Luonnolliset yksiköt

Hiukkasfysiikassa käytetään yleensä luonnollisia yksikköjä:

Luonnollisissa yksiköissä

$[E] = [t^{-1}] = [x^{-1}] = [m] = [p] = [T]$

eli kaikki suureet voidaan ilmaista esim. energian yksiköissä !

$$\hbar = \frac{h}{2\pi} = \frac{6.62607015 \cdot 10^{-34}}{2\pi} \, Js = 1$$

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

$$k_B = 1.380649 \cdot 10^{-23} \, J/K = 1$$

Miksi "luonnollinen"?

- Suhteellisuusteoria: $t' = \gamma(t - \frac{v}{c^2}x)$, $x' = \gamma(x - vt)$, $ds^2 = c^2dt^2 - d\vec{x}^2$

  ajan ja paikan välillä ei fundamentaalia eroa $\Rightarrow$ asetetaan $c = 1$, jolloin $[x] = [s]$

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

$$J = kg\frac{m^2}{s^2} = kg\frac{c^2}{(2.99\ldots \cdot 10^8)^2} = \frac{kg}{(2.99\ldots \cdot 10^8)^2} \Rightarrow kg = 8.98755 \cdot 10^{16} J \quad (E = mc^2 = m)$$

- QM epätarkkuusperiaate $\Delta x \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$, karakteristinen pituusskaala $\frac{\hbar}{2\Delta p}$

  asetetaan $\hbar = 1 \Rightarrow s = 2\pi \cdot 1.50919 \cdot 10^{33} J^{-1} \simeq 9.48 \cdot 10^{33} J^{-1}$

- Statistisessa fysiikassa esim. hiukkastiheys $n \propto e^{-\frac{E}{k_B T}}$, karakteristinen energiaskaala $k_B T$

  asetetaan $k_B = 1 \Rightarrow 1K = 1.380649 \cdot 10^{-23} J$

Luonnolliset yksiköt

Yleensä energian yksikkönä eV $(1\,eV = 1.60\ldots \cdot 10^{-19}\,J)$

$$\hbar = \frac{h}{2\pi} \simeq 6.58 \cdot 10^{-25}\,GeV\cdot s = 1$$

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

$$k_B \simeq 8{,}62 \cdot 10^{-14}\,GeV/K = 1$$

← 3 merkitsevän nro:n tarkkuudella

$$\Rightarrow \quad 1\,eV = 11600\,K = 1.60 \cdot 10^{-19}\,J = 5.07 \cdot 10^{6}\,m^{-1} = 1.52 \cdot 10^{15}\,s^{-1} = 1.78 \cdot 10^{-36}\,kg$$

Esim. Muunna pituus $x = \frac{1}{197\,MeV}$ takaisin SI-yksiköiksi

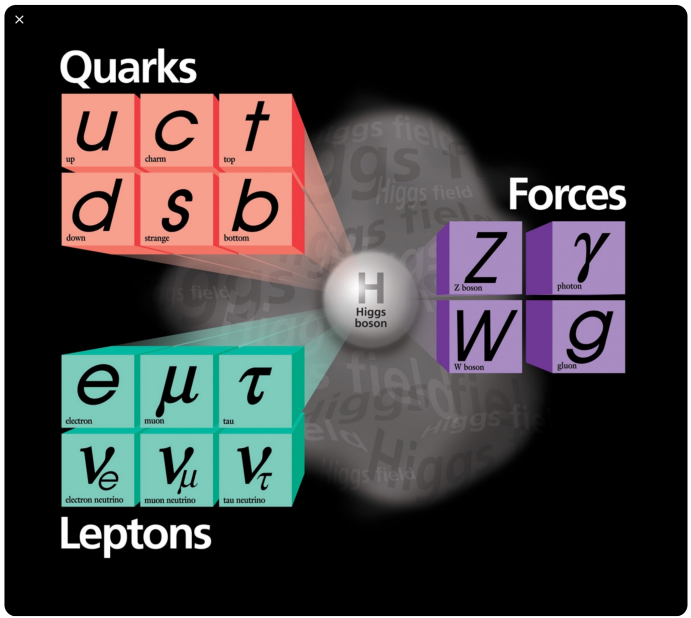
$$x = \frac{1}{197 \cdot 1.6 \cdot 10^{-13}\,J} = \frac{1}{197 \cdot 1.6 \cdot 10^{-13}}\,\frac{s^2}{kg\,m^2} = \frac{1}{197 \cdot 1.6 \cdot 10^{-13}}\,\frac{s^2}{kg\,m^2}\,\underbrace{\hbar c}_{=1\ \text{luonn. yks.}}$$

Sijoitetaan nyt SI-arvo $\hbar, c$:lle

$$x = \frac{1}{197 \cdot 1.6 \cdot 10^{-13}\,J}\,\frac{(6.63 \cdot 10^{-34}\,Js)}{2\pi}\left(3.00 \cdot 10^{8}\,\frac{m}{s}\right) \simeq 1.0\,fm \quad \Rightarrow \quad 197\,MeV\,fm = 1$$

Hiukkasfysiikka

- Nykyisen ymmärryksen mukaan aine koostuu alkeishiukkasista, joiden tunnettuja ominaisuuksia kuvaa hiukkasfysiikan standardimalli (SM)



Kvarkit (q), 3 "perhettä" ⇒ ytimet

Leptonit (l), 3 "perhettä" ⇒ elektroniverho

Higgs (H) ⇒ massat

Voimat: vahva vuorovaikutus (q)
heikko vuorovaikutus (q, l, H)
sähkömag. vuorovaikutus (q, l)
+ gravitaatio (kaikki)

- Alkeishiukkasilla ei havaittu alirakennetta ⇒ pistemäisiä
- Listaus alkeishiukkasten ominaisuuksista: pdg.lbl.gov

Tutkitaan hiukkaskiihdyttimillä

$\bar{F}_E = q\bar{E}$ sähkökentällä kiihdytetään varattuja hiukkasia

$\bar{F}_B = q(\bar{v} \times \bar{B})$ magneettikentällä muutetaan varatun hiukkasen suuntaa

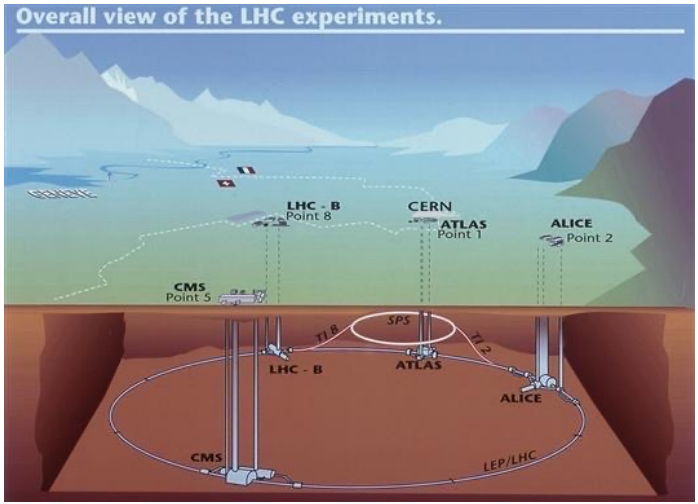


Fig:CERN

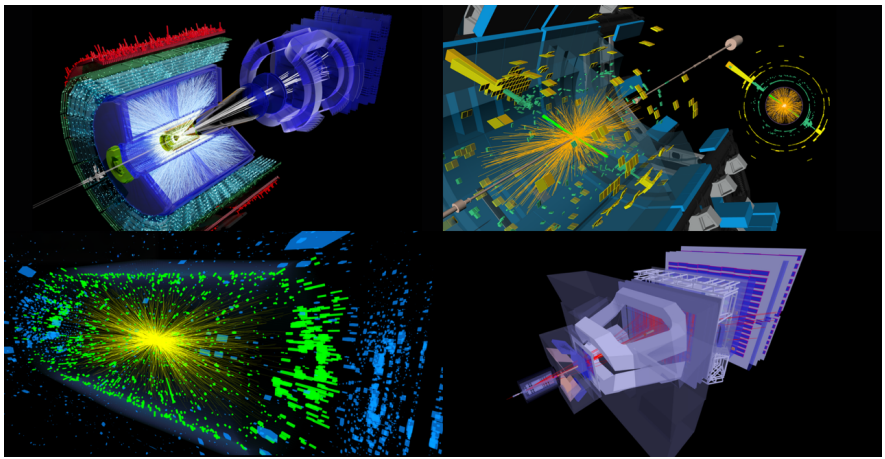
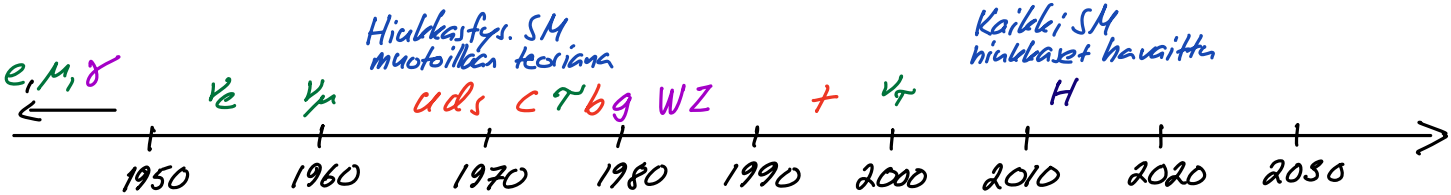


Fig:CERN

- Tällä hetkellä suurin kiihdytin on CERN LHC, max. energia $E \sim 6.8$ TeV/proton
- Hiukkasfysiikan teoreettinen ymmärrys tarkentunut askelittain kiihdyttimien kasvaessa:



Leptonit ≡ sähkömag. ja heikkoja vuorovaikutuksia

e^-	μ^-	τ^-	$Q = -1e$ (sähkövaraus)
ν_e	ν_μ	ν_τ	$Q = 0$

Massat eroavat

$m_e = 0.511$ MeV
$m_\mu = 107$ MeV
$m_\tau = 1780$ MeV
$m_\nu \simeq 0$

e^-, ν_e muodostavat perheen,
e^- ja ν_e:llä sama maku (flavour) → esiintyvät pareittain heikon v.v. prosesseissa
(esim. $n \to p + e^- + \bar{\nu}_e$)

Kvarkit ≡ tuntevat lisäksi vahvan vuorovaikutuksen

u	c	t	$Q = 2/3\,e$
d	s	b	$Q = -1/3\,e$

$m_u = 2{,}2$ MeV, $m_c = 1{,}3$ GeV, $m_t = 173$ GeV
$m_d = 4{,}7$ MeV, $m_s = 96$ MeV, $m_b = 4.2$ GeV

sama maku (flavour) → esiintyvät yhdessä pareittain heikon v.v. prosesseissa

Fermioneja, spin = 1/2

Antihiukkaset

kaikilla hiukkasilla niitä vastaava antihiukkanen, jolle:

$m_{hiuk} = m_{antihiuk}$, $Q_{hiuk} = -Q_{antihiuk}$

Antileptonit ≡ sähkömag. ja heikkoja vuorovaikutuksia

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

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

Antikvarkit ≡ tuntevat lisäksi vahvan vuorovaikutuksen

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

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

Hadronit = baryonit ja mesonit

Kvarkit muodostavat vahvan vv.n avulla yhdisteitä, hadroneita

vain p stabiili ✓

http://pdg.lbl.gov/

Mesons $q\bar{q}$

Mesons are bosonic hadrons.
There are about 140 types of mesons.

Symbol	Name	Quark content	Electric charge	Mass GeV/c^2	Spin
π^+	pion	$u\bar{d}$	+1	0.140	0
K^-	kaon	$s\bar{u}$	−1	0.494	0
ρ^+	rho	$u\bar{d}$	+1	0.770	1
B^0	B-zero	$d\bar{b}$	0	5.279	0
η_c	eta-c	$c\bar{c}$	0	2 .980	0

Baryons qqq and Antibaryons $\bar{q}\bar{q}\bar{q}$

Baryons are fermionic hadrons.
There are about 120 types of baryons.

Symbol	Name	Quark content	Electric charge	Mass GeV/c^2	Spin
p	proton	uud	1	0.938	1/2
$\bar{p}$	anti-proton	$\bar{u}\bar{u}\bar{d}$	−1	0.938	1/2
n	neutron	udd	0	0.940	1/2
Λ	lambda	uds	0	1.116	1/2
Ω^-	omega	sss	−1	1.672	3/2

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





tähän palatan tarkemmin



Voimiin liittyy välittäjähiukkanen

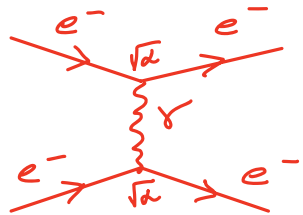
Coulombin potentiaali

Klassisesti $-\bar{F} \leftarrow e^- \quad r \quad e^- \rightarrow \bar{F}$

$$V_{pot} = \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 r} \qquad F = -\frac{dV}{dr}$$

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

Mikroskoopinen prosessi



in → out

QFT – kurssin lasku

Prosessin tod. näk. $P \equiv |\langle out|in\rangle|^2$

$$\langle out|in\rangle \propto \overbrace{\left(\frac{e}{\sqrt{4\pi\varepsilon_0}}\right)^2}^{\equiv\alpha} \int \frac{d\bar{k}}{(2\pi)^3} \frac{-i}{k^2} e^{i\bar{k}\cdot\bar{x}} = \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0}\frac{1}{r}$$

fotonin "amplitudi"

Coulombin pot.

QFT:ssä vuorovaikutus = välittäjähiukkasen vaihto

SM:n vuorovaikutukset ja niiden välittäjät

- **Vahva vuorovaikutus:** gluoni g (8 kpl) $\quad Q_{EM} = 0,\ m = 0,\ \text{spin} = 1$

  $Q_{strong} \neq 0 \Rightarrow$ kantama $\sim$ fm

  ↑ itseisvuorovaikutuksia !

- **Sähkömagneettinen vuorovaikutus:** fotoni γ $\quad Q_{EM} = 0,\ m = 0,\ \text{spin} = 1$

  kantama ∞

- **Heikko vuorovaikutus:** $W^{\pm}, Z$ bosonit $\quad$ spin = 1

  $Q(W^+) = e$

  $Q(W^-) = -e$

  $Q(Z) = 0$

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

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

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

siksi "heikko"

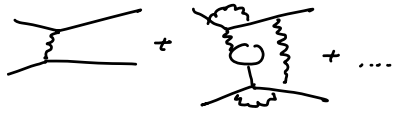
+ gravitaatio

Syventävää materiaalia

- gravitaatio : gravitoni ; $Q = 0$, $m = 0$, spin $= 2$, kantama ∞

Ongelma: gravitaation kvanttiteoriaa ei tunneta.*

QM: $\langle out | in \rangle = \langle out | \sum_i |\psi_i\rangle\langle\psi_i| \, | in \rangle$ =



↑ summa kaikkien mahd. välitilojen yli

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

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

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

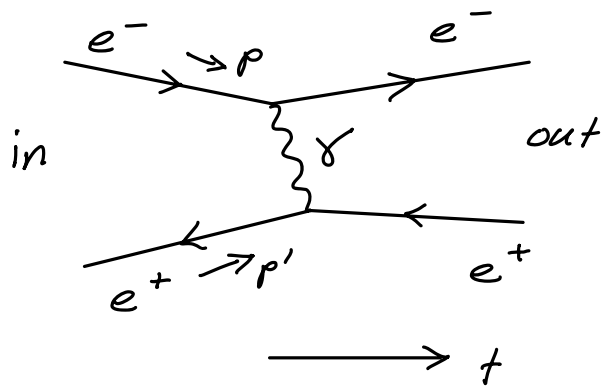
Alkeishiukkasten prosessit

Kätevä esittää ns. Feynmanin diagrammojen (graafien) avulla

Esim.

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

in-tila out-tila



Tällä kurssilla vain piirretään graafeja, mutta yleisemmin jokaista graafia vastaa tietty matemaattinen lauseke (opitaan QFT-kursseilla) siten että:

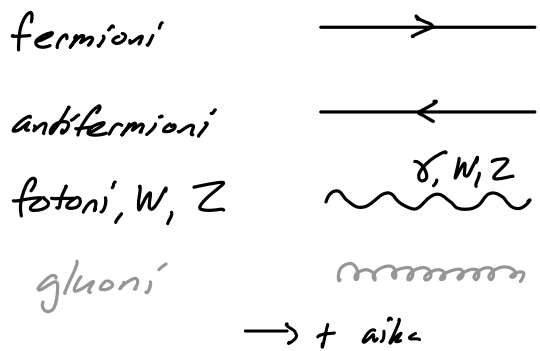
Prosessin tod. näköisyyden amplitudi $\langle out | in \rangle = \sum$ graafit

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

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

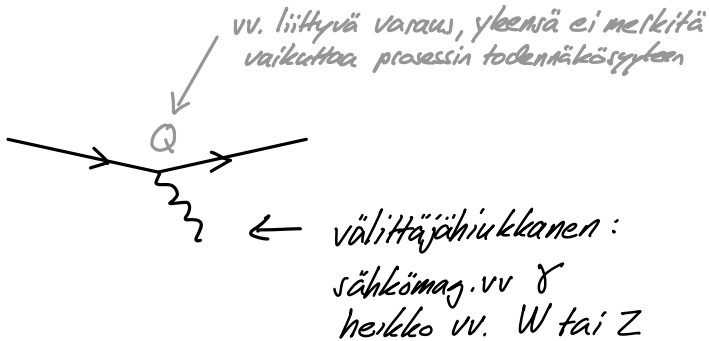
etenevät hiukkaset = "propagaattorit"

Notaatio: fermioneille nuoli ajan suuntaan
antifermioneille vastakkaiseen suuntaan



vuorovaikutukset = "verteksit"

leptoneille ja kvarkeille
aina 3-jalkaisia *

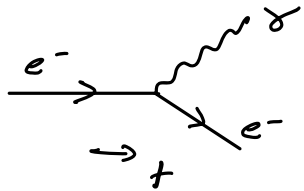


* gluoneille, W, Z-bosoneille ja Higgsille myös 4-jalkaisia, mutta niitä ei käsitellä tällä kurssilla

QED : Quantum Electrodynamics (= sähkömagnetismi)

QED:n vertekseissä : yksi jalka aina γ, varaus säilyy, maku säilyy

Esim

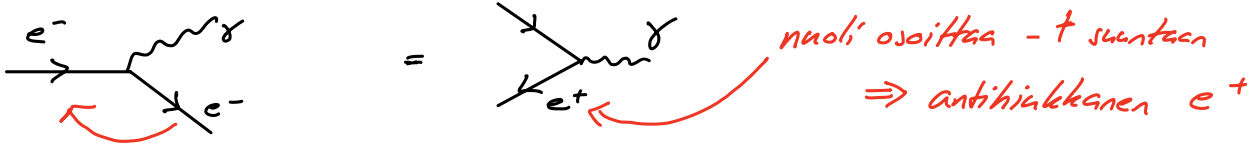


$Q_{in} = -e$, $Q_{out} = -e$ ✓

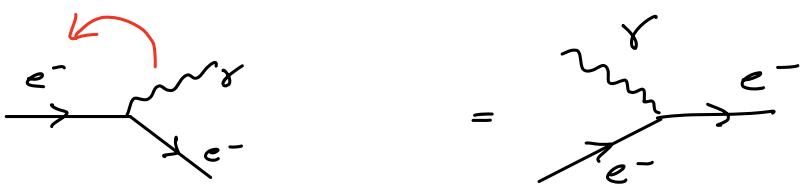
γ:lla ei makua $\Rightarrow$ maku säilyy* ✓

Verteksit $\exists$ vain hiukkasille, joiden sähkövaraus $Q \neq 0$!?

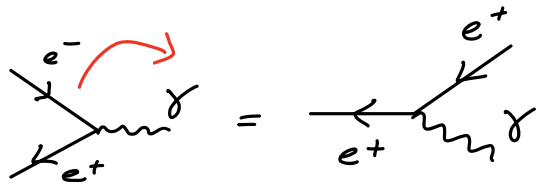
Yhdestä *perusverteksistä* voidaan *muodostaa muita* kääntämällä ulkoisia jalkoja



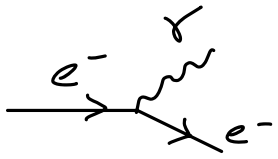
käänetään alkutilaan

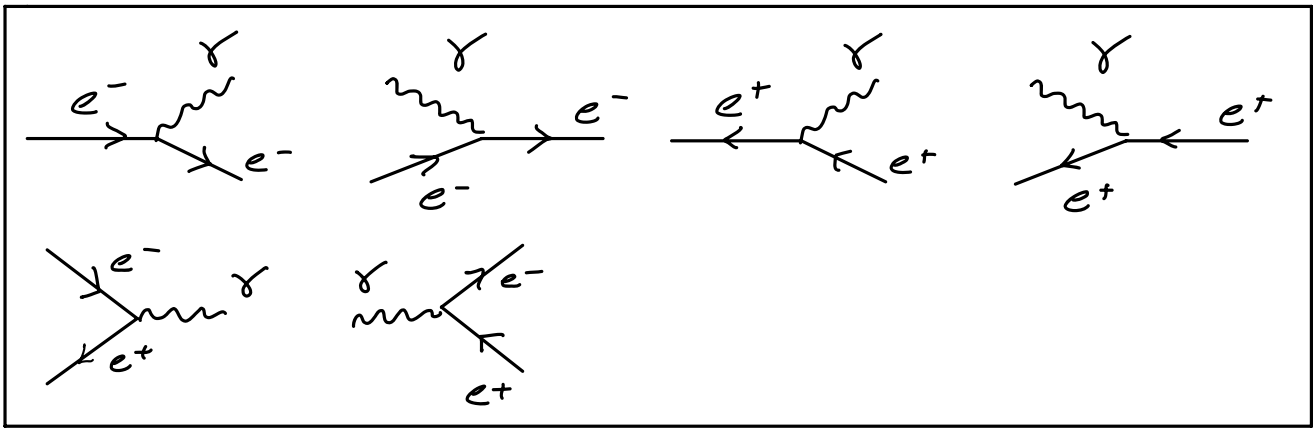


QED : Quantum Electrodynamics (= sähkömagnetismi)



jne.

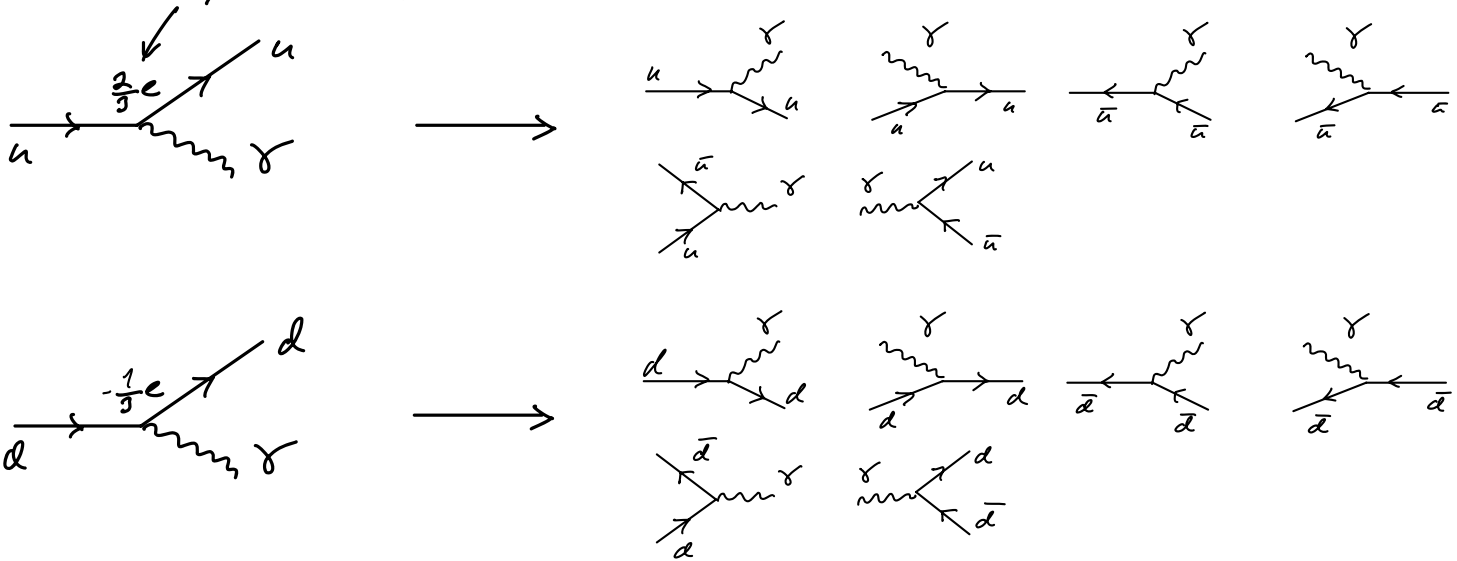
Näin perusverteksistä  saadaan johdettua:



QED : Quantum Electrodynamics (= sähkömagnetismi)

Kaikille muillekin varatuille hiukkasille on QED:ssä vastaavat vertekset

Esim. kytkentävakio riippuu varauksesta, vaikuttaa prosessin todenn. mutta ei graafeihin

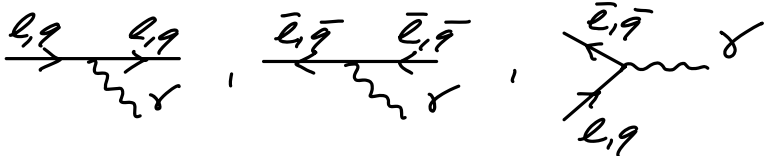


QED:n vertekseissä säilyy aina varaus ja maku

(esim.  koska maku ei säily)

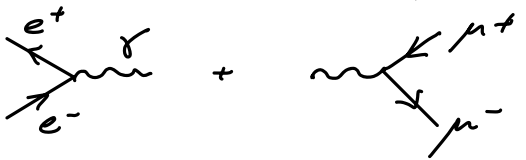
Resepti sallittujen prosessien muodostamiseksi

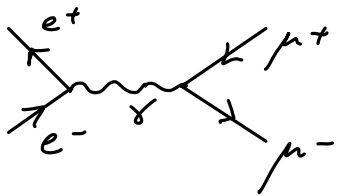
① Valitaan alkutila $|in\rangle$ ja lopputila $\langle out|$

② Verteksit 

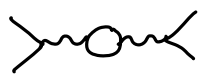
③ Etsitään kaikki tavat yhdistää alku- ja lopputilat ②:n avulla

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



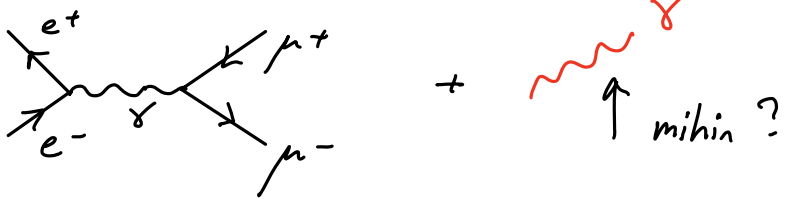
1 graafi 

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

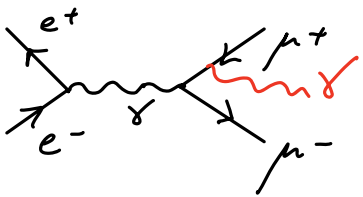
↑ "looppikorjauksia"  +....

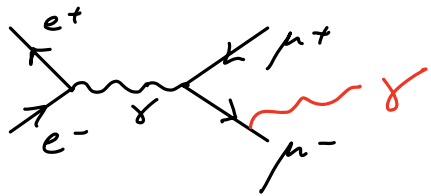
(ei tarvita tällä kurssilla)

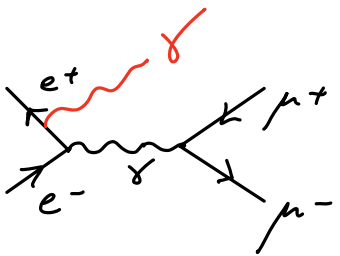
Esim: $e^+ + e^- \to \mu^+ + \mu^- + \gamma$, alin kertaluku eli pienin mahd. määrä vertekseja

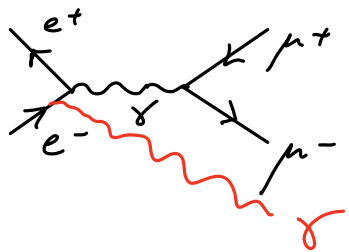


4 graafia





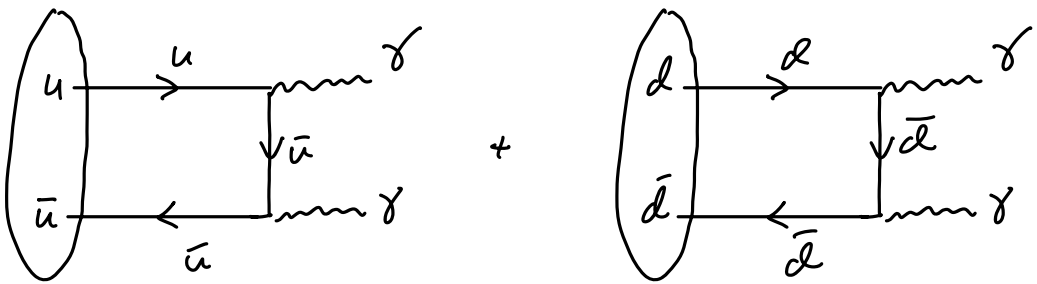




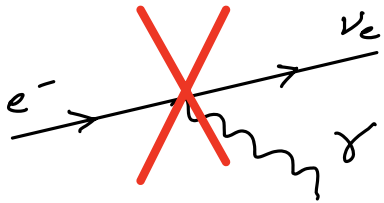
Esim. Kevyimmät hadronit ovat pioneja $\pi^0, \pi^\pm$ (nukleonien välinen vuorovaikutus voidaan esittää pionin vaihtona)

$$\pi^0 = \frac{1}{\sqrt{2}}(u\bar{u} - d\bar{d})$$ superpositio

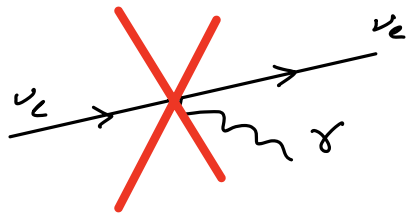
Pioni hajoaa $\pi^0 \to \gamma + \gamma$ $\quad \tau_{\pi^0} = 8{,}4 \cdot 10^{-17}\,s$



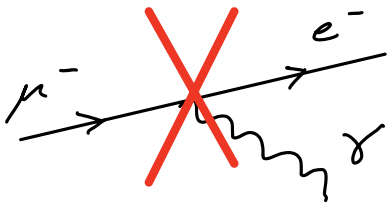
Esim: Kiellettyjä prosesseja QED:ssä $\Leftrightarrow$ verteksejä ei ole



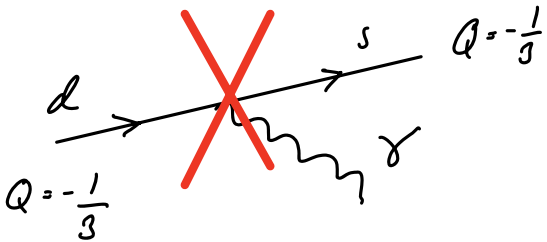
$Q_{in} \neq Q_{out}$ varaus ei säily



$Q_\nu = 0 \Rightarrow$ ei kytkentää

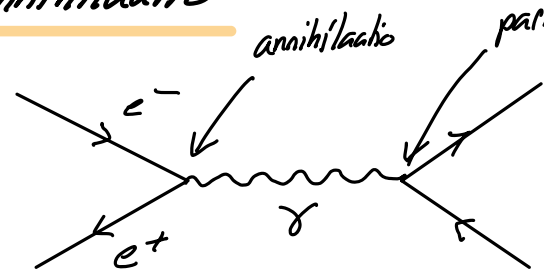


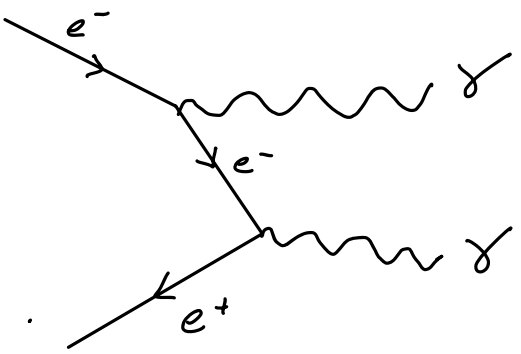
$Q_{in} = Q_{out}$, mutta flavour$(e^-) \neq$ flavour(μ^-)



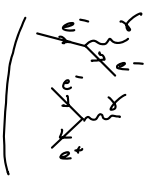
$Q_{in} = Q_{out}$, mutta flavour$(d) \neq$ flavour(s)

Annihilaatio





$e^+ + e^- \to 2\gamma$



kinemaattisesti kielletty: syntyvä γ virtuaalinen kun $\bar{p}_\gamma \neq 0$
$\Rightarrow$ ei voi esiintyä osat -tilassa

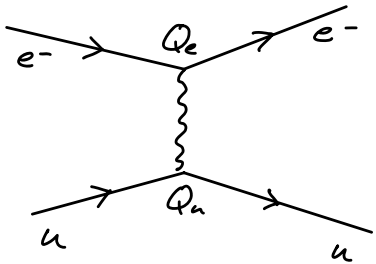
Aine ja antiaine tuhoavat toisensa!

Miksi $N_{aine} \gg N_{\overline{aine}}$? Havainnot $N_{\bar{B}} \sim 10^{-9} N_B$, asymmetria syntynyt varhaisessa maailmankaikkeudessa ($t \lesssim 10^{-10}$ s)

"Baryogeneesi", mekanismi vielä tuntematon, ei SM!

Prosessin todennäköisyys (syventävää materiaalia)

Esim.



Todennäköisyysamplitudi $\mathcal{M}$

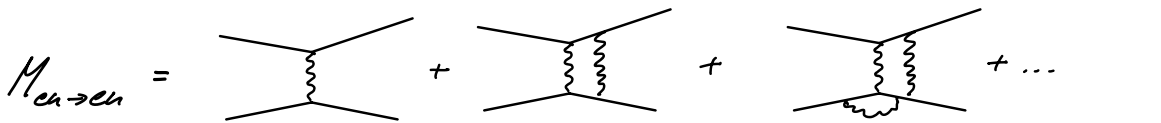
$\mathcal{M}_{e^-u\to e^-u} \propto Q_e Q_u \alpha \cdot e^2$ (↑ QFT-lasku)

$Q_e = -e$, $Q_u = \frac{2}{3}e$

$\Rightarrow \mathcal{M}_{e^-u\to e^-u} \propto \alpha$, $\alpha = \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0} \approx \frac{1}{137}$

Vastaava **todennäköisyys** on $|\text{amplitudi}|^2$ $P = |\mathcal{M}|^2 \propto \alpha^2$

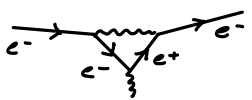
Prosessiin kontribuoivat kaikki mahdolliset graafit in- ja out tilojen välillä:



alin kertaluku — pieniä korjauksia, huomioitava tarkoissa laskuissa

QED tarkin fysiikan teoria:

e^- mag. momentti



$\Delta\left(\frac{g_{\text{theory}}}{2} - \frac{g_{\text{obs.}}}{2}\right) < 10^{-10}$!