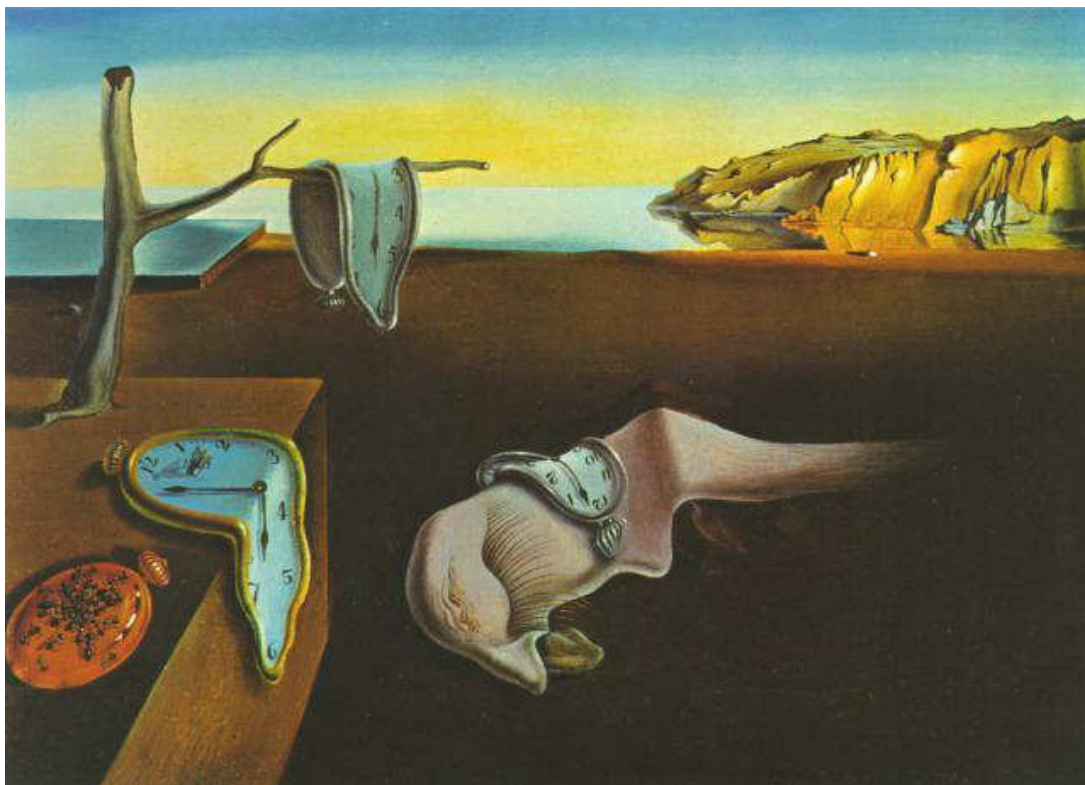


Erik Margan:

Kratka zgodovina - ČESA??

V zagovor stohastični elektrodinamiki



Salvador Dali, The Persistence of Memory, 1931.

Hudič je v podrobnostih.
(Slovenski ljudski pregovor)

Povzetek

Znanost, zlasti fiziko, običajno dojemamo kot opis 'objektivne realnosti', zato nam novejše fizikalne teorije večinoma zvenijo precej čudno, skoraj 'nadrealistično'!

Zgodovina fizike XX stoletja poglavitno zajema zgodovino raziskovanja snovi, medtem ko je do raziskovanja 'praznega' prostora (lat., *vacuum*) in njegovih lastnosti prišlo nekako spotoma, bolj po naključju kot načrtno. Danes se zavedamo, da vacuum ni zgolj 'gledališki oder' na katerem se odvija fizikalna 'predstava', temveč tvori nerazdružljivo celoto s snovjo in ima natančno določene fizikalne lastnosti. Brez razumevanja teh lastnosti danes več ne moremo celovito razumeti ne snovi, ne energije, ne Vesolja, ne njegovega nastanka in razvoja. Nekako kot presenečenje doživljamo ugotovitev, da so atomi in celo subatomske delci večinoma prazen prostor, med tem ko je 'prazen' prostor pravzaprav poln energije!

Dva dokaj različna pristopa k pojasnjevanju obnašanja snovi na mikro ravni, ki oba izvirata iz del Maxa Plancka leta 1900, sta pripeljala do dveh različnih 'šol' in dveh različnih teorij, kvantne elektrodinamike (QED) in stohastične elektrodinamike (SED), pri čemu je prva ves čas dominirala in imela status 'standardne' teorije (navkljub nekaterim očitnim pomanjkljivostim), med tem ko je druga vedno imela pridih 'eksotike'. Vendar najbrž ni naključje, da sta obe, vsaka na svoj način, pripeljale do skoraj identičnih spoznanj. V tej 'kratki zgodovini' skušamo slediti obe poti, od prvih domnev o fizikalnih lastnostih vacuuma, do spoznanja, ki ga danes imenujemo, odvisno od konteksta, z različnimi imeni, kot so 'energija polarizabilnega vacuuma', 'energija ničelne točke', 'kozmoloska konstanta', 'kvintesenca', ali 'temna energija'.

Mimogrede bomo pretehtali nekaj zanimivih implikacij in vprašanj, ki se s tem spoznanjem odpirajo.

Erik Margan

<erik.margan@ijs.si>

Ljubljana, 2007–2008

Izjava:

Kratka zgodovina - ČESA? je nastala kot sad avtorjevega ljubiteljskega poskusa sledenja razvoju današnje fizike, predvsem kot svojevrstna 'vaja v slogu', s ciljem pojasniti sebi nekatere novejša fizikalna teorija. Delo je nastalo izključno v prostem času in zanj ni bil porabljen niti cent davkoplačevalskega denarja.

Erik Margan

Kazalo

Povzetek	3
Kazalo	5
Seznam slik	6
Seznam tabel	6
Uvod	7
Rojstvo 'fizikalnega' vacuuma	15
Prve posredne eksperimentalne potrditve ZPE	23
Fizika na razpotju	25
Vrnitev na razpotje	29
ZPE in Planckova metrika	31
Neposredna potrditev ZPE	37
ZPE in virtualni delci	39
ZPE in svetlobna hitrost	41
ZPE in stabilnost atomov	45
Planckovi delci, ZPE in kozmološko 'napihovanje'	49
Nekaj kozmološko pomembnih implikacij	53
Problem 'temne snovi' in 'temne energije'	57
ZPE in gravitacija	69
ZPE in elektron	77
ZPE in ukrivljenost prostora	93
ZPE, masa, inercija, gravitacija in splošna relativnost	97
Kaj pričakujemo od Velikega Hadronskega Trkalnika?	103
ZPE in čas	109
O (ne)zmožnosti pridobivanja energije iz ZPE	117
Strokovnjaki pojma nimajo!	121
Zaključek	123
Reference	125

Seznam slik

Sl.1: Napačna predstavitev elektromagnetnega valovanja v Wikipediji	12
Sl.2: Pravilna predstavitev električne in magnetne komponente	12
Sl.3: Grafični prikaz matematičnih odnosov v energijskem polju fotona	13
Sl.4: Interferenca valov	16
Sl.5: Michelsonov in Morleyev interferometer	17
Sl.6: Poenostavljen prikaz delovanja interferometra	17
Sl.7: Pričakovani zamik interferometričnega vzorca	18
Sl.8: Prvih pet modusov nihanja	21
Sl.9: Interakcija dveh delcev	39
Sl.10: Vesoljska 'pajčevina'	49
Sl.11: Galaktična rotacija	57
Sl.12: Popularna različica Machovega načela	69
Sl.13: Nekateri modeli elektrona	77
Sl.14: Preverjanje časovne zakasnitve transmissijske linije	80
Sl.15: Heavisideov poskus na modern način	82
Sl.16: Odziv na značilnih točkah pri Heavisideovem poskusu	85
Sl.17: Vektorska analiza polja	85
Sl.18: Odboj stopničastega vala na impedančni diskontinuiteti	86
Sl.19: Hipotetična porazdelitev polja znotraj elektrona	88
Sl.20: Fazni zamik notranjega polja kot posledica zunanega polja	89
Sl.21: Energijska porazdelitev notranjega polja za klasični elektron	90
Sl.22: Einstein v policijski patrulji	91
Sl.23: Gravitacijsko lečenje	93
Sl.24: Ponazoritev ukrivljenosti 2D prostora	95
Sl.25: Gravitacija kot anizotropija ZPE	96
Sl.26: Središčni polprevodniški sledilnik eksperimenta DELPHI	104
Sl.27: Priprava ATLASovega 'soda'	105
Sl.28: Priprava ATLASovega 'soda'	105
Sl.29: V Ženevskem podzemlju	105
Sl.30: Računalniška simulacija tipičnega razpada Higgsovega bosona	106
Sl.31: Ura Slavadora Dalija	110
Sl.32: Ura Slavadora Dalija	110

Seznam tabel

Tabela 1: Osnovne 'naravne' konstante	31
Tabela 2: Planckove 'naravne' osnovne enote	32
Tabela 3: Izpeljane Planckove enote	32
Tabela 4: Relativna jakost znanih sil	70
Tabela 5: Primerjava formalizmov teorije SED in učinkov splošne relativnosti	123

Uvod

Po naslovu, ki je seveda parafraza naslova Hawkingove znamenite knjige *Kratka zgodovina časa*, utegne prenekateri bralec sklepati, da gre le za še enega v nizu člankov o tako imenovani 'Teoriji Vsega'¹ (ang., '*Theory of Everything*', TOE [1]).

Pa ni tako. Bi pa to lahko bil uvod v teorijo **skoraj** vsega, in še marsičesa!

V tem prispevku se bomo na hitro sprehodili skozi nekaj najpomembnejših dosežkov fizikalne misli XX stoletja v upanju, da bomo na koncu nekoliko boljše in v širšem kontekstu razumeli Vesolje v katerem živimo. A poleg globjega razumevanja Vesolja in njegovih osnovnih gradnikov bi radi pokazali, da znanost ni ostro razmejena in lepo urejena struktura, kot nam jo — po sili razmer — prikažejo v šoli. Zgodovina razvoja znanosti je bolj podobna Brownovemu gibanju, na videz nerazumljivo naključnemu in neurejenemu.

Ena poglobitvenih značilnosti fizike XX stoletja je prav gotovo spoznanje do katerega nas je pripeljalo preučevanje mikro-sveta in kvantnih pojavov, da nekaterih pomembnih procesov in zakonitosti ni mogoče do vseh potankosti določiti. Pa tu nimam v mislih običajnega pritoževanja velike večine dijakov in študentov, da je snov 'nerazumljiva', ali 'pretežka', ali 'kar nekaj', pač pa gre za temeljno nezmožnost razumevanja in razlage problemov v vsakodnevnem vzročno-posledičnem pomenu, vsaj v okvirih kvantne mehanike (*Quantum Mechanics*, QM), zaradi česar je predvidevanje izida poskusov na teoretični podlagi mogoče le v statističnem smislu. Hkrati smo tudi v makro-svetu s Splošno relativnostno teorijo (*General Theory of Relativity*, GTR) izgubili tisti prostorsko-časovni referenčni okvir, ki se nam v vsakdanjem življenju zdi samoumeven, a smo se mu v določenih okoliščinah prisiljeni odpovedati. V zvezi s tem se pojavlja problem, da so mnogi, celo vrhunski strokovnjaki, 'obupali' in prenehali poskušati predstavljati si pojave s katerimi se ukvarjajo, ter se zavestno omejili le na matematični opis. Še večji problem pa je, da je večina tudi prenehala tolmačiti te pojave, delno iz strahu, da ne bodo 'pravilno' razumljeni, delno pa ker menijo, da teh reči sploh ni mogoče razumeti, kaj šele razložiti, ker je narava ('poskrbela' da bo?) v svojem najglobljem bistvu nedoločljiva. Kot je nekoč izjavil Richard P. Feynman, "*če boste poskušali razumeti kvantno mehaniko, boste končali v črni luknji nerazumevanja*".

Stohastična elektrodinamika (*Stochastic Electrodynamics*, SED) si prizadeva popraviti to žalostno stanje. In, čeprav je v začetku slonela predvsem na klasičnih idejah, je postopoma prevzemala tudi nekatere ideje, ki so nastale znotraj kvantne elektrodinamike (*Quantum Electrodynamics*, QED), ter kmalu postregla s številnimi pomembnimi rezultati, identičnimi s tistimi pridobljenimi na 'ortodoksen' način, česar ni mogoče spregledati. Vrednost takega pristopa je v izhodiščnih idejah, ki slonijo na temeljnih fizikalnih načelih in ki kar kličejo po še bolj poglobljeni razlagi.

V preteklosti so številni teoretiki in filozofi poskušali to stanje prikazati kot svojevrstno 'krizo' znanosti kot celote (eden najbolj znamenitih med njimi je zagotovo Karl Popper, [2]), in skoraj vsi so si to stanje razlagali popolnoma napačno. Težava ni ne v znanstveni paradigmi, ne v metodi, ne v eksperimentu in tudi ne v matematiki, pač pa izključno v veščini modeliranja in interpretacije. Ne smemo nikoli pozabiti, da so

¹ Za ljubitelje Douglasa Adamsa: '42'. Nekateri med njimi bodo imeli za več kot golo naključje dejstvo, da je izraz za razmerje med temno energijo in temno snovjo tukaj enako oštevilčen!

naši opisi 'objektivne realnosti' dejansko, v večji ali manjši meri, le abstraktni in precej poenostavljeni modeli te realnosti. Naše enačbe opisujejo delovanje teh modelov, ne pa realnosti same. Naravi ni terba reševati diferencialnih enačb, da deluje tako kot pač deluje; mi smo tisti, ki moramo te enačbe reševati, če želimo o njenem delovanju izvedeti kaj več. Res pa je, da na koncu vedno primerjamo napovedi, pridobljene na osnovi modela, z realnimi pojavi, in če se kaj ne ujema, toliko slabše za naš model!

Če pa se zadeve le ujemajo, še vedno ostane problem interpretacije. Znanost nenehno išče različne možne interpretacije meritev in poskusov, iz teh spet gradi bolj ali manj uspešne, a vedno nekoliko poenostavljene modele realnosti, preskakuje z ene ideje na drugo, obenem nenehno preiskuje svoj filozofski, didaktični in dialektični položaj in poslanstvo, ter hkrati v danem zgodovinskem trenutku nudi najboljše trenutno možne odgovore na vprašanja s katerimi se tisti hip ubada.

V tem oziru zgodovina znanosti XX stoletja ni nobena izjema. Izjemno pa je bogatstvo idej in dosežkov, ki so se v tem času zgodili. Poleg tega pa je izrednega pomena dejstvo, da smo do enakih razlag pogosto prišli po različnih poteh, kar govori v prid mnenju, da vse naše teorije *"niti niso popolnoma napačne"*, kot se je nekoč posrečeno izrazil Nobelov nagrajenec Wolfgang Pauli, ko je obupaval nad nekaterimi malo verjetnimi interpretacijami.

Naša osrednja tema bo raziskovanje 'praznega' prostora (lat., *vacuum*). Razpravo bomo podkrepili le z najnujnejšimi enačbami, brez katerih bi razumevanje besedila bilo okrnjeno, ali vsaj premalo natančno opredeljeno kaj z določeno razlago želimo doseči. Podrobnosti so dobro dokumentirane v ustrezni literaturi in večina le te je že dosegljiva na svetovnem spletu, od koder izvirajo skoraj vse reference. Zavedam se pač, da ogromna večina mlajših bralcev sploh ne bi segla po fizikalnih učbenikih za dodatna pojasnila; če pa je razlaga dostopna le s par 'mišjih klikov', si jih morda le utegnejo ogledati. Zato sem si tudi dovoljil snov predstaviti bolj z vidika problemov, ter razlago usmeriti proti osnovam, raje kot je to običaj v učbenikih, kjer se začenja z razmeroma preprostimi in na prvi pogled razumljivimi pojavi in za resne probleme večinoma zmanjka časa, ali, kar je še hujše, se avtorji učbenikov namenoma izogibajo razlagi kontroverznih vsebin, da ne bi učencev po nepotrebnem 'zbegali'.

S pristopom od problemov k osnovam seveda tvegam, da mi bodo nekateri fiziki očitali nemetodičnost in nesistematičnost, ali pa imeli vse skupaj za nevredno branja. S takimi očitki se bom vnaprej sprijaznil, a vseeno imel svoj pristop za uspešnega, če se bo našel en sam bralec, ki bo začel 'klikati' po fizikalnih vsebinah Wikipedije. Globoko, namreč, verjamem, da je najtrdnejše znanje tisto, do katerega se človek dokoplje sam! S tega vidika je ta prispevek predvsem nekakšen napotek kje lahko bralec hitro najde nekatere osnovne in dodatne, bolj podrobne razlage, ne pa dokončni odgovor na probleme in vprašanja, s katerimi se znanost ubada.

Opozoriti pa je treba na past, da vsaka, še tako dobra teorija ob neustrezni ali površni razlagi lahko izzveni kot prazen 'čvek'. Vsaka razlaga, pač, že zaradi jezika samega, neizogibno vsebuje izraze iz vsakodnevnega življenja, ki so včasih neprimerni za opis konkretnega problema, zlasti v kvantnem svetu, katerega zakonitosti so povsem tuje, ali celo v nasprotju z našimi vsakdanjimi izkušnjami.

Prav tako neizogibno, vsaka razlaga vsebuje tudi osebna prepričanja in predsodke posameznega avtorja. Včasih se zgodi, da na osnovi sicer neizpodbitnih dejstev prehitro sklepamo in tako zameglimo, ali kar preprečimo uvid v možnost

drugačnih razlag in lahko pretečejo desetletja predno naposled ugotovimo kje in kdaj smo se zmotili. Zavedati se moramo, da vsak avtor, ne glede na to kako objektiven v svojem pristopu skuša biti, vedno obravnava probleme, ki se njemu zdijo pomembni, ter ponuja take rešitve, ki so blizu njegovemu osebnemu nazoru, tako v znanstvenem, kot tudi čisto filozofskem smislu.

Večina znanstvenikov se v svojih objavah zateka k poročanju v tretji osebi, v jezikovno brezosebnostni obliki, s čemer skuša poudariti objektivnost in lastno neprizadetost, oziroma določeno odmaknjenost od problema, katerega (rešitev) opisujejo. Nezavedno s tem skušajo pri svojih kolegih ustvariti po eni strani sliko o lastni verodostojnosti in resnicoljubnosti, po drugi strani pa vzbuditi občutek prepričljivosti in pomembnosti svojih znanstvenih dosežkov, spoznanj, ali rezultatov dela. Pa tega ne počno zato da bi sebe kakorkoli povzdignili, ali dosegli kakšno drugo korist zase; tak način izražanja pač zahteva nepisana doktrina o konciznosti znanstvenega poročanja, ki je delno tudi posledica skopo odmerjenega prostora v znanstvenem tisku. A tudi danes, ko prispevke pogosto preberemo prej kot v tisku na internetu, kjer prostorskih (in tudi drugih!) omejitev ni, je enak način pisanja še vedno prisoten. To govori v prid tezi, da gre predvsem za berljivost prispevka. Denimo, stavek: "izpeljani eksperimenti potrjujejo začetno hipotezo" ima enak pomen kot "rezultati vseh eksperimentov, ki sem jih v zadnjih petih letih izpeljal, govorijo v prid moji začetni hipotezi", toda čustveni naboj, ki ga je mogoče zaznati v slednjem, je po svoje moteč, ker teži prestavi s problema na človeka, poleg tega da vpliva na hitrost sporočanja. Žal se brezosebnostna oblika izražanja ohrani tudi kadar gre za popularizacijo znanosti, v prispevkih pisanih za široki krog bralcev, čeprav v tem primeru znanstveni formalizmi nikoli niso v ospredju, vedno so v ospredju ljudje, ki so se do svojih odkritj dokopali po številnih težavah in neuspehih.

Seveda so tudi izjeme, nekateri znanstveni prispevki so prave majhne umetnine, ki imajo svoj lastni ritem razlage, slikovito izražanje, čudovito preprosto logiko in bleščeče bisere spoznanja, a kljub temu pozornosti ne skušajo pritegniti nase, prav nasprotno, pozornost je vselej usmerjena k problemu. Znanstveniki sami neradi opisujejo svoja iskanja in stranpoti (razen morda v kakšni avtobiografiji), zato so članki vedno afirmativni, rešitev pa je vedno prikazana kot neposredna posledica pravilno izbrane hipoteze, premišljeno izvedenih eksperimentov in premočrnega logičnega sklepanja. A dejanske poti do doseženih rezultatov so v ogromni večini primerov vse prej kot take. Zato je toliko pomembnejša naloga zgodovinarjev znanosti, da okoliščine, ki so botrovale pomembnejšim odkritjem, ustrezno osvetlijo.

Praviloma se z znanostjo prvič srečamo v šoli, prek učbenikov. V učbenikih pa je prepogosto način seznanjanja z znanostjo naravnost katastrofalen, ko, namesto intelektualnega izziva in bogatsva spoznanj, prinašajo suhoparne 'formule', kot kakšne neštetokrat prežvečene kuharske recepte, in strogo pazijo da učenčeve pozornosti z ničemer ne odvrnejo od snovi. Rezultat je pogosto ravnodušnost, če ne že kar odpor do snovi. A vendar vsi iz iskušenj vemo, da si zabavne, smešne dogodke, anekdote, ali presenetljive miselne obrate zapomnimo brez truda, enkrat za vselej že ko jih prvič slišimo (na pr., Newtonovo jabolko). Prav tako si lažje zapomnimo reči, ki jih lahko povežemo z drugimi podobnimi pojmi, ali jih umestimo v njihov zgodovinski okvir, ter povežemo s pripadajočimi osebami, katerih človeške lastnosti so tudi del zgodbe. Dejstvo je, da se nihče do znanja ne dokoplje na lahek način, a to še ne pomeni da mora biti učenje duhamorno!

V zgodovini znanosti poznamo številne primere, ko je do pomembnega odkritja prišlo v trenutku prebliska, toda pred tem so vedno bila dolga leta ukvarjanja s problematiko. Poleg že omenjenega anekdotnega Newtonovega jabolka poznamo precej primerov, ko je do odkritja prišlo po daljšem sistematičnem in metodičnem raziskovanju (Robert Koch in odkritje bacila vraničnega prisada), vendar so še bolj številni primeri, ko je do odkritja prišlo po naključju, ali po ponesrečenem poskusu (Flemingovo odkritje penicilina).

Poznamo primere, ko je do spoznanja prišlo po strogemu sledenju osnovnim načelom (Einsteinova posebna relativnostna teorija), in obratno, ko je rešitev problema razkrila obstoj novega načela (Planckova kvantizacija), ali ko se je dolgoletno iskanje rešitve končalo ob srečanju z nekim drugim odkritjem, ki je zapolnilo pomembno vrzel (Bohrov model atoma in Balmerjeva formula spektralnih črt). Poznamo še rešitve po analogiji, oziroma primerjavi neznanega pojava z znanimi (Schrödingerjeva valovna enačba) in poznamo primere ko matematična konsistentnost izpeljane enačbe nujno zahteva obstoj nečesa novega (Diracov pozitron), ali kadar do odkritja pride preprosto zaradi novih in izboljšanih merilnih instrumentov (Hubble in širjenje Vesolja).

Vendar poznamo tudi primere ko je kasnejši premislek, nenavadna uganka, ali kar nora ideja prinesla novo spoznanje, denimo Einsteinov 3 strani dolg članek iz leta 1905 "Ali je inercija nekega telesa odvisna od vsebovane energije?", ki ga je napisal takoj po objavi svojega prvega članka o posebni relativnosti. Tak je tudi FitzGeraldov članek iz 1899, s petimi stavki in brez ene same enačbe, kjer navaja, da je edina logična pojasnitev negativnih rezultatov Michelsona in Morleya krajšanje dolžine v smeri gibanja; članek so takrat spregledali vsi, celo avtor sam sploh ni vedel da so ga objavili. Podobno, Hahn in Strassmann leta 1938 nista hotela verjeti svojim lastnim poskusom, ko sta po obsevanju urana z nevtroni zaznala tudi lažje elemente, kar je po njunem menju bilo "v nasprotju z vsemi znanimi fizikalnimi zakoni", a Meitnerjeva in Frisch nista imela takih pomislov in sta zasnovala idejo o jedrski fisiji. Kaj pa naj rečemo o Murrayu Gell-Mannu in njegovem prvem poročilu o kvarkih, v katerih prosi kolege eksperimentatorje naj ga prepričajo v njihov neobstoj? Ali pa o samozavestni, skoraj arogantni izjavi, ki so jo leta 1935 zapisali Einstein, Podolsky in Rosen, da kvantni mehaniki manjka "racionalna definicija fizikalne realnosti"?

Vsem tem znanstvenikom pa je skupna ena pomembna lastnost: zahvaljujoč svojim bogatim izkušnjam so takoj prepoznali pojav ali problem, ki je odstopal od ustaljenih pravil!

Zaradi vsega tega je pri branju znanstvenih prispevkov po eni strani nujna določena previdnost, obenem pa je potrebna tudi določena mera odprtosti do interpretacij, ki se nam iz takega ali drugečnega razloga zdijo na prvi pogled sporne: vedno pač obstaja možnost, da nova opazovanja ali poskusi pripeljejo do novih elementov teorije, ki lahko služijo kot vezni člen prej na videz nezdružljivih idej, prav tako kot lahko na osnovi izida enega samega poskusa, katerega rezultat se ne sklada z izračuni, popolnoma upravičeno zavržemo sicer splošno sprejeto teorijo.

Zadnji stavek pa seveda nikomur ne sme služiti kot opravičilo, da svoje poglede nekritično razglša za splošno veljavne in edino resnične. Onemogočanje kritičnih razprav še nikoli ni pripeljalo do pozitivnih prispevkov k razvoju znanosti. Kot je to v svojem zadnjem govoru v funkciji predsednika Ameriškega fizikalnega društva 1987 ponazoril Sidney D. Drell: "Odkrili smo sovražnike — oni so mi!"

Opozoriti moramo na še en vidik procesa znanstvenega spoznavanja. Kadar se ukvarjamo z resnično temeljnimi problemi, kot je, denimo, nastanek Vesolja, ali notranja zgradba snovi, prej ali slej pridemo do točke, ko nam začne primanjkovati eksperimentalno potrjenih podatkov. Pa vendar se znanost tu ne ustavi, in prav je tako. Ko podatkov zmanjka, se pogosto zatečemo k metodi 'učenega ugibanja' (ang., '*educated guessing*'), kjer na osnovi znanih dejstev in prav tako znanih matematičnih relacij, ki opisujejo fizikalne zakonitosti, skušamo uganiti manjkajoče podatke, ali vsaj določiti možno območje vrednosti le teh, jih nato matematično upoštevati, ter preveriti ali se izid takega ugibanja sklada (vsaj v limitah) s tem kar že vemo.

Za primer vzemimo v zadnjih 30 letih zelo popularno 'teorijo strun' (*String Theory*, ST): pravzaprav je vseh 5 njenih do sedaj razvitih različic zgrajenih s pomočjo takega ugibanja. Katera od teh različic je pravilna (ali sploh katera?), ali pa so, kot kažejo najnovejše raziskave, vse različice le delni vidiki ene in iste vseobsegajoče teorije, bo jasno, ko bomo imeli na voljo rezultate raziskav pri veliko večjih energijah, kot jih sedaj lahko laboratorijsko ustvarimo, ali izsledimo v naravi.

S takimi pristopi, kot je učenno ugibanje, ni težav vse dokler se natančno zavedamo kako smo do rezultata prišli. Narobe pa je, če začnemo tako pridobljeno znanje vnaprej razglašati za 'sveto resnico' le zato, ker temelji na matematiki. Matematika nam nudi nešteto možnih svetov; kateri od teh so tudi fizikalno realni, pa je povsem drugo vprašanje.

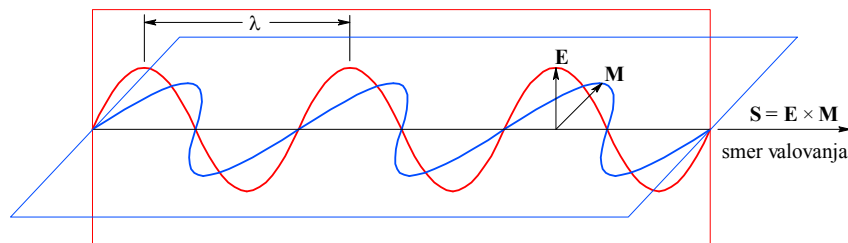
Če pa kdo pričakuje, da bo iz tega prispevka izvedel 'vse o vsem', bo najbrž razočaran, ker se večine zanimivejših fizikalnih problemov sploh ne bomo dotaknili, saj to je vendarle 'kratka zgodovina'. Bralcem, ki jim fizika ni stroka, se vnaprej opravičujem za zmedo, ki utegne nastati zaradi uporabe istih simbolov za različne pojme v različnih enačbah. Število črk je pač omejeno, poleg tega je uporaba nekaterih simbolov zgodovinsko pogojena. Zato se nekateri simboli podvajajo, denimo, simbol za foton γ (gama) in oznaka za Lorentzov relativistični popravek, $\gamma = 1/\sqrt{1 - v^2/c^2}$, ali λ (lambda) kot oznaka za valovno dolžino in hkrati parameter pri kozmološki konstanti, ali ν (nü) kot oznaka za frekvenco in simbol za nevtrino, E kot simbol za energijo in električno poljsko jakost, itd. Trudil sem se v besedilu sproti pojasniti za kateri pojem pri določenem simbolu gre. Energijo pa bomo vedno označevali z W (ang., '*work*', delo), razen pri Einsteinovi relaciji $E = mc^2$, pač iz zgodovinskih razlogov.

V vsaki razpravi, namenjeni širšemu krogu bralcev, nastopi tudi problem strokovne nomenklature. Kot vsako strokovno področje, tudi fizika ima svoje specifične strokovne izraze in poimenovanja pojmov, ki vedno imajo v ozadju natančno določene matematične enačbe, postopke, relacije, definicije, ali pojmovna področja na katera se nanašajo. Bralec, ki z določenim pojmom ni seznanjen, zato težje sledi razlagi, če se avtor besedila posebej ne potruži in vsaj nakaže kaj z določenim izrazom želi povedati. Toda dodatna razlaga besedilo preveč razvleče. Temu sem se skušal izogniti z vključitvijo večjega števila referenc, po katerih bodo zahtevnejši bralci zagotovo posegli za dodatna pojasnila. Reference pomembne za razumevanje problematike so označene **[rdeče]**, preostale, ki so bolj informativnega značaja, pa **[modro]**. 'Prenosljivi dokumentni format' (PDF) omogoča, da reference delujejo kot 'hiper-povezave': s klikom miškeinega kazalca nas prestavijo na konec besedila, kjer so reference zbrane. Od tod pa je spet s klikom na navedeno spletno povezavo mogoč dostop do pripadajoče vsebine prek privzetega spletnega brskalnika. Večina referenc se

nanaša na strani iz spletne enciklopedije Wikipedije, ki jo redno preverjajo in posodablajo njeni registrirani uporabniki, zato jo lahko imamo za dokaj zanesljiv vir podatkov. Toda **POZOR!** Kot vsak človeški izdelek, tudi Wikipedija ni brez napak! Ena najbolj očitnih je slika, ki naj bi ponazorila nihanje električnega in magnetnega polja pri elektromagnetnem valovanju, in se nahaja na strani:

<http://en.wikipedia.org/wiki/Electromagnetic_radiation>

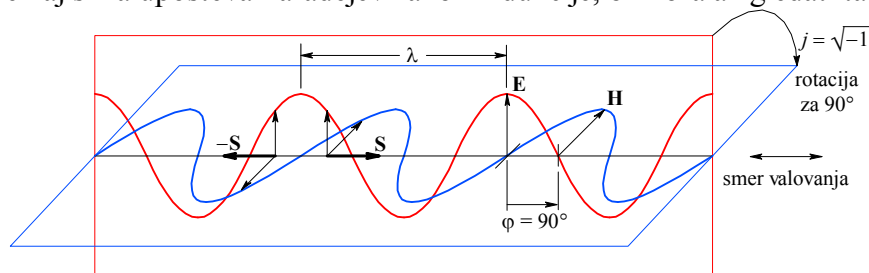
ter še na nekaterih drugih straneh, izgleda pa takole:



SI.1: Predstavitev elektromagnetnega valovanja v Wikipediji. Slika ne upošteva Faradeyevga zakona indukcije, kjer sprememba električnega polja povzroča spremembo magnetnega polja in obratno.

Prikaz na **SI.1** je po vsej verjetnosti nek rokohitrski administrator brez veliko razmišljanja zajel (le zakaj bi na novo risal, če ima na voljo 'copy-paste' ukaza?!) iz strani, ki obravnava polarizacijo elektromagnetnega valovanja s pomočjo dveh sofaznih električnih polj različnih amplitud (kjer slika ustreza vsebini), ter jo vnesel na navedeno stran (in še nekatere druge), s tem da je eno od komponent kar razglasil za magnetno polje (označeno z 'M', čeprav bi bilo ustrezneje uporabiti črko **H** za vektor magnetnega polja, tako kot je **E** oznaka za vektor električnega polja). Tak prikaz elektromagnetnega valovanja naj bi ustrezal ravninsko polariziranemu valu. Toda če polji nihata sofazno, potem je v trenutku, ko sta oba vektorja polj enaka nič, tudi energija polja enaka nič, pa tudi hitrost razširjanja valovanja je tisti hip enaka nič, in torej niha od nič do c , kar je fizikalni nesmisel!

Če naj slika upošteva Faradejev zakon indukcije, bi morala zgledati takole:



SI.2: Upoštevajoč Faradejev zakon indukcije dobimo nihanja polj, ki sta med seboj fazno zamaknjena za 90° in ležita v med seboj pravokotnih ravninah. Vendar v tem primeru niha tudi smer valovanja ('stacionarni val').

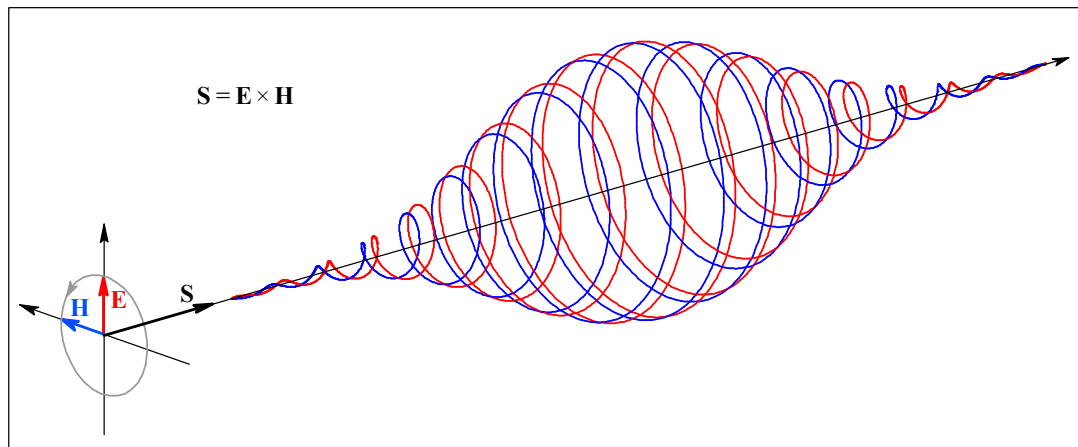
Vektorja električnega in magnetnega polja sta seveda med seboj navpična, a če upoštevamo Faradejev zakon indukcije sta med seboj fazno zamaknjena za 90° , **SI.2**. To sledi iz Eulerjevega izraza:

$$e^{j\omega t} = \cos \omega t + j \sin \omega t$$

Tu je frekvenca $\omega = 2\pi c/\lambda$, kjer je λ valovna dolžina, c pa svetlobna hitrost. Funkciji sinus in kosinus sta že po definicij fazno zamaknjena za 90° , $\cos \varphi = \sin(\varphi + 90^\circ)$, med

tem ko imaginarna enota $j = \sqrt{-1}$ ni nič 'imaginarnega', temveč predstavlja matematični izraz za rotacijo ravnine nihanja za 90° okoli smeri razširjanja valovanja. Smer razširjanja valovanja določa Poyntingov vektor $\mathbf{S} = \mathbf{E} \times \mathbf{H}$. Če obrnemo fazo ene od komponent, bodisi električne, bodisi magnetne, se smer razširjanja valovanja obrne; če pa obrnemo obe fazi hkrati, se smer ne spremeni, ker je produkt dveh negativnih velikosti pozitiven. A to pomeni da smer razširjanja valovanja na **SI.2** niha v pozitivno in negativno smer, $\pm c$, in je torej povprečna hitrost vala enaka nič ('stoječi val'). Zato tudi tak prikaz ni pravilen.

Če pa želimo (vsaj približno) ponazoriti kako naj bi izgledala prostorska razporeditev energijskega vektorja pri fotonu, ki kot nosilec elektromagnetnega polja predstavlja nekakšen elementarni elektromagnetni impulz, bi bila slika lahko taka:



SI.3: To ni foton, pač pa le grafični prikaz matematičnih odnosov v energijskem polju fotona!

Enačbi za električno in magnetno polje desno-sučnega krožno polariziranega fotona, ki potuje v mediju z magnetno permeabilnostjo μ in dielektrično permitivnostjo ϵ s hitrostjo $c = 1/\sqrt{\epsilon\mu}$ v smeri osi z , se glasijo takole:

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_0(x + jy)e^{-jk_z z} e^{-j\omega t}$$

$$\mathbf{H} = \mathbf{E}_0 \sqrt{\frac{\epsilon}{\mu}} (y - jx)e^{-jk_z z} e^{-j\omega t}$$

kjer je k_z karakteristično valovno število (v smeri osi z), valovna dolžina pa $\lambda = 2\pi c/\omega$, in efektivni radij (doseg polja pravokotno na os z) $r = \lambda/2\pi$. Podobne relacije veljajo tudi za levo-sučni foton. Ravninski val pa je vedno le linearna superpozicija velikega števila levo-sučnih in desno-sučnih fotonov. Ravninsko polariziranega fotona ni!

Na srečo v Wikipediji takih smešno-neumnih napak ni prav veliko. Večjo težavo predstavljajo tiste napake, ki jih ni mogoče odkriti že na prvi pogled. Zato naj pri branju katerega koli besedila (tudi tega!) velja pravilo:

Če česa ne razumete, obstaja 50% verjetnost, da je avtor besedila zagrešil napako!

Rojstvo 'fizikalnega' vacuuma

V teku XX stoletja je naše razumevanje fizikalnih pojmov 'snov' in 'prostor' doživelo temeljiti in presenetljivi preobrat.

V klasični, Galilejevi [3] in Newtonovi [4] fiziki, pa tudi še dandanes v običajnem pogovornem jeziku, doživljamo prostor v treh 'evklidskih' [5] razsežnostih kot prazen 'nič', ki mu šele prisotnost snovi daje fizikalni pomen.

Prvo spoznanje, da temu ni čisto tako je prišlo z razvojem termodinamike. William Thomson, poznejši Lord Kelvin [6], ki se ga danes najbolj spominjamo po njegovi 'absolutni' temperaturni lestvici, je s svojim delom odločilno prispeval k uveljavitvi ideje o temperaturi kot meri kinetične energije molekul plina, ki jo te prenašajo druga drugi s svojim nenehnimi medsebojnimi trki, ter trki s stenami posode v kateri je plin zaprt. Vendar je kmalu bilo ugotovljeno, da termometer v hermetično zaprti posodi še vedno kaže neko temperaturo, tudi če iz posode izčrpamo zrak. Zrakoprazna posoda ne prevaja zvoka, oziroma mehanske energije (pritiska), toda še zmeraj prevaja svetlobo in toploto, ter, kot je bilo ugotovljeno kasneje, tudi zelo dolge in zelo kratke valove elektromagnetnega spektra, od radijskih valov do žarkov γ (gr., 'gama'). Da sta svetloba in toplota le del elektromagnetnega spektra je, na podlagi Faradayevih [7] poskusov, dognal že Maxwell [8], dokazal pa Hertz [9].

Povezavo med temperaturo in sevanjem je leta 1900 podal Planck [10], ki je svoj znameniti zakon sevanja črnega telesa [11] izpeljal na podlagi domneve o kvantiziranosti energije sevanja. Kvantizacija v Planckovih relacijah nastopa v obliki energijsko-časovne konstante:

$$h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ Js} \quad (1)$$

ki danes nosi njegovo ime (Planck je izvirno uporabljal simbol b [12]). Ta konstanta določa minimalno količino energije, ki jo neko telo lahko sprejme ali odda v časovni enoti. Večje količine pa so vedno le celoštevilčni večkratniki te najmanjše količine.

Planckov zakon sevanja nakazuje, da je temperaturo, ki jo kaže termometer v vacuumski posodi, mogoče pripisati elektromagnetnemu valovanju, ki, očitno, ne potrebuje nikakršnega materialnega medija za razširjanje po prostoru.

Dolgo časa so sicer domnevali, da svetloba, kot vsa druga tedaj znana valovanja, za svoje razširjanje nujno potrebuje nekakšno prenosno sredstvo, ki so ga poimenovali 'eter' [13] (lat., *aether luminiferis*, iz gr., $\alpha\iota\theta\eta\rho$, to je snov, ki po grški mitologiji zapolnja nebeški prostor). Ker etra neposredno ni bilo mogoče zaznati, so mu mnogi pripisovali prav 'eterične' (nefizikalne) lastnosti.

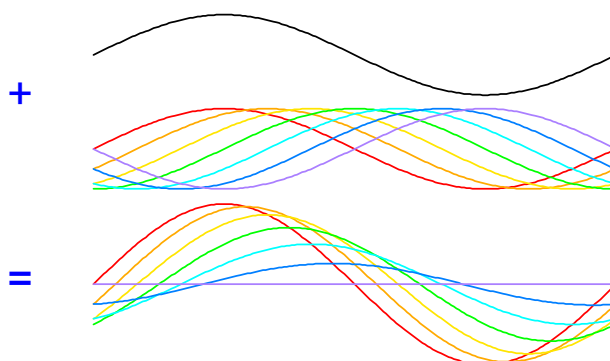
Poskusi dokazati obstoj etra so se vsi po vrsti izjalovili. Najbolj znameniti tak poskus [14] sta leta 1881 izpeljala, nato pa leta 1887 in kasneje, z izboljšanimi instrumenti večkrat ponovila Michelson [15] in Morley [16]. Domnevala sta, da bi z zadosti natančnimi meritvami odkrila spremembo svetlobne hitrosti² v odvisnosti od merilne smeri kot posledice gibanja Zemlje skozi domnevno nepremičen eter, in sicer za $\pm 463 \text{ m/s}$ na ekvatorju zaradi vrtenja Zemlje okoli polarne osi, ter za okoli $\pm 3 \times 10^4 \text{ m/s}$ zaradi gibanja Zemlje okoli Sonca (z današnjim znanjem astronomije bi

²Leta 1728 je James Bradley odkril pojav aberacije zvezd in prek tega pojava prišel do ocene svetlobne hitrosti od okoli 283,000 km/s, kar je za tiste čase bil izredno dober približek.

temu morali dodati okoli 2×10^5 m/s zaradi vrtenja naše galaksije ter verjetno okoli 6×10^5 m/s zaradi gibanja naše galaksije znotraj lokalnega jata galaksij, imenovanega 'Virgo Supercluster', katerega središče je v ozvezdju Device [17]).

Toda v primerjavi s hitrostjo gibanja Zemlje okoli Sonca je svetlobna hitrost zelo velika, $\sim 10\,000$ krat večja: mednarodni sistem merskih enot, SI [18], definira³ svetlobno hitrost kot $c = 299\,792\,458$ m/s [19], torej okrog 3×10^8 m/s. Zato pri merjenju z običajnimi instrumenti, kot sta jih pred tem izdelala Fizeau in Foucault [20], in katerih preciznost je le okoli 5%, ni bilo mogoče doseči zadosti velike natančnosti. Za zaznavanje vpliva gibanja Zemlje okoli Sonca na izmerjeno hitrost svetlobe bi potrebovali natančnost vsaj 0.01%. Zato sta se Michelson in Morley zatekla k interferometrični metodi [21].

Pojav interference valov (vseh, ne le svetlobnih!), **Sl.4**, je izredno pomemben in zasluži da mu odmerimo nekaj prostora. Z interferenco svetlobnih valov [22] so se ukvarjali mnogi raziskovalci. Prvi je ta pojav opazil verjetno že Galilei [3], kot je to mogoče slutiti iz nekaterih njegovih opisov leč in daljnogledov, ki jih je zgradil, toda ta podatek ni povsem zanesljiv. Različne interferenčne pojave so opisali Hooke [23], Grimaldi [24], Newton [25], ter Huygens [26]. Pojav pa je šele leta 1830 razložil Fresnel [27], in sicer na podlagi Huygensove domneve o valovni naravi svetlobe.



Sl.4: Interferenca valov. Amplituda vsote dveh sinusoidalnih valov, od katerih je drugi v primerjavi s prvim fazno zamaknjen za nek kot, bo odvisna od faznega zamika. Pri faznem kotu 0° (rdeča) sta valova sofazna in njuna vsota ima dvojno amplitudo. Če pa fazni kot povečujemo (na sliki si barve sledijo s 30° faznim zamikom) bo amplituda vedno nižja. Pri faznem zamiku 180° (vijolična) se valova potirata in je amplituda vsote enaka nič. **Pozor:** to pa ne pomeni da sta valova izginila! Če se, denimo, dva svetlobna žarka enake frekvence in amplitude prekrizata, bo na mestu križanja sicer prišlo do interference, vendar se bosta žarka potem spet 'čudežno' pojavila povsem neokrnjena!

Pojav interference je tudi potrditev domneve, da pri svetlobi gre v resnici za valovanje, kar je dokazal Young [28] s svojim znamenitim poskusom z dvojno režo [29]. Podoben poskus, vendar z uporabo elektronov namesto svetlobe, je kasneje postal temeljni dokaz, da tudi osnovni gradniki narave v določenih okoliščinah izkazujejo valovne lastnosti; temu se bomo še vrnili kasneje.

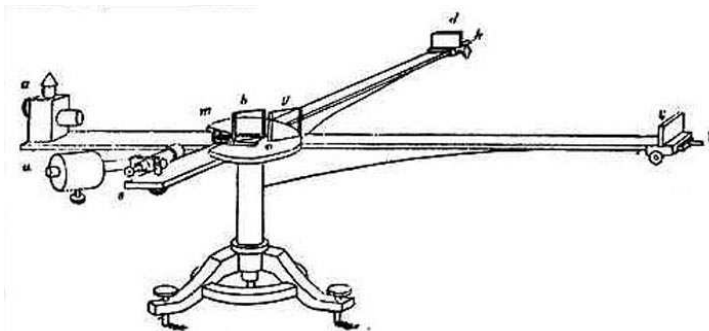
Treba je opozoriti, da valova, ki se v neki točki prostora potirata, ne izničita energije valovanja. Če bi, denimo dva svetlobna žarka enake intenzitete in frekvence v neki točki prostora prekrizali, bi na mestu križanja sicer opazili interferenco, vendar bosta oba žarka nemoteno nadaljevala svojo pot, kot če se ne bi križala! Fotoni, ki so

³ Pozor! Definicija c velja le v zemeljskem gravitacijskem polju na morski gladini!

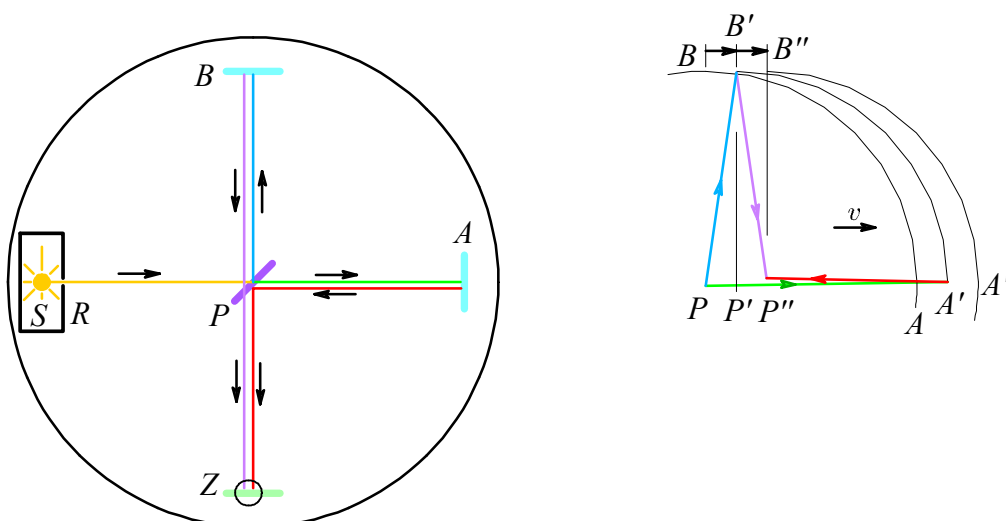
nosilci elektromagnetnega polja, sledijo Bose-Einsteinovi statistiki in se njihovi učinki lahko prosto superponirajo (fazno-vektorsko seštevajo).

Interferenca svetlobe nam omogoča merjenje razdalj na pol valovne dolžine natančno. Valovna dolžina rumene svetlobe, ki se standardno uporablja pri mnogih optičnih meritvah, znaša 555 nm. Svetlobni žarek razcepimo s pomočjo polprepustnih zrcal ali prizme, ter nato razcepljena žarka s pomočjo zrcal usmerimo na zaslon. Nato s štetjem svetlih in temnih interferenčnih črt lahko na četrto milijoninke metra natančno določimo za koliko smo eno od zrcal premaknili. Prav na takem štetju valov sloni tudi sodobna SI definicija metra [30], in sicer od leta 1960 dalje; prvi zagovornik take definicije osnovne dolžinske enote pa je bil prav Michelson, že leta 1893.

Michelson in Morley sta izdelala svoj prvi interferometer, **Sl.5**, leta 1881, vendar sta takoj ugotovila da za zastavljeno nalogo ni uporaben. Namreč, pri vrtenju okoli osi so se roke instrumenta preveč tresle in ni bilo mogoče zanesljivo šteti interferenčnih vzorcev. Zato sta zgradila nov instrument na osnovi trdne okrogle lesene mize, ki je plavala v kopeli živega srebra, poleg tega sta občutljivost izboljšala z uporabo večjega števila zrcal in tako z večkratnimi odboji podaljšala dolžino svetlobne poti. Navkljub tem predelavam je način delovanja instrumenta ostal nespremenjen in ga, sicer nekoliko poenostavljeno, predstavljamo na **Sl.6**.



Sl.5: Michelsonov in Morleyev interferometer iz leta 1881. Levo je vir svetlobe, v sredini sta polprepustni zrcali, zgoraj in desno pa navadni zrcali, spodaj pa zaslon in mikroskop.



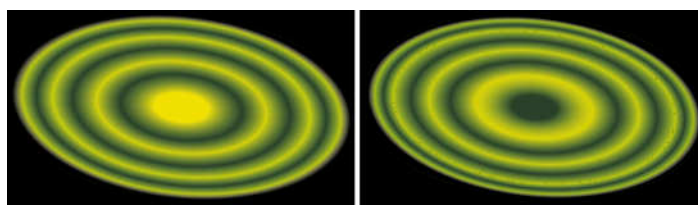
Sl.6: Poenostavljen prikaz delovanja interferometra Michelsona in Morleya. Monokromatski svetlobni vir S skozi odprtino R oddaja ozek svetlobni žarek, ki se na polprepustnem zrcalu P razcepi na dva žarka proti zrcalom A in B , kjer se odbijeta. Odbiti žarek zrcala B gre

skozi P na zaslon Z , odbiti žarek zrcala A pa se pri P odbije in tudi preusmeri na zaslon Z , kjer žarka tvorita inteferometrični vzorec.

Naj se interferometer (skupaj z Zemljo) giblje s hitrostjo v , in sicer v smeri PA . Med potjo svetlobe od P do A (in hkrati od P do B) se interferometer malenkostno premakne v položaj $P'A'B'$. Žarek, ki potuje proti zrcalu A , bo zaradi tega zadel zrcalo šele v točki A' , ter se vrnil do zrcala P ko bo ta že v P'' . Pot proti A bo daljša za razdaljo AA' , vendar bo pot nazaj krajša za razdaljo $P'P''$, ta pa (če se dolžina PA ne spreminja in je hitrost v konstantna) je enaka AA' . Skupna pot bo torej $2PA$, ne glede na to ali se interferometer (in tudi Zemlja) premika, ali ne.

Drugače pa je z žarkom, ki potuje do zrcala B in nazaj. Zaradi premikanja interferometra prečno na smer žarka bo pot daljša od $2PB$, in sicer po Pitagori: $PB' = \sqrt{(PB)^2 + (PP')^2}$, ter enako nazaj od B' do P'' , skupno torej $2PB'$.

Pravzaprav nas niti ne zanima natančna razlika obeh poti, $2PA$ in $2PB'$. Pomembno je le naslednje: če interferometer zavrtimo v smeri urnega kazalca za 90° , bosta smeri PA in PB zamenjali vlogi in, ker sta svetlobne poti različno dolgi, se mora tudi interferometrični vzorec spremeniti. Michelson in Morley sta pričakovala da bosta opazila spremembo vzorca kot je narisano na **Sl.7**.



Sl.7: Pričakovani zamik interferometričnega vzorca, kot naj bi bil viden s pomočjo interferometra Michelsona in Morleya.

Izmerjeni zamiki interferometričnih vzorcev so sicer kazali nekaj stresanja, a bistveno manj od pričakovanega, oziroma, po mnenju Michelsona in Morleya, znotraj sistemske merilne napake [31]. Kasneje so še drugi raziskovalci poskušali meritev ponoviti z vedno boljšimi interferometri, a — vsaj zdi se tako — brez uspeha.

Ponujenih je bilo več možnih razlag za tak nepričakovan izid. Že Michelson in Morley sta sama razmišljala o možnosti, da Zemlja s svojo gravitacijo 'vleče' eter za seboj [31] tako, da ob njeni površini miruje. Drugi so predlagali možnost, da Dopplerjev [32] učinek [33] kompenzira zakasnitev zaradi razlike v hitrosti. Nazadnje pa je leta 1889 FitzGerald [34] domneval, da se dolžina interferometra skrči v smeri gibanja za natančno tako dolžino, da izniči pričakovani rezultat. Do take domneve je prišel na podlagi enačb, ki jih je izpeljal njegov prijatelj Heaviside [35], ko je izpopolnil Maxwelllovo teorijo elektromagnetnih polj.

Na podobno idejo je leta 1892 prišel tudi Lorentz [36], ki jo je tudi poglobil in izpopolnil [37] v povezavi s svojo teorijo o elektronih. Ta razlaga je nato postala ena izmed podlag na katerih je Einstein [38] izpeljal posebno relativnostno teorijo [39], [40]. Tako je po letu 1905 večina fizikov, najprej z začudenjem, nato pa z olajšanjem, sprejela Einsteinovo razlago negativnega izida poskusov Michelsona in Morleya, ki pravi, da se elektromagnetno valovanje razširja s konstantno hitrostjo, ne glede na hitrost svetlobnega vira in prav tako ne glede na hitrost opazovalca.

Obenem iz Einsteinove razlage sledi, da elektromagnetno valovanje ne potrebuje nikakršnega materialnega prenosnega medija, ter posledično da eter ne obstaja. Pravzaprav je temelj na katerem stoji celotna relativnostna teorija prav Einsteinova domneva o invariantnosti (nespremenljivosti) svetlobne hitrosti za vse opazovalce, ne glede na to ali se gibljejo relativno glede na izvir svetlobe, ali ne. Ali, drugače povedano, vsi opazovalci, pa naj bodisi mirujejo, bodisi se enakomerno gibljejo relativno drug do drugega, ali glede na svetlobni vir, s kakršno koli hitrostjo, bodo vedno izmerili enako vrednost svetlobne hitrosti.

Čeprav se je Einsteinova relativnostna teorija razmeroma hitro uveljavila in stoji dokaj trdno še danes [41], so ji nekateri ostro nasprotovali (zlasti nekateri nemški fiziki v obdobju nacizma, ki so relativnost imeli za 'judovsko fiziko'). Mnogi so še naprej zagovarjali obstoj etra in nekateri zagovorniki 'alternativnih' teorij še danes menijo enako, ter celo razglašajo rezultate Michelsona in Morleya za sporne iz vrste različnih razlogov [42]. Večina fizikov pa je idejo o etru zavrgla.

Toda eter se je, sicer v popolnoma drugačni obliki od klasične (in tudi z drugačnim imenom), vrnil kot bumerang v 'standardno' teorijo, najprej skozi Einsteinove prispevke kvantni teoriji [43], nato pa še skozi njegovo splošno relativnostno teorijo [44].

Že proti koncu XIX stoletja so poskusi merjenja temperature v vacuumu pokazali, da prazen prostor energije ne le prevaja, temveč se obnaša kot da dejansko vsebuje neko merljivo termično energijo tudi takrat, ko je posoda zatemnjena in dobro izolizana od okolice, ter ohlajena skoraj do absolutne ničle. Na osnovi tega se je te energije prejelo ime 'energija ničelne točke', [45] (ang., *Zero-Point Energy*, ZPE; v obeh primerih gre za neroden, dobesedni prevod iz nemščine, *Nullpunktsenergie*; čeprav bomo še naprej uporabljali okrajšavo ZPE predvsem iz zgodovinskih razlogov, bi bilo fizikalno bolj pravilno uporabljati izraz 'energija polarizabilnega vacuuma', ali preprosto 'osnovna energija').

Po neki zgodovinski ironiji je bil prav Einstein tisti, ki je pojav poimenoval. Skupaj s Sternom [46] sta leta 1913 objavila analizo [47] o interakciji med snovjo in sevanjem z uporabo dipolnega oscilatorja kot modela za par komplementarno nabitih delcev (pristop, ki sloni izključno na klasični fiziki). Ena pomembnejših ugotovitev te analize se glasi, da tak dipolni oscilator mora imeti neko osnovno, od nič različno energijsko stanje $h\nu$ (kjer je h Planckova konstanta [48] in ν frekvenca nihanja dipola), iz česar je možno izpeljati Planckov zakon sevanja črnega telesa [11], *ne da bi sploh bilo potrebno predhodno privzeti domnevo o kvantizaciji energije*.

Predno to podrobneje razložimo, se moramo na kratko vrniti v XIX stoletje in problemu sevalnega spektra črnega telesa. Že v XIX stoletju je bilo ugotovljeno, da le telesa s popolnoma črno površino tudi popolnoma absorbirajo svetlobno energijo in jo vso pretvorijo v toploto (če neko telo del vidnega spektra odbija, to pač zaznamo kot 'barvo' tega telesa). Prav tako pa je bilo ugotovljeno, da je proces absorpcije svetlobe reverzibilen: črno telo, ogreto na neko temperaturo T , izseva enako količino energije, kot bi jo absorbiralo isto telo, ki bi se zaradi enake količine sprejete energije segrelo na enako temperaturo. Jožef Stefan [49] je leta 1879 eksperimentalno ugotovil, da je energijska gostota sevanja črnega telesa sorazmerna četrti potenci temperature:

$$j = \sigma T^4 \quad (2)$$

Stefanov učenec Boltzmann [50] je leta 1884 rezultat tudi teoretično izpeljal. Stefanova konstanta proporcionalnosti σ je bila kasneje določena na podlagi drugih osnovnih naravnih konstant [51]:

$$\sigma = \frac{2\pi^5 k_B^4}{15 c^2 h^3} = 5.670400 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4} \quad (3)$$

kjer je k_B Boltzmannova konstanta:

$$k_B = 1.3806504 \times 10^{-23} \text{ W s K}^{-1} \quad (4)$$

Spekter (odvisnost intenzitete od frekvence) sevanja črnega telesa so tradicionalno preučevali s pomočjo 'kavitacijskega sevalnika', votle kroglaste posode s črnimi notranjimi stenami, ki skozi majno izvrtino v steni oddaja energijo iz notranjosti. Leta 1893 je Wien [52] objavil izkustveno izpeljano formulo za izračun gostote izsevane energije na volumsko enoto v odvisnosti od temperature. Vendar se je hitro izkazalo, da pri dolgih valovnih dolžinah izračun po formuli odstopa od izmerjenih vrednosti, kar so preverili in potrdili še drugi raziskovalci v letih 1898 in 1899. Za to odstopanje sta leta 1905 Rayleigh in Jeans [53] predlagala drugačen izračun, a za tega se je izkazalo, da nedopustno odstopa na kratkih valovnih dolžinah, kar je postalo znano kot 'ultra-violična katastrofa' [54]. Ta je predstavljala le eno od kritičnih točk fizike na prelomu stoletja, vse skupaj pa je nakazovalo, da v okviru klasične teorije ni možno ponuditi ustrezne razlage za nekatere pomembne pojave.

Planck se je s sevanjem črnega telesa ukvarjal že od leta 1894. V letih 1900 [55] in 1901 [56] je objavil članka s svojo rešitvijo problema, ki se je popolnoma ujemala z eksperimentalnimi podatki. Kot smo že omenili, je njegova rešitev slonela na domnevi, da je valovna dolžina sevanja vedno nek celoštevilčni večkratnik neke osnovne valovne dolžine tako, da izsevano energijo W lahko zapišemo kot:

$$W = h\nu = h \frac{c}{\lambda} \quad (5)$$

kjer je ν frekvenca valovanja, λ je valovna dolžina, h je Planckova konstanta in c je svetlobna hitrost.

S tem je Planck dejansko vpeljal kvantizacijo energije v teorijo. Zaradi kvantiziranosti se frekvenca, oz. valovna dolžina, ne more spreminjati zvezno, temveč le v celoštevilčnih kvantnih skokih. Planck sam se tega takrat ni zavedal, a vendar je nagonsko čutil, da nekaj ni v skladu s klasičnimi zakoni in je celotno naslednje desetletje bil prepričan, da je izraz (5) le nekakšen matematični pripomoček, ne pa fizikalna realnost.

Da gre za kvantizacijo v temeljnem fizikalnem smislu je postalo jasno šele Einsteinu, ki je leta 1905 ob študiju foto-električnega učinka [43] predlagal model, po katerem snov ne le oddaja, pač pa tudi absorbira energijo v kvantih (Compton [57] jih je leta 1927 poimenoval 'fotoni' [58], iz gr., $\varphi\omega\varsigma$, 'fos', svetloba). Vendar se Einstein s tem ni podrobneje ukvarjal vse do leta 1924, ko je Bose [59] na enaki podlagi razvil statistično mehansko teorijo fotonov, po kateri je postalo mogoče izpeljati Planckov zakon sevanja zgolj teoretično, iz osnovnih načel, ne da bi bilo treba vnaprej privzeti kakšnih posebnih predpostavk.

Planckov zakon sevanja ponavadi zapišemo kot odvisnost spektralne gostote energije sevanja od frekvence sevanja ν in temperature T :

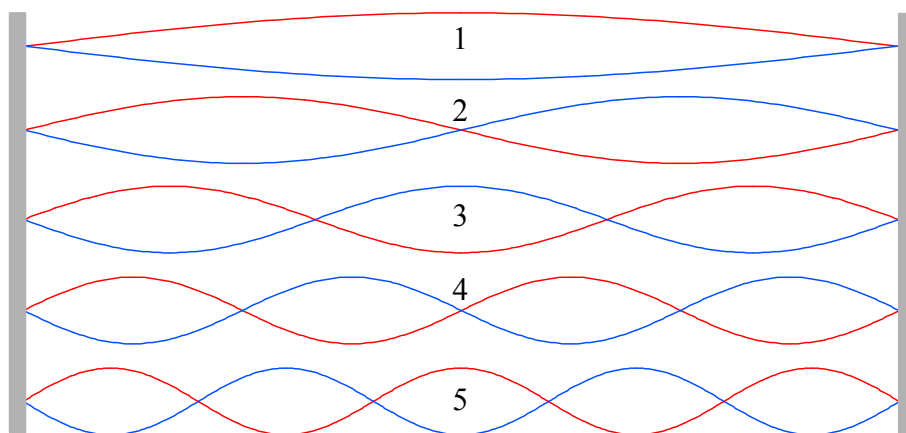
$$\rho(\nu, T)d\nu = 8\pi h \left(\frac{\nu}{c} \right)^3 \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{k_B T}} - 1} d\nu \quad (6)$$

Postopek izpeljave je relativno dolg in se z njim ne bomo ubadali, bolj radovedni bralci naj si ogledajo spletni naslov [60]. Moramo pa opozoriti na izhodišče izpeljave.

Zamislimo si votlo kovinsko kocko s stranico L , ki je zapolnjena z elektromagnetnim sevanjem. Ker je kovina prevodna, morajo na njeni površini nastati vozlišča 'stojnih' (vpadnih in odbitih) valov, kar pomeni, da vse s površino vspeoredne komponente električnega polja morajo biti enake nič, magnetne komponente pa se podvojijo. Polja, prisotna znotraj škatle, so zato rezultat preproste superpozicije harmoničnih funkcij (seštevanja in odštevanja elektromagnetnih valov sinusoidalne oblike). Valovna dolžina λ_i v vsaki od treh prostorskih smereh navpično na površino stranice kocke je zato lahko le:

$$\lambda_i = \frac{2L}{n_i} \quad (7)$$

kjer je n_i tako imenovani 'modus' nihanja. Pri $n_i = 1$ bomo imeli najnižjo možno frekvenco, z valovno dolžino $2L$, ker se val odbije od stene v protifazi in niha podobno kot struna klavirja ali kitare. Pri $n_i = 2$ dobimo drugo harmonsko komponento, pri $n_i = 3$ tretjo, in tako naprej, **SI.8**.



SI.8: Prvih pet modusov nihanja v zaprtem sistemu. Rdeče je vpadni val, modro reflektirani val.

Modusi se matematično (kot tudi v okviru tako klasične kot kvantne fizike) nadaljujejo v neskončnost, fizikalno (v novejših teorijah) pa le do neke najvišje možne frekvence, ki je fizikalni zakoni (kvantizacija!) še dopuščajo.

Ostale vmesne frekvence niso v celoštevilčnem razmerju z osnovno frekvenco in niso med seboj fazno usklajene, zato s časom interferirajo, ter se med seboj potrejo, ali pa zaradi fazne neusklajenosti ob trkih s stenami posode s časom izgubljajo energijo. Tako je možno izraz za energijo zapisati kot:

$$W_{n_1, n_2, n_3}(r) = \left(r + \frac{1}{2} \right) \frac{hc}{2L} \sqrt{n_1^2 + n_2^2 + n_3^2} \quad (8)$$

Tukaj je r kvantno število, ki predstavlja število fotonov v posameznem modusu nihanja $n_{1,2,3}$ za vsako od treh prostorskih razsežnosti. Sedaj pa ohladimo našo škatlo do absolutne ničle. Med ohlajevanjem se energija fotonov v notranjosti prenaša na stene posode, od koder jo 'posrka' ohlajevalni sistem. Če sedaj predpostavimo da fotonov ni več, torej je $r = 0$, pa **energija ne bo enaka nič**: v izrazu za energijo (8) še vedno ostane prispevek sorazmeren z $\frac{1}{2}h\nu$ (kjer je $\nu = c/2L$). Prav ta prispevek pa je jedro Einsteinove ideje o obstoju energije ničelne točke, oziroma ZPE.

Kot smo že omenili, Planck ni bil zadovoljen s svojo kvantno teorijo, čeprav ga je Einstein prepričeval v njeno pravilnost. Še naprej je iskal drugačne rešitve in končno v letih 1910-1911 izoblikoval svojo 'drugo' kvantno teorijo, v kateri je domneva o kvantizaciji energije postavljena nekoliko šibkeje, oziroma ni nujno del izhodiščnih pogojev. Enačba za povprečno energijo oscilatorja v ravnovesju s sevalnim poljem pri temperaturi T , objavljena leta 1912 [61], še vedno ima isti temperaturno odvisen člen iz 'prve' teorije, vendar sedaj vsebuje še dodaten, temperaturno neodvisen $\frac{1}{2}h\nu$ člen, ki prvič neposredno kaže na obstoj enakomernega in prostorsko izotropnega energijskega ozadja v smislu ZPE:

$$\begin{aligned} U(\nu) &= \frac{1}{2}h\nu \frac{e^{\frac{h\nu}{2k_B T}} + e^{-\frac{h\nu}{2k_B T}}}{e^{\frac{h\nu}{2k_B T}} - e^{-\frac{h\nu}{2k_B T}}} = \frac{1}{2}h\nu \coth \frac{h\nu}{k_B T} \\ &= \frac{1}{2}h\nu \frac{e^{\frac{h\nu}{k_B T}} + 1}{e^{\frac{h\nu}{k_B T}} - 1} = \frac{h\nu}{e^{\frac{h\nu}{k_B T}} - 1} + \frac{1}{2}h\nu \end{aligned} \quad (9)$$

Zaradi temperaturno neodvisnega člena $\frac{1}{2}h\nu$ ima potem tudi energijska spektralna gostota $\rho(\nu)$ pri $T = 0$ K naslednjo obliko:

$$\rho(\nu)d\nu = 2h\left(\frac{\nu}{c}\right)^3 d\nu \quad (10)$$

torej je sorazmerna s tretjo potenco frekvence ν . Kot bomo videli kasneje, ima taka zakonitost izredno pomembne posledice pri nekaterih drugih teoretičnih izpeljavah.

Navdihnjen s tem razvojem je Bohr [62] leta 1913 kvantiziral energijske nivoje [63] v nekaterih najlažjih atomih na osnovi Planckove konstante h in dobil svoj znameniti model atoma [64], [65]. Vendar je še desetletje za tem previdno poudarjal, da se njegov model atoma sklada s klasično fiziko le, če so kvantna števila visoka [66] (danes je to znano kot 'načelo korespondence' [67]). Bohrov model atoma je takoj požel uspeh, ker je lahko pojasnil Rydbergovo formulo [68] absorpcijskega spektra vodika, ki je bila že znana, a do takrat ni uživala velikega zaupanja v strokovnih krogih. Kasneje pa se je izkazalo, da Bohrov model vendarle ne more pojasniti vpliv nekaterih drugih pojavov (spin, kvantno nedoločenoost, sipanja zaradi 'fine strukture', itd.), zato je bil kmalu nadomeščen z ustrežnejšim.

Prve posredne eksperimentalne potrditve ZPE

Leta 1916 je Nernst [69] resno vzel tako Planckovo 'drugo' teorijo, kot tudi Einsteinov in Sternov predlog, ter ugotovil, da bi vesoljski prostor lahko bil poln ogromnih količin sevanja zaradi ZPE. Po nekaterih izračunih je danes v Vesolju prisotnih $\sim 10^5$ fotonov na vsak atom, kjer upoštevamo elektromagnetno energijo pri temperaturah večjih od 0 K. Toda to je le šibko 'dodatno' sevanje; ZPE pa predstavlja osnovno energijo prostora pri natanko 0 K. Nernst je uvidel, da oba omenjena predloga dejansko zahtevata kozmološki izvir ZPE [70]. Vendar se do takrat ZPE ni pojavljala nikjer, razen v nekaterih enačbah, nobenega eksperimentalnega namiga o njenem obstoju ni bilo. Kljub temu je obstajala trdna teoretična podlaga, ki je upravičevala, ter celo zahtevala obstoj ZPE, in ki je ni bilo mogoče spregledati.

Tako je leta 1911 Lorentz, ki se, mimogrede, nikoli ni zares pustil prepričati argumentom posebne relativnostne teorije, pisal: *"... kar relativnostna teorija pravi... lahko neodvisno izpeljemo iz nekaterih zamisli o etru in času. ... Ne glede na to ali obstaja nekaj podobnega etru ali ne, so elektromagnetna polja resnična, prav tako tudi energija elektromagnetnih oscilacij. ... Če nam beseda 'eter' pač ni všeč, moramo uporabiti kakšno drugo ime s katerim bomo označili pojave s tem v zvezi. ... Nosilcu teh lastnosti ni mogoče zanikati določene materialne realnosti in, če je že tako, lahko z vso skromnostjo zatrdimo, da je 'pravi čas' tisti, ki ga merijo ure, ki so fiksne v tem mediju, ter sočasnosti dogodkov (simultanosti) lahko dodelimo primarni konceptualni pomen."*

Pod težo teoretičnih argumentov je tudi sam Einstein spremenil mnenje o etru in je v predavanju ob svoji slovesni umestitvi na Leidenski univerzi leta 1920 poudaril, da 'prazen' prostor *"nedvoumno izkazuje fizikalne lastnosti"*. Še bolj neposreden je njegov komentar o etru [71]: *"... zato sem leta 1905 menil, da v fiziki sploh ne bi smeli govoriti o etru. Ta sodba je bila nekoliko pretirana, kot bomo videli iz naslednjih premislekov o splošni relativnostni teoriji. Sveda je še naprej dovoljeno privzeti nekakšen prostor zapolnjajoč medij, čeprav ne nujno materialen v običajnem pomenu besede, katerega obstoj pogojuje prisotnost elektromagnetnih polj."*

Kasneje je cela vrsta uglednih fizikov podprla podobna mnenja, celo sam Dirac je leta 1951 v članku objavljenem v reviji Nature z naslovom "Ali eter res obstaja?" zapisal: *"... z vidika moderne teorije o elektrodinamiki smo prisiljeni privzeti domnevo o etru."* Kljub temu se velika večina fizikov s takim razmišljanjem ni strinjala.

Do prve (posredne) eksperimentalne potrditve obstoja ZPE je prišlo leta 1925, ko je kemik Mulliken [72] analiziral absorpcijski spekter molekul borovega monoksida in borovega nitrda in odkril majhne odmike od teoretično predvidenih frekvenc. Te je mogoče pojasniti le kot posledico prisotnosti ZPE, ki rahlo spremeni energije elektronskih orbital, zato elektron pri preskoku med dvema orbitalama seva z opazno drugačno frekvenco od tiste, ki jo predvideva teorija brez vpliva ZPE.

Leta 1947 sta Lamb in Retherford [73] odkrila podobne zamike v vodikovem spektru s pomočjo tehnologije ki so jo razvili za radar. Istega leta je Bethe [74] pojasnil Lambov zamik s stališča kvantne elektrodinamike (QED) in od takrat je to odkritje citirano kot dokaz obstoja ZPE. Kot je izjavil sam Lamb, gre za *"eksperimentalni dokaz, da (popolni) vacuum ne obstaja"*.

Fizika na razpotju

Nekako do leta 1925 je razvoj fizike potekal vzporedno po dveh poteh. Nekatera odkritja so bila pojasnjena na podlagi Planckove 'prve' teorije, nekatera pa na podlagi 'druge', nobena od teh poti pa ni imela izrazite prevlade in nadaljnji razvoj bi lahko potekal po kateri koli od obeh, ali morda vmes. Vendar je v kratkem času prišlo do štirih odkritij, ki so prevesili tehtnico na stran Planckove 'prve' teorije.

- Najprej je leta 1924 de Broglie [75] predlagal možnost, da delcem predpišemo energiji ustrezno valovno dolžino. Prav tako kot poskusi kažejo, da se elektromagnetno valovanje v določenih okoliščinah obnaša kot 'delec', kažejo namreč delci v nekaterih okoliščinah lastnosti 'valov', če omenimo le interferenčno sipanje elektronov na kristalni mreži, na primer. Kot je ugotovil de Broglie, je možno delcu z mehanskim momentom p pripisati valovno dolžino $\lambda = h/p$.

- Nato so leta 1925 Born [76], Heisenberg [77] in Jordan [78] izpeljali nekatere pomembne matrične relacije, ki so postale osnova 'kvantne mehanike' (*quantum mechanics*, QM), nakar je Dirac [79] oblikoval svojo različico [80], potem ko je dobil priložnost vpogleda v njihovo delo pred objavo. Kasneje, leta 1928, je Dirac oblikoval še svojo 'relativistično kvantno mehaniko' [81].

- Potem ko se je nekaj časa ubadal s pomenom de Brogliejevega predloga je Schrödinger [82] leta 1926 predlagal 'valovno-mehansko' teorijo vodikovega atoma, iz katere je sledila znamenita Schrödingerjeva enačba [83].

- Leta 1927 je Heisenberg objavil svoje 'načelo nedoločenosti' [84].

Načelo nedoločenosti pravi, da je zmnožek nedoločenosti časa opazovanja in nedoločenosti energije nekega delca vedno večji ali k manjšemu enak Planckovi konstanti h deljeni z 2π , oziroma $\hbar$ v Diracovem zapisu:

$$\Delta W \cdot \Delta t \geq \hbar \quad (11)$$

Prav tako pa je zmnožek nedoločenosti položaja in nedoločenosti mehanskega momenta lahko le večji ali vsaj enak $\hbar$:

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \hbar \quad (12)$$

Ta nedoločenost je temeljna spodnja meja natančnosti do katere je še mogoče izmeriti nekatere fizikalne količine, ki nastopajo v atomskih in sub-atomskih procesih. Ko pa uporabimo to relacijo za delce pri absolutni temperaturni ničli, teoretično, tudi če položaj delca skušamo popolnoma določiti, njegovega momenta ni mogoče poznati natančno, vemo le, da mora biti večji od nič. Podobno pa je, če skušamo delcu zmanjšati moment: takrat je delec 'lahko hkrati kjerkoli'.

Da ne bi bilo pomote: nekateri fiziki so bili mnenja, da gre pri tem predvsem za 'nedoločljivost' v smislu naše nezmožnosti natančno izmeriti določene fizikalne količine hkrati. Pa temu ni tako: gre za resnično fizikalno omejitev, 'vgrajeno' v naravne zakonitosti! Zato govorimo o 'nedoločenosti' in ne o 'nedoločljivosti'.

Kot že rečeno, je Dirac (potem ko je v delu Borna, Heisenberga in Jordana zagledal nekatere enačbe, ki se se mu zdele podobne nekaterim klasičnim enačbam) izpeljal svojo različico kvantne mehanike. Izhajajoč iz relativistične relacije za celotno

(lastno, oz. 'mirovno', in kinetično) energijo delca, je prišel do sklepa, da, poleg delcev s pozitivno energijo, mora formalno obstajati neskončno 'morje' negativne energije [85] v katerem se delci s pozitivno energijo nahajajo, oziroma da mora veljati $E = \pm mc^2$. Prostor z neskončno gostoto enegrije si je težko predstavljati, a naj ne bi bil nemogoč, ker tako ali tako ni možno zaznati absolutne energije, možno je zaznati le energijsko razliko. Vendar je Dirac kmalu opustil to zamisel in napovedal, da delci z negativno energijo dejansko predstavljajo neke vrste 'anti-snov'. Ta domneva je bila potrjena dve leti kasneje z Andersonovim [86] odkritjem pozitrona [87], ki ima vse lastnosti elektrona [88], razen nasprotnega naboja. Kasneje je prišlo še do odkritja antiprotona in cele vrste mezonov, ki so tudi lahko imeli komplementarni naboj. Izkazalo se je tudi, da Diracovo 'morje', bolj kot vesoljski prostor, lepo ponazori dogajanje v kovinah in polprevodnikih, kjer so prosti elektroni 'potopljeni v morju' pozitivnega naboja atomskih jeder. Vseeno, ideja o prostoru ki vsebuje energijo je ostala. Namreč, kvantna mehanika z načelom nedoločenosti zahteva, da tudi pri absolutni ničli morajo delci še vedno imeti nek mehanski moment, zato tudi morajo imeti od nič različno energijo. Enak argument velja tudi za elektromagnetna polja, oziroma za fotone. Tako, čeprav je vpeljana le posredno preko načela nedoločenosti, predstavlja ZPE neizogibno posledico kvantnega pristopa problemu.

Natančneje povedano, izvor ZPE ima v tem pristopu zagovornike iz nekaj različnih 'šol', ki to idejo tudi različno tolmačijo. Tako ena šola pravi, da je ZPE le posledica kvantno-mehanskih lastnosti delcev in načela nedoločenosti preprosto zato, ker kvantne zakonitosti tako zahtevajo. Zaradi tega nekateri zagovorniki te teze razpravljajo ali tukaj nemara gre le za matematični konstrukt, ki se ga, z uporabo matematičnega aparata kakršnega zaenkrat imamo, preprosto ne moremo znebiti. Ostali trdijo, da vseeno gre za realno fizikalno lastnost delcev.

Druga šola pravi, da vsak delec pri svojem gibanju seva elektromagnetna polja in, ker noben delec v Vesolju ne more mirovati, naj bi ZPE zato bila le vsota sevanja vseh delcev v Vesolju. To zveni kot neke vrste samo-regenerirajoča se kozmološka povratna vez: *gibajoči se delci povzročajo ZPE, ta pa moti njihovo gibanje*. Zagovornike tega pogleda najdemo med relativisti, a ne toliko zaradi teorije same, pač pa bolj po analogiji z Einsteinovo splošno relativnostno teorijo, kjer *masa pove prostoru kako naj se upogne, upognjeni prostor pa pove masi kako naj se giblje*.

V nasprotju s temi, tretja šola, ki izhaja iz Planckove 'druge' teorije [61], ponuja obratno razlago: ZPE ima kozmološki izvir (od nastanka Vesolja) in njena prisotnost vpliva na obnašanje delcev, ter, kot bomo videli kasneje, morda tudi sploh omogoča obstoj delcev!

A razvoj znanosti ne poteka premočrtno (rekli bi lahko, da ima, kot kvantni pojavi, 'vgrajeno' Brownovo gibanje!) in tudi predvideti ga je sila nevhvaležno, tako na kratek kot tudi na daljši rok. Posledično do nekaterih odkritij prihaja 'prezgodaj', ko še nimamo dovolj podatkov za celovito obravnavo problema, zaradi česar smo prisiljeni sprejemati vnaprejšnje domneve, ki nam pomagajo teorijo vskladiti z opazovanji; ravno tako do nekaterih odkritij pridemo 'prepozno', ko smo že določeno teorijo izoblikovali in smo nato prisiljeni vpeljati ustrezne spremembe, ali pa v najslabšem primeru teorijo popolnoma opustiti.

Mnogo pred Lambovim znamenitim odkritjem [73] je prišlo do odkritja elektronovega spina [89], in Pauli [90] je postuliral svoje 'izključitveno načelo' [91], kar je pripomoglo k rojstvu 'kvantne elektrodinamike' (QED) [92]. Ta je kmalu

postala dominantna in tudi zelo uspešna pri razlagi in izračunih mnogih pojavov, četudi so njenim metodam in ugotovitvam ugovarjala tako znana imena kot sta Planck in Einstein. Legendarna je postala Einsteinova pripomba Bohru na račun nedoločenosti in statistične obravnave: “*Bog ne kocka!*”, ter Bohrov odgovor: “*Ti pa mu nehaj predpisovati kaj sme in česar ne!*”, [93] (seveda je v tem kontekstu besedo ‘Bog’ treba razumeti v smislu naravnih zakonitosti).

Einstein je Bohru očital predvsem ustrajanje na tako imenovani ‘Copenhagenski interpretaciji’ [94] kvantne mehanike, po kateri “*nič ne obstaja dokler ni izmerjeno*”. Namreč, po de Broglieu, vsak kvantni delec ima svojo ‘lastno valovno funkcijo’, Ψ , kvadrat katere predstavlja verjetnost, da ta delec najdemo v neki točki prostora. Ta verjetnost je v vsaki točki prostora od nič različna, vse do takrat, ko z meritvijo delec zaznamo, nakar lahko z gotovostjo ($\Psi^2 = 1$) rečemo, da se je delec v trenutku meritve nahajal natanko tam in nikjer drugje. Copenhagenska interpretacija kvantne mehanike temu pravi, da prostorska razporeditev valovne funkcije doživi ‘kolaps’ [95], ko se iz prisotnosti ‘pomalem vsepovsod’ spremeni v prisotnost ‘tukaj’.

Kot dokaz, da kvantna mehanika ne more biti popolna teorija, so Einstein, Podolski in Rosen formulirali znameniti miselni eksperiment, ki je postal znan kot ‘EPR-paradoks’ [96], vendar so kasneje praktični preskusi veljavnosti ‘Bellove neenačbe’ [97] z uporabo med seboj na daljavo ‘povezanih’ oziroma ‘prepletenih’ delcev (ang., *entangled particles*) podprli predvidevanja kvantne mehanike. Einstein je sicer ustrajal pri svojem videnju problema, kritiziral ta ‘strašljivi’ vpliv na daljavo (ang., ‘*spooky action at a distance*’), ter do konca svojega življenja poskušal najti drugačne rešitve, a v tem je bil vedno bolj osamljen in odrinjen na stranski tir.

Ironično pa je, da je tudi Bohrova interpretacija bila načelno napačna, vendar ne s stališča, ki ga je zastopal Einstein, temveč zaradi popolnoma drugega razloga. Namreč, ena od osnovnih postavk ‘Copenhagenske šole’ je ta, da je treba opazovani delec obravnavati po zakonih kvantne mehanike, med tem ko naj bi bilo dovoljeno eksperimentalni aparat in tudi samega eksperimentatorja obravnavati klasično. To nujno pripelje do nerešljivih paradoksov. V Vesolju pač ni ‘klasičnih’ sistemov, vsi sistemi, tudi tisti, ki se na makroskopski ravni obnašajo navidez klasično, so dejansko na mikro ravni kvantizirani in take so tudi njihove interakcije. Žal je to bilo razumljeno šele okoli leta 1980, po mnogih stranpoteh in neuspešnih poskusov uskladiti statistično obnašanje narave z nekaterimi temeljnimi vzročno–posledičnimi načeli, ki se jih fizika mora držati (glej primerjalno tabelo različnih šol in filozofij v [98]).

Kot piše nobelovec Weinberg leta 2005 v članku s pomenljivim naslovom ‘Einsteinove napake’ [99]: “*Copenhagenska interpretacija opisuje kaj se dogaja, ko nek opazovalec opravi meritev, vendar sta opazovalec in sam postopek merjenja obravnavani klasično. To je zagotovo napačno: na fizike in njihove instrumente morajo vplivati iste kvantnomehanske zakonitosti, ki vladajo vsem drugim delcem v Vesolju. Toda te zakonitosti so izražene v obliki valovnih funkcij (bolj natančno, z vektorji stanj), ki pa se razvijajo popolnoma deterministično.*”

Žal so nekateri predstavniki Copenhagenske šole v svojih filozofskih implikacijah šli tako daleč, da so, denimo, zatrjevali kako vsak elektron v poskusu z difrakcijo [100] že vnaprej ‘ve’ skozi katero izmed dveh odprtini so šli ostali elektroni, ne le tisti pred njim, marveč tudi tisti, ki mu bodo šele sledili, in to naj bi ‘vedeli’ vsi elektroni že od nastanka Vesolja! Nič čudnega če je potem David Mermin strogo posvaril svoje kolege: “*Molči in računaj!*”, kar je v glavnem obveljalo do današnjih

dni (od tega navodila danes opazno odstopajo nekateri predstavniki teorij ‘membranskih’ svetov, ki trdijo, da je naše Vesolje le eno od skupno $\sim 10^{500}$!!!; toda, resnici na ljubo, tudi oni so do te številke prišli na osnovi nekaterih izračunov — gre namreč za število možnih načinov kako 10 dimenzij, ki jih te teorije v izhodišču zahtevajo, reducirati na 4, ki jih dejansko opazamo).

Kakorkoli že, veljavnost QED je bila dramatično potrjena z eksplozijo prve atomske bombe. Ob tem moramo nujno pripomniti da, čeprav so ravno znanstveniki (na čelu s Szilárdom in Einsteinom) opozorili politike (ameriškega predsednika Roosevelta) na možnost izdelave atomske bombe (s stani nacistične Nemčije), je vso moč odločanja o *uporabi* (ameriške) atomske bombe vedno imela le (militantna) politika (predsednik Truman, general Groves, in drugi, so sklenili bombo uporabiti nad civilnim prebivalstvom, ne pa na bojišču, kot so mnogi znanstveniki samoumevno pričakovali). Tako je ob eksplozijah nad Hirošimo in Nagasakijem znanost bila potisnjena v vlogo nemočne, od groze in sramu obnemele opazovalke in kar nekaj časa je trajalo, da so se vodilni fiziki javno ogradili od take politike, čemur sta pomembno prispevala s svojo visoko moralno držo prav Einstein in Oppenheimer.

Navzlic rastoči uspešnosti QED, je že kmalu po letu 1925 prišlo do prvih večjih nesoglasij med teoretiki, in sicer predvsem med kvantnimi teoretiki in relativisti [101]. Namreč, kvantna mehanika ob zelo velikem številu delcev zvezno preide v klasično mehaniko, na drugi strani pa relativnostna teorija pri hitrostih mnogo nižjih od svetlobne prav tako gladko zdrsne v klasične vode. Vendar, paradoksalno, pri visokoh energijah kvantna in relativnostna teorija ne preideta druga v drugo, in to navkljub prav tako dokaj uspešni Diracovi relativistični kvantni mehaniki.

Najprej, kar je najbolj motilo Einsteina, kvantna mehanika s svojim statističnim pristopom navidez dovoljuje kršitev načela vzročnosti.

Nadalje, pri poskusih usklajevanja Schrödingerjeve enačbe z relativnostno teorijo je prav tako prišlo do razhajanja. Schrödingerjevo enačbo je mogoče spremeniti tako, da vsebuje izraz za lastno energijo delca in preide v relacije Klein–Gordonovega tipa ali Diracovega tipa. Toda te enačbe izkazujejo nekaj nezaželenih lastnosti, kot je, na primer, vsebovanje lastnih vrednosti, ki lahko sežejo proti $\pm \infty$ tako, da se zdi, da ni mogoče definirati osnovnega stanja delca. Denimo, pri elektronu se izkaže, da je elektrostatična energija neskončno velika (ker po Diracovi teoriji gre radij elektrona proti nič), in je potrebno vpeljati neskončno mirovno maso, ter njen energijski ekvivalent odšteti od elektrostatične energije da dobimo pravilno vrednost lastne energije elektrona (ta postopek je znan kot ‘renormalizacija’ [102], ki jo je na zdrave temelje postavil šele leta 1973 ’t Hof [103], Nobelov nagrajenec leta 1999).

In nenazadnje, kvantno–mehanske enačbe ne dopuščajo nastajanja in uničenja delcev, kar neposredno izhaja iz Einsteinove relacije med energijo in maso, $E = mc^2$, ene ključnih točk relativnostne teorije. Po tej enačbi so prehodi energije v maso in obratno povsem mogoči, kot je to bilo dokazano pri celi vrsti eksperimentov, tudi z eksplozijo atomske bombe. Še en primer je proces tvorbe parov delcev, ko foton z zadosti visoko energijo v močnem elektromagnetnem polju ob protonu rodi par elektron–pozitron. Možen je tudi obraten proces, ko se elektron in pozitron med seboj izničita in rodita par fotonov (to izkoriščamo v medicini pri slikanju s pozitronsko emisijsko tomografijo, PET). Dobra relativistična kvantna teorija bi morala zajeti tudi take procese. Nezadovoljstvo s takim stanjem je pripeljalo do razvoja kvantne teorije polj (ang., ‘Quantum Field Theory’, QFT [104]), a tudi ta ni razrešila vseh neskladij.

Vrnitev na razpotje

Kljub izjemnemu napredku QED, se nekateri teoretiki vseeno niso pustili prepričati 'Copenhagenski šoli' in niso opustili možnosti obstoja alternativnega tolmačenja kvantne narave snovi. Leta 1962 je de Broglie objavil knjigo [105] v kateri resno razmišlja o Planckovi 'drugi' teoriji in sprejetju kozmološkega izvira ZPE.

To je sprožilo mnoga ponovna preverjanja te alternative, ki so pokazala, da je mogoče kar tri od štirih prej omenjenih ključnih razvojnih dosežkov kvantne mehanike tolmačiti na povsem klasičen način, ob upoštevanju obstoja sevalnega ozadja v smislu ZPE.

Prvi tak mejnik predstavlja članek, ki ga je leta 1966 objavil Nelson [106], ki že v izviru navaja: "*V tem članku bomo poskusili dokazati, da je radikalni odklon od klasične fizike, nastal izpred 40 let z uvedbo kvantne mehanike, bil neupravičen. Podali bomo popolnoma klasično izpeljavo in tolmačenje Schrödingerjeve enačbe po poti razmišljanja, ki naravno sledi iz statistične mehanike in teorije Brownovega gibanja.*" Ta 'Newtonovska' izpeljava Schrödingerjeve enačbe predstavlja klasično alternativo ezoterični 'Copenhagenski' razlagi kvantne mehanike.

Izhajajoč iz tega pristopa je Boyer [107] leta 1975 z uporabo klasične fizike ob upoštevanju vpliva ZPE pokazal, da se fluktuacije, katerih vzrok leži v 'polju ničelne točke' (*Zero-Point Field*, ZPF), popolnoma skladajo z rezultati dobljenimi z uporabo kvantne teorije in Heisenbergovega načela nedoločenosti. V njegovem pristopu Heisenbergove relacije (11) in (12) niso zgolj rezultat teoretičnih kvantnih zakonitosti, temveč posledica obstoja vse prežemajočega energijskega polja, katerega naključna valovanja moteče vplivajo tako na same delce snovi, kot na izmenjavo energije med njimi, ter nenazadnje tudi na naše opazovanje teh delcev in procesov. Prisotnost ZPF je torej **razlog** za končno (ne)natančnost s katero je še mogoče meriti dogajanja na atomski in sub-atomski ravni (za razliko od načela nedoločenosti, ki je zgolj formalni 'predpis!'). Pri tem je posebej značilno, da Planckova konstanta h predstavlja nekakšno mero jakosti ZPF, kar je neposredna posledica člena $\frac{1}{2}h\nu$ v Planckovi 'drugi' teoriji.

Nadalje, de Brogliejevo valovanje podobno obnašanje delcev je doživelo reinterpretacijo. Ta značilnost delcev ni zgolj teoretična domneva, temveč je bila neposredno dokazana v poskusu, ki sta ga izvedla Davisson in Germer [108] leta 1927. Curek elektronov sta usmerila na kristal in opazovala difrakcijsko sliko za kristalom, ki je bila natančno taka kot bi jo sicer dobili z valovanjem. Rezultat je bil potrjen kmalu za tem s podobnimi poskusi ki jih je izvajal G.P. Thomson [109], kjer je elektrone usmerjal skozi zrnate strukture ali tenke kovinske liste. Postavilo se je vprašanje kako razložiti lastnost, ki daje delcem valovni značaj; ni bilo mogoče preprosto zadovoljiti se s trditvijo, da je to pač naravna zakonitost.

Odgovor na to vprašanje je delno podal sam de Broglie. Tako kot Planck, je tudi on podal svoj 'drugi' predlog: če izenačimo Einsteinov in Planckov izraz za energijo, $E = mc^2$ in $E = h\nu$, kjer je E energija delca in m njegova masa, lahko izrazimo frekvenco ν :

$$\nu = \frac{mc^2}{h} \quad (13)$$

Ta je znana kot Comptonova frekvenca [57], ki za elektron z maso m_e znaša $\nu_C = 1.23 \times 10^{20}$ Hz. Ta frekvenca, kot je verjel de Broglie, predstavlja 'notranjo' ali 'lastno' oscilacijo delca.

Če bi takrat šel en korak naprej in iz Planckove 'druge' teorije izpeljal vzrok za take oscilacije iz relacij za ZPF, bi bil de Broglie blizu rešitve [110]. Kot sta mnogo kasneje pokazala Haisch in Rueda [111], elektron resnično oscilira pri svoji Comptonovi frekvenci v svojem relativno mirujočem koordinatnem sistemu: *"ko opazujemo elektron iz relativno premikajočega se koordinatnega sistema zaznamo utripanje, superponirano njegovi lastni frekvenci, ki je rezultat Dopplerjevega zamika. Izkaže se, da je to utripanje natančno enako de Brogliejevi frekvenci premikajočega se elektrona. ...ZPF vsiljuje elektronu nihanje pri Comptonovi frekvenci..."* [112].

Kot bomo videli kasneje, je tak pogled na elektron mogoče še nekoliko izpopolniti.

ZPE in Planckova metrika

Kljub temu da je nastala zaradi nezadovoljstva s takratno kvantno elektrodinamiko (QED), je kvantna teorija polj (QFT) obdržala in še naprej razvijala večino njenih ugotovitev, le nekatere teoretične izboljšave je izpeljala na bolj naraven način, ter se tako ločila od svojevrstnega 'misticizma' 'Copenhagenske šole'. Je pa mimogrede prispevala k uveljavitvi drugačnega pogleda, poimenovanega 'stohastična elektrodinamika' (SED), ki je vlekla korenine iz Planckove 'druge' teorije. Vsem trem teorijam je značilna prisotnost energije vacuuma (ZPE), oziroma ustreznega energijskega polja (ZPF), čeprav iz konceptualno povsem drugačnih razlogov.

Omenili smo že, da SED postulira kozmološki izvor ZPF. To trditev je nujno upravičiti. Namreč, QED izpelje obstoj ZPF iz kvantne narave delcev kot naravno posledico le te, med tem ko SED nekako *ad hoc* pripiše ZPF kvantnemu vacuumu. Upravičenost take trditve je najlažje razumeti če se vrnemo Plancku in sledimo njegovemu razmišljanju o 'naravnih merskih enotah'.

V Planckovem času, v prvih letih XX stoletja, je na področju merskih enot vladala precejšnja zmeda. Obstajalo je nekaj različnih merskih sistemov, ki so se razvili in obdržali na določenih ozko specializiranih področjih. Metrični sistem merskih enot, ki je danes v uporabi in ki ga poznamo po okrajšavi SI (fr., *Le Système international d'unités*) [18], je sicer že obstajal, vendar le v rudimentarni obliki, ni bil tako vsestranski in je predstavljal le eno od možnih izbir. Pravzaprav je večina sistemov slonela na obstoju različnih 'etalonov', izdelanih v ta namen, po katerih so nato bile izdelovane uteži in drugi merilni pripomočki.

Planck si je prizadeval uveljaviti nekakšne 'naravne' enote, take ki bi bile neodvisne od muhavosti človeške izbire in trenutnih tehnoloških zmogljivosti. Do takrat je bilo znanih nekaj naravnih konstant, ena le teh je bila tudi Planckova konstanta h , in Planck je na njihovi osnovi, z ustreznim kombiniranjem, postavil nekatere izredno zanimive relacije med klasično mehaniko, kvantno mehaniko in relativistično fiziko. Poglejmo si najprej **Tabelo 1**, kjer so podane osnovne 'naravne' konstante, z vrednostmi izraženimi v enotah SI, kot jih poznamo danes.

Tabela 1: Osnovne 'naravne' konstante

Pomen	Simbol	Vrednost*	SI enote
propagacijska hitrost EM valovanja v vacuumu	c	299 792 458	m s^{-1}
Newtonova splošna gravitacijska konstanta	G	6.6742×10^{-11}	$\text{m}^3 \text{kg}^{-1} \text{s}^{-2}$
Diracova konstanta, oziroma 'reducirana' Planckova konstanta	$\hbar = \frac{h}{2\pi}$	$1.05457168 \times 10^{-34}$	$\text{kg m}^2 \text{s}^{-1}$
Coulombova konstanta (ϵ_0 je dielektrična konstanta)	$\frac{1}{4\pi\epsilon_0}$	8.98755174×10^9	$\text{kg m}^3 \text{s}^{-4} \text{A}^{-2}$
Boltzmannova termodinamična konstanta	k_B	$1.3806505 \times 10^{-23}$	$\text{kg m}^2 \text{s}^{-2} \text{K}^{-1}$

*Vrednost za svetlobno hitrost c izhaja iz SI definicije metra, zato je njena vrednost vzeta natančno. Prav tako je vrednost Coulombove konstante povezana z definicijo c in je tudi vzeta natančno. Ostale konstante so podane na toliko decimalnih mest kot smo jih do leta 2007 bili sposobni natančno meriti (merilne napake so velikostnega reda zadnje decimalke ali manjše).

Tabela 2: Planckove ‘naravne’ osnovne enote

Naziv	Simbolični izraz	Približna SI vrednost
Planckova dolžina	$l_P = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^3}}$	$1.61624 \times 10^{-35} \text{ m}$
Planckova masa	$m_P = \sqrt{\frac{\hbar c}{G}}$	$2.17645 \times 10^{-8} \text{ kg}$
Planckov čas	$t_P = \frac{l_P}{c} = \frac{\hbar}{m_P c^2} = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^5}}$	$5.39121 \times 10^{-44} \text{ s}$
Planckov naboj	$q_P = \sqrt{\hbar c 4\pi\epsilon_0}$	$1.8755459 \times 10^{-18} \text{ C}$
Planckova temperatura	$T_P = \frac{m_P c^2}{k_B} = \sqrt{\frac{\hbar c^5}{G k_B^2}}$	$1.41679 \times 10^{32} \text{ K}$

Tabela 3: Izpeljane Planckove enote

Enota za	Simbolični izraz	Približna SI vrednost
površino	$l_P^2 = \frac{\hbar G}{c^3}$	$2.61223 \times 10^{-70} \text{ m}^2$
volumen	$l_P^3 = \left(\frac{\hbar G}{c^3}\right)^{\frac{3}{2}}$	$4.2220 \times 10^{-105} \text{ m}^3$
moment	$m_P c = \frac{\hbar}{l_P} = \sqrt{\frac{\hbar c^3}{G}}$	$6.52485 \text{ kg m s}^{-1}$
energijo	$W_P = m_P c^2 = \frac{\hbar}{t_P} = \sqrt{\frac{\hbar c^5}{G}}$	$1.9561 \times 10^9 \text{ J}$ $1.2210 \times 10^{28} \text{ eV}$
gostoto energije	$\rho_P = \frac{W_P}{l_P^3} = \sqrt{\frac{c^{14}}{\hbar^2 G^4}}$	$4.6331 \times 10^{113} \text{ J m}^{-3}$
silo	$F_P = \frac{W_P}{l_P} = \frac{\hbar}{l_P t_P} = \frac{c^4}{G}$	$1.21027 \times 10^{44} \text{ N}$
moč	$P_P = \frac{W_P}{t_P} = \frac{\hbar}{t_P^2} = \frac{c^5}{G}$	$3.62831 \times 10^{52} \text{ W}$
masno gostoto	$\rho_P = \frac{m_P}{l_P^3} = \frac{\hbar t_P}{l_P^5} = \frac{c^5}{\hbar G^2}$	$5.15500 \times 10^{96} \text{ kg m}^{-3}$
kotno frekvenco	$\omega_P = \frac{1}{t_P} = \sqrt{\frac{c^5}{\hbar G}}$	$1.85487 \times 10^{43} \text{ rad s}^{-1}$
pritisk	$p_P = \frac{F_P}{l_P^2} = \frac{\hbar}{l_P^3 t_P} = \frac{c^7}{\hbar G^2}$	$4.63309 \times 10^{113} \text{ Pa}$
tok*	$I_P = \frac{q_P}{t_P} = \sqrt{\frac{c^6 4\pi\epsilon_0}{G}}$	$3.4789 \times 10^{25} \text{ A}$
napetost*	$V_P = \frac{W_P}{q_P} = \frac{\hbar}{q_P t_P} = \sqrt{\frac{c^4}{G 4\pi\epsilon_0}}$	$1.04295 \times 10^{27} \text{ V}$
impedanco*	$Z_P = \frac{V_P}{I_P} = \frac{\hbar}{q_P^2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0 c} = \frac{Z_0}{4\pi}$	29.972458Ω

*Če bi Coulombovo konstanto definirali le kot $1/\epsilon_0$ (in upoštevali krogelni površinski faktor $1/4\pi$ posebej), potem bi Planckova impedanca bila identično enaka elektromagnetni, torej $Z_P \equiv Z_0 \approx 377 \Omega$. Prav tako bi se napetost povečala in tok zmanjšal za faktor $\sqrt{4\pi}$.

Na osnovi naravnih konstant iz **Tabele 1** je Planck izpeljal ‘naravne’ osnovne enote za dolžino, maso in časovni interval, kot so podane v **Tabeli 2**. Kasneje so temu dodali še enote za električni naboj in temperaturo. Te osnovne enote so bile potem podlaga za določitev izpeljanih enot, podanih v **Tabeli 3**.

Naravne osnovne enote sicer niso zelo praktične za običajno vsakdanjo rabo, vendar močno poenostavijo mnoge fizikalne enačbe, če privzamemo $\hbar = c = 1$.

Ob teh tabelah je treba opozoriti na nekaj karakterističnih vrednosti, ki pomembno vplivajo na konsistentnost katere koli na njih zasnovane teorije. Prav tako pa opozarjamo, da **nekateri vrednosti močno odstopajo** od tistih, ki jih mogoče posredno izračunati na osnovi nekaterih drugih meritev. K temu se bomo še vrnil.

Za začetek si oglejmo nekatere mejne vrednosti, ki so posledica sprejetih enot in ki pomembno vplivajo na nekatere izračune, posredno pa tudi na filozofske implikacije teorije.

Prva taka omejitev izhaja iz vrednosti Planckove dolžine, l_p , vrednost katere je izredno majna, velikostnega reda 10^{-35} m. Primerjajmo to z nekaterimi drugimi vrednostmi, denimo velikostjo vodikovega atoma: Bohrov radij [65], z elektronom v osnovnem stanju, znaša:

$$r_B = \frac{4\pi\epsilon_0\hbar^2}{m_e q_e^2} = 5.292 \times 10^{-11} \text{ m} \quad (14)$$

kjer je:

$$\begin{aligned} q_e &= 1.60217653 \times 10^{-19} \text{ As} \dots\dots\dots \text{ naboj elektrona,} \\ m_e &= 9.1093826 \times 10^{-31} \text{ kg} \dots\dots\dots \text{ masa elektrona,} \\ \epsilon_0 &= 8.854185 \times 10^{-12} \text{ As/Vm} \dots\dots\dots \text{ dielektrična konstanta.} \end{aligned}$$

Torej je premer atoma velikostnega reda 10^{-10} m, oziroma kar 25 velikostnih redov večji od Planckove dolžine.

Ali pa primerjajmo l_p s premerom jedra vodikovega atoma, oziroma protona, ki po nekaterih meritvah znaša približno 1.5×10^{-15} m, in je torej 20 velikostnih redov večji.

Elektron, vsaj v Diracovi teoriji, naj bi bil točkasti naboj (čeprav to povzroči ne majhne težave z velikostjo Coulombove sile, ki divergira v neskončnost), kar posredno potrjujejo tudi poskusi s sipanjem, na podlagi katerih je mogoče sklepati da je radij elektrona manjši od 10^{-18} m, med tem ko na osnovi klasične elektrodinamike iz izraza za naboj lahko izračunamo $r_e \approx 2.82 \times 10^{-15}$ m [113] (čeprav obstajajo tudi drugačne ocene, denimo, od izračuna s pomočjo Comptonove valovne dolžine, $r_e = \alpha_f q_e \hbar c / m_e c^2 \approx 4.5 \times 10^{-34}$ m, pa vse do malo verjetnega modela elektrona kot črne luknje s pomočjo Schwarzschildovega radija, $r_e = 2Gm_e/c^2 \approx 1.35 \times 10^{-57}$ m).

Vidimo, torej, da je Planckova dolžinska enota 10^{-20} krat, torej kar 20 velikostnih redov, manjša od najmanjših gradnikov narave. Kako si to razlagamo in kakšne so posledice te razlage?

Leta 1960 so Arnowitt, Deser in Misner oblikovali teorijo, ki je postala znana pod imenom ‘geometrodinamika’ [114]. Istega leta je Wheeler [115] razširil to teorijo.

V tej različici je prostor razkosan na nekakšne majhne 'hiper-rezine', med tem ko je Einsteinova vacuumška enačba polja preoblikovana v evolucijsko enačbo, ki opisuje kako se, ob dani začetni geometriji neke hiper-rezine, ta geometrija razvija s časom. Wheeler dokazuje, da je možno, ko enkrat izrazimo mejne vrednosti momenta, dobiti Einsteinovo enačbo polja v celoti, ter navaja, da to lahko sledi izključno iz geometrijske obravnave problema. Splošna relativnost postane tako logično nujna. Podrobneje, ukrivljenost prostora (to je gravitacijsko polje, kot ga obravnava splošna relativnost) se pojavi kot makroskopsko povprečje čez sicer zelo zapletene topološke fenomene, ki nastopajo na teh najmanjših razsežnostih. Popularno so tako topologijo poimenovali 'kvantna pena' (ang., '*quantum foam*'; nekateri govorijo o 'gobasti' strukturi prostora, oba izraza pa dokaj dobro opisujeta to stanje; včasih najdemo tudi izraz '*granularity*' oz., 'zrnatost', ki pa, glede na fizikalni opis podan z ustreznimi enačbami, najbž ni primeren; gre za domnevo, po kateri naj bi se fizikalni procesi lahko odvijali le na površini mehurčkov kvantne pene, v notranjost mehurčkov pa ne segajo).

Te ideje so bile, in so še vedno, izredno zanimive mnogim fizikom, čeprav je kmalu sam Wheeler poskrbel za hladno prho — izkazalo se je namreč, da fermionov s spinom $\frac{1}{2}$ (elektroni, protoni) ni možno obravnavati na tak način.

Ne glede na to, ideja o diskretni naravi prostora na mikro ravni se je obdržala in je še vedno živa, na pr., v kvantni teoriji polja, teoriji strun, in drugih, ne nazadnje tudi v SED. Potrditev za tako interpretacijo je bilo mogoče izpeljati prav iz Planckove dolžine, ki naj bi predstavljala nekakšno spodnjo mejo delitve prostora. Z drugimi besedami, razsežnosti manjše od Planckove dolžine fizikalno sploh niso mogoče.

Če si sedaj zamislimo neko valovanje (denimo elektromagnetno) v takem diskretnem prostoru, takoj ugotovimo, da predstavlja Planckova dolžina najmanjšo možno valovno dolžino, ki jo tako valovanje lahko sploh še ima; struktura prostora torej postavi zgornjo frekvenčno mejo, in, posledično, zgornjo energijsko mejo. Obenem pa tak prostor preprečuje kakršnim koli objektom zvezno gibanje, ki zato postane skokovito, pa tudi oblika objekta samega ni gladka, pač pa nepravilna. Toda, tako kot mi ne moremo neposredno videti ali otipati posamičnih atomov (ker so vsaj 5 velikostnih redov manjši od najmanjših še opaznih drobcev), tako tudi atom in njegovi gradniki ne opazijo diskretnosti prostora (ki je 20 do 25 velikostnih redov manjša), vendar čutijo naključne energijske sunke, do katerih prihaja prav zaradi tega, ker se valovanje (energija) ne more spreminjati zvezno, marveč le skokovito.

Kar smo pravkar opisali, je osnovni razlog za kvantizacijo v mikro svetu. Planckova dolžina torej predstavlja najmanjšo valovno dolžino valovanj ($\approx 10^{-35}$ m) in hkrati pogojuje največjo možno energijo. Kako velika je ta energija? Če pogledamo v **Tabelo 3**, vidimo, da je W_P zares izjemno velika — okoli 10^9 J, kar na tako majhnem prostoru, kot je Planckov volumen ($\sim l_P^3$), pripelje do prav neverjetne energijske gostote: vsak kubični meter prostora vsebuje okoli 10^{113} J. Za ponazoritev, žarnica s katero si osvetljuje delovno mizo ima 100 W, torej v eni sekundi porabi 10^2 J; sedaj si skušajte predstavljati 10^{111} takih svetlečih žarnic, stlačenih v en kubični meter! Ta ogromna energijska gostota predstavlja tisto kar navadno razumemo pod pojmom ZPE.

Resnici na ljubo je treba povedati, da ZPE nima nujno tako visoke vrednosti. Namreč, pri večjih valovnih dolžinah pride do interference valov, ker je veliko dolgih valov, ki se razlikujejo le za Planckovo dolžino, ali nekaj takih dolžin, in je mnogo takih valov v nasprotni fazi, zato se mnogi valovi med seboj potrejo. Vseeno pa jih

ostane več kot dovolj — ocenjuje se (na osnovi statistike), da je dejanska gostota energije ZPE primerljiva z $\sqrt{\rho_P}$, oziroma 10^{56} J/m³, kar je še vedno ogromno. Sicer obstaja več različnih ocen, na osnovi različnih metodologij izračunov, in rezultati varirajo v zelo širokem razponu. Je pa tudi res, da najnovejše meritve posredno kažejo na nepričakovano nizko vrednost energije vacuuma, kot bomo videli kasneje.

Na kratko omenimo še dejstvo da, če sta že frekvenca valovanj in hitrost s katero se razširjajo, kvantizirani zaradi diskretne strukture prostora, potem je najbrž kvantiziran tudi čas (ali vsaj tisto, kar naj bi ustrezalo pojmu časa, $t_P = l_P/c$). Toda časovna kvantizacija je v popolnem nasprotju z QED in prav tako z relativnostno teorijo, kjer je čas obravnavan kot zvezna količina, in to povzroča velike težave. Če je, denimo, mogoče, da gre $\Delta t \rightarrow 0$, pomeni, da gre lahko frekvenca $\nu \rightarrow \infty$, a z njo tudi energija, kar zagotovo ni smiselno. Zato v QED in mnogih sodobnejših teorijah obstaja možnost tako imenovane 'renormalizacije' [102], kjer je načeloma dovoljeno eno neskončnost potreti s poljubno vpeljano drugo neskončnostjo, ter iz ostanka dobiti pravilen rezultat. Postopek je bil znan že okoli leta 1935 in Dirac, kasneje pa tudi Feynman [116], sta se zelo negativno izražala o tem, čeprav matematično postopku ni kaj očitati. Kot smo že omenili, je fizikalno upravičenost za tako obravnavo izpeljal šele leta 1973 't Hooft [103], in bil za ta dosežek nagrajen z Nobelovo nagrado leta 1999.

Vrnimo se spet k ZPE. Kot smo ugotovili, pri makroskopskih dimenzijah sta tako prostor kot tudi energija navidezno zvezni količini, po eni strani zaradi velike razlike v samih dimenzijah, po drugi strani pa, ker je ZPE prisotna vsepovsod, tudi znotraj atomov, in homogena ter izotropna po vsem Vesolju (čeprav, kot bomo videli nekoliko kasneje, lahko govorimo tudi o nekakšnem 'senčenju', ki ga povzročajo osnovni delci, kot so proton, nevtron, ali elektron). A kljub njeni izjemno veliki vrednosti, te energije sploh ne čutimo. To je nekako tako, kot ne čutimo atmosferskega pritiska, čeprav je ta zelo velik (na vsak centimeter naše kože pritiska kilogramska utež), to pa zato ker je enak pritisk prisoten tudi znotraj našega telesa, in šele če se zunanji pritisk hitro spremeni, kot, na pr., pri vožnji z žičnico na visoko goro, začutimo spremembo pritiska v ušesih.

Še ena pomembna lastnost ZPE, oziroma sevalnih polj, ZPF, je kovariantnost⁴ [117] v Lorentzovem smislu (ta je posledica domnevne invariantnosti svetlobne hitrosti). Opazovalec, ki se giblje enakomerno glede na opazovani sistem, bo izmeril drugačno dolžino, drugačno maso in drugačen čas, v primerjavi z nekom, ki glede na opazovani sistem miruje. Lorentzova transformacija [118] za dolžino se glasi:

$$l_v = \frac{l_0}{\gamma} \quad (15)$$

kjer je l_0 dolžina izmerjena v relativnem mirovanju, l_v je dolžina izmerjena v relativnem gibanju s hitrostjo v , in γ je relativistični faktor, odvisen od v :

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (16)$$

⁴ Kovariantnost pomeni, da se z spremembo neke fizikalne količine vse ostale podobne fizikalne količine spreminjajo po enaki zakonitosti. Za razliko od tega, pomeni invariantnost nespremenljivost neke fizikalne količine ob kakršnih koli spremembah ostalih fizikalnih količin.

Enako kot pri dolžini (15) velja tudi za čas, $t_v = t_0/\gamma$, za maso pa velja $m_v = m_0\gamma$.

Ker mora sprememba dolžine veljati tudi za zaznavanje valovne dolžine svetlobe, oziroma sevanja nasploh (spomnimo se poskusa Michelsona in Morleya), pomeni, da morata katera koli dva opazovalca, ki se gibljeta enakomerno (nepospešeno), zaznavati enak sevalni spekter ozadja, ne glede na njihovo medsebojno (relativno) razliko v hitrosti gibanja (da ne bi bilo pomote, sevalni spekter ozadja v smislu ZPE ima enako intenziteto pri vseh valovnih dolžinah in, ker vse frekvence utrpijo enak Dopplerjev zamik, ni spektralne razlike; drugače pa je pri energijsko omejenem, ali pa diskretnem spektru, v teh primerih seveda Dopplerjev zamik lahko zaznamo kot zamik spektra). Lorentzova kovariantnost pri sevalnem ozadju velja le, če je gostota energije sorazmerna tretji potenci frekvence sevanja, $\rho_W \propto \nu^3$, natančno tako, kot to predvideva Plankova 'druga' teorija, in iz nje izhajajoča enačba (10).

Pomembno je omeniti, da je prav Lorentzova kovariantnost tista, ki naredi sevalno polje ZPE drugačno od koncepcije etra iz XIX stoletja. Stari eter je načeloma dovoljeval zaznavo absolutne hitrosti gibanja v odnosu do njega, in prav zaradi tega je negativni rezultat poskusa Michelsona in Morleya prišel kot presenečenje.

Vendar, kljub temu, da inercialni opazovalci ne morejo zaznati svojega absolutnega gibanja z opazovanjem sevalnega spektra ZPE, pospeševani opazovalci lahko zaznajo dodatno termično sevanje. Z drugimi besedami, pri pospeševanju skozi vacuum se opazovalec znajde obkrožen z dodatnim toplotnim sevanjem in, večji ko je pospešek, višja bo efektivna temperatura tega sevanja. Žal pa je ta pojav težko merljiv, ker je za efektivni dvig temperature za 1 K potreben izredno visok pospešek od $10^{21} g$, po relaciji za ekvivalentno energijo pri enakomernem pospeševanju s pospeškom a :

$$k_B T = \frac{\hbar}{2\pi c} a \quad (17)$$

Tako efektivna temperatura vacuuma, kot posledica zemeljskega gravitacijskega pospeška $g = 9.81 \text{ m/s}^2$, znaša le $4 \times 10^{-20} \text{ K}$. Načrtujejo sicer poskus s pospeškom od 10^{26} m/s^2 , kar bi dalo efektivno temperaturo od okoli 400 K.

Relacijo (17) sta neodvisno izpeljala Davies [119] in Unruh [120], zato fenomen imenujemo *Davies-Unruhov učinek* [121].

Ena od potrditev tega učinka je tudi pojav povečane verjetnosti razpada sicer stabilnih delcev, kot je denimo proton, pri visokih pospeških. O vsem tem bomo v nadaljevanju še razpravljali.

Neposredna potrditev ZPE

ZPE je resnično ogromna, in, kot smo videli, ocenjenjene gostote se gibljejo od okoli 10^{41} J/m^3 pa do neskončno (v navadni QED). Neskončna vrednost po QED je bila vselej dvomljiva, ker potem vsak integral, ki zajema okolico neke točke, divergira. Zato je obstoj Plankove frekvence, kot zgornje meje energije, tisti ključni element teorije, ki je mnoge fizike dokončno prepričal v realnost ZPE. Tako je, denimo, Feynman ugotovil, da mora biti gostota ZPE “večja od gostote energije v jedru atoma” ($> 10^{41} \text{ J/m}^3$) [122]. Temu so sledili tudi drugi raziskovalci, denimo Prigogine [123] in Stengers [124] sta ocenila gostoto ZPE na okoli 10^{98} J/m^3 , podobno tudi Barnett [125], in Davies [126] (10^{114} J/m^3).

Prvi neposredni dokaz, da ZPE ni le teoretični konstrukt, pač pa merljiva fizikalna realnost, je prišel s predvidevanji, ki jih je leta 1948 objavil Casimir [127], eksperimentalno potrjenimi 9 let kasneje [128]. *Casimirov učinek* [129], kot je pojav postal znan, pride do izraza med dvema kovinskima ploščama, ki sta v vacuumski posodi in le malenkostno oddaljeni druga od druge, ne da bi se dotikali; takrat je mogoče izmeriti majhno silo, ki plošči tišči skupaj.

Popolno analizo, ki Casimirov učinek razloži kot posledico prisotnosti ZPE in v okviru SED, so leta 1988 podali Milonni, Cook in Goggin [130]. Če privzamemo da ZPE sestavljajo elektromagnetna valovanja, potem paralelni kovinski plošči predstavljata pregrado za nizkofrekvenčne (dolge) valove. Največja valovna dolžina, ki lahko nastopi med ploščami, je sorazmerna medsebojni oddaljenosti plošč, med tem ko na zunanjih stenah ni omejitve (oziroma je ta določena z mnogo večjo oddaljenostjo obeh plošč od drugih okoliških objektov). Dolgi valovi imajo nizko frekvenco, zato, po izrazu (5), nosijo manj energije, kar pomeni, da je gostota ZPE zunanje plošč malenkostno večja kot med ploščami. Fotoni (nosilci elektromagnetnega polja) lahko ob popolnem odboju na površini kovine svoj efektivni moment predajo kovini, po relaciji, ki jo je že leta 1900 objavil Lebedev [131]:

$$p = \frac{2J}{c} \quad (18)$$

kjer je J gostota energijskega toka sevanja, kot bi jo ustvaril nihajoči električni dipol, z razdaljo med poloma z_0 in frekvenco nihanja ω na razdalji r od centra dipola in pod kotom ϑ glede na ravnino nihanja:

$$J = \frac{q_e^2 z_0^2 \omega^4 \sin^2 \vartheta}{32 \pi^2 \epsilon_0 c^3 r^2} \quad (19)$$

Zaradi razlike v gostoti modusov nihanja ZPE se tudi gostota fotonov med ploščami razlikuje od gostote zunaj. Pojavi se razlika v pritiskih, ki plošči tišči skupaj.

Casimirova sila je sorazmerna površini plošč, vendar, za razliko od vseh drugih znanih pojavov (gravitacija, elektromagnetna polja), ni obratno sorazmerna kvadratu razdalje med ploščami, temveč njeni četrti potenci ($F \propto d^{-4}$). Pritisk, oziroma Casimirovo silo na površinsko enoto, lahko izpeljemo iz izraza za efektivno energijsko razliko za valovne dolžine večje od dvojne razdalje med ploščami, $2d$:

$$\frac{F_C}{A} = - \frac{\partial}{\partial d} \left(\frac{\langle W \rangle}{A} \right) = - \frac{\pi^2 \hbar c}{240 d^4} \quad (20)$$

z volumsko gostoto energije:

$$\rho(d) = - \frac{\pi^2 \hbar c}{720 d^3} \quad (21)$$

Tukaj, seveda, negativni predznak pomeni, da obstaja energijski pretok iz okolice v naš merilni sistem (ne pa zaradi tega ker bi sila tiščala plošči skupaj, kot to pravijo nekateri!).

Zaradi tako visoke potence (d^{-4}) pride Casimirova sila do izraza le pri zelo majhnih razdaljah ($< 10 \mu\text{m}$), in postane dominantna pri okoli 10 nm (≈ 100 atomskih premerov). Denimo, pri ploščah s površino 1 cm^2 , oddaljenih med seboj 500 nm , je Casimirova sila primerljiva uteži od 0.2 mg , med tem ko je pri razdalji 10 nm pritisk že primerljiv atmosferskemu ($\approx 1 \text{ kg/cm}^2$). Danes Casimirovo silo lahko merimo na odstotek natančno z uporabo mikroskopa na atomsko silo [132].

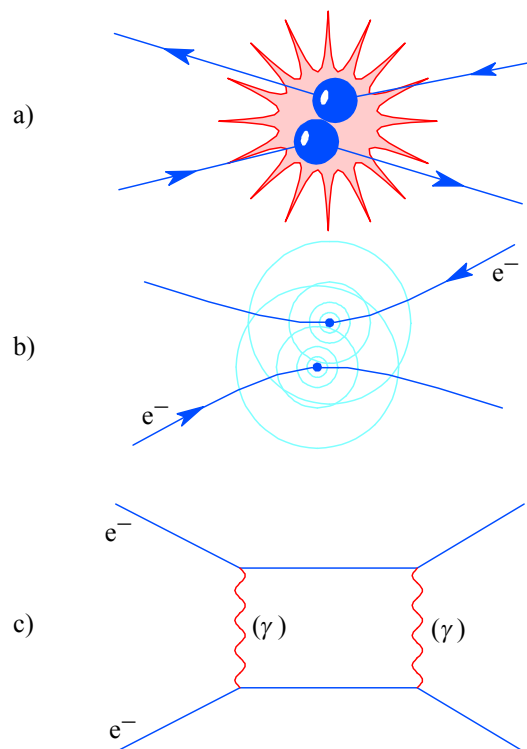
To spoznanje nam je omogočilo, da bolje razumemo celo vrsto fenomenov, od tega zakaj je majoneza tako viskozna, do tega, da lahko konstruiramo nano-stroje in preprečimo, da bi se njihovi sestavni deli med seboj zlepili [133].

Prav tako se je izkazalo, da je na tej osnovi možno razložiti tudi nekatere druge, že dalj časa znane fenomene v katerih nastopajo sile kratkega dosega, kot so, denimo, van der Waalove [134] sile [135]. Te sile so tiste ki, med drugim, omogočajo, da je realne pline mogoče utekočiniti (idealni plin se pri stiskanju obnaša matematično pravilno, obnašanje realnih plinov pa od idealnega odstopa [136]).

ZPE in virtualni delci

Že kmalu po odkritju pozitrona (elektronovega antidelca, [87]) je prišlo do eksperimentalne potrditve obstoja parov delec-antidelec pri vseh delcih, ki nosijo električni naboj (za električno nevtralne delce nekateri fiziki pravijo, da so sami svoj antidelec). Prav tako je bilo potrjeno, da lahko foton z zadosti visoko energijo ustvari par delcev [137], ter da se tak par pri medsebojnem srečanju anihilira [138] in hkrati ustvari par fotonov, ki odneseta vso notranjo energijo para delcev.

Nato je Feynman pokazal kako je mogoče večino reakcij med osnovnimi delci ponazoriti z izmenjavo tako imenovanih *virtualnih* (navideznih) delcev [139]. Navideznost se v tem primeru ne nanaša na delce same, temveč na dejstvo, da taki procesi potekajo izjemno hitro in v neposredni bližini interagirajočih delcev, zaradi česar izmenjave virtualnih delcev praktično ni mogoče odkriti, **SI.9**. A tudi ko bi nam to nekako uspelo, reakcija ne bi bila več enaka, ker bi z zaznavo virtualnega delca le temu odvzeli nekaj energije, ki bi nato primanjkovala pri zaključku reakcije in njeni končni produkti bi morali biti drugačni (parvzaprav postane izid reakcije v tem primeru drugačen že z detekcijo samo, ker 'virtualni' delec ob zaznavi postane 'realen'). Kljub temu, da virtualni delci ne sledijo nekaterim zakonom kvantne mehanike, denimo, ohranitvi momenta, pa vseeno morajo v procesih biti ohranjena nekatera druga kvantna števila. Drugače pa imajo virtualni delci vse lastnosti realnih delcev. Pravzaprav je tudi 'realnost' običajnih delcev le posledica naše navade in zgodovinskega razvoja fizike. Tako realni kot virtualni delci predstavljajo le začasna vzbujena stanja vacuumskih polj, edina razlika med njimi je v njihovi 'življenski dobi'. Tako je virtualnim delcem le bila uradno priznana 'domovinska pravica' znotraj standardnih in tudi manj standardnih teorij.



SI.9: Interakcija dveh delcev. a) Mehanski trk dveh kroglic; b) klasična elektrodinamika obravnava bližnje srečanje dveh elektronov prek interakcije njunih elektrostatičnih polj; c) enak dogodek, interpretiran s pomočjo Feynmanovega (shematskega) diagrama, z izmenjavo virtualnih fotonov.

Potem se je izkazalo, da je mogoče večino enačb kvantne teorije polj, QFT [104], prevesti na tvorbe in anihilacije parov virtualnih delcev. Tako vacuumska polja nenehoma tvorijo pare virtualnih delcev, ki se takoj nato spet anihilirajo in vrnejo energijo polju. Vesolje je nenadoma 'zavrelo'!

Pa vseeno za trenutek pomislimo: kaj pa če je vacuum zares popolnoma prazen, ne vsebuje nobenih delcev in nobene energije? Tudi v takem vacuumu mora še vedno veljati Heisenbergovo načelo nedoločenosti [84], zato mora obstajati neka končna, čeprav majhna nedoločenost količine energije, ki jo tak prostor lahko vsebuje. In ta majhna nedoločenost dovoljuje neki od nič različni energiji ΔW , da obstaja za kratek čas. Ta časovni interval Δt pa je definiran kot $\Delta t = \hbar / \Delta W$. Zaradi ekvivalence med maso in energijo, po slavni Einsteinovi formuli, če je Δt zadosti kratek, mora biti v ΔW dovolj veliko energije za rojstvo para delcev (denimo, za par elektron-pozitron je potreben le dober MeV, ali $\approx 1.6 \times 10^{-13}$ J. Nastali par (če se ne razide zaradi odvečne energije, ki preide v njuno kinetično energijo) pa bo obstajal največ $\Delta t \approx 10^{-21}$ s, najmanj pa $\sim t_P$ — glej **Tabelo 2**).

Skratka, že zaradi Heisenbergovega načela nedoločenosti, QED zahteva, da je vacuum poln parov virtualnih delcev, ki nenehno nastajajo iz polja fotonov in se takoj spet med seboj potrejo ter povrnejo energijo v obliki novega para fotonov. Prizor na Planckovi ravni spominja na površino vode prekrito z milnimi mehurčki, ki nenehno rastejo in se pri določeni velikosti spet razpočijo (od tod naziv 'kvantna pena', oziroma ang., '*quantum foam*'). V tem scenariju iz anihiliranih parov virtualnih delcev nenehno nastajajo tudi virtualni fotoni in ti se že v naslednjem hipu srečajo z drugimi tako nastalimi fotoni, pri čemur tvorijo nove virtualne delce, ki nato spet razpadejo v fotone, in tako naprej. Tako QED pripisuje večino vacuumske energije prav prisotnosti virtualnih delcev. Vendar enak scenarij nastopa tudi v QFT, ter drugih podobnih teorij, ne nazadnje tudi v SED. Razlika je le v tem katera teorija pripisuje kateremu od teh pojavov vzročnost in kateremu posledičnost. V tem smislu je v vseh teh teorijah nekdanje Diracovo 'morje' zamenjano z elektromagnetno energijo virtualnih delcev, oziroma ZPE.

Tako sedaj razloge za obstoj Casimirovega učinka iščemo v kontekstu virtualnih delcev in/ali fotonov v kateri koli od teh teorij. Že QED sama omogoča, da posamičnim delcem pripišemo valovno dolžino [75]. Posledično, le tisti delci, katerih celoštevilčni večkratnik valovne dolžine ustreza razdalji med Casimirovimi ploščami, lahko tudi obstajajo v tem prostoru. Vsi ostali so izločeni. Zato je tudi gostota vacuumske energije med ploščami manjša kot zunaj. Enak argument seveda velja tudi v primeru fotonov.

Lahko torej ugotovimo, da sta, vsaj v tem primeru, QED in SED povsem enakovredni alternativni. Vendar SED predpostavlja obstoj vacuumske energije neposredno, oziroma kot izhodišče, med tem ko je ta pri QED vpeljana posredno preko virtualnih delcev. Kakor koli že, Casimirov učinek ima nekatere teoretične implikacije, pomembnost katerih smo spoznali šele v začetku leta 1990.

ZPE in svetlobna hitrost

Postavlja se vprašanje ali in kako zmanjšanje vacuumske energije med Casimirovimi ploščami vpliva na ostale fizikalne zakonitosti v tem prostoru.

Leta 1990 sta Scharnhorst [140] in Barton [141] raziskala to zmanjšanje energije nekoliko podrobneje. Scharnhorst je s pomočjo QED izračunal kaj se dogaja s svetlobo med tem ko ta potuje med Casimirovimi ploščami. Že v uvodu svojega članka [140] navaja: *“...sprememba energije neposredno vpliva na spremembo svetlobne hitrosti”*, in dodaja: *“to pa je preprosto posledica spremembe vacuumske strukture zaradi prisotnosti plošč”*, ter sklene: *“Zmanjšanje energije med ploščami **poveča** hitrost propagacije elektromagnetnih valov v smeri navpično na površino plošč”*. Do podobnih ugotovitev je prišel tudi Barton [141], čeprav po nekoliko drugačni poti: *“Lahko bi rekli, da med Casimirovimi ploščami, tudi pri absolutni ničli, obstajajo elektromagnetna polja, katerih energijska gostota je manjša; če torej velja, da pozitivna gostota energije upočasni svetlobo, jo mora negativna pospešiti.”* Seveda sta pozitivnost in negativnost energije tukaj mišljeni relativno, v primerjavi z okolico.

V komentarju k tem raziskavam je Barnett [142] zapisal: *“Izvor teh presenetljivih ugotovitev leži v nenavadnih lastnostih vacuuma, kot jih razkriva kvantna elektrodinamika: vacuum ni prazen nič, pač pa vsebuje naključno spreminjajoča se elektromagnetna polja in virtualne pare elektron-pozitron, katerih energijska gostota je, zdi se, neskončno velika. Svetloba med potovanjem skozi tak prostor interagira z vacuumskimi polji, zato so vse zaznavne lastnosti, vključno s svetlobno hitrostjo, odvisne od teh interakcij.”*

Nadaljnje analize svetlobne hitrosti v spremenjenem vacuumu, objavljene leta 1995 [143], potrjujejo to domnevo: *“Ali se fotoni gibljejo počasneje ali hitreje od c je odvisno le od večje ali manjše energijske gostote v vacuumu. ... Avtomatično sledi, da v vacuumu z nižjo energijsko gostoto mora hitrost svetlobe biti večja od c Prisotnost bodisi realnih, bodisi virtualnih delcev upočasni hitrost brezmasnih delcev [fotonov]; upočasnitev je sorazmerna njihovi gostoti. V geometriji Casimirovega vacuuma, ki izloči nekatere moduse nihanja polj, ter posledično zmanjša gostoto virtualnih delcev, se zmanjša tudi sipanje fotonov in poveča njihova hitrost.”*

Barnett nadalje pojasnjuje: *“Scharnhorst in Barton poudarjata, da sprememba vacuumskih stanj vpliva na spremembo dielektrične permitivnosti in magnetne permeabilnosti vacuuma, ter s tem na svetlobno hitrost. ... Vloga virtualnih delcev pri določanju permitivnosti vacuuma je analogna relativni permeabilnosti v dielektričnih materialih. Svetloba na poti skozi material se lahko absorbira ... [toda] atomi ostanejo v vzbujenem stanju le kratek čas, nakar pri prehodu v nižje energijsko stanje oddajajo svetlobo. Pogostost absorpcije in re-emisije fotonov vpliva na optični lomni količnik materiala, ki tako vpliva na značilno zmanjšanje hitrosti svetlobe.”*

Barton je v svojih izračunih upošteval spremembo dielektrične in magnetne konstante vacuuma v Casimirovem vacuumu in ugotovil, da je ta sprememba pri obeh enakomerna, oziroma enaka za vse valovne dolžine. Scharnhorst to potrjuje in ugotavlja, da v tem procesu ni disperzije valovanja. Zato Barnett dodaja: *“Scharnhorst in Barton ... [sta dokazala], da se pri povečanju svetlobne hitrosti tako fazna kot grupna hitrost očitno zvišata za sorazmerno enak prispevek.”*

Torej sta tako permitivnost ε , kot permeabilnost μ v sorazmerju z energijsko gostoto ρ v Casimirovem vacuumu. Že iz Maxwelllove elektromagnetne teorije je znano, da je svetlobna hitrost c določena z μ in ε :

$$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon\mu}} \quad (22)$$

V različnih dielektričnih (izolacijskih) materialih je efektivna permitivnost $\varepsilon = \varepsilon_r \cdot \varepsilon_0$, kjer je ε_0 dielektrična konstanta vacuuma ($\varepsilon_0 = 8.8542 \times 10^{-12}$ As/Vm), med tem ko je ε_r relativna dielektričnost materiala. Za dielektrike vedno velja, da je $\varepsilon_r > 1$. Pri magnetnih materialih je, podobno, efektivna permeabilnost $\mu = \mu_r \cdot \mu_0$, kjer je μ_0 magnetna permeabilnost vacuuma ($\mu_0 = 10^{-7}/4\pi$ Vs/Am), ter μ_r relativna permeabilnost materiala. A za razliko od dielektrikov poznamo magnetne materiale pri katerih je $\mu_r \gg 1$ (feromagnetiki), takih kjer je $\mu_r > 1$ (paramagnetiki) in takih kjer je $\mu_r < 1$ (diamagnetiki).

Že v XVIII stoletju je Huygens [26] dognal, da je svetloba valovanje, zato mora svetlobna hitrost v vodi, ki je optično gostejša, biti manjša od hitrosti v zraku. Zato na površini vode pride do značilnega loma svetlobnih žarkov. Relativna dielektričnost vode je ~ 81 (pri nizkih frekvencah; z višanjem frekvence pada zaradi polarnosti vodnih molekul), zraka pa le malenkost več kot 1, permeabilnost pa v obeh primerih 1, kar pomeni, da je:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_r \varepsilon_0 \mu_r \mu_0}} = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_r}} = \frac{c}{N} \quad (23)$$

kjer $N = \sqrt{\varepsilon_r}$ predstavlja lomni količnik optičnih materialov.

Vendar do sedaj nismo nikoli naleteli na primer naravnega materiala z $\varepsilon_r < 1$ in hkrati $\mu_r < 1$. Casimirovo odkritje predstavlja prvi tak primer, le da tu ne gre za material, pač pa za vacuum, kjer material (kovinski plošči) služi le kot zrcalo za elektromagnetna valovanja, ki povzroči njihovo interferenco in posledično zmanjša energijsko gostoto.

Prav razumevanje te problematike je po letu 1998 pripeljalo do odkritja cele vrste kompozitnih materialov [144] (tako imenovanih 'meta-materialov', oziroma materialov z 'negativnim' lomnim količnikom), pri katerih je s kombiniranjem geometrijskih in materialnih lastnosti mogoče doseči, da sta $\varepsilon_r < 1$ in $\mu_r < 1$, vendar le v relativno ozkem frekvenčnem pasu (spodnja frekvenčna meja je običajno določena z debelino materiala, zgornja pa z dimenzijami majhnih ponavljajočih se geometričnih vzorcev, na pr., kovinskih prstanov). Možnost realizacije materialov s takimi lastnostimi je, sicer teoretično, napovedal že Veselago [145], leta 1967.

Ugotovili smo torej, da gostota in vrsta snovi (realnih delcev) neposredno vpliva na dielektrične in magnetne lastnosti materiala, ter tako tudi na svetlobno hitrost. V primeru Casimirovih plošč pa energijska gostota vacuuma prav tako vpliva na vrednosti permeabilnosti in permitivnosti. Ker veljata proporcionalnosti:

$$\frac{1}{\sqrt{\varepsilon}} \propto c \propto \frac{1}{\sqrt{\mu}} \quad (24)$$

mora prav tako veljati sorazmerje med vacuumsko gostoto energije ρ in svetlobno hitrostjo c :

$$c \propto \frac{1}{\rho} \quad (25)$$

Energijska gostota ρ ravninskega elektromagnetnega vala, ki ima električno poljsko jakost E in magnetno poljsko jakost H , je v vacuumu podana kot:

$$\rho = \frac{1}{2}(\varepsilon_0 E^2 + \mu_0 H^2) \quad (26)$$

Vendar je ta enačba veljavna za val v trirazsežnostnem prostoru, kjer so možne vse tri prostostne stopnje valovanja. V primeru Casimirovih plošč je torej treba ρ deliti z 3, ker je učinek zaznaven le v smeri navpično na plošči. Nadalje, elektromagnetno valovanje popagira tako, da električna komponenta polja povzroča magnetno, ta pa spet električno, itd., skupna energija pa je med potovanjem valovanja konstantna, zato mora biti energija vsake posamične komponente enaka:

$$\varepsilon_0 E^2 = \mu_0 H^2 \quad (27)$$

Iz teh ugotovitev sledi:

$$\frac{\rho}{3} = \varepsilon_0 E^2 = \mu_0 H^2 \quad (28)$$

kar lahko prevedemo v par enačb:

$$\varepsilon_0 = \frac{\rho}{3E^2} \quad (29)$$

$$\mu_0 = \frac{\rho}{3H^2} \quad (30)$$

Če povzamemo: elektromagnetne lastnosti vacuuma, ki jih čuti elektromagnetno valovanje z električno poljsko jakostjo E in magnetno poljsko jakostjo H , so neposredno določene z vacuumsko energijsko gostoto ρ (v smislu ZPE). Torej mora biti zmnožek $\varepsilon_0 \mu_0$:

$$\varepsilon_0 \mu_0 = \frac{\rho^2}{9E^2 H^2} = \frac{1}{c^2} \quad (31)$$

Iz tega sledi, da je svetlobna hitrost obratno sorazmerna energijski gostoti:

$$c = \frac{3EH}{\rho} \quad (32)$$

Pomembno je pripomniti, da kar velja za posamezni elektromagnetni val, mora veljati tudi za celoten spekter ZPE in njeno energijsko gostoto. Tako smo privzeto obratno sorazmernost (25) prevedli v enačbo (32). S tem smo tudi pojasnili presenetljiv učinek, ki ga imata Casimirovi plošči na propagacijsko hitrost energije kot posledico spremenjene energijske gostote.

Nekateri bralci se utegnejo spraševati ali je v Casimirovem vacuumu kršeno načelo vzročnosti [146], s tem ko dopušča hitrost svetlobe večjo od c . Odgovor je

seveda nikalen. Če definiramo čas v običajnem vacuumu kot $t = s/c$, bo v Casimirovem vacuumu $t' = s/c'$. Vendar je to čas ki velja za 'zunanjega' opazovalca. Po Einsteinovi posebni relativnostni teoriji čas, ki ga pripišemo gibajočemu se objektu, lahko računamo po enakih relacijah kot pri dolžini, (15) in (16): $t' = t/\gamma$. Torej se čas pri svetlobni hitrosti, ko je $v = c$, 'ustavi' — lahko bi rekli, da fotoni 'živijo' brezčasno življenje. Ali naj zato v Casimirovem vacuumu čas teče nazaj? Seveda ne: v Casimirovem vacuumu se čas ustavi šele pri c' in ne pri c , zato je načelo vzročnosti še vedno veljavno.

ZPE in stabilnost atomov

Vrnimo se na kratko klasični fiziki pred letom 1900. Obstoj elektrona, kot elektrokemične enote naboja, je bil predpostavljen že leta 1874 (Stoney [147], ki je leta 1894 elektronu tudi dal ime). Odkritje elektrona [88] kot subatomskega delca, leta 1897 (Thomson [148]), je delno porušilo domnevo o atomu kot nedeljivemu osnovnemu gradniku narave. Ko je potem še bila izmerjena elektronova masa, ki je okoli 1850 krat manjša od najlažjega atoma (vodik, ^1H), se je analogija atomov s Sončnim sistemom, po kateri okoli težkega pozitivnega jedra krožijo lahki negativni elektroni, ponujala kar sama. Tako so si takrat obstojnost atomov razlagali kot ravnovesje med centrifugalno silo elektrona in električnim poljem kot posledico privlačne sile med raznorodnima nabojema jedra in elektrona, ki naj bi imelo vlogo analogno gravitaciji v makroskopskem svetu.

Vendar je ta preprosta slika takoj naletela na znotraj klasične teorije nerešljiv problem: elektronovo krožno gibanje okoli jedra je pospešeno (tako kot vsako drugo krožno gibanje), pospeševanje pa črpa energijo iz sistema, kar naj bi povzročilo izgubo energije v obliki elektromagnetnega sevanja. Elektron bi zato moral v zelo kratkem času v spiralni tirnici pasti na jedro. Atom bi tako nehal obstajati (nevtronov takrat še niso poznali). Vendar so atomi zelo stabilni in sevanja (v osnovnem energijskem stanju) ni zaznati. Klasična fizika se je znašla v hudi krizi.

Kvantna mehanika je ta problem razrešila tako, da je, na podlagi nekaterih nesporno veljavnih enačb, postavila 'pravila' po katerih naj se vedejo osnovni delci. Ta pravila prepovedujejo elektronu gibanje po poljubni orbiti, omogočajo le nekatere orbite, povezane z natančno določenimi energijami, znotraj katerih ni nobenega sevanja energije iz sistema. Do sevanja pride le, če elektron preskoči iz ene orbitale na drugo. Za preskok na orbitalo z višjo energijsko ravni je potrebno, da elektron absorbira foton iz okolice. Obratno, pri preskoku na nižjo energijsko raven elektron odda odvečno energijo v obliki izsevanega fotona. Taka slika deluje zelo dobro in daje pri izračunih zelo natančne odgovore, ki se tudi zelo dobro ujemajo z meritvami.

Vendar se nekateri fiziki niso sprijaznili s tako razlago, ker so menili, da ta ne razreši osnovnega vprašanja, zakaj elektron, ujet v atomsko orbitalo, ne seva. Pravila, četudi ustrezna in uporabna, so ena stvar, fizikalna realnost pa je nekaj drugega. Vzročnost in posledičnost sta osnovni fizikalni kategoriji in pojave si moramo razlagati v skladu z njimi, golo sledenje pravilom (pa čeprav so v njihovem ozadju lahko čisto določene fizikalne zakonitosti) nas ne more in ne sme zadovoljiti.

Problem so začasno 'pometli pod preprogo' s tem da so na osnovi de Brogliejeve valovne dolžine za elektron izračunali, da je njegova koherenčna dolžina pri gibanju okoli jedra mnogo večja od obsega orbitale. Elektron se zato lahko giblje okoli jedra le v takih orbitalah v katerih je sam s svojim lastnim valovanjem v fazi korelaciji, med tem ko bi v vmesnih orbitalah svoje lastno valovanje potiral, zato vmesne orbitale (in energije) niso dovoljene.

Članek, ki ga je objavil Puthoff [149] leta 1987, kaže kako bi bilo mogoče problem razrešiti, ne da bi ob tem porušili celotno stavbo znanosti XX stoletja: *"...osnovno energijsko stanje vodikovega atoma je mogoče natančno definirati kot rezultat dinamičnega ravnovesja med sevanjem ki ga elektron emitira zaradi pospešenega gibanja po orbitali določeni s tem stanjem in absorbiranim sevanjem ki je posledica naključnih nihanj elektromagnetnega ozadja vacuumske energije..."*.

Z drugimi besedami, elektronsko orbitalo si lahko zamislimo v klasičnem smislu, po karetem elektron nenehno seva energijo v okolico, hkrati pa enako količino energije dobi iz te okolice nazaj iz ozadja ki ga tvori ZPE tako, da se energija sistema, ter s tem tudi radij elektronske orbitale, ohranja.

To je nekako podobno kot pri človeku, ki pri temperaturi 310 K seva prek površja svoje kože ($\sim 2 \text{ m}^2$) kot (skoraj) črno telo, torej okoli 400 J (kot 4 močne žarnice!). Kako lahko vzdržujemo ta energijski pretok, saj s hrano v telo vnesemo le za pol ure takega sevanja? Odgovor je sila preprost: skoraj enako količino energije dobimo nazaj iz okolice! Če je ne dobimo, nas zebe; moramo se obleči, da zadržimo topel zrak ob telesu. Energijska ravnovesja so v naravi pogosta in pomembna!

Čeprav se nam na prvi pogled zdi taka razlaga nekoliko samovoljna in po nepotrebnem zapletena, si moramo v mislih priklicati Casimirov učinek. Tako kot Casimirovi plošči, tudi proton in elektron učinkujeta kot prepreki za valovanja ZPE, zato se med njimi ustvari območje manjše gostote polja, večja gostota polja zunaj pa ju sili skupaj, ter prispeva k njuni medsebojni privlačni sili zaradi naboja. Toda Casimirova sila deluje v enaki smeri kot Coulombova elektrostatična sila med raznorodnima nabojema (čeprav z drugačno potenco krajevnega vektorja), zato se zdi paradoksalno, da bi z njeno pomočjo lahko karkoli pojasnili.

Tukaj je potrebno upoštevati, da sta, za razliko od Casimirovih plošč, ki sta nevtralni, elektron in proton nasprotno nabita in njuna polja lokalno prispevata k gostoti ozadja, zato ima polje med njima dodaten gradient (ki je superponiran tistemu, ki nastopa zaradi krogelne simetrije polj vsakega posamičnega delca). Poleg tega, za razliko od plošč, sta elektron in proton majhna delca in dolgi valovi gredo mimo njiju. 'Senčenje' vacuumskih polj zato nastopi šele pri frekvencah ki so ustrezno visoke (z valovnimi dolžinami primerljivimi z velikostjo atoma) in posledično bo v tem primeru Casimirov pritisk toliko močnejši. Tako bo elektron na malenkostno nižji orbitali izseval manj, absorbiral pa v povprečju več energije ozadja, in obratno, na malenkostno višji orbitali bo izseval več kot bo absorbiral iz ozadja. Energijska bilanca je torej taka, kot če bi bil elektron ujet v neki prostorski potencialni jami, ki ima obliko površine krogle okoli protona, zato je tak sistem lahko dolgočasovno stabilen.

Prav tako je pri tej razlagi potrebno upoštevati, da kaže polje ZPE naključne kvantne fluktuacije, zato tudi energija, ki jo absorbira elektron na svoji orbitali ni ves čas enaka in se prav tako naključno spreminja. Elektron sicer zaznava le veliko povprečje teh fluktuacij, vendar je zadosti majhen in lahek, da vseeno zazna in reagira na majhne spremembe. Zato tudi njegova orbitala kaže naključna odstopanja, točno tako kot to zahteva QED. Posledično, trenutno oddaljenost elektrona od jedra lahko opišemo le z verjetnostjo, da bomo elektron našli na neki določeni oddaljenosti.

Puthoffov članek iz leta 1987 [149] obravnava problem z vidika SED in elektromagnetne narave ZPE, vendar v zaključku posebej poudarja: "*... dejansko so vse enačbe obravnavanega problema identične tistim, ki jih dobimo ob upoštevanju Heisenbergovih enačb gibanja v operatorski obliki, in kvantno-mehansko povprečje vodi do identičnih rezultatov. Zato obravnava s pomočjo SED, ter izpeljani zaključki, popolnoma ustrezajo obravnavi v QED*". Torej tako QED kot SED dajeta enak rezultat, ne glede na drugačna izhodišča in delno drugačno matematično obravnavo.

Ta rezultat je bil tako pomemben, da je revija New Scientist posvetila dva članka tej problematiki. Prvi [150], z naslovom "*Zakaj se atomi ne sesedajo?*", pravi:

“Ugotavljamo, da je na podlagi dobro definiranih in natančnih kvantitativnih argumentov mogoče reči, da je osnovno stanje vodikovega atoma določeno z dinamičnim ravnovesjem v katerem kolaps stanja preprečuje prisotnost ZPE in naključnih fluktuacij elektromagnetnih polj. Pričakovana implikacija take razlage je, da je sama stabilnost snovi pogojena z obstojem ZPF fenomenov, na opisani način, kar presega običajne interpretacije vloge in pomena fluktuacij vacuumske energije.”

Kot smo že povedali, obstaja več ‘šol’, ki vsaka po svoje tolmačijo izvor ZPE, najbolj značilni sta dve, ostale predstavljajo en ali drug vidik z večjimi ali manjšimi variacijami. Prva (z oporo na QED) pravi, da vsota vseh gibanj vseh delcev v Vesolju povzroča ZPE, prav tako pa ZPE vpliva na gibanje vsakega delca, torej kot nekakšna samo-regenerirajoča se povratna zanka.

Po drugi strani, teorije, ki se opirajo na SED, pravijo, da je ZPE nastala in bila določena v trenutku rojstva Vesolja kot eden od nujnih mejnih pogojev, njena gostota pa je nato le sledila razširjanju Vesolja.

Da ne bo pomote, tukaj ne govorimo o kozmičnem mikrovalovnem sevalnem ozadju [151], [152], [153], [154], ki je poseben pojav (vzrok katerega se je zgodil šele kakšnih 380 000 let po ‘Velikem poku’, ko je povprečna energija fotonov upadla do te mere, da so delci, nastali kot posledica naključnih fluktuacij, lahko ostali stabilni zadosti dolgo, da so lahko formirali atome; snov se je tako razklopila od sevanja, in je Vesolje prvič postalo prozorno za sevanje).

Izkaže se, da je prvi pogled (QED) vsaj nekoliko pomanjkljiv; namreč, če je pogoj za obstoj atomov prav ZPE, brez katere bi se ti sesedli, postane tako razmišljanje dokaj neprepričljivo. Če bi se atomi brez prisotnosti ZPE takoj sesedli, je potem vprašljivo kako je do njihovega nastanka sploh lahko prišlo, če je ZPE vsaj delno posledica tudi njihovega obstoja.

Nujno torej potrebujemo nek bolj osnovni vzrok za obstoj ZPE, v smislu SED.

Planckova dolžina, kot smo to prej videli, predstavlja nekakšno spodnjo mejo valovne dolžine, oziroma je to meja pod katero praktično ni mogoče smiselno govoriti o prostoru, vsaj ne tako kot ga v običajnih makroskopskih okoliščinah doživljamo. Na tej ravni postane prostor ‘penast’, oziroma ‘gobast’, z med seboj večkratno navzkriž povezanimi cevastimi strukturami (ali nekaj takega), kot ga opišejo Misner, Thorne in Wheeler [155].

Taka struktura prostora je, po nekaterih domnevah, posledica formiranja parov delec-antidelec z energijami ki so podobne Planckovi energiji (**Tabela 2**). Razsežnosti teh delcev naj bi ustrezale Planckovi dolžini in njihova masa naj bi ustrezala Planckovi masi. Po izračunih naj bi velikost teh delcev bila primerljiva z njuno lastno de Brogliejevo valovno dolžino, hkrati pa naj bi njuna masa in premer ustrezali Schwartzschildovemu [156] kriteriju [157] za ‘horizont dogajanja’ [158] pri ‘črnih luknjah’ [159], ($d = 4Gm/c^2$). Take mikro črne luknje, na našo srečo, izjemo hitro razpadejo (v času ki naj bi bil primerljiv Planckovemu času, in sicer zaradi Hawking–Bekensteinovega sevanja [160]).

Ker taka diskretna struktura prostora nastopa le na najnižji možni dimenzijski ravni, je atomi in sub-atomski delci praktično ne zaznavajo, za njih je prostor gladek in zvezen, le energija v njem nekoliko valovi. Če bi lahko Planckov delec raztegnili, denimo, na velikost človeka, bi bil elektron primerljiv z velikostjo naše galaksije!

Planckovi delci so pogosto privzeti kot osnova tudi za različne, bolj eksotične kozmološke teorije, ki so trenutno še v začetku razvoja.

Taka je, denimo, teorija masivnih super-strun v 10- ali 11-dimenzijskem prostoru [161], [162], [163], [164]. Plankovi delci imajo v taki teoriji svoj ekvivalent, predstavljeni so kot 6-dimenzijske 'kroglice', razsežnost katerih je približno l_P (v vsaki od teh dimenzij), ki tvorijo v preostalih dimenzijah zanke približno enakega velikostnega reda, ter vibrirajo s frekvencami primerljivimi z f_P .

Več-dimenzijskost prostora [165], [166], v teh teorijah ima svoje korenine prav gotovo v matričnih dimenzijah kvantnih števil, s katerimi so običajno delci opisani, vendar do današnjega dne ni čisto jasno kaj je gnalo nekatere znane fizike [167], da so tudi taki kvantni lastnosti, kot je spin ali naboj, pripisali dimenzijskost v smislu prostorske razsežnosti (in ne, denimo, le 'prostostne stopnje'). In to kljub temu, da mnogi izmed teh fizikov uživajo nesporen, popolnoma zaslužen ugled (kot, denimo, Steven Hawking [168]). Je pa skoraj gotovo, da so takemu pogledu na prostor in snov veliko prispevale prav teorije tipa 'geometrodinamike' [169], kjer se različne vrste interakcij med delci razlaga poglavitno preko odvisnosti od geometrijske oblike njihovih energijskih polj; denimo, kroglena simetrija polja vedno ima za posledico silo sorazmerno z $1/r^2$ (na primer, električno polje elektrona ali protona, ali gravitacijsko polje). Kakor koli že, zaenkrat je še prezgodaj napovedati v kakšne vse svetove [170] nas bodo te (niti ne več tako) nove teorije odpeljale.

Na osnovi Heisenbergovega načela nedoločenosti, QED predpostavlja, da pari Planckovih delcev nastajajo, živijo, in izginjajo v časih ki so približno enaki t_P . Karikirano povedano to pomeni, da se narava (ali, če je komu ljubše, Narava) nikakor ne more odločiti, ali naj se znotraj volumna s premerom 10^{-35} metra v časovnem intervalu 10^{-44} sekunde nahaja masa od 10^{-8} kilogramov, ali pa čisto popolnoma nič, oziroma le 'foton' z energijo 10^9 joulea!

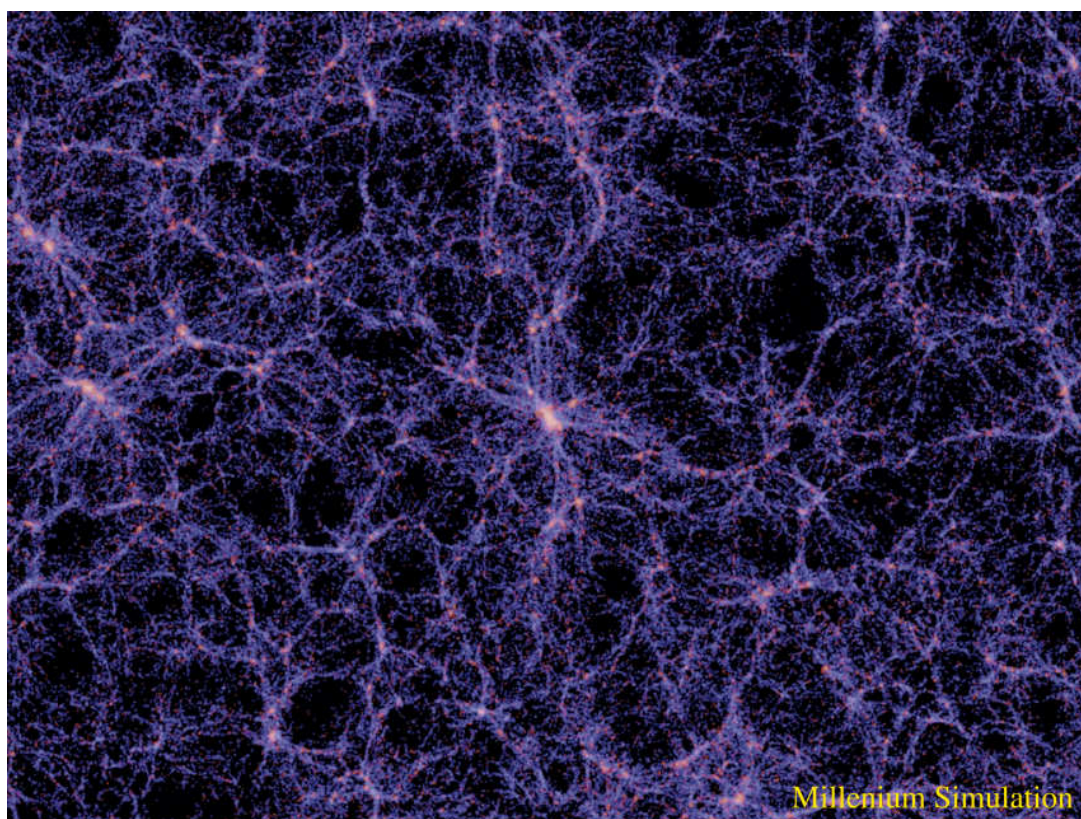
Nasprotno, zagovorniki SED domnevajo, in tudi prepričljivo trdijo, da je prav ZPE poglavitni razlog Heisenbergovi nedoločenosti. To pa lahko vnese v razpravo en nov argument: gre namreč za to, da je na dolžinah primerljivih z l_P prostor nezvezen, oziroma ne dovoljuje več poljubne smeri gibanja, pač pa le nekaterih. Posledično, prenos elektromagnetne energije v poljubno smer na tej ravni ni dovoljen.

To pa spet ima dve posledici. Najprej, ZPE postane neučinkovita, ali morda celo neaktivna na Planckovi ravni, celo Heisenbergova nedoločenost morda za Planckove delce ne velja več; pravzaprav so ti delci osnovni gradniki 'strukture' vacuuma. Druga posledica pa delno sloni na predhodni, namreč, če so Planckovi delci tisti osnovni gradniki, izvir ZPE mora zagotovo biti posledica medsebojnega delovanja teh delcev. Par Planckovih delcev, ki se med seboj potre, rodi par fotonov, ti pa se ob srečanju z drugimi tako nastalimi fotoni med seboj zapletejo in rodijo nov par Planckovih delcev. In tako v nedogled, že vseh 13.7 milijard let od Velikega poka!

Če te domneve držijo, imamo razlog za še nekaj izredno zanimivih domnev.

Planckovi delci, ZPE in kozmološko ‘napihovanje’

Astronomi in kozmologi so zelo dolgo iskali razlago zakaj je Vesolje na zelo velikih razsežnostih po eni strani tako zelo enakomerno posejano z jatami galaksij, po drugi strani pa zakaj so vmes take gromozansko velike praznine, med tem ko je snov pretežno koncentrirana v relativno majhnih galaksijah ali jatah galaksij, razpored katerih tvori pajčevini podobno ‘strukturo’ [171], **Sl.10**. Hkrati je povprečna gostota snovi le en atom vodika na m^3 .



Sl.10: Vesoljska ‘pajčevina’ — računalniško ustvarjena slika razporeda galaksij na zelo velikih razdaljah (vir Millenium Simulation, [171]). Slika zajema območje okoli 400×300 Mpc (megaparsek, $1 \text{ Mpc} \approx 3 \times 10^{22} \text{ m}$) v okolici našega galaktičnega jata (svetla skupina v sredini).

Do leta 1925 je še veljalo prepričanje, da je Vesolje relativno statično, čeprav bi se po Einsteinovi splošni relativnostni teoriji [44] (1915) morale zaradi gravitacije že zdavnaj zgostiti (če je geometrija Vesolja zaprtega tipa), ali pa razleteti (če je ta odprtega tipa) [172], [173]. Zato je Einstein svoji gravitacijski enačbi kar po občutku dodal člen, ki je Vesolje stabiliziral; ta člen je danes znan kot ‘kozmoška konstanta’ Λ [174], [175]. Vendar je leta 1925 Hubble [176] objavil svoje odkritje o zamiku spektralnih absorpcijskih črt [177] proti rdečemu [178], ki ga je izmeril pri večjem številu galaksij in ugotovil, da je zamik sorazmeren oddaljenosti posamičnih galaksij. Spektralni zamik si takrat niso znali razložiti drugače kot s pomočjo Dopplerjevega učinka [33] (danes sicer poznamo več učinkov, ki bi lahko skupaj temu prispevali), kar je napeljevalo na en sam možen sklep, namreč, da se Vesolje širi [179]. Einstein je takoj obžaloval vpeljavo kozmoške konstante in je kasneje o njej govoril kot o svoji največji napaki.

Ideja o širjenju Vesolja je hitro dobila zagovornike [180], [181], ki jim je bila skupna ideja o 'Velikem poku' [182] (kot je 'rojstvo' Vesolja posmehljivo poimenoval Hoyle [183]), a tudi alternativce [184-189] in nasprotnike [183], [190-195]. Dokončno pa je bila sprejeta po odkritju kozmičnega mikrovalovnega sevanja [151] (Penzias [152] in Willson [153], leta 1956), ki je nedvoumno kazalo na nekoč izredno gosto in izredno vroče Vesolje.

Vendar je vzrok za nastanek strukture galaktičnih jat, kot jih vidimo danes, dolgo časa bil skrivnosten, prav zaradi meritev kozmičnega mikrovalovnega sevanja, ki se je zdelo popolnoma homogeno in izotropno: njegova ekvivalentna temperatura je 2.7 K, enakomerno v vseh smereh; šele nedavno so z zelo natančnimi merjenji [154] ugotovili majhna odstopanja, velikostnega reda 10^{-3} K, ki se bolj ali manj ujemajo z današnjim razporedom snovi v Vesolju.

V vmesnem času pa je nastalo več različnih domnev o vzrokih za tako sliko Vesolja, in ena od teh je bila sprva čudna, nato pa široko sprejeta ideja o kozmološkem napihovanju (inflaciji) v zgodnjem Vesolju [196], [197], [198].

Neposreden povod za take domneve leži v dolgo znanem in nikoli zadovoljivo pojasnjenem 'problemu horizonta' [199]. Dejstvo, da je Vesolje na velikih razdaljah izotropno in ima do nekaj tisočink Kelvina enako temperaturo mikrovalovnega sevalnega ozadja, se sprva ne zdi kaj posebno nenavadnega, dokler ne pomislimo, da sta dva nasprotna vidna 'roba' Vesolja okoli 28 milijard svetlobnih let narazen, med tem ko je Vesolje staro slabih 14 milijard let. Ker nobena znana interakcija ne propagira hitreje kot svetloba, ni možnosti, da bi sevanje oddaljenih delov Vesolja imelo dovolj časa za medsebojni vpliv in doseganje termičnega ravnovesja, kot ga sedaj zaznavamo. Ta problem je kozmologom dolgo povzročal hude glavobole, zaradi česar so danes pripravljeni sprejeti take (in še bolj 'nore' [200]) ideje kot je inflacija.

Inflacija, oziroma hitro razširjanje same strukture prostora, domnevno za faktor 10^{50} v $\sim 10^{-33}$ sekunde (!!!), je edini proces, ki je lahko zgodaj formirane pare Planckovih delcev zadosti dolgo obdržal narazen, da se niso vsi med seboj takoj anihilirali, zato so nekateri le obstali in kasneje s svojim razpadom povzročili nastanek naslednjih rodov sub-atomskih delcev, ki so potem končno pripeljali do nastanka atomov. Žal pa, vsaj za enkrat, nihče ni podal prepričljive razlage kaj sproži inflacijo, tako da smo dejansko en nerešljiv problem zamenjali z drugim.

Kljub temu je ideja tako privlačna, da so številni teoretiki poskusili ponuditi boljše ali slabše opise takega procesa. En tak proces, kjer Planckovi pari delcev postanejo 'seme' današnje snovi, je opisal Gibson [201]. Njegova analiza sloni na dveh pojavih, ki so povezani s preučevanjem 'črnih lukenj'.

Omenili smo že Schwarzschildov kriterij za 'horizont dogajanja' pri črnih luknjah v odvisnosti od mase. Hawking [160] je pokazal možnost [202], da nerotirajoče črne luknje Planckove mase in razsežnosti utrpijo fazni prehod in se transformirajo v elektromagnetno sevanje (oziroma v fotone brez mase, a z energijo ekvivalentno Planckovim delcem), kar naj bi se zgodilo v časovnem intervalu reda velikosti Planckovega časa t_P . To bi se lahko zgodilo le delu zgodnjih Planckovih delcev.

Drugi pojav pa je posledica dejstva, da je Planckova masa zgornja mejna vrednost ki se lahko nahaja znotraj prostora velikosti Planckovega volumna, kar posledično pomeni, da se dva sosedna Planckova delca ne bosta takoj anihilirala, tudi

če kažeta lastnosti para nasprotno nabitih delcev, temveč bosta kratek čas le rotirala drug okoli drugega, oziroma si izmenjevala 'bivalni prostor'. Če tak par delcev po kvantnem naključju preživi zadosti dolgo, da naredi nekaj oscilacij, bo prav tako izseval del energije v obliki elektromagnetnega sevanja (zaenkrat ni nobenih razlogov, ki bi preprečevali paru Planckovih delcev, da imata nasprotni električni naboj).

Tako bi začetna količina elektromagnetnega sevanja v smislu ZPE nastala v teh dveh procesih. Možnosti pa je še več.

Verjetnost da najdemo nerotirajočo črno luknjo je izredno majhna, že zaradi razmer v katerih nastane. Denimo, zvezda, ki se sesede zaradi lastne gravitacije ko se njen notranji fotonski pritisk zmanjša (ker fuzijski procesi pri večjih atomskih masah imajo vedno manjši izkoristek), seveda ohrani svojo vrtilno količino tudi pod horizontom dogajanja. Rotirajoče, ali Kerrove črne luknje (novozelandski matematik Roy Kerr [203] je leta 1963 podal enačbe, ki opisujejo njihovo obnašanje) tako imajo neko vrtilno količino, ki vpliva na obliko horizonta dogajanja. Rotirajoče in povrh še električno nabite črne luknje pa imenujemo Kerr-Newmanove [204] črne luknje.

Razmere v zgodnjem Vesolju, ki so vodile k nastanku Planckovih delcev, so bile prav gotovo dovolj kaotične, da se je del energije ohranjal v obliki rotacije delcev. Zato bi morali take Planckove delce obravnavati po Kerr-Newmanovih relacijah. Če se, denimo, nek nerotirajoči Planckov delec približa rotirajočemu Kerr-Newman-Planckovemu delcu v smeri rotacije, lahko nastane rotirajoči par delcev, ki vrtnenje prostora le še poveča (v nasprotju z običajnimi razmerami, ko se par makroskopskih teles obnaša pri trkih več ali manj elastično, na Planckovi ravni so dogodki nelinearni in neelastični, ker delec lahko zavzame le diskretno volumsko enoto prostora), kot je pokazal Bizon s sodelavci [205]. Gibson [201] pa je ugotovil, da tak proces ima za posledico povečanje energije sistema, ki pa se izkazuje v produkciji novih Planckovih delcev, ter posledično še večji kaotičnosti in turbulentnosti prostora na vedno večjih razsežnostih, ki segajo lahko od velikosti elektrona pa vse do velikosti jat galaksij. Tvorba novih Planckovih delcev, ter s tem širjenja prostora, pa bi lahko potekala izjemno hitro, tako kot to zahteva inflacijska teorija.

Nekaj kozmološko pomembnih implikacij

Taka razlaga vzrokov za inflacijo v zgodnji fazi razvoja Vesolja, kot smo jo podali v prejšnjem poglavju, poraja nekaj kozmološko pomembnih implikacij.

Najprej, Kerr-Newman-Planckovi delci dejansko lahko tvorijo kratkožive rotirajoče dipole, ki porajajo visokoenergijska elektromagnetna polja v smislu ZPF.

Druga implikacija se nanaša na razsežnosti takih prostorskih vrtincev in posledično na nastanek zvezd, planetnih sistemov in galaksij. V zadnjem desetletju prejšnjega stoletja je bilo ugotovljeno, da vsa galaktična jedra vsebujejo supermasivne črne luknje, [206]. Novejše raziskave kažejo, da je masa galaktičnih jeter vedno približno tisočkrat večja od mase supermasivnih črnih lukenj v teh jedrih, [207]. Ta korelacija nakazuje, da obstaja nekakšna soodvisnost med supermasivno črno luknjo in galaktičnim jedrom, ki se okoli nje oblikuje (čeprav obstajajo indici, da nekatere galaksije, denimo M33, vsebujejo v svojem jedru črno luknjo, katere masa je 'le' okoli 1000-krat večja od mase našega Sonca [208]). Tako sklepanje potrjujeta Bean in Magueijo [209], ki razlagata, da so supermasivne črne luknje nastale že zelo zgodaj v kozmični evoluciji, in so kasneje vplivale na nastanek galaksij. Prav tako Richstone v svoji raziskavi, predstavljeni leta 2000, ugotavlja, da so pravzaprav supermasivne črne luknje ne le omogočile, temveč celo povzročile nastanek galaksij; podobno mnenje izraža Garmire [210]. Vse to nakazuje, da je mogoče na enovit način interpretirati dogajanje na mikro in makro ravni ob nastanku in evoluciji Vesolja. Gibson [201] celo poudarja, da se izmerjena majhna tempreturna odstopanja v mikrovalovnem sevanju (CMB, 2.7 ± 0.003 K, [154]) zadosti dobro ujemajo s teoretičnimi napovedmi le, če je njihov izvor zares v začetnih turbulentah na Planckovi ravni. To neposredno sledi iz faze kozmičnega napihovanja za faktor približno 10^{50} [197], ki je za podoben faktor povečala tudi turbulence na mikro ravni. Seveda pa so turbulence na makro ravni najbrž le povprečje tistih na mikro ravni.

Tretja implikacija se nanaša na formiranje atomskih jeter težjih od vodika. Zgodnje Vesolje naj bi vsebovalo predvsem vodik (okoli 75%) in helij (okoli 25%). Konvencionalna teorija nastanka težjih elementov (Bethe, [74]) pravi, da so se ti formirali v procesu fuzije v zvezdah, in sicer fuzija elementov lažjih od železa ima energijski presežek, ki se sprošča v obliki fotonov, med tem ko tvorba težjih elementov zahteva dodatno energijo iz svoje neposredne okolice. Zvezda, ki porabi pretežni del lažjih elementov v svojem jedru, ne proizvaja več zadosti fotonskega tlaka, zato prevlada gravitacija in jedro zvezde se sesede v procesu znanem kot 'nova', oziroma 'supernova' (pri zvezdah katerih masa je vsaj štirikrat večja od mase Sonca). Udarni val pri takih eksplozijah odpihne zunanji plašč zvezde in nekaj časa daje zadosti energije za tvorbo elementov težjih od železa. Razmerja pogostosti teh elementov pa morajo v splošnem biti sorazmerna energiji, ki je na voljo, oziroma začetni masi zvezde. Vendar so bila ugotovljena določena odstopanja od teoretičnih pričakovanj. Flambaum in Berengut [211] navajata, da obstaja možnost, da *"negativno nabit Planckov delec ob srečanju z dvema protonoma lahko sproži nastanek deuteriuma. ... Tretji proton bi lahko sodeloval pri nastanku ^3He , in tako naprej, vse do najtežjih jeter... V procesu lahko nastopajo tudi nevtroni, jedra He, itd. ... Podoben proces bi lahko potekal tudi v bližini črnih lukenj"*. Na ta način bi lahko pojasnili nekatera odstopanja v pogostosti nekaterih elementov, izmerjenih v naši galaksiji, kot tudi pri najbolj oddaljenih kvazarjih na robu vidnega Vesolja, med drugim tudi razmeroma velike količine zlata in platine na Zemlji, ki se težko pojasnijo le s formiranjem v

eksploziji supernove pred nastankom našega osončja. Tudi močno izražene kovinske spektralne linije v absorpcijskem spektru treh zelo oddaljenih kvazarjev (z rdečim zamikom $z = 6$) lahko pojasnimo na podoben način [212-215].

Četrtrič, vrtnčenje na Planckovi ravni bi lahko pojasnilo tudi oblikovanje planetov. Namreč, splošno sprejeti proces formiranja planetov iz istega oblaka prahu v katerem je že nastala centralna proto-zvezda ima določene omejitve. Ko proto-zvezda zasije in postane, denimo, T-Tauri, je čas, potreben za zbiranje okoliškega prahu v večje gruč, ki so potem lahko osnove planetov, predolg glede na intenziteto stelarne 'vetra' (toka ionov z zvezde), ki je pri T-Tauri tako močan, da bo odpihnil ves prah iz okolice zvezde mnogo pred nastankom večjih gručin, ki bi jih v svoji orbiti zvezda še lahko zadržala. Provenzale [216] je v dvodimenzionalnem modelu pokazal, da se prašni delci nabirajo v centrih vrtnicev, analogno nabiranju drobcev čajnih lističev na sredi dna šalice čaja, ko tega močno premešamo, le da v tem primeru imamo namesto hidrostatičnega in hidrodinamičnega pritiska pritisk fotonskih polj. Bracco in sodelavci [217] so enako analizo ponovili na primeru proto-zvezdnega diska in ugotovili, da *"simulacije potrjujejo, da se anticiklonski vrtnici lahko formirajo in obdržijo kot dolgožive koherentne strukture"*. Njihove analize potrjujejo tudi, da vrtnice zbira prašne delce učinkovito tudi ko njegova kotna hitrost pade. Ta proces bi lahko bil enako učinkovit kot je to elektrostatično privlačenje med z UV žarki ioniziranimi prašnimi delci. Seveda, taki vrtnici lahko nastanejo tudi kot posledica trkov snovi na makroskopski ravni.

Petič, obstajajo močne indikacije, da atomske orbitale niso le pod vplivom, temveč so tudi določene in vzdrževane z efektivnim pritiskom ZPE (Puthoff, [218]). Zato je tudi zelo verjetno, da bi spreminjanje energijske gostote ZPE vplivalo na vse atomske strukture v celotnem Vesolju, ki bi morale sproti prilagajati svoje energije v skladu z gostoto energije vacuuma. Ker pa so atomske orbitale kvantizirane, lahko pričakujemo, da bodo orbitale elektronov s časom preskočile na drugo energijsko raven ko se ZPE zadosti spremeni.

Zakaj naj bi se ZPE spreminjala? Kot smo že omenili pri kozmičnem napihovanju, obstajajo indikacije, da je prostorska gostota ZPE ob nastanku Vesolja bila mnogo nižja kot je danes, ter da se je v procesu napihovanja močno povečala. Vendar se proces širjenja Vesolja ni ustavil, zato domnevamo, da zviševanje gostote poteka še danes, čeprav mnogo bolj počasi. Zato bi lahko spekter sevanja atomov v zgodnejših obdobjih bil premaknjen bolj proti rdečemu delu. Ker pa s pogledom daleč v Vesolje, zaradi končne hitrosti svetlobe, vidimo prav tako daleč v preteklost, lahko pričakujemo, da bomo na določenih velikih razdaljah opazili kvantne preskoke v rdečem zamiku spektra oddaljenih galaksij. Prav tak 'kvantizirani rdeči zamik' je bil tudi zaznan v spektrih oddaljenih galaksij [219-222], kar nakazuje, da je vsaj del rdečega zamika, ki ga sicer pripisujemo Dopplerjevemu učinku in oddaljevanju galaksij, posledica spreminjanja gostote ZPE (sicer pa na rdeči zamik vpliva tudi gravitacija, po splošni relativnostni teoriji, in to na dveh ravneh: prvič lokalno gravitacijsko polje vpliva na potek časa in, posledično frekvence oscilacij posameznih atomov, drugič pa izsevani foton mora prevladati gravitacijski potencial celotne galaksije v kateri je nastal, čeprav potem nekaj te energije pridobi nazaj ob vstopu v gravitacijsko polje naše galaksije).

Vendar bi postopno povečevanje gostote ZPE na podoben način vplivalo tudi na samo svetlobno hitrost, kot smo to že videli pri Casimirovem učinku. Ta problem

postaja predmet intenzivnih raziskav, ker bi zelo visoka vrednost svetlobne hitrosti ob nastanku Vesolja razrešila vrsto neskladij v nekaterih astronomskih opazovanjih [223, 224]. V zadnjem času je nastala vrsta predlogov za modele Vesolja, v katerih naj bi se svetlobna hitrost zmanjševala z evolucijo Vesolja [225, 226]. Velika verjetnost je, da osnovni razlog za tako obnašanje Vesolja leži prav v lastnostih energije vacuuma, kot jo obravnavamo tukaj. Prav tako obstajajo še drugi indici, da so se nekatere količine, ki smo jih sicer imeli za konstante, v preteklosti tudi spreminjale. Tako je, na primer, odkritje, da absorpcija svetlobe oddaljenih kvazarjev v medzvezdnih oblakih plinov, ki vsebujejo večje količine kovin (Fe, Ni, Cr), kaže take spektralne značilnosti, ki bi lahko bile le posledica spremenjene konstante fine strukture, $\alpha_f \approx 1/137$ [227]. Po definiciji [228] je:

$$\alpha_f = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0\hbar c} \quad (33)$$

Če so se torej spreminjale same lastnosti prostora, in posledično tudi svetlobna hitrost, se je nujno morala spremeniti tudi vrednost α_f .

Še eno odkritje [229] podpira tezo o 'ne tako konstantnih' konstantah [230], namreč, analize razmerij nekaterih razpadnih produktov v ostankih doslej edinega znanega naravnega jedrskega reaktorja izpred kakih 2 milijardi let, najdenih v Oklu v Gabonu (Afrika), prav tako nakazujejo, da se je v preteklosti vrednost α_f bila za približno 4 % večja kot je danes.

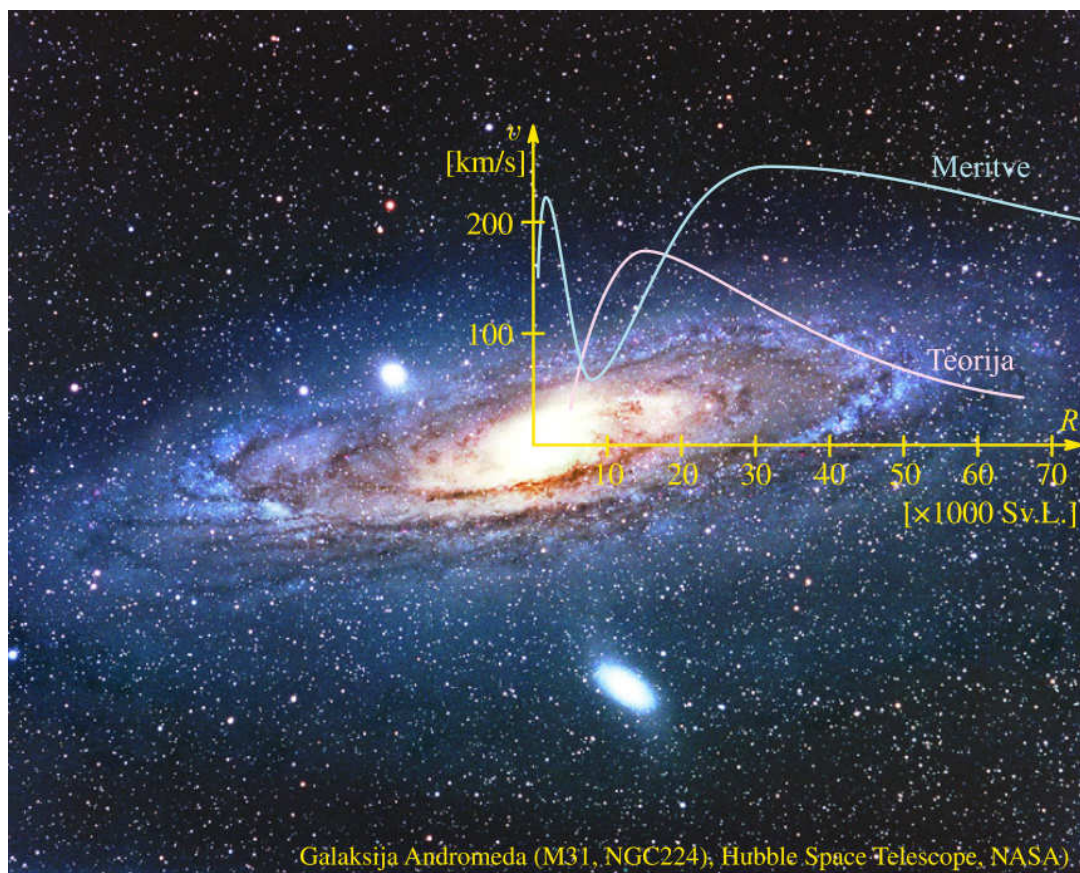
Rezultat spreminjanja gostote ZPE torej vpliva na energije osnovnih in vzbujenih stanj atomskih orbital, kot tudi na astronomske meritve rdečega zamika, ter končno tudi na svetlobno hitrost. Ker Planckovo konstanto h lahko imamo za nekakšno mero intenzitete ZPE, ter svetlobno hitrost c , ki je obratno sorazmerna gostoti ZPE, se poraja scenarij po katerem bi povečanje gostote ZPE v času XX stoletja že bilo zadosti veliko, da bi opazili oba učinka. Vendar bi zvišanje vrednosti h in znižanje vrednosti c povzročilo, da bi produkt hc ves čas ostajal nespremenjen, kot sta to predlagala Norman in Setterfield leta 1987 [231]. Meritve svetlobne hitrosti v teku XX stoletja [232] res kažejo majhno sistematično zmanjševanje, ki ga ni moč v celoti pripisati izboljšavi merilnih metod. Da bi ugotovili deleže teh učinkov, bi morali le primerjati podatke za rdeči zamik glede na razdaljo s podatki za svetlobno hitrost glede na čas. Žal izboljšave merilnih metod, tako v astronomiji kot tudi v optičnih laboratorijih te podatke nekoliko zamegljujejo in potreben bo zelo natančen pregled. Take raziskave že potekajo in rezultate bi si lahko obetali v kratkem.

Problem ‘temne snovi’ in ‘temne energije’

V drugi polovici XX stoletja smo bili priča izredno hitremu razvoju instrumentov in merilnih metod na vseh področjih. V astronomiji pa je ta razvoj privedel do dveh nepričakovanih odkritij.

Čeprav nam Vesolje zgleda podobno v kateri koli smeri, galaksije niso po prostoru razmetane naključno, tem več so zbrane v gručah ali jatih, a tudi razpored teh gručk kaže nekakšno ‘strukturo’, **Sl.10**. Edino kar bi lahko na velikih razdaljah držalo snov v takih gručah je seveda gravitacija. Že leta 1933 je Zwicky [188] analiziral disperzijo hitrosti v gruči galaksij znani kot ‘Coma Cluster’ in ugotovil določena odstopanja od pričakovanih vrednosti. Prav tako je Oort [233] leta 1932 pri analizi gibanj z uporabo Newtonovega gravitacijskega zakona (kjer privlačna sila upada s kvadratom razdalje) ukazal na pomanjkanje mase v nekaterih primerih, kar ga je napeljalo k domnevi o obstoju velikih količin snovi, ki ne seva in slabo reflektira svetlobo, zato jo ne vidimo (Oortov ‘oblak’).

Leta 1970 je Vera Cooper Rubin [234], z analizo rotacije večjega števila galaktičnih diskov, ugotovila, da vrednosti hitrosti rotacije od jedra proti robu diska ne upadajo tako kot bi pričakovali na osnovi Newtonovega gravitacijskega zakona, temveč se obnašajo kot da je celotna galaksija obkrožena z nekim mnogo večjim oblakom snovi, ki s svojo gravitacijo vpliva na vrtenje galaksije [235], **Sl.11**. Temu je potem sledila vrsta podobnih meritev in analiz na številnih galaksijah in gručah [236].



Sl.11: Primerjava teoretično pričakovane in izmerjene disperzije radialne hitrosti rotacije galaktičnega diska pri galaksiji Andromeda <http://en.wikipedia.org/wiki/Andromeda_Galaxy>. Razdalja R od središča je podana v tisočih svetlobnih let, hitrost v pa v kilometrih na sekundo.

Rotacijska hitrost [237] v nekega objekta v stabilni Keplerovi orbiti na razdalji R od skupnega centra mase mora ustrezati proporcionalnosti $v(r) \propto \sqrt{M(R)/R}$, pri čemur je $M(R)$ masa vseh objektov znotraj orbite na razdalji R . Zaradi tega bi pričakovali, da orbitalna hitrost doseže nek maksimum na relativno majhni razdalji od jedra in nato upada z razdaljo kot $v(R) \propto 1/\sqrt{R}$. Toda pri vseh galaksijah opazamo, da hitrost od roba galaktičnega jedra sprva hitro narašča, nato pa se do roba same galaksije skoraj ne spreminja (na pr., pri naši galaksiji na orbiti našega osončja znaša ta hitrost ~ 220 km/s in je skoraj enaka za celoten galaktični disk), kot če bi masa galaksije bila mnogo večja. Vendar običajna astronomska opažanja v celotnem elektromagnetnem spektru niso pokazala ničesar, kar bi lahko posebej odstopalo. Zato se je te hipotetične dodatne mase prejelo ime 'temna snov' [238] (snov ki ne seva, ne reflektira in ne absorbira svetlobe). Podrobni izračuni so pokazali, da bi te snovi morale biti približno $4\times$ do $5\times$ več kot je snovi, ki jo lahko zaznamo zaradi elektromagnetnega sevanja (zvezde, planeti, asteroidi, oblaki prahu in plina).

Takoj je nastalo nekaj različnih hipotez o naravi temne snovi. Ena od teh hipotez se nanaša na supermasivne črne luknje v galaktičnih jedrih, vendar analize gibanja zvezd v jedrih kažejo, da mase teh črnih lukenj niso dovolj velike, da bi povzročile opažene učinke. Potem je nastala hipoteza o manjših črnih luknjah raztresenih po vsej galaksiji. Črnih lukenj sicer res ne moremo videti, zelo dobro pa so vidni njeni učinki [159], tako na snov v njeni neposredni okolici, ki bi se morala hitro nabrati v močno pospešen in močno sevajoč akrecijski disk, ter značilna 'vodometa', (snov, ki zaradi vrtnčastega pospeška in trkov v tirnicah bližje polom pridobi zadosti energije, da se izogne gravitaciji in šviga v Vesolje, včasih mnogo svetlobnih let daleč). Takih aktivnosti pa ni videti ne v naši ne v drugih 'mirnih' galaksijah (za razliko od nekaterih zelo aktivnih galaksij, kvazarjev). Če pa so take črne luknje že 'požrle' vso snov v svoji bližini, bi njeno prisotnost še vedno lahko zaznali po gravitacijskem lečenju svetlobe zvezd v ozadju [239], kot to predvideva Einsteinova splošna relativnostna teorija [44]. Tako lečenje je sicer že opaženo, a še zdaleč ne v zadosti veliki gostoti (znotraj naše galaksije), ki bi omogočila pojasnjevanje opaženega vrtenja galaksije. Je pa zato lečenje svetlobe oddaljenih kvazarjev na nekaterih bližnjih jatah galaksij zadosti veliko in ravno pravšnje za potrditev domneve o obstoju temne snovi.

Še ena hipoteza o temni snovi sloni na domnevi, da ima ogromna večina zvezd planete, prav tako kot Sonce, kar je sicer že potrjeno z opazovanjem majhnih odmikov posameznih zvezd glede na s planeti skupno težišče [240]. Na ta način je že bilo odkritih nekaj deset planetov velikosti Jupitra v relativni bližini njihovih matičnih zvezd. Prav tako je že bilo odkritih nekaj manjših planetov na podlagi periodičnega delnega senčenja svetlobe njihove matične zvezde. In če večina zvezd ima planetne sisteme, je prav tako zelo verjetno, da imajo tudi oblake asteroidov, manjših meteoritov in prahu. Toda vsa ta snov, ki je sicer povsem navadna barionska snov, predstavlja v povprečju le 10–20% mase samih zvezd, med tem ko bi temne snovi morale biti 4 do 5 krat več kot vse navadne snovi.

Črne luknje, asteroidi in planeti skupaj tvorijo razred objektov, ki se jih je prejel akronim MACHO (ang., *MAssive Compact Halo Objects*).

Za razliko od teh, večina astronomov vidi kandidate za temno snov predvsem v takoiimenovanih WIMPs (ang., *Weakly Interacting Massive Particles*), oziroma šibko interagirajočih masivnih delcih. Poznamo vrsto delcev, ki se ne zmenijo za elektromagnetno silo in interagirajo le preko šibke jedrske sile, vendar so vsi ti delci

kratkoživi in razpadejo v delčku sekunde, razen nevtrinov [241], ki so stabilni, vendar domnevno brez mase. Najnovejša dognanja o nevtrinih potrjujejo obstoj treh rodov nevtrinov, ki naj bi 'oscilirali', oziroma prehajali iz ene oblike v drugo (menjava 'okusa', [242, 243]). Prav te oscilacije naj bi bile razlog za predpostavko, da imajo tudi nevtrini maso, čeprav izredno majno (z energijskim ekvivalentom v območju med 0.04 eV in 0.4 eV [244], kar je le majhen delček mase elektrona, katerega energijski ekvivalent je 511 eV).

Če pa je masivnih nevtrinov zadosti veliko, bi ti prav lahko predstajali manjkajočo temno snov. Težava je v tem, da prav zato ker nevtrini šibko reagirajo (lahko gredo skozi celotno Zemljo, ne da bi trčili v eno samo jedro kakega atoma), jih tudi težko preučujemo in njihovo število lahko le posredno ocenimo na osnovi jedrskih reakcij za katere vemo, da potekajo na Soncu in v velikih pospeševalnikih. Po podatkih zbranih s CERNovim trkalnikom LEP (*Large Electron-Positron Collider*, [245]) naj bi število masivnih nevtrinov, preostalih iz zgodnje termične faze Vesolja, bilo premajhno, prav tako pa bi masivni nevtrini nujno morali biti stabilni, čeprav ni znan noben dober razlog zakaj masiven nevtrino ne bi slej kot prej razpadel. Zaenkrat velja ocena, da nevtrini po najbolj optimističnem scenariju prispevajo dodatnih 40% k masi galaksije, kar je spet premalo za pojasnitev problema temne snovi.

Teoretiki sicer že dolgo napovedujejo možnost obstoja težkih, šibko interagirajočih delcev, predvsem v smislu 'super-simetričnih' (SUSY) partnerjev že znanih delcev [246] (to je delcev, ki naj bi se od običajnih že znanih razlikovali le za polovični spin), vendar je pri tem njihova življenska doba še vedno popolna neznanka. Prispevek k temni snovi naj bi lahko zagotovila predvsem dva najlažja SUSY delca, 'sneutrino' in 'nevtralino'. Prvi ima prevelik anihilacijski presek, zato bi moral imeti energijski ekvivalent mase večji kot 100 GeV, kar je le preveč, da bi bilo verjetno. Tako ostane le nevtralino, in število le teh, preostalih po zgodnji termični fazi Vesolja, naj bi bilo ravno pravšnje. 'Realisti' med fiziki ob takih idejah zmajujejo z glavo in opozarjajo, da še nismo odkrili niti enega SUSY delca, 'optimisti' pa odgovarjajo, da smo jih pravzaprav odkrili že polovico!

Še en hipotetični kandidat za razlago temne snovi je 'axion' [247], delec, ki je dobil ime po znanem ameriškem pralnem prašku iz šezdesetih let. Njegov obstoj je prvotno bil postuliran v zvezi z rešitvijo problema ohranitve naboja in parnosti (ang., *charge-parity*, CP, [248]) v kvantni kromodinamiki (QCD, [249]), jedrski kvantni fiziki. Kasneje pa se je izkazalo, da axion, ali njemu podoben delec, 'naravno' nastopa tudi v teoriji super-strun [162]. Axion naj bi bil nekakšen 'psevdo Nambu-Goldstoneov boson', povezan predvsem s spontanim zlomom simetrije globalnega Peccei-Quinnovega tipa v simetrijski skupini U(1) (o simetriji, zlomih in simetrijskih skupinah glej [250]). Čeprav brez mase pri temperaturah nad faznim prehodom QCD, naj bi pridobil maso pri energijah manjših od 1 GeV. Po nekaterih izračunih naj bi masa axiona ustrezala lastni energiji približno 0.1 MeV, po drugih izračunih pa bi bila lahko tudi večja. Zaenkrat je obsoj axiona še vedno v območju teoretičnih domnev, čeprav nekatere meritve posredno kažejo nanj, ali vsaj na nekaj podobnega.

Leta 2005 je Glashow [251] predlagal popravek 'Standardnega Modela' [252] osnovnih delcev. Standardni model ima dve resni težavi [253] (poleg nekaterih manj resnih): problem masne hierarhije [254] in problem kršitve CP simetrije v močnih interakcijah [248]. Glashowov popravek vpelje obstoj 'tera-fermionov', ob nekoliko drugačni simetriji CP, spotoma razreši nekatera odprta vprašanja in ponudi novega

kandidata za temno snov, nevtralni 'tera-Helij', atom sestavljen iz jedra s tera-kvarki U (za razliko od običajnih u kvarkov) in dveh tera-elektronov E^- z maso večjo od 100 GeV/ c^2 . Kmalu bomo videli če bodo analize trkov v novem pospeševalniku LHC [255] v CERNu pri energiji okoli 14 TeV, pokazale kakšne take sledi.

Vsi ti delci so taki, da bi jih lahko že, ali vsaj v bližnji prihodnosti, načeloma bilo mogoče zaznati. Obstaja pa nekaj predlogov za hladno temno snov, za katere je že sedaj jasno, da jih bo praktično nemogoče zaznati. Taki so, na pr., 'gravitino', ki je super-partner gravitona, s spinom 3/2, ter axino, axionov super-partner, s spinom 1/2. Seveda, če pustimo ob strani dejstvo, da ne obstoja gravitona [256], ne obstoja axiona, za enkrat nismo eksperimentalno potrdili!

Pri celotni razpravi o temni snovi sta nekoliko čudni dve reči: prvič, če na temno snov vpliva le gravitacija, in če je te snovi res $5\times$ več kot običajne, potem bi vsako masivno telo že zdavnaj moralo pritegniti k sebi večino te snovi iz svoje okolice, ter s tem odločilno vplivati na učinke Newtonove orbitalne dinamike že v našem osončju, in ne le na galaktični ravni. Tega pa do sedaj nismo opazili. Drugič, obstoj črnih lukenj poraja zanimivo vprašanje: če je Schwarzschildov horizont dogajanja res meja pod katero nobena informacija, niti en svetlobni kvant, ne more pobegniti, kako to da potem sploh okoliška snov čuti vpliv gravitacije črne luknje? Ali to pomeni, da je hitrost 'gravitonov' (hipotetičnih kvantov gravitacijskega polja, kot jih je napovedal že Einstein) za mnogo velikostnih redov (vsaj 10^5 krat) večja od svetlobne hitrosti (kar Einstein izrecno prepoveduje)? Ali pa to morda pomeni, da popolnoma črnih lukenj ni [257], temveč obstajajo le različne stopnje 'sivih'? Ali pa gre morda za kaj tretjega? Na ta vprašanja zenkrat tudi nimamo odgovora, čeprav bomo v zvezi med gravitacijo in energijo vacuuma kasneje nakazali še nekaj zanimivih možnosti.

Seveda so v zvezi z učinki temne snovi že bile ponudene drugačne razlage, od najbolj preprostih, ki trdijo, da se pri naših meritvah na galaktičnih razdaljah motimo, iz takih ali drugačnih, a za zdaj ne dovolj prepričljivih razlogov, do tega, da na opažene učinke vplivajo še nekatere druge lastnosti narave, ki smo jih pri izračunih neupravičeno zanemarili. Nekaj takih razlag, zbranih pod [258], iščejo možne rešitve problema dinamike galaktičnega diska, brez potrebe po eksotični temni snovi, v doslednem upoštevanju Einsteinove splošne relativnostne teorije in učinkov ukrivljenosti prostora, oziroma nekoliko drugačnih gravitacijskih zakonitosti na velikih razdaljah (Cooperstock in Tieu 2005, Carmeli 1982-2002, Hartnett 2007, Capozziello 2006, Barns-Dicke, H.Kim, 2006, itd).

Toda te razlage puščajo ob strani vprašanje galaktičnega gravitacijskega lečenja, ki je v nekaterih primerih mnogo večje od teoretično pričakovanega [259]. Prav tako ne razložijo pojava, ki so ga astronomi nedavno opazili pri trku dveh galaksij (ob tem smo lahko ponosni na prispevek znanstvenice slovenskega rodu, dr. Maruše Bradač, [260], s Stanfordske univerze v ZDA). Po tem 'trku', do katerega je prišlo pred ~ 90 milijonov let, je večina masivnih zvezd obeh galaksij nadaljevala svojo pot hitreje kot oblaki plina obeh galaksij, ki sedaj za zvezdami precej zaostajajo, kot če bi jih, zato ker so mnogo lažji od zvezd, upočasnila neka težka, temna snov, ter jih obdržala bližje skupnemu težišču (a tudi ta pojav je mogoče razložiti drugače, če pomislimo, da na oblake prahu lahko vpliva njihova mnogo večja gostota, ter posledično večja pogostost trkov, kot pri zvezdah, ki so večinoma šle druga mimo druge na velikanskih razdaljah, v povprečju nekaj svetlobnih let; pa še drugačne razlage so se pojavile [261]).

Največ kritik merjenja galaktične rotacije prihaja na račun velikosti zamika sevalnega spektra proti rdečemu, preko katerega so meritve izvedene. Večina teh meritev se zanaša izključno na Dopplerjevo razlago [33] rdečega zamika [178], na enak način pa so obravnavane tudi dipolne razlike v zamiku na različnih delih galaktičnega diska. Tako iz povprečja rdečega zamika galaksije sklepamo na njeno oddaljenost, iz razlik rdečega zamika med posameznimi deli galaktičnega diska pa na rotacijo. Iz razdalje in luminoznosti pa sklepamo na število zvezd in posledično na maso galaksije. Vendar je pri vsaki galaksiji nujno upoštevati tudi gravitacijski prispevek k rdečemu zamiku (po splošni relativnostni teoriji). Če bi namreč res bilo temne snovi petkrat več kot vidne, bi povečana gravitacija bila že dovolj velika, da bi to morali zaznati na velikosti rdečega zamika, ter prav tako tudi na gravitacijskem lečenju svetlobe zvezd daleč v ozadju.

S tem v zvezi se porajao tudi dvomi o velikosti Hubblovega parametra, ki predstavlja mero širjenja Vesolja in je definirana kot povprečno razmerje med časovnim odvodom razsežnostnega parametra r in njegove dejanske vrednosti:

$$H = \left\langle \frac{dr/dt}{r} \right\rangle \quad (34)$$

oziroma, gre za povprečje ulomka hitrosti oddaljevanja galaksij z njihovo oddaljenostjo.

Trenutno sprejeta vrednost Hubblove konstante H znaša $72 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$, kar pomeni, da se hitrost oddaljevanja galaksij poveča za 72 km/s za vsak megaparsek ('parsek', oziroma paralaksa-sekunda, je oddaljenost s katere je premer zemeljske orbite okrog Sonca videti pod prostorskim kotom ene ločne sekunde [$1^\circ/3600$], kar znaša približno $3 \times 10^{16} \text{ m}$, oziroma okoli 3.3 svetlobna leta; z opazovanjem paralakse v teku leta lahko merimo oddaljenosti le do relativno bližnjih zvezd).

Posredno Hubblova konstanta določa starost Vesolja, ki jo sedaj ocenjujemo na okoli 13.7×10^9 let. A če temna snov res dominira v Vesolju in prispeva gravitacijsko od $\frac{2}{3}$ do $\frac{4}{5}$ velikosti rdečega spektralnega zamika, pomeni, da bi Hubblova konstanta morala znašati le okoli $35 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$, ali še manj in bi posledično starost Vesolja bila vsaj dvakrat večja, $\sim 26 \times 10^9$ let. To potem poruši nekatere druge, sicer lepo ujemajoče se izračune pri standardnem modelu Vesolja.

Skratka, gravitacijski popravek zaradi prisotnosti temne snovi prinese s seboj več težav, kot jih vpeljava temne snovi v model Vesolja lahko razreši. Sicer pa so za prispevek k rdečemu spektralnemu zamiku možne tudi druge razlage, denimo, če se Vesolje razširja, potem je možno, da se spreminja tudi sama metrika prostor-časa (kot to predvideva de Sitterjev [190] model [191]), zato bi svetloba z oddaljenih zvezd v trenutku ko je nastala morala imeti krajšo valovno dolžino od tiste, ki jo zaznamo danes, itd. Določiti velikost posameznih možnih prispevkov je težko, ker so parametri, ki to določajo, globoko povezani z različnimi modeli Vesolja, zato spremembe teh parametrov vplivajo nazaj na sam obravnavani model, ter s tem na interpretacijo merilnih rezultatov in, posledično, še na mnoge druge lastnosti.

Še ena druga skupina razlag zanika obstoj temne snovi in predlaga, da na velikih razdaljah Newtonov gravitacijski zakon (sorazmernost sile z $1/r^2$) ne velja več (tako kot je to v primeru velike gostote snovi, kjer se zahteva popravek v smislu splošne relativnostne teorije). Tem idejam je skupna tako imenovana 'spremenjena

Newtonova dinamika' (ang., *modified Newtonian dynamics*, MOND, [262]). Do tega naj bi prišlo, po nekaterih interpretacijah, zaradi diskretne strukture prostora, ki da povzroča nekakšno fraktalno dimenzionalnost prostora (večjo od 2 in manjšo od 3) in tudi vpliva na 'kompaktifikacijo višjih dimenzij' [263]. Če je to zadnje res, bi to moralo vplivati na veljavnost Newtonovega zakona tudi pri zelo majhnih razdaljah, teoretično že pri okoli dve desetinki milimetra. Vendar dosedanje meritve zelo velike preciznosti ($\sim 10^{-7}$) na razdaljah do 0.06 mm tega niso potrdile [264]. Po drugi strani pa je Bekenstein leta 2007 objavil kritiko [265] različnih predlogov v MOND smislu in ugotovil, da relativistična MOND dinamika vseeno ni čisto 'iz trte zvita'. Ponudil je tudi nekaj predlogov kako bi tako zakonitost lahko preverili s pomočjo satelitov znotraj mej Sončnega sistema.

Podobno stališče izraža tudi sama Vera Rubin: "*Če lahko izbiram, bi raje spremenila Newtonove zakone za velike razdalje, kot da vpeljemo v igro nove delce.*"

Temna snov dejansko zahteva preveč hkrati:

- 1) mora biti dolgočasovno stabilna, oziroma njena življenska doba mora biti daljša od starosti Vesolja, če naj vpliva na razvoj njegove strukture;
- 2) mora biti znan učinkovit proizvodni 'mehanizem' neposredno po Velikem poku, ki naj zagotovi zadostno količino te snovi;
- 3) mora se obnašati nerelativistično med formiranjem galaksij (torej mora biti 'hladna');
- 4) mora interagirati kvečjemu prek šibke jedrske sile, če naj se izogne neposrednemu zaznavanju, kar pomeni da mora biti tako električno kot tudi 'barvno' nevtralna (v smislu kvantne kromodinamike, QCD);
- 5) gostota te snovi mora biti zadosti velika, da ustvari svojevrsten 'pritisk', ki naj zagotavlja izotropnost na majhnih razsežnostih, ter tako prepreči da bi se pod vplivom gravitacije nabirala v zvezdah in planetih, sicer bi njen vpliv bil viden že v Newtonovi dinamiki planetov, ne le pri vrtenju galaksij.

Kjub vsemu, problem temne snovi nikakor noče izginiti, pravzaprav dobiva vedno nove, a zaenkrat le posredne potrditve z novimi odkritji. Dve taki odkritji, do katerih je prišlo ob koncu XX stoletja, sta meritve izotropnosti kozmičnega mikrovalovnega sevanja s satelitskimi programi COBE [266] in WMAP [154], ter meritve rdečega spektralnega zamika pri supernovah tipa Ia [267].

Programa COBE in WMAP sta pokazala, da je mikrovalovno sevanje [151], ki sta ga leta 1965 odkrila Penzias in Willson, izotropno in od povprečja 2.7 K odstopa le za nekaj tisočink Kelvina. Ta odstopanja pa se dokaj dobro ujemajo z razporedom snovi v Vesolju. Oboje pa se ujema s teorijo o napihovanju Vesolja v zgodnji fazi.

Vendar sta programa postregla tudi s presenečenjem: izkazalo se je, da je metrika Vesolja, kot jo zahteva tako majhna anizotropija, na velikih razdaljah ravna (Evklidska), ne pa ukrivljena, kot je bilo možno pričakovati na osnovi splošne relativnostne teorije (kjer prisotnost mase in energije ukrivi prostor).

Po drugi strani pa so meritve svetilnosti in razdalj supernov tipa Ia pokazale, da hitrost razširjanja Vesolja narašča [268], ne pa pojema, kot je to bilo pričakovati po ugotovitvah o prisotnosti temne snovi.

Meritve razdalj v Vesolju so otežkočene, ker zaenkrat še nimamo enotnega merila za svetilnost posameznih objektov. Na majhnih razdaljah lahko določimo oddaljenost s paralakso, na srednje velikih razdaljah s pomočjo spremenljivih zvezd (Cefeide), katerih frekvenca urtipanja je sorazmerna njihovi masi, med tem ko na velikih razdaljah uporabljamo supernove tipa Ia. Eksplozije tega tipa se vedno zgodijo pri točno določeni masi zvezde, od mase pa je odvisna dinamika same eksplozije, oziroma kako hitro se svetilnost poveča in kako hitro upade. Manjša odstopanja so možna le zaradi različnih hitrosti rotacije zvezde pred eksplozijo, to pa je možno delno kompenzirati z meritvijo spektra in Dopplerjevega zamika. Zato so supernove tipa Ia zelo primerne kot standarna mera svetilnosti [269].

Z meritvijo večjega števila supernov tipa Ia v območju $0.5 < z < 1$ (z je indeks rdečega zamika, [178]) je bilo ugotovljeno, da so eksplozije pri večjem z nekoliko manj svetle, in torej bolj oddaljene, kot bi sicer sklepali na podlagi linearnega Hubblovega zakona. To je pripeljalo do sklepa, da se Vesolje širi pospešeno, ne pa enakomerno. Hubblova 'konstanta' torej ni konstanta, zato je bolj pravilno če uporabljamo izraz Hubblov parameter. Posledice pospešenega širjenja pa so za razumevanje modela Vesolja zelo resne.

Začnimo s splošno relativistično teorijo. Po njej je izotropno in homogeno Vesolje določeno z dvema parametroma: parametrom ukrivljenosti prostora κ in časovno odvisnim razsežnostnim parametrom $r(t)$. Le ta sta povezana z energijsko gostoto ρ po Friedmannovi enačbi [173]:

$$H^2 \equiv \left(\frac{dr/dt}{r} \right)^2 = \frac{8}{3} \pi G \rho - \frac{\kappa}{r^2} \quad (35)$$

Parameter κ je prirejen tako, da lahko zavzame le tri možne vrednosti: $+1$ v primeru zaprtega Vesolja, 0 v primeru ravnega Evklidskega Vesolja, ter -1 v primeru odprtega Vesolja.

Za katerokoli vrednost Hubblovega parametra širjenja H je mogoče določiti kritično gostoto mase in/ali energije ρ_k , ki zagotavlja nično prostorsko ukrivljenost ($\kappa = 0$):

$$\rho_k = \frac{3 H^2}{8 \pi G} \quad (36)$$

Običajno gostoto normaliziramo kot gostotni parameter Ω tako, da dejansko gostoto delimo s kritično:

$$\Omega = \frac{\rho}{\rho_k} \quad (37)$$

Astronomska opazovanja dinamike posamičnih galaksij in skupin galaksij kažejo, da količina 'snovi' (počasnih delcev, ki čutijo vpliv gravitacijskih potencialnih vrzeli) ustreza parametru masne gostote $\Omega_M \approx 0.3$ (v to sta vključeni tako običajna barionska snov, kot tudi temna snov), kar je precej pod kritično gostoto. Hkrati pa meritve termične anizotropije kozmičnega mikrovalovnega sevanja ustrezajo razsežnostno skoraj neodvisnim, gaussovskim, adiabatnim spremembam gostote primordialnega sevanja (takim, kot jih napoveduje scenarij inflatornega Vesolja) za

praktično neukrivljeno Vesolje, katerega celotna gostota približno ustreza kritični, torej: $\Omega_T \approx 1$. Razliko med obema parametroma gostote lahko potem pripišemo obstoju ‘temne energije’ [270], katere gostota ρ_E mora biti enakomerna v vsem prostoru, da ne zmoti lokalnih gibanj galaksij in njihovih skupin, s karakterističnim parametrom $\Omega_\Lambda \approx 0.7$ [271, 272]. To pomeni, da (ne)ukrivljenosti Vesolja poglavitni delež prispeva prav temna energija.

Med tem so meritve razdalje v odvisnosti od rdečega spektralnega zamika pri supernovah tipa Ia pokazale, da se razširjanje Vesolja pospešuje, torej $d^2r/dt^2 > 0$. Pomen in pomembnost tega odkritja postaneta razvidna, če Friedmannovo enačbo zapišemo tako, da jo pomnožimo z r^2 :

$$\left(\frac{dr}{dt}\right)^2 = \frac{8}{3} \pi G \rho r^2 - \kappa \quad (38)$$

Energijska gostota, vsebovana v masi snovi ne-relativističnih delcev, upada z redčenjem števila masnih delcev zaradi širjenja, tako da je gostota obratno sorazmerna tretji potenci razsežnostnega parametra: $\rho_M \propto r^{-3}$. Če pa delci dosegajo relativistične energije, zaradi česa jih je mogoče opredeliti kot ‘sevanje’, se ti prav tako redčijo, a njihova energija je obratno sorazmerna četrti potenci r , torej: $\rho_R \propto r^{-4}$. Ker pa je κ konstanta, med tem ko se $r^2\rho$ v razširjajočem se Vesolju zmanjšuje, se tudi desna stran enačbe (38) zmanjšuje, kar pomeni, da se tudi dr/dt mora zmanjševati. Podatki supernov tipa Ia torej namigujejo, da se mora temna energija počasi povečevati, tako v času, kot tudi z razsežnostjo Vesolja (približno povečanje rdečega spektralnega zamika mora biti počasneje kot r^{-2}), če seveda želimo, da se Vesolje razširja pospešeno.

Obstaja naravna izbira za temno energijo: to je bodisi energija vacuuma [273], bodisi kozmološka konstanta [174], bodisi ‘kvintesenca’ [274]. Razlika med zadnjima dvema je le v dinamiki: kvintesenca se s časom spreminja, kozmološka konstanta pa je statična; torej zahteva po časovni spremenljivosti energijske gostote dejansko izloči Einsteinovo kozmološko konstanto kot možnega kandidata.

Energijo vacuuma odlikuje posebna lastnost, to je, namreč, minimalna količina energijske gostote v katerem koli območju prostora, z enakomerno razporeditvijo po vsem prostoru. Če naj ustreza izmerjenim podatkom, mora gostota energije vacuuma biti približno:

$$\rho_\Lambda \approx (10^{-3} \text{ eV})^4 \quad (39)$$

kar je v primerjavi s pričakovano vrednostjo energije vacuuma presenetljivo malo!

Ideja, da je gostota temne energije preprosto neka konstanta, vsebovana v zgradbi prostor-časa, je sicer v popolnem soglasju s podatki, vendar pa izpostavi dve resni vprašanji: najprej, zakaj je opažena vrednost gostote energije vacuuma tako mnogo manjša od tiste ki smo jo izračunli na podlagi Planckovih enot (kar je znano kot problem kozmološke konstante)? In drugič, zakaj sta gostoti mase in energije danes približno enakega velikostnega reda (kar je znano kot ‘Problem coincidence’)? Seveda je prvo vprašanje pomembno tudi če temna energija ni isto kot kozmološka konstanta, čeprav njena od nič različna majhna vrednost predstavlja najbrž še večjo uganko, kot če bi bila ta natanko enaka nič.

Zaenkrat nimamo nobene možnosti zanesljivega izračuna energije vacuuma v realnem Vesolju, tudi ne v kakem posebnem vidiku teorije polj, kot je to, denimo, Standardni model [252] fizike osnovnih delcev. Lahko podamo le oceno velikostnega reda posameznih prispevkov. V Standardnem modelu sta vsaj dva pomembna prispevka vacuumskih polj: potencialna energija Higgsovega polja [275], za katero se pričakuje vrednost okoli $(100 \text{ GeV})^4$, ter energijska gostota QCD ‘kondenzatov’ parov kvark-antikvark $q\bar{q}$ (odgovornih za zlom kiralne simetrije [276]), katere pričakovana vrednost znaša okoli $(100 \text{ MeV})^4$. Seveda obstaja tudi prispevek kvantno-mehanske ZPE vseh polj v modelu. Kot smo že videli, ta prispevek sicer divergira zaradi učinkov visoko-frekvenčnih modusov nihanja, kar zahteva postavitev neke naravne visoko-frekvenčne meje (Planckova dolžina), v upanju, da bo nekoč neka boljša teorija tako mejo tudi fizikalno upravičila. Če zaenkrat privzamemo, da je ta meja na Planckovi ravni, dobimo gostoto energije vacuuma velikostnega reda $(10^{18} \text{ GeV})^4$. Prav tako nimamo nobenega razloga za izločitev čisto klasičnega prispevka kozmološki konstanti na Planckovi ravni, ki je enakega velikostnega reda. Žal za nobenega izmed teh prispevkov ne moremo zagotovo trditi niti tega ali je pripadajoči prispevek h gostoti energije pozitiven ali negativen. Kljub temu, zlasti ker ni nobene povezave med osnovnimi zakoni, ki določajo velikosti posameznih prispevkov, lahko domnevamo, da celotna energija približno ustreza velikosti največjega prispevka:

$$\rho_V \approx (10^{27} \text{ eV})^4 \quad (40)$$

Razmerje med teoretično ocenjeno gostoto energije vacuuma, ρ_V , in na podlagi opazovanj določeno temno energijo, ρ_Λ , je:

$$\frac{\rho_V}{\rho_\Lambda} = \frac{(10^{27} \text{ eV})^4}{(10^{-3} \text{ eV})^4} = 10^{120} \quad (41)$$

Tukaj je torej vsa težavnost (ne)slavnega problema kozmološke konstante! Do podobne relacije je mogoče priti še na druge, nekoliko bolj zapletene načine.

Morda je nekoliko pretirano poudarjati razmerje 10^{120} , ker je energijska gostota sorazmerna četrti potenci energije, zato bi bilo boljše govoriti o energijskemu razmerju okoli 10^{30} . A tudi ta vrednost je morda manjša, če drži teorija supersimetrije. Ta predvideva spontani zlom simetrije pri majhnih razsežnostih, energija vacuuma pa je določena z razsežnostjo pri kateri pride do zloma (če se prispevki fermionov in njihovih bosonskih super-partnerjev natančno potirajo). Če se supersimetrija ohranja nad energijo šibke interakcije, torej $W_V \approx W_{\text{SUSY}} \approx 10^3 \text{ GeV}$, bi imeli razmerje $W_{\text{SUSY}} = 10^{15} W_\Lambda$.

Skratka, tudi po najbolj optimističnem scenariju imamo opravka z najmanj petnajst velikostnih redov veliko neusklajenostjo med teorijo in opazovanji, ter prav nobene dobre ideje (v okviru standardne teorije) kako bi jo lahko razrešili. Ne glede na to, ta problem zasluži vso našo pozornost.

Tukaj pa je še drugi prej omenjeni ‘Problem coincidence’ med trenutno vrednostjo energije vacuuma in vrednostjo gostote snovi. Kot že rečeno, opazovanjem najustreznejši vrednosti sta $\Omega_\Lambda \approx 0.7$ in $\Omega_M \approx 0.3$, vendar se njuno razmerje spreminja zelo hitro:

$$\frac{\Omega_{\Lambda}}{\Omega_{\text{M}}} = \frac{\rho_{\Lambda}}{\rho_{\text{M}}} \propto r^3 \quad (42)$$

Posledično, v zgodnjem Vesolju je kozmološka konstanta zanemarljiva, dominirata pa snov in sevanje, med tem ko je v kasnejšem obdobju, ko se Vesolje dovolj razširi, obratno. Vmes pa obstaja, kozmološko gledano, zelo kratko obdobje (dolgo morda le kakšno milijardo let) v katerem sta oba prispevka med seboj primerljiva in v tem obdobju se nahajamo ravno sedaj. Ni čisto jasno čemu naj tako naključje pripišemo (ali nemara gre za še en argument v prid ‘Antropičnemu načelu’ [277]?).

Drugo presenečenje v smislu koincidence pa predstavlja razmerje med gostoto običajne barionske snovi, $\Omega_{\text{B}} \approx 0.04$, in gostoto nebarionske hladne temne snovi, $\Omega_{\text{CDM}} \approx 0.25$, ter morda tudi prispevka masivnih nevtrinov, $\Omega_{\nu} \leq 0.01$. Po trenutno prevladujočem razumevanju, te gostote so preostanki popolnoma ločenih procesov v zelo zgodnji fazi razvoja Vesolja, ki se ne spreminjajo več in zaenkrat ne najdemo nobenega dobrega razloga s katerim bi upravičili njihov podoben velikostni red. Sveda je treba razlikovati med razmerjem gostot snovi, ki je domnevno bilo dano enkrat za vselej, od razmerja med energijo in snovjo, ki se očitno spreminja, trenutno razmerje pa je možno le za kratko obdobje. Vprašanje je ali je sploh smiselno iskati rešitve, po katerih bi se gostota temne energije spreminjala tako, da bi vedno bila v določenem razmerju s snovjo. To bi pomenilo bodisi da se energija zmanjšuje (rdeči spektralni zamik) sorazmerno z r^3 , kar pripelje do nepospešenega razširjanja Vesolja, bodisi da splošna relativnost odpove tako pri nizkih kot tudi pri visokih energijah, kar bi povzročilo ne majhne težave pri pojasnjevanju rezultatov nekaterih drugih opazovanj (če omenimo le najpomembnejše: sintezo jeder v zgodnjem obdobju Velikega poka, ter s tem v zvezi pretežno vsebnost lahkih elementov, kot sta vodik in helij, majhno termično anizotropijo kozmičnega mikrovalovnega sevanja, razvoj strukture galaktičnih jat, ter določitev starosti Vesolja, ki seveda ne sme biti manjša od starosti najstarejših zvezd).

Pred nekaj leti smo dobili še eno potrditev, da se nekaj nanavdnega dogaja pri meritvah na velikih razdaljah. Gre za sondi Pioneer 10 in 11 ameriške vesoljske agencije NASA, lansiranih v letih 1972 in 1973. NASA je izgubila stik s sondo Pioneer 11 leta 1995, ko je ta bila oddaljena od Sonca kakšnih 40 AU (*astronomic unit*, astronomska enota, povprečna razdalja Zemlja-Sonce, 1 AU = 149 600 000 km), med tem ko so zadnjo uspešno komunikacijo s sondo Pioneer 10 imeli aprila 2002, ko se je ta nahajala približno 70 AU daleč. Problem je v tem, da je sonda Pioneer 10 za celih 400 000 km bližje, kot bi to pričakovali po izračunu njenega položaja z Newtonovimi zakoni. In tudi Pioneer 11 je kazal podobno anomalijo predno so z njo izgubili stik, vendar do takrat še niso izpeljali vseh možnih testov s katerimi bi izločili možne napake na merilnih napravah in stabilnosti frekvence radijskega oddajnika s katerim merijo zakasnitev odmeva signala 2.1 GHz MASERja. Po podatkih ki jih je zbrala NASA [278] se zdi, da je na sondi deloval pospešek v smeri proti Soncu, velikosti $(8.75 \pm 1.33) \times 10^{-10} \text{ m/s}^2$, v območju 20–70 AU. Čeprav podatki nakazujejo, da gre za pospešek, osnovni merilni podatki iz katerih je učinek preračunan predstavljajo dejansko Dopplerjev modri zamik frekvence vrnjenega signala.

Vrsta različnih študij je poskušala analizirati vzroke za ta pojav, a zaenkrat nobena ni bila dovolj prepričljiva. Pripomniti pa je treba, da je učinek izredno majhen in

opazovalno obdobje zelo dolgo, zato že majhne sistematične napake lahko čez čas povzročijo podobne učinke. Posledično je seveda mogoče, da v teh primerih le ni šlo za odstopanje od že znanih fizikalnih zakonov. Kljub temu NASA že načrtuje novo sondo posebej namenjeno natančnejšemu merjenju tega pojava.

V literaturi sicer najdemo kar nekaj predlogov za možne poti iskanja rešitev vseh omenjenih problemov, naštejmo le tri najbolj popularne:

- Temna energija je dejanska kozmološka konstanta, nespremenljiva tako v prostoru, kot v času. Energijski minimum ima lahko majhno, od nič različno energijsko gostoto, ali pa dejansko živimo v nepravem vacuumu z zelo majhno energijo. Kakorkoli že, v takih modelih praktično ni prostora za več dimenzij in teorijo strun, a to ni nujno huda napaka.
- Kozmološka konstanta dejansko ima vrednost nič, vendar obstaja počasi spreminjajoča se dinamična komponenta pozitivne energije vacuuma, podobna komponenti, ki je povzročila inflacijo zgodnjega Vesolja, kot nekakšno skalarno polje, ki se počasi sprevrača v potencial, včasih poimenovan 'kvintesenca', oziroma 'peta sila' (poleg štirih znanih: gravitacije, šibke jedrske, elektromagnetne in močne jedrske sile). Vendar, če 'peta sila' obstaja, bi njene učinke z dosedanjimi, že zadosti občutljivimi raziskavami morali odkriti tudi na mikro razdaljah, pa jih nismo. Sicer obstaja vrsta modelov, ki za izhodišče jemljejo fiziko osnovnih delcev, ter na tej osnovi iščejo rešitve, ki dajo ustrezno kozmologijo. Sprejemljiv model kvintesence, zgrajen na osnovi fizike osnovnih delcev, bi moral dati majhno skalarno maso in šibko sklopitev z običajno snovjo; tem zahtevam ustreza že omenjeni pseudo Nambu–Goldstoneov boson (axion, oziroma nekaj njemu podobnega), a zaenkrat potrditve njegovega obstoja ni.
- Einsteinov model je zgrešen in Friedmannova enačba ne ustreza opisu širjenja Vesolja. Opazovanja, katerih izidi podpirajo splošno relativnostno teorijo, sicer postavljajo dokaj ozke meje alternativnim rešitvam, a jih ne izključujejo, pravzaprav so za številne fizike take rešitve bolj sprejemljive od tistih, ki zagovarjajo še neodkrita delca ali izvore energije. Ena možnost je, denimo, da gravitacijo, ko ta postane zadosti šibka, 'prevpije' kozmični 'šum', ki je lahko posledica kakršnih koli polj (čeprav je to v nasprotju z običajnimi teorijami polj, kjer se zakonitosti navadno spremenijo pri visokih energijah). Žal nobena teorija spremenjenega obnašanja gravitacije, bodisi na zelo majhnih, bodisi na zelo velikih razsežnostih, zaenkrat ne obeta veliko pri reševanju Problema koincidence (čeprav je lahko vzrok za Problem koincidence le naključje).

S tem kratkim seznamom seveda še nismo izčrpali vseh možnosti. Čeprav novi opazovalni podatki, ki se danes kar vrstijo iz dneva v dan, vedno bolj ožijo prostor različnim alternativam, občasno vseeno nastajajo nove ideje, kot bomo videli kasneje. Nekaj odgovorov utegnemo dobiti v kratkem, s pomočjo satelita *Planck*, ki ga pripravlja evropska vesoljska agencija ESA, lansiranje katerega je predvideno ob koncu oktobra 2008. Več informacij je mogoče dobiti na uradni spletni strani: <<http://www.rssd.esa.int/index.php?project=Planck>>, ter v 'Modri knjigi', kjer so opisane mnoge tehnične in znanstvene podrobnosti o izvedbi in ciljih projekta: <http://www.rssd.esa.int/SA/PLANCK/docs/Bluebook-ESA-SCI%282005%291_V2.pdf>.

ZPE in gravitacija

Stara osnovnošolska šala “kaj je težje, kilo železa, ali kilo papirja?” lepo ponazarja naše vsakdanje intuitivno dojetje odnosa med maso in težnostjo.

Za Galilea [3] so telesa preprosto ‘težka’ in teža deluje med njimi ‘trenutno’, tudi če so med seboj astronomsko oddaljena.

Descartes [279] je idejo o medsebojnem delovanju teles na daljavo zavračal kot nesmiselno, po njemu telesa lahko delujejo druga na drugo le ob medsebojnem dotiku; tako pri njemu zasledimo začetne domneve o vrtincih v etru, ki naj bi silili planete h kroženju okoli Sonca.

Na osnovi opazovanj nizozemskega astronoma Brahea [280] je Kepler [281] podal svoje tri znamenite zakone gibalja planetov [282], kar predstavlja prvo geometrijsko teorijo gravitacije.

Newton [4] je potem te zakone izpeljal na osnovi svojih posplošenih zakonov gibanja; a čeprav je ugotovil ‘kako’ gravitacija deluje, ni še povedal ‘zakaj’, in tega se je tudi sam dobro zavedal. In prav tako kot Galilei, je tudi Newton imel delovanje gravitacije za lastnost teles samih, ter njeno razširjanje za ‘trenutno’, brez kakršne koli časovne zakasnitve (kot če bi propagacijska hitrost gravitacije bila neskončno velika).

Proti koncu XIX stoletja se je uveljavilo mnenje, kasneje znano kot ‘Machovo [283] načelo’ [284], po kateremu na gibanje vsakega posameznega telesa vpliva vsota gravitacijskih polj vseh ostalih teles v Vesolju. Ta ideja ni smešna le zaradi karikature na **Sl.12**, temveč zato, ker tudi privzema trenutno prisotnost gravitacijskih polj po vsem Vesolju, ter prav tako ne razreši problema o delovanju na daljavo.



Sl.12: Popularna različica Machovega načela

Šele Einstein je težave razrešil na fizikalno sprejemljiv način. Za Einsteina sta težka in inercialna masa eno in isto (načelo enakovrednosti [285]). Posledično v splošni relativnostni teoriji [44] prisotnost mase ‘ukrivi’ prostor okoli nje, zato se

druga masa v takem prostoru giblje tako, da se zunanjemu opazovalcu zdi, da sledi ukrivljenosti prostora (čuti 'težnostni pospešek'), med tem ko se v svojem lastnem koordinatnem sistemu še naprej giblje inercialno (astronavti v zemeljski orbiti ne čutijo težnosti). Izrednega pomena pa je dejstvo, da se v splošni relativnostni teoriji informacija o prisotnosti mase in njenem gibanju razširja skozi prostor z enako hitrostjo kot svetloba (torej, prvič v zgodovini znanosti končno hitro). Žal pa Einsteinova domneva po eni strani zahteva bodisi možnost vpliva mase na metriko prostora (kakšen je ta vpliv splošna relativnostna teorija ne pojasni), bodisi obstoj makroskopsko velikih višjih dimenzij (vsaj še ene: kot sta to pokazala Kaluza in Klein leta 1920, je načeloma možno izpeljati Maxwelllove enačbe z razširitvijo splošne relativnostne teorije na 5 dimenzij; vendar je obstoj makroskopsko velikih višjih dimenzij iz več različnih razlogov malo verjeten), po drugi strani pa se ne ujema povsem s kvantno mehaniko (Einstein je seveda krivdo — dokaj upravičeno — zvalil na kvantno mehaniko).

Dolga desetletja so mnogi poskušali težavo odpraviti v okviru teorije kvantne gravitacije (Quantum Gravity, QG, [286]), in kasneje zanke kvantne gravitacije (Loop Quantum Gravity, LQG, [287]), a, vsaj do tega trenutka, zdi se, brez večjih uspehov. Pravzaprav je edini uspeh teh teorij v tem, da je gravitacijo iz bolj ali manj 'obrobnega' problema naredil za osrednje vprašanje uspešnosti vsake sodobne fizikalne teorije. Do tega preskoka je prišlo, ko so leta 1974 v okviru teorije strun ugotovili, da strune naravno prenašajo brezmasne moduse nihanja s spinom $2\hbar$, kar ustreza Einsteinovemu 'gravitonu'. Sredi naslednjega desetletja so se stvari naenkrat obrnile na glavo: gravitacija je **upravičevala** teorijo strun! Žal, dosti naprej od tod niso prišli, iz preprostega razloga, ker nam še vedno primanjkuje eksperimentalnih podatkov na zadosti visokih energijah, da bi o različnih variantah teorije strun sploh lahko razsojali.

Šele v drugi polovici XX stoletja se pojavijo ideje o 'lokalni' naravi delovanja gravitacije kot posledice interakcij med snovjo in vacuumskimi fluktuacijami. Gravitacija je namreč daleč najšibkejša od vseh doslej znanih sil (glej **Tabelo 4**), zato bi vsaj načeloma lahko bila posledica delovanja kakršnih koli močnejših polj, če le obstaja nek nelinearni, ali pa morda nesimetrični 'mehanizem', ki omogoči, da se na večjih razdaljah vzročna polja med seboj ne izničijo popolnoma.

Tabela 4: Relativna jakost znanih sil

močna jedrska sila	1
elektromagnetna sila	10^{-2}
šibka jedrska sila	10^{-12}
gravitacija	10^{-40}

Kljub temu da je najšibkejša, gravitacija prevlada na velikih razsežnostih zato, ker sta močna in šibka jedrska sila kratkega dosega (prideta do izraza le na razdaljah primerljivih z velikostjo atomskega jedra), med tem ko električna in magnetna komponenta elektromagnetnih polj vedno nastopata v dipolni obliki, kar pomeni da se na velikih razdaljah, ko smo približno enako daleč od obeh polov, njuna vpliva med seboj potirata. Gravitacija pa deluje predvsem monopolno (vedno kot privlačna sila; obstoja antigravitacije zaenkrat še nikjer nismo zaznali).

O gravitaciji, kot o nekakšnem 'ostanku' elektromagnetne sile, sta razmišljala že Heaviside [35] in Tesla [288], vendar idejo o njenem lokalnem delovanju, kot interakciji masivnega telesa v stiku z okoliškim sevalnim poljem, prvič najdemo pri Saharovu [289, 290, 291], leta 1965. Vacuumske fluktuacije v smislu ZPE so bistvena sestavina vseh modernih teorij gravitacije (ter tudi drugih teorij, ne le gravitacije!), ne glede na to ali so te fluktuacije vzete kot vzrok ali kot posledica kvantnih procesov. Odkritje Casimirove sile, s prva le tehnične zanimivosti in teoretične uganke, danes razumemo kot neizpodbitni dokaz obstoja ZPE, ter obenem kot potrditev pravilnosti nekaterih vidikov različnih teorij polj. V sklopu z načelom enakovrednosti [285], eksperimentalno prav tako dobro potrjenim, uspeh takih teorij opogumlja iskanje načina za povezovanje ZPE z učinki na makroskopskih, ali celo kozmoloških razsežnostih, morda v kontekstu sorodnemu splošni relativnostni teoriji. Zaradi tega si moramo Einsteinove ideje ogledati nekoliko podrobneje.

V razvoju splošne relativnostne teorije je Einstein, sledeč svoji intuiciji, iskal predvsem take rešitve, ki imajo od nič različna le prva dva odvoda metričnega tenzorja g_{ik} (podrobnosti o tenzorjih, ki so matematično gradienti vektorskih polj, ter o njihovi vlogi v splošni relativnostni teoriji najdemo na naslovih [292, 293]). Po eni strani to omogoča ujemanje s klasično Newtonovo teorijo gravitacije za šibka polja, kar je bila tudi osnovna izhodiščna zahteva. Po drugi strani pa je to kasneje Einsteinu omogočilo preprosto razširitev teorije z vpeljavo kozmološke konstante Λ kot po volji izbrane vrednosti, ki lahko uskladi dinamiko gravitacijske enačbe z opazovanji:

$$G_{ik} \equiv R_{ik} - \frac{1}{2}g_{ik}R + \Lambda g_{ik} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{ik} \quad (43)$$

Zakon o ohranitvi energije zahteva, da je $T^k_{i;k} = 0$, kar drži le, če je kovariantni odvod $g^k_{i;k} = 0$. Zato se masni delec inercialno giblje po geodeziku, za kar ne porabi energije. Po drugi strani pa prisotnost mase vpliva na metriko prostora, kar pomeni, da je geodezik lahko ukrivljen. Če sedaj Λ povežemo s konstantami na desni strani enačbe, dobimo izraz za konstantno gostoto energije v prostoru:

$$\rho_\Lambda = \frac{\Lambda c^4}{8\pi G} \quad (44)$$

Po drugi strani pa izraz:

$$p_\Lambda = - \frac{\Lambda c^4}{8\pi G} \quad (45)$$

predstavlja izotropni pritisk, ki zapolni ves prostor enakomerno, ne glede na lokalne gruč mas. Torej kozmološka konstanta Λ ima vlogo energije in ta po splošni relativnostni teoriji povzroča dodatno ukrivljenost prostor-časa z radijem velikostnega reda $|\Lambda|^{-1/2}$.

V okviru klasične fizike ni možno najti neke naravno določene velikosti Λ . Če, denimo, postavimo $\hbar = 0$ in $\Lambda = 0$, v Einsteinovi enačbi (43) ni nobene količine za dolžino, in G/c^4 predstavlja le faktor pretvorbe med enoto za energijo in enoto za dolžino. Zato Λ lahko privzame kakršno koli vrednost, brez neposrednih posledic (in tudi brez potrebe po posebni razlagi) za teorijo.

Kakor hitro pa dovolimo $\hbar \neq 0$, dobimo količino z dimenzijo dolžine, namreč Planckovo dolžino:

$$l_P = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^3}} = 1.616 \times 10^{-35} \text{ m} \quad (46)$$

Posledično, z upoštevanjem kvantne teorije v okviru splošne relativnosti, lahko definiramo količino λ :

$$\lambda \equiv \Lambda l_P^2 = \frac{\hbar G \Lambda}{c^3} \quad (47)$$

ki je brezdimenzijsko število, ki, kot bomo videli, utegne imeti kozmološki pomen in katerega vrednost bi morda lahko določili s kvantno obravnavo teorije gravitacije.

Wolfgang Pauli [90] je okoli leta 1925 bil verjetno prvi, ki je premišljeval o vplivu vacuumskih kvantnih fluktuacij na ukrivljenost prostora. Dojel je, da je vsoto dveh modusov transverzalnih elektromagnetnih polj v vacuumu mogoče izraziti kot energijsko gostoto:

$$\rho_\Lambda = 2 \int_{l_{\min}}^{l_{\min}^{-1}} \frac{d^3 k}{(2\pi)^3} \frac{\hbar \omega_k}{2} = \frac{1}{8\pi^2} \frac{\hbar c}{l_{\min}^4} = -p_\Lambda \quad (48)$$

ki prispeva k energijskemu napetostnemu tenzorju v Einsteinovi teoriji na enak način kot kozmološka konstanta $\Lambda > 0$. Ker integral v izrazu (48) divergira, mora $l_{\min}$ imeti neko spodnjo mejo v ultravioletnem območju. Pauli je kot mejo sprva vzel klasični elektronov radij:

$$l_{\min} \approx r_e = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q_e^2}{m_e c^2} = 2.8179 \times 10^{-15} \text{ m} \quad (49)$$

in ugotovil, da bi, če seveda njegova ocena drži, Einsteinova teorija s tako veliko vrednostjo Λ imela za posledico tako ukrivljenost, da bi Vesolje bilo manjše od oddaljenosti med Zemljo in Luno. Če pa bi namesto elektrona vzel naravno, a mnogo krajšo Planckovo dolžino l_P , bi Λ postala še mnogo večja in bi se razsežnost Vesolja skrčila na velikost primerljivo z l_P , kar je še bolj v nasprotju z realnostjo.

Očitno je Paulijeva ocena vpliva kratkovalovnih elektromagnetnih modusov nihanja na ukrivljenost Vesolja napačna. Razlog lahko najdemo prav v Casimirovem učinku. Vacuumske fluktuacije v izrazu (48) so istega izvora kot tiste ki prispevajo k velikosti Casimirove sile. Vendar izraz (48), čigar velikost je obratno sorazmerna četrti potenci kratkovalovne spodnje limite, zagotovo ne more vplivati na ukrivljenost, ker je Casimirova sila, kot smo je izmerili v laboratoriju, majhna. To pa zato ker pri izračunu Casimirove sile **odštevamo** energijske prispevke zunaj in znotraj sistema in **razlika** teh prispevkov določa velikost sile. Zato se tudi vpliv $l_{\min}$ izniči, preostane pa le vpliv velikih valovnih dolžin, ki nosijo malo energije, tako kot smo to že zapisali v izrazu (5).

Vse to kaže, kot tudi potrjujejo eksperimenti, da so merljivi učinki, povezani z vacuumskimi fluktuacijami, posledica le infrardečih fenomenov, odvisnih od

makroskopskih mejnih pogojev, ter so praktično neodvisni od visokofrekvenčnih modusov nihanja in spodnje prostorske meje $l_{\min}$ v integralu (48).

Sledeč načelu enakovrednosti, fizikalne zakonitosti na (relativno) majhnih razdaljah pri šibko izraženi ukrivljenosti prostora morajo biti praktično enake kot v neukrivljenem prostoru. Zato tudi ne smemo pričakovati, da bodo vacuumske fluktuacije na mikro ravni kakor koli vplivale na ukrivljenost Vesolja, ali njegovo velikost, enako kot na velikost Casimirove sile, ne glede na to kako velika je dejanska gostota energije.

V kozmologiji je tudi sicer povsem običajno, da vpliv robnih pogojev lahko zanemarimo. Zato ni še jasno kaj naj v primeru Vesolja prevzame vlogo Casimirovih plošč pri določanju energijske gostote vacuuma. Prav tako vpliv ZPE na morebitno ukrivljenost Vesolja ostaja uganka od Paulijevih časov do danes.

V zadnjih dveh desetletjih je vprašanje ZPE preraslo iz temeljnega teoretičnega vprašanja kvantne fizike v središčno vprašanje opazovalne kozmologije. Na osnovi opazovanj supernov tipa Ia [267] smo prišli do spoznanja, da se razširjanje Vesolja pospešuje [268]. Če se držimo Einsteinovega modela, je pospešeno širjenje mogoče le, če energijska gostota in pritisk zadovoljujeta neenačbo:

$$\rho + 3p \equiv \rho(1 + 3w) < 0 \quad (50)$$

Energija vacuuma z gostoto $\rho > 0$ in $w \equiv p/\rho = -1$ povzroči pospešeno razširjanje, kot z nekakšno 'odbojno gravitacijo' v kateri relativistični učinki negativnega pritiska lahko prevladajo pozitivno energijsko gostoto v izrazu (43).

Kot že rečeno, opazovanja nakazujejo, da je okoli 70 % energije v Vesolju v obliki dosedaj neodkrite temne energije ($w = -1$) [270]. To pa nas ponovno pripelje do Einsteinove kozmološke konstante $\Lambda > 0$, pri čemur meritve kažejo na vrednost:

$$\Lambda_m \simeq 0.7 \frac{3H_0^2}{c^2} \simeq 1.4 \times 10^{-56} \text{ cm}^{-2} \simeq 3.6 \times 10^{-122} \frac{c^3}{\hbar G} \quad (51)$$

Tukaj je H_0 današnja vrednost Hubblovega parametra [178], ki, če privzamemo, da je ves rdeči spektralni zamik (ali vsaj njegov pretežni del) posledica Dopplerjevega učinka, znaša $H_0 \approx 72 \text{ km/s/Mpc} \approx 2.4 \times 10^{-18} \text{ s}^{-1}$ (po doslej najbolj natančnih podatkih dobljenih z WMAP programom [154]). Zadnje število v izrazu (51) pa izraža vrednost kozmološke temne energije, kot jo pridobimo na osnovi meritev supernov tipa Ia, v Planckovih enotah (spomnimo se: $l_p^{-2} = c^3/\hbar G$), kar pomeni, da gre za brezdimenzijsko število:

$$\lambda = 3.6 \times 10^{-122} \quad (52)$$

Pojasnitev tega najmanjšega števila v vsej fiziki je nujna za rešitev problema razmerja med gostoto energije vacuuma in izmerjeno (čeprav le posredno) vrednostjo kozmološke konstante. Z drugimi besedami: bodisi v naših teorijah, bodisi v naših opazovanjih, je nekaj 'rahlo' narobe!!!

Poudarimo še enkrat, da ta problem nastopa le, če kvantne vacuumske fluktuacije ($\hbar \neq 0$) in gravitacijo ($G \neq 0$) obravnavamo skupno. Če bi Vesolje modelirali čisto klasično, bi privzeli $l_p \equiv 0$, nakar bi Λ , ter posledično velikost in starost Vesolja, lahko imeli kakršno koli vrednost, zato tudi problem 'naravne'

majhnosti kozmološke konstante preprosto odpade. Nasprotno, kot smo to že spoznali pri Casimirovem učinku, če je $G = 0$, ter ni robnih pogojev, ki bi jih bilo treba upoštevati, potem tudi vpliv ZPE (četudi je ta odvisna od zgornje frekvenčne meje v neukrivljenem prostoru) lahko preprosto odštejemo brez posledic, ki bi jih z meritvami opazili.

Obstaja pa še ena možnost rešitve tega problema. Običajno v večini teoretičnih različic privzamemo, da je foton brez mase. Kaj pa če ni?

Pred kratkim je več teoretikov raziskalo možnost, da je masa fotona velikostnega reda 10^{-67} kg [294], kar je še vedno znotraj vseh eksperimentalno potrjenih meja. Vendar to ima, vsaj v nekaterih teoretičnih različicah, tudi nekaj netrivialnih posledic.

Ponovimo še enkrat domnevo, da je lahko tista 'misteriozna' temna energija dejansko posledica kvantnih energijskih fluktuacij v smislu ZPE, ter sledimo Wheelerjevemu [115] modelu harmoničnih oscilatorjev v osnovnem stanju (podobno kot pri Plancku, vendar v okviru QED formalizma) in pri tem upoštevajmo, da je ZPE povprečje energij velikega števila takih oscilatorjev. V tem primeru lahko amplitudo verjetnosti za odmik x od ravnovesja izrazimo kot:

$$\psi(x) = \left(\frac{m\omega}{\pi\hbar} \right)^{\frac{1}{4}} e^{-\frac{m\omega}{2\hbar}x^2} \quad (53)$$

kar pomeni, da posamezni oscilator fluktuira znotraj intervala:

$$\Delta x \sim \sqrt{\frac{\hbar}{m\omega}} \quad (54)$$

Če je elektromagnetno polje sevalnega ozadja vsota vseh posamičnih oscilatorjev, katerih posamične amplitude označimo z X_i , bo verjetnost, da posamični oscilator ima prav takšno amplitudo, funkcija vsote kvadratov vseh amplitud:

$$\psi(X) = e^{\left(-\sum_{i=1}^{\infty} X_i^2\right)} \quad (55)$$

Privzemimo sedaj, da je mogoče amplitudo verjetnosti izraziti s pomočjo komponent polja, denimo za magnetno polje $B(x, y, z)$ opisano s Fourierjevimi koeficienti $X_1, X_2, \dots$, itd. Obravnavajmo primer posameznega polja, ki naj ima vrednost nič povsod, razen znotraj omejenega dolžinskega intervala l , kjer je njegova vrednost velikostnega reda ΔB .

Amplituda verjetnosti $\psi(\Delta B)$ je potem sorazmerna z:

$$\psi(\Delta B) \propto e^{-\frac{(\Delta B)^4 l^4}{\hbar c}} \quad (56)$$

kar pomeni, da energija fluktuacij ima znotraj intervala l gostoto:

$$B^4 \propto \frac{\hbar c}{l^4} \quad (57)$$

Ta energijska gostota ustreza energiji $\hbar c/l$ znotraj volumna l^3 .

Iz tega sledi, da ima energija minimum ko je l maksimalen. Naj bo l enak radiju celotnega vidnega Vesolja, ki ga ocenjujemo na okoli 10^{26} m. Minimalna energija

sevalnega ozadja v smislu ZPE bo potem enaka 10^{-33} eV, kar se zelo dobro ujema z vrednostjo 'temne energije', kot jo lahko posredno izračunamo na osnovi meritev svetilnosti supernov tipa Ia.

Če pa pogledamo drugo skrajnost in predpišemo intervalu l vrednost Planckove dolžine $l_P = (\hbar G/c^3)^{1/2} \approx 10^{-35}$ m, dobimo energijo $\approx 10^{28}$ eV, kar ustreza Planckovi masi m_P . Pa ne le to, lahko določimo tudi nekatere vmesne primere. Denimo, če privzamemo razsežnost, ki ustreza Comptonovi valovni dolžini elektrona:

$$l = \lambda_C = \frac{h}{m_e c} \approx 2.4 \times 10^{-12} \text{ m} \quad (58)$$

pridemo do rezultata podobnega energiji elektrona ($\sim 5 \times 10^5$ eV) z maso m_e .

Seveda je celotna izpeljava dokaj poenostavljena in sloni na nekaterih domnevah, pravilnost katerih zaenkrat lahko potrdimo le posredno, vendar nas pripelje do preveč podrobnih ujemanj z izmerjenimi rezultati, da smo prisiljeni verjeti, da ne gre zgolj za navadno naključje.

Če povzamemo: na eni strani imamo Planckove razsežnosti, ki veljajo za razmere Vesolja neposredno po Velikem poku, z energijo pri kateri domnevamo, da pride do poenotenja vseh štirih znanih sil v eno in ki ustreza Planckovi masi $m_P \approx 10^{-8}$ kg; na drugi strani pa imamo razsežnosti današnjega Vesolja, kjer je efektivna energija z ekspanzijo prostora reducirana na velikostni red mase fotona $\approx 10^{-67}$ kg.

Opozoriti je treba na še eno dokaj obetavno različico 'spremenjene' gravitacijske teorije, ki so jo leta 1999 objavili Moffat, Brownstein in Clayton [295]. Ta teorija je postala znana kot 'Scalar-Tensor-Vector Gravity' (STVG) [296], in se razlikuje od teorije MOND v tem, da ne predvideva dveh različnih gravitacijskih zakonitosti v odvisnosti od razsežnosti kjer pridejo do izraza, temveč vpelje kvantne pojave v Einsteinovo splošno relativnostno teorijo. Kot pri drugih novejših fizikalnih teorijah, tudi tukaj vacuumske kvantne fluktuacije lahko vplivajo na interakcijo med objekti, ne glede na to ali so ti makroskopski ali subatomske. Po STVG na efektivno velikost interakcije vpliva gostota 'gravitonov' — hipotetičnih delcev, ki naj bi posredovali pri gravitaciji. Gostota gravitonov naj bi bila večja v bližini masivnih objektov, torej tudi galaktičnih jeder, med tem ko naj bi na večjih razdaljah vpadla.

Na ta način naj bi bilo mogoče pojasniti vse tri anomalije ki so jih astronomska opazovanja zadnjih desetletij spravila na plano: rotacijo galaktičnih diskov (brez sklicevanja na 'temno snov'), pospeševanje širjenja Vesolja (brez sklicevanja na 'temno energijo'), ter anomalni pospešek vesoljskih sond Pioneer 10 in 11. Preverjanja, ki sta jih opravila Brownstein in Moffat na 101 galaksiji se dobro ujemajo z opazovanji, a se ne razlikujejo od rezultatov MOND teorije. Vendar MOND ne more razložiti obnašanja in meritve mase 106 gruč galaksij, med tem ko je to uspelo STVG pri več kot polovici primerov. Prav tako se STVG dobro ujema z opazovanji sond Pioneer 10 in 11. Brownstein in Moffat ocenjujeta, da do opazne spremembe v gravitaciji pride na razdalji kakih 46 000 svetlobnih let od galaktičnega centra (oziroma na ustrezno manjši razdalji pri manjših galaksijah). Kot sama pravita: *"Ugotavljamo, da se predvidevanja STVG ujemajo z opazovanji na treh različnih razsežnostnih območjih."*

Navkljub tem uspehom, mnogi teoretiki opozarjajo, da bo za dokončno usodo te teorije bolj pomemben ključni test: na kakšen način bo upoštevano prasevanje v mikrovalovnem območju, kot ga zaznavamo danes (WMAP sonda), in ki je po Standardnem modelu posledica dogajanja na kvantni ravni neposredno po Velikemu poku. Kot pravi Carroll [297]: *“Model temne snovi in temne energije vsekakor ni brez pomanjkljivosti, vendar omogoča zelo dobre napovedi mikrovalovnega prasevanja. Nihče ne bi bil bolj srečen kot jaz če bi se izkaalo, da gre za spremenjeno gravitacijo in ne za temno snov, a žal rezultati novih opazovanj vedno bolj otežkočajo sprejetje take možnosti.”*

Da je pri celotni zadevi res nekaj nenavadnega pove tudi podatek, da v spektru mikrovalovnega prasevanja, kot ga je izmerila sonda WMAP, ni zaznati učinkov gravitacijskega lečenja velikih galaktičnih gruč [298], med tem ko tako lečenje v vidnem delu spektra zelo nazorno prikazujejo fotografije narejene z Vesoljskim teleskopom Hubble [299] ameriške agencije NASA.

Kakor koli že, treba je vselej imeti v mislih, da izmerjeni podatki o svetilnosti in razdaljah posameznih supernov tipa Ia ne podajajo neposredno energijske gostote vacuuma, ne geometrije prostora na velikih razdaljah, ne velikosti gravitacijske sile; do vsebnosti temne energije in enačbe stanja, podane z razmerjem $p/\rho \approx -1$, pridemo na osnovi teh podatkov šele z domnevo o veljavnosti neenačbe (50), ter s predpostavko o veljavnosti izhodiščne Einsteinove enačbe (43) kot dejanske gravitacijske teorije na ustreznih kozmoloških razdaljah ($z \leq 1$). Ob tem je bistvenega pomena tudi predpostavka, da ne naredimo velike napake če privzamemo, da je pretežni del rdečega spektralnega zamika možno pripisati le Dopplerjevemu učinku. Potrditev, da je možno najti način kako eksperimentalne podatke uskladiti z že obstoječimi in uveljavljenimi teorijami, je tudi veliko, navedimo le nekaj novejših primerov: [300], [301], [302], [303].

Prav tako ne smemo pozabiti, da danes še nobena kvantna teorija, vključno s kvantno teorijo polj (QTF), ne preide v splošno relativnostno teorijo v posameznih limitnih pogojih. Posledično je obravnava kvantnih procesov, tudi pri razdaljah mnogo večjih od naravne zgornje frekvenčne meje, mogoča le strogo znotraj QTF.

Zaradi tega je smiselno vprašati se ali bi morda lahko iznašli način kako formulirati QTF, da veljavnost njenih zakonitosti razširimo tudi na področje splošne relativnosti. Seveda to pomeni, da bi splošna relativnostna teorija morala doživeti temeljito reinterpretacijo, kar pa ne zahteva nujno njene razveljavitve.

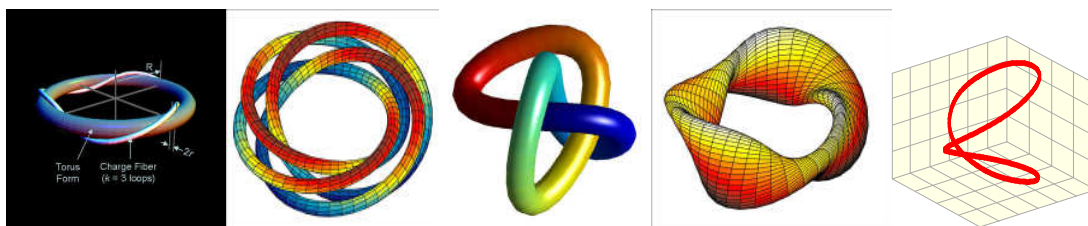
Eno tako možno različico, izpeljano na osnovi SED, je leta 1987 predstavil Puthoff [304], nato 1994 še Haisch in Rueda [305], ter Ibison [306]. Razlago so kasneje poglobili in postavili na trdnjše temelje [307], [308], [309], njihovim prizadevanjem pa se je pridružila še vrsta drugih raziskovalcev [310]. A predno se poglobimo v njihovo interpretacijo, moramo predstaviti možnost modeliranja osnovnih delcev v okviru SED.

ZPE in elektron

“Veste, zadoščalo bi že, če bi razumeli le elektron!”, je nekoč dejal Einstein.

Ta stavek še danes ima enako težo kot v času ko je bil izrečen. V tistem času, v prvih dveh desetletjih po odkritju (J.J. Thompson, 1897., [148]), je elektrton [88] v različnih poskusih izkazoval različne lastnosti, kar nikakor ni bilo mogoče enotno zajeti le s klasično razlago. Zato so se mnogi fiziki priklonili stališču, da klasična fizika popolnoma odpove pri opisu pojavov na kvantni ravni. Zgodovinski razvoj znanosti je pripeljal do tega, da danes elektron večinoma opisujemo predvsem matematično, s pomočjo enačb, in si ne belimo glave s tem, kako naj bi tak objekt dejansko ‘izgledal’. Tak pristop je sicer uspešen, tako pri razlagi rezultatov že izpeljanih eksperimentov, kot tudi pri predvidevanju izidov novih. Žal pa še vedno ni popolnoma konsistenten in v določenih pogojih se še vedno zgodi, da ugotavljamo kršitve nekaterih temeljnih in nespornih zakonitosti.

Fiziki, ki si upajo zapustiti varno okolje von Neumannovih [311] sebi adjungiranih matričnih operatorjev [312] v Hilbetrovem [313] prostoru [314], opisujejo elektron, odvisno od konteksta, bodisi popolnoma klasično, kot kroglico s premerom $\sim 10^{-15}$ m, z električnim ‘nabojem’ (karkoli naj ta beseda že pomeni!) enakomerno razporejenim po celotni površini te kroglice (ni čisto jasno kako naj bi ‘elementarni’ naboj lahko bil ‘enakomerno razporejen’ po kakršnem koli prostoru?), bodisi kvantno-mehansko, kot točkasti naboj (z ničelnim radijem, pri čemur električno polje zaradi naboja divergira v neskončnost!), bodisi kot ‘razmazan’ sferoid atomske orbitale v okviru Schrödingerjeve valovne enačbe (le za vodikov atom!), bodisi v okviru teorije super-strun [162] kot infinitezimalno tenko struno, dolžine primerljive s Comptonovo valovno dolžino, $\lambda_C = h/m_e c \approx 10^{-12}$ m, [315], toda s precejšnjimi težavami pri pojasnitvi spina $\hbar/2$, magnetnega momenta (Bohrovega magnetona) $q_e \hbar / 2m_e c$, ter anomalnega magnetnega momenta $\alpha_f / 2\pi$ v okviru istega enotnega modela. Obstaja tudi nekaj ‘variacij na temo’, denimo elektron v obliki zanke, oziroma prstana, z lastnostimi izračunanimi popolnoma klasično (Bergman, 1990., [316]), ali več različnih, dobesedno ‘zavozlanih’ modelov (kot je, denimo, eden bolj zanimivih, model s Hubiusovo dvojno zanko, Qiu-Hong [317] 2005, in še nekateri drugi [318]). **SL.13** kaže nekaj takih modelov elektrona, simuliranih s pomočjo programa MATLAB™ (The MathWorks, Inc.).



SL.13: Nekateri modeli notranje konfiguracije elektromagnetnega polja elektrona. Po vrsti z leve: Bergmanov prstan, več sklenjenih prstanov, trojni vozle, zasukana trakovna zanka, Hubiusova dvojna zanka. Žal, nobena izmed teh struktur ne more pojasniti vseh lastnosti elektrona hkrati. Največ težav je, tako kot pri preprosti odprti struni, s spinom $\hbar/2$, Bohrovim magnetonom $q_e \hbar / 2m_e c$, in anomalnim magnetnim momentom $\alpha_f / 2\pi$.

V okviru SED se že nekaj časa nakazuje še ena možna in obetajoča rešitev. Osnovna ideja se je porodila že v okviru klasične elektromagnetike ob koncu XIX stoletja, vendar jo je šele nedavno, leta 2006, formaliziral Puthoff [319]. Ideja je dobila

močno podporo, tako kot nekatere sorodne ideje, v že dolgo znanem pojavu tvorbe parov elektron–pozitron (e^- , e^+) [320] iz para fotonov (γ , γ), ter obratnega procesa, njune ponovne anihilacije v par fotonov:

$$\gamma + \gamma \rightleftharpoons e^+ + e^- \quad (59)$$

Presek $\gamma + \gamma$ interakcij je sicer izredno majhen, vsaj pri gostoti fotonov, ki smo jo sposobni danes ustvariti v laboratorijih, in v običajnih pogojih za fotone velja teorem superpozicije (njihova polja se fazno-vektorsko seštevajo, kot smo že razložili pri pojavu interference). Vendar je tvorbo parov mogoče redno opazovati pri interakcijah enega samega fotona z močnim elektromagnetnim poljem, kot je to, denimo, v neposredni okolici protona. Pri tem pa proton sodeluje v procesu le kot ‘katalizator’ (se ne spremeni), po relaciji: $\gamma + p \rightarrow e^+ + e^- + p$, energija vpadnega fotona pa mora biti večja od dvojne energije elektrona, $W_\gamma \geq 2 \times 0.511 \text{ MeV}$.

Nujna komponenta pri tem procesu, ki pomaga pojav razložiti (in ne le dokumentirati kot dejstvo), je prav obstoj ZPE. Razlaga teče nekako takole: ko gostota elektromagnetne energije znotraj zadosti majhnega prostora preseže omenjeni prag 1.022 MeV, se elektromagnetni impulz (foton) razcepi na dve komponenti. To se zgodi zaradi sukanja vektorjev električne in magnetne poljske jakosti krožno polariziranega polja fotona [58]. Močno lokalno magnetno polje deluje kot impedančni kratek stik, ki vsili fotonskemu polju orijentacijo magnetne komponente v smeri magnetnega polja za naraščajoči del (čelo) impulza, oziroma v nasprotni smeri polja za vpadajoči del (začelje) impulza. Pri tem čelo impulza utrpi levi zasuk, začelje impulza pa desni zasuk, ker ustavitev sukanja magnetnega vektorja polja povzroči sukanje Poyntingovega smernega vektorja. Že po nekaj zasukov v novi orijentaciji se električna komponenta razcepljenih fotonskih polj prostorsko sklene v fazno koherentno zanko in okrepi, magnetna pa (skoraj) izniči. Tako se ustvarita dva ‘vrtinca’ energije v obliki ‘stojnih’ [321] elektromagnetnih valovanj z nasprotnim spinom. Vrtinec z levosučnim spinom imenujemo elektron, tistega z desnosučnim pa pozitron. Takšno, le na videz ‘stojno’ valovanje izrine ostale moduse nihanja iz volumna, ki ga zaseže, kar lokalno (znotraj tega volumna) zmanjša gostoto ZPE. Notranji in zunanji elektromagnetni ‘tlak’ tako dosežeta dinamično ravnovesje, kar ohranja tako nastalo ‘strukturo’.

Za lažjo vizualizacijo tega procesa si pomagajmo z makroskopsko analogijo. Predstavljajte si, da sedite v čolnu in veslate. Pri potegu vesla skozi vodo nastaneta na površini vode ob robovih vesla dva nasproti vrteča se vrtinca, ki dejansko predstavljata dolgočasovno obstojni ‘luknji v vodi’. Znotraj vsakega vrtinca bo povečana dinamična komponenta pritiska na račun statične komponente, kot posledica sredobežne sile, ki deluje na vrteče se vodne molekule, kar se uravnovesi z okoliškim statičnim pritiskom vode. Seveda, medsebojno trenje in rotacija posameznih vodnih molekul počasi zmanjšuje celotno kinetično energijo vrtinca (ta gre v toploto), vrtinca počasi postajata vse bolj plitva in končno izgineta.

Toda v primeru notranje elektromagnetne energije elektrona in zunanje ZPE ni trenja ki bi povzročalo izgubo energije (‘trenje’ kot ga običajno poznamo je pravzaprav le posledica delovanja elektromagnetnih polj med posameznimi molekulami ali atomi snovi, oziroma njihovimi zunanjimi elektronskimi lupinami). Če ni izgube energije in če v neposredni bližini ni drugih nabitih delcev, tudi ni nobene druge izmenjave energije, zato sta nastali elektron in pozitron lahko stabilna. Pravzaprav mora biti pri nastanku para na voljo nekaj več energije; ta dodatna energija preide v

kinetično energijo nastalega para, zato delca odletita narazen, sicer bi se takoj med seboj izničila. Le če se ponovno srečata med seboj, ali z drugim sebi nasprotnim delcem, se potencialna energija (ki je posledica ZPE) med njima zniža in omogoči njuni notranji energiji prosto pot iz pasti v katero ju je ujela ZPE; takrat nastaneta dva nasproti polarizirana fotona, ki odletita v nasprotnih smereh ('anihilacija' [138]).

Modeliranje lastnosti snovi s pomočjo stojnega elektromagnetnega valovanja je bilo prvič predlagano že v XIX stoletju, ko je Heaviside [35] (neposredno **pred** Thomsonovim odkritjem elektrona!) razmišljal o konceptu elektromagnetnega izvira mase in je 1893 [322] predlagal možnost tolmačenja inercije s pomočjo fazne korelacije notranjega energijskega nihanja in gibanja električno nabitega delca v etru (polju ZPE, kot je to bilo razumljeno v okviru klasične elektromagnetike). Do podobnih idej o notranjem energijskem nihanju sta prišla leta 1924 de Broglie [75] in leta 1927 Compton [57], vendar izhajajoč iz čisto drugačnih predpostavk in eksperimentalnih rezultatov. O elektromagnetni interpretaciji inercije je razmišljal leta 1965 Saharov [289], [290]. Prvi uspešnejši model stojnega valovanja, ki je lako razložil tudi inercijo, je okoli leta 1979 predlagal Catt [323], čeprav se sam v podrobno formaliziranje svoje teorije ni poglobljal.

Leta 2002 je podoben model posplošeno formaliziral Koschmeider [324]. V svojem zadnjem članku iz leta 2008 pa je opisal, ne le možnost modeliranja notranje strukture osnovnih delcev, pač pa tudi razložil kako bi lahko pojasnili problem hierarhije njihovih mas, ter izvir šibke in močne sile, upoštevajoč le fotone in nevtrine, brez kakršnih koli drugih hipotetičnih osnovnih delcev. Zavidanja vreden dosežek, pa naj se izkaže za pravilnega, ali ne!

Razumevanje ideje o elektromagnetnem izviru inercije bo morda lažje, če si najprej ogledamo en klasičen elektromagnetni poskus, ki ga je že okoli leta 1880 naredil in pojasnil prav Heaviside.

V fiziki zgodovinske mejnike, ko je nek makroskopski pojav ukazal na kvantno naravo snovi in energije, lahko preštejemo na prste ene roke. Prvič smo to neposredno ugotovili pri Planckovem zakonu sevanja črnega telesa. Poskus, ki ga bomo opisali, in tudi njegova pravilna razlaga, pa sta še nekoliko starejši, četudi je spoznanje, da je pojav povezan s kvantnim svetom, prišlo mnogo kasneje.

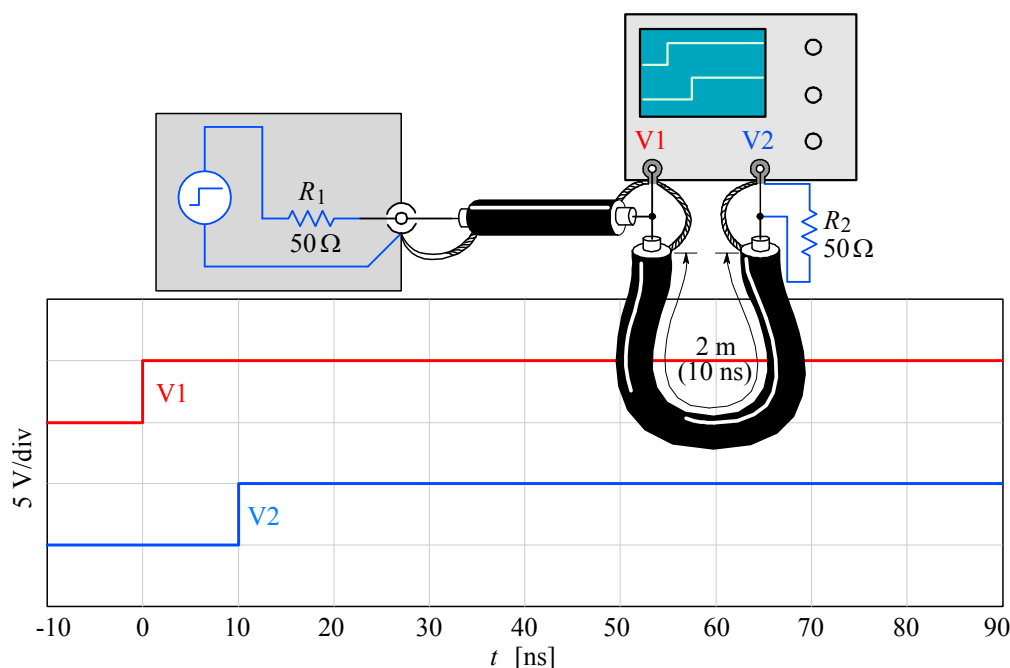
Prav neverjetno je kako preprosta sredstva je imel Heaviside na voljo, ko je prišel do svojih spoznanj. Tudi danes tak poskus lahko ponovi vsak osnovnošolec, če le poveže med seboj nekaj kosov koaksialnih kablov, par uporov, stikalo in baterijo. Le da danes ne potrebujemo več kilometre kablov, kot v Heavisidovih časih, zadostuje le nekaj metrov, ker si pri opazovanju elektromagnetnih impulzov lahko pomagamo s hitrim osciloskopom. Toda predno se poglobimo v sam poskus, moramo pojasniti nekaj splošnih lastnosti valovanja (ki veljajo tudi za elektromagnetna valovanja). Prav tako moramo pojasniti lastnosti koaksialnega kabla kot 'transmisijske linije' [325].

Za razlago valovanja uporabimo sledečo mehansko analogijo. Imejmo več metrov dolgo debelejšo vrv, ali kovinsko verigo, ki jo na enem koncu pritrdimo na steno, drugi konec pa držimo v roki in jo vlečemo le toliko, da prosto visi in se ne dotika tal. Sedaj z roko kratko sunimo navzgor le za nekaj centimetrov in opazujemo nastali impulz kako potuje po vrvi (večja ko je masa vrvi, manjša bo potovalna hitrost impulza). Ko impulz pride do konca, se odbije v nasprotni fazi in pripotuje do naše roke, kjer začutimo sunek navzdol. Podoben poskus naredimo z vrvjo ki jo spustimo

skozi okno stavbe, da prosto visi, namesto da je pritrjena na steno. V tem primeru se bo impulz odbil od (prostega) konca vrvi v isti fazi, ker bo drugi konec vrvi lahko prosto zanihal. Če pa drugi konec vrvi damo soigralcu naj ga bodisi trdno drži ob telesu, bodisi z iztegnjeno roko, bo le del odbite energije v fazi, del pa v protifazi, del pa se bo absorbiral ob premikanju mase roke.

Ta preprosta igra nam pomaga ponazoriti dva pomembna fizikalna koncepta. Prvi se navezuje na potovalno hitrost impulza, ki je obratno sorazmerna masi vrvi in njenemu modulu elastičnosti. Drugi pa se nanaša na odboj in absorpcijo energije impulza v odvisnosti od zaključne mehanske impedance sistema, oziroma pritrjenosti, ali razmerju mas na koncu vrvi: če je zaključna impedanca enaka nič (kot v primeru pritrjenosti na steno) dobimo protifazni odboj, pri neskončno veliki zaključni impedanci (prosto viseči konec) pa sofazni odboj. Če pa bi vrv vzbujali periodično enakomerno, ter uglaseno s potovalno hitrostjo valovanja po vrvi, bi vzbudili sinusno nihanje. V odvisnosti od frekvence vzbujanja in dolžine vrvi bi hitro našli tako frekvenco vzbujanja (rezonanco), ob kateri bo valovanje po daljšem času izgledalo kot da stoji [321] (se ne premika vzdolž vrvi), ker se vpadni val in odbiti val na posameznih odsekih vrvi ustrezno seštevata.

Pa se vrnimo elektromagnetnemu valovanju, kjer seveda veljajo enake valovne zakonitosti kot v primeru mehanskega valovanja, le z drugimi fizikalnimi parametri. Vzemimo 2 m dolg kos koaksialnega kabla, tipa RG-58, s karakteristično impedanco $Z_k = 50 \Omega$, in ga priključimo med vhoda dvokanalnega osciloskopa, **Sl.14**. Nato en konec s pomočjo T-člena ter kabla enakega tipa, katerega dolžina ta hip ni pomembna, priključimo še na generator pravokotnih impulzov, z daljšo periodo ponavljanja.



Sl.14: Preverjanje časovne zakasnitve transmissijske linije (koaksialnega kabla)

Tako kot mehansko valovanje, tudi elektromagnetno valovanje izkazuje odboj in absorpcijo, če se impedanca prostora, po katerem se val razširja, naglo spremeni. Če se želimo izogniti težavam z odboji in opazovati nepopačene pravokotne signale, morata oba konca kabla biti zaključena z impedanco enake vrednosti kot je karakteristična impedanca kabla, Z_k . Komercialni generatorji signala že imajo vgrajen

predpisan upor, in mnogi osciloskopi imajo tudi možnost izbire vgrajene vhodne impedance enake vrednosti. Če takega osciloskopa nimamo, za drugi konec kabla potrebujemo zunanji zaključni upor vrednosti $50\ \Omega$.

Vsa enegrija, ki jo ustvari generator, se tako porabi, polovica na generatorski notranji upornosti, polovica pa na zaključni upornosti, kjer preide v toploto in zato ni nobenih odbojev. Osciloskopska vhoda imata zadosti visoko vhodno impedanco (običajno $1\ \text{M}\Omega$ vzporedno z $10\ \text{pF}$), da je njen vpliv v primerjavi z Z_k mogoče zanemariti.

Opazujemo časovno razliko čela impulzov med obema kanaloma. Ta bo znašala okoli $10\ \text{ns}$. To pomeni, da je propagacijska hitrost elektromagnetnega vala v takem koaksialnem kablu $2\ \text{m}/10\ \text{ns}$, torej $2 \times 10^8\ \text{m/s}$, ali približno $2/3$ svetlobne hitrosti. To vrednost si zapomnimo, ker jo bomo potrebovali pri pojasnjevanju Heavisideovega poskusa.

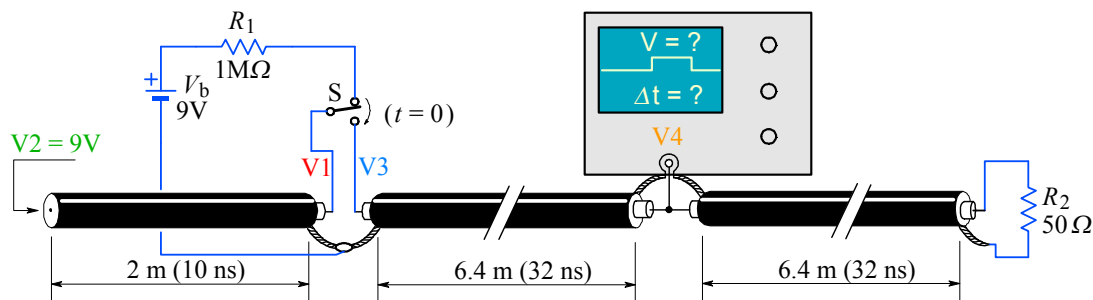
Ob koncu XIX stoletja, v času ko je Heaviside raziskoval elektromagnetne lastnosti telegrafskih linij, je, enako kot danes, stanje tehnike omogočalo le določeno končno hitrost 'bitov' (telegrafskih impulzov) preko katere ni bilo mogoče zanesljivo pošiljati nepopačenih sporočil. Izkušeni telegrafisti so že takrat na kratkih razdaljah lahko oddajali (in tudi na posluh prepoznavali) 150 znakov v minuti in več, in ker je pri Morseovi kodi [326] znak sestavljen iz 1 do 6 impulzov, povprečno 4 , pomeni da je bila potrebna hitrost signalizacije okoli 600 impulzov na minuto, oziroma 10 na sekundo. To pomeni, da je za zanesljivo detekcijo bila potrebna časovna natančnost od par stotink sekunde. Kot je mnogo kasneje pokazal Nyquist [327], je (v idealnem primeru) najvišja možna signalna frekvenca enaka polovici pasovne širine prenosnega sistema. Že pri medkrajevni telegrafiji, kaj šele pri transatlantski, je dolžina linij bila tako velika, da je pri impedanci kabla prevladovala kapacitivna komponenta, kar je povzročalo opazno zmanjšanje hitrosti signalizacije, sorazmerno z dolžino linije.

Heaviside (ki se ga je kasneje prejel naziv 'čarovnik induktivnosti') je problem omejitve komunikacijske hitrosti skušal rešiti z induktivno kompenzacijo kapacitivne impedančne komponente. Da bi raziskal do katere frekvence deluje njegova kompenzacija, je potreboval način kako generirati različno dolge impulze točno določene dolžine. Seveda, takrat še ni bilo na voljo komercialnih pulznih generatorjev, prve 'elektronske cevi' so izumili šele 50 let kasneje [328]. Heaviside si je zato pomagal z različno dolgimi in na točno določeno dolžino odrezanimi referenčnimi kablji, ter z baterijo galvanskih členov. Posamezni referenčni kabel bi prek stikala najprej priključil na baterijo, da se je na kapacitivnosti kabla nabral naboj, nato pa je nabit referenčni kabel s stikalom preklopil na linijo, ki jo je preskušal. Naboj je iz referenčnega kabla stekel v linijo s propagacijsko hitrostjo, določeno z induktivno in kapacitivno impedančno komponento kabla in tako ustvaril impulz željenega trajanja, ki je na koncu linije aktiviral elektromagnetno pisalo.

Natančen kot je bil, je Heaviside takoj opazil, da se dogaja nekaj nenavadnega!

Pa ponovimo Heavisideov poskus na moderni način. Potrebujemo nekaj kosov koaksialnega kabla tipa RG-58, od katerih naj bo eden referenčne dolžine $2\ \text{m}$, druga dva pa nekoliko daljša, denimo $6.4\ \text{m}$ (dolžini le teh nista pomembni, a naj bosta zaradi lažje obravnave precej daljši od referenčne dolžine; $2\ \text{m}$ in $6.4\ \text{m}$ sta standardni dolžini laboratorijskih kablov). Potrebujemo še par uporov, vrednost prvega naj bo razmeroma velika, denimo $1\ \text{M}\Omega$, drugega enako kot Z_k , $50\ \Omega$. Potrebujemo tudi preprosto

stikalo, baterijo 9 V in hiter osciloskop (če nimamo zadosti hitrega, lahko vzamemo vse kable $10\times$ daljše, zaradi česar bodo pulzi za enak faktor daljši). Te sestavine povežimo kot je narisano na **Sl.15**.



Sl.15: Heavisideov poskus na moderen način. Ko je stikalo S preklopljeno na baterijsko napetost $V_b = 9\text{ V}$ prek upora $R_1 = 1\text{ M}\Omega$, se bo referenčni kabel počasi nabil na enako napetost, 9 V. Ko stikalo preklopimo in referenčni kabel tako prevezemo na transmisijsko linijo, ki jo tvorita oba daljša kabla, bo vsa energija nakopičena v referenčnem kablu stekla po novo nastali poti in se pretvorila v toploto na zaključnem uporu $R_2 = 50\ \Omega$. Zanima nas kako visok in kako dolg bo pulz, ki ga bo zabeležil osciloskop.

Najprej bomo stikalo postavili tako, da bo referenčni kos kabla povezan na baterijo preko upora $1\text{ M}\Omega$ in se bo počasi nabil na enako napetost kot je napetost baterije, 9 V. Nato stikalo preklopimo. Energija, nakopičena na referenčnem kablu, bo iztekla v daljšo linijo, na sredi katere smo priključili osciloskop, s katerim bomo zaznali generirani impulz. Zaključni upor $50\ \Omega$ na koncu linije bo vso prispelo energijo pretvoril v toploto in zagotovil, da ni motečih odbojev, ki bi utegnili zmotiti meritev. Idealno bi bilo, če bi imeli stikalo, katerega kontakti so močeni z živim srebrom, da zagotovimo stik, ki se ne prekine in ne odskakuje pri preklonu, predno se dokončno umiri. Vendar so naši impulzi zadosti kratki, da bomo tudi z navadnim stikalom z nekaj vaje dobili zadovoljive merilne pogoje (mehanske vibracije stikala so običajno v območju med 10 in $300\ \mu\text{s}$).

Po meritvah zakasnitve impulza po kablu, ki smo jih opravili prej, bi pričakovali, da bo ves naboj iz referenčnega kabla odtekel in se pretvoril v toploto na zaključnem uporu, zato naj bi osciloskop prikazal impulz z napetostjo 9 V (torej enako, kot je baterijska), in širino 10 ns (če je referenčni kos kabla dolg 2 m).

Pa preklopimo stikalo. Kaj kaže osciloskop?

Presenečenje! Impulz na osciloskopu ima le **polovično amplitudo**, 4.5 V, in **dvojno dolžino**, 20 ns!

Kako naj si to razlagamo? Energija je sicer enaka, a zakaj se oblika spremeni?

Pri tem pojavu nam naše običajne predstave o elektronih, ki 'tečejo' po vodnikih od izvora do porabnika in zapolnjujejo vrzeli, ki so jih prej zapustili drugi elektroni, ne pomagajo veliko, prej nasprotno, le zmedejo nas. To je 'vodovodarska elektrotehnika', kot jo sam posmehljivo imenujem — pa da ne bo pomote, s tem se nikakor ne želim posmehovati vodovodarjem, ki jih sicer izredno cenim, zlasti ko mi počí cev v kopalnici — ne, posmeh gre nam, fizikom in elektrotehnikom! Ne poznamo, namreč, nobenega fizikalnega procesa, ki bi nam zadovoljivo pojasnil zakaj naj bi polovica elektronov v referenčnem kablu stekla ven takoj, ko se jim ukaže priložnost,

med tem ko naj bi druga polovica potrpežljivo čakala, da gneča mine in se šele nato odpravi za prvimi!!!

Tukaj je nujno priklicati na pomoč teorijo polja. Že Heaviside je, v nasprotju s tedanjim (in tudi kasnejšim!!!) prepričanjem, ugotovil, da energije ne nosijo elektroni v vodniku, temveč transverzalni elektromagnetni val med vodniki, ki mu elektroni v vodniku le sledijo. Pravzaprav so elektroni v vodniku za eno samo zgubo! Oni so 'krivci' za toplotne izgube v prevodniku. Te izgube pa izginejo brž ko prevodnik ohladimo na temperaturo blizu absolutni ničli, ko večina kovin postane supraprevodna [329]. Na tako nizki temperaturi se znotraj vodnika ustvari energijsko prepovedan pas, ki preprečuje elektronom, da bi pridobili malo večje energije. Elektroni se zaradi povečane koherentne valovne dolžine med seboj 'začitijo' in združno tvorijo Cooperove pare [330], katerih pglavitna lastnost je komplementarnost spinov, zato se taki pari obnašajo kot bosoni [331] (delci s celoštevilčnim spinom, ki sledijo Bose-Einsteinovi statistiki) in ne več kot fermioni [332] (polovični spin, Fermi-Diracova statistika). Za razliko od fermionov, za katere velja Paulijevo izključitveno načelo [91], so bosoni 'radi' vsi v istem kvantnem stanju, zato se združno otepajo kakršne koli zunanje energije, kar pripelje do tega, da se vodnika obnašata kot idalni zrcali za elektromagnetni val (znotraj supraprevodnika ni polja, Meissnerjev pojav [333]).

Idejo, da energijo dejansko prenaša dielektrik, izolator, ali prazen prostor med vodniki, ne pa vodnika sama, bo povprečno izobražen človek najbrž zavrnil kot neumnost. Obenem ta isti povprečnež kot popolnoma normalno in samoumevno sprejema dejstvo, da elektromagnetna energija (svetloba in toplota) prihaja s Sonca na Zemljo prek 150 milijonov kilometrov bolj ali manj 'praznega' prostora!

Težava je v tem, da razen redkih izjem (LASER, MASER [334]), vsi naši električni tokokrogi generirajo razmeroma nizkofrekvenčna polja, sestavljena iz sicer ogromne množice fotonov (Heavisideov 'energijski tok' [335]), ki pa so med seboj nekoherentni (imajo različne valovne dolžine in zato različne energije), zato se večinoma med seboj potrejo. Zato z našimi tokokrogi zaznavamo le njihovo povprečje (Drudeov model [336], Lorentzov intergal [337], [338]). To povprečje pa je (glej ga, zlomka!) sorazmerno s termičnimi izgubami v vodnikih (Ohmov zakon, [339]).

Heaviside je ocenil, da je 'energijski tok' mnogo (vsaj za $10^{28} \times$) večji od toplotnih izgub. Kaj to pomeni? Ali nemara elektrogospodarstvu dejansko plačujemo $10^{28} \times$ preveč za dobavljeno električno energijo? Ne! Elektrogospodarstvo nam zaračuna le tisto energijo, ki jo s svojimi generatorji lahko zajame iz (povprečja) fotonskega polja, zraven doda $\sim 30\%$ za izgube v pretvorbi in prenosu, $\sim 500\%$ za vzdrževanje in gradnjo infrastrukture (elektrarne, daljnovodi, transformatorske postaje), ter $\sim 300\%$ za plače svojih uslužbencev. Država pa na vse skupaj pribije 28% DDV. Skupno to znese le okoli $10 \times$ več od osnovne ekonomske cene proizvedene energije, še zdaleč ne $10^{28} \times$. Naša sreča je torej, da električni števci merijo le 'realne' kWh in ne Heavisideovega energijskega toka.

Nazaj k poskusu. Kaj se torej dogaja v našem referenčnem kablu ob preklopu stikala? Znotraj kabla je, v hipu ko ga odklopimo od baterije, prisotno elektromagnetno polje, ki le navidezno stoji ('elektrostatika') in kaže enosmerno napetost 9 V (enako kot takrat ko je še bilo priklopljeno na baterijo). Vendar 'fotoni', nosilci elektromagnetnega polja, že po definiciji ne morejo stati pri miru, lahko se le podijo po prostoru s hitrostjo, ki jo določata lokalni vrednosti permeabilnosti μ in

permitivnosti ε , po enačbi (22). Sicer pa je geometrija prostora (znotraj koaksialnega kabla) tista, ki določa impedanco kabla (ki za tip RG-85 znaša 50Ω), po enačbi [340]:

$$Z_k = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu_0 \mu_r}{\varepsilon_0 \varepsilon_r}} \ln \frac{r_z}{r_n} \quad (60)$$

kjer sta r_z in r_n zunanji in notranji radij vodnikov koaksialnega kabla, μ_0 in ε_0 sta permeabilnost in permitivnost vacuuma, μ_r je relativna magnetna permeabilnost vodnikov (≈ 1 za baker), ε_r pa je relativna dielektričnost izolacije med vodnikoma (≈ 2.25 za polietilen). Zunaj kabla (ε_r zraka) je le malenkost večji od 1 in ga lahko zanemarimo) pa je impedanca prostora:

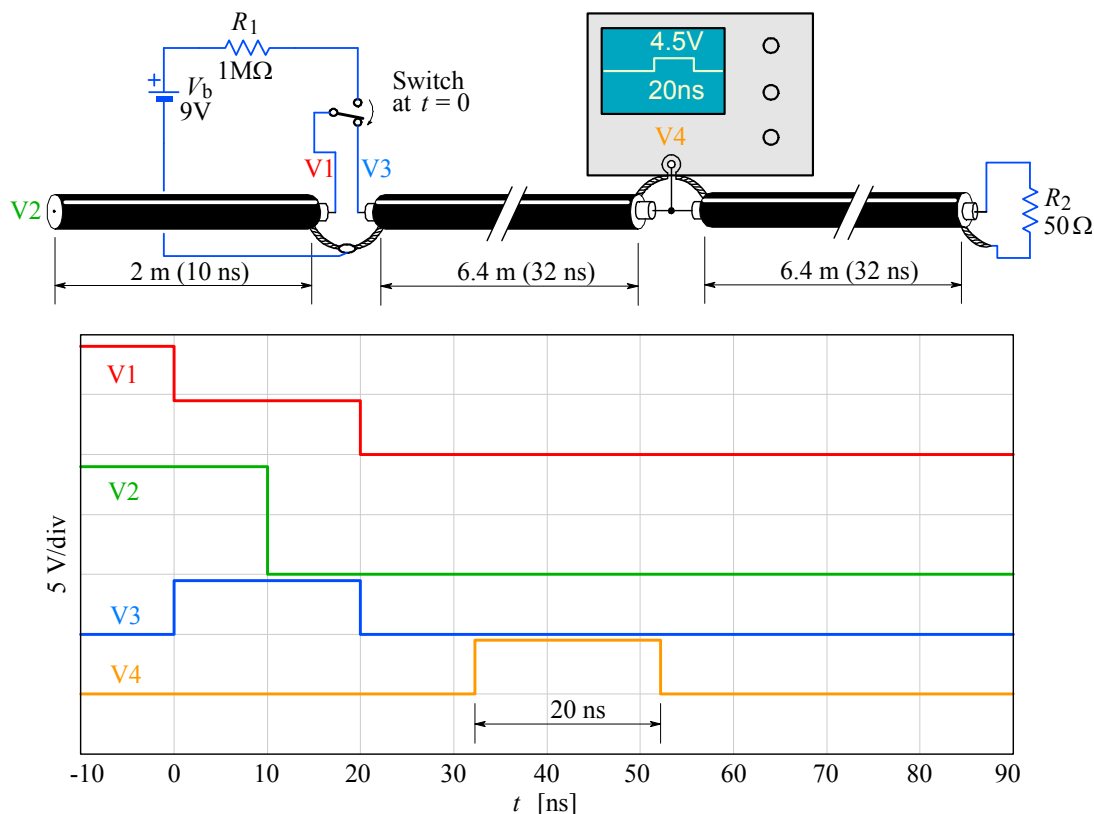
$$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} \approx 377 \Omega \quad (61)$$

Pozor: v obeh primerih, tako pri karakteristični impedanci kabla, kot tudi pri karakteristični impedanci vacuuma, gre za realno Ohmsko impedanco, ki je enaka za vse frekvence (čeprav so v primeru kabla prisotne še dodatne izgube v materialu, zato ima kabel vendar določeno zgornjo frekvenčno mejo, ki zmanjša strmino čela impulzov). Tu, namreč, ne gre za specifično upornost materiala (ki se pri kablji meri v Ω/m). Vendar je karakteristična impedanca dejansko sestavljena iz reaktivnih komponent (L_k in C_k za kabel, v vacuumu pa reaktivne lastnosti permeabilnosti μ in permitivnosti ε), zato karakteristična impedanca ni ne disipativna (je brez toplotnih izgub), ne disperzivna (ohranja fazno koherenco vala do zelo visokih frekvenc).

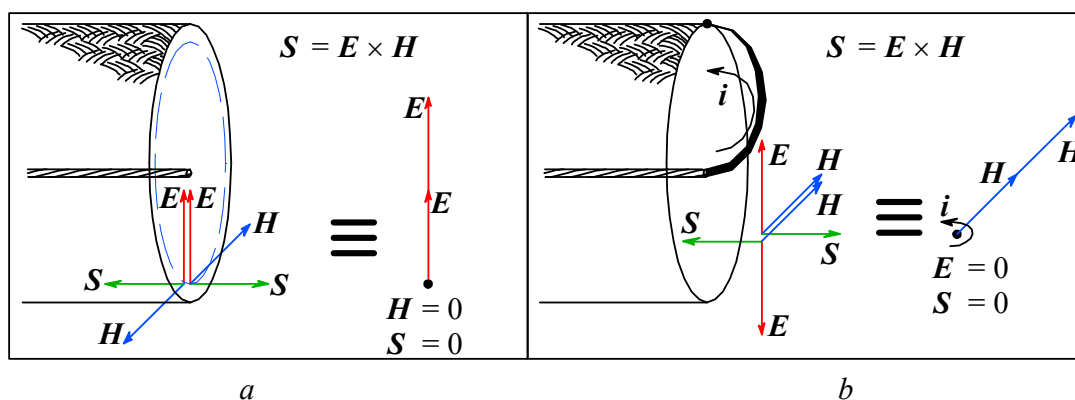
Ko pa elektromagnetni val pripotuje do odprtega konca kabla, tam zazna izredno strmo impedančno diskontinuiteto, kar povzroči, da se fotoni, ki potujejo proti odprtemu koncu kabla odbijejo s sofazno električno in protifazno magnetno komponento (tok $i = 0$, napetost $V = 2V_z$, kjer je V_z napetost vpadnega vala, določenega z razmerjem impedanc). Zato na odprtem koncu kabla vaznamo le napetost $V = 2V_z = V_b$, kot vidimo na **SI.16**.

Kaj pa je z magnetnim poljem, ali to zdaj 'izgine' in se elektromagnetni val 'ustavi'? Le zakaj bi? Spomnimo se interference dveh svetlobnih žarkov: dejansko znotraj kabla še naprej potujeta dva vala v nasprotnih smereh, vpadni in reflektirani val, vsak z napetostjo $V_z = V_r = V_b/2$. Seštevanje, oziroma odštevanje posamičnih komponent polja v primeru 'elektrostatičnega' polja, skupaj s smerjo pretoka energije, ki ga kaže Poyntingov vektor [341], kaže **SI.17**. Tu vidimo, da sta v primeru **a** električni komponenti obeh polj sofazni, zato se seštevata, med tem ko sta magnetni komponenti protifazni in se med seboj potreta, prav tako pa vsota Poyntingovih vektorjev. Zato imamo navidez le električno 'statično' polje (v primeru **b** magnetno).

V trenutku ko smo stikalo preklopili, se linija v eni smeri podaljša z okoljem, ki izkazuje enako karakteristično impedanco. Tisti fotoni, ki v tem trenutku že potujejo v tej smeri, pač nadaljujejo naprej po liniji, drugi pa, ki v tem trenutku potujejo v nasprotni smeri, nadaljujejo svojo pot nazaj, kjer naletijo na odprti konec referenčnega kabla, se odbijejo z električno komponento polja sofazno in magnetno komponento polja protifazno, ter po ponovnem prehodu referenčne dolžine kabla nadaljujejo po novi poti za prvimi fotoni. Zato dobimo $1/2$ amplitude in $2\times$ dolžino impulza. Če bi 4-kanalni osciloskop priključili na karakteristične točke vezja, V_1 , V_2 , V_3 in V_4 , kot so označene na **SI.16**, bi videli odzive kot na diagramu.



Sl.16: Odziv na značilnih točkah pri Heavisideovem poskusu. Ob preklopu stikala polovica energije teče po referenčnem kablu proti stikalu, polovica pa nazaj proti odprtem koncu, od koder se odbije nazaj, ter sledi prvi polovici. Zato je pulz dvakrat daljši od zakasnitve referenčnega kabla in ima polovično napetost baterije. Dokaz za to je napetost V_2 na odprtem koncu kabla, ki ostane na prvotni vrednosti 9 V še za cel čas zakasnitve referenčnega kabla (10 ns), nato pa pade na vrednost nič.

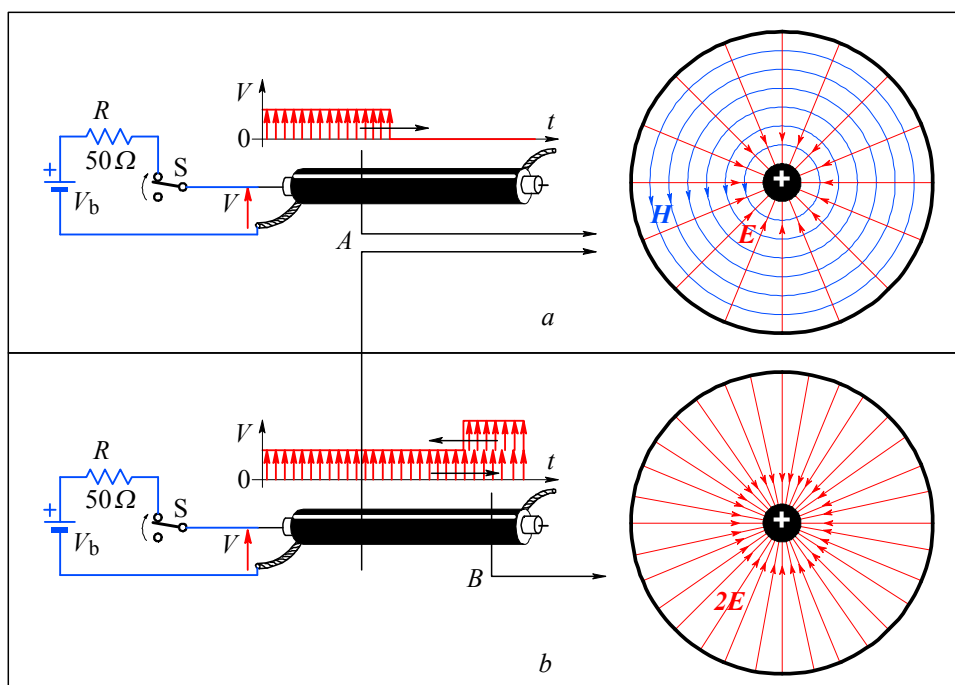


Sl.17: Vektorska analiza polja v poljubni točki med notranjim vodnikom in oklepom. a) pri odboju na odprtem koncu sta vpadna in reflektirana električna komponenta polja, E , sofazni in se seštevata, magnetni komponenti, H , sta protifazni in se potreta, prav tako tudi Poyntingov vektor $S = E \times H$, zato zaznavamo le električno 'statično' polje. b) pri kratkostičnem odboju sta magnetni komponenti polja sofazni in se seštevata, električni komponenti pa se potreta, prav tako tudi Poyntingova vektorja, zato zaznavamo le magnetno polje kot posledico toka i .

Načeloma bi za analizo takih problemov potrebovali Maxwellove enačbe, vendar bomo marsikateremu bralcu prihranili glavobol in olajšali razumevanje elektromagnetnih razmer če fizikalno razlago podkrepimo s **Sl.18**. Ta prikazuje

propagacijo elektromagnetnega polja od energijskega vira z napetostjo V_b skozi koaksijalni kabel in odboj na odprtem koncu kabla, s prikazom ustreznih polj na dveh presekih, A in B . V preseku A , med tem ko vir polni kabel z energijo, radialno električno polje E in krožno magnetno polje H , pravokotna drugo na drugo v vseh točkah, potujeta v smeri, ki je pravokotna na obe polji (Poyntingov vektor $\mathbf{S} = \mathbf{E} \times \mathbf{H}$ je usmerjen iz slike ven proti nam).

Ko pa elektromagnetno polje pripotuje do odprtega konca kabla, se reflektira na način kot smo ga že videli na vektorskem diagramu na **Sl.17a**: reflektirano in vpadno polje imata sofazni električni komponenti $\mathbf{E}$, ki se seštevata (kar je ponazorjeno z dvojno gostoto električnih 'silnic' na **Sl.18b**, prav tako se podvoji tudi napetost, $V \rightarrow 2V = V_b$), med tem ko sta magnetni komponenti $\mathbf{H}$ protifazni in se potreta (ni magnetnic na **Sl.18b**, prav tako ni toka, $I = 0$). Potreta se tudi Poyntingova vektorja $\mathbf{S}$: na koncu kabla, pa tudi na prerezu B , imamo navidez 'elektrostatično' polje. Hkrati pa v preseku A imamo še vedno enak elektromagnetni val kot prej!



Sl.18: Odboj stopničastega vala na odprtem koncu koaksijalnega kabla. *a)* Nekaj nanosekund po vklopu pozitivne napetosti V_b na notranji vodnik kabla bo elektromagnetno polje pripotovalo čez točko A . Ker vir polni kabel z energijo, bo polje v preseku A kazalo z električno komponento polja E od oklepa kabla proti notranjem vodniku, med tem ko magnetno polje H obkroža notranji vodnik v smeri urnega kazalca, polje pa potuje proti nam. *b)* Ko polje pripotuje do odprtega konca kabla se reflektira tako, da E ohrani fazo, med tem ko se H fazno obrne za 180° . Zato se gostota električnega polja podvoji (prav tako se podvoji tudi napetost), med tem ko se vpadna in reflektirana komponenta magnetnega polja potreta, kot kaže slika v preseku B . Hkrati pa energija iz vira še naprej doteka v kabel, ter se po odboju se vrača nazaj, tudi po tem ko reflektirani val pripotuje nazaj do izvira. Ker po vrnitvi polja k viru ni toka in ni magnetnega polja, imamo navidez opravka z 'elektrostatičnim' poljem. Toda fotoni (nosilci polja) še naprej potujejo po kablu naprej in nazaj.

Torej, v preseku B imamo že elektrostatične razmere, med tem ko v preseku A vir še naprej polni kabel z energijo. Ali to pomeni da sedaj v preseku B valovanje stoji? Le navidezno! Fotoni nimajo nobenega razloga da bi se ustavili na mestu kjer se

vpadno in reflektirano polje srečata. Ker pri nizki gostoti polj velja teorem superpozicije, se vpadni fotoni za reflektirane ne zmenijo in še naprej potujejo do prostega konca kabla, kjer se odbijajo nazaj. Fotoni ne morejo mirovati, lahko se le podijo s svetlobno hitrostjo (oziroma hitrostjo, ki jo določata lokalni vrednosti μ in ϵ), zato ni nobenega razloga da bi se vpadno polje kar ustavilo ko se sreča z reflektiranim poljem, prav tako tudi reflektirano polje potuje nazaj proti viru in se ne meni za vpadno polje. Zato v delu, kjer opažamo navidez statične razmere, imamo v resnici opravka z dvema nasproti potujočimi elektromagnetnimi polji.

Vendar, kaj se zgodi ko reflektirano polje pripotuje nazaj do izvira? Takrat je celotna linija pod enako napetostjo kot je napetost izvira, in, če je kabel na koncu odprt, tok ne teče (puščanje kableske izolacije je zanemarljivo); ali se polje sedaj končno ustavi? Ne! Toka iz vira resda ni več, vsota napetosti vpadnega in reflektiranega vala je enaka napetosti vira, zato tudi padca napetosti ni, in vir ne oddaja več energije. Toda vir še naprej pošilja fotone v kabel, ti pa se po odboju na odprtem koncu vračajo k viru. Skratka: **‘statična’ polja so le na videz statična!**

Zakaj smo posvetili toliko prostora podrobni razlagi nekega obskurnega poskusa s konca XIX stoletja? Razloga sta dva. Prvi razlog tiči v želji ponazoriti odnos med energijskim poljem in snovjo. Drugi razlog pa tiči v dejstvu, da ta poskus več kot nazorno kaže, da **‘elektrostatika’ sploh ne obstaja!** Oziroma, drugače: kadar koli imamo opravka z navidezno statičnim električnim poljem, sta tam dejansko vedno prisotna vsaj **dva v nasprotnih smereh potujoča elektromagnetna polja**. Za ‘magnetostatiko’ pa že dolgo vemo, da je ta le posledica bodisi orijentacije spinskih momentov električno nabitih delcev v magnetnem materialu, bodisi enosmernega toka, ki teče v neki zanki, torej tam tako ali tako ni nikoli bilo nič ‘statičnega’.

Kako pa je potem z elektroni? Že v osnovnošolski fiziki nas učijo da je naboj vir električnega polja, polje pa ne more biti vir drugega polja! Saj elektron vendarle že po definiciji mora predstavljati ‘pravo’ elektrostatično polje, mar ne?

Ne nujno! Tudi elektron je načeloma mogoče modelirati z dvema v nasprotnih smereh potujočimi valovanji. Le da zaenkrat, žal, ne vemo ničesar o notranji geometriji elektronovega polja; vemo le to, da ima njegovo zunanje efektivno polje že na razdalji primerljivi z radijem atoma sferično simetrijo.

Vendar pa o elektronovi notranji strukturi lahko vsaj ugibamo. Pravzaprav je profesionalna dolžnost vsakega fizika, da do potankosti razišče vse možne scenarije za rešitev posameznega teoretičnega problema in se (po možnosti) opredeli za tistega, ki se mu v danem trenutku in ob danih eksperimentalnih podatkih zdi najbolj prepričljiva, četudi te hipoteze še ne more neposredno preveriti.

Ugibajmo, torej! Geometrijsko najbolj preprosto zgradbo elektronovega notranjega polja, ki pa obenem naravno modelira tudi zunanje efektivno polje, dobimo, če privzamemo da sta oba notranja vala sferične oblike in potujeta eden proti ‘notranjosti’ elektrona, drugi pa navzven, tako da je v središču valni vozle, kjer je efektivna elektromagnetna impedanca enaka (skoraj) nič, zunanji pa je impedanca vakuumu, kot jo določa prisotnost ZPE, z vrednostjo $Z_0 \approx 377 \Omega$ (čeprav se ta na zunanjem ‘robu’ elektrona lahko tudi močno poveča, a zaenkrat tega ne upoštevajmo). Dolžina notranjega stojnega vala pa je (po klasični teoriji) $\sim 10^{-15}$ m, morda pa še manj. Oster impedančni prehod med notranjim in zunanjim poljem prepreči, da notranja energija uide, ker se na impedančno odprti ‘površini’ notranje valovanje odbija na enak

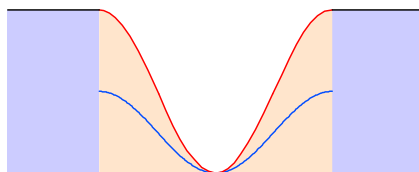
način, kot pri koaksialnem kablu, s sofazno električno in protifazno magnetno komponento, le da sta tokrat valovni fronti krogelne oblike. Na zunaj torej preostane le vsota sofaznih električnih komponent (in le nekaj malega 'anomalnega' magnetnega momenta).

Izredno privlačen model, a žal sferična simetrija ne more pojasniti spina [89], [342], [343], vsaj ne polovični spin, $\hbar/2$, kot ga izkazuje elektron.

Zaradi tega so le bolj verjetni nekateri nesimetrični, ali vsaj nesferično simetrični modeli, ko so že omenjeni prstani [316], ali vozli [317], **SL.13**. Kateri je bolj pravi in ali sploh kateri med temi, bo že pokazal čas, oziroma kak bolj domislen poskus. Vsekakor pa je nihanje notranjega polja lahko podlaga tako za de Brogliejevo valovno funkcijo elektrona, kot tudi za njegovo maso, oziroma inercijo!

Ne glede na to kakšna naj bo notranja struktura ali geometrija valovanja, še vedno lahko iz modela stojnega valovanja izluščimo nekatere lastnosti, za katere smo do sedaj menili, da imajo od elektromagnetike ločen izvor. Taka lastnost je inercija, oziroma masa. Že Eistein je ugotovil, da učinek mase in inercije mora povzročati v osnovi isti dejavnik [285] (danes vemo, da sta masa in inercija enaki po velikosti sile, ki jo povzročata, vsaj na 12 decimalnih mest natančno). Poleg tega je Einstein tudi ugotovil, da sta masa in energija le dva vidika istega pojava ($E = mc^2$). Modeliranje elektrona (in morda snovi nasploh) s pomočjo stojnega valovanja nam daje naravno podlago za obe trditvi, kot bomo videli na osnovi naslednjega premisleka.

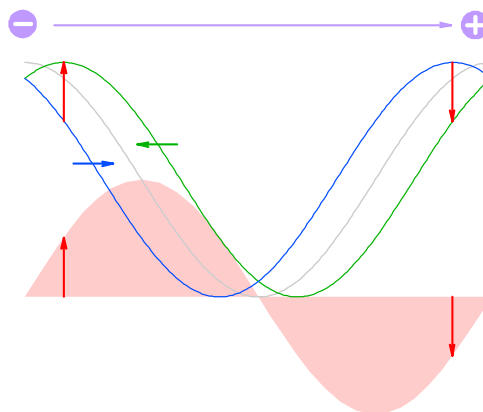
Zamislimo si mirujoči (relativno, seveda!) elektron med elektrodami ki jim lahko po volji vklopimo ali izklopimo enosmerno električno polje. Pri izklopljenem zunanjem polju naj ima notranja energija elektrona zaradi stojnega valovanja radialno porazdelitev v obliki kvadrata cosinusne funkcije radij-vektorja, $\cos^2 r$, tako da je polje maksimalno na površini elektrona, v središču pa je valni voz, kjer je energija minimalna. Če naj bo navzven vidna le električna komponenta polja, mora biti notranje stojno valovanje poredica dveh potujočih polj, enega od roba k središču in drugega v obratni smeri, zato se električna komponenta polja podvoji, magnetna pa izniči, kot na **SL.19**. Velikost rezultirajočega polja je v ravnovesju z zunanjim ZPF.



SL.19: Hipotetična porazdelitev polja v poljubnem prerezu elektrona. Notranje stojno valovanje sestavljata dva elektromagnetna vala, ki potujeta v nasprotnih smereh med središčem in zunanjimi robovi, ki predstavljajo pritisk ZPF. Zaradi sofaznega odboja na robovih bo električna komponenta podvojena, magnetna pa izničena. Notranja energija pa mora biti v ravnovesju z zunanjo energijo vacuuma.

Ob vklopu zunanjega polja se bo elektron začel pospešeno gibati v smeri polja, pač po zakonih, ki so nam znani že od Coulomba [344]. Zakaj? Zaradi dodatnega fotonskega tlaka zunanjega enosmerne polja na zunanje efektivno polje elektrona (ki ga generira notranje stojno valovanje). Ker je notranje polje, z ustrežno frekvenco in energijo, v ravnovesju z zunanjo energijo vacuuma, bo vsak dodaten foton, ki bi notranjo energijo kakor koli povečal, povzročil rahlo spremembo notranje frekvence

oziroma faze nihanja, **SI.20**. Toda s tem se energijsko ravnovesje poruši in elektron se odvečne energije takoj znebi, oziroma odda enak foton, kot če bi ga reflektiral kot zrcalo. Tak dogodek pa lahko obravnavamo po relaciji (18), kar pomeni da foton efektivno prenese elektronu 'mehanski' impulz. Množico fotonov pa, kot vemo, lako obravnavamo kot 'pritisk'.

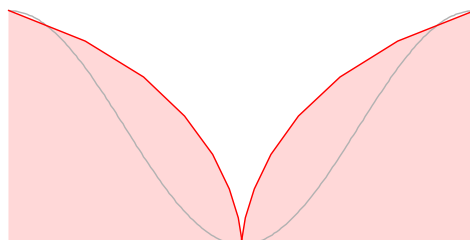


SI.20: Če na elektron deluje zunanje polje v smeri od negativne proti pozitivni elektrodi, kot to označuje puščica, bo notranje stojno valovanje utrpelo dodaten fotonski pritisk, zato bo nastalo fazno neravnovesje med nasprotni potujočima valovoma in elektron se bo začel gibati v smeri polja. Ker deformacija polja na eni strani potrebuje nek kratek čas da doseže nasprotni rob, notranje polje vzpostavi ravnovesje z zamudo, kar pomeni da se magnetni komponenti polj ne izničita popolnoma, zato gibajoči se elektron izkazuje magnetno polje, sorazmerno s hitrostjo gibanja. Na zunaj pa se fazni zaostanek kaže kot inercija. Ker se zaradi fazne razlike efektivno zunanje polje zmanjša, skuša ZPE elektron dodatno skriti v smeri gibanja, kar predstavlja Lorentzovo relativistično kontrakcijo dolžine.

Seveda, tako elektronovo notranje polje, kot tudi zunanje enosmerno polje (ki se superponira ZPE) sestavljata dejansko dve v nasprotnih smereh potujoči komponenti. Fotonski tlak deluje na impedančni barijeri le med tistimi komponentami polj, ki potujeta v nasprotnih smereh, zato se njuni medsebojni delovanja seštevata. Notranje polje elektrona niha v skladu s frekvenco (13) in fazo, kot jo določa 'razsežnost' elektrona (Comptonova valovna dolžina). Če se nihanje notranjega polja zaradi pritiska zunanjega polja v eni smeri popači, mora taka motnja prepotovati premer elektrona tja in nazaj, zato obstaja fazni in časovni zamik v 'reakciji' notranjega polja na zunanje polje, predno se spet vzpostavi ravnovesno stanje. Ker pa vsak foton zunanjega polja povzroči tako deformacijo, pomeni da se fazno ravnovesje ne more vzpostaviti, zato gibajoči se elektron izkazuje od nič različno magnetno polje, sorazmerno hitrosti gibanja. To fazno-časovna zakasnitev na zunaj zaznamo kot inercijo, ter sklepamo da elektron izkazuje lastnost 'mase', kot razmerja med električno silo in pospeškom.

V prikazanem modelu smo privzeli, da ima notranja energija cosinusno rzporeditev, vendar to ni nujno. Pravzaprav je tudi malo verjetno, predvsem zato, ker notranja energija elektrona izrine ZPE iz volumna, ki ga zajame. To pa pomeni, da znotraj elektrona lahko veljajo drugačne vrednosti μ in ε kot zuanj, torej se lahko hitrost valovanja upočasni. Privzemimo, da ima elektron res radij primerljiv tistemu, kot smo ga izračunali klasično, torej $\sim 10^{-15}$ m. Če bi elektromagnetni val tudi znotraj elektrona potoval s svetlobno hitrostjo, 3×10^8 m/s, bi prepotoval premer elektrona tja in nazaj v času $T = (4 \times 10^{-15}) / (3 \times 10^8) = 1.33 \times 10^{-23}$, kar ustreza frekvenci

$\nu = 1/T = 7.5 \times 10^{22}$ Hz. To pa je okoli $600\times$ več kot znaša Comptonova frekvenca za elektron ($\nu_C = m_e c^2/h = 1.24 \times 10^{20}$ Hz). Iz tega sledi da je elektron bodisi dejansko zelo zavozlan in je efektivna pot elektromagnetnega valovanja znotraj njega ustrezno dolga, bodisi sta znotraj elektrona μ in ϵ bistveno večja kot v vacuumu, zaradi tega je hitrost elektromagnetnega valovanja znotraj elektrona mnogo manjša od c , posledično pa ima lahko notranja razporeditev polj drugačno obliko od cosinusne, morda, denimo, hiperbolično, kot na **Sl.21**.



Sl.21: Energijska porazdelitev znotraj elektrona, če radij le-tega primerljiv s klasičnim ($\sim 10^{-15}$ m) bi, sodeč po Comptonovi frekvenci, lahko imela hiperbolično obliko, in hitrost valovanja v središču okoli $600\times$ manjšo od c . To bi imelo za posledico pulzirajoče efektivno zunanje polje elektrona.

Seveda je tudi možno, da so dejanske razsežnosti elektronovega notranjega valovanja primerljive s Comptonovo valovno dolžino, 2.42×10^{-12} m. V tem primeru pa dobimo za frekvenco pričakovan pravilen rezultat (Comptonovo frekvenco, kar je trivialno), predpostavke o drugačni hitrosti svetlobe znotraj elektrona pa so odveč.

Še nekaj pojavov lahko pojasnimo na naraven način ob pomoči takega modela elektrona. Najprej, zaradi fazne razlike notranjega valovanja se na zunanji električni komponenti polj efektivno zmanjšata, magnetni pa se ne potreta popolnoma. Tako zunanje polje dodatno (skupaj z ZPE) pritiska na elektron, ki se zato skrči v smeri gibanja, kar predstavlja Lorentzovo kontrakcijo dolžine.

In drugo, ob takem modelu mora obstajati določena zgornja meja hitrosti do katere lahko elektron pospešimo. Zamislimo si neskončno dolg sistem elektrod z odprtini skozi katere lahko potuje elektron, ki se v polju med elektrodami nenehno pospešuje. Do katere hitrosti lahko elektron pospešimo? Fotonski tlak vsake od poljskih komponent zunanjega polja deluje na ustrezno komponento notranjega polja. Polja v vacuumu potujejo v nasprotnih smereh s svetlobno hitrostjo. Interakcija med rezultatami obeh polj pa je možna le, če med njimi obstaja razlika v hitrosti. Rezultat tega je, da elektron lahko pospeši le do hitrosti s katero potujeta elektromagnetni polji, to pa je seveda svetlobna hitrost. Vendar do tega ne pride zaradi spremembe elektronove relativistične 'mase' (notranje energije), kot si je to zamislil Einstein, ko je uporabil Lorentzovo transformacijo za maso: $m_r = m_e \gamma$, kjer je γ podan z (16). V modelu stojnega valovanja je dejansko 'sila' (pravzaprav amplituda interakcije med fotoni obeh efektivnih polj) tista, ki je odvisna od razlike v hitrosti med efektivnim poljem elektrona in propagacijsko hitrostjo obeh zunanjih komponent polja:

$$F_r = \frac{F_0}{\gamma} = F_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \quad (62)$$

Tukaj je F_0 sila, s katero deluje zunanje polje na mirujoči elektron, v pa je trenutna hitrost elektrona. V trenutku vklopa pospeševalnega polja je $v = 0$ in $F_r = F_0$. Med

tem ko elektron pospešuje, se efektivna relativistična sila F_r zmanjšuje. Ko pa postane $v = c$, bo relativistična sila F_r enaka nič, zato tudi pospeševanja ni več. Toda v klasični fiziki silo izražamo kot produkt mase in pospeška, $F = ma$, pospešek pa je pogojen 'od zunaj', z velikostjo zunanega polja, zato je Einstein relativistično spremembo energije, logično, pripisal edini preostali 'notranji' količini, masi m . Vendar premislimo: če elektron pospešimo do svetlobne hitrosti (z pospeševalniki smo ga do sedaj lahko do 99.999997% c), pomeni da bi se notranje valovanje elektrona v smeri gibanja moralo skrčiti, po Lorentzu, na Planckovo dolžino, med tem ko naj bi v preostalih dveh emereh ostalo enako! To pa ni zelo verjetno.

Če pa tako pospešen elektron usmerimo na neko tarčo, bo faza notranjega energijskega nihanja prihajajočega elektrona ob trku z elektronom v tarči zaznala vso razliko v hitrosti in bo tako močno popačena, da se bo valovanje obeh elektronov izmuznilo iz pasti v kateri jih je držala ZPE, ter pobegnilo v obliki pljuska fotonov in/ali drugih novo nastalih delcev, kakor pač ustreza celotni (relativistično izračunani!) energiji trka in kvantnim naključjem glede smeri gibanja, notranjih faz valovanja, ter orientacije spinov objektov, ki so v trku udeleženi.

Podobno bi se zgodilo, če bi do svetlobne hitrosti pospešen elektron na kakršen koli način uspeli poriniti 'čez prag'. Takrat bi tudi prišlo do odtekanja notranje energije elektrona v obliki enega ali več fotonov.

Einstein je torej, presenetljivo, še enkrat imel prav. V našem Vesolju veljajo izredno stroga pravila: za prekoračitev svetlobne hitrosti nas doleti smrtna kazen!



Sl.22: "Pravite, da ste peljali tako hitro, da se vam je rdeča luč zdela kot zelena? Hmmm!"

A lahko smo kljub temu veseli! Opisani model elektrona ni nujno edini možni in najbrž tudi ni povsem pravilen, lahko bi celo rekli da je tak pogled na elektron dokaj naiven; toda pomagal nam je reinterpretirati učinke splošne relativnostne teorije, ne da bi jo ob tem sesuli, ali kakor koli okrnili, ter jo povezati z nekaterimi pomembnimi

kvantno-mehanskimi pojavi, hkrati pa nam odpira perspektivo za nove poglede in morebiti nove razlage nekaterih lastnosti snovi.

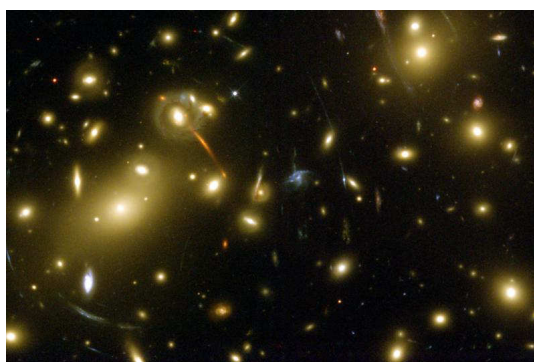
ZPE in ukrivljenost prostora

Ostane nam le en vidik splošne relativnostne teorije, ki se ga še nismo dotaknili. Videli smo že v razpravi o kozmološki konstanti in temni energiji, da na astronomskih razdaljah ne moremo govoriti o ukrivljenosti prostora, vsaj ne zaradi ZPE, pa naj bo njena velikost poljubna. Kaj pa na lokalnem nivoju, ali se prostor res ukrivi zaradi prisotnosti mase, kot je to predlagal Einstein?

Ugotavljanje ukrivljenosti prostora v prisotnosti zadosti velike mase je bilo predmet prvih dokazov pravilnosti Einsteinove splošne relativnostne teorije. Že sam Einstein je podal rešitev dolgo znanega problema prehitevanja Merkurovega perihela od klasično ugotovljenega položaja za 43 ločnih sekund na stoletje [345] in je z relativističnim popravkom dobil vrednost ki se je natančno ujemala z opazovanji. To je pojasnil z ogromno maso Sonca, ki ukrivlja prostor in s tem povzroča spremembo v gravitacijski tirnici bližnjega Merkura. Merkurov perihel se sicer že po Newtonu spreminja za okoli 5024 ločnih sekund na stoletje zaradi lastne precesije, ter še za okoli 531 ločnih sekund na stoletje zaradi gravitacije ostalih planetov (Sonce se namreč počasi vrti okoli s planeti skupnega težišča).

Ob tem rezultatu so mnogi še vedno ostali skeptični, prepričal jih je šele rezultat znamenite Eddingtonove odprave [346] opazovanja sončnega mrka leta 1919. Eddington je fotografiral sončni mrk in je z navideznim odmikom položaja zvezd v ozadju neposredno ob robu z Luno zakritega Sonca ugotovil, da je tirnica svetlobe pri prehodu mimo Sonca res videti ukrivljena, kot je to predvidel Einstein (1.75 ločne sekunde; po Newtonovi gravitacijski teoriji bi bil odmik zvezd pol manjši, okoli 0.8"). Kasneje se je izkazalo, da je Eddington, sicer vneti zagovornik relativnostne teorije, nekoliko prikrojil rezultate [347], na njegovih fotografijah, posnetih na otoku Principe, je odmik zvezd (1.9 ločne sekunde) istega velikostnega reda kot optične napake v sistemu leč teleskopa (ki je bil relativno majhen zaradi prenosljivosti) in zrnatosti filma, pa tudi temperaturne razlike med dnevom, ko so posneli mrk, in nočjo, ko so posneli referenčni položaj zvezd, bi lahko vplivale na rezultat. Poleg tega je popolnoma zanemaril posnetke, ki jih je drugi del odprave naredil v Brazilu; ti so kazali povprečen odmik le 0.9 ločne sekunde. Na njegovo srečo pa se je pri drugih podobnih opazovanjih, narejenih z mnogo večjo natančnostjo, izkazalo, da je pojav resnično tak, kot ga predvideva relativnostna teorija.

V zadnjem času je bila s pomočjo vesoljskega teleskopa Hubble [299] posneta vrsta fotografij gravitacijskega lečenja [239] svetlobe oddaljenih galaksij in kvazarjev, ki jo vmes v lok ukrivijo gruče drugih, bližjih galaksij, **Sl.23**. Na osnovi takih fotografij lahko danes dokaj natančno ocenimo maso galaktičnih gruč.



Sl.23: Gravitacijsko lečenje v galaktični gruči Abel; vir: NASA Hubble Space Telescope.

Vendar se postavlja vprašanje: ne glede na to kaj ustvari ukrivljenost, zakaj sploh foton, ki domnevno nima mase in ki naj bi vedno potoval z nespremenljivo hitrostjo (v vakuumu), sledi ukrivljenemu geodeziku? Del odgovora se skriva v Eisteinovem načelu ekvivalence med 'inercialno' in 'težko' maso, ter dobro znano relacijo med energijo in maso, in s tem je mogoče pojasniti na klasičen način izračunano ukrivljenost poti. Kaj pa preostali, relativistični del? Ali je ta res posledica ukrivljenosti prostora? Problem je zbežal že samega Einsteina [348]:

"Slednjič, naši rezultati kažejo, da, po splošni relativnostni teoriji, zakon o konstantnosti svetlobne hitrosti v vakuumu, ki je ena temeljnih predpostavk posebne relativnostne teorije in na katerega smo se že večkrat sklicevali, ne more terjati neomejene veljavnosti. Ukrivljanje svetlobnih žarkov se lahko udejanja le, če se propagacijska hitrost svetlobe krajevno spreminja. Posledično bi lahko menili, da sta zaradi tega posebna relativnostna teorija in z njo celotna relativnostna teorija neveljavni. Dejansko pa temu ni tako. Sklepamo lahko le, da posebna relativnostna teorija ne more terjati neomejene veljavnosti; njene ugotovitve držijo le kadar je mogoče zanemariti vpliva gravitacijskih polj na druge fenomene (na pr., svetlobo)."

Einstein je tukaj bil nekoliko preoptimističen. Tudi v primeru ukrivljenosti prostora, kot ga predpisuje splošna relativnostna teorija, se morata energija in hitrost fotona dodatno spreminjati zaradi gravitacijskega potenciala, kar nenazadnje potrjuje tudi leta 1964 izpeljan znameniti Shapirov poskus [349] meritve odboja radarskih pulzov od površine planeta Venere. Radarski pulzi na poti neposredno mimo Sonca so bili dodatno zakasneni za približno 200 μ s, za razliko od primera ko so pulzi potovali nekoliko bolj vstran. Merilna napaka zaradi tehničnih zmogljivosti tistega časa je bila precej pod 1 μ s, tako da rezultati nikoli niso bili sporni. Splošna relativnostna teorija sicer predvideva zakasnitev od okoli 240 μ s. Relacija za zakasnitev se glasi:

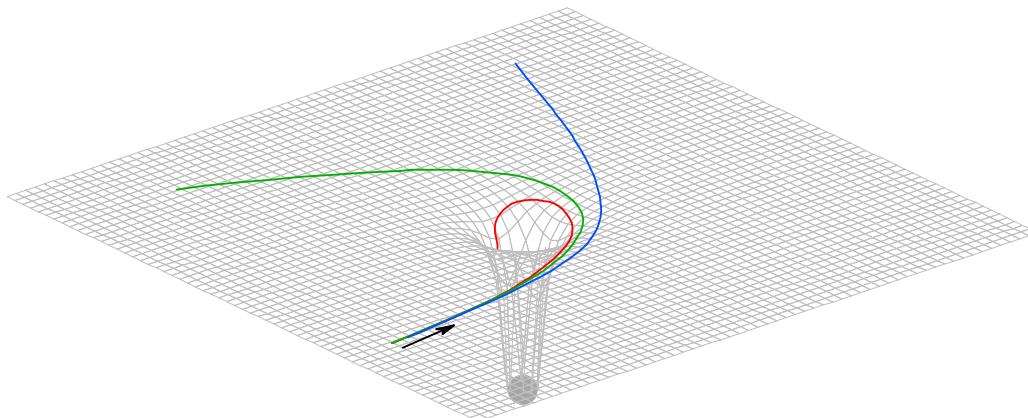
$$\Delta t = - \frac{2GM}{c^3} \ln(1 - \mathbf{R} \cdot \mathbf{x}) \quad (63)$$

kjer sta $\mathbf{R}$ in $\mathbf{x}$ enotna vektorja: $\mathbf{R}$ kaže v smeri od opazovalca proti izvoru sevanja, med tem ko $\mathbf{x}$ kaže od opazovalca proti objektu z maso M , čigar gravitacija povzroči zakasnitev. Posledično je njun produkt enak $\cos \theta$, kjer je θ kot med obema.

Problemu spreminjanja svetlobne hitrosti v gravitacijskem polju in tolmačenju tega pojava v kontekstu ZPE se bomo vrnil v kratkem. Prej pa, v zvezi z ukrivljanjem prostora, moramo izpostaviti še en vidik splošne relativnostne teorije. Ko je Einstein prvič računal popravek Merkurovega perihela, je dobil le polovičen rezultat in je takoj vedel, da je nekje naredil napako. Potem je ugotovil, da se v samem izračunu ni zmotil, pač pa je pri izračunu ukrivljenosti upošteval le maso Sonca, ne pa tudi energije samega gravitacijskega polja. Einstein je že prej iz izraza za moment izpeljal relacijo za energijo:

$$\begin{aligned} p &= \frac{E}{c} && \text{moment fotona izražen z njegovo energijo in hitrostjo;} \\ p &= mc && \text{klasični moment kot produkt mase in hitrosti;} \\ \frac{E}{c} &= mc && \text{če oba izraza enačimo, lahko izpostavimo energijo;} \\ E &= mc^2 && \text{in dobimo najbolj popularno enačbo vseh časov.} \end{aligned} \quad (64)$$

Einstein se je zavedal, da je $E = mc^2$ splošno veljavna za kateri koli delec, ne le za foton, zato mora veljati tudi za hipotetični 'graviton', delec ki naj bi posredoval pri gravitacijskih interakcijah (če tak delec zares obstaja). Z upoštevanjem energije polja je končno dobil pravi rezultat Merkurovega relativističnega popravka.



SI.24: Pri ponazoritvi ukrivljenosti prostora si ponavadi pomagamo z dvo-dimenzijsko analogijo ukrivljenosti tenkega gumijastega prta, na katerega postavimo svinčeno kroglico, ki površino ukrivi. Če sedaj lažjo plastično kroglico zakotalimo po tej ukrivljeni površini, bo njeno gibanje odvisno tako od njene hitrosti, kot tudi od ukrivljenosti površine. Že iz Newtonove teorije vemo, da obstajata dve kritični hitrostni meji: orbitalna hitrost in ubežna hitrost. Če se kroglica giblje s hitrostjo manjšo od orbitalne, bo njena tirnica spiralna in bo padla v gravitacijsko vrzel. Če se giblje hitreje od orbitalne hitrosti, bo njena tirnica parabolična. In če se giblje hitreje od ubežne hitrosti, bo tirnica hiperbolična. Pri svetlobni hitrosti bi bila tirnica le komaj opazno ukrivljena. Toda ta model ne pojasni osnovnega problema: če bi, denimo tak prt postavili v breztežnostnem prostoru in ga ukrivili, na pr., z leseno palico namesto svinčene kroglice, ter nato na ukrivljeno površino postavili plastično kroglico, bi ta ostala na mestu, ne bi imela nobenega razloga pasti v vrzel. Očitno ta model deluje le, če gravitacija že obstaja, torej ukrivljenost prostora sama zase ne pojasni obstoja privlačne sile. To je le eden od problemov geometrodinamske interpretacije splošne relativnostne teorije, kjer gibanja sicer sledijo geodezikom, toda tehtnice ne delujejo.

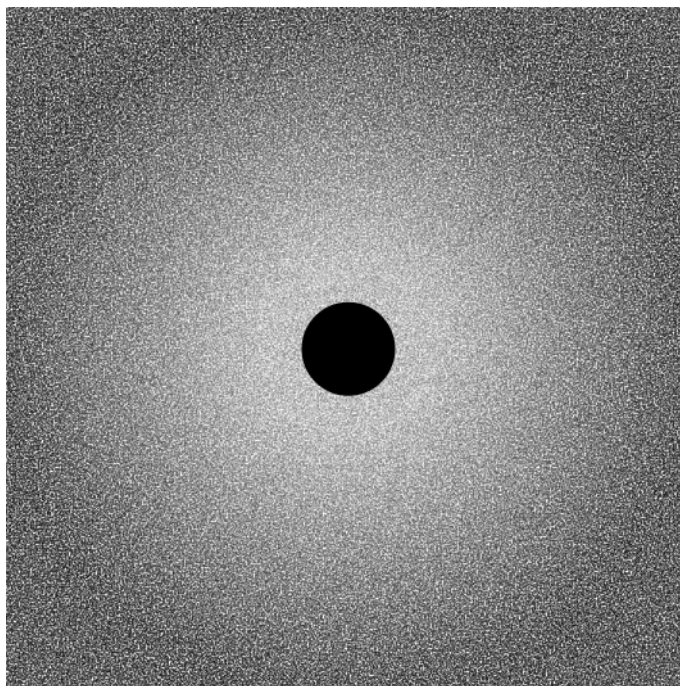
Torej, po Einsteinu, prisotnost energije vpliva na geometrijo prostora, pa naj bo ta energija razpršena kot v primeru gravitacijskega polja, ali 'kondenzirana' v obliki delcev snovi (pravzaprav oboje hkrati!). Na tej osnovi je mogoča kritična pripomba in dvom v obstoj ZPE, namreč, kot smo že omenili, je Pauli ugotovil, da bi zaradi gostote energije v prostoru, ki je za faktor $\sim 10^{100}$ večja od gostote energije posameznega osnovnega delca, Vesolje moralo biti zvito samo vase v volumen manjši od protona. Dejansko pa, kot je postalo razvidno iz meritev supernov tipa Ia in meritev s sondo WMAP, je Vesolje na velikih razdaljah praktično Evklidsko ravno, kar se prav tako ne sklada s splošno relativnostno teorijo, po kateri bi Vesolje moralo biti ukrivljeno in 'zaprtega' tipa (če zaupamo v pravilnost interpretacije najnovejših merilnih rezultatov, je v Vesolju ravno še zadosti 'temne snovi' in 'temne energije', tudi če ne upoštevamo ZPE, da Reimannove 'odprte' rešitve [350] niso več verjetne).

Ali bi v okviru stohastične elektrodinamike vseeno znali poiskati drugačno, ustrežnejšo razlago?

Spomnimo se, da smo že pri enačbi za svetlobno hitrost (21-31) ugotovili, da je ta obratno sorazmerna energijski gostoti ZPE. Če se, torej, svetlobna hitrost v gravitacijskem polju spreminja, bi to lahko pomenilo, da se v bližini masivnih objektov

spreminja tudi gostota ZPE, morda analogno Casimirovemu učinku. Tako sedaj, namesto *ad hoc* vpeljane ukrivljenosti prostora v okolici masivnih objektov, imamo opraviti s spremenljivo gostoto ZPE, ki bi jo znali celo izmeriti in tudi teoretično izpeljati, povzročala bi pa lahko učinke identične gravitacijskemu polju [351], [352], [353], [354].

Morda zveni presenetljivo, toda Levy [355] je pokazal, da z dosledno obravnavo propagacijske hitrosti svetlobe v pogojih spremenljive gostote ZPE lahko pojasnimo tudi take učinke, kot je relativnostni časovni zamik. Kot navaja v zaključku članka (številke v oklepajih se nanašajo na formule v citiranem članku): *“Primerjava matematičnih izrazov (6) in (7) nazorno kaže, da sta relativnostna teorija in teorija etra v temelju različni. Kljub temu, paradoksalno, zaradi sistematičnih napak, povzročenih z običajnimi postopki sinhronizacije ur, teorija etra vodi k urnimi odčitki, podanimi s formulo (13), ki pa je matematično enaka formuli (2); vendar je po relativnostni teoriji formula (2) eksaktna, med tem ko je po teoriji etra formula (13) rezultat merilnih napak. Skratka, opredelitev za eno oziroma drugo teorijo ni le vprašanje vsečnosti v filozofskem smislu”*. To pomeni, da bo, ob ustrezno zastavljenih meritvah, nekoč mogoče ugotoviti razliko v prid eni od obeh teorij.



Sl.25: Gravitacija kot anizotropija ZPE.

Idejo, da spremenljiva gostota ZPE povzroča učinke, ki jih običajno pripisujemo gravitaciji, bomo takoj podrobneje obdelali.

ZPE, masa, inercija, gravitacija in splošna relativnost

Po vsem kar smo prej povedali o elektronu in njegovemu naboju kot produktu notranjega stojnega elektromagnetnega vala ob prisotnosti ZPE, ter potem o problemu (ne)ukrivljenosti prostora, je čas, da se vrnemo vprašanjem, ki smo jih delno pustili odprta, namreč problemu gravitacije in izvora mase osnovnih gradnikov narave.

Že leta 1968 je Saharov postavil hipotezo [290], da je Newtonovo gravitacijo možno interpretirati kot silo van der Waalsovega, oziroma Casimirovega tipa, ki bi lahko bila posledica vacuumskih kvantnih fluktuacij v smislu ZPE.

Sledeč tej ideji je Puthoff [356] leta 1989 razvil model interakcije med osnovnimi delci in ZPE, kjer so gravitacijska masa in z njo povezani učinki izpeljani iz elektromagnetno induciranih interakcij med nabojem delca in ZPE na osnovi naključnih oscilacij samega delca (*Zitterbewegung*, nihajoče gibanje, kot je Schrödinger slikovito poimenoval tolmačenje znamenite Diracove enačbe [81]). Po taki teoretični obravnavi se gravitacija pojavi kot 'že poenotena' sila (v smislu zahteve po poenotenju vseh štirih naravnih sil).

Kmalu zatem, leta 1994, Haisch, Rueda in Puthoff objavijo članek [305] v katerem dosledno izpeljejo lasnot inercije iz interakcije polja pospešujočega delca in ZPF (polja ZPE). Izkazuje se, da je enačba gibanja $F = ma$ (in seveda tudi njena relativistična različica, $\mathcal{F} = d\mathcal{P}/d\tau$) povezana z že dolgo znanim popačenjem spektra ZPF v premočrtno pospešujočem referenčnem koordinatnem sistemu (Davies–Unruhov pojav [121]). Vendar avtorji pokažejo, da obstaja še en dotlej neobravnavan učinek Lorentzove elektromagnetne sile (pravzaprav le magnetna komponenta Lorentzove sile), ki deluje v smeri nasproti sili, ki povzroča pospešek; učinek, torej, ki je po vseh značilnostih identičen običajnemu upiranju pospeškom (inercija).

Argumenti, s katerimi avtorji podprejo svojo razlago, potekajo nekako takole:

Na osnovi enačbe (10), ki predstavlja spektralno gostoto ZPE (zapisano nekoliko drugače, upoštevajoč $\hbar = h/2\pi$ in $\omega = 2\pi\nu$):

$$\rho(\omega)d\omega = \frac{\hbar\omega^3}{2\pi^2c^3}d\omega \quad (65)$$

lahko ugotovimo, da spekter izkazuje kovariantnost glede Lorentzovih transformacij (kar je pogojeno s tretjo potenco frekvence), zato gibanje skozi prostor s konstantno hitrostjo nima nobenih merljivih učinkov in tudi ne omogoča detekcije ZPE. Vendar, kot smo že pojasnili prej (17), pri gibanju s konstantnim pospeškom a zaznamo Davies–Unruhov pojav (kar je z uporabo formalizmov SED izpeljal tudi Boyer), ki se kaže kot psevdo-Planckov spekter z ekvivalentno temperaturo:

$$T = a \frac{\hbar}{2\pi ck_B} \quad (66)$$

V takem enakomerno pospešenem referenčnem sistemu ima gostota energijskega spektra nekoliko spremenjeno obliko:

$$\rho(\omega)d\omega = \left(\frac{\omega^2}{\pi^2c^3} \right) \left(1 + \frac{a^2}{\omega^2c^2} \right) \left[\frac{\hbar\omega}{2} + \frac{\hbar\omega}{e^{\left(\frac{2\pi c\omega}{a}\right)} - 1} \right] d\omega \quad (67)$$

Haisch, Rueda in Puthoff ugotavljajo, da tako spremenjen spekter ZPE, kot ga je mogoče zaznati iz pospešujočega sistema, vodi k novemu rezultatu. Analizirajoč silo $\mathbf{F}$, ki jo ZPE izvaja na vsak pospešujoč delec, se je izkazalo, da je ta sila sorazmerna po velikosti in obratna po smeri od vektorja pospeška $\mathbf{a}$. To pomeni, da se ZPE upira pospeševanju in ta upor je funkcija dušilne konstante sevalne reakcije Γ , ki določa interakcijo delca s sevalnim poljem, in pospeška $\mathbf{a}$.

Tako obnašanje je seveda mogoče interpretirati kot da delec izkazuje lastnost inercialne mase. To pa je enakovredno izjavi, da je mogoče Newtonov zakon gibanja $\mathbf{F} = m\mathbf{a}$ izpeljati iz klasične elektrodinamike, ob vključitvi ZPE, s pomočjo formalizmov veljavnih v okviru SED, v smislu da elektrodinamska odvisnost $\mathbf{F}(\mathbf{a})$ napoveduje obstoj inercialne mase delca:

$$m_i = \frac{\hbar\omega_p}{c^2} (\Gamma\omega_p) \quad (68)$$

kjer je Γ Abraham-Lorentzova [337] dušilna konstanta oscilirajočega delca:

$$\Gamma = \frac{2q_e^2}{3m_0c^2} \quad (69)$$

in ω_p je Planckova frekvenca (glej Tabelo 3), med tem ko je m_0 mirovna (nerelativistična) masa delca, ki so jo v naslednjem članku [307] izpeljali kot:

$$m_0 = \frac{V_0}{c^2} \int \eta(\omega) \frac{\hbar\omega^3}{2\pi^2c^3} d\omega \quad (70)$$

Razlaga je preprosta: izraz $\hbar\omega^3 d\omega/2\pi^2c^3 = \rho_{zp}d\omega$ poznamo (65) kot volumsko gostoto energije, med tem ko brezdimenzijski parameter $\eta(\omega)$ predstavlja frekvenčno odvisni del sipanja pretoka ZPF; volumen V_0 , ki ga zavzema nek objekt, 'iztisne' ravno toliko energije ZPF kot je njegova notranja energija, oziroma kar energijski ekvivalent mirovne mase, ki jo dobimo z deljenjem energije z c^2 . Za elektron lahko privzamemo $V_0 \approx \lambda_C^3$, volumen določen s Comptonovo valovno dolžino (55, 12).

Treba je še povedati, da, čeprav sta tako inercija kot Davies–Unruhov pojav posledici popačenja ZPF, kot ga zaznava pospešujoči delec, pride Davies–Unruhov pojav do izraza predvsem pri nizkih frekvencah polja, kar sledi iz frekvenčne odvisnosti drugega prispevka v oglatem oklepaju v enačbi (67), ki pri višjih frekvencah eksponentijalno vpada. Inercija pa je posledica visokofrekvenčnih komponent ZPF, vpliv pa narašča linearno s frekvenco. HRP podrobnosti še dodatno dodelajo v nadaljnjih člankih [308], [309], [357].

Razlaga, ki sledi, sicer še ni teoretično povsem dodelana, vendar je v okviru prikazanega modela vsaj v izhodiščih sprejemljiva, v nekaterih podrobnostih tudi dokaj verjetna.

Izhajamo iz dveh nesporno veljavnih enačb: prva je izraz (22) za svetlobno hitrost c kot funkcije elektromagnetnih lastnosti prostora, permitivnosti ϵ in permeabilnosti μ . Druga je izraz (33) za konstanto fine strukture α_f , ki igra pomembno vlogo pri elektromagnetnih interakcijah med snovjo in energijo. V izrazu za α_f nastopa naboj elektrona q_e , ki ga, že zaradi zakona o ohranitvi naboja, imamo za konstanto. Prav tako nastopa tudi Planckova konstanta $\hbar$, ki tudi mora biti konstanta zaradi

ohranitve kotnega momenta krožno polariziranega fotona pri njegovi propagaciji skozi vacuum (sicer svetloba ne bi prišla prav daleč!).

V pogojih spremenljive polarizacije vacuuma se efektivna permitivnost in permeabilnost spreminjata kot linearni funkciji polarizacije K , in sicer:

$$\varepsilon(K) = K\varepsilon_0 \quad \text{in} \quad \mu(K) = K\mu_0 \quad (71)$$

kjer privzemamo da je $K = 1$ v vacuumu, in $K > 1$ v bližini snovi. Posledica tega je spreminjanje svetlobne hitrosti v območju kjer $K \neq 1$:

$$c' = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon(K)\mu(K)}} = \frac{c}{K} \quad (72)$$

Ker v izrazu za α_f nastopa tudi c , bi morda utegnili domnevati da se tudi α_f spreminja s polarizacijo. Vendar astronomska opazovanja postavljajo pri tem določene omejitve, zato celo v tistih teorijah, ki dopuščajo možnost da so se nekatere temeljne fizikalne konstante z razvojem Vesolja spreminjale, mora α_f ostati konstanta. To pa posredno potrjuje nujnost relacij (71) za μ in ε . Bolj neposredno, energijsko razmerje med električno in magnetno komponento elektromagnetnega polja mora ostati enako, in če se spreminja ε , se mora po enaki zakonitosti spreminjati tudi μ . Sledi da se hkrati ohranja razmerje $\sqrt{\mu/\varepsilon} = \sqrt{\mu_0/\varepsilon_0}$, torej je impedanca (geometrijsko neomejenega) vacuuma prav tako konstantna.

Kot smo to že povedali, obstoj ZPE zahteva veljavnost kovariantnosti v Lorentzovem smislu, tudi v pogojih spremenjene polarizabilnosti. Toda Einsteinova relacija enakovrednosti med maso in energijo, $E = mc^2$ še naprej velja, le da tokrat namesto c nastopa c/K . To pa pomeni da se v takem prostoru morata ustrezno spreminjati tako lastna energija delca kot tudi njegova masa:

$$W = \frac{W_0}{\sqrt{K}} \quad (73)$$

$$m = m_0 K^{\frac{3}{2}} \quad (74)$$

Podobne relacije veljajo tudi glede metrike prostora. Ker mora veljati $W = \hbar\omega$, sledi da je tudi frekvenca funkcija polarizabilnosti:

$$\omega = \frac{\omega_0}{\sqrt{K}} \quad (75)$$

in seveda recipročno mora veljati za časovni interval:

$$\Delta t = \Delta t_0 \sqrt{K} \quad (76)$$

Kar se tiče dolžine ('merilne palice'), pogledjmo izraz (14) za Bohrov radij vodikovega atoma v osnovnem energijskem (nevzbujenem) stanju. Če vpeljemo ustrezne zamenjave mora veljati:

$$r_B = \frac{r_{B0}}{\sqrt{K}} \quad (77)$$

Iz teh relacij so razvidne povezave s splošno relativnostno teorijo in spremenljivo metriko prostora. Tako sedaj lahko nekoliko bolje razumemo kaj pomeni 'ukrivljenost' prostora (kot jo definira splošna relativnost) v okviru SED: to je preprosto prostor v katerem vlada drugačna polarizabilnost vacuuma, z drugačno gostoto energije vacuuma.

V okviru Puthoffovega modela polarizabilnega vacuuma **energija nima mase!** Čeprav še vedno velja $E = mc^2$, izkazujejo lastnost 'mase' le objekti, v katerih je energija ujeta v fazno zaključeno zanko. Zunanji vplivi povzročajo le motnje v notranjih oscilacijah. Ker pa ujeta energija iztisne iz svojega volumna nekatere moduse nihanja zunanjih polj, mora notranja fazna zanka ob vsaki zunanji motnji ponovno uravnovesiti pritisk zunanjih polj, kar zaznamo od zunaj kot upiranje vsiljeni spremembi (inercija). Po drugi strani, prosta energijska polja ne izkazujejo lastnosti mase, zato tudi ni nobenega razloga za (metrično) ukrivljenost Vesolja zaradi prisotnosti ZPE, pa naj ta ima še tako veliko gostoto. Vendar se na zunaj prisotnost ujete energije v polju ZPE odraža na gostoti ZPE in posledično na anizotropnosti elektromagnetnih lastnosti prostora v okolici, kar pripelje do enakih posledic kot jih sicer pripisujemo gravitaciji (ukrivljanje tirnic drugih objektov, tudi svetlobe, centripetalni pospešek, teža, inercija, čeprav le v limiti nizkih vrednosti polj; pri močnih gravitacijskih poljih v bližini črnih lukenj se napovedi SED nekoliko razlikujejo od splošne relativnostne teorije, kar je šele treba raziskati). Toda, za razliko od vseh drugih teorij, SED omogoča ne le natančno reprodukcijo Newtonovih zakonov, pač pa tudi njihovo izpeljavo iz osnovnih načel.

Treba je imeti v mislih, da z našimi meritvami ne moremo neposredno zaznavati notranjih lastnosti snovi na elementarni ravni. Vse kar lahko zaznamo je energija, ki jo nekemu objektu ali sistemu dodamo ali odvzamemo in na podlagi tako povzročenih učinkov, ob privzetem fizikalnem modelu, določimo druge lastnosti. V klasični fiziki delovanje nekega energijskega polja (denimo elektromagnetnega, ali gravitacijskega) na nek objekt, ki nato pospeši, razložimo z vektorskim modelom sile $\mathbf{F}$, ki povzroči vektorski pospešek $\mathbf{a}$. Z meritvami ugotovimo, da gre za konstantno razmerje, $\mathbf{F}/\mathbf{a} = m$, ki mu pravimo masa, in ki jo pripišemo objektu. Kot že rečeno, v relativistični fiziki masa ni konstantna, pač pa je odvisna od trenutne hitrosti.

V okviru SED je fizikalna slika sicer nekoliko drugačna, predpostavljamo namreč določene interakcije delca z vsepovsod prisotnim poljem ZPE, v katerem je delec 'potopljen', nato pa enako zakonitost izpeljemo iz teh energijskih interakcij, pri čemur ima pojem mase drugačen, energijski pomen, vendar še vedno v skladu z Einsteinovo $E = mc^2$.

Vzemimo za primer maso protona, ki v energijskih enotah znaša ~ 938 MeV. Proton je delec, ki ga po kvantni kromodinamiki (Quantum Chromo-Dynamics, QCD [249]), teoriji jedrskih interakcij, sestavljajo trije kvarki [358], in sicer dva 'zgornja' kvarka ('up', u), čigar posamezni energijski ekvivalent mase znaša ~ 5 MeV, in en 'spodnji' kvark ('down', d), z energijskim ekvivalentom mase ~ 10 MeV. Torej je masa protona, kot svojevrstnega združenja kvarkov (uud) kar $50\times$ večja od vsote mas posamičnih kvarkov. Podobno je tudi z nevtronom (udd), čigar masa znaša ~ 940 MeV. Poznamo pa tudi nasprotni primere, na primer jedro helija, He, ki je sestavljeno iz dveh protonov in dveh nevtronov, je nekoliko lažje od vsote mas njegovih posamičnih sestavin. Kako si to lahko pojasnimo?

Že pri elektronu smo videli, da je z vrednostjo njegove mase neposredno povezana tudi določena 'resonančna' frekvenca, ki ustreza Comptonovi valovni dolžini. Od tega ni daleč misel, da je enako mogoče predpostaviti še za vse ostale delce. Kvarki, denimo, imajo svoje resonančne frekvence, ki ustrezajo njihovim masam, med tem ko bi pri protonih, nevtronih, ter drugih, iz kvarkov zgrajenih delcev, dominanten vpliv imele resonančne frekvence, ki so posledica njihovih medsebojnih interakcij ali sklopitev. Tako bi nekatere kombinacije osnovnih gradnikov, ali morda njihove medsebojne geometrijske razporeditve, bolj izdatno izpodrivale vacuumske fluktuacije, druge pa manj, kar bi seveda vplivalo na povezovalno energijo njihovih gradnikov, ter posledično tudi na od zunaj zaznано maso celote.

Tako razmišljanje ni povsem tuje običajni kvantnomehanski interpretaciji, kjer, denimo, združevanje prostih protonov in nevtronov v jedro helija pripelje do drugačne potencialne (vezalne) energije med njimi. Vendar sprememba resonančne frekvence, čeprav v osnovi opravi isto funkcijo sledenja spremembam mase, ima to prednost, da ne poterbuje nenehnih pretvorb neke 'materijalne' količine (mase) v 'nematerijalno' (energijo), zato je kot model bolj preprost in zahteva manjše število prostih parametrov. Prav tako pa omogoča pojasnitev nekaterih pojavov na bolj naraven način. Eden takih je znana sprememba spontane emisije pri atomih, ki smo jih postavili v ustrezno elektromagnetno kavitacijo, za več kot en velikostni red. Podobno lahko razložimo tudi pojav 'ekvivalentne' ali 'efektivne' mase, ki jo izkazujejo prevodni elektroni v različnih kristalnih mrežah v polprevodnikih ('mobilnost' nosilcev naboja je v siliciju nižja, kot v galijevem arsenidu). In če je kristalna struktura anizotropna, efektivna masa ni več navadna skalarna količina, temveč jo je potrebno obravnavati kot tenzor [292].

Zato upravičeno pričakujemo, da do spremembe mase lahko pride tudi v pogojih spremenjene vacuumske energije, kot v primeru Casimirovih plošč, ki pa je seveda primarno učinek nizkofrekvenčnih modusov nihanja ZPE. Če pa bi nam na nek podoben način uspelo zmanjšati vpliv visokofrekvenčnih modusov ZPE, bi lahko snov v takih pogojih imela precej manjšo maso, zato bi tudi pri enaki sili dosegli večji pospešek (če bi, seveda, na nek način zagotovili, da ta ista snov, zaradi znižanja zunanje ZPE, ne razpade...). Do uporabe Casimirovega učinka pri medzvezdnih potovanjih (tako imenovani 'Warp Drive' [359] iz TV serije 'Zvezdne steze') nas čaka še zelo dolga pot. A ljudje smo neverjetno iznajdljivi (kaj vse si bomo izmislili, da nam le ne bi bilo treba preveč delati!). Ne pozabimo, da smo samo pred 120 leti podobno zanikali možnosti letenja strojev težjih od zraka, tako kot se je pred 50 leti možnost potovanja človeka v Vesolje zdela (ne)znanstvena fantastika. Za razliko od nekoč, je tokrat ameriška vesoljska agencija NASA bolj previdna in pušča vse možnosti odprte [360].

Kakorkoli že, povedano kar se da preprosto, vsa snov na ravni kvarkov in elektronov čuti vpliv ZPE, ter ji je zaradi njene naključne narave vsiljeno osciliranje (znamenito Schrödingerjevo *Zitterbewegung* — nihajoče gibanje). Žal je to osciliranje, takoj po Diracovem odkritju, bilo na nek način pozabljeno, predvsem zaradi napačne interpretacije de Broglijejevga valovanja kot lastne valovne funkcije posameznega delca, namesto da bi bilo pravilno identificirano kot relativistični zamik lastne frekvence v Lorentzovem smislu:

$$\nu_Z = \frac{1}{\gamma} \nu_B \quad (78)$$

Verjetno je takemu nesrečnemu razpletu botrovalo dejstvo, da je lastna frekvenca že pri elektronu:

$$\nu_B = \frac{m_e c^2}{h} = 1.2367 \times 10^{20} \text{ Hz} \quad (79)$$

brezupno visoka za neposredno merjenje s takratnimi in celo današnjimi instrumenti, čeprav se danes že nakazuje možnost, da bi to frekvenco vsaj posredno zaznali [361] in tako končno potrdili da se znotraj elektrona nekaj zares dogaja.

Kakorkoli že, vsak nihajoči naboj ustvari svoje lastno elektromagnetno polje. Interakcija med tem lokalnim poljem in ZPE se kaže kot inercija. A zaradi ta istega lokalnega polja tudi vsak delec zaznava rahlo spremenjeno velikost ZPE, kot vpliv sosednih delcev. To pomeni, da vsak delec izvaja nekakšno 'senčenje' okoliške ZPE. In ta vpliv je dejansko enakovreden gravitaciji.

Kako dober je tak model inercije, oziroma gravitacije? Ali je na njegovi podlagi možno razumeti tudi odstopanja od pričakovanih klasičnih in relativističnih zakonitosti (problem pospeševanja razširjanja Vesolja, problem rotacije galaktičnega diska, anomalija plovil Pioneer), o katerih smo razglabljali v poglavju o gravitaciji?

Van Nieuwenhove je med leti 1992–2007 objavil serijo člankov, v katerih ponuja razlago omenjenih opazovanj na skoraj povsem klasičen način, ob doslednem upoštevanju obstoja ZPE in njenih učinkov. V članku iz leta 2007 [362] podrobno pojasni kako ZPE vpliva na neenakomernost upadanja gravitacijskega pospeška z razdaljo in periodično tvori območja na katerih šibko gravitacijsko polje spremeni predznak in se prelevi v odbojno polje. Njegova teorija, pimenovana 'Vacuum Modified Gravity', za razliko od MOND variante, izkazuje nekatere lastnosti, ki jih bo kmalu, z izboljšanjem natančnosti astronomskih opazovanj, mogoče praktično preveriti (napoveduje ostro pojemanje vektorja galaktične rotacije na ničelno vrednost na določeni oddaljenosti, s čemer je določena velikost galaksije, odvisno od mase).

Pred kratkim, marca 2008, pa je Ellis v reviji Nature objavil članek [363], v katerem pojasnjuje možnost, da je opaženo pospešeno razširjanje Vesolja le posledica lokalnih nehomogenosti na različnih razsežnostih, ter citira 14 različnih objav, ki rezultate meritev interpretirajo na podoben način, brez sklicevanja na temno energijo. Kot je iz Ellisovega članka razvidno, obstaja precejšnja verjetnost da smo se pri ocenah nekaterih vplivov precej zmotili, in bo potrebno večino dosedanjih meritev ponoviti z večjo natančnostjo in z izboljšano prostorsko ločljivostjo, če želimo biti zmožni razločiti dejanske velikosti nekaterih pomembnih učinkov, ter jih ustrezno interpretirati v luči posameznih teorij in primerjati izide s teoretično napovdanimi rezultati. Kljub temu, tudi ko bomo eksperimentalne rezultate in teoretične interpretacije 'prečistili' in odstranili sistematične in trivialne napake, bomo še vedno imeli veliko dela z razčlenjevanjem posameznih najbolj verjetnih teoretičnih modelov.

Zaenkrat je še prezgodaj trditi, da je model inercije, oziroma gravitacije, kot posledice delovanja ZPE boljši od katerega koli drugega do sedaj omenjenega, a že zaradi 'Okamovega rezila' (*William of Occam*, [364]) — pravila, po katerem je najbolj preprosta razlaga tudi najbolj verjetna — zasluži, da ga jemljemo dokaj resno.

Kaj pričakujemo od Velikega Hadronskega Trkalnika?

Že dolgo je fizikom povsem jasno, da je do temeljnih spoznanj o bistvu narave in njenih osnovnih gradnikov mogoče priti le, če v laboratoriju poustvarimo razmere, ki so vladale v kar se da zgodnjih trenutkih nastanka Vesolja. To obenem pomeni, da za ustrezno proučevanje teh razmer potrebujemo vedno več energije znotraj vedno manjšega volumna.

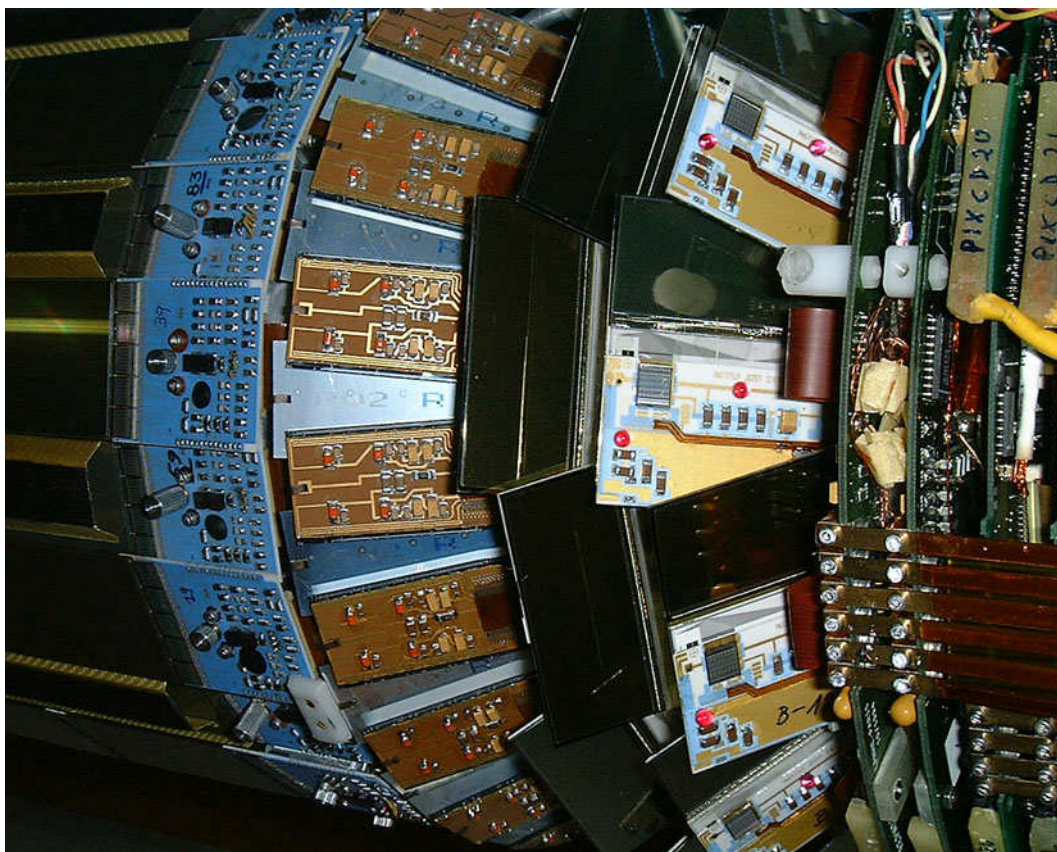
Zaenkrat znamo zadosti visoke gostote energije ustvariti le s pomočjo pospeševanja delcev do zelo visokih hitrosti, nakar nakopičeno kinetično energijo sprostimo v trku delca z neko tarčo, ali z drugim nasproti gibajočim se delcem.

Zgodovina pospeševalnikov delcev se začne 1895, ko je Röntgen [365] izvajal poskuse s katodno cevjo [366], ter ugotovil da tedaj že znani 'katodni žarki' (kasneje se je izkazalo da gre za elektrone, ki, zaradi segrevanja katode do visoke temperature, izstopijo iz kovine, nakar jih električno polje med katodo in anodo pospeši do zelo visoke hitrosti) ob trku s kovinsko anodo rodijo do tedaj neznane žarke velike predorne moči. Röntgen je neznane žarke poimenoval *žarki X* [367], danes pa jih poznamo kot njemu v čast poimenovane *Röntgenske žarke* (sam Röntgen je takemu poimenovanju odločno nasprotoval). Čeprav se je pred njim vrsta raziskovalcev ukvarjala s katodnimi žarki in ugotavljala nenavadne svetlobne učinke, je šele Röntgen doumel da gre za nov pojav, ki ga je tudi ustrezno dokumentiral, ter kasneje predlagal tudi medicinsko uporabo novih žarkov. Za te žarke se je kasneje izkazalo da so dejansko elektromagnetno valovanje z zelo visoko frekvenco (od 3×10^{16} do 3×10^{19} Hz), oziroma zelo kratko valovno dolžino (od 10 do 0.01 nm).

Večina pomembnih odkritij v prvih desetletjih XX stoletja je nastala z opazovanjem naravnih radioaktivnih razpadov. Raziskovanja snovi s pomočjo pospeševalnikov in trkalnikov pa so se razcvetela šele po drugi svetovni vojni. Na splošno delimo pospeševalnike na krožne in linearne, vsak tip ima določene prednosti in pomanjkljivosti. Zgrajeno je bilo več sto manjših in več kot 80 večjih pospeševalnikov. Najpomembnejši, tako po dimenzijah, kot tudi po doseženih energijah, so do leta 2007 bili Stanfordski SLAC [368] (linearni), CERNov LEP [369], Brookhavenov RHIC [370], ter Fermilabov Tevatron [371] (vsi trije krožni).

Bistvo pospeševalnikov je v tem, da z izredno močnimi električnimi polji pospešijo električno nabite delce do skoraj svetlobne hitrosti, ter izkoriščamo relativistično povečanje kinetične energije, ki se sprostí med trkom nasproti gibajočih se delcev. Ta energija, prostorsko zelo zgoščena, je potem na voljo za nastanek novih delcev. S tem dejansko poustvarjamo razmere, ki so vladale v zgodnjih razvojnih fazah Vesolja in, večja ko je energija trka, bližje smo Velikemu poku. Novo nastali delci v kratkem času razpadejo na energijsko šibkejšše delce, ti pa nato spet razpadejo na še šibkejšše, dokler ne ostanejo le dolgoživi, stabilni delci. Z natančnim sledenjem vsem tem razpadnim produktom in merjenjem njihovih energij lahko ugotavljamo lastnosti posameznih delcev, možne interakcije med njimi, ter kakšne so temeljne naravne zakonitosti po katerih se ti delci obnašajo.

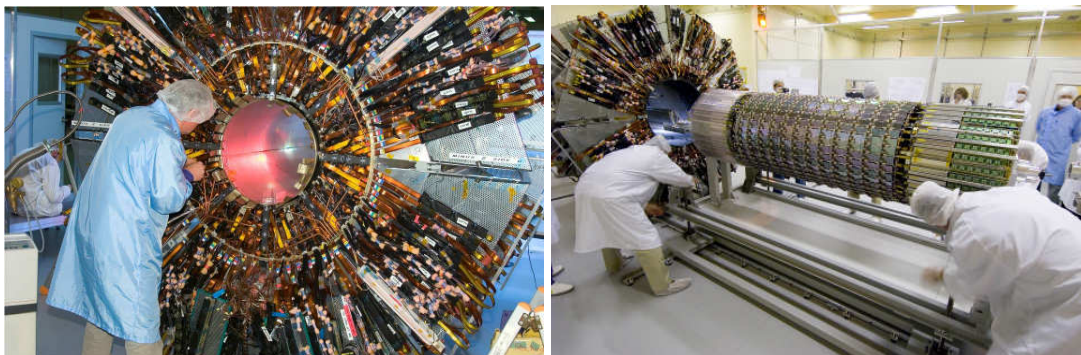
Sodelavci Oddelka za eksperimentalno fiziko osnovnih delcev Instituta "Jožef Stefan" [372] se lahko pohvalimo, da smo sodelovali tako pri konstrukciji detektorjev, kot tudi pri analizi merilnih rezultatov pri pospeševalniku LEP (eksperimenti DELPHI, SL26, ter CPLEAR), pri KEK (eksperiment Belle [373]) v Tsukubi na Japonskem, ter DESY (ARGUS, HERA-B [374]) v Hamburgu, in drugje.



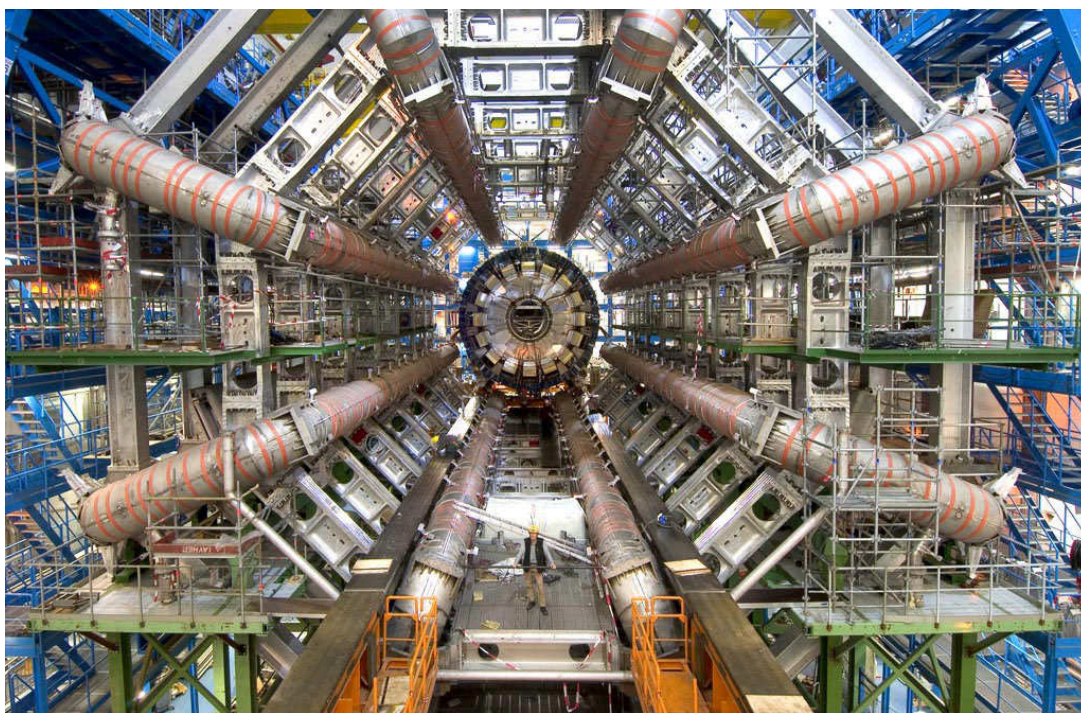
Sl.26: Središčni polprevodniški sledilnik eksperimenta DELPHI trkalnika LEP v CERNu. Levo so točkasti ('pixel') detektorji, v sredini pa pasovni ('strip') detektorji. Slika je nastala leta 2003 ob razgradnji trkalnika LEP, zato je na enem od pasovnih detektorjev dobro viden prstni odtis nekega radovedneža. Hibridna vezja s čitalno elektroniko pasovnih detektorjev so bila narejena na Institutu "Jožef Stefan". Vsak pasovni detektor, velikosti 5×5 cm, ima 512 pasov, vsak pas je širok le $25 \mu\text{m}$. Pasovi so zgrajeni kot inverzno polarizirane polprevodniške diode. Visokoenergijski delec, ki preleti skozi diodo, izbije nekaj tisoč elektronov, njihov naboj pa zazna čitalni ojačevalnik v integriranem vezju (sive ploščice velikosti $\sim 1 \times 1$ cm na hibridu). Vsak tak 'čip' vsebuje 128 ojačevalnih kanalov, na vsakem hibridnem vezju sta dva čipa. Po dva pasovna detektorja sta zlepljena v 'sendvič' in med seboj obrnjena za 90° , tako da pasovi tvorijo mrežo. Tako s čitanjem obeh detektorjev lahko določimo skozi kateri par pasov je šel delec. Pasovni detektorji so razporejeni v dve 'kroni' in pozicionirani na $\sim 10 \mu\text{m}$ natančno, obenem pa je število izbitih elektronov, ter posledično velikost signala, sorazmerna kinetični energiji delca, zato je mogoče pot in hitrost delca od mesta trka rekonstruirati z izredno veliko natančnostjo. Pasovni detektorji so del sistema 'Very Forward Tracker', ki zaznava predvsem delce, ki po trku odletijo pod majhnim kotom (do 15°) glede na smer delcev pred trkom.

V zadnjem desetletju sodelujemo tudi pri izdelavi polprevodniškega sledilnika (*semiconductor tracker*, SCT [375]) v eksperimentu ATLAS [376] novega velikega hadronskega trkalnika (*Large Hadron Collider*, LHC [255]), ki nadomešča CERNov LEP in začne z obratovanjem v začetku poletja 2008 (Sl.27, Sl.28, Sl.29).

LHC je prvi projekt resnično planetarnih razsežnosti: znanstveniki sicer radi sodelujejo v mednarodnih projektih, a glavni razlog so visoki stroški projekta, ki ga nobena, še tako bogata država ne bi zmogla sama (ZDA so se leta 1994 odpovedale svojemu supraprevodnemu super-trkalniku (*Superconducting Super-Collider*, SSC).



Sl.27 in Sl.28: Priprava ATLASovega 'soda' v čistih prostorih v CERNu. Zlato-rjave trakove (aluminij na kaptonski foliji), prek katerih se detektorji kontrolirajo in napajajo z električno energijo, ter več tisoč tiskanih vezij, ki nosijo elektronske sestavne dele, je po načrtih, nastalih na Oddelku za eksperimentalno fiziko osnovnih delcev Instituta Jožef Stefan, izdelalo slovensko podjetje Elgoline iz Cerknice. Celoten centralni detektor pa je sad timskega dela več sto znanstvenikov in strokovnjakov iz več deset različnih držav.

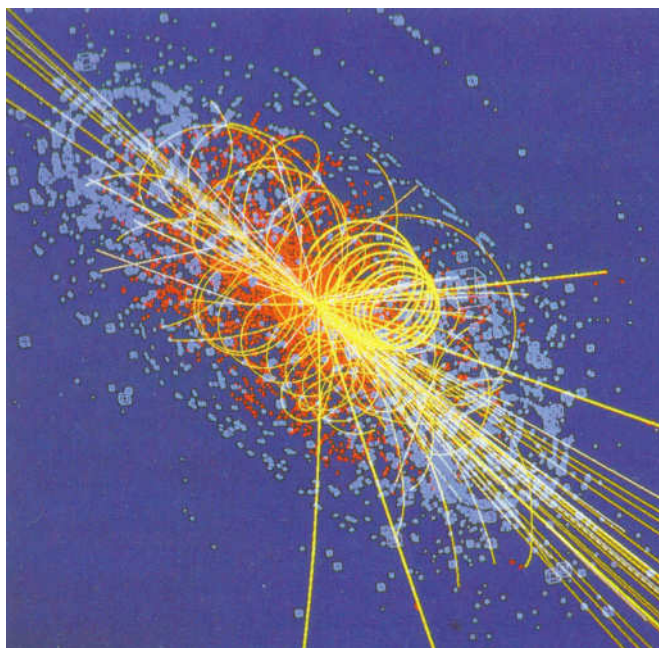


Sl.29: V Ženevskem 'podzemlju': 'sodček' prihaja na svoje mesto med 8 supraprevodnih magnetnih tuljav eksperimenta ATLAS (posneto jeseni 2006). Današnja slika ni več tako impresivna, ker je ves prostor že zapolnjen s številnimi detektorji različnih vrst. Več informacij in slikovnega gradiva je na voljo na domači spletni strani <<http://atlas.ch/>>, računalniško simulacijo sestavljanja celotnega sistema pa si lahko ogledate na naslovu <<http://www.youtube.com/TheATLASExperiment>>.

LHC bo postavil nov mejnik v energiji trkov. Dosedanji rekorder Tevatron je imel razpoložljivo energijo ~ 1 TeV (od tod tudi ime; 1 tera-elektron-volt = 10^{12} eV). Za razliko od trkalnika LEP, kjer je pri trku elektrona in pozitrona na voljo celotna njuna energija, je pri trkih protonov in antiprotonov za nastanek novih delcev na voljo le okoli 1/3 celotne energije, ker so protoni sestavljeni iz treh kvarkov (tako kot pri atomu, je tudi tu veliko praznega prostora in le tri 'drobtinice'), in le dva kvarka sta dejansko udeležena pri vsakem posameznem trku. Načrtovana najvišja energija

protonskih gruč pri LHC je okoli 14 TeV, kar pomeni da bo mogoče ustvariti delce z energijo le do okoli 4.6 TeV. Ta energija pa je precej večja od tiste, ki je potrebna za tvorbo nekaterih doslej neodkritih delcev, obstoj katerih je že teoretično napovedan v okviru Standardnega modela osnovnih delcev. Zato seveda vsi nestrpno pričakujemo začetek obratovanja LHC, čeprav bo najvišja energija in 'luminoznost' (pogostost trkov) na voljo šele čez določen čas. Luminoznost bodo zviševali postopoma, vmes pa bodo potekale številne nujne aktivnosti, kot so preverjanje delovanja vseh sistemov, preverjanje računalniških programov za kontrolo protonskih gruč, ter zajem in analizo podatkov, ter dokončno umerjanje (kalibracija) detektorjev.

Kakšna odkritja si obetamo? Če bi morali z eno samo besedo povedati kaj pravzaprav iščemo, bi rekli: '*Higgs*'. Higgsov delec (boson) [275], nosilec Higgsovega polja, naj bi bil tisti manjkajoči del Standardnega modela, s pomočjo katerega bi lahko pojasnili zakaj sploh izkazujejo ostali delci lastnost mase. Obstoj tega delca in njegove interakcije z ostalimi delci je leta 1964 podal Peter Ware Higgs. Predvidel je, da neničelna energijska gostota vacuuma pripelje do spontanega zloma simetrije elektrošibke interakcije. V okviru Standardnega modela vsebuje Higgsovo polje dve nevtralni in dve električno 'nabiti' komponenti. Ena nevtralna in obe nabiti komponenti naj bi bili Goldstoneovi bosoni, sami sicer brez mase, vendar povezani z že odkritimi elektrošibkomi bosoni W^+ , W^- in Z^0 , medtem ko naj bi kvant preostale nevtralne komponente predstavljal masivni Higgsov boson, brez spina (Higgsovo polje je skalarno polje) in (ocenjene) notranje energije približno 120 GeV.



Sl.30: Računalniška simulacija tipičnega pričakovanega razpada Higgsovega bosona, kot naj bi ga lahko zaznali v detektorju ATLAS. Električno nabiti delci imajo v magnetnem polju ukrivljene tirnice, z radijem odvisnim od mase in kinetične energije, ter smeri ukrivljanja odvisne od naboja. Nevtralni delci in fotoni pa imajo ravne tirnice.

Standardni model ne more predpisati velikosti mase Higgsovemu bosonu, a če bo ta med 115 in 180 GeV, bi lahko veljavnost Standardnega modela zdržala vse do Planckove energije, $\sim 10^{28}$ eV. Vendar mnogi teoretiki pričakujejo odkritje 'nove

fizike' v območju TeV, že zaradi nekaterih resnih pomanjkljivosti Standardnega modela. Odkritje supersimetričnih (SUSY) delcev bi bil eden izmed možnih izidov, ta pa predvideva več tipov Higgsovih delcev, najlažji naj bi bil prav pri 120 GeV.

Jeseni 2002 so LEP pgnali celo malenkost čez najvišjo načrtovano energijo, v upanju da bodo ob koncu njegove življenske dobe vendarle odkril Higgsov boson. Predno so LEP dokončno izklopili in razdrli, da bi naredili prostor za LHC, so zaznali kakšnih 11 dogodkov [377], ki so kazali podobne karakteristike, kot bi jih pričakovali pri razpadu Higgsovega bosona, vendar na podlagi rezultatov analize ni bilo mogoče zagotovo reči nič določenega. Pri Tevatronu so raziskave nadaljevali, toda do danes brez rezultata, zaradi česar so mnogi fiziki postali zaskrbljeni.

Seveda, v teoriji obstaja tudi nekaj alternativnih scenarijev, 'brez Higgsa'. Ena različica je nadgradnja kvantne kromodinamike (QCD), slikovito poimenovana 'Technicolor' [378], so pa še nekatere druge.

Vsekakor bi bilo nenavadno, če bi vse kar bo LHC odkril bil "*Higgs, le Higgs, ter nič drugega razen Higgs*"! A še mnogo bolj nenavadno bi bilo, če LHC ne bi odkril ničesar! Kot je to nekdo lepo povedal, si tega, že zaradi denarja, vloženega v to finančno 'črno luknjo', nikakor ne moremo privoščiti! Pa četudi gre za vsoto, ki jo, razdeljeno na prebivalstvo sodelujočih držav, lahko primerjamo z le eno ali dve skodelici kave letno v obdobju 14 let; pa še več kot polovica te vsote se je vrnila v obliki naročil gospodarstvom večine držav; da o koristi, ki jo bo svetovno gospodarstvo dolgoročno imelo zaradi osvojitve novih tehnologij, niti ne govorimo.

Z stališča razvoja znanosti pa se postavlja vprašanje, na kakšen način bodo nova odkritja povezana z energijo vacuuma, o kateri imamo sicer vedno več dokazov, a vseeno potrebujemo neposredno meritev njene prave gostote. Prav tako se postavlja vprašanje obstoja supersimetričnih delcev, ter njihovega morebitnega vpliva na visokofrekvenčna in visoko-energijska polja. Poudariti je treba, da SED zaenkrat upošteva le elektromagnetna polja, a je povsem mogoče, da tudi druga polja, ki so prav tako podložna vplivom kvantnih fluktuacij, imajo svoj prispevek, in zakaj ne, če Higgsovo polje obstaja, bo nujno upoštevati tudi tega. Lahko pa se tudi izkaže, da ima elektromagnetna interakcija naravno zgornjo frekvenčno in energijsko mejo nekje pri Comptonovi frekvenci $\sim 10^{20}$ Hz (ali morda nekoliko višje), ne pa šele pri Planckovi frekvenci $\sim 10^{42}$ Hz, med tem ko bi druga polja lahko imela drugačne frekvenčne meje. Potem bo treba doberšen del teorije postaviti nanovo.

Če mene osebno vprašate, vam lahko priznam: ob ponedeljkih, sredah in petkih 'navijam' za Higgsa!

ZPE in čas

Koncept časa je tako globoko zakoreninjen v naši zavesti, da ga jemljemo za samoumevnega, ne da bi sploh premislili o tem. Le poskusite, in videli boste kako je nemogoče oblikovati smiselni stavek, ki ne vsebuje, ali vsaj ne podmnjeva, kakršnega koli času sorodnega, ali s časom posredno povezanega izraza.

Najbrž je vsakomur jasno, da instrument, ki ga imenujemo 'ura' in ki ga uporabljamo za 'merjenje' časa, dejansko časa **ne meri**. Naj si gre za kuhinjsko peščeno klepsidro, ki jo uporabljamo pri kuhanju jajc, z natančnostjo ± 5 s, ali za atomsko uro [379] na osnovi oscilacij atomov cezija, ^{133}Cs , ki se uporablja kot osnova za sinhronizacijo navigacijskih satelitov v sistemu GPS [380], in katerih današnja natančnost znaša celo do $\pm 10^{-18}$ s, je njihova temeljna fizikalna funkcija preprosta primerjava dveh dogodkov: trenutno lego (ali katero koli drugo fizikalno lastnost) nekega telesa primerjamo s položajem urnih kazalcev, ali s prikazom na številčnem zaslonu, ali s številom nihanj med dvema radiofrekvenčnimi impulzi, itd. Ob tem pa se zanašamo na domnevo, da je potek časa v nespremenjenih fizikalnih okoliščinah enakomeren in vse kar potrebujemo je oscilator z dovolj stabilno frekvenco, ter splošni dogovor o načinu štetja period oscilacij, na podlagi katerega določimo numerični ekvivalent časovne enote.

O času samem pa dejansko ne vemo ničesar!

Za Heraklita [381] je realna le sprememba, stalnost pa le iluzija, kot je razvidno iz njegovega znanega aforizma "*παντα ρει*" (*Panta Rhei*, vse teče). "*V isto reko nihče ne stopi dvakrat — drugič reka ni več ista in prav tako človek ni več isti*", je po njemu povzel Platon [382]. Čas torej doživljamo kot nekakšno reko, ki nas vse nosi s seboj in nič ne moremo proti njenemu toku.

Tudi prve besede v Bibliji so "V začetku ...", podmnjevajoč, da je samo dejanje stvarjenja Sveta obenem porodilo neko evolutivno lastnost, označeno in omejeno s ta istim začetkom.

In tudi Einstein, čeprav je imel čas za "*iluzijo človeškega uma*", ni mogel brez časa, ki ga je vzdal v temelje 'prostor-časa' v svoji teoriji. Pravzaprav je postuliral, da merjenja časa ni mogoče ločiti od merjenja prostora, in obratno. In še kako prav je imel pri tem!

Danes, zahvaljujoč delno tudi Einsteinu, imamo čas za (četrto) fizikalno dimenzijo. Vendar moderni koncept časa kot fizikalne dimenzije vpelje veliko prej že d'Alembert [383] v besedilu, ki ga je pripravil za Diderotovo Enciklopedijo [384]: "*Vsako kategorijo, ki jo je možno izraziti numerično, imamo lahko za dimenzijo. Nek moj prijatelj celo pravi, da je tudi čas mogoče obravnavati kot dimenzijo.*" Javno izražati tako mnenje v tistih časih je pomenilo resno ogroziti lastno znanstveno verodostojnost in ugled. Vseeno so bili mnogi njegovi sodobniki prepričani, da je ta 'nek njegov prijatelj' dejansko d'Alembert sam.

Vendar je že Einstein sam podvomil v čas kot dimenzijo, ko je ta v njegovih enačbah postal funkcijsko odvisen od drugih zunanjih pogojev, kot sta hitrost in gravitacijsko polje. Ponazorimo to na hitro na Einsteinov način in uporabimo sledeči '*Gedanken Experiment*' (miselni poskus): denimo, da s stricem Albertom potujemo z relativistično hitrim vlakom, sedeč hrbtom obrnjeni v smer vožnje, ter opazujemo uro na odhodni postaji; ko začne vlak pospeševati do svetlobne hitrosti, bo svetloba z ure

potrebovala vedno več časa do naših oči (ne le zaradi večje oddaljenosti, pač pa tudi zaradi vedno nižje frekvence), zato se bodo kazalci ure navidez vedno počasneje premikali, in ko bomo dosegli svetlobno hitrost bo njihova slika potovala vzporedno z nami, zato se bodo navidez ustavili. Seveda, da bi to opazili, bi morali imeti izjemno zmogljiv teleskop in oči, ki vidijo najprej infra-rdeče, pa radijske frekvence, in končno tudi 'enosmerna' polja. Kaj pa naša ročna ura? Če bi pogledali na njo, bi videli, da tudi ta stoji, toda že zato da svoje oči usmerimo proti ročni uri bi potrebovali celo večnost. Ko pa vlak blizu cilja začne zmanjševati hitrost, se bo ura na postaji začela vrteti navidezno vedno hitreje, dokler ne doseže svoj 'pravi' čas (z zamikom, sorazmernim razdalji), ko se vlak naposled ustavi. Vendar — presenečenje: naša ročna ura krepko zaostaja za uro na postaji, ker preprosto 'ni imela časa' da se premakne!



Sl.31 in Sl.32: Nadrealistični slikar Salvador Dali je bil obseden z izmuzljivostjo časa.

Žal, tako stric Albert, kot tudi mnogi drugi 'relativisti', previdno molčijo o tem kako naj bi med potjo videli uro na ciljni postaji! Ta bi se morala, če sledimo tej poenostavljeni razlagi, vrteti kot ventilator, tako da bi zgledalo, da so kazalci 'razmazani' po celem krogu ure. Toda to je v nasprotju s temelji relativnostne teorije, ki pravi, da za opazovalca, ki se giblje s svetlobno hitrostjo, **vse** ure stojijo!

Torej, že dejstvo, da se potek časa spreminja pod vplivom zunanjih okoliščin, bi moralo zadoščati, da podvomimo v upravičenost podelitve statusa temeljne merske enote časovni 'dimenziji'. Vendar ne gre le za mersko enoto.

Čeprav je občutek za časovni tok in njegovo smer ne le psihološka, temveč predvsem termodinamska in kozmološka kategorija, nimamo prav nobenega dokaza, da bi čas moral biti fizikalna dimenzija. Prav tako ni nobenega tehtnega razloga zakaj naj bi prav čas izbrali za eno osnovnih merskih enot, na način kot smo to sprejeli. Edino opravičilo, ki ga lahko navedemo, je dejansko bolj filozofsko, kot fizikalno: ker se nam zdi, da se vse s časom spreminja, a nič od tega kar poznamo ne vpliva neposredno na (naš občutek za) njegov potek (vsaj dokler ni potrebno uporabiti relativističnih popravkov).

Da čas ni nujno privilegirana dimenzija, in tudi ne dimenzija na sploh, je dolgo bil predmet dvoma nekaterih fizikov in še več filozofov. Prvi matematični namig, da je s takim razumevanjem nekaj narobe, pa je prišel z 'tisto prekleto enačbo', ki sta jo izpeljala Wheeler in De Witt [385] in jo zaradi njenega nedvoumnega pomena tako tudi poimenovala:

$$H\Psi = 0 \quad (80)$$

Tukaj je Ψ kvantnomehanska valovna funkcija celotnega Vesolja (če bo tako sploh kdaj mogoče zapisati), med tem ko je H 'ustrezni' Hamiltonov operator (karkoli naj v tem kontekstu beseda 'ustrezno' že pomeni).

Na osnovi tega je Barbour razvil svoj koncept 'Platonije', brezčasovnega modela našega Vesolja, ki ga opisuje v svoji knjigi *The End of Time* [386]. V tem modelu obstajajo hkrati ne le preteklost, sedanjost in prihodnost, pač pa tudi vse možne preteklosti, sedanjosti in prihodnosti, in je od naših odločitev odvisno v kakšnem času se bomo znašli. Hawking pa je na podobni osnovi razvil kozmološko teorijo s pomočjo iz kvantne mehanike izposojenega koncepta 'imaginarnega časa' [387], s katerim si je pomagal pri reševanju zapletenih 'membranskih svetov' [164], v kar so ga prisilile težave, ki izhajajo iz običajne obravnave časa kot vektorja (pa pustimo zaenkrat ob strani dejstvo, da je imaginarnost časa le posledica slabo razumljene Eulerjeve [388] trigonometrične transformacije: $e^{j\varphi} = \cos\varphi + j\sin\varphi$, če privzamemo $\varphi = \omega t$).

Vprašajmo se najprej: ali je potovanje v času sploh možno? Denimo, da bi želeli poslati en sam elektron za nekaj sekund v preteklost (o prihodnosti zaenkrat še ne vemo niti ali sploh obstaja, in če že, kje in kdaj naj jo iščemo!). Kolikšno energijo bi za kaj takega potrebovali? No, ta elektron, če naj se znajde v 'pravi' preteklosti, mora okoli sebe 'videti' vse okoliščine, ki so v tej naši preteklosti veljale takrat, torej naš laboratorij, stavbo v kateri je, in kar celotno Zemljo, ter Sončni sistem, z našo galaksijo, lokalno gručo galaksij, dejansko kar celotno Vesolje se mora znajti tam! Torej je energija, potrebna za kaj takega, enaka vsej energiji Vesolja, morda še več.

Sicer pa ima Hawking svoj 'antropični' argument zakaj tako potovanje ni mogoče: če bi bilo, bi že sedaj povsod mrgolelo turistov iz celotne (neskončne?) prihodnosti. S tem se sicer popolnoma strinjam; le kadar grem za poletne počitnice na morje, se včasih sprašujem...

Če pa je čas možno opredeliti kot dimenzijo, zakaj potem ni možno časovnih koordinat po volji spreminjati, tako kot jih lahko pri treh prostorskih dimenzijah? Zakaj ni možno potovati v času, oziroma, še bolj pomembneje, zakaj ima časovna 'puščica' lahko le eno smer?

V naših enačbah ni nobenega pogoja, na katerega bi se lahko oprli in ki bi predpisal katera smer nekega dogodka je 'prava'. Če, denimo, opazujemo filmski posnetek trka dveh kroglic na mizi za biliard, ne bomo mogli ugotoviti v katero smer se mora film vrteti, da posnetek ustreza verjetnemu fizikalnemu dogodku — obe smeri sta lahko povsem enakovredni. A če se spomnimo pred leti zelo popularne reklame za neko osvežilno pijačo, ko iz hotelskega bazena izkoči natakak in s pijačo postreže lepemu dekletu, ki sedi ob robu bazena, takoj vemo, da so film posneli tako, da je natakak naredil korak nazaj in padel v bazen — če nič drugega, po skoku iz bazena je bil videti nekam preveč suh!

Zares, tudi v vsakodnevem življenju smo se navadili nekatere pojave obravnavati brezčasno, ne da bi ob tem imeli kakšnih posebnih psiholoških pomislekov. Če, na primer, rečemo "lačen sem", imamo v mislih "zdaj" in tudi kdorkoli drug bo to razumel enako; če pa rečemo "po poklicu sem fizik", pa imamo v mislih "vedno", čeprav se nam lahko že v naslednjem trenutku zgodi, da bomo prisiljeni ukvarjati se s povsem nefizikalno zadevo, kot je, denimo, davčna napoved!

Podobno je v znanosti in tehniki. Denimo, elektroniki se počutijo čisto domače pri 'stacionarni' fazorski analizi izmeničnih tokov, Nyquist-Bodejevi amplitudno-frekvenčni analizi, Fourierjevi spektralni analizi, Laplaceovi kompleksni transformaciji, ali celo Hilbertovi 'kepstralni' transformaciji (ki je časovni spekter kompleksnega frekvenčnega spektra). Fiziki pa mirne vesti govorijo o Schrödingerjevi valovni enačbi brez časovne odvisnosti, čeprav leži njen izvir v Hamiltonovem časovnem operatorju. Da ne govorimo o spinu, kvantni lastnosti nekoliko nerodnega imena, ki ne pomeni 'vrtenja', pač pa predstavlja sučnost polja kot kvantno stanje določenega delca, opisano s številom brez kakršne koli časovne odvisnosti (edino kar se lahko spremeni je le 'orientacija' spina, pa še to se zgodi le z določeno verjetnostjo v določenih okoliščinah). Tudi Hilbertov prostor si predstavljamo brezčasovno, čeprav predstavljajo matrične funkcije v tem prostoru rezultat časovne integracije v intervalu $-\infty < t < +\infty$.

Seveda, nič ni narobe s takimi pristopi, vendar je pri tem nujno imeti v mislih katera matematična orodja smo uporabili za doseg rezultatov, zato da bomo lahko ta rezultat ustrezno interpretirali (če bomo imeli srečo, morda tudi pravilno!).

Po drugi strani iz izkušenj vemo, da je verjetnost, da bi kdaj opazili črepinje na tleh kako se zberejo nazaj v čajno šalico, ki nato skoči nazaj na mizo, enaka nič! Če bi opazovali tak posnetek, bi takoj vedeli katera smer filma je 'prava'. In v fiziki osnovnih delcev poznamo vrsto pojavov, ki so, tako ali drugače, nesimetrični, a njihovo obravnavo skušamo posplošiti v zrcalno simetričnih slikah. Na primer nekatere dogodke je mogoče obravnavati na enak način le, če delci med seboj zamenjajo naboj ('*Charge Conjugation*', C), druge pa če zrcalimo prostorske koordinate (parnost, '*Parity Symetry*', P), spet tretje, ki kršijo posamične simetrije C ali P in jih lahko vskladimo le s kombinacijo simetrij CP [248], ter četrte ki zahtevajo še simetrijo na obrat časa (T), CPT [389].

Toda, ali je sploh fizikalno smiselno obravnavati pojave simetrično na obrat časa? Nekateri fiziki (Dirac med prvimi) so predlagali, da naj bi bila anti-snov (snov z nasprotnim nabojem) dejansko navadna snov, ki se giblje v času nazaj. Spet drugi predlagajo, da, če bomo kdaj sploh odkrili 'tahione' (hipotetične delce ki se gibljejo hitreje od svetlobe), bi jih lahko imeli za navadne delce, ki se gibljejo v času nazaj. To je pripeljalo nekatere fizike do trditev, da, tudi če je v makro-svetu časovni obrat nemogoč, naj bi na ravni mikro-sveta vseeno bilo upravičeno dopustiti možnost, da nekateri delci pač 'živijo' v časovno obrnjenem svetu. Čeprav so taki pogledi matematično povsem možni, so, vsaj po mojem prepričanju, fizikalno nesmiselni.

S tem smo pripeljali razpravo do točke, kjer se moramo opredeliti in to opredelitev ustrezno upravičiti. Začnimo pri termodinamiki. Spontano termodinamsko dogajanje je znano kot smer entropije [390]. Entropijo si predstavljamo kot nekakšno mero 'neurejenosti'. Če povemo po vsakdanje, smer entropije lahko vsakdo preveri pri sebi doma, zadošča že, če opustimo vsakodnevno pospravljanje za en teden. Po drugi strani pa ima entropija tudi zaželjene posledice, denimo, '*nobena juha se ne pojè tako vroča, kot se skuha*', pravi stari slovenski pregovor, ki ga v tem primeru jemljemo povsem dobesedno.

Skratka, entropija nam pravi, da se bo naša čajna šalica ob padcu na tla nepopravljivo raztreščila. Čeprav se katerakoli dva atoma te šalice ločita na podoben način, je zaporedje teh dogodkov naključno in neponovljivo, že zaradi velikanskega števila delcev ki so pri tem udeleženi, tudi če za vsakega od njih Heisenbergov princip

ne bi veljal. Če je to število N , je verjetnost, da se nek dogodek natančno enako ponovi obratno sorazmerna z $N!$ (faktorialno). Iz enakega razloga je tudi časovno obraten proces nemogoč, pa čeprav je matematična verjetnost $1/N!$, sicer izredno majhna, a vseeno večja od nič, ker je $N \ll N! \ll \infty$.

Žal pa s tem, ko fenomenološko upravičimo nujnost določene smeri časovne puščice, nismo še nič povedali zakaj v časovni dimenziji ni možno po volji spreminjati koordinat. Navsezadnje, ali nas ni že Einstein naučil, da se potek časa spreminja s hitrostjo gibanja? Da bi to pojasnili, se moramo nekoliko globlje spustiti v prostor-čas Minkowskega [391].

Začnimo s problemom ortogonalnosti. Izraz 'ortogonalnost' smo si izposodili iz geometrije, kjer pomeni pravokotnost, dobesedno. Čeprav Descartes [279] v svojem delu *La geometrie* nikjer dobesedno ne zapiše, da morajo biti njegove 'referenčne črte' med seboj pravokotne, se je prav to uveljavilo kot preferenčni koordinatni sistem, ki še danes nosi njegovo ime. To pa zato, ker ortogonalnost koordinatnih osi omogoča bistveno poenostavitev matematične obravnave večrazsežnostnih problemov: če, denimo, spreminjamo le x , ostanejo ostale koordinate ($y, z, \dots$) nespremenjene, torej so med seboj neodvisne. Pa pogledajmo kako izgleda nek dogodek v koordinatah Minkowskega.

Najprej nam mora biti jasno, da meritev v eni sami točki prostor-časa ne pove ničesar, razen da se tam nek objekt tisti hip nahaja, ali pa ne. Za opis kakršnega koli dogodka potrebujemo vsaj dve meritvi v dveh različnih točkah prostor-časa. Iz tega lahko povemo da se je nekaj zgodilo, ne vemo pa kako. Denimo, šli smo z avtom na pot od doma ob 8:15 in prispeli na cilj ob 9:47. Iz tega še ne vemo kje na poti smo pospešili in kje zavirali, kje smo zavili levo, ali desno, ali in kje smo se ustavili pred rdečim semaforjem, itd. Za podroben opis dogodka potrebujemo torej večje število vmesnih meritev.

Če nek predmet spustimo da prosto pade na tla, nam poleg začetnih in končnih koordinat zadostuje le še ena vmesna meritev (če ne poznamo velikost gravitacijskega pospeška na planetu kjer poskus poteka), iz katere potem lahko izračunamo odvod hitrosti v tej točki, nakar ob predpostavki, da se gravitacijsko polje ne spreminja med poskusom, lahko ugotovimo ne le pospešek v eni točki, temveč znamo ekstrapolirati zakonitost gibanja za vse vmesne točke poti. Pa ne le za opazovani predmet, temveč za kateri koli predmet, kadar koli! Vendar, kar nam je samoumevno v klasični fiziki, smo v kvantni mehaniki na nek način zavrgli, ne da bi se tega zavedali. Tam, namreč, redno uporabljamo moment $\mathbf{p}(x,t)$ za opis energije delca v **eni** sami točki. Toda moment $\mathbf{p} = m\mathbf{v}$ določimo s hitrostjo delca, hitrost pa merimo kot $v = \Delta s / \Delta t$, kjer sta $\Delta s = s_2 - s_1$ krajevni koordinati in $\Delta t = t_2 - t_1$ časovni koordinati, torej nujno potrebujemo vsaj **dve** meritvi. Nič čudnega, torej, če nas nekatere predpostavke kvantne mehanike včasih pripeljejo do navidez nerazrešljivih paradoksov!

Nazaj k Minkowskemu: vzemimo, da poznamo zakonitosti nekega sistema zadosti dobro, da nam za opis pojava zadoščata le začetna in končna meritev. V štiridimezijskem prostor-času zato rabimo štiri pare koordinat. Pozor: tudi če vsem štirim začetnim koordinatam priredimo vrednost nič in zapišemo končne koordinate kot (x, y, z, t) , in ne kot razlike $(x_2 - x_1, y_2 - y_1, z_2 - z_1, t_2 - t_1)$, jih implicito še vedno nujno potrebujemo, nikakor niso kar izginile!

Pot pri takem dogodku je preprosto enaka radij-vektorju od začetnih do končnih koordinat, oziroma, diagonali štiridimenzijskega hiper-paralelepipeda, preprosto po Pitagori [392]:

$$r = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2 + (ic\Delta t)^2} \quad (82)$$

Kaj pa je zdaj tisti $ic\Delta t$? Očitno je Δt časovna razlika med končnim in začetnim časom meritve. Pomnožena s svetlobno hitrostjo c se časovna razlika efektivno 'geometrizira', oziroma pretvori v 'časovno pot'. Zato tudi pogosto pravimo, da je splošna relativnostna teorija v svojem bistvu 'geometrijska' teorija (tako kot še mnoge druge). Vendar, zaradi zahteve po ortogonalnosti razsežnostnih osi, moramo časovno pot narisati pravokotno na vse tri običajne prostorske osi, kar dosežemo z množenjem z imaginarno enoto, $i = \sqrt{-1}$ (iz teorije kompleksnih spremenljivk pa vemo, da je množenje z imaginarno enoto enakovredno rotaciji za pravi kot, 90° , oziroma $\pi/2$ radiana). Tako naj bi naredili časovne koordinate neodvisne od krajevnih (pa čeprav nam je skoraj nemogoče zamisliti 'četrto prostorsko razsežnost').

V zvezi z imaginarno enoto moramo omeniti še nekaj. Ker je $i^2 = -1$, in ker pogosto privzamemo, da so začetne koordinate enake nič, ter zato izpustimo Δ , enačbo (82) pogosto najdemo zapisano kot:

$$r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2 - c^2 t^2} \quad (83)$$

Na žalost, tisti nenavadni *minus* nekateri (matematično premalo razgledani) fiziki tolmačijo po svoje, pogosto tako, da rečejo: ko se rodimo, imamo pred seboj ves svoj življenski čas, potem pa vedno manj, obratno kot kažejo naše ure, ki se vrtijo v smeri večjih števil. Nekateri drugi pa menijo, da zadeva postane bolj razumljiva, če rečejo, da je prostorske koordinate vedno možno obrniti, časovne pa ne, zato zapišejo matriko enotnih vektorjev kot:

$$\begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c^2 \end{bmatrix} \quad (84)$$

kar je prav tako narobe, kot bomo takoj videli (pa ne le zato, ker razlike prostorskih koordinat nastopajo kot kvadrati in zato predznak ne more biti negativen!).

Svojevrstna lepota relacije (82) je v tem, da če za vseh šest prostorskih koordinat predpišemo vrednost nič, dejansko stojimo na mestu, se pa vendarle staramo (žal!), kar se lepo sklada z našimi vsakodnevnimi izkušnjami.

Vendar sedaj premislimo: ali se lahko premaknemo, denimo v smeri x , ne da bi obenem spremenili časovne koordinate? Seveda ne moremo, in to velja za vse tri prostorske koordinate. Tudi če bi se gibali s svetlobno hitrostjo in bi se naš čas med potjo navidezno ustavil, kot je to dognal Einstein, bi ob koncu poti ugotovili, da se je celotno Vesolje postaralo! Sklepamo torej, da nam je Minkowski (najbrž nevede!) podtaknil neustrezen model: tak sistem koordinat dejansko ni in ne more biti ortogonalen, razen v primeru popolnega mirovanja (v 'absolutnem' prostoru)!

Druga pomembna ugotovitev je dejstvo, da tudi naša vektorska matematika ni najbolj prilagojena našim zahtevam, vendar ne zaradi matematike same. Premislimo: hitrost v je zagotovo vektor (pripisati ji je mogoče trenutno velikost in smer). Tudi pot x mora biti krajevni vektor. Prehojena pot pa je seveda odvisna od hitrosti in preteklega časa, $x = vt$. Vprašanje, ki se mu ne moremo izogniti, se glasi: ali je (v tej relaciji) čas t sploh lahko vektor? Težko, sicer bi morali produkt obravnavati vektorsko, kar pomeni, da bi vektor poti x kazal v smer pravokotno na oba vektorja na desni, v in t . To pa ne bi imelo nobenega smisla! Pa še za vsako prostorsko koordinato posebej bi moral veljati drugačen čas, če se spomnimo Lorentzove kontrakcije, ki velja le v smeri gibanja, in ne v drugih dveh pravokotnih smereh. Zato bi čas lahko bil kvečjemu skalar, nikakor ne vektor. Vendar tudi skalarno časovno 'polje' v teoriji poraja mnoge pomisleke.

Nekateri fiziki ta vidik problema razrešijo tako, da imajo prostor (pot) za skalar, ki dobi (vektorsko) orijentacijo le zaradi smeri časovne puščice (potovanje se začne na 'začetku' in konča na 'cilju' zaradi smeri časa in če čas obrnemo se tudi smer poti obrne). Za delec ki se prosto giblje v prostoru je to vsekakor mogoče reči, a če gledamo posnetek človeka ki hodi, vedno natančno vemo kdaj je smer filma 'prava' (v smislu 'naprej–nazaj'; orijentacije v smeri 'levo–desno' ne moremo razlikovati, razen v primeru ko dobro poznamo pokrajino na posnetku).

Obstaja še en vidik problema ortogonalnosti [393]. Posebna relativnostna teorija dopušča le spremembo smeri fotona, ne pa tudi spremembe hitrosti, ker je absolutna vrednost četvernega vektorja hitrosti konstantna, $\sqrt{-c^2} = ic$. Posledično mora biti tudi četverni vektor kakršne koli sile, ki povzroči to spremembo smeri, ortogonalen na četverni vektor hitrosti. Zaradi zahteve po ortogonalnosti mora potem izraz za silo imeti (vsaj) tri med seboj neodvisne komponente. Vendar se izkaže, da Maxwelllova elektrodinamika vsebuje le dve neodvisni komponenti, E in H . Obstoj morebitne tretje komponente bi torej lahko predstavljal 'skrito' spremenljivko v kvantni mehaniki, tako kot so nekateri teoretiki že napovedovali, da v okviru formalizma kvantne mehanike 'nekaj manjka'. Ni pa še čisto jasno kaj bi ta manjkajoča komponenta lahko predstavljala, zaenkrat lahko le upamo da se bo nekomu nekoč posrečilo odkriti nekakšno korelacijo.

Ali morda znamo poiskati drugačno, bolj verjetno rešitev?

Videli smo že da, sledeč logiki stohastične elektrodinamike, vse naše izkušnje izhajajo iz elektromagnetnih interakcij, ki propagirajo s karakteristično hitrostjo c , ta pa je odvisna od gostote energije vacuuma, izražene s pomočjo elektromagnetnih konstant μ_0 in ε_0 (besedo 'konstanta' je tukaj nujno vzeti pogojno, veljavno le v okolju kjer je gostota snovi zelo majhna, sicer vsaka snov dodatno vpliva s svojimi vrednostmi; čeprav, kot smo videli pri Casimiovem učinku, tudi geometrija igra pomembno vlogo). Zato je efektivna (navidezna!) 'časovna oddaljenost' dveh dogodkov določena z lokalno vrednostjo propagacijske hitrosti elektromagnetnega valovanja, ki pa, očitno, ni konstanta, čeprav jo bomo še naprej označevali z ' c '. To pomeni, da je naš **občutek** o 'pretoku časa' le posledica dejstva, da vse informacije imajo končno propagacijsko hitrost, in čas kot fizikala količina dejansko sploh ne obstaja! Občutek o pretoku časa pa imamo le zaradi naše sposobnosti zapomniti si trenutne okoliščine in že v naslednjem hipu zapomnjeno priklicati iz spomnija, ter primerjati z novimi okoliščinami ('informacijska teorija časa', [394]).

Rekli boste, pa saj vendar že sama beseda 'hitrost' implicitno vključuje čas, kako potem naj čas ne bi obstajal?

To seveda drži, vendar le, če so naše 'osnovne merske enote' take, kot jih poznamo danes po SI: kilogram, meter, sekunda, ... Če, denimo, opustimo sekundo in meter, ter vpeljemo kot temeljno enoto hitrost c , bo zadeva že bolj urejena. Pravzaprav smo ta korak že naredili z uveljavitvijo SI definicije metra in sekunde na osnovi istega merilnega procesa (nihanja atomov ^{133}Cs) in potrebujemo le še formalno uveljavitev. Po drugi strani pa vemo, da je elektromagnetna impedanca prostora Z_0 določena z istimi lokalnimi vrednostmi μ_0 in ε_0 , vendar drugače kot c , glej enačbi (22) in (61). Dejansko sta si impedanca Z_0 in hitrost c medsebojno ortogonalni količini, čeprav sta v tesni zvezi. Poleg tega, konstanti μ_0 in ε_0 lahko določimo kvazi-statično, neodvisno od propagacijske hitrosti. Če poznamo lokalno impedanco Z in če njeno vacuumsko vrednost Z_0 vzamemo za temeljno enoto, se lahko znebimo še ampera, enote za električni tok, ki je v SI zataval preko elektrokemije.

Posledično lahko tudi kilogram, edini preostali 'nenaravni' etalon, definiramo elektromagnetno, prav tako preko procesov, ki so v zvezi z gostoto ZPE in tako izboljšamo mersko natančnost za maso na vsaj 14 značilnih decimalnih mest (namesto le 4 ali 5, kot je to sedaj, kljub temu da Avogadrovo število [395] poznamo na 8 decimalnih mest natančno, [396]).

Tako bi dobili ortogonalen, prečiščen, izredno natančen in prek temeljnih naravnih procesov definiran sistem merskih enot. Sekundo, 'časovno' enoto (ki to dejansko ni!), pa lahko še vedno obdržimo, če jo prestavimo med 'izpeljane' enote SI.

Lahko torej mirne vesti privzamemo, da 'čas' ne obstaja. Obstaja le 'zdaj'. Obstaja tudi verjetnost, da se neko stanje, ki velja 'zdaj', spremeni v neko drugo stanje, veljavno ob naslednjemu 'zdaj' (10^{-44} sekunde kasneje — ah, spet ta čas, treba se ga bo odvaditi!). Verjetnost, da do spremembe pride, pa je sorazmerna minimalni vrednosti energije, ki je za tako spremembo potrebna. Velike spremembe pač niso zelo verjetne, ali pa zahtevajo ogromno energije. Majhne spremembe pa se (po Heisenbergu, [84]) dogajajo nenehno.

Težave s tako prenovljenim merskim sistemom utegnemo imeti le, če bi se izkazalo, da svetlobna hitrost v prostoru brez prisotnosti mase ni vedno (bila) konstanta, oziroma, če se gostota energije vacuuma, ter z njo elektromagnetna impedanca, spreminjata z razvojem Vesolja. A tudi v tem primeru bi brezčasovni sistem bil bolj sprejemljiv kot ta, ki ga imamo sedaj, čeprav bi veljal le 'lokalno'.

Ali to pomeni, da meritev časa lahko nadomestimo z meritvijo lokalnih vrednosti impedance prostora in svetlobne hitrosti? Seveda, lahko. Ali to tudi pomeni, da bomo čez desetletje ali dva hodili naokrog z merilnikom impedance na eni roki in Sagnacovim laserskim interferometrom na drugi, oba pa bosta znamke Rolex? Prav gotovo ne! Ure so bistveno bolj preproste in za vsakdanjo uporabo izredno praktične. Ali bomo morda otrokom v osnovni šoli nekoč vsiljevali pouk brezčasovne fizike? Najbrž tudi ne!

Vendar bi se fizikalni teoretiki morali o vsem tem globoko zamisliti.

O (ne)zmožnosti pridobivanja energije iz ZPE

Zgodovina 'izumov' naprav tipa *perpetuum mobile* [397] je izredno pestra. Te (ideje za) naprave bi lahko razvrstili v več kategorij, glede načina izkoriščanja energijskega vira. Klasični tip naprav, ki potrebujejo le začetni zagon, nato pa delujejo neprestano, brez zunanjega energijskega vira, ponavadi imenujemo '*perpetuum mobile prve kategorije*', PMK1. Naprave '*druge kategorije*', PMK2, ponavadi izkoriščajo nek naravni energijski vir, kot je, denimo, zemeljsko magnetno polje, atmosferski električni potencial, gravitacijo, in podobno. Naprave '*tretje kategorije*', PMK3, pa, poleg zunanjega naravnega energijskega vira, potrebujejo še dodatno energijo, ponavadi v obliki električnega toka iz baterije, ali mehanskega dela, toda (domnevno) proizvajajo več energije, kot se za njihovo delovanje porabi iz tega dodatnega vira, in ta energijski presežek, po zagotavljanju izumiteljev teh naprav, na nek poseben, le njim znan način pridobivajo iz naravnega vira.

Seveda, naprav tipa PMK1 in PMK2, ki bi jih lahko preverili neodvisno od njihovih 'izumiteljev', in ki bi dejansko delovale, še ni, in jih tudi nikoli ne bo!

Klub tem na internetu ne manjka številnih opisov naprav tipa PMK3, če le 'poguglamo' za besedno sintagmo 'free energy' (prosta, oziroma brezplačna energija), ali 'over-unity devices' (naprave z izkoristkom večjim od 1). Izjemno dolg seznam zadetkov vsebuje različne naprave, od sicer povsem mogočih, kot so sončne celice in veterne elektrarne, pa do povsem neverjetnih: naprave na osnovi hladnega zlitja jader ('cold fusion'), motorji, ki na videz opravijo večje delo, kot je energija, ki jo posrkajo iz baterije ('over-unity motors'), 'orgonski akumulatorji', asimetrični kondenzatorji, asimetrična magnetna polja, itd. Poleg tega najdete še celo vrsto 'pričevanj', da ameriška, ruska, ali kar obe armadi že naveliko raziskujeta možnosti izkoriščanja ZPE v vojaške namene, oziroma že imata plovila na pogon s pomočjo ZPE (kar naj bi, mimo grede, pridobili iz ostankov 'letečih krožnikov', ki naj bi padli na območju Roswella leta 1947, oziroma v Sibiriji leta 1908), ter vrsto podobnih, večinoma povsem neumnih trditev. Pa še za dobro mero opisov 'eksotičnih' eksperimentov Nikole Tesle.

Na hitro opravimo s Teslo [288]. Brez vsakršnega dvoma, gre za enega največjih genijev in vizionarjev, ki so kdaj živeli. Toda, ali je res odkril 'brezplačno' energijo? Ni, čeprav je sam verjel v možnost izkoriščanja sevalne energije Sonca, atmosferskega električnega potenciala, itd [398]. Energija, ki naj bi jo lovil pri svojih poskusih v Colorado Springsu, ter s svojo znamenito, a nikoli dokončano anteno Wardencliff Tower (Shoreham, Long Island, New York) je prihajala od ionosferskega potenciala Zemlje, kjer prevladujejo nizkofrekvenčne komponente polja (Schumannova resonanca, [399]), ta potencial pa je predvsem posledica sončnega UV sevanja. Kljub relativno visoki napetosti je tok večinoma šibek, zadošča morda le za polnjenje akumulatorčka za mobilni telefon. Za bolj učinkovit zajem te energije bi potrebovali antene, ki bi bodisi segale v ionosfero, denimo s pomočjo balonov, povezanih z žico, bodisi bi imele razsežnosti primerljive z večjimi daljnovodnimi omrežji. Pa še te bi se morale nahajati zadosti blizu polarnega pasu, kjer se zaradi zemeljskega magnetnega polja koncentrira tok ioniziranih delcev sončevega 'vetra' (*aurora* [400]), in ki ob večjih izbruhih sončnih protuberanc sunkovito naraste do $\sim 10^5$ A, ter preobremeni transformatorske in daljnovodne varovalke, kar sproži izpad celotnega omrežja (kot se je že nekajkrat zgodilo v Kanadi in ZDA [401]).

Pri večini svojih raziskav (z izjemo dokaj učinkovitih polifaznih generatorjev in transformatorjev) pa je Tesla pogosto porabil na stotine kW energije za le W ali dva koristnega dela, z ogromno 'jalove' moči (velikega faznega zamika med napetostjo in tokom) ki je preobremenila daljnovode, zaradi česar so mu iz lokalnih elektrarn prav tako pogosto izklapljali dobavo električne energije.

Res pa je, kot je to Tesla ugotovil, da je energijo mogoče prenašati brezžično, in to ni nobena skrivnost. Vse kar potrebujemo je zadosti visoka frekvenca, tam nekje nad 10 GHz, še bolje 100 GHz, ter dva dobro uglašena resonančna kroga. Vendar je izkoristek pri takem prenosu največ kakšnih 30–40 %, pa še to le, če sta oddajnik in sprejemnik oddaljena kvečjemu nekaj valovnih dolžin. Za večji izkoristek pa bi potrebovali bodisi razdalje med oddajnikom in sprejemnikom manjše od $\lambda/4$, bodisi velike paraboloidne antene s površino več deset m², bodisi frekvence daleč v teraherčnem območju ($> 10^{12}$ Hz).

Tesla je sicer predvideval tudi obstoj longitudinalnega elektromagnetnega valovanja [402], čeprav na osnovi Maxwellovih enačb izhaja da je elektromagnetno valovanje lahko le transversalno. Nekateri fiziki domnevajo da se Coulombova, oziroma elektrostatična polja razširjajo longitudinalno, vendar je za tako ramišljanje le malo realne podlage, zlast v luči interpretacije 'statičnih' polj s pomočjo stojnega valovanja, kot smo to že razložili. Kljub temu vrsta raziskovalcev še naprej išče podobne rešitve in ugotavlja 'nenavadne' učinke [403].

Žal do današnjega dne še nikomur ni uspelo iznajti tako geometrijo antene, ki bi zajela ves Heavysideov 'energijski tok' [335] (tisti tok, ki ga je Lorentz z upeljavo svoje metode integracije polja 'izničil' — nekateri sicer skušajo dokazovati da neupravičeno [404]). In vprašanje je, ali bo kaj takega sploh kdaj mogoče, glede na dejstvo, potrjeno s Casimirovim učinkom, da je učinkovito izkoriščanje ZPE možno le na izredno majhnih dimenzijah.

Pravzaprav nam že narava sama, z dimenzijami svojih osnovnih gradnikov nakazuje, da je možno visoke gostote energije zajeti le znotraj relativno majhnega prostora, pa še to v omejenih količinah (če kakšnemu osnovnemu delcu dovajamo dodatno energijo, se ta izrazi predvsem v obliki povečane kinetične energije, med tem ko tisti del energije, ki ga delec iz kakršnega koli razloga ne more sprejeti, takoj odvalovi stran v obliki Comptonovega sipanja). V makroskopskih razmerah le črne luknje izkazujejo zmožnost (teoretično) neomejene koncentracije energije, a tudi črne luknje, kot pravi Hawking, počasi 'izhlapevajo' (čeprav nekateri [405] v to dvomijo, zlasti ker v modelih Vesolja, v katerih sta bodisi kozmološka konstanta, bodisi energija vacuuma različni od nič, Hawkingov teorem odpove).

Obstaja pa en temeljni problem, ki ga večina navdušenih zagovornikov uporabe 'proste' energije venomer prezre, to pa je problem osnovnega energijskega stanja in energijske razlike. Za kaj gre? V grobem povedano, ZPE, kot jo fizikalno razumemo, predstavlja le **osnovno, najnižje možno energijsko stanje narave**, obenem tudi definira osnovno stanje kakršnega koli gradnika narave in (vsaj teoretično) ni nobenega nižjega energijskega stanja. Izkoriščanje energije pa je vedno povezano s pretokom energije od višjega k nižjemu energijskemu stanju. Pretok v obratni smeri pomeni, da smo v ta proces vložili energijo, denimo kot pri hladilniku: če želimo da je notranjost hladnejša od okolice, mora kompresor delovati in zato porabiti električno energijo, hkrati pa segrevati rebra na zadnji strani hladilnika nad temperaturo okolice, ki ji nato lahko spontano predaja termično energijo odvzeto iz notranjosti.

Če torej nižjega energijskega stanja od ZPE po definiciji ni, pomeni, da te energije tudi ni mogoče izkoristiti! Toda ta stavek je treba nekoliko dopolniti: Casimirovi plošči lahko ustvarita prostor, ki vsebuje manj energije kot okolica. A ne smemo pozabiti, da je ZPE prisotna tudi med atomi teh plošč, prav tako tudi med elektroni in jedrom vsakega posamičnega atoma. Atom pač zasede preveč 'praznega' prostora in ne more zadosti učinkovito senčiti sevalne energije ZPE na visokih frekvencah. Za bolj učinkovito senčenje potrebujemo vsaj tako gostoto delcev, kot jo je mogoče najti v nevtronskih zvezdah, ali pa v samih črnih luknjah. Tehnologije, ki bi obvladovala take gostote snovi pa še zelo dolgo ne bomo imeli, če sploh kdaj [\[406\]](#).

Tako bo, verjetno, izkoriščanje ZPE za vedno ostalo zunaj našega dosega.

Strokovnjaki pojma nimajo!

A da ne bomo končali preveč pesimistično, za tolažbo in v spodbudo mladim rodovom znanstvenikov in tehnikov navedimo nekaj primerov napačnih napovedi iz preteklosti, pri katerih so se sicer spoštovanja vredni strokovnjaki krepko ušтели:

“Vrtati za nafto? Mislite, vrtati v zemljo v upanju da najdemo nafto? Saj ste nor!”

Rudarji, ki jih je Edwin L. Drake poskušal najeti za vrtanje, 1859.

“Teorija o mikrobih Luisa Pasteura je smešna izmišljotina!”

Pierre Pachet, profesor fiziologije, Toulouse, 1872.

“Trebušna votlina, prsni koš in možgani naj modremu in humanemu kirurgu za vedno ostanejo zaprti pred vdorom.”

Sir John E. Ericksen, britanski kirurg, imenovan za izrednega kirurga Kraljice Viktorije, 1873.

“Ta ‘telefon’ ima preveč pomanjkljivosti, da ga težko jemljemo kot resno komunikacijsko sredstvo. Nam ta naprava ne predstavlja nobene vsebinske vrednosti.”

Interno poročilo podjetja Western Union, 1876.

“Leteči stroji, težji od zraka, niso možni!”

Lord Kelvin, znanstvenik in predsednik Royal Society, 1895.

“Vse, kar je možno izumiti, je že izumljeno!”

Charles H. Duell, patentni ocenjevalec, US Office of Patents, 1899.

“Letala so zanimive igrače, a za vojaške namene neuporabna.”

Maršal Ferdinand Foch, profesor strategije, Ecole Supérieure de Guerre, Francija, 1912.

“Človek nikoli ne bo dosegel Lune, navkljub vsemu prihodnjemu napredku znanosti!”

Lee DeForest, ‘oče’ radija.

“Brezžična glasbena ‘skrinjica’ nima nobene tržne vrednosti. Le kdo bi bil pripravljen plačevati za sporočila, oddana kar tako, nikomur posamično?”

Poslovni družabniki Davida Sarnoffa v odgovoru na njegov poziv k investiranju v radio, 1920.

“Ni verjetno, da bi človek kdaj lahko izkoriščal moč atoma.”

Robert Millikan, Nobelov nagrajenec za fiziko, 1923.

“Zdi se, da so delnice dosegle visoko raven, ki se v prihodnosti ne more več bistveno spreminjati.”

Irving Fisher, profesor ekonomije, Yale University, 1929.

“Menim, da bo svetovni trg potreboval le kakih pet računalnikov.”

Thomas Watson, predsednik IBM, 1943.

“Ta bomba ne bo delovala! To trdim kot strokovnjak za eksplozive.”

Admiral William Leahy, član vojaškega poveljstva za razvoj atomske bombe, 1945.

“Računalniki bodo v daljnji prihodnosti tehtali kvečjemu poldrugo tono.”

Popular Mechanics Magazine, 1949.

“Super-računalnik je tehnološko neuresničljiv, saj bi potrebovali vso vodo slapov Niagare le za odvajanje toplote preštevilnih, a nujno potrebnih elektronskih cevi.”

Profesor elektrotehnike, New York University, 1950.

“Le vesel sem, da bo Clark Gable šel ‘po gobe’, ne pa Garry Cooper.”

Garry Cooper, ko je zavrnil ponujeno glavno vlogo v filmu “Gone With The Wind”.

“Prepotoval sem to deželo po dolgem in počez, se pogovarjal z najboljšimi strokovnjaki, in lahko vam zagotovim, da je ‘procesiranje podatkov’ le modna muha, ki ne bo trajala niti do konca leta.”

Glavni urednik oddelka strokovne literature založbe Prentice Hall, 1957.

“Ni jasno, kakšno korist bi lahko kdorkoli imel od stroja, ki izdeluje kopije dokumentov. Zagotovo to ni dejavnost, ki bi bila sposobna vzdrževati se sama.”

Vodstvo IBM o ideji Chestera Carlsona, ki je nato ob podpori Haloid Co. ustanovil Xerox Corp., 1959.

“Ni nam vseč njihov zvok; kakorkoli že, popularnost kitarske glasbe je v zatonu.”

Decca Recording Co., ob zavrnitvi prošnje za snemanje ansambla The Beatles, 1962.

“Kakšna pa je sploh korist od tega ‘mikroprocesorja’?”

Inženir pri Advanced Computing Systems Division, IBM, 1968.

“Ne poznam nobenega razloga zakaj bi kdorkoli želel računalnik imeti doma.”

Ken Olson, predsednik in ustanovitelj Digital Equipment Corp., 1977.

“640 K RAMa bi morale zadoščati komurkoli!”

Bill Gates, vodilni razvijalec, lastnik in ustanovitelj podjetja Microsoft, 1981.

Pa še dve iz domačih logov, ki sem jih imel priložnost slišati na lastna ušesa:

“Tekočekristalni zasloni (LCD) se ne bodo nikoli prijeli: ločljivost imajo kot *LEGO* kocke, prepočasni so, mehansko so preobčutljivi, pa še barv ne premorejo!”

Inženir Oddelka za meroslovje in zagotavljanje kakovosti, Iskra, 1985.

“Mobilni telefoni se bodo uporabljali morda le v avtomobilih: nihče ne bo pripravljen pol kile težke ‘opeke’ nositi v žepu.”

Razvojni inženir, Iskra Telekomunikacije, 1989.

Zaključek

Stohastična elektrodinamika (SED) lahko na bolj naraven način pojasni mnoge kvantne in relativistične pojave, ki so sicer težko združljivi, mnoge druge pa pojasni enako dobro kot standardne teorije, vendar z manj posebnih predpostavk.

V **Tabeli 5** je podan kratek pregled nekaterih najpomembnejših relacij SED in njihovih posledic, ki so identične učinkom gravitacijskega polja v okviru splošne relativnostne teorije, pri čemer je za referenco posamezne spremenljivke vzeta vrednost v neskončni oddaljenosti od katerekoli mase, kjer je polarizacijski faktor $K = 1$.

Tabela 5: Primerjava formalizmov teorije SED in učinkov splošne relativnosti

spremenljivka	relacija	učinek ob prisotnosti mase, $K > 1$
svetlobna hitrost, $c'(K)$	$c' = \frac{c}{K}$	zmanjšanje svetlobne hitrosti
masa, $m(K)$	$m = m_0 K^{3/2}$	efektivno povečanje mase
frekvenca, $\omega(K)$	$\omega = \frac{\omega_0}{\sqrt{K}}$	rdeči spektralni zamik
časovni interval, $\Delta t(K)$	$\Delta t = \Delta t_0 \sqrt{K}$	ure tečejo počasneje
energija, $W(K)$	$W = \frac{W_0}{\sqrt{K}}$	nižja energijska stanja
dolžina, $l(K)$	$l(K) = \frac{l_0}{\sqrt{K}}$	dolžine se skrčijo
‘težnost’, $F(K)$	$F(K) \propto \nabla K$	privlačna ‘gravitacijska sila’

Referenčne vrednosti so pri neskončni oddaljenosti od katerekoli mase, ko je $K = 1$.

Žal pa SED še zdaleč ne more pojasniti vsega, kar je po svoje razumljivo. Če le upoštevamo razmerje zmnožkov števila raziskovalcev in števila let vloženih v razvoj teorije, standardna kvantna teorija zmaga ‘zvezanih rok’! Prav tako je treba upoštevati, da so starejši znanstveniki, ki spodbujajo mlajše kolege k iskanju alternativnih odgovorov, razmeroma redki. Kot je to nekoč povedal Freeman Dyson, “*Da neka nova teorija prepriča le z argumenti, se ne zgodi pogosto. Običajno pride do spremembe šele, ko se stari profesorji umaknejo, njihove katedre pa zasedejo mlajši, ki so z novimi idejami že dolgo seznanjeni.*” Črnogledo, ni kaj.

Kljub temu, SED hitro dohiteva standardne teorije, nenazadnje tudi zato, ker so eksperimentalni rezultati pri dobro zastavljenih poskusih dokaj neodvisni od hipotez, na katerih posamični poskusi slonijo (kar je značilnost dobre znanstvene prakse), zato so ti rezultati na voljo vsem enako. Sicer imajo eksperimentalisti radi presenečenja, ker jim vsako novo odkritje olajša pridobivanje sredstev za nadaljnje raziskave. Teoretiki pa večinoma presenečenj ne marajo, ker jim podrejo načrte, ki so si jih zastavili za mnoga leta vnaprej.

Trenutno smo vsi na točki, ko nam kronično primanjkuje eksperimentalnih podatkov na elementarni ravni, zato je večina teoretičnih interpretacij zgrajena na ugibanjih znotraj meja, postavljenih na podlagi dosedanjih odkritij. Vsi teoretiki se strinjajo da je Standardni model nujno potreben popravkov. Kako radikalni in daljnosežni naj bi ti bili, pa se mnenja že razlikujejo.

SED je tu v rahli prednosti, ker se ni zavezala neki konkretni strukturi snovi in Vesolja, ki bi, če se izkaže za napačno, teorijo tudi pokopala. SED se razvija predvsem na temeljnih, nespornih načelih, ki jih je mogoče prilagoditi vsakršni osnovni strukturi. Podobno velja tudi za kvantno teorijo polj, QFT (kjer so nekatera izhodišča iz QED nadomeščena z ustrežnejšimi).

Za razliko od teh, QED ni zadosti 'relativna' in v limitah divergira. Teorije strun, ST, in membranskih svetov, MT, ki se že sedaj v različnih varijantah med seboj precej razlikujejo, pa že za posredno potrditev zahtevajo tako visoke energije, da jih še dolgo ne bo mogoče neposredno preveriti; poleg tega utegnejo imeti velikanske težave s prilagajanjem novim odkritjem že, če bodo ta le malenkostno zunaj predvidenih meja, ali pa če se izkaže, da gravitacija le ni naravno vgrajena v te teorije, ali če se izkaže da se v energijskih limitah ne skladajo, bodisi s splošno relativnostjo, bodisi s kvantno teorijo.

Čeprav smo pokazali kako SED lahko poveže mnoge kvantne pojave s splošno relativnostno teorijo, ter na naraven način reproducira učinke pri relativistično relevantnih pogojih (z izjemo črnih lukenj, kjer po SED gravitacija narašča eksponentno, pri splošni relativnostni teoriji pa na nekoliko bolj zapleten Schwazschildov način, na podlagi česar nam bo morda v kratkem uspelo ugotoviti katera bolj ustreza realnosti [257]). Toda treba je poudariti, da je splošna relativnost pravzaprav teorija klasičnega tipa, pri njej ni prostora za kvantizacijo na mikro ravni, in tudi kozmološka konstanta Λ , po prvotni Einsteinovi interpretaciji, ne izvira iz kvantnih pojavov, pač pa iz energije vseh gravitacijskih polj v Vesolju. Zato se poraja vprašanje ali sploh smemo energijski gostoti, izvirajoči iz vsote običajne barionske in temne snovi $\Omega_M \approx 0.3$, kar tako prišteti temno energijo $\Omega_\Lambda \approx 0.7$, če naj ta izvira iz vacuumskih fluktuacij. Od tega fizikalnega vprašanja pa ni več daleč do filozofskega vprašanja, ali sploh smemo Vesolju predpisati celotno gostoto $\Omega_T = \Omega_M + \Omega_\Lambda = 1$. Posledice odgovora na to vprašanje pa so vse prej kot trivialne. Prav zaradi tega je izrednega pomena dejstvo, da je povsem mogoče tako kvantno kot tudi relativnostno teorijo reinterpretirati (v smislu SED), ne da bi ju bilo treba porušiti.

Skratka, stohastična elektrodinamika, ki je svojo pot začela kot kvazi-klasična teorija, je svoj način modeliranja sveta uspešno razširila tudi na pojave, ki so se sprva zdeli v popolnem nasprotju s čisto klasičnim videnjem, ter v tem smislu nerešljivi ali med seboj nezdružljivi. Žal, v okviru SED še vedno nismo dobili nobene napovedi obstoja še neodkritih pojavov, ki bi če bi bili potrjeni, pričali v prid natanko taki razlagi sveta. Morda se nam v kratkem tudi v tem oziru odprejo nove možnosti.

Reference:

- [1] Teorija Vsega, <http://en.wikipedia.org/wiki/Theory_of_Everything>
- [2] *Karl R. Popper*, 1902–1994, <http://en.wikipedia.org/wiki/Karl_Popper>
The Karl Popper Web, <<http://elm.eeng.dcu.ie/~tkpw/>>
- [3] *Galileo Galilei*, 1564–1642, <http://en.wikipedia.org/wiki/Galileo_Galilei>
- [4] *Isaac Newton*, 1643–1727, <http://en.wikipedia.org/wiki/Isaac_Newton>
- [5] *Evklid* (gr.: *Εὐκλείδης* [Eukleides]) iz Aleksandrije, ca. 330 pnš.,
<http://en.wikipedia.org/wiki/Euclid_of_Alexandria>
- [6] *William Thomson, Lord Kelvin*, 1824–1907, <http://en.wikipedia.org/wiki/Lord_Kelvin>
- [7] *Michael Faraday*, 1791–1867, <http://en.wikipedia.org/wiki/Michael_Faraday>
- [8] *James Clerk Maxwell*, 1831–1879, <http://en.wikipedia.org/wiki/James_Clark_Maxwell>
- [9] *Heinrich R. Hertz*, 1857–1894, <http://en.wikipedia.org/wiki/Heinrich_Rudolf_Hertz>
- [10] *Max Karl Ernst Ludwig Planck*, 1858–1947, <http://en.wikipedia.org/wiki/Max_Planck>
- [11] Zakon sevanja črnega telesa, <http://en.wikipedia.org/wiki/Black-body_radiation>
- [12] *M. Planck*, Ann. d. Physik, 4 (1901), pp.553-563.
- [13] Eter, <http://en.wikipedia.org/wiki/Luminiferous_aether>
- [14] Poskus Michelsona in Morleya, <http://en.wikipedia.org/wiki/Michelson-Morley_experiment>
- [15] *Albert A. Michelson*, 1852–1931, <http://en.wikipedia.org/wiki/Albert_Michelson>
- [16] *Edward W. Morley*, 1838–1923, <http://en.wikipedia.org/wiki/Edward_Morley>
- [17] Virgo Supercluster, <http://en.wikipedia.org/wiki/Virgo_Supercluster>
- [18] Mednarodni sistem merskih enot, SI,
<http://en.wikipedia.org/wiki/International_System_of_Units>
<<http://physics.nist.gov/cuu/Units/index.html>>
- [19] Svetlobna hitrost, c , <http://en.wikipedia.org/wiki/Speed_of_light>
- [20] *Fizeau–Foucaultova* naprava za merjenje svetlobne hitrosti,
<http://en.wikipedia.org/wiki/Fizeau%E2%80%93Foucault_apparatus>
- [21] Interferometer, <<http://en.wikipedia.org/wiki/Interferometer>>
- [22] Interferenca, <<http://en.wikipedia.org/wiki/Interference>>
- [23] *Robert Hooke*, 1635–1703, <http://en.wikipedia.org/wiki/Robert_Hooke>
- [24] *Francesco Maria Grimaldi*, 1618–1663,
<http://en.wikipedia.org/wiki/Francesco_Maria_Grimaldi>
- [25] Newtonovi kolobarji, <http://en.wikipedia.org/wiki/Newton%27s_rings>
- [26] *Christiaan Huygens*, 1629–1695, <http://en.wikipedia.org/wiki/Christiaan_Huygens>
- [27] *Augustin-Jean Fresnel*, 1788–1827, <<http://en.wikipedia.org/wiki/Fresnel>>
- [28] *Thomas Young*, 1773–1829, <http://en.wikipedia.org/wiki/Thomas_Young_%28scientist%29>
- [29] Poskus z dvojno režo, <http://en.wikipedia.org/wiki/Double-slit_experiment>
- [30] Meter, <<http://en.wikipedia.org/wiki/Meter>>
- [31] *A.A.Michelson, E.W.Morley*, On the Relative Motion of the Earth and the Luminiferous Ether,
The American Journal of Science, No.203, Nov., 1887,
<<http://www.aip.org/history/gap/PDF/michelson.pdf>>

- [32] *Johann Christian Andreas Doppler*, 1803–1853,
<http://en.wikipedia.org/wiki/Christian_Doppler>
- [33] Dopplerjev učinek, <http://en.wikipedia.org/wiki/Doppler_effect>
- [34] *George Francis FitzGerald*, 1851–1901, <http://en.wikipedia.org/wiki/George_FitzGerald>
- [35] *Oliver Heaviside*, 1850–1925, <http://en.wikipedia.org/wiki/Oliver_Heaviside>
- [36] *Hendrik Antoon Lorentz*, 1853–1928, <http://en.wikipedia.org/wiki/Hendrik_Lorentz>
- [37] Lorentz-FitzGeraldovo skrčenje dolžin, <http://en.wikipedia.org/wiki/Length_contraction>
- [38] *Albert Einstein*, 1879–1955, <http://en.wikipedia.org/wiki/Albert_Einstein>
- [39] *A. Einstein*, On the Electrodynamics of Moving Bodies,
Annalen der Physik, 17:891, June 30, 1905 (angleški prevod originalnega članka v nemščini)
<<http://www.fourmilab.ch/etexts/einstein/specrel/www/>>
- [40] Posebna relativnostna teorija, <http://en.wikipedia.org/wiki/Special_Theory_of_Relativity>
- [41] *C.M. Will*, The Confrontation between General Relativity and Experiment
<<http://relativity.livingreviews.org/Articles/lrr-2001-4/>>
- [42] Anti-relativnost, <<http://www.anti-relativity.com/mmx.htm>>
Alternative splošni relativnosti,
<http://en.wikipedia.org/wiki/Alternatives_to_general_relativity>
Relativity Challenge: Einstein's Math Errors,
<<http://www.relativitychallenge.com/index.htm>>
J. DeMeo, Dayton Miller's Ether-Drift Experiments: A Fresh Look
<<http://www.orgonelab.org/miller.htm>>
Paul Marmet, The Overlooked Phenomena in the Michelson-Morley Experiment,
<<http://www.newtonphysics.on.ca/michelson/michelson.html>>
Eliahu Comay, Theoretical Errors in Contemporary Physics,
<<http://www-nuclear.tau.ac.il/~elic/>>
Galilean Electrodynamics, <<http://home.comcast.net/~adring/>>
Takehisa Fujita, Quantum Gravity without General Relativity
<http://xxx.lanl.gov/PS_cache/arxiv/pdf/0804/0804.2518v1.pdf>
Hans C. Ohanian, Einstein's $E = mc^2$ mistakes
<<http://xxx.lanl.gov/ftp/arxiv/papers/0805/0805.1400.pdf>>
M. Anyon, J. Dunning-Davies, Some Comments on the Tests of General Relativity
<<http://xxx.lanl.gov/ftp/arxiv/papers/0806/0806.0528.pdf>>
C. Tsolkas, Wrong Relativity, <<http://www.tsolkas.gr/english/english.html>>
H.J. Zweig, Michelson-Morley Plus Lorentz
<<http://www.aquestionoftime.com/condensed.htm>>
H.H. Lindner, Flawed Relativity: Flowing Space
<<http://www.geocities.com/Athens/Atrium/8041/Writings/Space/Physics.htm>>
T.S. Holman, Special Relativity Theory, Built Upon Quicksand
<<http://d1002391.mydomainwebhost.com/JOT/Links/Papers/Holman2.pdf>>
M. Weiss, Can You See the Lorentz-Fitzgerald Contraction? Or: Penrose-Terrell Rotation
<<http://math.ucr.edu/home/baez/physics/Relativity/SR/penrose.html>>
C. Nassif, Electrodynamics of Moving Particles in Gravitational Fields
<http://lanl.arxiv.org/PS_cache/physics/pdf/0702/0702095v4.pdf>

- S. M. Wagh*, Beyond Einstein
<http://xxx.lanl.gov/PS_cache/physics/pdf/0603/0603149v1.pdf>
- [43] Foto-električni učinek, <http://en.wikipedia.org/wiki/Photoelectric_effect>
- [44] Splošna relativnostna teorija, <http://en.wikipedia.org/wiki/General_relativity>
- [45] Energija ničelne točke, ZPE, <http://en.wikipedia.org/wiki/Zero-point_energy>
- A. Einstein*, The Development of Our Views on the Composition and Essence of Radiation, 1909
<http://en.wikisource.org/wiki/The_Development_of_Our_Views_on_the_Composition_and_Essence_of_Radiation>
- [46] *Otto Stern*, 1888–1969, <http://en.wikipedia.org/wiki/Otto_Stern>
- [47] *A. Einstein, O. Stern*,
Einige argumente für die annahme einer molekularen agitation beim absoluten nullpunkt,
Annalen Der Physik 40 (1913), p.551.
- [48] Planckova konstanta, h , <http://en.wikipedia.org/wiki/Planck_constant>
- [49] *Jožef Stefan*, 1835–1893, <http://en.wikipedia.org/wiki/Joseph_Stefan>
- [50] *Ludwig E. Boltzmann*, 1844–1906, <http://en.wikipedia.org/wiki/Ludwig_Boltzmann>
Boltzmannova konstanta, <http://en.wikipedia.org/wiki/Boltzmann_constant>
- [51] Stefan–Boltzmannov zakon <http://en.wikipedia.org/wiki/Stefan-Boltzmann_law>
- [52] *Wilhelm C.W.O.F.F. Wien*, 1864–1928, <http://en.wikipedia.org/wiki/Wilhelm_Wien>
- [53] Zakon sevanja Rayleigh–Jeansa, <http://en.wikipedia.org/wiki/Rayleigh-Jeans_law>
- [54] 'Ultraviolična katastrofa', <http://en.wikipedia.org/wiki/Ultraviolet_catastrophe>
- [55] *M. Planck*, Ann. d. Phys. 1 (1900), p. 719.
- [56] *M. Planck*, Ann. d. Physik, 4 (1901), pp.553-563.
On the Law of Distribution of Energy in the Normal Spectrum (angleški prevod):
<<http://dbhs.wvusd.k12.ca.us/webdocs/Chem-History/Planck-1901/Planck-1901.html>>
- [57] *Arthur Holly Compton*, 1892–1962, <http://en.wikipedia.org/wiki/Arthur_Holly_Compton>
- [58] Foton, <<http://en.wikipedia.org/wiki/Photon>>
- [59] *Satyendra Nath Bose*, 1894–1974, <http://en.wikipedia.org/wiki/Satyendra_Nath_Bose>
- [60] Planckov zakon sevanja, <http://en.wikipedia.org/wiki/Planck%27s_law>
- [61] *M. Planck*, Über die begründung des gesetzes der schwarzen strahlung,
Ann. d. Physik, 37, (1912), 642.
- [62] *Niels H.D. Bohr*, 1885–1962, <http://en.wikipedia.org/wiki/Niels_Bohr>
- [63] *N. Bohr*, Phil. Mag. 26 (1913), pp.1, 476, 857.
- [64] Bohrov model atoma, <http://en.wikipedia.org/wiki/Bohr%27s_model>
- [65] Bohrov radij, <http://en.wikipedia.org/wiki/Bohr_radius>
- [66] *Niels Bohr*: On the Constitution of Atoms and Molecules, Philosophical Magazine Series 6,
Volume 26 July 1913, p. 1-25,
<<http://dbhs.wvusd.k12.ca.us/webdocs/Chem-History/Bohr/Bohr-1913a.html>>
- [67] Načelo korespondence, <http://en.wikipedia.org/wiki/Correspondence_principle>
- [68] Rydbergova formula, <http://en.wikipedia.org/wiki/Rydberg_formula>
- [69] *Walther H. Nernst*, 1864–1941, <<http://en.wikipedia.org/wiki/Nernst>>
- [70] *W. Nernst*, Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft 4 (1916), pp.83-116.
- [71] *A.Einstein*, 1920,

Grundgedanken und Methoden der Relativitätstheorie in ihrer Entwicklung dargestellt

- [72] *Robert S. Mulliken*, 1896–1986, <http://en.wikipedia.org/wiki/Robert_Mulliken>
- [73] Lambov zamik, <http://en.wikipedia.org/wiki/Lamb_shift>
- [74] *Hans Albrecht Bethe*, 1906–2005, <http://en.wikipedia.org/wiki/Hans_Bethe>
- [75] *Louis V.P.R. de Broglie*, 1892–1987, <http://en.wikipedia.org/wiki/Louis_de_Broglie>
- [76] *Max Born*, 1882–1970, <http://en.wikipedia.org/wiki/Max_Born>
- [77] *Werner Karl Heisenberg*, 1901–1976, <<http://en.wikipedia.org/wiki/Heisenberg>>
- [78] *Pascual Jordan*, 1902–1980, <http://en.wikipedia.org/wiki/Pascual_Jordan>
- [79] *Paul A.M. Dirac*, 1902–1984, <http://en.wikipedia.org/wiki/Paul_Dirac>
- [80] Kanonična kvantizacija, <http://en.wikipedia.org/wiki/Canonical_quantization>
- [81] Diracova enačba, <http://en.wikipedia.org/wiki/Dirac_equation>
- [82] *Erwin R.J.A. Schrödinger*, 1887–1961, <http://en.wikipedia.org/wiki/Erwin_Schroedinger>
- [83] Schrödingerjeva enačba, <http://en.wikipedia.org/wiki/Schr%C3%B6dinger_equation>
- [84] Načelo nedoločenosti, <http://en.wikipedia.org/wiki/Uncertainty_principle>
- [85] Diracovo 'morje', <http://en.wikipedia.org/wiki/Dirac_sea>
- [86] *Carl D. Anderson*, 1905–1991, <http://en.wikipedia.org/wiki/Carl_D_Anderson>
- [87] Pozitron, <<http://en.wikipedia.org/wiki/Positron>>
- [88] Elektron, <<http://en.wikipedia.org/wiki/Electron>>
- [89] Elektronov spin, <http://en.wikipedia.org/wiki/Electron_spin>
- [90] *Wolfgang Ernst Pauli*, 1900–1958, <http://en.wikipedia.org/wiki/Wolfgang_Pauli>
- [91] Paulijevo izključitveno načelo, <http://en.wikipedia.org/wiki/Pauli_exclusion_principle>
- [92] Kvantna elektrodinamika, <http://en.wikipedia.org/wiki/Quantum_electrodynamics>
- [93] Nesoglasja med Bohrom in Einsteinom <http://en.wikipedia.org/wiki/Bohr-Einstein_debates>
- [94] Copenhagenska interpretacija, <http://en.wikipedia.org/wiki/Copenhagen_interpretation>
- [95] Kolaps valovne funkcije, <http://en.wikipedia.org/wiki/Wavefunction_collapse>
- [96] EPR paradoks, <http://en.wikipedia.org/wiki/EPR_paradox>
- [97] Bellova neenačba, <http://en.wikipedia.org/wiki/Bell%27s_inequality>
- [98] Interpretacija QM, <http://en.wikipedia.org/wiki/Interpretation_of_quantum_mechanics>
- [99] *Steven Weinberg*: Einstein's Mistakes, Physics Today, Nov. 2005, p31
<<http://www.physicstoday.org/vol-58/iss-11/p31.html>>
- [100] Difrakcija elektronov, <http://en.wikipedia.org/wiki/Electron_diffraction>
- [101] Nekompatibilnost kvantne mehanike in splošne relativnostne teorije
<http://en.wikipedia.org/wiki/Quantum_mechanics#Relativity_and_quantum_mechanics>
- [102] Renormalizacija, <<http://en.wikipedia.org/wiki/Renormalization>>
- [103] *Gerardus 't Hooft*, 1946–, <http://en.wikipedia.org/wiki/Gerardus_'t_Hooft>
<<http://www.phys.uu.nl/~thooft/theorist.html>>
- [104] Kvantna teorija polj, QFT, <http://en.wikipedia.org/wiki/Quantum_field_theory>
M. Hindmarsh, Relativistic Quantum Fields 2, April 2002,
<<http://www.pact.cpes.sussex.ac.uk/users/markh/Teaching/RQF2>>

- [105] *L. de Broglie*, New Perspectives in Physics, Basic Books Publishing Co., New York, 1962.
- [106] *E. Nelson*, Phys. Rev. 150 (1966), p.1079.
- [107] *T. H. Boyer*, Phys. Rev. D. 11 (1975), p.790
- [108] Davisson-Germer, <<http://en.wikipedia.org/wiki/Davisson-Germer>>
- [108] G.P. Thomson, <http://en.wikipedia.org/wiki/George_Paget_Thomson>
- [110] *L. de la Pena & A. M. Cetto*, The Quantum Dice: An Introduction to Stochastic Electrodynamics,
Chapter12, Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1996.
- [111] *B. Haisch and A. Rueda*, Phys. Lett. A, 268 (2000), p.224.
- [112] *Questions and Answers about the Origin of Inertia and the Zero-Point Field*, p.1, California Institute for Physics and Astrophysics, <<http://www.calphysics.org/questions.html>>
- [113] Klasični radij elektrona <http://en.wikipedia.org/wiki/Classical_electron_radius>
- [114] Geometrodinamika, <<http://en.wikipedia.org/wiki/Geometrodynamics>>
- [115] *John Archibald Wheeler*, 1911–2008, <http://en.wikipedia.org/wiki/John_Archibald_Wheeler>
- [116] *Richard Phillips Feynman*, 1918–1988, <http://en.wikipedia.org/wiki/Richard_Feynman>
- [117] Invariantnost in kovariantnost, <http://en.wikipedia.org/wiki/Lorentz_covariance>
- [118] Lorentzove transformacije, <http://en.wikipedia.org/wiki/Lorentz_transformation>
- [119] *Paul Charles William Davies*, 1946–, <http://en.wikipedia.org/wiki/Paul_Davies>
- [120] *William G. Unruh*, 1945–, <http://en.wikipedia.org/wiki/Bill_Unruh>
- [121] Davies–Unruhov pojav, <http://en.wikipedia.org/wiki/Unruh_effect>
- [122] *Feynman, R.P., Hibbs, A.R.*, Quantum Mechanics and Path Integrals, McGraw-Hill, 1965
- [123] *Ilya Prigogine*, 1917–2003, <<http://en.wikipedia.org/wiki/Prigogine>>
- [124] *Isabelle Stengers*, 1949, <http://en.wikipedia.org/wiki/Isabelle_Stengers>
- [125] *S.M. Barnett*, Nature, March 22, 1990, p.289.
- [126] *P.C.W. Davies*, New Scientist, pp.30-34, 3 November 2001.
- [127] *Hendrik Brugt Gerhard Casimir*, 1909–2000, <http://en.wikipedia.org/wiki/Hendrik_Casimir>
- [128] Prve izredno občutljive in zahtevne poskuse s paralelnimi ploščami je naredil *Marcus Sparnaay* v Philipsovih Laboratorijih v Eindhoven leta 1958 in dobil rezultate v skladu s Casimirovo teorijo, čeprav s precejšnjimi odstopanji. Poskuse so leta 1997 z mnogo večjo natančnostjo ponovili *Steve K. Lamoreaux* (Los Alamos National Laboratory), ter *Umar Mohideen* in *Anushree Roy* (University of California at Riverside, *U. Mohideen and A. Roy*, Phys. Rev. Lett. 81, 1998, p.4549.). Leta 2001 je skupina fizikov na Univerzi v Padovi končno potrdila teorijo z odstopanji manjšimi od 1%.
- [129] Casimirov učinek <http://en.wikipedia.org/wiki/Casimir_effect>
- [130] *P. W. Milonni, R. J. Cook, M. E. Goggin*, Physical Review A 38 (1988), p.1621.
- [131] *Pjotr Nikolaevič Lebedev* (Пётр Николаевич Лебедев), 1866–1912, <http://en.wikipedia.org/wiki/Pyotr_Nikolaevich_Lebedev>
- [132] Mikroskop na atomsko silo, AFM <http://en.wikipedia.org/wiki/Atomic_force_microscope>
- [133] Nanotehnologija, <<http://en.wikipedia.org/wiki/Nanotechnology>>
- [134] *Johannes Diderik van der Waals*, 1837–1923, <http://en.wikipedia.org/wiki/Johannes_Diderik_van_der_Waals>
- [135] van der Waalsova sila, <http://en.wikipedia.org/wiki/Van_der_Waals_force>

- [136] *W. J. Moore*, Physical Chemistry, pp. 12-13, Longmans 1961.
- [137] Tvorba parov delec-antidelec, <http://en.wikipedia.org/wiki/Pair_production>
- [138] Anihilacija, <http://en.wikipedia.org/wiki/Electron-positron_annihilation>
- [139] Virtualni delci, <http://en.wikipedia.org/wiki/Virtual_particles>
<http://en.wikipedia.org/wiki/Virtual_particles#Virtual_particles_in_Feynman_diagrams>
- [140] *K. Scharnhorst*, Phys. Lett. B, 236 (1990), p.354.
- [141] *G. Barton*, Phys. Lett. B, 237 (1990), p.559.
- [142] *S. Barnett*, Nature 344 (1990), p.289.
- [143] *J. I. Latorre, P. Pascual, R. Tarrach*, Nuclear Physics B 437 (1995), p.60-82.
- [144] Metamaterijali, <<http://en.wikipedia.org/wiki/Metamaterial>>
- [145] *Victor G. Veselago*, 1929–, <http://en.wikipedia.org/wiki/Victor_Veselago>
- [146] Načelo vzročnosti, <http://en.wikipedia.org/wiki/Causality_%28physics%29>
- [147] *George Johnstone Stoney*, 1826–1911, <http://en.wikipedia.org/wiki/George_Johnstone_Stoney>
- [148] *Joseph John "J.J." Thomson*, 1856–1940, <http://en.wikipedia.org/wiki/J._J._Thomson>
- [149] *H. E. Puthoff*, Physical Review D, 35 (1987), p.3266.
- [150] Science Editor, New Scientist, July 1987.
- [151] Kozmično mikrovalovno sevanje,
<http://en.wikipedia.org/wiki/Cosmic_microwave_background_radiation>
- [152] *Arno Allan Penzias*, 1933–, <http://en.wikipedia.org/wiki/Arno_Penzias>
- [153] *Robert Woodrow Wilson*, 1936–, <http://en.wikipedia.org/wiki/Robert_Woodrow_Wilson>
- [154] WMAP, <<http://map.gsfc.nasa.gov/>>
D.N. Spergel et al., Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Three Year Observations: Implications for Cosmology,
<http://lanl.arxiv.org/PS_cache/astro-ph/pdf/0603/0603449v2.pdf>
<http://en.wikipedia.org/wiki/Wilkinson_Microwave_Anisotropy_Probe>
- [155] *C. W. Misner, K. S. Thorne, J. A. Wheeler*, Gravitation, p.12, W. H. Freeman and Co., 1997.
- [156] *Karl Schwarzschild*, 1873–1916, <http://en.wikipedia.org/wiki/Karl_Schwarzschild>
- [157] Schwarzschildov radij, <http://en.wikipedia.org/wiki/Schwarzschild_radius>
- [158] Horizont dogajanja, <http://en.wikipedia.org/wiki/Event_horizon>
Chandrasekharjeva meja, <http://en.wikipedia.org/wiki/Chandrasekhar_limit>
- [159] 'Črna luknja', <http://en.wikipedia.org/wiki/Black_hole>
Black hole powered jet, <<http://hubblesite.org/newscenter/archive/releases/2000/20/image/a/>>
- [160] Hawking–Bekensteinovo sevanje, <http://en.wikipedia.org/wiki/Hawking_radiation>
- [161] Teorija strun, <http://en.wikipedia.org/wiki/String_theory>
Fernando Quevedo, The string-theory landscape, Physics in Action: November 2003
<<http://physicsweb.org/articles/world/16/11/3>>
Cosmic String Dynamics and Evolution
<http://www.damtp.cam.ac.uk/user/gr/public/cs_interact.html>
- [162] Teorija super-strun, <http://en.wikipedia.org/wiki/Superstring_theory>
- [163] Supergravitacija, <<http://en.wikipedia.org/wiki/Supergravity>>

- [164] M-teorija, <<http://en.wikipedia.org/wiki/M-theory>>
- [165] *B. Greene*, The Elegant Universe, W. W. Norton and Co., New York, 1999.
(v slovenskem prevodu: Čudovito Vesolje)
- [166] *B. Greene*, The Fabric of the Cosmos, Penguin Books, 2004.
(v slovenskem prevodu: Tkanina Vesolja)
- [167] *Lisa Randall*, 1962–, <http://en.wikipedia.org/wiki/Lisa_Randall>
<<http://www.physicscentral.com/explore/writers/randall.cfm>>
- [168] *Stephen William Hawking*, 1942–, <http://en.wikipedia.org/wiki/Stephen_Hawking>
- [169] *Anderson, E.*, Geometrodynamics: Spacetime or Space?
<http://www.arxiv.org/PS_cache/gr-qc/pdf/0409/0409123.pdf>
- [170] 'Mnogoverzum', paralelna vesolja, <<http://en.wikipedia.org/wiki/Multiverse>>
- [171] Millenium simulation - galaxies,
<http://en.wikiquote.org/wiki/Image:Millenium_simulation_-_galaxies.jpg>
<<http://www.mpa-garching.mpg.de/galform/millennium/>>
V. Springel, et al., Simulating the joint evolution of quasars, galaxies and their large-scale distribution, <<http://arxiv.org/abs/astro-ph/0504097>>
- [172] *Alexander Alexandrovič Fridman* (ali *Friedman*) (*Александр Александрович Фридман*), 1888–1925, <http://en.wikipedia.org/wiki/Alexander_Friedman>
- [173] Fridmanove enačbe, <http://en.wikipedia.org/wiki/Friedmann_equations>
Oblika Vesolja, <http://en.wikipedia.org/wiki/Shape_of_the_Universe>
- [174] Kozmološka konstanta, <http://en.wikipedia.org/wiki/Cosmological_constant>
Norbert Straumann, The history of the cosmological constant problem, Aug. 2002
<<http://arxiv.org/abs/gr-qc/0208027v1>>
- [175] Fizikalna kozmologija, <http://en.wikipedia.org/wiki/Physical_cosmology>
- [176] *Edwin Powell Hubble*, 1889–1953, <http://en.wikipedia.org/wiki/Edwin_Hubble>
E. Hubble, A Relation between Distance and Radial Velocity among Extra-Galactic Nebulae, (1929), Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA, Volume 15, Issue 3, pp. 168-173, <<http://www.pnas.org/cgi/reprint/15/3/168>> (PDF)
- [177] Spektralne črte, <http://en.wikipedia.org/wiki/Spectral_line>
- [178] Rdeči spektralni zamik, <<http://en.wikipedia.org/wiki/Redshift>>
- [179] Širjenje Vesolja, <http://en.wikipedia.org/wiki/Metric_expansion_of_space>
Hubbleov zakon, <http://en.wikipedia.org/wiki/Hubble_law>
- [180] *Georges Henri Joseph Édouard Lemaître*, 1894–1966,
<http://en.wikipedia.org/wiki/Georges_Lema%C3%AAtre>
- [181] *Eddington, A.*, The Expanding Universe: Astronomy's 'Great Debate', 1900–1931, Press Syndicate of the University of Cambridge in 1933.
- [182] Veliki pok, <http://en.wikipedia.org/wiki/Big_Bang>
- [183] *Frederick Hoyle*, 1915–2001, <http://en.wikipedia.org/wiki/Fred_Hoyle>
- [184] *Edward Arthur Milne*, 1896–1950, <http://en.wikipedia.org/wiki/Edward_Arthur_Milne>
- [185] Milnejev model, <http://en.wikipedia.org/wiki/Milne_model>
- [186] *Richard Chace Tolman*, 1881–1948, <http://en.wikipedia.org/wiki/Richard_Tolman>
- [187] Oscilirajoče Vesolje, <http://en.wikipedia.org/wiki/Oscillatory_universe>
- [188] Fritz Zwicky, 1898–1974, <http://en.wikipedia.org/wiki/Fritz_Zwicky>

- [189] 'Utrujena' svetloba, <http://en.wikipedia.org/wiki/Tired_light>
- [190] *Willem de Sitter*, 1872–1934, <http://en.wikipedia.org/wiki/Willem_de_Sitter>
- [191] de Sitterjev prostor, <http://en.wikipedia.org/wiki/De_Sitter_space>
- [192] *Tullio Levi-Civita*, 1873–1941, <http://en.wikipedia.org/wiki/Tullio_Levi-Civita>
- [193] *Thomas Gold*, 1920–2004, <http://en.wikipedia.org/wiki/Thomas_Gold>
- [194] *Hermann Bondi*, 1919–2005, <http://en.wikipedia.org/wiki/Hermann_Bondi>
- [195] Nespremenljivo Vesolje, <http://en.wikipedia.org/wiki/Steady_state_theory>
- [196] Kozmična inflacija ('napihovanje'), <http://en.wikipedia.org/wiki/Cosmic_inflation>
- [197] *Alan Harvey Guth*, 1947–, <http://en.wikipedia.org/wiki/Alan_Guth>
- [198] *Andrei Linde*, 1948–, <http://en.wikipedia.org/wiki/Andrei_Linde>
- [199] Lastnosti in problemi Velikega poka,
<http://en.wikipedia.org/wiki/Big_Bang#Features.2C_issues_and_problems>
- [200] *Harwit, M.*, *Astrophysical Concepts*, p.513, Springer-Verlag, New York, 1988.
- [201] *Gibson, C.H.*, Turbulence and mixing in the early universe,
Keynote Paper, International Conference on Mechanical Engineering, Dhaka, Bangladesh,
Dec.26-28, 2001., <<http://arxiv.org/abs/astro-ph/0110012>>
- [202] Mikro črne luknje, <http://en.wikipedia.org/wiki/Micro_black_hole>
- [203] *Roy Patrick Kerr*, 1934–, <http://en.wikipedia.org/wiki/Roy_Kerr>
- [204] Rotirajoče črne luknje, <http://en.wikipedia.org/wiki/Rotating_black_hole>
- [205] *C. Bizon et al*, Dynamics: Models and kinetic Methods for Nonequilibrium Many-Body Systems, (J. Karkheck, Ed.) Kluwer, Dordrecht, February 1999. <<http://arxiv.org/cond-mat/9904135v1>>, 9 April 1999.
- [206] Supermasivne črne luknje, <http://en.wikipedia.org/wiki/Supermassive_black_hole>
- [207] *D. Merritt and L. Ferrarese*, Relationship of Black Holes to Bulges,
<http://arxiv.org/PS_cache/astro-ph/pdf/0107/0107134v2.pdf>
- [208] *K. Gebhardt et al.*, M33: A Galaxy With No Supermassive Black Hole,
<http://arxiv.org/PS_cache/astro-ph/pdf/0107/0107135v2.pdf>
- [209] *R. Bean, J. Magueijo*, Could supermassive black holes be quintessential primordial black holes?,
<http://arxiv.org/PS_cache/astro-ph/pdf/0204/0204486v1.pdf>
- [210] *S. Battersby*, *New Scientist*, 1 April 2000, pp.32-36.
- [211] *V. V. Flambaum, J. C. Berengut*, Atom made from charged elementary black hole,
<http://arxiv.org/PS_cache/gr-qc/pdf/0001/0001022v1.pdf>
- [212] News Release, "Is the Universe older than expected?", European Space Agency, 10th July, 2002.
- [213] News Release, "Element reveals abundance of matter in early Universe," National Radio Astronomy Observatory, 3rd January 2002,
- [214] News Editor, "Cosmic Birth Of Precious Metals", *Astronomy*, July 2001, p.28.
- [215] *X. Fan, V. K. Narayanan, R. H. Lupton*, et al., *Astron. Jour.*, Dec. 2001,
<<http://arxiv.org/abs/astro-ph/0108063>>
- [216] *A. Provenzale*, *Ann. Rev. Fluid Mech.* 31 (1995), p.55.
- [217] *A. Bracco, P. H. Chavanis, A. Provenzale, E. A. Spiegel*, Particle Aggregation in a Turbulent Keplerian Flow, 29 October, 1999, <<http://arXiv.org/abs/astro-ph/9810336>>

- [218] *H. E. Puthoff*, Ground State of Hydrogen as a Zero-Point-Fluctuation-Determined State, *Physical Review D*, Vol.35, No.10, 15 May, 1987, <http://www.earthtech.org/publications/PRDv35_3266.pdf>
- [219] *W. G. Tifft*, *Astrophysical Journal* 211 (1977), 31.
W. G. Tifft, *Astrophysical Journal* 233 (1979), 799.
W. G. Tifft, *Astrophysical Journal* 382 (1991), 396.
W. G. Tifft, W. J. Cocke, *Astrophysical Journal* 287 (1984), 492.
- [220] *H. Arp, J. Sulentic*, *Astrophysical Journal*, 291 (1985), 88.
- [221] *R. Matthews*, *Science*, 271 (1996), 759.
- [222] *H. Arp*, *Seeing Red: Redshifts, Cosmology and Academic Science*, p.199, Apeiron, 1998.
- [223] *V. S. Troitskii*, *Astrophysics and Space Science*, 139 (1987), 389.
- [224] *A. Albrecht, J. Magueijo*, *Phys. Rev. D* 59:4 (1999), 3515.
- [225] *J. D. Barrow*, *Phys. Rev. D* 59:4 (1999), 043515-1.
- [226] *P. C. W Davies, T. M. Davis, C. H. Lineweaver*, *Nature* 418 (2002), 602.
- [227] *M. J. Drinkwater, J. K. Webb, J. D. Barrow, V. V. Flambaum*, New Limits on the Possible Variation of Physical Constants, <http://arxiv.org/PS_cache/astro-ph/pdf/9711/9711290v1.pdf>
- [228] Konstanta fine strukture, α_f , <http://en.wikipedia.org/wiki/Fine_structure_constant>
- [229] *S. Lamoreaux et al.*, *Physical Review D*, vol 69, p 121701
- [230] *E. Peik, et al.*, Laboratory Limits on Temporal Variations of Fundamental Constants: An Update, <http://arxiv.org/PS_cache/physics/pdf/0611/0611088v1.pdf>
- [231] *T. Norman, B. Setterfield*, Atomic Constants, Light, and Time, Research Report for SRI International, August 1987.
- [232] Spremenljiva hitrost svetlobe, <http://en.wikipedia.org/wiki/Variable_speed_of_light>
- [233] *Jan Hendrik Oort*, 1900–1992, <<http://en.wikipedia.org/wiki/Oort>>
- [234] *Vera Cooper Rubin*, 1928–, <http://en.wikipedia.org/wiki/Vera_Rubin>
- [235] *V. Rubin, W. K. Ford, Jr*, Rotation of the Andromeda Nebula from a Spectroscopic Survey of Emission Regions. *Astrophysical Journal* 159: 379, (1970).
- [236] *V. Rubin, W. K. Ford, Jr, N. Thonnard*, Rotational Properties of 21 Sc Galaxies with a Large Range of Luminosities and Radii from NGC 4605 (R=4kpc) to UGC 2885 (R=122kpc), *Astrophysical Journal* 238: 471, (1980).
- [237] Porazdelitev galaktične rotacije, <http://en.wikipedia.org/wiki/Rotation_curve>
- [238] Temna snov, <http://en.wikipedia.org/wiki/Dark_matter>
- [239] Gravitacijske leče, <http://en.wikipedia.org/wiki/Gravitational_lens>
- [240] Seznam zvezd z odkritimi ekstrasolarnimi planeti, <http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_stars_with_confirmed_extrasolar_planets>
- [241] Nevtrino, <<http://en.wikipedia.org/wiki/Neutrino>>
- [242] Nevtrinske oscilacije <http://en.wikipedia.org/wiki/Neutrino_oscillation>
- [243] 'Okus' v fiziki delcev, <http://en.wikipedia.org/wiki/Flavour_%28particle_physics%29>
- [244] Neutrino Mixing, (2005), <<http://pdg.lbl.gov/2005/reviews/numixrpp.pdf>>, glej en. (13.38)
- [245] CERN LEP Neutrinos, <<http://cdsweb.cern.ch/record/482962/>>
- [246] Supersimetrija, SUSY, <<http://en.wikipedia.org/wiki/Supersymmetry>>
MSSM, <http://en.wikipedia.org/wiki/Minimal_Supersymmetric_Standard_Model>

- Temna snov kot SUSY delci, <<http://www.physto.se/~edsjo/darksusy/>>
- [247] *J.I. Collar et al.*, CAST: A search for solar axions at CERN
<http://arxiv.org/PS_cache/hep-ex/pdf/0304/0304024v1.pdf>
- [248] Kršitev CP-simetrije, <http://en.wikipedia.org/wiki/CP_violation>
- [249] Kvantna kromodinamika, QCD, <http://en.wikipedia.org/wiki/Quantum_chromodynamics>
- [250] <http://en.wikipedia.org/wiki/Symmetry_in_physics>
<http://en.wikipedia.org/wiki/Gauge_symmetry>
<http://en.wikipedia.org/wiki/Unitary_group>
<http://en.wikipedia.org/wiki/Special_unitary_group>
<<http://en.wikipedia.org/wiki/SU%283%29XSU%282%29XU%281%29>>
<http://en.wikipedia.org/wiki/Spontaneous_symmetry_breaking>
- [251] *S.L. Glashow*, A Sinister Extension of the Standard Model to $SU(3) \times SU(2) \times SU(2) \times U(1)$
<http://lanl.arxiv.org/PS_cache/hep-ph/pdf/0504/0504287v1.pdf>
- [252] Standardni model osnovnih delcev, <http://en.wikipedia.org/wiki/Standard_Model>
<http://en.wikipedia.org/wiki/Standard_model_%28basic_details%29>
- [253] Izzivi Standardnemu modelu,
<http://en.wikipedia.org/wiki/Standard_model#Challenges_to_the_Standard_Model>
Nerešeni problemi v fiziki, <http://en.wikipedia.org/wiki/Unsolved_problems_in_physics>
13 things that don't make sense
<<http://www.newscientist.com/channel/space/mg18524911.600>>
J. Baez, Open Questions
<http://math.ucr.edu/home/baez/physics/General/open_questions.html>
- [254] *B.F. Riley*, A unified model of particle mass,
<<http://xxx.lanl.gov/ftp/physics/papers/0306/0306098.pdf>>
<http://en.wikipedia.org/wiki/Hierarchy_problem>
- [255] CERN LHC, <<http://public.web.cern.ch/Public/en/LHC/LHC-en.html>>
Dobrodošli v CERN, <<http://public.web.cern.ch/Public/Welcome.html>>
LHC, <<http://public.web.cern.ch/Public/en/LHC/LHC-en.html>>
CERN-LHC-vodič
<<http://cdsweb.cern.ch/record/1092437/files/CERN-Brochure-2008-001-Eng.pdf>>
Znanost-Slovar, <<http://public.web.cern.ch/Public/en/Science/Glossary-en.php>>
- [256] Graviton, <<http://en.wikipedia.org/wiki/Graviton>>
- [257] *Fang-Pei Chen*, The Lorentz and Levi-Civita Conservation Laws Prohibit the Existence of Black Holes, <<http://xxx.lanl.gov/ftp/arxiv/papers/0805/0805.2451.pdf>>
- [258] *F. I. Cooperstock and S. Tieu*, General Relativity Resolves Galactic Rotation Without Exotic Dark Matter, <http://arxiv.org/PS_cache/astro-ph/pdf/0507/0507619v1.pdf>
Carmeli, M. (2000). Derivation of the Tully-Fisher Law: Doubts About the Necessity and Existence of Halo Dark Matter, *Int. J. Theor. Phys.* 39 (5): 1397-1404
J.G. Hartnett, Spheroidal and elliptical galaxy radial velocity dispersion from Cosmological General Relativity, <http://lanl.arxiv.org/PS_cache/arxiv/pdf/0707/0707.2858v1.pdf>
S. Capozziello., V.F. Cardone., A. Troisi, Dark energy and dark matter as curvature effects,
<http://lanl.arxiv.org/PS_cache/astro-ph/pdf/0602/0602349v3.pdf>
Brans-Dickeova teorija, <http://en.wikipedia.org/wiki/Brans-Dicke_theory>

- Hongsu Kim*, Can the Brans-Dicke gravity possibly with be a theory of Dark Matter?
<http://lanl.arxiv.org/PS_cache/astro-ph/pdf/0604/0604055v2.pdf>
- Laura Mgrdichian*, Dark Energy and Dark Matter – The Results of Flawed Physics?
Copyright 2006 PhysOrg.com, <<http://www.physorg.com/news77190620.html>>
- [259] *M. Fairbairn*, CSL-1: Lensing by a Cosmic String or a Dark Matter Filament?
<http://arxiv.org/PS_cache/astro-ph/pdf/0511/0511085v2.pdf>
- [260] *Maruša Bradač*, et al.,
<http://lanl.arxiv.org/PS_cache/astro-ph/pdf/0608/0608407v1.pdf>
<http://lanl.arxiv.org/PS_cache/astro-ph/pdf/0608/0608408v1.pdf>
<http://lanl.arxiv.org/PS_cache/astro-ph/pdf/0704/0704.0261v1.pdf>
'Bullet Cluster', <http://en.wikipedia.org/wiki/Bullet_cluster>
- [261] *J.R. Brownstein, J.W. Moffat*, The Bullet Cluster 1E0657-558 evidence shows Modified Gravity in the absence of Dark Matter,
<http://www.arxiv.org/PS_cache/astro-ph/pdf/0702/0702146v1.pdf>
- [262] MOND, <http://en.wikipedia.org/wiki/Modified_Newtonian_Dynamics>
- [263] Kompaktifikacija višjih dimenzij,
<http://en.wikipedia.org/wiki/Compactification_%28physics%29>
<http://en.wikipedia.org/wiki/Kaluza-Klein_theory>
<http://en.wikipedia.org/wiki/Calabi-Yau_spaces>
- [264] *St. Schlamminger*, et al., A Measurement of Newton's Gravitational Constant
<http://arxiv.org/PS_cache/gr-qc/pdf/0609/0609027v1.pdf>
- E. Adelberger, B. Heckel, C. D. Hoyle*, Testing the gravitational inverse-square law,
PhysicsWeb Features: April 2005, <<http://physicsweb.org/articles/world/18/4/6/1>>
- [265] *J.D. Bekenstein*, Modified Gravity vs Dark Matter: Relativistic theory for MOND
<http://arxiv.org/PS_cache/astro-ph/pdf/0412/0412652v3.pdf>
- [266] COBE program, <<http://en.wikipedia.org/wiki/COBE>>
- [267] Supernove tipa Ia, <http://en.wikipedia.org/wiki/Type_Ia_supernova>
SN1A, 14.02.2008, <<http://www.nature.com/nature/journal/v451/n7180/pdf/nature06602.pdf>>
SpaceDaily,
<http://www.spacedaily.com/reports/Champagne_Supernova_Challenges_Ideas_about_How_Supernovae_Work_999.html>
- [268] Pospešeno širjenje Vesolja, <http://en.wikipedia.org/wiki/Accelerating_universe>
- [269] Standardna svetilnost (ang., 'standard candle')
<<http://www.nature.com/nature/journal/v443/n7109/abs/nature05103.html>>
<http://en.wikipedia.org/wiki/Standard_candle>
- [270] Temna energija, <http://en.wikipedia.org/wiki/Dark_energy>
<<http://www.lbl.gov/Science-Articles/Archive/dark-energy.html>>
<http://hubblesite.org/hubble_discoveries/dark_energy/>
- [271] *S. Nobbenhuis*, Categorizing Different Approaches to the Cosmological Constant Problem
<http://arxiv.org/PS_cache/gr-qc/pdf/0411/0411093v3.pdf>
- [272] *A. Albrecht*, Report of the Dark Energy Task Force,
<<http://arxiv.org/ftp/astro-ph/papers/0609/0609591.pdf>>
- [273] Energija vakuum, <http://en.wikipedia.org/wiki/Vacuum_energy>
H. Genz, Nothingness: The Science Of Empty Space,
Perseus Books, Reading, Massachusetts, 1999.
- [274] Kvintesenca, <http://en.wikipedia.org/wiki/Quintessence_%28physics%29>
- [275] Higgsov boson, <http://en.wikipedia.org/wiki/Higgs_boson>

- Peter Ware Higgs*, 1929–, <http://en.wikipedia.org/wiki/Peter_Higgs>
- [276] Kiralnost, <http://en.wikipedia.org/wiki/Chirality_%28physics%29>
Zlom kiralne simetrije, <http://en.wikipedia.org/wiki/Chiral_symmetry_breaking>
- [277] Cosmologists expose flaws in anthropic reasoning, November 28, 2006
<<http://www.physorg.com/news83924839.html>>
Antropično načelo, <http://en.wikipedia.org/wiki/Anthropic_principle>
- [278] Anomalija plovil Pioneer, <http://www.arxiv.org/PS_cache/gr-qc/pdf/0411/0411077v2.pdf>
- [279] *René Descartes*, 1596–1650, <http://en.wikipedia.org/wiki/Ren%C3%A9_Descartes>
- [280] *Tycho Brahe* (Tyge Ottesen Brahe), 1546–1601, <http://en.wikipedia.org/wiki/Tycho_Brahe>
- [281] *Johannes Kepler*, 1571–1630, <http://en.wikipedia.org/wiki/Johannes_Kepler>
- [282] Kaplerovi zakoni, <http://en.wikipedia.org/wiki/Kepler%27s_laws_of_planetary_motion>
- [283] Ernst Mach, 1838–1916, <http://en.wikipedia.org/wiki/Ernst_Mach>
- [284] Machovo načelo, <http://en.wikipedia.org/wiki/Mach%27s_principle>
- [285] Načelo enakovrednosti, <http://en.wikipedia.org/wiki/Equivalence_principle>
- [286] Kvantna gravitacija, <http://en.wikipedia.org/wiki/Quantum_gravity>
- [287] Zančna kvantna gravitacija, <http://en.wikipedia.org/wiki/Loop_quantum_gravity>
- [288] *Nikola Tesla*, <http://en.wikipedia.org/wiki/Nikola_Tesla>
- [289] *Andrej Dmitrijevič Saharov* (Андре́й Дми́триевич Сажа́ров), 1921–1989,
<http://en.wikipedia.org/wiki/Andrei_Sakharov>
- [290] *A. D. Saharov*, Dokl. Akad. Nauk SSSR, 177, 70 (1968)
- [291] Inducirana gravitacija, <http://en.wikipedia.org/wiki/Induced_gravity>
- [292] Tenzorski račun, <http://en.wikipedia.org/wiki/Tensor_calculus>
- [293] Metrični tenzor, <http://en.wikipedia.org/wiki/Metric_tensor_%28general_relativity%29>
- [294] *J. Q. Shen*, Comment on “New Experimental Limit on the Photon Rest Mass with a Rotating Torsion Balance”, <http://arxiv.org/PS_cache/physics/pdf/0305/0305090v1.pdf>
- [295] *M. A. Clayton, J. W. Moffat*, Scalar-Tensor Gravity Theory For Dynamical Light Velocity,
<http://arxiv.org/PS_cache/gr-qc/pdf/9910/9910112v2.pdf>
- [296] STVG, <http://en.wikipedia.org/wiki/Scalar-tensor-vector_gravity>
- [297] *S.M. Carroll*, et al., Particle Astrophysics and Cosmology: Cosmic Laboratories for New Physics
(Summary of the Snowmass 2001 P4 Working Group)
<http://arxiv.org/PS_cache/hep-ph/pdf/0201/0201178v1.pdf>
S.M. Carroll, The Cosmological Constant
<<http://relativity.livingreviews.org/Articles/lrr-2001-1/index.html>>
- [298] *R. Lieu, J.P.D. Mittaz*, On the absence of gravitational lensing of the cosmic microwave background, <http://arxiv.org/PS_cache/astro-ph/pdf/0412/0412276v5.pdf>
- [299] Vesoljski teleskop Hubble, <<http://hubble.nasa.gov/>>, <<http://hubblesite.org/>>
- [300] *J.G. Hartnett, F.J. Oliveira*, Testing Cosmological General Relativity against high redshift observations, <http://lanl.arxiv.org/PS_cache/astro-ph/pdf/0603/0603500v5.pdf>
- [301] *A. Diez-Tejedor, A. Feinstein*, The Homogeneous Scalar Field and the Wet Dark Sides of the Universe, <http://lanl.arxiv.org/PS_cache/gr-qc/pdf/0604/0604031v2.pdf>
- [302] *J.G. Gilson*, A Dust Universe Solution to the Dark Energy Problem,
<http://xxx.lanl.gov/PS_cache/physics/pdf/0512/0512166v2.pdf>

- J.G. Gilson*, Reconciliation of Zero-Point and Dark Energies in a Friedman Dust Universe with Einstein's Lambda, <<http://xxx.lanl.gov/pdf/0704.2998v3.pdf>>
- [303] *S. Capozziello, V.F. Cardone, A. Troisi*, Dark energy and dark matter as curvature effects, <http://lanl.arxiv.org/PS_cache/astro-ph/pdf/0602/0602349v3.pdf>
- [304] *H.E. Puthoff*, Gravity as a zero-point-fluctuation force, 1989, The American Physical Society, DOI: 10.1103/PhysRevA.39.2333, <<http://link.aps.org/abstract/PRA/v39/p2333>>
- [305] *B. Haisch, A. Rueda, H.E. Puthoff*, Inertia as a zero-point-field Lorentz force, Physical Review A, Vol. 49, No. 2, pp. 678-694 (1994). <<http://www.calphysics.org/articles/PRA94.pdf>>
- [306] *M. Ibison, B. Haisch*, Quantum and classical statistics of the electromagnetic zero-point-field, Physical Review A, 54, pp. 2737-2744, (1996). <<http://www.calphysics.org/articles/PRA96.pdf>>
- [307] *B. Haisch, A. Rueda, H.E. Puthoff*, Physics of the Zero-Point-Field: Implications for Inertia, Gravitation and Mass, Speculations in Science & Technology, Vol. 20, pp. 99-114, (1997). <<http://www.calphysics.org/articles/PRA96.pdf>>
- [308] *A. Rueda, B. Haisch*, Electromagnetic Vacuum and Inertial Mass in *G. Hunter, S. Jeffers, J.P. Vigiér* (eds.), Causality and Locality in Modern Physics, Kluwer Acad. Publ., pp. 179-186, (1998).
- [309] *B. Haisch, A. Rueda*, The Zero-Point Field and Inertia in *G. Hunter, S. Jeffers, J.P. Vigiér* (eds.), Causality and Locality in Modern Physics, Kluwer Acad. Publ., pp. 171-178, (1998). <http://arxiv.org/PS_cache/gr-qc/pdf/9908/9908057v1.pdf>
- [310] Calphysics Institute, Scientific Articles, <http://www.calphysics.org/sci_articles.html>
- [311] *John von Neumann*, <http://en.wikipedia.org/wiki/Von_Neuman#Quantum_mechanics>
- [312] Sebi adjungirani operatorji, <http://en.wikipedia.org/wiki/Self-adjoint_operator>
- [313] *David Hilbert*, 1862-1943, <http://en.wikipedia.org/wiki/David_Hilbert>
- [314] Hilbertov prostor, <http://en.wikipedia.org/wiki/Hilbert_space>
- [315] Comptonovo sipanje, <http://en.wikipedia.org/wiki/Compton_scattering>
- [316] *David Bergman*, Common Sense Science, 1990, <http://www.commonssciencescience.org/spinning_ring.html>
- Journal of Theoretics:
- V.N. Yershov*, Neutrino Masses and the Structure of the Weak Gauge Boson, <<http://www.journaloftheoretics.com/second-index.htm>>
- Ph. M. Kanarev*, Planck's Constant and the Model of the Electron <<http://www.journaloftheoretics.com/second-index.htm>>
- [317] *Qiu-Hong Hu*, The nature of the electron, 2005, <<http://arxiv.org/ftp/physics/papers/0512/0512265.pdf>>
- [318] *C. Schiller*, Does vacuum differ from matter?, 1996 <<http://www.motionmountain.org/C10-QMGR.pdf>>
- A. Pineda*, Learning about the chiral structure of the proton from the hyperfine splitting. <http://lanl.arxiv.org/PS_cache/hep-ph/pdf/0308/0308193v1.pdf>, Aug. 2003
- Journal of Theoretics, <<http://www.journaloftheoretics.com/second-index.htm>>
- D. Di Mario*, Reality of the Planck Mass
- V.N. Yershov*, Neutrino Masses and the Structure of the Weak Gauge Boson
- C.P. Phillips, J.M. Robinson*, Quantum Riddles Part I: Charge, a Case for Causality Galilean Electrodynamics, November/December 2004

- <<http://home.comcast.net/~adring/RobPhil.pdf>>
- G.P. Shpenkov, L.G. Kreidik*, Dynamic Model of Elementary Particles and Fundamental Interactions, Galilean Electrodynamics
<<http://home.comcast.net/~adring/ShpenkovKreidik.pdf>>
- [319] *H.E. Puthoff*, Casimir vacuum energy and the semiclassical electron,
<<http://arxiv.org/ftp/physics/papers/0610/0610042.pdf>>
- [320] Tvorba parov, <http://en.wikipedia.org/wiki/Pair_production>
- [321] Stojno valovanje, <http://en.wikipedia.org/wiki/Standing_wave>
On Truth & Reality: The Spherical Standing Wave Structure of Matter (WSM) in Space
<<http://www.spaceandmotion.com/Physics-String-Theory-Waves.htm>>
- [322] *O. Heaviside*, A Gravitational and Electromagnetic Analogy, Part I, The Electrician, 31, 281-282 (1893)
<<http://www.as.wvu.edu/coll03/phys/www/OJ/Heavisid.htm>>
- [323] *Ivor Catt*, 1935–, <http://en.wikipedia.org/wiki/Ivor_Catt>
Ivor Catt, Wireless World, July 1979
- [324] *E.L. Koschmieder*, The standing wave model of the mesons and baryons
<http://arxiv.org/PS_cache/physics/pdf/0211/0211100v1.pdf>
E.L. Koschmieder, The spin of the mesons and baryons
<http://arxiv.org/PS_cache/physics/pdf/0301/0301060v3.pdf>
E.L. Koschmieder, Theory of the Elementary Particles
<http://arxiv.org/PS_cache/physics/pdf/0804/0804.4848v2.pdf>
- [325] Transmisijnska linija, <http://en.wikipedia.org/wiki/Transmission_line>
- [326] Morseova koda, <http://en.wikipedia.org/wiki/Morse_code>
- [327] *Harry Nyquist*, 1889–1976, <http://en.wikipedia.org/wiki/Harry_Nyquist>
- [328] Elektronske (vacuumske) cevi, <http://en.wikipedia.org/wiki/Vacuum_tube>
- [329] Supraprevodnost, <<http://en.wikipedia.org/wiki/Superconductivity>>
- [330] Cooperovi pari, <http://en.wikipedia.org/wiki/Cooper_pair>
- [331] Bosoni, <<http://en.wikipedia.org/wiki/Boson>>
- [332] Fermioni, <<http://en.wikipedia.org/wiki/Fermion>>
- [333] Meissnerjev pojav, <http://en.wikipedia.org/wiki/Meissner_effect>
- [334] LASER, MASER <<http://en.wikipedia.org/wiki/LASER>>
- [335] Energijski tok, <http://en.wikipedia.org/wiki/Energy_current>
- [336] Drudeov model, <http://en.wikipedia.org/wiki/Drude_model>
- [337] Lorentzova sila, <http://en.wikipedia.org/wiki/Abraham-Lorentz_force>
- [338] Elektromagnetno polje, <http://en.wikipedia.org/wiki/Electromagnetic_field>
- [339] Ohmov zakon, <http://en.wikipedia.org/wiki/Ohm%27s_law>
- [340] *J. Mlakar*, Elektromagnetno valovanje, Založba FER, ISBN 86-7739-100-2, 1995.
- [341] Poyntingov vektor, <http://en.wikipedia.org/wiki/Poynting_vector>
- [342] Spin (v fiziki), <http://en.wikipedia.org/wiki/Spin_%28physics%29>
- [343] *A. Gsponer*, What is spin?, <http://arxiv.org/PS_cache/physics/pdf/0308/0308027v3.pdf>
- [344] *Charles Augustin de Coulomb*, 1736–1806,
<http://en.wikipedia.org/wiki/Charles-Augustin_de_Coulomb>

- [345] Precesija perihela, <http://en.wikipedia.org/wiki/General_Relativity#Precession_of_apsides>
- [346] *Arthur Stanley Eddington*, <http://en.wikipedia.org/wiki/Arthur_Stanley_Eddington>
- [347] Sončni mrk 1919.,
<http://en.wikipedia.org/wiki/Predictive_power#Relativity_and_the_1919_eclipse>
- [348] *A. Einstein*, The General Theory of Relativity,
Chapter 22 - A Few Inferences from the General Principle of Relativity:
“In the second place our result shows that, according to the general theory of relativity, the law of the constancy of the velocity of light in vacuo, which constitutes one of the two fundamental assumptions in the special theory of relativity and to which we have already frequently referred, cannot claim any unlimited validity. A curvature of rays of light can only take place when the velocity of propagation of light varies with position. Now we might think that as a consequence of this, the special theory of relativity and with it the whole theory of relativity would be laid in the dust. But in reality this is not the case. We can only conclude that the special theory of relativity cannot claim an unlimited domain of validity ; its results hold only so long as we are able to disregard the influences of gravitational fields on the phenomena (e.g. of light).”
- [349] Shapirova časovna zakasnitev, <http://en.wikipedia.org/wiki/Shapiro_delay>
Irwin I. Shapiro, <http://en.wikipedia.org/wiki/Irwin_I._Shapiro>
I.I. Shapiro, Fourth Test of General Relativity, Physical Review Letters 13: 789-791, Dec 1964
- [350] *Georg Friedrich Bernhard Riemann*, 1826–1866,
<http://en.wikipedia.org/wiki/Bernhard_Riemann>
<http://en.wikipedia.org/wiki/Riemannian_manifold>
- [351] *H.E. Puthoff*, Polarizable-Vacuum (PV) representation of general relativity,
<<http://xxx.lanl.gov/ftp/gr-qc/papers/9909/9909037.pdf>>
Poarizabilnost vacuuma, <http://en.wikipedia.org/wiki/Vacuum_polarization>
- [352] *M. Ibison*, An Investigation of the Polarizable Vacuum Cosmology
<http://lanl.arxiv.org/PS_cache/astro-ph/pdf/0302/0302273v3.pdf>
- [353] *H.E. Puthoff, C. Maccone, E.W. Davis*,
Levi-Civita Effect in the polarizable vacuum (PV) representation of general relativity,
<<http://xxx.lanl.gov/ftp/physics/papers/0403/0403064.pdf>>
- [354] *J.X. Zheng-Johansson, P-I. Johansson, R. Lundin*,
Depolarization Radiation Force. Its Consideration as the Cause of Gravity,
<http://xxx.lanl.gov/PS_cache/physics/pdf/0411/0411245v3.pdf>
- [355] *J. Levy*, Aether Theory Clock Retardation vs. Special Relativity Time Dilation,
<<http://arxiv.org/ftp/physics/papers/0611/0611077.pdf>>
- [356] *H.E. Puthoff*, Ground state of hydrogen as a zero-point-fluctuation-determined state,
Physical Review D, Vol. 35, No. 10, pp. 3266-3269 (1987).
<http://www.calphysics.org/articles/puthoff_Hyd87.pdf>
Received 22 December 1986
We show here that, within the stochastic electrodynamic formulation and at the level of Bohr theory, the ground state of the hydrogen atom can be precisely defined as resulting from a dynamic equilibrium between radiation emitted due to acceleration of the electron in its ground-state orbit and radiation absorbed from zero-point fluctuations of the background vacuum electromagnetic field, thereby resolving the issue of radiative collapse of the Bohr atom.
©1987 The American Physical Society
URL: <<http://link.aps.org/abstract/PRD/v35/p3266>>
DOI: 10.1103/PhysRevD.35.3266
- [357] *A. Rueda, B. Haisch*, Inertia as reaction of the vacuum to accelerated motion,
<http://arxiv.org/PS_cache/physics/pdf/9802/9802031v1.pdf>
G.B. Sidharth, ZPF, Zitterbewegung and Inertial Mass

- <http://xxx.lanl.gov/PS_cache/arxiv/pdf/0804/0804.1984v1.pdf>
G. Modanese, Zero-point field induced mass vs. QED mass renormalization
 <<http://arxiv.org/abs/hep-th/0011250v1>>
- [358] Kvarki, <<http://en.wikipedia.org/wiki/Quarks>>
- [359] Warp Drive, <<http://antwarp.gsfc.nasa.gov/apod/ap061217.html>>
 <<http://www.nasa.gov/centers/glenn/research/warp/possible.html#vac>>
- [360] NASA Breakthrough Propulsion Physics website, <<http://www.lerc.nasa.gov/WWW/bpp/>>.
- [361] *D. Hestenes*, Reading the Electron Clock,
 <http://lanl.arxiv.org/PS_cache/arxiv/pdf/0802/0802.3227v1.pdf>
- [362] *R. Van Nieuwenhove*, Vacuum Modified Gravity as an explanation for flat galaxy rotation curves,
 <arXiv:0712.1110 [physics.gen-ph]>, Dec. 2007
- [363] *George Ellis*, Patchy Solutions, *Nature*, Vol. 452, March 13, 2008, pp.158–161
- [364] Okamovo rezilo, <http://en.wikipedia.org/wiki/Occam's_razor>
- [365] *Wilhelm Conrad Röntgen*, 1845–1923,
 <http://en.wikipedia.org/wiki/Wilhelm_Conrad_R%C3%B6ntgen>
- [366] Katodni žarki, <http://en.wikipedia.org/wiki/Cathode_ray>
- [367] X-žarki, <<http://en.wikipedia.org/wiki/X-rays>>
- [368] SLAC, <http://en.wikipedia.org/wiki/Stanford_Linear_Accelerator_Center>
- [369] LEP, <<http://en.wikipedia.org/wiki/LEP>>
- [370] RHIC, <<http://en.wikipedia.org/wiki/RHIC>>
- [371] Tevatron, <<http://en.wikipedia.org/wiki/Tevatron>>
- [372] Institut Jožef Stefan, Oddelek za eksperimentalno fiziko osnovnih delcev (F-9)
 <<http://www.ijs.si/ijsw/F9>>, <<http://www-f9.ijs.si/webgui/>>
- [373] KEKB Belle experiment, <http://en.wikipedia.org/wiki/Belle_experiment>
- [374] DESY, <<http://en.wikipedia.org/wiki/DESY>>
 HERA, <<http://en.wikipedia.org/wiki/HERA>>
- [375] Semiconductor Tracer, SCT, <http://atlas.ch/inner_detector2.html>
- [376] ATLAS, <<http://atlas.ch/>>
- [377] *P. Renton*, Has the Higgs boson been discovered?,
Nature, Vol.428, 11 March 204, pp.141–144.
- [378] Technicolor, <http://en.wikipedia.org/wiki/Technicolor_%28physics%29>
- [379] Atomska ura, <http://en.wikipedia.org/wiki/Atomic_clock>
- [380] Globalni položajni sistem, <http://en.wikipedia.org/wiki/Global_Positioning_System>
- [381] Heraklit iz Efeza (gr., *Ἡρακλείτος ὁ Εφεσῖος*) cca. 535–475 p.n.š.
 <<http://en.wikipedia.org/wiki/Heraclitus>>
 <http://en.wikipedia.org/wiki/Panta_rhei>
- [382] Platon (gr. *Πλάτων*), 424/423–348/347p.n.š., <<http://en.wikipedia.org/wiki/Plato>>
- [383] *Jean le Rond d'Alembert*, 1717–1783, <<http://en.wikipedia.org/wiki/D%27Alembert>>
- [384] *Denis Diderot*, 1713–1784, <http://en.wikipedia.org/wiki/Denis_Diderot>
- [385] Wheeler–De Wittova enačba, <http://en.wikipedia.org/wiki/Wheeler-DeWitt_equation>
- [386] *Julian Barbour*, The End of Time: The Next Revolution in Physics,

Oxford University Press, 2000, ISBN 0-19-511729-8

- [387] Imaginarni čas, <http://en.wikipedia.org/wiki/Imaginary_time>
- [388] *Leonhard Paul Euler*, 1707–1783, <<http://en.wikipedia.org/wiki/Euler>>
- [389] CPT-simetrija, <http://en.wikipedia.org/wiki/CPT_symmetry>
- [390] Entropija, <<http://en.wikipedia.org/wiki/Entropy>>
- [391] *Hermann Minkowski*, 1864–1909, <http://en.wikipedia.org/wiki/Hermann_Minkowski>
- [392] Pitagora iz Samosa (gr. *Πυθαγόρας*), 580/572–500/490 p.n.š.,
<<http://en.wikipedia.org/wiki/Pythagoras>>
<http://en.wikipedia.org/wiki/Pythagorean_theorem>
- [393] *H.Y. Cui*, A defect of the electromagnetism as a hidden variable for quantum mechanics
<http://xxx.lanl.gov/PS_cache/physics/pdf/0603/0603091.pdf>
- [394] *S.M. Hitchcock*, Time and Information: The Origins of 'Time' from Information Flow In Complex Systems, <http://lanl.arxiv.org/PS_cache/quant-ph/pdf/0111/0111025v2.pdf>
- [395] *Lorenzo Romano Amedeo Carlo Avogadro*, 1776–1856,
<http://en.wikipedia.org/wiki/Amedeo_Avogadro>
- [396] Avogadrovo število, <http://en.wikipedia.org/wiki/Avogadro%27s_constant>
- [397] *Perpetuum mobile*, nenehno gibanje, <http://en.wikipedia.org/wiki/Perpetual_motion>
- [398] Seznam Teslinih patentov, <http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_Tesla_patents>
U.S. Patent 0,645,576: System of Transmission of Electrical Energy
U.S. Patent 0,649,621: Apparatus for Transmission of Electrical Energy
Patente lahko poiščete neposredno pri US Patent Office <<http://www.uspto.gov/>>, ali s pomočjo prostih iskalnikov kot so <<http://www.freepatentsonline.com/>>, ali <<http://www.pat2pdf.org/>>
Brezžični prenos energije, <http://en.wikipedia.org/wiki/Wireless_energy_transmission>
- [399] Schummanova resonanca, <http://en.wikipedia.org/wiki/Schumann_resonance>
- [400] *Aurora borealis*, <http://en.wikipedia.org/wiki/Aurora_borealis>
- [401] Magnetne nevihte, <http://en.wikipedia.org/wiki/Geomagnetic_storm>
- [402] Longitudinalni val, <http://en.wikipedia.org/wiki/Longitudinal_wave>
- [403] *C. Monstein, J. P. Wesley*, Observation of scalar longitudinal electrodynamic waves
Europhysics Letters, 59 (4), pp. 514–520 (Aug.15, 2002)
- [404] *J. Franklin*, The nature of electromagnetic energy
<http://arxiv.org/PS_cache/gen-ph/pdf/0707/0707.3421v1.pdf>
- [405] *A. D. Helfer*, Do black holes radiate?
<http://arxiv.org/PS_cache/gr-qc/pdf/0304/0304042v1.pdf>
- [406] *E.W. Davis, V.L. Teofilo, B. Haisch, H.E. Puthoff, L.J. Nickisch, A. Rueda, and D.C. Cole*,
Review of Experimental Concepts for Studying the Quantum Vacuum Field
<http://www.calphysics.org/articles/Davis_STAIF06.pdf>

Nekaj zanimivih dodatkov:

Event-Symmetric Space-Time, <<http://www.weburbia.com/press/html/gframe.htm>>

R.Mills, Atomic Physics, Part I, <<http://www.blacklightpower.com/theory/theory.shtml>>

Relativity visualized, Space Time Travel, <<http://www.spacetime travel.org/>>

Zero-Point Energy Utilization, <<http://users.erols.com/iri/ZPENERGY.html>>

ZPE News Portal, <<http://www.zpenergy.com/>>

J.F. Gunion, H.E. Haber, G. Kane, S. Dawson, The Higgs Hunter's Guide,
Perseus Publ., Cambridge, Massachusetts, ISBN: 0-7382-0305-X, 1990-2000

T. Morii, C.S. Lim, S.N. Mukherjee, The Physics of the Standard Model and Beyond
World Scientific Publ. Co., 2004, ISBN: 981-02-4571-8

P.Coles, F. Lucchin, Cosmology: The Origin and Evolution of Cosmic Structure
J. Wiley, 2002, ISBN: 0-471-48909-3

Lee Smolin's Home Page <<http://www.leesmolin.com/>>

L.Smolin, The Trouble with Physics <<http://www.thetroublewithphysics.com/>>

ESA, *Planck*, <<http://www.rssd.esa.int/index.php?project=Planck>>

<http://www.rssd.esa.int/SA/PLANCK/docs/Bluebook-ESA-SCI%282005%291_V2.pdf>.

