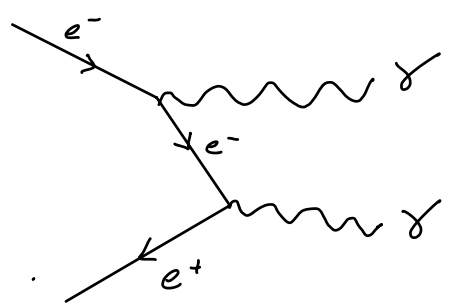
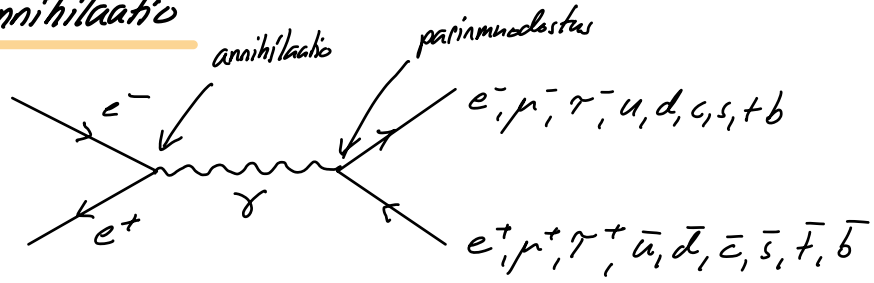


# Annihilaatio



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

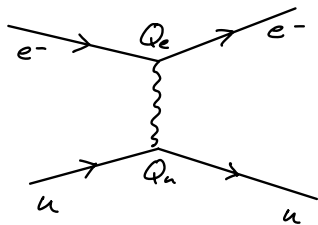
kinemattisesti kielletty: syntyy  $\gamma$  viivanalinen kun  $\vec{p}_\gamma \neq 0$   
 $\Rightarrow$  ei voi esiintyä out-tilassa

**Aine ja antiaine tuhoavat toisensa !**

Miksi  $N_{aine} \gg N_{\bar{aine}}$  ? Havainnot  $N_B \sim 10^{-9} N_{\bar{B}}$ , asymmetria syntynyt vanhaissa magneettikentkeudessa ( $t \lesssim 10^{-10} s$ )  
 "Baryogenesis", mekanismi vielä tuntematon, ei SM!

# Prosessin todennäköisyys

Esim.



Todennäköisyysamplitudi:  $M$

$$M_{e \rightarrow e e \rightarrow e} \propto Q_e Q_u \propto e^2$$

↑  
QFT-lasku

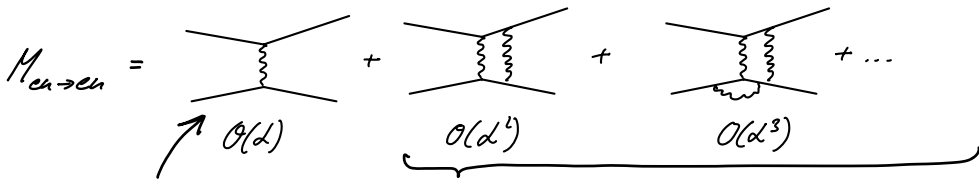
$$Q_e = -e$$

$$Q_u = \frac{2}{3}e$$

$$\Rightarrow M_{e \rightarrow e e \rightarrow e} \propto d, \quad d = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \approx \frac{1}{137}$$

Vastava todennäköisyys on amplitudi<sup>2</sup>  $P = |M|^2 \propto d^2$

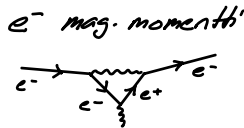
Prosessiin kontribuovat kaikki mahdolliset graafit in- ja out tilojen välillä:



alin kertaluku

pieniä korjauksia, huomioitava tarkaisissa laskuissa

QED tarkin fysiikan teoria:



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



# Heikot vuorovaikutukset

- 3 välittäjäbosonia  $W^\pm, Z^0$

$$Q(W^+) = e \quad \begin{array}{c} \text{w}^+ \\ \text{~~~~~} \\ \text{w}^- \\ \text{~~~~~} \\ \text{z}^0 \\ \text{~~~~~} \end{array}$$

$$Q(W^-) = -e$$

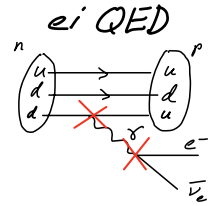
$$Q(Z^0) = 0$$

- Verteksit leptoneille

$$L = e, \mu, \tau$$

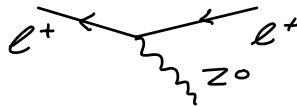
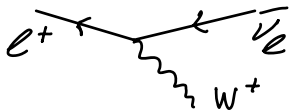
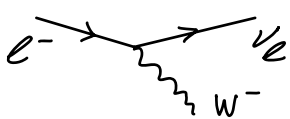
$$V_L = \nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$$

Esim:  $n \rightarrow p e^- \bar{\nu}_e$   
 $\tau \approx 880 \text{ s}$   
 heikon vu.n prosessi



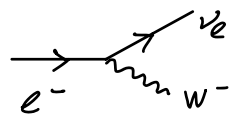
$$L(e) = 1, L(\bar{e}) = -1$$

Varaus, leptoniluku ja maku\* säilyvät

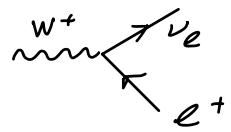
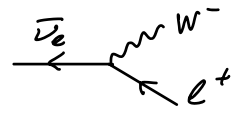
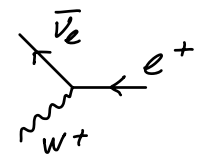
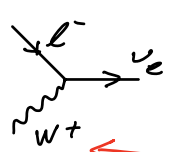
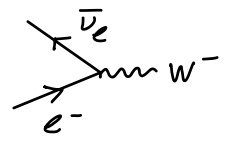


\* Rajalla  $m_\nu = 0$ , mutta havainnot:  $m_\nu = \mathcal{O}(0.1 \text{ eV}) \Rightarrow \nu_e$  makua muuttavia suppressoitavia prosesseja.

Näistä perusvertteuksista saadaan taas kaikki muut jalat kääntämällä:

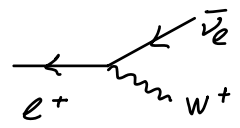


→

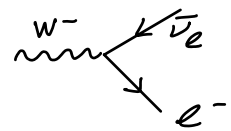
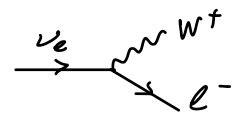
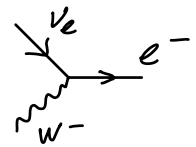
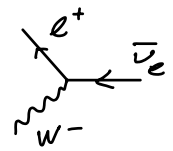
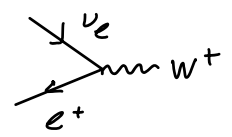


W+ on W-:n antihinkkanen

Ja samat antihinkkasille



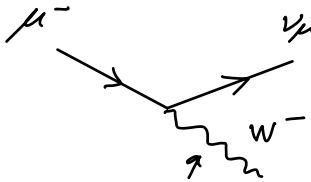
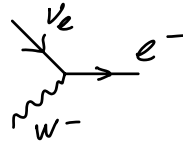
→



Esim

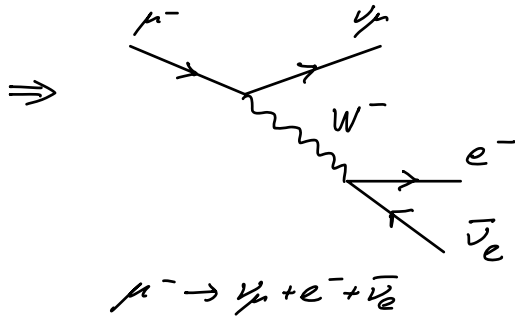
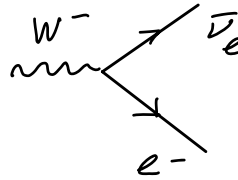
Myonin hajoaminen  $\tau_\mu = 2,2 \cdot 10^{-6} s$

Tarvitaan verteksi:



virtuaalinen, ei voi olla lopputila

+



muut leptonit kinemaattisesti kiellettyjä

$$m_\mu \geq \underbrace{m_{\nu_\mu} + m_{\bar{\nu}_e}}_{\approx 0} + m_e$$

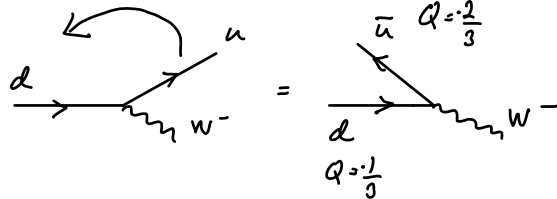
$\Rightarrow m_e < m_\mu$   
joten pakko olla  
 $l=e$

• Verteksit kvarkeille (heitko vr.)

Jokaiselle parille:  $\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix} \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}$



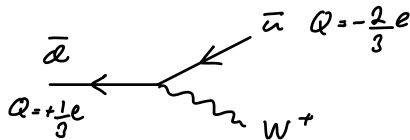
varaus säilyy, maku säilyy



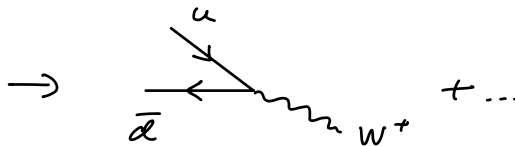
varaus säilyy, maku säilyy

+ muut jalkoja edelleen käänkelemättä

Samat antihidreille:



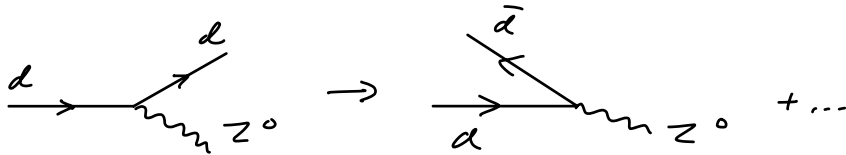
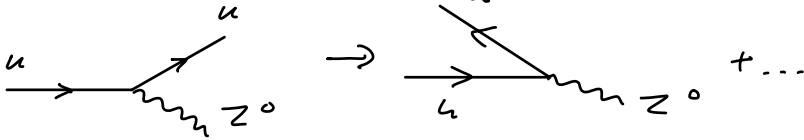
varaus säilyy, maku säilyy



varaus säilyy, maku säilyy

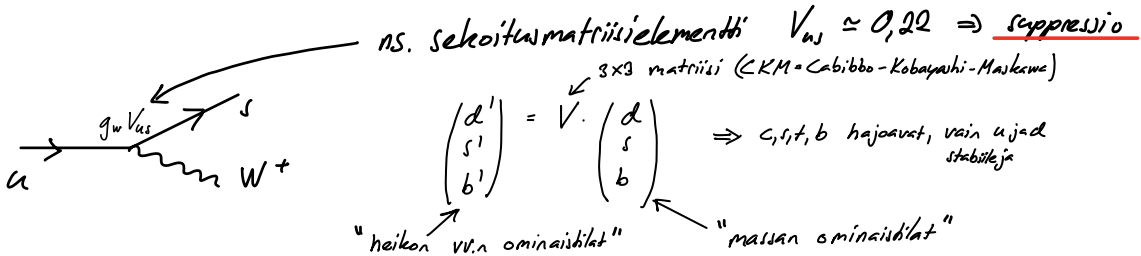
• Jatkuu:

Jokaiselle parille:  $\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix} \begin{pmatrix} + \\ b \end{pmatrix}$



• Lisäksi esiintyy makuu vaihtavia verttejä, joissa kvarkki muuttuu toisen makuiseksi

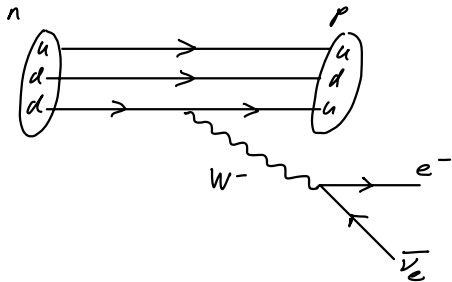
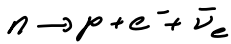
Esim.



Esim  $d' = V_1 d + V_2 s + V_3 b$  heikossa vuorovaikutuksessa esiintyvä  $d'$  ei olekaan vain d-kvarkki, vaan sekoitus d, s, b -kvarkkeja.

Esim.

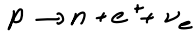
$\beta^-$ -hajoaminen



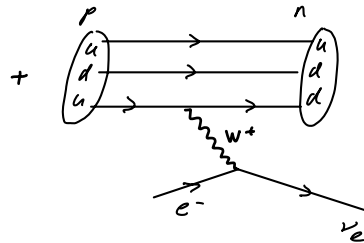
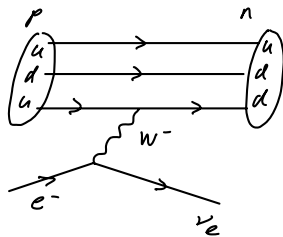
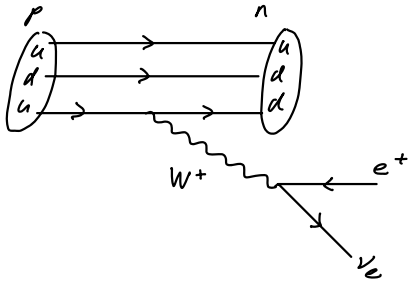
$Q_u = 2/3e$

$Q_d = -1/3e$

$\beta^+$ -hajoaminen



elektronisieppaus  $p + e^- \rightarrow n + \nu_e$



Esim.  $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$

$$P = \left[ \text{Diagram 1} + \text{Diagram 2} \right]^2$$

Diagram 1:  $e^+$  and  $e^-$  lines meet at a vertex with a photon ( $\gamma$ ) line, which then splits into  $\mu^+$  and  $\mu^-$  lines. This term is labeled  $= \mathcal{O}(d)$ .

Diagram 2:  $e^+$  and  $e^-$  lines meet at a vertex with a  $Z^0$  line, which then splits into  $\mu^+$  and  $\mu^-$  lines. This term is labeled  $= \mathcal{O}(g_z^2)$ .

Sekä EM että heikko w. kontribuoiivat

$Z^0$  liittynä kytkentävakio

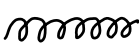
↓  
QFT-lasku (opitaan hiukkeäfyysikan kursilla ja QFT-kurssilla)

$$= \left| \# \frac{d}{E^2} + \# \frac{g_z^2}{M_Z^2} \right|^2 \quad \text{kun } E \ll M_Z$$

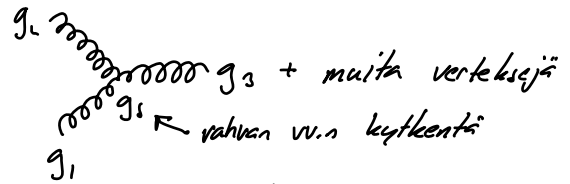
↑ numeroita (pointing to the first term)

↑ suppressio (pointing to the second term, where  $M_Z^2$  is circled)

# Vahva vuorovaikutus (QCD)

- Välittäjänä gluonit  $g$   8 kpl

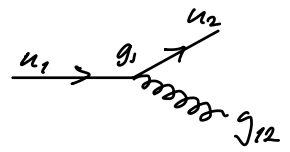
Gluoneilla QCD-varaus = "värivaraus"



$g$  vuorovaikuttavat keskenään  $\Rightarrow$  **non-abelisista**

- Kvarkeilla myös väri ( $q_a, a=1,2,3$ )  $\Rightarrow$  gluonit kytkävät kvarkkeihin

esim.



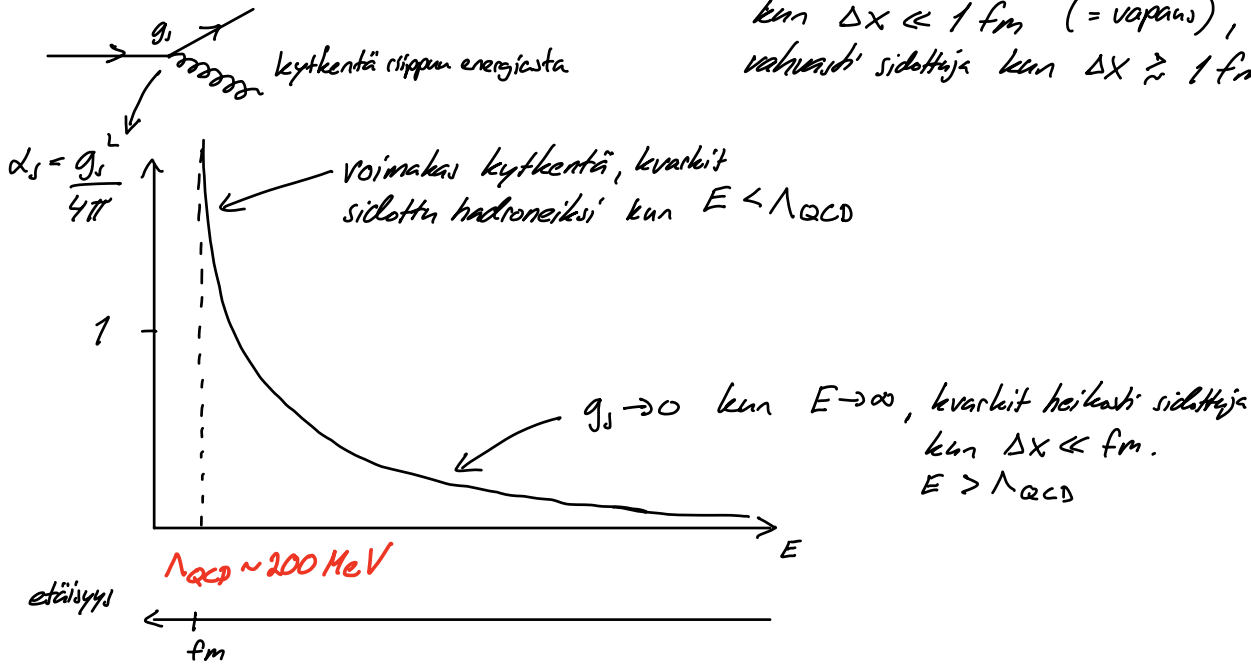
värivaraus säilyy

- Muut alkeishidut värittömiä  $\Rightarrow$  vain kvarkit tunkevat vahvan vu:n



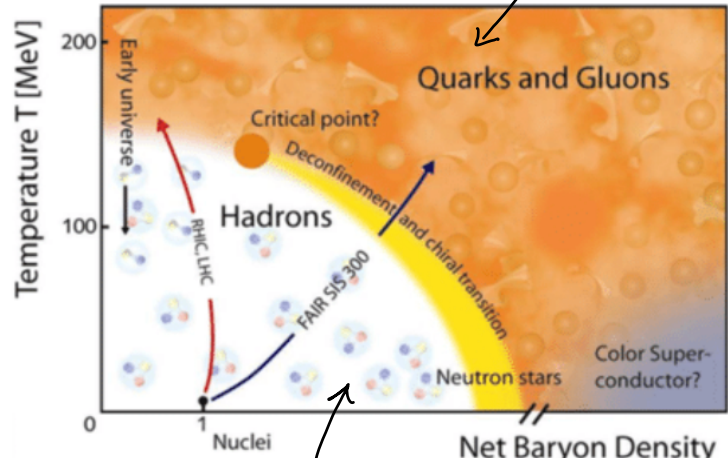
- Gluonit massattomia  $m_g = 0$ , mutta vuorovaikuttavat itsensä kanssa  
 $\Rightarrow$  lyhyt kantama  $\sim 1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$

- Vahvalla vuorovaikutuksella asymptottinen vapaus: kvarkit heikosti sidottuja kun  $\Delta x \ll 1 \text{ fm}$  (= vapaus), vahvasti sidottuja kun  $\Delta x \gtrsim 1 \text{ fm}$



# QCD - faasidiagramma

Faasi 1: kvarkki-gluoni-plasma  
(asymptottinen vapaus)

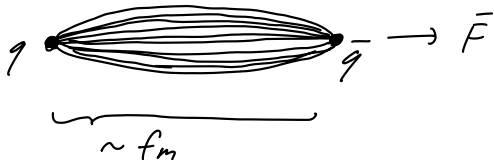


Net Baryon Density ~ paine

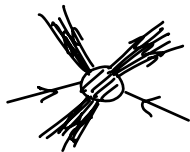
(fermioneille  $p \neq 0$   
vakiin  $T \rightarrow 0$ )

Faasi 2: kvarkit sidotut hadroneihin (confinement)

# Vapaita kvarkkeja ei havaita



Hadronisaatio: hadronien törmäyksissä syntyy hadroniyöppöjä

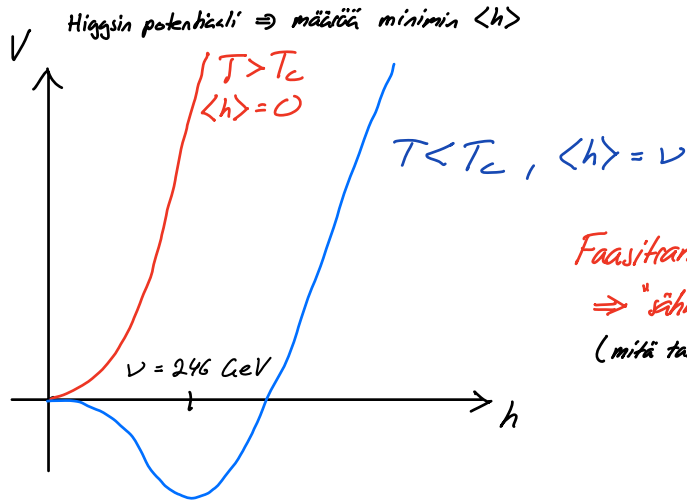


# Higgsin kenttä

(Discovery 2012 at LHC, CERN)

130

- Liittyy symmetriarikkoon, Higgs  $\Phi$  (4 komp.), pituus  $h \equiv \frac{\sqrt{\Phi^\dagger \Phi}}{\sqrt{2}}$
  - EM + heikko vr. = sähköheikko vr.  
 $U(1) \quad SU(2) \quad SU(2) \times U(1)$   
 $\uparrow$   
vuorovaikutukseen liittyvä symmetriaryhmä
- $\langle h \rangle = 0$  "symmetria voimassa" ( $M_Z = M_W = 0$ )  
 $\langle h \rangle \neq 0$  "symmetria rikki" ( $M_Z \neq 0$ ,  $M_W \neq 0$ )



Faasitransitio kun  $T = T_c \sim 100 \text{ GeV}$   
 $\Rightarrow$  "sähköheikko symmetria rikkoutuu"  
(mitä tarkoittaa täsmällisesti  $\Rightarrow$  QFT -kurssit)

# Massat

QFT-laskuista:  $m_W = \frac{g}{2} \langle h \rangle$  ← Higgsin kentän odotusarvo

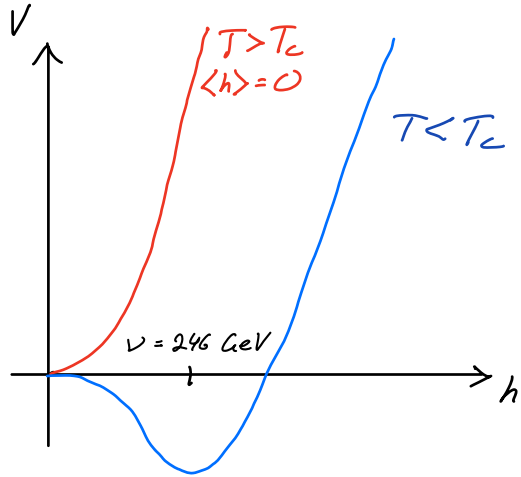
$$m_Z = \frac{\sqrt{g^2 + g'^2}}{2} \langle h \rangle$$

heikon v:n kytkentöjä

vuorovaikutuksia

Kvarkeille ja leptonille:  $m_q = y_q \langle h \rangle$ ,  $m_l = y_l \langle h \rangle$

"Yukawa kytkemisiä"

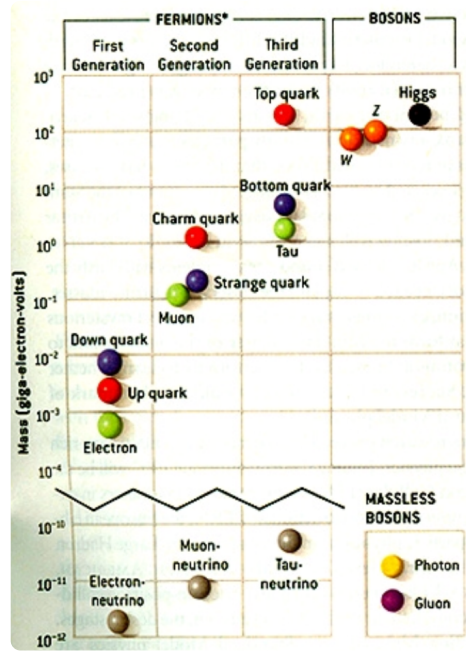


SM hidat massattomia kun  $T > T_c$ ,  
massat syntyvät kun  $h \rightarrow v$  at  $T = T_c$ .

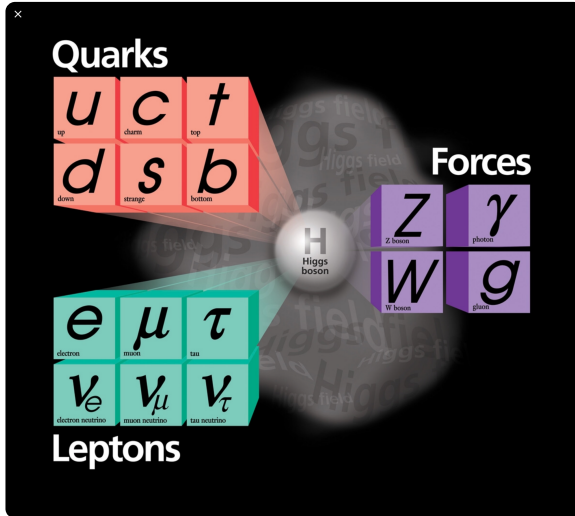
Massat = kytkentä Higgsiin

### Standard Model of Elementary Particles

	three generations of matter (fermions)			interactions / force carriers (bosons)	
	I	II	III		
mass	$\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 125.09 \text{ GeV}/c^2$
charge	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0	0
spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	0
	<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top	<b>g</b> gluon	<b>H</b> higgs
	<b>d</b> down	<b>s</b> strange	<b>b</b> bottom	<b><math>\gamma</math></b> photon	
	<b>e</b> electron	<b><math>\mu</math></b> muon	<b><math>\tau</math></b> tau	<b>Z</b> Z boson	
	<b><math>\nu_e</math></b> electron neutrino	<b><math>\nu_\mu</math></b> muon neutrino	<b><math>\nu_\tau</math></b> tau neutrino	<b>W</b> W boson	



$m \sim eV \dots 170 \text{ GeV} = \text{kytkentät Higgsiin eri seurauksia}$



Sähkömagn.

Kvarkit:  $\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix} \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}$

$$Q = 2/3 e$$

$$Q = -1/3 e$$

vahva, heikko + sähkömag. vv.

Leptonit:  $\begin{pmatrix} e \\ \nu_e \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mu \\ \nu_\mu \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tau \\ \nu_\tau \end{pmatrix}$

$$Q = -e$$

$$Q = 0$$

heikko + sähkömag. vv.

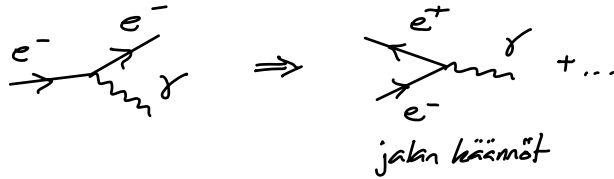
Voimien välittäjät:

- sähkömagnetismi: fotoni  $\gamma$ , kantama  $\infty$
- heikko vv.:  $W^\pm, Z^0$  bosonit, kantama  $\sim 10^{-3} \text{fm}$
- vahva vv.: gluoni  $g$ , kantama  $\sim \text{fm}$

# Feynmanin diagrammat

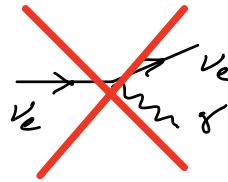
- Esittävät alkeishiukkasten välisiä prosesseja

Sähkömagnetismi:



Verteiksissä säilyy:

- sähkövaraus
- leptoniluku
- maku
- $E$  ja  $\vec{p}$



ei kytkentää  
 $Q_V = 0$  hitwihin

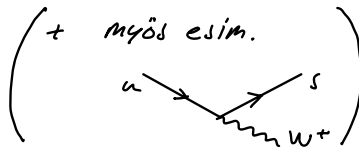
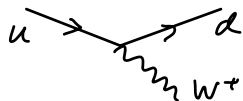
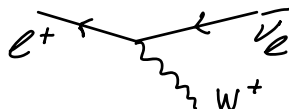
Reaalinen hiukkanen:  $E^2 = m^2 c^4 + |\vec{p}|^2 c^2$

Virtuaalinen hiukkanen:  $E^2 \neq m^2 c^4 + |\vec{p}|^2 c^2$  ei koskaan alka- tai lopputilassa



# Heikko vuorovaikutus

• Verteksit:



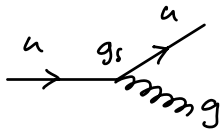
Säilyy:

- sähkövaraus
- leptoniluku
- leptoneille maku (kun  $m_\nu = 0$ )

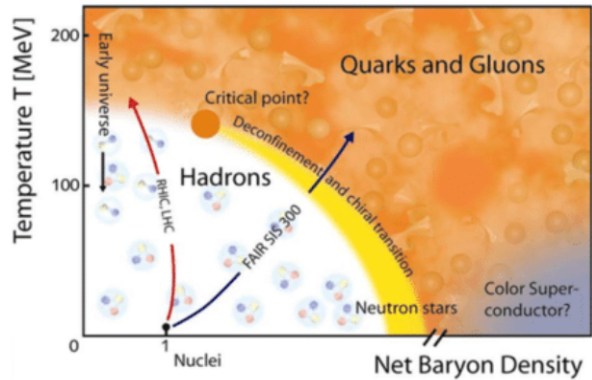
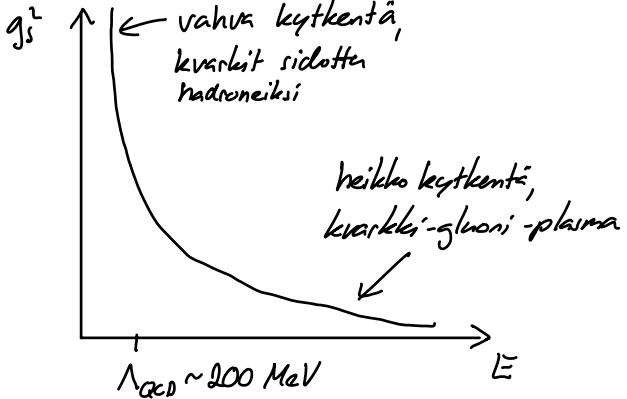
• Hajoamiset :  $n \rightarrow p + e + \nu_e$  ,  $\mu \rightarrow \nu_\mu + e + \nu_e$  etc.

# Vahva vuorovaikutus

- Kytkee vain kvarkkeihin (värivaraus)



- Asymptoottinen vapaus, kvarkit heikosti sidottuja kun  $\Delta x \ll f_m$

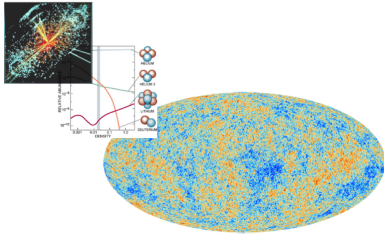


- Vapaita kvarkkeja ei havaita, kvarkit sidottu hadroneiksi

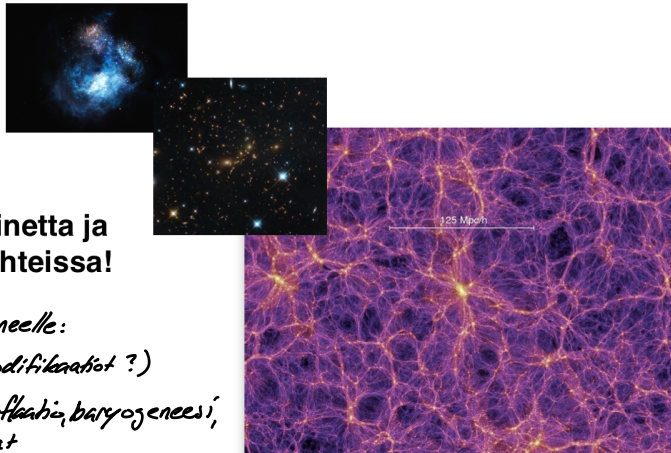
# Kosmologia tutkii maailmankaikkeuden syntyä, rakennetta ja kehitystä

Energia

Etäisyys



Hiukkaskiihdyttimessä (CERN/LHC)  $E \sim 10\ 000\ \text{GeV}$   
 Inflaatiovaiheen aikana  $E \sim 10\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000\ \text{GeV}$



**Kosmologiassa tutkitaan ainetta ja vuorovaikutuksia ääriolosuhteissa!**

Tarvitaan teoria gravitaatiolle ja aineelle:

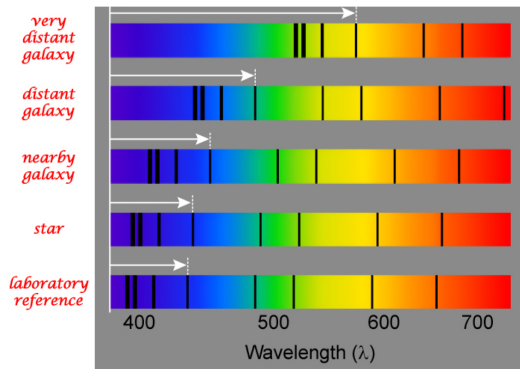
- yleinen suhteellisuusteoria (+ modifikaatiot ?)
  - hiukkastieteen SM + DM, DE, inflaatio, baryogeneesi,  $\nu$ -massat
- = uutta fysiikkaa*

Aika

# Keskeiset havainnot I: maailmankaikkeus laajenee

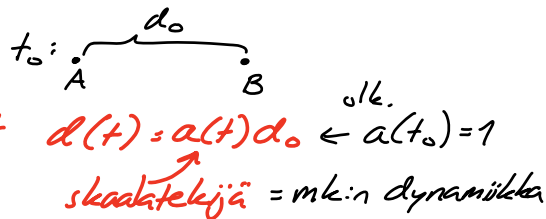
(maailmankaikkeus  $\equiv$  mk) (139)

- Kaukaisten kohteiden valo havaitaan punasiirtyneenä  $\lambda_0 > \lambda_{em}$ , mitä kaukaisempi kohde sitä suurempi efekti  
 $\Rightarrow$  kaukaiset kohteet vaikuttavat etääntyvän meistä  
 (ensimmäinen havainto E. Hubble 1929)
- Sama havainto kaikissa suunnissa  
 $\Rightarrow$  avaruuden ominaisuus, ei yksittäisten kohteiden satunnainen liike



Maailmankaikkeus laajenee  $\Leftrightarrow$  etäisyydet venyvät

$\Rightarrow$  myös valon aallonpituus venyy



$$\frac{\lambda_0}{\lambda_{em}} = \frac{a(t_0)}{a(t_{em})} \equiv 1+z$$

Kosminen punasiirtymä

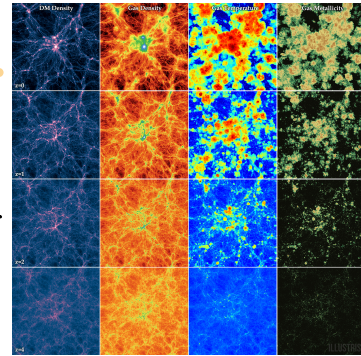
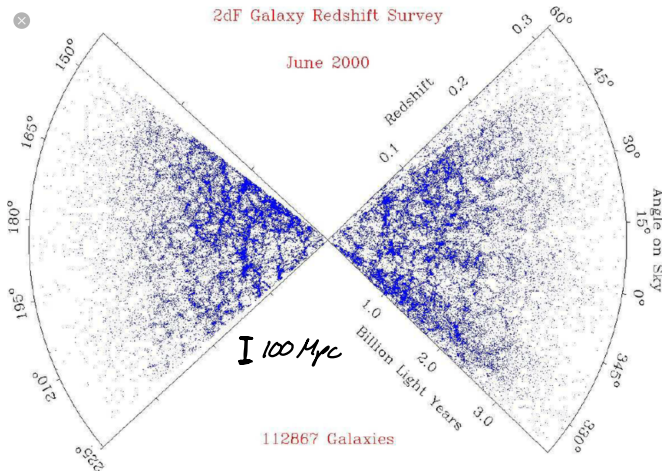
$$a(t_0) > a(t_{em}) \Rightarrow \lambda_0 > \lambda_{em}$$

$t_{em}$  = signaalin lähetyshetki

$t_0$  = signaalin vastaanottohetki = nykyhetki

## Keskeiset havainnot II: rakenteet kasvavat ajassa

Galaksit, galaksiklusterit ym. rakenne kehittynyt pienistä alkurakenteista



Lähde:  
Illustris

$$1 \text{ pc} = 3.09 \cdot 10^{16} \text{ m} = 3,26 \text{ ly}$$

$$(1 \text{ ly} = c \cdot 1 \text{ y} = \text{valovuosi})$$

Galaksin koko  $\sim 0,1 \text{ Mpc}$

Galaksien välinen  $\sim \text{Mpc}$   
etäisyys

Galaksiklusterien  $\sim 10 \text{ Mpc}$   
välinen etäisyys

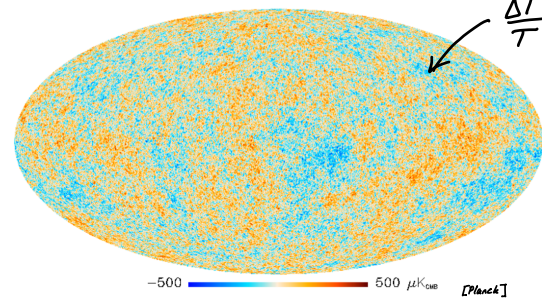
Suurilla etäisyyksillä ( $d \gtrsim 100 \text{ Mpc}$ ) mk nykyhetkelläkin homogeeninen ja isotrooppinen, eli rakenteen jakauma ei riipu paikasta, tai suunnasta

# Keskeiset havainnot III: CMB ja BBN

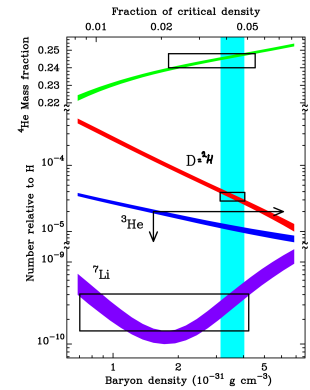
Hk. laajenee  $\rightarrow$  aine harvenee ja jäähtyy kun mk.:n ikä + kasvaa  
 $\Rightarrow$  kääntäen: *varhainen mk. tiheä ja kuuma*

Cosmic Microwave Background (CMB)  
= kosminen mikroaaltotausta

Big Bang Nucleosynthesis (BBN)  
= nukleosynteesi



$\frac{\Delta T}{T} \sim 10^{-5}$   
pieniä alkutiheyden vaihteluita,  
kaikki rakenne kasvanut näistä

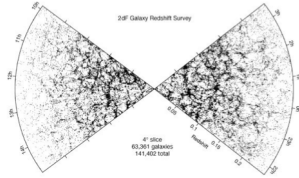


$e^+ + p \rightarrow H + \gamma$  kun  $T \sim 3000$  K  
 $\Rightarrow$  fotonit pääsevät etenemään vapaasti  
Havaitaan  $T_0 = 2,725$  K taustasäteilynä  
(ensimmäinen havainto vahingossa 1964  $\rightarrow$  Nobel 1978)

$p + n \rightarrow H, He, Li$  kun  $T \sim 0.1$  MeV  
Kevyet ytimet syntyvät, BBN-osuudet  
havaittavissa esim. kääpiögalakseissa (ei tähtien  
fuusioita)

# Kosmologian standardimalli ( $\Lambda$ CDM)

## 1. Suuressa mittakaavassa mk homogeeninen ja isotrooppinen



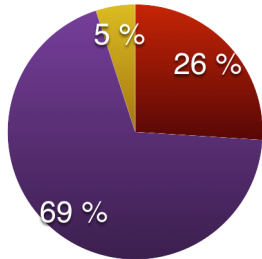
aika-avaruuden etäisyydet:  $\Delta s^2 = \Delta t^2 - a(t)^2(\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2)$

skaalatekijän liikeyhtälöt yleisestä suhteellisuusteoriasta

(erityisessä suhteellisuusteoriassa: ei gravitaatiota  $\rightarrow a(t) = 1$ )

## 2. Aine: säteilyä (relativistisia hiukkasia, esim. valo), materiaa (epärelativistisia hiukkasia, esim. galaksit), tyhjiöenergiaa

nykyhetkellä  $t = 13.8 \times 10^9$ y



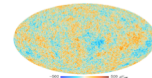
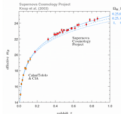
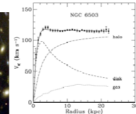
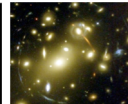
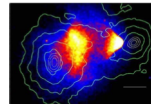
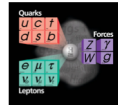
**Näkyvä aine:** tunnetuista alkeishiukkasista koostuva aine (tähdet, galaksit, kaasupilvet), kaikki paitsi fotonit epärelativistisia

**Pimeä aine:** näkymätöntä epärelativistista ainetta, uusia alkeishiukkasia?

*CDM = Cold Dark Matter*

**Pimeä energia:** näkymätön tyhjiöenergian kaltainen komponentti

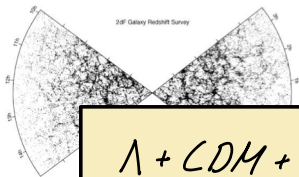
$\Lambda$



## 3. Alkuehdot: alkuhäiriöt, aine-antiaine asymmetria

# Kosmologian standardimalli (ΛCDM)

1. Suuressa mittakaavassa m<sub>k</sub> homogeeninen ja isotrooppinen

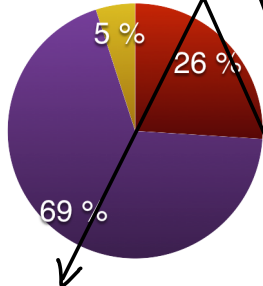


$$\text{aika-avaruuden etäisyydet: } \Delta s^2 = \Delta t^2 - a(t)^2(\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2)$$

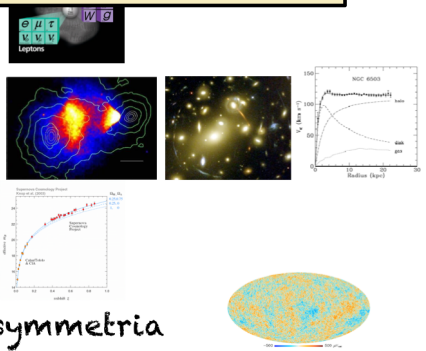
skaalatekijän liikeyhtälöt yleisestä suhteellisuusteoriasta

Λ + CDM + alkuehdot = uutta fysiikkaa, jota SM + yk. suhteellisuusteoria ei selitä ⇒ mikroskooppinen teoria avoin tutkimuskysymys

2. Ai...  
(e...  
nyk...



- Näkymä aine: tutuista alkeishiukkasista koostuva aine (tähdet, galaksit, kaasupilvet), kaikki paitsi fotonit epärelativistisia
- Pimeä aine: näkymätöntä epärelativistista ainetta, uusia alkeishiukkasia? CDM = Cold Dark Matter
- Pimeä energia: näkymätön tyhjiöenergian kaltainen komponentti Λ



3. Alkuehdot: alkuhäiriöt, aine-antiaine asymmetria



# Maailmankaikkeuden dynamiikkaa

142

Yleinen suhteellisuusteoria = teoria painovoimalle

↳ gravitaatio = aika-avaruuden kaareutuminen

Einsteinin yhtälöt

$$G_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu}$$

↑  
aika-avaruuden  
ominaisuudet

↑  
aineen ominaisuudet  
Newtonin gravitaatio

Kosmologiassa: aika-avaruus:  $\Delta s^2 = \Delta t^2 - a^2(t)(\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2)$

aineen ominaisuudet: paine  $p$ , energiatihveys  $\rho$

Einsteinin yhtälöt tässä tapauksessa (= liikeyhtälöt  $a(t)$ :lle):

$$\left(\frac{\dot{a}(t)}{a(t)}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3} \rho(t) \quad \text{"Friedmanin yhtälö"}$$

$$\dot{\rho}(t) + 3\frac{\dot{a}(t)}{a(t)}(\rho(t) + p(t)) = 0 \quad \text{"jatkuvuusyhtälö"}$$

missä:  $\dot{a} \equiv \frac{da}{dt}$ ,  $\dot{\rho} \equiv \frac{d\rho}{dt}$  ja  $c = 1$  (luonnolliset yksiköt)

## Aine $\Lambda$ CDM-mallissa

148

- Aineen ominaisuudet määrittelee **tilanyhtälö**:  $p = w \rho$ 
  - $w = 1/3$ , säteily eli relativistinen aine  $\rho = \frac{1}{3} \rho$ ,  $E \approx m$
  - $w = 0$ , materia eli epärelativistinen aine  $\rho = 0$ ,  $E \approx m$
  - $w = -1$ , tyhjiöenergia  $\rho = -\rho$

Erityisesti:

Pimeä aine DM:  $w_{DM} = 0$ ,  $p_{DM} = 0$

Pimeä energia DE:  $w_{DE} = -1$ ,  $p_{DE} = -\rho_{DE}$

Näkyvä aine:  $w = 0$  tai  $1/3$  riippuen hiukkalajista ja lämpötilasta

- Edellisen sivun jatkuvuusyhtälöstä:

$$\dot{\rho} + 3\frac{\dot{a}}{a}(\rho + p) = \dot{\rho} + 3\frac{\dot{a}}{a}\rho(1+w) = 0 \Rightarrow$$

vakioita

$$\rho_{rad} = \rho_{rad0} \left(\frac{a_0}{a}\right)^4, \quad w = \frac{1}{3}$$

$$\rho_{mat} = \rho_{mat0} \left(\frac{a_0}{a}\right)^3, \quad w = 0$$

$$\rho_{vac} = \rho_{vac0} = \text{vakio}, \quad w = -1$$

- Kun  $w$  tiedetään,  $a(t)$  voidaan ratkaista Friedmannin yhtälöstä

Esim.

Säteilyn dominoima maailmankaikkeus  $w = \frac{1}{3} \Rightarrow \rho(t) = \rho_0 \left(\frac{a_0}{a(t)}\right)^4$

Sij. Friedmannin yhtälöön  $\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3} \rho$

$$\Rightarrow \frac{1}{a} \frac{da}{dt} = \underbrace{\sqrt{\frac{8\pi G \rho_0}{3}}}_{\equiv H_0} \left(\frac{a_0}{a}\right)^2 \quad \frac{\dot{a}}{a} \equiv H(t)$$

$$H_0 = H(t_0)$$

$$\int_{a_0}^a da = H_0 a_0^2 \int_{t_0}^t dt$$

$$\frac{1}{2} a^2 - \frac{1}{2} a_0^2 = H_0 a_0^2 (t - t_0)$$

$$a = a_0 (1 + 2H_0(t - t_0))^{1/2} \quad \text{valitaan } t_0 \text{ s.e. } t_0 = \frac{1}{2H_0}$$

$$a = a_0 \left(\frac{t}{t_0}\right)^{1/2}$$

$a(t) \rightarrow 0$  kun  $t \rightarrow 0 \Rightarrow$  tiheä alkuvaihe

Yhtälöt: 
$$\left(\frac{\dot{a}(t)}{a(t)}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3} \rho(t)$$

$$\dot{\rho}(t) + 3\frac{\dot{a}(t)}{a(t)}(\rho(t) + p(t)) = 0$$

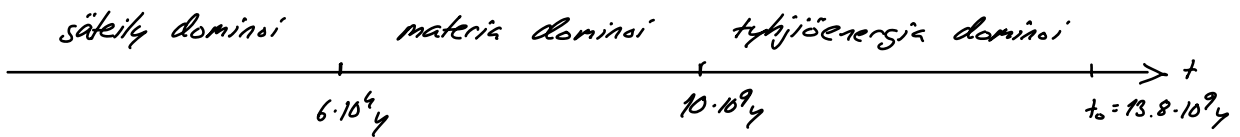
Ratkaisut erikoistapauksille: (HT)

säteily  $p = \frac{1}{3}\rho \Rightarrow \rho \propto a^{-4}, a \propto t^{1/2}$

materia  $p = 0 \Rightarrow \rho \propto a^{-3}, a \propto t^{2/3}$

tyhjiöenergia  $p = -\rho \Rightarrow \rho \propto \text{vakio}, a \propto e^{Ht} \quad H = \text{vakio}$

Todellinen mk. näiden kaikkien sekoitus:

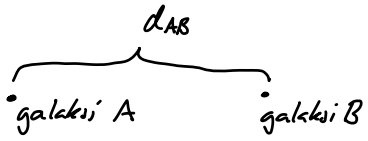


Pituudet, lämpötila, punasiirtymä

$$\Delta S^2 = \Delta t^2 - a^2(t) \Delta X^2$$

Etäisyydet :

$$d_{AB}(t) \equiv \sqrt{-\Delta S_{AB}^2} \Big|_{t=\text{vakio}} = a(t) (x_B - x_A)$$



etäisyydet venyvät  
suhteessa skaalatekijään

Laajenemisnopeus:  $H \equiv \frac{\dot{a}}{a}$  = Hubblen funktio

$$\text{Nykyhetkellä } t_0 = 13,8 \cdot 10^9 \text{ y} : H_0 = (67 \pm 0.5) \frac{\text{km}}{\text{s Mpc}} \quad (\text{Planck 18})$$

Myös valo venyy eli punasiirtymä:

$$\frac{\lambda_0}{\lambda_{em}} = \frac{a(t_0)}{a(t_{em})} \equiv 1+z$$

$t_0$  = nykyhetki  
 $t_{em}$  = signaalin  
emittointihetki

Sama pätee lämpötiloille:  $E_\gamma = \frac{hc}{\lambda}$

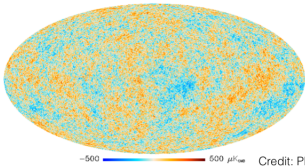
$$\langle E_\gamma \rangle \propto T \Rightarrow T \propto a^{-1}$$

lämpötila pienenee  
kun mk. kasvaa

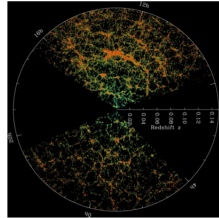
# $\Lambda$ CDM parametrin havaintodatasta

Suuren skaalan rakenne  
= galaksit, klusterit...

Kosminen mikroaaltotausta

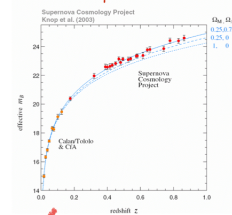


Credit: Planck

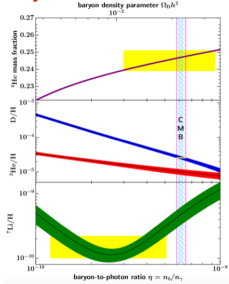


Credit: SDSS

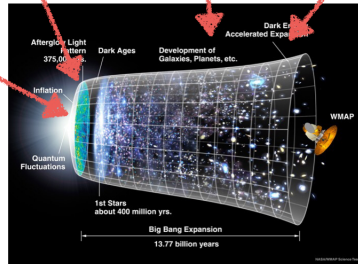
Supernovat



Kevyiden alkuaineiden määrät



Fields et. al. 20



$t_0 =$  nykyhetki

- ▷  $\frac{\Omega_{DM}(t_0)}{\Omega_{tot}(t_0)}$  DM = pimeä aine
- ▷  $\frac{\Omega_{DE}(t_0)}{\Omega_{tot}(t_0)}$  DE = pimeä energia
- ▷  $\frac{\Omega_{VII}(t_0)}{\Omega_{tot}(t_0)}$

$$\frac{\dot{a}(t_0)}{a(t_0)} = \frac{87G \rho_{tot}(t_0)}{3} \equiv H_0 = (67,4 \pm 0,5) \frac{\text{km}}{\text{Mpc}}$$

Hubblen parametri,  
laajenemisnopeus nykyhetkellä

$$\text{Mpc} = 3,26 \cdot 10^6 \text{ ly} \quad 1 \text{ ly} = 9,47 \cdot 10^{15} \text{ m}$$

# Maailmankaikkeuden kehitys LCDM-mallin mukaan

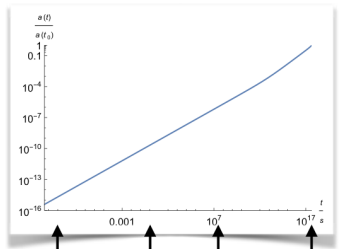
$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3} (\rho_{vis} + \rho_{DM} + \rho_{DE})$$

ratkaistaan  
koko suhteessa  
nykyhetkeen

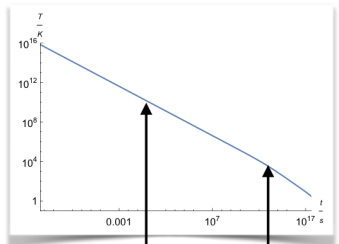
$$T = T_0 \frac{a_0}{a}$$

$T_0 = 2,725 K$   
Lämpötila

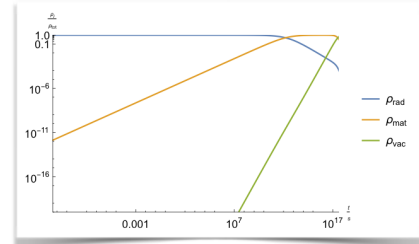
energiakomponentit



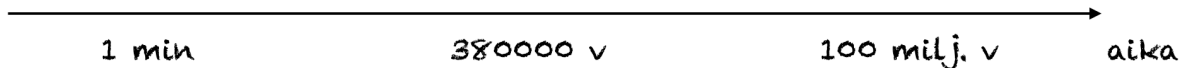
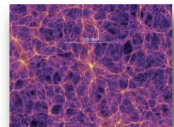
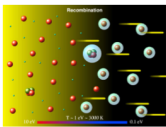
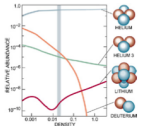
10<sup>-10</sup> sek. 1 sek. 1 vuosi nykyhetki  
13,8\*10<sup>9</sup> vuotta



ytimen sidosenergia atomin sidosenergia



säteily hallitsee materiaa tyhjiöenergiaa  
hallitsee hallitsee



1 min  
nukleosynteesi:  
H, He, Li, Be ytimien synty

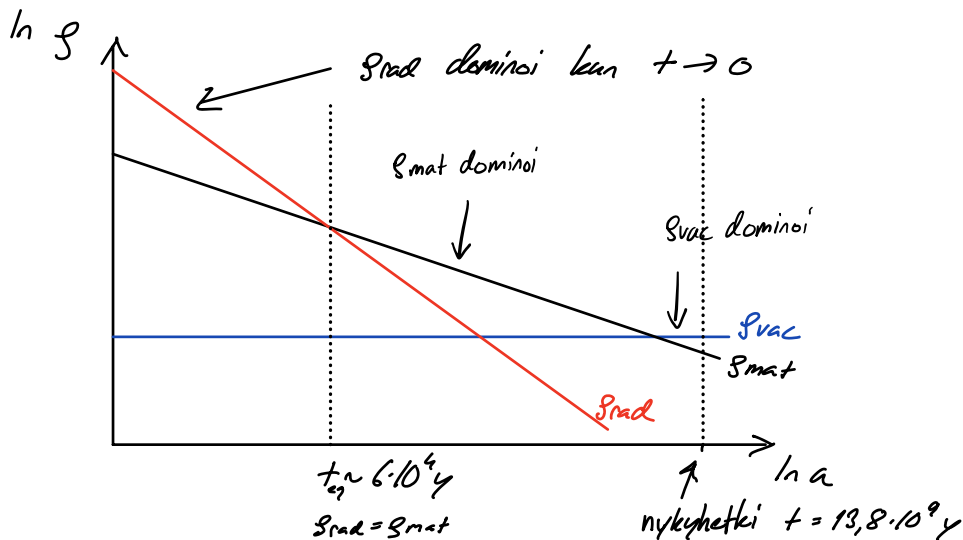
380000 v  
mikroaaltotausta syntyy:  
H<sup>+</sup> + e<sup>-</sup> -> H ja mk muuttuu  
läpinäkyväksi

100 milj. v  
ensimmäiset tähdet syntyvät

aika

# Vanhainen maailmanlaajuus säteilyn dominanssi

$$\begin{aligned} \rho_{rad} &= \rho_{rad0} \left(\frac{a_0}{a}\right)^4 && \text{säteily} \\ \rho_{mat} &= \rho_{mat0} \left(\frac{a_0}{a}\right)^3 && \text{materia} \\ \rho_{vac} &= \rho_{vac0} = \text{vakio} && \text{vakuumienergia} \end{aligned}$$





Säteilyn dominoima vaihe  $t < 6 \cdot 10^{-4}$  s :

149

Kuuma alkuräjähdyksen malli = relativistisia hiukkasia + termien tasapaino

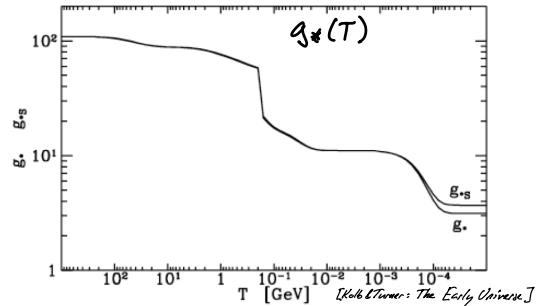
$$g = \sum_i g_i \frac{\pi^2}{30} T^4 + \sum_j \frac{7}{8} g_j \frac{\pi^2}{30} T^4 \equiv \frac{\pi^2}{30} g_*(T) T^4$$

bosonit                      fermionit

↑  
eff. relativististen vapausastiden lkm.

Säteilyn dominoivalle mk:lle:  $a(t) = a_0 \left(\frac{t}{t_0}\right)^{1/2}$

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3} \rho \quad \rho = \frac{\pi^2}{30} g_*(T) T^4$$

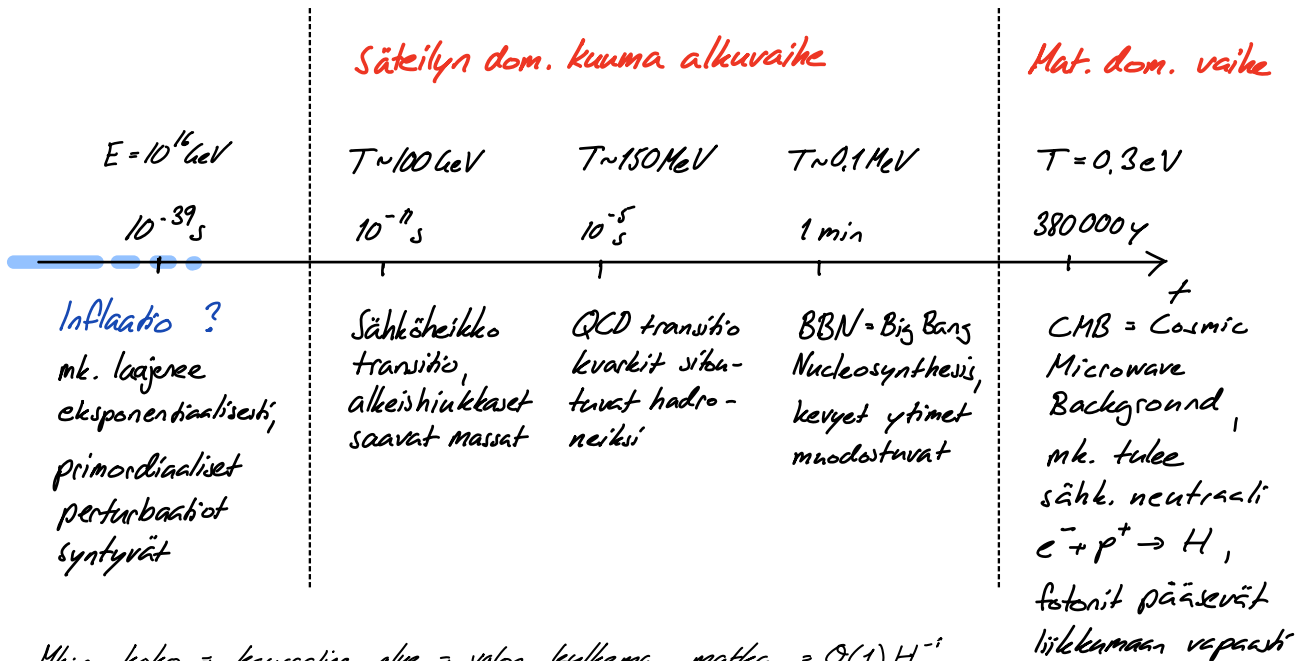


$$\Rightarrow t \approx \frac{2.4}{\sqrt{g_*(T)}} \left(\frac{T}{\text{MeV}}\right)^{-2} \text{ s}$$

mk.:n ikä sekunneissa  
lämpötilan funktiona

Mk. kasvaa ja jäähtyy

# Varhainen maailmankaikkeus



Mk:n koko = kausaalinen alue = valon kulkenut matka =  $\mathcal{O}(1) H^{-1}$   
 $H^{-1} = 2t = \left(\frac{t}{s}\right) 2s = \left(\frac{t}{s}\right) 6 \cdot 10^8 \text{ m} \approx \left(\frac{t}{s}\right) 2 \cdot 10^{-8} \text{ pc}$

(vrt. nykyhetkellä  $H_0^{-1} \approx 2000 \text{ Mpc}$ )

# Nukleosynteesi (BBN = Big Bang Nucleosynthesis)

- Ydintyppiä - osiosta: ytimen sidosenergia/nukleoni  $E_B/A \sim 9 \text{ (MeV)}$   
 $\Rightarrow$  kun  $T \gg \text{MeV}$  p, n vapaina, ei sidottuja ytimiä
- $^4\text{He}$  ytimiä alkaa muodostua kun  $T \sim 0.1 \text{ MeV}$  (ei  $T \sim \text{MeV}$ , koska fuusioketjussa  $^3\text{H}$ :n muodostumiseen liittyvä pullonkaula)

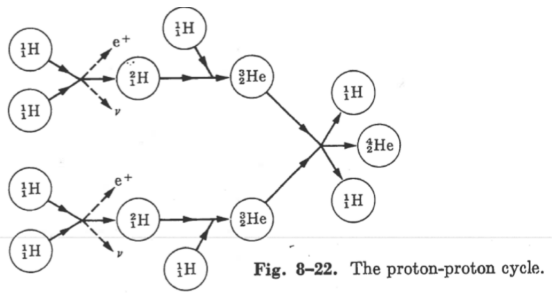
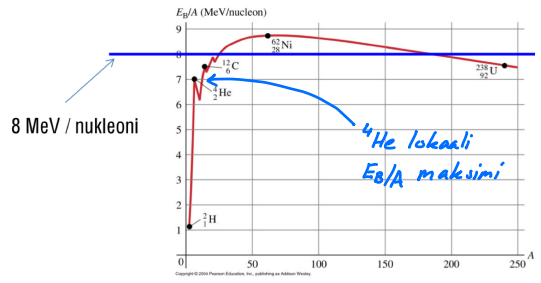
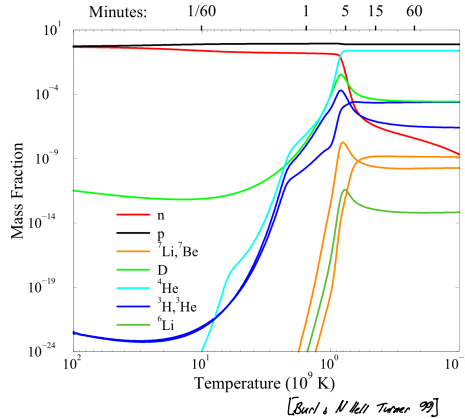
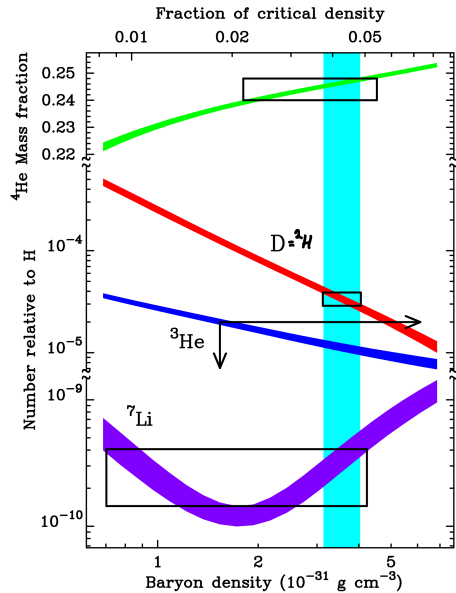


Fig. 8-22. The proton-proton cycle.



- $^4\text{He}$  fuusioitua edelleen  $\rightarrow \text{Li, Be}$  energia ei riitä raskaampiin, koska  $T \propto t^{-1/2}$

# BBN ennustaa kevyiden alkuaineiden määrät



$$n_b = n_b - n_{\bar{b}}$$

↑  
antibaryonien määrä

BBN ennusteet vastaavat mitattuja alkuainepitoisuuksia

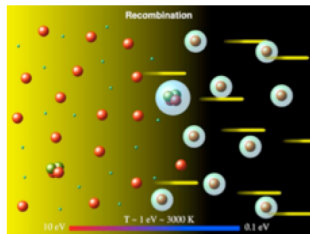
# Kosminen mikroaaltotausta CMB = Cosmic Microwave Background

153

BBN:  $\sim 75\%$  baryonisesta aineesta vetyä, vetyatomin sidosenergia  $B_H = 13.6 \text{ eV}$

Kun  $T \gg \text{eV}$ ,  $p + e^-$  erillään  $\Rightarrow$  varattujen hiukkasten plasmaa,  
fotonit eivät etene vapaasti, mk  
läpinäkymätön

Kun  $T \sim 0.3 \text{ eV}$ ,  $p + e^- \rightarrow H + \gamma$  (ns. rekombinaatio)  
mk. muuttuu sähköisesti neutraaliksi, fotonit pääsevät  
etenemään vapaasti, CMB = fotoneja rekomb. hetkeltä

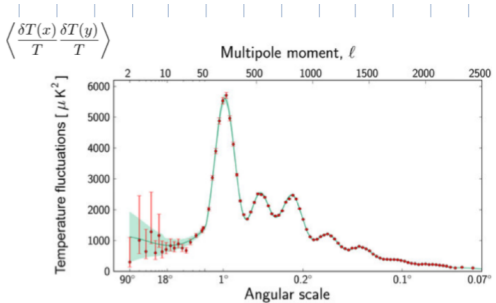
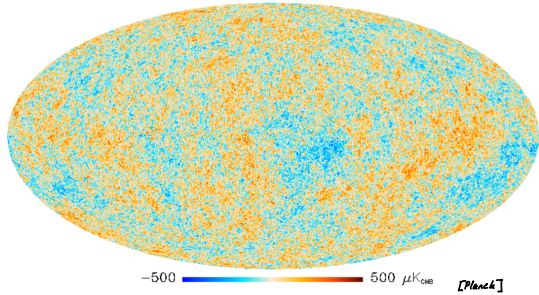


CMB-fotonien lämpötila nykyhetkellä  $t_0$ :

$$T_0 = T_{\text{rek}} \frac{a_{\text{rek}}}{a_0} = \frac{T_{\text{rek}}}{1+z_{\text{rek}}} \approx 2.7 \text{ K}$$

$\uparrow$   
 $T_{\text{rek}} \approx 0.3 \text{ eV} \approx 3000 \text{ K}$

# CMB lämpötilavaihtelut



$\delta T/T$  korreloituneita koko  
havaittavan mk:n yli  $r_0 \Rightarrow c t_{\text{rek}}$

CMB lämpötilassa pientä vaihtelua

$$\frac{\delta T(\theta, \varphi)}{T(\theta, \varphi)} \sim 10^{-5}$$

$\Rightarrow$  aineen jakaumassa  $\frac{\delta \rho}{\rho} \sim 10^{-5}$   
tiheyden/harventumien hetkellä

$t_{\text{rek}} = 380000 \text{ v}$ , alkuhäiriötä

$\frac{\delta T}{T}$  jakaumassa "akustisia piikkejä"

valtavasti tietoa mk:sta:  
ikä, koostumus, geometria...



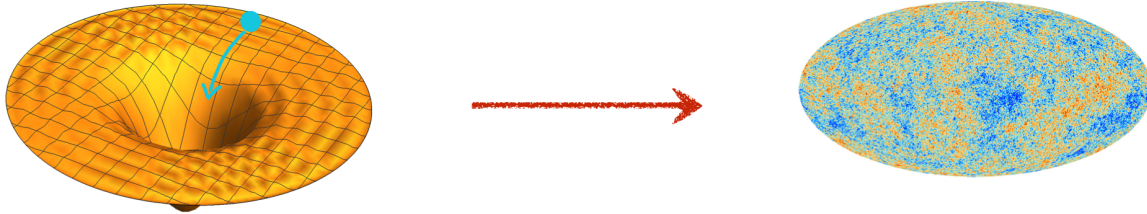
<https://chrisnorth.github.io/planckapps/Simulator/>

tarvitaan inflaatio  $\ddot{a} > 0$  ennen  
säteilyn dominoimaa vaihetta

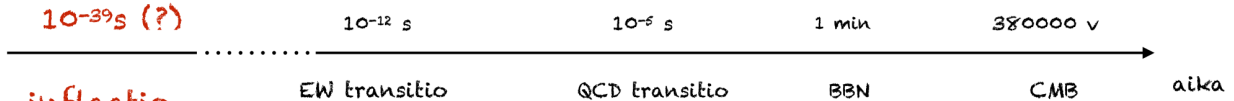
$$c t \rightarrow e^N c t \gg r_0$$

$\uparrow$   $N \geq 60$  "inflaation määrä"

# Alkuhäiriöiden tod. näk. selitys inflaatio



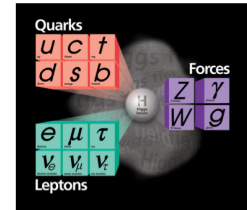
QM tyhjiö + inflaatio  $\rightarrow$  alkuhäiriöt



**inflaatio**  
 $\ddot{a} > 0$  kiihtyvä laajeneminen

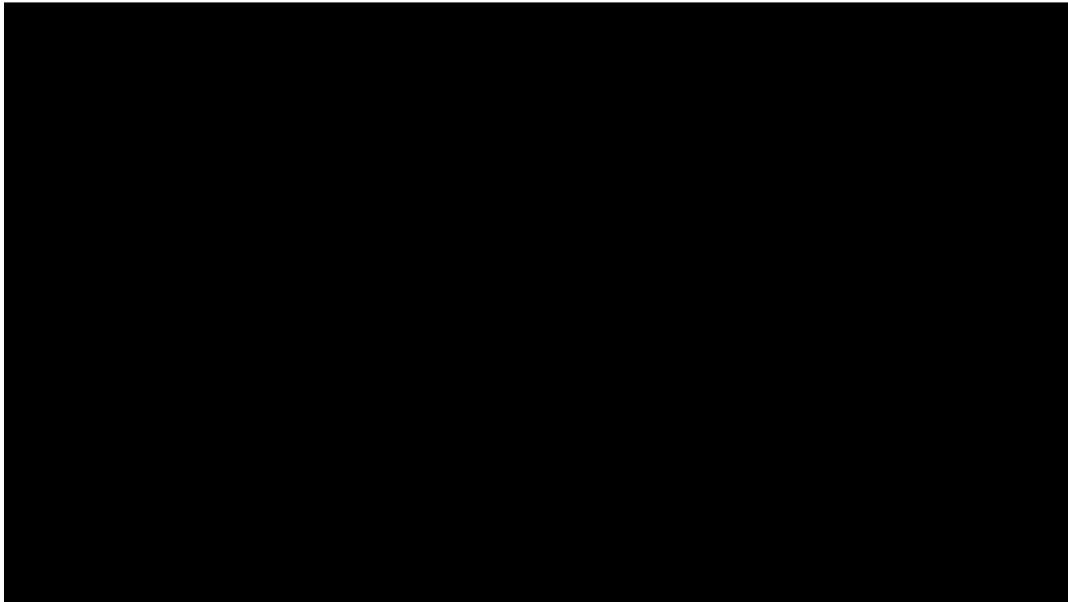
Inflaation mikroskooppinen teoria ei selvillä, mikä aiheutti inflaation ???

Higgsin hiukkanen yksi kandidaatti, voi myös liittyä täysin uusiin alkeishiukkasiin tai gravitaatiosektorin (QM) fysiikkaan



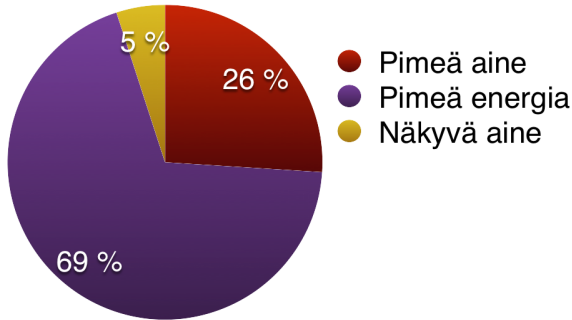
## Rakenteen muodostuminen

- Vuosimiljardien kuluessa gravitaatio kasvattaa alkuhäiriöitä -> syntyy tähtiä (0.1 mrd v), sitten galakseja (0.4 mrd v) ja edelleen galaksijoukkoja





# Maailmankaikkeuden pimeä puoli



$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3} (\rho_{\text{visible}} + \rho_{\text{DM}} + \rho_{\text{DE}})$$

Pimeä aine: näkymätöntä, mutta massiivista ainetta, paine = 0. Esim. uusia massivisia alkeishiukkasia.

$$\rho_{\text{DM}} = 0, w_{\text{DM}} = 0, \rho_{\text{DM}} \propto a^{-3}$$

Pimeä energia: näkymätöntä ainetta, paine = - energiatiheys. Käyttäytyy kuten tyhjiöenergia.

$$\rho_{\text{DE}} = -p_{\text{DE}} = \text{vakio}, w_{\text{DE}} = -1$$

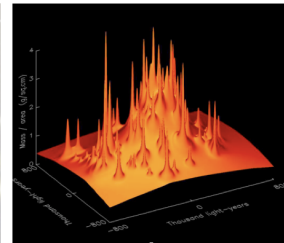
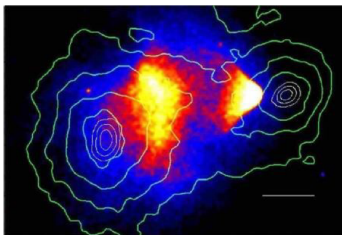
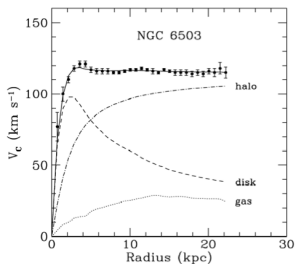


Pimeä sektori = uutta kiinnostavaa fysiikkaa

DE+DM havaittu vain gravitaation kautta

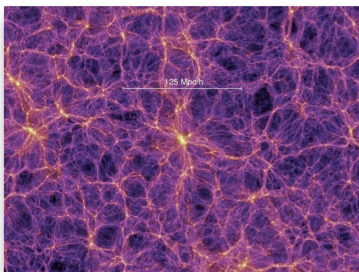
# Miten pimeä aine näkyy?

Pimeä aine vaikuttaa painovoiman kautta aina galaksien mittakaavasta mk:n n suuren skaalan rakenteeseen ja mikroaaltotaustaan asti, esim:

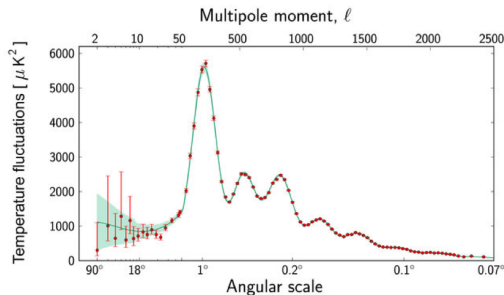


galaksien dynamiikka

galaksiklusterien dynamiikka/gravitaatiolinssit



rakenteiden synty



CMB yksityiskohdat

# Pimeä energia

- Mk:n näyttää laajenevan kiihtyvästi nykyhetkellä, tulos pohjautuu havaittujen supernovien punasiirtymän ja luminosititeetin väliseen käytökseen (Nobel 2011)

**Pimeä energia:** kiihtyvän laajenemisen aiheuttaja, efektiivisesti kosmologinen vakio:

$$\rho = -p = \Lambda^4$$

Ongelmana on selittää vaadittu äärimmäisen pieni arvo:

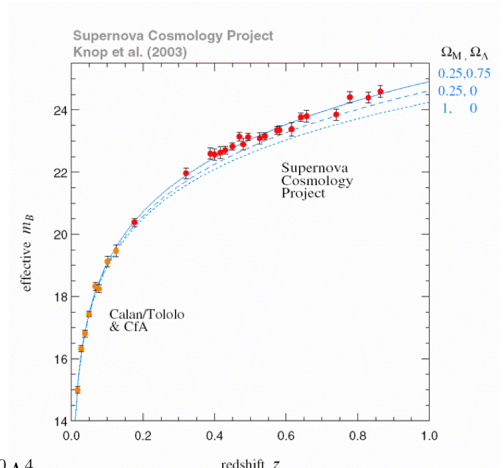
$$\Lambda \simeq 10^{-3} \text{ eV}$$

Tyhjiöenergia käyttäytyy kuten kosmologinen vakio, mutta

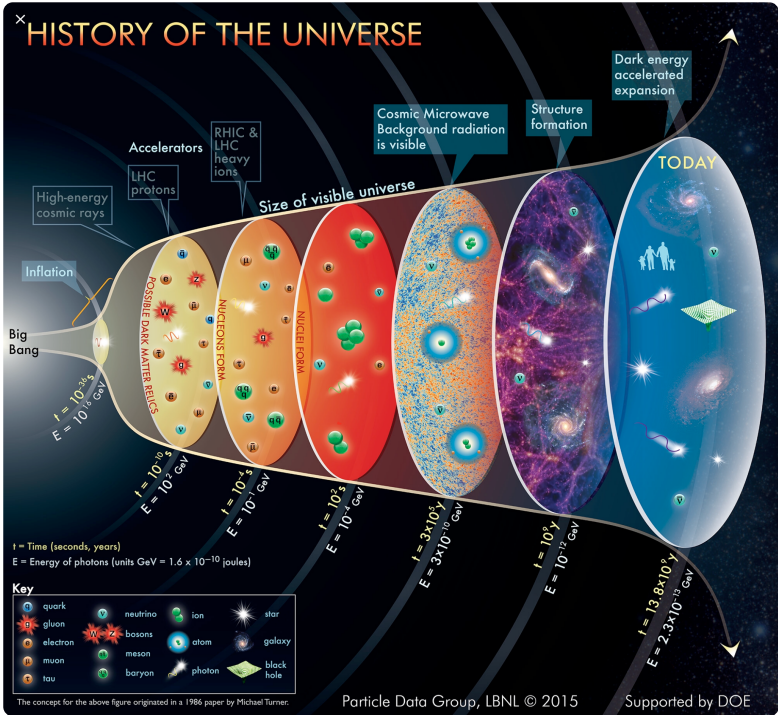
$$\rho_{\text{vac}} = \int_0^M d^3k E_k \sim M^4$$

$$M = M_P \Rightarrow \rho_{\text{vac}} \sim 10^{120} \Lambda^4$$

$$M = 10\text{TeV} \Rightarrow \rho_{\text{vac}} \sim 10^{64} \Lambda^4$$



Oikeastaan kaksi onglemaa: 1) mitä pimeä energia on, 2) miksi tyhjiöenergia ei kytke gravitaatioon

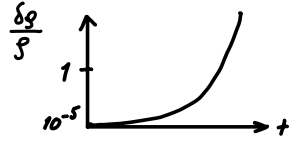


## Cornerstones

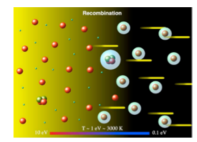
• Expansion

$$z + 1 = \frac{\lambda_{em}}{\lambda_{obs}} = \frac{a(t_{em})}{a(t_{obs})}$$

• Growth of structures



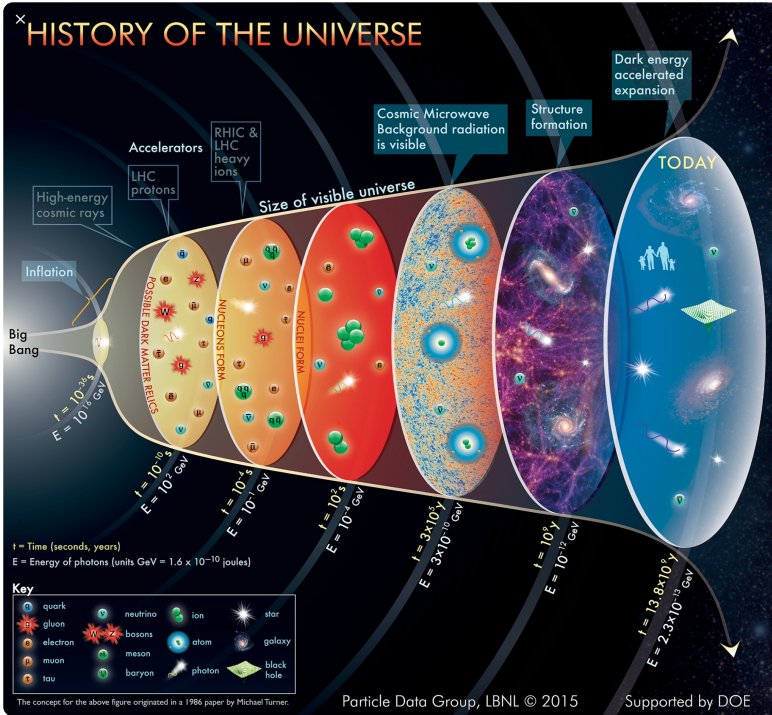
• CMB



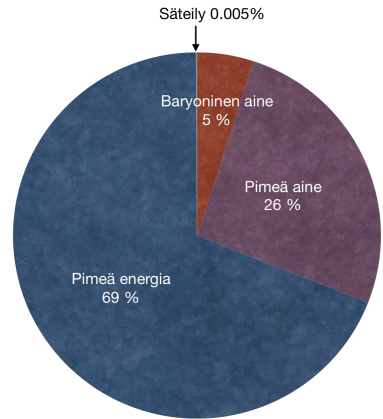
• BBN

Fusion of H, He, Li, Be  
 when  $t = 1 \text{ min} \dots 1 \text{ hr}$

energy ← ————— → time



$\Lambda$ CDM = kosmologian standardimalli



Toimii erinomaisesti, mutta ei täydellinen mikroskooppinen teoria:

- Mitä on pimeä aine?
- Mitä on pimeä energia?
- Mikä synnytti baryoniasymmetrian?
- Mikä aiheutti inflaation

Näihin SM+GR ei vastaa  $\Rightarrow$  avoimia tutkimuskysymyksiä!

# Kurssin keskeiset asiat

## 1. Suppea suhteellisuusteoria

- Perusteet: fysiikan lait saman muotoiset kaikille inertiaalilähtökehyksille,  $c$ -vakio, Newtonin fysiikka saadaan rajalla  $v \ll c$
- Lorentz-muunnokset, aikadilatatio, pituuskontraktio: näiden sovellukset
- Kinematiikka:  $p$  säilyy,  $E = \sqrt{m^2 + (p)^2}$ , sovellukset yksinkertaisiin tilanteisiin

## 2. Ydinfysiikka

- Perusteet: ytimen rakennneosat, kokoskaala, vuorovaikutukset, sidosenergijat  $Q$ ,  $Q/A$  vs. fissio ja fissio
- Radioaktiivisuus:  $\alpha, \beta, \gamma$  -hajoamiset, hajoamislaki ja sen sovelluksia

### 3. Hiukkasfysiikka

- Peruskäsitteet: hiukkassisältö, voimat ja niiden välittäjät, Higgs vs. massat, kvarkkien asympotoottinen vapaus ja hadronit
- Prosessit (Feynmanin diagrammit): QED + heikko vv., esim.  $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$ ,  
 $n \rightarrow p c \bar{u}_e$ ,  $\mu^- \rightarrow \nu_\mu e^- \bar{\nu}_e$ , säilyvät suureet

### 4. Kosmologia

- Perusteet: mk:n historia ja koostumus (yleiskuva), pimeä aine, pimeä energia
- Friedmannin yhtälöt, jatkuvuusyhtälö ja niiden sovelluksia

## Tentti:

- 5 tehtävää, joka aihealueesta jotain
- Peruskäsitteiden selittämistä lyhyesti + laskutehtäviä
- Kaavakokoelma käytössä, sisältää numeroarvot, perusgraafit ja "epätiviaalit" kaavat
- Selitä mitä/miten lasket (lyhyesti), sijoitus kaavaan + tulos ei yksistään riitä





