ALTERNATOR
Misliti znanost.

Kaj je vakuum in zakaj še ne moremo razumeti vakuuma našega vesolja?

7. 11. 2024

Številka: 26/2024

Avtor:

- Sašo Grozdanov

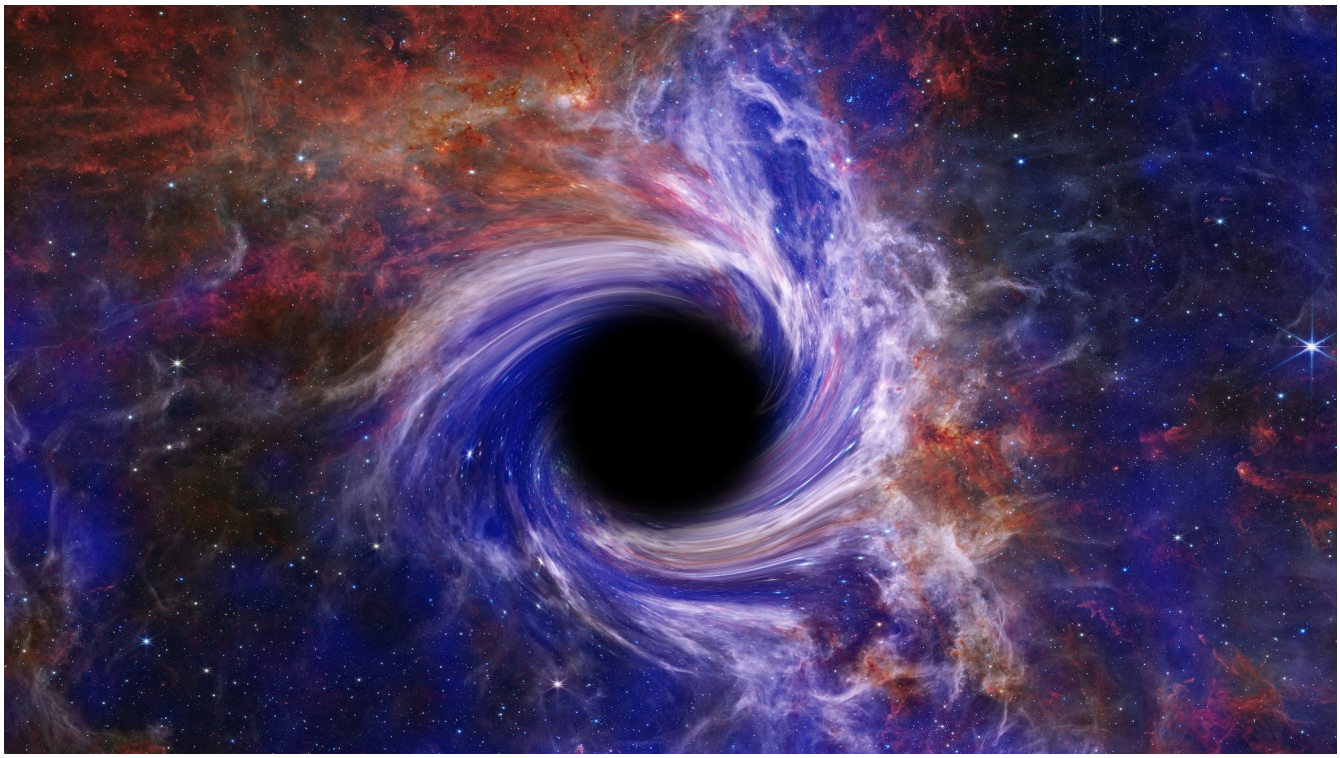

Foto: NASA, računalniška obdelava: Katja Bidovec

Besedo *vakuum* običajno razumemo kot praznino ali kot nič. V vsakodnevnem smislu je to besedo lažje razumeti kot nekaj, kar je definirano s tem, česar ni, namesto s tem, kar je. Torej, vakuum običajno razumemo kot odsotnost snovi – nič. Kljub tej, mogoče navidezno zadovoljivi definiciji besede pa nas je fizika v zadnjih stotih letih naučila, da je vakuum vse prej kot najpreprostejše možno stanje narave. V resnici je pri razumevanju vakuuma in njegovih fizikalnih lastnosti potrebno razumevanje vsega – vseh sil, delcev in podrobnosti našega kvantnega in relativističnega vesolja. Za ilustracijo kompleksnosti praznega prostora se bomo v tem članku sprehodili skozi nekaj zanimivih vidikov neintuitivnih fizikalnih lastnosti vakuuma, ki kažejo na to, kako zahtevno je razumevanje niča.

Teorija relativnosti

Zakoni osnovne fizike slonijo na dveh temeljih: na teoriji relativnosti in na kvantni mehaniki. Oba koncepta sta se rodila v zgodnjem dvajsetem stoletju. Relativnost je klasična teorija (s tem konkretno mislimo na teorijo, ki ne vključuje konceptov kvantne mehanike, o katerih bomo govorili v nadaljevanju), ki povezuje prostor in čas v eno geometrično enoto: prostor-čas. Posebna teorija relativnosti (https://en.wikipedia.org/wiki/Special_relativity) je posledica dejstva, da je hitrost svetlobe c v vakuumu konstantna za vse opazovalce. Ta trditev, ki je osrednja predpostavka posebne relativnosti, je posledica Maxwellove teorije elektromagnetizma, saj se svetlobo ustaljeno razume kot elektromagnetno valovanje. Ni naključje, da Maxwellove enačbe (https://en.wikipedia.org/wiki/Maxwells_equations) implicirajo konstantno hitrost svetlobe. Enačbe, ki opisujejo obnašanje električnega in magnetnega polja v prisotnosti gostote in toka nabitih delcev, so v skladu z matematično strukturo teorije relativnosti, čeravno je to dejstvo ostalo skrito njenim izumiteljem v devetnajstem stoletju (Andréju-Marieju Ampèrju, Michaelu Faradayu in tudi Jamesu Clerku Maxwellu). Iz posebne teorije relativnosti sledi, da čas ni absoluten, kar pomeni, da je odvisen od (hitrosti) opazovalca. Prav tako iz teorije sledi, da sta masa in energija

neločljivo povezani. V najbolj enostavnem primeru delca v mirovanju se ta povezava izrazi s slavno relacijo $E = mc^2$, kjer je E energija, m pa masa delca.

Posebno teorijo relativnosti z modernega vidika teoretične fizike najbolje razumemo kot strukturo, ki ji morajo, ko zanemarimo silo gravitacije, zadostiti vse osnovne teorije narave. Ta struktura se nanaša na simetrije prostora-časa, ki je v posebni teoriji relativnosti raven. Tak prostor-čas se imenuje prostor-čas Minkowskega (https://en.wikisource.org/wiki/Translation:Space_and_Time) . Primer omenjenih simetrij so rotacije. Raven (in prazen) prostor je namreč videti enako ne glede na to, v katero smer se ga zavrti okoli poljubno izbrane osi. Teorija gravitacije pa v splošnem zahteva razumevanje koncepta ukrivljenih prostorov-časov – njihove geometrije. Kot enostaven primer ukrivljenega prostora si lahko predstavljamo površino krogle, na kateri vsota kotov trikotnika ni 180 stopinj, kot je to običajno v ukrivljenih prostorih. Einstein je klasično teorijo gravitacije, ki jo imenujemo splošna teorija relativnosti (https://en.wikipedia.org/wiki/General_relativity) in je skladna s konceptom relativnosti, formuliral deset let po posebni teoriji, in sicer leta 1915. Einsteinova gravitacijska enačba, ki je vrhunec te teorije in zagotovo eden najpomembnejših dosežkov v zgodovini znanosti, povezuje gravitacijsko silo z ukrivljenostjo geometrije prostora-časa in med njima vzpostavlja natančno relacijo. V tej teoriji je gravitacijska sila (oziroma gravitacijsko polje) nadomeščena z ukrivljeno geometrijo; namesto da bi delec zaradi sile privlaka med masivnimi telesi pospešil v gravitacijskem polju (kar je newtonovski vidik), delec prosto pada v ukrivljenem prostoru-času. Giblje se po najkrajši možni poti. Einsteinova enačba tako podaja povezavo med ukrivljenostjo prostora-časa (ki je enaka gravitaciji) in energijo snovi v tem prostoru-času (npr. v našem vesolju).

Črne luknje v vakuumu

Kako se gravitacija vede v vesolju brez materije, torej v vakuumu? Odgovor na to vprašanje je že v klasični, nekvantni teoriji osupljiv. Najenostavnejši odgovor je seveda, da je rešitev tega problema prazen in raven prostor-čas Minkowskega iz posebne teorije relativnosti brez gravitacije. Zaradi ekstremne kompleksnosti Einsteinove enačbe pa je to le ena od mnogih rešitev. Druga rešitev, ki prav tako zadosti enačbam v vakuumu, torej v vesolju brez snovi, v katerem je prisotna le gravitacija, je masivna črna luknja (https://en.wikipedia.org/wiki/Schwarzschild_metric) , ki jo je leta 1916 prvi odkril Karl Schwarzschild, čeprav njemu in drugim fizikom še več desetletij ni bilo jasno, kaj takšna rešitev pomeni. Kljub temu, da o črnih luknjah pogosto razmišljamo kot o končnem stanju sesedanja zvezde, kar je vse prej kot vakuum, je črna luknja povsem konsistentna rešitev Einsteinove enačbe brez zvezde. Obe rešitvi za geometrijo vesolja, takšna brez in takšna z zvezdo (pred kolapsom), sta identični. To pa je v vakuumu mogoče zaradi nelinearne narave gravitacije, kar pomeni, da gravitacijsko polje interagira samo s sabo in obstaja v stabilnem stanju z neko energijo. Energija pa je na način, ki se lahko tudi v splošni relativnosti natančno definira, ekvivalentna masi. Črna luknja, ki je videti, kot da je bila narejena iz materije z maso, je z vsemi svojimi neintuitivnimi fizikalnimi lastnostmi torej povsem legitimna rešitev Einsteinove enačbe v vakuumu.

Vakuum v kvantni mehaniki in kvantni teoriji polja

Če se zdi ta vidik vakuuma nenavaden, pa postanejo stvari samo še bolj neverjetne, ko v svoje analize vključimo kvantno mehaniko. Kvantna mehanika je teorija, ki opisuje naravo na majhnih dolžinskih skalah ali, kar je ekvivalentno, pri visokih energijah, ki so potrebne, da se fizika na mikroskopskih skalah lahko razloči. Tukaj govorimo o atomih in vsem, kar je manjše. Primer tega so osnovni delci: elektroni, kvarki, nevtrini itd. Čeprav je kvantna mehanika veljavna na vseh dolžinskih skalah, tako na tistih, ki jih izkusimo v vsakodnevnem življenju, kot tudi na tistih, ki opisujejo vesolje, pa običajno kvantnih efektov, kot je superpozicija različnih stanj, v makroskopskem svetu ne moremo zaznati. V kvantni mehaniki vakuum razumemo kot najnižje energetsko stanje sistema. Takšno stanje v splošnem nima ničelne energije, temveč je ta energija končna. Za primer lahko vzamemo enega najenostavnejših kvantnih sistemov: kvantni harmonski oscilator. To je kvantni delec, ki se v eni prostorski dimenziji obnaša kot kvantna vzmet. Tak delec lahko zavzame samo diskretno (ali nezvezno) vrednost energije, kar je tipično za kvantne sisteme in razlog za uporabo besed *kvantno* in *kvantizirano*. Najnižja možna energija pa ni enaka nič, temveč je pozitivna.

Za obravnavo mnogodelčnih kvantnih sistemov, kot je vesolje, zlasti ko so ti relativistični, je potrebna nadgradnja standardne enodelčne kvantne mehanike. Imenuje se kvantna teorija polja (https://en.wikipedia.org/wiki/Quantum_field_theory) in opisuje obnašanje polja, kot je na primer elektromagnetno polje, ki zapolnjuje celoten prostor-čas in katerega kvantne ekscitacije so delci. Takšne teorije izjemno uspešno opisujejo vse znane osnovne delce in vse sile med njimi (elektromagnetno ter šibko in močno jedrsko silo), razen gravitacije. Teorija kvantne relativistične gravitacije, ki konsistentno nadgrajuje kvantno teorijo polja, se imenuje teorija strun (https://en.wikipedia.org/wiki/String_theory) , a še ni znano, ali je ta različica kvantne gravitacije prava za opis našega vesolja. Razumevanje vakuuma postane na nivoju kvantne teorije polja mnogo bolj pereče kot v drugih situacijah, ki smo jih opisali zgoraj. Prvi problem lahko zasledimo že v najenostavnejši kvantni teoriji polja delcev, na katere ne deluje nobena sila. Tak sistem lahko namreč razumemo kot sistem neskončnega števila kvantnih harmonskih oscilatorjev. Ker ima vsak od njih končno energijo vakuuma, to pomeni, da je energija vakuuma v kvantni teoriji polja navidezno neskončna. Izhod iz te in podobnih zagat, ki so povezane s problemi neskončnosti v kvantni teoriji polja, se imenuje renormalizacija (https://en.wikipedia.org/wiki/Renormalization) – sistematičen proces odstranjevanja neskončnosti na način, ki obdrži samo fizikalno merljive končne napovedi. V primeru kvantnega vakuuma se pogosto opremo na dejstvo, ki je analogno fiziki električne sile, kjer vemo, da električnega potenciala samega ne moremo izmeriti, lahko pa izmerimo razlike v električnem potencialu. Podobno lahko formalno odštejemo neskončno energijo vakuuma in merimo samo končne

razlike med energijo vakuuma in energijami višjih energetskih stanj.

Učinki vakuuma v kvantni teoriji polja

Čeprav lahko vakuum na neki način odštejemo, pa v kvantni teoriji polja kvantne fluktuacije vakuumskega stanja vseeno povzročijo merljive učinke. Primer takega pojava je Casimirjeva sila (https://en.wikipedia.org/wiki/Casimir_e%EF%AC%80ect) . Predstavljajmo si ravni plošči, kot sta v električnem kondenzatorju. Čeprav ju obkroža le vakuum, se zaradi fluktuacij vakuuma plošči privlačita. Nanju deluje sila privlaka, ki je – če sta plošči dovolj blizu (približno nekaj nanometrov) – merljiva v laboratoriju. Še en enostaven in poučen primer posledic vakuuma lahko najdemo v teoriji kvantne elektrodinamike, ki je kvantna teorija polja za opisovanje elektromagnetne sile. Je torej teorija elektromagnetno nabite materije (elektronov), antimaterije (pozitronov, ki so antimaterijski partnerji elektronov) in svetlobe (fotonov, ki so osnovni delci in prenosniki svetlobe). Antimaterijo, ki jo je leta 1928 s svojim izključno teoretičnim delom napovedal Paul Dirac, opišemo s pomočjo združitve relativnosti in kvantne mehanike. Kvantna elektrodinamika napoveduje obstoj efekta, ki se imenuje polarizacija vakuuma (https://en.wikipedia.org/wiki/Vacuum_polarization) . Ko svetloba (fotoni) potuje skozi vakuum, se zaradi kvantnih procesov iz vakuuma navidezno in za kratek čas ustvarjajo in nato izničijo pari negativnih elektronov in pozitivnih pozitronov. Zaradi tega pride do polarizacije svetlobe (https://en.wikipedia.org/wiki/Polarization_(waves)) , kar pomeni, da ima vakuum merljiv učinek na svetlobo. Še bolj nenavaden pa je t. i. Schwingerjev efekt (https://en.wikipedia.org/wiki/Schwinger_e%EF%AC%80ect) , ki pravi, da če ima svetloba dovolj energije, se lahko iz nje (iz fotonov) spontano in preko istega procesa ustvarijo pari elektronov in pozitronov, ki so stabilni, in sicer v smislu, da se med seboj ne izničijo nazaj v svetlobo. Energija svetlobe se pretvori v maso materije in antimaterije. Vakuum je v teorijah drugih sil, kot je kvantna kromodinamika (to je teorija močne jedrske sile), samo še dramatično bolj zapleten. Analizirati ga je večinoma mogoče samo z numeričnimi tehnikami in simulacijo na superračunalnikih.

Energija vakuuma v našem vesolju oziroma problem temne energije ali kozmološke konstante

Kvantna teorija polja nas uči, da je vakuum dinamično stanje, iz katerega se lahko ustvari materija. Lastnosti vakuuma so odvisne od vseh interakcij (tj. vseh sil) in vseh delcev v vesolju, čemur običajno rečemo teorija vsega. Danes ta teorija ni dokončno znana. Zaradi tega v tem trenutku ne moremo razumeti vakuuma našega vesolja in posledično ne moremo izračunati njegove energije. Dokler se ukvarjamo samo s teorijo polja brez gravitacije, to v praksi ni tako velik problem, saj lahko – kot smo omenili zgoraj – to neznano energijo formalno odštejemo in naše fizikalne napovedi niso odvisne od nje. Ko pa želimo analizirati učinke gravitacije, denimo na nivoju celotnega vesolja, pa to postane ogromen nerešen problem. Razlog za to je, da se gravitacijska sila oziroma geometrija prostora-časa dinamično odziva na prav vso energijo v sistemu, tudi tisto, ki je shranjena v vakuumu. Neposredna posledica tega dejstva, ki izvira že iz klasične Einsteinove teorije in je verjetno največji odprti problem v teoretični fiziki, je problem temne energije (https://en.wikipedia.org/wiki/Dark_energy) , ki je odgovorna za pospešeno širjenje vesolja. V jeziku Einsteinove splošne relativnosti gre tu za razumevanje velikosti t. i. kozmološke konstante (https://en.wikipedia.org/wiki/Cosmological_constant) , ki je ekvivalentna energiji vakuuma vseh ostalih gradnikov vesolja. Vse konkretne napovedi te konstante, izračunane iz kvantne teorije polja, so izjemno slabe v primerjavi z njeno izmerjeno vrednostjo. Najenostavnejša ocena gostote energije vakuuma, ki sešteje vakuumske energije kvantnih harmonskih oscilatorjev, nam namreč prinese napoved, ki je lahko tudi do 120 velikostnih redov prevelika.

Glede na naše trenutno razumevanje teorije strun nam tudi ta teorija ne zna pomagati pri napovedi prave (izmerjene), nizke pozitivne vrednosti kozmološke konstante in s tem energije vakuuma. V resnici so trenutno različne teorije strun razumljene le v posebnih limitah, kar pa ne omogoča tega, da bi našli pravo, edinstveno različico teorije za naše vesolje (če ta obstaja). Zanimivo je, da večina scenarijev v teoriji strun, ki jih je ogromno, verjetno glede na naše trenutno razumevanje neskončno mnogo, pri stanju vakuuma daje prednost negativni energiji. Konsistentna napoved pozitivne energije vakuuma, kot jo imamo mi in ki povzroča pospešeno širjenje vesolja, se je izkazala za izjemno težavno. Velja omeniti, da je morda to dober znak – teorije, ki vključujejo pozitivno energijo vakuuma, so na neki način bolj posebne in izvirnejše.

Seveda pa pri določitvi prave teorije strun in pravega vakuuma obstaja še ena možnost. Ta možnost je, da je narava izbrala naš vakuum brez posebnih razlogov in da smo se znašli v njem čisto po naključju. Mogoče obstajajo v različnih delih neskončnega prostora-časa izven našega končnega vesolja različne vrednosti energije vakuuma. Vsi deli prostora-časa namreč sestavljajo množico vesolj, ki jim skupno rečemo multiverzum, ta vesolja pa so zaradi končne hitrosti potovanja svetlobe (ali, ekvivalentno, končne hitrosti potovanja informacij) vzročno nepovezana. Možno je tudi, da je naš trenutni vakuum samo začasen in da bo naše vesolje v nekem trenutku kvantno tuneliralo v stanje z nižjo energijo (https://doi.org/10.3986/alternator.2020.28) . Če smo se v našem vesolju znašli po nekem naključju in se o vrednosti energije vakuuma sprašujemo samo zato, ker smo tukaj, obstaja tudi možnost, da njegove vrednosti ni mogoče izračunati iz bolj osnovnih principov. Takšno razmišljanje sledi t. i. antropičnemu načelu, ki deluje precej neznanstveno, obstaja pa seveda možnost, da ni napačno. Zanimivo je, da je Stevenu Weinbergu leta 1987 samo z antropičnim premislekom (https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.59.2607) uspelo postaviti zelo razumno zgornjo mejo vrednosti pozitivne energije vakuuma. Z drugimi besedami: če bi bila ta energija prevelika, se zaradi še bolj pospešenega širjenja vesolja snov pod vplivom gravitacije nikoli ne bi sesedla. V takšnem vesolju ne bi obstajale niti zvezde, niti planeti, niti mi, ki danes o tem razmišljamo. Kljub temu pa nekateri fiziki upamo, da obstaja za razumevanje vseh podrobnosti našega vakuuma in vseh osnovnih zakonov tega, kar je v njem in v našem vesolju, kakšna bolj globoka, pomenljiva in predvsem edinstvena fizikalna razlaga.

https://www.alternator.science/sl/daljse/kaj-je-vakuum-in-zakaj-se-ne-moremo-razumeti-vakuuma-nasega-vesolja/