

თანამედროვე ფიზიკის საკვანძო ექსპერიმენტები

დიდი აღმოჩენები ყოველთვის წარმოადგენდა საზოგადოების განსაკუთრებული და საყოველთაო ინტერესის საგანს. იგივე შეიძლება ითქვას ცერნში დიდ ადრონულ კოლაიდერებზე მიმდინარე ექსპერიმენტებთან მიმართებით. მედიაში ფართოდ იყო გაშუქებული ცერნში დაგეგმილი ექსპერიმენტები და მოლოდინები. განსაკუთრებულ ინტერესს იმსახურებდა ჟურნალისტების მიერ „ღვთიურ ნაწილაკად“ მონათლული ჰიპოთეტური „ჰიგსის ბოზონი“, რომლის კანდიდატი დამზერილ იქნა კიდევ ცერნში ორ ერთმანეთის დამოუკიდებლად მიმდინარე ექსპერიმენტში. ფიზიკოსთა ღრმა რწმენით ეს სწორედ ის „ღვთიურ ნაწილაკია“, თუმცა საბოლოო, დაზუსტებული დასტური ჯერ კიდევ ასევე ვთქვათ გზაშია (მიუხედავად იმისა, რომ კ.ჰიგსს და ფ. ენგლერტს, როგორც სუბატომური ნაწილაკების მასის წარმოქმნის მექანიზმის აღმოჩენის ავტორებს, 2013 წელს მიენიჭათ ნობელის პრემია).

მეცხრამეტე საუკუნის დასასრული და მეოცე საუკუნის დასაწყისი იყო მნიშვნელოვანი აღმოჩენების პერიოდი. ამ დროს მოღვაწე მთელი რიგი ფიზიკოსების დაუშრეტელი ფანტაზიის და დაუღალავი შრომის შედეგად შეიქმნა თვალთ უხილავი სამყაროს - ატომების და სუბატომების - ულამაზესი, მწყობრი თეორია, რომელიც დღეს კვანტური თეორიის სახელით არის ცნობილი. ამ მიმართულებით ინტენსიური თეორიული და ექსპერიმენტული კვლევა დღესაც მიმდინარეობს. მისი მასშტაბი დიდი ხანია გაცდა ერთეული სახელმწიფოების ფარგლებს. თეორიული იდეები მოითხოვენ უცილო დადასტურებას ექსპერიმენტების გზით, რაც დაკავშირებულია უზარმაზარ ფინანსურ და ადამიანურ რესურსებთან და ერთ სახელმწიფოს არ ხელეწიფება. ცერნი წარმოადგენს სწორედ ევროპის სახელმწიფოების გაერთიანებას, სადაც შეკრებილია სამეცნიერო, საინჟინრო-ტექნიკური და საინფორმაციო-ტექნოლოგიური პოტენციალი სხვადასხვა ქვეყნებიდან (მინდა ხაზი გაუსვა ცერნში მიმდინარე პროცესებში ქართველი მეცნიერების აქტიურ მონაწილეობას, რომელსაც სათავე მეოცე საუკუნის სამოციან წლებში დაედო). ამდენად ამ ცენტრის წვლილი და მნიშვნელობა ძალიან დიდია სამყაროს შესწავლის რთულ და ჯერ კიდევ დაუსრულებელ გზაზე¹ (მკითხველს შევახსენებ, რომ ქსელური კავშირის იდეა სწორედ ცერნში შეიქმნა და სწორედ ცერნია სამშობლო თანამედროვე ინტერნეტის, რომელიც ასე ღრმად არის შესული თვითეული ჩვენთაგანის ცხოვრებაში).

¹ საერთაშორისო კვლევით დაწესებულებას წარმოადგენს აგრეთვე დუბნის ბირთვული კვლევის გაერთიანებული ინსტიტუტი (რუსეთი), რომელიც შეიქმნა როგორც სოციალისტური ბანაკის საერთაშორისო ცენტრი და რომელმაც დიდი წვლილი შეიტანა სუბატომური ფიზიკის შესწავლის საქმეში. ამ მიმართულებით არ შეიძლება არ აღინიშნოს ცალკეულ ქვეყნებში შექმნილი კვლევითი ინსტიტუტები (სადაც სხვადასხვა დროს აგებული იქნა სხვადასხვა სიმძლავრის ამაჩქარებლები) როგორცაა მაგალითად კვლევითი ცენტრები ბრუკჰავენში, ბატავიაში, ლოს-ალამოსში, სტანფორდში (აშშ), პროტვინოში, ნოვოსიბირსკში (რუსეთი), ჰამბურგში (გერმანია) და ა.შ., სადაც ათეული წლებია ტარდება კვლევები და რომლებშიც მონაწილეობას ღებულობენ არა მარტო ადგილობრივი მეცნიერები (მათ შორის ქართველი მეცნიერებიც).

გამომდინარე ამ საყოველთაო ინტერესიდან გაჩნდა აზრი მკითხველს შევთავაზოთ წერილების ციკლი იმ ძირითადი იდეების და ექსპერიმენტების შესახებ, რომლებმაც ფიზიკოსები მიიყვანეს თეორიამდე, რასაც თანამედროვე ფიზიკა ეწოდება. ეს არის პოსტნიუტონისეული თეორია - კვანტური თეორია, რომელიც შისწავლის მიკროსამყაროს სტრუქტურას, მათში მიმდინარე პროცესებს, პროცესებს მაღალ სიჩქარეებსა და ენერგიებზე, რაც სცდება კლასიკური ფიზიკის ფარგლებს.

ელექტრონის აღმოჩენა

წინამდებარე წერილში მკითხველს ვთავაზობთ ელექტრონის აღმოჩენის ისტორიას. მეცხრამეტე საუკუნის ბოლომდე გაბატონებული იყო აზრი, რომ ატომები წარმოადგენდნენ ნივთიერების შემადგენელ უმცირეს ნაწილაკებს. ჯ. ჯ. ტომსონი იყო პირველი მეცნიერი, რომელიც მის მიერ ჩატარებული ექსპერიმენტების საფუძველზე მივიდა დასკვნამდე, რომ ატომი არ არის ნივთიერების შემადგენელი უმცირესი ნაწილაკი და რომ თვით ატომი შეიცავდა მასზე ათასჯერ და უფრო მეტად მსუბუქ ნაწილაკს, რომელსაც შემდგომ ელექტრონი ეწოდა. ტომსონმა თავის ცნობილი ექსპერიმენტები ჩაატარა კათოდურ სხივებზე. ვიდრე ჯ. ჯ. ტომსონის ექსპერიმენტებს აღვწერდეთ, საჭიროდ მიგვაჩნია მოკლედ მიმოვიხილოთ კათოდური მილაკის შექმნის ისტორია, რადგან მის გარეშე ჯ. ჯ. ტომსონი ვერ მოახერხებდა თავის შედეგების მიღებას.

კათოდური მილაკი წარმოადგენს მინის მილს, რომლიდანაც ამოტუმბულია ჰაერი. მასში ჩარჩილულია ორი ელექტროდი, რომელთაგან ერთი მიერთებულია დენის წყაროს დადებით პოლუსთან, ხოლო მეორე უარყოფითთან (ანოდი და კათოდი). უარყოფითი პოლუსთან მიერთებული ლითონის გამტარიდან ამოფრქვეულ ელექტრონების ნაკადს ეწოდება კათოდური სხივი.

კათოდური მილაკის შექმნა შესაძლებელი გახდა მას შემდეგ, რაც გამოგონებულ იქნა ვაკუუმური ტუმბო (ოტო ვან გერიკე, 1654 წ.). ამ დროიდან მოყოლებული მეცნიერებმა წამოიწყეს ცდები გაიშვიათებულ ჰაერში ელექტრული მოვლენების შესასწავლად. შემჩნეულ იქნა, რომ ელექტრული ნაპერწკალი გაიშვიათებულ ჰაერში უფრო დიდ მანძილს გადიოდა, ვიდრე ნორმალური ატმოსფერული წნევის პირობებში. დროთა განმავლობაში ვაკუუმური ტუმბოს სიმძლავრე იზრდებოდა და შესაბამისად ელექტრული ეფექტი უფრო შესამჩნევი ხდებოდა. მ.ფარადეი იყო პირველი მეცნიერი, რომელმაც გაიშვიათებული ჰაერით შევსებულ მილაკში შენიშნა (1838წ.) სინათლის რკალი კათოდსა და ანოდს შორის. გერმანელმა ფიზიკოსმა ჰ. გაისლერმა მილაკში 10^{-3} ატმ ტოლი წნევის დროს მილაკში დაინახა არა რკალი კათოდსა და ანოდს შორის, არამედ ნათება, რომელმაც მილაკი შეავსო. გაისლერის მილაკი მაგნიტურ ველში მოათავსა მისმა კოლეგამ გერმანელმა ფიზიკოსმა ი.პლიუკერმა. მან შენიშნა, რომ წარნოქმნილი ნათება გადაიხარა მილაკის კედლისკენ. ეს კი იმის ნიშანი იყო, რომ მნათი სვეტი შეიცავდა დამუხტულ ნაწილაკებს. თუმცა ეს ჯერ კიდევ არ იყო კათოდური სხივი. მისი მიღება შესაძლებელი გახდა მილაკში ჰაერის შემდგომმა

გაიშვიათებამ. 1870 წელს წელს ინგლისელმა მეცნიერმა უ. კრუკსმა მოახერხა ჰაერის გაიშვიათება 10^{-6} ატმ-დე. მან მილაკში შენიშნა ბნელი სვეტი კათოდიდან თვით ანოდამდე, ხოლო ანოდთან მილაკის კედლების ნათება. ეს უკვე კათოდური სხივი იყო. კედლის ნათება შეიძლებოდა გამოეწვია დამუხტული ნაწილაკების დაჯახებას. უ. კრუკსმა გამოთქვა მოსაზრება, რომ კათოდური სხივები შეიცავდნენ უარყოფით ნაწილაკებს, რომლებიც ამოფრქვეულ იქნენ კათოდიდან. ამ მოსაზრებით მან ეჭვი შეიტანა იმ დროს საყოველთაოდ გაბატონებულ დალტონის მოსაზრებაში ატომის, როგორც ნივთიერების შემადგენელი უმცირესი ნაწილაკის, შესახებ. ამ ნაწილაკებს მოგვიანებით ირლანდიელმა ფიზიკოსმა ჯ. სტოუნიმ ელექტრონი უწოდა. (ასეთი თამამი მოსაზრება მიუღებელი იყო იმ დროის ფიზიკოსების უმეტესი ნაწილისთვის. მაგალითისთვის მოვიყვანთ ცნობილი გერმანელ ფიზიკოსს ჰ. ჰერცს, რომელიც დარწმუნებული იყო, რომ კათოდური სხივები სხვა არაფერი იყო თუ არა ტალღები. ჰ. ჰერცმა ჩაატარა ცდა, რომელშიც მან დაინახა, რომ კათოდული სხივები განჰოლავდნენ ოქროს თხელ კილიტას. მან ჩათვალა, რომ კათოდური სხივები წარმოადგენდნენ ტალღებს. იმ დროისთვის დაუჯერებელი იყო, რომ ნაწილაკებს შეეძლოთ კილიტის განჰოლვა. ჰერცმა ამავე დროს ვერ მოახერხა დაემზირა კათოდური სხივების გადახრა ელექტრული ველის გავლენით. ამის მიზეზი კი იყო არასაკმარისად გაიშვიათებული ჰაერი მილაკში). შემდგომ ცდებში მინის კედლის ნათების გასაძლიერებლად გამოყენებულ იქნა ცინკის სულფიდი, რომლითაც იფარებოდა მილაკის



ტომსონი კავენდიშის ლაბორატორიაში²

კედელი. ამ ცდების ლოგიკური დაგვირგვინება იყო ჯ. ჯ. ტომსონის ცდები, რომლებშიც მან შეძლო დაედგინა კათოდური სხივის შემადგენელი ნაწილაკის მასა - ის აღმოჩნდა მიახლოებით 1800-ჯერ მსუბუქი, ვიდრე ყველაზე მსუბუქი ატომის წყალბადის ატომის მასა. ჯ. ჯ. ტომსონმა პირველმა გამოთქვა მოსაზრება, რომ ატომი არ არის ნივთიერების შემადგენელი უმცირესი ნაწილაკი.

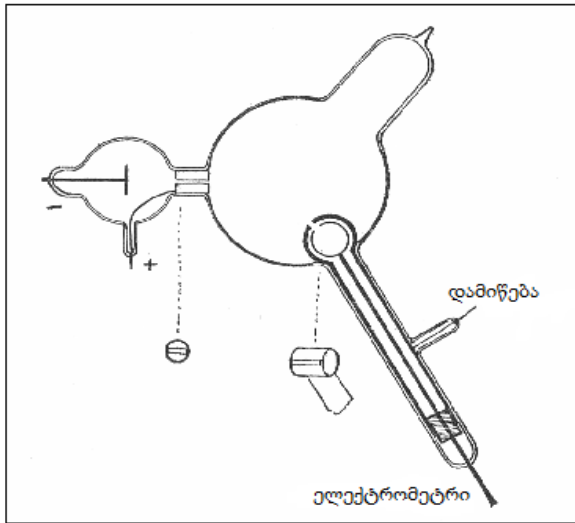
მამ ასე, 1897 წლის ოქტომბრის თვეში კემბრიჯის უნივერსიტეტის კავენდიშის პროფესორმა³ ჯოზეფ ჯონ ტომსონმა ჟურნალში *Philosophical Magazine*, ტ. 44

² <https://www.aip.org/history/electron/jjequip.htm>

³ კავენდიშის პროფესორი არის კემბრიჯის უნივერსიტეტის უფროსი პროფესორის წოდება ფიზიკაში, რომელიც დაფუძნებულ იქნა კავენდიშის ლაბორატორიასთან ერთად 1871 წლის 9 თებერვალს უნივერსიტეტის იმდროინდელი კანცლერის, დეკონშირის მეშვიდე ჰერცოგის უილიამ კავენდიშის ქველმოქმედების მეშვეობით. კავენდიშის სახელი მან ლაბორატორიას მიანიჭა მისი ნათესავის, მეთვრამეტე საუკუნის გამოჩენილი მეცნიერის ჰენრიხ კავენდიშის (მან პირველმა გაზომა ლაბორატორიაში ორ სხეულს შორის მიზიდულობის ძალა) საპატივცემულოდ.

გამოაქვეყნა სამეცნიერო სტატია სათაურით: სტატიაში აღწერილი იყო მის მიერ ჩატარებული სამი ექსპერიმენტის შედეგები, რომლებმაც ჯ. ჯ. ტომსონი მიიყვანა მისივე სიტყვებით რომ ვთქვათ შემდეგ აღმოჩენამდე: „...უარყოფითი მუხტის მატარებელი არის სხეული, რომელსაც მე ვუწოდებ კორპუსკული და რომლის მასა არის ნებისმიერი ცნობილი ელემენტის ატომის მასაზე ბევრჯერ ნაკლები და რომლის ბუნება არის ერთნაირი იმის მიუხედავად, თუ უარყოფითი ელექტრობის რომელი წყაროდან არის წარმოქმნილი.“⁴

ჯ. ჯ. ტომსონის პირველმა ცდამ იგი მიიყვანა დასკვნამდე, რომ კათოდიდან წამოსული სხივი უარყოფითად არის დამუხტული. მან გაიმეორა ჟ. პერინის ცდა მცირეოდენი მოდიფიკაციით. ჟ. პერინმა კათოდური სხივების პირდაპირ მოათავსა ორი ერთმანეთისგან იზოლირებული კოაქსიალური ცილინდრი, რომელთაგან ერთერთი იყო დამიწებული, ხოლო მეორე მიერთებული ელექტროსკოპთან. ცილინდრებს ჰქონდათ ხვრელი, რომელშიც გადიოდა კათოდური სხივი. ჟ. პერინმა აღმოაჩინა, რომ ელექტროსკოპი უარყოფითად იმუხტებოდა, თუ კათოდური სხივი გავიდოდა ხვრელში. როდესაც ჟ. პერინი კათოდურ სხივს მოათავსებდა მაგნიტურ ველში და სხივს გადახრიდა ისე, რომ იგი აღარ გადიოდა ხვრელში, მაშინ ელექტროსკოპი არ იმუხტებოდა. ამ ცდის საფუძველზე პერინმა დაასკვნა, რომ კათოდური სხივი უარყოფითი მუხტის მატარებელი იყო. თუმცა მეცნიერთა დიდ ნაწილი, რომელთაც სჯეროდათ ეთერის არსებობა, ბოლომდე არ იზიარებდა ამ დასკვნას.



ნახ. 1

ისინი აღიარებდნენ, რომ კათოდიდან გამოიტყორცნებოდა უარყოფითი მუხტის მატარებელი ნაწილაკები, მაგრამ როგორც ჯ. ჯ. ტომსონმა თქვა „მათ არ სჯეროდათ, რომ უარყოფითი მუხტს უფრო მეტი ჰქონდა საერთო კათოდურ სხივებთან, ვიდრე თოფიდან ნასროლს ტყვიის ბურთულას ნათებასთან, რომელიც თოფის გასროლის დროს წარმოიქმნება.“⁵ ჯ. ჯ. ტომსონმა ორი კოაქსიალური ცილინდრი მოათავსა არა კათოდის მოპირდაპირედ, არამედ, ისე რომ მასში კათოდური სხივები მოხვედრილიყო მაგნიტურ ველში გავლის შემდეგ. ამ გზით მას უნდოდა კათოდური სხივიდან უარყოფითი

მუხტის მატარებელი სხეულების გამოყოფა, თუ მასში სხვა რამეც იყო. ნახ. 1⁶ წარმოადგენს ჯ. ჯ. ტომსონის მიერ დამზადებულ ხელსაწყოს. საერთო ხვრელის მქონე ორი კოაქსიალური

⁴ http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1906/thomson-lecture.pdf

⁵ J. J. Thomson, Cathode Rays; *Philosophical Magazine*, v. 44, 293 (1897).

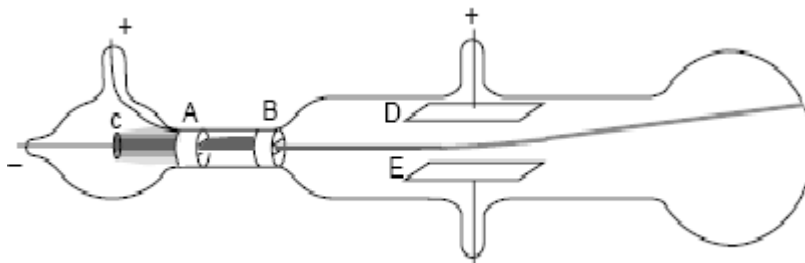
<http://web.lemoyne.edu/giunta/thomson1897.html>

⁶ <https://www.aip.org/history/electron/electro.htm>

ცილინდრი მოთავსებულია მილაკში, რომელიც მიერთებულია სხივურ მილაკთან. კათოდური სხივი გადის მილაკების შემაერთებელ ყელში

ჩადგმული ლითონის ხვრელში. ამდენად სხივი ვერ მოხვდებოდა ცილიდრებში, თუ მისი ტრანექტორია არ გამრუდდებოდა. ტომსონმა აღმოაჩინა საკმარისად დიდი უარყოფითი მუხტი, როდესაც მაგნიტურ ველში გადახრილი კათოდური სხივი გაატარა ცილინდრების ხვრელში. ელექტრომეტრი იმუხტებოდა უმნიშვნელოდ, თუ მაგნიტური ველი სხივს გადახრიდა იმდენად, რომ ის ხვრელში ვერ გაივლიდა. ამ შედეგმა ჯ. ჯ. ტომსონი მიიყვანა დასკვნამდე, რომ უარყოფითი მუხტი „დაყვებოდა“ კათოდურ სხივს და მაშასადამე კათოდური სხივი წარმოადგენდა უარყოფითად დამუხტული სხეულების ნაკადს.

მიუხედავად ამისა კიდევ არსებობდა მიზეზი, რის გამოც მოწინააღმდეგებს შეეძლოთ არ მიეღოთ ეს შედეგი, კერძოდ არ არსებობდა ცდა, რომელშიც სუსტი ელექტროსტატიკური ველი გამოიწვევდა კათოდური სხივის გადახრას. ძლიერი ელექტრული ველის შემთხვევაში სხივის გადახრა მათ მიერ აიხსნებოდა როგორც მაღალ ძაბვაზე მილაკში არსებული არსებული აირის განმუხტვის შედეგი. ჯ. ჯ. ტომსონმა მაქსიმალურად ამოტუმბა აირი მილაკიდან (ნახ. 3)⁷ და მხოლოდ ამის შემდეგ დაინახა, რომ C კათოდიდან A ანოდისკენ წამოსული კათოდური სხივი გადაიხრებოდა იმ ფირფიტისკენ, რომელიც მიერთებული იყო დენის წყაროს დადებით პოლუსთან (D ან E) სუსტი ელექტროსტატიკური ველის შემთხვე-



ნახ. 3

ვაშიც, რამაც განამტკიცა მისი რწმენა, რომ კათოდური სხივი შეიცავდა უარყოფითად დამუხტულ სხეულებს: „მე ვერ ვხედავ სხვას ვერაფერს გარდა შემდეგი დასკვნისა: ეს არის უარყოფითი მუხტის მატარებელი ნივთიერების ნაწილაკი. იბადება კითხვა, რა არის ეს? ატომი, მოლეკულა თუ ნივთიერება უფრო დანაწევრებულ მდგომარეობაში?“⁵ ამ კითხვაზე პასუხის გასაცემად ჯ. ჯ. ტომსონმა გადაწყვიტა ცდით დაედგინა ამ ნაწილაკის მასის მის მუხტთან ფარდობის სიდიდე. ამისთვის მან გამოიყენა ორი ერთმანეთისგან განსხვავებული მეთოდი. ვთქვათ კათოდურ სხივის ნებისმიერ განივკვეთში ერთ წამში გადის N რაოდენობის დამუხტული ნაწილაკი, რომლის მასა და მუხტი შესაბამისად არის m და q . მაშინ სრული მუხტი, რომელიც შეიძლება გაიზომოს ელექტრომეტრით იქნება $Q = qN$. თუ ნაწილაკები ეჯახებიან რომელიმე მყარ ნივთიერებას, რომლის მასა და კუთრი

⁷ http://www.vias.org/physics/bk4_02_06.html

სითბოტევადობა ცნობილია, მაშინ დაჯახებით გამოწვეული ტემპერატურული ცვლილების გაზომვით შეიძლება გაიზომოს ნაწილაკის კინეტიკური ენერგია. თუ მივიღებთ დაშვებას, რომ დაჯახებისას ნაწილაკების კინეტიკური ენერგია მთლიანად იხარჯება მყარი ნივთიერების გათბობაზე, მაშინ

$$\frac{Nmv^2}{2} = W,$$

სადაც v არის ნაწილაკის სიჩქარე, ხოლო W დაჯახების შედეგად მყარი ნივთიერებისთვის გადაცემული სითბოს რაოდენობა. მეორეს მხრივ მაგნიტურ ველში მის მართობულად სიჩქარით მოძრავი დამუხტული ნაწილაკისთვის

$$\frac{mv}{R} = qB,$$

სადაც B არის მაგნიტური ველის ინდუქცია, ხოლო R წრეწირის რადიუსი, რომელზე მოძრაობს დამუხტული ნაწილაკი მაგნიტური ველის გავლენით. ამ ორი განტოლებიდან შესაძლებელია განისზღვროს v და m/q , კერძოდ

$$v = \frac{2W}{qBR}, \quad \frac{m}{q} = \frac{2QB^2R^2}{2W}.$$

ჯ. ჯ. ტომსონმა ცდით გაზომა სიდიდეები Q , B , R , W შემდეგნაირად. ნახ. 3-ზე მოცემულ მილაკში D და E ფირფიტების ნაცვლად მილაკის ბოლოში მოათავსა ორი ერთმანეთისგან იზოლირებული კოაქსიალური ცილინდრი საერთო ღრიჭოთი, რომელთაგან ერთი მიუერთა ელექტრომეტრს(შიდა), ხოლო მეორე დაამიწა. კათოდური სხივები მოხვდებოდნენ რა შიდა ცილინდრზე მუხტავდნენ ელექტრომეტრს, რომელიც ზომავდა მუხტს. ამავე დროს გარე და შიდა ცილინდრებს შორის ჯ. ჯ. ტომსონმა მოათავსა რკინის და სპილენძის თხელი ზოლებისგან დამზადებული თერმო წყვილი, მიერთებული შიდა ცილინდრთან. თერმოწყვილის მეორე ბოლო გადიოდა მილაკის კედელში და უერთდებოდა გალვანომეტრს. ამ გზით ტომსონმა მოახერხა კათოდური სხივის დაჯახებისას თერმოწყვილის ფირფიტებისთვის გადაცემული სითბოს რაოდენობის გაზომვა (გალვანომეტრის ჩვენების დახმარებით). ცალკე მილაკში, რომელიც მოთავსებული იყო ჰელმჰოლცის ორ პარალელურ კოჭას შორის, ჯ. ჯ. ტომსონმა მოახერხა გაეზომა იმ ტრაექტორიის რადიუსი, რომელზეც მოძრაობდა მაგნიტური ველის გავლენით კათოდური სხივის დამუხტული ნაწილაკი. ჩატარებული ცდების შედეგად მან მიიღო ნაწილაკის მასის და მუხტის ფარდობის რიცხვითი მნიშვნელობა.

ჯ. ჯ. ტომსონის მეორე მეთოდი დაფუძნებული იყო ფაქტზე, რომ ელექტრული ან/და მაგნიტური ველები ამრუდებდნენ ველში მოხვედრილი ნაწილაკის ტრაექტორიას. თუ ველის მართობულად v სიჩქარით მოძრავი დამუხტული ნაწილაკი გაივლის ელექტრულ ველში (ორ პარალელურ საპირისპირო ნიშნით დამუხტულ ფირფიტებს შორის), მაშინ

დამუხტული ნაწილაკის ტრაექტორია გადაიხრება ნაწილაკის მუხტის საპირისპირო ნიშნის მუხტის მქონე ფირფიტისკენ. ამ ნაწილაკის მოძრაობა აღიწერება ჰორიზონტისადმი კუთხით გასროლილი სხეულის მოძრაობის ანალოგიურად დედამიწის მიზიდულობის გავლენით: ფირფიტების პარალელური მიმართულებით ნაწილაკი ასრულებს წრფივ და თანაბარ მოძრაობას, ხოლო მართობული მიმართულებით წრფივ თანაბარაჩქარებულ მოძრაობას მუდმივი ძალის გავლენით. თუ ფირფიტის სიგრძე (მანძილი გავლილი ნაწილაკის მიერ ელექტრულ ველში) არის l , ხოლო ფირფიტების მართობულად გავლილი მანძილი - h , მაშინ

$$l = vt, \quad h = \frac{at^2}{2} = \frac{qEt^2}{2m}, \quad (1)$$

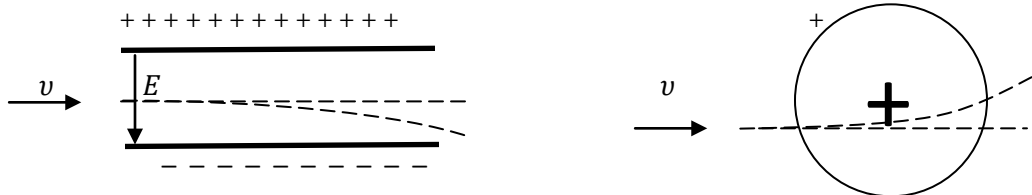
სადაც E არის ელექტრული ველის დამაბულობა. თუ ელექტრულ ველთან ერთად შემოვიტანთ მაგნიტურ ველს ისე, რომ მის მიერ მუხტზე მოქმედი ძალა გააბათილებს ელექტრული ველი მხრიდან მოქმედ ძალას (ნაწილაკის ტრაექტორიის მაგნიტური ველით გამოწვეული გადახრის კუთხე გაუტოლდება სიდიდით და იქნება საპირისპირო), მაშინ ნაწილაკი გააგრძელებს წრფივ თანაბარ მოძრაობას. მაგნიტური ველი დამუხტულ ნაწილაკზე მოქმედებს ძალით (სიჩქარის მართობულად მოქმედი მაგნიტური ველი), რომელიც ტოლია

$$F = qvB. \quad (2)$$

თუ ეს ძალა უტოლდება ელექტრული ველის მხრიდან მოქმედ ძალას, მაშინ შეიძლება განისაზღვროს, ამ ველებში მოძრავი ნაწილაკის სიჩქარე:

$$v = \frac{E}{B}$$

ე.ი. ნაწილაკის სიჩქარის გასაგებად საჭიროა ელექტრული ველის დამაბულობის და მაგნიტურ ველის ინდუქციის გაზომვა. ქვემოთ მოყვანილ ნახ. 4-ზე ნაჩვენებია დადებითი მუხტის ტრაექტორიის გადახრა ა) ელექტრულ და ბ) მაგნიტურ ველებში. მაგნიტური ველი მიმართულია სიბრტყისკენ მის მართობულად ისე, რომ მისი მხრიდან მოქმედი ძალა ელექტრული ველის მხრიდან მოქმედი ძალის საპირისპიროდ არის მიმართული.



ნახ. 4 ა) მუხტი ელექტრულ ველში

ბ) მუხტი მაგნიტურ ველში

ამ გზით ჯ. ჯ. ტომსონმა მოახერხა კათოდიდან ამოფრქვეული დამუხტული ნაწილაკების სიჩქარის გაზომვა.

სიჩქარის გაზომვის შემდეგ შესაძლებელი გახდა კათოდური სხივის შემადგენელი ნაწი-

ლაკების მასის და მისი მუხტის ფარდობის გაზომვა. ელექტრულ ველში მოძრავი დამუხტული ნაწილაკის ელექტრული ველიდან გამოსვლის θ კუთხე ტოლია სიჩქარის ვერტიკალური და ჰორიზონტალური მდგენელების ფარდობის (უფრო ზუსტად კუთხის ტანგენსი, რომელიც კუთხის სიმცირის გამო შეიძლება შეიცვალოს კუთხით). (1) და (2) ფორმულებიდან მარტივი გარდაქმნების შემდეგ m/q სიდიდისთვის მივიღებთ შემდეგ გამოსახულებას:

$$\frac{m}{q} = \frac{B^2 l^2}{h \theta E}$$

ჯ. ჯ. ტომსონმა თავის ექსპერიმენტებში გამოიყენა სხვადასხვა აირები, სხვადასხვა ნითიერებები კათოდის დასამზადებლად და დარწმუნდა, რომ ფარდობის სიდიდე ცდომილების ფარგლებში არ იცვლებოდა. ეს კი მიუთითებდა ამ ფარდობის უნივერსალურ ხასიათზე. ჯ. ჯ. ტომსონის მიერ მიღებული რიცხვითი მნიშვნელობა დღეს საყოველთაოდ მიღებული კუთრი მუხტის სიდიდისთვის ტოლია (და არა მასის მუხტთან ფარდობისთვის)

$$\frac{q}{m} = 1.76 \cdot 10^{11} \text{ კ/კგ.}$$

ამ მნიშვნელობის ახსნა შეიძლებოდა ორგვარად: შეიძლება ნაწილაკის მუხტის სიდიდე იყოს ძალიან დიდი, ან მისი მასა ძალიან მცირე. ჯ. ჯ. ტომსონმა ყურადღება მიაქცია ფაქტს, რომ წყალბადის იონიზირებული ატომის კუთრი მუხტის სიდიდე დაახლოებით 1800-ჯერ ნაკლებია კათოდური სხივის შემადგენელი ნაწილაკის კუთრი მუხტის სიდიდეზე. ამავე



დროს მან იცოდა, რომ ატომის დადებითი მუხტი ტოლი იყო ყოველივე ამის საფუძველზე ჯ. ჯ. ტომსონმა დაასკვნა, რომ ნითიერების ატომი არ არის განუყოფელი და რომ მისი შემადგენელია ნაწილაკი, რომელსაც მან უწოდა კორპუსკული და რომლის მასა წყალბადის ატომის მასაზე დაახლოებით 1800-ჯერ ნაკლებია. როგორც აღვნიშნეთ მოგვიანებით ამ ნაწილაკს ეწოდა ელექტრონი. და ბოლოს მკითხველის ყურადღება მიიწვიოს სურათს,

ჯ. ჯ. ტომსონის კათოდური სხივების მილაკი⁸

⁸ http://www-outreach.phy.cam.ac.uk/camphy/museum/area2/images/cabinet3_2.jpg

რომელზეც გამოსახულია კათოდური სხივების მილაკი. ეს ის მილაკია, რომელიც ტომსონმა გამოიყენა ცდებში.

როგორც ცნობილია ჯ. ჯ. ტომსონმა მის მიერ ჩატარებული ცდების საფუძველზე შეიმუშავა ატომის, იმ დრომდე ნივთიერების უმცირესი შემადგენელი ნაწილაკის ახალი მოდელი, რომლის თანახმად ატომის მთელ მოცულობაში თანაბრად არის განაწილებული დადებითი მუხტი და ელექტრონები გაბნეულია მასში ისე, რომ ატომი ელექტრულად ნეიტრალურია. ეს მოდელი სამწუხაროდ არ გამოდგა სწორი და ეს დადასტურდა მოგვიანებით ე. რეზერფორდის ცდებში.

ელექტრონის მუხტის განსაზღვრა

ჯ. ჯ. ტომსონს ელექტრონის აღმოჩენისთვის 1906 წელს მიენიჭა ნობელის პრემია , ხოლო 1913 წელს ამერიკელმა მეცნიერმა რობერტ ა. მილიკენმა (იხ. ფოტო⁹) გამოაქვეყნა სამეცნიერო სტატია, რომელიც მიემდვნა ექსპერიმენტულ კვლევას ელექტრონის მუხტის სიდიდის დასადგენად. ეს ექსპერიმენტი ცნობილია, რომელიც მან ჩატარა მის მოწაფესთან ჰარვეი ფლეტჩერთან ერთად „ზეთის წვეთის“ ექსპერიმენტის სახელით. ცხადია, შეუძლებელი იყო ატომის შემადგენელი ელექტრონის მუხტის პირდაპირი გაზომვა. რ. მილიკენმა და ჰ. ფლეტჩერმა შეიმუშვეს მეთოდი, რომელმაც მათ საშუალება მისცა დაესკვნათ, რომ უარყოფითი მუხტი არის ელემენტარული მუხტის, ელექტრონის მუხტის მთელი რიცხვის ჯერადი და ცდით განესაზღვრათ მისი რიცხვითი მნიშვნელობა. ექსპერიმენტის იდეა მდგომარეობდა შემდეგში: საფრქვევი ხელსაწყოს მეშვეობით მათ ზეთის ძალიან პატარა წვეთები შეაფრქვიეს ხელსაწყოში, საიდანაც ისინი მოხვდნენ ფირფიტებს შორის, რომლებზეც



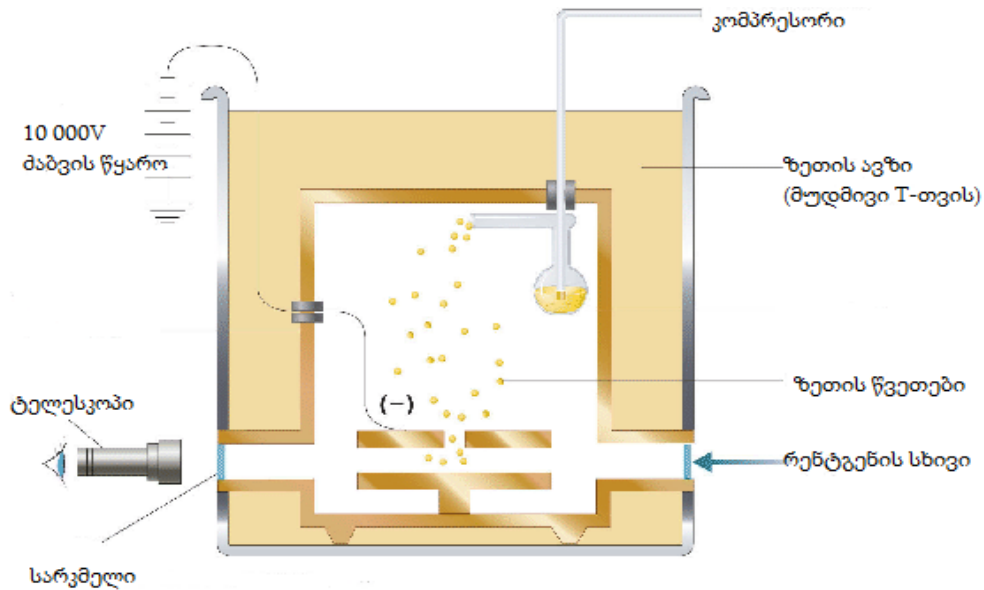
მოდებული იყო ძაბვა. ელექტრული ველში ცვლილებით მათ მოახერხეს ჰაერში ასეთი წვეთების შეწონილ მდგომარეობაში გაჩერება. ამ მეთოდის გამოყენებით შესაძლებელი გახდა ელექტრონის მუხტის რიცხვითი მნიშვნელობის დადგენა. ხელსაწყო, რომელიც მათ გამოიყენეს გარეგნულად ასე გამოიყურება¹⁰. ხელსაწყოს შიგნით ჩადგმულია ორი პარალელური ბრტყელი ფირფიტა, რომლებიც დამუხტულია საპირისპირო ნიშნის მუხტით. ხელსაწყოს კედელში ამ ზედა ფირფიტის ზემოთ ჩადგმულია ზეთის საფრქვევი მოწყობილობა, რომლის მეშვეობით ხდება ზეთის



⁹ <http://en.wikipedia.org/wiki/File:Millikan.jpg>

¹⁰ http://en.wikipedia.org/wiki/File:Millikan%E2%80%99s_oil-drop_apparatus_1.jpg

წვეთების შეფრქვევა. ფირფიტაში გაკეთებულია მცირე ხვრელი და ამგვარად ელექტრულ ველში მოხვდება ზეთის ძალიან პატარა წვეთები, რომლებიც მოძრაობენ ქვევით. შეფრქვევის დროს ზეთის წვეთების ნაწილი იმუხტება. გარდა ამისა გამოყენებული იქნა მაიონიზებელი გამოსხივება, რომელიც ზეთის წვეთებს ანიჭებდა მუხტს. ასეთი დამუხტული ზეთის წვეთების მოძრაობდნენ ორი ურთიერთსაპირისპირო ძალის - მიზიდულობის და ელექტროსტატიკური ძალის გავლენით. ელექტრული ველის დამაბულობის ცვლილებით შესაძლებელი იყო ზეთის წვეთის შეწონილ მდგომარეობაში გაჩერება ფირფიტებს შორის. ამდროს ელექტროსტატიკური ძალა გაწონასწორებულია მიზიდულობის ძალით $mg = qE$. აქ q არის ზეთის წვეთის მუხტი, m მისი მასა, ხოლო E ფირფიტებს შორის ელექტრული ველის დამაბულობა. ხელსაწყო შიგნით იყო განათებული, ხოლო მის კედელში ჩადგმული იყო ტელესკოპი, რომლითაც შესაძლებელი იყო ზეთის წვეთებზე დაკვირვების განხორციელება. ხელსაწყოს სქემა მოცემულია ქვემოთ:¹¹



ამრიგად, თუ ზეთის წვეთის მასა ცნობილია, შესაძლებელია ზეთის წვეთის მუხტის გაზომვა. წარმოვიდგინოთ, რომ მოხერხდა ერთი წვეთის გამოყოფა წონასწორობაში. ამის შემდეგ ცდა გაგრძელდა ამ წვეთზე. მხედველობაში იქნა მიღებული, რომ წვეთი ვარდნის დროს მიზიდულობის ძალის გავლენით სწრაფად აღწევს ზღვრულ სიჩქარეს, რომელიც სტოქსის კანონით გამოითვლება: $F_{\text{წ}} = 6\pi r\sigma v_1$, აქ $F_{\text{წ}}$ არის ჰაერის წინაღობის ძალა, r წვეთის რადიუსი, σ ჰაერის სიბლანტე და v_1 წვეთის სიჩქარე ქვევით მოძრაობის დროს. ძაბვის ცვლილებით შეიძლება წვეთი ამოძრავდეს ზევით აჩქარებით და ამ შემთხვევაშიც მისი სიჩქარე მიაღწევს ზღვრულ მნიშვნელობას v_2 , რომელიც ანალოგიური ფორმულით გამოითვლება. სიჩქარეები ცდების დროს გაზომილი იქნა. ეს მანიპულაციები ჩატარებულ იქნა სხვადასხვა ზომის წვეთებზე, რომელთაც გააჩნდათ სხვადასხვა მუხტი. გაზომილ იქნა

¹¹ http://www.nyu.edu/classes/tuckerman/adv.chem/lectures/lecture_3/node1.html

აგრეთვე წვეთების რადიუსებიც. მკითხველს არ გადავტვირთავთ გამოთვლებით და მოვიყვანთ საბოლოო ფორმულას, რომლის მიხედვით მოხდა ელექტრონის მუხტის e სიდიდის დადგენა. ნებისმიერი წვეთის მუხტი q_n აღმოჩნდა ამ მინიმალური მუხტის პროპორციული. ფორმულას აქვს შემდეგი სახე:¹²

$$e = \frac{q_1}{\left(1 + A \frac{l}{r}\right)^{3/2}}.$$

აქ q_1 არის წვეთების მუხტების უდიდესი საერთო გამყოფი, l არის მოლეკულის თავისუფალი განარბენი, ხოლო A მუდმივა, რომელიც განისაზღვრა ემპირიულად. ცდა ჩატარებულ იქნა სხვადასხვა სითხეებისთვის. შედეგი არ აღმოჩნდა დამოკიდებული სითხის გვარობაზე. ელექტრონის მუხტი (ტომსონის შედეგის გამოყენებით) აღმოჩნდა

$$e = 1,5924 \cdot 10^{-19} \text{კულონი.}$$

აქვე აღვნიშნავთ, რომ რ. მილიკენმა გამოიკვლია ფოტოექსტის მოვლენა და დაადასტურა ეინშტეინის თეორია. 1923 წელს რობერტ ა. მილიკენს მიენიჭა ნობელის პრემია გამორჩეული სამეცნიერო მოღვაწეობისთვის.

¹² R. A. Millikan, *On the elementary electrical charge and the Avogadro constant*, Physical Review, vol. II, Series II, 109, (1913); <http://www.aip.org/history/gap/PDF/millikan.pdf>