



ზეემანის ეფექტი

ზაალ მაჭავარიანი

თსუ ფუსტ და საბუნებისმეტყველო მეცნიერებათა ფაკულტეტის
ასოცირებული პროფესორი



•ნიდერლანდელი ფიზიკოსი პიტერ ზეემანი განათლებას ლეიდენის უნივერსიტეტში იღებდა. მისი მასწავლებლები იყვნენ კამერლინგ ჰაიკე ონესი (ფიზიკა 1913) და ჰ.ა. ლორენცი (ფიზიკა 1902). ზეემანი ამსტერდამში პროფესორი გახდა, სადაც პენსიაზე გასვლამდე მუშაობდა. 1923 წელს იგი მისი სახელობის ლაბორატორიის დირექტორი გახდა. ადრეულ ასაკში მას ფიზიკის, განსაკუთრებით ასტრონომიისადმი ინტერესი გაუჩნდა. 18 წლის ასაკში მან ჟურნალ „Nature“-ს წარუდგინა სტატია პოლარული ნათების შესახებ, რომელმაც ისინი გამოაქვეყნა.

დაარღვია უფროსების პირდაპირი ბრძანებები. უფროსის შვებულების დროს ლაბორატორიული აღჭურვილობა გამოიყენა მაგნიტური ველის მიერ სპექტრული ხაზების გახლეჩის შესასწავლად.

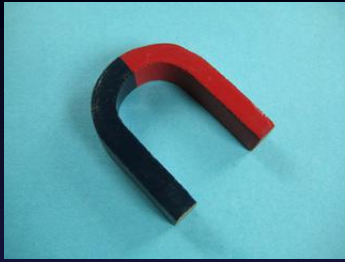
1902 წელს მან მიიღო ნობელის პრემია ფიზიკაში...

ზეემანის ეფექტი

“ცეცხლში, რომელიც მოთავსებული იყო ელექტრომაგნიტის პოლუსებს შორის, მე ჩავდე ასბესტის ბოჭკო, რომელიც გაჟღენთილი იყო ჩვეულებრივი სამზარეულოს მარილით. ცეცხლის შუქი განვიხილე როულანდის დიფრაქციული ბადით. ყოველ ჯერზე, როდესაც წრედი იკვრებოდა, ნატრიუმის ორივე D-ხაზი ფართოვდებოდა“.

წერდა პიტერ ზეემანი ჟურნალ **Nature**, 1897 წელს

როგორი მაგნიტი გამოიყენა ზეემანმა?

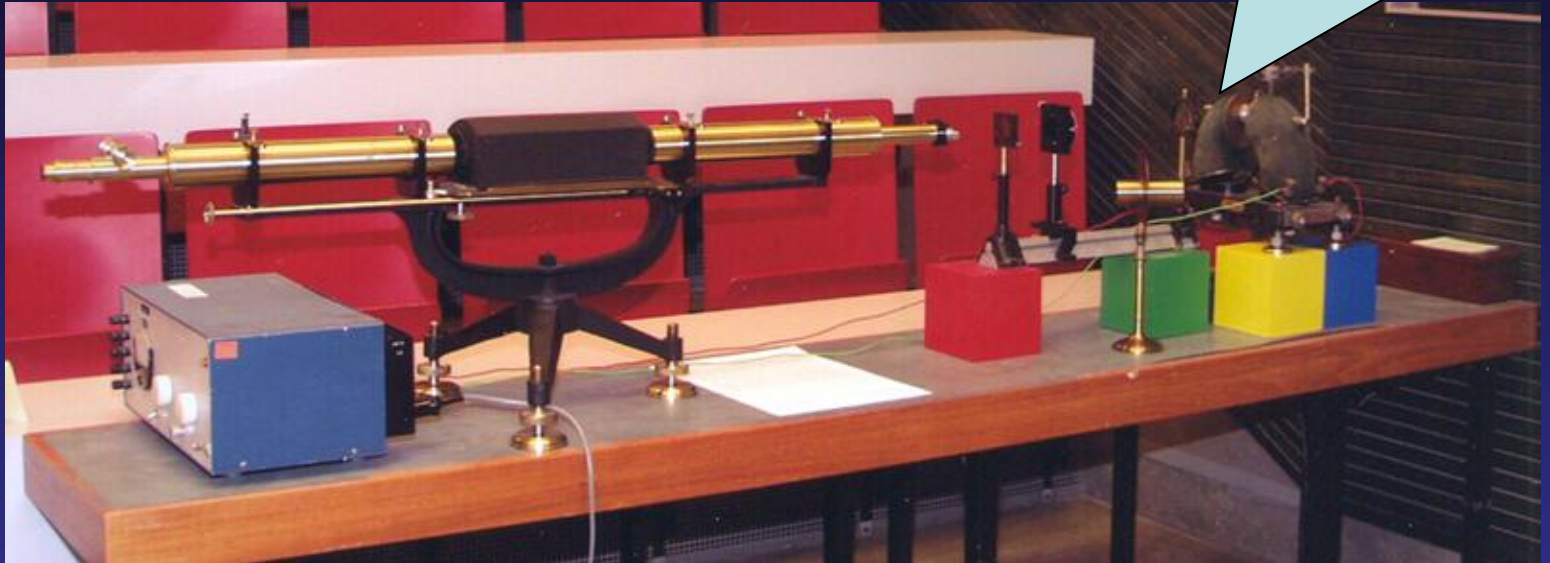


~ 1 ტესლა

ელექტრომაგნიტი ლაიდენის ცნობილ ექსპერიმენტში დღემდე ინახება ლაიდენის მუზეუმში.

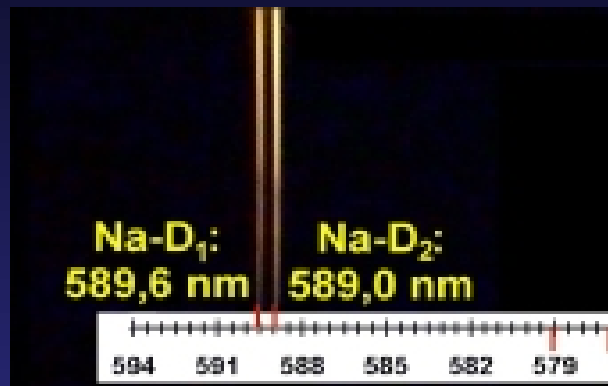
პიტერ ზეემანის 18 რეკონსტრუქცია

მარჯვენა მხარეს მდებარე მაგნიტი ზეემანმა ამსტერდამში გადასვლის შემდეგ გამოიყენა.



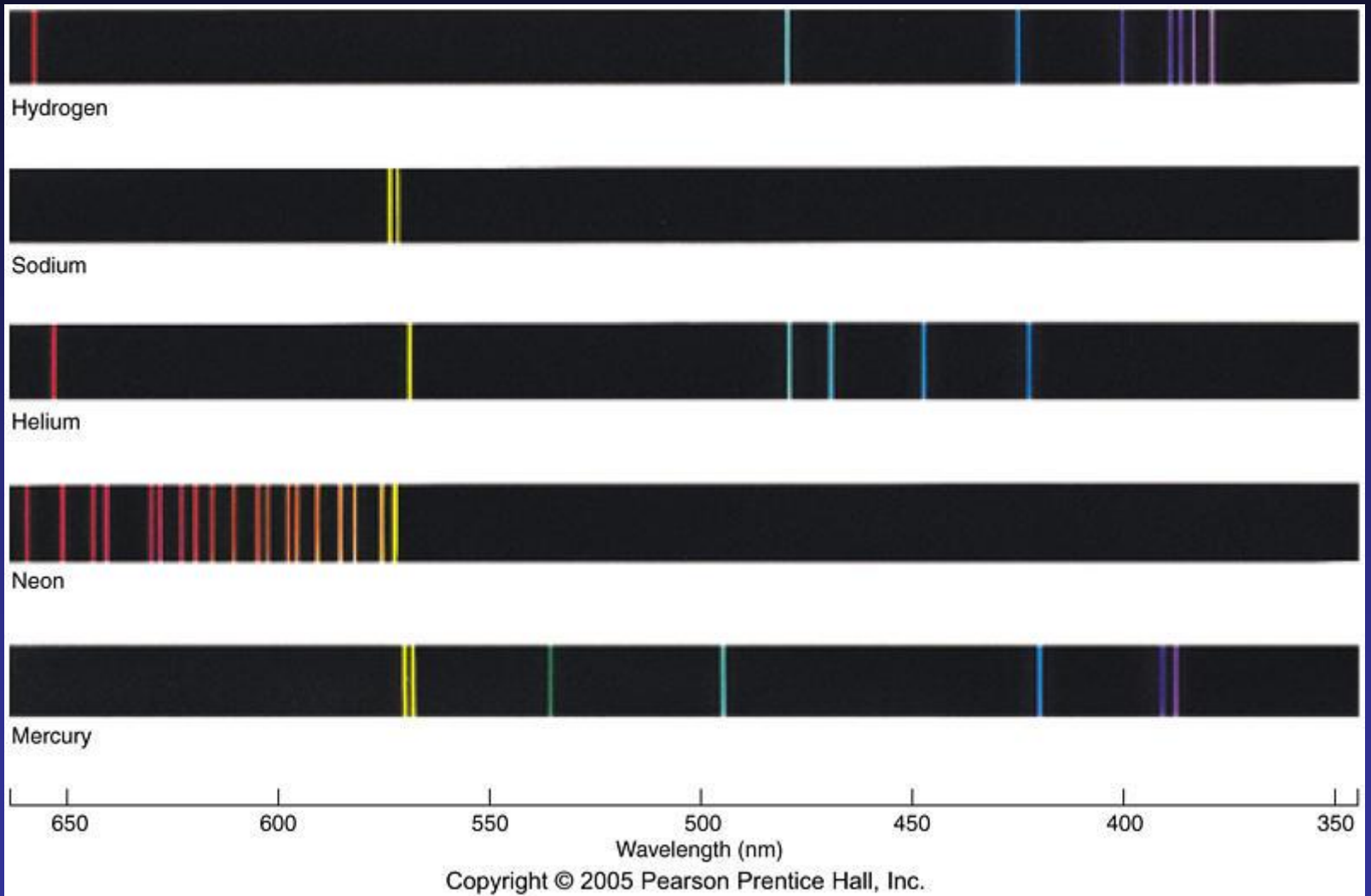
ექსპერიმენტს რეკონსტრუქცია ჩაუტარდა 2002 წელს, ზეემანისა და ლორენცისთვის ნობელის პრემიის ასი წლისთავის აღსანიშნავად.

ნატრიუმის D-ხაზები

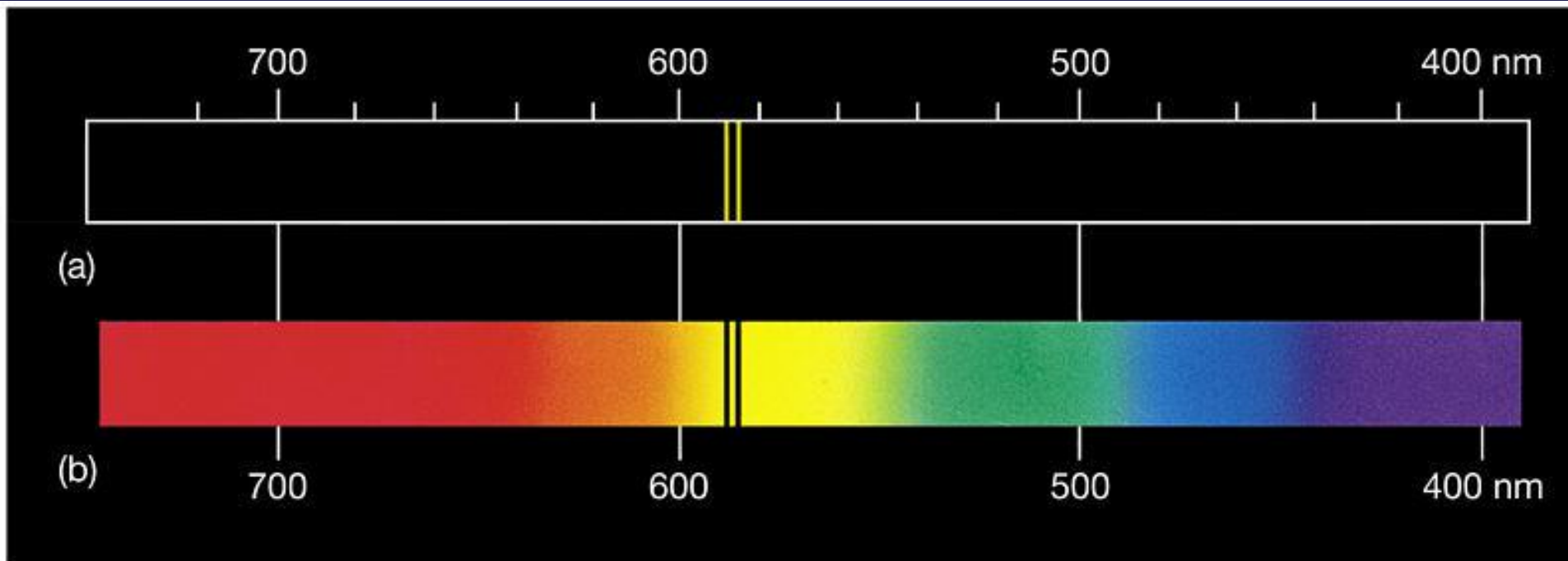


- ნატრიუმის სპექტრში დომინირებს ძალიან კაშკაშა დუპლეტი, ე.წ. **D-ხაზები**, ტალღის სიგრძეებით **588.9950** და **589.5924** ნანომეტრი. **589.0** ნმ ხაზის ინტენსივობა ორჯერ აღემატება **589.6** ნმ ხაზის ინტენსივობას.
- ხილული სპექტრის ფარგლებში (400–700 ნმ) შემდეგი ყველაზე ინტენსიური ხაზი მდებარეობს **568.8205** ნმ-ზე და მისი ინტენსივობა შეადგენს მხოლოდ **0.7%-ს** **D₁** ხაზთან შედარებით.
- დანარჩენი ყველა ხაზი ასეულჯერ უფრო სუსტია — პრაქტიკულად ნათებადი ნატრიუმის მთელი გამოსხივება მოდის მხოლოდ ამ ორ სახელგანთქმულ **D-ხაზზე**.

მიუთითეთ ნატრიუმის სპექტრი








სად არის ნატრიუმის შთანთქმის სპექტრი და სად არის ნატრიუმის გამოსხივების სპექტრი?



Copyright © 2005 Pearson Prentice Hall, Inc.

ზეემანი ეფექტი

-  ისტორია
-  ლორენცის ახსნა
-  გამოყენება
-  ზეემანის ეფექტის „დანადგარი“
-  შეკითხვები

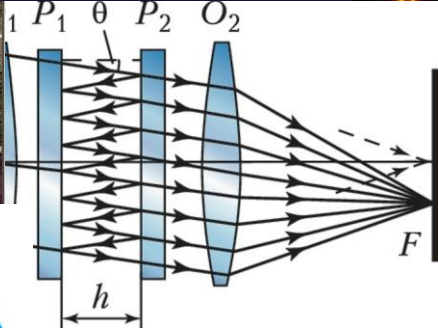
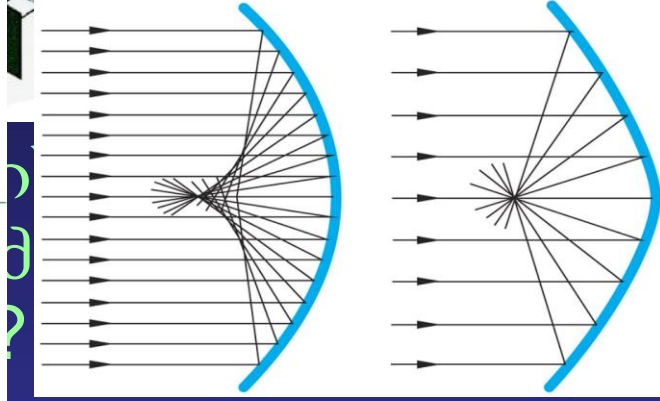
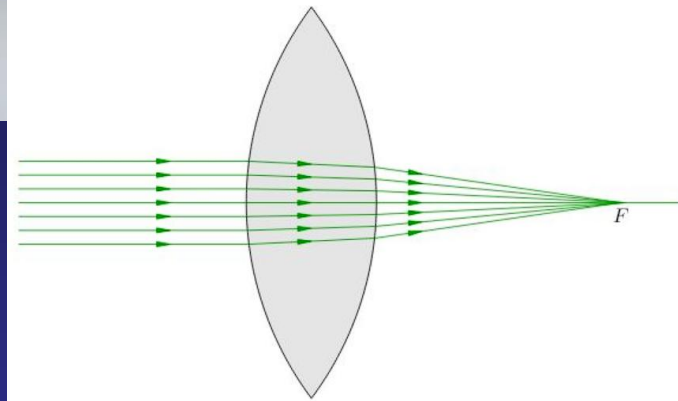
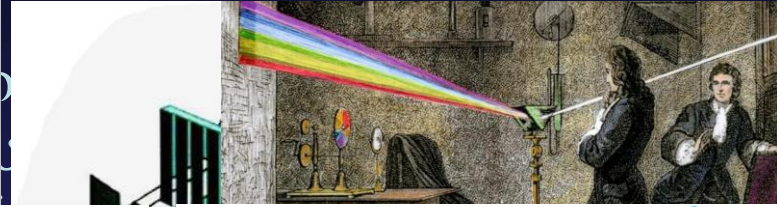
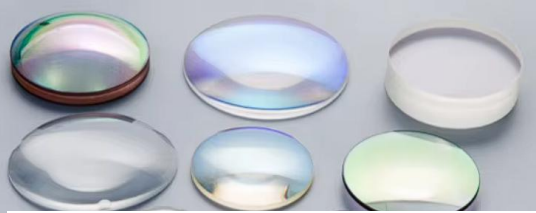
✂ ეფექტის მოლოდინი

- 1862 წელს ფარადეიმ ჩაატარა თავისი ბოლო ექსპერიმენტი. მან ნატრიუმის სპექტრში ცვლილებები მოძებნა მაგნიტური ველის გაჩენის დროს.
- ფარადეიმ ვერ აღმოაჩინა ეფექტი და არ გამოაქვეყნა წარუმატებელი ექსპერიმენტის შედეგები (მისი ლაბორატორიული ჩანაწერები მოგვიანებით მაქსველმა გამოაქვეყნა)..
- და ზეემანის პირველი ექსპერიმენტები 1891 წელს წარუმატებელი აღმოჩნდა. არანაირი ეფექტი არ ყოფილა!
- მაგრამ როდესაც ზეემანმა ფარადეის წარუმატებლობის შესახებ შეიტყო, გაიფიქრა: „თუ ფარადეიც გამოთქვამდა ასეთი კავშირის შესაძლებლობას...“ და „სახელოები აიჩეჩა“.

1891-1896 «მონდომება და შრომისმოყვარეობა...»

- იკვლევდა რკინის სპექტრს მაგნიტურ ველში – მაგნიტური ველის გავლენა არ აღინიშნება.
- იმისათვის, რომ ნატრიუმის ხაზები ალში უფრო კაშკაშა ყოფილიყო, აძლიერებდა სანთურის ალს წყალბადით და ჟანგბადით.
- მეზობელი ლაბორატორიიდან ითხოვა მგრძნობიარე გალვანომეტრი (მაგნიტური ველის უფრო ზუსტი გამოთვლისთვის).
- სპექტრს აკვირდებოდა ფრენელის ლინზის საშუალებით.
- იყენებდა შესანიშნავ როულანდის დიფრაქციული ბადეს.

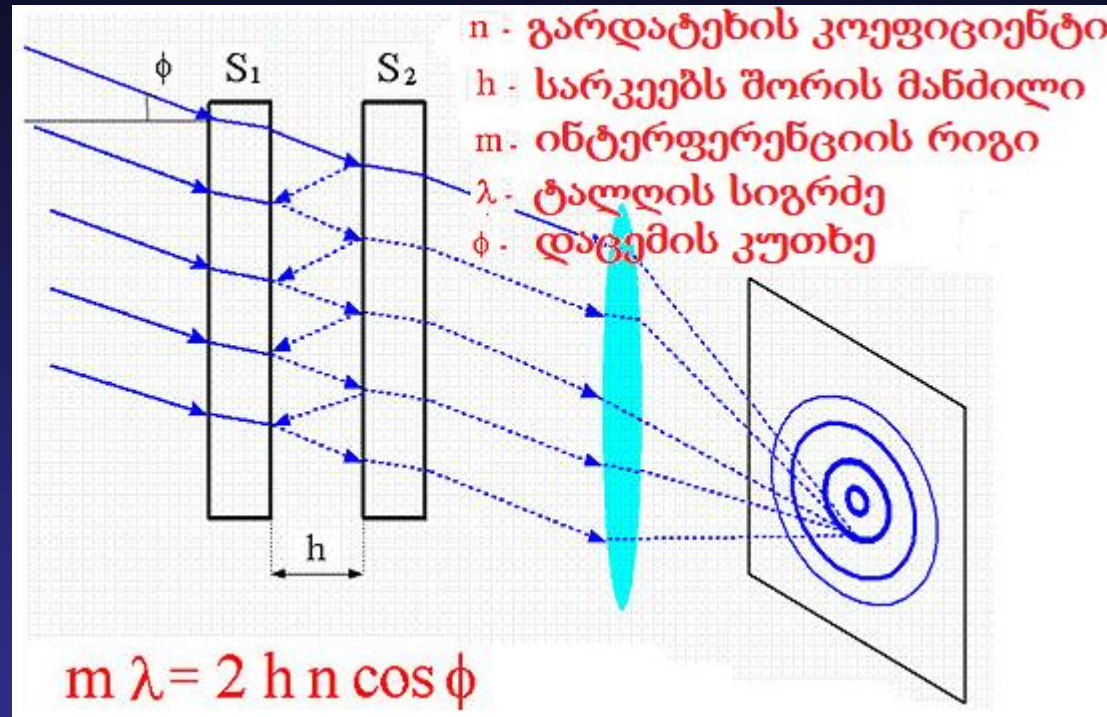
კითხვები



კვლევა
კვლევის

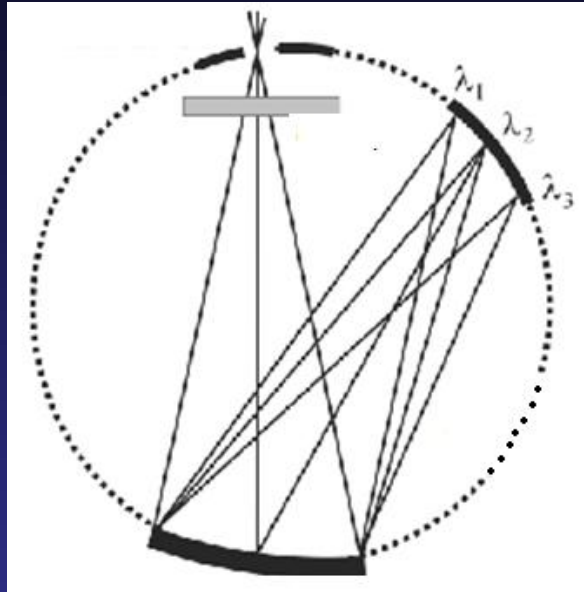
- დაფიქრდით, შესაძლებელია თუ არა ისეთი მოწყობილობის შექმნა, რომელიც ერთდროულად დაშლის სხივს ტალღის სიგრძეებად და შეაგროვებს დაშლილ ტალღებს?

ფაბრი-პეროს ინტერფერომეტრი 1894



• h სისქის ჰაერის სივრცე შემოიფარგლება S_1 და S_2 სარკეების მატარებელი მინის ფირფიტებით. სარკეები ნახევრადგამჭვირვალეა, ამიტომ სინათლის ნაწილი მათგან აირეკლება, ნაწილი კი გაივლის არეკვლის გარეშე. „კლასიკური“ სპექტროგრაფისგან განსხვავებით, ფაბრი-პეროს ეტალონს არ სჭირდება ვიწრო ჭრილი, რაც შესაძლებელს ხდის შესწავლილი წყაროებიდან სინათლის ნაკადის უფრო სრულად გამოყენებას. ეს მოწყობილობა სინათლეს სპექტრად არ შლის; ის მხოლოდ გარკვეული ტალღის სიგრძის სინათლეს ატარებს (ან არ ატარებს), რომელთა მნიშვნელობები დამოკიდებულია მის ფირფიტებზე სინათლის დაცემის კუთხეზე.

როულენდის ბადე



- ასეთი მოწყობილობა შექმნა ჰენრი როულენდმა 1882 წელს. მისი ბადე გაკეთებული იყო ჩაზნექილ ზედაპირზე, ის ასრულებდა როგორც დისპერსიის, ასევე ფოკუსირების ფუნქციებს! (დაუჯერებელია, რომ როულენდი ამერიკელი იყო - მან თავისი ბადები ინსტიტუტებს თვითღირებულებით მიჰყიდა) ჭრილის ფორმა ძალიან მნიშვნელოვანი იყო ზეემანის ექსპერიმენტისთვის! თავის ლაბორატორიაში მყოფი მექანიკოსისთვის ამ ნიჟარის დამზადება პროფესიულ გამოცდად იქცა.

ზეემანის ეფექტი

- «ელექტრომაგნიტის პოლუსებს შორის ცეცხლში ჩვეულებრივ მარილში დასველებული აზბესტის ბოჭკო მოვათავსე.
- აღის სინათლე შეისწავლებოდა როულენდის დიფრაქციული ბადის გამოყენებით.
- ყოველი წრედის ჩართვისას, ორივე ნატრიუმის D-ხაზი ფართოვდებოდა.»

პიტერ ზეემანი, Nature, 1897

ენდე, მაგრამ გადაამოწმე...

- ეფექტის მიღებისთანავე, ზეემანმა დაიწყო შემოწმება, მოქმედებდა თუ არა მაგნიტური ველი თავად ალზე. წვის დროს ნატრიუმის წვა მილში მოვათავსე და გაზომვების დროს მოვატრიალე (ტემპერატურის ვარიაციების აღმოსაფხვრელად).
- და მთავარი კითხვა უცვლელი დარჩა

რატომ გაფართოვდნენ ისინი?



ლორენცის ახსნა

- ლორენცმა ზეემანის ექსპერიმენტების შესახებ პირველად 1896 წლის 31 ოქტომბერს, შაბათს, ამსტერდამში, ნიდერლანდების სამეფო მეცნიერებათა აკადემიის სხდომაზე გაიგო, სადაც ზეემანის ხელმძღვანელმა, კამერლინგ ონესმა, ექსპერიმენტის შედეგების შესახებ ანგარიში წარადგინა.
- ორშაბათს ლორენცი ზეემანს შეხვდა და დაკვირვებულ ეფექტის შესახებ მისი ახსნა შესთავაზა.

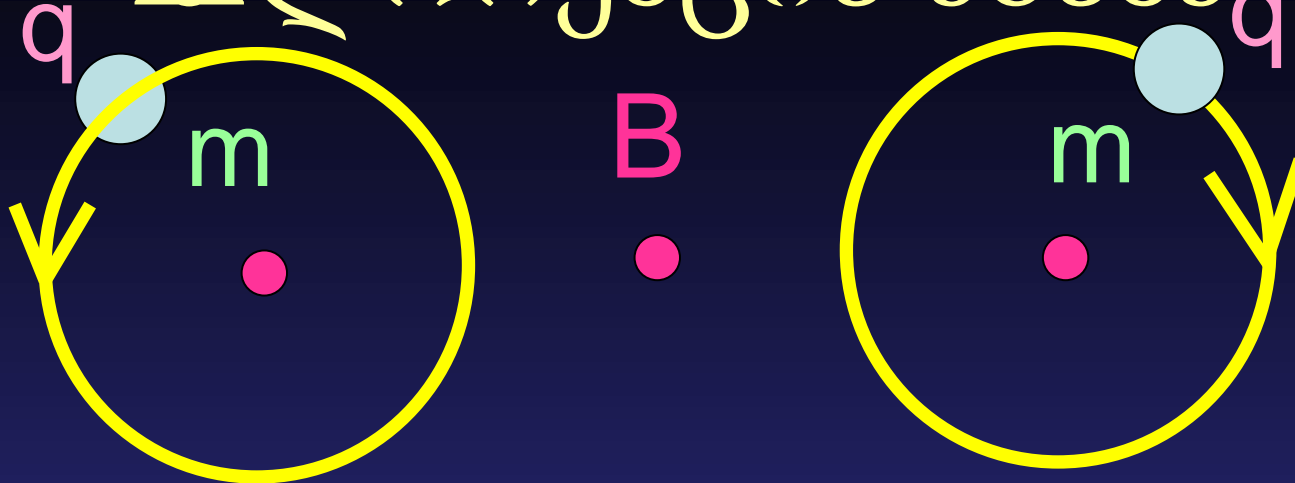


ლორენცის ახსნა

(გაიხსენეთ ლორენცის ძალის მიმართულება)

- დამუხტული ნაწილაკები ატომში რხევით მოძრაობას ასრულებენ (ლორენცი მათ იონებს უწოდებდა - ეს 1896 წელი იყო, ამიტომ ეს საპატიებელია)
- თუ ამ რხევებს ორ კომპონენტად დავშლით - ველის პარალელურად და ველის პერპენდიკულარულად, მაშინ მაგნიტური ველი ერთ კომპონენტზე (რომელზე?) გავლენას არ მოახდენს.
- მაგრამ მეორე კომპონენტით ყველაფერი უფრო რთულია, შეგიძლიათ მისი საათის ისრის მიმართულებით და საათის ისრის საწინააღმდეგოდ ბრუნვა.

ლორენცის ახსნა



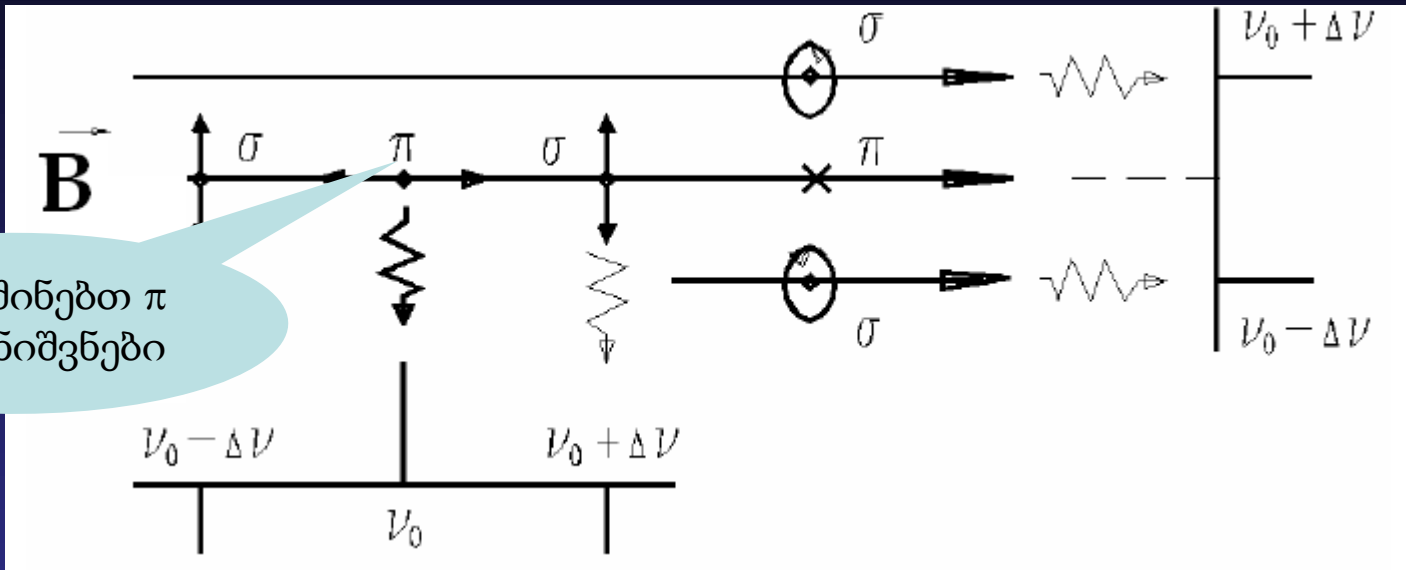
- ლორენცის თანახმად ბრუნვა შესაძლებელია საათის ისრის მიმართულებითაც და საწინააღმდეგოდაც. მაგნიტური ველი მიმართულია ჩვენსკენ. თუ მაგნიტური ველის ჩართვამდე ნაწილაკები ახდენდნენ რხევებს სიხშირით ν_0 , ეს ნიშნავს, რომ ისინი ბრუნავდნენ $2\pi\nu_0 R$ სიჩქარით. მათ „აბრუნებდა“ გარკვეული ძალა F . ნიუტონის მეორე კანონის თანახმად : $F=ma$

- მაგნიტური ველის მხრიდან მოქმედი ლორენცის ძალა $F_{\text{ლ}} = qvB = 2\pi\nu_0 RqB$

ამრიგად, ელექტრონის რხევების საწყისი სიხშირე ω_0 იყოფა (იხლიჩება) ორ განსხვავებულ სიხშირედ:

$$\omega = \omega_0 \pm \frac{eB}{2m}$$

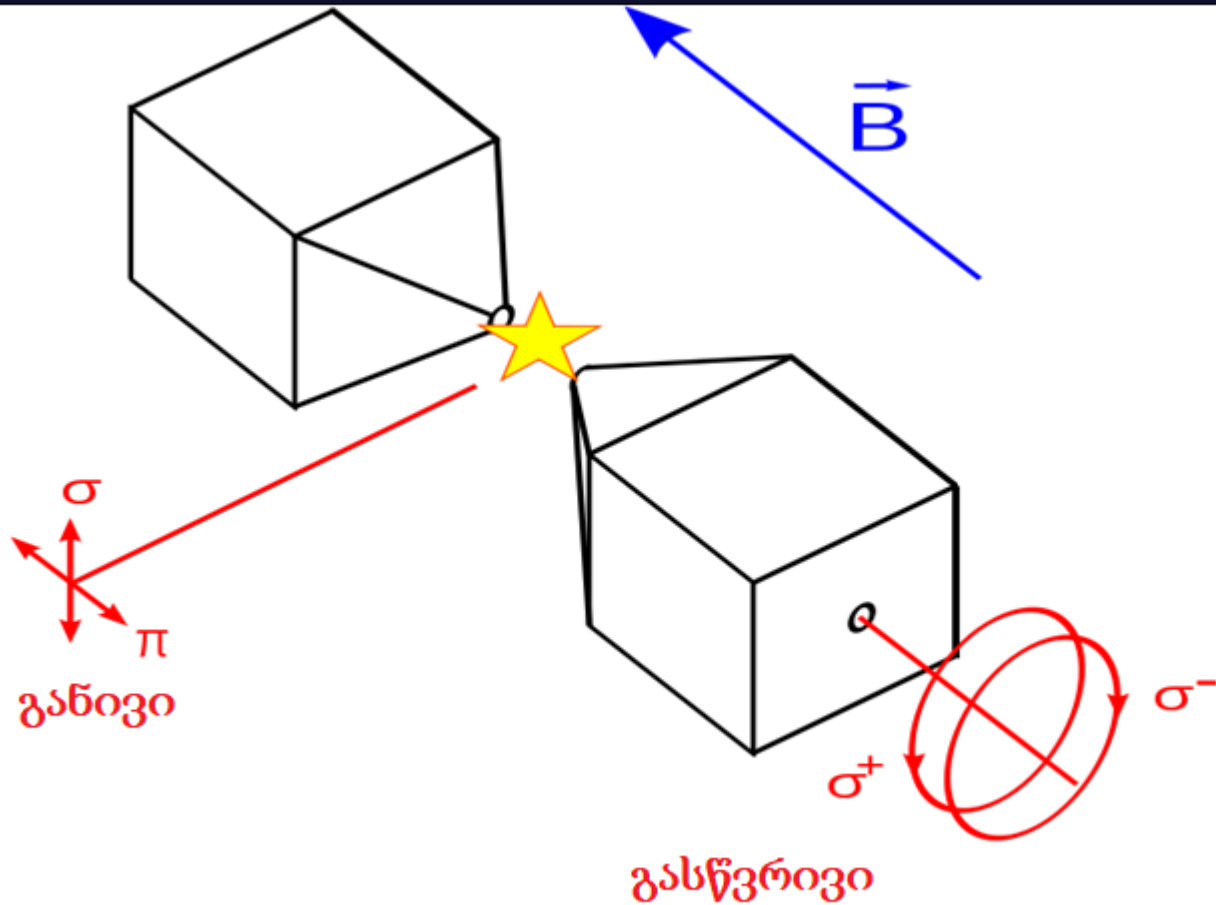
ლორენცის წინასწარმეტყველება



ნუ შეგაშინებთ π და σ აღნიშვნები

- რადგან ველის პარალელური რხევები არ იცვლება, ხოლო ველს პერპენდიკულარული რხევები ცვლიან სიხშირეს $+\Delta V$ -ით და $-\Delta V$ -ით, მაგნიტურ ველში ერთი ხაზი გაიყოფა 3 კომპონენტად — 1 უცვლელი და ორი შეცვლილი სიხშირით. შეცვლილი კომპონენტები უნდა იყოს პოლარიზებული განსხვავებულ მიმართულებებში!
- თუ სპექტრული აპარატის გარჩევადობა საკმარისი არ არის, რომ სამი ხაზი ცალ-ცალკე დავინახოთ, მაინც შესაძლებელია შევადაროთ გასქელებული, დაკვირვებადი ხაზის კიდეების პოლარიზაცია.

მაგრამ ხაზის კიდებზე დაკვირვება უნდა მოხდეს ველის გასწვრივ!



- ტექნიკური კითხვა: როგორ შევხედოთ ველის გასწვრივ, თუ მაგნიტი გაუმჭვირვალეა?

ისინი პოლარიზებულები არიან! ლორენცი მართალია!

- 1896 წლის 10 ნოემბერს ზემანი სწავლობს კიდეების პოლარიზაციას. უარყოფითი შედეგი.
- 20 ნოემბერს ზემანმა გააცნობიერა თავისი შეცდომა - ის მაგნიტური ველის პერპენდიკულარულად იყურებოდა!
- ის იღებს პერფორირებულ (ნახვრეტიან) მაგნიტს და ხედავს ნაწინასწარმეტყველებ ეფექტს!

ნობელის პრემია ფიზიკაში 1902



ჰენდრიკ ანტონ
ლორენცი



პიტერ ზეემანი

მაგნეტიზმის გამოსხივებაზე გავლენის შესწავლისთვის

ეფექტის გამოყენება ასტროფიზიკაში

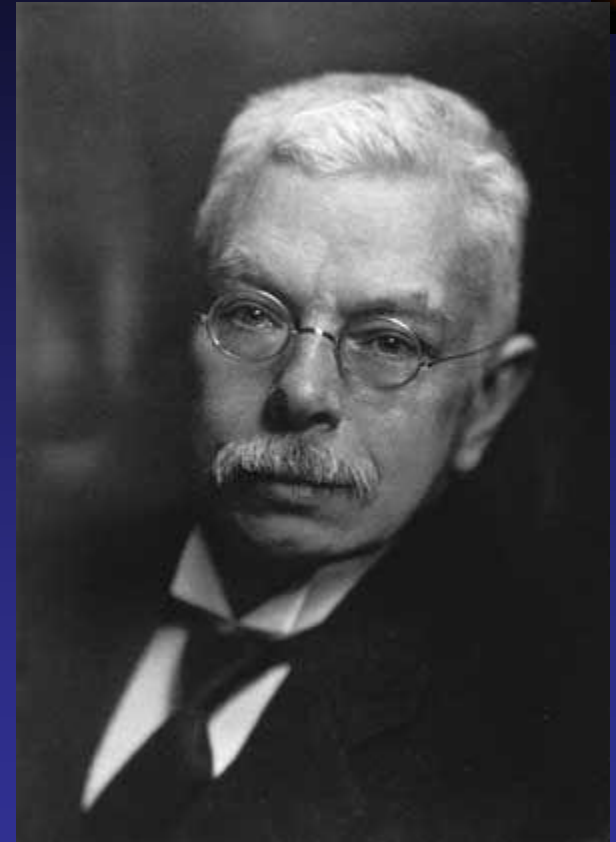
- უკვე მეორე ნაშრომში ზეემანმა შესთავაზა ეფექტის გამოყენება მზის მაგნიტური ველის შესაფასებლად. მისთვის გაგზავნილ წერილში (1908) ასტრონომმა გეილმა დაადასტურა მზის რადიაციის ხაზების გახლეჩისა და პოლარიზაციის არსებობა.
- მზის, როგორც ვარსკვლავის, სრული მაგნიტური ველი საშუალოდ დაახლოებით 1 გ-ია (გაუსი = 10^{-4} T), თუმცა, მზის ლაქებში ველის მნიშვნელობა მნიშვნელოვნად მაღალია და რამდენიმე ათას გ-ს აღწევს.
- ვარსკვლავური მაგნიტური ველების გაზომვისას, შთანთქმის დროს, როგორც წესი, შეინიშნება სპექტრული ხაზების ზეემანის გაყოფა. მაგნიტური ველის გრძივი კომპონენტი გაიზომა სხვადასხვა სპექტრული კლასის ასობით ვარსკვლავში. აღმოჩნდა, რომ ვარსკვლავების ეგრეთ წოდებული მაგნიტური ველების ზედაპირზე მაგნიტური ველის ინდუქცია რამდენიმე ათას გ-ს აღწევს. ძალიან ძლიერი მაგნიტები. 10 გ-ზე მეტი ველები ზეემანის ეფექტით რამდენიმე გადაგვარებულ ვარსკვლავში - თეთრ ჯუჯებში - დაფიქსირდა.
- გალაქტიკის მაგნიტური ველების გაზომვა შესაძლებელია 21 სმ-იანი წყალბადის რადიოხაზის ზიმანის გაყოფით. გალაქტიკის საშუალო მასშტაბური ველის სიდიდე 2 მკვაუსია.

სამუშაო ყოველთვის არის მთავარია შევძლოთ მისი შესრულება...

• მისი შემდგომი ნაშრომები მოიცავდა სინათლის სიჩქარის უკიდურესად რთულ და ზუსტ გაზომვებს ისეთ გამჭვირვალე მასალებში, როგორცაა მინა და კვარცი (სხვა მეცნიერებმაც გააკეთეს მსგავსი გაზომვები წყლის მოძრაობაში). მან აღმოაჩინა, რომ ცვლილებები დამოკიდებული იყო არა მხოლოდ მოძრავი გარემოს სიჩქარესა და გარდატეხის მაჩვენებელზე, არამედ სინათლის სიხშირეზეც.

• ზეემანმა ასევე შეიმუშავა ელექტრულად დამუხტული ატომების კომბინირებული მაგნიტურ-ელექტრული გადახრების ტექნიკა, რათა ისინი მასების მიხედვით გამოეყოთ და აღმოაჩინა რამდენიმე ახალი იზოტოპი (Ar-38, Ni-64 და ა.შ.).

• 1908 წელს ზეემანი ამსტერდამის უნივერსიტეტის ფიზიკის ინსტიტუტის დირექტორად დაინიშნა. დამკვიდრებული ტრადიციისამებრ, მან თანამდებობა დატოვა და ამსტერდამის უნივერსიტეტი 1935 წელს, სამოცდაათი წლის ასაკში დატოვა; რვა წლის შემდეგ ის გარდაიცვალა.



1865-1943

სტუმრები ზეემანის ლაბორატორიაში 1920



ელექტრომაგნიტი (103 კგ)
ხვრელში – თუთიის ნათურა

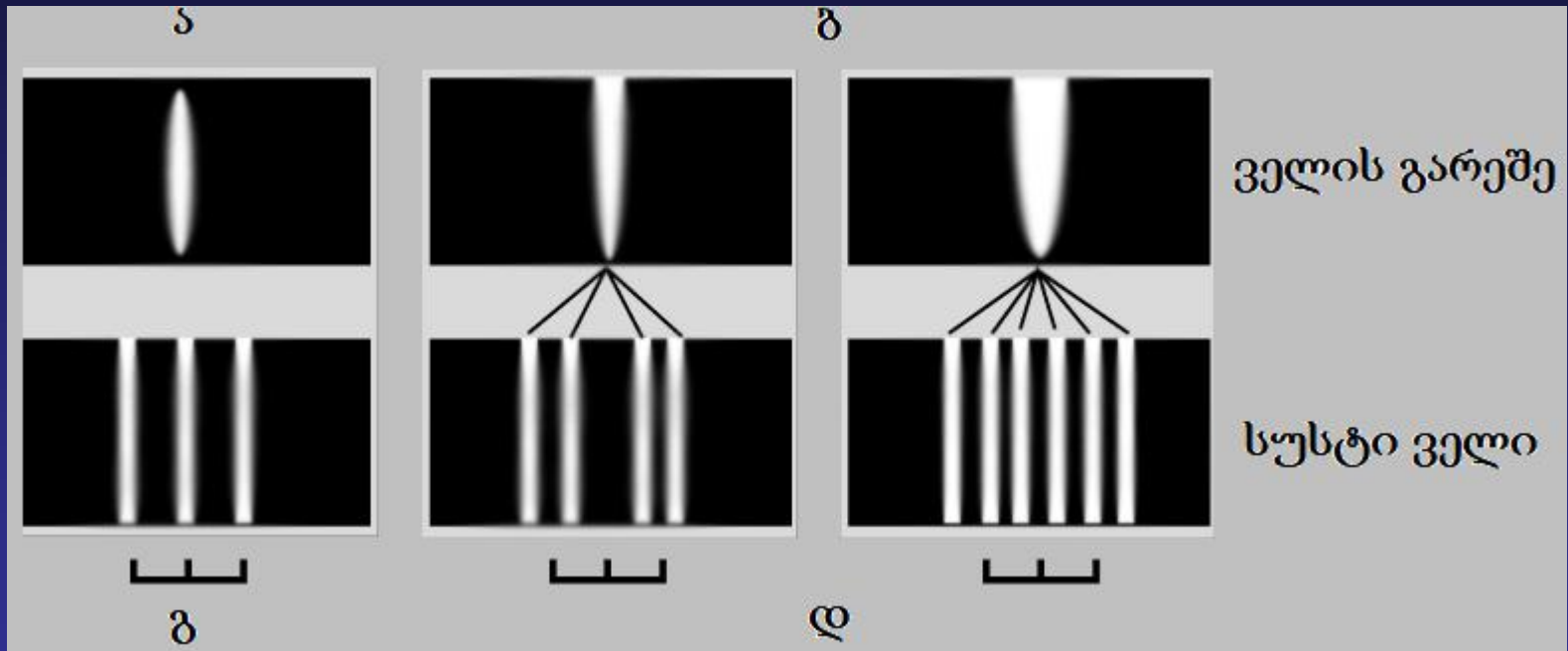


პერსონალური კომპიუტერის კაბელი

CCD (Charge coupled
Devie)- სახაზავი

ნუ ფიქრობთ, რომ ეს დასასრულია...

- ზეემანის ეფექტის აღმოჩენიდან სულ რაღაც რამდენიმე თვის შემდეგ აღმოჩნდა, რომ დაშლა ყოველთვის სამ კომპონენტად არ ხდება. თავად ნახეთ:

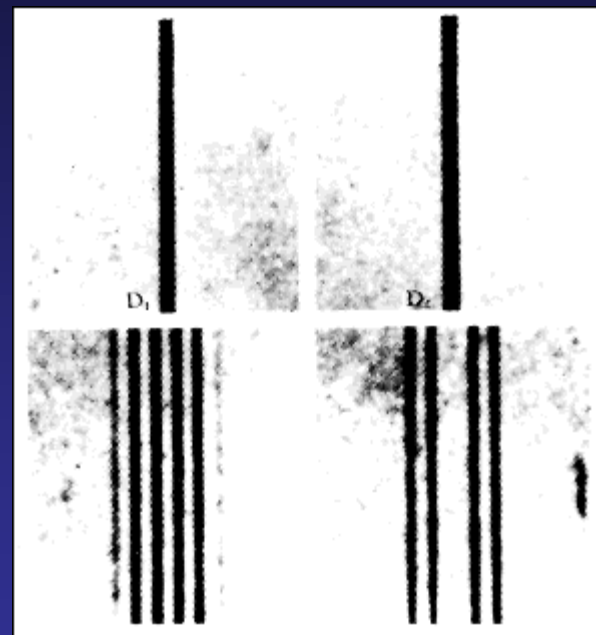
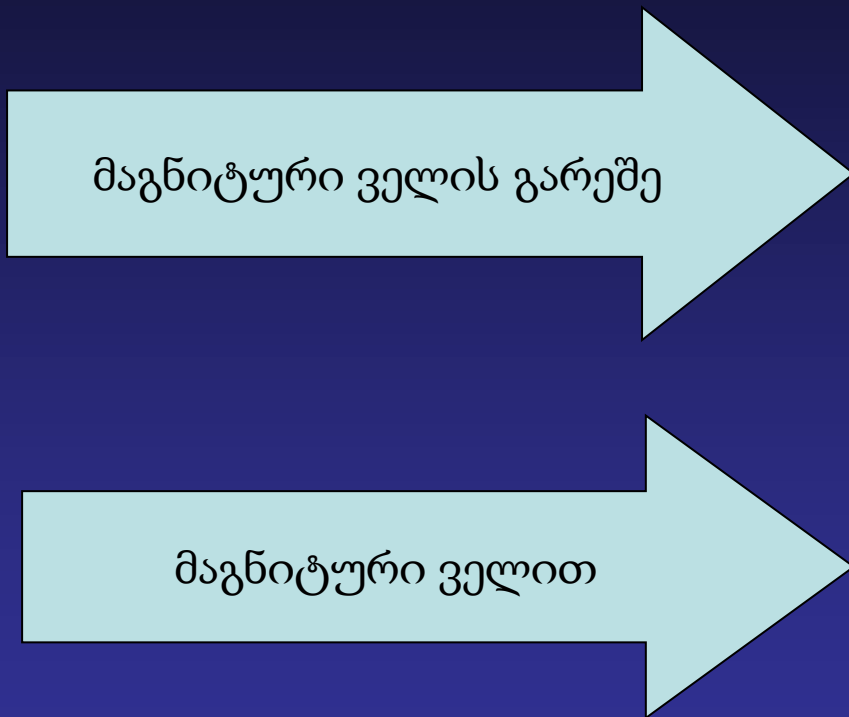


ზედი პერპენდიკულარულია მაგნიტური ველის მიმართულების მიმართ. ა – თუთიის სინგლეტი; ბ – ნატრიუმის ძირითადი დუბლეტი; გ - ნორმალური ტრიპლეტი; დ - ანომალური გაყოფა.

« ყველაფერი ისე არ არის, როგორც უნდა იყოს... »

- 1898 წელს ტ. პრესტონმა განაცხადა, რომ თუთიისა და კადმიუმის ზოგიერთი სპექტრული ხაზი ოთხ კომპონენტად იყოფა და მალევე ა. კორნუმ აღმოაჩინა, რომ ფარადეის და ზეემანის მიერ ექსპერიმენტულად ჩატარებული ნატრიუმის ორი D-ხაზიდან ერთი ოთხ კომპონენტად, ხოლო მეორე ექვს კომპონენტად იყოფა. 1911 წელს კ. რუნგემ და ფ. პაშენმა დაადგინეს, რომ ვერცხლისწყლის სპექტრში ინტენსიური მწვანე ხაზი 11 კომპონენტად იყოფა. თავდაპირველად, ასეთი ძლიერი გახლეჩა აღიქმებოდა, როგორც „ანომალიური ზეემანის ეფექტი“. მაგრამ მალევე გაირკვა, რომ სამ კომპონენტად დაყოფის „ნორმალური ზეემანის ეფექტი“ თავისთავად გამოწვევის იყო და საჭირო გახდა ლორენცის თეორიის შემდგომი დახვეწა.
- პაული იხსენებდა: „კოპენჰაგენის ულამაზეს ქუჩებში უმიზნოდ მოსეირნე კოლეგა შემხვდა და მეგობრულად მითხრა: „ძალიან უბედურად გამოიყურები“, მე კი გაბრაზებულმა ვუპასუხე: „ვინ გამოიყურება ბედნიერად, როცა ანომალიურ ზეემანის ეფექტზე ფიქრობს?“

ზეემანის ფოტო, სადაც ნაჩვენებია ნატრიუმის D-ხაზის გაყოფა



- ლორენცის ახსნა აშკარად არასაკმარისია ...
- უნდა გავერკვეთ კვანტურ მექანიკაში.

$$g = 1 +$$

$$\frac{2J(J+1)}{2J(J+1)}$$

ლანდეს ფაქტორი

$$g = 1 + \frac{J(J+1) + S(S+1) - L(L+1)}{2J(J+1)}$$

მხოლოდ 1923 წელს აოლფ ლანდემ ტიუბინგენიდან (ექსპერიმენტული მონაცემების საფუძვლიანად გაანალიზების შედეგად სხვადასხვა კონკრეტული შემთხვევებისთვის) იპოვა რთული ზოგადი ფორმულა, რომელიც ზუსტად იძლეოდა ზემანის ეფექტის გამოთვლის საშუალებას ნებისმიერი სპექტრალური ხაზისთვის.

მიზეზი, რის გამოც ატომური ელექტრონის მოძრაობით მაგნიტურ ველში გამოწვეული მარტივი მოვლენების აღწერისთვის საჭიროა ასეთი რთული ფორმულა, გახდა ცხადი 1925 წელს ჰაუდსმიტისა და ულენბეკის მიერ გაკეთებული აღმოჩენის შემდეგ.

მათ აღმოაჩინეს, რომ ელექტრონი ბზრიალას მსგავსად ტრიალებს თავისი ღერძის გარშემო. ელექტროდინამიკა გვიჩვენებს, რომ ასეთი ელექტრონი უნდა იქცეოდეს, როგორც პატარა მაგნიტი, და რომ სწორედ ორმაგი ურთიერთქმედება ატომში ორბიტული მომენტის მაგნიტურ ველთან და სპინთან იწვევს ასეთ რთულ დინამიკურ სურათს.



ჰაუდსმიტი და ბორი
უყურებენ
ბზრიალას.



ჰეიზენბერგი - ნობელის ლაურეანტი 1932 წელი

$$g = 1 + \frac{J(J+1) + S(S+1) - L(L+1)}{2J(J+1)}$$

- **1926 წელს** ვერნერ ჰეიზენბერგმა და პასკუალ იორდანმა, კვანტური მექანიკის მეთოდების გამოყენებით, გააანალიზეს ზემანის ეფექტი და ლანდეს ფორმულა გამოიყვანეს თეორიის ძირითადი პრინციპებიდან.
- ეს ზემანის ეფექტის სრულყოფილი ახსნა გახდა ახალი ატომური თეორიის ერთ-ერთი პირველი ტრიუმფი.
- შეეცადეთ გარკვიოთ c J , S და L , მაგალითად აქედან:
http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1932/heisenberg-docu.html
- <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1902/summary/>

მადლობა ყურადღებისათვის