

RELATIVISTIČKE KVANTNE TEORIJE POLJA (QFT)

↳ trenutno standardni, opće prihvaćeni matematičko-fizikalni okvir, odnosno način opisa prirode na najdubljijoj, fundamentalnoj razini našeg razumijevanja i spoznaje o prirodi svijeta, odnosno svemira.

- one su:
- 1) TEORIJE POLJA - ono što "postoji" su "polja" kao npr. električno ili magnetsko polje, dakle funkcije koje "daju" NEŠTO (broj, vektor, ...) u svakoj točki prostora (tj. prostor-vremena)
 - 2) KVANTNE - nije svako stanje (konfiguracija) polja moguća, odnosno "dozvoljena"
 - 3) RELATIVISTIČKE - transformiraju se u skladu s Lorentzovim transformacijama između (inercijalnih) referentnih sustava [dakle NE po Galilejevim transformacijama, kao npr. Schrödingerova jedn.]

→ zato što su polja u kojima mogu postojati valovi - dakle „poremećaji“ od „ravnotežnog položaja“ (vakuma) koji kroz polje „putuju“...

⇒ ČESTICE se mogu objasniti / doživjeti / zamisliti otprilike kao LOKALIZIRANI POREMEĆAJI tih polja koji mogu „putovati“ zadržavajući oblik (zamislite „impulsi“ val na npr. užetu ...  ...)

→ zato se ponašaju kao „kuglice“ kad gledate „iz daleka“ (zoom out ...  ...), a kao „valovi“ kad gledate dovoljno „izbliza“ (zoom in)

[sjetite se elektrona i ogiba i De Brogliea]

→ postoje dva fundamentalno različita tipa polja, tj.

TIPA ČESTICA - FERMIONI i BOZONI:

- 1) FERMIONI - „normalne“ čestice (od čega se sastoji „materija“)
 - opisani DIRACOVOM jednačinom (relativistička verzija Schrödingerove jedn.)
 - imaju polusjelo brojni SPIN, npr. $s = 1/2, 3/2, \dots$ (sljedeće tzv. Fermi-Diracovu statistiku)

2) Bozoni – tzv. „prijenosioci sila“, čestice „polja sila“
npr. FOTON za elektromagnetsku silu

– imaju cjelobrojni SPIN, npr. $s = 0, 1, 2, \dots$
(sljedeće tzv. Bose-Einsteinovu statistiku)

– bozoni mogu biti i KOMPOZITNE ČESTICE (spoj nekoliko fermiona) čiji je ukupni spin cjelobrojan (npr. atomi ${}^4_2\text{He} - 2p^+, 2n^0, 4e^-$)

$\Rightarrow$ moguća su JAKO ČUDNA stanja tvari
(pri vrlo niskim temperaturama, doduše):

- Bose-Einsteinovi kondenzati (BEC)
- SUPRAVODLJIVOST (supravodiči – quantum levitation, quantum locking, ...)
- SUPERFLUIDNOST (tekući Helij...)

STANDARDNI MODEL FIZIKE

- postoji 12 fundamentalnih „čestica“ (fermionskih kvantnih polja) i 4 „tradicionalne“ fundamentalne „sile“ (bozonska kvantna polja) + još jedno dodatno polje, tzv. Higgsovo polje
- svaka fundamentalna „sila“ (interakcija) djeluje na jedno fundamentalno svojstvo prirode/materije koje općenito nazivamo NABOJ te sile, a koje „čestice“ (tj. polja) posjeduju (ili ne posjeduju)

SILA	NABOJ	ČESTICA	JAČINA
<u>ELEKTROMAGNETSKA</u>	električni naboj (Q) $[\pm N \cdot q_e]$	<u>FOTON</u> masa $m=0 \rightarrow v=c$ naboj $q=0$! spin $s=1$	<u>$\approx 230 N$</u> između 2 čestice s $\pm 1 q_e$ na $r \approx 1 \text{ fm}$
<u>SLABA</u> (nuklearna)	„okus“ (flavour - F)	<u>$W^\pm, Z^0$ bozoni</u> masa $m \gg 0$! naboj $q \neq 0$!	<u>$\approx 10^{-7}$</u> puta slabija od EM između 2 čestice na $r \approx 1 \text{ fm}$
<u>JAKA</u> (nuklearna)	„boja“ (colour - C)	<u>GLUON</u> masa $m=0 \rightarrow v=c$ boja $c \neq 0$! spin $s=1$	<u>≈ 100</u> puta jača od EM između 2 kvarka na $r \approx 1 \text{ fm}$
<u>GRAVITACIJA</u>	masa, tj. energija $[E = m \cdot c^2]$	<u>GRAVITON ??</u> masa $m=0 \rightarrow v=c$ spin $s=2$!	<u>$\approx 10^{-36}$</u> puta slabija od EM između 2 nukleona na $r \approx 1 \text{ fm}$

→ ELEMENTARNE ČESTICE (FERMIONI)

- otkrili / potvrdili smo postojanje 12 fundamentalnih fermionskih polja, čija "pobudjenja" su čestice za koje (trenutno) mislimo da nemaju "strukturu", dakle da su kao "materijalne točke"
- ta polja / čestice imaju svojstva (masa, naboj, ...) preko kojih međudjeluju "silama" s drugim poljima ...
- podjeljene su u 2 "grupe": KVARKOVI i LEPTONI, i svaka od njih u 3 "generacije" ... [grč. LEPTOS - maleno]
(Google: "table of elementary particles" ...)
- sve imaju MASU (grav.), EL. NABOJ (EM sila) [osim neutrina!]
i naravno "okus" (slaba), ali SAMO KVARKOVI IMAJU "BOJU", dakle međudjeluju jakom silom!
- dodatno, kvarkovi su jedine poznate čestice s $Q < q_e$!
(imaju $+2/3$ ili $-1/3$ q_e)

→ čestice svake generacije su „iste“ osim po MASI,
svaka iduća generacija je PUNO (~ 100 puta) teža...

⇒ čestice II. i III. generacije JAKO kratko „žive“ i
brzo se „raspadaju“ u svoje pandane I. generacije
(jer su stanja niže energije) koji su jedini „trajni“
(jer su najlakši mogući), dakle elektroni i „up“
i „down“ kvarkovi koji tvore protone i neutrone

→ Nemamo dobro/smisleno objašnjenje zašto je
priroda takva, zašto postoji hrpa čestica koje
nisu stabilne, koja je njihova „korist“ ili „svrha“...
(zašto su „nužne“, u nekom smislu, ako je to uopće
smisleno pitanje...)

→ za svaku česticu postoji i ANTIČESTICA !

→ nužna posljedica Diracove jednačbe, koja je skoro pa nužna posljedica matematike ...

→ one su „pobuđenja“ istih polja (npr. pozitron (e^+), dakle anti-elektron, je pobuđenje elektronskog polja), ali na neki način „suprotna“ ...

→ svi naboji isti po iznosu, ali suprotni (osim MASE koja ne može biti suprotna !)

$$\left[\begin{array}{l} \text{npr. } Q(e^+) = -Q(e^-) \text{ i tzv. „leptonski broj“ } l(e^+) = \\ = -l(e^-) = -1, \text{ ali } m(e^+) = m(e^-) \end{array} \right]$$

→ kada se „susretnu“ se „ponište“ u „čistu energiju“ (tj. u bozonsko pobuđenje, npr. foton) [annihilation]

→ također, iz „čiste energije“, npr. fotona (jače velike energije), ili drugog nekog bozona, može „spontano“ nastati par čestica-antičestica ... [pair production]

→ postoje i „kompozitne“ antičestice (npr. anti proton, anti-vodik, anti-helij, ...) - kada su svi dijelovi „anti“

→ ELEKTROMAGNETSKA SILA

↳ ime teorije: QUANTUM ELECTRODYNAMICS (QED)

→ u osnovi i dalje samo Maxwellove jednačbe

→ postoji interakcija (povezanost) samo s česticama (pojima)

koja imaju el. naboj ($Q \neq 0$) [npr. elektronsko poje, ali i poje slabe sile ($W^\pm$ bozoni)]

→ prijenosioci sile (FOTONI) sami nemaju ni masu niti ikakav drugi naboj...

⇒ EM interakcija NE MOŽE promijeniti (prenijeti) svojstva čestica (npr. el. naboj)

⇒ sila se prenosi brziom svjetlosti (jer $m_f = 0$)

→ iznos sile pada s kvadratom udaljenosti ($F \sim 1/r^2$)

↳ „dugi“ doseg (relativno „spori“ pad s r)

→ eksperimentalno testirana i potvrđena teorija do nevjerojatnih preciznosti (a opisuje i objašnjava skoro sve oko nas...)



→ SLABA (nuklearna) SILA

↳ ime teorije: QUANTUM FLAVOUR DYNAMICS (QFD)

→ „okus“ je naziv za „vrstu“ čestice/polja, npr. elektroni imaju „okus“ elektrona (svaka ima svoj)

→ postoji interakcija (povezanost) sa SVM česticama / poljima jer SVE, po definiciji, imaju neki „okus“

→ djelovanje slabe sile MISLENJA okus čestica, tj.

! PRETVARA ČESTICE JEDNE VRSTE U DRUGU (npr. β raspad; jedina sila/interakcija koja to može)

→ prijenosnici sile ($W^\pm$; Z^0 bozoni) imaju veliku masu ($m \approx 100 \text{ GeV}/c^2 \approx 100 u$), a $W^\pm$ bozoni i el. naboj ($\pm 1 e$)

⇒ zato slaba sila/interakcija može promijeniti česticu jedne vrste i naboja u drugu različitog el. naboja...
(npr. β^- raspad... $d \rightarrow u + (W^-) \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e$)

⇒ interakcija je slaba, ali i spora ($v \ll c$) i vrlo kratkog doseg zbog velike mase $W^\pm$ i Z^0 bozona (brzo se „raspadnu“ na nešto lakše...)

To da prijenosnici slabe sile imaju svojstvo koje "pripada" sasvim drugoj sili (el. naboj $W^\pm$ bozona) ukazuje na duboku povezanost te dvije sile - slabe i elektromagnetske...

{ kao što je utjecaj magnetskog polja na el. naboj i stvaranje magnetskog polja od el. naboja u gibanju ukazivalo na fundamentalnu povezanost električne i magnetske sile... }

... Zapravo su jedna sila - tzv. ELEKTROSLABA SILA !

→ Matematički su ujedinjene pri JAKO visokim energijama/temperaturama ($T > 10^{15}$ K, vrlo rani svemir npr.)

→ naizgled se "razdvajaju" procesom tzv. SPONTANOG LOMA SIMETRIJE (spontaneous symmetry breaking)

↳ odgovorno za velike mase $W^\pm$ i Z^0 bozona

↳ eksperimentalno potvrđeno na CERN-u 2012.

kroz "otkrice" Higgsovog bozona...

→ JAKA (nuklearna) SILA

↳ ime teorije: QUANTUM CHROMODYNAMICS (QCD)

→ postoji interakcija (povezanost) SAMO s česticama (pojima)

koja imaju „BOJU“ (samo kvarkovi i gluoni)

→ naboj jake sile zove se „boja“ jer postoje 3 vrste,

npr. R, G i B (i njihove „antiboje“ - $\bar{R}$, $\bar{G}$ i $\bar{B}$) i postoje

pravila njihovog kombiniranja koja podsjećaju na pravila

kombiniranja boja, npr. čestice sastavljene od kvarkova

moraju uvijek biti „bijele“, dakle npr. $R+G+B$ ili $R+\bar{R}$

→ prijenosnici sile (GLUONI) nemaju masu, ali IMAJU boju...

⇒ interakcija mijenja boju čestica (kvarkova)!

(kao $W^\pm$ bozoni naboja, a za razliku od fotona...)

⇒ sila se prenosi brzinom svjetlosti (jer $m_g = 0$)

! → iznos sile RASTE s udaljenosti ($F \sim r$; kao opruga)

⇒ NEMOGUĆE je kvarkove RAZDVOJITI i imati „slobodne“, samostalne kvarkove, uvijek se nalaze unutar „većih“

čestica - HADRONA [grč. HADROS - veliko, jako]

To se zove „zarobljavanje“ (confinement).

→ postoje 2 vrste HADRONA:

- BARYONI (grč. BARUS - težak) - sastoje se od
3 kvarka, npr. PROTONI (uud) $[Q(p^+) = +\frac{2}{3} + \frac{2}{3} - \frac{1}{3} = +1]$
 $\uparrow$
3 različite „boje“

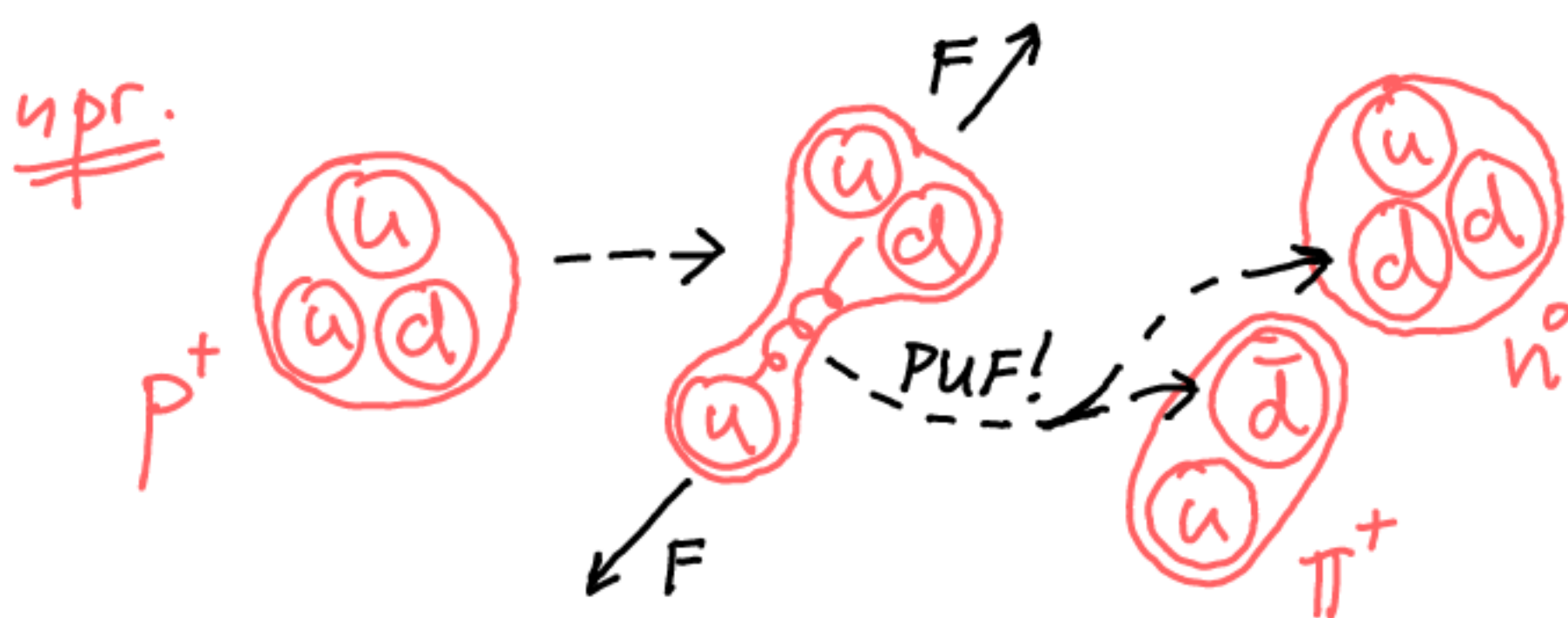
ili
NEUTRONI (udd) $[Q(n^0) = +\frac{2}{3} - \frac{1}{3} - \frac{1}{3} = 0]$

- MEZONI (grč. MESON - srednji) - sastoje se od
kvarka i antikvarka, npr. PION ($u\bar{d}$) $[Q(\pi^+) = +\frac{2}{3} + \frac{1}{3} = +1]$
 $\uparrow$
boja i anti boja

(kratko „žive“, nisu stabilni!)

[npr. $u\bar{d} \rightarrow (d+W^+)\bar{d} \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$
 $\uparrow \quad \uparrow$
PUF!
 $\downarrow$
 $e^+ + \nu_e$]

→ ako bi 2 kvarka pokušali razdvojiti morali bi
uložiti toliko energije da kada bi „veza“ pušla
bi iz ogromne potencijalne energije spontano
nastao kvark-antikvark par i opet se vezali...



⇒ gluoni (daju jaka sila) „zarobljavaju“ kvarkove
u hadrone (kao „gipilo“ - zato ime „gluoni“)

→ jaka sila RASTE s udaljenošću, a privlačna je ...

⇒ $E_p \rightarrow \infty$ kad $r \rightarrow \infty$!

⇒ najmanji iznos je kada su čestice „najbliže“, a uvijek je POZITIVNA ...

⇒ pozitivna E_p = masa ! ($m = E/c^2$)

→ većina mase HADRONA (dakle i protona i neutrona, dakle jezgre atoma, dakle atoma, dakle svega na zemlji, u i oko vas) ne dolazi od masa kvarkova (za p^+ i $n^0 \approx 1\%$ - provjeri) nego od njihove potencijalne i kinetičke energije !

→ problem provjere i predviđanja teorije zbog izrazito visokih energija i kompleksnosti → vrlo komplicirani i teški izračuni (praktički nemoguće „na ruke“) ...

→ simulacije i digitalno računanje → najjača super računala na svijetu (i još uvijek preslabo...) !

→ mogućnost/perspektiva teorijskog ujedinjenja s elektroslabom silom (na još višim energijama) ...

⇒ GUT (Grand Unified Theory) - ima ideja/kandidata ...

→ GRAVITACIJA (kvantna)

↳ ime teorije: još ne postoji kvantna teorija gravitacije!

(objašnjenje na idućoj stranici...)

→ postoji interakcija (povezanost) sa SVIM poljima/česticama
(jer sve ima neku energiju!)

→ prijenosnici sile (GRAVITONI) sami nemaju ni masu
niti ikakav drugi naboj (samo energiju)...

⇒ gravitacijska interakcija NE MOŽE promijeniti (prenijeti)
svojstva čestica (isto kao EM)

⇒ sila se prenosi brzinom svjetlosti (jer $m_g = 0$)

→ jedina razlika u odnosu na fotone je što $spin = 2$!
(jedinu takav bozon/polje → puno važnih posljedica!)

[gravitoni još nisu eksperimentalno potvrđeni, ali znamo
da bi trebali postojati i imati ova svojstva, ako je
gravitacija sila kao i druge...]

→ iznos sile pada s kvadratom udaljenosti ($F \sim 1/r^2$)

↳ „dugi“ doseg (relativno „spori“ pad s r)

[isto kao EM sila, zato su jedine koje „vidimo“ na
djelu izravno u svijetu oko sebe, makroskopski...]

Zašto (još) ne postoji kvantna teorija gravitacije?

Zato što je posebna na takav način da naše uobičajene metode ne daju smislene rezultate za jako velike mase/energije na jako malim udaljenostima (npr. jedina ima spin 2, interagira sama sa sobom (energija) ...)

Zašto to nije (veliki) problem u praksi?

Zato što je gravitacija TOliko slaba da je u praksi u potpunosti zanemariva na malim udaljenostima na kojima bi kvantna teorija bila potrebna ($< 1\text{nm}$) pa nam je „klasična“ teorija koju imamo više nego dovoljno dobra (to je tzv. opća teorija relativnosti - o njoj više malo kasnije)

Zašto nam treba kvantna teorija gravitacije?

Barem 2 jaka razloga (i vjerojatno još puno „manjih“, ako samo spoznavanje istine o prirodi nije dovoljno - a trebalo bi biti):

- 1) Razumijevanje CRNIH RUPA - ogromne mase u malo prostora, znamo da postoje, ne razumijemo kako točno nastaju ni što se događa u njima...
- 2) Stavljanje u isti teorijski okvir/jezik s drugim silama i traženje jedne ujedinjujuće teorije, tzv. teorije svega (TOE)

Neki aktualni kandidati za kvantnu teoriju gravitacije:

1) String theory (teorija struna) - matematički jako napredno i apstraktno, konceptualno jako neobično i drugačije (cijeli drugačiji teorijski "okvir" od QFT); već dugo se na njoj radi i bio je "hype", ali nedostaju rezultati...

[potencijalno nepotrebno pretjerano komplicirana i nefizikalna?]

2) Asymptotic safety - konzervativan pristup (unutar okvira QFT) u koji je malo tko vjerovao (pa se i malo tko njime bavio), ali u zadnje vrijeme rezultati po kojima se sve više čini da bi mogao funkcionirati (i dalje jako matem. komplicirano, ali konceptualno slično ostalim silama, isti teorijski okvir/"jezik")

itd.

→ HIGGSOVO POLJE

↳ bozonsko polje čija je vrijednost svugdje u svemiru različita od 0 (čak i u vakuumu!)

[kroz ranije spomenuti proces spontanog loma simetrije...]

→ sva ostala polja/čestice dobivaju svoju fundamentalnu masu u interakciji s Higgsovim poljem...

(kao da „zapiju“ za njega, inače bi se kretale brzinom c)

[podsjecam: većina mase na svijetu nije ta masa, nego kinetička i potencijalna energija kvarkova u hadronima...]

→ Higgsov bozon - „poremećaj“ u Higgsovom polju...

↳ specifičan jer ima spin = 0 (jedini takav)

→ druge čestice/polja ga mogu „stvarati“ i „upijati“...

⇒ HIGGSOVA SILA - može se smatrati 5. fundamentalnom silom...

↳ jako slaba i jako kratkog doseg

(jer H bozon ima veliku masu - $m_H \approx 125 \text{ GeV}/c^2$)

→ jača među težim česticama (3. generacije)

OPĆA TEORIJA RELATIVNOSTI (GTR)

↳ klasična (ne-kvantna) teorija gravitacije koju je otkrio/osmislio Einstein (1915.)

→ trenutno važeća i najbolja koju imamo...

→ trijumf teorijske fizike - nova i točnija teorija iz čisto konceptualnih pobuda, bez eksperimentalnih rezultata koje je trebalo objasniti...

→ MOTIVACIJA: jednakost inercijske i gravitacijske mase ...
($F = m_i \cdot a$) ($F_g = m_g \cdot \frac{G \cdot M}{r^2} = m_g \cdot g$)

⇒ PRINCIP EKVIVALENCIJE ! ($m_i = m_g = m = E/c^2$)

⇒ tijelo kada slobodno pada ne osjeća gravitacijsku silu, ne može razlikovati to od kretanja konstantnom brzinom (ili mirovanja) u praznom prostoru bez gravitacije...

[zamislite da ste u kutiji bez prozora koja slobodno pada prema zemlji... ili u liftu upr...]

→ ZAKLJUČCI: 1) slobodno padanje je inercijalni sustav !

2) slobodno padanje je jednoliko pravocrtno gibanje u ZAKRIVLJENOM PROSTORU !

! 3) masa/energija iskrivljuje prostor (i vrijeme) oko sebe → to je gravitacija !

Oblik prostora matematički se opisuje nečime što se zove METRIČKI TENZOR (nešto kao matrica), a označava se s $g_{\mu\nu}$, pri čemu indeksi „ μ “ i „ ν “ označavaju da je to matrica s retcima i stupcima (ako se uvrste brojevi, npr. g_{02} , dobije se konkretan element matrice, npr. u 1. retku i 3. stupcu)

primjeri:

- 2D (beskonačna) ravniha: $g_{\mu\nu} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$
- 3D (beskonačan) RAVNI prostor (Euklidski): $g_{\mu\nu} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
- (3+1)D RAVNO (Minkowski) prostor-vrijeme: $g_{\mu\nu} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$

→ EINSTEINOVA JEDNADŽBA: $\left[\underline{R_{\mu\nu}} - \frac{1}{2} \underline{R \cdot g_{\mu\nu}} \right] + \underline{\Lambda \cdot g_{\mu\nu}} = \frac{8\pi G}{c^4} \cdot \underline{T_{\mu\nu}}$

mjere „zakrivljenosti“ prostor-vremena

tzv. „kozmoška konstanta“

TENZOR ENERGIJE I MOMENTA
koliko ima energije/mase, gdje je i kako se kreće

→ rješenja jednadžbe su metrički tenzori ($g_{\mu\nu}$ - OUTPUT) za danu raspodjelu i kretanje materije/energije ($T_{\mu\nu}$ - INPUT)

→ JAKO komplicirana matematika, JAKO teško pronaći EGZAKTNA rješenja (kao npr. Schwarzschildovo), uglavnom se koriste aproksimacije i numerika...

→ POSLEDICE I PREDVIĐANJA (neke od)

- vrijeme sporije teče „dublje“ u gravitacijskom polju, tamo gdje je gravitacija „jača“, npr. na površini zemlje u odnosu na iznad atmosfere (jer je i vrijeme iskrivljeno)
 - da se taj efekt ne uzme u obzir GPS ne bi mogao biti precizniji od ~100 metara!
- gravitacija utječe i na svjetlost (jer se kreće po prostor-vremenu koji je zakrivljen!) → efekt gravitacijske leće (gravitational lensing - Eddington 1919.)
- male, ali mjerljive korekcije na Newtonovu gravitaciju...
 - npr. precesija Merkurovog perihelija (prva potvrda teorije)
- gravitacijski valovi (slično sve kao i u elektromagnetizmu)
 - tijela dok se neinercijalno gibaju (npr. kruže) zrače gravitacijske valove i tako gube energiju...
 - POTPUNO zanemarivo OSM za najteže objekte kada su jako blizu i kreću se jako brzo (2 neutronske zvijezde i/ili crne rupe)
 - potvrđeno (detektirani) 2015. (LIGO)
 - GRAVITACIJSKA ASTRONOMIJA! (LIGO, VIRGO, ...)

Opća teorija relativnosti nam je dovoljno dobra sve dok je iznos gravitacijske sile između pojedinih čestica puno manji od ostalih (kvantnih) sila ...

CRNA RUPA je tijelo čija je gravitacijska sila na nekoj udaljenosti od površine tijela toliko jaka da bi bilo što unutar te udaljenosti trebalo imati brzinu veću od brzine svjetlosti kako bi izašlo van (a to je nemoguće).

Ta udaljenost se zove HORIZONT crne rupe, sama crna rupa (tijelo, masa) je negdje unutar horizonta, ali nemoguće je išta saznati (eksperimentalno) o tome što je „iza horizonta“ (bar se tako čini ...)

Ta situacija se može dogoditi samo kada mase/materije ima toliko da gravitacijska sila/pritisak nadjača sve ostale poznate sile ... Znamo da se to može dogoditi (jer vidimo crne rupe u svemiru), ali da bi mogli razumjeti kako se to dogodi i što je „iza horizonta“ treba nam teorija kvantne gravitacije ! (koju bi trebali potvrditi na neki drugi način, jer iza horizonta ne možemo „vidjeti“)

NASTANAK I POVIJEST SVEMIRA

↳ standardni kozmološki model: FLRW metrika ($g_{\mu\nu}$)

→ rješenje Einsteinove jednačbe uz neke (razumne, ali ne nužno točne) pretpostavke i koje je u skladu s trenutno najboljim podacima o svemiru koje imamo (iako ona nisu sva baš najpreciznija i ostavljaju prostor za alternativne analize, interpretacije i teorije)

→ ako se taj model „odvrti“ nazad u vremenu dobije se SINGULARITET (nefizička i neobjašnjiva „točka“ beskonačne energije) prije $13.787 \cdot 10^9 \pm 21 \cdot 10^6$ godina koja se od onda (brže ili sporije) širi → BIG BANG !

→ iza BIG BANGA podjela na 4 faze povijesti svemira:

1) JAKO RANI SVEMIR ($t \lesssim 10^{-12}$ s, $T > 10^{15}$ K, $r < 1$ AU)

(nastanak/razdvajanje sila u oblik u kojem su danas)

2) RANI SVEMIR ($t \lesssim 370\,000$ god, $T > 4000$ K, $r < 50 \cdot 10^6$ ly)

(nastajanje neutralnih primordijalnih atoma - H, He)

3) TAMNO DOBA I PRVE STRUKTURE ($t \lesssim 10^9$ god, $T > 20$ K)

(nastajanje prvih zvijezda, crnih rupa i galaksija...)

4) SVEMIR KAKAV JE DANAS (više-manje isti)

→ JAKO RANI SVEMIR ($0 < t < 10^{-12} \text{ s}$)

1) Svemir je IZRAZITO vruć i gust, sile nisu kakve su danas...? ($t < 10^{-36} \text{ s}$)

→ TOE (kvantna gravitacija), GUT, ... ukratko - nemamo pojma

2) INFLACIJA? - svemir se JAKO naglo širi (10^{26} puta u
 $\sim 10^{-35} \text{ s}$) i hladi (s 10^{27} K na 10^{22} K)

→ nepotvrđena hipoteza, puno različitih mogućih vrsta i načina inflacije... ukratko - nismo sigurni

→ objašnjava „primordijalnu nehomogenost“ svemira koja je izvor svih kasnijih struktura (zvijezda, galaksija, ...) na način da su se naglo „napuhale“ neke minijaturne nehomogenosti (tzv. kvantne fluktuacije)

3) Spontani lom elektroslabe simetrije ($t \lesssim 10^{-12} \text{ s}$, $T \gtrsim 10^{15} \text{ K}$)

→ Higgsovo polje dobiva vrijednost $\neq 0$ svugdje, čestice dobivaju svoju fundamentalnu masu, EM i slaba sila se razdvajaju i postaju kakve su danas...

→ RANI SVEMIR ($10^{-12} \text{ s} < t \lesssim 370\,000 \text{ god}$)

1) kvark-gluon plazma ($t < 10^{-5} \text{ s}, T > 10^{12} \text{ K}$)

→ "juha" nepovezanih kvarkova ("prevruće" i za jaku silu)

2) kvarkovi se vežu u hadrone ($t < 1 \text{ s}, T > 10^{10} \text{ K}$)

→ na kraju preostaju samo protoni i neutroni (6 puta više protona jer su stabilniji, jer su lakši)

3) primordijalna nukleosinteza ($t < 20 \text{ min}, T > 10^7 \text{ K}$)

→ nastaju jezgre vodika (~75%), helija-4 (~25%) i deuterija, helija-3 i litija-7 (u tragovima)

→ elektroni postaju stabilni tj. trajni (prestanak velike količine spontane produkcije parova i anihilacije)

4) svemir je vruća, neprozirna plazma (mješavina pozitivnih jezgri i iona, negativnih elektrona i fotona)

5) REKOMBINACIJA ($18\,000 \lesssim t \lesssim 370\,000 \text{ god}, T \approx 4000 \text{ K}$)

→ svemir postaje dovoljno hladan (T ispod E ionizacije) da se elektroni vežu za jezgre u neutralne atome !

→ nema više plazme, svemir postaje "proziran", fotoni postaju "slobodni" → nastaje CMB zračenje...

CMB (Cosmic Microwave Background Radiation)

- EM zračenje koje je nastalo ~istovremeno u svim točkama svemira tijekom perioda rekombinacije i krenulo se širiti u svim smjerovima jednako (*izotropno*)
- ono je TERMALNO zračenje (kao od toplog tijela)
- svemir kao skoro savršeno „crno tijelo“ !
 - u vrijeme rekombinacije na $\sim 4000\text{ K}$ (cijeli svemir narančasto-žut, malo „tamniji“ od Sunca sada)
 - danas $\sim 2.7\text{ K}$ jer se ohladio širenjem (pa se i valna dužina CMB-a „rastegnula“ do mikrovalnog)
- minijatura odstupanja od savršene homogenosti – odraz „primordijalne nehomogenosti“ raspodijele energije / materije, koja je nastala inflacijom i izvor je svih kasnijih struktura u svemiru (zvijezda, galaksija, ...)
- danas kada „pogledamo“ u „nebo“ (svemir) „vidimo“ CMB koji je nastao u doba rekombinacije u dijelu svemira koji je (danas) ~ 13.8 mlrd. svj. god. daleko od nas...
(zanimljiva priča o otkriću – Penzias & Wilson, Nobelova 1978.)
- konceptualna zanimljivost: CMB kao „preferirani“ ref. sustav ?!

→ TAMNO DOBA I PRVE STRUKTURE ($370000 \text{ god.} < t \lesssim 10^3 \text{ god.}$)

→ nakon rekombinacije cijeli svemir je bio poprilično homogeni, i relativno rijetki ($\sim 10^{-17} \text{ atm} \approx 10^{-12} \text{ Pa}$) i topli plin vodika i helija...

→ djelovanjem gravitacije atomi su se približavali i skupljali u kuglaste strukture (maglice)... Nakon dovoljno vremena gustoća i tlak u središtu tih kugli plina postali su dovoljno veliki da se počela odvijati FUSIJA...

⇒ PRVE ZVIJEZDE ! (nismo ih još vidjeli, predaleko su)

→ gravitacija među atomima u plinu JAKO je slaba, zato je vrijeme do pojave prvih zvijezda i galaksija tako dugo (~ 500 milijuna godina)... Od rekombinacije do tada svemir nije stvarao novu svjetlost/fotone, postojao je samo CMB...

⇒ TAMNO DOBA SVEMIRA

→ prve zvijezde su se (gravitacijski) povezale u prve galaksije... Zvijezde su „umirale“ u eksplozijama, stvarajući i šireći po svemiru teže elemente... Galaksije su se sudarale, razbijale, nastajale nove...

ŽIVOTNI CIKLUS I VRSTE ZVJEZDA

Zvjezde su oni astronomski objekti u/nu kojima se događa fuzija lakših elemenata u teže...

→ Postoji puno vrsta i prolaze kroz različite faze koje traju različito dugo i u kojima se odvijaju različiti fuzijski procesi/reakcije (npr. proton-proton, CNO, ...)...

Detalji ovise uglavnom o početnoj/trenutnoj masi i sastavu (vidi npr. Hertzsprung-Russell dijagram).

U pravilu što je veća masa to kraće „traju“ (brže „gore“).

Konačni stadiji:

1) BIJELI PATULJAK → Crni patuljak (kad se ohladi) [+ maglica]

↳ zvjezde početne mase $\sim 0.8 - 8 M_s$ (masa Sunca)

→ electron-degenerate matter ($\sim$ milijun puta gušće od normalne tvari)

2) SUPERNOVA (kada bi masa bijelog patuljka bila ili postala $> 1.4 M_s$)

↳ velika eksplozija u kojoj nastaju elementi teži od Fe

Chandrasekhar
limit

koji se razlete po svemiru ... Ostatci:

1) ništa, tj. samo maglica (raspršeni materijal...)

2) NEUTRONSKA ZVJEZDA/PULSAR ($1.4 M_s \leq m \leq 2 M_s$) [+ maglica]

→ neutron-degenerate matter ($\sim 10^8$ puta gušće od bijelog patuljka)

3) CRNA RUPA [+ maglica]

→ SVEMIR KAKAV JE DANAS ($t > 10^9$ god.)

→ iz maglica su nastajale (i nastaju) nove zvijezde (i zvijezdani sustavi) s većim udjelom elemenata težih od helija (tzv. metalicitet) i međuzvijezdane prašine...

⇒ zvijezde s kamenitim i plinovitim planetima oko sebe...

Trenutno stanje vidljivog svemira:

- promjer $d \sim 100$ mlrd. svj. god. ($\sim 10^{27}$ m)

- masa $m > 10^{53}$ kg ($N_{\text{atoma}} \sim 10^{80}$)

- oblik: ravan? (utvrđeno do na $\pm 0.4\%$)

- GALAKSIJE: broj - min 100 mlrd ($\sim 10^{11} - 10^{12}$) !

→ različite veličine i oblici (kugle, diskovi, spirale...)

↳ nije nam jasno kako zadržavaju oblik...

⇒ TAMNA TVAR ! ?

→ „aktivna“ središta - KVAZARI (supermasivne crne rupe)

→ „naša“ galaksija (Mliječna staza - Milky Way)

↳ relativno velika ($\sim 100\,000$ svj. god.)

↳ aktivno središte $\sim 4 \cdot 10^6 M_{\odot}$

↳ broj zvijezdi: min 100 mlrd ($\sim 10^{11} - 10^{12}$)

UKUPNI BROJ ZVIJEZDI U SVEMIRU: $\sim 10^{22} - 10^{24}$ (~ 1 mol !)

ŽIVOT U SVEMIRU?

→ Zvijezde istog/sličnog tipa kao Sunce (Sun-like) u našoj galaksiji: $\sim 10\%$ ukupnog broja

→ Od njih one koje imaju kameniti planet u tzv. nastanjivoj zoni (habitable / Goldilocks zone): $\sim 20\%$ (procjena)

[$\hookrightarrow$ zona oko zvijezde u kojoj bi planet mogao imati tekuću vodu na površini; engl. Goldilocks = zlatokasa]

$\Rightarrow$ min 10^{20} zvijezdi s „potencijalom“ za planetom poput Zemlje, odnosno s potencijalom za „život“ ... !

Procjena broja civilizacija/vrsta u svemiru dovoljno inteligentnih da bi mogli s nama komunicirati ... DRAKEOVA JEDNADŽBA !

[Procjene imaju JAKO velik raspon i podložne su svakakvim argumentima i pristranostima, ali razuman sredina je 10-100 u našoj galaksiji !]

→ Kako to da onda još nismo stupili u kontakt s njima, tj. oni s nama ?? ... FERMIEV „PARADOKS“ !

Istražujte dalje sami ... The truth is out there ;)

NASVEĆA OTVORENA PITANJA I PERSPEKTIVE (moj izbor...)

1) Asimetrija količine materije i antimaterije!

→ u našim teorijama je svejedno, zašto onda je svemir od materije, a ne od antimaterije??

2) Oblik i veličina svemira!

→ je li ravan i beskonačan ili zakrivljen i konačan?

→ u „čemu“ se „Big Bang“ dogodio (i imali to pitanje smisla)?

→ je li fundamentalno izotropan („isti“ u svim smjerovima, statistički i na najvećim skalama)?

3) Tamna energija / kozmološka konstanta (Λ)!

→ Je li uopće potrebna? (Ubrzava li se širenje svemira??)

→ Ako je: što je, odakle dolazi i koliko je ima?

[Računi iz QFT trenutno puno redova veličine VIŠE od opservacija...]

4) Tamna tvar! (26% energije svemira?!) (▼ one kažu ~68% energije svemira)

→ Postoji li uopće, je li potrebna??

→ Ako je: što je, kako ju dodati u standardni model??

→ Ako nije: što je prava teorija gravitacije?? (tzv. MOND)

5) Kvantna gravitacija i priroda crnih rupa!

6) Masa i priroda neutrina!

EUGEN ROŽIĆ, prof.