

Jäljed taevas

Kvantgravitatsiooni otsingul kosmoses

Manuel Hohmann

Teoreetilise Füüsika Labor - Füüsika Instituut - Tartu Ülikool
Tippkeskus “Fundamentaalne Universum”



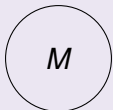
Tumeaine kuu astronoomia loeng - 18. november 2025

1. Miks kvantgravitatsioon?
2. Lähenemised kvantgravitatsioonile
3. Kvantgravitatsiooni jäljed
4. Otsingud ja vaatlused
5. Kokkuvõte

1. Miks kvantgravitatsioon?
2. Lähenemised kvantgravitatsioonile
3. Kvantgravitatsiooni jäljed
4. Otsingud ja vaatlused
5. Kokkuvõte

Newtoni gravitatsioon

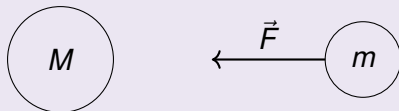
- Mass M kohas $\vec{R}$.



Newtoni gravitatsioon

- Mass M kohas $\vec{R}$.
- Jõud massile m kohas $\vec{r}$:

$$\vec{F} = -GMm \frac{\vec{r} - \vec{R}}{|\vec{r} - \vec{R}|^3}. \quad (1)$$



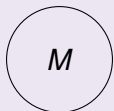
Newtoni gravitatsioon

- Mass M kohas $\vec{R}$.
- Jõud massile m kohas $\vec{r}$:

$$\vec{F} = -GMm \frac{\vec{r} - \vec{R}}{|\vec{r} - \vec{R}|^3}. \quad (1)$$

⇒ Mass M tekitab potentsiaali kohas $\vec{r}$:

$$\Phi = -\frac{GM}{|\vec{r} - \vec{R}|}. \quad (2)$$



$\Phi(\vec{r})$

Newtoni gravitatsioon

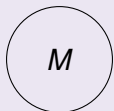
- Mass M kohas $\vec{R}$.
- Jõud massile m kohas $\vec{r}$:

$$\vec{F} = -GMm \frac{\vec{r} - \vec{R}}{|\vec{r} - \vec{R}|^3}. \quad (1)$$

⇒ Mass M tekitab potentsiaali kohas $\vec{r}$:

$$\Phi = -\frac{GM}{|\vec{r} - \vec{R}|}. \quad (2)$$

⇒ Sõltub M asukohast $\vec{R}$ samal ajal.



$\Phi(\vec{r})$

Newtoni gravitatsioon ja elektrostaatika

Newtoni gravitatsioon

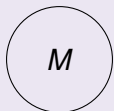
- Mass M kohas $\vec{R}$.
- Jõud massile m kohas $\vec{r}$:

$$\vec{F} = -GMm \frac{\vec{r} - \vec{R}}{|\vec{r} - \vec{R}|^3}. \quad (1)$$

⇒ Mass M tekitab potentsiaali kohas $\vec{r}$:

$$\Phi = -\frac{GM}{|\vec{r} - \vec{R}|}. \quad (2)$$

⇒ Sõltub M asukohast $\vec{R}$ samal ajal.



$\Phi(\vec{r})$

Elektrostaatika

- Laeng Q kohas $\vec{R}$.



Newtoni gravitatsioon ja elektrostaatika

Newtoni gravitatsioon

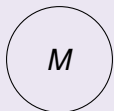
- Mass M kohas $\vec{R}$.
- Jõud massile m kohas $\vec{r}$:

$$\vec{F} = -GMm \frac{\vec{r} - \vec{R}}{|\vec{r} - \vec{R}|^3}. \quad (1)$$

⇒ Mass M tekitab potentsiaali kohas $\vec{r}$:

$$\Phi = -\frac{GM}{|\vec{r} - \vec{R}|}. \quad (2)$$

⇒ Sõltub M asukohast $\vec{R}$ samal ajal.

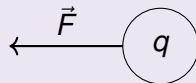
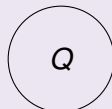


$\Phi(\vec{r})$

Elektrostaatika

- Laeng Q kohas $\vec{R}$.
- Jõud laengule q kohas $\vec{r}$:

$$\vec{F} = \frac{Qq}{4\pi\epsilon} \frac{\vec{r} - \vec{R}}{|\vec{r} - \vec{R}|^3}. \quad (3)$$



Newtoni gravitatsioon ja elektrostaatika

Newtoni gravitatsioon

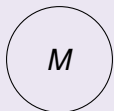
- Mass M kohas $\vec{R}$.
- Jõud massile m kohas $\vec{r}$:

$$\vec{F} = -GMm \frac{\vec{r} - \vec{R}}{|\vec{r} - \vec{R}|^3}. \quad (1)$$

⇒ Mass M tekitab potentsiaali kohas $\vec{r}$:

$$\Phi = -\frac{GM}{|\vec{r} - \vec{R}|}. \quad (2)$$

⇒ Sõltub M asukohast $\vec{R}$ samal ajal.



$\Phi(\vec{r})$

Elektrostaatika

- Laeng Q kohas $\vec{R}$.
- Jõud laengule q kohas $\vec{r}$:

$$\vec{F} = \frac{Qq}{4\pi\epsilon} \frac{\vec{r} - \vec{R}}{|\vec{r} - \vec{R}|^3}. \quad (3)$$

⇒ Laeng Q tekitab potentsiaali kohas $\vec{r}$:

$$\Phi = \frac{Q}{4\pi\epsilon |\vec{r} - \vec{R}|}. \quad (4)$$



$\Phi(\vec{r})$

Newtoni gravitatsioon ja elektrostaatika

Newtoni gravitatsioon

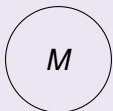
- Mass M kohas $\vec{R}$.
- Jõud massile m kohas $\vec{r}$:

$$\vec{F} = -GMm \frac{\vec{r} - \vec{R}}{|\vec{r} - \vec{R}|^3}. \quad (1)$$

⇒ Mass M tekitab potentsiaali kohas $\vec{r}$:

$$\Phi = -\frac{GM}{|\vec{r} - \vec{R}|}. \quad (2)$$

⇒ Sõltub M asukohast $\vec{R}$ samal ajal.



$\Phi(\vec{r})$

Elektrostaatika

- Laeng Q kohas $\vec{R}$.
- Jõud laengule q kohas $\vec{r}$:

$$\vec{F} = \frac{Qq}{4\pi\epsilon} \frac{\vec{r} - \vec{R}}{|\vec{r} - \vec{R}|^3}. \quad (3)$$

⇒ Laeng Q tekitab potentsiaali kohas $\vec{r}$:

$$\Phi = \frac{Q}{4\pi\epsilon |\vec{r} - \vec{R}|}. \quad (4)$$

⇒ Sõltub Q asukohast $\vec{R}$ samal ajal.

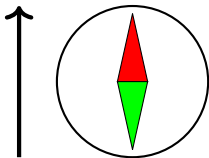


$\Phi(\vec{r})$

- Vaatlused viitasid elektrostaatikast edasi elektrodünaamikale:

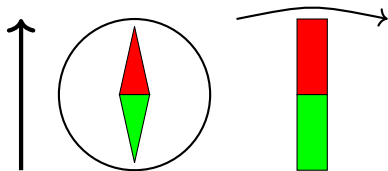
Maxwelli elektrodünaamika ja erirelatiivsusteooria

- Vaatlused viitasid elektrostaatikast edasi elektrodünaamikale:
 1. Liikuvad laengud (voolud) mõjuvad magnetile $\Rightarrow$ magnetväli.



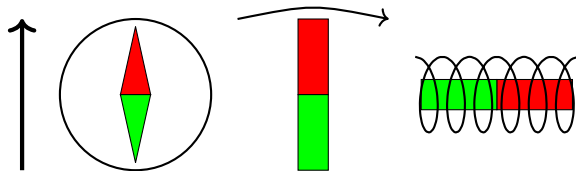
Maxwelli elektrodünaamika ja erirelatiivsusteooria

- Vaatlused viitasid elektrostaatikast edasi elektrodünaamikale:
 1. Liikuvad laengud (voolud) mõjuvad magnetile $\Rightarrow$ magnetväli.
 2. Magnetväli tekitab jõudu liikuvatele laengutele (voolule).



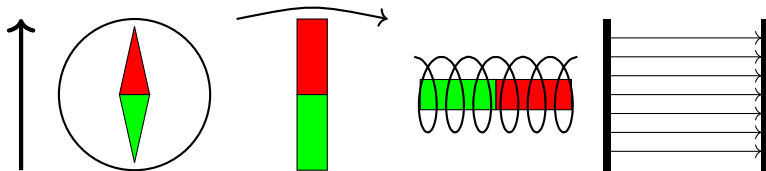
Maxwelli elektrodünaamika ja erirelatiivsusteooria

- Vaatlused viitasid elektrostaatikast edasi elektrodünaamikale:
 1. Liikuvad laengud (voolud) mõjuvad magnetile $\Rightarrow$ magnetväli.
 2. Magnetväli tekitab jõudu liikuvatele laengutele (voolule).
 3. Ajast sõltuv magnetväli tekitab elektrivälja.



Maxwelli elektrodünaamika ja erirelatiivsusteooria

- Vaatlused viitasid elektrostaatikast edasi elektrodünaamikale:
 1. Liikuvad laengud (voolud) mõjuvad magnetile $\Rightarrow$ magnetväli.
 2. Magnetväli tekitab jõudu liikuvatele laengutele (voolule).
 3. Ajast sõltuv magnetväli tekitab elektrivälja.
 4. Ajast sõltuv elektriväli tekitab magnetvälja.

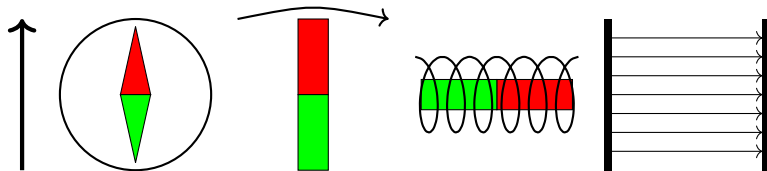


Maxwelli elektrodünaamika ja erirelatiivsusteooria

- Vaatlused viitasid elektrostaatikast edasi elektrodünaamikale:

1. Liikuvad laengud (voolud) mõjuvad magnetile $\Rightarrow$ magnetväli.
2. Magnetväli tekitab jõudu liikuvatele laengutele (voolule).
3. Ajast sõltuv magnetväli tekitab elektrivälja.
4. Ajast sõltuv elektriväli tekitab magnetvälja.

$\Rightarrow$ Maxwelli elektrodünaamika kirjeldab elektromagnetismi.



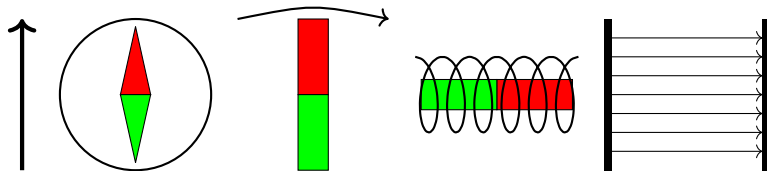
Maxwelli elektrodünaamika ja erirelatiivsusteooria

- Vaatlused viitasid elektrostaatikast edasi elektrodünaamikale:

1. Liikuvad laengud (voolud) mõjuvad magnetile $\Rightarrow$ magnetväli.
2. Magnetväli tekitab jõudu liikuvatele laengutele (voolule).
3. Ajast sõltuv magnetväli tekitab elektrivälja.
4. Ajast sõltuv elektriväli tekitab magnetvälja.

$\Rightarrow$ Maxwelli elektrodünaamika kirjeldab elektromagnetismi.

- Järeldused Maxwelli teooriast:



Maxwelli elektrodünaamika ja erirelatiivsusteooria

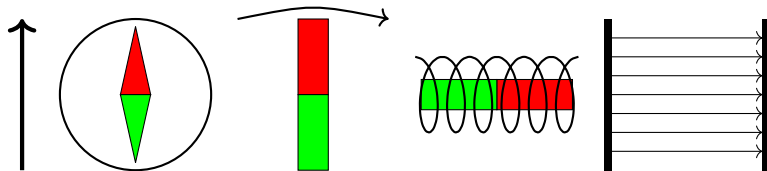
- Vaatlused viitasid elektrostaatikast edasi elektrodünaamikale:

1. Liikuvad laengud (voolud) mõjuvad magnetile $\Rightarrow$ magnetväli.
2. Magnetväli tekitab jõudu liikuvatele laengutele (voolule).
3. Ajast sõltuv magnetväli tekitab elektrivälja.
4. Ajast sõltuv elektriväli tekitab magnetvälja.

$\Rightarrow$ Maxwelli elektrodünaamika kirjeldab elektromagnetismi.

- Järeldused Maxwelli teooriast:

1. Elektriväli ja magnetväli võivad moodustada laineid.



Maxwelli elektrodünaamika ja erirelatiivsusteooria

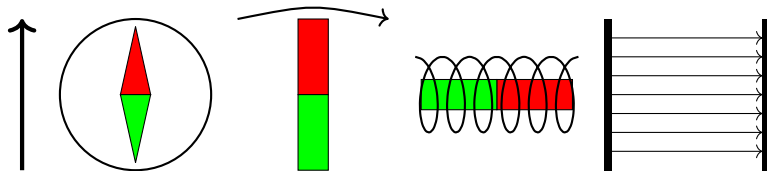
- Vaatlused viitasid elektrostaatikast edasi elektrodünaamikale:

1. Liikuvad laengud (voolud) mõjuvad magnetile $\Rightarrow$ magnetväli.
2. Magnetväli tekitab jõudu liikuvatele laengutele (voolule).
3. Ajast sõltuv magnetväli tekitab elektrivälja.
4. Ajast sõltuv elektriväli tekitab magnetvälja.

$\Rightarrow$ Maxwelli elektrodünaamika kirjeldab elektromagnetismi.

- Järeldused Maxwelli teooriast:

1. Elektriväli ja magnetväli võivad moodustada laineid.
2. Kiirenev laeng kiirgab elektromagnetlaineid.



Maxwelli elektrodünaamika ja erirelatiivsusteooria

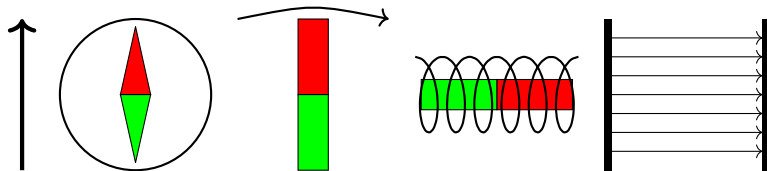
- Vaatlused viitasid elektrostaatikast edasi elektrodünaamikale:

1. Liikuvad laengud (voolud) mõjuvad magnetile $\Rightarrow$ magnetväli.
2. Magnetväli tekitab jõudu liikuvatele laengutele (voolule).
3. Ajast sõltuv magnetväli tekitab elektrivälja.
4. Ajast sõltuv elektriväli tekitab magnetvälja.

$\Rightarrow$ Maxwelli elektrodünaamika kirjeldab elektromagnetismi.

- Järeldused Maxwelli teooriast:

1. Elektriväli ja magnetväli võivad moodustada laineid.
2. Kiirenev laeng kiirgab elektromagnetlaineid.
3. Võrranditest leidub elektromagnetlainete levimiskiirus c .



Maxwelli elektrodünaamika ja erirelatiivsusteooria

- Vaatlused viitasid elektrostaatikast edasi elektrodünaamikale:

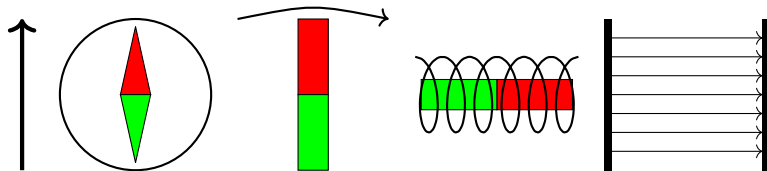
1. Liikuvad laengud (voolud) mõjuvad magnetile $\Rightarrow$ magnetväli.
2. Magnetväli tekitab jõudu liikuvatele laengutele (voolule).
3. Ajast sõltuv magnetväli tekitab elektrivälja.
4. Ajast sõltuv elektriväli tekitab magnetvälja.

$\Rightarrow$ Maxwelli elektrodünaamika kirjeldab elektromagnetismi.

- Järeldused Maxwelli teooriast:

1. Elektriväli ja magnetväli võivad moodustada laineid.
2. Kiirenev laeng kiirgab elektromagnetlaineid.
3. Võrranditest leidub elektromagnetlainete levimiskiirus c .

$\Rightarrow$ Elektromagnetvälja levimiskiirus on lõplik.



Maxwelli elektrodünaamika ja erirelatiivsusteooria

- Vaatlused viitasid elektrostaatikast edasi elektrodünaamikale:

1. Liikuvad laengud (voolud) mõjuvad magnetile $\Rightarrow$ magnetväli.
2. Magnetväli tekitab jõudu liikuvatele laengutele (voolule).
3. Ajast sõltuv magnetväli tekitab elektrivälja.
4. Ajast sõltuv elektriväli tekitab magnetvälja.

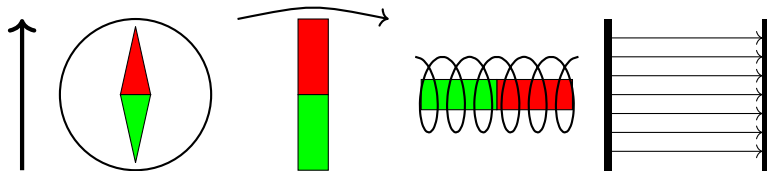
$\Rightarrow$ Maxwelli elektrodünaamika kirjeldab elektromagnetismi.

- Järeldused Maxwelli teooriast:

1. Elektriväli ja magnetväli võivad moodustada laineid.
2. Kiirenev laeng kiirgab elektromagnetlaineid.
3. Võrranditest leidub elektromagnetlainete levimiskiirus c .

$\Rightarrow$ Elektromagnetvälja levimiskiirus on lõplik.

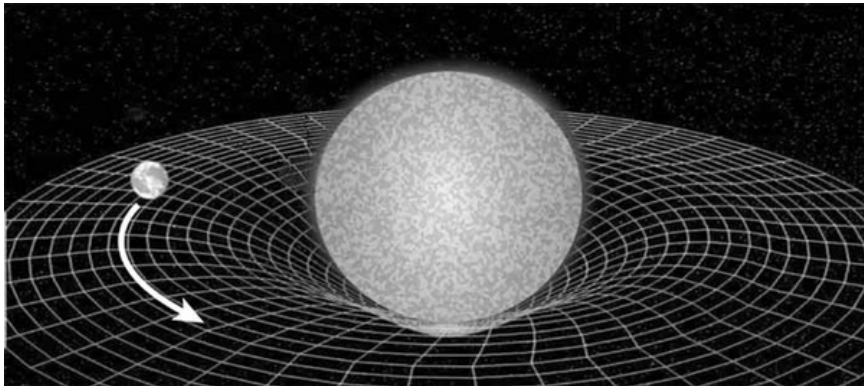
$\Rightarrow$ Erirelatiivsusteooria.



- ⚡ Newtoni gravitatsiooni viivimatu jõud ei ole kooskõlas erirelatiivsusega.

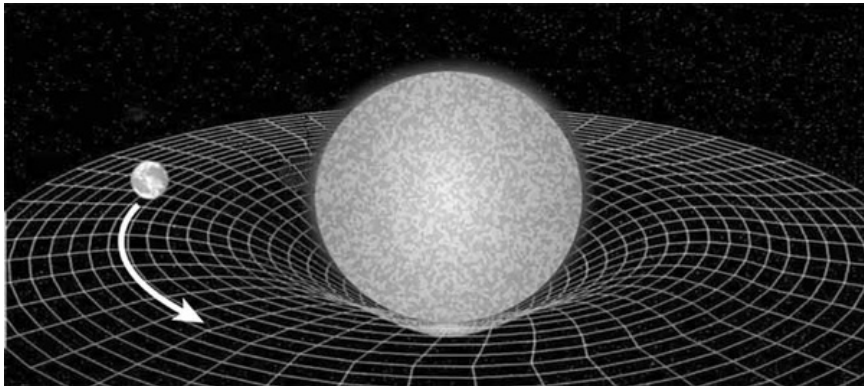
Üldrelatiivsusteooria

- ⚡ Newtoni gravitatsiooni viivimatu jõud ei ole kooskõlas erirelatiivsusega.
- ⇒ Üldrelatiivsusteooria: gravitatsiooni kirjeldab **aegruumi kõverus**:



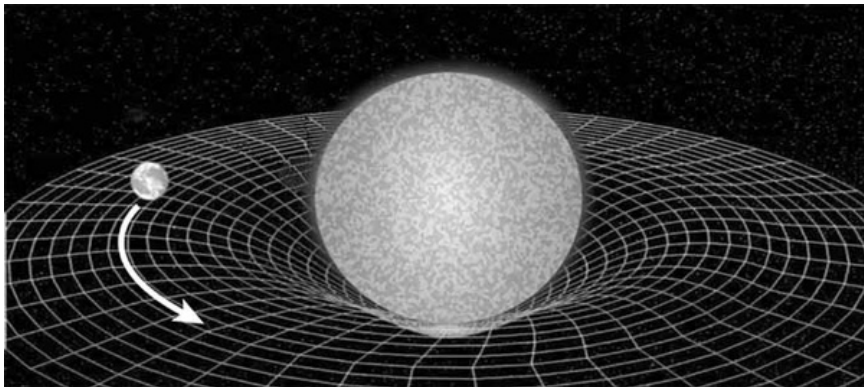
Üldrelatiivsusteooria

- ⚡ Newtoni gravitatsiooni viivimatu jõud ei ole kooskõlas erirelatiivsusega.
- ⇒ Üldrelatiivsusteooria: gravitatsiooni kirjeldab aegruumi kõverus:
 - Mass, energia, impulss, rõhk... kõverdavad aegruumi.



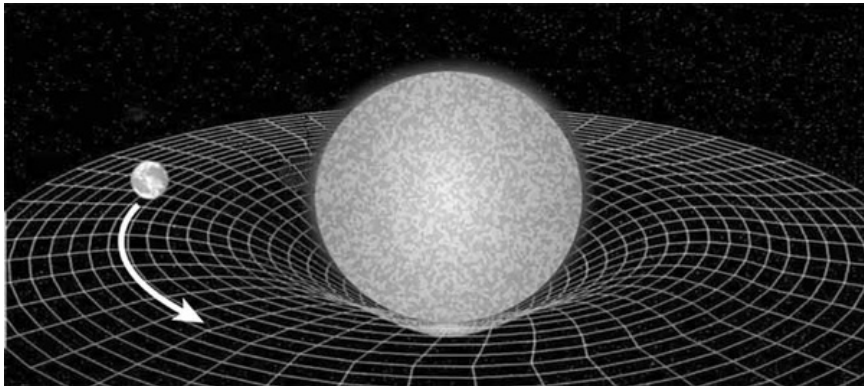
Üldreelatiivsusteooria

- ⚡ Newtoni gravitatsiooni viivimatu jõud ei ole kooskõlas erirelatiivsusega.
- ⇒ Üldreelatiivsusteooria: gravitatsiooni kirjeldab aegruumi kõverus:
 - Mass, energia, impulss, rõhk. . . kõverdavad aegruumi.
 - Kõverdatud aegruum mõjub teistele massidele, valgusele, kelladele. . .



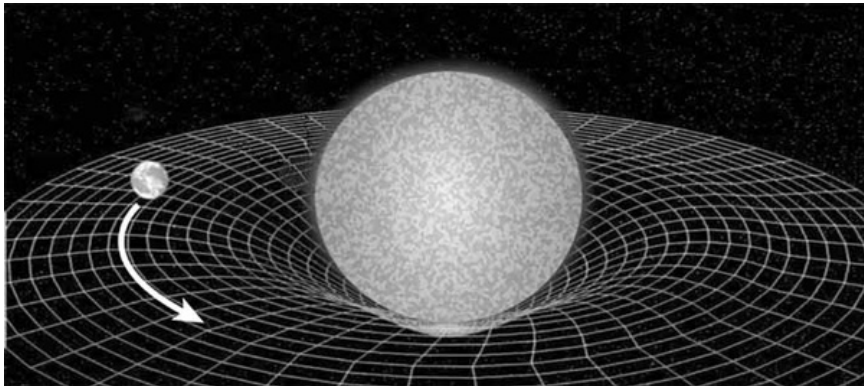
Üldreelatiivsusteooria

- ⚡ Newtoni gravitatsiooni viivimatu jõud ei ole kooskõlas erirelatiivsusega.
- ⇒ Üldreelatiivsusteooria: gravitatsiooni kirjeldab aegruumi kõverus:
 - Mass, energia, impulss, rõhk... kõverdavad aegruumi.
 - Kõverdatud aegruum mõjub teistele massidele, valgusele, kelladele...
 - Aegruumi kõverus levib kui gravitatsioonilaine.



Üldreelatiivsusteooria

- ⚡ Newtoni gravitatsiooni viivimatu jõud ei ole kooskõlas erirelatiivsusega.
- ⇒ Üldreelatiivsusteooria: gravitatsiooni kirjeldab aegruumi kõverus:
 - Mass, energia, impulss, rõhk. . . kõverdavad aegruumi.
 - Kõverdatud aegruum mõjub teistele massidele, valgusele, kelladele. . .
 - Aegruumi kõverus levib kui gravitatsioonilaine.
 - Kiirenev masside liikumine tekitab gravitatsioonilaineid.



- Vaatlused viitasid mõistatusele:

- Vaatlused viitasid mõistatusele:
 1. Mustkiirguri (ehk soojuskiirguri) spekter on infrapunases lõplik.

- Vaatlused viitasid mõistatusele:
 1. Mustkiirguri (ehk soojuskiirguri) spekter on infrapunases lõplik.
 2. Fotoefekt: intensiivne, kuid punane valgus ei vabasta metallist elektrone.

- Vaatlused viitasid mõistatusele:
 1. Mustkiirguri (ehk soojuskiirguri) spekter on infrapunases lõplik.
 2. Fotoefekt: intensiivne, kuid punane valgus ei vabasta metallist elektrone.
 3. Aatomid koosnevad elektriliselt laetud osakestest, kuid ei kiirga ja on stabiilsed.

- Vaatlused viitasid mõistatusele:

1. Mustkiirguri (ehk soojuskiirguri) spekter on infrapunases lõplik.
2. Fotoefekt: intensiivne, kuid punane valgus ei vabasta metallist elektrone.
3. Aatomid koosnevad elektriliselt laetud osakestest, kuid ei kiirga ja on stabiilsed.

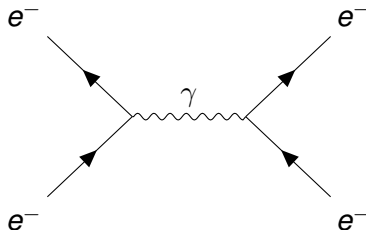
⇒ Elektromagnetlaine koosneb osakestest: footonid.

- Vaatlused viitasid mõistatusele:

1. Mustkiirguri (ehk soojuskiirguri) spekter on infrapunases lõplik.
2. Fotoefekt: intensiivne, kuid punane valgus ei vabasta metallist elektrone.
3. Aatomid koosnevad elektriliselt laetud osakestest, kuid ei kiirga ja on stabiilsed.

⇒ Elektromagnetlaine koosneb osakestest: fotonid.

⇒ Kvantväljateooria: foton kannab elektromagnetismi laetud osakeste vahel.



Üldrelatiivsusteooria ja kvantteooria - kvantgravitatsioon?

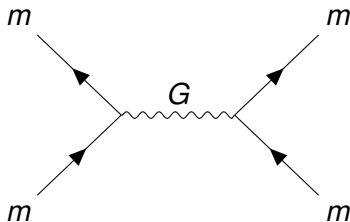
- Mõned küsimused millele teooria peaks vastama:

Üldrelatiivsusteooria ja kvantteooria - kvantgravitatsioon?

- Mõned küsimused millele teooria peaks vastama:
 1. Kas (neutraalsetest) massidest võib koosneda stabiilne “gravitatsiooniatom”?

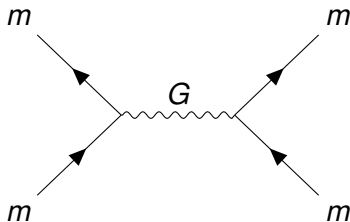
Üldrelatiivsusteooria ja kvantteooria - kvantgravitatsioon?

- Mõned küsimused millele teooria peaks vastama:
 1. Kas (neutraalsetest) massidest võib koosneda stabiilne “gravitatsiooniatom”?
 2. Kas gravitatsioonijõudu vahendab elementaariosake - graviton?



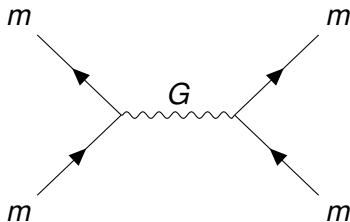
Üldrelatiivsusteooria ja kvantteooria - kvantgravitatsioon?

- Mõned küsimused millele teooria peaks vastama:
 1. Kas (neutraalsetest) massidest võib koosneda stabiilne “gravitatsiooniatom”?
 2. Kas gravitatsioonijõudu vahendab elementaarosake - graviton?
 3. Kuidas on gravitonid seotud aegruumi kõverusega?



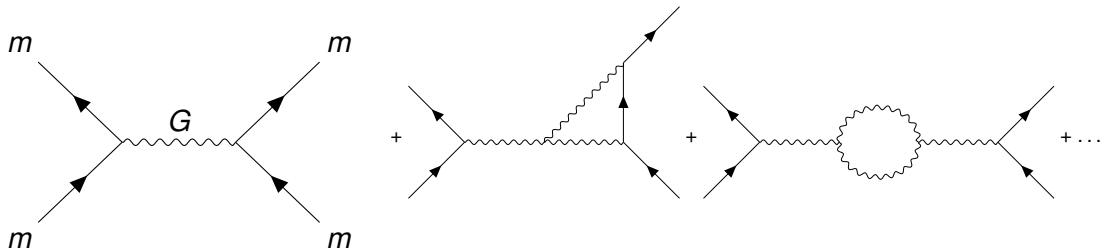
Üldrelatiivsusteooria ja kvantteooria - kvantgravitatsioon?

- Mõned küsimused millele teooria peaks vastama:
 1. Kas (neutraalsetest) massidest võib koosneda stabiilne “gravitatsiooniatom”?
 2. Kas gravitatsioonijõudu vahendab elementaarosake - graviton?
 3. Kuidas on gravitonid seotud aegruumi kõverusega?
- Probleem: gravitonitel on energia, seega nad tekitavad gravitatsiooni.



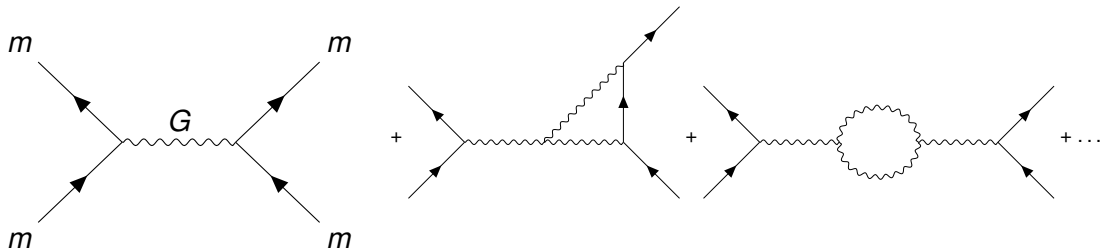
Üldrelatiivsusteooria ja kvantteooria - kvantgravitatsioon?

- Mõned küsimused millele teooria peaks vastama:
 1. Kas (neutraalsetest) massidest võib koosneda stabiilne “gravitatsiooniatom”?
 2. Kas gravitatsioonijõudu vahendab elementaarosake - graviton?
 3. Kuidas on gravitonid seotud aegruumi kõverusega?
- Probleem: gravitonitel on energia, seega nad tekitavad gravitatsiooni.
⇒ Vastastikmõju mitme gravitoni vahel.



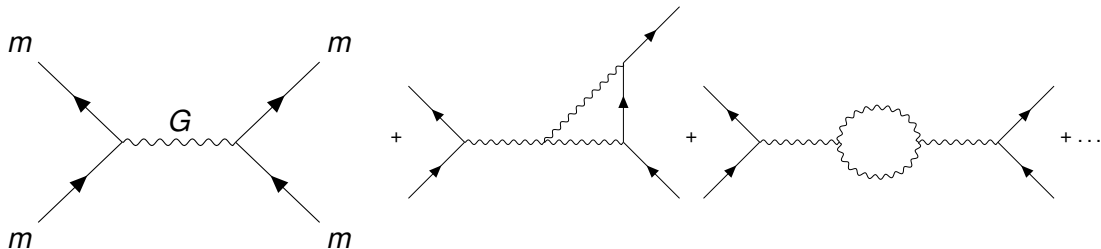
Üldrelatiivsusteooria ja kvantteooria - kvantgravitatsioon?

- Mõned küsimused millele teooria peaks vastama:
 1. Kas (neutraalsetest) massidest võib koosneda stabiilne “gravitatsiooniatom”?
 2. Kas gravitatsioonijõudu vahendab elementaarosake - graviton?
 3. Kuidas on gravitonid seotud aegruumi kõverusega?
- Probleem: gravitonitel on energia, seega nad tekitavad gravitatsiooni.
 - ⇒ Vastastikmõju mitme gravitoni vahel.
 - ⇒ Vastastikmõju tugevus ei koondunud, summad on lõpmatud.



Üldrelatiivsusteooria ja kvantteooria - kvantgravitatsioon?

- Mõned küsimused millele teooria peaks vastama:
 1. Kas (neutraalsetest) massidest võib koosneda stabiilne “gravitatsiooniatom”?
 2. Kas gravitatsioonijõudu vahendab elementaarosake - graviton?
 3. Kuidas on gravitonid seotud aegruumi kõverusega?
- Probleem: gravitonitel on energia, seega nad tekitavad gravitatsiooni.
 - ⇒ Vastastikmõju mitme gravitoni vahel.
 - ⇒ Vastastikmõju tugevus ei koondunud, summad on lõpmatud.
- Milline on gravitatsiooni kvantteooria?



1. Miks kvantgravitatsioon?
2. Lähenemised kvantgravitatsioonile
3. Kvantgravitatsiooni jäljed
4. Otsingud ja vaatlused
5. Kokkuvõte

Stringiteooria

- Stringiteooria põhimõte:

Stringiteooria

- Stringiteooria põhimõtte:
 - Kvant(välja)teooria on punktosaeste kvantteooria.

Stringiteooria

- Stringiteooria põhimõte:
 - Kvant(välja)teooria on punktosakeste kvantteooria.
 - ↪ Stringiteooria on ühemõõtmeliste “osakeste” (stringide) kvantteooria.

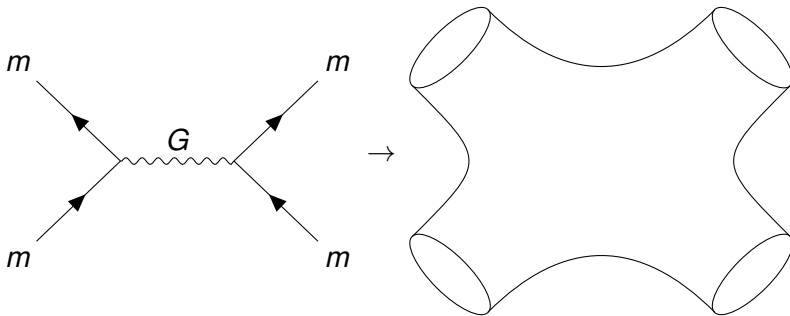
Stringiteooria

- Stringiteooria põhimõtte:

- Kvant(välja)teooria on punktosaeste kvantteooria.

- ↪ Stringiteooria on ühemõõtmeliste “osaeste” (stringide) kvantteooria.

⇒ Asendame vastastikmõju stringide diagrammidega.



Stringiteooria

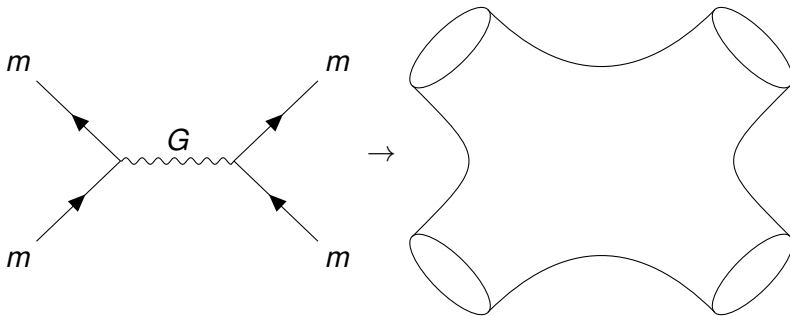
- Stringiteooria põhimõtte:

- Kvant(välja)teooria on punktosaeste kvantteooria.

- ↪ Stringiteooria on ühemõõtmeliste “osaeste” (stringide) kvantteooria.

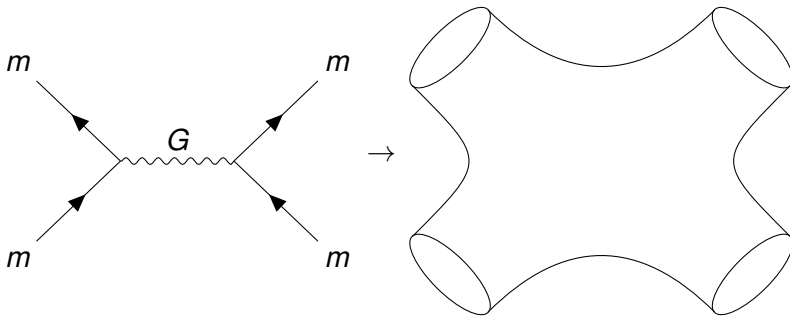
⇒ Asendame vastastikmõju stringide diagrammidega.

⇒ Lõpmatute suuruste asemel lõplikud tulemused.



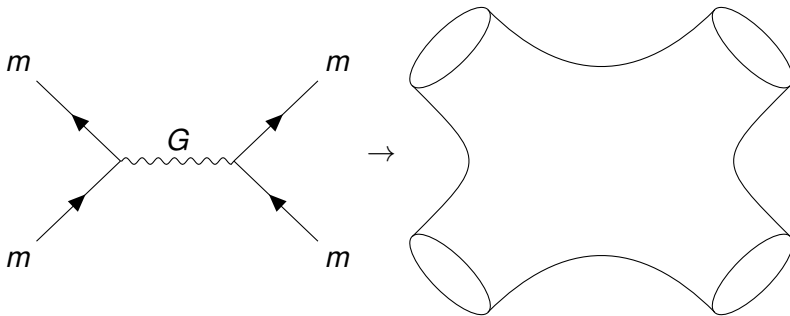
Stringiteooria

- Stringiteooria põhimõtte:
 - Kvant(välja)teooria on punktosaeste kvantteooria.
 - ↪ Stringiteooria on ühemõõtmeliste “osaeste” (stringide) kvantteooria.
- ⇒ Asendame vastastikmõju stringide diagrammidega.
- ⇒ Lõpmatute suuruste asemel lõplikud tulemused.
- Probleemid:



Stringiteooria

- Stringiteooria põhimõtte:
 - Kvant(välja)teooria on punktosaakeste kvantteooria.
 - ↪ Stringiteooria on ühemõõtmeliste “osaakeste” (stringide) kvantteooria.
- ⇒ Asendame vastastikmõju stringide diagrammidega.
- ⇒ Lõpmatute suuruste asemel lõplikud tulemused.
- Probleemid:
 - ⚡ Aegruum peab olema 10-mõõtmeline - mida teha 6 dimensiooniga?



Stringiteooria

- Stringiteooria põhimõtte:

- Kvant(välja)teooria on punktosaakeste kvantteooria.

- ↪ Stringiteooria on ühemõõtmeliste “osaakeste” (stringide) kvantteooria.

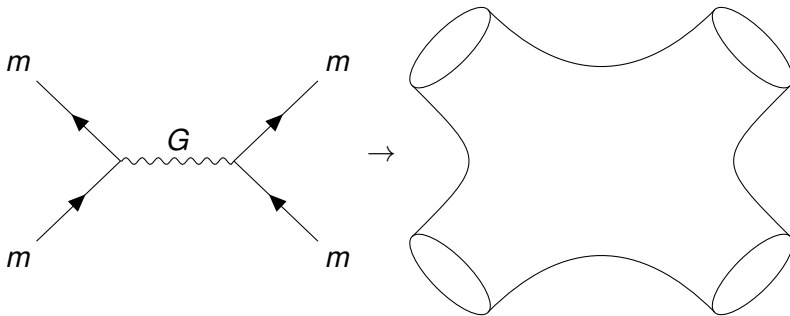
⇒ Asendame vastastikmõju stringide diagrammidega.

⇒ Lõpmatute suuruste asemel lõplikud tulemused.

- Probleemid:

- ⚡ Aegruum peab olema 10-mõõtmeline - mida teha 6 dimensiooniga?

- ⚡ Raske tuletada konkreetseid ennustusi teooria testimiseks.



Stringiteooria

- Stringiteooria põhimõtte:

- Kvant(välja)teooria on punktosaakeste kvantteooria.

- ↪ Stringiteooria on ühemõõtmeliste “osaakeste” (stringide) kvantteooria.

⇒ Asendame vastastikmõju stringide diagrammidega.

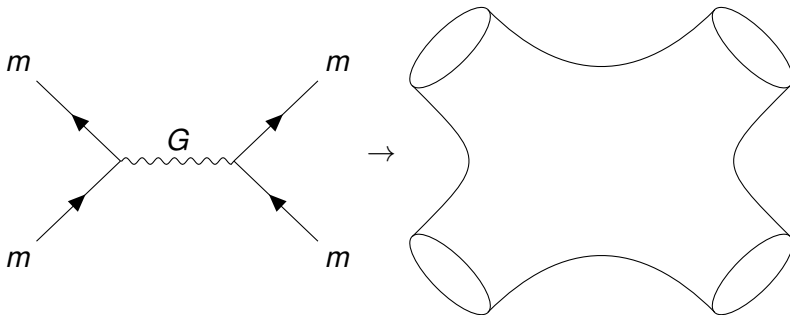
⇒ Lõpmatute suuruste asemel lõplikud tulemused.

- Probleemid:

- ⚡ Aegruum peab olema 10-mõõtmeline - mida teha 6 dimensiooniga?

- ⚡ Raske tuletada konkreetseid ennustusi teooria testimiseks.

- ⚡ Palju vaakumilahendeid, kuid ebaselge, milline vastab meie universumile.



Aegruum kui vaht?

- Järeldused kvantväljateooriast:

Aegruum kui vaht?

- Järeldused kvantväljateooriast:
 - Vaakumis pidevalt tekivad ja kaovad “virtuaalsed” osakesed.

Aegruum kui vaht?

- Järeldused kvantväljateooriast:
 - Vaakumis pidevalt tekivad ja kaovad “virtuaalsed” osakesed.
 - ⇒ Kvantgravitatsioonis tekivad ja kaovad ka virtuaalsed gravitonid.

Aegruum kui vaht?

- Järeldused kvantväljateooriast:
 - Vaakumis pidevalt tekivad ja kaovad “virtuaalsed” osakesed.
 - ⇒ Kvantgravitatsioonis tekivad ja kaovad ka virtuaalsed gravitonid.
 - ⇒ Graviton kui aegruumi geomeetria vahendaja - aegruumi kui “vaht” väikestel skaaladel.



Diskreetne aegruum?

- Tahke aine struktuur:

Diskreetne aegruum?

- Tahke aine struktuur:
 - Suurtel skaaladel aine paistab “sile”, pidev keha olevat.

Diskreetne aegruum?

- Tahke aine struktuur:
 - Suurtel skaaladel aine paistab “sile”, pidev keha olevat.
 - Väikestel skaaladel ilmub, et tahke keha koosneb aatomitest.

Diskreetne aegruum?

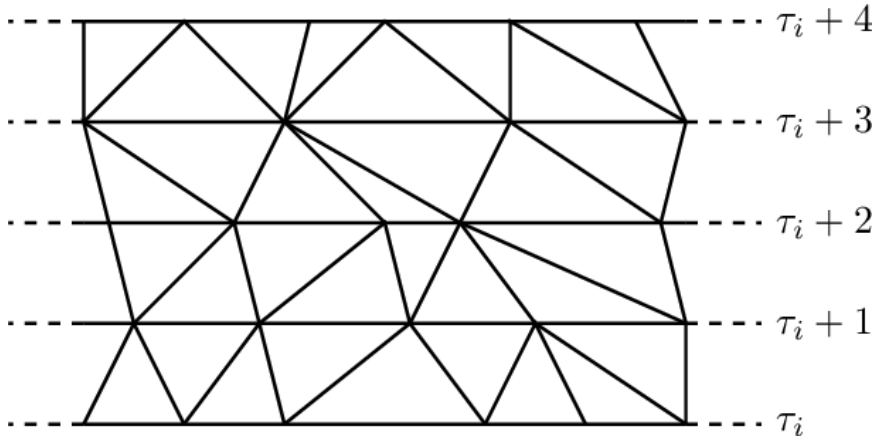
- Tahke aine struktuur:
 - Suurtel skaaladel aine paistab “sile”, pidev keha olevat.
 - Väikestel skaaladel ilmub, et tahke keha koosneb aatomitest.
 - Aatomite paigaldus sõltub materjalist: regulaarne võre, korratu struktuur. . .

Diskreetne aegruum?

- Tahke aine struktuur:
 - Suurtel skaaladel aine paistab “sile”, pidev keha olevat.
 - Väikestel skaaladel ilmub, et tahke keha koosneb aatomitest.
 - Aatomite paigaldus sõltub materjalist: regulaarne võre, korratu struktuur. . .
 - Vastastikmõju aatomite vahel määrab materjali omadusi.

Diskreetne aegruum?

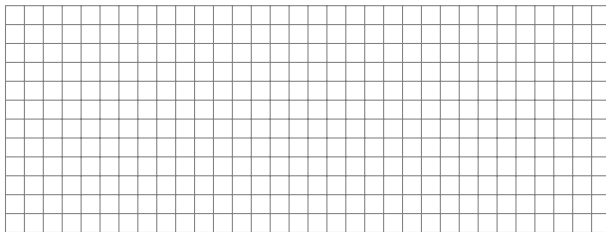
- Tahke aine struktuur:
 - Suurtel skaaladel aine paistab “sile”, pidev keha olevat.
 - Väikestel skaaladel ilmub, et tahke keha koosneb aatomitest.
 - Aatomite paigaldus sõltub materjalist: regulaarne võre, korratu struktuur. . .
 - Vastastikmõju aatomite vahel määrab materjali omadusi.
- ↪ Kas aegruum võib koosneda “aatomitest”, mille paigaldus määrab geomeetriat?



1. Miks kvantgravitatsioon?
2. Lähenemised kvantgravitatsioonile
3. Kvantgravitatsiooni jäljed
4. Otsingud ja vaatlused
5. Kokkuvõte

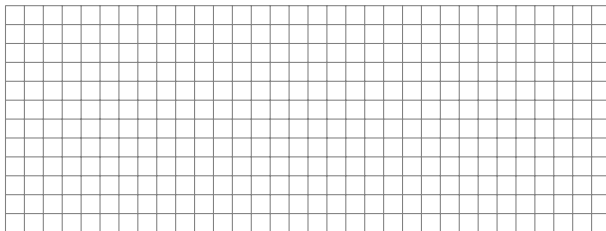
Osakeste liikumine kvantgravitatsioonis

- Tuletame meelde: väikestel skaaladel aegruum ei pruugi olla sile.



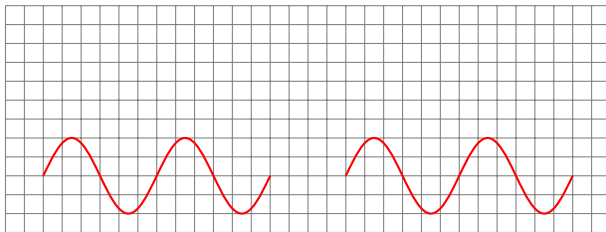
Osakeste liikumine kvantgravitatsioonis

- Tuletame meelde: väikestel skaaladel aegruum ei pruugi olla sile.
- ↪ Osakeste liikumine sõltub energiast / impulsist:



Osakeste liikumine kvantgravitatsioonis

- Tuletame meelde: väikestel skaaladel aegruum ei pruugi olla sile.
- Osakeste liikumine sõltub energiast / impulsist:
 - Madal energia $\hat{=}$ suur lainepikkus: aegruum paistab sile olevat; otsene teekond.

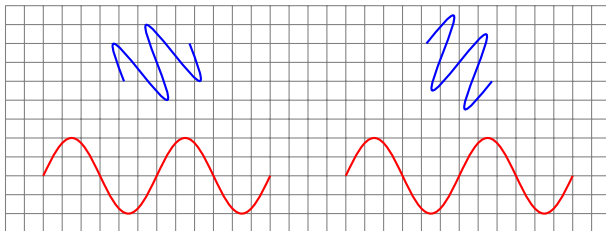


Osakeste liikumine kvantgravitatsioonis

- Tuletame meelde: väikestel skaaladel aegruum ei pruugi olla sile.

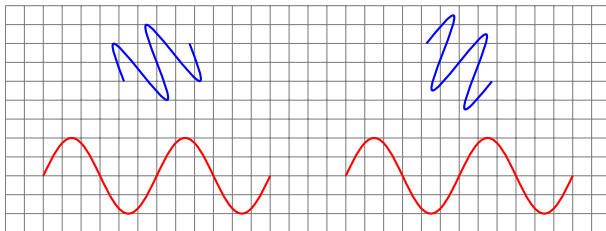
→ Osakeste liikumine sõltub energiast / impulsist:

- Madal energia $\hat{=}$ suur lainepikkus: aegruum paistab sile olevat; otsene teekond.
- Kõrge energia $\hat{=}$ väike lainepikkus: aegruum paistab kõver olevat; häiritus.



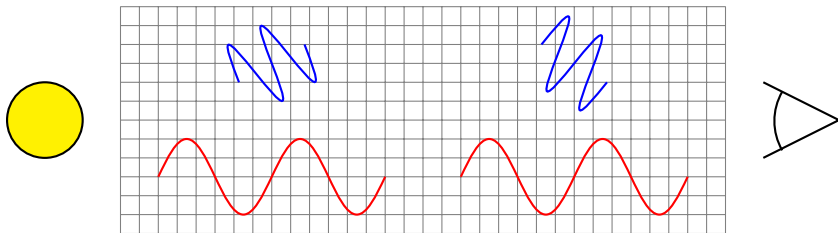
Osakeste liikumine kvantgravitatsioonis

- Tuletame meelde: väikestel skaaladel aegruum ei pruugi olla sile.
- ↪ Osakeste liikumine sõltub energiast / impulsist:
 - Madal energia $\hat{=}$ suur lainepikkus: aegruum paistab sile olevat; otsene teekond.
 - Kõrge energia $\hat{=}$ väike lainepikkus: aegruum paistab kõver olevat; häiritus.
- ↪ Osakestel on spinn (polarisatsioon): lisamõju, kui aegruumil on eelissuund.



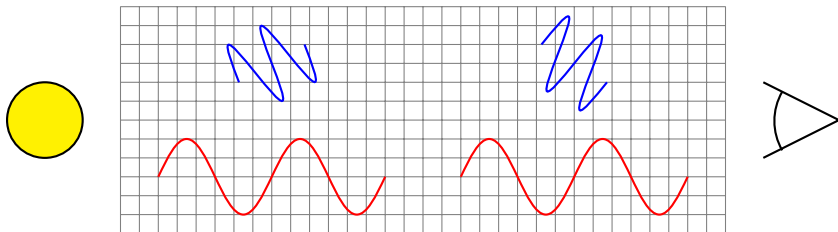
Osakeste liikumine kvantgravitatsioonis

- Tuletame meelde: väikestel skaaladel aegruum ei pruugi olla sile.
- ↪ Osakeste liikumine sõltub energiast / impulsist:
 - Madal energia $\hat{=}$ suur lainepikkus: aegruum paistab sile olevat; otsene teekond.
 - Kõrge energia $\hat{=}$ väike lainepikkus: aegruum paistab kõver olevat; häiritus.
- ↪ Osakestel on spinn (polarisatsioon): lisamõju, kui aegruumil on eelissuund.
- ⇒ Osakeste teekond, selle pikkus ja möödumise kestus ei ole konstantsed.



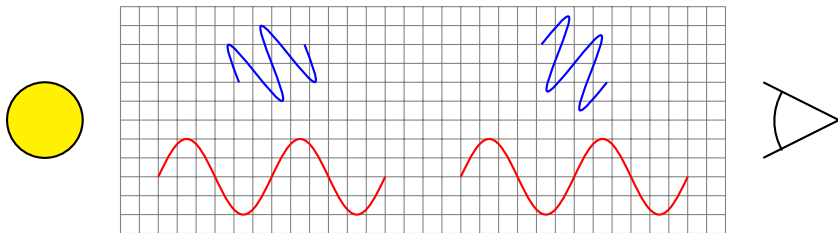
Osakeste liikumine kvantgravitatsioonis

- Tuletame meelde: väikestel skaaladel aegruum ei pruugi olla sile.
- ↪ Osakeste liikumine sõltub energiast / impulsist:
 - Madal energia $\hat{=}$ suur lainepikkus: aegruum paistab sile olevat; otsene teekond.
 - Kõrge energia $\hat{=}$ väike lainepikkus: aegruum paistab kõver olevat; häiritus.
- ↪ Osakestel on spinn (polarisatsioon): lisamõju, kui aegruumil on eelissuund.
- ⇒ Osakeste teekond, selle pikkus ja möödumise kestus ei ole konstantsed.
- Efekt on seda suurem, mida...



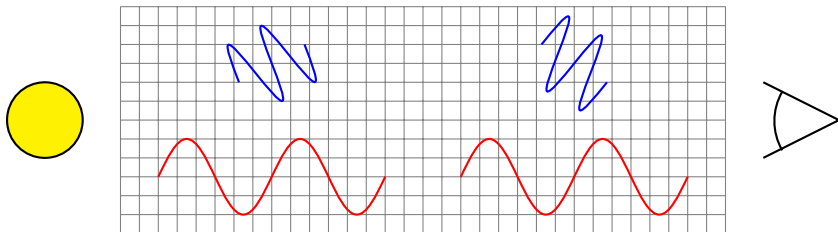
Osakeste liikumine kvantgravitatsioonis

- Tuletame meelde: väikestel skaaladel aegruum ei pruugi olla sile.
- ↪ Osakeste liikumine sõltub energiast / impulsist:
 - Madal energia $\hat{=}$ suur lainepikkus: aegruum paistab sile olevat; otsene teekond.
 - Kõrge energia $\hat{=}$ väike lainepikkus: aegruum paistab kõver olevat; häiritus.
- ↪ Osakestel on spinn (polarisatsioon): lisamõju, kui aegruumil on eelissuund.
- ⇒ Osakeste teekond, selle pikkus ja möödumise kestus ei ole konstantsed.
- Efekt on seda suurem, mida...
 - ... pikem on teekond: vaatleme võimalikult kaugeid allikaid kosmoses.



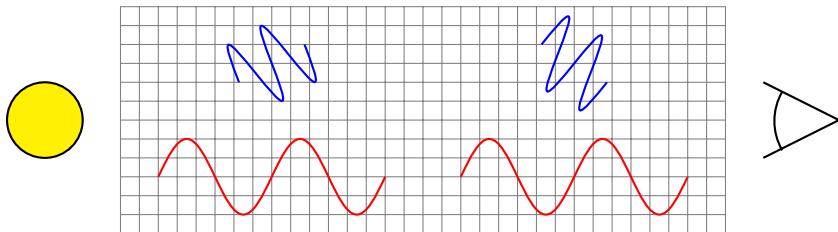
Osakeste liikumine kvantgravitatsioonis

- Tuletame meelde: väikestel skaaladel aegruum ei pruugi olla sile.
- ↪ Osakeste liikumine sõltub energiast / impulsist:
 - Madal energia $\hat{=}$ suur lainepikkus: aegruum paistab sile olevat; otsene teekond.
 - Kõrge energia $\hat{=}$ väike lainepikkus: aegruum paistab kõver olevat; häiritus.
- ↪ Osakestel on spinn (polarisatsioon): lisamõju, kui aegruumil on eelissuund.
- ⇒ Osakeste teekond, selle pikkus ja möödumise kestus ei ole konstantsed.
- Efekt on seda suurem, mida...
 - ... pikem on teekond: vaatleme võimalikult kaugeid allikaid kosmoses.
 - ... kõrgem on energia: vaatleme gammakiirgust ja neutriinosid.



Osakeste liikumine kvantgravitatsioonis

- Tuletame meelde: väikestel skaaladel aegruum ei pruugi olla sile.
- ↪ Osakeste liikumine sõltub energiast / impulsist:
 - Madal energia $\hat{=}$ suur lainepikkus: aegruum paistab sile olevat; otsene teekond.
 - Kõrge energia $\hat{=}$ väike lainepikkus: aegruum paistab kõver olevat; häiritus.
- ↪ Osakestel on spinn (polarisatsioon): lisamõju, kui aegruumil on eelissuund.
- ⇒ Osakeste teekond, selle pikkus ja möödumise kestus ei ole konstantsed.
- Efekt on seda suurem, mida...
 - ... pikem on teekond: vaatleme võimalikult kaugeid allikaid kosmoses.
 - ... kõrgem on energia: vaatleme gammakiirgust ja neutriinosid.
- ↪ Gammasähvatused (neutrontähtede kokkupõrge, massiivse tähe kollaps).



- Miks uurida kvantgravitatsiooni efekte mustade aukude ümbruses?

Tugevad gravitatsiooniväljad - mustad augud

- Miks uurida kvantgravitatsiooni efekte mustade aukude ümbruses?
 - Tuletame meelde: gravitonitel on energia, seega ka gravitatsioon.

Tugevad gravitatsiooniväljad - mustad augud

- Miks uurida kvantgravitatsiooni efekte mustade aukude ümbruses?
 - Tuletame meelde: gravitonitel on energia, seega ka gravitatsioon.
 - Kõige suurem efekt kui on palju gravitone: tugev gravitatsiooniväli.

Tugevad gravitatsiooniväljad - mustad augud

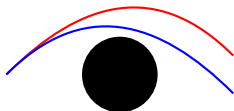
- Miks uurida kvantgravitatsiooni efekte mustade aukude ümbruses?
 - Tuletame meelde: gravitonitel on energia, seega ka gravitatsioon.
 - Kõige suurem efekt kui on palju gravitone: tugev gravitatsiooniväli.
 - Kõige tugevam gravitatsiooniallikas universumis: mustad augud.

Tugevad gravitatsiooniväljad - mustad augud

- Miks uurida kvantgravitatsiooni efekte mustade aukude ümbruses?
 - Tuletame meelde: gravitonitel on energia, seega ka gravitatsioon.
 - Kõige suurem efekt kui on palju gravitone: tugev gravitatsiooniväli.
 - Kõige tugevam gravitatsiooniallikas universumis: mustad augud.
- Võimalikud kvantgravitatsiooni efektid mustade aukude juures:

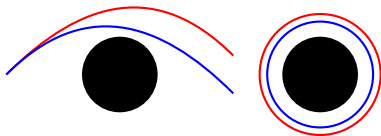
Tugevad gravitatsiooniväljad - mustad augud

- Miks uurida kvantgravitatsiooni efekte mustade aukude ümbruses?
 - Tuletame meelde: gravitonitel on energia, seega ka gravitatsioon.
 - Kõige suurem efekt kui on palju gravitone: tugev gravitatsiooniväli.
 - Kõige tugevam gravitatsiooniallikas universumis: mustad augud.
- Võimalikud kvantgravitatsiooni efektid mustade aukude juures:
 - Valguse kõrvalekaldumine: sõltuvus energiast ja polarisatsioonist.



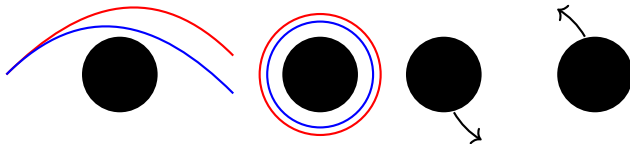
Tugevad gravitatsiooniväljad - mustad augud

- Miks uurida kvantgravitatsiooni efekte mustade aukude ümbruses?
 - Tuletame meelde: gravitonitel on energia, seega ka gravitatsioon.
 - Kõige suurem efekt kui on palju gravitone: tugev gravitatsiooniväli.
 - Kõige tugevam gravitatsiooniallikas universumis: mustad augud.
- Võimalikud kvantgravitatsiooni efektid mustade aukude juures:
 - Valguse kõrvalekaldumine: sõltuvus energiast ja polarisatsioonist.
 - Orbiidid musta augu ümber: sõltuvus objekti massist ja spinnist.



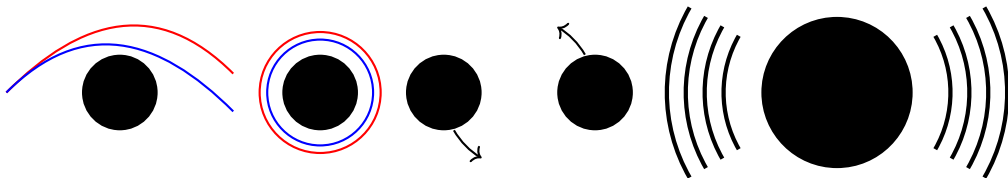
Tugevad gravitatsiooniväljad - mustad augud

- Miks uurida kvantgravitatsiooni efekte mustade aukude ümbruses?
 - Tuletame meelde: gravitonitel on energia, seega ka gravitatsioon.
 - Kõige suurem efekt kui on palju gravitone: tugev gravitatsiooniväli.
 - Kõige tugevam gravitatsiooniallikas universumis: mustad augud.
- Võimalikud kvantgravitatsiooni efektid mustade aukude juures:
 - Valguse kõrvalekaldumine: sõltuvus energiast ja polarisatsioonist.
 - Orbiidid musta augu ümber: sõltuvus objekti massist ja spinnist.
 - Mustade aukude kokkutiirlemine ja gravitatsioonilained.



Tugevad gravitatsiooniväljad - mustad augud

- Miks uurida kvantgravitatsiooni efekte mustade aukude ümbruses?
 - Tuletame meelde: gravitonitel on energia, seega ka gravitatsioon.
 - Kõige suurem efekt kui on palju gravitone: tugev gravitatsiooniväli.
 - Kõige tugevam gravitatsiooniallikas universumis: mustad augud.
- Võimalikud kvantgravitatsiooni efektid mustade aukude juures:
 - Valguse kõrvalekaldumine: sõltuvus energiast ja polarisatsioonist.
 - Orbiidid musta augu ümber: sõltuvus objekti massist ja spinnist.
 - Mustade aukude kokkutiirlemine ja gravitatsioonilained.
 - Musta augu võnkumine pärast kokkupõrget ja gravitatsioonilained.



- Miks uurida kvantgravitatsiooni varajases universumis?

Varajane universum

- Miks uurida kvantgravitatsiooni varajases universumis?
 - Varajane universum oli väiksem, tihedam, kuumem.

Varajane universum

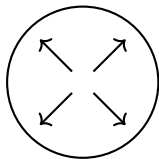
- Miks uurida kvantgravitatsiooni varajases universumis?
 - Varajane universum oli väiksem, tihedam, kuumem.
 - Suur mateeriatihedus $\hat{=}$ suur aegruumi kõverus $\hat{=}$ tugev gravitatsioon.

Varajane universum

- Miks uurida kvantgravitatsiooni varajases universumis?
 - Varajane universum oli väiksem, tihedam, kuumem.
 - Suur mateeriatihedus $\hat{=}$ suur aegruumi kõverus $\hat{=}$ tugev gravitatsioon.
- Võimalikud kvantgravitatsiooni efektid varajases universumis:

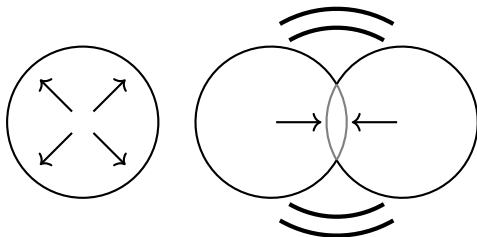
Varajane universum

- Miks uurida kvantgravitatsiooni varajases universumis?
 - Varajane universum oli väiksem, tihedam, kuumem.
 - Suur materiatihedus $\hat{=}$ suur aegruumi kõverus $\hat{=}$ tugev gravitatsioon.
- Võimalikud kvantgravitatsiooni efektid varajases universumis:
 - Inflatsioon: kiirenev paisumine mõjub universumi geomeetria ja tihedusele.



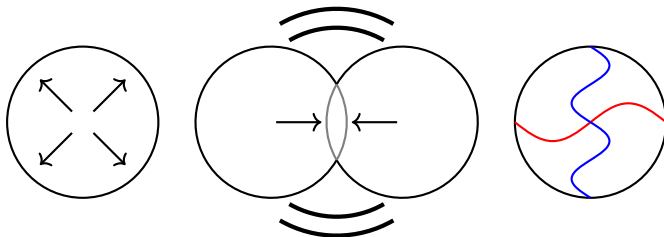
Varajane universum

- Miks uurida kvantgravitatsiooni varajases universumis?
 - Varajane universum oli väiksem, tihedam, kuumem.
 - Suur materiatihedus $\hat{=}$ suur aegruumi kõverus $\hat{=}$ tugev gravitatsioon.
- Võimalikud kvantgravitatsiooni efektid varajases universumis:
 - Inflatsioon: kiirenev paisumine mõjub universumi geomeetria ja tihedusele.
 - Gravitatsioonilained paisuvate piirkondade (“mullide”) kokkupõrgetest.



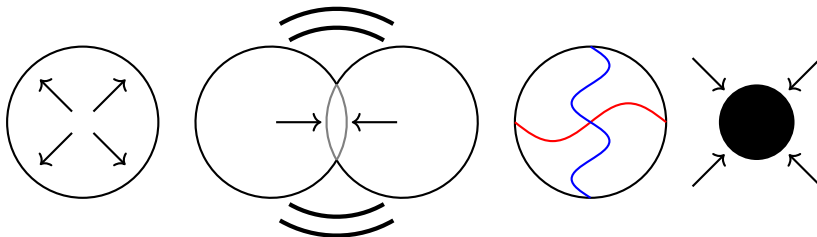
Varajane universum

- Miks uurida kvantgravitatsiooni varajases universumis?
 - Varajane universum oli väiksem, tihedam, kuumem.
 - Suur materiatihedus $\hat{=}$ suur aegruumi kõverus $\hat{=}$ tugev gravitatsioon.
- Võimalikud kvantgravitatsiooni efektid varajases universumis:
 - Inflatsioon: kiirenev paisumine mõjub universumi geomeetria ja tihedusele.
 - Gravitatsioonilained paisuvate piirkondade (“mullide”) kokkupõrgetest.
 - Ürgsed kvantvõnkumised ja karakteristikud lainepikkused.



Varajane universum

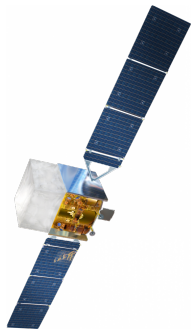
- Miks uurida kvantgravitatsiooni varajases universumis?
 - Varajane universum oli väiksem, tihedam, kuumem.
 - Suur materiatihedus $\hat{=}$ suur aegruumi kõverus $\hat{=}$ tugev gravitatsioon.
- Võimalikud kvantgravitatsiooni efektid varajases universumis:
 - Inflatsioon: kiirenev paisumine mõjub universumi geomeetria ja tihedusele.
 - Gravitatsioonilained paisuvate piirkondade ("mullide") kokkupõrgetest.
 - Ürgsed kvantvõnkumised ja karakteristlikud lainepikkused.
 - Ürgsete mustade aukude teke ülitihedatest piirkondadest.



1. Miks kvantgravitatsioon?
2. Lähenemised kvantgravitatsioonile
3. Kvantgravitatsiooni jäljed
4. Otsingud ja vaatlused
5. Kokkuvõte

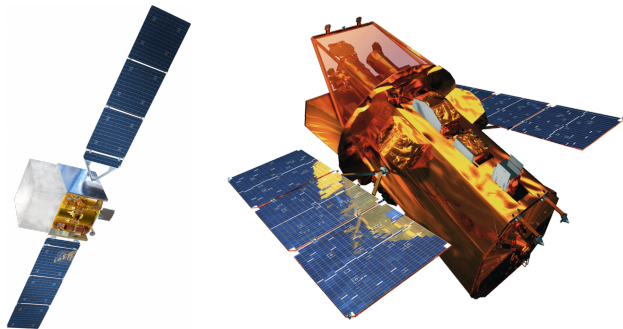
Kosmilise kiirguse detektorid kosmoses

- Fermi - kosmilise gammakiirguse teleskoop.



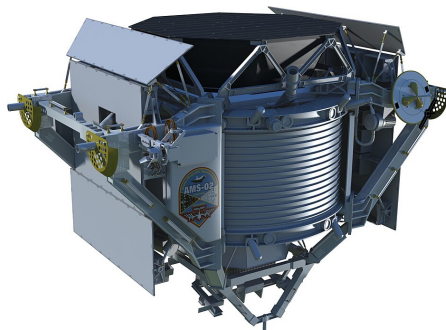
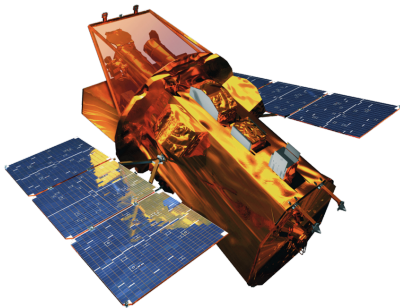
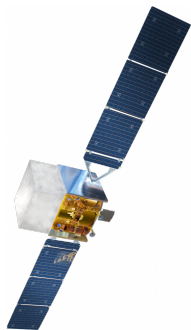
Kosmilise kiirguse detektorid kosmoses

- Fermi - kosmilise gammakiirguse teleskoop.
- Swift - röntgenkiirguse ja ultraviolettkiirguse teleskoop.



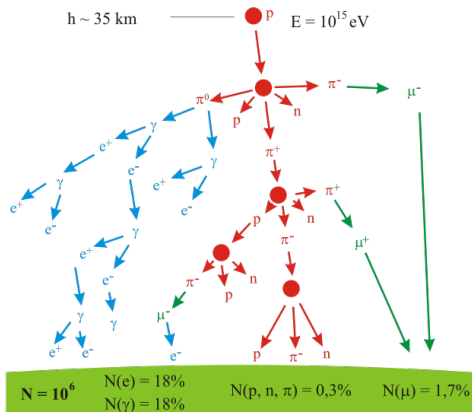
Kosmilise kiirguse detektorid kosmoses

- Fermi - kosmilise gammakiirguse teleskoop.
- Swift - röntgenkiirguse ja ultraviolettkiirguse teleskoop.
- Alpha Magnetic Spectrometer - laetud osakeste detektor.



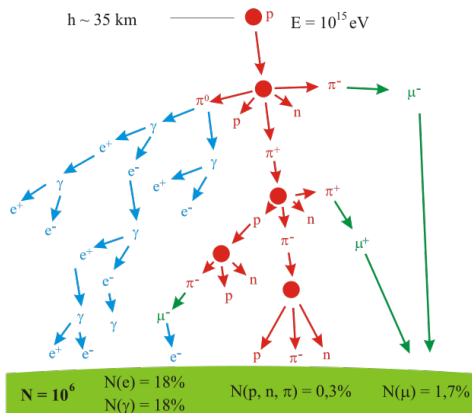
Kosmilise kiirguse uurimine maa peal

- Kosmilise sekundaarkiirguse printsiip:



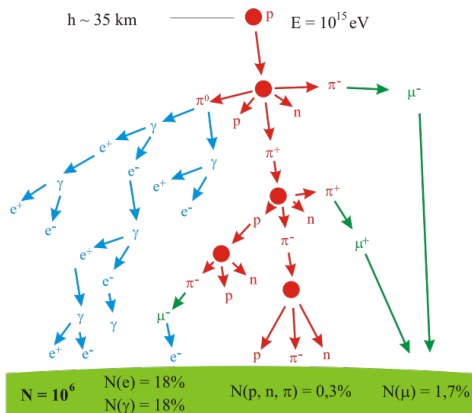
Kosmilise kiirguse uurimine maa peal

- Kosmilise sekundaarkiirguse printsiip:
 - Kõrge energiaga osake kosmosest tekitab kokkupõrget atmosfääris.



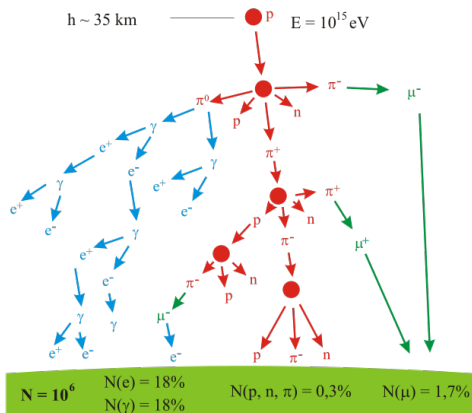
Kosmilise kiirguse uurimine maa peal

- Kosmilise sekundaarkiirguse printsiip:
 - Kõrge energiaga osake kosmosest tekitab kokkupõrget atmosfääris.
 - Kokkupõrgest tekivad uued (osaliselt ebastabiilsed) osakesed.



Kosmilise kiirguse uurimine maa peal

- Kosmilise sekundaarkiirguse printsiip:
 - Kõrge energiaga osake kosmosest tekitab kokkupõrget atmosfääris.
 - Kokkupõrgest tekivad uued (osaliselt ebastabiilsed) osakesed.
 - Uued osakesed lagunevad ja tekitavad veel kokkupõrke.

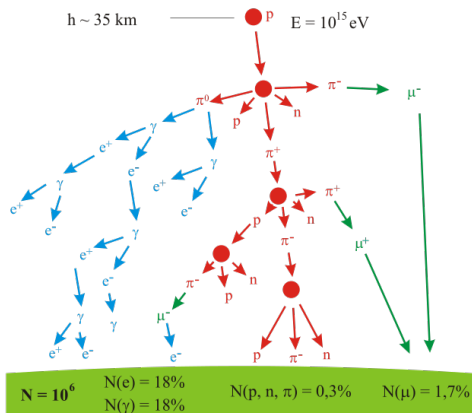


Kosmilise kiirguse uurimine maa peal

- Kosmilise sekundaarkiirguse printsiip:

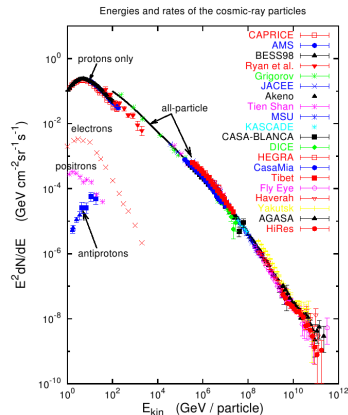
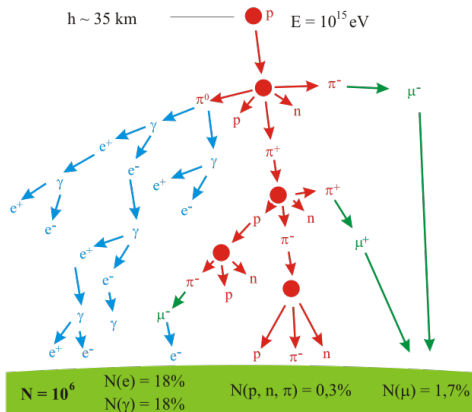
- Kõrge energiaga osake kosmosest tekitab kokkupõrget atmosfääris.
- Kokkupõrgest tekivad uued (osaliselt ebastabiilsed) osakesed.
- Uued osakesed lagunevad ja tekitavad veel kokkupõrke.

→ Uuritakse footoneid ja laetud osakesi mis maapinnale jõuavad.



Kosmilise kiirguse uurimine maa peal

- Kosmilise sekundaarkiirguse printsiip:
 - Kõrge energiaga osake kosmosest tekitab kokkupõrget atmosfääris.
 - Kokkupõrgest tekivad uued (osaliselt ebastabiilsed) osakesed.
 - Uued osakesed lagunevad ja tekitavad veel kokkupõrke.
- ⇒ Uuritakse footoneid ja laetud osakesi mis maapinnale jõuavad.
- ⇒ Algse kosmilise kiirguse spekter.



- Kuidas tuvastada kõrge energiaga neutriinosid kosmosest?

- Kuidas tuvastada kõrge energiaga neutriinosid kosmosest?
 - Neutriino tekitab kokkupõrget laetud osakesega (nt vees, jääs).

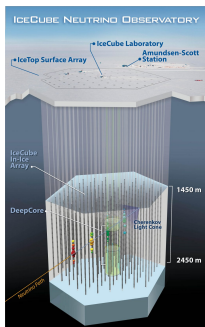
- Kuidas tuvastada kõrge energiaga neutriinosid kosmosest?
 - Neutriino tekitab kokkupõrget laetud osakesega (nt vees, jääs).
 - ↪ Aines liikuv laetud osake tekitab kiirgust (footonid).

Neutriinodetektorid

- Kuidas tuvastada kõrge energiaga neutriinosid kosmosest?
 - Neutriino tekitab kokkupõrget laetud osakesega (nt vees, jääs).
 - ↪ Aines liikuv laetud osake tekitab kiirgust (fotonid).
- Kõige suuremad praegused ja ehitatavad detektorid:

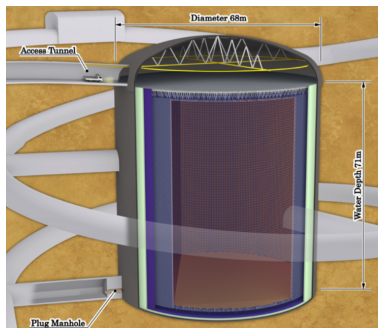
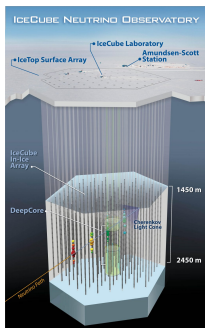
Neutriinodetektorid

- Kuidas tuvastada kõrge energiaga neutriinosid kosmosest?
 - Neutriino tekitab kokkupõrget laetud osakesega (nt vees, jääs).
 - ↪ Aines liikuv laetud osake tekitab kiirgust (fotonid).
- Kõige suuremad praegused ja ehitatavad detektorid:
 - IceCube - asub Antarktikas, läbipaistvas jääs.



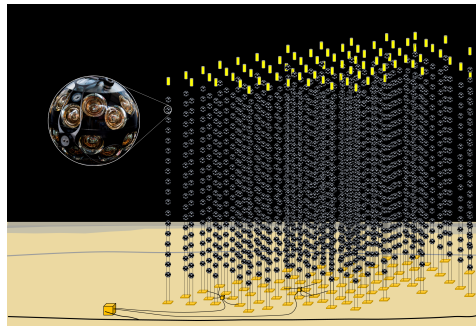
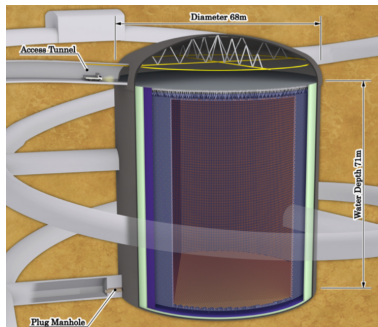
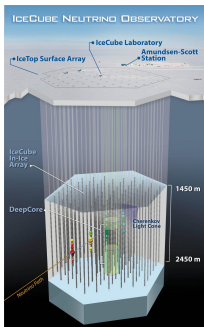
Neutriinodetektorid

- Kuidas tuvastada kõrge energiaga neutriinosid kosmosest?
 - Neutriino tekitab kokkupõrget laetud osakesega (nt vees, jääs).
 - ↪ Aines liikuv laetud osake tekitab kiirgust (fotonid).
- Kõige suuremad praegused ja ehitatavad detektorid:
 - IceCube - asub Antarktikas, läbipaistvas jääs.
 - Hyper-Kamiokande - ehitatakse Jaapanis koopas.



Neutriinodetektorid

- Kuidas tuvastada kõrge energiaga neutriinosid kosmosest?
 - Neutriino tekitab kokkupõrget laetud osakesega (nt vees, jääs).
 - ↪ Aines liikuv laetud osake tekitab kiirgust (fotonid).
- Kõige suuremad praegused ja ehitatavad detektorid:
 - IceCube - asub Antarktikas, läbipaistvas jääs.
 - Hyper-Kamiokande - ehitatakse Jaapanis koopas.
 - KM3NeT - ehitatakse Vahemeres.



Sündmushorisoni teleskoop

- Koosneb radioteleskoopidest üle maailma.

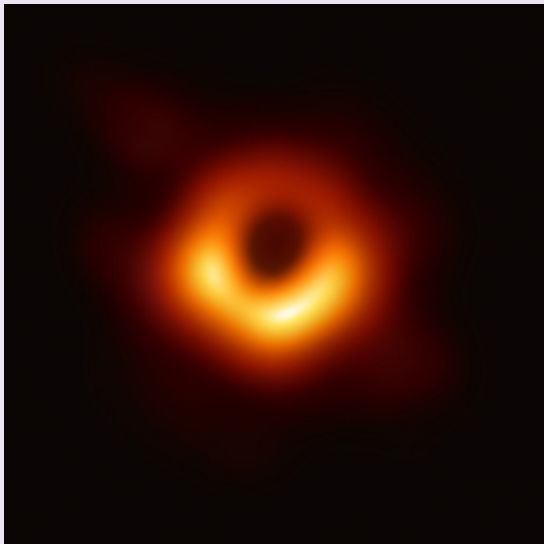


Sündmushorisoni teleskoop

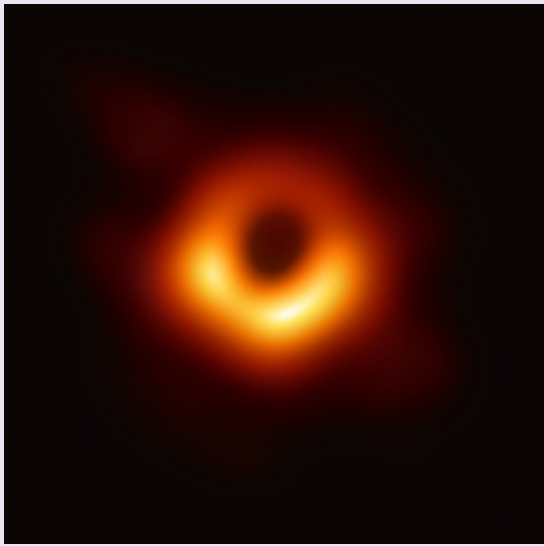
- Koosneb radioteleskoopidest üle maailma.
- Kõige suurem lahutusvõime, mida saab maa peal saavutada.



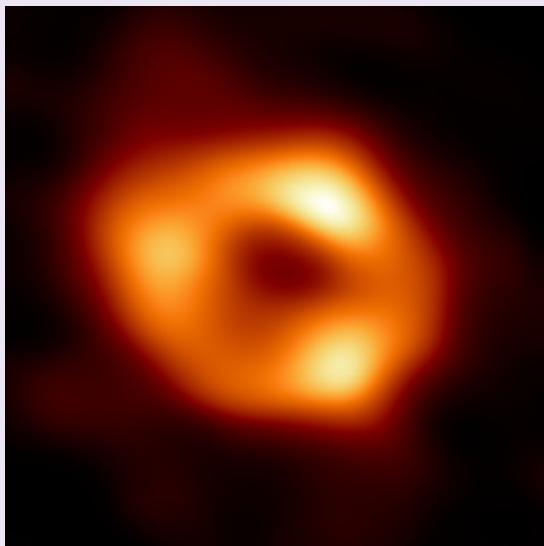
M87*



M87*



Sgr A*



- Sgr A*: must auk galaktika keskel.

Tähtede liikumine musta augu lähedal

- Sgr A*: must auk galaktika keskel.
- Gaasipilved varjuvad Sgr A*.

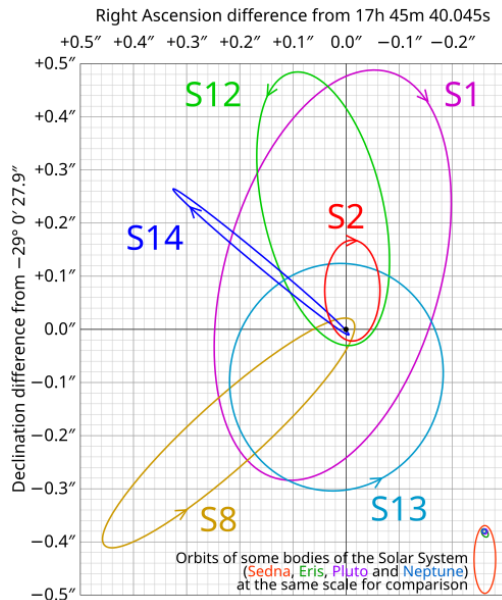
Tähtede liikumine musta augu lähedal

- Sgr A*: must auk galaktika keskel.
- Gaasipilved varjuvad Sgr A*.

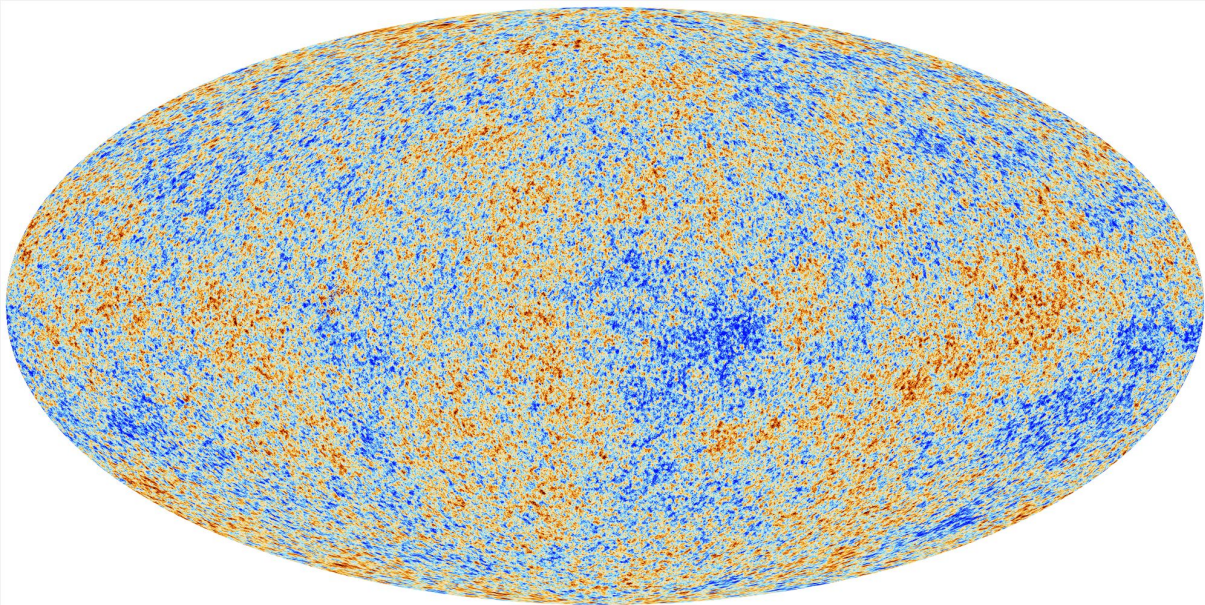
→ Infrapunateleskoobid.

Tähtede liikumine musta augu lähedal

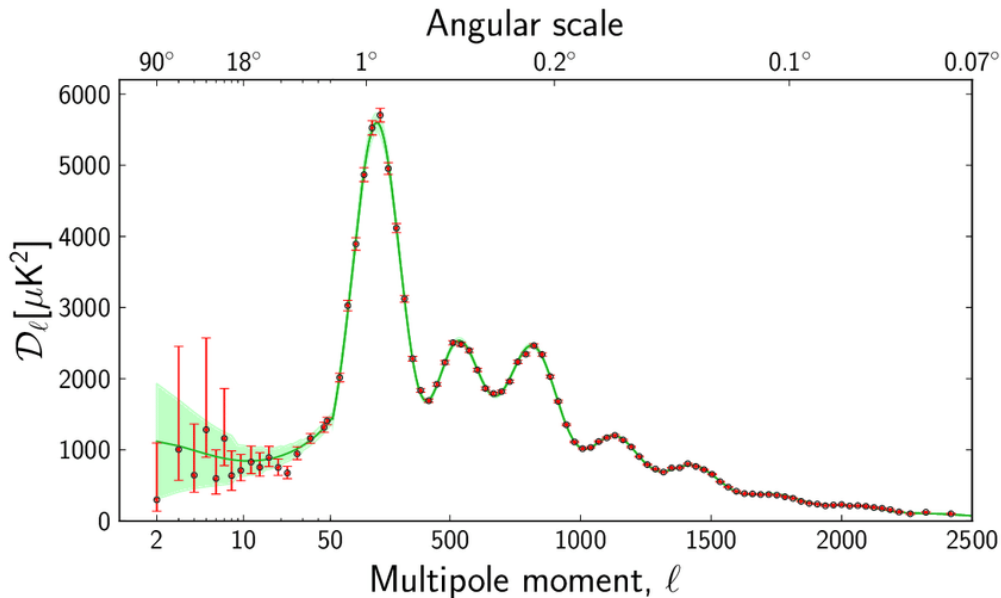
- Sgr A*: must auk galaktika keskel.
- Gaasipilved varjuvad Sgr A*.
- ~ Infrapunateleskoobid.
- Tähed tiirlevad ümber Sgr A*.



Kosmiline mikrolainetaustkiirgus



Mikrolainetaustkiirguse nurkspekter



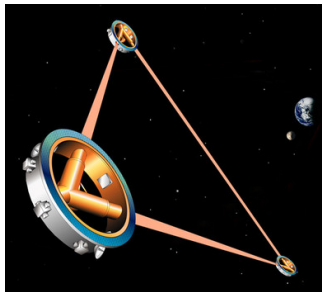
Kuidas uurida gravitatsioonilaineid?

- Kõrge sagedus: laserinterferomeetri detektorid maapinnal.



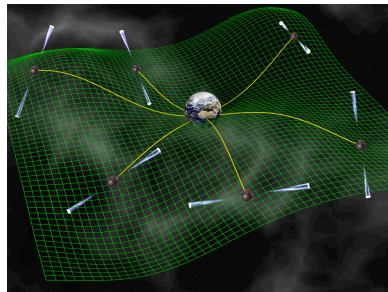
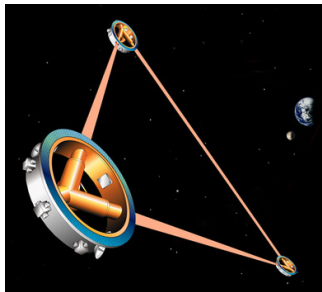
Kuidas uurida gravitatsioonilaineid?

- Kõrge sagedus: laserinterferomeetri detektorid maapinnal.
- Keskmise sagedus: laserinterferomeetri detektorid kosmoses.



Kuidas uurida gravitatsioonilaineid?

- Kõrge sagedus: laserinterferomeetri detektorid maapinnal.
- Keskmine sagedus: laserinterferomeetri detektorid kosmoses.
- Madal sagedus: pulsarite võrk, raadioteleskoobid.



1. Miks kvantgravitatsioon?
2. Lähenemised kvantgravitatsioonile
3. Kvantgravitatsiooni jäljed
4. Otsingud ja vaatlused
5. Kokkuvõte

- Kvantgravitatsiooni teooria vajadus:
 - Kvantteooria selgitab osakesi ja interaktsioone väikestel skaaladel.
 - Üldrelatiivsusteooria selgitab gravitatsiooni suurtel skaaladel.
 - Ühisteooria peab selgitama gravitatsiooni väikestel skaaladel.

- Kvantgravitatsiooni teooria vajadus:
 - Kvantteooria selgitab osakesi ja interaktsioone väikestel skaaladel.
 - Üldrelatiivsusteooria selgitab gravitatsiooni suurtel skaaladel.
 - Ühisteooria peab selgitama gravitatsiooni väikestel skaaladel.
- Kvantgravitatsioon muudab aegruumi struktuuri väikestel skaaladel.

- Kvantgravitatsiooni teooria vajadus:

- Kvantteooria selgitab osakesi ja interaktsioone väikestel skaaladel.
- Üldrelatiivsusteooria selgitab gravitatsiooni suurtel skaaladel.
- Ühisteooria peab selgitama gravitatsiooni väikestel skaaladel.

⇒ Kvantgravitatsioon muudab aegruumi struktuuri väikestel skaaladel.

⇒ Võimalikud efektid millest otsitakse kvantgravitatsiooni järgi:

- Kõrge energiaga osakeste liikumise kiirus vaakumis.
- Osakeste ja masside liikumine musta augu ümbruses.
- Gravitatsioonilained kokkupõrgetest ja varajasest universumist.
- Mikrolainetaustkiirguse nurkspekter.

- Kvantgravitatsiooni teooria vajadus:
 - Kvantteooria selgitab osakesi ja interaktsioone väikestel skaaladel.
 - Üldrelatiivsusteooria selgitab gravitatsiooni suurtel skaaladel.
 - Ühisteooria peab selgitama gravitatsiooni väikestel skaaladel.
- ↪ Kvantgravitatsioon muudab aegruumi struktuuri väikestel skaaladel.
- ⇒ Võimalikud efektid millest otsitakse kvantgravitatsiooni järgi:
 - Kõrge energiaga osakeste liikumise kiirus vaakumis.
 - Osakeste ja masside liikumine musta augu ümbruses.
 - Gravitatsioonilained kokkupõrgetest ja varajasest universumist.
 - Mikrolainetaustkiirguse nurkspekter.
- ↪ Efektid on pisikesed ⇒ tuleb otsida kõige ekstreemsematest protsessidest.

- Kvantgravitatsiooni teooria vajadus:
 - Kvantteooria selgitab osakesi ja interaktsioone väikestel skaaladel.
 - Üldrelatiivsusteooria selgitab gravitatsiooni suurtel skaaladel.
 - Ühisteooria peab selgitama gravitatsiooni väikestel skaaladel.
- ↪ Kvantgravitatsioon muudab aegruumi struktuuri väikestel skaaladel.
- ⇒ Võimalikud efektid millest otsitakse kvantgravitatsiooni jälgi:
 - Kõrge energiaga osakeste liikumise kiirus vaakumis.
 - Osakeste ja masside liikumine musta augu ümbruses.
 - Gravitatsioonilained kokkupõrgetest ja varajasest universumist.
 - Mikrolainetaustkiirguse nurkspekter.
- ↪ Efektid on pisikesed ⇒ tuleb otsida kõige ekstreemsematest protsessidest.
- ↪ Teadusühing: Kõrgete ja madalate energiatega sildamine kvantgravitatsiooni otsingul.



↪ <http://web.infn.it/BridgeQG/>