

## Luonnon radioaktiivisuus

Luonnossa esiintyy luonnollista radioaktiivisuutta (siis ei ihmisen tuottamaa).

Osa niistä jäänteinä galaksimme syntyajoista. ( $T_{1/2} > 10^9 \text{ v}$ )

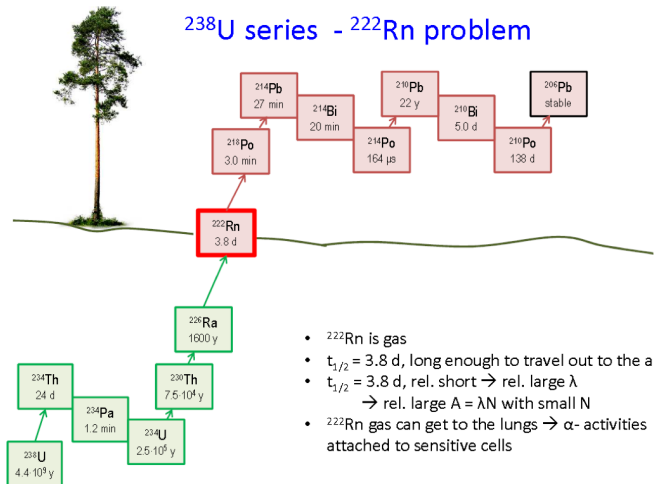
Osa syntyy avaruuden kosmisen säteilyn indusoimissa ydinreaktioissa.

Esim.

$^{14}\text{C}$ : isotooppisuus  $1.2 \times 10^{-10} \%$

Eräät raskaat erittäin pitkäikäiset nuklidit muodostavat **hajoamissarjoja**, jolloin luonnossa havaitaan myös näiden sarjojen lyhyempi-ikäisiä jäseniä:

Esim.  $^{238}\text{U}$  – sarja, johon liittyy mm.  $^{222}\text{Rn}$ - ongelma

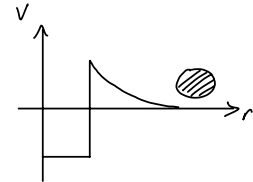


## Ydinreaktioista

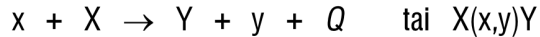
Coulombin valli  $\Rightarrow$  tarvitaan energiaa saattamaan kaksi ydintä toistensa kosketukseen (ydinvoimien vaikutuspiiriin).

$\Rightarrow$

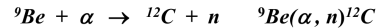
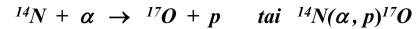
Ydinreaktio saadaan aikaan esim. pommittamalla kohtioytimiä hiukkaskiihdyttimestä saadulla hiukkassuihkulla.



Ydinreaktion tyypillinen muoto:



*Esim.*



$x$  = pommittava hiukkanen,  $K_x$  = pommitusenergia

$X$  = kohtioydin (yleensä levossa)

$Y$  = tulositydin

$y$  = tulosityimestä poistuva hiukkanen (tai hiukkaset)

$Q$  = reaktion  $Q$ -arvo (energia)

$$Q = (M_x + M_X - M_Y - M_y) c^2$$

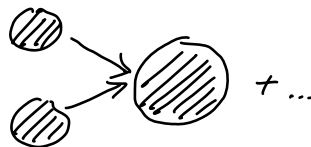
$Q < 0 \leftrightarrow$  endoterminen reaktio

*kin. energiaa sitoutun systeemiin*

$Q > 0 \leftrightarrow$  eksoterminen reaktio

*kin. energiaa vapautun systeemistä*

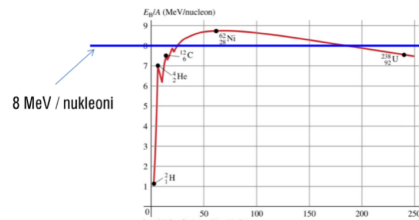
## Fuusio



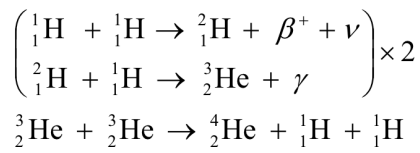
Fuusio on ydinreaktio, jossa kaksi ydintä yhtyy muodostaen raskaamman ytimen.

Esim.  $^{48}\text{Ca} + ^{208}\text{Pb} \rightarrow ^{254}\text{No} + 2n$  ,

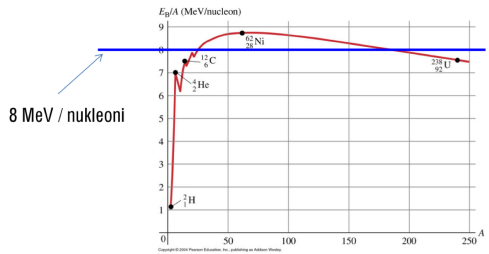
$Q < 0$ , reaktion synnyttämiseen tarvitaan n. 215 MeV:n  $^{48}\text{Ca}$  suihku kiihdyttimestä



Esim. Keveiden ytimien fuusiot auringossa:  
 Protoni-protoni-kierto



Kovassa gravitaatio generoimassa  
 puristuksessa lämpötila kohoaa →  
 Coulombin valli ylittyy → kaksi protonia  
 pääsee hetkeksi ( $10^{-16}$  s) muodostamaan  ${}^2\text{He}$  ytimen,  
 joka  $\beta^+$  -hajoaa  ${}^2\text{H}$ :ksi, joka on sidottu ydin.  
 Tämän jälkeen ei "pullonkauloja".  
 → Nettotulos  ${}^4\text{He}$  ja 24.7MeV:iä energiaa



$Q = 24.7 \text{ MeV} > 0 \rightarrow$  vapautuu energiaa  
 kunhan Coulombin valli on ylitetty

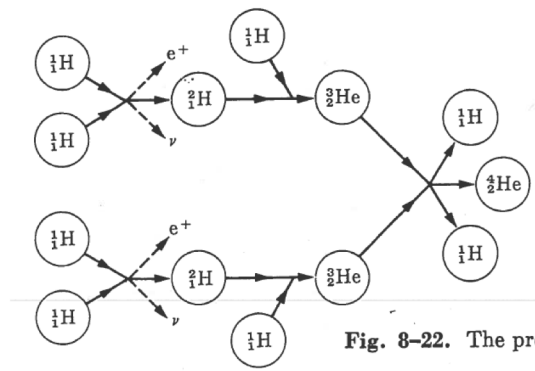


Fig. 8-22. The proton-proton cycle.

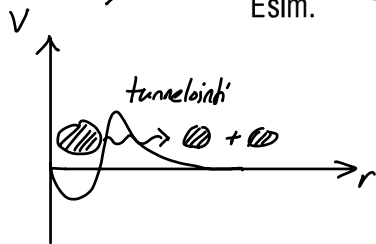
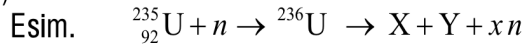
• Nukleosynteesi: H, He, Li syntyivät varhaisessa maailmankaikkeudessa kun  $t \approx 3 \text{ min}$ .

# Fissio

Fissio on reaktio, jossa raskas nuklidi halkeaa kahdeksi keskiraskaaksi nuklidiksi.

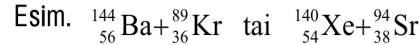
a) Spontaani fissio (suht. harvinaisen)

b) Indusoitu fissio:

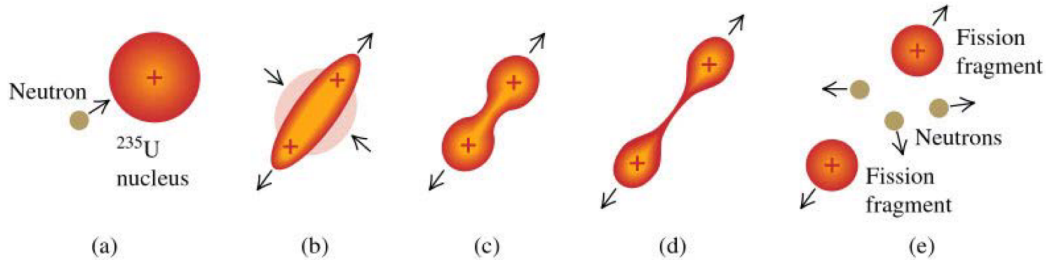


$n$  = "terminen" neutroni (hidas, liike-energia vähäinen)

$X + Y$  = kaksi keskiraskaasta tulosydintä

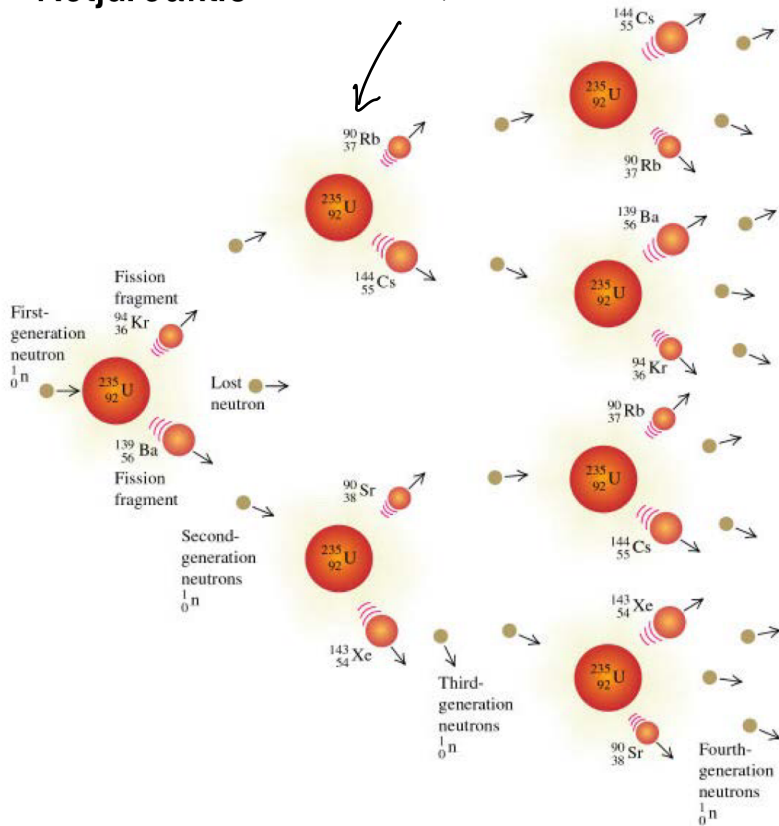


$x n$  =  $x$  kpl neutroneja



# Ketjureaktio

$Q \approx 200 \text{ MeV}$



## Luonnolliset yksiköt

Hiukkeistyyhiäksä käytetään yleensä yksikköjä:

$$(1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV} = 10^9 \cdot 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ J})$$

$$\hbar = \frac{h}{2\pi} = 6.58211945 \cdot 10^{-25} \text{ GeV} \cdot \text{s} = 1$$

$$c = 2,99792458 \cdot 10^8 \text{ m/s} = 1$$

$$k_B = 8,617330350 \cdot 10^{-14} \text{ GeV/K} = 1$$

luonnolliset yksiköt

Hyödyllinen muistisääntö:

$$197 \text{ MeV} \cdot \text{fm} = 1$$

$$\text{Tällöin siis } \frac{[E]}{[T]} = \frac{L}{[X]} = [m] = [p] = [T]$$

eli kaikki suureet voidaan ilmaista yksiköissä GeV. Tämä on "luonnollinen" valinta, sillä suhteellisuusteoria ei tee fundamentaalista eroa ajan ja paikan välillä

$$\Delta s^2 = c^2 \Delta t^2 - \Delta x^2 \quad c=1 \Rightarrow [x] = [t]$$

$$\text{QM: } xp - px = i\hbar \quad \hbar=1 \Rightarrow [x] = [p] = [p^{-1}]$$

$$E = \sqrt{m^2 c^4 + p^2 c^2}$$

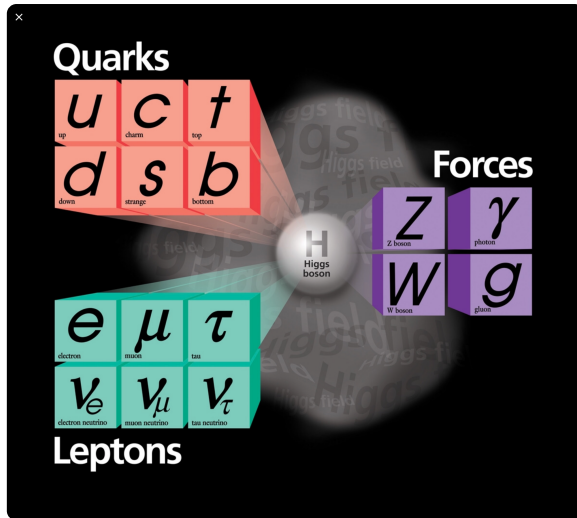
$$c=1 \Rightarrow [E] = [m] = [x^{-1}] = [t^{-1}]$$

$$\text{Stat. fys. } n = e^{-\frac{E}{k_B T}}$$

$$k_B=1 \Rightarrow [T] = [E]$$

## Hiukkafysiikka

- Nykyien ymmärryksen mukaan aine koostuu alkeishiikkeistä, joita kuvaa hiukkafysiikan standardimalli (SM)



Kvarkit (q), 3 "perhettä"  $\Rightarrow$  ytimet

Leptonit (l), 3 "perhettä"  $\Rightarrow$  elektroniverho

Higgs (H)  $\Rightarrow$  massat

Voimat: vahva vuorovaikutus (q)

heikko vuorovaikutus (q, l, H)

sähkömagn. vuorovaikutus (q, l)

+ gravitaatio (kaikki)

- Alkeishiikkeillä ei havaittu alirakennetta  $\Rightarrow$  "pistemäisiä"



29

Leptonit  $\equiv$  sähkömag. ja heikkoja vuorovaikutuksia

Massat eroavat

$e^-$	$\mu^-$	$\tau^-$	$Q = -1e$ (sähkövaraus)
$\nu_e$	$\nu_\mu$	$\nu_\tau$	$Q = 0$

$$m_e = 0.511 \text{ MeV}$$

$$m_\mu = 107 \text{ MeV}$$

$$m_\tau = 1780 \text{ MeV}$$

$$m_\nu = 0$$

$e^-$ ,  $\nu_e$  muodostavat perheen,  
 $e^-$  ja  $\nu_e$ :lla sama maku (flavour)  $\rightarrow$  esiintyvät pareittain heikon vv. n prosesseissa

Quarkit  $\equiv$  tuntevat lisäksi vahvan vuorovaikutuksen

$u$	$c$	$t$	$Q = 2/3e$	$m_u = 2,2 \text{ MeV}$	$m_c = 1,3 \text{ GeV}$	$m_t = 173 \text{ GeV}$
$d$	$s$	$b$	$Q = -1/3e$	$m_d = 4,7 \text{ MeV}$	$m_s = 96 \text{ MeV}$	$m_b = 4,2 \text{ GeV}$

sama maku (flavour)  $\rightarrow$  esiintyvät pareittain heikon vv. n prosesseissa

Fermioneja, spin =  $1/2$

Antihiekkäet

$M_{hieta} = M_{antihieta}$  ,  $Q_{hieta} = -Q_{antihieta}$

Antileptonit  $\equiv$  sähköm. ja heikkoja vuorovaikutuksia

$e^+$	$\mu^+$	$\tau^+$	$Q = +1e$ (sähkövaraus)
$\bar{\nu}_e$	$\bar{\nu}_\mu$	$\bar{\nu}_\tau$	$Q = 0$

↑ sama maku (flavour) = esiintyvät pareittain heikon vv.n prosesseissa

Antikvarkit  $\equiv$  tuntevat lisäksi vahvan vuorovaikutuksen

$\bar{u}$	$\bar{c}$	$\bar{t}$	$Q = -2/3e$
$\bar{d}$	$\bar{s}$	$\bar{b}$	$Q = +1/3e$

↑ sama maku (flavour) = esiintyvät pareittain heikon vv.n prosesseissa

Hadronit = baryonit ja mesonit

Kvarkit muodostavat vahvan vu:n avulla yhdisteitä, hadroneita (vain p stabiili!)

<http://pdg.lbl.gov/>

Mesons $q\bar{q}$						Baryons $qqq$ and Antibaryons $\bar{q}\bar{q}\bar{q}$					
Mesons are bosonic hadrons. There are about 140 types of mesons.						Baryons are fermionic hadrons. There are about 120 types of baryons.					
Symbol	Name	Quark content	Electric charge	Mass GeV/c <sup>2</sup>	Spin	Symbol	Name	Quark content	Electric charge	Mass GeV/c <sup>2</sup>	Spin
$\pi^+$	pion	$u\bar{d}$	+1	0.140	0	<b>p</b>	proton	<b>uud</b>	1	0.938	1/2
$K^-$	kaon	$s\bar{u}$	-1	0.494	0	$\bar{p}$	anti-proton	$\bar{u}\bar{u}\bar{d}$	-1	0.938	1/2
$\rho^+$	rho	$u\bar{d}$	+1	0.770	1	<b>n</b>	neutron	<b>udd</b>	0	0.940	1/2
$B^0$	B-zero	$d\bar{b}$	0	5.279	0	$\Lambda$	lambda	<b>uds</b>	0	1.116	1/2
$\eta_c$	eta-c	$c\bar{c}$	0	2.980	0	$\Omega^-$	omega	<b>sss</b>	-1	1.672	3/2

Kvarkkeja ei koskaan havaita vapaina (vahvan vu:n ominaisuus), kuvainnollisesti:



Voimiin liittyy välittäjähiukkanen

Coulombin potentiaali

Klassisesti  $-\vec{F} \leftarrow \cdot \underbrace{\hspace{2cm}}_{=r} \cdot \rightarrow F$   $V_{\text{pot}} = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r}$   $F = -\frac{dV}{dr}$

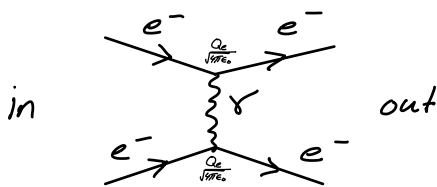
Hilukkeafysiikka (= kvanttikenttäteoria = Quantum Field Theory (QFT))

Proessin tod. näk.  $P \equiv |\langle \text{out} | \text{in} \rangle|^2$

$Q_e = e$

$\langle \text{out} | \text{in} \rangle \sim \left( \frac{e}{\sqrt{4\pi\epsilon_0}} \right)^2 \int \frac{d^4k}{(2\pi)^4} \frac{-i}{k^2} e^{ik \cdot \bar{x}}$

↑  
QFT-lasku



$= \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{r}$  Coulombin pot.

vuorovaikutus = välittäjähiukkanen vaihto

## SM:n vuorovaikutukset ja niiden välittäjät

- Vahva vuorovaikutus:** gluoni  $g$   $Q_{EM} = 0$ ,  $m = 0$ ,  $spin = 1$   
 (8 kpl)  $Q_{strong} \neq 0 \Rightarrow$  kantama  $\sim fm$  ( $10^{-16} m$ )  
 $\uparrow$  itseisvuorovaikutuksia  $\nabla$
- Sähkömagneettinen vuorovaikutus:** fotoni  $\gamma$   $Q_{EM} = 0$ ,  $m = 0$ ,  $spin = 1$   
 kantama  $\infty$
- Heikko vuorovaikutus:**  $W^{\pm}, Z$  bosonit  $Q(W^+) = e$ ,  $spin = 1$   
 $Q(W^-) = -e$   
 $Q(Z) = 0$

$$m_W = 80,4 \text{ GeV}$$

$$m_Z = 91,2 \text{ GeV}$$

 $\Rightarrow$ 

$$\text{kantama} \sim \frac{1}{m} = \frac{\hbar}{mc} \sim 10^{-3} \text{ fm}$$

siksi "heikko"

## + gravitaatio

### Syventävää materiaalia

- gravitaatio: gravitoni;  $Q=0$ ,  $m=0$ ,  $\text{spin}=2$ , kantama  $\propto$

Ongelma: gravitaation kvanttiteoriaa ei tunneta.\*

$$QM: \langle \text{out} | \text{in} \rangle = \langle \text{out} | \sum_i |\psi_i\rangle \langle \psi_i | \text{in} \rangle = \text{diagram 1} + \text{diagram 2} + \dots$$

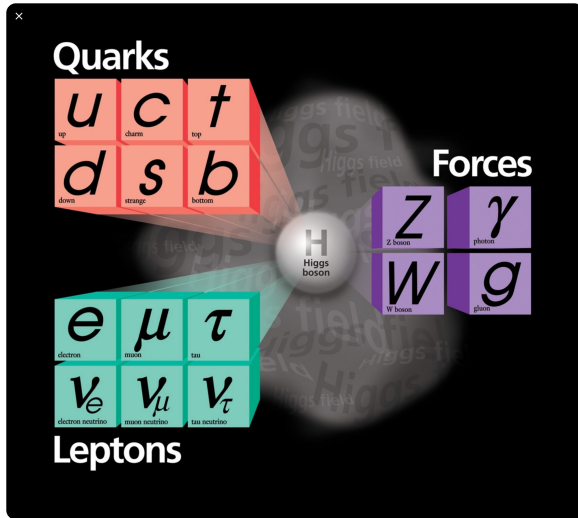
summa kaikkien mahd.  
välitilojen yli

QM korjauksia, joissa  $\Delta E \sim \frac{\hbar}{\Delta t} \rightarrow \infty$ , kun  $\Delta t \rightarrow 0$

$\Rightarrow$  Täytyy tietää teorian rakenne  $E \rightarrow \infty$  asti,  
gravitaatiolle ei tiedetä  $\Rightarrow$  teoria ei "renormalisoidu"

\* Yksi mahdollisuus on ns. säieteoria, mutta sen ennusteita ei osata kunnolla laskea.

# Alkeishiukkasten ominaisuuksia



**Varaukset** = mitkä vuorovaikutukset hihti tuntee ja miten voimakkaasti

Esim.  $Q_{EM}(e^-) = -e$

$Q_{EM}(\nu_e) = 0$

**Massa** = kytkentä Higgsin kenttään

**Spin** = sis. liikemäärämomentti

$l$  = leptoni,  $\bar{l}$  = anti-leptoni

**Leptoniluku**  $L(l) = 1, L(\bar{l}) = -1$

$L(q) = L(\bar{q}) = 0$

$q$  = kvarkki  
 $\bar{q}$  = anti-kvarkki

Listaus alkeishiikojen ominaisuuksista: [pdg.lbl.gov](http://pdg.lbl.gov)

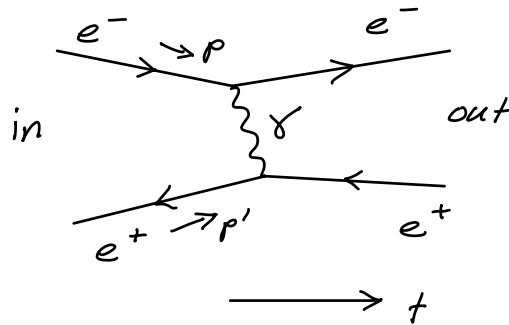
## Alkeishiikkasten prosessit

Kätevä esittää ns. Feynmanin diagrammojen (graafien) avulla

Esim.

$$e^- + e^+ \rightarrow e^- + e^+$$

in-tila                      out-tila



Jokaista graafia vastaa tietty kvanttikenttäteoriasta laskettava matemaattinen lauseke, joihin palataan QFT-kursseilla.

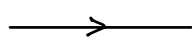
Prosessin tod. näköisyyden amplitudi  $\langle \text{out} | \text{in} \rangle = \sum \text{graafit}$

Prosessi tod. näköisyys  $|\langle \text{out} | \text{in} \rangle|^2 = |\sum \text{graafit}|^2$

Tällä kurssilla vain piirretään graafeja.

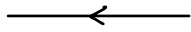


Diagrammat koostuvat tietyistä osista, joita yhdistelemällä syntyy mikä tahansa teorian prosessi (mitä ei synny, sitä ei tapahdu)



fermioni

etenevät hiukkaset = "propagaattorit"



antiferioni

Notaatio: fermionille nuoli ajan suuntaan

 $\gamma, W, Z$ 

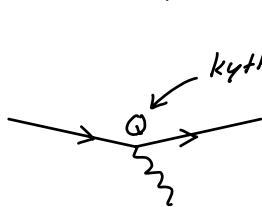
fotoni, W, Z

antiferionille vastakkaiseen suuntaan



gluoni

→ + aika



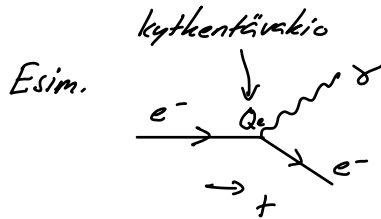
kytkennän voimakkuus = varaus (sähkö, heikko tai vahva)

vuorovaikutukset = "verteksit"

+ muita (ei tarvita tässä)

# QED: Quantum Electrodynamics (= sähkömagnetismi)

QED:n vertekseissä: varaus, leptoniluku ja maku säilyvät



$$\alpha = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 \hbar c} = \frac{1}{137,04\dots} \text{ hienorakennevakio}$$

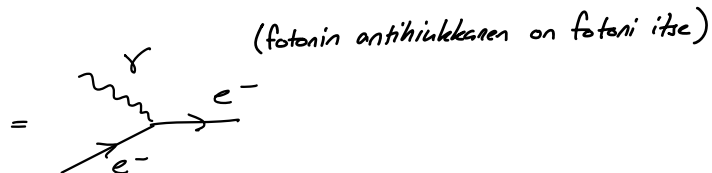
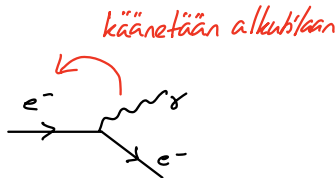
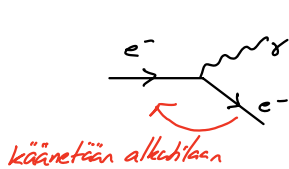
$$Q_{in} = -e, Q_{out} = -e \quad \checkmark$$

$$L_e^{in} = L_e(e^-) = 1$$

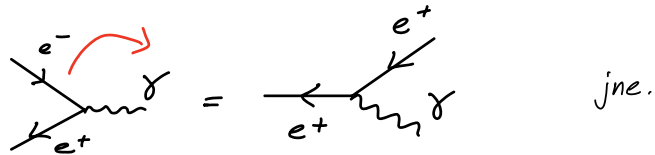
$$L_e^{out} = L_e(e^-) = 1 \quad \checkmark$$

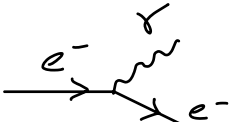
↑ leptoniluku per maku

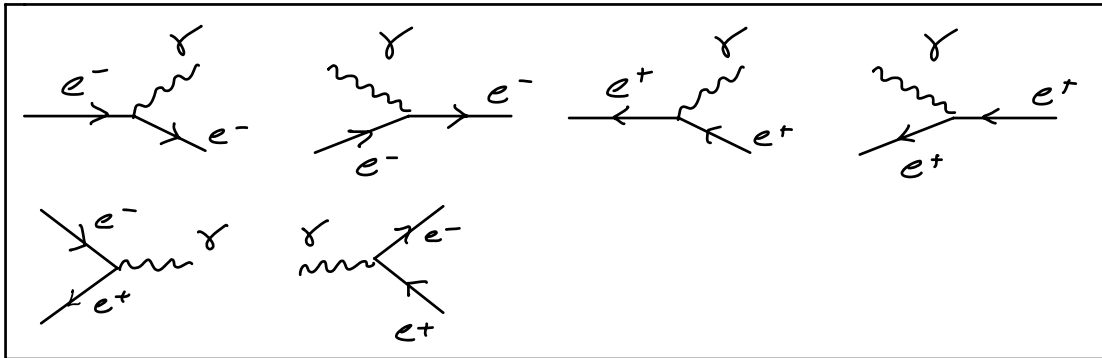
Yhdestä perusverteksistä voidaan muodostaa muita kääntämällä ulkoisia jalkoja




# QED: Quantum Electrodynamics (= sähkömagnetismi)



Näin perusverteksistä  saadaan johdettua:

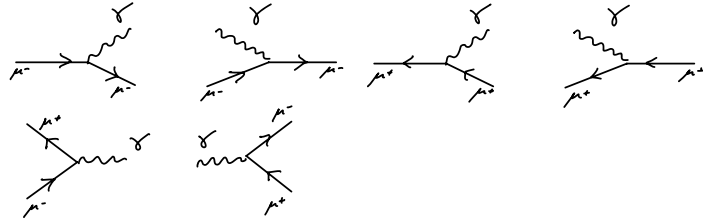
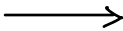
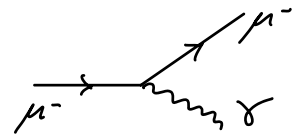
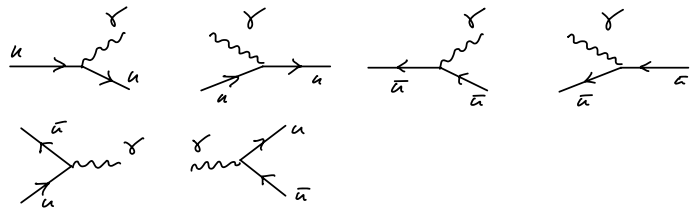
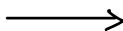
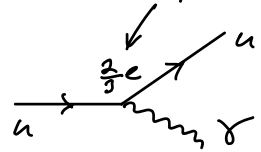


(esim. ~~~~ koska maku muuttuu,  $e^- \rightarrow \mu^-$ )

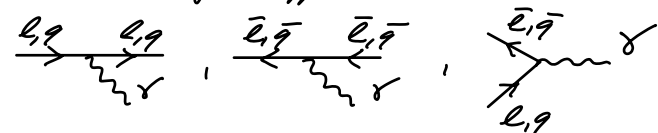
QED: Quantum Electrodynamics (= sähkömagnetismi)

Kaikille leptoneille ja kvarkeille on QED:ssä vastaavat verteksit:

Esim. *kytkentävakio riippuu varauksesta, vaikuttaa prosessin tod.näit. mutta ei geometriin*

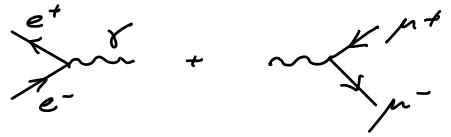


**Resepti** sallittujen prosessien muodostamiseksi

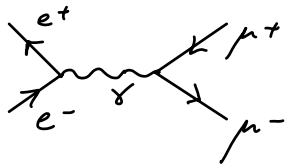
- ① Valitaan alkutila  $in$  ja lopputila  $out$
- ② Verteksit 
- ③ Etsitään kaikki tavat yhdistää alku- ja lopputilat ②:n avulla

$l$  = varattu leptoni  
 $q$  = kvarkki


Esim:  $e^+ + e^- \rightarrow \mu^+ + \mu^-$  alin kertaluku kytkennässä, eli pienin mahd. määrä verteksejä



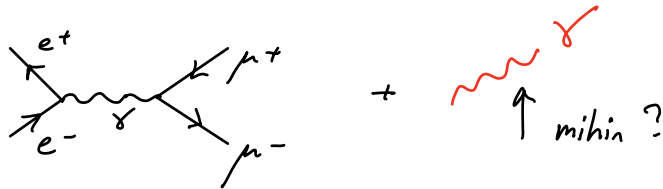
1 graafi



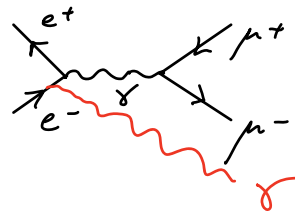
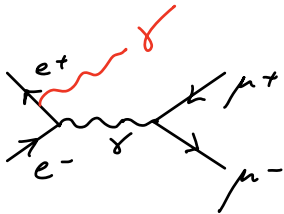
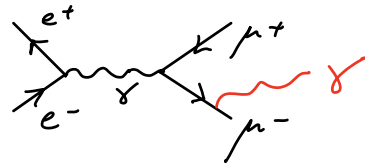
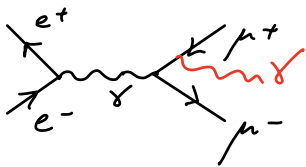
+  $\mathcal{O}(e^4)$

↑ "looppikorjauksia"  + ...  
(ei tarvita tällä kurssilla)

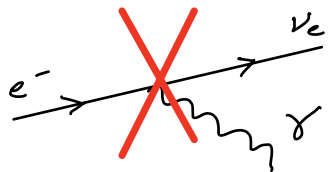
Esim:  $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^- + \gamma$ , alin kertaluku



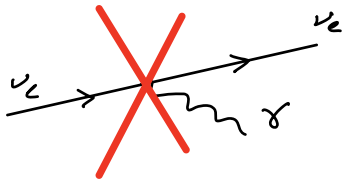
4 graafia



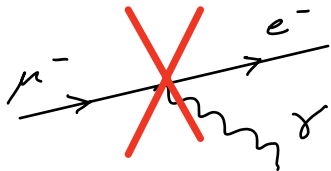
Esim: Kiellettyjä prosesseja QED:ssä  $\Leftrightarrow$  verteksejä ei ole



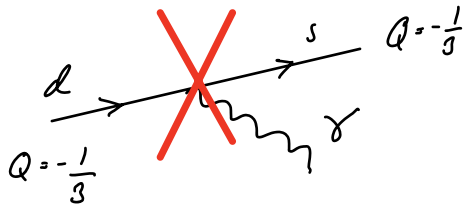
$Q_{in} \neq Q_{out}$  varaus ei säily



$Q_e = 0 \Rightarrow$  ei kytkentää



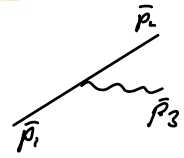
$Q_{in} = Q_{out}$  , mutta flavour( $e^-$ )  $\neq$  flavour( $\mu^-$ )



$Q_{in} = Q_{out}$  , mutta flavour( $d$ )  $\neq$  flavour( $s$ )

# E ja p säilyvät

Joka verteksissä:



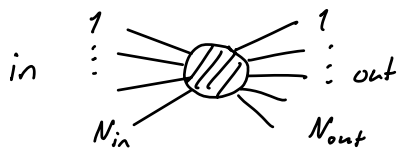
$$\vec{p}_1 = \vec{p}_2 + \vec{p}_3$$

$$E_1 = E_2 + E_3$$

$$\vec{p} = \gamma m \vec{v}$$

$$E = \gamma m c^2$$

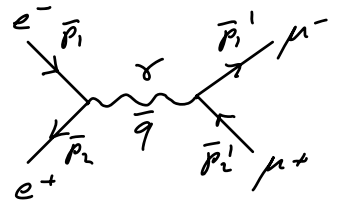
Koko prosessissa:



$$\sum_{i=1}^{N_{in}} \vec{p}_i = \sum_{i=1}^{N_{out}} \vec{p}_{out}$$

$$\sum_{i=1}^{N_{in}} E_i = \sum_{i=1}^{N_{out}} E_{out}$$

Välitilojen hiukkaset ovat yleensä virtuaalisia  $\Leftrightarrow E^2 \neq m^2 c^4 + |\vec{p}|^2 c^2$  QM välikä



$|\vec{q}|c \neq E_\gamma \Rightarrow \gamma$  virtuaalinen

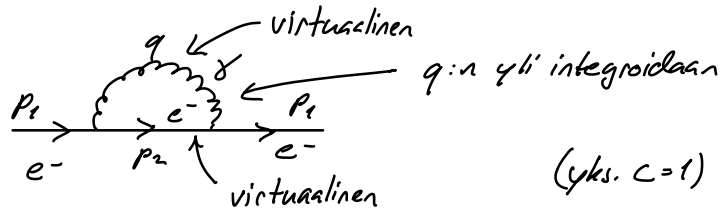
Alku- ja lopputilojen hiukkasille aina  $E^2 = m^2 c^4 + |\vec{p}|^2 c^2$

Virtuaalisia hitaaja esiintyy vain välikäissä, joita ei voida suoraan havaita = matemaattinen kuvaus



## Syventävää materiaalia

Virtuaalisen hiukkasen energia voi olla mielivaltaisen suuri



$$q = p_1 - p_2$$

$$\begin{aligned} \text{CM-frame } \vec{p}_1 = 0 &\Rightarrow \vec{q} = -\vec{p}_2 \\ E_1 = m_1 &= E_q + E_2 \end{aligned} \Rightarrow$$

$$p_1 = (m_e, \vec{0})$$

$$q = (q_0, \vec{q})$$

$$p_2 = (m_e - q_0, -\vec{q})$$

$$q_0 = |\vec{q}| + \Delta E \leftarrow \text{ voi olla mitä vaan}$$

$$\text{Heisenberg: } \Delta E \sim \frac{\hbar}{\Delta t} \rightarrow \infty \text{ kun } \Delta t \rightarrow 0$$

↑  
virtuaalinen välitila lyhytikäinen