

# Vaatlustest Einsteini teooriateni ja sealt edasi

Manuel Hohmann

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



European Union  
European Regional  
Development Fund



Investing  
in your future

6. september 2022

1. Eirelatiivsusteooria

2. Üldrelatiivsusteooria

3. Relatiivsusteooriast edasi

1. Eirelatiivsusteooria

2. Üldrelatiivsusteooria

3. Relatiivsusteooriast edasi

## Taustsüsteemi mõiste (§ 3)

- **Taustkeha** (nt peroon, rong) määrab süsteemi ruumilist asendit:
  - Fikseeri punkti keha peal kui koordinaatsüsteemi alguspunkti.
  - Fikseeri teljesid keha ruumilise orientatsiooni abil.
  - Kasuta eukleidilisi koordinaate  $x, y, z$ .
- Taustkehaga kaasa liikuv **kell** määrab süsteemi aega  $t$ .

## Taustsüsteemi mõiste (§ 3)

- Taustkeha (nt peroon, rong) määrab süsteemi ruumilist asendit:
  - Fikseeri punkti keha peal kui koordinaatsüsteemi alguspunkti.
  - Fikseeri teljesid keha ruumilise orientatsiooni abil.
  - Kasuta eukleidilisi koordinaate  $x, y, z$ .
- Taustkehaga kaasa liikuv kell määrab süsteemi aega  $t$ .

## Trajektoori mõiste (§ 3)

Taustsüsteemi abil saab keha liikumist kirjeldada järgnevalt: iga aja  $t$  väärtuse korral on keha asukoht kirjeldatav ruumiliste koordinaatidega  $(x(t), y(t), z(t))$ .

## Taustsüsteemi mõiste (§ 3)

- Taustkeha (nt peroon, rong) määrab süsteemi ruumilist asendit:
  - Fikseeri punkti keha peal kui koordinaatsüsteemi alguspunkti.
  - Fikseeri teljesid keha ruumilise orientatsiooni abil.
  - Kasuta eukleidilisi koordinaate  $x, y, z$ .
- Taustkehaga kaasa liikuv kell määrab süsteemi aega  $t$ .

## Trajektoori mõiste (§ 3)

Taustsüsteemi abil saab keha liikumist kirjeldada järgnevalt: iga aja  $t$  väärtuse korral on keha asukoht kirjeldatav ruumiliste koordinaatidega  $(x(t), y(t), z(t))$ .

## Galilei taustsüsteem (§ 4)

On olemas taustsüsteemid (Galilei või inertsiaalsed süsteemid), milles kehtib inertsiseadus: Keha püsib paigal või liigub ühtlaselt ja sirgjooneliselt, kuni välised jõud seda olekut ei muuda:

$$\frac{d^2}{dt^2} (x(t), y(t), z(t)) = 0.$$

## Suhe Galilei taustsüsteemide vahel (§ 5)

Olgu  $K$  ja  $K'$  taustsüsteemid järgnevalt:

- Taustkehad liiguvad üksteise suhtes ühtlaselt, sirgjooneliselt ja mittepöörlevalt.
- $K$  on Galilei süsteem: jõuvaba keha liigub ühtlaselt ja sirgjooneliselt.

⇒ Süsteemis  $K'$  kehtib inertsiseadus ⇒  $K'$  on samuti Galilei taustsüsteem.

## Suhe Galilei taustsüsteemide vahel (§ 5)

Olgu  $K$  ja  $K'$  taustsüsteemid järgnevalt:

- Taustkehad liiguvad üksteise suhtes ühtlaselt, sirgjooneliselt ja mittepöörlevalt.
- $K$  on Galilei süsteem: jõuvaba keha liigub ühtlaselt ja sirgjooneliselt.

⇒ Süsteemis  $K'$  kehtib inertsiseadus ⇒  $K'$  on samuti Galilei taustsüsteem.

## Galilei taustsüsteemide suhte matemaatiline kirjeldus

Koordinaatide vahel peab kehtima afiinne teisendus:

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ t' \end{pmatrix} = M \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ t \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} x'_0 \\ y'_0 \\ z'_0 \\ t'_0 \end{pmatrix} \Rightarrow \frac{d^2}{dt'^2} (x'(t'), y'(t'), z'(t')) = 0.$$



## Üldistus mehhaanikast: erirelatiivsuspriintiip (§ 5)

Igas Galilei taustsüsteemis kehtivad samad füüsikalised seadused:  
mehhaanika, optika, elektrodünaamika. . .

## Üldistus mehhaanikast: erirelatiivsusprintsiiip (§ 5)

Igas Galilei taustsüsteemis kehtivad samad füüsikalised seadused: mehhaanika, optika, elektrodünaamika. . .

## Mehhaanika kui näidisteooria (§ 5)

- Newtoni mehhaanika seadused ei muutu Galilei taustsüsteemide vahel.
- ↪ Hüpotees: teised füüsika seadused samuti ei muutu nende süsteemide vahel.

## Üldistus mehhaanikast: erirelatiivsusprintsiiip (§ 5)

Igas Galilei taustsüsteemis kehtivad samad füüsikalised seadused: mehhaanika, optika, elektrodünaamika. . .

## Mehhaanika kui näidisteooria (§ 5)

- Newtoni mehhaanika seadused ei muutu Galilei taustsüsteemide vahel.
- ↪ Hüpotees: teised füüsika seadused samuti ei muutu nende süsteemide vahel.

## Eristatud taustsüsteemi puudumine (§ 5)

- Vastuhüpotees: füüsikaliste seaduste kuju muutub Galilei taustsüsteemide vahel.
  - ↪ **Eristatud** süsteem  $K_0$  milles kehtivad kõige algsemad seadused.
  - ↪ Süsteem  $K_0$  on “**absoluutne paigalsüsteem**”, mille suhtes teised süsteemid liiguvad.
  - ↪ Süsteem  $K_0$  on eristatav teistest süsteemidest füüsikaliste seaduste uurimisel.
- **Vaatlused ei viita absoluutse paigalsüsteemi olemasolekule.**

## Klassikaline kiiruste liitmise ülesanne (§ 6)

- Rong sõidab kiirusega  $v$  mööda perooni.
- Rongis kõnnib inimene kiirusega  $w$  rongi ettepoole.
- Millise kiirusega liigub inimene perooni taustsüsteemi suhtes?

## Klassikaline kiiruste liitmise ülesanne (§ 6)

- Rong sõidab kiirusega  $v$  mööda perooni.
- Rongis kõnnib inimene kiirusega  $w$  rongi ettepoole.
- Millise kiirusega liigub inimene perooni taustsüsteemi suhtes?

## Intuiitivne lähenemine (§ 6)

- Kui inimene seisaks rongis, liiguks ta kiirusega  $w$ .
  - Inimene läbib vaguni pikkusega  $\Delta x'$  aja  $\Delta t' = \Delta x' / w$  jooksul.
- ⇒ Liikumise kiirus perooni süsteemis:
- Aja  $\Delta t = \Delta t'$  jooksul liigub vaguni tagumine ots  $\Delta x_1 = v \cdot \Delta t$ .
  - Inimene liigub sama aja jooksul veel  $\Delta x_2 = \Delta x' = w \cdot \Delta t'$ .
- ⇒ Liikumise kiirus perooni süsteemis:  $W = (\Delta x_1 + \Delta x_2) / \Delta t = v + w$ .

## Klassikaline kiiruste liitmise ülesanne (§ 6)

- Rong sõidab kiirusega  $v$  mööda perooni.
- Rongis kõnnib inimene kiirusega  $w$  rongi ettepoole.
- Millise kiirusega liigub inimene perooni taustsüsteemi suhtes?

## Intuiitivne lähenemine (§ 6)

- Kui inimene seisaks rongis, liiguks ta kiirusega  $w$ .
  - Inimene läbib vaguni pikkusega  $\Delta x'$  aja  $\Delta t' = \Delta x' / w$  jooksul.
- ⇒ Liikumise kiirus perooni süsteemis:
- Aja  $\Delta t = \Delta t'$  jooksul liigub vaguni tagumine ots  $\Delta x_1 = v \cdot \Delta t$ .
  - Inimene liigub sama aja jooksul veel  $\Delta x_2 = \Delta x' = w \cdot \Delta t'$ .
- ⇒ Liikumise kiirus perooni süsteemis:  $W = (\Delta x_1 + \Delta x_2) / \Delta t = v + w$ .

## Intuiitivse lähenemise eeldused

- Mõlemas süsteemis möödub sama aeg  $\Delta t = \Delta t'$ .
- Mõlemas süsteemis on vagunil sama pikkus  $\Delta x_2 = \Delta x'$ .

## Elektrodünaamika ja valguskiirus (§ 7)

- Elektrodünaamika seadused: Maxwell'i võrrandid.
- ⇒ Elektromagnetlained (sh valgud) levivad konstantse kiirusega  $c$ .

## Elektrodünaamika ja valguskiirus (§ 7)

- Elektrodünaamika seadused: Maxwell'i võrrandid.
- ⇒ Elektromagnetlained (sh valgud) levivad konstantse kiirusega  $c$ .

## Kiiruste liitmise ennustus (§ 7)

- Rong liigub perooni süsteemis kiirusega  $v$ .
- ⇒ Valguskiirus rongi süsteemis on  $c - v$ .



# Elektrodünaamika ja valguskiirus

## Elektrodünaamika ja valguskiirus (§ 7)

- Elektrodünaamika seadused: Maxwell'i võrrandid.
- ⇒ Elektromagnetlained (sh valgud) levivad konstantse kiirusega  $c$ .

## Kiiruste liitmise ennustus (§ 7)

- Rong liigub perooni süsteemis kiirusega  $v$ .
- ⇒ Valguskiirus rongi süsteemis on  $c - v$ .

## Relatiivsuspriintiibi ennustus (§ 7)

- Maxwell'i elektrodünaamika seadused kehtivad **igas** Galilei süsteemis.
- ⇒ Rongi süsteemis on valguskiirus samuti  $c$ .

# Elektrodünaamika ja valguskiirus

## Elektrodünaamika ja valguskiirus (§ 7)

- Elektrodünaamika seadused: Maxwell'i võrrandid.
- ⇒ Elektromagnetlained (sh valgud) levivad konstantse kiirusega  $c$ .

## Kiiruste liitmise ennustus (§ 7)

- Rong liigub perooni süsteemis kiirusega  $v$ .
- ⇒ Valguskiirus rongi süsteemis on  $c - v$ .

## Relatiivsuspriintiibi ennustus (§ 7)

- Maxwell'i elektrodünaamika seadused kehtivad igas Galilei süsteemis.
- ⇒ Rongi süsteemis on valguskiirus samuti  $c$ .

## Vastuolu võimalikud lahendused (§ 7)

- ⚡ Maxwell'i elektrodünaamika ei kehti - vastuolus vaatlustega!
- ⚡ Relatiivsuspriintiip ei kehti - vastuolus vaatlustega!
- ↪ **Kiiruste liitmise seadus vajab parandamist!**

## Aja relatiivsus (§ 9)

- Igas taustsüsteemis aeg määratud kaasaliikuvate kelladega.
- Kellade sünkroniseerimine kasutades valguskiiruse konstantsust.
- Samaaegsus ja aja möödumine sõltuvad vaatlejast.

## Aja relatiivsus (§ 9)

- Igas taustsüsteemis aeg määratud kaasaliikuvate kelladega.
- Kellade sünkroniseerimine kasutades valguskiiruse konstantsust.
- Samaaegsus ja aja möödumine sõltuvad vaatlejast.

## Ruumi relatiivsus (§ 10)

- Vaatlejad rongis ja peroonil mõõdavad sama suhtelist kiirust  $v$ .
  - Mõõda rongipikkust kasutades  $v$  ja aega, millal rongi otsad mööduvad jaama.
- ⇒ Aeg sõltub vaatlejast ⇒ rongi pikkus sõltub vaatlejast.

## Aja relatiivsus (§ 9)

- Igas taustsüsteemis aeg määratud kaasaliikuvate kelladega.
- Kellade sünkroniseerimine kasutades valguskiiruse konstantsust.
- Samaaegsus ja aja möödumine sõltuvad vaatlejast.

## Ruumi relatiivsus (§ 10)

- Vaatlejad rongis ja peroonil mõõdavad sama suhtelist kiirust  $v$ .
  - Mõõda rongipikkust kasutades  $v$  ja aega, millal rongi otsad mööduvad jaama.
- ⇒ Aeg sõltub vaatlejast ⇒ rongi pikkus sõltub vaatlejast.

## Kiiruste liitmine?

Kiiruste liitmise intuiitse seaduse eeldused ei kehti!

## Lorentzi teisendus (§ 11)

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}, \quad y' = y, \quad z' = z, \quad t' = \frac{t - vx/c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}.$$

## Lorentzi teisendus (§ 11)

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}, \quad y' = y, \quad z' = z, \quad t' = \frac{t - vx/c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}.$$

## Aja ja ruumi dilatatsioon (§ 12)

Lorentzi tegur  $\sqrt{1 - v^2/c^2}$  määrab suhet taustsüsteemide vahel.

# Lorentzi teisendus ja kiiruste liitmine

## Lorentzi teisendus (§ 11)

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}, \quad y' = y, \quad z' = z, \quad t' = \frac{t - vx/c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}.$$

## Aja ja ruumi dilatatsioon (§ 12)

Lorentzi tegur  $\sqrt{1 - v^2/c^2}$  määrab suhet taustsüsteemide vahel.

## Kiiruste liitmine - parandatud valem (§ 13)

$$W = \frac{v + w}{1 + vw/c^2}.$$



# Lorentzi teisendus ja kiiruste liitmine

## Lorentzi teisendus (§ 11)

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}, \quad y' = y, \quad z' = z, \quad t' = \frac{t - vx/c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}.$$

## Aja ja ruumi dilatatsioon (§ 12)

Lorentzi tegur  $\sqrt{1 - v^2/c^2}$  määrab suhet taustsüsteemide vahel.

## Kiiruste liitmine - parandatud valem (§ 13)

$$W = \frac{v + w}{1 + vw/c^2}.$$

## Erirelatiivsuspriintiip ja erirelatiivsusteooria (§ 14-16)

- Erirelatiivsusteooria: mehhaanika seadused üldistatud Newtoni teooriast.
- Erirelatiivsuspriintiip: samad seadused kehtivad igas Galilei süsteemis.
- Väikeste kiiruste korral läheneb teooria Newtoni teooriale.

1. Eirelatiivsusteooria

2. Üldrelatiivsusteooria

3. Relatiivsusteooriast edasi

## Relatiivsusprintsiiibi üldistamine (§ 18)

- Erirelatiivsusprintsiiip:
  - Galilei taustsüsteemid on need, milles kehtib inertsiseadus.
  - Kõigis Galilei taustsüsteemides kehtivad samad füüsikalised seadused.
- Üldrelatiivsusprintsiiip?
  - **Kõigis** taustsüsteemides kehtivad samad füüsikalised seadused.
  - Kuidas on võimalik kirjeldada seadusi taustsüsteemist sõltumatult?

# Erirelatiivsusprintsiiip - üldrelatiivsusprintsiiip?

## Relatiivsusprintsiiibi üldistamine (§ 18)

- Erirelatiivsusprintsiiip:
  - Galilei taustsüsteemid on need, milles kehtib inertsiseadus.
  - Kõigis Galilei taustsüsteemides kehtivad samad füüsikalised seadused.
- Üldrelatiivsusprintsiiip?
  - Kõigis taustsüsteemides kehtivad samad füüsikalised seadused.
  - Kuidas on võimalik kirjeldada seadusi taustsüsteemist sõltumatult?

## Võrdlus vaatlustega - inerts kui takistuskivi? (§ 18)

- Vaatleja ühtlase kiirusega sõitvas rongis:
  - Vaatleja ei tunne rongi liikumist, peab oma süsteemi paigalolekuks.
  - Aknast vaadates paistab peroon kui ühtlaselt liikuv süsteem.
- Vaatleja kiirenevas rongis:
  - Vaatleja tunneb rongi kiirenemise tõttu inertsijõudu.
  - ⚡ Mehhaanika seadused on erinevad võrdluses ühtlaselt liikuva rongiga.

## Gravitatsioonijõud ja gravitatsiooniväli (§ 18)

- Klassikaline ettekujutus gravitatsioonijõust:
  - Massiivne keha “tõmbab” teisi kehasid gravitatsioonijõuga.
  - Gravitatsioonijõud valitseb koheselt ükskõik millisel kaugusel.
- Gravitatsioon kui väljateooria - sarnane elektrodünaamikaga:
  - Massiivne keha tekitab oma ümbruses gravitatsioonivälja.
  - Gravitatsiooniväli mõjub teistele kehadele teatud tugevusega  $\vec{g}$ .
  - Mõju kehale sõltub tema gravitatsiooni “laengust”  $m_g$ .

## Gravitatsioonijõud ja gravitatsiooniväli (§ 18)

- Klassikaline ettekujutus gravitatsioonijõust:
  - Massiivne keha “tõmbab” teisi kehasid gravitatsioonijõuga.
  - Gravitatsioonijõud valitseb koheselt ükskõik millisel kaugusel.
- Gravitatsioon kui väljateooria - sarnane elektrodünaamikaga:
  - Massiivne keha tekitab oma ümbruses gravitatsioonivälja.
  - Gravitatsiooniväli mõjub teistele kehadele teatud tugevusega  $\vec{g}$ .
  - Mõju kehale sõltub tema gravitatsiooni “laengust”  $m_g$ .

## Gravitatsioon ja inerts (§ 19)

- Newtoni liikumise seadus ja inertsimass  $m_i$ :  $\vec{F} = m_i \vec{a}$ .
  - Newtoni gravitatsiooniseadus ja gravitatsioonimass  $m_g$ :  $\vec{F} = m_g \vec{g}$ .
- ⇒ Keha vabalangemise kiirendus gravitatsiooniväljas:  $\vec{a} = \frac{m_g}{m_i} \vec{g}$ .
- **Vaatlus: kõik kehad langevad sama kiirendusega:  $m_i \equiv m_g$ .**

## Gravitatsioon ja kiirendus (§ 20)

- Valime taustkehaks labori kui kasti tühjas maailmaruumis:
  - Kaugel taevakehadest ei ole gravitatsioonijõudu.
  - Vaatleja kassis leiab, et kehad liiguvad kui Galilei taustsüsteemis.

## Gravitatsioon ja kiirendus (§ 20)

- Valime taustkehaks labori kui kasti tühjas maailmaruumis:
    - Kaugel taevakehadest ei ole gravitatsioonijõudu.
    - Vaatleja kastis leiab, et kehad liiguvad kui Galilei taustsüsteemis.
  - Oletame, et kasti tõmmatakse ühtlase kiirendusega “üles”:
    - Kasti suhtes paigal püsimiseks peab vaatleja konstantse jalajõuga seisma.
    - Ilma jõuta kõik kehad langevad kasti suhtes sama kiirendusega.
- ⇒ Vaatleja järeldab, et laboris valitseb gravitatsiooniväli.



## Gravitatsioon ja kiirendus (§ 20)

- Valime taustkehaks labori kui kasti tühjas maailmaruumis:
  - Kaugel taevakehadest ei ole gravitatsioonijõudu.
  - Vaatleja kastis leiab, et kehad liiguvad kui Galilei taustsüsteemis.
- Oletame, et kasti tõmmatakse ühtlase kiirendusega “üles”:
  - Kasti suhtes paigal püsimiseks peab vaatleja konstantse jalajõuga seisma.
  - Ilma jõuta kõik kehad langevad kasti suhtes sama kiirendusega.
  - ⇒ Vaatleja järeldab, et laboris valitseb gravitatsiooniväli.
- Kas vaatleja saab eristada gravitatsiooni ja kiirendust?
  - Vaatleja riputab lae alla massi ja nööri tekib konstantne pinge.
  - ⇒ Vaatleja kastis järeldab: pinget tekitab gravitatsioonijõud  $\sim m_g$ .
  - ⇒ Väline vaatleja järeldab: pinge on kiirendamiseks vajalik jõud  $\sim m_i$ .
    - $m_i = m_g$ : gravitatsiooni ei saa eristada kiirendusest.

## Gravitatsioon ja kiirendus (§ 20)

- Valime taustkehaks labori kui kasti tühjas maailmaruumis:
  - Kaugel taevakehadest ei ole gravitatsioonijõudu.
  - Vaatleja kassis leiab, et kehad liiguvad kui Galilei taustsüsteemis.
- Oletame, et kasti tõmmatakse ühtlase kiirendusega “üles”:
  - Kasti suhtes paigal püsimiseks peab vaatleja konstantse jalajõuga seisma.
  - Ilma jõuta kõik kehad langevad kasti suhtes sama kiirendusega.
  - ⇒ Vaatleja järeldab, et laboris valitseb gravitatsiooniväli.
- Kas vaatleja saab eristada gravitatsiooni ja kiirendust?
  - Vaatleja riputab lae alla massi ja nööri tekib konstantne pinge.
  - ⇒ Vaatleja kassis järeldab: pinget tekitab gravitatsioonijõud  $\sim m_g$ .
  - ⇒ Väline vaatleja järeldab: pinge on kiirendamiseks vajalik jõud  $\sim m_i$ .
  - $m_i = m_g$ : gravitatsiooni ei saa eristada kiirendusest.

## Üldrelatiivsuspriintiip (§ 20)

Kõikides taustsüsteemides kehtivad samad füüsikalised seadused, arvesse võttes et gravitatsioon ja kiirendus on ekvivalentsed nähtused.

## Üldrelatiivsuspriinid ja vaatlused

- Valguse levimine gravitatsiooniväljas (§ 22):
    - Galilei taustsüsteemis levib valgus ühtlaselt ja sirgjoonelisel.
    - Kiirenevas taustsüsteemis levib valgus kõveral trajektoorigil.
- ⇒ Gravitatsiooniväljas levib valgus kõveral trajektoorigil.

## Üldrelatiivsuspriinid ja vaatlused

- Valguse levimine gravitatsiooniväljas (§ 22):
  - Galilei taustsüsteemis levib valgus ühtlaselt ja sirgjooneliselt.
  - Kiirenevas taustsüsteemis levib valgus kõveral trajektoorigil.
  - ⇒ Gravitatsiooniväljas levib valgus kõveral trajektoorigil.
- Kellad ja mastaabid pöörlevas taustsüsteemis (§ 23):
  - Pöörlevas süsteemis sõltub kiirus asukohast.
  - Aja möödumine ja mastaabide pikkused sõltuvad asukohast.
  - Eukleidilise geomeetriast ei piisa üldise aegruumi kirjeldamiseks.

# Üldrelatiivsusteooria põhimõtted

## Üldrelatiivsusprintsip ja vaatlused

- Valguse levimine gravitatsiooniväljas (§ 22):
  - Galilei taustsüsteemis levib valgus ühtlaselt ja sirgjooneliselt.
  - Kiirenevas taustsüsteemis levib valgus kõveral trajektoorigil.
  - ⇒ Gravitatsiooniväljas levib valgus kõveral trajektoorigil.
- Kellad ja mastaabid pöörlevas taustsüsteemis (§ 23):
  - Pöörlevas süsteemis sõltub kiirus asukohast.
  - Aja möödumine ja mastaabide pikkused sõltuvad asukohast.
  - Eukleidilisest geomeetriast ei piisa üldise aegruumi kirjeldamiseks.

## Üldrelatiivsusprintsip ja geomeetria

- Taustsüsteemiks võib valida **suvalist** koordinaatsüsteemi  $(t, x, y, z)$ . (§ 28)
- Üldrelatiivsusprintsip: igas taustsüsteemis on füüsikalistel seadustel sama kuju.
- Üldrelatiivsusteooria: gravitatsiooniteooria, kooskõlas üldrelatiivsusprintsipiga. (§ 29)
- Gravitatsiooni kirjeldab aegruumi **geomeetria**.

1. Eirelatiivsusteooria

2. Üldrelatiivsusteooria

3. Relatiivsusteooriast edasi

## Vaatlused kosmoloogias

- ⚡ Universumi kiirenev paisumine: tundmatu ja avastamata “tume energia”.
- ⚡ Kosmilise mikrolaine taustkiirguse isotroopsus: selgitamata “inflatsioon”.
- ⚡ Hubble’i parameetri erinevad mõõtmise tulemused sõltuvalt uuritud efektist.

## Vaatlused kosmoloogias

- ⚡ Universumi kiirenev paisumine: tundmatu ja avastamata “tume energia”.
- ⚡ Kosmilise mikrolaine taustkiirguse isotroopsus: selgitamata “inflatsioon”.
- ⚡ Hubble’i parameetri erinevad mõõtmise tulemused sõltuvalt uuritud efektist.

## Gravitatsioon, osakestefüüsika ja kvantteooria

- Kõik osakeste vastastikmõjud kirjeldatud kvantväljateooria abil.
- ⚡ Üldrelatiivsusteooria ja kvantteooria kirjeldused on omavahel vastuolus.



## Vaatlused kosmoloogias

- ⚡ Universumi kiirenev paisumine: tundmatu ja avastamata “tume energia”.
- ⚡ Kosmilise mikrolaine taustkiirguse isotroopsus: selgitamata “inflatsioon”.
- ⚡ Hubble’i parameetri erinevad mõõtmise tulemused sõltuvalt uuritud efektist.

## Gravitatsioon, osakestefüüsika ja kvantteooria

- Kõik osakeste vastastikmõjud kirjeldatud kvantväljateooria abil.
- ⚡ Üldrelatiivsusteooria ja kvantteooria kirjeldused on omavahel vastuolus.

## Võimalikud lahendused relatiivsuspriintiibi üldistusest?

- Taustsüsteemi üldisem geomeetriline mõiste, kaasates teisi välju?
- Üldisem teisendus taustsüsteemide vahel, mis viitab laiendatud teooriale?

Asukohast sõltuv gravitatsiooniseadus: skalaarväli

- Gravitatsiooni tugevust määrav tegur  $G$  pole konstant, vaid skalaarväli  $\phi(x)$ .

⇒ Skalaar-tensori gravitatsiooniteooria dünaamilise skalaarväljaga.

# Gravitatsiooniteooria ja geomeetria üldistused

## Asukohast sõltuv gravitatsiooniseadus: skalaarväli

- Gravitatsiooni tugevust määrav tegur  $G$  pole konstant, vaid skalaarväli  $\phi(x)$ .
- ⇒ Skalaar-tensori gravitatsiooniteooria dünaamilise skalaarväljaga.

## Üldisem vabalangemise seadus: seostus

- Vabalangemise seadus üldrelatiivsusteoorias:

$$\ddot{x}^\mu + \Gamma^\mu_{\nu\rho} \dot{x}^\nu \dot{x}^\rho = 0, \quad \Gamma^\mu_{\nu\rho} = \frac{1}{2} g^{\mu\sigma} (\partial_\nu g_{\sigma\rho} + \partial_\rho g_{\nu\sigma} - \partial_\sigma g_{\nu\rho}).$$

- Üldisem seostus  $\Gamma^\mu_{\nu\rho}$ , mis ei ole täielikult määratud meetrika  $g_{\mu\nu}$  kaudu?

# Gravitatsiooniteooria ja geomeetria üldistused

## Asukohast sõltuv gravitatsiooniseadus: skalaarväli

- Gravitatsiooni tugevust määrav tegur  $G$  pole konstant, vaid skalaarväli  $\phi(x)$ .
- ⇒ Skalaar-tensori gravitatsiooniteooria dünaamilise skalaarväljaga.

## Üldisem vabalangemise seadus: seostus

- Vabalangemise seadus üldrelatiivsusteoorias:

$$\ddot{x}^\mu + \Gamma^\mu_{\nu\rho} \dot{x}^\nu \dot{x}^\rho = 0, \quad \Gamma^\mu_{\nu\rho} = \frac{1}{2} g^{\mu\sigma} (\partial_\nu g_{\sigma\rho} + \partial_\rho g_{\nu\sigma} - \partial_\sigma g_{\nu\rho}).$$

- Üldisem seostus  $\Gamma^\mu_{\nu\rho}$ , mis ei ole täielikult määratud meetrika  $g_{\mu\nu}$  kaudu?

## Üldisem kella mõiste: Finsleri geomeetria

- Omaaeg: aeg  $\tau$ , mida liikuv kell näitab:

$$\tau(\lambda_2) - \tau(\lambda_1) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} F(\gamma(\lambda), \dot{\gamma}(\lambda)) d\lambda, \quad F = \sqrt{-g_{\mu\nu} \dot{\gamma}^\mu \dot{\gamma}^\nu}.$$

- Üldisem pikkusemõõt  $F$ ?

## Sissejuhatav näide: konformsed teisendused

- Meetrika asendamine skalaar-tensori teoorias skaleeritud meetrikaga:

$$g_{\mu\nu}(x) \mapsto g_{\mu\nu}(x) \exp(\gamma(\phi(x))).$$

⇒ Gravitatsioonivälja dünaamika võrdselt kirjeldatav teisendatud meetrika kaudu.

## Sissejuhatav näide: konformsed teisendused

- Meetrika asendamine skalaar-tensori teorias skaleeritud meetrikaga:

$$g_{\mu\nu}(x) \mapsto g_{\mu\nu}(x) \exp(\gamma(\phi(x))).$$

⇒ Gravitatsioonivälja dünaamika võrdselt kirjeldatav teisendatud meetrika kaudu.

## Eristatud üldistatud “taustsüsteemid” laiendatud geomeetrias?

- Skalaar-tensoriteooria: Jordani raam - aine ei interageeru skalaarväljaga.
- Meetriline teleparalleelne teooria: Weitzenböcki raam - spinni seostus võrdub nulliga.
- Sümmeetriline teleparalleelne teooria: kokkulangev raam - seostus võrdub nulliga.
- Üldised teleparalleelsed teooriad: inertsikalibratsioon - eristab inertsiaali ja gravitatsiooni.

## Sissejuhatav näide: konformsed teisendused

- Meetrika asendamine skalaar-tensori teorias skaleeritud meetrikaga:

$$g_{\mu\nu}(x) \mapsto g_{\mu\nu}(x) \exp(\gamma(\phi(x))).$$

⇒ Gravitatsioonivälja dünaamika võrdselt kirjeldatav teisendatud meetrika kaudu.

## Eristatud üldistatud “taustsüsteemid” laiendatud geomeetrias?

- Skalaar-tensoriteooria: Jordani raam - aine ei interageeru skalaarväljaga.
- Meetriline teleparalleelne teooria: Weitzenböcki raam - spinni seostus võrdub nulliga.
- Sümmeetriline teleparalleelne teooria: kokkulangev raam - seostus võrdub nulliga.
- Üldised teleparalleelsed teooriad: inertsikalibratsioon - eristab inertsiaali ja gravitatsiooni.

## Üldistatud relatiivsuspriintiip

- **Ükski** mainitud kalibratsioon ei ole vaatluste kaudu eristatav!

⇒ **Füüsikalised seadused ei sõltu valitud kalibratsioonist ega raamist.**