

Tumeda universumi kolm lugu

Gravitatsiooni roll universumi avastamisel

Manuel Hohmann

Teoreetilise Füüsika Labor - Füüsika Instituut - Tartu Ülikool
Tippkeskus "Fundamentaalne Universum"



Tumeaine nädala astronoomia loeng - 29. oktoober 2024

1. Tumedad planeedid
2. Tume aine
3. Tume energia
4. Tuleviku väljavaade ja kokkuvõte

1. Tumedad planeedid

2. Tume aine

3. Tume energia

4. Tuleviku väljavaade ja kokkuvõte

1845: Uraani orbiidi anomaalia

- Neptuuni avastamine:
 - Bouvard avaldas 1821 Uraani orbiidi tabeleid ja ennustusi.

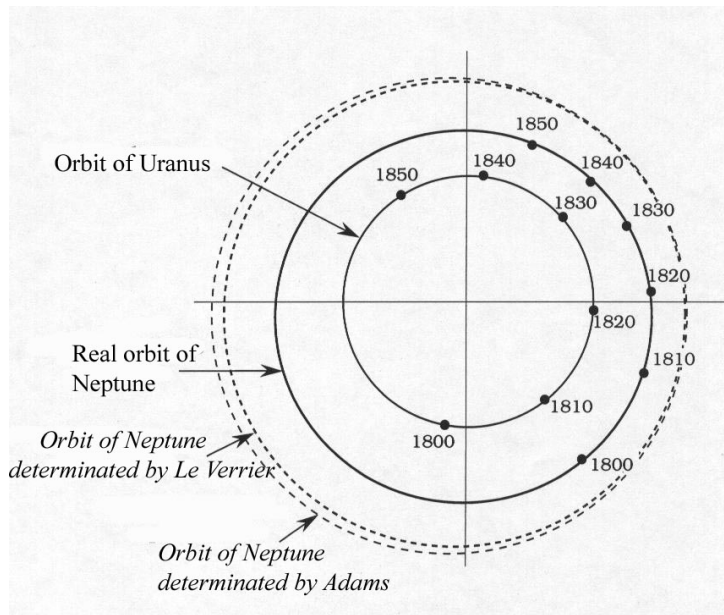
1845: Uraani orbiidi anomaalia

- Neptuuni avastamine:
 - Bouvard avaldas 1821 Uraani orbiidi tabeleid ja ennustusi.
 - ⚡ Vaatlused järgnevatel aastatel näitasid erinevusi.

1845: Uraani orbiidi anomaalia

- Neptuuni avastamine:
 - Bouvard avaldas 1821 Uraani orbiidi tabeleid ja ennustusi.
 - ⚡ Vaatlused järgnevatel aastatel näitasid erinevusi.
 - ⇒ 1845 Adams ja Le Verrier kahtlustasid et on tabamatu planeet.

Uraan ja Neptuun



1845: Uraani orbiidi anomaalia

- Neptuuni avastamine:
 - Bouvard avaldas 1821 Uraani orbiidi tabeleid ja ennustusi.
 - ⚡ Vaatlused järgnevatel aastatel näitasid erinevusi.
 - ⇒ 1845 Adams ja Le Verrier kahtlustasid et on tabamatu planeet.
 - ✓ 24. septembril 1846 Galle avastas Neptuuni.

1845: Uraani orbiidi anomaalia

- Neptuuni avastamine:
 - Bouvard avaldas 1821 Uraani orbiidi tabeleid ja ennustusi.
 - ⚡ Vaatlused järgnevatel aastatel näitasid erinevusi.
 - ⇒ 1845 Adams ja Le Verrier kahtlustasid et on tabamatu planeet.
 - ✓ 24. septembril 1846 Galle avastas Neptuuni.
- Kuidas avastamine toimus?
 1. Ennustus gravitatsiooniteooria ja vaatluste alusel.

1845: Uraani orbiidi anomaalia

- Neptuuni avastamine:
 - Bouvard avaldas 1821 Uraani orbiidi tabeleid ja ennustusi.
 - ⚡ Vaatlused järgnevatel aastatel näitasid erinevusi.
 - ⇒ 1845 Adams ja Le Verrier kahtlustasid et on tabamatu planeet.
 - ✓ 24. septembril 1846 Galle avastas Neptuuni.
- Kuidas avastamine toimus?
 1. Ennustus gravitatsiooniteooria ja vaatluste alusel.
 - ⚡ Vastuolu ennustuse ja järgnevate vaatluste vahel.

1845: Uraani orbiidi anomaalia

- Neptuuni avastamine:
 - Bouvard avaldas 1821 Uraani orbiidi tabeleid ja ennustusi.
 - ⚡ Vaatlused järgnevatel aastatel näitasid erinevusi.
 - ⇒ 1845 Adams ja Le Verrier kahtlustasid et on tabamatu planeet.
 - ✓ 24. septembril 1846 Galle avastas Neptuuni.
- Kuidas avastamine toimus?
 1. Ennustus gravitatsiooniteooria ja vaatluste alusel.
 - ⚡ Vastuolu ennustuse ja järgnevate vaatluste vahel.
 - ⇒ Hüpotees et avastamata taevakeha selgitab vaatlust.

1845: Uraani orbiidi anomaalia

- Neptuuni avastamine:
 - Bouvard avaldas 1821 Uraani orbiidi tabeleid ja ennustusi.
 - ⚡ Vaatlused järgnevatel aastatel näitasid erinevusi.
 - ⇒ 1845 Adams ja Le Verrier kahtlustasid et on tabamatu planeet.
 - ✓ 24. septembril 1846 Galle avastas Neptuuni.
- Kuidas avastamine toimus?
 1. Ennustus gravitatsiooniteooria ja vaatluste alusel.
 - ⚡ Vastuolu ennustuse ja järgnevate vaatluste vahel.
 - ⇒ Hüpotees et avastamata taevakeha selgitab vaatlust.
 - ✓ Hüpoteetilise taevakeha **tuvastus** uute vaatlustega.

1845: Uraani orbiidi anomaalia

- Neptuuni avastamine:
 - Bouvard avaldas 1821 Uraani orbiidi tabeleid ja ennustusi.
 - ⚡ Vaatlused järgnevatel aastatel näitasid erinevusi.
 - ⇒ 1845 Adams ja Le Verrier kahtlustasid et on tabamatu planeet.
 - ✓ 24. septembril 1846 Galle avastas Neptuuni.
- Kuidas avastamine toimus?
 1. Ennustus gravitatsiooniteooria ja vaatluste alusel.
 - ⚡ Vastuolu ennustuse ja järgnevate vaatluste vahel.
 - ⇒ Hüpotees et avastamata taevakeha selgitab vaatlust.
 - ✓ Hüpoteetilise taevakeha tuvastus uute vaatlustega.

Tumeda universumi lugu

Nähtava planeedi (Uraani) liikumine ja Newtoni gravitatsiooniteooria viitasid seni tabamatuks (astronoomide jaoks seega “tumedaks”) jäänud taevakehale.

1859: Merkuuri mõistatus

- Merkuuri vaatlused:
 - Le Verrier uuris Merkuuri vaatlusi 1859, Newcomb täpsustas 1882.

1859: Merkuuri mõistatus

- Merkuuri vaatlused:
 - Le Verrier uuris Merkuuri vaatlusi 1859, Newcomb täpsustas 1882.
 - Vaatlused: Merkuuri periheel (päikeselähis) pöörleb 575'' sajandis.

1859: Merkuuri mõistatus

- Merkuuri vaatlused:
 - Le Verrier uuris Merkuuri vaatlusi 1859, Newcomb täpsustas 1882.
 - Vaatlused: Merkuuri periheel (päikeselähis) pöörleb $575''$ sajandis.
 - Ennustus: teiste planeetide mõju tekitab $532''$ sajandis.

1859: Merkuuri mõistatus

- Merkuuri vaatlused:

- Le Verrier uuris Merkuuri vaatlusi 1859, Newcomb täpsustas 1882.
- Vaatlused: Merkuuri periheel (päikeselähis) pöörleb $575''$ sajandis.
- Ennustus: teiste planeetide mõju tekitab $532''$ sajandis.
- ⚡ Selgitamata erinevus: $43''$ sajandis.

1859: Merkuuri mõistatus

- Merkuuri vaatlused:
 - Le Verrier uuris Merkuuri vaatlusi 1859, Newcomb täpsustas 1882.
 - Vaatlused: Merkuuri periheel (päikeselähis) pöörleb $575''$ sajandis.
 - Ennustus: teiste planeetide mõju tekitab $532''$ sajandis.
 - ⚡ Selgitamata erinevus: $43''$ sajandis.
- Tuvastamata (“tume”) planeet Merkuuri ja päikese vahel?
 - Le Verrier järeldas 1859 et Merkuuri orbiiti mõjutab teine planeet.

1859: Merkuuri mõistatus

- Merkuuri vaatlused:
 - Le Verrier uuris Merkuuri vaatlusi 1859, Newcomb täpsustas 1882.
 - Vaatlused: Merkuuri periheel (päikeselähis) pöörleb $575''$ sajandis.
 - Ennustus: teiste planeetide mõju tekitab $532''$ sajandis.
 - ⚡ Selgitamata erinevus: $43''$ sajandis.
- Tuvastamata ("tume") planeet Merkuuri ja päikese vahel?
 - Le Verrier järeldas 1859 et Merkuuri orbiiti mõjutab teine planeet.
 - Lescarbault väitis 1859 et ta on planeedi transiiti vaadelnud.

1859: Merkuuri mõistatus

- Merkuuri vaatlused:
 - Le Verrier uuris Merkuuri vaatlusi 1859, Newcomb täpsustas 1882.
 - Vaatlused: Merkuuri periheel (päikeselähis) pöörleb $575''$ sajandis.
 - Ennustus: teiste planeetide mõju tekitab $532''$ sajandis.
 - ⚡ Selgitamata erinevus: $43''$ sajandis.
- Tuvastamata (“tume”) planeet Merkuuri ja päikese vahel?
 - Le Verrier järeldas 1859 et Merkuuri orbiiti mõjutab teine planeet.
 - Lescarbault väitis 1859 et ta on planeedi transiiti vaadelnud.
 - Väidetavalt vaadeldi planeeti ka aastatel 1860, 1862, 1865, 1878...

1859: Merkuuri mõistatus

- Merkuuri vaatlused:
 - Le Verrier uuris Merkuuri vaatlusi 1859, Newcomb täpsustas 1882.
 - Vaatlused: Merkuuri periheel (päikeselähis) pöörleb $575''$ sajandis.
 - Ennustus: teiste planeetide mõju tekitab $532''$ sajandis.
 - ⚡ Selgitamata erinevus: $43''$ sajandis.
- Tuvastamata (“tume”) planeet Merkuuri ja päikese vahel?
 - Le Verrier järeldas 1859 et Merkuuri orbiiti mõjutab teine planeet.
 - Lescarbault väitis 1859 et ta on planeedi transiiti vaadelnud.
 - Väidetavalt vaadeldi planeeti ka aastatel 1860, 1862, 1865, 1878...
 - ⚡ Erinevad “vaatlused” ei olnud omavahel kooskõlas.

1859: Merkuuri mõistatus

- Merkuuri vaatlused:
 - Le Verrier uuris Merkuuri vaatlusi 1859, Newcomb täpsustas 1882.
 - Vaatlused: Merkuuri periheel (päikeselähis) pöörleb $575''$ sajandis.
 - Ennustus: teiste planeetide mõju tekitab $532''$ sajandis.
 - ⚡ Selgitamata erinevus: $43''$ sajandis.
 - Tuvastamata (“tume”) planeet Merkuuri ja päikese vahel?
 - Le Verrier järeldas 1859 et Merkuuri orbiiti mõjutab teine planeet.
 - Lescarbault väitis 1859 et ta on planeedi transiiti vaadelnud.
 - Väidetavalt vaadeldi planeeti ka aastatel 1860, 1862, 1865, 1878...
 - ⚡ Erinevad “vaatlused” ei olnud omavahel kooskõlas.
- ✓ 1915 üldrelatiivsusteooria selgitas vaatlusi ilma planeedita.

1859: Merkuuri mõistatus

- Merkuuri vaatlused:
 - Le Verrier uuris Merkuuri vaatlusi 1859, Newcomb täpsustas 1882.
 - Vaatlused: Merkuuri periheel (päikeselähis) pöörleb $575''$ sajandis.
 - Ennustus: teiste planeetide mõju tekitab $532''$ sajandis.
 - ⚡ Selgitamata erinevus: $43''$ sajandis.
- Tuvastamata (“tume”) planeet Merkuuri ja päikese vahel?
 - Le Verrier järeldas 1859 et Merkuuri orbiiti mõjutab teine planeet.
 - Lescarbault väitis 1859 et ta on planeedi transiiti vaadelnud.
 - Väidetavalt vaadeldi planeeti ka aastatel 1860, 1862, 1865, 1878...
 - ⚡ Erinevad “vaatlused” ei olnud omavahel kooskõlas.
- ✓ 1915 üldrelatiivsusteooria selgitas vaatlusi ilma planeedita.

Tumeda universumi lugu

Tundmatu mõju nähtavale taevakehale ei pruugi olla tundmatust objektist põhjustatud. Selle asemel võib meie arusaam vastastikmõjust erinevate taevakehade vahel olla puudulik.

1980: Pioneeri anomaalia

- Pioneer 10 & 11 kosmosesondid:
 - Saadeti 1972 & 1973 teele planeetidele (Jupiter, Saturn).

1980: Pioneeri anomaalia

- Pioneer 10 & 11 kosmosesondid:
 - Saadeti 1972 & 1973 teele planeetidele (Jupiter, Saturn).
 - Pärast planeetidelt möödumist vaba lend päikesesüsteemist välja.

1980: Pioneeri anomaalia

- Pioneer 10 & 11 kosmosesondid:
 - Saadeti 1972 & 1973 teele planeetidele (Jupiter, Saturn).
 - Pärast planeetidelt möödumist vaba lend päikesesüsteemist välja.
 - ⇒ Täpsed möõtmised sondide asukohast ja kiirusest raadiosignaaliga.

1980: Pioneer anomaalia

- Pioneer 10 & 11 kosmosesondid:
 - Saadeti 1972 & 1973 teele planeetidele (Jupiter, Saturn).
 - Pärast planeetidelt möödumist vaba lend päikesesüsteemist välja.
- ⇒ Täpsed mõõtmised sondide asukohast ja kiirusest raadiosignaaliga.
- ⚡ Selgitamata aeglustus: $(8.74 \pm 1.33) \cdot 10^{-10} \text{ms}^{-2}$.

1980: Pioneeri anomaalia

- Pioneer 10 & 11 kosmosesondid:
 - Saadeti 1972 & 1973 teele planeetidele (Jupiter, Saturn).
 - Pärast planeetidelt möödumist vaba lend päikesesüsteemist välja.
 - ⇒ Täpsed mõõtmised sondide asukohast ja kiirusest raadiosignaaliga.
 - ⚡ Selgitamata aeglustus: $(8.74 \pm 1.33) \cdot 10^{-10} \text{ms}^{-2}$.
- Võimalikud selgitused:
 - Tuvastamata mass päikesesüsteemis?

1980: Pioneeri anomaalia

- Pioneer 10 & 11 kosmosesondid:
 - Saadeti 1972 & 1973 teele planeetidele (Jupiter, Saturn).
 - Pärast planeetidelt möödumist vaba lend päikesesüsteemist välja.
 - ⇒ Täpsed mõõtmised sondide asukohast ja kiirusest raadiosignaaliga.
 - ⚡ Selgitamata aeglustus: $(8.74 \pm 1.33) \cdot 10^{-10} \text{ms}^{-2}$.
- Võimalikud selgitused:
 - Tuvastamata mass päikesesüsteemis?
 - Hõõrdejõud planeetidevahelise gaasi tõttu?

1980: Pioneeri anomaalia

- Pioneer 10 & 11 kosmosesondid:
 - Saadeti 1972 & 1973 teele planeetidele (Jupiter, Saturn).
 - Pärast planeetidelt möödumist vaba lend päikesesüsteemist välja.
 - ⇒ Täpsed mõõtmised sondide asukohast ja kiirusest raadiosignaaliga.
 - ⚡ Selgitamata aeglustus: $(8.74 \pm 1.33) \cdot 10^{-10} \text{ms}^{-2}$.
- Võimalikud selgitused:
 - Tuvastamata mass päikesesüsteemis?
 - Hõõrdejõud planeetidevahelise gaasi tõttu?
 - Sondist lekkiv gaas (heelium)?

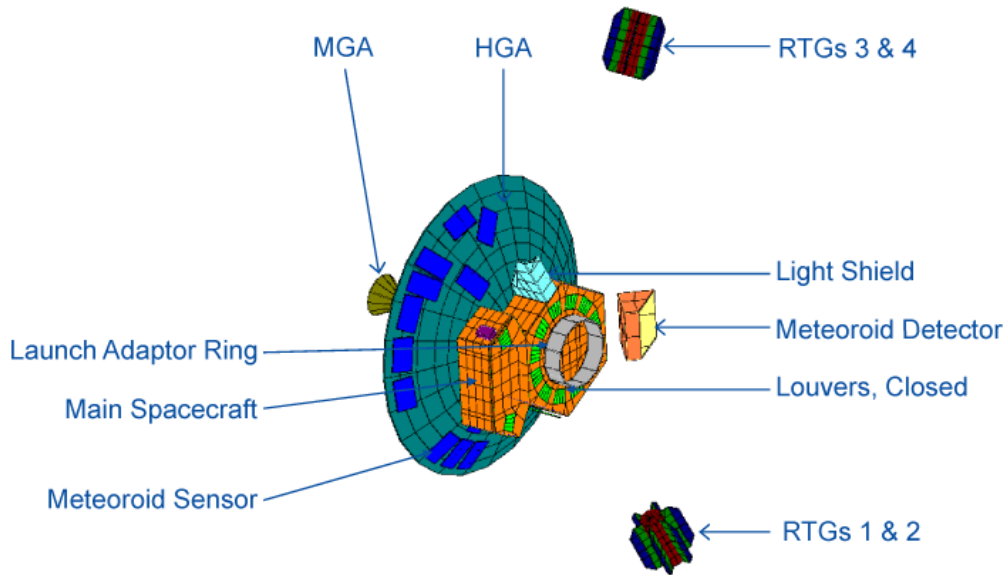
1980: Pioneeri anomaalia

- Pioneer 10 & 11 kosmosesondid:
 - Saadeti 1972 & 1973 teele planeetidele (Jupiter, Saturn).
 - Pärast planeetidelt möödumist vaba lend päikesesüsteemist välja.
 - ⇒ Täpsed mõõtmised sondide asukohast ja kiirusest raadiosignaaliga.
 - ⚡ Selgitamata aeglustus: $(8.74 \pm 1.33) \cdot 10^{-10} \text{ms}^{-2}$.
- Võimalikud selgitused:
 - Tuvastamata mass päikesesüsteemis?
 - Hõõrdejõud planeetidevahelise gaasi tõttu?
 - Sondist lekkiv gaas (heelium)?
 - Muudetus gravitatsiooniseaduses?

1980: Pioneeri anomaalia

- Pioneer 10 & 11 kosmosesondid:
 - Saadeti 1972 & 1973 teele planeetidele (Jupiter, Saturn).
 - Pärast planeetidelt möödumist vaba lend päikesesüsteemist välja.
 - ⇒ Täpsed mõõtmised sondide asukohast ja kiirusest raadiosignaaliga.
 - ⚡ Selgitamata aeglustus: $(8.74 \pm 1.33) \cdot 10^{-10} \text{ms}^{-2}$.
 - Võimalikud selgitused:
 - Tuvastamata mass päikesesüsteemis?
 - Hõõrdejõud planeetidevahelise gaasi tõttu?
 - Sondist lekkiv gaas (heelium)?
 - Muudetus gravitatsiooniseaduses?
- ✓ 2012: termineline mudel näitas mitteisotroopset soojuskiirgust.

Pioneereri kosmosesondid



1980: Pioneeri anomaalia

- Pioneer 10 & 11 kosmosesondid:
 - Saadeti 1972 & 1973 teele planeetidele (Jupiter, Saturn).
 - Pärast planeetidelt möödumist vaba lend päikesesüsteemist välja.
 - ⇒ Täpsed mõõtmised sondide asukohast ja kiirusest raadiosignaaliga.
 - ⚡ Selgitamata aeglustus: $(8.74 \pm 1.33) \cdot 10^{-10} \text{ms}^{-2}$.
- Võimalikud selgitused:
 - Tuvastamata mass päikesesüsteemis?
 - Hõõrdejõud planeetidevahelise gaasi tõttu?
 - Sondist lekkiv gaas (heelium)?
 - Muudetus gravitatsiooniseaduses?
 - ✓ 2012: termineline mudel näitas mitteisotroopset soojuskiirgust.

Tumeda universumi lugu

Vaadeldud objekti selgitamata kiirendus võib ka olla klassikalise füüsika efekt, mis on seni arvestamata jäänud.

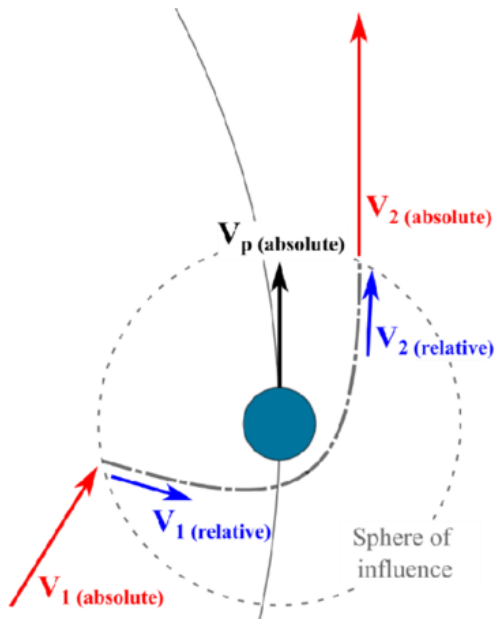
1990: Möödalenno anomaalia

- Planetaarne linguefekt:
 - Kosmoseaparaat möödub planeeti teekonnan läbi päikesesüsteemi.

1990: Möödalennu anomaalia

- Planetaarne linguefekt:
 - Kosmoseaparaat möödub planeeti teekonnal läbi päikesesüsteemi.
 - Suhteline kiirus planeediga enne ja pärast möödulendu on sama.

Planetaarne linguefekt



1990: Möödalennu anomaalia

- Planetaarne linguefekt:
 - Kosmoseaparaat möödub planeeti teekonnal läbi päikesesüsteemi.
 - Suhteline kiirus planeediga enne ja pärast möödulendu on sama.
 - Võimalus üle kanda impulssi ja energiat planeedilt aparaadile.

1990: Möödalennu anomaalia

- Planetaarne linguefekt:
 - Kosmoseaparaat möödub planeeti teekonnal läbi päikesesüsteemi.
 - Suhteline kiirus planeediga enne ja pärast möödulendu on sama.
 - Võimalus üle kanda impulssi ja energiat planeedilt aparaadile.
- ⚡ Möödalennu anomaalia: erinevus teooria ja vaatluste vahel:
 - 1990: Galileo, $3.92 \pm 0.08 \text{ mm/s}$.

1990: Möödalennu anomaalia

- Planetaarne linguefekt:
 - Kosmoseaparaat möödub planeeti teekonnal läbi päikesesüsteemi.
 - Suhteline kiirus planeediga enne ja pärast möödulendu on sama.
 - Võimalus üle kanda impulssi ja energiat planeedilt aparaadile.
- ⚡ Möödalennu anomaalia: erinevus teooria ja vaatluste vahel:
 - 1990: Galileo, $3.92 \pm 0.08 \text{ mm/s}$.
 - 1998: NEAR, $13.46 \pm 0.13 \text{ mm/s}$.

1990: Möödalennu anomaalia

- Planetaarne linguefekt:
 - Kosmoseaparaat möödub planeeti teekonnal läbi päikesesüsteemi.
 - Suhteline kiirus planeediga enne ja pärast möödulendu on sama.
 - Võimalus üle kanda impulssi ja energiat planeedilt aparaadile.
- ⚡ Möödalennu anomaalia: erinevus teooria ja vaatluste vahel:
 - 1990: Galileo, $3.92 \pm 0.08 \text{ mm/s}$.
 - 1998: NEAR, $13.46 \pm 0.13 \text{ mm/s}$.
 - 2005: Rosetta, $1.82 \pm 0.05 \text{ mm/s}$.

1990: Möödalennu anomaalia

- Planetaarne linguefekt:
 - Kosmoseaparaat möödub planeeti teekonnal läbi päikesesüsteemi.
 - Suhteline kiirus planeediga enne ja pärast möödulendu on sama.
 - Võimalus üle kanda impulssi ja energiat planeedilt aparaadile.
- ⚡ Möödalennu anomaalia: erinevus teooria ja vaatluste vahel:
 - 1990: Galileo, $3.92 \pm 0.08 \text{ mm/s}$.
 - 1998: NEAR, $13.46 \pm 0.13 \text{ mm/s}$.
 - 2005: Rosetta, $1.82 \pm 0.05 \text{ mm/s}$.
- Võimalikud selgitused:
 - Signaali viivitus NASA süvakosmose sidevõrgus?

1990: Möödalennu anomaalia

- Planetaarne linguefekt:
 - Kosmoseaparaat möödub planeeti teekonnal läbi päikesesüsteemi.
 - Suhteline kiirus planeediga enne ja pärast möödulendu on sama.
 - Võimalus üle kanda impulssi ja energiat planeedilt aparaadile.
- ⚡ Möödalennu anomaalia: erinevus teooria ja vaatluste vahel:
 - 1990: Galileo, $3.92 \pm 0.08\text{mm/s}$.
 - 1998: NEAR, $13.46 \pm 0.13\text{mm/s}$.
 - 2005: Rosetta, $1.82 \pm 0.05\text{mm/s}$.
- Võimalikud selgitused:
 - Signaali viivitus NASA süvakosmose sidevõrgus?
 - Tuvastamata mass maa ümbruses?

1990: Möödalennu anomaalia

- Planetaarne linguefekt:
 - Kosmoseaparaat möödub planeeti teekonnal läbi päikesesüsteemi.
 - Suhteline kiirus planeediga enne ja pärast möödulendu on sama.
 - Võimalus üle kanda impulssi ja energiat planeedilt aparaadile.
- ⚡ Möödalennu anomaalia: erinevus teooria ja vaatluste vahel:
 - 1990: Galileo, $3.92 \pm 0.08 \text{ mm/s}$.
 - 1998: NEAR, $13.46 \pm 0.13 \text{ mm/s}$.
 - 2005: Rosetta, $1.82 \pm 0.05 \text{ mm/s}$.
- Võimalikud selgitused:
 - Signaali viivitus NASA süvakosmose sidevõrgus?
 - Tuvastamata mass maa ümbruses?
 - Liigne ebatäpsus maa gravitatsioonivälja mudelis?

1990: Möödalennu anomaalia

- Planetaarne linguefekt:
 - Kosmoseaparaat möödub planeeti teekonnal läbi päikesesüsteemi.
 - Suhteline kiirus planeediga enne ja pärast möödulendu on sama.
 - Võimalus üle kanda impulssi ja energiat planeedilt aparaadile.
- ⚡ Möödalennu anomaalia: erinevus teooria ja vaatluste vahel:
 - 1990: Galileo, $3.92 \pm 0.08\text{mm/s}$.
 - 1998: NEAR, $13.46 \pm 0.13\text{mm/s}$.
 - 2005: Rosetta, $1.82 \pm 0.05\text{mm/s}$.
- Võimalikud selgitused:
 - Signaali viivitus NASA süvakosmose sidevõrgus?
 - Tuvastamata mass maa ümbruses?
 - Liigne ebatäpsus maa gravitatsioonivälja mudelis?
 - Suunast sõltuv valguskiirus?

1990: Möödalennu anomaalia

- Planetaarne linguefekt:
 - Kosmoseaparaat möödub planeeti teekonnal läbi päikesesüsteemi.
 - Suhteline kiirus planeediga enne ja pärast möödulendu on sama.
 - Võimalus üle kanda impulssi ja energiat planeedilt aparaadile.
- ⚡ Möödalennu anomaalia: erinevus teooria ja vaatluste vahel:
 - 1990: Galileo, $3.92 \pm 0.08\text{mm/s}$.
 - 1998: NEAR, $13.46 \pm 0.13\text{mm/s}$.
 - 2005: Rosetta, $1.82 \pm 0.05\text{mm/s}$.
- Võimalikud selgitused:
 - Signaali viivitus NASA süvakosmose sidevõrgus?
 - Tuvastamata mass maa ümbruses?
 - Liigne ebatäpsus maa gravitatsioonivälja mudelis?
 - Suunast sõltuv valguskiirus?
 - Muudetus gravitatsiooniseaduses?

1990: Möödalennu anomaalia

- Planetaarne linguefekt:
 - Kosmoseaparaat möödub planeeti teekonnal läbi päikesesüsteemi.
 - Suhteline kiirus planeediga enne ja pärast möödulendu on sama.
 - Võimalus üle kanda impulssi ja energiat planeedilt aparaadile.
- ⚡ Möödalennu anomaalia: erinevus teooria ja vaatluste vahel:
 - 1990: Galileo, $3.92 \pm 0.08\text{mm/s}$.
 - 1998: NEAR, $13.46 \pm 0.13\text{mm/s}$.
 - 2005: Rosetta, $1.82 \pm 0.05\text{mm/s}$.
- Võimalikud selgitused:
 - Signaali viivitus NASA süvakosmose sidevõrgus?
 - Tuvastamata mass maa ümbruses?
 - Liigne ebatäpsus maa gravitatsioonivälja mudelis?
 - Suunast sõltuv valguskiirus?
 - Muudetus gravitatsiooniseaduses?

Tumeda universumi lugu

Möödalennu anomaalia on lahendamata mõistatus.

1. Tumedad planeedid

2. Tume aine

3. Tume energia

4. Tuleviku väljavaade ja kokkuvõte

- Kapteyni mudel linnuteest:
 - 1904: Kapteyn leidis et tähed liiguvad kahes eelissuunas.

- Kapteyni mudel linnuteest:
 - 1904: Kapteyn leidis et tähed liiguvad kahes eelissuunas.
 - 1906: Kapteyn hakkas süstemaatiliselt uurima tähtede jaotust.

- Kapteyni mudel linnuteest:
 - 1904: Kapteyn leidis et tähed liiguvad kahes eelissuunas.
 - 1906: Kapteyn hakkas süstemaatiliselt uurima tähtede jaotust.
 - 1922: Kapteyn leidis et linnutee peab olema läätsekujuline.

Linnutee tähtede liikumine

- Kapteyni mudel linnuteest:
 - 1904: Kapteyn leidis et tähed liiguvad kahes eelissuunas.
 - 1906: Kapteyn hakkas süstemaatiliselt uurima tähtede jaotust.
 - 1922: Kapteyn leidis et linnutee peab olema läätsekujuline.
- ⇒ Kapteyn pidas võimalikuks kogumassi mõõta tähtede liikumise abil.

Linnutee tähtede liikumine

- Kapteyni mudel linnuteest:
 - 1904: Kapteyn leidis et tähed **liiguvad kahes eelissuunas**.
 - 1906: Kapteyn hakkas süstemaatiliselt uurima tähtede jaotust.
 - 1922: Kapteyn leidis et linnutee peab olema läätsekujuline.
 - ⇒ Kapteyn pidas võimalikuks kogumassi mõõta tähtede liikumise abil.
- Linnutee täpsemad uuringud:
 - 1927: Lindblad, Oort avastasid linnutee pöörlemist.

Linnutee tähtede liikumine

- Kapteyni mudel linnuteest:
 - 1904: Kapteyn leidis et tähed liiguvad kahes eelissuunas.
 - 1906: Kapteyn hakkas süstemaatiliselt uurima tähtede jaotust.
 - 1922: Kapteyn leidis et linnutee peab olema läätsekujuline.

⇒ Kapteyn pidas võimalikuks kogumassi mõõta tähtede liikumise abil.
- Linnutee täpsemad uuringud:
 - 1927: Lindblad, Oort avastasid linnutee pöörlemist.
 - 1932: Oort tuletas linnutee massi naabrigalaktikate omaliikumisest.

- Kapteyni mudel linnuteest:
 - 1904: Kapteyn leidis et tähed liiguvad kahes eelissuunas.
 - 1906: Kapteyn hakkas süstemaatiliselt uurima tähtede jaotust.
 - 1922: Kapteyn leidis et linnutee peab olema läätsekujuline.

⇒ Kapteyn pidas võimalikuks kogumassi mõõta tähtede liikumise abil.
- Linnutee täpsemad uuringud:
 - 1927: Lindblad, Oort avastasid linnutee pöörlemist.
 - 1932: Oort tuletas linnutee massi naabrigalaktikate omaliikumisest.
 - 1989: Hipparcos - 10^5 tähe asukohad ja kiirused.

- Kapteyni mudel linnuteest:
 - 1904: Kapteyn leidis et tähed liiguvad kahes eelissuunas.
 - 1906: Kapteyn hakkas süstemaatiliselt uurima tähtede jaotust.
 - 1922: Kapteyn leidis et linnutee peab olema läätsekujuline.

⇒ Kapteyn pidas võimalikuks kogumassi mõõta tähtede liikumise abil.
- Linnutee täpsemad uuringud:
 - 1927: Lindblad, Oort avastasid linnutee pöörlemist.
 - 1932: Oort tuletas linnutee massi naabrigalaktikate omaliikumisest.
 - 1989: Hipparcos - 10^5 tähe asukohad ja kiirused.
 - 2014: Gaia - $1.3 \cdot 10^9$ tähe asukohad ja kiirused.

- Kapteyni mudel linnuteest:
 - 1904: Kapteyn leidis et tähed liiguvad kahes eelissuunas.
 - 1906: Kapteyn hakkas süstemaatiliselt uurima tähtede jaotust.
 - 1922: Kapteyn leidis et linnutee peab olema läätsekujuline.

⇒ Kapteyn pidas võimalikuks kogumassi mõõta tähtede liikumise abil.
- Linnutee täpsemad uuringud:
 - 1927: Lindblad, Oort avastasid linnutee pöörlemist.
 - 1932: Oort tuletas linnutee massi naabrigalaktikate omaliikumisest.
 - 1989: Hipparcos - 10^5 tähe asukohad ja kiirused.
 - 2014: Gaia - $1.3 \cdot 10^9$ tähe asukohad ja kiirused.
- Linnutee vaatluse raskused:

- Kapteyni mudel linnuteest:
 - 1904: Kapteyn leidis et tähed liiguvad kahes eelissuunas.
 - 1906: Kapteyn hakkas süstemaatiliselt uurima tähtede jaotust.
 - 1922: Kapteyn leidis et linnutee peab olema läätsekujuline.
 - ⇒ Kapteyn pidas võimalikuks kogumassi mõõta tähtede liikumise abil.
- Linnutee täpsemad uuringud:
 - 1927: Lindblad, Oort avastasid linnutee pöörlemist.
 - 1932: Oort tuletas linnutee massi naabrigalaktikate omaliikumisest.
 - 1989: Hipparcos - 10^5 tähe asukohad ja kiirused.
 - 2014: Gaia - $1.3 \cdot 10^9$ tähe asukohad ja kiirused.
- Linnutee vaatluse raskused:
 - Struktuuri on raske tuvastada kui vaadatakse ketta seest.

- Kapteyni mudel linnuteest:
 - 1904: Kapteyn leidis et tähed liiguvad kahes eelissuunas.
 - 1906: Kapteyn hakkas süstemaatiliselt uurima tähtede jaotust.
 - 1922: Kapteyn leidis et linnutee peab olema läätsekujuline.
 - ⇒ Kapteyn pidas võimalikuks kogumassi mõõta tähtede liikumise abil.
- Linnutee täpsemad uuringud:
 - 1927: Lindblad, Oort avastasid linnutee pöörlemist.
 - 1932: Oort tuletas linnutee massi naabrigalaktikate omaliikumisest.
 - 1989: Hipparcos - 10^5 tähe asukohad ja kiirused.
 - 2014: Gaia - $1.3 \cdot 10^9$ tähe asukohad ja kiirused.
- Linnutee vaatluse raskused:
 - Struktuuri on raske tuvastada kui vaadatakse ketta seest.
 - Osa galaktikast on tumedatest gaasipilvedest varjatud.

Linnutee tähtede liikumine

- Kapteyni mudel linnuteest:
 - 1904: Kapteyn leidis et tähed liiguvad kahes eelissuunas.
 - 1906: Kapteyn hakkas süstemaatiliselt uurima tähtede jaotust.
 - 1922: Kapteyn leidis et linnutee peab olema läätsekujuline.
 - ⇒ Kapteyn pidas võimalikuks kogumassi mõõta tähtede liikumise abil.
- Linnutee täpsemad uuringud:
 - 1927: Lindblad, Oort avastasid linnutee pöörlemist.
 - 1932: Oort tuletas linnutee massi naabrigalaktikate omaliikumisest.
 - 1989: Hipparcos - 10^5 tähe asukohad ja kiirused.
 - 2014: Gaia - $1.3 \cdot 10^9$ tähe asukohad ja kiirused.
- Linnutee vaatluse raskused:
 - Struktuuri on raske tuvastada kui vaadatakse ketta seest.
 - Osa galaktikast on tumedatest gaasipilvedest varjatud.

Tumeda universumi lugu

Linnutee massi on raske tuvastada.

- Galaktikaparvede dünaamika:
 - 1933: Zwicky mõõtis Coma parve galaktikate omaliikumist.

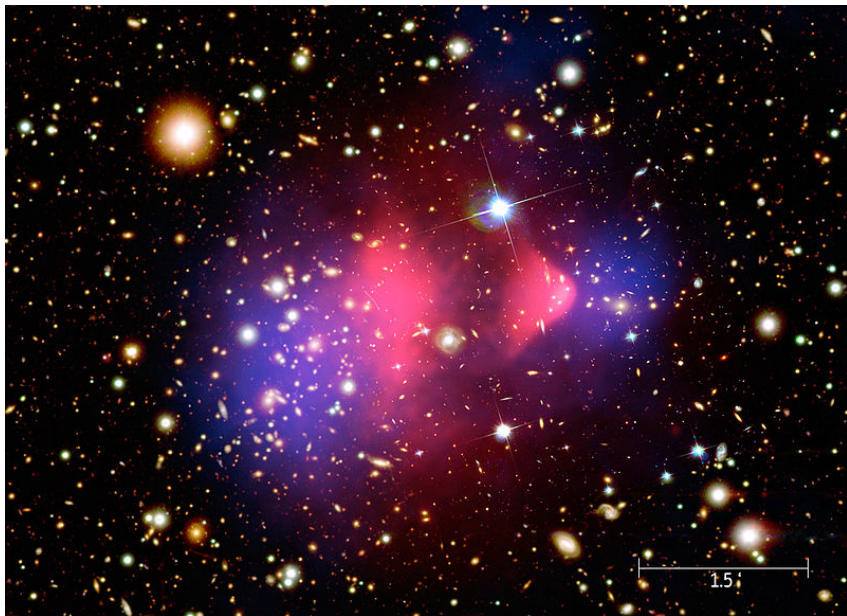
- Galaktikaparvede dünaamika:
 - 1933: Zwicky mõõtis Coma parve galaktikate omaliikumist.
 - Viriaalsuse teoreem: kineetiline energia $\approx$ potentsiaalne energia.

- Galaktikaparvede dünaamika:
 - 1933: Zwicky mõõtis Coma parve galaktikate omaliikumist.
 - Viriaalsuse teoreem: kineetiline energia $\approx$ potentsiaalne energia.
 - ⇒ Zwicky arvutas gravitatsiooni potentsiaali Coma parves.

- Galaktikaparvede dünaamika:
 - 1933: Zwicky mõõtis Coma parve galaktikate omaliikumist.
 - Viriaalsuse teoreem: kineetiline energia $\approx$ potentsiaalne energia.
- ⇒ Zwicky arvutas gravitatsiooni potentsiaali Coma parves.
- ⚡ Coma parve mass on oluliselt suurem kui nähtava aine oma.

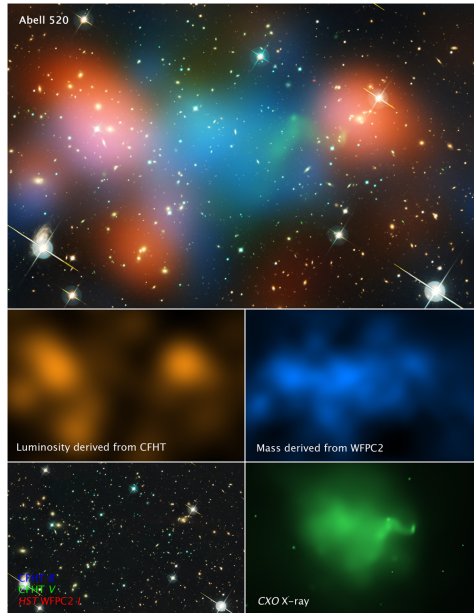
- Galaktikaparvede dünaamika:
 - 1933: Zwicky mõõtis Coma parve galaktikate omaliikumist.
 - Viriaalsuse teoreem: kineetiline energia $\approx$ potentsiaalne energia.
 - ⇒ Zwicky arvutas gravitatsiooni potentsiaali Coma parves.
 - ⚡ Coma parve mass on oluliselt suurem kui nähtava aine oma.
- Gravitatsiooniläätsed ja parvede kokkupõrked:
 - 2004: Kuuliparv: kahe galaktikaparve kokkupõrge.

1E 0657-56 (kuuliparv)



- Galaktikaparvede dünaamika:
 - 1933: Zwicky mõõtis Coma parve galaktikate omaliikumist.
 - Viriaalsuse teoreem: kineetiline energia $\approx$ potentsiaalne energia.
 - ⇒ Zwicky arvutas gravitatsiooni potentsiaali Coma parves.
 - ⚡ Coma parve mass on oluliselt suurem kui nähtava aine oma.
- Gravitatsiooniläätсед ja parvede kokkupõrked:
 - 2004: Kuuliparv: kahe galaktikaparve kokkupõrge.
 - 2007: Rongihukuparv: suuremast kokkupõrkest tekkinud parv.

Abell 520 (rongihukuparv)



- Galaktikaparvede dünaamika:
 - 1933: Zwicky mõõtis Coma parve galaktikate omaliikumist.
 - Viriaalsuse teoreem: kineetiline energia $\approx$ potentsiaalne energia.
 - ⇒ Zwicky arvutas gravitatsiooni potentsiaali Coma parves.
 - ⚡ Coma parve mass on oluliselt suurem kui nähtava aine oma.
- Gravitatsiooniläätсед ja parvede kokkupõrked:
 - 2004: Kuuliparv: kahe galaktikaparve kokkupõrge.
 - 2007: Rongihukuparv: suuremast kokkupõrkest tekkinud parv.

Tumeda universumi lugu

Vaatlused viitavad nähtamatule massile galaktikaparvedes, mis käitub gaasist erinevalt, ja võib kokkupõrkes nähtavast ainest eralduda.

- Teoreetiline ennustus:
 - Enamus galaktika nähtavast ainest paikneb tema tuumas.

- Teoreetiline ennustus:
 - Enamus galaktika nähtavast ainest paikneb tema tuumas.
 - Tuumas on tihedus enam-vähem konstantne.

- Teoreetiline ennustus:
 - Enamus galaktika nähtavast ainest paikneb tema tuumas.
 - Tuumas on tihedus enam-vähem konstantne.
 - ⇒ Tuumas kasvab orbiidikiirus lineaarselt: $v \sim r$.

- Teoreetiline ennustus:
 - Enamus galaktika nähtavast ainest paikneb tema tuumas.
 - Tuumas on tihedus enam-vähem konstantne.
 - ⇒ Tuumas kasvab orbiidikiirus lineaarselt: $v \sim r$.
 - ⇒ Tuumast väljas langeb orbiidikiirus: $v \sim r^{-1/2}$.

Galaktikate dünaamika

- Teoreetiline ennustus:
 - Enamus galaktika nähtavast ainest paikneb tema tuumas.
 - Tuumas on tihedus enam-vähem konstantne.
 - ⇒ Tuumas kasvab orbiidikiirus lineaarselt: $v \sim r$.
 - ⇒ Tuumast väljas langeb orbiidikiirus: $v \sim r^{-1/2}$.
- Galaktikate pöörlemise vaatlused:
 - 1939: Babcock tuletas Andromeda tähtede kiirusest tema massi.

Galaktikate dünaamika

- Teoreetiline ennustus:
 - Enamus galaktika nähtavast ainekse paikneb tema tuumas.
 - Tuumas on tihedus enam-vähem konstantne.
 - ⇒ Tuumas kasvab orbiidikiirus lineaarselt: $v \sim r$.
 - ⇒ Tuumast väljas langeb orbiidikiirus: $v \sim r^{-1/2}$.
- Galaktikate pöörlemise vaatlused:
 - 1939: Babcock tuletas Andromeda tähtede kiirusest tema massi.
 - 1940: Oort uuris NGC 3115 ja NGC 4494 galaktika dünaamikat.

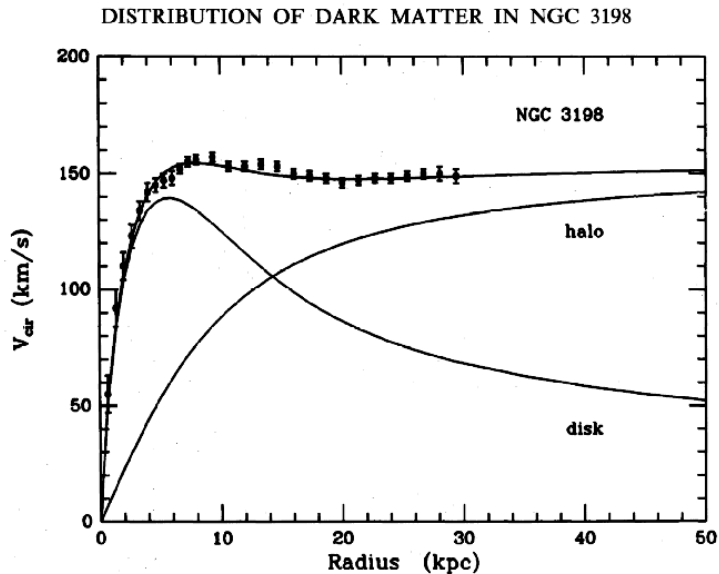
Galaktikate dünaamika

- Teoreetiline ennustus:
 - Enamus galaktika nähtavast ainest paikneb tema tuumas.
 - Tuumas on tihedus enam-vähem konstantne.
 - ⇒ Tuumas kasvab orbiidikiirus lineaarselt: $v \sim r$.
 - ⇒ Tuumast väljas langeb orbiidikiirus: $v \sim r^{-1/2}$.
- Galaktikate pöörlemise vaatlused:
 - 1939: Babcock tuletas Andromeda tähtede kiirusest tema massi.
 - 1940: Oort uuris NGC 3115 ja NGC 4494 galaktika dünaamikat.
 - 1980: Rubin uuris 21 galaktika pöörlemiskiiruse profiili.

Galaktikate dünaamika

- Teoreetiline ennustus:
 - Enamus galaktika nähtavast ainest paikneb tema tuumas.
 - Tuumas on tihedus enam-vähem konstantne.
 - ⇒ Tuumas kasvab orbiidikiirus lineaarselt: $v \sim r$.
 - ⇒ Tuumast väljas langeb orbiidikiirus: $v \sim r^{-1/2}$.
- Galaktikate pöörlemise vaatlused:
 - 1939: Babcock tuletas Andromeda tähtede kiirusest tema massi.
 - 1940: Oort uuris NGC 3115 ja NGC 4494 galaktika dünaamikat.
 - 1980: Rubin uuris 21 galaktika pöörlemiskiiruse profiili.
 - ⚡ Tuumast väljas leiti konstantset orbiidikiirust.

NGC 3198 pöörlemise profiil



Galaktikate dünaamika

- Teoreetiline ennustus:
 - Enamus galaktika nähtavast ainest paikneb tema tuumas.
 - Tuumas on tihedus enam-vähem konstantne.
 - ⇒ Tuumas kasvab orbiidikiirus lineaarselt: $v \sim r$.
 - ⇒ Tuumast väljas langeb orbiidikiirus: $v \sim r^{-1/2}$.
- Galaktikate pöörlemise vaatlused:
 - 1939: Babcock tuletas Andromeda tähtede kiirusest tema massi.
 - 1940: Oort uuris NGC 3115 ja NGC 4494 galaktika dünaamikat.
 - 1980: Rubin uuris 21 galaktika pöörlemiskiiruse profiili.
 - ⚡ Tuumast väljas leiti konstantset orbiidikiirust.
- Võimalikud selgitused:
 - Galaktikad sisaldavad rohkem gaasi mis ei kiirga valgust.

Galaktikate dünaamika

- Teoreetiline ennustus:
 - Enamus galaktika nähtavast ainest paikneb tema tuumas.
 - Tuumas on tihedus enam-vähem konstantne.
 - ⇒ Tuumas kasvab orbiidikiirus lineaarselt: $v \sim r$.
 - ⇒ Tuumast väljas langeb orbiidikiirus: $v \sim r^{-1/2}$.
- Galaktikate pöörlemise vaatlused:
 - 1939: Babcock tuletas Andromeda tähtede kiirusest tema massi.
 - 1940: Oort uuris NGC 3115 ja NGC 4494 galaktika dünaamikat.
 - 1980: Rubin uuris 21 galaktika pöörlemiskiiruse profiili.
 - ⚡ Tuumast väljas leiti konstantset orbiidikiirust.
- Võimalikud selgitused:
 - Galaktikad sisaldavad rohkem gaasi mis ei kiirga valgust.
 - Galaktika massi moodustab peamiselt tumeda aine halo.

Galaktikate dünaamika

- Teoreetiline ennustus:
 - Enamus galaktika nähtavast ainest paikneb tema tuumas.
 - Tuumas on tihedus enam-vähem konstantne.
 - ⇒ Tuumas kasvab orbiidikiirus lineaarselt: $v \sim r$.
 - ⇒ Tuumast väljas langeb orbiidikiirus: $v \sim r^{-1/2}$.
- Galaktikate pöörlemise vaatlused:
 - 1939: Babcock tuletas Andromeda tähtede kiirusest tema massi.
 - 1940: Oort uuris NGC 3115 ja NGC 4494 galaktika dünaamikat.
 - 1980: Rubin uuris 21 galaktika pöörlemiskiiruse profiili.
 - ⚡ Tuumast väljas leiti konstantset orbiidikiirust.
- Võimalikud selgitused:
 - Galaktikad sisaldavad rohkem gaasi mis ei kiirga valgust.
 - Galaktika massi moodustab peamiselt tumeda aine halo.
 - Tähtede liikumist määrab modifitseeritud Newtoni dünaamika.

Galaktikate dünaamika

- Teoreetiline ennustus:
 - Enamus galaktika nähtavast ainest paikneb tema tuumas.
 - Tuumas on tihedus enam-vähem konstantne.
 - ⇒ Tuumas kasvab orbiidikiirus lineaarselt: $v \sim r$.
 - ⇒ Tuumast väljas langeb orbiidikiirus: $v \sim r^{-1/2}$.
- Galaktikate pöörlemise vaatlused:
 - 1939: Babcock tuletas Andromeda tähtede kiirusest tema massi.
 - 1940: Oort uuris NGC 3115 ja NGC 4494 galaktika dünaamikat.
 - 1980: Rubin uuris 21 galaktika pöörlemiskiiruse profiili.
 - ⚡ Tuumast väljas leiti konstantset orbiidikiirust.
- Võimalikud selgitused:
 - Galaktikad sisaldavad rohkem gaasi mis ei kiirga valgust.
 - Galaktika massi moodustab peamiselt tumeda aine halo.
 - Tähtede liikumist määrab modifitseeritud Newtoni dünaamika.
 - Üldrelatiivsusteooria mittelineaarsus tekitab lisajõudu.

Galaktikate dünaamika

- Teoreetiline ennustus:
 - Enamus galaktika nähtavast ainest paikneb tema tuumas.
 - Tuumas on tihedus enam-vähem konstantne.
 - ⇒ Tuumas kasvab orbiidikiirus lineaarselt: $v \sim r$.
 - ⇒ Tuumast väljas langeb orbiidikiirus: $v \sim r^{-1/2}$.
- Galaktikate pöörlemise vaatlused:
 - 1939: Babcock tuletas Andromeda tähtede kiirusest tema massi.
 - 1940: Oort uuris NGC 3115 ja NGC 4494 galaktika dünaamikat.
 - 1980: Rubin uuris 21 galaktika pöörlemiskiiruse profiili.
 - ⚡ Tuumast väljas leiti konstantset orbiidikiirust.
- Võimalikud selgitused:
 - Galaktikad sisaldavad rohkem gaasi mis ei kiirga valgust.
 - Galaktika massi moodustab peamiselt tumeda aine halo.
 - Tähtede liikumist määrab modifitseeritud Newtoni dünaamika.
 - Üldrelatiivsusteooria mittelineaarsus tekitab lisajõudu.

Tumeda universumi lugu

Galaktikate pöörlemine viitab tumedale ainele galaktikates.

Universumi suuremastaabiline struktuur

- Struktuuritekke universumis tumeda ainega:
 - Varajane universum: kvantfluktuatsioonid ürgses plasmas.

Universumi suuremastaabiline struktuur

- Struktuuritekke universumis tumeda ainega:
 - Varajane universum: kvantfluktuatsioonid ürgses plasmas.
 - Plasmas tekivad tiheduse fluktuatsioonid.

Universumi suuremastaabiline struktuur

- Struktuuritekke universumis tumeda ainega:
 - Varajane universum: kvantfluktuatsioonid ürgses plasmas.
 - Plasmas tekivad tiheduse fluktuatsioonid.
 - Barüonide akustilised võnkumised ürgses plasmas:
 - Tihedamad piirkonnad tõmbavad gravitatsiooni kaudu ainet.
 - Barüonide rõhk kasvab ja barüonid põrkuvad tagasi.
 - Tume aine koguneb ületiheduste keskel.

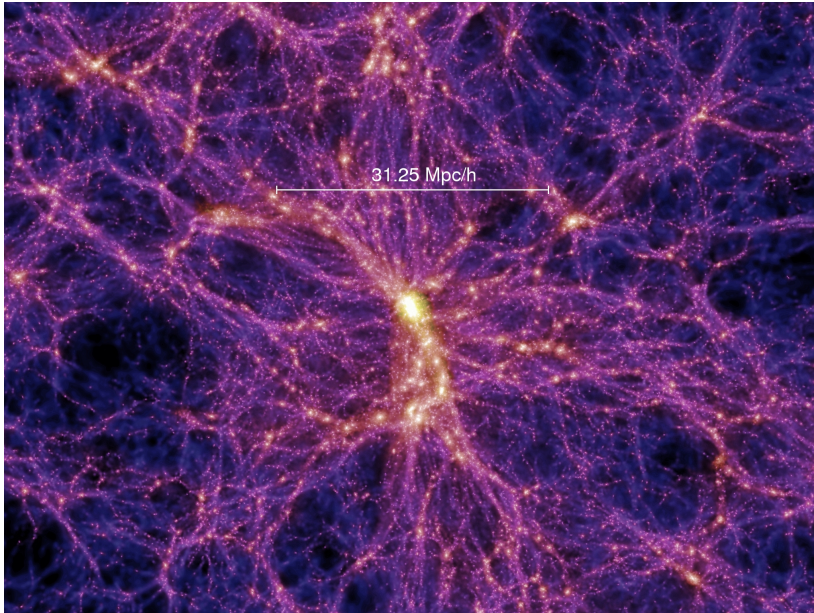
Universumi suuremastaabiline struktuur

- Struktuuritekke universumis tumeda ainega:
 - Varajane universum: kvantfluktuatsioonid ürgses plasmas.
 - Plasmas tekivad tiheduse fluktuatsioonid.
 - Barüonide akustilised võnkumised ürgses plasmas:
 - Tihedamad piirkonnad tõmbavad gravitatsiooni kaudu ainet.
 - Barüonide rõhk kasvab ja barüonid pörkuvad tagasi.
 - Tume aine koguneb ületiheduste keskel.
 - Tumeda aine ületihedused moodustavad struktuuriteke algust.

Universumi suuremastaabiline struktuur

- Struktuuritekke universumis tumeda ainega:
 - Varajane universum: kvantfluktuatsioonid ürgses plasmas.
 - Plasmas tekivad tiheduse fluktuatsioonid.
 - Barüonide akustilised võnkumised ürgses plasmas:
 - Tihedamad piirkonnad tõmbavad gravitatsiooni kaudu ainet.
 - Barüonide rõhk kasvab ja barüonid põrkuvad tagasi.
 - Tume aine koguneb ületiheduste keskel.
 - Tumeda eine ületihedused moodustavad struktuuriteke algust.
- Struktuuritekke ja arvutisimulatsioonid:
 - Simuleeritakse tumedat ainet (ilma rõhuta) ja barüonplasmata.

Millenniumi simulatsioon



Universumi suuremastaabiline struktuur

- Struktuuritekke universumis tumeda ainega:
 - Varajane universum: kvantfluktuatsioonid ürgses plasmas.
 - Plasmas tekivad tiheduse fluktuatsioonid.
 - Barüonide akustilised võnkumised ürgses plasmas:
 - Tihedamad piirkonnad tõmbavad gravitatsiooni kaudu ainet.
 - Barüonide rõhk kasvab ja barüonid põrkuvad tagasi.
 - Tume aine koguneb ületiheduste keskel.
 - Tumeda aine ületihedused moodustavad struktuuritekke algust.
- Struktuuritekke ja arvutisimulatsioonid:
 - Simuleeritakse tumedat ainet (ilma rõhuta) ja barüonplasmata.
 - Barüonid kogunevad seal kus tume aine tekitab struktuure.

Universumi suuremastaabiline struktuur

- Struktuuritekke universumis tumeda ainega:
 - Varajane universum: kvantfluktuatsioonid ürgses plasmas.
 - Plasmas tekivad tiheduse fluktuatsioonid.
 - Barüonide akustilised võnkumised ürgses plasmas:
 - Tihedamad piirkonnad tõmbavad gravitatsiooni kaudu ainet.
 - Barüonide rõhk kasvab ja barüonid põrkuvad tagasi.
 - Tume aine koguneb ületiheduste keskel.
 - Tumeda aine ületihedused moodustavad struktuuriteke algust.
- Struktuuritekke ja arvutisimulatsioonid:
 - Simuleeritakse tumedat ainet (ilma rõhuta) ja barüonplasmata.
 - Barüonid kogunevad seal kus tume aine tekitab struktuure.
 - Saadud struktuur sõltub oluliselt tumeda aine tihedusest.

Universumi suuremastaabiline struktuur

- Struktuuritekke universumis tumeda ainega:
 - Varajane universum: kvantfluktuatsioonid ürgses plasmas.
 - Plasmas tekivad tiheduse fluktuatsioonid.
 - Barüonide akustilised võnkumised ürgses plasmas:
 - Tihedamad piirkonnad tõmbavad gravitatsiooni kaudu ainet.
 - Barüonide rõhk kasvab ja barüonid põrkuvad tagasi.
 - Tume aine koguneb ületiheduste keskel.
 - Tumeda aine ületihedused moodustavad struktuuritekke algust.
- Struktuuritekke ja arvutisimulatsioonid:
 - Simuleeritakse tumedat ainet (ilma rõhuta) ja barüonplasmata.
 - Barüonid kogunevad seal kus tume aine tekitab struktuure.
 - Saadud struktuur sõltub oluliselt tumeda aine tihedusest.
- Barüonide akustilised võnkumised:
 - Võnkumistest tekivad barüonide mullid ületiheduste ümber.

Universumi suuremastaabiline struktuur

- Struktuuritekke universumis tumeda ainega:
 - Varajane universum: kvantfluktuatsioonid ürgses plasmas.
 - Plasmas tekivad tiheduse fluktuatsioonid.
 - Barüonide akustilised võnkumised ürgses plasmas:
 - Tihedamad piirkonnad tõmbavad gravitatsiooni kaudu ainet.
 - Barüonide rõhk kasvab ja barüonid pörkuvad tagasi.
 - Tume aine koguneb ületiheduste keskel.
 - Tumeda aine ületihedused moodustavad struktuuritekke algust.
- Struktuuritekke ja arvutisimulatsioonid:
 - Simuleeritakse tumedat ainet (ilma rõhuta) ja barüonplasmata.
 - Barüonid kogunevad seal kus tume aine tekitab struktuure.
 - Saadud struktuur sõltub oluliselt tumeda aine tihedusest.
- Barüonide akustilised võnkumised:
 - Võnkumistest tekivad barüonide mullid ületiheduste ümber.
 - Mullide raadius määrab universaalset kaugusskaalat.

Universumi suuremastaabiline struktuur

- Struktuuritekke universumis tumeda ainega:
 - Varajane universum: kvantfluktuatsioonid ürgses plasmas.
 - Plasmas tekivad tiheduse fluktuatsioonid.
 - Barüonide akustilised võnkumised ürgses plasmas:
 - Tihedamad piirkonnad tõmbavad gravitatsiooni kaudu ainet.
 - Barüonide rõhk kasvab ja barüonid põrkuvad tagasi.
 - Tume aine koguneb ületiheduste keskel.
 - Tumeda aine ületihedused moodustavad struktuuritekke algust.
- Struktuuritekke ja arvutisimulatsioonid:
 - Simuleeritakse tumedat ainet (ilma rõhuta) ja barüonplasmata.
 - Barüonid kogunevad seal kus tume aine tekitab struktuure.
 - Saadud struktuur sõltub oluliselt tumeda aine tihedusest.
- Barüonide akustilised võnkumised:
 - Võnkumistest tekivad barüonide mullid ületiheduste ümber.
 - Mullide raadius määrab universaalset kaugusskaalat.
 - Galaktikate asukohtade statistikat võib skaalat tuvastada.

Universumi suuremastaabiline struktuur

- Struktuuritekke universumis tumeda ainega:
 - Varajane universum: kvantfluktuatsioonid ürgses plasmas.
 - Plasmas tekivad tiheduse fluktuatsioonid.
 - Barüonide akustilised võnkumised ürgses plasmas:
 - Tihedamad piirkonnad tõmbavad gravitatsiooni kaudu ainet.
 - Barüonide rõhk kasvab ja barüonid põrkuvad tagasi.
 - Tume aine koguneb ületiheduste keskel.
 - Tumeda aine ületihedused moodustavad struktuuritekke algust.
- Struktuuritekke ja arvutisimulatsioonid:
 - Simuleeritakse tumedat ainet (ilma rõhuta) ja barüonplasmata.
 - Barüonid kogunevad seal kus tume aine tekitab struktuure.
 - Saadud struktuur sõltub oluliselt tumeda aine tihedusest.
- Barüonide akustilised võnkumised:
 - Võnkumistest tekivad barüonide mullid ületiheduste ümber.
 - Mullide raadius määrab universaalset kaugusskaalat.
 - Galaktikate asukohtade statistikat võib skaalat tuvastada.

Tumeda universumi lugu

Vaatlused võimaldavad mõõta tumeda aine tihedust universumis.

1. Tumedad planeedid

2. Tume aine

3. Tume energia

4. Tuleviku väljavaade ja kokkuvõte

Universumi (kiirenev) paisumine

- Einstein ja kosmoloogiline konstant:
 - 1915: Üldrelatiivsusteooria väljavõrrandid.

Universumi (kiirenev) paisumine

- Einstein ja kosmoloogiline konstant:
 - 1915: Üldrelatiivsusteooria väljavõrrandid.
 - ⚡ 1917: Staatiline universum ei ole väljavõrrandite lahend.

Universumi (kiirenev) paisumine

- Einstein ja kosmoloogiline konstant:
 - 1915: Üldrelatiivsusteooria väljavõrrandid.
 - ⚡ 1917: Staatiline universum ei ole väljavõrrandite lahend.
 - ✓ Probleemi saab lahendada lisades võrranditele konstanti Λ .

Universumi (kiirenev) paisumine

- Einstein ja kosmoloogiline konstant:
 - 1915: Üldrelatiivsusteooria väljavõrrandid.
 - ⚡ 1917: Staatiline universum ei ole väljavõrrandite lahend.
 - ✓ Probleemi saab lahendada lisades võrranditele konstanti Λ .
- ⚡ Vaatlused ja võrdlus teooriaga viitasid universumi paisumisele:
 - 1922: Friedmann uuris üldrelatiivsusteooria paisuvat lahendit.

Universumi (kiirenev) paisumine

- Einstein ja kosmoloogiline konstant:
 - 1915: Üldrelatiivsusteooria väljavõrrandid.
 - ⚡ 1917: Staatiline universum ei ole väljavõrrandite lahend.
 - ✓ Probleemi saab lahendada lisades võrranditele konstanti Λ .
- ⚡ Vaatlused ja võrdlus teooriaga viitasid universumi paisumisele:
 - 1922: Friedmann uuris üldrelatiivsusteooria paisuvat lahendit.
 - 1927: Lemaître uuris seost paisuva universumi ja vaatluste vahel.

Universumi (kiirenev) paisumine

- Einstein ja kosmoloogiline konstant:
 - 1915: Üldrelatiivsusteooria väljavõrrandid.
 - ⚡ 1917: Staatiline universum ei ole väljavõrrandite lahend.
 - ✓ Probleemi saab lahendada lisades võrranditele konstanti Λ .
- ⚡ Vaatlused ja võrdlus teooriaga viitasid universumi paisumisele:
 - 1922: Friedmann uuris üldrelatiivsusteooria paisuvat lahendit.
 - 1927: Lemaître uuris seost paisuva universumi ja vaatluste vahel.
 - 1929: Hubble tuletas lähedaste galaktikate dünaamikast paisumist.

Universumi (kiirenev) paisumine

- Einstein ja kosmoloogiline konstant:
 - 1915: Üldrelatiivsusteooria väljavõrrandid.
 - ⚡ 1917: Staatiline universum ei ole väljavõrrandite lahend.
 - ✓ Probleemi saab lahendada lisades võrranditele konstanti Λ .
- ⚡ Vaatlused ja võrdlus teooriaga viitasid universumi paisumisele:
 - 1922: Friedmann uuris üldrelatiivsusteooria paisuvat lahendit.
 - 1927: Lemaître uuris seost paisuva universumi ja vaatluste vahel.
 - 1929: Hubble tuletas lähedaste galaktikate dünaamikast paisumist.
 - ⇒ 1931: Einstein eemaldas kosmoloogilist konstanti oma teoriast.

Universumi (kiirenev) paisumine

- Einstein ja kosmoloogiline konstant:
 - 1915: Üldrelatiivsusteooria väljavõrrandid.
 - ⚡ 1917: Staatiline universum ei ole väljavõrrandite lahend.
 - ✓ Probleemi saab lahendada lisades võrranditele konstanti Λ .
- ⚡ Vaatlused ja võrdlus teooriaga viitasid universumi paisumisele:
 - 1922: Friedmann uuris üldrelatiivsusteooria paisuvat lahendit.
 - 1927: Lemaître uuris seost paisuva universumi ja vaatluste vahel.
 - 1929: Hubble tuletas lähedaste galaktikate dünaamikast paisumist.
 - ⇒ 1931: Einstein eemaldas kosmoloogilist konstanti oma teoriast.
- Vaatlused jätkuvad - universumi kiirenev paisumine:
 - 1998: Kaks uurimisrühma leiab universumi kiirenevat paisumist.

Universumi (kiirenev) paisumine

- Einstein ja kosmoloogiline konstant:
 - 1915: Üldrelatiivsusteooria väljavõrrandid.
 - ⚡ 1917: Staatiline universum ei ole väljavõrrandite lahend.
 - ✓ Probleemi saab lahendada lisades võrranditele konstanti Λ .
- ⚡ Vaatlused ja võrdlus teooriaga viitasid universumi paisumisele:
 - 1922: Friedmann uuris üldrelatiivsusteooria paisuvat lahendit.
 - 1927: Lemaître uuris seost paisuva universumi ja vaatluste vahel.
 - 1929: Hubble tuletas lähedaste galaktikate dünaamikast paisumist.
 - ⇒ 1931: Einstein eemaldas kosmoloogilist konstanti oma teoriast.
- Vaatlused jätkuvad - universumi kiirenev paisumine:
 - 1998: Kaks uurimisrühma leiab universumi kiirenevat paisumist.
 - 2003: WMAP kinnitab vaatlust mikrolaine-taustkiirguse uuringuga.

Universumi (kiirenev) paisumine

- Einstein ja kosmoloogiline konstant:
 - 1915: Üldrelatiivsusteooria väljavõrrandid.
 - ⚡ 1917: Staatiline universum ei ole väljavõrrandite lahend.
 - ✓ Probleemi saab lahendada lisades võrranditele konstanti Λ .
- ⚡ Vaatlused ja võrdlus teooriaga viitasid universumi paisumisele:
 - 1922: Friedmann uuris üldrelatiivsusteooria paisuvat lahendit.
 - 1927: Lemaître uuris seost paisuva universumi ja vaatluste vahel.
 - 1929: Hubble tuletas lähedaste galaktikate dünaamikast paisumist.
 - ⇒ 1931: Einstein eemaldas kosmoloogilist konstanti oma teoriast.
- Vaatlused jätkuvad - universumi kiirenev paisumine:
 - 1998: Kaks uurimisrühma leiab universumi kiirenevat paisumist.
 - 2003: WMAP kinnitab vaatlust mikrolaine-taustkiirguse uuringuga.
 - 2005: SDSS kinnitab vaatlust galaktikate kaardistamisega.

Universumi (kiirenev) paisumine

- Einstein ja kosmoloogiline konstant:
 - 1915: Üldrelatiivsusteooria väljavõrrandid.
 - ⚡ 1917: Staatiline universum ei ole väljavõrrandite lahend.
 - ✓ Probleemi saab lahendada lisades võrranditele konstanti Λ .
- ⚡ Vaatlused ja võrdlus teooriaga viitasid universumi paisumisele:
 - 1922: Friedmann uuris üldrelatiivsusteooria paisuvat lahendit.
 - 1927: Lemaître uuris seost paisuva universumi ja vaatluste vahel.
 - 1929: Hubble tuletas lähedaste galaktikate dünaamikast paisumist.
 - ⇒ 1931: Einstein eemaldas kosmoloogilist konstanti oma teoriast.
- Vaatlused jätkuvad - universumi kiirenev paisumine:
 - 1998: Kaks uurimisrühma leiab universumi kiirenevat paisumist.
 - 2003: WMAP kinnitab vaatlust mikrolaine-taustkiirguse uuringuga.
 - 2005: SDSS kinnitab vaatlust galaktikate kaardistamisega.
 - 2013: Planck uurib mikrolaine-taustkiirgust suurema täpsusega.

Universumi (kiirenev) paisumine

- Einstein ja kosmoloogiline konstant:
 - 1915: Üldrelatiivsusteooria väljavõrrandid.
 - ⚡ 1917: Staatiline universum ei ole väljavõrrandite lahend.
 - ✓ Probleemi saab lahendada lisades võrranditele konstanti Λ .
- ⚡ Vaatlused ja võrdlus teooriaga viitasid universumi paisumisele:
 - 1922: Friedmann uuris üldrelatiivsusteooria paisuvat lahendit.
 - 1927: Lemaître uuris seost paisuva universumi ja vaatluste vahel.
 - 1929: Hubble tuletas lähedaste galaktikate dünaamikast paisumist.
 - ⇒ 1931: Einstein eemaldas kosmoloogilist konstanti oma teooriast.
- Vaatlused jätkuvad - universumi kiirenev paisumine:
 - 1998: Kaks uurimisrühma leiab universumi kiirenevat paisumist.
 - 2003: WMAP kinnitab vaatlust mikrolaine-taustkiirguse uuringuga.
 - 2005: SDSS kinnitab vaatlust galaktikate kaardistamisega.
 - 2013: Planck uurib mikrolaine-taustkiirgust suurema täpsusega.

Tumeda universumi lugu

Universum paisub kiirenevalt - kuid mis on põhjus?

Kosmoloogiline konstant ja vaakumienergia

- Energiatiheduse ρ sõltuvus mastaabikordajast a :
 - Kiirgus (fotonid, relativistlikud osakesed): $\rho \sim a^{-4}$.

Kosmoloogiline konstant ja vaakumienergia

- Energiatiheduse ρ sõltuvus mastaabikordajast a :
 - Kiirgus (fotonid, relativistlikud osakesed): $\rho \sim a^{-4}$.
 - Tolm (tume aine, mitterelativistlikud osakesed): $\rho \sim a^{-3}$.

Kosmoloogiline konstant ja vaakumienergia

- Energiatiheduse ρ sõltuvus mastaabikordajast a :
 - Kiirgus (fotonid, relativistlikud osakesed): $\rho \sim a^{-4}$.
 - Tolm (tume aine, mitterelativistlikud osakesed): $\rho \sim a^{-3}$.
 - Aegruumi ruumiline kõverus: $\rho \sim a^{-2}$.

Kosmoloogiline konstant ja vaakumienergia

- Energiatiheduse ρ sõltuvus mastaabikordajast a :
 - Kiirgus (fotonid, relativistlikud osakesed): $\rho \sim a^{-4}$.
 - Tolm (tume aine, mitterelativistlikud osakesed): $\rho \sim a^{-3}$.
 - Aegruumi ruumiline kõverus: $\rho \sim a^{-2}$.
 - Tume energia (kosmoloogiline konstant): $\rho \sim a^{-0}$.

Kosmoloogiline konstant ja vaakumienergia

- Energiatiheduse ρ sõltuvus mastaabikordajast a :
 - Kiirgus (footonid, relativistlikud osakesed): $\rho \sim a^{-4}$.
 - Tolm (tume aine, mitterelativistlikud osakesed): $\rho \sim a^{-3}$.
 - Aegruumi ruumiline kõverus: $\rho \sim a^{-2}$.
 - Tume energia (kosmoloogiline konstant): $\rho \sim a^{-0}$.

⇒ Tumeda energia tihedus on konstantne.

Kosmoloogiline konstant ja vaakumienergia

- Energiatiheduse ρ sõltuvus mastaabikordajast a :
 - Kiirgus (footonid, relativistlikud osakesed): $\rho \sim a^{-4}$.
 - Tolm (tume aine, mitterelativistlikud osakesed): $\rho \sim a^{-3}$.
 - Aegruumi ruumiline kõverus: $\rho \sim a^{-2}$.
 - Tume energia (kosmoloogiline konstant): $\rho \sim a^{-0}$.

⇒ Tumeda energia tihedus on konstantne.

- Tume energia kui vaakumienergia kvantväljateoorias?
 - Vaakum kvantväljateoorias on universumi põhiolek.

Kosmoloogiline konstant ja vaakumienergia

- Energiatiheduse ρ sõltuvus mastaabikordajast a :
 - Kiirgus (footonid, relativistlikud osakesed): $\rho \sim a^{-4}$.
 - Tolm (tume aine, mitterelativistlikud osakesed): $\rho \sim a^{-3}$.
 - Aegruumi ruumiline kõverus: $\rho \sim a^{-2}$.
 - Tume energia (kosmoloogiline konstant): $\rho \sim a^{-0}$.

⇒ Tumeda energia tihedus on konstantne.

- Tume energia kui vaakumienergia kvantväljateoorias?
 - Vaakum kvantväljateoorias on universumi põhiolek.
 - Vaakum ei ole tühi, vaid sisaldab virtuaalseid osakesi.

Kosmoloogiline konstant ja vaakumienergia

- Energiatiheduse ρ sõltuvus mastaabikordajast a :
 - Kiirgus (footonid, relativistlikud osakesed): $\rho \sim a^{-4}$.
 - Tolm (tume aine, mitterelativistlikud osakesed): $\rho \sim a^{-3}$.
 - Aegruumi ruumiline kõverus: $\rho \sim a^{-2}$.
 - Tume energia (kosmoloogiline konstant): $\rho \sim a^{-0}$.

⇒ Tumeda energia tihedus on konstantne.

- Tume energia kui vaakumienergia kvantväljateoorias?
 - Vaakum kvantväljateoorias on universumi põhiolek.
 - Vaakum ei ole tühi, vaid sisaldab virtuaalseid osakesi.
- ⇒ Osakesed annavad vaakumile konstantset energiatihedust.

Kosmoloogiline konstant ja vaakumienergia

- Energiatiheduse ρ sõltuvus mastaabikordajast a :
 - Kiirgus (fotonid, relativistlikud osakesed): $\rho \sim a^{-4}$.
 - Tolm (tume aine, mitterelativistlikud osakesed): $\rho \sim a^{-3}$.
 - Aegruumi ruumiline kõverus: $\rho \sim a^{-2}$.
 - Tume energia (kosmoloogiline konstant): $\rho \sim a^{-0}$.

⇒ Tumeda energia tihedus on konstantne.

- Tume energia kui vaakumienergia kvantväljateoorias?
 - Vaakum kvantväljateoorias on universumi põhiolek.
 - Vaakum ei ole tühi, vaid sisaldab virtuaalseid osakesi.
 - ⇒ Osakesed annavad vaakumile konstantset energiatihedust.
 - ⇒ Energiatihedus kvantelektrodünaamikas: 10^{113}Jm^{-3} .

Kosmoloogiline konstant ja vaakumienergia

- Energiatiheduse ρ sõltuvus mastaabikordajast a :
 - Kiirgus (fotonid, relativistlikud osakesed): $\rho \sim a^{-4}$.
 - Tolm (tume aine, mitterelativistlikud osakesed): $\rho \sim a^{-3}$.
 - Aegruumi ruumiline kõverus: $\rho \sim a^{-2}$.
 - Tume energia (kosmoloogiline konstant): $\rho \sim a^{-0}$.

⇒ Tumeda energia tihedus on konstantne.

- Tume energia kui vaakumienergia kvantväljateoorias?
 - Vaakum kvantväljateoorias on universumi põhiolek.
 - Vaakum ei ole tühi, vaid sisaldab virtuaalseid osakesi.
 - ⇒ Osakesed annavad vaakumile konstantset energiatihedust.
 - ⇒ Energiatihedus kvantelektrodünaamikas: 10^{113}Jm^{-3} .

⚡ Tumeda energia tihedus kosmoloogia vaatlustes: 10^{-9}Jm^{-3} .

Kosmoloogiline konstant ja vaakumienergia

- Energiatiheduse ρ sõltuvus mastaabikordajast a :
 - Kiirgus (fotonid, relativistlikud osakesed): $\rho \sim a^{-4}$.
 - Tolm (tume aine, mitterelativistlikud osakesed): $\rho \sim a^{-3}$.
 - Aegruumi ruumiline kõverus: $\rho \sim a^{-2}$.
 - Tume energia (kosmoloogiline konstant): $\rho \sim a^{-0}$.

⇒ Tumeda energia tihedus on konstantne.

- Tume energia kui vaakumienergia kvantväljateoorias?
 - Vaakum kvantväljateoorias on universumi põhiolek.
 - Vaakum ei ole tühi, vaid sisaldab virtuaalseid osakesi.
 - ⇒ Osakesed annavad vaakumile konstantset energiatihedust.
 - ⇒ Energiatihedus kvantelektrodünaamikas: 10^{113}Jm^{-3} .

⚡ Tumeda energia tihedus kosmoloogia vaatlustes: 10^{-9}Jm^{-3} .

Tumeda universumi lugu

Kõige suurem erinevus füüsikas teooria ja vaatluse vahel.

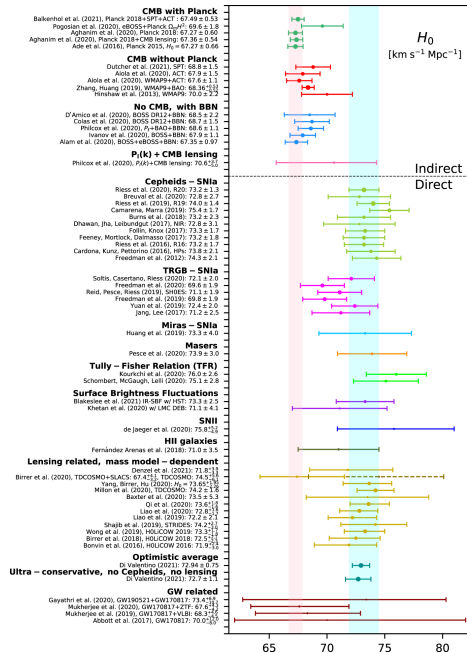
- Hubble'i parameetri erinevad vaatlustüübid:
 - Galaktikate kaugused ja punanihked.

- Hubble'i parameetri erinevad vaatlustüübid:
 - Galaktikate kaugused ja punanihked.
 - Kosmiline mikrolaine-taustkiirgus.

- Hubble'i parameetri erinevad vaatlustüübid:
 - Galaktikate kaugused ja punanihked.
 - Kosmiline mikrolaine-taustkiirgus.
 - Gravitatsioonilainete levimine paisuvas universumis.

- Hubble'i parameetri erinevad vaatlustüübid:
 - Galaktikate kaugused ja punanihked $74.03 \pm 1.42 \text{ km/s/Mpc}$.
 - Kosmiline mikrolaine-taustkiirus $67.66 \pm 0.42 \text{ km/s/Mpc}$.
 - Gravitatsioonilainete levimine paisuvas universumis.
- ⚡ Erinevad tulemused hilise ja varajase universumi vaatlustest.

Hubble'i pinge



- Hubble'i parameetri erinevad vaatlustüübid:
 - Galaktikate kaugused ja punanihked $74.03 \pm 1.42 \text{ km/s/Mpc}$.
 - Kosmiline mikrolaine-taustkiirgus $67.66 \pm 0.42 \text{ km/s/Mpc}$.
 - Gravitatsioonilainete levimine paisuvas universumis.
- ⚡ Erinevad tulemused hilise ja varajase universumi vaatlustest.
- ⚡ Varajase universumi vaatlus eeldab et Λ CDM mudel on õige.

- Hubble'i parameetri erinevad vaatlustüübid:

- Galaktikate kaugused ja punanihked $74.03 \pm 1.42 \text{ km/s/Mpc}$.
- Kosmiline mikrolaine-taustkiirgus $67.66 \pm 0.42 \text{ km/s/Mpc}$.
- Gravitatsioonilainete levimine paisuvas universumis.

⚡ Erinevad tulemused hilise ja varajase universumi vaatlustest.

⚡ Varajase universumi vaatlus eeldab et Λ CDM mudel on õige.

⇒ Võimalikud selgitused:

- Tume energia ei ole konstantne, vaid ajast sõltuv.

- Hubble'i parameetri erinevad vaatlustüübid:

- Galaktikate kaugused ja punanihked $74.03 \pm 1.42 \text{ km/s/Mpc}$.
- Kosmiline mikrolaine-taustkiirgus $67.66 \pm 0.42 \text{ km/s/Mpc}$.
- Gravitatsioonilainete levimine paisuvas universumis.

⚡ Erinevad tulemused hilise ja varajase universumi vaatlustest.

⚡ Varajase universumi vaatlus eeldab et Λ CDM mudel on õige.

⇒ Võimalikud selgitused:

- Tume energia ei ole konstantne, vaid ajast sõltuv.
- Gravitatsiooniseaduse parandus üldrelatiivsusteooriale.

- Hubble'i parameetri erinevad vaatlustüübid:

- Galaktikate kaugused ja punanihked $74.03 \pm 1.42 \text{ km/s/Mpc}$.
- Kosmiline mikrolaine-taustkiirgus $67.66 \pm 0.42 \text{ km/s/Mpc}$.
- Gravitatsioonilainete levimine paisuvas universumis.

⚡ Erinevad tulemused hilise ja varajase universumi vaatlustest.

⚡ Varajase universumi vaatlus eeldab et Λ CDM mudel on õige.

⇒ Võimalikud selgitused:

- Tume energia ei ole konstantne, vaid ajast sõltuv.
- Gravitatsiooniseaduse parandus üldrelatiivsusteooriale.
- Süstemaatiline viga galaktikate kauguste mõõtmistel.

Hubble'i pinge

- Hubble'i parameetri erinevad vaatlustüübid:

- Galaktikate kaugused ja punanihked $74.03 \pm 1.42 \text{ km/s/Mpc}$.
- Kosmiline mikrolaine-taustkiirgus $67.66 \pm 0.42 \text{ km/s/Mpc}$.
- Gravitatsioonilainete levimine paisuvas universumis.

⚡ Erinevad tulemused hilise ja varajase universumi vaatlustest.

⚡ Varajase universumi vaatlus eeldab et Λ CDM mudel on õige.

⇒ Võimalikud selgitused:

- Tume energia ei ole konstantne, vaid ajast sõltuv.
- Gravitatsiooniseaduse parandus üldrelatiivsusteooriale.
- Süstemaatiline viga galaktikate kauguste mõõtmistel.

Tumeda universumi lugu

Hubble'i pinge on lahendamata mõistatus.

1. Tumedad planeedid
2. Tume aine
3. Tume energia
4. Tuleviku väljavaade ja kokkuvõte

- Käimasolevad vaatlusprojektid:
 - DESI: fiiberoptiline spektrograaf Arizona kõrbes.

- Käimasolevad vaatlusprojektid:
 - DESI: fiiberoptiline spektrograaf Arizona kõrbes.
 - Euclid: nähtava valguse ja infrapuna teleskoop kosmoses.

- Käimasolevad vaatlusprojektid:
 - DESI: fiiberoptiline spektrograaf Arizona kõrbes.
 - Euclid: nähtava valguse ja infrapuna teleskoop kosmoses.
- Kogutakse galaktikate asukohti, punanihkeid ja kujusid.

- Käimasolevad vaatlusprojektid:
 - DESI: fiiberoptiline spektrograaf Arizona kõrbes.
 - Euclid: nähtava valguse ja infrapuna teleskoop kosmoses.
- Kogutakse galaktikate asukohti, punanihkeid ja kujusid.
- Mida võib andmetest tuletada?
 - Gravitatsiooniläätssed: galaktikate kujud $\Rightarrow$ massi jaotus.

- Käimasolevad vaatlusprojektid:
 - DESI: fiiberoptiline spektrograaf Arizona kõrbes.
 - Euclid: nähtava valguse ja infrapuna teleskoop kosmoses.
- Kogutakse galaktikate asukohti, punanihkeid ja kujusid.
- Mida võib andmetest tuletada?
 - Gravitatsiooniläätssed: galaktikate kujud $\Rightarrow$ massi jaotus.
 - Galaktikate ruumiline jaotus: tumeda aine sõrmejälg.

- Käimasolevad vaatlusprojektid:
 - DESI: fiiberoptiline spektrograaf Arizona kõrbes.
 - Euclid: nähtava valguse ja infrapuna teleskoop kosmoses.
- Kogutakse galaktikate asukohti, punanihkeid ja kujusid.
- Mida võib andmetest tuletada?
 - Gravitatsiooniläätssed: galaktikate kujud $\Rightarrow$ massi jaotus.
 - Galaktikate ruumiline jaotus: tumeda aine sõrmejalg.
 - Galaktikate ajaline areng: paisumise dünaamika ja tume energia.

Tänapäevased täppisvaatlused

- Käimasolevad vaatlusprojektid:
 - DESI: fiiberoptiline spektrograaf Arizona kõrbes.
 - Euclid: nähtava valguse ja infrapuna teleskoop kosmoses.
- Kogutakse galaktikate asukohti, punanihkeid ja kujusid.
- Mida võib andmetest tuletada?
 - Gravitatsiooniläätssed: galaktikate kujud $\Rightarrow$ massi jaotus.
 - Galaktikate ruumiline jaotus: tumeda aine sõrmejalg.
 - Galaktikate ajaline areng: paisumise dünaamika ja tume energia.

Tumeda universumi lugu

Esmaandmed äratavad lootust lahendada mõnda mõistatust.

- Vaatlused päikesesüsteemis ja võrdlus teooriaga:
 - Neptuuni avastati tänu tema gravitatsiooni mõjule Uraanile.

- Vaatlused päikesesüsteemis ja võrdlus teooriaga:
 - Neptuuni avastati tänu tema gravitatsiooni mõjule Uraanile.
 - Merkuuri orbiit aitas avastada üldrelatiivsusteooriat.

- Vaatlused päikesesüsteemis ja võrdlus teooriaga:
 - Neptuuni avastati tänu tema gravitatsiooni mõjule Uraanile.
 - Merkuuri orbiit aitas avastada üldrelatiivsusteooriat.
 - Pioneeri anomaaliat selgitab täpne mudel kosmosesondist.

- Vaatlused päikesesüsteemis ja võrdlus teooriaga:
 - Neptuuni avastati tänu tema gravitatsiooni mõjule Uraanile.
 - Merkuuri orbiit aitas avastada üldrelatiivsusteooriat.
 - Pioneeri anomaaliat selgitab täpne mudel kosmosesondist.
 - Möödalennu anomaalia on lahendamata mõistus.

- Vaatlused päikesesüsteemis ja võrdlus teooriaga:
 - Neptuuni avastati tänu tema gravitatsiooni mõjule Uraanile.
 - Merkuuri orbiit aitas avastada üldrelatiivsusteooriat.
 - Pioneeri anomaaliat selgitab täpne mudel kosmosesondist.
 - Möödalennu anomaalia on lahendamata mõistus.
- Tume aine:
 - Nähtamatu mass mis avaldub ainult gravitatsiooni kaudu.

- Vaatlused päikesesüsteemis ja võrdlus teooriaga:
 - Neptuuni avastati tänu tema gravitatsiooni mõjule Uraanile.
 - Merkuuri orbiit aitas avastada üldrelatiivsusteooriat.
 - Pioneeri anomaaliat selgitab täpne mudel kosmosesondist.
 - Möödalennu anomaalia on lahendamata mõistus.
- Tume aine:
 - Nähtamatu mass mis avaldub ainult gravitatsiooni kaudu.
 - Käitub vaatlustes nagu ideaalne tolmu.

- Vaatlused päikesesüsteemis ja võrdlus teooriaga:
 - Neptuuni avastati tänu tema gravitatsiooni mõjule Uraanile.
 - Merkuuri orbiit aitas avastada üldrelatiivsusteooriat.
 - Pioneeri anomaaliat selgitab täpne mudel kosmosesondist.
 - Möödalennu anomaalia on lahendamata mõistus.
- Tume aine:
 - Nähtamatu mass mis avaldub ainult gravitatsiooni kaudu.
 - Käitub vaatlustes nagu ideaalne tolmu.
 - Leitav erinevatel skaaladel: galaktikad, galaktikaparved.

- Vaatlused päikesesüsteemis ja võrdlus teooriaga:
 - Neptuuni avastati tänu tema gravitatsiooni mõjule Uraanile.
 - Merkuuri orbiit aitas avastada üldrelatiivsusteooriat.
 - Pioneeri anomaaliat selgitab täpne mudel kosmosesondist.
 - Möödalennu anomaalia on lahendamata mõistus.
- Tume aine:
 - Nähtamatu mass mis avaldub ainult gravitatsiooni kaudu.
 - Käitub vaatlustes nagu ideaalne tolmu.
 - Leitav erinevatel skaaladel: galaktikad, galaktikaparved.
 - Mängib olulist rolli kosmilises struktuuritekes.

- Vaatlused päikesesüsteemis ja võrdlus teooriaga:
 - Neptuuni avastati tänu tema gravitatsiooni mõjule Uraanile.
 - Merkuuri orbiit aitas avastada üldrelatiivsusteooriat.
 - Pioneeri anomaaliat selgitab täpne mudel kosmosesondist.
 - Möödalennu anomaalia on lahendamata mõistatus.
- Tume aine:
 - Nähtamatu mass mis avaldub ainult gravitatsiooni kaudu.
 - Käitub vaatlustes nagu ideaalne tolmu.
 - Leitav erinevatel skaaladel: galaktikad, galaktikaparved.
 - Mängib olulist rolli kosmilises struktuuritekes.
 - Tundmatu koosseis: avastamata osakesed, mustad augud, ... ?

- Vaatlused päikesesüsteemis ja võrdlus teooriaga:
 - Neptuuni avastati tänu tema gravitatsiooni mõjule Uraanile.
 - Merkuuri orbiit aitas avastada üldrelatiivsusteooriat.
 - Pioneeri anomaaliat selgitab täpne mudel kosmosesondist.
 - Möödalennu anomaalia on lahendamata mõistus.
- Tume aine:
 - Nähtamatu mass mis avaldub ainult gravitatsiooni kaudu.
 - Käitub vaatlustes nagu ideaalne tolmu.
 - Leitav erinevatel skaaladel: galaktikad, galaktikaparved.
 - Mängib olulist rolli kosmilises struktuuritekes.
 - Tundmatu koosseis: avastamata osakesed, mustad augud, ... ?
- Tume energia:
 - Vaatlused näitavad universumi kiirenevat paisumist.

- Vaatlused päikesesüsteemis ja võrdlus teooriaga:
 - Neptuuni avastati tänu tema gravitatsiooni mõjule Uraanile.
 - Merkuuri orbiit aitas avastada üldrelatiivsusteooriat.
 - Pioneeri anomaaliat selgitab täpne mudel kosmosesondist.
 - Möödalennu anomaalia on lahendamata mõistus.
- Tume aine:
 - Nähtamatu mass mis avaldub ainult gravitatsiooni kaudu.
 - Käitub vaatlustes nagu ideaalne tolm.
 - Leitav erinevatel skaaladel: galaktikad, galaktikaparved.
 - Mängib olulist rolli kosmilises struktuuritekes.
 - Tundmatu koosseis: avastamata osakesed, mustad augud, ... ?
- Tume energia:
 - Vaatlused näitavad universumi kiirenevat paisumist.
 - Võimalik selgitus: kosmoloogiline konstant gravitatsiooniteoorias.

- Vaatlused päikesesüsteemis ja võrdlus teooriaga:
 - Neptuuni avastati tänu tema gravitatsiooni mõjule Uraanile.
 - Merkuuri orbiit aitas avastada üldrelatiivsusteooriat.
 - Pioneeri anomaaliat selgitab täpne mudel kosmosesondist.
 - Möödalennu anomaalia on lahendamata mõistus.
- Tume aine:
 - Nähtamatu mass mis avaldub ainult gravitatsiooni kaudu.
 - Käitub vaatlustes nagu ideaalne tolmu.
 - Leitav erinevatel skaaladel: galaktikad, galaktikaparved.
 - Mängib olulist rolli kosmilises struktuuritekes.
 - Tundmatu koosseis: avastamata osakesed, mustad augud, ... ?
- Tume energia:
 - Vaatlused näitavad universumi kiirenevat paisumist.
 - Võimalik selgitus: kosmoloogiline konstant gravitatsiooniteoorias.
 - Kosmoloogiline konstant käitub nagu konstantne energiatihedus.

- Vaatlused päikesesüsteemis ja võrdlus teooriaga:
 - Neptuuni avastati tänu tema gravitatsiooni mõjule Uraanile.
 - Merkuuri orbiit aitas avastada üldrelatiivsusteooriat.
 - Pioneeri anomaaliat selgitab täpne mudel kosmosesondist.
 - Möödalennu anomaalia on lahendamata mõistus.
- Tume aine:
 - Nähtamatu mass mis avaldub ainult gravitatsiooni kaudu.
 - Käitub vaatlustes nagu ideaalne tolmu.
 - Leitav erinevatel skaaladel: galaktikad, galaktikaparved.
 - Mängib olulist rolli kosmilises struktuuritekes.
 - Tundmatu koosseis: avastamata osakesed, mustad augud, ... ?
- Tume energia:
 - Vaatlused näitavad universumi kiirenevat paisumist.
 - Võimalik selgitus: kosmoloogiline konstant gravitatsiooniteoorias.
 - Kosmoloogiline konstant käitub nagu konstantne energiatihedus.
 - Kvantväljateooria ennustus 10^{120} korda liiga suur.

- Vaatlused päikesesüsteemis ja võrdlus teooriaga:
 - Neptuuni avastati tänu tema gravitatsiooni mõjule Uraanile.
 - Merkuuri orbiit aitas avastada üldrelatiivsusteooriat.
 - Pioneeri anomaaliat selgitab täpne mudel kosmosesondist.
 - Möödalennu anomaalia on lahendamata mõistus.
- Tume aine:
 - Nähtamatu mass mis avaldub ainult gravitatsiooni kaudu.
 - Käitub vaatlustes nagu ideaalne tolmu.
 - Leitav erinevatel skaaladel: galaktikad, galaktikaparved.
 - Mängib olulist rolli kosmilises struktuuritekes.
 - Tundmatu koosseis: avastamata osakesed, mustad augud, ... ?
- Tume energia:
 - Vaatlused näitavad universumi kiirenevat paisumist.
 - Võimalik selgitus: kosmoloogiline konstant gravitatsiooniteoorias.
 - Kosmoloogiline konstant käitub nagu konstantne energiatihedus.
 - Kvantväljateooria ennustus 10^{120} korda liiga suur.
 - Paistab vastuolus olevat Hubble'i parameetri mõõtmistega.

- Vaatlused päikesesüsteemis ja võrdlus teooriaga:
 - Neptuuni avastati tänu tema gravitatsiooni mõjule Uraanile.
 - Merkuuri orbiit aitas avastada üldrelatiivsusteooriat.
 - Pioneeri anomaaliat selgitab täpne mudel kosmosesondist.
 - Möödalennu anomaalia on lahendamata mõistus.
- Tume aine:
 - Nähtamatu mass mis avaldub ainult gravitatsiooni kaudu.
 - Käitub vaatlustes nagu ideaalne tolm.
 - Leitav erinevatel skaaladel: galaktikad, galaktikaparved.
 - Mängib olulist rolli kosmilises struktuuritekes.
 - Tundmatu koosseis: avastamata osakesed, mustad augud, ... ?
- Tume energia:
 - Vaatlused näitavad universumi kiirenevat paisumist.
 - Võimalik selgitus: kosmoloogiline konstant gravitatsiooniteoorias.
 - Kosmoloogiline konstant käitub nagu konstantne energiatihedus.
 - Kvantväljateooria ennustus 10^{120} korda liiga suur.
 - Paistab vastuolus olevat Hubble'i parameetri mõõtmistega.
 - Alternatiivne selgitus: muudatus gravitatsiooniseaduses.

- Vaatlused päikesesüsteemis ja võrdlus teooriaga:
 - Neptuuni avastati tänu tema gravitatsiooni mõjule Uraanile.
 - Merkuuri orbiit aitas avastada üldrelatiivsusteooriat.
 - Pioneeri anomaaliat selgitab täpne mudel kosmosesondist.
 - Möödalennu anomaalia on lahendamata mõistus.
- Tume aine: **26.8% universumi koosseisust.**
 - Nähtamatu mass mis avaldub ainult gravitatsiooni kaudu.
 - Käitub vaatlustes nagu ideaalne tolm.
 - Leitav erinevatel skaaladel: galaktikad, galaktikaparved.
 - Mängib olulist rolli kosmilises struktuuritekes.
 - Tundmatu koosseis: avastamata osakesed, mustad augud, ... ?
- Tume energia: **68.2% universumi koosseisust.**
 - Vaatlused näitavad universumi kiirenevat paisumist.
 - Võimalik selgitus: kosmoloogiline konstant gravitatsiooniteoorias.
 - Kosmoloogiline konstant käitub nagu konstantne energiatihedus.
 - Kvantväljateooria ennustus 10^{120} korda liiga suur.
 - Paistab vastuolus olevat Hubble'i parameetri mõõtmistega.
 - Alternatiivne selgitus: muudatus gravitatsiooniseaduses.

- Vaatlused päikesesüsteemis ja võrdlus teooriaga:
 - Neptuuni avastati tänu tema **gravitatsiooni** mõjule Uraanile.
 - Merkuuri orbiit aitas avastada **üldrelatiivsusteooriat**.
 - Pioneeri anomaaliat selgitab täpne mudel kosmosesondist.
 - Möödalennu anomaalia on lahendamata mõistus.
- Tume aine: 26.8% universumi koosseisust.
 - Nähtamatu mass mis avaldub ainult **gravitatsiooni** kaudu.
 - Käitub vaatlustes nagu ideaalne tolmu.
 - Leitav erinevatel skaaladel: galaktikad, galaktikaparved.
 - Mängib olulist rolli kosmilises struktuuritekes.
 - Tundmatu koosseis: avastamata osakesed, mustad augud, ... ?
- Tume energia: 68.2% universumi koosseisust.
 - Vaatlused näitavad universumi kiirenevat paisumist.
 - Võimalik selgitus: kosmoloogiline konstant **gravitatsiooniteoorias**.
 - Kosmoloogiline konstant käitub nagu konstantne energiatihedus.
 - Kvantväljateooria ennustus 10^{120} korda liiga suur.
 - Paistab vastuolus olevat Hubble'i parameetri mõõtmistega.
 - Alternatiivne selgitus: muudatus **gravitatsiooniseaduses**.

Gravitatsiooni roll universumi uuringutel

Gravitatsioonist aru saamine on elementaarne universumi uuringutel!