

# Tänapäevased lahendused kosmoloogilise konstandi probleemile

Manuel Hohmann, Laur Järv

Teoreetilise Füüsika Labor - Füüsika Instituut - Tartu Ülikool  
Tippkeskus TK133 "Tume Universum"



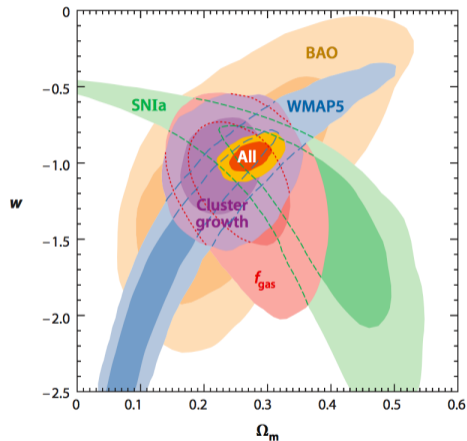
Kosmoloogiline konstant 100  
7. märts 2017

# Kosmoloogilise konstandi probleem

- Kui kehtib üldrelatiivsusteooria

(ja universumit võib lugeda homogeeneks ja isotroopseks) siis

- u 70% universumi energiatihedusest tuleb muust kui kiirgus ning tavaline- ja tumeaine ( $\Omega_r \approx 10^{-5}$ ,  $\Omega_m \approx 0,3$ ,  $\Omega_\Lambda \approx 0,7$ ),
  - kusjuures selle täiendava komponendi energiatihedus jääb ruumi paisumisel konstantseks ( $w \approx -1$ ,  $\rho \approx 1,5 \cdot 10^{-25} \text{ kg/m}^3$ )
  - ning selle negatiivne rõhk paneb universumi kiirenevalt paisuma.
- Kui see täiendav komponent oleks tuntud kvantväljade vaakumi energia, siis oleks see palju-palju suurusjärke suurem!

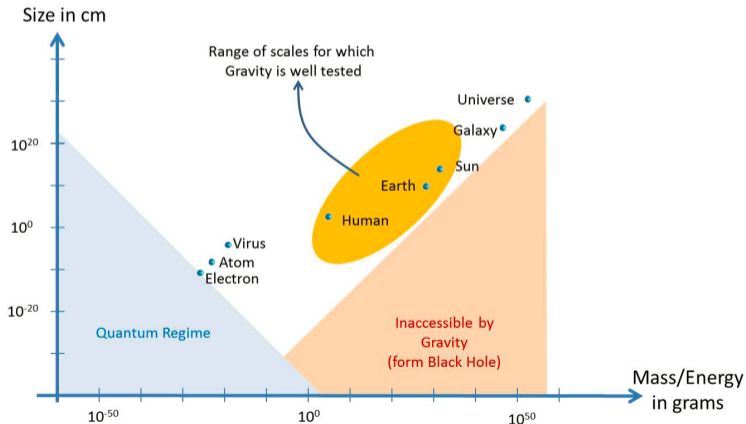


# Kui kosmoloogiline konstant ei ole vaakumi energia...

...siis mis põhjustab Universumi kiirenevat paisumist?

$$\mathcal{G}_{\mu\nu}^{\text{ÜRT}} + \mathcal{G}_{\mu\nu}^{\text{tumegrav}} = \frac{8\pi(G_{\text{Newton}} + G_{\text{tumegrav}})}{c^4} (T_{\mu\nu}^{\text{kiirgus}} + T_{\mu\nu}^{\text{aine}} + T_{\mu\nu}^{\text{tumeenergia}})$$

- lisame täiendava aine (tumeenergia)
- laiendame Einsteini gravitatsiooniteooriat (tumegravitatsioon), modifikatsioon suurtes mastaapides



- Üldrelatiivsusteoorias sõltub universumi paisumine aine tihedusest ja rõhust:

$$\frac{\ddot{a}}{a} \sim -(\rho + 3p).$$

## Kiirenevat paisumist tekitav aine - “tume energia”

- Üldrelatiivsusteoorias sõltub universumi paisumine aine tihedusest ja rõhust:

$$\frac{\ddot{a}}{a} \sim -(\rho + 3p).$$

- Tihedus  $\rho$  ei saa olla negatiivne.

## Kiirenevat paisumist tekitav aine - “tume energia”

- Üldrelatiivsusteoorias sõltub universumi paisumine aine tihedusest ja rõhust:

$$\frac{\ddot{a}}{a} \sim -(\rho + 3p).$$

- Tihedus  $\rho$  ei saa olla negatiivne.
- Rõhk  $p$  võib olla negatiivne.

## Kiirenevat paisumist tekitav aine - “tume energia”

- Üldrelatiivsusteoorias sõltub universumi paisumine aine tihedusest ja rõhust:

$$\frac{\ddot{a}}{a} \sim -(\rho + 3p) > 0.$$

- Tihedus  $\rho$  ei saa olla negatiivne.
- Rõhk  $p$  võib olla negatiivne.
- Ainet, mis rahuldab  $p < -\frac{1}{3}\rho$ , nimetatakse **tumedaks energiaks**.

# Kiirenevat paisumist tekitav aine - “tume energia”

- Üldrelatiivsusteoorias sõltub universumi paisumine aine tihedusest ja rõhust:

$$\frac{\ddot{a}}{a} \sim -(\rho + 3p) > 0.$$

- Tihedus  $\rho$  ei saa olla negatiivne.
- Rõhk  $p$  võib olla negatiivne.
- Ainet, mis rahuldab  $p < -\frac{1}{3}\rho$ , nimetatakse tumedaks energiaks.
- Palju mudeleid tumeda energia selgitamiseks:
  - kvintessents
  - K essents
  - Chaplignini gaas
  - ...



# Alternatiivid tumedale energiale - modifitseeritud gravitatsioon

## Lorentzi rikkumine

LR massiivne grav.

Horava-Lifshitz

vaimu  
kondensaat

laiendatud HL

Finsler

cuscuton

## Lorentzi invariantisus

kõrgem spinn

osaliselt  
massitu  
spinn 3

## spinn 2 gravitatsioon

### massitu spinn 2

Brans-Dicke

kameleon

$f(R)$

sümmetron

Horndeski

galileon

DBI-galileon

multi-galileon

massiivne  
graviton-  
galileon

### massiivne spinn 2

kaskad. grav.

DGP

massiivne grav.

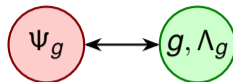
kvasi-dilaton

bi-/multi-grav.

# Kas universumis on ainult üks kosmoloogiline konstant?

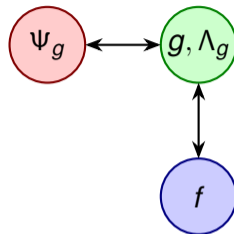
- Üldrelatiivsusteooria

- dünaamiline meetrika  $g \leftarrow \Lambda_g$
- materia  $\Psi_g$



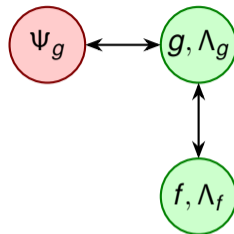
# Kas universumis on ainult üks kosmoloogiline konstant?

- Üldrelatiivsusteooria
  - dünaamiline meetrika  $g \leftarrow \Lambda_g$
  - ateria  $\Psi_g$
- Massiivne gravitatsioon
  - dünaamiline meetrika  $g \leftarrow \Lambda_g$
  - mittedünaamiline taustmeetrika  $f$
  - ateria  $\Psi_g$



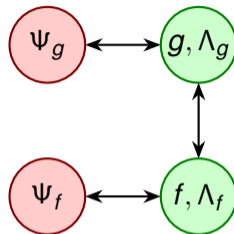
# Kas universumis on ainult üks kosmoloogiline konstant?

- Üldrelatiivsusteooria
  - dünaamiline meetrika  $g \leftarrow \Lambda_g$
  - ateria  $\Psi_g$
- Massiivne gravitatsioon
  - dünaamiline meetrika  $g \leftarrow \Lambda_g$
  - mittedünaamiline taustmeetrika  $f$
  - ateria  $\Psi_g$
- Bigravitatsioon
  - dünaamilised meetrikad  
 $g, f \leftarrow \Lambda_g, \Lambda_f$
  - ateria  $\Psi_g$



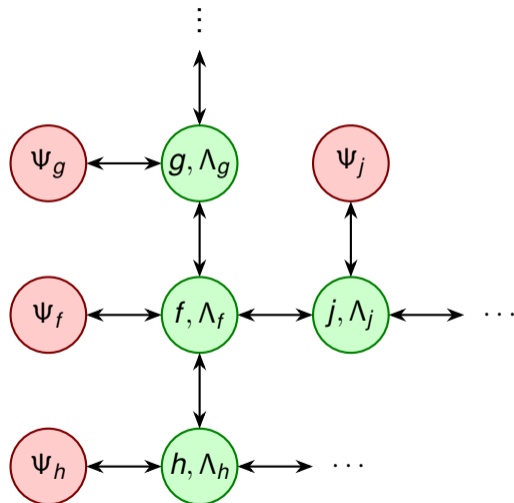
# Kas universumis on ainult üks kosmoloogiline konstant?

- Üldrelatiivsusteooria
  - dünaamiline meetrika  $g \leftarrow \Lambda_g$
  - aine  $\Psi_g$
- Massiivne gravitatsioon
  - dünaamiline meetrika  $g \leftarrow \Lambda_g$
  - mittedünaamiline taustmeetrika  $f$
  - aine  $\Psi_g$
- Bigravitatsioon
  - dünaamilised meetrikad  
 $g, f \leftarrow \Lambda_g, \Lambda_f$
  - aine  $\Psi_g, \Psi_f$



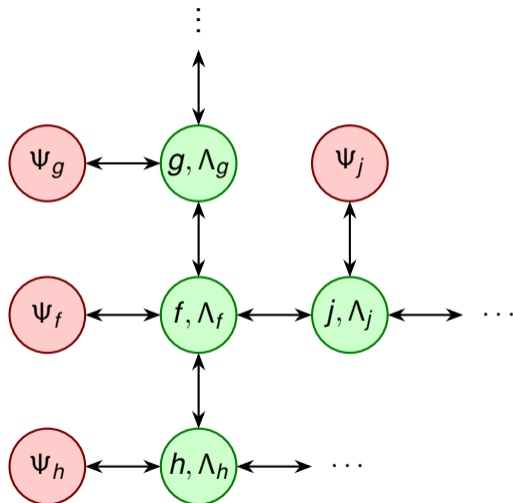
# Kas universumis on ainult üks kosmoloogiline konstant?

- Üldrelatiivsusteooria
  - dünaamiline meetrika  $g \leftarrow \Lambda_g$
  - ateria  $\Psi_g$
- Massiivne gravitatsioon
  - dünaamiline meetrika  $g \leftarrow \Lambda_g$
  - mittedünaamiline taustmeetrika  $f$
  - ateria  $\Psi_g$
- Bigravitatsioon
  - dünaamilised meetrikad  $g, f \leftarrow \Lambda_g, \Lambda_f$
  - ateria  $\Psi_g, \Psi_f$
- Multigravitatsioon
  - dünaamilised meetrikad  $\leftarrow \Lambda_{\dots}$
  - igale meetrikale vastav ateria



# Kas universumis on ainult üks kosmoloogiline konstant?

- Üldrelatiivsusteooria
  - dünaamiline meetrika  $g \leftarrow \Lambda_g$
  - aine  $\Psi_g$
- Massiivne gravitatsioon
  - dünaamiline meetrika  $g \leftarrow \Lambda_g$
  - mittedünaamiline taustmeetrika  $f$
  - aine  $\Psi_g$
- Bigravitatsioon
  - dünaamilised meetrikad  $g, f \leftarrow \Lambda_g, \Lambda_f$
  - aine  $\Psi_g, \Psi_f$
- Multigravitatsioon
  - dünaamilised meetrikad  $\leftarrow \Lambda_{\dots}$
  - igale meetrikale vastav aine
- Igal meetrikal võib olla oma  $\Lambda$ .



# Universumi kiirenev paisumine või valguse levimise muutus?

- Vaadeldavad signaalid on EM lained:
  - kosmoloogiline taustkiirgus
  - supernoovad



# Universumi kiirenev paisumine või valguse levimise muutus?

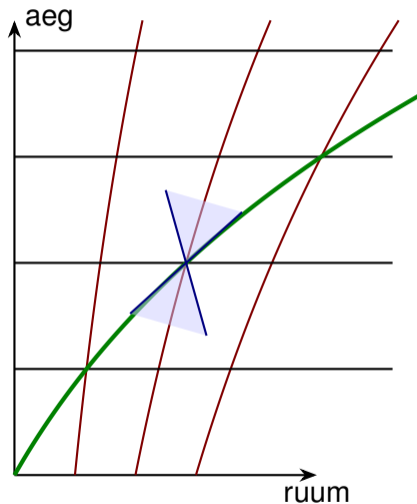
- Vaadeldavad signaalid on EM lained:

- kosmoloogiline taustkiirgus
- **supernoovad**

vaadeldud heledus-punanihke suhe

meetriline aegruumi geomeetria

universumi kiirenev paisumine



# Universumi kiirenev paisumine või valguse levimise muutus?

- Vaadeldavad signaalid on EM lained:

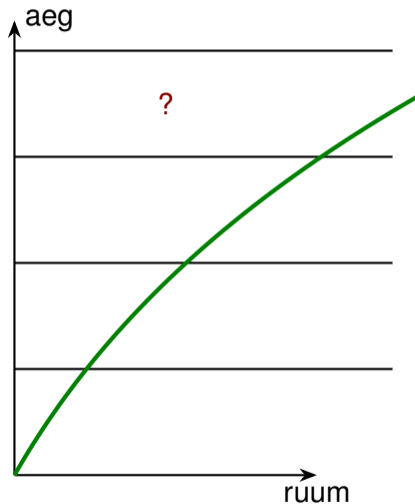
- kosmoloogiline taustkiirgus
- supernoovad

vaadeldud heledus-punanihke suhe

~~meetriline aegruumi geomeetria~~

universumi kiirenev paisumine?

- Taustgeomeetria ei pruugi olla meetriline.



# Universumi kiirenev paisumine või valguse levimise muutus?

- Vaadeldavad signaalid on EM lained:

- kosmoloogiline taustkiirgus
- supernoovad

vaadeldud heledus-punanihke suhe

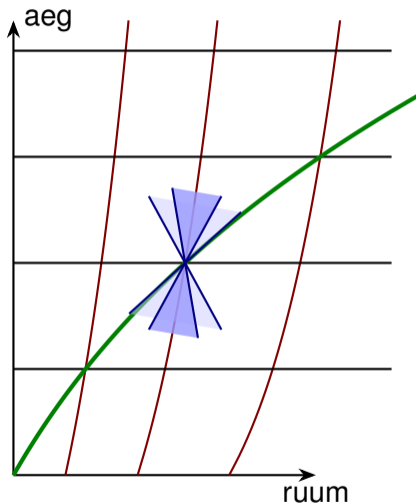
~~meetriline aegruumi geomeetria~~

universumi kiirenev paisumine?

- Taustgeomeetria ei pruugi olla meetriline.

- Näide: Finsleri geomeetria.

- Valguse levimist kirjeldab nullkoonus.
- Universumi paisumist kirjeldab pikkusefunktsionaal.



# Universumi kiirenev paisumine või valguse levimise muutus?

- Vaadeldavad signaalid on EM lained:

- kosmoloogiline taustkiirgus
- supernoovad

vaadeldud gravitatsioonilained

???

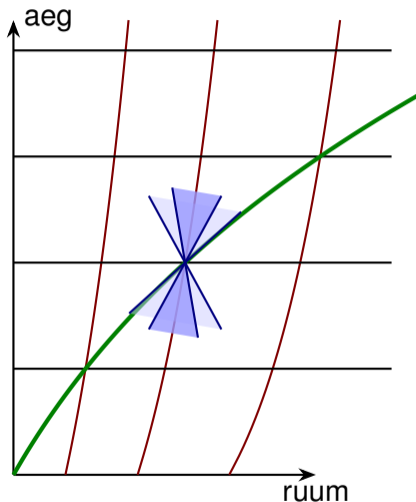
???

- Taustgeomeetria ei pruugi olla meetriline.

- Näide: Finsleri geomeetria.

- Valguse levimist kirjeldab nullkoonus.
- Universumi paisumist kirjeldab pikkusefunktsionaal.

- Uued vaatlused ootavad - gravitatsioonilained!



## ● **Elementaarosakeste teooria ja eksperiment (KBFI)**

Martti Raidal (tippkeskuse juht), Ram Krishna Dewanjee, Stefano Di Chiara, Sean Fraser, Emidio Gabrielli, Els Heinsalu, Andi Hektor, Mario Kadastik, Kristjan Kannike, Ilja Livenson, Lauri Liibert, David Navidad Maeso, Carlo Marzo, Luca Marzola, Joosep Pata, Marco Patriarca, Morten Piibeleht, Andres Põldaru, Antonio Racioppi, Christian Spethmann, Alessandro Strumia, Andres Tiko, Andres Toomsalu, Taavi Tuvi, Federico Urban, Ville Vaskonen, Christian Veelken, Hardi Veermäe

## ● **Kosmoloogia (TO)**

Enn Saar (tippkeskuse asejuht), Jaan Einasto, Mirt Gramann, Urmas Haud, Gert Hütsi, Juhan Liivamägi, Valeri Maljuto, Ivan Suhhonenko, Erik Tago, Antti Tamm, Elmo Tempel, Peeter Tenjes, Jaan Vennik

## ● **Gravitatsiooniteooria (TÜ FI)**

Manuel Hohmann, Laur Järv, Martin Krššák, Christian Pfeifer, Mihkel Rünkla, Margus Saal, Erik Randla, Ulbossyn Ualikhanova, Ott Vilson



Toetab



Euroopa Liit  
Euroopa  
Regionaalarengu Fond



Eesti  
tuleviku heaks