

PIMEÄ ENERGIA **mysteeri vai kangastus?**

Kari Enqvist

Helsingin yliopisto ja Fysiikan tutkimuslaitos

**1917: Einstein sovelsi yleistä suhteellisuusteoriaa
koko maailmankaikkeuteen**



*Linnunradan eli maailmankaikkeuden
tulisi romahtaa kasaan*



lisätään teoriaan ylimääräinen termi

Kosmologinen vakio

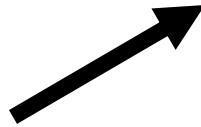
tyhjiön energiaa

puskee avaruutta erilleen



Edwin Hubble

- 1925: Linnunradan ulkopuolella on galakseja
- 1929: galaksien lähettämä valo punasiirtyy sitä enemmän, mitä kauempana ne ovat



avaruus laajenee

Einstein kosmologisesta vakioista: "elämäni suurin möhläys"

MUTTA ON JÄLLEEN PALANNUT NÄYTTÄMÖLLE:

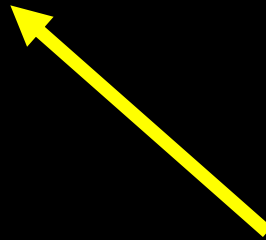
PIMEÄ ENERGIA

maailmankaikkeuden energiabudjetti

- tavallista ainetta

- pimeää ainetta

- pimeää energiaa



nykykosmologian polttavin teoreettinen ongelma

*Miten tutkitaan
eli
Mitä kosmologin pitää osata?*

- statistinen fysiikka
- kvanttifysiikka
- kvanttikenttäteoria
- hiukkasfysiikka
- suhteellisuusteoria
- kosmologian erikoiskurssit
- kosmologian kesäkoulut

alkuräjähdyks á la Einstein

- ei tapahtunut missään: aika ja avaruus saivat alkunsa alkuräjähdyksessä
- avaruus ei laajene mihinkään tyhjään tilaan
- valo kulkee vain 300 000 km/s: katsomalla kauas katsotaan samalla menneisyyteen

BIG BANG

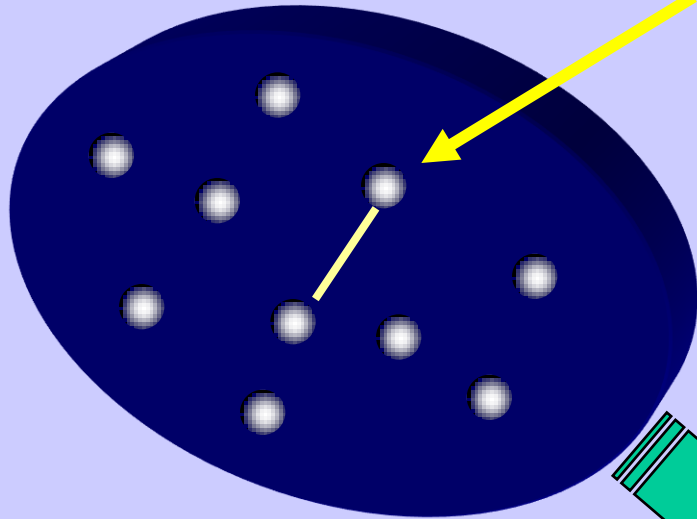
9
 8
 7
 6
 5
 4
 3
 2
 1

3K

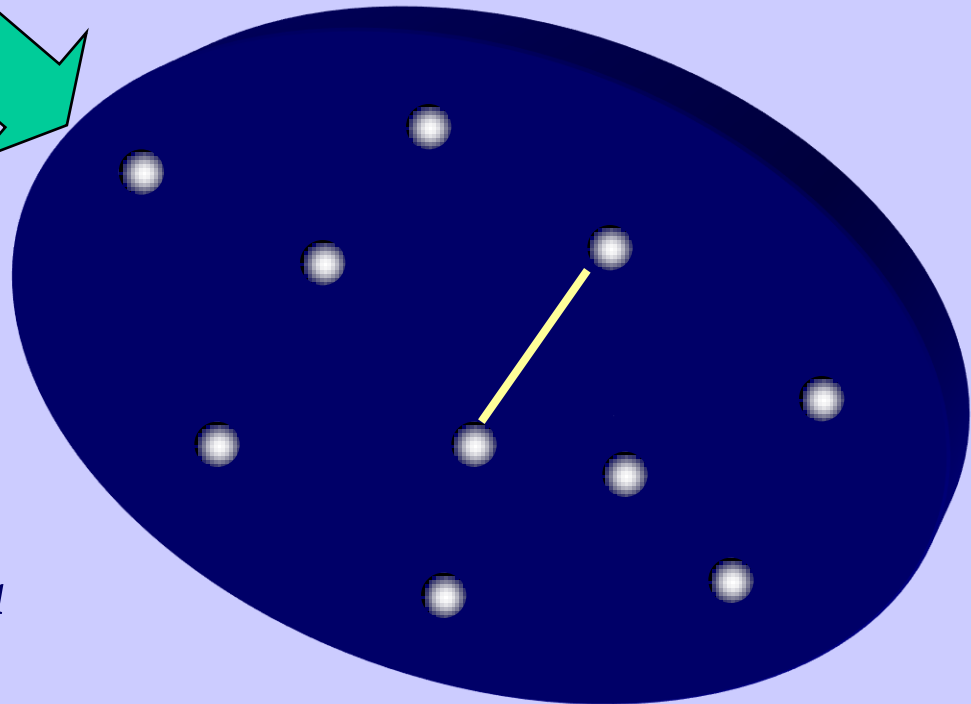
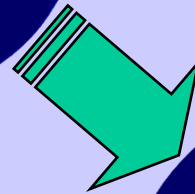
H
D
He

tyhjä avaruus laajenee

Linnunrata

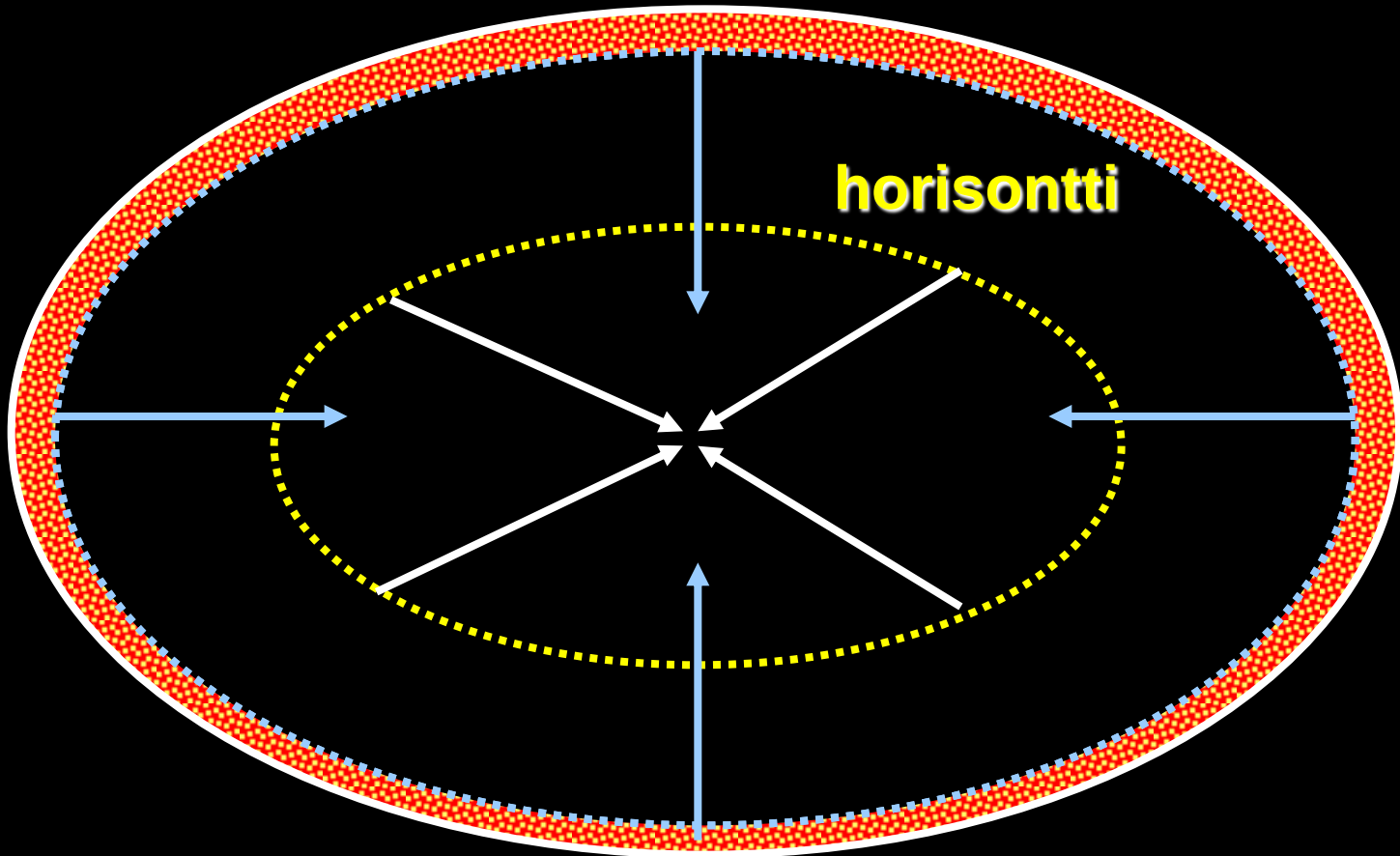


välimatkat näyttävät venyvän



atomit, galaksit sidottu toisiinsa

valo joka ei vielä ole ehtinyt Maahan



**maailmankaikkeus voi olla ääretön, mutta
me näemme siitä vain äärellisen osan**

Miten katsotaan menneisyyteen?

- valon nopeus on vain 300 000 km/s: kun katsotaan kauas, katsotaan samalla menneisyyteen

KUU on noin 1 s päässä menneisyydessä

AURINKO on noin 8 minuutin päässä

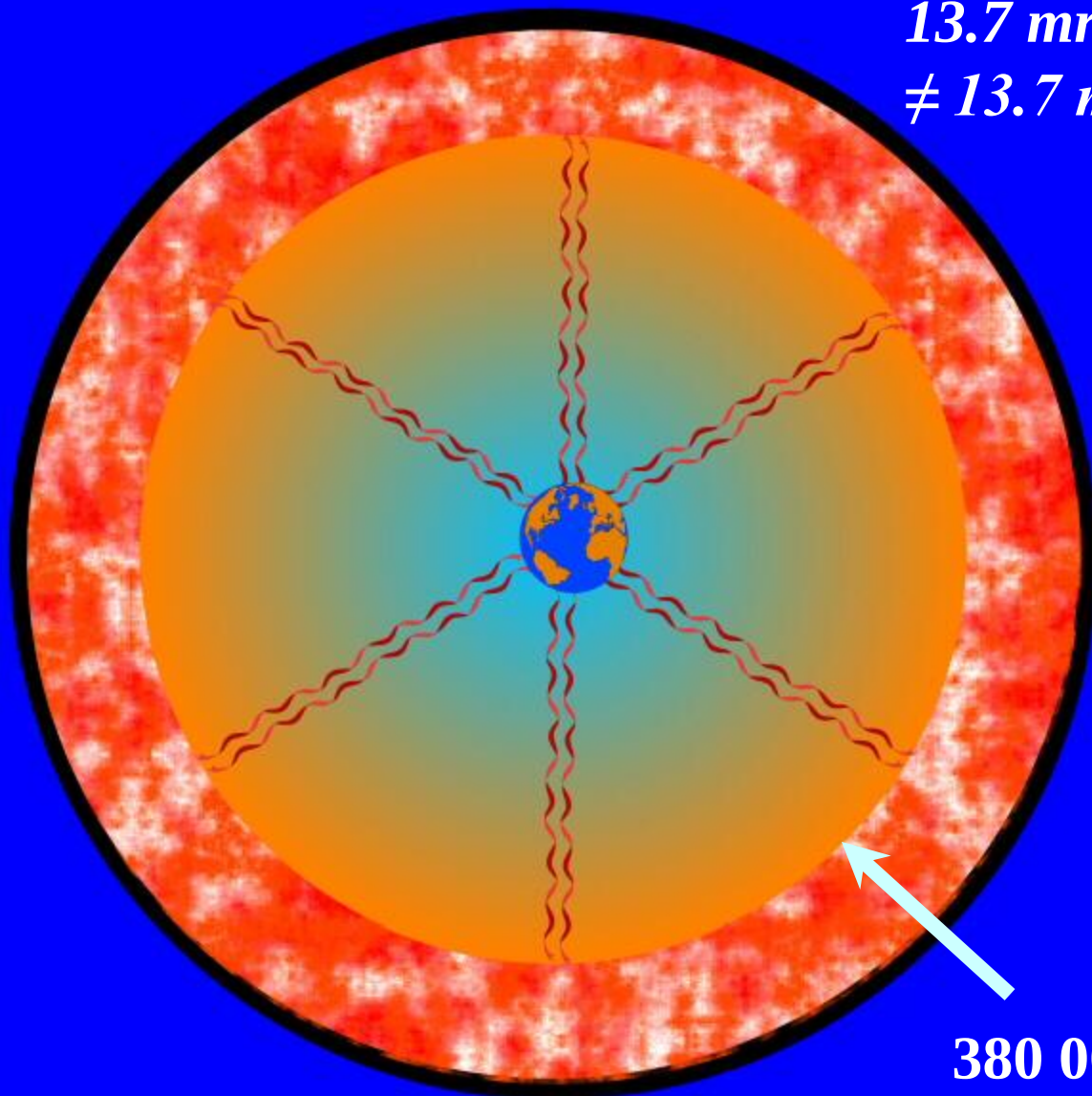
ANDROMEDAN GALAKSI on 2 miljoonan vuoden päässä

ALKURÄJÄHDYS on 13.7 miljardin vuoden päässä

*Kun katsotaan niin kauas kuin on mahdollista katsoa,
nähdään*

KOSMINEN MIKROAALTOTAUSTA

- löytyi sattumalta vuonna 1965*
- joka suunnasta saapuvaa mikroaaltosäteilyä*



13.7 mrd vuotta
≠ 13.7 mrd valovuotta

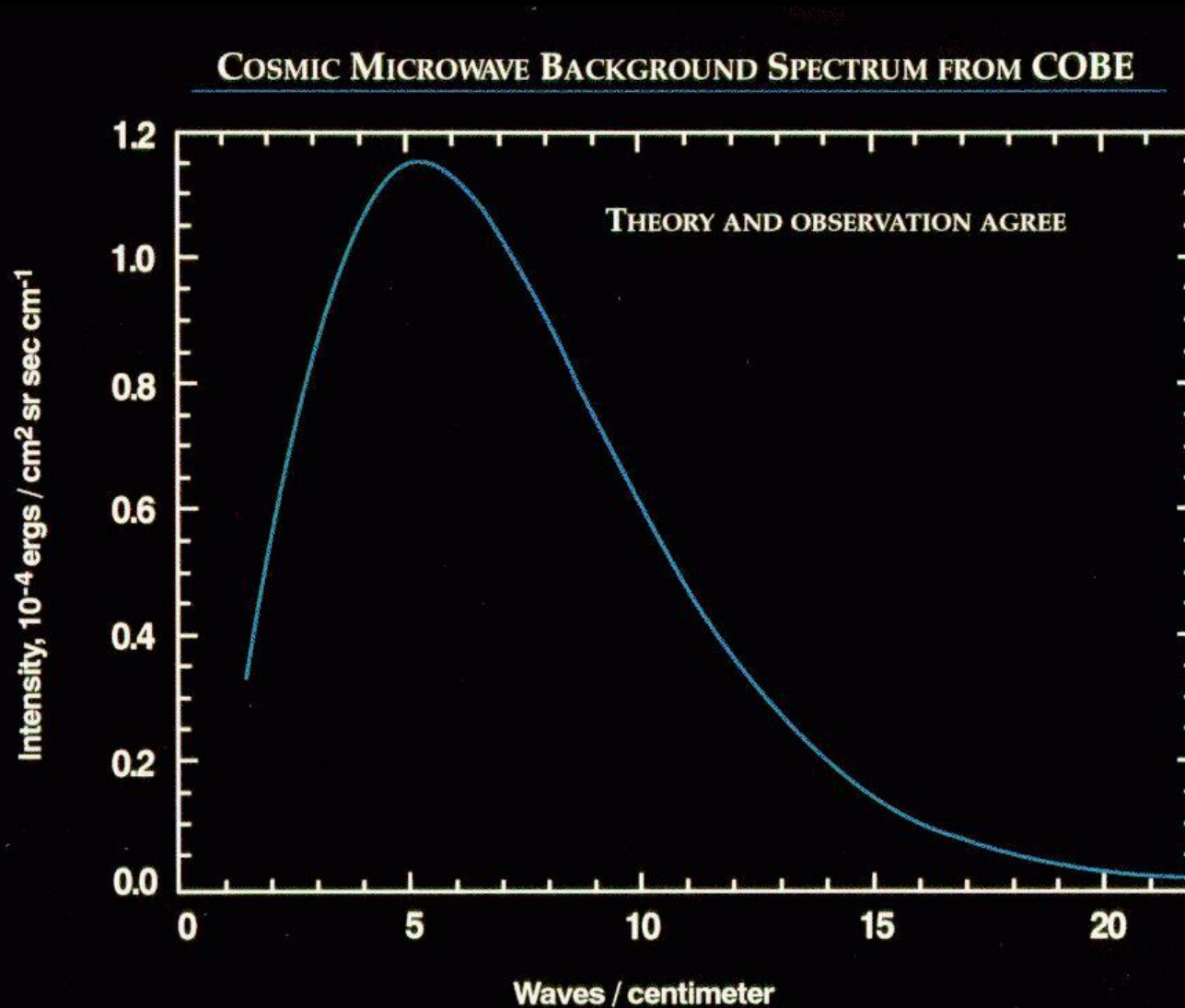
380 000 vuotta
alkuräjähdyksestä

Mikroaaltotaustaa mitanneita satelliitteja

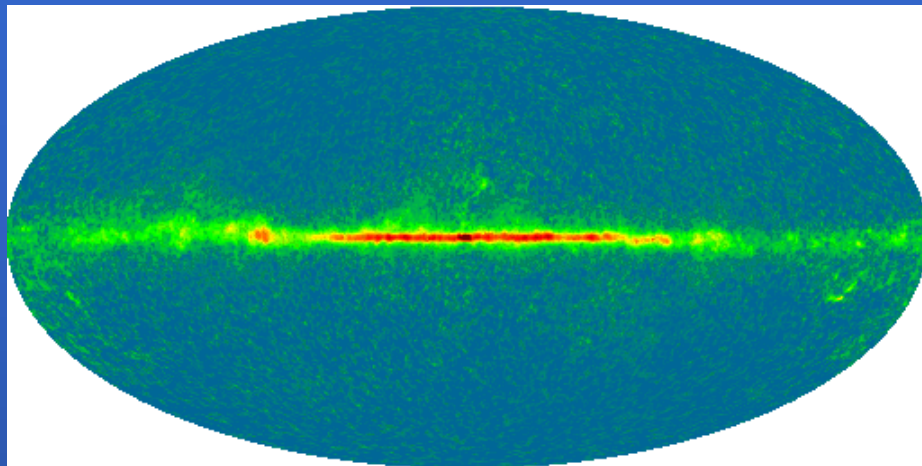
- COBE (Cosmic Background Explorer) 1992
- WMAP (Wilkinson microwave anisotropy probe) 2003
- Planck (vrt. Max Planck) 2009 keväällä
 - suomalaiset tutkijat mukana

Kuuma alkutila → lämpösäteilyä

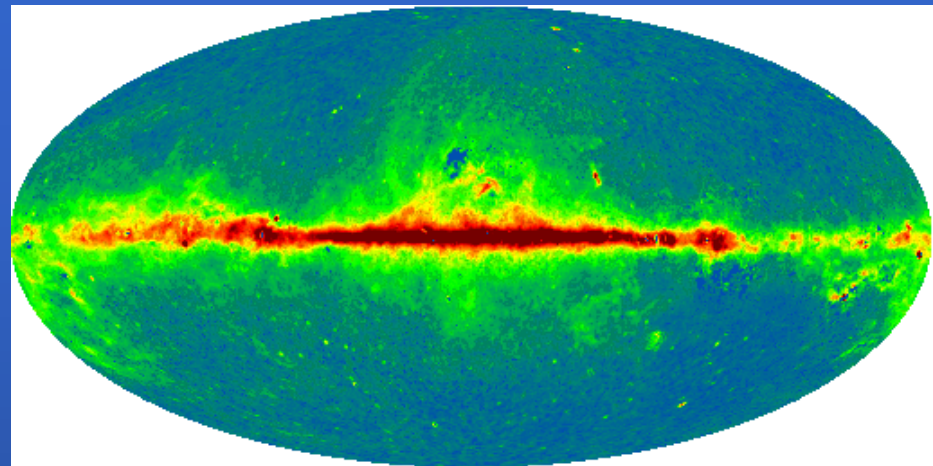
$$T = 2.725 \text{ K}$$



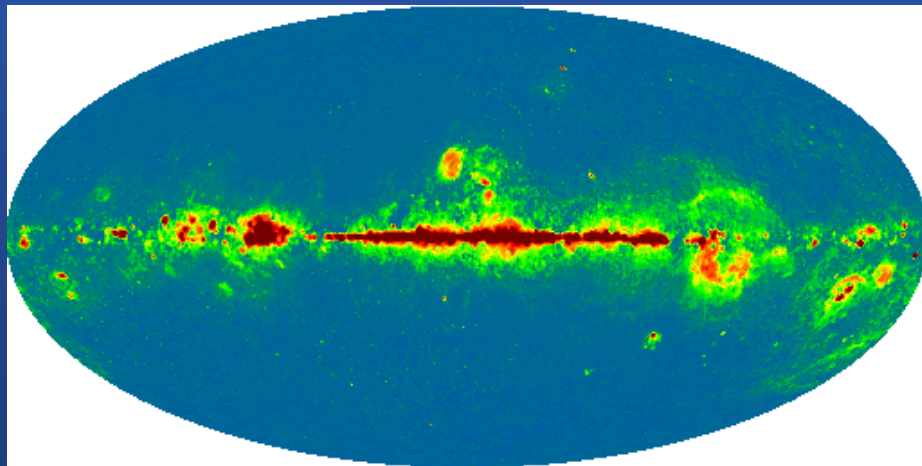
WMAP derived maps



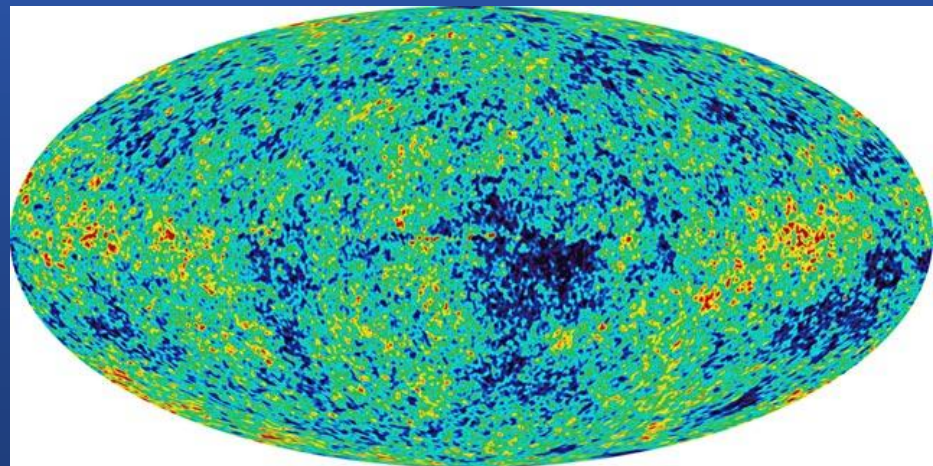
Dust map



Synchrotron map



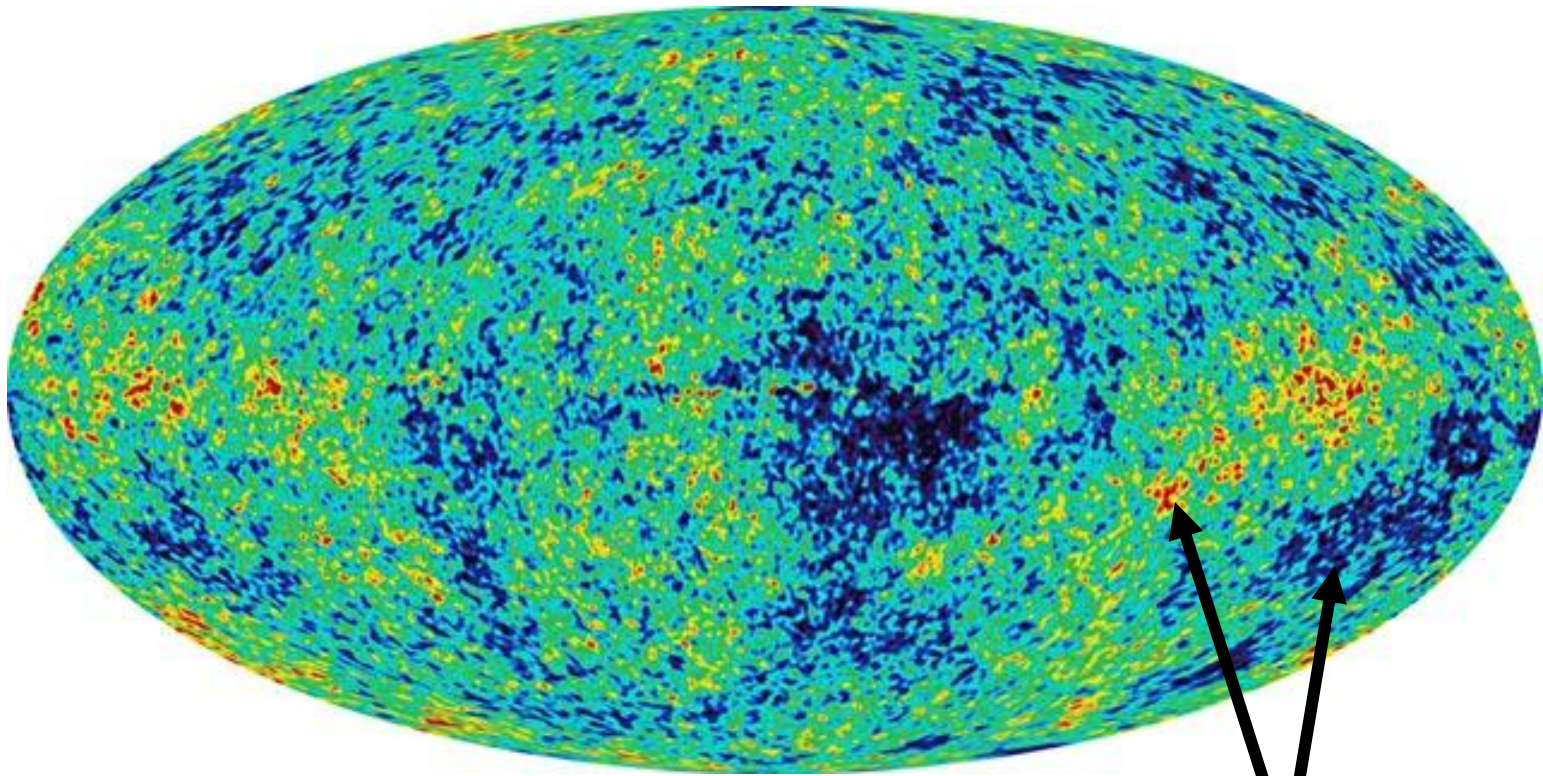
Free-free map



CMB map

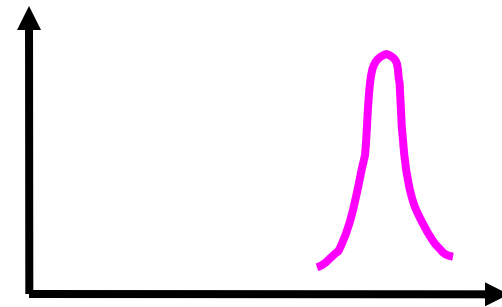
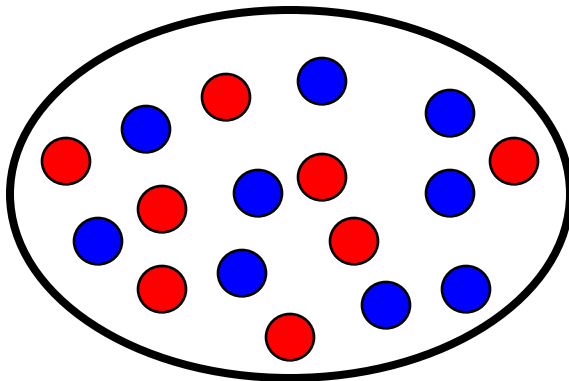
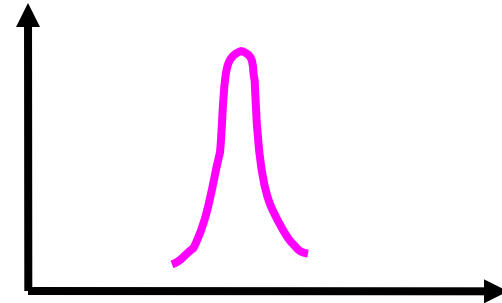
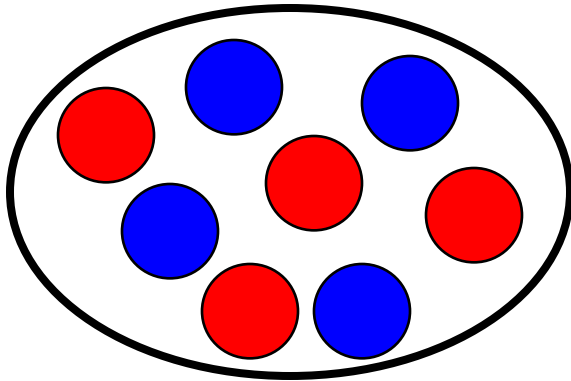
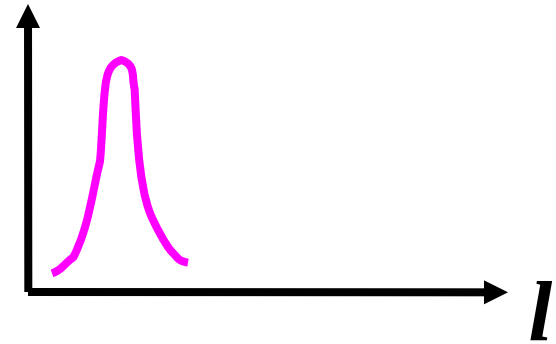
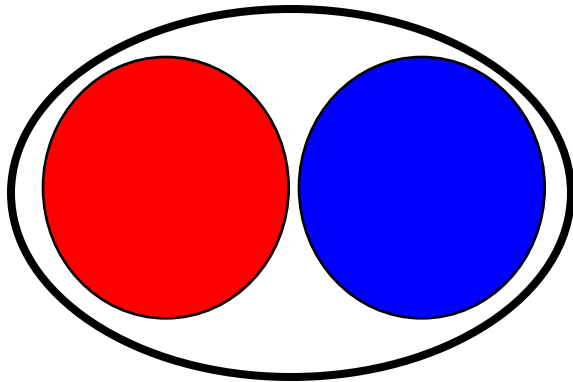
WMAP PRIMORDIAL SKY MAP

$$\langle T \rangle = 2.725 \text{ K} \pm \mathcal{O}(10^{-5}) \text{ K}$$

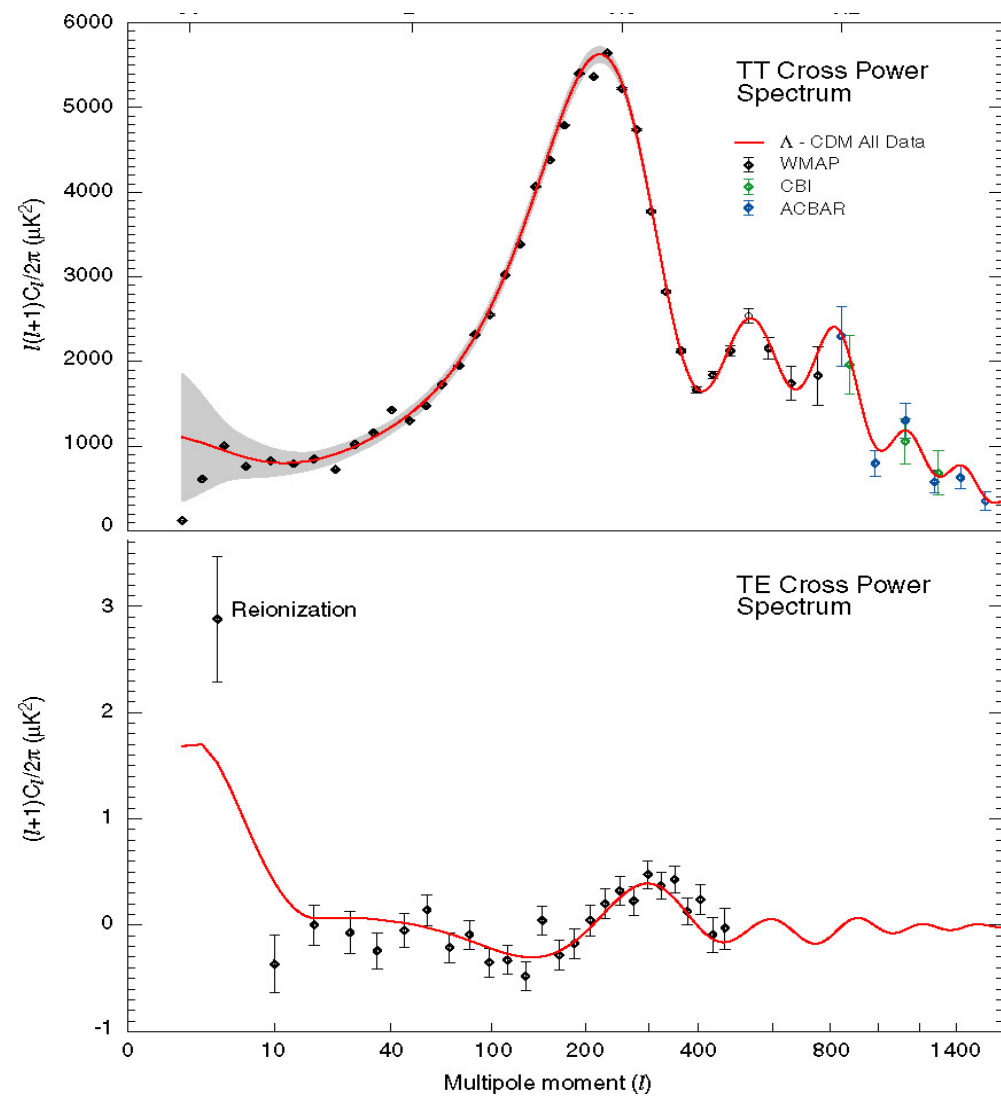


Kuumia ja kylmiä alueita

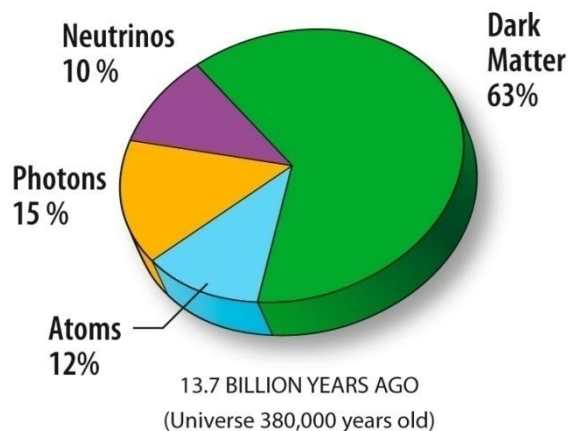
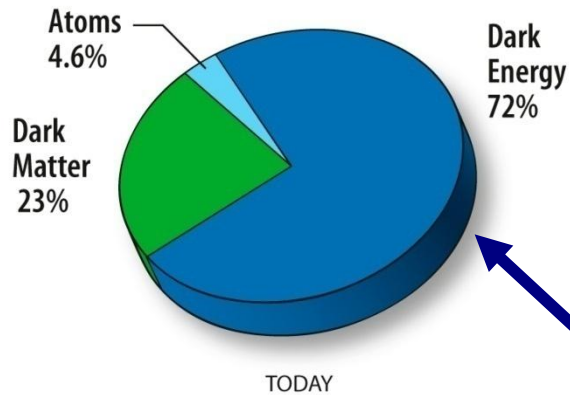
*muutaman sadastuhannesosa-
asteen suuruisia eroja*



← kulmakoko



UNIVERSUMIN KALUSTELUETTELO



aiheuttaa kiihtyvää laajenemista

PIMEÄ AINE

CDM
cold dark
matter

- ”läpinäkyvää” – ei lähetä eikä vastaanota sähkömagneettista säteilyä
- vaikuttaa painovoimallaan

toistaiseksi tuntemattomien alkeishiukkasten muodostama kylmä kaasu

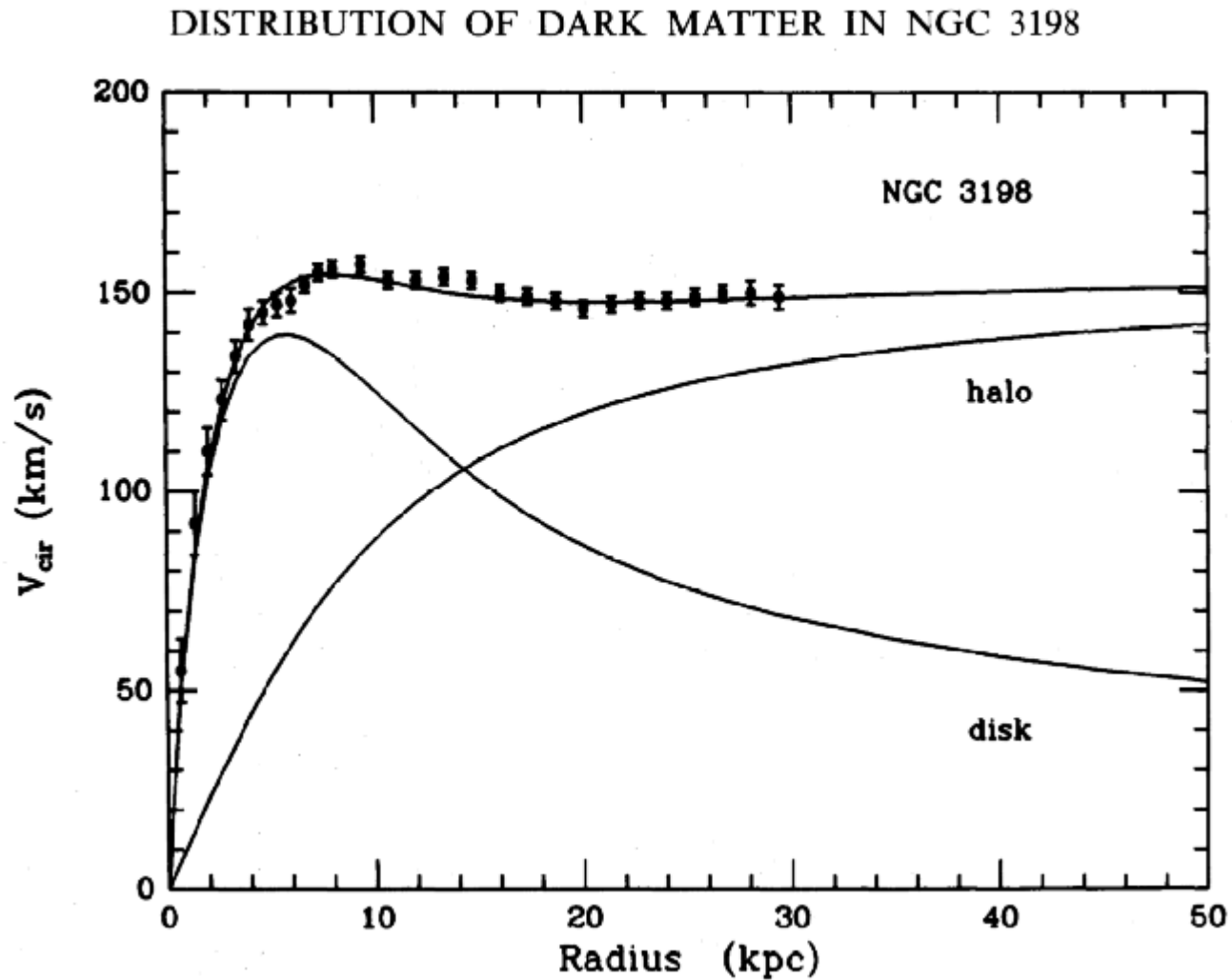
supersymmetria:
neutraliinat

CERN LHC-kiihdytin 2010

galaksien ulko-osien pyörimisnopeus

Newton:

$$v^2 \propto \frac{M}{r}$$



Bullet cluster: dark matter in action



PIMEÄ ENERGIA



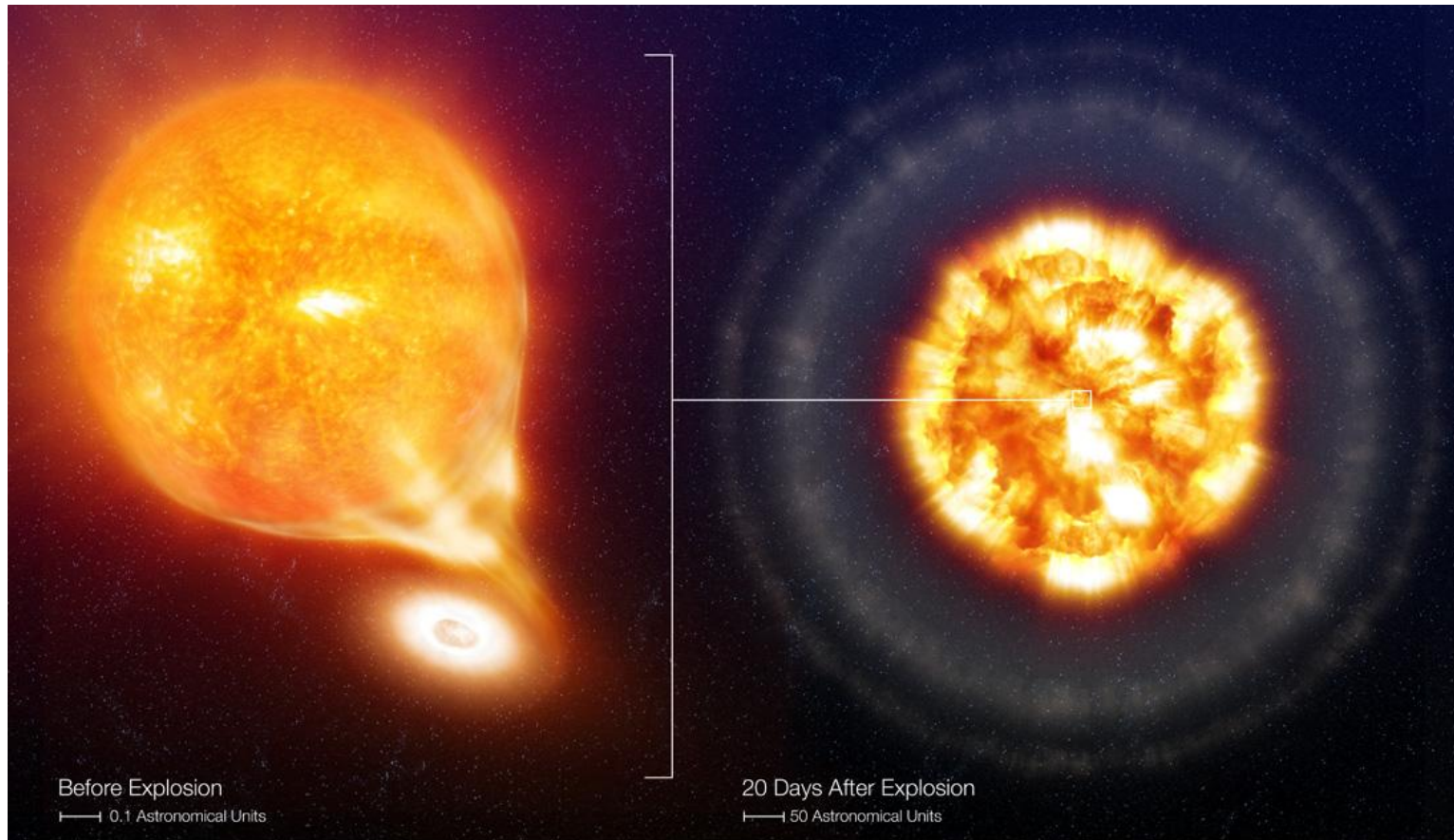
EI KOOSTU
HIUKKASISTA

tyhjiöenergia = kosmologinen vakio

“pimeä energia” yleisempi: kosmologinen vakio voi muuttua ajan kuluessa

osallistuu maailmankaikkeuden kehitykseen painovoimavaikutuksellaan (energia on massaa ja massa energiaa!)

Tyyppi Ia supernova



SN 2006X, before and after the Type Ia Supernova Explosion
(Artist Impression)

ESO Press Photo 31b/07 (12 July 2007)

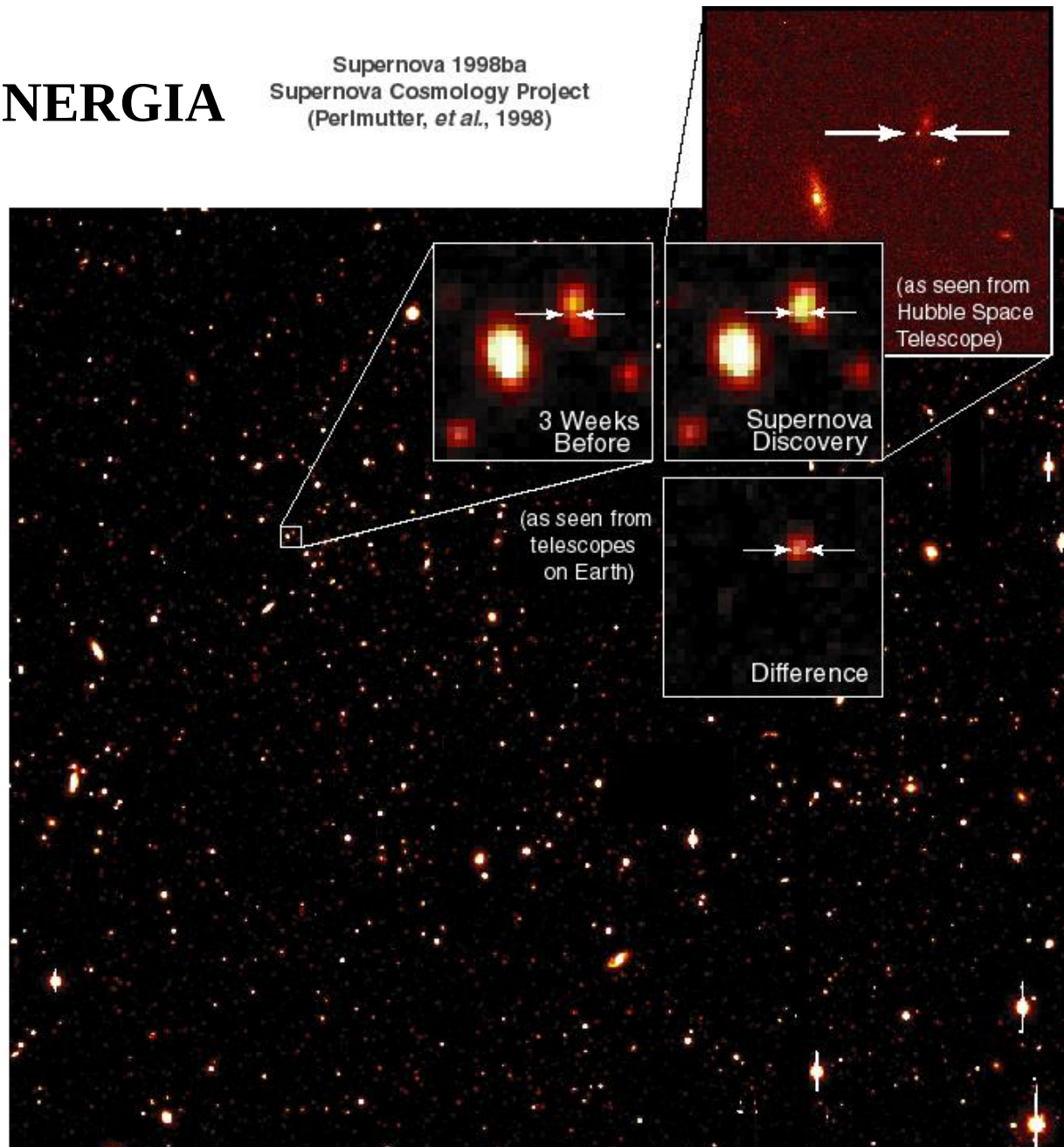
This image is copyright © ESO. It is released in connection with an ESO press release and may be used by the press on the condition that the source is clearly indicated in the caption.



Chandrasekharin raja → standardikynttilä

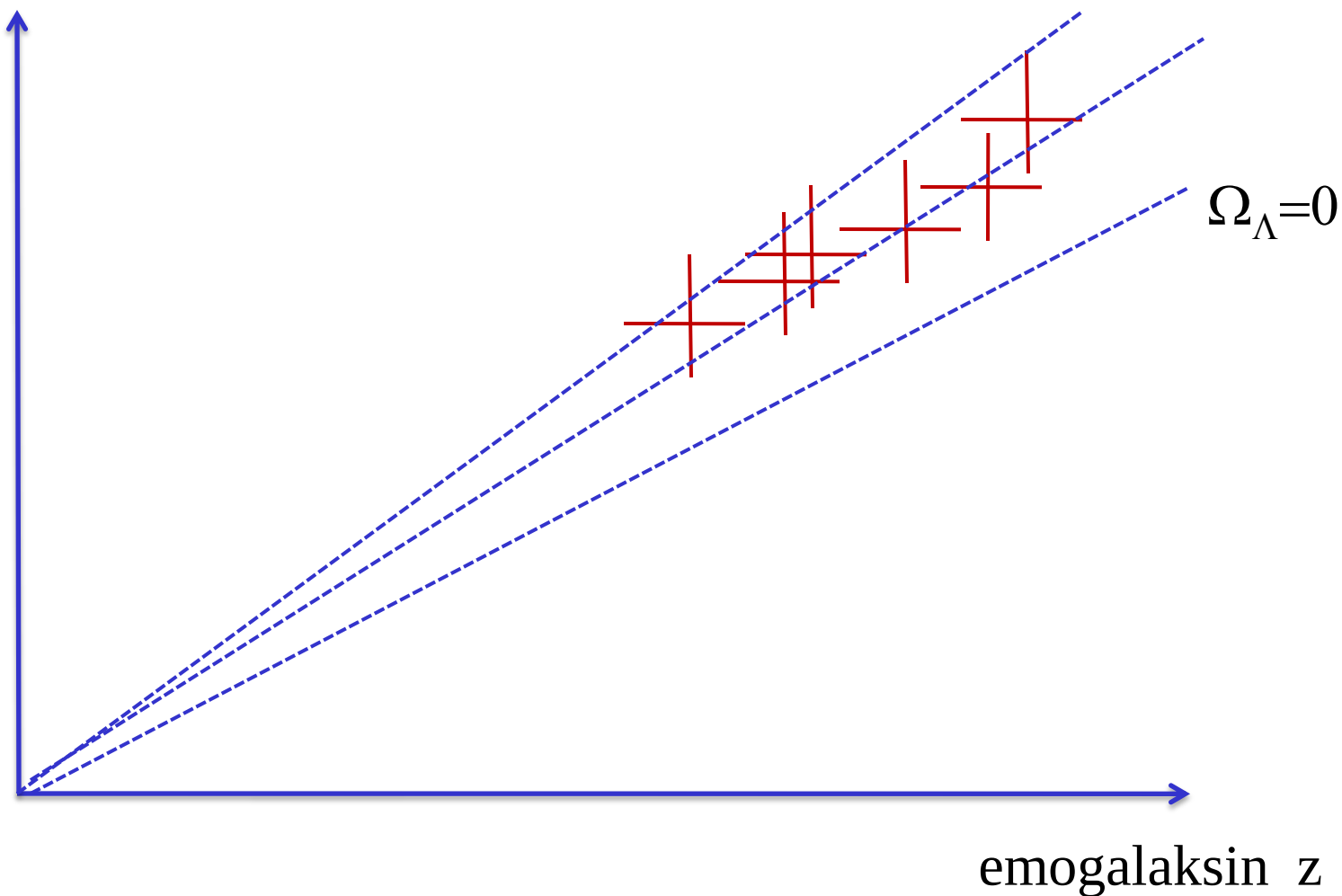
PIMEÄ ENERGIA

Supernova 1998ba
Supernova Cosmology Project
(Perlmutter, *et al.*, 1998)

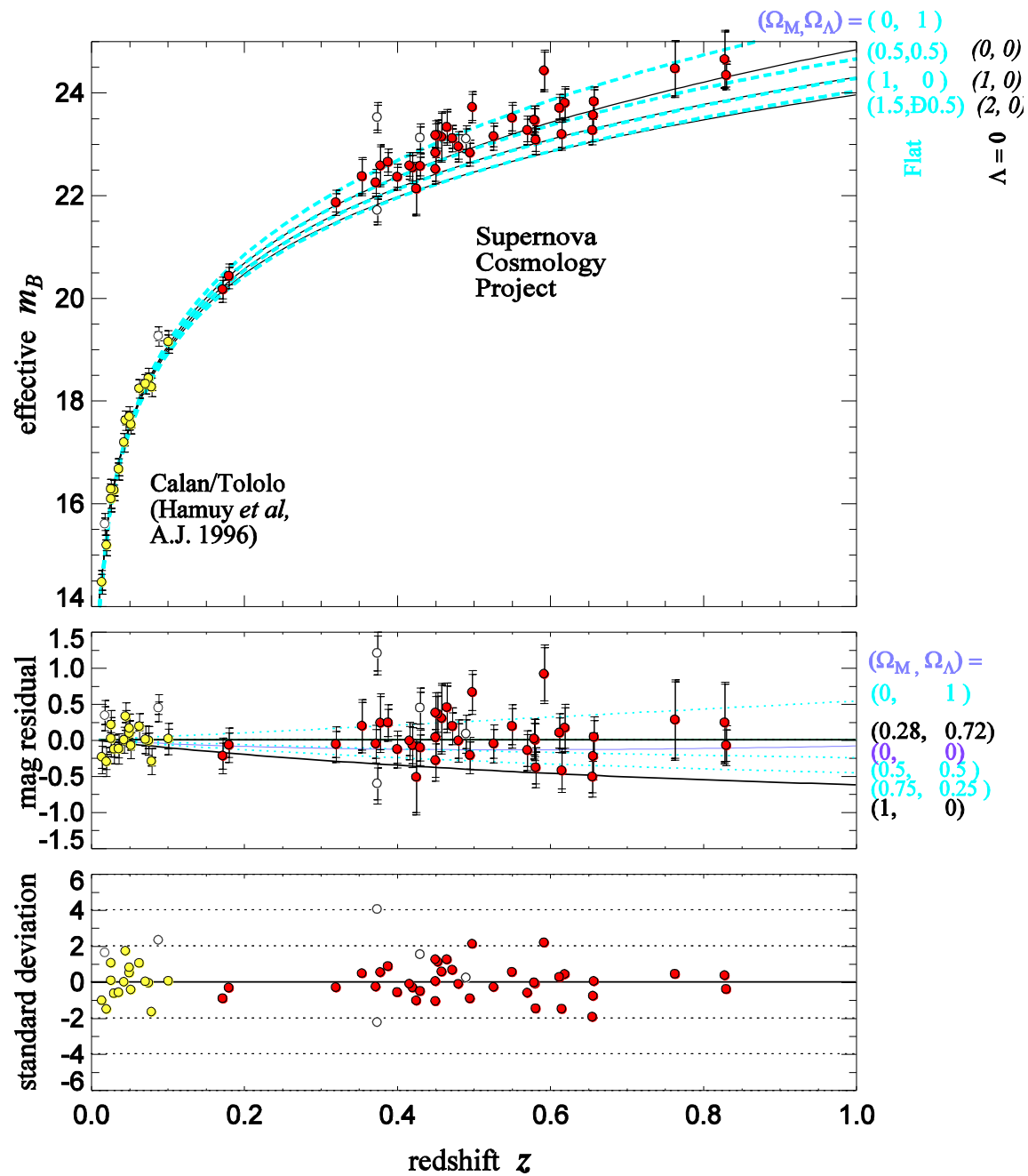


SN kirkkaus d

$$d = [z + f(\Omega_\Lambda, \Omega_m)z^2]/H_0$$

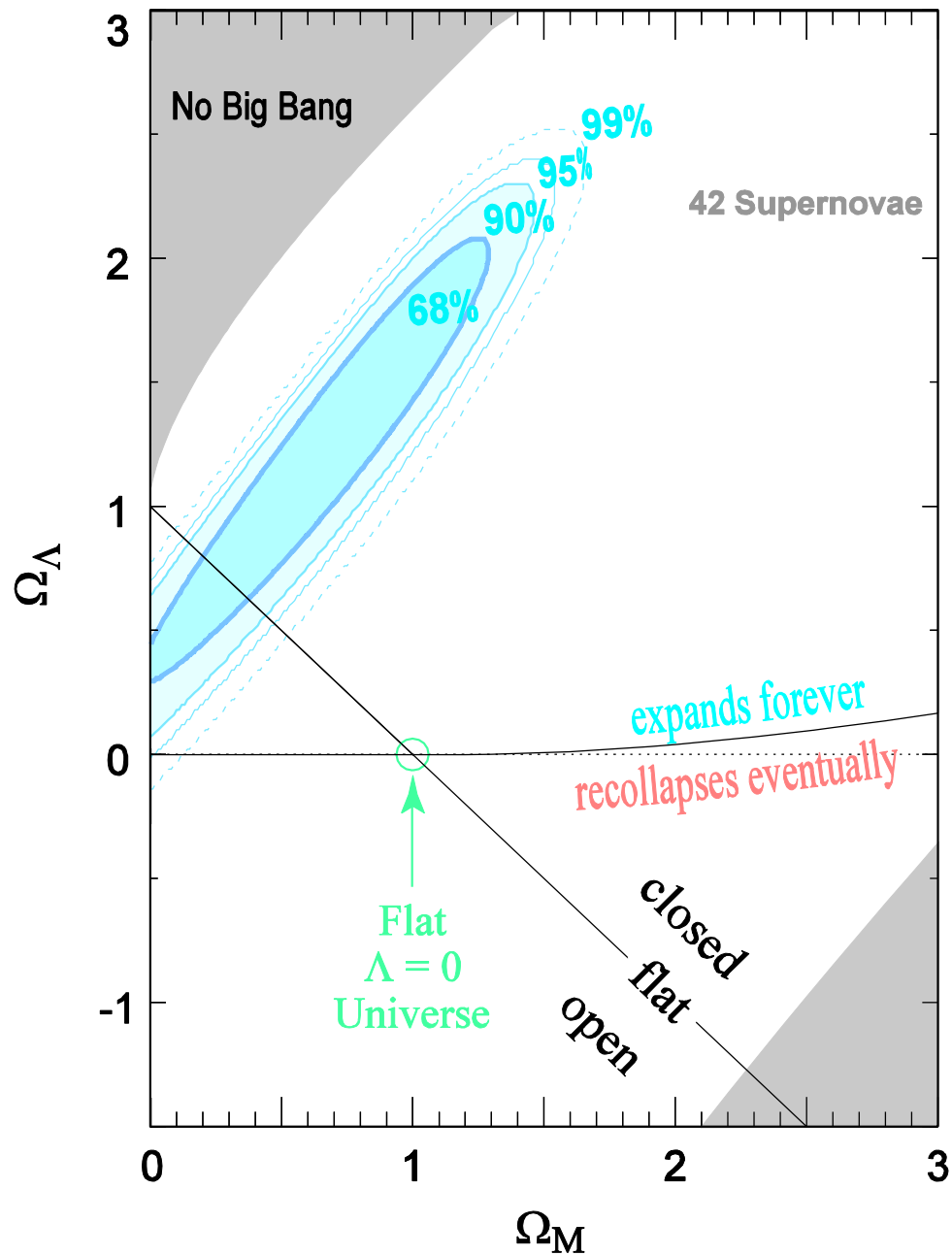


$\Omega = \text{energia/kriittinen energia}$



Perlmutter, *et al.* (1998)

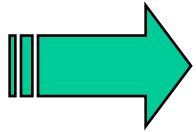
Supernova Cosmology Project
Perlmutter *et al.* (1998)



TEORIAA

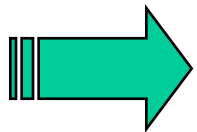
Einsteinin yhtälöt

homogeeninen Friedmann-Robertson-Walker-universumi



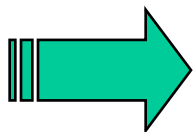
laajenemisnopeus riippuu universumin sisältämästä aineesta ja energiasta

”pöly” (=galaksit, pimeä aine), säteily



hidastuva laajeneminen (gravitaatio attraktiivinen)

tyhjiöenergia

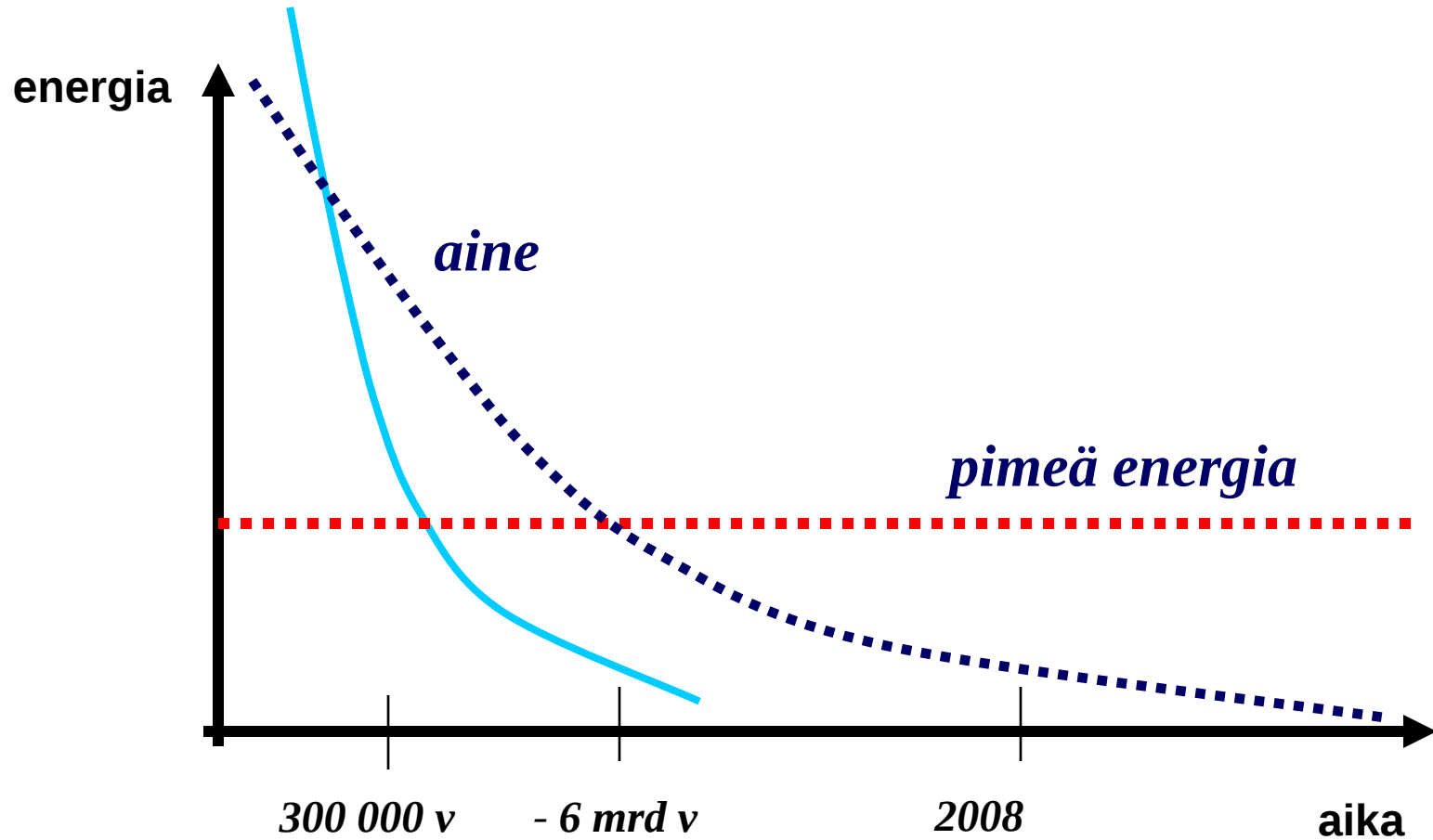


kiihtyvä laajeneminen

supernovahavainnot + FRW-oletus

laajenemisvauhti alkoi kiihtyä n. 6 miljardia vuotta sitten

relativistinen aine = säteily



pimeä energia = teoreettinen ongelma



hiukkasteoriat

- *miksi suuruusluokka $E \sim 10^{-120}$?*
- *miksi juuri nyt?*

Nykykosmologian suurin haaste

Onko pimeä energia varmasti olemassa?

laajenemista ei nähdä – ainoastaan valoa

epähomogeniat → kangastus?

Onko teoria varmasti oikea?

yleinen suhteellisuusteoria väärä?

yleistä suhteellisuusteoriaa pitää laajentaa?

Pitääkö yleistä suhteellisuusteoriaa rukata?

ei yleisin mahdollinen gravitaatioteoria

kaksi malliluokkaa: rumat ja erittäin rumat

- yleistetty gravitaatio*
- kvintessensi*

tieteellinen keskustelu jatkuu kiivaana ...

- *kiitos havaintojen, kosmologia on muuttunut täsmätieteeksi*
- *teoreettinen kehittely: pieni ja suuri kohtaavat alkuräjähdyksessä (mm. säieteoriat)*
- *suurin teoreettinen ongelma: pimeä energia; pimeän aineen suora havainto 10 v skaalassa?*
- *uusia kokeita tulossa: mm Euroopan avaruusjärjestön ESAn Planck-satelliitti 2009 (suomalaiset mukana)*

LISÄTIETOJA

- www.physics.helsinki.fi/~enqvist (*tämä esitys*)
- www.physics.helsinki.fi/~tfo_cosm/ (*Astroparticle physics and cosmology pages*)
- phys45.phys.jyu.fi/~kimmo/cosmophysics/ (*HIPin kosmologiaprojekti*)
- http://www.helsinki.fi/~tfo_cosm/tfo_planck.html (*Planck-sivut*)
- www.physics.helsinki.fi/~hkurkisu/ (*dos. Kurki-Suonio*)