

Moderni fysiikka (Fysiikan kurssi 8)

Juhani Kaukoranta
Raahen lukio

Klassisen fysiikan kriisi

1800-luvun loppupuolella fysiikassa
kaikki oli selvää:

Newtonin mekaniikka selitti liikkeen
aukottomasti

Maxwellin 4 yhtälöä selittivät sähkön
ja magnetismin

Termodynamiikka selitti lämpöopin

Ajateltiin, että fysiikka oli valmis.

Jäljellä on vain fysiikan soveltamista, tekniikka

Oudot havainnot

Valon nopeus oli aina vakio,
riippumaton valon lähteen nopeudesta.

Mustan kappaleen säteilyä ei pystytty
selittämään, jos säteilyllä oletettiin olevan
jatkuva energiajakauma: →
 Ultaviolettikatastrofi
 (energia olisi ääretön!)

Molemmat havainnot olivat **ristiriidassa**
klassisen fysiikan kanssa. → Uudet teoriat

Maxwellin yhtälöt

(”Jumalako nämä merkit piirsi”)

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{1}{\epsilon_0} \rho$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$$

Maxwellin yhtälöt selittävät **sähkön ja magnetismin** ja antavat **sähkömagneettisen aaltoliikkeen** olemassaolon ja ominaisuudet.

Maxwellin yhtälöt ja valon nopeus

Valon nopeus mitattiin kohtalaisen tarkasti 1800 luvun lopulla (Michelsonin-Morleyn koe) Mittaus osoitti, että Maata kohti tulevan lähteen valo kulki samalla nopeudella kuin Maasta loittonevan lähteen valo. Maan ratanopeus noin 30 km/s olisi pitänyt näkyä mittauksissa

Toisaalta tässä ei olisi tarvittu mittauksiakaan: **Maxwellin yhtälöistä** seuraa suoraan, että valo etenee vakionopeudella kaikkiin suuntiin. Eikä tarvita mitään "eetteriä" kuljettamaan sähkömagneettista aaltoliikettä.

Einstein ja valon nopeus

Einstein otti vuonna 1905 lähtökohdaksi Maxwellin yhtälöiden antaman valon vakionopeuden.

Hän tutki, millaisia liikeyhtälöiden pitäisi olla tasaisella nopeudella liikkuvissa koordinaatistoissa. Hän asetti vaatimuksen, että yhtälöt olivat samanlaisia kaikissa tasaisesti liikkuvissa koordinaatistoissa

→ Suppeampi suhteellisuusteoria v. 1905

Suppeampi Suhteellisuusteoria (1905)

Aineessa on energiaa ja energialla massa.

Levossa olevan kappaleen kokonaisenergia on

$$E = mc^2$$

Nopeudella v liikkuvan kappaleen kokonaisenergia

$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Kappaleen liike-energia on siten:

$$E_{\text{kin}} = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - mc^2$$

Huom! Liike-energian likiarvo on vanha tuttu

$$E_{\text{kin}} \approx \frac{mv^2}{2}$$

Suppeampi Suhteellisuusteoria (1905)

Tasaisesti liikkuvissa koordinaatistoissa

Ajan kulku on suhteellista, se riippuu kappaleen (systeemin) liiketilasta.

Valon nopeus c on vakio joka systeemissä

Se on signaalin ylärajanopeus

Tasaisesti liikkuvissa koordinaatistoissa

”aikadilataatio”:

Maassa aikaväli

$$\Delta t = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

raketin sisällä aikaväli, raketin koordinaatiston kellon mukaan. Tämä on aina lyhin aikaväli.

Esimerkki :

Raketti-Paavo lentää 10 valovuoden päässä olevaan aurinkokuntaan nopeudella $0,99c$. Kuinka kauan lento kestää a) Maassa olevan havaitsijan mukaan b) Raketti-Paavon kellon mukaan?

a) Maan mukaan $\Delta t = 10 \text{ valovuotta} / 0,99c \approx \mathbf{10,1 \text{ vuotta}}$

b) Maassa olevan havaitsijan mukaan aika on $\Delta t = 10,1 \text{ a}$
Raketti-Paavon kellon mukaan aika on $\Delta t_0 = ?$

$$\Delta t = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$\Delta t_0 = 10,1a \cdot \sqrt{1 - \frac{(0,99c)^2}{c^2}} \approx 1,4a$$

Vastaus: **Paavon kellon mukaan 1,4 vuotta**

Yleinen suhteellisuusteoria 1916

On luonteeltaan **painovoimateoria**

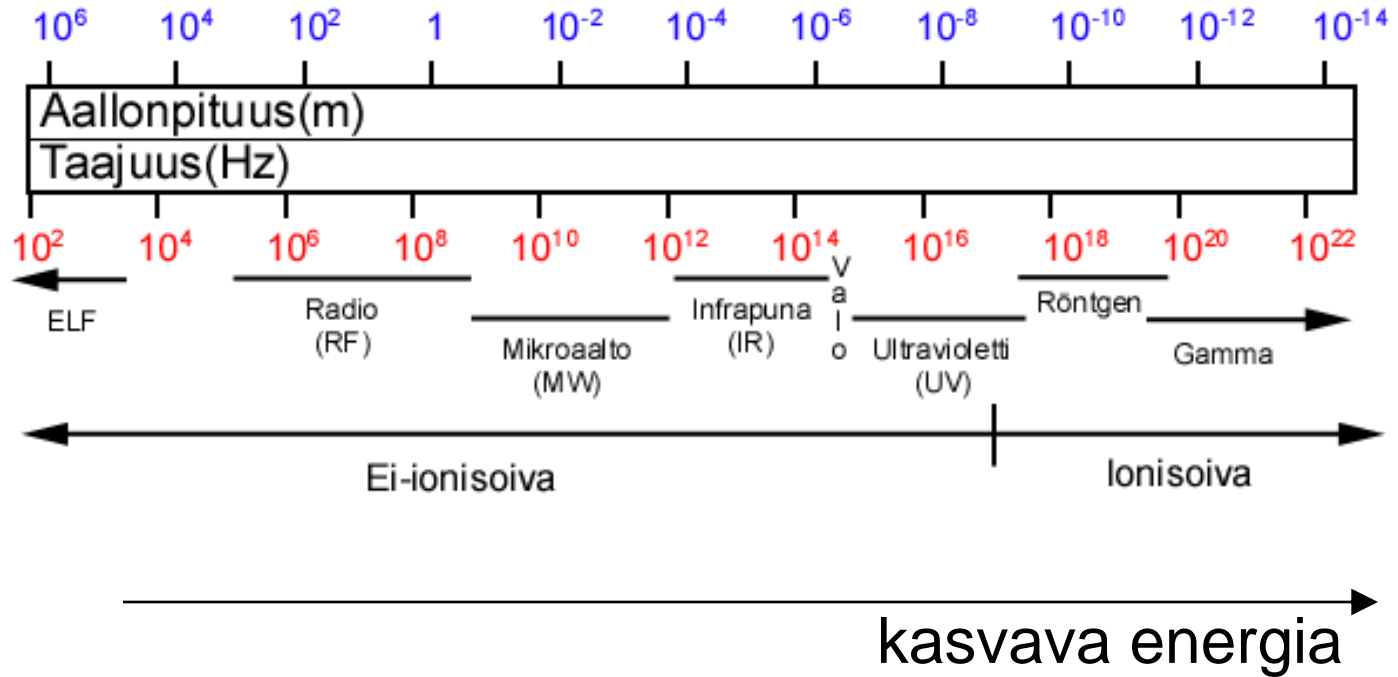
Massa "vääristää" avaruuden geometrian

Valo taipuu painovoimakentässä
ja aallonpituus muuttuu.

Ajan kulku hidastuu suuressa
painovoimakentässä

Ääritapaus: Mustat aukot

Sähkömagneettinen säteily



Kvantin energia E:

$$E = hf = \frac{hc}{\lambda}$$

Kvanttimekaniikan alku

Max Planck vuosisadan alussa, tutki lämpösäteilyä. Tuli vääjäämättä tulokseen että säteilyn energia esiintyy **kvantteina**, pieninä energiapaketteina, fotoneina

Jos f = säteilyn taajuus, λ = aallonpituus
 h = ns. Planckin vakio, E = kvantin energia

$$E = hf = \frac{hc}{\lambda}$$

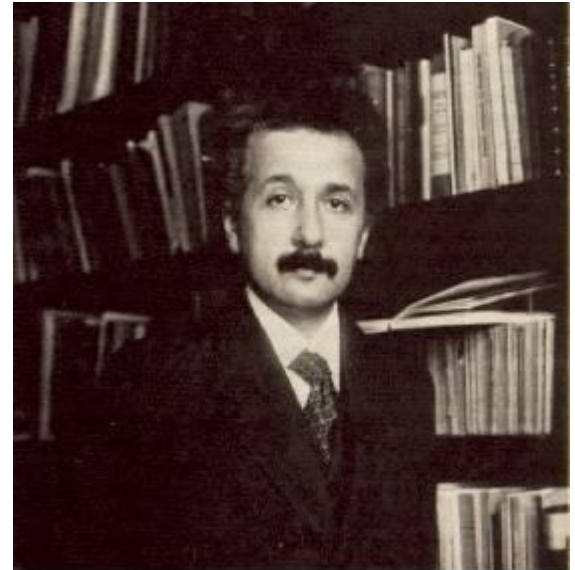
(Sähkömagneettisilla aalloilla $f \cdot \lambda = c$)

Kvanttimekaniikan alku

Einstein: valokvantti on fotoni

$$\text{Fotonin energia } E = hf = \frac{hc}{\lambda}$$

$$\text{Fotonin liikemäärä } p = \frac{h}{\lambda}$$



Albert Einstein

Valosähköinen ilmiö

Ultravioletti valo irrottaa elektroneita negatiivisesti varastusta sinkkilevystä.

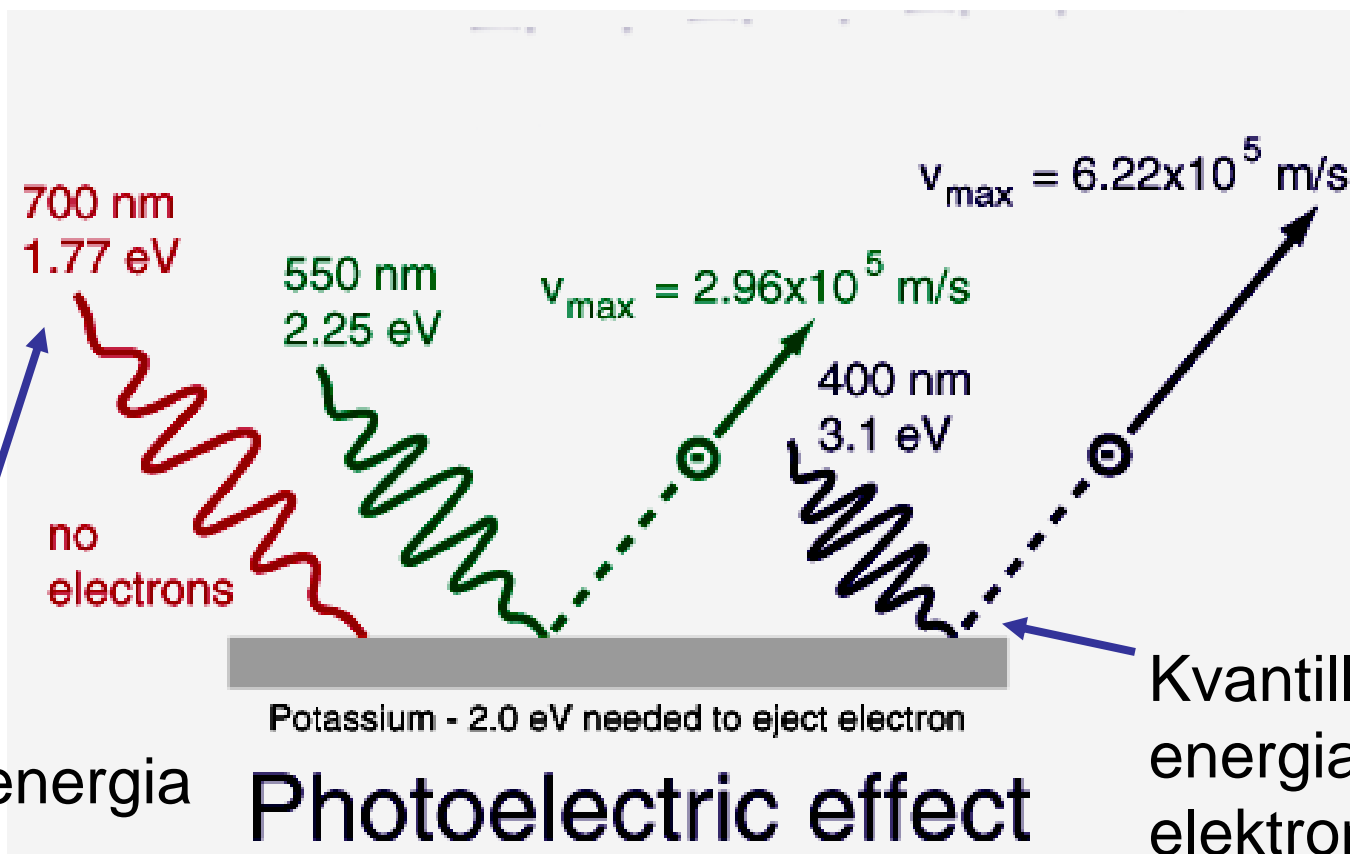
Lisää intensiteettiä (teho, watteja) → enemmän elektroneja

Tiettyä taajuutta pienempitaajuinen (suurempi aallonpituus) ei pystynyt irrottamaan elektroneja sinkistä, olipa teho kuinka suuri tahansa.

Einstein selitti valosähköisen ilmiön:

- valo luovuttaa elektroneille energiaa kvantteina, kvantin on Planckin lain mukaan $E = hf$
- Jos kaikkien kvanttien energia on alle irrotustyön, yksikään elektroni ei irtoa
- Kvantin energia menee irrotustyöhön ja vauhdin antamiseen elektronille

Valosähköinen ilmiö



Kvantin energia ei riitä

Kvantilla paljon energiaa → elektronille vauhtia

Valosähköinen ilmiö

Elektronin irrotus vaatii **irrotustyön**, joka on alkuainekohtainen
Irrotustyöt löytyvät taulukkokirjasta s. 101

$$W_0 = hf_0 = \frac{hc}{\lambda_0}$$

f_0 = rajataajuus

λ_0 = suurin aallonpituus

joilla elektroni juuri ja juuri irtoaa

Jos kvantilla on tarpeeksi energiaa, osa kuluu **irrottamiseen**
lopun **vauhdin** antamiseen elektronille. **Yksi kvantti voi irrottaa vain yhden elektronin**

Kvantin energia

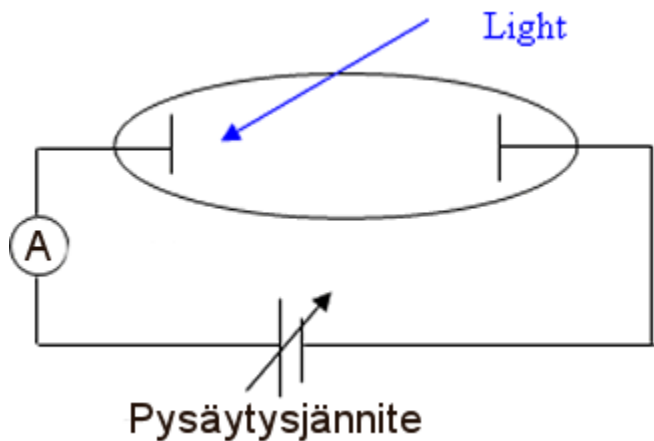


$$\frac{hc}{\lambda} = W_0 + \frac{mv^2}{2}$$

irrotustyö

Elektronin saama liike-energia

Tehtävä 1-19 (s.26): Planckin vakion määrittäminen ja irrotustyön määrittäminen



Pysäytysjännite juuri ja juuri pysäyttää irronneet elektronit →

U_e = elektronin liike-energia

$$hf = \frac{hc}{\lambda} = W_0 + \frac{mv^2}{2}$$

$$hf = W_0 + U_e$$



$$U_e = hf - W_0$$

kuvaaja:

$$y = kx + b$$

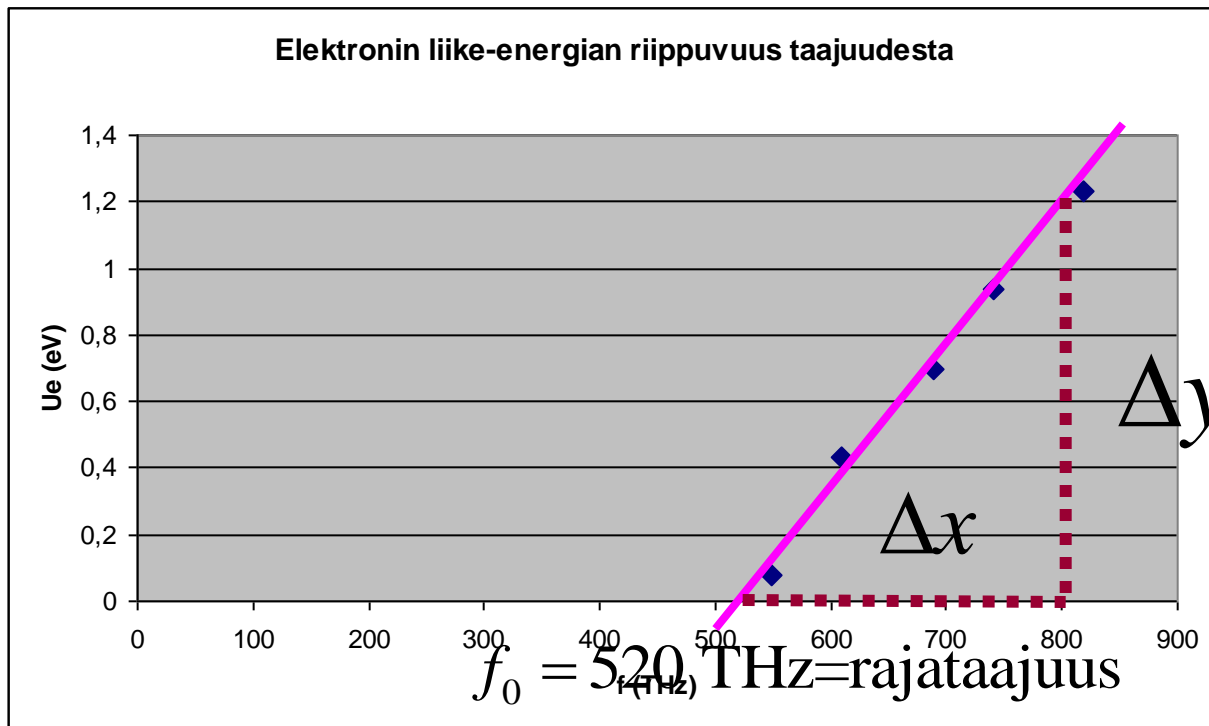
$$c = f \cdot \lambda \rightarrow f = \frac{c}{\lambda}$$



λ (nm)	f (THz)	Ue (eV)
366	819	1,23
405	740	0,94
436	688	0,7
492	609	0,43
546	549	0,08

$$Ue = hf - W_0$$

$$k = \frac{\Delta y}{\Delta x} = 0,0042 \frac{eV}{THz} \approx 6,7 \cdot 10^{-34} Js$$

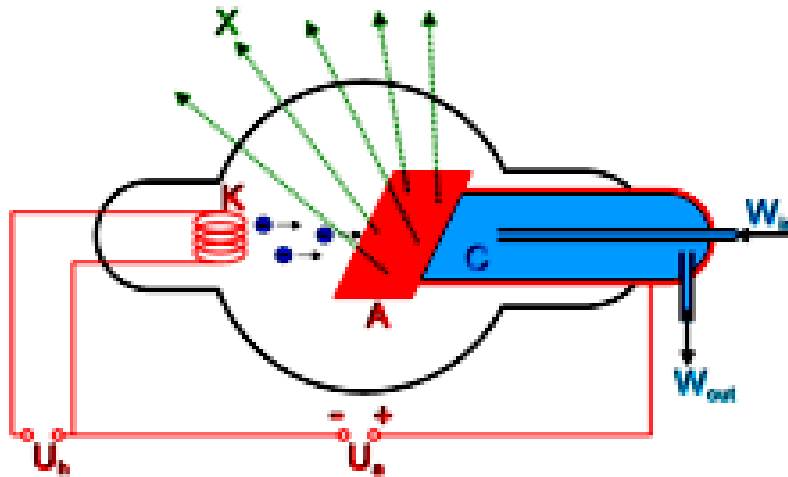


Röntgensäteily

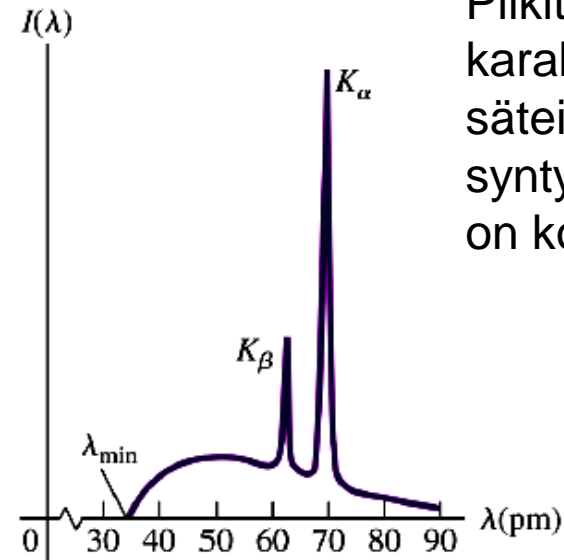
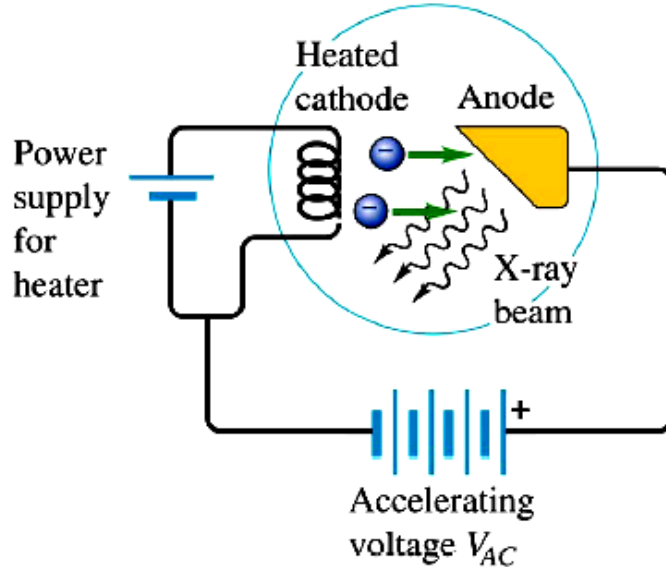
Elektronisuihku osuu wolfram-kohtioon.

Elektronien jarruuntuessa syntyy **jarrutussäteilyä**, joka on röntgensäteilyä.

Toisaalta syntyy myös karakteristista röntgensäteilyä, joka riippuu kohtion ominaisuuksista.



Röntgenputki ja röntgensäteily



Piikit ovat karakteristista säteilyä. Niitä syntyy, kun jännite on korkea

Röntgenspektrissä 2 komponenttia:

- **Jarrutussäteily** (engl. bremsstrahlung):
Jatkuva spektri, ei riipu oleellisesti anodimateriaalista.
Klassinen SM-teoria: Hidastuva varaus emittoi säteilyä (elektronit jarruuntuvat törmättyään anodimateriaaliin)
- **Karakteristinen säteily**:
Teräviä viivoja; aallonpituudet anodimateriaalille ominaisia, Seurausta ko. materiaalin atomien energiatasokaaviosta.

Röntgenputki

Elektroneita kiihdytetään 5 – 400 kV sähköjännitteellä. Ne törmäävät kohtioon, jolloin elektronit jarruuntuvat. Hidastuvassa liikkeessä oleva elektroni menettää liike-energiaansa ja lähettää sähkömagneettista säteilyä ”jarrutussäteilyä”, käytännössä röntgensäteilyä.

Ensin kiihdytystyö Ue muuttuu elektronien liike-energiaksi.

$$Ue = \frac{mv^2}{2}$$

Sitten jarrutus tuottaa röntgensäteitä

Lyhytaaltoisimman röntgenkvantin aallonpituus saadaan yhtälöstä

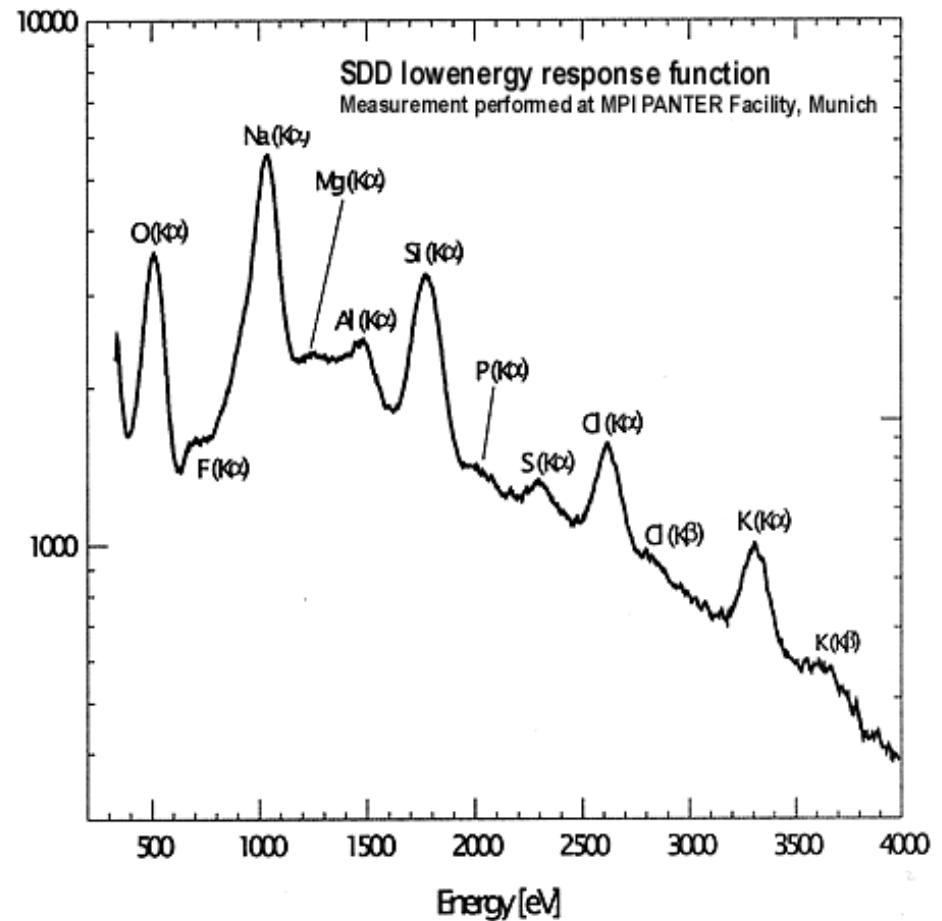
$$Ue = hf = \frac{hc}{\lambda}$$

jossa U = putken jännite, e =elektronin varaus, λ =kvantin aallonpituus

Kohtion karakteristinen spektri

Kohtiossa elektroni iskee elektronin pois sisemmältä **elektronikuorelta** (K-kuori)
Ylemmältä kuorelta putoaa elektroni tilalle, jolloin kuorien välinen energiaero vapautuu röntgenkvanttina

Käytetään alkuaineiden tunnistamiseen



Synkrotronisäteily



Hiukkaskiihdyttimessä kulkee protoneja.
Kaarteissa ne kokevat suuria kiihtyvyyksiä
→ tasalaatuista röntgensäteilyä
("synkrotronisäteilyä")

Synkrotronisäteilyn käytetään
mikropiirien valmistukseen, lääketieteen
tutkimukseen jne.

YO kevät 1999

9. a) Röntgenputken rakenne ja toimintaperiaate
b) Hahmottele tyypillinen röntgensäteilyn spektri ja perustele sen muoto säteilyn syntymekanismien perusteella.
c) Kuinka suuri on röntgenputken jännitteen oltava, jotta syntyisi säteilyä, jonka aallonpituus on 0,15 nm?

Kysymys a)

- Röntgenputki on tyhjä putki, jossa on hehkukatodi ja vesijäähdytetty anodi
- Katodilta irtoavat elektronit kiihdytetään suureen nopeuteen.
- Kun ne törmäävät anodiin ja jarruuntuvat, syntyy röntgensäteilyä.
- Elektronien energia muuttuu kokonaan tai osittain säteilykvanteiksi.

Kysymys b)

Jatkuva osa on jarrutussäteilystä, ja toisena komponenttina spektrissä on teräviä intensiteetti-*piikkejä*, jotka johtuvat ominaissäteilystä.

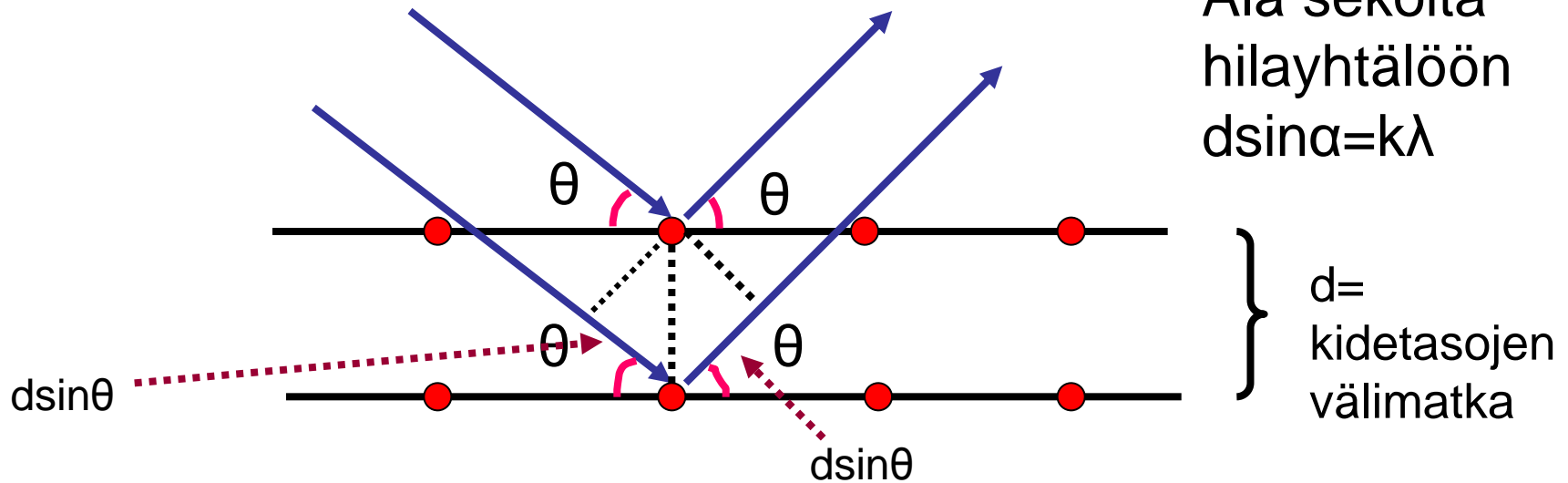
Elektronit pystyvät ionisoimaan kohdeainetta -> sisimmille elektronikehille aukkoja ja kun aukot täyttyvät, syntyy anodiaineelle ominaista säteilyä.

Kysymys c)

Jännitteen on oltava suurempi kuin 8,3 kV

Röntgensäteily kidehilassa: Braggin laki

Älä sekoita
hilyhtälöön
 $d\sin\alpha = k\lambda$



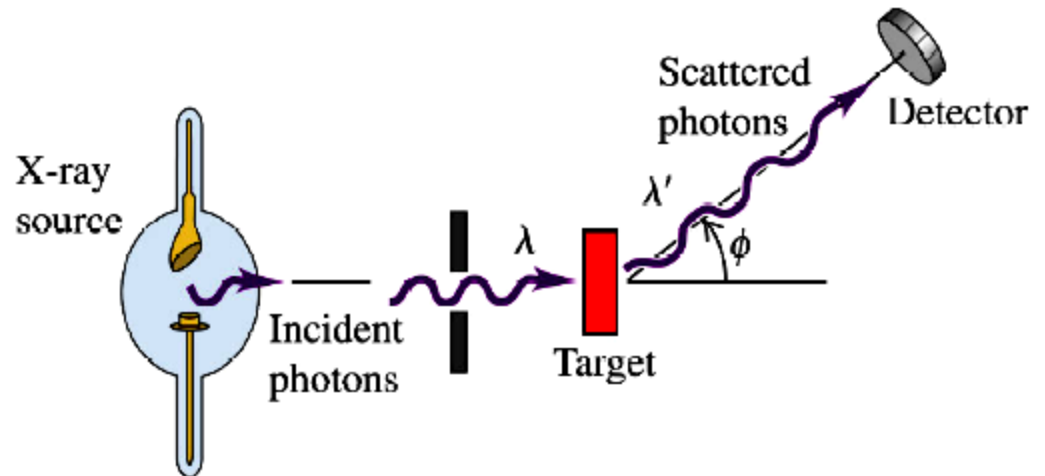
Heijastuneet säteet vahvistavat toisiaan, kun aaltojen kulkemien säteiden matkaero on aallopituuden monikerta. Matkaero on yhteensä $2d\sin\theta$

Säteily heijastuu suuntiin
(maksimit)

$$2d\sin\theta = k\lambda$$

$$k = 1, 2, 3 \dots$$

Comptonin sironta:



Compton (1923): Fotonin törmätessä vapaaseen elektroniin sen aallonpituus kasvaa ja suunta muuttuu:

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \lambda_C (1 - \cos \phi) \quad (\text{kokeellinen havainto})$$

$\lambda_C = \text{vakio}$

Tulkinta: Fotoni käyttäytyy kuten hiukkanen.
Kyseessä on fotonin ja elektronin elastinen törmäys.

Myöhemmin osoitettiin:

$$\lambda' - \lambda = \frac{h}{m c} (1 - \cos \phi)$$

Aurinkopurjeella tähtiin?

1900-luvun alusta lähtien on tiedetty, että fotoni eli valokvantti käyttäytyy myös hiukkasen tavoin. Sillä on liikemäärä. Osuessaan peiliin fotoni heijastuu, jolloin liikemäärä muuttuu. Tämä aiheuttaa peiliin voiman.

Voima = liikemäärän muutos aikayksikköä kohti

Venäläiset rakettipioneerit Tsiolkovski ja Tsander ehdottivat 1920-luvulla aurinkopurjeen käyttämistä avaruusaluksen kiihdytyksen lähteenä. 21.6.2005 Cosmos 1:n piti testata aurinkopurjetta, mutta satelliitti ei päässyt radalleen.

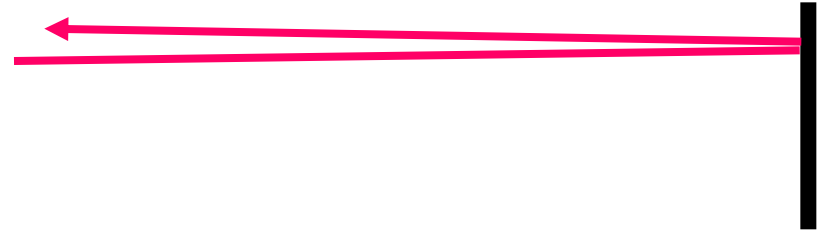
$$\text{Valokvantin energia } E_{\text{kv}} = hf = \frac{hc}{\lambda}, \quad \text{kvantin nopeus} = c, \quad \text{Energiaa vastaava massa } m = \frac{E_{\text{kv}}}{c^2}$$

$$\text{Kvantin liikemäärä } p = mc = \frac{E_{\text{kv}}}{c^2} \cdot c = \frac{E_{\text{kv}}}{c} = \frac{hf}{c} = \frac{hc}{c\lambda} = \frac{h}{\lambda}$$

Valon säteilypainne

Valokvantti osuu 100 % heijastavaan peiliin nopeudella c ja heijastuu takaisin vastakkaiseen suuntaan nopeudella c
Jos kvantin energia on E_{kv} , liikemäärän muutos on tällöin:

$$\Delta p = m \cdot 2c = \frac{E_{kv}}{c^2} \cdot 2c = \frac{2E_{kv}}{c}$$



(Jos peili olisi absoluuttisen musta, $\Delta p = \frac{E}{c}$)

Oletetaan, että teholla P valoa tulee peiliin ajan Δt .
Kvanttien energia on $\Delta E = P \cdot \Delta t$

$$\Delta p = \frac{2\Delta E}{c} = \frac{2P\Delta t}{c}$$

$$\text{Seinään kohdistuu voima } F = \frac{\Delta p}{\Delta t} = \frac{2P}{c}$$

Valon hiukkas- ja aaltoluonne

Valo on sähkömagneettista aaltoliikettä

- Maxwellin yhtälöt
- Taipuminen hilassa
- Taittuminen

Valolla on hiukkasluonne

- Valosähköinen ilmiö (kvantit)
- Comptonin sironta
- Valon aiheuttama säteilypaine

de Broglie: Ainehiukkasen aalto:

Siis fotonilla on sekä aalto- että hiukkasluonne.
de Brogliella välähti v 1926, että ainehiukkaseen,
jonka massa on m ja nopeus v , liittyy aalto

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}$$

Davisson-Germer 1927: Kapean raon läpi kulkeva elektronisuihku taipuu valon kaltaisesti.

1939-luvulla keksittiin elektronimikroskooppi (Ernst Ruska), joka perustuu elektroniaaltoihin.

Esim. Elektronimikroskoopissa elektronisuihku kiihdytetään 50 000 voltin jännitteellä. Laske elektronien aallonpituus.

Elektronien kiihdytys
 $U = 50\,000\text{ V}$, $v = ?$

$$U \cdot e = \frac{mv^2}{2}$$



$$v = \sqrt{\frac{2Ue}{m}}$$

Elektronien aallonpituus

$$\lambda = \frac{h}{mv}$$

$$\lambda = \frac{h}{mv} = \frac{h}{m \sqrt{\frac{2Ue}{m}}} = \frac{h}{\sqrt{2U \cdot e \cdot m}} \approx 5,48 \cdot 10^{-12} \text{ m} \approx 5,5 \text{ pm}$$

Elektronin aallonpituus:

$$\lambda = \frac{h}{mv}$$

Planckin vakio
 $6,63 \cdot 10^{-34}$ Js

massa

nopeus

Sähköisesti kiihdytettyn elektronin nopeus:

varaus

$1,602 \cdot 10^{-19}$ C

jännite

$$v = \sqrt{\frac{2eU}{m}}$$

massa

Klassinen fysiikka
($U < 50$ kV)

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2emU}} \approx \frac{12.26 \cdot 10^{-10}}{\sqrt{U}}$$

Suhteellisuusteoria
($U > 50$ kV)

$$\lambda \approx \frac{12.26 \cdot 10^{-10}}{\sqrt{U(1 + 0.978 \cdot 10^{-6} U)}}$$

suhteellisuusteorian
aiheuttama korjaus

1kV <-> 0.05%

50kV <-> 2.5%

100kV <-> 5%

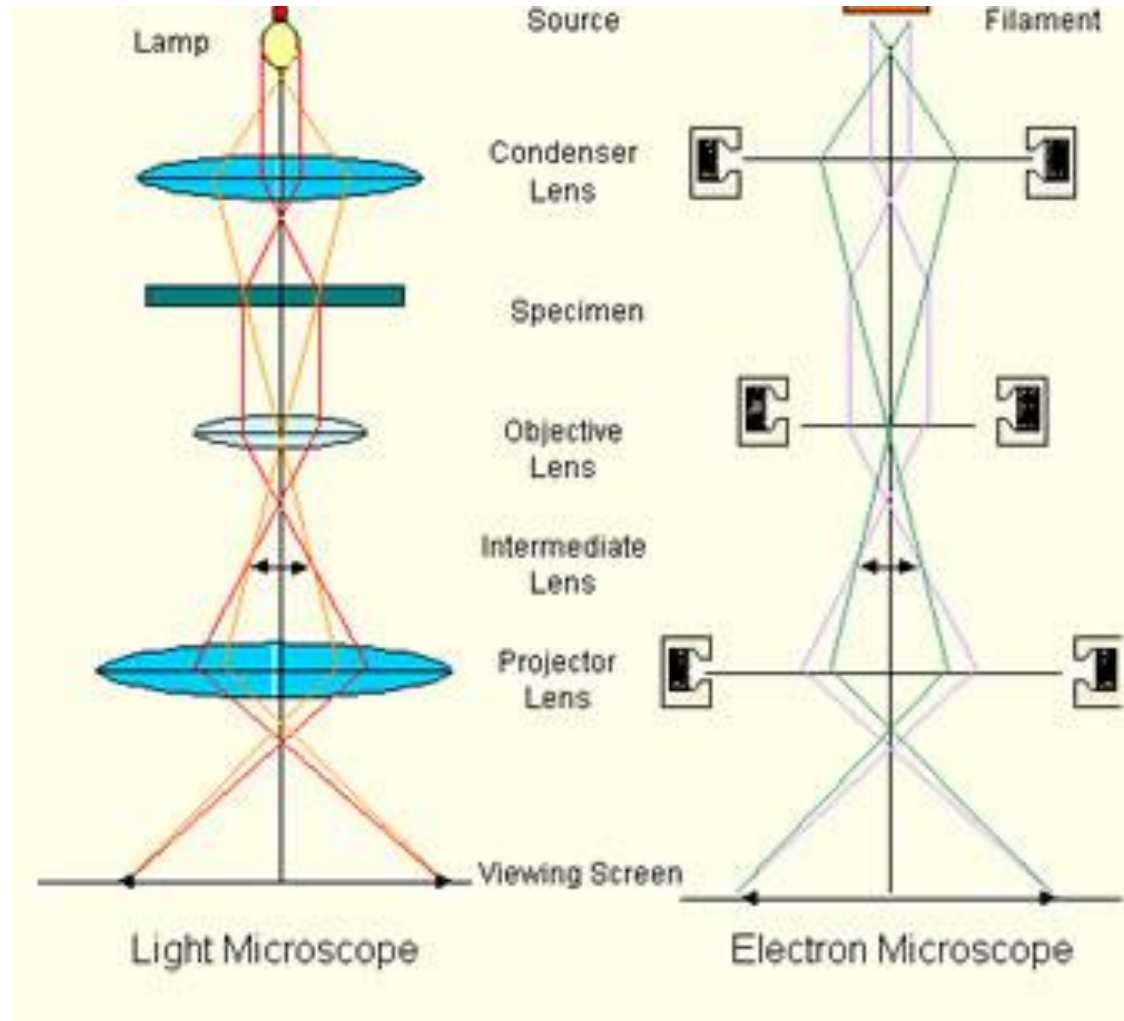
Tarkka suhteellisuusteoreettinen kaava elektronin aallonpituudelle

Kiinnostuneille olen johtanut seuraavan tarkan kaavan

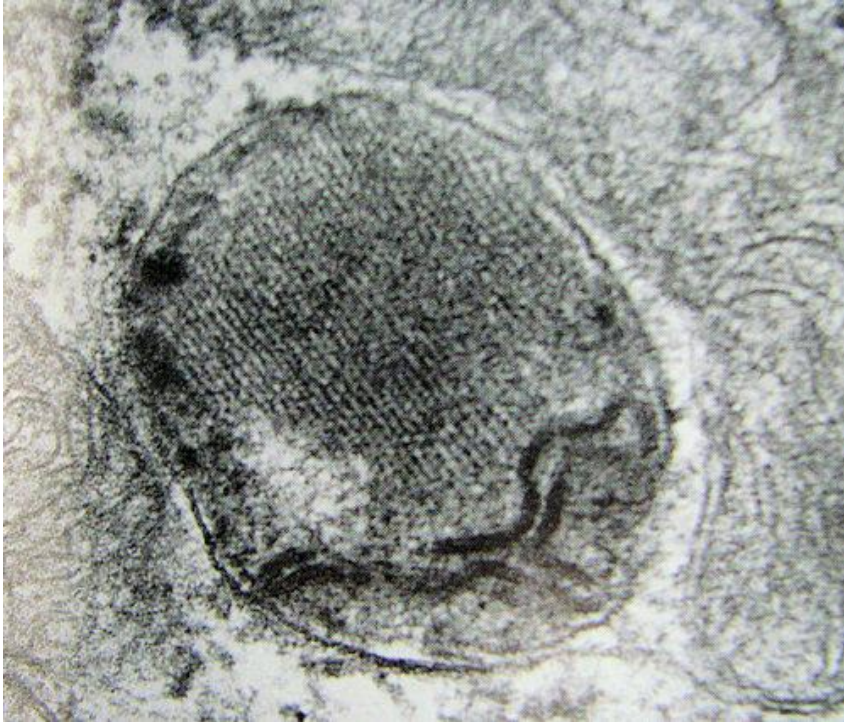
$$\lambda = \frac{hc / e}{\sqrt{U^2 + \frac{2mc^2}{e} \cdot U}}$$

$$\lambda \approx \frac{1,239841857 \cdot 10^{-6}}{\sqrt{U^2 + 1021997,805 \cdot U}} \approx \frac{12,26425897 \cdot 10^{-10}}{\sqrt{U(1 + 978,4756827 \cdot 10^{-6} U)}}$$

Läpäisy-elektroni mikroskooppi



Läpäisyelektronimikroskooppi (TEM)

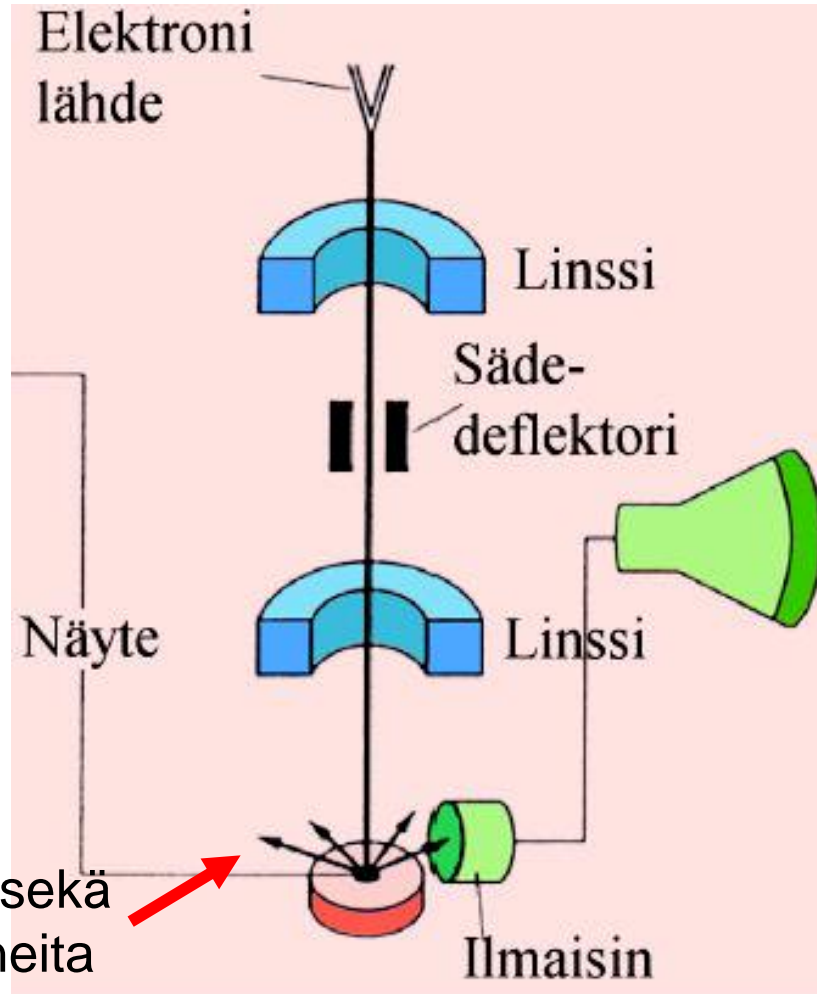


OYS:n Patologian laitoksen läpäisyelektronimikroskoopin antama kuva sydänlihasolun mitokondriosta.

Suurennus 62000-kertaa
Kiihdytysjännite 60 kV

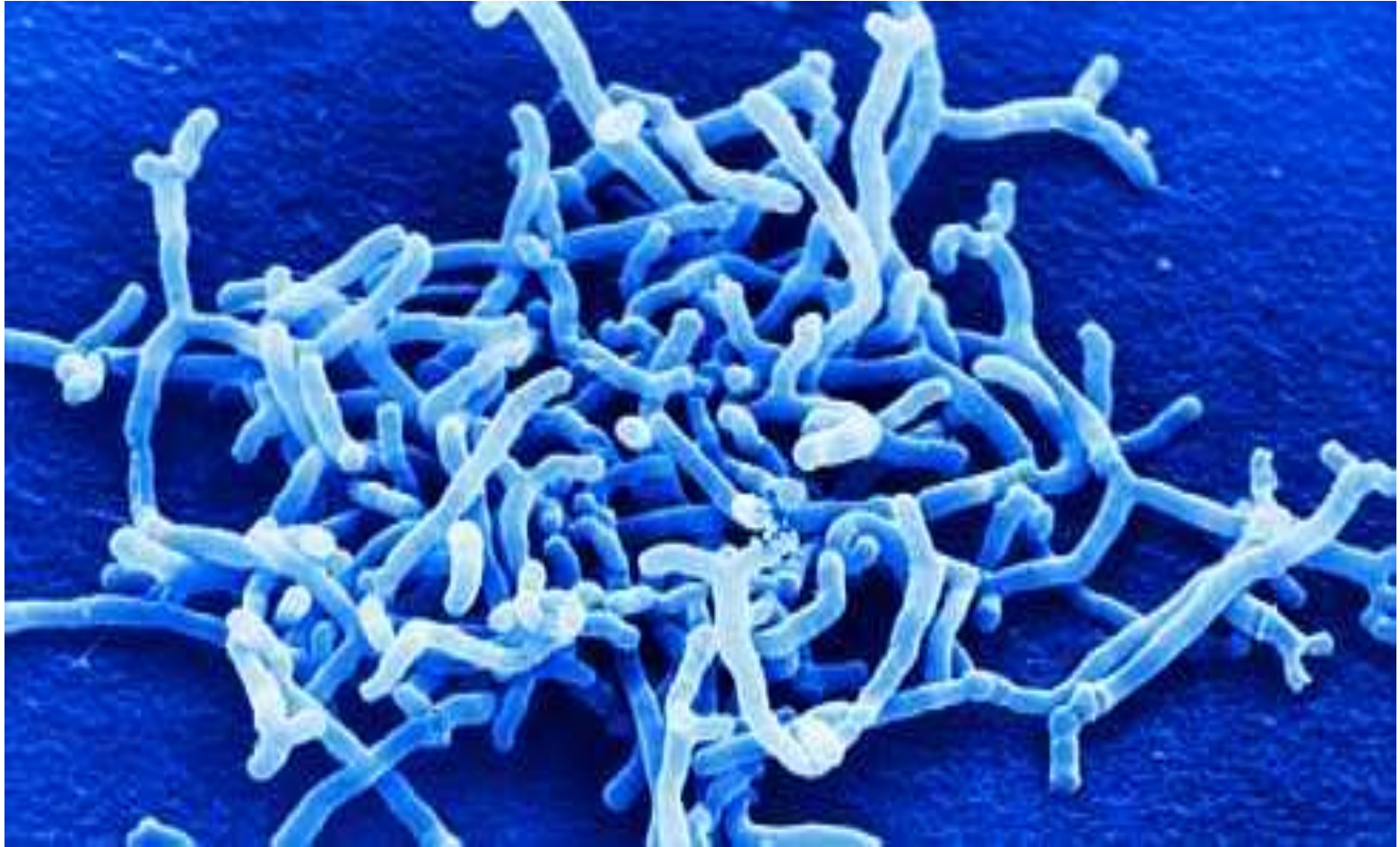
Mitokondriot ovat solun voimalaitoksia. Niiden vauriosta voidaan arvioida sydänlihaksen vauriot leikkauksessa.

Pyyhkäiselektronimikroskooppi (SEM)

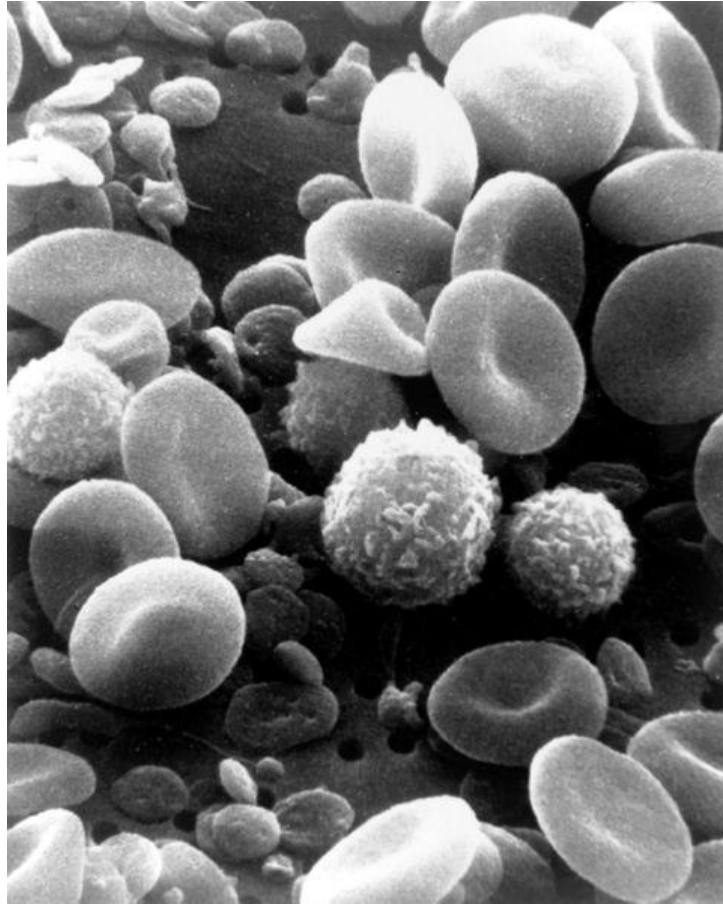


Takaisinsironneita sekä sekundaarielektoneita

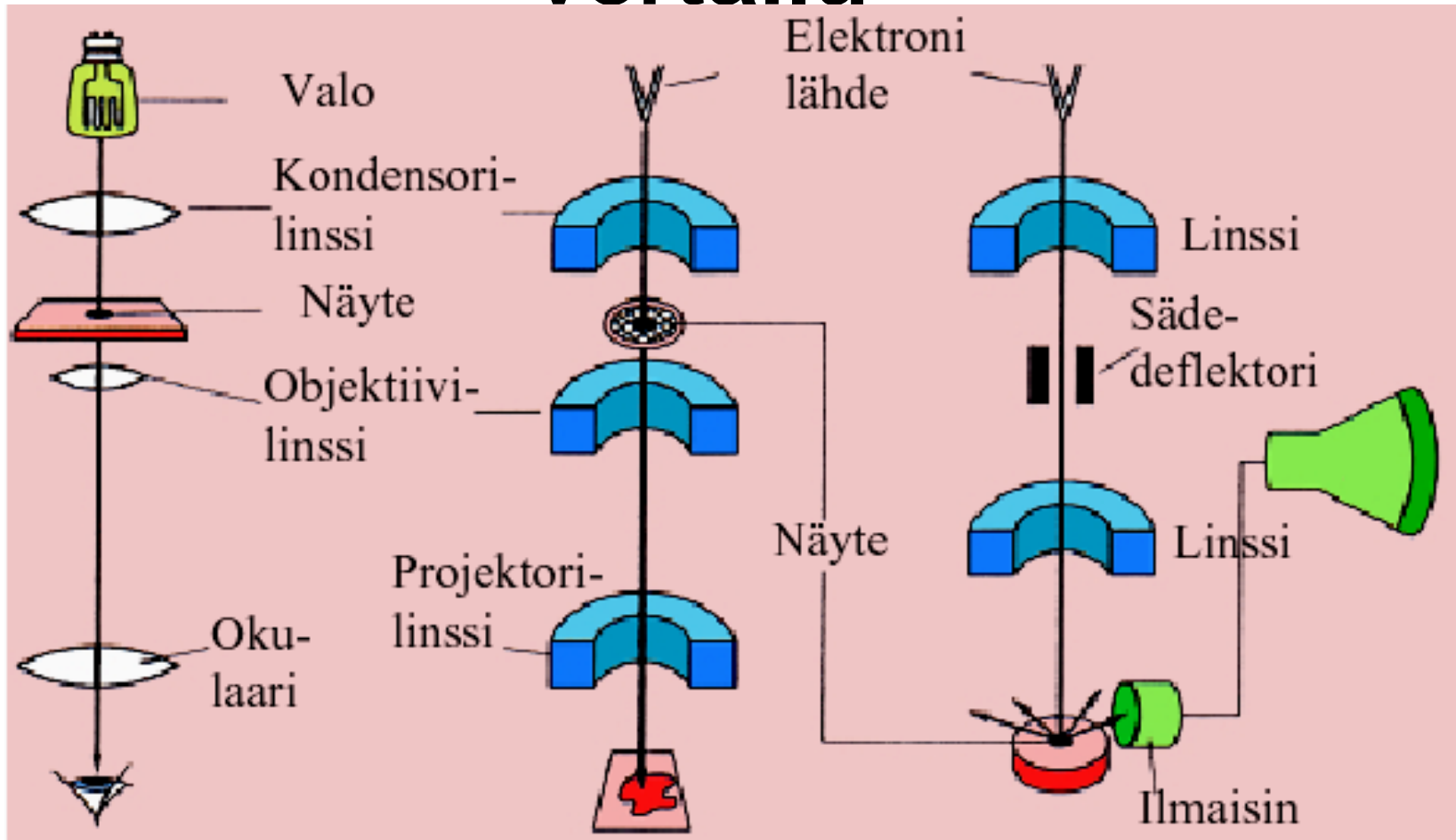
Pyyhkäiselektronimikroskooppi



Pyyhkäisy-elektronimikroskoopin (SEM) antama kuva ihmisen verisolusta



Eri mikroskooppitekniikoiden vertailu

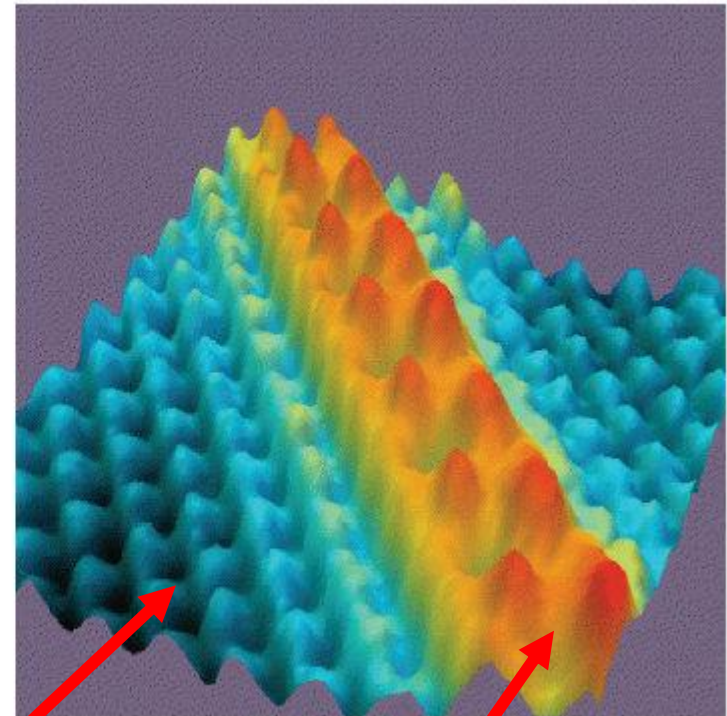
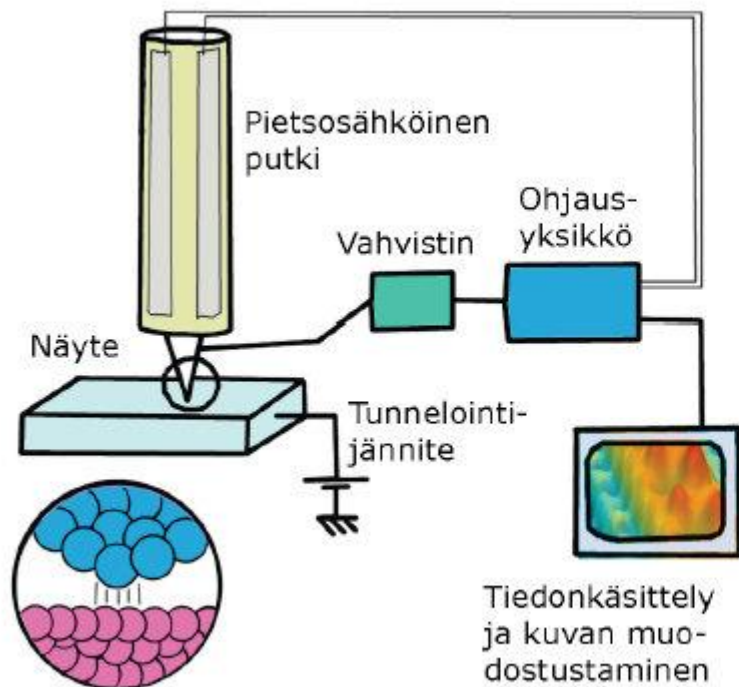


Valomikroskopia

Transmissioelektronimikroskopia

Pyyhkäiselektronimikroskopia

Tunnelointimikroskooppi näkee jopa yksittäisiä atomeja ja molekyyliä

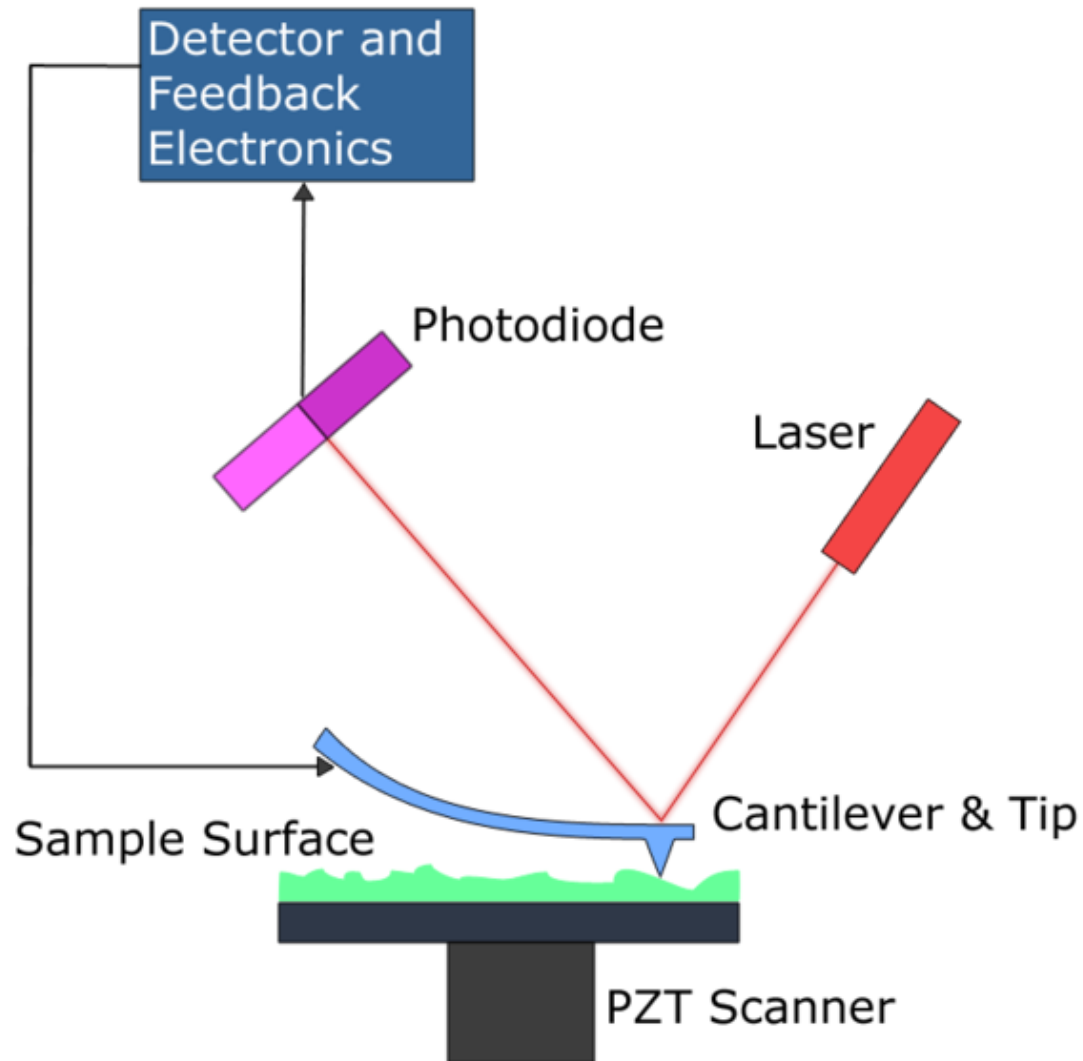


Galliumarseniittia

Cesium-atomeja

Tunnelointimikroskooppi ei perustu elektronisuihkuun. Kyseessä tunneloitumisilmiö

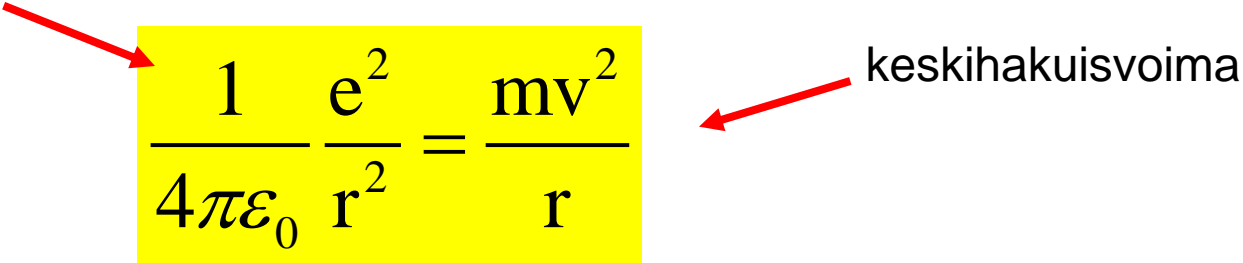
Atomivoimamikroskooppi (AFM) (Tunnelointimikroskoopin kaltainen)



Bohrin vetyatomimalli v 1913

Elektronit kiertävät ympyräratoja

Sähköinen voima pitää radallaan:


$$\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r^2} = \frac{mv^2}{r}$$

keskihakuisvoima

Ongelmana on, että Maxwellin yhtälöiden mukaisen klassisen sähköopin mukaan elektroni säteilisi fotoneja ja menettäessään koko ajan energiaa syöksyisi ytimeen, 10^{-10} sekunnissa.

Ratkaisu: **Sallitut radat**, joilla elektroni pystyy kiertämään säteilemättä energiaa.

Bohr ja de Broglie

de Broglien elektronien aalto selittää
Bohrin vetyatomimallin sallitut radat:

Elektronien rata on **seisova aaltoliike**
rata on **aallonpituuden monikerta**

$$2\pi r_n = n\lambda_n$$

jossa

$$\lambda_n = \frac{h}{mv_n}$$

Tästä saadaan impulssimomentti L
(liikemäärämomentti)

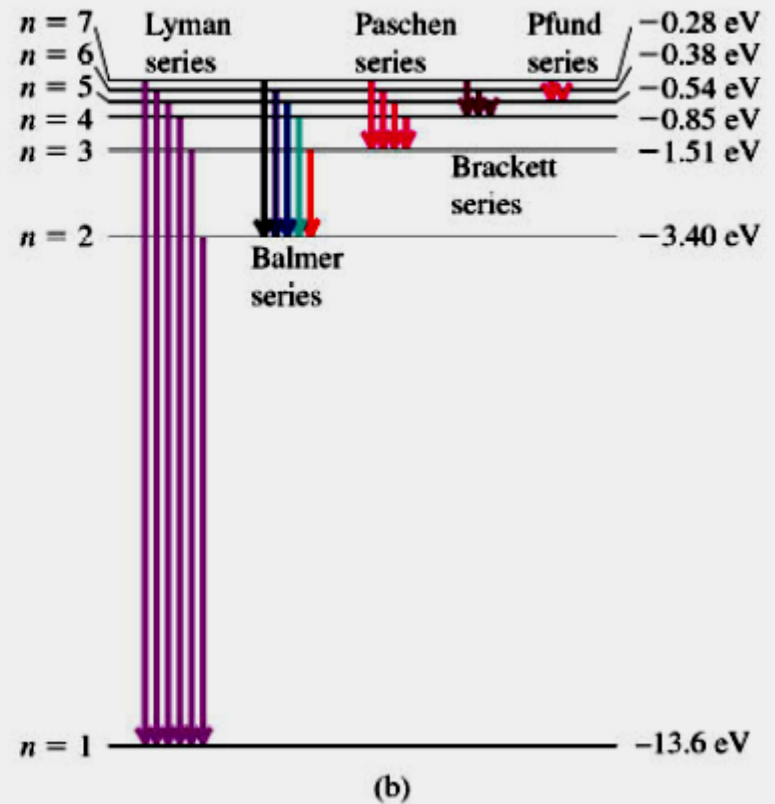
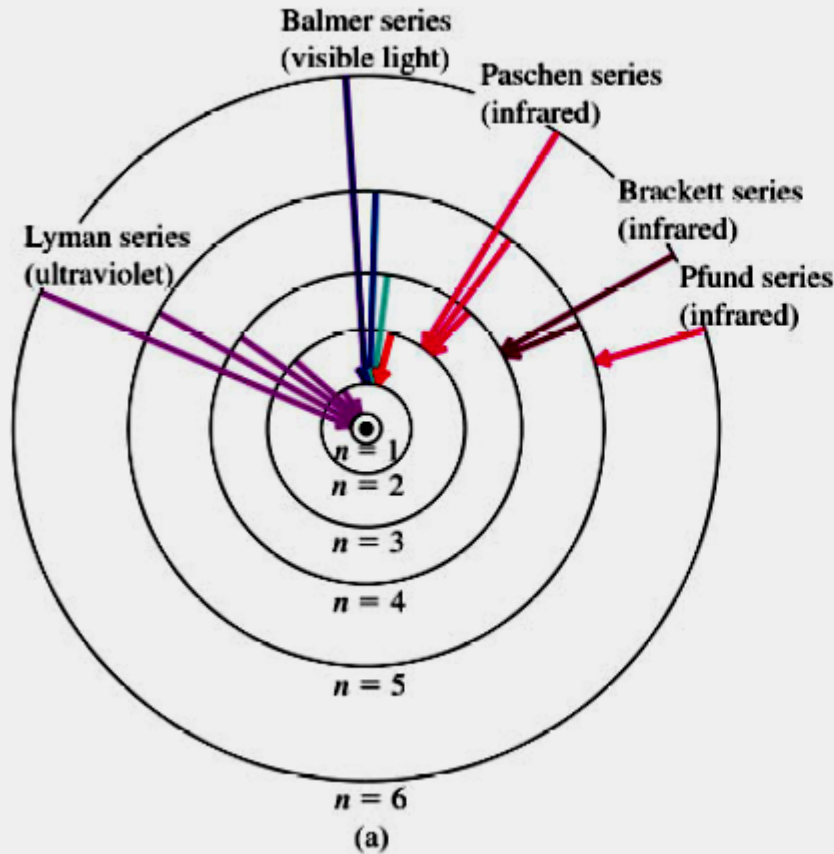
$$L = mv_n r_n = \frac{nh}{2\pi}$$

L on kvantittunut,
 $n=1,2,3,\dots$

Vetyatomin spektrit siirtymä $m \rightarrow n$

$$\frac{1}{\lambda} = R_H \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right) \quad n=1,2,3\dots \quad m=n+1,n+2,\dots$$

jossa Rydbergin vakio $R_H = 1,0973731 \cdot 10^7 \text{ 1/m}$

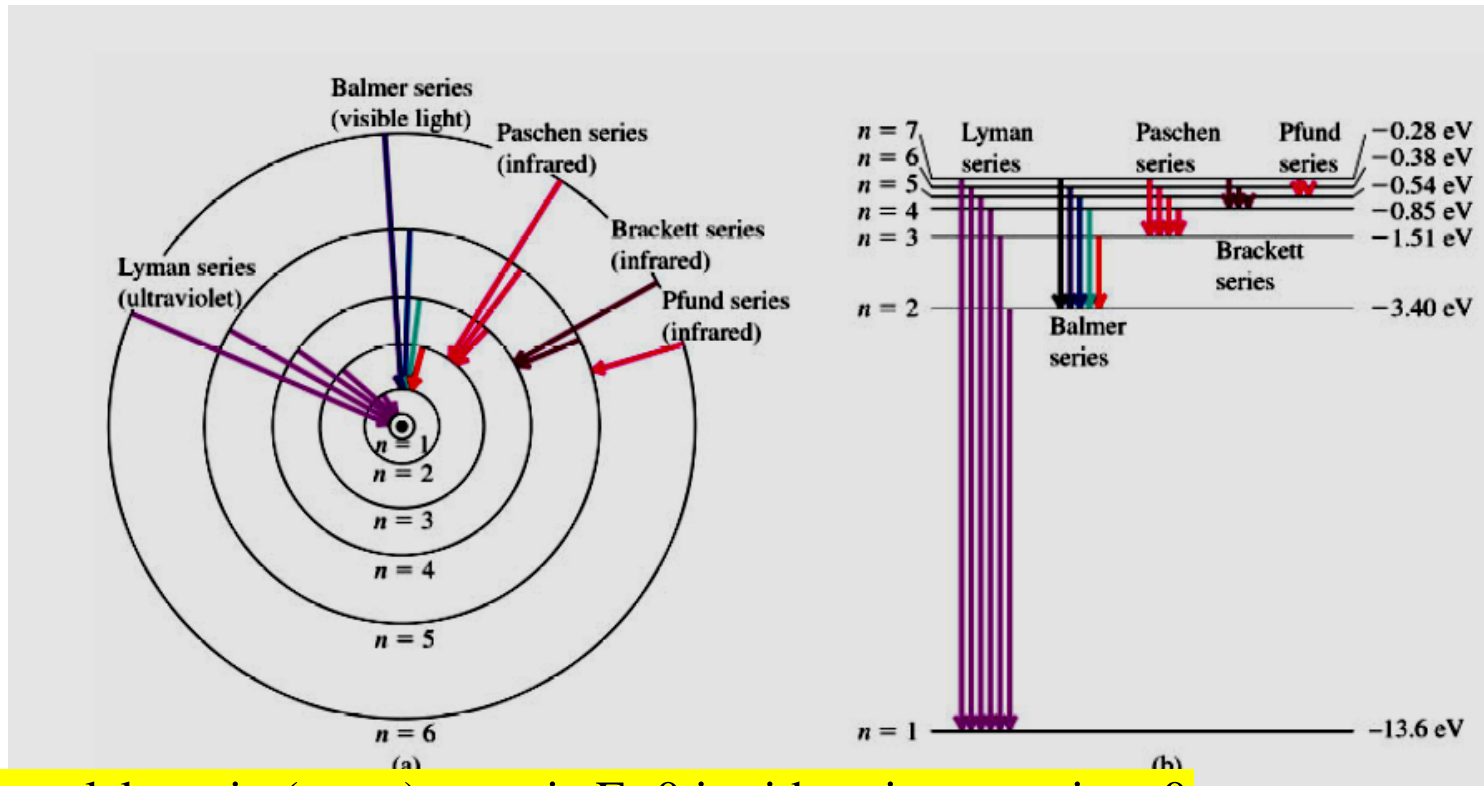


Vetyatomi emittoi ja absorboi näitä aallonpituuksia
Bohrin vetyatomimalli selittää mainiosti nämä spektrit

Vetyatomin spektrit ja energiatasot

$$\frac{1}{\lambda} = R_H \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right) \quad n=1,2,3\dots \quad m=n+1,n+2,\dots$$

jossa Rydbergin vakio $R_H = 1,0973731 \cdot 10^7 \text{ 1/m}$



Vapaan elektronin ($m=\infty$) energia $E=0$ ja sidottujen energia < 0

Tällöin tason n energia on

$$E_n = \frac{hc}{\lambda} = \left(\frac{hcR}{n^2} - \frac{hcR}{\infty} \right) = \frac{hcR}{n^2} = - \frac{13,6}{n^2} \text{ eV}$$

Vedyn perustilan (n=1) energia on -13,6 eV

Elektronin siirtymää vastaavan kvantin aallonpituus voidaan laskea kahdella tavalla:

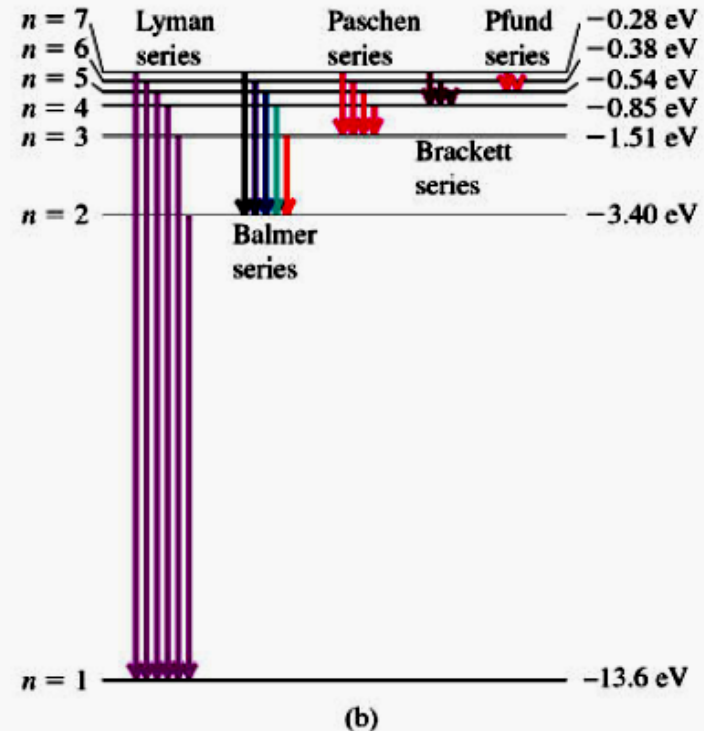
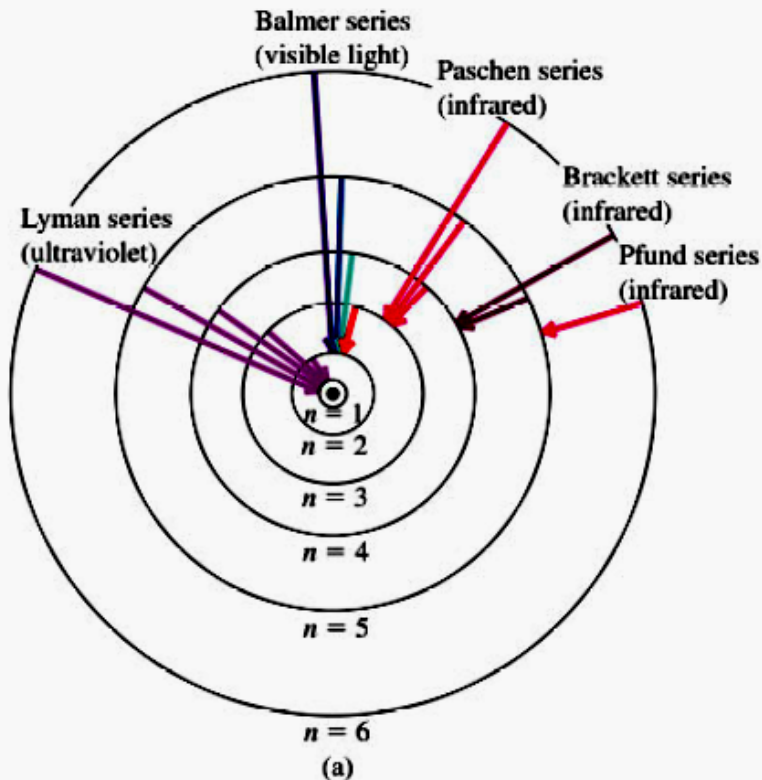
1. Tapa (kaikille)

$$\frac{hc}{\lambda} = \Delta E, \text{ josta } \lambda = \frac{hc}{\Delta E}$$

2. Tapa (vain vetyatomille)

$$\frac{1}{\lambda} = R_H \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right) \quad n=1,2,3\dots \quad m=n+1,n+2,\dots$$

jossa Rydbergin vakio $R_H = 1,0973731 \cdot 10^7 \text{ 1/m}$



Balmerin spektri, näkyvää valoa

$$n=2 \text{ ja } m=3,4,5,\dots$$

Pääkvanttiluku $n=2$ kertoo sen, että elektronit "putoavat" toiseksi alimmalle tasolle. Tuloksena on Balmerin spektrisarjan mukaista näkyvää valoa.

$$\frac{1}{\lambda} = R_H \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{m^2} \right) \quad \text{jossa } m=3,4,5,\dots$$

H_α – viiva, jolloin $m=3$: $\lambda=656,1 \text{ nm}$ (punaista)

(Joko ylläolevasta tai $\frac{hc}{\lambda} = \Delta E = 3,4 \text{ eV} - 1,51 \text{ eV} = 1,89 \text{ eV}$)

H_β – viiva: $m=4$, jne

"äärettömän" korkealta, jossa $E=0$, tasolle 2 putoavan elektronin $\Delta E=3,4 \text{ eV}$, jolloin aallonpituus $\lambda=364,9 \text{ nm}$

ABSORPTIO JA EMISSIO

Kun kaasua valaistaan valkoisella valolla, kaasu imee eli **absorboi** tiettyjä aallonpituuksia. Ne vastaavat kaasun elektronitilojen energiaeroja → **absorptiospektri (yleensä aina perustilan ja ylemmän tilan eroja)**

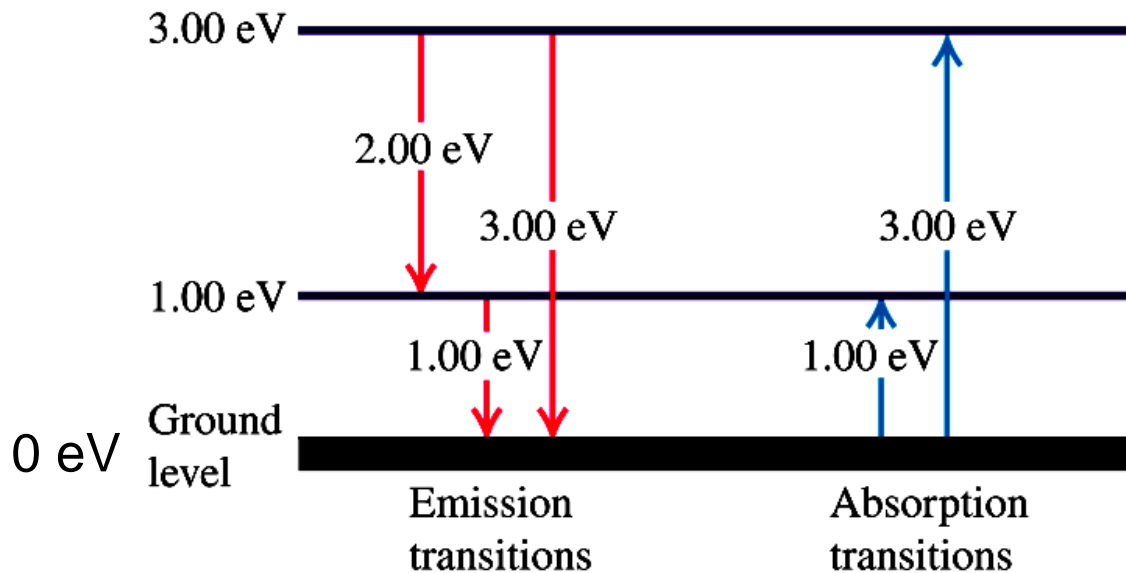
Kun pienipaineista kaasua kuumennetaan, se lähettää eli **emittoi** alkuaineen elektronitilojen energiatasojen erojen mukaisia aallonpituuksia → **viivaspektri (emissio myös välitilojen välillä, ei vain perustilasta ylös)**

Musta kappale **absorboi** kaikki aallonpituudet ja **emittoi** jatkuvasti kaikkia aallonpituuksia → **jatkuva spektri**
Kiinteä kpl lähettää jatkuvan spektrin. Spektri riippuu ainoastaan **lämpötilasta**.

Spektrometreillä tunnistetaan alkuaineita spektriviivojen sijainnin perusteella (aallonpituuksien perusteella)

Tehtävä. Hypoteettisella atomilla on kolme energiatasoa. Perustaso, sekä 1.00 eV ja 3.00 eV perustason yläpuolella.

- Etsi ne spektriviivan taajuudet ja aallonpituudet, joita tämä atomi voi emittoida virittyneenä.
- Mitä aallonpituuksia atomi pystyy absorboimaan, jos se on alun perin perustasolla?



Huom! Atomit ovat normaalisti ^(a) lähes aina perustilassa jolloin **absorptio** tapahtuu **vain perustilasta ylöspäin**

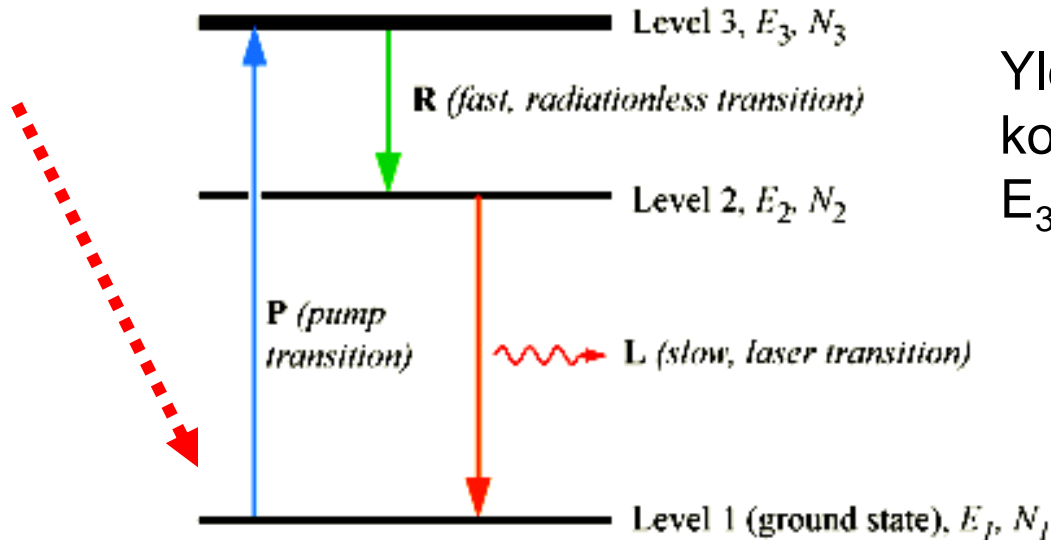
Laser (3-tilainen, esim rubiinilaser)

Light **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation
(valon vahvistus säteilyn stimuloidulla emissiolla)

Normaalisti
kaikki elektronit
ovat tilassa E_1
koska:

$$\frac{N_2}{N_1} = e^{-\frac{E_2 - E_1}{kT}}$$

$$\frac{N_3}{N_1} = e^{-\frac{E_3 - E_1}{kT}}$$

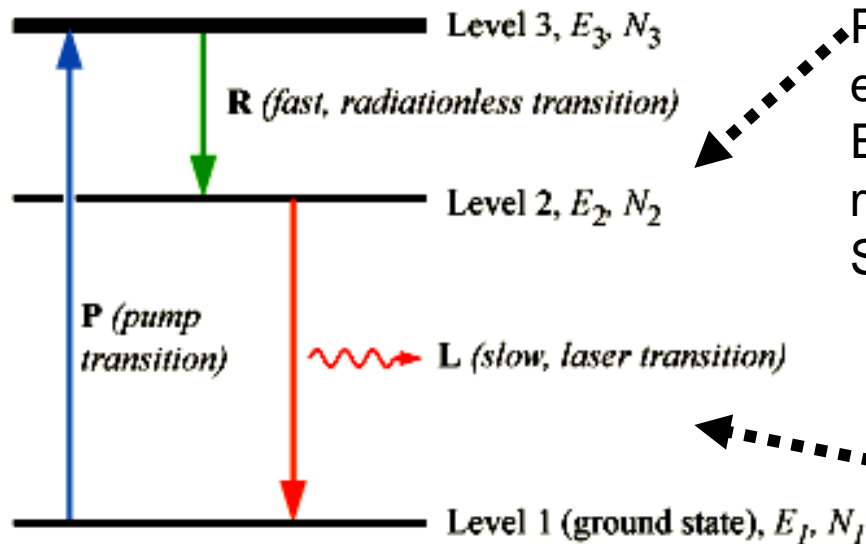


Ylemmällä tasolla
korkeampi energia:
 $E_3 > E_2 > E_1$

Normaalisti perustilassa E_1 on valtavasti enemmän elektroneita kuin viritetyissä tiloissa E_2 ja E_3 . **Optisella pumppauksella** saadaan osa elektroneista siirtymään $E_1 \rightarrow E_3$.

Tietyillä aineilla on **välitila** E_2 , jonne elektronit voivat pudota **nopeasti säteilemättä** fonia. Tällöin energiaero vapautuu lämpönä. Kun pumppausta jatketaan, tilassa E_2 on **enemmän** elektroneja kuin E_1 :ssa.

Laser (3-tilainen, esim rubiinilaser)



Pumppauksen jatkuessa tilassa E_2 on enemmän elektroneja kuin perustilassa E_1 . Tätä sanotaan käänteiseksi miehitykseksi (population inversion) Siis nyt $N_2 > N_1$ ja $N_3 \approx 0$

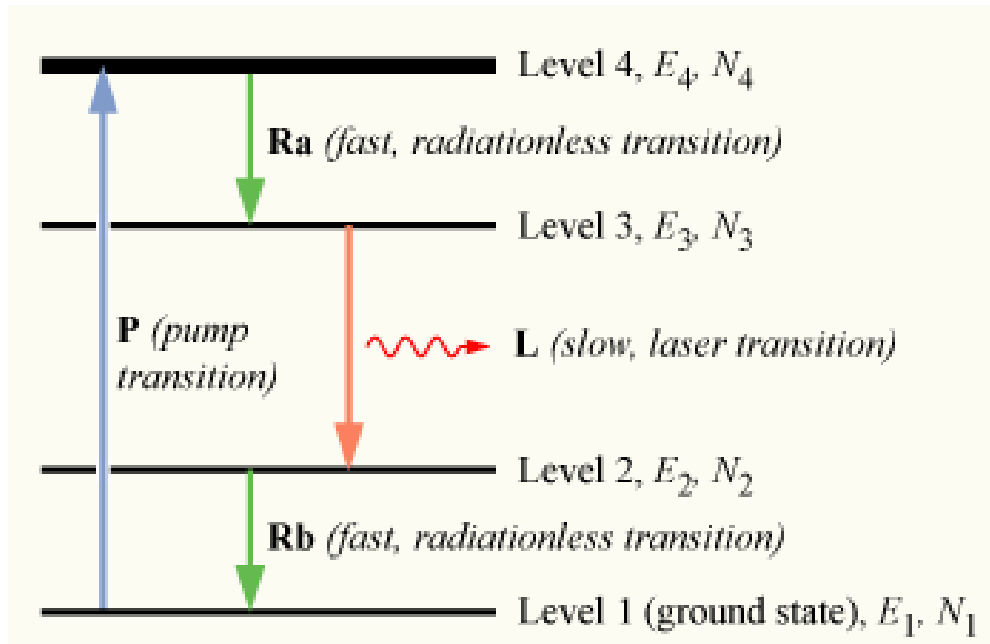
Kun yksi elektroni siirtyy tilasta 2 tilaan 1, syntyy fotoni. Se **laukaisee** toisen siirtymän, tämä taas toisen, jolloin syntyy ketjureaktio, **stimuloitu emissio**

Ketjureaktiona etenevä stimuloitu emissio tuottaa äkillisesti suuren joukon täsmälleen samantaajuisia ja samanvaiheisia fotoneja, ”koherenttia valoa”, laservaloa.

ketjureaktio = ”light amplification by stimulated emission”

3-tilainen laser on melko tehoton, hyötysuhteeltaan huono.

Tehokkaammat laserit 4-tilaisia



Pumppauksen jatkuessa suurin osa elektroneista on tilassa E_3 . Syntyy siis käänteinen miehitys eli $N_3 > N_1$

Kun yksi elektroni siirtyy tilasta 3 tilaan kaksi 2, syntyy fotoni. Se **laukaisee** toisen siirtymän, tämä taas toisen, jolloin syntyy ketjureaktio, **stimuloitu emissio**

Pumppaus voidaan tehdä valolla, sähköpurkauksella tai kemiallisella reaktiolla.

Fluoresenssi ja fosforesenssi

Fluoresenssi-ilmiössä virittynyt atomi tai molekyyli palaa perustilaansa yhden tai useamman välitilan kautta.

Jos viritys on saatu aikaan sähkömagneettisen säteilyn avulla, fluoresenssisäteilyn aallonpituus on luonnollisesti suurempi kuin virittäneen säteilyn aallonpituus. Esim. loisteputken loisteaine

Fosforesenssi-ilmiö on sama kuin **viivästynyt** fluoresenssi. Jälkisäteily jatkuu kauan. Esim. kellotaulujen fosfori.

Heisenbergin epätarkkuusperiaate

Hiukkasen paikkaa ja liikemäärää ei voi mitata samanaikaisesti mielivaltaisen tarkasti

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{h}{4\pi}$$

Myöskään hiukkasen energian ja mittaushetken tarkkuudella on raja

$$\Delta t \cdot \Delta E \geq \frac{h}{4\pi}$$

Epätarkkuusperiaate asettaa mittausten tarkkuudelle rajan.

Kvanttimekaniikka

Schrödingerin aaltoyhtälö kuvaa hiukkasen tiloja. Sillä on ratkaisuja vain tietyillä kokonaislukuarvoilla → kvantittuminen (vastaavat seisovaa aaltoliikettä)

Esimerkiksi hiukkanen 3-ulotteisessa laatikossa:

$$\left[-\frac{\hbar^2}{2m}\nabla^2 + U(\mathbf{r})\right]\psi(\mathbf{r}) = E\psi(\mathbf{r}).$$

Hiukkaseen liittyy aaltofunktio Ψ , josta saadaan hiukkasen mitattavia ominaisuuksia, mm. **energiaspektri** Ψ antaa itse asiassa mitattavien ominaisuuksien **todennäköisyysjakaumia**.

$|\Psi|^2$ antaa hiukkasen **esiintymistodennäköisyyden** tietyssä paikassa.

Klassinen mekaniikka \leftrightarrow Kvanttimekaniikka

Liikkeyhtälöt

Antaa hiukkaselle **tarkan** paikan ja nopeuden.
Jos hiukkaseen vaikuttavat voimat ja hiukkasen alkutila tunnetaan, hiukkasen tuleva tila määräytyy tarkasti (**deterministinen**)

Schrödingerin aaltoyhtälö

Hiukkaselle aaltofunktio antaa **todennäköisyysjakauman** hiukkasen paikalle ja nopeudelle.
Kuhunkin mitattavaan suureeseen liittyy operaattori, jonka ominaisarvot ovat mitattavia arvoja.
Suuri kappale käyttäytyy samoin kuin klassisessa mekaniikassa.

Kvanttimekaaninen atomimalli

Schrödingerin aaltoyhtälö antaa atomissa olevalle elektronille **3 kvanttilukua**, jotka kuvaavat elektronin ”tilaa”. **Tilaa sanotaan orbitaaliksi** (\neq fyysinen ”rata”).

1. **Pääkvanttiluku n** liittyy elektronin kokonaisenergiaan

$$\text{Esim. vetyatomin elektronin kokonaisenergiat } E_n = - \frac{13,607 \text{ eV}}{n^2} \quad \text{jossa } n = 1, 2, 3, \dots$$

2. **Sivukvanttiluku l** liittyy liikemäärämomenttiin L

$$L = \sqrt{l(l+1)} \frac{h}{2\pi} \quad \text{jossa } l = 0, 1, 2, \dots, (n-1)$$

3. **Magneettinen kvanttiluku m** ilmaisee liikemäärämomentin z-komponentin

$$m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm l$$

4. Myöhemmin todettiin, että tarvitaan neljäskin **kvanttiluku $m_s = \pm 1/2$** , jolle annettiin nimi **spin**. Se liittyy elektronin pyörimissuuntaan.

Kvanttimekaniikka ja atomin kuorimalli

Kvanttimekaniikan pohjalta kehitettiin atomin **kuorimalli**. Siinä elektronit voivat sijaita tietyillä ”kuorilla”. Kullakin kuorella voi olla vain tietty määrä elektroneja. **Uloin kuori** määrää alkuaineen kemialliset ominaisuudet.

Pääkvanttiluku n ilmaisee pääkuoren. $n:n$ arvoja 1,2,3,3,5,6 vastaavat kuoret K,L,M,N,O,P

Sivukvanttiluku ℓ ilmaisee yhdessä pääkvanttiluvun kanssa alakuoren, joiden tunnukset $\ell=0,1,2,3,\dots \rightarrow \mathbf{s,p,d,f,\dots}$
Alakuoria merkitään 1s, 2s, 2p, 3s, 3p, 3d, 4s, 4p, 4d, 4f, ...

Magneettinen kvanttiluku m ilmaisee pääkvanttiluvun ja sivukvanttiluvun kanssa elektronin orbitaalin. Orbitaalille mahtuu 2 elektronia, vastaten spinin arvoja $+1/2$ ja $-1/2$

Paulin kieltoääntö v. 1925: Atomissa ei voi olla kahta elektronia, joilla on sama kvanttilukujen yhdistelmä. Tästä seuraa, että atomit eivät voi tunkeutua toistensa sisään \rightarrow aine on ”kovaa”, vaikka se on itse asiassa lähes tyhjiyttä.

Elektronien asettuminen kuorille: alimmat energiatilat täyttyvät ensin

$l = 0, 1, 2, \dots, (n-1)$ $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm l$
orbitaalilla spin $= \pm \frac{1}{2} \rightarrow \text{max } 2$ elektronia

$\rightarrow \text{max } 2n^2$ elektronia

$n = 1$ eli K-kuori: $l = 0$ $m = 0$ spin $= \pm \frac{1}{2} \rightarrow \text{max } 2$ elektronia

5-kuoren elektronit, $n = 5$, O-kuori: $\rightarrow \text{max } 2 \cdot 5^2 = 50$ elektronia, jotka voivat sijoittua seuraavan taulukon mukaisesti:

Shell	Subshell	Orbitals		Electrons
$n = 5$	$l = 0$	$m = 0$	$\rightarrow 1$ type s orbital	$\rightarrow \text{max } 2$ electrons
	$l = 1$	$m = -1, 0, +1$	$\rightarrow 3$ type p orbitals	$\rightarrow \text{max } 6$ electrons
	$l = 2$	$m = -2, -1, 0, +1, +2$	$\rightarrow 5$ type d orbitals	$\rightarrow \text{max } 10$ electrons
	$l = 3$	$m = -3, -2, -1, 0, +1, +2, +3$	$\rightarrow 7$ type f orbitals	$\rightarrow \text{max } 14$ electrons
	$l = 4$	$m = -4, -3, -2, -1, 0, +1, +2, +3, +4$	$\rightarrow 9$ type g orbitals	$\rightarrow \text{max } 18$ electrons
				Total: max 50 electrons

Tiiviissä muodossa täysi 5-kuori on: $5s^2 5p^6 5d^{10} 5f^{14} 5g^{18}$

Nanotekniikka

Nano = atomitason mittakaavan tekniikkaa

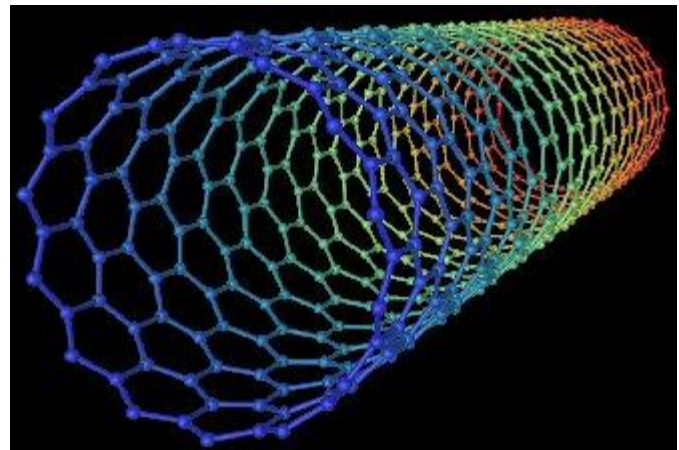
Kvanttitietokone?

Kiinteän aineen fysiikkaa, hiilinanoputket

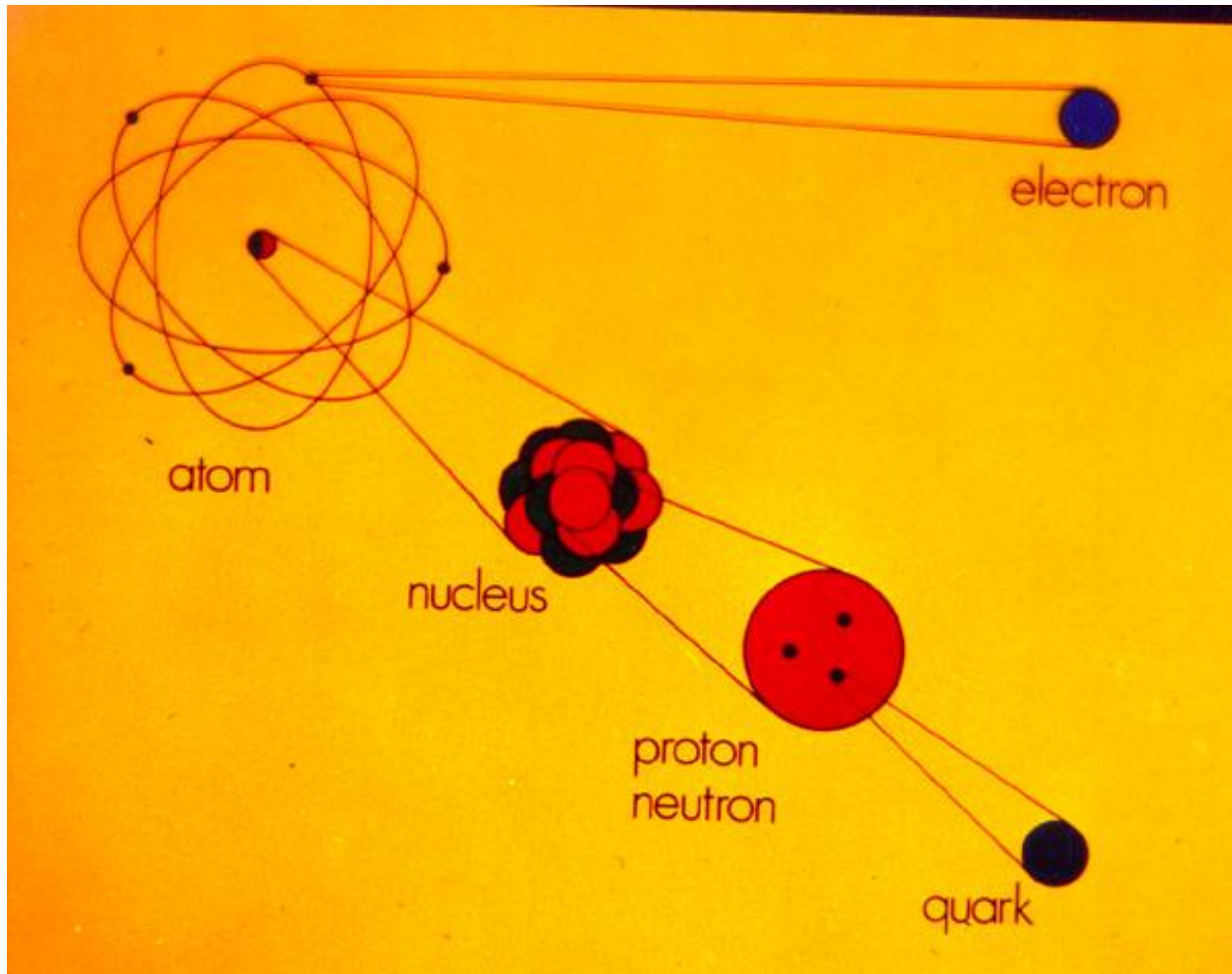
Molekyylimikropiirit ?

Nanorobotit, nanokoneet?

Avaruushissi nanoputki-
köyden avulla?



YLI 99,99 % NÄKYVÄSTÄ AINEESTA
koostuu down- ja up-kvarkeista ja
elektronista. Lisäksi on neutriinoja.

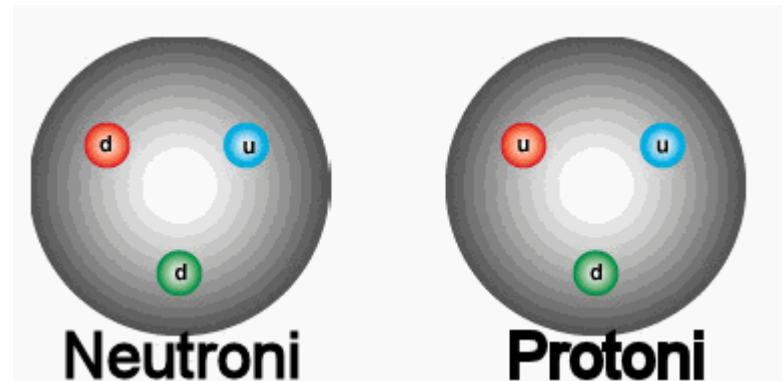


”Tavallisen” aineen rakenne

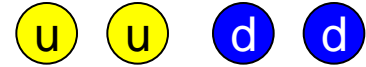
Tavallinen aine rakentuu 3 alkeishiukkastyypistä, jotka muodostuivat alkuräjähdyksen jälkeen noin 13 miljardia vuotta sitten.

elektroni
u-kvarkki
d-kvarkki

u- ja d-kvarkit eivät esiinny vapaana. Ne esiintyvät ”kolmen koplana” muodostaen protonin ja neutronin

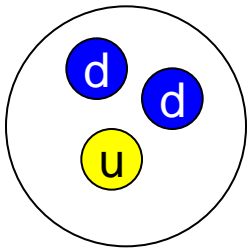


(ei sähköinen) (positiivinen)

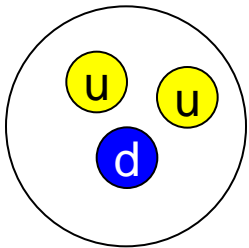


Atomin ydin

Atomin ydin koostuu protoneista ja neutroneista



Neutroni rakentuu kahdesta down-kvarkista (**d**) ja yhdestä up-kvarkista (**u**)



Protoni koostuu kahdesta up-kvarkista (**u**) ja yhdestä down-kvarkista (**d**)

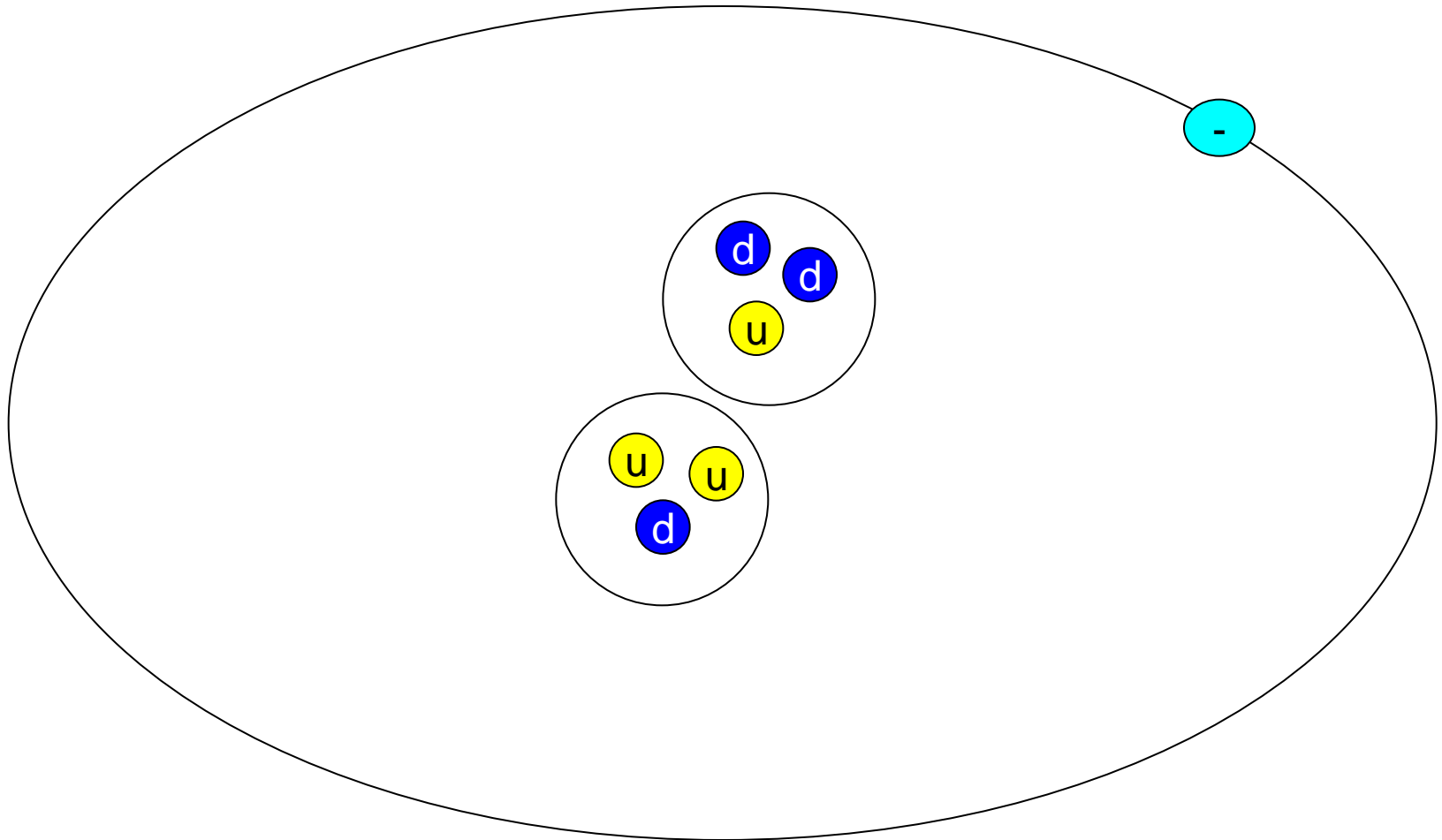
u-kvarkin varaus $+\frac{2}{3}$ ja d-kvarkin varaus $-\frac{1}{3}$
d-kvarkki on hieman raskaampi kuin u-kvarkki

protonin varaus $\frac{2}{3} + \frac{2}{3} - \frac{1}{3} = +1$ ja neutronin varaus $-\frac{1}{3} - \frac{1}{3} + \frac{2}{3} = 0$

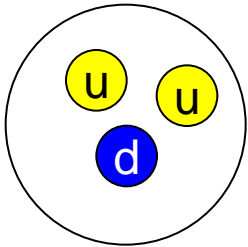
Ydintä kiertää elektroniverho

${}^2_1\text{H}$ eli deuterium

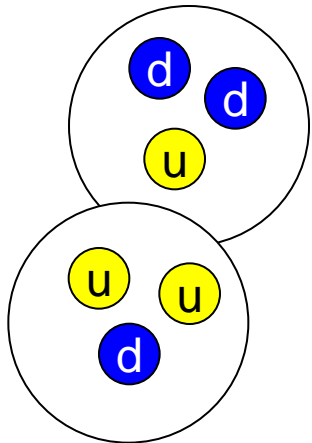
Sähköinen vuorovaikutus pakottaa elektronit kiertämään ydintä



Atomin ytimen vuorovaikutukset



Kvarkkeja sitoo yhteen vahva vuorovaikutus
Kvarkit eivät voi esiintyä luonnossa vapaina.
Mahdollisia pareittain tai kolmittain.



Kvarkkien välisen vahvan vuorovaikutuksen heikko
jäännösvuorovaikutus pitää atomin ydintä koossa
(naapurin kvarkkien vaikutus ulottuu läheisen
ydinhiukkasen kvarkkeihin)

4 perusvuorovaikutusta

- 1. Vahva vuorovaikutus:** (kvarkkien välillä)
- 2. Sähkömagneettinen vuorovaikutus** (elektronit ja ydin, pitää molekyylit koossa)
- 3. Heikko vuorovaikutus** (radioaktiivisuus)
(neutroni hajoaa protoniksi ja elektroniksi)
- 4. Gravitaatiovuorovaikutus** (galaksit, aurinkokunnat)

Vuorovaikutus on lajille ominaisten **välittäjähiukkasten** vaihtoa, sekä hiukkasten kykyä tuntea ja aiheuttaa eri vuorovaikutuksia.

Vuorovaikutusten välittäjät = hiukkasia joita vuorovaikutuksessa olevat vaihtavat keskenään

Vuorovaikutus

Välittäjähiukkaset

Vahva vuorovaikutus

Gluoni

Sähkömagneettinen vuorovaikutus

Fotoni

Heikko vuorovaikutus

Bosonit

Gravitaatiovuorovaikutus

Gravitoni

Onko muuta kuin ”tavallista” ainetta?

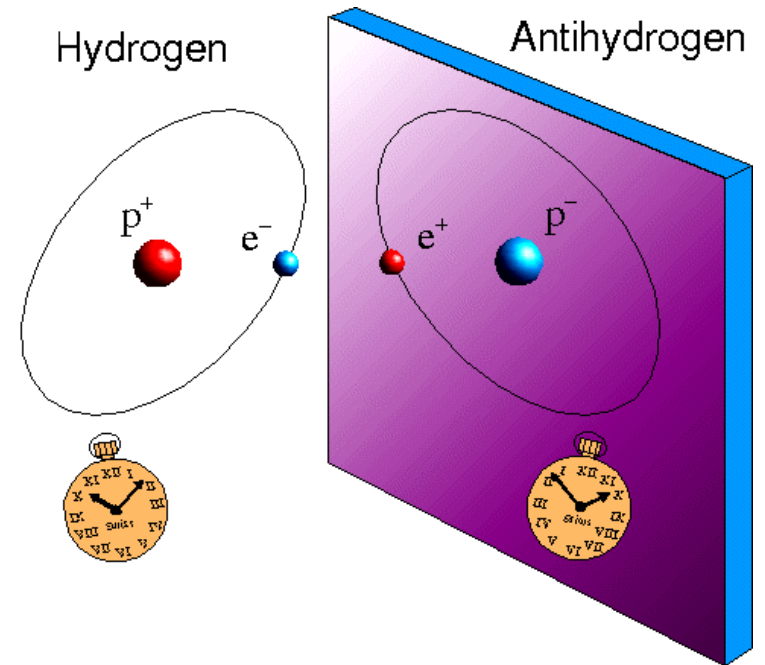
Alkuräjähdyksen aikana oli sekä **materiaa** että **antimateriaa**. Jostakin syystä materiaa syntyi hieman enemmän kuin antimateriaa. Materian ja antimaterian **tuhotessa toisensa** jäi jäljellä pieni ylijäämä materiaa, siis tavallista ainetta. Siitä koostuu kaikki näkyvä aine. Miksi antimateriaa oli vähemmän?

Euroopan hiukkastutkimuskeskuksen CERN:n antimaterialaboratoriossa valmistetaan antimateriaa jotta voidaan tutkia sen ominaisuuksia ja selvittää miksi antimateriaa oli vähemmän



Antimateria

- jokaista materiahiukkasta vastaa antimateriahiukkanen
- antimateriahiukkasella päinvastainen varaus
- materian ja antimaterian kohtaaminen → **annihilaatio**
- suuri määrä energiaa gammasäteilyn muodossa



Antimateria CERNissä

Antivetyä valmistetaan tutkimuksia varten

Tutkitaan materian ja antimaterian eroja

- miksi maailmankaikkeus koostuu materiasta eikä antimateriasta?
- miksi materia voitti antimaterian alkuräjähdyshetkellä



Tällä hetkellä 3 koetta Cernissä:

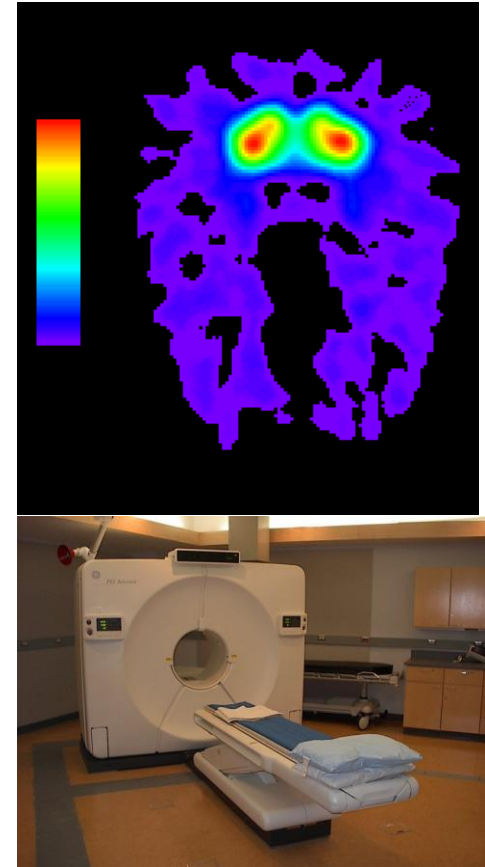
Athena

Atrap

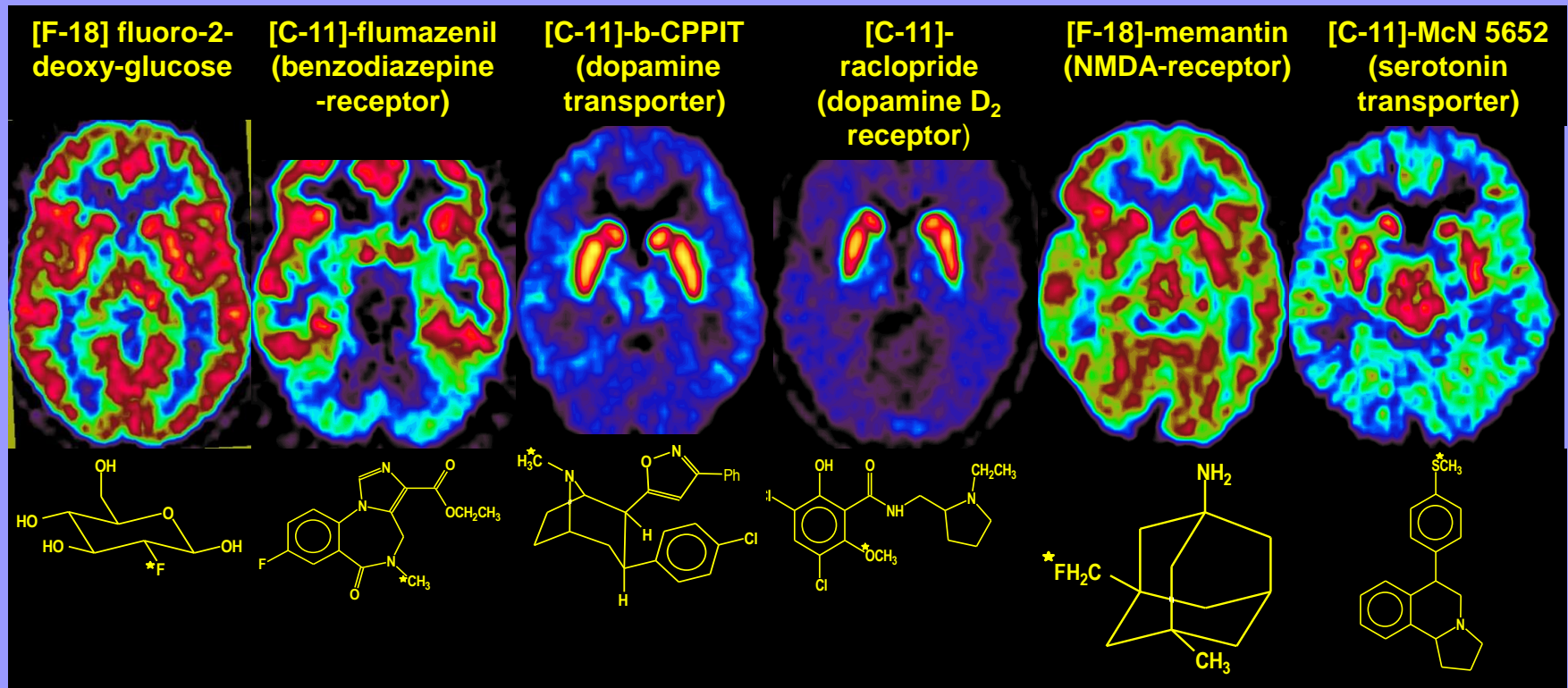
Asacusa

Antimaterian käyttö

- PET-kuvauksessa saadaan tarkkoja kuvia elimistön kudoksista
(PET = Positroni-Elektroni Tomografia)
- Aivokasvainten hoidossa syöpäsolussa elektronin ja positronin annihilaatio → gammakvantti, joka tuhoaa syöpäsolun
Paljon turvallisempi kuin tavanomainen sädehoito



A gallery of images brain metabolism and receptor systems



Imaging of brain function: the extremely high signal/noise in nuclear studies and the use of highly specific tracers of properties of brain receptor systems opens new frontiers in drug design

Pimeä aine

Viime vuosina on havaittu, että maailmankaikkeuden materiasta on **näkyvää materiaa** vain 4 %, siis elektroneista ja kvarkeista koostuneiden protonien ja neutronien muodostamaa tavallista ainetta. Pimeää ainetta on 22 % maailmankaikkeuden massaenergiasta.

Pimeä aine, näkymätön aine, itse asiassa läpinäkyvä aine, on ilmeisesti tuntemattomia alkeishiukkasia, jotka eivät vaikuta sähkömagneettisesti. Pimeä aine aiheuttaa kuitenkin painovoimaa.

<http://home.slac.stanford.edu/pressreleases/2006/20060821.htm>



Kuva 21.8.2006: Pimeä aine on galaksin reunoilla (epäsuora havainto) Pimeä aine on väritetty siniseksi, näkyvä aine punaiseksi

Loput 74 % maailmankaikkeuden massaenergiasta on **pimeää energiaa**

Pimeä energia kiihdyttää laajentumista

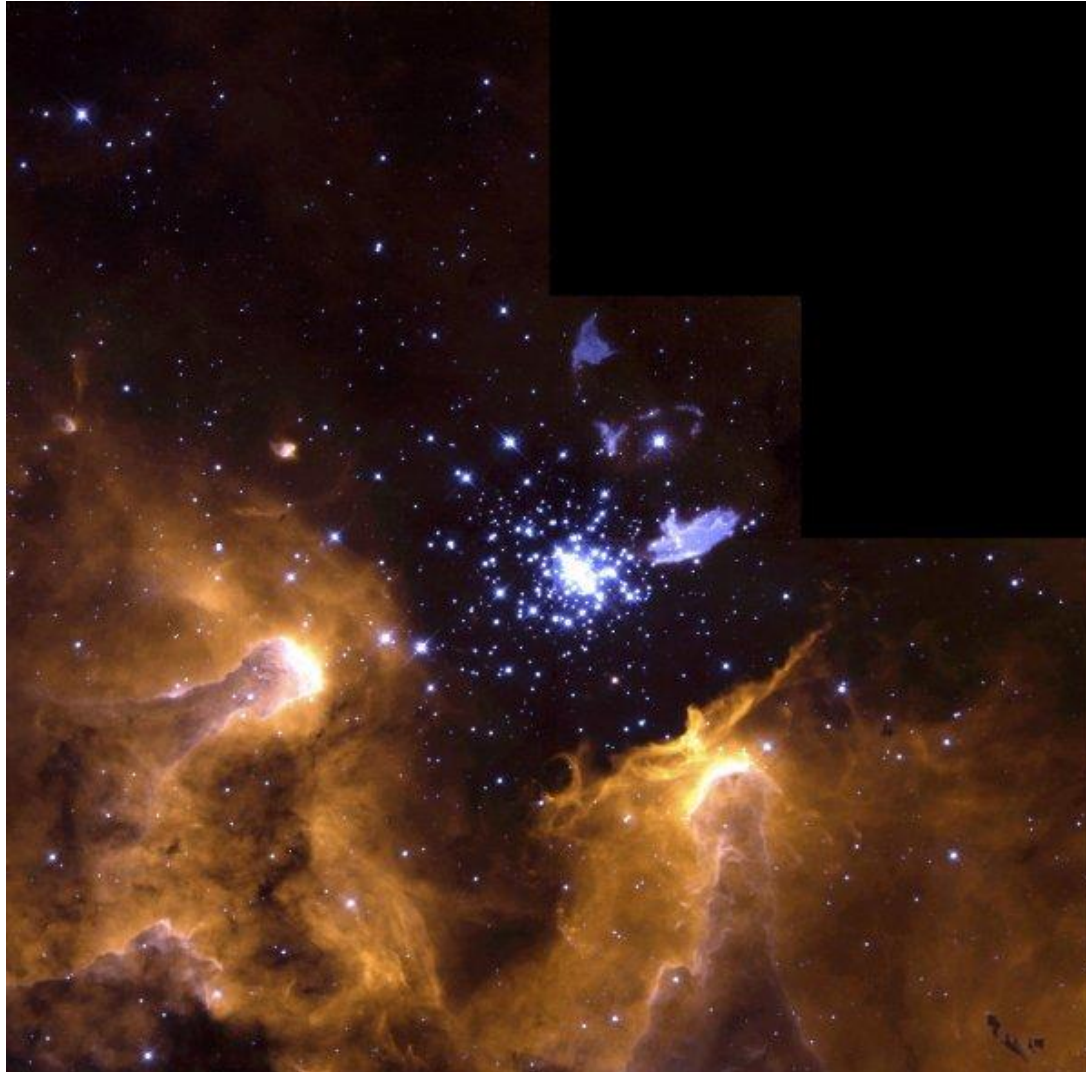
1990-luvun lopulla havaittiin kaukaisten supernovien punasiirtymistä, että avaruuden laajentuminen on alkanut kiihtyä noin 5 miljardia vuotta sitten. Mittaukset on vahvistettu moneen kertaan toisistaan riippumattomilla tavoilla (mikroaaltotausta, gravitaatiolinssit, maailman ikä, avruuden suuret rakenteet, supernovat).

Tekijää, joka kiihdyttää avaruuden laajentumista, on alettu nimittämään **pimeäksi energiaksi**. Sen luonteesta ei juuri tiedetä mitään. (Kosmologinen vakio?, kvintessenssi?)

Wmap-satelliitin viimeisimpien mittausten mukaan maailmankaikkeuden massaenergiasta näkyvää ainetta on 4 %, pimeää ainetta 22 % ja pimeää energiaa 74 %.

Pimeä energia on eräiden tulkintojen mukaan sama kuin Einsteinin kenttäyhtälöiden kosmologinen vakio,

”Tähtipölystä sinä olet syntynyt
ja tähtipölyksi olet muuttuva”



Hiukkasfysiikan Standardimalli

12 alkeishiukkasta: leptoneita ja kvarkkeja jäsentyneenä kolmeen ”perheeseen”: elektronin, myonin ja taun perheet

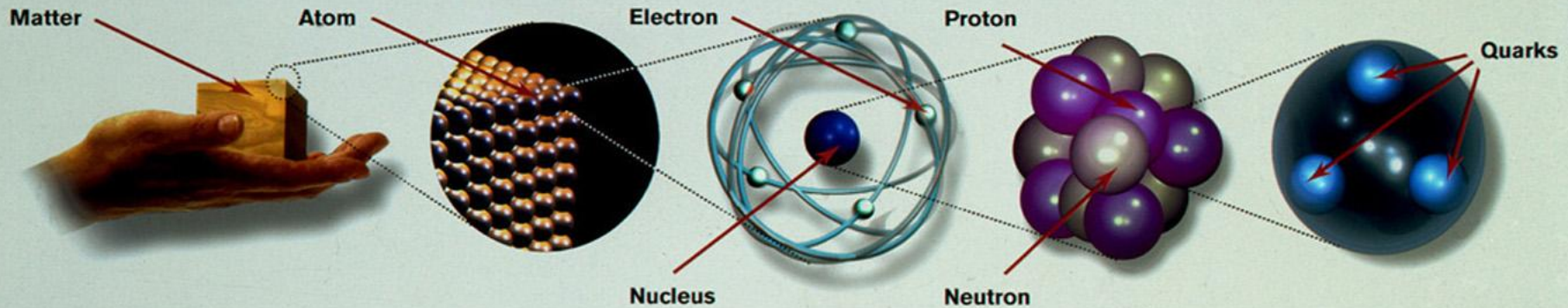
Jokaisella hiukkasella antihiukkanen

Lisäksi edellyttää ”voimahiukkasia” eli vuorovaikutuksia välittäviä hiukkasia

Hyvin tarkasti sopusoinnussa hiukkaskiihdyttimillä yms saatujen mittaustulosten, atomien ydinten ominaisuuksien kosmisten säteiden ominaisuuksien jne kanssa

Ongelma: **Ei pysty yhdistämään gravitaatiota ja mikromaailmaa**, joten tarvitaan vielä parempi ja tarkempi fysiikan perusteoria. Mustien aukkojen fysiikka ja kosmologia vaatisivat tällaista.







Hiukkasfysiikan Standardimalli









Matter particles

All ordinary particles belong to this group

These particles existed just after the Big Bang. Now they are found only in cosmic rays and accelerators


LEPTONS				
FIRST FAMILY	Electron Responsible for electricity and chemical reactions; it has a charge of -1		Electron neutrino Particle with no electric charge, and possibly no mass; billions fly through your body every second	
SECOND FAMILY	Muon A heavier relative of the electron; it lives for two-millionths of a second		Muon neutrino Created along with muons when some particles decay	
THIRD FAMILY	Tau Heavier still; it is extremely unstable. It was discovered in 1975		Tau neutrino not yet discovered but believed to exist	

QUARKS			
Up Has an electric charge of plus two-thirds; protons contain two, neutrons contain one		Down Has an electric charge of minus one-third; protons contain one, neutrons contain two	
Charm A heavier relative of the up; found in 1974		Strange A heavier relative of the down; found in 1964	
Top Heavier still		Bottom Heavier still; measuring bottom quarks is an important test of electroweak theory	

Force particles

These particles transmit the four fundamental forces of nature although gravitons have so far not been discovered


Gluons
 Carriers of the strong force between quarks



Felt by: quarks

The explosive release of nuclear energy is the result of the strong force

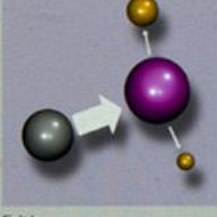
Photons
 Particles that make up light; they carry the electromagnetic force



Felt by: quarks and charged leptons

Electricity, magnetism and chemistry are all the results of electro-magnetic force


Intermediate vector bosons
 Carriers of the weak force



Felt by: quarks and leptons

Some forms of radio-activity are the result of the weak force

Gravitons
 Carriers of gravity



Felt by: all particles with mass

All the weight we experience is the result of the gravitational force

"Standardimalli" edellytti salaperäistä hiukkasta, jota etsittiin vuosikausia

- Higgsin hiukkanen antaa olemassaolollaan ja vuorovaikutuksillaan muille **hiukkasille massan**
- Vasta CERN jättikiihdytin LHC löysi vuonna 2012 Higgsin hiukkasen. "Standardimalli" loksautti paikoilleen. Sen massa on noin 125-126 GeV.

Hiukkanen saa massansa, kun se on vuorovaikutuksessa Higgsin kentän kanssa. Higgsin hiukkanen on itse asiassa Higgsin kentän kvantti.

Standardimalli ei ole koko totuus!

- Vaikka Higgsin hiukkanen löytyikin, teoriolla ei silti voida laskea mielivaltaisen **suurienergisiä** ilmiöitä.
- Ei myöskään tiedetä, miten voitaisiin muotoilla **painovoiman kvanttikenttäteoria**.
- Monien teoreetikkojen mielestä standardimalli on liian "monimutkainen":
 - Miksi juuri kolme perhettä?
 - Miksi niin monenlaisia eri massoja?

Mitä standardimallin jälkeen?

→ fysiikan perusteoria

-Supersymmetria

Uusia hiukkasia, lisää monimutkaisuutta...

”s-kieli”=jokaiselle hiukkaselle ss-partneri...

-Suuri yhtenäisteoria

Yhdistää sähkömagneettisen, heikon ja vahvan vuorovaikutuksen yhdeksi teoriaksi.

Ehkä välivaihe matkalla fysiikan ”kaiken teoriaan”

-Supersäieteoria

Hiukkaset eivät ole pistemäisiä, vaan värähteleviä säikeitä. Vaatii 11-ulottuvuutta
Maailma on ”sfäärien musiikkia”

**Aika tulee näyttämään, mikä teoria vastaa luonnon todellisuutta
CERNin jättikiihdyttimestä LHC:stä ehkä apua**

CERN:n LHC-kiihdyttinen uusi löytö: takaisku supersymmetrialle

Marraskuussa 2012 CERN:ssa havaittiin; että kvarkista ja antikvarkista koostuva B^0_S -hiukkanen hajoavaa myonipariksi huomattavasti harvemmin kuin useimmat supersymmetriateoriat ennustavat.

Ehkä siis supersymmetria ei olekaan oikea selitys pimeään aineen hiukkasille...

Atomin ytimen rakenne

Ydintä kuvaavat

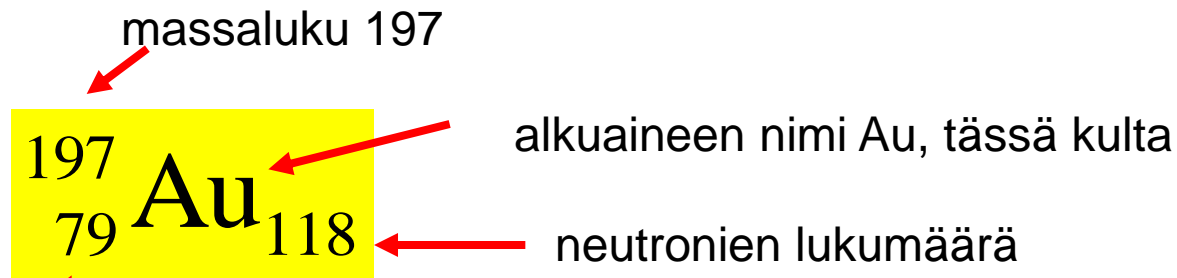
Z= järjestysluku (protonien määrä)

N = neutronien määrä

A = massaluku (protonit + neutronit = nukleonit)

$$A = Z + N$$

(massaluku = järjestysluku + neutronien määrä)



järjestysluku $Z=79 \rightarrow 79$ protonia ytimessä $\rightarrow 79$ elektronia kiertämässä ydintä

Pysyvät ja radioaktiiviset isotoopit

Samasta alkuaineesta voi esiintyä useita **eri isotooppeja**:

- Järjestysluku Z on kaikilla sama (protonien määrä)
- Neutronien määrä voi vaihdella
→ Massaluku vaihtelee

Osa isotoopeista voi olla **pysyviä**, osa epästabiileja eli **radioaktiivisia** (hajoavia)



Isotooppeja voidaan merkitä myös:
 ${}^{12}\text{C}$, C-12, He-3, He-4, Po-209,
Polonium-210

Atomimassayksikkö u

$$1 \text{ u} = \frac{1}{12} \text{ - osa } ^{12}\text{C:n massasta}$$

(C-12 = Tavallinen hiili)

→ C-12:n atomin massa on 12u

Yksi mooli C-12 on massaltaan 12 g ja se sisältää Avogadron luvun $6,0221367 \cdot 10^{23}$ kpl hiiliatomeja

→ $1 \text{ u} = 1,6605402 \cdot 10^{-23} \text{ kg}$

→ $1 \text{ u energiasisältö} = 931,49432 \text{ MeV}$

Taulukkokirjassa on protonin, elektronin ja neutronin massat u-yksikköinä ja kg sekä energiat MeV. Siellä on kaikkien isotooppien tarkat massat u-yksikköinä

Kadonnut massa = Massavaje

Kun lasketaan alkuaineen massa u-yksikköinä atomin sisältämien hiukkasten mukaan, saadaan suurempi massa kuin alkuaineen mitä atomilla todellisuudessa on. Massaa on kadonnut jonnekin

Osaset siis painavat yhdessä enemmän kuin niistä koostunut atomi!

Ytimen massavaje Δm = atomin osasten massa – atomin massa

$$\Delta m = Z \cdot m_p + N \cdot m_n + Z \cdot m_e - m$$

Protonien määrä
ja protonin massa

Neutronien määrä
ja neutronin massa

Elektronit

Elektronit pitää laskea mukaan, koska taulukoissa on annettu koko atomit massat

Atomin taulukkomassa (sisältää myös elektronit)

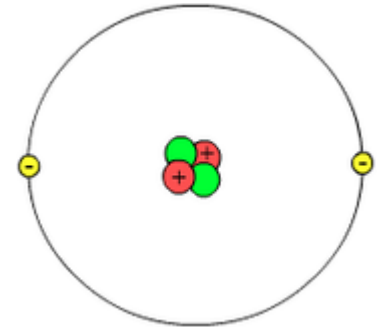
Esim. He-4:n massavaje

sivu 71:

Protoneja $Z = 2$
Massaluku $A = 4$
Neutroneja $N = 2$
Elektroneita $= 2$
atomin massa $m = 4,0026033 \text{ u}$

$$\begin{aligned}m_p &= 1,0072765 \text{ u} \\m_n &= 1,0086650 \text{ u} \\m_e &= 0,0005485799 \text{ u}\end{aligned}$$

$$\Delta m = Z \cdot m_p + N \cdot m_n + Z \cdot m_e - m$$



$$\begin{aligned}\text{Massavaje } \Delta m &= 2 \cdot 1,0072765 \text{ u} + 2 \cdot 1,0086650 \text{ u} \\ &\quad + 2 \cdot 0,0005485799 \text{ u} - 4,0026033 \text{ u} \\ \Delta m &= 0,03037686 \text{ u}\end{aligned}$$

Massavajetta vastaava energia $1 \text{ u} = 931,49432 \text{ MeV}$
energia $= 0,03037686 \cdot 931,49432 \text{ MeV} = 28,3 \text{ MeV}$

Massavaje, sidosenergia ja sidososuus

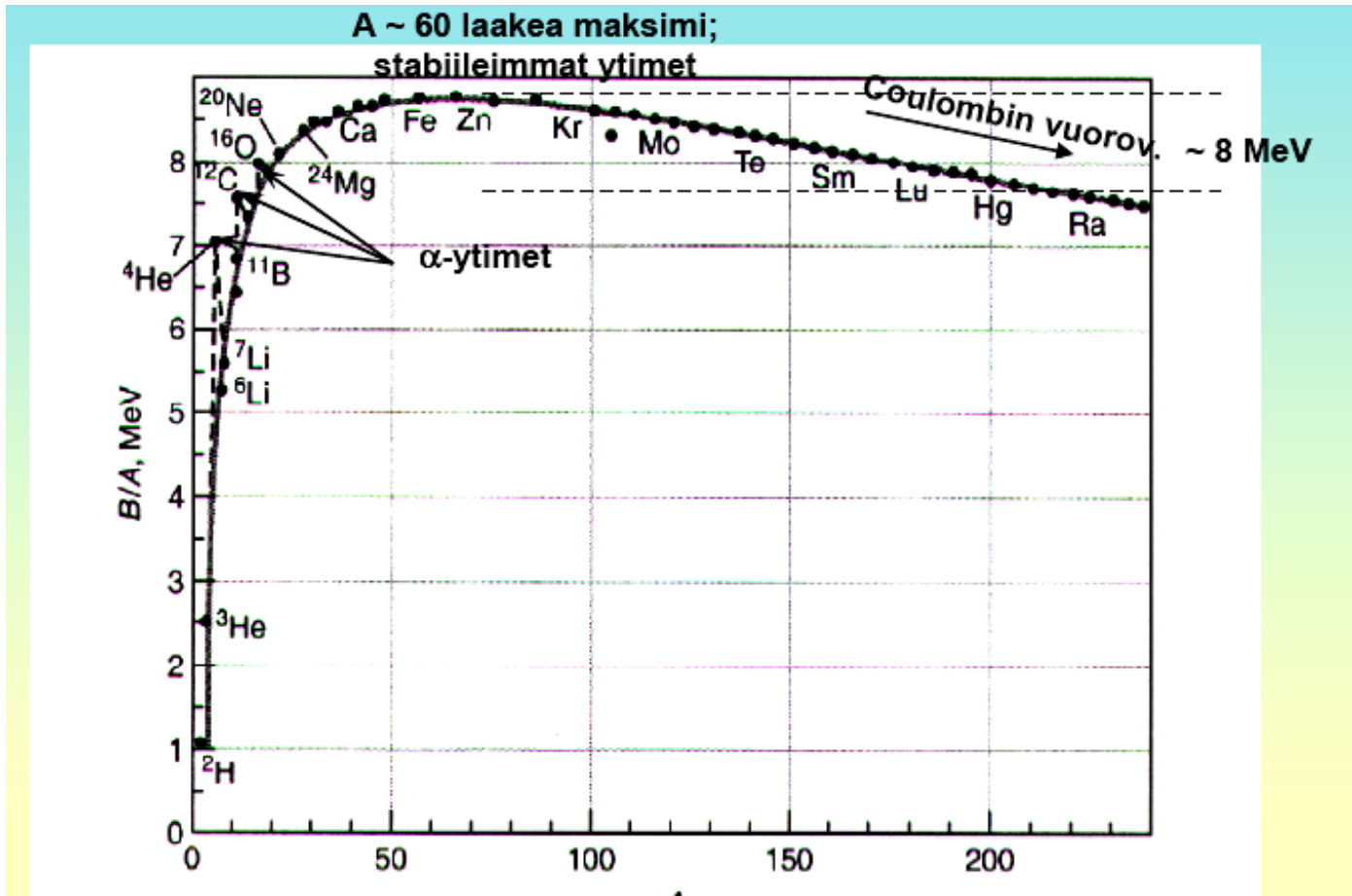
Massavajetta Δm vastaava energia vapautuu, kun ytimen rakenneosaset yhtyvät ytimeksi. Energiaa sanotaan **sidosenergiaksi**, koska ytimen hajottaminen osasikseen vaatii saman energian.

Sidosenergia ydinhiukkasta (nukleonia) kohti on sidososuus. Se kuvaa ytimen lujutta. Mitä suurempi sidososuus, sitä tiukemmin ydinhiukkaset ovat kiinni ytimessä

$$\text{Sidososuus} = \frac{\text{Sidosenergia}}{\text{Massaluku}}$$

Sidososuus kasvaa aina massalukuun 60 asti. Sitten se alkaa pienetä.

Sidososuus eri ytimillä



Keveiden ydinten fuusio: sidososuus kasvaa, energiaa vapautuu
Raskaiden ydinten fissio: sidososuus kasvaa, energiaa vapautuu

Fuusio: Deuterium + Tritium

Keveiden ytimien yhtyessä massaa muuttuu energiaksi.

Vedyn isotooppeja deuteriumia ja tritium pannaan samaan tilaan. Seosta puristetaan ja kuumennetaan jolloin deuteriumytimet ja tritiumytimet yhtyvät muodostaen heliumia

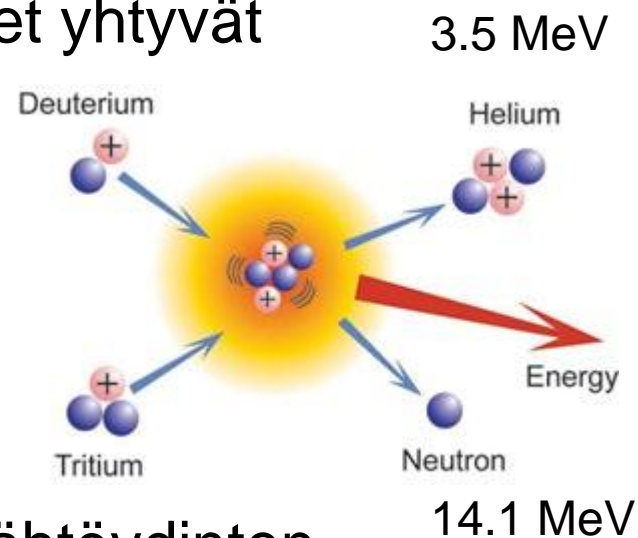


Reaktion massavaje

tulosydinten massa on pienempi kuin lähtöydinten

massa → Massavaje 0,0186 u

vapautunut energia 17,6 MeV



Tehtävä. (Teknillisten korkeakoulujen fysiikan valintakoe 1993:

Fuusiovoimalassa aiotaan käyttää polttoaineena deuteriumin ja tritiumin seosta



- Kuinka paljon energiaa saadaan 1,0 kg polttoainetta?
- Suomen vuotuinen energiantarve on noin 30 miljoonaa öljytonnia vastaava (30 Mtoe). Kuinka paljon fuusiopolttoainettatarvittaisiin energiatarpeen tyydyttämiseksi?

Fuusio: Deuterium+He-3

Keveiden ytimien yhtyessä (fuusio) tulosydinten ja hiukkasten yhteenlaskettu massa on pienempi kuin lähtöydinten ja hiukkasten massa.

Erotus, massavaje, muuttuu energiaksi.

Esimerkiksi deuterium-ytimen ja He-3 –ytimen fuusio:



D-ydin : 2,0141018u – e

${}^3\text{He}$ -ydin: 3,0160293u – 2e

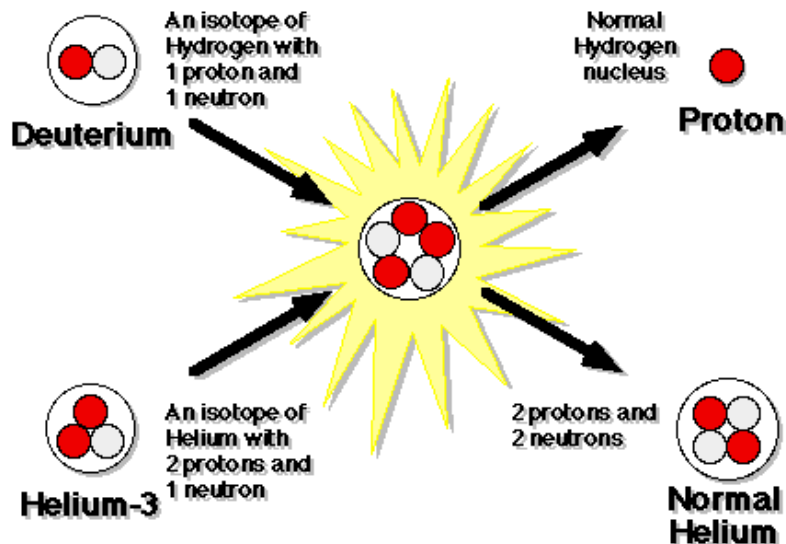
${}^4\text{He}$ -ydin = α -hiukkanen = 4,001507u

p: 1,0072765u

e: 0,0005485799u

1 u : 931,49432 MeV

→ massavaje = 0,019701863 u = 18,4 MeV



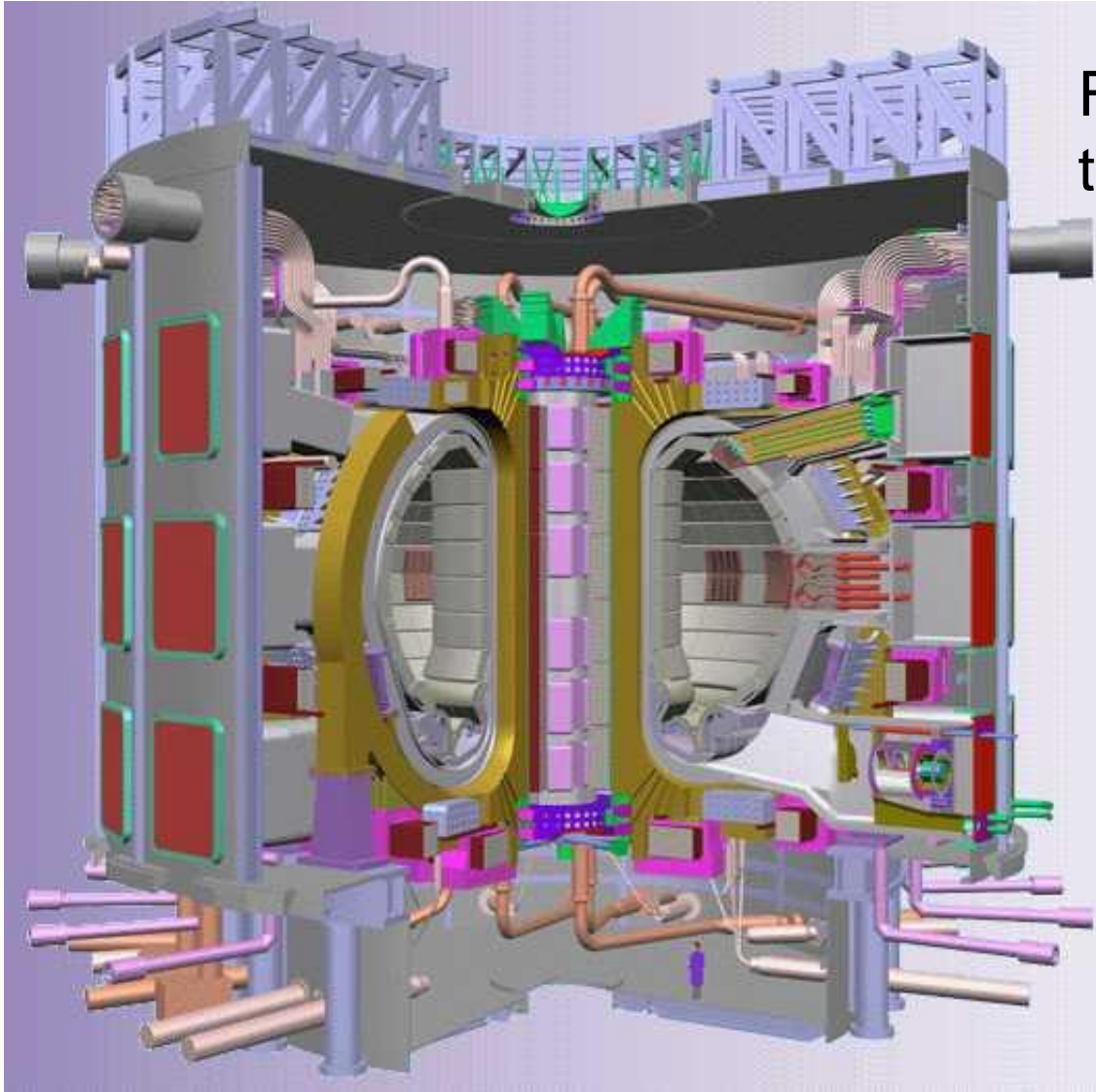
Auringon fuusioreaktiot

Protoni-Protoni -ketju:



Aurinko muuttaa yhdessä sekunnissa
600 miljoonaa tonnia vetyä 596 tonniksi heliumia.
Noin neljä miljoonaa tonnia massasta muuttuu
energiaksi, jolloin Auringon teho on $3,86 \cdot 10^{26}$ W

Fuusioreaktori ITER vuonna 2020



Fuusioi deuteriumia ja tritiumia. Teho 500 MW

Tritium valmistetaan litiumista neutronien avulla

ITERin jälkeen sähköä tuottava koevoimala

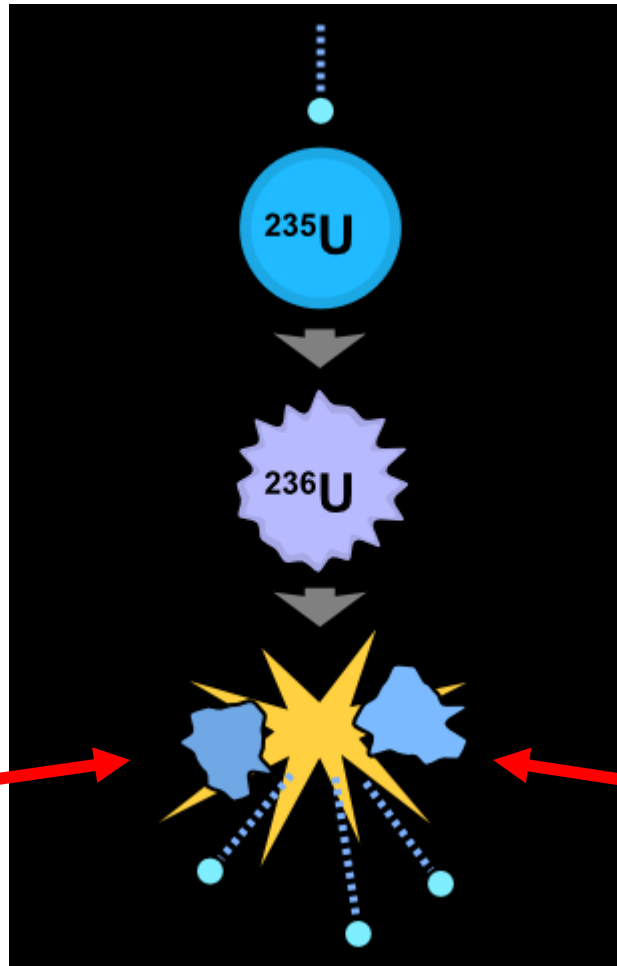
Sen jälkeen kaupallinen fuusiovoimala, ehkä vasta v 2050

Raskaiden ytimien fissio

Raskas ydin hajoaa kahdeksi keskiraskaaksi, joiden sidososuus on suurempi kuin raskaan ytimen sidososuus.

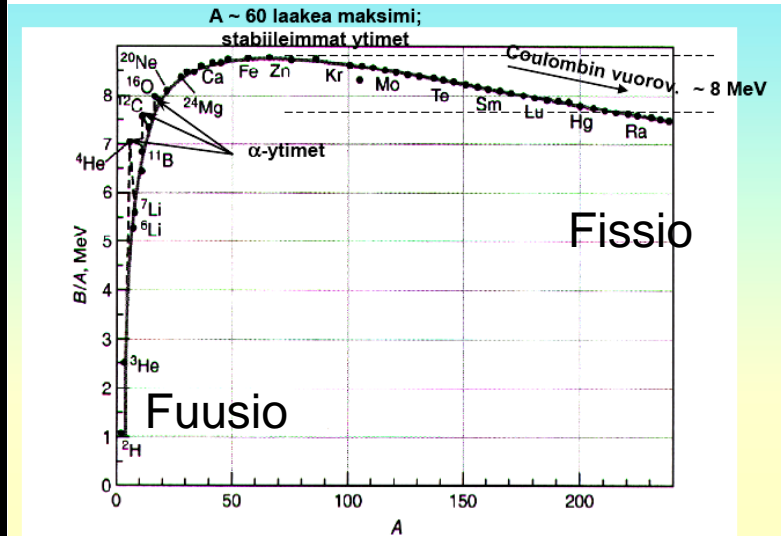
Energiaa vapautuu

Kr-92



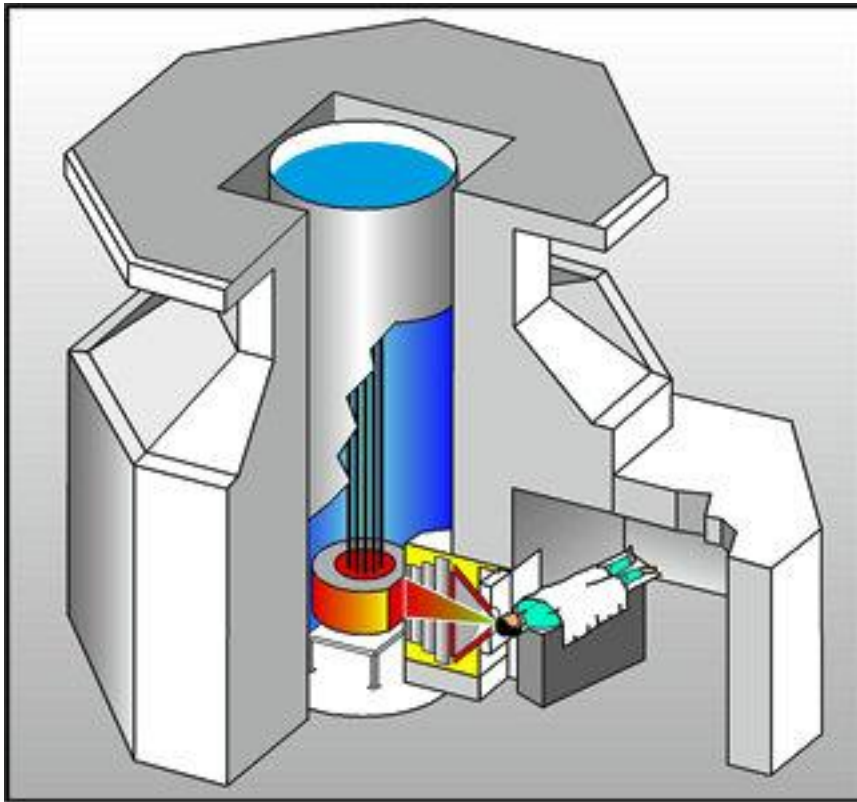
neutroneita

Ytimien sidososuudet



BNCT

Boorineutronikaappaushoito



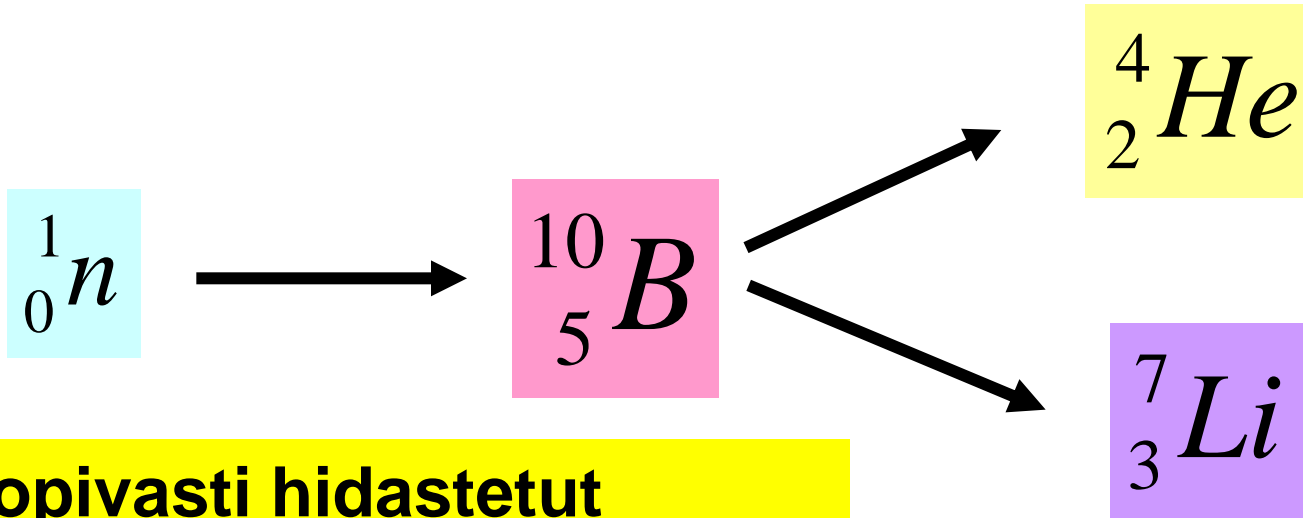
VTT:n Triga-reaktori
Otaniemessä

Aivokasvainpotilas saa booriliuosta, joka hakeutuu kasvaimen. Kasvainta pommitetaan **neutroneilla**, jolloin **Boori-10-atomit hajoavat He-4 ja Li-7-atomeiksi**.

Hajoamistuotteet **jarruuntuvat** lyhyellä matkalla kasvaimessa tuottaen röntgensäteilyä. Säteily tuhoaa kasvainta

BNCT

Boorineutronikaappaushoito



Sopivasti hidastetut neutronit eivät juurikaan reagoi kudoksen kanssa (eivät ole sähköisiä), mutta halkaisevat booriatomeja

**He-4 ja Li-7 jarruuntuvat kasvaimessa hyvin lyhyellä matkalla tuottaen sähkömagneettista säteilyä
Tämä tuhoaa syöpäsoluja**

Maailmankaikkeuden kyaymyksiä (kosmologiaa)

Mistä maailmankaikkeus on tullut?

Mitä maailmankaikkeuden rakenne?

Mistä me olemme tulleet, minne menemme?

Mikä on maailmankaikkeuden kohtalo?

Maailmankaikkeuden tietämyksen läpimurtoja:

Kopernikus 1500-luvulla: Maa kiertää Aurinkoa

Newton 1600-luvun lopulla: **Painovoimalaki** selittää täysin planeettojen kiertoradat

Einstein 1905,1916: **Suhteellisuusteoria** selittää painovoiman ja maailmankaikkeuden syvällisesti

Hubble 1929: On muitakin galakseja kuin omamme, Maailmankaikkeus **laajenee** koko ajan

Bethe 1930-luvulla: Tähdet saavat energiansa **vetyfuusiosta**, ydinreaktioista

Maailmankaikkeuden tietämyksen, kosmologian, läpimurtoja:

Vera Rubin 1930-luvulla: Galakseissa pimeää ainetta enemmän kuin näkyvää

Gamov 1940-luvulla: Alussa **alkuräjähdyks**, ”Big Bang”

Penzias, Wilson 1965: Löysivät alkuräjähdyksen kaiun, kaikkialta tulevan **kosmisen mikroaaltotaustasäteilyn**.

Nyt: Kosmisen taustasäteilyn pienet vaihtelut kertovat alkuräjähdyksen tapahtuneen **13,7 miljardia vuotta** sitten (satelliittimittaukset: COBE, WMAP)

ESA:n Planck-satelliitti v 2009 alkaen mittaa kosmisen mikroaaltotaustan ”kuprut” ennennäkemättömän tarkasti.

Mistä tiedetään, kuinka paljon maailmassa on näkyvää ainetta?

Maailmankaikkeuden heliumin määrästä Heliumia on 24 % kaikesta aineesta. Tämä on sekä mitattu avaruudesta että laskettu hiukkasfysiikan avulla.

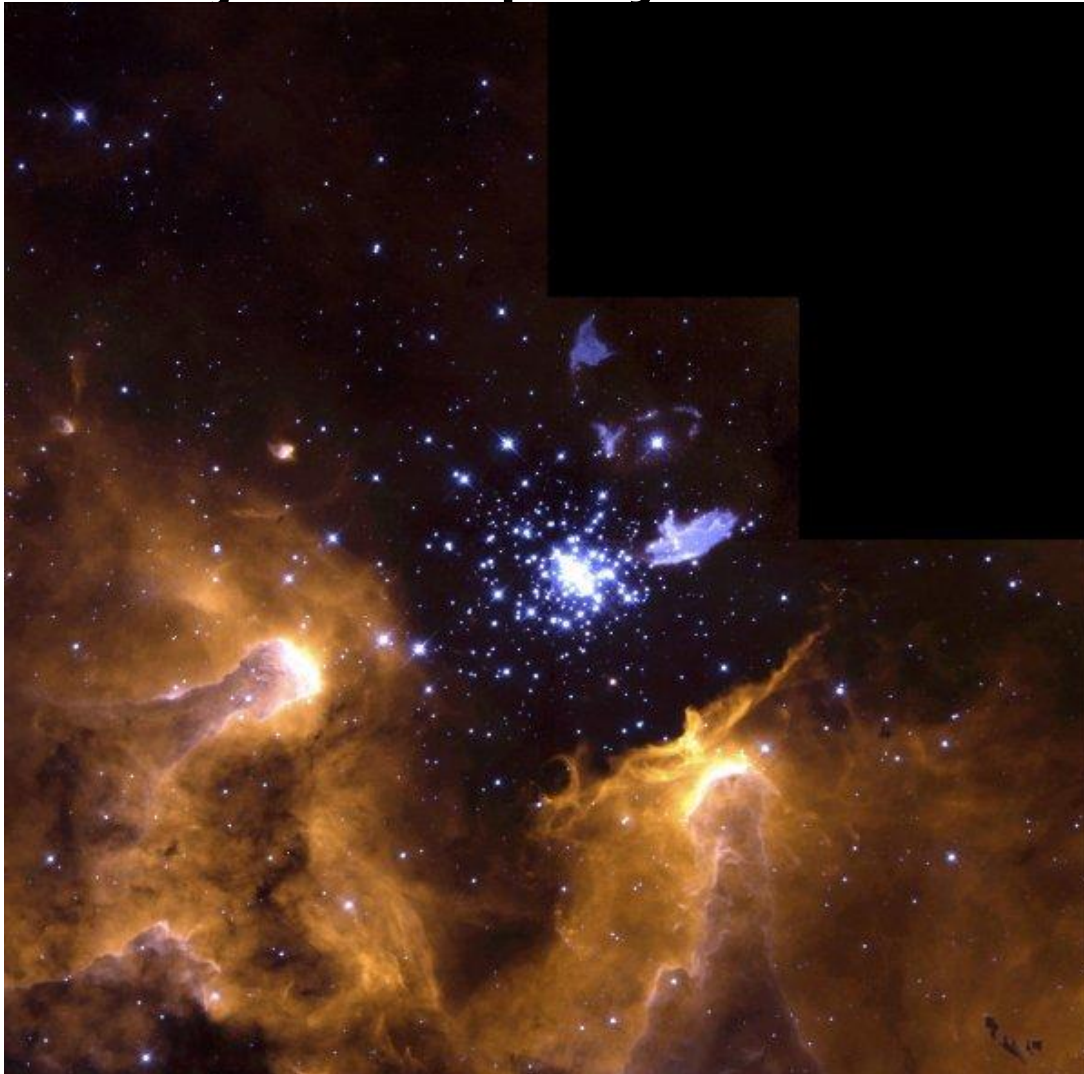
Galaksien määrä 100 miljardia, galaksien massa gravitaation ja galaksien lähettämän valon avulla.

”Tähtipölystä sinä olet syntynyt
ja tähtipölyksi olet muuttuva”

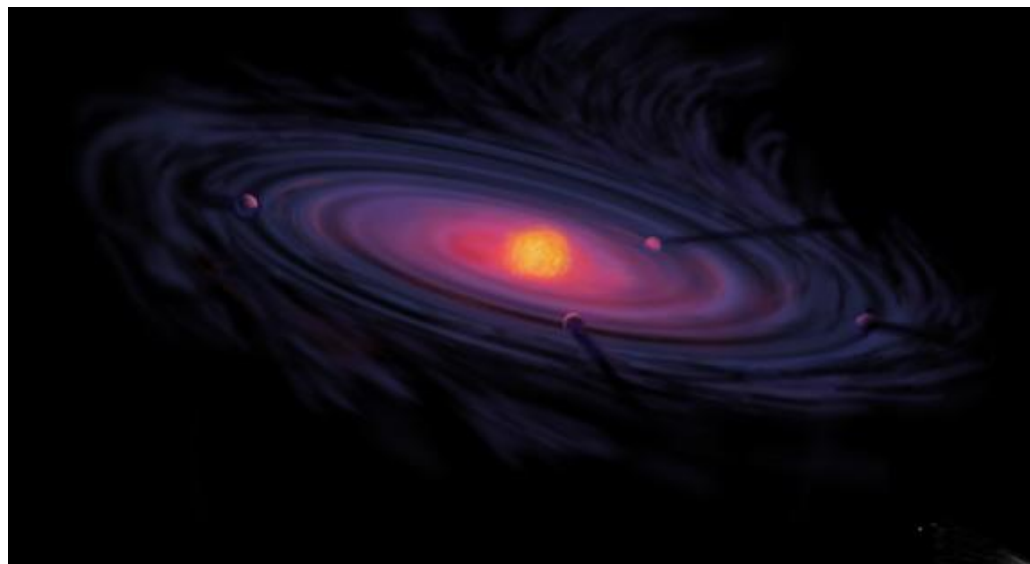
Kiertokulku

Pölyä, kaasua
Syntymässä olevia tähtiä
Metallien syntymistä
Kuolevia tähtiä
Kuolleiden tähtien jäänteitä

Samat kvarkit ja
elektronit kiertävät
tähdissä, planeetoissa,
pölyissä



Aurinkokunnan synty



Noin 5 miljardia vuotta sitten valtaisa **vety/pölypilvi** alkoi **painovoiman** vaikutuksesta tiivistyä. Vetypilvi puristui ja kuumentui, kunnes sen sisällä syttyi ydinreaktioita. Näin oli syntynyt Aurinkomme. Pölystä ja kaasusta syntyivät **kivi- ja kaasuplaneetat**. Lopusta pölystä ja jäästä tuli **asteroideja ja komeettoja**.

Maan ja Auringon tulevaisuus



**12 miljardin
vuoden tarina
päättyy**

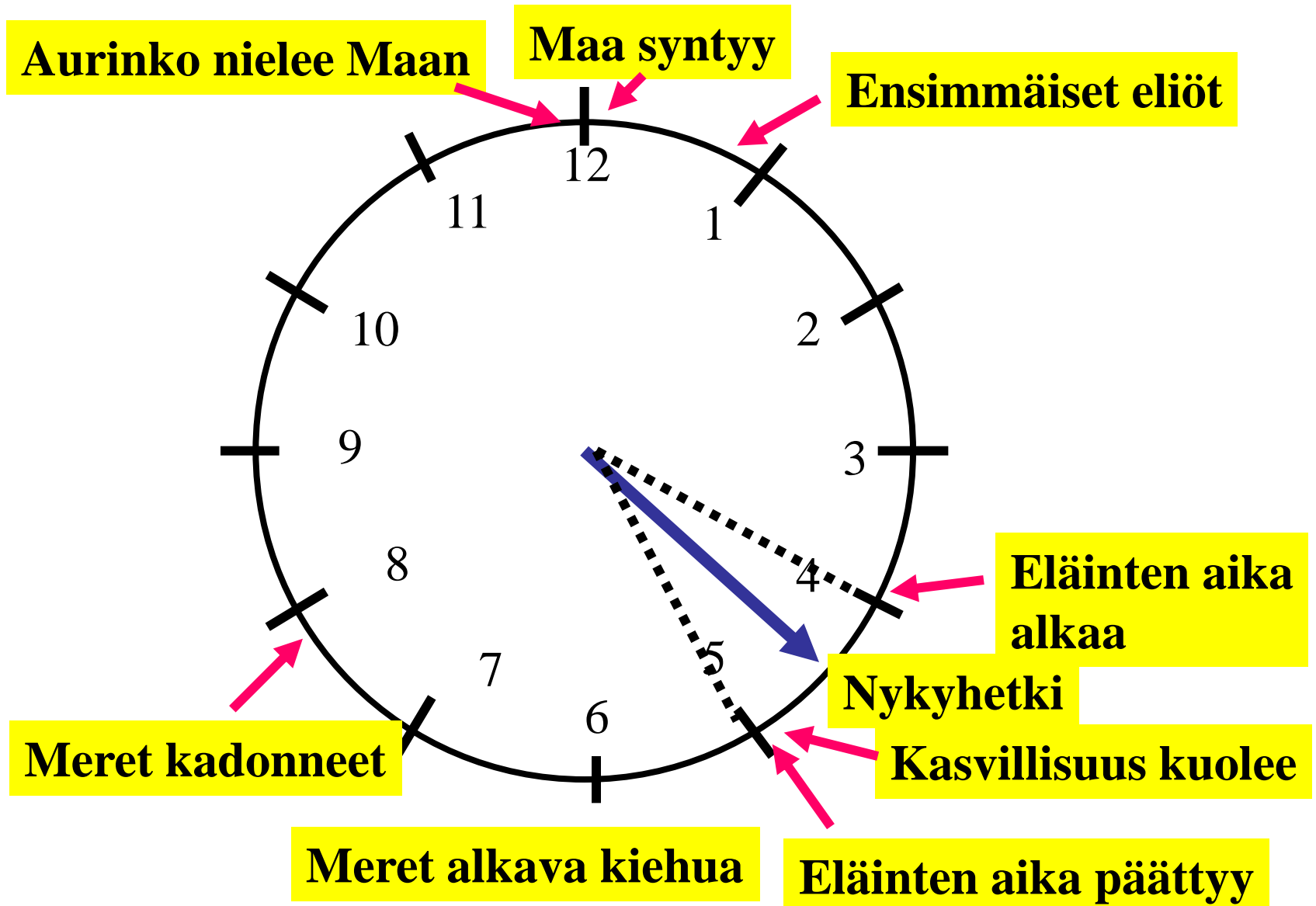
Aurinko on säteillyt jo 5 miljardia vuotta.

Joka sekunti Aurinko muuttaa 4 miljoonaa tonnia ainetta energiaksi Einsteinin kaavan $E=mc^2$ mukaisesti.

Vetypolttoainetta riittää vielä 7 miljardia vuotta.

Aurinko kuumenee koko ajan ja kirkastuu. Lopulta 7 miljardin vuoden kuluttua Aurinko pullistuu Maan radalle asti ja romahtaa sitten **valkoiseksi kääpiöksi**.

Maan kello: 1 h = 1 miljardi vuotta



Säteily ja säteilyn lähteet

Säteily on energiaa, joka etenee ilman väliainetta

Aurinko siirtää Maapallolle valtavasti energiaa säteilyn muodossa. Aurinko on Maan tärkein energianlähde. (Toinen lähde on Maapallon sisuksen radioaktiivisuus, joka näkyy tuliperäisyytenä.)

Auringosta tulee lämpösäteilyä, näkyvää valoa, ultraviolettivaloa, röntgensäteilyä ja hiukkasia

Maapallo säteilee avaruuteen lähinnä lämpösäteilyä.

Radioaktiivisten aineiden ytimistä lähtee alfa, beeta ja gammasäteilyä (radioaktiivinen säteily)

Avaruudesta kosmisia säteitä (suurienergisiä hiukkasia)

Säteilyn luokittelu

A. Sähkömagneettinen säteily:

- Radioaallot (kännykkä, mikroaaltouuni)
- Lämpösäteily eli infrapunasäteily
- Näkyvä valo
- UV- eli ultraviolettisäteily (Auringosta)
- Röntgensäteily (ionisoivaa, röntgenkuvaus)
- Gammasäteily (ionisoivaa, maaperästä)

B. Hiukkassäteily

- alfahiukkaset, lähtee esimerkiksi uraanista
- beetahiukkaset (elektroneja tai positroneja)
- neutronisäteily

Ionisoiva säteily

Pystyy irrottamaan atomista elektroneja, jolloin atomista tulee ioni. On siksi **epäterveellistä**.

Sähkömagneettisesta säteilystä ionisoivia vain

- röntgensäteily
- gammasäteily

Hiukkassäteilystä sähköiset hiukkaset ionisoivia

- alfahiukkaset (heliumin ytimiä)
- beetahiukkaset (elektroni tai positroni)

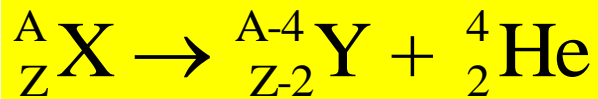
Myös **neutronit** aiheuttavat välillisesti ionisaatiota, aiheuttavat ydinreaktioita → **sekundaarisäteilyä**

Ionisoivan säteilyn altistukset ihmiselle

1. Maaperästä tiheä radon-kaasu, 54 %
(sisätiloissa), säteilee alfahiukkasia
2. Lääketieteellinen käyttö, 15 %
röntgenkuvaukset, syöpähoito
3. Maaperästä tuleva gammasäteily, 14 %
uraanipitoinen peruskallio
4. Avaruudesta tuleva kosminen säteily, 8 %
5. Ihmisestä itsestään tuleva säteily, 8 %
6. Tshernobylin jättämä laskeuma, 1 %

Radioaktiivisuus: Peräisin ytimistä

Alfa-säteily: atomin ydin sinkoaa alfahiukkaseen, joka on **He-4** –ydin (2 protonia ja 2 neutronia)



massaluku alenee 4:llä
järjestysluku 2:llä

Beetasäteily: ydin sinkoaa **elektronin** ja antineutriinon. Syynä on yhden neutronin muuttuminen protoniksi ja elektroniksi



järjestysluku kasvaa yhdellä

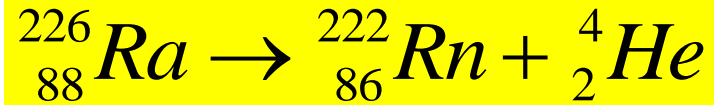
Beetasäteily: ydin sinkoaa **positronin** ja neutriinon. Syynä on yhden protonin muuttuminen neutroniksi ja elektroniksi



järjestysluku pienenee yhdellä

Esimerkkejä ytimen säteilystä

Alfahajoaminen:



Radium-226 \rightarrow Radon-222 ja Helium-4:

Beetahajoaminen -



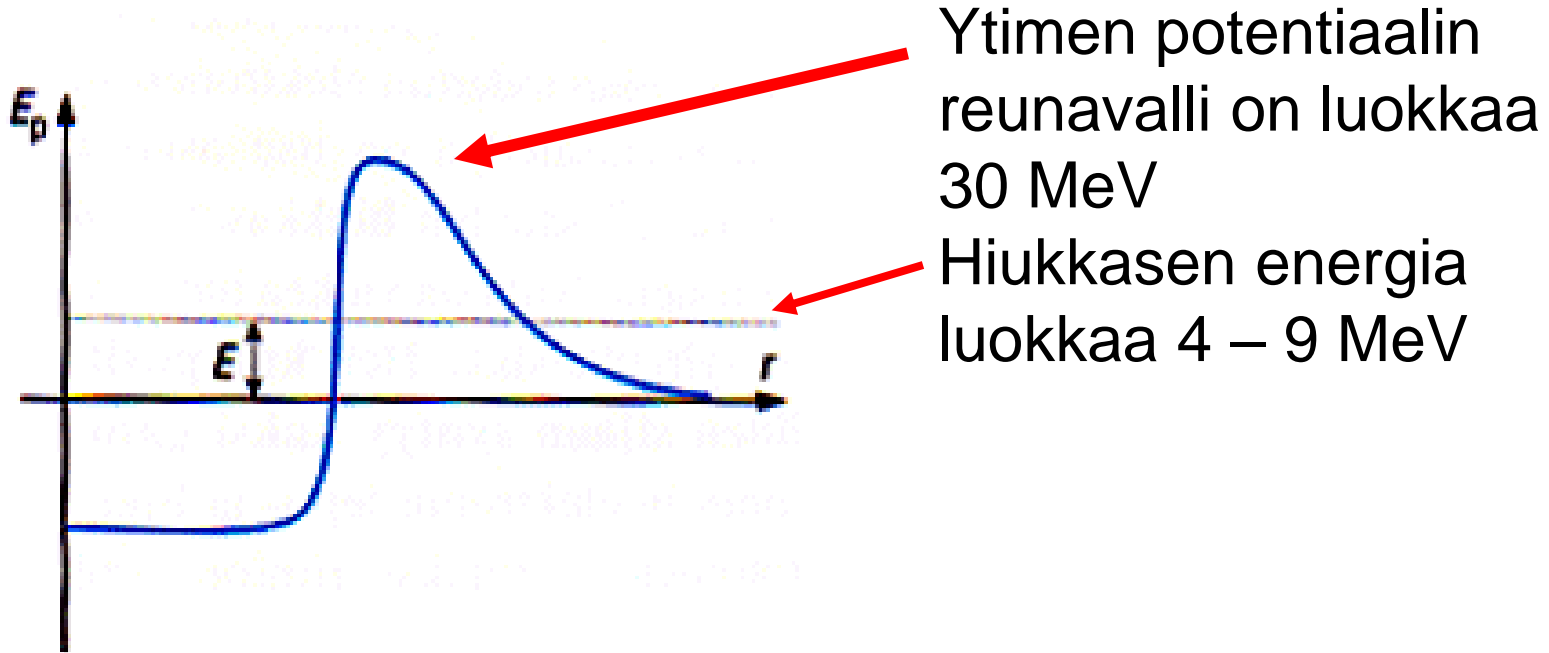
Strontium-90 \rightarrow Yttrium-90 ja elektroni ja antineutriino

Beetahajoaminen +



Typpi-13 \rightarrow Hiili-13 ja positroni ja neutriino

Miksi ytimestä voi lähteä hiukkasia?



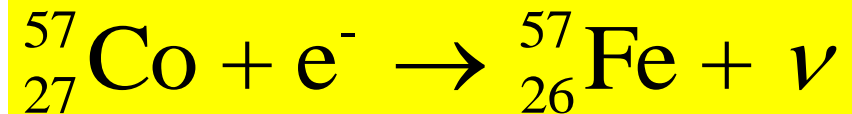
Selitys: Osa alfahiukkasen aaltofunktiosta ulottuu ytimen ulkopuolelle → pienellä todennäköisyydellä hiukkanen voi päästä vallin läpi (**tunneloituminen**)

K-kaappaus eli Elektronisieppaus (EC, ydin sieppaa elektronin)

Atomin sisimmät elektronit ovat lähellä ydintä, K-kuorella. Näiden elektronien **aaltofunktio ulottuu ytimeen asti**. Elektroni voi siis hyvin pienellä todennäköisyydellä **tunneloitua** ytimeen

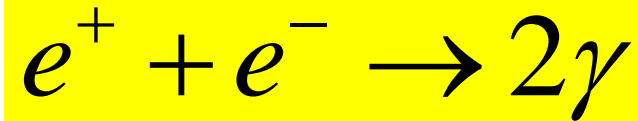
Tällöin elektroniverhoon jää elektroniaukko. Kun aukkoon putoaa elektroni ylemmältä kuorelta, syntyy **röntgenkvantti**. Tämä on aineelle ominaista karakteristista röntgensäteilyä.

Elektronisieppauksessa ytimeen joutunut elektroni muodostaa protonin kanssa neutroni. Siis ytimen järjestysluku alenee yhdellä:



Annihilaatio ja Parinmuodostus

Annihilaatio: Kun hiukkanen ja sen antihukkanen kohtaavat, ne tuhoavat toisensa. Kummankin massa muuttuu gammasäteilyksi.



Parinmuodostus: Kun *ytimen lähelle* tulee suurenerginen (> 1 MeV) gammakvantti, se voi aineellistua elektroni-positronipariksi (0,511 MeV + 0,511 MeV + liike-energiat)



Hiukkaskiihdyttimissä törmäytyksissä aineellistuu suuri liuta suurenergisiä hiukkasia.

Radioaktiivisen aineen hajoamislaki hajoamisvakio λ ja puoliintumisaika $T_{1/2}$

Radioaktiivisuuden määrää ilmaisee suure **aktiivisuus**.

**Aktiivisuus = kuinka monta ytimen hajoamista sekunnissa
yksikkö 1 Bq = 1 becquerel = 1 hajoaminen sekunnissa**

Jos merkitsemme A = aktiivisuus ja N = ydinten määrä
Niin sekä aktiivisuus että ydinten määrä vähenee ajan
mukana eksponentiaalisesti

Aktiivisuus on suoraan verrannollinen ydinten määrään

$$A = \lambda N$$

jossa λ = hajoamisvakio (isotoopille ominainen)

$$A = \lambda N = - \frac{dN}{dt}$$

integroimalla



$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad \text{ja} \quad A = A_0 e^{-\lambda t}$$

Hajoamisvakio ja puoliintumisaika

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$$

(kts kaava Taulukkokirjasta)

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}}$$

Taulukkokirjassa on annettu kullekin isotoopille puoliintumisaika. Siitä voi laskea hajoamisvakion λ . Aktiivisuus ja ytimien määrä voidaan laskea myös:

$$A = A_0 \cdot 0,50^{\frac{t}{T_{1/2}}}$$

Esim. Polonium-210:n puoliintumisaika on 138,4 d
Kuinka paljon polonium-210 hajoaa 10 päivässä?

$$A_0 \cdot 0,50^{\frac{t}{T_{1/2}}} = A_0 \cdot 0,50^{\frac{10d}{138,4d}} \approx 0,951A_0$$

**V: Jäljellä 95,1 %
hajonnut 4,9 %**

Tehtävä:

Hiilinäytteen aktiivisuus $A = 7500 \pm 90$ 1/d

Tuoreen vastaavan näytteen aktiivisuus $A_0 = 20200$ 1/d

$T_{1/2} = 5730$ a

näytteen ikä $t = ?$

$$A = A_0 \cdot 0,50^{\frac{t}{T_{1/2}}}$$



$$0,50^{\frac{t}{T_{1/2}}} = \frac{A}{A_0}$$

logaritmi ln

$$\frac{t}{T_{1/2}} \cdot \ln 0,50 = \ln \left(\frac{A}{A_0} \right)$$



$$t = T_{1/2} \frac{\ln \left(\frac{A}{A_0} \right)}{\ln 0,50} = 5730a \cdot \frac{\ln \left(\frac{7500a}{20200} \right)}{\ln 0,50} \approx 8190a$$

$$A = 7590a \rightarrow t \approx 8100 a$$

$$A = 7410a \rightarrow t \approx 8300a$$

V: näytteen ikä on $8200 \pm 100a$

Massa, Moolit, Ytimien määrä

Aineen massa m

Atomin massaluku (moolimassa) M

Aineen määrä mooleina n

Aineen atomien (ytimien) määrä N

$$n = \frac{m}{M} = \frac{\text{massa}}{\text{moolimassa}}$$

Yhdessä moolissa ainetta on Avogadron luvun verran osasia (ytimiä, atomeja, ioneja yms)

$$N = n \cdot N_A = \frac{m}{M} \cdot N_A$$

Tehtävä. Laske, kuinka suurella teholla 1 g polonium-210 tuottaa energiaa?



209,982848u 205,974440u 4,0026033u
(atomien massat, mukana elektronit)

Massavaje = 0,0058047u

1 u = 931,494 MeV

1 eV = 1,602176462 · 10⁻¹⁹ J

Energia $\Delta E = 5,407043 \text{ MeV}$
 $= 8,663037 \cdot 10^{-13} \text{ J}$

Lasketaan, kuinka monta ydintä on 1 g Po-210 ja kuinka monta niistä hajoaa sekunnissa. Jokainen hajoaminen tuottaa ΔE energian.

$$N = \frac{m}{M} \cdot N_A = \frac{1 \text{ g}}{209,982848 \text{ g/mol}} \cdot 6,02214199 \cdot 10^{23} = 2,8679184 \cdot 10^{21}$$

1 grammassa Po-210 ytimiä $N = 2,8679184 \cdot 10^{21}$ ydintä

Sekunnissa ytimiä hajoaa $A = \left| \frac{dN}{dt} \right| = \lambda N$

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} = 5,797636 \cdot 10^{-8} \text{ 1/s}$$

Energiaa vapautuu sekunnissa $\lambda N \cdot \Delta E$

Teho = $5,797636 \cdot 10^{-8} \cdot 2,8679184 \cdot 10^{21} \cdot 8,663037 \cdot 10^{-13} \text{ W} \approx 144 \text{ W}$

Kuinka kauan kestää 1 vesilitran lämmittäminen
 $0\text{ }^{\circ}\text{C} \rightarrow 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ yhdellä grammalla Po-210?

1 g Po-210 tuottaa 144 W lämpötehoa.

$$\text{Lämmitysenergia} = Q = cm\Delta t = 4,19 \frac{\text{kJ}}{\text{kg } ^{\circ}\text{C}} \cdot 1\text{kg} \cdot 100^{\circ}\text{C} = 419 \text{ kJ}$$

$$\text{Lämmitysaika} = \frac{419000 \text{ J}}{144 \text{ W}} = 2909 \text{ s} = 48 \text{ minuuttia}$$

PS. Jos Po-210 lämmitys olisi tapahtunut yhden puoliintumisajan 138,4 päivän kuluttua poloniumin syntymisestä, teho olisi ollut 72 wattia. Polonium-210 valmistetaan ydinreaktorissa.

Säteily ja syöpä

Ionisoiva säteily ja neutronisäteily voi aiheuttaa syöpää

Vain 5 % teollistuneiden maiden syöpätapauksista aiheutuu ihmisen tuottamasta säteilystä.

Suurimman osan syöpätapauksista aiheutuu muista syistä (kemialliset karsinogeenit, Auringon UV-säteily)

Säteilylle herkimmät ovat

- ruoansulatuselimistö
- luuydin
- perna
- sikiö

1930-luvun muotihullutus: Ihmeaine Radium parantaa kaikki sairaudet, antaa elinvoimaa, kauneutta,...

Suomen Kuvalehti 1930

Hermoni — hermoni



Vapiseva levottomuus koko elimistössä — säpsähdetään — joudutaan pois tasapainosta usein aivan tyhjämpäiväisten asiain johdosta — tullaan »kuolemanväsyneiksi» — ne ovat hermot, jotka ajan mittaan kokonaan pilaavat terveyden ja mielialan. — Elimistönne tarvitsee lepoa — luonnon arvokasta apuainetta oikeaa radiumia, joka ihmeellisellä tavalla muodostaa uusia, elinvoimaisia soluja väsyneisiin ja »kulu-neisiin» elimiin.

Teidän on viipymättä aloettava Miradium-hoito. On tieteellinen takuu siitä että Miradium sisältää ihmeellistä alkuainetta, oikeaa Radiumia — aivan tarkalleen määrättyinä, tehokkaina annoksina. Radium-hoito on jo auttanut tuhansia ja taas tuhansia. Sitä suosittelevat lääkärit kautta koko maailman.

Miksi odotatte? Miksi ette anna radiumin säteilyvoiman kerrassaan nuorentaa elimistöä sisällisesti? — Oikea radium on luonnon oma tehokas parannuskeino hermoille ja kihtiä, reumatismia sekä iskiasta vastaan — unta parantavaa ja tehokasta aineen vaihtoon sekä vanhuuden heikkouteen.

Miradium-suolaa on saatavana apteekkeista. Hinta Smk. 60:— putkesta, joka riittää koko kuukauden kestävään radium-hoitoon.

CRÈME THO-RADIA POUDRE

THO-RADIA

EMBEILLISSANTES PARCE QUE CURATIVES
à base de thorium et de radium selon la formule du
DOCTEUR ALFRED CURIE
EXCLUSIVEMENT CHEZ LES PHARMACIENS

CRÈME
125 GRAMMES
125 GRAMMES

POUDRE
125 GRAMMES
125 GRAMMES

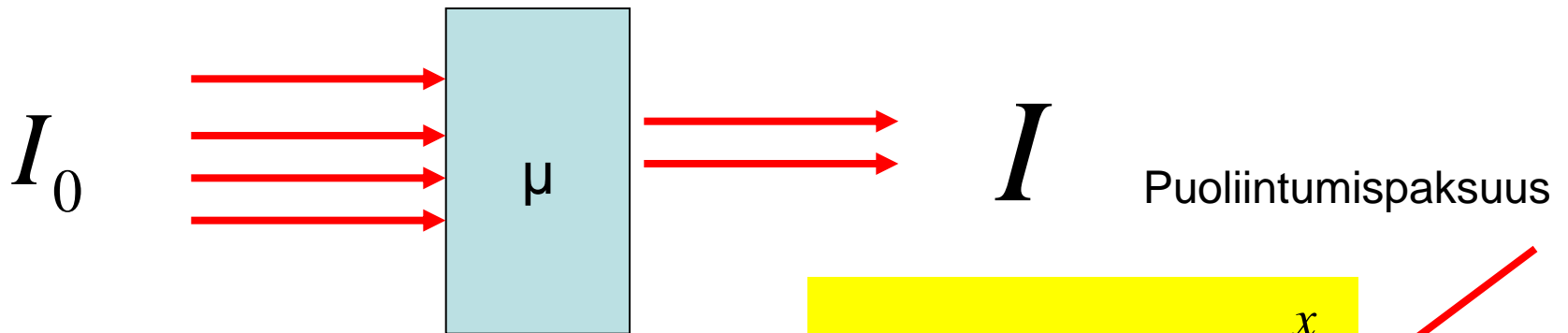
BROCHURE GRATUITE SUR DEMANDE À THO-RADIA, 20 RUE DES CAPUCINES, PARIS.
FORMULE RADIA

Säteilyn heikkeneminen väliaineessa

Sähkömagneettinen säteily imeytyy väliaineeseen, jolloin sen intensiteetti (wattia/neliömetri) heikkenee eksponentiaalisesti.

$$I = I_0 e^{-\mu x}$$

μ = matkavaimennuskerroin, (yks 1/m)
(riippuu aineesta ja säteilyn aallonpituudesta)
 x = ainekerroksen paksuus (yks m)



Puoliintumispaksuuden avulla:

$$I = I_0 \cdot 0,50^{\frac{x}{d_{1/2}}}$$

Tehtävä: 5 MeV Gammasäteily vaimenee kymmenesosaan alkuperäisestä, jos säteilylähteen eteen laitetaan 30 cm vettä. Laske veden matkavaimennuskertoimen μ ja puoliintumispaksuus $d_{1/2}$

Puoliintumispaksuuden ja matkavaimennuskertoimen yhteys

$$d_{1/2} = \frac{\ln 2}{\mu}$$

$$I = I_0 e^{-\mu x}$$



$$0,10I_0 = I_0 e^{-\mu \cdot 0,30}$$

otetaan ln

$$-\mu \cdot 0,30 = \ln 0,10$$

$$\mu = -\frac{\ln 0,10}{0,30 \text{ m}} = 7,675 \text{ 1/m} \approx 7,7 \text{ 1/m}$$

$$d_{1/2} = \frac{\ln 2}{\mu} = \frac{\ln 2}{7,675 \text{ 1/m}} = 0,09 \text{ m} = 9,0 \text{ cm}$$

Tehtävä: Gammalähteen eteen pantiin eri paksuisia lyijylevyjä (mm) ja mitattiin läpi päässeen säteilyn pulssimääriä geigermittarilla (pulssia/100s).

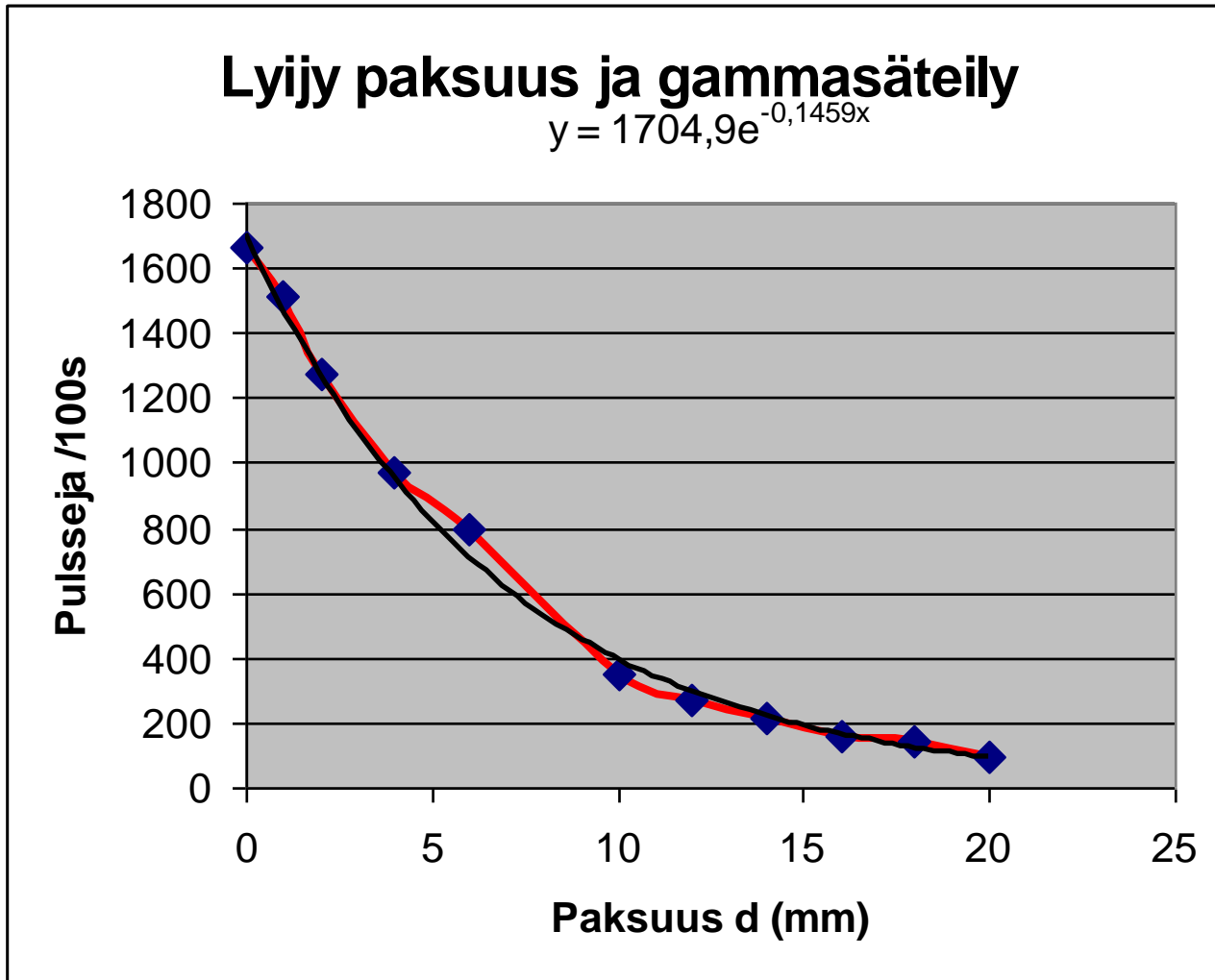
d (mm)	A (1p/100s)
0	1662
1	1517
2	1272
4	970
6	795
10	354
12	273
14	214
16	157
18	141
20	93

- a) Piirrä kuvaaja, josta ilmenee pulssimäärän riippuvuus lyijyn paksuudesta.
Määritä kuvaajasta likimääräinen puoliintumispaksuus
- b) Piirrä lineaarinen kuvaaja, jonka kulmakertoimesta voit määrittää melkoisen tarkasti vaimennuskertoimen

Huom! b-kohdan menetelmä on parempi kuin a:n

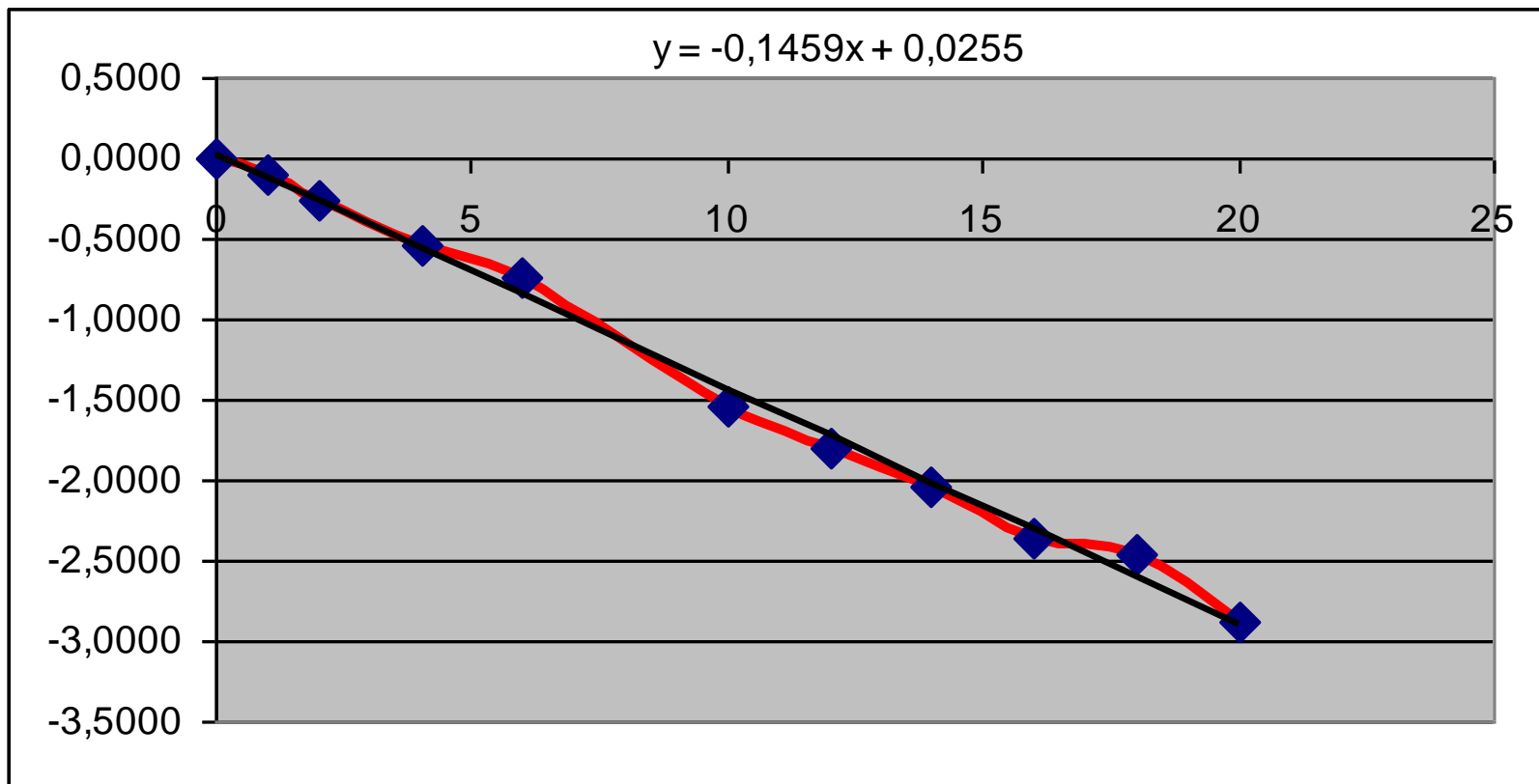
a)-kohdan eksponentiaalinen käytä

$$I = I_0 e^{-\mu x}$$



b)-kohdan lineaarinen kuvaaja

$$y = \ln\left(\frac{I}{I_0}\right) = -\mu x$$



$$\mu = 0,146 \text{ 1/mm} = 146 \text{ 1/m}$$

CERNin TARKOITUS

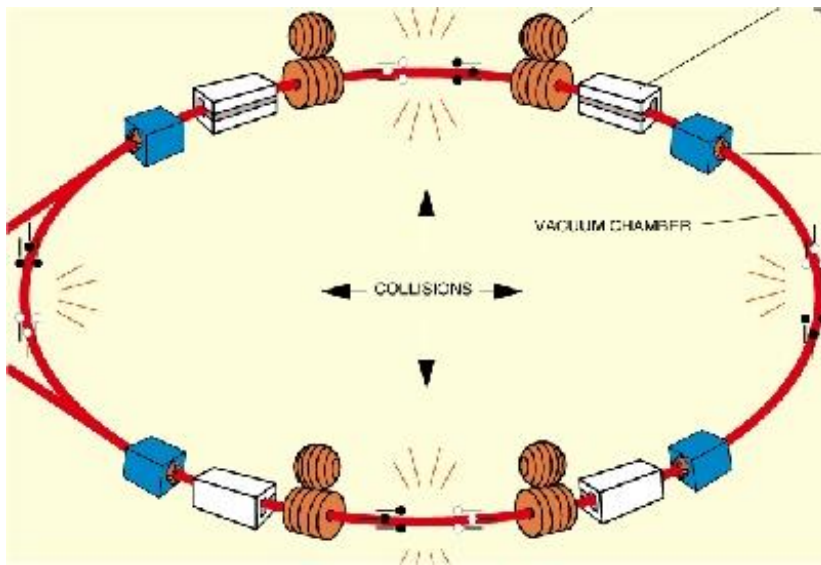
CERNissä tuhannet fyysikot pyrkivät selvittämään muun muassa:

- Luonnon syvimmät vuorovaikutusvoimat
- Miksi luonnonlait ovat sellaisia kuin ne ovat
- Miten maailmankaikkeus on syntynyt
- Mikä on maailmankaikkeuden kohtalo

Tärkein tutkimusväline on **hiukkaskiihdytin**

Mikä hiukkaskiihdytin on?

- Laite, jolla kiihdytetään varauksellisten hiukkasten suihku lähes valonnopeuteen.
- LHC-kiihdyttimessä kaksi hiukkassuihkua kulkee vastakkaisiin suuntiin.



27 km tunneli

Miten kiihdytin toimii?

- Sähköisesti varattu hiukkanen (esim. protoni) kiihdytetään sähkökentällä
- Kiihdytetty suihku saadaan kaartumaan ympyräradalle hyvin voimakkailla magneeteilla (7 teslaa)



Sähkökenttä E kiihdyttää ja myös kaarruttaa, jos $\mathbf{v} \perp \mathbf{E}$

Homogeeninen sähkökenttä E ,
suunta pos varauksen liikesuunta

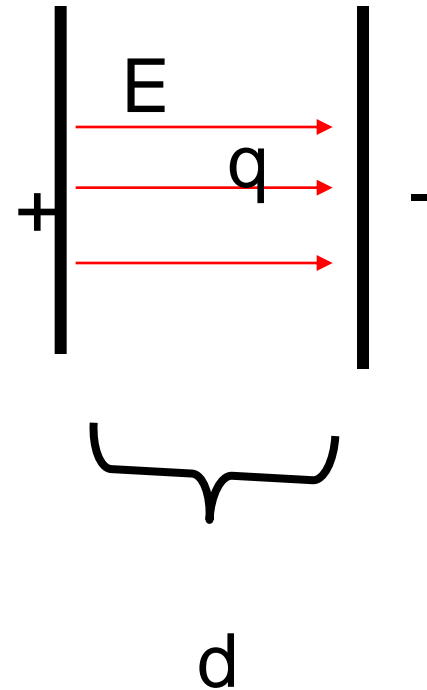
$$E = \frac{U}{d}$$

Sähkökenttä aikaansaa
varaukseen q voiman

$$\mathbf{F} = q\mathbf{E}$$

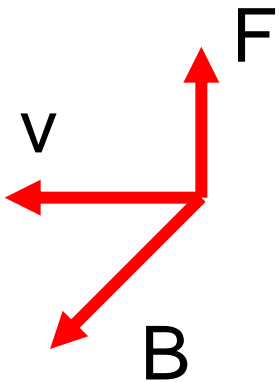
Sähkökenttä tekee varaukselle työn W

$$W = Uq = \frac{mv^2}{2} \rightarrow \text{saadaan } v$$



Magneettikenttä B kaarruttaa

F suunta
positiiviselle
varaukselle:



Jos nopeus v ja magneettikenttä B ovat kohtisuorassa toisiaan vastaan:

$$\mathbf{F} = q\mathbf{v}\mathbf{B}$$

Varaus q joutuu kaartuvaan liikkeeseen

$$qvB = \frac{mv^2}{R}$$

$$\text{josta } R = \frac{mv}{qB}$$

Kulmanopeus ω ja ratanopeus v :

$$\mathbf{v} = \omega\mathbf{R}$$

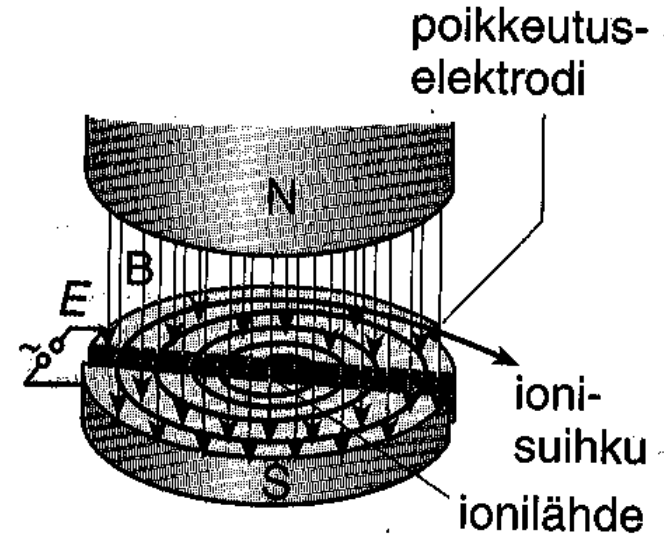
Syklotroni

Suurtaajuisen vaihtojännitteen
Avulla kiihdytetään varauksia.
Rata on spiraali

$$qvB = \frac{mv^2}{R}$$

$$v = \omega R$$

$$\omega T = 2\pi \rightarrow f = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi}$$



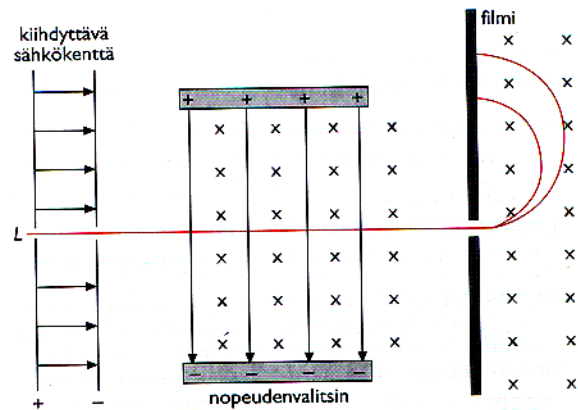
Syklotroni

Näistä saadaan vaihtojännitteen taajuudeksi f

$$f = \frac{qB}{2\pi m}$$

Massaspektrometri

Massaspektrometrin avulla saadaan hyvin tarkasti ionisoitujen atomien massan ja varauksen suhde sekä alkuaineiden isotoppien massat.



Läpi tulee hiukkaset, joiden nopeus on v . Ne kaartuvat magneettikentässä B :

$$qvB = \frac{mv^2}{R}$$

$$\text{josta } R = \frac{mv}{qB}$$

**Nopeudenvälitsin:
 E ja B :n voimat yhtä suuria \rightarrow lentää suoraan**

$$qE = qvB$$

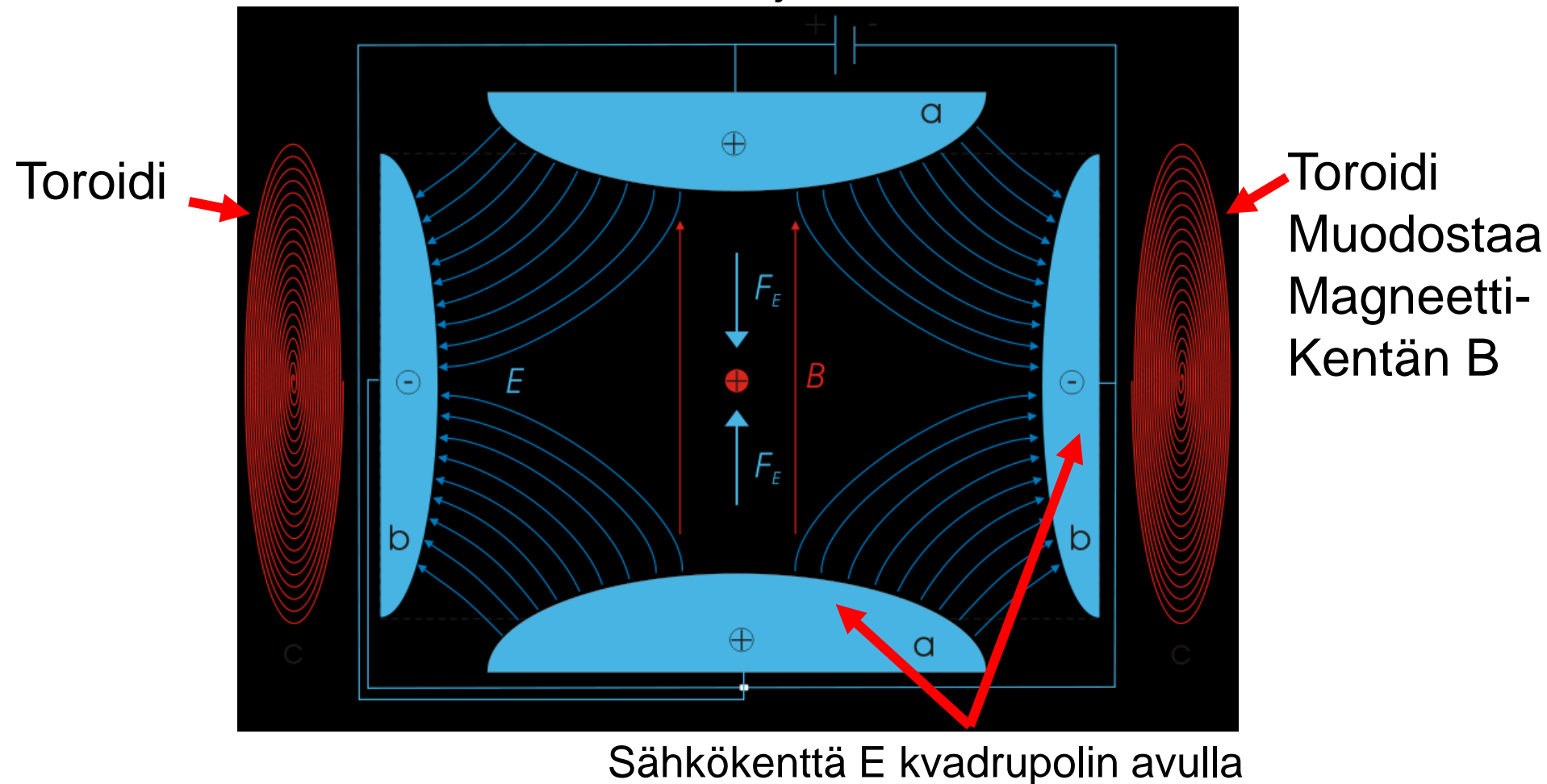
$$v = \frac{E}{B}$$

Eri massaiset isotootit kaartuvat eri paikkaan

Penning-loukku (Penning Trap)

Vakio kvadrupolisähkökenttä ja magneettikenttä

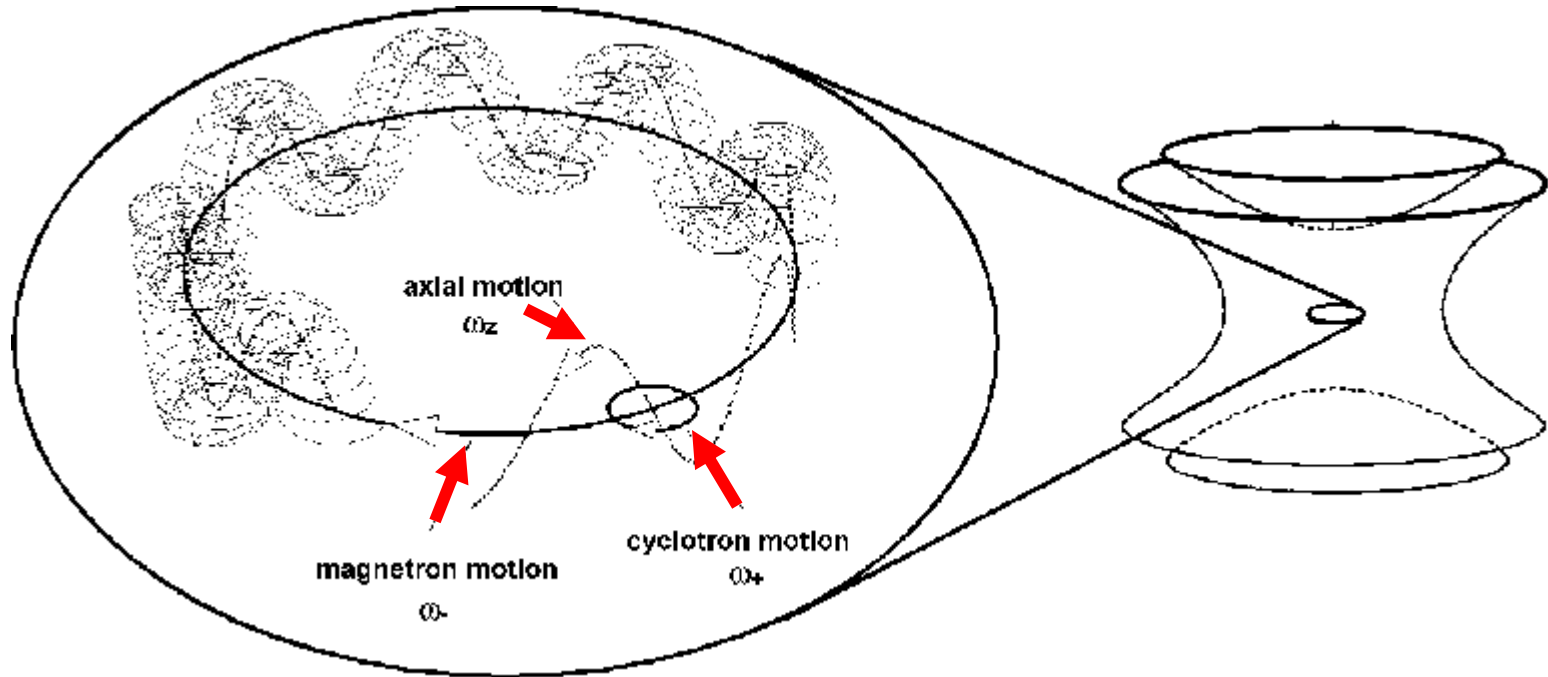
- säilötään varauksia, mm antiprotoneja
- mitataan tarkasti varattujen hiukkasten ominaisuuksia



Penning-loukussa ioni voi liikkua kolmella tavalla

- Aksiaalinen värähtely
- Kaksi ympyräliikettä: syklotroni- ja magnetroniliike

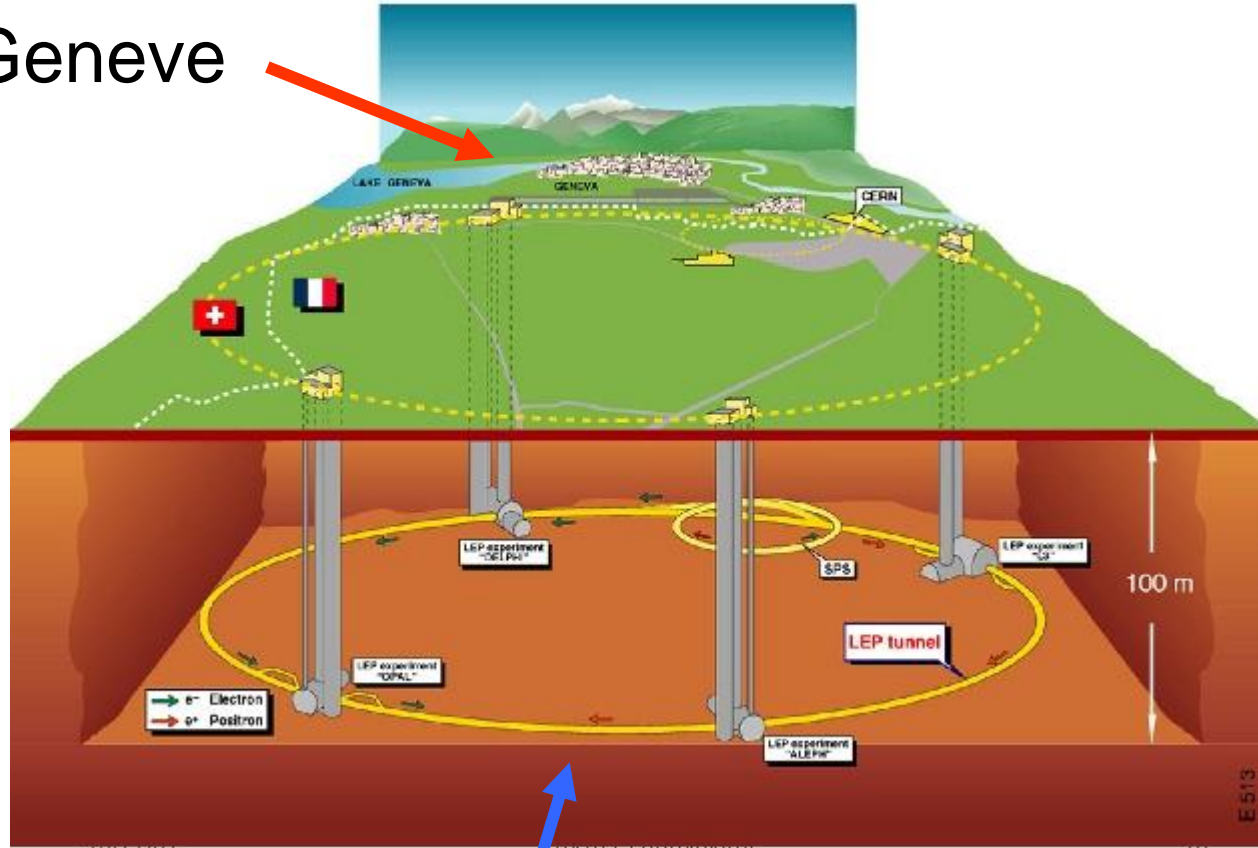
Penningin loukku mahdollistaa huipputarkat massojen
Määritykset, esim. He-4: 4.002 603 256 8(13)



CERN:n LHC - KIIHDYTIMÄ

valmistui 2008 - maailman suurin

Geneve



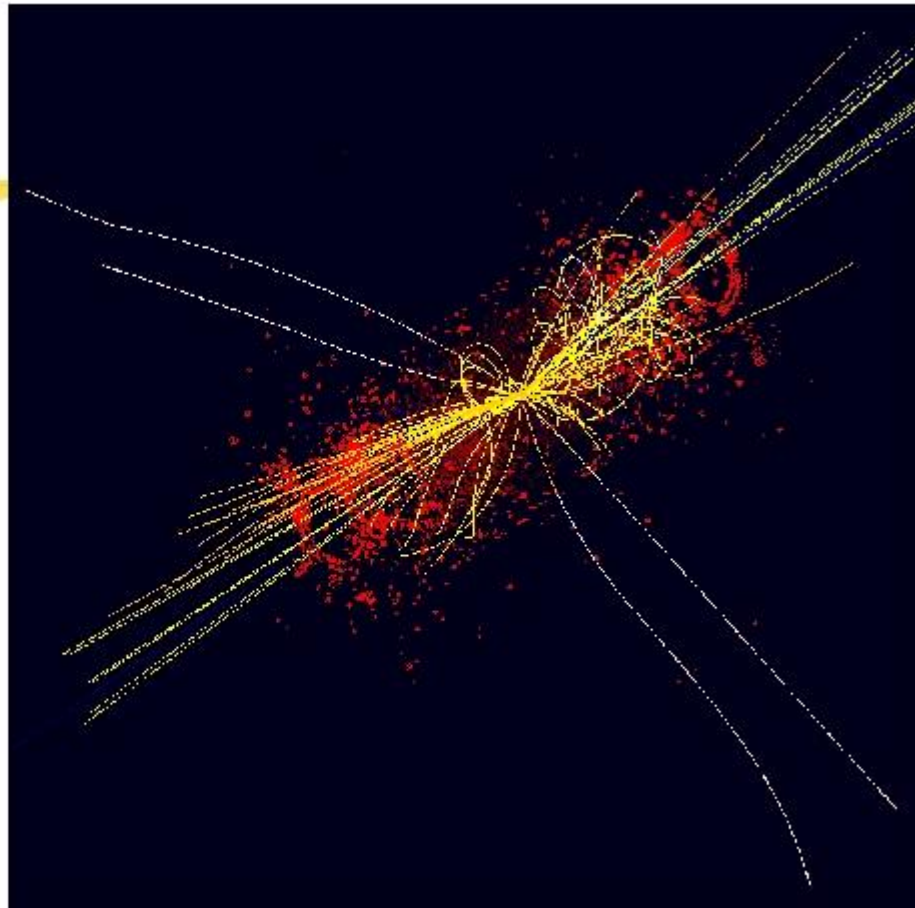
27 km tunneli 100 m syvyydessä

Mitä ilmaisimet ovat?

- Kiihdyttimen kaksi hiukkassuihkua törmäävät toisiinsa ilmaisimen kohdalla
- Törmäyksen energiatiheys vastaa oloja muutama sekunnin murto-osa alkuräjähdyksen jälkeen
- Törmäyksessä energiaa aineellistuu hiukkasiksi
- Ilmaisimittaa syntyneiden hiukkasten ominaisuudet

Törmäysjäljistä päätellään syntyneiden hiukkasten ominaisuudet

H -> 4 muons
CMS-
koeasemassa



Miten hiukkaset tunnustetaan?

- Hiukkaset tunnustetaan massan ja varauksen perusteella.
- Ilmaisimessa on useita kerroksia. eri ominaisuuksien tunnustamista varten.

Fission perustuva ydinvoimalat

Polttoaineena uraani-238, jossa halkeavina ytiminä uraani-235 (enintään 5 %)

U-235:n halkeamisessa syntyy 2-3 nopeaa neutronia, jotka eivät yleensä ehdi aiheuttaa uusia halkeamisia.

Siksi nämä neutronit **hidastetaan**

Kevytvesireaktoreissa (**PWR ja BWR**) hidastimena **tavallinen vesi**. Kanadalaisessa luonnonuraa käyttävässä CANDU-reaktorissa **raskas vesi**.

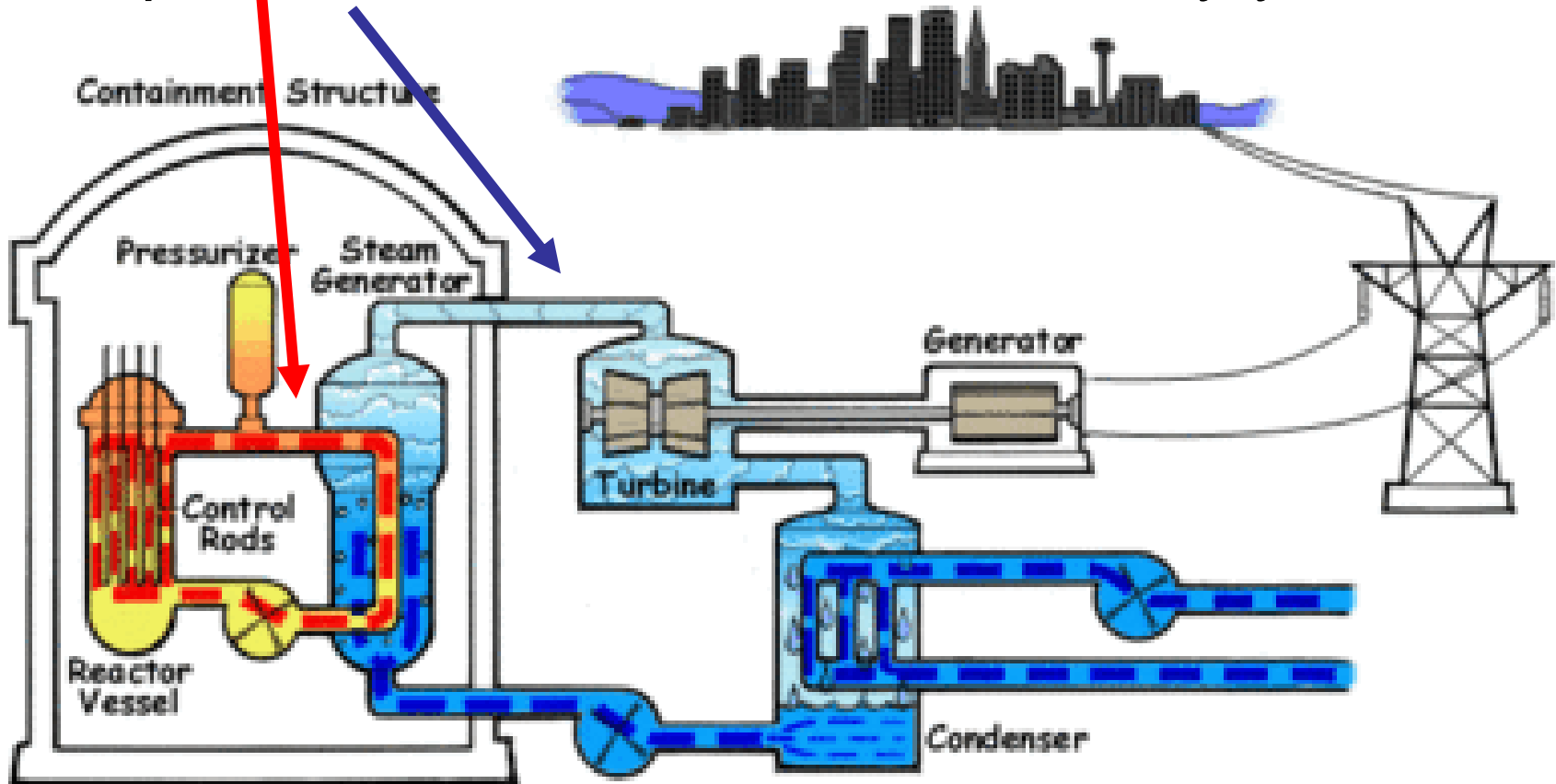
Myös **grafiitti** mahdollinen, mutta reaktori on vaikeasti säädettävä (venäläinen RBMK)

Painevesireaktori (PWR)

Esimerkiksi Loviisa I-II

Ensiöpiirissa 300 °C & 150 bar

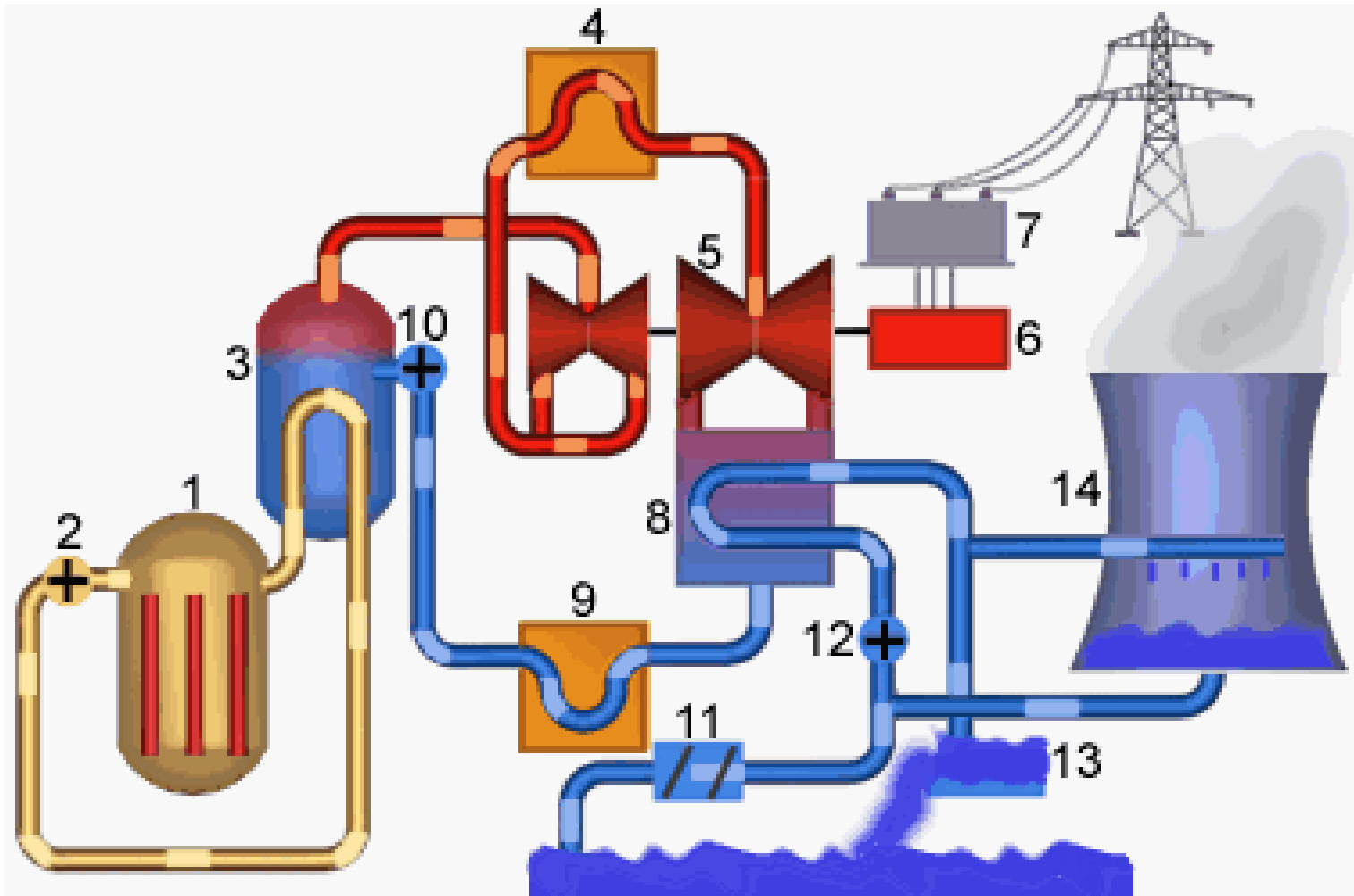
Toisiopiirissä 300 °C & 70 bar, kiehuu höyryksi



Painevesireaktori on vakaa ja helposti ohjattava

Olkiluoto 3: EPR, 1500 MW

Moderni painevesivesireaktori

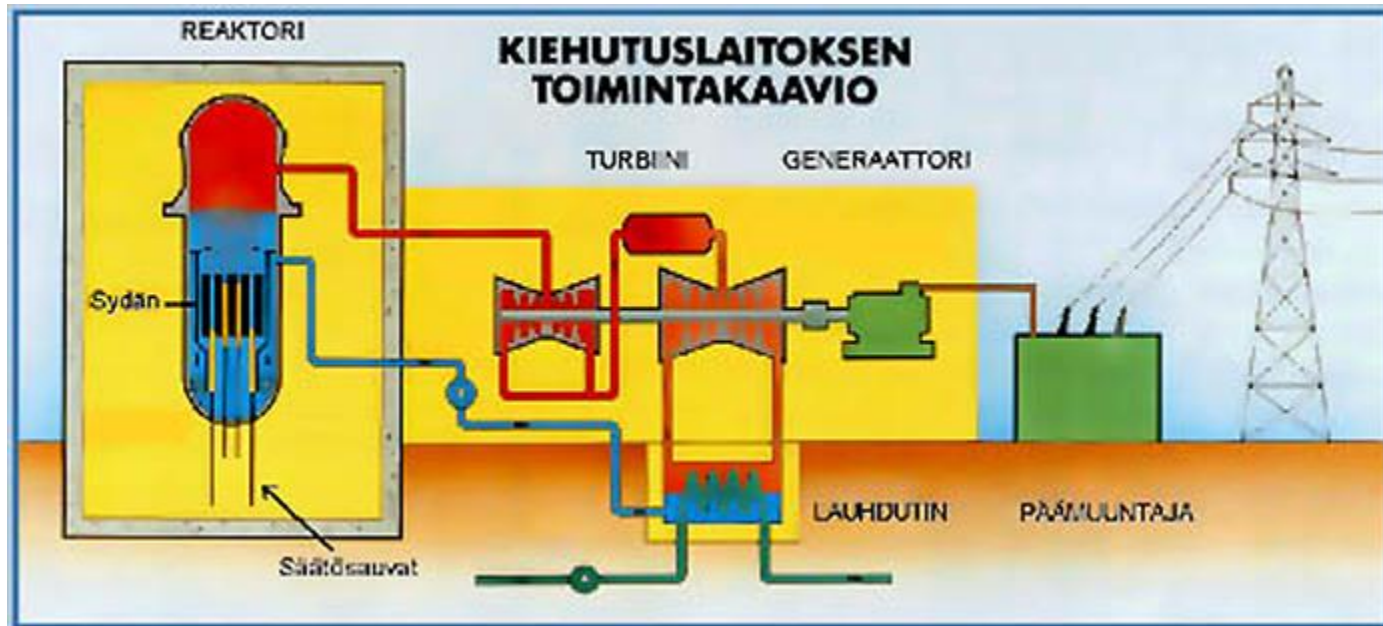


Polttoaine: Uraani, jossa 5 % U-235

Kiehutusvesireaktori (BWR)

Esimerkiksi Olkiluoto I-II

Vesi kiehuu osittain jo reaktorissa, paine 75 bar ja johdetaan suoraan turbiiniin.



Kiehutusvesireaktorin ohjaus on monimutkaisempaa kuin painevesireaktorin ohjaus

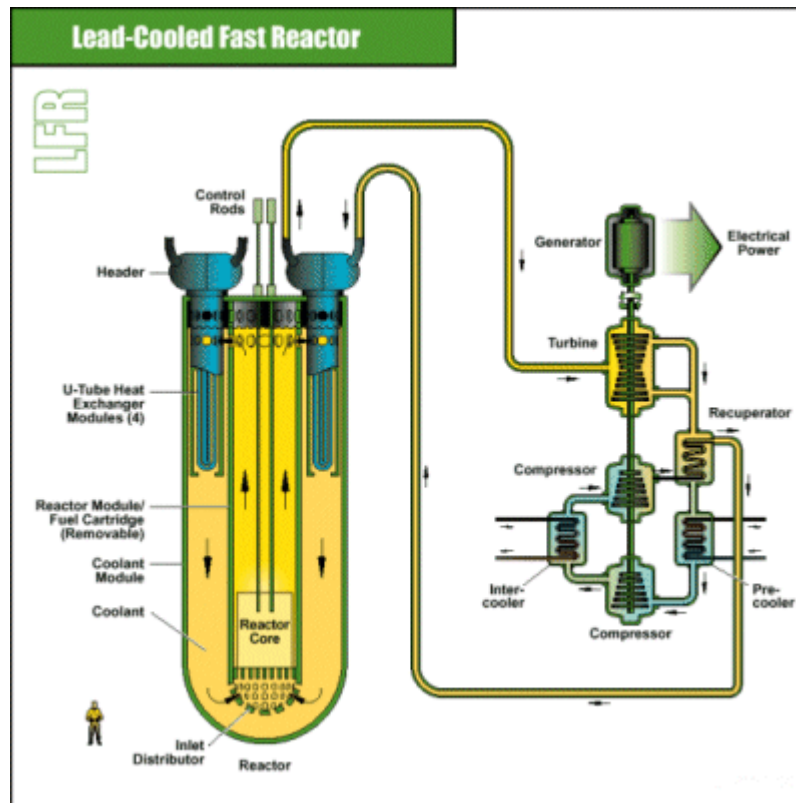
Hyötöreaktori (Breeder)

- Hyötöreaktori käyttää polttoaineenaan U-238, jonka seassa on hajoavana aineena Pu-239
- Toimii nopeilla neutroneilla.
- Lämmönsiirto reaktorista pois hoituu nestemäisillä helposti sulavilla metalleilla (Na, Pb, Bi).

Hyötöreaktori **tuottaa uraanista neutronien avulla plutoniumia**, jolloin koko luonnonuraanin energia voidaan hyödyntää → 1 kg uraanista 50-100 kertaa enemmän energiaa kuin perinteisessä U-238 & U-235 -reaktorissa.

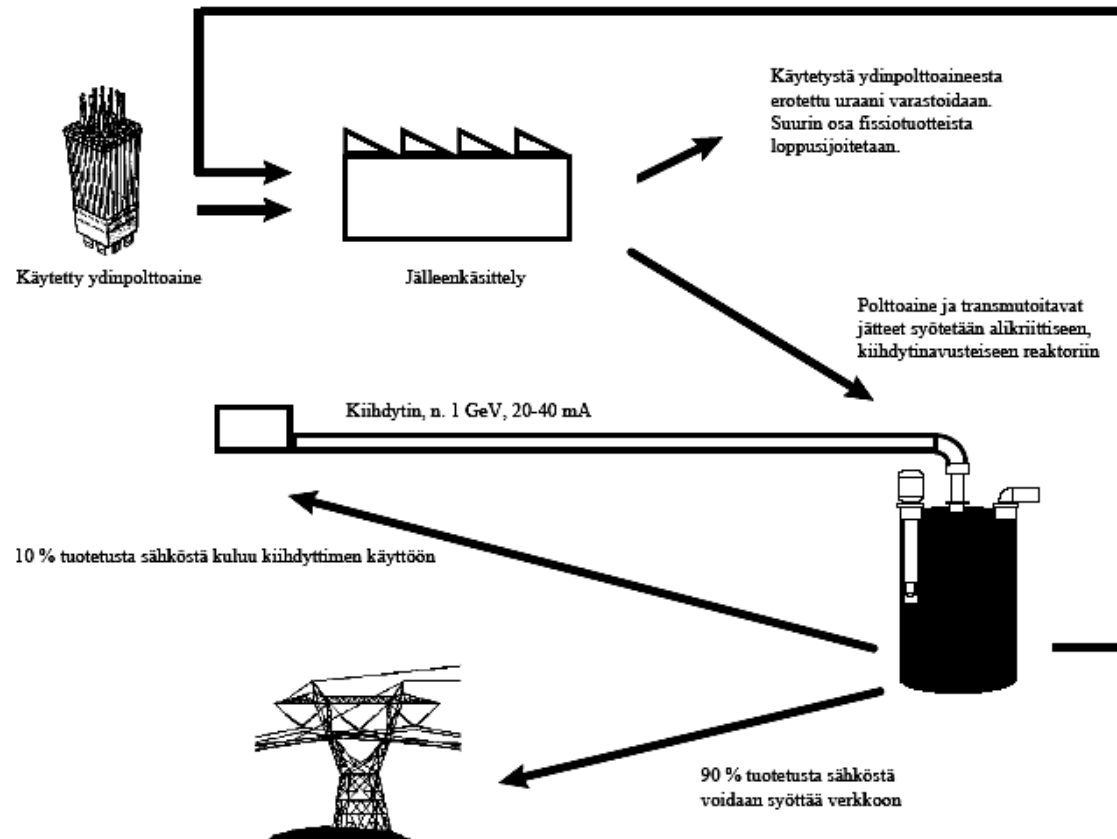
Uraanin halpuus, reaktorin monimutkaisuus, politiikka
→ vain muutama, lähinnä koeluonteinen laitos.

Lyijyjäähdytteinen nopea reaktori



Entinen Neuvostoliitto ja nykyinen Venäjä on kehittänyt lyijyjäähdytteisiä reaktoreita **sukellusveneiden** voimanlähteiksi. Ne ovat kevyempiä ja niiden energiantuotannon säädeltävyys on paljon parempi kevytvesireaktoreilla.

Ydinjätteiden hävittäminen kiihdytinavusteisella transmutaatiolla



Kuva 3. Kiihdytinavusteinen transmutaatio. Järjestelmä koostuu jälleenkäsittelylaitoksesta, kiihdyttimestä, kohtion sisältävästä alikriittisestä reaktorista sekä sähkögeneraattorista turpiiniyksikköineen. Käytetystä ydinpolttoaineesta erotetaan jälleenkäsittelylaitoksessa uraani ja suurin osa fissiotuotteista. Muut aktinidit ja fissiotuotteet viedään alikriittiseen reaktoriin, jossa korkeaa neutronivuota ylläpidetään protonikiihdyttimen avulla. Aktinidien halkeaminen tuottaa energiaa, joka muunnetaan sähköksi. Tästä sähköstä kiihdytin kuluttaa n. 10 %.

Ydinenergian tulevaisuus

Fuusioreaktori (ITER 2020) ja fuusio yleensä pitkällä tähtäimellä kestävä ratkaisu

Deuterium & Tritium (tritiumia litiumista):

- Rajattomasti polttoainetta → energiaa
- Tritiumin kanssa oltava varovainen
- Reaktoriastia käytön jälkeen muutaman kymmenen vuotta aktiivinen, sitten uusiokäyttö

Helium-3 & Deuterium:

- Kuussa valtavasti He-3 (samoin Uranus)
- Ei minkäänlaisia radioaktiivisia jätteitä
- Mahdollisesti avaruusalusten polttoaineena (asteroidien metallien hyödyntäminen)

Fissio: Välivaihe ilman hyötöreaktoreita