

O *prostorčasu* (Minkowskega) v prostoru in času: nekaj razrešenih in nekaj nerazrešenih vprašanj

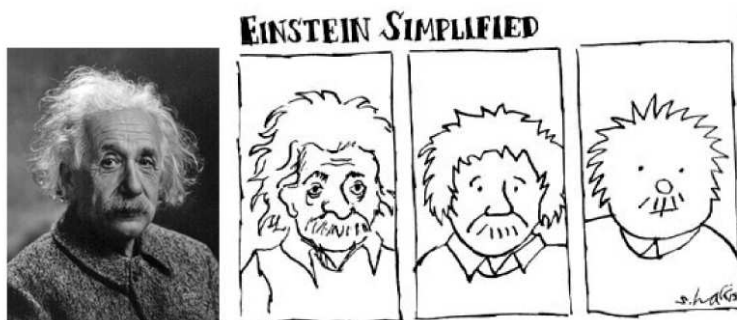
Erik Margan

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

Pasti poenostavljanja

Ni ravno preprosto nespecialistom predstaviti probleme s katerimi se ubadajo specialisti. Še posebej kadar gre za tako zahtevno področje kot je sodobna fizika, ki uporablja veliko matematike, še bolj pa če je v jedru problema prav problematiziranje odnosov med fiziko in matematiko, med fizikalnim pomenom in matematično predstavitvijo le tega, med fizikalnimi načeli in matematično operacionalizacijo le teh.

Fiziko običajno dojemamo kot vedo, ki obravnava fizikalno realnost, med tem ko imamo matematiko za bolj abstraktno vedo s sebi lastnimi, do skrajnosti poenostavljenimi elementi, ter navidez povsem arbitrarno določenimi zakoni, ki urejajo odnose med temi elementi. Kadar ju združimo, vsaka nujno izgubi nekaj od svoje posebnosti. Naenkrat mora fizikalno dogajanje ustrezati idealiziranim matematičnim relacijam, matematika pa je že v samem izhodišču omejena s preslikavo omejenih fizikalnih količin v matematične elemente. Fizikalno realnost zato skušamo modelirati *kolikor je mogoče poenostavljeno, toda ne še bolj enostavno!* (Einstein), med tem ko moramo matematiko krotiti, da ne vsiljuje svoje svobode interpretaciji fizikalnih pojmov.



Sl.1: Einstein, poenostavljeno. Fizikalna realnost in njeni poenostavljeni modeli (tukaj si bomo prizadevali ostati kolikor je le mogoče v okvirjih tretje slike z leve;o).

Da pa te opredelitve ne izzvenijo preveč splošno, si oglejmo nekaj preprostih primerov iz zgodovine.

V klasični fiziki vpeljemo pojem sile, s katerim si razlagamo medsebojne vplive in prenos energije med objekti. Zavedamo se, da je sila umetni konstrukt, vemo da je za prenos energije med objekti narava poskrbela drugače, vendar je sila kot koncept dokaj uporabna, še posebej na začetni ravni v osnovni šoli. Za Aristotela je bila sila sorazmerna teži telesa in njegovi hitrosti. A že Galileju je bilo jasno, da teža in masa telesa nista eno in isto, teža sama

dejansko pripada kategoriji sile. Newton pa je popolnoma spremenil definicijo: sila je produkt mase in pospeška, pospešek pa je sprememba hitrosti, oziroma njen časovni diferencial. Po vsej verjetnosti Aristotel sploh ni poznal koncepta pospeška, čeprav je zagotovo vedel, da so hitrosti lahko različne in se torej morajo spreminjati s časom. Sama hitrost pa predstavlja razmerje med spremembo krajevnih koordinat in spremembo časovnih koordinat, torej časovni diferencial prepotovane razdalje.

To pomeni, da je pospešek sprememba spremembe prepotovane razdalje v različnih časovnih intervalih, ali dvojni diferencial. Če bi Aristotel morda še razumel pojem časovnega diferenciala kot spremembo v prostoru in času, bi bil v primeru dvojnega diferenciala povsem zbežan in si ga ne bi znal predstavljati. Težava je v tem, da nam pri opisu pojava ne zadoščata več dve krajevni in dve časovni koordinati, dvojni diferencial zahteva vsaj tri pare. Nam, ki se vsakodnevno peljemo z avtobusi mestnega prometa, je povsem jasno kaj je pospešek, ker ga neposredno zaznavamo: pri povečevanju hitrosti pri odhodu s postaje, pri zaviranju in ustavljanju, ali spremembi smeri v ovinku. A še bolj bi Aristotela zbegali, če bi ga odpeljali v višje nadstropje kakega nebotačnika in bi v hitrem dvigalu brez oken, torej brez vidne zunanje reference, naenkrat začutil povečano težo na začetku dviga in izgubo teže ob koncu.

Nek drug pojav pa bi Aristotel verjetno prav dobro razumel, gre za relativnost hitrosti potnika, ki se sprehaja po avtobusu med vožnjo. Njegovo hitrost bi gotovo znal prišteti ali odšteti od hitrosti avtobusa, pač na Galilejev način, in to bi se mu zdelo logično in samoumevno. Mnogo težje pa bi mu bilo razumeti Einsteinovo načelo o konstantnosti svetlobne hitrosti, ne glede na hitrost svetlobnega vira ali hitrost opazovalca. Če bi mu povedali, da je svetloba valovanje, bi si zagotovo to skušal predstavljati z valovanjem na vodni gladini. Ob tem pa bi takoj protestiral: čoln z veslači, ki ustvarja valove ob gibanju, brez težav prehiti svoje valove, ker se premikajo počasneje od čolna, zato čoln pušča za seboj trikotno sled, ki je tem ožja, večja ko je njegova hitrost. Če svetloba ni trenutni pojav, naj se giba še tako hitro, vedno bi morala svetloba iz premikajočega se vira biti hitrejša od svetlobe iz mirujočega vira.

A morda bi Aristotel le razumel argument o konstantnosti svetlobne hitrosti, če bi mu povedali da je Maxwell dokazal, da je hitrost svetlobe odvisna le od elektromagnetnih lastnosti prostora v katerem potuje. Hitrost v zraku je večja od hitrosti v vodi, zato se slika slamice delno potopljene v kozarcu vode na vodni gladini navidezno zlomi. Navsezadnje, tudi valovi na vodi, ki jih ustvari čoln, ko se enkrat oddaljijo od čolna, se premikajo s tako hitrostjo, kot jo dovoljujejo lastnosti vode, niso odvisni od hitrosti čolna. Toda zakaj potem hitrost svetlobe ni odvisna od hitrosti opazovalca? Če se peljemo v drugem čolnu nasproti valovom, ki jih ustvari prvi čoln, pridemo čez te valove hitreje, kot če bi mirovali in valovi bi se nam zdeli krajši.

Kako to razumeti? Tu bi obupal še marsikateri drug modrec, ne le Aristotel. Vendar Aristotel ne bi kar tako še vrgel puške v koruzo. Po dolgem premisleku bi morda prišel na tole misel: če je svetloba valovanje, kaj bi videl, če bi se premikal z enako hitrostjo kot svetloba? Takrat bi se vedno nahajal v isti točki vala, kar pomeni, da valovanja v smislu spremembe velikosti vala s časom sploh ne bi zaznaval. Bi potem sploh kaj videl? In če bi se premikal le za spoznanje počasneje od svetlobe, bi opazil da se velikost vala zelo počasi spreminja. Kako pa bi to bilo videti? S takim premislekom bi počasi spoznal, da bi utegnil Dopplerjev frekvenčni zamik pojasniti večino, če ne kar vseh relativističnih vprašanj. A bi se pri tem krepko motil.

Tudi mnogo pred Einsteinom so posamezniki prišli do prenekaterih elementov relativistike. Toda šele Einsteinu je uspelo vse te in še druge sorodne elemente povezati v koherentno celoto, jim dati ustrezno matematično obliko, ter pokazati, kako jih je mogoče

izpeljati iz le nekaj osnovnih načel. In za razliko od ogromne večine drugih, Einsteina ni prav nič motilo, če je zaradi vztrajanja pri osnovnih načelih bilo nujno opustiti naše ustaljene predstave o prostoru in času. Če so lastnosti prostora in časa odvisne od fizikalnega dogajanja v tem prostoru in času, je to pač treba sprejeti kot del fizike, ne pa izumljati domislic kako se temu izogniti. Pravzaprav je Einsteinu postalo jasno, da lastnosti prostora in časa lahko ugotavljamo le s pomočjo svetlobe, kar potem vključuje spoznanje, da prostorskih koordinat ni mogoče spreminjati brez hkratne spremembe časovnih, sicer bi za to potrebna energija bila neskončno velika. Zato je nujno obravnavati prostor in čas skupaj, enovito, kot *prostorčas*.

Hkrati pa se je Einstein dobro zavedal, da mora ta nov pogled na *prostorčas* in fizikalno dogajanje v njem v običajnih pogojih majhnih relativnih hitrosti in nizke gravitacije gladko preiti v klasično Newtonovo fiziko, kar je s Splošno teorijo relativnosti tudi dosegel. A podobno gladkega prehoda med relativistiko in kvantno mehaniko ni in ni bilo mogoče doseči. V iskanju rešitve se je Einstein po eni strani oddaljil od kvantne mehanike, po drugi pa se je vedno bolj zapletal v vedno bolj zahtevno matematiko. Poraja se celo občutek, da je proti koncu življenja nekoliko zapostavil fizikalna načela in primat dodelil matematičnim načelom. Ali nemara tu tiči eden od razlogov, da v svojem iskanju "teorije vsega" ni uspel?

Težave s filozofijo

Kljub temu da vso svojo delovno dobo delam v znanosti kot eksperimentalist in razvojni inženir, se osebno bolj zavzemam za večji poudarek temeljnim raziskavam in za globlji filozofski pristop v znanosti. Naj pojasnim zakaj.

Priznati je treba da je filozofija že več desetletij v svojevrstni krizi, ki se kaže predvsem v oženju njenega tematskega prostora. Od nekoč vseobsegajoče in multidisciplinarne naravoslovne vede se je v zadnjem času omejila pretežno na družbeno problematiko. A tudi iz tako zoženega prostora jo vedno bolj izrivata po eni strani ekonomska teorija, po drugi pa psihodinamične analize obnašanja množic, ali celo teorija kaotičnih sistemov! Iz astronomije in kozmologije jo je že zdavnaj izrinila fizika, iz antropologije biokemija in genetika, iz psihologije metoda slikanja delovanja možganov s pomočjo jedrske magnetne resonance, iz moralne problematike pa formalno pravo in religija!

Vzrok za tako stanje je delno tudi v filozofiji sami: s togim vztrajanjem na splošnih načelih se je obsodila na capljanje za eksponencialnim naraščanjem novih spoznanj v bolj specializiranih panogah.

Po drugi strani, kljub nedvomno fantastičnem napredku na vseh znanstvenih področjih, mnoga temeljna in še zlasti etična vprašanja v specializiranih znanstvenih panogah ostajajo nerešena, ali vsaj nedorečena. Torej potreba, ali kar nujnost po vseobsegajočem pristopu pri mnogih temeljnih vprašanjih še vedno obstaja, lahko bi rekli da je vedno večja.

Za fiziko bi sicer lahko trdili, da je ravno z Einsteinovo teorijo relativnosti največ prispevala uveljavitvi filozofskih načel v znanosti predvsem zato, ker je Einstein sam vselej poudarjal pomembnost izhajanja iz temeljnih naravnih in logičnih načel. Svojevrsten preobrat je prinesel razvoj drugega Einsteinovega "otroka", kvantne mehanike, ki je z Nielsom Bohrom in takoimenovano Kopenhagensko šolo [1] vpeljala v filozofijo znanosti pridih mističnosti zaradi določenih nedoločenosti (namenoma uporabljen pleonazem!) na mikro ravni. Zelo odmevna je bila zlasti večdnevna razprava med Einsteinom in Bohrom na peti Solvayevi konferenci leta 1927 [2] (kjer je Einstein ugovarjal Bohru: *Bog ne kocka!*; Bohr pa mu je očital: *Einstein, nehaj predpisovati Bogu kaj sme in česar ne!*). Ta razprava se je

nadaljevala tudi kasneje. Čeprav večina fizikov danes meni, da je iz te razprave Bohr izšel kot nesporni zmagovalec, razprava med fiziki dejansko ni nikoli prenehala in je živa še danes.

Naveličan takega stanja je Nathaniel David Mermin [3] nekoč od fizikov zahteval: *Shut up and calculate!* (*Molči in računaj!*), ter tako nehote potisnil filozofijo še bolj v ozadje.

Iz današnje perspektive je jasno, da ne Einstein ne Bohr nista imela prav, pa ne zaradi tistega, kar sta očitala drug drugemu. Kot pravi Steven Weinberg v članku s pomenljivim naslovom "Einsteinove napake" [4], je nekoč veljalo, da je nujno kvantne delce obravnavati po kvantnem formalizmu, med tem ko naj bi bilo dovoljeno njihove interakcije z merilnimi napravami obravnavati klasično; tak pristop neizogibno vodi v protislovje. Seveda so merilne naprave narejene iz istih kvantnih delcev kot so tisti, katerih lastnosti raziskujemo, vendar je dosledna kvantna obravnava zelo velikih skupin kvantnih delcev prezapletena, zato se pač zatekamo k različnim bolj ali manj po(ne)srečenim približkom.

Po fenomenalnem uspehu kvantne mehanike in njenih kasnejših izboljšav (relativistične kvantne mehanike, kvantne elektrodinamike, kvantne kromodinamike, ter kvantne teorije polja) je najnovejša različica, teorija strun, zašla, tako se zdi, v slepo ulico (*Teorija strun je zavozlana*, pravi Lee Smolin v knjigi *Težave s fiziko* [5]). Velika pričakovanja, ki so jih gojili teoretiki do rezultatov meritev v Velikem hadronskem trkalniku (*Large Hadron Collider*, LHC) Evropske organizacije za jedrske raziskave (CERN), se niso potrdila. Nasprotno, zaenkrat kaže, da je z odkritjem Higgsovega bozona potrdilo dobil "stari" Standardni model [6].

Ravno tako so najnovejše astronomske meritve neenakomernosti v kozmičnem mikrovalovnem prasevanju (opravljene s sondami BOOMERanG, COBE, WMAP in Planck [7]) pokazale, da Vesolje na velikih razdaljah izkazuje bolj Evklidsko geometrijo [8], in ne Einstein-Riemannove, in to kljub temu, da na posnetkih oddaljenih galaktičnih jat narejenih z orbitalnim teleskopom Hubble jasno vidimo gravitacijsko ukrivljanje svetlobnih žarkov [9] natanko po Einsteinovi napovedi. Ti, ter še nekateri drugi nasprotujoči si merilni rezultati naznanjajo potrebo po ponovnem premisleku o temeljnih lastnostih *prostorčasa*, kot tudi snovno-energijskih interakcij.

Izhajajoč iz čisto filozofskega stališča je treba poudariti, da v fiziki nikoli ne obravnavamo realnosti same, temveč le bolj ali manj poenostavljene modele realnosti (stara šolska šala pravi, da učitelji fizike živijo termično izolirani v zrakopraznem prostoru brez trenja;0). Fizikalne procese modeliramo predvsem zato, ker želimo naloge opraviti v nekem končnem času ob končnih zmogljivostih in sredstvih, ki so nam tisti hip na voljo. Vprašanje je le do kakšne stopnje si lahko privoščimo problem poenostaviti, ne da bi pri tem naredili večje napake. Zaradi tega je vsaka teorija nujno do neke mere omejena, vendar vedno lahko kasneje ob boljših raziskovalnih zmogljivostih poiščemo boljše, natančnejšo in bolj splošno.

V začetku XX stoletja se je v znanosti, sprva na eksperimentalni, nato pa še na teoretični ravni, zgodil popoln preobrat: najprej Planck (1910) [10], potem pa še Einstein in Stern (1913) [11], ter končno Nernst (1916) [12] ugotavljajo da prazen prostor (brez snovi) v resnici sploh ni prazen, ampak poln energije! Že pred tem je Maxwell pokazal, da prazen prostor izkazuje natančno določene elektromagnetne lastnosti, magnetno permeabilnost μ_0 in dielektričnost ϵ_0 , ki skupaj določata hitrost svetlobe, $c = (1/\mu_0\epsilon_0)^{1/2}$ [13], oziroma kar vseh elektromagnetnih interakcij nasploh (tale enačba, mimogrede, bi morala biti **druga** najbolj slavna enačba vseh časov, pa jo celo mnogi strokovnjaki ne poznajo!). Prostor tako dobi merljive fizikalne lastnosti in obenem povsem določeno stopnjo samostojne fizikalne realnosti (v nasprotju s prej uveljavljeno idejo, da prostoru lahko pogojno pripišemo fizikalno realnost le posredno, ob opisu medsebojnih odnosov delcev snovi in njihovimi energijskimi interakcijami).

Danes ni povsem jasno zakaj se je Einstein leta 1915 odločil zanemariti svoje odkritje iz leta 1913 in raje privzeti čisto matematično geometrizacijo *prostorčasa*, kot jo je leta 1908 vpeljal Minkowski (v obliki četrte dimenzije, *ict*) [14]. Znani so le razlogi zakaj se je oklenil nekaterih osnovnih načel (načelo enakovrednosti gravitacijskega in kinematičnega pospeška, načelo enakovrednosti gravitacijske in inercialne mase, ter načelo konstantnosti svetlobne hitrosti) na katerih je nato poiskal rešitve v danes s fizikalnega stališča vprašljivi Riemannovi geometriji.

Knjigovodstveno gledano, Splošna teorija relativnosti ima čiste račune, deluje brez napake. Vendar so se kmalu po njeni objavi pokazale tudi nekatere omejitve: po eni strani na zelo majhnih razsežnostih ne preide gladko v kvantno mehaniko, po drugi strani pa pri zelo velikih toda končnih gostotah energij zaide v matematične singularnosti (nekateri količine divergirajo v neskončnost, druge pa proti nič). Singularnosti v fiziki so vedno znak za zaskrbljenost. Najpogosteje je razlog za pojav singularnosti neka napaka v izhodiščnih predpostavkah, v privzetih aksiomih, ki to dejansko niso in bi jih bilo potrebno bodisi posebej utemeljiti, bodisi zavreči in poiskati boljše. Poleg tega vemo, da niso vsa gibanja relativna: pomembno izjemo predstavlja rotacija okoli lastne osi, ki se sicer vzdržuje inercialno, gibanje pa je pospešeno.

Drugačno problematiko predstavljajo številni časovni paradoksi, ki so pretežno posledica dejstva, da Lorentzove transformacije zahtevajo spremembe prostorskih in časovnih koordinat le v smeri gibanja [15], ne pa tudi v smereh pravokotnih na smer gibanja. Časovna geometrizacija Minkowskega, v smislu poskusa ortogonalizacije časovne koordinatne osi, *ict*, je tu posebej problematična, ker koordinatni sistem Minkowskega dejansko sploh ni ortogonalen.

A tudi kvantna mehanika in njene novejši različice niso brez težav. Po eni strani naj bi temeljne gradnike Vesolja in njihove lastnosti poenostavili (na tri generacije kvarkov in leptonov), po drugi strani pa potrebujemo kar 23 temeljnih parametrov, ki jih ne znamo določiti iz osnovnih načel, pač pa jih moramo ugotavljati eksperimentalno. Teoretično ne znamo upravičiti razlogov za pojave spontanega zloma simetrije, niti problema hierarhije mas pri družinah osnovnih delcev, ne znamo dobro upravičiti uporabe nekaterih sicer rutinskih postopkov, kot je denimo renormalizacija, ne znamo razložiti problema nelokalnosti in kvantne prepletenosti, poleg tega pa se zdi (kar je najbolj motilo Einsteina), da kvantna mehanika navidez krši načelo vzročnosti. Za povrhu, iz vseh kvantnih teorij izhaja, da mora biti gostota energije v prostoru brez snovi izredno visoka (navsezadnje je to eden od pogojev obstojnosti snovi), po drugi strani pa nekatera astronomska opazovanja zahtevajo za dobrih 120 velikostnih redov manjšo gostoto energije ($\sim 10^{-9} \text{ J/m}^3$ proti $\sim 10^{13} \text{ J/m}^3$) [16]. Če to ni črna sramota!

Več kot očitno je torej, da je treba problemom prostora, časa, snovi in energije pristopiti iz povsem drugačnih izhodišč. Danes se zdi še najbolj verjetna ideja o poenotenju večine snovno-energijskih interakcij, vključno z gravitacijo, na ravni elektromagnetne nehomogenosti in naključnih kvantnih fluktuacij v gostoti energije prostora [17]. Prav tako se zdi, da bi naredili še najmanjšo napako, če bi predpostavili, da čas kot fizikalna dimenzija sploh ne obstaja [18]. Dejansko lahko privzamemo da je navideznost časovne dimenzije zgolj posledica končne propagacijske hitrosti energije (s tem vsakršne z izmenjavo energije posredovane informacije), ter naše zmožnosti, da informacije zaznavamo, shranjujemo, jih primerjamo, ter nanje reagiramo. Vsi fizikalni procesi so le posledica lokalno razpoložljive energijske razlike: če je ta majhna, so spremembe komaj opazne, če pa je ta velika, se lahko zgodi karkoli, lahko celo nastane celo Vesolje [19]! Časovno enosmernost dogodkov v smislu vzročno-posledičnega sosledja pa zagotavljajo ravno omenjene naključne kvantne fluktuacije, ki preprečujejo natančno ponovljivost in reverzibilnost fizikalnih procesov.

Ob vseh teh odprtih teoretičnih vprašanjih si sedaj postavimo še eno povsem praktično in organizacijsko: ali od znanstvenika, ki mora vsako leto znova na razpisih za konkretne razvojne projekte priskrbeti sredstva za plače in raziskovalno opremo, sploh lahko pričakujemo preboj v takih temeljnih znanstvenih vprašanjih? Seveda ne, oziroma zelo težko. Prej se bo zgodilo, da se bo loteval predvsem tistih problemov, za katere je vnaprej prepričan, da jih bo uspešno rešil; morda pa bo celo z rešitvijo odlašal in z delnimi uspehi upravičeval zahteve po dodatnih sredstvih na naslednjem razpisu... Torej smo se z obstoječo organizacijo znanstvenega dela kot civilizacija vnaprej odrekli reševanju pomembnih temeljnih vprašanj, oziroma smo tovrstna vprašanja prepustili amaterjem in entuziastom, na njihov strošek! Morda pa to niti ni tako slabo...

Vsekakor pa bi rad to ugotovitev položil na srce tistim bralcem, ki se počutijo bolj domače v družboslovnih vedah: v našem sistemu so tradicionalno na oblasti v veliki večini ljudje z družboslovno izobrazbo, med tem ko naravoslovce, ki bi jih mikalo sedenje v parlamentu lahko naštejemo na prste. Zato je pomembno, da tudi ljudje z družboslovno izobrazbo razumejo tako vsebinske, kot tudi organizacijske in finančne probleme v naravoslovju, da se bodo v prihodnje znali bolje opredeliti do vprašanj kakšno znanost si kot družba dejansko želimo, kaj od znanosti pričakujemo in zahtevamo in kaj je potrebno spremeniti da lahko te želje in zastavljene cilje tudi uresničimo. Navsezadnje, po mojem osebnem prepričanju je antagonistična delitev na družboslovce in naravoslovce povsem umetno napihnjena in škodljiva: interesi pravega intelektualca so vedno bistveno širši od njegovega ozkega profesionalnega področja.

Težave z znanostjo

Pišemo leto 2015: stoletnico Splošne teorije relativnosti, ter mednarodno leto svetlobe. Oboje je povezano bolj, kot si to na prvi pogled mislimo. Svetloba, oziroma elektromagnetne interakcije nasploh so tisti način izmenjave energije iz katerega izhaja ogromna večina naših izkušenj, nenazadnje tudi delovanje naših možganov. Poleg tega, kot je ugotovil že Einstein, fizikalne lastnosti *prostorčasa* lahko raziskujemo le s pomočjo svetlobe. In obratno, propagacijska hitrost svetlobe, ter s tem hkrati vsakršne informacije, je odvisna ravno od elektromagnetnih lastnosti prostora. To smo tudi že vpeljali v prakso: merski enoti za čas in dolžino [20] smo določili na podlagi valovne dolžine, oziroma frekvence zelo stabilnega svetlobnega vira (leta 1983 smo sprejeli definiciji metra in sekunde na podlagi sevalne frekvence hiperfinega prehoda v elektronski orbitali atoma cezija, ^{133}Cs , uporabljenega v atomskih urah [21]). Prizadevamo pa si, da bi edino preostalo mersko enoto, ki kot etalon uporablja nek fizikalni artefakt, kilogram (enota za maso) tudi določili na podlagi fizikalnih konstant elektromagnetne interakcije [22]. Naša slika sveta je dobesedno zgrajena na svetlobi.

Motivacijo za bolj temeljit filozofski pristop nekaterimi fizikalnim prvinam smo že razgrnili, prav tako pa (v drugem prispevku) obravnavali razloge in predloge za nekoliko drugačno interpretacijo relativističnih popravkov, ter obenem postavili nekaj temeljnih zasnov za poenoteno obravnavo energije in snovi, v kateri elektromagnetne lastnosti fizikalnega prostora igrajo izredno pomembno vlogo. Povejmo pa še kaj o problemu časa.

Fiziki rado svoja razglabljanja začnemo pri starogrških filozofih, zato nam že nekje v srednjem veku, ali v najboljšem primeru pri Newtonu, zmanjka časa za vse ostalo. Zato naj mi bo dovoljeno tukaj preskočiti Heraklitovo *Παντα ρει* (*Panta rei*, vse teče), ter še marsikaj vmes in preiti takoj k svetemu Avguštinu [23], ki je Aristotelovo domnevo o neskončnosti časa navzdol omejil: če je Bog ustvaril vse (razen sebe), potem je ustvaril tudi čas in je zato

nesmiselno spraševati se kaj je bilo prej. Enaka teološka domneva, toda kmalu eksperimentalno podprta z analizo večanja spektralnega zamika svetlobe oddaljenih galaksij z razdaljo, kot je to ugotovil ameriški astronom Edwin Hubble [24], je botrovala tudi ideji o nastanku Vesolja v Velikem poku, ideji, ki jo je prvi predstavil belgijski katoliški svečenik in astronom Georges Lemaître leta 1927 [25]. A tudi če božje posredovanje odmislimo in rojstvo Vesolja pripišemo nekemu naravnemu vzroku, smo še vedno na istem. Po odkritju kozmičnega mikrovalovnega prasevanja (Penzias in Wilson, 1965, [26]) ni več nobenega dvoma, da je Vesolje šlo (vsaj enkrat) skozi zelo gosto in zelo vročo fazo, po kateri se je širilo in ohlajalo. Čas dobi začetek.

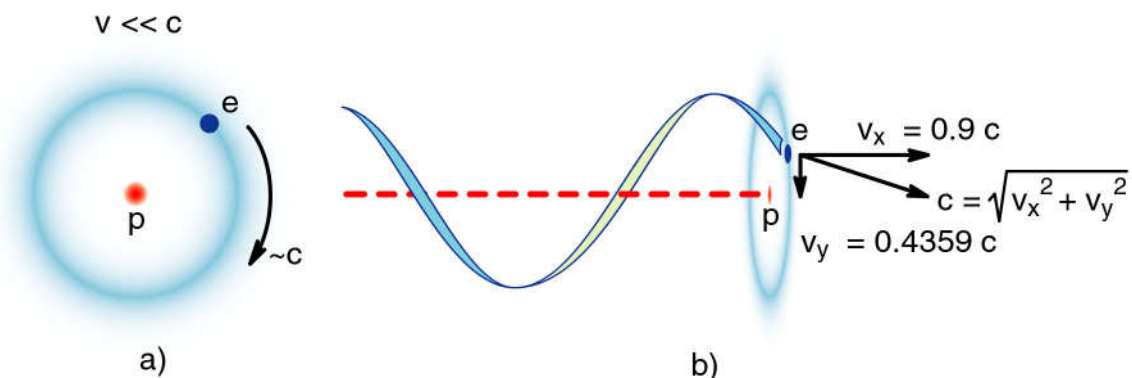
Vendar današnje pojmovanje časa kot dimenzije verjetno dolgujemo kratki razpravi o dimenzijah, ki jo je francoski filozof in matematik Jean d'Alembert [27] napisal za Diderotovo Enciklopedijo. Med drugim je zapisal: *Vsako kategorijo, ki jo je možno izraziti numerično, imamo lahko za dimenzijo. Nek moj prijatelj celo pravi, da je tudi čas mogoče obravnavati kot dimenzijo.* Javno izražati tako mnenje je takrat pomenilo resno ogroziti lastno znanstveno verodostojnost in ugled. Vseeno so bili mnogi njegovi sodobniki prepričani, da je ta "nek njegov prijatelj" le d'Alembert sam.

Einstein, čeprav je imel čas za *iluzijo človeškega uma* (verjetno po kabalistični tradiciji), tudi ni mogel brez časa, ki ga je vzdikal v temelje štiridimenzijskega *prostorčasa* [28], dobrim delom zahvaljujoč matematiku Hermanu Minkowskemu in njegovi geometrizaciji časovne dimenzije. V resnici pa je Einstein postuliral le, da merjenja časa ni mogoče ločiti od merjenja prostora, in obratno. In še kako prav je imel pri tem!

Vendar je že Einstein sam podvomil v čas kot fizikalno dimenzijo, ko je ta v njegovih enačbah postal funkcijsko odvisen od drugih zunanjih pogojev, kot sta hitrost in gravitacijsko polje. Ponazorimo to na hitro na Einsteinov način in uporabimo sledeči *Gedanken Experiment* (miselni poskus): denimo, da s stricem Albertom potujemo z relativistično hitrim vlakom, sedeč hrbtom obrnjeni v smer vožnje, ter opazujemo uro na odhodni postaji; ko začne vlak pospeševati do svetlobne hitrosti, bo svetloba z ure potrebovala vedno več časa do naših oči, zato se bodo kazalci ure navidez vedno počasneje premikali (ne le zaradi vedno večje oddaljenosti, pač pa tudi zaradi vedno nižje frekvence), in ko bomo dosegli svetlobno hitrost bo njihova slika potovala vzporedno z nami, zato se bodo urni kazalci navidez ustavili. Seveda, da bi to opazili, bi morali imeti izjemno zmogljiv teleskop in oči, ki vidijo najprej infra-rdeče, pa radijske frekvence, in končno tudi "statična" polja. Kaj pa naša ročna ura? Če bi pogledali na njo, bi videli, da tudi ta stoji, toda že zato da svoje oči usmerimo proti ročni uri bi potrebovali celo večnost, čeprav se tega sploh ne bi zavedali! Ko pa vlak blizu cilja začne zmanjševati hitrost, se nam bo zdelo, da se ura na odhodni postaji vrti vedno hitreje, dokler končno ne doseže svoje "prave" frekvence (seveda s časovnim zamikom, ki je sorazmeren razdalji deljeni s svetlobno hitrostjo), ko se vlak naposled ustavi. Vendar — presenečenje: naša ročna ura bo krepko zaostajala za urami obeh postaj, ker med potovanjem preprosto "ni imela časa" da se premakne!

Toliko o tem na anekdotski ravni. Kako pa naj si to razlagamo na ravni fizike v mikro svetu, na ravni atomov? Vzemimo za primer najpreprostejšega od vseh atomov, atom vodika, z enim protonom kot jedrom in enim elektronom v orbitali krogelne oblike (v osnovnem energijskem stanju; v višjih vzbujenih stanjih imajo orbitale lahko zelo zapletene oblike [29]). Ko je hitrost gibanja atoma mnogo manjša od svetlobne hitrosti, se elektron lahko giblje okoli jedra s približno svetlobno hitrostjo in njegova orbitala ima krogelno obliko. Če pa atom pospešimo do na primer 90% svetlobne hitrosti, se elektron v smeri prečno na smer gibanja atoma lahko giba le s hitrostjo, ki znaša kvečjemu 43,59% svetlobne hitrosti. To pa zato, ker je celotna hitrost elektrona enaka vektorski vsoti obeh hitrosti (torej korenu iz vsote

kvadratov), celotna hitrost pa ne more biti večja od svetlobne hitrosti. Slika 2 prikazuje oba primera.



Sl.2: Oblika elektronske orbitale v primeru mirujočega atoma in atoma ki se giba z visoko hitrostjo.

Posledice vektorskega seštevanja hitrosti so dvojne: po eni strani se elektron giba okoli jedra v vedno bolj sploščeni orbitali (elipsoid) bolj ko se hitrost atoma bliža svetlobni hitrosti, kar ustreza Lorentzovemu relativističnemu popravku za dolžino v smeri gibanja; po drugi strani pa se elektron za relativno mirujočega opazovalca giba po nekakšni raztegnjeni spirali, ter posledično naredi manj obhodov okoli jedra v določenem časovnem intervalu, kot bi jih naredil v primeru mirovanja atoma, kar pomeni da je obhodna frekvenca nižja, oziroma obhodna časovna perioda daljša, to pa ustreza Lorentzovemu relativističnemu popravku lokalnega časa [15].

Tej zakonitosti so podvrženi tudi vsi procesi in vse interakcije med atomi v večjih skupinah. Zaradi popačenih orbital se popačijo tudi razdalje med atomi, ki jih vežejo elektronske vezi. To pomeni da ne obstaja nobena dovolj trdna palica narejena iz atomov, ki bi lahko služila kot absolutna referenčna dolžina. In zaradi efektivnega nižanja frekvenc in daljšanja orbitalnih period so tudi molekularne termične oscilacije med atomi počasnejše, kar pomeni da za gibajoči se atom čas efektivno teče počasneje. Imejmo neko nestabilno molekulo, ki naj razpade po določenem številu oscilacij. Ker je pri gibanju frekvenca oscilacij nižja, se bo tudi življenjska doba molekule za zunanega opazovalca sorazmerno podaljšala in lahko rečemo, da se molekula stara počasneje, čeprav še vedno razpade po enakem številu oscilacij. Enako se zgodi z vsemi kemičnimi procesi. To je tudi razlog za upočasnjevanje vseh bioloških procesov pri gibanju z visoko hitrostjo.

Ta pojav so prvič opazili pri poskusih detekcije kozmičnih žarkov: ti ob trku z atomi v vrhni plasti ozračja ustvarijo pljuske delcev, med katerimi so tudi dokaj kratkoživi pozitivno in negativno nabiti mioni (μ^\pm), povprečna življenjska doba znaša le $2,2\mu\text{s}$ [30]. Brez relativističnega časovnega zamika teh delcev sploh ne bi mogli detektirati na površju zemlje, ker bi ob gibanju s svetlobno hitrostjo ($\sim 3 \times 10^8 \text{ m/s}$) lahko dosegli razdaljo le $\sim 660 \text{ m}$ preden razpadejo na par elektron-pozitron. Dejstvo, da jih detektiramo pri tleh, kakšnih 50 km nižje, kot so nastali (torej po $\sim 166\mu\text{s}$), govori v prid relativistiki. Danes ta pojav redno opazujemo pri pospeševalnikih osnovnih delcev, kjer po trku nastali kratkoživi produkti imajo precej daljšo življenjsko dobo, večja ko je njihova hitrost.

Podobno si lahko razložimo Lorentzovo transformacijo za maso. Na osnovi Maxwellovih enačb in Poyntingovega vektorskega teorema [31] o smeri pretoka energije vemo, da je mogoče vsako navidez statično polje predstaviti z nasproti potujočim parom polj.

Če to velja za polja na sploh, velja tudi za polja elementarnih delcev, kot sta denimo elektron, ali proton. Če torej elektron postavimo v zelo dolgo in enakomerno "statično" polje, bo elektron pospeševal, sprva enakomerno, nakar se bo ob približevanju svetlobni hitrosti njegovo pospeševanje zmanjševalo, dokler se končno hitrosti ne izenačita. Običajna relativistična razlaga je, da se z večanjem hitrosti veča tudi masa delca, ki ob gibanju s svetlobno hitrostjo postane neskončno velika, zato naj bi za presežanje svetlobne hitrosti potrebovali neskončno količino energije, kar seveda ni mogoče. Vendar relativistični popravek za maso lahko pojasnimo tudi s preprostim dejstvom, da fotonski "tlak", zaradi katerega elektron pospešuje, na koncu izgine ko se hitrosti fotona in elektrona izenačita, zato tudi pospeška ni več. Seveda se ob trku tega elektrona z mirujočo tarčo sprostijo celotna relativistično pridobljena energija, ki jo je formalno sicer mogoče pripisati povečanju mase, a tudi to je mogoče enako dobro razložiti z relativno hitrostjo polj delcev, ki trčita.

To pomeni, da imamo alternativno interpretacijo relativističnih pojavov, ki same relativistike v ničemer ne okni, temveč jo ustrezno fizikalno upraviči tudi na mikro ravni, ne le makroskopsko.

Če se vrnemo problemu časa, je teorija relativnosti doživela največ kritik na račun takoimenovanega paradoksa dvojčkov [32]. Gre za še en miselni poskus, v katerem se eden od dvojčkov odpravi na pot v Vesolje z relativistično visoko hitrostjo in se po določenem času vrne na Zemljo, kjer sreča svojega precej bolj ostarelega brata. A če so vsa gibanja relativna, pravijo kritiki, potem je enako mogoče trditi, da je brat astronom zgolj miroval v Vesolju, med tem ko je Zemlja (in s tem njegov brat dvojček) opravila obratno pot, zato naj bi enak relativistični popravek veljal bratu na Zemlji. Oboje se seveda med seboj izključuje.

Razlaga eksperimenta sloni na Splošni teoriji relativnosti: inercialno stanje, oziroma gibanje s enakomerno hitrostjo, je invariantno, pospeševanje, ali sprememba hitrosti, pa ne — in vemo kateri izmed dvojčkov je bil podvržen pospeševanju. Vendar je mogoče zamisliti tudi tak eksperiment, v katerem bi astronom pospeševal polovico poti z natančno enakim pospeškom kot je zemeljski gravitacijski pospešek, nato pa bi smer plovila obrnil in zmanjševal hitrost spet z enakim pojemkom, kot je gravitacijski pospešek na Zemlji. S tem naj bi oba brata bila ves čas v enako pospešenih pogojih in zato bi problem ponovno bil simetričen in spet ne bi vedeli kateremu bratu naj pripišemo relativistični popravek.

A tudi ta kritika ne zdrži. Prvič, gravitacijsko polje povzroči pohiritev časa v primerjavi z okolico dovolj oddaljeno od kakršne koli večje mase, med tem ko pospešeno gibanje upočasni čas. To vemo, ker moramo ustrezna popravka upoštevati pri satelitskem sistemu za globalno določanje položaja, GPS [33]; brez popravkov bi sistem že po enem dnevu postal neuporaben. In drugič, privzemimo da se brata dogovorita, da bosta vsak po svoji lokalni uri v enakih časovnih intervalih oddajala drug drugemu sporočila, v katerih si bosta izmenjevala tudi informacije o stanju svoje ure. Ob dosledni relativistični analizi potovanja in števila oddanih sporočil je mogoče pokazati, da v obeh primerih astronom odda manjše število sporočil, kot njegov brat na Zemlji, kar pomeni, da oba brata natanko vesta kakšen čas kažeta njuni uri in natanko vesta kateri od njiju je bil izpostavljen relativistični spremembi časa. Torej problem nikakor ni simetričen in kritike niso upravičene, "paradoks" dejansko to sploh ni.

Dejanski problem, ki ga ni tako preprosto razložiti, je povsem drugje: zakaj je pospešek (sprememba hitrosti) absolutno določljiva količina, ki jo je mogoče zaznati in izmeriti ne ozirajoč se na lokalni ali globalni referenčni okvir, med tem ko je premikanje s enakomerno hitrostjo (inercialno gibanje) zgolj relativno in ga ni mogoče določiti drugače, kot v primerjavi z ustreznim zunanjim referenčnim sistemom?

Če pomislimo o zadevi matematično: hitrost je enaka kvocientu spremembe položaja in spremembe časa, $v = (s_2 - s_1)/(t_2 - t_1)$, ali bolj splošno odvodu poti po času, $v = ds/dt$; pospešek pa je odvod hitrosti po času, $a = dv/dt$, ali dvojni odvod poti po času, $a = d^2s/dt^2$. Zakaj torej prvi odvod ne povzroča enakega učinka kot drugi odvod? Matematika nam tukaj ne daje nikakršnega konkretnega odgovora, moramo se zateči fizikalni razlagi. Namreč, v matematiki si redko belimo glavo z drugimi okoliščinami, pomemben je zgolj dosleden postopek skladno z matematičnimi pravili. Nasprotno, v fiziki vedno imamo opravka s celo vrsto dodatnih omejitev, na katere se matematika ne ozira. Prva taka omejitev je zakon o ohranitvi energije. V primeru inercialnega sistema po definiciji ni nobene izmenjave energije, med tem ko v primeru pospeševanja z raketo zamenjamo kemično energijo raketnega goriva za povečanje hitrosti, oziroma spremembo energije rakete.

Iz tega sledi, da, če je ključni kriterij izmenjava energije, mora biti temeljna značilnost interakcije med energije prostora in energijo ujeta v osnovnih delcih ta, da dovoljuje inercialno gibanje, med tem ko se pospeševanju upira. Kako si to razlagamo?

Vemo, da se energija (sevanje gama) v pogojih visoke gostote lahko spremeni v snov, oziroma par delec–antidelec [34]; in obratno, delec in njegov antidelec se lahko med seboj "izničita", njuna notranja energija pa zapusti točko srečanja v obliki dveh fotonov [35]. Dvofotonska fizika [36] je področje fizike, ki obravnava take pojave. Prav tako pa vemo, da delec, ki z visoko hitrostjo prileti v snov in zato upočasni gibanje, oddaja takoimenovano zavorno sevanje [37] (Röntgensko sevanje je tak primer). Prav tako tudi naelektren delec, ki mu z magnetnim poljem vsilimo spremembo smeri gibanja, oddaja podobno sevanje (sinhrotronsko sevanje, [38]). To pomeni, da v določenih pogojih notranja energija delca lahko preide v sevalno energijo in obratno. Navsezadnje, to nam pravi najslavnejša od vseh enačb, $E = mc^2$. Potemtakem masa delca m ni nič drugega, kot mera notranje energije delca. Torej si delec lahko predstavljamo kot neke vrste visokoenergijsko "past", v kateri ujeta energija niha navzven in spet navznoter, ter tako ustvarja stojno valovanje, ki ga od zunaj zaznamo kot električni naboj delca. Ob gibanju delca temu valovanju lahko pripišemo določeno frekvenco ν (de Broglie, [39]), ki se ob pospeševanju spreminja, kar pomeni povečanje notranje energije delca, skladno s Planck–Einsteinovo enačbo $E = h\nu$ [40]. Enačenje obeh izrazov za energijo pripelje do ustrezne interpretacije pojma mase: $m = h\nu/c^2$.

Iz povedanega sledi, da moramo svoje ustaljene predstave o masi kot lastnosti nečesa "materialnega", ali "trdnega", spremeniti: delec je "trden" le toliko, kolikor je visoka njegova notranja energija, nič več in nič manj.

Vendar za razlago vpliva gravitacije na potek časa moramo najprej ugotoviti kaj dejansko gravitacija je in kako deluje. Okoli tega vprašanja zaenkrat ni soglasja, razlag in ugibanj je zelo veliko. Ena od precej verjetnih možnosti pa leži ravno v gostoti energije prostora [41], ki jo prisotnost mase delno razredči [42]. Vsak masivni objekt predstavlja oviro prosti propagaciji fotonov v vseh smereh, lahko bi rekli da gre za neke vrste "senčenje" [43], zato fotonski tlak na nek testni objekt v bližini ni enako velik, kot je to dalj od masnega središča, pa tudi ni enak iz vseh smeri, obstaja gradient v smeri proti masnemu središču. Efektivna gostota energije pada s kvadratom oddaljenosti, kar je posledica krogelne simetrije polja okoli masnega središča.

Kakorkoli že, v drugem prispevku smo pokazali "mehanizem" vpliva gostote energije na potek časa, zato tudi mora veljati podoben vpliv, če si gravitacijsko polje lahko razlagamo kot modulacijo energije prostora. Lokalno znižanje energije prostora, ki je posledica prisotnosti večje mase, ima za posledico manj pogoste kvantne fluktuacije [44], manj pogosto pojavljanje virtualnih parov delcev [45], ter posledično zmanjšanje svetlobne hitrosti [46], torej efektivno skrajšanje časovnih intervalov [47].

Na opisan način je potem mogoče enovito obravnavati kvantne pojave in gravitacijo, kar sicer v klasični relativistiki in klasični kvantni mehaniki ni združljivo.

Iz vsega povedanega sledi, da potek časa (v smislu fizikalne dimenzije) lahko nadomestimo z energijskimi interakcijami med snovjo in energijo prostora na kvantni ravni. Ker so te interakcije drugačne v smeri gibanja delca, kot v smeri pravokotni na smer gibanja, imamo razlago za relativistično transformacijo "efektivnega lokalnega časa", ki poteka drugače od časa drugod. **V resnici pa sploh ne gre za čas, temveč za pogojevanje procesov izmenjave energije.** Vprašati se je treba, ali so fizikalne spremembe dejansko funkcije časa (torej, ali se spreminjajo **zato**, ker se spreminjajo časovne koordinate), ali pa je navidezni potek časa v resnici **posledica** določenega fizikalnega dogajanja. Ponazorimo to razliko z enostavnejšim primerom: kadar grem v trgovino, vedno vzamem s seboj denarnico in obujem čevlje; toda denarnico vzamem **zato**, ker jo bom v trgovini nujno potreboval, med tem ko čevlje nosim iz povsem drugega razloga in gre zgolj za korelacijo. Če torej dobro premislimo, časa dejansko sploh ne potrebujemo. Za osnovno fizikalno količino in mersko enoto je potem treba privzeti (svetlobno) hitrost, ne pa dolžine in časa, ti dve moramo predstaviti med izpeljane količine, ker nista neodvisni od lokalnih fizikalnih okoliščin.

Teorija relativnosti je sicer v zadnjem času doživela celo vrsto novih formalnih potrditev, a tudi vrsto pojavov smo odkrili, ki nekatere vidike oziroma interpretacije postavljajo pod vprašaj (ne pa teorije v celoti, prav tako ne samega principa relativnosti, ali osnovnih načel na katerih sloni). Ena večjih zanimivosti v tem oziru je ravno odkritje kozmičnega mikrovalovnega prasevanja, le to nam ponuja dve fizikalni prvini, ki v določenem smislu relativizirata relativnost: prvič, dejstvo, da je spekter prasevanja zadosti enakomeren (homogen in izotropen glede na smer), da lahko z Dopplerjevim spektralnim zamikom merimo absolutno smer in hitrost tudi kadar se gibljemo inercialno; in drugič, meritve odstopanja od homogenosti in izotropnosti so pokazale, da Vesolje na velikih razdaljah praktično izkazuje Evklidsko geometrijo (z napako manjšo od 1% [8]), ne pa Einstein–Riemannove ukrivljenosti, kot bi jo na podlagi vsebovane celotne mase in energije pričakovali. O teh rečeh se bodo v prihodnosti še kresala znanstvena mnenja.

Vendar se s teorijo relativnosti tukaj ukvarjamo več kot s katero koli drugo teorijo iz še enega pomembnega vzroka: ontološko gledano je to prva in vsaj za sedaj edina teorija, ki je bila oblikovana povsem neodvisno od splošnega znanstvenega ozadja, izpeljana je bila zgolj na nekaterih temeljnih načelih. To pa je izjemen dosežek, ki ga je potrebno posebej prepoznati in obravnavati z vsem dolžnim spoštovanjem (tudi če se nekoč morda izkaže, da je šlo le za prvi približek neki bolj splošni teoriji).

Težave s filozofijo znanosti

Če dovolj dolgo in vztrajno nekaj iščeš, boš zagotovo odkril nekaj drugega.

Tako se glasi Erikov Prvi amandma na Murphyjev zakon o raziskovalni dejavnosti. Izrek odslikava notorno dejstvo, da je ogromna večina znanstvenih odkritij prej posledica srečnih naključij, kot pa strogo načrtovanega raziskovalnega procesa, čeprav je zgodovinsko tudi res, da je v večini takih primerov le ustrezno strokovno podkovan posameznik prepoznal v naključnem dogodku nekaj izjemnega, nenavadnega, vrednega dodatnih preiskav. Pogoja za uspeh sta torej dva: temeljito ukvarjanje z znanstveno–raziskovalno dejavnostjo in srečno naključje!

Seveda je pri tem pomembno razumevanje še številnih drugih okoliščin [48], ni nepomembno niti to iz katerih izhodišč v svojih pogledih izhajamo [49].

Filozof Karl Popper [50] je postavil tezo, da z znanstvenim pristopom ni mogoče nobene teorije dokončno dokazati in potrditi, lahko pa jo le razveljavimo [51]. Do razveljavitve pa začetna hipoteza sicer lahko preide v teorijo ob zadostnem številu preverjanj s pozitivnim izidom; za razveljavitev pa zadošča že en sam negativen primer. In znanstveniki naj bi si vedno prizadevali vsako teorijo izpostaviti kar se da zahtevnim testom in strogim kriterijem, ter sprejeti le tiste teorije, ki te teste uspešno prestanejo, vse ostale pa bi morali brez pomisleka zavreči. Ni pa povsem jasno kaj naj bi po Popperu naredili v primeru ko v izredno uspešni teoriji naletimo na novoodkrita težava: naj se teoriji takoj odpovemo, ali pa naj jo skušamo izpopolniti z uvedbo novega dotlej neznanega dejavnika?

Pravzaprav smo v tem položaju bili že nešteto krat v zgodovini znanosti, navedimo le dva primera: odkritje planeta Neptuna [52] in pojasnitev zamika Merkurovega perihelija [53] (orbitalnega položaja v katerem je oddaljenost od Sonca najmanjša).

Obstajajo Galilejeve risbe iz let 1612 in 1613, na katerih je mogoče prepoznati Neptun, ki je takrat bil v konjunkciji z Jupitrom, vendar je v tem času Neptun bil ravno na začetku svoje navidezno retrogradne zanke (zaradi gibanja Zemlje), zato ga je Galilej imel za nepremično zvezdo. Zato mu tudi ne pripisujemo odkritja. Leta 1821 je astronom Alexis Bouvard objavil tabele Uranove orbite in kmalu za tem je bilo jasno da Uranova orbita opazno odstopa od izračunov po Newtonovih zakonih. Zato se je postavilo vprašanje, ali naj bi popravili Newtonove zakone, ki naj ne bi veljali popolnoma na velikih oddaljenostih, ali pa naj predpostavimo, da neko še neodkrito telo s svojo gravitacijo moti opazovano orbito. To zadnjo hipotezo sta neodvisno drug od drugega obdelala John C. Adams (1843) in Urbain Le Verrier (1845-46) in na osnovi orbitalnih motenj izračunala verjetni položaj morebitnega novega planeta. In res so potem leta 1846 odkrili planet le 1° od položaja, ki ga je predvidel Verrier. S kako preciznimi izračuni imamo opravka naj ponazorita razdalji in orbitalni periodi obeh planetov: Uran je oddaljen od Sonca 19 krat bolj kot Zemlja, Neptun pa 30 krat, Uranova perioda znaša 84 let, Neptunova pa 164,8 let. To pomeni, da je od odkritja Neptun šele leta 2010 zaključil svoj prvi orbitalni obhod! Sicer pa je masa Urana 14,6 krat večja od zemeljske, Neptunova pa 17,2 krat.

Še bolj zanimiv je primer precesije Merkuovrga perihelija. Planet Merkur je od vseh planetov najbližji Soncu, ima pa tudi najbolj ekscentrično orbito: njegova največja oddaljenost od Sonca je za $\sim 1,5$ krat večja od najmanjše (70 proti 46 milijonov km). Njegova orbitalna perioda pa je malenkost manjša od 88 zemeljskih dni. Že omenjeni francoski matematik in astronom Le Verrier je leta 1859 poročal, da Merkurove počasne precesije ni mogoče popolnoma pojasniti upoštevajoč znane vplive ostalih planetov po Newtonovih zakonih. Od opaženega zamika za 5600 ločnih sekund na stoletje je bilo možno z vplivi ostalih planetov pojasniti le 5557 ločnih sekund (za ponazoritev: ena ločna sekunda je kot pod katerim vidimo debelino človeškega lasu, $\sim 50\mu\text{m}$, z razdalje 10m). Preostalih 43 ločnih sekund na stoletje je bil Le Verrier, poučen z izkušnjo Neptuna, sklon pripisati vplivu nekega majhnega, še neodkrita planeta (ki so mu kar takoj nadeli ime Vulkan), ali pa večjem številu še manjših objektov. Ničesar temu podobnega pa ni bilo mogoče najti in problem je ostal nerešen vse do leta 1915, ko je Einstein ugotovil, da razlika natančno ustreza relativističnemu gravitacijskemu učinku Sonca, kar je obveljalo za enega prvih dokazov veljavnosti Splošne teorije relativnosti.

Tako imamo odkritje Neptuna za primer, ko je mogoče uveljavljeno teorijo rešiti z vpeljavo novega elementa; pojasnitev Merkurove precesije pa za primer, ko uveljavljeno teorijo moramo vpricho novih odkritij nadgraditi. Namreč, sam Einstein se je pri razvoju

Splošne teorije relativnosti dobro zavedal, da mora le ta v pogojih nizkih hitrosti in šibkih gravitacijskih polj gladko preiti v Newtonovo teorijo. Oba primera pa v precejšnji meri omilita ostrino Popperjeve zahteve.

Madžarski filozof Imre Lakatos [54] je prav na primeru odkritja Neptuna kritiziral Popperjevo tezo. Za njega je to zgovoren primer znanstvene prakse, da zelo redko zavrne katero koli teorijo že na podlagi enega samega negativnega izida preverjanja. Lakatos vidi boljše razlago obnašanja znanosti (znanstvenikov) v tistem, kar sam imenuje *raziskovalni program*, ki se sestoji iz *trdega jedra* (v tem primeru so to trije Newtonovi zakoni gibanja) in *zaščitnega pasu* bolj ali manj številnih dodatnih predpostavk, ki jih po potrebi prikličemo v razlago (v tem primeru je to število planetov v sončnem sistemu). Kadar naletimo na težave, vedno lahko prikličemo katero od dodatnih predpostavk in z ustrezno korekcijo napovemo novo rešitev (ki se seveda mora v primeru *progresivnega programa* pokazati za pravilno, sicer gre za *degenerativni program*, ki posledično vodi v opustitev programa).

Seveda, nobena od teh tez ne odgovarja vnaprej na vprašanje kako naj se znanstveniki obnašajo v podobnih primerih. Francoski fizik in filozof Pierre Duhem [55] pravi, da znanstveniki takrat rado sledijo svojemu *dobremu občutku*, a žal je to povsem subjektiven pojem, od posameznika do posameznika drugačen, pa tudi od primera do primera drugačen, na to se ne gre zanašati. Duhem je med drugim oporekal trditvi Newtona, da je zakone gibanja formuliral na temelju opazovanj in Keplerjevih zakonov; trdil je da to ne more biti res, ker večji planeti očitno motijo orbite manjših planetov. Vendar tukaj Duhem prezre metodo indukcije, kjer izhajajoč iz preprostega primera sistema dveh teles, rešitev katerega je skoraj trivialno preprosta, nato te rešitve posplošimo na probleme večjega števila teles z ustreznimi medsebojnimi vplivi. Tako tudi tega očitka ni treba jemati resno.

Vprašati se moramo, kdaj nek novoodkriti znanstveni pojav nakazuje potrebo po zamenjavi paradigme? Oziroma, v katerih pogojih se lahko še naprej oklepamo stare paradigme, ne da bi tvegali ujetja v past konzervativizma?

Zgodovinar in filozof Thomas Samuel Khun [56] je leta 1962 objavil zelo vplivno delo z naslovom "Struktura znanstvenih revolucij", kjer je oslikal razvoj znanosti v cikličnih sosledjih, poimenovanih *normalna znanost* – to je obdobje kumulativnega, inkrementalnega napredka, *kriza* – obdobje v katerem ena ali več izjem ali nepravilnosti resno ogroža vse dotedanje znanje, ter *znanstvena revolucija* – razmeroma kratko obdobje novih odkritij, ki omogočijo preboj v razumevanju in novo tolmačenje. Po tem modelu stara paradigma, četudi že stoletja uspešna in vedno znova potrjena, prej ali slej zaide v krizo ob vedno večjem številu novo odkritih pojavov ali ugotovljenih dejstev, ki jih ni mogoče na dotedanji način umestiti v obstoječo shemo znanstvenih spoznanj. Iskanje rešitev teh neskladij v nekem trenutku pripelje do odkritja, ki sproži znanstveno revolucijo in s tem opustitev stare in afirmacijo nove paradigme. Zanimivo pri tem je, da Khun v paradigmo vključuje ne le znanstveno teorijo, ki jo znanstvena srenja privzema v danem obdobju, temveč tudi vse dostopne eksperimentalne in tehnično-tehnološke zmogljivosti, kulturne vplive, ter celo sprejete družbene vrednote. Khun definira prehod med paradigmi v smislu medsebojne inkomenzurabilnosti (neprimerljivosti) obeh.

Dober primer vpliva družbenih okoliščin in vrednot na znanost in znanstvena odkritja imamo v odpovedi projekta Superprevodnega Super Trkalnika (SSC) [57], ki ga je ob konzervativni večini v ameriškem kongresu, rastočih stroških in spremenjenih zunanjepolitičnih razmerah administracija predsednika Clintona leta 1993 bila prisiljena ustaviti, po več letih gradnje in porabljenih 2 milijardah dolarjev. Posledično je s tem odkritje Higgsovega bozona (in kdo ve še česa!) bilo podarjeno evropskemu CERNu. A poleg tega je to imelo hude posledice za razvoj fizike v ZDA: ne le, da je cela vrsta najbolj sposobnih

fizikov poiskala službo v CERNu, tudi mnogi, ki so ostali doma, so se zaposlili v drugih dejavnostih, po nekaterih analizah se jih je nenavadno veliko zaposlilo v bančništvu, zavarovalnicah in nasploh različnih finančnih in svetovalnih ustanovah. Obstajajo celo govorice, da so finančno krizo leta 2008 zakrivili prav mladi fiziki zaposleni v finančnih ustanovah, v katerih so na podlagi fizikalnih modelov za analizo kaotičnih sistemov predlagali uvedbo cele vrste tveganih finančnih "produktov" in metod za reševanje propadlih naložb, ki jih tradicionalno konzervativne finančne ustanove same ne bi nikoli sprejele. A takrat se je mnogim zdelo da gre za *win-win* poteze, s katerimi naj bi finančne ustanove v vsakem primeru pridobile precejšno finančno korist. Sledila je poplava najemanja navidez poceni kreditov, ki jih kreditorejmalci v rahlo zaostrenih ekonomskih razmerah niso več zmogli redno odplačevati, nakar so jim kreditodajalci zasegli s krediti kupljene ali zastavljene nepremičnine. Ker pa je bilo dogajanje tako hitro in množično, teh nepremičnin ni bilo več mogoče prodati naprej, nepremičninski trg se je sesul in sprožil domine stečajev finančnih ustanov, ter posledično svetovno krizo.

Naj je ta anekdota resnična ali ne, ostaja dejstvo, da znanstvena dejavnost nikakor ni ločena in izolirana od dogajanj v celotni družbi, pa četudi na prvi pogled zgleda od družbenih problemov precej odmaknjena, ali vase zaprta.

Da je Khunova domneva o cikličnosti faz v razvoju znanosti utemeljena, nam ponazarja tudi današnje stanje v kozmologiji. Leta 1970 je Vera Cooper Rubin [58] ugotovila, da pri ogromni večini galaksij hitrost rotacije galaktičnega diska ne pada z oddaljenostjo od središča, tako kot to napoveduje klasična teorija, relativne hitrosti pa so vseeno premajhne, da bi lahko razloge za ta pojav iskali v Splošni teoriji relativnosti.

Podoben pojav je že v 30tih letih opazil astronom Fritz Zwicky pri preučevanju hitrosti galaksij v enem od galaktičnih jat, ki so bile razmeroma velike glede na celotno gostoto snovi, zato bi se moralo to jato že zdavnaj razleteti. Zwicky je predpostavil da mora tovrstna jata držati skupaj gravitacija velikih količin neke nevidne snovi. Takratna astronomija je bila omejena na optična opazovanja, zato je Zwicky predpostavil da mora dodatno maso predstavljati gosti plin ali večje količine prahu v medgalaktičnem prostoru. Zato do odkritja Rubinove temu niso posvečali večje pozornosti.

V 80tih letih pa je bila radioastronomija že zelo razvita in je bilo mogoče goste oblake plina rutinsko detektirati, vendar je bila gostota plina v galaktičnih diskih še vedno premajhna, da bi pojasnila opaženo porazdelitev hitrosti. Podrobnejše meritve in matematične analize so pokazale, da mora biti masa galaksije vsaj $4-5 \times$ večja od optično detektirane snovi. Zato je predpostavka o temni snovi dobila novo vsebino v povezavi s takrat že teoretično uveljavljeno, a eksperimentalno še nepotrjeno teorijo supersimetrije — ta razširitev Standardnega modela namreč razreši nekatere druge probleme kvantne teorije tako, da vpelje težke supersimetrične partnerje vsem do sedaj znanim osnovnim delcem (pesimisti med fiziki opozarjajo, da nismo še odkrili nobenega takega delca, optimisti pa odgovarjajo, da smo jih pravzaprav odkrili že polovico; o). Ena temeljnih lastnosti nekaterih supersimetričnih delcev je, da ne interagirajo elektromagnetno, torej ne absorbirajo in ne oddajajo svetlobe, imajo pa precej večjo maso, in so strokovno znani kot WIMPS [59] (*Weakly Interacting Massive Particles*, šibko interagirajoči masivni delci), zato se je te snovi popularno prijelo ime "hladna temna snov", *Cold Dark Matter*, CDM [60].

Seveda obstaja tudi cela vrsta alternativnih rešitev problema galaktične rotacije, od domneve da je nevtrinov [61] veliko več, kot jih lahko detektiramo, ter da imajo sicer majhno, a od nič različno maso (kar je že posredno potrjeno), prek domneve o večjih količinah MACHO objektov [62] (akronim za *MAssive Compact Halo Objects*, torej vesoljsko kamenje, asteroide, planetoide, itd), pa vse do domneve o spremenjeni Newtonovi dinamiki na velikih

razdaljah, MOND (*Modified Newtonian Dynamics*) [63]. Vsaka od teh razlag ima svoje prednosti in svoje omejitve, nobena nima še dovolj prepričljivih argumentov. Tem pa se je pred kratkim pridružila še možnost, da so galaksije v resnici precej večje kot jih lahko vidimo z različnimi astronomskimi tehnikami, denimo za bližnjo Andromedo [64] se je izkazalo, da je dejansko dvakrat večja, pa tudi naša Rimska cesta naj bi bila prav tako vsaj dvakrat večja, sodeč po nedavno objavljenih raziskavah [65]. A tudi to ne odpravi problema v celoti.

Problem temne snovi nakazuje, da zaenkrat po vsej verjetnosti ne vemo ničesar o kar 80% sestave Vesolja. A obstaja možnost, da to še zdaleč ni največji problem.

Leta 1998 je več skupin astronomov preučevalo eksplozije zvezd znane pod imenom supernove tipa Ia [66]. Eksplozije te vrste se dogajajo v natančno določenih okoliščinah, namreč v binarnih zvezdnih sistemih, ko zelo gosta bela pritlikavka s svojim močnim gravitacijskim poljem jemlje snov s površja sosednje rdeče velikanke. Zaradi kopičenja snovi doseže bela pritlikavka čez čas kritično vrednost, ko njen notranji ftonski tlak ne zdrži več pritiska, ki je posledica vedno močnejšega gravitacijskega polja. Jedro zvezde se zato sesede v nevtronsko zvezdo, sproščena energija pa raznese plašč zvezde, ki se zaradi eksplozije hitro širi in močno sveti. Ker se pojav zgodi ob dobro določeni gostoti snovi, ima eksplozija dobro določeno in predvidljivo dinamiko in svetilnost. Zaradi te lastnosti uporabljajo astronomi tovrstne eksplozije kot "standardne sveče" [67], torej objekte znane navidezne velikosti. Če te primerjamo z ostalimi znanimi zvezdami, lahko precej natančno določimo oddaljenost galaksije v kateri je do eksplozije prišlo, tudi na zelo velikih oddaljenostih, ker so supernove izredno svetle. Če izmerimo še spektralni zamik svetlobe galaksije proti rdečem delu spektra, lahko na temelju Dopplerjevega učinka izračunamo tudi hitrost oddaljevanja posamične galaksije. In če enako naredimo pri velikem številu galaksij, dobimo podatek o velikosti in hitrosti širjenja Vesolja.

Po zelo velikem številu tako pregledanih galaksij in pojavov supernov se je počasi začel izrisovati pravilen vzorec: namesto običajnega padca svetilnosti s kvadratom oddaljenost je bilo mogoče ugotoviti dodatno odstopanje, namreč zelo oddaljene supernove so bile za spoznanje manj svetle, kot bi to po preprostem geometričnem pravilu ob upoštevanju hitrosti širjenja Vesolja pričakovali. Ta pojav bi bilo mogoče najbolj preprosto pojasniti z obstojem vedno večjih količin plina in prahu skozi katerega se mora svetloba prebijati na svoji dolgi poti, vendar bi to imelo za posledico tudi bolj razmazano sliko oddaljenih galaksij. Tega pa ni opaziti: na posnetkih zelo oddaljenih galaksij narejenih z vesoljskim teleskopom Hubble so slike oddaljenih galaksij podobno ostre, kot tiste bližnjih. Zato so astronomi bili prisiljeni zateči se drugi najbolj preprosti razlagi: hitrost širjenja vesolja se postopoma povečuje [68]. A ta domneva zahteva pojasnilo, kaj naj bi povzročalo ta dodatni pospešek.

Dobrega kandidata pa smo že imeli na voljo: Einsteinovo kozmološko konstanto Λ (Lambda) [69], ki jo je vpeljal v Splošno teorijo relativnosti s ciljem omogočiti dolgotrajno stabilnost Vesolja, potem ko je postalo jasno, da Fridmanove rešitve [70] Einsteinovih enačb polja ne omogočajo statičnega Vesolja. Kmalu pa so teoretiki izpeljali kar pet različnih variacij, pri čemur bi lahko energija prostora bila bodisi konstantna, bodisi bi s starostjo Vesolja naraščala, ali se zmanjševala, ali pa bi zahtevala še kakšne druge, dodatne pogoje, denimo spreminjanje svetlobne hitrosti s starostjo Vesolja, ali morda nekaterih drugih temeljnih fizikalnih konstant. Ob tem pa je treba omeniti še vrsto drugačnih možnosti, od tega, da fotoni s časom izgubljajo energijo (to je sicer močno vprašljivo), pa do tega, da Fridmanove rešitve, ki so bile izpeljane na temelju domneve, da je Vesolje na velikih razdaljah homogeno in izotropno, ne ustrezajo dejanskim razmeram v obstoječem Vesolju. Morda pa se že pri meritvah nekje motimo zaradi neke druge privzete predpostavke, ki v resnici ne drži?

Kakorkoli že, vsaka od omenjenih teoretičnih možnosti ima svoje prednosti in pomanjkljivosti, za nobeno še ni mogoče trditi da je prava, so le bolj ali manj verjetne. In vsaj zaenkrat se zdi, da največjo verjetnost ima ravno Einsteinova različica energije prostora, ki so jo po analogiji s temno snovjo že kmalu poimenovali "temna energija" [71]. Kaj pa to v kozmološkem smislu pomeni?

Če še naprej sledimo Fridmanovim rešitvam (takoimenovane metrike FLRW, Fridman-Lemaître-Robertson-Walker, [72]), mora biti celotna specifična gostota snovi in energije enaka ena:

$$\Omega_{\Lambda} + \Omega_{\text{CDM}} + \Omega_{\text{B}} = 1$$

pri čemur Ω_{Λ} ustreza gostoti energije prostora, Ω_{CDM} gostoti temne snovi, Ω_{B} pa gostoti običajne barionske snovi. Najnovejše eksperimentalno ocenjene gostote pa so med seboj v razmerju 68% : 27% : 5%, kar pomeni, da danes poznamo le 5% vsebine Vesolja. Precej klavno, glede na spektakularen razvoj znanosti v zadnjem stoletju.

Kako se bo zgodba razpletla, bomo morda izvedeli kmalu, v nekaj letih, če bodo kakšna nova odkritja prišla na dan iz podatkov, ki jih bo zbral CERNov LHC, katerega po dveletni prenovi tehnološko močno izpopolnjenega ponovno zaganjajo ravno te dni [73], ko tole besedilo nastaja.

Nauk, ki ga moramo potegniti iz cele zgodbe je, da obdržimo določeno kritično distanco do medijsko senzacionalnih znanstvenih objav, pa naj bodo te teoretično še tako dobro podprte, ker vedno obstaja možnost, da kakšno novejšo spoznanje osvetli zadevo v povsem drugačni luči. Pa tudi eksperimentalistom se včasih zalomi, če neučakano pohitijo z objavo, kot se je to zgodilo septembra 2011 z znamenitim OPERA eksperimentom [74] in nevtrini, ki so domnevno potovali hitreje od svetlobe! Teoretiki pa seveda niso pripravljeni čakati na eksperimentaliste, da jim priskrbijo dodatne podatke, navadili so se pač delati s tistim kar imajo pri roki. In če pridejo do kakšnega zanimivega rezultata, ga seveda tudi objavijo, po eni strani zato, da si lažje priskrbijo sredstva za dodatne raziskave, po drugi pa, da eksperimentalistom ponudijo nove smernice za iskanje.

Težave z objektivno realnostjo in njenim znanstvenim opisom

Tako smo počasi prišli do vprašanja, kako naj sprejemamo deklarirano znanstveno resnico? Kako naj se postavimo, da nas vsakokratna sprememba paradigme ne zbega? Edini razumen odgovor je, da je treba vse reči vedno tehtati v zgodovinski razvojni perspektivi, nič ni dano enkrat za vselej, vendar počasi konvergiramo.

Mnogi študenti fizike, pa tudi mnogi študenti drugih naravoslovnih in tehničnih ved, ki imajo fiziko kot del študijskih obveznosti, že v teku študija opazijo počasen prehod od temeljnih fizikalnih načel k temeljnim matematičnim načelom v obravnavi fizikalnih pojavov odkritih v teku XX stoletja. Za nekatere je to zelo moteče, ker imajo občutek, da ostajajo brez zanesljivega intuitivnega vpogleda v probleme, ki so si ga izoblikovali v letih izobraževanja v osnovni in srednji šoli. Drugi, maloštevilni, tisti matematično boljše podkovani, pa to sprejemajo naravno, brez večjih težav.

Vzrok temu je večplasten. Imamo:

- problem privzetih aksiomov in domnev, ki jih implicitno upoštevamo, a jih ne obravnavamo in se o njih pogosto sploh ne sprašujemo;

- problem temeljnih načel (denimo načelo vzročnosti nasproti načelu negotovosti, ohranitvena načela nasproti načelom simetrije in spontane kršitve le te, itd.);
- problem ustreznega matematičnega modeliranja obravnavanega fizikalnega sistema;
- problem merjenja (problem temeljnih fizikalnih konstant in referenčnih vrednosti, problem merljivosti, bodisi zelo majhnih, bodisi zelo velikih količin ali razsežnosti, sistematične in naključne merilne napake, problem vpliva procesa merjenja na merilni rezultat, problem ločljivosti, ter sorazmernosti merjenih količin, problem neposrednega in posrednega zaznavanja in merjenja);
- problem matematične (statistične) obdelave merilnih rezultatov;
- problem ujemanja obnašanja sistema in njegovega matematičnega modela;
- problem razumevanja modela in modeliranega sistema in fizikalne interpretacije fizikalnih procesov pri obeh;
- problem jezika (matematike, logike, formalne in dejanske fizike, lingvistike).

Mimogrede, problem merjenja ima, poleg naštetih, še eno čisto načelno komponento, ki si zasluži posebno pozornost. Proces merjenja je v resnici proces primerjanja merjene količine z neko dogovorjeno standardno količino. Vendar, **ker so merilni instrumenti narejeni iz enake snovi, kot je tista katere lastnosti želimo spoznati**, za instrumente veljajo enaki pogoji in enake zakonitosti izmenjave energije, ter s tem vsakršne druge informacije, torej merjenja niso nikoli povsem neodvisna od tega, kar naj bi merili. Zato, poleg izjemnega poznavanja fizikalnih zakonitosti in dosegljivih tehnično-tehnoloških zmogljivosti, morajo biti eksperimentalisti neverjetno zviti in sposobni ustvariti take merilne pogoje, v katerih bo iskano količino mogoče ločiti od vseh ostalih, ob kar se da majhni izgubi iskane informacije. To pa skoraj nikoli ni preprosto, še posebej ne, ko iščemo zelo velike ali zelo majhne količine. Utemeljeno se lahko sprašujemo, ali je iz medsebojne izmenjave energije dveh povsem enakih delcev sploh možno na načelni ravni izluščiti kakršno koli informacijo, razen seveda tiste, da je do izmenjave energije prišlo? To je tista temeljna meja, katero je v mislih imel Bohr, ko je govoril o nam dosegljivi in nedosegljivi fizikalni realnosti.

Več kot očitno je, da naš koncept fizikalne in tudi siceršnje realnosti oblikujemo upoštevajoč vse zgoraj našeto, vendar smo zelo redko v položaju, da jasno ločujemo med posameznimi dejavniki in njihovimi vplivi. Še poseben problem predstavlja matematika, ki je sicer znotraj sebe konsistentna in eksaktna, vendar je v funkciji fizikalnega orodja lahko tudi moteča in celo zavajajoča, zlasti zato, ker je implicitno ali eksplicitno vpletena v fizikalno obravnavo na različnih stopnjah, in se težave pojavijo pogosto šele proti koncu, vzrok pa je lahko že nekje na začetku.

Če navedemo en sam primer: v kvantnem svetu imamo nedvomno opravka z diskretnimi vrednostmi energije, a če pri obravnavi nismo previdni in za kvantne sisteme uporabimo Newtonov infinitezimalni račun, kjer lahko vsako količino po volji zmanjšujemo do neskončno majhne velikosti, se nam računi večinoma ne izidejo. Tako je denimo pri elektronu, ki ima končno velik električni naboj, vendar ga v klasični kvantni mehaniki obravnavamo kot točko brez dimenzij (v poskusih s sipanjem zgleđa, kot da elektron sploh nima razsežnosti), zato je njegov radij efektivno enak nič, kar pomeni da je sila zaradi naboja neskončno velika in bi se moral elektron že zaradi lastne notranje energije razleteti. Vemo pa, da temu ni tako, elektron je dolgočasovno stabilen, in seveda mora biti končno majhen objekt [75]. Vzrok za to težavo je delno tudi v neprimerno izbrani matematični metodi, za analizo

kvantnih pojavov bi morali uporabljati diskretno matematiko, namesto infinitezimalne (to pa morda le izjemoma).

V tem in podobnih primerih vzroke problemov ni težko identificirati (čeprav smo zgodovinsko rabili par desetletij, da smo to ugotovili pri elektronu!), a obstaja množica primerov, ko to ne gre tako zlahka in niti ne vemo, kje naj sploh iščemo vzrok za težave. Od tod pogosto izvirajo različni "kvantni paradoksi", ali neprimerne interpretacije; posledično se pogosto dogaja, da težavo pripišemo fizikalni teoriji, oziroma njeni zasnovi, namesto neprimernim analitičnim orodjem. Seveda so pogosti tudi obratni primeri, ko se izkaže da je problem neodvisen od izbranih matematičnih orodij, zaplete pa se zaradi neustrezne fizikalne domneve na samem začetku.

Če k tem operativnim težavam dodamo zunanje vplive, na katere nobena še tako izpopolnjena in strogo kontrolirana dejavnost ni imuna, kot so dogma, ideologija, ali celo namerno izkrivljanje zaradi individualnih finančnih interesov ali prestiža, potem imamo pogosto v razvoju znanosti vse prej kot lahko nalogo. Še težje potem doseže razumevanje, ali si ustvari neodvisno in nepristransko mnenje posameznik, ki sicer sam v zadevo ni vpleten, ga pa problem na splošno zanima, nenazadnje tudi kot davkoplačevalca.

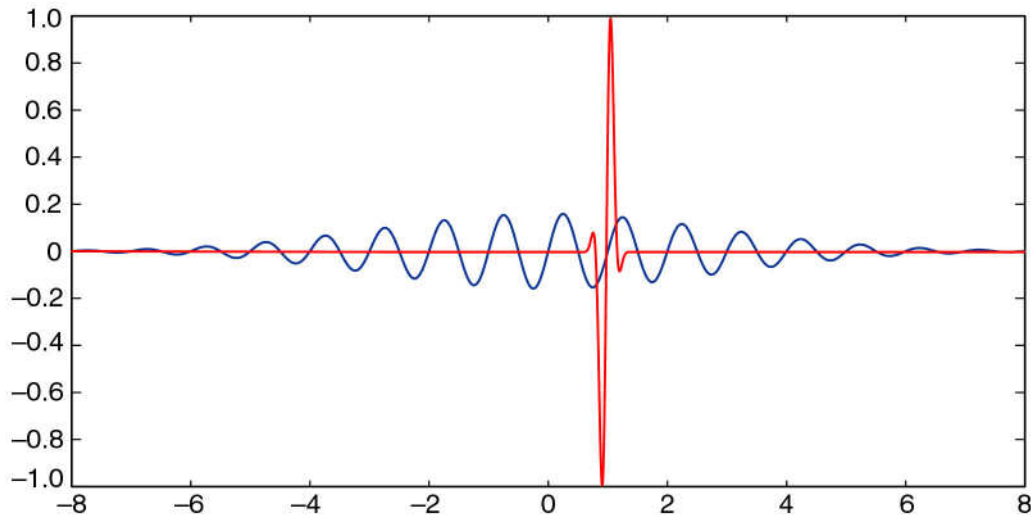
Fizika, kot znanstvena disciplina, si je zgradila in izborila sloves in kredibilnost kot zanesljivo, eksperimentalno ponovljivo in operativno znanje, ter temu ustrezne metode za pridobivanje in prečiščevanje tega znanja, v stoletnih bojih in prizadevanjih proti dogmi in despotizmu na osnovi kategoričnega zavzemanja za objektivno realnost, ki jo je mogoče prav tako objektivno spoznati ob dosledni uporabi znanstvene metode. Pojem objektivne realnosti je vgrajen v temelje sodobne kulture in civilizacije, čeprav si v ekstremnih razmerah še vedno nismo vedno povsem na jasnem.

Seveda so mnoga praznoverja še kako živa, mnogi psevdoznanstveni miti in prepričanja, temelječa na izkrivljeni znanosti ali na nepopolnem razumevanju [76], se ne bodo pustili kar tako izkoreniniti, vendar ta sama po sebi niso problem, vsaj ne za znanost (morda bolj za ideologijo in politiko?). Problem je, da od začetka XX stoletja v fiziko in znanost na sploh vdirajo ideje, ki bi jih sicer morali brez pomislekov zavreči kot neznanstvene, zato tudi nerealne, pa jih ne moremo, ker izvirajo iz nekaterih rezultatov znotraj same fizike. Skupno tem idejam je prizadevanje za opustitev pojma objektivne realnosti, njegovo nadgradnjo, zanikanje, ali le zmanjšanje njegovega pomena. Žal, mnoge od teh idej temeljijo na zamenjavi fizikalnih načel s čisto matematičnimi. Ni nobena skrivnost, da so začetniki tega preobrata ravno nekatera vidna imena kvantne fizike v prvi polovici XX stoletja, ki jih ponavadi omenjamo v povezavi s Kopenhagensko interpretacijo kvantne mehanike.

Einstein, tudi sam eden izmed začetnikov kvantne mehanike, se je takim tolmačenjem krčevito upiral, kar so mnogi potem imeli za postopno pogrezanje v močvirje konzervativnosti ostarelega znanstvenika. Če sploh komu, vsaj Einsteinu nikakor ne moremo očitati konzervativnosti, nasprotno, njegova stališča so vedno bila trdno postavljena v bran iskanju rešitev zasnovanih na temeljnih fizikalnih načelih, predvsem načelu vzročnosti. V tem smislu je treba tolmačiti tudi njegovo zavzemanje za objektivno realnost, izraženo v stavku: "*...rad si predstavljam, da je Luna še vedno tam gori, tudi ko je ne gledam.*"

Nasprotno je Bohr zastopal nekakšno neo-Kantovsko stališče, da fizika nima dostopa do objektivne realnosti, pač pa le do nekaterih eksperimentalnih rezultatov, ki le delno odslikavajo globinsko fizikalno realnost. Če za Bohra fizikalna realnost morda še obstaja, četudi naj ne bi imeli do nje neposrednega dostopa, je za mnoge kasnejše privržence Kopenhagenske "šole" to zgolj videz neke temeljne fizikalne realnosti, ki v resnici sploh ne obstaja, pač pa si ga mi sami izgradimo na temelju eksperimentalnih rezultatov. Heisenberg je promoviral idejo o "potencialni realnosti", nekakšnem virtualnem prostoru verjetnosti, iz

katerega je mogoče izbrati vsakokratne okoliščine, ki botrujejo konkretnemu eksperimentalnemu izidu. Wigner, von Neumann in Pauli pa so šli tako daleč, da so imeli eksperimentatorjevo zavest za nujen element vsakega eksperimenta, kar so potem razlagali s takimi *ad hoc* privzetimi idejami, kot je "kolaps verjetnostne valovne funkcije" [77], slika 3.



Sl.3: Kolaps verjetnostne valovne funkcije. Dokler ne vemo v kateri točki prostora je nek delec, je njegova verjetnostna valovna funkcija porazdeljena po vsem prostoru in ima nizko amplitudo. Tisti hip, ko delec najdemo, se zgodi kolaps verjetnostne valovne funkcije, le ta je sedaj dobro lokalizirana in ima amplitudo enako 1, drugod po prostoru pa 0. Seveda gre za **matematično verjetnost, ki jo je mogoče interpretirati kot položaj delca**, ne pa za dejanski položaj, zato se ta funkcija lahko v trenutku spremeni, brez hujših posledic za naše razumevanje fizike.

V kvantni mehaniki, tako kot v klasični mehaniki, je izid poskusov seveda odvisen od pogojev, ki jih postavijo eksperimentatorji že pri zasnovi ali izvedbi eksperimenta, a včasih celo tudi od kasnejše odločitve eksperimentatorjev pri obdelavi rezultatov (kar je znano kot "učinek zamujene odločitve").

Pa povejmo takoj zakaj človeška zavest ne more vplivati na izid kvantnih eksperimentov (če lahko odmislimo pripravo eksperimenta in analizo rezultatov): zavest je makroskopski pojav, ne kvantni pojav. Slikanje delovanja možganov z metodo funkcionalne jedrske magnetne resonance (*functional magnetic resonance imaging*, fMRI, [78]) nazorno pokaže, da oscilacije nevronov v čelnem režnju (kjer se oblikuje občutek zavedanja) nastanejo povsem na koncu cele verige oscilacij velikih skupin nevronov (milijarde živčnih celic, ki začnejo pulzirati naključno in se postopoma v nekaj milisekundah časovno uskladijo), od senzorični centrov, prek interpretativnih in povezovalnih centrov, do frontalnega režnja in končno oblikovanja spomina preko kratkoročnih (na molekularni ravni) in dolgoročnih (na strukturni ravni v obliki nevrnskih povezav) procesov. Do oblikovanja zavesti o dogodku pride torej kakšnih 30–70ms po prvi indikacij o zaznavi dogodka. Nekaj, kar se zgodi kasneje, ne more biti vzrok tistemu, kar se je zgodilo prej, vsaj v tem Vesolju ne (pozor, tukaj imamo v mislih dogodka, ki so neposredno v zvezi drug z drugim, ne pa dogodkov ki so si daleč narazen in za katere potem velja relativnost simultanosti [79]).

Ah, rekli boste, ampak delovanje možganov na nezavedni ravni, ali na ravni posameznih nevronov, ali ionov v sinapsah, ali celo na ravni osnovnih delcev bi morda lahko razložilo... Nikakor ne. Možgani so seveda sestavljeni iz elektronov in protonov, ki pa si izmenjujejo energijo s fotoni, toda zavest ne more nastati na ravni osnovnih delcev. To je

podobno, kot če bi delovanje računalnika skušali pojasniti na ravni delovanja tranzistorjev. Seveda je procesorska enota računalnika zgrajena iz (milijard) tranzistorjev, toda ena sama spominska celica (bistabilni register) zahteva vsaj šest tranzistorjev, vsebuje pa le en bit informacije; ta celica ničesar ne ve o ostalih bitih, in prav tako nič o algoritmih, ki bodo te informacije procesirali. Podroben opis delovanja spominske celice na ravni tranzistorjev zahteva precej zapleten postopek, na ravni skupine kot celote pa za opis delovanja potrebujemo eno samo programsko vrstico!

Pa tudi na sploh, zavest ni enostopenjski proces. Informacija, ki jo posredujejo sensorji se že v senzoričnih centrih razčleni in delno prepozna, nato se posreduje naprej drugim centrom, odvisno od pomena, ali kakega drugega asociativnega kriterija, se shrani v začasni spomin, se primerja s podobnimi že prej shranjenimi informacijami po različnih kriterijih, po katerih se tudi ovrednoti, spravi nazaj, ponovno primerja z novimi informacijami in se nazadnje odvisno od pomembnosti shrani v trajni spomin. Torej gre za večkratne povratne zanke na več različnih ravneh.

Seveda, narava med svojim delovanjem ne rešuje diferencialnih enačb; mi smo tisti, ki moramo reševati enačbe, če želimo nekaj izvedeti o njej in njenem delovanju. Vendar nam argument ponazarja zapletenost procesov na elementarni ravni, ki na sistemski ravni postanejo le še bolj zapleteni in kot taki za analizo neuporabni. Zato si procese na sistemski ravni raje pojasnjujemo z močno poenostavljenimi modeli. Za opis delovanja računalnika ponavadi uporabljamo velike strukture (denimo register, logični komparator, števec, itd.) in algoritme prirejene delovanju teh struktur, in podobno je tudi pri možganih, ki si jih zamišljamo razdeljene na posamezne centre, med tem ko algoritmom, ki se v teh centrih odvijajo pravimo "psiho-fiziologija", četudi za transport informacij konec koncev skrbijo natrijevi in kalijeve ioni v sinapsah, torej dobra stara kemija (a tudi to lahko reduciramo na elektronske interakcije med zunanjimi orbitalami posameznih atomov). Če si potem lahko privoščim nekaj arogance (predvsem v zabavo bralcu), bi lahko rekel, da bi od fizikov kalibra Wignera, von Neumanna, Paulija, ter številnih drugih pričakoval, da bi ti fantje imeli malo več soli v glavi.

Vsekakor je treba poudariti, da vzrok za taka stališča pogosto leži v posebej prilagojeni statistični obdelavi rezultatov, ki jo zahteva nenavadna lastnost kvantnih pojavov, imenovana "superpozicija kvantnih stanj" [80]. Ni pa še povsem jasno ali je treba "krivdo" pripisati neprimerni statistiki, ali resnično nenavnim lastnostim kvantnih pojavov, ali pa morda le napačnemu razumevanju problema (na kateri koli ravni). Osebnostno menim, da gre za ta zadnji dejavnik, namreč v klasični kvantni mehaniki nikoli niso valovne mehanike jemali dovolj resno, pač pa le kot eno izmed bizarnih lastnosti kvantnih objektov.

To pa seveda ne pomeni da bi valovna mehanika, ki sta jo zastopala de Broglie in Bohm [81], bila kakor koli boljša, tudi ne enakovredna ali enako zadovoljiva, kot je bila Kopenhagenska interpretacija in na njej zasnovani nekateri drugačni pristopi. Premisliti je treba zakaj so bile valovne ideje zavrnjene in celo odkrito osmešene (Heisenberg), ker tega ni mogoče pojasniti in upravičiti z uveljavljeno znanstveno metodologijo. Z današnjega zornega kota je videti, da je šlo prej za že znani stari ideološko-dogmatski boj med subjektivizmom in realizmom, med idealizmom in materializmom (tudi če bi se nekoč v prihodnje izkazalo, da v najrazličnejših oblikah energijskih valovanj ni ničesar materialnega – to zadnje seveda v klasičnem pomenu besede).

Vendar je ponovno treba poudariti, da do tega ideološkega boja ni prišlo izključno na ideološki podlagi, pač pa v prvi vrsti na podlagi eksperimentalnih rezultatov in matematične analize le teh. Toda **interpretacija** le teh je vsekakor bila do določene mere ideološko obarvana, tu ni nobenega dvoma.

Na tem mestu se mi zdi potrebno bralcem, ki jim kvantna fizika in statistika nista domači, pojasniti problem s pomočjo nekaj preprostih primerov.

V sobi brez oken je omara v kateri držimo med drugimi oblačili tudi nogavice, in sicer večje število modrih in črnih parov, žarnica pa je crknila, baterijske lučke ni pri roki, a nujno moramo obuti ustrezni par nogavic: najmanj koliko nogavic moramo vzeti iz omare, da bomo zagotovo imeli vsaj en par? Odgovor je seveda tri. Imamo potem naslednje možne kombinacije: tri črne, tri modre, dve črni in eno modro, ter dve modri in eno črno. Klasično bi to lahko zapisali v obliki enačbe možnih stanj, v kateri je M modra nogavica, Č pa črna:

$$MMM + \check{C}\check{C}\check{C} + MM\check{C} + \check{C}\check{C}M = 1$$

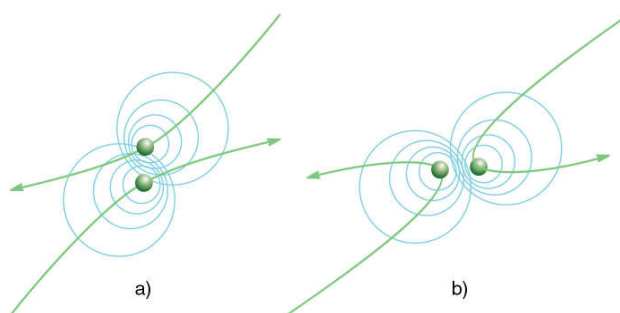
zato vsakemu členu v enačbi gre 1/4 verjetnosti.

Ker pa nam je vseeno ali bomo obuli moder ali črn par, lahko zadnja dva primera obravnavamo enakopravno, ter za izračun verjetnosti dobimo sledečo enačbo:

$$MMM + \check{C}\check{C}\check{C} + \frac{1}{2}(MM\check{C} + \check{C}\check{C}M) = 1$$

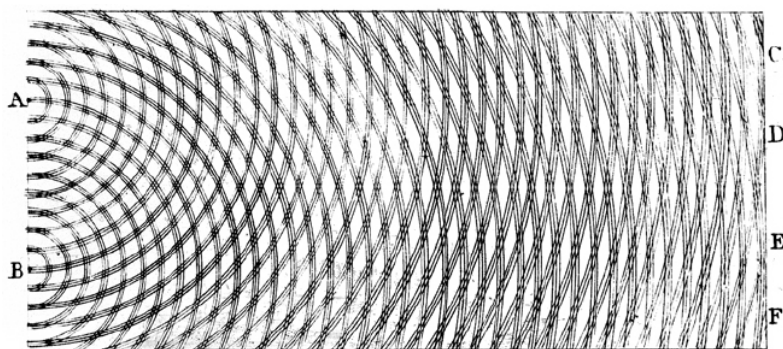
iz česar sledi, da vsakemu členu pripada 1/3 verjetnosti. Zadnji člen na levi strani enačbe predstavlja tisto, kar v kvantni mehaniki imenujemo "superpozicija kvantnih stanj". Seveda v makroskopskem svetu lahko razlikujemo oba stanja že po položaju posameznih nogavic v skupini, a v kvantnem svetu to ni mogoče. Zakaj?

Vzemimo primer dveh elektronov, ki letita drug proti drugemu in v neki točki prostora prideta zadosti blizu, da med seboj interagirata, se odbijeta, ter prostor interakcije zapustita, nakar ju detektiramo vsakega v svojem detektorju v obliki kratkega impulza. Slika 4 prikazuje dve možnosti ob njunem srečanju. Pogoji za njuno nemoteno interakcijo je, da elektronom nikjer ne odvzamemo ali dodamo nič energije, zato je smer elektronov po srečanju odvisna izključno od majhnih kvantnih naključij že pri njuni izstrelitvi iz vira, na kar tudi ne moremo vplivati, ali kakor koli izvedeti to informacijo z zadostno natančnostjo, ne da bi ju pri tem zmotili. Zato tudi ne moremo razlikovati kateri elektron je šel proti kateremu detektorju. Posledično oba dogodka obravnavamo kot en sam dogodek v smislu kvantne superpozicije.



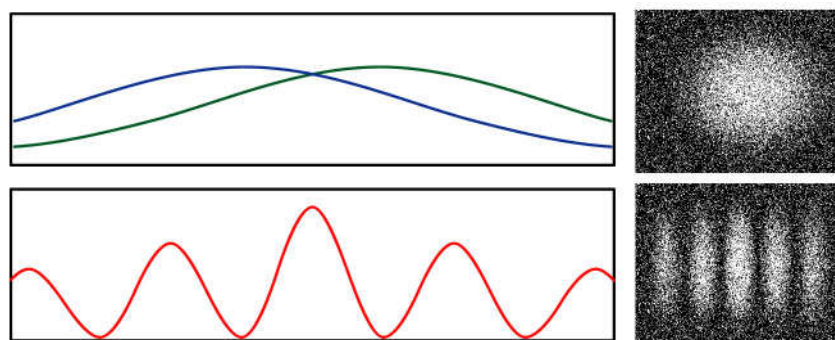
Sl.4: V interakciji dveh elektronov ne moremo razlikovati kateri elektron je šel v katero smer.

Drug primer pa je pojav, ki bega znanstvenike že od samih začetkov kvantne mehanike. Pravzaprav gre za pojav na katerem stoji vsa nenavadnost in "misterija" kvantnega sveta: pojav interference ob sipanju na dvojni reži [82]. Poglavitni dokaz, da gre pri svetlobi za valovanje, je podal Thomas Young v znamenitem poskusu v katerem je s svetlobo osvetljeval pregrado z dvojno režo in na zaslonu za režama opazoval interferenco: svetle in temne lise, ki so posledica različne dolžine poti svetlobe za režama, ter posledično fazne razlike med svetlobnimi valovanji. Pojav je povsem analogen valovanju na vodni gladini, zato ga je bilo mogoče opazovati makroskopsko in opisati z že znanimi valovnimi enačbami. Na sliki 5 je originalna risba, ki jo je naredil Young za ponazoritev rezultatov svojega poskusa.



Sl.5: Youngova risba (1803) interference valov za pregrado z dvojno režo.

Ravni val, ki prihaja do pregrade z režama A in B gre skozi reži, ki za valovanje za pregrado predstavljata sicer neodvisna, toda fazno korelirana vira. Za vsako režo se valovanje širi polkrožno in njegova intenziteta z oddaljenostjo pada. Če eno od rež zapremo, bomo na zaslonu za režo videli porazdelitev amplitud kot na sliki 6 zgoraj, ob obeh odprtih režah pa interferenčno sliko spodaj.



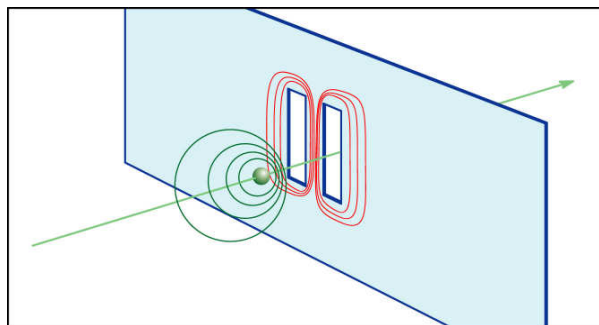
Sl.6: Zgoraj je porazdelitev amplitud ob eni odprti reži, spodaj pa interferenca ob obeh odprtih režah.

Seveda, seštevanje in odštevanje fazno premaknjenih valovanj na različnih delih zaslona je za valovanje skoraj samoumevno razumljivo. Podoben pojav lahko opazujemo tudi ob obali v pristanišču, ko morski valovi prihajajo proti obali poševno in se pod enakim kotom odbijejo, odbito valovanje pa potem interferira z vpadnim, zato se ponekod amplituda vala podvoji, drugje pa izniči, ob vseh vmesnih prehodih.

Preseneča pa odkritje, da fotoni (svetlobni kvanti), če jih spuščamo posamično skozi dvojno režo, čez čas po velikem številu zadetkov zaslona ravno tako tvorijo interferenčno sliko! Kot če bi vsak foton na nek skrivnosten način natančno vedel kako se bodo porazdelili vsi drugi fotoni in temu ustrezno prilagodil svojo pot za režama. Sprva taki razlagi ni nihče verjel (kasneje pa so se nekateri priklonili ravno tej tezi!), vendar se kot edina alternativa ponuja možnost, da vsak foton gre skozi obe reži hkrati in interferira sam s seboj. V prvi različici gre za tisto, čemur je Einstein pravil *spooky action at a distance* (grozljiv vpliv na daljavo). V drugi pa za nelokalnost kvantnih objektov, oziroma možnost, da so z določeno verjetnostjo porazdeljeni po celem prostoru hkrati, morda v obliki "verjetnostnih valov", nakar ob detekciji pride do spontanega kolapsa valovne funkcije in zadetka fotona v posamezno točko zaslona.

A ker je svetloba (povprečje velikega števila fotonov) valovanje, morajo tudi posamezni fotoni predstavljati nekakšno valovanje, zato tako obnašanje za fotone morda niti ni tako presenetljivo. Mnogo bolj presenetljivo je, da se povsem enako godi posameznim elektronom! Poudariti je treba, da takega poskusa z elektroni ni naredil še nihče. Namreč, za poskus z vidno svetlobo ni težko narediti dve reži med seboj razmaknjeni za eno valovno dolžino ($\sim 5 \times 10^{-7}$ m), toda velikost elektronov znaša vsaj 10^{-18} m, oziroma tisoč milijard krat manj, ali kakšnih stotisočkrat manj kot je velikost enega samega atoma, torej je nemogoče zahtevati izdelavo reže s tako preciznostjo. Kljub temu natančno vemo, kako bi se elektroni obnašali v takem primeru, ker poznamo njihovo obnašanje pri prehodu skozi snov [83]. Namreč, poskus s sipanjem Röntgenske svetlobe na kristalih in tenkih kovinskih listkih je pokazal, da so atomi v njih razporejeni po geometrijsko pravilnem vzorcu [84]. Obstreljevanje kristalov in kovinskih listkov z elektroni pa je pokazalo enak vzorec, kot pri Röntgenski svetlobi.

Torej elektroni lahko izkazujejo lastnosti bodisi delcev, bodisi valovanja, odvisno od poskusnih pogojev. Elektronom pripišemo kompleksno valovno funkcijo, ψ , katere absolutna vrednost (produkt s sebi konjugirano kompleksno vrednostjo, $\psi^* \psi$) predstavlja verjetnost, da bomo v neki točki prostora elektron tudi našli. Če smo elektron zaznali na zaslonu za pregrado z dvojno režo, mora biti vsota verjetnosti da je elektron šel skozi eno ali drugo režo enaka ena. To pomeni da je pri prehodu skozi režo položaj elektrona prostorsko močno omejen, zato pa, sledeč Heisenbergu, ima moment elektrona zelo široko območje vrednosti, tako po velikosti kot tudi po smeri. V takem tolmačenju sledi elektron kvantnim pravilom, pregrada z režama pa je kot del merilne aparature povsem klasičen objekt, ima zgolj funkcijo selekcije. To pa seveda ne more biti povsem prav, ker ob prehodu skozi režo (ta, spomnimo, mora biti po velikosti primerljiva de Brogliejevi valovni dolžini elektrona) mora elektron zaznati polja elektronov v strukturi pregrade in z njimi interferirati. Kar pomeni da pregrada ni povsem pasiven objekt, pač pa aktivno vpliva na smer in hitrost elektrona, **le da se mi delamo kot da temu ni tako!** Kot da smo pozabili vajo iz klasične elektrodinamike, v kateri prehod naboja predstavlja tok, ki v kovinskem okvirju inducira magnetno polje, to pa spet deluje na smer gibanja naboja.



Sl.7: Samointerferenca v klasični elektrodinamiki: prehod naboja predstavlja tok, ki inducira magnetno polje v kovinski pregradi, kar posledično vpliva na smer gibanja naboja. Zakaj bi potem bilo čudno, če se nekaj podobnega dogaja tudi na kvantni ravni?

Mimogrede, teorija, ki sta jo postavila de Broglie in Bohm predvideva take interferenčne poti delcev za dvojno režo, kot so jih dejansko izmerili s tehniko takoimenovanega "šibkega merjenja" [85].

Nujno je torej vse objekte v interakciji obravnavati po istem kvantnem formalizmu, če naj pričakujemo pravilen in logično konsistenten rezultat. Res pa je, da je kvantna obravnava

sistemov z več delci izredno zapletena [86], in ne pridemo daleč, če vztrajamo dosledno na kvantnem formalizmu, preprosto se moramo zateči določenim poenostavitvam. Toda potem se moramo tudi zavedati, da smo sistem matematično poenostavili, in če dobimo čudne ali nepričakovane rezultate, moramo vzrok le teh prvo poiskati v privzetih poenostavitvah, ne pa takoj daljnosežno sklepati na "zavestno" obnašanje kvantnih delcev!

Naše stališče je, da znanstvena dejavnost predpostavlja obstoj objektivne realnosti, ter možnost spoznanja le te ob dosledni uporabi znanstvene metode. Posledično vsaka dejavnost, ki to objektivno realnost v svojih izhodiščnih stališčih ali interpretaciji doseženih rezultatov zanika, ali s čem pogojuje, mora nujno pripeljati do notranjega protislovja. Kopenhagenska interpretacija kvantne mehanike predstavlja v tem oziru svojevrsten epistemološki samomor. Žal je inercija (tromost) šolskega sistema velikanska, ogromno dela je potrebno vložiti, da ga premaknemo v določeno smer, ter enako, če želimo to smer spremeniti. Zato bomo najbrž še naprej pri pouku kvantne fizike občasno zasledili elemente Kopenhagenske interpretacije.

A naše prizadevanje pri znanstvenem spoznavanju mora temeljiti na znanstveni racionalnosti. Ta pa vključuje opazovanje in potrjevanje obstoja značilnih pojavov, ki jih opredeljujemo s fizikalnimi količinami, odnose med njimi pa vzpostavimo prek matematično podprte fizikalne analize in kolikor je le mogoče preciznega eksperimentalnega dela, s katerim končno dokazujemo obstoj pojava in njegove povezave s sorodnimi pojavi v celovito, koherentno in konsistentno strukturo znanja. Taka ontološka slika narave in naravnih pojavov je nujna, če naj znanstvena dejavnost sploh ima kak smisel.

V tem oziru je treba priznati, da je tudi Kopenhagenska interpretacija slonela na eksperimentalni dejavnosti, le ta pa je globoko zakoreninjena v pozitivizmu in njegovemu močnemu vplivu na fiziko prve polovice XX stoletja. Pozitivizem seveda ima postopek merjenja za os znanstvene dejavnosti, za osrednji odločujoč faktor fizikalnih izkušenj na sploh. A čeprav je eksperiment pomembna sestavina znanstvene dejavnosti, ni vselej edino možno izhodišče. Prav tako je mogoče izhajati iz temeljnih znanstvenih načel in vsega do tedaj znanega na nekem področju, ter iz tega izpeljati nove poglede na znane ali novoodkrita pojave, ki jih je težko ustrezno umestiti v obstoječo strukturo znanja. To je lepo pokazal sam Einstein, prav tako pa tudi David Bohm v začetku 50tih let. Za razliko od Bohra in Heisenberga, ki sta izhajala iz meritev in statistične analize medsebojnih odnosov makro in mikro sveta, je Bohm izhajal iz Schrödingerove enačbe, iz katere je izpeljal dve enačbi, ki se lepo prilegata vzročno-posledični in objektivistični interpretaciji. Kjer skuša Kopenhagenska interpretacija na vsak način ustvariti vtis, da njene ugotovitve nujno sledijo iz fizikalnega eksperimenta, ter na koncu zatava v nemogočo mešanico pozitivizma in subjektivizma, prinaša Bohmova interpretacija iz leta 1952 svežino kritičnega realizma.

V zvezi s povedanim se vrnimo še na kratko problemu fizikalnega pomena. Klasična fizika najprej zgradi fizikalni pomen na opazovanju pojava, matematični opis fizikalnega modela sledi kasneje in vse skupaj kulminira v matematični analizi. V fiziki XX stoletja pa opazamo, da opis fizikalnega pojava takoj dobi matematično formalizacijo, temu sledi iskanje ustrezne rešitve problema, šele na koncu pa iščemo rešitvi ustrezno fizikalno tolmačenje. Pa ne le to, včasih se zdi, da imajo matematična pravila prednost pred naravnimi zakoni, ali jih celo nadomeščajo, matematičnim pravilom se nekako *a priori* (in neupravičeno!) podeli status objektivne realnosti. Sicer ni nobenega načelnega razloga, zaradi katerega bi se bilo treba odločiti za prvi ali drugi pristop, oba sta enako sprejemljiva, a le dokler se nam teoretična dognanja ujemajo z rezultati eksperimentov. Kadar pride do razhajanj, pa ni več vseeno, drug pristop vedno vzbuja dodaten dvom in zahteva dodatno preverjanje.

V teh primerih je najbolj pomemben tisti del teorije, na katerem slonijo teoretična pričakovanja eksperimentalnih rezultatov. Kadar eksperimentalni rezultati odstopajo od

pričakovanj, sicer obstaja možnost da je vzrok v izvedbi eksperimenta, toda taki primeri so razmeroma preprosti in napake ni težko odkriti. Večji problem nastane, kadar nam uspe z dodatnimi teoretičnimi prijemi upravičiti opažena odstopanja, a takrat je še vedno treba pojasniti zakaj so pričakovanja bila napačna. Tu se lahko zaplete, ker se v retrospektivi zdijo tisti dodatni teoretični prijemi že vgrajeni v celotno teorijo in postanejo njen neločljivi del, ki za nazaj upraviči del predhodne teorije, na kateri so napačna pričakovanja nastala. S tem smo napako pometli pod preprogo in jo bo izredno težko odkriti in popraviti. Zato je vedno treba imeti v mislih staro modrost, ki pravi, da nam teorija pove kaj si mi mislimo o delovanju narave, eksperiment pa nam pove kaj si narava misli o naši teoriji!

Dodatno branje:

Pripomba: poglavitni kriterij izbire je bil brezplačni dostop prek interneta. Namen je predvsem širiti obzorja bralcu, ne pa dokazovati katero koli trditev ali mnenje izraženo v prispevku. V nekaterih citiranih delih se zagovarjajo tudi drugačna in celo nasprotna stališča!

- [1] <http://en.wikipedia.org/wiki/Copenhagen_interpretation>
- [2] <http://en.wikipedia.org/wiki/Solvay_Conference>
- [3] <http://en.wikipedia.org/wiki/David_Mermin>
- [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] Smolin, L: The Trouble with Physics
<http://www.amazon.com/Trouble-Physics-Houghton-Harcourt-Hardcover/dp/B00DU7JF9C/ref=sr_1_fkmr0_2?ie=UTF8&qid=1429653770&sr=8-2-fkmr0&keywords=The+Trouble+with+Physics%2C+Lee+Smolin>
- [6] <http://en.wikipedia.org/wiki/Standard_Model>
- [7] <http://en.wikipedia.org/wiki/BOOMERanG_experiment>
<http://en.wikipedia.org/wiki/Wilkinson_Microwave_Anisotropy_Probe>
<http://en.wikipedia.org/wiki/Cosmic_Background_Explorer>
<http://en.wikipedia.org/wiki/Planck_%28spacecraft%29>
<http://www.esa.int/Our_Activities/Space_Science/Planck>
- [8] <<http://www.cosmos.esa.int/web/planck/publications>>
Planck 2013 results. XVI. Cosmological parameters <<http://arxiv.org/abs/1303.5076>>
"Including curvature, we find that the Universe is consistent with spatial flatness to percent-level precision using Planck CMB data alone."
- [9] Hubble Space Telescope, NASA <http://www.nasa.gov/mission_pages/hubble/main/index.html>
Gravitational lensing <<http://apod.nasa.gov/apod/ap130102.html>>
- [10] 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>>
- [11] 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>
- [12] Nernst, W., Über einen Versuch von quantentheoretischen Betrachtungen zur Annahme stetiger Energieänderungen zurückzukehren, Verhandl. Deut. Phys. Gen. 18, 83, 1916.
- [13] <http://en.wikipedia.org/wiki/Speed_of_light>
- [14] Hermann Minkowski <http://en.wikipedia.org/wiki/Hermann_Minkowski>
<http://en.wikipedia.org/wiki/Minkowski_space>
- [15] <http://en.wikipedia.org/wiki/Lorentz_transformation>
- [16] <http://en.wikipedia.org/wiki/Vacuum_energy>
- [17] <http://en.wikipedia.org/wiki/Quantum_fluctuation>
<http://en.wikipedia.org/wiki/False_vacuum>
- [18] <<http://en.wikipedia.org/wiki/Time>>
- [19] <http://en.wikipedia.org/wiki/Big_Bang>
- [20] <http://en.wikipedia.org/wiki/International_System_of_Units>
- [21] <http://en.wikipedia.org/wiki/Atomic_clock>
- [22] <http://en.wikipedia.org/wiki/Watt_balance>
- [23] <http://en.wikipedia.org/wiki/Augustine_of_Hippo>
- [24] <http://en.wikipedia.org/wiki/Edwin_Hubble>

- [25] <http://en.wikipedia.org/wiki/Georges_Lema%C3%AEtre>
- [26] <http://en.wikipedia.org/wiki/Cosmic_microwave_background>
- [27] <http://en.wikipedia.org/wiki/Jean_le_Rond_d%27Alembert>
- [28] <<http://en.wikipedia.org/wiki/Spacetime>>
- [29] <http://en.wikipedia.org/wiki/Atomic_orbital>
- [30] <<http://en.wikipedia.org/wiki/Muon>>
- [31] <http://en.wikipedia.org/wiki/Poynting%27s_theorem>
<http://en.wikipedia.org/wiki/Poynting_vector>
- [32] <http://en.wikipedia.org/wiki/Twin_paradox>
- [33] <http://en.wikipedia.org/wiki/Global_Positioning_System>
- [34] <http://en.wikipedia.org/wiki/Pair_production>
- [35] <<http://en.wikipedia.org/wiki/Annihilation>>
- [36] <http://en.wikipedia.org/wiki/Two-photon_physics>
- [37] <<http://en.wikipedia.org/wiki/Bremsstrahlung>>
- [38] <http://en.wikipedia.org/wiki/Cyclotron_radiation>
<http://en.wikipedia.org/wiki/Synchrotron_radiation>
- [39] <http://en.wikipedia.org/wiki/Matter_wave>
- [40] <http://en.wikipedia.org/wiki/Planck%E2%80%93Einstein_relation>
- [41] A. Einstein, Leiden Address, 5.5.1920.: Ether and the Theory of Relativity
<http://www-history.mcs.st-and.ac.uk/Extras/Einstein_ether.html>
- [42] <http://en.wikipedia.org/wiki/Vacuum_energy>
- [43] <http://en.wikipedia.org/wiki/Casimir_effect>
- [44] <http://en.wikipedia.org/wiki/Quantum_fluctuation>
<http://en.wikipedia.org/wiki/Vacuum_expectation_value>
- [45] <http://en.wikipedia.org/wiki/Virtual_particle>
- [46] <http://en.wikipedia.org/wiki/Shapiro_delay>
<http://en.wikipedia.org/wiki/Gravitational_redshift>
- [47] <http://en.wikipedia.org/wiki/Proper_time>
- [48] <http://en.wikipedia.org/wiki/Scientific_method>
- [49] <http://en.wikipedia.org/wiki/Philosophy_of_physics>
- [50] <http://en.wikipedia.org/wiki/Karl_Popper>
- [51] <<http://en.wikipedia.org/wiki/Falsifiability>>
- [52] <<http://en.wikipedia.org/wiki/Neptune>>
- [53] <http://en.wikipedia.org/wiki/Mercury_%28planet%29#Advance_of_perihelion>
- [54] <http://en.wikipedia.org/wiki/Imre_Lakatos>
- [55] <http://en.wikipedia.org/wiki/Pierre_Duhem>
- [56] <http://en.wikipedia.org/wiki/Thomas_Kuhn>
- [57] <http://en.wikipedia.org/wiki/Superconducting_Super_Collider>
- [58] <http://en.wikipedia.org/wiki/Vera_Rubin>
- [59] <http://en.wikipedia.org/wiki/Weakly_interacting_massive_particles>
- [60] <http://en.wikipedia.org/wiki/Cold_dark_matter>
- [61] <http://en.wikipedia.org/wiki/Neutrino_oscillation>

- [62] <http://en.wikipedia.org/wiki/Massive_Compact_Halo_Object>
- [63] <http://en.wikipedia.org/wiki/Modified_Newtonian_dynamics>
- [64] <http://en.wikipedia.org/wiki/Andromeda_Galaxy#Mass_and_luminosity_estimates>
- [65] <http://en.wikipedia.org/wiki/Milky_Way#Size_and_mass>
- [66] <http://en.wikipedia.org/wiki/Type_Ia_supernova>
- [67] <http://en.wikipedia.org/wiki/Cosmic_distance_ladder#Standard_candles>
- [68] <http://en.wikipedia.org/wiki/Accelerating_universe>
- [69] <http://en.wikipedia.org/wiki/Lambda-CDM_model>
- [70] <http://en.wikipedia.org/wiki/Friedmann_equations>
- [71] <http://en.wikipedia.org/wiki/Dark_energy>
- [72] <http://en.wikipedia.org/wiki/Friedmann-Lema%C3%AAtre-Robertson-Walker_metric>
- [73] <<http://home.web.cern.ch/about/updates/2015/04/first-successful-beam-record-energy-65-tev>>
- [74] <http://en.wikipedia.org/wiki/OPERA_experiment#Time-of-flight_measurements>
- [75] Alexander Burinskii, Kerr-Newman electron as spinning soliton
 Journal-ref: Int J. of Mod. Phys. A Vol. 29 (2014) 1450133
 <<http://arxiv.org/pdf/1410.2888>> (Submitted on 10 Oct 2014)
 Pripomba: Predstavljena kombinacija de Broglie-Bohmove valne teorije, Kerr-Newmanovega formalizma za črne luknje, ter teorije strun izredno uspešno modelira elektron.
- [76] <<http://www.globalresearch.ca/the-large-hadron-collider-ultimate-weapon-of-mass-destruction/5442232>>
 Pojasnilo: Zemljo vseskozi od njenega nastanka pred ~4,5 milijarde let dobesedno bombardirajo delci iz vesolja, glej diagram na strani <http://en.wikipedia.org/wiki/Cosmic_ray>, z energijami, ki so za faktor 10 večje (~10eV) od tistih, ki jih lahko doseže LHC (1.3×10eV). Tudi gostote pretoka delcev so v običajnih delovnih razmerah mnogo manjše od tistih v zgornjih plasteh ozračja. Le v primeru prekinitve eksperimenta in usmerjanja žarka v debeli kovinski blok so gostote znatne, toda energija delcev je pol manjša: 0,65×10eV. Kozmični žarki so torej imeli več kot dovolj priložnosti ustvariti črne luknje, ki bi pogoltile Zemljo, pa se to ni zgodilo.
- [77] <http://en.wikipedia.org/wiki/Wave_function_collapse>
 <http://en.wikipedia.org/wiki/Objective_collapse_theory>
- [78] <http://en.wikipedia.org/wiki/Functional_magnetic_resonance_imaging>
- [79] <http://en.wikipedia.org/wiki/Relativity_of_simultaneity>
- [80] <http://en.wikipedia.org/wiki/Quantum_superposition>
- [81] <http://en.wikipedia.org/wiki/De_Broglie%E2%80%93Bohm_theory>
- [82] <http://en.wikipedia.org/wiki/Double-slit_experiment>
- [83] <http://en.wikipedia.org/wiki/Electron_diffraction>
- [84] <http://en.wikipedia.org/wiki/X-ray_crystallography>
- [85] <http://en.wikipedia.org/wiki/Weak_measurement>
 S. Kocsis, S. Ravets, B. Braverman, K. Shalm, A.M. Steinberg, Observing the trajectories of a single photon using weak measurement, 19th AIP Congress, 2010 [2],
 <https://web.archive.org/web/20120324224949/http://www.aip.org.au/Congress2010/Abstracts/Monday%2006%20Dec%20-%20Orals/Session_3E/Kocsis_Observing_the_Trajectories.pdf>
- [86] <http://en.wikipedia.org/wiki/Many-body_problem>