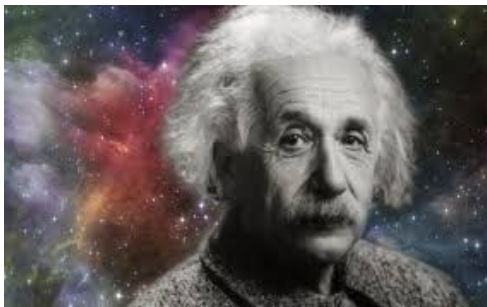


KVANTNA GRAVITACIJA

VOJA RADOVANOVIĆ

FIZIČKI FAKULTET, UNIVERZITET U BEOGRADU

JUNE 27, 2015



MATERIJA DEFORMIŠE PROSTOR-VREME. PROSTOR-VREME JE OPISANO METRIKOM

$$ds^2 = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu .$$

$g_{\mu\nu}(x)$ JE METRIKA

AJNŠTAJNOVE JEDNAČINE

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R + \frac{\Lambda}{c^2}g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu} \quad (1)$$

$R_{\mu\nu}$, R - RIČIJEV TENZOR, SKALARNA KRIVINA

G -ŃJUTNOVA KONSTANTA

$T_{\mu\nu}$ TENZOR ENERGIJE IMPULSA

Λ JE KOSMOLOŠKA KONSTANTA.

OBLIK OVE JEDNAČINE JE:

GEOMETRIJA = MATERIJA

JOHN WHEELER: 'MATERIJA KAŽE PROSTOR-VREMENU KAKO DA SE ZAKRIVI, A PROSTOR-VREME MATERIJI KAKO DA SE KREĆE.

EKSPERIMENTALNO

$$\frac{\Lambda}{8\pi G} = 10^{-12} \text{eV}^4$$

TEORIJSKI (KTP)=ENERGIJA VAKUUMA

$$10^{112} \text{eV}^4$$

RAZLIKA 120 REDOVA VELIČINE.



ŠVARCŠILDOVA CRNA RUPA (1916)

$$ds^2 = -\left(1 - \frac{2Gm}{rc^2}\right) dt^2 + \frac{1}{1 - \frac{2Gm}{rc^2}} dr^2 + r^2 d\Omega$$

DVE VRSTE SINGULARNOSTI: KOORDINATNA I PRAVA.

1. KOORDINATNA SINGULARNOST $r_h = 2mG/c^2$

- HORIZONT DOGADJAJA JE SFERA POLUPREČNIKA $r_h = 2mG/c^2$ 'TAČKA BEZ POVRATKA'. ČESTICE NE MOGU DA NAPUSTE HORIZONT DOGADJAJA. ZAROBLJENE SU U CRNOJ RUPI.

MASE SUNCA - m_s

HORIZONT DOGADJAJA JE

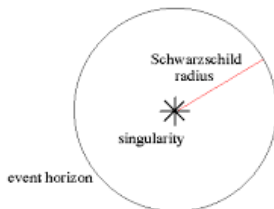
$$r_h = \frac{2Gm}{c^2} = 3\frac{m}{m_s}\text{km} .$$

ZA SUNCE $r_h = 3\text{km}$, A ZA ZEMLJU $r_h = 1\text{cm}$.

- HORIZONT DOGADJAJA JE KOORDINATNI SINGULARITET. SLOBODNO PADAJUĆI POSMATRAČ ZA KONAČNO VREME (PO SVOM SATU) PADA U CRNU RUPU. ZA UDALJENOG POSMATRAČA ČESTICI TREBA BESKONAČNO PUNO VREMENA DA DOSTIGNE HORIZONT DOGADJAJA.
- 2. TAČKA $r = 0$ JE PRAVA SINGULARNOST

$$R^{\mu\nu\rho\sigma}R_{\mu\nu\rho\sigma} = \frac{48G^2m^2}{r^6}$$

Black Hole Interior

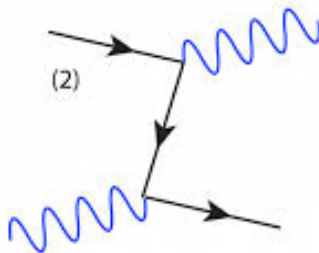
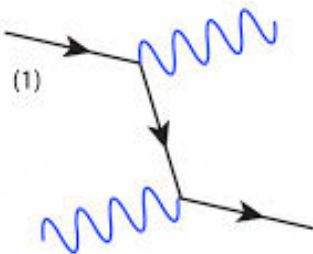


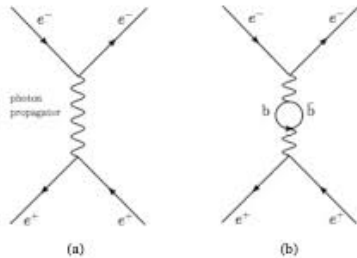
KLASIČNA ELEKTRODINAMIKA: ZRAČENJE ANTENE, DISPERZIJA SVETLOSTI,...

KVANTNA ELEKTRODINAMIKA: RASEJANJE FOTONA NA ELEKTRONU,

$$p_f = \frac{\hbar\omega}{c} \sim p_e = mc$$

FAJNMANOVI DIJAGRAMI=SLIKOVITI PRIKAZ MATEMATIČKE FORMULE ZA AMPLITUDU PRELAZA.





KVANTNA GRAVITACIJA JE NERENORMALIZABILNA.

PROBLEMI OTR

1. MALA RASTOJANJA (VELIKE ENERGIJE): SINGULARNOST. OČEKUJEMO DA IH KVANTNA TEORIJA OTKLONI.

NPR. KVANTNA ELEKTRODINAMIKA UBLAŽAVA DIVERGENCIJE KLASIČNE ELEKTRODINAMIKE

2. VELIKA RASTOJANJA: PROBLEM TAMNE MATERIJE I ENERGIJE. GRAVITACIJA JE NEKOMPLETNA TEORIJA.

PLANKOVA SKALA:

$$l_p = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^3}} = 1,62 \cdot 10^{-33} \text{cm},$$

$$m_p = \sqrt{\frac{\hbar c}{G}} = 2.18 \cdot 10^{-5} \text{g},$$

$$t_p = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^5}} = 5.39 \cdot 10^{-44} \text{s},$$

$$E_p = \sqrt{\frac{\hbar c^5}{G}} = 1.22 \cdot 10^{19} \text{GeV}.$$

HOKINGOVO ZRAČENJE

SKALARNO (KVANTNO) POLJE U KRIVOM (KLASIČNOM) PROSTORU:

$$\phi(x) = \int d^3k \left(a(k) u_k(x) + a^\dagger(k) u_k^*(x) \right),$$

$u_k(x)$ ORTONORMIRANI MODOVI, $a(k)$ I $a^\dagger(k)$ SU ANIHILACIONI I KREACIONI OPERATORI:

$$[a(k), a^\dagger(q)] = \delta_{kq}, \quad (2)$$

$$[a(k), a(q)] = 0, \quad [a^\dagger(k), a^\dagger(q)] = 0. \quad (3)$$

VAKUUM, $|0, x\rangle$ JE DEFINISAN SA $a(k) |0, x\rangle = 0$.

U y -KOORDINATAMA

$$\phi(y) = \int d^3k \left(b_k v_k(y) + b^\dagger(k) v_k^*(y) \right).$$

KOMUTACIONE RELACIJE:

$$[b(k), b^\dagger(q)] = \delta_{kq}, \quad (4)$$

$$[b(k), b(q)] = 0, \quad [b^\dagger(k), b^\dagger(q)] = 0. \quad (5)$$

NOVI VAKUUM $|0, y\rangle$. ALI, $|0, x\rangle \neq |0, y\rangle$.

$$b(k) = \int d^3q \left(\alpha_{kq} a(q) + \beta_{kq} a^\dagger(q) \right),$$

GDE SU α_{kq} I β_{kq} BOGOLJUBOVLJEVI KOEFICIJENTI. BROJ $a(k)$ ČESTICA U STANJU $|0, x\rangle$ JE

$$\langle 0, x | a^\dagger(k) a(k) | 0, x \rangle = 0$$

ALI, BROJ $b(k)$ ČESTICA U OVOM STANJU JE

$$\langle 0, x | b^\dagger(k) b(k) | 0, x \rangle = \frac{1}{e^{\frac{\hbar\omega}{kT}} - 1}.$$

CRNA RUPA ZRAČI (ISPARAVA) KAO CRNO TELO. ZRAČENJE JE TERMALNO:

$$T = \frac{1}{8\pi m} = 6 \cdot 10^{-8} \frac{m_s}{m} \text{K}.$$

STANDARDNI MODEL:

OPISUJE ELEKTROMAGNETNU, SLABU I JAKU INTERAKCIJU

KVANTNO KONZISTENTAN,

NADJEN JE HIGSOV BOZON, MASE 125GeV

ALI DOSTA OTVORENIH PITANJA: MNOGO PARAMETARA, PROBLEM
HIJERARHIJE (MASENA SKALA NIJE STABILNA NA RADIJATIVNE POPRAVKE)

SUPERSIMETRIJA STABILIZUJE SKALU.

ZAŠTO TRI GENERACIJE LEPTONA I KVARKOVA?

ZAKLJUČAK: SM JE EFEKTIVNA TEORIJA POLJA NA SKALI 1TeV , DAKLE
SVAKAKO NIJE POSLEDNJA REČ TEORIJSKE FIZIKE.

KA KVANTNOJ GRAVITACIJI

ISTORIJSKI: UNIFIKACIJA JE DOBRA IDEJA

DVE PRETPOSTAVKE GR/SM: KONCEPT TAČKASTE ČESTICE I KONCEPT PROSTOR-VREMENA KAO DIFERENCIJALNE MNOGOSTRUKOSTI.

1. TEORIJA SUPERSTRUNA

TAČKASTI OBJEKTI (ČESTICE) SE KREĆU PO ONOJ PUTANJI ZA KOJU DEJSTVO

$$S = mc^2 \int ds$$

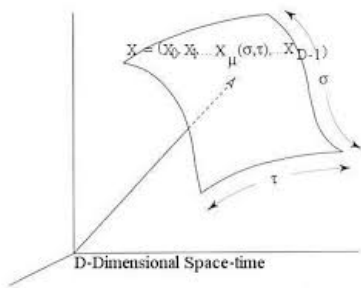
IMA EKSTREMUM. STRUNA JE JEDNODIMENZIONNI OBJEKT DUŽINE l_P . PRI KRETANJU OPISUJU POVRŠ.

$$S = -T \int dA$$

$$S = -\frac{T}{2} \int d^2\sigma \sqrt{-h} h^{\alpha\beta} \partial_\alpha X^\mu \partial_\beta X^\nu \eta_{\mu\nu}$$

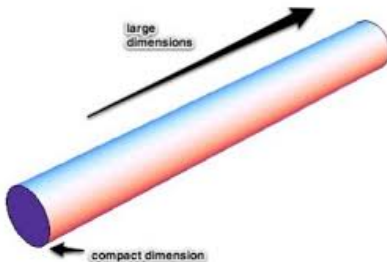
MODOVİ BOZONSKE STRUNE: SKALAR, VEKTOR, GRAVİTON (SPIN 2), I DRUGI. BOZONSKA STRUNA JE KVANTNO KONZISTENTNA U 26 DIMENZIJA, ALI SADRŽI TAHION. SUPERSIMETRIJA POPRAVLJA SITUACIJU I TAKO DOLAZIMO DO SUPERSTRUNE. TEORIJA SUPERSTRUNA JE KONZISTENTNA U $D = 10$ DIMENZIJA.

PROBLEM TEORIJE STRUNA: REPRODUKCIJA NISKOENERGETSKE FIZIKE.



2. EKSTRA DIMENZIJE

A) KALUCA, KLAJN (1919, 1926)-UJEDINIJEVANJE GRAVITACIJE I ELEKTROMAGNETIZMA: PROSTOR JE PROIZVOD $4d \times S^1$. EKSTRA PROSTOR JE KRUG MALOG RADIJUSA.



B) ARKANI, DIMOPOULS, DVALI

n -BROJ EKSTRA PROSTORNIH DIMENZIJA

$G_* \sim \frac{1}{M_*^{n+2}}$ NJUTNOVA KONSTANTA U $d = 4 + n$ DIMENZIJA

GRAVITACIJA PROPAGIRA U SVIM DIMENZIJAMA, A OSTALE INTERAKCIJE
ŽIVE U 4 DIMENZIJE. DEJSTVO:

$$S = -\frac{1}{16\pi G_*} \int d^{4+n}x \sqrt{g^{(4+n)}} R^{(4+n)}$$

REDUKCIJA NA 4 DIMENZIJE DAJE

$$G_N = \frac{G_*}{V_n} = \frac{G_*}{(2\pi R)^n} .$$

$M_* = 1 \text{ TeV}$ I $n = 1$ DAJE $R \sim 10^{11} m$

$n = 2$ DAJE $R = 0,2 \text{ mm}$

3. LOOP KVANTNA GRAVITACIJA

AŠTEKAR, PENROUZ, ROVELI, SMOLIN

NA PLANKOVOJ SKALI PROSTOR-VREME IMA DISKRETNU STRUKTURU.
SPINSKE MREŽE.

4. NEKOMUTATIVNA TEORIJA POLJA

$$[x^\mu, y^\nu] = i\theta^{\mu\nu} .$$

ANALIZIRANA JE MODIFIKACIJA AJNŠTAJNOVE TEORIJE NA OVAKVIM
PROSTORIMA.

5. GRAVITACIJA JE EFEKTIVNA TERMODINAMIČKA TEORIJA KOJA NE
ZAHTEVA DIREKTNU KVANTIZACIJU. POSTOJI, NEKA MIKROSKOPSKA
TEORIJA!

ZAKLJUČAK:

I QFT I GR SU NEKOMPLETNE TEORIJE. NEŠTO DRAMATIČNO MORA DA SE URADI SA NAŠIM KONCEPTIMA ČESTICE I PROSTOR-VREMENA.

POSTAVLJAJUĆI PITANJA IMAMO ŠANSE DA NADJEMO ODGOVORE.

OSLANJAMO SE NA INTUICIJU, ISKUSTVO, SIMETRIJU, ..

PUNO IZAZOVA!