Laiendatud geomeetrilised gravitatsiooniteooriad

Laur Järv, Manuel Hohmann, Margus Saal

Teoreetilise Füüsika Labor - Füüsika Instituut - Tartu Ülikool
Tippkeskus TK133 “Tume Universum”

European Union
European Regional
Development Fund

Investing
in your future

Physicumi seminar Eesti Vabariigi 2020. aasta teaduspreemia teemal
27. veebruar 2020

Aegruumi geomeetria jaoks vajalikud mõisted

Milline peab olema aegruumi geomeetria?

Aegruumi geomeetria määrab kausaalsust, vaatlejaid ja gravitatsiooni.

Aegruumi geomeetria jaoks vajalikud mõisted

Milline peab olema aegruumi geomeetria?

Aegruumi geomeetria määrab kausaalsust, vaatlejaid ja gravitatsiooni.

1. Kausaalsus:
   - Aegruumi punktid $\leftrightsquigarrow$ "sündmused", millel on asukoht ja toimumisaeg.
   - Kausaalne seos: millised sündmused võivad milliseid sündmusi mõjutada?
   - Igal sündmusel peab olema kausaalne minevik ja tulevik.

Aegruumi geomeetria jaoks vajalikud mõisted

Milline peab olema aegruumi geomeetria?

Aegruumi geomeetria määrab kausaalsust, vaatlejaid ja gravitatsiooni.

1. Kausaalsus:
   - Aegruumi punktid $\leftrightsquigarrow$ "sündmused", millel on asukoht ja toimumisaeg.
   - Kausaalne seos: millised sündmused võivad milliseid sündmusi mõjutada?
   - Igal sündmusel peab olema kausaalne minevik ja tulevik.
2. Vaatlejad:
   - Vaatleja peab olema võimeline mõõta füüsikalisi suuruseid.
   - Igal vaatlejal on oma (labori) taustsüsteem, mille suhtes suurused on määratud.
   - Mitme vaatleja puhul on vaja mõõtmisi üle kanda nende taustsüsteemide vahel.

Aegruumi geomeetria jaoks vajalikud mõisted

Milline peab olema aegruumi geomeetria?

Aegruumi geomeetria määrab kausaalsust, vaatlejaid ja gravitatsiooni.

1. Kausaalsus:
   - Aegruumi punktid $\leftrightsquigarrow$ "sündmused", millel on asukoht ja toimumisaeg.
   - Kausaalne seos: millised sündmused võivad milliseid sündmusi mõjutada?
   - Igal sündmusel peab olema kausaalne minevik ja tulevik.
2. Vaatlejad:
   - Vaatleja peab olema võimeline mõõta füüsikalisi suuruseid.
   - Igal vaatlejal on oma (labori) taustsüsteem, mille suhtes suurused on määratud.
   - Mitme vaatleja puhul on vaja mõõtmisi üle kanda nende taustsüsteemide vahel.
3. Gravitatsioon:
   - Gravitatsiooni allikate (mateeria) jaotus määrab aegruumi geomeetrilist struktuuri.
   - Aegruumi geomeetriline struktuur määrab kehade (mateeria) liikumist.
   - Gravitatsiooniline vastasmõju $\leftrightsquigarrow$ aegruumi geomeetria.

Aegruumi geomeetria jaoks vajalikud mõisted

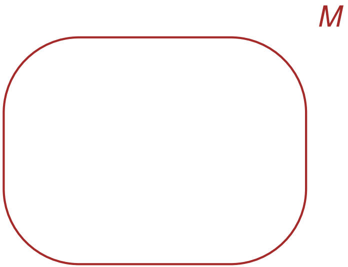
Milline peab olema aegruumi geomeetria?

Aegruumi geomeetria määrab kausaalsust, vaatlejaid ja gravitatsiooni.

1. Kausaalsus olemas erirelatiivsusteoorias:
   - Aegruumi punktid $\leftrightsquigarrow$ "sündmused", millel on asukoht ja toimumisaeg.
   - Kausaalne seos: millised sündmused võivad milliseid sündmusi mõjutada?
   - Igal sündmusel peab olema kausaalne minevik ja tulevik.
2. Vaatlejad olemas erirelatiivsusteoorias:
   - Vaatleja peab olema võimeline mõõta füüsikalisi suuruseid.
   - Igal vaatlejal on oma (labori) taustsüsteem, mille suhtes suurused on määratud.
   - Mitme vaatleja puhul on vaja mõõtmisi üle kanda nende taustsüsteemide vahel.
3. Gravitatsioon olemas üldrelatiivsusteoorias:
   - Gravitatsiooni allikate (mateeria) jaotus määrab aegruumi geomeetrilist struktuuri.
   - Aegruumi geomeetriline struktuur määrab kehade (mateeria) liikumist.
   - Gravitatsiooniline vastasmõju $\leftrightsquigarrow$ aegruumi geomeetria.

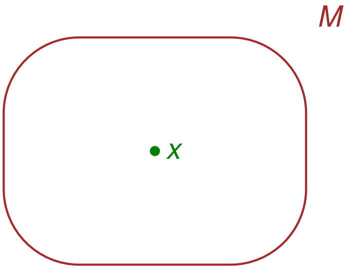
Mis on muutkond?

- Aegruumi punktid moodustavad hulka M. . .



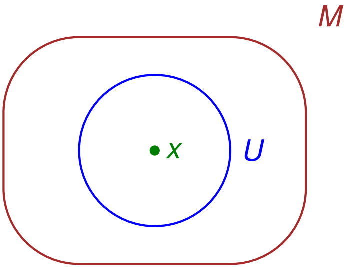
Mis on muutkond?

- Aegruumi punktid moodustavad hulka M...
- ...niiet igal sündmusel / punktil $x \in M$...



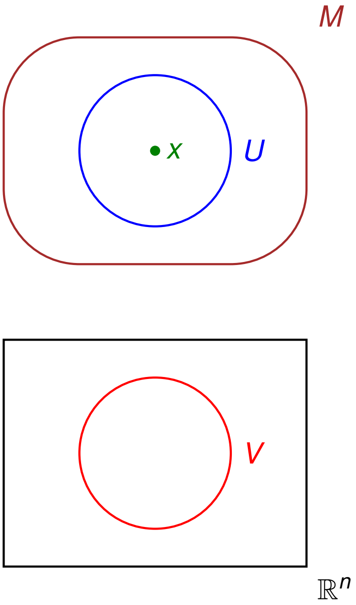
Mis on muutkond?

- Aegruumi punktid moodustavad hulka M...
- ...niiet igal sündmusel / punktil $x \in M$...
- ...on ümbrus $U \subset M$...



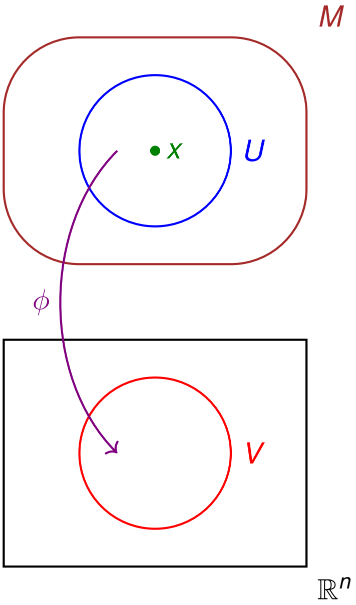
Mis on muutkond?

- Aegruumi punktid moodustavad hulka M...
- ...niiet igal sündmusel / punktil $x \in M$...
- ...on ümbrus $U \subset M$...
- ...mis on eukleidilise ruumi $\mathbb{R}^n$ alamhulgaga V...



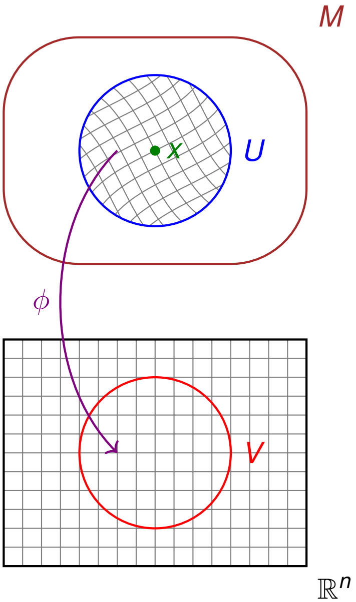
Mis on muutkond?

- Aegruumi punktid moodustavad hulka M...
- ...niiet igal sündmusel / punktil $x \in M$...
- ...on ümbrus $U \subset M$...
- ...mis on eukleidilise ruumi $\mathbb{R}^n$ alamhulgaga V...
- ...üks-ühele vastavuses funktsiooni ϕ kaudu...



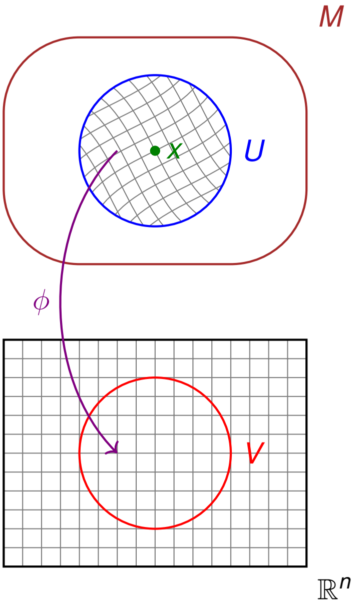
Mis on muutkond?

- Aegruumi punktid moodustavad hulka M…
- …niiet igal sündmusel / punktil $x \in M$…
- …on ümbrus $U \subset M$…
- …mis on eukleidilise ruumi $\mathbb{R}^n$ alamhulgaga V…
- …üks-ühele vastavuses funktsiooni ϕ kaudu…
- …mille abil saab defineerida lokaalseid koordinaate.



Mis on muutkond?

- Aegruumi punktid moodustavad hulka M...
- ...niiet igal sündmusel / punktil $x \in M$...
- ...on ümbrus $U \subset M$...
- ...mis on eukleidilise ruumi $\mathbb{R}^n$ alamhulgaga V...
- ...üks-ühele vastavuses funktsiooni ϕ kaudu...
- ...mille abil saab defineerida lokaalseid koordinaate.

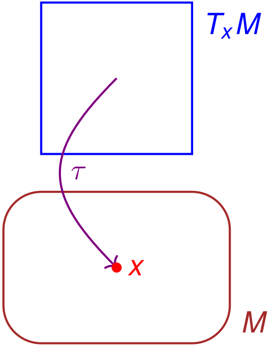


Diferentsiaalgeomeetria mõisted

- $(U, \phi) \leftrightsquigarrow$ kaart.
- Kogumik $\mathcal{A} = \{(U, \phi)\} \leftrightsquigarrow$ atlas.
- $(M, \mathcal{A}) \leftrightsquigarrow$ muutkond.

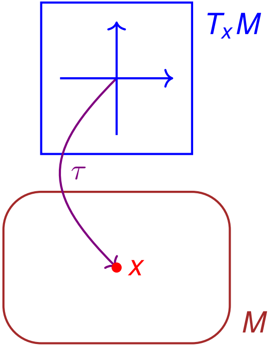
Mis on puutujaruum?

- Muutkonna M igas punktis x asub puutujaruum T_xM.



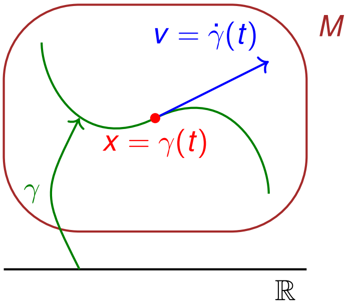
Mis on puutujaruum?

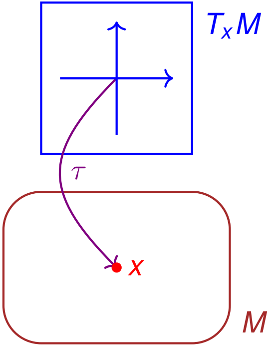
- Muutkonna M igas punktis x asub puutujaruum T_xM.
- Puutujaruum T_xM on vektoriruum.



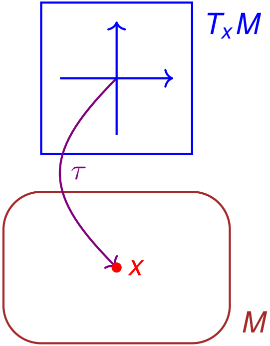
Mis on puutujaruum?

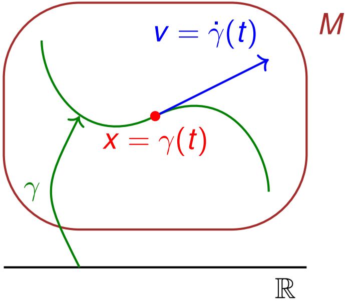
- Muutkonna M igas punktis x asub puutujaruum T_xM.
- Puutujaruum T_xM on vektoriruum.
- Puutujavektori $v \in T_xM$ kolm ekvivalentset kirjeldust:
    1. Punkti x läbiva trajektoori γ kiirus.

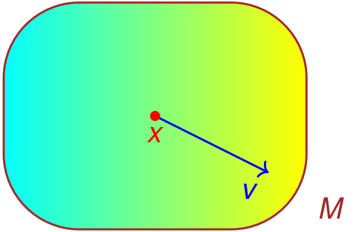




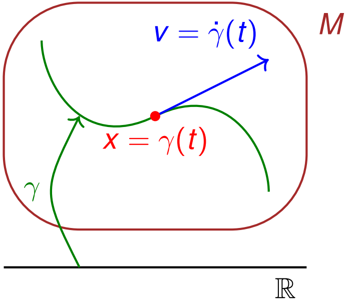
- Muutkonna M igas punktis x asub puutujaruum T_xM.
- Puutujaruum T_xM on vektoriruum.
- Puutujavektori $v \in T_xM$ kolm ekvivalentset kirjeldust:
    1. Punkti x läbiva trajektoori γ kiirus.
    2. Funktsioonide suunatuletis punktis x.

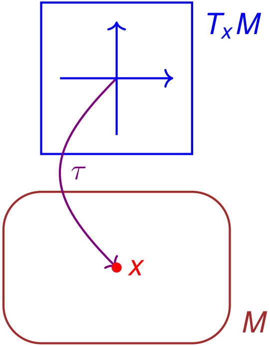


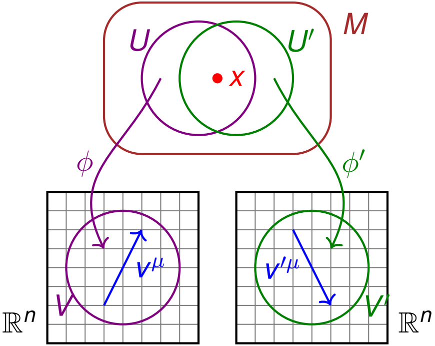


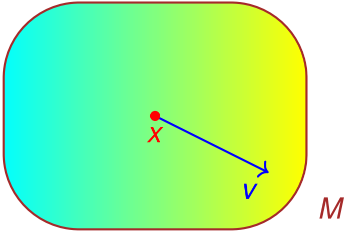


- Muutkonna M igas punktis x asub puutujaruum T_xM.
- Puutujaruum T_xM on vektoriruum.
- Puutujavektori $v \in T_xM$ kolm ekvivalentset kirjeldust:
  1. Punkti x läbiva trajektoori γ kiirus.
  2. Funktsioonide suunatuletis punktis x.
  3. Komponentide v^μ ja nende teisendusseaduse kaudu.





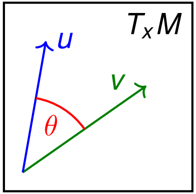




Meetrika - pikkus, aeg, kausaalsus

- Meetrika on skalaarkorrutis iga punkti x puutujaruumis T_xM:

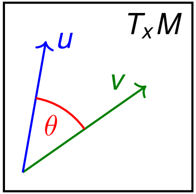
$$g(u, v) = g_{\mu\nu}(x) u^\mu v^\nu = \|u\| \|v\| \cos\theta \,.$$



Meetrika - pikkus, aeg, kausaalsus

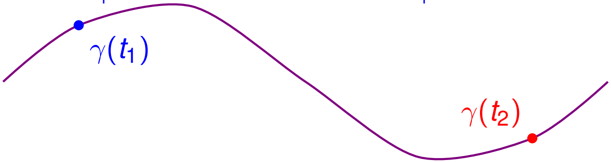
- Meetrika on skalaarkorrutis iga punkti x puutujaruumis T_xM:

$$g(u,v) = g_{\mu\nu}(x)u^\mu v^\nu = \|u\|\|v\|\cos\theta\,.$$



- Meetrika määrab trajektoori γ pikkust vahemikus (t_1, t_2):

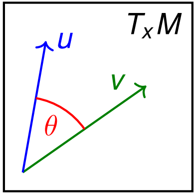
$$\ell = \int_{t_1}^{t_2} \sqrt{|g(\dot\gamma(t),\dot\gamma(t))|}\,\mathrm{d}t = \int_{t_1}^{t_2} \sqrt{|g_{\mu\nu}(\gamma(t))\dot\gamma^\mu(t)\dot\gamma^\nu(t)|}\,\mathrm{d}t\,.$$



- Trajektoori pikkus $\ell \leftrightsquigarrow$ kaasakantava kella möödunud aeg.

Meetrika - pikkus, aeg, kausaalsus

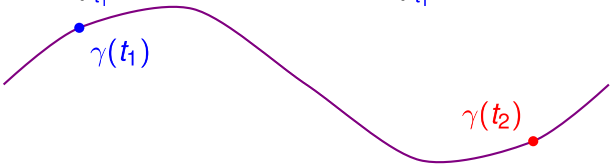
- Meetrika on skalaarkorrutis iga punkti x puutujaruumis T_xM:

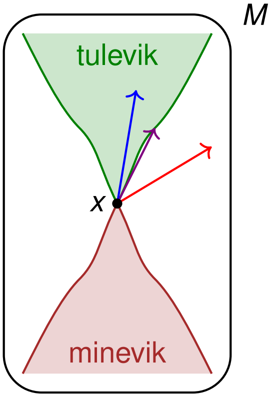


$$g(u, v) = g_{\mu\nu}(x)u^\mu v^\nu = \|u\|\|v\|\cos\theta\,.$$

- Meetrika määrab trajektoori γ pikkust vahemikus (t_1, t_2):

$$\ell = \int_{t_1}^{t_2} \sqrt{|g(\dot\gamma(t), \dot\gamma(t))|}\,dt = \int_{t_1}^{t_2} \sqrt{|g_{\mu\nu}(\gamma(t))\dot\gamma^\mu(t)\dot\gamma^\nu(t)|}\,dt\,.$$

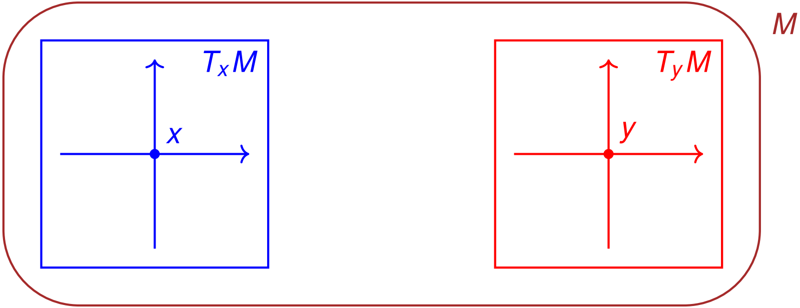




- Trajektoori pikkus $\ell \leftrightsquigarrow$ kaasakantava kella möödunud aeg.
- Meetrika määrab kausaalsust ja informatsiooni levimist:

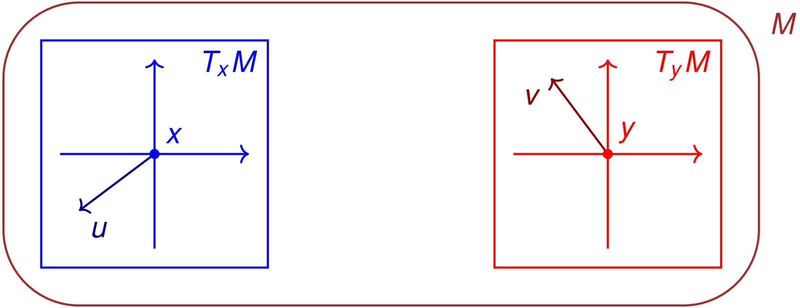
$g(v, v) > 0$	$g(v, v) = 0$	$g(v, v) < 0$
ruumisarnane	valgusesarnane	ajasarnane

- Puutujaruumid $T_x M$ ja $T_y M$ on erinevad kui $x \neq y$.



- Puutujaruumid T_xM ja T_yM on erinevad kui $x \neq y$.

$\Rightarrow$ Ei ole võimalust võrrelda $u \in T_xM$ ja $v \in T_yM$.

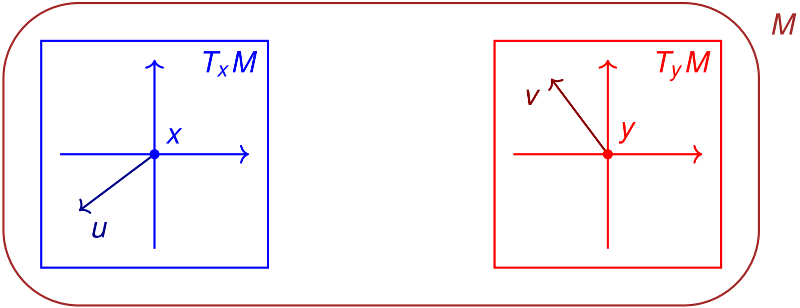


Seostus - rööpülekanne ja autoparalleelsed trajektoorid

- Puutujaruumid T_xM ja T_yM on erinevad kui $x \neq y$.

$\Rightarrow$ Ei ole võimalust võrrelda $u \in T_xM$ ja $v \in T_yM$.

- Seostus võimaldab võrrelda erinevaid puutujaruume.

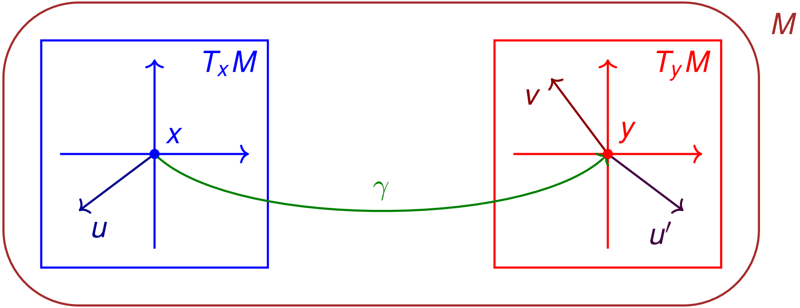


Seostus - rööpülekanne ja autoparalleelsed trajektoorid

- Puutujaruumid T_xM ja T_yM on erinevad kui $x \neq y$.

$\Rightarrow$ Ei ole võimalust võrrelda $u \in T_xM$ ja $v \in T_yM$.

- Seostus võimaldab võrrelda erinevaid puutujaruume.
- Rööpülekanne: puutujavektor vedamine mööda trajektoori.

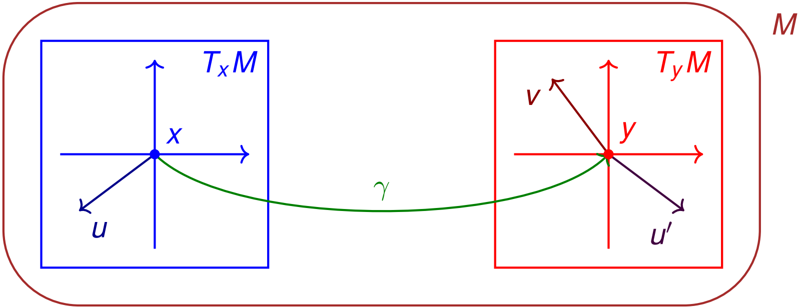


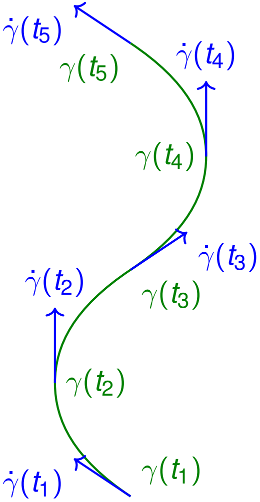
Seostus - rööpülekanne ja autoparalleelsed trajektoorid

- Puutujaruumid T_xM ja T_yM on erinevad kui $x \neq y$.

$\Rightarrow$ Ei ole võimalust võrrelda $u \in T_xM$ ja $v \in T_yM$.

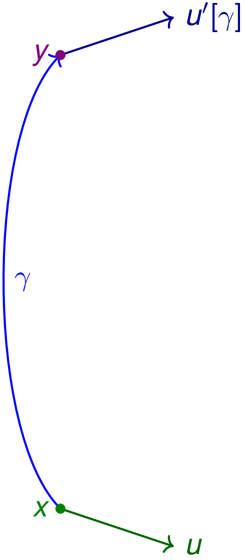
- Seostus võimaldab võrrelda erinevaid puutujaruume.
- Rööpülekanne: puutujavektor vedamine mööda trajektoori.
- Autoparalleelne trajektoor $\leftrightsquigarrow$ kiirusvektori $\dot{\gamma}$ rööpülekanne.





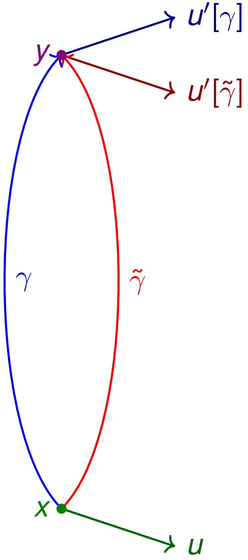
Kõverus: kuidas rööpülekanne sõltub trajektoorist

- Vektori u rööpülekanne punktist x punkti y. . .



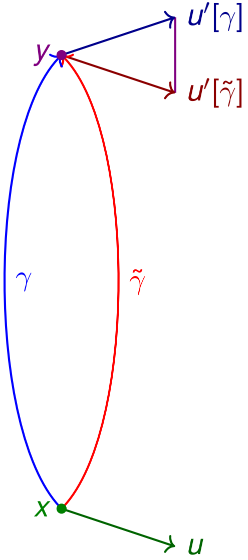
Kõverus: kuidas rööpülekanne sõltub trajektoorist

- Vektori u rööpülekanne punktist x punkti y…
- …üldjuhul sõltub trajektoorist γ või $\tilde{\gamma}$.

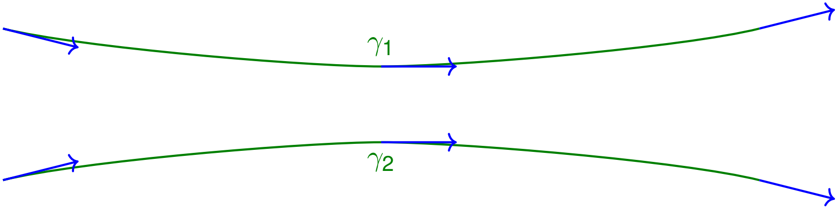


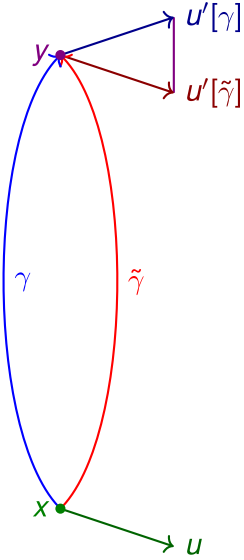
Kõverus: kuidas rööpülekanne sõltub trajektoorist

- Vektori u rööpülekanne punktist x punkti y…
- …üldjuhul sõltub trajektoorist γ või $\tilde{\gamma}$.
- Seostuse kõverus R mõõdab $u'[\gamma]$ ja $u'[\tilde{\gamma}]$ vahet.



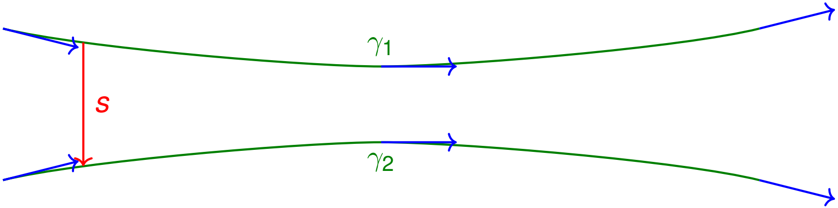
- Vektori u rööpülekanne punktist x punkti y...
- ...üldjuhul sõltub trajektoorist γ või $\tilde{\gamma}$.
- Seostuse kõverus R mõõdab $u'[\gamma]$ ja $u'[\tilde{\gamma}]$ vahet.
- Kui on kaks autoparalleelset trajektoori γ_1 ja γ_2...

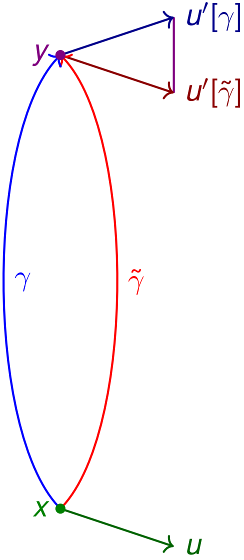




Kõverus: kuidas rööpülekanne sõltub trajektoorist

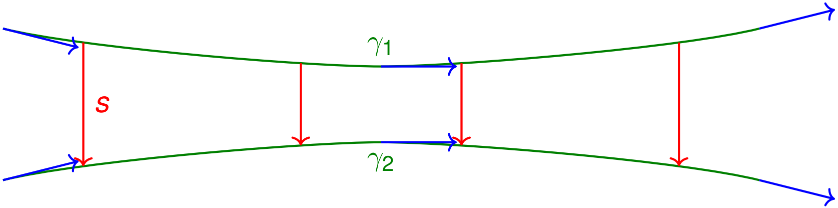
- Vektori u rööpülekanne punktist x punkti y...
- ...üldjuhul sõltub trajektoorist γ või $\tilde{\gamma}$.
- Seostuse kõverus R mõõdab $u'[\gamma]$ ja $u'[\tilde{\gamma}]$ vahet.
- Kui on kaks autoparalleelset trajektoori γ_1 ja γ_2...
- ...mille (infinitesimaalset) vahet kirjeldab vektor s...

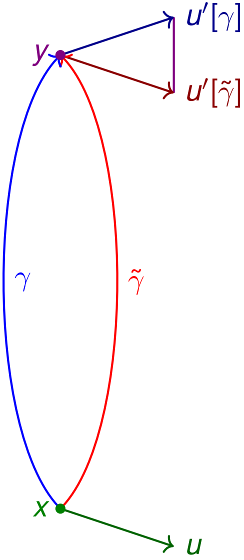




Kõverus: kuidas rööpülekanne sõltub trajektoorist

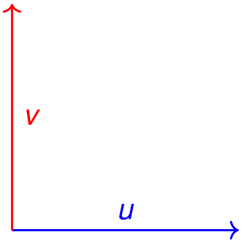
- Vektori u rööpülekanne punktist x punkti y...
- ...üldjuhul sõltub trajektoorist γ või $\tilde{\gamma}$.
- Seostuse kõverus R mõõdab $u'[\gamma]$ ja $u'[\tilde{\gamma}]$ vahet.
- Kui on kaks autoparalleelset trajektoori γ_1 ja γ_2...
- ...mille (infinitesimaalset) vahet kirjeldab vektor s...
- ...siis kõverus kirjeldab vektori s arenemist trajektooril.





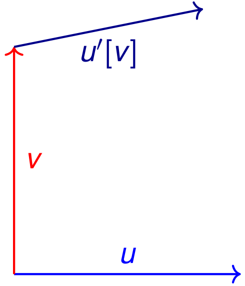
Väänе: mida tähendab asümmeetriline rööpülekanne

- Kui on antud vektorid u, v samas puutujaruumis T_xM...



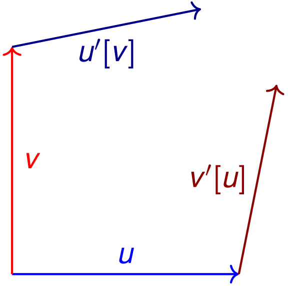
Vääne: mida tähendab asümmeetriline rööpülekanne

- Kui on antud vektorid u, v samas puutujaruumis $T_x M$…
- …siis võib kanda u (infinitesimaalselt) v suunas…



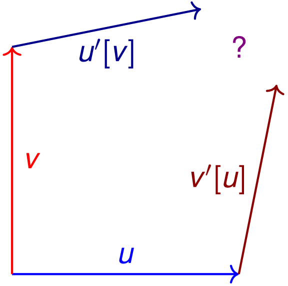
Vääne: mida tähendab asümmeetriline rööpülekanne

- Kui on antud vektorid u, v samas puutujaruumis $T_x M$...
- ...siis võib kanda u (infinitesimaalselt) v suunas...
- ...ja samuti ka v (infinitesimaalselt) u suunas...



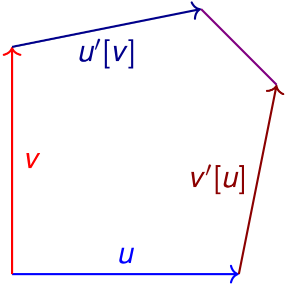
Vääne: mida tähendab asümmeetriline rööpülekanne

- Kui on antud vektorid u, v samas puutujaruumis $T_x M$…
- …siis võib kanda u (infinitesimaalselt) v suunas…
- …ja samuti ka v (infinitesimaalselt) u suunas…
- …aga tulemus ei pruugi olla sama.



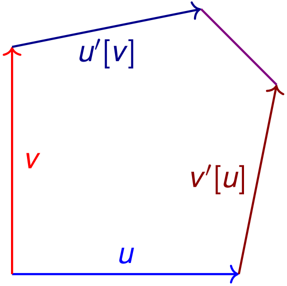
Vääne: mida tähendab asümmeetriline rööpülekanne

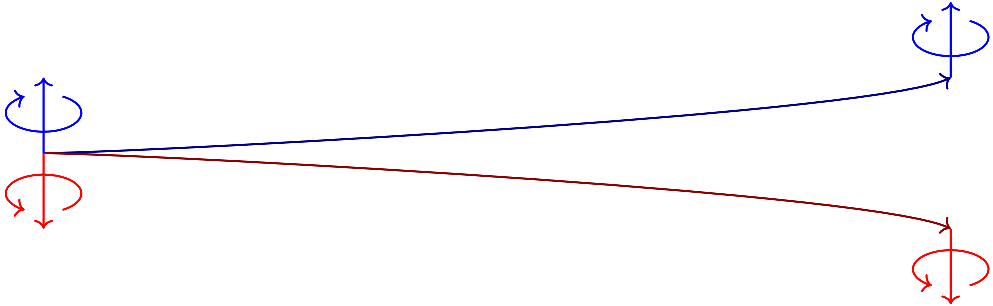
- Kui on antud vektorid u, v samas puutujaruumis T_xM...
- ...siis võib kanda u (infinitesimaalselt) v suunas...
- ...ja samuti ka v (infinitesimaalselt) u suunas...
- ...aga tulemus ei pruugi olla sama.
- Vahet $u'[v]$ ja $v'[u]$ vahel kirjeldab seostuse vääne T.



Vääne: mida tähendab asümmeetriline rööpülekanne

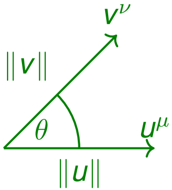
- Kui on antud vektorid u, v samas puutujaruumis $T_x M$...
- ...siis võib kanda u (infinitesimaalselt) v suunas...
- ...ja samuti ka v (infinitesimaalselt) u suunas...
- ...aga tulemus ei pruugi olla sama.
- Vahet $u'[v]$ ja $v'[u]$ vahel kirjeldab seostuse vääne T.
- Vääne võib mõjuda ka spinniga osakestele (fermionitele).





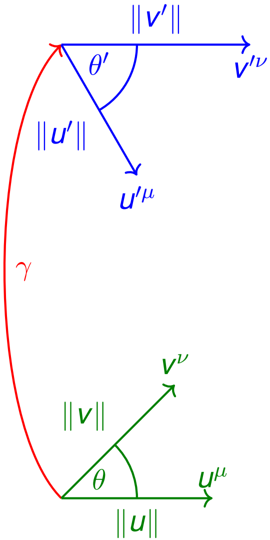
Mittemeetrilisus: kui meetrika ja seostus ei ole kooskõlas

- Mõiste nõuab kahte geomeetrilist objekti:
  - Meetrika määrab puutujavektorite pikkuseid.



Mittemeetrilisus: kui meetrika ja seostus ei ole kooskõlas

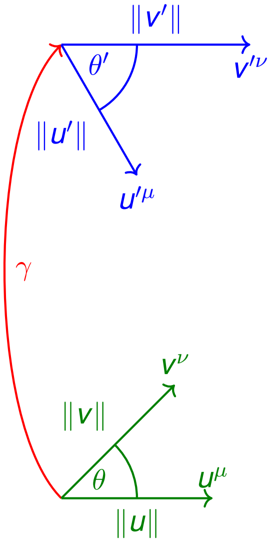
- Mõiste nõuab kahte geomeetrilist objekti:
  - Meetrika määrab puutujavektorite pikkuseid.
  - Seostus määrab puutujavektori rööpülekannet.



Mittemeetrilisus: kui meetrika ja seostus ei ole kooskõlas

- Mõiste nõuab kahte geomeetrilist objekti:
  - Meetrika määrab puutujavektorite pikkuseid.
  - Seostus määrab puutujavektori rööpülekannet.
- Mittemeetrilisus Q: meetrika g kovariantne tuletis

$$Q_{\rho\mu\nu} = \nabla_\rho g_{\mu\nu} \, .$$



Mittemeetrilisus: kui meetrika ja seostus ei ole kooskõlas

- Mõiste nõuab kahte geomeetrilist objekti:
  - Meetrika määrab puutujavektorite pikkuseid.
  - Seostus määrab puutujavektori rööpülekannet.
- Mittemeetrilisus Q: meetrika g kovariantne tuletis

$$Q_{\rho\mu\nu} = \nabla_\rho g_{\mu\nu} \,.$$

- Mida tähendab $Q \neq 0$ geomeetriliselt?
  - Puutujavektorite skalaarkorrutis muutub rööpülekandel:

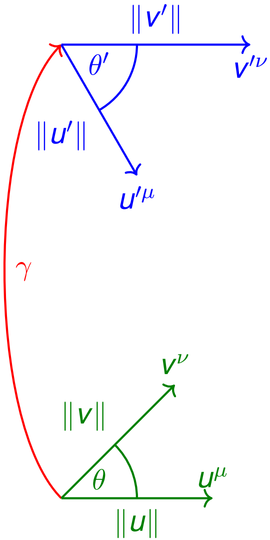
$$g_{\mu\nu} u^\mu v^\nu \neq g'_{\mu\nu} u'^\mu v'^\nu \,.$$

  - Puutujavektorite pikkused muutuvad rööpülekandel:

$$\|u\| \neq \|u'\| \,, \quad \|v\| \neq \|v'\| \,.$$

  - Nurk puutujavektorite vahel muutub rööpülekandel:

$$\theta \neq \theta' \,.$$



- Meetrika olemasolu võimaldab seostuse unikaalset lagundamist:

$$\Gamma^{\mu}{}_{\nu\rho} = \left\{{}^{\mu}_{\nu\rho}\right\} + K^{\mu}{}_{\nu\rho} + L^{\mu}{}_{\nu\rho} \,.$$

Seostuse komponendid: Levi-Civita, vääne ja mittemeetrilisus

- Meetrika olemasolu võimaldab seostuse unikaalset lagundamist:

$$\Gamma^{\mu}{}_{\nu\rho} = \left\{ {\mu \atop \nu\rho} \right\} + K^{\mu}{}_{\nu\rho} + L^{\mu}{}_{\nu\rho} \,.$$

- Seostuse komponendid:
  1. Levi-Civita seostus:

$$\left\{ {\mu \atop \nu\rho} \right\} = \frac{1}{2} g^{\mu\sigma} \left(\partial_\nu g_{\sigma\rho} + \partial_\rho g_{\nu\sigma} - \partial_\sigma g_{\nu\rho} \right) .$$

Seostuse komponendid: Levi-Civita, vääne ja mittemeetrilisus

- Meetrika olemasolu võimaldab seostuse unikaalset lagundamist:

$$\Gamma^{\mu}{}_{\nu\rho} = \left\{ {\mu \atop \nu\rho} \right\} + K^{\mu}{}_{\nu\rho} + L^{\mu}{}_{\nu\rho} \, .$$

- Seostuse komponendid:
  1. Levi-Civita seostus:

$$\left\{ {\mu \atop \nu\rho} \right\} = \frac{1}{2} g^{\mu\sigma} \left(\partial_\nu g_{\sigma\rho} + \partial_\rho g_{\nu\sigma} - \partial_\sigma g_{\nu\rho} \right) .$$

  2. Vääne:

$$K^{\mu}{}_{\nu\rho} = \frac{1}{2} \left(T_{\nu}{}^{\mu}{}_{\rho} + T_{\rho}{}^{\mu}{}_{\nu} - T^{\mu}{}_{\nu\rho} \right) .$$

Seostuse komponendid: Levi-Civita, vääne ja mittemeetrilisus

- Meetrika olemasolu võimaldab seostuse unikaalset lagundamist:

$$\Gamma^{\mu}{}_{\nu\rho} = \left\{ {\mu \atop \nu\rho} \right\} + K^{\mu}{}_{\nu\rho} + L^{\mu}{}_{\nu\rho} \,.$$

- Seostuse komponendid:
  1. Levi-Civita seostus:

$$\left\{ {\mu \atop \nu\rho} \right\} = \frac{1}{2} g^{\mu\sigma} \left(\partial_\nu g_{\sigma\rho} + \partial_\rho g_{\nu\sigma} - \partial_\sigma g_{\nu\rho} \right) .$$

  2. Vääne:

$$K^{\mu}{}_{\nu\rho} = \frac{1}{2} \left(T_{\nu}{}^{\mu}{}_{\rho} + T_{\rho}{}^{\mu}{}_{\nu} - T^{\mu}{}_{\nu\rho} \right) .$$

  3. Mittemeetrilisus:

$$L^{\mu}{}_{\nu\rho} = \frac{1}{2} \left(Q^{\mu}{}_{\nu\rho} - Q_{\nu}{}^{\mu}{}_{\rho} - Q_{\rho}{}^{\mu}{}_{\nu} \right) .$$

Miks laiendada? Ja miks just skalaarväljadega?

- Miks laiendame gravitatsiooniteooriaid / lisame vabadusastmeid?
  - Vabadusastmed kosmoloogiliste vaatluste seletamiseks: inflatsioon, tume energia.
  - Asukohast sõltuv gravitatsiooni“konstant” tumeda aine alternatiivseks mudeliks.
  - Lisaväljad gravitatsiooni kvantiseerimise abivahendiks.

Miks laiendada? Ja miks just skalaarväljadega?

- Miks laiendame gravitatsiooniteooriaid / lisame vabadusastmeid?
  - Vabadusastmed kosmoloogiliste vaatluste seletamiseks: inflatsioon, tume energia.
  - Asukohast sõltuv gravitatsiooni“konstant” tumeda aine alternatiivseks mudeliks.
  - Lisaväljad gravitatsiooni kvantiseerimise abivahendiks.
- Miks laiendame just skalaarväljadega?
  - Skalaarväli on kõige lihtsamalt lisanduv vabadusaste.
  - Higgsi boosoni avastamine näitas et fundamentaalsed skalaarväljad on olemas.
  - Skalaarväljad ilmuvad kui teiste teooriate (nt stringide) efektiivne kirjeldus.
  - Skalaarväljadega võib kirjeldada aegruumi (konformseid) sümmeetriaid.

Miks laiendada? Ja miks just skalaarväljadega?

- Miks laiendame gravitatsiooniteooriaid / lisame vabadusastmeid?
  - Vabadusastmed kosmoloogiliste vaatluste seletamiseks: inflatsioon, tume energia.
  - Asukohast sõltuv gravitatsiooni“konstant” tumeda aine alternatiivseks mudeliks.
  - Lisaväljad gravitatsiooni kvantiseerimise abivahendiks.
- Miks laiendame just skalaarväljadega?
  - Skalaarväli on kõige lihtsamalt lisanduv vabadusaste.
  - Higgsi boosoni avastamine näitas et fundamentaalsed skalaarväljad on olemas.
  - Skalaarväljad ilmuvad kui teiste teooriate (nt stringide) efektiivne kirjeldus.
  - Skalaarväljadega võib kirjeldada aegruumi (konformseid) sümmeetriaid.
- Miks peaks skalaarväli olema gravitatsiooniga mitteminimaalselt seotud?
  - Efektiivne mitteminimaalne vastasmõju võib tuleneda kvantteooriast.
  - Mitteminimaalse seose liikmed kirjeldavad silmustega Feynmanni diagramme.
  - Sümmeetria konformsete teisenduste all nõuab mitteminimaalset seost.
  - Varjumise efektid: gravitatsiooni tugevus sõltub kaugusest ja tihedusest.

Modifitseeritud gravitatsiooniteooriate loomaaed

Lorentzi rikkumine

- LR massiivne grav.
- Horava-Lifshitz
- laiendatud HL
- vaimu kondensaat
- Finsler
- cuscuton

Lorentzi invariantsus

kõrgem spinn

- osaliselt massitu spinn 3

spinn 2 gravitatsioon

massitu spinn 2

- Horndeski
- Brans-Dicke
- galileon
- kameleon
- $f(R)$
- DBI-galileon
- sümmetron
- multi-galileon

massiivne graviton-galileon

massiivne spinn 2

- kaskad. grav.
- DGP
- massiivne grav.
- kvasi-dilaton
- bi-/multi-grav.

Teooriate vaatluslikud piirangud

- Gravitatsioonilainete levimine:
  - Polarisatsioonite arv ja tüübid tuvastatav gravitatsioonilainete detektorites.
  - Gravitatsioonilainete kiirus vaadeldud neutrontähtede kokkupõrge abil.

Teooriate vaatluslikud piirangud

- Gravitatsioonilainete levimine:
  - Polarisatsioonite arv ja tüübid tuvastatav gravitatsioonilainete detektorites.
  - Gravitatsioonilainete kiirus vaadeldud neutrontähtede kokkupõrge abil.
- Nõrgad gravitatsiooniväljad ja post-Newtoni piir:
  - Täppisvaatlused päikesesüsteemis: planeetide liikumine ja valguse levimine.
  - Kompaktsete objektide kokkutiirlemine ja gravitatsioonilainete teke.

Teooriate vaatluslikud piirangud

- Gravitatsioonilainete levimine:
  - Polarisatsioonite arv ja tüübid tuvastatav gravitatsioonilainete detektorites.
  - Gravitatsioonilainete kiirus vaadeldud neutrontähtede kokkupõrge abil.
- Nõrgad gravitatsiooniväljad ja post-Newtoni piir:
  - Täppisvaatlused päikesesüsteemis: planeetide liikumine ja valguse levimine.
  - Kompaktsete objektide kokkutiirlemine ja gravitatsioonilainete teke.
- Tugevad gravitatsiooniväljad ja kompaktsed objektid:
  - Valgusesfäärid kompaktsete objektide ümber (ehk nende "vari").
  - Kvasinormaalsed võnkumised: kompaktsete objektide gravitatsioonilainete sagedused.
  - Neutrontähtede universaalsed seosed: gravitatsiooni karakteristlikud jäljed.

Teooriate vaatluslikud piirangud

- Gravitatsioonilainete levimine:
  - Polarisatsioonite arv ja tüübid tuvastatav gravitatsioonilainete detektorites.
  - Gravitatsioonilainete kiirus vaadeldud neutrontähtede kokkupõrge abil.
- Nõrgad gravitatsiooniväljad ja post-Newtoni piir:
  - Täppisvaatlused päikesesüsteemis: planeetide liikumine ja valguse levimine.
  - Kompaktsete objektide kokkutiirlemine ja gravitatsioonilainete teke.
- Tugevad gravitatsiooniväljad ja kompaktsed objektid:
  - Valgusesfäärid kompaktsete objektide ümber (ehk nende "vari").
  - Kvasinormaalsed võnkumised: kompaktsete objektide gravitatsioonilainete sagedused.
  - Neutrontähtede universaalsed seosed: gravitatsiooni karakteristlikud jäljed.
- Kosmoloogia ja vaatlused suuremates mastaabitel:
  - Inflatsiooni parameetrid ja nende jäljed mikrolaine taustkiirguses.
  - Suuremate struktuuride (galaktikate, parvede) teke ja nende dünaamika.
  - Universumi kiirenev paisumine, supernoovad ja tume energia.
  - Universumi evolutsioon, stabiilsus ja tulevik - Suur Rebenemine või Krudin?

Kuhu edasi? Tee universumi mõistmise ja kvantgravitatsioonini

- Uued geomeetriad heidavad uut valgust vanadele probleemidele:
  - Kuidas saab kirjeldada Suure Paugu ja musta augu singulaarsusi?
  - Kuidas saab lahendada musta augu horisondiga seotud informatsiooni paradoksi?
  - Mis tekitab inflatsiooni ja tumeda energiaga seotud universumi paisumist?
  - Milline on kõikide vastasmõjude (sh gravitatsiooni ja osakestefüüsika) ühine teooria?
  - Milline on kooskõlaline gravitatsiooni kvantteooria?

Kuhu edasi? Tee universumi mõistmise ja kvantgravitatsioonini

- Uued geomeetriad heidavad uut valgust vanadele probleemidele:
  - Kuidas saab kirjeldada Suure Paugu ja musta augu singulaarsusi?
  - Kuidas saab lahendada musta augu horisondiga seotud informatsiooni paradoksi?
  - Mis tekitab inflatsiooni ja tumeda energiaga seotud universumi paisumist?
  - Milline on kõikide vastasmõjude (sh gravitatsiooni ja osakestefüüsika) ühine teooria?
  - Milline on kooskõlaline gravitatsiooni kvantteooria?
- Millised on gravitatsiooni uute geomeetriliste kirjelduste eelised?
  - Gravitatsioon kui kalibratsiooniteooria - sarnasus osakestefüüsikaga.
    - Elektromagnetismi, nõrka ja tugevat tuumajõudu kirjeldavad kalibratsiooniteooriad.
    - Ühine fundamentaaljõudude kirjeldus nõuab gravitatsiooni sarnast kirjeldust.
  - Esimest järku mõjufunktsionaal ei vaja täiendavat ääreliiget (Gibbons-Hawking-York):
    - Ääreliige ei mõjuta väljavõrrandeid, aga nt horisondi probleemi ja Casimiri efekti.
    - Mustade aukude termodünaamika ja entroopia alternatiivne kirjeldus.
  - Ühine kirjeldus Cartani geomeetria abil võib viia silmuskvantgravitatsioonini.
    - Cartani geomeetria kaudu on võimalik defineerida Ashtekari muutujaid.
    - Ashtekari muutujad on silmusmeetodi kvantiseerimise alus.

Kuhu edasi? Tee universumi mõistmise ja kvantgravitatsioonini

- Uued geomeetriad heidavad uut valgust vanadele probleemidele:
  - Kuidas saab kirjeldada Suure Paugu ja musta augu singulaarsusi?
  - Kuidas saab lahendada musta augu horisondiga seotud informatsiooni paradoksi?
  - Mis tekitab inflatsiooni ja tumeda energiaga seotud universumi paisumist?
  - Milline on kõikide vastasmõjude (sh gravitatsiooni ja osakestefüüsika) ühine teooria?
  - Milline on kooskõlaline gravitatsiooni kvantteooria?
- Millised on gravitatsiooni uute geomeetriliste kirjelduste eelised?
  - Gravitatsioon kui kalibratsiooniteooria - sarnasus osakestefüüsikaga.
    - Elektromagnetismi, nõrka ja tugevat tuumajõudu kirjeldavad kalibratsiooniteooriad.
    - Ühine fundamentaaljõudude kirjeldus nõuab gravitatsiooni sarnast kirjeldust.
  - Esimest järku mõjufunktsionaal ei vaja täiendavat ääreliiget (Gibbons-Hawking-York):
    - Ääreliige ei mõjuta väljavõrrandeid, aga nt horisondi probleemi ja Casimiri efekti.
    - Mustade aukude termodünaamika ja entroopia alternatiivne kirjeldus.
  - Ühine kirjeldus Cartani geomeetria abil võib viia silmuskvantgravitatsioonini.
    - Cartani geomeetria kaudu on võimalik defineerida Ashtekari muutujaid.
    - Ashtekari muutujad on silmusmeetodi kvantiseerimise alus.

$\Rightarrow$ Gravitatsiooni kui geomeetria mõistmisel on võtmeroll tänapäevases füüsikas.