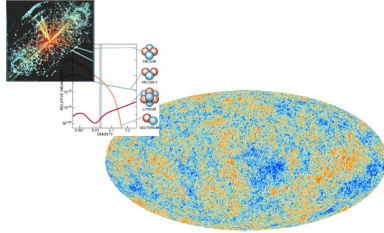
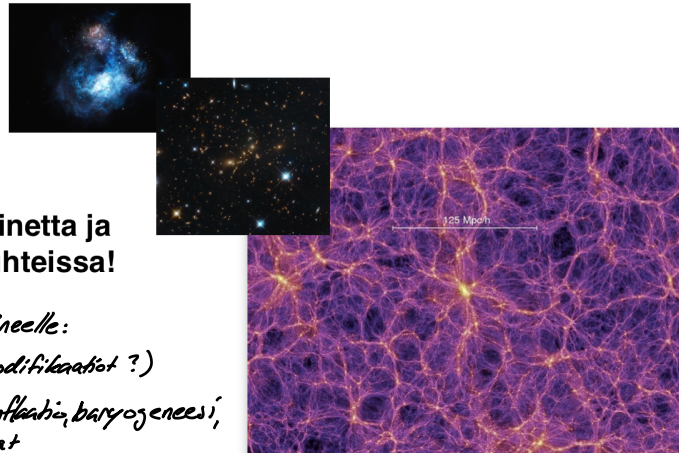


Energia

Etäisyys



Hiukkaskiihdyttimessä (CERN/LHC) $E \sim 10\,000$ GeV
Inflaatiiovaiheen aikana $E \sim 10\,000\,000\,000\,000\,000$ GeV



Kosmologiassa tutkitaan ainetta ja vuorovaikutuksia ääriolosuhteissa!

Tarvitaan teoria gravitaatiolle ja aineelle:

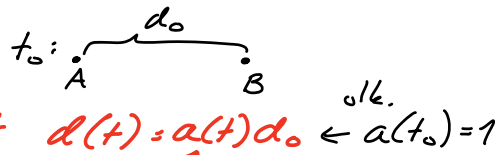
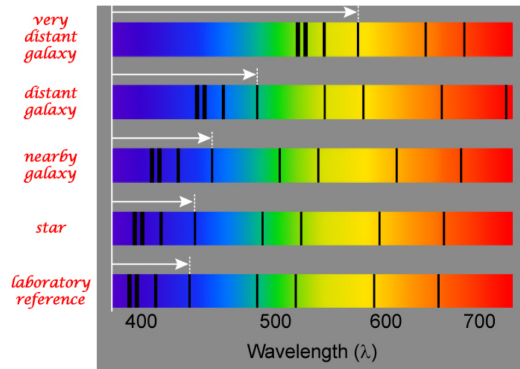
- yleinen suhteellisuusteoria (+ modifikaatiot ?)
 - hiukkasfysiikan SM + DM, DE, inflaatio, baryogeneesi, ν -massat
- $\underbrace{\hspace{10em}}_{=}$ uutta fysiikkaa

Aika

Keskeiset havainnot I: maailmankaikkeus laajenee

(maailmankaikkeus \equiv mk) (138)

- 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 skaalatekijä = mk:n dynamiikka

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

Kosminen punasiirtymä

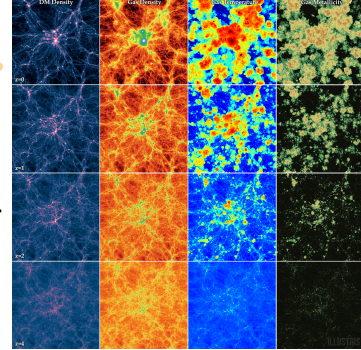
$$a(t_0) > a(t_{em}) \Rightarrow \lambda_0 > \lambda_{em}$$

t_{em} = signaalin lähetys hetki

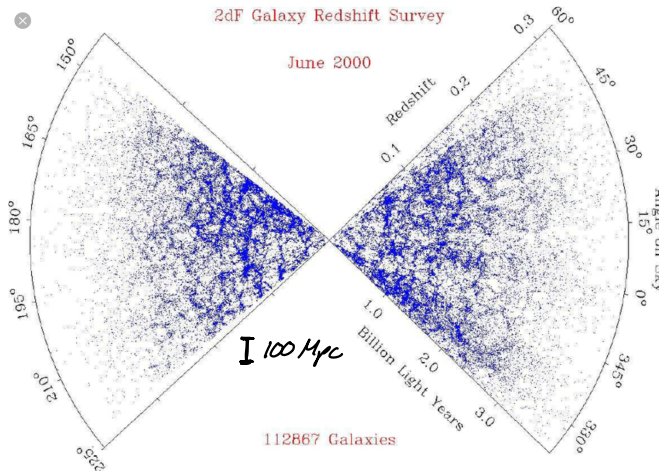
t_0 = signaalin vastaanotto hetki = nykyhetki

Keskeiset havainnot II: rakenteet kasvavat ajassa

Galaksit, galaksiklusterit ym. rakenne kehittynyt pienistä alkutiloista



139



aika ↑

Lähde:
Illustris

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

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

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

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

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

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

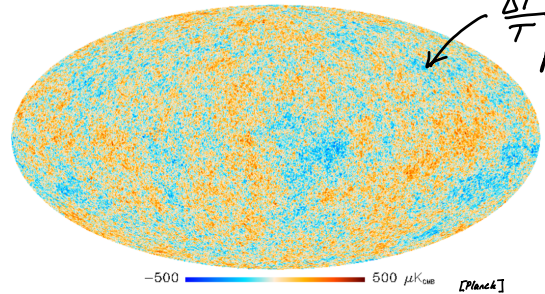
Keskeiset havainnot III: CMB ja BBN

Hk. laajenee \rightarrow aine harvenee ja jäähtyy kun mk.:n ikä + kasvaa

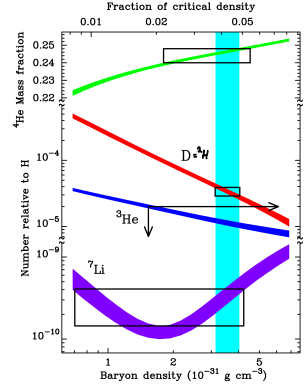
\Rightarrow kääntäen: *varhainen mk. tiheä ja kuuma*

Cosmic Microwave Background (CMB)
= kosminen mikroaaltotausta

Big Bang Nucleosynthesis (BBN)
= nukleosynteesi



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

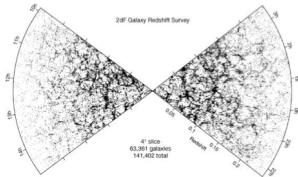


$e^+ + p \rightarrow H + \gamma$ kun $T \sim 3000$ K
 \Rightarrow fotonit pääsevät etenemään vapaasti
Havaitaan $T_0 = 2,725$ K taustasäteilynä
(ensimmäinen havainto vahingossa 1964 \rightarrow Nobel 1978)

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

Kosmologian standardimalli (Λ CDM)

1. Suuressa mittakaavassa mk homogeeninen ja isotrooppinen



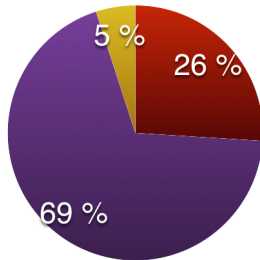
aika-avaruuden etäisyydet: $\Delta s^2 = \Delta t^2 - a(t)^2(\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2)$

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



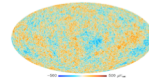
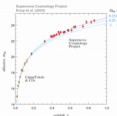
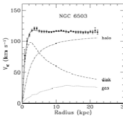
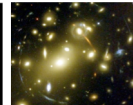
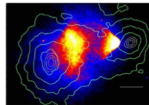
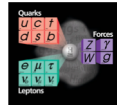
Näkyvä aine: tunnetuista alkeishiukkasista koostuva aine (tähdet, galaksit, kaasupilvet), kaikki paitsi fotonit epärelativistisia

Pimeä aine: näkymätöntä epärelativistista ainetta, uusia alkeishiukkasia?

Λ CDM = Cold Dark Matter

Pimeä energia: näkymätön tyhjiöenergian kaltainen komponentti

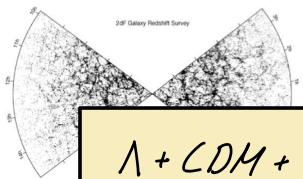
Λ



3. Alkuehdot: alkuhäiriöt, aine-antiaine asymmetria

Kosmologian standardimalli (ΛCDM)

1. Suuressa mittakaavassa mk homogeeninen ja isotrooppinen

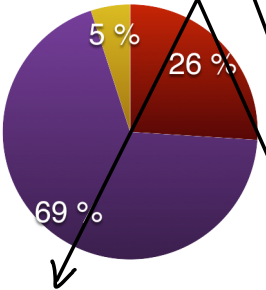


aika-avaruuden etäisyydet: $\Delta s^2 = \Delta t^2 - a(t)^2(\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2)$

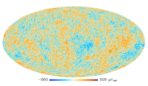
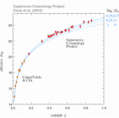
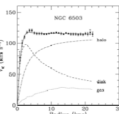
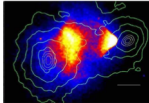
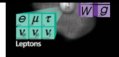
skaalatekijän liikeyhtälöt yleisestä suhteellisuusteoriasta

$\Lambda + \text{CDM} + \text{alkuehdot} = \text{uutta fysiikkaa, jota SM} + \text{yl. suhteellisuusteoria ei selitä} \Rightarrow \text{mikroskooppinen teoria avoin tutkimuskysymys}$

2. Ai (e nyk



- **Näkymä 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 **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

↑
Newtonin gravitaatiovakio

↑
aineen ominaisuudet

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 ρ

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 Λ CDM -mallissa

- Aineen ominaisuudet määrittelee **tilanyhtälö**: $p = w \rho$
 - $w = 1/3$, säteily eli relativistinen aine $p = \frac{1}{3} \rho$, $E \approx pc$
 - $w = 0$, materia eli epärelativistinen aine $p = 0$, $E \approx mc^2$
 - $w = -1$, tyhjiöenergia $p = -\rho$

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 hiukkasajista ja lämpötilasta

• Edellisen sivun jatkuvuusyhtälöstä:

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

vakioita
 ↙ ↘

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

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

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

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

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

$$H_0 = H(t_0)$$

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

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

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

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

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

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

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

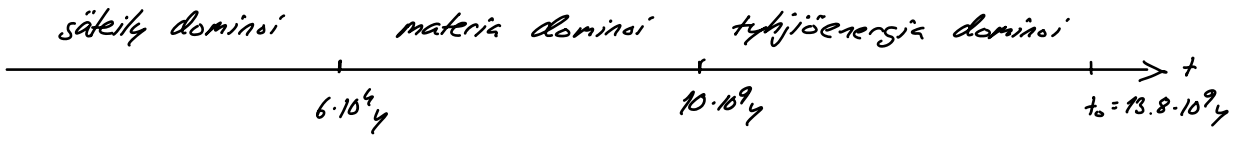
Ratkaisut erikoistapauksille: (HT)

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

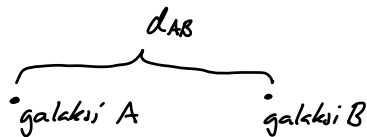
materia $p = 0 \Rightarrow \rho \propto a^{-3}, a \propto t^{2/3}$

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

Todellinen mk. näiden kaikkien sekoitus:



Etäisyydet :



$$d_{AB}(t) \propto a(t)$$

etäisyydet venyvät
verrannollisen skaalatekijään

Laajenemisnopeus: $H \equiv \frac{\dot{a}}{a}$ = Hubble'n funktio

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

Nyös 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
emittimishetki

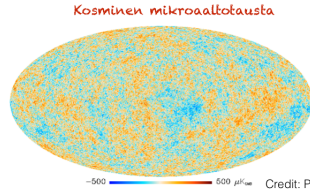
Sama pätee lämpötiloille: $E_\gamma = \frac{hc}{\lambda}$

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

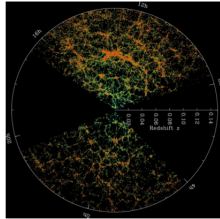
lämpötila pienenee
kun mk. kasvaa

Λ CDM parametrin havaintodatasta

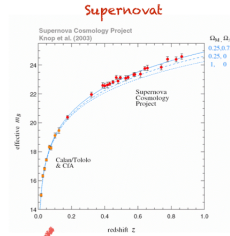
Suuren skaalan rakenne
= galaksit, klusterit..



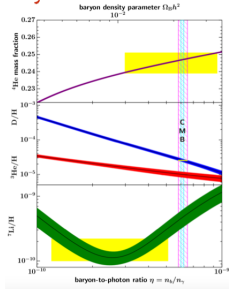
Credit: Planck



Credit: SDSS



Keuyiden alkuaineiden määrit



Fields et al. 20

Quantum Fluctuations, Inflation, Dark Ages, 1st Stars about 400 million yrs., Big Bang Expansion 13.77 billion years, Accelerated Expansion, Dark Energy, Dark Matter, Ordinary Matter, WMAP

$t_0 = \text{nykyhetki}$
 $\frac{\Omega_{DM}(t_0)}{S_{tot}(t_0)}$ DM = pimeä aine
 $\frac{\Omega_{DE}(t_0)}{S_{tot}(t_0)}$ DE = pimeä energia
 $\frac{\Omega_{vis}(t_0)}{S_{tot}(t_0)}$

$\frac{\dot{a}(t_0)}{a(t_0)} = \frac{87 \text{ km/s/Mpc}}{3} \equiv H_0 = (67,4 \pm 0,5) \frac{\text{km}}{\text{s Mpc}}$
 ↑
 Hubblen parametri, laajenemisnopeus nykyhetkellä

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

Maailmankaikkeuden kehitys LCDM-mallin mukaan

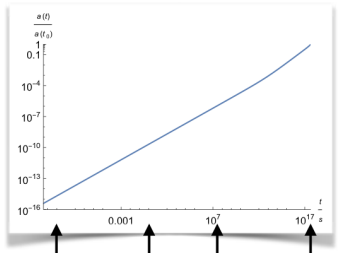
$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3} (\rho_{SM} + \rho_{DM} + \rho_{DE})$$

$a(t)$ koko suhteessa nykyhetkeen

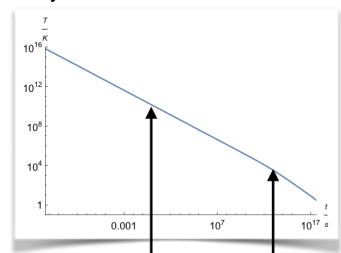
$$T = T_0 \frac{a_0}{a} \quad T_0 = 2,725K$$

$T(t)$ lämpötila

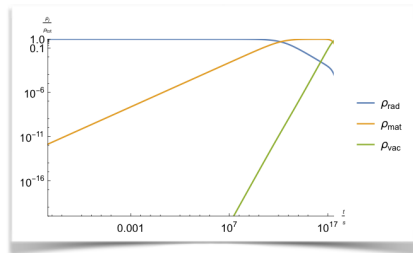
energiakomponentit



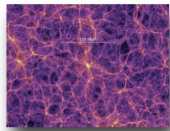
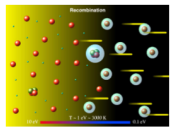
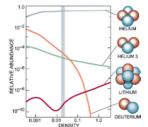
10⁻¹⁰ sek. 1 sek. 1 vuosi nykyhetki 13,8*10⁹ vuotta



ytimen sidosenergia atomin sidosenergia



säteily hallitsee materia tyhjiöenergia hallitsee



1 min 380000 v 100 milj. v aika

nukleosynteesi:
H, He, Li, Be ytimien synty

mikroaaltotausta syntyy:
H⁺ + e⁻ → H ja mk muuttuu läpinäkyväksi

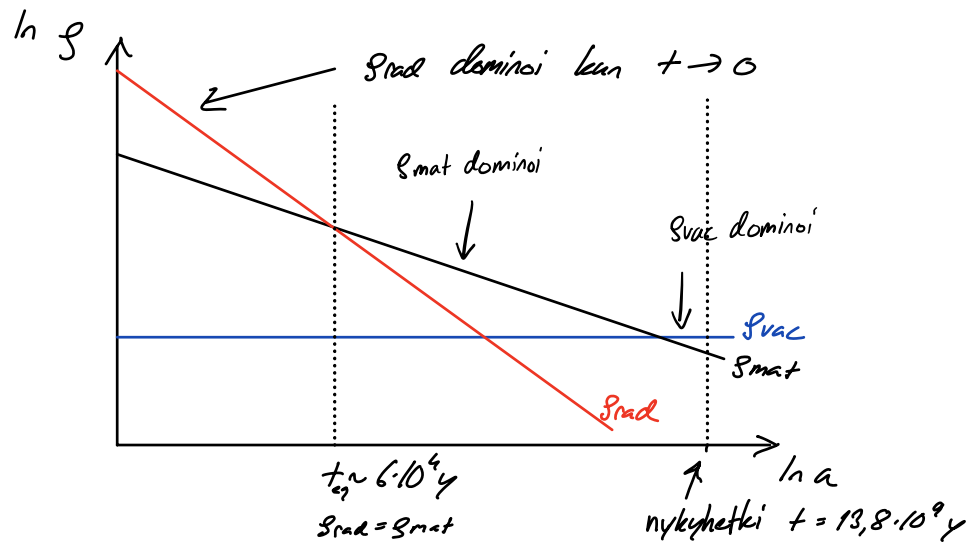
ensimmäiset tähdet syntyvät

Vanhain maailmankaikkeus säteilyn dominoima

$$\rho_{rad} = \rho_{rad0} \left(\frac{a_0}{a}\right)^4 \quad \text{säteily}$$

$$\rho_{mat} = \rho_{mat0} \left(\frac{a_0}{a}\right)^3 \quad \text{materia}$$

$$\rho_{vac} = \rho_{vac0} = \text{vakio} \quad \text{vakuumienergia}$$



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

Kuuma alkuräjähdyksmalli = relativistisia hiukkasia + termien tasapaino

$$g = \frac{\pi^2}{30} g_{**}(T) T^4$$

↑ relativististen vapausastiden lkm.

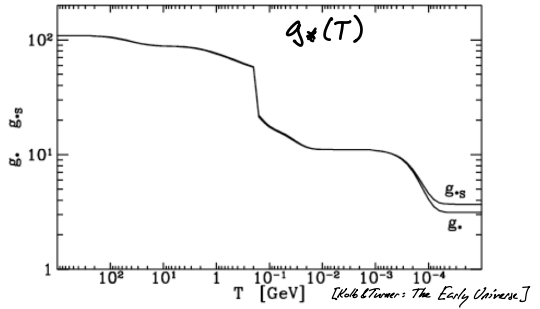
Säteilyn dominoivalle mk:lle: $a(t) = a_0 \left(\frac{t}{t_0}\right)^{1/2}$

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

⇓ (H)

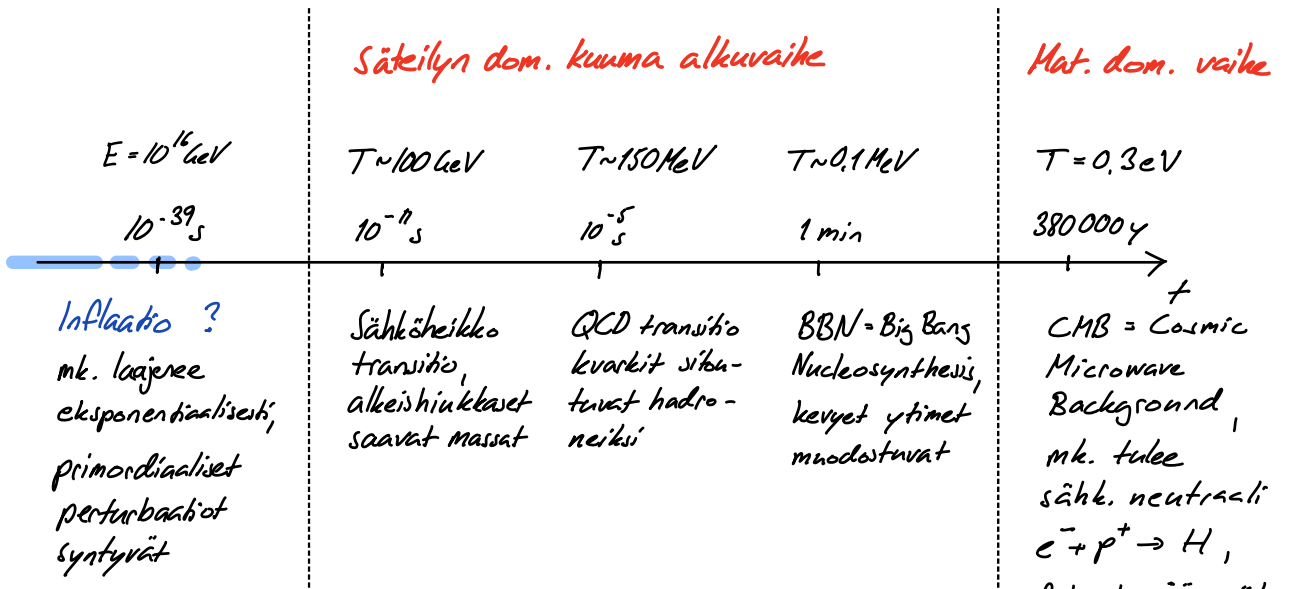
$$\Rightarrow t \approx \frac{2.4}{\sqrt{g_{**}(T)}} \left(\frac{T}{\text{MeV}}\right)^{-2} \text{ s}$$

Mk. kasvaa ja jäähtyy



mk.:n ikä sekunneissa
lämpötilan funktiona

Varhainen maailmankaikkeus



Mk:n koko = kausaalinen alue = valon kulkema matka = $\mathcal{O}(1) H^{-1}$

$$H^{-1} = 2t = \left(\frac{t}{s}\right) 2s = \left(\frac{t}{s}\right) 6 \cdot 10^8 \text{ m} \approx \left(\frac{t}{s}\right) 2 \cdot 10^{-8} \text{ pc}$$

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

Nukleosynteesi (BBN = Big Bang Nucleosynthesis)

- Ydintyriikka - 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 ${}^2\text{H}$:in muodostumiseen liittyvä pullonkaula)

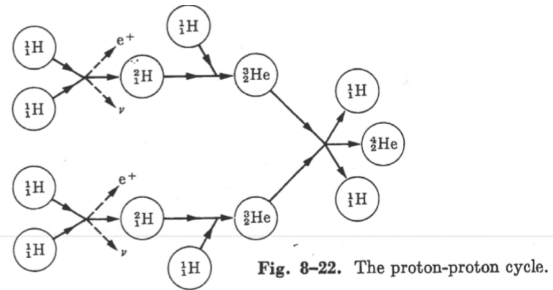
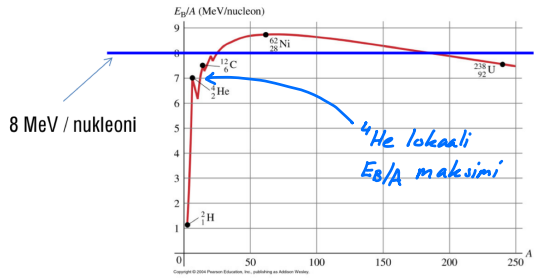
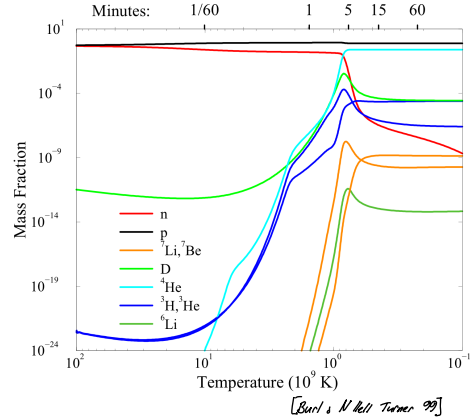
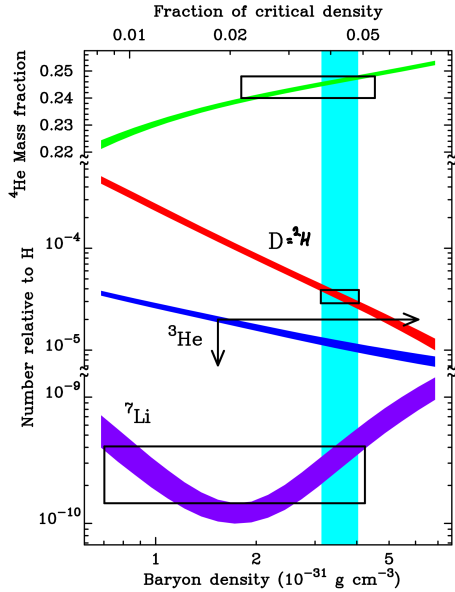


Fig. 8-22. The proton-proton cycle.



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

BBN ennustaa kevyiden alkuaineiden määrät



BBN ennusteet vastaavat mitattuja alkuainepitoisuuksia

$$n_b = n_b - \bar{n}_b$$

↑
antibaryonien määrä

Kosminen mikroaaltotausta CMB = Cosmic Microwave Background

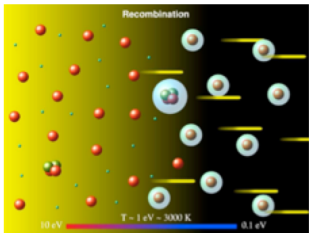
153

BBN: $\sim 75\%$ baryonisesta aineesta vetyä, vetyatomien 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

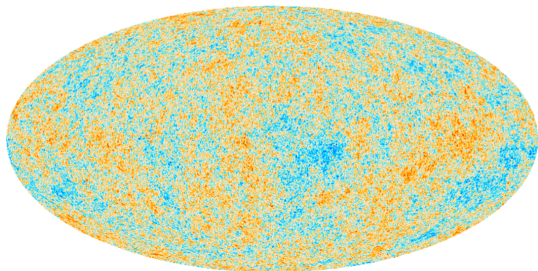


CMB-fotonien lämpötila nykyhetkellä t_0 :

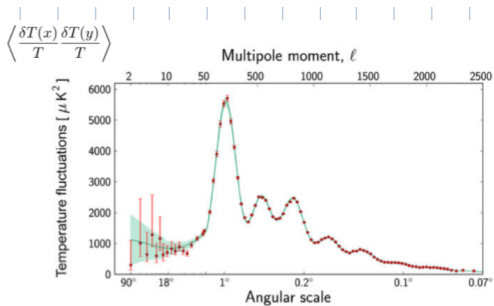
$$T_0 = T_{\text{rek}} \frac{a_{\text{rek}}}{a_0} = \frac{T_{\text{rek}}}{1+z_{\text{rek}}} \approx 2.7 \text{ K}$$

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

CMB lämpötilavaiktelut



-500 500 μK_{CMB} [Planck]



CMB lämpötilassa pientä vaihtelua

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

⇒ aineen jakaumassa $\frac{\delta \rho}{\rho} \sim 10^{-5}$
 tihtentymä/harventumia hetkellä

$t_{\text{rek}} = 380\,000\text{v}$, alkuhäiriötä

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

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



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

$\delta T/T$ korreloituneita koko
 havaittavan m_k :n yli $r_0 \Rightarrow ct_{\text{rek}}$



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

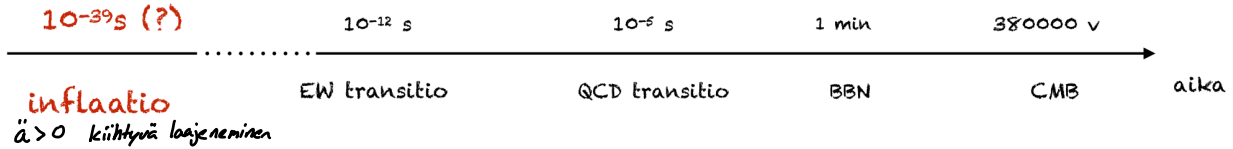
$$ct \rightarrow e^N ct \gg r_0$$

↑ $N \geq 60$ "inflaation määrä"

Alkuhäiriöiden tod. näk. selitys inflaatio

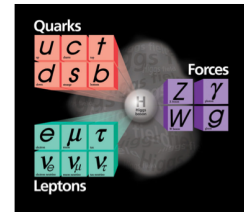


QM tyhjiö + inflaatio → alkuhäiriöt



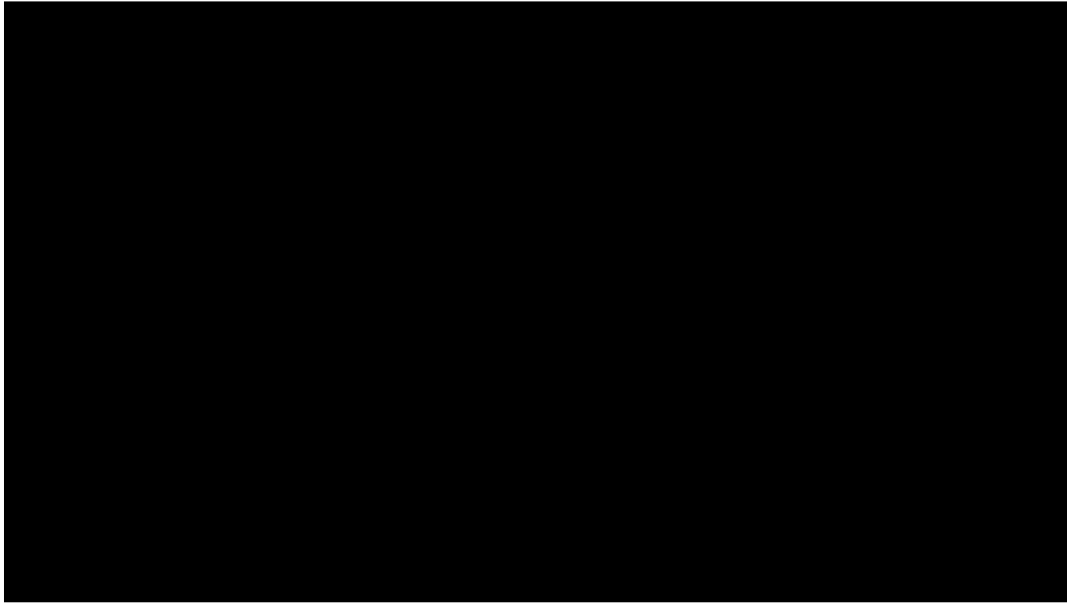
Inflaation mikroskooppinen teoria ei selvillä, mikä aiheutti inflaation ???

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

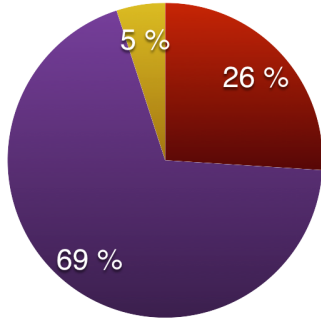


Rakenteen muodostuminen

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



Maailmankaikkeuden pimeä puoli



- Pimeä aine
- Pimeä energia
- Näkyvä aine

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

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

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

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

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

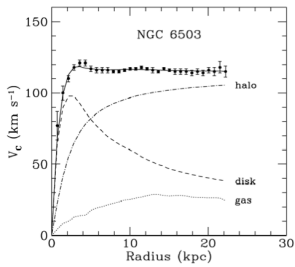


Pimeä sektori = uutta kiinnostavaa fysiikkaa

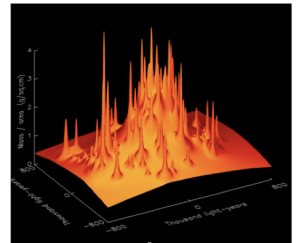
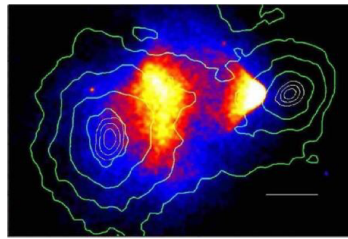
DE+DM havaittu vain gravitaation kautta

Miten pimeä aine näkyy?

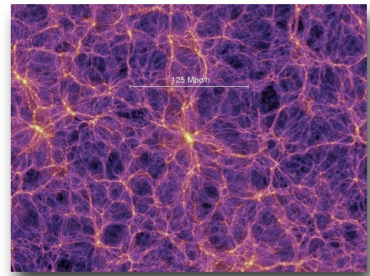
Pimeä aine vaikuttaa painovoiman kautta aina galaksien mittakaavasta mk:n n suuren skaalan rakenteeseen ja mikroaaltotaustaan asti, esim:



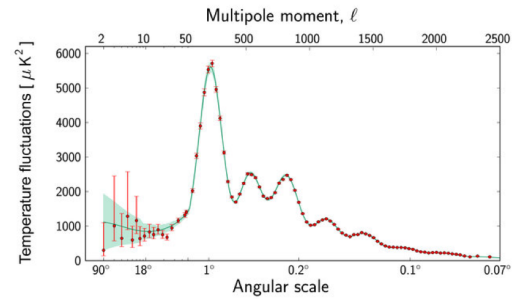
galaksien dynamiikka



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)

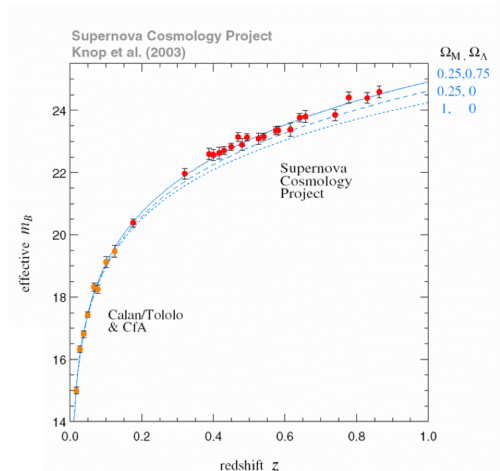
Pimeä energia: kiihtyvän laajenemisen aiheuttaja, efektiivisesti kosmologinen vakio:

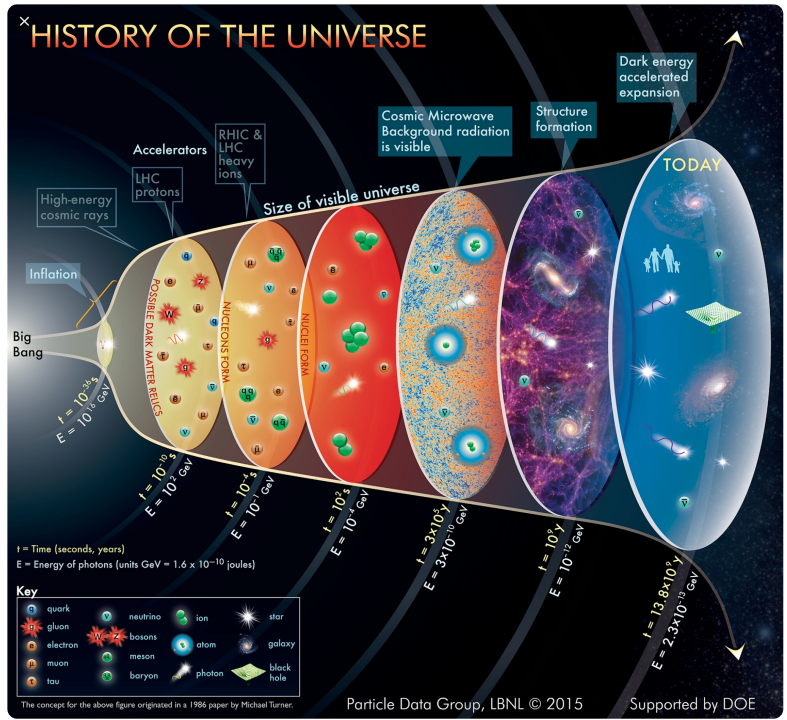
$$\rho = -p = \Lambda^4$$

Ongelmana on selittää vaadittu äärimmäisen pieni arvo:

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

mistä tämä skaala?



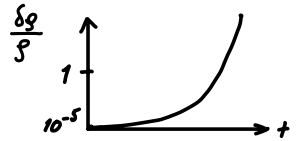


Cornerstones

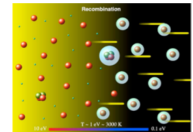
• Expansion

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

• Growth of structures



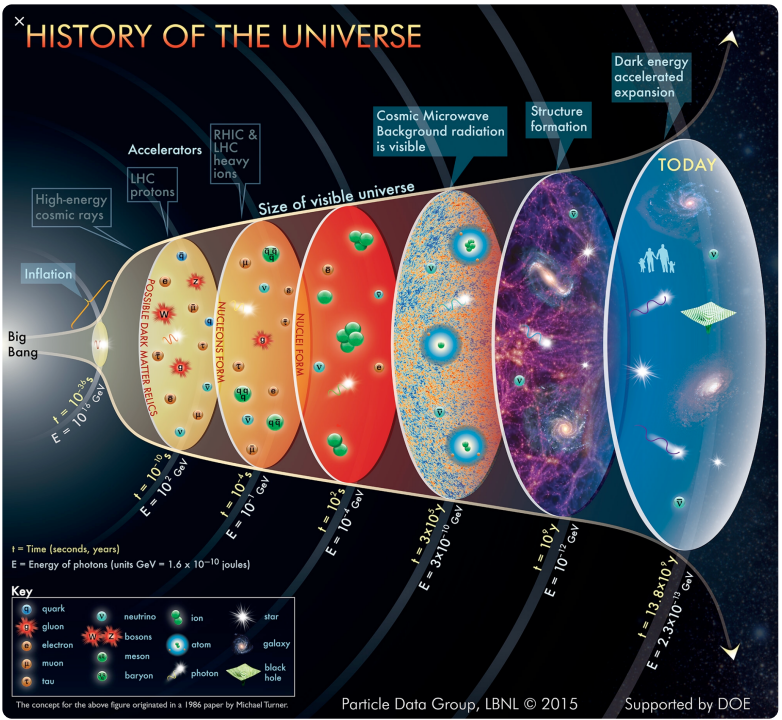
• CMB



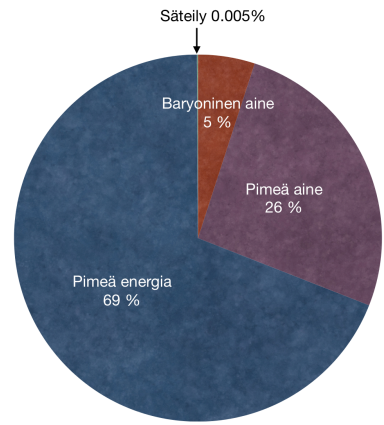
• BBN

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

energy ← ————— → time



Λ 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 inertiaalihavaintijoille, c -vakio, Newtonin fysiikka saadaan rajalla $v \ll c$
- Lorentz-muunnokset, aikadilataatio, pituuskontraktio: näiden sovellukset
- Kinematiikka: p säilyy, $E = \sqrt{m^2 + (p)^2}$, sovellukset yksinkertaisiin tilanteisiin

2. Ydinfysiikka

- Perusteet: ytimen rakenneosat, kokoskaala, vuorovaikutukset, sidosenergijat Q , Q/A vs. fissio ja fissio
- Radioaktiivisuus: α, β, γ -hajoamiset, hajoamislaki ja sen sovelluksia

3. Hiukkasfysiikka

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

4. Kosmologia

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

Tentti:

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