ	კალორია =4.187 ჯ

მანძილის დიაპაზონი სამყაროში

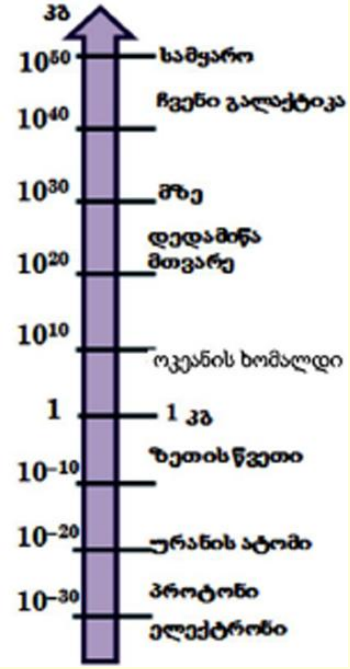


ფიზიკურ სიდიდეთა წარმოებული ერთეულები (გაგრძელება)

სიდიდე	აღნიშ.	ერთეული	აღნიშ.	სხვა ერთეულები
კუთრი სითბოტევადობა	c	ჯოული კილოგრამ–კელვინზე	ჯ კგ$^{-1}$ K^{-1}	
მოლური მასა	M	კილოგრამი მოლთან	კგ მოლი$^{-1}$	
კონცენტრაცია	n	1 კუბურ მეტრთან	მ$^{-3}$	სმ$^{-3}$ = 10^{6} მ$^{-3}$
ელექტრული მუხტი	q	კულონი	კ	
დენის სიმკვრივე	J	ამპერი კვადრატულ–მეტრთან	ა მ$^{-2}$	
ძაბვა, ემძ	U, Є	ვოლტი	ვ	
ელ. ველის დაძაბულობა	E	ვოლტი მეტრთან	ვ მ$^{-1}$	
წინააღმდეგობა	R	ომი	ომი	
კუთრი წინააღმდეგობა	ρ	ომი მეტრი	ომი მ	ომი მმ^{2} მ$^{-1}$=10^{-6} ომი მ
ელექტრო ტევადობა	C	ფარადა	ფ	
მაგნიტური ინდუქცია	B	ტესლა	ტლ	
მაგნიტური ნაკადი	F	ვებერი	ვბ	
ინდუქტივობა	L	ჰენრი	ჰნ	
სინათლის ნაკადი	F	ლუმენი	ლმ	
განათებულობა	E	ლუქსი	ლქ	
ოპტიკური ძალა	D	დიოპტრი	დპტრ	მ$^{-1}$ ≡ დპტრ



მასის დიაპაზონი სამყაროში



ზოგიერთი ნივთიერების სიმკვრივე, კგ·მ$^{-3}$

ბირთვული ნივთიერება	**10^{17}**
მზის ცენტრალური ნაწილის ნივთიერება	10^{5}
დედამიწის ბირთვი	$12\ 10^{3}$
ტყვია	$11.3\ 10^{3}$
ალუმინი	$2.7\ 10^{3}$
წყალი	$1\ 10^{3}$
ჰაერი	1.3
ნივთიერება მაღალ (ლაბორატორიულ) ვაკუუმში	10^{-15}
ნივთიერება ვარსკლავთშორის სივრცეში	10^{-21}
ნივთიერება გალაქტიკათშორის სივრცეში	10^{-27}

ზოგიერთი ტიპური სიჩქარე, მ·წმ$^{-1}$

თმა ადამიანის თავზე	$5\ 10^{-9}$
სწრაფად მოძრავი მყინვარი	$3\ 10^{-6}$
მაჯის საათის წამების ისრის ბოლო	10^{-3}
მორბენალი	10
სარბოლო ავტომანქანა	70
ბგერა ჰაერში	330
რეაქტიული თვითმფრინავი	$2\ 10^{3}$
დედამიწა ორბიტაზე	$3\ 10^{4}$
ელექტრონი წყალბადის ატომში	$2.2\ 10^{6}$
სინათლე სიცარიელეში	$3\ 10^{8}$

Appendix II. გამოყენებული ლიტერატურა

1. **ა.გიგინეიშვილი, გ.კუკულაძე ზოგადი ფიზიკა. I ტომი.** “ტექნიკური უნივერსიტეტი”. 2011
2. **ა.გიგინეიშვილი, გ.კუკულაძე ზოგადი ფიზიკა. II ტომი.** “ტექნიკური უნივერსიტეტი”. 2012
3. **ა.გიგინეიშვილი, გ.კუკულაძე ზოგადი ფიზიკის კურსი. II ტომი.** “ტექნიკური უნივერსიტეტი”. 2009
4. **Duglas C. Giancoli General Physics.** Prentice-Hall. Inc. 1984
5. **Д.В.Сивухин Общий курс физики. Том I-V.** МФТИ. 2005
6. **ლ.გლურჯიძე, ი.პაპავა ფიზიკა.** ინტელექტი. 2014
7. **П.Н.Пахлов Антиматерия** (Цикл лекций). ИТЭФ. 2013-2015
8. **Werner Heisenberg Physics and Philosophy: The Revolution in Modern Science.** Harper Perennial Modern Classics. 2007
9. **Michio Kaku Parallel Words.** Anchor. 2006
10. **Steven Weinberg Dreams of a Final Theory.** Random House, Inc. 1993
11. **Edward de Bono Serious Creativity.** Harper Collins Publishers. 1997
12. **Tony Buzan** with **Barry Buzan The Mind Map Book.** BBC Books. 2000