

Prostor in čas - argumenti za drugačno paradigmo

Erik Margan

(Oddelek za eksperimentalno fiziko osnovnih delcev, Institut Jožef Stefan)

Povzetek

Zdi se mi potrebno zagovarjati idejo, da takoimenovani "prazen prostor" sploh ni prazen, pač pa se obnaša kot energijsko bogat medij, ki ima natančno določene fizikalne lastnosti, le te pa so posledica naključnih kvantnih fluktuacij v volumski gostoti vsebovane energije. Dosledna analiza takega modela nas pripelje do sklepa, da so zakonitosti znane iz Splošne teorije relativnosti neposredna posledica sprememb v pogostosti kvantnih fluktuacij. V tem modelu osnovni delci niso od prostora ločeni objekti, temveč so geometrijsko lokalizirane ekscitacije energije prostora v ravnovesju z nelokalizirano energijo. Čas pa sploh ne obstaja, vsaj ne kot fizikalna dimenzija. Trudil sem se matematični formalizem obdržati na najnižem minimumu, podrobnejše analize pa so podane v virih.

Uvod v "nove" ideje

Ideje, ki jih bom predstavil (beseda "pojasnil" bi bila vsekakor preambiciozna v tem okviru) niso nove, izvirajo iz različnih obdobij v teku XX stoletja, z začetkom okoli leta 1898 z odkritjem elektrona (J.J. Thomson) [1], delca, ki tvori atomske orbitale. Spoznali smo, da je atom, do tedaj navidezno "trdna in nedeljiva snov" (Demokritov *ατομος* pomeni *nedeljiv*), v resnici le veliko praznega prostora, razen zelo majhnega jedra in različnega števila še manjših elektronov v orbitalah okoli jedra. A ni ostalo le pri tem, takoj so se pojavile še bolj drzne zamisli, da tudi ti "osnovni delci" snovi dejansko niso nič drugega kot v nekakšno zanko ujeta energija. Najbolj značilen tovrstni pogled je podal Henri Poincaré v članku *La Fin de la Matière* (*Konec snovi*, Athenæum, 1906), [2], ki še danes deluje sveže in vizionarsko.

Pred tem in kasneje je bilo še precej podobnih pogledov, ki so jih prispevala slavna imena, ki jih sicer povezujemo bolj s Standardno teorijo, kot so W. Thomson (Lord Kelvin), M. Planck, H. Lorentz, A. Einstein, O. Stern, W.H. Nernst, E. Schrödinger, W. Heisenberg, P.A.M. Dirac, L. de Broglie, D.J. Bohm, J. Schwinger, W. Lamb, A. Saharov, R.P. Feynman, A.H. Compton, J.A. Wheeler, B. de Witt, P. Davies, W. Unruh, H.B.G. Casimir, pa tudi mnoga druga manj znana imena, predvsem T.W. Marshall, E. Nelson, T.H. Boyer, in v novejših časih M. Ibison, B. Haisch, A. Rueda, H. Puthoff, L. de la Peña, A.M. Cetto, in drugi.

Navkljub večji ali manjši podpori tako zvenceh imen se te nove (nove?) ideje nekako niso prijele in imajo še danes pridih alternative (v slabšem pomenu). Po besedah Erwina Schrödingerja, očeta valovne mehanike, je vedno lažje premišljevati in računati z delci, kot z valovanji.

In kako se glasi ta novi fizikalni *manifesto*? V nekaj kratkih stavkih bi ga lahko povzeli takole:

- Najprej, takoimenovani "prazen prostor" (*vacuum* [vakuum], prostor brez snovi) dejansko sploh ni prazen, pač pa poln energije. Za vsako energijo, tudi za energijo vakuuma, velja Heisenbergovo Načelo nedoločenosti in kvantne fluktuacije energijske gostote, posledica katerih pa je nenehno nastajanje kratkoživih parov delec-antidelec, ki se takoj spet "anihilirajo" in s tem povrnejo prostoru energijo iz katere so nastali. Na kvantni ravni prazen prostor dobesedno vre.
- Nadalje, osnovni delci sploh niso "snov" v običajnem pomenu (fizike biljardnih kroglic), pač pa gre za valovanja ujeta v lastno "past", stabilnost katere zagotavlja ravno omenjena energija vakuuma s svojo visoko prostorsko gostoto in visokim efektivnim pritiskom. Prav tako fotoni (svetlobni kvanti) niso ne delci, ne energijska nihanja v prostoru, temveč nihanja same gostote energije prostora.
- Posledično so tudi elektromagnetne lastnosti prostora zgolj posledica lokalne nehomogenosti vakuumskih kvantnih fluktuacij. Tudi znamenito relativistično ukrivljenost *prostorčasa* (Riemann-Einsteinovo geometrijo) je mogoče tolmačiti kot nehomogenost gostote energije v sicer Evklidskem (ravnem) prostoru; ob prisotnosti snovi pa se gostota energije lokalno spremeni, kar končno rezultira v gravitaciji in ukrivljanju svetlobne poti v bližini velike mase snovi.
- In končno, "čas" dejansko sploh ne obstaja, vsaj ne kot fizikalna dimenzija, temveč je "potek časa" le navidezna posledica po eni strani omejene propagacijske hitrosti svetlobe (in energije na sploh, ter ob tem tudi vsakršne izmenjave informacij) v energijsko gostem prostoru, po drugi strani pa človeške zmožnosti zaznavanja, pomnjenja in sprotne primerjanja dogodkov. Takoimenovana "časovna puščica" (enosmerni potek časa iz preteklosti v prihodnost) pa je posledica temeljne neponovljivosti dogodkov na kvantni ravni zaradi naključnih kvantnih fluktuacij v energiji prostora.

Še kratko pojasnilo: v nadaljevanju bom občasno uporabil besedo *prostorčas*, ki naj vedno pomeni štirirazsežno relativistično območje Minkowskega, kjer je četrta razsežnost geometrizirani čas, *ict*, torej čas pomnožen s svetlobno hitrostjo, kar daje dolžino, ki jo prepotuje svetloba v času t , ter pomnožen z imaginarno enoto $i = \sqrt{-1}$, kar to os zavrti za 90° glede na ostale tri osi. Besedi "prostor" in "čas" imata običajni pomen.

Znanost kot umetnost modeliranja

Bralci, ki jim fizika ni stroka, a so že slišali za Kvantno mehaniko in Teorijo relativnosti, verjetno vedo, da te teorije opisujejo pogoje v katerih naše vsakdanje izkušnje niso več uporabne pri zaznavi, analizi, ali tolmačenju pojavov. Zato je treba zanesti se na premišljeno zastavljene eksperimente in na osnovi njihovih rezultatov izpeljane matematično-fizikalne zakonitosti. Tako smo se v preteklem stoletju večkrat znašli v zadregi, ali naj se odpovemo naravni potrebi po intuitivnem razumevanju problemov, ali pa naj nenavadnosti eksperimentalnih rezultatov raje pripišemo še neodkritim pojavom in morebitnim novim fizikalnim zakonom. V obeh primerih bi bili prisiljeni načrtno razvijati povsem drugačno dožemanje fizike in imeti pričakovanja drugačna od običajnih, hkrati pa bi morali postaviti temeljna teoretična izhodišča povsem na novo.

V Splošni teoriji relativnosti nam težavo povzročajo visoke hitrosti in gravitacijska polja, ker spremenijo metriko *prostorčasa*. Če si *prostorčas* predstavljamo kot nekakšno štirirazsežno mrežo, potem prisotnost snovi povzroči popačenje siceršnje enakomerne oddaljenosti vozlišč v tej mreži; prav tako gibanje pri visoki hitrosti povzroča popačeno zaznavanje te mreže.

V Kvantni mehaniki pa se zadeve zapletejo še bolj zaradi težav s samim zaznavanjem osnovnih gradnikov narave: zaznava kvantnih lastnosti zahteva količino energije primerljivo s količino potrebno za spremembo teh lastnosti; posledično se lastnosti ob zaznavi praviloma spremenijo, kar povzroča nezmožnost natančnega določanja izidov eksperimentov in nas sili v statistično obravnavo rezultatov.

Na hitro bomo preleteli temeljne izhodiščne predpostavke na katerih sloni znanstvena dejavnost, obenem pa bomo pregledali okvirne razsežnosti naših dosedanjih spoznanj, ter pripravili "teren" za širše razumevanje problemov s katerimi se bomo spoprijeli v nadaljevanju.

Naše zaznavanje sveta temelji na naših čutilih, ki zaradi svoje zgradbe imajo določene omejitve, tako glede zvrsti pojavov, kot tudi njihovih razsežnosti in velikosti energijske izmenjave. Zaznave naših čutil dodatno obdelujemo, jih shranjujemo v spomin in prikličemo iz spomina, primerjamo in razvrščamo, nato pa na teh osnovah skušamo vzpostaviti določen red, odkriti pravilnosti in zakonitosti. To nam pomaga razumeti pojave in dogodke, jih prepoznavati, jih tolmačiti v luči že znanih pojavov, ter celo razviti pričakovanja o njihovem poteku v prihodnosti. Ob znani ponovljivosti in zanesljivosti napovedi se lahko pojavom ali dogodkom, ki nam predstavljajo določeno grožnjo in nevarnost bodisi izognemo, bodisi jih z ustrezno prilagojeno aktivnostjo preprečimo. Te naše lastnosti predstavljajo določene evolucijske prednosti, zato so se postopoma razvile v izredno kompleksen in občutljiv sistem.

Čeprav nam naša čutila omogočajo dokaj natančno neposredno primerjavo pojavov, je njihova absolutna natančnost zaznave razmeroma slaba. Poleg tega pa je ponovljivost zaznav močno odvisna od drugih okoliščin, ali motečih objektivnih in še bolj subjektivnih dejavnikov. Da bi se temu izognili smo iznašli številne merilne instrumente: ti lahko prenesejo veliko večje obremenitve od naših čutil, njihov odziv je ponovljiv in niso preveč občutljivi na spremembe drugih okoliščin ali dejavnikov (nadležni znajo biti zlasti temperaturni raztezki, vendar načeloma vsaka izmenjava energije lahko pripelje do merilne napake). Poleg tega pa so merilni instrumenti večinoma prirejani sledenju spremembam merilnih količin po linearni zakonitosti, torej da dvakratna sprememba merjene količine ustreza dvakratni vrednosti, ki jo pokaže instrument, seveda znotraj kar se da majhne merilne napake, ki smo jo še pripravljene dopuščati. Denimo soseda, ki si delita neko zemljišče se najbrž ne bosta razburjala zaradi 10 cm velike napake v določanju meje, a včasih že 50 cm razlike lahko zaneti spor. In peku ne bomo zamerili, če se njegovi kruhki med seboj razlikujejo za nekaj gramov, a če nam pri kilogramu odščipne 100 gramov, pa že pokličemo tržno inšpekcijo (nekoč bi ga dali "rakom žvižgat!").

Izkušnje z neposredno zaznavo znanih fizikalnih količin nam včasih posredno nakazujejo obstoj drugih količin, ki jih naša čutila ne morejo neposredno zaznati, niti ob uporabi preprostejših pomagal, kot so merilne palice ali uteži. Denimo, na električni tok

smo zelo občutljivi, na magnetna polja pa ne. In nekatere močne strupe ne moremo zaznati, ker so brez okusa in vonja, na primer ogljikov monoksid, CO. Radioaktivno sevanje je tudi en tak pojav, ki ga ne moremo začutiti neposredno niti takrat, ko nam že hudo poškoduje telo.

Mimogrede: življenje za Zemlji je vedno bilo izpostavljeno določeni količini naravnega ionizirajočega sevanja (torej energijsko dovolj izdatnega, da lahko pretrga kemične vezi bioloških molekul). To je s časoma pripeljalo do razvoja bioloških procesov, ki genetske poškodbe bodisi popravljajo, bodisi ob delitvi celic in razmnoževanju preprečujejo prenos škodljivih sprememb naprej na naslednjo generacijo, če je treba tudi z apoptozo (programiranim odmiranjem poškodovanih celic). Le manjše funkcionalne napake se tovrstni kontroli izognejo in spremembe lahko propagirajo v naslednje generacije. To po eni strani omogoča mutacije, ki potem pripeljejo do razvoja novih lastnosti organizmov in boljši prilagodljivosti življenjskim pogojem, po drugi pa v določenem odstotku lahko pripelje do gensko pogojenih bolezni, kot so nekatere avtoimune bolezni, ali rak (značilnost katerega je nenadzorovano razmnoževanje sicer normalno delujočih celic). Ocenjuje se, da na 1kg teže organizma dnevno prihaja med 30 in 100 milijonov poškodb genetskega materiala. Te poškodbe so posledica delno celičnega metabolizma, delno dejavnosti bioloških mikroorganizmov (virusi, bakterije), delno pa naravnega radioaktivnega sevanja. Navkljub tako velikemu številu poškodb je verjetnost, da bomo do šestdesetega leta starosti zboleli za eno od mnogih vrst raka manjša od 1%. S starostjo, ko učinkovitost večine bioloških procesov in s tem tudi korekcijskih procesov peha, se ta verjetnost seveda poveča. Vendar z neposrednim merjenjem ravni radioaktivnosti ne moremo z gotovostjo napovedati stopnjo njene škodljivosti za vsak posamezni primer povečanega obsevanja, lahko napovemo zgolj statistično kakšna bo škoda v večini primerov in v kakšnem odstotku primerov pride do razvoja tumorja. To pa zato, ker se merilni instrumenti funkcionalno razlikujejo od bioloških organizmov in je izmerjene vrednosti potrebno dodatno izkustveno ovrednotiti in interpretirati.

Fenomen, ki ga tudi precej slabo neposredno zaznavamo, a ga iz praktičnih razlogov pogosto želimo poznati precej natančno, je seveda čas. Na splošno beseda "merjenje" pomeni primerjavo neznane ali spremenljive merilne količine z neko dogovorno izbrano, dobro določeno in nespremenljivo količino (ali vsaj količino, ki se ob spremembi merilnih okoliščin, ali v daljšem obdobju bistveno ne spreminja). Tako je pri vseh fizikalnih količinah - razen pri času! Poteka časa ne moremo meriti neposredno. Največ kar lahko naredimo je, da za primerjavo uporabimo nek naravni pojav, ki se ponavlja z razmeroma stabilno periodo, za kar smo se prepričali na več različnih in med seboj neodvisnih načinov. Tempo današnjega življenja nam narekuje poznavanje standardno umerjenega časa s kar se da majhnim odstopanjem; časovna koordinata je (poleg krajevnih koordinat, določenih relativno glede na znane objekte) nujna za zadosti visoko verjetnost srečanja z osebami s katerimi smo domenjeni. Poleg tega je za mnoge procese, denimo termično obdelavo hrane, ključno poznavanje in nadzorovanje njihovega trajanja. Zato je danes ura najbolj množičen merilni instrument. Vendar iz izkušenj vemo, da kadar imamo na vpogled dva ali več urnih mehanizmov, ne vemo več koliko je ura. Zahteve po natančnosti pa so takšne, da že odstopanja za nekaj sekund na dan lahko povzročijo slabo voljo, pač zaradi nezanesljivosti in potrebe po nenehnem umerjanju

(kalibraciji) s standardom. Še posebej, če smo za uro odšteli nesorazmerno veliko denarja in želimo, da ta poleg funkcije nakita ima tudi uporabno vrednost!

Za tolažbo naj povem, da smo znanstveniki vedno v takem položaju: vse naše merilne instrumente moramo redno preverjati in po potrebi kalibrirati, če naj se na merilne rezultate lahko zanesemo. V povprečju gre vsaj tretjina delovnega časa na preverjanje ustreznosti merilnih metod, izločanje in odpravo motenj iz okolice in tudi znotraj merilnih naprav, primerjanje s standardnimi merilnimi količinami, ter preverjanje algoritmov za analizo merilnih rezultatov. To pa še zlasti velja pri dražjih merilnih napravah, ker od njih pričakujemo tudi večjo natančnost. Naj gre za navadni laboratorijski voltmeter, ali pa za Veliki hadronski trkalnik v ženevskem podzemlju, se pogostim kalibracijskim postopkom ne moremo in tudi nočemo izogniti.

Vendar samo umerjanje ni dovolj. Včasih gre za pojave na sami meji zaznavanja in se je treba vprašati, ali je tovrstne pojave sploh možno izmeriti z zadostno zanesljivostjo, da o njih kaj rečemo z določeno gotovostjo. Predvsem je treba zajete podatke natančno pregledati in izločiti vse morebitne primere, ko nismo sigurni ali gre za zaznavo podobnih, vendar ne pravih iskanih pojavov ("*false positive*"), prav tako pa se moramo prepričati, da nismo s prestrogimi kriteriji izgubili morebitne prave pojave, ki pa zaradi kakšne malenkosti ne sovpadajo povsem s pričakovanji ("*false negative*"). Vprašati se je treba tudi, ali smo v okviru pričakovanj na podlagi fizikalnih procesov uspeli zbrane podatke analizirati s statistično značilno gotovostjo.

Tu smo tudi že blizu čisto filozofskih vprašanj o sami znanosti kot racionalni dejavnosti, o naših zmožnostih zaznavanja, razumevanja in interpretacije zaznanega v naravi, ali v laboratorijskih pogojih. Pogosto smo tudi v položaju, da se glede nekega pojava ali družine pojavov moramo opredeliti, čeprav nam primanjkuje izmerjenih podatkov, ker merilna tehnologija še ni na ravni, ki bi omogočala ustrezen zajem manjkajočih podatkov.

Teoretiki pa seveda niso pripravljeni čakati na napredek tehnologije, plačani pa so zato, da najdejo odgovore na pereča vprašanja. Zato se zatekajo bodisi izločanju posameznih merilnih območij iz katerih že imajo podatke in tako omejujejo eksperimentalno in teoretično iskanje možnih še neznanih pojavov, bodisi se zatečejo "učnemu ugibanju", procesu v katerem postavijo verjetne hipoteze in v njihovi luči analizirajo, ali in v kolikšni meri predlagane teoretične rešitve lahko reproducirajo že znane pojave in procese. Na ta način zagotovijo večjo verjetnost veljavnosti hipoteze, nakar razširijo teoretično podlago na še neznan ali iskana področja, ter skušajo napovedati okvir novih dognanj in morda predlagati nove poskuse s pomočjo katerih bi bilo mogoče hipotezo preveriti.

Razumeti je treba, da v teoretičnem smislu nikoli nimamo opravka z naravo samo, pač pa vedno le z njenim bolj ali manj **poenostavljenim modelom**. To pa zato, ker so naravni procesi vedno zapleteni in na njihov izid hkrati vplivajo številni dejavniki, mi pa bi radi razčlenili odvisnosti za vsak posamezni dejavnik. Zato si prizadevamo vse ostale dejavnike na tak ali drugačen način izločiti, bodisi tako da jih med merjenjem vzdržujemo pri eni in isti nespremenljivi vrednosti, bodisi da njihov vpliv posebej izmerimo in od rezultatov odštejemo. Poleg tega pa seveda želimo do novih spoznanj priti v nekem končno dolgem obdobju in z omejenimi sredstvi, ki so nam na voljo (pa ne

zgolj zaradi nenehnega zmanjševanja finančnih sredstev, ki jih država namenja raziskavam). Zato je smiselno fizikalni model poenostaviti do te mere, da ga lahko še vedno ustrezno kvalitetno obdelamo z matematičnim aparatom, ki ga obvladamo (žal nikoli dovolj dobro!), hkrati pa s to poenostavitvijo ne smemo izgubiti bistvenih lastnosti obravnavanega sistema, zaradi česar bi obravnava utegnila biti napačna. Torej ima teorija v določenem smislu funkcijo zemljevida: le ta nikoli ni popolnoma pristna slika pokrajine, pač pa zgolj simbolična, je pa vendar dovolj berljiva, da nam zelo olajša orientacijo.

Če bo problem uspešno rešen in teoretični model eksperimentalno potrjen (popolnoma, ali vsaj delno), vedno lahko kasneje model razširimo in vanj vključimo prvotno zanemarjeno fiziko, ter poskusimo znova. To je pač ena od značilnosti znanstvene dejavnosti, da spoznanja do katerih se dokoplujemo nikoli ne predstavljajo dokončne resnice (še manj pa Resnice; znanost le to drage volje prepušča drugim metodam spoznavanja, kot so religija, umetnost, filozofija, ...). Znanstvena resnica je vedno le približek, včasih boljši, včasih slabši. Za nekatere pojave zahtevamo visoko preciznost, ker jo pač lahko in razmeroma poceni tudi dosežemo. Denimo, najboljše atomske ure delujejo s frekvenco stabilno do enega nihaja na vsakih 10^{16} ; popularno ta podatek priredimo tako, da rečemo, da tovrstna ura izgubi ali pridobi eno sekundo v 300 milijonov let, čeprav vemo, da mnoge kovine razpadejo že v nekaj 10 tisoč letih, steklo pa v pol milijona let. Vendar nam za vsakodnevne potrebe zadošča natančnost $1:10^6$, ali okoli sekunda razlike v 10 dneh, tako natančen pa je že vsak kristalni oscilator za 70 centov. Za nekatere druge pojave pa smo srečni, če sploh lahko ocenimo njihov pravi velikostni red, kot je to pri nekaterih astronomskih meritvah.

Skratka, slika sveta gledana s fizikalnimi očmi je resda impresivna, toda v mnogih ozirih nedokončana. Vendar, za razliko od *a priori* in dogmatično postavljenih Resnic, smo v znanosti vedno pripravljeni svoje poglede popraviti, če nekje ugotovimo znatno odstopanje od realnosti. Seveda se dogmatska stališča pogosto pritihočajo tudi v znanost. Pri tem pa ne gre nujno zgolj za miselno zadržanost, niti za zlonamernost, prav tako ne za zaroto, in tudi ne za pohlevno prilagajanje ali podrejanje uveljavljenemu večinskemu mnenju zaradi lažjega pridobivanja raziskovalnega denarja, čeprav tudi takih primerov ne manjka. Pogosto gre zgolj za to, da se nekateri raziskovalci in teoretiki tako poistovetijo z idejami in modeli, ki jih sami razvijajo, da kritične pripombe kolegov, celo tiste dobronamerne, jemljejo kot napad na njihovo osebnost in njihov "zdrav razum" (če kaj takega sploh obstaja!). Vendar v znanosti na dolgi rok obveljajo izključno argumenti, ki jih na noben znan način ni mogoče ovreči. Sklicevati se na "znanstveni konsenz", ki baje velja za mnoga spoznanja, je povsem brezplodno, ker zadostuje le en sam nasprotni a neovrgljivi argument, ki splošno sprejeto spoznanje razveljavi. Zato je vsakomur, ki trdi nekaj v nasprotju s splošno sprejetimi stališči vredno prisluhniti in njegova stališča nadvse resno obravnavati, dokler se argumentirano in zanesljivo ne dokaže, da gre za zmoto. Po drugi strani pa mnogokrat v teorijah, ki se izkažejo za napačne, lahko najdemo tudi povsem uporabno drobno idejo, ki jo je treba prepoznati in postaviti v ustrezni kontekst, da pridobi svoj pravi pomen.

Nenavadni fizikalni svetovi: ukrivljeni *prostorčas*

So pa še drugi vidiki iste problematike. Denimo, v znanosti se zelo pogosto moramo zadovoljiti s pojasnjevanjem in opisom **kako** narava deluje, ne da bi bili zmožni obenem odgovoriti tudi **zakaj** je temu tako. Oglejmo si to na primeru Newtonovega zakona gravitacije. Izraz za silo, ki planetom določa njihove orbite, vsebuje zgolj tri med seboj neodvisne količine: maso Sonca m_S (ta predstavlja 99% celotne mase sistema), maso opazovanega planeta m_p , ter njuno medsebojno razdaljo r . Matematično to lahko simbolično zapišemo kot proporcionalnost (sorazmernost):

$$F \propto \frac{m_S m_p}{r^2}$$

kar pomeni da je sila sorazmerna produktu posamičnih ulomkov m/r . Vendar sorazmernost še ne pomeni enakosti! Če bi namesto znaka za sorazmernost (\propto) zapisali enačaj (=), ter na tej podlagi določili še orbite planetov, se številke sicer ne bi ujemale z opazovanji, opazili pa bi, da so medsebojna razmerja vedno enaka. To nas napelje na misel o obstoju neke splošne gravitacijske konstante, imenujmo jo G , ki predstavlja merilo jakosti gravitacijske interakcije med masami. Šele z upoštevanjem splošne gravitacijske konstante lahko zgornjo relacijo zapišemo kot enačbo:

$$F = G \frac{m_S m_p}{r^2}$$

Splošno gravitacijsko konstanto G lahko določimo na različne načine, med drugim tudi laboratorijsko (kot je to prvi naredil Henry Cavendish leta 1798 z uporabo torzijske tehtnice, dobil je vrednost $G = 6.754 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$; današnja vrednost je malo bolj natančna: $6.67384 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$). **Pozor:** splošne gravitacijske konstante ne smemo zamešati za zemeljski gravitacijski pospešek, $g = 9.81 \text{ ms}^{-2}$ (ta je le povprečje vrednosti izmerjenih na morskni gladini na različnih krajih; ker se zaradi oblike Zemlje in njene rotacije krajevno spreminja, ni konstanta!). Na splošno je pospešek razmerje med silo in maso na katero sila deluje, $a = F/m$. Za gravitacijski pospešek velja: $g = Gm_Z/r^2$, kjer je m_Z masa Zemlje in m masa opazovanega telesa; g pada s kvadratom razdalje r od masnega središča!

V taki obliki je enačba za velikost sile uporabna za kateri koli sistem dveh teles, na njeni podlagi je mogoče natančno izračunati tirnice planetov in njihove obhodne čase, pa naj gre za planet velikosti Jupitra, ali majhnega Plutona, ali lune v orbiti planeta, vse do najmanjših asteroidov, umetnih satelitov, pa tudi za izračun s kakšno hitrostjo bo žoga padla na tla, če jo izpustimo z določene višine.

Vendar nam kljub izjemno natančnemu ujemanju z opazovanji ta enačba še nič ne pove o vzroku za ugotovljeno velikost G , prav tako nam nič ne pove o vzroku za pojav gravitacijske sile med masami nasploh. Zgodovinsko gledano je Newton omenjeno enačbo dejansko zgolj uganil na osnovi podatkov o položajih planetov in osnovnih načel obnašanja teles v zemeljskem gravitacijskem polju (jabolko vedno pada proti središču Zemlje); te enačbe ni izpeljal iz drugih enačb. Četudi se je s tem problemom dolgo in izčrpno ukvarjal je na koncu sklenil, da nima dovolj podatkov na osnovi katerih bi lahko sklepal o razlogih za obstoj gravitacije. Zato se je poskusom pojasnjevanja izrecno odrekel: *Hypotheses non fingo!*, je zapisal.

Na prvi uspešen poskus pojasnjevanja vzrokov za pojav gravitacije smo morali čakati do leta 1915, ko je Albert Einstein objavil svojo Splošno teorijo relativnosti. S to teorijo smo dobili ne le popravek in nadgradnjo Newtonove teorije, s katerim je bilo mogoče pojasniti majhno a pomembno odstopanje izračunov za planet Merkur, ki je Soncu najbližji, temveč tudi razloge za obstoj gravitacije, ki temeljijo na osnovnih načelih delovanja naravnih zakonitosti. Splošna teorija relativnosti razlaga gravitacijo kot spremenljivo geometrijo *prostorčasa*. Trirazsežnostni prostor in enorazsežnostni čas nista več ločeni dimenzijski domeni, kot je to v Newtonovi teoriji, pač pa sta združena v soodvisni 4D kontinuum, katerega lastnosti se spreminjajo v odvisnosti od prisotnosti mase in relativnih hitrosti opazovalca glede na opazovani sistem. Kot je to povzel J.A. Wheeler, *masa pove prostorčasu kako naj se upogne, upognjeni prostorčas pa pove masi kako naj se giblje*.

Zaradi take medsebojne soodvisnosti v 4D *prostorčasu* postane matematična obravnava silno zapletena. Za večjo preglednost in krajši zapis ponavadi združimo Einsteinovih deset enačb polja v tenzorsko obliko. Tenzor si lahko poenostavljeno predstavljamo kot matriko, katere elementi so vektorji, vendar bi nas odneslo predaleč, če bi tukaj poskusili razložiti vse poglobitve značilnosti tenzorskega računa. Za občutek naj zadošča naslednja razlaga (pri tem pa upam, da ne bom še sam padel v past pretiranega poenostavljanja, zaradi česar bi bila razlaga povsem napačna).

V Splošni teoriji relativnosti preide masa v bolj splošno količino, ki ji pravimo energijsko-napetostni tenzor, $T_{\mu\nu}$, ki vključuje energijske gostote v vseh možnih oblikah. Indeks μ in ν sta stolpčni in vrstični indeks matričnih elementov T po posameznih razsežnostih *prostorčasa*, in sicer tako, da razsežnostim $[t, x, y, z]$ po dogovoru pripadajo indeksi $[0, 1, 2, 3]$. Potem Einsteinov tenzor $G_{\mu\nu}$, ki je posebna brez-divergentna kombinacija Riccijevega tenzorja $R_{\mu\nu}$ in metrike *prostorčasa* $g_{\mu\nu}$, enačimo s $\kappa T_{\mu\nu}$ tako, da konstanta κ zagotavlja skladnost z opazovanji v mejah veljavnosti Newtonove teorije, torej pri hitrostih mnogo nižjih od svetlobne, ter za šibka gravitacijska polja. Matematično to zgleda takole:

$$G_{\mu\nu} \equiv R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

Tukaj predstavlja količina $R = g^{\mu\nu} R_{\mu\nu}$ skalarno vrednost ukrivljenosti *prostorčasa*; G na desni strani enačbe je splošna gravitacijska konstanta (enake vrednosti kot v Newtonovi teoriji) in c je svetlobna hitrost. Torej je $\kappa = 8\pi G/c^4$.

Riccijev tenzor $R_{\mu\nu}$ predstavlja mero popačenja *prostorčasa* v primerjavi z ravnim Evklidskim prostorom ob enakomernem poteku časa. V primeru, da v prostoru ni mase, postane $R_{\mu\nu} = 0$ in enačbe preidejo v Einsteinove vakuumske relacije.

Ruski fizik in matematik Aleksandr Fridman (v nemški in angleški literaturi njegovo ime pišejo kot Alexander Friedmann) je leta 1922 izpeljal svoji kozmološki enačbi izhajajoč iz Einsteinovih enačb polja, ter ob predpostavki, da je Vesolje na velikih razsežnostih homogeno in izotropno (po domače bi temu rekli, da Vesolje zgleda v vse smeri dokaj podobno). Takoj je postalo jasno, da predstavljata Fridmanovi enačbi nestabilno rešitev, že najmanjša motnja v porazdelitvi snovi bi povzročila bodisi postopno sesedanje, bodisi postopno širjenje. Takratno poznavanje vesolja je bilo razmeroma omejeno, in Einstein je, tako kot mnogi drugi verjel, da je Vesolje stabilno in

dolgočasovno nespremenljivo. Zato je svojim enačbam dodal "kozмолоško konstanto", Λ , katere vrednost naj bi bila taka, da zagotavlja dolgočasovno stabilnost:

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R + g_{\mu\nu}\Lambda = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}$$

Kozmološko konstanto lahko razumemo kot gostoto energije prostora, ki deluje kot nekakšen pritisk navzven in preprečuje, da bi se Vesolje sesedlo. Ta dodatek je fizikalno upravičen, ker ne moremo zaznati absolutne vrednosti energije, lahko zaznamo le energijske razlike, zato je absolutna velikost energije prostora lahko poljubno velika, ali pa nič (mora pa biti pozitivna, če naj Vesolje stabilizira).

Leta 1929 je Edwin Hubble združil podatke o rdečem spektralnem zamiku galaksij (ki jih je leta 1917 objavil Vesto Slipher) s svojimi merjenji oddaljenosti med galaksijami, ter ugotovil, da se njihove hitrosti večajo sorazmerno z oddaljenostjo, na podlagi česar je mogoče sklepati, da se vse galaksije (razen tistih zbranih v gostejših jatah) oddaljujejo druga od druge, oziroma da se Vesolje širi. Do enakega zaključka je dve leti prej prišel tudi Georges Lemaître z od Fridmanove neodvisno izpeljavo na osnovi Splošne teorije relativnosti. Einstein je sklenil, da je bila vpeljava kozmološke konstante nepotrebna in jo je imenoval za svojo največjo napako.

Vendar se je potreba po kozmološki konstanti spet pokazala leta 1998, ko je skupina astronomov s preučevanjem spektrov eksplozij supernov tipa Ia ugotovila, da se Vesolje ne le širi, temveč da se njegovo širjenje pospešuje, namesto da bi se zaradi gravitacije upočasnjevalo. Majhna pozitivna vrednost kozmološke konstante bi rezultate teh meritev pojasnila na najbolj preprost način.

Toda to ni edini razlog za vpeljavo od nič različne vrednosti gostote energije vakuuma, do podobne zahteve pridemo tudi v Kvantni mehaniki.

Nenavadni fizikalni svetovi: dualnost in nedoločnost

Težave z natančnim določanjem fizikalnih količin so se začele že v začetkih klasične fizike. Okoli leta 1660 je F.M. Grimaldi prvi podrobno raziskal obnašanje svetlobe ob prehodu skozi ozke odprtine in odkril pojav, ki ga je poimenoval difrakcija (sipanje ravninskega valovanja v vse smeri). Ožja ko je bila odprtina, širši je bil difrakcijski kot. Ta pojav, do katerega pride vedno kadar je velikost odprtine primerljiva z valovno dolžino, je značilen za vsa valovanja, med drugimi tudi za valovanja na površju vode. Zato pojava pri svetlobi ni bilo težko pojasniti, seveda ob predpostavki, da je tudi svetloba valovanje. Newton, ki je tudi preučeval te pojave, je imel ob tej zadnji domnevi nekaj pomislekov, in je postavil teorijo, da gre pri svetlobi za curek delcev. Vendar sta potem C. Huygens z razlago preloma svetlobe na prehodu med zrakom in tekočino, ter T. Young s pojavom interference po prehodu skozi dvojno režo (leta 1806) dokazala, da gre pri svetlobi za valovanje. Huyensovo teorijo je nato izpopolnil še A.J. Fresnel.

Za valovanja v linearnih medijih velja teorem superpozicije (faznega seštevanja in odštevanja trenutnih amplitud valov). Če se poti valov med seboj razlikujeta za polovico valovne dolžine, se valovni amplitudi med seboj odštevata in na zaslonu dobimo temno

področje; če pa se poti razlikujejo za celo valovno dolžino, se amplitudi seštevata in na zaslonu dobimo svetlo področje.

Pojav difrakcije postavlja spodnjo mejo ločljivosti pri optičnih instrumentih, kjer (razen v nekaterih posebnih primerih) ni mogoče razločevati objektov, ki so med seboj oddaljeni manj, kot je valovna dolžina svetlobe. Namesto da bi z močnejšim fokusiranjem sliko majhnega objekta izostrili, bo ta vedno bolj zamegljena in razmazana. Valovne dolžine vidne svetlobe so med 760nm (meja med rdečo in infrardečo svetlobo) in 390nm (meja med vijolično in ultravijolično svetlobo). Ker pa so atomi veliki okoli 0.1nm, posameznih atomov ni mogoče videti. To je postalo možno šele z odkritjem žarkov X (W.C. Röntgen, 1895), katerih valovna dolžina je primerljiva z razdaljo med atomi (A. Sommerfeld). Leta 1912 je M. von Laue s poskusom sipanja žarkov X na kristalnih strukturah dokončno potrdil, da je snov sestavljena iz atomov (ki so pri kristalih razporejeni v geometrijsko pravilnih mrežah), ter hkrati dokazal, da so žarki X del elektromagnetnega spektra, tako kot je to vidna svetloba.

Toda na ločljivost opazovanja ne vpliva le valovna dolžina. Planck je leta 1900 zadovoljivo pojasnil spekter sevanja idealno črnega telesa z vpeljavo energijske kvantizacije, vendar je domneval, da pri tem gre za kvantiziranost energije elektronskih orbital v atomih. Einstein pa je leta 1905 postavil tezo, da mora biti tudi svetloba sama kvantizirana v obliki energijskih paketov (ne pa kot neprekinjeno valovanje) in je s tem pojasnil foto-učinek (pojav, ko UV svetloba izbije elektrone iz površja kovine, za kar je tudi dobil Nobelovo nagrado leta 1920). Vendar je njegova domneva o kvantiziranosti svetlobe postala splošno sprejeta šele leta 1922, ko jo je Compton potrdil s poskusom sipanja žarkov X na elektronih. Torej so interakcije svetlobe s snovjo pogojene tudi s kvantizacijo: svetlobni kvant se bodisi absorbira v celoti, ali sploh ne.

Zaradi kvantizacije je potem formalno matematično upravičeno obravnavati svetlobne kvante kot delce, "fotone", kot jih je leta 1926 poimenoval G.N. Lewis (njegova teorija kemičnih interakcij se je kasneje pokazala za napačno, toda ime se je prijelo, zlasti potem, ko je Comptonu bila dodeljena Nobelova nagrada leta 1927).

Vendar tudi z delci imamo podobne težave kot z valovanji. Že v klasični mehaniki so težave, denimo kadar želimo hkrati poznati položaj in hitrost nekega delca. Če položaj v neki točki prostora, x , določimo zelo natančno, ne bomo mogli ugotoviti njegove hitrosti. Hitrost definiramo kot ulomek poti in časa, ki je za to pot potreben, $v = (x_2 - x_1)/(t_2 - t_1) = \Delta x/\Delta t$. Če torej gre $\Delta x \rightarrow 0$, mora tudi $\Delta t \rightarrow 0$, imamo torej nedoločen izraz $0/0$ in je vrednost hitrosti lahko kakršna koli. Seveda v matematiki imamo možnost opraviti limitni proces postopoma, z ugotavljanjem kako hitro gresta posamezni količini proti nič, potem pa je rezultat sicer odvisen od funkcije po kateri se vse skupaj dogaja, je pa dobro determiniran. A ne v fiziki, kjer za posamezni delec imamo na voljo le eno samo priložnost merjenja, in sicer ob prehodu delca skozi točko x . Lahko poskus potem ponovimo z velikim številom delcev, a ker na vsak posamezni delec lahko vplivajo mnogi moteči faktorji, je zadeva obvladljiva zgolj statistično. S ponavljanjem poskusa lahko izboljšamo le srednjo vrednost, ter ugotovimo verjetnost, da bo nek posamezni delec od nje odstopal znotraj določenega statistično značilnega intervala. Ne moremo pa napovedati ničesar bolj določenega.

Kvantna mehanika pa je temu dodala še vrsto drugih zapletov. Med letoma 1912-1925 so se fiziki osredotočali predvsem na Bohrov model atoma in poskuse, da bi s popravki klasične mehanike dobili relacije za določanje energije elektronov v posameznih orbitalah. S preučevanjem spektralnih črt vodika se je leta 1925 ukvarjal tudi W. Heisenberg, ki se mu je ob neki priliki porodila misel, da bi rešitev utegnila biti v nekomutativnosti nekaterih fizikalnih količin. Matematično je vseeno ali zapišemo 5×3 ali 3×5 , rezultat je vedno enak, pravimo da je množenje komutativna operacija. Vendar to ne velja za nekatere (po Bohru imenovane komplementarne) fizikalne količine. Ena izmed relacij do katere je prišel Heisenberg je vsebovala produkt položaja x in gibalnega momenta p (moment je vektorska količina in je enaka produktu mase in vektorja hitrosti, $\mathbf{p} = m\mathbf{v}$; p je magnituda, oziroma absolutna vrednost vektorja \mathbf{p}). Po Heisenbergovih izračunih naj bi za elektrone v atomskih orbitalah veljala neenačba $xp - px \geq \hbar/2$, kar pomeni da je razlika med nekomutativnima produktoma položaja in gibalnega momenta vedno večja, ali najmanj enaka polovici reducirane Planckove konstante. Ko je Heisenberg svoje izračune pokazal W. Pauliju, je rezultat komentiral z besedami: "*Marsikaj mi še ni povsem jasno, toda vse kaže, da se elektroni ne gibljejo po pravilnih orbitah!*"

S tem je Heisenberg postavil temelje matrični kvantni mehaniki. Kmalu se je izkazalo da je komplementarnih, nekomutativnih količin še več, podobno je denimo tudi z energijo in časom: $\Delta W \cdot \Delta t \geq \hbar/2$. Tovrstne relacije so postale znane kot Heisenbergovo Načelo nedoločenosti (bolj pravilen prevod izraza *Uncertainty Principle* bi bil Načelo negotovosti, vendar se je izraz "nedoločenost" že zdavnaj udomačil, zato ga ne bomo spreminjali; je pa res, da je sam Heisenberg v začetku pretežno uporabljal izraz "*Ungenauigkeit*", šele kasneje pa "*Unsicherheit*").

Zgodovinsko pa je Načelo nedoločenosti bilo pogosto napačno interpretirano kot "problem opazovalca": vsako merjenje zahteva izmenjavo določene količine energije med sistemom, ki ga merimo in merilnim instrumentom, toda pri kvantnih pojavih smo na meji zaznavanja, za zaznavo je potreben najmanj en celi energijski kvant, ali večje celo število le teh. Ni mogoče izmenjati manj kot en celi kvant, ker sicer do interakcije ne pride in je rezultat poskusa drugačen. Izkaže pa se, da obstaja vrsta primerov, ko je mogoče vpliv merjenja znižati pod mejo podano z Načelom nedoločenosti, ki še naprej velja neodvisno. Tej napačni interpretaciji je botrovala poglavitno takoimenovana Kopenhagenska interpretacija kvantne mehanike, kot se je razvila v krogih šole N. Bohra. O tem nekoliko kasneje, najprej pa nekaj o elektronih, ki so prvi odkriti osnovni delci.

Prvo domnevo o elementarnem nosilcu električnega naboja je leta 1838 postavil R. Laming, da bi pojasnil kemične lastnosti atomov. J.W. Hittorf je leta 1869 ob preučevanju električne prevodnosti razredčenih plinov opazil šibko sevanje okoli katode, ki se je z znižanjem tlaka plina povečevalo. E. Goldstein je ugotovil, da kovinska ploščica zasenči to sevanje in ga je poimenoval "katodni žarki". W. Crookes je v obdobju med 1870 in 1880 izdelal prve katodne cevi z visokim vakuumom, ter ugotavljal odklon katodnih žarkov v električnem in magnetnem polju in domneval, da gre pri katodnih žarkih za curek električno negativno nabitih delcev. Leta 1891 je G.J. Stoney te nosilce naboja poimenoval "elektroni", po grški besedi za jantar, ki je od nekdaj znan kot material, ki ga je mogoče s trenjem naelektriti. Obstoj elektrona je leta 1897 potrdil J.J. Thompson s sodelavcema J.S. Towsendom in H.A. Wilsonom in ga identificiral kot

delec z negativnim električnim nabojem. S tem je tudi postalo jasno, da atom ni nedeljiv in da mora imeti tudi pozitivno naelektreno jedro (ker so atomi sicer električno nevtralni, mogoče pa jih je ionizirati s tem, da jim odvzamemo ali dodamo enega ali več elektronov).

Za elektron pravimo da je osnovni (elementarni) delec, ker ni videti, da bi imel strukture (oziroma sestavnih delov). Njegove lastnosti so naboj (-1.6×10^{-19} As), masa (9.1×10^{-31} kg, kar je $1836 \times$ manj kot je masa jedra vodika, protona, tej masi pa po Einsteinovi relaciji ustreza notranja energija $\sim 8.2 \times 10^{-14}$ J, ali 511 keV) in spin ($\pm \hbar/2$, pri čemur je orientacija spina glede na smer gibanja znana kot heličnost, ki je lahko levosučna ali desnosučna).

Po Heisenbergovih ugotovitvah se elektron v atomu ne giblje po geometrijsko pravih orbitalah, pač pa po "orbitalah", ki si jih predstavljamo kot verjetnostno porazdelitev možnih leg elektrona, njihove oblike pa so odvisne od energijskih stanj, ki jih lahko zasedejo posamezni elektroni. Za elektron torej tudi velja Heisenbergovo Načelo nedoločenosti, $\Delta x \cdot \Delta p \geq \hbar/2$. Iz tega sledi, da se elektron ne more gibati okoli jedra na poljubno izbrani oddaljenosti in s poljubno hitrostjo, pač pa le po takih orbitalah, ki ustrezajo celoštevilčnemu mnogokratniku količine $\hbar/2$. To potem tudi pojasni kvantiziranost energijskih stanj elektronskih orbital pri vseh atomih.

Ker pa so prehodi med posameznimi energijskimi stanji mogoči le, če elektronu dovedemo ali odvzamemo količino energije, ki ustreza razliki energij med posameznimi orbitalami, so tudi pojavi absorpcije in emisije fotonov z ustrezno frekvenco ω , oziroma energijo $W = \hbar\omega$, natančno določeni. S tem pojasnimo absorpcijske in sevalne spektre vseh atomov. Spektri predstavljajo svojevrsten "prstni odtis" sestave snovi. Tako je denimo mogoče na osnovi spektralnih črt v sončnem sevanju določiti kemično sestavo plinov na njegovem površju, in enako tudi za zvezde v najbolj oddaljenih galaksijah.

Dejstvo, da energijska kvantizacija velja tako za elektrone (delce na sploh), kot tudi za fotone (oboju izkazujejo lastnosti tako valovanja kot delca) je napeljalo na misel, da naj bi vsi delci izkazovali tudi valovne lastnosti. To domnevo je opisal L. de Broglie v svoji doktorski disertaciji leta 1924. Tako naj bi delcu z gibalnim momentom p pripadala valovna dolžina $\lambda = 2\pi\hbar/p$, oziroma frekvenca $\omega = W/\hbar$ (to zadnje je že bilo znano kot Planck-Einsteinova relacija).

Nato je E. Schrödinger leta 1926 objavil svojo znamenito valovno enačbo, ki je predstavljala neke vrste snovno valovno analogijo Maxwellovih enačb, opisuje pa val, ki potuje v matematično abstraktnem "faznem prostoru". Schrödinger je s to enačbo lahko analitično izpeljal relacije za energijski spekter vodika, ki se je popolnoma ujema z eksperimentalnim. Istega leta je še M. Born predstavil danes standardno fizikalno interpretacijo valovne funkcije elektrona, katere absolutna vrednost predstavlja verjetnost, da v neki točki prostora elektron tudi najdemo.

Leta 1927 sta C. Davisson in L. Germer v Bellovih Laboratorijih izpeljala eksperiment, v katerem so curek počasnih elektronov usmerili na tarčo iz niklja in iz izmerjenih kotov sipanja elektronov ugotovili, da ima sipanje enak vzorec, kot je bil ugotovljen za sipanje žarkov X (W.L. Bragg), s čemer sta eksperimentalno potrdila de Brogliejevo domnevo o valovanju elektronov. S tem so bile postavljene osnove valovne mehanike in upravičenost ideje o dualni naravi snovi. Snov se torej (v odvisnosti

od eksperimentalnih pogojev) obnaša bodisi kot delec (denimo v Einsteinovem fotoelektričnem eksperimentu), bodisi kot valovanje.

S pomočjo valovne enačbe smo dobili močno orodje za napovedi in razlage cele vrste učinkov, v katerih pride do izraza valovna narava snovi. Podobni eksperimenti so bili kasneje izpeljani z nevtroni, atomi, molekulami in celo makromolekulami, kot so fullereni (60 atomov ogljika).

Vendar smo na osnovi valovne mehanike dobili v letih 1924–1927 tudi že omenjeno Kopenhagensko interpretacijo kvantne mehanike, ki je prva v celi vrsti kasnejših različnih interpretacij. Začetnika sta Bohr in Heisenberg, okoli njiju pa se je potem oblikovala "Kopenhagenska šola" zagovornikov tovrstne razlage. Ime je sicer nastalo šele kasneje, domnevno okoli leta 1955, po seriji predavanj in objav, v katerih je Heisenberg kritiziral nekatere druge interpretacije (predvsem tisto, ki jo je zagovarjal D. Bohm) kot popoln nesmisel. Navkljub celi gori literature s tega področja ne obstaja formalna definicija pravil ali teorije Kopenhagenske interpretacije. Lahko pa jo povzamemo približno tako, da naj bi kvantna mehanika ne ponujala opisa neke "objektivne realnosti", pač pa se ukvarja zgolj z verjetnostjo, da pri merjenju in opazovanju ugotovljamo različne vzorce obnašanja snovi na mikro ravni, ki ne ustrezajo ne klasičnemu opisu delca, ne klasičnemu opisu valovanja. Po tej razlagi se snov sicer nahaja v superpoziciji vseh možnih kvantnih stanj, nakar ob merjenju ali zaznavi naključno privzame le eno od teh možnih stanj. Matematično je ta proces znan pod imenom "kolaps valovne funkcije". To velja za posamezne delce ali majhne skupine delcev, med tem ko za sisteme sestavljene iz velikega števila delcev (kot so merilne naprave) velja, da kvantne zakonitosti posameznih sestavnih delcev preidejo v povprečje, ki rezultira v klasičnih približkih. Zato naj bi makroskopske merilne naprave bile sposobne zaznavati zgolj klasične približke lastnosti kvantnih delcev.

Toda mnogi kasnejši zagovorniki Kopenhagenske interpretacije gredo v svojih filozofskih razlagah tako daleč, da pravijo, da "nič ne obstaja, dokler ni izmerjeno". Denimo poskuse z difrakcijo in interferenco elektronov za dvojno režo si razlagajo tako, da naj bi elektron (oziroma njegova valovna funkcija!) šel hkrati skozi obe reži, ter nato na zaslonu za režo ustvaril svojemu valovanju ustrezno interferenčno sliko. Na tej osnovi so kasneje nastale nekatere druge interpretacije, prek integracije čez vse možne zgodovine (R.P. Feynman), do interpretacije "mnogoterih svetov" (H. Everett, B. DeWitt), celo do tega, da naj bi zavest opazovalca bila nujna za povzročitev kolapsa valovne funkcije (J. von Neumann, E. Wigner, in drugi). Einstein je taka stališča nekoč kritiziral rekoč, da *"rad verjamem, da je Luna še vedno tam gori, tudi kadar jo ne gledam"*. Bilo pa je tudi nekaj poskusov "bolj realističnih" interpretacij, denimo C.F. von Weizsäcker je menil, da Kopenhagenska interpretacija nedvomno vključuje obstoj tistega, kar je izmerjeno ali opazovano, vendar si o tistem, česar ne opazujemo lahko ustvarimo primerne uporabne predpostavke in to svobodo si jemljemo zato, da se izognemo paradoksom.

Čeprav še vedno najdemo v literaturi celo vrsto podobnih pogledov, je danes jasno, da ne Bohr ne Einstein nista imela prav, vendar ne zaradi razlogov, ki sta jih očitala drug drugemu. Težave z interpretacijo eksperimentalnih izidov nastanejo zato, ker naj bi bilo dovoljeno merilno aparaturo obravnavati klasično. To je seveda narobe. Na delce, ki tvorijo merilno napravo prav tako delujejo iste kvantne zakonitosti, kot na testne

delce, ki jih opazujemo. Zato morajo v interakcijah med testnim delcem in delcem, ki tvorijo merilno napravo nastopati energijske izmenjave na kvantni ravni, ki potem privedejo do ustreznega merilnega rezultata. Če na tak način obravnavamo problem, se paradoksnim interpretacijam povsem izognemo. Ni pa to vedno preprosto, pogosto tudi praktično ni mogoče.

Lahko bi rekli, da sta ugled in cenjenost znanosti v današnji družbi utrpela nepopravljivo škodo v veliki meri ravno zaradi nekritične popularizacije idej Kopenhagenske šole. Če je bilo mogoče Einsteinovo popularno "vse je relativno" načelo še tolerirati, pa idej, da ničesar ne poznamo in ne moremo poznati z nobeno stopnjo natančnosti, ni mogoče lahkotno sprejeti. Najprej je "kvantni preskok" (vedno majhen in na sami meji zaznavnosti) v popularni kulturi pridobil pomen velikega kakovostnega preskoka. Nato je kvantna nedoločenost iz sicer obvladljive nedoločljivosti prerasla v bizarno in smešno-tragično popolno nevednost in apriorno nezmožnost vedenja. Kot pika na "i" pa se je fizikalna vloga opazovalca in njegove zavesti izrodila v popolnoma iracionalni vpliv zavesti na vse živo in neživo.

Logično, teh napačnih predstav so se polastili še šarlatani vseh barv in nam na teh "znanstveno dokazanih" osnovah ponujajo mistične in ezoterične razlage sveta in naše vloge v njem, da razlag o vplivu na naše fiziološko in mentalno zdravje ne omenjam. Padeč ugleda znanosti in kakovostne izobrazbe nasploh pa se je odrazil tudi na naše politične, gospodarske in finančne elite, v njihovih vrstah prepogosto najdemo ljudi, ki se odkrito hvalijo, kako jim v šoli ni šlo najbolje, a so temu navkljub, ali ravno zaradi tega v življenju uspeli. To sicer delno kaže na nizko kakovost samega izobraževalnega procesa, vendar je v dobri meri posledica tudi splošne (ne)kulture naravnosti. Nenazadnje, imamo paradoksalno situacijo, kjer smo tako družba v celoti, kot posamezniki močno odvisni od cele vrste tehnoloških dosežkov, ki jih tudi s pridom in zaupanjem uporabljamo (od vodovodne in električne napeljave, do računalnikov in mobilnih telefonov), hkrati pa smo pripravljeni verjeti različnim teorijam zarot, ki prikazujejo znanost in znanstveno dejavnost najpogosteje kot s strani politike podkupljivo, ali celo namenoma škodovalno početje s ciljem obvladovati in vladati neukemu ljudstvu.

Če želimo kot družba dolgoročno napredovati in se razvijati, je nujno tako stanje iz temelja spremeniti. Pokazati je treba, da so problemi sicer veliki, da pa so ob ustreznem mentalnem naporu obvladljivi, možno jih je razumeti in razreševati.

Nekateri nerešeni fizikalni problemi

Po neslavni ameriški politični aferi Watergate leta 1972, ki je nato leta 1974 privedla do odstopa takratnega predsednika ZDA Richarda P. Nixona, smo se naučili, da, če želimo razumeti politiko, moramo slediti toku denarja ("*Follow the money!*"), kot je to novinarjema časopisa Washington Post, Bobu Woodwardu in Carlu Bernsteinu povedal njihov skrivnostni vir, kodno poimenovan "Globoko grlo", takrat povsem neznan in pravkar upokojeni podpredsednik FBI, Mark Felt.

Podobno velja v naravoslovju: **če želimo razumeti naravo, sledimo energiji!**

Namreč, brez razumevanja kako in kam gre energija ni mogoče razumeti naravnih procesov in njihovih zakonitosti. Tako kot naj bi umetnost in telesna rekreacija bili

dostopni vsakomur in prispevali kvaliteti življenja, tako naj bi tudi poznavanje temeljnih naravnih procesov bilo del naše splošne izobrazbe in kulture. Žal smo z našim okostenelim šolskim sistemom (ki se od časov, ko je cesarica Marija Terezija vpeljala obvezno osnovno izobraževanje ni bistveno spremenil) dodobra priskutili matematiko in fiziko številnim generacijam. Klavrno stanje na tem področju je pač neposredna posledica vsiljevanja faktografskega znanja ob toleriranju funkcionalnega nerazumevanja (v jalovem upanju, da bo razumevanje prišlo kasneje, po osvajanju ustrezne količine golih dejstev). A to je zgodba za neko drugo razpravo.

Tukaj bomo poskusili predstaviti temelje naravoslovja kot zgodbo, ki jo je dejansko mogoče razumeti (ne pa, kot je to povedal v slabi šali R.P. Feynman, da naj kvantne mehanike niti ne poskušamo razumeti, ker bomo sicer končali v črni luknji neznanja, kar so mnogi vzeli nadvse resno!).

Navkljub neverjetno hitremu in obsežnemu razvoju fizike v zadnjih dekadah mnogi temeljni fizikalni problemi še zdaleč niso razrešeni. Wikipedia našteva zajeten seznam 76 pomembnih vprašanj [3] razvrščenih v različna področja, a je seznam verjetno še daljši. Tukaj se bomo omejili na le nekaj najbolj pomembnih vprašanj.

Najprej je treba opaziti, da nimamo le ene same fizike, ampak dejansko dve med seboj komplementarni disciplini: kvantne teorije na eni strani in klasične teorije z relativističnimi popravki na drugi. Denimo, Splošna teorija relativnosti v pogojih šibkih gravitacijskih polj in hitrostih mnogo manjših od svetlobne daje enake rezultate in enake relacije kot "stara" Newtonova teorija; toda med kvantno mehaniko in relativnostjo takega gladkega prehoda ni! Čeprav smo se z leti privadili ločeno reševati probleme na različnih razsežnostnih ravneh in hitro preklopimo iz diskretnih (vendar statistično pogojenih) analitičnih metod v infinitezimalne, tako stanje ni ravno idealno za nadaljnji razvoj teorije. Bilo je veliko različnih poskusov združevanja obeh svetov, od Diracove relativistične kvantne mehanike do kvantne teorije polja in teorije strun, a z nobeno nismo popolnoma zadovoljni.

Poleg tega se zdi, da kvantna mehanika s svojim statističnim pristopom navidez dovoljuje kršitve načela vzročnosti, kar je najbolj motilo Einsteina. Tako tudi znotraj same kvantne mehanike imamo nekakšno dihotomijo, ki se je pokazala že kmalu po prvih formulacijah kvantne teorije. Znana je večdnevna debata med Einsteinom in Bohrom na peti Solvayevi konferenci leta 1927, kjer je Einstein zavračal Bohrove poglede na posledice Heisenbergovega Načela nedoločenosti v kvantni mehaniki z znamenitim stavkom "*Bog ne kocka!*", na kar je Bohr odgovoril "*Einstein, nehaj Bogu predpisovati kaj sme in česar ne!*". Danes večina fizikov meni, da je iz tega besednega in teoretičnega dvoboja Bohr izšel kot nesporni zmagovalec.

Toda razprava se nikoli ni zares končala in traja še vedno. Sicer je iz današnje perspektive jasno, da nobeden od njiju ni imel prav, a ne zaradi razlogov, ki sta jih očitata drug drugemu [4]. Namreč delce, ki jih v eksperimentu preučujemo, moramo obravnavati v okviru kvantnih formalizmov, med tem ko naj bi bilo dovoljeno merilno aparaturo obravnavati klasično. To je zagotovo recept za številne paradokse, ker na aparaturo in pogoje v katerih ta interagira s kvantnimi delci seveda delujejo iste kvantne zakonitosti, kot na opazovane delce same. Žal pa je dosledna kvantna obravnava makroskopske

aparature v praksi nemogoča in tako smo vedno prisiljeni uporabljati bolj ali manj uspešne približke.

Naslednji problem se nanaša na lastnosti praznega prostora. Verjetno se je Lord Kelvin po svoji izjavi leta 1900 ugriznil v jezik, ker je dejal da "v fiziki ni več ničesar novega za odkriti, preostaja le izboljšanje natančnosti meritev". Istega leta je namreč Max Planck objavil rešitev problema sevalnega spektra idealnega črnega telesa [5] in ob tem vpeljal kvantizacijo energije v fiziko. Rešitev je iskal več kot 10 let, ker na osnovi klasične fizike ni bilo mogoče teoretično izpeljati relacij za eksperimentalno ugotovljene spektre. Klasična fizika je s tem navidez obrobni problemom zašla v hudo krizo in Planck se je tega dobro zavedal [6]. Kvantizacijo energije je privzel, kot se je sam izrazil "iz obupa", kot sicer matematično pravilno, a začasno rešitev, ki jo bo neka boljša teorija nekoč odpravila. Šele mnoga leta kasneje ga je Einstein prepričal, da gre pri kvantizaciji energije za temeljno fizikalno dejstvo.

Leta 1912 je Planck objavil še droben popravek sevalne zakonitosti pri najnižjih temperaturah [7], ki je vseboval dodatni, temperaturno neodvisni prištevek $\hbar\omega/2$. Leta 1913 sta Einstein in Stern [8] to eksperimentalno potrdila. Ta prištevek dejansko pomeni, da prostor brez snovi in ohlajen do absolutne ničle (torej tudi brez fotonov) očitno vsebuje neko osnovno nihavno stanje pri vsaki možni frekvenci ω . Einstein je to stanje poimenoval *Nullpunktsenergie*, "energija ničelne točke" (neroden dobesedni prevod, ki se je udomačil v vseh jezikih, dejansko pa pomeni osnovno energijsko stanje praznega prostora pri absolutni temperaturi 0 K, oziroma -273°C).

Takoj je postalo jasno [9], da mora biti ta osnovna energija ogromna. Namreč, iz Planckovih relacij izhaja, da je energija fotona $W_\gamma = \hbar\omega$, torej sorazmerna produktu Planckove konstante in frekvence; ker je frekvenca lahko zelo visoka in je frekvenčni spekter lahko zelo gost, je tudi vsota energij vseh teh nihanj zelo visoka.

Najbrž se zdi skrajno neverjetno, a s tem ni nič narobe. Denimo, zračni pritisk znaša toliko, kot bi na vsakem centimetru naše kože imeli kilogramsko utež, toda tega sploh ne čutimo, ker enak pritisk obstaja tudi znotraj telesa. Začutimo le razliko ob hitri spremembi zunanega pritiska, ker se pritisk znotraj telesa ne more hipoma spremeniti. Podobno je z energijo, lahko zaznamo le spremembo energije, ali razliko v energiji med različnimi območji, ne pa dejanske absolutne vrednosti. Zato je načeloma vseeno, ali je energija praznega prostora enaka nič, ali je od nič različna, če je le enakomerno porazdeljena po prostoru. Kakršna koli naj bo njena vrednost, le ta predstavlja najnižjo možno vrednost sploh, zato je tudi ni mogoče neposredno zaznati.

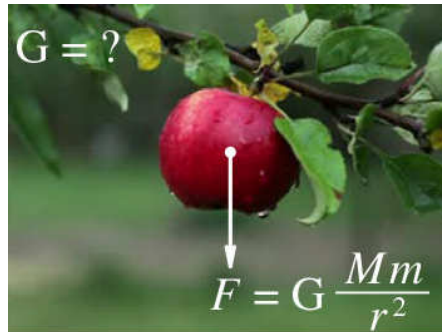
Začuda Einstein temu svojemu odkritju ni posvečal večje pozornosti. Za razrešitev problemov, ki jih Posebna teorija relativnosti (1905) ni vključevala, se je raje zatekel Riemannovi geometriji (ob spodbudah matematikov M. Grossmanna in T. Levi-Civita) in na teh osnovah leta 1915 objavil svoje znamenite enačbe polj, znane kot Splošna teorija relativnosti. Le to so takoj skušali uporabiti tudi pri nekaterih kozmoloških problemih (K. Schwarzschild, A. Fridman, ...) in kmalu je postalo jasno, da Einsteinove enačbe nimajo stabilnih rešitev. V prepričanju, da je Vesolje dolgočasovno stabilno, je Einstein v enačbe vključil dodatni člen, znan kot kozmološka konstanta Λ (Lambda), ki lahko zagotavlja tudi stabilne rešitve [10].

Seveda, po objavi odkritja spektralnega zamika proti rdeči barvi v svetlobi številnih galaksij in večanja tega zamika z oddaljenostjo (E. Hubble, 1929, [11]) je postalo jasno, da Vesolje ni statično, ampak se širi. Einstein je vključitev kozmološke konstante obžaloval in o njej govoril kot o svoji največji napaki (matematično je ta sicer neznatna, toda Vesolje je velikansko; o). Do presenečenja pa je prišlo po letu 1998, ko se je v meritvah svetlobe oddaljenih zvezdnih eksplozij (supernove tipa Ia) izkazalo, da se hitrost razširjanja Vesolja povečuje (namesto da bi se zaradi vpliva gravitacije upočasnjevala). S tem je kozmološka konstanta postala spet aktualna; predstavljamo si jo kot gostoto energije prostora, ki učinkuje kot notranji pritisk. Majhna pozitivna vrednost te konstante bi lahko zadovoljivo razložila opazovanja.

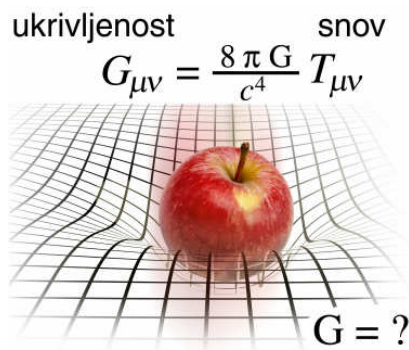
Takoj pa se je pojavil nov problem. Gostota energije vakuuma izračunana na osnovi astronomskih opazovanj naj bi bila res majhna, $\rho_v = \Lambda c^4 / 8\pi G \approx 10^{-9} \text{ J/m}^3$ (tukaj je c svetlobna hitrost, G je splošna Newtonova gravitacijska konstanta, in $\Lambda \approx 2 \times 10^{-52} \text{ m}^{-2}$ je na osnovi opazovanj določena vrednost kozmološke konstante). Po drugi strani pa gostoto energije vakuuma izraženo s pomočjo kvantnih zakonitosti lahko zapišemo v Planckovih naravnih enotah [12] kot $\rho_P = c^7 / \hbar G^2$, vrednost le te pa je velikostnega reda 10^{113} Jm . Razmerje med obema je torej $\sim 10^{122}!!!$

Kaj pa je v resnici Newtonova splošna gravitacijska konstanta G ? Najdemo jo v definiciji za gravitacijsko silo med masama m_1 in m_2 , ki sta med seboj oddaljeni za razdaljo r : $F = Gm_1m_2/r^2$. Seveda lahko G izrazimo s pomočjo Planckove prostorske energijske gostote: $G = \sqrt{(c^7/\hbar\rho_P)}$, a ker je Planckov čas določen kot $t_P = \sqrt{(\hbar G/c^5)}$, lahko zapišemo tudi: $G = c^2/t_P^2\rho_P$. Kot bomo videli kmalu, je mogoče količino c^2 prek elektromagnetnih lastnosti prostora tudi povezati s kvantnimi fluktuacijami energije prostora. S tem dobi Newtonova splošna gravitacijska konstanta tudi kvantni pomen.

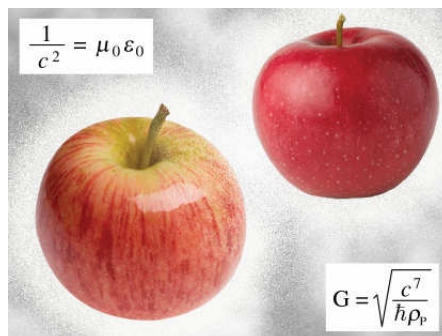
Obstaja sicer še cela vrsta različnih ocen gostote energije vakuuma, vendar omenjeno razmerje med teoretično napovedano in efektivno izmerjeno prostorsko energijsko gostoto znaša celih 122 velikostnih redov, kar je vsekakor največja sramota v sodobni teoretični fiziki, ki jo je nujno čim prej razrešiti! Razprava, ki sledi je poskus v tej smeri.



Sl.1: V Newtonovi teoriji gravitacije je privlačna sila F določena s produktom mas Zemlje M in jabolka m in je obratno sorazmerna kvadratu njune medsebojne razdalje r . Splošna gravitacijska konstanta G sicer zagotavlja številčno enakost v vsakem posameznem primeru, vendar sta vzrok za njen obstoj in razlog za njeno številčno vrednost neznani in le to moramo določiti eksperimentalno.



Sl.2: V Einsteinovi Splošni teoriji relativnosti je koncept sile nadomeščen z vplivom telesa na ukrivljenost prostora. Na metriko prostora, podano s tenzorjem $G_{\mu\nu}$, vpliva prisotnost snovi, katere celotno energijo (njen masni ekvivalent mc^2 , kinetično energijo, termično energijo, ...) predstavlja tenzor $T_{\mu\nu}$. Faktor 8π je posledica sferične geometrije polja posameznega telesa, c pa je svetlobna hitrost. Še vedno za ustrezno številčno enakost teorija potrebuje Newtonovo splošno gravitacijsko konstanto G , o kateri pa se sploh ne izreče.



Sl.3: V novi interpretaciji teorije relativnosti, ki združuje tudi klasično Maxwellovo elektromagnetno teorijo in kvantno elektrodinamiko, si gravitacijo predstavljamo kot posledico zmanjšane gostote energije prostora v okolici masivnih teles. Relativistični faktor $1/c^2$ je določen s produktom temeljnih elektromagnetnih konstant praznega prostora, μ_0 in ϵ_0 , razloge za splošno gravitacijsko konstanto pa najdemo v Planckovi energijski konstanti \hbar in gostoti energije prostora ρ_p .

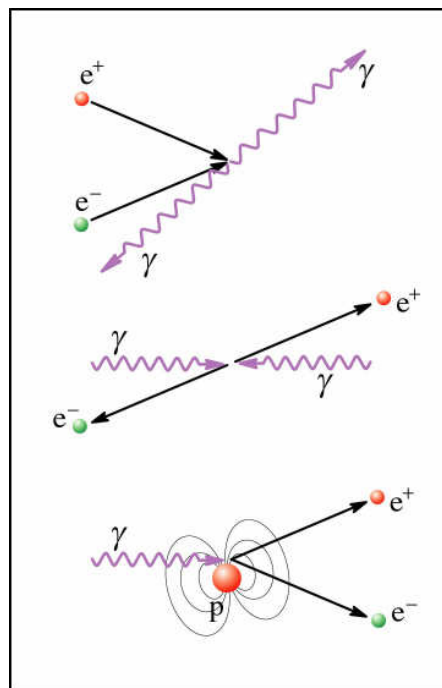
Lastnosti ujete svetlobe

Začnimo pri temeljni relaciji energijske pretvorbe v fiziki osnovnih delcev. Ko se srečata delec (na primer elektron) in njegov antidelec (pozitron, ki ima vse lastnosti enake, le predznak električnega naboja je nasproten) se ta med seboj izničita; pravimo da se "anihilirata" (lat. *nil* pomeni nič), toda energija ne more kar na lepem izpuhteti, načelo ohranitve energije vedno velja. Posledično točko njunega srečanja zapustita v nasprotnih smereh dva visokoenergijska fotona (označena z grško črko gama, γ , ker je njuna frekvenca v območju sevanja gama). Simbolično enačbo zapišemo takole:



Dvosmerna puščica nakazuje, da je proces reverzibilen: če se ob pravih pogojih srečata dva fotona ustreznih energij, lahko ustvarita par delec–antidelec [13].

Proces anihilacije že izkoriščamo v medicini (metoda slikanja notranjosti telesa s pomočjo pozitronske emisije, PET). Tvorba parov pa redno poteka v notranjosti Sonca, oziroma v zvezdah nasploh. V laboratorijskih pogojih tvorbo parov lahko opazujemo le, če kratek visokoenergijski laserski pulz oplazi jedro atoma in interagira z njegovim magnetnim poljem. Za neposredno interakcijo parov fotonov zaenkrat nimamo dovolj močnih laserjev, vendar bo taka tehnologija kmalu dostopna.



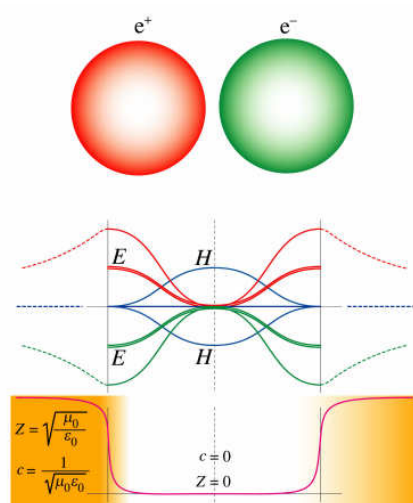
Sl.4: Fotonsko-snovne interakcije: par elektron-pozitron se anihilira v par fotonov, prav tako par fotonov ustrežno visoke energije rodi par elektron-pozitron. Take reakcije ves čas potekajo v zvezdah. V laboratorijskih pogojih je možen nastanek parov ob interakciji fotona z magnetnim poljem protona.

Ne gre torej za nikakršno eksotiko, ampak za vsakodnevne pojave. Pomen relacije (1) pa je v neposredni pretvorbi energije v snov in obratno. Na delu je torej vsem dobro

znana Einsteinova enačba $W = mc^2$ (Einstein je energijo označeval z E , toda simbol E je rezerviran za električno jakost polja; da se izognemo zmedi, bomo energijo označevali z W , po angleški besedi za delo, *work*). Splošna ohranitvena načela zahtevajo enakosti energij, momentov, naboja, itd. Če torej med seboj izenačimo Planckovo in Einsteinovo relacijo za energijo, imamo $\hbar\omega = mc^2$. To pomeni, da mora imeti foton tako frekvenco, katere energija ustreza mirovni masi (notranji energiji) elektrona. Ta frekvenca je znana kot Comptonova frekvenca [14] (A.H. Compton, 1923, Nobelova nagrada 1927) in jo ponavadi označujemo z ω_c .

Od tod pa do ideje, da bi elektron lahko bil le v nekakšno past ali zanko ujet foton ni več daleč, zlasti če vemo, da se elektron v nekaterih pogojih obnaša kot bi šlo za valovanje. Še več, znano je, da foton ujet med zrcali oddaljenimi le za par valovnih dolžin (torej mnogo manj kot je lastna koherentna dolžina fotona) zaradi interference vpadnega in odbitega vala na zrcalu izkazuje mnoge lastnosti, ki so na las podobne delcem. Če naštejemo le nekatere:

- 1) ujeti foton izkazuje enako inercijo (mirovno maso) kot delec: $m = \hbar\omega/c^2$;
- 2) na ujeti foton deluje gravitacija enako kot na delec z maso m ;
- 3) ujeti foton izkazuje enako kinetično energijo: $W_k = \frac{1}{2}(mv^2) = \frac{1}{2}(\hbar\omega/c^2)v^2$;
- 4) ujeti foton izkazuje enak mehanski moment (gibalni impulz): $p = mv$;
- 5) če se sistem zrcal premika, imata na zrcalih vpadna in odbita vala različni valovni dolžini, zato ima interferenčna ovojnica valovno dolžino λ_s , ki je natančno enaka de Brogliejevi valovni dolžini delca z maso m : $\lambda_s = \lambda_B = 2\pi\hbar/p$;
- 6) pri gibanju sistema z ujetim fotonom je fazna hitrost interferenčne ovojnice enaka de Brogliejevi fazni hitrosti za delec: $v_s = w = c^2/v$;
- 7) prav tako je grupna hitrost valovanja ujetega fotona enaka grupni hitrosti delca: $v_B = u$;
- 8) za premikajoč se sistem z ujetim fotonom velja enak relativistični popravek efektivne valovne dolžine kot za premikajoči se delec: $\lambda_B = \lambda_0\sqrt{1 - v^2/c^2}$;
- 9) od vrste zrcala in posledično faze vpadnega in odbitega valovanja na zrcalu je odvisna zunanja efektivna polariteta električnega naboja, oziroma orientacija magnetnega polja (o tem več kasneje).



Sl.5: Naivna ponazoritev notranje energije elektrona ali pozitrona s stojnim valom (brez upoštevanja spina - podrobneje glej [63] do [67]). Na strmem impedančnem skoku se električno polje odbije sofazno, zato se na zunaj amplituda podvoji, magnetno polje pa protifazno, zato se na zunaj izniči. Polariteta "naboja" je odvisna od polaritete električnega polja.

Podobno, vendar precej bolj zapleteno bi lahko pokazali, da ujeti foton mora imeti spin, magnetni moment, in druge delcem podobne lastnosti. Naj bo to zaenkrat dovolj za sklep, da se stojno valovanje (kar ujeti foton je) obnaša delcu podobno. Seveda, modeliranje stojnega valovanja z zrcali lahko le delno ponazori interferenčne učinke valovanja, vendar za delec kot je elektron mora veljati krogelna prostorska simetrija. Torej mora notranje valovanje elektrona propagirati hkrati iz centra navzven in nazaj.

Toda: kaj bi lahko povzročilo odboj vala na zunanjem "robu" elektrona? Čemu naj bi foton, ki sicer ne zna nič drugega, kot da se podi po Vesolju premočrtno s svetlobno hitrostjo naenkrat odloči ostati ujet v nekem zelo majhnem prostoru? O tem bo govora v naslednjih poglavjih.

Elektromagnetne lastnosti prostora

V Newtonovi Optiki (Opticks, 1704) najdemo zapisano: "*Mar ni mogoče masivnih teles in svetlobe pretvarjati drugo v drugo?... in ali ne dobijo masivna telesa pretežni delež svoje aktivnosti ravno od svetlobe, ki vstopa v njihovo sestavo?*"

Zveni zelo sodobno, mar ne? Newton je sicer verjel, da je svetloba pretok delcev, predvsem zaradi ostrih senc teles, če so ta osvetljena s točkastim svetlobnim virom. Newton je med drugim zaslovel tudi po iznajdbi zrcalnega teleskopa, poznal pa je tudi mikroskop; a če bi imel na voljo le malo boljši mikroskop bi ugotovil, da sence le niso tako ostre. Nasprotno je C. Huygens bil prepričan da gre pri svetlobi za valovanje, predvsem zaradi loma na meji optično različno gostih prozornih snovi. T. Young in A.J. Fresnel sta na osnovi pojava interference presodila v Huygensovo korist, čeprav je njuna teorija vsebovala tudi dele Newtonove teorije. Valovanja (predvsem na površju vode) je dobro opisal že J.B.R. d'Alembert s svojo valovno enačbo, čeprav je svetlobno

valovanje nekoliko drugačno od tistega na površju vode. Kljub temu so nekatere analogije lahko ustrezne. Teorijo svetlobe je dokončno zaokrožil J.C. Maxwell, ki je poenotil do takrat ločene pojave elektrike, magnetizma in svetlobe v enotno elektromagnetno teorijo [15].

Še vedno pa je ostalo nerešeno temeljno vprašanje: če je svetloba res valovanje, potem valovanje česa, ali v čemu? Po analogiji z valovanji tekočin in plinov se je zelo zgodaj oblikovala ideja, da mora svetlobo prenašati nekakšen izredno fin in vse prežemajoč fluid, imenovan *Aether* [16] (po snovi iz katere naj bi po grški mitologiji bilo sestavljeno ozračje, ki ga dihajo bogovi živeči na zvezdah). Obstoje etra so poskušali dokazati mnogi, a brez uspeha; najbolj znamenit spodleteli poskus detekcije sta izvedla A. Michelson in E. Morley z uporabo interferenčne metode z namenom zaznati orbitalno gibanje Zemlje skozi domnevno mirujoč eter [17]. Negativen rezultat njunih poskusov, ter mnogih drugih podobnih kasnejših, je bil le eden od temeljev na katerih je Einstein zasnoval svojo Posebno teorijo relativnosti.

Posebna teorija relativnosti je s postulatoma o konstantnosti svetlobne hitrosti v vseh referenčnih okvirjih navidez odpravila potrebo po etru. Vendar je kmalu po objavi Splošne teorije relativnosti postalo jasno, da je zaradi nekaterih učinkov (predvsem ukrivljanja svetlobe ob zelo masivnih objektih) odprava etra "*bila nekoliko preuranjena*", kot je zapisal Einstein leta 1920 [16]. Po njegovih ugotovitvah prostor nedvomno izkazuje določene fizikalne lastnosti, in je zato mogoče govoriti o obstoju etra, čeprav ne ravno v klasičnem materialnem pomenu.

Znano je tudi, da se N. Tesla ni povsem strinjal s teorijo relativnosti, vendar je bil njegov model elektromagnetnega etra povsem klasičen: ni vseboval kovariantnih transformacij H. Lorentza, čeprav je vedel za izpeljave, ki jih je v elektromagnetne lastnosti prostora vpeljal O. Heaviside [18]. Ključne Heavisideove ugotovitve temeljijo na posebnih ("konstitutivnih") enačbah v Maxwellovi teoriji iz katerih izhaja, da svetlobno hitrost določata efektivna elektromagnetna prostorska parametra μ_0 in ε_0 (magnetilna permeabilnost in dielektrična permitivnost), in sicer takole:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}} = 299\,792\,458 \text{ m/s} \quad (2)$$

Indeks 0 pomeni da gre za lastnosti praznega prostora. Enačba (2) pomeni, da je propagacijska hitrost elektromagnetnega valovanja (oziroma svetlobna hitrost) odvisna od količin, ki bi jih lahko primerjali z vztrajnostjo in elastičnostjo snovnega medija skozi katerega potuje mehansko valovanje. Morda se zdi nenavadno, vendar je nesporno dejstvo, da tovrstne fizikalne lastnosti očitno ima tudi prostor brez snovi.

Za propagacijo elektromagnetne energije lahko iz istih parametrov določimo efektivno impedanco Z (kompleksno upornost) prostora kot medija, kar predstavlja razmerje med električno in magnetno komponento jakosti polja, E in H ; efektivno gre za neke vrste Ohmov zakon v praznem prostoru:

$$\frac{E}{H} = Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} \approx 376.7 \, \Omega \quad (3)$$

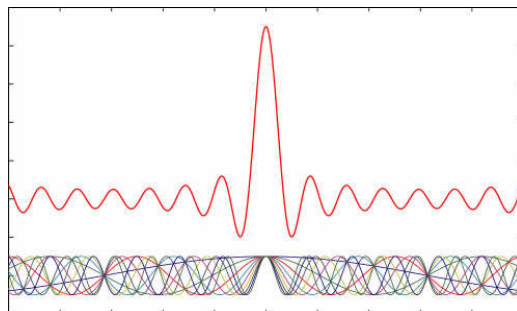
Iz elektromagnetne teorije vemo, da prisotnost snovi spremeni omenjene lastnosti prostora, in sicer tako, da se spremenita bodisi magnetilnost, bodisi dielektričnost, bodisi

oboje: $\varepsilon = \varepsilon_r \varepsilon_0$, ter $\mu = \mu_r \mu_0$ (indeks r v obeh primerih označuje relativne vrednosti materialnih lastnosti v primerjavi s praznim prostorom).

Postavlja se vprašanje: posledica česa sta μ_0 in ε_0 v praznem prostoru?

Za odgovor se moramo vrniti osnovni energiji praznega prostora. Na osnovi Planckove vrednosti za to energijo ($\hbar\omega/2$) sklepamo, da si jo je mogoče zamisliti kot seštevek fotonov vseh možnih frekvenc, potujočih v vseh možnih smereh. Posledično se le ti efektivno med seboj izničijo (v povprečju), vendar se vedno lahko zgodi, da v posamezni točki prostora obstajajo majhne fazne razlike, in torej vsota ni vedno enaka nič. Kvantna mehanika narekuje, da za vsak sistem mora veljati Heisenbergovo Načelo nedoločenosti [19], ponavadi ga zapišemo kot neenačbo za lego in moment nekega delca, $\Delta x \cdot \Delta p \geq \hbar/2$, podobno pa velja za energijo in časovni interval, $\Delta W \cdot \Delta t \geq \hbar/2$. Tudi za energijo praznega prostora mora veljati enako. Naj so kvantne fluktuacije [20] še tako majhne, ko gre za visoko gostoto energije mora tudi vsota teh kvantnih fluktuacij občasno lokalno dosegati visoke vrednosti, tudi takšne, da za njih velja enačba (1), torej da iz fotonov nastajajo komplementarni pari delcev, ki se nato spet anihilirajo in povrnejo energijo prostoru.

To pomeni, da prazen prostor, ki je sicer linearen medij in omogoča linearno superpozicijo (seštevanje) fotonov, pri visokih gostotah energije postane nelinearen in iz njega začnejo frčati pari delcev. Mejo pri kateri se to zgodi določa Schwingerjeva jakost polja: $E_s = m_e^2 c^3 / q_e \hbar \approx 1.3 \times 10^{18}$ V/m (J.S. Schwinger, Nobelova nagrada l. 1965, skupaj z R.P. Feynmanom in S. Tomonago).



Sl.6: Primer superpozicije večjega števila valov (poleg osnove frekvence sta tu še vse lihe harmonske komponente od 3. do 17.). Če je gostota fotonov v prostoru zelo velika, se pogosto najde dovolj med seboj fazno in frekvenčno koreliranih komponent, katerih rezultat je lokalno zelo visoka gostota energije, daleč nad povprečjem. Če gostota energije preseže Schwingerjev prag, nastane kratkoživi par delec-antidelec, ta se v kratkem spet anihilirata in povrneta prostoru energijo v obliki dveh fotonov.

Iz relacije za Comptonovo frekvenco ω_c lahko sklepamo, da mora biti povprečna življenjska doba takega komplementarnega para delcev obratno sorazmerna frekvenci, torej tudi njuni masi (notranji energiji):

$$\tau = \frac{2\pi}{\omega_c} = \frac{\hbar}{mc^2} \quad (4)$$

Poleg tega iz laboratorijskih preučevanj lastnosti pozitronija (kratkoživega "atoma" sestavljenega iz elektrona in pozitrona, [21]) vemo, da je na njegovo polarizacijo mogoče vplivati z zunanji polji. Obračanje polarizacijske osi v smeri polja, četudi le kratkotrajno, jemlje delček energije zunanjemu polju. Zato je lokalna vrednost polja malenkost manjša, sorazmerno pogostosti pojavljanja tovrstnih delcev.

To nas navaja na sklep, da gostota energije praznega prostora pogojuje nastanek komplementarnih parov delcev z določeno pogostostjo, ter da ti prek svoje polarizabilnosti [22] vplivajo na elektromagnetne lastnosti praznega prostora. Torej sta magnetilnost μ_0 in dielektričnost ϵ_0 neposredni posledici gostote parov delcev v praznem prostoru, oziroma posredni posledici gostote energije praznega prostora in njenih kvantnih fluktuacij.

Ponavadi definiramo dielektrični premik (z mastnim tiskom so označene vektorske količine) kot:

$$\mathbf{D} = \epsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P} = \epsilon_r \epsilon_0 \mathbf{E} \quad (5)$$

in je relativna dielektričnost razumljena kot funkcija dovzetnosti (susceptibilnosti) obravnavanega optičnega medija s polarizacijo \mathbf{P} :

$$\epsilon_r = 1 + \chi \quad (6)$$

Potemtakem je $\epsilon_0 \mathbf{E}$ efektivna polarizacija praznega prostora pod vplivom vektorja električnega polja.

Za razliko od kvantne fizike bi v klasični fiziki tako razumevanje bilo nenavadno, ker je "prazen prostor" po definiciji pač prazen, torej brez snovi, ki bi jo lahko polarizirali. Kvantno razumevanje pa nas (ob upoštevanju drugih prejšnjih relacij) pripelje do vrednosti za volumsko polarizacijo vakuumu:

$$P_0 = \frac{q_e^2}{m_e \omega_0^2 \lambda_c^3} E \quad (7)$$

kjer je q_e naboj elektrona, m_e masa elektrona, ω_0 osnovna frekvenca sistema, λ_c je Comptonova valovna dolžina (in posledično λ_c^3 predstavlja volumen prostora). Zaradi podobnosti z enačbo (5) lahko ulomku, ki množi poljsko jakost E pripišemo vlogo efektivne dielektričnosti:

$$\tilde{\epsilon}_0 = \frac{q_e^2}{m_e \omega_0^2 \lambda_c^3} \quad (8)$$

Podobno relacijo je mogoče izpeljati tudi za magnetilnost μ_0 .

Tako izračunana vrednost je premajhna, okoli 18% dejanske vrednosti ϵ_0 [23], toda v tem postopku smo prostorskim kvantnim fluktuacijam implicitno pripisali le energijo, ki ustreza tvorbi parov e^-e^+ . Seveda so lahko kvantne fluktuacije večje in omogočajo tudi tvorbo težjih parov delcev, ob določeni statistični porazdelitvi verjetnosti. Pokazali pa smo, da taka interpretacija ni nemogoča, je dokaj verjetna.

Oglejmo si nekaj posledic takega razumevanja lastnosti praznega prostora. Relacije bomo poenostavili tako, da bomo privzeli:

$$\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E} = \kappa \epsilon_0 \mathbf{E} \quad (9)$$

kjer naj bo faktor κ razmeroma majhen popravek ($|\kappa - 1| \ll 1$) spremenjene polarizabilnosti praznega prostora, kar velja ob prisotnosti navadne snovi. Če sta torej dielektričnost in magnetilnost funkciji faktorja κ , denimo $\varepsilon(\kappa) = \kappa\varepsilon_0$ in $\mu(\kappa) = \kappa\mu_0$, se mora s spremembo polarizacije lokalno spreminjati tudi svetlobna hitrost [24]:

$$c' = \frac{1}{\sqrt{\mu(\kappa)\varepsilon(\kappa)}} = \frac{1}{\sqrt{\kappa^2\mu_0\varepsilon_0}} = \frac{c}{\kappa} \quad (10)$$

To se na prvi pogled razlikuje od postulata Posebne teorije relativnosti, toda za sklep je še prezgodaj: pogledajmo prej vpliv kvantnih fluktuacij na meritev dolžine in časa.

Teorija relativnosti zahteva uporabo Lorentzovih transformacij za meritve v različnih sistemskih referenčnih okvirjih. Za opazovalca, ki ob opazovanem sistemu relativno miruje, sprememb ni. Toda za opazovalca, ki se mimo opazovanega sistema premika z relativno hitrostjo v , bodo meritve časovnega intervala Δt in razdalje Δx v opazovanem sistemu odvisne od razmerja relativne hitrosti v in svetlobne hitrosti c . Lorentzov časovni popravek [25] (brez krajevnega prispevka) izračunamo takole:

$$\Delta t' = \Delta t \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (11)$$

To pomeni, da se z višanjem hitrosti v časovni interval podaljšuje (ura tiktaka počasneje). Lorentzov dolžinski popravek [26] (brez časovnega prispevka) pa bo:

$$\Delta x' = \Delta x \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \quad (12)$$

torej se opazovana razdalja z višanjem hitrosti v skrajšuje.

Einsteinovo Načelo enakovrednosti zahteva veljavnost podobnih relacij tudi v gravitacijskem polju. Vendar popravke v gravitacijskem polju računamo nekoliko drugače: za referenčno vrednost moramo vzeti količino izmerjeno zelo daleč od objekta, ki povzroča gravitacijsko polje, in nato računati popravek pri neki vmesni razdalji r . Pri tem upoštevamo Schwarzschildov mejni radij $r_s = 2GM/c^2$ za maso M , pri kateremu taka masa preide v singularnost ("črna luknja"). Časovni interval na neki vmesni razdalji r (med r_s in ∞) bo torej podaljšan (ura tiktaka počasneje, če je bližje centru mase) :

$$\Delta t_r = \Delta t_\infty \sqrt{1 - \frac{r_s}{r}} = \Delta t_\infty \sqrt{1 - \frac{2GM}{rc^2}} \quad (13)$$

V gravitacijskem polju pa se dolžina objektov radialno poveča ("spaghetti-efekt"):

$$\Delta x_r = x_\infty \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{2GM}{rc^2}}} \quad (14)$$

Poudarimo še, da je podobnost teh relacij z relacijami (11) in (12) zagotovljena s tem, da količina $v_u^2 = 2GM/r$ predstavlja ubežno hitrost na razdalji r od mase M , torej imamo pod korenem spet razmerje hitrosti, v_u^2/c^2 . Omenimo še dejstvo, da bi sistem globalnega določanja položaja s pomočjo satelitov (GPS) brez upoštevanja obeh časovnih

relativističnih popravkov (11) in (13) že po enem samem dnevu postal popolnoma neuporaben!

Če torej privzamemo, da prisotnost masivnih teles vpliva na polarizacijo prostora, potem vpliv polarizacije na meritve količin Δt in Δx mora slediti enaki zakonitosti:

$$\Delta t' = \Delta t \sqrt{\kappa} \quad (15)$$

$$\Delta x' = \frac{\Delta x}{\sqrt{\kappa}} \quad (16)$$

Svetlobno hitrost je mogoče meriti s svetlobnim pulzom, ki v časovnem intervalu Δt prepotuje razdaljo Δx , tako da je $c = \Delta x / \Delta t$; to velja za prazen prostor daleč od kakršne koli mase, kjer je gravitacijsko polje zanemarljivo. Če merila Δx in Δt uporabimo v pogojih spremenjene polarizacije, bomo z njimi v skladu z relacijo (10) izmerili c/κ :

$$c' = \frac{\Delta x'}{\Delta t'} = \frac{c}{\kappa} \quad (17)$$

Če sedaj vnesemo (15) in (16) v (17), sledi:

$$\frac{\Delta x'}{\Delta t'} = \frac{\frac{\Delta x}{\sqrt{\kappa}}}{\Delta t \sqrt{\kappa}} = \frac{\Delta x}{\Delta t} \cdot \frac{1}{\kappa} = c' \kappa \cdot \frac{1}{\kappa} = c \quad (18)$$

kar pomeni, da v pogojih lokalno spremenjene polarizacije Lorentzove transformacije prostora in časa poskrbijo, da **spremenbe svetlobne hitrosti ni mogoče izmeriti**. Rezultat se torej popolnoma sklada s postulatom relativnostne teorije.

Kar pa lahko izmerimo je časovna zakasnitev svetlobnega ali radarskega impulza, ki potuje mimo masivnega telesa, kot je to ugotovil I. Shapiro [27] z odbojem radarskih pulzov od Venere, ko je ta bila vidna ob robu Sonca. Prav tako je ukrivljanje svetlobe zvezd mimo Sonca (kar je bila ena prvih potrditev Splošne teorije relativnosti) v resnici dokaz, da se svetlobna hitrost ob veliki masi spreminja.

Podobno je z relacijami za frekvenco in energijo. Frekvenca f je določena kot število nihalnih period znotraj časovne enote, $n/\Delta t$. Če Δt skrajšamo na velikost ene periode, oziroma $1/\Delta t = f = \omega/2\pi$, lahko zapišemo:

$$\omega' = \frac{2\pi}{\Delta t'} = \frac{2\pi}{\Delta t \sqrt{\kappa}} = \frac{\omega}{\sqrt{\kappa}} \quad (19)$$

To znižanje frekvence opazimo kot rdeči zamik [28] spektra v gravitacijskem polju (denimo v spektrih masivnih zvezd). Potem iz Planckove relacije za energijo sledi tudi tolmačenje izgube energije fotona zaradi vzpenjanja v gravitacijskem polju:

$$W' = \hbar \omega' = \hbar \frac{\omega}{\sqrt{\kappa}} = \frac{W}{\sqrt{\kappa}} \quad (20)$$

Poglejmo še kako je z maso, če upoštevamo Einsteinovo enačbo $m = W/c^2$:

$$m' = \frac{W'}{(c')^2} = \frac{\frac{W}{\sqrt{\kappa}}}{\left(\frac{c}{\kappa}\right)^2} = \frac{W}{c^2} \cdot \frac{\kappa^2}{\sqrt{\kappa}} = m\kappa^{3/2} \quad (21)$$

Vpliv polarizacije na snov lahko ponazorimo z izračunom Bohrovega radija za vodikov atom v osnovnem energijskem stanju. V enačbi za Bohrov radij zamenjamo količine, ki določajo konstanto fine strukture α :

$$r_B = \frac{4\pi\epsilon_0\hbar^2}{m_e q_e^2} = \frac{\hbar}{m_e c \alpha} \quad (22)$$

z ustrezno zamenjavo za m'_e in c' in dobimo:

$$r'_B = \frac{\hbar}{\alpha} \cdot \frac{1}{m'_e c'} = \frac{\hbar}{\alpha} \cdot \frac{1}{m_e \kappa^{3/2} \frac{c}{\kappa}} = \frac{r_B}{\sqrt{\kappa}} \quad (23)$$

Očitno gre za enako relacijo kot za spremembo dolžine (16). Če se torej razdalja na kateri elektron kroži okoli atomskega jedra v gravitacijskem polju zmanjša pomeni, da ne obstaja nobeno zadosti trdno ravnilo s katerim bi izmerili neko dolžino enako v vseh pogojih. Podobno je mogoče pokazati za druge dolžinske relacije, kot so klasična velikost elektrona, Comptonova valovna dolžina, itd., torej korekcija splošno velja.

Imamo torej vrsto relacij s pomočjo katerih je mogoče interpretirati rezultate Splošne teorije relativnosti na osnovi vakuumskih kvantnih fluktuacij. Namesto *ad hoc* vpeljane Einstein-Riemannove ukrivljenosti prostora lahko obdržimo Evklidsko ravno geometrijo, v kateri spremenjene elektromagnetne lastnosti prostora vplivajo na meritve; in elektromagnetne lastnosti prostora so izključno posledica velike gostote osnovne energije prostora in njenih kvantnih fluktuacij.

Konec koncev, kaj dejansko pomeni "skrivnostna" količina c^2 , ki ureja skoraj vse odnose v relativnostni teoriji? Poznamo jo iz enačbe (2):

$$c^2 = \frac{1}{\mu_0 \epsilon_0} \quad (24)$$

Marsikdo utegne ugovarjati, da z vsem tem nismo naredili nič novega, le eno domnevo smo zamenjali za drugo. Pa ni povsem tako.

Najprej, za Einstein-Riemannovo ukrivljenost prostora ob prisotnosti mase nimamo nobenega prepričljivega dokaza; nasprotno, nedavne zelo natančne meritve kozmičnega mikrovalovnega prasevanja s satelitom Planck [29] ne puščajo veliko prostora taki domnevi, učinkov ukrivljenosti prostora na prasevanje preprosto ni opaziti [30]. Zdi se da je Vesolje na vseh razsežnostih dejansko Evklidsko ravno. Ukrivljanje poti svetlobe pri prehodu ob veliki masi najbolj prepričljivo pojasnimo upoštevajoč spremenjene elektromagnetne lastnosti prostora [31].

Nadalje, Splošna teorija relativnosti sicer izpelje vse zakonitosti izjemno natančno zgolj na temeljnih načelih in nekaterih postulatih (denimo konstantnost vrednosti svetlobne hitrosti znotraj katerega koli referenčnega okvirja, enakovrednost težnosti in pospeška, itd.), vendar ta načela in postulate vpelje na osnovi izkušenj, zanje ne zahteva

nobene fizikalne razlage. Osnovna energija prostora, ki s kvantnimi fluktuacijami vpliva na elektromagnetne lastnosti prostora, pa nudi prepričljivo fizikalno razlago za vsa načela in postulate, ki so temelj Splošne teorije relativnosti.

In nenazadnje, poznamo celo vrsto dokazov, da mora biti gostota osnovne energije prostora ne le od nič različna, pač pa tudi izredno visoka. Prvi tovrsten dokaz je prispeval W. Lamb leta 1947 [32] z meritvami energijske razlike med vodikovimi orbitalami $^2S_{1/2}$ in $^2P_{1/2}$. Po Diracovih enačbah bi morale te orbitale imeti enako energijo, vendar ima sevanje, ki je posledica vzbujanja in relaksacije orbitale $^2S_{1/2}$ za okoli 1GHz višjo frekvenco, torej tudi višjo energijo. Razliko je na osnovi kvantne elektrodinamike pojasnil H. Bethe kot interakcijo elektrona s kvantnimi fluktuacijami v osnovni energiji prostora, česar pa Diracove enačbe ne zajemajo. Tako so bili postavljeni temelji moderne kvantne elektrodinamike, v okviru katere prek Lambovega energijskega zamika lahko izmerimo vrednost konstante fine strukture α na 6 decimalk natančno, ter temu primerno izboljšamo natančnost mnogih drugih lastnosti osnovnih delcev.

H.G.B. Casimir je leta 1948 teoretično napovedal učinek kvantnih fluktuacij energije prostora, ki ga omejujeta med seboj vzporedni kovinski plošči [33], kar je bilo 10 let zatem tudi eksperimentalno potrjeno. Sila, ki je rezultat nekoliko večje energije prostora zunaj plošč kot med njima, narašča z četrto potenco zmanjševanja oddaljenosti med ploščama, $\propto 1/x^4$, kar je mogoče le, če je tudi delovanje energije prostora na površinsko enoto sorazmerno četrti potenci frekvence, $\propto \omega^4$, ter izkazuje lastnosti Lorentzove kovariantnosti. Danes lahko merimo ta učinek na 1% natančno.

Še en dokaz najdemo pri samem elektronu, oziroma njegovemu anomalnemu magnetnemu momentu [34]. Klasična predstava o elektronu, kot kroglici s površinskim nabojem, ki ob svojem vrtenju proizvaja magnetni dipolni moment, napoveduje vrednost $\boldsymbol{\mu}_s = (-q_e/2m_e)\mathbf{L}$ (q_e je električni naboj, m_e je masa elektrona, \mathbf{L} je vektor kotnega momenta). Kvantna teorija pa na osnovi Diracove enačbe, ter ob upoštevanju spinskega kotnega momenta določa popravek, ki je za faktor g_s večji: $\boldsymbol{\mu}_s = g_s(-q_e/2m_e)\mathbf{L}$. Faktor g_s bi teoretično moral biti natančno enak 2, a se izkaže da je malenkost večji, $g_s = 2,002319304199$, z merilno napako $\pm 1,5 \times 10^{-12}$. Ta vrednost je ena najbolj natančno izmerjenih količin v fiziki osnovnih delcev. Razlika od teoretično pričakovane vrednosti je takoimenovani anomalni magnetni moment, in podobne ali večje razlike so bile opažene pri vseh osnovnih delcih, tudi nevtrona (ki je navzven sicer električno nevtralen, vendar vsebuje električno nabite kvarke). To razliko pripisujemo interakciji delcev s kvantnimi fluktuacijami v energiji prostora.

Obstaja še vrsta drugih posrednih pokazateljev, ki kažejo na visoko gostoto osnovne energije prostora. Tukaj pa nas zanima predvsem kako prisotnost mase vpliva na to gostoto. Za razlage, ki sledijo obstajajo utemeljeni izračuni, a so predolgi da bi jih tukaj ponavljali; bolj radovedne bralce moram napotiti na druge vire [35-62].

Če si predstavljamo energijo prostora kot povprečje valovanj (fotonov) vseh možnih frekvenc iz vseh možnih smeri lahko domnevamo, da za nekatere frekvence predstavlja prisotnost delca določeno oviro, vsaj za valovne dolžine primerljive z velikostjo delca. To pomeni da snov na nek način "senči" del energije prostora v svoji neposredni okolici. In če je gostota energije prostora ob snovi manjša, bodo tudi kvantne fluktuacije te energije manjše in manj pogoste. To pa spet vpliva na polarizabilnost parov

delcev, ki se porajajo in izginjajo v teh kvantnih fluktuacijah, kar pomeni, da se z oddaljenostjo od snovi spreminja tudi vrednost polarizacijskega faktorja κ . Krogelna simetrija polja pa zagotavlja, da se mora vrednost κ spreminjati obratno sorazmerno kvadratu razdalje, $\propto 1/r^2$.

Vrnimo se za trenutek enačbam (2) in (3). Za svetlobno hitrost smo pokazali da se v okoliščinah spremenjene polarizabilnosti za oddaljenega opazovalca spreminja, za lokalnega pa ne. Ker impedanco prostora izražamo s pomočjo enakih količin sledi, da tudi za impedanco mora veljati podobno. Iz enačbe (1) izhaja, da je mogoče elektron razumeti kot v lastno past ujeto svetlobo, torej kot stojno valovanje [63-67]. Stojno valovanje je vedno posledica (vsaj) dveh nasproti potujočih valovanj, zato je efektivna propagacijska hitrost enaka nič. Posledično mora tudi impedanca v njegovem središču biti enaka nič. Torej ima stojni val v središču svoj minimum, na razdalji $1/4$ valovne dolžine od središča pa maksimum, in tam je gostota energije največja. Prav tako je na tem "robu" impedanca enaka impedanci prostora.

Na impedančni meji prihaja do odboja vala, podobno kot na prehodu med optično različno gostimi mediji. In če je impedančni skok oster, imamo opravka z razmerami podobnimi zrcalu. Zato se navzven propagirajoč val na impedančni meji odbije sofazno nazaj proti središču. Sofazna električna komponenta odbitega vala pomeni, da se amplituda na meji sešteva z vpadnim valom. Toda smer valovanja se obrne, zato se mora magnetna komponenta vala obrniti (Poyntingov teorem) in se na "robu" odšteva od magnetne komponente vpadnega vala.

Torej imamo na "robu" zgolj "statično" električno polje (naboj!), med tem ko je v središču magnetno polje maksimalno. Razmerje med fazami električne in magnetne komponente polja pa določa smer sukanja polja (spin!). Energija notranjega stojnega valovanja mora biti v ravnovesju z zunanjo energijo prostora. Namreč gostota energije efektivno pomeni pritisk. Če pa imamo v prostoru nek gradient polja, bo to povzročilo neravnovesje vsote energij na obeh straneh elektrona. Temu neravnovesju se mora prilagoditi tudi notranje stojno valovanje z ustrezno spremembo faze na robu in posledično neravnovesju v središču, kar pomeni, da bo začelo drseti proti viru polja, če sta polariteti različni, oziroma stran od vira, če sta polariteti enaki.

Denimo, da smo na elektronovo stojno valovanje od zunaj vplivali s kratkim električnim impulzom. Neravnovesje polja na eni strani potrebuje nek končni čas da pride do nasprotne strani in povzroči ustrezno fazno spremembo. To pomeni, da na motnjo ne bo reagiralo takoj, oziroma se bo obnašalo kot bi izkazovalo lastnosti inercije. Ker se sistem upira zunanji motnji z vso svojo notranjo energijo pomeni, da na zunaj opazujemo razmerje med silo, ki je posledica delovanja impulza in pospeškom, ki ga je ta ustvaril. Razmerje F/a imenujemo "inercialna masa", m .

Kadar pa pride do trka para delcev pri zelo veliki hitrosti, se impedančna bariera med njima poruši, in notranja energija obeh delcev najde prosto pot navzven v obliki dveh fotonov. Obratno, ob srečanju dveh fotonov z ustrezno energijo in v pravi fazni korelaciji bo lokalna vrednost energije zadosti visoka, da bo iztisnila del osnovne energije prostora, ter ustvarila impedančne pasti za nastanek para delcev.

Počasi torej nastaja sicer še vedno razmeroma grob, a vseeno dokaj koherenten model fizikalne realnosti, ki se obnaša natanko tako kot smo vajeni, povrhu pa smo

sposobni razumeti zakaj je temu tako. In še: izhajajoč iz kvantnih zakonitosti smo upravičili zakonitosti Splošne teorije relativnosti kot logično nadaljevanje le teh. To pa je pomemben dosežek, kljub obstoju mnogih še nerešenih podrobnosti. In v kvantnem svetu je Hegelov pregovorni hudič vedno v podrobnostih, dobesedno.

Termodinamika, svetloba in problem časa

Kvantna elektrodinamika, kvantna kromodinamika, kvantna teorija polja, vse napovedujejo obstoj energije prostora razmeroma visoke gostote. Razlika med standardnimi teorijami in "novo" stohastično elektrodinamiko je predvsem v tem čemu gre pripisati vir te energije.

V standardnih teorijah vsi delci s svojim gibanjem ali vzbujenimi stanji hkrati oddajajo odvečne fotone in obenem absorbirajo druge, ki so jih oddali drugi delci. Dolgočasovno makroskopsko povprečje izmenjane energije imenujemo temperatura. Ker je število delcev v (vidnem) Vesolju ocenjeno na okoli 10^{80} , pomeni to res veliko izmenjavo energije. A če upoštevamo, da je povprečna gostota delcev v Vesolju le atom ali dva na kubični meter, pa tako ustvarjena gostota energije niti po Heisenbergovem naključju ne more biti zadosti velika, da bi obdržala na kupu en sam elektron, kaj šele drugih energijsko bolj izdatnih delcev. Obstoj dolgoročno stabilnih delcev preprosto zahteva vsaj 10^{50} J/m^3 , če naj bo omogočena stabilnost jeder najtežjih elementov, morda pa tudi celotno Planckovo gostoto 10^{113} J/m^3 .

Edini vir, ki bi na nek način zadostil potrebi po visoki gostoti energije prostora je proces, ki se je zgodil ob rojstvu Vesolja. Sicer teorija Velikega poka ni edina teorija nastanka Vesolja; je pa edina, ki je eksperimentalno in teoretično dovolj dobro podprta, da zaenkrat nima resne konkurence.

Ob rojstvu Vesolja je zaradi že omenjenih ohranitvenih načel morala nastati enaka količina snovi in antisnovi. Vemo tudi, da je Vesolje v svoji najzgodnejši fazi moralo iti skozi (vsaj eno) zelo gosto in zelo vročo fazo, v kateri so se procesi opisani z enačbo (1) dogajali nepretrgoma in na več ravnovesnih ravneh. Namreč, med tem ko se je Vesolje počasi ohlajalo in razširjalo so nastajali in se med seboj anihilirali pari delcev, katerih masa (notranja energija) ustreza povprečni energiji fotonov, ki so takrat zapolnjevali ves prostor. Večina nastalih delcev se je med seboj anihilirala, a zaradi majhne nesimetrije v obnašanju snovi in antisnovi je ostal majhen presežek snovi, ki tvori Vesolje kot ga vidimo danes. Denimo, nesimetrija med razpadom nevtralnih kaonov, k^0 , na par mionov μ^\pm je taka, da se v enem od 500 primerov zgodi en razpad na 3 mione. Podobno je tudi pri nekaterih drugih vrstah kratkoživih delcev. Tako zaenkrat veljajo ocene, da je vsak danes obstoječi delec snovi preostanek anihilacije kakšnih 10^{10} komplementarnih parov delcev.

Kam je torej šla vsa energija fotonov, ki so bili rezultat teh anihilacij? Nikamor, še vedno je tukaj v obliki osnovne energije prostora.

Energija prostora in njene kvantne fluktuacije niso zgolj zagotovilo obstoja snovi, so tudi zagotovilo učinkovite neponovljivosti vsakega bolj zapletenega procesa. Preprosti procesi, kot so opisani z enačbo (1) so seveda reverzibilni in ponovljivi zaradi kvantizacije energije. Toda ne moremo predvideti natančno kje in kako se bosta oba fotona srečala, ali bosta v taki fazni in prostorski korelaciji da bosta ustvarila par delcev,

ali pa bosta preprosto šla drug skozi drugega. Ne moremo vedeti niti kako in kje se bosta srečala elektron in pozitron, niti v katero smer se bosta po njuni anihilaciji odpravila oba nastala fotona, vemo le, da bosta odletela 180° narazen. Povrhu je že zaporedje dveh takih procesov praktično neponovljivo. Vsak bolj zapleten proces je tej zapletenosti primerno različen od drugega podobnega procesa. Na ravni atomov pa ne moremo predvideti niti trenutnega stanja vseh elektronov v orbitalah, zato tudi posamezne kemične reakcije ni mogoče predvideti. Napovemo lahko le povprečje, statistično verjetnost izida. Zato je verjetnost, da bomo videli črepinje na tleh kako se zlepijo skupaj v skodelico s čajem in skočijo na mizo pač enaka nič.

Kvantne fluktuacije, Heisenbergovo Načelo nedoločenosti, termodinamika, entropija, ter končno velika vrednost svetlobne hitrosti, z njo pa tudi hitrost prenosa vsakršne druge informacije, nam zagotavljajo smer "časovne puščice".

Težava z našim običajnim razumevanjem časa izvira iz zgodovinskega razvoja fizike, namreč vse temeljne enačbe so časovno reverzibilne; razen nekaj redkih primerov razpadov visokoenergijskih delcev so fizikalni zakoni simetrični na obrat časa [68-70]. Poleg tega nobena enačba ne pušča možnosti za utemeljitev koncepta sedanosti (bodisi v smislu trenutnega izhodišnega stanja, bodisi kakorkoli drugače opredeljene preferenčne koordinate). Čas v fiziki nikoli ni opredeljen kot trenutek, oziroma kot matematična točka: čeprav se lahko poslužujemo matematičnih limitnih procesov in dopuščamo da gre $\Delta t \rightarrow 0$, dejansko vedno razumemo čas kot interval, $\Delta t > 0$.

V tem oziru je treba omeniti idejo o *prostorčasu* Minkowskega [71]. Ker Splošna teorija relativnosti, kot smo videli, zahteva relativistične popravke hkrati za čas in razdaljo ob veliki masi se moramo vprašati kako in zakaj morajo temu vplivu biti podvrženi dve popolnoma različni fizikalni količini. Minkowski je skušal ta problem rešiti tako, da je časovno dimenzijo geometriziral in spravil na enako metriko kot prostorske razsežnosti. Čas t je pomnožil s svetlobno hitrostjo, ct , kar je enakovredno razdalji, ki jo svetloba prepotuje v časovni enoti. Toda, če naj bo sprememba prostorskih in časovnih koordinat med seboj neodvisna, mora biti časovna os pravokotna na vse tri prostorske osi. V trigonometriji in v Eulerjevih enačbah velja, da se orientacija neke osi obrne okoli izhodišča za 90° ob množenju z imaginarno enoto, $i = \sqrt{-1}$. Seveda izraz $y = ix$ ne pomeni nič imaginarnega, pomeni le, da je rešitve te preproste enačbe za vsak x treba iskati na osi, ki je na os x navpična in ima z njo skupno le izhodišče. Zato je Minkowski privzel izraz ict za časovno os, ter tako dobil 4-dimenzijski prostorčas z enakovredno metriko za vse osi.

Na ta način neko razdaljo med dvema dogodkoma sedaj lahko zapišemo kot prostorsko diagonalo v 4D:

$$s = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2 + (ict)^2} = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2 - c^2t^2} \quad (25)$$

Nekatere fizike zelo moti negativni predznak kvadrata časovne osi, in so se domislili vrste drobnih trikov kako se mu izogniti. Eni pravijo da čas v resnici poteka nazaj, češ ko se rodimo imamo pred seboj celo življenje, potem pa z vsako sekundo vedno manj. Drugi pravijo, da je prostor simetričen in prostorskim koordinatam lahko brez težav obrnemo predznak, čas pa naj bo pozitiven; toda pozabljajo da so pod korenem kvadrati, zato $(-x)^2 \equiv x^2$. Očitno ne razumejo, da je negativen predznak

posledica kvadrata imaginarne enote, $i^2 = -1$, le ta pa je posledica zahteve po ortogonalnosti časovne dimenzije na ostale tri prostorske dimenzije.

Če ima morda kateri izmed bralcev težave z predstavo o 4D prostorčasu, ga moram potolažiti da nikakor ni edini. Toda to ni tako hud problem. Mnogo huje je dejstvo, da Lorentzove transformacije veljajo le za čas in prostorsko os v smeri gibanja: če se gibamo v smeri osi x , moramo za Δt in Δx uporabiti ustrezne transformacije (11) in (12). Toda obe navpični prostorski koordinati morata ostati nespremenjeni, $y' = y$ in $z' = z$. Če pa smo muhasti in se odločimo spremeniti smer gibanja, denimo da zavijemo v smer osi y , moramo upoštevati popravek (12) za os y , med tem ko bo os x sedaj nespremenjena, $x' = x$.

Pa to ni edini problem. *Prostorčas* Minkowskega naj bi imel med seboj ortogonalne osi (to je bil cilj!), vendar jih nima. Sicer, kadar sedimo doma v fotelji in svojih prostorskih koordinat relativno ne spreminjamo, se še vedno staramo, čas torej teče neodvisno. Toda nobene prostorske koordinate ni mogoče spremeniti ne da bi hkrati spremenili časovne koordinate! To pomeni da so prostorske koordinate časovno odvisne, in torej niso ortogonalne. Miknowski je to skušal rešiti tako, da je potegnil poševnico skozi izhodišče koordinatnega sistema in jo zavrtel v dvojno konico, ter s tem omejil dogodke na tiste, ki so nam v nekem trenutku dosegljivi (do njih lahko dostopamo s hitrostjo nižjo od svetlobne) in tiste, ki nam niso dosegljivi, ker bi za to morali prekoračiti svetlobno hitrost. Posledica tega pa je, da v bližini plašča konice geometrija prostorčasa ni več linearna, pač pa se močno ukrivlja bolj ko se bližamo plašču konice (svetlobni hitrosti). To pa se ne sklada z dejanskim stanjem: če bi se denimo z avtomobilom peljali po avtocesti okrog Zemlje s polovico svetlobne hitrosti, bi se nam pot zdela relativistično skrajšana, toda pogled na števec porabljenega goriva bi razkril, da smo energijo porabili za celotno, nerelativistično pot!

Skratka, Minkowski je s svojo rešitvijo vse skupaj le še bolj zapletel. In sploh, kakšno Vesolje pa je to, ki za vsak delec, naj se giba v katero koli smer in s katero koli hitrostjo, zahteva vsakič drugačne popravke? Očitno 4D *prostorčas* ni ravno uporaben univerzalni model Vesolja.

Rešitev je dejansko zelo preprosta:

Čas kot fizikalna dimenzija ne obstaja!

Prikaz fizikalnih relacij v obliki časovnih funkcij je sicer uporaben matematični in analitični pripomoček v številnih primerih, vendar ne temelji na vzročno-posledičnih razmerah. Fizikalni dogodek se zgodi zaradi lokalnih energijskih razlik, ne pa zaradi poteka časa. Delno smo to že priznali: danes kot merske enote za dolžino in čas uporabljamo lastnosti svetlobe, oziroma elektromagnetnega sevanja (enkrat v obliki štetja valovnih dolžin, drugič kot štetje nihalnih period). To pomeni, da smo primarni fizikalni pomen pripisali svetlobni hitrosti, in ne več prostoru in času. Ker pa je lokalna vrednost svetlobne hitrosti posledica pripadajočih elektromagnetnih lastnosti prostora, kot nakazuje enačba (2), in ker so le te posledica gostote energije prostora in njenih kvantnih fluktuacij, je pač smiselno odreči se času kot fizikalni dimenziji.

Naše doživljanje časa je preprosto posledica dejstva, da smo sposobni dogodke zaznavati, jih pomniti, priklicati iz spomina in primerjati; obenem pa tudi posledica končne propagacijske hitrosti svetlobe, energije nasploh, torej tudi informacije, ki jo ta nosi s seboj. Enosmernost navideznega poteka časa pa zagotavljajo ravno naključne kvantne fluktuacije.

Brezčasna prihodnost

Fiziki poznamo tudi svojevrsten "idejni Dopplerjev učinek": kadar ti kakšna ideja pade na pamet tako hitro, da te zaslepi in zgleda bolj iskriva, kot dejansko je. Prav tako nas zgodovinske izkušnje učijo, da kadar nek znanstvenik pravi, da je nekaj mogoče ima najbrž prav; ko pa trdi, da nekaj ni mogoče obstaja velika verjetnost, da se moti. Zato je treba biti vedno skrajno previden in preverjati svoje ideje na vse možne načine.

Toda za to priložnost sem bil vljudno povabljen podati tudi kakšno napoved prihodnjega razvoja, ali morebitnih novih odkritij temelječih na predstavljenih idejah. Takega vabila se ne spodobi zavrniti, kljub tveganju, da se bom nekoč ugriznil v jezik.

Po vsej verjetnosti ne tvegam veliko s trditvijo, da potovanje v času ni možno. Naj mi oprostijo vsi ljubitelji znanstvene fantastike, še posebej Paula Andersona, moram vas razočarati. Čas ni ne prostostna stopnja, ne dimenzija po kateri bi se lahko poljubno sprehajali. Efektivni potek časa je sicer možno lokalno upočasniti, toda obrniti ga ni mogoče. Samo pomislimo: če naj en sam elektron prenesemo v preteklost za eno samo sekundo, bi moral ta elektron tam zaznavati tudi svojo neposredno okolico, laboratorijsko opremo, ki ga je prestavila nazaj, torej tudi stavbo v kateri je, ter celo Zemljo, ki se je med tem zavrtela za 15 ločnih sekund, ali celih 463 metrov na ekvatorju, ter na svoji orbiti prepotovala dodatnih 30km; temu bi morali dodati še hitrost Sončevega sistema okoli galaktičnega jedra, hitrost galaksije v lokalni jati galaksij, itd. Skratka, energija, ki bi bila potrebna za ta eksperiment bi bila enakovredna energiji celega Vesolja!

Prepričljiv argument temu v prid je podal Stephen Hawking: če naj bi potovanje v času bilo možno, kje so potem vse tiste trume časovnih turistov iz cele prihodnosti? Čeprav, ko se za poletne počitnice odpravim z avtom proti obali, se včasih sprašujem...

Koncept časa bomo morda načeloma opustili, vendar gre za tako preprosto in uporabno poenostavitev v okoliščinah šibkih gravitacijskih polj in hitrosti pod 1% svetlobne hitrosti, da bomo za zmenke še naprej uporabljali časovne koordinate, tako kot še vedno uporabljamo Newtonove zakone. Torej ne pričakujem, da bomo v kratkem na zapetju nosili merilnike gostote kvantnih fluktuacij znamke Rolex.

Vsekakor pa sem prepričan, da bomo že v tem stoletju razvili tehnologijo omejenega manipuliranja z osnovno energijo prostora na mikro ravni, Casimirov učinek že kaže na to. Namreč že sedaj imamo pri nano-tehnologijah velike težave, ker se nam majhni sestavni deli na molekularni ravni "zlepijo" med seboj!

Toda, ali to pomeni da bomo lahko dobili neizčrpen vir energije, s katerim bomo naftnim mogotcem enkrat za vselej pomahali v slovo? Nikakor! Na svetovnem spletu je sicer mogoče najti napovedi in celo praktične demonstracije strojev, ki naj bi to energijo tako ali drugače izkoriščali. Vendar avtorji tovrstnih idej in njihovi občudovalci ne

razumejo, da je energijo mogoče izkoristiti le, kadar se ta spontano pretaka z višje na nižjo raven. Osnovna energija prostora pa že predstavlja najnižjo možno raven, ni nobene nižje. Za pretok v obratni smeri pa je treba energijo dodajati (kot pri hladilniku). Casimirov učinek resda med kovinskima ploščama malenkostno zniža energijo prostora, toda učinek je zelo majhen. Za kaj več bi bilo potrebno imeti plošče s tako gostoto snovi, kot je v nevtronskih zvezdah, ali črnih luknjah. Da bi kmalu imeli kaj takega, pa je malo verjetno.

Potovanja z nadsvetlobno hitrostjo in Einstein-Rosenove "črvine" lahko tudi mirno izključim. *Warp Drive*, podoben tistemu kot ga poznamo iz kultne TV serije *Star Trek*, je sicer predlagal že M. Alcubierre [72]: v prostoru pred vesoljskim plovilom naj bi na nek način znižali energijo prostora, za njo pa zvišali, vmes okoli plovila pa bi nastal "mehurček" prostora nespremenjenih lastnosti. Tako ustvarjen energijski gradient bi sam od sebe pognal prostorski "mehurček" skupaj z vesoljskim plovilom do svetlobne hitrosti in čez brez inercije, pospeški naj bi bili skoraj hipni. Toda čeprav bi v prostoru z znižano gostoto energije pred plovilom bila efektivna svetlobna hitrost višja, bi morala biti zadaj v prostoru z višjo gostoto energije nižja. Če bi se potem prostor spredaj spontano širil naprej, bi tisti od zadaj zaostajal celo za svetlobo v normalnem prostoru in inercialni "mehurček" okoli plovila bi razpadel. Tudi če bi le spredaj znižali gostoto energije prostora bi še vedno plovilo, ki bi vstopalo v to motnjo, vstopalo počasneje, kot bi motnja spredaj bežala. In ker noben stroj nima neskončno veliko energije, ki bi motnjo na njeni poti naprej trajno vzdrževal, bi sistem spet razpadel. Tudi možnost, da bi stroj za modulacijo polja delal v impulznem načinu ne bi učinkovala, s tem bi se sicer delno znižala inercija plovila, toda ogromno energije bi trčili na vsakič novo modulacijo polja, ki bi takoj pobegnilo. Za Rosen–Einsteinove črvine pa itak vemo, da bi morala biti gostota energije v njih tako visoka kot v črnih luknjah [73], zato bi bile neprehodne, tudi če bi jih bilo mogoče ustvariti.

Po teoretični plati pa predvidevam, da bo napredek v razumevanju dogajanja na ravni osnovne energije prostora močno pospešil razvoj fizikalne teorije. Namreč sliko, ki smo jo orisali je treba dopolniti še s podatki o dejanski gostoti energije prostora (zahtevamo najmanj $\sim 10^{48} \text{ J/m}^3$, temu ustreza gostota energije t -kvarkov), ter o pogostosti nastajanja parov delcev in statistične porazdelitve tipov teh parov (obstajajo namreč indicacije, da v kvantnih fluktuacijah nastajajo pretežno pari pionov, π^\pm). Pomembno je tudi najti vzrok za spin osnovnih delcev, zlasti fotona, ter ugotoviti ali v energiji prostora nastopajo zgolj elektromagnetne interakcije, ali pa je ta posledica delovanja več različnih vrst polj, med drugimi tudi Higgsovega polja.

S čisto estetskega stališča je eno samo univerzalno polje videti lepše. Za razliko, Standardna teorija kljub svoji neverjetni knjigovodstveni natančnosti zahteva eksperimentalno določitev 21 prostih parametrov, ki jih ni mogoče izpeljati iz osnovnih predpostavk, kljub temu pa še ne vključuje gravitacije. Da pa ne zgubljam besed o teoriji strun, kjer je potrebno zadovoljivo pojasniti vsaj 32 parametrov v 10 ali 11 dimenzijah, ter prepričljivo pojasniti kje natančno se nahaja tistih $\sim 10^{500}$ domnevnih vzporednih Univerzumov!

Praksa in tehnologija bosta capljali za teorijo precej bolj počasi zaradi izredno hudih zahtev po miniaturizaciji instrumentov, ter zahtevani visoki gostoti energije.

Vendar verjamem v človeško iznajdljivost: česa vse ne bomo izumili, da nam le ne bi bilo treba trdo delat!

Namesto zaključka

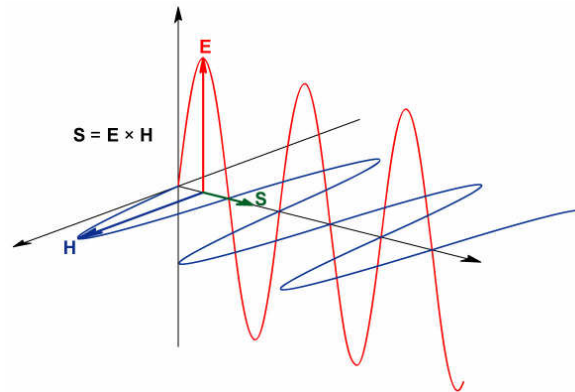
Nekako od začetka XXI stoletja so nam na voljo nekatere izredno zanimive tehnične zmogljivosti, ki nam pomagajo izogniti se omejitvam zaznave dogodkov na kvantni ravni (znane so pod imenom *weak quantum measurements*, torej meritve z izmenjavo energije manjše od potrebne za spremembo kvantnih stanj; da ne bo pomote, to ni v zvezi s šibko jedrsko interakcijo), ali celo na makroskopski ravni poustvariti podobne pogoje, kot jih srečujemo na mikro ravni. S tem se nam odpirajo možnosti neposrednega vpogleda v kvantni svet, torej tudi doživljanje neposrednih izkušenj in posledično ustvarjanje domačnosti tega sveta in njegovega intuitivnega razumevanja.

Od letos pa smo bogatejši za še en tak eksperiment. Ker sem zanj izvedel šele ko je tole besedilo bilo že napisano, sem ga uvrstil na koncu virov pod številki [74] in [75]. Splača se pogledati zlasti video posnetek [74]; bolj radovedni bralci pa si lahko preberejo tudi ustrezno strokovno razlago v besedilu [75], oziroma bolj popularno razlago na spletni strani [76].

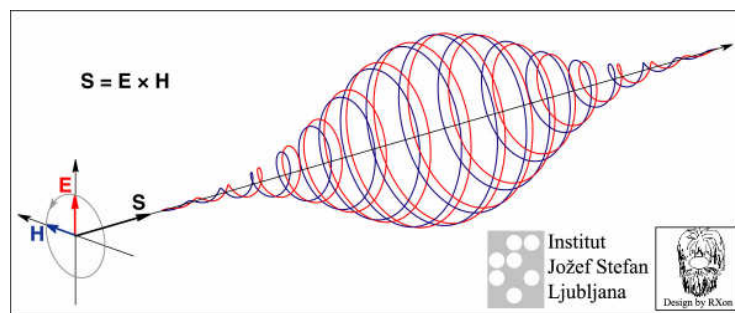
V pomoč razumevanju naj poudarim, da je ultrazvočno vzbujanje podlage sistema, ki ga uporabljajo pri teh poskusih možno po analogiji enačiti s kvantnimi fluktuacijami v osnovni energiji praznega prostora. Kvantni pojavi pa so potem posledica interakcije med kvantnimi energijskimi fluktuacijami v prostoru in notranjimi energijskimi oscilacijami vsebovanimi v kvantnih delcih. Teoretična podlaga za razlago tovrstnih poskusov je v strokovni literaturi znana kot "stohastična elektrodinamika", ki vleče korenine iz de Broglie–Bohmove valovne mehanike iz obdobja okoli leta 1950, ter idej A. Saharova sredi 1960tih, a je po letu 1990 doživela nov razcvet. V tej luči postanejo vse nenavadne in včasih misteriozne lastnosti delcev na kvantni ravni logične in razumljive.

Seveda je v moderni fiziki še cela vrsta drugačnih teorij in tudi različnih vidikov iste problematike, česar se tukaj sploh nismo dotaknili, a za bolj temeljit pregled bi rabili še mnogo več prostora. Sicer pa stohastična elektrodinamika še zdaleč ni tako teoretično dodelana kot standardna kvantna elektrodinamika, kar je v pričo števila raziskovalcev in vloženih raziskovalnih ur razumljivo. A med tem ko je standardna teorija kljub neverjetnim uspehom zašla v svojevrstno razvojno krizo, ima stohastična elektrodinamika velik razvojni potencial in tudi izredno hitro napreduje.

Dodatek: elektromagneti val in foton



Sl.7: Klasični prikaz ravninskega elektromagnetnega polja iz dveh med seboj pravokotnih sinusnih nihanj, kot ga običajno rišejo v učbenikih. To naj bi bila matematično najbolj preprosta rešitev Maxwellovih enačb.



Sl.8: Vektorski model fotona v klasični Maxwellovi teoriji elektromagnetnega polja (\mathbf{E} in \mathbf{H}). Model je izrisan na temelju enačb izpeljanih iz eksperimentalnih rezultatov obnašanja fotona. Desnosučni krožno polariziran foton, ki potuje skozi medij z magnetno permeabilnostjo μ in dielektrično permitivnostjo ε s hitrostjo $c = 1/\sqrt{\mu\varepsilon}$, ima sledeče trenutne vrednosti polj:

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

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

kjer je k_z karakteristično valovno število v smeri z osi (koincidenčno z Poyntingovim energijskim vektorjem $\mathbf{S} = \mathbf{E} \times \mathbf{H}$), in valovno dolžino $\lambda = 2\pi c/\omega$, ter efektivnim dosegom polja v transverzalni smeri $r = \lambda/2\pi$. Klasični ravninsko polariziran EM val na Sl.7 pa je dejansko sestavljen iz velikega števila levosučnih in desnosučnih fotonov v linearni superpoziciji (očitno ima narava svoje mnenje o tem, kako naj zglada najpreprostejša oblika rešitve Maxwellovih enačb; o).

Viri

Seznam, ki sledi, je namenjen zgolj pridobitvi občutka, kako se o obravnavani problematiki ta hip v svetu premišljuje; je daleč od tega da bi bil popoln, ali reprezentativen, ali kakorkoli dokazoval pravilnost predstavljenega modela. Pri sestavljanju me je vodilo predvsem načelo, da naj bi material bil prosto dostopen na omrežju, kar naj radovednemu bralcu olajša iskanje. Strani Wikipedije so vključene delno zaradi podrobnejše predstavitve posameznega problema, delno pa ker so na koncu strani pogosto povezave na izvirne znanstvene prispevke.

- [1] Thomson, J.J., <http://en.wikipedia.org/wiki/J._J._Thomson>
<<http://en.wikipedia.org/wiki/Electron>>
- [2] Poincaré, H., La Fin de la Matière, Athenäum, 1906,
(angl. prevod: The End of Matter, <http://en.wikisource.org/wiki/Translation:The_End_of_Matter>)
- [3] Seznam nerešenih fizikalnih problemov, Wikipedia
<http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_unsolved_problems_in_physics>
- [4] Weinberg, S.: Einstein's Mistakes, Physics Today (2005);
<http://scitation.aip.org/journals/doc/PHTOAD-ft/vol_58/iss_11/31_1.shtml>
- [5] Planck, M., Über das Gesetz der Energieverteilung im Normalspektrum, Annalen der Physik vol. 4: pp553 ff (1901) <<http://www.chemteam.info/Chem-History/Planck-1901/Planck-1901.html>>
- [6] Planck, M., The Genesis and Present State of Development of the Quantum Theory (Nobelova nagrada za fiziko 1918) Nobel Lecture, June 2, 1920,
<http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1918/planck-lecture.html>
- [7] Planck, M., Über die Begründung des Gesetzes der Schwarzen Strahlung, Ann. d. Phys. 37, 642, 1912.,
<<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/andp.19123420403/abstract>>
- [8] Einstein, A., Stern, O., Einige Argumente für die Annahme einer molekularen Agitation beim absoluten Nullpunkt, Ann. d. Phys. 40, 551, 1913.
Glej še: <http://en.wikipedia.org/wiki/Zero-point_energy>
- [9] Nernst, W., Über einen Versuch von quantentheoretischen Betrachtungen zur Annahme stetiger Energieänderungen zurückzukehren, Verhandl. Deut. Phys. Gen. 18, 83, 1916.
- [10] Kozmološka konstanta, <http://en.wikipedia.org/wiki/Cosmological_constant>
- [11] Hubbleov zakon, <http://en.wikipedia.org/wiki/Hubble_Law>
- [12] Planckove naravne enote, <http://en.wikipedia.org/wiki/Planck_units>
- [13] Tvorba parov, <http://en.wikipedia.org/wiki/Pair_production>
Anihilacija, <http://en.wikipedia.org/wiki/Electron%E2%80%93positron_annihilation>
- [14] Comptonovo sipanje, <http://en.wikipedia.org/wiki/Compton_scattering>
- [15] Maxwellove enačbe, <http://en.wikipedia.org/wiki/Maxwell%27s_equations>
Glej: Vacuum equations, electromagnetic waves and speed of light
Glej še: Svetlobna hitrost, <http://en.wikipedia.org/wiki/Speed_of_light>
Baez, J., Svetlobna hitrost,
<http://math.ucr.edu/home/baez/physics/Relativity/SpeedOfLight/speed_of_light.html>
- [16] Aether, <http://en.wikipedia.org/wiki/Luminiferous_aether>
Einstein, A.: Ether and Relativity (Leiden Address, May 5th, 1920)
<http://www-history.mcs.st-andrews.ac.uk/Extras/Einstein_ether.html>
- [17] Poskus Michelsona in Morleya,
<http://en.wikipedia.org/wiki/Michelson%E2%80%93Morley_experiment>
- [18] Heaviside, O., A gravitational and electromagnetic analogy, The Electrician 31: 81–82, 1893

- [19] Heisenbergovo Načelo nedoločenosti
<http://en.wikipedia.org/wiki/Heisenberg_Uncertainty_Principle>
- [20] Vakuuum v kvantni elektrodinamiki, <http://en.wikipedia.org/wiki/QED_vacuum>
- [21] Pozitronij, <<http://en.wikipedia.org/wiki/Positronium>>
- [22] Polarizacija vakuuma, <http://en.wikipedia.org/wiki/Vacuum_polarization>
- [23] Dielektrična konstanta, <http://en.wikipedia.org/wiki/Vacuum_permittivity>
- [24] Urban, M., Couchot, F., Sarazin, X., Does the speed of light depend upon the vacuum?
<<http://lanl.arxiv.org/abs/1106.3996>>
- [25] Lorentzovo podaljšanje časa, <http://en.wikipedia.org/wiki/Time_dilation>
- [26] Lorentzovo skrčenje dolžin, <http://en.wikipedia.org/wiki/Length_contraction>
- [27] Shapirova zakasnitev, <http://en.wikipedia.org/wiki/Shapiro_delay>
- [28] Gravitacijski rdeči spektralni zamik, <http://en.wikipedia.org/wiki/Gravitational_red_shift>
- [29] Evropska vesoljska agencija (ESA), Planck program,
<http://www.esa.int/Our_Activities/Space_Science/Planck/Planck_reveals_an_almost_perfect_Universe>
- [30] Planck program, rezultati, <<http://arxiv.org/pdf/1303.5062v1.pdf>>, p.41:
– An exploration of parameter space beyond the basic set leads to: (a) firmly establishing the effective number of relativistic species (neutrinos) at 3; (b) constraining the flatness of space-time to a level of 0.1%; (c) setting significantly improved constraints on the total mass of neutrinos, the abundance of primordial Helium, and the running of the spectral index of the power spectrum.
– we find no evidence at the current level of analysis for tensor modes, nor for a dynamical form of dark energy, nor for time variations of the fine structure constant.
- [31] YE Xing-Hao, LIN Qiang, Inhomogeneous space as an alternative to curved spacetime,
<iopscience.iop.org/0256-307X/25/5/014/pdf/0256-307X_25_5_014.pdf>
- [32] Lambov spektralni zamik, <http://en.wikipedia.org/wiki/Lamb_shift>
- [33] Casimirov učinek, <http://en.wikipedia.org/wiki/Casimir_effect>
Casimir, H.B.G., On the Attraction Between Two Perfectly Conducting Plates,
Proc. K. Ned. Akad. Wet., 51:793, 1948
Casimir, H.B.G., Physica XIX, 846., 1953
- [34] Anomalni magnetni dipolni moment elektrona,
<http://en.wikipedia.org/wiki/Anomalous_magnetic_dipole_moment>
- [35] R. S. Mulliken, The band spectrum of boron monoxide, Nature 114, 349, 1924.
- [36] Milonni, P.W., The Quantum Vacuum: An Introduction to Quantum Electrodynamics,
Academic Press, Inc. San Diego, 1994.
- [37] Rohrlich, F., Self-energy and stability of the classical electron, Am. J. Phys. 28, 639, 1960.
- [38] Puthoff, H.E., Casimir vacuum energy and the semiclassical electron,
<<http://arxiv.org/pdf/physics/0610042>>
- [39] Sakharov, A., Vacuum Quantum Fluctuations in Curved Space and the Theory of Gravity,
<<http://www.math.uwaterloo.ca/~akempf/sakharov.pdf>>
(Translated from Doklady Akademii Nauk SSSR, vol. 177, No. 1, pp. 70–71, November 1967.)
- [40] Davies, P.C.W., Dray, T., Manogue, C.A., Detecting the rotating quantum vacuum,
Physical Review D Vol. 53, N. 8 15 Apr. 1996
- [41] Feigel, A., Quantum Vacuum Contribution to the Momentum of the Dielectric Media,
<<http://arxiv.org/pdf/physics/0304100>>

- [42] Donaire, M., The Quantum Vacuum of Complex Media. A Unified Approach to the Dielectric Constant, the Spontaneous Emission and the Zero-Temperature Electromagnetic Pressure, <<http://arxiv.org/pdf/0912.3218>>
- [43] Kim, W.J., Brownell, J.H., Onofrio, R., Detectability of dissipative motion in quantum vacuum via superradiance, <<http://xxx.lanl.gov/pdf/0705.2895>>
- [44] Battesti, R., Rizzo, C., Magnetic and electric properties of quantum vacuum, <<http://lanl.arxiv.org/pdf/1211.1933>>
- [45] Della Valle, F., Gastaldi, U., Messineo, G., Milotti, E., Pengo, R., Piemontese, L., Ruoso, G., Zavattini, G., Measurements of vacuum magnetic birefringence using permanent dipole magnets: the PVLAS experiment, <<http://xxx.lanl.gov/pdf/1301.4918>>
- [46] Consoli, M., Pagano, A., Pappalardo, L., Vacuum condensates and ‘ether-drift’ experiments, <<http://xxx.lanl.gov/pdf/physics/0306094>>
- [47] Lorentz, H.A., The Theory of Electrons and Its Applications to the Phenomena of Light and Radiation Heat, 2nd ed., Dover Publications, Inc., New York, 1952.
- [48] Boyer, T.H., Derivation of the blackbody radiation spectrum from the equivalence principle in classical physics with classical electromagnetic zero-point radiation, Phys. Rev. D29, 1096, 1984.
- [49] de la Pena, L., Cetto, A.M., The Quantum Dice: An Introduction to Stochastic Electrodynamics, Kluwer Academic Publishers, 1996.
- [50] Thorne, K.S., Misner, C.W., Wheeler, J.A., Gravitation, W.H. Freeman, 1973.
- [51] Rueda, A., Haisch, B., Gravity and the quantum vacuum hypothesis, <<http://xxx.lanl.gov/pdf/gr-qc/0504061>>
- [52] Leonard, K.E., Prokopec, T., Woodard, R.P., Covariant Vacuum Polarizations on de Sitter Background, <<http://xxx.lanl.gov/pdf/1210.6968>>
- [53] Marshall, T.W., Nonlocality – The party may be over!, <<http://xxx.lanl.gov/pdf/quant-ph/0203042>>
- [54] Santos, E., Space-Time Curvature Induced by Quantum Vacuum Fluctuations as an Alternative to Dark Energy, Int. J. Theor. Phys., DOI 10.1007/s10773-010-0633-6, Springer Science & Business Media, LLC 2010
- [55] Urban, M., Couchot, F., Sarazin, X., A mechanism giving a finite value to the speed of light, and some experimental consequences, <<http://lanl.arxiv.org/abs/1111.1847>>
- [56] Leuchs, G., Sánchez-Soto, L.L., A sum rule for charged elementary particles, <<http://link.springer.com/article/10.1140/epjd/e2013-30577-8>>
- [57] Boyer, T.H., Classical and Quantum Interpretations Regarding Thermal Behavior in a Coordinate Frame Accelerating Through Zero-Point Radiation, <<http://lanl.arxiv.org/pdf/1011.1426v1>>
- [58] Cavalleri G., Barbero F., Bertazzi G., Cesaroni E., Tonni E., Bosi L., Spavieri G., Gillies G.T., A quantitative assessment of stochastic electrodynamics with spin (SEDS): Physical principles and novel applications, Front. Phys. Ch., 2010, 5(1): 107–122 DOI 10.1007/s11467-009-0080-0
- [59] Martins, A.A., Pinheiro, M.J., On the electromagnetic origin of inertia and inertial mass, <<http://lanl.arxiv.org/pdf/0802.0284v1>>
- [60] Modanese, G., Zero-point field induced mass vs. QED mass renormalization, <<http://arxiv.org/pdf/hep-th/0011250>>
- [61] Dicke, R.H., 1957 Rev. Mod. Phys. 29 363
- [62] Eddington, A.S., Space, Time and Gravitation, Cambridge Univ. Press, 1920, p 109

- [63] Koschmieder, E.L., The standing wave model of the mesons and baryons,
<<http://arxiv.org/pdf/physics/0211100>>
- [64] Koschmieder, E.L., Theory of the Elementary Particles, <<http://arxiv.org/pdf/0804.4848>>
- [65] Williamson, J.G., van der Mark, M.B., Is the electron a photon with toroidal topology?
Annales de la Fondation Louis de Broglie, Volume 22, no.2, 133 (1997)
<<http://members.chello.nl/~n.benschop/electron.pdf>>
- [66] Ivanchin, A., Nonpotential Solution of the Electron Problem, <<http://arxiv.org/pdf/0902.1286>>
- [67] Qiu-Hong Hu, The nature of the electron, <<http://arxiv.org/pdf/physics/0512265>>
- [68] Balasubramanian, V., What We Don't Know About Time, Found. Phys. (2013) 43:101–114,
DOI 10.1007/s10701-011-9591-y
- [69] Rovelli, C., "Forget time", <<http://arxiv.org/pdf/0903.3832v3>>
- [70] Sidharth, B.G., Modelling Time, <<http://arxiv.org/pdf/0809.0587>>
- [71] Prostor Minkowskega, <http://en.wikipedia.org/wiki/Minkowski_space>
- [72] Alcubierre, M., The warp drive: hyper-fast travel within general relativity,
<<http://lanl.arxiv.org/abs/gr-qc/0009013>>
- [73] Roman, T.A., Some Thoughts on Energy Conditions and Wormholes,
<<http://arxiv.org/pdf/gr-qc/0409090>>
- [74] Yves Couder : Explains Wave/Particle Duality via Silicon Droplets
<<https://www.youtube.com/watch?v=W9yWv5dqSKk#t=14>>
- [75] Brady, R., Anderson, R., Why bouncing droplets are a pretty good model of quantum mechanics
<<http://arxiv.org/pdf/1401.4356>>
- [76] N. Wolchover: Fluid Tests Hint at Concrete Quantum Reality, Quanta Magazine, 06.30.14,
<<http://www.simonsfoundation.org/quanta/20140624-fluid-tests-hint-at-concrete-quantum-reality/>>