Pot naprej

Predzadnji vrhovi – Računalniki – Numerična analiza – Analitična mehanika – Mehanika zvezne snovi – Analitična termodinamika – Štirirazsežni svet – Splošna relativnost – Raziskave vesolja – Kvantni prostor stanj – Kvantna elektrodinamika – Osnovni delci in polja – Kvantni čas-prostor – Zadnja meja

Predzadnji vrhovi

Že in še

Razvoj znanosti, poustvarjen v pričujoči knjigi, je dosegel stopnjo, ko smo – tako kaže – spoznali zgradbo in osnovne zakonitosti sveta povsod, razen v njegovih najbolj skrajnih področjih: v notranjosti in bližini nukleonov, v notranjosti in bližini črnih lukenj ter v najbolj zgodnjem in najbolj oddaljenem vesolju. S tem knjigo zaključujemo. Povzpeli smo se na vse "predzadnje" vrhove, kar jih je do danes osvojilo človeštvo. V oblakih pa se kažejo obrisi "zadnjih", najvišjih vrhov. Spodobi se, da za konec omenimo, kaj je bilo pri plezanju nanje že narejenega in kakšna je pričakovana pot navzgor.

Računalniki

Raziskave polprevodnikov prinesejo nepričakovano odkritje polprevodniške diode in polprevodniške triode – transistorja (SHOCKLEY). Ta dva polprevodniška elementa delujeta (skoraj) tako, kot njuna vakuumska prednika. Sta pa mnogo manjša in robustnejša, zato ju prav hitro in povsod zamenjata. Zamenjata tudi dosedanjo kristalno diodo in refleksne ter (šibke) dvovotlinske klistrone v mikrovalovnih napravah.

Digitalna vezja

Majhnost polprevodniških elementov omogoči, da sestavljamo čedalje bolj gosta in zapletena vezja za opravljanje najrazličnejših opravil. Posebej uporabna se pokažejo vezja za obdelavo digitalnih signalov, to je takšnih, ki so sestavljeni iz zaporedja dveh vrst impulzov: visokih in nizkih/ničelnih. Tako sestavimo števec impulzov s segmentnim zaslonom, digitalno uro, analogno-digitalni pretvornik, digitalno-analogni pretvornik, ročni kalkulator z zaslonom iz tekočih kristalov in – krono vsega – namizni *računalnik* s tipkovnico, miško in matričnim zaslonom.

Informacijski stroji

Računalnik je najbolj zapletena in vsestranska priprava, kar jih je doslej naredil človek. Je stroj za obdelavo informacij: digitalno kodiranih števil, besedil, slik, zvoka, videa in še kaj. Z njim dobimo v roke sanjsko orodje za pisanje, risanje in računanje, za zajem, obdelavo in prikaz merskih podatkov, za krmiljenje merilnikov in drugih naprav ter še za mnogo drugega. Medsebojna povezava računalnikov v svetovno omrežje pa omogoča hipni dostop do nepreglednega morja informacij ter hipno komuniciranje preko vseh prostorskih meja. Posebej se razmahne komunikacija preko mikrovalov in množice mobilnih osebnih telefonov ter talnih postaj kratkega dosega. Po pravici lahko rečemo, da je z računalnikom človeštvo stopilo v novo dobo.

Numerična analiza

Računsko orodje znanosti je matematika – ukvarjanje s števili, funkcijami in enačbami. V principu lahko vse to delamo s svinčnikom na papirju. Če je računanje preobsežno, in v zapletenih primerih je vedno tako, pa pride praktično v poštev le računalnik. Ta v sekundi opravi toliko osnovnih računskih operacij, kolikor bi jih človek s svinčnikom in papirjem v milijon letih.

Računalniška numerika

Primeri za numerično uporabo računalnika so naslednji: statistična obdelava nepreglednih množic izmerkov – izračun porazdelitev, povprečij, standardnih deviacij, korelacijskih koeficientov, regresijskih parametrov in drugo; izračun in tabeliranje funkcij, podanih z vrsto ali integralom; izračun harmoničnih spektrov funkcij; reševanje poljubnih enačb; reševanje sistemov linearnih enačb – izračun inverzne matrike, lastnih vrednosti in lastnih vektorjev; in reševanje navadnih ter parcialnih diferencialnih enačb iz podanih začetnih in/ali robnih pogojev.

Reševanje osnovnih enačb

Vsi glavni zakoni narave, kakor smo jih spoznali, imajo obliko diferencialnih enačb. Njihovo reševanje je zato osnovnega pomena. Tako, na primer, lahko izračunamo gibanje planetov okoli Sonca, vključno z vsemi njihovimi medsebojnimi vplivi (gibalna enačba); prevajanje toplote po snovi (difuzijska enačba); statična električna in magnetna polja okoli nabojev in tokov (potencialna enačba); stojne akustične in elektromagnetne valove v notranjosti resonatorjev (amplitudna enačba); valovne funkcije in lastne energije elektronov v različnih potencialih (kvantna amplitudna enačba); stacionarna notranja stanja in razvoj zvezd; in še mnogo drugega.

Analitična mehanika

Princip najmanjše akcije

Pot, ki jo pod vplivom konservativne sile ubere delec iz izbrane začetne točke, je določena z začetno hitrostjo in z gibalno enačbo. Sčasoma prispe delec v neko "končno" točko. Namesto da je ubrana pot določena z začetno lego in začetno hitrostjo, je morda določena tudi z začetno in končno lego? Med obema točkama si namreč lahko mislimo mnogo poti. Katera od njih je prava? Ugotovimo, da je prava tista pot, vzdolž katere je razlika med kinetično in potencialno energijo, integrirana po času, najmanjša. Drugače rečeno, prava pot je tista, za katero ima *akcija* $S = {}_{t1}\int^{t2} (K - W)\,\mathrm{d}t$ ekstrem (Hamilton). Integrand poimenujemo *akcijska energija* $L = K - W$. Kar velja za eno točko in kartezične koordinate, velja tudi za poljuben sistem točk in za njegove posplošene koordinate q_i – razdalje med deli sistema, kote, ki določajo orientacijo, itd. Upoštevati moramo le celotno kinetično in celotno potencialno energijo sistema.

Posplošene enačbe gibanja

Kako izračunamo ekstremalno pot? Ugotovimo, da mora akcijska energija zadoščati naslednjim enačbam druge stopnje (LAGRANGE): $\mathrm{d}/\mathrm{d}t\,(\partial L/\partial q_i') - \partial L/\partial q_i = 0$. To so *posplošene enačbe gibanja*. Če vanje vstavimo specifični L, ki opisuje preučevani sistem, dobimo sistem diferencialnih enačb za $q_i(t)$, ki ga potem rešujemo kakor vemo in znamo.

Kanonične enačbe gibanja

Posplošene enačbe lahko tudi zapišemo kot sistem dvakrat toliko enačb prve stopnje za posplošene koordinate q_i in posplošene impulze $p_i = \partial L/\partial q_i'$. To so *kanonične enačbe gibanja* (HAMILTON): $\mathrm{d}q_i/\mathrm{d}t = \partial H/\partial p_i$, $\mathrm{d}p_i/\mathrm{d}t = -\partial H/\mathrm{d}q_i$, $H = K + W$. V njih namesto akcijske energije nastopa *polna energija*, ki je enaka vsoti kinetične in potencialne energije sistema.

Gibanje sistema masnih točk lahko torej opišemo na več enakopravnih načinov: z akcijskim integralom oziroma z vektorskimi, posplošenimi ali kanoničnimi diferencialnimi enačbami. Eno sledi iz drugega. Izberemo tisti način, ki je za dani problem najbolj primeren.

Simetrije in ohranitveni zakoni

Če je čas homogen, mora biti akcijska energija sistema neodvisna od časa. Iz tega sledi, da se ohranja energija zaprtega sistema. Če je prostor homogen, mora biti akcijska energija nespremenjena za majhen premik; iz tega sledi, da se ohranja gibalna količina zaprtega sistema. In če je prostor izotropen, mora biti akcijska energija nespremenjena za majhen zasuk; sledi, da se ohranja vrtilna količina zaprtega sistema. Veliki ohranitveni zakoni se tako pokažejo kot posledica homogenosti časa in homogenosti ter izotropnosti prostora (NOETHER).

Mehanika zvezne snovi

Opis gibanja

Gibanje kontinua opišemo tako, da za vsak njegov snovni del povemo, kam se pomakne v času. Ali pa za vsako prostorsko točko povemo, kakšna je tamkajšnja hitrost snovi. Spremembo gibanja v kratkem času zato podamo na dva načina: s substancialnimi odvodi $\mathrm{d}\boldsymbol{v}/\mathrm{d}t$ ali z lokalnimi odvodi $\partial\boldsymbol{v}/\partial t$. Med obojimi velja advekcijska povezava $\mathrm{d}\boldsymbol{v}/\mathrm{d}t = \partial\boldsymbol{v}/\partial t + (\boldsymbol{v}\cdot\boldsymbol{\nabla})\boldsymbol{v}$.

Gibalna enačba

Sile, ki delujejo na snovne dele kontinua, so dveh vrst: prostorninsko porazdeljene (kot npr. teža) $\boldsymbol{f}$ in površinsko porazdeljene (sile ob dotiku). Za vsako ploskev $\mathrm{d}\boldsymbol{S}$, ki si jo zamislimo v snovi, moramo vedeti, s kakšno silo $\mathrm{d}\boldsymbol{F}$ deluje levi del na desnega in obratno: $\mathrm{d}\boldsymbol{F} = \boldsymbol{\sigma}\,\mathrm{d}\boldsymbol{S}$. Matrika devetih koeficientov σ_{ij} je (simetrični) *napetostni tenzor*. Gibalni zakon za del snovi se potem glasi $\rho\mathrm{d}\boldsymbol{v}/\mathrm{d}t = \boldsymbol{f} + \operatorname{div}\boldsymbol{\sigma}$. Zapisani zakon lahko uporabimo za izračun gibanja šele, ko poznamo napetostni tenzor za preučevano snov. To nam uspe za dve vrsti snovi: za prožno snov in za viskozno stisljivo tekočino.

Elastomehanika

Za prožno snov tako izpeljemo enačbo gibanja $\rho\partial^2\boldsymbol{u}/\partial t^2 = \boldsymbol{f} + G\,\boldsymbol{\nabla}^2\boldsymbol{u} + (K + G/3)\,\boldsymbol{\nabla}(\boldsymbol{\nabla}\boldsymbol{u})$, vsebujočo prožnostni in strižni modul (CAUCHY / NAVIER). To je valovna enačba. Z njo izračunamo deformacije in lastna nihanja "lepih" teles, na primer upogib nosilca, zasuk gredi, nihanje krožne opne, nihanje gumijaste žoge in podobno. Iz nje tudi izpeljemo enačbi za hitrost longitudinalnih in transverzalnih valov v neomejeni snovi. Obojni valovi nastajajo pri potresih. Z merjenjem časa potresnih sunkov na več opazovalnicah izračunavamo žarišča potresov. Ker se transverzalni valovi ne širijo skozi tekočine, ugotovimo, da ima Zemlja pod trdno skorjo tekoč plašč.

Hidromehanika

Za viskozno stisljivo tekočino pa izpeljemo gibalno enačbo $\rho\,\mathrm{d}\boldsymbol{v}/\mathrm{d}t = \boldsymbol{f} - \boldsymbol{\nabla}p + \eta\boldsymbol{\nabla}^2\boldsymbol{v} + (\zeta + \eta/3)\,\boldsymbol{\nabla}(\boldsymbol{\nabla}\boldsymbol{v})$, vsebujočo strižno in dilatacijsko viskoznost (NAVIER / STOKES). Enačbo lahko poenostavimo za primer neviskozne in/ali nestisljive tekočine. Iz nje tudi izpeljemo enačbi za zvočne in gravitacijske valove.

Meteorologija

Posebej zanimiv kontinuum jo zemeljsko ozračje. To je suh zrak s primesmi vodne pare, oblačnih kapljic in padavinskih delcev. Vse skupaj opišemo z zapletenim sistemom enačb. Osnovo tvorijo enačbe za suh zrak: hidrodinamična gibalna enačba, energijska enačba, kontinuitetna enačba in enačba stanja. Dodane so še razne enačbe za primesi. Upoštevamo tudi sistemske sile zaradi vrtenja Zemlje, sončno obsevanje in hribovitost. Začetne pogoje v ozračju določimo iz množice meritev, nadaljnji razvoj pa izračunamo z računalnikom. Tako uspešno napovedujemo vreme za nekaj dni vnaprej. Rešitev sistema enačb je zelo občutljiva na majhne spremembe v začetnih pogojih (LORENZ), zato bolj dolgoročnih napovedi (zaenkrat) ne zmoremo izdelovati.

Analitična termodinamika

Spremembe stanja

Termodinamični sistem, na primer posoda s plinom, je v ravnovesju popolnoma opisan z enačbo stanja. Ta enačba povezuje temperaturo, pritisk, prostornino in še kaj, če je sistem bolj zamotan. Stanje sistema se lahko spreminja. Prehod iz začetnega v končno stanje je "reverzibilen" ali ne. Reverzibilen je tak prehod, katerega nazaj zavrten posnetek je realističen. Izotermno ali adiabatno stiskanje sistema je reverzibilno. Prevajanje toplote, difuzija in gorenje pa to nisto.

Krožne spremembe in entropija

Posebej zanimive so take spremembe, po katerih se sistem vrne v začetno stanje. To so krožne spremembe. Tudi te so lahko reverzibilne ali ne. Odkrijemo, da za krožno reverzibilno spremembo velja $\oint \mathrm{d}Q_{\mathrm{rev}}/T = 0$ (CARNOT). Vsota dovedenih in odvedenih toplot, uteženih s pripadajočimi temperaturami, je enaka nič. To pomeni, da za reverzibilen prehod iz enega stanja v drugega velja $\int \mathrm{d}Q_{\mathrm{rev}}/T = S_2 - S_1$. S tem je definirana entropija S sistema relativno na poljubno izbrano stanje. Entropija je funkcija stanja. Kakršenkoli prehod med dvema stanjema – reverzibilena li ne – je povezan s spremembo entropije. Ta sprememba je natanko tolikšna kot pri reverzibilnem prehodu. Entropija je aditivna in se ne ohranja. V izoliranem sistemu narašča, dokler sistem ne doseže notranjega ravnovesja. Če sistem ni izoliran, pa se njegova entropija seveda lahko zmanjša, vendar se pri tem poveča entropija okolice. Skupna entropija sistema in okolice se poveča. To je entropijski zakon (CLAUSIUS).

Termodinamični potenciali

Z vpeljano entropijo se energijski zakon zapiše v obliki $\mathrm{d}U = T\mathrm{d}S - p\mathrm{d}V$ oziroma v kateri izmed ekvivalentnih oblik: za entalpijo $\mathrm{d}H = T\mathrm{d}S + V\mathrm{d}p$, prosto energijo $\mathrm{d}F = -S\mathrm{d}T - p\mathrm{d}V$ ter prosto entalpijo $\mathrm{d}G = -S\mathrm{d}T + V\mathrm{d}p$. To so diferencialne enačbe za termodinamične potenciale. S parcialnimi odvodi potencialov po pripadajočih spremenljivkah so določene preostale termodinamične spremenljivke. Za sistem v ravnovesju imajo potenciali minimalne vrednosti. Zapisane enačbe veljajo – s potrebnimi dopolnitvami – tudi za večfazne, večkomponentne in celo za kemično reagirajoče sisteme (GIBBS). Omogočajo nam, da izračunamo, kolikšen delovni izplen prinašajo razne krožne spremembe in kakšne so ravnotežne konstante raznih snovnih pretvorb. Tako med drugim ugotovimo, da znaša maksimalni izkoristek toplotnega stroja $\eta = \Delta T/T$ in da so ravnovesja v dvofaznem sistemu (para in voda, voda in led) opisana z enačbo $\mathrm{d}p/\mathrm{d}T = H/\Delta V$.

Statistični opis

Do sedaj smo statistično opisovali množico enakih, vendar preprostih sistemov – atomov, molekul, elektronov in fotonov. Sedaj opis razširimo na množico enakih, vendar poljubnih sistemov. Tak sistem je, na primer, zaprta posoda z vodo in paro. Sistem, sestavljen iz N delcev, opišemo v principu s $3N$ posplošenimi koordinatami q_i in s $3N$ posplošenimi impulzi p_i ter ga predstavimo kot točko v $6N$ faznem prostoru. Nato si zamislimo neskončno mnogo takih sistemov (ali obravnavani sistem v neskončno mnogo trenutkih) v toplotni kopeli in raziščemo, kako so njihove "točke" porazdeljene po faznem prostoru. Ugotovimo, da je porazdelitev prav taka, kot pri preprostih sistemih, namreč kanonična (GIBBS): $P_i = (1/Z)\exp(-E_i/kT)$. Pri tem je P_i delež sistemov, ki so v energijskem stanju E_i, Z pa je normalizacijska konstanta – particijska funkcija. Termodinamični potenciali se izražajo preko njenih odvodov. Tudi za entropijo najdemo statistično razlago (BOLTZMANN). Sorazmerna je logaritmu števila mikrostanj Ω, ki sestavljajo aktualno energijsko stanje sistema: $S = k\ln\Omega$. V termodinamičnem ravnovesju je ogromna večina sistemov v tistem makrostanju, ki je sestavljeno iz največ mikrostanj, zato je tedaj entropija največja.

Štirirazsežni svet

Četverna lega

Ugotovili smo, da niti časovni presledki niti dolžine v svetu niso enake, če jih merimo v različnih inercialnih sistemih. Pri sedlanju iz enega sistema v drugega se časi in lege med seboj prepletajo: transformacija lege vsebuje čas in transformacija časa vsebuje lego. Čas in lega igrata formalno enakopravno vlogo. Zato na svet pogledamo (MINKOWSKI) kot na *štirirazsežni prostor*, katerega točke – dogodke – predstavimo s štirimi koordinatami: tremi prostorskimi in eno časovno (časom, pomnoženim s svetlobno hitrostjo). Takšno četverico poimenujemo četverno lego: $x_i = (ct, x, y, z)$. Njena kvadratna norma $x_i \cdot x_i = (ct)^2 - x^2 - y^2 - z^2$ je invarianta, to je, v vsakem inercialnem sistemu je enaka. Transformacijo četverne lege iz enega v drug inercialni sistem opišemo z ustrezno transformacijsko matriko: $x_i' = L_{ij} x_j$. Podvojeni indeks, tukaj in zanaprej, pomeni seštevanje po njem.

Četverni vektorji

Gibanje delca predstavimo s krivuljo – življenjsko črto – v prostoru-času, pri čemer kot parameter služi čas, ki ga kaže ura na delcu, to je njegov lastni čas τ. Kratek premik vzdolž življenjske črte se zapiše kot $\mathrm{d}s^2 = (c\mathrm{d}\tau)^2 = (c\mathrm{d}t)^2 - \mathrm{d}x^2 - \mathrm{d}y^2 - \mathrm{d}z^2$. Odvod četverne lege po lastnem času, ki je skalar, poimenujemo četverno hitrost. Ko jo pomnožimo z maso delca, pa dobimo četverno gibalno količino. Njena ohranitev vsebuje združeni zakon o ohranitvi gibalne količine in energije. Odvod četverne gibalne količine po lastnem času pa je četverna sila. V njej se skriva relativistično popravljeni trirazsežni gibalni zakon. Vsi našteti četverci se transformirajo enako – z isto matriko – kot četverna lega. Njihove norme so invariantne.

Četverna elektrodinamika

Za štirirazsežni svet priredimo še enačbe za električni naboj, tok in elektromagnetno polje. Vpeljemo četverni gradientni operator, četverno gostoto toka (ki vsebuje gostoto naboja in gostoto toka) ter četverni potencial (ki vsebuje skalarni in vektorski potencial). Stara kontinuitetna enačba za naboj se potem zapiše kot četverna divergenca četverne gostote toka. Iz gostote toka gibalne količine in iz gostote energijskega toka sestavimo četverni napetostni tenzor. Kontinuitetni enačbi za gibalno količino in energijo se potem zapišeta v eni sapi kot četverni gradient četvernega napetostnega tenzorja. Končno še iz komponent električne in magnetne poljske jakosti sestavimo četverno poljsko jakost. Osnovne štiri enačbe polja se potem zapišejo kot dve enačbi za četverno polje. Vsi vpeljani četverci se transformirajo kot četverna lega, četverni tenzorji pa kot tenzorski produkt dveh četvercev. V vseh inercialnih sistemih imajo vse "četverne" enačbe enako obliko.

Splošna relativnost

V težnem polju, kakor smo ga opisali s težnim zakonom oziroma s težno potencialno enačbo, se vplivi širijo neskončno hitro. To je v nasprotju s teorijo relativnosti. Teorijo gravitacije je zato potrebno ustrezno nadgraditi (EINSTEIN).

Ukrivljeni prostor-čas

Osnovna zamisel je naslednja: gravitacijsko polje ni nič drugega kot deformacija inercialnega, to je "ravnega" prostora-časa. Kakšna je deformacija, določa prisotna snov. Delec se med dvema točkama giblje po najkrajši poti, geodetki. Dobesedno prosto pada. Z gibanjem delcev se pa seveda spremeni dotedanja porazdelitev snovi ter s tem dotedanja deformacija prostora-časa. Prostor ni nič več nekaj ločenega od snovi, ampak postane ena od "snovnih" sestavin sveta. Nakaj, kar se upogiba, krivi in valuje. Nismo ujeti v nevidno togo ogrodje: potopljeni smo v nekakšnem orjaškem gibkem mehkužcu. Pri roki je nazorna predstava. Prožno opno napnemo na okvir in nanjo tu in tam položimo različno težke kamne. Opna se pod njimi usloči. Po opni zaženemo kroglico in ta se giblje tako, kakor ji velevajo krivine.

Enačbe gibanja

Štirirazsežni prostor-čas opišemo s poljubnimi krivočrtnimi koordinatami x^i. Kratek premik v tem prostoru se zapiše kot $\mathrm{d}s^2 = g_{ij}\,\mathrm{d}x^i\,\mathrm{d}x^j$. To je metrična enačba ali krajše *metrika*. Koeficienti g_{ij} sestavljajo *metrični tenzor* in opisujejo, kako je prostor deformiran. Če te koeficiente poznamo, so geodetke popolnoma določene z geodetskimi enačbami $\mathrm{d}^2x^k/\mathrm{d}\tau^2 - \Gamma^k{}_{ij} \cdot \mathrm{d}x^i/\mathrm{d}\tau \cdot \mathrm{d}x^j/\mathrm{d}\tau = 0$. V izrazih $\Gamma^k{}_{ij}$ so skriti metrični koeficienti in njihovi odvodi. Masni delci, kot rečeno, sledijo geodetkam. Geodetske enačbe so torej enačbe gibanja, v katerih koeficienti $\Gamma^k{}_{ij}$ prevzamejo vlogo gravitacijske sile. Tudi fotoni sledijo geodetkam, le da te ne morejo biti opisane parametrično z lastnim časom, saj je zanje enak nič.

Enačbe polja

Lokalno deformacijo prostora-časa opisuje *krivinski tenzor* R_{ij}. To je posplošitev krivinskega radija pri dvorazsežnih ploskvah. Komponente krivinskega tenzorja so na zamotan način izražene z lokalnimi diferenciali geodetk. Vsota tega tenzorja in (s skalarno ukrivljenostjo pomnoženega) metričnega tenzorja je sorazmerna z *napetostnim tenzorjem*, katerega komponente vsebujejo porazdelitev in pretoke mase, energije, gibalne količine in pritiska po prostoru-času: $R_{ij} - {}^1\!/_2\, R\, g_{ij} = \kappa/8\pi c^4 \cdot T_{ij}$. Sorazmernostni koeficient vsebuje znano gravitacijsko konstanto. Zapisana tenzorska enačba – ki je sestavljena iz desetih različnih enačb, ker so nastopajoči tenzorji simetrični – prevzame vlogo stare potencialne enačbe. Slednja je tudi mejni primer, ko je gibanje počasno in ukrivljenost majhna, to je, ko je polje šibko.

Rešitve enačb

Reševanje relativistične gravitacijske enačbe pomeni, da za dani napetostni tenzor iščemo ustrezajoči metrični tenzor, torej metrične koeficiente. Če je napetostni tenzor enak nič, dobimo ravno metriko. Izračun nam uspe tudi v dveh pomembnih primerih: za središče neskončno velike homogene krogle (FRIDMAN) in za okolico stacionarne krogle (SCHWARZSCHILD). Tako dobimo "vesoljsko" metriko in "zvezdno" metriko. Iz prve sledi opis raztezajočega se vesolja; ujema se s tistim, ki ga že poznamo. Iz druge pa izpeljemo, kolikšen je radij obzorja okrog črne luknje. Svetloba, ujeta znotraj tega obzorja, ne more ubežati preko njega. Črne luknje so nevidne.

Princip ekvivalence

V vsaki točki ukrivljenega prostora-časa si lahko mislimo prosto padajoč predmet, recimo zaprto kabino. Na kabino vezan koordinatni sistem je lokalno inercialen: vsi pojavi v njem so prav taki, kakor bi bili v enakomerno se gibajočem sistemu – z izjemo gravitacije, ki čudežno izgine. Zato vse enačbe, ki veljajo v "zaresnih" inercialnih sistemih, veljajo v enaki obliki tudi v lokalnih inercialnih sistemih.

Napovedi in preizkusi

Ali je teorija pravilna ali ne, preverimo preko njenih napovedi. Teorija med drugim napove naslednje. — Merkur, kot Soncu najbližji planet, se giblje po elipsi, katere perihelij se počasi vrti. — Svetloba se pri letu mimo Sonca rahlo odkloni. — Ure (seveda ne tiste na težno nihalo) tečejo v težnem polju počasneje. — Svetloba, izsevana iz atomov v težnem polju, je rdeče premaknjena. — Obstajajo težni valovi. Vse to res opazimo in kvantitativno potrdimo. Vendar pa so v teh in drugih "normalnih" okoliščinah posledice teorije tako majhne, da jih večinoma ni treba upoštevati.

Raziskave vesolja

Razvoj polprevodniških naprav prinese tudi nov svetlobni senzor: kvadratno "fotomatriko" iz drobcenih fotodiod. V hipu zamenja dosedanjo fotografsko ploščo v fotoaparatih in astronomskih daljnogledih. Za krmiljenje, zajem in obdelavo izmerkov seveda poskrbijo računalniki. Posebni motorji prilagajajo obliko sestavljenih zrcal tako, da zmanjšujejo motnje iz ozračja in poskrbijo za ostre slike.

Vidni daljnogledi

S tako izboljšanimi daljnogledi – s premeri do 10 metrov – uspemo izmeriti paralakse zvezd do razdalje 300 svetlobnih let in katalogizirati preko 100 000 zvezd. S tem močno zgostimo dosedanje zvezdne diagrame. Z dolgim časom ekspozicije pa sežemo do galaksij na oddaljenosti $10 \cdot 10^9$ svetlobnih let, to je, skoraj na rob (ali na začetek) vidnega vesolja. V vidnem vesolju naštejemo 100 milijard galaksij. Samo v naši Galaksiji naštejemo kakšnih 100 milijard zvezd. Okrog mnogih bližnjih zvezd zaznamo celo planete. Okrog nekaterih jat ali kopic galaksij pa opazimo tudi gravitacijski odklon svetlobe iz zadaj ležečih izvorov: kažejo se kot večkratne slike izvora.

Radijski teleskopi Poleg vidnih daljnogledov zgradimo tudi radijske teleskope. Največji ima premer antene 300 metrov in leži v mrtvem vulkanskem kraterju. "Usmerjamo" ga s premikanjem fokalnega sprejemnika. Z radijskimi teleskopi odkrijemo *pulzarje*, ki jih prepoznamo kot hitro se vrteče nevtronske zvezde, in *kvazarje*, ki so verjetno ogromne črne luknje v središču mladih (oddaljenih) galaksij, požirajoče okolišnje zvezde. Radijski teleskop uporabimo tudi kot radar in z njim zelo natančno izmerimo oddaljenosti do Lune in do najbližjih planetov.

Temna masa Pri raziskovanju pa nas čakajo tudi presenečenja. Zvezde na robu galaksij krožijo hitreje, kakor bi smele, če bi na njih delovalo skupno gravitacijsko polje galaksije, ocenjeno iz števila in mas vsebujočih zvezd. Zdi se, kakor da je vsaka galaksija ujeta v kroglo iz nekakšne *temne snovi*, ki ne seva (OSTRIKER). Te snovi je nekajkrat več kot navadne snovi. Kaj naj bi bila, ne vemo.

Temna energija Oddaljene supernove so manj svetle, kakor bi morale biti pri oddaljenosti, izračunani iz rdečega zamika njihove svetlobe. To pomeni, da se vesolje danes širi hitreje kot nekoč. Kaže, da v vesolju obstaja nekakšna *temna energija*, enakomerno porazdeljena, ki vesolje pospešeno napihuje. Kaj naj bi se skrivalo za vsem tem, ne vemo. Morda so celo meritve napačne. K celotni masi vesolja naj bi temna energija prispevala 70 %, temna snov 25 %, vidna snov pa zgolj okrog 5 %. Vesolje je kot morje ponoči, ko vidimo le bele pene na valovih.

Sateliti in sonde Vesolja pa ne opazujemo zgolj z Zemlje, ampak vanj tudi vstopimo. — V tirnico okoli Zemlje izstrelimo umetne satelite in nanje postavimo daljnoglede. Tako so povsem izven območja ozračnih motenj, zaznavajo pa lahko tudi žarke gama, ki jih ozračje sicer močno absorbira. — Vidne in infrardeče kamere na satelitih usmerimo proti Zemlji, da sporočajo lego in gibanje vremenskih sistemov v njenem ozračju. — Mreža posebnih satelitov z atomskimi urami na krovu pošilja na Zemljo časovne signale, sprejemniki na Zemlji pa iz njih izračunavajo svojo zemljepisno lego na 1″ (30 m) natančno. Pri tem morajo upoštevati vpliv gibanja in težnega polja na tek ur. Kopenska, morska in zračna navigacija postanejo otročje lahke. — Na Mesec pošljemo rakete z ljudmi in jih tudi varno vrnemo. — Sonde na daljinsko krmiljenje in z množico raznih merilnikov pa pošljemo v orbite okrog Venere, Marsa in drugih planetov. Na Veneri in Marsu tudi pristanejo in raziskujejo okolico, izmerke in slike pa pošiljajo na Zemljo. Za izračunavanje poti v težnih poljih ni treba upoštevati relativnosti. — Energijo za delovanje satelitov in sond zagotavljajo radioaktivni viri in polprevodniške sončne celice.

Kvantni prostor stanj

Vektorji stanja

Stanje kvantnega sistema, recimo delca v potencialni jami, smo opisali s kompleksno valovno funkcijo $\Psi(x)$. Zaradi preglednosti privzamemo, da so koordinate x celoštevilčne. Na valovno funkcijo $\Psi(i)$ lahko potem pogledamo kot na zaporedje amplitud $\{\Psi(1), \Psi(2) \ldots\} = \{c_1, c_2 \ldots\}$. Zaporedje $\{c_i\}$ je "vektor" s končno ali neskončno mnogo kompleksnimi komponentami. Po zgledu navadnih vektorjev v tridimenzionalnem skalarnem polju vpeljemo *kvantne vektorje* v mnogodimenzionalnem kompleksnem polju (DIRAC): $|S\rangle = \sum c_i|i\rangle$. Bazni vektor $|i\rangle$ je stolpec, ki ima i-to komponento enako 1, vse druge pa 0. Njegovo transponirano (in konjugirano) obliko – vrstico – označimo kot $\langle i| = |i\rangle^\dagger$. Produkt baznega "bra" vektorja z njegovim "ket" vektorjem je enak 1, z drugimi ket vektorji pa 0. Zato velja $\langle i|S\rangle = c_i = \Psi(i)$.

Kvantni prostor

Stanje kvantnega sistema si torej lahko nazorno predstavljamo kot vektor $|S\rangle$ v namišljenem *kvantnem prostoru*. Ta prostor je napet na končno ali neskončno mnogo baznih vektorjev $|i\rangle$. Vsak ima dolžino 1. Vsi so pravokotni drug na drugega. Projekcije $|S\rangle$ na bazne vektorje so kompleksna števila c_i – verjetnostne amplitude za različna bazna stanja, v katerih moremo sistem najti ob merjenju. Število vektorjevih komponent je enako številu baznih stanj. Prehod iz diskretnih na zvezni nabor baznih vektorjev je formalno urejen z vpeljavo delta funkcij in njihovih integralov. V zvezni limiti velja $\Psi(x) = \langle x|S\rangle$. Posplošitev na večdelčne sisteme je neposredna.

Posplošene baze

Namesto s funkcijo $\Psi(x)$ lahko opišemo sistem – v istem stanju – s funkcijo $\Phi(G)$. Velja vse povedano, le bazni vektorji so sedaj drugi: namesto "lokacijskih" so "gibalni". Zato je ugodno razmišljati o vektorju stanja neodvisno od tega, na katere bazne vektorje je projiciran. Postuliramo naslednje (DIRAC). — Stanje sistema je popolnoma opisano z vektorjem stanja $|S\rangle$ v kvantnem prostoru. — Vsaka opazljivka A, recimo lega delca, ima v tem kvantnem prostoru razpet svoj nabor baznih vektorjev $|a\rangle$, na katerega je aktualni vektor stanja projiciran: $|S\rangle = \sum c_a|a\rangle$. Ko merimo A, najdemo sistem v enem izmed baznih stanj $|a\rangle$ in izmerimo mu ustrezajočo vrednost a. — Bazne vektorje $|a\rangle$ opazljivke A in njihove pripadajoče vrednosti a določa enačba $\mathrm{A}|a\rangle = a|a\rangle$, pri čemer je A za to spremenljivko merodajen operator. — Povprečna vrednost spremenljivke, izmerjena v mnogo meritvah, znaša $\langle A\rangle = \sum a|c_a|^2$. — Vektor stanja se v času spreminja po gibalnem zakonu $\mathrm{i}\hbar \mathrm{d}/\mathrm{d}t|S\rangle = \mathrm{H}|S\rangle$, pri čemer je H energijski operator. Pravzaprav so to stare, že znane enačbe, zapisane na "nepopoln" način. Če jih množimo s konkretnimi baznimi vektorji, recimo z $\langle x|$, dobimo "popolne" enačbe v ustreznih koordinatah.

Mnogotirna pot

Za gibanje klasičnega delca velja princip najmanjše akcije. Domnevamo, da velja nekaj podobnega tudi za gibanje kvantnega delca. Da se pojavi interferenca, pa morajo različne poti med seboj nekako sodelovati. Tako postuliramo (FEYNMAN): ko se delec giblje iz stanja $|x_1,t_1\rangle$ v stanje $|x_2,t_2\rangle$, ne ubere enega določenega tira, ampak "sočasno" ubere vse mogoče tire $x(t)$, ki povezujejo obe točki. Prispevek posamičnega tira je eksponencial, katerega (imaginarna) faza je klasična akcija (normirana na kvantno konstanto) za dotični tir. Celotni prispevek od vseh tirov je amplituda verjetnosti za prehod: $\langle x_2,t_2|x_1,t_1\rangle = \sum \exp(\mathrm{i}S/\hbar)$. Nazorno to pomeni, da je delec opremljen s puščico enotne dolžine, ki se vzdolž tira vrti. V končni točki seštejemo puščice vseh tirov v skupno puščico. Njen kvadrat je verjetnost, da se tam delec pojavi. Prehod iz diskretnih na zvezni nabor tirov je formalno urejen z vpeljavo mnogotirnih integralov. Dejansko računanje je obsežno in zamotano.

Opisana formulacija kvantnega gibanja je nazorno zelo zadovoljujoča. Ker ne vemo, po kateri poti se delec giblje, pač seštejemo vse poti. Delec med gibanjem takorekoč preizkuša oziroma "voha" vse možne poti. Če je zaprt v jami, delec raziskuje, kaj je zunaj nje in se odloči, ali bo tuneliral ali ne. Če čepi na vrhu potencialnega hriba, pa ugotovi, da je v okolici potencialna energija nižja, in se odloči, da pade.

Kar smo ugotovili za gibanje iz ene točke v drugo, velja tudi za gibanje iz množice začetnih točk v množico končnih točk. To pomeni, da s tem pravzaprav računamo časovni razvoj valovne funkcije. Tako definirana valovna funkcija in njen razvoj zadoščata kvantni gibalni enačbi. Posplošitev na več delcev je neposredna. Mnogotirni opis kvantnih sistemov je torej enakovreden valovnemu opisu.

Kvantna elektrodinamika

Kvantna mehanika opisuje gibanje lahkih počasnih delcev, ki ne izginjajo in ne nastajajo in med katerimi delujejo konservativne sile, podane s potencialom. Ko jo uporabimo za opis atomov, predpostavljamo, da se elektroni v njih gibljejo nerelativistično, kar ni povsem res. Poleg tega je kvantizirano le gibanje elektronov, elektromagnetno polje sil med njimi pa je opisano klasično, z električnim potencialom. To ne zadostuje, da bi opisali vsa dogajanja v atomih, zlasti ne tista, pri katerih se rojevajo in umirajo fotoni. Izsevanje in absorpcija svetlobe v atomih (in prostih elektronih) sta pač področji, ki sta kvantni mehaniki tuja, in smo jih v njenem okviru tudi obravnavali kot tujka.

Kvantna polja

Iz povedanega izhaja, da bi bilo zaželjeno kvantno mehaniko nekako razširiti, da bo zajela tako relativistične elektrone kot fotone. To nam uspe: zgradimo novo teorijo – kvantno elektrodinamiko. V njej nastopajo tako delci snovi – elektroni in pozitroni (antielektroni) – kot tudi delci elektromagnetnega polja – fotoni. Oboji so opisani s *kvantnimi polji*, ki medsebojno vplivajo druga na drugo. Elektroni in pozitroni torej niso več opisani kot posamični delci, pač pa so predstavljeni kot vzbujena stanja v kvantiziranem elektronsko-pozitronskem polju. Osnovna enačba kvantne elektrodinamike ima podobno obliko kot osnovna enačba kvantne mehanike; namesto "stare" valovne funkcije, ki je odvisna od koordinat elektronov, vsebuje "novo" valovno funkcijo, ki je odvisna od zasedbenih števil delčnih stanj. Energijski operator v enačbi pa je temu ustrezno prilagojen.

Virtualni fotoni

V kvantni elektrodinamiki se elektromagnetna sila med električno nabitimi snovnimi delci kaže kot izmenjava *virtualnih fotonov* – tako kratkoživih fotonov, da jih ne moremo zaznati. Nabiti delci nenehno izsevajo in absorbirajo virtualne fotone in tako vplivajo drug na drugega. Tipični pojav, ki ga postavljena teorija opisuje, je sipanje: elektrona na elektronu, elektrona na pozitronu, fotona na elektronu in podobno. Dana je, na primer, začetna konfiguracija dveh elektronov; kakšna je verjetnost za katerokoli končno konfiguracijo? Najlažje jo izračunamo po prilagojeni metodi mnogotirnih poti iz začetne v vsako končno konfiguracijo. Pri tem moramo vključiti najrazličenjša izsevanja in absorpcije virtualnih fotonov. Brez računalnika ne gre. Podobno računamo tudi gibanje hitrih elektronov v električnih poljih atomov in sorodne probleme. Računi se povsem ujemajo z eksperimenti.

Osnovni delci in polja

"Nemogoči" poskusi

Izboljšani detektorji delcev, podprti z računalniki, omogočijo izvedbo takih poskusov, ki smo jih doslej imeli zgolj za miselne ali celo za nemogoče. Tako uspe, na primer, interferenčni poskus s posamičnimi elektroni na dveh režah.

Pospeševalniki delcev

Obstreljevanje atomskih jeder z "naravnimi" izstrelki – predvsem z "radioaktivnimi" delci alfa in nevtroni – se hitro pokaže za nezadostno. Nimamo dovolj nadzora nad energijami teh delcev in želimo si tudi večjih energij. Zato zgradimo pospeševalnike za "umetne" izstrelke, zlasti elektrone in protone (LAWRENCE). Pospešujemo jih z električnimi polji – enkrat vzdolž ravnih stez ali večkrat vzdolž krožnih stez, pri čemer za ukrivljanje poskrbijo magnetna polja. Uspe nam zgraditi krožno stezo z obsegom 30 km in doseči energijo protonov preko 1 TeV, torej za faktor 10^6 večjo od radioaktivnih delcev alfa! Seveda za zajem in obdelavo izmerkov spet poskrbijo računalniki.

Množica novih delcev

Izsledki poskusov so osupljivi. Poleg protonov, nevtronov, elektronov, pozitronov, nevtrinov in fotonov – do sedaj poznanih delcev – odkrijemo še nekaj sto drugih, lahkih in težkih. Večina je zelo kratkoživih. Vse te delce uspemo (GELL-MANN) sistemizirati kot sestavljene iz dobrih dveh ducatov osnovnih delcev – delcev snovi in delcev interakcijskih polj med njimi. Zgledujemo se po kvantni elektrodinamiki. Snovni delci izsevajo ali absorbirajo delce polja in tako vplivajo drug na drugega.

Sistemizacija delcev

Osnovni delci snovi imajo polcel spin in spadajo v dve družini: *leptone* in *kvarke*. Med leptone štejemo: elektron, mion in tauon ter elektronski, mionski in tauonski nevtrino. Med kvarke pa štejemo delce u(p), d(own), s(trange), c(charm), b(ottom) in t(op). K vsakemu delcu obstaja še njegov antidelec, ki ima nekatere nasprotne lastnosti.

Osnovni delci polj imajo cel spin. Močno polje, ki deluje med kvarki, sestavljajo gluoni, in sicer osem njih. Šibko polje, ki deluje med vsemi delci, prenašajo šibki bozoni, troje njih. Obe polji imata kratek doseg. Elektromagnetno polje med delci z električnim nabojem pa prenašajo, kot že vemo, fotoni.

Kvark ima električni naboj ±1/3 ali ±2/3 ter barvni naboj, ki je lahko rdeč, zelen ali moder. Anti-kvarki imajo barvni naboj anti-rdeč, anti-zelen ali anti-moder. Prosti kvarki ne obstajajo. Obstajajo le vezani; med drugim tvorijo protone in nevtrone. Proton je sestavljen iz treh kvarkov tako, da je njegov električni naboj enak 1 in barvni naboj bel (rdeč + zelen + moder). Podobno velja za nevtron.

Kvarki se vežejo v protone in nevtrone preko gluonov. Vsak gluon izmed osmih nosi po en barvni naboj in anti-naboj, recimo moder in anti-zelen. Preostanek močne sile navzven se kaže kot jedrska sila, ki veže protone in nevtrone med seboj. Močna sila deluje celo med gluoni samimi, saj izsevajo in absorbirajo druge gluone.

Poenotenje treh sil

Tako imamo zgrajene kvantne teorije polj za elektromagnetno, močno in šibko silo. Vse te teorije so v skladu s posebno relativnostjo. Deloma je izdelana še poenotena teorija vseh treh sil. Ta teorija pravi, da so sile odvisne od temperature (energije) delcev. Močna sila, na primer, z energijo pojema. Pri temperaturah, kakršne so vladale na samem začetku velikega poka, naj bi postale vse tri sile med seboj nerazločljive. Ko se je vesolje širilo in ohlajalo, pa so se tudi sile začele razlikovati. Šibka in elektromagnetna sila sta že uspešno združeni. Močna sila na to še čaka.

Kvantni čas-prostor

Kaj pa sila, ki jo je človeštvo spoznalo najprej: gravitacija oziroma ukrivljen prostor-čas, kakor smo jo že prepoznali? Ali je tudi ona kvantizirana v hipotetične gravitone?

Velika teorija vsega

V primerjavi z ostalimi tremi osnovnimi silami je gravitacija tako šibka, da ne igra nobene vloge v atomih in jedrih. Pomembna postane le v ekstremnih področjih: v notranjosti črnih lukenj in v zgodnjem, gostem vesolju. S tem se pojavi tudi delovna potreba po njeni kvantizaciji. Še močnejše gonilo za to pa je stremljenje po poenotenem opisu vseh štirih sil, to je k izdelavi "velike teorije vsega". Ta teorija naj bi kvantizirala ukrivljeni prostor-čas in mase delcev ter zaobjela vse štiri znane sile in morda še kakšno neznano.

Kako do nje

Pot do velike teorije vsega ni znana. Nekateri raziskovalci izhajajo iz obstoječih kvantnih teorij polj in jih poskušajo prilagoditi, da bi vključili še gravitacijo. Težava pri tem je, da izhodiščne teorije polj temeljijo na ozadju ravnega prostora-časa. Drugi pa raje izhajajo iz splošne relativnosti in poskušajo kvantizirati njene enačbe, nato pa vključiti še preostale sile, če bo šlo. Zdi se, da je ta pristop boljši. Kakšnih posebnih uspehov do sedaj pa še ni.

Zadnja meja

Ali bo kdaj izdelana velika teorija vsega, ne vemo. Lepo bi jo že bilo imeti. Vendar na poti do nje stojijo visoke, morda nepremostljive ovire: matematične in eksperimentalne. Do sedaj je bilo človeštvo pri napredovanju še vedno uspešno. Upajmo, da bo tako tudi tokrat.

Ovire pri napredku

Danes se zdi, da so trenutne ovire napredka matematične, in te verjetno niso nepremostljive. V okviru svojih omejitev bo človeški razum že našel način, kako jih odpraviti. Še zmeraj je bilo tako. S tem bi uspešno in poenoteno, vsaj v principu, opisali vse, kar je v naravi opaženega. Mnogo bolj resne so pričakovane eksperimentalne ovire. Sodobne meritve postajajo tako težke in merilne naprave tako drage, da se zdi, kot da že trkamo ob eksperimentalno mejo. Tudi če bi končno teorijo le uspeli izdelati, se kaj lahko zgodi, da njenih napovedi (recimo gravitonov) ne bi mogli izmeriti. Prav tako nikoli ne bi mogli biti gotovi, da izven končne teorije ni ničesar več, kar bi ji lahko oporekalo (tudi če bi teorija sama tako trdila). Morda je takšna možnost še najbolj verjetna.

Simulacije sveta

Kakor vse kaže, bodo v prihodnje čedalje večjo vlogo igrali računalniški izračuni in simulacije izsekov sveta. Morda pri tem ne bo treba več reševati poznanih enačb gibanja, ampak preigravati nekaj preprostih pravil, kakor pri šahu, ki bi se jim pokoravali sestavni delci sveta pri medsebojni igri gibanja. Računalniki pa bi morali biti dovolj hitri, da bi po teh pravilih lahko uspešno računali. Konec koncev lahko tudi na vesolje pogledamo kot na orjaški računalnik, ki s svojimi sestavnimi deli "računa" in "kaže" rezultate, ne da bi reševal kakršnekoli enačbe. Do takih pravil in do takih računalnikov pa še ni vidne, kaj šele speljane poti. □