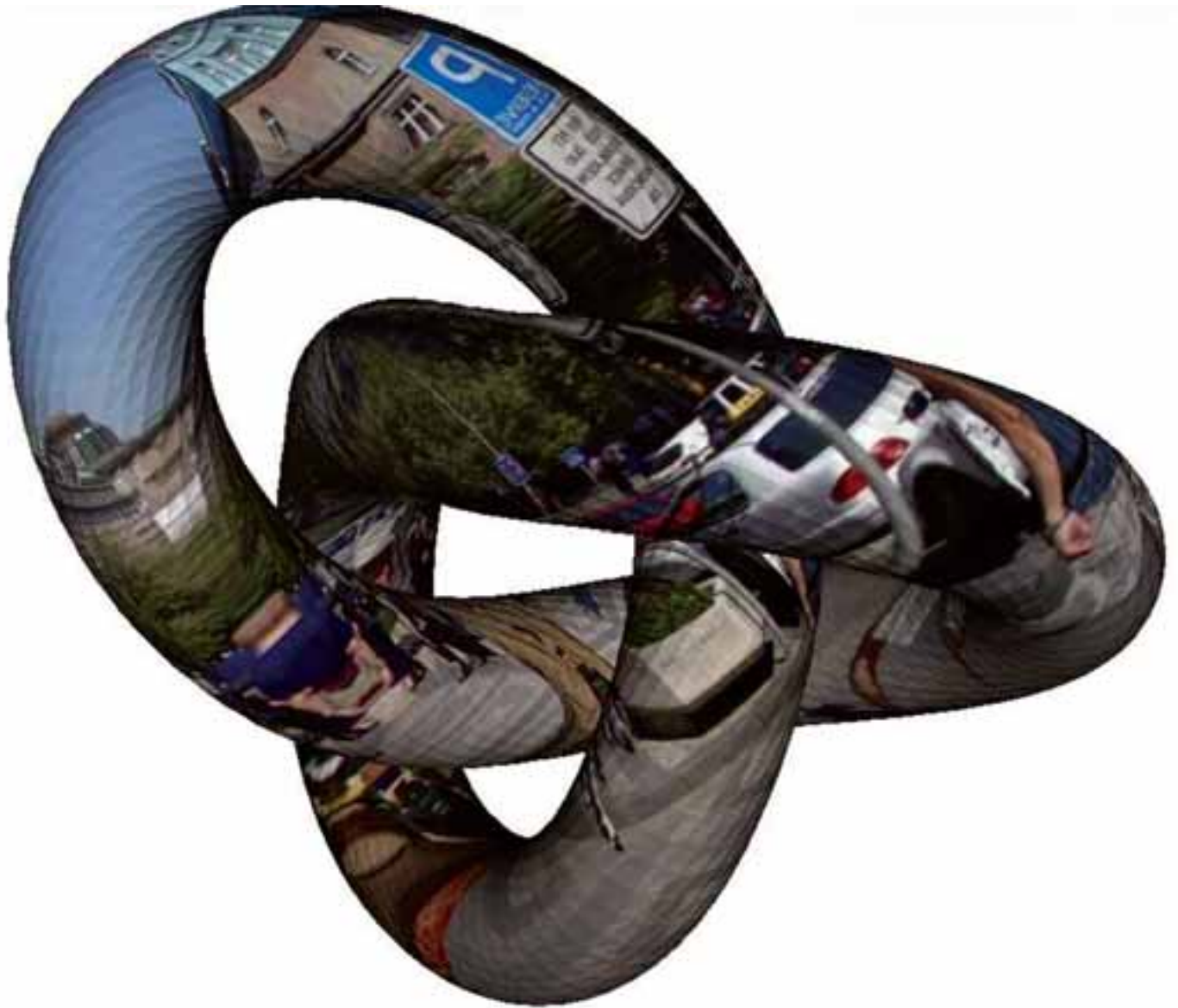


Ruđer

Vol. 6, broj 9/10
rujan/listopad, 2005.



2 M. Jurin

Uvodnik glavnog urednika

3 N. Bilić

Kozmološki pejzaži teorije struna

7 M. Krčmar

Skrivena jakost gravitacije i tamna materija

12 T. Ivezić

Invarijantna specijalna relativnost

19 S. Szilner

Loveći dugu

24 M. Jakšić

Akceleratori u znanosti i primjenama

28 M. Eckert-Maksić

Nagrada - dr. sc. Boris Kovačević

Znanstveno glasilo
Instituta "Ruder Bošković"
 Bijenička c. 54, 10 002 Zagreb
 tel: +385 (0)1 4561 111,
 fax: 4560 084
 e-mail: rudjer@rudjer.irb.hr
 URL: http://www.irb.hr

Glavni urednik: *Mislav Jurin*
 Tehnički urednik: *Karolj Skala*

Uredništvo:
Dunja Čukman
Koraljka Gall-Trošelj
Kata Majerski
Mladen Martinis
Iva Melinščak-Zlodi
Tvrtko Smital
Jadranka Stojanovski

Digitalna obrada i izvedba:
Institut Ruder Bošković
Grafički fakultet u Zagrebu

ISSN 1333-5693
 UDK 061.6:5

Tisak: Kratis d.o.o.
 Izlazi dvomjesečno u nakladi
 od 600 primjeraka uz financijsku
 potporu Instituta Ruder Bošković

ISSN 1333-5693



9 771333 569007

U ovoj Godini fizike ovaj broj Rudera sadrži priloge naših fizičara. Možda ovo potaknu daljnje priloge, ili i rasprave!

U prilogu «Kozmološki pejzaži teorije struna» dr. Neven Bilić ukazuje da je san svih fizičara sveobuhvatna fundamentalna teorija, popularno nazvana teorija svega, koja bi objasnila elementarne procese u prirodi. Josip Ruđer Bošković govorio je da su sve poznate sile u prirodi manifestacija jedne, na što se nadograđuju uvjerenja fizičara modernog doba da je jedna interakcija postojala odmah po nastanku svemira koja se je, njegovim širenjem i hlađenjem, podijelila u četiri sile – gravitaciju, elektromagnetizam, slabu i jaku silu. Kratkim prikazom teorije struna i tzv. D-opni prikazuje kojim se putem kreće suvremena kozmologija. Očito je da za teorijske fizičare ima još dosta posla u nastavku potraga za teorijom svega.

Gravitacija je najslabija od četiriju poznatih temeljnih sila ali joj značaj nije u snazi nego u univerzalnosti. O tome u prilogu "Skrivena jakost gravitacije i tamna materija" piše dr. Milica Krčmar. Skreće nam pažnju na trenutačno aktualna mjerenja gravitacijske sile između masivnih tijela na udaljenostima kraćim od dvije desetinke milimetra. Proučavanje skrivene jakosti gravitacije moglo bi pomoći u traganju za identitetom tamne mrlje jer brojni fizičari nastoje, primjenom brojnih sofisticiranih pristupa, otkriti tu nikad viđenu supstancu.

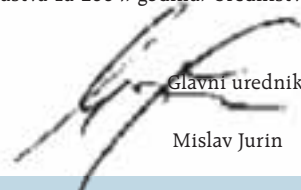
Spektar boja na nebu pri izmjenama kišnih i sunčanih razdoblja, tzv. atmosferska duga, posljedica je loma svjetlosti u kišnim kapima, dok tzv. nuklearnu dugu opažamo kada se snop čestica, koje imaju i valnu prirodu, lomi i raspršuje pri sudaru s drugim česticama, atomima i jezgrama, u skladu sa svojom valnom duljinom. O tome u prilogu «Loveći dugu» piše dr. Suzana Szilner. Napominje dvije bitne razlike između raspršenja svjetlosti na prozirnim kapljicama vode i pojave atomske i nuklearne duge. Jedna se temelji na činjenici da je voda prozirna za valne duljine vidljive svjetlosti, dok prilikom sudara čestica uslijedi apsorpcija, odnosno slabljenje ulaznog toka. Druga se temelji na svojstvima indeksa loma koji je u slučaju atmosferske duge definiran oštrom granicom između zraka i vode,

dok je u slučaju sudara dvaju čestica ulogu indeksa loma preuzela sila međudjelovanja koja, približavanjem čestica, djeluje postupno ali konstantno.

Dilatacija vremena i kontrakcija dužine spadaju među najpoznatije relativističke efekte. Mionski raspad je jedan od osnovnih eksperimenata koji potvrđuje Einsteinovo predviđanje dilatacije vremena. Dr. Tomislav Ivezić u prilogu «Invarijantna specijalna relativnost ili geometrijski pristup teoriji prostorvremena» prikazuje geometrijsku formulaciju specijalne relativnosti (invarijantna specijalna relativnost), koja se razlikuje od Einsteinove formulacije. Napravljena je usporedba Einsteinove formulacije specijalne relativnosti i invarijantne specijalne relativnosti s realnim eksperimentima (mionski raspad). Rezultati ovih eksperimenata mogu se potpuno objasniti i bez uvođenja dilatacije vremena i kontrakcije dužine, dakle u okviru invarijantne specijalne relativnosti kao geometrijske teorije četvero-dimenzionalnog prostorvremena.

Tijekom proteklih preko pet desetljeća eksperimentalna fizika Instituta bila je prepoznatljiva po akceleratorima čestica, od onih «starih» sada van uporabe, kao što su 200 kV Cooft Walton neutronske generator iz 1956. godine, te ciklotron iz 1962. godine, koji su svojevremeno poslužili brojnim generacijama fizičara, preko «veterana» koji još rade (300 kV Cockroft Walton neutronske generator iz 1970. godine i 6.0 MV Tandem Van de Graaff akcelerator iz 1987. godine) do 1.0 MV Tandetron akceleratora koji je ove godine otpočeo raditi. Iako se brojni eksperimentalni fizičari, ne samo iz Instituta nego i iz brojnih zemalja, u težnji za sve većim akceleratorima, priključuju velikim međunarodnim kolaboracijama i akceleratorskim centrima, treba naznačiti da centar u našem institutu često ugošćuje strane znanstvenike. Navedenu problematiku ovdje ilustrativno iznosi dr. Milko Jakšić.

Lijepo je kad skoro u svakom od naših brojeva pišemo o nagradama koje su dobili naši znanstvenici. Ovog puta to je dr. Boris Kovačević dobitnik nagrade Lavoslav Ružička, Hrvatskog kemijskog društva za 2004. godinu. Uredništvo srdačno čestita!



Glavni urednik
 Mislav Jurin

Došli u Institut tijekom rujna 2005:

Martina Ferik dipl. ecc., Vilko Klein, Anita Rajtarić.

Disertacije izrađene u Institutu i obranjene tijekom rujna 2005.

Marina Skender: Egzaktno rješavanje problema magnetskog prespajanja u astrofizičkim plazmama, voditelji B. Vranak i M. Martinis, obrana 14. 9. 2005.

Magistarski radovi izrađeni u Institutu i obranjeni tijekom rujna 2005.

Dragomira Majhen: Preusmjeravanje adenovirusa tip 5 na aminopeptidazu N, voditeljica A. Ambriović Ristov, obrana 29. 09. 2005.

Luka Mandić: Visoko razlučiva spektroskopija X-zraka induciranih ionima MeV-skih energija, voditelj M Jakšić, obrana 30. 09. 2005.

Diplomski radovi izrađeni u Institutu i obranjeni tijekom rujna 2005.

Jelena Bošković: Sinteza O-glukoziliranog dipeptida, voditelji V. Vrčec i L. Varga-Defterdarović, obrana 28. 09. 2005.

Došli u Institut tijekom listopada 2005.

Jelena Dautović, Marko Karlušić dipl. inž. fizike, dr. sc. Damir Marjanović.

Otišli iz Instituta tijekom listopada 2005.

Zvonimir Bokulić dipl. inž. kemije, Sandra Kujundžić dipl. inž. elektrotehnike.

Disertacije izrađene u Institutu i obranjene tijekom listopada 2005.

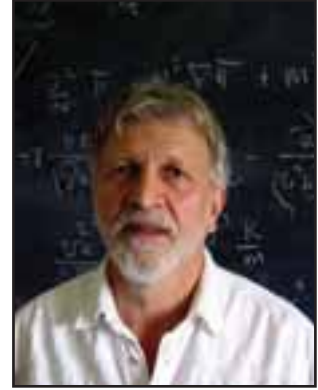
Ivana Leščić Ašler: Strukturne odlike nekih lipaza iz bakterija roda Streptomyces, voditeljica B. Kojić-Prodić i M. Luić, obrana 11. 10. 2005.

Diplomski radovi izrađeni u Institutu i obranjeni tijekom listopada 2005.

Nataša Vlaisavljević: Sinteza glukozilnog etera L-tirozil-L-serina, voditelji J. Vorkapić-Furač i L. Varga-Defterdarović obrana 07. 10. 2005.



Kozmološki pejzaži teorije struna



PIŠE: NEVENKO BILIĆ

San svih fizičara je sveobuhvatna fundamentalna teorija, koja se često u popularnoj znanstvenoj literaturi naziva teorija svega. Naravno, nitko od te teorije ne očekuje odgovor baš na sva pitanja, na primjer, kako nastaje rak, kako funkcionira mozak i slično. Pod teorijom svega podrazumjeva se teorija koja bi objasnila elementarne procese u prirodi. Danas većina fizičara dijeli slijedeći pogled na svijet: zakoni prirode jednoznačno su opisani principom nekog jedinstvenog djelovanja (odnosno Lagrangiana) koji potpuno određuje vakuum, spektar elementarnih čestica, sile i simetrije.

Potruga za teorijom svega počela je davno. Prvenstvo ideje da su sve poznate sile u prirodi manifestacija jedne jedinstvene sile pripada Ruđeru Boškoviću. Kasnije, Maxwell ujedinjuje električnu i magnetsku silu a Einstein, u drugom dijelu svog znanstvenog opusa, pokušava ujediniti elektromagnetizam i gravitaciju, jedine sile koje je smatrao stvarno fundamentalnim. Fizičari modernog doba dijele uvjerenje da je odmah poslije nastanka svemira postojala samo jedna interakcija. Ta interakcija se, ekspanzijom svemira i hlađenjem, podijelila u četiri sile koje danas opažamo: gravitaciju, elektromagnetizam, slabu i jaku silu.

Problemi standardne kozmologije

Vjeruje se da bi jedinstvena teorija, pored ujedinjenja svih interakcija, trebala riješiti sve do sad nerješene kozmološke zagonetke. Navedimo samo najvažnije:

Početni singularitet. Kozmološka opažanja, kao npr. mikrovalno pozadinsko zračenje, nedvojbeno pokazuju da je svemir nastao u *Velikom prasku* (Big Bang), formalno iz jedne točke s beskonačnom gustoćom energije. Koji je uzrok Velikog praska?

Inflacija. Opservabilna kozmologija zahtijeva brzo napuhavanje ranog svemira. Teoretski ono nastaje kao posljedica dinamike nekog postuliranog skalarnog polja, tzv. inflatornog polja. Koje je porijeklo inflatornog polja i inflacije?

Tamna energija. Substanca negativnog tlaka potrebna radi objašnjenja ubrzane ekspanzije svemira pripisuje se energiji vakuuma odnosno kozmološkoj konstanti.

Standardni kozmološki model i standardni model fizike čestica ne daju zadovoljavajuće objašnjenje porijekla tamne energije. Na primjer, energija vakuuma koju daje kvantna teorija polja u nesrazmjeru je za oko sto redova veličine s vrijednošću koju favorizira standardni kozmološki model.

Tamna materija Prema mnogim opažanjima u astrofizici i kozmologiji količina materije u svemiru za dva reda veličine veća je od vidljive materije. Od te nevidljive materije samo je oko 10% obična tvar; ostatak je nevidljiva tvar nepoznatog porijekla. Mogući kandidati za tamnu materiju su hipotetske čestice koje predviđaju tzv. supersimetrične teorije ali koje se, barem za sada, ne vide u eksperimentima.

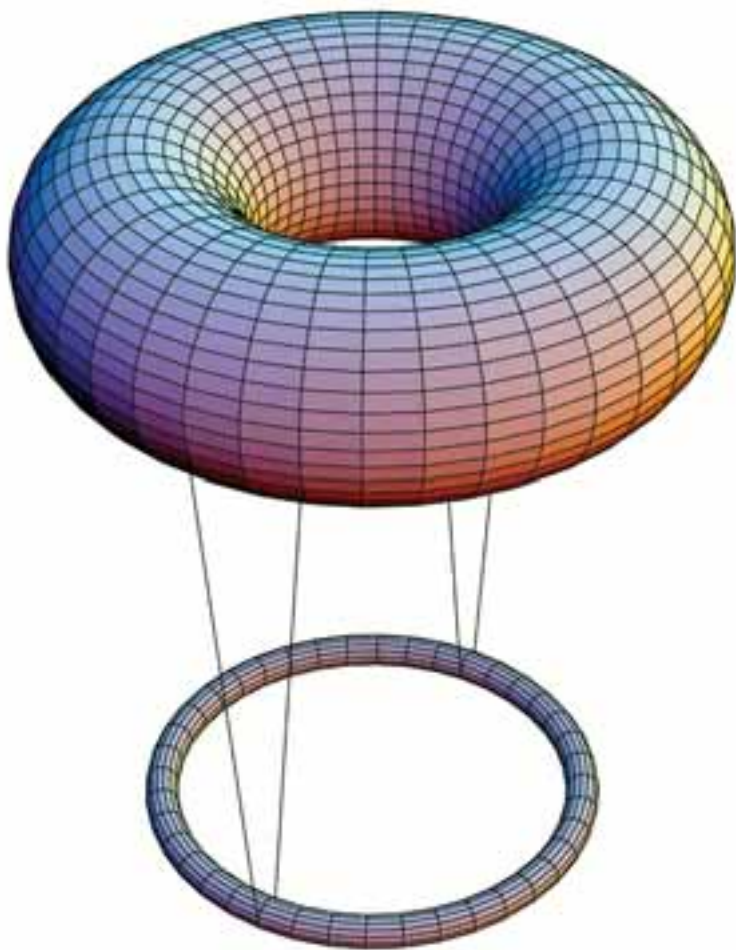
Teorija struna

Najuvjerljiviji kandidat za teoriju svega je teorija struna. Elementarni objekti teorije su strune duljine oko 10^{-30} cm. Strune vibriraju različitim frekvencijama a svakoj frekvenciji pripada neka čestica u prirodi. To uključuje i čestice koje prenose interakcije, kao na primjer foton (prenosilac elektromagnetske sile), graviton (prenosilac gravitacijske sile) itd. Možemo zamisliti materijalne objekte u interakciji kao kompleksne muzičke kompozicije u kojima su tonovi elementarne čestice: kvarkovi, elektron, neutrini itd. Spektri elementarnih čestica su tonske ljestvice. Vjeruje se da teorija struna opisuje jednu jedinstvenu interakciju na vrlo malim udaljenostima (kojima odgovaraju vrlo visoke energije), a da su poznate interakcije i spektar elementarnih čestica niskoenergetska realizacija teorije.

Jedna od važnih manifestacija teorije struna, koja se u načelu može eksperimentalno verificirati, je postojanje dodatnih dimenzija. Naime, konzistentnost i principi kvantene teorije polja, impliciraju broj dimenzija prostora-vremena: za bozonsku teoriju, ...

odnosno teoriju bez spina, zahtjevamo 26 dimenzija a za supersimetričnu teoriju, tj. teoriju u kojoj postoji simetrija između cjelobrojnog i polovičnog spina, broj dimenzija mora biti 10. Osim toga, razni tipovi teorije struna, zapravo su različiti granični slučajevi jedne šire sveobuhvatne teorije, tzv. M-teorije, koja još nije posve poznata, ali zna se da mora biti formulirana u najmanje 11 dimenzija. U svakom slučaju čini se da prostor u kojem živimo ima daleko više dimenzija nego što to osjećamo u svakodnevnom životu.

U početku razvoja teorije pojava dodatnih dimenzija smatrana je problemom čije je rješenje traženo pomoću tzv. *kompaktifikacije*: suviše dimenzije zbog nekog su razloga jako zakrivljene s promjerom zakrivljenosti toliko malim da ih ne opažamo (slika 1). Sam mehanizam kompaktifikacije nije još sasvim jasan, ali je jasno da postoji više mogućih kompaktifikacija i da



Slika 1. Ilustracija kompaktifikacije: dvodimenzionalna ploha u obliku torusa postaje efektivno jednodimezionalni prsten kad se promjer valjka jako smanji.

svakoj odgovara različita niskoenergetska realizacija teorije struna s različitim vakuumom i spektrom čestica kao i ostalim parametrima u teoriji.

Pejsaž teorije struna

Kompaktifikacija dimenzija uvela je nove probleme. Zbog velikog broja mogućih kompaktifikacija, teorija struna realizira se na čitavom prostoru mogućih vakuuma. Taj se prostor naziva *moduli-prostor supersimetričnih vakuuma* ili *pejsaž* (landscape).

Broj mogućih načina realizacije teorije struna enormno je velik. Danas nitko ne može sa sigurnošću reći koliko rješenja postoji, spominju se brojke kao što su *googol* i *googolplex* ($1 \text{ googol} = 10^{100}$ što je više od broja atoma u svemiru; $1 \text{ googolplex} = 10^{\text{googol}}$). Što je još neugodnije, svako od mnogih rješenja teorije struna predstavlja različit svemir, ovisno o tome na koji su način dodatne dimenzije povezane. Moguć je gotovo svaki zamislivi svemir, ne samo kao varijanta mikroskopske teorije (na primjer svemir s masivnim fotonima, s 15 kvarkova i slično) nego i makroskopski: svemir s više od 3 prostorne dimenzije s kompleksnom topologijom višestrukog torusa i slično. Na slici 2 prikazan je dvodimenzionalni svemir s topologijom torusa svezanog u čvor.

Fizičari, međutim, nisu posve obeshrabreni ovakvim neugodnim razvojem teorije. Štoviše, najveći među velikim teoretičarima, kao na primjer Steven Weinberg, doista vjeruju u realnost višestrukog svemira (*multiverse* umjesto *universe*). Trenutno su najpopularnije dvije interpretacije. Prema prvoj, koju zastupa Weinberg, mogući svemiri koegzistiraju na isti način kao i fizikalna stanja u kvantnoj mehanici. Zakoni kvantne fizike dozvoljavaju da čestice, pa čak i makroskopski objekti (kao na primjer Schrödingerova mačka), budu istovremeno u više različitih stanja. Isto tako mnoga stanja svemira podjednako su realna, a mi sami smo u jednom od tih stanja: u našem običnom svemiru. ...



Slika 2. Dvodimenzionalni svijet s netrivialnom topologijom.

Drugu interpretaciju, tzv. *antropski pejisaž*, zastupa Leonard Susskind. Mnogi svemiri postoje istovremeno kao mjehuri u različitim djelovima prostora a naš svemir je samo jedan segment tog pejisaža (slika 3).

I jedna i druga interpretacija zapravo su manifestacije tzv. antropskog principa: prirodni zakoni i prirodne konstante moraju biti podešene (fine tuned) upravo tako da omoguće inteligentni život; u protivnom mi ne bismo bili živi i u mogućnosti da ih mjerimo. Međutim, sa stajališta fenomenologije antropski princip potpuno je neprihvatljiv. Naime svaka teorija koja počiva na antropskom principu ima slabu prediktivnu moć i praktički je neoboriva. Oborivost teorije znači da postoji mogućnost, barem u načelu, eksperimenta čiji bi negativni rezultat oborio teoriju. Teorija koja to ne zadovoljava nije znanstvena. Iz tog razloga znatan broj teorijskih fizičara, među kojima se ubraja i Edward Witten, nisu baš sretni s pejisažom teorije struna, ali za sada nemaju pravih argumenata protiv, pa ga s nelagodom prihvaćaju.

Većina teoretičara gleda na teoriju struna posve pragmatično: treba pokušati izračunati što se izračunati da i ako je moguće načiniti provjeru usporedbom s opažanjima. U odsustvu visokoenergetskih

eksperimentata trenutno se mogući opservabilni efekti teorije struna traže u kozmologiji. Postojanje dodatnih dimenzija otvara široke mogućnosti interpretacije postojećih opažanja kroz eventualne modifikacije opće teorije relativnosti i standardne kozmologije kao i objašnjenje postojećih zagonetki. Možda nisu sve dimenzije kompaktificirane na isti način, neke od njih možda su kompaktne s puno većim radijusom zakrivljenosti, neke dodatne dimenzije možda uopće ne doživljavaju kompaktifikaciju. Naravno, sve te

mogućnosti, ako su realistične, moraju biti u skladu s postojećim opažanjima.

Svijet na opni

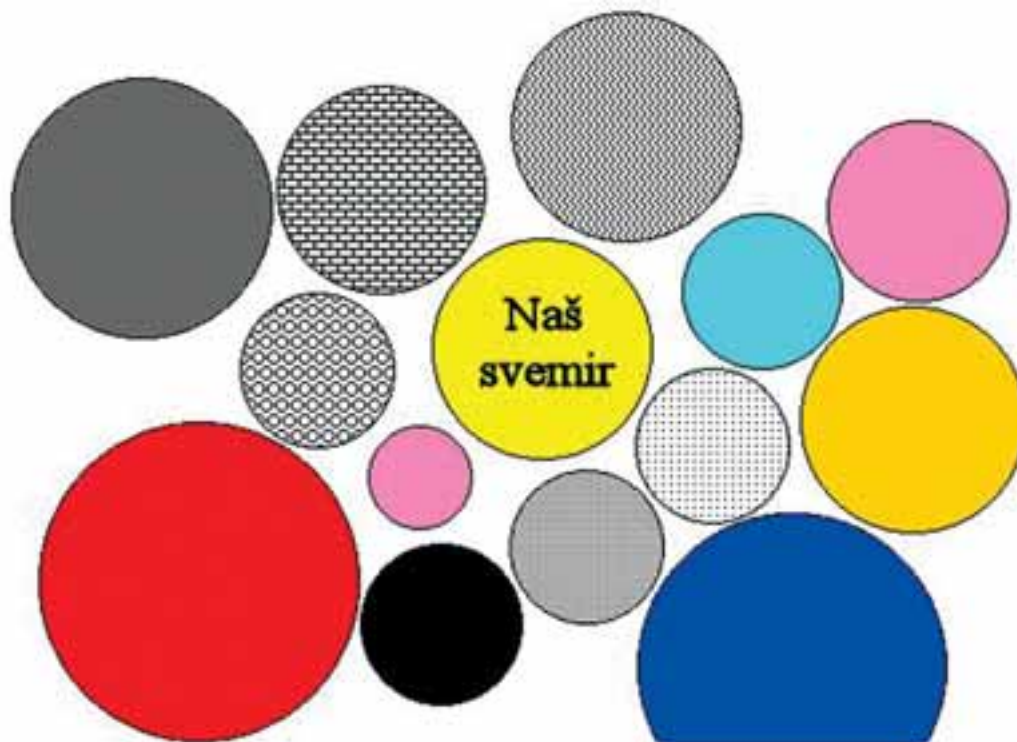
Osim struna kao elementarnih jednodimenzionalnih objekata, teorija struna sadrži višedimenzionalne objekte, takozvane D-opne (D-branes). D-opna je generalizacija dvodimenzionalne membrane i može biti dimenzije od 0 do 9. Proučavanje dinamike D-opni dovelo je do novog zamaha u teorijskoj kozmologiji: kozmologija svijeta na opni (brane world). Osnovna ideja je jednostavna i zapravo nije nova: naš je svemir 3-dimenzionalna opna koja se giba u prostoru dimenzije 4 ili više. Novina je da svijet na opni proizlazi iz teorije struna s parametrima koji ovise o osnovnom parametru teorije struna: napetošću strune. Dodatne dimenzije izvan opne mogu se promatrati kao nova skalarna polja, tzv. *moduli* u jeziku teorije struna. Ta dodatna skalarna polja, kao i još neka druga polja koja se javljaju u niskoenergetskim realizacijama teorije struna, modificiraju standardnu kozmologiju i potencijalno omogućuju rješenje spomenutih notornih problema kozmologije i fizike čestica: dinamiku ranog svemira, problem energije vakuuma (odnosno kozmološke konstante), problem tamne materije. ■■■

Navedimo dva primjera kozmoloških implikacija dinamike D-opni. Prvi se primjer odnosi na inflaciju. Inflacija, odnosno brzo napuhavanje ranog svemira, uvedena je kao teorijski model radi rješenja nekoliko problema observabilne kozmologije, a danas je manje-više prihvaćena kao dio standardnog kozmološkog modela. Inflacija nastaje kao fazni prijelaz u ranom svemiru uzrokovan inflatornim poljem. Račun u teoriji struna pokazuje da bi inflacija mogla nastati kao posljedica dinamike para D-opni koje se međusobno približavaju i čija međusobna udaljenost igra ulogu inflatornog skalarnog polja.

pejsažima teorije struna. Naravno, postoje alternativne ideje, od kojih je možda najpopularnija tzv. kvantna gravitacija petlji (loop quantum gravity). Alternativne ideje treba pažljivo pratiti ali i razvijati vlastite. U svakom slučaju, za teorijske fizičare ima još puno posla. Potraga za teorijom svega se nastavlja.

Zahvala

Autor se zahvaljuje članovima družine Robina Hooda Hrvoju Abrahamu i Predragu Laziću na pomoći u izradi ilustracija.



Slika 3. Kozmološki pejzaž.

Drugi primjer je mogućnost ujedinjenja tamne energije i tamne materije koju nudi dinamika gibanja d-dimenzionalne opne u d+1 dimenzionalnom prostoru. U tom slučaju dodatna dimenzija inducira na opni efektivnu prostorno-vremensku metriku koja se manifestira kao tzv. Čapljinov plin. Čapljinov plin je fluid u kojem je tlak negativan i obrnuto razmjerni gustoći energije. Kao posljedica tog svojstva fluid se u ranijim fazama ekspanzije ponaša pretežno kao tamna materija a u sadašnjoj i budućoj fazi kao tamna energija.

Navedeni primjeri ilustriraju kojim se putem kreće suvremena kozmologija inspirirana raskošnim

Literatura

- Fernando Quevedo, Lectures on String/Brane Cosmology, *Class. Quant. Grav.* 19 (2002) 5721.
 L. Susskind, The Anthropic Landscape of String Theory, preprint hep-th/0302219.
 Peter Coles, The state of the Universe, *Nature* 433 (20 Jan 2005) 248. ■

Skrivena jakost gravitacije i tamna materija

7

*Jesi li shvatio prostranstvo Zemlje?
Gdje je put do boravišta svjetlosti,
A gdje je mjesto tame?*

Knjiga o Jobu

Stvari su padale prema dolje od pamtivijeka. Od davnine se vjerovalo da Mjesec kruži oko Zemlje. Isaac Newton (1642.- 1727.) je bio prvi čovjek koji je shvatio da je uzrok ovih dviju različitih pojava jedna te ista sila. Newtonov zakon gravitacije je bio teorijski, zapravo prilično jednostavna matematička apstrakcija: svako tijelo privlači svako drugo tijelo silom koja je upravo proporcionalna umnošku njihovih masa, a obrnuto proporcionalna kvadratu udaljenosti među njima. Gravitacija je sila koja djeluje na daljinu. Stalno pljuskanje valova o obalu djelomično je izazvano smjenom plime i oseke. Mjesec i Sunce su daleko od nas, ali njihov gravitacijski utjecaj vrlo je stvaran i osjetan ovdje na Zemlji. Konačno, i učinak Zemljine sile teže svakodnevno osjećamo kao vlastitu težinu. Isti zakon gravitacije vrijedi bilo gdje u svemiru, a **gravitacijska sila** je odgovorna za formiranje galaktika, zvijezda i planeta.

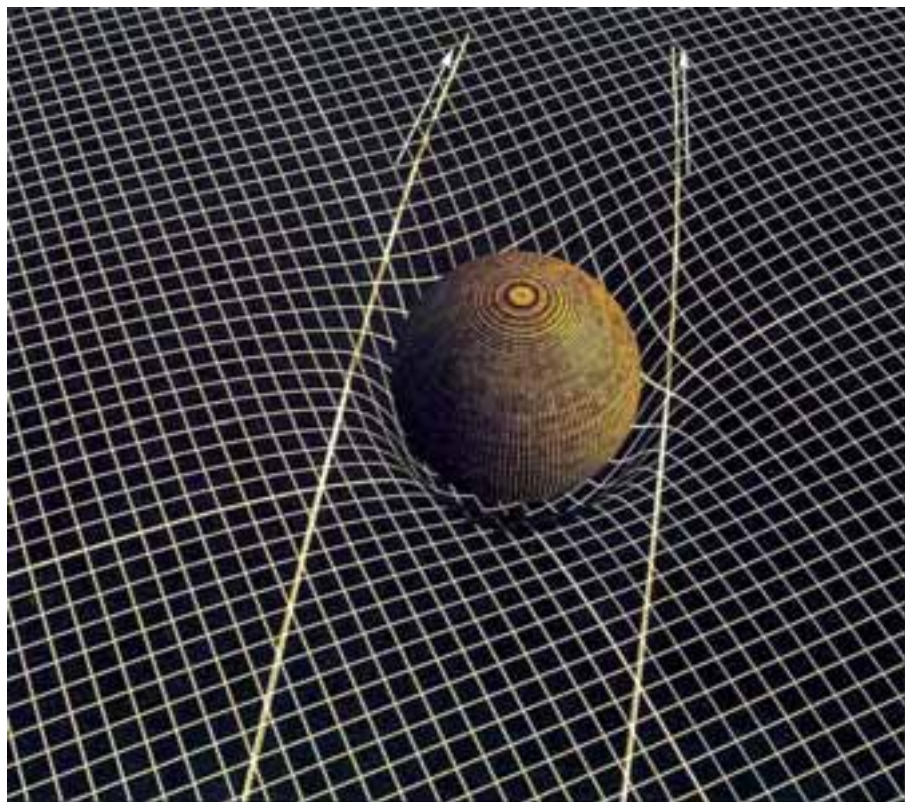


PIŠE: **MILICA KRČMAR**

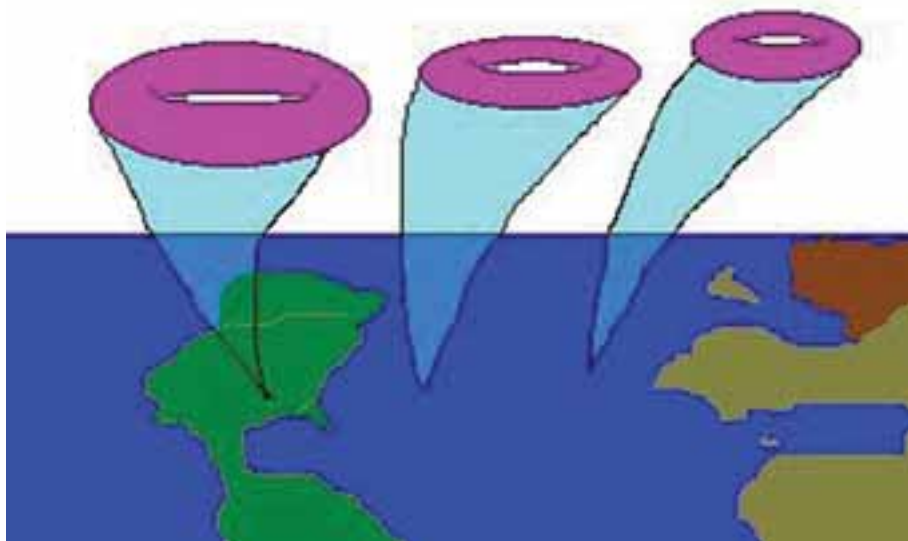
Masa je ono svojstvo materije koje je uzrok privlačenja drugog tijela, kao u Newtonovom zakonu o gravitaciji. Ili, masa je ono svojstvo tijela kojim se ono opire promjeni brzine, kao u drugom Newtonovom zakonu gibanja. U skladu s današnjim razumijevanjem prirode, sve materijalno što nas okružuje sazdano je od atoma, koji su opet sazdani od vrlo guste središnje jezgre okružene oblakom elektrona. Atome na okupu drži **elektromagnetska sila**, koja je osnova svih kemijskih reakcija. Naš svakidašnji život ovisi o strukturi atoma. Električna polja daju masi tjelesnost. Bez električnih sila, u svemiru ne bi postojale stvari, sve bi se raspalo u nevidljivu finu prašinu. Gusta jezgra atoma sastavljena je, pak, od protona i neutrona, a oni od elementarnih

čestica takozvanih kvarkova. Sve njih zajedno u jezgri atoma drži **jaka nuklearna sila**. Ona je važna u nuklearnim reakcijama kao što su fuzija i fisija, dok **slaba nuklearna sila** određuje radioaktivni raspad, odnosno spontanu emisiju beta čestica iz unutrašnjosti jezgre.

Od četiriju poznatih temeljnih sila (ili međudjelovanja) prirode – gravitacije, elektromagnetizma, slabe i jake nuklearne sile – gravitacija je daleko najslabija. Na primjer, gravitacijsko privlačenje između dva protona je 35 redova veličine (sto milijuna milijarda milijarda milijarda puta) slabije od njihovog elektromagnetskog odbijanja. Značaj gravitacije, međutim, nije u njejoj jakosti, već u njejoj univerzalnosti....



Masivno tijelo zakrivljuje prostor-vrijeme, savijajući tako staze svjetlosti u svojoj blizini.



Prikazano na ekstremno shematski način: svakoj točki našeg četverodimenzionalnog svijeta pridruženo je klupko sitno smotanih dodatnih prostornih dimenzija.

Objekti ne mogu biti gravitacijski neutralni, sva tijela s masom se privlače. Prema tome, kod dovoljno velikog broja čestica materije, gravitacijska sila preteže u odnosu na sve ostale sile. To je i razlog što gravitacija određuje razvoj, i u konačnici, sudbinu svemira. Čak i kada su u pitanju tijela veličine zvijezda, privlačno djelovanje gravitacije može nadjačati sve ostale sile i dovesti do urušavanja neke zvijezde do veličine kada je masa zvijezde stiješnjena u dovoljno mali prostor da gravitacijsko polje na njoj površini postaje toliko jako da mu ni svjetlost ne može pobjeći (takozvana crna jama).

Iz svakodnevnog iskustva znamo da živimo u trodimenzionalnom prostoru. Drugim riječima, položaj neke točke u prostoru možemo odrediti sa trima brojevima: na primjer, geografskom dužinom i širinom te nadmorskom visinom. Prvi matematički model prostora i vremena dao je Newton. U tom su modelu, prostor i vrijeme bili samo pozadina na kojoj su se odigravali događaji. Albert Einstein (1879.- 1955.) je 1915. godine izložio potpuno novi matematički model: opću teoriju relativnosti, koja povezuje vrijeme i tri dimenzije prostora u četverodimenzionalno prostor-vrijeme, koje nije ravno već je zakrivljeno, izobličeno pod utjecajem mase i energije u njemu. Naime, već je Einsteinova specijalna teorija relativnosti, objavljena 1905. godine, pokazala da su energija i masa samo pismo i glava jednog te istog novčića, povezane

zauvijek čuvenom jednadžbom $E = m c^2$ (gdje E predstavlja energiju, m masu, a c brzinu svjetlosti).

Zakrivljenost prostor-vremena određena je rasporedom mase i energije u svemiru, ali tim rasporedom, s druge strane, upravlja baš zakrivljenost prostora.

Newtonova gravitacijska sila zamijenjena je zakrivljenim prostorom.

Okolnost da je prostor zakrivljen znači da i svjetlost ostavlja utisak kao da se ne kreće pravocrtno u prostoru. U skladu s teorijom, očekuje se da će svjetlost (s neke daleke zvijezde) koja prođe pokraj Sunca biti skrenuta za jedan mali kut pa će nekom

promatraču na Zemlji izgledati da se ta zvijezda nalazi na različitom mjestu. Na spektakularan način to je i potvrđeno 1919. godine, kada je jedna britanska ekspedicija, koja je pratila pomrčinu Sunca u zapadnoj Africi, pokazala da Sunce doista savija zrake svjetlosti što prolaze pokraj njega.

Znamo da se u fizici nove teorije grade na prethodnima, pri čemu se zadržavaju zamisli koje izdrže pokusne provjere. Također je važno razumjeti pojam djelomičnih teorija. Newtonov zakon gravitacije vrlo je precizan samo kada je gravitacija slaba. U jakim gravitacijskim poljima moramo ga zamijeniti Einsteinovom općom teorijom relativnosti. Međutim, kada se ispituju međudjelovanja na mikroskopskoj razini, kao što je singularitet Velikog praska (trenutak rođenja svemira) ili crna jama, opća teorija relativnosti mora se zamijeniti kvantnom gravitacijom.

Kvantne teorije sustava kakav je atom, koji sadrži konačan broj čestica, postavili su još dvadesetih godina prošlog stoljeća Heisenberg, Schroedinger i Dirac. Jedna od bitnih postavki kvantne mehanike je Heisenbergovo načelo neodređenosti. Ono kaže da postoje granice preciznosti našeg promatranja određenih fizičkih veličina, kao što su položaj, brzina, energija i vrijeme. To nije ograničenje mjernih instrumenata, već sama bit svemira. Na primjer, mi pretpostavljamo da vakuum u svemiru ne sadrži apsolutno ništa i stoga

...

¹ Parovi virtualnih čestica-antičestica ne mogu se neposredno opažati, ali se njihova posredna djelovanja mogu mjeriti. Na primjer, postojanje kvantnih fluktuacija osnovnog stanja eksperimentalno je potvrđeno takozvanim Casimirovim efektom, slabom silom između paralelnih metalnih ploča.



Tehnika gravitacijskih leća (koje su predviđene općom teorijom relativnosti) pokazuje da je oko devet desetina mase jata galaktika u formi tamne materije (prikazana plavom bojom).

ima nultu energiju. Ali, i u praznom prostoru, zbog principa neodređenosti pojavljuju se parovi virtualnih čestica- antičestica¹, koji kratkotrajno opstaju, a onda se međusobno poništavaju. Problem je što bi ove kvantne fluktuacije vakuuma vodile na beskonačnu količinu energije osnovnog stanja (takozvana vakuumska energija). Budući da je energija (kao i materija) izvor gravitacije, ova beskonačna gustoća energije morala bi značiti da u svemiru postoji dovoljno gravitacijskog privlačenja da zakrivi prostor-vrijeme u jednu točku. Ali to očito nije slučaj. Mogućnost razrješenja problema beskonačnosti u kvantnoj gravitaciji danas se nazire u takozvanoj supersimetričnoj teoriji struna. Kvantna teorija struna nije, međutim, matematički konzistentna u četiri dimenzije, već samo pri deset ili jedanaest dimenzija. Premda nam se čini da deset ili jedanaest dimenzija ima malo što zajedničkog s prostor-vremenom kakvog znamo iz iskustva, osnovna zamisao je u tome da su sve ostale dimenzije tako sitno sklupčane da ih mi ne zamjećujemo; svjesni smo samo postojanja četiriju velikih i gotovo ravnih dimenzija. Štoviše, kad je opća teorija relativnosti pokazala da bismo ono što opažamo kao gravitacijsku silu mogli povezati sa zakrivljenošću prostora, nije više

bilo skandalozno razmišljati o tome da bi i druge sile mogle biti povezane sa zakrivljenošću još nekih dimenzija! **Možda bi se i sve prirodne sile dale objasniti teorijom koja predviđa postojanje dodatnih prostornih dimenzija** i prema kojoj su sve dimenzije, osim četiriju nam poznatih, smotane u krug s promjerom jednakim Planckovoj dužini (jedna stotisućinka milijardinke milijardinke milijardinke milimetra), zbog čega su danas nemjerljive.

Nedavno su se, pak, pojavile zamisli da su jedna ili više dodatnih dimenzija razmjerno velike ili su čak beskonačne. Njihovo postojanje bi vodilo na zaključak da živimo na jednoj četverodimenzionalnoj površini ili brani u

jednom višedimenzionalnom prostor-vremenu. Takozvana obična materija (građena od atoma) te elektromagnetska, slaba i jaka nuklearna sila bile bi ograničene na branu i ponašale bi se stoga kao u četiri dimenzije. Za razliku od toga, gravitacija bi ispunjavala cjelokupno višedimenzionalno prostor-vrijeme. Budući da bi gravitacija bila proširena i u n dodatnih dimenzija, brže bi opadala s povećanjem udaljenosti (kao $1/r^{2+n}$) nego što bi se to očekivalo (kao $1/r^2$). Ako se ovo brzo opadanje gravitacijske sile proširi na astronomske udaljenosti, uočili bismo njegov utjecaj na staze planeta: one ne bi bile postojane, planeti bi se srušili na Sunce ili bi odbjegli u tamu međuzvezdanog prostora. Ali to se ne događa, a i ne bi se dogodilo ako bi se dodatne dimenzije završavale na drugoj brani², ne predalekoj od brane na kojoj mi živimo. To bi značilo da se gravitacija ne bi mogla slobodno prostirati na udaljenostima većim od razmaka između brana, već bi njeno djelovanje bilo ograničeno na branu. Stoga bi staze planeta bile stabilne. S druge strane, gravitacija bi se brže mijenjala na udaljenostima manjim od razmaka između brana. U scenariju branskog svijeta, mi bismo živjeli na jednoj brani, ali u neposrednoj

² Umjesto da se dodatne dimenzije završavaju na drugoj brani, moguće je, također, da budu jako zakrivljene. Ta zakrivljenost sprečava gravitacijsko polje materije na brani da se širi daleko u dodatne dimenzije.



Gravitacija tamne tvari odgovorna je i za raspored vidljive tvari u svemiru.

blizini mogla bi postojati još jedna "brana-sjena". Taj svijet-sjenu ne bismo mogli vidjeti jer bi svjetlost bila ograničena na pojedinačne brane i ne bi se širila kroz međuprostor. Mogli bismo samo osjećati gravitacijski utjecaj materije s brane-sjene. Na našoj brani činilo bi se da su izvori te gravitacijske sile doista **"tamni"**, u smislu da je jedini način na koji ih možemo otkriti njihova gravitacija.

Pustimo, načas, po strani ove spekulativne zamisli o branskom svijetu. Zapravo, da bi se objasnilo pomicanje zvijezda na rubovima galaktika, mora, kako izgleda, u galaktikama postojati više mase nego što iz promatranja zaključujemo da ima **vidljive (obične)** materije. I dok galaktike blistaju zahvaljujući "termonuklearnim pećima", što u središtima zvijezda sagorijevaju vodik u helij, natapajući svemir svjetlošću, **tamna materija** drži jata galaktika na okupu i zadržava zvijezde u njima da se ne razlete. Astronomi su napravili i karte te za sada neuhvatljive supstancije, odgovorne za raspored svega što vidimo na nebu. Predviđanja opće teorije relativnosti (gravitacija tamne tvari nabire prostor-vrijeme i savija zrake svjetlosti koje tuda prolaze) ukazuju na mogućnost da bi tamna tvar mogla sačinjavati i do devet desetina galaktičke materije. U vidljivom svemiru prevladava nevidljiva tvar³.

Pitanje o naravi, porijeklu i rasporedu tamne materije jedno je od najzbudljivijih neriješenih pitanja današnje fizike. Postoje jaki argumenti, povezani s prvobitnom sintezom atomskih jezgara, da je tamna tvar sačinjena od čestica sasvim različitih od protona, neutrona i elektrona koji tvore običnu materiju. Te egzotične elementarne čestice neće se zgrudati u nebeska tijela nego će tvoriti difuzni plin što protječe kroz galaktike. Budući da s običnom materijom reagiraju u najboljem slučaju tek neznatno, te bi čestice mogle

neopazice prolaziti kroz naše tijelo, kroz Zemlju. Možda tamna materija potječe od masa vrlo lakih čestica kao što su aksioni ili od još egzotičnijih vrsta čestica, kakve su WIMP-ovi (masivne čestice slabog međudjelovanja). Njihovo postojanje predviđaju suvremene teorije elementarnih čestica, premda još nisu otkrivene u pokusima. Ove bi čestice vjerojatno bile ostaci proizvodnih procesa u vreloj "juhi" sasvim ranog svemira, mnogo mlađeg od jedne sekunde (danas bi se na rođendanskoj torti svemira nalazilo oko 14 milijarda svijećica!).

Danas fizičari tragaju za identitetom tamne materije i pokušavaju otkriti tu nikad viđenu supstanciju u brojnim sofisticiranim eksperimentima. Grupa fizičara⁴ iz Laboratorija za elektromagnetske i slabe interakcije u Zavodu za eksperimentalnu fiziku na Institutu "Ruđer Bošković" (LEI/ZEF/IRB) uključila se u traganje za aksionima sredinom 1990-tih. Eksperimenti izvedeni na IRB-u ocijenjeni su od najeminentnijih znanstvenika iz područja fizike čestica, okupljenih u Particle Data Group, kao otvaranje novog područja u istraživanju aksiona. Neki članovi Laboratorija također sudjeluju i u međunarodnoj kolaboraciji koja traga za aksionima pomoću CERN-ovog⁵ teleskopa za Sunčeve aksione (engleska kratica CAST), koji je ujedno i najveći

³ Danas znamo da tamna materija nije jedina tamna strana svemira. Nakon 1920-tih smatralo se da gravitacija usporava širenje svemira. Nedavno se, međutim, promatranjem dalekih zvijezda (supernove tipa Ia) utvrdilo upravo suprotno: širenje svemira se danas ubrzava! Sila koja bi to mogla učiniti jest zagonetna "tamna energija". Suprotstavljajući se gravitacijskom privlačenju, ona bi na kraju mogla nadvladati sve sile koje povezuju materiju.

⁴ Dr. Raul Horvat, Mr. Krešimir Jakovčić, Dr. Dalibor Kekez, Dr. Milica Krčmar, Dr. Zvonko Krečak, Dr. Biljana Lakić, Dr. Ante Ljubičić i Dr. Mario Stipčević.

⁵ CERN je Europski laboratorij za fiziku visokih energija i jedan od najvećih akceleratorskih centara u svijetu. Sagrađen je u blizini Ženeve zajedničkim naporima europskih zemalja.

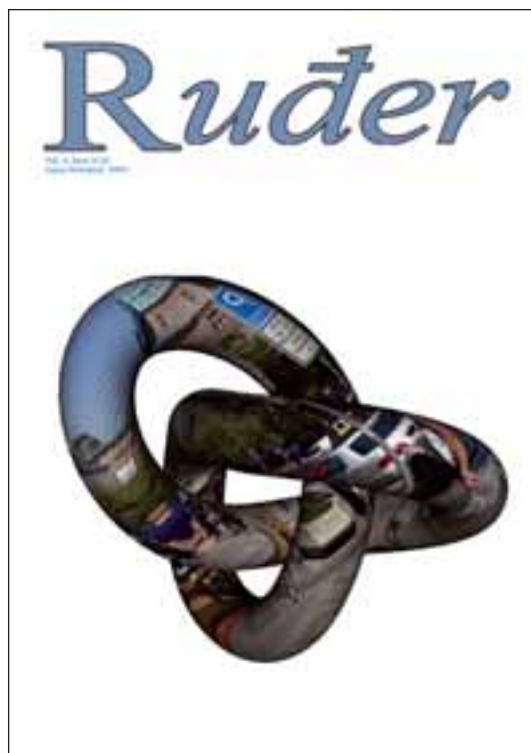


CERN-ov teleskop za Sunčeve aksione sastoji se od 10 metarskog LHC test magnetu nominalne jakosti 9 Tesla, montiranog na pokretnu platformu koja omogućuje praćenje Sunca oko tri sata dnevno.

desetinke milimetra. Mnogo se očekuje i od Velikog sudarača hadrona (LHC) koji se gradi u CERN-u, a pomoću kojeg će se moći proniknuti do dužina od interesa za postojanje branskog svijeta. Time bi se mogla objasniti i **tajna skrivene jakosti gravitacije**. Gravitacija je možda vrlo jaka u osnovnoj teoriji, ali njeno prostiranje kroz dodatne dimenzije imalo bi za posljedicu da će sila teže biti slaba na velikim udaljenostima na brani na kojoj živimo. ■■

akcioni teleskop na svijetu. CAST je dizajniran za traganje za aksionima koji mogu nastati konverzijom toplinskih fotona u električnom polju jezgara vodika i helija te elektrona u središtu Sunca. Tako nastali aksioni su širokog energijskog spektra sa srednjom energijom od oko 4 keV ⁶. U jakom transverzalnom magnetskom polju supravodljivog magnetu, aksioni se mogu pretvoriti ponovno u fotone, koji se detektiraju na krajevima magnetu pomoću detektora X-zračenja. Ubacivanjem plinovitog helija u magnetsko polje postiže se velika selektivnost teleskopa na aksionsku masu. Upravo koristeći ovo svojstvo teleskopa, nedavno su znanstvenici iz LEI-a pokazali da je CAST, osim na aksione, osjetljiv i na moguću prisutnost dodatnih prostornih dimenzija⁷. Naime, pored gravitacije i slabo-interagirajuće čestice, poput aksiona, mogu se širiti u dodatne dimenzije. To bi, opet, imalo za posljedicu da se umjesto jedne mase aksiona, u četverodimenzionalnom prostor-vremenu pojavljuje čitav toranj aksionskih masa, čija bi detekcija ukazala na postojanje branskog svijeta.

Spekulativne zamisli branskog svijeta su plod **S**najnovijih istraživanja. One nude nove mogućnosti koje se mogu provjeriti u pokusima. Trenutačno se poduzimaju mjerenja gravitacijske sile između masivnih tijela na udaljenostima kraćim od dvije



OPIS NASLOVNICE:

Dvodimenzionalni svijet s netrivijalnom topologijom.

⁶ Jedan kilo elektronvolt (keV) je energija koju elektron dobije ubrzanjem kroz razliku potencijala od tisuću Volta.

⁷ R. Horvat, M. Krčmar and B. Lakić, Phys. Rev. D 69 (2004) 125011.

Invarijantna specijalna relativnost ili geometrijski pristup teoriji prostorvremena



PIŠE: **TOMISLAV IVEZIĆ**

1. Uvod

Dilatacija vremena i kontrakcija dužine smatraju se osnovnim relativističkim efektima koji se navode u svim udžbenicima fizike i stalno se eksperimentalno provjeravaju sa sve većom preciznošću u različitim tipovima eksperimenata. Ti fenomeni ne samo da su interesantni fizičarima, nego zaokupljaju maštu i mnogih drugih koji su vrlo daleko od fizike.

U ovom prilogu iznijet ću jedan drugi pogled na te efekte i pokazati (na primjeru eksperimenta s mionskim raspadom) da se svi eksperimenti koji testiraju specijalnu relativnost (SR) mogu ispravno objasniti i bez korištenja dilatacije i kontrakcije: tj., da postoji potpuno slaganje takvih eksperimenata i jedne geometrijske formulacije SR, invarijantne SR, koja se razlikuje od Einsteinove formulacije SR.

2. Dilatacija vremena i kontrakcija dužine

U nedavnom broju «Ruđera» (ožujak/travanj 2005), koji je bio posvećen «Otvorenim danima» 2005. nalazi se i članak «Čestice i Einstein» Tome Antičića. Nekako u to vrijeme izveden je u predvorju Fizičkog odsjeka PMF-a interaktivni pokus «Dilatacija vremena», a nositelj aktivnosti je bio Damir Bosnar (http://www.wyp2005.hr/interaktivni_pokusi/). U oba demonstracijska pokusa detektirani su mioni na zemljinoj površini, što se onda objašnjava Einsteinovom teorijom relativnosti i njenim predviđanjem dilatacije vremena. Naime, mioni iz kozmičkih zraka nastaju u gornjim slojevima atmosfere na visinama oko 20 km. Njihovo vlastito vrijeme života Δt u sustavu u kojem miruju je oko $2,2 \mu\text{s}$, pa, iako se gibaju velikom brzinom ($\cong c$), od mjesta nastanka do mjesta raspada prešli bi manje od 1 km i ne bi mogli stići na površinu Zemlje. U svom fundamentalnom radu iz 1905.: «Oelektrodinamici gibajućih tijela» [1], u kojem je postavljena SR, Einstein je utvrdio da vrijeme u sustavu koji se giba teče sporije za faktor $\gamma = 1/(1 - v^2/c^2)^{1/2}$ gdje je v brzina sustava

(u slučaju miona to je njihova brzina mjerena u odnosu na Zemlju) a c je brzina svjetlosti, $c = 3 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}$. Tako vrijeme života miona u sustavu Zemlje $\Delta t'$ postaje puno veće nego vlastito vrijeme Δt

$$\Delta t' = \gamma \Delta t, \quad (1)$$

pa gotovo svi mogu doći do Zemlje prije nego se raspadnu. Ta pojava sporijeg tečenja vremena za gibajuće satove nazvana je dilatacija vremena i smatra se jednim od najvažnijih relativističkih efekata.

Drugi, isto tako poznat relativistički efekt, koji je Einstein formulirao u spomenutom radu iz 1905., je kontrakcija dužine gibajućih tijela. Prema Einsteinu, ako je dužina nekog štapa u sustavu u kojem miruje L (vlastita dužina), tada je dužina tog istog štapa u sustavu u kome se taj štap giba manja od L ,

$$L' = (1/\gamma)L = \sqrt{1 - v^2/c^2} L. \quad (2)$$

Treba primjetiti da se udaljenosti između početka i kraja štapa određuju istovremeno po satovima u danom sustavu; za vlastitu dužinu L početak i kraj štapa su određeni istovremeno u vlastitom sustavu (nazovimo ga sustav S) a za L' istovremeno po satovima sustava S' u kome se štap giba brzinom v . Oba efekta, dilatacija vremena i kontrakcija dužine, nalaze se u svim udžbenicima fizike i smatraju se dobro potvrđenim u raznim eksperimentima.

3. 4D prostorvrijeme Minkowskog

Nedugo nakon što je Einstein objavio svoj rad, Minkowski [2] je dao matematičku formulaciju Einsteinovih rezultata uvodeći 4D prostorvrijeme. Prema Minkowskom: «Henceforth space by itself, and time by itself are doomed to fade away into mere shadows, and only a kind of union of the two will preserve an independent reality.». Znači, vrijeme i prostor ne postoje više kao odvojene, dobro definirane veličine, nego samo njihovo jedinstvo ima neovisnu fizikalnu realnost. U 4D prostoru Minkowskog nekom su događaju A pridružene četiri koordinate, vremenska $x^0 = ct$ (kada se događaj desio) i tri prostorne $x^1 = x$, $x^2 = y$, $x^3 = z$ (gdje se desio), $A(x^0, x^1, x^2, x^3)$, ili kraće, događaju A pridružene su koordinate x^μ , $\mu = 0, 1, 2, 3$. Kvadrat prostornovremenske duljine, 4D duljine, između dva događaja $A(x_A^\mu)$ i $B(x_B^\mu)$ dan je razlikom

$$\ell^2 = (x_B^0 - x_A^0)^2 - d^2 = c^2(t_B - t_A)^2 - d^2, \quad (3)$$

gdje je d obična prostorna udaljenost, $d^2 = (x_B - x_A)^2 + (y_B - y_A)^2 + (z_B - z_A)^2$. Bitna razlika geometrije 4D prostorvremena i geometrije običnog 3D prostora je postojanje minus predznaka u izrazu za ℓ^2 (3). Zbog toga je geometrija 4D prostorvremena pseudo-Euklidska a ne obična Euklidska geometrija 3D prostora u kojoj su svi predznaci pozitivni u prostornoj udaljenosti d dviju točaka.

Koordinate jednog te istog događaja mjerene u dva relativno gibajuća inercijalna 4D sustava S i S' (S' se giba stalnom brzinom v duž zajedničke x, x' osi) povezane su Lorentzovim transformacijama

$$\begin{aligned} x'^0 &= \gamma(x^0 - \beta x^1), & x'^1 &= \gamma(x^1 - \beta x^0), \\ x'^2 &= x^2, & x'^3 &= x^3, \end{aligned} \quad (4)$$

gdje je $\beta = v/c$ i $\gamma = (1 - \beta^2)^{-1/2}$. Iste relacije vrijede i za $\Delta x^0, \Delta x^1, \dots$, tj. $\Delta x'^0 = \gamma(\Delta x^0 - \beta \Delta x^1), \dots$. Kvadrat 4D duljine ℓ^2 dan jednadžbom (3) je isti u oba sustava, tj. ℓ^2 je invarijanta na Lorentzove transformacije (LT). Iako je Minkowski pravilno shvatio da je samo jedinstvo prostora i vremena dobro definirano, ipak je i on smatrao da su kontrakcija dužine i dilatacije vremena dobro definirani relativistički efekti.

Razlog zašto ovo napominjem je taj što se npr. u relaciji (2) za kontrakciju dužine uspoređuju samo dvije dužine - L' i L (nema nikakvog vremenskog dijela) i svaka od njih je određena istovremeno po satovima opažača koji mjeri tu dužinu. No, zbog LT (4), ako su dvije prostorno udaljene točke određene istovremeno u jednom sustavu, one ne mogu biti istovremene i u drugom 4D koordinatnom sustavu (relativnost istovremenosti). Naime iz (4) slijedi da je $\Delta x'^0 = \gamma(\Delta x^0 - \beta \Delta x^1)$, pa ako su A i B istovremeni događaji u sustavu S , $\Delta x^0 = 0$, tada vidimo da $\Delta x'^0 = -\beta \gamma \Delta x^1 \neq 0$; ta dva događaja nisu istovremeni u sustavu S' . Njihova vremenska udaljenost u sustavu S' , $\Delta x'^0$, ovisi o tome koliko su oni prostorno udaljeni u sustavu S , tj. ovisi o Δx^1 i o relativnoj brzini sustava S' i S , preko β i γ .

Na sličan način se u relaciji za dilataciju vremena (1) uspoređuju samo vremenski intervali u dva 4D sustava S i S' a LT pokazuju da se uvijek mora razmatrati ukupnost vremenskih i prostornih intervala u oba 4D sustava.

4. Rohrlichove «prividne» (apparent) i «istinite» (true) transformacije

U jednom je radu iz 1966. Rohrlich [3] pokazao da Lorentzova kontrakcija, tj. kontrakcija dužine, nije u skladu s LT. On je uveo jedan vrlo važan koncept u teoriju, koncept istovjetnosti jedne fizikalne veličine za razne opažače, koji je, na žalost, ostao gotovo potpuno neprimjećen. Prema tom konceptu, kao što Rohrlich kaže: «*A quantity is therefore physically meaningful (in the sense that it is of the same nature to all observers) if it has tensorial properties under Lorentz transformations.*». Također je uveo pojmove «istinitih» (true) transformacija i «prividnih» (apparent) transformacija. Istinite transformacije povezuju opažanja dvaju relativno gibajućih opažača načinjena na istom fizikalnom sistemu; tipični primjer su Lorentzove transformacije. Prividne transformacije povezuju opažanja koja se ne odnose na iste prostornovremenske događaje nego npr. na ista mjerenja, kao kod Lorentzove kontrakcije, u kojoj oba opažača vrše isto mjerenje duljine nekog objekta. Kao što je već rečeno, oni mjere udaljenost između početka i kraja objekta tako da ih svaki određuje istovremeno, po svojim satovima. No, zbog relativnosti istovremenosti njihovi se podaci ne odnose na iste prostorno-vremenske događaje.

To pitanje, što je ista 4D fizikalna veličina za razne relativno gibajuće opažače, također je vrlo lijepo objasnio Gamba [4]. On kaže isto kao i Rohrlich: «*The quantity $A_\mu(x_\lambda, X_\lambda)$ for S is the same as the quantity $A'_\mu(x'_\lambda, X'_\lambda)$ for S' when all the primed quantities are obtained from the corresponding unprimed quantities through Lorentz transformation (tensor calculus).*»

5. Invarijantna SR ili geometrijski pristup teoriji prostorvremena

Iako su Rohrlich [3] i Gamba [4] uočili problem s Einsteinovom [1] definicijom duljine, tj. s Lorentzovom kontrakcijom, i jasno formulirali koncept istovjetnosti (the concept of sameness) fizikalnog sistema za razne opažače, ipak uobičajeni kovarijantni formalizam, koji su i oni koristili, nije sasvim odgovarajuć za pravilnu matematičku formulaciju tog koncepta istovjetnosti. Naime u običnoj kovarijantnoj formulaciji fizikalne veličine su predložene s tenzorima napisanim u komponentnoj, koordinatnoj formi kao npr. već spomenuti 4-vektor položaja $x^\mu = (x^0 = ct, x^1, x^2, x^3)$, 4-vektor količine gibanja $p^\mu = (E/c, p^1, p^2, p^3)$, 4-vektor ...

gustoće struje $j^\mu = (c\rho, j^1, j^2, j^3)$, itd. (Treba napomenuti da se prostorne komponente 4-vektora p^μ razlikuju od komponentata običnog 3D vektora količine gibanja $\mathbf{p} = m\mathbf{v}$; 3D vektori su označeni masnim slovima. Naime $p^1 = \gamma p_x$, i tako za p^2 i p^3 .) No, prilikom takvog zapisa (koji se koristi u gotovo svim udžbenicima i člancima iz teorije relativnosti) implicitno se pretpostavlja da je odabran specifičan 4D koordinatni sustav s pravokutnim prostornim koordinatama, i što je najvažnije, s Einsteinovom sinhronizacijom prostorno udaljenih satova. Takav koordinatni sustav zvat ćemo Einsteinov koordinatni sustav. Tenzori zapisani samo preko komponentata su koordinatne veličine, tj. veličine ovisne o odabranom koordinatnom sustavu, a fizika, tj. zakoni fizike, ne smiju ovisiti niti o izboru referentnog sustava (fizikalni objekt: opažači s metrima i satovima), niti o izboru koordinatnog sustava u odabranom referentnom sustavu.

Matematičari već odavno shvaćaju tenzore kao geometrijske veličine koje se sastoje od komponentata i baze. Takvo shvaćanje je onda u novijoj literaturi preneseno u opću teoriju relativnosti, a u radovima [5-8] to je korišteno i u SR. Komponente sadrže samo dio informacije o nekoj fizikalnoj veličini, a ostatak je sadržan u bazi. To znači da će u geometrijskom pristupu SR 4-vektor položaja x^a biti zapisan u standardnoj bazi $\{e_\mu\}$ kao $x^a = x^0e_0 + x^1e_1 + x^2e_2 + x^3e_3$ (ili kraće $x^a = x^\mu e_\mu$, gdje ponovljeni grčki indeksi podrazumijevaju sumaciju od 0-3). e_μ su jedinični 4-vektori baze, npr. komponente jediničnog 4-vektora duž vremenske osi, e_0 , su $e_0(1, 0, 0, 0)$. Standardna baza $\{e_\mu\}$ odgovara izboru Einsteinovog koordinatnog sustava. Latinski indeksi a, b (npr. indeks 'a' u x^a) označavaju geometrijski objekt, tj. o kojem tipu tenzora se radi; tenzor prvog ranga je 4-vektor, npr. x^a , p^a , j^a , tenzor drugog ranga je npr. F^{ab} , tenzor elektromagnetskog polja, itd. Takve geometrijske veličine, koje su definirane bez referentnog sustava, zvat ćemo apsolutne veličine (AV). Ako se uvede neka baza, tada su AV predočene pomoću komponentata i baze, pa govorimo o koordinatno-zasnovanoj geometrijskoj veličini (KZGV). Koncept istovjetnosti fizikalne veličine za razne opažače je prirodno ugrađen u takvom geometrijskom formalizmu. Svaka 4D KZGV je invarijantna na LT; komponente se transformiraju, kao i u kovarijantnom pristupu, pomoću LT, npr. (4), a vektori baze se transformiraju pomoću inverznih LT, pa se ukupna KZGV ne mijenja prilikom LT. Tako možemo pisati

$$x^a = x^\mu e_\mu = x'^\mu e'_\mu, \quad (5)$$

gdje su sve crtane veličine LT odgovarajućih necrtanih. Jedinični 4-vektori e_μ se transformiraju kao

$$e'_0 = \gamma(e_0 + \beta e_1), \quad e'_1 = \gamma(e_1 + \beta e_0), \\ e'_2 = e_2, \quad e'_3 = e_3. \quad (6)$$

pa se lako može provjeriti pomoću jednadžbi (4) i (6) da vrijedi invarijantnost dana jednadžbom (5). Rohrlchove i Gambine ideje su dobile jasnu matematičku formulaciju u geometrijskom pristupu SR.

Napišemo li fizikalne zakone pomoću takvih 4D AV ili 4D KZGV, tada oni automatski zadovoljavaju – princip relativnosti, što je bitna razlika u odnosu na Einsteinovu SR, gdje se princip relativnosti postulira izvan matematičke formulacije teorije. (Prema principu relativnosti, svi fizikalni zakoni moraju imati isti oblik u svim inercijalnim sustavima, tj. ne možemo pomoću nikakvih pojava utvrditi da li se gibamo jednoliko po pravcu ili mirujemo.)

Fizikalni zakoni napisani pomoću AV ili odgovarajućih KZGV su invarijantni ne samo na LT, nego i na transformacije koje povezuju različite sustave koordinata u istom referentnom sustavu. To uključuje i mogućnost korištenja raznih sinhronizacija satova a ne samo, kao što je uobičajeno, Einsteinove sinhronizacije.

(Ovaj geometrijski pristup je jednostavno poopćenje običnog formalizma s 3D vektorima na 4D prostor. Tako npr. 4-vektoru položaja x^a (koji je geometrijska veličina u 4D prostoru, dakle definiran bez referentnog sustava, 4D AV) odgovara 3D vektor položaja \mathbf{r} (koji je geometrijska veličina u običnom 3D prostoru, 3D AV). Kada se uvede npr. pravokutni koordinatni sustav u običnom 3D prostoru, tada 3D AV \mathbf{r} postaje 3D KZGV $\mathbf{r} = x\mathbf{i} + y\mathbf{j} + z\mathbf{k}$, ili kraće, $\mathbf{r} = x^p \mathbf{i}_p$, $p = 1, 2, 3$, gdje su \mathbf{i}_p tri okomita jedinična vektora \mathbf{i} , \mathbf{j} , \mathbf{k} , koji tvore bazu $\{\mathbf{i}_p\}$ u 3D prostoru. Ako se napravi rotacija 3D koordinatnog sustava, tada se sam vektor \mathbf{r} ne mijenja, ali u novom, zarotiranom, sustavu on ima druge komponente x^p i drugu bazu $\{\mathbf{i}'_p\}$, te vrijedi $\mathbf{r} = x^p \mathbf{i}_p = x'^p \mathbf{i}'_p$, što odgovara relaciji (5) u 4D prostorvremenu.)

Odmah se vidi da u invarijantnoj SR veza između vremenskih intervala (dilatacija vremena) dana jednadžbom (1) i veza između sinhrono određenih (za opažača) duljina objekta (Lorentzova kontrakcija) dana jednadžbom (2) nisu LT i zapravo nemaju dobro

definiran fizikalni smisao u 4D prostorvremenu. Vlastito vrijeme Δt i vrijeme $\Delta t'$ mjereno gibajućim satovima nisu ista 4D veličina, isto kao što su vlastita dužina L (za mirujući štap) i dužina L' mjerena za gibajući štap dvije sasvim različite veličine u 4D prostorvremenu. Umjesto takvih fizikalnih veličina koje nisu dobro definirane (prostorne dužine L , L' i vremenski intervali Δt , $\Delta t'$) u 4D prostorvremenu, uvodi se u invarijantnoj SR 4-vektor udaljenosti dvaju događaja A i B s 4-vektorima položaja x_A^a i x_B^a

$$\ell_{AB}^a = x_B^a - x_A^a = (x_B^\mu - x_A^\mu)e_\mu, \quad (7)$$

i prostornovremenska duljina, ili 4D duljina ℓ

$$\ell = \left| (x_B^\mu - x_A^\mu)(x_{\mu B} - x_{\mu A}) \right|^{1/2}, \quad (8)$$

što je u Einsteinovom sistemu koordinata isto kao (3). ℓ_{AB}^a dan jednadžbom (7) je ista 4D veličina (4-vektor) za sve relativno gibajuće sustave, a isto tako je 4D duljina ℓ uvijek isti broj (skalar) za sve takve sustave.

4D duljina za gibajući štap - Neka npr. promatramo štap duljine L smješten duž osi x u sustavu S u kome štap miruje. Tada je u S sustavu 4-vektor $\ell_{AB}^a = L e_1$ (e_1 je jedinični 4-vektor duž osi x), a 4D duljina ℓ za taj štap je $\ell = L$. U sustavu S' (koji se giba brzinom v duž zajedničke osi x , x') 4-vektor ℓ_{AB}^a će imati druge komponente i drugu bazu (određene pomoću LT) ali će cijeli 4-vektor ℓ_{AB}^a ostati isti $\ell_{AB}^a = -\gamma\beta L e'_0 + \gamma L e'_1 = L e_1$; komponente $\ell^0 = -\beta\gamma L$ i $\ell^1 = \gamma L$ su određene kao u jednadžbi (4), a jedinični 4-vektori e'_0 i e'_1 kao u (6).

Nadalje, 4D duljina ℓ (jednadžba (8)) je isto nepromjenjena

$$\ell = \left| (-\beta\gamma L)^2 - (\gamma L)^2 \right|^{1/2} = L, \quad (9)$$

jer je $1 - \beta^2 = \frac{1}{\gamma^2}$.

Bitno je uočiti da u sustavu S' postoji i vremenska ($-\beta\gamma L$), a ne samo prostorna komponenta (L) kao u vlastitom sustavu S . Osim toga, vidi se da je prostorna komponenta u S' jednaka γL , što je veće nego dužina L u sustavu S . Dakle, ako bi se uspoređivale samo prostorne komponente (zaboravljajući na vremensku komponentu), kao što se radi u Einsteinovoj SR, tada bismo zapravo imali – dilataciju dužine – a ne kontrakciju dužine. No, u invarijantnoj SR takvo uspoređivanje pojedinih komponenata nema nikakvog smisla, jer samo cjelokupnost svih komponenti zajedno s bazom ima dobro definirani fizikalni smisao u 4D prostorvremenu. Znači, u 4D prostorvremenu ne

možemo reći kolika je prostorna duljina (3D) gibajućeg štapa (kao što je to moguće u Einsteinovoj teoriji, jednadžba (2)), ali zato možemo točno reći, tj. izmjeriti, kolika je 4D duljina tog gibajućeg štapa; ona je uvijek jednaka vlastitoj duljini, $\ell = L$, jednadžba (9).

Lorentzova kontrakcija za gibajući štap -

Treba napomenuti da se prilikom izvođenja izraza za Lorentzovu kontrakciju (2), kako je dano u gotovo svim udžbenicima, uvijek razmatraju samo komponente (znači implicitna baza je standardna baza $\{e_\mu\}$, odnosno Einsteinov sustav koordinata). Nadalje, sasvim se zaboravlja na transformaciju vremenske komponente i razmatra se samo transformacija prostorne komponente $\ell^1 = \gamma(L^1 + \beta\ell^0)$, tj. $L = \gamma(L' + \beta\ell^0)$. Budući da su i u S' sustavu, u kome se štap giba, početak i kraj štapa određeni istovremeno po satovima u S' , to je i $\ell^0 = 0$ (ℓ^0 u sustavu S je isto $= 0$), što onda daje $L = \gamma L'$, odnosno jednadžbu (2) za Lorentzovu kontrakciju.

Sa stanovišta invarijantne SR napravljeno je nekoliko neispravnih koraka u dobivanju Lorentzove kontrakcije (2). Prvo, transformacija vremenske komponente ($\ell^0 = \gamma(\ell^0 + \beta\ell^1)$) se uopće ne uzima u obzir. Drugo, u transformaciji prostorne komponente se proizvoljno postavlja da je $\ell^0 = c(t'_B - t'_A) = 0$, tj. da su početak i kraj štapa i u S' određeni istovremeno. To jasno pokazuje da je Lorentzova kontrakcija «prividna» transformacija, a ne LT i u geometrijskoj teoriji 4D prostorvremena nema nikakvog smisla.

4D duljina za gibajući sat (mion) -

Na potpuno isti način se može razmatrati raspad miona i dilatacija vremena. Sada će događaj A biti nastanak miona, a događaj B odgovara raspadu miona. Neka je događaj A ishodište 2D koordinatnog sustava (ct, x) (prostorne koordinate y i z nam nisu važne). U vlastitom sustavu miona (ct, x) , mion miruje u ishodištu: od njegovog nastanka pa sve do raspada. Znači da su 4-vektori položaja za događaje A i B, $x_A^a = 0e_0 + 0e_1$, a $x_B^a = (c\Delta t)e_0 + 0e_1$, odnosno $\ell_{AB}^a = (c\Delta t)e_0 + 0e_1$ i 4D duljina $\ell = c\Delta t$. U sustavu Zemlje, S' sustav, u odnosu na koji se mion giba, $\ell_{AB}^a = (c\Delta t)'e'_0 + \ell^1 e'_1$, odnosno $\ell_{AB}^a = \gamma(c\Delta t)e'_0 - \beta\gamma(c\Delta t)e'_1$, gdje su komponente opet određene pomoću LT kao u jednadžbi (4). Ponovo vidimo da u S' sustavu postoji i prostorna komponenta (to je prostorna udaljenost koju mion pređe do raspada, $\beta\gamma c\Delta t = v(\gamma\Delta t)$). 4D duljina ℓ je i u S' jednaka kao i u S , $\ell = \left| \gamma^2 c^2 \Delta t^2 - \beta^2 \gamma^2 c^2 \Delta t^2 \right|^{1/2} = c\Delta t$. Iz te jednakosti ℓ u vlastitom sustavu S i u S' , u kome se giba, odmah se vidi zašto je vlastita vremenska...

komponenta $c\Delta t$ manja od vremenske komponente $c\Delta t'$, u sustavu gdje se mion giba. Naime, vrijedi da je $c^2\Delta t^2 = c^2(\Delta t')^2 - (\ell^1)^2$; oduzeli smo pozitivnu veličinu $(\ell^1)^2$ od $c^2\Delta t'^2$ da dobijemo $c^2\Delta t^2$. I u ovom se slučaju vidi da LT ne transformiraju vremensku komponentu $c\Delta t$ iz vlastitog sustava opet samo u vremensku komponentu $\gamma(c\Delta t) = c\Delta t'$ u gibajućem sustavu, nego još nužno nastaje i prostorna komponenta $\ell^1 = \beta\gamma(c\Delta t)$ u S'. U invarijantnoj SR, usporedba samo vremenskih komponenata nema nikakvog fizikalnog smisla.

Dilatacija vremena za gibajući sat (mion)

- Može se pokazati, na isti način kao i za Lorentzovu kontrakciju, da je i dilatacija vremena «prividna» transformacija, a ne LT. U uobičajenom izvodu, danom u mnogim udžbenicima, potpuno se zanemaruje transformacija prostorne komponente ($\ell^1 = \gamma(\ell^1 - \beta l^0$) i razmatra se samo transformacija vremenske komponente $\ell^0 = \gamma(\ell^0 - \beta \ell^1)$, gdje se još uzima i da je $\ell^1 = 0$ (mion miruje u vlastitom sustavu), što onda daje jednadžbu (1), $\Delta t' = \gamma\Delta t$. Sve ovo je opisano u detalje u radovima [5-7].

6. Usporedba s eksperimentima

Osnovna razlika invarijantne SR predočene u radovima [5-8] u odnosu na druge geometrijske i obične kovarijantne pristupe SR je u tom što se u svim ostalim pristupima 4D veličine shvaćaju samo kao pogodan matematički formalizam, dok se uobičajene 3D veličine izvede iz odgovarajućih 4D veličina i te 3D veličine se smatraju fizikalno realnim. Tako npr., 4-količina gibanja je $p^a = p^\mu e_\mu$ i iz nje se izvede 3D veličine, energija E ($p^0 = E/c$) i obična 3D količina gibanja \mathbf{p} , tako da se uzme da je $\gamma \cong 1$, tj. da se radi o malim brzinama u odnosu na c (podsjetimo da je npr. $p^1 = \gamma p_x$). Slično, 4-gustoća struje $j^a = j^\mu e_\mu$ smatra se samo pogodnim matematičkim zapisom, dok se prava fizikalna realnost pripisuje gustoći naboja ρ ($j^0 = c\rho$) i običnoj 3D struji $\mathbf{J} = j_x \mathbf{i} + j_y \mathbf{j} + j_z \mathbf{k}$. U invarijantnoj SR neovisna fizikalna realnost se pripisuje samo potpunog 4D geometrijskoj veličini. LT miješaju komponente, pa ako npr. u jednom sustavu imamo samo gustoću naboja ρ , tj. komponente ($j^0 = c\rho, 0, 0, 0$), tada ćemo u drugom sustavu imati i ρ' i \mathbf{J}' , tj. ($c\rho', j^1, 0, 0$). Dakle, 4D veličine ne samo da su pogodne za teorijska razmatranja, nego su i veličine koje treba mjeriti u eksperimentima koji testiraju SR.

Mionski raspad. Einsteinova SR – Sada ćemo razmotriti eksperimente u kojima je istraživana mionski raspad u kozmičkim zrakama. U prijašnjoj diskusiji mionskog raspada radilo se samo o jednom mionu. Međutim, u stvarnim eksperimentima, npr. [9], mjeri se broj miona na planini N_m (to je početni broj) i broj miona koji dođu do podnožja (tj. površine mora) N_s . Veza među njima je dana zakonom radioaktivnog raspada $N_s = N_m \exp(-\lambda t)$, što je rješenje jednadžbe $dN/dt = -\lambda N$; $\lambda = 1/\tau$, τ je vrijeme života. Tada u sustavu Zemlje, gdje se mioni gibaju, $N_{sE} = N_{mE} \exp(-t_E/\tau_E)$. $t_E = H_E/v$, H_E je visina planine, v brzina miona. Kako bi se dobilo dobro slaganje s eksperimentom, pretpostavi se da su vrijeme života τ_E u sustavu Zemlje i vlastito vrijeme života τ_μ (u sustavu miona) vezani dilatacijom vremena $\tau_E = \gamma\tau_\mu$ (mjeri se τ_μ , v i H_E). Tada se za dani N_{mE} eksperimentalno određen N_{sE} slaže s teorijskom vrijednošću.

Ako se isti eksperiment interpretira sa stanovišta vlastitog sustava miona, tada se pretpostavlja da zakon radioaktivnog raspada ostaje istog oblika, pa je $N_{s\mu} = N_{m\mu} \exp(-t_\mu/\tau_\mu)$. Sada mion miruje, a planina se u odnosu na njega giba. Kako bi se opet dobilo slaganje s eksperimentom, pretpostavi se da dolazi do kontrakcije dužine gibajuće planine $H_\mu = H_E/\gamma$. Otud slijedi da je $t_\mu = H_\mu/v = t_E/\gamma$, odnosno da su eksponencijalni faktori isti u oba sustava $\exp(-t_E/\tau_E) = \exp(-H_E/v\gamma\tau_\mu) = \exp(-t_\mu/\tau_\mu)$, što onda vodi na slaganje s eksperimentom i u sustavu miona.

Sa stanovišta invarijantne SR, postoji nekoliko ozbiljnih prigovora na takvo tretiranje raspada miona i na rezultate usporedbe. Kao prvo, zakon radioaktivnog raspada ($dN/dt = -\lambda N$) neće biti istog oblika u sustavu Zemlje i u sustavu miona, jer sadrži izdvojenu vremensku koordinatu, koja Lorentzovim transformacijama neće opet preći samo u vremensku koordinatu. Drugim riječima, zakon nije napisan u kovarijantnom obliku, a u izvodu jednakosti eksponencijalnih faktora je pretpostavljeno da zakon ima isti oblik u oba sustava. Drugo, za dobivanje slaganja s eksperimentom, u sustavu Zemlje koristi se dilatacija vremena, a u sustavu miona kontrakcija dužine. No, kako je prije diskutirano, niti jedno niti drugo nije dobro definirana transformacija u 4D prostorvremenu. Treće, u čitavoj toj uobičajenoj teoriji implicitno je usvojena Einsteinova sinhronizacija satova, no ako se uzme neka druga sinhronizacija (drugi način usklađivanja prostorno udaljenih satova), uz isti ■■■

standardni postupak s dilatacijom i kontrakcijom, tada se teorijski dobije rezultat za N_s koji **jako odstupa od eksperimentalne vrijednosti**. No, fizika ne smije ovisiti o odabranoj sinhronizaciji, jer je to samo dogovor, isto kao što je npr. dogovor koji ćemo prostorni sustav koordinata odabrati, pravokutni, sferni, polarni, itd. (Usporedba s eksperimentima uz korištenje Einsteinove sinhronizacije i jedne sasvim drugačije sinhronizacije provedena je u mom radu [10].)

Cijelo ovo razmatranje eksplicitno pokazuje da je, suprotno opće prihvaćenom mišljenju, slaganje Einsteinove SR i eksperimenata s mionskom raspadom samo - prividno slaganje.

Mionski raspad. Invarijantna SR - Nasuprot tome, slaganje tih eksperimenata s teorijskim predviđanjima invarijantne SR je istinito, potpuno slaganje, koje je neovisno o odabranom referentnom sustavu (Zemlja, mion) i neovisno o odabranom sustavu koordinata, uključivši razne sinhronizacije. Pokažimo to. Najprije se zakon radioaktivnog raspada napiše pomoću AV kao

$$dN/d\ell = -\lambda N, \quad (10)$$

gdje je ℓ 4D duljina. Rješenje je

$$N_s = N_m \exp(-\ell_{OA}/\ell_{OT}), \quad (11)$$

gdje je ℓ_{OA} 4D duljina (8) između događaja O (nastanak miona) i događaja A (dolazak miona u podnožje), a ℓ_{OT} je 4D duljina (8) između događaja O i događaja T (raspad miona nakon vremena života τ), a $\lambda = 1/\ell_{OT}$. Zakon radioaktivnog raspada je napisan u jednadžbi (11) bez ikakvog referentnog sustava, tj. neovisan je o odabranom referentnom sustavu i o odabranom sustavu koordinata u njemu. Eksponecijalni faktor $\exp(-\ell_{OA}/\ell_{OT})$ je isti broj (skalar) u svim sustavima, pa ga možemo izračunati u bilo kojem sustavu. Tako u sustavu miona i u Einsteinovom sistemu koordinata 4-vektor udaljenosti je $\ell_{OA}^\alpha = ct_\mu e_0 + 0e_1$, pa je 4D duljina između događaja O nastanka miona i događaja A dolaska miona do podnožja dana s $\ell_{OA} = ct_\mu$, a 4D duljina za O i događaj T iščezavanja miona je dana s $\ell_{OT} = c\tau_\mu$. Uvrštavanjem tih relacija u (11) dobiva se $N_s = N_m \exp(-t_\mu/\tau_\mu)$. Tako izračunata vrijednost N_s potpuno se slaže s mjerenjima provedenim u [9] i to jednako za Einsteinovu sinhronizaciju i za bilo koju drugu sinhronizaciju (vidi [10]), što nije bio slučaj kod usporedbe Einsteinove SR i eksperimenata.

Dakle geometrijski pristup SR dan u [5-8,10] se potpuno slaže s eksperimentima i bez uvođenja

dilatacije vremena i kontrakcije dužine, pa nije ispravno tvrditi, kao što se to radi u gotovo cjelokupnoj literaturi, da eksperimenti s mionskim raspadom potvrđuju dilataciju vremena.

Kratka diskusija drugih eksperimenata

– U radovima [7] i [10] dana je detaljna usporedba Einsteinove SR koja koristi dilataciju vremena i kontrakciju dužine i invarijantne SR s nizom drugih eksperimenata koji testiraju SR, kao što su: Michelson-Morleyev eksperiment i moderne laserske verzije tog eksperimenta, zatim Ives-Stilwellovi eksperimenti (relativistički Dopplerov efekt) i njihove novije verzije, itd.. Pokazano je, na isti način kao i za mionski raspad, da invarijantna SR objašnjava sve te eksperimente bez korištenja dilatacije vremena i kontrakcije dužine i da je slaganje te geometrijske formulacije SR s eksperimentima neovisno o odabranom referentnom i koordinatnom sustavu, tj. jedno istinito slaganje, za razliku od prividnog slaganja Einsteinove SR i tih eksperimenata.

Dva takva eksperimenta, koji testiraju SR, namjeravamo uskoro predložiti kao projekt u kome bi sudjelovali fizičari s IRB-a, IF-a i PMF-a, a možda i iz nekih inozemnih instituta (Cambridge). Jedan od njih se odnosi na relativistički Dopplerov efekt i aberaciju svjetlosti. To je opisano u radovima [7] i [10]. Prema Einsteinovoj SR, relativistički Dopplerov efekt se objašnjava dilatacijom vremena i može postojati kao samostalan efekt; uspoređuju se samo frekvencije u dva sustava, kao kod usporedbe vremenskih intervala u relaciji (1). U invarijantnoj SR, dobro definirana veličina u 4D prostoru je 4-valni vektor $k^a = k^\mu e_\mu = k'^\mu e'_\mu$, $k^\mu = (k^0 = \omega/c, k^1, k^2, k^3)$, što znači da je promjena frekvencije prilikom prelaska iz jednog sustava u relativno gibajući sustav nužno povezana i s promjenom smjera valnog vektora \mathbf{k} , tj. s aberacijom svjetlosti. Tradicionalna i moderna mjerenja Dopplerovog efekta određuju promjenu frekvencije samo kada je kut ϕ između smjera relativne brzine sustava \mathbf{v} i smjera valnog vektora \mathbf{k} jednak 0° ili 180° . Samo u tim slučajevima smjer valnog vektora se ne mijenja prilikom prelaska iz sustava u sustav (nema aberacije), pa se može gledati samo promjena frekvencije, tj. Dopplerov efekt. Međutim, ako je kut ϕ različit od 0° ili 180° , tada, prema invarijantnoj SR, nužno mora doći i do promjene smjera od \mathbf{k} (aberracija svjetlosti) i, prema tome, Dopplerov efekt se neće vidjeti osim ako se grane spektroskopa ne zakrenu za aberacioni kut. Takav eksperiment s mogućnošću zakretanja grana spektroskopa još nije napravljen. ...

Mi namjeravamo izvesti taj eksperiment, jer bi on izravno pokazao da promjena frekvencije uzeta sama za sebe, tj. dilatacija vremena, nije dobro definirana, nego je ispravna veličina u 4D prostorvremenu samo cjelokupna 4D geometrijska veličina k^a . Da parafraziramo Minkowskog: Ne postoje ni Dopplerov efekt ni aberacija svjetlosti kao samostalni efekti, nego samo njihovo jedinstvo ima neovisnu fizikalnu realnost.

Drugi eksperiment se odnosi na određivanje električnog polja oko mirne supervodljive petlje sa stalnom strujom. U običnoj formulaciji SR, koja koristi dilataciju vremena i kontrakciju dužine, predviđa se da oko mirne petlje sa stalnom strujom postoji samo magnetsko polje, dok oko iste te, ali gibajuće petlje, postoji magnetsko i električno polje. Invarijantna SR predviđa (vidi [5,6]) da električno polje postoji i oko mirne supervodljive petlje sa stalnom strujom. U svom fundamentalnom radu [1], Einstein je izveo transformacije 3D vektora električnog \mathbf{E} i magnetskog polja \mathbf{B} iz jednog sustava u drugi, koje se uvijek navode u svim udžbenicima iz elektromagnetizma. Prema tim transformacijama, ako u jednom sustavu (S sustav) postoji samo 3D magnetsko polje \mathbf{B} , tada će opažatelj u relativno gibajućem sustavu (S' sustav) «vidjeti» da postoji malo izmijenjeno 3D magnetsko polje \mathbf{B}' i novo 3D električno polje \mathbf{E}' . Te transformacije se svuda nazivaju LT 3D vektora \mathbf{E} i \mathbf{B} . U nedavnom radu [8] je dokazano da su transformacije 3D vektora \mathbf{E} i \mathbf{B} zapravo prividne transformacije istog tipa kao što su dilatacija vremena i kontrakcija dužine i da se u 4D prostorvremenu prave LT električnog i magnetskog polja odnose na električno i magnetsko polje predočene 4D geometrijskim veličinama, 4-vektorima E^a i B^a . Za njih vrijedi isto što i za svaki drugi 4-vektor: da je $E^a = E^\mu e_\mu^a = E'^\mu e'_\mu^a$ i $B^a = B^\mu e_\mu^a = B'^\mu e'_\mu^a$, gdje su crtane veličine LT necrtanih. To znači da prilikom LT 4-vektori električnog i magnetskog polja prelaze sami u sebe kao i svi drugi 4-vektori, električno u električno i magnetsko u magnetsko polje. Otud bi, prema invarijantnoj SR, trebalo očekivati da oko mirne supervodljive petlje sa stalnom strujom postoji i magnetsko i električno polje, jer se u literaturi tvrdi da je i to električno polje detektirano za gibajuću petlju. Taj eksperiment bi bio vrlo važan ne samo s teorijskog aspekta nego i sa stanovišta mogućih primjena.

Reference

- [1] A. Einstein, «Zur Elektrodynamik bewegter Körper», *Annalen der Physik*, **17**, 891 (1905); prijevod na engleski u: W. Perret i G.B. Jeffery, *The Principle of Relativity* (Dover, New York, 1952).
- [2] H. Minkowski, «Space and Time»; prijevod na engleski u: W. Perret i G.B. Jeffery, *The Principle of Relativity* (Dover, New York, 1952).
- [3] F. Rohrlich, «True and apparent transformations, classical electrons, and relativistic thermodynamics», *Nuovo Cimento B* **45**, 76 (1966).
- [4] A. Gamba, «Physical Quantities in Different Reference Systems According to Relativity», *American Journal of Physics* **35**, 83 (1967).
- [5] T. Ivezić, «Relatively moving systems in «true transformation relativity»», *Foundations of Physics Letters* **12**, 507 (1999).
- [6] T. Ivezić, ««True Transformations Relativity» and Electrodynamics», *Foundations of Physics* **31**, 1139 (2001).
- [7] T. Ivezić, «An invariant formulation of special relativity, or the «true transformations relativity,» and comparison with experiments», *Foundations of Physics Letters* **15**, 27 (2002).
- [8] T. Ivezić, «The Proof that the Standard Transformations of E and B Are not the Lorentz Transformations», *Foundations of Physics* **33**, 1339 (2003).
- [9] D.H. Frisch and J. H. Smith, «Measurement of the Relativistic Time Dilation Using μ -Mesons», *American Journal of Physics* **31**, 342 (1963).
- [10] T. Ivezić, «An invariant formulation of special relativity, or the «true transformations relativity,» and its comparison with experiments», e-print, arXiv: physics/0103026. ■

Loveći dugu

**⁸Potom reče Bog Noi i sinovima njegovim, što su bili s njim:
"Evo, sklapam sad zavjet s vama i s vašim potomcima, što će biti nakon vas,
I sa svima živim bićima, što su s vama, s pticama, sa stokom i sa svima zvijerima,**

**...
¹³Dugu svoju stavljam u oblake, koja će biti znak zavjeta između mene i zemlje!"**

Biblija, Postanak, glava 9



PIŠE: SUZANA SZILNER

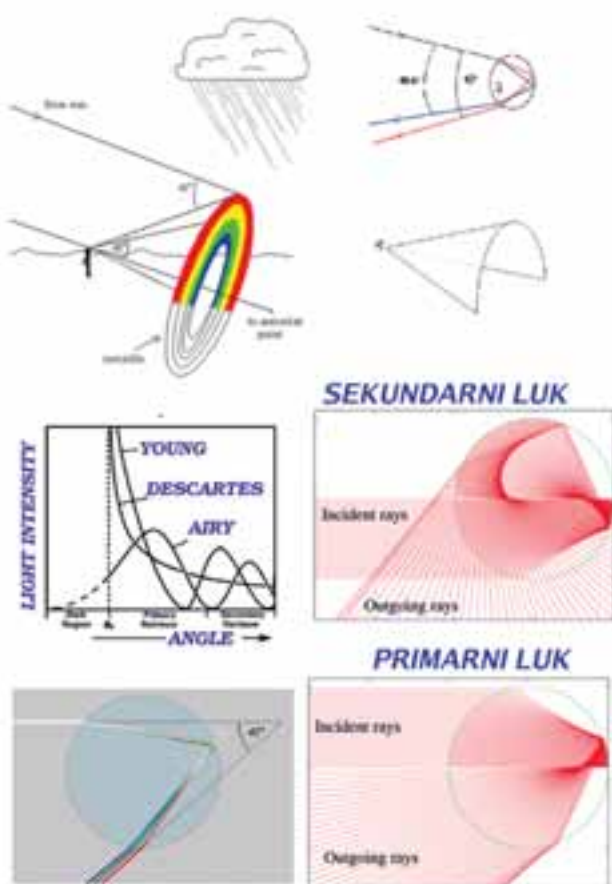
U svojoj poznatoj priči Dinko Šimunović iskoristio je mit koji obećava ispunjenje želje prolaskom ispod duginog luka. Duga kao most do skrivenog blaga, put do posude zlata i glasnik radosnih događaja često je korišten motiv u svijetu bajki. Onkraj svih mitova i legendi, duga je i dalje najstaknutija i najdojmljivija atmosferska pojava. Duga se pojavljuje na nebeskom svodu u dane kad se izmjenjuju kišna i sunčana razdoblja, a opažatelj je smješten između sunčevog diska i kišnih oblaka (leđima prema suncu). Ključ misterije skriven je u valnim svojstvima svjetlosti, te u optičkim svojstvima vode i obliku kišnih kapi. Dva su osnovna fenomena koja sudjeluju u stvaranju duginog luka, odbijanje (refleksija) i lom (refrakcija) zraka svjetlosti. Pod imenom atmosferska duga skrivaju se primarni i sekundarni luk, Alexanderovo tamno područje između dva luka, te nekoliko lukova spektralno bliskih ljubičastoj boji smještenih ispod primarnog luka koje se nazivaju Airyve oscilacije. O dugi je prvi raspravljao Aristotel, određujući je kao neobično odbijanje sunčeve svjetlosti na oblacima. Godine 1266, R. Bacon prvi je izmjerio kut između kapljica kiše na kojima se duga stvara i upadne sunčeve svjetlosti. Njemački svećenik Theodoric iz Freiburga uvodi postavku da duga nastaje na svakoj pojedinačnoj kišnoj kapljici. Opitom prati prolazak svjetlosne zrake kroz prozirnu kuglastu posudu ispunjenu vodom i nastanak dugi slične pojave, tj. pojavu spektra. Splitski nadbiskup Marko Antonije de Dominis, u svojem radu *De radiis visus et lucis in vitris prespectivis et iride* iz 1611, znanstveno raspravlja o rastavljanju sunčeve svjetlosti na pripadajuće boje i dugu određuje kao posljedicu odbijanja i loma

svjetlosti na kišnim kapljicama. Nezavisno do istih zaključaka dolazi i Descartes (rad iz 1637 godine) koji dodatno uvodi i matematički aparat za objašnjenje ove atmosferske pojave. Koristeći Snellov zakon (iz 1621. godine) prati zraku svjetlosti pri prolasku kroz jednoliku kuglastu kapljicu vode. Kut loma zrake određen je svojstvima dvaju sredstava, vode i zraka, tj. njihovim indeksima loma koji se definiraju kao omjeri brzine svjetlosti u vakumu i u danom sredstvu. Omjer sinusa kuta upadne i slomljene zrake za neka dva sredstva konstantan je i jednak omjeru njihovih indeksa loma. Na taj način različite boje (valne duljine) lome se u različite izlazne kutove dajući rasap svjetlosti (disperziju), koju je matematički opisao Newton (1666. godine) nakon svog eksperimenta s prizmom. Koristeći saznanja i matematičke metode klasične geometrijske optike (valovi se mogu prikazati putem zraka svjetlosti) moguće je objasniti osnovne pojave i geometriju primarnog i sekundarnog luka. Geometrija je određena kutovima raspršenja koji postavljaju primarni luk oko kuta 42° (točan kut raspršenja razlikuje se od boje do boje) i sekundarni oko 50° (samo nešto manje od 10% upadne svjetlosti dvostruko se odbija unutar kapljice doprinoseći sekundarnom luku obrnutih boja). Između ta dva kuta pristiže neznatno malo upadne svjetlosti stvarajući Aleksanderovu vrpču, dio nebeskog svoda između dva luka koji je znatno tamniji od okolnog neba. Do ove geometrije dolazi se prateći zraku svjetlosti, preko njenog loma pri ulasku u kuglastu kapljicu vode, odbijanja od stražnje strane kapljice, do ponovnog loma pri izlasku iz kapljice. Svi smjerovi raspršenja jednako su vjerojatni, a ovise o parametru upada zrake

na površinu kugle, tj. pomaku upadne zrake u odnosu na os koja prolazi središtem kugle. Upadni parametar raste od nule za prolazak kroz središte kugle, do neke maksimalne vrijednosti kada zraka upada na kapljicu tangencijalno, samo je okrznuvši. Kako raste parametar upada, kut raspršenja također se povećava, ali umjesto da se takvo ponašanje nastavi sve do zrake okrznuća, kut raspršenja doseže maksimalnu vrijednost za upadni parametar oko 7/8 radijusa kapljice. Taj kritični parametar određuje i kritični kut raspršenja, tj. 42°

za crvenu svjetlost, kut pod kojim se duga pojavljuje na nebeskom svodu. Upravo ova činjenica da postoji neki kritični parametar upada, omogućava povećanje intenziteta svjetlosti u području lukova, veliki broj upadnih sunčevih zraka raspršuje se u relativno usko kutno područje, koje je daleko intenzivnije od okolnog neba. Teorija geometrijske optike ne može objasniti (vrlo rijetko) pojavljivanje dodatnih lukova pod primarnim lukom. Za njihovo objašnjenje potrebno je uključiti valnu narav svjetlosti i teoriju slaganja

ATMOSFERSKA DUGA

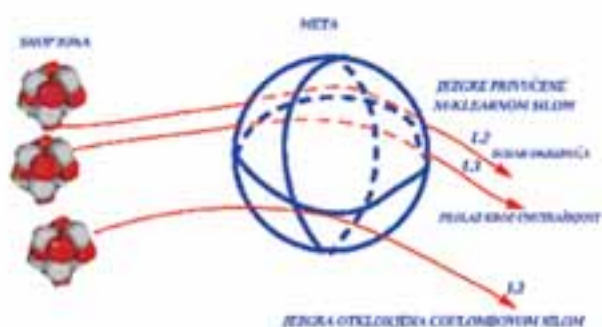


SLIKA 1: Fotografije i shematski prikazi atmosferske duge. U lijevom gornjem kutu nalazi se shematski prikaz nastanka duge na kišnim kapljicama preko odbijanja i loma zraka svjetlosti koje proizvode primarni luk, položaja promatrača u odnosu na sunce i oblake, te zamišljenog konusa na kojem leži primarni luk duge. Svaka je duga koju vidite na nebu jedinstvena jer leži na jedinstvenom konusu s vrhom u oku svakog promatrača, dakle svaka duga koju vidite na nebu pripada samo vama. Lijevi donji dio slike pokazuje točan položaj minimuma i maksimuma intenziteta svjetlosti kao funkcije kuta raspršenja sljedeći račune Descartesa, Younga i (kvantitativno točne) Airya. Prikazani su i točni proračuni putanja monokromatskih zraka svjetlosti u kuglastoj kapljici vode koje proizvode primarni i sekundarni luk, te kako se zrake različitih valnih duljina (boja) po pravilima Snellovog zakona odbijaju i lome u različite izlazne kutove. Na fotografijama na desnoj strani jasno se vide sve pojave atmosferske duge, primarni luk, te povrh njega sekundarni luk obrnutog slijeda boja. Između lukova nalazi se Alexanderovo tamno područje, a ispod primarnog luka Airyjeve oscilacije.

valova (Youngova teorija interferencije, 1803. godina). Za svaku raspršenu zraku u kut manji od 42° , postoje dvije zrake koje se raspršuju u isti kut ovisno o svom parametru upada (malo manji i malo veći od kritičnog).

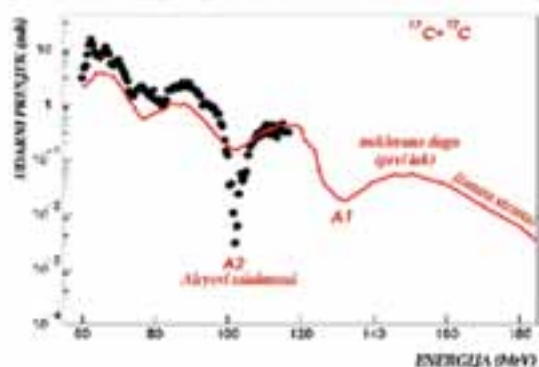
Te dvije zrake, raspršene u isti kut imaju različite točke upada na kapljicu i različite putanje unutar kapljice. U ovom slučaju, ta razlika njihovih puteva je mala i bliska samoj njihovoj valnoj duljini, te time nadilazi

NUKLEARNA DUGA



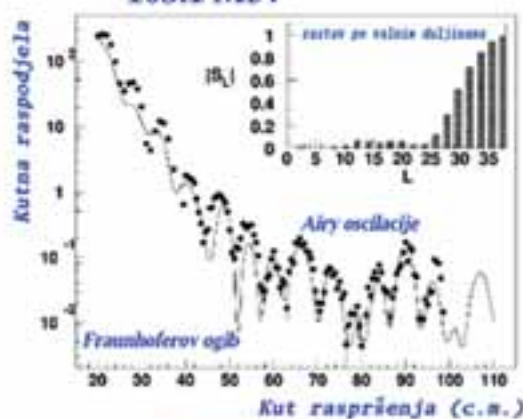
$^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$

(udarni presjek za $85^\circ - 95^\circ$)

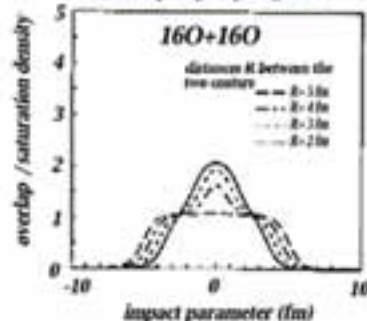


$^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$

103.1 MeV



Preklapanje jezgara



SLIKA 2: Nuklearna duga

U lijevom gornjem kutu nalazi se shematski prikaz sudara atamskih jezgara na kojem se vide putanje otklonjene Coulombovom silom (L1), te dvije različite putanje privučene nuklearnom silom, od kojih jedna (L3) duboko prodire u jezgro. Slaganje ovih putanja u udarnim presjecima prepoznaje se kao Fraunhoferova ogibna oscilacija (L1 interferira s L2) i Airyjeve oscilacije (L2 interferira s L3). Primjer udarnih presjeka mjerenih pri sudaru jezgara α -podstrukture, ^{12}C i ^{16}O vide se na grafovima u gornjem desnom i donjem lijevom uglu. Jezgra ugljika ^{12}C sastavljena je od 6 protona i 6 neutrona, a neka od njezinih stanja moguće je opisati preko grozda 3 α čestice. Isto tako, jezgra kisika ^{16}O može se prikazati kao grozd sastavljen od 4 α čestice. Prikazana mjerenja izvršena su na Van der Graaff akceleratoru u Strasbourgu. Na difrencijalnom udarnom presjeku sudara jezgara $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ prikazanom u ovisnosti o kutu raspršenja, jasno se vidi Fraunhoferova difrakcija oštrijih oscilacija kraćeg perioda na prednjim kutovima, te Airyjeve oscilacije dužeg perioda koje se za ovu energiju pojavljuju na većim kutovima. U umetnutom okviru vidi se rastav udarnog presjeka na valne duljine koje mu doprinose (ekvivalentno rastavu sunčeve svjetlosti na pripadajuće boje), od duboko prodirućih putanja manjih valnih duljina do putanje okružna.

Lijevo dolje nalazi se prikaz udarnog presjeka jezgara $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ (zbrojen oko 90°) kao funkcija energije snopa, a položaji primarnog luka i prvog i drugog Airyjevog minimuma su obilježeni na slici. Desno dolje nalazi se graf koji prikazuje gustoće preklapajućih atamskih jezgara do kojih dolazi u slučaju kada su opaženi refraktivni efekti. Za centralne sudare gustoća je bliska dvostrukoju gustoći svake od jezgara zasebno, potvrđujući da pojavljivanje nuklearne duge u sudarima atamskih jezgara omogućuje uvid u unutrašnjost jezgara i proučavanje nuklearne tvari u ekstremnim uvjetima.

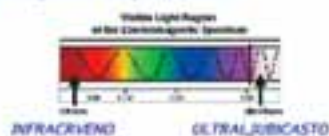
zakone geometrijske optike. Slaganje tih valova dovodi do niza minimuma i maksimuma u kutnoj raspodjeli intenziteta svjetlosti, tj. do niza lukova slabijeg intenziteta smještenih ispod primarnog luka. Na taj su način barem kvalitativno objašnjene sve pojave vezane uz atmosfersku dugu, dok se na točan matematički opis čekalo do sredine 19. stoljeća. Sir Airy preko tzv. integrala duge ili Airyjeve funkcije kvantitativno opisuje intenzitet raspršene svjetlosti u ovisnosti o kutu raspršenja. Einstein 1905. godine objavljuje svoj rad o fotoelektričnom efektu, pokazujući da se svjetlost u određenim uvjetima mjerenja ponaša kao snop kvantiziranih čestica, fotona. De Broglie, 1924.

godine, postavlja smjelu hipotezu prema kojoj svaka čestica koja se giba osim svojstava čestice posjeduje i valna svojstva. Slijedeći tu eksperimentalno dokazanu tvrdnju, snop čestica lomi se i raspršuje pri sudaru s drugim česticama, atomima i jezgrama, u skladu sa svojom valnom prirodom. Opažanje dugi istovrsnih pojava, tj. posljedica loma i raspršenja snopa atoma i atomskih jezgara na drugim sličnim česticama, atomima i jezgrama, pokazatelj je stupnja prozirnosti materije, omogućene upravo zakonitostima kvantne fizike.

Dvije su bitne razlike pri usporedbi raspršenja svjetlosti na prozirnim kapljicama vode i

GEOMETRIJSKA OPTIKA

VIDLJIVA SVJETLOST



ODBIJANJE (REFLEKSIJA) I LOM (REFRAKCIJA)

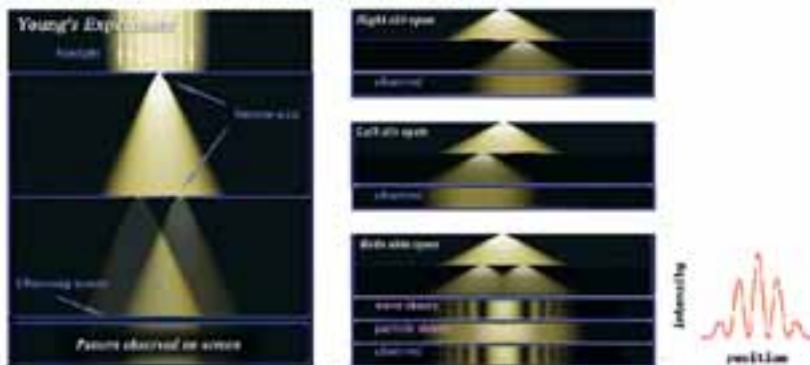


Snellov zakon:
$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{\sin \theta_2}{\sin \theta_1}$$

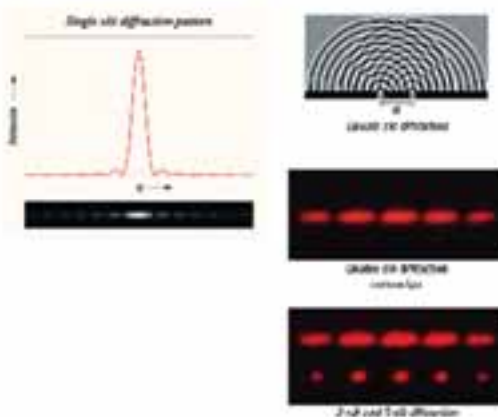
RASPRSENJE (DISPERZIJA)



SLAGANJE VALOVA (INTERFERENCIJA)



OGIB (DIFRAKCIJA)



SLIKA 3: Osnovni zakoni optike

Slika shematski prikazuje ponašanja svjetlosti u optici. S lijeve strane vidimo rastav vidljive svjetlosti po valnim duljinama, te osnovne zakone geometrijske optike: odbijanje, lom i raspršenje zraka svjetlosti. Desna strana pokazuje kako se svjetlost ponaša prilikom nailaska na pukotine koje su po svojim dimenzijama usporedive s valnom duljinom svjetlosti, ogib valova i njihovo slaganje pri prolasku kroz različiti broj pukotina.

pojavi atomske i nuklearne duge. Prva je upravo u stupnju prozirnosti. Voda je prozirna za valne duljine vidljive svjetlosti, dok prilikom sudara čestice s drugim česticama dolazi do pojave apsorpcije, tj. prigušenja ulaznog toka. To prigušenje događa se jer se dio energije koje gibajuće čestice donose u sistem pretvara u energiju pobuđenja samog sistema (recimo neelastično pobuđenje jezgre mete, ili otvaranje drugih kanala reakcije, kao reakcije prijenosa nukleona između jezgara snopa i mete). Druga glavna razlika odnosi se na indeks loma. Dok kod atmosfarske duge dva različita sredstva imaju oštru granicu i svako je određeno svojim indeksom loma, u slučaju sudara dvaju čestica ulogu indeksa loma preuzima sila međudjelovanja koja djeluje postupno, ali konstantno kako se čestice jedna drugoj približavaju. Proučavanje ovih pojava u atomskoj i nuklearnoj fizici od velike je važnosti jer nam neposredno daje uvid u svojstva sile međudjelovanja, njenoj jačini i dosegu. Atomske jezgre masivni su složeni objekti koji podliježu zakonitostima kvantne fizike, kako u opisivanju jezgara kao cjelina, tako i u opisivanju gibanja sastavnih dijelova, nukleona. Proučavanje nuklearne tvari, te modeliranje svojstava jezgara, njihovih radijusa, energija vezanja i energetskih nivoa osniva se na egzaktnom poznavanju međudjelovanja između pojedinog nukleona i njegovog okruženja, nuklearne tvari. Upravo podaci prikupljeni proučavanjem dugi sličnih pojava, gdje jezgre međudjeluju i prodiru jedna kroz drugu, predstavljaju jedinstveni izvor saznanja o sili koja djeluje između nukleona u nuklearnoj tvari. U nuklearnoj fizici sudari dvaju jezgara, ovisno o njihovoj strukturi i energiji, obično su popraćeni snažnom apsorpcijom. Veliki dio ulaznog toka pretvara se bilo u energiju pobuđenja ili odlazi u druge reakcijske kanale, kao fuziju, stvaranje složene jezgre ili reakcije prijenosa nukleona. (Apsorpcija dovodi do pojavljivanja minimuma i

maksimuma u mjerenoj kutnoj ovisnosti presjeka, slično kao kod ogiba, te se i naziva Fraunhoferovo difraktivno raspršenje.) U rijetkim slučajevima sudara lakših jezgara pojavljuje se smanjena apsorpcija zbog prisutne α -podstrukture (čestica, jezgra ${}^4\text{He}$, posjeduje veliku energiju vezanja nukleona). Refraktivni efekti posebno su vidljivi u raspršenjima α čestica na jezgrama α -podstrukture (jezgre višekratnici α čestica) ili međusobnim sudarima jezgara α -podstrukture. U sudaru atomskih jezgara, ioni snopa (više ili manje od elektronskog omotača ogoljeni atomi) nalaze se pod utjecajem dvaju sila, elektromagnetskog Coulombovog polja, koje zbog istovrsnog naboja odbija jezgre snopa od onih u meti, te privlačne nuklearne sile koja uzrokuje pojavu refraktivnih efekata. Slično kao i kod atmosfarske duge, postoji neki kritični maksimalni kut raspršenja jezgara snopa na jezgrama mete. To odgovara jezgrama snopa koje su najsnažnije odbijene od jezgara mete. Taj kut naziva se kut nuklearne duge i određen je prije svega upravo međudjelovanjem nukleona smještenih u dvije sudarajuće jezgre. Ponovo za svaki kut manji od kritičnog postoje dvije zamišljene putanje različitih upadnih parametara, koje se svijaju pod djelovanjem sile u isti kut. Tim različitim putanjama pridruženi su različiti kutni momenti gibanja koji se prema de Broglijevom postulatu mogu predstaviti kao različite valne duljine. Slaganje tih različitih valnih duljina proizvodi minimume i maksimume u funkciji intenziteta ovisno o kutu raspršenja. Ovdje je vrlo važno naglasiti da ukoliko ne postoji duboko prodiranje jezgara snopa u jezgre mete (tj. kada je apsorpcija velika), unutrašnja putanja s ulaznim parametrom manjim od kritičnog (bliže centralnim sudarima) neće preživjeti sudar, te će interferencija izostati. Pojava nuklearne duge u energijskoj i kutnoj ovisnosti presjeka jedinstveni je potpis unutrašnjosti jezgara u procesu njihovog snažnog preklapanja.



PIŠE: MILKO JAKŠIĆ

Osvrt povodom otvorenja novog 'Tandetron' akceleratora na Institutu i organizacije znanstvenog skupa 'International Symposium on Utilization of Accelerators' koji je održan prošlog lipnja u Dubrovniku.

Od osnutka Instituta Ruđer Bošković pa do danas, znanost instituta, a posebno eksperimentalna fizika, bila je prepoznatljiva po akceleratorima. Počevši od 200 kV Cockroft Walton neutronske generatore iz 1956. i cikotrona 1962. godine, pa preko još radećih 300 kV Cockroft Walton neutronske generatore iz 1970. i 6.0 MV Tandem Van de Graaff akceleratora iz 1987., ove godine počeo je s radom i novi 1.0 MV Tandetron akcelerator. Važna je činjenica da je Institut Ruđer Bošković kroz svoju povijest rastao kao regionalni centar za eksperimentalna istraživanja u fizici uz korištenje akceleratora. Istraživanja u nuklearnoj fizici i fizici elementarnih čestica težila su ipak sve većim akceleratorima, pa su se mnogi institutski eksperimentalni fizičari priključivali velikim međunarodnim kolaboracijama i akceleratorskim

centrima. Na IRB-u je za to vrijeme, iako na mnogo manjoj skali, rastao jedan takav centar koji s nizom eksperimentalnih linija, a sada i s dva akceleratora i danas često ugošćuje strane znanstvenike.

Tijekom proteklih desetljeća, značajni poticaj u izgradnji akceleratora dao je partnerski odnos IRB-a s Međunarodnom agencijom za atomsku energiju (IAEA). Razvoj i korištenje akceleratora, ali i drugih područja nuklearnih znanosti, tradicionalno su na Institutu bili popraćeni suradnjom s IAEA putem niza projekata tehničke suradnje i istraživačkih projekata, te drugim oblicima suradnje kao što su školovanje naših znanstvenika u inozemstvu, ugošćavanje stranih stipendista, te pružanje ili korištenje ekspertskih usluga. Projektima tehničke suradnje koje je financirala IAEA, a uz podršku Ministarstva znanosti obrazovanja i športa, nabavljen je i novi Tandetron akcelerator koji je krajem 2004. smješten u novosagrađenu zgradu uz postojeću halu Tandem Van de Graaff akceleratora.



Zgrada Tandetron akceleratora

Nabavka akceleratora je bila financirana u podjednakim udjelima od strane IAEA i Ministarstva znanosti, obrazovanja i športa. Ipak, ta su sredstva (oko 400 000 Eu) bila dostatna za nabavku samog akceleratora i sustava za recirkulaciju izolacijskog plina, te nekih komponenata sustava ionske optike na visoko energijskoj strani akceleratora. Niskoenergijska strana akceleratora s ionskim izvorom, morala je stoga biti izgrađena na Institutu. Kao kostur sustava poslužile su komponente duoplazmatronskog ionskog izvora koje smo dobili

putem donacija s University of Oxford (Dr. G.W. Grime) i University of Uppsala (Dr. G. Possnert). Znatni dio sustava smo izradili uz pomoć nekoliko domaćih tvrtki (Dilogic – napajanja magneta i izrada digitalnih modula za računalnu kontrolu akceleratora, Volta – izrada namotaja injektorskog magneta te izolacionih transformatora i Spiroflex – izrada fleksibilnih cijevi za vakuumske linije) koje su uspjele i cijenom i kvalitetom zadovoljiti naše zahtjeve.

Vlastite snage i razvoj su ipak 'uštedjele' najznačajniji dio sredstava. Digitalni moduli te programska podrška za računalnu kontrolu akceleratora razvijeni su u sklopu našeg projekta informatičke tehnologije, a na bazi prije razvijene računalne kontrole Tandem Van de Graaff akceleratora. Neki slični svjetski akceleratori u laboratoriji već su zatražili našu pomoć pri računalnoj kontroli njihovih akceleratora. Veliki dio vakuumskih komponenti oko ionskog izvora izrađen je u laboratorijskoj radionici, dok su provođenje kablova i povezivanja strujnih i naponskih napajanja također izveli djelatnici Laboratorija. Planiranje, konstrukcija i montaža linija za vođenje snopa do stare eksperimentalne hale bio je također zahtjevan posao jer je iziskivao proračun ionske optike, postavljanje dva analizatorska magneta, te nekoliko ionsko optičkih elemenata kao što su deflektori i kvadrupoli.

Da bi Tandetron akcelerator ipak zadovoljio sve naše buduće potrebe, planiramo postavljanje i drugog ionskog izvora, koji će za razliku od duoplazmatronskog koji se najviše koristi za proizvodnju negativnih iona vodika, moći proizvoditi i većinu ostalih iona periodnog sustava elemenata. U sklopu najnovijeg projekta tehničke suradnje IAEA, narudžba 'sputtering' ionskog izvora upravo je u završnoj fazi te očekujemo njegovu instalaciju tijekom 2006.

Sam akcelerator te ionski izvor svečano je pušten u pogon još početkom lipnja, kad je u Hrvatskoj boravio Werner Burkart, zamjenik Generalnog direktora IAEA, a uz prisustvo izaslanika Predsjednika Republike i Ministarstva znanosti obrazovanja i športa. Isti dan je

Prof. Herwig Schopper, bivši generalni direktor CERN-a, održao i Kolokvij Instituta Ruđer Bošković na temu: 'Do we need basic science?'



Novi Tandetron akcelerator

Zbivanja na Institutu početkom lipnja bila su uvod u skup 'International Symposium on Utilization of Accelerators' koji je Institut Ruđer Bošković u suradnji s IAEA organizirao od 5. do 9. lipnja u Dubrovniku. Nakon Sao Paola, gdje je organiziran prvi IAEA skup s tom temom, u Dubrovniku su sudionici iz 40 zemalja predstavili svoja najnovija znanstvena dostignuća na polju primjena akceleratora. Tako je spomenut i podatak da se od oko 15000 postojećih akceleratora na svijetu, danas većina koristi u industrijskim (npr. ionska implantacija) ili medicinskim primjenama (terapija, te proizvodnja radioizotopa za dijagnostiku), a tek manji dio akceleratora (oko 1000) smješten je u znanstvenim institucijama. Rad skupa je bio organiziran u sekcijama: akceleratori sustavi, akceleratori masena spektrometrija, modifikacija i analiza ionskim snopovima, ozračivanja elektronskim i fotonim snopovima, biomedicinske primjene, primjene akceleratora za sigurnosne sustave i akceleratori tehnologija.

Danas, nekoliko mjeseci nakon otvorenja, Tandetron akcelerator proizvodi snopove protona i ^{16}O iona koji su ubrzavani u 'tandem' sustavu s

potencijalom od maksimalno 1.0 MV što znači da je maksimalna energija protona iz akceleratora 2 MeV. Ionski snop može biti usmjeren na bilo koju od 5 postojećih eksperimentalnih linija (vidi shemu). U planu je i izgradnja 3 nove eksperimentalne linije, od kojih će na jednoj biti moguće istovremeno ozračavanje mete s dvije vrste iona iz dva različita akceleratora. Zbog bitno većeg sjaja (brightness) snopa iz Tandetron akceleratora, najznačajnije poboljšanje prema radu sa ionskim snopovima iz Tandem Van de Graaff akceleratora ostvareno je na liniji nuklearne mikroprobe gdje će povećane ionske struje omogućiti brža mjerenja PIXE spektroskopijom, uz smanjenje dimenzija fokusiranog snopa, koje je trenutno oko 1 μm . Velika stabilnost napona akceleratora (0.01%) pridonosi stabilnijoj ionskoj struji te time i nekim novim primjenama IBIC (Ion Beam Induced Charge) metode na nuklearnoj mikroprobi, koja se koristi za karakterizaciju poluvodičkih sustava. Stabilni rad, te računalna kontrola omogućit će i noćni rad akceleratora bez nadzora operatera, što će povećati naše mogućnosti za

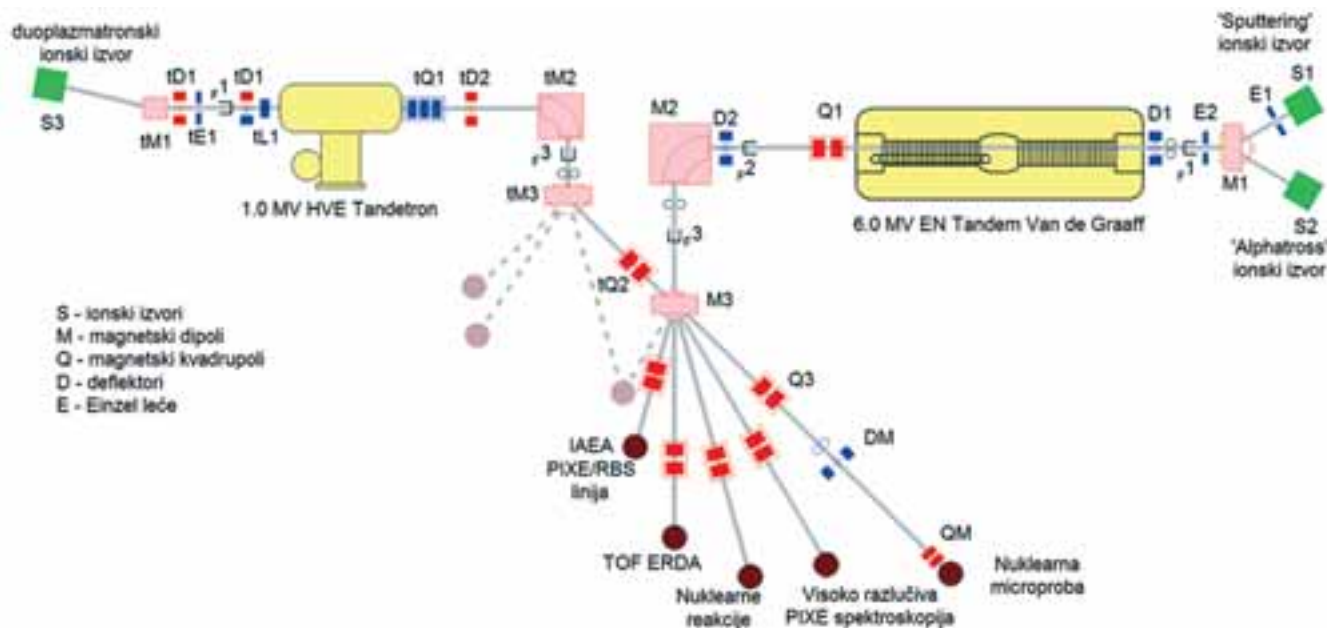


Otvoreње ISUA (International Symposium on Utilization of Accelerators) skupa

analize PIXE i RBS spektroskopijama suradnicima sa ili izvan Instituta. Ipak najveće znanstvene rezultate očekujemo u području modifikacije materijala težim ionima niskih energija, koji zbog svog manjeg dosega u materijalu mogu naći svoje mjesto u proizvodnji i karakterizaciji nanostrukture.



Organizacijski odbor



Shematski prikaz sustava akceleratora i eksperimentalnih linija na IRB-u

Na kraju je nužno spomenuti da otvorenje Tandetron akceleratora ne znači i manju iskoristivost starog Tandem Van de Graaff akceleratora. Nakon planiranog servisa početkom 2006. godine kojom prilikom ćemo zamijeniti akceleratorne cijevi, očekujemo veću primjenu tog akceleratora sa snopovima ^3He i ^4He , te težih iona viših energija (do 0.5 MeV/nukleonu). Između ostalog, teži ioni viših energija bit će od posebnog značaja za nov sustav TOF (time of flight) ERDA (elastic recoil detection analysis) metode, jedne od najmoćnijih multielementnih metoda za analizu dubinskih profila tankih nanometarskih slojeva. TOF ERDA sustav upravo je u fazi probnog rada na centralnoj eksperimentalnoj liniji.



Nova TOF ERDA eksperimentalna linija

Dr. sc. Boris Kovačević

Dobitnik nagrade Leopold Ružička Hrvatskog kemijskog društva za 2004. godinu

PIŠE: **MIRJANA ECKERT-MAKSIĆ**

Nagradu Leopold Ružička utemeljilo je Hrvatsko kemijsko društvo 2002. godine kao priznanje mladim znanstvenicima za izvrsnost u znanstvenom radu ostvarenom u Republici Hrvatskoj u polju kemije. Nominirani kandidat mora biti državljanin Republike Hrvatske i član Hrvatskoga kemijskog društva, koji u godini predlaganja nije stariji od 35 godina. Kandidat mora imati znanstvene radove objavljene u vodećim svjetskim časopisima, a moraju sadržavati rezultate koji: otvaraju nova područja istraživanja, nude nove poglede i daju novu interpretaciju poznatih činjenica, opisuju nove sinteze i sl. Odluku o dobitniku Nagrade donosi Upravni odbor Hrvatskog kemijskog društva na prijedlog Odbora za dodjelu nagrade. Dobitnik ove prestižne nagrade za 2004. god. je dr. sc. Boris Kovačević, znanstveni suradnik IRB-a. Nagrada mu je uručena na godišnjoj skupštini Hrvatskog kemijskog društva održanoj 12. srpnja 2005. godine, kojom je prigodom Dr. sc. Kovačević održao predavanje pod naslovom "Dizajn neutralnih organskih superbaza primjenom kvantno-kemijskih metoda".

Dr. sc. Boris Kovačević diplomirao je kemiju na Prirodoslovno-matematičkom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu 1996. godine. Diplomski rad je izradio pod vodstvom prof. dr. sc. Z. Maksića u Grupi za kvantnu organsku kemiju Instituta "Ruđer Bošković". Nakon obrane diplomskog rada počinje raditi kao mlađi asistent u istoj grupi gdje i danas radi. Magistarski rad je obranio 1999., a doktorsku disertaciju 2001. godine pod vodstvom mentora Z. Maksića. Godinu dana kasnije izabran je u zvanje znanstvenog suradnika, a 2004. godine imenovan je za v.d. voditelja Grupe za kvantnu organsku kemiju. Dobitnik je godišnje nagrade za novake i mlade istraživače za 2003. godinu.

Dr. sc. Kovačević bavi se istraživanjem elektronske strukture molekula i predviđanjem njihovih svojstava. Najzapaženije rezultate postigao je u području dizajna jakih organskih baza, koja su dovela do otkrića novih izuzetno jakih neutralnih organskih superbaza. Istraživanjem strukturnih i elektronskih čimbenika odgovornih za bazičnost organskih molekula razvijena je strategija dizajna super baza nazvana Aufbau principom. On se sastoji od izbora funkcionalne grupe s velikom imanentnom bazičnošću poput imino skupine, odabira osnovnog kostura molekule



(spacer), koji ima mobilne pi-elektrone zbog prijenosa pozitivnog naboja nakon protoniranja te, konačno, stavljanja pogodnih supstituenata na strateške pozicije na perimetru molekule. Aufbau princip je omogućio izgradnju niza superbaza, koje po svojim protonskim afinitetima ulaze u područje energija deprotoniranja anorganskih kiselina, čime je postignuto spajanje obiju ljestvica. Pri tome su se kao posebno pogodni pokazali molekularni kosturi, koji omogućuju aromatski domino efekt, stvaranje višestrukih inramolekularnih veza i polienska kationska rezonancija. Ti rezultati našli su eksperimentalnu potvrdu u sintezi i mjerenjima bazičnosti nekoliko takvih spojeva u zemlji i u inozemstvu i u svojoj konačnici dovela su do dva patenta i dvije nove organske superbaze na tržištu.

Rezultate svojih dosadašnjih istraživanja dr. sc. Kovačević objavio je u 29 znanstvenih radova u vodećim svjetskim znanstvenim časopisima koji se odlikuju vrlo strogim recenzentskim postupkom i visokim faktorima utjecaja. Među njima treba spomenuti Chem. Eur. Journal, Organic Letters, Chem. Phys. Chem., Chem. Phys. Letters, J. Phys. Chem. A, Eur. J. Org. Chem. itd. Nadalje, valja istaknuti revijalni članak, kojega je objavio u su-autorstvu sa svojim mentorom prof. dr. sc. Z. Maksićem, "Computational Design of Highly Potent Organic Superbases". Ovaj rad objavljen je na poziv Istraživačkog centra u Jülichu (SR Njemačka), jer je bio ocijenjen kao jedan od najboljih projekata napravljenih u ovom najvećem kompjuterskom centru u Europi. Radovi dr. sc. B. Kovačevića naišli su na značajan odjek u znanstvenoj literaturi i citirani su dosada oko 200 puta.