

Evolving Dimensions

Dejan Stojkovic
SUNY at Buffalo



INSTITUT ZA FIZIKU
JUL 19, 2011
BEOGRAD



Bazirano na:

Detecting Vanishing Dimensions Via Primordial Gravitational Wave Astronomy

J. Mureika, D. Stojkovic,

Phys. Rev. Lett. **106**, 101101 (2011).

Searching for the Layered Structure of Space at the LHC.

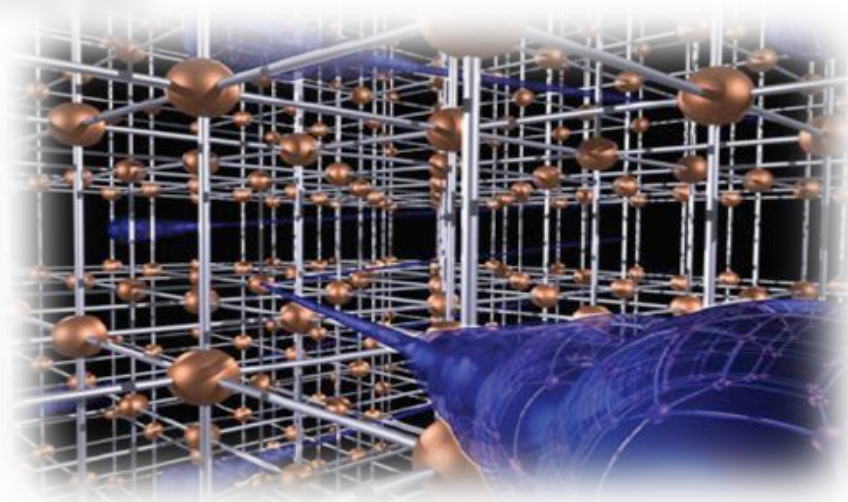
L. Anchordoqui, D. Dai, H. Goldberg, G. Landsberg, G. Shaughnessy, D. Stojkovic, T. Weiler,

Phys. Rev. D **83**, 114046 (2011)

Vanishing Dimensions and Planar Events at the LHC.

L. Anchordoqui, D. Dai, M. Fairbairn, G. Landsberg, D. Stojkovic,

e-Print: **arXiv:1003.5914** [hep-ph]





Motivacija

- **Ozbiljni problemi u modernoj fizici**
- *Hierarhija u SM, kosmoloska konstanta, tamna materija, pocetni uslovi u kosmologiji, gubitak informacije u crnim rupama, kvantna gravitacija...*



Mnogo predlozenih modela, jos uvek daleko od resenja

Vrlo je tesko zamisliti ikakav dalji progres ako prvo ne resimo ove probleme!

Outline

• Uvod

- Dimenzionalnost prostor-vremena
- Ekstra dimenzije

• Evoluirajuće dimenzije:

Nas univerzum je nize-dim na visokim energijama a vise-dim na nizim!

- Motivacija za ovaj predlog
- Potencijalna exp. podrška već postoji?

Potencijalni problemi

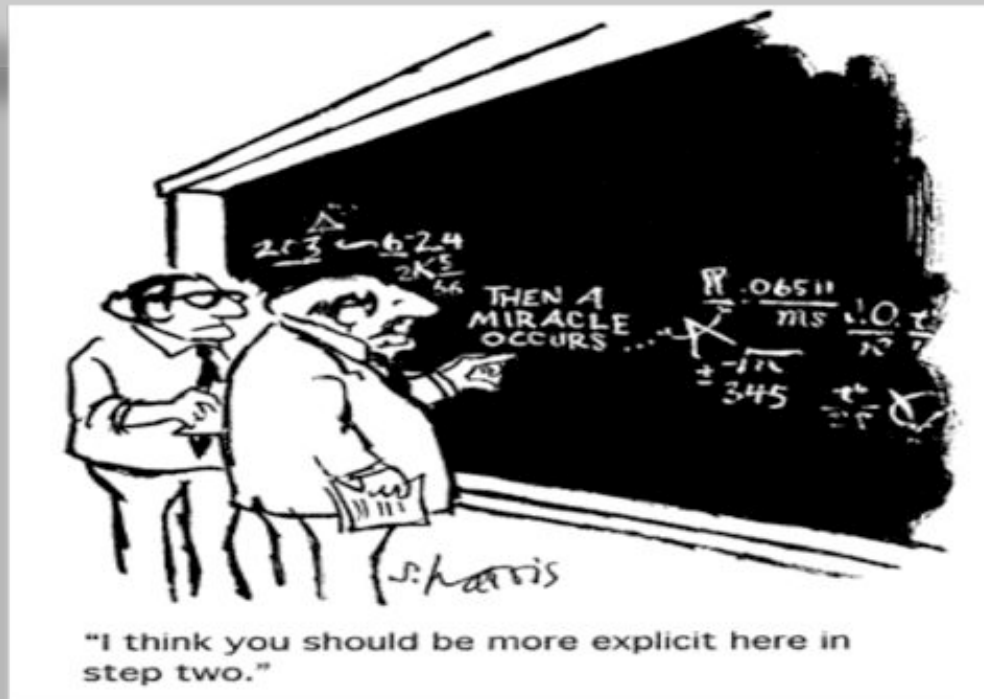
Eksperimentalni signali





Standardna filozofija

- Napravimo vrlo komplikovan model
- ↓
- Uvedemo nove dimenzije, nove cestice, nove strukture...
- ↓
- I nadamo se da ce problemi cudesno nestati



Ekstra Dimenzije

- Nas svet je manifestno (3+1)-dimenzionalni na vecim rastojanjima
- Kaluza (1921) i Klein (1926) uvode petu dimenziju da bi ujedinili gravitaciju sa elektromagnetizmom



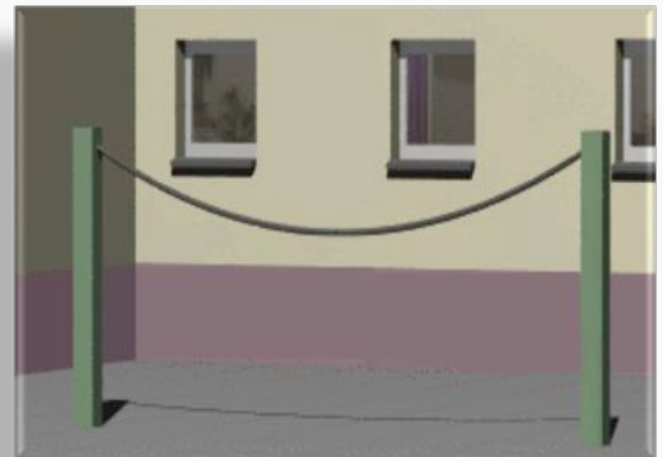
Kaluza



Klein

- Peta dimenzija je u obliku kruga
- Radijus kruga je vrlo mali:

$$R = L_{Pl} = 10^{-33} \text{ cm}$$



Univerzum sa ekstra dimenzijama

- Da bi ujedinili sve interakcije potrebno nam je vise od 5 dimenzija

KK modeli → najmanje 11 dimenzija

Teorija Struna → 10 ili 11 dimenzija



- Interesantni vise dimenzionalni objekti mogu da postoje:
vise dimenzionalne crne rupe, topoloski defekti (strune, membrane...)
- Progres prema unifikaciji interakcija je napravljen
- Mnogi zaostali problemi



Pre 13 godina
ekstra dimenzije su reinkarnirane po drugi put

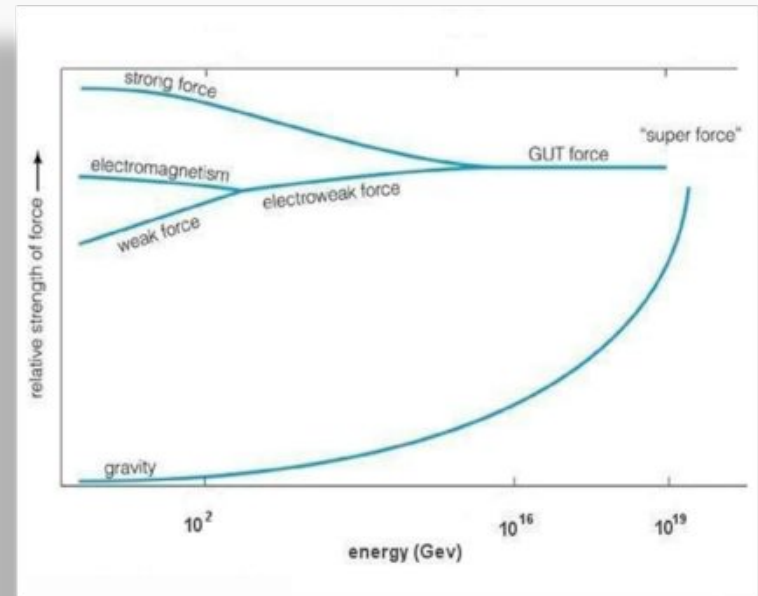
Problem hierarhije energetske skale:

• Planck-ova skala: $M_{Pl} = 10^{19} \text{ GeV}$

• Electroweak skala $M_{EW} = 200 \text{ GeV}$

• "Grand Desert" između skala

• $G_{Newton} = \frac{1}{M_{Pl}^2}$ slaba gravitacija



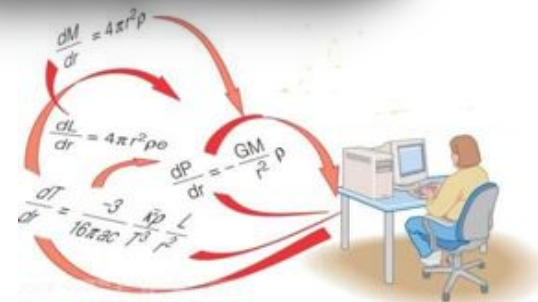
• Gravitacija je daleko najslabija interakcija u prirodi

• Za protone, gravitacija je 10^{36} puta slabija nego elektromagnetizam

$$F_{EM} = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \quad F_G = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

Problem hierarhije u SM

Lagranžijan Standardnog Modela

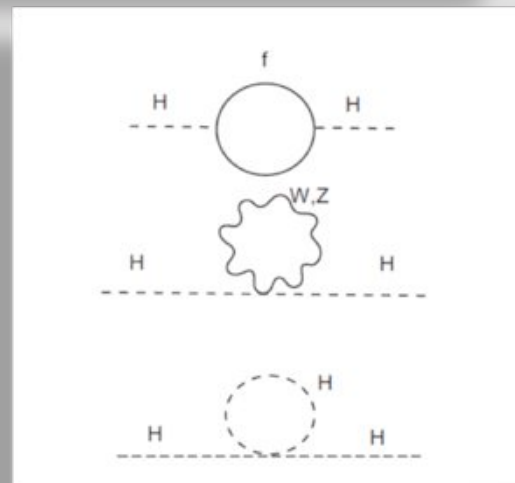


$$L_H = D_\mu \phi^\dagger D^\mu \phi - \mu^2 \phi^\dagger \phi + \frac{\lambda}{2} (\phi^\dagger \phi)^2 - \sum_f g_f \phi \bar{\psi}_f \psi_f$$

• Radijativne korekcije Higgs-ove mase:

$$\Delta m_h^2 \approx \Lambda^2 \frac{3(2m_W^2 + m_Z^2 + m_h^2 - 4m_t^2)}{32\pi^2 v^2}$$

- Ako je SM validan sve do M_{Pl} značajan fine-tuning mora da postoji (reda velicine 10^{17})

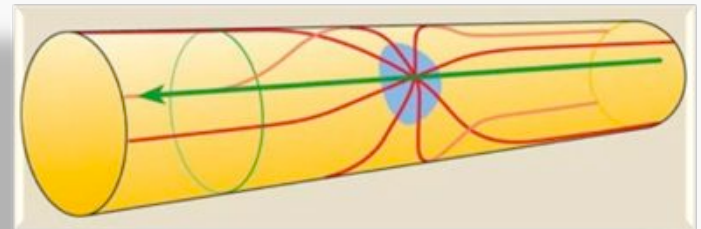


Jaka gravitacija: ADD model

Arkani-Hamed, Dimopoulos and Dvali, Phys. Lett. B 429, 263 (1998)

Antoniadis, Arkani-Hamed, Dimopoulos and Dvali, Phys. Lett. B 436,257 (1998)

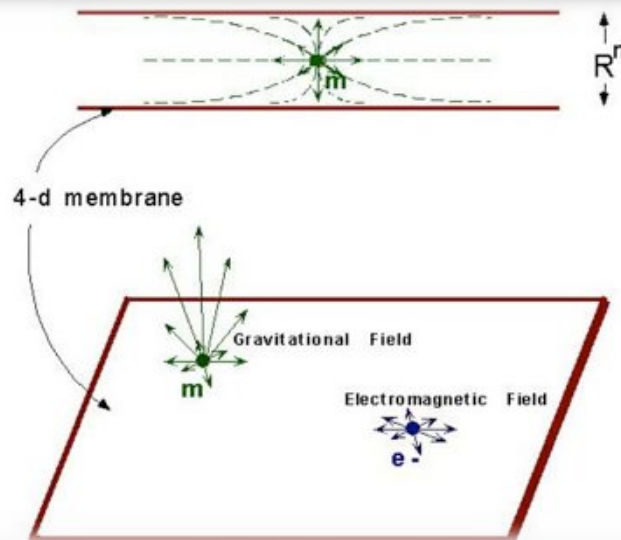
- Prostor u kome živimo se sastoji od:
- $3+n$ space-like dimenzija (bulk)
- n ekstra dimenzija je kompaktifikovano sa radijusom R



- ***Samo gravitoni mogu da propagiraju u svim dimenzijama***
- ***Cestice SM su lokalizovane na 3-dim potprostoru (brane)***

U ovom modelu:

- Gravitacija je jaka kao i elektroslaba interakcija
- Ali je gravitaciona sila razredjena prisustvom ekstra dimenzija



Slaba gravitacija je samo iluzija za posmatraca lokalizovanog na "brane"

Ozbiljni problemi u TeV scale gravitaciji

• Neki fenomeni imaju svoj prirodni habitat u "grand desert-u" koji je eliminisan TeV scale gravitacijom

- stabilnost protona
- masa neutrina
- miksovanje izmedju leptona
- neprihvatljive FCNC

• Jaka gravitacija implicira vrlo brzi raspad protona! $p \rightarrow \pi^0 + e^+$

$$\tau_{proton} = m_{proton}^{-1} \left(\frac{M_{Pl}}{m_{proton}} \right)^4$$



"Og discovered fire, and Thorak invented the wheel. There's nothing left for us."



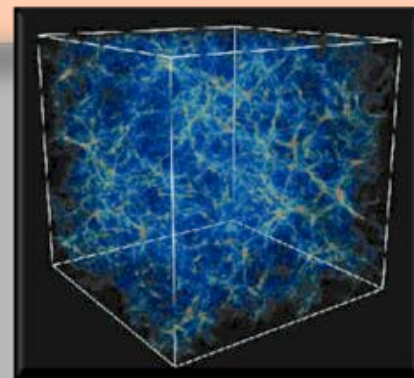
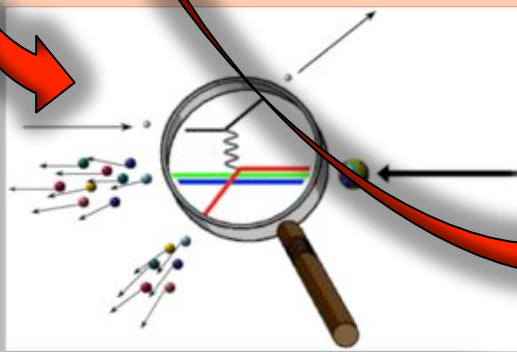
Predlog

▪ Broj dimenzija zavisi od skale koju proučavamo

• Male duzine: ($L < \text{TeV}^{-1}$) prostor je nize-dimenzionalan

Srednje duzine: ($\text{TeV}^{-1} < L < \text{Gpc}$) prostor je 3-dim

Velike duzine: ($L > \text{Gpc}$) prostor je vise-dimenzionalan



Primer

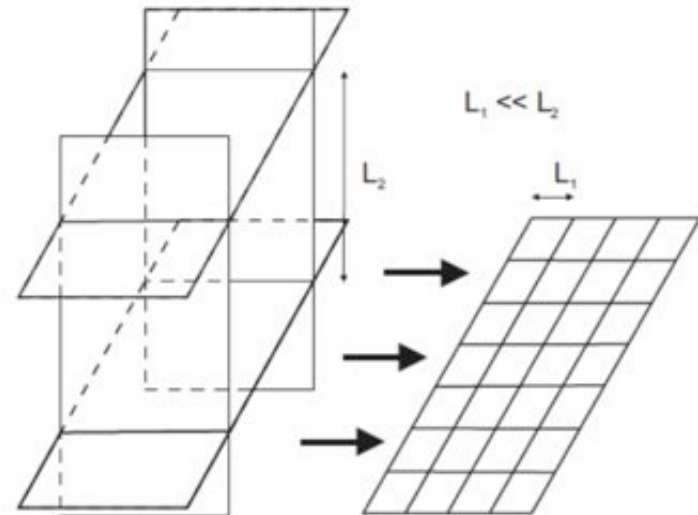
Primer strukture koja je 1d na kratkim skalama dok izgleda efektivno 2d na duzim skalama



Uredjena resetka

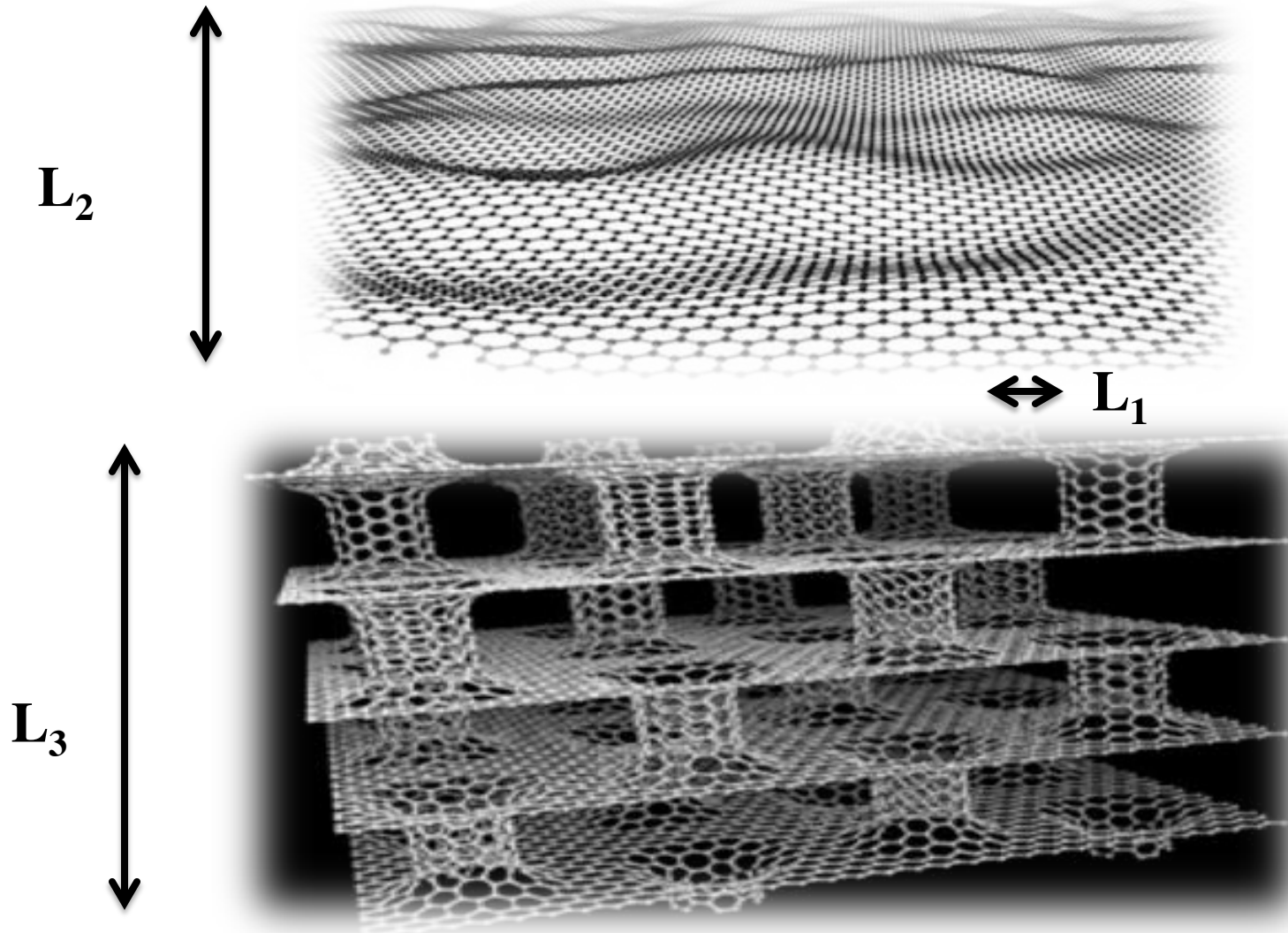
Uredjena resetka. Ova struktura je

- 1d na skalama $0 < L < L_1$,
- 2d na skalama $L_1 < L < L_2$
- 3d na skalama $L_2 < L < L_3$
-



Graphene

Priroda vec gradi slicne strukture

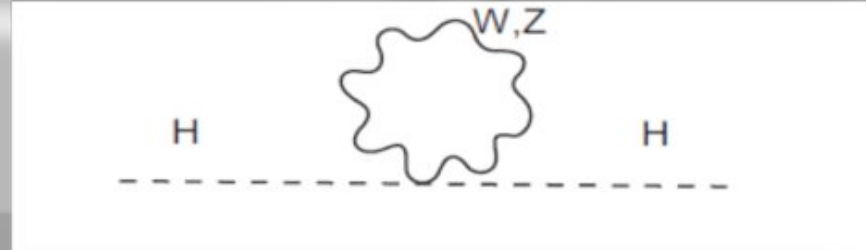


Benefits?

Sta dobijamo sa manje dimenzija na visokim energijama?



The hierarchy problem



- Korekcija Higgsove mase usled virtuelnih gauge bosona:

$$\text{U 3 dim : } \frac{g^2}{4} \int \frac{d^4 k}{(2\pi)^4} \frac{1}{k^2 - m_W^2} \approx \Lambda^2 \frac{g^2}{64\pi^2}$$

$$\text{U 2 dim : } \frac{g^2}{4} \int \frac{d^3 k}{(2\pi)^3} \frac{1}{k^2 - m_W^2} \approx \Lambda \frac{g^2}{8\pi^2}$$

$$\text{U 1 dim : } \frac{g^2}{4} \int \frac{d^2 k}{2\pi} \frac{1}{k^2 - m_W^2} \approx \text{Log} \left(\frac{\Lambda}{m_W} \right) \frac{g^2}{8\pi}$$



The hierarchy problem

Ako se prelaz iz $3d \rightarrow 2d$ desava na 1 TeV
 $2d \rightarrow 1d$ na 10-100 TeV



- **Problem hierarhije nestaje!**
- **Nema potrebe za novom fizikom – samo Standardni Model.**

Sta je sa gravitacijom?

U 2+1 dim sva resenja vakumskih Einstein-ovih jedn. su lokalno ravna

$$R_{\mu\nu\rho\sigma} = \varepsilon_{\mu\nu\alpha} \varepsilon_{\rho\sigma\beta} G^{\alpha\beta}$$

- nema lokalnih gravitacionih stepena slobode
- broj stepena slobode je konacan
- problem ne-renormalizabilnosti nestaje

Nema Crnih Rupa u 2+1 dim!



U 2+1 dim sva resenja vakumskih Einstein-ovih jedn. su lokalno ravna



Nema pravih singulariteta – NEMA CRNIH RUPA



3d crna rupa isparava, postaje 2d, i prestaje biti crna rupa



PARADOKS GUBITKA INFORMACIJE NESTAJE

Gravitacija prestaje biti OTR?

U 1+1 dim

$\int d^2x \sqrt{-g} R = \text{Euler - ova karakteristika manifold - a}$

Sem ako ne dodamo skalarno polje

$\int d^2x \sqrt{-g} [\phi R + V(\phi)]$ – dilaton gravity

Kompletno integrabilna i kvantizabilna

Benefits?

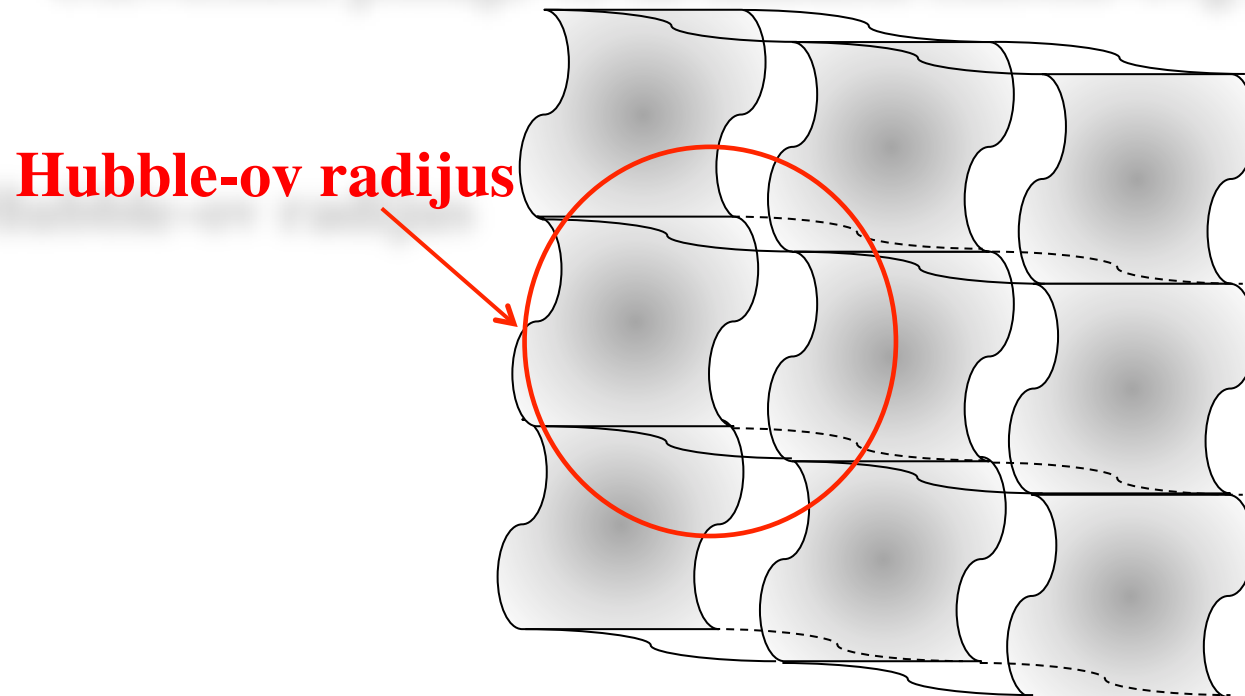
Sta dobijamo sa vise dimenzija na velikim razdaljinama?



Nas Univerzum može biti 4+1 dim na velikim rastojanjima

4d kristalna rešetka

- 3d blokovi efektivno sacinjavaju 4d prostor
- Zvedze i galaksije se nalaze na 3d blokovima
- Univerzum postaje 4d na skalama Hubble-ovg radijusa



Kosmoloska konstanta

Egzaktno rešenje Einstein-ovih jednačina u 4+1 dim

$$ds^2 = dt^2 - e^{2\sqrt{\Lambda/3}t} (dr^2 + r^2 d\Omega^2) - d\psi^2$$

$\Lambda = 3 / \Psi^2$ - efektivna kosmoloska konstanta

Vakuumske jed. $G_{AB} = 0$, za 3d posmatraca na $\psi = \text{const}$, izgledaju

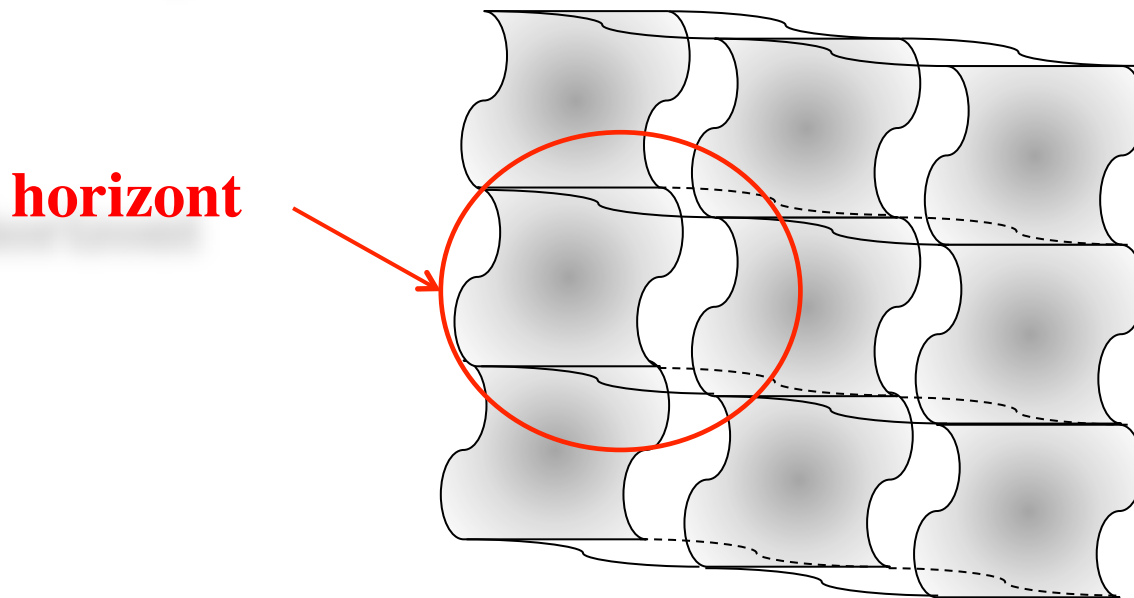
$$G_{\mu\nu} = 8\pi T_{\mu\nu}$$

gde je $T_{\mu\nu}$ indukovana materija sa $p = -\rho$, $\rho = \Lambda/(8\pi G)$

$\rho = (10^{-3} eV)^4$ numericki odgovara $\psi \approx 10^{60} M_{Pl}^{-1} \approx$ Hubble - ov radijus

Ostali problemi na velikim rastojanjima

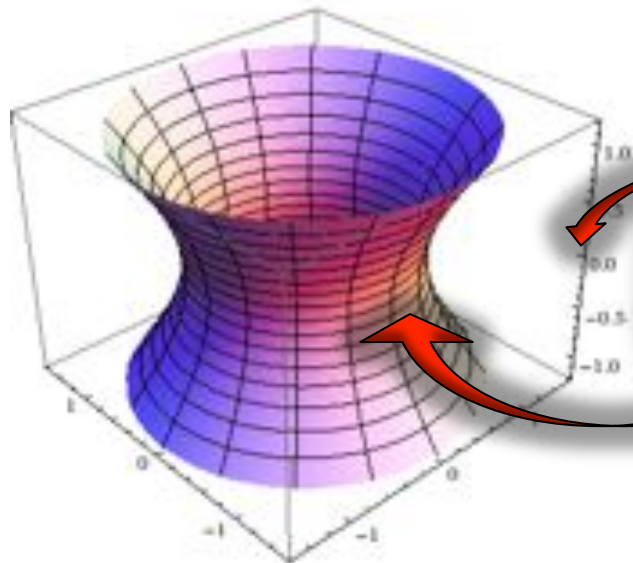
- “Bulk flow”
- “Axes of Evil”
- Smanjen intenzitet CMBR na velikim skalama



Mogu biti posledica eksctitacije 4d resetke sa velikim talasnim duzinama

Kako opisati ovakav background?

$g_{\mu\nu}$ - metrika na vise-dimenzionalnom manifold-u
 γ_{ab} - metrika na sub-manifold-u .



$$\gamma_{ab} = g_{\mu\nu} \partial_a X^\mu \partial_b X^\nu$$

Standardno: γ_{ab} - indukovana, $g_{\mu\nu}$ - fundamentalna

Nova slika: γ_{ab} - fundamentalna, $g_{\mu\nu}$ - indukovana

Kako opisati ovakav background?

I. R. Klebanov and L. Susskind, Nucl.Phys. B 309, 175 (1988)

- ◆ Podelimo strunu na N segmenta
- ◆ Svaki segment nosi nenulti P^+ i P_{\perp}



$$H = \sum_i^N \frac{1}{2P^+(i)} \left\{ \vec{P}_{\perp}^2(i) + [\vec{X}(i+1) - \vec{X}(i)]^2 \right\}$$

- ◆ P^+ uzrokuje rast duzine strune
- ◆ P_{\perp} je izvor spoljasne krivine

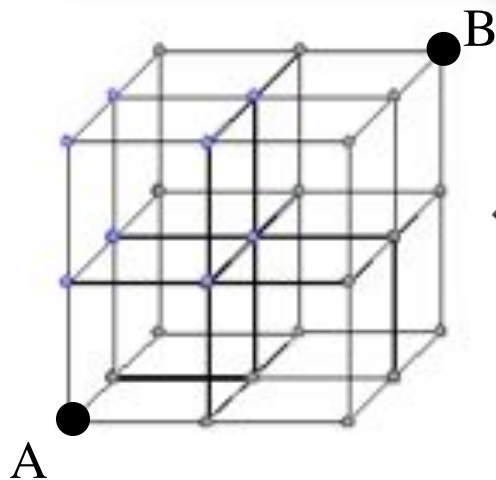
Rezultat

- Evolucija ovakve strune gradi strukturu:

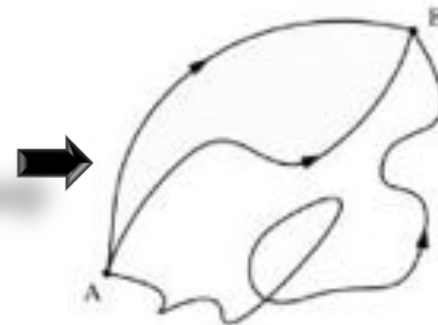


- totalna duzina raste linearno kao N
- radijus indukovanog prostora raste kao $(\text{Log } N)^{1/2}$
- u limitu $N \rightarrow \infty$ struna postaje “space filling”

Kako cestice propagiraju na ovom background-u?



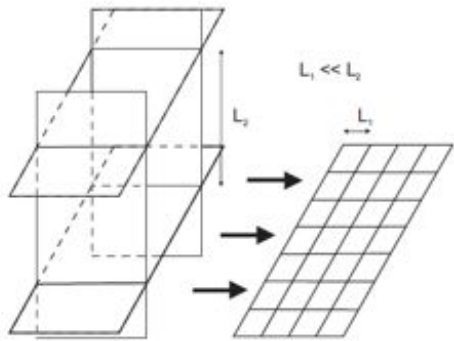
Izmedju svake dve tacke postoji mnogo mogucih puteva



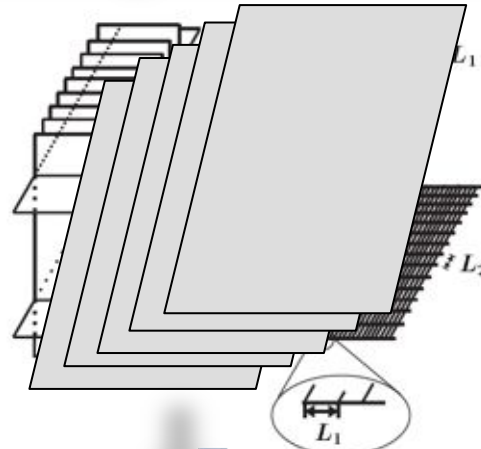
Feynman Path Integral

- Zbog kvantnih fluktuacija cestica sledi nazubljenu trajektoriju
- Klasicna trajektorija i putevi najblizi njoj daju najveći doprinos
- Interferencija mogucih puteva daje klasicnu trajektoriju posle usrednjavanja
- Nas slucaj: geometrija resetke diktira nazubljenost trajektorije

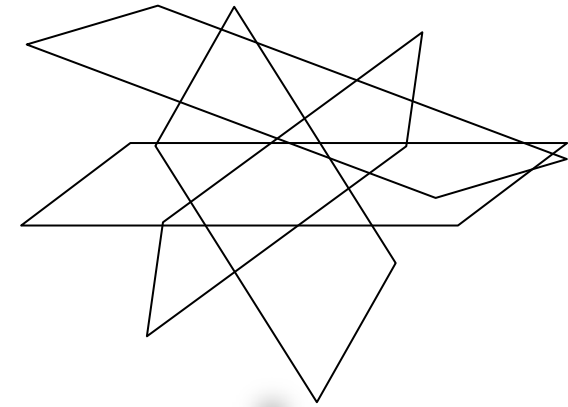
Geometrija resetke



“Prirodna” resetka



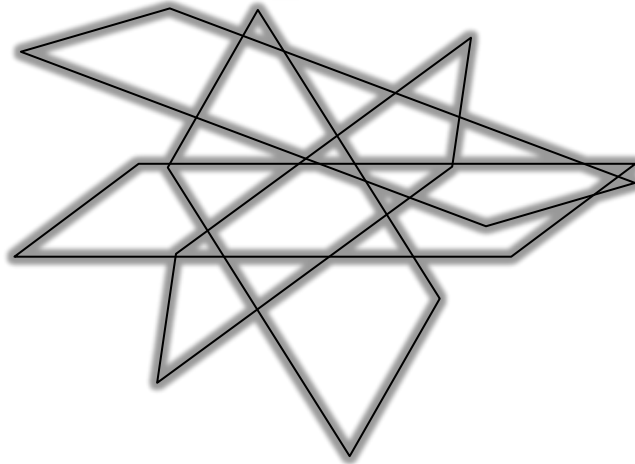
Niz ravni (stack of branes)



Random Lattice

- U svim slucajevima fizika na malim rastojanjima je 2d (1d)
- Ali nacin na koji rekonstruisemo 3d prostor nije isti

Geometrija resetke



Random Lattice



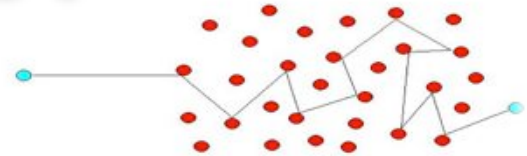
- Izbegava preferencijalni pravac u prostoru
- Izbegava sistematsko narušavanje Lorentz-ove simetrije
- Preferencijalni referentni sistem postoji: “rest frame” resetke
(nije nista više problematičan nego preferencijalni sistem CMB-a)

Narusenje Lorentz-ove simetrije

- Lorentz-ova simetrija nije narusena na velikim rastojanjima
- Ali male fluktuacije tokom puta mogu da imaju merljive efekte na fotone koji dolaze do nas sa kosmoloških rastojanja

Efektivna brzina svetlosti **može** da bude razlicita od “c”

$$c_{eff} = c \left(1 + \xi \frac{E}{E_*} + \eta \frac{E^2}{E_*^2} \right)$$



Dva istovremeno emitovana fotona sa razlikom energije $\Delta E = E_1 - E_2$ stizu do posmatraca sa razlikom u vremenu $\Delta t = t_1 - t_2$

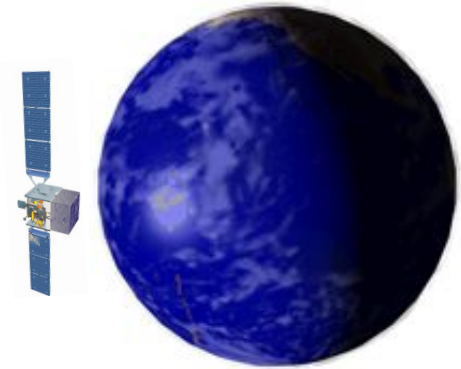
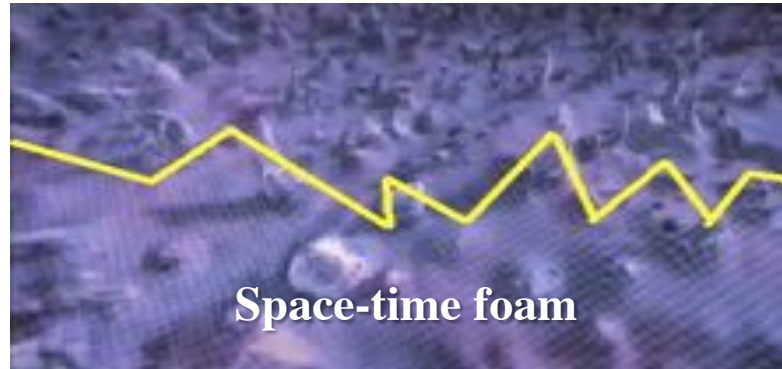
$$\left| \frac{c_{eff}}{c} - 1 \right| \approx \left(\frac{E_\gamma}{E_* c^2} \right)^n \quad n = 1, 2, 3$$

$$\Delta t \approx \left(\frac{\Delta E_\gamma}{E_* c^2} \right)^n \frac{D}{c}$$

Gama zraci i satelit Fermi



GRB



Earth

Fermi je detektovao dva fotona od 31-GeV i 3-GeV koji stizu sa razlikom u vremenu od manje od 1 sec



Cesto interpretirano kao limit $E_* \geq M_{\text{Pl}}$

Fermi-jev rezultat i dimenzije

- **Problemi sa ovom interpretacijom:**
 - i. Detektovan samo jedan dogadjaj
 - ii. Fizika izvora nedovoljno poznata
 - iii. Limit $E_* \geq M_{\text{pl}}$ validan samo za linearne korekcije (LQG)
 - iv. Oba fotona $E_\gamma < \text{TeV} \rightarrow$ nema $c_{\text{eff}}(\Delta E)$
 - v. Velika verovatnoca interakcije gama zraka sa CMB,
tj. produkcija parova ($e^+ e^-$) absorbuje relevantne fotone

Fermi-jev rezultat i uredjena resetka

- **Fundamentalni problem:**
Diskretne strukture ne impliciraju automatsko narusenje Lorentz-ove simetrije

Lorentz-invarijantna diskretna struktura:

Boost-irana slika statisticki nerazluciva od originalne

Regular vs. random lattice

F. Dowker, J. Henson, R. Sorkin, gr-qc/0311055



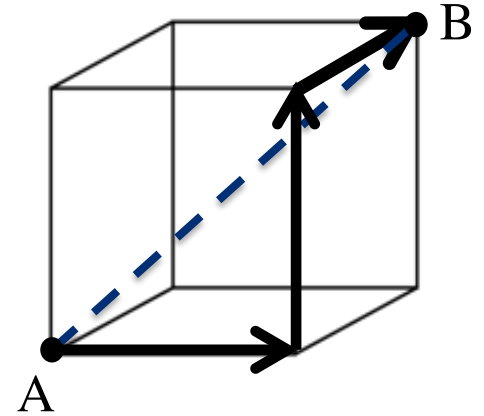
Regular lattice u dva razlicita Lorentz sistema (a) and (b)

(Poison) Randomizacija je krucijalna:

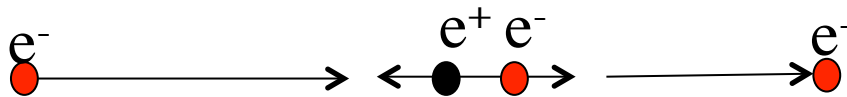
- Ne moze se favorizovati sistem koji je koriscen za razbacivanje tacaka
- Aproksimacija je podjednako dobra u svakom sistemu

Efektivna brzina svetlosti

- Propagacija od A do B brzinom c po pravoj liniji
- Brzina cestice mora biti $c_{\text{eff}} = \sqrt{3} c$ duz strana



Nije problem u Feynman path integral slici



Za kratko vreme (TeV^{-1}) cestica moze ima $v > c$ zbog kvantnih efekata



Diskretne strukture ne moraju da menjanju efektivnu brzinu svetlosti

Narusenje Lorentz-ove simetrije

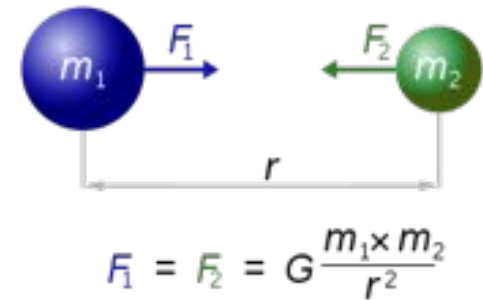
Limit ($E_* \geq M_{Pl}$) verovatno nema fizickog smisla

Mi jednostavno ne razumemo kako cestice interaguju sa strukturom prostor-vremena na fundamentalnom nivou

$M_{Pl} = 10^{19}$ GeV nema znacaja u 2d

$$M_{Pl}^{(3d)} = \sqrt{\frac{c\hbar}{G^{(3d)}}}$$

$$M_{Pl}^{(2d)} = \frac{c^2}{G^{(2d)}}$$



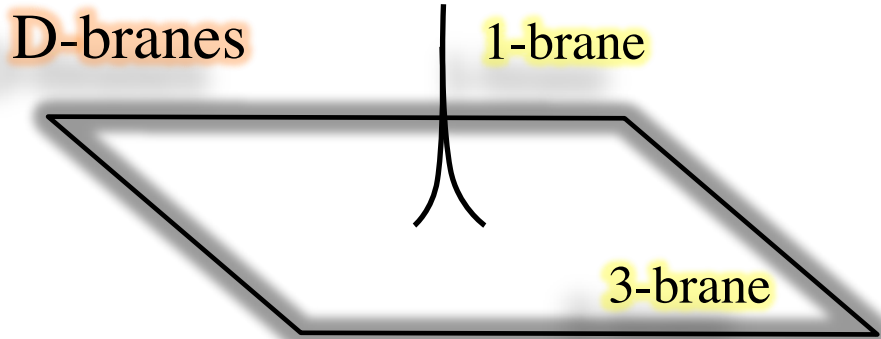
Nema \hbar u izrazu za M_{Pl} in 2d

Nema kvantne gravitacije u 2d? Klasicna gravitacija dovoljna?

Resenja iz teorije struna

C. Callan, J. Maldacena, Nucl.Phys. B513, 198 (1998)

N. Constable, R. Myers, O. Tafjord, Phys.Rev. D61 (2000) 106009

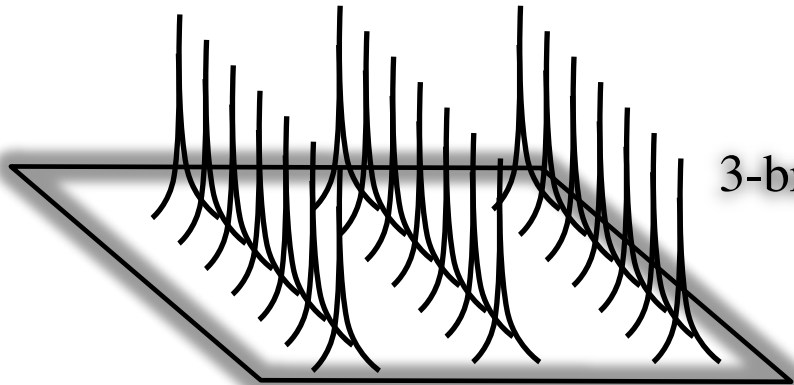


1-brane glatko prelazi u 3-brane

$$ds^2 = -dt^2 + f(r)dr^2 + g(r)d\Omega^2$$

\downarrow $r \rightarrow 0$ \downarrow $r \rightarrow 0$

$$dz^2 \qquad \qquad \qquad 0$$



3-brane koja izgleda kao 1-brane oko svake tacke

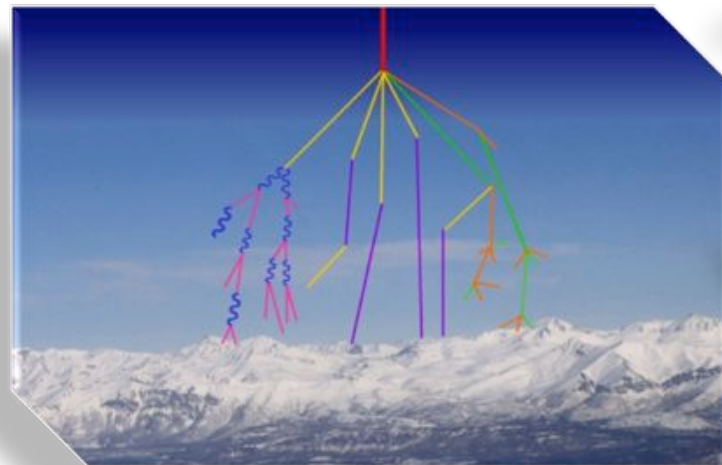
$$\sum_i \frac{1}{|x - x_i|^n}$$

Eksperimentalna podrška?

Eksperimentalna podrška za “vanishing dimensions” vec postoji?

Poravnanje sekundarnih snopova cestica visokih energija primeceno je u eksperimentima sa kosmickim zracima na planini Pamir

6 od 14 dogadjaja

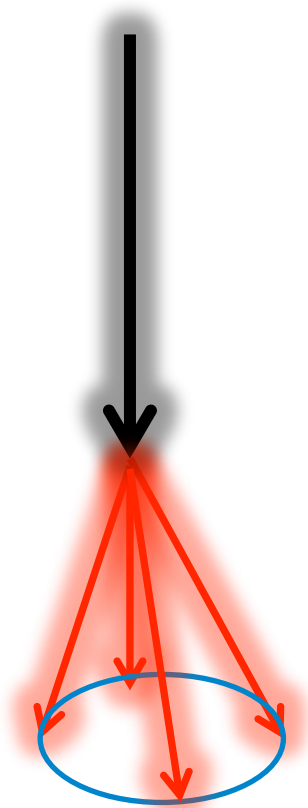


(Russia and Tajikistan)

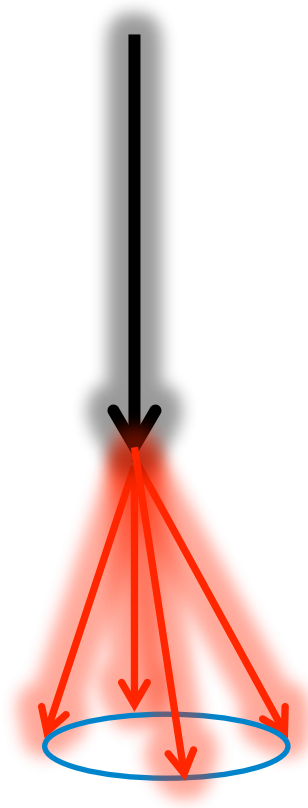
Visina od 4400 m

Poravnanje je statisticki znacajno za familije vrlo visoke energije

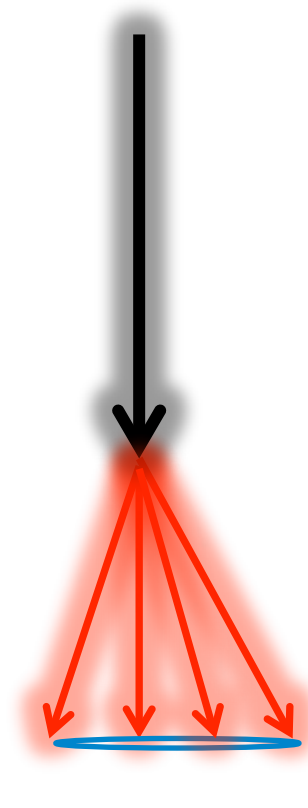
$E > 700 \text{ TeV}$ sto odgovara **$E_{\text{COM}} > 4 \text{ TeV}$**



Krug:
3d dogadjaj
 $\lambda = 0$



Elipsa:
Planarnost
 $\lambda > 0.5$



Linija:
Cisto 2d dogadjaj
 $\lambda = 1$

Parametar λ meri stepen planarnosti

Eksperimentalna podrška?

- Planarni događaji imaju izvor neposredno iznad detektora
- Eksperimenti na nivou mora ne vide ovaj efekat!

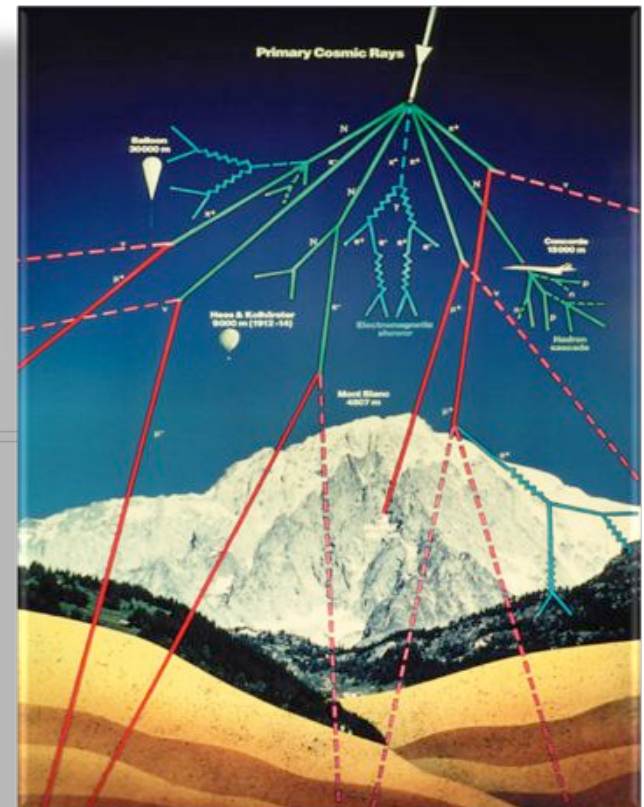
Mt. Kanbala (China)

$E > 700 \text{ TeV}$, 3 od 6 događaja

Dva eksperimenta u stratosferi

$E > 1000 \text{ TeV}$

- *STRANA* superfamilija, detektovana na Ruskom stratosferskom balonu $\lambda = 0.99$
- *JF2af2* superfamilija, detektovana na letu supersoničnog Concorde-a $\lambda = 0.998$



Moguće implikacije za LHC

Ako planarni događaji na $E_{\text{COM}} > 4 \text{ TeV}$ nisu fluktuacija



LHC bi mogao da detektuje slične događaje



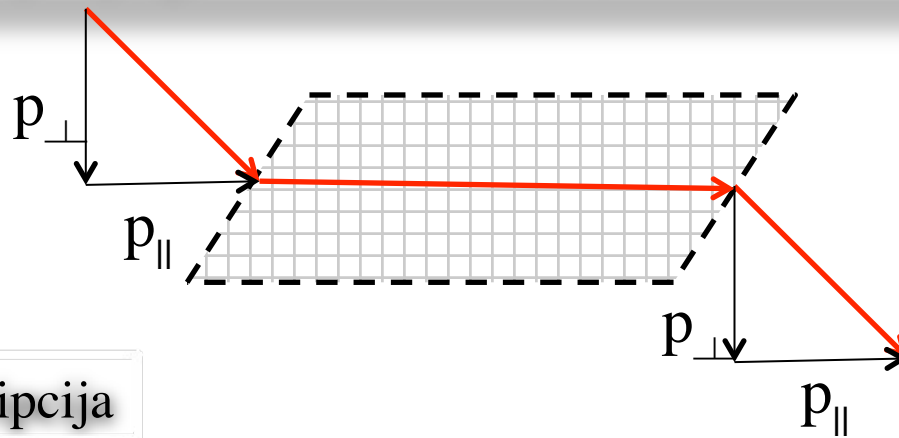
LHC signatura

*Ako je fundamentalna fizika visokih energija 2d ,
bez obzira na konkretan model:*

- **Cross-section se menja zbog redukovanog faznog prostora**
- **Scattering procesi viseg reda postaju planarni**
- **Snopovi dovoljno visoke energije postaju elipticni**

Ocuvanje 3d impulsa

Ako je $\lambda_{\text{de Broglie}} < L_3$ 
cestica propagira lokalno u 2d, umesto u 3d



Lokalna deskripcija

branons

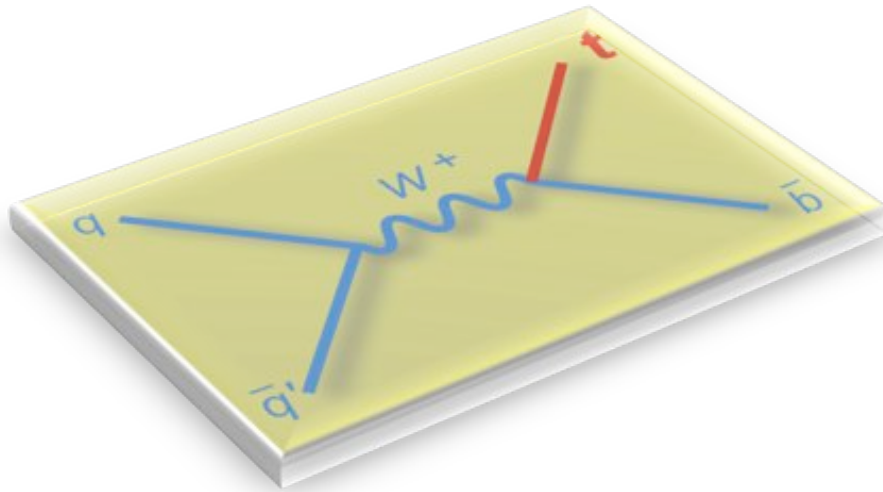
Da bi sacuvali 3d impuls u propagacijama na $L \gg L_3$
resetka mora da absorbuje i re-emituje p_{\perp}

Ne-lokalna deskripcija

Cestica pamti svoju grupnu brzinu kroz kvantnu interferenciju vise puteva

2d scattering

Da bi scattering bio 2d , talasna duzina medijatora mora biti $< L_3$

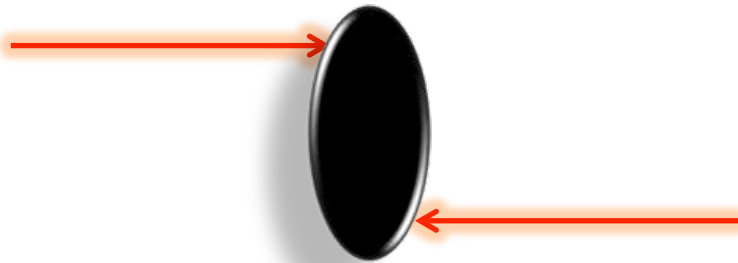


Momentum transfer
 $Q^2 > \Lambda_3^2$

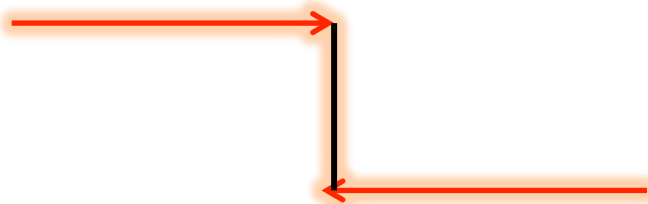
Samo “hard scattering” moze da testira 2d strukturu prostora

2d vs 3d scattering

Cross-section u 2d je linija (nije disk kao u 3d)



3d cross section



2d cross section

Fazni prostor $\sim d\Omega_d$: totalni cross-section redukovan za factor 2

2d vs 3d scattering

Coulomb-ov Potencijal:

$$3d \quad V(r) \propto \alpha / r \quad \longrightarrow \quad \alpha \text{ nema dimenzije}$$

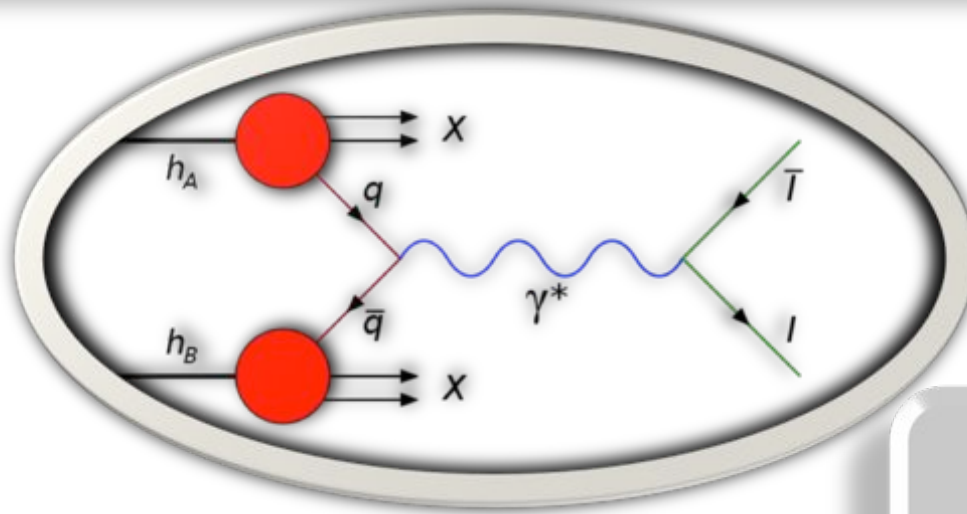
$$2d \quad V(r) \propto \alpha \text{Ln}\left(\frac{r}{r_0}\right) \quad \longrightarrow \quad \alpha = L^{-1}$$

$$3d \quad \sigma = L^2 \Rightarrow \sigma \propto \frac{\alpha^2}{E^2}$$

$$2d \quad \sigma = L \Rightarrow \sigma \propto \frac{\alpha^2}{E^3}$$

2d vs 3d scattering

Drell-Yan cross section opada kao $1/E^3$ umesto $1/E^2$
kad se desi prelaz $3d \rightarrow 2d$



Drell-Yan proces

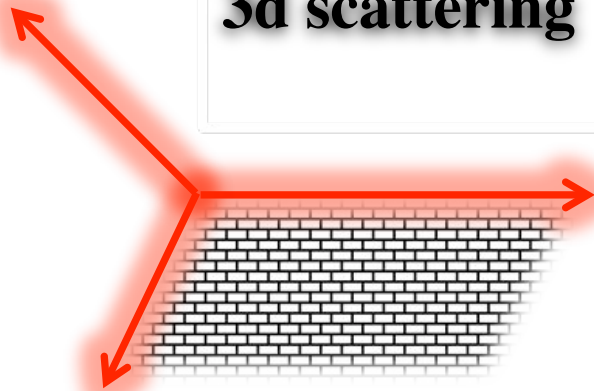
$$\sigma^{DY} = \begin{cases} \sigma_{SM}^{DY} & \text{if } \sqrt{\hat{s}} < \Lambda_3 \\ \sigma_{SM}^{DY} \left(\frac{\Lambda_3}{\sqrt{\hat{s}}} \right) & \text{if } \sqrt{\hat{s}} > \Lambda_3 \end{cases}$$

Limit iz Tevatron-a $\Lambda_3 > 800 \text{ GeV}$

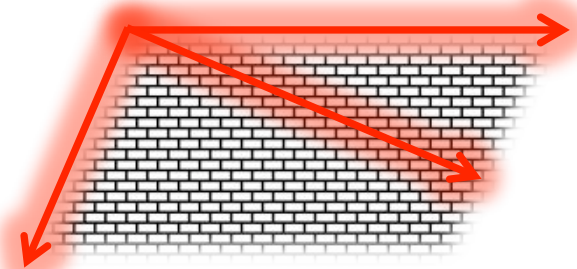
Planarni multijet dogadjaji

U $2 \rightarrow 3$ scattering sa $Q^2 > \Lambda_3^2$, sve virtualne cestice (propagatori) moraju biti u istoj 2d ravni

3d scattering



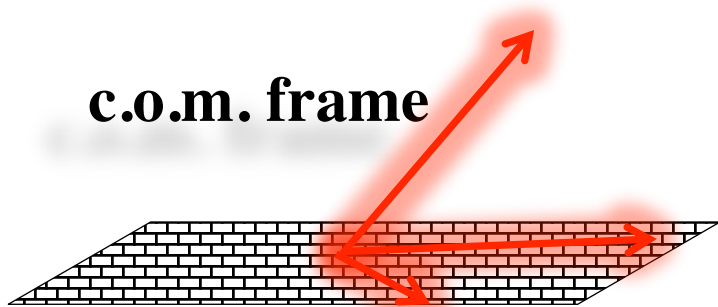
2d scattering



Znaci, outgoing partoni moraju biti u istoj ravni u sistemu CM sudara
Drasticna razlika od 3d scattering-a

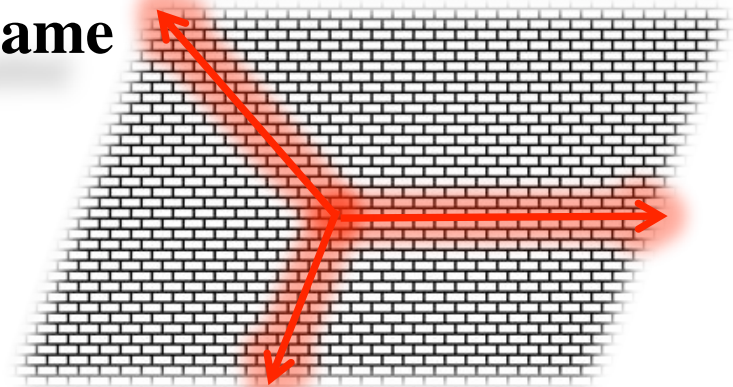
Planarni multijet događaji

- Lokalna ravan absorbuje inicijalni p_{\perp}
- Planarni scattering se desava u sistemu CM
- Rešetka predaje p_{\perp} finalnim cesticama dajuci im boost
- Planarnost je ocuvana samo ako boost-iramo cesticice nazad



Nemoguće u sistemu CM čak i u 3d

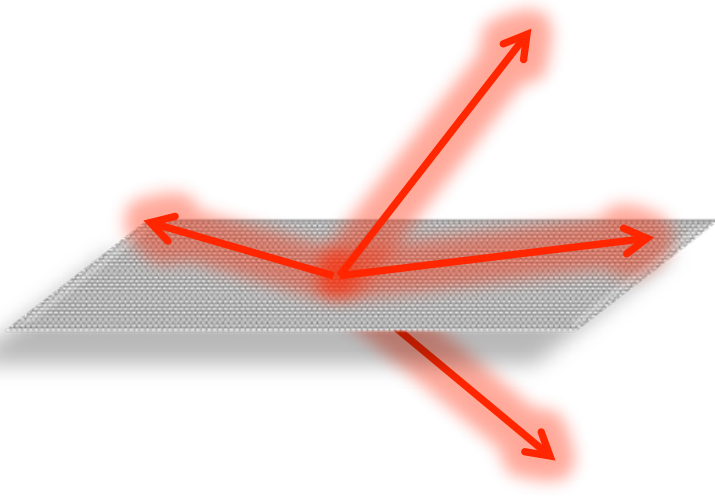
c.o.m. frame



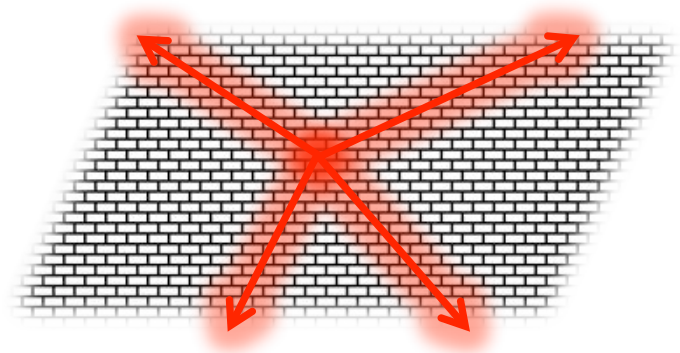
Bilo koja 3 vektora sa zajedničkim početkom i održanim nultim impulsom moraju da budu ko-planarna čak i u 3d

Planarni multijet događaji

3d scattering



2d scattering

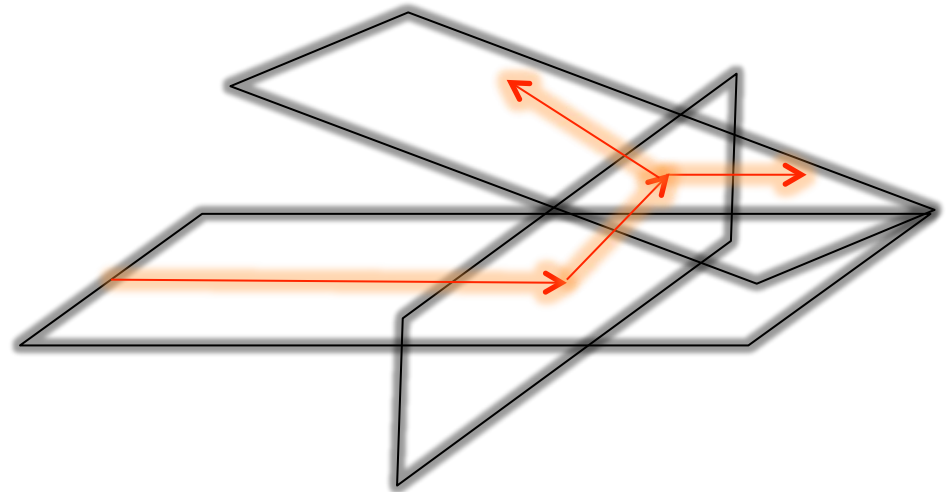
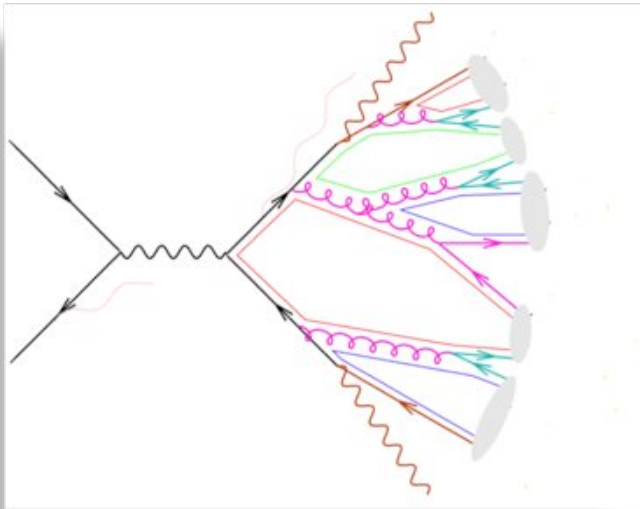


Potrebna su 4-jeta za ne-planarne događaje u 3d

Ko-planarni 4-jet događaji → čista 2d signatura

Elipticni Jet-ovi

- Ako je orijentacija lokalne ravni sacuvana na rastojanjima $\Lambda^{-1}_{\text{QCD}}$ individualni jet-ovi mogu postati elipticnog oblika
- Snopovi partona su uredjeni po Q^2 : najveći Q^2 se desava prvi



- Snopovi ne moraju biti cirkularni u preseku
- Pocnu kao planarni a onda se razvijaju u 3d

Nize-dim kosmologija

- **FRW metrika u 2+1 dim:**

$$ds^2 = dt^2 - a(t)^2 \left(\frac{dr^2}{1 - kr^2} + r^2 d\theta^2 \right)$$

- **Jednacine:**

$$\left(\frac{\dot{a}}{a} \right)^2 = 2\pi G \rho - \frac{k}{a^2}, \quad \frac{d}{dt} (\rho a^2) + p \frac{d}{dt} a^2 = 0$$

- **Radiation dominated univerzum:**

$$p = \frac{1}{2} \rho, \quad \rho a^3 = \text{const}$$

- **Rezultat:**

$$a(t) \propto t^{2/3}$$

Nize-dim kosmologija

- **FRW metrika u 1+1 dim je:**

$$ds^2 = dt^2 - a(t)^2 \frac{dx^2}{1 - kx^2}$$

- **Clan $1-kx^2$ moze biti apsorbovan u definiciju x -a**

$$g_{\mu\nu} = e^{\phi} \eta_{\mu\nu}$$

- **Svaka 1+1 dim metrika je konformno ravna**
(Φ moze da se promovise u dinamicko polje – dilaton)

OTR nije jedini izbor

- Nije nuzno zahtevati dobar Njutnov limit u 2+1 dim:

$$R_{\mu\nu} = kT_{\mu\nu}$$

Alternativni izbor



$$a(t) \propto t$$

resenje

- Nije nuzno zahtevati $G_{\mu\nu} = kT_{\mu\nu}$
- Nije nuzno zahtevati ni FRW metriku

Gravitacioni talasi

U 2+1 dim resenja vakuumskih Einstein-ovih jedn. su lokalno ravna

$$R_{\mu\nu\rho\sigma} = \varepsilon_{\mu\nu\alpha} \varepsilon_{\rho\sigma\beta} G^{\alpha\beta}$$

- **Nema lokalnih gravitacionih stepena slobode**
 - nema gravitona u kvantnoj teoriji
 - nema gravitacionih talasa u klasicnoj teoriji



Gravitacioni talasi

Karakteristicna frekvencija gravitacionih talasa proizvedenih u trenutku t u proslosti redshift-ovana je do danasnje vrednosti

$$f_0 = f_* a(t)/a(t_0)$$

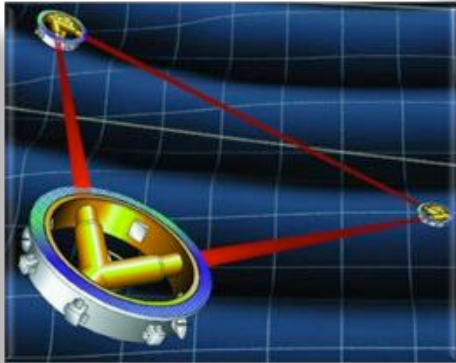
$$f_* \approx H_*^{-1} \quad H_* \approx \frac{8\pi^3 g_* T_*^4}{90M_{Pl}^2}$$

$$f_0 \approx 1.67 \times 10^{-4} \left(\frac{T_*}{TeV} \right) \text{ Hz}$$

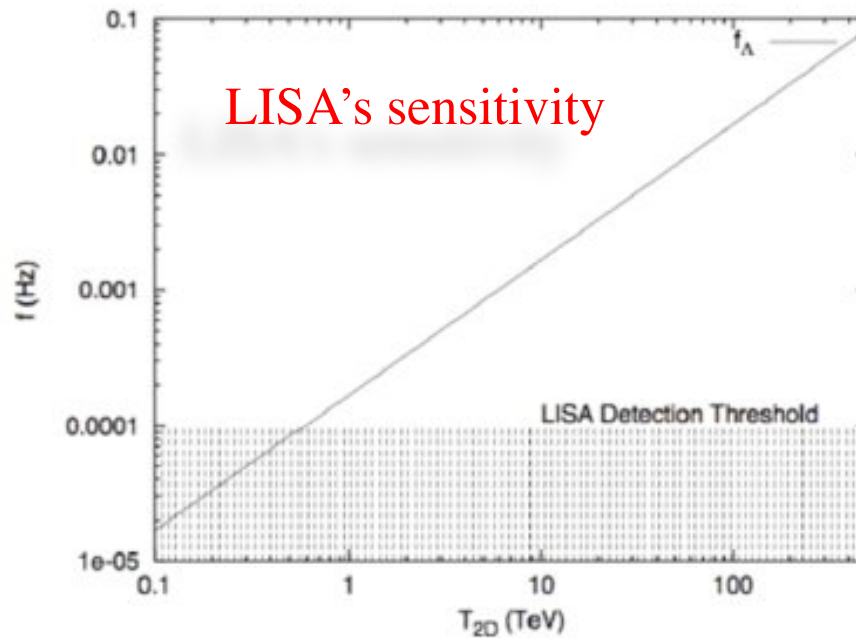
Danasnja frekvencija primordijalnih talasa kreiranih pri $T=T_*$

Gravitacioni talasi

LISA sposobna da vidi cut-off u frekvencijama GT



$$f_0 \approx 1.67 \times 10^{-4} \left(\frac{T_*}{TeV} \right) \text{ Hz}$$



Zaključak

- **Fundamentalni problemi se akumuliraju**
- **Sadasnje ideje ne rade**
- **Vreme za radikalno nove ideje**



Uveli smo koncept dimenzija koje evoluiraju

- Mnogi problemi jednostavno nestaju
- Jasne “model-independent” predikcije



Ostaje da se uradi:

- Konkretni Model - Lagranžijan



A black oval shape is centered on a white background. Inside the oval, the word "Hvala" is written in a bright yellow, sans-serif font. The oval has a slight shadow on its left side, giving it a three-dimensional appearance.

Hvala