

Fysiikkaa runoilijoille

Osa 1

Klassinen fysiikka

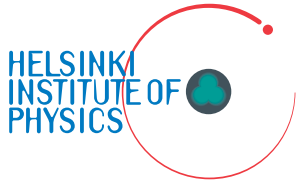
Syksy Räsänen

Helsingin yliopisto

fysiikan osasto ja fysiikan tutkimuslaitos

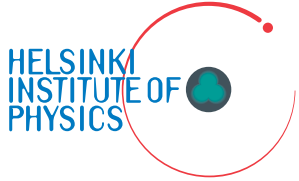


Kurssin käytännöt



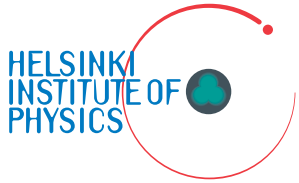
- Luennot 6.9.-19.10. Zoomissa ovat avoimia kaikille.
 - ma ja ti 10.15-12.00
- Luentojen aikana kysyminen on suositeltavaa.
- Luentotauolla voi kysyä chatissä.
- Moodlessa voi kysyä anonyymisti, voi kysyä sähköpostitse (syksy.rasanen@helsinki.fi).
- Luentojen Powerpoint- ja pdf-tiedostot tulevat kotisivulle etukäteen, nauhoitukset jälkikäteen.

<https://www.mv.helsinki.fi/home/syrasane/run2021/>



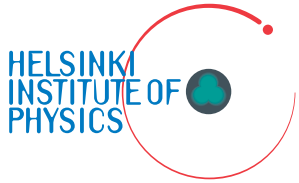
Kurssin suorittaminen

- Jos aikoo suorittaa kurssin, pitää ilmoittautua SISUssa.
- Suorittaminen edellyttää:
 - Viikkotehtävien tekemistä Moodlessa.
 - Loppuesseen kirjoittamista.
 - Palautekyselyn täyttämistä.



Kurssin arvostelu

- Arvostelu asteikolla 0-5.
- Arvosana perustuu vain loppuesseeseen. Viikkotehtävät eivät vaikuta arvosanaan.
- Loppuesseen pituus on 15 000-30 000 merkkiä ja deadline 14.11..
- Kannattaa tehdä muistiinpanoja kurssin edetessä.

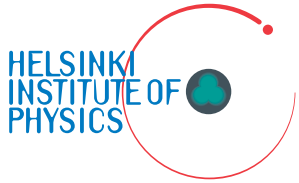


Mitä kurssi on ja ei ole

- Tämä ei ole tieteen historian eikä filosofian kurssi.
- Kyseessä on fyysikon kuvaus fysiikan teorioiden sisällöstä ja kehityksestä sekä fysikaalisesta ajattelusta.
- Ei edellytä esitietoja fysiikasta eikä sisällä laskemista.
- Tavoitteena on selventää fysiikan teorioita, ilmiöitä ja maailmankuvallista merkitystä yleistajuisesti.
- Luennot eivät (toivottavasti) ole synkkä yksinpuhelu.



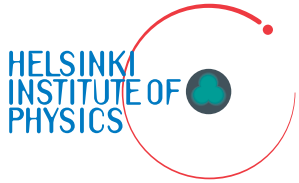
Motivaatio



- Fysiikka on mullistanut maailman.
- Sen sovellukset, kuten höyrykone ja sähkö, olivat teollisen vallankumouksen ytimessä.
- Lähes kaikki nykYTEknologia (elektroniikka, kemia, ...) pohjaa kvanttimekaniikkaan. Arkemme on kvanttimekaniikan läpitunkema.
- Mutta suhteellisuusteoria ja kvanttifysiikka ovat myös muuttaneet kuvamme maailmasta ja sellaisista asioista kuin aika, avaruus, aine, oleminen ja tapahtuminen.



Aiheet

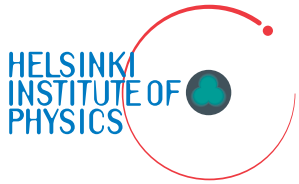


1. Klassinen fysiikka
2. Suppea suhteellisuusteoria
3. Yleinen suhteellisuusteoria
4. Kvanttimekaniikka
5. Kvanttikenttäteoria
6. Kosmologia
7. Kohti kaiken teoriaa

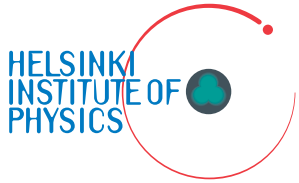
Kotisivulla on hajanainen kokoelma lähteitä.



Mitä on fysiikka?

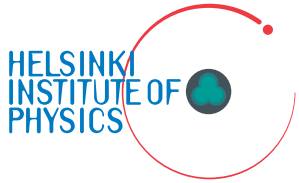


- Fysiikka on **empiirinen** tapa **matemaattisesti** mallintaa havaittavaa todellisuutta eli **luontoa** ja ymmärtää sitä **teorioiden** avulla. (En erottele fysiikkaa, kemiaa jne..)
 - Luontoa kutsutaan myös nimellä **maailma**.
 - Matematiikka tutkii havainnoista riippumattomia totuuksia.
 - Filosofia ei (yleensä) ole matemaattista eikä empiiristä.
 - Astrologia käyttää matemaattisia malleja havaintojen ennustamiseen, mutta ei havaintoja mallien rakentamiseen ja hylkäämiseen. (Ennusteiden kaksi roolia.) (Makrotaloustiede?)
- **Luonnonlaki** on matemaattinen säännönmukaisuus luonnossa. (Varmennettu luonnonlaki on **kokeellisesti testattu**.)



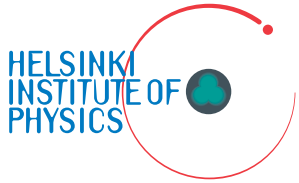
Perustavanlaatuiset lait

- Fysiikan voi jaotella **fundamentaaliin** (perustavanlaatuiseen) ja **emergenttiin**.
- Fundamentaaleja luonnonlakeja ei *edes periaatteessa* voida toistaiseksi johtaa mistään.
- Emergentit lait periaatteessa palautuvat muihin lakeihin.
 - Käytännössä niitä ei välttämättä osata palauttaa muihin lakeihin.
 - Emergentit lait ovat usein kvalitatiivisesti erilaisia kuin niiden pohjalla olevat lait. (Esimerkiksi kemia vs. kvanttikenttäteoria.)
- Se mikä on tänään perustavanlaatuista, on huomenna emergenttiä.
- Keskityn perustavanlaatuisiin luonnonlakeihin.



Kohti klassista fysiikkaa

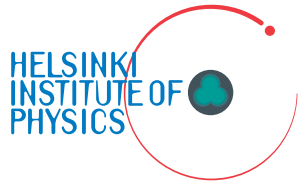
- Ensimmäinen fysiikaksi tunnistettava teoria on Isaac Newtonin (1643-1727) **klassinen fysiikka**.
- *"If I have seen further, it is by standing on the shoulders of giants."* (Newton 1676)
- Fysiikka on **kumulatiivinen** tiede, ja samalla tiede, jossa historialla ei ole merkitystä.
- Tutkimuskohteena on luonto, ei näkemykset luonnosta.



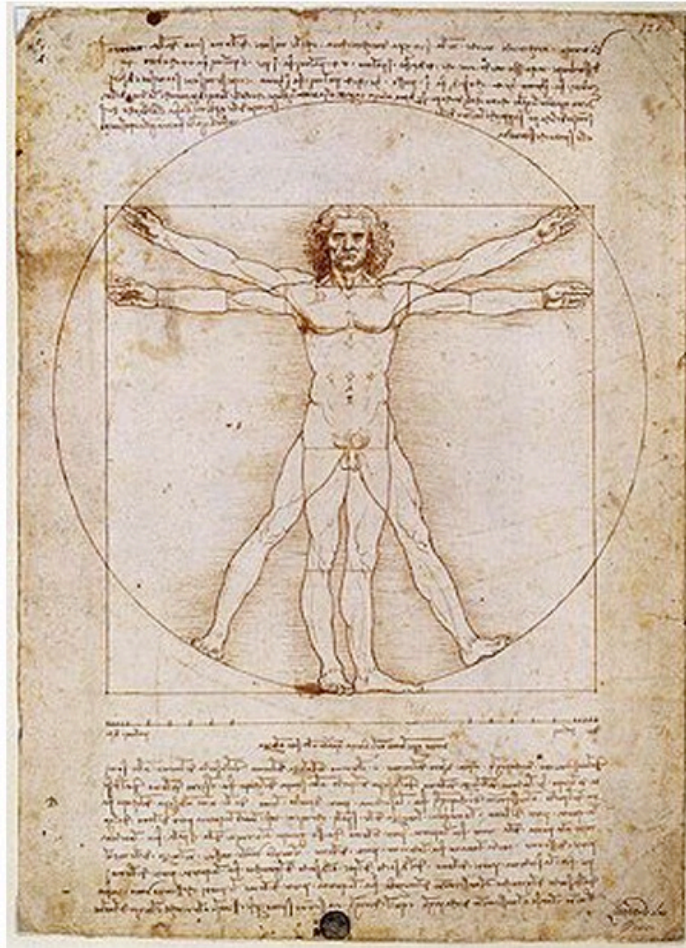
Irtiotto muinaisuudesta

"Every minute, [...] every instant that you have wasted on those books is utterly and entirely lost. You have burdened your memory with exploded systems and useless names. Good God! In what desert land have you lived, where no one was kind enough to inform you that these fancies which you have so greedily imbibed are a thousand years old and as musty as they are ancient? [...] My dear sir, you must begin your studies entirely anew."

- Mary Shelley (1797-1851): *Frankenstein; or, The Modern Prometheus* (1818-23)



Matemaattista mallintamista muttei empiriaa

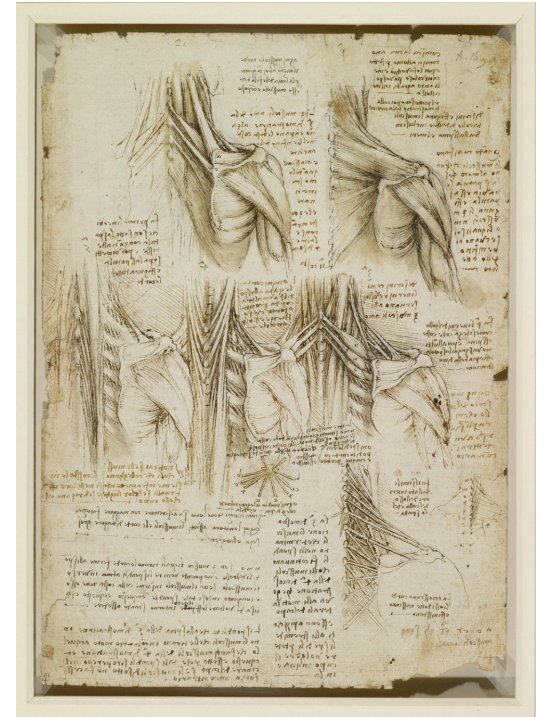
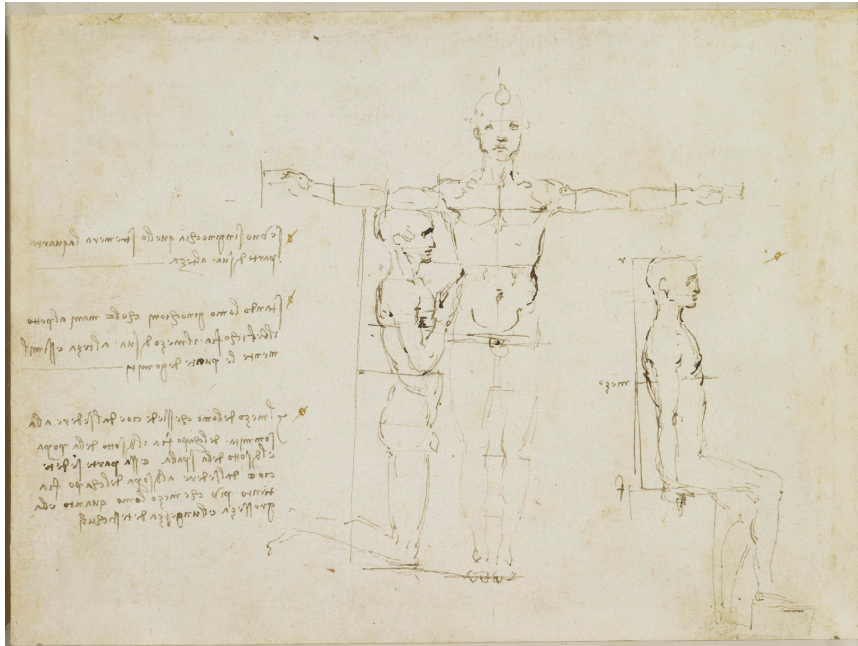
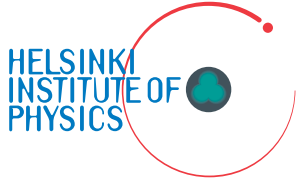


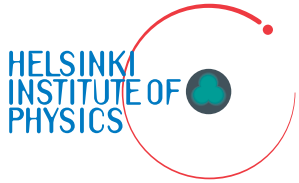
Leonardo da Vinci (1452-1519):

Vitruviuksen mies (1487)



Empiriaa muttei matemaattista mallintamista



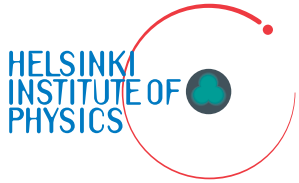


Taivaasta tieteeseen

- Neljä merkittävää Newtonin edeltäjää: Kopernikus, Brahe, Kepler ja Galilei.
- Taivaan ilmiöillä oli iso rooli fysiikan synnyssä.
- Maan ulkopuolisia taivaan ilmiöitä on helppo havainnoida, toistaa havainnot ja välittää ne toisille.
- Fysiikan menestyksen taustalla on yksinkertaisten asioiden tutkiminen yksityiskohtaisesti.
- *“Truth emerges more readily from error than from confusion.”*
(Francis Bacon, *Novum Organum*, 1620)



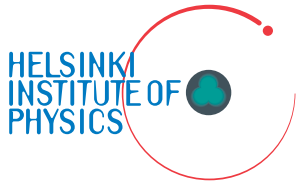
Sykleistä episykleihin



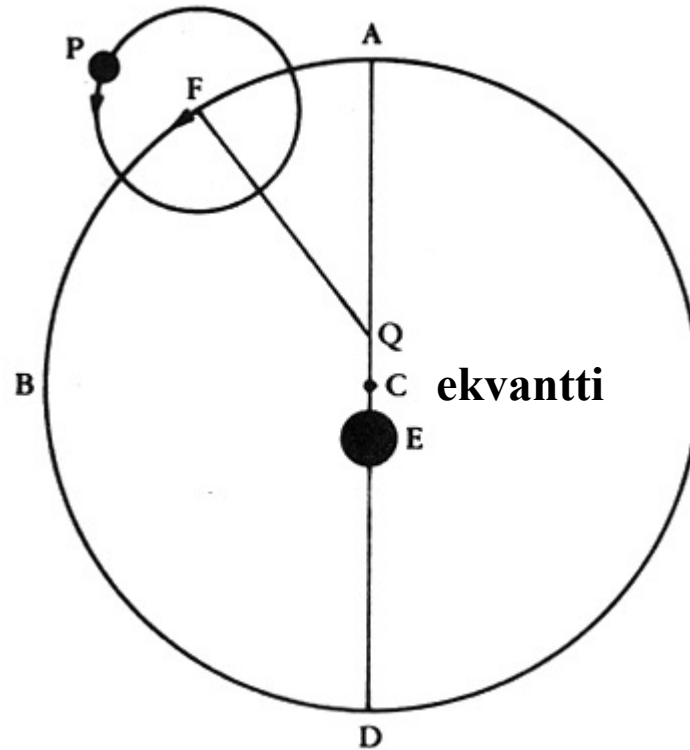
- Antiikin ajoista oli vallinnut Ptolemaioksen (100-170) mukaan nimetty malli, jossa Maa on maailmankaikkeuden keskipiste, jonka ympäri planeetat, Aurinko ja Kuu liikkuvat.
- Ympyräradat ovat ilmeisessä ristiriidassa jo muinaisten babylonialaisten havaintojen kanssa ellei mukaan oteta **episyklejä** ja **ekvantteja**.

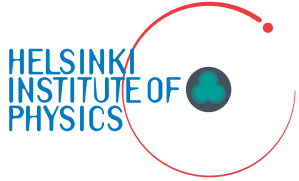


Sykleistä episykleihin



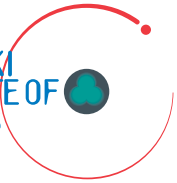
episykli



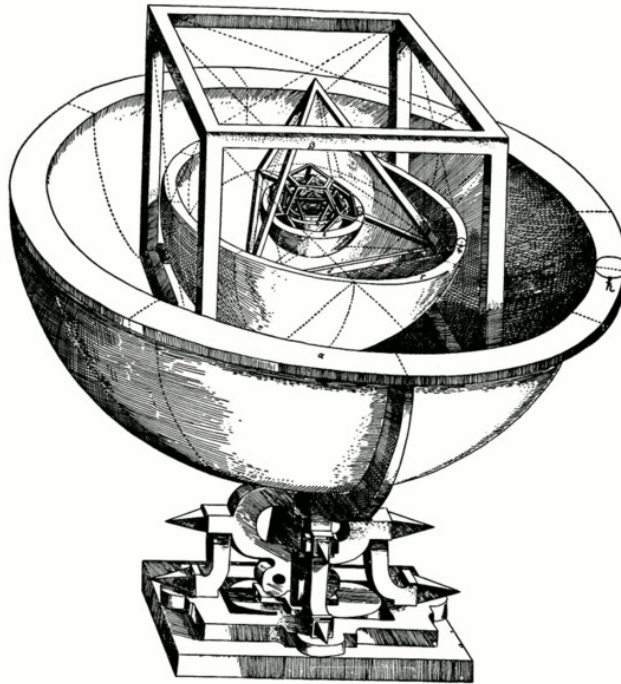


Kopernikus: ympyrät ovat kauniita, Aurinko on keskipiste

- Nikolaus Kopernikus (1473-1543) ei pitänyt ekvanteista, hän halusi puhtaat ympyrät.
- Teoksessa *De revolutionibus orbium coelestium* (1543) hän esitti mallin, jossa Maa ja muut planeetat kiertävät ympyräradoilla episykleillä Auringon ympäri.
- Syy uudistukseen ei ollut kokeellinen vaan teoreettinen: se liittyi kauneuteen ja **symmetriaan**.
- Symmetria tarkoittaa sitä, että jokin asia säilyy samanlaisena jonkun muun asian muuttuessa.

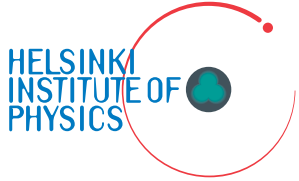


Keplerin monitahokasmalli



- Viisi Platonin kappaletta, viisi planeettaa (+ Maa).
- Sattumaako?
- Planeettojen radat sopivat suunnilleen monitahokkaita ympäröiviin palloihin.
- Ei sopinut yhteen Brahen havaintojen kanssa.

Johannes Kepler (1571-1630): *Mysterium Cosmographicum* (1596)

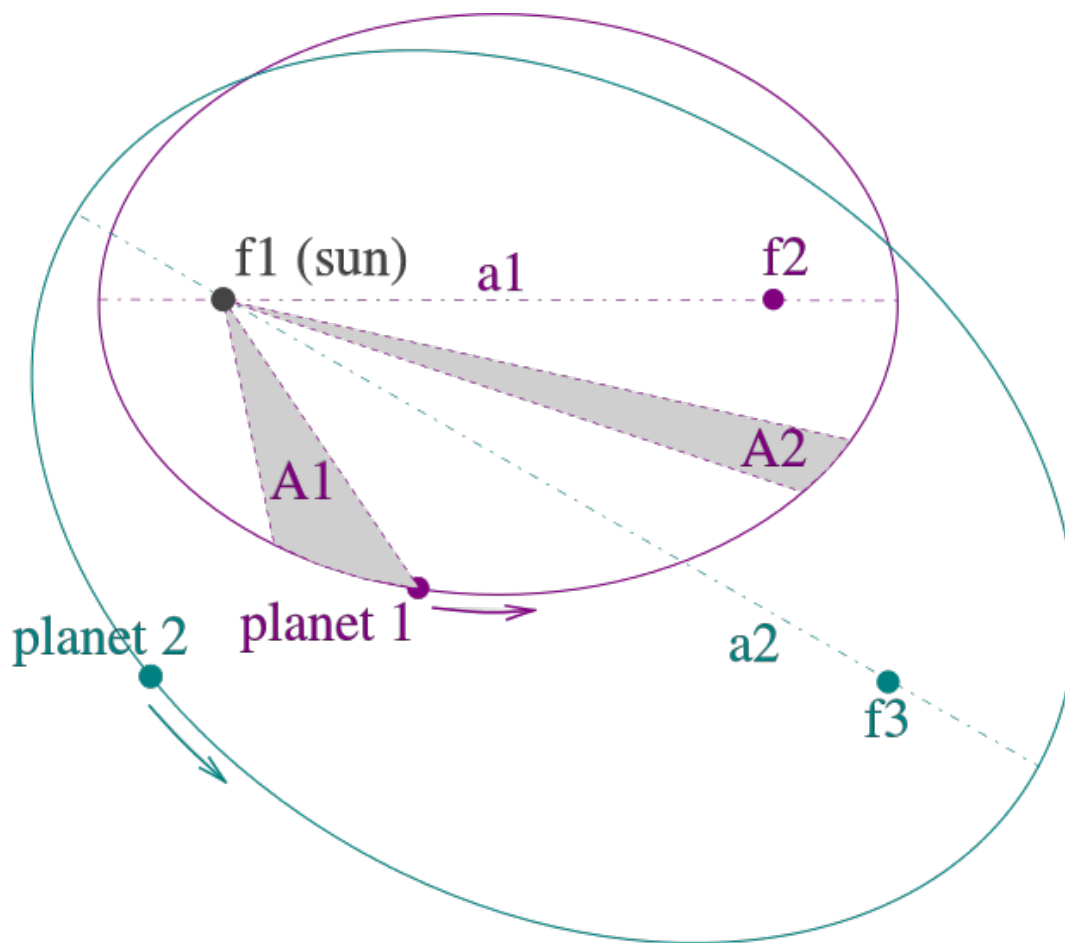
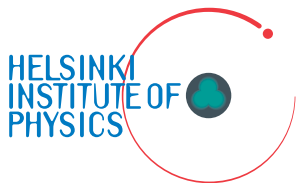


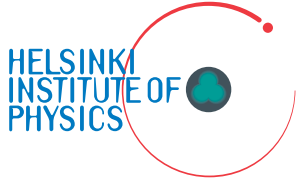
Brahe ja Kepler: radat eivät ole ympyröitä

- Kepler osoitti Tyko Brahen (1546-1601) tekemien tarkkojen havaintojen avulla, että aurinkokeskinen ympyräratamalli ei kuvaa luontoa tarpeeksi tarkasti.
- Kepler esitti (1609, 1617-21) mallin, jossa on kolme lakia:
 1. Planeetat liikkuvat ellipseillä, joiden polttopisteessä on Aurinko.
 2. Auringon ja planeetan välinen viiva peittää samassa ajassa saman pinta-alan.
 3. $T^2/R^3 = \text{vakio}$, missä T on kiertoaika ja R on isoakseli.



Keplerin lait



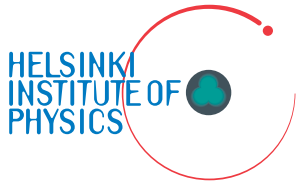


Kepler ja teorian puute

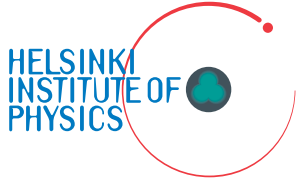
- Ideat symmetriasta olivat tärkeitä Keplerin mallin löytämisessä, mutta se toteuttaa vain osan niistä.
- Tarkat havainnot ratkaisivat.
- Keplerillä oli mukana empiria ja matemaattinen mallinnus, mutta ei teoriaa: mistä lait seuraavat ja mihin ne liittyvät?



Galilei ja liikkeen lait



- Galileo Galilei (1564-1642) käsitteli taivaan lisäksi maanpäällisen liikkeen perusteita matemaattisesti ja empiirisesti.
- Yksinkertainen kysymys: miten kappaleet putoavat ja miten niiden liike hidastuu?
- Liike on muutosta avaruudessa ajan myötä. Päästään perustavanlaatuisen kysymysten jäljille: mitä ovat aika ja avaruus?



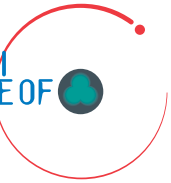
Galilein suhteellisuusmalli

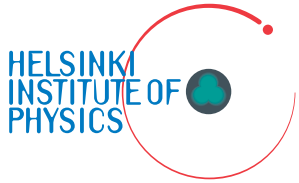
1. Lepoa ja liikettä vakionopeudella ei voi erottaa kokeellisesti.
 - Tasainen liike on **suhteellista**.
 2. Vapaasti liikkuva kappale jatkaa liikettä vakionopeudella.
 - Yhtä hyvin voi sanoa, että se pysyy paikallaan.
 3. Kappaleet gravitaatiokentässä putoavat yhtä nopeasti koostumuksesta riippumatta.
- Galilei päätteli nämä lait empiirisesti, ja ilmaisi ne matemaattisesti sanoin.
 - Lähestytään teoriaa.



Apollo 15 (1971)

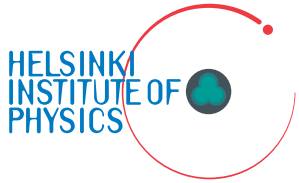
HELSINKI
INSTITUTE OF
PHYSICS





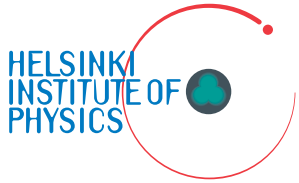
Fysiikan alku

- Isaac Newton (1643-1727) esitteli teoksessa *Philosophiae naturalis principia mathematica* (1687) perustan rakennelmalle, joka tunnetaan nimellä **klassinen fysiikka**.
- Se pohjaa luonnonlait havainnoille ja ilmaisee ne matemaattisilla merkeillä.
- Se on teoria, joka selittää ilmiöitä, ei vain kuvaile niitä.
- Newtonin kolme lakia ovat **klassisen mekaniikan** sydän.



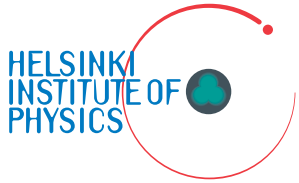
Newtonin kolme lakia

- Aine koostuu **hiukkasista**, jotka ovat pistemäisiä, massiivisia ja jatkuvasti olemassa. Ne vuorovaikuttavat ja sitoutuvat kappaleiksi kohdistamalla toisiinsa **voimia**.
- Voimat määräävät kappaleiden liikkeen seuraavasti:
 1. Kappale, johon ei kohdistu voimia, liikkuu tasaisella nopeudella.
 2. $\vec{F} = m\vec{a}$
 3. Jos kappale A kohdistaa kappaleeseen B voiman $\vec{F}$, niin B kohdistaa A :han voiman $-\vec{F}$.



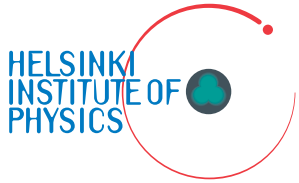
Yhtälön $\vec{F} = m\vec{a}$ lukemista

- Viiva suureen päällä tarkoittaa sitä, että sillä on suuruuden lisäksi suunta.
- Nopeus $\vec{v}$ kertoo, miten nopeasti paikka muuttuu.
- Kiihtyvyys $\vec{a}$ kertoo, miten nopeasti nopeus muuttuu.
- **Massa** m kertoo, miten nopeasti kappaleen nopeus muuttuu, kun siihen kohdistetaan voima. (Tarkemmin sanottuna m on **hitausmassa**.)
- Newtonin lait eivät kerro, mikä on voima $\vec{F}$, se pitää erikseen löytää.



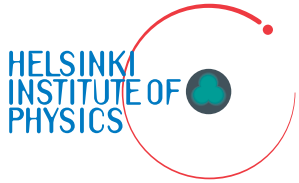
Luonnonlakien symmetrioita

- Yhtälössä $\vec{F} = m\vec{a}$ voimalla ja massa kertaa kiihtyvyydellä on sama suuruus ja sama suunta.
- Jos avaruutta kiertää, yhtälö (ja muut Newtonin lait) pitävät yhä paikkansa.
 - Avaruus on samanlainen joka suunnassa.
- Jos avaruutta siirtää $\vec{x} \rightarrow \vec{x} + \vec{x}_0$, ne pitävät myös paikkansa.
 - Avaruus on samanlainen kaikkialla.
- Sama juttu ajan nollakohdan kanssa: $t \rightarrow t + t_0$.
 - Aika on aina samanlaista.
- Luonnonlait ovat symmetrisiä näiden muunnosten suhteen.



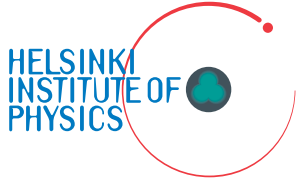
Suhteellinen ja absoluuttinen

- Suure on **absoluuttinen**, jos sen arvo on sama kaikille havaitsijoille (tai tietylle joukolle havaitsijoita: klassisessa fysiikassa havaitsijoille, jotka liikkuvat vakionopeudella).
- Absoluuttisen vastakohta on **suhteellinen**.
- Klassisessa mekaniikassa suunta ja paikka ovat suhteellisia, samoin ajanhetki.
- Klassisessa mekaniikassa absoluuttisia ovat aika- ja paikkavälit (eli etäisyydet ajassa ja paikassa), massa ja kiihtyvyys.
- Klassisessa mekaniikassa aika ja avaruus ovat absoluuttisia.



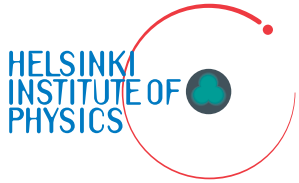
Nopeus on suhteellista

- Newton ajatteli nopeuden olevan absoluuttista (eli liike on liikettä absoluuttisten paikkojen suhteen), mutta:
 - *"In truth since these parts of space are unable to be seen, and to be distinguished from each other by our senses; we use in turn perceptible measures of these. For we define all places from the positions and distances of things from some body, which we regard as fixed" (Principia)*
- Tekijän mielipiteellä ei merkitystä.
- Klassisessa mekaniikassa nopeus on suhteellista.



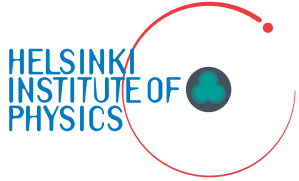
Suhteellisuuden merkitys

- Suhteellinen on eri asia kuin epätodellinen.
- Koska nopeus on suhteellista, myös liike-energia on suhteellista.
- Liike-energia on silti todellista, ja sillä on havaittavia vaikutuksia.



Galilei-symmetria

- Newtonin lait ovat samat, jos kaikkiin nopeuksiin lisätään vakio: $\vec{v} \rightarrow \vec{v} + \vec{v}_0$.
- Tämä tunnetaan nimellä **Galilei-symmetria**.
- Newtonin 1. laki näyttää toisen lain erityistapaukselta.
- Nykynäkökulmasta 1. laki on tärkein, koska se ilmaisee teorian keskeisen symmetrian. (Kiertojen ja siirtojen ohella.)
- Toisen lain täytyy noudattaa tätä symmetriaa.

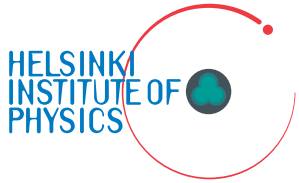


Newtonin gravitaatioteoria

- Newtonin gravitaatioteoria koostuu Newtonin lakien lisäksi gravitaatiovoimasta:

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

- Tässä G_N on Newtonin vakio, r on kappaleiden etäisyys, m ja M ovat niiden massat ja $\vec{e}$ on niiden välinen suunta.
- Tarkemmin sanottuna tässä esiintyvä m on **painava massa**, joka kertoo, miten paljon gravitaatio vaikuttaa kappaleeseen.



Tuloksena Galilein putoamismalli

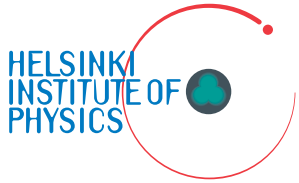
$$\vec{F} = -G_N \frac{m_p M_p}{r^2} \vec{e}$$

- Laissa $\vec{F} = m_h \vec{a}$ esiintyvä m on **hitausmassa**.
- Merkitään sitä symbolilla m_h ja painavaa massaa symbolilla m_p .

- Laitetaan gravitaatiovoima Newtonin 2. lakiin:

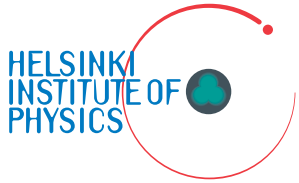
$$\vec{a} = -G_N \frac{m_p}{m_h} \frac{M}{r^2} \vec{e}$$

- Jos $m_h = m_p$, niin saadaan Galilein tulos: kappaleet putoavat samalla kiihtyvyydellä kohti Maapalloa massasta riippumatta. (Ja tämä kiihtyvyys on melkein vakio.)



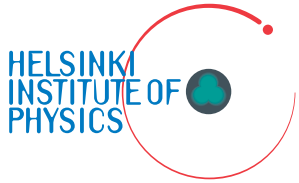
Tuloksena Keplerin lait

- Kun sovelletaan Newtonin gravitaatioteoriaa liikkeisiin Auringon ympärillä, saadaan tulokseksi, että rata voi olla ellipsi (rajatapauksena suora tai ympyrä) tai hyperbeli.
- Newtonin teoria selittää, mitä Keplerin lakien takana on ja ennustaa uusia ilmiöitä.
- Se myös yhdistää maanpäälliset tapahtumat (Galilei) taivaallisiin tapahtumiin (Kepler), selittäen ne samojen lakien erilaisiksi ilmentymiksi.
- Ensimmäinen fysiikan teoria (ei vain malli).



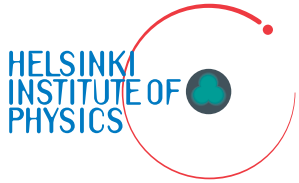
Teoria vs. malli

- Malli tiivistää havaintoja (ellipsit vs. lukutaulukot), se kertoo millainen järjestys niissä on.
- Teoria selittää, mikä on sääntö havaitun järjestyksen taustalla.
- Teoriassa ei ole kyse vain havaintojen kuvailemisesta, vaan maailman ymmärtämisestä niiden kautta.



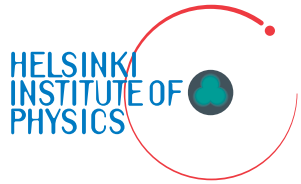
Lakien symmetria

- Keplerin mallissa on vähemmän symmetriaa kuin Kopernikuksen mallissa. (Ellipsi vs. ympyrä.)
- Newtonin teoriassa on enemmän symmetriaa kuin Kopernikuksen mallissa, mutta symmetria ei koske teorian ilmentymiä, vaan lakeja.
- Kopernikuksen mallissa liike on kiertosymmetristä tasossa (eli yhden akselin ympäri). (Plus episyklit.)
- Newtonin teoriassa lait ovat kiertosymmetriset avaruudessa (eli kaikkien kolmen akselin ympäri) ja symmetriset keskipisteen valinnan suhteen.
- Laeilla on enemmän symmetriaa kuin niiden ilmentymillä.
 - Alkuehdot eivät ole osa lakeja.
 - Yhtälöt vs. niiden ratkaisut.



Fysiikan kauneus

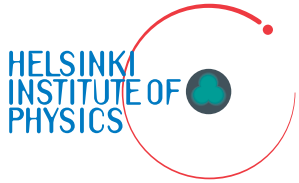
- Newton paljasti syvemmän kauneuden tason.
- Fysiikan kauneus ei piile sen kuvaamien asioiden ilmentymissä.
- Fysiikan kauneus koskee luonnonlakeja, jotka määräävät sen, millaiset ilmentymät ovat mahdollisia.
- Kyse ei ole niistä muodoista, mitä havaitaan, vaan muodoista niiden takana: lakien muodoista.
- Esteettiset arviot ovat keskeisiä fysiikan lakien löytämisessä.
 - Estetiikan tajua täytyy kehittää havaintojen ja matematiikan edistymisen myötä.



Mistä en puhu, kun puhun kauneudesta

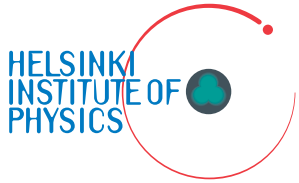


Tonja Goldblatt (1977-):
Jääkausi (2014)



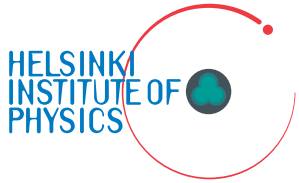
Avaruus näyttämönä

- Klassisen mekaniikan aika ja avaruus ovat absoluuttisia.
- Aika ja avaruus ovat passiivisia: ne eivät reagoi aineeseen.
- Aika ja avaruus ovat muuttumattomia ja tasaisia: ne ovat samanlaisia aina ja kaikkialla.
- Avaruus on näyttämö tapahtumille, ja aika kertoo, missä kohtaa näytelmää ollaan.
- Ei ole erityistä nykyhetkeä, ei ole tapahtumista.



Kellokoneistomaailma

- Newtonin lait ovat **deterministisiä**.
- Jos jollain hetkellä on määrätty
 - luonnonlait (eli kappaleiden väliset voimat),
 - kappaleiden ominaisuudet (eli massat) sekä
 - kappaleiden tila (eli paikat ja nopeudet),niin Newtonin lait määrittävät tulevaisuuden ja menneisyyden yksikäsitteisesti.
- Maailman tapahtumat ovat kuin peli, jossa seuraava siirto määräytyy edellisestä.

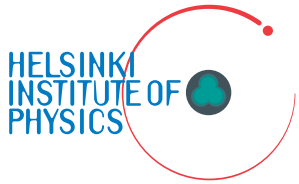


Täsmällinen demoni

- Pierre-Simon Laplace (1749-1827) esitti vuonna 1814 idean, joka on nimetty **Laplacen demoniksi**.
- Jos jokin olento tietäisi täsmällisesti maailman tilan jonakin hetkenä ja sillä olisi rajaton laskentakyky, se tietäisi kaiken tulevaisuudesta ja menneisyydestä.
- Käytännössä ei ole äärettömän tarkkaa tietoa.
 - Kyse on siitä, onko maailman kehitys ennalta määrätty, ei siitä, onko se käytännössä ennustettavissa.



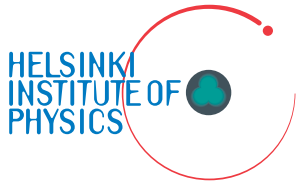
Kuu, Aurinko ja kaaos



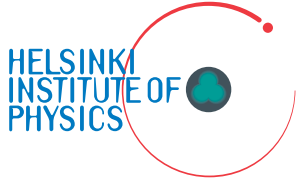
- Newtonin teoria oli menestys paitsi planeettojen ratojen selittämisessä (ellipsit), myös komeettojen ratojen ennustamisessa (hyperbelit).
- Newtonin teorian soveltaminen Kuun liikkeisiin meni aluksi pieleen. Kuun ja Maan lähimmän etäisyyden arvo oli väärin tekijällä kaksi.
- Ehdotettiin, että pienillä (Maan ja Kuun välin suuruisilla) etäisyyksillä gravitaatiovoima käyttäytyykin kuin $1/r^4$, ei $1/r^2$.
- Avain oli Auringon ottaminen huomioon. **Kolmen kappaleen ongelmalle** ei ole yleistä ratkaisua.
- Asian tyydyttävä laskeminen kesti noin 60 vuotta.



Kuu, Aurinko ja kaaos



- Jo Newton kiinnitti huomiota siihen, että planeetat häiritsevät toistensa ratoja.
- Lyhyellä aikavälillä (vuodet) häiriöitä, joiden avulla voi löytää planeettoja. (Neptunus 1846, planeetta 9 pian?)
- Pitkällä aikavälillä (miljoonat vuodet) radat voivat muuttua kokonaan, ja Aurinkokunta on käynyt läpi monenlaisia muutoksia. Klassinen fysiikka selittää planeettojen synnyn.
- Aurinkokunta on **kaoottinen**: pienet muutokset alkutilassa johtavat suuriin muutoksiin lopputilassa, niin että ennustaminen pitkän ajan (miljardien vuosien) päähän on käytännössä mahdotonta.



Yhtenäisteoriat

- Klassinen mekaniikka yhdisti tasaisen liikkeen ja levon.
- Se myös yhdisti maalliset ja taivaalliset lait (kuunalisen ja kuunylisen maailman).
- Klassinen fysiikka oli **yhtenäisteoria**: rakennelma, joka osoittaa aiemmin erillisinä pidettyjen ilmiöiden olevan osa yhtä kokonaisuutta.
 - (Teoriat jossain mielessä yhdistävät malleja toisiinsa.)
- Fysiikka on ollut yhtenäisteorioiden voittokulkua.
- Seuraavat askeleet perustavanlaatuisissa yhtenäisteorioissa olivat sähkömagnetismi ja suppea suhteellisuusteoria.