

KRATKA ZGODOVINA ...

ČESA? (2. del)

O vakuumu, svetlobi, težnosti, in prostorčasu

► Erik Margan



Naslov tega članka izhaja seveda iz naslova znamenite kultne knjige *Kratka zgodovina časa*, nedavno preminulega zvezdniškega fizika Stephena Hawkinga. Ni veliko ljudi v zgodovini znanosti, ki so bili tako slavni, da so njihovo delo poznali vsi, a hkrati tako slabo razumljeni, da so le redki vedeli, za kaj točno gre: na misel nam pridejo poleg Hawkinga še Albert Einstein, Richard Feynman, pa še morda ... hmmm.

TUDI MENE KOLEGI POGO-STO ne razumejo najbolje, tu pa se primerjava z omejenimi fiziki konča. Vendar me to prav nič ne ovira, da se ne bi lotil kratke razprave o nekaterih temeljnih problemih, s katerimi se ubada današnja fizika.

Veliko fizikov danes s težkim srcem priznava, da je moderna fizika zašla v krizo nekako po letu 1975. Bilo je sicer veliko novih odkritij in dosežkov, vendar vsi temeljijo na teoretičnih dognanjih izpred tega leta. Nikakor ne moremo trditi, da se teoretiki niso trudili, nasprotno, domislili so se marsičesa, kar naj bi fiziko postavilo na povsem nove temelje. A nobena od teh zamisli se ni izkazala za pravilno, nobena ni bila potrjena s poskusi in nobena ni postregla s preverljivo napovedjo, vsaj ne takšno, ki bi bila v dosegu današnje tehnologije. Prostor

in čas, ali bolje kar *prostorčas* (saj sta neločljiva), ter njegovo razumevanje je v jedru problematike, ki jo bom skušal vsaj delno približati bralcem, ki so sicer ohranili znanstveno radovednost, a življenje raje posvečajo pomembnejšim rečem. Ob tem še kratka osebna izkušnja. Imel sem 14 let in ležal v postelji z angino (gre za bolezen in ne za osebno ime) ter se obupno dolgočasil. Vsake pol ure sem vstajal in s polic dobro založene družinske knjižnice vzel nekaj knjig in jih prelistal. Tako mi je v roke prišla tudi v hrvaščino prevedena knjiga Einsteinova teorija relativnosti znamenitega nemškega fizika Maxa Borna. Vedel sem, da je bila tam že celo večnost, a mi nikoli ni prišlo na misel, da bi jo odprl. Jezik je bil dokaj starinski, ampak razlaga je bila postopna in temeljita, tako da sem z nekaj osnovnošolske me-

hanike v opisih gibanja marsikaj razumel. Že prej sem poznal tisto najslavnejšo enačbo vseh časov, $E = mc^2$, danes znano že otrokom v nižjih razredih osnovne šole, zato se mi tudi Lorentzove transformacije, ki prav tako vsebujejo člen c^2 , niso zdele prezahtevne. Zataknilo pa se mi je pri nekaterih pojmi, kot so denimo svetovnica, referenčni okvir ipd. Če bi mi kdo povedal da gre za geodeziko, ter lokalne fizikalne pogoje, bi še nekako šlo, a počasi sem obupal, predvsem ker nisem nikjer našel razlage, zakaj ravno c^2 . To vprašanje pa se mi je zdelo ključno. OK, svetlobna hitrost je veliko število, njen kvadrat še mnogo večji, toda to ne razloži ničesar in tudi grafični prikaz relativnih gibanj, ki pripelje do Lorentzovih transformacij, ni pomagal. Knjigo sem končno odložil in utrujen zaspal, mati pa jo

je pospravila na polico, kjer je spet samevala dolga leta.

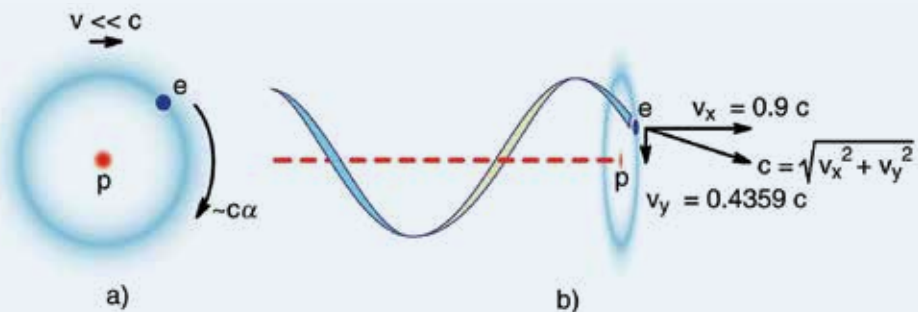
Šele mnogo kasneje, na fakulteti ob obravnavi Maxwellove enačbe sem ugotovil, kaj dejansko pomeni c^2 . Zadeva ni očitna, ker Maxwellove enačbe v Heavisidovi obliki obravnavajo odnose med krajevnimi in časovnimi odvodi vektorskih polj, biser pa je skrit v tako imenovanih konstitutivnih enačbah, kjer je med drugimi podan tudi ta izraz:

$c^2 = (\mu_0 \epsilon_0)^{-1}$. Kvadrat svetlobne hitrosti je torej inverzni produkt magnetilne in dielektrične konstante vakuuma. To sem sprejel in si zapomnil, a se nisem spraševal, kako to, da ima vakuum, po vseh pravilih prazen prostor (nič!), merljive fizikalne lastnosti. Magnetilnost nekako ustreza mehanski inerciji (vztrajnosti), dielektričnost pa mehanski elastičnosti (prožnosti).

Lorentzova transformacija

Lorentzova časovna transformacija je nedvomno potrjena z delovanjem satelitske navigacije. Lorentzovo krčenje zaradi gibanja lahko ponazorimo na atomski ravni. V klasičnem Bohrovem modelu atoma je hitrost elektrona okoli jedra določena s svetlobno hitrostjo c in konstanto fine strukture $\alpha = e^2/4\pi\epsilon_0\hbar c \approx 1/137$. Ko

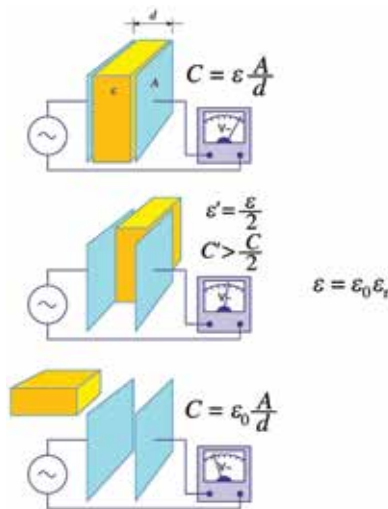
pa atom pospešimo do hitrosti, ki je blizu svetlobne hitrosti, se elektron ne more gibati hitreje od nje. Njegovo gibanje lahko razstavimo vektorsko na gibanje v smeri gibanja atoma in v prečno smer. S tem se elektronska orbitala v smer gibanja atoma skrči, prav tako pade tudi doseg medatomskih sil. (ilustracija: Erik Margan)



V vsaki mehanski valovni enačbi je po znani D'Alembertovi enačbi hitrost širjenja določena z inercijo in elastičnostjo medija, skozi katerega gre valovanje. Podobno velja za elektromagnetiko, tudi brez snovnega medija. Od kod vakuumu od nič različne vrednosti magnetilnosti in dielektričnosti, pa sem razumel šele mnogo kasneje, ko sem se bolj poglobil v kvantno teorijo. Že iz klasične elektromagnetne teorije poznamo enačbo za kapacitivnost kondenzatorja. Ta je odvisna od geometrije polja, podane s površino plošč A in njuno oddaljenostjo d , ter dielektričnosti izolacijske snovi med ploščama ϵ : $C = \epsilon A/d$. Če pa izolacijsko snov med ploščami počasi odstranimo, se kapacitivnost sicer zmanjšuje, vendar niti v vakuumu ne pade na nič. Dielektričnost lahko zapišemo kot zmnožek dielektričnosti vakuuma in relativne dielektričnosti snovi: $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$. Ko odstranimo izolacijo in zrak med ploščami, postane $\epsilon_r = 1$ in nam ostane le $\epsilon_0 = 8.8541878128 \times 10^{-12} \text{ As/Vm}$.

Podobno velja v primeru induktivnosti navitja z magnetnim jedrom: $L = \mu_0 \mu_r \pi D^2 l / 4(d + \delta)^2$. Tu je magnetilnost prav tako razdeljena na magnetilnost vakuuma μ_0 in relativno magnetilnost jedra μ_r . Preostali členi enačbe predstavljajo geometrijo navitja, premer D , dolžino vodnika l , debelino vodnika d in razmik med sosednjimi navoji δ . Ko odstranimo jedro, bo $\mu_r = 1$ in nam ostane le $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ Vs/Am}$.

Kot vidimo, sta konstanti ϵ_0 in μ_0 edini fizikalni količini, ki poleg geometrije polja določata vrednost kapacitivnosti oziroma induktivnosti. Zato je pomembno določiti 'mehanizem', ki v vakuumu ustvarja ti lastnosti.

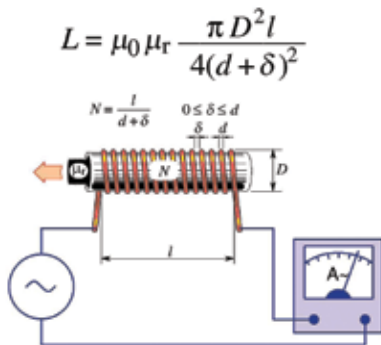


⊕ Kapacitivnost: če dielektrik (izolator) med kovinskima ploščama kondenzatorja izvlečemo, kapacitivnost ne pade na nič, pač pa ostane pri vrednosti, ki e poleg geometrije plošč določena še s dielektričnostjo vakuuma. (ilustracija: Erik Margan)

Ob prehodu v 20. stoletje so se v kratkem času zvrstila mnoga pomembna odkritja: odkritje elektrona (J. J. Thomson), kvantiziranost energije (Max Planck), foto-učinek in posebna relativnost (Albert Einstein), odkritje atomskega jedra (Ernest Rutherford) ter prvi uporabni model atoma (Niels Bohr). Vsa ta odkritja so bila posledica študij pojavov, ki jih je bilo s klasično fiziko težko razložiti. Potrebno je bilo še dobro desetletje raziskav, da so fiziki dele te sestavljanke zložiti v fizikalno in matematično razumljivo sliko, čeprav so nekateri manjkali, nekatere pa še vedno iščemo.

Bohrov učenec in sodelavec Werner Heisenberg je postavil temelje matrične kvantne mehanike, ki je dobro pojasnjevala večino pojavov, s katerimi so se takrat srečevali pri proučevanju atomov in atomskih gradnikov. Skoraj istočasno pa je Louis De Broglie predlagal drugačno razlago pojava, ki so ga poimenovali dualnost (dvojnost) in zanj dolgo niso znali najti ustrezne razlage. Poskusi so namreč pokazali, da delci snovi včasih kažejo lastnosti,

⇒ Induktivnost: če magnetno jedro izvlečemo iz prevodnega navitja, induktivnost ne pade na nič, ampak ostane pri vrednosti, ki je poleg geometrije navitja določena z magnetilno konstanto vakuuma. (ilustracija: Erik Margan)



podobne valovanju (npr. difrakcija oz. uklon in interferenca pri prehodu skozi dvojno režo), (svetlobno) valovanje pa se včasih obnaša kot tok delcev (npr. pri foto-učinku, za razlago katerega je Einstein kasneje prejel Nobelovo nagrado). De Broglie je sestavil Planckov izraz za energijo fotona, $E = h\nu$, z Einsteinovim izrazom za energijo delca $E = mc^2$, ter ugotovil, da je mogoče vsakemu delcu z maso m pripisati frekvenco $\nu = mc^2/h$ oz. valovno dolžino $\lambda = c/\nu = h/mc$. Valovno razlago je potem dopolnil še Erwin Schrödinger. Tako smo dobili dve konkurenčni razlagi, a Heisenbergova je bila veliko bolj dodelana in

Heisenberg je izkoristil vsako priložnost za javno smešenje valovne razlage. Tega ni bilo konec niti ob kasnejši dopolnitvi teorije, ko je David Bohm pokazal, da valovna razlaga daje povsem enake napovedi izidov poskusov. Heisenbergova teorija je prevladala in na njej so kasneje zasnovali druge kvantne teorije, tudi sodobno teorijo polja.

Kompleksno valovno funkcijo so vendarle vključili v standardno teorijo, ko se je izkazalo, da je možno valovno funkcijo razložiti kot verjetnost kvantnega stanja delcev (Max Born). A kot bomo videli, imamo danes možnost s poskusi

pokazati, da ima tudi De Broglie-Bohmova teorija velike možnosti za razvoj, čeprav med fiziki še vedno ni kdove kako priljubljena. Bohr-Heisenbergova teorija pa je prinesla izraz za kvantno nedoločenoost. Merjenja pojavov pri nizkih energijah so tudi sicer težavna, saj gre za občutljive postopke, ki jih lahko zmotijo različni vplivi iz okolice, da o kvantiziranem energijskem stanju niti ne razpravljamo. To pomeni, da z opazovanjem nekega kvantnega sistema le temu odvzemamo ali dodajamo neko končno količino energije, zaradi česar se sistem ob merjenju spremeni. Energije se pač ne da spremeniti za poljubno majhno količino, poleg tega pa je sistem sam ne more sprejeti ali oddati poljubno malo, pač pa le v večkratnikih osnovnega kvantnega stanja. Zato se moramo pri izvajanju meritev opreti na veliko število poskusov in rezultate obravnavati statistično.

Hkrati to pomeni, da izidov posameznih poskusov ni mogoče napovedati poljubno natančno, lahko napovemo le verjetnost posamičnega izida. Heisenberg je ugotovil, da obstaja spodnja energijska meja, pod katero načeloma ni mogoče natančneje poznati stanja sistema. To je zapisal v obliki odnosa med spremembo položaja Δx in spremembo mehanskega momenta Δp , pri katerem je njun zmnožek vedno večji ali najmanj enak polovici reducirane Planckove konstante $\hbar/2$ (*kjer je $\hbar = h/2\pi$*), torej $\Delta x \cdot \Delta p \geq \hbar/2$.

Izkaže se, da podoben odnos velja tudi za druge komplementarne količine, denimo med spremembo energije in časovnim intervalom itd. Einstein se s tako teoretično razlago ni nikoli povsem sprijaznil, a še bolj kot ta statistična nedoločenoost so

Nedoločnost v vsakdanjosti

Nedoločnost sicer ni tako neobičajna, kot se na prvi pogled zdi. Pojav namreč brez težav zaznamo, če skušamo fotografirati kaj premikajočega se, npr. avtomobil, pri čemer nam bosta težave povzročala njegova lega in moment.

Sliko na levi so posneli z nepremičnim fotoaparatom, zato je ozadje

ostro, dirkalnik pa je zaradi hitrega premikanja v času, ko je zaslonka odprta, videti razblinjen. Na desni pa fotoaparati sledi gibanju avtomobila, zato je ta jase, ozadje pa zamegljeno. Razblinjenost oz. nedoločnost bi v obeh primerih lahko zmanjšali s krajšim časom odpiranja zaslonke, vendar pa ta ne more biti enak nič.



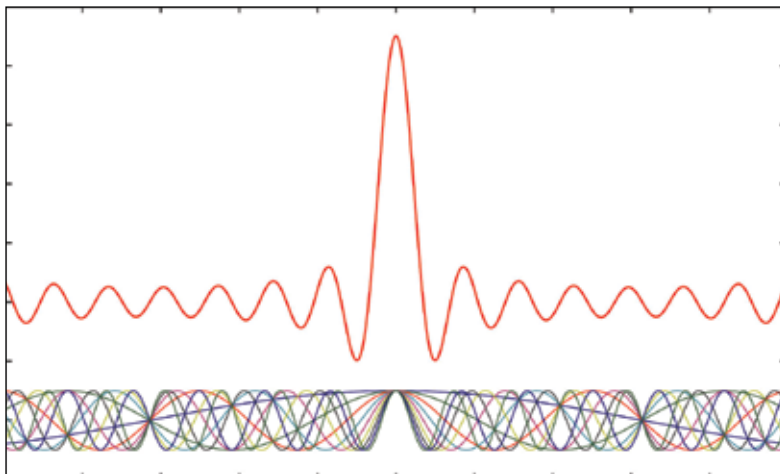
ga motile nekatere druge posledice kvantne teorije (predvsem kvantna prepletenost). Velika večina fizikov je bila zato prepričana, da je Einstein s starostjo izgubil zmožnost razumnega presojanja, seveda le na področju kvantne fizike.

Hkrati z razvojem kvantne teorije se je pojavila še ena podobna težava, in sicer nesoglasje med kvantno teorijo in relativistiko. Vsaka zase sta izjemno natančni, skupaj pa se ne ujemata, saj v mejnih primerih ne prehajata gladko druga v drugo. Paul Dirac je sicer razvil relativistično kvantno mehaniko, iz katere je sledila napoved obstoja antisnovi (za kar je leta 1933 dobil Nobelovo nagrado). Diracova teorija daje pravilne rezultate v nekaterih primerih, v drugih pa odpove. Z leti so se fiziki sicer navadili po potrebi preskakovati z enega področja v drugega, odvisno od vrste problema in števila

elementov v obravnavanem sistemu. Toda tako stanje je dolgoročno nevdržno in danes se dobro zavedamo, da nujno potrebujemo nadgradnjo in poenotenje obeh teorij.

V zgodovini fizike že poznamo nekaj primerov poenotenj: Galilej-Newtonovo (splošna gravitacija) in Maxwellovo (elektrika, magnetizem, svetloba). Do tretjega poenotenja je prišlo na področju kvantne elektrodinamike in šibke jedrske sile v teorijo elektro-šibke interakcije, razlago zanjo pa so okoli leta 1970 prispevali Glashow, Salam in Weinberg (Nobelova nagrada leta 1979). To je kasneje med drugim privedlo tudi do odkritja Higgsovega bozona, delca ali bolje rečeno vzbujenega stanja Higgsovega polja, ki je delno odgovoren za maso osnovnih delcev. Obstoj Higgsovega polja so že pred kakšnimi šestimi desetletji neodvisno drug od drugega napo-

↪ Interferenca: vsota večjega števila valov enake amplitude, a različnih frekvenc, lahko v območju fazne korelacije povzroči močno lokalno povečanje jakosti polja. (ilustracija: Erik Margan)



vedale tri skupine raziskovalcev: Kibble, Guralnik in Hagen, Englert in Brout ter Peter Higgs. Englert in Higgs sta za to leta 2012 dobila tudi Nobelovo nagrado. Sodobna kvantna teorija polja sicer nakazuje nekaj možnosti za četrto poenotenje, ko bi morda na isti osnovi lahko združili elektro-šibko in močno jedrsko interakcijo (ki nastopa med kvarki in gluoni). Peto poenotenje pa naj bi privedlo do združenja kvantne teorije s silo težnosti oz. splošno teorijo relativnosti.

Kljub neverjetnemu napredku sodobne fizike pa se je izkazalo, da je združevanje kvantne teorije in relativistike zaenkrat prehud zalogaj. Veliko časa smo zapravili s teorijo strun, ki osnovne delce prikaže kot tresljaje majhnih sklenjenih ali odprtih strun. V tej teoriji se naravno pojavi tudi delec s spinom 2, podoben Einsteinovemu hipotetičnemu gravitonu. Zaradi tega je teorija strun postala zelo obetavna in mnogi so jo imeli za pravo pot, saj je kazala možnost poenotenja s silo težnosti. A žal po skoraj 50 letih razvoja nobena od petih različic te teorije (najbrž obstaja še kakšna

manj znana) ni privedla do pričakovanega preboja, čeprav mnogi teoretiki, tudi slovenski, nad njimi še niso povsem obupali.

Zaradi tega so se nekateri fiziki začeli ozirati proti De Broglie-Bohmovi teoriji, a ta razvojna pot se šele začinja (glede na število raziskovalnih ur in raziskovalcev na tem področju) z delom, opravljenim na razvoju standardnega modela. Kljub temu je napredek omogočil nekatere poskuse, o katerih smo do nedavnega lahko le sanjali in s katerimi bi morda bilo mogoče pridobiti nove podatke, na podlagi katerih bi zgradili popolnejšo teorijo.

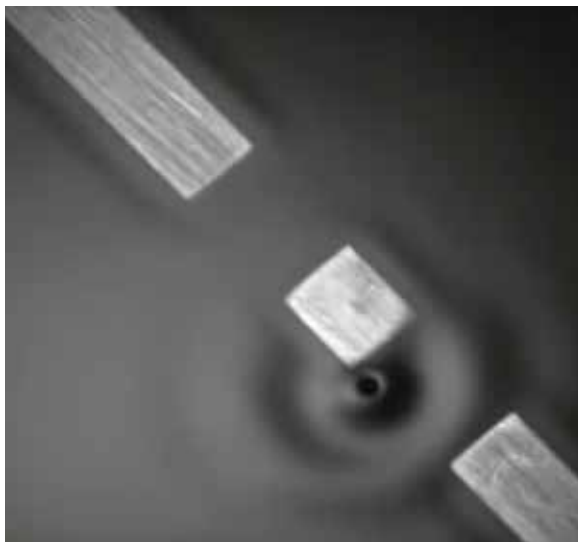
Ena od teh novih možnosti so tudi šibke merilne metode (angl. *weak measurements*), s katerimi je mogoče opazovati oz. zaznavati kvantna stanja z dovolj majhno energijo, da jih ta ne zmoti. Pri tem uporabljamo nekatere zanimive kvantne pojave, kot je denimo kvantna prepletenost (angl. *entanglement*) parov delcev z dopolnjujočimi se (komplementarnimi) lastnostmi. Eno izmerimo na enem, drugo pa na drugem delcu, zaradi prepletenosti para pa vemo, da se morata rezultata meritev do-

polnjevati. S tem smo za prvi delc določili obe iskani lastnosti, ki ju sicer zaradi Heisenbergovega načela nedoločenosti ne bi mogli izmeriti.

Drug pomemben nov pripomoček je makroskopska simulacija kvantnih valovnih stanj. To lahko med drugim dosežemo tako, da preizkušane, denimo kapljico silikonskega olja na oljni površini, vzbujamo z ultrazvočnim valovanjem. Ob tem nastajajo podobni interferenčni pojavi med valovanji in delci kot v kvantni mehaniki. Prvi je tak poskus opravil Yves Couder s sodelavci, posnetek poskusa si lahko ogledamo na spletu [1].

Pri Couderovem poskusu difrakcije na dvojni reži se oljna kapljica ob interferenci z ultrazvočnim vzbujanjem površine obda z valovanjem, ki spominja na pilotni val iz De Broglie-Bohmove teorije. Kapljica potuje skozi eno odprtino v pregradi, val pa skozi obe. To pojasni, kaj se dogaja s posameznimi delci v podobnem poskusu na kvantni ravni.

Zakaj je vzbujanje z ultrazvokom sploh potrebno? Za Heisenbergovo načelo nedoločenosti se domneva, da izhaja iz kvantne narave samih delcev in energije. Vendar je že 10 let po odkritju zakona sevanja črne telesa sam Planck objavil popravljen zakonitost, ki vsebuje dodatni, od temperature neodvisni člen, odvisen le od frekvence: $h\nu/2$. Če ga integriramo po vsem obravnavanem prostoru in po vseh možnih frekvencah tega prostora, lahko postane ogromen! Fizikalno si to razložimo kot energijo vakuuma, ki jo lahko dojemamo kot nekakšen ocean. Na njegovem površju valovijo majhne kvantne fluktuacije, ki vplivajo na obnašanje kvantnih delcev.



Naključno obnašanje kvantnih delcev in tudi njihova življenjska doba je po tej razlagi odvisna od razmerja med notranjo energijo delca in trenutno lokalno vrednostjo energije vakuuma okoli delca. Pri dolgoročno stabilnih delcih je notranja energija manjša od energije v okolici, pri nestabilnih pa je notranja energija večja, zato po določenem času ti delci sami od sebe razpadejo. Npr. nevtron je dolgoročno stabilen le, če je združen z drugimi delci v atomskem jedru; če ga osamimo, bo po približno 15 minutah razpadel na proton, elektron in anti-nevtrino. Podobno je z drugimi kratkoživimi delci, ki jih večina zelo hitro razpade.

V Couderovem eksperimentu torej ultrazvočno vzbujanje posode, ki se prenaša po olju na površju, igra vlogo energije ozadja, s katero potem kapljice olja na površju interferirajo. Pri tem nastaja valovanje podobno pilotnemu valu v De Broglie-Bohmovi teoriji.

Zanimivo pri vsem tem je, da je obstoj energije vakuuma bil doka-

🔗 Poskus Yvesa Couderja z interferenčnim valovanjem na dvojni reži (vir: oddaja TV nanizanke *Through the wormhole*)

zan že leta 1913 v eksperimentu, ki sta ga z ohlajanjem plinov do temperatur blizu absolutne ničle opravila Einstein in Stern [2]. Opazila sta, da ohlajanje ne poteka premo sorazmerno, pač pa se blizu absolutne ničle potek krivi, kot da bi obstajala določena spodnja energijska meja. To sta Einstein in Stern pripisala dodatnemu členu $h\nu/2$ v Planckovem zakonu. Energijo sta poimenovala *Nullspunktenergie*, kar je bilo kasneje ponesrečeno prevedeno v angleščino kot *zero point energy*, energija ničelne točke. Gre pa preprosto za energijo prostora, ohlajenega do Kelvinove absolutne temperaturne ničle. Čudi pa, da je Einstein kasneje na to svoje prelomno odkritje povsem pozabil in se je v iskanju rešitev za problem sile težnosti raje zatekel v čisto matematične vode Riemannove geometrije. Nato so se zvrstili tudi drugi dokazi obstoja energije vakuuma: Lambov frekvenčni zamik [3], Casimirov pojav [4] in še nekateri. Žal nimamo dovolj prostora, da bi se jim posvetili do mere, ki si jo zaslužijo. Kljub vsem tem dokazom pa energija vakuuma ostaja na robu znanosti [5]. Nekateri fiziki dvomijo vanjo, saj menijo, da bi te učinke lahko razložili tudi drugače.

Sicer pa smo leta 1998 v kozmologiji dobili nepričakovano potrditev obstoja neke skrivnostne energije, ki naj bi pospeševala širjenje vesolja. V skladu s prav tako skrivnostno temno snovjo, ki se ne odziva na elektromagnetna polja, so jo poimenovali temna energija. Po teh spoznanjih naj bi bilo vesolje sestavljeno iz 71 % temne energije, 25 % temne snovi in samo 4 % običajne barionske (iz delcev sestavljene) snovi. Po teoriji velikega poka ter po opazovanjih

zmanjševanja svetilnosti z oddaljenostjo eksplozij supernov tipa 1a, naj bi v zgodnjem vesolju prevladovala inflacija (hitro napihovanje *prostorčasa*), nato bi sledila faza prevladovanja snovi, ki bi upočasnjevala širjenje vesolja, nazadnje pa naj bi prevladala temna energija, ki povzroča trenutno majhno, a vse bolj naraščajoče pospeševanje širjenja vesolja. Najpreprostejša razlaga temne energije pravi, da ustreza Einsteinovi kozmološki konstanti [6], ki jo je vpeljal v splošno relativnost, ko sta Fridman in Lemaître pokazala, da po njegovih enačbah polja vesolje ne more biti stabilno in se mora bodisi širiti bodisi krčiti. S kozmološko konstanto je Einstein elegantno uravnotežil vesolje, vendar je njeno uvedbo kmalu obžaloval, saj je Hubble dokazal obstoj drugih galaksij, ki se od naše oddaljujejo s hitrostjo, ki se z večanjem razdalje povečuje.

Pri tem se pojavlja še ena težava: prostorska gostota temne energije je določena na le okoli 10^{-9} J/m³. To je sicer videti zelo malo, toda vesolje je velikansko in na velikih razdaljah se še tako majhni prispevki seštevajo in nastali pritisk odriva oddaljene galaksije vedno hitreje. Po drugi strani pa je prostorninska gostota energije vakuuma v Planckovi limiti ogromna, kar 10^{113} J/m³. To nesoglasje, ki obsega več kot 122 velikostnih redov, je največja sramota v sodobni fiziki in zahteva kar najhitrejšo razrešitev.

▶ VIRI, LITERATURA IN SPLETNI NASLOVI ...

... so zaradi pomanjkanja prostora na voljo na naši spletni strani na povezavi