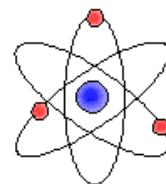




20. ljetna škola mladih fizičara
Hrvatskog fizikalnog društva



"Ususret Svjetskoj godini fizike 2005."

Vela Luka, 20.-26. lipnja 2004.



ZBORNIK PREDAVANJA

(Internetsko izdanje)

priredio M. Požek

Hrvatsko fizikalno društvo
Zagreb, lipanj 2004.

ISBN 953-7178-01-3

Izdavač: Hrvatsko fizikalno društvo
www.hfd.hr

Mjesto izdanja: Zagreb, lipanj 2004.

Za izdavača: Ana Zidić

Urednik: Prof. dr. sc. Miroslav Požek

Tehničko uređenje i korektura: Miroslav Požek

Predgovor

Pred Vama je zbornik predavanja na jubilarnoj, dvadesetoj, ljetnoj školi Hrvatskoga fizikalnog društva. Bliži se velika godina za fizičare cijeloga svijeta. UNESCO je podržao inicijativu Europskog fizikalnog društva (EPS) i Međunarodne unije za čistu i primijenjenu fiziku (IUPAP) da se 2005. godina proglasi Svjetskom godinom fizike. Stoga je tome posvećena i središnja tema ovogodišnje ljetne škole. U dvije radionice s polaznicima Škole i jednom predavanju pokušat ćemo dati svoje ideje i doprinos svjetskim nastojanjima da se fizika približi nefizičarima, da se popularizira i da se ukaže na njezinu nezaobilaznu ulogu u suvremenom razvoju.

Svijest o potrebi popularizacije fizike nije od jučer. U Hrvatskom fizikalnom društvu ona postoji od samih početaka organiziranja i seže u razdoblje Saveza matematičara i fizičara Hrvatske. Važna karika u tom procesu jest organizacija natjecanja iz fizike za učenike osnovnih i srednjih škola, izdavanje Matematičko-fizičkog lista, a prije dvadeset godina pokrenuta je i Ljetna škola kao nagrada i poticaj najboljim učenicima da prošire svoja znanja iz fizike. Budući da slavimo jubilej, logično je bilo pozvati prve organizatore i dugogodišnje voditelje Ljetne škole. Oni su mnogim predavačima omogućili da svoja znanja prenesu učenicima, a ovaj put im dajemo priliku da i oni predstave svoja područja istraživanja i znanstvena razmišljanja.

Teme predavanja su raznovrsne. Uz već spomenute, osvrnut ćemo se na prošlogodišnju Nobelovu nagradu iz fizike, imat ćemo predavanja iz astrofizike, atomske i molekularne fizike, i pokazati kako se fizika primjenjuje u najrazličitijim područjima znanosti i istraživanja.

Aktivno sudjelovanje učenika osigurat će se kroz dvije radionice, dva praktikuma (detekcija miona i spektralna analiza Sunčeve svjetlosti) i rješavanje niza problemskih zadataka.

Ovogodišnji zbornik tiskan je prvi put kao knjiga i objavljen na Internetu kao službena publikacija Hrvatskog fizikalnog društva, zavedena u Nacionalnoj i sveučilišnoj knjižnici, s pridijeljenim ISBN brojem. Na taj način ostat će trajan dokument, a vjerujem da svojim sadržajem to i opravdava.

Ovom prigodom želim zahvaliti svim suorganizatorima, sponzorima i donatorima, a posebnu zahvalu upućujem Srednjoj školi Vela Luka i njezinu ravnatelju Tončiju Andreisu bez čije bi se pomoći cijela škola teško mogla zamisliti.

Svim učenicima, nastavnicima i predavačima želim uspješno sudjelovanje na Ljetnoj školi te ugodan, zanimljiv i poučan boravak u Veloj Luci.

Miroslav Požek

Organizator:

Hrvatsko fizikalno društvo

Organizacijski odbor:

Prof. dr. sc. Damir Bosnar
Mladen Buljubašić, prof.
Prof. dr. Laszlo Forro
Dr. sc. Davor Kirin
Dr. sc. Marina Kveder
Prof. dr. Stjepan Marčelja
Prof. dr. sc. Ivica Picik
Prof. dr. sc. Miroslav Požek, **voditelj**
Dr. sc. Ana Smontara
Dr. sc. Eduard Tutiš

Suorganizatori:

Ministarstvo znanosti, obrazovanja i sporta
Prirodoslovno-matematički fakultet Sveučilišta u Zagrebu
Institut "Ruđer Bošković", Zagreb
Institut za fiziku, Zagreb
Fakultet prirodoslovno-matematičkih znanosti i odgojnih područja Sveučilišta u Splitu
Institut de physique de la matiere complexe, Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, Švicarska

Sponzori:

Gradski ured za obrazovanje i šport Grada Zagreba
Dalekovod d.d., Zagreb
KONČAR – Distributivni i specijalni transformatori d.d., Zagreb
Općina Vela Luka
Srednja škola Vela Luka
Lura d.d. (osvježanje u stankama)



Donatori:

Dr. sc. Eduard Tutiš, Zagreb

Program predavanja i sadržaj zbornika

Nedjelja, 20. lipnja 2004.

Dolazak i smještaj sudionika

Ponedjeljak, 21. lipnja 2004.

str.

A. Bjeliš (PMF Zagreb)	Protjecanja i vrtloženja	1-1
A. Smontara (IF Zagreb) i A. Bilušić (PMF Split)	Što su i kako se istražuju termoelektrični materijali?	2-1
S. Barišić (PMF Zagreb)	Supravodljivost i suprafluidnost - uz Nobelovu nagradu za fiziku 2003. g	3-1
Poslijepodne:	radionica "Svjetska godina fizike u mojoj školi"	

Utorak, 22. lipnja 2004.

Hrvoje Štefančić (IRB Zagreb)	Problem tamne energije - što uzrokuje današnje ubrzano širenje svemira?	4-1
Matko Milin (IRB Zagreb)	Nuklearni procesi u zvijezdama i ranom svemiru	5-1
Damir Bosnar (PMF Zagreb)	Što nam to dolazi iz svemira?	6-1
Poslijepodne:	praktikum " Detekcija kozmičkih miona i mjerenje vremena njihova života "	

Srijeda, 23. lipnja 2004.

IZLET

Četvrtak, 24. lipnja 2004.

Irena Labazan (IF Zagreb)	Atomska i molekulska fizika - od fundamentalnih istraživanja do primjene u svakodnevnom životu	7-1
Slobodan Milošević (IF Zagreb)	2005. – Svjetska godina fizike	8-1
Poslijepodne:	praktikum "Analizirajmo Sunčev spektar"	

Petak, 25. lipnja 2004.

S. Marčelja (IRB Zagreb)	Od oka do svijesti - kako radi naš vizualni sustav?	9-1
S. Mitrović (EPFL Lausanne)	Sinkrotronsko svjetlo - moćna proba materije	10-1
B. Lukić (EPFL Lausanne)	Eksperimenti s optičkom pincetom	11-1
Poslijepodne:	radionica "Svjetska godina fizike u mojoj školi"	

Subota, 26. lipnja 2004.

Odlazak sudionika

POZVANI UČENICI NA LJETNU ŠKOLU FIZIKE 2004.

	<i>učenik</i>	<i>škola</i>	<i>mjesto</i>	<i>kategorija</i>
	Damir Mulc	OŠ Š.K.Benje	Zadar	Grupa OŠ
	Karlo Radman (<i>odustao</i>)	OŠ Ivana Zajca	Rijeka	Grupa OŠ
	Luka Štambuk	OŠ Trstenik	Split	Grupa OŠ
	Vanja Vargek	OŠ Šenkovec	Šenkovec	Grupa OŠ
	Branimir Žarković (<i>odustao</i>)	OŠ A. Šenoe	Zagreb	OŠ exp.
	Slaven Gojković	XI. OŠ	Slavonski Brod	OŠ exp.
	Nikolina Halusek	OŠ. Kloštar Podravski	Kloštar Podravski	OŠ exp.
	Patrick Ružman	OŠ. Kloštar Podravski	Kloštar Podravski	OŠ exp.
	Nikolina Artić	OŠ A. Cesarca	Krapina	MFL
	Igor Telalović	Gimnazija L. Vranjanina	Zagreb	I. grupa
	Petar Sirković	V. gimnazija	Zagreb	I. grupa
	Mijo Tvrdogević	Gimnazija M. Mesića	Slavonski Brod	I. grupa
	Bojan Miklenić	XV. gimnazija	Zagreb	I. grupa
	Ivor Kovačević	XV. gimnazija	Zagreb	I. grupa
	Vedran Sabadoš	T.Š. R. Boškovića	Zagreb	II. grupa
	Marko Popović	V. gimnazija	Zagreb	II. grupa
	Boran Car	3. gimnazija	Split	II. grupa
	Marija Mustać	Gimnazija F. Petrića	Zadar	II. grupa
	Dino Kovačić	XV. gimnazija	Zagreb	II. grupa
	Antonio Majdandžić (<i>odustao</i>)	Gimnazija F. Petrića	Zadar	III. grupa
	Andelo Martinović (<i>odustao</i>)	Zadarska priv. gimnazija	Zadar	III. grupa
	Filip Kos (<i>odustao</i>)	XV. gimnazija	Zagreb	III. grupa
	Bruno Klajn (<i>odustao</i>)	V. gimnazija	Zagreb	III. grupa
	Alen Karabegović	V. gimnazija	Zagreb	III. grupa
	Aleksandar Prokopec	V. gimnazija	Zagreb	IV. grupa
	Krunoslav Zaher (<i>odustao</i>)	Tehnička škola	Karlovac	IV. grupa
	Ivan Vulić (<i>odustao</i>)	Gimnazija F. Petrića	Zadar	IV. grupa
	Dunja Bjelobrk	Gimnazija L. Vranjanina	Zagreb	IV. grupa
	Nastasija Grubić (<i>odustala</i>)	3. gimnazija	Split	IV. grupa
	Kristian Hengster-Movrić	XV. gimnazija	Zagreb	IV. grupa
	Tihomir Knežević	Gimnazija M. Mesića	Slavonski Brod	SŠ exp.
	Anamarija Mišković	Gimnazija M. Mesića	Slavonski Brod	SŠ exp.
	Domagoj Hrgić	Gimnazija M. Mesića	Slavonski Brod	SŠ exp.
	Dunja Vuksan	Gimnazija M. Mesića	Slavonski Brod	SŠ exp.
	Dražen Mrvoš	V. gimnazija	Zagreb	SŠ exp.
	Dalibor Mucko	V. gimnazija	Zagreb	SŠ exp.
	Marko Habunek	Elektro-strojarska škola	Varaždin	SŠ exp.
	Luka Ilić Buljan	Elektro-strojarska škola	Varaždin	SŠ exp.
	Jasna Šibalin	Hrvatska gimnazija	Budimpešta	Med. Sur.
	Milan Šibalin	Hrvatska gimnazija	Budimpešta	Med. Sur.
	Dušan Horvat	Hrvatska gimnazija	Budimpešta	Med. Sur.
	Goran Radanović	3. gimnazija	Split	III. grupa
	Hrvoje Kaluđer	Gimnazija L. Vranjanina	Zagreb	III. grupa
	Neven Šantić	Gimnazija L. Vranjanina	Zagreb	III. grupa
	Hrvoje Ribčić (<i>odustao</i>)	XV. gimnazija	Zagreb	III. grupa
	Ivan Domladovec	OŠ M. Gupca	Zagreb	Grupa OŠ
	Danijel Cmrk	Gimnazija "Fran Galović"	Koprivnica	IV. grupa
	Drago Ružman	Gimnazija "Fran Galović"	Koprivnica	IV. grupa
	Daniel Miočić	Gimnazija F. Petrića	Zadar	
	Marija Pekas	Gimnazija A. Vrančića	Šibenik	MFL
	Mišo Bratković	Elektro-strojarska škola	Varaždin	SŠ exp.
	Jan Nypl	OŠ Vela Luka	Vela Luka	OŠ exp.

Studenti u pratnji:
 Andrej Ficnar, Zagreb
 Goran Nikšić, Zagreb

Nastavnici u pratnji:
 Ivan Brzović, Mali Lošinj (*odustao*)
 Marina Gojković, Slavonski Brod
 Terezija Haklić-Hegeduš, Budimpešta (*odustala*)
 Mario Jerkić, Budimpešta

PROTJECANJA I VRTLOŽENJA

Aleksa Bjeliš¹

Fizički odsjek Prirodoslovno-matematičkog fakulteta, Sveučilište u Zagrebu,
Zagreb, Bijenička 32

Teorijske postavke

Do strujanja u fluidu (tekućini, plinu, ...) dolazi kada su pojedini njegovi dijelovi podvrgnuti različitim silama, što se najčešće izražava vektorom usmjerenim duž smjera promjene tlaka zvanim *gradijentom* tlaka, ∇p , gdje je ∇ simbol za vektorsku derivaciju. Na pojedine male djeliće fluida («kapljice») djeluju konačne vanjske sile pa se, u skladu s Newtonovim zakonom, oni ubrzavaju. Međutim u fizici fluida najčešće se ne pitamo kako se giba pojedina kapljica, već kako izgleda protjecanje, pobliže, kako se brzina fluida u danoj točki prostora mijenja u vremenu. Zanima nas dakle funkcija $\mathbf{v}(\mathbf{r}, t)$.² Ubrzanje fluida u izabranoj točki prostora $\mathbf{r}$ ima dva doprinosa: onaj koji dolazi od ubrzanja kapljice koja se u taj čas nalazi u točki $\mathbf{r}$, $\partial \mathbf{v} / \partial t$, i onaj čije je porijeklo u različitim brzinama dane kapljice i njoj susjednih, $(\mathbf{v} \nabla) \mathbf{v}$.

Fluidi u kojima pratimo protjecanja čine nam se neprekinutima. Za njihov opis dovoljno je pretpostaviti da su nam zamišljene «kapljice» dovoljno male da se svakoj od njih može pripisati jedinstvena brzina i da je mijenjanje brzine od kapi do kapi neprekinuta (kontinuirana) funkcija prostora i vremena. Dok je za praćenje protjecanja u šalici čaja dovoljno uzeti «kapljice» koje nisu veće od recimo kubičnog milimetra, za strujanja oceanskih vodenih masa ili za atmosferska zračna strujanja «kapljice» najčešće ne moraju biti manje od kubičnog kilometra.

Očigledno da uz takvu proizvoljnost u izboru veličina «kapljice» ne možemo očekivati kako ćemo u matematičkim jednadžbama za protjecanja moći u potpunosti uzeti u obzir potankosti u opisu međumolekularnih sila koje djeluju između «kapljica». Hidrodinamika kao teorija koja fluide tretira kao *klasične kontinuume* niti nema takav cilj. Ipak, da bi se dostigla dovoljna realističnost opisa strujanja na prostornim razmacima (*skalama*) koje su znatno veće od skale molekularne građe fluida, potrebno je uzeti u obzir da relativna gibanja susjednih kapljica utječu i na gibanja molekula u njima. Analogno gubicima energije zbog sila trenja kod relativnih gibanja krutina u dodiru, i ovdje se javljaju gubici energije zbog «unutrašnjeg trenja» među slojevima fluida koji se jedan spram drugog gibaju, tj. zbog konačne *viskoznosti* fluida. Odgovarajući doprinos u izrazu za ubrzanje je razmjernan drugim prostornim derivacijama brzine $\mathbf{v}(\mathbf{r})$, tako da sveukupno dolazimo do Navier-Stokesove jednadžbe,

$$\rho \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \rho (\mathbf{v} \nabla) \mathbf{v} = -\nabla p + \rho \nu \nabla^2 \mathbf{v}, \quad (1)$$

kojom se u prvoj polovici XIX. stoljeća udario temelj za teoriju protjecanja fluida. Ovdje je ρ gustoća mase fluida za koju smo pretpostavili da je konstantna (što je svojstvo *nestišljivih*

¹ bjeliš@phy.hr

² U cijelom su tekstu vektorske veličine označene masnim slovima, a skalarne kurzivom.

fluida), dok je ν koeficijent viskoznosti. U granici $\nu \rightarrow 0$ jednačba (1) svodi se na stariju Eulerovu jednačbu (1755.) za idealne fluide bez viskoznosti.

Raspad uređenih protjecanja na neuređena (termička) gibanja molekula

Mjerimo li prostorne udaljenosti i brzinu protjecanja karakterističnom veličinom sustava (l) u kojem fluid teče (npr. širinom cijevi, veličinom zapreke, itd.) i karakterističnom *ulaznom* brzinom (u) fluida na rubovima (npr. brzinom koju fluid ima na ulazu u cijev, ili daleko od zapreke), pokazuje se da je, uz dane geometrijske karakteristike sustava, u Navier-Stokesovoj jednačbi prisutan samo jedan bezdimenzionalni parametar zvan Reynoldsov broj, $R \equiv ul / \nu$. Pojedina rješenja te jednačbe imaju stoga općenito oblik $\mathbf{v}(\mathbf{r}, t) = u \mathbf{f}(\mathbf{r}/l, t, R)$.

Kontinuiranim mijenjanjem parametra R proći ćemo kroz sva moguća protjecanja koja se u fluidu mogu pojaviti. Za fluide koji mogu imati jako različita svojstva viskoznosti, ili različite ulazne brzine, ili različite prostorne dimenzije, vrijedi dakle *zakon sličnosti* po kojem će se u njima javljati istovjetna strujanja ako su im Reynoldsovi brojevi jednaki.

S druge strane, tijekom svakog protjecanja fluida kod kojeg dolazi do trenja među susjednim slojevima dio kinetičke energije zbog gibanja «kapljica» se gubi tako da se pretvara u nasumična molekularna (tj. toplinska) gibanja. Brzina promjene kinetičke energije, tj. pretvaranja uređene kinetičke energije u neuređenu (toplinsku), razmjerna je izrazu

$$\frac{1}{R} \left\langle \sum_{i,j=x,y,z} \left(\frac{\partial f_i}{\partial \tilde{r}_j} + \frac{\partial f_j}{\partial \tilde{r}_i} \right)^2 \right\rangle \quad (2)$$

u kojem je $\tilde{r} \equiv \mathbf{r}/l$, dok $\langle \dots \rangle$ zagrada označava usrednjenje preko prostora. Derivacije $\partial f_i / \partial \tilde{r}_j$ imaju jednostavnu interpretaciju: one su mjera promjene i -te komponente reducirane brzine $\mathbf{f} = \mathbf{v}/u$ u j -tom smjeru.

Uočimo sada kako u fluidu dane viskoznosti Reynoldsov broj raste s porastom karakteristične brzine (a to znači i karakteristične kinetičke energije) zbog uređenog gibanja kapljica u makroskopskom protjecanju. Bržim gibanjem fluida sve će se više uređene kinetičke energije pretvarati u neuređenu, tj. pozitivan izraz (2) će rasti. To pak znači da usrednjena veličina u tom izrazu mora rasti brže od Reynoldsova broja u nazivniku. Taj izraz može rasti samo ako derivacije $\partial f_i / \partial \tilde{r}_j$ rastu, tj. ako se protjecanje organizira tako da razlike brzina susjednih kapljica bivaju sve veće i veće.

Prisjetimo se da, kako smo već istakli, ovaj zaključak mora vrijediti za široki raspon veličina kapljica, tj. da povećanje relativnih brzina mora biti prisutno u širokom rasponu skala, ograničenih jedino zahtjevom da su one dovoljno velike u usporedbi s molekularnim skalama i dovoljno male u usporedbi s veličinom cijelog sustava u kojem pratimo protjecanje. Ovaj jednostavni način zaključivanja dovodi nas do grubog razumijevanja pojave koju redovito uočavamo kad promatramo nemirne (turbulentne) tokove; do vrludavog gibanja djelića (kapljica) fluida na svim skalama na kojima pratimo njegovo protjecanje.

Prijelaz s «mirnih» (laminarnih) na «nemirna» (turbulentna) protjecanja

Iskustvo nam kazuje kako je za dovoljno male Reynoldsove brojeve protjecanje fluida «mirno» (laminarno), takvo da je u svakoj točki prostora brzina nepromjenljiva u vremenu, $\mathbf{v}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{v}(\mathbf{r})$. Turbulentno protjecanje se pak javlja kada Reynoldsov broj premaši neku kritičnu vrijednost između 100 i 1000, ovisno o geometrijskim detaljima sustava. Središnje i jedno od najtežih općenitih pitanja koje se provlači kroz povijest teorije fluida i klasične fizike je: kroz kakva sve protjecanja fluid prolazi «na putu» od laminarnog na turbulentno protjecanje?

Da bi se na ovo pitanje moglo odgovoriti treba ispitivati stabilnost pojedinih rješenja Navier-Stokesove jednadžbe (2). Metodu analize stabilnosti razvili su Landau i Hopf pedesetih godina 20. stoljeća. Početno pitanje je: Kako laminarno rješenje prestaje biti stabilno povećavanjem Reynoldsova broja? Pokazuje se da ga za R veći od neke kritične vrijednosti R_1 nadomještava rješenje u kojem je u svakoj točki fluida brzina periodička funkcija vremena s kružnom frekvencijom ω_1 (i periodom $2\pi/\omega_1$) koja ovisi o Reynoldsovu broju, $\mathbf{v}(\mathbf{r}, t + 2\pi/\omega_1) = \mathbf{v}(\mathbf{r}, t)$. Spektar takvog protjecanja zadan je vršcima na temeljnoj frekvenciji ω_1 i njezinim višim harmonicima, $N_1 \omega_1$, gdje su N_1 cijeli brojevi.

Daljnijim povećanjem Reynoldsova broja takvo periodičko protjecanje postaje nestabilno za R veće od neke druge kritične vrijednosti $R_2 > R_1$, tako da ga nadomještava protjecanje u kojem brzinu u danoj točki fluida karakteriziraju dvije vremenske periodičnosti s kružnim frekvencijama ω_1 i ω_2 . Takve se vremenske promjene nazivaju dvoperiodičkima. Pripadni spektar sada ima dvije temeljne frekvencije i njihove harmonike.

Prateći prijelaz s laminarnog na periodičko, pa zatim dvoperiodičko, protjecanje, Landau i Hopf nastavljaju u tom smjeru i razvijaju teoriju po kojoj se u daljnjim prijelazima u vremenskoj ovisnosti rješenja $\mathbf{v}(\mathbf{r}, t)$ sukcesivno javljaju nove i nove temeljne frekvencije. Drugim riječima, sustav prolazi kroz protjecanja u kojima brzina postaje troperiodička, četverperiodička, ..., funkcija vremena za vrijednosti Reynoldsova broja $R_3 < R_4 < \dots$. Po toj teoriji turbulentno ponašanje i nije ništa drugo nego vremenski ovisno protjecanje u kojem je superponiran dovoljno veliki broj frekvencija $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \dots$. Ukratko, po Landauu i Hopfu turbulentna protjecanja su višeperiodičke (multi-periodičke) pojave. Njihova ključna predikcija je da će se u spektru turbulentnog protjecanja javiti diskretan skup temeljnih frekvencija i njima odgovarajućih viših harmonika. Ona se može provjeriti spektrometrijskim mjerenjima, ali ne i izravnim vizualnim praćenjem protjecanja. Naime, ljudskoj percepciji već superpozicija nekoliko različitih periodičnosti ostavlja dojam sasvim nasumične pojave u kojoj se ne uočava nikakva unutrašnja pravilnost.

U Landau-Hopfovom pristupu sustavno se prate svojstva vremenskih ovisnosti rješenja $\mathbf{v}(\mathbf{r}, t)$, dok se prostorne ovisnosti stavljaju u drugi plan. Na taj se način hidrodinamička teorija (1) svodi na sustav izvedenih nelinearnih diferencijalnih jednadžbi s konačnim brojem varijabli («stupnjeva slobode»), jednakim broju gore uvedenih frekvencija. Takvi sustavi se javljaju u mnogim raznorodnim situacijama, ne samo unutar prirodnih već i unutar tehničkih, medicinskih i društvenih znanosti. Proteklih desetljeća ostvaren je veliki napredak u njihovu razumijevanju, ne samo zahvaljujući brzom razvoju numeričkih metoda i simulacija, već i produblivanjem rigoroznih istraživanja njihovih općenitih svojstava.

Jedan od takvih rigoroznih rezultata imao je izravni utjecaj na napredak u razumijevanju nastajanja turbulentnih tokova. Ruelle i Takens su osamdesetih godina dvadesetog stoljeća ustvrdili da općenito dinamički sustavi skoro nikad neće, nakon prijelaza s vremenski neovisnog («laminarnog») u periodičko i dvoperiodičko ponašanje, ući u troperiodičko ponašanje. Namjesto njega nastupa stanje u kojem vremenska ovisnost stupnjeva slobode ima sve odlike kaotičnosti. Ono je neponovljivo i, za razliku od multiperiodičkih stanja, izrazito osjetljivo na male utjecaje. Spektar takvih vremenskih ovisnosti je kontinuiran, tj. ima odlike spektra šuma.

Daljnja bitna razlika ovakvog gibanja u odnosu na multiperiodička, ogleda se u svojstvima tzv. *dimenzije atraktora*, efektivnog broja stupnjeva slobode koji su aktivni u vremenski ovisnoj pojavi. Kod multiperiodičkih gibanja dimenzija atraktora podudara se s brojem aktiviranih frekvencija, dakle ona je nula za laminarne tokove, jedan za periodičke tokove, dva za dvoperiodičke tokove, itd. Pripadni atraktori simbolički se predstavljaju točkom, kružnicom, torusom, Kaotično gibanje koje po Ruelleu i Takensu nastupa nakon dvoperiodičkog gibanja karakterizirano je tzv. čudesnim (stranim) atraktorom. Čudesni atraktor simbolizira se objektom koji ima necjelobrojnu (fraktalnu) dimenziju čija je vrijednost veća od dva i manja od tri. Takav objekt može se uroniti u trodimenzionalni prostor, ali se ne može prekriti dvodimenzionalnom plohom.

Ruelle-Takensov teorem omogućava opis pojave turbulencije koji je drukčiji od Landau-Hopfova. Po njemu, turbulentnost ima sva svojstva nepredvidivog (kaotičnog) gibanja, i nastupa već destabilizacijom dvoperiodičkog gibanja. Za opis ovog gibanja dovoljno je prilikom uspostave modela uzeti u obzir samo tri stupnja slobode.

Unatoč iznenađujućem konceptualnom pojednostavljenju koje uvodi Ruelle-Takensov pristup, problem turbulencije još krije u sebi mnoge nepoznanice. Jedna od njih ogleda se u činjenici da brojni konkretni modeli s tri varijable koji polaze od takvog koncepta vode na još jednostavnije «scenarije» pojave turbulentnosti, npr. na takve kod kojih sustav nakon laminarnog i periodičkog protjecanja izravno prelazi u kaotično stanje karakterizirano čudesnim atraktorom. Nadalje, nejasno je do koje mjere je opravdano pretpostaviti da pojedinosti prostornih ovisnosti u protjecanjima nisu relevantne za nastajanje turbulencija. I ovdje smo se novim odgovorom na staro pitanje našli pred nizom novih pitanja

Literatura:

L. D. Landau i E. M. Lifshitz, Fluid Mechanics, Second edition, Pergamon Press, 1987.

Što su i kako se istražuju termoelektrični materijali?

Ante Bilušić¹

Fakultet prirodoslovno-matematičkih znanosti i odgojnih područja, Nikole Tesle 12, Split

Ana Smontara²

Institut za fiziku, Bijenička 46, Zagreb

Termoelektrični koeficijenti

Razvitak i funkcioniranje svakog društva i svake civilizacije temelji se na crpljenju i iskorištavanju energije. Danas se većina energije dobiva izgaranjem *fosilnih goriva* (ugljen, nafta, zemni plin) i *cijepanjem* (fisijom) *atoma*. Ti su energetske izvori istodobno i izvori onečišćenja okoliša. Svima je poznato da se pretjeranim izgaranjem fosilnih goriva u zadnjih stotinjak godina toliko povećala koncentracija takozvanih *stakleničkih plinova* u Zemljinoj atmosferi da je pokrenut proces sveobuhvatnih klimatskih promjena čijim manifestacijama, na žalost, sve češće svjedočimo. Nuklearni otpad, nusproizvod cijepanja atomskih jezgara, ostaje radioaktivan još tisućama godina. Zato ga treba skladištiti u posebno sagrađene spremnike radi prostornog ograničenja štetnog utjecaja radioaktivnosti. Ovi ekološki problemi dovode do potrebe iznalaženja novih izdašnih energetskih izvora s kojima bi prestala potreba za korištenjem za okoliš štetnih energenata. Primjerice, znanstvenici istražuju iskorištavanje energije vjetra, morskih mijena, biljnih ulja, sunca, vodika i drugih plinova. Svima im je, još uvijek, zajedničko svojstvo slaba iskorištenost uložene energije.

Termoelektrični materijali još su jedan potencijalni novi izvor energije. Fizikalna pojava na kojoj se temelji rad termoelektričnog generatora i hladila naziva se *Peltierovom pojavom*, a uočio ju je Francuz Jean Peltier još davne 1834. godine. Peltierova pojava blisko je povezana s još dvije: Seebeckovom (nazvane po Estoncu njemačkog podrijetla Seebecku koji ju je prvi uočio 1821. godine) i Thomsonovom pojavom (otkrio ju je 1855. godine Englez William Thomson, koji se poslije nazvao lordom Kelvinom). Što su i kako se mogu objasniti spomenute tri pojave? Zamislimo metalnu žicu čiji krajevi nisu kratko spojeni niti je između njih spojen izvor električnog napona. Pretpostavimo da je duž žice, na primjer grijanjem jednog njezina kraja, ostvarena temperaturna razlika. Posljedica je toga narušavanje termodinamičke ravnoteže: slobodni elektroni koji se nalaze u toplijem dijelu žice imaju veću energiju od onih u hladnijem dijelu. Radi toga dolazi do difuzije elektrona iz toplijeg u hladniji kraj žice, zbog čega nastaje električno polje s pozitivnim polom na toplijem, a negativnim na hladnijem dijelu žice. Pojavom električnog polja dolazi do ponovne uspostave stanja termodinamičke ravnoteže. Između nametnoga temperaturnoga gradijenta $\vec{\nabla}T$ ³ i stvorenoga električnog polja $\vec{E}$ postoji linearna veza:

$$\vec{E} = S \cdot \vec{\nabla}T \quad (1)$$

gdje je S *Seebeckov koeficijent* i ovisan je o materijalu. Važno je napomenuti da su vektori $\vec{\nabla}T$ i $\vec{E}$ usmjereni u različitim smjerovima pa je Seebeckov koeficijent metala po definiciji negativan. Za bolje razumijevanje Peltierove pojave promotrimo sliku 1. Na njoj su slovima 'a' i 'b' označeni različiti metali, spojeni u dvjema točkama, A i B. Zamislimo da je između

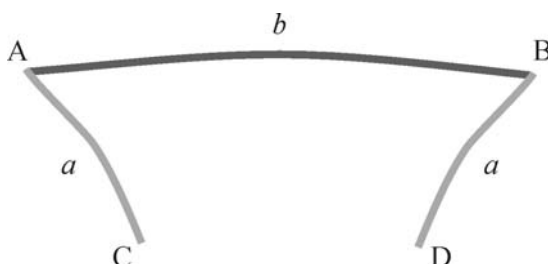
¹ bilusic@pmfs.hr

² ana@ifs.hr

³ Gradijent $\vec{\nabla}$ je usmjerena prostorna derivacija. U ovom slučaju $\vec{\nabla}T$ predstavlja smjer razlike temperatura između dva kraja.

točaka C i D spojen izvor elektromotorne sile. Peltier je uočio da protjecanjem struje kroz spojište dvaju različitih metala dolazi do primanja ili oslobađanja topline, ovisno o smjeru struje. Kako to objasniti? Tok električne struje znači tok čestica naboja (u slučaju metala radi se o elektronima). Uz naboj, čestice imaju i energiju, pa je tok naboja popraćen i tokom energije. Možemo pretpostaviti da je veza između toka (drugim riječima, struje) naboja i energije linearna:

$$\vec{j}_E = \Pi \cdot \vec{j}, \quad (2)$$



Slika 1 Sklop od dva različita metala kojim je u tekstu objašnjen princip rada termoelektričnog hladila/generatora.

gdje je s $\vec{j}_E$ označena struja energije, a s $\vec{j}$ struja naboja. Koeficijent proporcionalnosti Π naziva se *Peltierovim koeficijentom*. On je, poput Seebeckova, karakteristika materijala te u različitim materijalima jednaka struja naboja nije popraćena i jednakom strujom energije. Zbog toga na spojištu dvaju različitih materijala dolazi do otpuštanja ili primanja energije u vidu topline. Ako, primjerice, električna struja ide iz točke C u D preko točaka A i B (s time da je Peltierov koeficijent materijala 'a' Π_a veći od Π_b), na spojištu A toplina će biti oduzimana okolini (drugim riječima, okolina će se hladiti) – dobili smo termoelektrični hladnjak. Za iznos topline Q vrijedi:

$$Q \propto |\Pi_a - \Pi_b| \cdot |\vec{j}|. \quad (3)$$

Vrlo je važno primijetiti da će na drugom spoju (na slici 1 označenim slovom B), zbog toga što sada imamo tok struje iz materijala s manjim iznosom Π_b u materijal s većim Π_a , ista količina topline Q biti predana okolini.

Zamislamo sada sljedeću situaciju: Između točaka C i D nije spojen naponski izvor nego neko trošilo, a između točaka A i B nametnut je temperaturni gradijent. Tada se, prema relaciji (1), između točaka stvara električni napon, koji može biti iskorišten za napajanje trošila. Dobili smo termoelektrični generator napona!

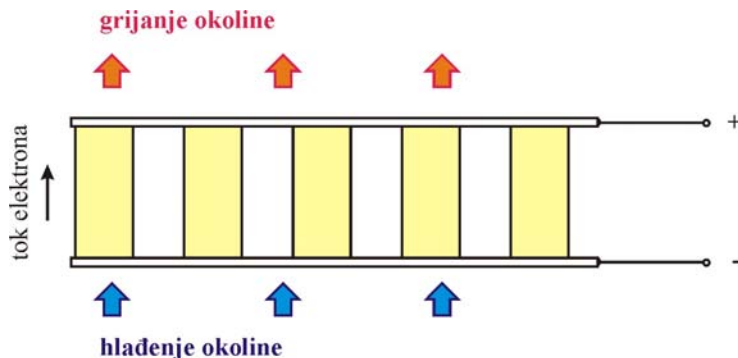
Thomsonova pojava objedinjuje Seebeckovu i Peltierovu: kada je na neki neizolirajući materijal nametnuto i električno polje (zbog čega teče električna struja) i gradijent temperature (zbog čega struji toplina), javlja se grijanje, odnosno hlađenje, ovisno o međusobnim smjerovima vektora električnog polja i temperaturnog gradijenta. Thomson (odnosno lord Kelvin) našao je i funkcionalnu vezu između Seebeckova i Peltierova koeficijenta:

$$\Pi = S \cdot T, \quad (4)$$

gdje je T temperatura izražena u Kelvinovoj skali.

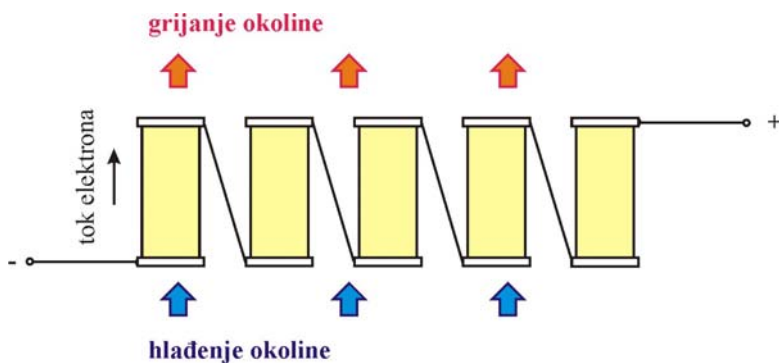
Termoelektrični hladnjaci i generatori

Kako na temelju činjenica izrečenih u prijašnjem poglavlju napraviti termoelektrični hladnjak, odnosno generator? Prva ideja koja pada na pamet jest paralelno spojiti cijeli niz termoelektrika⁴ i kroz njih puštati struju (slika 2). Mana je takve konstrukcije vrlo malen otpor



Slika 2 Niz paralelno spojenih termoelektrika. Ovakvo termoelektrično hladilo ne bi funkcioniralo zbog stvaranja velike količine Jouleove topline.

sklopa, zbog čega već za vrlo malen vanjski napon (reda nekoliko milivolti) sklopom prođe struja od nekoliko ampera. Jouleova toplina nastala protjecanjem tako velike struje termoelektrikom (a sjetimo se da je Jouleova toplina proporcionalna kvadratu struje!) bi poništila bi učinke hlađenja. Rješenje u smislu smanjenja broja paralelno spojenih termoelektrika nije dobro jer termoelektrici koji su danas u uporabi nisu (još) dovoljno efikasni. Drugo je rješenje spajanje termoelektrika ne u paralelni, nego u serijski spoj, kao na slici 3. Ukupan otpor serijskog spoja velikog broja termoelektrika nije više toliko velik kao u slučaju paralelnog spoja i nastala Jouleova toplina ne poništava učinke hlađenja. Međutim, ovdje se javlja jedan drugi izvor poništavanja učinka hlađenja. To su metalne žice kojima su termoelektrici međusobno serijski spojeni. Metali su dobri vodiči topline i, na primjeru slike 3, toplinu stvorenu u gornjem dijelu sklopa dovode u donji, ohlađeni dio.

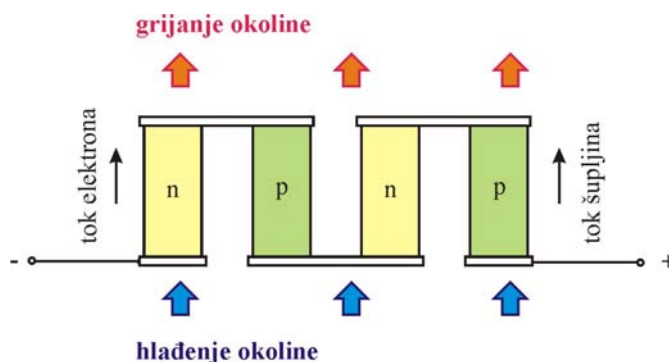


Slika 3 Niz serijski spojenih termoelektrika. Ovakvo termoelektrično hladilo ne bi funkcioniralo zbog kratkog spajanja toplih i hladnih dijelova sklopa.

Kako riješiti ove probleme? Prisjetimo se da smo u razmatranjima Peltierova učinka uzimali u obzir metal kojemu su nositelji naboja negativno nabijene čestice - elektroni. Zamislimo sada materijal kojemu naboj nose pozitivno nabijene čestice. Tada priča o Seebeckovu, Peltierovu i

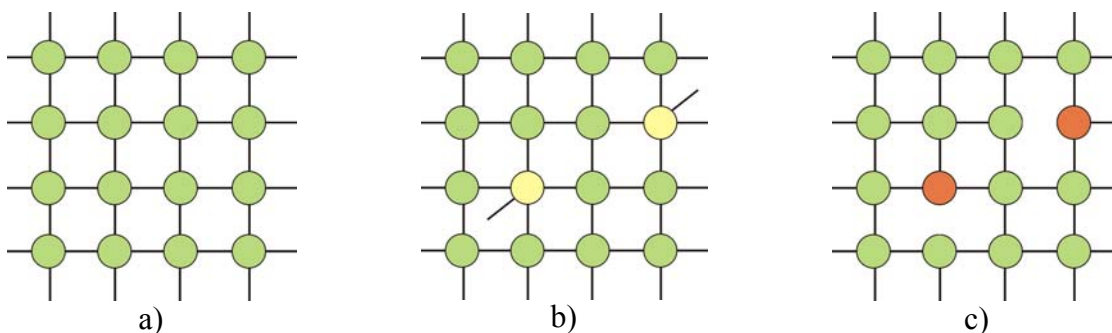
⁴ Materijali prikladni za izgradnju termoelektričnih hladnjaka/generators nazivaju se termoelektrici. O svojstvima koja takvi materijali trebaju imati, piše više u poglavlju 'Faktor izvrsnosti'.

Thomsonovu učinku, ispričana u prvom poglavlju, ostaje nepromijenjena uz jednu iznimku: smjer električne struje je suprotan. Primjerice, zamislimo da na slici 1 želimo u točki A ohladiti okolinu, a u materijalima *a* i *b* su nositelji naboja pozitivno nabijene čestice. Tada bi smjer struje morao biti suprotan smjeru struje da u materijalima *a* i *b* naboj prenose negativne čestice. Dakle, rješenje nam se nameće: upotrijebiti takve termoelektrike koji mogu imati i pozitivne i negativne nositelje naboja te ih spojiti serijski. Na slici 4 shematski je prikazano tipično termoelektrično hladilo u kojemu su serijski spojeni naizmjenično termoelektrici n- i p-tipa (n-tip označava one termoelektrike u kojima električnu struju provode negativno, a p-tip pozitivno nabijene čestice).



Slika 4 Princip rada termoelektričnog hladila

Materijali kojima je relativno jednostavno mijenjati vrstu nositelja naboja jesu *poluvodiči*. Na slici 5a dvodimenzionalno je prikazana kristalna rešetka nekog poluvodiča. Tipični je predstavnik poluvodiča silicij čiji su atomi četverovalentni. Namjernim onečišćavanjem četverovalentnog silicija nekim peterovalentnim elementom (primjerice fosforom), atomi fosfora zauzmu jedno od mjesta na kojima je prije bio atom silicija. Za gradnju veza sa susjednim atomima atomu fosfora potrebna su samo četiri elektrona te peti valentni elektron



Slika 5 Dio slike označen slovom a) označava zamišljeni dvodimenzionalni četverovalentni poluvodič. Srednja slika prikazuje stvaranje viška slobodnih elektrona onečišćenjem peterovalentnim atomom. Ako se četverovalentna matrica onečisti trovalentnim atomom, nastaju šupljine - manjak negativnog naboja (slika c)

ostaje nesparen i postane slobodan; nastao je poluvodič n-tipa kojemu su nositelji naboja negativno nabijeni elektroni (slika 5 b). Ako se četverovalentna matrica onečisti trovalentnim atomima (npr. borom), jedna njegova valencija ostaje prazna te se na tome mjestu stvara takozvana šupljina, odnosno manjak negativnog naboja. Ta šupljina može biti popunjena nekim valentnim elektronom koji gradi međuatomne veze na nekome drugome mjestu. Time

je stvorena šupljina na mjestu koje je napustio valentni elektron te se šupljina (odnosno pozitivno nabijena čestica) giba; dobiven je poluvodič p-tipa.

Faktor izvrsnosti

Kada je neki materijal prikladan za termoelektrike? Prvo, potrebno je od njega moći dobiti n- i p-tip električne vodljivosti. Drugo, pretvorba toplinske energije u električnu (i obrnuto) treba biti što efikasnija. To je svojstvo materijala opisano Peltierovim koeficijentom Π , odnosno Seebeckovim koeficijentom S , međusobno povezanim relacijom (4), u smislu da je poželjno da njihov apsolutni iznos bude što veći. Treće, čestice – nositelji naboja moraju što je moguće lakše putovati termoelektrikom. Ako to nije tako, čestice se češće sudaraju s atomima koji grade termoelektrik, pri čemu predaju dio svoje energije termoelektriku. Drugim riječima, termoelektrik se zagrijava (Jouleova toplota), čime se narušavaju učinci Peltierova hlađenja. U materijalima koji imaju veći električni otpor stvara se više Jouleove topline. Zato je poželjno da termoelektrik ima što manju električnu otpornost ρ , odnosno što veću električnu vodljivost σ . Naposljetku, kako je jedan kraj termoelektrika topliji od drugoga, duž njega nastaje temperaturni gradijent. Da bi se smanjio tok topline s toplijeg na hladniji kraj termoelektrika, sam termoelektrik treba što slabije voditi toplinu. Drugim riječima, mora imati što je moguće manji koeficijent toplinske vodljivosti κ (κ je, u slučaju vođenja topline, analogan električnoj vodljivosti σ pri vođenju električne struje). Sve to matematički se može sažeti u takozvanom *faktoru izvrsnosti* ZT termoelektrika, definiranim ovako:

$$ZT = \frac{S^2 \sigma}{\kappa} T. \quad (6)$$

Postići visoku vrijednost ZT po samoj je definiciji proturječno: nešto što dobro vodi električni naboj (odnosno ima veće vrijednosti Seebeckova koeficijenta S i električne otpornosti σ), nužno dobro vodi i toplinu (dakle, ima veći koeficijent toplinske vodljivosti κ). Do sada su se najkorisnijim termoelektricima pokazali spojevi iz obitelji telurita (bizmut-teluriti Bi_2Te_3 , odnosno kompleksni teluriti poput CsBi_4Te_6 i Tl_9BiTe_6). Znanstvenici su stalno u potrazi za novim potencijalnim termoelektricima i za sada su najizgledniji kandidati koji pripadaju obitelji takozvanih *klatrata*, *skuterudita* i *kvazikristala*.

Primjena termoelektrika

Na tržištu postoje termoelektrična hladila. Budući da su upotrebljavani termoelektrici male iskoristivosti, i hladila su male snage hlađenja. Najčešće se koriste u ručnim hladnjacima i kao hladila elektroničkih sklopova. Termoelektrični generatori primjenu su našli u svemirskim letjelicama: za izvor topline koristi se radioaktivni izotop (obično plutonij-238) koji se, zbog spontanog radioaktivnog raspada, zagrijava te se ta toplota koristi za stvaranje temperaturne razlike duž rubova sklopa termoelektrika. Spomenimo da je niz sondi poslanih u dubine Sunčeva sustava (*Voyager*, *Viking*, *Pioneer*, *Galileo*) godinama slao (a neki šalju i dan-danas) svoje signale zahvaljujući svojim termoelektričnim generatorima.

Literatura

- [1] H. J. Goldsmid, *Thermoelectric Refrigeration*, Temple Press Books Ltd., London, 1964.
- [2] N. W. Ashcroft, N. D. Mermin, *Solid State Physics*, Saunders College, Philadelphia, 1976.
- [3] <http://www2.jpl.nasa.gov/galileo/>
- [4] <http://www.tellurex.com/12most.html>

Supravodljivost i suprafluidnost - uz Nobelovu nagradu za fiziku 2003 g.¹

Slaven Barišić²

Fizički odsjek Prirodoslovno-matematičkog fakulteta, Sveučilište u Zagrebu,
Zagreb, Bijenička 32

Uvod

Supravodljivost je fizičko svojstvo koje znanstvenike fascinira još od kada ga je Kamerlingh Onnes 1911. g. otkrio i za to dobio Nobelovu nagradu (NN) 1913. g. Taj interes najbolje ilustrira činjenica da se od 96 NN koje su od 1901. g. dodijeljene za sva područja fizike čak njih devet (godine 1913., 1962., 1972., 1973., 1978., 1987., 1996., 2001., 2003.) izravno odnosi na supravodljivost i njoj srodnu suprafluidnost. Supravodljivost je i danas, 90-ak godina nakon njezina otkrića, jedno od najzanimljivijih područja istraživanja unutar fizike čvrstog stanja, odnosno, zajedno sa suprafluidnošću, unutar nešto šireg područja fizike zgusnute tvari. I prošlogodišnja Nobelova nagrada koju su dobili *Aleksej Abrikosov*,³ *Vitali Ginzburg*⁴ i *Anthony Leggett*,⁵ i koja je povod ovom tekstu, dodijeljena je za rezultate njihovih istraživanja supravodljivosti i suprafluidnosti.



Slika 1 Supravodič ($YBa_2Cu_3O_7$) lebdi iznad pola magneta jer je njegov magnetski moment M usmjeren suprotno od magnetskog polja H magneta.



Slika 2 Vlak lebdi na magnetskom polju centralne tračnice po principu slike 1 i kreće se bez kotača brzinom od oko 500 km/h.

¹ Rad je u izvornom obliku objavljen u Matematičko-fizičkom listu, LIV 3 (2003.-2004.) 161-169.

² sbarisic@phy.hr

³ Aleksej A. Abrikosov, američki i ruski državljani, rođen 1928. g. u Moskvi. Doktorat znanosti stekao 1951. g. na Institutu za fizičke probleme u Moskvi. Sada na položaju "istaknutog znanstvenika" u National Laboratory, Argonne, Illinois, SAD.

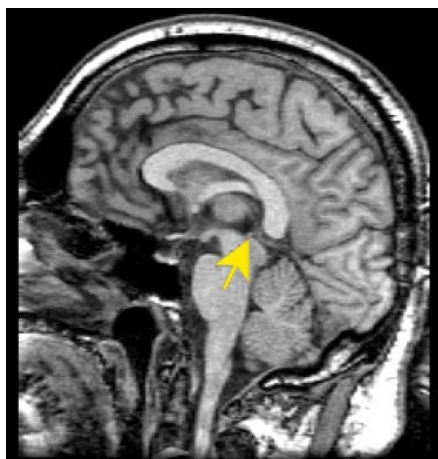
⁴ Vitali L. Ginzburg, ruski državljani, rođen 1916. g. u Moskvi. Doktorat znanosti stekao na Univerzitetu u Moskvi. Svojedobno pročelnik Teorijske grupe Lebedevljeva fizičkog instituta u Moskvi, Rusija.

⁵ Anthony J. Leggett, britanski i američki državljani, rođen 1938. g. u Londonu. Doktorat znanosti stekao 1964. g. na Univerzitetu u Oxfordu. Sada profesor na Sveučilištu Illinois u Urbana-Champaign, SAD.

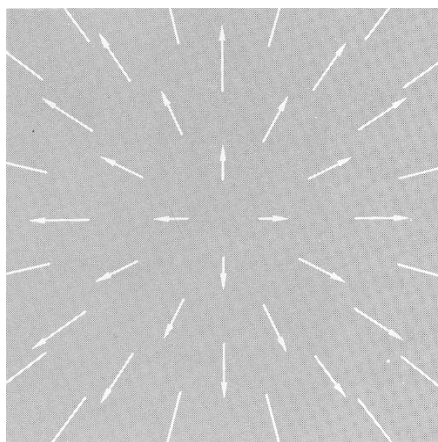
Dva su glavna razloga za tako izrazit interes znanstvenika, pa i šire javnosti, za supravodljivost i suprafluidnost. Ponajprije, fizička svojstva supravodljivosti iskorištena su, ili nagovještavaju da će biti još bolje iskorištena u revolucionarno novim visokim tehnologijama koja bi mogla promijeniti današnju sliku naše civilizacije. Tu treba ponajprije spomenuti prijenos električne energije bez za sada još velikih gubitaka, skladištenje proizvedene električne energije do trenutka vršne potrošnje, konstrukciju novih elektromotora i generatora.

Već se sve više širi proizvodnja moćnih magnetskih polja (sl. 1), upotrebljivanih u najrazličitije svrhe, od podizanja u lebdjenje čitavih ultrabrzih vlakova (sl. 2) do uvođenja novih medicinskih tehnika preciznog snimanja ljudskih organa (sl. 3) metodama nuklearne magnetske rezonancije (P.C: Lauterbur, P. Mansfield (fizičar), NN za medicinu (2003.)). Tu treba spomenuti i upotrebu supravodljivih kvantnih interferometara za mjerenje vrlo slabih magnetskih polja. Uz pojavu supravodljivih mikroelemenata (za velike računalne sustave), to su samo su neki primjeri novih visokih tehnologija o kojima se nedavno samo maštalo ili se još uvijek mašta.

Nadalje, na spoznajnoj razini, supravodljivost i suprafluidnost najfascinantije su manifestacije kvantne mehanike (KM) izravno dostupne ljudskim osjetilima (sl. 1). KM nam kaže da se položaj x i impuls p čestice (umnožak njezine mase i brzine) ne mogu ni najboljim



Slika 3 Snimka živog mozga nuklearnom magnetskom rezonancijom za koju su potrebna jaka i vrlo homogena magnetska polja.



Slika 4 Primjer vala $\psi(\vec{r}) = \psi_x(\vec{r}) + i\psi_y(\vec{r})$ u dvodimenzionalnom prostoru $\vec{r} = x\vec{i} + y\vec{j}$. Vektori prikazuju $\psi = \vec{i}\psi_x + \vec{j}\psi_y$. Izabran je ψ s virom u $x=y=0$.

eksperimentom odrediti istovremeno, nego da su njihove odgovarajuće neodređenosti Δx i Δp najmanje takve da zadovoljavaju Heisenbergovu relaciju $\Delta x \cdot \Delta p = \hbar$, gdje je $\hbar$ Planckova konstanta, jednaka za sve čestice. Kada se ta relacija primijeni na objekte velike mase (npr. na bilijske kugle) vidi se da je kvantna neodređenost nevažna, odnosno da su tipične eksperimentalne pogreške u mjerenjima položaja i impulsa takvih objekata veće od odgovarajućih kvantnih neodređenosti. Njih se stoga može zanemariti i upotrijebiti zakone Newtonove klasične mehanike. S druge strane, za česticu male mase, kao što je npr. neutron, proton, elektron, ... ograničenja kroz $\Delta x \cdot \Delta p \geq \hbar$, odnosno zakoni KM, postaju važni. Kvantna se neodređenost za takvu česticu povezuje s njezinom dualnom, valnom prirodom: ponašanje takve čestice opisuje se valom kompleksne amplitude ψ (sl. 4) koji daje vjerojatnosti da se izmjeri položaj x i impuls p (valna duljina) čestice s neodređenostima Δx i Δp . Zato se pri otkriću KM početkom 20. stoljeća držalo da ona opisuje samo čestice male mase, mikrosvijet nama dostupan samo putem (složenih) mjernih uređaja. Kao što ćemo ovdje vidjeti supravodljivost i suprafluidnost su tome protuprimjeri: kod njih zakoni KM postaju važni i za objašnjenje zajedničkog ponašanja mnoštva malih čestica, tipično 10^{23} čestica po cm^3 . Doduše, pored supravodljivosti i suprafluidnosti postoje i druge makroskopske fizičke pojave, kao što je npr. pojava permanentnih magneta, čije objašnjenje zahtijeva upotrebu KM, no većina tih pojava može se opisati kroz analogiju (tzv. princip korespondencije) s klasičnim sustavima, dok takvog zora za supravodljivost i suprafluidnost nema.

Bose-Einsteinovo zgušnjavanje

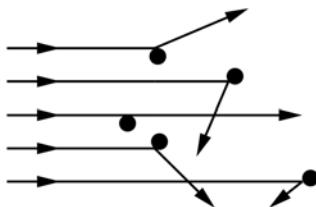
Heisenbergova relacija $\Delta x \cdot \Delta p = \hbar$ nam kaže da kvantnoj čestici možemo definirati impuls ($\Delta p \approx 0$) s tim da potpuno izgubimo informaciju o njezinu položaju. Kada se nadalje promatraju dvije ili više čestica, KM razlikuje (kroz tzv. Paulijev princip) fermione od bozona. Dok isti impuls p mogu imati najviše dva fermiona kad među njima ne djeluju nikakve sile, broj slobodnih bozona istog impulsa nije tako ograničen. Govoreći jezikom KM, val raspodjele vjerojatnosti ψ , koji opisuje jedan fermion može ih opisati najviše dva, dok val ψ koji opisuje jedan bozon može ponijeti njihovo mnoštvo. Radovima Bosea i Einsteina (BE) zatim je pokazano da je ispod neke kritične temperature T_c najvjerojatnije stanje sustava konačnog broja slobodnih bozona stanje u kojem su (gotovo) svi bozoni opisani *istim valom* ψ_0 impulsa $p = 0$. Takva se pojava naziva BE zgušnjavanje. Dok klasična fizika dozvoljava zgušnjavanje mnoštva čestica koje se ne gibaju ($p = 0$) u jednu točku (npr. $x = 0$), BE zgušnjavanje je najveće zgušnjavanje kojeg dozvoljava KM, u val ψ_0 s $p = 0$ i s potpuno neodređenim položajem.

Uključe li se sada (električne) sile među fermionima i/ili bozonima slika se obogaćuje i komplicira, ali koncept BE zgušnjavanja u jedan val približno preostaje. Doduše, BE zgušnjavanje ne obuhvaća tada sve bozone nego samo njihov dio (npr. nekoliko postotaka). S druge strane, međudjelovanjima se pojavljuje i jedna potpuno nova mogućnost - BE zgušnjavanje fermiona. Dva se naime fermiona mogu međusobno vezati u stanje niske energije - sjećamo se da Heisenbergova relacija $\Delta x \cdot \Delta p = \hbar$ ne zabranjuje dvama fermionima biti npr. u istoj točki prostora x , sada s potpuno neodređenim impulsima p . Tako nastali par fermiona, poznat kao Cooperov par, karakteriziran je prosječnim radijusom ξ i energijom veze Δ . Nadalje, Cooperov par, kao cjelina, ponaša se približno kao bozon: mnoštvo Cooperovih parova može se zgusnuti u stanje impulsa p *centra mase* jednog para. Dolazi se do situacije kada jedan jedini val, kažemo koherentno stanje, opisuje ponašanje mnoštva elementarnih ili složenih čestica, za razliku od situacije kada je svaka čestica posebno opisana svojim valom. Takva je slika u pozadini mikroskopskih objašnjenja supravodljivosti kao rezultata sparivanja elektrona u Cooperove parove (Bardeen, Cooper, Schrieffer, NN 1972. g.); suprafluidnosti

^4He (Kapitsa, NN 1978. g.), kao BE zgušnjavanje bozona ^4He (Landau, NN 1962. g.); suprafluidnost ^3He (Lee, Osheroff, Richardson, NN 1996. g.) kao rezultat sparivanja električki neutralnih atoma ^3He , koji su fermioni, u Cooperove parove i njihova BE zgušnjavanja (Leggett, NN 2003. g.); BE zgušnjavanja rijetkih plinova alkalnih atoma (Rb, K, Li) (Cornell, Ketterle, Wieman, NN 2001. g.) uključujući vodik.

Supravodljivost

Dva osnovna svojstva karakteriziraju supravodljivo stanje materije: *nestanak* električnog otpora R pri vođenju električne struje I i "*izbacivanje*" magnetskog polja B iz područja supravodljivosti. Električni otpor R nastaje kada se pojedini elektroni raspršuju na nasumično raspoređenim centrima raspršenja. Pri tome se kinetička energija gibanja centra mase svih elektrona pretvara u (unutarnju) energiju njihova nasumičnog gibanja, odnosno razvija se Jouleova toplina, snagom $P = RI^2$, gdje je R otpor, a I struja elektrona. Takva slika (sl. 5) podrazumijeva da je svaki pojedini elektron opisan posebno (u KM svaki svojim valom) i da se raspršuje nezavisno od drugih. Međutim, kada su, nakon BE zgušnjavanja, svi



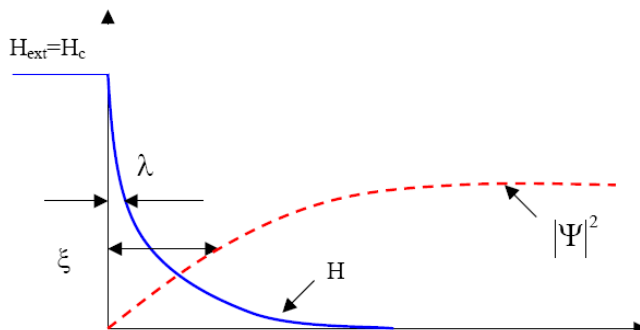
Slika 5 Elektroni nailaze na centre raspršenja i svoju energiju translacije pretvaraju u unutarnju energiju kaotičnog gibanja

elektroni opisani jednim te istim valom ψ , raspršenja ne mogu voditi nasumičnom gibanju pojedinih elektrona, jer su oni međusobno povezani, najprije u Cooperove parove, pa zatim u njihov BE kondenzat. Stoga tada električni otpor R nestaje. Kada se nadalje na supravodljivi sustav nametne vanjsko magnetsko polje H , kao na sl. 1, u supravodiču se prema Lentzovu pravilu pojavljuju struje čije je magnetsko polje M usmjereno suprotno od H , čineći $B = H + M$ malim. Pojava zgušnjavanja na konačnoj temperaturi T_c pri tome je suštinski važna, jer se na konačnoj temperaturi ni u načelu ne može izbjeći postojanje centara raspršenja za elektrone, nego se njihov utjecaj mora ukloniti zgušnjavanjem.

Ovogodišnja Nobelova nagrada dodijeljena je Abrikosovu i Ginzburgu za njihov doprinos razumijevanju gore opisanih osnovnih svojstava suprovodljivosti i prije nego se zgušnjavanje Cooperovih parova u jedan val pojavilo 1957. g. kao približno objašnjenje opisa supravodljivog sustava (Bardeen, Cooper, Schrieffer, NN 1972. g.). Ginzburg je 1950. g., zajedno s Landauom (NN, 1962. g.), predložio da *samo jedan val* ψ opisuje čitav elektronski sustav (10^{23} elektrona po cm^3), ne ulazeći u njegovo porijeklo. Dakle, supravodljivi sustav opisan je jednom valnom funkcijom $\psi(x)$, tj. jednim kompleksnim brojem ψ u svakoj točki prostora x (sl. 4), $|\psi(x)|^2$ je identificiran s gustoćom supravodljivih elektrona oko točke x . Posluživši se Landauovom teorijom faznih prijelaza iz 1937. g. za prijelaz u kvalitativno (simetrijski) novo supravodljivo stanje, Landau i Ginzburg su pokazali da iz pretpostavke jednog vala slijedi i nestanak električnog otpora supravodiča i potpuno izbacivanje magnetskog toka, $B = H + M = 0$, iz područja supravodljivosti (Meissnerov efekt) za H manji od kritične vrijednosti H_c .

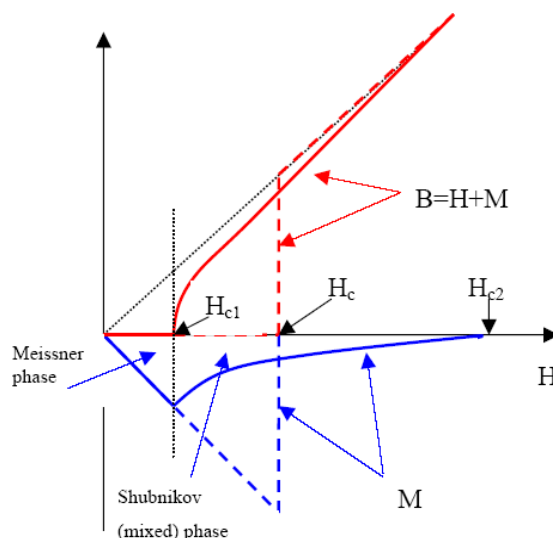
Izuzetak je samo usko prijelazno područje uz samu površinu supravodiča, gdje gustoća supravodljivih elektrona $|\psi(x)|^2$ progresivno raste prema unutrašnjosti supravodiča preko

karakteristične udaljenosti ξ (koju je L. P. Gor'kov, Landauov student, kasnije identificirao kao radijus Cooperova para), a magnetsko polje B se gubi preko udaljenosti λ (sl. 6). Četrdesetak godina nakon otkrića supravodljivosti i unatoč mnogim naporima, to je bila prva teorija koja je *jednostavno* opisivala sve rezultate postojećih mjerenja na materijalima u supravodljivu stanju.



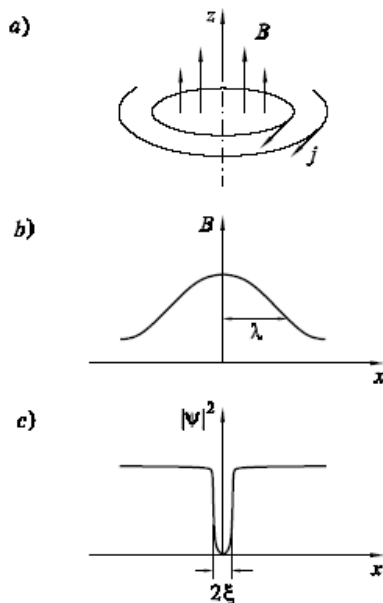
Slika 6 Raspodjela gustoće elektrona $|\psi(x)|^2$ i magnetskog polja $B(x)$ pri površini supravodiča *I.* vrste.

Ipak, ubrzo se ispostavilo da postoje materijali u kojim Ginzburg-Landauovo rješenje ne vrijedi. Već su i njih dvojica zapazili da njihovo rješenje sa sl. 6 podrazumijeva da je $\xi > \sqrt{2}\lambda$ ("supravodiči *I.* vrste"), ali da u obrnutom slučaju zahtijeva promjenu. Potaknut eksperimentima, taj je korak učinio unutar Ginzburg-Landauove teorije Landauov student Abrikosov i našao "supravodiče *II.* vrste", čija su svojstva bogatija i za primjenu mnogo važnija od onih supravodiča *I.* vrste. Magnetsko ponašanje supravodiča *II.* vrste prikazano je na sl. 7. U malim vanjskim poljima H i oni pokazuju potpuni Meissnerov efekt, $B = H + M = 0$. No kad H dostigne prvo kritično polje H_{c1} u supravodič lokalno prodre magnetsko polje oko kojeg cirkuliraju Lentzove dijamagnetske struje (sl. 8). U valu ψ stvara se vir, (kao na sl. 4), u kojem su gustoća supravodljivih elektrona $|\psi(x)|^2$ i magnetsko polje $B(x)$ raspoređeni od centra vira prema obodu opet kao na sl. 6, ali s $\xi < \sqrt{2}\lambda$. Povećava li se dalje magnetsko polje H ukupni magnetski tok ϕ_0 kroz pojedini vir

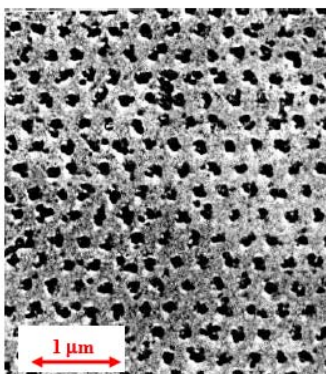


Slika 7 Prosječno polje $B=M+H$ kroz supravodič kao funkcija vanjskog polja H , te prosječni magnetski moment M supravodiča *II.* vrste.

se ne mijenja, no u materijal prodire sve više i više virova. Električni pak otpor R iščezava dok materijal između virova ostaje supravodljiv, $|\psi(x)|^2 \neq 0$, a virovi se ne gibaju. Abrikosov je pokazao da će se virovi urediti u triangularnu rešetku, koja je uskoro i opažena posipanjem površine supravodiča željeznom piljevinom (sl. 9). Tek na drugom kritičnom polju H_{c2} (sl. 7) virovi dolaze tako blizu da se počnu preklapati i supravodljivosti potpuno nestaje.



Slika 8 Raspodjela polja B i struja j , te gustoće elektrona $|\psi|^2$ oko vira sa slike 4.



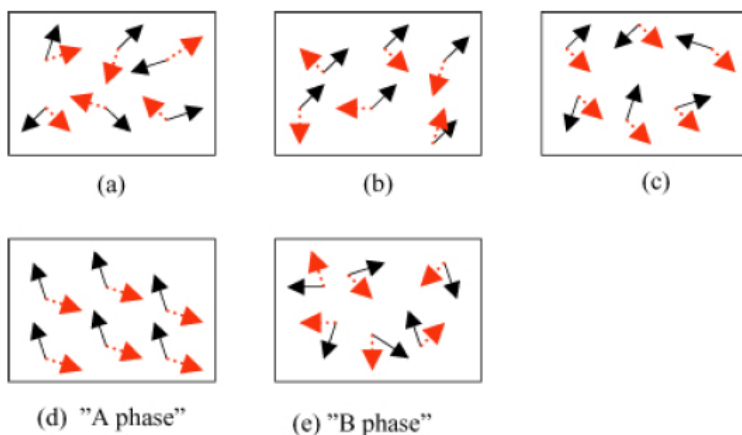
Slika 9 Abrikosovljeva rešetka virova posuta željeznom piljevinom.

Pronalazak i objašnjenje supravodiča II. vrste polovicom 20. stoljeća bili su važni iz dva razloga. Ponajprije, zadržavanje supravodljivosti do vrlo velikih magnetskih polja H_{c2} učinila ih je pogodnim za proizvodnju na drugi način nedostupno snažnih elektromagneta (sl. 2 i 3), no ostalo je ograničenje supravodljivosti na vrlo niske temperature (do 20-ak K): čim temperatura prijeđe energiju veze Δ Cooperova para, parovi se raspadaju, pa supravodljivosti nestaje iznad $T_c \approx \Delta$. Δ je mala energija jer su sile vezivanja u Cooperove parove slabe. Tek 1986. g. u kupratima rijetkih zemalja (sl. 1) nađeni su (Bednorz, Müller, NN, 1987. g.) supravodiči II. vrste sve do dosta visokih temperatura (oko 130 K), što otvara put širokim tehnološkim primjenama. Sa spoznajne pak strane, pokazano je da se magnetski tok kroz vodič mijenja u kvantima ϕ_0 , što je dokazalo da je priroda Ginzburg-Landauovog vala ψ

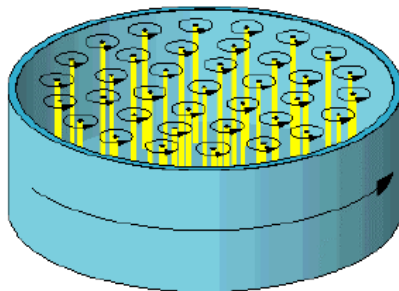
kvantna, a kao osnovni nosilac električnog naboja u definiciji ϕ_0 kasnije se pojavio Cooperov par naboja $2e$. Landau-Ginzburg-Abrikosovljeva teorija zato je jedan od najljepših primjera prožimanja spoznajnih i primjenjivih vidova istraživanja u fizici.

Suprafluidnost ^3He

Treći fizičar nagrađen Nobelovom nagradom za 2003., A. Leggett, istakao se u objašnjenju suprafluidnosti ^3He (2 protona + 1 neutron + 2 elektrona), rijetkog izotopa helija. Za razliku od ^4He , koji je sam bozon i postaje suprafluidan BE zgušnjavanjem ispod $T_c = 2,3\text{ K}$, atomi ^3He su fermioni i njihov sustav postaje suprafluidan ispod ekstremno niske temperature od približno $0,003\text{ K}$, zgušnjavanjem "Cooperovih parova" ^3He fermiona. No, kako je predložio Leggett, struktura tih parova znatno je složenija od Cooperovih parova koji ulaze u BCS teoriju supravodljivosti. Razlog tome je što se fermioni ^3He na malim udaljenostima jako odbijaju pa se tu i izbjegavaju. Odgovarajući KM problem je lako riješiv i Leggett je pokazao da uz val ψ koji opisuje gibanje centra mase dvije čestice treba upotrijebiti još dva trokomponentna vektora da bi se opisalo njihovo međusobno stanje. Zato nakon BE zgušnjavanja u to stanje opis sustava zahtijeva u svakoj točki prostora x pored dvije komponente valne funkcije ψ (kompleksan broj) još dva vektora (ukupno $2 \times 3 \times 3 = 18$ komponentata). Već prema međusobnoj orijentaciji ta dva vektora u svakoj točki prostora i



Slika 10 Moguća stanja (faze) ^3He u mirovanju. U fazi (a) dva su vektora proizvoljno orijentirana u svakoj točki i među raznim točkama prostora. U fazama (b)-(e) vektori se progresivno uređuju. Faze (d) i (e) opažene su u ^3He .



Slika 11 Virovi u suprafluidu koji se nalazi u rotirajućoj posudi.

između različitih točaka prostora moguća su različita uređenja ^3He , kao što je prikazano na sl. 10. Primijetimo da neke faze imaju preferiranu os ili osi, pa te faze imaju i različita svojstva u različitim smjerovima, anizotropne su, kao što je i opaženo.

Budući da su Cooperovi parovi ^3He električno neutralni u suprafluidnom ^3He magnetsko polje ne inducira Lentzove struje te ^3He ne pokazuje Meissnerov efekt i/ili odgovarajuću pojavu Abrikosovljevih virova. Ipak, stavi li se suprafluid u rotirajuću posudu u njemu se pojavljuju "pravi" virovi (sl. 11), strukture i porijekla sličnog onom nađenom u supravodičima II. vrste, tj. diktiranom kvantnom prirodom vala ψ . Naravno, vrtloženje suprafluidnog ^3He nije povezano sa zagrijavanjem sustava, za razliku od vrtloženja vode, koje s vremenom nestaje pretvaranjem energije vrtloženja u toplinu. Kao ni u supravodičima, niti u suprafluidima tijekom cirkularnih struja ne disipira energiju.

Završna riječ

Devedesetogodišnja saga o supravodljivosti i suprafluidnosti predstavlja iznimno poučan primjer općih značajki hoda moderne civilizacije, od čiste, romantične želje za spoznajom, do neočekivanih fundamentalnih otkrića, preko često vrlo apstraktnih koncepata potrebnih u razumijevanju nađenog, sve do odgovarajućih tehnoloških razvoja i primjena u cilju poboljšanja uvjeta svakodnevnog života. To nije jednosmjernan, pravocrtni hod, nego lanac pun povratnih veza, s visećim karikama i izgubljenim koracima, građen upornošću i hrabrošću mnogih generacija. U ovdje opisanom slučaju supravodljivosti i suprafluidnosti taj put ide, ovamo-onamo, od osnovnog otkrića (sl. 1) do njegovih primjena (sl. 2 i 3), preko izgradnje osnovnog konceptualnog aparata (sl. 4 i 5), sve do detaljnih opisa svojstava supravodiča i suprafluida (sl. 6 - 11). I devet Nobelovih nagrada, od 1913. do 2003. g., ilustrira taj nesigurni hod znanosti, koji ipak, izgleda, uvijek vodi naprijed: domet i značaj pojedinih koraka shvaćen je ponekad odmah ali još češće mnogo kasnije nego što su se zbili. Pa i sama Nobelova nagrada za 2003. g. primjer je takve prirode istraživačke avanture: dvojicu istraživača nagradila je za njihove davnašnje rezultate, a trećega za ono što je našao gotovo jučer. Mnogi su drugi zauvijek ostali u medijskoj sjeni ili možda još uvijek čekaju da budu shvaćeni, no najvažnije je da njihov rad služi dobrobiti čitavog ljudskog roda. Ili, kako je to slikovitije rekao Alfred Nobel, čovjek koji je svoje bogatstvo stekao na izumima i proizvodnji dinamita, "širiti znanje je širiti dobrobit". Mislio je naravno na opću a ne na pojedinačnu dobrobit i, mučen upotrebom svojih eksploziva u ratne svrhe, dodao ".... napredak znanstvenih istraživanja i stalno širenje njihovog kruga budi nam nadu da će mikrobi, kako mikrobi duše tako i mikrobi tijela, postepeno nestati, i da će jedini rat kojeg će u budućnosti čovječanstvo još voditi biti rat protiv mikroba". Kao svoje najživlje interese u "širećem se znanju" Nobel je 1890. g. naveo "međudjelujuće atome", pa odmah zatim "funkciju mozga, misao i memoriju". Kroz BE kondenzaciju međudjelujućih atoma ^4He , ^3He , Li, Rb, ..., kroz studije mozga nuklearnom magnetskom rezonancijom, (sl. 3) i slično, supravodljivost te suprafluidnost i Nobel pružaju odgovore na njegove najvažnije interese vezane uz njegovu želju za pobjedom protiv mikroba tijela i duše. Ipak, nakon čitavog stoljeća od Nobelovih razmišljanja, izgleda da čovječanstvu rat protiv mikroba tijela ide bolje nego rat protiv mikroba duše. No to je već jedna druga, nova priča.

Problem tamne energije - što uzrokuje današnje ubrzano širenje svemira?

Hrvoje Štefančić¹

Zavod za teorijsku fiziku, Institut "Ruđer Bošković", Zagreb

Svemir, impresivan po mjerilima svakog čovjeka iz svake epohe, od davnina je objekt znatiželje ljudi. Istu, pa i veću znatiželju dijelili su znanstvenici iz raznih vremena i uvijek u razumijevanje svemira i pojava u njemu pokušavali ugraditi svoja najveća dostignuća. Tako je bilo s visoko geometriziranim antičkim kozmološkim modelima, provjerom Newtonova zakona gravitacije na stvarnim planetarnim gibanjima pa sve do stapanja najmodernijih znanja iz fizike visokih energija i Einsteinove opće teorije relativnosti u teoriji velikog praska. Želja za razumijevanjem svemira vrlo je često snažno vukla znanost, osobito fiziku, prema naprijed. Stupanj napretka koji je dosegnula fizika do našeg doba mogao bi nas navesti na pomisao da danas razumijemo najveći dio svemira i pojava u njemu. Rezultati velikog broja različitih kozmoloških promatranja, prikupljenih mahom u posljednjih pet godina, međutim, upućuju na suprotno. Naše današnje znanje o građi svemira otkriva da nam priroda približno 95 % ukupne gustoće energije u svemiru nije poznata.

Prvi pokazatelji o postojanju dosad nepoznatih komponenti svemira dobiveni su iz promatranja supernova tipa Ia [1, 2]. Za supernove tog tipa promatranjem odnosa njihove luminozitetne udaljenosti (čiji je kvadrat obrnuto proporcionalan opaženom sjaju supernove) i njihova crvenog pomaka (određenog iz pomaka spektralnih linija) utvrđeno je da su (promatrane supernove) tamnije nego što bi se očekivalo na osnovi tada važećeg kozmološkog modela koji je pretpostavljao postojanje samo uobičajenih komponenti građe svemira: zračenja i nerelativističke materije. Manji sjaj supernova protumačen je većom udaljenošću opaženih supernova od očekivane ², odnosno svemir se u periodu između eksplozije pojedine supernove i trenutka kada je mi opažamo širio ubrzano. U to vrijeme prihvaćeni kozmološki model predviđao je usporeno širenje svemira pa je ovaj rezultat nedvojbeno revolucionarno promijenio našu sliku o svemiru i doveo kozmologiju do novog pitanja: Što uzrokuje ubrzano širenje svemira? Kao odgovor na to pitanje, uvedena je nova komponenta građe svemira nazvana *tamna energija*. Ona je uvedena prvenstveno kao komponenta koja može dovesti do ubrzanog širenja svemira. Takav utjecaj tamne energije na širenje svemira proizlazi iz njezina najbitnijeg svojstva: tlak tamne energije je *negativan*. Ostala njezina svojstva znatno su manje poznata i prava priroda tamne energije jedan je od najvažnijih ciljeva istraživanja u kozmologiji, ali i drugim područjima fizike, poput fizike elementarnih čestica. I druga su kozmološka opažanja potvrdila postojanje tamne energije. Posebnu važnost među njima zauzimaju vrlo precizna mjerenja anizotropija kozmičkog mikrovalnog pozadinskog zračenja koja je obavila NASA-ina sonda WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe) [4]. Ta su mjerenja s većom preciznošću potvrdila rezultate niza prethodnih mjerenja anizotropija kozmičkog mikrovalnog pozadinskog zračenja [5, 6, 7] te dala snažnu podršku kozmološkom modelu koji uključuje tamnu energiju. Dodatne potvrde stigle su iz promatranja korelacija anizotropija kozmičkog mikrovalnog pozadinskog zračenja i fluktuacija u raspodjeli "obične"

¹shrvoje@thphys.irb.hr

²Kritičko razmatranje ovih rezultata je obuhvatilo i proučavanje alternativnih razloga slabijeg sjaja opaženih supernova tipa Ia. Jedan od zanimljivijih alternativnih pokušaja objašnjenja slabijeg sjaja supernova je osnovan na pretpostavci oscilacija fotona emitiranih u supernovoj u hipotetske čestice *aksione* [3].

materije u svemiru (npr. galaksija ili skupova galaksija) [8].

S tamnom energijom, međutim, ne završava popis nepoznatih komponenti svemira. Možemo li ostatak ukupne gustoće energije u svemiru objasniti pomoću nama poznatih komponenti poput tzv. barionske materije (od koje smo izgrađeni mi sami i velika većina stvari na našem planetu) i zračenja (poput npr. elektromagnetskog zračenja Sunca)? I u ovom slučaju kozmologija daje negativan odgovor. U svemiru je prisutna još jedna tamna komponenta, *tamna materija*. Prisutnost tamne materije nužna je za objašnjenje ukupne gustoće energije u svemiru, no njezini su učinci već vidljivi na razini galaksija pri promatranju brzine kruženja zvijezda i skupova zvijezda oko galaktičkog središta. Priroda tamne materije gotovo je jednako tajnovita kao i priroda tamne energije.

Raspodjela ukupne gustoće energije po komponentama [4] otkriva zanimljiv poredak. U svemiru u današnjem trenutku ima približno

- 73 % tamne energije
- 23 % tamne materije
- 4 % barionske materije

što pokazuje da tamna energija danas prevladava u građi svemira, a tamne komponente zajedno čine više od 95 % svemira. Današnja gustoća energije fotona i neutrina čini vrlo malen dio ukupne gustoće energije u svemiru.

Razmotrimo detaljnije mehanizam širenja svemira i način kako tamna energija vodi do njegovog ubrzanja. Udaljenosti u širećem svemiru opisane su *faktorom skale*³ a . Ta veličina određuje stvarnu udaljenost između dva objekta u svemiru, mjerenu npr. vremenom potrebnim svjetlosnom signalu da dođe od jednog objekta do drugoga. Opažena homogenost i izotropnost raspodjele materije i struktura na najvećim skalama u svemiru omogućuje da svaku od komponenti svemira na kozmološkim skalama opišemo kao homogen idealni fluid. Temeljna jednadžba idealnog fluida, tzv. jednadžba stanja idealnog fluida, povezuje tlak p i gustoću energije fluida ρ :

$$p = w\rho. \quad (1)$$

Parametar jednadžbe stanja w može biti konstantan, no isto tako može biti promjenjiv i ovisiti o npr. vremenu ili drugim varijablama relevantnim u kozmologiji. Za nerelativističku materiju (i za barionsku i za tzv. hladnu tamnu materiju) vrijedi $w \approx 0$, dok je za zračenje, odnosno relativističku materiju, $w = 1/3$. Za komponentu koja je opisana jednadžbom stanja (1) s konstantnim w i koja ne izmjenjuje energiju s drugim komponentama u svemiru, jednadžba stanja određuje promjenu gustoće energije te komponente s promjenom faktora skale a :

$$\rho = \rho_0 \left(\frac{a}{a_0} \right)^{-3(1+w)}. \quad (2)$$

Indeks 0 označava veličine u današnjem trenutku. Tako za nerelativističku materiju vrijedi $\rho \sim a^{-3}$, a za relativističku materiju dobivamo $\rho \sim a^{-4}$. Iz osnovnog svojstva tamne energije, negativnog tlaka, slijedi da je za tamnu energiju parametar w

³Faktor skale a je element složenijeg objekta koji se naziva metrički tenzor $g_{\mu\nu}$. Određivanje metričkog tenzora cilj je rješavanja svakog problema u općoj teoriji relativnosti.

negativan. Ta činjenica, zajedno s jednadžbom (2), upućuje da gustoća energije nerelativističke ili relativističke materije brže opada u odnosu na gustoću tamne energije pri širenju svemira. Različite brzine promjene gustoće energije svemirskih komponenti otkrivaju da je u prošlosti svemira gustoća nerelativističke i relativističke materije bila znatno veća od gustoće tamne energije. Isto tako, u budućnosti će tamna energija, s obzirom na gustoću energije, potpuno prevladavati u odnosu na druge komponente građe svemira. Posebna zanimljivost može se iščitati iz podataka za današnji udio pojedinih komponenti u ukupnoj gustoći energije svemira. Naime, u današnjem trenutku širenja svemira, gustoće tamne energije i ostalih komponenti istog su reda veličine, tj. usporedive. Budući da se gustoće energije komponenti mijenjaju vrlo različitim brzinama, postavlja se pitanje zašto su navedene komponente usporedive upravo sada. Taj problem, koji se u osnovi svodi na pitanje zašto gustoća tamne energije ima svoj izmjereni iznos, naziva se i *problem koincidencije*.

Einsteinova opća teorija relativnosti daje jednadžbe za brzinu i ubrzanje širenja svemira. Brzina širenja svemira dana je tzv. Friedmannovom jednadžbom

$$\dot{a}^2 + kc^2 = \frac{8\pi G}{3c^2} \sum_i \rho_i a^2, \quad (3)$$

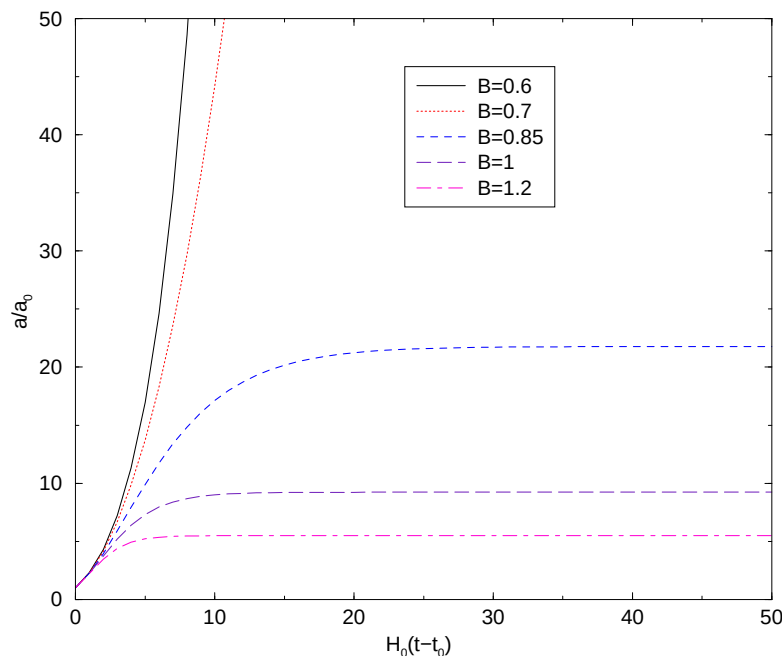
gdje $\dot{a}$ označava brzinu širenja svemira, G je gravitacijska konstanta, c je brzina širenja svjetlosti, sumira se po svim komponentama građe svemira, a k je tzv. *parametar zakrivljenosti*. Jednadžba (3) pokazuje da brzina širenja svemira u svakom trenutku ovisi o gustoći energije u njemu. Iz te jednadžbe vidi se da bi za svemir koji bi sadržavao samo nerelativističku i relativističku materiju $\dot{a}$ opadao sa širenjem svemira. Ubrzanje svemirskog širenja dano je izrazom

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3c^2} \sum_i (\rho_i + 3p_i). \quad (4)$$

U tom izrazu G označava gravitacijsku konstantu, c je brzina svjetlosti, $\ddot{a}$ označava ubrzanje širenja svemira, a sumira se po svim komponentama građe svemira. Izraz za ubrzanje otkriva nam još jedno svojstvo koje mora zadovoljavati jednadžba stanja tamne energije. Parametar jednadžbe stanja mora biti $w < -1/3$ kako bi za tamnu energiju izraz $(\rho + 3p)$ postao negativan, a, kad tamna energija postane dominantna komponenta, ubrzanje svemira pozitivno.

Bilo je mnogo pokušaja i izgrađeni su mnogi modeli u smjeru teorijskog razumijevanja prirode tamne energije. Jedan od najistaknutijih i, prema nekim svojim svojstvima, nezaobilaznih modela jest model vakuumske energije [9, 10, 11]. U sklopu tog modela pretpostavlja se da je tamna energija zapravo jednaka energiji vakuuma. Taj je model ekvivalentan standardnom kozmološkom modelu s *kozmoškom konstantom* (koja je mjera energije vakuuma) koji je Einstein uveo kao sastavni dio opće teorije relativnosti u samim njezinim počecima [12]. Prema danas najbolje potvrđenoj kvantnoj teoriji, *kvantnoj teoriji polja*, postojanje vakuumske energije, odnosno kozmološke konstante, neizbježna je činjenica⁴. Naime, kvantna teorija polja predviđa da kvantne fluktuacije svih kvantnih polja pridonose energiji vakuuma te da postoje doprinosi energiji vakuuma zbog tzv. faznih prijelaza u ranim fazama života svemira. Postojanje neiščezavajuće vakuumske energije teorijski je dobro utemeljeno. Problem je u brojčanom iznosu koji je teorijski predviđen. Naime, teorijska vrijednost za gustoću energije vakuuma neuspore-

⁴Jedna od manifestacija vakuumske energije jest i Casimirov efekt [13]



Slika 1: Vremenska ovisnost faktora skale za pet različitih vrijednosti parametra u modelu vremenski ovisne kozmološke “konstante”. H_0 označava *Hubbleov parametar*. Za drukčije vrijednosti parametara svemir može imati bitno drukčiju sudbinu.

divo je veća od vrijednosti dobivene kozmološkim opažanjima (ako se u analizi podataka pretpostavi postojanje kozmološke konstante, tj. vakuumske energije). U nekim teorijskim varijantama neslaganje teorijski predviđene i opažene gustoće vakuumske energije čak je u približno 120 redova veličine (faktor od 10^{120}). Navedeni problem jedan je od najdubljih problema fizike uopće i katkad se naziva i *problemom kozmološke konstante*. Rješenje tog problema zasigurno je jedan od najvećih izazova za kozmologiju i fiziku visokih energija u budućnosti. Posebno je bitno iznaći teorijsko objašnjenje mehanizma koji vrijednost gustoće vakuumske energije svodi s izuzetno velike teorijski predviđene vrijednosti na opaženu. Parametar jednadžbe stanja kozmološke konstante iznosi $w = -1$. Iz izraza (2) proizlazi da se gustoća energije pridružena kozmološkoj konstanti ne mijenja s faktorom skale a . U svemiru s neiščezavajućom pozitivnom kozmološkom konstantom u dalekoj budućnosti svemirom dominira upravo kozmološka konstanta, dok je gustoća energije ostalih komponenti zanemariva. Iz Friedmannove jednadžbe (3) vidi se da u ovakvom svemiru u dalekoj budućnosti faktor skale raste eksponencijalno s vremenom. Vrlo zanimljivi rezultati dobivaju se ako se kozmološka konstanta promatra kao dinamička veličina⁵ [14]. Ovisno o parametrima modela, sudbina svemira može biti vrlo različita: svemir se u dalekoj budućnosti može neograničeno širiti, ali i asimptotski težiti nekoj maksimalnoj vrijednosti faktora skale, slika 1.

Niz drugih modela za tamnu energiju pretpostavlja da za sada nepoznati mehanizam, koji vakuumsku energiju svodi s vrlo velikih vrijednosti, ne završava na opaženoj vrijednosti tamne energije, već svodi vakuumsku energiju na nulu. Oni, dakle, pretpostavljaju da vakuumska energija iščezava i da je tamna energija drukčije prirode. U tim je modelima uobičajeno tamnu energiju smatrati dinamičkom komponentom opisanom pomoću skalarnog polja koje se razvija u vremenu u prikladno odabranom potencijalu

⁵U ovom slučaju primjereniji je naziv *kozmoški član*

[15]. Široko prihvaćeni naziv za takav tip tamne energije je *kvintesencija* ⁶. Parametar jednadžbe stanja za ove modele je $w \geq -1$, što znači da gustoća tamne energije u ovim modelima općenito opada sa širenjem svemira, ali znatno sporije od gustoće energije ostalih komponenti. Prisutni su i modeli koji idu za ujedinjenjem tamne energije i tamne materije te ujedno nastoje objasniti i već spomenuti problem koincidencije. Jedan od istaknutih modela iz te grupe jest model Čapljiginova plina [16].

Posebna skupina modela tamne energije pretpostavlja da gustoća tamne energije raste s faktorom skale a . Ta je skupina modela karakterizirana parametrom jednadžbe stanja $w < -1$. Tip tamne energije razmatran u tim modelima dobio je naziv *fantomska energija* [17]. Prema svojim svojstvima ti su modeli teorijski kontroverzni, no dopušteni s obzirom na rezultate kozmoloških promatranja. Ovisno o načinu i brzini rasta gustoće fantomske energije, faktor skale može poprimiti beskonačnu vrijednost nakon konačnog vremenskog intervala u odnosu na sadašnji trenutak. Takav način širenja svemira ima dramatične učinke na vezane sustave u svemiru, neovisno o vrsti međudjelovanja zbog kojeg je sustav vezan. Naime, zbog negativnog i rastućeg tlaka fantomske energije, svi vezani sustavi postaju slobodni, odnosno dolazi do njihova raspada ili “razvezivanja”. Upravo zbog takva djelovanja na vezane sustave, ova vrsta konačne sudbine svemira dobila je naziv “*veliko razdiranje*” ⁷. Razmotrimo i jedan brojčani primjer [18]. Kada bi parametar jednadžbe stanja fantomske energije iznosio $w = -3/2$, “veliko razdiranje” nastupilo bi za približno 22 milijarde godina (za usporedbu, svemira je star $13,7 \pm 0,2$ milijardi godina [4]). Raspadi pojedinih vezanih sustava u svemiru slijede ovim redoslijedom. Milijardu godina prije “velikog razdiranja” skupovi galaksija više ne mogu održavati pojedinačne galaksije u vezanom stanju. Približno 60 milijuna godina prije kraja svemira, naša se galaksija raspada. Tri mjeseca prije “velikog razdiranja” Sunce više ne može svojom gravitacijskom silom zadržati planete u orbiti i dolazi do raspada Sunčeva sustava. Približno pola sata prije “velikog razdiranja” Zemlja više nije gravitacijski vezana i dolazi do njezina raspada. Atomi se raspadaju 10^{-19} s prije kraja svemira, a ubrzo slijede i raspadi atomskih jezgara i nukleona. Istaknimo da je ovakav dramatični kraj svemira samo jedan od mogućih kozmoloških scenarija koji uključuju fantomsku energiju. Postoje kozmološki modeli s fantomskom energijom koji ne vode do “velikog razdiranja”, već se u dalekoj budućnosti ponašaju slično svemiru s kozmološkom konstantom.

Na kraju spomenimo da su izgrađeni i modeli koji posebnosti širenja svemira nastoje objasniti bez uvođenja tamne energije. Neki od tih modela uzimaju da je gravitacijsko međudjelovanje modificirano na najvećim udaljenostima, što se sada očituje u ubrzanom širenju svemira [19]. Drugi modeli pak polaze od pretpostavke da je naš svemir dio svemira s većim brojem dimenzija te tako nastoje objasniti kozmološku dinamiku [20].

Utvrđivanje razloga ubrzanog širenja svemira te daljnje testiranje hipoteze o tamnoj energiji kao uzroku tog ubrzanja bit će i u budućnosti jedan od temeljnih ciljeva moderne kozmologije. Velik broj različitih modela i predloženih objašnjenja prirode tamne energije prisutnih u kozmološkoj literaturi govori o golemom interesu znanstvene zajednice za taj problem. S druge strane, postojanje bitno različitih modela za istu pojavu, kao što je ubrzano širenje svemira, otkriva da je znanost još daleko od ukupnog razumijevanja te pojave. Daljnja i sve preciznija kozmološka opažanja u budućnosti će izdvojiti modele koji najbolje opisuju nama dostupna svojstva svemira i tako nas još više približiti potpunom razumijevanju tamne energije i svemira u cjelini.

⁶od engleske riječi *quintessence*

⁷prema engleskom nazivu “*Big Rip*”

Literatura

- [1] A. G. Riess et al., *Astron. J.* 116 (1998) 1009; <http://cfa-www.harvard.edu/cfa/oir/Research/supernova/HighZ.html>.
- [2] S. Perlmutter et al., *Astrophys. J.* 517 (1999) 565; <http://www-supernova.lbl.gov/public/>.
- [3] C. Csaki, N. Kaloper, J. Terning, *Phys. Rev. Lett.* 88 (2002) 161302, <http://arxiv.org/abs/hep-ph/0111311>.
- [4] D. N. Spergel et al., *Astrophys. J. Suppl. Ser.* 148 (2003) 175; <http://map.gsfc.nasa.gov/>.
- [5] <http://lambda.gsfc.nasa.gov/product/cobe/>.
- [6] <http://cosmology.berkeley.edu/group/cmb/>.
- [7] <http://cmb.phys.cwru.edu/boomerang/>.
- [8] M. R. Nolta et al., <http://arxiv.org/abs/astro-ph/0305097>.
- [9] S. Weinberg, *Rev. Mod. Phys.* 61 (1989) 1.
- [10] P.J.E. Peebles, B. Ratra, *Rev. Mod. Phys.* 75 (2003) 559, <http://arxiv.org/abs/astro-ph/0207347>.
- [11] T. Padmanabhan, *Phys. Rept.* 380 (2003) 235, <http://arxiv.org/abs/hep-th/0212290>.
- [12] A. Einstein, *Sitzungsber. Preuss. Akad. Wiss. phys.-math. Klasse VI* (1917) 142.
- [13] H. B. G. Casimir, *Kon. Ned. Akad. Wetensch. Proc.* 51 (1948) 793.
- [14] B. Guberina, R. Horvat, H. Štefančić, *Phys. Rev. D* 67 (2003) 083001, <http://arxiv.org/abs/hep-ph/0211184>.
- [15] R. R. Caldwell, R. Dave, P. J. Steinhardt, *Phys. Rev. Lett.* 80 (1998) 1582, <http://arxiv.org/abs/astro-ph/9708069>.
- [16] A. Yu. Kamenshchik, U. Moschella, V. Pasquier, *Phys. Lett. B* 511 (2001) 265, <http://arxiv.org/abs/gr-qc/0103004>;
N. Bilić G.B. Tupper, R.D. Viollier, *Phys. Lett. B* 535 (2002) 17, <http://arxiv.org/abs/astro-ph/0111325>.
- [17] R. R. Caldwell, *Phys. Lett. B* 545 (2002) 23, <http://arxiv.org/abs/astro-ph/9908168>.
- [18] R. R. Caldwell, M. Kamionkowski, N. N. Weinberg, *Phys. Rev. Lett.* 91 (2003) 071301, <http://arxiv.org/abs/astro-ph/0302506>.
- [19] K. Freese, M. Lewis, *Phys. Lett. B* 540 (2002) 1, <http://arxiv.org/abs/astro-ph/0201229>.
- [20] V. Sahni, Yu. Shtanov, *JCAP* 0311 (2003) 014, <http://arxiv.org/abs/astro-ph/0202346>.

NUKLEARNE REAKCIJE U ZVIJEZDAMA I RANOM SVEMIRU

Matko Milin¹

Institut “Ruđer Bošković”, Zagreb

1 Uvod

Nuklearna astrofizika, tj. fizika nuklearnih procesa u svemiru, dio je znanosti u kojem se uspješno spajaju dva naizgled suprotna ekstrema svemira: njegovi ponajmanji objekti (atomske jezgre) s najvećima (zvijezdama, galaksijama i svemirom u cjelini). Nastala je već u ranim danima nuklearne fizike kada je uočeno da jedino nuklearne reakcije mogu objasniti golemu energiju koja se oslobađa na Suncu i u drugim zvijezdama (Bethe, 1938.). Danas je, unatoč dugogodišnjem intenzivnom razvoju, ona najživlji dio nuklearne fizike, još uvijek prepun iznenađenja i novih otkrića.

Glavni cilj nuklearne astrofizike jest razumjeti način na koji nastaju (i nestaju) izotopi i energija u zvijezdama i općenito u svemiru. Osnovni principi većine procesa odavno su poznati. No, velik broj bitnih detalja izmiče shvaćanju već jako dugo i stoga se ulažu velika sredstva za njihovo eksperimentalno proučavanje. Eksperimentalna nuklearna astrofizika uključuje laboratorijska mjerenja reakcija od astrofizičkog značaja. Zadnje desetljeće donijelo je velike pomake na mnogim područjima. Ogroman tehnički napredak (i u promatranjima i u eksperimentima) i sofisticiranije računske metode dovele su do mnogih važnih otkrića.

Za nuklearnog i čestičnog fizičara svemir predstavlja i najveći mogući ubrzivač čestica i kao takav pruža mogućnost indirektnog proučavanja procesa koji se nikad neće moći izazvati pomoću zemaljskih ubrzivača. Veza između nuklearne fizike i astrofizike je stoga dvosmjerna; ta se dva područja intenzivno isprepleću i potpuno razumijevanje jednoga od njih nemoguće je bez značajnog doprinosa drugoga...

1.1 Nuklearna astrofizika: astrofizički unos

Astrofizika je specifičan dio fizike jer je najveći dio spoznaja unutar nje dobiven jednostavnim *promatranjem*. Najveći dio svemira posve nam je nedostupan za bilo kakav drugi način istraživanja, a dakako, s astrofizičkim objektima (galaksijama, zvijezdama, planetima, ...) nemoguće je obavljati eksperimente. Posao je astrofizičara zato da iz podataka koji se dobivaju promatranjem rekonstruira procese koji se u pojedinim dijelovima i fazama svemira odigravaju. Dakako, najvažniji unos u svaki astrofizički model jesu dobri rezultati opažanja i njihova elementarna interpretacija.

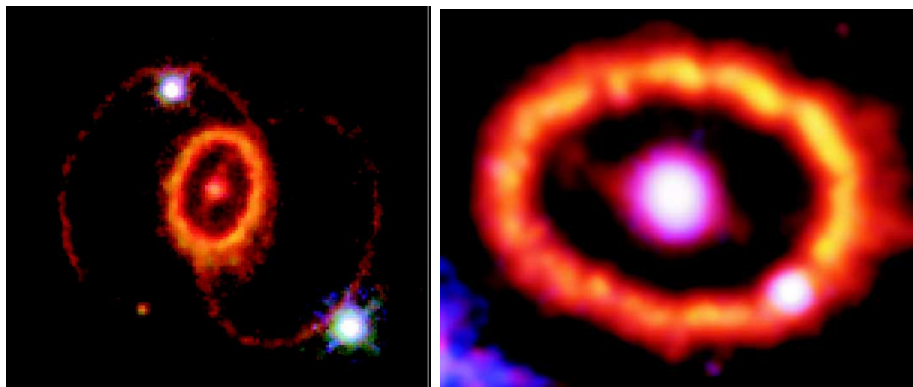
1.1.1 Zvijezde i njihova svojstva

Definirati pojam “zvijezda” nije posve jednostavno. Približno je točno reći da su zvijezde vruće svijetleće kugle plina koje nastaju u nebulama (“maglicama”) i u kojima se energija oslobađa nuklearnim reakcijama. Svojstva zvijezda variraju unutar vrlo širokog opsega: polumjer im može biti i ≈ 500 puta manji od Sunčeva, ali i ≈ 1000 puta veći. Masa im je između $1/20$ i 50 masa Sunca, a površinska temperatura od 3000 do 50000 °C. Vruće zvijezde su plave, a hladne crvene. Naše je Sunce između tih ekstrema i čini se žutim.

¹mmilin@lnr.irb.hr

Postoje objekti koji odstupaju od spomenutog opisa, a ipak se nazivaju zvijezdama. Npr. “neutronske zvijezde” nisu plinovite, “smeđi patuljci” nemaju vlastiti izvor energije itd. Dakle, pojam zvijezde određuje vrlo različite objekte, no baš ta raznolikost omogućuje izradu boljih modela i potpunije razumijevanje svih procesa u zvijezdama i oko njih.

Energija koju zvijezde zrače stvara se u njihovu središtu nuklearnim reakcijama. Evolucija svake zvijezde ponajprije ovisi o tim reakcijama te načinu i brzini trošenja nuklearnoga goriva. Drugi važni (ne nužno nezavisni) parametri su masa i polumjer zvijezde, te njihova temperatura i intenzitet zračenja. Dobar zvjezdani model, krećući od nuklearnih reakcija u jezgri zvijezde i prijenosa energije od jezgre do njezine površine, mora kao izlaz dobiti veličine koje su zabilježene astronomskim promatranjem. Također, model mora opisati promjenu zvijezde u vremenu, od njezina nastajanja do smrti. Baš je taj posljednji stupanj razvoja većine zvijezda, to jest njihova eksplozivna smrt, posebno važan jer se njime u međuzvjezdani prostor oslobađaju velike količine “prerađenog” materijala. Riječ je o tzv. **supernovama** koje nastaju u trenutku kada masivna zvijezda (najmanje ≈ 6 puta teža od Sunca) više nije u stanju nuklearnim reakcijama držati u ravnoteži gravitacijsku silu sažimanja. Nedavno (u “galaktičkim” razmjerima) uočena supernova SN1987A vrlo je važna za razvoj astrofizike. Precizno su izmjerene razne značajne veličine, a uz svjetlost i ostalo elektromagnetsko zračenje, detektirane su čak i neke čestice proizvedene pri toj eksploziji.



Slika 1: Supernova SN1987A slikana Hubbleovim teleskopom 1994. i 1998. godine.

1.1.2 Kemijski sastav materijala u svemiru

Slično kao i zvijezde, međuzvjezdani (i međugalaktički) materijal u raznim dijelovima svemira pokazuje vrlo različita svojstva. Njegov se kemijski sastav određuje na razne načine i njegovo je precizno poznavanje vrlo važno za astrofizičke modele. Npr., jedan od temeljnih argumenata u prilog danas standardno prihvaćenoj teoriji velikog praska (*engl.* Big Bang) je “prvobitni” kemijski sastav svemira, tj. njegov sastav prije formiranja prvih zvijezda. Proučavanjem “starih” objekata i dijelova svemira zaključeno je da se nakon prvih par minuta vidljiva materija u svemiru sastojala od $\approx 75\%$ masenog udjela vodika i $\approx 25\%$ helija, a te brojke je nemoguće reproducirati drugim modelima evolucije svemira, a ni kasnijim nuklearnim gorenjem vodika u zvijezdama.

Za shvaćanje procesa u svemiru iznimno je važno i točno poznavanje udjela ostalih elemenata u njegovu kemijskom sastavu. Npr., na temelju izmjerene količine deuterona

(deuteron je izotop vodika koji uz proton sadržava neutron) i izotopa litija stvorenih u ranom svemiru, moguće je relativno precizno odrediti niz parametara bitnih za standardni kozmološki model. Nadalje, količina težih elemenata u nekom dijelu svemira direktno je povezana s brojem i vrstom supernova u tom području od početka svemira do danas. Tako se za naš lokalni dio svemira procjenjuje da je prošao kroz jednu zvjezdanu evoluciju od zvjezdane prašine do supernove. Štoviše, vjeruje se da je supernova u našem bliskom susjedstvu inicirala nastanak Sunčeva sustava prije ≈ 5 milijardi godina i proizvela sve elemente teže od helija bez kojih ne bi bilo života na Zemlji...

1.1.3 Kozmičke zrake

Kozmičko zračenje čine visokoenergijske nabijene čestice koje na Zemlju stižu s raznih svemirskih objekata (npr. Sunca, aktivnih galaktičkih jezgara ili supernova). Ono uključuje elektrone, protone, helijeve jezgre, jezgre ugljika, kisika i praktički svih ostalih stabilnih izotopa. Zastupljenost pojedinih čestica u kozmičkom zračenju, kao i njihova energijska ovisnost, korisni su izvori informacija o njihovom izvoru. Interakcijom kozmičkog zračenja s atmosferom njegov se sastav bitno mijenja i na površini Zemlje se detektiraju i čestice koje ne postoje u primarnom zračenju (npr. mioni). Proučavanjem kozmičkih zraka moguće je indirektno dobiti informacije i o međuzvjezdanom i međugalaktičkom materijalu koji na njih utječe na putu od izvora do Zemlje.

1.2 Nuklearna astrofizika: unos nuklearne fizike

Da bi se u potpunosti razumjeli nuklearni procesi u svemiru, potrebno je, praktički, sve znanje iz nuklearne fizike. Dakako, neki su procesi i jezgre više bitni, a neki manje i zbog toga se o pojedinim dijelovima nuklearne fizike govori kao o “astrofizičkim”. Istraživanja tih dijelova nuklearne fizike posebno su se intenzivirala u zadnjih desetak godina.

1.2.1 Svojstva jezgara

Atomi se sastoje od jezgre i elektronskog omotača. Same jezgre su pozitivno nabijene i sastoje se od protona i neutrona povezanih jakim nuklearnom silom, najjačom od 4 osnovne sile (a to su: slaba i jaka nuklearna, te gravitacijska i elektromagnetska sila). Vrlo bitno svojstvo nuklearne sile je njezin vrlo kratak doseg: ona djeluje samo među protonima i neutronima (zajedničkim imenom: “nukleonima”) koji su udaljene manje od nekoliko femtometara ($1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$). To direktno utječe na veličinu i oblik atomskih jezgara: velika većina jezgara zbog toga je kuglasta oblika, a najteže stabilne jezgre imaju tek nešto više od ukupno 200 nukleona. Uz jaku, stabilnost jezgre određuje i slaba nuklearna sila (ona uzrokuje tzv. β -raspade koji su općenito sporiji od čestičnih).

U prirodi se može naći ≈ 250 stabilnih (ili vrlo dugo živućih) izotopa. Još je par tisuća izotopa β -nestabilno s vremenom poluživota dovoljno dugim da odigraju važnu ulogu u brzom, eksplozivnom nukleosintezi. Čak su i neke jezgre (^8Be) čije je vrijeme poluživota svega $\approx 10^{-16} \text{ s}$ važne u astrofizičkim procesima! Dakle, za opis astrofizičkih procesa potrebno je uistinu veliko poznavanje nuklearne fizike.

1.2.2 Svojstva nuklearnih reakcija

Nuklearna reakcija je proces u kojem se dvije jezgre dovoljno približe da među njima

djeluje nuklearna sila. Svaka se od jezgara u tom procesu može, ali i ne mora promijeniti, ovisno o mehanizmima same reakcije koji znaju biti vrlo različiti. Na neki se način u reakcijama postiže efekt za kojim su težili srednjovjekovni alkemičari: jedni elementi se pretvaraju u druge. Alkemičari su samo imali krivo što se tiče temperature: umjesto temperatura od 200 do 300 °C koje su oni koristili u pećima, potrebne su temperature od ≈ 15 milijuna °C, kao npr. u središtu Sunca.

Nuklearna fuzija je vrsta reakcije kod koje se dvije jezgre spajaju i tvore treću, težu. Principi nuklearne fuzije već su desetljećima dobro poznati i ona se među raznim jezgrama danas standardno izaziva i proučava u stotinama laboratorija diljem svijeta, i to zbog temeljnih istraživanja u nuklearnoj fizici, istraživanja povezanih s astrofizikom, a već se neko vrijeme ispituje i mogućnost ostvarivanja komercijalno isplative fuzije.

Sve jezgre su električno pozitivno nabijene pa se prije nuklearne reakcije odbijaju relativno jakom kulonskom silom. Da bi se jezgre uopće našle na dovoljno malenoj udaljenosti na kojoj nuklearna reakcija postaje moguća, moraju imati dovoljno veliku kinetičku energiju kojom će svladati tu “kulonsku barijeru”. To se u zvijezdama događa zahvaljujući visokim temperaturama; zbog toga se govori o “termonuklearnoj fuziji” (u pitanju su temperature od stotine milijuna °C).

Ako je ukupna masa jezgara prije reakcije veća nego nakon nje, u tom se procesu oslobađa energija koja se može izračunati prema čuvenoj Einsteinovoj formuli: $\Delta E = \Delta m \cdot c^2$. Npr., reakcijom ${}^2\text{H} + {}^3\text{H} \rightarrow {}^4\text{He} + n$ oslobađa se i energija od 17.59 MeV (**MeV** je standardna jedinica za energiju u nuklearnoj fizici, a jednaka je 1.6×10^{-13} J). Oslobodena energija pomaže u održavanju visokih temperatura nužnih za reakcije.

2 Odabrani nuklearni procesi u svemiru

Kombinirajući spomenuta znanja o astronomskim fenomenima s rezultatima nuklearne fizike, moguće je rekonstruirati tijek mnogih astrofizičkih procesa. Oni se zbivaju u raznim dijelovima svemira, i u zvijezdama i izvan njih, a ovdje će biti izdvojeni samo neki, najzanimljiviji procesi.

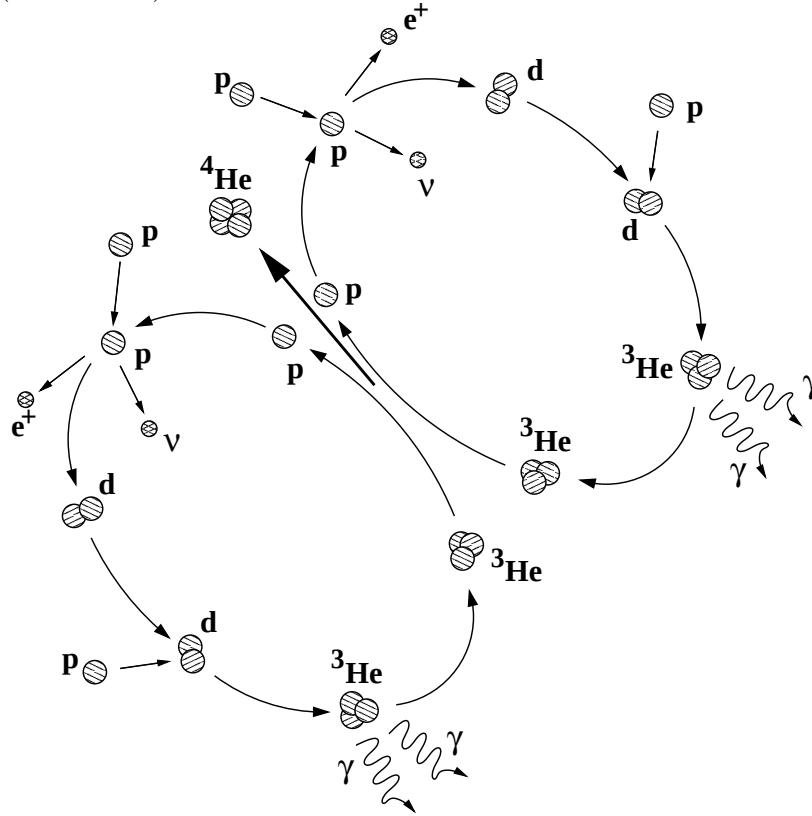
2.1 Nuklearne reakcije u ranom svemiru

U vrlo ranoj fazi (do trenutka $t = 0.01$ s poslije velikog praska, što odgovara temperaturi od oko $T = 10^{11}$ °C) svemirom dominira zračenje. Hlađenjem, zbog širenja svemira, slabe nuklearne interakcije postaju zanemarive, pa protoni i neutroni ispadaju iz statističke ravnoteže ($t = 1$ s, $T \approx 10^{10}$ °C), i broj se neutrona (zbog njihova β -raspada) od tog časa smanjuje u odnosu na broj protona. Temperature su još uvijek previsoke da bi postojale nezanemarive količine bilo koje jezgre teže od protona, odnosno neutrona. Nukleosinteza počinje reakcijom:



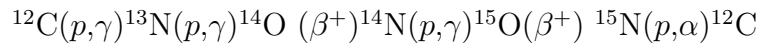
(s n je označen neutron, s p proton, s d deuteron, a s γ foton). Na dovoljno visokim temperaturama, deuteron nastao ovom reakcijom praktički se momentalno razbija fotonima. Tome pogoduje i mala energija vezanja deuteronu (2.225 MeV) i velik broj fotona (na svaki nukleon otpada $\approx 10^9$ fotona). Opstanak deuteronu postaje moguć na temperaturi $T \approx 10^8$ °C što odgovara starosti svemira od $t = 200$ s. Jednom kada je stvoren deuteron, moguće je i stvaranje težih jezgara (koje imaju veću energiju vezanja)

masa 4 protona veći je za 0.7% od mase helijeve jezgre; masa koja nedostaje pretvorila se u energiju (≈ 26 MeV).



Slika 3: Gorenje vodika u zvijezdama putem ciklusa “proton-proton”.

Povećavanjem temperature središta zvijezde, gorenje vodika sve se više počinje zbiti modificiranim proton-proton ciklusima koji uključuju i teže jezgre. Konačno, na temperaturama $\approx 2 \cdot 10^8$ °C važan postaje i tzv. CNO-ciklus:



Valja uočiti da je netto-efekt ovog procesa više-manje jednak pp -ciklusu: četiri protona su pretvorena u jezgru ^4He (uz emisiju fotona i “lakih” čestica). Naše Sunce za sada $\approx 99\%$ energije proizvodi pp -ciklusom, a samo $\approx 1\%$ putem CNO-ciklusa.

2.2.2 Nuklearno gorenje helija i težih elemenata

Trošenjem vodika kao nuklearnog goriva, dolazi do ponovnog sažimanja zvijezde (gravitacijska sila više nije uravnotežena tlakom nastalim zbog oslobađanja energije nuklearnim reakcijama). U središtu zvijezde sada se nalaze velike količine helija i njegova temperatura raste sve dok ne dostigne temperaturu potrebnu za “paljenje” helija.

Za gorenje helija vrlo je važna sljedeća činjenica: ne postoje čestično stabilne jezgre s 5 ili 8 nukleona. Dakle, najjednostavnijim reakcijama (dodavanjem nukleona ili još jedne jezgre helija) proizvode se jezgre koje se odmah brzo raspadaju i time se sinteza težih elemenata bitno usporava. Proizvodnja teških elemenata zato se dalje zbiva putem reakcije s tri (!) čestice u ulaznom kanalu: $^4\text{He} + ^4\text{He} + ^4\text{He} \rightarrow ^{12}\text{C} + \gamma$; zbivanje te reakcije dijelom je ubrzano zbog prisutnosti čestično nestabilnog međustanja jezgre ^8Be . Dodavanjem još jedne jezgre helija dobiva se jezgra ^{16}O , a daljnjim reakcijama ^{28}Si i tako dalje sve do najjače vezane jezgre: ^{56}Fe .

2.3 Supernove

Daljnja nukleosinteza zbiva se u eksplozivnim procesima, ponajprije u supernovama. Pojednostavljeno rečeno, ti su procesi toliko brzi i intenzivni da su, s astrofizičkog stanovišta, moguće praktički sve nuklearne reakcije. Koji će se procesi uistinu zbivati, ovisi ponajprije o nuklearnoj fizici i to je predmet intenzivnog istraživanja posljednjih godina. Treba reći da uspješan model supernove još ne postoji!

3 Eksperimentalna nuklearna astrofizika

Velik dio nuklearnih reakcija važnih za astrofiziku ostao je do danas nedovoljno istražen ponajprije zbog eksperimentalnih ograničenja. Prvo i najveće takvo ograničenje jest nemogućnost mjerenja na pravim energijama. Naime, koliko god temperature u središtu zvijezda izgledale visokima, njima još uvijek odgovaraju energije gibanja koje su bitno manje od energija na kojima se nuklearne reakcije mogu mjeriti u laboratoriju. Mjerenje na vrlo niskim energijama teško je prije svega zbog malenih vjerojatnosti da se reakcije dogode. Te su vjerojatnosti toliko malene da bilo kakvi neželjeni događaji u detektorima (npr. prije spomenuto kozmičko zračenje) postaju neprihvatljivi. Rješenja tog problema su dvojaka: ili eliminirati sve potencijalne izvore šuma (nedavno je zbog toga jedan malen akcelerator instaliran u tunelu Gran Sasso u Italiji, 1400 metara ispod površine Zemlje) ili koristiti neku od indirektnih metoda. Npr. parametri koji opisuju jednu reakciju mogu se odrediti mjerenjem neke druge reakcije pod točno određenim eksperimentalnim uvjetima i uz razumne teorijske pretpostavke. Jedna se takva metoda (tzv. metoda trojanskog konja), u suradnji s grupom iz Catanije već godinama koristi i na ubrzivaču Tandem Van de Graaf na Institutu “Ruđer Bošković” u Zagrebu. Detalji se mogu naći na web-adresi Laboratorija za nuklearne reakcije Instituta “Ruđer Bošković”:

<http://www.irb.hr/hr/str/zef/z3labs/lmr/>

Drugi, također vrlo bitan ograničavajući faktor mjerenja jest činjenica da je znatan dio jezgara koje sudjeluju u zanimljivim reakcijama β -nestabilan. Njihov poluživot varira od milisekunda pa sve do godina, no čak ni s ovim posljednjim direktno mjerenje sve donedavno nije bilo moguće. Tek prije desetak godina počela su se intenzivno razvijati postrojenja na kojima se ubrzavaju radioaktivni snopovi. Ovaj je dio eksperimentalne nuklearne astrofizike vrlo živ i u idućih desetak godina očekuje se mjerenje velikog broja bitnih reakcija. Grupa s Instituta “Ruđer Bošković” aktivno je uključena i u mjerenja s radioaktivnim snopovima; detalji se mogu naći na spomenutoj web-adresi.

Na kraju treba spomenuti i nedavno pokrenut projekt **ITER** (kratica od engl. *International Thermonuclear Experimental Reactor*). U pitanju je ponovni pokušaj postizanja komercijalno isplative fuzije kao novog izvora energije. ITER je kolaboracija više desetaka znanstvenih timova iz zemalja Europske unije, Japana, Rusije, SAD-a, Kine i eventualno Kanade. Uz Međunarodnu svemirsku stanicu, riječ je o najskupljem znanstvenom projektu svih vremena (proračun mu je procijenjen na čak ≈ 20 milijardi dolara). Ideja i cilj projekta vrlo su jednostavni: u laboratoriju proizvesti nuklearnu fuziju vodika, ali tako da se u proces uloži manje energije nego što se iz njega izvuče. Time bi se otvorio put za izgradnju fuzijskih nuklearnih elektrana, koje bi, za razliku od danas standardnih fisijskih elektrana, koristile jeftino gorivo te proizvodile kudikamo manje radioaktivnog otpada. Način na koji se energija proizvodi u zvijezdama kopirao bi se na Zemlji...

Što nam to dolazi iz svemira?

Damir Bosnar¹

Fizički odsjek Prirodoslovno-matematičkog fakulteta, Sveučilište u Zagrebu,
Zagreb, Bijenička 32

Tok različitih nabijenih čestica koje iz svemira dolaze na Zemljinu površinu, pa tako i na naša tijela a da mi to posebno ne opažamo, iznosi oko 180 čestica u sekundi po kvadratnom metru i približno tri četvrtine njih su mioni. Iako je svemirsko zračenje otkriveno prije gotovo stotinu godina i od tada se neprestano proučava, priroda, porijeklo i energija tih čestica je različita i ne sasvim razjašnjena. Za razumijevanje tih pojava potrebno je znanje iz astronomije, nuklearne fizike te fizike elementarnih čestica, stečeno u proučavanju pojava i na Zemlji i u svemiru. S druge strane, to zračenje koje dopire do nas donosi nam informacije o samom svemiru, njegovu nastanku i razvoju te o svojstvima elementarnih čestica koje susrećemo na Zemlji i od kojih je izgrađena sva materija, pa i mi sami.

Ukratko ćemo navesti današnje razumijevanje svemirskog zračenja te opisati jednostavan uređaj za detektiranje svemirskih miona i mjerenje vremena njihova života.

Vrste zračenja

Sva materija sastavljena je od neutralnih atoma u čijem je središtu pozitivna atomska jezgra sastavljena od protona i neutrona, a oko nje kruže negativno nabijeni elektroni. Do te su spoznaje došli fizičari početkom prošlog stoljeća eksperimentalnim i teorijskim istraživanjima. Još i prije nego što je formirana slika atoma, opažena je emisija nabijenih ili neutralnih čestica iz nekih atoma. Ta pojava, za koju je ustanovljeno da potječe iz atomske jezgre, nazvana je radioaktivnost. Prema vrsti emitiranih čestica razlikujemo alfa, beta i gama zračenje. Alfa i beta čestice nose električni naboj, dok je gama zračenje električki neutralno. Alfa čestice su jezgre helijeva atoma sastavljene od dva protona i dva neutrona, beta čestice su elektroni (ili njihove pozitivne antičestice, pozitroni), dok su gama čestice elektromagnetsko zračenje. Čestice emitirane u radioaktivnom zračenju prilikom prolaska kroz materiju uzrokuju odvajanje elektrona iz elektronskog omotača i jezgre atoma te tvari. Na temelju te pojave, nazvane ionizacijom, radioaktivnost se može identificirati i mjeriti jednostavnim sakupljanjem naboja koji se proizvede u nekoj tvari, obično plinu, prilikom prolaska zračenja. Radioaktivno zračenje ima danas mnoge medicinske i tehnološke primjene, ali, isto tako, ustanovljen je i štetan utjecaj na čovjeka upravo zbog ionizacije atoma tvari kroz koji prolazi, što uzrokuje uništavanje i odumiranje stanica tkiva.

Kod radioaktivnih raspada od neutralnih čestica, osim spomenutog elektromagnetskog zračenja, javljaju se i neutrini, egzotične čestice koje vrlo slabo međudjeluju s materijom i za koje se do nedavno vjerovalo da nemaju mase, a čije je postojanje pretpostavljeno 1930. godine da bi se objasnio raspad jezgara koje emitiraju beta čestice. Postojanje neutrina eksperimentalno je potvrđeno 1956. godine, dok njegova masa još nije izmjerena.

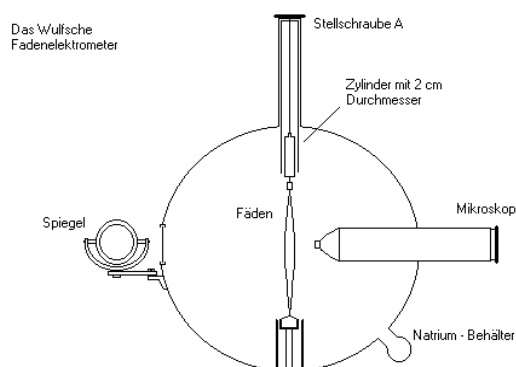
Prilikom prelaska elektrona iz viših u niža energijska stanja u elektronskom omotaču atoma, također se emitira jedna vrsta elektromagnetskog zračenja, nazvana X-zračenje.

¹ bosnar@phy.hr

Osim prirodnih radioaktivnih, elementa na Zemlji danas postoje i umjetni radioaktivni elementi proizvedeni u ubrzivačima čestica ili kao usputni produkti u nekim primjenama kao što je proizvodnja energije u nuklearnim elektranama.

Svemirsko zračenje

Osim ovog zračenja koje potječe iz zemaljskih elemenata, Zemlja i sve na njoj izloženo je stalnom toku čestica iz svemira, nabijenih i neutralnih, različitih vrsta i energija. Izvori tog svemirskog zračenja nalaze se i u našem Sunčevu sustavu i u našoj galaksiji, a i izvan nje. Svemirsko zračenje otkrio je 1912. austrijski fizičar Viktor Hess, koji je eksperimentima u balonu na različitim visinama (slika 1) ustanovio da se ionizacija plina u instrumentima za mjerenje radioaktivnosti povećava s visinom, što je bilo u suprotnosti s pretpostavkom da je ta ionizacija uzrokovana prirodnom radioaktivnošću iz elemenata na Zemlji. Hess je zaključio da to zračenje potječe iz svemira i za to je otkriće 1936. godine dobio Nobelovu nagradu. No to je bila tek prva u nizu Nobelovih nagrada za proučavanja vezana sa svemirskim zračenjima.



Slika 1 Lijevo: Viktor Hess u balonu s instrumentima za mjerenje radioaktivnosti. Desno: Mjerni instrument koji se u Hessovo doba rabio za mjerenje radioaktivnosti. Više informacija na <http://physik.uibk.ac.at/hephy/Hess/homepage>.

Od samog otkrića svemirskog zračenja nastojale su se ustanoviti vrste zračenja, energije čestica kao i njihovo podrijetlo. Promatramo li ovo primarno svemirsko zračenje tj. nabijene čestice koje dolaze u Zemljinu atmosferu, danas znamo da ga 98% čine atomske jezgre, dok su 2% elektroni. Od jezgara, najviše ima vodikovih jezgara (protona) – oko 87 % , zatim helijevih jezgara – oko 12% , a jedan posto čine teže jezgre i zastupljeni su gotovo svi elementi periodičnog sustava elemenata. Energije čestica svemirskog zračenja u rasponu su od nekoliko tisuća eV do preko 10^{20} eV ($1\text{eV}=1,6 \cdot 10^{-19}$ J). Učestalost upada nabijenih čestica na Zemlju ovisi o njihovim energijama. Tako za čestice energije 10^{12} eV imamo otprilike 10 čestica po metru kvadratnom u minuti, dok za energije od 10^{20} eV imamo 1 česticu na kvadratni kilometar u oko 100 godina. Priroda i podrijetlo tih čestica najviših energija još su zagonetni, kao i načini na koje se te čestice ubrzaju na tako velike brzine. Međunarodna kolaboracija pod imenom «Pierre Augere», sastavljena od 250 znanstvenika iz 14 zemalja, u

Argentini gradi sustav od 1600 detektora koji bi trebao razjasniti porijeklo i prirodu tih čestica najviših energija (vidjeti <http://www.auger.org/>).

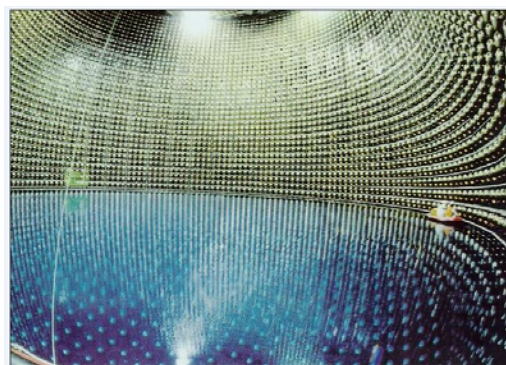
Osim nabijenih čestica, na Zemlju dolaze i neutralne čestice: elektromagnetsko zračenje različitih energija te neutrini. Jedan od izvora neutrina je Sunce. U Suncu neutrini nastaju u reakciji spajanja lakših jezgara u teže – fuziji, koja je izvor Sunčeve energije. Neutrini su egzotične čestice koje vrlo slabo interagiraju s materijom i imaju vrlo malu masu, tako da mogu proći kroz cijelu Zemlju a da ne djeluju s materijom. Time je njihovo opažanje vrlo otežano, a eksperimenti u kojima se oni detektiraju vrlo zahtjevni i dugotrajni. Opažaju se detektiranjem određenih reakcija u kojima iz jednog elementa nastaje drugi prilikom interakcije s neutrinom, no zbog slabog međudjelovanja učestalost takvih reakcija vrlo je mala te je potrebno ili dugo vrijeme mjerenja ili detektori vrlo velike mase.

Za proučavanje neutrina iz Sunca posljednja u nizu Nobelovih nagrada za fiziku vezana za istraživanja svemirskog zračenja dodijeljena je 2002. godine američkom fizičaru Rayu



Slika 2 Davisov eksperiment za detekciju neutrina iz Sunca s posudom od 600 tona C_2Cl_4 u rudniku Homestake, J. Dakota, SAD. Posuda s C_2Cl_4 nalazi se u bazenu s vodom kao zaštitom od pozadinskog zračenja, a koja se, kao što vidimo, mogla koristiti kao bazen za osvježavanje u čekanju rezultata, jer su mjerenja trajala godinama.

Vidjeti <http://www.bnl.gov/bnlweb/raydavis/research.htm>.



Slika 3 Detektor Kamiokande koji sadržava 3000 tona vode (na slici desno fotomultiplikatori koji registriraju svjetlosni signal proizveden prolaskom neutrina kroz vodu, a lijevo detektor djelomično ispunjen vodom i znanstvenici u gumenom čamcu u obilasku i popravljanju fotomultiplikatora) izgrađen u rudniku Kamioka u Japanu pod vodstvom Koshibe za detekciju neutrina iz Svemira, njime su potvrđeni Davisovi rezultati i indirektno pokazano da neutrini imaju masu, vidjeti <http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp>.

Davisu mlađem (slika 2). On je tu nagradu podijelio s japanskim fizičarem Masatoshijem Koshibom, voditeljem eksperimenta Kamiokande (slika 3), također za proučavanje neutrina iz svemira, te s talijanskim fizičarem, koji radi u SAD-u, Riccardom Giacconi-om za proučavanje X-zračenja iz svemira (slika 4).²



Slika 4 Svemirska stanica Chandra za opažanje x-zračenja iz svemira, razvijena na prijedlog i pod vodstvom Giacconi-ja, a lansirana 1999. godine. X-zračenje iz svemira moguće je detektirati samo svemirskim letjelicama izvan atmosfere, jer se ono u atmosferi apsorbira. To nam zračenje donosi novu vrstu informacija o svemiru.

Vidjeti <http://chandra.harvard.edu/>, <http://chandra.harvard.edu/photo/index.html>.

Svemirski mioni i njihovo opažanje

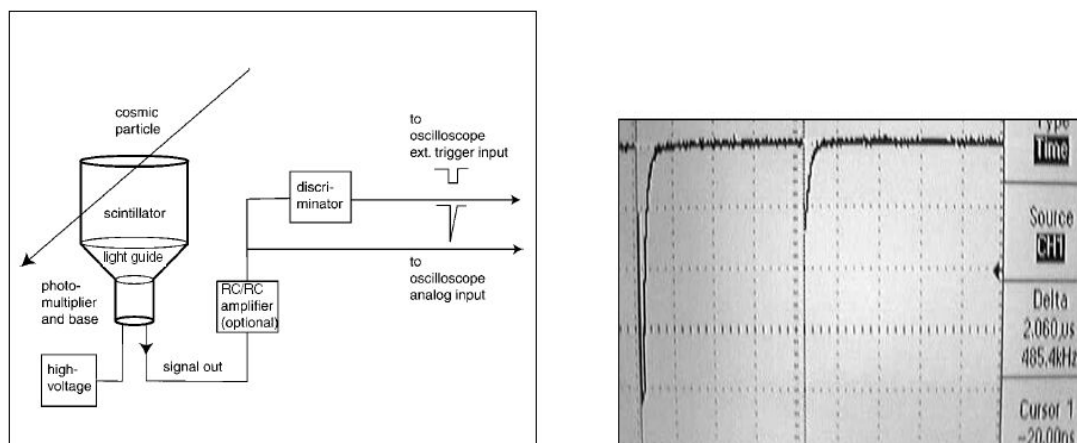
Kada primarno svemirsko zračenje, koje se, kao što smo spomenuli, pretežno sastoji od protona, upadne u Zemljinu atmosferu, u sudarima s jezgrama atoma zraka nastanu različite čestice nazvane sekundarno svemirsko zračenje. U prvoj polovici 20. stoljeća proučavanjem sekundarnog svemirskog zračenja otkriven je niz dotad nepoznatih čestica kao što su pozitroni, mioni, pioni. Time je započeta nova grana istraživanja u fizici, fizika elementarnih čestica. Ta istraživanja temeljnih svojstava materije nastavljena su od sredine prošlog stoljeća uporabom sve većih i većih ubrzivača čestica, koji su te novootkrivene čestice proizvodili u laboratorijima i omogućavali detaljno proučavanje njihovih svojstava. No energije opažene kod čestica koje dolaze iz svemira još nisu dosegnute, niti su moguće današnjom tehnologijom i najvećim postojećim i planiranim ubrzivačima.

Jedna od elementarnih čestica otkrivenih u tim prvim istraživanjima svemirskih zraka bio je mion. Danas znamo da on pripada obitelji leptona, vrste čestica bez jakih interakcija. Možemo reći da je on teži i kratkoživići brat mnogo poznatijeg elektrona. Mion se, u prosjeku nakon 2,2 mikrosekunde, raspada na elektron i dva neutrina, a također postoji i mion koji nosi pozitivan naboj. No povijest njegova otkrića vrlo je složena. U početku se pogrešno mislilo da je on prijenosnik jake interakcije, tj. čestica čije je postojanje pretpostavio japanski fizičar Yukawa prije 2. svjetskog rata. No eksperimentalna i teorijska istraživanja sredinom prošlog stoljeća postavila su stvari na svoje mjesto kada je proučavanjem svemirskog zračenja otkriven pion i identificiran kao pravi nositelj jakog međudjelovanja. Pion nastaje u srazu protona iz primarnog svemirskog zračenja s jezgrama

² O Nobelovoj nagradi 2002. godine priloge su napisali Ivica Picek i Krešimir Pavlovski za zbornik 19. ljetne škole (<http://www.hfd.hr/ljskola/ljskola19.html>)

atoma zraka. Kako je i on nestabilna čestica, raspada se, a jedan od produkata raspada je upravo mion koji dolazi do površine Zemlje.

Danas nam detekcija ovih miona koji nastaju iz piona nastalih u interakciji primarnog svemirskog zračenja s jezgrama atoma zraka može poslužiti kao jednostavna ilustracija metoda istraživanja u fizici elementarnih čestica. Od otkrića miona prošlo je više od pola stoljeća i u tom su se razdoblju znatno razvile eksperimentalne tehnike detekcije elementarnih čestica. Danas je mione moguće detektirati vrlo jednostavnom aparaturom sastavljenom od scintilacijskog detektora s pripadajućom elektronikom i digitalnog osciloskopa te izmjeriti vrijeme njihova života (slika 5).



Slika 5 Lijevo: Skica jednostavnog detektorskog sustava sa scintilacijskim detektorom za detekciju svemirskih miona. Desno: tipičan signal raspada miona – mion ulazi u scintilacijski detektor (prvi signal na osciloskopu) i raspada se nakon 2.06 mikrosekunde (drugi signal na osciloskopu). Izvor: H. Muehry and P. Ritter The Physics Teacher, 40 (2002) 294.

Zanimljivo je uočiti da je preživljavanje svemirskih miona od mjesta nastanka u atmosferi do površine Zemlje omogućeno relativističkom dilatacijom vremena. Ona kaže da vrijeme teče sporije u sustavu koji se giba, pa tako mion, nastao u atmosferi raspadom piona i koji se giba velikom brzinom, može preživjeti do dolaska na površinu Zemlje, iako njegov put traje više od vremena koje mion u mirovanju živi. Tako nam ovaj jednostavni eksperiment, osim ilustracije principa detekcije elementarnih čestica, može poslužiti i kao demonstracija specijalne teorije relativnosti.

Atomska i molekulska fizika - od fundamentalnih istraživanja do primjene u svakodnevnom životu

Irena Labazan¹

Institut za fiziku, Zagreb, Bijenička 46

1. Uvod

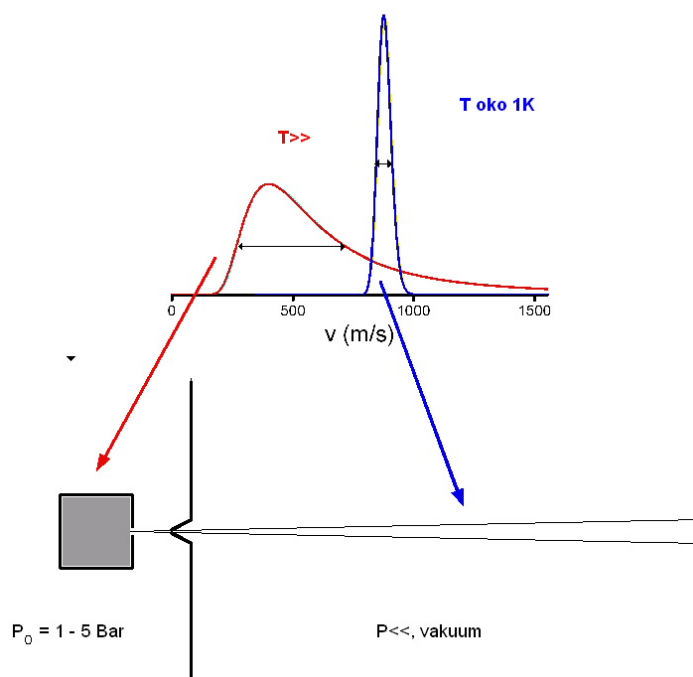
Suvremena atomska i molekulska fizika sve više pomiče temperaturne granice prema ultrahladnom području, gdje je gibanje molekula i atoma potpuno ili djelomično zamrznuto [1], [2]. Temperatura nekog skupa čestica u plinovitoj fazi definirana je srednjom kinetičkom energijom, odnosno brzinom tih čestica. Naš doživljaj temperature, određen je konstantnim bombardiranjem našeg tijela vrlo brzim molekulama. Ako se brzina molekula reducira, temperatura se smanjuje. Na sobnoj temperaturi, srednja brzina molekula zraka je oko 500 m/s, što je oko 2000 km/h. Molekule će mirovati samo na vrlo malim temperaturama koje su blizu apsolutne nule ($-273.15\text{ }^{\circ}\text{C}$). Postavlja se pitanje zašto je toliko važno razvijati nerijetko vrlo komplicirane (i skupe) metode za uspješno usporavanje atoma i molekula. Ako na primjer želimo proučavati muhu i naučiti nešto o njezinom izgledu i osobinama, najlakše je to učiniti ako ona miruje. Slično je i s molekulama. Mogućnost proučavanja molekula ograničena je njihovim velikim brzinama na normalnim temperaturama. Tipična dimenzija spektroskopskih eksperimentalnih postava je oko 1 m, i molekule brzine 500 m/s proći će tu udaljenost u nekoliko milisekundi, što ograničava spektroskopsku razlučivost. Spore molekule proboravit će više vremena u tipičnom mjernom uređaju i time će točnost mjerenih varijabli porasti. Molekule se mogu usporavati na nekoliko načina. Jedan način temelji se na promjenama kinetičke energije snopa polarnih molekula u vremenski promjenjivim električnim poljima [3]. Različite stare i nove metode optičke spektroskopije primjenjuju se u svrhu detektiranja sporih atoma i molekula. U prvom dijelu rada prikazat ćemo tehniku formiranja atomskih i molekulskih snopova. Drugi dio posvećen je vrlo preciznoj spektroskopskoj metodi detekcije molekula, laserskoj apsorpcijskoj spektroskopiji pomoću optičkog rezonatora, LASPOR.

2. Atomski i molekulski snopovi

Metoda atomskih i molekulskih snopova poznata je već duži niz godina, a primijenjuje se za priređivanje molekula malih translacijskih, rotacijskih i vibracijskih temperatura. Elektroni u atomima i molekulama ne mogu se gibati proizvoljnim brzinama i biti na proizvoljnim udaljenostima od jezgre, već su te veličine određene tako da energija poprima samo određene vrijednosti (kvantizacija energije) koje proizlaze iz kvantne mehanike (tzv. dozvoljeni energijski nivoi). Molekule i atomi čiji su elektroni u najnižem dozvoljenom energijskom nivou mogu se pobuditi fotonima one valne duljine koja odgovara razlici dva dozvoljena energijska stanja (tzv. rezonantni fotoni). Pored elektronskih pobuđenja, svaka molekula može se translirati, rotirati i vibrirati. Na primjer, dvoatomske molekule mogu rotirati oko osi koja je okomita na liniju koja spaja dvije atomske jezgre. Atomi u dvoatomskoj molekuli mogu vibrirati jedan u odnosu na drugi, duž osi koja spaja atomske jezgre. Te rotacije i vibracije u molekuli nisu proizvoljne, već se odvijaju na načine koji ispunjavaju zahtjev kvantizacije energije koji proizlazi iz kvantne mehanike. Kažemo da molekula okupira

¹ labazan@ifs.hr

određene rotacijsko-vibracijske energijske nivoe, odnosno energije rotacije i vibracije mogu biti jednake samo određenim dozvoljenim vrijednostima. Molekule iz nekog proizvoljnog skupa mogu biti u različitim kvantno-mehanički dozvoljenim rotacijskim i vibracijskim nivoima. Energije onih rotacijskih nivoa koji su najviše popunjeni u takvome skupu molekula određuju rotacijsku temperaturu. Analogno, energije onih vibracijskih nivoa koji su najpopunjeniji određuju vibracijsku temperaturu skupa molekula.



Slika 1 Ilustracija formiranja atomskog ili molekulskog snopa i prikaz pripadajućih raspodjela brzina. Poluširina prikazanih raspodjela mjera je temperature sistema molekula.

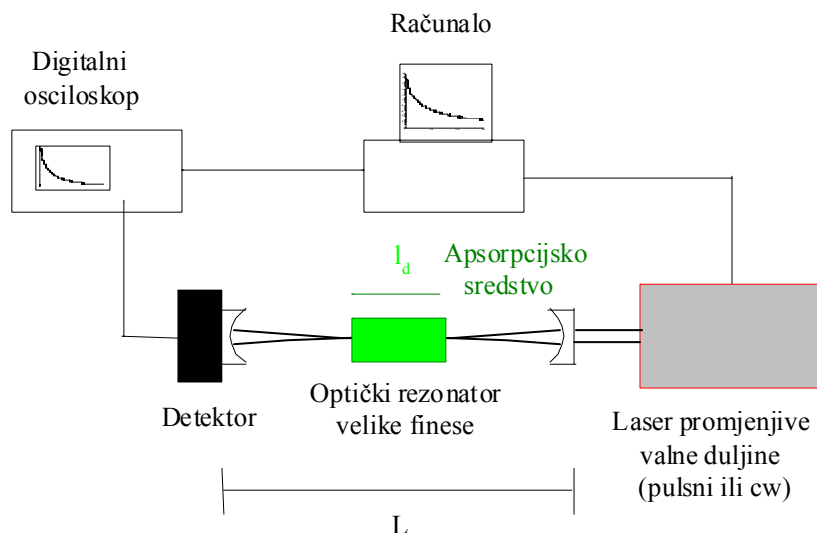
Zamislamo sada molekule u nekoj metalnoj kutiji na visokom tlaku P_0 (slika 1). Kutija s molekulama spojena je vrlo malim otvorom s drugom kutijom u kojoj je tlak P , izrazito malen u odnosu na tlak u prvoj kutiji (vakuum). Molekule na sobnoj (i višim) temperaturama mogu se gibati u bilo kojem smjeru, tako da je bilo koji smjer gibanja jednako vjerojatan. Dio molekula počeo će se širiti (ekspandirati) iz kutije pod visokim tlakom P_0 u kutiju malog tlaka P . Pri takvoj ekspanziji gotovo se sva energija molekula pretvara u kinetičku energiju toka molekula iz kutije visokog tlaka u kutiju malog tlaka tj. formira se molekulski snop. Molekule ili atomi u snopu gibati će se usmjereno u prostoru, tako da će im brzina u smjeru gibanja biti znatno veća od okomitih komponenta brzine. U koordinatnom sustavu molekulskog snopa, relativna brzina molekula je vrlo mala, te je odgovarajuća translacijska temperatura vrlo blizu 1 K (za definiciju translacijske temperature vidi sliku 1). Pobuđenja rotacijskih i vibracijskih stupnjeva slobode su minimalna tj. molekule u snopu okupiraju najniže rotacijske i vibracijske energijske nivoe.

Snopove atoma i molekula koje su na sobnoj temperaturi u plinovitoj fazi nije teško formirati (plemeniti plinovi, na primjer). Molekule koje su na sobnoj temperaturi u čvrstoj fazi, mogu se ispariti pomoću fokusiranog laserskog pulsa (laserska ablacija, engl. laser ablation) i tako uvesti u već formiran snop plemenitih plinova (tzv. seeded beams). Takav postupak priređivanja molekula omogućio je da se po prvi puta kreiraju i spektroskopski

opaze molekule kao Cu_2 , Pb_2 , YbF , CuSi , AgSi , AlC , AuSi , različite C_n ($n=2,3,4..$) molekule itd. Zajednička ekspanzija molekula od interesa i nekog plemenitog plina vrlo je korisna kod proučavanja tzv. slobodnih radikala, kemijski nestabilnih međuprodukata različitih kemijskih reakcija (NH , OH , $\text{CH}...$). Nalazimo ih svugdje, u Zemljinoj atmosferi, međuzvjezdanoj materiji, ljudskom tijelu itd. Njihovo je vrijeme života jako kratko zbog reakcije s okolinom, međutim, u molekulskom snopu sastavljenom od plemenitog plina i nekoliko postotaka radikala, sprječavaju se te reakcije i otvaraju vrata za vrlo preciznu optičku spektroskopiju. Snopovi (bio)molekula pružaju mogućnost vrlo precizne spektroskopije molekula sastavljenih od mnogo atoma, upravo zbog tog svojstva zamrzavanja unutrašnjih pobuđenja.

3. Laserska apsorpcijska spektroskopija pomoću optičkog rezonatora

Za detekciju molekula u snopovima najčešće se koristi metoda laserom inducirane fluorescencije, rezonantna ionizacijska spektroskopija, a sve češće i jedna nova apsorpcijska metoda, tzv. laserska apsorpcijska spektroskopija pomoću optičkog rezonatora, LASPOR [4], [5] (*engl.* cavity ring-down spectroscopy, CRDS). Mjerenje apsorpcije i određivanje gustoća metodom LASPOR razvija se unazad zadnjih desetak godina. U klasičnoj apsorpcijskoj spektroskopiji, promjena intenziteta izvora svjetlosti na nekoj rezonantnoj valnoj duljini nakon prolaska kroz apsorbirajuće sredstvo (skup molekula), određuje apsorpciju, proporcionalnu gustoći molekula apsorpcijskog sredstva. Međutim, male promjene se teško mogu detektirati, što znatno smanjuje mogućnost određivanja malih koncentracija. U LASPOR metodi mjerimo vrijeme (tzv. vrijeme života) koje laserski fotoni provedu u optičkom rezonatoru u koje se stavlja apsorpcijski uzorak. Osnova metode je optički rezonator, sastavljen od dva zakrivljena visokorefleksivna zrcala, postavljenih paralelno jedno u odnosu na drugo i smještenih na udaljenosti koja zadovoljava uvjete stabilnosti.



Slika 2 Tipična eksperimentalna postava za LASPOR

Zamislamo laserski puls valne duljine λ koji ulazi u linearni optički rezonator formiran od dva identična zrcala vrlo velikog koeficijenta refleksivnosti R ($R > 99.999\%$), slika 2. Laserski puls će se djelomično reflektirati na stražnjem zrcalu, a jedan dio će izaći iz

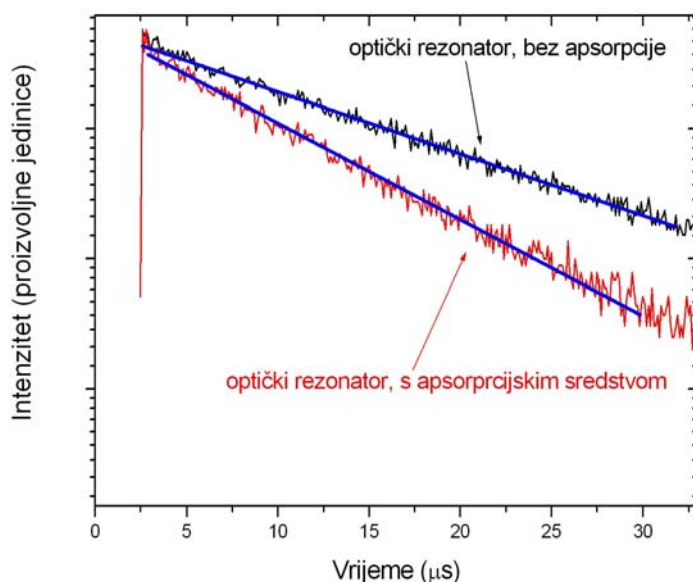
rezonatora. Reflektirani puls smanjenog intenziteta nastavlja gibanje prema ulaznom zrcalu, gdje se opet djelomično reflektira i putuje prema stražnjem zrcalu. Dio pulsa izlazi iz rezonatora, a dio se reflektira prema ulaznom zrcalu itd. Ukoliko nakon izlaznog zrcala postavimo detektor fotona, možemo mjeriti vremensku promjenu izlaznog intenziteta iz optičkog rezonatora, takozvanu valnu formu. U idealnom slučaju ta je promjena eksponencijalnog oblika i ovisna je o refleksivnosti zrcala R , njihovoj međusobnoj udaljenosti L i brzini svjetlosti c .

$$I(t) = I_0 e^{-\frac{c}{L} |\ln(R)| t} = I_0 e^{-\frac{t}{\tau_0}} \quad (1)$$

Veličina τ_0 naziva se vlastito vrijeme života fotona određene valne duljine u praznom optičkom rezonatoru. U izrazu (1) veličina I_0 označava početni intenzitet. Zamislamo sada da se u optičkom rezonatoru nalazi i neko apsorpcijsko sredstvo dimenzije l_d koje može apsorbirati laserske fotone baš te valne duljine. Svaki puta kada laserski snop prođe kroz rezonator, intenzitet će mu se dodatno smanjiti zbog apsorpcije. Na izlazu iz optičkog rezonatora opet ćemo mjeriti izlazni intenzitet, no sada će on biti ovisan o veličini τ , vlastitom vremenu života fotona u punom optičkom rezonatoru:

$$I(t) = I_0 e^{-\frac{c}{L} (|\ln(R)| + \kappa l_d) t} = I_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (2)$$

τ je sada ovisan i o apsorpciji opisanoj produktom $\kappa \cdot l_d$, gdje κ označava apsorpcijski koeficijent laserskih fotona valne duljine λ u apsorpcijskom sredstvu koje se nalazi u optičkom rezonatoru. Izmjerene valne forme praznog i punog rezonatora prilagođavaju se na eksponencijalne funkcije (1) i (2) i određuju se vremena života τ_0 i τ . Tipične valne forme praznog i punog rezonatora prikazane su na slici 3, u linearno-logaritamskoj skali



Slika 3 Tipične valne forme (promjene izlaznog intenziteta u vremenu) optičkog rezonatora bez (crno) i sa (crveno) apsorpcijskim sredstvom. Plavom bojom prikazane su prilagodbe na funkcije oblika (1) i (2).

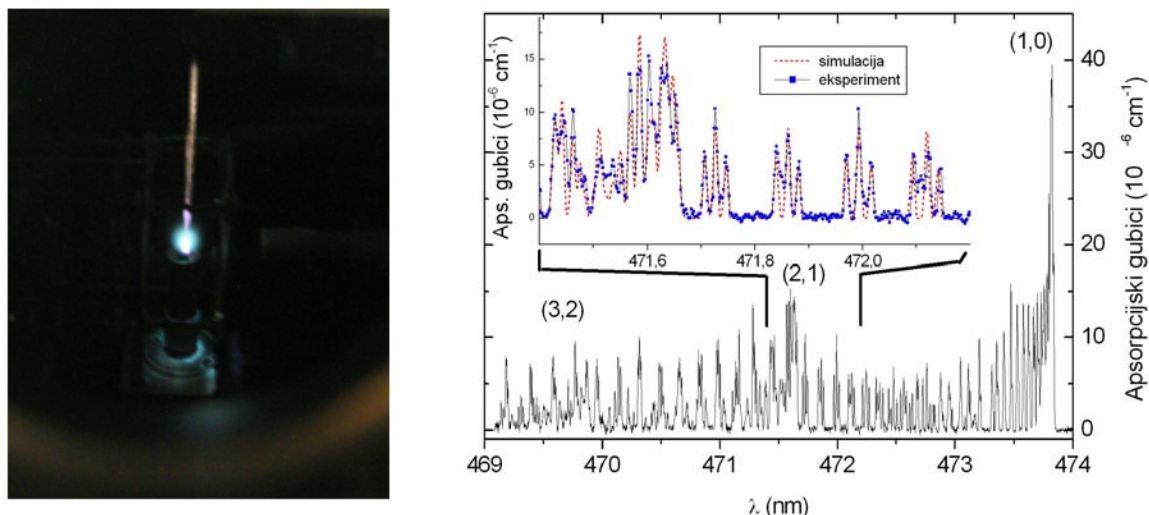
Korelacija τ_0 i τ sadrži informaciju o apsorpciji za određenu valnu duljinu lasera:

$$A \equiv \kappa l_d = \frac{L}{c} \left(\frac{1}{\tau} - \frac{1}{\tau_0} \right) \quad (3)$$

Ako se laserska valna duljina mijenja unutar nekog intervala i za svaku valnu duljinu mjeri τ_0 i τ , dobit ćemo apsorpcijski spektar apsorbirajućeg uzorka u optičkom rezonatoru u apsolutnim mjernim jedinicama. Apсорpcija je proporcionalna gustoći atoma ili molekula u apsorpcijskom uzorku pa LASPOR metoda omogućuje određivanje gustoća atoma i molekula. LASPOR metoda razvijena je prvenstveno za apsorpcijska mjerenja pulsnim laserskim sistemima podložnim fluktuacijama intenziteta snopa. Stanovite modifikacije omogućile su upotrebu kontinuiranih laserskih sistema koji daju lasersku akciju kontinuirano u vremenu i čija je spektralna poluširina manja od pulsnih.

Osjetljivost metode uvelike ovisi o koeficijentu reflektivnosti zrcala. Danas su nam dostupna kvalitetna visokoreflektivna zrcala cjelokupno vidljivo područje i dio infracrvenog optičkog spektra. Tehnološki je zahtjevnija izrada visokoreflektivnih zrcala za područje spektra UV dijela optičkog spektra (valne duljine manje od 400 nm), gdje se postiže nešto niža reflektivnost (99.9 %).

Dosada su LASPOR metodom detektirane različite molekule i radikali u molekulskim snopovima, od kojih mnoge nisu bile poznate otprije ili se vrlo malo znalo o njima. U 'Laboratoriju za nanosekundnu lasersku spektroskopiju' na Institutu za fiziku primijenjujemo LASPOR na detektiranje molekula i vremenski promjenjive apsorpcije pri laserskom isparavanju različitih meta [5]. Na slici 4 prikazan je tipičan apsorpcijski spektar izmjeren LASPOR metodom, a prikazuje tzv. Swan vrpce C_2 molekula opaženih pri laserskom isparavanju grafitnih meta.



Slika 4 Lijevo: Lasersko isparavanje grafitne mete. Desno: Tipičan LASPOR spektar izmjeren u laserski isparenom oblaku grafitne mete, prikazuje tzv. Swanovu vrpce C_2 molekule.

Pored fundamentalnih spektroskopskih istraživanja, LASPOR se kao vrlo precizna i apsolutna metoda, počinje primijenjivati i izvan okvira laboratorija. Na primjer, malen i kompaktan prijenosan LASPOR uređaj opremljen pulsnim laserskim sistemom Nd:YAG + dye laser, valne duljine 662 nm koja odgovara karakterističnim i jakim spektralnim linijama NO_3 i N_2O_5 molekula, poslužio je za određivanje i praćenje promjena koncentracije spomenutih molekula u zraku na Sveučilištu Boulder, Colorado [6]. LASPOR eksperimentalna tehnika upotrijebljena je za detekciju C_2H_6 molekula u izdahu pušača i nepušača, u realnom vremenu. Različiti hidrokarbonati u atmosferi uzrokuju efekt staklenika i pridonose globalnom zatopljenju. Pomoću LASPOR-a određivana je koncentracija nečistoća kao što su H_2CO (formaldehid) i CH_4 (metan) u ambijentalnom zraku [7].

Osim od velikog značaja u fundamentalnim istraživanjima materije, spektroskopija postaje nezamjenjiva metoda u velikom broju primijenjenih istraživanja. Do danas razvijeni i komercijalno dostupni laserski sistemi pokrivaju velik dio elektromagnetskog spektra, od ultraljubičastog, do dalekog infracrvenog. Poznavanje karakterističnih spektroskopskih prijelaza nekog atoma ili molekule, omogućuje nam mjerenje apsorpcije A (relacija (3)) samo na jednoj valnoj duljini i brzo i efikasno određivanje vrlo točnih koncentracija u različitim situacijama izvan laboratorija.

Bibliografija:

- [1] <http://www.nobel.se/physics/laureates/1997/index.html>;
<http://www.nobel.se/physics/laureates/2001/index.html>.
- [2] S. Milošević, Matematičko-fizički list, broj 3, 1998/99.
- [3] H. L. Bethlem, G. Meijer, Int. Rev. Phys. Chem. **22** (2003) 73;
<http://www.rijnh.nl/n4/n2/fl234.htm>.
- [4] I. Labazan, S. Milošević, Phys. Rev. A **68** (2003) 032901
http://eskola.hfd.hr/proc_zav/proc-14/proc14.htm.
- [5] <http://bobi.ifs.hr/~slobodan/pro03.htm>; I. Labazan, doktorska disertacija, PMF, Sveučilište u Zagrebu, 2002.
- [6] S. S. Brown, H. Stark, S. J. Ciciora, A. R. Ravishankara, Geophys. Res. Letters **28** (2001) 3227.
- [7] <http://www.uni-duesseldorf.de/WWW/MedFak/LaserMedizin/hering/CRDS/Crds.html>.

2005. – SVJETSKA GODINA FIZIKE

Slobodan Milošević¹
Institut za fiziku, Zagreb, Bijenička 46

U ovom predavanju bit će riječi o Svjetskoj godini fizike 2005., njezinu neposrednom povodu, stvarnim razlozima za takvu akciju te o tome kakve se aktivnosti očekuju.

Priprema se velika fešta! Tulum, slavlje. 2005. godina priprema se kao Svjetska godina fizike. Tu inicijativu Europskog fizikalnog društva (EPS), kojoj se pridružila Međunarodna unija za temeljnu i primijenjenu fiziku (IUPAP) podržava i UNESCO [1]. Svi su pozvani: pojedinci, fizičari, znanstvenici, profesori, učitelji, institucije, društva, škole, publika, i vi koji čitate ove retke.

2005. godine navršava se stotinu godina otkada je Albert Einstein, sigurno jedan od najpoznatijih znanstvenika svih vremena, objavio svoja tri (pet) epohalna rada. Obilježavajući tu "čudesnu godinu", želi se skrenuti pažnja svjetske javnosti na važnost fizike i prirodoslovlja za svakodnevni život i budućnost.



Logo proslave 2005. godine. (*Beverly Hartline*) . Crvena baza – prošlost ; Plavo gore – budućnost; Žuto i zeleno – povezujući prošlost i budućnost, zeleno za napredak, žuto za mir, partnerstvo, suradnju i timski rad.

Vidi: www.wyp2005.org

Zašto? Zato što se u cijelom svijetu opaža pad stupnja razumijevanja fizike u javnosti. Zato što u cijelom svijetu opada interes za studiranje fizike. S druge strane, rješavanje velikih globalnih problema koji se na početku 21. stoljeća uočavaju, kao što je problem proizvodnje energije, zaštita okoliša i ljudskog zdravlja, teško može napredovati bez razvoja i doprinosa fizike. To je jasno fizičarima, ali ne i širokoj javnosti.

Organizatori Svjetske godine fizike (WYP2005), zato žele iskoristiti dobar glas jednog od najvećih fizičara svih vremena, Alberta Einsteina, i preokrenuti spomenute negativne trendove, slaveći njegove epohalne radove koji su označili povijest i utemeljili specijalnu teoriju relativnosti, znatno pridonijeli razvoju kvantne fizike te objasnili Brownovo gibanje pomoću molekularno-kinetičke teorije topline.

O *Albertu Einsteinu* napisane su mnoge knjige, a postoji i opsežan sadržaj na Internetu [2,3,4]. Ukratko, Albert Einstein rođen je 14. ožujka 1879. godine u Ulmu, gradu na jugu Njemačke. Majka Pauline bila je učena žena, violinistica, a otac Herman elektrotehničar, inovator-poduzetnik. Einsteinovo školovanje nije išlo sasvim glatko, no vrlo rano postao je svjestan da želi biti teorijski fizičar. U dobi od 26 godina, 1905. postigao je znanstveni stupanj doktora znanosti (30. travnja) i istovremeno objavio pet čuvenih radova. U to doba radio je u Švicarskom patentnom zavodu u Bernu kao ispitivač patenata, bio je oženjen Milevom (od

¹ slobodan@ifs.hr

1903.) i otac malog djeteta (sin Hans-Albert rođen 1904., drugi sin Eduard rođen je 1910.). Godine 1933. napustio je Njemačku i preselio se u Princeton. Umro je 18. travnja 1955. godine u Princetonu kao slavan znanstvenik, humanist i filozof. Dobitnik je Nobelove nagrade za fiziku 1921. godine za rad koji je objasnio fotoelektrični efekt [5]. Znete li gdje se sve primjenjuje fotoelektrični efekt?

O vremenu prije 100 godina. Da bismo si dočarali atmosferu u kojoj su nastali Einsteinovi radovi, potrebno je prebaciti se razmišljanjem u vrijeme 100 godina unatrag. Kako je tada izgledao svakodnevni život, što je znala znanost, što je tehnika poznavala? Možemo se poslužiti raznim vremenskim skalama (vidi ref. [6] ključna riječ: timeline). U društveno-političkom smislu bilo je to doba ratova, sukoba i previranja (kao i danas), ali i u srcu same Europe (odvajanje Norveške od Švedske, napadi Turske na Bugarsku, rat Rusija-Japan, pobuna u Rusiji itd.). U tehničkom smislu: Rudolf Diesel konstruira «svoj» motor 1892., Marconi izmišlja bežični telegram 1895., Marconi šalje prvu radioporuku 1897., prvi hidrogenerator prema Teslinu nacrtu u upotrebi 1896., Marconi šalje radiovalove preko Atlantika 1901., neonsko svjetlo izmišlja George Claude 1902., konstruiran parni generator i parna turbina 1903., itd.

U fizici, godini 1905. prethodili su važni eksperimenti i otkrića: fotoelektrični efekt otkriva Hertz 1887., iste godine Michelson i Morley izvede eksperiment u kojem pokazuju konstantnost brzine svjetlosti. Bitna su otkrića o subatomskej prirodi i elektromagnetskom zračenju: otkriće X- zraka 1895., radioaktivnosti 1896., otkriće elektrona 1897., protona 1898., otkriće alfa i beta zraka 1899., gama zraka 1900. itd.

O značenju navedenih radova i o samim radovima Alberta Einsteina koji su objavljeni 1905. godine napisane su mnoge knjige [7,8]. Bila je to zaista čudesna godina. Naravno, Einstein je godinama prije radio na tim radovima, ali ponukan obiteljskim zahtjevima i tražeći odgovarajući posao, uspio je biti vrlo efikasan.

- U ožujku 1905. godine Einstein je poslao u časopis *Annalen der Physik*, tada vodeći njemački časopis iz fizike, članak pod naslovom: «Razmatrajući heruistički pogled prema emisiji i transformaciji svjetlosti», u kojem je izložio novo razumijevanje strukture svjetlosti. Predložio je da svjetlost može djelovati kao da se sastoji od diskretnih, neovisnih čestica energije, na neki način po uzoru na čestice plina. Poslije (1926.) te su čestice dobile ime: fotoni. Godine 1900. Max Planck izložio je ideju o diskretnosti energije, objašnjavajući zračenje crnog tijela. Ipak Einsteinova pretpostavka bila je dalekosežnija. Njegova se teorija naizgled suprostavljala dotad općeprihvaćenoj teoriji da se svjetlost sastoji od oscilirajućih elektromagnetskih valova. No pomoću «svjetlosnih djelića», kako je nazvao čestice energije, uspio je objasniti fenomen fotoelektričnog efekta u kojem svjetlost izbacuje elektrone iz metala. Konačnu eksperimentalnu potvrdu donijeli su eksperimenti Comptona 1922. godine.

- U travnju 1905. dovršio je doktorski rad «Novo određivanje molekularnih dimenzija» u kojem je pokazao kako se može odrediti Avogadrov broj i veličine iona u otopini mjereći osmotski tlak i difuzijske koeficijente.

- U svibnju 1905. godine u časopis *Annalen der Physik* stigao je drugi članak Alberta Einsteina pod naslovom «O gibanju čestica uronjenih u mirujuću tekućinu kako to nalaže molekularna kinetička teorija topline». Einstein je predložio objašnjenje nasumičnog kretanja mikroskopskih čestica (Brownova gibanja poznatog od 1827.) pomoću poznate kinetičke teorije koja objašnjava toplinu kao efekt neprestanog kretanja atoma. Ako se sićušne ali vidljive (pod mikroskopom) čestice nalaze u tekućini, nasumični sudari s nevidljivim atomima (molekulama) uzrokuju da mikročestice plešu nasumičan skokovit ples. Detaljno je objasnio

to kretanje i osnažio postojeću kinetičku teoriju. To je bio velik doprinos u stvaranju predodžbe o atomima i molekulama kao osnovnim djelićima svega što nas okružuje.

- U lipnju 1905. Einstein je poslao u *Annalen der Physik* članak o elektromagnetizmu i gibanju «O elektrodinamici pokretnih tijela». Na tom je radu vjerojatno radio niz godina. Od vremena Galileja i Newtona fizičari su znali da laboratorijska mjerenja raznih mehaničkih procesa nikad ne pokazuju razliku između aparatura koje miruju ili onih koje se pravocrtno gibaju konstantnom brzinom. To je princip relativnosti. No prema teoriji koju su razvili Maxwell i Lorentz, svjetlost ne bi trebala zadovoljavati taj princip. Njihova je teorija predviđala da bi mjerenja brzine svjetlosti trebala pokazivati efekt gibanja. Eksperimentalno to nije bilo opažano. Einstein je intuitivno pretpostavio da se princip relativnosti mora odnositi na sve fenomene, mehaničke i nemehaničke. U članku je iznio novu teoriju (koja je poslije dobila ime specijalna teorija relativnosti) koja je pokazala usklađenost teorije o elektromagnetizmu i principa relativnosti, uvodeći novi koncept vremena.

- U rujnu 1905. Einstein je u članku «Ovisi li inercija tijela o njegovu energetsom sastavu?» izložio jednu od posljedica svoje specijalne teorije relativnosti: ako neko tijelo emitira određen iznos energije, tada se masa tog tijela mora smanjiti za proporcionalni iznos. Taj odnos između energije i mase izražava se čuvenom formulom $E = mc^2$. Energija i masa dvije su različite manifestacije jedne te iste stvari. To je konačno potvrđeno 1933. godine u eksperimentu Irène Joliot-Curie i Frédérica Joliot.

Kako bi svijet danas izgledao bez Einsteinovih radova? Vjerojatno nije sasvim korektno postaviti takvo pitanje jer se njegovi radovi ne mogu odvojiti od eksperimentalnih otkrića na kojima počivaju. Dakle, vjerojatno bi netko drugi došao do istih rezultata (vidi ref. [9]). No Einsteinova fantastična intuicija nesumnjivo je ubrzala tijek događaja koji su slijedili. Neke posljedice tih i nešto kasnijih radova realizirane su znatno kasnije (otkriće lasera 1960., Bose-Einsteinova kondenzacija 1995.), postavke specijalne teorije relativnosti i dalje se dokazuju sa sve većom točnošću [10], dok se neke posljedice Einsteinovih predviđanja opće teorije gravitacije tek prvi put provjeravaju 2005. [ref. 11]. Sve to govori o opravdanosti povoda za slavljenje radova iz 1905. godine, ali i svih ostalih važnih otkrića prije i nakon toga.

Što se sve planira za 2005. godinu? Pregršt je ideja i prijedloga. Lokalne i putujuće izložbe o fizici i njezinim postignućima; lokalni događaji o fizici u svakodnevnom životu - integracija u kulturne događaje, javni performansi; akcije u školama, na fakultetima u nacionalnim i privatnim istraživačkim laboratorijima (popularna predavanja, radionice za učenike i roditelje, razna natjecanja, otvoreni dani); interdisciplinarnе konferencije, radionice ili simpoziji (matematika, kemija, biologija, itd.); suradnja s lokalnom industrijom, tehnološkim parkovima itd.; publicitet u novinama i specijaliziranim časopisima, plakati na javnim mjestima i sredstvima javnog prijevoza (vlakovi, autobusi, avioni), specijalna izdanja poštanskih maraka itd.; posebni programi na nacionalnoj i lokalnim TV i radio postajama; Izdavanje SGF2005 (WYP2005) novosti u izdanjima nacionalnih fizikalnih društava; WYP2005 web-stranice sa svježim informacijama i forumima, itd. U tim se akcijama žele obraditi razne teme: promocija javnog razumijevanja fizike i prirodoslovlja; fizika u obrazovanju; fizika kao baza mnogih drugih disciplina i inkubator za pojavu novih znanstvenih i tehnoloških područja; veliki izazovi za fiziku u 21. stoljeću; fizika u zemljama u razvoju i fizika za razvoj; žene u fizici; kulturno nasljeđe fizike, od kineskog, egipatskog, starogrčkog nasljeđa do moderne fizike itd. Bilo bi nepravredno i površno ne spomenuti da se takve i slične akcije već godinama održavaju u raznim prilikama (npr. Europski tjedan znanosti, Fizika na pozornici, Godina fizike u Njemačkoj 2000. itd. vidi ref. [12].)

O popularizaciji znanosti, o komunikaciji znanosti. Nesumnjivo je da se na popularizaciji fizike i znanosti radi sve više. Čak i dnevne novine uvode (uz autopriloge i kuharice) i priloge o znanosti. Razvoj Interneta tomu zasigurno znatno pridonosi. Vijesti o novim otkrićima objavljuju se sve češće u novinama i na televiziji paralelno s objavom u znanstvenim časopisima. Nažalost, katkad i prije toga. Zato je, uoči godine posebnog veličanja fizike, očekivanih cirkusa i parada, potrebno reći još nekoliko riječi i o tome što je to znanost, i znanstvenik, i koji su to principi znanstvenog rada koji se ne smiju napustiti. Jer mediji, koliko god bili nužni u promicanju znanstvene svijesti, kriju u sebi i niz opasnosti. Neke od njih proizlaze iz neobučenosti ljudi u medijima, ali i iz neznanstvenog ponašanja nekih «znanstvenika». Protekle godine obilježile su tako razne afere objavljivanja lažnih rezultata od ljudi koji žele postići slavu (i novac), nanoseći veliku štetu naporima mnogih drugih promotora i komunikatora znanosti (afere s novim materijalima Schon, element 118, kvark-gluonska plazma itd). Pravi znanstvenik objavljuje svoje rezultate ponajprije u znanstvenim časopisima koji provode recenziju (provjeru) na međunarodnoj razini. A rezultat postaje vjerodostojan tek ako je ponovljiv od nezavisnih laboratorija. I ono što je posebno važno pravi znanstvenik neprestano **sumnja** u svoje otkriće, spreman je staviti ga na ponovnu provjeru, i spreman je prihvatiti nova rješenja. Imperativ u znanosti je sumnjati. Da bismo postigli napredak u razumijevanju, moramo ostati suzdržani i dopustiti si da nešto ne znamo. Ako skupljate informacije (znanje) u znanosti, to ne znači da pronalazite istinu, nego nalazite da je to manje ili više moguće (vidi predavanja R.P. Feynmana [13]: ako je A. Einstein bio vizionar za 20. stoljeće, onda je R.P. Feynman bio vizionar za 21. stoljeće (nanotehnologija)). To je na neki način u suprotnosti s izlaženjem u medije, u suprotnosti s popularizacijom, u suprotnosti sa stvaranjem klišeja i vjerovanja. Jedna od značajki Svjetske godine fizike jest ta što se ti pravi znanstvenici potiču na komunikaciju i popularizaciju. Važno je probuditi svijest da znanstveno otkriće ne završava objavom u poznatom svjetskom časopisu, nego da ga treba približiti što široj javnosti, ali pritom ne gubeći ništa od znanstvenog pristupa. Jer i smisao znanstvenih otkrića jest da to budu otkrića za sve i svakomu na korist. To nije lagan zadatak.

O tome što se planira u svijetu, a što u Hrvatskoj, možete naći na priloženim linkovima. Informacije se iz dana u dan mijenjaju i nadopunjuju. U trenutku održavanja ove ljetne škole bit će vjerojatno poznato više detalja o događajima koji se planiraju u Hrvatskoj. Jer, naposljetku, to nas sve posebno zanima, gdje je fizika u Hrvatskoj (Fizika u Hrvatskoj) [14]. Kako se vi možete uključiti, bilo da nastavljate sa školom sljedeće godine ili započinjete studij?



Lijevo je službeni logo Hrvatskog fizikalnog društva koje na nacionalnoj razini okuplja više od 700 članova, znanstvenika, osmoškolskih i srednjoškolskih profesora te studenata u nastojanju da unaprijedi i pomogne razvoj fizike u Hrvatskoj.

Vidi: www.hfd.hr

Iz života Alberta Einsteina možemo naučiti da je, osim čvrstog uvjerenja od rane mladosti o tome što želi raditi u životu, većinu svojih velikih otkrića postigao mlad, prije 35. godine. Neki će reći da više ništa veliko nije ostalo da bi se otkrilo. No to nije točno. Jednako kao i godina oko 1905., i danas se događaju čudesna otkrića, bilježi nepredvidljiv tehnološki napredak i postoji niz neriješenih zagonetki koje čekaju nekoga s intuicijom da ih riješi.

Prijedlog za igru: Što se događa danas? Postoji li negdje jedan «mali Einstein» i s čim se on suočava?, Kakvo je društveno-političko okruženje, što znanost zna? Što može tehnologija? Koja su otvorena pitanja u fizici i znanosti? To ostavljamo za predavanje i radionice ljetne škole. Naputak: upotrijebi Google (ključne riječi: nanotehnologija, kvantno računanje, novi materijali, nova stanja materije, manipulacija atomima ...[15])

Za kraj, Albert Einstein nije bio samo briljantan fizičar, već i humanist i filozof. Kao i mnogim slavnim osobama, pripisuju mu se razne izreke. Jedna prikladna glasi: «Ako je A uspjeh u životu, onda je $A = x + y + z$, gdje je $x = \text{RAD}$, $y = \text{IGRA}$, a $z = \text{znati šutjeti}$.» [vidi ref 16 za još].

Literatura / linkovi

- [1] Web stranica organizacije: www.wyp2005.org
- [2] Izložba o Einsteinu on-line <http://www.aip.org/history/einstein/>
- [3] Albert Einstein Arhive : <http://jnul.huji.ac.il/einstein/>
- [4] Einstein revealed NOVA TV : <http://www.pbs.org/wgbh/nova/einstein/>
- [5] Nobel e-muzej: <http://www.nobel.se/physics/laureates/1921/index.html>
- [6] PSI Gate: http://www.psigate.ac.uk/newsite/physics_timeline.html
- [7] Physweb: 1905: Einstein's paper revolution <http://physicsweb.org/article/review/11/10/1>
- [8] Einstein's Miraculous Year: Five Papers That Changed the Face of Physics (ed) John Stachel 1998 Princeton University Press 198 stranica
- [9] David Jamieson, Celebrating 1905: A famous year for Einstein and physics – and almost for Melbourne's William Sutherland http://uninews.unimelb.edu.au/articleid_1361.html
- [10] The Most Precise Test Yet of Special Relativity <http://www.aip.org/enews/physnews/2002/split/590-1.html>
- [11] Gravity probe B <http://einstein.stanford.edu/>
- [12] S. Milošević, Fizika na pozornici, http://eskola.hfd.hr/proc_za_vas/proc-13/proc13.htm lipanj 2000.
- [13] R. P. Feynman, The pleasure of finding Things Out (najbolji kratki radovi) Helix books, Perseus Pub. Cambridge Massachusetts 1999) ISBN 0-7382-0349-1
- [14] Hrvatska web stranica <http://www.hfd.hr/hr/activ/hrwyp2005.html>
- [15] S. Milošević, Pregled događanja u fizici 2003. godine http://eskola.hfd.hr/proc_za_vas/proc-20/proc20.htm (i pregledi prethodnih godina od 1999.)
- [16] Albert Einstein Quotes <http://www.heartquotes.net/Einstein.html>

Od oka do svijesti - kako radi naš vizualni sustav?

S. Marčelja¹

Institut "Ruđer Bošković", Zagreb, Bijenička 54

Da bismo razumjeli osnove rada našeg vizualnog sustava, potrebno je bar elementarno poznavanje svih prirodnih znanosti – od fizike do neurofiziologije. Problem je, stoga, zanimljiv, i uči nas potrebi za interdisciplinarnim znanjem koje se u našem obrazovnom sustavu uglavnom zanemaruje. Dodatna motivacija za studenta takvih problema jest što će ujedno naučiti osnove obrade signala ili reprezentacije slika. To se onda, na primjer, može iskoristiti u biomedicinskim (dijagnostičkim) primjenama ili u strojnom prepoznavanju oblika.

Za fizičare su zanimljivi mnogi koraci u putovanju informacije od časa kad ulazne zrake padnu na rožnicu oka pa sve do diskretnih akcijskih potencijala kojima neuroni prenose informaciju između oko 10^{10} stanica koje čine mozak. Svaki od neurona u mozgu stvara oko 10^4 veza, te se iz toga vidi ogromna kompleksnost problema. Valja još reći i da je daleko najveći dio obrade podataka u mozgu nelinearan i stoga specifičan za određeni zadatak i teško razumljiv.

Nekoliko općenitih principa ipak nam pomaže pri razumijevanju algoritama i logike obrade u vizualnom korteksu. Korteks je sistem koji se sam organizira prema principima razrađenim u milijunima godina evolucije. Količina informacija u DNK lancima embrionalne stanice manja je od 1GB, dakle ni približno dovoljna da bi se specificirale veze u mozgu. Veze se uspostavljaju prema određenim principima, na osnovi aktivnosti u ranoj dobi razvoja i u skladu s principom optimizacije svakog od stupnjeva obrade za specifičan zadatak.

Mozak ostaje plastičan i u odrasloj dobi i naši neuroni mogu, prema potrebi, dobiti nove zadatke. Mogućnost geneze novih neurona tema je sadašnjih istraživanja². Naravno, moguć je i obratni proces, uništavanje neurona neaktivnošću ili drogom. Svi događaji u životu ostavljaju trag u plastičnim (promjenjivim) sinaptičkim vezama između individualnih neurona.

Vratimo li se sad na vizualni sustav, prva zanimljiva pitanja su ona iz optike oka, aberacija i potrebnih optičkih korekcija tako da oštra slika svijeta padne na retinu.³

¹ ravnatelj@irb.hr

² Na primjer P. Rakić (2004) *Nature* 427, 685-686.

³ Optička svojstva:

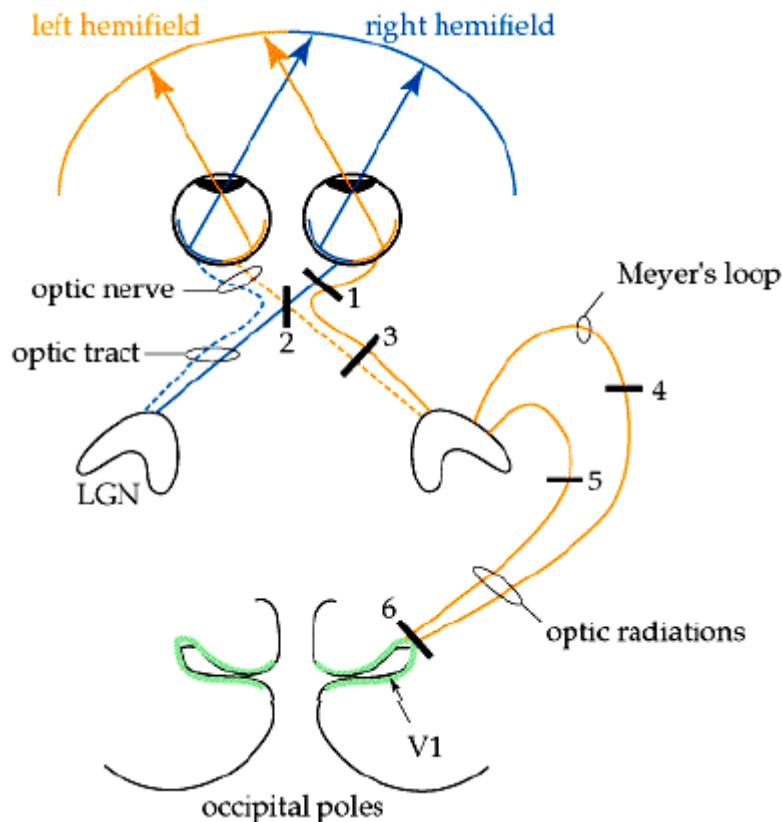
[Hhttp://www.neuro.uu.se/fysiologi/gu/nbb/lectures/EyeOptics.html](http://www.neuro.uu.se/fysiologi/gu/nbb/lectures/EyeOptics.html)H

ili

[Hhttp://thierry.baudart.waika9.com/unifocal/doc/H](http://thierry.baudart.waika9.com/unifocal/doc/H)

U receptorima retine,⁴ fotoni pobuđuju molekule rhodopsina i pokreću biokemijsku kaskadu koja pojačava signal. Osjetljivost i pojačanje izvanredno su efikasni pa tako, na primjer, neki insekti mogu detektirati dolazak samo jednog fotona (kod ljudi je osjetljivost nekoliko puta manja). Biokemijska kaskada primjer je niza sličnih procesa u organizmu gdje se slabi inicijalni signal jako pojačava, a intermedijarni spoj je cGMP.

Depolarizacija fotoreceptora nakon pojačanja pobuđuje aktivnost stanica u sljedećih nekoliko slojeva retine. Nakon što je slika vizualnog svijeta zabilježena, na retini oka počinju prvi od mnogih stupnjeva obrade informacija. U tim prvim stupnjevima obrade kroz nekoliko živčanih slojeva retine informacije se komprimiraju. Otprilike 10^8 fotoreceptora u svakom oku šalje vizualnu informaciju kroz samo 10^6 linija u optičkom živcu preko relejnih stanica (lateral geniculate nuclei, LGN na slici) u primarni vizualni korteks⁵ koji se nalazi na stražnjoj strani glave.



Slika 1 Put kojim vizualna informacija prolazi od oka do mozga.

Lijeva strana vizualnog polja reprezentirana je u desnoj strani korteksa, i obratno.

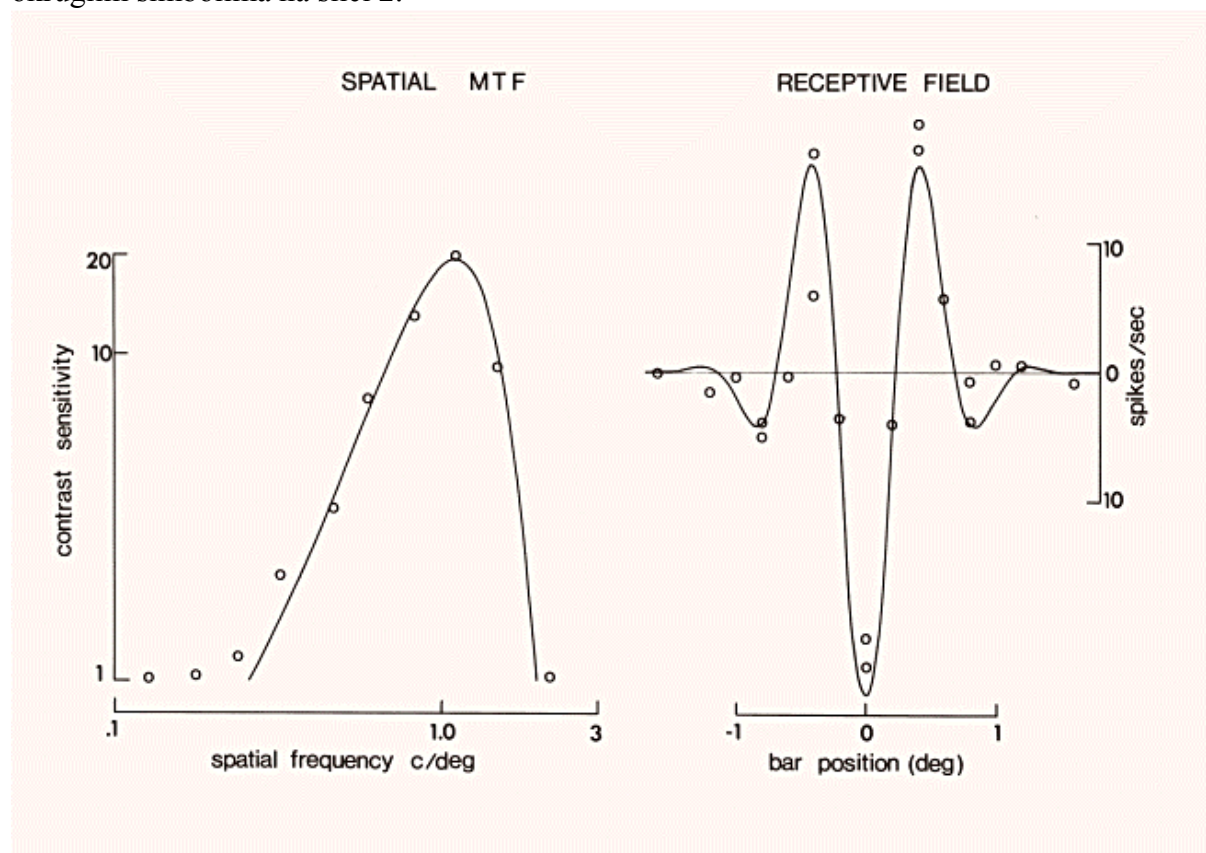
⁴ The Washington University School of Medicine
Neuroscience Tutorial
<http://thalamus.wustl.edu/course/H>

⁵ Primarni vizuelni korteks
<http://webvision.med.utah.edu/VisualCortex.html>

Organizacija vizualne informacije u tom inicijalnom sloju korteksa (područje V1 na slici) slijedi vrlo zanimljivu logiku koja se može povezati s određenim koracima u razvoju fizike iz doba Heisenberga, Von Neumanna i Gabora. (To je područje u kojem sam radio prije više od dvadeset godina, na samom početku njegova razvoja.)

Pokusi na mačkama i majmunima vrše se tako da se mikroelektrodom mjeri odgovor stanice na svjetlosni signal koji pada negdje na zastor u koji gleda pokusna životinja. Rezultati pokazuju da najjednostavnije stanice u vizualnom korteksu odgovaraju na svjetlo u određenom ograničenom dijelu vizualnog polja, i to se područje zove receptivno polje.

Ako je stimulus svijetla linija, odgovor jednostavnih stanica izgleda kao što je prikazano okruglim simbolima na slici 2.



Slika 2 Mjerenja⁶ (kružni simboli) i teorija⁷ za odgovor jednostavnih stanica u vizualnom korteksu.

Kad je Heisenberg 1927. godine pronašao princip neodređenosti,

$$\Delta x \Delta p \geq \hbar,$$

⁶ R. L. De Valois, D. G. Albrecht and L. G. Thorell, Cortical cells: Bar and edge detectors or spatial frequency filters, in *Frontiers in Visual Science*, Springer, New York 1978.

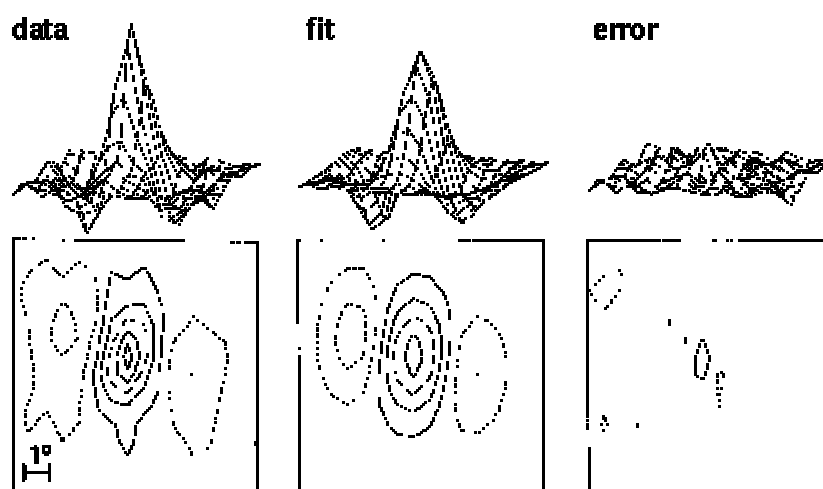
⁷ S. Marčelja (1980) Mathematical description of the responses of simple cortical cells. *Journal of the Optical Society of America*, vol.70, no.11, pp.1297-1300.

odredio je i funkcije koje je taj princip zadovoljavao sa znakom jednakosti. Funkcije su produkt Gaussove funkcije i trigonometrijskih funkcija, kao

$$\psi(x) = a \exp(-bx^2) \cos(x)$$

Prikazana funkcija je simetrična, dok će za antisimetrične funkcije $\cos(x)$ biti zamijenjen sa $\sin(x)$. Funkcije su pokazane kao pune linije na slici 2. Od njih se može sastaviti kompletna reprezentacija bilo kakve funkcije, kao što je to otkrio Von Neumann. Upravo je ta reprezentacija ona koju vizualni korteks koristi u inicijalnim stupnjevima obrade informacija.

U dvije dimenzije, što je realna situacija, slika izgleda kao na slici 3.



Slika 3 Mjerenja⁸ receptivnog polja jednostavne stanice upoređena s dvodimenzionalnim Gaborovim signalom.

Reprezentacija je zanimljiva i zato što je to jedan od primjera u kojima se slike stvaraju od lokaliziranih valića,⁹ a algoritam se može iskoristiti kao efikasna metoda u biomedicinskoj dijagnostici¹⁰ ili drugim zadacima obrade signala. Kasniji radovi¹¹ pokazali su da je, u skladu s našim očekivanjima, ta reprezentacija najefikasnija u kompaktnom prikazu prirodnih vizualnih scena.

⁸ J.P. Jones and L.A. Palmer (1987) An evaluation of the two-dimensional gabor filter model of simple receptive fields in cat striate cortex. *J. Neurophysiol.*, 58(6):1233-1258.

⁹ Gabor Wavelet Transformation:

[Hhttp://www.neuroinformatik.ruhr-uni-bochum.de/ini/VDM/research/computerVision/imageProcessing/wavelets/gabor/contents.html](http://www.neuroinformatik.ruhr-uni-bochum.de/ini/VDM/research/computerVision/imageProcessing/wavelets/gabor/contents.html)H

¹⁰ M. Unser (1996) A Review of Wavelets in Biomedical Applications, *Proceedings of the IEEE* **84**, 626-638.

¹¹ D. J. Field (1999) Wavelets, vision and the statistics of natural scenes. *Philosophical transactions of the Royal Society London A* **357**, 2527-2542.

Sinkrotronsko svjetlo – Moćna proba materije

Slobodan Mitrović¹

École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Švicarska

Tridesetih godina prošlog stoljeća znanstvenici su otkrili da je svijet elementarnih čestica mnogo bogatiji nego što se u to vrijeme znalo - svijet fizike otvorio se prema visokim energijama i počeo je lov na najelementarnije čestice materije. Da bi se proniknulo u tajne podatomske strukture, trebalo je slomiti atome visokoenergetskim česticama u dobro kontroliranim uvjetima. U tu svrhu počeli su se graditi ubrzivači elektrona koji su brzo prerasli u sofisticirane naprave koje bi u vakuumu ubrzavale elektrone u kružnim putanjama tako da skupe što više energije prije negoli se usmjere prema atomu — meti. U posebnim prstenovima, elektroni su ubrzavani sinkroniziranim pogurivanjem



Slika 1. Institut «Paul Scherrer» i kružna zgrada švicarskog sinkrotrona SLS (Swiss Light Source) (slika vlasništvo PSI, Villigen)

mikrovalovima, pa su stoga ta postrojenja ubrzo nazvana *sinkrotronima*. U jednom takvom sinkrotronu 1947. godine fizičari General Electric Company u SAD-u uočili su neobično zračenje. Želimo li održavati nabijenu česticu, poput elektrona, u kružnoj orbiti, ona će neizbježno gubiti dio svoje energije (bremsstrahlung) u obliku elektromagnetskog zračenja – *svjetla*. Fizičari visokih energija nisu bili zadovoljni ovim gubitkom energije. Ubrzavanje elektrona došlo je do svoje prirodne granice jer bi s većim ubrzanjem sve više energije bilo izračeno umjesto pohranjeno u elektronu.

S druge strane, spomenuti izvor svjetla pobudio je zanimanje jedne sasvim druge grupacije fizičara. Naime, sinkrotronsko svjetlo koje su emitirali elektroni ubrzani do gotovo brzine svjetlosti bilo je doista neobično svjetlo, a ne tipični bremsstrahlung. Raspon valnih duljina bio je impresivan: od infracrvene, preko vidljive svjetlosti pa sve do mekih i tvrdih X-zraka. Intenzitet ništa manje impresivan – i milijun puta sjajniji od Sunčeva svjetla! Fizičari koji su se bavili strukturom materije koristili su se do tada za svoje eksperimente izvorima X-zraka koji su bili i do milijardu puta manjeg intenziteta, a gotovo uvijek ograničeni samo na određenu valnu dužinu. Ubrzo su sinkrotroni dobili svoju sekundarnu zadaću – proučavanje strukture materije sinkrotronskim svjetlom. Parazitsko zračenje koje je frustriralo fizičare visokih energija postalo je moćan novi prozor u strukturu materije. Mjerne

¹ slobodan.mitrovic@epfl.ch

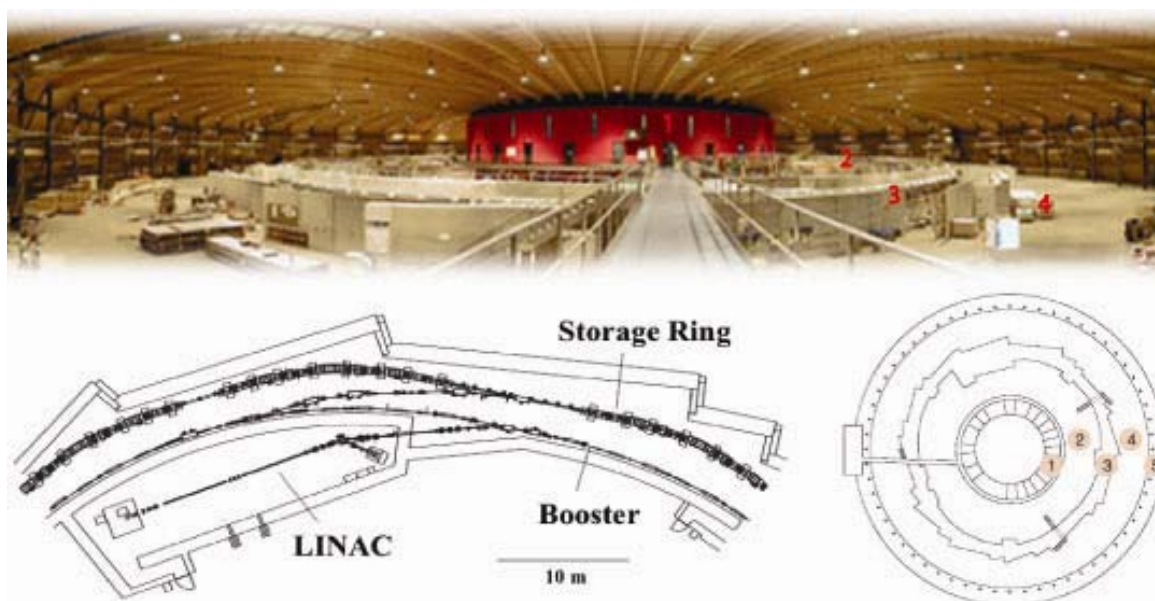
postaje koje su iskorištavale sinkrotronsko svjetlo postale su redoviti dodatak sinkrotronima. Danas te sinkrotrone nazivamo *prvim naraštajem izvora sinkrotronskog svjetla*.



Uspjeh tih mjernih postaja i stalno proširivanje načina na koje se sinkrotronsko svjetlo upotrebljavalo dovelo je u 70-im godinama prošlog stoljeća do izgradnje prvih postrojenja koja su bila namijenjena isključivo za proizvodnju

sinkrotronskog svjetla. Taj *drugi naraštaj sinkrotrona* postao je primjenjiv ne samo u fizici, već i u biologiji, medicini i industriji. Na njima se istražuje kristalna i elektronska struktura materijala, grade se mikroskopske naprave, određuje se struktura proteina za dizajniranje novih lijekova, sintetiziraju se novi materijali posebnih mehaničkih svojstava, izvodi se medicinska dijagnostika i terapija. Na svijetu trenutačno postoji više od 40 sinkrotrona, od LNLS-a u Brazilu, preko mnogobrojnih sinkrotrona u SAD-u, Europi, Aziji do **Australian synchrotrona** u Melbourneu.

Danas se nalazimo na revolucionarnoj prekretnici u svijetu sinkrotrona. Novi, *treći naraštaj sinkrotrona* donosi ne samo nekoliko redova veličine sjajnije svjetlo, već i neke potpuno nove karakteristike koje eksperimentalcima otvaraju nove mogućnosti. Ti sinkrotroni ne održavaju jednostavno elektrone u kružnoj putanji, već se dodatno koriste posebnim napravama (eng. *insertion devices* - umetnute naprave - jer se u principu umeću prema potrebi u putanju elektrona) koje tjeraju elektrone na posebna oscilatorna gibanja i tako sažimaju, odnosno kolimiraju relativno širok snop u vrlo uzak stožac zračenja. Taj snop ima mnogo bolje karakteristike od prošlih naraštaja, uključujući *koherenciju* – najuređenije stanje u kojem se svjetlo može nalaziti. Svjetlost je elektromagnetski val. Do sada smo za različite eksperimente iskorištavali samo amplitudu tog vala, odnosno intenzitet svjetla. Koherencija sada omogućava da se koristi i *faza* vala. Trenutačno postoje četiri potpuno operativna sinkrotrona trećeg naraštaja: **ESRF** (European Synchrotron Research Facility) u Grenobleu, Francuska, zatim **APS** (Advanced Photon Source), Argonne, SAD; **SPRING-8**, Harima, Japan i **SLS** (Swiss Light Source) u švicarskom Villigen (vidi sliku 1). U Europi se grade još dva takva postrojenja, **Diamond** u Velikoj Britaniji i **Soleil** u Francuskoj. Nama najbliži sinkrotron nalazi se u blizini Trsta, i zove se **ELETTRA**.



Slika 2. Gore : Pogled u unutrašnjost SLS-a. Dolje lijevo: LINAC, booster i skladišni prsten unutar debelih betonskih zidova. Dolje lijevo: shema zgrade SLS-a; 1. uredi, 2. prostor za elektroniku, 3. betonski ogradeni prstenovi ubrzivača i 5. vanjski zid sinkrotrona sa sustavom za hlađenje (slike vlasništvo PSI, Villigen)

Pogledajmo pojednostavljeno kako radi sinkrotron i na koji način korisnik dobiva njegovo svjetlo za upotrebu u svome eksperimentalnom uređaju. Kao konkretan primjer uzet ćemo podatke švicarskog **SLS-a**. Sinkrotronsko svjetlo proizvode elektroni. Dakle, prvi je korak proizvodnja elektrona koja se događa u elektronskom topu. Elektronski top izbacuje elektrone dalje u prostor koji je uvijek u ultravisokom vakuumu. Na taj se način elektroni mogu nesputano kretati u svojim putanjama. Drugi je korak ubrzavanje elektrona. Prvo ubrzanje daje linearni ubrzivač *linac*. Kako samo ime kaže u njemu se elektroni predubrzavaju u linearnoj putanji. U **SLS-u** je *linac* odvojen od ostatka postrojenja. Na izlazu prema sljedećem koraku ubrzanja, elektroni će imati energiju od 100 MeV i već će biti ubrzani na brzine usporedive s brzinom svjetla. Sljedeći je korak sam po sebi mali sinkrotron, i naziva se *booster*. Riječ je o prstenu opsega 270 metara, svega nešto manjeg od samoga glavnog prstena. Ukupno 237 različitih magneta kontrolira putanju elektrona i tri puta u sekundi ubrzava određenu količinu elektrona prije negoli ih ubaci u glavni prsten sinkrotrona. Na kraju procesa u glavni prsten bit će ubačeno nekoliko trilijuna elektrona koji će imati energiju od 2.4 GeV. Booster je vrlo važan dio cijelog procesa, jer omogućava dobivanje vrlo kvalitetnog snopa koji se može periodički ubacivati u glavni prsten i tako održavati struju elektrona konstantnom cijelo vrijeme, za razliku od većine sinkrotrona u kojima struja opada s vremenom te je potrebno zaustaviti proces (engl. *dump beam*) i ponoviti proizvodnju ispočetka. Glavni, skladišni prsten u kojemu su pohranjeni elektroni (engl. *storage ring*) i booster koncentrično su postavljeni u istome prostoru, zatvoreni debelim betonskim blokovima koji sprečavaju slobodno širenje zračenja u širi prostor sinkrotronske zgrade (slika 2).

Skladišni prsten ima opseg od 288 metara i opremljen je svom modernom tehnologijom sinkrotrona trećeg naraštaja. Putanja elektrona zakreće se kao i u

starijim sinkrotronima tzv. zakretnim magnetima (engl. *bending magnets*). No prsten nije potpuno okrugao, već postoji nekoliko ravnih dijelova duljine od 4 do 11 metara. U te su dijelove postavljene posebne magnetske naprave (već spomenute *umetnute naprave*) koje tjeraju elektrone da oscilatorno mijenjaju svoju putanju i time proizvode karakteristično svjetlo trećeg naraštaja. Te se naprave prema potrebi mogu uključivati i isključivati. Jedna vrsta tih naprava ljulja elektrone (engl. naziv je *wiggler*). Efekt je isti kao u zakretnim magnetima: svaka promjena smjera isijava svjetlost, samo u ovom slučaju mnogo više puta na manjem prostoru i tako pojačava ukupno svjetlo. Druga vrsta naprava su ondulatori (engl. *undulators*) koji iskorištavaju efekte Einsteinove specijalne teorije relativnosti. Upravo se te naprave koriste u skladišnom prstenu SLS-a. Relativistički efekti proizvode svjetlo nalik na laser: zraka dobivenog svjetla čak na 30 metara od ondulatora široka je samo nekoliko milimetara. Također, više ne dobivamo kontinuiran spektar frekvencija nego diskretan. Intenzitet je pojačan 1000 puta u odnosu na onaj koji se dobiva samo zakretnim magnetom. Krajnji je rezultat svjetlo visoke stabilnosti u položaju same zrake, malih dimenzija i velike sjajnosti. Cijena: pogon od oko 600 sofisticiranih magneta, 300 pumpi koje održavaju vakuum, 600 metara cijevi pod vakuumom, 5 rezonantnih šupljina, 150 dijagnostičkih postaja, 50 kilometara naponskih kabela i oko 500 kilometara kabela za signale. Ukupno 2.5 MW potrošnje električne energije.

Nakon što je svjetlo proizvedeno, treba ga dovesti do krajnjeg korisnika i njegove postaje (engl. *end-user station*). Na tom putu nalazi se neka vrsta umetnute naprave (*wiggler* ili *ondulator*), zatim optički dijelovi poput zrcala te monokromator koji služi za odabir željene valne duljine (ovaj sustav obično se naziva linijom zrake, engl. *beamline*). Tu su i razni sigurnosni elementi te mnoštvo elektronike i dijagnostike. Linija zrake uvijek je postavljena tangencijalno na skladišni prsten. Tek nakon tog koraka svjetlo stiže do same postaje korisnika koja najčešće ima dva osnovna dijela – dio u kojem se postavlja uzorak koji će biti obasjan svjetlošću i detektor koji prikuplja podatke nakon što se dogodila određena interakcija između svjetla i materije, bilo da je to samo svjetlo nakon interakcije ili neki proizvod interakcije poput elektrona.

Svaku krajnju postaju održava poseban tim znanstvenika i tehničara. Korisnici sinkrotrona zapravo su korisnici određene linije, ovisno o vrsti znanosti kojom se bave. Gotovo uvijek su to znanstvenici iz cijelog svijeta, a ne samo zemlje u kojoj se sinkrotron nalazi. Oni se svojim projektima često moraju izboriti za samo nekoliko dana do najviše tjedan - dva mjerenja u godini!

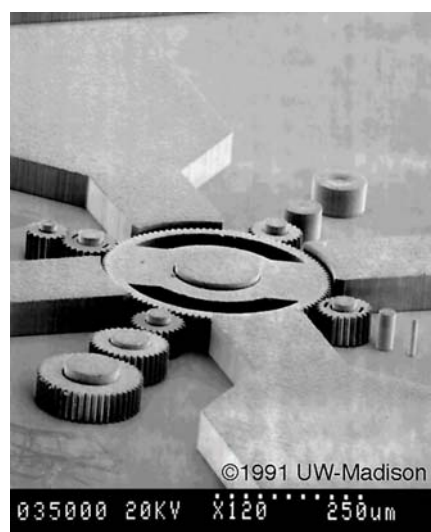
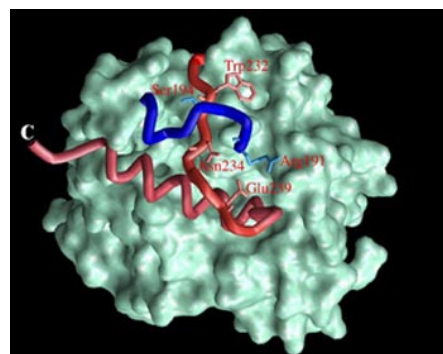
Pogledajmo sada neke primjere korištenja sinkrotronskog svjetla. Za početak, jedna od najstarijih primjena X-zraka jest određivanje kristalne strukture. Ovdje ćemo pokazati jedan mnogo sofisticiraniji eksperiment – određivanje strukture proteina. Slika 3 prikazuje rezultat rada znanstvenika iz Argonne National Laboratory te University of Toronto na postrojenju u **APS**-u u Argonneu, Illinois [1]. Proučavajući

najstariju jednostaničnu bakteriju, archaebacterium, odredili su strukturu proteina koji je, na njihovo iznenađenje, bio zavezan u čvor – jedan od veoma rijetkih oblika. Proučavana bakterija od koristi je industriji jer razgrađuje otpad i pretvara ga u plin metan. Znanstvenici, naravno, žele shvatiti i koji su sve mogući oblici proteina te vezu strukture i uloge proteina. Poznavanje strukture, posebno virusnih proteina, pomoglo je u stvaranju boljih lijekova.

Dimenzije zrake sinkrotronskog svjetla omogućuju i prvi pogled u neke uistinu male strukture poput stanice. No omogućuju i manipuliranje materijom na malim skalama. Litografija X-zrakama sinkrotrona omogućuje stvaranje pravih malih mikrostrojeva (vidi sliku desno – referenca 2). Kao primjer pogledajmo jedan takav stroj – mikromotor koji je primjenjiv u mikrorobotici i svemirskoj tehnologiji, no moguće primjene sežu sve do medicinskih. Zamislimo mikronske medicinske implantate koji bi obavljali terapijske funkcije unutar organizma!

Koherencija svjetlosti koristi se također u medicinske svrhe. Zamislimo da imamo rendgen koji, osim same apsorpcije na mjestu gdje se nalazi gušća prepreka, ima i mogućnost korištenja efekata difrakcije i refrakcije! Koherentno svjetlo omogućuje upravo to. Rezultat su rendgenske slike ne samo kostiju već i mnogo mekših tkiva poput krvnih žila ili mozga! Zamislimo sada da imamo mogućnost detektiranja tih efekata u zadanom volumenu kao što to radi CT-skener. Na sreću, to više ne moramo zamišljati. Tehnologija modernih sinkrotrona i velika moć današnjih računala omogućuje potpuno 3D vizualiziranje ne samo krvnih žila već gotovo neograničenog broja vrlo malih, mikronskih i manjih struktura. Pa čak i kad se radi o relativno istim okolinama koje se moraju razlučiti jedna od druge jer faza svjetlosti ih prepoznaje, iako je apsorpcija identična.

Primjene sinkrotrona time nisu ni blizu iscrpljene. Čak se nismo dotaknuli primjena u izučavanju materijala i njihovih svojstava. Nove tehnike i nove karakteristike ovih izvora svjetlosti obećavaju znanosti i primjeni svijetlu budućnost. Čak milijun puta svjetliju od Sunca!



Reference, literatura i web stranice

[1] T. I. Zarembinski et al., "Deep Trefoil Knot Implicated in RNA Binding Found in an Archaeobacterial Protein," *PROTEINS: Structure, Function, and Genetics* 50:177 to 183 (2003); slika uz tekst preuzeta iz članka

[2] Slika vlasništvo Dr. Henry Guckel, University of Wisconsin, Madison

Stranica SLS-a : <http://sls.web.psi.ch>

Sinkrotroni diljem svijeta: <http://srdweb2.dl.ac.uk/srs/srworld>

EKSPERIMENTI S OPTIČKOM PINCETOM

Branimir Lukić¹

École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Švicarska

Dualna priroda svjetlosti kao vala i kao roja čestica omogućuje pomicanje materije svjetlošću. Možda najimpresivnija pojava mehaničkog pokretanja materije zračenjem jesu kometi, gdje Sunčev vjetar otpuhuje plin koji se nalazi neposredno uz kometovu jezgru. Međutim, materija se također može pokretati svjetlom na mnogo manjoj skali, koristeći optičku pincetu. Snažno fokusirana laserska zraka može pokretati objekte promjera od 5 nm do desetaka μm silama do 100 pN i rezolucijom sve do 100 aN. Zbog malih sila i rada u vodi, ova eksperimentalna tehnika našla je veliku primjenu u biofizici i fizici koloidnih čestica u zadnjih petnaestak godina.

U ovom predavanju pokazat ćemo princip rada optičke pincete te njezino korištenje za proučavanje prelaska čestice iz režima balističkog gibanja u Brownovo na malim vremenskim skalama.

Optička pinceta

Kada svjetlost prelazi iz jednog medija u drugi, dolazi do loma svjetlosti. Lom svjetlosti bit će to veći što se indeksi loma dvaju medija više razlikuju. Ako stavimo staklenu kuglicu u tekućinu, svjetlost će se lomiti prema istom principu (slika 1b). Za objašnjenje kako svjetlost može zarobiti staklenu kuglicu, moramo uključiti nešto kvantne mehanike. Svjetlost se može reprezentirati na dva načina: kao val te kao tok čestica – fotona. Lom svjetlosti može se tada objasniti kao promjena količine gibanja fotona Δp na granici sredstava. Promotrimo sliku 1b. Foton koji se kreće putanjom a na ulasku u kuglicu mijenja količinu gibanja. Kako je sila jednaka promjeni količine gibanja $F_S = \Delta p / \Delta t$, jasno je da je kuglica djelovala silom na foton. Prema trećem Newtonovu zakonu, i foton je djelovao na kuglicu silom istog iznosa, a suprotna smjera F_a . Isto tako, foton na putanji b djeluje na kuglicu silom F_b . Zbroj tih sila $F = F_a + F_b$ gura će kuglicu prema natrag. Kad se kuglica približi leći, sila F promijeni predznak i gura kuglicu prema naprijed.

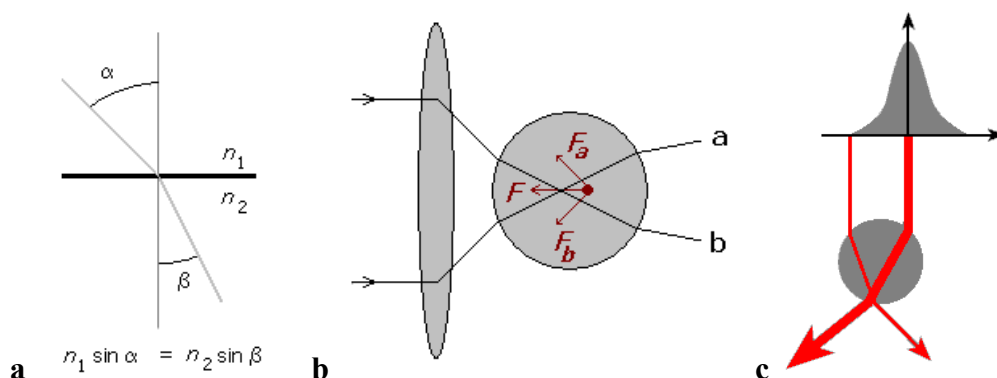
To objašnjava kako se kuglica zarobi u smjeru kretanja snopa fotona. Optička pinceta pak zarobljava kuglicu u sva tri smjera u prostoru. To se postiže nejednoliko oblikovanim snopovima (slika 1c). Ako se kuglica nađe lijevo od centra snopa, lom svjetlosti bit će veći zdesna nego s lijeva, i rezultat je sila koja pokazuje prema udesno. Ukupni efekt svih sila bit će kuglica zarobljena u prostoru reda veličine 100 nm x 100 nm x 100 nm.

Zarobljena kuglica ponašat će se kao masa pričvršćena na oprugu. Sila koju kuglica osjeća F bit će proporcionalna pomaku iz centra zamke x :

$$F = -kx \quad (1)$$

gdje je k konstanta zamke i ekvivalentna je konstanti opruge. Potencijalna energija kuglice

¹ branimir.lukic@epfl.ch

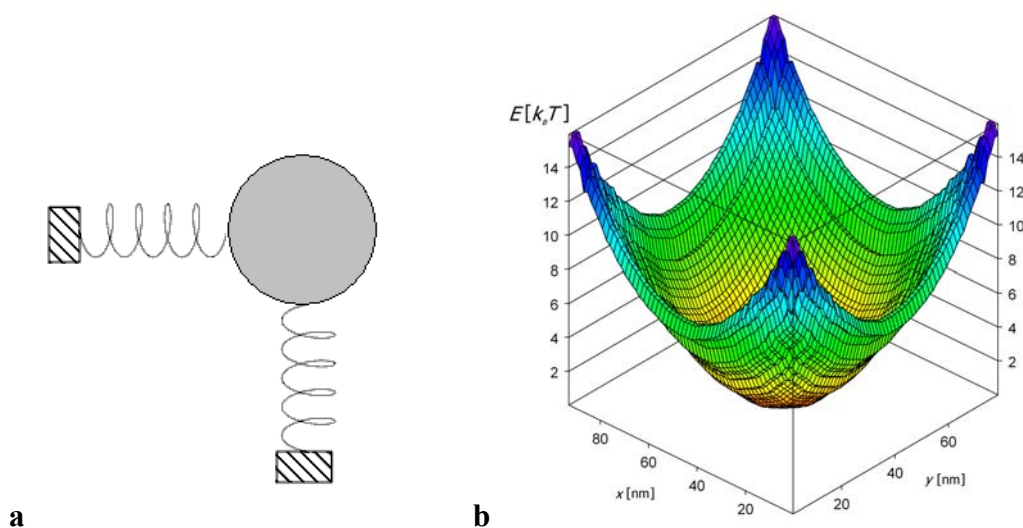


Slika 1 **a** Lom svjetlosti, **b** Dvije laserske zrake fokusirane lećom lome se na kuglici te rezultiraju silom F . **c** Laserski snop je neuniforman pa su sile koje dolaze na kuglicu slijeva i zdesna različite. Razlika sila gurat će kuglicu udesno. [Slika (c) je preuzeta iz K. Dholakia *et al.* Optical tweezers: the next generation. *Physics World*, October 2002]

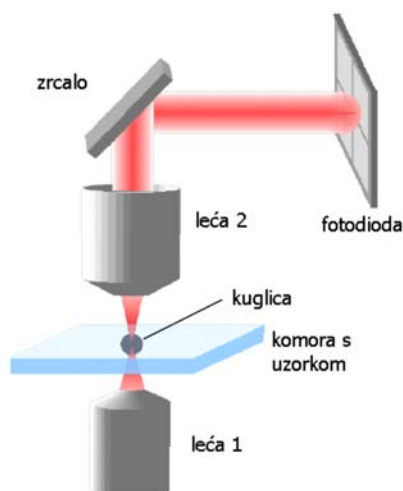
će, kao u slučaju opruge, biti tada jednaka:

$$E = \frac{1}{2} kx^2 \quad (2)$$

U ovom je trenutku bitno primijetiti da se kuglica ponaša na ovaj način u sva tri smjera, tj. kao kuglica koja se nalazi u uglu kutije privezana za stijenke trima oprugama. Ukupna potencijalna energija kuglice bit će tada zbroj energija u sva tri smjera. Na slici 2 je prikazana kuglica pričvršćena na dvije opruge te njezina potencijalna energija.



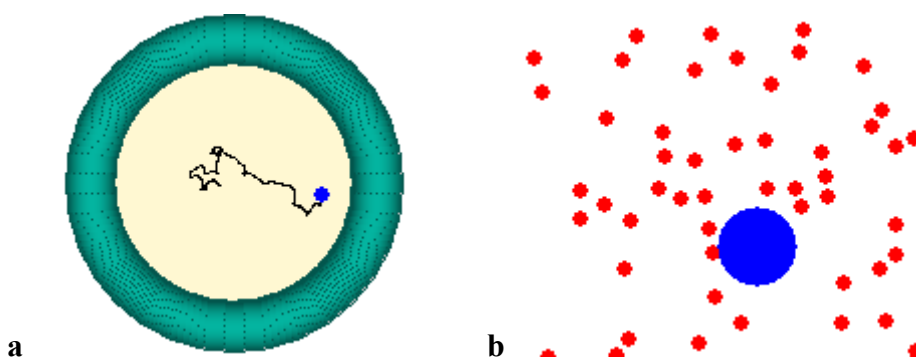
Slika 2 **a** Kuglica pričvršćena na dvije opruge, **b** Potencijalna energija kuglice zarobljene u zamci u ovisnosti o dva prostorna smjera. Takav profil imala bi i kuglica vezana za dvije opruge kao u (a). Potencijalna energija jednaka je $E = \frac{1}{2} kx^2 + \frac{1}{2} ky^2$



Slika 3 Shema optičke pincete. [Ljubaznošću Sylvie Jeney]

Shema optičke pincete nalazi se na slici 3. Sastoji se od lasera, dviju leća te fotodiode. Prva leća koristi se za fokusiranje laserske zrake, što je potrebno za uspješno zarobljavanje kuglice. Druga leća koristi se za skupljanje zraka iz fokusa i projekciju na fotodiodu. Fotodioda bilježi interferenciju laserske zrake i zrake raspršene na kuglici koja daje informaciju o položaju kuglice u tri dimenzije. Pomoću fotodiode položaj kuglice može se mjeriti na prostornoj skali do nanometra te na vremenskoj skali do mikrosekunde.

No, da bi kuglica slijedila položaj zamke, potrebno joj je dati i neku kinetičku energiju - nju dobiva iz Brownova gibanja. Ne zaboravimo da se kuglica nalazi u tekućini te da je molekule tekućine neprestano udaraju iz svih smjerova. Kako su udarci nasumični, rezultat je *Brownovo gibanje*, gdje se kuglica giba poput "pijana mornara" (slika 4). Zarobljena kuglica onda bi se gibala kao pijani mornar u velikoj rupi. Iz jednadžbe (1)



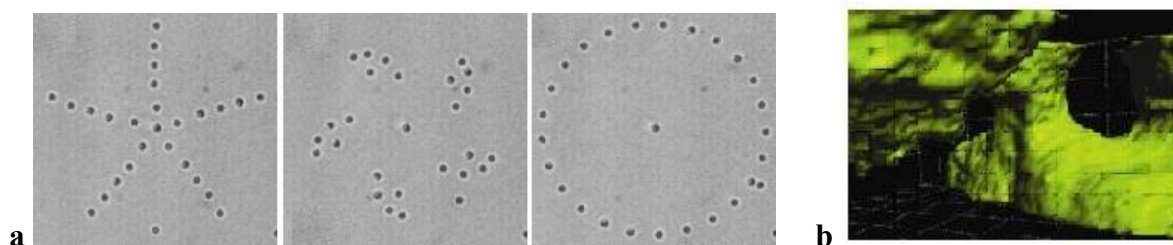
Slika 4 a Pogled na Brownovo gibanje kroz mikroskop. **b** Mikroskopsko objašnjenje Brownova gibanja: molekule vode nasumično udaraju kuglicu koja se onda i giba nasumično kao u (a). Ovo je skica Java appleta koji cijeli možete pogledati na:

http://galileo.phys.virginia.edu/classes/109N/more_stuff/Applets/brownian/brownian.html

vidljivo je da konstanta zamke određuje "čvrstoću" zamke. Tj., što je veći k , to se kuglica teže miče, ili je potpuno nepomična (rupa je za našeg mornara veoma duboka i uska). Pomičući položaj zamke, kuglicu možemo premještati po volji, kao što običnom pincetom pomičemo malene predmete. Ime "optička pinceta" dolazi od prvih studija koje su koristile čvrste zamke, odnosno veliki k za hvatanje i pomicanje objekata, dok se danas koriste i slabije zamke (mali k) za mjerenje viskoznosti ili malih sila.

Svoju primjenu, optička pinceta je našla npr. u istraživanju molekularnih motora koji služe za transport tvari u stanici, elastičnosti proteina i DNA, difuziji proteina u membrani stanice, te istraživanju sustava koloidnih čestica. Također, moguće je uhvatiti velik broj čestica u polja optičkih pinceti (Slika 5a).

Dva eksperimenta se odmah vežu na Brownovo gibanje. Ako dopustimo čestici dovoljno vremena, ona će zbog Brownova gibanja istražiti cijeli slobodni prostor oko sebe. Ako se nalazi u optičkoj zamci, gibanje nije slobodno, ali još uvijek može istražiti prostor oko sebe. To se može iskoristiti za tzv. *fotografiranje termalnim šumom*. Kuglica se postavi u unutrašnjost poroznog materijala, prati se njezino gibanje i bilježi se u kojem dijelu uzorka se vidi Brownovo gibanje. Na Slici 5b prikazana je unutrašnjost mreže polimera i vide se šupljine u polimeru. Žutim je prikazan volumen gdje kuglica nije imala pristupa zbog prisutnosti polimera. U ovom slučaju se pod "termalnim šumom" podrazumijevaju nasumični udarci molekula o česticu čiji intenzitet ovisi o temperaturi (prosječna kinetička energija čestica idealnog plina je proporcionalna temperaturi).



Slika 5 a. 26 staklenih kuglica promjera 1 μm uhvaćenih u polja optičkih pinceta raznih oblika. **b** Slika unutrašnjosti polimera dobivena pomoću *fotografiranja termičkim šumom*. [Slike preuzete iz J.E. Curtis *et al.* Dynamic holographic optical tweezers *Optics Communications* **207** (2002) 169; C. Tischer *et al.* Three-dimensional thermal noise imaging *Applied Physics Letters* **79** (2001) 3878]

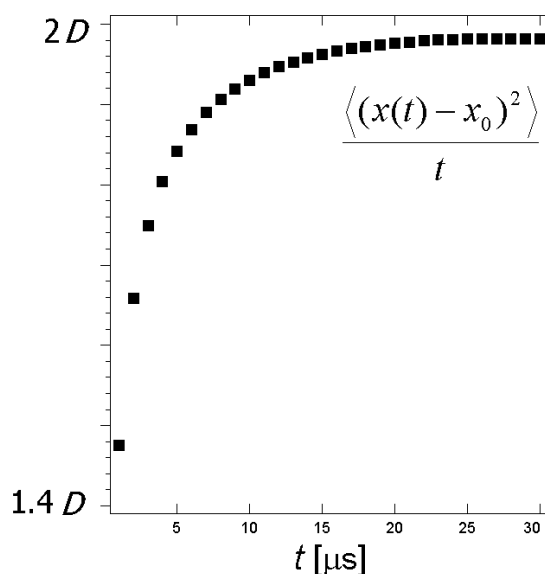
Brownovo gibanje usko je vezano uz pojam difuzije. Ako stavimo kap tinte u vodu, tinta će se kroz neko vrijeme jednoliko rasporediti kroz tekućinu što ćemo vidjeti kao jednaku boju tekućine u svim dijelovima volumena. Ako pogledamo поближе, molekula tinte se ponaša kao šetač kojeg molekule vode udaraju nasumično, pa će i molekula tinte slijediti krivulju gdje je smjer između svake dvije točke nasumičan. Rezultat je Brownovo gibanje prikazano na slici 4a. No, možemo se pitati koliko je brzo Brownovo gibanje? Veličina koja to opisuje je konstanta difuzije D . Veće čestice će imati i veću masu, pa će se nakon udara molekule vode gibati sporije, tj. konstanta difuzije je manja.

Ako promatramo položaj čestice $x(t)$ u odnosu na neki početni položaj x_0 , vrijedit će relacija

$$\langle (x(t) - x_0)^2 \rangle = 2Dt \quad (3)$$

tj. prosječan kvadrat pomaka čestice je proporcionalan vremenu, a $2D$ je konstanta proporcionalnosti. Zagrada " $\langle \rangle$ " znači da je kvadrat razlike položaja usrednjen kroz neki vremenski period. Što se događa na manjim vremenskim skalama? Kada u kuglicu udari samo jedna molekula vode, ona joj preda dio svoje količine gibanja (naravno, kuglica mora biti dovoljno malena da bi predana količina gibanja bila značajna). Kuglica će se gibati *balistički*, kao bilijska kugla koju udarimo štapom. Kuglica će ipak nakon nekog vremena usporiti zbog trenja s ostatkom tekućine, a udarat će je i ostale molekule vode. Ali, na vremenskim skalama koje su usporedive s vremenom usporavanja, broj udaraca je malen te se kuglica ne nalazi u režimu Brownova gibanja.

Ako kuglicu zarobimo pomoću optičke pincete, vidjet ćemo Brownovo gibanje ograničeno u prostoru od nekoliko stotina nanometara što odgovara veličini zamke. Ako koristimo jako slabu zamku, tj. jako malen k , potencijalna energija kuglice u zamki bit će jako sploštena. Na malim vremenskim skalama kuglica tada neće osjetiti prisutnost zamke i ponašat će se kao slobodna kuglica. Ako snimamo položaj kuglice promjera oko $1 \mu\text{m}$ s vremenskom rezolucijom od oko $1 \mu\text{s}$, vidjet ćemo da se kuglica ne ponaša prema jednadžbi (3), kao što je prikazano na slici 5. Za karakteristična vremena oko $1 \mu\text{s}$, konstanta difuzije D počinje ovisiti o vremenu, što pokazuje da se ne nalazimo u režimu Brownova gibanja.



Slika 6 Na velikim vremenskim skalama kuglica će biti u režimu Brownova gibanja (slika 4) i $\langle (x(t) - x_0)^2 \rangle / t = 2D$ prema jednadžbi (1). No na malim vremenskim skalama, $\langle (x(t) - x_0)^2 \rangle / t < 2D$, odnosno izlazimo iz Brownova režima, te difuzija kuglice više neće biti opisana konstantom difuzije D .