

Struktura vakuuma i problem kozmološke konstante

Ivica Picek¹

Koncept vakuuma usko je vezan uz naše shvaćanje prostora, vremena i materije. Kako se ono mijenjalo kroz povijest, tako se mijenjalo i gledanje na vakuum. U grubom, povijest prati izmjenjivanje dva stajališta ustanovljena još u četvrtom stoljeću prije naše ere.

- i) *Demokrit* (rođ. oko 470. g. p. n. e.) svodi bitak na stome i prazninu.
- ii) *Platon* (rođ. oko 427. g. p. n. e.) shvaća fizička tijela kao prazan prostor omeđen geometrijskim plohamama – geometrijsko gledanje čiji je sljedbenik i *Einstein*.

Kroz izmjenjivanje perioda različitih gledanja pojam vakuuma je evoluirao od fizikalnog “ništa” do složenog vakuuma, čija je struktura jedan od središnjih problema suvremene fizike.

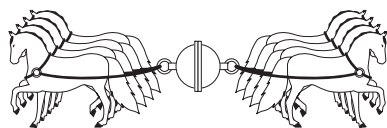
1. Klasična jednadžba vakuuma

Intuitivna definicija iz svakodnevnog života ili iz leksikona

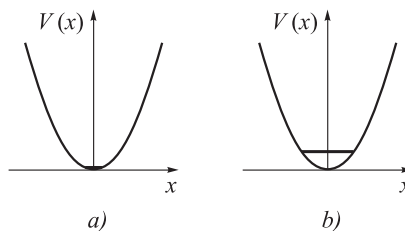
vakuum je prostor bez materije (1)

nastala je iz pokušaja inženjera da odstrane svu materiju iz neke posude (v. sliku 1). Napomenimo da današnja tehnologija omogućuje vakuum od 10^{-13} Torra² (ili 10^{-10} Torra u radnim uvjetima modernih akceleratora).

U svakodnevnom se životu srećemo i s pojmom “etera” kroz koji se šire elektromagnetski valovi.³ Taj pojam, koji nije preživio eksperimentalne provjere, ostatak je iz devetnaestog stoljeća kada se vjerovalo u postojanje elastičnog krutog tijela čije bi titranje omogućilo veliku brzinu svjetlosti.



Slika 1. Osam konja nije u stanju razdvojiti polusfere iz kojih je ispumpan zrak – u čuvenoj demonstraciji (Otto von Guericke) iz 1650.



Slika 2. Zamislamo česticu (npr. elektron) bačen u zdjelu sa zaobljenim dnom. Klasična fizika predviđa da elektron postepenim gubljenjem energije odskakače sve manje i na kraju se nađe na dnu potencijalne jame (slika 2a). No kvantna fizika predviđa do kraja nepredvidivo odskakanje elektrona – u stanju najniže energije postoji kvantni šum (slika 2b).

¹ Ivica Picek je redoviti profesor od 1992. g. i profesor emeritus od 2017. g. na Fizičkom odsjeku PMF-a Sveučilišta u Zagrebu. Članak je objavljen šk. god. 1988/89.

² Budući da se ovdje vakuum postiže čisto mehaničkim ispumpavanjem zraka, uobičajeno ga je mjeriti u jedinicama tlaka zraka; 1 Torr odgovara tlaku 1 mm stupca žive. SI jedinica je 1 Torr \approx 133 Pa.

³ Radio-valovi i svjetlost samo su mali dio spektra elektromagnetskih valova.

No preostalo je specificiranje brzine svjetlosti u vakuumu, pri čemu se misli na medij u kome se mjeri najveća brzina svjetlosti. U svim ostalim sredstvima svjetlost se širi sporije (čak ako se radi "samo" o prisustvu jakog električnog ili magnetskog polja). Dakle, bolja će definicija biti

vakuum je prostor bez materije i polja. (2)

2. Kvantno-mehaničko iskrenje u vakuumu

Definicijom (2) pokušali smo iz vakuuma eliminirati energiju, koja je u stvari samo oblik materije. Takve pretvorbe energije u materiju realizirane su na mikroskopskim dimenzijama – na kojima vrijede zakoni kvantne fizike. Njihova osnovna karakteristika je "princip neodređenosti" koji izriče da izvjesne parove fizikalnih veličina (npr. koordinatu čestice i impuls) ne možemo mjeriti na po volji veliku točnost. Kao posljedica toga javlja se "kvantni šum": klasično stanje koje bi imalo najnižu energiju kao na slici 2a pokazuje u stanju najniže energije kvantni šum (slika 2b).

Sličnim kvantno-mehaničkim fluktuacijama podvrgnuta su i polja. Zbog toga potpuno odstranjivanje polja (sugerirano u (2)) neće biti moguće. Budući da se fluktuacije npr. električnog i magnetskog polja zbivaju kaotično, one će se zbog slučajnih orijentacija usrednjiti na nulu. No još uvijek te fluktuacije nose energiju. Prema tome, vakuumsko stanje definirat će se kao

stanje koje, usrednjeno kroz dulje vrijeme, ima najnižu energiju. (3)

Na ovaj način, uvođenjem kvantne teorije elektromagnetskih i drugih polja obnovljena je slika neke vrste etera. Uočimo bogatstva čestica i polja sadržanih u standardnom modelu ujedinjenih fundamentalnih sila (usp. MFL 3/142, str. 93) i pripadno bogatstvo fluktuacija.

Naravno, ovakvo živahno komešanje čestica i polja unutar vakuuma bilo bi poželjno detektirati. Nizozemski fizičar *Hendrik Casimir* predložio je kako da se to učini za elektromagnetsko polje vakuuma. Postavljanje dviju paralelnih, reflektirajućih metalnih ploča ometat će titranje slobodnog vakuuma. Kao što žica učvršćena na gitari odabere određenu muzičku notu⁴ i njene više harmonike, tako će reflektirajuće metalne ploče odabrati fluktuaciju koja odgovara razmaku između ploča, a ugušiti sve ostale. Dakako, radi se o gušenju onih fluktuacija koje su dovoljno velikih valnih duljina da ih osjećaju obje ploče, dok na fluktuacije malih valnih duljina nema utjecaja. Takvo potisnuće nekih frekvencija povlači potisnuće dijela energije. Ta vrlo mala promjena energije vakuuma ipak se može mjeriti kao sila privlačenja metalnih ploča.

Tim mjerenjem dokazano je postojanje fluktuirajućih kvantnih elektromagnetskih polja. U vrlo kratkim vremenskim intervalima te fluktuacije mogu imati dovoljno energije za stvaranje materijalnih čestica, npr. virtualnih parova elektron-pozitron. Njihovo prisustvo manifestira se kroz polarizabilnost vakuuma u električnom polju – pomak naboja kao što se to opaža za dielektrike. Kod atoma efekt polarizacije vakuuma odražava se kao mali, ali mjerivi pomak atomskih nivoa (tzv. *Lambov pomak*, čije se mjerenje za vodikov atom slaže s teorijskim predviđanjem do na milijunti dio!). Izravno opažanje – "pumpanje" virtualnih čestica iz vakuuma je teži zadatak. Cilj je da se elektronu dade dovoljno energije, tako da se prije nego što iščezne uspije pretvoriti u realni elektron (praćen pojavom pozitrona, da bi električni naboj ostao sačuvan). To je

⁴ za koju pola valne duljine odgovara dužini žice

u principu moguće u jakom električnom polju – na žalost takve jačine da se sadašnjom tehnologijom još ne može ostvariti. No dovoljno jako polje za takav “radioaktivni raspad” vakuuma postojalo bi u blizini atomske jezgre s oko 200 protona. Za kratko vrijeme takve jezgre mogu postojati pri sudarima teških iona – pokusima koji su već u toku (v. MFL 4/139, str. 117).

3. Kompleksni vakuum i problem kozmološke konstante

S aspekta gravitacijske sile, energija uskladištena u vakuumu ponašat će se poput mase. Stoga je za očekivati da će se gravitirajuće svojstvo energije kompleksnog vakuuma odraziti na širenje svemira. Posebno će se to odnositi na rani svemir, laboratorij koji raspolaže i tako visokim energijama kakvima barataju teorije velike unifikacije. Različite fundamentalne interakcije koje sudjeluju u takvim unifikacijama uvode različite energetske skale, a time i različite doprinose energiji vakuuma. Vraćamo li se prema ranom svemiru (v. MFL 2/145, str. 39), doći ćemo do tzv. taljenja vakuuma jake interakcije kod gustoće energije od $1 \text{ GeV}/\text{fm}^3$ – točke kod koje kvarkovi i gluoni postaju slobodni (ponašaju se kao bez mase). Uobičajeno je govoriti o kvark-gluonskoj plazmi. Pri tome jedinica volumena rastaljenog jakog vakuuma pokazuje gravitirajuće ponašanje koje odgovara masi 1 GeV . Sličan prijelaz za elektroslabu silu odvija se na 10^2 GeV , za veliku unifikaciju kod 10^{15} GeV , a za kvantnu gravitaciju na 10^{19} GeV . U usporedbi s tim skalama fizike čestica, opažena granica na gustoću energije vakuuma u današnjem svemiru je nevjerovatno mala⁵,

$$\rho_{\text{vac}} < (0.004 \text{ eV})^4. \quad (*)$$

To predstavlja primjer najvećeg odstupanja između predviđene i opažene vrijednosti neke fizikalne veličine, tzv. *problem kozmološke konstante*. Za veličinu koja je potisnuta za toliko decimalnih mjesta bilo bi “prirodno” očekivati da iščezava. Svojedobno je *Einstein* usrećio kozmologe sugestijom da kozmološku konstantu treba zaboraviti. No dolaskom ujedinjenih teorija fundamentalnih međudjelovanja kozmološka konstanta je ponovno iskrsela kao misteriozan i neriješen problem.

4. Mogućnost krivog vakuuma i inflacijska ekspanzija svemira

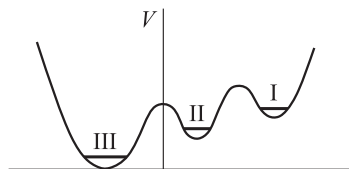
Postojanje kompleksnog vakuuma ukazuje na to da nam definicija (3) ne daje apsolutnu definiciju vakuuma. Naš bi sustav mogao imati stanja različite energije koja pripada lokalnim minimumima kao na slici 3.

Kao primjer možemo uzeti bure baruta, koje će oslobađanjem energije u eksploziji prijeći u stanje niže energije. Dajmo stoga još jedno proširenje definicije vakuumske stanja nekog fizikalnog sustava kao

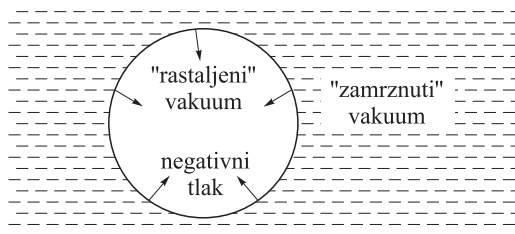
$$\text{stanje najniže energije koje se može postići uz dane početne i rubne uvjete.} \quad (4)$$

Kako to možemo primijeniti na svemir koji opažamo u stadiju eksplozije (vidi MFL 2/145, str. 39)?

⁵ $\text{GeV}/\text{fm}^3 \approx \text{GeV}/(0.2 \text{ GeV})^{-3} \approx (0.3 \text{ GeV})^4$ odstupa od (*) za 43 redova veličina dok je to odstupanje za elektroslabi vakuum $\sim (0.9 \text{ GeV})^4$ reda 10^{45} , za vakuum velike unifikacije $\sim (1.7 \text{ TeV})^4$ reda 10^{58} , a za vakuum kvantne gravitacije $\sim (7 \text{ TeV})^4$ reda 10^{62} .



Slika 3. Za lokalne energetske minimume odvojene potencijalnom barijerom, vakuum može za gotovo neograničeno vrijeme ostati zarobljen u "krivom" stanju.



Slika 4. U slučaju kvantne kromodinamike, kvarkovi unutar protona, vezani za rastaljeni vakuum, svojim gibanjem izbalansiraju razliku tlaka između dva vakuuma. Pritom se negativni tlak manifestira "antigravitacijskim" efektom.

U ranom svemiru, s mnogo manjim volumenom, gustoća energije je bila dovoljna da vodi do taljenja pojedinih vakuuma. Suptilnost koja se pri tom javlja je negativni tlak (slika 4) takvog vakuuma (ako se uzme da je tlak zamrznutog vakuuma nula) s efektom gravitacijskog odbijanja (po općoj Einsteinovoj teoriji relativnosti ne gravitira samo masa nego i tlak). Širenjem i hlađenjem svemira dosiže se točka kada čestice više ne mogu izbalansirati negativni tlak. Događa se prijelaz na zamrznuti vakuum (npr. kvarkovi se zatvaraju u mikroskopske domene s rastaljenim vakuumom – nukleone ili mezone). Pri brznoj ekspanziji svemira prijelaz na zamrznuti vakuum (na nukleon i mezon) nije trenutna. Svemir dio svoje evolucije provede u krivom vakuumu, s neizbalansiranim negativnim tlakom. Svemir se ponaša kao boca s pothlađenom vodom. Prijelaz u zamrznuti vakuum je eksplozivan – latentna toplina rastaljenog vakuuma prelazi u termalnu energiju. Kroz vrijeme neizbalansiranog negativnog tlaka, "antigravitacijski" efekt manifestira se kao eksponencijalna (inflacijska) ekspanzija ranog svemira, koja olakšava odgovor na mnoge kozmološke probleme (v. MFL 2/145, str. 39).

Prirodno se nameće pitanje u kojem je vakuumu svemir u kome se danas nalazimo. Što nam garantira da smo dosegli najnižu stepenicu u slijedu krivih vakuuma na slici 3? Ništa! Velika je vjerojatnost da i dalje sjedimo na buretu baruta. Jedino je pitanje opasnosti da to bure eksplodira. Iskrenje koje proizvode i najmoćniji akceleratori današnjice izgleda slabašno i bezopasno. Potencijalno opasno iskrenje kakvo bilježimo u kozmičkim zrakama za sada nas nije ugrozilo. Sam problem kozmološke konstante pokazuje da je naše znanje u ovom području još uvijek u povojima. Odgovori na gornja pitanja sigurno zadiru u pitanje same strukture prostora-vremena.