

=> Proslijedite prema interaktivnom
sadržaju zbornika

21. ljetna škola mladih fizičara

Hrvatskog fizikalnog društva



Fizika u temeljima suvremene znanosti i društva

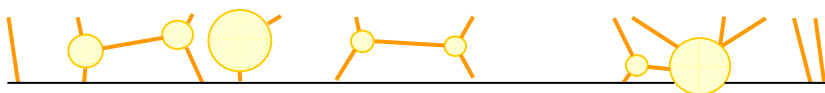


Labin, 19.-25. lipnja 2005. godine

Zbornik predavanja

priredio A. Šiber

Hrvatsko fizikalno društvo, lipanj 2005. godine



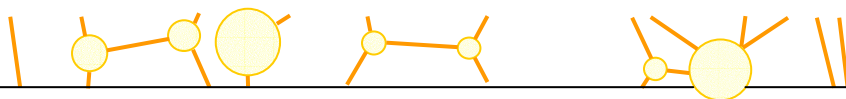
Predgovor

Prije stotinu godina tri rada Alberta Einsteina označila su prekretnicu u fizici i poimanju svijeta oko nas. Nakon postavljanja teorije relativnosti, objašnjenja fotoelektričnog efekta i Brownova gibanja nije se samo izmijenilo razumijevanje pojava koje nas okružuju, nego su se otvorile neizmjerne nove stranice istraživanja u fizici, koje su dovele i još dovode do neslućenog tehnološkog razvoja i općeg poboljšanja kvalitete života.

Prošlo je cijelo stoljeće od Einsteinove čudesne 1905. godine. U tih stotinu godina fizika je napredovala ogromnim koracima, ali možda je još uočljiviji i interesantniji bio napredak kemije i biologije, koji je bio najizraženiji upravo onda kad su ove znanosti primjenjivale spoznaje i metode «posuđene» iz fizike (npr. objašnjenje vezanja atoma u molekule primjenom metoda kvantne fizike ili otkriće strukture DNA uzvojnice primjenom metode difrakcije X-zraka). Upravo zahvaljujući Einsteinovim radovima iz 1905. godine, prije svega radovima na objašnjenju foto-efekta i Brownovog gibanja, fizika je postala sama suština i temelj kemije i biologije – život funkcionira zahvaljujući tome što su prirodne pojave kvantne naravi (sjetimo se samo foto-pobuđenja molekule klorofila i procesa fotosinteze koji bez ovog ključnog koraka kvantne naravi ne bi funkcionirao), a sva kemija je u dubokoj suštini kvantna fizika mnoštva čestica. U ovakvim stavovima nikako nismo originalni, jer je već 1965. godine američki nobelovac (i fizičar, naravno) Richard Feynman izjavio: *«Ispada da je vrlo teško precizno predvidjeti što će se dogoditi u kemijskoj reakciji, no bez obzira na to, najdublji dio teorijske kemije mora završiti u kvantnoj mehanici.»*

21. stoljeće je stoljeće fizike – možda će se fizika u nekima od svojih budućih pojavnosti nazivati «kemijom» ili «biologijom», ali bez obzira na svoja buduća imena, svakako će biti u temelju znanosti 21. stoljeća, jednako kao što je to bila i u proteklih 100 godina. Zbornik radova 21. Ljetne škole mladih fizičara pokazat će vam koliko je fizika raznolika i bogata i kolikim spektrom različitih pitanja se bavi. Izabrana predavanja jasno pokazuju koliko duboko i čvrsto je *fizika u temeljima suvremene znanosti i društva*.

Antonio Šiber
Miroslav Požek

**Organizator:**

Hrvatsko fizikalno društvo

Suorganizatori:

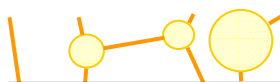
Ministarstvo znanosti, obrazovanja i športa
Prirodoslovno-matematički fakultet, Zagreb
Institut «Ruđer Bošković», Zagreb
Institut za fiziku, Zagreb
Institut de physique de la matière complexe, FSB-EPFL, Lausanne, Švicarska
Srednja škola Mate Blažine, Labin

Organizacijski odbor:

Damir Bosnar, PMF, Zagreb
Mladen Buljubašić, MZOŠ, Split
Laszlo Forro, EPFL, Lausanne
Davor Kirin, IRB, Zagreb
Marina Kveder, IRB, Zagreb
Stjepan Marčelja, ANU, Canberra
Ivica Picek, PMF, Zagreb
Miroslav Požek (voditelj), PMF, Zagreb
Ana Smontara, IF, Zagreb
Antonio Šiber, IF, Zagreb
Eduard Tutiš, IF, Zagreb

Sponzori:

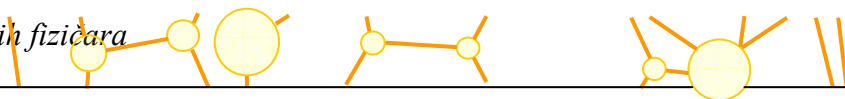
Grad Zagreb
Županija Istarska
Dalekovod d.d.
Grad Labin
Općine Kršan, Nedešćina, Raša i Pićan
HEP – TE Plomin
Holcim d.d.
Rabac d.d.



Sudionici 21. ljetne škole mladih fizičara

Učenicima:

<i>Ime</i>	<i>Prezime</i>	<i>Mjesto</i>	<i>Kategorija</i>
Ivan	Domladovec	Zagreb	Grupa OŠ
Ilijan	Kotarac	Kaštel Gomilica	Grupa OŠ
Magdalena	Magličić	Karlovac	Grupa OŠ
Manuela	Činko	Roč	Grupa OŠ
Filip	Dumbović	V. Gorica	Grupa OŠ
Irma	Telarović	Zagreb	ostalo (OŠ)
Ivan	Šandrak	Zagreb	I. grupa
Juraj	Klarić	Zagreb	I. grupa
Ivan	Peris	Karlovac	I. grupa
Matija	Varga	Zagreb	I. grupa
Luka	Štambuk	Split	I. grupa
Mario	Menix	Metković	I. grupa
Nikolina	Artić	Krapina	MFL (I. razred)
Mario	Volarević	Zagreb	ostalo (I.)
Josip	Klapač	V. Gorica	ostalo (I.)
Vedran	Brdar	Rijeka	ostalo(I.)
Kruno	Lenac	Rijeka	ostalo(I.)
Petar	Mrazović	Zagreb	ostalo (I.)
Ivan	Gavran	Zagreb	ostalo (I.)
Matija	Hustić	Slavonski Brod	II. grupa
Mijo	Tvrdojević	Slavonski Brod	II. grupa
Albert	Ćosić	Karlovac	II. Grupa
Dario	Đurđević	Osijek	II. Grupa
Jelena Kristina	Željeznjak	Zagreb	II. Grupa
Josip	Čović	Subotica	Međ. sur. (II.)
Silvio	Đonlić	Split	ostalo(II.)
Matija	Bakos	Čakovec	ostalo(II.)
Miljenko	Bujanić	Čakovec	ostalo(II.)
Tomislav	Bronić	Zagreb	III. Grupa
Lovre	Bošnjak	Ploče	III. Grupa
Ivan	Rančić	Zadar	III. Grupa
Mirjana	Horvatski	Subotica	Međ. sur. (III.)



Robert	Mađarić	Subotica	Međ. sur. (III.)
Marija	Mustać	Zadar	IV. grupa
Nikola	Marković	Rijeka	IV. Grupa
Ivica	Sertić	Varaždin	OŠ exp.
Slaven	Mišak	Varaždin	OŠ exp.
Tea	Plaftak	Kuršanec	OŠ exp.
Ivan	Habrka	Zagreb	SŠ exp.
Neven	Čaplar	Zagreb	SŠ exp.
Stjepan	Vučković	Zagreb	SŠ exp.
Ivan	Vidić	Zadar	ostalo

Nastavnici u pratnji:

Valter Krajcar, Gospić
Stipan Stantić, Subotica

Studenti u pratnji:

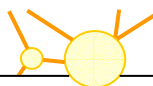
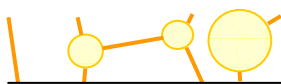
Juraj Radić, Zagreb
Zvonimir Vlah, Čakovec

Domaćini:

Čedomir Ružić, ravnatelj
Željko Brenčić, profesor fizike.

Organizacija ljetne škole ne bi bila moguća bez svesrdne pomoći mnogih djelatnika Srednje škole Mate Blažine iz Labina.

Najsrdacnije im zahvaljujemo!



Program predavanja i sadržaj zbornika

Nedjelja, 19. lipnja 2005. godine

Svečano otvorenje (19:00)

Ponedjeljak, 20. lipnja 2005. godine

Ivica Picek (PMF Zagreb)	<i>Zašto je Sovjetska godina fizike u znaku Einsteinovih otkrića?</i>	str. 7
Predrag Prester (PMF Zagreb)	<i>100 godina teorije relativnosti</i>	str. 15
Dubravko Klabučar (PMF Zagreb)	<i>Fotoelektrični efekt i Einsteinova fotonska hipoteza</i>	str. 21
Željko Brenčić (Srednja škola Labin)	<i>Pokusi s fotoelektričnim efektom</i>	

Utorak, 21. lipnja 2005. godine

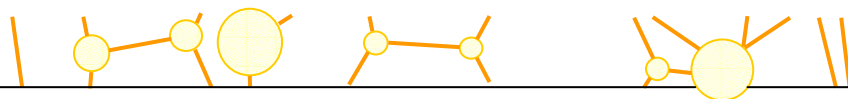
Ivica Picek (PMF Zagreb)	<i>Nobelova nagrada za fiziku 2004.</i>	str. 33
Sanja Tomić (IRB Zagreb)	<i>Otkrivanje tajni molekula</i>	str. 41
Damir Aumiler (IF Zagreb)	<i>Laseri u modernoj znanosti i tehnologiji</i>	str. 47
Branko Grisogono (PMF Zagreb)	<i>Kako znati o budućem vremenu i klimi</i>	str. 53
Poslije podne:	<i>Rješavanje problemskih zadataka</i>	

Srijeda, 22. lipnja 2005. godine

IZLET

Četvrtak, 23. lipnja 2005. godine

Ivica Aviani (IF Zagreb)	<i>Fizika kao temelj novih tehnologija</i>	str. 57
Tihomir Vukelja (PMF Zagreb)	<i>Moderna fizika kao filozofski problem</i>	str. 65
Branimir Lukić (EPFL Lausanne)	<i>Brownovo gibanje</i>	str. 73
Željko Brenčić (Srednja škola Labin)	<i>Pokusi s Brownovim gibanjem</i>	
Poslije podne:	<i>Rješavanje problemskih zadataka</i>	



Petak, 24. lipnja 2005. godine

Milko Jakšić (IRB Zagreb)	<i>Mali akceleratori u primjeni</i>	str. 81
Janko Herak (FBF Zagreb)	<i>Fizička organizacija lipoproteina</i>	str. 87
Snježana Markušić (PMF Zagreb)	<i>Tsunami - razorni morski val uzrokovao potresom</i>	str. 95
Poslije podne:	<i>Projekcija filma "Sfere unutar sfera" (A. Šiber, IF Zagreb)</i>	

Subota, 25. lipnja 2005. godine

Odlazak

Einsteinova otkrića iz 1905. i Svjetska godina fizike 2005.

Ivica Picek

Fizički odsjek, Prirodoslovno-matematički fakultet Sveučilišta u Zagrebu

Kratki pregled kroz period koji je prethodio čudesnoj godini

Albert Einstein je rođen kao sin Hermanna Einsteina i Pauline (rođ. Koch) u Ulmu (Njemačka) 14.03.1879. godine. Već slijedeće godine obitelj seli u München gdje kasnije Albert pohađa katoličku osnovnu školu. Dodatni satovi judaizma potiču kod njega u dobi od jedanaest godina fazu intenzivnog vjerskog zanosa, a dodatni satovi violine ostavljaju mu taj instrument kao doživotnu ljubav. Od ranih doživljaja kojih se Einstein kasnije volio prisjećati istaknimo njegovu općinjenost magnetskim kompasom (odnosno skrivenom silom koja upravlja magnetskom iglom) u dobi od pet godina. Svoje «otkriće geometrije» (jednostavnih, dokazljivih tvrdnji, poput one da se tri visine trokuta sijeku u jednoj točki) duguje maloj knjižici koja mu je došla pod ruku kad je bio star dvanaest godina.

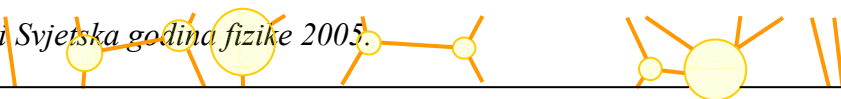
God. 1896. prolazi (iz drugog pokušaja, zbog problema s grčkim i latinskim jezikom) prijemni ispit na ETH u Zürichu. Za vrijeme studija nastavlja samostalno izučavati teorijsku fiziku, a pri polaganju ispita se oslanja na izvrsne bilješke svojeg prijatelja Marcela Grossmanna. Nakon diplomiranja 1900. bezuspješno pokušava naći posao u nastavi. Uz pomoć oca istog prijatelja preuzima posao u patentnom uredu u Bernu i 1901. postaje švicarskim državljaninom. Nakon što 1902. s kolegicom sa studija Milevom Marić dobiva kćer Lieserl, oni se vjenčaju i u braku koji traje do 1914. dobivaju još sinove Hansa-Alberta i Eduarda.

Posao u patentnom uredu u Bernu dopuštao je Einsteinu da se posveti teorijskoj fizici kao svojem hobi. U tada vodećem njemačkom časopisu *Annalen der Physik* on u naredne četiri godine objavljuje četiri rada u kojima se bavi realnošću atoma i molekula, nečeg što tada još nije bilo opće prihvaćeno. Potom dolazi do eksplozije njegove kreativnosti u 1905. godini, njegovoj čudesnoj godini (*annus mirabilis*) [1].

Čudesna godina 1905.

U ovom napisu zadržat ćemo se na godini u kojoj su se pojavili Einsteinovi radovi koji će obilježiti cijelo nadolazeće stoljeće:

- **17.03.1905.** Einstein šalje na objavljivanje u *Annalen der Physik* rad u kojemu predlaže postojanje kvanta svjetlosti i na temelju toga daje objašnjenje fotoelektričnog učinka;



- dovršava rad u kojemu pokazuje kako se izračunava Avogadrov broj i veličina molekula i to na temelju njihova gibanja u otopini. Taj mu je rad **u srpnju** prihvaćen kao doktorat na Sveučilištu u Zürichu, a odmah potom on šalje u *Annalen der Physik* **još jedan rad** u kojemu daje objašnjenje Brownovog gibanja;
- **30.06.1905.** u časopis *Annalen der Physik* stiže njegov rad «o elektrodinamici tijela u gibanju», u kojemu, pri preispitivanju tadašnjeg razumijevanja prostora i vremena, uvodi specijalnu teoriju relativnosti;
- **27.09.2005.** u isti časopis stiže i peti, posljednji njegov rad iz te godine, u kojemu ispituje ovisnost inercije tijela o njegovoj energiji.

Izgleda nevjerojatno da su svi ti radovi djelo istog čovjeka: rad na **Brownovom gibanju**, **fotoelektrični učinak** i **specijalna relativnost** s relacijom $E=mc^2$, svaki slijedeći impresivniji od prethodnoga! Po riječima Franka Wilczeka, jednog od dobitnika Nobelove nagrade za 2004. godinu (o njoj će biti riječi u mojem drugom predavanju) ta bi tri rada, u navedenom redosljedu, zasluživala solidnu, jaku i super jaku Nobelovu nagradu. Dogodilo se da je nagrađen samo ovaj srednji koji se odnosi na svjetlosne kvante, 1921. godine, «za njegove doprinose teorijskoj fizici, a posebice za otkriće zakona fotoelektričnog učinka».

S današnjeg gledišta postaje jasno kako je svojim radovima iz «čudesne godine» Einstein postavio abecedu (korake koje ćemo u ovom napisu označiti s **A**, **B** i **C**) povijesnog pohoda na izučavanje atomskog i subatomskog svijeta, pohoda koji je na neponovljivi način premostio 19. i 21. stoljeće.

Kao što su radovi iz 1905. samo blistavi početak, tako već Einsteinov rad iz 1907. pokazuje da je on svjestan kako je i sama specijalna relativnost samo početak općenitije teorije. Isprva Einstein smatra da je oblačenje specijalne relativnosti u moderno tenzorsko ruho, kako je to učinio Herman Minkowski, samo odraz «suvišne učenosti». No ubrzo i sam usvaja tenzorsku metodu koja mu omogućuje prijelaz od specijalne na opću teoriju relativnosti kojom postavlja teoriju za silu gravitacije i koja se općenito smatra njegovim najvećim postignućem.

Dio i cjelina u Einsteinovu radu

Einsteina je od početka vodila potreba općenitog razumijevanja prirode i u toj službi je bio i njegov interes za odabrane vrlo specifične probleme poput Brownovog gibanja ili fotoelektričnog efekta. Tim je problemima kao čarobnim štapićem počeo razotkrivati ljuske mikrosvijeta.

A: Brownovo gibanje je poslužilo za nepobitni dokaz molekularne i atomske podstrukture.

B: Uvođenjem kvanta svjetlosti Einstein je načio problem dualnosti čestice i vala. Na razrješavanju dualnosti, nezaobilazne na skali karakteriziranoj Bohrovim radijusom atoma, $r_B = 5.3 \cdot 10^{-10} \text{ m}$, izrasla je kvantna mehanika.

C: Pokazalo se da je pri izučavanju još manjih dimenzija, na subatomske skali karakteriziranoj tzv. Comptonovom valnom duljinom, $r_c = 3.86 \cdot 10^{-13}$ m, potrebno kvantnu mehaniku dopuniti sa specijalnom teorijom relativnosti. U tom spoju rođena je teorija polja (relativistička kvantna mehanika) kao moćno oruđe za budući opis temeljnih sila (pa tako i temeljne jakе sile, za koju je dodjeljena Nobelova nagrada za 2004. godinu).

Budući da su specifične teme pod A i B pokrivene drugim predavanjima na ovoj školi, zadržimo se ovdje na idejama i dosezima specijalne teorije relativnosti.

Specijalna teorija relativnosti

Einsteinova specijalna teorija relativnosti predstavljala je neviđeni odmak u dotadašnjem shvaćanju prostora i vremena. Usprkos imenu "relativnosti", ta se teorija temelji na dvijema apsolutnim sastavnicama: **brzini svjetlosti** i **vlastitom vremenu!** Ono što je "relativno" je pojava. Primjerice, dok mirujemo u odnosu na električni naboj, za nas je on izvor čisto električnog polja. No, ukoliko se gibamo u odnosu na taj naboj, uz električno opažat ćemo i magnetsko polje. Takva «relativnost pojavnosti» događa se na još elementarnijoj razini gdje ruši Newtonove pojmove apsolutnog prostora i vremena. Newtonovo je shvaćanje blisko našem svakodnevnom iskustvu. Prema njemu vrijeme ima pojava potpuno različitu od one prostora. Udaljenosti u prostoru nemaju ništa zajedničko s vremenskim razmacima. Kvadrat vremenskog intervala, t^2 , pozitivna je vrijednost, kao i kvadrat prostorne udaljenosti, l^2 . Ova posljednja u pravokutnom koordinatnom sustavu zadovoljava poznato Pitagorino pravilo,

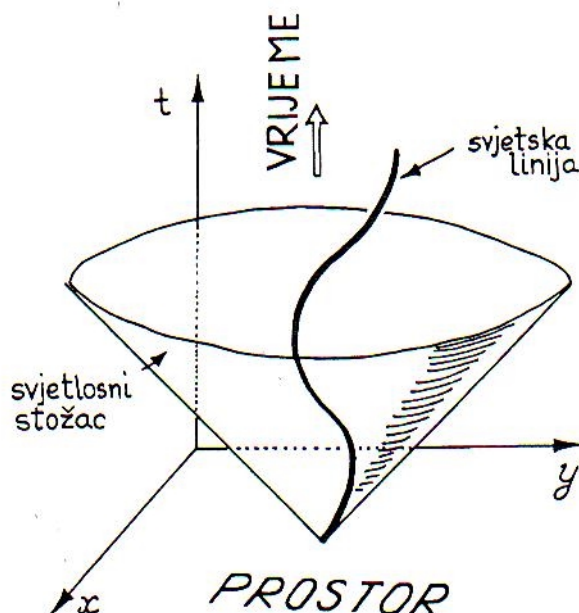
$$l^2 = x^2 + y^2 + z^2.$$

Međusobna neovisnost prostora i vremena odražava se i u različitim jedinicama (metrima i sekundama) u kojima mjerimo prostor i vrijeme. Shvaćanje specijalne relativnosti, prema kojoj prostorni i vremenski razmaci između dva događaja nisu "invarijantni" (isti za svakoga) nego ovise o stanju gibanja promatrača, naizgled se kosi s iskustvom (doduše ograničenim na brzine koje su puno manje od brzine svjetlosti).

O kakvom je prostoru uistinu riječ, dočarat će nam neobično svojstvo širenja svjetlosti, koje ne pošiva uobičajeno zbrajanje brzina (vidjeti *Vježbu 1*). Naime, mnoga su mjerenja potvrdila iznenađujuće rezultate prvih mjerenja Michelsona i Morleya iz 1881. godine, koja su pokazivala uvijek istu brzinu svjetlosti, bez obzira na brzinu kojom se giba osoba koja tu brzinu mjeri. To je u sukobu s Newtonovim zakonima, prema kojima rezultat mjerenja brzine mora ovisiti o brzini opažача. U sustavu mirovanja etera (koji podržava širenje svjetlosti i koji prema Newtonu miruje u apsolutnom prostoru) mjerila bi se ista brzina svjetlosti u svim smjerovima, dok netko u gibanju treba mjeriti različitu brzinu. S druge strane, apsolutnost brzine svjetlosti, njena ista vrijednost za svakoga, omogućava nam da onda i prostorne udaljenosti mjerimo svjetlosnim sekundama ili svjetlosnim godinama, kao vremenom koju svjetlost treba da prevali danu udaljenost.

Poistovjećivanjem svjetlosti i vremena dolazi do stapanja prostora i vremena u objedinjeni četverodimenzijski prostorno-vremenski svijet. Zasebni Newtonovi intervali vremena i prostora spojeni su u "invarijantni" prostorno-vremenski interval, putem neobičnog poopćenja Pitagorinog poučka:

$$(\text{prostorno-vremenski interval})^2 = (\text{vremenski interval})^2 - (\text{prostorni interval})^2.$$



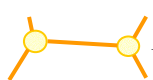
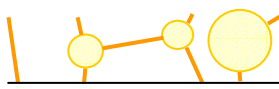
Slika 1-1: Prikaz svjetske linije-gibanja čestice u prostoru-vremenu s dvije prostorne koordinate (preuzeto iz ref. [2])

Relativni "minus" predznak u tom "poučku" govori o neeuclidskoj geometriji prostora-vremena, o prostoru Minkowskog. Označimo li četvero interval tog prostora slovom s , a brzinu svjetlosti slovom c , gornji "poučak" dobiva ekonomičniji, matematički zapis

$$s^2 = c^2 t^2 - (x^2 + y^2 + z^2).$$

To je u stvari jednadžba čuvenog "svjetlosnog stošca", kakvog možemo nacrtati u dvije dimenzije, na papiru, u x, y, t -koordinatama (vidjeti sl.1-1.).

Svjetlosni stožac je u stvari omotač putova svjetlosnih zraka, za koje je prostorno-vremenska udaljenost $s = 0$. Četverodimenzijska prostorno-vremenska udaljenost između našeg oka i zvijezda koje ono gleda, je nula [3]. "Svjetlosno područje" koje opisuje stožac, razdvaja unutarnje "vremensko područje" dohvatljivo svjetlosnim signalima, od vanjskog "prostornog područja" koje svjetlost ne može dohvatiti. Time je određen i "horizont" kauzalno povezanih događaja za nekog budućeg promatrača.



Svaki opažač koji živi u četverodimenzijском prostoru-vremenu, posjeduje vlastiti sustav, sustav mirovanja, u kojemu je definirano vlastito vrijeme, τ , kao invarijanta dana relacijom

$$s^2 = c^2 \tau^2.$$

Vlastito vrijeme je važni atribut elementarnih čestica [2], koje posjeduju određena, dobro definirana vremena života. Primjerice, mion, čestica koja u mirovanju živi samo milijuntinku sekunde, djeluje kao sat. Mioni u gibanju žive duže, tako da primjerci koji se gibaju brzinama bliskim brzini svjetlosti mogu prevaliti znatne udaljenosti, bilo u atmosferi, bilo u prstenovima suvremenih ubrzivača elementarnih čestica (vidjeti *Vježbu 2*).

Nasuprot «relativnoj» pojavnosti, zakoni prirode su apsolutni (posvuda isti). Najbolji primjer za to su danas spoznati temeljni zakoni međudjelovanja elementarnih čestica. Univerzalnost tih zakona postaje očigledna kada se oni formuliraju u tenzorskom zapisu u četverodimenzijском prostoru vremenu, na "relativistički invarijantni način".

Neke od posljedica specijalne relativnosti

Einsteinovim postavljanjem **invarijanti**, veličina koje su iste za sve inercijalne opažače, započela je era vladavine načela simetrije u fizici. Relativistička simetrija opisana grupom Lorentzovih transformacija imaće niz zanimljivih posljedica koje dolaze do izražaja tek kod sustava s velikim brzinama v relativnih gibanja, izraženih relativističkim faktorom

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

Faktor γ se često pojavljuje u relativnosti (posljedica je Lorentzovih transformacija koje prikazujemo u *Vježbi 1*). Tim su faktorom određene i glasovite pojave *dilatacije vremena* i *kontrakcije dužina* (koje ćemo objasniti u *Vježbi 2*):

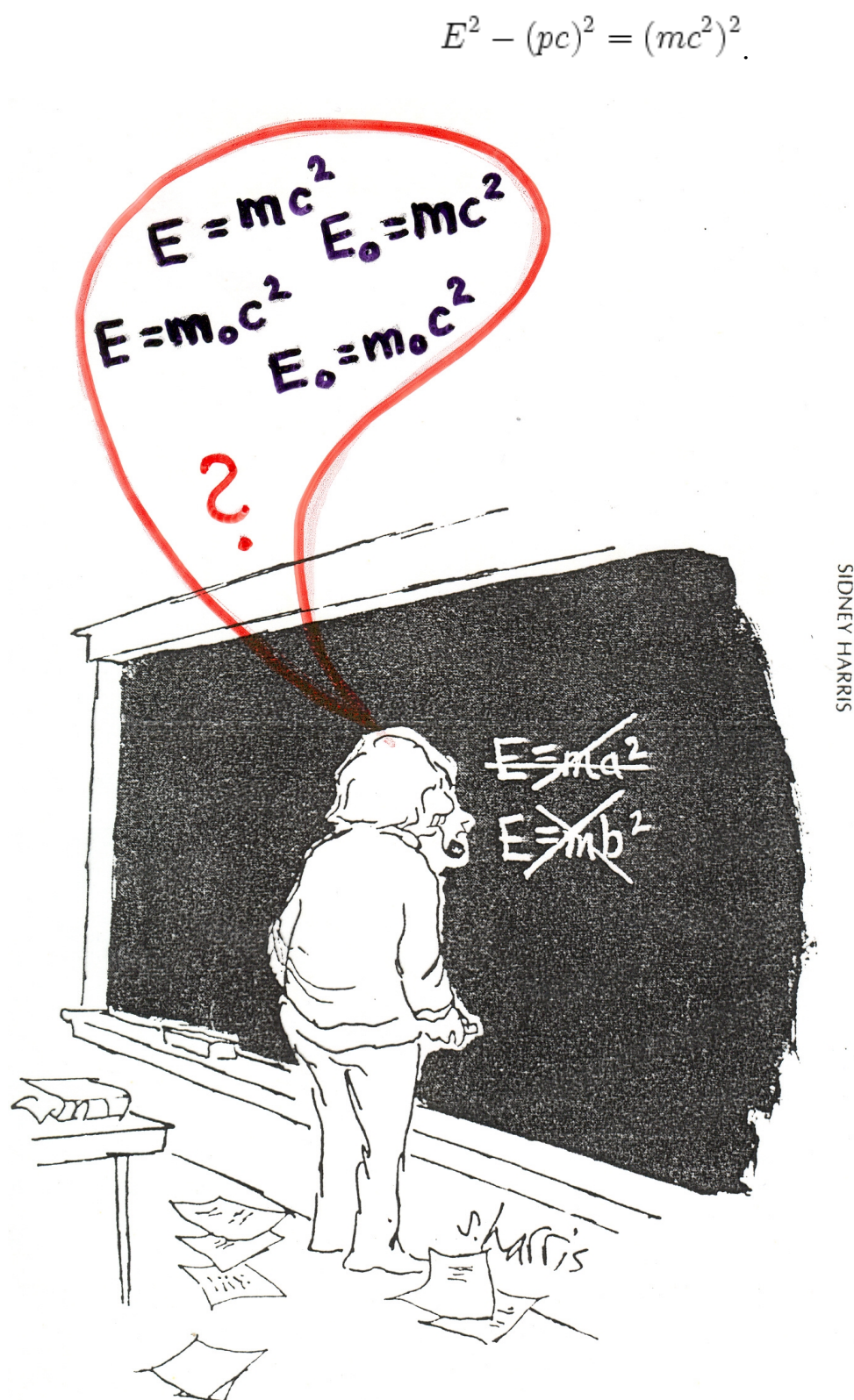
$$\Delta t = \gamma \Delta t_0; \quad L = L_0/\gamma.$$

Faktor γ će ući i u izraze za energiju i impuls tijela mase m u gibanju brzinom v ,

$$E = \gamma mc^2$$

$$p = \gamma mv.$$

pri čemu su energija i impuls povezani relativističkom formulom



Slika 1-2: Nadopunjena ilustracija preuzeta iz ref. [4].

Za brzine puno manje od brzine svjetlosti γ se može razviti u Taylorov red, što daje

$$E \approx mc^2 + \frac{1}{2}mv^2$$

$$p \approx mv$$

Oдавде je očigledno da je masa samo jedan oblik energije (čuvana ekvivalentnost na sl.1-2).

Vježba 1: Relativističko zbrajanje brzina

U klasičnoj fizici znamo za jednostavno zbrajanje brzina. Promatrajmo tri koordinatna sustava: prvi sustav O, drugi O' koji se duž njegove x -osi giba brzinom v i treći O'' koji se duž x' -osi sustava O' giba brzinom u . Tada se O'' giba u odnosu na O brzinom $u+v$. Lako je zamisliti sustave koji se onda gibaju dvostrukom brzinom svjetlosti. Da bi očuvali c kao maksimalnu moguću brzinu, sustavi moraju biti povezani Lorentzovim transformacijama: transformacije od O na O' i od O' na O'' mogu se napisati u matričnom obliku,

$$\begin{pmatrix} x' \\ ct' \end{pmatrix} = \gamma \begin{pmatrix} 1 & -\beta \\ -\beta & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ ct \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} x'' \\ t'' \end{pmatrix} = \gamma' \begin{pmatrix} 1 & -\beta' \\ -\beta' & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x' \\ ct' \end{pmatrix}$$

gdje su uvedene oznake za β i za γ na način

$$\beta = \frac{u}{c} \quad \gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}$$

$$\beta' = \frac{v}{c} \quad \gamma' = \frac{1}{\sqrt{1-\beta'^2}}$$

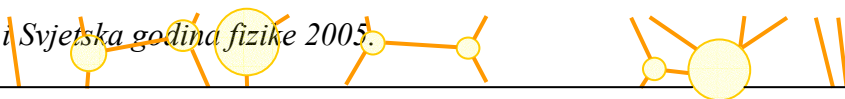
Veza između koordinata sustava O i O'' dobije se jednostavnim množenjem matrica

$$\begin{pmatrix} x'' \\ ct'' \end{pmatrix} = \gamma\gamma' \begin{pmatrix} 1 + \beta\beta' & -(\beta + \beta') \\ -(\beta + \beta') & 1 + \beta\beta' \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ ct \end{pmatrix}$$

Isčitajte odatle β'' izraženu s β i β' . (Iskrpni odgovor naći ćete u udžbenicima, npr. ref. [5]).

Vježba 2: Vrijeme života čestice u gibanju

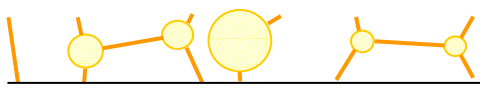
Mioni su elementarne čestice koje žive $2.2 \cdot 10^{-6}$ sekundi prije nego se raspadnu (za razlikovanje «vremena života» od «poluživota pogledajte ref. [5]). Kojom se brzinom moraju gibati mioni stvoreni u atmosferi na 15 km visine, da bi u svojem preletu dosegli površinu Zemlje? Usporedite viđenje tog događaja od promatrača koji «sjedi» na mionu i od promatrača koji sjedi na Zemlji.



Literatura

- [1] Abraham Pais, "*Subtle is the Lord... Scientific biography of A. Einstein*", Oxford University Press, 1982
- [2] Ivica Picek, "*Elementarne čestice – iskrenje u svemiru tamne tvari*", Školska knjiga, Zagreb 1997
- [3] Edward R. Harrison, "*Cosmology, the science of the universe*", Cambridge University Press, 1981
- [4] Lev b. Okun, "*The concept of mass* ", Physics Today, June 1989 , p.31
- [5] Ivica Picek, "*Fizika elementarnih čestica*", Udžbenik Sveučilišta u Zagrebu, HINUS, Zagreb 1997

Niz web-stranica nudi sadržaje specijalne relativnosti. Od onih na hrvatskom jeziku preporučam e-školu Hrvatskog fizikalnog društva, <http://eskola.hfd.hr>, posebno «fiziku svemira», http://eskola.hfd.hr/fizika_svemira/svemir.html.



100 godina teorije relativnosti

Predrag Prester

Max Planck Institute for Gravitational Physics
(Albert Einstein Institute), Potsdam

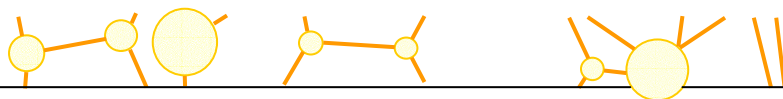
Fizički odsjek, Prirodoslovno-matematički fakultet Sveučilišta u Zagrebu

Ove godine se navršava 100 godina od kada je Albert Einstein objavio tri epohalna rada; o specijalnoj teoriji relativnosti, fotoefektu te o Brownovom gibanju. I iako se često kaže da je svaki od tih radova pojedinačno toliko važan da zaslužuje Nobelovu nagradu (koju je A. Einstein i dobio 1921. za objašnjenje fotoefekta), po svom utjecaju na naše razumijevanje ustrojstva svijeta i svemira posebno se ističe teorija relativnosti. Jedan razlog tome je što ona govori o strukturi prostora i vremena, i kao takva je utkana u sve modele kojima danas opisujemo fundamentalne sile. Drugi je što je teorija relativnosti (pogotovo opća koja uključuje i gravitaciju) donijela radikalnu promjenu u našem razumijevanju prostora i vremena, koji prestaju biti statični i odvojeni, i postaju nerazdvojno vezani u dinamični prostorno-vremenski kontinuum. Da bi razumjeli promjene koje je donijela teorija relativnosti potrebno je prvo se podsjetiti fizikalnog opisa prostora i vremena prije 1905.

Galileo-Newton-Maxwell

Fizika 19. stoljeća je bila zasnovana na Newtonovoj mehanici i gravitaciji, te teoriji elektriciteta i magnetizma koju je formulirao u konačnom obliku James C. Maxwell. U toj slici svijeta materija i polja su "uronjeni" u prostor i mijenjaju se u vremenu. Prostor je trodimenzionalni kontinuum, što znači da za određivanje položaja nekog točkastog tijela (relativno u odnosu na neko proizvoljno ishodište) trebamo tri realna broja, tzv. prostorne koordinate (jer postoje tri nezavisna smjera: naprijed-natrag, lijevo-desno, gore-dolje). Vrijeme je jednodimenzijski kontinuum, što znači da za određivanje trenutka kada se tijelo nalazilo u danoj točki trebamo jedan realni broj (trebamo očitati vrijeme na satu). Sami za sebe prostor i vrijeme su nepromjenljivi.

U ovoj slici vrijeme je *apsolutno* – ako dvije osobe uzmu dva jednaka sata koja su jednako podešena te se potom razidu i nakon nekog vremena ponovo sretnu, njihovi satovi će pokazivati isto vrijeme, bez obzira kakvo gibanje osobe izvode (naravno pod uvjetom da su satovi dovoljno čvrsti da ubrzavanje ne poremeti njihov rad). Slično je i prostor apsolutan – dvije osobe koje dobiju identične štapove, razidu se i ponovo prolete jedan pored drugoga, će ustanoviti da su im štapovi i dalje iste duljine.



Specijalna teorija relativnosti

Krajem 19. stoljeća fizičari Michaelson i Morley vršili su ekperimente u kojima su mjerili ovisnost brzine svjetlosti (emitirane iz izvora koji miruje na Zemlji) o smjeru u kojem putuje. Naime, pošto se Zemlja vrti oko Sunca brzinom otprilike 30 km/s (što je više od 100000 km/h), Sunčev sustav se vrti oko centra naše galaksije (Mliječnog puta), koja se pak giba u odnosu na druge galaksije u našoj nakupini galaksija, očito je da jednostavni zakon o zbrajanju brzina predviđa ovisnost o smjeru. No, u navedenim (vrlo preciznim) eksperimentima nije se uočila nikakva razlika u brzini svjetlosti emitirane u različitim smjerovima.

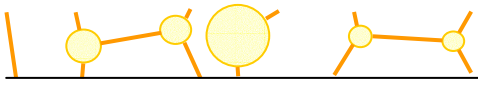
Iako su brojni fizičari pokušavali objasniti rezultate Michaelsona i Morleya različitim (kompliciranim) teorijama, tek je Einstein shvatio da naprosto treba jednostavno uzeti ono što su eksperimenti govorili: *Iznos brzine svjetlosti (u vakuumu) ne ovisi o gibanju izvora svjetlosti*. No, pokazuje se da ta jednostavna pretpostavka povlači za sobom potpuno nova svojstva prostora i vremena, koji prestaju biti apsolutni i postaju *relativni*:

- Prostorno udaljeni događaji koji su istovremeni za jednog promatrača, neće biti istovremeni za drugog koji se giba nekom brzinom u odnosu na prvog
- Jednaki satovi koji se razdvoje i izvode različito gibanje, ukoliko se ponovo sretnu neće pokazivati isto vrijeme (čuveni paradoks blizanaca)
- Štap koji se giba izgledat će kraći od istog takvog ali koji miruje
- Prostor i vrijeme postaju povezani – relativnost vremena je kroz relativnost istovremenosti povezana sa relativnosti prostora. Govorimo o prostor-vremenu kao o četverodimenzionalnom kontinuumu
- Fizikalne informacije se ne mogu prostirati brže od svjetlosti u vakuumu
- Masa je oblik energije i može se pretvarati u druge oblike energije

Više detalja o specijalnoj teoriji relativnosti možete naći u bilješkama I. Piceka.

Uključivanje gravitacije - opća teorija relativnosti

Vrlo brzo nakon formulacije specijalne teorije relativnosti, Einstein je uočio da ona i Newtonova teorija gravitacije nisu u skladu. Jedan razlog je odmah vidljiv – u Newtonovoj teoriji gravitacijska sila između dvije mase djeluje trenutno na daljinu, što je u neskladu sa tvrdnjom da se nikakav fizikalni učinak ne može prenijeti brže od svjetlosti. Također, mjerenja precesije Merkurovog perihela su davala bitno veću brzinu od one koju je predviđala Newtonova teorija gravitacije. Formulacija relativističke teorije gravitacije je bio težak problem za koji je Einsteinu (uz pomoć matematičara Hilberta) trebalo 10-tak godina da ga u potpunosti riješi. No, zato se konačni rezultat, poznat pod nazivom opća teorija relativnosti, smatra jednim od najvećih i najljepših dostignuća znanosti uopće.



Pošto je Newtonova teorija prilično precizno opisivala putanje planeta u Sunčevom sustavu, bilo je jasno da nova teorija mora nekako sadržavati neke elemente stare teorije. Jedno od posebnih svojstava Newtonove teorije je da putanja tijela na koje djeluje samo gravitacijska sila ne ovisi o njegovoj masi. To se lako vidi koristeći Newtonov drugi zakon te izraz za gravitacijsku silu kojom točkasta tijela masa M_j , koja se nalaze u točkama prostora određenim radij-vektorima $\vec{r}_j$ djeluju na točkasto tijelo mase m koje se nalazi u točki određenoj sa $\vec{r}$:

$$m\vec{a} = \vec{F}_{grav} = \sum_j G_N \frac{mM_j}{(\vec{r} - \vec{r}_j)^2}$$

Kada podijelimo gornju jednadžbu sa m ona više u opće ne sadrži masu promatranog tijela, što znači da putanja čestice (koja se dobije rješavanjem gornje jednadžbe) neće ovisiti o njenoj masi (a ni drugim svojstvima). Einstein je zaključio da to svojstvo treba vrijediti i u novoj teoriji, i u njenoj konstrukciji krenuo od slijedećeg postulata:

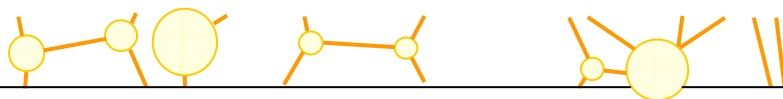
Sva tijela koja se nalaze pod utjecajem isključivo gravitacijske sile gibat će se na istovjetan način.

Krećući od gornjeg postulata i zahtjevajući pri tom također:

- Pri malim brzinama (puno manjim od brzine svjetlosti) te slabim gravitacijskim djelovanjem (kakvo je npr. između Sunca i planeta) nova teorija se mora svoditi na Newtonovu teoriju gravitacije
- Ako zanemarimo gravitacijsko djelovanje (npr. ako su druge sile poput elektromagnetske puno jače) teorija se mora svoditi na specijalnu teoriju relativnosti

Einstein je došao do potpuno novog opisa koji neposredno povezuje gravitaciju sa prostor-vremenom. U tom novom opisu, koji se (pomalo nespretno) nazvao opća teorija relativnosti, prostor-vrijeme više nije statično već *dinamičko*. Gravitacija nije neko polje koje samo ispunjava prostor-vrijeme (kao što su električno ili magnetsko polje), već se očituje kao *zakrivljenje* prostor-vremena. Sva tijela (uključujući i svjetlost) se gibaju po najravnijim putanjama, no te putanje nisu više pravci zato što je prostor-vrijeme zakrivljeno. Što ga zakrivljuje? Naravno, to mora biti nešto što uzrokuje gravitacijsku silu, a znamo iz Newtonove teorije da je to masa. No, specijalna teorija relativnosti govori da je masa samo jedan oblik energije. Konačni zaključak je da sva energija koja je sadržana u nekom dijelu prostora zakrivljuje prostor-vrijeme oko sebe, i to razmjerno svom iznosu (veća gustoća energije dovodi do većeg zakrivljenja).

Gornja objašnjenja vjerojatno djeluju apstraktno i vjerojatno nerazumljivo. Potpuno objašnjenje opće teorije relativnosti zahtjeva upotrebu napredne matematike (zване diferencijalna geometrija) koja se izučava tek na 4. godini studija fizike. Također problem predstavlja i vizualizacija četverodimenzionalnih prostora. No, nekoliko slikovitih primjera u dvije dimenzije može dati osjećaj za zakrivljene prostore. Ravan prostor je onaj u kojem vrijedi Euklidska geometrija (npr. Pitagorin poučak), a primjeri su ravna površina stola ili papira. Primjer zakrivljenog prostora je sfera (tj. površina lopte). Što su najravnije krivulje na sferi? To su velike kružnice koje dijele sferu na pola



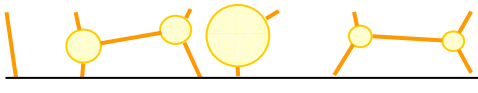
(to su kružnice najvećeg polumjera koje možemo nacrtati na sferi, a što kružnica ima veći polumjer to je manje zakrivljena, tj. ravnija).

Slikoviti prikaz kako materija zakrivljuje prostor je slijedeći. Zamislite da stojite pored kreveta koji ima ravni madrac preko kojeg je dobro zategnuta plahta. Ako uzmete dovoljno laganu kuglicu (tako da ne propada u plahtu) i samo je stavite na plahtu ona će mirovati (osim ako madrac nije nagnut, u kojem slučaju ga treba postaviti u vodoravni položaj). Ako ju zakotrljate po površini kreveta, vidjet ćete da će se ona gibati po pravcu (zbog trenja će usporavati i na koncu stati, ali zanemarimo to ovdje). To odgovara slučaju kad na tijelo ne djeluju vanjske sile. Zamislite sada da na krevet stavite neko teško tijelo (recimo sjednete na njega) koje će udubiti madrac i učiniti plahtu neravnom. Ako sad stavite kuglicu dovoljno blizu središta udubljenja, vidjet ćete da će se skotrljati prema njemu. Što ju stavite bliže središtu, brže će se skotrljati u njega. Ako kuglici date neku početnu brzinu koja nije u smjeru udubljenja, ona će se gibati po zakrivljenoj putanji. Ova situacija slikovito prikazuje zakrivljenje prostora (plahta) od strane neke materije (ono što je udubilo plahtu), koje dovodi da se tijela (kuglica) više ne gibaju po pravcima ili miruju već se gibaju po zakrivljenim putanjama. Ne postoji nikakva sila na daljinu ili neko dodatno polje – materija djeluje na tijela jedino tako što zakrivljuje prostor oko sebe.

Astrofizika i kozmologija – svemir kao laboratorij

U općoj teoriji relativnosti prostor-vrijeme nije statična arena već nešto dinamično i uzročno-posljedično povezano sa materijom sa kojom čini jednu cjelinu. Promjene u stanju materije u svemiru nužno dovode do promjene u strukturi prostor-vremena, i obrnuto. To je dovelo do potpuno novih spoznaja o Svemiru, potvrđenih eksperimentalno, od kojih ćemo ovdje spomenuti samo neke najspektakularnije.

- **Big Bang** – opisujući rezultate astrofizičkih promatranja, opća teorija relativnosti udružena sa standardnim modelom fizike elementarnih čestica (zasnovan pak na specijalnoj teoriji relativnosti) daje opis razvoja našeg Svemira. U tom opisu Svemir je prije otprilike 10 milijardi godina bio vrlo malen i ispunjen izuzetno vrućom i gustom juhom sastavljenom od elementarnih čestica. Kako se Svemir (odnosno prostor-vrijeme) širio, tako se i hladio. To je omogućilo stvaranje prvih atoma (vodika i helija), te puno kasnije prvih zvijezda, galaksija itd.
- **Crne rupe** – kada dovoljno velika zvijezda potroši svoje nuklearno gorivo, dolazi do nestabilnosti koja dovodi do eksplozije (supernova). Ukoliko nakon eksplozije zvijezda ostane dovoljno masivna, opća teorija relativnosti kaže da gravitacijsko privlačenje na koncu nadjača sve ostale sile i cijela zvijezda kolapsira u centar. Oko centra nastane sfera (horizont događaja) koja omeđuje prostor iz kojeg ništa ne može izaći, čak ni svjetlost, i koji se stoga naziva crna rupa. Što god jednom prođe horizont događaja, više ne može izaći. Astrofizičari su u zadnjih 15-tak godina uočili nekoliko kandidata za crne rupe (od kojih su neke gigantske u središtima galaksija).



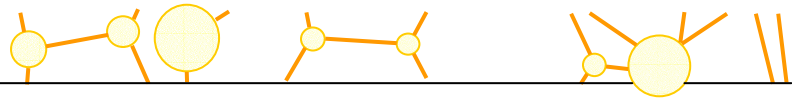
Interes za proučavanje Svemira je doveo do velikog razvoja i ulaganja u astrofiziku. Kao posljedica, tehnike mjerenja su postale toliko precizne da se ti rezultati mogu koristiti za spoznaje o strukturi materije na fundamentalnom nivou, odnosno za testiranje standardnog modela elementarnih čestica. To je posebno važno jer je izgradnja novih laboratorija neophodnih za pročišćavanje sudara čestica na dovoljno visokim energijama postala toliko skupa da je čak i superbogata zemlja poput SAD-a odustala od daljnje gradnje. To pak znači da će Svemir sve više postajati vodeći laboratorij i za proučavanje međudjelovanja na najmanjim udaljenostima.

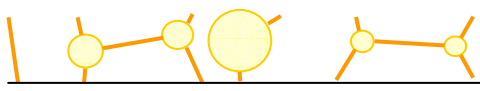
21. st. - crvotočine, vremeplovi, strune, 11 ili više dimenzija, ...?

Usprkos velikom razvoju fizike u 20. stoljeću, u kojem je fundamentalnu ulogu odigrala teorija relativnosti, naše razumijevanje stvarne strukture prostora i vremena je daleko od potpunog. Navedimo neka od zanimljivijih otvorenih pitanja:

- **Putovanje kroz vrijeme?** – opća teorija relativnosti, onako kako ju danas razumijemo, ostavlja otvorenim mogućnost putovanja kroz vrijeme, pa i postojanje vremeplova. Takva mogućnost otvara mnoga pitanja, pa i ona filozofska i bizarna, npr. što kad bi se vratili natrag u vremenu i ubili sebe kao bebu? Zbog tog i sličnih argumenata većina fizičara smatra da postoji neki razlog ili mehanizam koji to zabranjuje, no nitko ga nije još pronašao. Jednostavno odbacivanje takvih rješenja samo zato jer nam se ne sviđaju može biti krivo – to se dogodilo u slučaju crnih rupa za koje je dugo vremena većina fizičara smatrala da su besmislica.
- **Kvantna gravitacija?** – kao što je već rečeno, postoji velika razlika u opisu gravitacije (opće teorije relativnosti) i ostalih međudjelovanja. Između ostalog, ostala međudjelovanja (poput elektromagnetskog) se na malim udaljenostima opisuju kvantnom fizikom, dok je opća teorija relativnosti klasična teorija. Pošto Einsteinova jednažba povezuje jedne sa drugima, za pretpostaviti je da i gravitacija posjeduje kvantna svojstva na dovoljno malim udaljenostima. No, gravitacija govori o prostor-vremenu. Što bi moglo biti kvantno prostor-vrijeme? To pitanje je već desetljećima u središtu zanimanja teorijskih fizičara i zasad postoje samo (prilično spekulativne) teorije. Matematički smisljena teorija koja ima potencijal da objedini sve sile je *teorija superstruna*. Po njoj elementarni objekti nisu (točkaste) čestice već (jednodimenzionalne) strune koje žive u 10 ili možda 11 dimenzionalnom prostor-vremenu. To naravno odmah provocira brojna pitanja (npr. gdje je preostalih 6, odnosno 7 dimenzija i zašto ih ne vidimo?).

Očito je da nam treba još puno griza za razumijevanje strukture prostor-vremena, odnosno gravitacije. No, zato je to pravi izazov za nove generacije jer fizika vapi za potpuno novim idejama. Tko je spreman prihvatiti rukavicu?





Fotoelektrični efekt i Einsteinova fotonska hipoteza

Dubravko Klabučar¹

Fizički odsjek, Prirodoslovno-matematički fakultet Sveučilišta u Zagrebu

O povijesti i značenju fotoelektričnog efekta

Fotoelektričnim efektom, ili skraćeno foto-efektom, nazivamo izbijanje elektrona iz tijela (tipično, iz poliranih metalnih ploča) na koja pada elektromagnetsko zračenje: vidljiva svjetlost, ultraljubičasto zračenje, itd. Taj efekt je nađen i proučavan prvenstveno u pokusima Heinricha R. Hertza (1887), Wilhelma Hallwachsa (1888), Josepha J. Thomsona (1899), Philippa Lenarda (1899), te Roberta A. Millikana (1916). Osobita važnost foto-efekta je u tome što klasična fizika nije dovoljna da bi ga se objasnilo, već se mora primijeniti Planckova hipoteza o kvantima energije. Štoviše, čak se i ona mora radikalizirati proširenjem na Einsteinovu hipotezu o kvantima elektromagnetskog polja - dakle, «česticama svjetlosti», kasnije nazvanim fotonima.

Albert Einstein je dakle (1905. godine) otkrio da je foto-efekt prvi i vrhunski dokaz da svjetlost - i elektromagnetsko zračenje općenito - ima i čestičnu, a ne samo valnu prirodu. Hertzovo prvotno otkriće zato predstavlja poseban kuriozitet u povijesti znanosti. Naime, on je slučajno opazio foto-efekt baš prilikom onih slavnih pokusa, kojima je dokazao postojanje upravo elektromagnetskih valova.

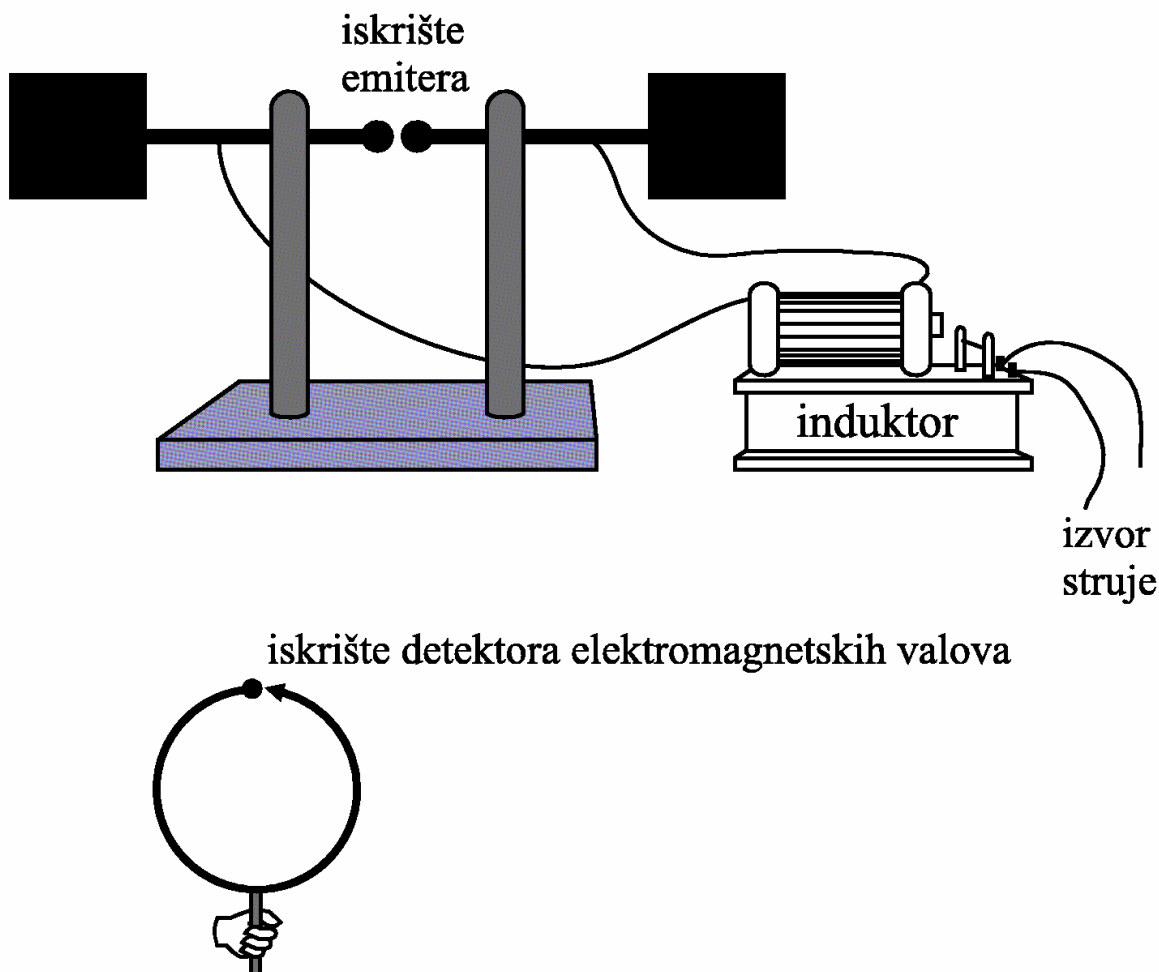
Hertzovo otkriće foto-efekta

Prvi eksperimentalni odašiljač je Hertz sastavio od visokonaponskog induktora spojenog na dva mjedena cilindra (proširena velikim metalnim pločama da se poveća kapacitet prihvatanja naboja) - vidi Sliku 3-1. Na krajevima cilindara bile su kuglice razmaknute za petinu milimetra. Time je načinio iskrište jer bi iskre preskakale zbog visokog napona iz induktora. Hertz je naime zamislio da će, čim iskra stvori vodljivu stazu između dva mjedena vodiča, električni naboj hitro oscilirati prelazeći naizmjenice s jednog vodiča na drugi, te u skladu s Maxwelllovom teorijom emitirati elektromagnetske valove valne duljine približne dimenzijama tih vodiča. Ali, da bi dokazao da su ti valovi zaista emitirani, morao ih je i detektirati. Hertzov detektor, dakle prvi prijemnik, bio je komad bakrene žice duljine približne (ukupnoj) duljini emiserskih vodiča, da bi prirodna (svojstvena) frekvencija oscilacije električne struje u toj žici bila bliska frekvenciji oscilacija u emiteru. Žicu s mjedenom kuglicom na jednom kraju i šiljkom na drugom kraju, Hertz je savio u krug, da bi se inducirane oscilacije naboja u žici razotkrile iskrenjem preko malenog razmaka između kuglice i

¹ Copyright ©D. Klabučar 2005. Autor pridržava sva prava.



šiljka (vidi Sliku 3-1). Zamisao je bila uspješna: čim bi se induktor stavio u pogon, u iskrištu «prijemnika» bi počele preskakati iskricе.

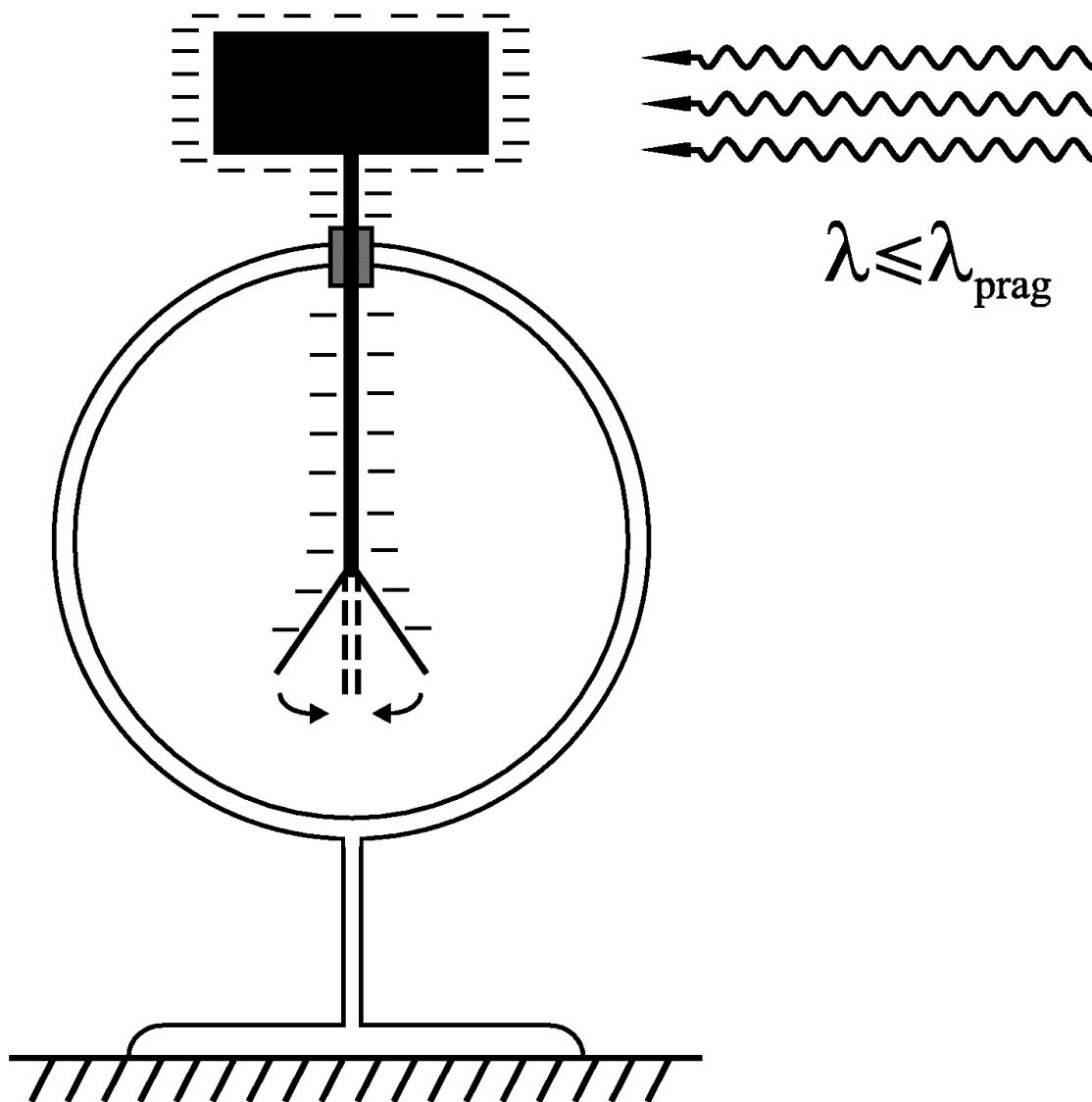


Slika 3-1: Prvi radio-odašiljač i prijemnik: Hertzov emiter i detektor elektromagnetskih valova. Pomoću njih je Hertz dokazao postojanje Maxwellovih valova, ali je istovremeno otkrio i fotoelektrični efekt. Naime, primijetio je da električna iskra lakše izbija na metalnom iskrištu ako ga obasjava ultraljubičasta svjetlost.

Razradom osnovne ideje u nizu briljantnih eksperimenata, Hertz je nepobitno dokazao postojanje Maxwellovih elektromagnetskih valova. Ono što je pak dovelo do otkrića foto-efekta, bilo je Hertzovo nastojanje da poboljša detekciju time da bolje vidi iskricе. To je pokušavao postići zamračivanjem iskrišta detekora njegovim zatvaranjem u kutiju, ali je opazio da je time primjetno smanjena maksimalna duljina iskrica; odnosno, maksimalni razmak između kuglice i šiljka morao se znatno smanjiti da bi iskricе preskakale i sada. Dakle, zatvaranje u kutiju je otežalo iskrenje u odnosu na prethodnu situaciju. Uklanjanjem raznih dijelova kutije, vidjelo se da to otežanje uzrokuje samo onaj dio koji zaklanja iskrište detekora od iskara na emiteru, i to nezavisno od položaja te prepreke. Važno je bilo samo da li iskre emitera nesmetano obasjavaju iskrište detekora ili ne, pa je Hertz konačno zaključio da to obasjavanje na neki način olakšava iskrenje detekora. Upornim izvođenjem raznovrsnih pokusa pokazao je i da taj efekt ne izaziva vidljiva svjetlost, nego ultraljubičasta. Naime,

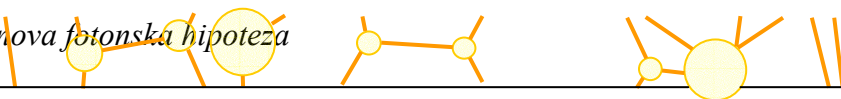


zasjenjenje izvora izazivale su i sasvim prozirne ploče ako su bile od običnog stakla, a one od kvarcnog stakla nisu. Znalo se da zračenje iskara uz vidljivu svjetlost ima i ultraljubičastu komponentu. Nju kvarcno staklo propušta, ali obično staklo ne. Na koncu je Hertz kvarcnom prizmom rastavio svjetlost iskara odašiljača na komponentne valne duljine i dokazao da one ultraljubičaste, dakle kraće od vidljivih, na neki tajnoviti način olakšavaju i pojačavaju električne izboje, t.j. iskrenje detektora.



Slika 3-2: Demonstracija foto-efekta pomoću negativno nabijenog elektroskopa. Sklapanje listića elektroskopa pokazuje brz gubitak naboja uslijed foto-efekta. On se događa tek kad metalnu pločicu obasjava svjetlost valne duljine λ manje od neke valne duljine praga λ_{prag} , koja ovisi o tome od kojeg metala je pločica. Na pr., laki alkalni metali imaju λ_{prag} u vidljivom dijelu spektra: za kalij $\lambda_{\text{prag}} = 5.50 \cdot 10^{-7} \text{ m} = 0.550 \mu\text{m}$, za natrij $0.540 \mu\text{m}$, te za litij $0.500 \mu\text{m}$. U originalnom Hallwachsovom pokusu to je bio cink, pa je $\lambda_{\text{prag}} = 0.287 \mu\text{m}$, što je u ultraljubičastom dijelu elektromagnetskog spektra. Za željezo i srebro na primjer, λ_{prag} su još kraće, $0.262 \mu\text{m}$ odnosno $0.261 \mu\text{m}$.

Daljnji eksperimentalni razvoj



Hertzovo slučajno otkriće foto-efekta zbilo se u kontekstu pokusa namijenjenog drugoj svrsi (emisiji i detekciji elektromagnetskih valova), gdje su okolnosti bile prekomplikirane a da bi se moglo doći do daljnjih spoznaja o čemu se tu radi. Zato je W. Hallwachs već sljedeće, 1888. godine načinio jednostavan pokus koji nam i danas služi kao školski primjer foto-efekta. Izoliranu pločicu cinka (kao u originalnom Hallwachsovom pokusu) ili nekog drugog metala spojimo na elektroskop koji može biti nabijen negativno ili pozitivno da bi mu listići bili razdvojeni. Ako pazimo da sve bude dobro izolirano, naboj će se gubiti vrlo sporo, t.j., dugo će vremena trebati da primijetimo i najmanje sklapanje listića elektroskopa. Zatim, metalnu pločicu obasjavamo svjetlom raznih intenziteta i valnih duljina. Bez obzira na povećanje intenziteta, t.j. jakosti izvora svjetla, opažamo sljedeće:

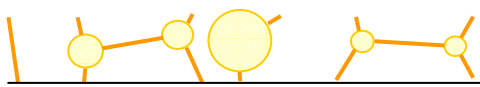
a) Ako je instrument pozitivno električno nabijen, nikad ne opažamo nikakav učinak tog obasjavanja, kakvo god ono bilo.

b) Ako je pak instrument nabijen negativno, opažamo brz gubitak naboja ako pločicu obasjavamo svjetlom koje sadrži dovoljno kratke valne duljine λ , odnosno dovoljno visoke frekvencije $\nu=c/\lambda$. Kolika je maksimalna valna duljina λ_{prag} odnosno minimalna frekvencija ν_{prag} pri kojoj opažamo brz izboj, ovisi o kemijskom sastavu pločice. Ako je ona od cinka, kao u originalnom Hallwachsovom pokusu, potreban nam je svjetlosni izvor koji sadrži ultraljubičastu komponentu (na pr. živina lampa ili plamen izgaranja magnezija). Obasjavanje cinčane pločice nema nikakvog učinka ako izvor zrači samo valne duljine veće od ultraljubičaste, t.j. samo vidljivu i infracrvenu svjetlost (kao na pr. obična žarulja).

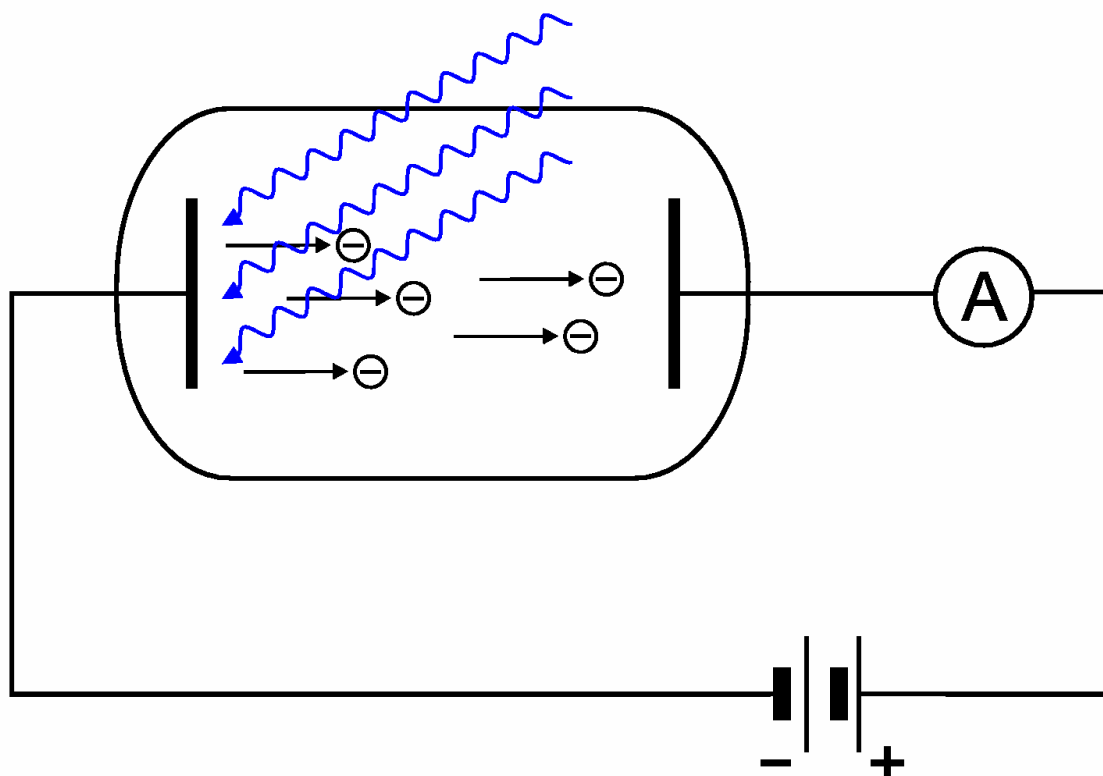
c) Ako instrument u početku niti nije bio nabijen, obasjavanje metalne pločice valnim duljinama kraćim od λ_{prag} , uzrokovat će na instrumentu mali pozitivni naboj.

Nakon Hallwachsovog pokusa je postalo jasno da se kod fotoelektričnog efekta pod utjecajem svjetlosti događa izbacivanje negativnog naboja iz metala (pa se tako olakšava i iskrenje u Hertzovim pokusima). Ali, nije postojala nikakva teorija, nikakvo adekvatno objašnjenje što se, kako i zašto sve to događa. Misterij se počeo razrješavati 1899. godine. Tada su J. J. Thomson i P. Lenard pokusima s vakuumskim cijevima pokazali da se pri foto-efektu izbacuju negativno nabijene čestice i da su to upravo elektroni.

Međutim su Lenardovi pokusi 1902. godine otkrili nove misteriozne činjenice. Proučavajući kako svojstva izbačenih elektrona ovise o intenzitetu i frekvenciji svjetlosti, ustanovio je da o intenzitetu (dakle energiji koju donosi svjetlost u jedinici vremena) ovisi samo broj izbačenih elektrona, ali njihova energija ovisi samo o frekvenciji. Lenard je u biti došao do empiričkih činjenica koje smo temeljito i pažljivo izrekli u sljedećoj sekciji, te označili s I, II i III. Einstein je 1905. godine na temelju Lenardovih rezultata formulisao svoju hipotezu o kvantima elektromagnetskog polja, «česticama svjetla», fotonima.



Lenardovi su rezultati bili dosta neprecizni jer su u ono vrijeme takvi eksperimenti bili teško provedivi. Einsteinovu znanstvenu intuiciju, smjelost i duboko razumijevanje fizike pokazuje i to što je bio u stanju uvesti ideju fotona na temelju takvih ograničenih, kvalitativnih eksperimentalnih podataka. S druge strane, to je značilo da Einsteinova teorija zapravo još *nije* bila eksperimentalno dokazana. Vodeći američki eksperimentalni fizičar R. Millikan, kao i mnogi drugi, nije prihvaćao fotonsku hipotezu jer ju je gledao kao napad na valnu teoriju svjetla i elektromagnetizma općenito. Zato se poduhvatio toga da sve što je u vezi foto-efekta radio Lenard, on napravi precizno, kvantitativno i potpuno, kako bi opovrgao Einsteina i potvrdio valnu, klasičnu elektrodinamiku. Radio je deset godina uporno i mukotrpno da nadiđe Lenardova ograničenja. Na primjer, razvio je tehniku struganja i poliranja metala unutar vakuumskih cijevi, jer je oksidacija metala (zbog nesavršenog vakuuma) bila jedan od problema koji su Lenardu ograničili preciznost.



Slika 3-3: Foto-efekt je pogodno proučavati u vakuumskim cijevima. Valovite linije označavaju elektromagnetsko zračenje koje upada na jednu od elektroda. U eksperimentalnoj fazi kad je u pitanju sama detekcija foto-efekta, zgodno je tu elektrodu priključiti na negativni, a suprotnu na pozitivni potencijal. To naime pogoduje skupljanju što većeg broja izbijenih elektrona na kolektorskoj elektrodi i tako omogućava ampermetru (A) detekciju struje i kod vrlo slabih intenziteta elektromagnetskog zračenja. (Naravno, valja primijeniti samo slabe potencijale, za koje nema nikakve sumnje da bi mogli nekako - na pr. hladnom emisijom - utjecati na sâm proces nastanka foto-efekta i izazvati spuriozno pojačanje fotoelektrične struje.)

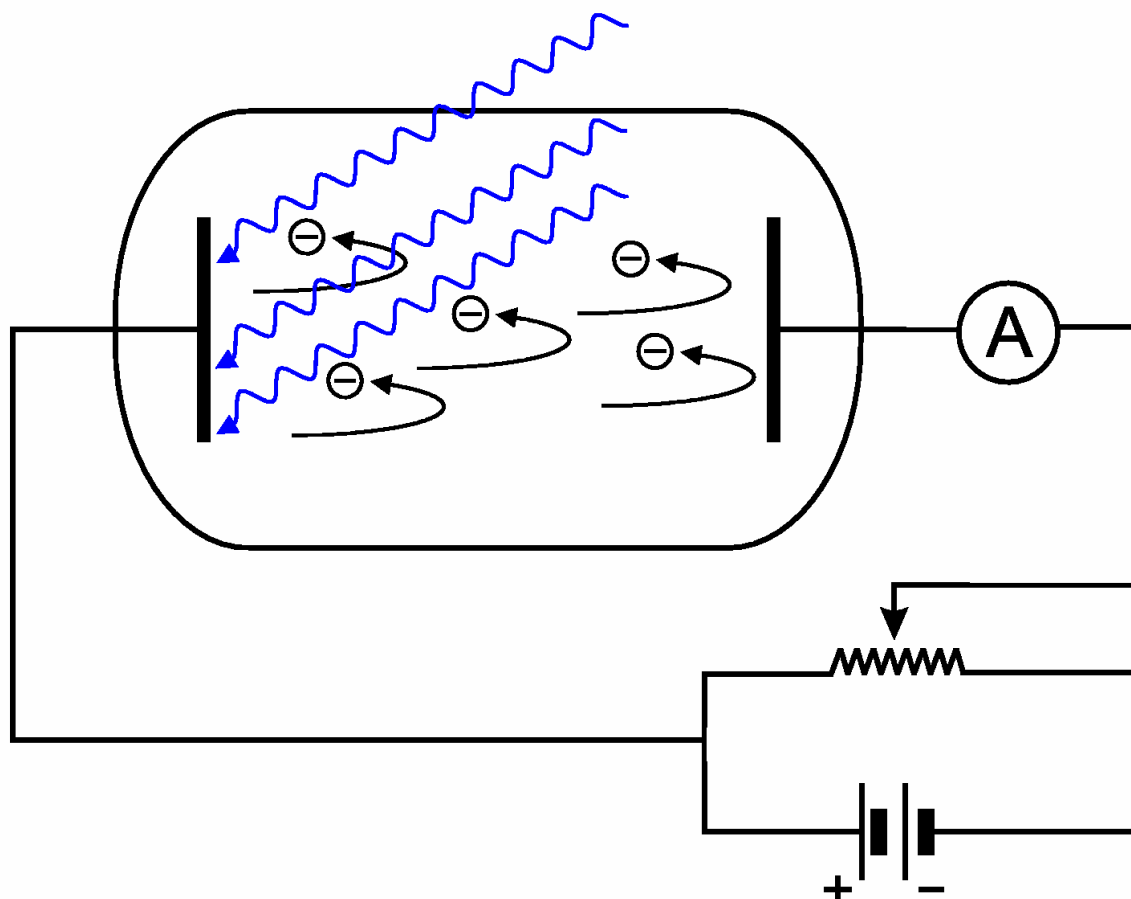
Kao što ćemo vidjeti u idućoj sekciji, Millikan je usput našao novu metodu mjerenja Planckove konstante do na 0.5 % točnosti, te na koncu 1916. godine morao zaključiti da njegovi eksperimenti nipošto ne ruše, nego naprotiv, nepobitno dokazuju



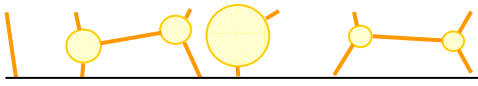
Einsteinovo objašnjenje foto-efekta. Za njega je Einstein dobio Nobelovu nagradu 1921. godine. Sâ m Millikan se međutim sigurno utješio kad je i on (1923. godine) također dobio Nobelovu nagradu za svoje precizne eksperimente s foto-efektom.

Einsteinovo objašnjenje foto-efekta

Sâ mo *postojanje* foto-efekta nije iznenađujuće sa stanovišta klasične elektromagnetske teorije, jer se znalo da materija sadrži elektrone, i da se baš unutar metala relativno «slobodno» kreće jako mnogo elektrona jer to metalima i daje visoku električnu vodljivost. Uostalom, i proučavanje termoemisivnosti elektrona iz vrućih metala pokazuje da pojedini elektron može napustiti metal ako mu se zagrijavanjem dade neka minimalna energija, tzv. *izlazni rad*. Onda je jasno da se u principu i apsorpcijom elektromagnetskog zračenja elektroni mogu tako ubrzati da pobjegnu iz potencijala koji ih inače sprečava da napuste komade metala. Ipak, valna teorija svjetlosti, kao ni klasična fizika općenito, nikako ne može objasniti foto-efekt. Naime, ako razmotrimo četiri bitne *kvantitativne* empirijske činjenice u donjem tekstu, istaknute debelim tiskom kao I – IV, postaje jasno da druga i treća zahtijevaju Planckovu kvantnu hipotezu, te da se čak i ona mora proširiti i radikalizirati zbog četvrte točke.



Slika 3-4: Mjerenje frekventne ovisnosti maksimalne energije $\mathcal{E}_{\max}$ koju postižu foto-elektroni lako se postiže malom modifikacijom eksperimentalnog postava s prethodne slike. Upotrijebimo svjetlo relativnog velikog intenziteta koje izbija vrlo mnogo foto-elektrona. Tada ih dovoljno pristigne na kolektorsku elektrodu tako da ampermetar može registrirati fotoelektričnu struju čak i onda kad polaritet izvora napona obrnemo tako da kolektorska elektroda postane odbojna. Zatim potencijetrom postepeno



povećavamo taj odbojni napon V_{stop} tako da je elektronima sve teže stići na kolektorsku elektrodu, pa ampermetar registrira sve slabiju fotoelektričnu struju. Kad ona padne na nulu, znači da je V_{stop} tako velik da je zaustavio i odbio čak i one elektrone koji su foto-efektom primili najveću moguću energiju $\mathcal{E}_{max}$, te da smo je izmjerili jer $\mathcal{E}_{max} = eV_{stop}$. Rezultati takvih mjerenja za razne frekvencije ν dani su na Slici 3-5.

I. Kad postoji fotoelektrični efekt, to jest kad se može opaziti struja izbijenih elektrona, ona je proporcionalna intenzitetu izvora svjetlosti, dakle kvadratu amplitude elektromagnetskog polja koje izbija elektrone iz tijela. - Ova činjenica je shvatljiva i očekivana i sa stanovišta klasične fizike, jer je energija koju nosi elektromagnetski val proporcionalna njegovom intenzitetu, t.j. kvadratu njegove amplitude E . Jednostavno zbog sačuvanja energije, tome mora biti proporcionalan i broj elektrona izbijenih u jedinici vremena.

II. Da li foto-efekta uopće ima, t.j. da li se iz pojedinog metala izbijaju elektroni ili ne, ovisi samo o frekvenciji svjetlosti koja ga obasjava. Za svaki metal postoji za njega karakteristična *frekvencija praga* ν_{prag} , i **samo elektromagnetsko zračenje frekvencije ν veće od ν_{prag} može izbiti elektrone iz tog metala.** - Dakle, ako previše smanjimo frekvenciju, nestat će foto-efekta bez obzira koliko je velik intenzitet ($\sim E^2$) zračenja. S druge strane, bez obzira koliko mi taj intenzitet smanjili, za $\nu > \nu_{prag}$ registrirat ćemo izbijene elektrone, jedino što njihov broj (t.j. fotoelektrična struja) pada s intenzitetom u skladu s točkom I. Ovakva «sve ili ništa» zavisnost o frekvenciji praga je vrlo čudna sa stanovišta klasične elektromagnetske teorije, gdje energija elektromagnetskog vala ovisi jedino o njegovom intenzitetu, a nikako o njegovoj frekvenciji. Iz istog razloga, još je misteriozniji i treći skup činjenica:

III. Energija izbijenih elektrona je neovisna o intenzitetu svjetlosti koja izaziva foto-efekt, ali ovisi o frekvenciji. Eksperiment prikazan na Slici 3-4 daje osobito jasnu frekventnu ovisnost *maksimalne* kinetičke energije ($\mathcal{E}_{max}$) izbijenih fotoelektrona - vidi Sliku 3-5. S nje je očito da $\mathcal{E}_{max}$ **o frekvenciji ovisi linearno:**

$$\mathcal{E}_{max} = h\nu - \Phi. \quad (1)$$

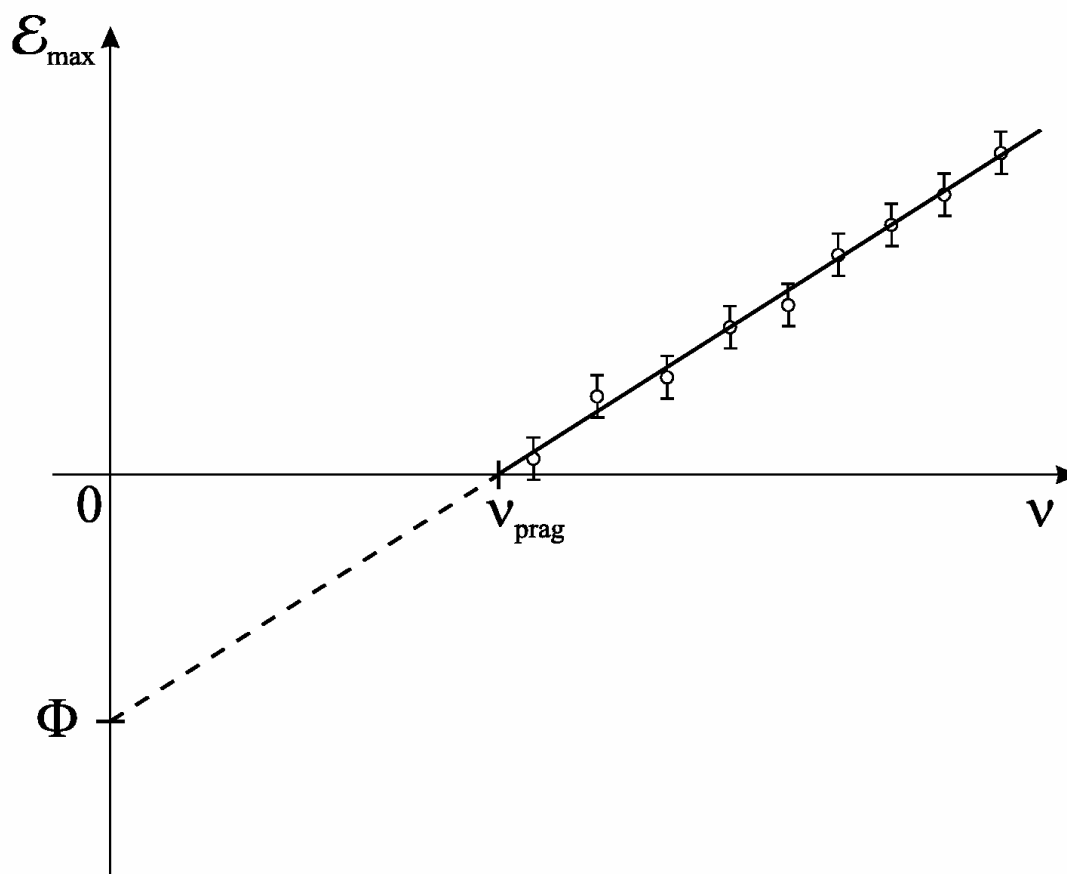
Precizna mjerenja $\mathcal{E}_{max}$ (na pr. Millikan, 1916) pokazuju da je koeficijent smjera dat Planckovom konstantom h . Simbol Φ označava izlazni rad. On je različit za svaki pojedini metal, a s frekvencijom praga povezan je Planckovom konstantom:

$$\Phi = h\nu_{prag}. \quad (2)$$

Frekventne ovisnosti **II** i **III**, a osobito precizna frekventna ovisnost (1) nikako se ne mogu objasniti klasično, dakle bez Planckove hipoteza o apsorpciji energije u diskretnim porcijama - kvantima $h\nu$. Einstein je uočio da je s njom, naprotiv, objašnjenje vrlo lagano, elegantno i prirodno. Od elektromagnetskog zračenja frekvencije ν , elektron vezan u metalu prima kvant energije $h\nu$ - vidi Sliku 3-6. Oni



elektroni koji u tom metalu imaju najvišu energiju E_M , moraju od novodobivene energije $h\nu$ potrošiti samo energiju Φ da pobjegnu iz potencijala koji ih veže u metalu. To su upravo oni fotoelektroni koji pri datoj frekvenciji ν imaju maksimalnu² kinetičku energiju $\mathcal{E}_{max}$, i evo nam formule (1). S druge strane, ako je frekvencija elektromagnetskog zračenja $\nu < \nu_{prag}$, apsorbirani kvant energije $h\nu < \Phi$ i elektron nije dobio dovoljno energije³ da se odvoji od metala, pa ne dolazi do foto-efekta.

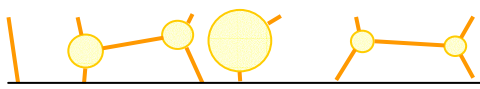


Slika 3-5: Eksperimentalne točke pokazuju da je ovisnost maksimalne energije foto-elektrona o frekvenciji elektromagnetskog zračenja data formulom (1).

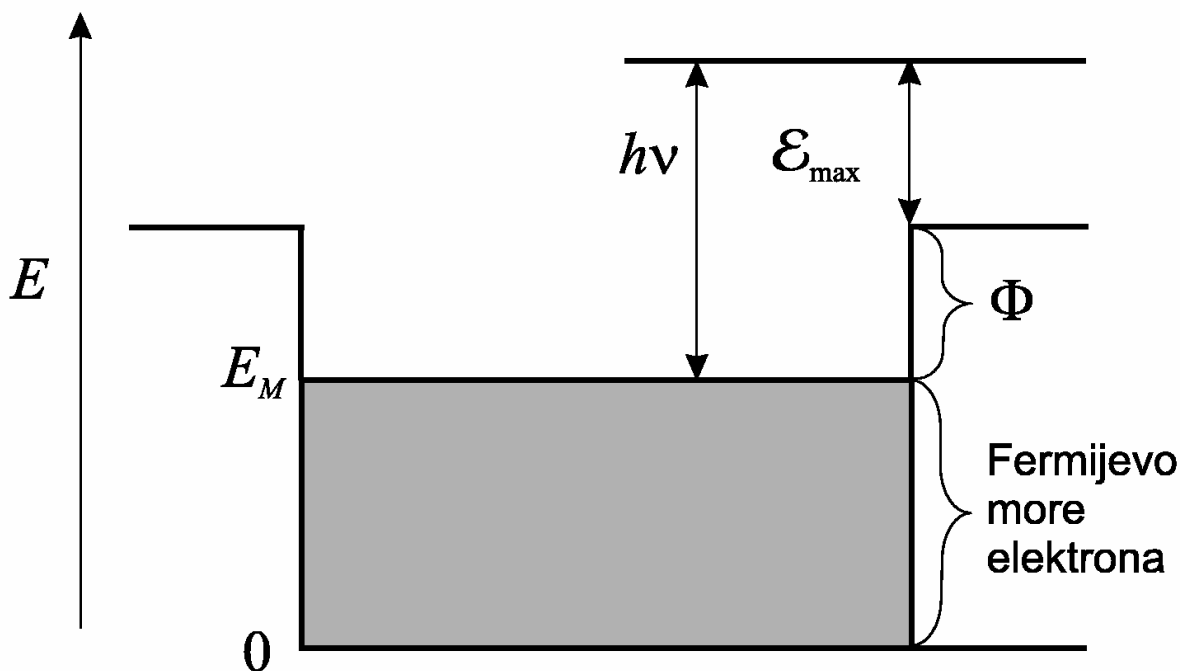
Dakle, kvantna hipoteza je uspješna i ovdje. Zamijetite da dosad nije bilo potrebno pretpostaviti ništa više nego kod Planckovog objašnjenja zračenja crnog tijela, t.j. da se energija može emitirati i apsorbirati samo u diskretnim porcijama, kvantima

² Naravno, iz razmatranja otpadaju oni elektroni koji su dio apsorbirane energije prije izlaska iz metala opet izgubili, na pr. u nekom sudaru, jer takvi ne mogu postići maksimalnu energiju $\mathcal{E}_{max}$.

³ Doduše, dovoljno energije da nadmaši Φ iako $\nu < \nu_{prag}$, elektron može dobiti tzv. multi-fotonskom apsorpcijom. To je slučaj kada elektron apsorbira dva ili više fotona simultano, ili u tako brzom slijedu (unutar $\sim 10^{-15}$ s) da ne stigne pasti iz pobuđenog stanja prije nove apsorpcije. Međutim, zbog vrlo male vjerojatnosti takve višestruke apsorpcije, za nju je potrebna goleme gustoća fotona. Zato se ona može realizirati tek uz upotrebu posebnih lasera veoma visokog intenziteta, a ne kod običnog foto-efekta, pa tu mogućnost ovdje ne razmatramo.

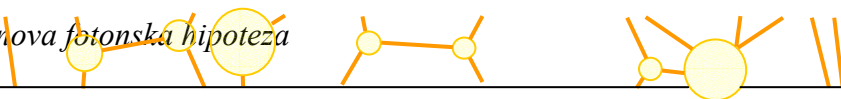


$h\nu$. Primjerice, dovoljna je pretpostavka da elektron može iz elektromagnetskog polja apsorbirati energiju samo u porcijama $h\nu$. Dovoljna je i, također planckovska, pretpostavka o *kvantizaciji energija oscilacija*. Ako je kvantizirana energija harmonički oscilirajućih naboja u izvoru elektromagnetskog zračenja, onda i od njih stvoreno elektromagnetsko polje na frekvenciji ν ima energiju $Nh\nu$ gdje je N cijeli broj. Zato je, posljedično, i ta energija kvantizirana. Ali, nigdje se nije pretpostavilo da je i *sâmo elektromagnetsko polje kvantizirano*.



Slika 3-6: Tzv. Sommerfeldov model raspodjele elektronskih energija u metalu koji objašnjava ovisnost $E_{\max} = h\nu - \Phi$ (1) i $\Phi = h\nu_{\text{prag}}$ (2). Njegov shematski karakter ne utječe na općenitu valjanost rezultata (1) i (2), jer nisu važni nikakvi detalji nego samo činjenica da je najviša energija elektrona u metalu, E_M , za izlazni rad Φ manja od potencijalne energije elektrona koji se upravo oslobodio iz potencijalne jame koja ga je vezala u metalu. (Vrijednost najviše elektronske energije E_M na apsolutnoj nuli temperature naziva se Fermijeva energija, E_F , tog metala.)

Međutim, u svom slavnom objašnjenju foto-efekta 1905. godine, Einstein je upravo tom pretpostavkom otišao i dalje od Planckove hipoteze o kvantima energije. Elektromagnetsko polje nije više zamišljao kao klasičan, kontinuiran val, već da je ono na neki način «zrnato» na mikroskopskom nivou. Naime, postulirao je da se elektromagnetsko zračenje frekvencije ν sastoji od diskretnih kvanata, fotona, od kojih svaki pojedini nosi energiju $h\nu$. Dakle, *kvantno* elektromagnetsko polje bi se sastojalo od tih elementarnih pobuđenja, «česticâ svjetla». Tek u fizikalnim procesima u kojima istovremeno sudjeluje ogroman broj fotona, elektromagnetsko polje možemo opisati kao klasično valno polje Maxwelllove elektromagnetske teorije. Doduše, tu spadaju gotovo sve elektromagnetske pojave koje možemo zapaziti u našem makroskopskom svijetu, uz rijetke iznimke kao što je foto-efekt, pa je teorija zasnovana na klasičnim Maxwellovim jednažbama ipak spektakularno uspješna. Tu valja istaći i brojne



uspjehe tzv. *poluklasičnog* pristupa kvantnim pojavama, u kojem se za elektromagnetsko zračenje upotrebljavaju klasična polja, a kvantni aspekti su drugdje, kao na pr. u tretmanu elektrona i druge «materije» i u njihovim diskretnim, kvantiziranim energijama. Na primjer, u kvantnomehaničkom opisu atoma i molekula dovoljno je već i klasično Coulombovo polje da se vrlo točno opiše interakciju između elektrona i jezgara. Obično se ne mora uzimati u obzir da ono zapravo potječe od emisije i apsorpcije fotona⁴ na električnim nabojima.

Zapravo, gore smo vidjeli da se i činjenice **I**, **II**, **III** o foto-efektu također mogu shvatiti kroz planckovsku hipotezu o apsorpciji diskretnih energetske kvanta ali uz klasično elektromagnetsko polje, dakle bez Einsteinovog fotonskog koncepta. Međutim, njega čini potpuno neizbježnim to što kod foto-efekta imamo i ovu empiričku činjenicu:

IV. Nikad nema vremenskog zaostatka od trenutka kad svjetlost padne na metal do trenutka emisije foto-elektrona (odnosno, to vrijeme je vrlo kratko, reda veličine $\sim 10^{-9}$ sekundi ili manje).

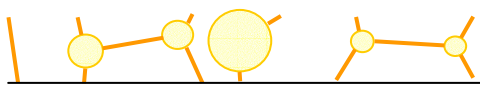
Ono što je dostatno da objasni **I**, **II** i **III**, naime Planckova kvantna hipoteza da elektroni apsorbiraju diskretne porcije energije $h\nu$ iz elektromagnetskog polja, zbog **IV** više nije dovoljno ako je elektromagnetsko polje klasično. Naime, količina energije koju na metal donosi klasično elektromagnetsko zračenje snopom presjeka površine A u vremenu τ , iznosi $c\epsilon_0\langle E^2\rangle A\tau$, gdje $\langle E^2\rangle$ znači srednju vrijednost kvadrata električnog polja E . Zato bi za vrlo slab intenzitet svjetla, dakle vrlo maleni E^2 , bilo potrebno razmjerno dugo vrijeme

$$\tau > \frac{\Phi}{c\epsilon_0\langle E^2\rangle A} \quad (3)$$

da se apsorbira energija $h\nu$ potrebna da nadmaši izlazni rad Φ i da emisija foto-elektrona započne. Ali, to se nikad ne nalazi eksperimentalno, nego uvijek činjenica **IV**, bez obzira koliko se oslabi polje E . Dakle, ako u ovoj situaciji inzistiramo na klasičnom elektromagnetskom polju, foto-efekt bi značio nesačuvanje energije. S druge strane, fotonska teorija, t.j. koncept kvantnog elektromagnetskog polja, nema tu nikakvih problema jer implicira da do foto-efekta dolazi tako da se apsorpcija energije na elektronu događa *odjednom*, u trenutku interakcije elektrona i «zrnca svjetlosti» - fotona. Kvadrat amplitude polja, koji je u klasičnoj teoriji polja proporcionalan gustoći energije zračenja, u kvantnoj je teoriji polja proporcionalan i prosječnom broju fotona po jedinici volumena, pa očito ni u njoj nema problema s objašnjenjem činjenice **I**.

Ne čudi da je Plancku i mnogim drugima koji su prihvaćali kvante energije, bilo vrlo teško prihvatiti Einsteinove kvante elektromagnetskog polja, fotone. Mnogo je

⁴ Emisija i apsorpcija fotona, dakle efekti kvantne teorije elektromagnetskih polja, moraju se u atomskoj fizici uzeti u obzir tek kad se zahtijevaju tako velike točnosti teorijskog opisa da bi se mogli objasniti izvanredno fini efekti kao što je tzv. Lambov pomak.



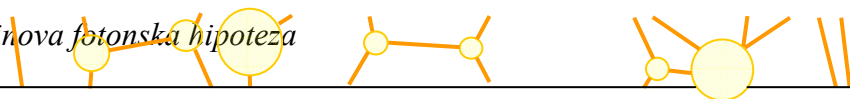
lakše bilo povjerovati da su kvantizirane oscilacije «materije» (na pr. naboja u materijalu predmeta koji su emitirali elektromagnetsko zračenje) nego da je kvantizirano samo elektromagnetsko polje. Bilo je tako jer se o atomima znalo toliko malo da je bilo prostora da im se pripišu najneobičnija svojstva kako bi se objasnile fizikalne pojave. Nasuprot tome, elektromagnetsko zračenje se činilo savršeno opisano klasičnim Maxwellovim jednadžbama pa tu naizgled nije bilo prostora za ikakve promjene ili dopune. Fotonska teorija je zato postala općeprihvaćena tek nakon što je dobila odlučnu potvrdu kroz Comptonov efekt, ali je onda postala začetak daljnjeg razvoja kvantne teorije u smjeru **kvantne teorije polja**. Po njoj su sve elementarne kvantne čestice («mikro-čestice») zapravo diskretna pobuđenja odgovarajućeg kvantiziranog polja, po analogiji s fotonima, «česticama svjetlosti» elektromagnetskog polja.

Autor zahvaljuje dipl. ing. Davoru Horvatiću za pomoć kod crtanja slika.

Zadaci s foto-efektom

- 1.) Kolika je $\mathcal{E}_{max}$ elektrona koje iz cinka izbija ultraljubičasto zračenje valne duljine 240 nm? Izlazni rad cinka je 3.6 eV. Da li i vidljivo svjetlo može proizvesti foto-efekt na cinku?
- 2.) Kolika može biti energija foto-elektrona koju iz površine komada volframa izbija ultraljubičasto svjetlo valne duljine 200 nm? Valna duljina fotoelektričnog praga volframa je 230 nm. Da li i vidljivo svjetlo može proizvesti foto-efekt na volframu?
- 3.) Koliki je izlazni rad cezija ako se foto-elektroni izbijeni iz njega ultraljubičastim svjetlom valne duljine 200 nm, zaustavljaju potencijalom $V_{stop}=4.21$ V? Da li i vidljivo svjetlo može proizvesti foto-efekt na ceziju?

3. Fotoelektrični efekt i Einsteinova fotonska hipoteza



Neobično antizasjenjenje naboja

Asimptotska sloboda i Nobelova nagrada za teoriju jake sile

Ivica Picek

Fizički odsjek, Prirodoslovno-matematički fakultet Sveučilišta u Zagrebu

Nobelovu nagradu iz fizike za 2004. godinu podijelili su *David J. Gross* s Kavli instituta za teorijsku fiziku Kalifornijskog sveučilišta u Santa Barbari, *H. David Politzer* s Kalifornijskog instituta za tehnologiju (Caltech) u Pasadeni i *Frank Wilczek* s Massachusettskog instituta za tehnologiju (MIT) u SAD, «za otkriće asimptotske slobode u teoriji jakog međudjelovanja». Riječ je o otkriću koje je s jedne strane dovelo do razumijevanja jake sile kao dijela «standardnog modela» kao opisa međudjelovanja temeljnih čestica prirode, a istodobno je potaknulo pokušaje još sveobuhvatnijeg, velikog ujedinjenog opisa temeljnih sila prirode.

Upoznavanje s temeljnom jakom silom

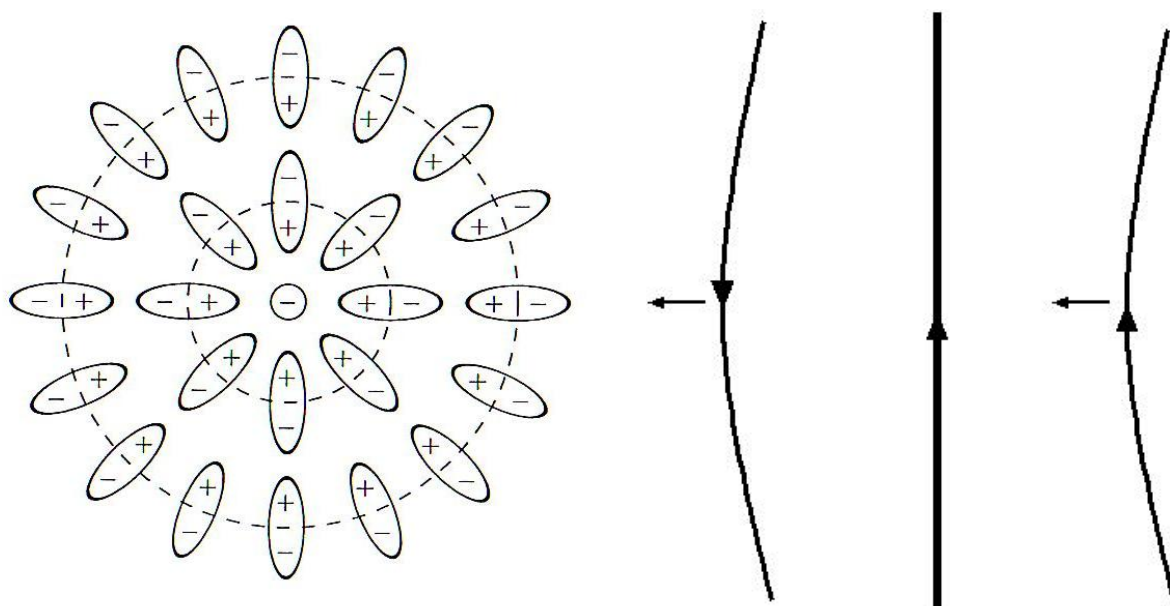
U našem svijetu na djelu je tek nekoliko temeljnih sila: gravitacija i elektromagnetizam, upoznate u makrosvjetu te subatomske, jaka i slaba sila (Slika 4-1). Ključno za razumijevanje svake od tih sila je poznavanje «naboja» iz kojega ona izvire. Za gravitacijsku silu koja drži na okupu Sunčev sustav ti «naboji» su mase planeta i Sunca, a za elektromagnetsku silu koja drži elektrone oko atomske jezgre to su električni naboji elektrona i protona.

Svojstvo \ Interakcija	Gravitacijska	Slaba (elektroslaba)	Elektromagnetska (elektroslaba)	Jaka	
	masa - energija	okus	električni naboj	fundamentalna	rezidualna
djeluje na:	masa - energija	okus	električni naboj	naboj boje	
čestice koje ju osjećaju	sve	kvarkovi, leptoni	električki nabijene	kvarkovi, gluoni	hadroni
čestice posrednici	graviton	W^+, W^-, Z^0	γ	gluoni	mezoni
jakost za dva kvarka na: 10^{-18} m (relativno prema elektromagnetskoj) $3 \cdot 10^{-17}$ m	10^{-41} 10^{-41}	0.8 10^{-4}	1 1	25 60	ne djeluje na kvarkove
za dva protona u jezgri	10^{-36} 10^{-36}	10^{-7}	1	ne djeluje na hadrone	20

Slika 4-1: Temeljne sile u prirodi

Pitanje postojanja novih naboja postavilo se na subatomskej razini, nakon spoznaje da su unutar atomske jezgre na djelu dvije nove sile: slaba sila odgovorna za radioaktivnost i jaka sila koja drži u jezgrama pozitivno nabijene protone i električki neutralne neutrone. Iz činjenice da jaka nuklearna sila ima kratki doseg (približno 10^{-15} m) japanski fizičar Hideki Yukawa (Nobelova nagrada za 1949) je predvidio pion kao česticu koja bi mogla biti njenim prijenosnikom. Otkriveni su još neki mezoni koji bi mogli sudjelovati u jakoj sili, no opis jake sile s takvim prijenosnicima nije se mogao svesti na teoriju polja, kao što je to postignuto za elektrodinamiku.

Teorija polja o kojoj je riječ, osim kvantne mehanike nezaobilazne u unutrašnjosti atoma, uključuje i Einsteinovu specijalnu teoriju relativnosti. Pri opisu elektromagnetizma teorija polja se proslavila kao čuvena «QED» (kvantna elektrodinamika, za koju je Nobelova nagrada dodijeljena 1965. godine Feynmanu, Schwingeru i Tomonagi). Činjenica da se mezonska teorija nije mogla svesti na teoriju polja, dovela je pod sumnju i teoriju polja elektrodinamike. Kao moguću slabu točku same elektrodinamike, Landau i Pomerančuk su uočili problem tzv. Landauvljevog zasjenjenja, tendencije da se oko električnog naboja neograničeno skupljaju virtualne čestice. Kvantno mehanički vakuum u kojemu sve vrvi od stvaranja virtualnih parova čestica i antičestica pokazuje svojstvo dielektričnog medija i time dovodi do problematičnog zasjenjenja već za relativno slabi elektromagnetizam (Slika 4-2 (a)). To zasjenjenje bi trebalo biti katastrofalno za *jaku* silu.

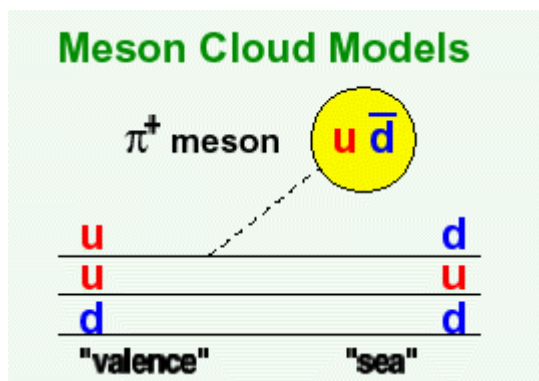


Slika 4-2: (a) Zasjenjenje električnog naboja, lijevo, pridruženo je dijamagnetskom svojstvu medija (b), desno

Uz to, akceleratorski pokusi druge polovice prošlog stoljeća doveli su do tolikog mnoštva hadrona, čestica koje sudjeluju u jakoj interakciji, da se postavilo pitanje njihove elementarnosti. Elementarnost se mogla obnoviti uvođenjem temeljnijih čestica, *kvarkova*, koji bi gradili sve hadrone. Istodobno bi uvođenjem sile koja bi djelovala između kvarkova, vežući ih u hadrone, mogli doći do temeljne sile, podvrgnute teoriji polja. Tu temeljnu jaku silu razlikovat ćemo od one koja drži nukleone u atomskim jezgrama, preostale (rezidualne) jake sile. Budući da sila koja drži kvarkove na okupu mora biti puno snažnija od elektromagnetske, postavlja se pitanje dodatnog naboja kvarka iz kojeg izvire ta jaka sila.

Želimo li se pozabaviti silom o kojoj je riječ u ovogodišnjoj Nobelovoj nagradi, moramo se stoga spustiti u svijet kvarkova zatočenih unutar dimenzija čestica koje oni izgrađuju. Tako će proton biti izgrađen od dva «gornja» *u* kvarka (električnog naboja $2/3$) i jednog «donjeg» *d* kvarka (naboja $-1/3$). Slično, neutron će biti izgrađen od dva *d* kvarka i jednog *u* kvarka. Lako zamislimo (Slika 4-3) kako se nukleoni u atomskoj

jezgri okružuju oblakom mezona, primjerice piona (pion pozitivnog naboja bit će građen od u kvarka i $\bar{d}$ antikvarka naboja $1/3$).



Slika 4-3: Pion kao prijenosnik rezidualne jake sile

Pokusima do sada nije uspjelo izdvojiti kvark iz hadrona. Ulaganje energije za takvo razdvajanje kvarka i antikvarka rezultira stvaranjem novog mezona. To podsjeća na pokušaj razdvajanja polova magneta. Umjesto da razdvojimo magnetske polove, od jednog magneta nastaju dva. Jaka sila pokazuje porast pri pokušaju razdvajanja kvarkova. Zamislivo je da će takva sila među kvarkovima slabiti ukoliko se oni približavaju?

Neobično antizasjenjenje bojnog naboja

Rana proučavanja jake sile bila su usredotočena na pravilnosti (Reggeove polove) koje su opažane na niskim energijama (prijenosima impulsa). Činjenica da kvarkovi nisu opažani niti pri vrijednostima koje su deseterostruko premašivale prag njihove produkcije, podupirala je uvjerenje da je riječ o čisto matematičkim objektima, bez fizikalne realnosti. Kasnije je shvaćeno da će najvažnije informacije poteći iz «duboko neelastičnih» raspršenja na velikim prijenosima impulsa, gdje se ispituju kratke međukvarkovske udaljenosti. Pojava «skaliranja» koja je tu opažena mogla se objasniti teorijom polja samo ako kvarkovi nemaju interakcije. No kako možemo ugasiti interakciju između kvarkova, kad bi u tom slučaju očekivali da se hadroni razgrade na svoje kvarkovske sastavnice?

Ta su pitanja potaknula teorijske izračune vakuumske polarizacije za slučaj jake sile. Analogni račun za elektromagnetizam rezultirao je poznatim zasjenjenjem električnog naboja (Slika 4-2 (a)), očekivanim na temelju iskustva s dielektričkim sredstvima kojima smo okruženi.

U relativističkoj teoriji dielektrična konstanta ϵ može se izračunati pomoću magnetske permeabilnosti μ pomoću relacije $\epsilon \mu = 1$ (u jedinicama gdje je brzina svjetlosti $c=1$). U klasičnoj fizici, gdje su sva magnetska polja stvorena strujama, mediji su dijamagnetski: u tom slučaju struje istih smjerova se privlače, a suprotnih smjerova se odbijaju (Slika 4-2 (b)). Dijamagnetizam s $\mu < 1$ odgovara električnom zasjenjenju s $\epsilon > 1$.

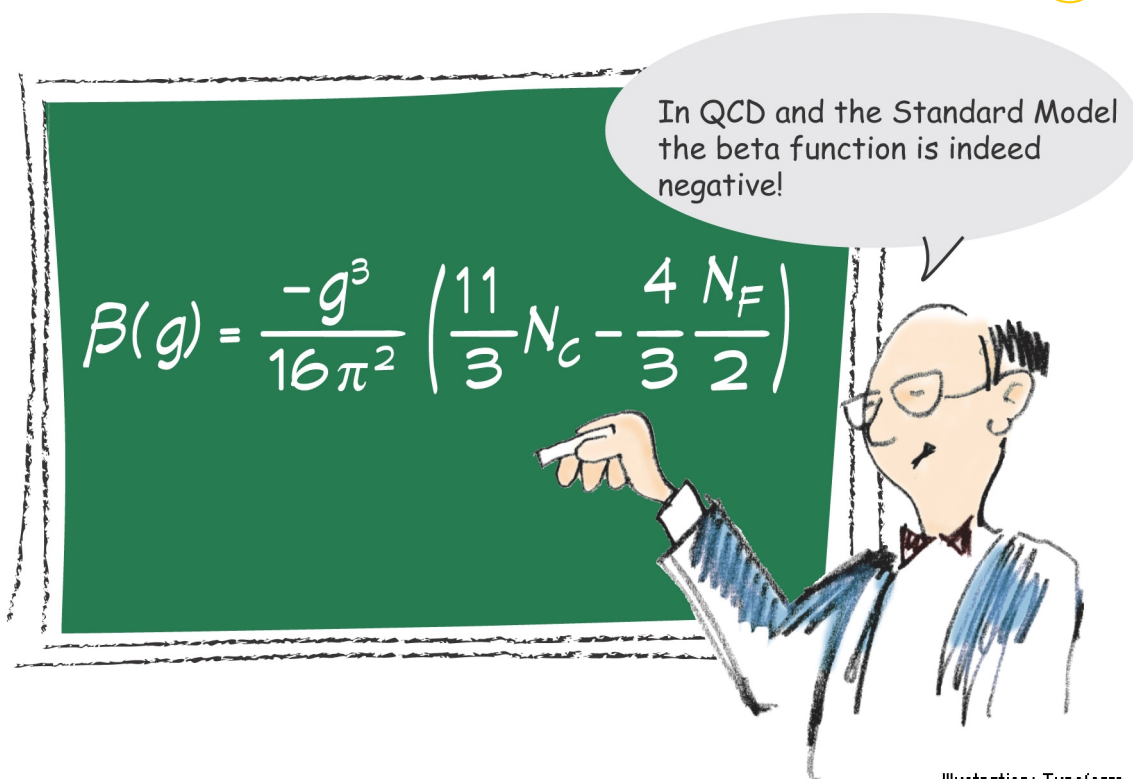


Illustration: Typoform

Slika 4-4: Budući da prvi član u zagradi prevladava, β funkcija kromodinamike je negativna

Naučili smo da je u kvantno-mehaničkim sustavima moguć i paramagnetizam, tj. da postoje permanentni magnetski dipoli koji se usmjeravaju paralelno s nametnutim magnetskim poljem i time ga povećavaju, dajući $\mu > 1$. Slutimo da bi u takvim situacijama mogli imati $\varepsilon < 1$, tj. antizasjenjenje. Fizikalni vakuum se pokazuje kao zanimljiv kvantno-mehanički sustav, kojega tek treba ispitati u odnosu na nove naboje još nedovoljno izučenih fundamentalnih sila.

Kao što se električni naboj e_0 u mediju okružuje električnim dipolima, slično se događa i u vakuumu. Naime, vakuum elektrodinamike je na račun virtualne produkcije parova elektrona i pozitrona snabdjeven električnim dipolima. Fizikalni vakuum se ponaša kao polarizabilni medij: naboj uronjen u vakuum proizvodit će polarizaciju vakuuma.

Ekvivalentno, medij u kojemu postoje virtualni električni dipoli vodit će na zasjenjenje naboja na vrijednost $e(r) = (e_0)/\varepsilon$, gdje dielektrična konstanta ε ovisi o frekvenciji (energiji), odnosno o udaljenosti r . U ovom slučaju, ukoliko se udaljavamo od naboja on će biti okružen sa sve više dipola, tako da $e(r)$ opada s udaljenošću. Za mjerenje takvog ponašanja uobičajeno je u teoriji polja uvesti tzv. β funkciju, kao «minus» derivacije logaritma naboja $\ln[e(r)]$ po $\ln(r)$. Obično se kaže da je promjena jakosti naboja određena «jednadžbom renormalizacijske grupe». Za elektrodinamiku ta β funkcija je pozitivna.

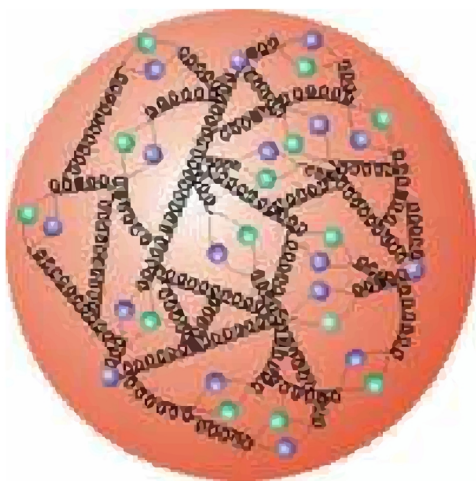
Za teoriju jake sile koja se temelji na naboju koji je nazvan «bojom» (otuda i naziv «kromodinamika») račun β funkcije je bio puno složeniji. Razlog tome leži u specifičnostima naboja boje. Bilo je više naznaka da se svaki od uvedenih kvarkova (u ,

d , s , ...) mora pojavljivati u tri vrste, tri «boje». Promicanje boje u izvor sile koji se oslanja na $SU(3)$ simetriju boje, zahtjeva da (za razliku od fotona) prijenosnici jake sile, «gluoni», i sami posjeduju bojni naboj. Račun polarizacije vakuuma za Yang-Millsove teorije kakva je $SU(3)_{\text{boje}}$ provele su neovisno dvije grupe teorijskih fizičara: D. Gross sa svojim studentom i suradnikom F. Wilczekom na Princetonu i D. Politzer koji je bio student Sidneya Colemana na Harvardu. Coleman je održavao kontakt s Princetonskom grupom i dva nezavisna proračuna β funkcije objavljena su istodobno, 1973., s rezultatom prikazanim na Slici 4-4.

Dva člana u tom rezultatu su u konkurenciji. Drugi član u zagradi potječe od doprinosa kvarkova i vodi na zasjenjenje. Za tri boje ($N_c = 3$) ukupni rezultat ovisi o predznaku izraza $(11/2 - N_F/3)$. Sve dok broj kvarkovskih okusa N_F ne prelazi brojku 16 prevladava učinak antizasjenjenja od gluona i kvantna kromodinamika je asimptotski slobodna. Gluoni pokazuju svojstvo permanentnih bojno-magnetskih dipola pa se antizasjenjenje kromodinamičkog vakuuma može razumjeti kao neobični paramagnetizam vakuuma.

Oživljavanje Einsteinovog originalnog svodenja mase na energiju

Rad iz 1905. u kojemu je postavljena Einsteinova ekvivalencije energije i mase u stvari je objavljen s naslovom: *Da li inercija tijela ovisi o njegovoj energiji?* Ekvivalencije energije i mase postavljena u tom obliku, $m = E/c^2$, pokušaj je da se porijeklo mase nađe u energiji. Upravo to je najočiglednije ostvareno u kvantnoj kromodinamici (Slika 4-5). Masa tvari kojom smo okruženi potječe gotovo u cjelosti od energije bezmasenih gluona.

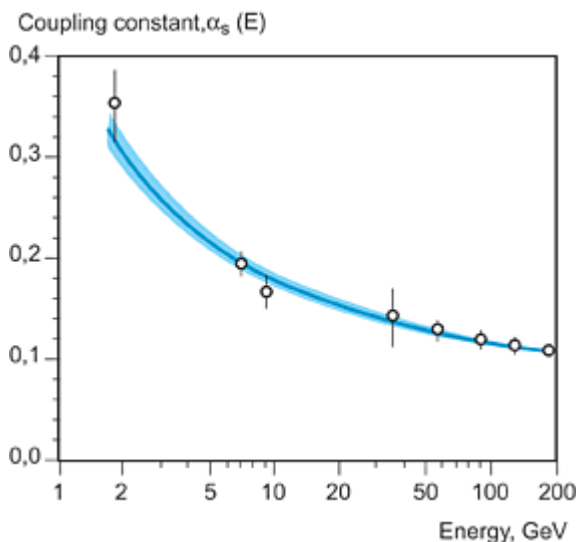


Slika 4-5: Protoni i neutroni od kojih su građene atomske jezgre sadrže bezmasene gluone i gotovo bezmasene kvarkove.

Dosezi otkrića asimptotske slobode

Na nužnost postojanja teorija polja s negativnom β funkcijom upozorio je Kurt Symanzik na konferenciji u Marseilleu u ljeto 1972. On sam je znao za jednu takvu teoriju sa skalarnim poljem, a Gerardus 't Hooft je pritom pokazao da poznaje takvu

negativnu β funkciju za Yang-Millsove baždarnе teorije. No konkretnu važnost za jaku interakciju uočili su navedeni fizičari s Princetona i Harvarda. Oni su se pritom oslonili na baždarnu grupu $SU(3)$ kakvu su godinu dana ranije predložili Harald Fritzsch i Gell-Mann na tragu $SU(3)$ modela modela kojega je još davne 1965. godine izložio Y. Nambu. Asimptotska sloboda kromodinamike znači da jakost bojnog naboja opada prema višim energijama, što je danas dobro ustanovljeni eksperimentalni rezultat (Slika 4-6).

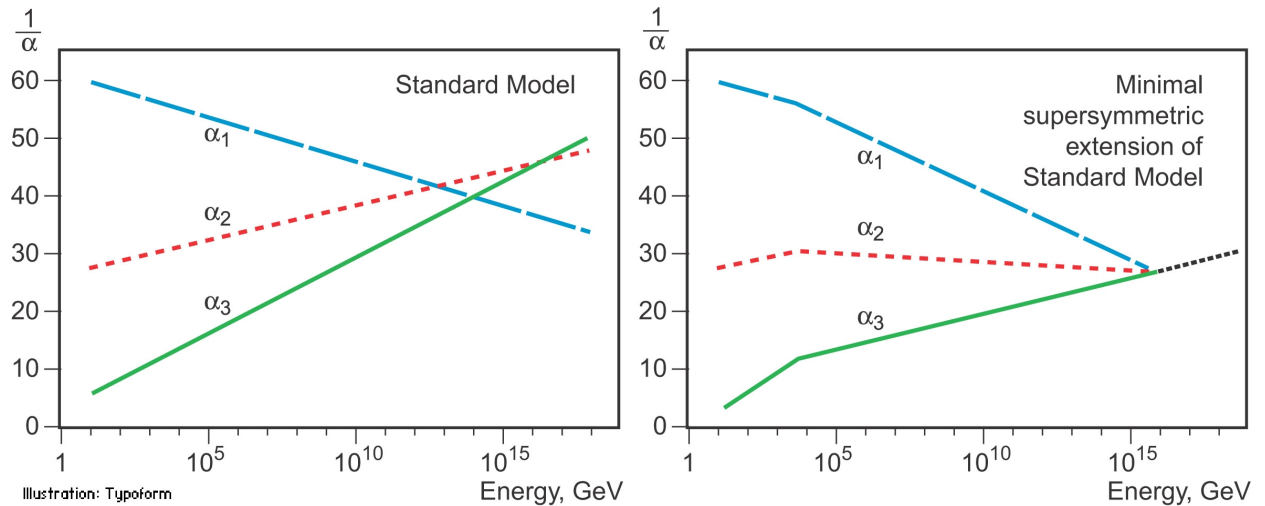


Slika 4-6: Opadanje jakog vezanja $\alpha_s = g^2 / (4\pi)$ kakvo daje krivulja asimptotske slobode potvrđeno je postojećim mjerenjima

Tom eksperimentalnom potvrdom teorija jakog međudjelovanja staje uz bok elektroslabe teorije okrunjene Nobelovom nagradom 1999. godine (vidjeti MFL 2/198, str. 74-80) i zajedno s njom čini standardni model za opis temeljnih čestica i sila u prirodi. Matematički je standardni model izražen umnoškom grupa $U(1) \times SU(2) \times SU(3)$, kao «grupom standardnog modela». Dva množitelja u toj grupi su nekomutirajuće (neabelovske) grupe, Yang-Millsove grupe $SU(2)$ i $SU(3)$.

Ustanovljavanje asimptotske slobode tih Yang-Millsovih komponenti grupe standardnog modela ima i dodatnu važnost. Zbog suprotnog ponašanja od Abelovog $U(1)$ dijela, moguć je susret jakosti naboja abelovskog i neabelovskih dijelova. Time se otvara mogućnost velikog ujedinjenja sila na visokoj energiji unifikacije, kako je prikazano na Slici 4-7.

Umjesto tri vezanja g_1, g_2, g_3 , odnosno $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$, koja odgovaraju množiteljima u gornjem elektro-slabo-jakom umnošku (ovdje smo kromodinamičko vezanje g označili s g_3), na dovoljno visokim energijama postojalo bi jedinstveno vezanje (primjerice g_5 u $SU(5)$ ujedinjenju, ili «supersimetričnoj» inačici kakva je prikazana na desnoj strani slike 4-4). Dodatna potpora takvim poopćenjima standardnog modela stiže iz mjerenja oscilacija neutrina koja upućuju na neutrine s masom (vidjeti MFL 3/211, str. 176-181 za otkriće nagrađeno Nobelovom nagradom za 2002. godinu). Naime, jednostavne grupe kao $SU(5)$, $SO(10)$, E_6 , ... koje sadrže grupu standardnog modela kao svoju podgrupu, vrlo lako ugrađuju u sebe masivne neutrine.



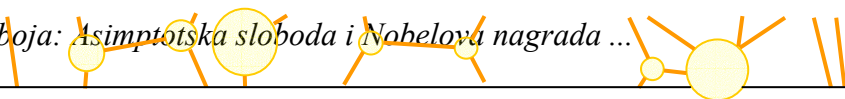
Slika 4-7: Susret naboja elektro-slabo-jakih sastavnica standardnog modela (ili njegove inačice obogaćene supersimetričnim česticama) označio bi novi, ujedinjeni opis sila.

Očigledno, otkriće asimptotske slobode nadilazi okvire same kromodinamike uz koju je najizravnije vezano. Ono se pokazuje nužnim uvjetom da bi temeljna međudjelovanja mogli opisivati konzistentnim teorijama polja. Uz novo shvaćanje samih naboja kao izvora sila, otkriće asimptotske slobode je unijelo i novo svjetlo na samo razumijevanje temeljnih sila u prirodi.

Literatura

<http://nobelprize.org/>

4. Neobično antizasjenjenje naboja: Asimptotska sloboda i Nobelova nagrada ...



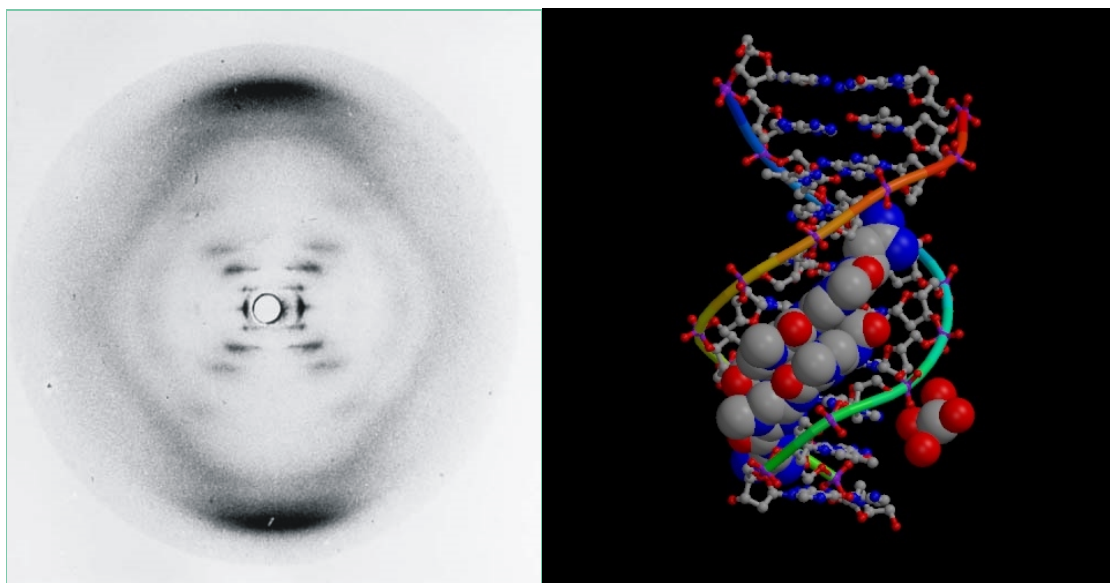


Razotkrivanje tajni (za život važnih) molekula

Sanja Tomić

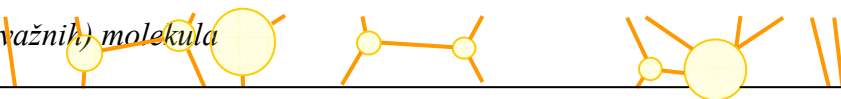
Institut Ruđer Bošković, Zagreb

Riječ fizika obično nas podsjeća na atom, atomsku jezgru i elektron, na nuklearne reakcije, neutrino ili pak na Svemir i njegovo širenje. No fizika i fizičari uvelike su pridonijeli i razumjevanju tajni života. Među dobitnicima Nobelovih nagrada za medicinu, biologiju i kemiju značajan je udio fizičara. U ovom tisućljeću to su fizičar Alan Heeger, dobitnik Nobelove nagrade za kemiju 2000. godine (nagrada je dodijeljena za otkriće i razvoj vodljivih polimera), biofizičar Roderick MacKinnon dobitnik Nobelove nagrade za kemiju 2003. (za otkrića vezana za kanale u membrani stanice), te Sir Peter Mansfield koji je Nobelovu nagradu za medicinu 2003. (za primjenu metoda magnetske rezonancije u medicini) podijelio s Paul Lauterburom, fizikalnim kemičarem.



Slika 5-1: Lijevo je prikazana difrakcijska slika DNA koju je sredinom prošlog stoljeća odredila Rosalind Franklin. Desno je struktura DNA s malom molekulom vezanom u njezinu udubinu, određena pomoću difrakcije X-zraka 2002 godine (<http://rutgers.rcsb.org/pdb/>).

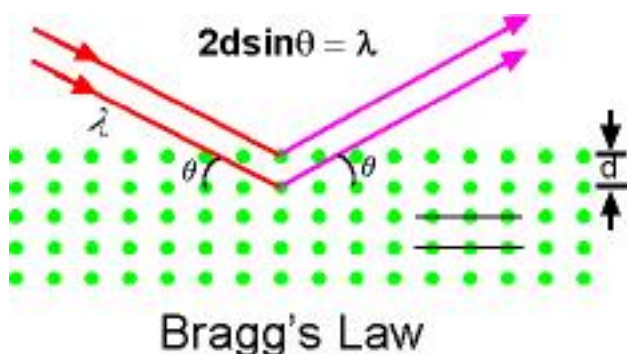
Vratimo se malo dalje u prošlost, sredinom prošlog stoljeća razotkrivena je tajna molekule kojom se informacije o životu prenose s pokoljenja na pokoljenje. Strukturu «spirale života», tj deoksiribonukleinske kiseline (DNA) točno su predvidjeli biolog James Watson i fizičar Francis Crick. Rad su objavili u časopisu Nature 1953. godine. Watson i Crick vjerovali su da je molekula DNA spiralna, a Crick je dokazao da bi rendgenska slika takve molekule pokazivala oblik križa. Prve rendgenske slike DNA napravila je Rosalind Franklin i one su odgovarale Crickovim pretpostavkama. Kemijska analiza pokazala je da je DNA dugi lanac šećera i fosfata na koji su



pričvršćene baze adenin (A), guanin (G), timin (T) i citozin (C) (plosnate prstenaste molekule koje sadrže ugljik, dušik i vodik), te da količina adenina u molekuli DNA odgovara količini timina, a količina guanina količini citozina. Na temelju prikupljenih informacija Watson i Crick sagradili su trodimenzionalni model DNA. Pravilno su pretpostavili da su A i T, te G i C u molekuli povezani tzv. vodikovim mostovima, slabim vezama u kojima se atom vodika nalazi između dva negativno nabijena atoma, dok vanjsku ovojnicu molekule čine šećer i fosfati.

DNA sadrži informaciju o građi proteina, molekula koje s pravom nose naziv 'građevni blokovi' života. Proteini čine 12-18% težine odraslog čovjeka, grade mišiće i čine strukturni okvir za druga tkiva (npr. vezivna). Pored građivne njihova uloga u funkcioniranju života, na svim nivoima složenosti, je višestruka: miofibrili i aktin omogućuju stezanje i rastezanje mišića, hemoglobin, albumin i niz drugih proteina prenosi tvari kroz tijelo, proteini djeluju kao enzimi (u tijelu čovjeka postoji oko 1000 proteinskih enzima), reguliraju fiziološke procese i rast, sastavni su dio imunog sistema [1].

Svi prirodni proteini građeni su od 20 različitih aminokiselina i to njihovih 8 izomera. Ovisno o veličini proteini se sastoje od nekoliko desetaka do nekoliko stotina tisuća aminokiselina povezanih peptidnim vezama. Redosljed aminokiselina u nizu definira oblik i funkciju proteina, a kodiran je unutra DNA, tako da skupina od tri baze, 'kodon', predstavlja jednu aminokiselinu. Četiri različite baze koje se javljaju u DNA mogu se na 64 načina složiti u 'trojke', koje kodiraju 20 različitih aminokiselina (pojedine aminokiseline kodira više trojki baza, no ovisno o kojoj je trojki riječ aminokiselina će imati različite susjede). Niz tripleta baza koji definira pojedini protein naziva se gen. Genetski kod dešifriran je 1996, a slijedilo je sekvencioniranje kromosoma niza organizama. Sekvencioniranje ljudskog genoma završeno je 2001. godine [2]. Utvrđeno je da sadrži nekoliko desetaka tisuća gena, znatno manje nego se u početku pretpostavljalo. U posljednje vrijeme sve se više pažnje posvećuje istraživanju nekodirajućeg dijela kromosoma, budući postoji sve više indicija da, suprotno prijašnjim pretpostavkama i on nosi određene informacije.



Slika 5-2: Difrakcija elektromagnetskog zračenja na čvorovima rešetke.

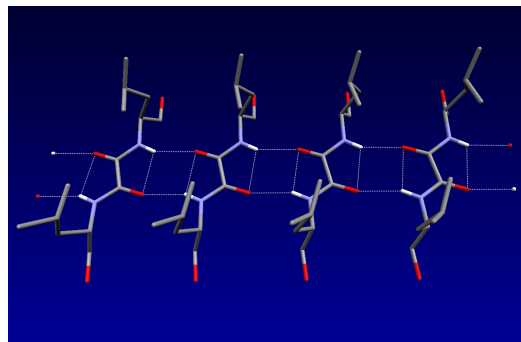
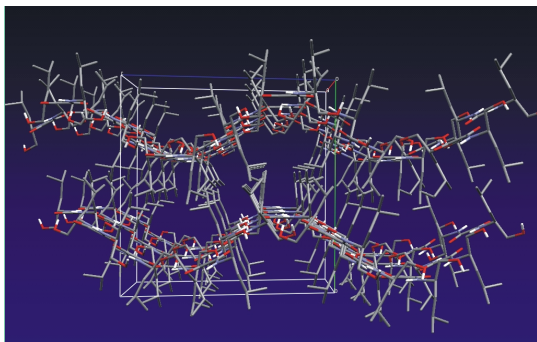
<http://www.mrl.ucsb.edu/mrl/centralfacilities/xray/xray-basics/>

Razotkrivanje tajni života i rješavanje kompleksnih problema vezanih uz biološke sisteme moguće je samo interdisciplinarnim pristupom, te se biofizika, bioinformatika i biokemija sve više isprepleću. Od eksperimentalnih metoda najbolji uvid u oblik molekule, trodimenzionalnu strukturu, pružaju difrakcija X-zraka,



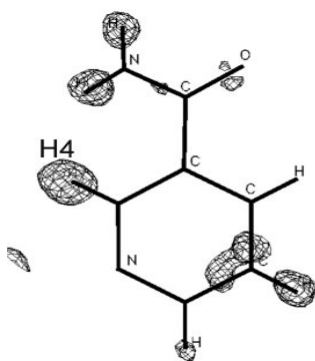
difrakcija neutrona, nuklearna magnetska rezonancija te u novije vrijeme elektronska mikroskopija.

Difrakcijske metode mogu se primjeniti praktički na sve molekule, velike i male. Jedini preduvjet je dobiti monokristal, što je ponekad, pogotovo kod membranskih proteina ravno magiji. Valna duljina X-zraka približno odgovara udaljenosti atoma u molekuli, pa njihovim raspršenjem na monokristalima, tzv. molekulskim rešetkama, u kojima su istovrsne molekule pravilno, periodički poredane, omogućuje određivanje trodimenzionalne strukture molekule.



Slika 5-3: Razmještaj molekula u kristalu. Na slici lijevo istaknuta je jedinična ćelija kristalne rešetke [3].

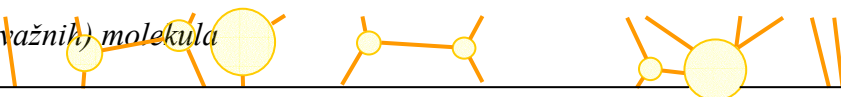
X-zrake raspršuju se na elektronima u molekuli i intenzitet raspršenog zračenja (kvadrat valne funkcije) proporcionalan je gustoći elektrona. Problem u rješavanju strukture predstavlja određivanje faza valne funkcije budući se one ne mogu mjeriti. Kako bi se problem faza riješio postoji nekoliko pristupa, no u osnovi svakoga je da se pretpostavi oblik molekule i na temelju utvrđene kristalne simetrije odredi raspodjela intenziteta koja se zatim uspoređuje s eksperimentalnim vrijednostima.



Slika 5-4: Mapa elektronske gustoće nakon oduzimanja izračunatih od izmjerenih F vrijednosti ($F_{obs} - F_{calc}$). Konture su rađene na 2σ određene elektronske gustoće [4].

Ovisno o razlici navedenih vrijednosti model se modificira sve dok se ne postigne najbolje moguće slaganje izračunatih i izmjerenih vrijednosti intenziteta.

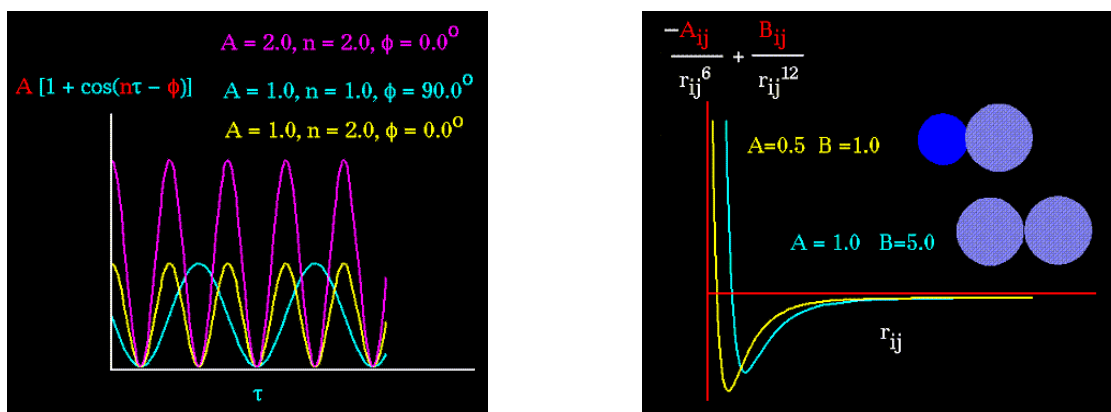
Kako bi što točnije odredili ponašanje i funkciju neke molekule nastojimo o njoj što više saznati. U današnje vrijeme najveći naponi u bio-znanostima ulažu se na utvrđivanje funkcije pojedinih proteina, te njegove povezanosti s ostalim proteinima u stanici. Tako se razvio niz teorijskih metoda koje nam omogućuju proučavanje oblika i



dinamike, te elektronskih svojstava molekule, a time i njezine reaktivnosti. Ukoliko nas prvenstveno zanima oblik molekule, njezino ponašanje u otopini i sposobnost stvaranja nekovalentnih kompleksa s drugim molekulama, promatrati ćemo je kao klasični objekt, dakle kao tvorevinu koja se sastoji od kuglica različitih veličina, masa i naboja među kojima djeluju sile analogne onima koje nalazimo na makroskopskoj skali. Potencijalna energija molekule u tom je pristupu najčešće prikazana kao suma harmoničkih i periodičnih članova te elektrostatske i van der Waalsove energije interakcije:

$$U = \frac{1}{2} \sum_v k_v (b - b_0)^2 + \frac{1}{2} \sum_k k_k (a - a_0)^2 + \frac{1}{2} \sum_t k_t [1 + \cos(n\tau - \phi)] + \sum_{ij} [q_i q_j / R_{ij} + (A_{ij} / R_{ij}^{12} - B_{ij} / R_{ij}^6)]$$

Prve tri sume u navedenom izrazu za potencijalnu energiju molekule nazivaju se vezni, a posljednje dvije, nevezni članovi. Harmonički članovi vode računa da veze i valentni kutevi između kovalentno povezanih atoma u molekuli budu u ravnotežnom stanju, dok periodični član određuje moguće položaje četiri uzastopno povezana atoma. Konstante sile (k) i ravnotežne vrijednosti veza (b_0) i kuteva (a_0) određuju se eksperimentalno, spektroskopskim, difrakcijskim i kalorimetrijskim mjerenjima, ali i kvantnomehaničkim računima. Kod velikih molekula, kao što su proteini i nukleinske kiseline, DNA i RNA, broj neveznih interakcija znatno je veći od veznih, pa je potrebno vrlo pažljivo odrediti parametre u izrazu za van der Waalsov i elektrostatsku potencijalnu energiju.



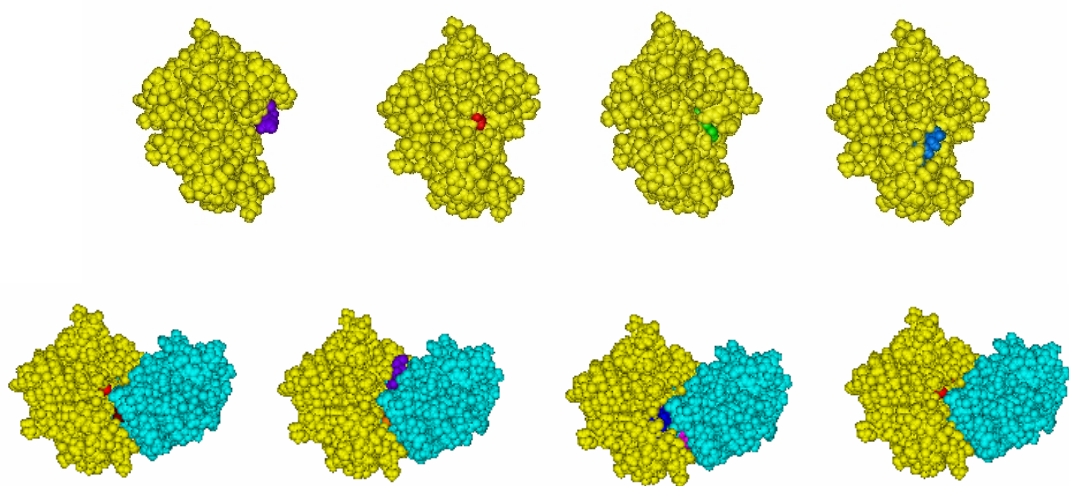
Slika 5-5: Izgled funkcija kojim se opisuje potencijalna energija molekule. Periodični potencijal torzijskih kuteva u molekuli (lijevo), van der Waalsov potencijal (desno)[5].

Ukoliko promatramo sustav molekula, npr. molekulu proteina otoplenu u vodi ili pak vodenoj otopini natrijevog klorida, što približno odgovara mediju u kome se proteini nalaze u živim organizmima, pored unutarnje potencijalne energije, molekule imaju i potencijalnu energiju koju određuju raspored i naboj okolnih molekula. Nadalje, kako bi što vjernije simulirali fiziološke uvjete, sustavu molekula pridružujemo i određenu temperaturu, T , dakle kinetičku energiju. Na temperaturi T , sustavu od N , relativno slobodnih, atoma pridružena je kinetička energija u iznosu $(3N-6) k_B T / 2$, pri čemu je k_B Boltzmanova konstanta, a $(3N-6)$ broj stupnjeva slobode u sustavu (energija sustava ne ovisi o translaciji i rotaciji njegovog centra mase). Gibanje svake pojedine čestice, i , u takvom se sustavu prikazuje Newtonovom jednadžbom



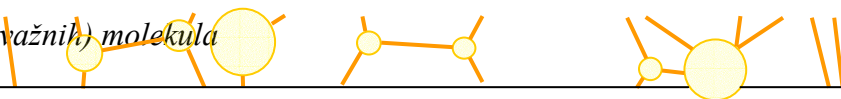
gibanja, $-\frac{dU_i}{dt} = m_i \frac{d^2 r}{dt^2}$, (i predstavlja atom ili čitavu molekulu), a praćenje promjena molekule (sustava) naziva se molekularna (ili molekulska :) dinamika (MD). Pored navedene, o temperaturi ovisne kinetičke energije, molekule u sustavu dio kinetičke energije dobivaju, ili gube, promjenom potencijalne energije, što dovodi do zagrijavanja, odnosno do hlađenja sistema. Kako bi se navedene promjene izbjegle koriste se različiti regulatori topline sistema. Ukoliko se kao regulator temperature sistema uvodi trenje, jednačba gibanja je oblika $-\frac{dU_i}{dt} - \gamma_i m_i = m_i \frac{d^2 r}{dt^2}$. Vremenski korak tijekom simulacije određen je najbržim gibanjem unutar molekule i obično je reda veličine fs, 10^{-15} s (frekvencije atoma vodika vezanih za atom ugljika su reda veličine 10^{-14} s).

Eksplcitno simuliranje molekula otapala vrlo je skupo, pa se njegov utjecaj na elektrostatski potencijal molekule aproksimira dielektričnom konstantom ili reakcijskim potencijalom, a sudari otapala s promatranom molekulom opisuju se slučajnom silom R . Pored, neusmjerenog, Brownovog gibanja, molekule se gibaju u smjeru smanjenja elektrostatskog potencijala što dovodi do nastajanja njihovih nakupina i kompleksa. Mutacije aminokiselina u proteinima utječu na brzinu nastajanja kompleksa, na njihovu stabilnost i specifičnost. Navedene efekte možemo proučavati eksperimentalno, korištenjem NMR tehnika ili teorijski, modeliranjem mutanata proteina i njihovih kompleksa i računanjem brzina asocijacije, onosno razlika njihovih «slobododnih energija vezanja» ($\Delta G = \Delta H - T\Delta S$).



Slika 5-6: Na «površini» proteina, ribonukleaze, Barnase (gore) označene su točkaste mutacije koje najviše utječu na stabilnost njegovog kompleksa s proteinom Barstar (dolje). 'Površina proteina' definirana je van der Waalsovima radiusima atoma.

Pri modeliranju kompleksa proteina i nukleinskih kiselina znanstvenici se ponajprije koriste eksperimentalno riješenim strukturama koje su pohranjene u bazi PDB. Trenutačno (svibanj 2005. godine) se u bazi nalazi oko 31000 riješenih struktura (no veliki broj tih struktura odnosi se na mutante i komplekse proteina i nukleinskih



kiselina, te se broj bitno različitih struktura svodi na tristotinjak), od toga oko 27000 je riješeno difrakcijom X-zraka. Eksperimentalno određivanje strukture proteina skupo je i dugotrajno, pa znanstvenici sve više koriste teorijske pristupe kako bi odredili strukturu proteina. Tako se razvila nova disciplina bioinformatika, koja koristi sličnosti proteina kako bi odredila nepoznate strukture. Korištenjem MD simulacija moguće je pratiti savijanje proteina *ab ovo*, tj. od potpuno istegnutog niza aminokiselina. No takve simulacije su izrazito duge i zahtjevne. Naime, prosječno vrijeme smatanja proteina iznosi oko *ms* do *s*, a samo mali broj njih smota se već nakon nekoliko desetaka μs . Primjer jednog takvog projekta je simuliranje savijanja proteina Vilinska perjanica (36 amino kiselina). Savijanje se simulira na 150000 PC širom svijeta: <http://folding.stanford.edu/science.html>.

Ukoliko nas zanima raspodjela elektrona unutar molekule, njezina reaktivnost i katalitička svojstva, molekulu moramo promatrati kao kvantno-mehanički objekt. Proučavanje kemijskih reakcija moguće je samo kvantnomehaničkim metodama. U tom slučaju polazimo od Schrödingerove jednadžbe, $H\Psi=E\Psi$. No egzatno rješenje te jednadžbe moguće je isključivo na vrlo malim sustavima kao što je npr. atom vodika. Schrödingerovu jednadžbu za molekule možemo riješiti samo aproksimativno, uvođenjem niza pretpostavki, pa se pri opisu i ne suviše velikih molekula nailazi na niz problema. No, usavršavanjem računala i razvojem različitih iterativnih pristupa, kao i razvojem samog formalizma kvantnomehaničkog računa, on se danas uvelike koristi i nadopunjuje klasični opis molekula. Uglavnom se koriste dvije metode: Hatree Fockova metoda molekulskih orbitala te metoda koja se bazira na funkciji gustoće elektronskog oblaka, DFT (density functional theory).

Literatura

- [1] Peter Karlson, *Biokemija*, Školska knjiga, Zagreb (1982).
- [2] Venter *et al.*, Science 291.
- [3] Z. Štefanić, Doktorska disertacija 2004.
- [4] Podjarny *et al.*, Europhysics News Vol. 33, No. 4 (2002).
- [5] NIH, *Uvod u molekulsku mehaniku*.



Lasери u modernoj znanosti i tehnologiji

Damir Aumiler
Institut za fiziku, Zagreb

Uvod

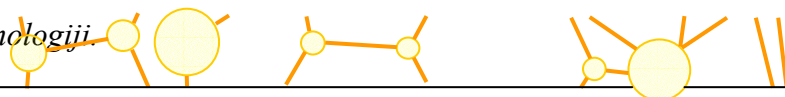
Otkriće lasera 1960. g. započelo je revoluciju kako u znanosti tako i u području tehnologije i znanstvene primjene. Danas, 45 godina kasnije, gotovo je nemoguće pronaći područje znanosti u kojem laser nije pronašao svoju ulogu. Laseri i laserska tehnologija postali su zasebno područje znanosti. Neke znanstvene grane, kao spektroskopija na primjer, otkrićem lasera doživjele su ponovni procvat. Kao koherentni monokromatski izvori svjetlosti, laseri predstavljaju svjetlosne izvore velike spektralne gustoće energije koja mnogostruko nadmašuje druge nekoherentne izvore. Stoga su postali nenadoknadivo znanstveno sredstvo u istraživanjima strukture atoma i molekula. Time su bitno pridonijeli razvoju atomske i molekulske fizike, koja je danas nezamisliva bez lasera, te kemije, molekularne biologije...

No znanost nije jedina profitirala otkrićem lasera. Kako su se razvijali novi tipovi lasera, a danas ih je gotovo i teško sve nabrojati, tako su se otkrivale i nove mogućnosti primjene. Od industrije, gdje se laser pokazao kao savršen alat za rezanje i bušenje, preko medicine (kirurgije, oftalmologije, dermatologije, estetske kirurgije), telekomunikacija, informatičke industrije, vojne industrije, zabavne industrije, itd. Laserom se danas podjednako uspješno reže metal, vrše korekcije oka, vode munje, čitaju CD-i i DVD-i, navode rakete, hlade atomi, ili jednostavno uklanjaju neželjene dlake s kože. U isto vrijeme dok se razvijaju laserski sistemi za istraživanje fuzije veličine tvornice, možemo se jednostavno uputiti do placa i kupiti laserski pointer za 10-tak kuna. Što je slijedeće – svjetlosne sablje iz Ratova zvijezda?!

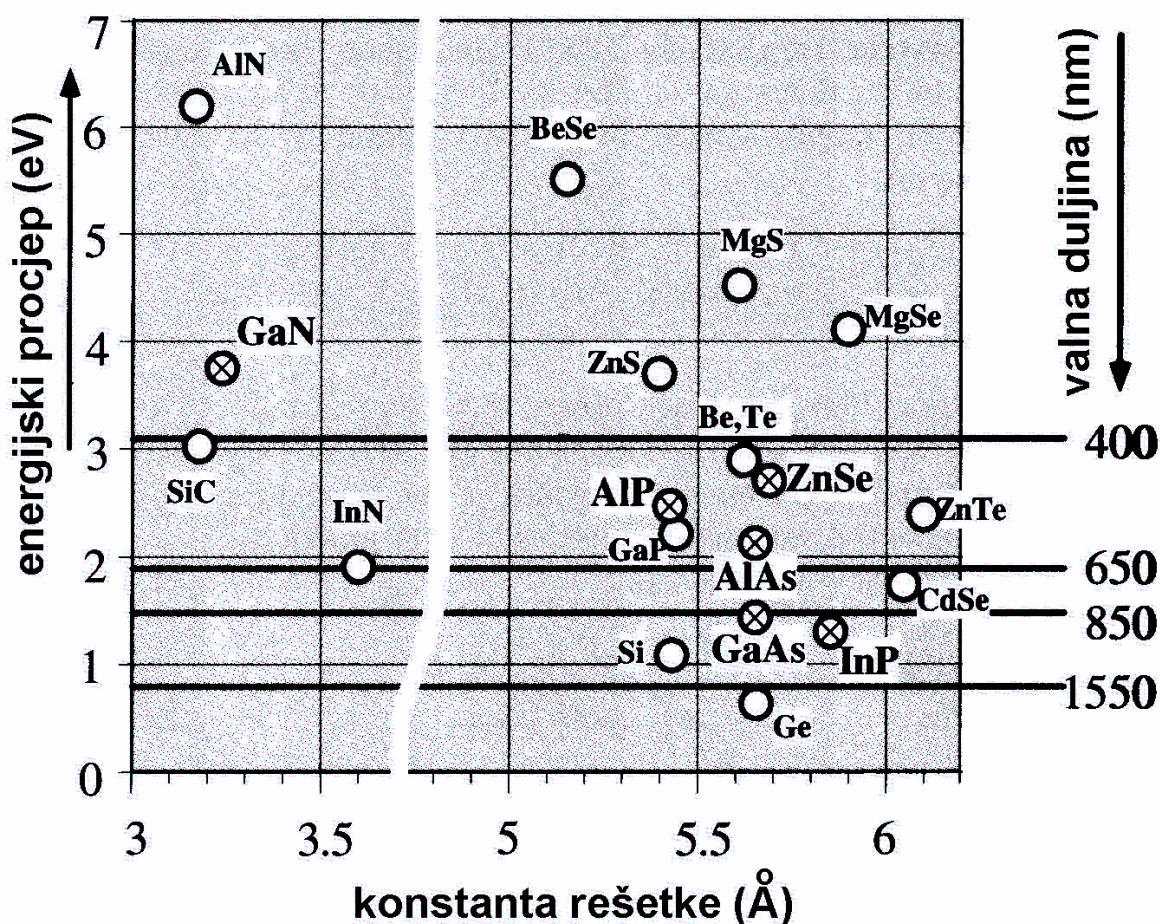
U ovom kratkom osvrtu koncentrirat ćemo se na dva gotovo oprečna tipa lasera. S jedne strane to su poluvodički laseri – najšire primijenjeni tip lasera u svakodnevnom životu. To su laseri uglavnom male snage i izrazito visoke spektralne razlučivosti. S druge strane, bit će govora o femtosekundnim laserskim sistemima koji generiraju najkraće i najsnažnije pulseve svjetlosti.

Poluvodički laseri

Iako prvi poluvodički laseri datiraju još iz '60-tih godina, trebalo je više od 20 godina da poluvodički laseri postanu komercijalan proizvod. Prve laserske diode funkcionirale su samo na kriogenim temperaturama. Danas su laserske diode jedan od najvažnijih opto-elektroničkih uređaja jer omogućuju direktnu transformaciju električne struje u koherentnu svjetlost.

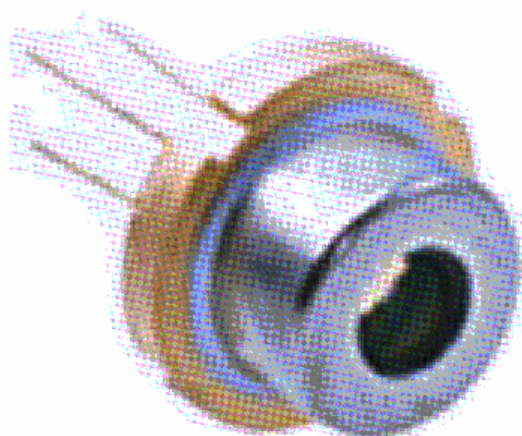
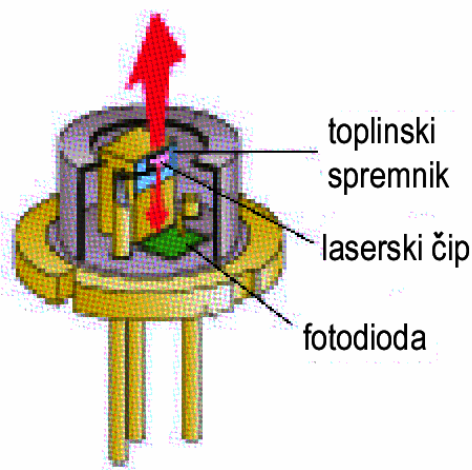


Srce svake laserske diode je spoj p- i n-dopiranog poluvodičkog materijala, na kojem dolazi do rekombinacije elektrona i šupljina pri čemu se emitira svjetlost. Valna duljina emitirane svjetlosti određena je energijskim procjepom između valentne i vodljive vrpce. Na slici 1. prikazana su svojstva važnijih opto-elektroničkih poluvodiča kao funkcija konstante rešetke, koja je bitna za proizvodnju kristala. Činjenica da su konstante rešetke GaAs i AlAs pokazala se vrlo bitnom jer se energijski procjep (a time i valna duljina svjetlosti) može kontrolirati u širokom rasponu pomoću omjera miješanja x u $(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x})\text{As}$ kristalima. InGaAsP kristal je također značajan zbog valne duljine $1.55\ \mu\text{m}$ koja se koristi u optičkim komunikacijama. Zanimljivo je da silicij, ekonomski najvažniji poluvodički materijal, nema bitnu ulogu u proizvodnji laserskih dioda.



Slika 4-1: Energijski procjep nekih važnijih poluvodičkih materijala. Materijali za koje je postignut laserski efekt označeni su križićem [1].

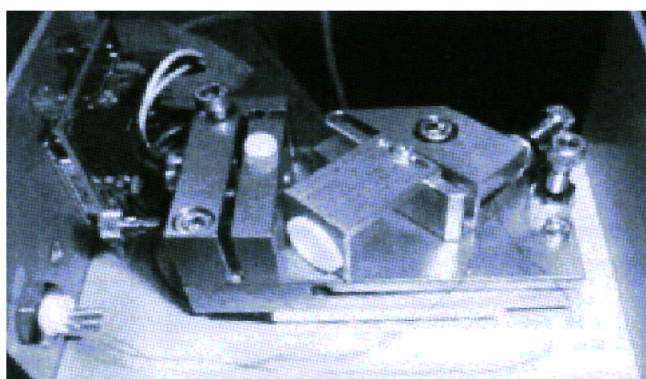
Kao zanimljivost treba navesti 1996. g. koja je ušla u povijest industrije poluvodičkih dioda. Naime, te je godine Shuji Nakamura predstavio svijetu prvu plavu lasersku diodu. Već dugo je postojao komercijalni interes za plavu svjetlost, jer se bez nje nije moglo proizvesti ekrane u boji bazirane na poluvodičima. Širom svijeta velika su sredstva uložena u istraživanje ZnSe, za koji se smatralo da ima najveće šanse za uspjeh. No Shuji Nakamura napravio je prvu plavu lasersku diodu na bazi GaN, koji se dotad smatrao potpuno neprikladnim! Svim znanstvenim predviđanjima unatoč, plave laserske diode postale su tržišno dostupne.



Slika 4-2: Laserska dioda

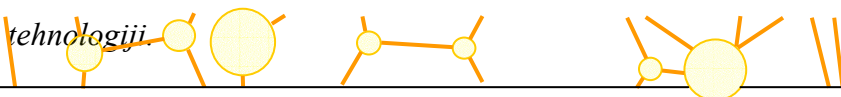
Najčešća upotreba laserskih dioda je u CD i DVD uređajima. Koriste se diode valne duljine oko 780 nm (CD) i 650 nm (DVD), snage od nekoliko mW do preko 100 mW. Laserske diode koriste se i u printerima, "bar code" čitačima, laserskim pointerima, optičkim komunikacijama, itd.

Diodni laseri u znanstvenoj primjeni koriste činjenicu da im je valna duljina samo okvirno definirana energijskim procjepom poluvodičkog elementa. U praksi se valna duljina može mijenjati unutar oko 10 nm i to promjenom temperature i struje kroz diodu. Prednost laserskih dioda je u njihovoj maloj spektralnoj širini koja je unutar 100 MHz (oko 0.0001 nm). Spektralne karakteristike dodatno su poboljšane u diodnim laserima s vanjskim rezonatorom. Vanjski rezonator uspostavlja se optičkom povratnom vezom između površine laserske diode i holografske optičke rešetke, čime se postižu spektralne širine reda 1 MHz (oko 0.000001 nm).

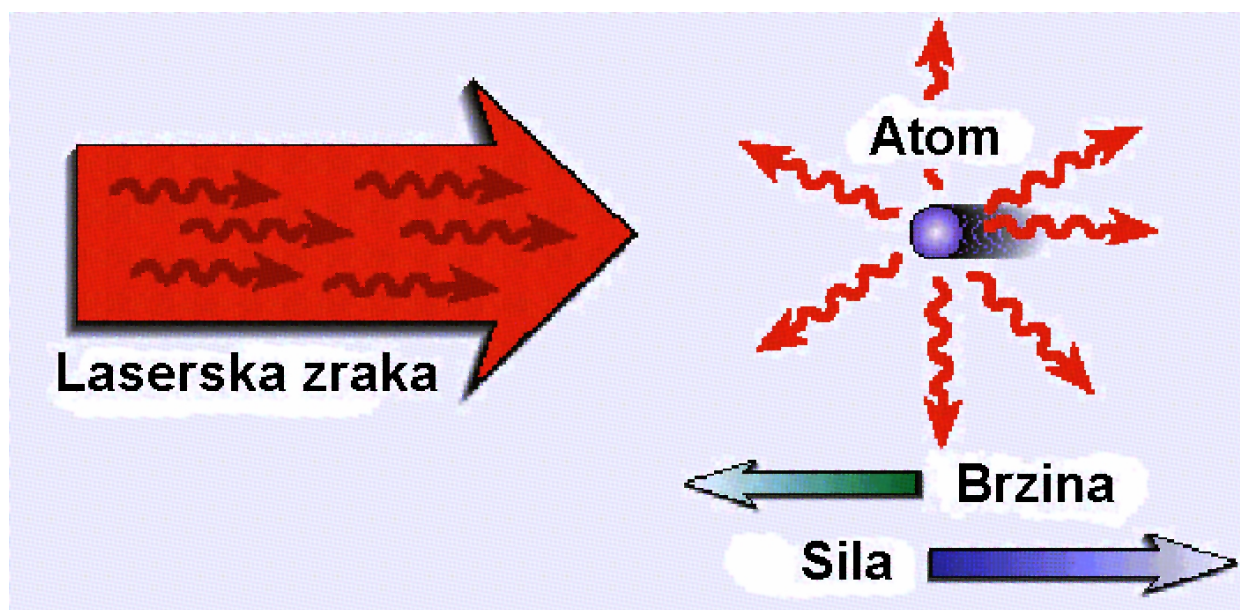


Slika 4-3: Diodni laser s vanjskim rezonatorom

Diodni laseri s vanjskim rezonatorom vrlo se uspješno koriste za lasersko hlađenje atoma. Naime, ugodu li se valna duljina lasera u crveno krilo atomske linije, svjetlost će apsorbirati samo oni atomi koji se gibaju prema laseru. To je posljedica Dopplerovog efekta, odnosno činjenice da atomi koji se gibaju prema laseru "vide" svjetlost lasera s plavim pomakom (pa jako apsorbiraju), dok atomi koji se gibaju od



lasera vide svjetlost lasera s crvenim pomakom (ne apsorbiraju svjetlost lasera). Apsorpcijom se atomi usporavaju (hlade), pa ako se ukrsti 6 takvih laserskih zraka u njihovom presjecištu može se postići da se atomi gotovo potpuno zaustave. Temperatura takvih atoma manja je od 1 K, odnosno bliska je apsolutnoj nuli! Uključivanjem magnetskog polja atomi se tada mogu zarobiti u tzv. magneto-optičke stupice ili dodatno hladiti tehnikom evaporativnog hlađenja. Na taj način postignute su temperature niže od 0.0000001 stupnja iznad apsolutne nule, što je rezultiralo otkrićem novog stanja materije – Bose-Einsteinovog kondenzata, za što su Eric A. Cornell, Wolfgang Ketterle i Carl E. Wieman dobili Nobelovu nagradu za fiziku 2001. godine [2].



Slika 4-4: Lasersko hlađenje atoma

Femtosekundni laseri

Ubrzo nakon otkrića lasera razvijene su i metode korištenja lasera za dobivanje laserskih pulseva svjetlosti. Još u '60-tim godinama razvijene su i obilato korištene i primijenjene tehnike generacije mikrosekundnih ($1 \mu\text{s} = 0.000001 \text{ s}$) i nanosekundnih ($1 \text{ ns} = 0.000000001 \text{ s}$) laserskih pulseva. Razvoj laserske fizike u '70-tim donio je proboj u pikosekundno ($1 \text{ ps} = 0.000000000001 \text{ s}$) područje, a posljednja dva desetljeća obilježila je pojava femtosekundnih ($1 \text{ fs} = 0.000000000000001 \text{ s}$) laserskih sistema. Primjena femtosekundnih laserskih pulseva dovela je posljednjih godina i do utemeljenja novog područja znanosti – attosekundne fizike ($1 \text{ as} = 0.000000000000000001 \text{ s}$) [3]. Otkud toliki interes i napor da se razviju tehnike za stvaranje sve kraćih i kraćih pulseva laserske svjetlosti?

Odgovor leži u mogućnosti promatranja i kontrole prirodnih procesa na ekstremno malim vremenskim skalama. Odnos jedne fs naprema jednoj sekundi je otprilike kao odnos pet minuta naprema starosti Zemlje! Za vrijeme jedne fs svjetlost

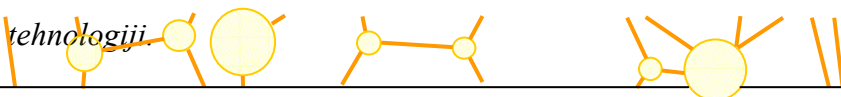


prevaleći udaljenost od nekoliko stotina nanometara, a femtosekundni laserski pulsevi su toliko kratki da ih ničim drugim ne možemo izmjeriti nego njima samima! Teško da nešto toliko kratko možemo iskoristiti u svakodnevnom životu, no fs vremenska skala je vrlo bitna u mikrosvijetu. Razni fundamentalni procesi u atomima i molekulama, kao i njihove međusobne interakcije, dešavaju se na vremenskoj skali manjoj od 1 ps. A upravo su ti procesi osnova i polazište za razumijevanje većine makroskopskih procesa ne samo u fizici, već i u kemiji i biologiji. Uzmimo molekule kao primjer: ovisno o potencijalima i masama atoma koji ih sačinjavaju, periodi molekulskih vibracija i rotacija spadaju u ps i fs područje. Kemijske reakcije također su primjer ultrabrze dinamike u svijetu molekula, za što je 1999. g. Ahmed H. Zewail dobio Nobelovu nagradu za kemiju "jer je pokazao da je moguće pomoću ultrabrze laserske tehnike vidjeti kako se atomi u molekuli gibaju za vrijeme kemijskih reakcija" [4].



Slika 4-5: Fotografija samoinduciranog svjetlosnog filameta u zraku nastalog infra-crvenim (800 nm) fs pulsom velike snage [5].

Osim vremenske razlučivosti, važnost femtosekundnih lasera leži i u mogućnosti postizanja vrlo velikih laserskih snaga. Tako primjerice puls energije 1 mJ trajanja 50 fs ima vršnu snagu po pulsu od 20 GW. Fokusanjem takvih pulseva u točku površine $100 \mu\text{m}^2$ postiže se intenzitet od $20 \times 10^{15} \text{ W/cm}^2$, što odgovara jakosti električnog polja od 3 GV/cm (tipične jakosti električnog polja unutar atoma su reda 1 GV/cm). Također, razvijene su i metode koje omogućuju propagaciju ultrakratkih



pulseva na velikim udaljenostima bez distorzija, što otvara primjenu u prijenosu informacija, ali i omogućuje istraživanje Zemljine atmosfere. Naime, propagacijom fs pulseva velike snage (TW) kroz zrak dolazi do promjene indeksa loma zraka, što dovodi do samofokusiranja laserske zrake. Taj efekt (Kerr efekt) uravnotežuje difrakcija zbog ionizacije zraka. Kao rezultat nastaje filament svjetlosti, koji se ponekad naziva i "svjetlosni metak".

Literatura

- [1] Dieter Meschede: *Optics, Light and Lasers*, Wiley-Vch, Weinheim (2004).
- [2] W. Ketterle: *When atoms behave as waves: Bose-Einstein condensation and the atom laser*, Les Prix Nobel 2001, The Nobel Foundation, Stockholm (2002), Rev. Mod. Phys. **74**, 1131-1151 (2002).
- [3] Papadogiannis *et al.*, Phys. Rev. Lett. **83**, 4289 (1999).
- [4] Ahmed Zewail: *Femtochemistry: Atomic-Scale Dynamics of the Chemical Bond Using Ultrafast Lasers*, Nobel Lectures, Chemistry 1996-2000, World Scientific Publishing Co., Singapur (2003).
- [5] projekt *Teramobile*, www.teramobile.org

Kako znati o budućem vremenu i klimi: numerički modeli za prognozu vremena i klime

Branko Grisogono

AMGI Geofizički odsjek, PMF, Sveuč. u Zagrebu, Horvatovac bb, Zagreb

Uvod

Cilj predavanja i ovog teksta je na da jednostavan način približi prognoziranje vremena i klime. Prognoza se danas najčešće radi numeričkim tro-dimenzionalnim (3D), nelinearnim modelima (NWP=Numerical Weather Prediction). Evo prvo nekoliko činjenica. Prvo, geofizička (dakle i meteorološka) mjerenja, sa svojim pogreškama su "prerijetka" u prostoru i vremenu. Mi živimo u našoj laboratoriji (atmosfera i more) čije je početno stanje nedovoljno poznato. Drugo, NWP i klimatski modeli ne mogu razlučiti u prostoru i vremenu sve relevantne fizikalne procese (za to bi trebala rezolucija od barem 1 cm i 1 s). I treće, atmosfera i more su, unatoč jake determinističke komponente, kaotični.

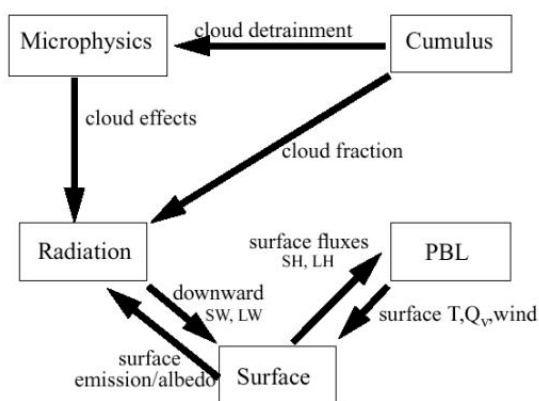
Ponašanje atmosfere određuje niz fizikalnih zakona koji govore kako se zrak giba, grije i hladi, te o ulozi vode u tome. Taj set osnovnih jednažbi se ne može ni približno riješiti analitički, već se rješava numerički, a ta su rješenja uvijek, nužno, samo približna. U principu, ako poznamo početno i rubno stanje atmosfere, spomenutim se setom nelinearnih osnovnih parcijalnih diferencijalnih jednažbi može to početno stanje projicirati na budućnost, tj. dati prognoza. Od 30-tak 'slide-ova' za usmenu prezentaciju, ovdje će se detaljnije diskutirati 4 slike.

Modeli

NWP (kraći račun i finija rezolucija) i klimatski modeli su u biti slični. Najčešće računaju konačnim razlikama po visini i u vremenu, i spektralno po horizontali. Rezolucija im se danas stalno poboljšava, a time se i stalno mijenjaju osnovne pretpostavke tih modela (npr. da li su hidrostatski ili ne, da li filtriraju zvučne valove ili ne, itd.). Današnji NWP modeli koriste računske korake $dx \sim dy \sim 10\text{km}$, $20\text{m} < z < 500\text{m}$ i $dt \sim 1\text{min}$. Klimatski modeli danas obično imaju $dx \sim dy \sim 150\text{km}$, $200\text{m} < z < 2\text{km}$ i $dt \sim 3\text{h}$. Najveće su im razlike obično u tzv. parametrizacijama, tj. u tretiranju procesa koji nisu eksplicitno razlučeni mrežom modela («podskalni procesi») a ipak imaju relativno značajan utjecaj na konačan rezultat.

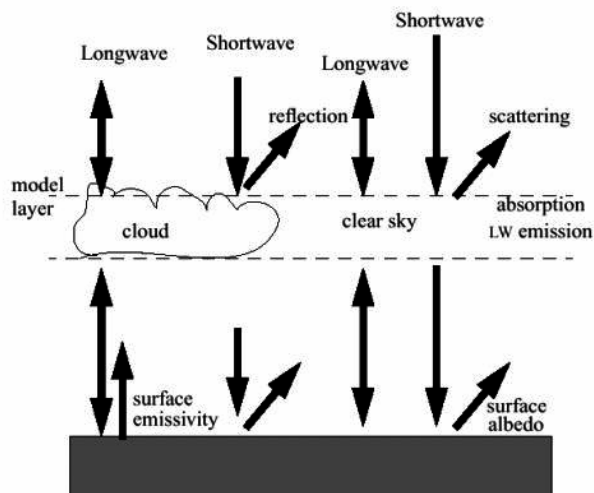
Interactions among physics schemes

Direct Interactions of Parameterizations



Slika 7-1: Shematski prikaz direktnih međudjelovanja fizikalnih schema parametrizacije u numeričkim prognostičkim modelima. 'Najjača' je bilanca energije tla, zatim zračenje i turbulentni procesi u atmosferskom graničnom sloju (PBL) te konvektivna naoblaka i mikrofizika čestica u zraku.

Illustration of Free Atmosphere Radiation Processes



Slika 7-2: Prikaz zračenja u slobodnoj atmosferi (iznad PBLa). Tlo i oblaci igraju bitne uloge u bilanci kratkovalnog i dugovalnog zračenja.

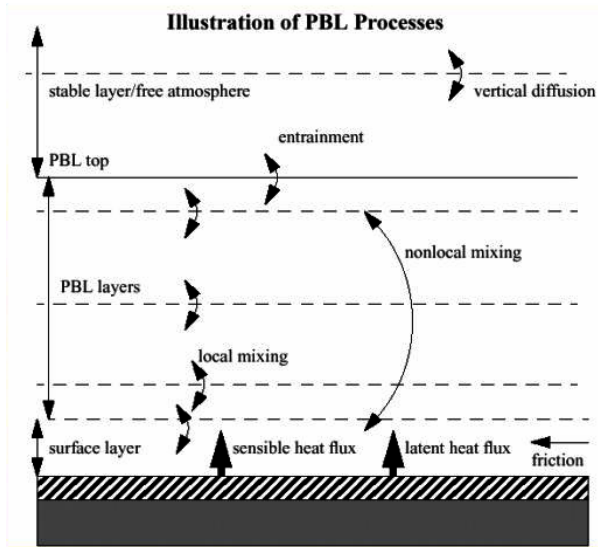
Parametrizacije

Podskalni se procesi uzimaju u obzir statistički i to je bit svake parametrizacije. Slika 7-1 prikazuje kako različite parametrizacije djeluju u jednom NWP ili klimatskom modelu. Formuliranje parametrizacije nije jednoznačno, tj. ono ovisi o rezoluciji, o planiranoj brzini računala, duljini integracije prognostičkog modela, te o (ne)detaljnem poznavanju parametriziranih procesa. Naime, jedno je parametrizirati zračenje (Slika 7-2) ili možda kondenzaciju i stvaranje oborine, a drugo je parametrizirati turbulentciju – principalno neriješen problem fizike. Turbulencija je karakteristična za donji dio atmosfere, tzv. granični sloj (stalno pod utjecajem podloge - trenja i grijanja/hladjenja), i tu pristupamo problemu praktično, tj. inženjerski – da račun radi! Svodimo problem turbulentnog strujanja na a) problem rezolucije, i b) analogiju miješanja zraka i slobodnog puta molekule (tj. koliko se dugo ili daleko molekula 'sjeća' svojeg identiteta). Slikovito je to prikazano na Slici 7-3. Tako je i bio uveden pojam karakteristične duljine miješanja za turbulentne vrtloge. Ostale parametrizacije se odnose na bilancu energije tla, mikrofiziku oblaka, oborine, magle, itd.

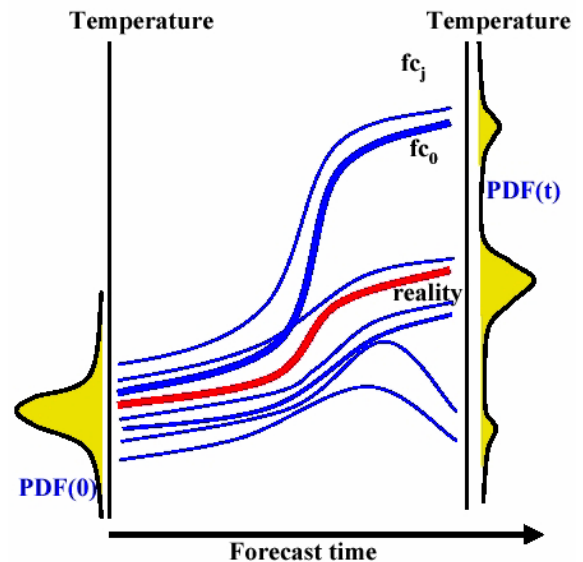
Asimilacija podataka

Asimilacija izmjerenih podataka je barem podjednako važan čimbenik NWP i klimatskih modela kao i spomenute parametrizacije. Motrenja i mjerenja daju trenutno stanje atmosfere i mora, ali to je nekompletna slika svijeta. Ona su neregularna u prostoru i vremenu (barem za modele), imaju drugačiju prirodu pogrešaka no modeli, i

konačno, nerijetko se mjere veličine što nisu direktno varijable (polja) modela. Tu su ponekad modeli u prednosti jer daju na dinamički konzistentan način polja koja je vrlo teško precizno rutinski mjeriti (gustoća zraka ili vode i vertikalna brzina). Što više, NWP modeli se koriste za procesiranje mjerenja i motrenja za dobijanje potpunijeg stanja atmosfere i mora, tj. slike svijeta. Dakle, asimilacija podataka je danas puno više no "pretprocesiranje" modela.



Slika 7-3: Prikaz procesa miješanja u PBLu. Tlo djeluje trenjem, grijanjem i hlađenjem na (ne)lokalno miješanje. Procesima uvlačenja/izvlačenja (entrainment/detrainment) zraka PBL međudjeluje sa slobodnom atmosferom.



Slika 7-4: Schematski prikaz prognoze gustoće vjerojatnosti (PDF) određene atmosferske temperature metodom ansambl-prognoze.

Kaos atmosfere

Modeli su osjetljivi na male razlike u početnim poljima. Buduće stanje atmosfere, tj. prognoza, odnosno buduća slika svijeta, može se jako razlikovati nakon, recimo 120h, a za vrlo male početne razlike u meteorološkim ulaznim poljima. Danas se to rješava računanjem statistike na većem broju uvjetno sličnih prognoza, tzv. ansambl-prognozom, Slika 7-4. Najčešće se to radi tako da se jedan te isti model pokreće za 50-100 slučajeva s malo početno-poremećenim ulaznim poljima. Dakle, ansambl-prognozama tretiramo prognoznjivost, tj. prediktabilnost atmosfere, koja, poput turbulencije, ovisi o samom strujanju (jaka 3D nelinearnost). Takodjer, mogu se pokretati različiti modeli s istim ulaznim podacima.

Ostali aspekti modeliranja vremena i klime se ne završavaju na gore spomenutom. Modeli mogu biti različito povezani s oceanografskim, hidrološkim, biološkim ili ekonomskim modelima, itd. Mnogobrojne primjene zahtijevaju različite vrste tzv. 'postprocesiranja' rezultata modela. Na primjer, određeni broj sunčanih sati s temperaturom iznad 10°C nije posebno zanimljiv u meteorologiji ili klimatologiji, ali

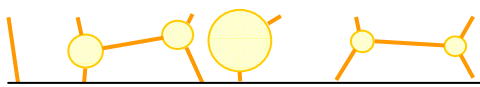
može biti važan parametar u poljoprivredi. Puno sličnih slučajeva ima i u prometu, građevini, itd.

Zaključak

Prikazan je kratki pregled osnovnih principa rada numeričkih prognostičkih modela vremena i klime. Vrlo različiti i brojni fizikalni procesi trebaju biti modelirani: neki su razlučeni, a neki ne. Nerazlučeni procesi su parametrizirani. Diskutirana je inicijalizacija modela, rubni i početni uvjeti, te eventualno združivanje različitih modela. Napomenute su glavne razlike između modela za prognozu vremena odnosno klime (rezolucija, duljina integracije, vrste parametrizacijskog paketa). Od 30tak 'slide-ova' pripremljenih za usmenu prezentaciju, u ovom tekstu se detaljno diskutiraju 4 slike.

Literatura

- [1] Grisogono, B., 1995: A view on a part of the cooperation in atmospheric physics between the USA and Croatia. *USA-Croatia scientific cooperation 1963-1993*. HAZU (Urednik: Vladimir Paar, 559 str.) 101-103. Školska knjiga, Zagreb.
- [2] Holton, J.R., 1992: *An Introduction to Dynamic Meteorology*. Academic Press, 3. izdanje, San Diego, USA, 511 str.
- [3] Rogers, D.P., E.C. Dorman, K.A. Edvards, I.M. Brooks, W.K. Melville, S.D. Burk, W.T. Thompson, T. Holt, L.M. Strom, M. Tjernstrom, B. Grisogono, J.M. Bane, W.A.Nuss, B.M. Morley and A.J. Schanot, 1998: Highlights of Coastal Waves 1996, *Bul. Am. Meteorol. Soc.* **79**, 1307-1326.



Fizika kao temelj novih tehnologija

Ivica Aviani
Institut za fiziku, Zagreb

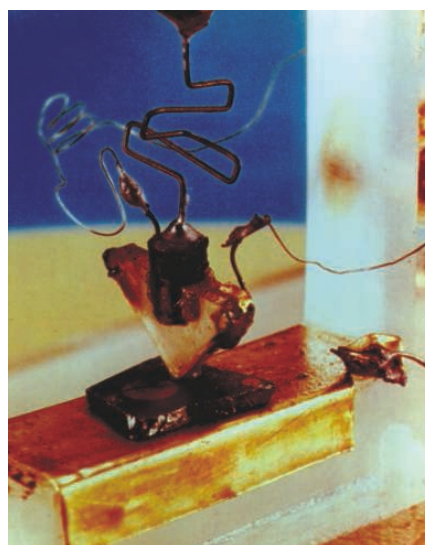
Uvod

Kroz većinu ljudske povijesti ljudi su prenosili svoje znanje i vještine s potomstva na potomstvo, poboljšavajući svoje proizvode postupno, najčešće iskustvom. Prvu bitnu promjenu načina proizvodnje, industrijsku revoluciju, prouzročio je parni stroj koji je dominirao ekonomijom devetnaestog stoljeća. U dvadesetom stoljeću dominira motor s unutrašnjim sagorijevanjem i tranzistor. Proizvodi kao što su automobil, telefon, gramofon, radio i televizija, avion, rezultat su tehnološke revolucije dvadesetog stoljeća. Tehnologija bitno utječe na društvo, koje se brzo transformira, postaje potrošačko, mobilno i informatizirano. Na početku dvadesetprvog stoljeća živimo u svijetu kojeg je čovjek prilagodio svojim potrebama više nego ikada prije.

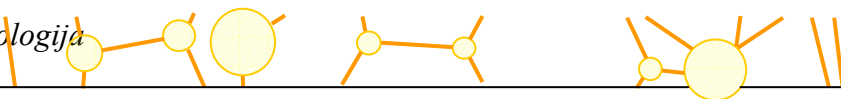
Pod pojmom tehnologija podrazumijevamo proces kojim ljudi mijenjaju prirodu da bi je prilagodili svojim potrebama. Osim potrebnog znanja i tehničkih vještina, tehnologija danas uključuje i cijelu infrastrukturu potrebnu za dizajn, proizvodnju, rad i održavanje proizvoda. U nesmiljenoj konkurenciji tržišta, tehnologija brzo postaje zastarjela i stalno nam treba nova. Tražeći nove mogućnosti, tehnologija se sve više i sve čvršće povezuje s znanošću, a posebno s fizikom. Jasno je da dizajn npr. kompjutorskog čipa ovisi o detaljnom razumijevanju električnih i ostalih fizikalnih svojstava materijala.

Tehnologija je postala toliko komplicirana da većina ljudi novu generaciju uređaja kao što su mobiteli, kompjutori, audio i video uređaji, automobili, doživljava veoma slično drveću ili cvijeću u svome vrtu, odnosno davno su se prestali pitati kako te stvari rade.

Koliki je utjecaj fizike na tehnologiju možda najbolje pokazuje primjer otkrića kvantne fizike početkom dvadesetog stoljeća, a zatim i tranzistora. Tranzistor i integrirani krug u dvadesetom stoljeću postali su nositelji oko 30 % svjetske ekonomije. Kvantna mehanika pritom je odigrala ključnu ulogu. Možemo slobodno reći da je dvadeseto stoljeće koje je počelo velikim fizikalnim otkrićima teorije relativnosti i kvantne fizike, završilo trijumfom



Slika 8-1: Prvi tranzistor iz 1947. (Chelikowsky, Science 2005)

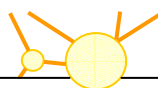


fizike. U njemu je fizika neposredno doprinijela razvoju i transformaciji suvremene civilizacije više nego ijedna druga disciplina. Danas fizika zauzima centralno mjesto u razvoju tehnologije i ekonomskom rastu. Analitičke metode, koje su razvili fizičari, općeprihvaćene su čak i u bankarstvu. Fizičari su razvili tehnike koje su pokrenule i omogućile brz razvoj drugih znanosti, prije svega kemije, biologije i medicine. Fizika je omogućila razvoj industrija ključnih za razvoj civilizacije kao što su energetika, komunikacije i računarstvo. Neposredno je pomogla stvaranju mikroskopa, teleskopa, rendgena, magnetske rezonancije, mobilnih telefona, lasera, dekodiranju DNA. Ne treba zaboraviti da je i Internet, koji predstavlja glavnu socijalnu i ekonomsku inovaciju dvadesetprvog stoljeća izašao iz fizikalnih laboratorija CERN-a. Pod utjecajem Interneta kultura i znanost poprimaju potpuno nove oblike, diktirane informacijskim i interdisciplinarnim dobom.

Tehnološki razvoj, također, potiče razvoj fizike. Dobar primjer za to je meteorologija. Ako imate veliki broj senzora na Zemlji i veliki broj satelitskih snimki atmosfere, onda vam trebaju i superračunala da prihvate i obrade sve te podatke i na kraju da, na temelju fizikalnih zakona, izračunaju kakvo će vrijeme biti sutra ili za tjedan dana. Mogućnost provjere fizikalnih modela vremena ovdje direktno ovisi o količini i kvaliteti podataka i o snazi računala. Slično je i u ostalim granama fizike. Napredak fizike čestica i astronomije također direktno ovisi o tehnologiji prikupljanja i analize golemog broja podataka. Ni teorijski fizičari nisu tehnološki neovisni. Na snažnim računalima oni rješavaju sve složenije i sve realnije probleme, a mnogi od njih rade simulacije fizikalnih procesa i numeričke eksperimente, pomoću kojih nastoje zadobiti osjećaj za fizikalnu pojavu.

Za fizičare koji rade npr. u bankama mnogi misle da troše svoj talent. No je li baš tako? Fizika je način razmišljanja! I to uspješan. Fizičara treba prihvatiti kao osobu koja zahvaljujući svojem obrazovanju, sposobnostima i sklonosti rješavanju problema, može i treba potaknuti znanstvenu aktivnost u svakoj sredini. Obrazovanje fizičara usmjereno je na egzaktno rješavanje problema, ulazak u samu bit stvari i stalnom preispitivanju istine. Fizičar, što objektivnije, prikuplja podatke kako bi ih analizirao i uočavao njihovu pravilnost. Pritom je prikupljanje podataka sredstvo, a ne i svrha znanstvenog rada. U analizi mu pomaže matematika, a rezultat su nove ideje i teorije pomoću kojih može predviđati nove pojave. Brza razmjena informacija dovela je do toga da fizičari uočavaju sličnu problematiku, onu koju znaju riješiti, i u drugim područjima, i rado se uključuju.

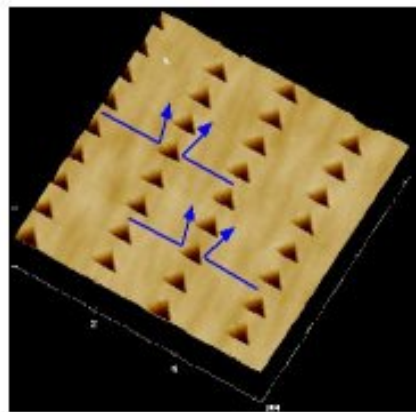
Dvadesetprvo stoljeće započelo je informatičkom revolucijom, a čini se da će se nastaviti u znaku manipulacije pojedinačnima atomima, izradi kvantnih računala i efikasnim strojevima za konverziju energije, a možda i jeftinom energijom fuzije. Sociolozi i futurolozi mogu samo zamišljati u kojem smjeru bi se razvijao svijet ako bi npr. ovladali fuzijom, neiscrpnim i ekološkim izvorom energije.



Nanotehnologija

Nanotehnologija ili tehnologija manipuliranja molekulama i atomima, pravi je izazov našeg stoljeća, u kojem interdisciplinarnost i isprepletenost suvremene znanosti i tehnologije dolazi do punog izražaja. Osim ideje stvaranja minijturnih strojeva i robota, pod pojmom nanotehnologija danas podrazumijevamo i skenirajući tunelirajući mikroskop, minijaturiziranu elektroniku, tehnologiju tankih filmova i kompozitnih materijala. Radi se na sintezi materijala s novim mehaničkim svojstvima kao što su ugljikove nanocijevi i aluminijski kompoziti ili s novim električnim svojstvima kao što su kvantne jame i kvantne žice. Veliki doprinos ove tehnologije očekuje se pri stvaranju manjih i bržih kompjutera nove generacije, biosenzora i superefikasnih solarnih ćelija. Današnji kompjutori i ostali tehnološki uređaji rade tako da kontroliraju elektronski naboj. Previđa se nova generacija manjih, bržih i efikasnijih uređaja koji bi radili na sasvim drugom konceptu – kontroli elektronskog spina. Fizičari iz raznih laboratorija već su uspjeli kontrolirati spin izoliranog elektrona.

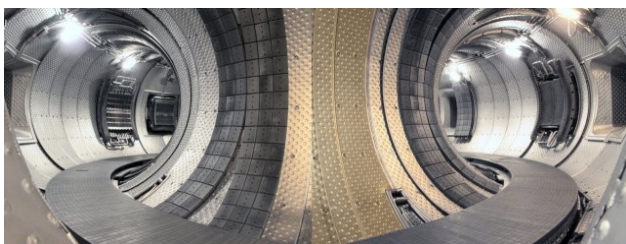
Nanotehnologija je omogućila izradu naprava dimenzija manjih od prosječnog puta kojeg elektron prijeđe između dva uzastopna sudara kad se giba u vodiču. U takvoj napravi, elektroni se ponašaju kao biljarske kuglice. Na slici je prikazan balistički ispravljač. Elektroni, baš kao biljarske kuglice, nalijeću na trokutastu prepreku od nevodljivog materijala i odbijaju se prema dolje bez obzira na to dolaze li s lijeva ili s desna. Na taj način njihovo je strujanje usmjereno uvijek prema dolje. Za rad ovog ispravljača bitno je da je izuzetno malen i napravljen od veoma čistog poluvodičkog materijala. Ovaj ispravljač napravljen je standardnom nanolitografijom, a radi na frekvenciji od 50 GHz što je znatno više od radne frekvencije klasične diode.



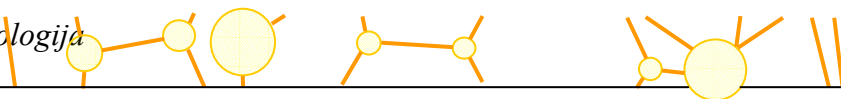
Slika 8-2: Balistički ispravljač: plave strelice označavaju putanje elektrona.

(<http://www.ee.umist.ac.uk/mmd/research/BallisticRectifier.htm>)

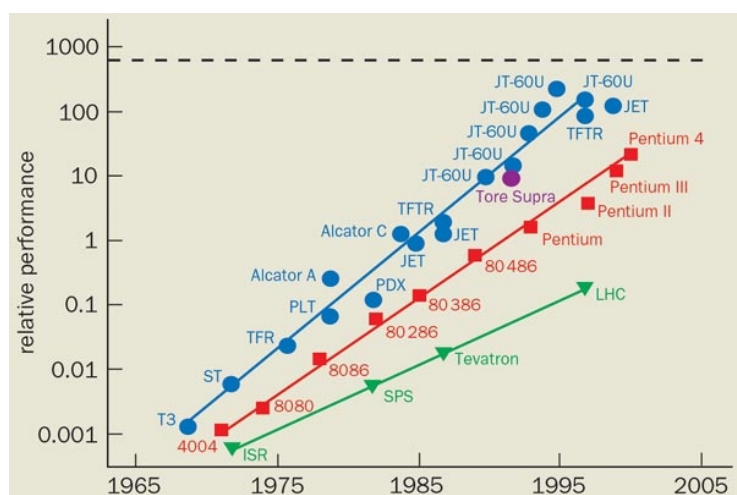
Energija fuzije



Slika 8-3: Tore Supra – unutrašnjost tokamaka (Cadache Francuska). Magnetsko polje održavaju supravodljivi magneti. (<http://www-fusion-magnetique.cea.fr>)



Posljednja dva stoljeća intenzivno trošimo fosilna goriva i već smo dobro iscrpili postojeće zalihe. Istovremeno zahtjevi za energijom postaju sve veći. Zbog toga razvijamo alternativne izvore energije. Također je jasno da jedino nuklearna energija može zadovoljiti naše rastuće potrebe. Energija koju dobivamo cijepanjem urana, zbog opasnih radioaktivnih nusprodukata, više nam izgleda kao nužno zlo, nego kao rješenje za budućnost. Međutim, energija fuzije izotopa vodika, deuterija i tricija, u helij, energija Sunca, daje nam mogućnost čistog i neiscrpnog izvora energije. Problem je, međutim, na Zemlji, održavati vodikovu plazmu na temperaturi od 10^6 K, potrebnoj za nuklearnu reakciju. Veliki napredci već su postignuti, s fuzijskim reaktorom, tokamak, u kojem magnetsko polje oblika torusa održava struju vruće plazme u centralnom dijelu. U konstrukciji ovog generatora fizika i tehnologija nerazdvojivo se nadopunjuju. Stalna poboljšanja konstrukcije i radiofrekventnih izvora za zagrijavanje plazme, te uvođenje supravodljivih magneta, zajedno s razvojem mjerne tehnike i



Slika 8-4: Razvoj visokotehnoloških sustava u posljednjih 30 godina. Počevši od ruskog tokamaka T3 učinak fuzijskih reaktora (plava linija) udvostručavao se svakih 1.8 godina. Istovremeno se broj tranzistora na procesoru udvostručavao svake dvije godine (crvena linija), dok se energija akceleratora čestica udvostručavala svake tri godine (zelena linija). (Hoang and Jacquinet, *Physics World*, January, 2004.)

računarstva, rezultirali su udvostručenjem performansi tokamaka svakih 1.8 g, što je veći porast od rasta mogućnosti računala. Veliki civilizacijski izazov za međunarodni projekt Internacionalni Termonuklearni Eksperimentalni Reaktor (ITER) je integracija različitih polja fizike i tehnologije da bi se do 2015. g., u Japanu ili u Njemačkoj, izgradio generator koji bi radio kontinuirano uz proizvodnju 500 MW snage.

Akceleratori čestica

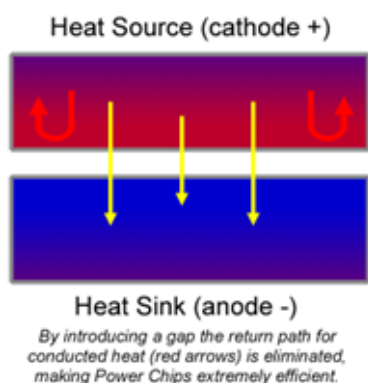
U svijetu postoji 42 sinhrotronska akceleratora, a zbog povećane potražnje, u planu je izgradnja još tridesetak. Snažne x-zrake koje emitira elektronski snop dok kruži u sinhrotronu, omogućavaju puno bolju osjetljivost i razlučivanje od rendgenskih zraka, a danas su nezamjenjive pri ispitivanju malih objekata kao što su npr. virusi. Osim u fizici i u kemiji, sve više se koriste u biologiji, medicini i industriji. U suradnji s fizičarima akceleratori čestica grade se i upotrebljavaju u industriji za poboljšanje kvalitete proizvoda, sterilizaciju medicinske opreme i hrane, te u kompjutorskoj industriji, automobilskoj i u avio industriji. Ionskom implantacijom se ionima iz



akceleratora usađuju ioni jednog materijala u površinu drugog, čime površina postaje čvršća, otporna na koroziju ili, ako se radi o medicinskom umetku, prihvatljivija za organizam. Alati i metode koje su timovi fizičara razvili da bi mogli razbijati atomsku jezgru i detektirati novonastale čestice, uvijek su bili na samoj granici tehnoloških mogućnosti vremena. Tako je fizičarska radoznalost i entuzijazam, postavljajući stalno nove i nove zahtjeve iznjedrila mnoge alate koji se danas koriste kako u industriji tako i u medicinskoj dijagnostici i liječenju tumora.

Veliki hadronski supersudarivač u CERN-u, u kojem bi se svakih 25 ns trebali sudarati protonski snopovi kinetičke energije od fantastičnih 14 TeV trebao bi proraditi do 2007. godine. Osim zahtjevne konstrukcije supersudarivača, istraživački timovi morali su i konstruirati mnoštvo ekstremno brzih i osjetljivih detektora različitih čestica smještenih oko mjesta sudaranja. Njihovi naponi rezultirali su mnoštvom proizvoda za široku primjenu, npr. novih detektora malih doza zračenja za radiologiju i materijala za brzo odvođenje topline i hlađenje. Mnoštvo podataka koji će pristizati na detektore moguće je prikupiti samo novom brzom elektroničkom i informatičkom tehnologijom. Razvijeni su i algoritmi prepoznavanja i analize pomoću kojih se eliminiraju nevažni podaci kojih je čak milijardu puta više od onih koji nose korisnu informaciju. Zajedno s velikim informatičkim kompanijama razvijaju se novi resursi pomoću kojih će fizičari iz cijelog svijeta velikom brzinom, putem Interneta i umreženih kompjutera analizirati podatke. Takvi resursi odmah će pomoći i genetičarima, astronomima, meteorolozima, ali svim ostalim djelatnicima koji trebaju analizu velikog broja podataka.

Termoelektrici i gorive ćelije



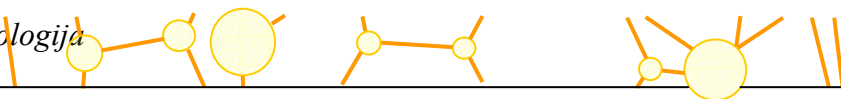
Slika 8-5: Princip rada Power chipa. Između toplog i hladnog kraja, je vakuumski procijep manji od 10 nm koji prekida prijenos topline kroz rešetku, dok ga elektroni preskaču tuneliranjem. (<http://www.powerchips.gi>)



Power Chip prototype (shown with a US Quarter for size comparison)

Slika 8-6: Prototip Power chipa. Za usporedbu veličine prikazan je i novčić od četvrt dolara. (<http://www.powerchips.gi>)

Slično parnom stroju, benzinski i dizel motor, kao i većina ostalih strojeva devetnaestog i dvadesetog stoljeća pretvaraju toplinsku energiju u korisni rad.



Unutrašnja kemijska energija goriva prvo se izgaranjem pretvara u toplinu, da bi se zatim širenjem zagrijanog plina pretvarala u koristan rad. Današnje termoelektrane i termonuklearne elektrane, rade na istom principu. Toplinsku energiju možemo samo djelomično pretvoriti u koristan rad i to uvijek s postotkom koji je manji od onog određenim Carnotovim kružnim procesom. Uz mnoštvo senzora i kompjutorski regulirano paljenje iskorištenje kemijske energije goriva, u suvremenom automobilu, doseglo je tek vrijednost od 20%. U nestašici goriva koja slijedi, to nije ni blizu dovoljno. Ovdje postoje dva pravca istraživanja.

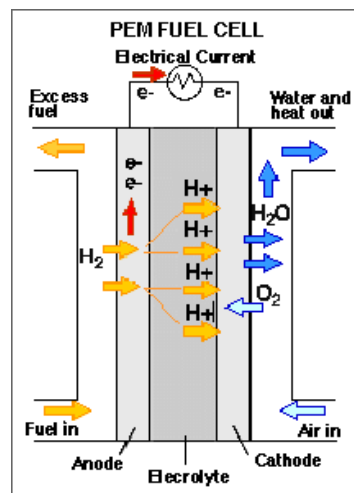
Prvi je direktno pretvaranje toplinske energije u električnu, bez vanjskih pokretnih dijelova. To se nastoji postići pomoću termoelektrika: električki vodljivih materijala čija se elektronska energija jako mijenja s temperaturom. Zato ako jedan njegov kraj grijemo, a drugi hladimo dolazi do razdvajanja elektronskog naboja i pojave elektromotorne sile. Prednost ovakvog izvora, uz ekološku prihvatljivost, je velika pouzdanost rada jer nema pokretnih dijelova. Problem je međutim, njihova niska efikasnost, zbog velikih gubitaka topline koji nastaju vođenjem topline od toplog prema hladnom kraju kroz termoelektrik, uglavnom titranjima kristalne rešetke. Tisuće fizičara danas nastoje pronaći način kako povećati efikasnost ovih uređaja. Zanimljiv pristup visoko-tehnološkog rješavanja ovog problema je tzv. *Power Chip* u kojem je u termoelektriku na velikoj površini od nekoliko cm^2 , između toplog i hladnog kraja, ostvaren vakuumski procijep manji od 10 nm. Ovaj procijep prekida prijenos topline kroz rešetku, a dovoljno je mali da ga «vrući» elektroni mogu nesmetano preskakati tunel efektom. Predviđa se da bi *Power Chip* mogao doseći 70-80% Carnot-ovog iskorištenja, što je dvostruko više od iskorištenja konvencionalnih toplinskih strojeva.

Drugi je direktno pretvaranje kemijske energije goriva u električnu energiju, i to disocijacijom molekula i razlaganjem njenog naboja, kao u bateriji. U bateriji koristimo razliku energija veze nekog atoma u dvije različite molekule. Da bi atom promijenio molekulu, spontano se seli s jedne elektrode na drugu, ali ne u komadu. Pri seobi on se ionizira, tako da njegov pozitivni ion prolazi kroz elektrolit, tvar između dviju elektroda u koja vodi samo ione, a njegov elektron prolazi kroz vodič u vanjskom strujnom krugu. Gibanje elektrona u vanjskom krugu daje nam koristan rad električne energije. U ovom procesu zaobilazi se izgaranje goriva, a time pretvaranje kemijske energije u slabo iskoristivu toplinsku energiju. Pronalazak dobrog polimernog protonskog vodiča na sobnoj temperaturi izazvao je pravu revoluciju omogućivši rad gorive ćelije, koja energiju sinteze vodika i kisika u vodu pretvara direktno u električnu energiju. Produkt sinteze je obična voda. Zbog toga su gorive ćelije su buduće ekološko rješenje za pohranu velikih količina energije u obliku kemijske energije vodika, i njeno korištenje za pogon automobila i kućnih uređaja, neovisno o električnoj mreži. Tehnološki je izuzetno važno pronaći dobar spremnik vodika. Gorive ćelije koje koriste energiju metana već su u upotrebi, a radi se i na ćelijama koje bi koristile kemijsku energiju drugih energetskih plinova. Istraživanja fizičara ključna su za sintezu materijala potrebnih svojstava za elektrode i elektrolite.



Supravodiči

Snazni supravodljivi magneti već su našli široku upotrebu. Koriste se za lebdeće vlakove (MAGLEV), za magnetsku rezonanciju, u akceleratorima čestica, u fuzijskim reaktorima. Najveće tehnološko ograničenje za njihovu širu primjenu su njihove niske radne temperature, za što je potrebna skupa tehnologija tekućeg helija. Ne tako davno otkriveni visokotemperaturni supravodiči, tehnološki su izuzetno zanimljivi jer za svoj rad trebaju puno jeftiniju tehnologiju tekućeg dušika. Otkriće supravodljivosti na sobnoj temperaturi potpuno bi promijenilo tehnologiju distribucije i korištenja električne energije, kao i većinu električnih uređaja koje poznajemo. Mogućnost dijamagnetskog lebdenja koje nastaje zbog Meissnerovog efekta, u supravodiču promijenila bi mogućnosti transporta, osobine mehaničkih ležajeva i sl.. Računalna tehnologija, čiji razvoj ograničava zagrijavanje procesora Jouleovom toplinom, također bi doživjela veliki napredak.



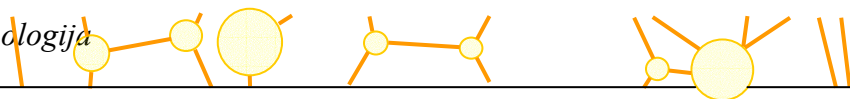
Slika 8-7: Princip rada gorive ćelije. (U. S. Dept. of Energy.)

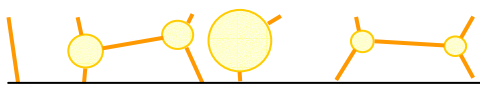
Umjesto zaključka

Osnovna vodilja znanosti je želja spoznaje svijeta i svrhe postojanja. Pritom čovjek ne želi ovisiti o prirodnim pojavama, bolestima, životnom vijeku, pa čak i Suncu kao izvoru energije. Time su određeni i glavni pravci istraživanja u fizici: istraživanje energije koja pokreće život, istraživanje mikro i nano svijeta s ciljem spoznaje i kontrole postojećeg života i istraživanje Svemira i elementarnih čestica a time i svrhe postojanja. Za neka područja istraživanja obični ljudi, pa i mnogi fizičari, misle da troše previše novca, a ne donose neku značajnu korist. Je li npr. visokoenergetska fizika samo egzotična disciplina? Je li moguće utvrditi granicu između želje za zadovoljenjem znatiželje i ekonomske koristi? Pitajući se često zaboravljamo da je većina važnih i ekonomski isplativih otkrića nastala sasvim slučajno, kao rezultat ljudske znatiželje.

Literatura

- [1] R. Chelikowsky, Science, **307**, 1724 (2005)
- [2] A. M. Song, A. Lorke, A. Kriele, J. P. Kotthaus, W. Wegscheider, and M. Bichler, Phys. Rev. Lett. **80**, 3831, (1998)
- [3] B. Ridley, Physics World, december, 2001
- [4] G. T. Hoang and J. Jacquinet, Physics World, January, 2004
- [5] <http://www.powerchips.gi>
- [6] <http://www-fusion-magnetique.cea.fr>





Moderna fizika kao filozofski problem

Tihomir Vukelja¹

Zavod za povijest, filozofiju i sociologiju znanosti Fizičkoga odsjeka Prirodoslovno-matematičkoga fakulteta Sveučilišta u Zagrebu, Bijenička 32, Zagreb

Uvod

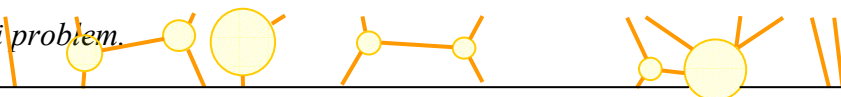
Tijekom 2000 godina od Aristotela do Galileija i Newtona fizika je bila grana filozofije, nastojanje da se prirodne pojave koje zapažamo u svakidašnjem iskustvu objasne na temelju filozofskih pretpostavki o naravi svijeta. U 17. stoljeću fizika postaje »moderna«: usvaja novu metodu – oslanjanje na instrumente, pokus i matematiku – i odvaja se od filozofije. No veze s filozofijom ostale su jake. S jedne su strane filozofska uvjerenja znanstvenika igrala odlučujuću ulogu u mnogim epizodama razvoja moderne fizike; s druge je strane osamostaljena fizika postala predmet filozofskih promišljanja.

U kojem se smislu moderna fizika pojavljuje kao filozofski problem? Bez ambicije da damo preciznu definiciju možemo reći da je fizika ljudska djelatnost putem koje nastojimo upoznati i objasniti ponašanje prirode, razumjeti svijet u kojem živimo. S druge pak strane među temeljnim filozofskim problemima nalazimo pitanja poput »Što je svijet?« i »Što možemo uistinu znati o svijetu?«. Oslonimo li se u traganju za odgovorom na ta pitanja na rezultate fizike kao puta do spoznaje, ona poprimaju oblik »Što je svijet po fizici?« i »Čime možemo opravdati tvrdnju da je svijet uistinu onakav kakvim ga prikazuje fizika?«. To su temeljni vidovi filozofskoga promišljanja fizike koje ćemo ocrtati na nekoliko primjera, ostavljajući po strani druga važna pitanja, poput onih etičkih, tj. propitivanja posljedica fizičnih istraživanja i odgovornosti fizike za sudbinu ljudskoga društva i svijeta u cjelini.

Slika svijeta po Newtonovoj mehanici

Pitanje »Što je svijet po fizici?« je pitanje o tome što nam fizika kaže o svijetu, kakvu nam sliku svijeta nudi. Za ishodište takva razmatranja uzimamo neku fizičnu teoriju te istražujemo njezine pojmove i ustroj, nastojeći oblikovati odgovarajuću predodžbu svijeta: od čega je po toj teoriji svijet sazdan i kakva je narav tih njegovih sastavnica. Pitamo se, nadalje, je li takva slika svijeta zadovoljavajuća, nameće li ona možda neke problematične ili neprihvatljive zaključke. Takvo nas promišljanje fizike vodi onkraj dosega pokusa i matematike. Ono produbljuje naše razumijevanje fizičnih teorija, pomaže nam da uvidimo njihove probleme i ograničenja i upućuje nas na smjer

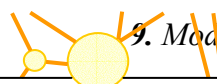
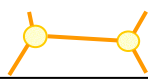
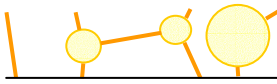
¹ tvukelja@phy.hr



daljnjih istraživanja. Razmotrimo u osnovnim obrisima jedan primjer, sliku svijeta po Newtonovoj mehanici.

Newtonova mehanika je teorija koja opisuje i objašnjava gibanja tijelâ, a zamisli pomoću kojih to čini temelj su odgovarajuće slike svijeta. Prema toj slici se događaji u svijetu odvijaju na pozornici apsolutnoga prostora i apsolutnoga vremena (»apsolutnih« u smislu da posjeduju vlastiti nepromjenljivi ustroj i opstoje neovisno o tijelima i događajima), a koji su međusobno neovisni. »Glumci« koji nastupaju na toj pozornici su čestice zamišljene kao tvarne točke, beskonačno malena tijela koja u svakom trenutku posjeduju svojstva koja možemo strogo definirati i precizno mjeriti (masa, položaj, brzina itd.) i koja nam omogućuju da ih međusobno razlikujemo. Tijela konačnih dimenzija shvaćamo kao nakupine takvih čestica. Ponašanje tijelâ i sustavâ tijelâ u cjelosti slijedi iz ponašanja čestica koje ih čine i sva se njihova svojstva mogu svesti na svojstva tih dijelova. Isto vrijedi za svijet u cjelini: svijet je naprosto zbroj dijelova, koje možemo razumjeti neovisno o cjelini (u opreci spram aristotelske fizike, gdje cjelina svijeta određuje ulogu, odlike, mjesto i svrhu svojih dijelova, te je stoga dijelove svijeta i njihove odnose moguće valjano razumjeti jedino u okviru razumijevanja cjeline). Razumijevanje cjeline svijeta slijedi iz razumijevanja njegovih dijelova i njihovih odnosa. Ti odnosi dijelova svijeta, tijelâ u svijetu, su međudjelovanja: tijela se mogu privlačiti ili odbijati, utjecati jedno na drugo bez dodira ili »na daljinu«. Nadalje, jedine uloge koje ti svjetski glumci mogu igrati su gibanja kroz apsolutni prostor. Ta su gibanja jednoznačno određena međudjelovanjima, putem Newtonovih zakona gibanja. Stoga su svi budući događaji u svijetu posve predodređeni trenutnim stanjem stvari, odnosno položajima i brzinama tijelâ te njihovim međudjelovanjima – što nam omogućuje da ih pretkažemo – i nemaju svrhu, ne zbivaju se radi ostvarenja nekog krajnjeg cilja, nekog stanja ka kojem svijet teži. Dakle, čitav se svijet svodi na gibanja tvarnih točaka u apsolutnom prostoru i vremenu, jednoznačno određena međudjelovanjima i zakonima gibanja, i sve pojave u svijetu valja razumjeti na toj osnovi. Svijet mora biti takav da bi Newtonova mehanika davala ispravne rezultate.

Ta se je teorija uistinu pokazala veoma uspješnom. Ona je omogućila Newtonu da točno izračuna putanje planeta i odvijanje mnogih zemaljskih pojava, a nama da pošaljemo letjelice u svemir. No, s druge strane, opisana slika svijeta otvara mnoge filozofske probleme. Primjerice, Newtonova predodžba apsolutnoga prostora i vremena podrazumijeva pojam *apsolutnoga* gibanja, gibanja u odnosu na sam prostor. Takva su nam gibanja načelno nedohvatljiva; uvijek opažamo i računamo samo *relativna* gibanja, gibanja tijela u odnosu na neko drugo tijelo. Je li onda opravdano rabiti u fizici pojam apsolutnoga prostora i vremena i tvrditi na temelju fizične teorije da su prostor i vrijeme uistinu apsolutni? Je li fizici primjerenija predodžba *relacijskoga* prostora i vremena, prema kojoj oni ne opstoje neovisno od tijela i događaja, već se smatraju skupovima mogućih odnosa među tijelima i događajima (nalik skupu rodbinskih odnosa, koji ne opstoje neovisno od ljudi koji čine obitelj)? Nadalje, u opisanoj se slici svijeta brzina tijela ne ograničava, zbog čega, primjerice, mogućnost razlikovanja tvarnih točaka postaje upitna. Treba li je stoga ograničiti, što nužno dovodi do povezivanja prostora i vremena? Kako razumjeti međudjelovanje na daljinu, uzajamni utjecaj tijelâ bez dodira ili posrednika? Može li se svaki sustav, čak i



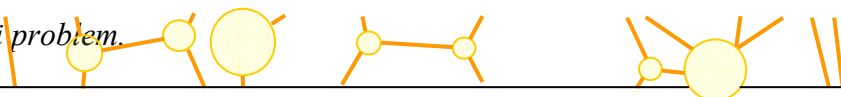
živo biće, smatrati naprosto zbrojem svojih dijelova? Možemo li na temelju pretkazivosti nekih događaja zaključiti da je svijet posve predodređen? Ako je uistinu tako, što je s ljudskom slobodom i odgovornošću?

Fizične teorije kao nagađanja o svijetu

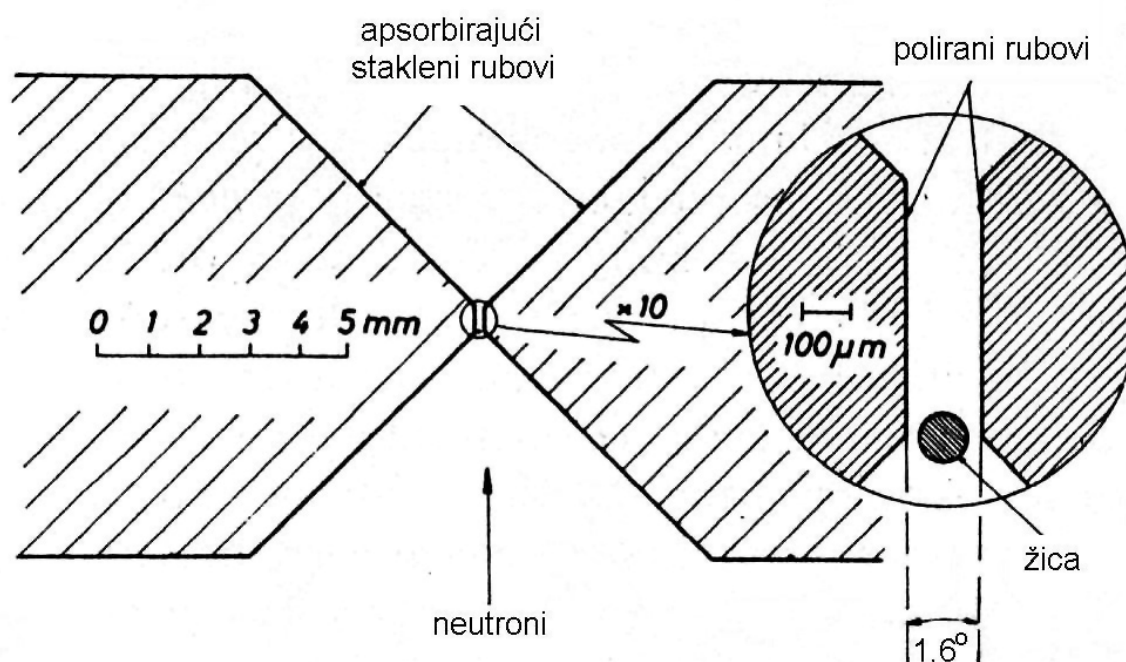
Sljedeće filozofsko pitanje koje nam se nameće jest kako znamo da je svijet uistinu takav, kako opravdati tvrdnju da je opisana slika svijeta, oblikovana na temelju Newtonove mehanike, ispravna? Svjesni smo ugleda kojeg fizika uživa u društvu. Čime opravdati taj ugled, kako objasniti zbog čega se fizične teorije mogu smatrati pravim znanjem o svijetu, a ne tek suvremenim mitom, u čem je posebnost ili »tajna« fizike? Što se našega primjera tiče, stožer ocrtane slike svijeta je Newtonov zakon gibanja, ona sadrži pretpostavke o svijetu nužne za uspostavu tog zakona. Ako je taj zakon valjan, onda s priličnim pouzdanjem možemo reći da smo na pravom putu. Stoga se moramo upitati kako znamo da je Newtonov zakon gibanja valjan.

Uobičajen odgovor na gornje pitanje je da se naše pouzdanje u Newtonov zakon gibanja temelji na iskustvu, na opažanjima, mjerenjima i pokusima. Valjanost tog zakona je potvrđena na mnoštvu različitih primjera, od gibanja planeta do padanja kamena. To pokazuje da je zakon ispravan, a time u biti i opisana slika svijeta. No takav odgovor nije posve zadovoljavajuć. Prije svega, znamo da postoje gibanja koja se ne mogu podvesti pod taj zakon, poput gibanja planeta Merkura ili atomnih predmeta (atoma, neutrona i sl.). Ti slučajevi zahtijevaju primjenu drukčijih zakona gibanja, razvijenih u okviru teorije relativnosti i kvantne mehanike. No te teorije upućuju na slike svijeta poprilično drukčije od one opisane i stoga ona naprosto ne može biti valjana.

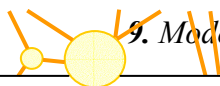
No ponuđeni odgovor ne bi bio valjano rješenje postavljenoga problema čak i da ne poznajemo protuprimjere za Newtonov zakon. Taj je zakon, naime, po svojoj naravi *univerzalna* tvrdnja, tvrdnja koja se odnosi na sva gibanja svih tijela u svim okolnostima, drugim riječima, na beskonačno mnogo situacija. S druge strane, naše je iskustvo nužno ograničeno: niti je zakon iskušan na svim gibanjima, niti je to izvedivo. No iz ograničenoga skupa istinitih opisa opažanja (primjerice, »Opaženi labud L_1 je bijel«, »Opaženi labud L_2 je bijel«, ... , »Opaženi labud L_n je bijel«,) koja su u skladu s nekom univerzalnom tvrdnjom (»Svi su labudovi bijeli«), nije moguće logički strogo izvesti istinitost te univerzalne tvrdnje (jer je posve moguće da postoje i labudovi drugih boja, koje još nismo opazili; uistinu, iz Australije potiče crni labud, *Cygnus atratus*). Uopćenja potkrijepljena ograničenim skupom činjenica ne smijemo smatrati istinitim tvrdnjama, već tek *nagađanjima*, jer ne postoje jasna mjerila koja bi nam omogućila da opravdana uopćenja razlikujemo od neopravdanih, prenatragljenih, poput onog »Svi su labudovi bijeli«. Imamo li to na umu, moramo se pomiriti s time da Newtonov zakon gibanja, kao i svi drugi fizički zakoni i teorije, ostaje, unatoč opsežnoj iskustvenoj potpori, tek pretpostavka, nagađanje, koje se na temelju iskustva ne može jednom za uvijek potvrditi kao istinito i za koje možemo reći tek da je u nekim granicama i za neko vrijeme potkrijepljeno iskustvom.



Dovodi li uvid da su fizične teorije tek nagađanja o funkcioniranju prirode, koja nije moguće konačno dokazati pozivanjem na iskustvo, u pitanje ugled fizike kao puta do spoznaje svijeta? Ne nužno. Mnogi filozofi smatraju da su unatoč tome fizične teorije najbolje znanje o svijetu koje su ljudi svojim razumom i iskustvom u stanju dohvatiti. Posebnost tih teorija je, tvrdi primjerice Karl Popper, u tome što smo pomoću njih u stanju precizno pretkazati ponašanje stvari. Primjerice, Newtonov zakon gibanja nam vrlo jasno kaže kako bi se neko tijelo trebalo gibati u zadanim okolnostima. Ako iskustvo pokaže da se stvarno gibanje tijela razlikuje od tog pretkazanja, poput gibanja planeta Merkura, to znači da je naše pretkazanje *opovrgnuto*, iskustveno je dokazana njegova neistinitost, a time i neistinitost univerzalnog zakona iz kojeg smo ga izveli. Posebnost fizičnih zakona kao nagađanja je, po Popperu, u tome što se pozivanjem na iskustvo može konačno ustanoviti njihova *neistinitost*, a fizika, kao put do spoznaje, je posebna po tome što bez oklijevanja i bez milosti odbacuje teorije koje su se u suočavanju sa zbiljom pokazale neistinitima i na njihovo mjesto stavlja nove teorije, nova nagađanja, bolje prilagođena zbilji. Tajna fizike, kao pravoga puta do spoznaje svijeta, je u njezinoj nemilosrdnoj samokritičnosti, a ne u tobožnjoj utemeljenosti teorija na činjenicama. U modernoj fizici ne težimo k apsolutnoj istini i sigurnosti, što je antički ideal, već k napretku i poboljšanju našega razumijevanja svijeta, k sve obuhvatnijim i zbilji svijeta primjerenijim teorijama-nagađanjima. Premda se za fizičnu sliku svijeta ne može reći da je konačna istina, može se reći da fizika stalno napreduje kroz odbacivanje opovrgnutih pretpostavki i njihovo nadomještanje novim pretpostavkama, i time se neprestano približava istini.

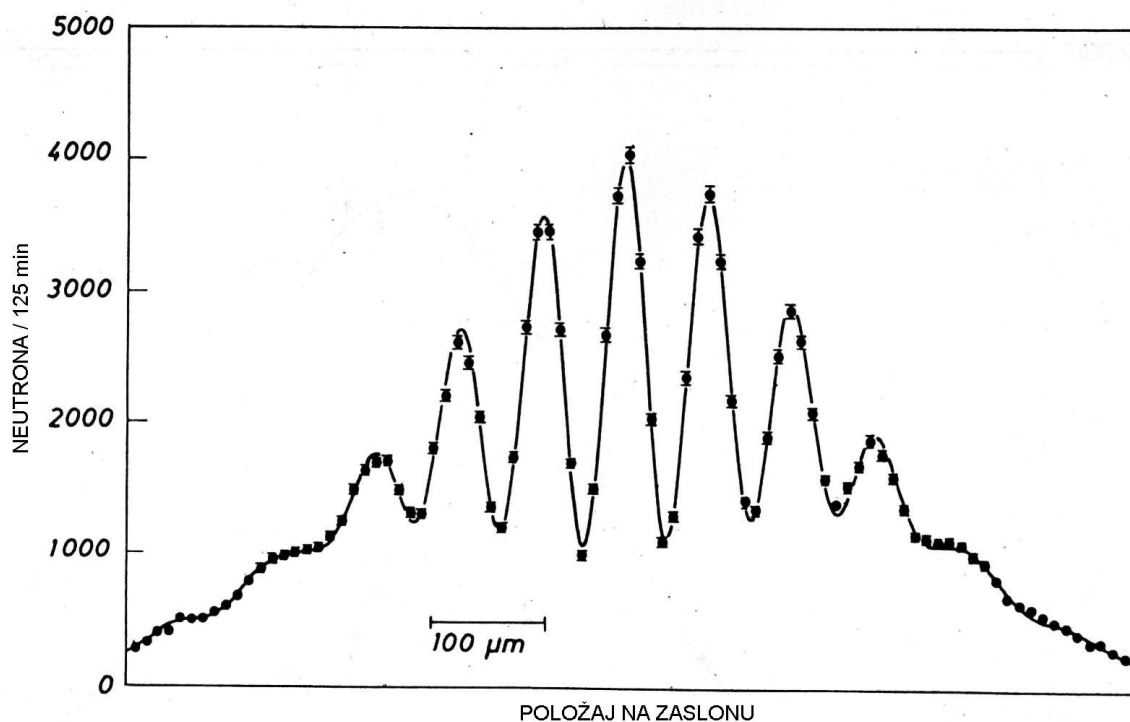


Slika 9-1



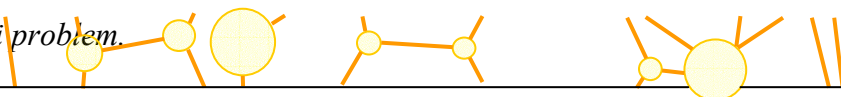
Slika svijeta po kvantnoj mehanici

Razmotrimo jedan primjer opovrgavanja Newtonova zakona gibanja, koji ima dalekosežne posljedice po fizičnu sliku svijeta [1]. Neutroni prolaze kroz pukotinu u koju je umetnuta žica (Slika 9-1.) i detektiraju se na zaslonu iza pukotine. Pretpostavljamo da između pukotine i zaslona na neutrone ne djeluje nikakva sila. Izbrojimo li detekcije neutrona u svakoj pojedinoj točki zaslona vidimo da raspodjela broja detekcija po zaslonu slijedi *interferentni* obrazac (Slika 9-2.). No iz pretpostavke da se neutroni gibaju u skladu s Newtonovim zakonom gibanja slijedi *zvonolika* raspodjela detekcija i stoga moramo zaključiti da je u ovom slučaju taj zakon opovrgnut.



Slika 9-2

Za ispravno teorijsko reproduciranje i pretkazivanje rezultata pokusa izvedenih s atomnim predmetima, poput ovog upravo opisanoga, morala je biti razvijena nova teorija gibanja – kvantna mehanika (na Slici 9-2. točke prikazuju mjerene vrijednosti, a puna linija kvantnomehanično pretkazanje). No u okviru te teorije se gibanje atomnih predmeta ne opisuje određenom putanjom kroz fizički prostor, već »valnom funkcijom« u apstraktnom »konfiguracijskom« prostoru, koja, u gornjem slučaju, određuje vjerojatnost da neutron bude detektiran u nekoj točki zaslona. Takva narav zakona gibanja atomnih predmeta ima za posljedicu da se slika svijeta po kvantnoj mehanici korjenito razlikuje od one prije opisane. Premda u toj novoj slici svijeta pozornicu na kojoj se odvijaju događaji i dalje čine apsolutni prostor i vrijeme, glumci koji na njoj nastupaju, atomni predmeti, su posve drukčije naravi. To nisu stvarne točke, već posve nepredočiva bića, a opazivi pojedinačni događaji u takvu svijetu, poput



detekcije neutrona na zaslonu, nisu predodređeni, već su slučajni – ništa ne određuje jednoznačno u kojoj će točki zaslona neki neutron biti detektiran.

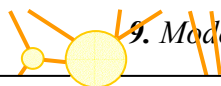
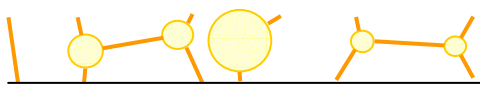
Ova nam prigoda ne dopušta da opišemo začuđujuće potankosti te slike svijeta, već ćemo samo ukazati na njezin fundamentalni problem: kako iz tako shvaćena »mikrosvijeta« izrasta »makrosvijet« našega svakidašnjega iskustva? Zašto se izravno opaziva tijela ponašaju drukčije od atoma od kojih su po pretpostavci sazdana, zašto nikad ne opažamo njihovo »kvantnomehanično« ponašanje? Kako je moguće da atomi, koji po kvantnoj mehanici ne slijede određene putanje kroz prostor, čine tijela koja slijede takve putanje, kako je moguće da se slučajna događanja iz mikrosvijeta slože u predodređene događaje makrosvijeta, kako »određeni« makrosvijet izranja iz »neodređena« mikrosvijeta? Među fizičarima danas nema jednodušnosti glede rješenja tog problema i on jasno pokazuje da nešto nije u redu ili s uobičajenom kvantnomehaničnom slikom svijeta ili s našim svakidašnjim iskustvom svijeta ili s našim shvaćanjem kvantne mehanike.

Opovrgava li uistinu gibanje atomnih predmeta Newtonov zakon?

Na jedan mogući izlaz iz tog problema ukazuje pitanje razmatranje pitanja je li Newtonov zakon gibanja uistinu opovrgnut rezultatima opisanoga pokusa s neutronima i drugih pokusa s atomnim predmetima. Naime, nije uvijek lako nedvosmisleno opovrgnuti neku fizičnu pretpostavku pozivanjem na iskustvo, imamo li na umu činjenicu da je u fizična objašnjenja ishoda pokusa nužno uključeno mnoštvo pretpostavki i da često nije jasno na koju od njih valja svaliti krivnju kad se teorijska očekivanja ne poklope s opažanjima.

Zgodan primjer iz povijesti fizike je otkriće planeta Neptuna. Motrenja gibanja Urana u 19. st. su pokazala da njegova putanja znatno odstupa od one koju predviđa Newtonov zakon gibanja. To se je iskustvo moglo tumačiti kao opovrgavanje tog zakona, ali to nije bilo jedino moguće objašnjenje. Moglo se je umjesto toga pretpostaviti da zakon gravitacije nije valjan ili da optički zakoni koji ravnaju opažanjima nisu valjani (lom svjetlosti u lećama teleskopa i u atmosferi) ili da u računu nisu uzete u obzir sve sile koje djeluju na Uran itd. Kao pokušaj prevladavanja tih problema pretpostavljeno je postojanje dotad neopaženog planeta u blizini Urana, gravitacijski utjecaj kojeg bi trebao biti odgovoran za opažena odstupanja putanje. Položaj tog planeta je izračunat na temelju odstupanja Uranove putanje i Newtonove teorije, a teleskopsko opažanje je potvrdilo postojanje planeta kojeg danas nazivamo Neptunom na tom mjestu. Tako je ta epizoda od mogućega opovrgavanja Newtonova zakona gibanja postala njegov veliki uspjeh.

Kakve posljedice ima taj uvid po našu raspravu o gibanju neutrona? Interferentnu raspodjelu detekcija neutrona smo protumačili kao bjelodano opovrgavanje Newtonova zakona gibanja, jer bi po njemu neutroni koji se slobodno gibaju morali dati zvonoliku raspodjelu detekcija. No valjanost Newtonova zakona gibanja možemo očuvati tako da promijenimo neku drugu pretpostavku u tumačenju eksperimentalne situacije. Primjerice, u opisu pokusa smo pretpostavili da se u



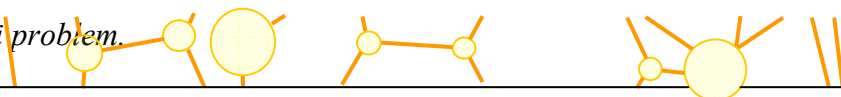
prostoru između pukotine i zaslona neutroni gibaju slobodno, jer tu na njih ne djeluje nikakva sila poznata klasičnoj fizici. Pretpostavimo li pak da na neutrone tu zapravo djeluje neka sila zbog koje se oni gibaju, u skladu s Newtonovim zakonom gibanja, upravo tako da dadu interferentnu raspodjelu detekcija, možemo spasiti taj zakon od opovrgavanja. Štoviše, David Bohm je pokazao da je takvu silu moguće strogo definirati i za svaki konkretan slučaj izvesti iz odgovarajuće kvantnomehanične valne funkcije. Po njemu je standardna, općenito prihvaćena kvantna mehanika tek dio priče o atomnome svijetu, dio koji smo krivo protumačili kao potpun prikaz tog svijeta.

Ta nas pretpostavka vodi na posve drukčiju predodžbu atomnoga svijeta, mnogo sličniju onoj izvedenoj iz Newtonove mehanike. U okviru te slike se atomni predmeti ne shvaćaju kao nepredočiva bića, već kao obične čestice koje se deterministički gibaju po određenim putanjama, u skladu s Newtonovim zakonom gibanja, a pod utjecajem klasičnih sila i jedne neklasične, »kvantne« sile. Između svijeta atoma i svijeta našega svakidašnjega iskustva nema fundamentalne razlike, osim učinaka kvantne sile. No i u takvoj slici svijeta nailazimo na ozbiljne probleme, od kojih je najveći narav kvantne sile, koja ima neka veoma teško razumljiva i nepoželjna svojstva. Kako bilo da bilo, Newtonov zakon gibanja ne možemo mirne duše smatrati opovrgnutim na slučaju gibanja atomnih predmeta.

Za koju se sliku svijeta odlučiti?

Tragajući za slikom svijeta po kvantnoj mehanici našli smo se u neočekivanoj situaciji. Imamo pred sobom dvije teorije gibanja atomnih predmeta, u biti različite, premda sadrže neke zajedničke elemente. Obje su u stanju objasniti i pretkazati rezultate svih izvedenih pokusa s atomnim premetima, ali na temeljito različite načine, i stoga upućuju na temeljito različite slike svijeta. Prema jednoj se atomni svijet korjenito razlikuje od svijeta svakidašnjega iskustva, to je svijet slučajnih događaja i nepredočivih bića kojima vladaju kvantnomehanični zakoni, a iz kojeg na nama još uvijek nejasan način izranja predodređen i predočiv svijet makroskopskih tijela i događaja. Prema drugoj je atomni svijet u biti jako nalik svijetu svakidašnjega iskustva, čine ga predočive čestice koje se gibaju u skladu s Newtonovim zakonom gibanja, a pod utjecajem tajnovite kvantne sile. Kako se u takvoj situaciji odlučiti, na temelju čega možemo reći koja je od tih slika ispravna ili barem bliža zbiljskom stanju stvari u svijetu atoma?

Očigledno se ne možemo odlučiti na temelju iskustva, jer obje slike, barem koliko danas znamo, jednako dobro pretkazuju rezultate svih pokusa. Neki filozofi smatraju da pri odlučivanju u takvim situacijama važnu ili čak odlučujuću ulogu igraju fizici izvanjski čimbenici, poput filozofskih i estetskih sklonosti, ustroja znanstvene zajednice, pa čak i političkih uvjerenja i društvenoga statusa: fizičari se u pravilu ne mogu racionalno, tj. na temelju iskustva, opredijeliti za neku od raspoloživih alternativa te se stoga povijest fizike može razumjeti jedino na temelju psiholoških i socioloških istraživanja znanstvene zajednice. Takva istraživanja uloge društvenih faktora u oblikovanju i prihvaćanju fizičnih teorija, koja u ekstremima vode na



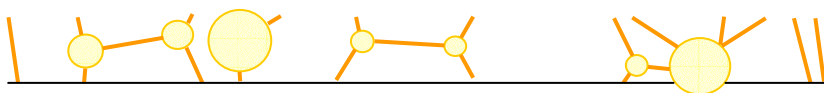
shvaćanje fizičke slike svijeta kao suvremenoga mita kojeg fizičari svojim autoritetom nameću društvu, su danas prilično popularna u okviru sociologije znanosti.

Ogradimo li se od takvih pretjerivanja, moramo ipak priznati da još ne postoje neupitni razlozi koji bi nas nužno prisilili da prigrlimo jednu od ocrtanih alternativnih slika atomnoga svijeta. Situaciju dodatno usložnjavaju drukčiji stavovi o naravi kvantne mehanike, poput onih Nielsa Bohra i Alberta Einsteina. Obojica su, iz različitih razloga, tvrdili da nije opravdano utemeljiti sliku svijeta na toj teoriji. Po Bohru kvantna mehanika uopće ne opisuje ponašanje samih atomnih predmeta, već ponašanje nerazdruživih cjelina koje oni u pokusima čine s mjernim uređajima u koje su uronjeni, što je istodobno krajnja granica naših mogućnosti prodora u atomni svijet. Po njemu je makroskopski svijet valjano opisan klasičnom fizikom, dok se kvantna fizika ne odnosi na atomni svijet, već na »međusvijet« u kojem se susreću i stapaju atomni predmeti i mjerni uređaji. Stoga nije opravdano izvoditi iz kvantne mehanike zaključke o naravi atomnoga svijeta. Einstein je pak smatrao da se tu radi o pomoćnoj, privremenoj teoriji, koja statistički opisuje ponašanje mnoštva atomnih predmeta, a ne ponašanje jednog jedinog atomnog predmeta (stoga iz nje ne smijemo izvoditi zaključke o naravi pojedinačnih atomnih predmeta) te da fizika tek treba razviti takvu teoriju.

Nakon stotinjak godina razvoja kvantne teorije još uvijek nema jednodušnosti o tome na kakvu nas sliku svijeta fizika navodi. U takvoj je situaciji korisno svratiti pogled na povijest fizike i uočiti da su te prilike, unatoč nekim važnim razlikama, ipak poprilično nalik onima u ranim danima obnovljenoga sukoba geocentrične i heliocentrične slike svijeta u drugoj polovici 16. stoljeća. A taj nas primjer, kao i suvremena filozofska promišljanja, uči upravo tome da se kroz instrumente i pokuse zbilja svijeta naposljetku probija u fizičku sliku svijeta i odlučujuće je oblikuje i pročišćuje, ma koliko se u toj slici možda zrcalila naša preduvjerenja, sklonosti i društvene metafore; da je razvoj fizike uistinu napredak u razumijevanju zbilje, a ne tek niz po dogovoru prihvaćenih bajki o svijetu neovisnih o zbilji; te da je fizika u stanju unutar sebe naći sredstva za razrješenje opisane dvojbe, premda će ono očigledno zahtijevati dodatne teorijske i eksperimentalne napore iz kojih mogu uslijediti velika iznenađenja.

Literatura

[1] A. Zeilinger, R. Gähler, C. G. Shull, W. Treimer, i W. Mampe, *Single- and double-slit diffraction of neutrons*, *Reviews of Modern Physics* **60**, 1067 – 1073 (1988).



Brownovo gibanje

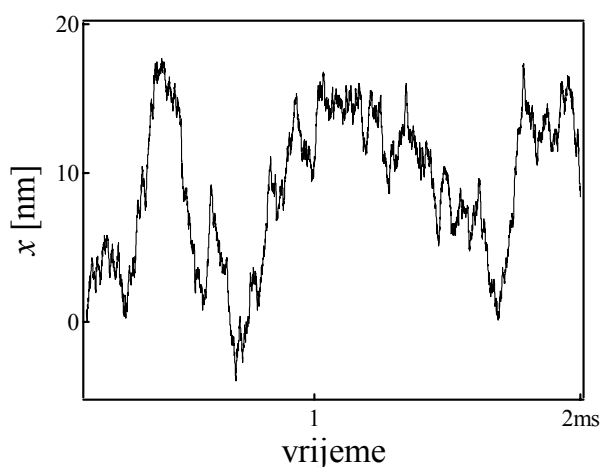
Branimir Lukić¹

École Polytechnique Fédérale de Lausanne

Einsteinov rad iz 1905. godine [1], «O zahtjevima molekularno-kinetičke teorije topline na gibanje čestica raspršenih u stacionarnoj tekućini», je povezao nasumično Brownovo gibanje čestica na mikroskali s njihovom difuzijom na makroskali. Na početku 20. stoljeća Einsteinovo teorijsko predviđanje i eksperimentalni rad Jeana Perrina konačno su potvrdili postojanje atoma. Vizija koju je ovaj rad postavio – da se naš makroskopski svijet zasniva na neprekidnim fluktuacijama svojih elementarnih dijelova – je nastavio da inspirira istraživanja sve do današnjeg dana u najrazličitijim znanstvenim disciplinama.

U okviru predavanja, ispitati ćemo osnove Brownovog gibanja te staviti Einsteinov rezultat u povijesni kontekst u kojem se pojavio.

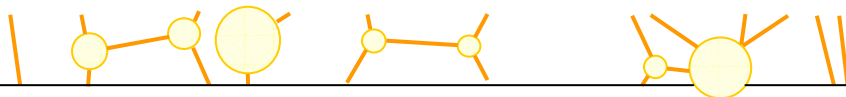
Brownovo gibanje



Slika 10-1: Brownovo gibanje. Krivulja gibanja kuglice od lateksa promjera $2.5\ \mu\text{m}$ u vodi tijekom prve 2 milisekunde.

Kuglica od jednog mikrometra će se u vodi na sobnoj temperaturi gibati nasumično – poput pijanca koji se zanosi čas na jednu, čas na drugu stranu dok hoda. Ukoliko mjerimo njezin položaj u vremenu $x(t)$, dobit ćemo krivulju koja nije kontinuirana, već isprekidana (slika 10-1). Kojim veličinama možemo opisati njezino gibanje? Npr. brzina ili akceleracija nam neće biti od velike koristi, pošto vektor brzine nasumično mijenja smjer. Ako mjerimo udaljenost između dvije točke na slici 1, tj. gledamo razliku $|x_2 - x_1|$, vidjet ćemo da ne možemo predvidjeti vrijednost $|x_2 - x_1|$. Još gore, ako ponovno snimimo položaj kuglice, vidjet ćemo sasvim drukčiju krivulju.

¹ <http://nanotubes.epfl.ch/lukic>, branimir.lukic AT epfl.ch



Na koji način možemo opisati njezino gibanje? Krenimo od Newtonovih zakona koji kažu da je zbroj svih stila koje djeluju na česticu jednak umnošku mase m i akceleracije a čestice. Vanjske sile F_V koje djeluju na česticu će dovesti do njenog gibanja. Ali na kuglicu u pokretu koja se nalazi u viskoznoj tekućini s koeficijentom trenja γ , će djelovati i sila trenja $F_{tr} = -\gamma v$, gdje je v brzina čestice. Jednadžba koja opisuje gibanje čestice u tekućini je onda dana s

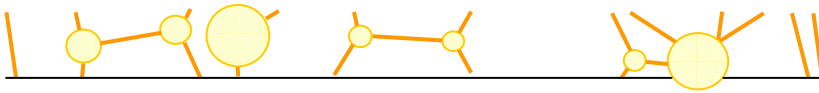
$$ma = F_{tr} + F_V = -\gamma v + F_V \quad (1)$$

Nasumičnost koju vidimo na slici 1 može doći jedino od vanjske sile F_V , koja pak može doći samo od tekućine u kojoj se kuglica nalazi. Danas znamo da tekućina nije kontinuirani medij, već se sastoji od molekula. Gibanje molekula pak možemo opisati u prvoj aproksimaciji idealnim plinom gdje se svaka molekula giba pravocrtno konstantnom brzinom i mijenja smjer prilikom sudara s ostalim molekulama ili zidovima posude u kojoj se nalazi. Naravno, ukoliko stavimo kuglicu u takav medij, molekule će se sudarati i s kuglicom. Pri svakom sudaru vrijedi zakon očuvanja momenta gibanja koji je vektorska veličina. Ukoliko pri sudaru molekula s momentom gibanja p promijeni smjer gibanja za 180° , kuglica će dobiti moment $2p$. Sila kojom onda molekula djeluje na kuglicu je jednaka $2p/\Delta t$, gdje je Δt vrijeme u kojem se dogodila promjena impulsa molekule. Da bi opisali silu F_V i opisali gibanje $x(t)$ trebali bi opisati kada koja molekula udara u kuglicu, te kojom brzinom. Kako je broj molekula reda 10^{23} , potreban nam je alternativni pristup.

Ukoliko jednadžbu (1) pomnožimo s položajem $x(t)$, dobit ćemo član $F_V(t)x(t)$. Kako molekule nasumično udaraju u kuglicu, smjer sile F_V neće biti povezan s pomakom kuglice: neće se dogoditi da ako se kuglica giba u desno, da će sve molekule gurati kuglicu u desno - smjer sile ne ovisi o pomaku kuglice. Drukčije rečeno, kažemo da veličine $F_V(t)$ i $x(t)$ nisu korelirane i ukoliko njihov umnožak sumiramo kroz određeni vremenski period, dobit ćemo nulu. Tj. prosjek umnoška je jednak nuli $\langle F_V(t)x(t) \rangle = 0$ gdje zagrada „ $\langle \rangle$ ” označava «uprosječno po vremenu». Na taj način, jednadžba (1) postane

$$\langle m\ddot{x} \rangle + \gamma \langle \dot{x} \rangle = \langle x F_V \rangle = 0 \quad (2)$$

Jednadžba (2) kaže da više ne možemo govoriti o kontinuiranim veličinama (tj. gdje se čestica nalazi u kojem trenutku), već samo o prosječnim veličinama. Ako upotrijebimo diferencijalni račun ($a = dv/dt$, i $v = dx/dt$) možemo riješiti jednadžbu (2) (potpuni prikaz rješenja je dan u [2] ili [3]). Pri tome moramo koristiti ekviparticioni teorem koji kaže $\langle mv^2 \rangle = kT/2$, gdje je k Boltzmannova konstanta, a T termodinamička temperatura. Ekviparticioni teorem kaže kako je kinetička energija svakog stupnja slobode (npr. translacija u x smjeru) u idealnom plinu (tj. tekućini) jednaka $kT/2$. Kako su tekućina i kuglica u termodinamičkoj ravnoteži (tj. neće se dogoditi da se kuglica giba brže na račun hlađenja tekućine), istu energiju možemo uzeti i za kinetičku energiju kuglice. Rješenje na kraju vodi na rješenje



$$\langle x^2(t) \rangle = \frac{2kT}{\gamma} t \quad (3)$$

Prosječni kvadrat odstupanja od početnog položaja raste proporcionalno s vremenom. Premda ne možemo točno predvidjeti položaj kuglice, ipak možemo opisati koliko brzo će se kuglica gibati i dokle će stići nakon vremena t . Što je temperatura tekućine veća, kvadrat odstupanja će biti veći, tj. kuglica će brže istraživati okolinu. Što je trenje kuglice s tekućinom veće, kuglica će se gibati sporije. Kuglica konstantno dobiva kinetičku energiju od nasumičnog gibanja molekula tekućine, koju zatim gubi pri trenju s tim istim molekulama.

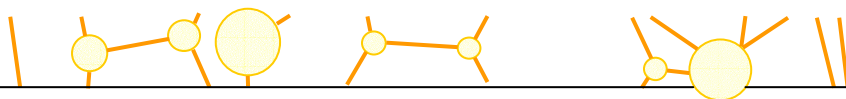
Možemo se dalje pitati što se događa na vrlo malim vremenima? Što bi bilo kada bi imali samo jednu molekulu i jednu kuglicu? Prilikom sudara, one bi se ponašale kao dvije biljarske kugle, sa savršeno definiranim položajem i brzinom. Kuglica bi se onda ponašala kao $\langle x^2 \rangle \propto t^2$. Ako bi mogli mjeriti položaj kuglice dovoljno brzo, došli bismo i do tog ponašanja koje zovemo balističkim. U jednadžbi (1) smo dodatno pretpostavili kako je sila trenja uvijek proporcionalna brzini. Ipak to nije istina na malim vremenskim skalama. Kada molekule vode daju svoj moment gibanja kuglici, kuglica će im dio tog momenta vratiti, tako da će se i molekule vode gibati usmjereno, tj. ne više nasumično. U tom režimu gibanja će se kuglica zapravo gibati sporije od gibanja predviđenog u jednadžbi (3). Za kuglicu promjera oko mikrona, vrijeme kada počinje vrijediti jednadžba (3) iznosi oko 3 milisekunde [4]. U ostatku teksta, baviti ćemo se samo s fenomenom opisanim jednadžbom (3). Taj režim gibanja zovemo difuzivnim.

Nasumični šetač – matematički model Brownovog gibanja

Brownovo gibanje možemo matematički opisati modelom nasumičnog šetača. Uzet ćemo jednodimenzionalni model gdje je šetač točka koja se može micati diskretnim koracima po pravcu, lijevo ili desno. Vjerovatnost da se pomakne na lijevo ili desno je pri svakom koraku jednaka, i ne ovisi o položaju na pravcu. Ako je svaki korak dužine L , gdje će se točka nalaziti nakon n koraka? Razmak između položaja točke u n -tom koraku, X_n i u prethodnom $(n-1)$ -tom koraku, X_{n-1} je L , tj. $X_n = X_{n-1} + L$. Kako je $X_n^2 = X_{n-1}^2 + 2 \cdot X_{n-1}L + L^2$ i ako uzmemo prosjek (uz $\langle X_{n-1}L \rangle = 0$), dobijemo $\langle X_n^2 \rangle = \langle X_{n-1}^2 \rangle + L^2$. Ukoliko sada nastavimo s rješavanjem, uz $X_{n-1} = X_{n-2} + L$ i $\langle X_n^2 \rangle = \langle X_{n-2}^2 \rangle + 2L^2$, dobit ćemo na kraju $\langle X_n^2 \rangle = nL^2$. Kako je broj koraka n proporcionalan vremenu (recimo da je za svaki korak potrebno određeno vrijeme Δt i $t = n \Delta t$), dobijemo

$$\langle X_n^2 \rangle = 2Kt \quad (4)$$

gdje je K konstanta proporcionalnosti ($K = L^2/(2\Delta t)$). Usporedimo li relacije (3) i (4), vidjet ćemo da se radi o istom predviđanju – prosječni kvadratni pomaka raste linearno



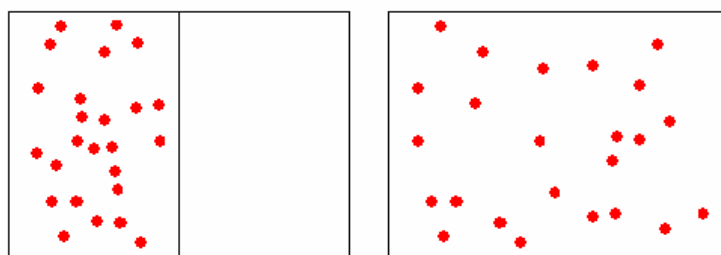
s vremenom. Tj. naše rješavanje jednadžbe gibanja (1) nam je dalo rezultat kao i matematički model nasumičnog šetača.

Difuzija

Iz modela nasumičnog šetača se dalje može izračunati vjerovatnost nalaženja točke na bilo kojoj točki pravca. Potpuni račun [5] kaže da se vjerovatnost nalaženja točke ravna po jednadžbi difuzije, te da je konstanta K jednaka konstanti difuzije D . Difuzija je pojam vezan uz gibanje molekula plina (slika 10-2). Ukoliko imamo posudu s plinom, ali dva odjeljka koji imaju različite koncentracije. Uklanjanjem pregrade, koncentracije će se izjednačiti. Brzina kojom će čestice iz područja veće koncentracije preći u područje niže koncentracije je opisana upravo konstantom D . Relacije (4) i (5) onda daju

$$D = \frac{kT}{\gamma} \quad (5)$$

Veličina γ je jednaka $6\pi\eta R$, gdje je η viskoznost tekućine, a R polumjer kuglice². Relacija (5) povezuje konstantu difuzije D , koja je makroskopsko svojstvo, i koeficijent trenja γ koji ovisi o mikroskopskom parametru kuglice poput R . Ili drugim riječima, relacije (4) – (5) kažu da je $D = \langle x^2(t) \rangle / (2t)$, tj. makroskopski parametar D možemo izračunati samo iz fluktuacije mikroskopske varijable $x(t)$. Iz nasumične varijable $x(t)$ na mikroskali dobili smo „glatke“ krivulje na makroskali (jednadžba difuzije je kontinuirana diferencijalna jednadžba). Upravo u ovom razumijevanju leži najveći Einsteinov doprinos u članku o Brownovom gibanju iz 1905. godine.

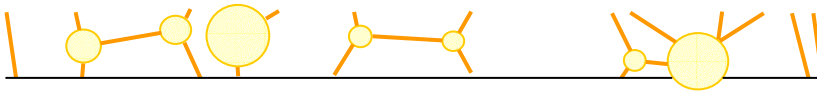


Slika 10-2: Difuzija. Brzina izjednačavanja koncentracija u dva odjeljka posude opisana je konstantom difuzije D .

Einsteinov doprinos u povijesnom kontekstu

Već po otkriću mikroskopa u 17. stoljeću, zabilježena su i prva opažanja Brownovog gibanja [6]. Ipak, uzrok gibanja je objašnjavan biološki, kao gibanje živih bića. Škotski botaničar Robert Brown je 1827. napravio sistematska istraživanja

² Premda od početka govorimo o kuglici polumjera R , jednadžbe (4) i (6) su generalnije i važe za objekt bilo kojeg oblika. U tom slučaju γ opet ovisi o viskoznosti tekućine η i veličini objekta.



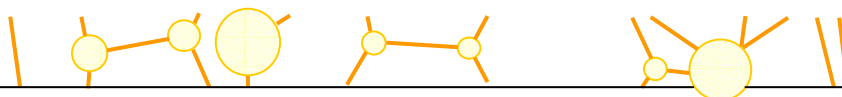
kaotičnog gibanja čestica i isključio svaku biološku osnovu vidjevši slično ponašanje i kod čestica minerala [7]. Brown je također isključio bilo kakve optičke efekte ili smetnje koje bi uzrokovale ovo gibanje. Ipak, Brownovi rezultati nisu pobudili veće zanimanje, i većina znanstvenika je uzrok gibanja vidjela negdje drugdje – bilo u električnim efektima, napetosti površine ili razlikama temperature na mikroskali. U kontekstu jednadžbe (1), rasprava se u 19. stoljeću vodila o porijeklu vanjske sile na česticu F_v – je li biološkog, optičkog ili kakvog drugog porijekla? Léon Gouy je krajem stoljeća demonstrirao kako F_v dolazi od termalnih fluktuacija tekućine. Eksperimentalni pokušaji mjerenja Brownovog gibanja su davali kontradiktorne rezultate u pokušaju da mjere brzinu Brownove čestice (a ne srednji kvadrat odstupanja kao u jednadžbi (3)) [8].

Interpretacija ranih eksperimenata je bila temeljena na pretpostavci kontinuirane krivulje gibanja koja se uklapa u koncept svijeta kontinuirane materije koji je vladao fizikom 19. stoljeća. Pojave poput elektromagnetizma i širenja topline u tijelima su bile opisane moćnim pojmovnim aparatom – diferencijalnim jednadžbama. Difuzija je također bila opisana kontinuiranim diferencijalnim jednadžbama (poznate kao Fickovi zakoni po njemačkom patologu Adolfu Ficku). Krajem stoljeća Ludwig Boltzmann je razvio kinetičku teoriju plinova koja se zasnivala na pretpostavci o diskontinuiranoj materiji – tj. atomima. Teorija je mogla objasniti rezultate u termodinamici, ali ju je velik broj fizičara uzimao kao eksperimentalno neprovjerljivu hipotezu. Fizika 19. stoljeća se tako našla u filozofskom procjepu između „kontinuiranog“ i „diskretnog“ objašnjenja svijeta – dva i pol tisućljeća nakon Demokritove ideje o atomima.

Einstein je u članku iz 1905. godine prvo izveo relaciju (5) i time povezao dva koeficijenta, D i γ . Ovo je omogućilo mjerenje Boltzmannove konstante k i zatim Avogardovog broja N_A koji kaže koliko se molekula nalazi u jednom molu plina. Drugi dio članka se bavi izvedom relacije (5), gdje je Einstein razvio matematički model koji bi mu dopustio da predvidi gibanje Brownove čestice, i poveže ga s konstantom difuzije, tj. $\langle x^2 \rangle = 2Dt$. Paul Langevin je 1908. godine dao jednostavnu i direktnu metodu koju smo i slijedili u ovom tekstu postavljanjem jednadžbe (1) koja vodi na (3). Premda je bilo nekoliko eksperimenata koji su pokušali dokazati Einsteinova predviđanja, konačnu potvrdu je napravio Jean Perrin sa suradnicima u nizu eksperimenata između 1908. i 1911. godine. Eksperimenti su zahtijevali precizno određivanje veličine kuglica, kontrole njihovog polumjera i velik broj mjerenja. Preciznost njegovih eksperimenata nije ostavila prostora za sumnju u točnost Einsteinovih predviđanja i u diskretnu sliku svijeta baziranu na atomima³.

Ovi rezultati su doveli do prihvaćanja slike makroskopskog svijeta koji postoji zahvaljujući fluktuacijama na mikroskali. Početkom 20. stoljeća uslijedile su dvije revolucije bazirane na ostalim Einsteinovim člancima iz 1905. godine koje su više zaokupile pažnju fizičara – teorija relativnosti i kvantna mehanika. Kvantna mehanika je našla sličan princip na razini elementarnih čestica – gdje se položaj elektrona u atomu ne može opisati kontinuiranom krivuljom, već samo statistički – kroz

³ U Langevinovom izvodu, diskretnost materije ulazi korištenjem ekviparticionog teorema između jednadžbi (3) i (4).



vjerovatnost da se elektron nađe određenoj točki prostora⁴. Ipak, statistička fizika se razvila na Einsteinovom modelu nasumičnog šetača i nastavila utjecati na naše shvaćanje svijeta sve do danas. Njene metode su primjenjene u shvaćanju fluktuacija cijene dionica na burzi⁵ [9], ekoloških sistema, prometa, te funkcioniranju staničnih struktura.

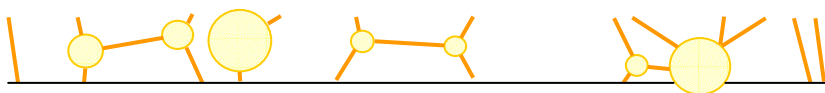
Brownovo gibanje i termalne fluktuacije su najviše utjecali na razvoj znanosti o koloidima i staničnim strukturama [10]. Dok god se dinamika sistema nalazi u području energije bliskoj kT , termalne fluktuacije imaju bitan utjecaj na ponašanje sistema. Molekularni motori u stanicama [11] imaju pomake od nekoliko nanometara i vuku stanične organele od stanične membrane do jezgre silama od nekoliko pikonewtona, što znači da operiraju na energetske skali bliskoj $kT = 4$ pN nm. Polimeri poput molekule DNA ili proteina su kompleksne strukture i termalne fluktuacije ne utječu samo na cijelu molekulu, već i na njihove unutrašnje dijelove – na svaki monomer posebno. Proučavanje Brownovog gibanja se i dalje nastavlja u pokušaju da odgovorimo kako se iz nereda gibanja pojedinih čestica nastaje red na većim skalama?

Literatura

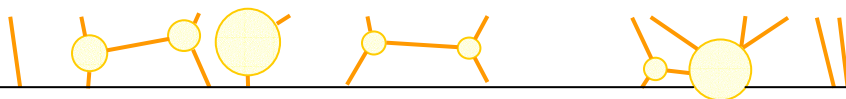
- [1] A. Einstein: Über die von der molekularkinetischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen. *Annalen der Physik* **17** (1905): 549-560.
- [2] R. P. Feynman, R. B. Leighton and M. L. Sands: The Feynman Lectures on Physics, Vol. I (Addison-Wesley, Reading, 1963).
- [3] F. Reif: Fundamentals of Statistical and Thermal Physics (McGraw-Hill, Singapore, 1965)
- [4] B. Lukić: Eksperimenti s optičkom pincetom, Zbornik Ljetne škole mladih fizičara HFD-a, Vela Luka, 2004, <http://www.hfd.hr/ljskola/2004/lukic.pdf>
- [5] D. K. Sunko: Statistička fizika, <http://www.phy.hr/dodip/notes/statisticka.html>
- [6] M. D. Haw: Colloidal suspension, Brownian motion, molecular reality: a short history, *Journal of Physics: Condensed Matter* **14** (2002): 7769-7779.
- [7] R. Brown: A brief account of microscopical observations made in the months of June, July and August, 1827, on the particles contained in the pollen of plants; and on the general existence of active molecules in organic and inorganic bodies, *Philosophical Journal* **4** (1828): 161-173. (<http://sciweb.nybg.org/science2/pdfs/dws/Brownian.pdf>)

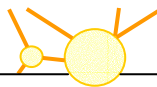
⁴ Premda Einstein nije imao problema s prihvaćanjem statističkog opisa Brownove čestice, statistički opis elektrona ga nije zadovoljio [8].

⁵ Model nasumičnog šetača za cijene dionica na burzi nezavisno je razvio Bachelier 1900. godine [6].



- [8] M. D. Haw: Einstein's random walk, *Physics World*, January 2005, <http://physicsweb.org/articles/world/18/1/3/1>
- [9] M. Latković: Streetwise, Zbornik Ljetne škole mladih fizičara HFD-a, Jelsa, 2001, <http://www.hfd.hr/ljskola/2001/latkovic-mladen/latkovic-mladen.htm>
- [10] E. Frey & K. Kroy: Brownian motion: a paradigm of soft matter and biological physics, *Annalen der Physik (Leipzig)* **14** (2005): 20-50.
- [11] I. Weber: Mehanika staničnog skeleta, Zbornik Ljetne škole mladih fizičara HFD-a, Vela Luka, 2003, <http://www.hfd.hr/ljskola/2003/iweber.doc>





Mali akceleratori u primjeni

Milko Jakšić

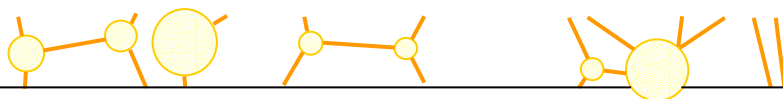
Institut Ruđer Bošković, Zavod za eksperimentalnu fiziku, Bijenička c. 54, Zagreb

Uvod

Akceleratori su uređji koji služe za ubrzavanje električki nabijenih čestica. Te čestice mogu biti elektroni, protoni ili drugi ioni koji ovisno o mehanizmu ubrzavanja mogu biti djelomično ili potpuno ogoljeni od svog elektronskog omotača. Ubrzavanje drugih vrsta elementarnih čestica (neutralne čestice kao neutron, antičestice, čestice kratkog života) moguće je izvesti tek posredno sa snopom primarno ubrzanih stabilnih nabijenih čestica kao što je proton, a nekom od reakcija u za to odgovarajućim uvjetima (energija snopa, vrsta mete, itd.).

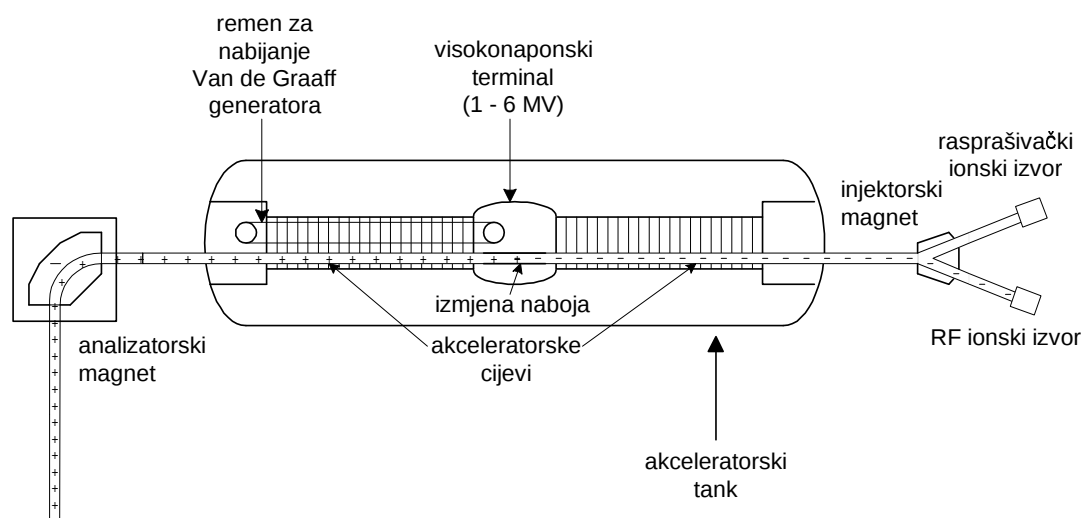
Od prvih akceleratora konstruiranih tridesetih godina prošlog stoljeća, koji su ubrzavali protone pa do danas, akceleratori su prestali biti samo instrumenti koji se koriste u svrhu znanstvenih istraživanja. Od 15000 postojećih akceleratora na svijetu, tek se 10% ne koriste u nekoj od komercijalnih primjena. Njihov najveći dio se koristi u industriji (poluvodiča i specijalnih materijala) kao «implanteri». U implanterima se ubrzavanjem iona potencijalima od nekoliko desetaka kV, ubacuju točno određene vrste elemenata u materijale gdje je kemijskim putevima to neizvedivo. Stvaraju se materijali posebnih karakteristika (npr. implantiranjem dušika u metal se stvaraju posebno otporni alati). Akceleratori sustavi koji se na različite načine koriste u medicini, u svrhu terapije (zračenje tumorskih stanica) ili dijagnostike (proizvodnja radioaktivnih izotopa) drugo je najznačajnije područje akceleratora u primjeni.

Akceleratori kao instrumenti u znanosti su danas u manjini. Uz desetak najvećih akceleratorskih sustava, kao što je onaj u CERN-u, Geneva, tek je stotinjak onih koji se još uvijek koriste u temeljnim istraživanjima nuklearne fizike. Ostali dio akceleratora u znanosti koriste se u drugim granama fizike ili ostalim prirodnim znanostima. O takvim akceleratorima je upravo riječ u ovom tekstu. U većini slučajeva to su elektrostatski akceleratori koji ubrzavaju ione pomoću visokih napona (stotinjak tisuća do nekoliko milijuna volti).



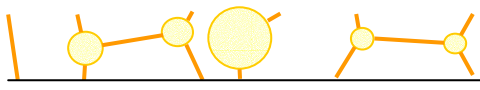
Elektrostatski akceleratori

Najpoznatiji princip dobivanja konstantnog visokog napona je svakako onaj koji je izumio fizičar Robert J. Van de Graaff prije 75 godina. Tu se izolirajućom elastičnom trakom sa uzemljene strane generatora transportira električni naboj. Sam naboj na traci stvoren je indukcijom preko šiljaka četkica spojenih na napon od nekoliko kV. Transportiranjem tog naboja trakom do unutrašnje strane izolirajuće kugle ili «terminala» (gdje je električno polje jednako nuli), naboj se preko drugih četkica nakuplja na kugli. Potencijal terminala polagano raste, te vrlo brzo može doseći i milijune volti. Zbog tako visokog napona, cijeli uređaj se smješta u zatvorenu posudu «tank» ispunjenu izolacijskim plinom (npr. smjesa dušika i ugljičnog dioksida), čime se sprječava iskrenje. Na Institutu Ruđer Bošković nalazi se Tandem Van de Graaff akcelerator maksimalnog napona od 6 MV. Kao što je vidljivo iz Slike 11-1. kod tandem akceleratora se ubrzavaju negativni ioni (proizvedeni u nekom od ionskih izvora) do pozitivnog visokonaponskog terminala. Prolaskom kroz «stripper» cijev dolazi do ogoljenja negativnih iona sudarima s rijetkim plinom, pri čemu negativni ioni postaju pozitivni. Tada, pozitivno nabijeni «terminal» odbija pozitivne ione prema drugom kraju akceleratora, što rezultira dvostrukim ili tandem principom ubrzanja.



Slika 11-1: Shematski prikaz Tandem Van de Graaff akceleratora na Institutu Ruđer Bošković

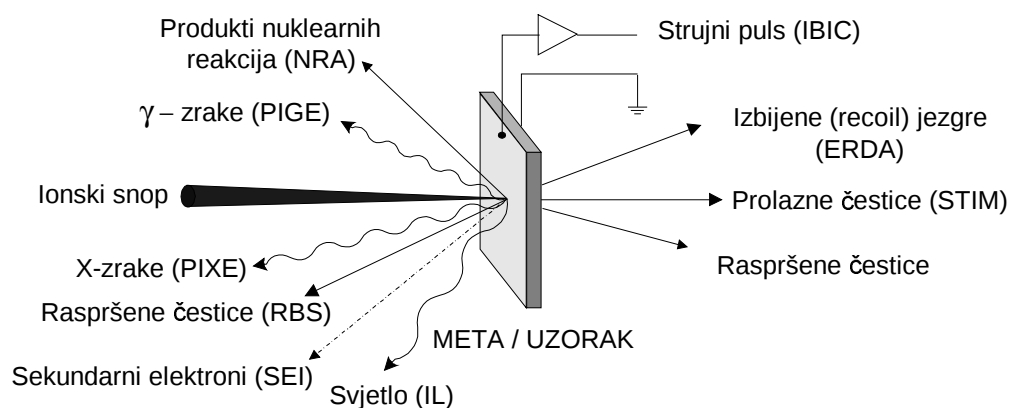
Ioni dobro definirane energije iona odabiru se u analizatorskom magnetu, te se usmjeravaju prema jednoj od eksperimentalnih linija.



Metode analize ionskim snopovima

Najčešća primjena ionskih snopova u drugim područjima fizike, a prije svega u istraživanjima materijala, jesu metode analize zasnovane na nekom od procesa interakcije ionskog snopa i materijala mete. Za razliku od interakcije elektronskog snopa sa atomima mete, koji se zasniva samo na ionizaciji atoma mete, sudari teških i brzih čestica kao što su protoni i drugi ioni sa atomima mete daleko je burnije. Uz ionizaciju dešavaju se i elastična raspršenja te nuklearne reakcije, čijom detekcijom se uzorak može daleko opsežnije karakterizirati.

Na Slici 11-2. prikazani su procesi koji se zbivaju prilikom prolaska iona kroz materijal mete, te pripadajuće metode analize.



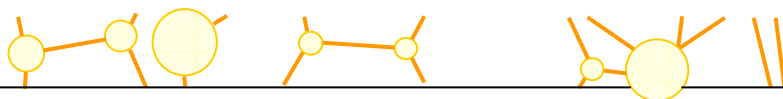
Slika 11- 2: Shematski prikaz vrsta procesa koji se dešavaju prilikom ulaska ionskog snopa u materijal mete, te kratice metoda za karakterizaciju materijala

PIXE – Particle Induced X-ray Emission spektroskopija – Ionizacija atoma mete vodi na emisiju karakterističnih x-zraka čijom detekcijom (spektroskopijom) određujemo elementni sastav materijala.

RBS – Rutherford Backscattering Spectrometry – Energija raspršenih čestica snopa na jezgrama atoma u meti ovisi o elementnom sastavu i dubinskoj raspodjeli elemenata.

PIGE – Particle Induced Gamma Emission – Pobuđivanjem atomskih jezgri u meti nuklearnim reakcijama, emitiraju se gama zrake čija je energija ovisna o izotopu elementa (nuklearne reakcije su najvjerojatnije kod lakih iona).

NRA – Nuclear Reaction Analysis – Neelastični sudari iona snopa i atomskih jezgri u meti vode na nuklearne reakcije, pri čemu se emitiraju čestice produkti, čija energija i vrsta opisuje izotope elementa (nuklearne reakcije su najvjerojatnije kod lakih iona).



SEI – Secondary electron imaging – ionizacija atoma na površini mete, vodi na emisiju sekundarnih elektrona, čijom detekcijom možemo kao u elektronskom mikroskopu 'vidjeti' morfologiju mete.

IL – Ionoluminescence – ionizacija vodi i na emisiju svjetla koja ponekad daje informaciju o kemijskoj formi ili kristalnoj strukturi mete.

ERDA – Elastic Recoil Detection Analysis – Energija izbijenih čestica iz mete snopom teških jezgri ovisi o elementnom sastavu i dubinskoj raspodjeli elemenata. Dubinska je osjetljivost izuzetno dobra te se ova metoda koristi za određivanje sastava i debljine nanometarski tankih slojeva .

STIM – Scanning Transmission Ion Microscopy - Ioni snopa prolaskom kroz materijal mete gube energiju, te se mjerenjem te promjene određuje debljina mete.

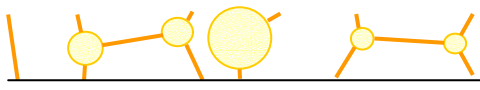
IBIC – Ion Beam Induced Charge - Prolaskom iona kroz poluvodički materijal sa internim električnim poljem, inducira se naboj čiji puls možemo izmjeriti i time odrediti električna svojstva analiziranog materijala.

Nuklearna mikroskopija

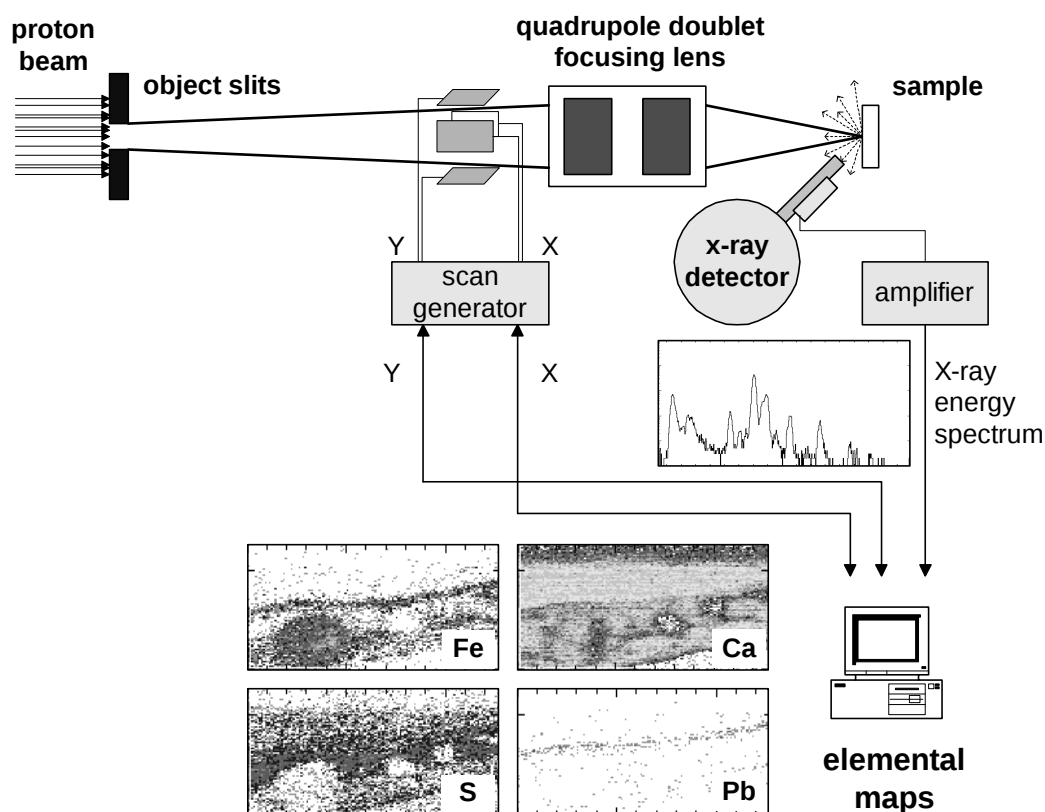
Da bi informacija koju navedene analitičke metode mogu pružiti bile još korisnije, konstruiran je uređaj za fokusiranje iona, takozvana nuklearna (jer koristi nuklearne čestice) mikroproba. Snop iona se pomoću magnetskih kvadrupola fokusira na dimenzije manje od 1 μm , uz mogućnost skeniranja preko površine mete koja se ispituje. Korištenjem neke od navedenih analitičkih metoda, možemo dobiti «elementne slike» odnosno prostorne distribucije svojstava koje korištena metoda mjeri. Na Slici 11-3. prikazan je način dobivanja elementnih slika PIXE spektroskopijom. Skup analitičkih metoda koje možemo koristiti pomoću nuklearne mikroprobe, često se zove «nuklearna mikroskopija».

Na Institutu Ruđer Bošković, metode nuklearne mikroskopije su primjenjivane na nizu interdisciplinarnih istraživanja:

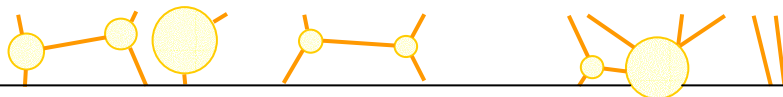
- Kulturna baština – zbog nedestruktivnosti ovih metoda izvedeno je niz analiza pigmenata umjetničkih slika, analiza legura u skulpturama nepoznatog porijekla, analiza sastava keramika i porculena, analiza metalnih niti u tkaninama, itd.
- Okoliš – analizom sastava lebdećih čestica u atmosferi prepoznaju se metodom 'otiska prsta' izvori zagađenja ili se monitoriraju vremenske promjene u zagađenju atmosfere.



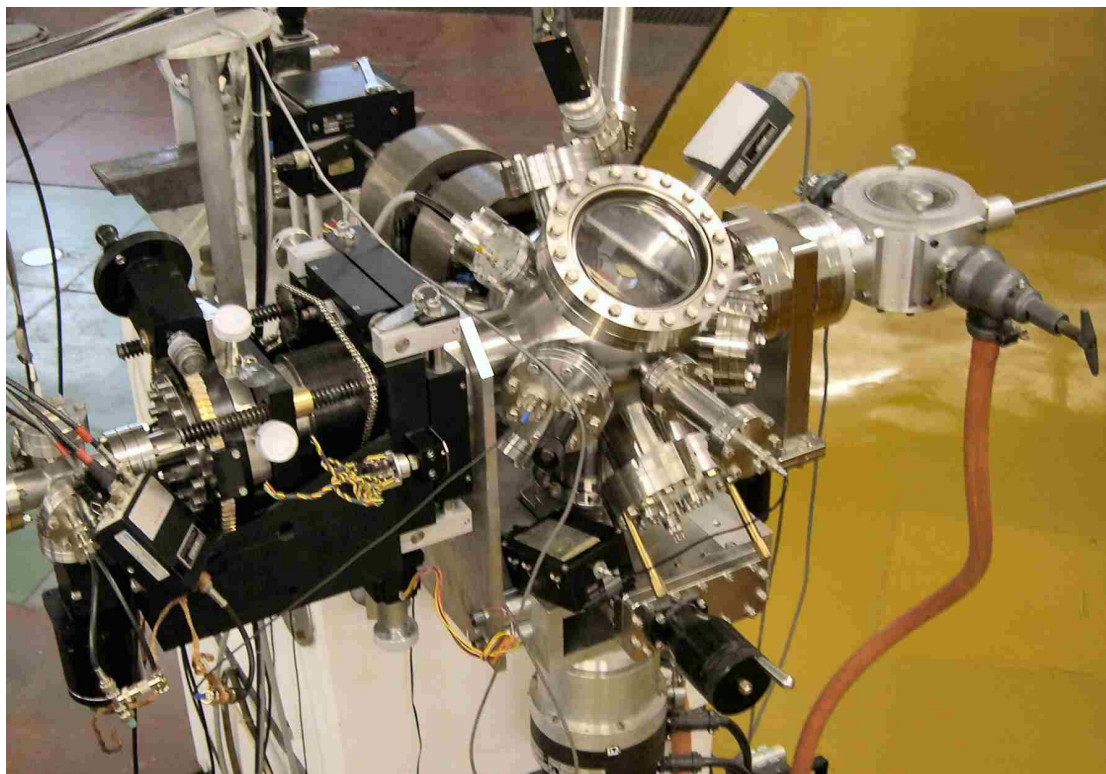
- Industrija – analiza sastava i debljina slojeva sunčevih ćelija od amornog silicija koristi se za poboljšanje efikasnosti; analiza sastava cementa koji određuje njegova svojstva
- Biomedicina – analizom elementnog sastava stanica tretiranih određenim lijekovima može se pratiti ulazak lijeka u stanice.



Slika 11-3: Shematski prikaz PIXE analize nuklearnom mikroprobom. Predstavljene elementne slike, rezultat su analize mikropresjeka boje s freske.



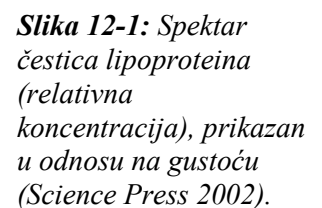
Na Slici 11-4. prikazan je i izgled komore za raspršenje na nuklearnoj mikroprobi Instituta Ruđer Bošković.

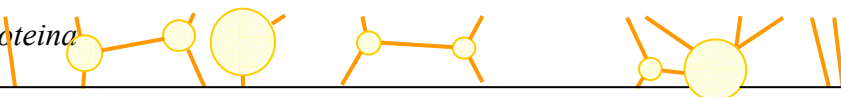


Slika 11- 4: Izgled komore za raspršenje nuklearne mikroprobe u Zagrebu. Lijevo je sustav za mikromanipulaciju uzraka, desno je komora za ubacivanje ozoraka bez narušavanja vakuuma u središnjoj komori za raspršenje. U pozadini je sustav kvadrupolnih magneta za fokusiranje. Na sfernoj su komori radijalno smješteni razni detektori koji prate procese na meti koja je smještena u središtu komore.

Janko Herak
Farmaceutsko-biokemijski fakultet, Zagreb

Pod pojmom *lipoproteini* obično podrazumijevamo čestice sastavljene od lipida i proteina, koje nalazimo u krvnoj plazmi. Bolji bi i točniji naziv za te čestice bio *lipoproteini iz krvne plazme* ili *serumski lipoproteini*, no mi ćemo ovdje upotrebljavati prvi, najjednostavniji naziv. Po kemijskom sastavu lipoproteini su srodni membranama. Dok membrane (stanične i unutarstanične) obavljaju vrlo raznoliku funkciju, bitnu za rad svake biološke stanice, lipoproteini su u biti prenositelji lipida do svih stanica organizma. Lipidi (često popularno zvani i „masti”), sastavni su dio staničnih membrana, ali služe i kao „sirovina” za sintezu mnogih biološki važnih molekula, između ostaloga cijelog niza hormona. Kako su lipidi netopivi u vodi, dakle i u krvi, za njihov put iz želuca i crijeva, kuda dođu uzimanjem hrane, lipidi se u organizmu združuju sa specifičnim proteinima u lipoproteinske čestice „topive” u krvnoj plazmi. U stvari, radi se o disperziji, a ne o pravoj otopini lipoproteina. Golemo zanimanje za lipoproteine iz krvne plazme potječe ne samo iz znanstvene znatiželje za upoznavanjem njihove funkcije u normalnim biološkim procesima, nego i zbog spoznaje da lipoproteini sudjeluju u procesu aterogeneze, dakle oboljenja srca i krvnih žila. Kao što je poznato, ateroskleroza je najveći uzročnik smrtnosti u razvijenim zemljama svijeta.





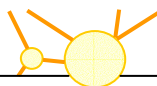
Najčešći način izdvajanja lipoproteina iz krvne plazme je primjenom snažnih centrifuga. U centrifugi se sve krvne sastavnice razvrstavaju prema svojoj masi i gustoći. Za odvajanje lipoproteina kao supramolekulskih čestica potrebna su jaka centrifugalna polja ($\omega^2 r \approx 10^5 g$), što se postiže u posebno konstruiranim rotorima vrlo brzom vrtnjom u ultracentrifugama. Na slici 12-1 prikazan je profil lipoproteina uravnoteženih u gradijentu gustoće otapala u ultracentrifugi. Mogu se uočiti diskretni razredi lipoproteina, razvrstani prema gustoći. Najveće lipoproteinske čestice, ujedno i čestice najmanje gustoće nazivamo kilomikronima (CM). Nešto manje čestice nazivamo lipoproteinima vrlo male gustoće, najčešće poznate pod akronimom VLDL (od engleskog *Very Low Density Lipoprotein*). Još manje i gušće čestice su lipoproteini male gustoće (LDL – *Low Density Lipoprotein*), a najgušće i najmanje čestice su lipoproteini velike gustoće, HDL (od engl. *High Density Lipoprotein*). Neka osnovna svojstva svih razreda lipoproteinskih čestica prikazana su u Tablici 12-1.

Tablica 12-1: Sastav i svojstva ljudskih lipoproteina

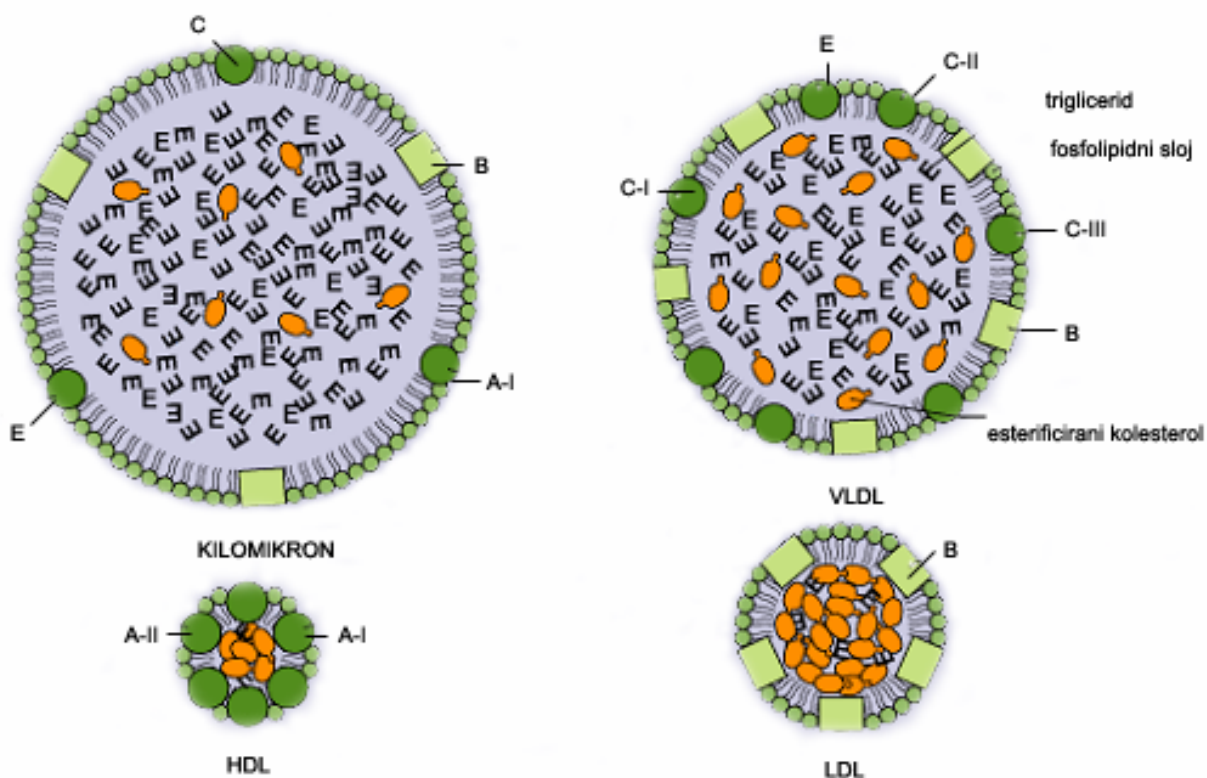
Lipoprotein	Gustoća (g/mL)	Promjer (nm)	Protein	Fosfolipid (maseni udio, %)	Triglicerid (maseni udio, %)	Kolesterol
HDL	1.063- 1.21	5 – 15	33	29	8	30
LDL	1.019 – 1.063	18 – 28	25	21	4	50
IDL	1.006- 1.019	25 – 50	18	22	31	29
VLDL	0.95 – 1.006	30 – 80	10	18	50	22
Kilomikron	< 0.95	100 - 500	1 - 2	7	84	8

Molekulska organizacija lipoproteina

Svi razredi lipoproteina, bez obzira na veličinu i kvantitativni odnos lipida i proteina imaju neka zajednička svojstva. Svi lipoproteini imaju u svom sastavu jedan ili više dobro definiranih proteina, koje obično nazivamo *apoproteinima* ili *apolipoproteinima*. Proteini iz sastava lipoproteina (apoproteini), imaju neke dijelove organizirane u obliku uzvojnice, a neke druge u obliku nabranog lista. Do takve se spoznaje došlo uglavnom iz analize primarne strukture (sastava i redoslijeda aminokiselina u proteinskom lancu) apoproteina. Kao što se može i pretpostaviti, o trodimenzijskoj strukturi i organizaciji apoproteina u česticama lipoproteina nema vrijednih informacija iz standardne rentgenske strukturne analize, naprosto zato što kvalitetna analiza tako kompleksnih sustava kao što su lipoproteini nije napravljena, iako je bilo mnogo pokušaja. Pa ipak, pouzdani podaci o sekundarnoj strukturi (konformaciji pojedinih dijelova proteinskih lanaca) dobiveni su analogijom s podacima u drugim, bolje poznatim proteinima, dostupnim znanstvenoj javnosti.

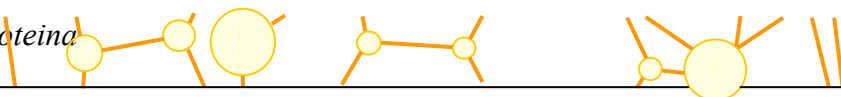


Lipidna komponenta lipoproteina sadrži četiri tipa molekula, u različitom omjeru u različitim razredima lipoproteina. Svi lipoproteini imaju u svom sastavu fosfolipide, kolesterol, esterificirani kolesterol i trigliceride. Poznavajući svojstva ovih kategorija lipida može se pouzdano sačiniti opći model lipoproteina. Fosfolipidi, zbog svojstva amfipatičnosti (jedan kraj molekule je polaran a drugi apolaran) sasvim sigurno zajedno s proteinima čine vanjsku ovojnicu lipoproteina. Pritom su polarne glave fosfolipida izložene vodenom mediju, a apolarni krajevi okrenuti prema unutrašnjosti. Esterificirani kolesterol i trigliceridi velike su nepolarne molekule i sasvim sigurno su daleko od vrlo polarnog medija, otapala; smještene su negdje u sredini čestice. Kolesterol je blago polaran, pa može biti i na površini i u unutrašnjosti čestice. Na temelju ovakve analize i činjenice da se radi o kvazikuglastim česticama (što je poznato iz snimaka elektronskom mikroskopijom), dobivena je opća slika čestica lipoproteina, što je prikazano na slici 12-2.



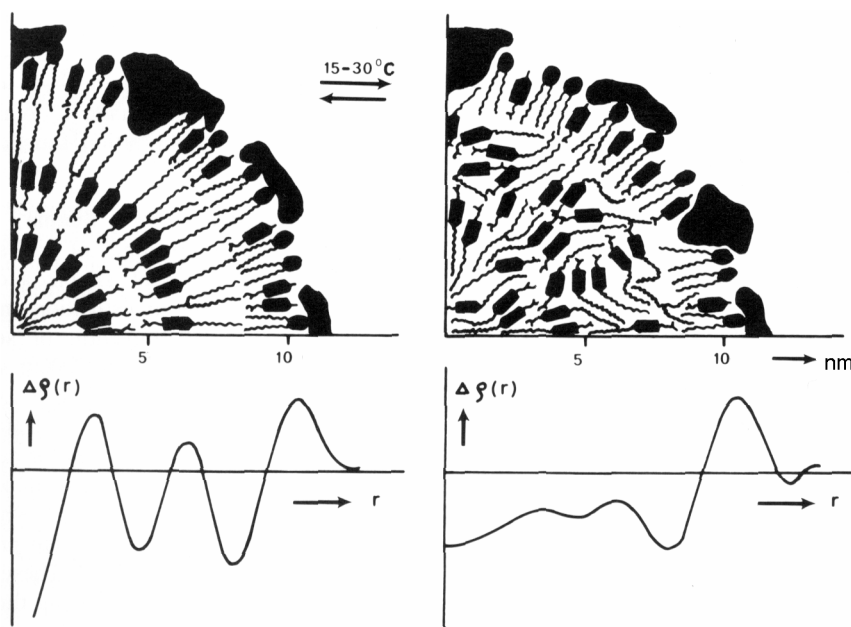
Slika 12-2: Shematski prikaz molekulske organizacije u četiri razreda lipoproteina. Na slici su i standardne oznake za apoproteine prisutne u pojedinim vrstama čestica. Odnos veličine čestica na slici ne odgovara stvarnom odnosu veličina (Science Press 2002).

No detaljna organizacija različitih molekula u česticama različita je u različitim razredima lipoproteina. Do detaljnijih podataka o strukturi i organizaciji lipoproteinskih čestica došlo se primjenom i drugih metoda. Spektroskopskim metodama, metodama strukturne analize i različitim kemijskim, biokemijskim i imunololškim metodama posebno su se proučavale molekule i dijelovi molekula dostupni vodenom mediju, a posebno molekule koje se nalaze u jezgri lipoproteina. Na taj se način stekla općenita slika o organizaciji molekula i molekulskim interakcijama u česticama. Danas najviše znamo o detaljima strukture lipoproteina male gustoće (LDL).



Struktura i molekulska organizacija LDL-a

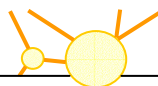
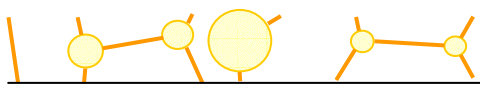
Kilomikroni i VLDL uključeni su u prijenos i odlaganje triglicerida u tkiva u organizmu. VLDL, LDL i HDL odgovorni su za prijenos i opskrbu stanica kolesterolom. U tim metaboličkim putovima LDL igra ključnu ulogu jer kao cjelina ulazi u stanice koje imaju potrebu za kolesterolom. Stoga je učinjen golem napor da se spozna mehanizam ulaska LDL-a u stanicu i njegova daljnja sudbina u stanici. Ubrzo se pokazalo da LDL može biti biološki odstranjen iz krvi i drugim mehanizmom, ulaskom u međustanični prostor u stijenci arterija, odakle se odstranjuje djelovanjem posebnih stanica, makrofaga. Dio LDL-a ostaje u arteriji trajno, sudjelujući zajedno sa stanicama mišićnih vlakana i makrofaga u tvorbi trajnih makroskopskih nakupina – ateroma, ključnog elementa ateroskleroze. Upravo ova spoznaja potaknula je mnoštvo znanstvenika različitih profila na istraživanje svojstava LDL-a, uključujući detalje strukture ovih čestica.



Slika 12- 3: Shematski prikaz presjeka modela LDL-a, u uređenoj fazi (lijevo) i neuređenoj fazi (desno), sačinjen na temelju radijalne raspodjele elektronske gustoće (prikazane na donjem dijelu slike)

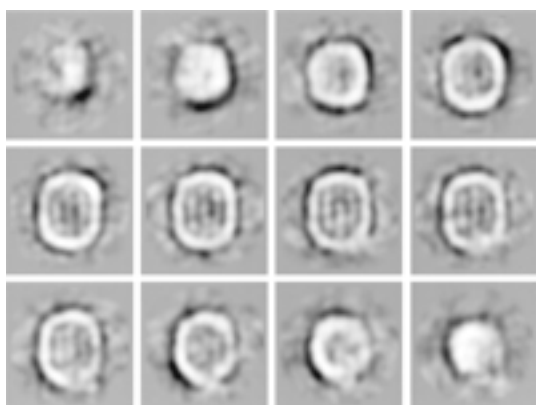
Rezultati istraživanja LDL-a raspršenjem rentgenskih zraka pod malim kutom [1] potvrdili su strukturiranje ovog lipoproteina u skladu s općom slikom, predloženom na slici 12-2. Analiza je pokazala sferičnu raspodjelu elektronske gustoće u čestici. Na temelju toga predložen je i detaljniji model strukture LDL čestice, prikazan na sl. 12-3 (lijeva strana). U međuvremenu se kalorimetrijskim mjerenjima utvrdilo da u LDL-u postoji termotropski fazni prijelaz [2]; LDL mijenja svoju uređenost pri temperaturnom prijelazu na oko 25 °C. Ubrzo nakon toga i pokusi s raspršenjem rentgenskih zraka pod malim kutom potvrdili su postojanje drugačije organizacije unutrašnjosti lipoproteina na temperaturi ispod faznog prijelaza od one na temperaturi iznad faznog prijelaza (fiziološkoj temperaturi), što je ilustrirano na sl. 12-3.

Kada je određena primarna struktura jedinog apoproteina iz sastava LDL-a, apoproteina B, pokušala se analogijom s već poznatim proteinima odrediti njegova



sekundarna struktura [3]. To nije bio nimalo jednostavan posao jer je apoprotein B jedan od najvećih poznatih proteina, sastavljen od 4536 aminokiselina. Iz sekundarne strukture može se računanjem hidrofobičnosti fragmenata u lancu proteina predvidjeti njegov smještaj u LDL čestici, asocijaciju s lipidima te vjerojatna mjesta interakcije s receptorskim proteinom u membrani stanice prilikom njegova ulaska u stanicu. Osim manjih potpuno hidrofilnih ili hidrofobnih segmenata, većina apoproteina ima amfipatična područja, pogodna bilo za tvorbu amfipatičnih uzvojnica (α) ili amfipatičnih motiva u obliku nabranih listova (β). Domene su poredane u nizu NH_2 - $\beta\alpha_1$ - β_1 - α_2 - β_2 - α_3 - COOH . Iz duljine tih domena i njihovih svojstava moglo se pretpostaviti kako je apoprotein B namotan po površini LDL čestice.

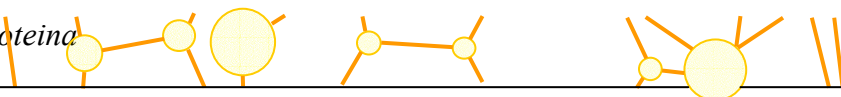
Primjenom elektronske kriomikroskopije potvrđena je relativna raznolikost (nehomogenost) LDL čestica. Od mnoštva mikroskopskih slika odabrano je nekoliko tisuća, za koje se smatralo da bi mogle pripadati istoj podskupini LDL čestica. Na nekima od njih uočene su po tri poprečne pruge u unutrašnjosti čestica, što se dobro vidi na slici 12-4. [4]



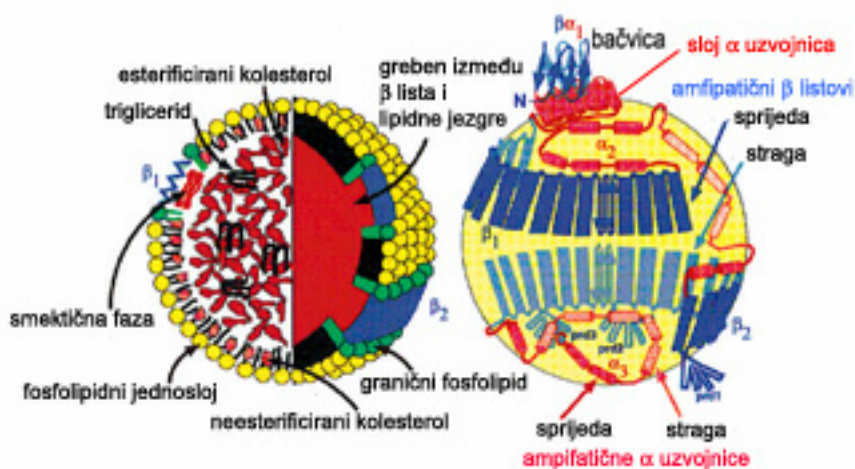
Slika 12-4: Elektronska kriomikroskopska slika nekoliko presjeka LDL-a različitih orijentacija

Ove su slike shvaćene kao različite orijentacije istovrsnih čestica, pa je matematičkom rekonstrukcijom napravljen trodimenzijski model LDL čestice. Iako je slika dosta gruba (razlučivanje oko 2,7 nm), pokazalo se da je ova podskupina čestica elipsoidnog oblika, dimenzija 25 x 21 x 17,5 nm. Nadalje, potvrđena je velika elektronska gustoća u vanjskom omotaču čestice, što je bilo poznato još od prvih pokusa s raspršenjem rentgenskih zraka pod malim kutom. Sasvim je razvidno da na niskim temperaturama lipidna jezgra nije kuglaste simetrije. Pruge veće elektronske gustoće pripisuju se organizaciji esterificiranog kolesterola u smektičkoj fazi. Iz ovih, kriomikroskopskih mjerenja nije moguće ništa pobliže doznati o obliku LDL čestica i organiziranosti kod fiziološke temperature.

Dvije skupine istraživača uspjele su napraviti monokristale LDL čestica. Standardni pokusi raspršenja rentgenskih zraka na kristalu dali su dosta grub difraktogram, koji je omogućio analizu s razlučivanjem od oko 2,7 nm [5]. Rekonstruirana slika dobivena na temelju ovih podataka u osnovnim se crtama podudara s onom dobivenom elektronskom kriomikroskopijom.



Na temelju svega poznatoga sačinjen je trodimenzijski model LDL-a prikazan na sl. 5. [6]



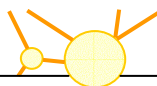
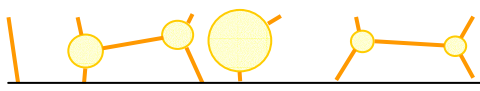
Slika 12-5: Shematski prikaz trodimenzijskog modela LDL-a. Lijeva strana prikazuje očekivanu organizaciju lipida, a desna strana očekivanu organizaciju apoproteina B na površini LDL čestice

Lijeva strana prikazuje organizaciju lipida, uključujući i granično područje između lipida i β_1 lista, područja koje vjerojatno sadrži i nešto esterificiranog kolesterola u smektičkoj fazi čak i kod fiziološke temperature. Desna strana prikazuje organizaciju apoproteina B na površini LDL čestice. Uočava se dio β_{a1} domene u obliku bačvice, tri skupine izvan površine lipoproteina, bogate prolinom (prd), te pojas sastavljen od amfipatičnih α uzvojnica i β listova koji ovija česticu.

Predloženi model sačinjen je 2001. godine. U posljednje četiri godine nema novih rezultata koji bi bitno doprinijeli poboljšanju modela.

Literatura

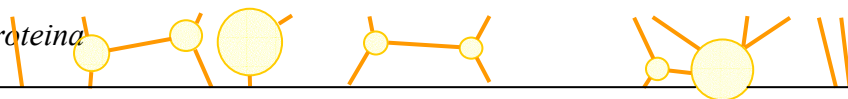
- [1] P. Laggner and K. W. Müller, The structure of serum lipoproteins as analyzed by X-ray small angle scattering, *Q. Rev. Biophys.* 11, 371 (1978).
- [2] R. J. Deckelbaum, G. G. Shipley, D. M. Small, R. S. Lees and P. K. George, Thermal transitions in human low density lipoproteins, *Science* 252, 744 (1977).
- [3] Y. C. Yang, S. H. Chen, S. H. Gianturco, W. A. Bradley, J. T. Sparrow, M. Tanimura, W. H. Li, D. A. Sparrow, H. DeLoof, et al., Sequence, structure, receptor-binding domains and internal repeats of human apolipoprotein B, *Nature* 323, 798 (1986).
- [4] E. W. Orlova, M. B. Sherman, W. Chiu, H. Mowri, L. C. Smith and A. M. Gotto, Jr., Three dimensional structure of low density lipoproteins by electron cryomicroscopy, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 96, 8420 (1999).



[5] V. Y. Lunin, N. L. Lunina, S. Ritter, I. Frey, A. Berg, K. Diederichs, A. D. Podjarny, A. Urzhumtsev and M. W. Baumstark, Low-resolution data for low-density lipoprotein particle, *Acta Cryst.* D57, 101 (2001).

[6] P. Segrest, M. K. Jones, H. De Loof and N. Dashti, Structure of apolipoprotein B-100 in low density lipoproteins, *J. Lipid Res.* 42, 1346 (2001).

12. Fizička organizacija lipoproteina





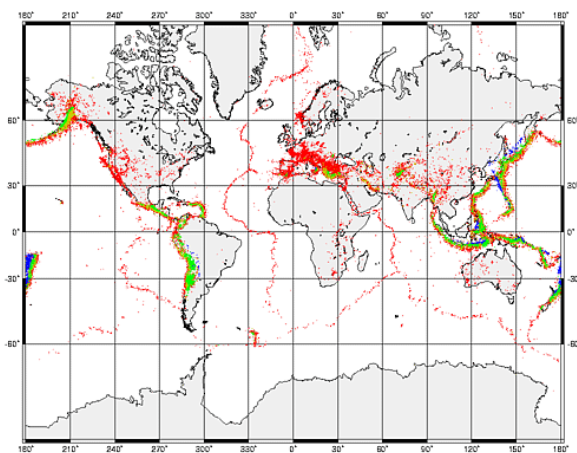
Tsunami – razorni morski val uzrokovan potresom

Snježana Markušić

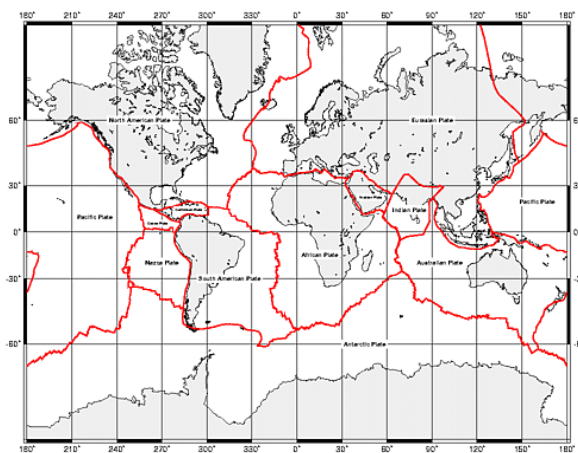
Geofizički odsjek, PMF, Sveuč. u Zagrebu, Horvátovac bb, Zagreb

O globalnoj seizmičnosti

Pod **seizmičnošću** (= seizmička aktivnost) podrazumijevamo prostornu razdiobu potresa u ovisnosti o njihovoj jakosti. Globalna razdioba potresa je prikazana na slici 13-1 (a). Možemo uočiti da Zemlja nije svuda jednako seizmički aktivna, te da se potresi uglavnom dešavaju duž točno određenih linija koje definiraju granice tektonskih ploča (slika 13-1 (b)). Pa tako već samo iz prikaza globalne razdiobe potresa možemo zaključiti da su oni povezani s aktivnom tektonikom ploča. Najveći broj potresa, kao i najjači potresi, vezani su uz dva vrlo uska seizmička područja. Prvi je **cirkumpacifički** seizmički pojas («The Ring of Fire») na kojeg otpada oko 77% ukupne svjetske seizmičnosti. Taj pojas se proteže uz obale Tihog oceana. Drugi je **mediteransko-azijski** seizmički pojas koji obuhvaća oko 18% svjetske seizmičnosti. Proteže se od Kanarskih otoka preko Sredozemlja prema Himalajima, gdje zavija prema jugu preko Sumatre i Jave do Tihog oceana.

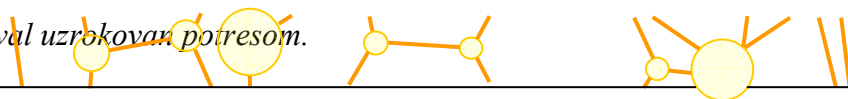


Slika 13-1: (a) Globalna razdoba epicentara potresa.



Slika 13-1: (b) Granice glavnih tektonskih ploča.

Globalnu statistiku potresa izražavamo brojem potresa unutar određenog intervala magnituda koji se dogode tijekom jedne godine (prosjeak!) u svijetu (tablica 13-1.). Također je moguće na isti način promatrati statistiku potresa unutar manjih područja koja nas interesiraju, te na osnovu toga zaključivati o eventualnoj prognozi potresa, kao i probabilističkoj procjeni seizmičke ugroženosti datog područja.



Sam potres je jedna od najneugodnijih prirodnih pojava za čovjeka, a koja se očituje u ljuljanju tla, pri čemu čovjek osjeti da mu prestaje stabilnost uporišta, ili u snažnim trzajima Zemljine kore koji mogu razoriti gotovo sve ljudske tvorevine u određenom području. Kod potresa dolazi do naglog oslobađanja energije u unutrašnjosti Zemlje. Prema uzroku nastajanja i izvoru energije potrese dijelimo na tektonske, vulkanske i urušne. Izvor **tektonskih potresa** su elastičke napetosti u Zemljinoj kori. Potres nastaje onda kada te elastičke napetosti prijeđu granicu elastičnosti materije, pri čemu dolazi do naglog oslobađanja akumulirane elastičke energije. Na tektonske potrese otpada 90% svih potresa. Izvor **vulkanskih potresa** je naglo oslobađanje termokemijske energije iz magme i to kad ona prodire na površinu. No pri tome (erupcija vulkana) se samo malen dio ukupne energije pretvori u mehaničku energiju elastičkih valova. Glavni dio te energije je potreban za dizanje masa iz unutrašnjosti ili pak prijeđe u atmosferu. Prema tome vulkanski potresi nisu snažni, a pomaci tla su im reda veličine onih kod velikih eksplozija. Na vulkanske potrese otpada 7% svih potresa. **Urušni potresi** nastaju prilikom urušavanja šupljina u Zemljinoj kori, koje nastaju djelovanjem vode na materije topive u vodi. Izvor energije im potječe od polja sile teže, tako da kod urušavanja naglo opadne potencijalna energija postojeće raspodjele masa. Energija tih potresa je jako mala i analogna oslobođenoj energiji prilikom pada meteorita. Na urušne potrese otpada 3% svih potresa.

Tablica 13-1: Globalna čestina potresa od 1900. godine.

Opis	Magnituda	Godišnji prosjek
Ogroman	>8	1
Velik	7–7.9	18
Jak	6–6.9	120
Umjeren	5–5.9	800
Slab	4–4.9	6,200
Malen	3–3.9	49,000
Vrlo slab	2–3	1,000 ¹
Vrlo malen	1–2	8,000 ¹

¹ Dnevno

O valovima u moru

Valovi u moru predstavljaju periodičku deformaciju granične površine. Površinski valovi se javljaju na granici atmosfera-more, dok se u moru još javljaju i **unutarnji valovi** koji nastaju na granicama različitih slojeva u moru. Osim toga,



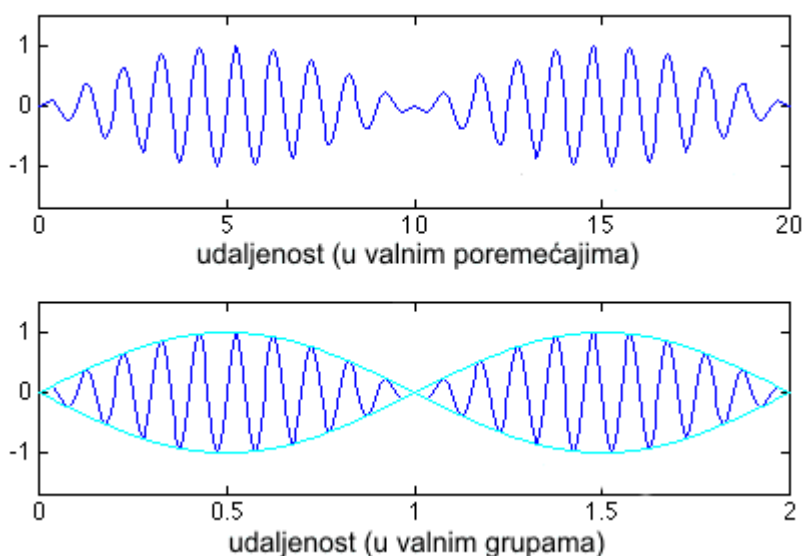
unutarnji i površinski valovi mogu se javljati na otvorenom oceanu, kao i zbog postojanja prostornih promjena u topografiji mora – tzv. **rubni valovi**.



Slika 13-2: Grafički prikaz vala u moru.

Valovi se gibaju određenom valnom brzinom, dok čestice u moru opisuju periodičko gibanje te se vraćaju na početni položaj tijekom jednog ciklusa. Kako vidimo na slici 13-2. valna visina je promjena u visini između brijega i dola vala, te iznosi dvije valne amplitude. Valna duljina pak je udaljenost između dva susjedna brijega ili dola vala, dok se period vala definira kao vrijeme potrebno da dva susjedna brijega ili dola vala prođu neku čvrstu točku. Broj brijegova ili dolova vala koji prođu pokraj čvrste točke u jedinici vremena predstavlja frekvenciju vala.

Valovi mogu biti progresivni, što znači da se njihova energija giba u određenom smjeru, ili stojni valovi koji predstavljaju dva progresivna vala koji se gibaju u suprotnim smjerovima. Primjer progresivnog vala su **plimni valovi**, dok su **slobodne oscilacije** - seši primjeri stojnih valova u moru.



Slika 13-3: Superpozicija dvaju valova slične valne duljine ima za posljedicu gibanje njihove ovojnice grupnom brzinom.

Sila uzročnica nastanka valova u moru može biti periodička i neperiodička, pa stoga razlikujemo valove uzrokovane plimotvornom silom - plimni valovi, valove uzrokovane vremenskim promjenama topografije dna - **tsunamiji**, te valove uzrokovane atmosferskim djelovanjem na površini mora - **površinski valovi uzrokovani vjetrom**, seši i drugi. Osim toga, na kraćim valnim duljinama (manjim od 1.7 cm) javljaju se kapilarni valovi, koji su pokretani (relaksirani) silom napetosti površine mora. Na kraju, činjenica da je Zemlja rotirajući elipsoid uzrokuje i pojavu

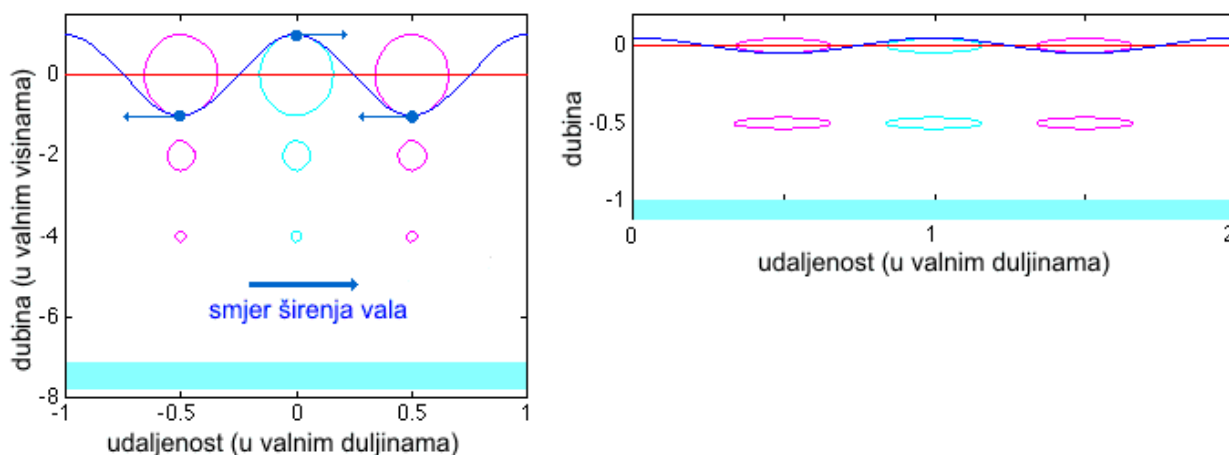


inercijalnih oscilacija i **Rossbyjevih valova**, koji se mogu manifestirati kao površinski ili unutarnji valovi.

Superpozicija više valnih poremećaja koji se gibaju u istom smjeru predstavlja valnu grupu ili valni paket. Pojedinačni valovi u valnoj grupi gibaju se valnom brzinom c , dok valna grupa c_g putuje brzinom:

$$c_g = c - \lambda \frac{dc}{d\lambda} = \frac{d\omega}{dk}, \quad \omega = \frac{2\pi}{T}, \quad k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

gdje je λ valna duljina, ω kružna frekvencija, k valni broj, te T period vala. U moru je za većinu valova valna brzina proporcionalna valnoj duljini, odnosno dulji valovi se brže gibaju i obrnuto. Stoga je grupna brzina manja od pojedinačne brzine valova koji sačinjavaju grupu (slika 13-3.). Energija valnog poremećaja se giba grupnom brzinom, a skupina valova kod kojih se razlikuju valna i grupna brzina nazivaju se disperzivni valovi.



Slika 13-4: Gibanje čestica mora kod kratkoperiodičkih (lijevo) i dugoperiodičkih (desno) valova.

Naposljetku, valove dijelimo na **valove dubokog mora**, za koje vrijedi da je valna duljina mnogo manja od dubine mora, te na **valove plitkog mora**, za koje je dubina mora bitno manja od valne duljine valnog poremećaja (slika 13-4.). Primjeri valova dubokog mora su **površinski valovi uzrokovani vjetrom**, dok su **tsunami** predstavnici valova plitkog mora.

Što uzrokuje pojavljivanje potresnih valova – tsunamija?

Tsunami su **dugi valovi** uzrokovani tektonskim pomicanjem ploča morskog dna, odnosno podmorskim potresima. Naziv potječe iz japanskog jezika (tsuo-NAH-mee) te znači "val u luci". Često ih se pogrešno naziva **plimnim valovima**, no nemaju nikakve veze s plimnim oscilacijama.



Uzroci nastajanja tsunamija su: potresi (više od 80% slučajeva), odroni (npr. Aljaska, 1958.), vulkanske erupcije (npr. Krakatau, 1883.), eksplozije (npr. Halifax, 1917.) i udari meteorita (npr. Karibi, prije oko $65 \cdot 10^6$ godina).

Najrazorniji poznati tsunami u povijesti je bio uzrokovan erupcijom vulkana Krakatau na Sundskim otocima 1883. godine. Najviša zabilježena visina vala tada je iznosila 35 m, dok se broj žrtava popeo na 36830. Osim toga, na Pacifiku su zabilježena 4 tsunamija viša od 30 m u razdoblju nakon 684. godine.

Dugi valovi putuju brzinom c koja iznosi:

$$c = \sqrt{gH}$$

gdje je g ubrzanje sile teže, a H dubina mora. Iz navedenoga vidimo da je brzina širenja tsunamija ovisna samo o dubini oceana. Lako je izračunati da će brzina c , za prosječnu dubinu mora od 4000 m, iznositi približno 200 m/s, što je oko 700 km/h.

Kako uobičajeni periodi tsunamija (T) iznose od 10 do 100 minuta, a ovise o prostorno-vremenskim karakteristikama pomicanja morskog dna u zoni epicentra, tako možemo izračunati da će uobičajene duljine valnih dužina ($\lambda = c \cdot T$) biti od 100 do 1000 km.

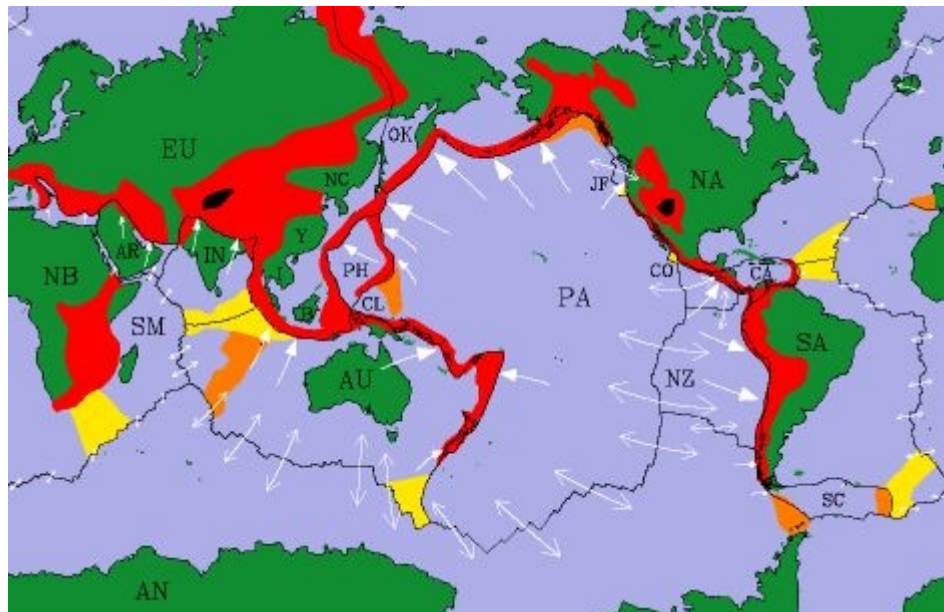
U blizini epicentra visina potresnih valova može biti izuzetno visoka. S udaljavanjem od epicentra, te prilikom putovanja u dubokim oceanskim zaravnima, tsunami ima male amplitude no putuje, kako je već navedeno, velikim brzinama. Približavajući se obali, oni se usporavaju te se, zbog **sačuvanja mase**, uzdižu ovisno o smanjenju dubine mora. Dolaskom na obalu njihove visine mogu poprimiti izvanredne vrijednosti od nekoliko desetaka metara.

Postoji još jedna važna činjenica vezana uz tsunamije, a to je brzina kojom ti valovi gube energiju. Općenito vrijedi da je brzina opadanja energije vala obrnuto proporcionalna njegovoj valnoj dužini. Tako proizlazi, da tsunami može dugo putovati vrlo velikom brzinom, a da pri tome izgubi jako malo energije, što samo pridonosi njegovoj razornosti.

26. prosinca 2004. – potres u Indijskom oceanu (Sumatra – Andaman otočje)

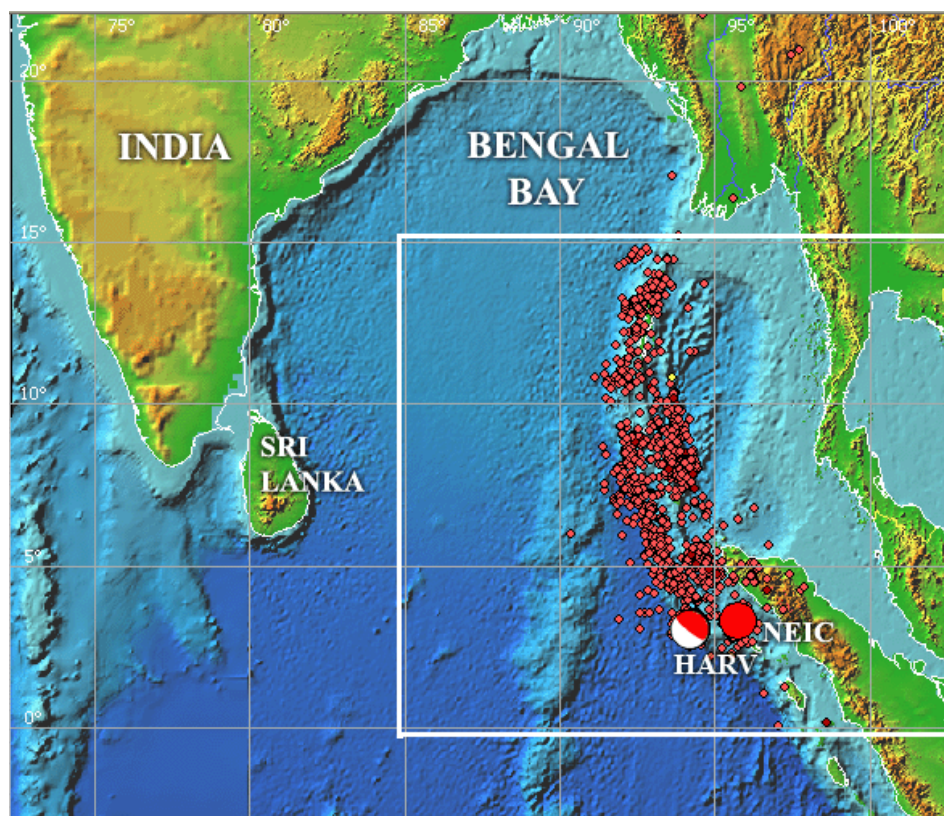
Zemljinu vanjsku ljusku čini 15 glavnih krutih ploča, debljine oko 100 km. Ploče se gibaju relativno jedna prema drugoj, brzinom od nekoliko centimetara na godinu (otprilike brzina rasta noktiju). Ploče su krute u smislu da unutar njih dolazi do vrlo malih deformacija (idealno bi bilo da ih uopće nema) dok se glavnina (idealno bi bilo da sva) deformacije dešava na granicama ploča, izazivajući potrese, formiranje planina, vulkanizme,... Tip granica i deformacija unutar ploča ovise o smjeru i brzini gibanja, kao i o termalno-mehaničkoj strukturi samih ploča.

Na slici 13-5. možemo vidjeti da se Indijska (IN) i Australijska (AU) ploča gibaju prema sjeveru i sjeveroistoku, te se sudaraju s Euroazijskom (EU). To gibanje Indije prema sjeveru deformira cijelo područje, pa se pojavljuje mnoštvo malih ploča (mikroploče) i blokova.



Slika 13-5: Smjerovi gibanja velikih tektonskih ploča

(preuzeto iz R.G. Gordon and S. Stein, *Global tectonics and space geodesy*, *Science* **256**, 333-342 (1992)).



Slika 13-6: Lokacija epicentara potresa u Indijskom oceanu od 26.12.2004. Veliki krug pokazuje položaj epicentra glavnog potresa prema NEIC i HARV, a mali kružići lokacije epicentara naknadnih potresa koji su se dogodili unutar prvih mjesec dana nakon glavnog

(preuzeto s <http://tsun.sssc.ru/tsulab/20041226.htm>)

Indija se podvlači pod Burmansku mikroploču brzinom od oko 5 cm na godinu. Tamo se glavina potresa događa na dodiru ploča duž luka Sumatre (zona podvlačenja je nazvana Sunda brazda). Dana 26. prosinca 2004. upravo se na Sunda brazdi, oko 150 km od zapadne obale sjeverne Sumatre, dogodio izuzetno jaki potres, magnitude 9.0.



Na slici 13-6. dana je prostorna razdioba dijela naknadnih potresa, uključujući i položaj epicentra glavnog potresa.



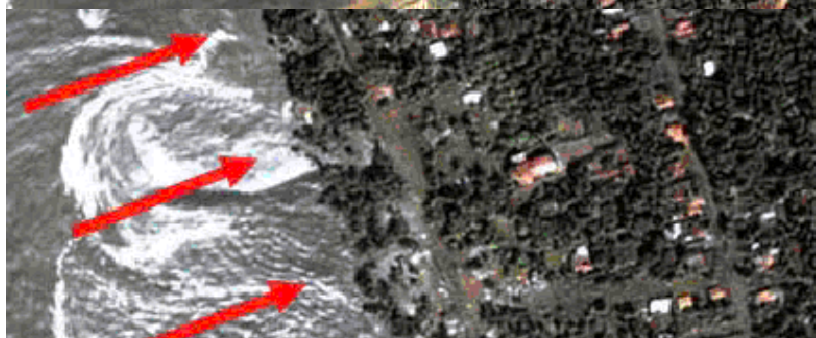
Slika 13-7: Satelitska snimka obalnog područja Kalutare (Šri Lanka) prije potresa od 26.12.2004.

(DigitalGlobe Quickbird satellite)



Slika 13-8: Iznenadno povlačenje vode prije udara tsunamija.

(DigitalGlobe Quickbird satellite)

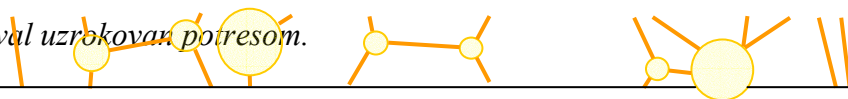


Slika 13-9: Nailazak tsunamija.

(DigitalGlobe Quickbird satellite)

Navedeni potres je jedan od najjačih koji su se dogodili od kad postoji instrumentalna registracija. Točnije, ovo je četvrti najjači potres u svijetu od 1900. i najjači poslije potresa koji se 1964. dogodio na Aljasci ($M=9.2$). Ukupno je poginulo više od 283100 ljudi, 14100 ih se još smatra nestalima, a više od 1500000 je ostalo bez krova nad glavom u 11 zemalja Južne Azije i Istočne Afrike. Potres je uzrokovao znatne štete i gubitke u području sjeverne Sumatre, Indonezije, te otočja Nicobar.

Tsunami, koji je nastao kao posljedica ovog potresa, uzrokovao je više šteta i gubitaka ljudskih života od ijednog do sada instrumentalno zabilježenog potresa i to u čak 18 država koje graniče s Indijskim oceanom, te je bio registriran na gotovo svim svjetskim postajama u Pacifiku, te Indijskom i Atlantskom oceanu. U blizini sjeverne Sumatre izmjerena je visina vala od 10.5 m, a na plimnoj postaji Manzanillo u Mexicu registriran je val visine 2.6 m. Val je za 2-3 sata došao do Indije, za 3 sata do Šri Lanke, a za 7 sati prevalio je udaljenost od 4500 km i došao do obala Somalije.



Razorne posljedice tsunamija, u smislu gubitaka ljudstva, mogu se spriječiti, ili bar ublažiti, dobro organiziranom mrežom motrenja i obavješćivanja. Međutim, za područje Indijskog oceana ne postoji organizirani sustav obavješćivanja i upozoravanja na tsunamije, kao što takav sustav postoji za Pacifik (sjedište u Honolulu). Tako većina zemalja koje je tsunami poharao nema organizirane ni službe motrenja. Na slici 13-7. je satelitska snimka obalnog dijela Kalutare (Šri Lanka) prije potresa. Jedini znak prije nego što je tsunami udario je bilo iznenadno povlačenje vode ostavljajući stotine metara plaže bez vode (slika 13-8.). Nakon toga do obale Kalutare je došlo nekoliko valova tsunamija u intervalima od 5 do 40 minuta. Voda je prodrla u kopno dublje od 1 km, prouzročivši strašne štete (slika 13-9.).



Slika 13-10: Fotografija nepoznatog autora - nailazak tsunamija (Phuket, Tajland).

Dakle, možemo zaključiti da jedini pouzdani znak da sigurno dolazi tsunami je kada se voda u zaljevima, lukama i plažama iznenada povuče, ostavljajući ribe i brodove na suhom. Kada se to dogodi, možete biti sigurni da će udar tsunamija uslijediti bilo kada u narednih 5 do 30 minuta. U tom trenutku najbitnije je skloniti se što dalje od obale, jer udar tsunamija je strašniji i razorniji nego što možete i zamisliti. To je vidljivo i iz fotografije prikazane na slici 13-10. na kojoj je, sa obližnjeg nebodera, snimljen nailazak tsunamija na obalu grada Phuketa, Tajland. Obratite pažnju na visinu vala u odnosu na visine zgrada.