

თანამედროვე ფიზიკის საკვანძო ექსპერიმენტები

ავთანდილ შურღაია

დიდი აღმოჩენები ყოველთვის წარმოადგენდა საზოგადოების განსაკუთრებული და საყოველთაო ინტერესის საგანს. იგივე შეიძლება ითქვას ცერნში დიდ ადრონულ კოლაიდერებზე მიმდინარე ექსპერიმენტების შესახებაც. მედიაში ფართოდ გააშუქეს ცერნში დაგეგმილი ექსპერიმენტები და მოლოდინები მათ მიმართ. განსაკუთრებული ინტერესი გამოიწვია ჟურნალისტების მიერ „ღვთიურ ნაწილაკად“ მონათლულმა ჰიპოთეტურმა „ჰიგსის ბოზონმა“, რომლის კანდიდატი დამზერილ იქნა კიდევ ცერნში ორ ერთმანეთისგან დამოუკიდებლად მიმდინარე ექსპერიმენტში. ფიზიკოსთა ღრმა რწმენით, ეს სწორედ ის „ღვთიური ნაწილაკია“, თუმცა საბოლოო დასტური ჯერ კიდევ, ასე ვთქვათ, გზაშია (მიუხედავად იმისა, რომ პ. ჰიგსს და ფ. ენგლერტს, როგორც სუბატომური ნაწილაკების მასის წარმოქმნის მექანიზმის აღმოჩენის ავტორებს, 2013 წელს მიენიჭათ ნობელის პრემია).

მეცხრამეტე საუკუნის დასასრული და მეოცე საუკუნის დასაწყისი მნიშვნელოვანი აღმოჩენების პერიოდი იყო. ამ დროს მოღვაწე ფიზიკოსთა პლედის უშრეტი ფანტაზიისა და დაუღალავი შრომის შედეგად შეიქმნა თვალთ უხილავი სამყაროს - ატომებისა 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 გასცდა ცალკეულ სახელმწიფოთა ფარგლებს. თეორიული იდეები მოითხოვს უცილო დადასტურებას ექსპერიმენტების გზით, რაც უზარმაზარ ფინანსურ და ადამიანურ რესურსს მოითხოვს და ერთ ქვეყანას არ ხელეწიფება. ცერნი წარმოადგენს ევროპის სახელმწიფოთა გაერთიანებას, სადაც შეკრებილია სხვადასხვა ქვეყნის სამეცნიერო, საინჟინრო-ტექნიკური და საინფორმაციო-ტექნოლოგიური პოტენციალი (მინდა, ხაზი გავუსვა ცერნში მიმდინარე პროცესებში ქართველი მეცნიერების აქტიურ მონაწილეობას, რომელსაც სათავე მეოცე საუკუნის სამოციან წლებში დაედო). ამდენად, ძალიან დიდია ამ ცენტრის წვლილი და მნიშვნელობა სამყაროს შესწავლის რთულ და ჯერ კიდევ დაუსრულებელ გზაზე¹ (მკითხველს შევახსენებ, რომ ქსელური კავშირის იდეა სწორედ ცერნში შეიქმნა; ცერნია სამშობლო თანამედროვე ინტერნეტისა, რომელიც ასე ღრმად შემოიჭრა თითოეული ჩვენგანის ცხოვრებაში).

ამ საყოველთაო ინტერესიდან გამომდინარე, დაიბადა აზრი, მკითხველს შევთავაზოთ წერილების ციკლი იმ ძირითადი იდეებისა და ექსპერიმენტების შესახებ, რომლებმაც

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 მონაწილეობასღებულობენ არა მარტო ადგილობრივი მეცნიერები (მათ შორის ქართველი მეცნიერებიც).

ფიზიკოსები მიიყვანა იქამდე, რასაც თანამედროვე ფიზიკა ეწოდება. ეს არის პოსტნიუტონისეული თეორია - კვანტური თეორია, რომელიც შეისწავლის მიკროსამყაროს სტრუქტურას, მასში მიმდინარე პროცესებს, პროცესებს მაღალ სიჩქარეებსა და ენერგიებზე, რაც სცდება კლასიკური ფიზიკის ფარგლებს.

ელექტრონის აღმოჩენა

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

კათოდური მილაკი წარმოადგენს მინის მილს, რომლიდანაც ამოტუმბულია ჰაერი. მასში ჩარჩილულია ორი ელექტროდი, რომელთაგან ერთი დენის წყაროს დადებით პოლუსთან არის მიერთებული, ხოლო მეორე - უარყოფითთან (ანოდი და კათოდი). უარყოფით 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.). აქედან 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 ელექტრული ეფექტიც უფრო შესამჩნევი ხდებოდა. მ. ფარადეი იყო პირველი მეცნიერი, რომელმაც გაიშვიათებული ჰაერით შევსებულ მილაკში შეამჩნია სინათლის რკალი კათოდსა და ანოდს შორის (1838 წ.). 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 შეამჩნია, რომ წარმოქმნილი ნათება მილაკის კედლისკენ გადაიხარა, ეს კი იმის ნიშანი იყო, რომ მნათი სვეტი დამუხტულ ნაწილაკებს შეიცავდა. 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 შეამჩნია ბნელი სვეტი კათოდიდან თვით ანოდად, ხოლო ანოდთან - მილაკის კედლების ნათება. ეს უკვე კათოდური სხივი იყო. კედლის ნათება შეიძლებოდა გამოეწვია დამუხტული ნაწილაკების

დაჯახებას. უ. კრუკსმა გამოთქვა მოსაზრება, რომ კათოდური სხივები შეიცავდა უარყოფით ნაწილაკებს, რომლებიც ამოიფრქვა კათოდიდან. ამ მოსაზრებით მან ექვი შეიტანა იმ დროს საყოველთაოდ გაბატონებულ დალტონის მოსაზრებაში ატომის, როგორც ნივთიერების შამადგენელი უმცირესი ნაწილაკის, შესახებ. ამ ნაწილაკებს მოგვიანებით ირლანდიელმა ფიზიკოსმა ჯ. სტოუნიმ ელექტრონები უწოდა (ასეთი თამამი მოსაზრება მიუღებელი იყო იმ დროის ფიზიკოსთა უმეტესობისთვის. მაგალითად მოვიყვანთ ცნობილ გერმანელ ფიზიკოსს ჰ. ჰერცს, რომელიც დარწმუნებული გახლდათ, რომ კათოდური სხივები სხვა არაფერი იყო, თუ არა ტალღები. ჰ. ჰერცმა ჩაატარა ცდა, რომლის დროსაც მან დაინახა, რომ კათოდური სხივები განჭოლავდა ოქროს თხელ კილიტას. მან ჩათვალა, რომ კათოდური სხივები ტალღებს წარმოადგენდა. იმ დროისთვის დაუჯერებელი იყო, რომ ნაწილაკებს კილიტის განჭოლვა შეეძლოთ. ამავე დროს, ჰერცმა ვერ მოახერხა დაემზირა კათოდური სხივების გადახრა ელექტრული ველის გავლენით. ამის მიზეზი კი გახლდათ არასაკმარისად გაიშვიათებული ჰაერი მილაკში). შემდგომ ცდებში მინის კედლის ნათების გასაძლიერებლად გამოყენებულ იქნა თუთიის სულფიდი, რომლითაც იფარებოდა მილაკის კედელი. ამ ცდების ლოგიკური დაგვირგვინება იყო ჯ. ჯ. ტომსონის ცდები, რომლებითაც მან შეძლო დაედგინა კათოდური სხივის შემადგენელი ნაწილაკის მასა - ის აღმოჩნდა დაახლოებით 1800-ჯერ ნაკლები, ვიდრე ყველაზე მსუბუქი ატომის წყალბადის ატომის მასა. ჯ. ჯ. ტომსონმა პირველმა გამოთქვა მოსაზრება, რომ ატომი არ იყო ნივთიერების შემადგენელი უმცირესი ნაწილაკი.



ტომსონი კავენდიშის ლაბორატორიაში²

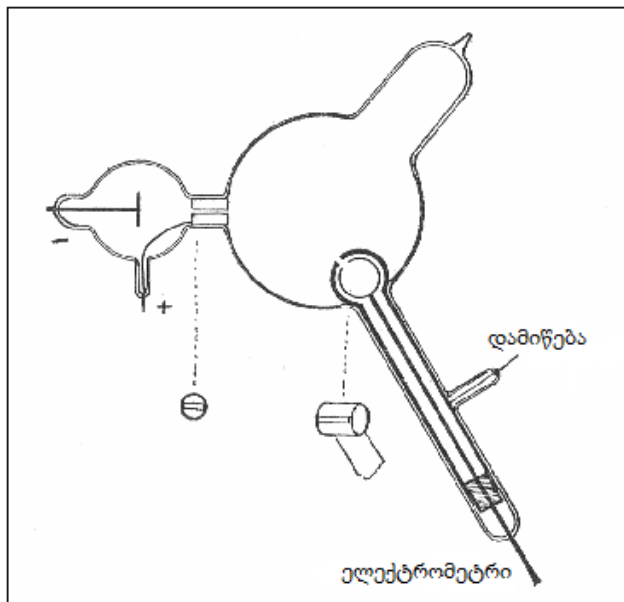
მაშ ასე, 1897 წლის ოქტომბერში კემბრიჯის უნივერსიტეტის კავენდიშის პროფესორმა³ ჯოზეფ ჯონ ტომსონმა ჟურნალ *Philosophical Magazine*-ში (ტ. 44) სამეცნიერო სტატია გამოაქვეყნა.

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, დევენშირის მეშვიდე ჰერცოგის უილიამ კავენდიშის ქველმოქმედების მეშვეობით. კავენდიშის სახელი მან ლაბორატორიას მიანიჭა თავისი ნათესავის, მეთვრამეტე საუკუნის გამოჩენილი

სტატიაში აღწერილი იყო მის მიერ ჩატარებული სამი ექსპერიმენტის შედეგები, რომლებმაც ჯ. ჯ. ტომსონი, მისივე სიტყვებით რომ ვთქვათ, შემდეგ აღმოჩენამდე მიიყვანა: „...უარყოფითი მუხტის მატარებელი არის სხეული, რომელსაც მე ვუწოდებ კორპუსკული, რომლის მასა ნებისმიერი ცნობილი ელემენტის ატომის მასაზე მრავალჯერ ნაკლებია და რომლის ბუნება ერთნაირია, განურჩევლად იმისა, უარყოფითი ელექტრობის რომელი წყაროდან არის წარმოქმნილი“⁴.

პირველმა ცდამ ჯ. ჯ. ტომსონი 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 ერთი იყო დამიწებული, ხოლო მეორე - მიერთებული ელექტროსკოპთან. ცილინდრებს ჰქონდათ ხვრელი, რომელშიც გადიოდა კათოდური სხივი. ჟ. პერონმა აღმოაჩინა, რომ თუ კათოდური სხივი გაივლიდა ხვრელში, ელექტროსკოპი უარყოფითად იმუხტებოდა. როდესაც ჟ. პერინი კათოდურ სხივს მოათავსებდა მაგნიტურ ველში და სხივს გადახრიდა ისე, რომ იგი აღარ გაივლიდა ხვრელში, 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. ისინი აღიარებდნენ, რომ კათოდიდან



ნახ. 1

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 ნასროლ ტყვიის ბურთულას - ნათებასთან, რომელიც თოფის გასროლის დროს წარმოიშობა“⁵. ჯ. ჯ. ტომსონმა ორი კოაქსიალური ცილინდრი მოათავსა არა კათოდის მოპირდაპირედ, არამედ ისე, რომ მათში კათოდური სხივები მოხვედრილიყო მაგნიტურ ველში გავლის შემდეგ. ამ გზით მას უნდოდა კათოდური სხივიდან უარყოფითი მუხტის მატარებელი სხეულების გამოყოფა, თუ მასში სხვა რამეც იყო. პირველ ნახატზე აღბეჭდილია ჯ. ჯ. ტომსონის მიერ

დამზადებული ხელსაწყო. საერთო ხვრელის მქონე ორი კოაქსიალური ცილინდრი მოათავსებულია მილაკში, რომელიც სხივურ მილაკთან არის მიერთებული. კათოდური სხივი

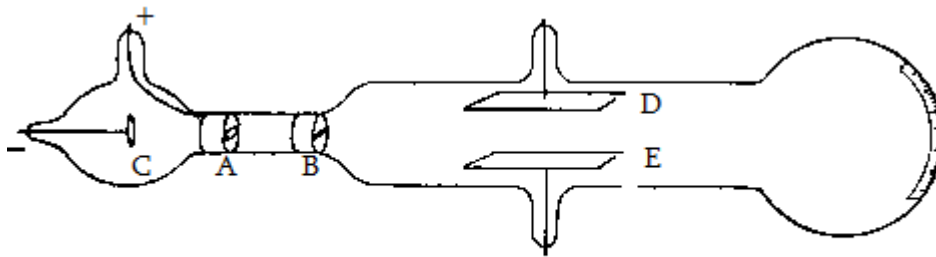
მეცნიერის ჰენრიხ კავენდიშის (მან პირველმა გაზომა ლაბორატორიაში ორ სხეულს შორის მიზიდულობის ძალა) პატივსაცემად.

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>

გაივლის მილაკების შემაერთებელ ყელში ჩადგმულ ლითონის ხვრელში. ამდენად, სხივი ვერ მოხვდებოდა ცილინდრებში, თუ მისი ტრაექტორია არ გამრუდდებოდა. ტომსონმა აღმოაჩინა საკმარისად დიდი უარყოფითი მუხტი, როდესაც მაგნიტურ ველში გადახრილი კათოდური სხივი ცილინდრების ხვრელში გაატარა. ელექტრომეტრი უმნიშვნელოდ იმუხტებოდა, თუ მაგნიტური ველი სხივს გადახრიდა იმდენად, რომ ის ხვრელში ვერ გაივლიდა. ამ შედეგმა ჯ. ჯ. ტომსონი მიიყვანა დასკვნამდე, რომ უარყოფითი მუხტი „დაჰყვებოდა“ კათოდურ სხივს და, მაშასადამე, კათოდური სხივი წარმოადგენდა უარყოფითად დამუხტულ სხეულების ნაკადს.



ნახ. 3

მიუხედავად ამისა, იყო სხვა მიზეზიც, რის გამოც მოწინააღმდეგეებს შესაძლოა არ მიეღოთ ეს შედეგი. კერძოდ, არ არსებობდა ცდა, რომელშიც სუსტი ელექტროსტატიკური ველი გამოიწვევდა კათოდური სხივის გადახრას. ძლიერი ელექტრული ველის შემთხვევაში სხივის გადახრას ისინი ხსნიდნენ როგორც მაღალ ძაბვაზე მილაკში არსებული აირის განმუხტვის შედეგს. ჯ. ჯ. ტომსონმა მაქსიმალურად ამოტუმბა აირი მილაკიდან (სურ. 3) და მხოლოდ ამის შემდეგ დაინახა, რომ C კათოდიდან A ანოდისკენ წამოსული კათოდური სხივი გადაიხრებოდა იმ ფირფიტისკენ, რომელიც მიერთებული იყო დენის წყაროს უარყოფით პოლუსთან (D ან E) სუსტი ელექტროსტატიკური ველის შემთხვევაშიც, რამაც მას განუმტკიცა რწმენა, რომ კათოდური სხივი შეიცავდა უარყოფითად დამუხტულ სხეულებს: „მე ვერაფერს ვხედავ, 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, კათოდური სხივის ნებისმიერ განივკვეთში ერთ წამში გაივლის N რაოდენობის დამუხტული ნაწილაკი, რომელთა 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 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. მეორე მხრივ, მაგნიტურ ველში მის მართობულად სიჩქარით მოძრავი დამუხტული ნაწილაკისთვის

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

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

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

ჯ. ჯ. ტომსონმა Q, B, R, W სიდიდეები ცდით შემდეგნაირად გაზომა: სურ. 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 შიდა ცილინდრზე მოხვედრისას მუხტავდნენ ელექტრომეტრს, რომელიც ზომავდა მუხტს. ამავე დროს გარე და შიდა ცილინდრებს შორის ჯ. ჯ. ტომსონმა მოათავსა რკინისა და სპილენძის თხელი ზოლებისგან დამზადებული თერმოწყვილი, მიერთებული შიდა ცილინდრთან. თერმოწყვილის მეორე ბოლო გაივლიდა 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 მასისა და მუხტის ფარდობის რიცხვითი მნიშვნელობა.

ჯ. ჯ. ტომსონის მეორე მეთოდი ეფუძნებოდა ფაქტს, რომ ელექტრული ან/და მაგნიტური ველები ამრუდებდა ველში მოხვედრილი ნაწილაკის ტრაექტორიას. თუ ველის მართობულად v სიჩქარით მოძრავი დამუხტული ნაწილაკი გაივლის ელექტრულ ველში (ორ პარალელურ საპირისპირო ნიშნით დამუხტულ ფირფიტას 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

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

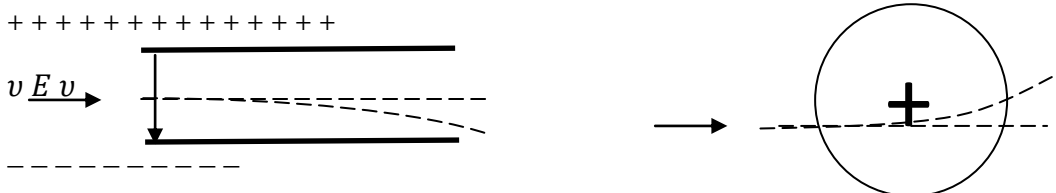
სადაც E არის ელექტრული ველის დამაბულობა. თუ ელექტრულ ველთან ერთად შემოვიტანთ მაგნიტურ ველს ისე, რომ მის მიერ მუხტზე მოქმედი ძალა გააბათილებს ელექტრული ველი მხრიდან მოქმედ ძალას (ნაწილაკის ტრაექტორიის მაგნიტური ველით გამოწვეული გადახრის კუთხე გაუტოლდება სიდიდით და იქნება საპირისპირო), მაშინ ნაწილაკი გააგრძელებს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

$$F = qvB. (2)$$

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 დამაბულობისა და მაგნიტური ველის ინდუქციის გაზომვა. სურ. 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.



სურ. 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 ნაწილაკების მასისა და მუხტის ფარდობის გაზომვაც. ელექტრულ ველში მოძრავი დამუხტული ნაწილაკის ელექტრული ველიდან გამოსვლის უკუთხე ტოლია სიჩქარის ვერტიკალური და ჰორიზონტალური მდგენელების ფარდობისა (უფრო ზუსტად, კუთხის ტანგენსი, რომელიც კუთხის სიმცირის გამო შეიძლება შეიცვალოს კუთხით). (1) და (2) ფორმულებიდან მარტივი გარდაქმნების შემდეგ m/q სიდიდისთვის მივიღებთ შემდეგ გამოსახულებას:

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

ჯ. ჯ. ტომსონმა თავის ექსპერიმენტებში გამოიყენა სხვადასხვა აირი, სხვადასხვა ნივთიერება 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 (და არა მასის მუხტთან ფარდობისთვის) ტოლია

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

ამ მნიშვნელობის ახსნა ორგვარად შეიძლებოდა: შესაძლოა, ნაწილაკის მუხტის სიდიდე ყოფილიყო ძალიან დიდი, ან მისი მასა - ძალიან მცირე. ჯ. ჯ. ტომსონმა ყურადღება მიაქცია ფაქტს, რომ წყალბადის იონიზებული 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 ნივთიერების ატომი არ არის განუყოფელი და რომ მისი შემადგენელია ნაწილაკი, რომელსაც მან კორპუსკული უწოდა და რომლის მასა წყალბადის ატომის მასაზე დაახლოებით 1800-ჯერ ნაკლებია. როგორც აღვნიშნეთ, მოგვიანებით ამ ნაწილაკს ელექტრონი ეწოდა.

დასასრულ, მინდა, მკითხველის ყურადღება მივაქციო სურათს, რომელზეც გამოსახულია კათოდური სხივების მილაკი. ეს ის მილაკია, რომელიც გამოიყენა ჯ. ჯ. ტომსონმა ცდებში.



ტომსონის კათოდური სხივების მილაკი⁶

როგორც ცნობილია, ჯ. ჯ. ტომსონმა თავისი ცდების საფუძველზე შეიმუშავა ატომის, იმ დრომდე ცნობილი ნივთიერების უმცირესი შემადგენელი ნაწილაკის, ახალი მოდელი, რომლის თანახმად, ატომის მთელ მოცულობაში თანაბრად არის განაწილებული დადებითი მუხტი და

⁶ http://www-outreach.phy.cam.ac.uk/camphy/museum/area2/images/cabinet3_2.jpg

ელექტრონები მასში ისეა გაბნეული, რომ ატომი ელექტრულად ნეიტრალურია. სამწუხაროდ, ეს მოდელი არ გამოდგა სწორი, რაც მოგვიანებით ე. რეზერფორდის ცდებმა დაადასტურა.

ელექტრონის მუხტის განსაზღვრა

1906 წელს ჯ. ჯ. ტომსონს ელექტრონის აღმოჩენისთვის ნობელის პრემია მიენიჭა, ხოლო 1913 წელს ამერიკელმა მეცნიერმა რობერტ ა. მილიკენმა (იხ. ფოტო (სურ. 7)) გამოაქვეყნა სტატია, რომელიც მიემდგვნა ექსპერიმენტულ კვლევას ელექტრონის მუხტის სიდიდის დასადგენად. ეს



ექსპერიმენტი, რომელიც მან ჩატარა თავის მოწაფესთან ჰარვეი ფლეტჩერთან ერთად, ცნობილია „ზეთის წვეთის“ ექსპერიმენტის სახელით. ცხადია, ატომის შემადგენელი ელექტრონის მუხტის პირდაპირი გაზომვა შეუძლებელი იყო. რ. მილიკენმა და ჰ. ფლეტჩერმა შეიმუშავეს მეთოდი, რომელმაც მათ საშუალება მისცა დაესკვნათ, რომ უარყოფითი მუხტი არის ელემენტარული მუხტის, ელექტრონის მუხტის მთელი რიცხვის ჯერადი და ცდით განესაზღვრათ მისი რიცხვითი მნიშვნელობა. ექსპერიმენტის არსი შემდეგში მდგომარეობდა: მათ ზეთის ძალიან პატარა წვეთები საფრქვევი ხელსაწყოთა მეშვეობით ხელსაწყოში შეაფრქვეეს; აქედან წვეთები მოხვდა ფირფიტებს შორის, რომლებზეც მოდებული იყო ძაბვა; ელექტრული ველის ცვლილებით მეცნიერებმა მოახერხეს ამ

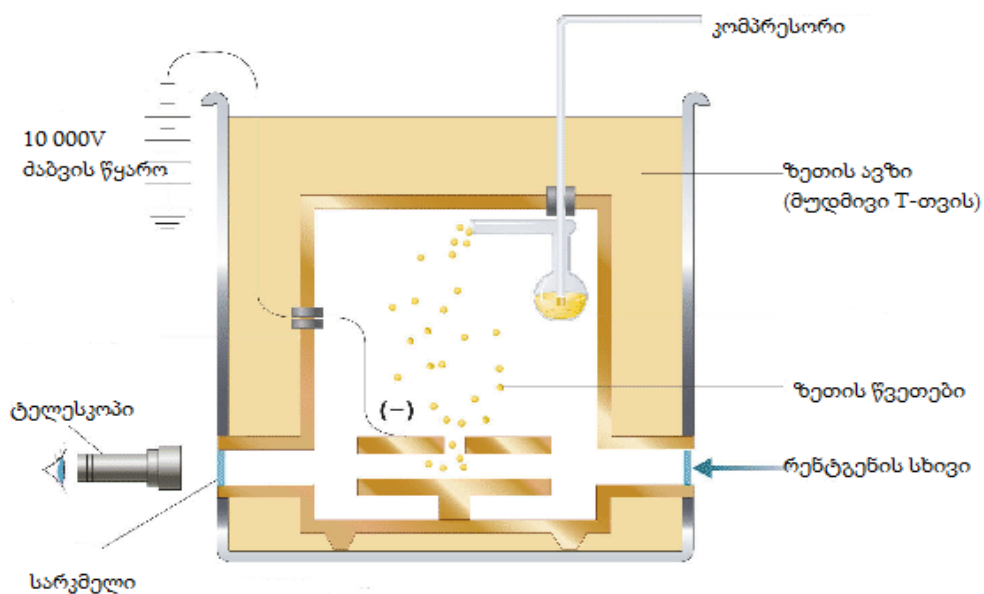
წვეთების ჰაერში შეწონილ მდგომარეობაში გაჩერება. ამ მეთოდის წყალობით შესაძლებელი გახდა ელექტრონის მუხტის რიცხვითი მნიშვნელობის დადგენა.

ხელსაწყო, რომელიც მათ გამოიყენეს, გარეგნულად ასე გამოიყურება (სურ. 8):



ხელსაწყოთა შიგნით ჩადგმულია ორი პარალელური ბრტყელი ფირფიტა, რომლებიც დამუხტულია საპირისპირო ნიშნის მუხტით. ხელსაწყოთა კედელში ზედა ფირფიტის ზემოთ ჩადგმულია ზეთის საფრქვევი მოწყობილობა, რომლის მეშვეობითაც ხდება ზეთის წვეთების შეფრქვევა. ფირფიტაში გაკეთებულია მცირე ხვრელი და ამგვარად ელექტრულ ველში ხვდება ზეთის ძალიან პატარა წვეთები, რომლებიც ქვევით მოძრაობს. შეფრქვევის დროს ზეთის

წვეთების ნაწილი იმუხტება. გარდა ამისა, გამოყენებულ იქნა მაიონიზებული გამოსხივება, რომელიც ზეთის წვეთებს მუხტს ანიჭებდა. დამუხტული წვეთები მოძრაობდა ორი ურთიერთსაპირისპირო ძალის - მიზიდულობისა და ელექტროსტატიკური ძალის - გავლენით. ელექტრული ველის დაძაბულობის ცვლილებით შესაძლებელი იყო ზეთის წვეთის შეწონილ მდგომარეობაში გაჩერება ფირფიტებს შორის. ამ დროს ელექტროსტატიკური ძალა გაწონასწორებულია მიზიდულობის ძალით $mg = qE$. აქ q არის ზეთის წვეთის მუხტი, m - მისი მასა, ხოლო E - ფირფიტებს შორის ელექტრული ველის დაძაბულობა. ხელსაწყო შიგნიდან განათებული იყო, ხოლო მის კედელში ჩადგმული გახლდათ ტელესკოპი, რომლითაც შესაძლებელი იყო ზეთის წვეთებზე დაკვირვება. ხელსაწყოს სქემა მოცემულია ქვემოთ (სურ. 9):



ამრიგად, თუ ზეთის წვეთის მასა ცნობილია, შესაძლებელია ზეთის წვეთის მუხტის გაზომვა. წარმოვიდგინოთ, რომ მოხერხდა ერთი წვეთის გამოყოფა წონასწორობაში. ამის შემდეგ ცდა გაგრძელდა ამ წვეთზე. გათვალისწინებულ იქნა, რომ წვეთი ვარდნის დროს მიზიდულობის ძალის გავლენით სწრაფად აღწევს ზღვრულ სიჩქარეს, რომელიც სტოქსის კანონით გამოითვლება: $F_f = 6\pi r\sigma v_1$, აქ F_f არის ჰაერის წინააღობის ძალა, r - წვეთის რადიუსი, σ - ჰაერის სიბლანტე, ხოლო v_1 - წვეთის სიჩქარე ქვევით მოძრაობის დროს. ძაბვის ცვლილებით წვეთი შეიძლება ამოძრავდეს ზევით აჩქარებით და ამ შემთხვევაშიც მისი სიჩქარე მიაღწევს ზღვრულ მნიშვნელობას - v_2 , რომელიც ანალოგიური ფორმულით გამოითვლება. სიჩქარეები ცდების დროს გაზომილ იქნა. ეს მანიპულაციები ჩატარდა სხვადასხვა ზომის წვეთებზე, რომლებსაც ჰქონდათ სხვადასხვა მუხტი. გაზომილ იქნა წვეთების რადიუსებიც. მკითხველს გამოთვლებით არ გადავტვირთავთ, მოვიყვანთ მხოლოდ საბოლოო ფორმულას, რომლის მიხედვითაც მოხდა ელექტრონის მუხტის e სიდიდის დადგენა. ნებისმიერი წვეთის მუხტი q_n ამ მინიმალური მუხტის პროპორციული აღმოჩნდა. ფორმულას აქვს შემდეგი სახე:⁷

⁷ 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>

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

აქ q_1 არის წვეთების მუხტების უდიდესი საერთო გამყოფი, l - აირის მოლეკულის თავისუფალი განარბენი, ხოლო A - მუდმივა, რომელიც განისაზღვრა ემპირიულად. ცდა ჩატარებულ იქნა სხვადასხვა სითხეზე. შედეგი არ აღმოჩნდა დამოკიდებული სითხის გვარობაზე. ელექტრონის მუხტი (ტომსონის შედეგის გამოყენებით) აღმოჩნდა $e = 1,5924 \cdot 10^{-19}$ კულონი.

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