

Zavirimo u atome (iliti kvantna mehanika za osnovnu školu)

Duje Jerić-Miloš

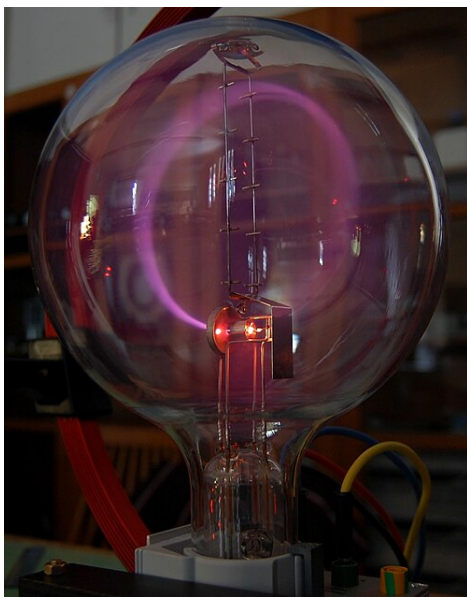
9. travnja 2025.

Izvorno, atomi kakve ih je zamišljala grčka filozofija (Demokrit) su nedjeljivi komadići od kojih je materija građena. Kasnije je otkriveno da je sva materija zaista građena od malih čestica (tzv. atoma), no ispostavilo se da te čestice nisu nedjeljive. Otkrili smo da i atomi imaju nekakvu unutrašnju strukturu.

1 Elektron

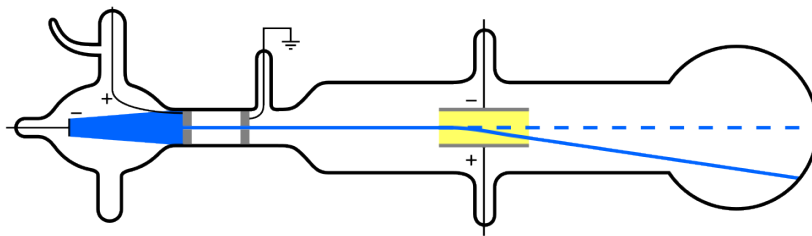
Što se dogodi kada imamo dva kraja žice i primijenimo voltažu? Poteći će struja. Sada presiječemo žicu - struje nema. Ali ako povećamo voltažu i ako se žica nalazi u zraku mogu se javiti iskre između žica (struja u tom slučaju koristi zrak da bi se prebacila s jednog kraja žice na drugi). Sada uzmimo veliku staklenu cijev, ispumpamo sav zrak iz nje (stvorimo vakuum) te na dva kraja te cijevi stavimo metalne ploče koje spojene na veliku voltažu. Što će se sada dogoditi? S one ploče koja je spojena na negativni pol izvora napona (tzv. katodu¹) će isijavati tzv. *katodna zraka*. U savršenom vakuumu ove zrake su nevidljive, no ako ostane malo plina u cijevi, onda taj plin može sjajiti kada ga udari zrak.

¹Ovdje bi valjalo objasniti terminologiju "anoda" i "katoda". Radi jednostavnosti uzmimo da nam je izvor napona baterija. Struja ide od + prema -. Drugim riječima, iz pozitivnog pola baterije u dio uređaja koji je spojen na pozitivni pol. Potom struja izlazi iz uređaja kroz dio koji je spojen na negativni pol i ulazi u negativni pol baterije. Dio (elementa) u koji ulazi struja zove se anoda, a dio iz kojeg izlazi struja katoda. Dakle, + pol baterije je katoda baterija, a dio uređaja koji je spojen na taj pol je anoda uređaja. Dio uređaja koji je spojen na negativni pol (anodu baterije) je katoda uređaja.



Slika 1: Sjaj koji stvara katodna zraka. Izvor: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Cyclotron_motion_smaller_view.jpg

Ovo je trebalo objasniti. J.J. Thomson je otkrio (1897. godine) da električno polje zakreće katodnu zraku kao da je onda negativno nabijena:



Slika 2: Katodna cijev u Thomsonovom eksperimentu, autor: Kurzon, javna domena. U prvom (lijevom) dijelu cijevi imamo katodu i anodu cijevi koje su spojene na visoku voltažu. Zraka prolazi kroz otvor u anodi, potom ulazi u drugi (desni) dio cijevi gdje je zakreće električno polje.

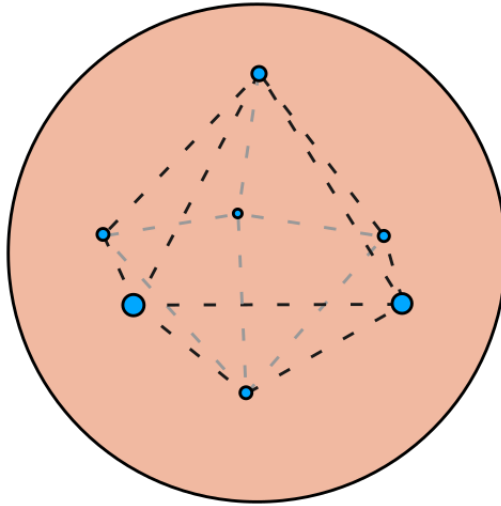
Na sličan način je i magnetsko polje zakretalo zraku. Iz ovoga se moglo zaključiti da se zraka sastoji od nekakvih negativno nabijenih čestica - **elektrona**.

Očigledno (jer je u cijevi vakuum), zraka dolazi od metalnih ploča (anode i katode), a zbog njene usmjerenosti možemo zaključiti da zraka zapravo potječe s katode. Dakle, male čestice (elektroni) se ispaljuju iz materijala od kojeg je građena katoda. Zagrijavanjem katode možemo pospješiti to oslobađanje. Nadalje, možemo provjeriti da je nebitno od kojeg materijala su dvije metalne ploče građene, dobit ćemo isti efekt. Dakle ti elektroni se nalaze u mnogim materijalima oko nas. Konačni komadić slagalice smo dobili kada je J.J. Thomson otkrio da je elektron masom puno manji od najlakšeg poznatog atoma (vodika), iz čega se onda moglo zaključiti da je elektron sastavni dio atoma.

Naime, ako katodnu zraku zakrenemo koristeći električno polje, kasnije je možemo zakrenuti u suprotnom smjeru koristeći magnetsko polje. Čestice većeg naboja se više zakreću i u magnetskom i u električnom polju, a masivnije čestice je teže zakrenuti (zbog tromosti). Mjereći iznos električnog i magnetskog polja koje su potrebni da bi se zraka "izravnala" (da bi ukupna sila na elektron bila 0) može se doći do omjera mase i naboja. Taj omjer ne ovisi o materijalu od kojih su anoda i katoda građene, što je sugerira da je u svim slučajevima riječ o jednoj te istoj čestici. Konačno, na sličan način se izračuna omjer mase i naboja i za najlakši atomski ion (ion vodika) te se dobije puno veći broj. Ovo se jedino može dogoditi ako je naboj elektrona puno veći ili ako je masa elektrona puno manja.

Iz drugih eksperimenata i malo teorijskog nagađanja (vidi rad *On the Masses of the Ions in Gases at Low Pressures*, 1899.) se dalo naslutiti da su po iznosu naboj vodika i elektrona jednaki. Ovo sve dovodi do zaključka da je masa elektrona puno manja od atoma, tj. da je elektron *subatomska* čestica. Točan naboj elektrona je prvi točno izmjerio Millikan 1909. godine, što je potvrdilo postojeću sliku.

J.J Thomson je stoga dao sljedeću sliku atoma. Elektroni su sitne negativno nabijene čestice od kojih je atom građen. Atom je neutralan, stoga mora postojati i neki izvor pozitivnog naboja. Točno odakle pozitivni naboj atomu Thomson nije znao pa postavio slutnju da se možda proteže kroz čitav atom jednoliko (kao kakav "fluid"), a elektroni su smješteni u atomu kao groždice u kakvom kolaču (brit. eng. *Christmass pudding*, *plum pudding*):



Slika 3: Izvor: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Thomson_atom_seven_electrons.svg

2 Jezgra

Thomsonov student Rutherford je u radu s uranijem i radonom otkrio da oni zrače određene pozitivno nabijene čestice - tzv. alfa čestice (α -čestice). Isto kao za elektron se mogao odrediti omjer naboja i mase ovih čestica, no Rutherford je htio zasebno odrediti naboj svake pojedine alfa čestice. Ideja je bila izbrojati ukupni broj alfa čestica i njihov ukupni naboj. Količnik te dvije veličine bi dao naboj pojedine čestice. Za ovo je trebalo izmisliti dovoljno osjetljivi detektor koji bi mogao mjeriti pojedinačne alfa čestice u čemu mu je pomogao Geiger (po kome je uređaj kasnije dobio ime Geigerov brojač).

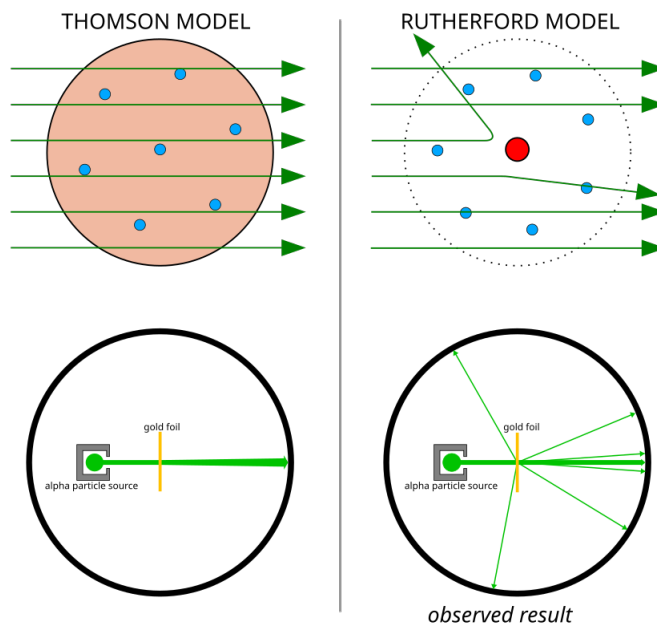
U osnovi, α -čestice se propuste kroz komoru s plinom. Kako se α -čestice sudaraju molekulama plina, stvaraju se ioni (nabijene čestice). Ti ioni mogu stvoriti dodatne ione, što dovodi do kaskade nabijenih čestica koje onda stvore značajniji puls struje koji se može detektirati. Ideja je bila ta da bi svaka alfa čestica trebala ionizirati više-manje isti broj molekula i tako stvoriti isti puls, a iz pulseva bismo onda mogli pobrojati alfa čestice. Kroz eksperimente su Rutherford i Geiger odredili da je alfa čestica ni manje ni više nego helij-4 bez dva elektrona (vidi rad *The Charge and Nature of the α -particle*).

Primijetili su, doduše, da je smjer raspršenja alfa čestica znatno odudarao od očekivanog. Ovo ih je dovelo do toga da točnije istraže točno koliko će tvari raspršiti alfa čestice. Eksperimente su, proveli uglavnom Geiger i njegov student Marsden, a Rutherford je matematički dao matematički opis.

Ideja je bila uzeti komadić metala i raširiti ga u vrlo tanku foliju (uzeli su zlato jer je ono vrlo mekano). Prema toj tankoj foliji su ispucavali alfa čestice i mjerili kuteve pod kojima su se te čestice odbijale i broj odbijenih čestica (najsofisticiraniju verziju tog eksperimenta Geiger i Marsden su proveli 1913. godine, *The Laws of Deflexion of α -Particles through Large Angles*). U eksperimentu iz 1909. godine je otkriveno sljedeće:

1. većina alfa čestica je prošla ravno kroz foliju
2. neke čestice su se odbile za velike kutove (skoro unatrag)

Odbijanje unatrag jednostavno nije bilo u suglasnosti s Thomsonovim modelom. U Thomsonovom modelu je pozitivni dio atoma razmazan na veću površinu, što znači da je međudjelovanje s alfa česticom slabije i da bi ona trebala samo proći kroz atom.



Slika 4: Izvor: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Geiger-Marsden_experiment_expectation_and_result.svg

Nesuglasice nestanu ako pretpostavimo da je pozitivni dio atoma jako malen. Ovako dobijemo da još uvijek većina alfa čestica prođe kroz foliju, ali neke (koje se dovoljno približe pozitivnom dijelu) snažno međudjeluju. Dakle, ovo nas dovodi do sljedeće slike: atom ima jako malenu pozitivno nabijenu jezgru i oko nje negativno nabijeni elektronski omotač. Dakle, možda bismo situaciju mogli zamisliti kao Sunčev sustav: oko jezgre (Sunca) kruže elektroni (planeti) ². Kako je atom električno neutralna čestica, broj elektrona u omotaču mora biti jednak naboju jezgre. Elektron je (kako je J.J. Thomson to već zaključio) vrlo male mase pa je u jezgri praktički sva masa atoma. Za kratko objašnjenje Rutherfordovog eksperimenta vidi <https://www.youtube.com/watch?v=XBqHkraf8iE>.

3 Proton i neutron

Rutherford je kasnijim eksperimentima (1917.) pokazao da se vodikova jezgra nalazi u jezgrama drugih elemenata. Rezultati su objavljeni nakon rata u radu *Collision of α -Particles with Light Atoms*, 1919. Puštao je alfa čestice kroz plinove (konkretno dušik) i primijetio da se stvaraju atomi vodika:

[...] It is necessary to conclude that the nitrogen atom is disintegrated under the intense forces developed in the close collision with a swift α -particle, and that the hydrogen atom which is liberated formed a constituent part of the nitrogen nucleus.

Dakle, (pozitivna) vodikova jezgra je osnovna čestica od kojih su građene jezgre drugih težih elemenata - **proton**. Kasnije je, doduše, otkriveno da je jezgra masivnija nego se moglo objasniti samo protonima. 1931 smo shvatili da je jezgra je pak građena od i protona i električno neutralnih **neutrona**.

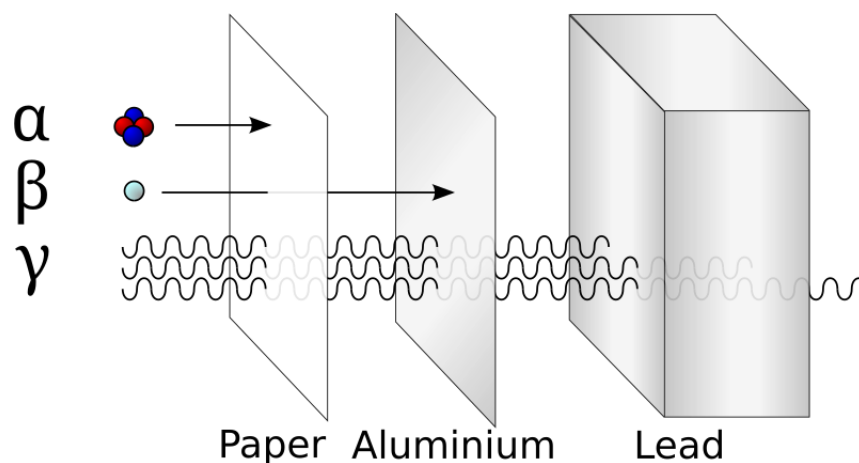
Boethe i Becker su pokazali da se, kada neke lakše elemente bombardiramo alfa česticama, stvara neko neutralno zračenje (slično kao gama zračenje, tj. foton). Kasniji eksperimenti (H. C. Webster) su pokazali da je to zračenje imalo prodiralo dublje u materijale nago se moglo objasniti za gama zračenje. Chadwick se onda dosjetio da bi se svojstva mogla objasniti kada bi zračenje bilo izazvano masivnim neutralnim česticama - **neutronima**. Kasnije je izmjerena da je masa ovih čestica vrlo blizu mase protona te je za sav taj rad

²Sličnu sliku atoma je ranije predložio Hantaro Nagaoka (gdje je jezgra Saturn, a elektroni poput njegovih prstena)

Chadwicku dodijeljena Nobelova nagrada - vidi <https://www.nobelprize.org/uploads/2018/06/chadwick-lecture.pdf>.

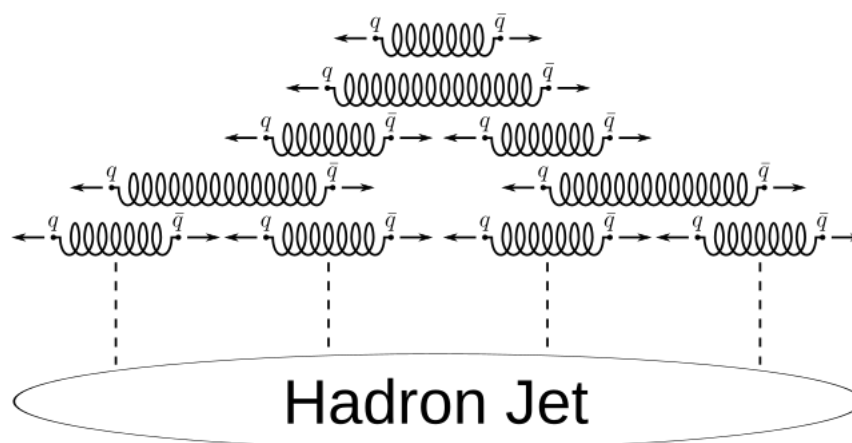
Napomenimo ovdje da je James Chadwick bio Rutherfordov student. Dakle, imamo neprekinuti niz gdje Thomson otkriva elektron, dobija Nobelovu nagradu, mentorira Rutherforda koji otkriva jezgru (i proton) i dobiva Nobelovu nagradu, koji potom mentorira Chadwicka koji otkriva neutron i - dobija Nobelovu nagradu. Naravno ovo nije puna priča - i drugi fizičari su igrali ključne uloge za ove uspjehe, ali je nevjerojatno da je tako usko vezana šačica ljudi konstantno bila u središtu akcije.

Prirodno je dalje se zapitati - od čega su građeni neutron, proton i elektron? Neutron van jezgre atoma je vrlo nestabilan - raspada se na elektron i proton (i, kako je kasnije otkriveno, elektronski neutrino). Ovo je navelo ljude da vjeruju da je neutron građen od protona i elektrona, što se ispostavilo da nije točno. Ovaj raspad se zove beta raspad i njega to je zaslužna slaba nuklearna sila. Nazivi alfa, beta i gama za zračenja zapravo samo dolaze od prva tri slova grčke abecede - to su doslovno zračenje A, zračenje B i zračenje C. Beta zračenje je negativno (sastoji se od elektrona), alfa pozitivno (sastoji se od alfa čestica) i gama je neutralno (to je u osnovi isto što i svjetlost - samo na puno višoj energiji, tj. na manjim valnim duljinama):



Slika 5: Različiti tipovi zračenja različito penetriraju. Alfa zračenje se može zaustaviti papirom, beta zračenje tankim komadom lima, no gama zračenje možemo zaustaviti tek debljim komadom olova. Izvor https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Alfa_beta_gamma_radiation_penetration.svg

U konačnici, 1960-ih je pokazano da su proton i neutron uistinu građeni od manjih čestica - tzv. kvarkova. Za elektron još uvijek vjerujemo da je elementarna čestica (tj. da nije građen ni od čega). Problem s kvarkovima je, doduše, što ih ne možete izolirati kao što možete proton ili neutron - pokušaj vađenja kvarka zahtijeva toliko energije da se odmah stvori novi par kvarkova (tzv. *color confinement*). Dakle, opet imamo proton ili neutron s jedne strane, a s druge strane dobijemo neku česticu građenu od dva kvarka (mezon).



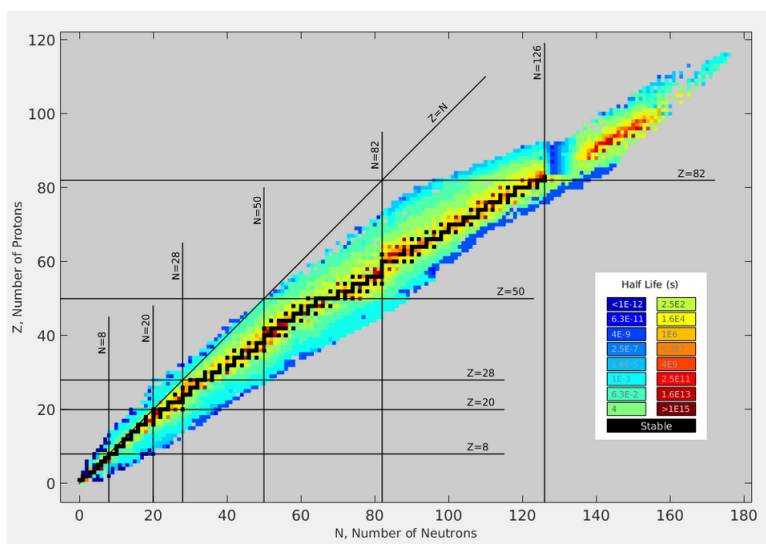
Slika 6: Color confinement. Izvor: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Gluon_tube-color_confinement_animation.gif. Kvarkovi su vezani snažnom nuklearnom silom tako što međudjeluju putem tzv. *gluona* (što je ovdje predstavljeno oprugama). Kada se uloži dovoljno energije da bi se kvarkovi izolirali, stvara se novi par čestica.

4 Moderna slika atoma

Sagledajmo stvari malo s visoka. Atom se sastoji od jezgre i elektronskog omotača. Jezgra je pak građena od određenog broja protona i neutrona. Broj protona određuje naboj jezgre i električno ponašanje atoma - određuje kemiju. Stoga svi atomi s istim brojem protona su kemičarima isti kemijski element. Elemente stoga poredamo po njihovom rednom broju (broju protona u jezgri) u periodni sustav. Izbacivanjem protona iz jezgre (npr. radioaktivnim raspadom) ili ubacivanjem protona u jezgru (bombardiranjem jezgre alfa česticama) možemo prebaciti jedan element u drugi, tj. izvršiti

transmutaciju kakvu su priželjkivali srednjovjekovni alkemisti. Dakle, zaista iz drugih tvari možemo stvoriti zlato, ali samo jako male komadiće zlata. Proces je toliko skup i spor da je jednostavnije (i puno jeftinije) jednostavno kupiti komad zlata.

Čestice koje tvore jezgru (neutroni i protoni) međudjeluju snažnom nuklearnom silom, ali ne direktno putem gluona (kao kvarkovi), već putem Yukawinih mezona (piona) - vidi https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Nuclear_Force_anim_smaller.gif. Ovo drži jezgru na okupu unatoč odbojnoj sili među protonima. Kada imamo dvije čestice s istim brojem protona, ali različitim brojem neutrona, onda govorimo o **izotopima** istog kemijskog elementa. Previše ili premalo neutrona će dovesti do nestabilne atomske jezgre - ona će se raspasti (bilo izbacivanje neutrona, alfa čestice ili raspadom na dvije manje jezgre). Za lakše elemente (s manjim brojem neutrona) najstabilnija situacija kada imamo otprilike isti broj neutrona i protona. Primjerice, najstabilniji izotop kisika ima točno 8 protona i 8 neutrona.



Slika 7: Atomske jezgre poredane po stabilnosti. Crne jezgre su stabilne. Izvor: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:HalflifeNuDat2.png>

Imajući ovu sliku atoma na umu, što se dakle događa kada nastavimo zagrijavati materiju koja je već u plinovitom stanju? Prvo, ako je plin građen od molekula, cijepat će se atomske veze i polako ćemo dobiti zasebne atome.

Ako nastavimo i dalje zagrijavati, sami atomi će početi ionizirati - dobit ćemo slobodne elektrone i pozitivno nabijene ione. Sunce je na dovoljno visokoj temperaturi tako da u Suncu nemamo vodik (i helij) u obliku atoma, već u obliku **plazme** - električki nabijenog fluida kojeg sačinjavaju elektroni i ioni. Zapravo, prisutni su i atomi i ioni, a njihov omjer ovisi točno o temperaturi te je dan Saha-om jednadžbom (vidi https://en.wikipedia.org/wiki/Saha_ionization_equation).

Ovo je razlog zašto su solarne baklje opasne za naše elektroničke uređaje (ponajprije satelite). Solarna baklja je masivno izbacivanje Sunčeve plazme te se sastoji uglavnom od elektrona, vodikovih jezgara (protona) te helijevih jezgara (alfa čestica). Gibanje te plazme (gibanje nabijenih čestica) stvara magnetska polja koja mogu poremetiti rad satelita. Štoviše, ako je magnetsko polje dovoljno jako, može utjecati i na Zemljino polje pa može poremetiti rad elektroničkih uređaja čak i na Zemlji. Primjerice, za vrijeme Carringtonovog događaja se događalo iskrenje u telegrafkim postajama.

Ako nastavimo plazmu zagrijavati, nakon što se atomi potpuno ioniziraju, i sama jezgra će postati nestabilna. Nakon što razbijemo jezgru, i sami protoni i neutroni mogu postati nestabilni te je konačno stanje tzv. kvark-gluonska plazma. Smatra se da je sva materija bila u ovom obliku u ranim trenucima nastanka svemira. Kako se svemir polako hladio, tako su nastali prvo protoni i neutroni, potom atomske jezgre, potom su se elektroni vezali na te jezgre i oformili atome, a atomi vezali u molekule.

5 Double slit eksperiment

Problem sa slikom jezgre i "omotača" je što nisam točno objasnio što "omotač" znači. Naivno bismo mogli pomisliti da su elektroni male čestice nalik na male krute kuglice koje kruže oko jezgre atoma kao atomi oko Sunca. Zato što kruže, ti elektroni moraju *ubrzavati*, ali znamo da nabijena čestica koja ubrzava nužno stvara elektromagnetke (EM) valove, stoga bi ti elektroni zračili svoju početnu energiju i vrlo brzo se urušili u jezgru atoma. Znači nešto nije kako treba. Bohr je predložio da se elektroni mogu gibati samo po predodređenim putanjama, a kada elektron ima veću energiju giba se po putanji udaljenijoj od jezgre. Ipak, jasnija teorija je nastala tek kasnije doprinosima de Brogliea³ i Schrodingera.

³de Broglie francusko ime pa bi najbliža hrvatska fonetska inačica bila /de broj/. Ako ime konjugiramo po fonetskom principu /de broja/, onda bi valjda trebalo pisati de Bro-

Atom možemo više-manje zamisliti kao običnu česticu - ima nekakav određeni položaj. Kada atomom pogodimo nekakav detektor, detektor se aktivira samo na jednom mjestu. Čak i jezgru atoma možemo shvatiti na isti način, ali elektron u atomu ne možemo shvatiti kao česticu. Za opis elektrona je potrebna puna mašinerija kvantne mehanike. To debelo izlazi iz opsega fizike osnovne škole, ali osnovna ideja je sljedeća. Elektron se ne ponaša u potpunosti kao čestica, već i ima neka *valna* svojstva. Ali elektron se ne ponaša ni u potpunosti kao val, već ima i neka čestična svojstva. Što točno ovo znači? Bolje je to ne shvatiti preozbiljno. Elektroni se ponašaju kao *elektroni*, a sve drugo je nekakva metafora/analogija kojom pokušavamo razjasniti to ponašanje. Ipak, voljeli bismo metaforu koja je logički konzistentna i daje dobra predviđanja, no koristiti samo čestice ili samo valove neće dovesti do toga.

Centralni rezultat koji može razjasniti ovaj problem (ili bolje rečeno čovjeka temeljito zbuniti u vezi s istim) je eksperiment s dva proreza (eng. *double slit experiment*). Imamo izvor elektrona na jednom i detektor na suprotnom kraju sobe. Između izvora i detektora stavimo nekakvu pregradu s dva proreza (elektroni mogu samo proći kroz te proreze).

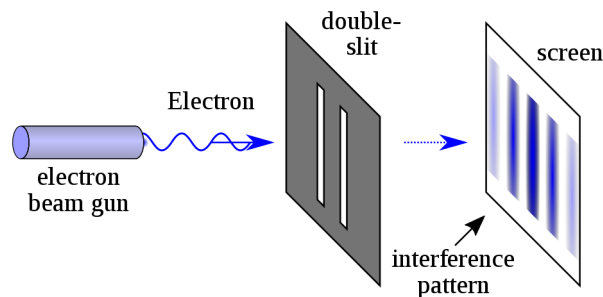
U osnovi, valovi imaju sljedeće ponašanje. Ako zatvorimo jedan prorez, na zaslonu ćemo dobiti jednu vertikalnu liniju (iza tog orireza), ali ako su oba proreza otvorena, dobit ćemo interferencijski uzorak:



Slika 8: Ako imamo val očekujemo pravce gdje se valovi poništavaju i pravce gdje se valovi međusobno podupiru. Izvor: <https://www.youtube.com/watch?v=Iuv6hY6zsd0>

gliea (mjesto npr. de Broglieja).

Naime, valovi se zbrajaju na specifičan način. Ako zbrojimo amplitudu (visinu) vala koji prolazi kroz prvu rupu s amplitudom vala koji prolazi kroz drugu, na nekim mjestima možemo dobiti mirnu vodu (valovi se ponište; destruktivna interferencija), a na nekim mjestima vodu koja je viša od pojedinačnih valova (valovi se podupiru; konstruktivna interferencija). Kada se brijeg jednog vala susretne s dolom drugog dobijemo poništenje, a kada se brijegovi i dolovi susretnu dobijemo podupiranje. Dakle, ako je elektron val, očekujemo sljedeći rezultat kada ga pustimo kroz dvostruki prorez:



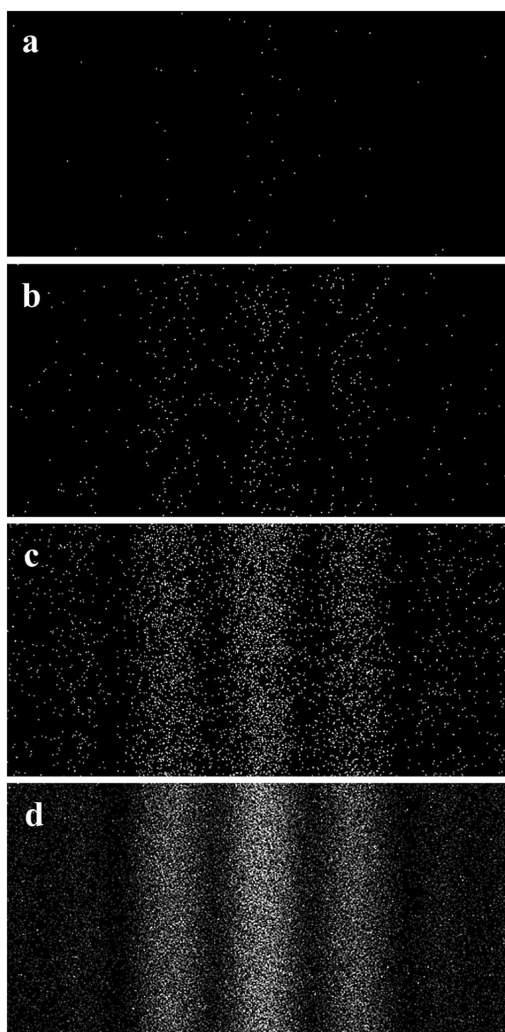
Intenzitet vala I je pak definiran kao snaga vala (P) po jedinici površine (A). Dakle, ako val prenese puno energije na područje male površine u jedinici vremena, onda na tom mjestu imamo veliki intenzitet. Intenzitet vala na nekom mjestu je inače proporcionalan kvadratu amplitude (maksimalne visine vala) na tom mjestu⁴ Svjetlina pruge bit će jednaka intenzitetu (koliko je energije val ostavio).

Naravno, kada elektron pogodi detektor, ono što dobijemo nije šum koji je veći na nekom mjestu pa opada u nulu pa se opet povećava opada u nulu,

⁴Prvo, dok se val giba, kroz neku površinu A će proći energija E u nekom vremenu t . Dakle, intenzitet je snaga po jedinici površine, tj. $I = \frac{P}{A} = \frac{E}{t \cdot A}$. Sada ako val prijeđe udaljenost d , onda je $V = A \cdot d$ volumen koji je val popunio. Konačno, imamo: $I = \frac{E}{t \cdot A} = \frac{E \cdot d}{t \cdot V} = \frac{E}{V} \cdot \frac{d}{t} = \varepsilon \cdot c$. $\varepsilon = E/V$ je gustoća energije (energija po jedinici volumena), a $c = d/t$ je brzina vala (konstanta karakteristična za val). Sada jedino preostaje pokazati da je gustoća energije vala proporcionalna amplitudi na kvadrat. Zaista, uzmimo mehanički val koji ima energiju zbog titranja malih komadića materijala. Energija vala na nekom mjestu je dana maksimalnom kinetičkom energijom komadića koja titra na tom mjestu $\frac{1}{2}mv^2$, gdje je v maksimalna brzina, a m masa komadića. Maksimalna brzina komadića koja titra pak linearno ovisi o amplitudi (udvostručimo li amplitudu, udvostručili smo put koji komadić mora prevaliti u jednom periodu pa i brzina mora biti dvostruko veća). Zaključujemo da je energija proporcionalna amplitudi na kvadrat, stoga je i gustoća energije pa samim time i intenzitet.

itd. Kada elektron pogodi detektor dobijemo obično jednostavno lokalizirano "bum" - kao da je udario metak na nekom mjestu. Dakle, elektroni nisu valovi.

Sada pustimo drugi elektron kroz prorez i zabilježimo gdje je udrio. Pustimo treći, četvrti... Nakon što je čitava horda elektrona prošla kroz dvostruki prorez i udrila u detektor, dobit ćemo sljedeći rezultat:

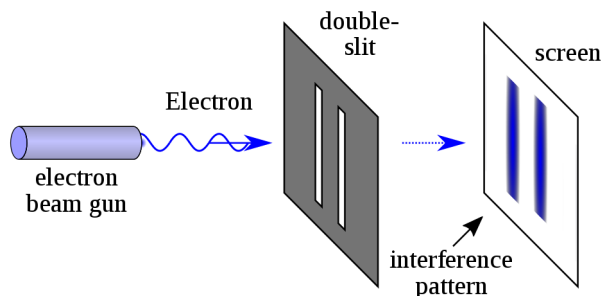


Slika 9: Double slit eksperiment, 2018 izvor <https://www.nature.com/articles/s41598-018-19380-4>

Sigurno mislite koji k... atastrofalno poražavajući rezultat. Uopće nema

smisla da bi se jedan elektron ponašao kao čestica, a puno njih kao val. Ovo *pogotovo* nema smisla jer te elektrone puštamo zasebno jedan nakon drugog. Možemo čekati po minutu, sat (dan ako treba!) između puštanja dva elektrona. Kako se to onda elektroni udruže da na kraju dobijemo valni uzorak?

Nadalje, ako elektron promatramo kao česticu, onda ima smisla pitati, npr. kroz koji prorez je elektron prošao. Ako je elektron val odgovor na pitanje je naravno oba. Sada stavimo nekakav detektor na samom prorezu tako da možemo odrediti kroz koji prorez elektron prolazi. Ovo je vrlo nježni detektor koji može odrediti kroz koji prorez je elektron prošao bez da ga zaustavi⁵ Sada opet mjerimo udar prvog elektrona pa drugog pa trećeg... Ali sada više **nemamo valni uzorak**. Dobili smo na zaslonu samo dvije svijetle pruge koje odgovaraju dvama prorezima:



Ako prije ništa nije bilo jasno sada je valjda još manje.

6 Valna funkcija

Moderna fizika elektrone (i druge sitne čestice) objašnjava na sljedeći način. Razmislimo prvo o valnom uzorku. Za dani elektron ne znamo točno gdje će on završiti u detektoru. Ta nas činjenica tjera na statističku interpretaciju -

⁵Ovo je samo opis klasičnog misaonog eksperimenta. U praksi, ovakav detektor je problematičan jer čestice najlakše "detektiramo" tako da ih apsorbiramo u nekakav film. Dakle, teško je "detektirati" česticu dok se ona giba, tj. u stvarnosti moramo "označiti" česticu na neki način. Ovakvi "which way" eksperimenti su obično provedeni za fotone i to na takav način da su korišteni polarizacijski filteri (onda samo foton odgovarajuće polarizacije može proći kroz odgovarajući prorez). Dakle, fotone označimo tako da im odredimo polarizaciju (u tom slučaju znamo kroz koji prorez su prošli).

nakon što smo izbrojali puno i puno elektrona, znamo koja su mjesta vjerojatnija, a koja manje vjerojatna. Dakle, možemo govoriti o vjerojatnosti da će trenutni elektron pogoditi detektor na nekom mjestu.

Zapravo, budući da se ta vjerojatnost očigledno ponaša kao intenzitet vala, bilo bi dobro pričati o amplitudi vjerojatnosti (isto kao što smo pričali o amplitudi vala čiji je kvadrat dao intenzitet). Kvadrat amplitude vjerojatnosti (koja može biti i negativna⁶). daje vjerojatnost da ćemo elektron pronaći na različitim lokacijama.

Dakle, elektron je opisan valnom funkcijom i kako on prolazi kroz dva proreza, ta se valna funkcija mijenja kao i amplituda vala. Kvadrat valne funkcije nam pak daje uzorak na detektoru. Ovo znači da ćemo, kada napravimo puno mjerenja, većinu elektrona pronaći tamo gdje je vrijednost kvadrata valne funkcije velika.

Odmah vidimo problem. Recimo da smo na detektoru izmjerili gdje se elektron nalazi. Što ako ponovno idemo mjeriti položaj elektrona? Zar su vjerojatnosti sada opet iste - onakve kao za val? Naravno, da nisu. Kada izmjerimo ponovno položaj elektrona (ukoliko se ništa drastično nije u međuvremenu dogodilo), očekujemo da ćemo ga naći točno na onom mjestu gdje smo ga prije toga pronašli. Primijetimo da ovo znači da sami čin mjerenja mijenja vjerojatnosti (valnu funkciju).

Sada je valjda malo jasnije što se događa kada stavimo detektor ispred proreza (u pokušaju da izmjerimo kroz koji prorez elektron prolazi). U tom slučaju smo odredili kroz koji koji prorez elektron prolazi i njegova valna funkcija više ne opisuje istu situaciju kao u prvom slučaju, izmjenjena je - dogodio se "kolaps" valne funkcije. Ovo bi valjalo još jednom izreći:

Kada govorimo o sitnim sustavima kakvima se bavi kvantna fizika, svaki čin mjerenja takvih sustava ih drastično mijenja. Zašto? Zato što je svaki čin mjerenja međudjelovanje sa sustavom. Ne

⁶Zapravo može biti i kompleksni broj. Nećemo ulaziti u diskusiju o ovome jer nećemo ništa konkretno računati u kvantnoj mehanici, ali čisto da znate matematiku amplituda valova je obično najlakše iskazati kompleksnim brojevima (matematika je najelegantnija) pa su kompleksni brojevi vjerojatno tako i ušli u kvantnu mehaniku. U to jesu li kompleksni brojevi apsolutno nužni ili ne za kvantnu mehaniku neću ulaziti, ali sam mišljenja da nisu (algebra opservabli ne ovisi toliko o svojstvima kompleksnih brojeva, oni više dolaze do izražaja kada se spustimo na razinu valnih funkcija - vidi <https://physics.stackexchange.com/questions/32422>)

možemo "pasivno" promatrati kvantni sustav. Svaki detektor nekako pokušava osjetiti prisutnost čestica - ali to znači da mora te čestice "prodrmati".

"Pasivno promatranje" (gledanje iz daleka) na koje smo navikli u svakodnevnom životu je laž. Mi vidimo iz razloga što se od predmeta koji promatramo fotoni (čestice svjetla) odbiju do naših očiju. Tamo aktiviraju naše fotoreceptore, koji pak stvore živčani impuls u očnom živcu, koji se prenese do mozga i tamo pretvori u sliku. Dakle, sve je u stanju međudjelovanja, nema pasivnosti!

7 Kolaps valne funkcije

Svaki čin mjerenja "krhkog" kvantnog sustava prodrma isti, te se njegovo stanje (valna funkcija) promijeni. Kako se točno valna funkcija mijenja dok mjerimo nije poznato, što se zove "measurement problem". Fizičari su samo opisali situaciju na sljedeći način.

Svaka opservabla (ono što možemo mjeriti - položaj, brzina, energija...) ima svoje "svojstvene vrijednosti" i njima pridružena "svojstvena stanja" (svojstvene valne funkcije). Kada izmjerimo opservablu, kao rezultat mjerenja, dobit ćemo jednu od svojstvenih vrijednosti (s različitim vjerojatnostima⁷), a valna funkcija će se "urušiti" u pripadajuće svojstveno stanje. Može se dogoditi da je jednoj svojstvenoj vrijednosti pridruženo više svojstvenih stanja (čitav vektorski prostor tih stanja). U tom slučaju samo znamo da je valna funkcija jedno od tih stanja. Ako, nakon što smo mjerili opservablu A i dobili vrijednost a , ponovno mjerimo A (bez da smo mjerili ili radili sa sustavom išta drugo), naravno dobit ćemo opet vrijednost a .

Što kada imamo dvije opservable? Onda nema razloga zašto bi svojstvena stanja jedne bila ujedno i svojstvena stanja druge. Ako se ovo dogodi može reći da su te dvije opservable *kompatibilne* (ovo nije uobičajena terminologija, fizičari će reći da su te dvije opservable komutativne, ali ne želim sada objašnjavati razloge iza tog žargona).

Preciznije, kompatibilnost znači sljedeće. Mjerenje opservable A daje neku vrijednost a , a mijenja valnu funkciju u neko od svojstvenih stanja koje su pridružene svojstvenoj vrijednosti a . Ako su A i B kompatibilne,

⁷Ovisno o početnom stanju u kojem je sustav pripremljen, neke vrijednosti će biti više, a neke manje vjerojatne

onda među svojstvenim stanjima opservable A imamo i svojstvena stanja opservable B . Ovo znači da će mjerenje opservable B dati neku vrijednost b i baciti nas u svojstveno stanje od B **koje je ujedno svojstveno stanje od A sa svojstvenom vrijednosti a** . Dakle, ako sada opet izmjerimo A , dobit ćemo a . Ovo znači da kompatibilne opservable možemo "istovremeno" izmjeriti.

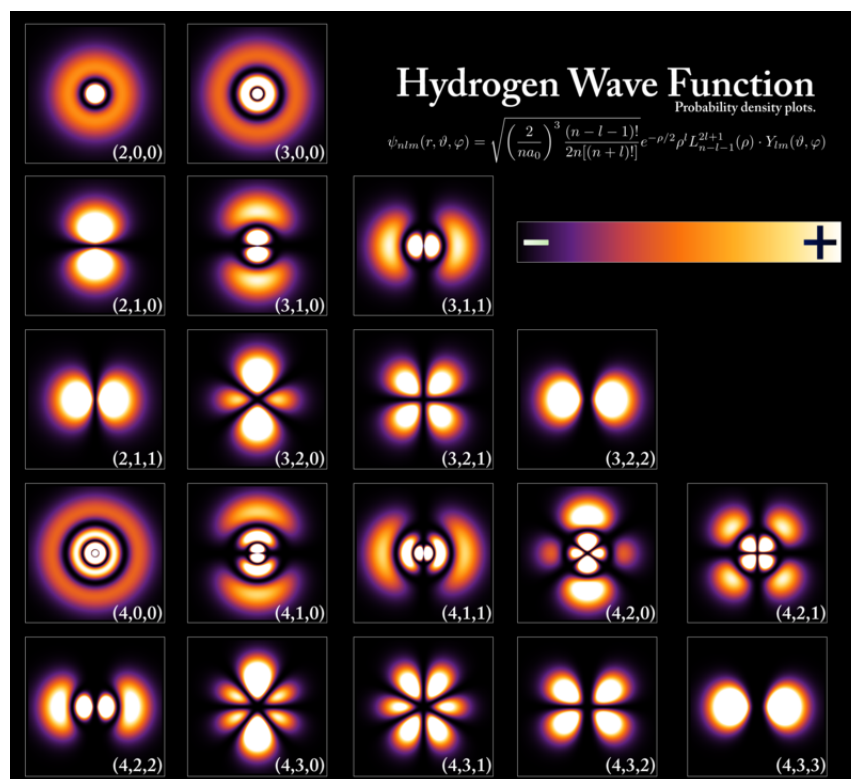
Kada opservable nisu kompatibilne, onda mjerenje jedne narušava vrijednost koju smo izmjerili za drugu. Primjerice, A daje vrijednost a_1 i svojstveno stanje $|a_1\rangle$. Sada mjerimo B , a on nam vrati vrijednost b i svojstveno stanje $|b\rangle$. Ako sada opet izmjerimo opservablu A , dobit ćemo neku vrijednost a_2 koja *ne mora biti jednaka* prethodnoj vrijednosti a_1 . Naime, $|b\rangle$ nije svojstveno stanje od A pa ćemo iz stanja $|b\rangle$ opet s različitim vjerojatnostima dobiti neku od svojstvenih vrijednosti opservable A . Dakle, mjerenje opservable B je narušilo mjerenje koje smo već napravili za A . Ove dvije opservable stoga ne možemo istovremeno mjeriti.

8 Atomske orbitale

Ova čitava rasprava nas dovodi do sljedeće slike elektronskog oblaka. Elektroni su u atomu opisani valnom funkcijom. Njen kvadrat predstavlja vjerojatnost (tj. distribuciju vjerojatnost) da ćemo elektron pronaći na različitim položajima. Što je energija elektrona veća, to je izglednije da ćemo ga pronaći dalje od jezgre (slično kao i za planet oko sunca).

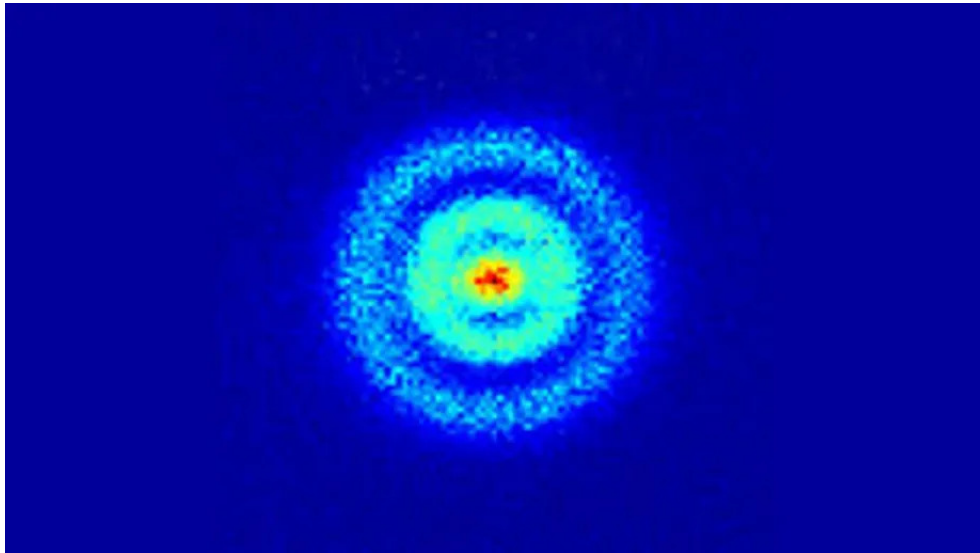
Energije atoma su svojstvene vrijednosti energije, a svojstvena stanja energije su valne funkcije koje elektron ima kada je na danoj energiji (u kemiji njih još zovemo **atomske orbitale**). Orbitale opisuju prostorno gibanje elektrona oko jezgre - slično kao gibanje planeta oko Sunca. Elektroni imaju i određenu unutrašnju kutnu količinu gibanja, koju zovemo *spin*, slično kao i planet koji se vrti oko svoje osi.

Energijske svojstvene funkcije (orbitale) žive beskonačno - one su stabilne. Druga stanja će se urušiti na jedno od tih stabilnih i stajati tamo dok ih neka vanjska pobuda opet ne izbaci iz tog stanja i ubaci u neko drugo energetska stanje, itd. Te orbitale imaju sljedeći oblik:



Slika 10: Orbitale za vodikov atom, izvor: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Hydrogen_Density_Plots.png

Vidjeli smo da atome možemo "uslikati" kao točkice, ali zasigurno ne možemo vidjeti unutar atoma. Prvo, kao što smo rekli, elektroni nisu nekakve krute točkice. Oni su opisani valnim funkcijama (čiji kvadrat daje distribuciju vjerojatnosti položaja elektrona), a svaki pokušaj mjerenja valne funkcije istu mijenja. Nadalje, kada bismo obasjali atom svjetlošću valne dužine koja je toliko mala da možemo vidjeti unutrašnju strukturu, sami atom bi se ionizirao pa ne bismo imali više elektron kojeg želimo uslikati. Zacijelo smo samo prepušteni rješavanju Schrödingerove jednadžbe i zamišljanju dobivenih valnih funkcija bez mogućnosti da ih dobijemo nekim direktnim eksperimentom? Pogrešno! Predstavljam vam atom vodika:



Ovo je uslikano fotoionizacijom (rad: <https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.110.213001>). Ideja je da izložimo atom električnom polju. To će ionizirati atom, no možemo detektirati elektrone koje ionizacija izbacila. Vidi <https://physics.aps.org/articles/v6/58>

Za više o eksperimentu s dvostrukim prerezom vidi Feynmanovo predavanje <https://www.youtube.com/watch?v=b0EChbwSuuQ>.