ALTERNATOR
Misliti znanost.

Razpad vesoljnega vakuuma

11. 6. 2020

Number: 28/2020

Author:

- Miha Nemevšek

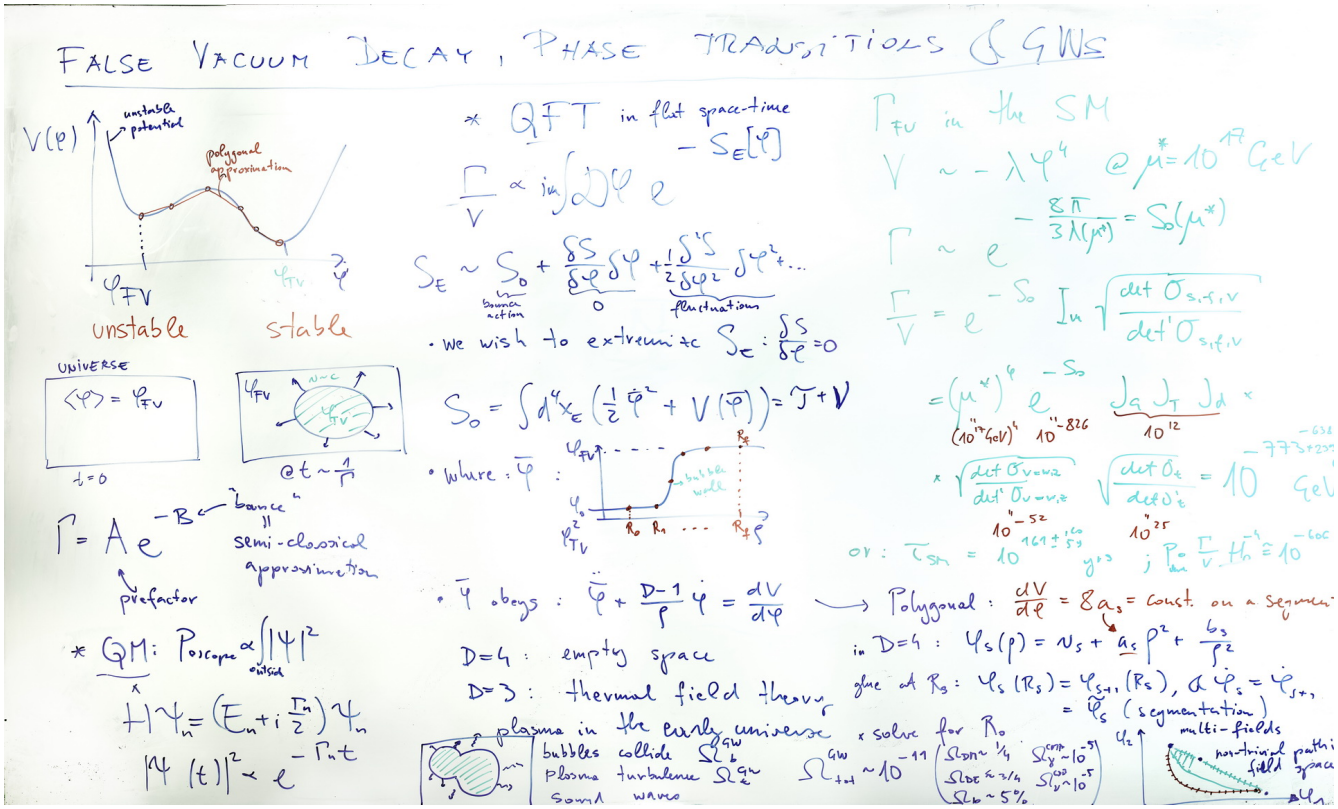


Foto: Katja Bidovec

Umrljivo vesolje

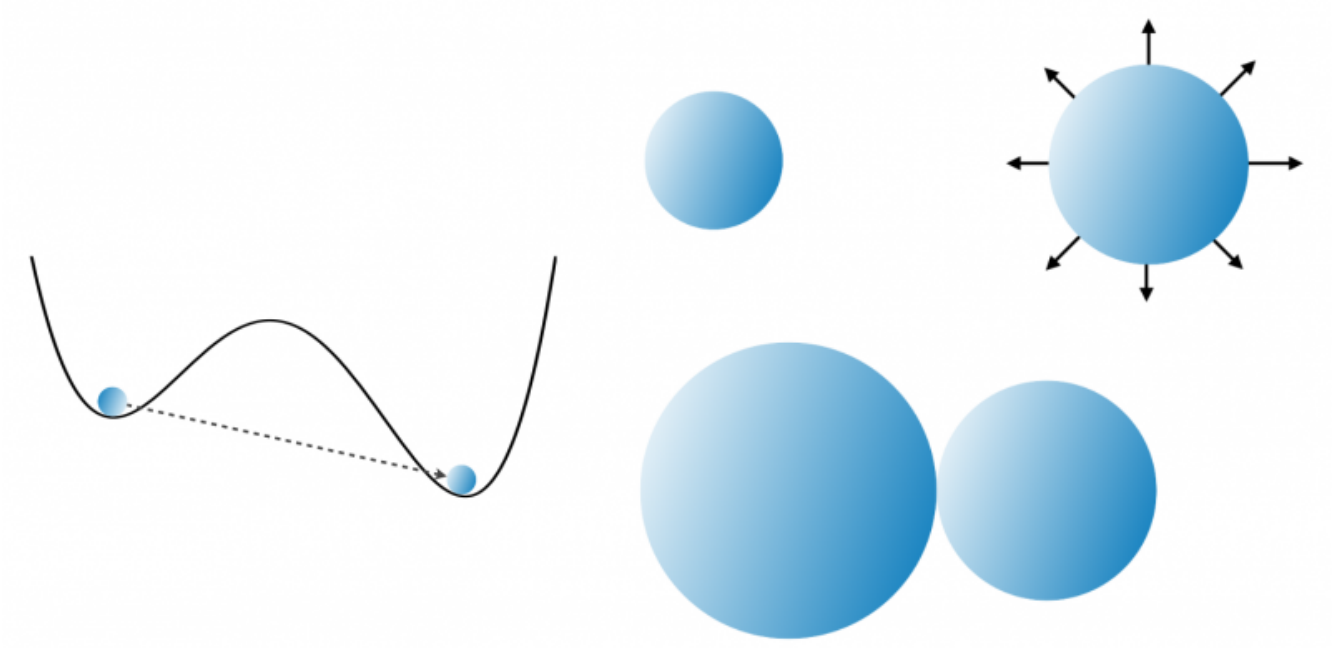
V času klimatskih sprememb in globalnega razmaha covida-19 se zdi, da je treba ukrepati odločno, da se izognemo katastrofalnim posledicam. Hitrost širjenja okužb in vpliv človeka na okolje dokazujejo, da smo postali globalna vrsta, ki z obema nogama stoji v antropocenu. Vseeno smo v širši perspektivi, na astronomskih skalah, neznatni in podvrženi dosti bolj kataklizmičnim dogodkom, kot smo jih sposobni ustvariti sami. Morda se tu najde prostor za kontemplacijo in tolažbo, v vsakem primeru pa bomo videli, da so takšni fenomeni izredno fascinantni in ne nujno usodni.

Le malo stvari okoli nas ima dolg rok trajanja, slej ko prej nas vse najé zob časa. Očitno je, da sistemi stremijo k temu, da najdejo čimbolj ugodno, stabilno lego. V prisotnosti zunanjih sprememb to lahko vodi do spremembe stanja oziroma faznega prehoda. Dobro poznan prehod je nastanek ledu iz vode. Če je ohlajanje hitro, se fazni prehod zgodi zvezno in nemoteno. Lahko pa se zgodi, da se s počasnim nemotenim ohlajanjem voda podhladi (https://www.youtube.com/watch?v=Fot3m7kyLn4) in ostane v tekočem stanju, čeprav bi bil nastanek ledu energijsko ugodnejši. Takemu stanju rečemo *metastabilno stanje*. V takem stanju se lahko zaradi majhne motnje v tekočini pojavi mehurček ledu, ki v kratkem času zapolni prostor okrog sebe. Takšni procesi so zelo hitri in nezvezni. V splošnem je pojav metastabilnosti precej pogost, pomemben npr. za obstojnost kemijskih učinkovin v farmaciji. Drugi primer je radioaktivnost – določeni atomi imajo omejen rok trajanja in razpadejo v stabilnejše atome z izsevanjem svetlobe, elektronov, lažjih jeder ali z razcepom v dve jedri.

Večje kot je področje faznega prehoda, bolj je ta fascinanten – zamrznejo lahko morja in zgorijo amazonski gozdovi. Obstaja pa možnost skoraj neverjetne ultimativne katastrofe, kjer lahko izgine vse, kar poznamo. Celotno vesolje se morda nahaja v metastabilnem stanju in mu lahko, z nedoločljivim občutkom neprijetnosti, pripišemo končen življenjski čas. Da bi razumeli, kako pride do takšnega izjemnega pojava, zadošča poznavanje osnov sodobne kvantne fizike.

Kvantna katastrofa

Za razliko od klasičnih delcev kvantnim objektom ne moremo hkrati določiti položaja in hitrosti. To pomeni, da jih je težje omejiti v določenem prostoru in da lahko pobegnejo oziroma tunelirajo (https://en.wikipedia.org/wiki/Quantum_tunnelling) skozi območja, ki so za klasične delce »prepovedana«. Z drugimi besedami – kvantni delci lahko preidejo skozi prepreke, kot da bi žoga nepoškodovana ušla skozi steno škatle, v katero bi jo želeli zapreti. Rečemo, da so kvantne fluktuacije, majhne motnje zaradi nenatančnega položaja in hitrosti, odgovorne za tuneliranje skozi prepreko (kot je prikazano na spodnji sliki).



Levo: metastabilno energijsko stanje in tuneliranje skozi bariero, desno: nukleacija in razširjanje mehurčkov ter trki

Relativistične kvantne delce opišemo s kvantno teorijo polja (https://en.wikipedia.org/wiki/Quantum_field_theory) , kjer se polja raztezajo po prostoru. Delce svetlobe (fotone) opišemo z vektorskimi polji, medtem ko za elektrone uporabljamo drugačna, t. i. fermionska polja. Takšna usmerjena polja poznamo že dolgo časa. Obstajajo pa tudi skalarna polja, ki v prostoru niso usmerjena (klasični analog bi bila temperatura ali tlak) in imajo v vsaki točki v prostoru-času določeno le eno samo, tj. skalarno vrednost. Pripadajoči delec je Higgsov bozon (https://en.wikipedia.org/wiki/Higgs_boson) , ki so ga odkrili na velikem hadronskem trkalniku LHC (https://en.wikipedia.org/wiki/Large_Hadron_Collider) šele leta 2012. Do takrat so bila namreč skalarna polja zgolj dobro motiviran teoretični konstrukt.

Z odkritjem Higgsovega bozona je obstoj kvantnih skalarnih polj prvič postal realnost. Ključna lastnost Higgsovega polja je, da ima po celotnem vesolju določeno konstantno vrednost, ki ustreza energijskemu minimumu vesolja. To lastnost imajo le skalarna polja, saj usmerjena polja, kot so vektorska in fermionska, ne morejo imeti usmerjene konstantne vrednosti – to bi bilo v nasprotju z načeli relativnosti.

Sedaj lahko razumemo, kako pride do vesoljne kvantne katastrofe. Podobno kot pri podhlajeni vodi obstaja možnost, da konstantna vrednost Higgsovega polja ni v absolutnem minimumu. Lahko se zgodi, da je polje zataknjeno v metastabilnem, a dolgoživem stanju (zgornja dolina na zgornji sliki levo), katerega življenjski čas je vsaj 14,7 milijarde let. Tako kot voda zaradi nečistoče ali termične motnje preide v mehurček ledu, ki napolni posodo z vodo, tako lahko metastabilno skalarno polje preko kvantnih fluktuacij tunelira v energijsko ugodnejše stanje (spodnja dolina na zgornji sliki levo).

Če bi živeli na robu ultimativnega vesoljnega propada, bi po preteku tipičnega razpadnega časa kvantne motnje ustvarile majhen mehurček energijsko ugodnejšega vakuuma (globlje doline na zgornji sliki). V notranjosti tega mehurčka bi imelo Higgsovo skalarno polje drugačno vrednost od te, ki so jo izmerili na trkalniku LHC.

Ker se mehurčku, podobno kot ledu, »izplača« zasesti čim več prostora, bi se začel hitro širiti in bi kmalu dosegel hitrost blizu svetlobne. Ko bi nas dosegel, ne bi imeli časa za svarilo. Tik preden bi nas dosegla svetloba z njegovega roba, bi nas pogoltnil, in svet, v katerem živimo, bi se drastično spremenil, kot da bi nam nekdo potegnil preprogo izpod nog. Mase osnovnih delcev v novem vakuumu bi bile drugačne in zelo verjetno, čeprav ne popolnoma nemogoče, v takšnih pogojih ne bi mogli več obstajati. Zveni kot znanstvenofantastični roman – pa se to res lahko zgodi?

Trenutne meritve mase Higgsovega bozona in ostalih delcev nakazujejo, da ta možnost obstaja, a je z veliko verjetnostjo življenjski čas izjemno dolg, približno 10^{102}–10^{241} let. Ta ocena

(https://journals.aps.org/prd/abstract/10.1103/PhysRevD.97.056006) , do katere je prišla skupina s Harvarda, velja za Standardni model (SM) osnovnih delcev. To je minimalna teorija, ki uspešno opisuje veliko večino izmerjenih procesov. Kljub velikem uspehu tega teoretičnega okvira obstajajo razlogi, zaradi katerih verjamemo, da SM ne more biti dokončen opis narave na najbolj osnovni ravni.

Najbrž najbolj neposreden laboratorijski dokaz za pomanjkljivost SM so meritve nevtrinskih oscilacij (https://en.wikipedia.org/wiki/Neutrino_oscillation) , ki zahtevajo masivne nevtrine, v nasprotju z napovedjo SM, ki napove nevtrine z maso nič. Prav tako SM ne razloži obstoja temne snovi ali dinamične razlage dejstva, da je v vesolju precej več snovi kot antisnovi. Ne glede na motivacijo se v teorijah, ki segajo onstran SM, spremenijo energijske lastnosti skalarnih polj. To pomeni, da se z dodajanjem novih polj lahko ustvarijo novi minimumi (nove doline v energijski pokrajini) oziroma nova osnovna stanja. V tem primeru je lahko naše vesolje bodisi popolnoma stabilno bodisi se mu življenjski čas skrajša.

Poligonalni napredek

Določanje življenjskega časa razpada vakuuma v teorijah z več skalarnimi polji je fizikalno zanimiv in računsko zahteven problem. V zadnjih letih smo na Institutu "Jožef Stefan", skupaj z doktorskim študentom Victorjem Guado in sodelavcem Alessiem Maiezzo z Instituta Ruđer Bošković (Zagreb) razvili uspešen pristop (https://journals.aps.org/prd/abstract/10.1103/PhysRevD.99.056020) , ki poenostavi iskanje razpadnega časa metastabilnih stanj. Ideja je enostavna: namesto neposrednega reševanja enačb, ki opisujejo metastabilno dolino na zgornji sliki, razdelimo pot v linearne odseke. Za vsak tak gradnik poznamo rešitev in več gradnikov lahko zlepimo v gladko funkcijo, ki jo opiše ena sama neznanka. Izkaže se, da je iskanje končne rešitve dosti bolj enostavno in numerično stabilno kot reševanje originalnega problema.

Ko je takšen poligonalen gradbeni oder postavljen, lahko nanj dodamo nelinearne dele in z malo dodatnega truda opišemo popravke višjega reda. Z dodajanjem odsekov in nelinearnih popravkov imamo na voljo poljubno natančen in računsko hiter pristop za izračun življenjskega časa vesolja. Razvoj in testiranje robustnosti poligonalne metode je relativno zamuden proces. Za veliko sodelavcev na našem področju je zato prikladna uporaba namenskega programa (https://arxiv.org/abs/2002.00881) , s katerim lahko hitro in enostavno pridemo do relevantnih količin, ki karakterizirajo fazne prehode, povezane z razpadom vakuuma.

Mehurčki vročega vesolja

Kot smo opisali v prej navedenem primeru, nenadno rojstvo mehurčka v praznem prostoru sprožijo kvantne motnje. Poznavanje razmer v zgodnjem vesolju pa nam omogoča kvalitativno drugačno fizikalno ozadje za podobne procese. Iz meritev zamika spektra zvezd namreč vemo, da se galaksije od nas oddaljujejo, kar dokazuje, da se vesolje širi. To pomeni, da je bilo v preteklosti precej manjše in bolj vroče. Meritve količin lahkih elementov in temne snovi kažejo, da je bilo vesolje v preteklosti vroč plin, sestavljen iz osnovnih delcev in svetlobe.

Takšna slika ima pomemben vpliv na stanja skalarnih polj v zgodnjem vesolju. Pri visokih temperaturah lahko povsem stabilen energijski minimum postane metastabilen. Namesto kvantnih motenj bodo v teh pogojih nastanek mehurčkov energijsko ugodnejšega vakuuma sprožile termične motnje. Prav tako nadaljnje napihovanje mehurčka v zgodnjem vesolju vključuje interakcijo s plinom osnovnih delcev

(https://en.wikipedia.org/wiki/Structure_formation#Primordial_plasma) , kar oteži problem in ga je treba obravnavati bolj pazljivo.

Iz takšne smo snovi kot vakuum?

Za razliko od katastrofe, ki bi jo povzročil razpad vakuuma v praznem prostoru, ponujajo prehodi v zgodnjem vesolju bolj optimistične obete. Najbolj presenetljiva in mikavna je verjetno priložnost za razumevanje našega obstoja. Ena izmed ugank, ki je SM ne pojasni, je prevlada snovi nad antisnovjo. V zgodnjem vesolju bi se po napovedih SM ustvarili zelo podobni količini snovi in antisnovi, ki bi se uspešno izničili v sevanje. Ostala bi le vroč plin fotonov in zanemarljiva količina snovi, kar je v nasprotju z dosedanjimi opažanji.

Kako bi lahko nastanek mehurčkov v zgodnjem vesolju razložil to situacijo? Takšen hipotetični mehanizem je povezan s potovanjem mehurčka skozi vročo plazmo (plin osnovnih delcev). Stena mehurčka namreč ločuje dva fizikalno povsem različna svetova. Na zunanji strani živijo nam še nepoznani delci z novimi, še neznanimi interakcijami. Če so lastnosti novih delcev in sil med njimi ravno prave, potem prehod skozi membrano mehurčka prepusti več delcev kot antidelcev. Tako bi v notranjosti mehurčka nastalo naše domače vesolje, tvorila bi se plazma znanih delcev in svetlobe. Ta se zaradi širjenja mehurčka in kasneje prostora-časa ohlaja ter tvori galaksije, zvezde in planete, v katerih prevladuje snov nad antisnovjo.

V okviru SM ni možno tvoriti mehurčkov Higgsovega polja v zgodnjem vesolju pri visokih temperaturah, kar je znano iz opravljenih meritev na trkalniku LHC (https://www.youtube.com/watch?v=pQhbhpU9Wrg) . Za uspešen nastanek mehurčka bi morala biti masa Higgsovega bozona precej manjša. Kot smo že omenili, obstajajo razlogi za razširitev SM in precej takšnih razširjenih modelov omogoča obstoj faznega prehoda pri visokih temperaturah. Natančen izračun nastanka prevlade snovi nad antisnovjo je precej zahteven in vsebuje različne približke. Kar pa lahko določimo s precejšnjo natančnostjo, je verjetnost za nastanek mehurčka v zgodnjem vesolju oziroma določimo temperaturo zgodnjega vesolja, pri kateri bo ta verjetnost zelo velika (pravimo ji nukleacijska temperatura). Ta problem je zelo podoben razpadu vakuuma v praznem prostoru in ga lahko obravnavamo s prej omenjeno novorazvito poligonalno metodo.

Oglašanje prostora-časa

Veliko modelov, s pomočjo katerih lahko razložimo prevlado snovi nad antisnovjo, je možno testirati na trkalnikih. Mase novih delcev so lahko povsem v dosegu trenutnih iskanj na trkalniku LHC, kjer iščemo delce z ravno takšnimi lastnostmi, ki bi omogočali kozmološke prehode v zgodnjem vesolju. Glede na to, da imamo pred sabo še vrsto let delovanja in zajemanja podatkov na trkalniku LHC, se veliko raziskovalcev posveča takšnim iskanjem. Kot bomo videli, pa obstaja tudi drugačen in precej bolj tih način, kako ugotoviti, ali so nastali mehurčki vakuuma v zgodnjem vesolju. Gre za LIGO (https://www.youtube.com/watch?v=tQ_teIUb3tE) ali laserski interferometrični observatorij gravitacijskih valov, tj. neznatnih nihanj v prostoru-času.

Na trkalniku LHC pospešimo curke protonov do laboratorijsko najvišjih dosegljivih energij. Pri vsakem trku se zgodi ognjemet različnih delcev, ki jih detektorji polovijo. A za razliko od kakofonije podatkov, ki jih filtrira LHC, potekajo meritve gravitacijskih valov v izjemni tišini.

LIGO sestoji iz dveh detektorjev na različnih koncih ZDA. Vsak interferometer sestavljata dva štiri kilometre dolga kraka, po katerih potuje laserska svetloba, ki se več stokrat odbije. Naloga interferometra je, da meri

gravitacijske valove, ki neznatno spremenijo dolžino krakov in čas potovanja svetlobe skozi kraka. Te spremembe so izredno majhne, najmanjša sprememba razdalje, ki jo LIGO še lahko izmeri, je neverjetnih 10^{-19} m, kar je ena milijardinka velikosti atoma vodika.

Eden izmed razlogov, da je trajalo več desetletij, da nam je uspelo direktno izmeriti gravitacijske valove, so bili pomisleki o zadostnem številu dovolj močnih izvorov gravitacijskih valov v vesolju. Čeprav smo iz ohlajanja pulzarjev (https://en.wikipedia.org/wiki/Hulse%E2%80%93Taylor_binary) (nevtronskih zvezd, ki sevajo) vedeli, da ti valovi obstajajo, se ni vedelo dovolj o številu nevtronskih zvezd in črnih lukenj, katerih združitev je glavni izvor gravitacijskih valov. V zadnjih štirih letih je LIGO uspešno izmeril več deset izmerjenih dogodkov, ki večinoma ustrezajo združitvam črnih lukenj z masami okoli 10-krat mase sonca. Ti dogodki ne smejo biti predaleč stran od zemlje in s pomočjo tretjega, sicer manj občutljivega italijanskega detektorja VIRGO lahko določimo njihov položaj na nebu.

Poleg združitev črnih lukenj in nevtronskih zvezd so detektorji gravitacijskih valov sposobni izmeriti signale faznih prehodov v zgodnjem vesolju. Skozi celotno zgodnje vesolje se pri nukleacijski temperaturi tvorijo mehurčki, ki eventualno trčijo, se združijo in za sabo pustijo turbulenten tok plazme delcev in svetlobe (kot je prikazano na zgornji sliki desno). S pomočjo analitičnih približkov in numeričnih simulacij je mogoče določiti te izvore ter napovedati frekvenco in moč skupnega signala gravitacijskih valov. Za razliko od lokalizirane združitve črnih lukenj bi trki mehurčkov v zgodnjem vesolju sprožili enakomeren šum, podoben kozmičnemu mikrovalovnemu ozadju fotonov.

V naslednjih letih pričakujemo posodobitev trkalnikov in detektorjev gravitacijskih valov, prav tako so že začeli delovati novi eksperimenti z občutljivostmi pri različnih frekvencah. Za fiziko osnovnih delcev bo to zanimivo obdobje, v katerem bomo raziskovali, katere teoretične okvire bomo lahko testirali, in poskrbeli, da bodo modelske nedoločenosti pod kontrolo. Seveda bi bilo odkritje novih signalov izjemno razburljivo. Lahko nam odprejo vrata do novih interakcij, razumevanja nevtrinskih mas, temne snovi in – konec koncev – našega obstoja.