

Tähtedevaheline

Füüsikalised faktid & filmikunsti fantaasiad

Manuel Hohmann

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



Füüsikuga Kinno - 23. aprill 2022

1 Sissejuhatus

2 Diskussioon

3 Kokkuvõte

Kip Thorne

- Teoreetiline füüsik, Nobeli preemia laureaat (2017).
- Uurib gravitatsioonilaineid, musti auke, ussiauke.
- *Contact*:
 - Carl Sagan'i romaan (1985) ja mängufilm (1997).
 - Sagan vaja viisi kuidas kiirelt reisida läbi galaktika.
 - Thorne pakkus välja et “otsetee” võiks olla ussiauk.
- Morris ja Thorne teadusartikkel ussiaukudest (1988).
- *Tähtedevaheline*:
 - Esimene idee oli Thorne'il ja Lynda Obst'il (produtsent) 2007.
 - Thorne andis nõu kuidas ussiauk ja must auk välja näevad.



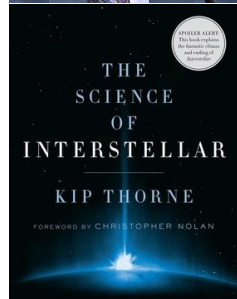
“Tähtedevaheline” - füüsika ideest mängufilmini

Kip Thorne

- Teoreetiline füüsik, Nobeli preemia laureaat (2017).
- Uurib gravitatsioonilaineid, musti auke, ussiauke.
- *Contact*:
 - Carl Sagan'i romaan (1985) ja mängufilm (1997).
 - Sagan vaja viisi kuidas kiirelt reisida läbi galaktika.
 - Thorne pakkus välja et “otsetee” võiks olla ussiauk.
- Morris ja Thorne teadusartikkel ussiaukudest (1988).
- *Tähtedevaheline*:
 - Esimene idee oli Thorne'il ja Lynda Obst'il (produtsent) 2007.
 - Thorne andis nõu kuidas ussiauk ja must auk välja näevad.

Fantaasia ja reaalsus - raamat filmist ja teadusest

Kip Thorne, *The Science of Interstellar*, W. W. Norton & Company, New York, London, 2014. ISBN 978-0393351378.



Must auk kui teooria ennustus

- Michell (1784): täht on “tume”, kui ta on nii massiivne, et valgus ei pääse välja.

Must auk kui teooria ennustus

- Michell (1784): täht on “tume”, kui ta on nii massiivne, et valgus ei pääse välja.
- Schwarzschild (1916): Üldrelatiivsusteooria sfääriliselt sümmeetriline vaakumilahend.

Must auk kui teooria ennustus

- Michell (1784): täht on “tume”, kui ta on nii massiivne, et valgus ei pääse välja.
- Schwarzschild (1916): Üldrelatiivsusteooria sfääriliselt sümmeetriline vaakumilahend.
- Oppenheimer & Snyder (1939): must auk tekib, kui massiivne täht kokku variseb.

Must auk kui teooria ennustus

- Michell (1784): täht on “tume”, kui ta on nii massiivne, et valgus ei pääse välja.
- Schwarzschild (1916): Üldrelatiivsusteooria sfääriliselt sümmeetriline vaakumilahend.
- Oppenheimer & Snyder (1939): must auk tekib, kui massiivne täht kokku variseb.
- Kerr (1963): Schwarzschildi meetrika üldistus, pöörlev vaakumilahend.

Mis on must auk?

Must auk kui teooria ennustus

- Michell (1784): täht on “tume”, kui ta on nii massiivne, et valgus ei pääse välja.
- Schwarzschild (1916): Üldrelatiivsusteooria sfääriliselt sümmeetriline vaakumilahend.
- Oppenheimer & Snyder (1939): must auk tekib, kui massiivne täht kokku variseb.
- Kerr (1963): Schwarzschildi meetrika üldistus, pöörlev vaakumilahend.

Teoreetilise musta augu omadused

- Musta augu keskel on “singulaarsus”: aegruumi kõverus on lõpmatu.

Must auk kui teooria ennustus

- Michell (1784): täht on “tume”, kui ta on nii massiivne, et valgus ei pääse välja.
- Schwarzschild (1916): Üldrelatiivsusteooria sfääriliselt sümmeetriline vaakumilahend.
- Oppenheimer & Snyder (1939): must auk tekib, kui massiivne täht kokku variseb.
- Kerr (1963): Schwarzschildi meetrika üldistus, pöörlev vaakumilahend.

Teoreetilise musta augu omadused

- Musta augu keskel on “singulaarsus”: aegruumi kõverus on lõpmatu.
- Musta auku ümbritseb “sündmushorisont”: midagi (sh valgus) ei pääse välja.

Mis on must auk?

Must auk kui teooria ennustus

- Michell (1784): täht on “tume”, kui ta on nii massiivne, et valgus ei pääse välja.
- Schwarzschild (1916): Üldrelatiivsusteooria sfääriliselt sümmeetriline vaakumilahend.
- Oppenheimer & Snyder (1939): must auk tekib, kui massiivne täht kokku variseb.
- Kerr (1963): Schwarzschildi meetrika üldistus, pöörlev vaakumilahend.

Teoreetilise musta augu omadused

- Musta augu keskel on “singulaarsus”: aegruumi kõverus on lõpmatu.
- Musta auku ümbritseb “sündmushorisont”: midagi (sh valgus) ei pääse välja.
- Must auk kõverdab aegruumi: isegi valgus tiirleb ümber musta augu.

Must auk kui teooria ennustus

- Michell (1784): täht on “tume”, kui ta on nii massiivne, et valgus ei pääse välja.
- Schwarzschild (1916): Üldrelatiivsusteooria sfääriliselt sümmeetriline vaakumilahend.
- Oppenheimer & Snyder (1939): must auk tekib, kui massiivne täht kokku variseb.
- Kerr (1963): Schwarzschildi meetrika üldistus, pöörlev vaakumilahend.

Teoreetilise musta augu omadused

- Musta augu keskel on “singulaarsus”: aegruumi kõverus on lõpmatu.
- Musta augu ümbritseb “sündmushorisont”: midagi (sh valgus) ei pääse välja.
- Must auk kõverdab aegruumi: isegi valgus tiirleb ümber musta augu.
- Musta augu lähedal möödub aeg aeglasemalt kui sellest eemal.

Must auk kui teooria ennustus

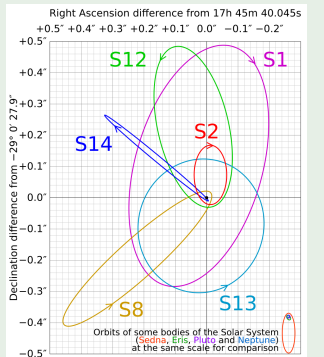
- Michell (1784): täht on “tume”, kui ta on nii massiivne, et valgus ei pääse välja.
- Schwarzschild (1916): Üldrelatiivsusteooria sfääriliselt sümmeetriline vaakumilahend.
- Oppenheimer & Snyder (1939): must auk tekib, kui massiivne täht kokku variseb.
- Kerr (1963): Schwarzschildi meetrika üldistus, pöörlev vaakumilahend.

Teoreetilise musta augu omadused

- Musta augu keskel on “singulaarsus”: aegruumi kõverus on lõpmatu.
- Musta auku ümbritseb “sündmushorisont”: midagi (sh valgus) ei pääse välja.
- Must auk kõverdab aegruumi: isegi valgus tiirleb ümber musta augu.
- Musta augu lähedal möödub aeg aeglasemalt kui sellest eemal.
- Musta auku langemine: langeja jaoks on aeg lõplik, välismaailmas lõpmatu.

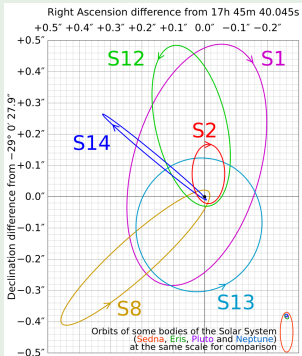
Kas mustad augud on päriselt kosmoses?

Tähed linnutee keskel

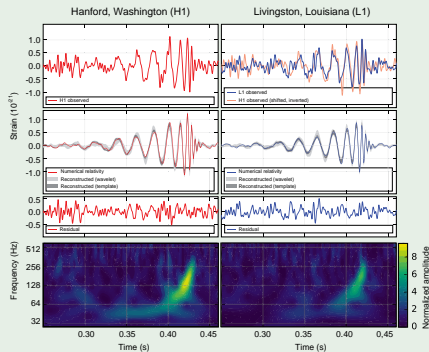


Kas mustad augud on päriselt kosmoses?

Tähed linnutee keskel

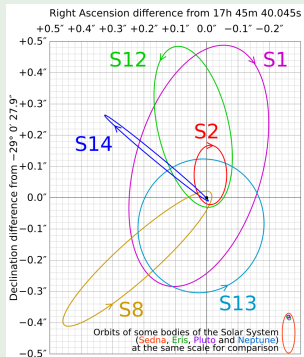


Gravitatsioonilained

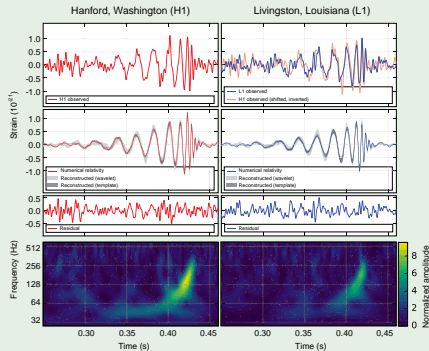


Kas mustad augud on päriselt kosmoses?

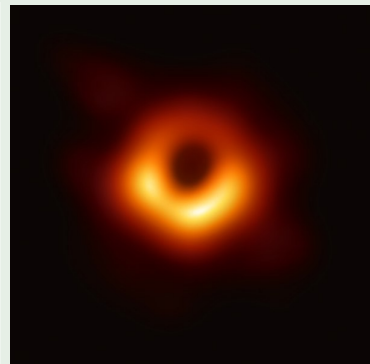
Tähed linnutee keskel



Gravitatsioonilained

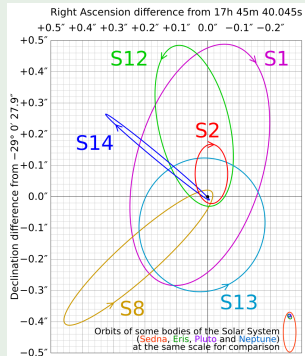


Pilt M87 galaktikast

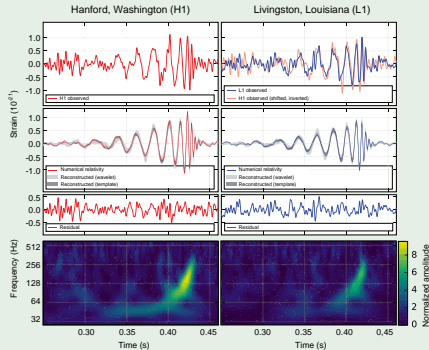


Kas mustad augud on päriselt kosmoses?

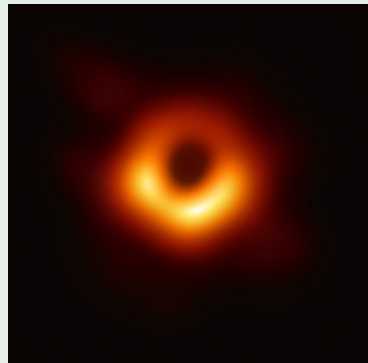
Tähed linnutee keskel



Gravitatsioonilained



Pilt M87 galaktikast

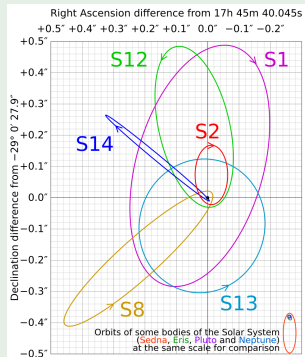


Näeb välja, heliseb & mõjub ümbrusele nagu must auk - kas siis ongi must auk?

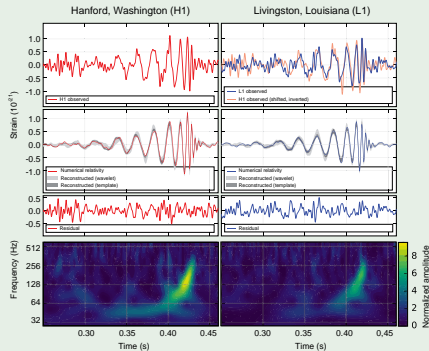
⇒ Kõik vaatlused on kooskõlalised musta augu ennustustega.

Kas mustad augud on päriselt kosmoses?

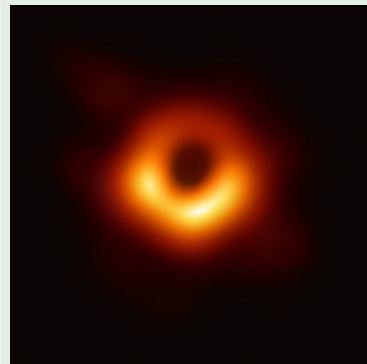
Tähed linnutee keskel



Gravitatsioonilained



Pilt M87 galaktikast



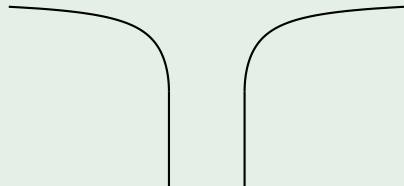
Näeb välja, heliseb & mõjub ümbrusele nagu must auk - kas siis ongi must auk?

⇒ Kõik vaatlused on kooskõlalised musta augu ennustustega.

- Ükski vaatlus ei välista, et tegemist on hoopis “eksootilise” objektiga.

Einstein-Roseni sild (Flamm 1916, Einstein & Rosen 1935)

- Schwarzschildi lahend (must auk).



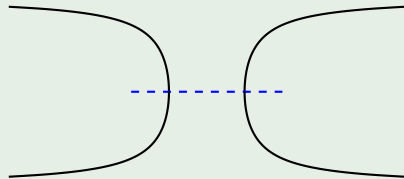
Einstein-Roseni sild (Flamm 1916, Einstein & Rosen 1935)

- Schwarzschildi lahend (must auk).
- Sündmushorisonti võib “ära lõigata”.



Einstein-Roseni sild (Flamm 1916, Einstein & Rosen 1935)

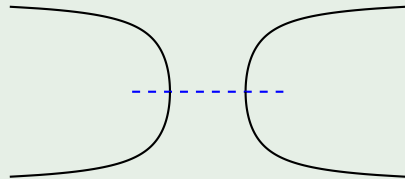
- Schwarzschildi lahend (must auk).
- Sündmushorisonti võib “ära lõigata”.
- Musta augu sisu asemel teine “väline aegruum”.



Mis on ussiauk?

Einstein-Roseni sild (Flamm 1916, Einstein & Rosen 1935)

- Schwarzschildi lahend (must auk).
- Sündmushorisonti võib “ära lõigata”.
- Musta augu sisu asemel teine “väline aegruum”.
- ⚡ Einstein-Roseni sild ei ole stabiilne ega läbitav.



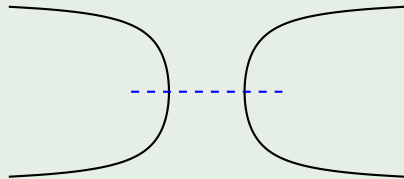
Läbitavad ussiaugud üldrelatiivsusteoorias?

- Einsteini väljavõrrand seostab materiat ja geomeetriat: $G_{ab} = 8\pi\kappa T_{ab}$.

Mis on ussiauk?

Einstein-Roseni sild (Flamm 1916, Einstein & Rosen 1935)

- Schwarzschildi lahend (must auk).
- Sündmushorisonti võib “ära lõigata”.
- Musta augu sisu asemel teine “väline aegruum”.
- ⚡ Einstein-Roseni sild ei ole stabiilne ega läbitav.



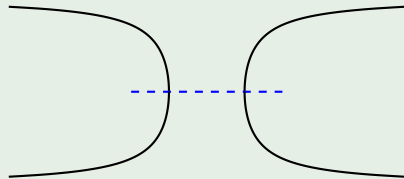
Läbitavad ussiaugud üldrelatiivsusteoorias?

- Einsteini väljavõrrand seostab materiat ja geomeetriat: $G_{ab} = 8\pi\kappa T_{ab}$.
- Aegruumi kõverus: ussiaugu geomeetria puhul on **negatiivne**.

Mis on ussiauk?

Einstein-Roseni sild (Flamm 1916, Einstein & Rosen 1935)

- Schwarzschildi lahend (must auk).
- Sündmushorisonti võib “ära lõigata”.
- Musta augu sisu asemel teine “väline aegruum”.
- ⚡ Einstein-Roseni sild ei ole stabiilne ega läbitav.



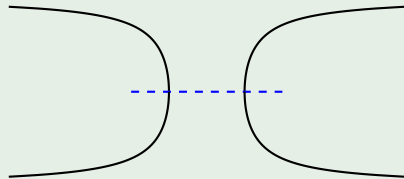
Läbitavad ussiaugud üldrelatiivsusteoorias?

- Einsteini väljavõrrand seostab materiat ja geomeetriat: $G_{ab} = 8\pi\kappa T_{ab}$.
- Aegruumi kõverus: ussiaugu geomeetria puhul on negatiivne.
- ⚡ Energia tihedus peab samuti olema negatiivne - eksootiline aine!

Mis on ussiauk?

Einstein-Roseni sild (Flamm 1916, Einstein & Rosen 1935)

- Schwarzschildi lahend (must auk).
- Sündmushorisonti võib “ära lõigata”.
- Musta augu sisu asemel teine “väline aegruum”.
- ⚡ Einstein-Roseni sild ei ole stabiilne ega läbitav.



Läbitavad ussiaugud üldrelatiivsusteoorias?

- Einsteini väljavõrrand seostab materiat ja geomeetriat: $G_{ab} = 8\pi\kappa T_{ab}$.
- Aegruumi kõverus: ussiaugu geomeetria puhul on negatiivne.
- ⚡ Energia tihedus peab samuti olema negatiivne - eksootiline aine!

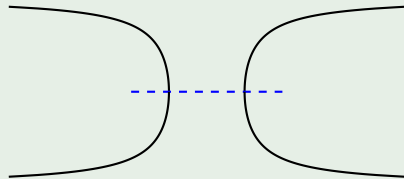
Võimalused ussiaugi leidmiseks või ehitamiseks?

- Kas üldrelatiivsusteooria on “õige”, või ainult “õige teooria” lähend?

Mis on ussiauk?

Einstein-Roseni sild (Flamm 1916, Einstein & Rosen 1935)

- Schwarzschildi lahend (must auk).
- Sündmushorisonti võib “ära lõigata”.
- Musta augu sisu asemel teine “väline aegruum”.
- ⚡ Einstein-Roseni sild ei ole stabiilne ega läbitav.



Läbitavad ussiaugud üldrelatiivsusteoorias?

- Einsteini väljavõrrand seostab materiat ja geomeetriat: $G_{ab} = 8\pi\kappa T_{ab}$.
- Aegruumi kõverus: ussiaugu geomeetria puhul on negatiivne.
- ⚡ Energia tihedus peab samuti olema negatiivne - eksootiline aine!

Võimalused ussiaugi leidmiseks või ehitamiseks?

- Kas üldrelatiivsusteooria on “õige”, või ainult “õige teooria” lähend?
- Kas kvantefektid võivad tekitada “eksootilist” olukorda?

1 Sissejuhatus

2 Diskussioon

3 Kokkuvõte

Kuidas näeb ussiauk välja?

Väited filmist

- Ussiauk on otsetee läbi kõrgema dimensiooni.
- Paberimudel ussiaugu visualiseerimiseks: kahemõõtmeline, seega auk on ring.
- Ussiaugu kuju on “kolmemõõtmeline ring” = sfäär.

Kuidas näeb ussiauk välja?

Väited filmist

- Ussiauk on otsetee läbi kõrgema dimensiooni.
- Paberimudel ussiaugu visualiseerimiseks: kahemõõtmeline, seega auk on ring.
- Ussiaugu kuju on “kolmemõõtmeline ring” = sfäär.

Tähtedevaheline

Ussiauk on sfääriline.

Kuidas näeb ussiauk välja?

Väited filmist

- Ussiauk on otsetee läbi kõrgema dimensiooni.
- Paberimudel ussiaugu visualiseerimiseks: kahemõõtmeline, seega auk on ring.
- Ussiaugu kuju on “kolmemõõtmeline ring” = sfäär.

Tähtedevaheline

Ussiauk on sfääriline.

Star Trek, Stargate jne

Ussiauk näeb välja nagu auk / tunneli värav.

Kuidas näeb ussiauk välja?

Väited filmist

- USSIAUK ON OTSETEE LÄBI KÕRGE MA DIMENSIOONI.
- Paberimudel ussiaugu visualiseerimiseks: kahemõõtmeline, seega auk on ring.
- USSIAUGU KUJU ON “KOLMEMÕÕTMELINE RING” = SFÄÄR.

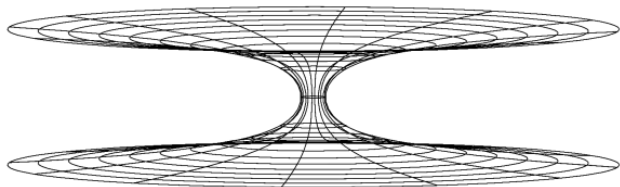
Tähtedevaheline

USSIAUK ON SFÄÄRILINE.

Star Trek, Stargate jne

USSIAUK NÄEB VÄLJA NAGU AUK / TUNNELI VÄRAV.

- NAIIVNE VAADE: “VÄLJASPOOLT MODELI PEALE”.



Kuidas näeb ussiauk välja?

Väited filmist

- USSIAUK ON OTSETEE LÄBI KÕRGE MA DIMENSIOONI.
- Paberimudel ussiaugu visualiseerimiseks: kahemõõtmeline, seega auk on ring.
- USSIAUGU KUJU ON “KOLMEMÕÕTMELINE RING” = SFÄÄR.

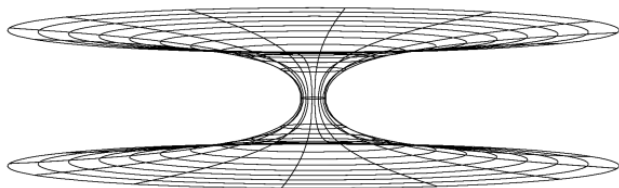
Tähtedevaheline

USSIAUK ON SFÄÄRILINE.

- NAIIVNE VAADE: “VÄLJASPOOLT MODELI PEALE”.
- VAATAJA ASUB HOOPIS MODELI SEES.

Star Trek, Stargate jne

USSIAUK NÄEB VÄLJA NAGU AUK / TUNNELI VÄRAV.



Kuidas näeb ussiauk välja?

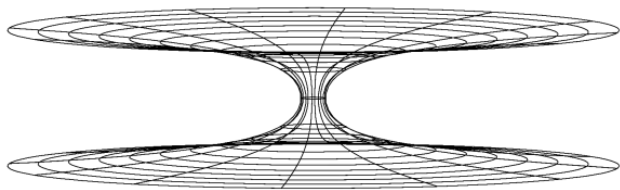
Väited filmist

- USSIAUK ON OTSETEE LÄBI KÕRGE MA DIMENSIOONI.
- Paberimudel ussiaugu visualiseerimiseks: kahemõõtmeline, seega auk on ring.
- USSIAUGU KUJU ON “KOLMEMÕÕTMELINE RING” = SFÄÄR.

Tähtedevaheline

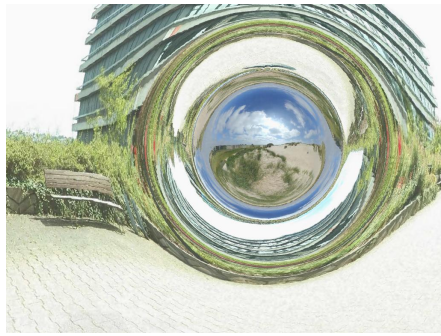
USSIAUK ON SFÄÄRILINE.

- NAIIVNE VAADE: “VÄLJASPOOLT MODELI PEALE”.
- VAATAJA ASUB HOOPIS MODELI SEES.
- IGA ST SUUNAST SAMA VAADE ⇒ SFÄÄR.



Star Trek, Stargate jne

USSIAUK NÄEB VÄLJA NAGU AUK / TUNNELI VÄRAV.



Kuidas näeb ussiauk välja?

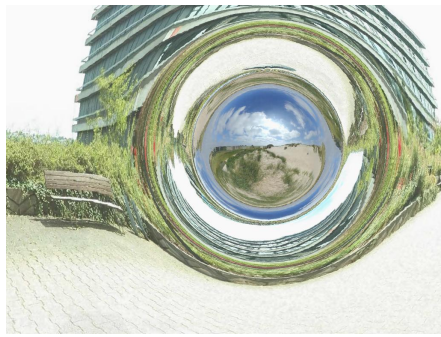
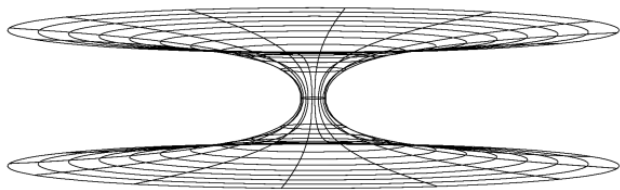
Väited filmist

- Ussiauk on otsetee läbi kõrgema dimensiooni.
- Paberimudel ussiaugu visualiseerimiseks: kahemõõtmeline, seega auk on ring.
- Ussiaugu kuju on “kolmemõõtmeline ring” = sfäär.

Tähtedevaheline

Ussiauk on sfääriline.

- Naiivne vaade: “väljaspoolt mudeli peale”.
- Vaataja asub hoopis mudeli sees.
- Igast suunast sama vaade \Rightarrow sfäär.



Kas filmi must auk on realistlik?

Väited filmist

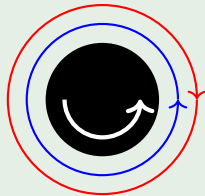
- Ajadilatatsioon: 1 tund Milleri planeedil on 7 aastat välismaailmas.
- Raskuskiirendus Milleri planeedil on 30% suurem kui Maal.

Kas filmi must auk on realistlik?

Väited filmist

- Ajadilatatsioon: 1 tund Milleri planeedil on 7 aastat välismaailmas.
- Raskuskiirendus Milleri planeedil on 30% suurem kui Maal.

Orbiidid



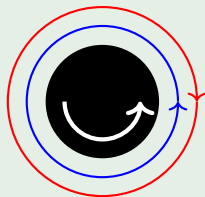
- Füüsikalised piirangud Milleri planeedi orbiiti kohta:
 - Stabiilsel orbiidil on minimaalne raadius.
 - Pöörleva musta augu puhul raadius sõltub suunast.

Kas filmi must auk on realistlik?

Väited filmist

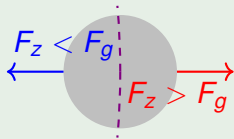
- Ajadilatatsioon: 1 tund Milleri planeedil on 7 aastat välismaailmas.
- Raskuskiirendus Milleri planeedil on 30% suurem kui Maal.

Orbiidid



- Füüsikalised piirangud Milleri planeedi orbiiti kohta:
 - Stabiilsel orbiidil on minimaalne raadius.
 - Pöörleva musta augu puhul raadius sõltub suunast.
- Loodejõud ja planeedi stabiilsus:
 - Tsentrifugaaljõud ja gravitatsioon võrdsed planeedi keskel.
 - Loodejõud ei tohi ületada planeedi pindgravitatsiooni.

Loodejõud

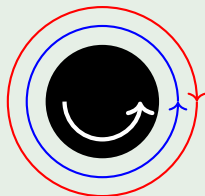


Kas filmi must auk on realistlik?

Väited filmist

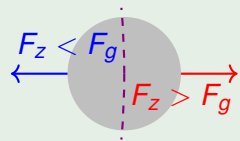
- Ajadilatatsioon: 1 tund Milleri planeedil on 7 aastat välismaailmas.
- Raskuskiirendus Milleri planeedil on 30% suurem kui Maal.

Orbiidid



- Füüsikalised piirangud Milleri planeedi orbiiti kohta:
 - Stabiilsel orbiidil on minimaalne raadius.
 - Pöörleva musta augu puhul raadius sõltub suunast.
- Loodejõud ja planeedi stabiilsus:
 - Tsentrifugaaljõud ja gravitatsioon võrdsed planeedi keskel.
 - Loodejõud ei tohi ületada planeedi pindgravitatsiooni.
- Järeldused musta augu omadustele:
 - Milleri planeedi orbiit kaasapöörleva minimaalorbiidi lähedal.
 - Musta augu mass $M \geq 10^8 M_{\odot}$ et vältida planeedi rebimist.
 - Ajadilatatsioon nõuab pöörlemist $J/J_{\max} > 1 - 10^{-14}$.

Loodejõud

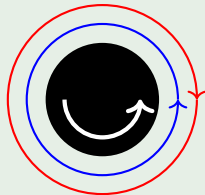


Kas filmi must auk on realistlik?

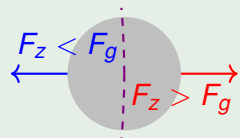
Väited filmist

- Ajadilatatsioon: 1 tund Milleri planeedil on 7 aastat välismaailmas.
- Raskuskiirendus Milleri planeedil on 30% suurem kui Maal.

Orbiidid



Loodejõud



- Füüsikalised piirangud Milleri planeedi orbiiti kohta:
 - Stabiilsel orbiidil on minimaalne raadius.
 - Pöörleva musta augu puhul raadius sõltub suunast.
- Loodejõud ja planeedi stabiilsus:
 - Tsentrifugaaljõud ja gravitatsioon võrdsed planeedi keskel.
 - Loodejõud ei tohi ületada planeedi pindgravitatsiooni.
- Järeldused musta augu omadustele:
 - Milleri planeedi orbiit kaasapöörleva minimaalorbiidi lähedal.
 - Musta augu mass $M \geq 10^8 M_\odot$ et vältida planeedi rebimist.
 - Ajadilatatsioon nõuab pöörlemist $J/J_{\max} > 1 - 10^{-14}$.

⇒ Võrdlus reaalsete mustade aukudega:

- Ülimassiivne must auk, \approx sama mass kui linnutee keskel.
- Pöörlemiskiirus füüsikaliselt lubatud, kuid ebarealistlik.

Kas filmi must auk on õigesti pildistatud?

Realistlik

Must aug näeks välja just nagu filmis.

Kas filmi must auk on õigesti pildistatud?

Realistlik

Must auk näeks välja just nagu filmis.

Ebarealistlik

Pilt ei vasta musta augu kirjeldusele.

Kas filmi must auk on õigesti pildistatud?

Realistlik

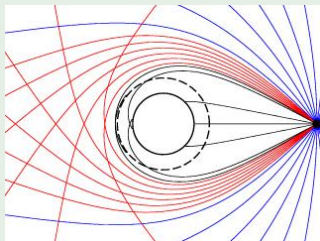
Must auk näeks välja just nagu filmis.

Ebarealistlik

Pilt ei vasta musta augu kirjeldusele.

Kuidas näeb must auk välja? Võrdlus faktidega

- ✓ Aegruumi kõverus: akkretsiooniketas nähtav musta augu servades.



Kas filmi must auk on õigesti pildistatud?

Realistlik

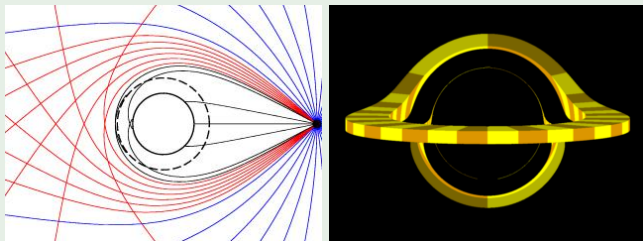
Must aug näeks välja just nagu filmis.

Ebarealistlik

Pilt ei vasta musta augu kirjeldusele.

Kuidas näeb must auk välja? Võrdlus faktidega

- ✓ Aegruumi kõverus: akkretsiooniketas nähtav musta augu servades.
- ✓ Footoniring: valgus ringleb mitu korda ümber musta augu.



Kas filmi must auk on õigesti pildistatud?

Realistlik

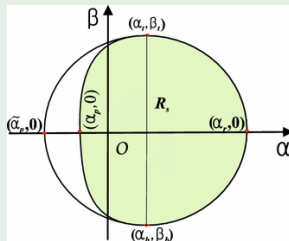
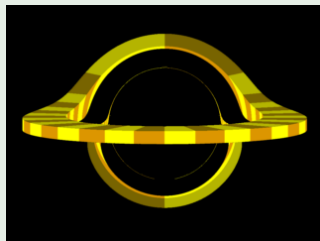
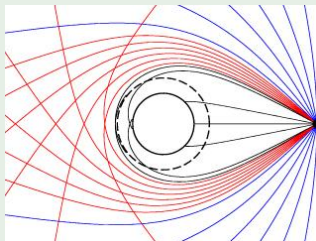
Must auk näeks välja just nagu filmis.

Ebarealistlik

Pilt ei vasta musta augu kirjeldusele.

Kuidas näeb must auk välja? Võrdlus faktidega

- ✓ Aegruumi kõverus: akkretsiooniketas nähtav musta augu servades.
- ✓ Footoniring: valgus ringleb mitu korda ümber musta augu.
- ⚡ Musta augu kuju: kiirelt pöörlev must auk paistab ühel pool lame.



Kas filmi must auk on õigesti pildistatud?

Realistlik

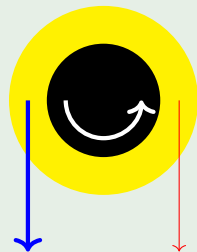
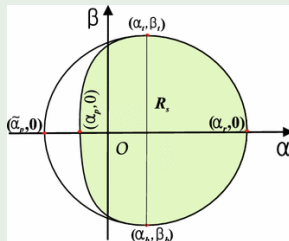
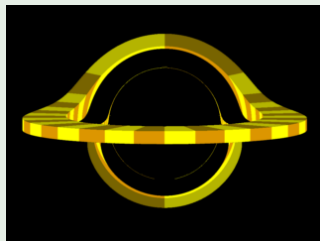
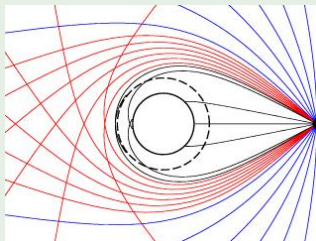
Must auk näeks välja just nagu filmis.

Ebarealistlik

Pilt ei vasta musta augu kirjeldusele.

Kuidas näeb must auk välja? Võrdlus faktidega

- ✓ Aegruumi kõverus: akkretsiooniketas nähtav musta augu servades.
- ✓ Footoniring: valgus ringleb mitu korda ümber musta augu.
- ⚡ Musta augu kuju: kiirelt pöörlev must auk paistab ühel pool lame.
- ⚡ Doppleri efekt: lähenev pool heledam ja sinisem kui eemalduv pool.



Kas filmi must auk on õigesti pildistatud?

Realistlik

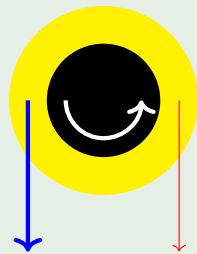
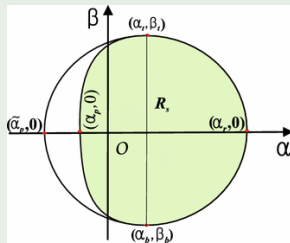
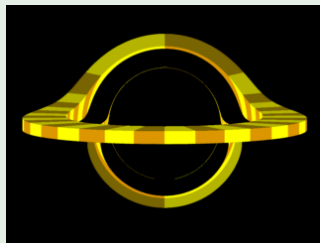
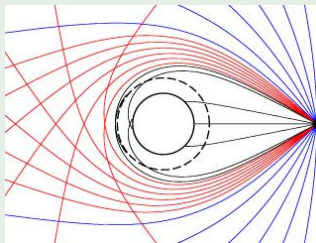
Must auk näeks välja just nagu filmis.

Ebarealistlik

Pilt ei vasta musta augu kirjeldusele.

Kuidas näeb must auk välja? Võrdlus faktidega

- ✓ Aegruumi kõverus: akkretsiooniketas nähtav musta augu servades.
- ✓ Footoniring: valgus ringleb mitu korda ümber musta augu.
- ⚡ Musta augu kuju: kiirelt pöörlev must auk paistab ühel pool lame.
- ⚡ Doppleri efekt: lähenev pool heledam ja sinisem kui eemalduv pool.
- ⚡ Milleri planeet: orbiit peab olema akkretsiooniketa sees.



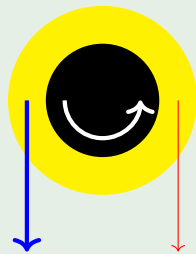
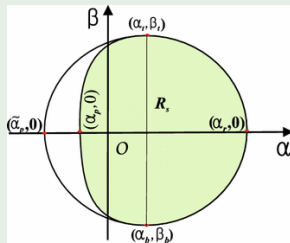
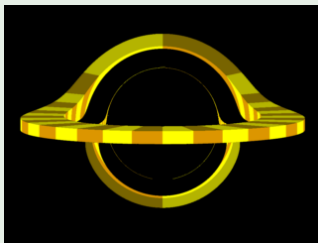
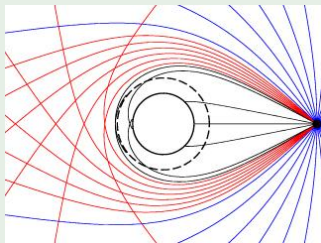
Kas filmi must auk on õigesti pildistatud?

Ebarealistlik

Pilt ei vasta musta augu kirjeldusele.

Kuidas näeb must auk välja? Võrdlus faktidega

- ✓ Aegruumi kõverus: akkretsiooniketas nähtav musta augu servades.
- ✓ Footoniring: valgus ringleb mitu korda ümber musta augu.
- ⚡ Musta augu kuju: kiirelt pöörlev must auk paistab ühel pool lame.
- ⚡ Doppleri efekt: lähenev pool heledam ja sinisem kui eemalduv pool.
- ⚡ Milleri planeet: orbiit peab olema akkretsiooniketa sees.



Kuidas mõjub must auk raadiosignaale?

Väited filmist

- Igalt sihtplaneedilt saadab kosmosesond signaali kord aastas.
- Milleri planeedilt on püsivalt vastu võetud regulaarsed signaalid.
- Ajadilatatsioon: 1 tund Milleri planeedil on 7 aastat välismaailmas.
- Vastuvõetud signaal on esimese saadetud signaali kaja.

Kuidas mõjub must auk raadiosignaale?

Väited filmist

- Igalt sihtplaneedilt saadab kosmosesond signaali kord aastas.
- Milleri planeedilt on püsivalt vastu võetud regulaarsed signaalid.
- Ajadilatatsioon: 1 tund Milleri planeedil on 7 aastat välismaailmas.
- Vastuvõetud signaal on esimese saadetud signaali kaja.

Realistlik

Musta augu tõttu tekib kaja, mida võib ära segada õige signaaliga.

Kuidas mõjub must auk raadiosignaale?

Väited filmist

- Igalt sihtplaneedilt saadab kosmosesond signaali kord aastas.
- Milleri planeedilt on püsivalt vastu võetud regulaarsed signaalid.
- Ajadilatatsioon: 1 tund Milleri planeedil on 7 aastat välismaailmas.
- Vastuvõetud signaal on esimese saadetud signaali kaja.

Realistlik

Musta augu tõttu tekib kaja, mida võib ära segada õige signaaliga.

Ebarealistlik

Võib eristada, kas vastuvõetud signaal on igaaastane signaal või musta augu efekt.

Kuidas mõjub must auk raadiosignaale?

Väited filmist

- Igalt sihtplaneedilt saadab kosmosesond signaali kord aastas.
- Milleri planeedilt on püsivalt vastu võetud regulaarsed signaalid.
- Ajadilatatsioon: 1 tund Milleri planeedil on 7 aastat välismaailmas.
- Vastuvõetud signaal on esimese saadetud signaali kaja.

Realistlik

Musta augu tõttu tekib kaja, mida võib ära segada õige signaaliga.

- ✓ Gravitatsiooniläätse efekt: signaal ringleb ümber musta auku \Rightarrow kaja.

Ebarealistlik

Võib eristada, kas vastuvõetud signaal on igaaastane signaal või musta augu efekt.

Kuidas mõjub must auk raadiosignaale?

Väited filmist

- Igalt sihtplaneedilt saadab kosmosesond signaali kord aastas.
- Milleri planeedilt on püsivalt vastu võetud regulaarsed signaalid.
- Ajadilatatsioon: 1 tund Milleri planeedil on 7 aastat välismaailmas.
- Vastuvõetud signaal on esimese saadetud signaali kaja.

Realistlik

Musta augu tõttu tekib kaja, mida võib ära segada õige signaaliga.

- ✓ Gravitatsiooniläätse efekt: signaal ringleb ümber musta auku \Rightarrow kaja.
- ⚡ Ajadilatatsioon (≈ 61320) muudab signaali sagedust:
 - Eeldame saatja sagedust $\approx 2\text{GHz}$ (tüüpiline kosmosesondide jaoks).
 - Signaali sagedus musta augu potentsiaalst väljas: $\approx 32.6\text{kHz}$.
 - Signaal ei pääse läbi atmosfääri ja on selgelt eristatav kui ajadilatatsioon.

Ebarealistlik

Võib eristada, kas vastuvõetud signaal on igaaastane signaal või musta augu efekt.

Kuidas mõjub must auk raadiosignaale?

Väited filmist

- Igalt sihtplaneedilt saadab kosmosesond signaali kord aastas.
- Milleri planeedilt on püsivalt vastu võetud regulaarsed signaalid.
- Ajadilatatsioon: 1 tund Milleri planeedil on 7 aastat välismaailmas.
- Vastuvõetud signaal on esimese saadetud signaali kaja.

Realistlik

Musta augu tõttu tekib kaja, mida võib ära segada õige signaaliga.

- ✓ Gravitatsiooniläätse efekt: signaal ringleb ümber musta auku \Rightarrow kaja.
- ⚡ Ajadilatatsioon (≈ 61320) muudab signaali sagedust:
 - Eeldame saatja sagedust $\approx 2\text{GHz}$ (tüüpiline kosmosesondide jaoks).
 - Signaali sagedus musta augu potentsiaalst väljas: $\approx 32.6\text{kHz}$.
 - Signaal ei pääse läbi atmosfääri ja on selgelt eristatav kui ajadilatatsioon.
- ⚡ Saada koos iga signaaliga ka unikaalset ajatempli!

Ebarealistlik

Võib eristada, kas vastuvõetud signaal on igaaastane signaal või musta augu efekt.

Kuidas mõjub must auk raadiosignaale?

Väited filmist

- Igalt sihtplaneedilt saadab kosmosesond signaali kord aastas.
- Milleri planeedilt on püsivalt vastu võetud regulaarsed signaalid.
- Ajadilatatsioon: 1 tund Milleri planeedil on 7 aastat välismaailmas.
- Vastuvõetud signaal on esimese saadetud signaali kaja.

Ebarealistlik

Võib eristada, kas vastuvõetud signaal on igaaastane signaal või musta augu efekt.

- ✓ Gravitatsiooniläätse efekt: signaal ringleb ümber musta auku \Rightarrow kaja.
- ⚡ Ajadilatatsioon (≈ 61320) muudab signaali sagedust:
 - Eeldame saatja sagedust $\approx 2\text{GHz}$ (tüüpiline kosmosesondide jaoks).
 - Signaali sagedus musta augu potentsiaalst väljas: $\approx 32.6\text{kHz}$.
 - Signaal ei pääse läbi atmosfääri ja on selgelt eristatav kui ajadilatatsioon.
- ⚡ Saada koos iga signaaliga ka unikaalset ajatempli!

Väited filmist

- Endurance pöörleb 68 korda minutis \Rightarrow nurksagedus $\omega = 408^\circ\text{s}^{-1} \approx 7.12\text{s}^{-1}$.
- Dokkimine õnnestub kosmoselaeva pöörlemisest hoolimata.

Dokkimine pöörleva kosmoselaevaga

Väited filmist

- Endurance pöörleb 68 korda minutis \Rightarrow nurksagedus $\omega = 408^\circ\text{s}^{-1} \approx 7.12\text{s}^{-1}$.
- Dokkimine õnnestub kosmoselaeva pöörlemisest hoolimata.

Realistlik

Kui Ranger liigub täpselt pöörleva taustsüsteemiga kaasa, saab dokkida.

Dokkimine pöörleva kosmoselaevaga

Väited filmist

- Endurance pöörleb 68 korda minutis \Rightarrow nurksagedus $\omega = 408^\circ\text{s}^{-1} \approx 7.12\text{s}^{-1}$.
- Dokkimine õnnestub kosmoselaeva pöörlemisest hoolimata.

Realistlik

Kui Ranger liigub täpselt pöörleva taustüsteemiga kaasa, saab dokkida.

Ebarealistlik

Pöörleva kosmoselaeva puhul on võimatu saavutada dokkimiseks piisavat täpsust.

Dokkimine pöörleva kosmoselaevaga

Väited filmist

- Endurance pöörleb 68 korda minutis \Rightarrow nurksagedus $\omega = 408^\circ\text{s}^{-1} \approx 7.12\text{s}^{-1}$.
- Dokkimine õnnestub kosmoselaeva pöörlemisest hoolimata.

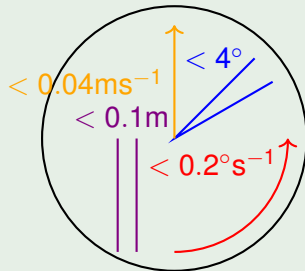
Realistlik

Kui Ranger liigub täpselt pöörleva taustsüsteemiga kaasa, saab dokkida.

Ebarealistlik

Pöörleva kosmoselaeva puhul on võimatu saavutada dokkimiseks piisavat täpsust.

RV dokkimise standart



Dokkimine pöörleva kosmoselaevaga

Väited filmist

- Endurance pöörleb 68 korda minutis \Rightarrow nurksagedus $\omega = 408^\circ\text{s}^{-1} \approx 7.12\text{s}^{-1}$.
- Dokkimine õnnestub kosmoselaeva pöörlemisest hoolimata.

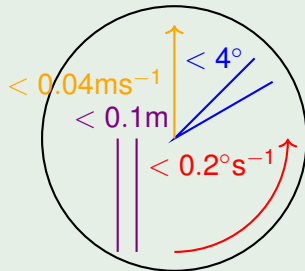
Realistlik

Kui Ranger liigub täpselt pöörleva taustsüsteemiga kaasa, saab dokkida.

Ebarealistlik

Pöörleva kosmoselaeva puhul on võimatu saavutada dokkimiseks piisavat täpsust.

RV dokkimise standart



- Pöörlevas taustsüsteemis ilmuvad inertsikiirendused:
 - tsentrifugaaljõud: $\vec{a}_z = -\vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{r})$
 - Coriolisi jõud $\vec{a}_c = -2\vec{\omega} \times \vec{v}$

Dokkimine pöörleva kosmoselaevaga

Väited filmist

- Endurance pöörleb 68 korda minutis \Rightarrow nurksagedus $\omega = 408^\circ\text{s}^{-1} \approx 7.12\text{s}^{-1}$.
- Dokkimine õnnestub kosmoselaeva pöörlemisest hoolimata.

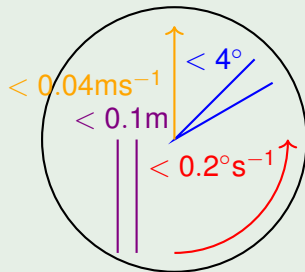
Realistlik

Kui Ranger liigub täpselt pöörleva taustsüsteemiga kaasa, saab dokkida.

Ebarealistlik

Pöörleva kosmoselaeva puhul on võimatu saavutada dokkimiseks piisavat täpsust.

RV dokkimise standart



- Pöörlevas taustsüsteemis ilmuvad inertsikiirendused:
 - tsentrifugaaljõud: $\vec{a}_z = -\vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{r})$
 - Coriolisi jõud $\vec{a}_c = -2\vec{\omega} \times \vec{v}$
- Manööver äärmiselt piirides: $r \approx 0.1\text{m}$, $v \approx 0.04\text{ms}^{-1}$.

Dokkimine pöörleva kosmoselaevaga

Väited filmist

- Endurance pöörleb 68 korda minutis \Rightarrow nurksagedus $\omega = 408^\circ\text{s}^{-1} \approx 7.12\text{s}^{-1}$.
- Dokkimine õnnestub kosmoselaeva pöörlemisest hoolimata.

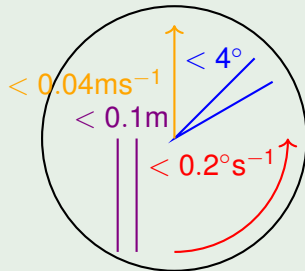
Realistlik

Kui Ranger liigub täpselt pöörleva taustsüsteemiga kaasa, saab dokkida.

Ebarealistlik

Pöörleva kosmoselaeva puhul on võimatu saavutada dokkimiseks piisavat täpsust.

RV dokkimise standart



- Pöörlevas taustsüsteemis ilmuvad inertsikiirendused:
 - tsentrifugaaljõud: $\vec{a}_z = -\vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{r})$
 - Coriolisi jõud $\vec{a}_c = -2\vec{\omega} \times \vec{v}$
- Manööver äärmiselt piirides: $r \approx 0.1\text{m}$, $v \approx 0.04\text{ms}^{-1}$.
- ⚡ $a \approx 5\text{ms}^{-2} \Rightarrow$ lahkume piiridest 0.008s jooksul!

Dokkimine pöörleva kosmoselaevaga

Väited filmist

- Endurance pöörleb 68 korda minutis \Rightarrow nurksagedus $\omega = 408^\circ\text{s}^{-1} \approx 7.12\text{s}^{-1}$.
- Dokkimine õnnestub kosmoselaeva pöörlemisest hoolimata.

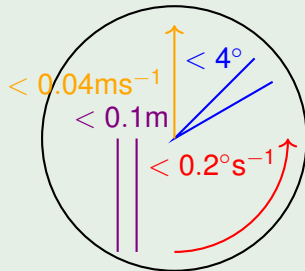
Realistlik

Kui Ranger liigub täpselt pöörleva taustsüsteemiga kaasa, saab dokkida.

Ebarealistlik

Pöörleva kosmoselaeva puhul on võimatu saavutada dokkimiseks piisavat täpsust.

RV dokkimise standart



- Pöörlevas taustsüsteemis ilmuvad inertsikiirendused:
 - tsentrifugaaljõud: $\vec{a}_z = -\vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{r})$
 - Coriolisi jõud $\vec{a}_c = -2\vec{\omega} \times \vec{v}$
- Manööver äärmiselt piirides: $r \approx 0.1\text{m}$, $v \approx 0.04\text{ms}^{-1}$.
- ⚡ $a \approx 5\text{ms}^{-2} \Rightarrow$ lahkume piiridest 0.008s jooksul!
- ⚡ Et manöövriks oleks aega 8s, tuleks jõudu kompenseerida 0.1% täpsusega.

Dokkimine pöörleva kosmoselaevaga

Väited filmist

- Endurance pöörleb 68 korda minutis \Rightarrow nurksagedus $\omega = 408^\circ\text{s}^{-1} \approx 7.12\text{s}^{-1}$.
- Dokkimine õnnestub kosmoselaeva pöörlemisest hoolimata.

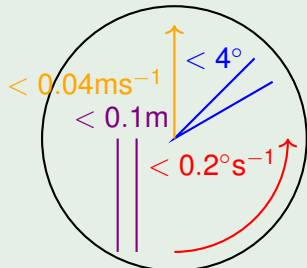
Realistlik

Kui Ranger liigub täpselt pöörleva taustsüsteemiga kaasa, saab dokkida.

Ebarealistlik

Pöörleva kosmoselaeva puhul on võimatu saavutada dokkimiseks piisavat täpsust.

RV dokkimise standart



- Pöörlevas taustsüsteemis ilmuvad inertsikiirendused:
 - tsentrifugaaljõud: $\vec{a}_z = -\vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{r})$
 - Coriolisi jõud $\vec{a}_c = -2\vec{\omega} \times \vec{v}$
- Manööver äärmiselt piirides: $r \approx 0.1\text{m}$, $v \approx 0.04\text{ms}^{-1}$.
- ⚡ $a \approx 5\text{ms}^{-2} \Rightarrow$ lahkume piiridest 0.008s jooksul!
- ⚡ Et manöövriks oleks aega 8s, tuleks jõudu kompenseerida 0.1% täpsusega.
- ! Dragon, $\leq 10000\text{kg}$, 16 Draco 400N reaktiivmootorit.

Dokkimine pöörleva kosmoselaevaga

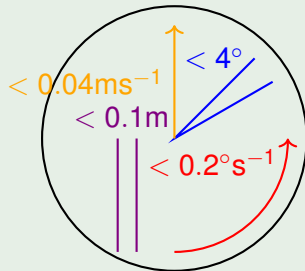
Väited filmist

- Endurance pöörleb 68 korda minutis \Rightarrow nurksagedus $\omega = 408^\circ\text{s}^{-1} \approx 7.12\text{s}^{-1}$.
- Dokkimine õnnestub kosmoselaeva pöörlemisest hoolimata.

Ebarealistlik

Pöörleva kosmoselaeva puhul on võimatu saavutada dokkimiseks piisavat täpsust.

RV dokkimise standart



- Pöörlevas taustsüsteemis ilmuvad inertsikiirendused:
 - tsentrifugaaljõud: $\vec{a}_z = -\vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{r})$
 - Coriolisi jõud $\vec{a}_c = -2\vec{\omega} \times \vec{v}$
- Manööver äärmiselt piirides: $r \approx 0.1\text{m}$, $v \approx 0.04\text{ms}^{-1}$.
- ⚡ $a \approx 5\text{ms}^{-2} \Rightarrow$ lahkume piiridest 0.008s jooksul!
- ⚡ Et manöövriks oleks aega 8s, tuleks jõudu kompenseerida 0.1% täpsusega.
- ! Dragon, $\leq 10000\text{kg}$, 16 Draco 400N reaktiivmootorit.

“Ragulka” manööver musta augu lähedal

Väited filmist

- Endurance'il pole piisavalt kütust Edmunds'i planeedile jõudmiseks.
- Endurance läheneb mustale augule kiirenemiseks.
- Musta augu lähedal Lander 1 ja Ranger 2 eralduvad ja langevad musta auku.
- Endurance jätkab teekonda kõrgema kiirusega kui ilma manöövrita.

“Ragulka” manööver musta augu lähedal

Väited filmist

- Endurance'il pole piisavalt kütust Edmunds'i planeedile jõudmiseks.
- Endurance läheneb mustale augule kiirenemiseks.
- Musta augu lähedal Lander 1 ja Ranger 2 eralduvad ja langevad musta auku.
- Endurance jätkab teekonda kõrgema kiirusega kui ilma manöövrita.

Realistlik

Mustalt augult saab energiat juurde.

“Ragulka” manööver musta augu lähedal

Väited filmist

- Endurance'il pole piisavalt kütust Edmunds'i planeedile jõudmiseks.
- Endurance läheneb mustale augule kiirenemiseks.
- Musta augu lähedal Lander 1 ja Ranger 2 eralduvad ja langevad musta auku.
- Endurance jätkab teekonda kõrgema kiirusega kui ilma manöövrita.

Realistlik

Mustalt augult saab energiat juurde.

Ebarealistlik

Puhas fantaasia - kangeline ohverdab end.

“Ragulka” manööver musta augu lähedal

Väited filmist

- Endurance'il pole piisavalt kütust Edmunds'i planeedile jõudmiseks.
- Endurance läheneb mustale augule kiirenemiseks.
- Musta augu lähedal Lander 1 ja Ranger 2 eralduvad ja langevad musta auku.
- Endurance jätkab teekonda kõrgema kiirusega kui ilma manöövrita.

Realistlik

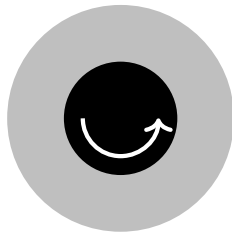
Mustalt augult saab energiat juurde.

Ebarealistlik

Puhas fantaasia - kangeline ohverdab end.

Penrose'i protsess

- Pöörleval mustal augul on **ergosfäär**.



“Ragulka” manööver musta augu lähedal

Väited filmist

- Endurance'il pole piisavalt kütust Edmunds'i planeedile jõudmiseks.
- Endurance läheneb mustale augule kiirenemiseks.
- Musta augu lähedal Lander 1 ja Ranger 2 eralduvad ja langevad musta auku.
- Endurance jätkab teekonda kõrgema kiirusega kui ilma manöövrita.

Realistlik

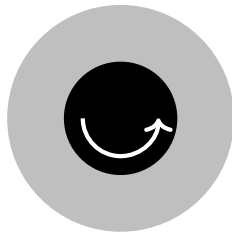
Mustalt augult saab energiat juurde.

Ebarealistlik

Puhas fantaasia - kangeline ohverdab end.

Penrose'i protsess

- Pöörleval mustal augul on ergosfäär.
- Ergosfääris kaasa pöörlemine on **vältimatu**.



“Ragulka” manööver musta augu lähedal

Väited filmist

- Endurance'il pole piisavalt kütust Edmunds'i planeedile jõudmiseks.
- Endurance läheneb mustale augule kiirenemiseks.
- Musta augu lähedal Lander 1 ja Ranger 2 eralduvad ja langevad musta auku.
- Endurance jätkab teekonda kõrgema kiirusega kui ilma manöövrita.

Realistlik

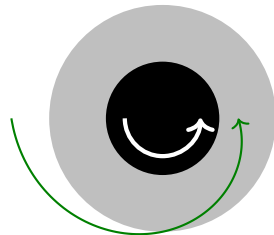
Mustalt augult saab energiat juurde.

Ebarealistlik

Puhas fantaasia - kangeline ohverdab end.

Penrose'i protsess

- Pöörleval mustal augul on ergosfäär.
- Ergosfääris kaasa pöörlemine on vältimatu.
- Kosmoselaev siseneb ergosfääri.



“Ragulka” manööver musta augu lähedal

Väited filmist

- Endurance'il pole piisavalt kütust Edmunds'i planeedile jõudmiseks.
- Endurance läheneb mustale augule kiirenemiseks.
- Musta augu lähedal Lander 1 ja Ranger 2 eralduvad ja langevad musta auku.
- Endurance jätkab teekonda kõrgema kiirusega kui ilma manöövrita.

Realistlik

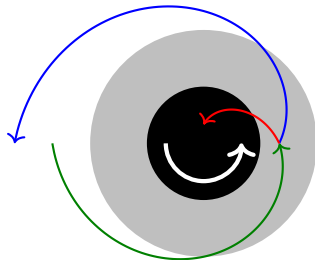
Mustalt augult saab energiat juurde.

Ebarealistlik

Puhas fantaasia - kangeline ohverdab end.

Penrose'i protsess

- Pöörleval mustal augul on ergosfäär.
- Ergosfääris kaasa pöörlemine on vältimatu.
- Kosmoselaev siseneb ergosfääri.
- Ergosfääris kosmoselaev viskab massi enda taha.



“Ragulka” manööver musta augu lähedal

Väited filmist

- Endurance'il pole piisavalt kütust Edmunds'i planeedile jõudmiseks.
- Endurance läheneb mustale augule kiirenemiseks.
- Musta augu lähedal Lander 1 ja Ranger 2 eralduvad ja langevad musta auku.
- Endurance jätkab teekonda kõrgema kiirusega kui ilma manöövrita.

Realistlik

Mustalt augult saab energiat juurde.

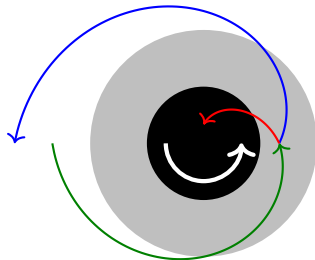
Ebarealistlik

Puhas fantaasia - kangeline ohverdab end.

Penrose'i protsess

- Pöörleval mustal augul on ergosfäär.
- Ergosfääris kaasa pöörlemine on vältimatu.
- Kosmoselaev siseneb ergosfääri.
- Ergosfääris kosmoselaev viskab massi enda taha.

⇒ Laev saab energiat musta augu pöörlemisest.



“Ragulka” manööver musta augu lähedal

Väited filmist

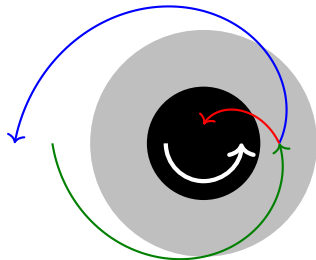
- Endurance'il pole piisavalt kütust Edmunds'i planeedile jõudmiseks.
- Endurance läheneb mustale augule kiirenemiseks.
- Musta augu lähedal Lander 1 ja Ranger 2 eralduvad ja langevad musta auku.
- Endurance jätkab teekonda kõrgema kiirusega kui ilma manöövrita.

Realistlik

Mustalt augult saab energiat juurde.

Penrose'i protsess

- Pöörleval mustal augul on ergosfäär.
 - Ergosfääris kaasa pöörlemine on vältimatu.
 - Kosmoselaev siseneb ergosfääri.
 - Ergosfääris kosmoselaev viskab massi enda taha.
- ⇒ Laev saab energiat musta augu pöörlemisest.



Musta auku langemine

Väide filmist

Cooper langeb koos Ranger 2'ga musta auku ja jääb ellu.

Musta auku langemine

Väide filmist

Cooper langeb koos Ranger 2'ga musta auku ja jääb ellu.

Realistlik

Horisonti saab ületada ja ellu jääda.

Musta auku langemine

Väide filmist

Cooper langeb koos Ranger 2'ga musta auku ja jääb ellu.

Realistlik

Horisonti saab ületada ja ellu jääda.

Ebarealistlik

Horisondil valitseb liiga tugev gravitatsioon.

Musta auku langemine

Väide filmist

Cooper langeb koos Ranger 2'ga musta auku ja jääb ellu.

Realistlik

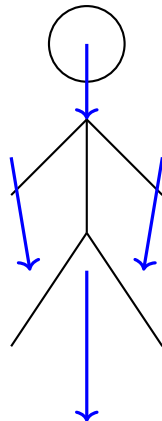
Horisonti saab ületada ja ellu jääda.

Ebarealistlik

Horisondil valitseb liiga tugev gravitatsioon.

Loodejõud

- Mittehomogeenses gravitatsiooniväljas sõltub jõud asukohast.



Musta auku langemine

Väide filmist

Cooper langeb koos Ranger 2'ga musta auku ja jääb ellu.

Realistlik

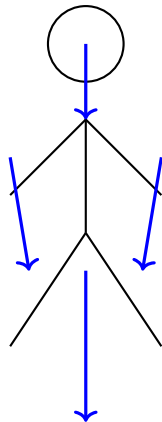
Horisonti saab ületada ja ellu jääda.

Ebarealistlik

Horisondil valitseb liiga tugev gravitatsioon.

Loodejõud

- Mittehomogeenses gravitatsiooniväljas sõltub jõud asukohast.
- ⇒ Erinevad kehaosad kiireneksid vabalt langedes erinevalt.



Musta auku langemine

Väide filmist

Cooper langeb koos Ranger 2'ga musta auku ja jääb ellu.

Realistlik

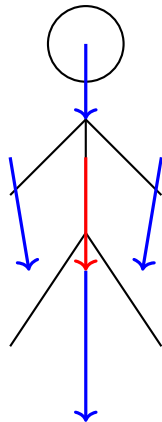
Horisonti saab ületada ja ellu jääda.

Ebarealistlik

Horisondil valitseb liiga tugev gravitatsioon.

Loodejõud

- Mittehomogeenses gravitatsiooniväljas sõltub jõud asukohast.
- ⇒ Erinevad kehaosad kiireneksid vabalt langedes erinevalt.
- Aatomivaheline jõud: keha jääb langedes (veel) terveks.



Musta auku langemine

Väide filmist

Cooper langeb koos Ranger 2'ga musta auku ja jääb ellu.

Realistlik

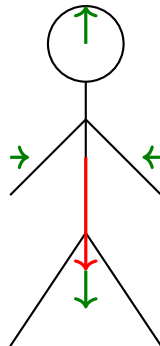
Horisonti saab ületada ja ellu jääda.

Ebarealistlik

Horisondil valitseb liiga tugev gravitatsioon.

Loodejõud

- Mittehomogeenses gravitatsiooniväljas sõltub jõud asukohast.
- ⇒ Erinevad kehaosad kiireneksid vabalt langedes erinevalt.
- Aatomivaheline jõud: keha jääb langedes (veel) terveks.
 - Vabalt langevas süsteemis on jääkjõud: loodejõud.



Musta auku langemine

Väide filmist

Cooper langeb koos Ranger 2'ga musta auku ja jääb ellu.

Realistlik

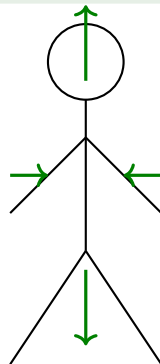
Horisonti saab ületada ja ellu jääda.

Ebarealistlik

Horisondil valitseb liiga tugev gravitatsioon.

Loodejõud

- Mittehomogeenses gravitatsiooniväljas sõltub jõud asukohast.
- ⇒ Erinevad kehaosad kiireneksid vabalt langedes erinevalt.
- Aatomivaheline jõud: keha jääb langedes (veel) terveks.
- Vabalt langevas süsteemis on jääkjõud: loodejõud.
- ⇒ Singulaarsusele lähenedes kasvab jõud: “spaghettifitseerimine”.



Musta auku langemine

Väide filmist

Cooper langeb koos Ranger 2'ga musta auku ja jääb ellu.

Realistlik

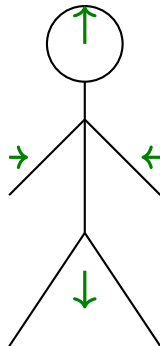
Horisonti saab ületada ja ellu jääda.

Ebarealistlik

Horisondil valitseb liiga tugev gravitatsioon.

Loodejõud

- Mittehomogeenses gravitatsiooniväljas sõltub jõud asukohast.
- ⇒ Erinevad kehaosad kiireneksid vabalt langedes erinevalt.
- Aatomivaheline jõud: keha jääb langedes (veel) terveks.
- Vabalt langevas süsteemis on jääkjõud: loodejõud.
- ⇒ Singulaarsusele lähenedes kasvab jõud: “spaghettifitseerimine”.
- Mida homogeensem gravitatsiooniväli, seda väiksem loodejõud.



Musta auku langemine

Väide filmist

Cooper langeb koos Ranger 2'ga musta auku ja jääb ellu.

Realistlik

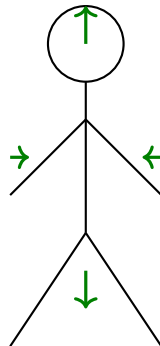
Horisonti saab ületada ja ellu jääda.

Ebarealistlik

Horisondil valitseb liiga tugev gravitatsioon.

Loodejõud

- Mittehomogeenses gravitatsiooniväljas sõltub jõud asukohast.
- ⇒ Erinevad kehaosad kiireneksid vabalt langedes erinevalt.
- Aatomivaheline jõud: keha jääb langedes (veel) terveks.
- Vabalt langevas süsteemis on jääkjõud: loodejõud.
- ⇒ Singulaarsusele lähenedes kasvab jõud: “spaghettifitseerimine”.
- Mida homogeensem gravitatsiooniväli, seda väiksem loodejõud.
- Ülimassiivsel mustal augul on horisondil madal loodejõud.



Musta auku langemine

Väide filmist

Cooper langeb koos Ranger 2'ga musta auku ja jääb ellu.

Realistlik

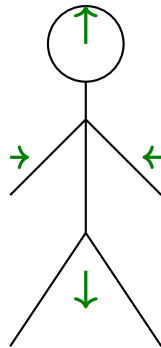
Horisonti saab ületada ja ellu jääda.

Ebarealistlik

Horisondil valitseb liiga tugev gravitatsioon.

Loodejõud

- Mittehomogeenses gravitatsiooniväljas sõltub jõud asukohast.
- ⇒ Erinevad kehaosad kiireneksid vabalt langedes erinevalt.
- Aatomivaheline jõud: keha jääb langedes (veel) terveks.
- Vabalt langevas süsteemis on jääkjõud: loodejõud.
- ⇒ Singulaarsusele lähenedes kasvab jõud: “spaghettifitseerimine”.
- Mida homogeensem gravitatsiooniväli, seda väiksem loodejõud.
- Ülimassiivsel mustal augul on horisondil madal loodejõud.
- ⇒ Gargantua puhul: erinevus pea ja jalgade vahel $\approx 10^{-6}\text{ms}^{-1}$.



Musta auku langemine

Väide filmist

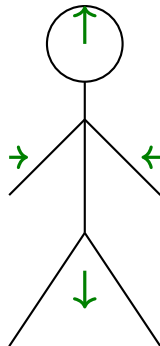
Cooper langeb koos Ranger 2'ga musta auku ja jääb ellu.

Realistlik

Horisonti saab ületada ja ellu jääda.

Loodejõud

- Mittehomogeenses gravitatsiooniväljas sõltub jõud asukohast.
- ⇒ Erinevad kehaosad kiireneksid vabalt langedes erinevalt.
- Aatomivaheline jõud: keha jääb langedes (veel) terveks.
- Vabalt langevas süsteemis on jääkjõud: loodejõud.
- ⇒ Singulaarsusele lähenedes kasvab jõud: “spaghettifitseerimine”.
- Mida homogeensem gravitatsiooniväli, seda väiksem loodejõud.
- Ülimassiivsel mustal augul on horisondil madal loodejõud.
- ⇒ Gargantua puhul: erinevus pea ja jalgade vahel $\approx 10^{-6}\text{ms}^{-1}$.



Kas gravitatsioon selgitab filmis nähtavaid efekte?

Väited filmist

- Gravitatsiooni anomaaliad liigutavad asju Murph'i toas.
- Ainult gravitatsioon saab ajas edasi ja tagasi liikuda.
- "Kõrgema dimensiooni olendi" jaoks aeg on lihtsalt üks dimensioon.
- Gravitatsiooni manipuleerimine aitab tõsta inimkonda kosmosesse.

Kas gravitatsioon selgitab filmis nähtavaid efekte?

Väited filmist

- Gravitatsiooni anomaaliad liigutavad asju Murph'i toas.
- Ainult gravitatsioon saab ajas edasi ja tagasi liikuda.
- "Kõrgema dimensiooni olendi" jaoks aeg on lihtsalt üks dimensioon.
- Gravitatsiooni manipuleerimine aitab tõsta inimkonda kosmosesse.

Realistlik

Efektid on kooskõlalised füüsikaga.

Kas gravitatsioon selgitab filmis nähtavaid efekte?

Väited filmist

- Gravitatsiooni anomaaliad liigutavad asju Murph'i toas.
- Ainult gravitatsioon saab ajas edasi ja tagasi liikuda.
- "Kõrgema dimensiooni olendi" jaoks aeg on lihtsalt üks dimensioon.
- Gravitatsiooni manipuleerimine aitab tõsta inimkonda kosmosesse.

Realistlik

Efektid on kooskõlalised füüsikaga.

Ebarealistlik

Puhas fantaasia - gravitatsioon on "igav".

Kas gravitatsioon selgitab filmis nähtavaid efekte?

Väited filmist

- Gravitatsiooni anomaaliad liigutavad asju Murph'i toas.
- Ainult gravitatsioon saab ajas edasi ja tagasi liikuda.
- "Kõrgema dimensiooni olendi" jaoks aeg on lihtsalt üks dimensioon.
- Gravitatsiooni manipuleerimine aitab tõsta inimkonda kosmosesse.

Realistlik

Efektid on kooskõlalised füüsikaga.

Ebarealistlik

Puhas fantaasia - gravitatsioon on "igav".

Üldrelatiivsusteooria

- Gravitatsiooni tugevus on konstantne (Newtoni konstant).
 - Aegruumi geomeetria määrab kausaalsust: ruum ja aeg.
 - Aegruum on neljamõõtmeline - kõrgemaid dimensioone ei ole.
- ⇒ Üldrelatiivsusteooria ei selgita filmis nähtavaid efekte.

Kas gravitatsioon selgitab filmis nähtavaid efekte?

Väited filmist

- Gravitatsiooni anomaaliad liigutavad asju Murph'i toas.
- Ainult gravitatsioon saab ajas edasi ja tagasi liikuda.
- "Kõrgema dimensiooni olendi" jaoks aeg on lihtsalt üks dimensioon.
- Gravitatsiooni manipuleerimine aitab tõsta inimkonda kosmosesse.

Ebarealistlik

Puhas fantaasia - gravitatsioon on "igav".

Üldrelatiivsusteooria

- Gravitatsiooni tugevus on konstantne (Newtoni konstant).
 - Aegruumi geomeetria määrab kausaalsust: ruum ja aeg.
 - Aegruum on neljamõõtmeline - kõrgemaid dimensioone ei ole.
- ⇒ Üldrelatiivsusteooria ei selgita filmis nähtavaid efekte.

Kas gravitatsioon selgitab filmis nähtavaid efekte?

Väited filmist

- Gravitatsiooni anomaaliad liigutavad asju Murph'i toas.
- Ainult gravitatsioon saab ajas edasi ja tagasi liikuda.
- "Kõrgema dimensiooni olendi" jaoks aeg on lihtsalt üks dimensioon.
- Gravitatsiooni manipuleerimine aitab tõsta inimkonda kosmosesse.

Realistlik

Efektid on kooskõlalised füüsikaga.

Ebarealistlik

Puhas fantaasia - gravitatsioon on "igav".

Üldrelatiivsusteooria ei selgita universumi täielikult

- Universumi massi sisaldus: tume aine suurtes struktuurides.
- Universumi kiirenev paisumine: tume energia?
- Universumi ruumiline geomeetria on suurtel skaaladel tasane.
- Kosmiline mikrolaine taustkiirgus: sama temperatuur igas suunas.
- Üldrelatiivsusteooria ei ole kooskõlas kvantteooriaga.

Kas gravitatsioon selgitab filmis nähtavaid efekte?

Väited filmist

- Gravitatsiooni anomaaliad liigutavad asju Murph'i toas.
- Ainult gravitatsioon saab ajas edasi ja tagasi liikuda.
- "Kõrgema dimensiooni olendi" jaoks aeg on lihtsalt üks dimensioon.
- Gravitatsiooni manipuleerimine aitab tõsta inimkonda kosmosesse.

Realistlik

Efektid on kooskõlalised füüsikaga.

Ebarealistlik

Puhas fantaasia - gravitatsioon on "igav".

Modifitseeritud / alternatiivsed gravitatsiooniteooriad?

- Brans-Dicke teooria: Newtoni "konstant" pole konstant, vaid skalaarväli.

Kas gravitatsioon selgitab filmis nähtavaid efekte?

Väited filmist

- Gravitatsiooni anomaaliad liigutavad asju Murph'i toas.
- Ainult gravitatsioon saab ajas edasi ja tagasi liikuda.
- "Kõrgema dimensiooni olendi" jaoks aeg on lihtsalt üks dimensioon.
- Gravitatsiooni manipuleerimine aitab tõsta inimkonda kosmosesse.

Realistlik

Efektid on kooskõlalised füüsikaga.

Ebarealistlik

Puhas fantaasia - gravitatsioon on "igav".

Modifitseeritud / alternatiivsed gravitatsiooniteooriad?

- Brans-Dicke teooria: Newtoni "konstant" pole konstant, vaid skalaarväli.
- Stringiteooria ja AdS/CFT: nähtav universum on neljamõõtmeline "braan".
- Braaniteoorias gravitatsioon kehtiv ka braani ümbritsevas ruumis.
- Kokkupõrked braanide vahel erinevatel aegadel kui aeg sõltub braanist.

Kas gravitatsioon selgitab filmis nähtavaid efekte?

Väited filmist

- Gravitatsiooni anomaaliad liigutavad asju Murph'i toas.
- Ainult gravitatsioon saab ajas edasi ja tagasi liikuda.
- "Kõrgema dimensiooni olendi" jaoks aeg on lihtsalt üks dimensioon.
- Gravitatsiooni manipuleerimine aitab tõsta inimkonda kosmosesse.

Realistlik?

Efektid on kooskõlalised füüsikaga.

Ebarealistlik?

Puhas fantaasia - gravitatsioon on "igav".

Modifitseeritud / alternatiivsed gravitatsiooniteooriad?

- Brans-Dicke teooria: Newtoni "konstant" pole konstant, vaid skalaarväli.
- Stringiteooria ja AdS/CFT: nähtav universum on neljamõõtmeline "braan".
- Braaniteoorias gravitatsioon kehtiv ka braani ümbritsevas ruumis.
- Kokkupõrked braanide vahel erinevatel aegadel kui aeg sõltub braanist.

1 Sissejuhatus

2 Diskussioon

3 **Kokkuvõte**

1. Maalt lahkumine on raske. Hoiame oma planeeti!

1. Maalt lahkumine on raske. Hoiame oma planeeti!
... kuni keegi avastab efekti, mis võimaldab lahkuda
Maalt gravitatsioonist hoolimata.

1. Maalt lahkumine on raske. Hoiame oma planeeti!
... kuni keegi avastab efekti, mis võimaldab lahkuda
Maalt gravitatsioonist hoolimata.
2. Kangelane võib päästa maailma.

1. Maalt lahkumine on raske. Hoiame oma planeeti!
... kuni keegi avastab efekti, mis võimaldab lahkuda
Maalt gravitatsioonist hoolimata.
2. Kangelane võib päästa maailma,
kui ta oskab füüsikat.

1. Maalt lahkumine on raske. Hoiame oma planeeti!
... kuni keegi avastab efekti, mis võimaldab lahkuda
Maalt gravitatsioonist hoolimata.
2. Kangelane võib päästa maailma,
kui ta oskab füüsikat.
3. Ükskõik milline on probleem ja kui suur:

1. Maalt lahkumine on raske. Hoiame oma planeeti!
... kuni keegi avastab efekti, mis võimaldab lahkuda
Maalt gravitatsioonist hoolimata.
2. Kangelane võib päästa maailma,
kui ta oskab füüsikat.
3. Ükskõik milline on probleem ja kui suur:
It only has to work once.