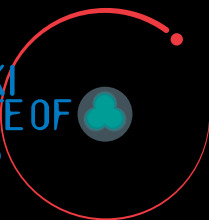




HELSINKI
INSTITUTE OF
PHYSICS



Fysiikkaa runoilijoille

Osa 3

Yleinen suhteellisuusteoria

Syksy Räsänen

Helsingin yliopisto

fysiikan osasto ja fysiikan tutkimuslaitos



Näyttämöstä näyttelijäksi

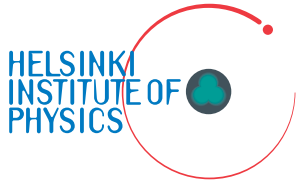


- Yleinen suhteellisuusteoria (ST) kasvoi suppean ST:n ja gravitaation sovittamisesta yhteen.
- Osoittautui, että gravitaation kuvaaminen vaatii kehittyvän ja vuorovaikuttavan aika-avaruuden.
- Suppea ST yhdisti ajan ja avaruuden aika-avaruudeksi, yleinen ST nosti sen toimijaksi.
- Avaruus kehittyy ajassa, aika kulkee eri tavalla eri paikoissa.



Gravitaatio ja suhteellisuusteoria

$$\vec{F} = -G_N \frac{m_p M_p}{r^2} \vec{e}$$

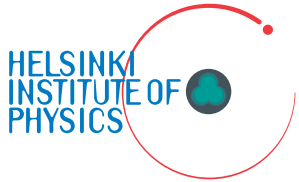


- Newtonin gravitaatio on ristiriidassa suppean suhteellisuusteorian kanssa.
- Newtonin teoriassa gravitaatio etenee äärettömällä nopeudella.
- Newton oli jättänyt avoimeksi kysymyksen siitä, mikä välittää gravitaatiota.



Suuri järjettömyys

$$\vec{F} = -G_N \frac{m_p M_p}{r^2} \vec{e}$$



- *”That Gravity should be innate, inherent and essential to Matter, so that one body may act upon another at a distance thro' a Vacuum, without the Mediation of any thing else, by and through which their Action and Force may be conveyed from one to another, is to me so great an Absurdity that **I believe no Man who has in philosophical Matters a competent Faculty of thinking can ever fall into it.** Gravity must be caused by an Agent acting constantly according to certain laws; but whether this Agent be material or immaterial, I have left to the Consideration of my readers.” (Newton 1692)*



Suomalaista vetovoimaa



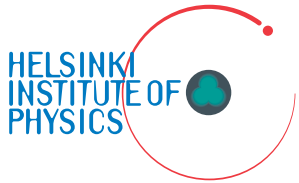
- Sähkömagneettinen kenttä välittää Coulombin lakia, joten voi yrittää nostaa gravitaatiokentän itsenäiseksi toimijaksi samaan tapaan.
- Ensimmäinen toimiva toteutus oli Gunnar Nordströmin (1881-1923) painovoimateoria vuonna 1913.
- Se oli sopusoinnussa suppean suhteellisuusteorian kanssa, yksinkertainen ja elegantti.
- Se on myös täysin väärä, kuten vuonna 1919 havaittiin.



Galilein selittämistä

$$\vec{F} = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \vec{e}$$

$$\vec{F} = m_h \vec{a} \quad \vec{F} = -G_N \frac{m_p M_p}{r^2} \vec{e}$$



- Einstein kulki eri reittejä kuin Nordström, ja nosti keskiöön Galilein putoamislain.
- Kappaleet liikkuvat sähkökentässä eri tavalla, mutta gravitaatiokentässä samalla tavalla. Miksi?
- Newtonin mekaniikka selittää tämän, jos hidas massa on yhtä suuri kuin painava massa, $m_h = m_p$. Mutta miksi näin on?
- Entäpä jos ne eivät ole *yhtä suuria*, vaan *sama asia*?
- Tällöin gravitaation laeissa on kyse liikkeen laeista, eli aika-avaruudesta.



Ekvivalenssiperiaate



- Galilei ja Newton yhdistivät levon ja tasaisen liikkeen.
- Einstein yhdisti tasaisen liikkeen ja **vapaan pudotuksen**, eli liikkeen vain gravitaation alaisena.
- Jos olet painottomana hississä, mistä tiedät oletko avaruudessa vai onko vaijeri vain katkennut? (Vrt. Galilein ajatuskoe liikkeestä laivan sisällä.)
- Idea, että gravitaatio ei vaikuta paikallisesti, tunnetaan nimellä **ekvivalenssiperiaate**.
- Einstein 1907: *"Elämäni onnellisin ajatus."*



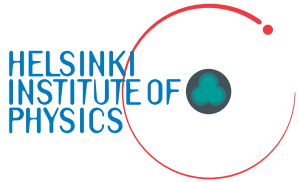
Tuumasta toimeen



- Yleisen suhteellisuusteorian löytäminen ekvivalenssiperiaatteesta lähtien kesti 8 vuotta.
- Sitä varten piti omaksua Bernhard Riemannin (1826-1866) ja muiden kehittämä **differentiaaligeometria**, joka käsittelee epäeuklidisia avaruuksia, ja yleistää se aika-avaruuteen.
- Fysiikan edetessä tarvitaan yhä hienompaa matematiikkaa maailman rakenteen yhä tarkempaan kuvaamiseen.
- Kyse ei ole vain saman tekemisestä tarkemmin, vaan uudenlaisten käsitteiden löytämisestä, jotka avaavat ovia uusiin teorioihin, ja ne uusiin havaintoihin.



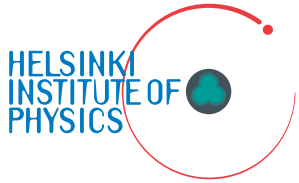
Aine puhuu aika-avaruudelle, aika-avaruus aineelle



- Yleinen suhteellisuusteoria on periaatteiltaan yksinkertainen mutta matemaattisesti hienostunut.
- Toisin kuin suppean suhteellisuusteorian tapauksessa, yleisen suhteellisuusteorian sisällön kuvaaminen kunnolla ei onnistu lyhyesti ilman edistynyttä matematiikkaa.
- Siinä on kaksi osaa:
 - Gravitaatio on aika-avaruuden **kaarevuuden** ilmentymä.
 - Kaarevuuden lähteenä on aine.
- *"Matter tells space how to curve, and space tells matter how to move."* (Misner, Thorne ja Wheeler: *Gravitation*, 1973)



Kaarevuus ja laakeus



- Avaruus on euklidinen, jos etäisyydet ovat kaikkialla tällaiset:

$$L^2 = (\Delta x)^2 + (\Delta y)^2$$

- Suppean suhteellisuusteorian Minkowskin aika-avaruus on epäeuklidinen, koska ajan edessä on miinusmerkki:

$$M^2 = -c^2(\Delta t)^2 + (\Delta x)^2$$

- Minkowskin avaruus on kuitenkin **laakea (flat)**, koska se on tasainen kaikkialla.
- Laakean vastakohta on **kaareva (curved)**.



Kaareva avaruus



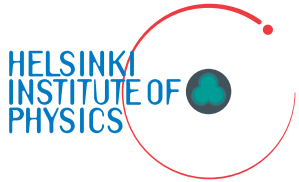
- Avaruus on kaareva, jos etäisyydet riippuvat paikasta:

$$L^2 = A(x, y)(\Delta x)^2 + B(x, y)(\Delta y)^2 + C(x, y)\Delta x\Delta y$$

- Tällainen avaruus on epäeuklidinen, koska etäisyydet riippuvat paikasta.
 - Esimerkiksi pallon pinta.
- Pinnan muoto (eli kaarevuus) tiivistyy pisteiden välisiin etäisyyksiin.
- Maapallon pinnan muodon voi kertoa luettelemalla kaikkien pisteiden etäisyyden toisistaan.



Kaareva aika-avaruus



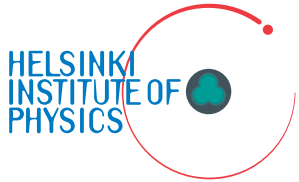
- Yleisen suhteellisuusteorian aika-avaruus on kaareva:

$$M^2 = -A(t, x)c^2(\Delta t)^2 + B(t, x)(\Delta x)^2 + C(t, x)c\Delta t\Delta x$$

- Se on epäeuklidinen kahdella eri tavalla: miinusmerkin takia (aika-avaruus) ja ei-laakeuden takia (kaarevuus).
- Paikka- ja aikavälit voivat muuttua ajassa ja paikassa, eli aika-avaruuden muoto on erilainen sen eri osissa.



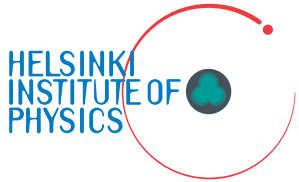
Kaarevuus ja ekvivalenssiperiaate



- Yleisen suhteellisuusteorian aika-avaruus on paikallisesti Minkowskin avaruus.
 - Paikallisesti ei ole gravitaatiota.
- Kaarevan aika-avaruuden voi ymmärtää kokoelmana Minkowskin avaruuksia, jotka on nivottu yhteen.
- Vrt. pallon pinta on joka kohdassa paikallisesti tasainen: jos kertoo, miten tasot nivoutuvat toisiinsa, tietää, miten pinta on kaareutunut.



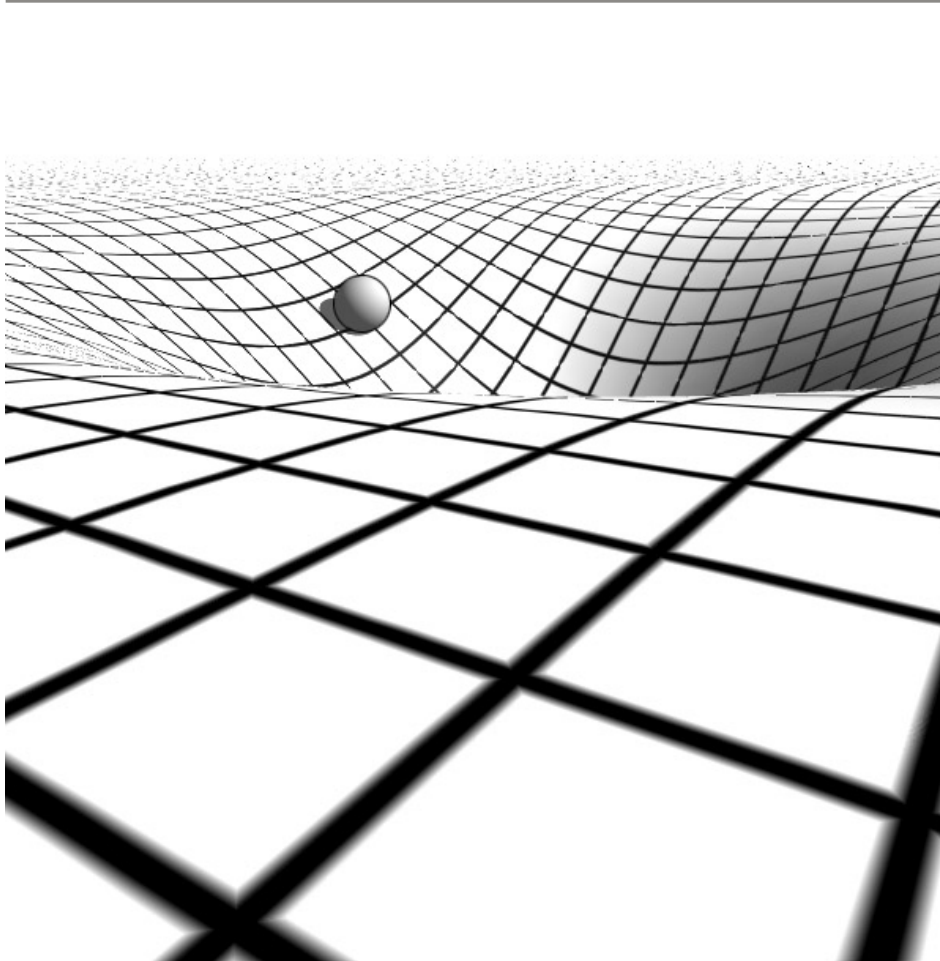
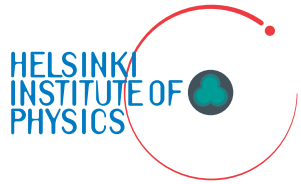
Ei ympyrä, vaan suora



- Vapaassa pudotuksessa kappaleet liikkuvat suoraan kaarevassa aika-avaruudessa.
- Jos ajattelee aika-avaruuden olevan laakea, liike näyttää kaartuneelta.
- Kyse on liikkeestä aika-avaruudessa, ei avaruudessa: Maapallon rata näyttää lähes suoralta.
- Kopernikuksesta Einsteininiin, ympyrästä suoraan.
- Voimat työntävät kappaleita pois suorilta reiteiltä. (Gravitaatio ei ole voima.)

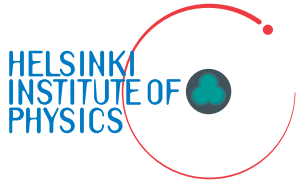


Kaksiulotteinen analogia





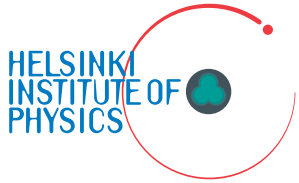
Donitsi vs. pallo



- Ei ole ylimääräistä ulottuvuutta, jossa kaareutuminen tapahtuisi.
- Kyse ei ole ulkoisesta kaarevuudesta, vaan sisäisestä kaarevuudesta.



Aika-avaruuden numerot



- Maxwellin teoriassa on kaksi kenttää, joilla on suunta. (Kolme numeroa per paikka per kenttä.)
- Yleisessä suhteellisuusteoriassa aika-avaruuden kaarevuuteen liittyy kymmenen numeroa per paikka.



Oikean symmetrian löytäminen



- Newtonin mekaniikan ytimessä on Galilei-symmetria, suppean suhteellisuusteorian Lorentz-symmetria.
- Molempien mukaan fysiikan lait ovat samoja kaikille vakionopeudella liikkuville havaitsijoille.
- Einstein & kumpp. etsivät pitkään tämän yleistystä yleisen ST:n tapaukseen, kunnes totesivat, että fysiikan lakien pitää olla samoja kaikille havaitsijoille, liiketilasta riippumatta.
- Tämä on erittäin rajoittava vaatimus.



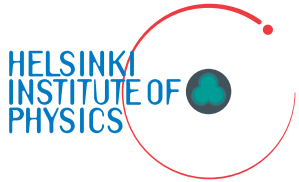
Einsteinin yhtälö



- Vaatimus siitä, että lait ovat samat kaikille (plus tietyt matemaattiset ehdot) määräävät aineen ja kaarevuuden yhteyden (lähes) yksikäsitteisesti.
- Vuonna 1915 Einstein ja David Hilbert (1862-1943) löysivät yleisen suhteellisuusteorian (lähes) lopullisen muodon, joka ilmenee **Einsteinin yhtälössä**.
- (Sanaan ”lähes” palataan kosmologiaosuudessa!)



Aine määrää kaarevuuden



- Einsteinin yhtälö on kymmenen monimutkaisen yhtälön kokoelma.
- Sen mukaan gravitaation lähteenä ei ole massa, vaan energia. (Vrt. $E=mc^2$.)
 - Myös massattomat hiukkaset gravitoivat.
- Myös paine gravitoi, samoin kuin muut aineen ominaisuudet, kuten pyöriminen.
- Auringon massa ei vedä Maata puoleensa.
 - Auringon massaan liittyvä energia kaareuttaa aika-avaruutta, jossa Maa liikkuu.



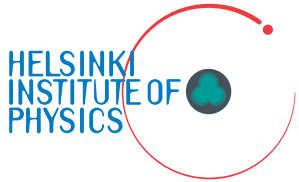
Aika-avaruus toimijana



- Yleinen suhteellisuusteoria on yhtenäisteoria gravitaatiosta, liikkeestä ja aika-avaruudesta.
- Aika-avaruus on absoluuttinen.
- Aika-avaruus on aktiivinen ja muuttuu: se vaikuttaa aineeseen, ja aine vaikuttaa siihen.
- Aika-avaruus on kaartunut eri tavalla eri kohdissa, aineen jakaumasta riippuen.



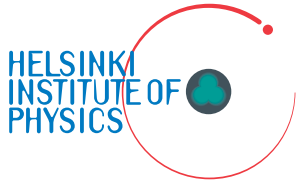
Avaruuden kellokoneisto



- Yleinen suhteellisuusteoria on deterministinen, aivan kuten klassinen fysiikka.
- Jos jollain hetkellä on määrätty
 - aine,
 - avaruus, ja
 - miten nopeasti avaruus muuttuu,niin Einsteinin yhtälö määrittää tulevaisuuden ja menneisyyden yksikäsitteisesti.



Ennustaminen ja poikkeamien selittäminen



- Teoriasta voi johtaa monenlaisia lausuntoja maailmasta.
- Niitä lausuntoja, jotka on mahdollista tarkistaa, mutta joita ei ole vielä tarkistettu, sanotaan **ennustuksiksi**.
 - Havainnot on voitu jo tehdä, kunhan niitä ei ole käyty läpi.
- Ennustukset ovat keskeisiä teorioiden varmentamiselle: ilman niitä ei voi tietää, onko teoria oikein. (**Prediction**.)
 - Helppo keksiä selityksiä asioille, jotka jo tietää.
- Mutta myös tunnettujen poikkeamien selittäminen todistaa teorian oikeellisuudesta. (**Postdiction**: mennustus?)
 - Newton: planeettojen ja Kuun radat.



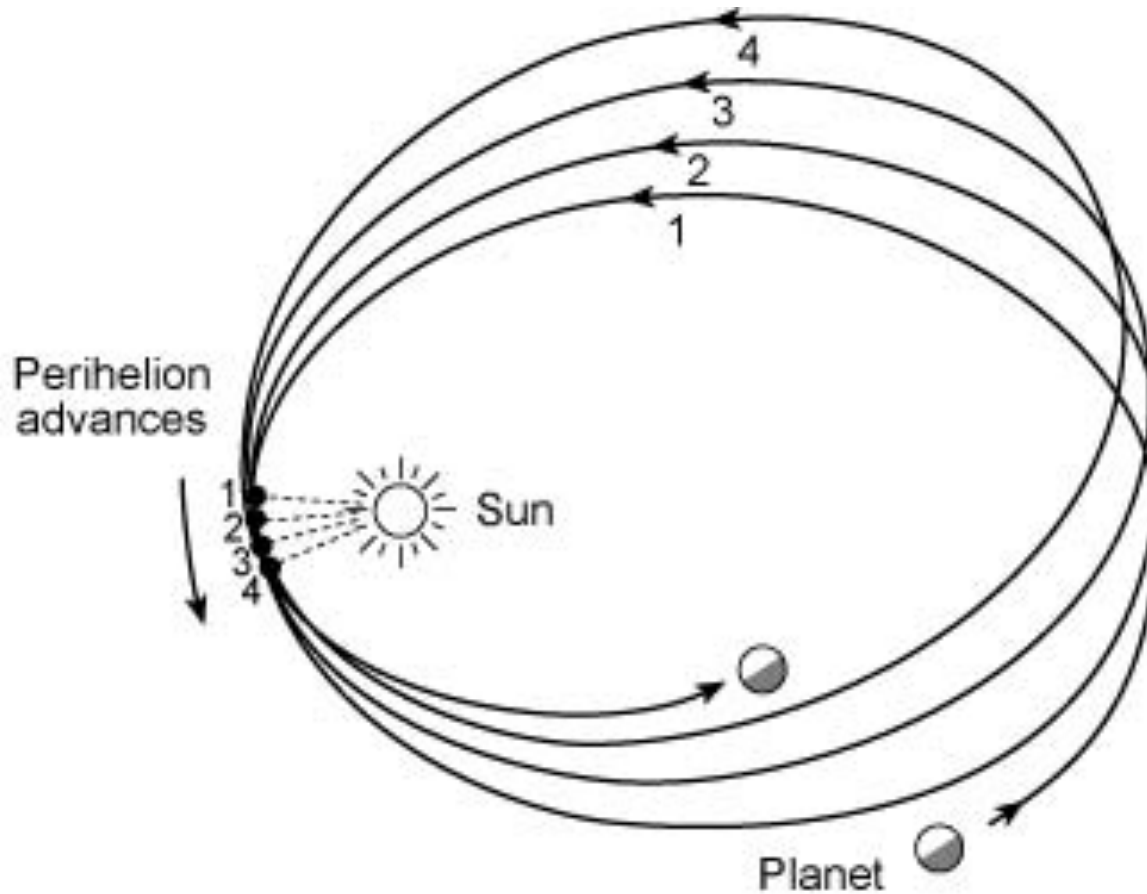
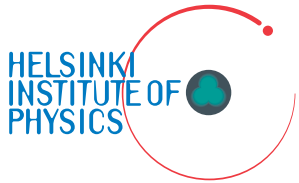
Merkuriuksen rata



- Newtonin teorian ja Uranuksen radan perusteella ennustettiin vuonna 1846, että Neptunus on olemassa.
- Merkuriuksen radassakin havaittiin poikkeamia vuodesta 1859 alkaen.
- Jos olisi vain Merkurius ja Aurinko, niin Newtonin mekaniikan mukaan niiden lyhin etäisyys (**periheli**) olisi samassa kohdassa joka kerroksella.
- Havaintojen mukaan periheli kuitenkin muuttuu: Merkuriuksen ellipsi kääntyy.

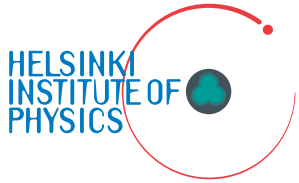


Rataellipsin kääntyminen





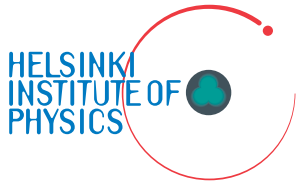
Vulkanus



- Merkuriuksen radan kiertymä on hyvin pieni, ja siitä 93% selittyy tunnettujen planeettojen vaikutuksella.
- Ehdotettiin, että 7% selittyisi tuntemattoman planeetan vaikutuksella.
- Newtonin teoria ennusti Vulkanus-planeetan.
 - Vrt. Maan ja Kuun pienimmän etäisyyden muutos.
- Vulkanuksesta tehtiinkin pian havaintoja.
 - Ne olivat kuitenkin väärin.



Yleisen suhteellisuusteorian menestys



- Yleinen suhteellisuusteoria selittää Merkuriuksen radan ylimääräisen kiertymisen täsmällisesti.
- Kiertymistä pidetään nykyään osoituksena Newtonin teorian pätevyysalueen rajan ylittymisestä, ja todisteena yleisen ST:n puolesta.
- Kyseessä ei ole ennustus, koska Einstein tunsi havainnot teoriaa kehittäessään. (Vaikka teoriassa ei olekaan säätämisen varaa.)



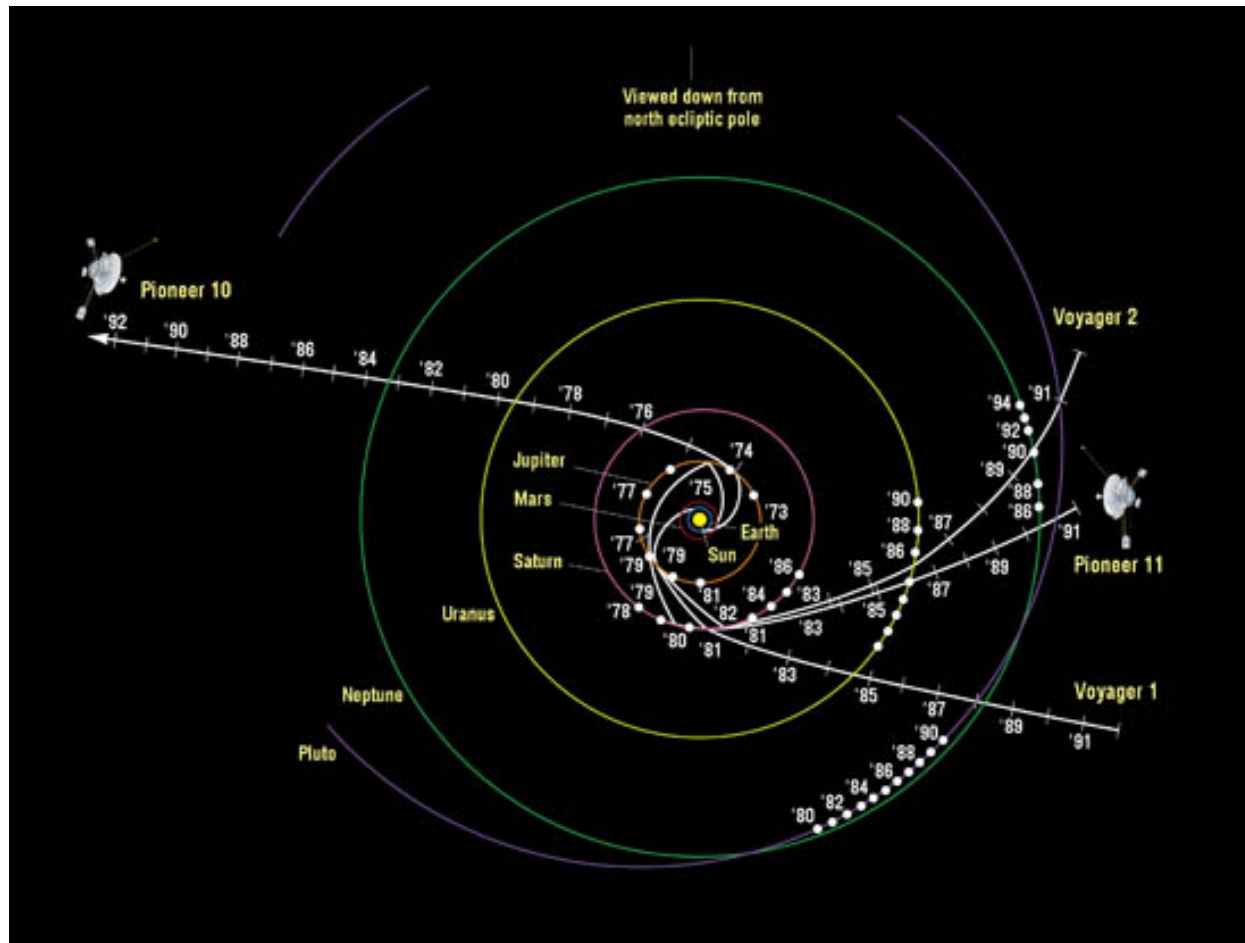
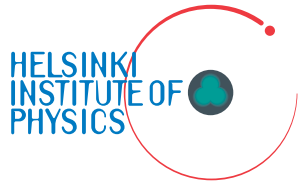
Pioneer-anomalia



- Luotaimet Pioneer 10 ja 11 laukaistiin 1972 ja 1973 tutkimaan Jupiteria ja Saturnusta.
- Niiden radiosignaali on siistein mittaustulokset liikkeistä Aurinkokunnassa.
- Luotaimilla oli ylimääräinen kiihtyvyys kohti Aurinkoa etäisyyksillä 20-70 AU.
- Selittyi vuonna 2012 luotainten lämpösäteilyllä.

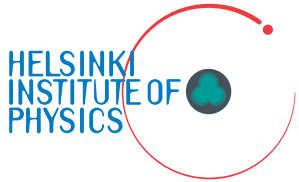


Pioneer-anomalia





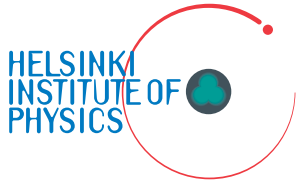
Kaikki poikkeamat eivät kumoa teoriaa



- Havaintojen ja teorian välillä on usein poikkeamia.
- Yleisen suhteellisuusteorian ja taivaan liikkeiden kohdalla on kolme mahdollista selitystä:
 - Tuntematon aine. (Uranus -> Neptunus)
 - Uusi gravitaatiolaki. (Merkurius -> yleinen ST)
 - Virheet havainnoissa tai niiden tulkinnassa. (Pioneer)
- Useimmiten kyse on kolmannesta vaihtoehdosta.



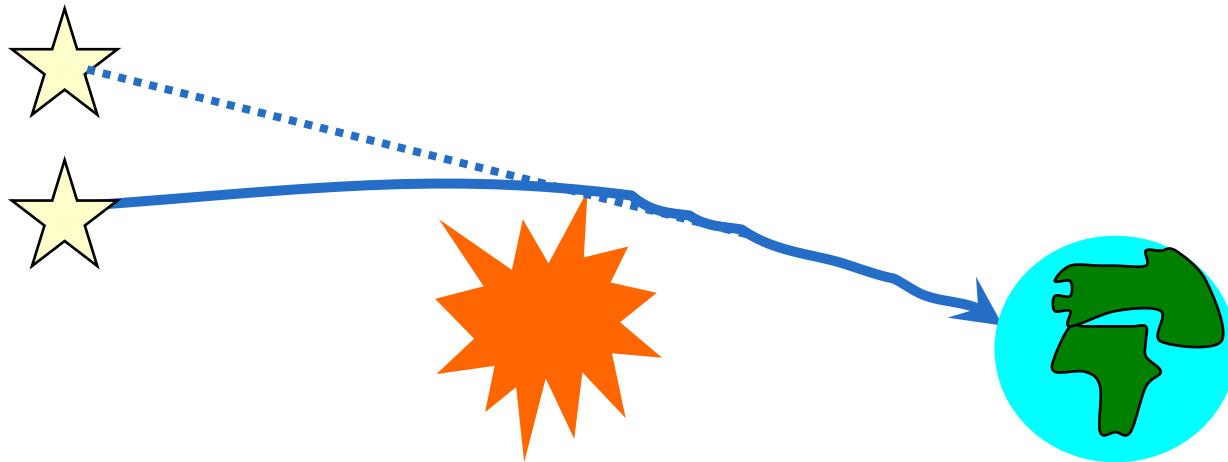
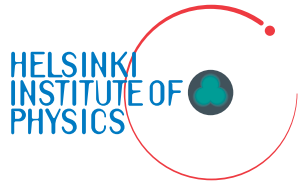
Valon taipuminen



- Yleisen suhteellisuusteorian mukaan gravitaatiossa on kyse aika-avaruuden kaareutumisesta.
- Valo kulkee aika-avaruudessa, eli gravitaatio vaikuttaa valoon.
- Valo taipuu gravitaatiokentässä.
- Auringon lähellä on vahvin gravitaatiokenttä Aurinkokunnassa.
- Aurinko on kirkas: odotetaan auringonpimennystä.

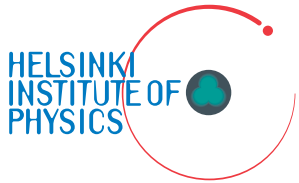


Valon taipuminen Auringon lähellä





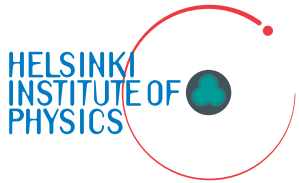
Ensimmäinen varmennettu ennustus



- Vuoden 1919 auringonpimennyksen aikaan tehtiin mittauksia Brasiliassa ja Príncipessä.
- Yleinen suhteellisuusteoria ennusti tähtien sijainnin muuttuvan asteen tuhannesosan puolikkaan verran.
 - Nordströmin teorian mukaan tähtien paikka ei muutu.
 - Newtonin voi tulkita ennustavan joko ei muutosta tai puolet yleisen ST:n muutoksesta.
- Havaintojen perusteella yleinen ST oli oikein, muut väärin.
- Sittemmin yleinen ST on testattu aurinkokunnassa tarkkuudella 10^{-5} .



Tieteellinen vallankumous 1919



- The Times –lehden otsikko:
Revolution in science
New theory of the Universe
Newtonian ideas overthrown
- Yleinen suhteellisuusteoria hyväksyttiin melko pian, ja Einsteinista tuli ensimmäinen tiedejulkkis.
- Einstein sai Nobelin palkinnon vuonna 1921, mutta ei yleisestä suhteellisuusteoriasta. (Sen tiimoilta myönnettiin Nobel vasta vuonna 1993.)



Kohti äärimmäisyyttä



- Kuten Newtonin teorian kehittämisessä, yleisen suhteellisuusteorian kohdalla näkyy taivaan tarkkailun merkitys: havainnot tarkkoja, toistettavia, yksinkertaisia.
- Lisäksi olosuhteet, jollaisia ei ole Maapallolla: Auringon vahvempi gravitaatiokenttä, isot radat.
- Yleinen suhteellisuusteorian leimalliset piirteet tulevat esille äärimmäisissä olosuhteissa, kuten **mustissa aukoissa**.



Mustat aukot



- Karl Schwarzschild (1873-1916) esitti joulukuussa 1915 yleisen suhteellisuusteorian Einsteinin yhtälön ensimmäisen täsmällisen ratkaisun.
- Se kuvaa tyhjää aika-avaruutta pallosymmetrisen massan ulkopuolella.
- Esimerkiksi Auringon tai Maapallon gravitaatiokenttä.
- Ratkaisulla on silmiinpistävä piirre. Jos massan pakkaa tarpeeksi pienen säteen sisään, valo ei enää pääse pois: syntyy musta aukko.



Tapahtumahorisontti



- Klassisessa mekaniikassa tarvitaan tietty määrä energiaa kappaleen vapauttamiseksi planeetan pinnalta.
- Mitä tiheämpi kappale, sitä enemmän energiaa tarvitaan, mutta poispääsy on aina mahdollista.
- Jos yleisessä suhteellisuusteoriassa energiaa pakkaa tarpeeksi pienen säteen sisään, muodostuu **tapahtumahorisontti**, jonka takaa ei pääse pois.
 - Maapallolle säde on 9 mm, Auringolle 3 km.



Kaarevuus, ei voima



- Klassisessa mekaniikassa painovoima vetää massoja. Mitä massiivisempi planeetta, sitä enemmän työntövoimaa tarvitaan pois pääsemiseen.
- Yleisessä suhteellisuusteoriassa gravitaatiossa on kyse aika-avaruuden kaareutumisesta, ei voimasta.



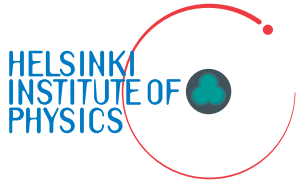
Avaruus käpertyy itseensä



- Mustassa aukossa aika-avaruus on kaareutunut niin paljon, että sen sisällä voi kulkea vain kohti keskustaa, ei poispäin.
 - Aivan kuten ajassa voi kulkea vain eteenpäin.
- Mustaankuonon sisään voi mennä, mutta sieltä ei voi tulla ulos.
- Sillä, miten voimakkaasti rimpuilee, ei ole merkitystä.
- Aika-avaruutta rajaavat **horisontit** ovat yleisen suhteellisuusteorian tärkeä piirre.



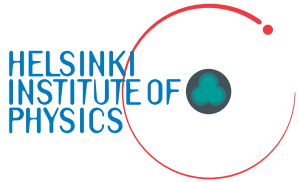
Gravitaatiosta aiheutuva aikadilataatio



- Schwarzschildin ratkaisussa aika kulkee sitä hitaammin, mitä lähempänä keskipistettä on.
- Tämä pitää paikkansa myös silloin, kun kyseessä ei ole musta aukko.
- Esimerkiksi Maapallolla kellot käyvät hitaammin lähempänä maanpintaa.
- Mustan aukon tapauksessa aika hidastuu rajatta lähestyttäessä tapahtumahorisonttia.



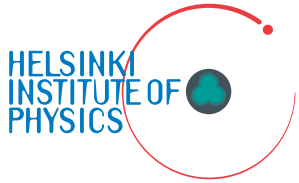
Marginaalista valtavirtaan



- Mustia aukkoja pidettiin pitkään teoreettisina kummajaisina.
- Nykyään ne ovat astrofysiikan keskeisiä kohteita, joilla on tärkeä rooli galaksien kehityksessä.
- Mustia aukkoja syntyy tähtien romahtaessa. (Paine gravitoidi.)
- Linnunradan keskustassa on neljän miljoonan Auringon massainen musta aukko.



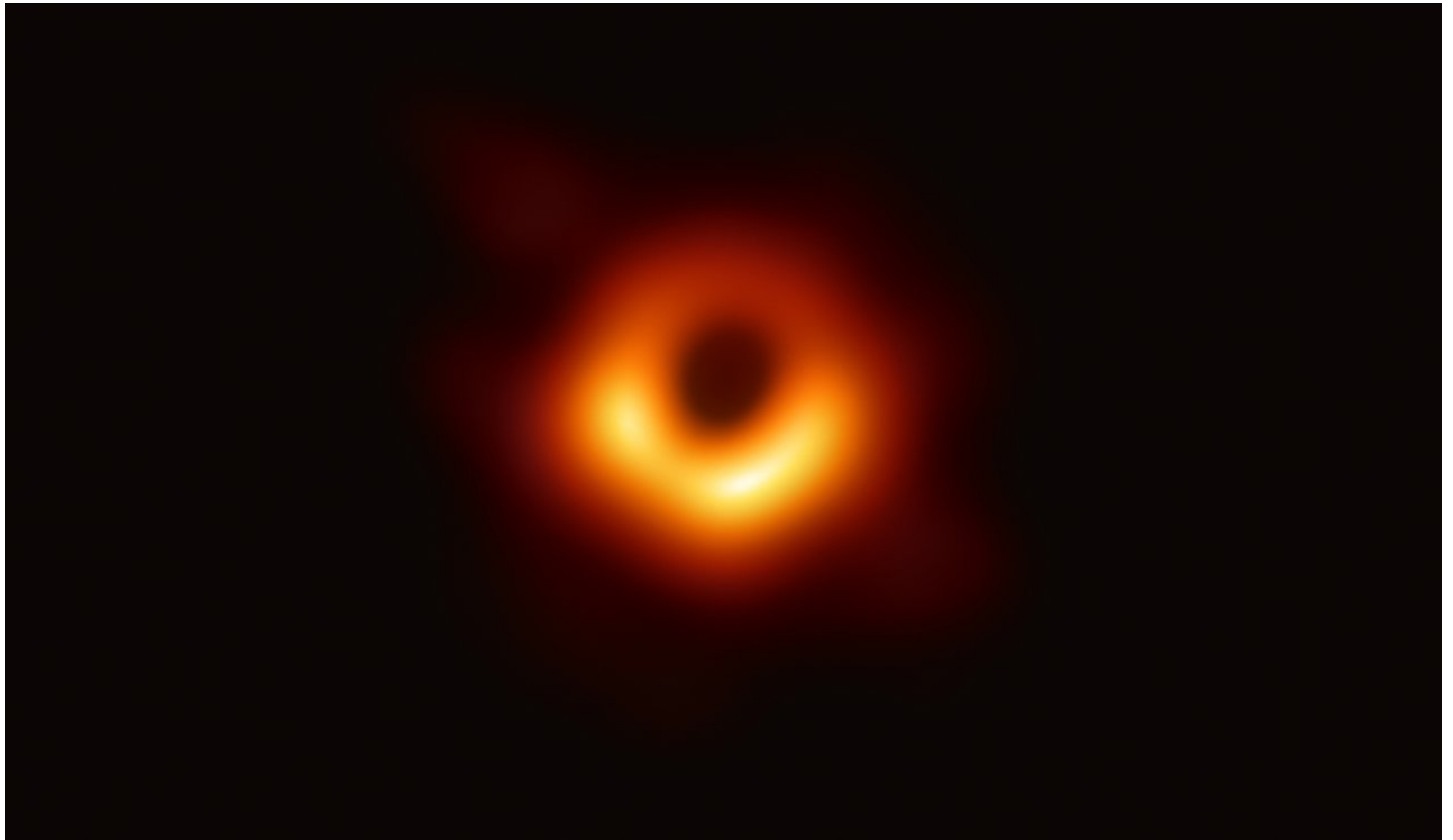
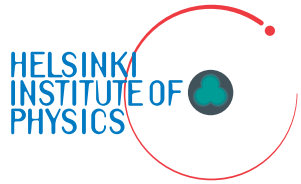
Äärimmäisyyden reunalta



- 10.4.2019 Einstein Horizon Telescope -koeryhmä julkisti ensimmäisen kuvan mustan aukon tapahtumahorisontin tiimoilta.
- Galaksin M87 keskellä on musta aukko, jonka massa on kuusi miljardia Auringon massaa.
- M87 on 55 miljoonan valovuoden päässä, ja sen mustan aukon kulmakoko taivaalla on suunnilleen sama kuin Linnunradan mustan aukon.



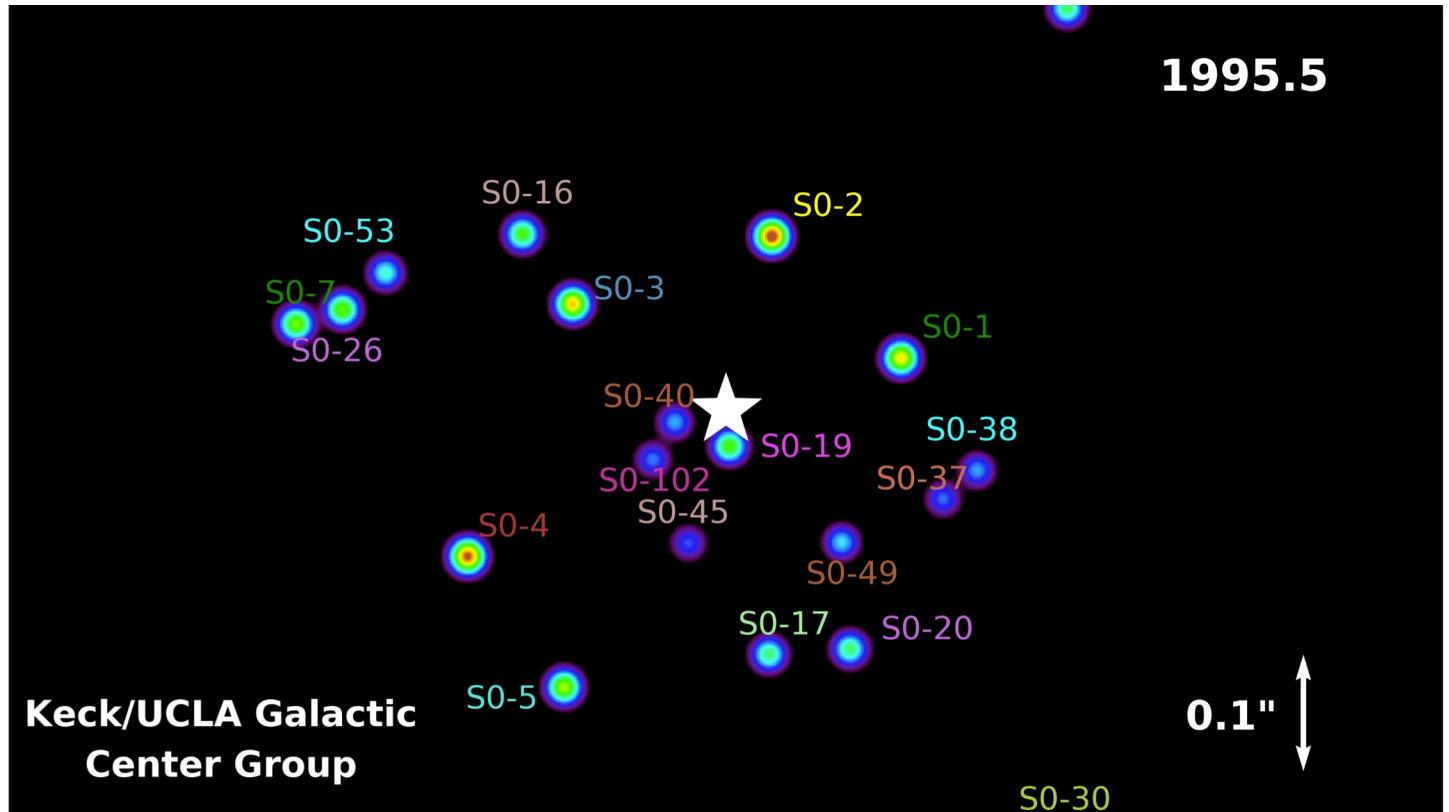
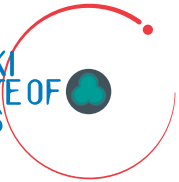
Kiekon katsomista





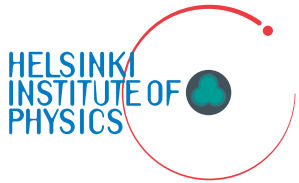
Lähin jättiläinen

HELSINKI
INSTITUTE OF
PHYSICS





Suora näkymä äärimmäisyyteen

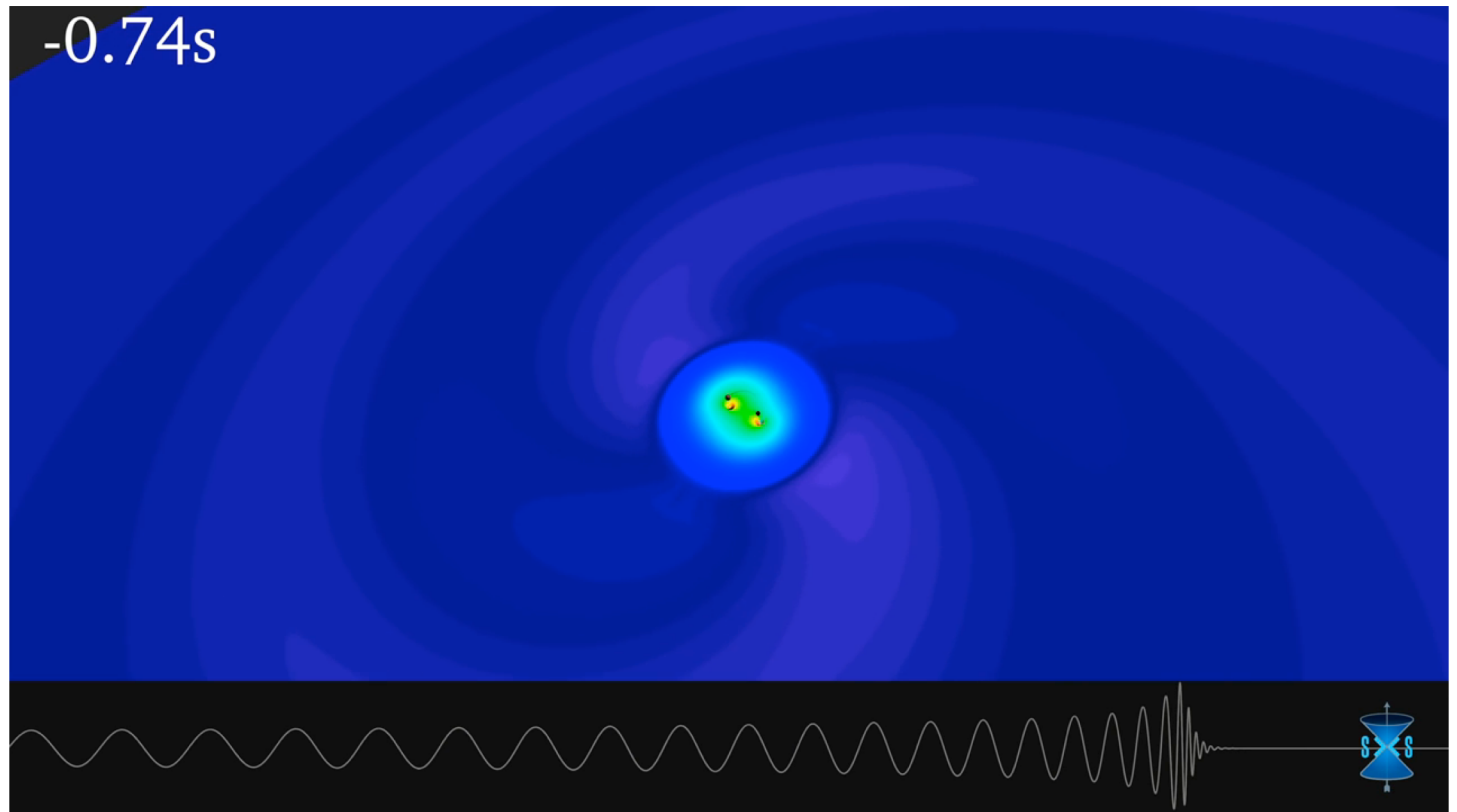
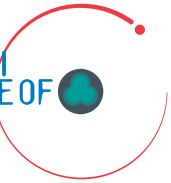


- 14.9.2015 LIGO-koeryhmä teki ensimmäisen havainnon mustien aukkojen törmäyksestä. (Nobelin palkinto 2017.)
- Miljardi vuotta sitten miljardin valovuoden päässä kaksi 30 Auringon massaista mustaa aukkoa törmäsi.
- Niiden liikkeissä näkyy, kuinka kahden kappaleen kiertoliike on paljon ellipsiä monimutkaisempi.



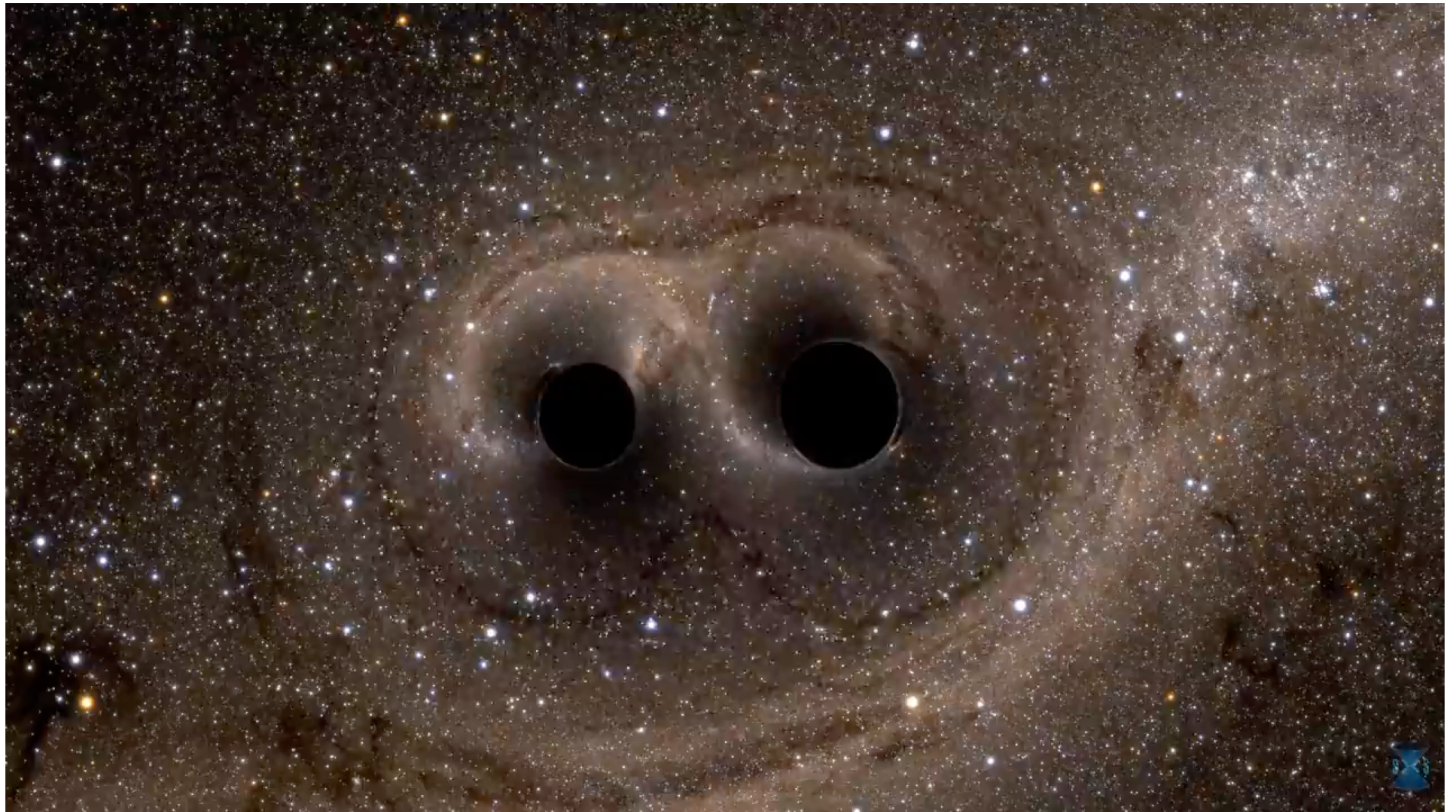
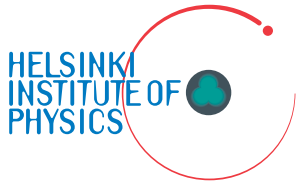
Syyskuun sulautuminen

HELSINKI
INSTITUTE OF
PHYSICS





Valon taipuminen





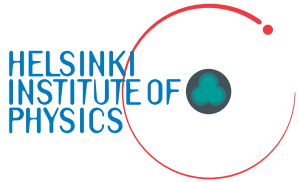
Avaruuden aaltoilua



- Gravitaatioaallot ovat avaruuden värähtelyä. (Pituudet muuttuvat eri tavalla eri suunnissa.)
- Valo on sähkökentän ja magneettikentän aaltoilua, gravitaatioaallot ovat avaruuden aaltoilua.
- Ne liikkuvat valonnopeudella aineesta välittämättä.
- Erittäin heikkoja.
- Gravitaatioaaltojen vaikutus kaksoistähtien liikkeeseen havaittiin jo 1974. (Nobelin palkinto 1993.)



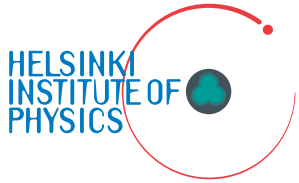
Yleinen suhteellisuusteoria ja Pokémon GO



- Yleisen ST:n ainoa käytännön sovellus on GPS-paikannusjärjestelmä.
- GPS perustuu eri satelliiteista tulevien radiosignaalien ajoituksen vertaamiseen.
- Satelliittien suuremman nopeuden takia niiden kello jätättää 7 mikrosekuntia päivässä, ja heikomman gravitaatiokentän takia edistää 45 mikrosekuntia päivässä.
 - Satelliittien kellot edistävät 38 mikrosekuntia päivässä.
 - Valo kulkee tuossa ajassa 11 km.
- Aikadilataatio on tärkeä taskussamme oleville työkaluille.



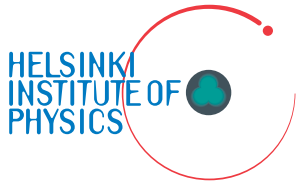
Kohti kaikkeutta



- Yleinen suhteellisuusteoria teki mahdolliseksi aika-avaruuden käsittelemisen isoimmassa mahdollisessa mittakaavassa.
- **Kosmologia** tutkii maailmankaikkeutta kokonaisuutena.
- Kosmologia on yleisen suhteellisuusteorian merkittävin sovellus. Se on osaltaan mullistanut käsityksemme maailmasta ja auttanut perustavanlaatuisen lakien löytämisessä.
- Palataan kosmologiaan yksityiskohtaisesti osassa 6.



Miljardi vuotta minuutissa



- Maapallon massan takia aika kulkee vain miljardisosan hitaammin.
- Mustan aukon tapauksessa aika hidastuu rajatta lähestyttäessä tapahtumahorisonttia.
- Käymällä käännyssä tapahtumahorisontin luona on mahdollista nousta takaisin miten paljon myöhemmin tahansa: matka tulevaisuuteen.



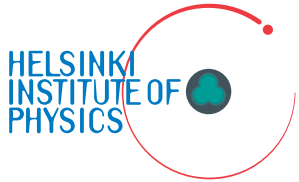
Kohti menneisyyttä



- Monien varmennettujen ihmeiden lisäksi yleisessä suhteellisuusteoriassa on piirteitä, joista ei ole selvää kuvaavatko ne todellisuutta.
- Yksi esimerkki on aikamatkailu.
- Ei ole absoluuttista aikaa, ja aika voi kulkea eri tavalla eri paikoissa.
- Yleinen suhteellisuusteoria ei kiellä sitä, että olisi reittejä, joita pitkin kulkee taaksepäin ajassa.



Pyörimällä menneisyyteen



- Yksinkertaisin esimerkki aikakoneesta on tietynlainen pyörivä musta aukko.
- Lähellä keskustaa aika ja avaruus vaihtavat roolia. Laskeutumalla alas ja kiertämällä voi tulla ulos ennen kuin meni sisään.
- Mustat aukot, jotka pyörivät tarpeeksi nopeasti, jotta ne muodostavat sillan menneisyyteen, ovat epästabiileja: niitä ei ole todellisuudessa olemassa.



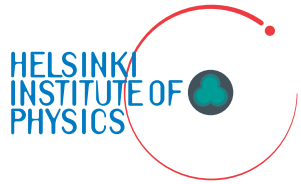
Aikakoneita rakentamaan?



- On muitakin mahdollisuuksia: nopeasti pyörivä avaruus yleensä sallii matkaamisen taaksepäin ajassa.
- Tarvittava tiheys ja pyörimisnopeus ovat kaukana teknologiamme saavuttamattomissa.
- Mutta yleinen ST ei kiellä aikamatkailua: se on itse asiassa teorian aika yleinen piirre.



Quantum Break



<http://www.dualshockers.com/2016/02/01/xbox-one-exclusive-quantum-break-gets-new-artwork-showing-monarch-soldiers-and-tech/>



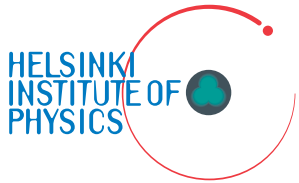
Tuntemattomat rajat



- On epäselvää, onko aikamatkailu yleisen suhteellisuusteorian pätevyysalueen ulkopuolella.
 - Vrt. liike yli valonnopeudella klassisessa mekaniikassa.
- Stephen Hawking (1942-2018) esitti **aikajärjestyksen suojelemiskonjektuurin (chronology protection conjecture)**, jonka mukaan kvanttiteoria estäisi aikamatkailun.
- Ei tiedetä, onko aikamatkailu mahdollista vai mahdotonta.



Yksi pilari kahdesta



- Yli 100 vuotta sitten löydetty yleinen suhteellisuusteoria on yhä perustavanlaatuinen teoria ajasta, avaruudesta ja gravitaatiosta.
- Se osoitti, että näennäinen vetovoima on vain pieni osa gravitaation rikkaasta ilmiömaailmasta, ja avasi uudenlaisen tavan hahmottaa maailmankaikkeutta.
- Yleiselle ST:lle on esitetty satoja laajennuksia, mutta mitään poikkeamia ei ole vielä varmistettu.
- Toinen perustavanlaatuinen teoriamme on **kvanttikenttäteoria**, joka on laajentanut maailmankuvaa eri suuntaan.