

Mörk materia och det tidiga universum

Joakim Edsjö
edsjo@physto.se
Stockholms Universitet

- Introduktion till kosmologi
- Mörk materia
- Den kosmologiska bakgrundsstrålningen
- Supernovor och universums geometri

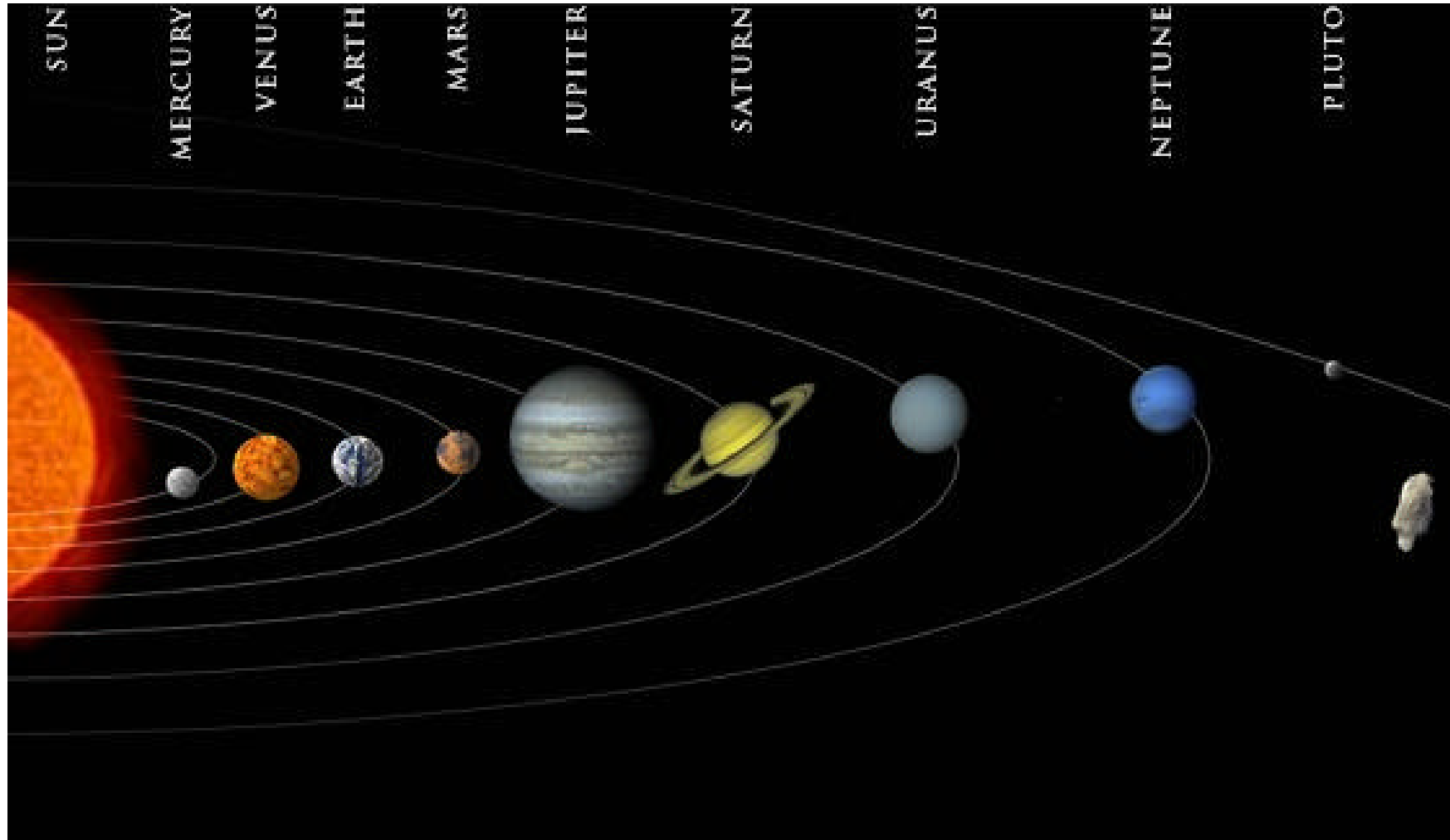
Astropartikelfysik

Från det allra minsta till det allra största



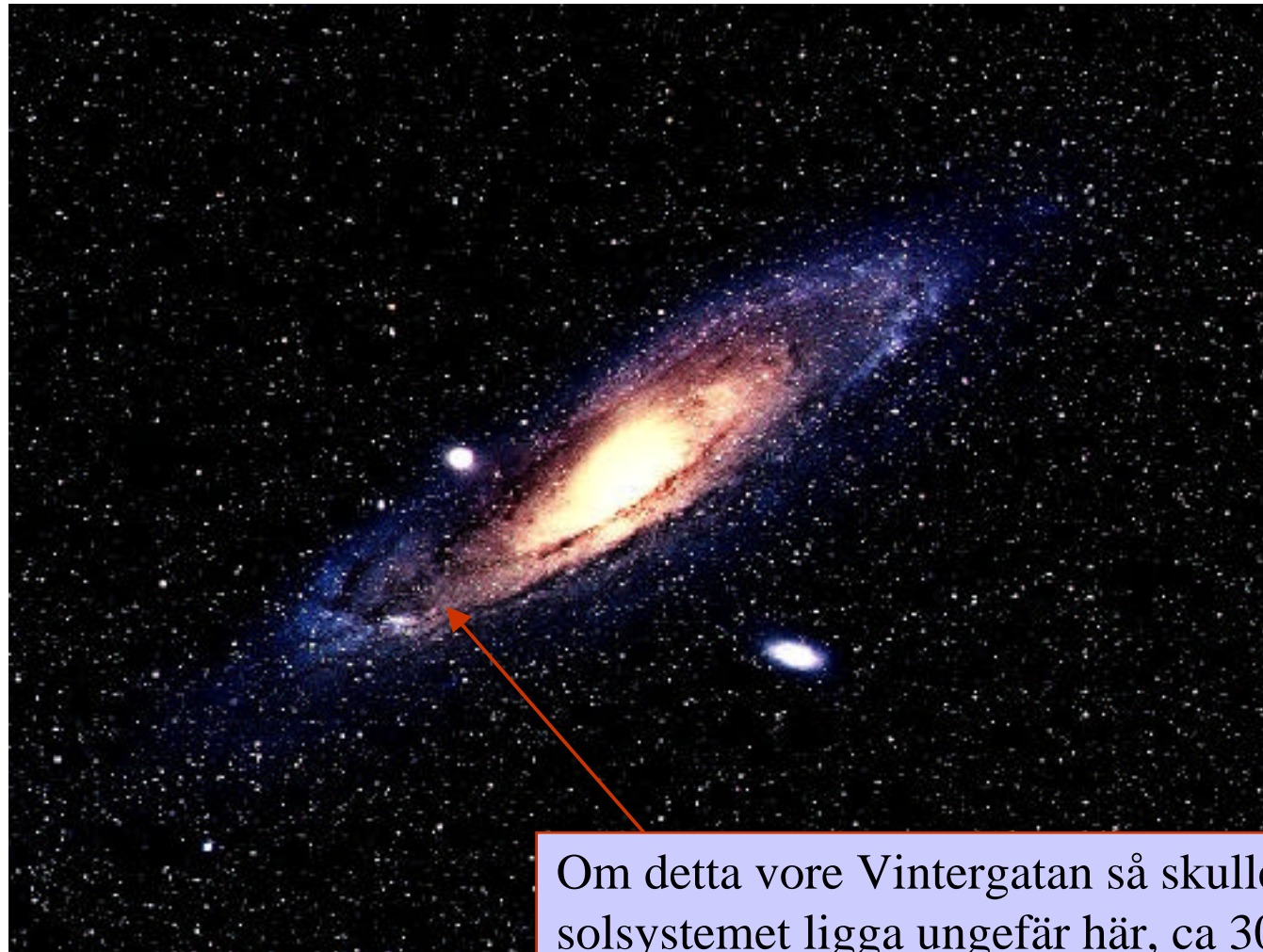
Från <http://www.quarkstothecosmos.org/>

Solsystemet



Från <http://photojournal.jpl.nasa.gov/>

Andromedagalaxen / M31



$$M \approx 10^{12} M_{sol}$$

Vi ser stjärnor
och gas.

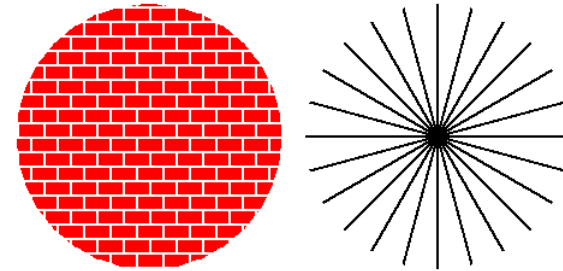
Finns det
något mer?

Om detta vore Vintergatan så skulle
solsystemet ligga ungefär här, ca 30 000
ljusår från centrum.

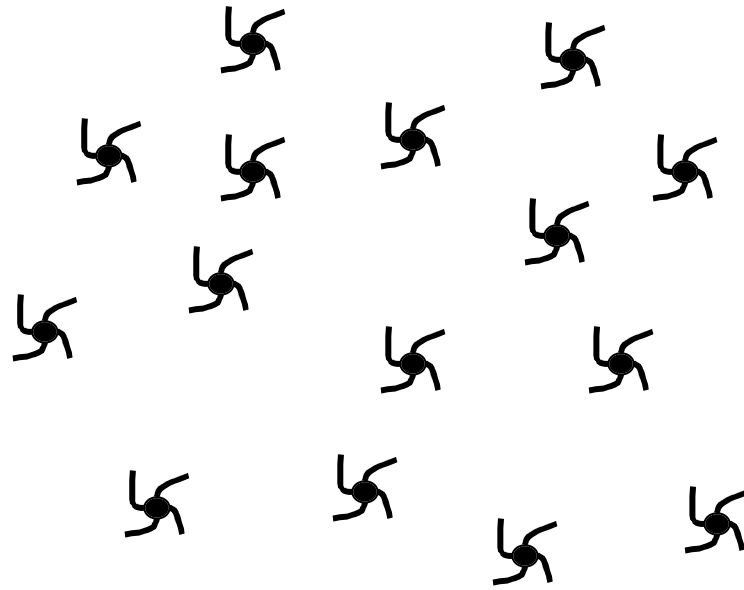
1 ljusår = 3.1×10^6 meter

Den kosmologiska standardmodellen

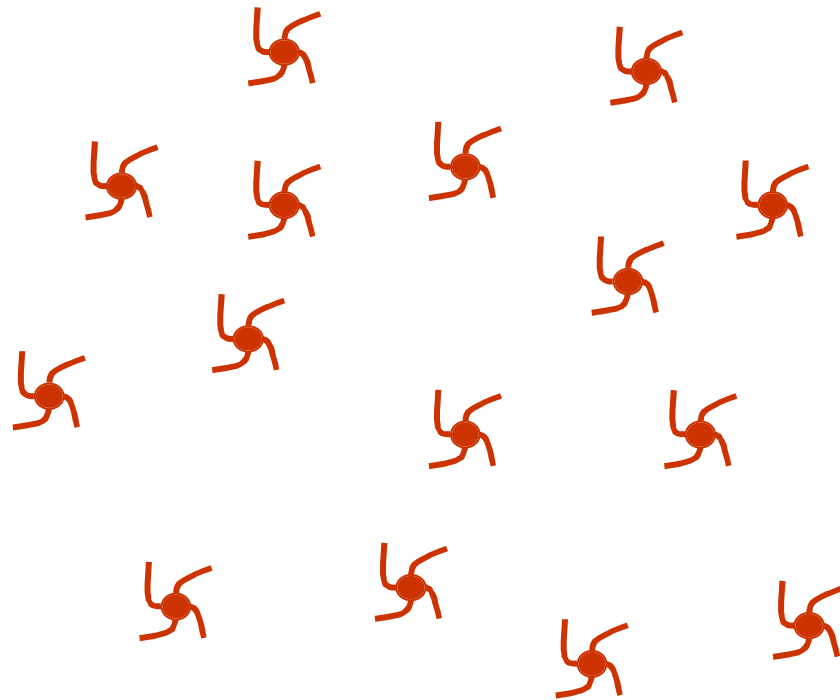
- Universum är
homogent och **isotropt**.
- I begynnelsen var universum
hett och **tätt**
och har efter det expanderat (**Big Bang**).
- Kommer expansionen att fortsätta för alltid?



Universums expansion



Lite senare...

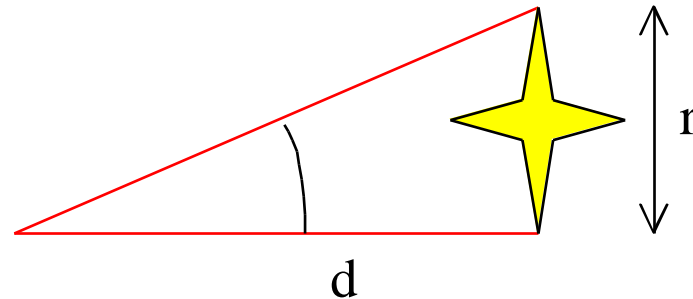


Hur mäter vi avstånd i universum?

- **Med "standardlinjaler"**

Utnyttja känd storlek, r , och uppmätt vinkel, θ :

$$d = \frac{r}{\tan \theta} \approx \frac{r}{\theta}$$



- **Med "standardljus"**

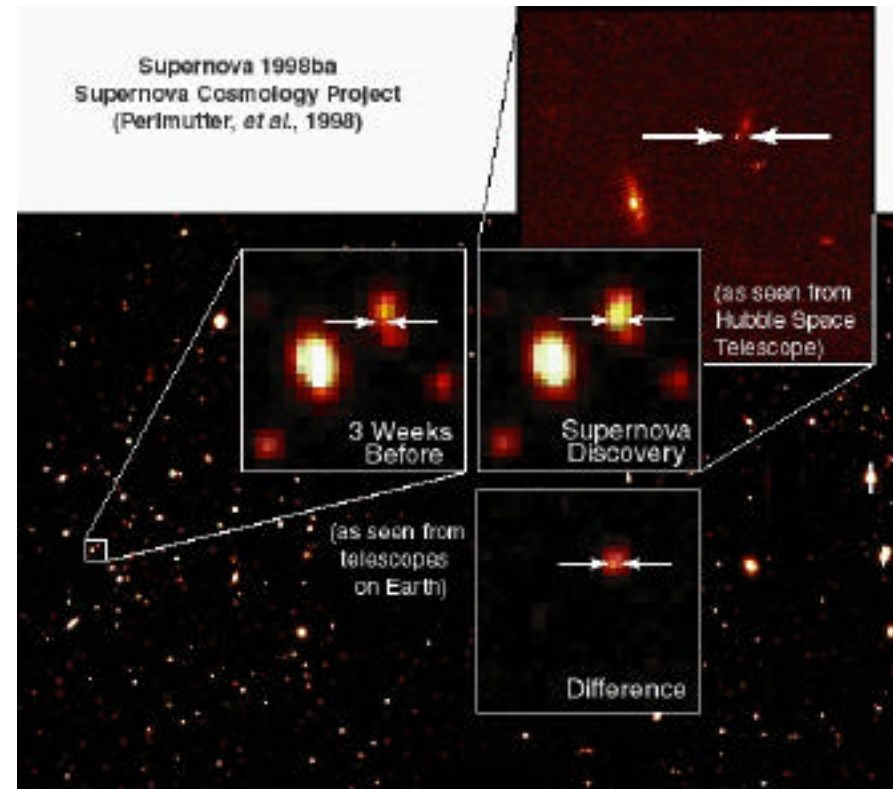
Utnyttja känd ljusstyrka, B , och uppmätt ljusstyrka, b :

$$b = \frac{B}{4\pi d^2}$$

$$d = \sqrt{\frac{B}{4\pi b}}$$

Standardlinjaler och standardljus

- **Standardlinjaler**
 - elliptiska galaxer
 - nebulosor
- **Standardljus**
 - Cepheid-stjärnor
 - spiralgalaxer
 - Supernovor av typ Ia



Universums expansion

Skalfaktorn och Hubbleparametern

- Inför en *skalfaktor*, a , som anger universums storlek.

- Universum expanderar

$$\frac{da}{dt} > 0$$

- Inför *Hubbleparametern*, H

$$H = \frac{\frac{da}{dt}}{a} \quad 71 \pm 6 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$$

- Ofta inför man den *reducerade Hubbleparametern*, h

$$h = \frac{H}{100 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}} \quad 0.71 \pm 0.06$$

$$1 \text{ Mpc} = 3.3 \times 10^6 \text{ ljusår} = 3.1 \times 10^{22} \text{ meter}$$

Universums expansion

Hur ändras densiteten när universum expanderar?

- Vi har tre huvudtyper av ”*energi*”

– **Materia**

$$\rho_{\text{materia}} \sim \frac{1}{a(t)^3}$$

– **Strålning**

$$\rho_{\text{strålning}} \sim \frac{1}{a(t)^4}$$

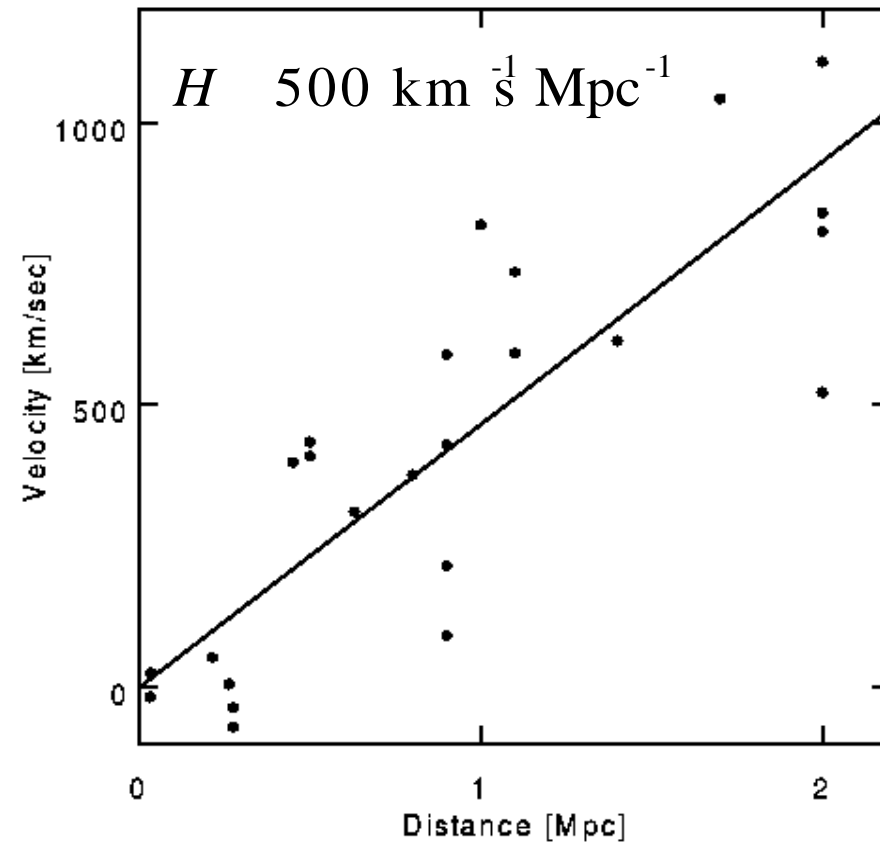
– **Vakuumentergi**

$$\rho_{\text{vakuumentergi}} \sim \text{konstant}$$

$$a(t) = \text{skalfaktorn}$$

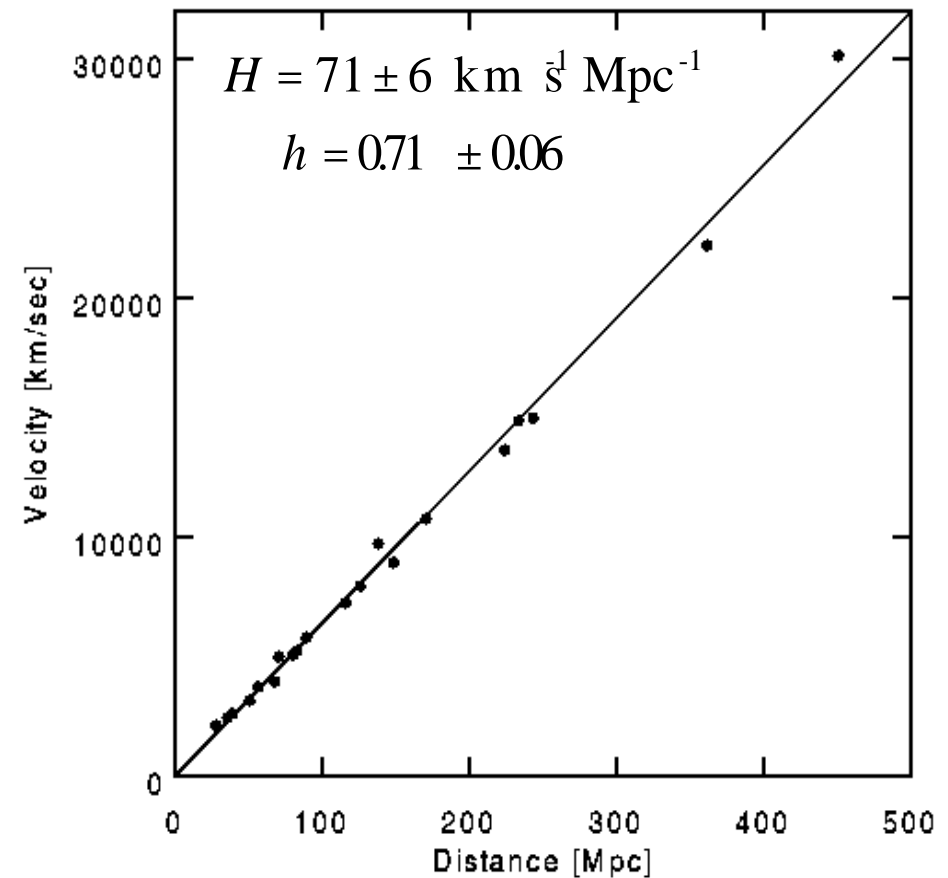
Edwin Hubbles observationer 1929

Hubbles lag: $v = H d$; $H = \frac{da / dt}{a}$



Hubble-diagram med Hubble-teleskopet

Hubbles lag: $v = H d$; $H = \frac{da/dt}{a}$



Einsteins ekvationer

$$G_{\mu\nu} = g_{\mu\nu} + 8\pi GT_{\mu\nu}$$



Rummets geometri

- krökt, plant, ...

Kosmologisk konstant

- vakuumenergi

Energimomenttensor

- energi
- materia
- strålning

Universums totala energitäthet kan skrivas

$$\rho_{tot} = \rho_{materia} + \rho_{vakuum}$$

Universums geometri

Inför den kritiska densiteten

$$\rho_{krit}$$

Då $\rho_{tot} = \rho_{krit}$ är universums geometri plan.

Definiera nu

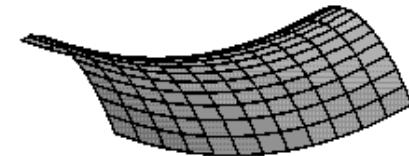
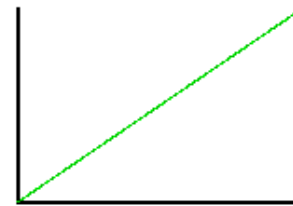
$$= \frac{\rho}{\rho_{krit}}$$

$$= \text{materia} + \text{vakuum}$$

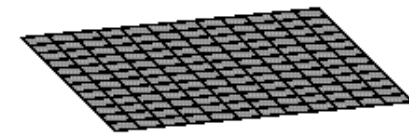
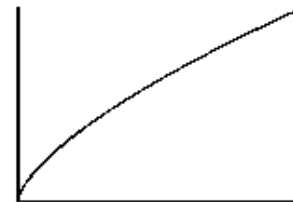
$$= m +$$

Universums storlek om $\Omega = 0$

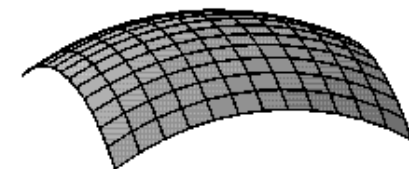
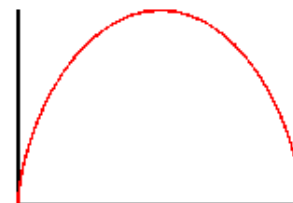
2D-analogi



öppet

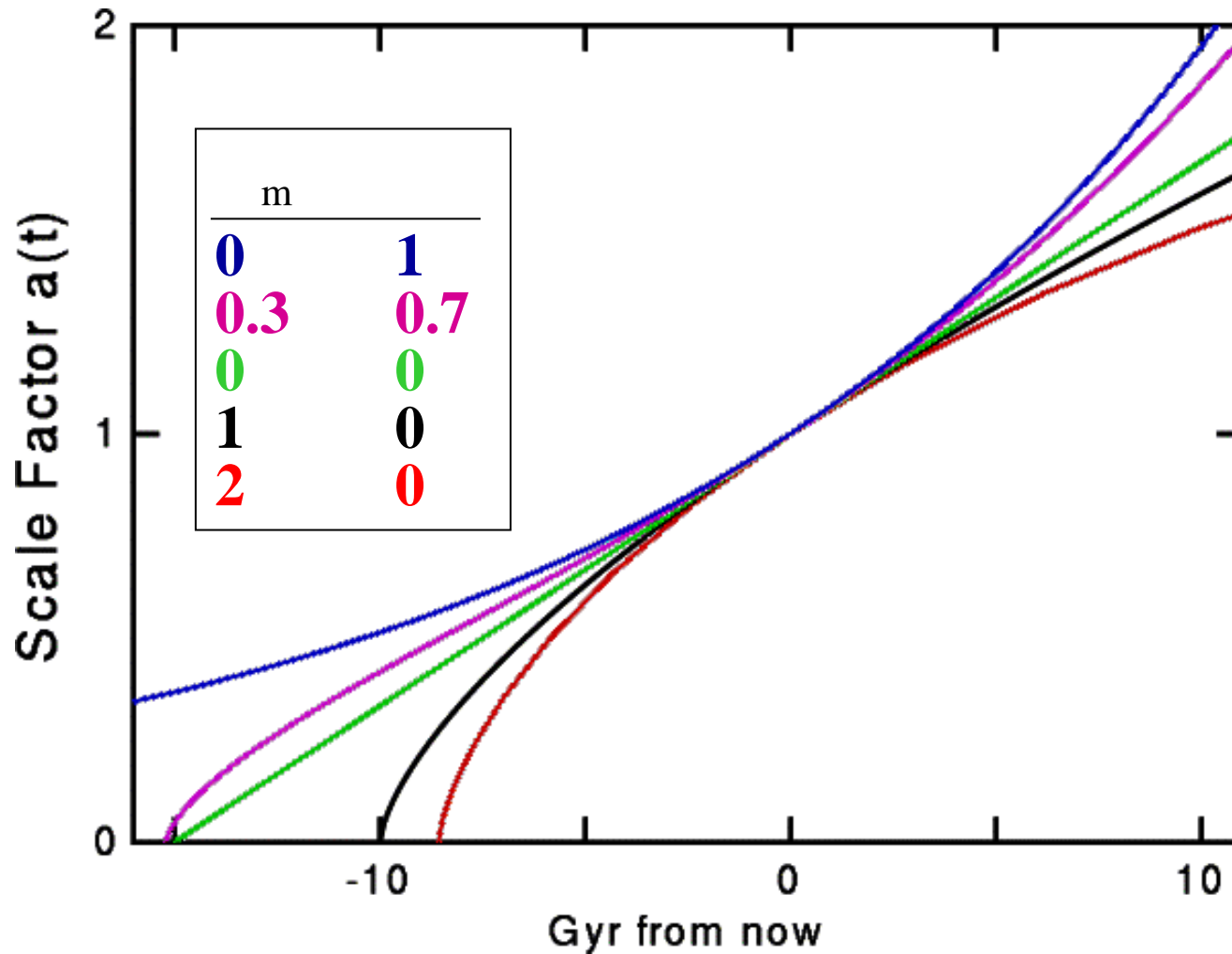


plant



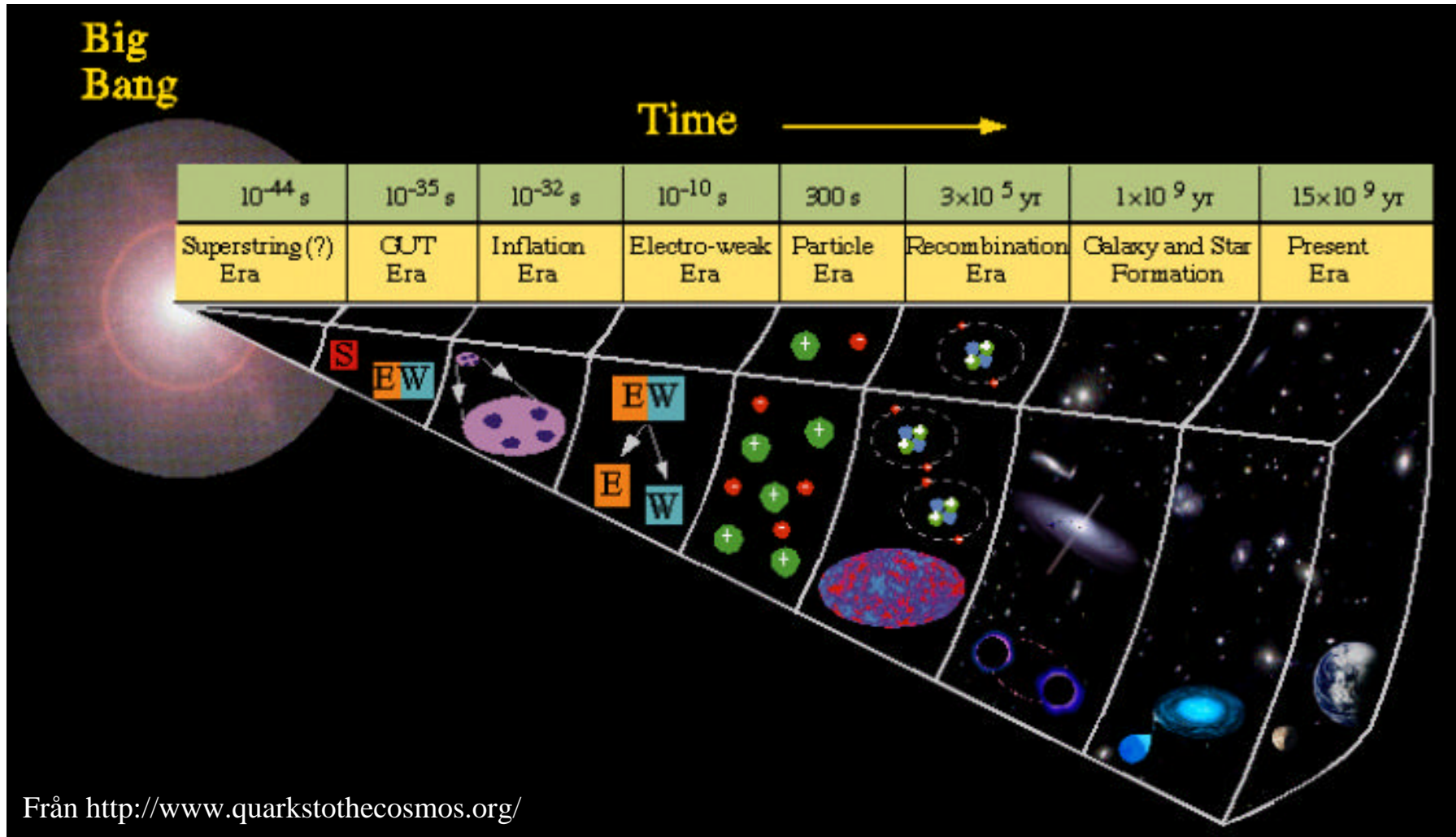
slutet

Universums storlek med $\Omega_{\Lambda} \neq 0$



Från <http://www.astro.ucla.edu/~wright/cosmolog.htm>

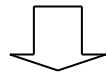
Universums utveckling



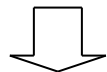
Från <http://www.quarkstothecosmos.org/>

Big Bang Nukleosyntes

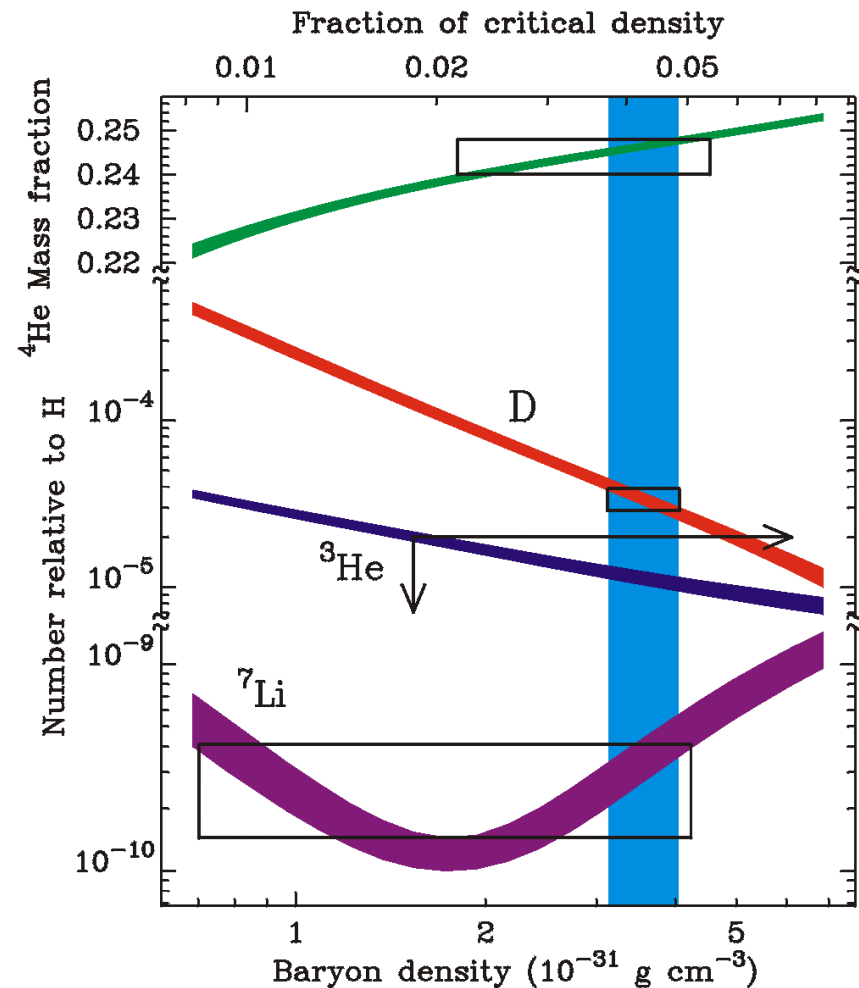
- Lätta ämnen upp till ${}^7\text{Li}$ produceras i Big Bang.
- Kärnreaktionerna är kända



- Mängden av de lätta ämnena i universum idag kan beräknas
- Jämför med observationer

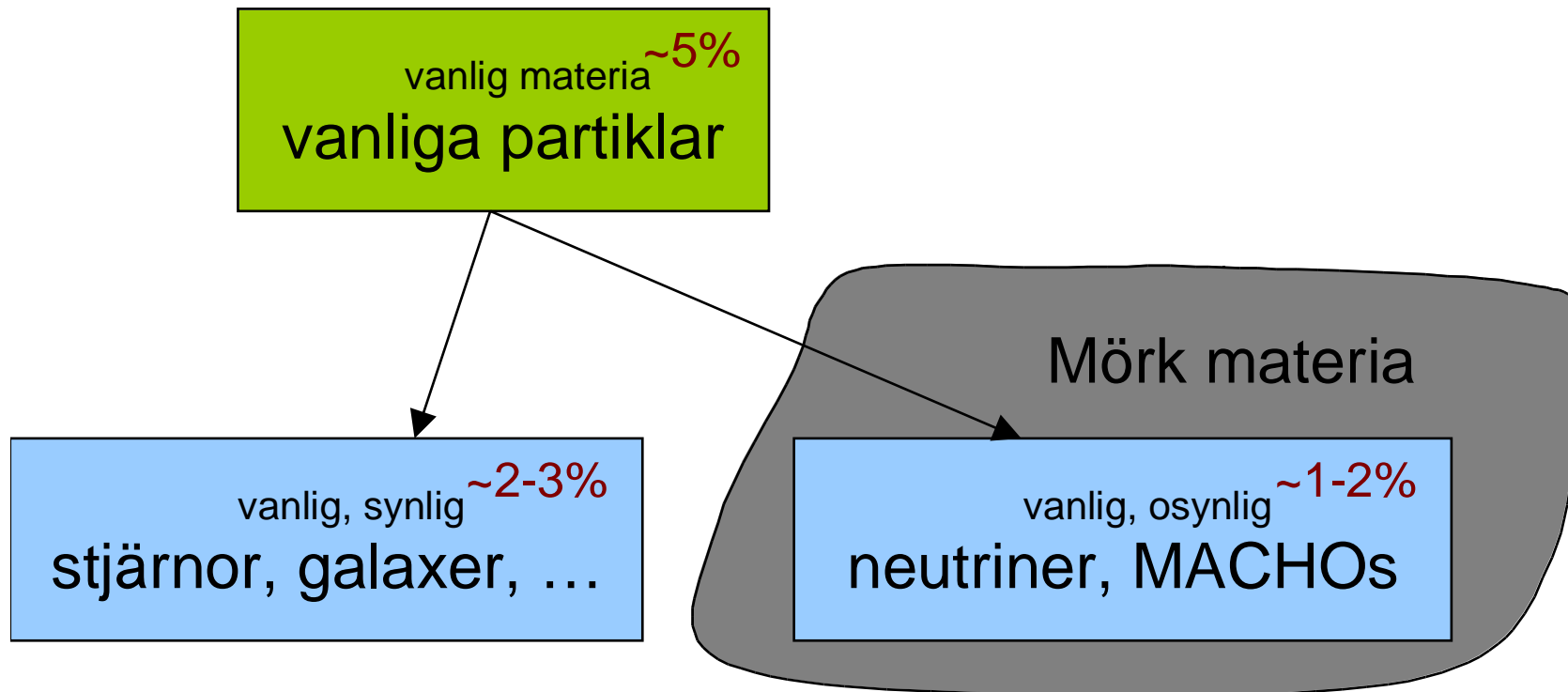


$$baryon h^2 = 0.0190 \pm 0.0018$$



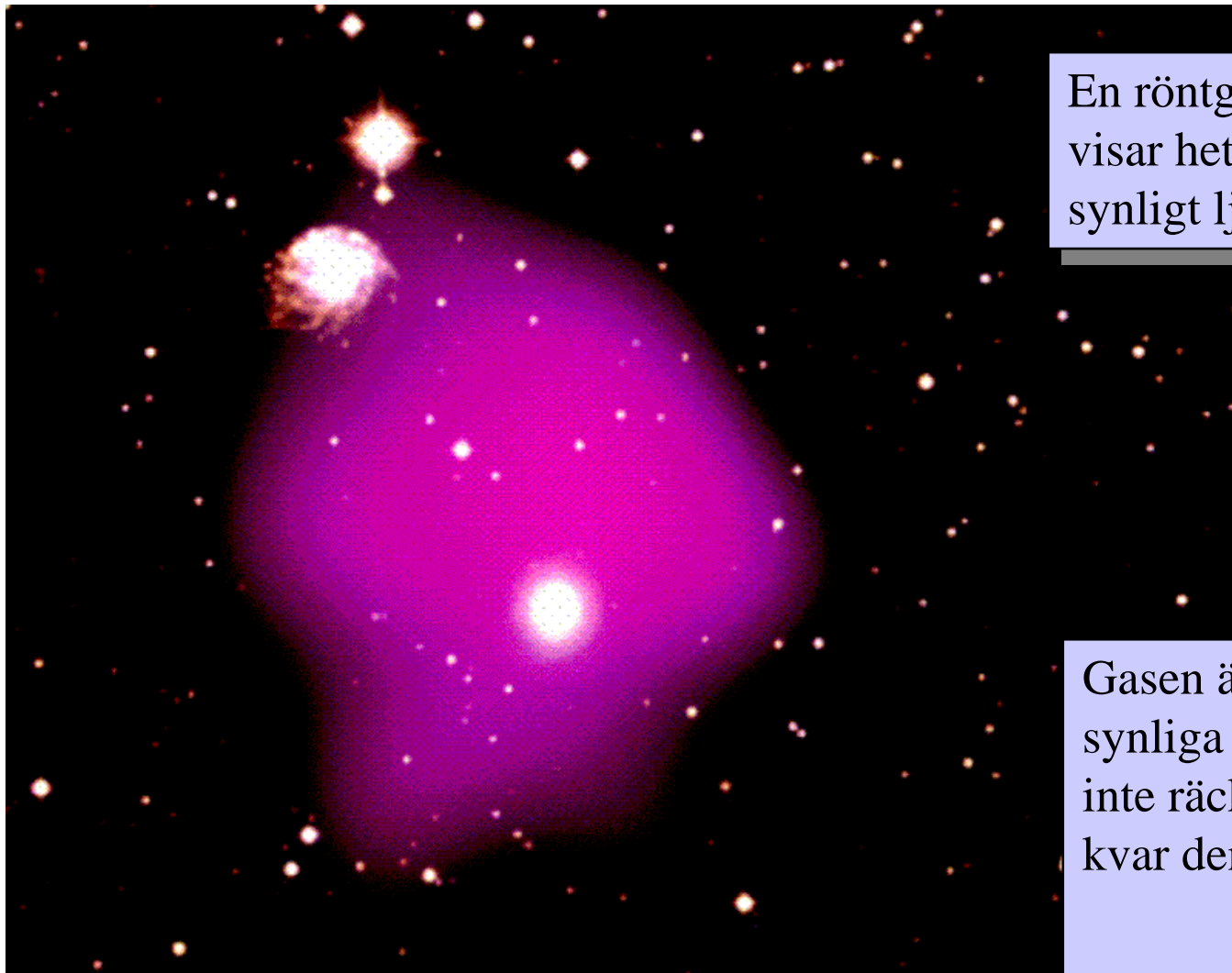
Energibalans för universum

Hittills har vi



Mörk materia

Röntgenstrålning från het gas i en galaxhop



En röntgenbild (**violett**) som visar het gas ovanpå en bild i synligt ljus.

Gasen är så het att den synliga massan i galaxhopen inte räcker till för att hålla kvar den!

Mörk materia!

Mörk materia Gravitationslinser

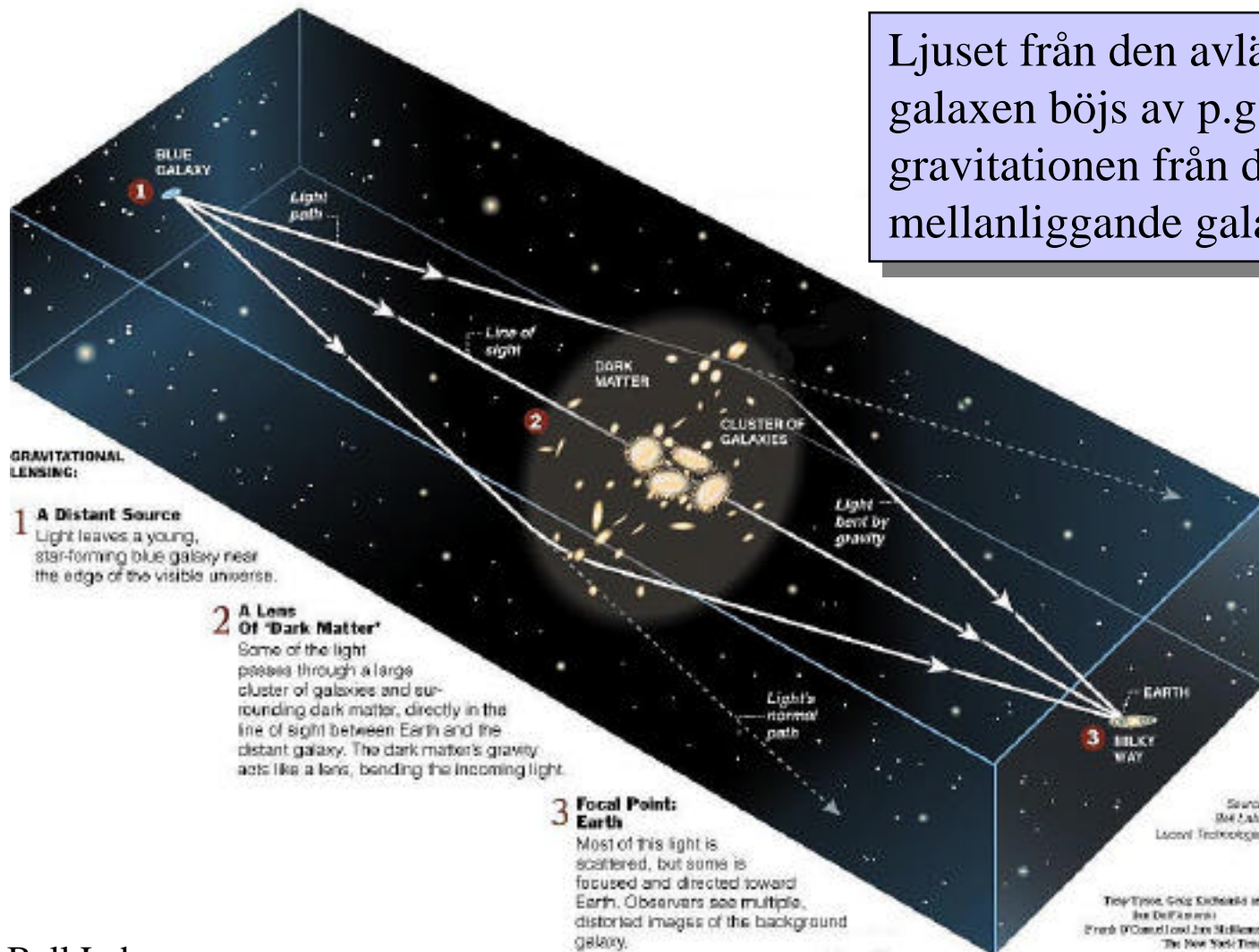
- Lagg märke till de blå bågarna.
- De är en avlägsen galax vars ljus bryts av galaxhopen i förgrunden!



Mörk materia

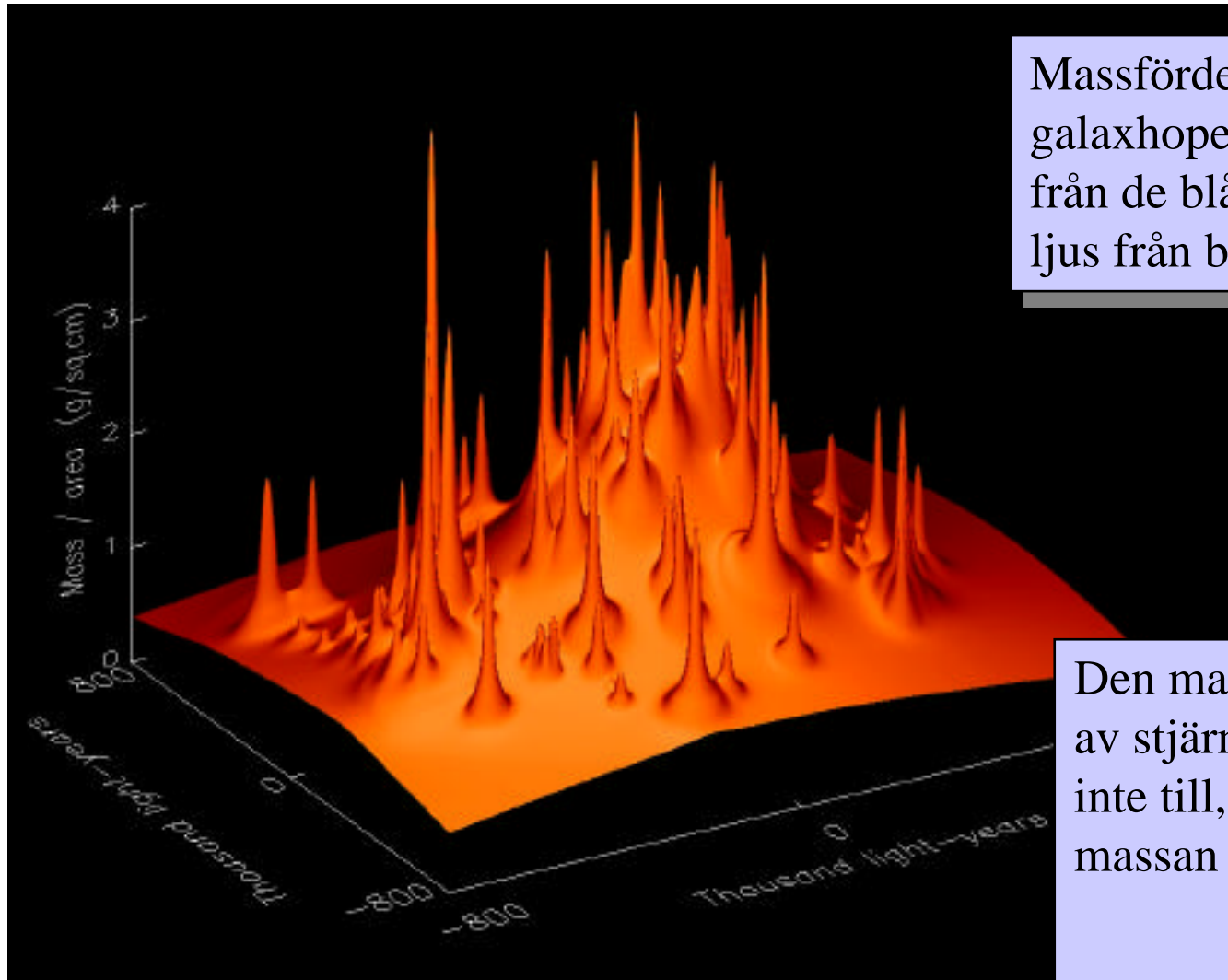
Principen för gravitationslinser

Ljuset från den avlägsna galaxen böjs av p.g.a. gravitationen från den mellanliggande galaxhopen.



Mörk materia - gravitationslinser

Rekonstruktion av galaxhopens massfördelning



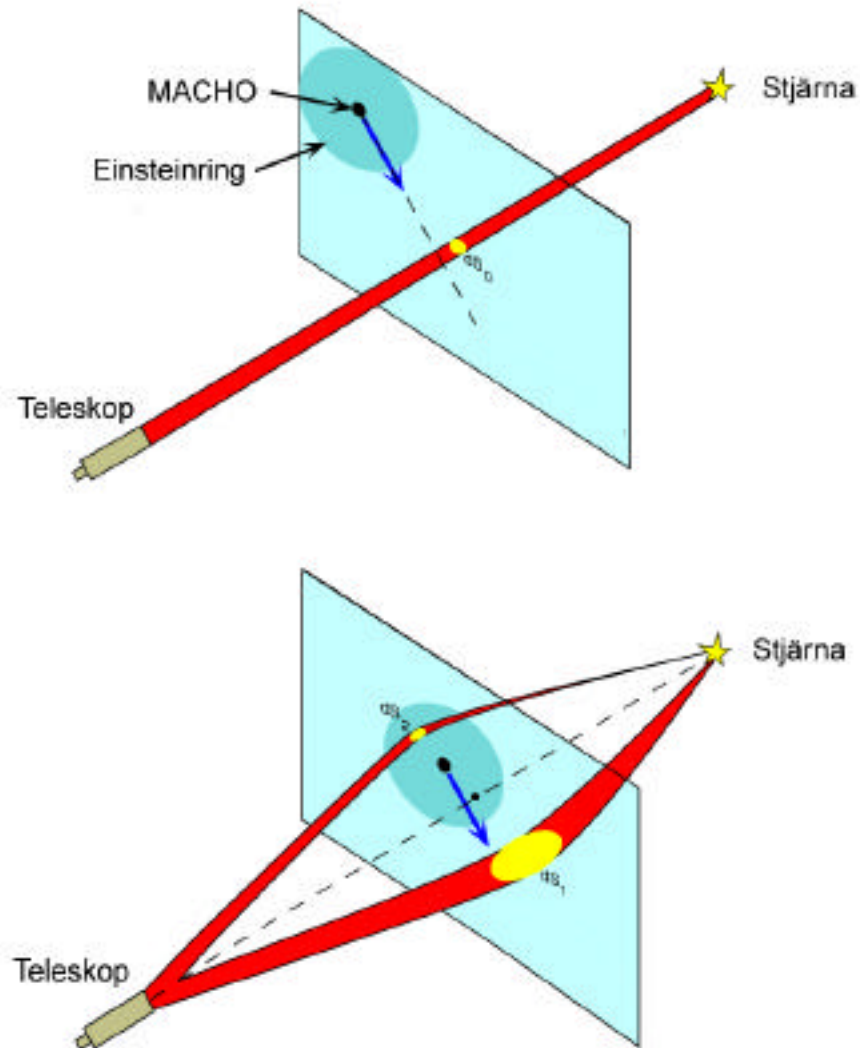
Massfördelningen hos galaxhopen är rekonstruerad från de blå bågarna som alla är ljus från bakgrundsgalaxen.

Den massa som syns i form av stjärnor och gas räcker inte till, den rekonstruerade massan är mycket större!

Mörk materia!

Mörk materia

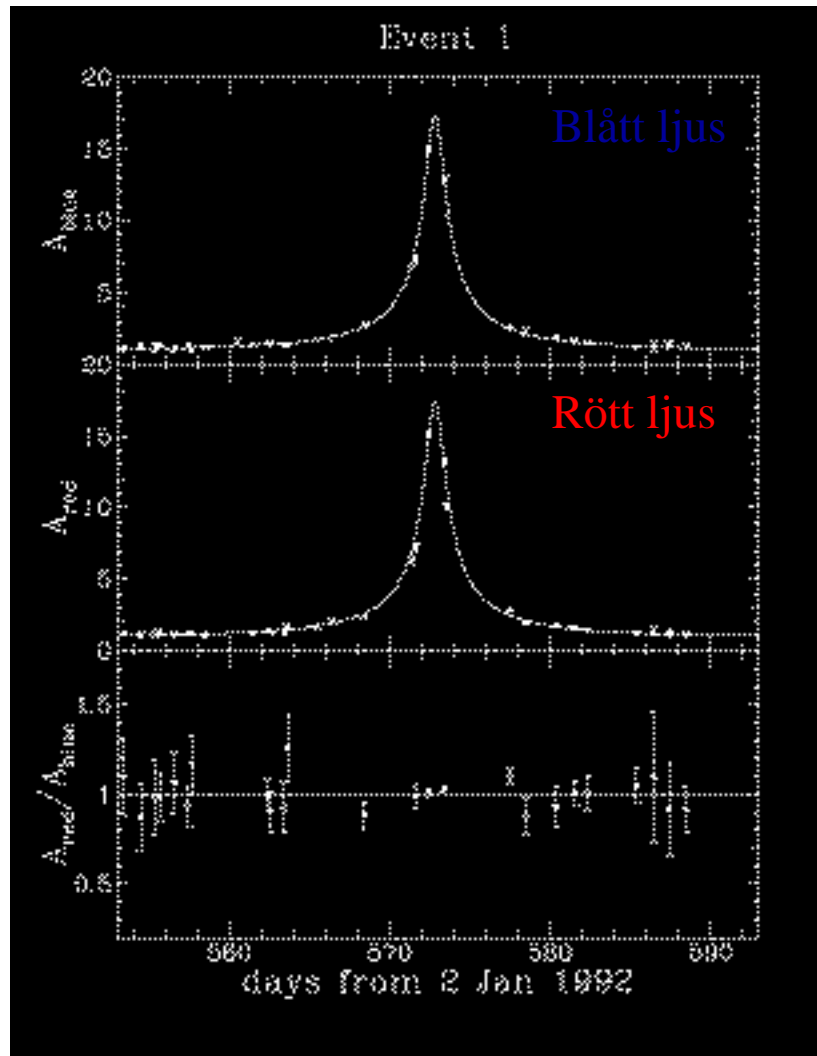
Massive Compact Halo Objects – MACHOs



- När en himlakropp (MACHO) passerar nära siktlinjen till en stjärna böjs ljuset av p.g.a. gravitationen.
- MACHOn fungerar ungefär som en lins, en *gravitationslins*!

Mörk materia

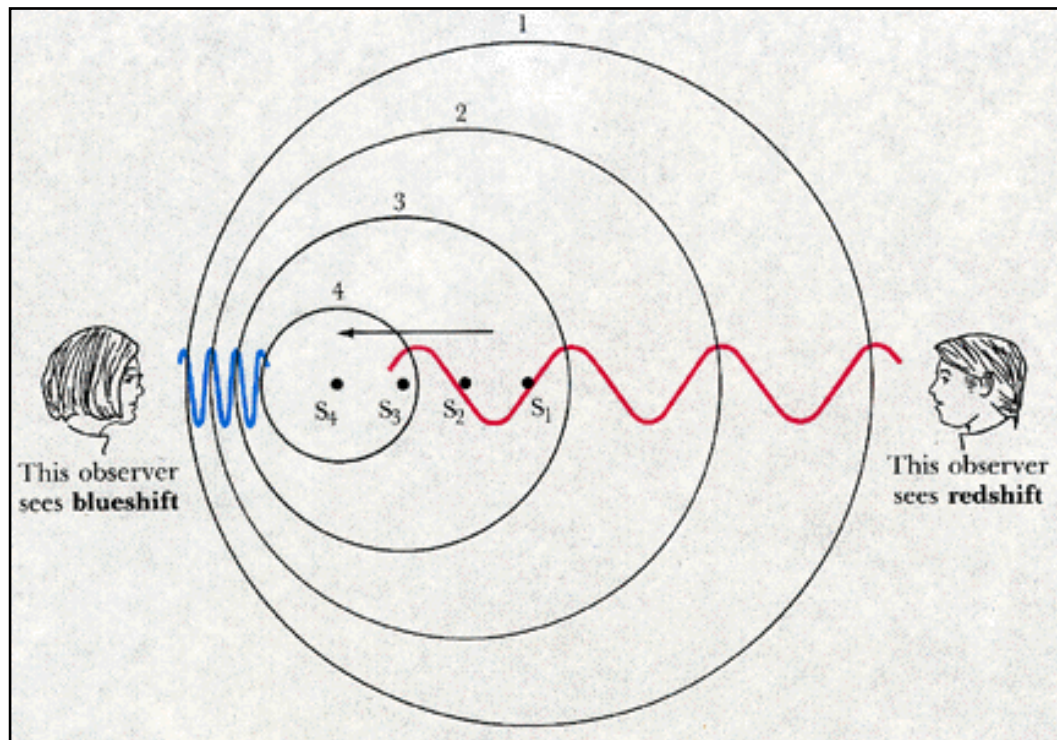
Massive Compact Halo Objects – MACHOs



- Exempel på en stjärna vars ljus har förstärkts av en förbipasserande MACHO.
- MACHO och EROS uppskattar att 10-30% av den mörka materian i vår galax kan utgöras av MACHOs.

Dopplereffekten

- En ljuskälla som rör sig bort från oss, ser **rödare** ut.
- En ljuskälla som rör sig mot oss, ser **blåare** ut.
- Detta kan vi utnyttja för att mäta hastigheten på stjärnor, galaxer m.m.

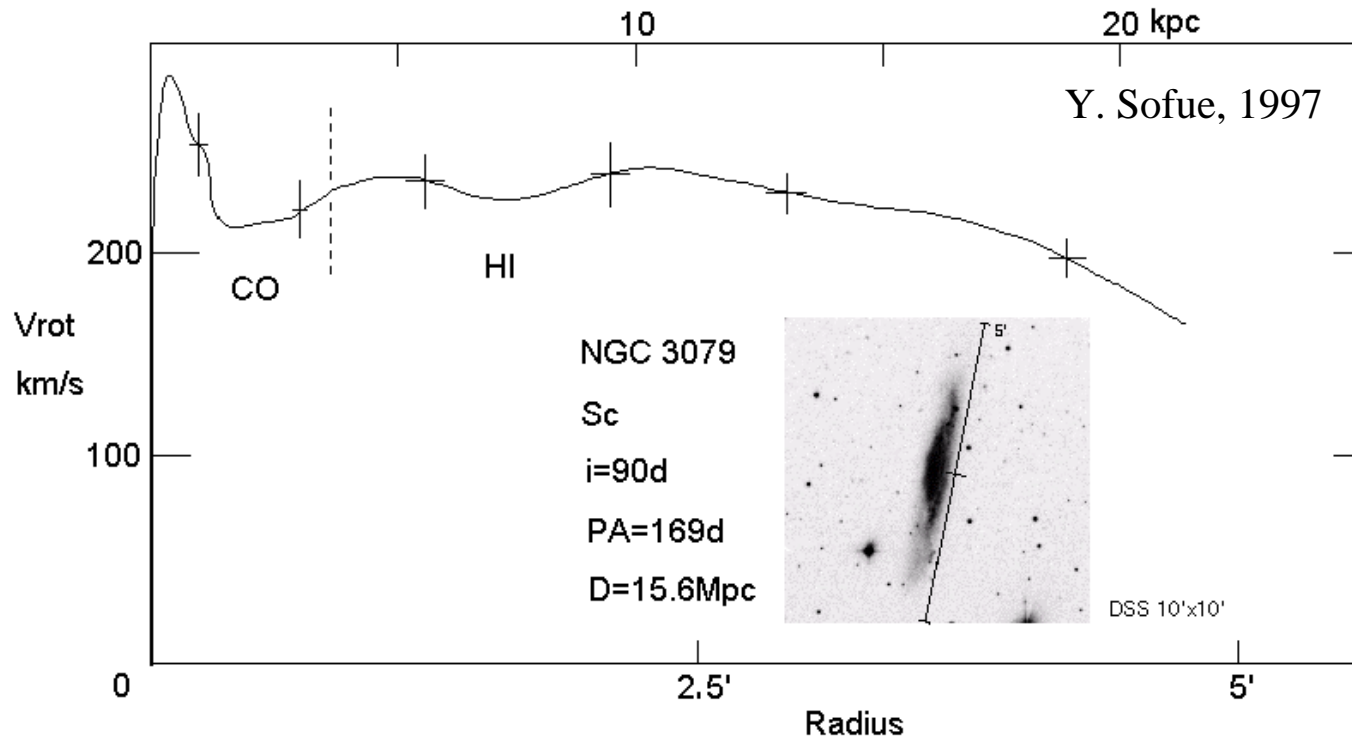


Rödförskjutning

$$z = \frac{\lambda_{\text{observerad}} - \lambda_{\text{utsänd}}}{\lambda_{\text{utsänd}}}$$
$$z \approx \frac{v_r}{c} \quad (\text{små } v_r)$$

Mörk materia

Galaxers rotationskurvor



Centripetalkraft: $F_c = \frac{mv^2(r)}{r}$

Gravitationskraft: $F_g = G_N \frac{M(r)m}{r^2}$

$F_c = F_g$ & $M(r) = M_{\text{synlig}}$

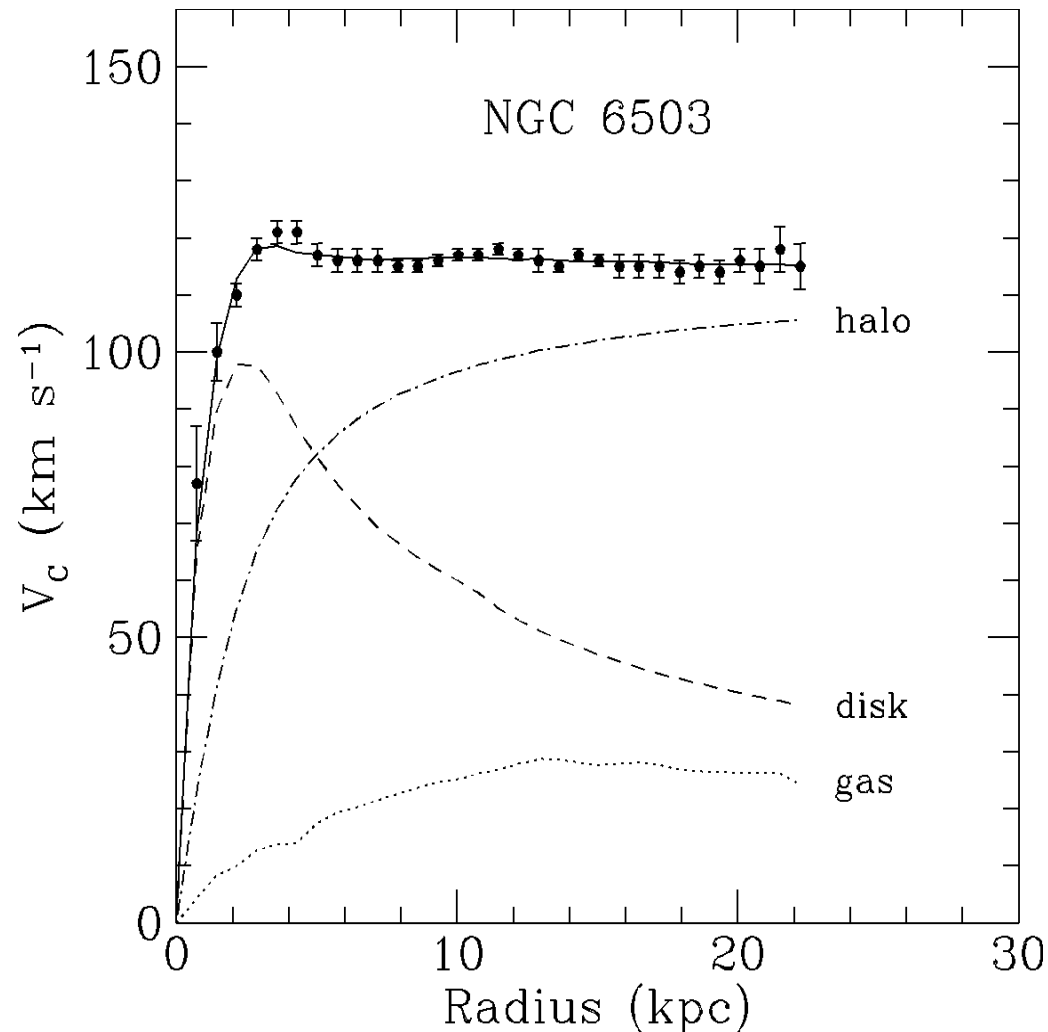
$$v(r) = \sqrt{\frac{G_N M_{\text{synlig}}}{r}}$$

Men rotationskurvorna är ju plana!

Mörk materia!

Mörk materia

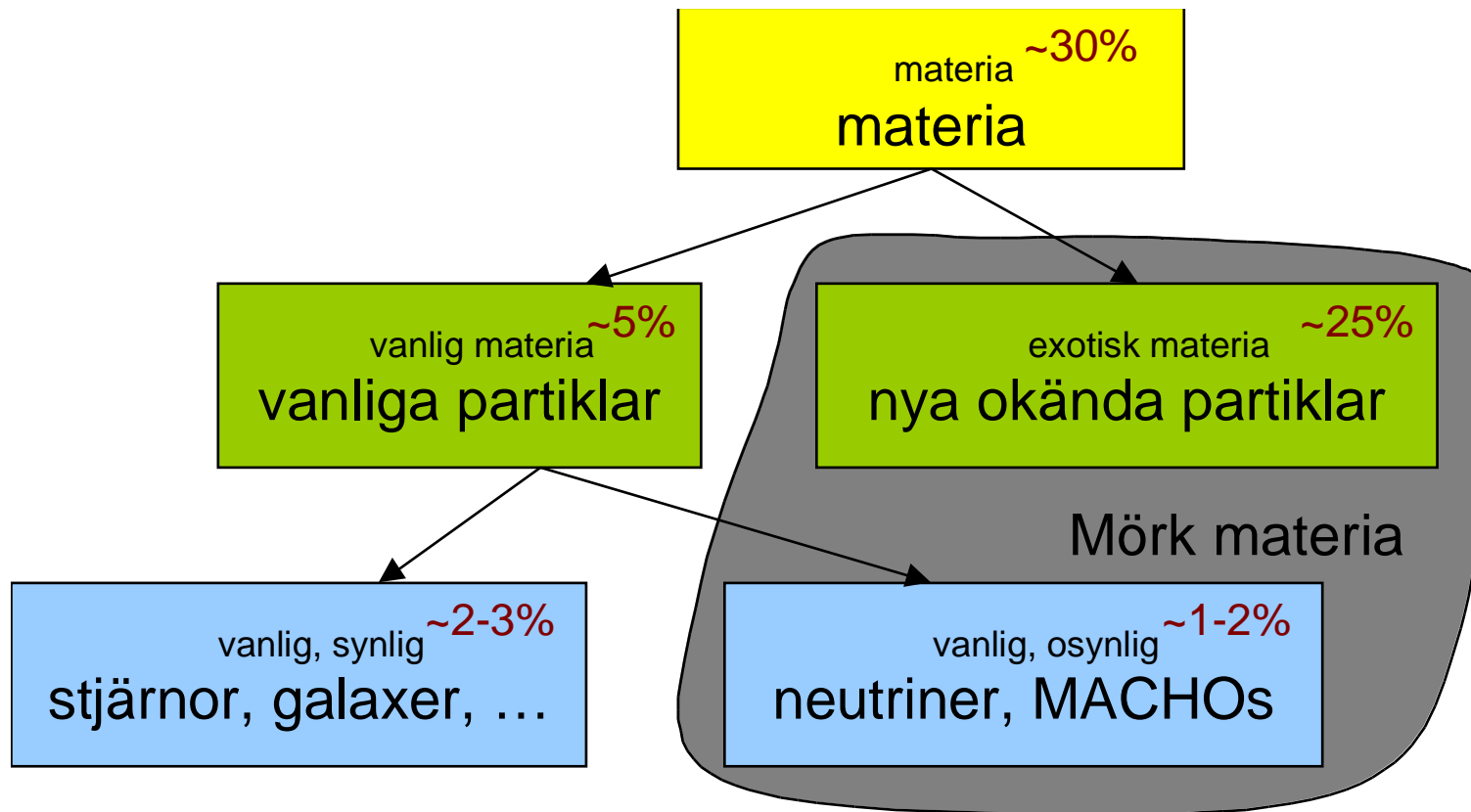
Galaxers beståndsdelar och rotationskurvor



Vi behöver både den synliga materian och den mörka halon för att förklara rotationskurvorna!

Energibalans för universum

Hittills har vi



Kosmisk bakgrundsstrålning

Kort historik

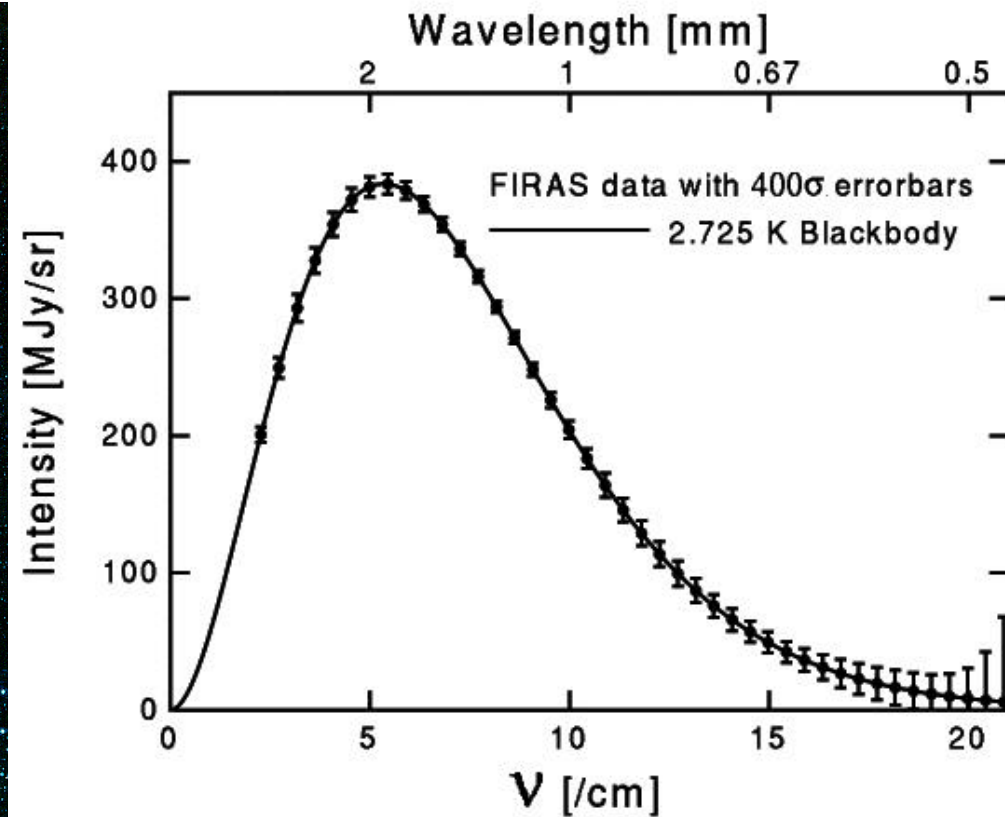
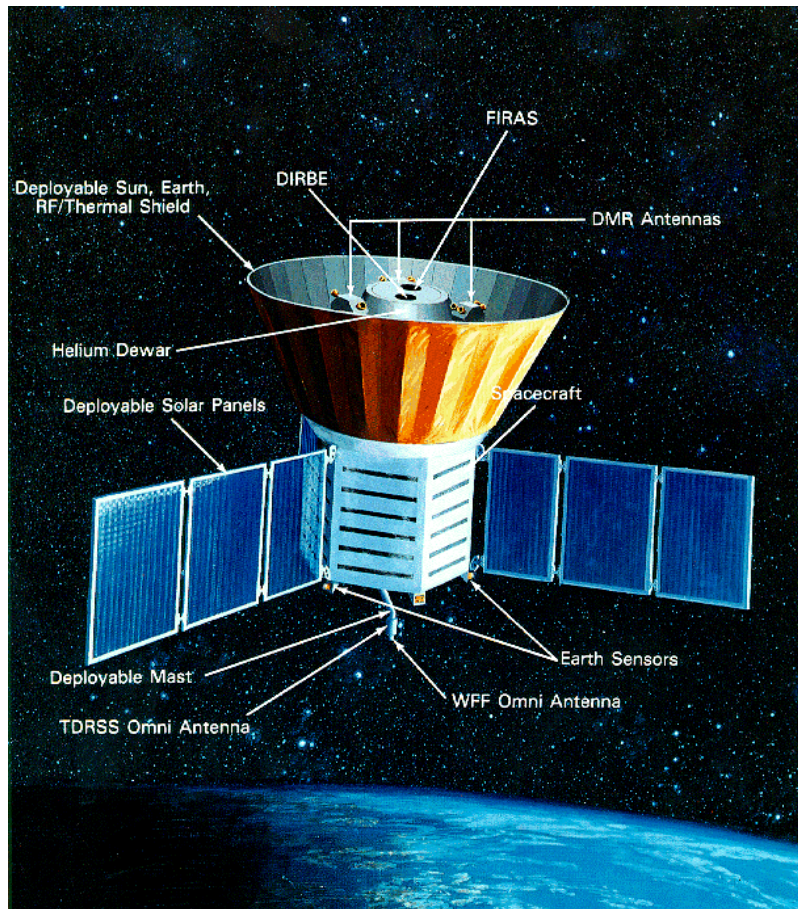


Arno Penzias and Robert
Wilson, Nobelpris 1978

- Gamow förutsåg bakgrundsstrålningen 1946 (dock med delvis felaktiga antaganden).
- Penzias och Wilson upptäckte den 1965. Fick nobelpris 1978.
- Dicke, Peebles, Roll och Wilkinson förklarar Penzias och Wilsons mätningar 1965.

Kosmisk bakgrundsstrålning – svartkroppsstrålning

COBE



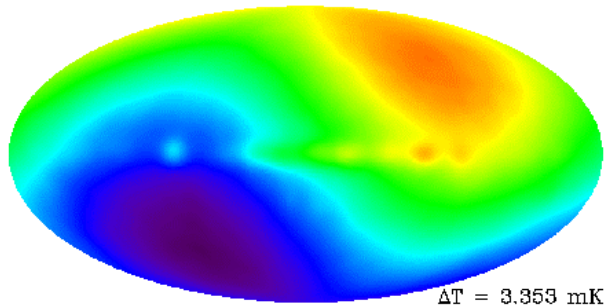
Från <http://space.gsfc.nasa.gov/astro/cobe>

Från <http://www.astro.ucla.edu/~wright/cosmolog.htm>

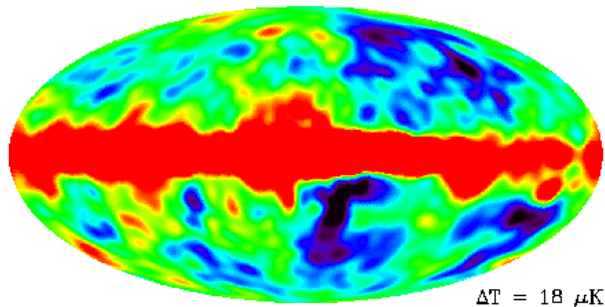
Kosmisk bakgrundsstrålning COBE-DMR



Bakgrundsstrålningen är i stort sett isotrop!



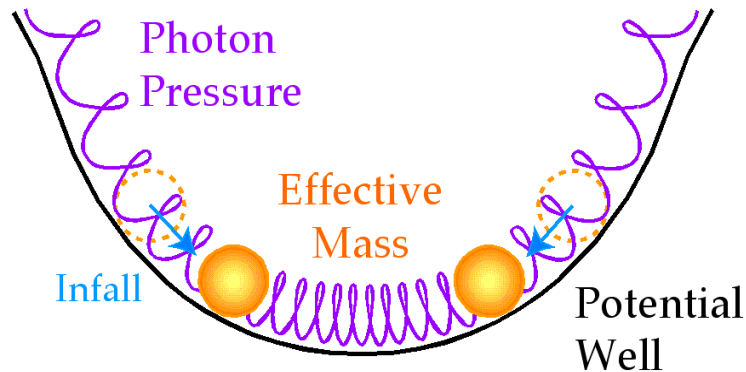
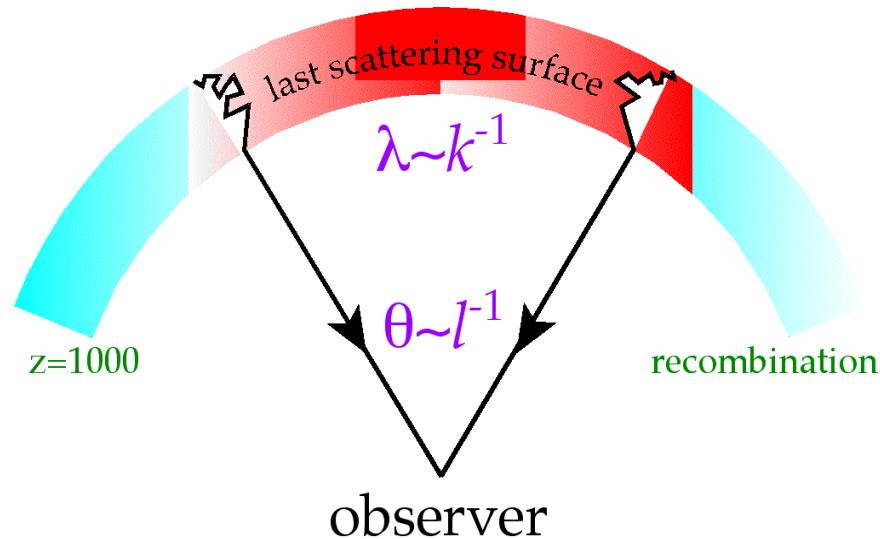
Förstärker vi kontrasten 1000x så ser vi denna dipol. Detta är Dopplereffekten från jordens rörelse relativt bakgrundsstrålningen!



Tar vi bort dipolen och förstärker kontrasten 100 000x ser vi fluktuationer i bakgrundsstrålningen själv!
(Bandet i mitten är vår galax.)

Kosmologisk bakgrundsstrålning

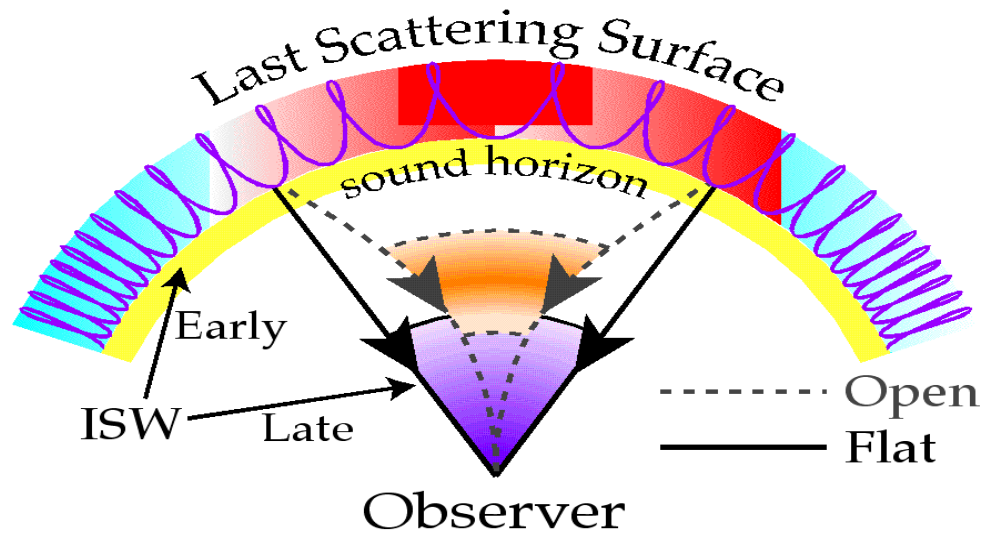
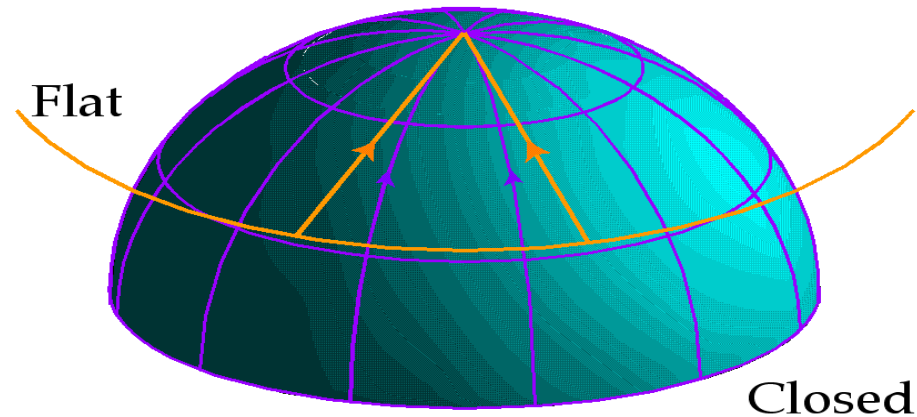
Hur uppstår fluktuationerna?



- Vi har en balans mellan infall och tryck.
- Oscillationer uppstår.
- Fotoner som kommer från täta (heta) områden har högre energi än de som kommer från glesa (kalla) områden.
- Det typiska avståndet mellan heta och kalla områden på himlen är ca. 1° .
- Detta avstånd fungerar som en standardlinjal och den exakta vinkeln beror på universums geometri!

Kosmologisk bakgrundsstrålning

Universums geometri



**Typiskt avstånd
mellan kalla och heta
punkter:**

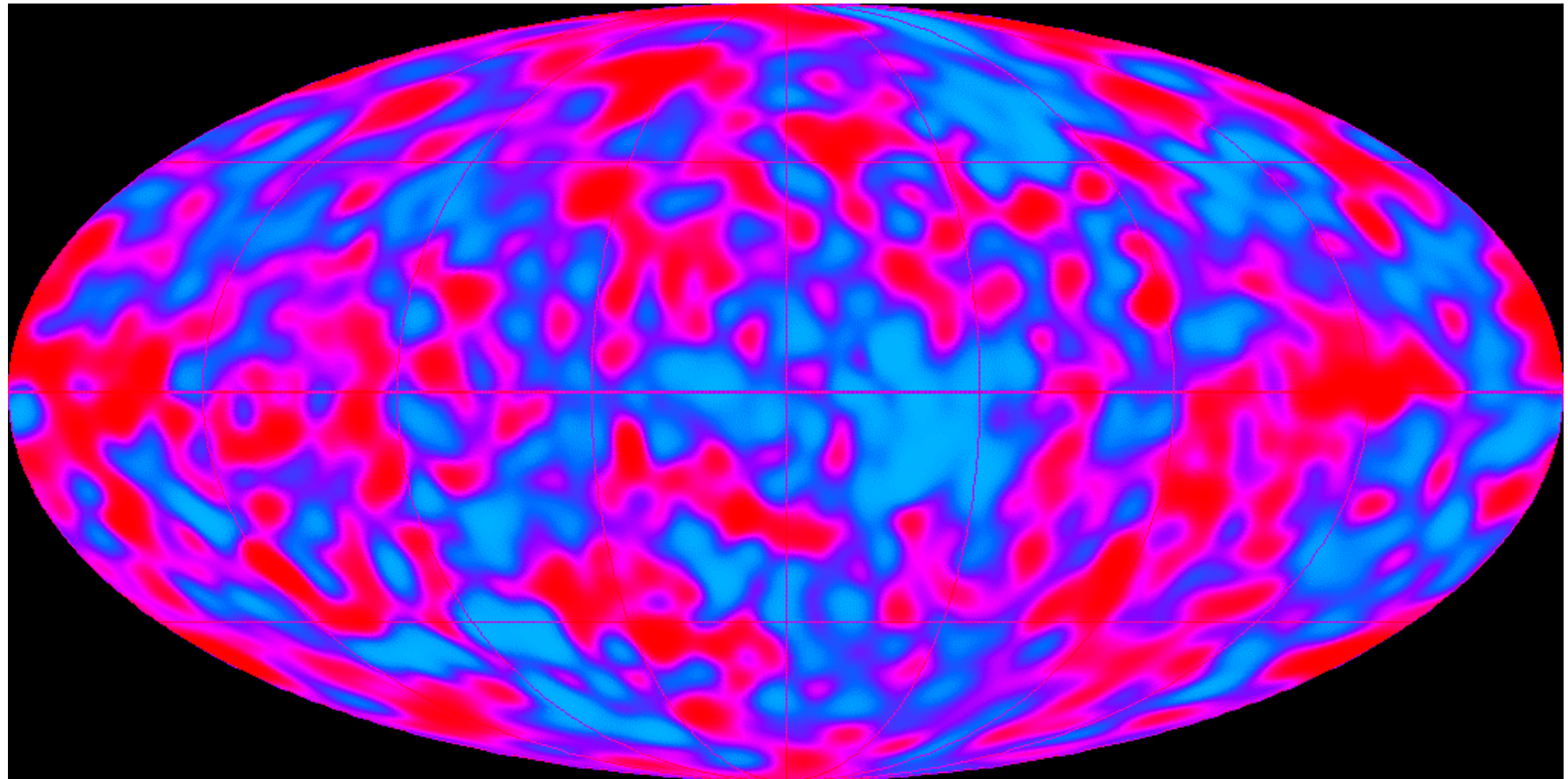
Platt universum: $\sim 1^\circ$

Öppet universum: $< 1^\circ$

Slutet universum: $> 1^\circ$

Kosmisk bakgrundsstrålning COBE-DMR

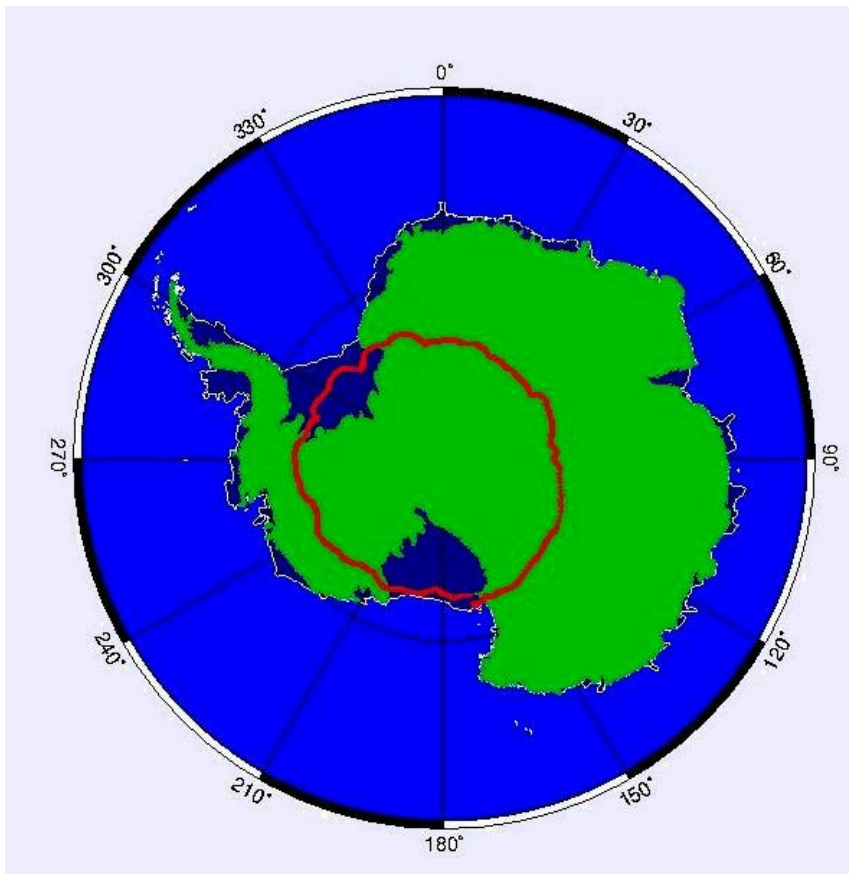
Dipolen från jordens rörelse och galaxens emission är borttagen.



Kosmisk bakgrundsstrålning

Boomerang-flygning 1998

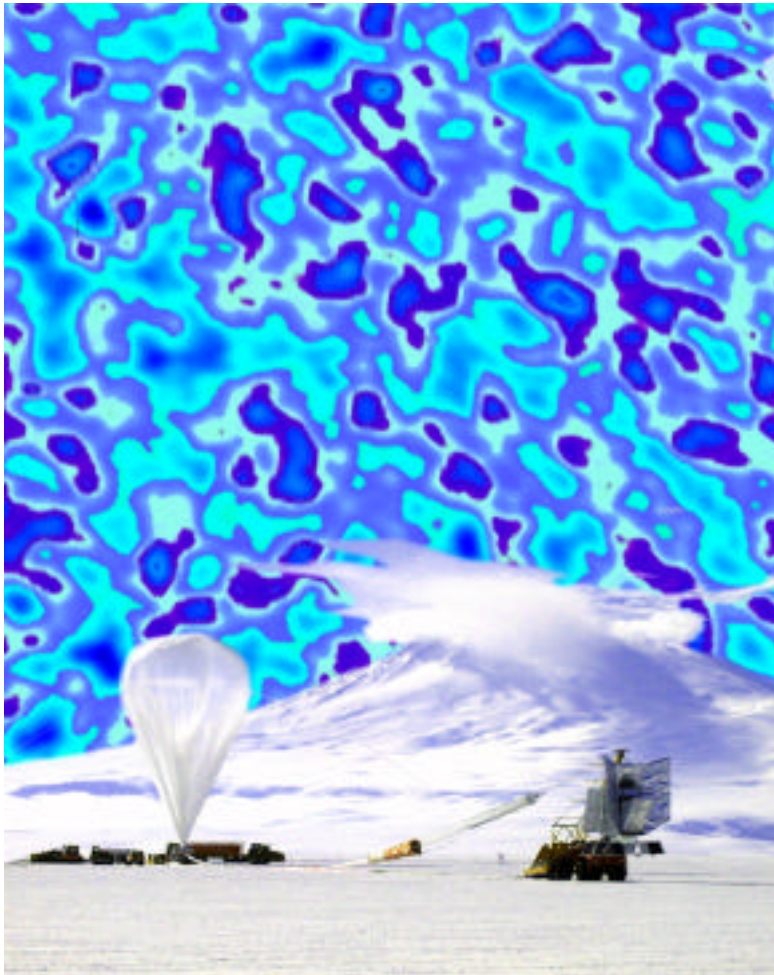
Flygs runt Antarktis. En rundflygning tar ca. 2 veckor.



Från <http://www.physics.ucsb.edu/~boomerang>

Kosmisk bakgrundsstrålning

Boomerangs himmelsbild

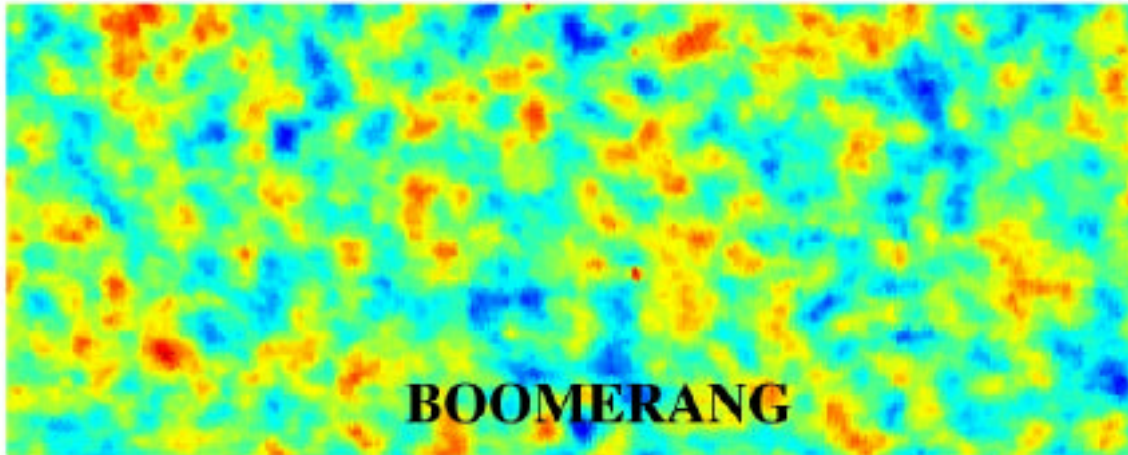


Om våra ögon kunde se mikrovågor så skulle himlen se ut ungefär så här!

Kosmisk bakgrundsstrålning

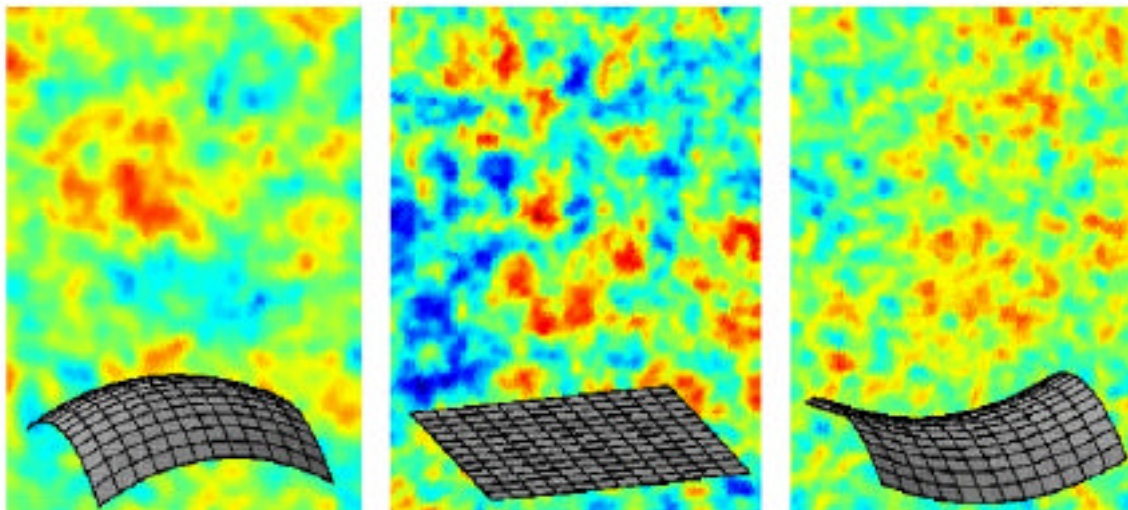
Jämförelse med simuleringar

25°



Data

Simuleringar
för olika
geometrier



slutet

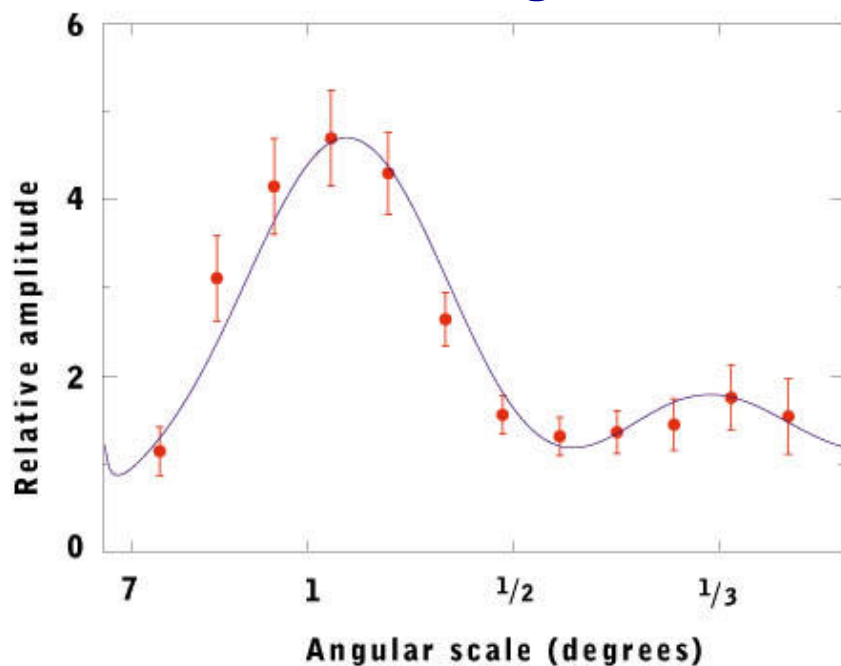
platt

öppet

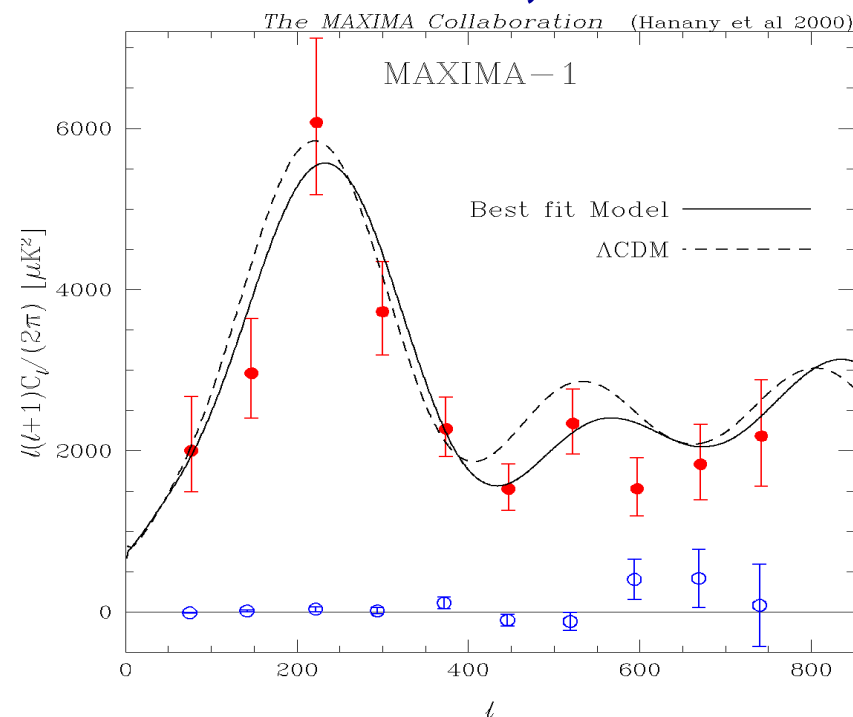
**Vilken geometri
stämmer bäst?**

Kosmologisk bakgrundsstrålning Amplitudspektrum

Boomerang, 2000



Maxima, 2000



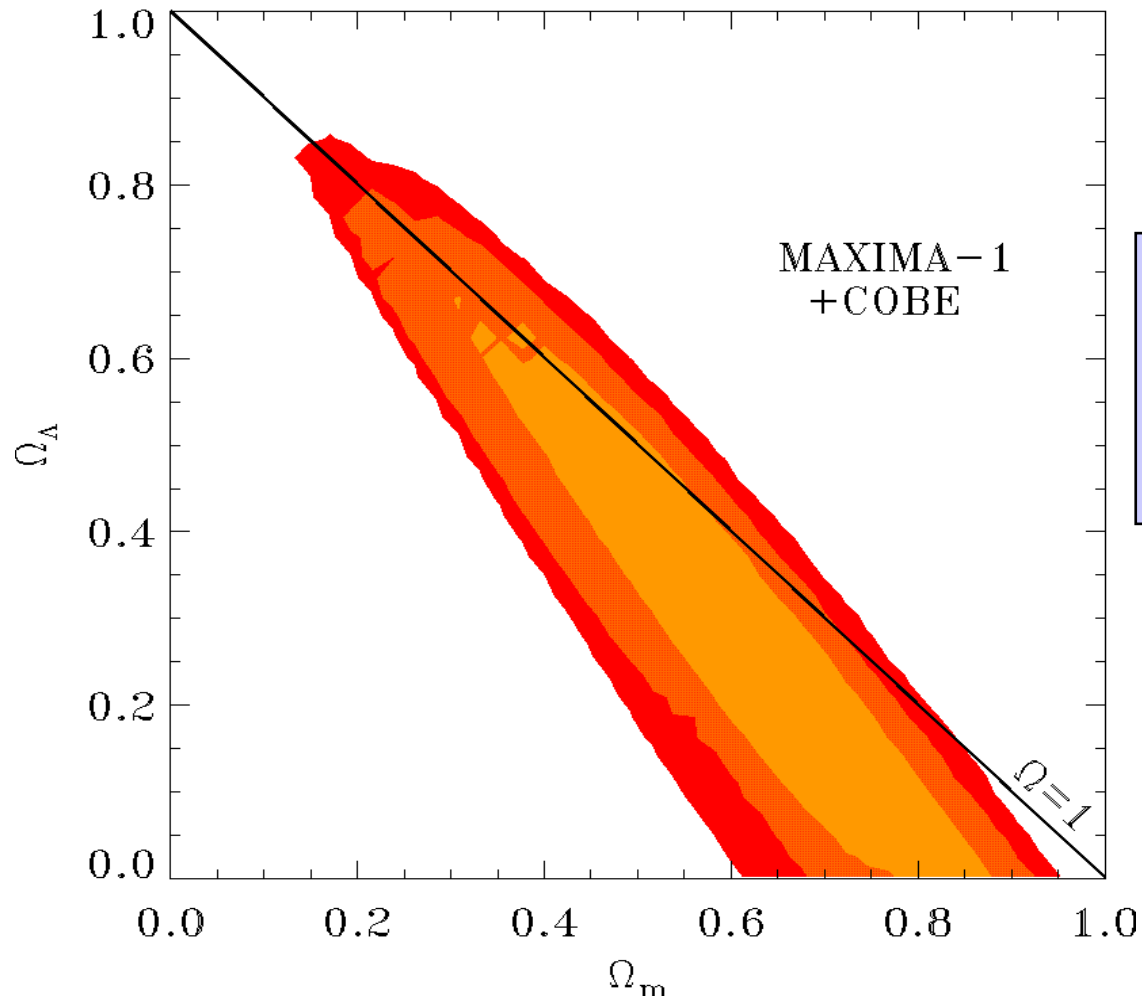
← stora vinklar små vinklar

- ☞ Toppen ligger vid 1°
- ☞ Universums geometri är med andra ord väldigt nära platt

Kosmisk bakgrundsstrålning

Universums geometri

The MAXIMA Collaboration (Balbi et al. 2000)



Universums geometri
är i stort sett plan, dvs

total 1

Supernovor Ia

Hur kan de lära oss om universums geometri?

- Supernovor typ Ia är standardljus med en inneboende ljusstyrka, B . Mät hur ljusstarka de ser ut att vara, b , och bestäm luminositetsavståndet, d_L

$$b = \frac{B}{4\pi d_L^2} \qquad d_L = \sqrt{\frac{B}{4\pi b}}$$

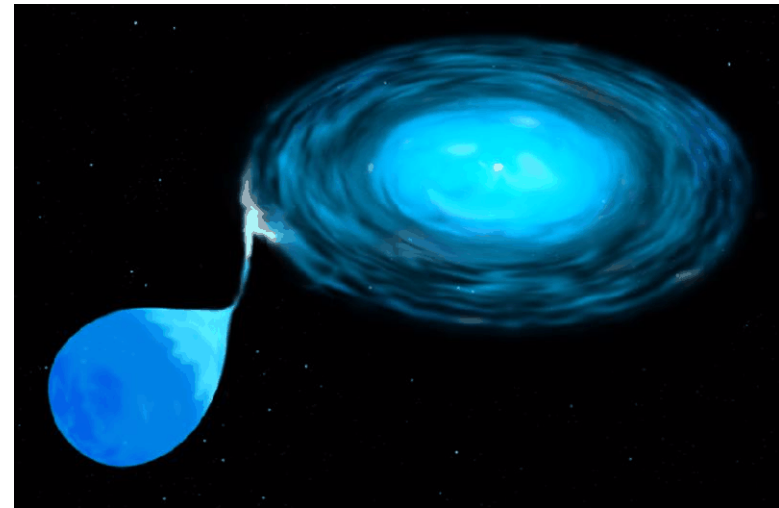
- Man kan uttrycka detta samband med hjälp av rödförskjutningen, z

$$d_L = \frac{1}{H_0} \left(z + f(\text{materia}, \dots) z^2 + \dots \right)$$

Bestäm avvikelserna från ett linjärt samband och vi lär oss om materia och .

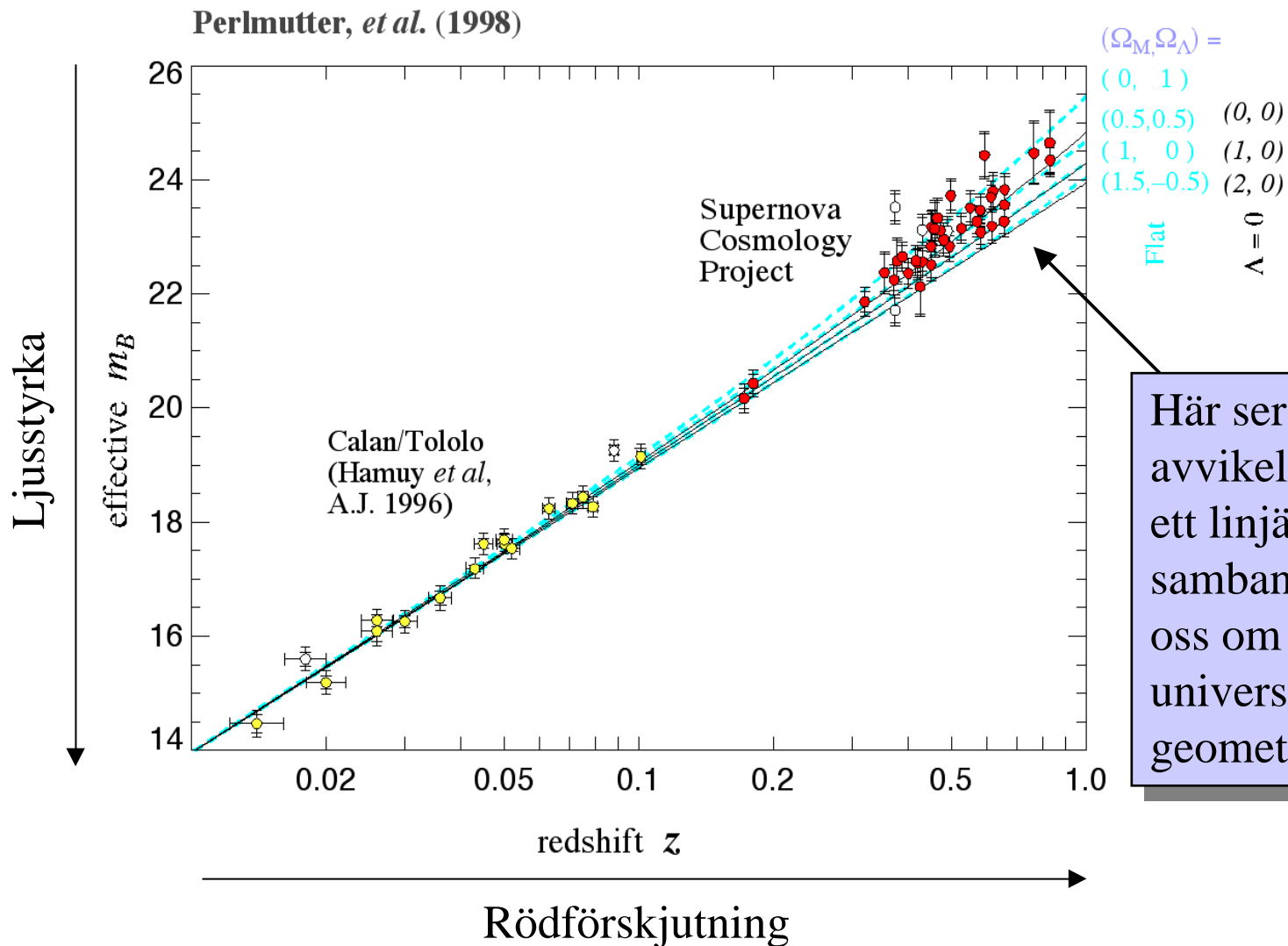
Supernovor Ia som standardljus

- Supernovor Ia bildas när en vit dvärg i ett dubbelstjärnesystem blir så tung att den börjar bränna kol.
- Då exploderar den, alltid på samma sätt, med samma ljusstyrka!

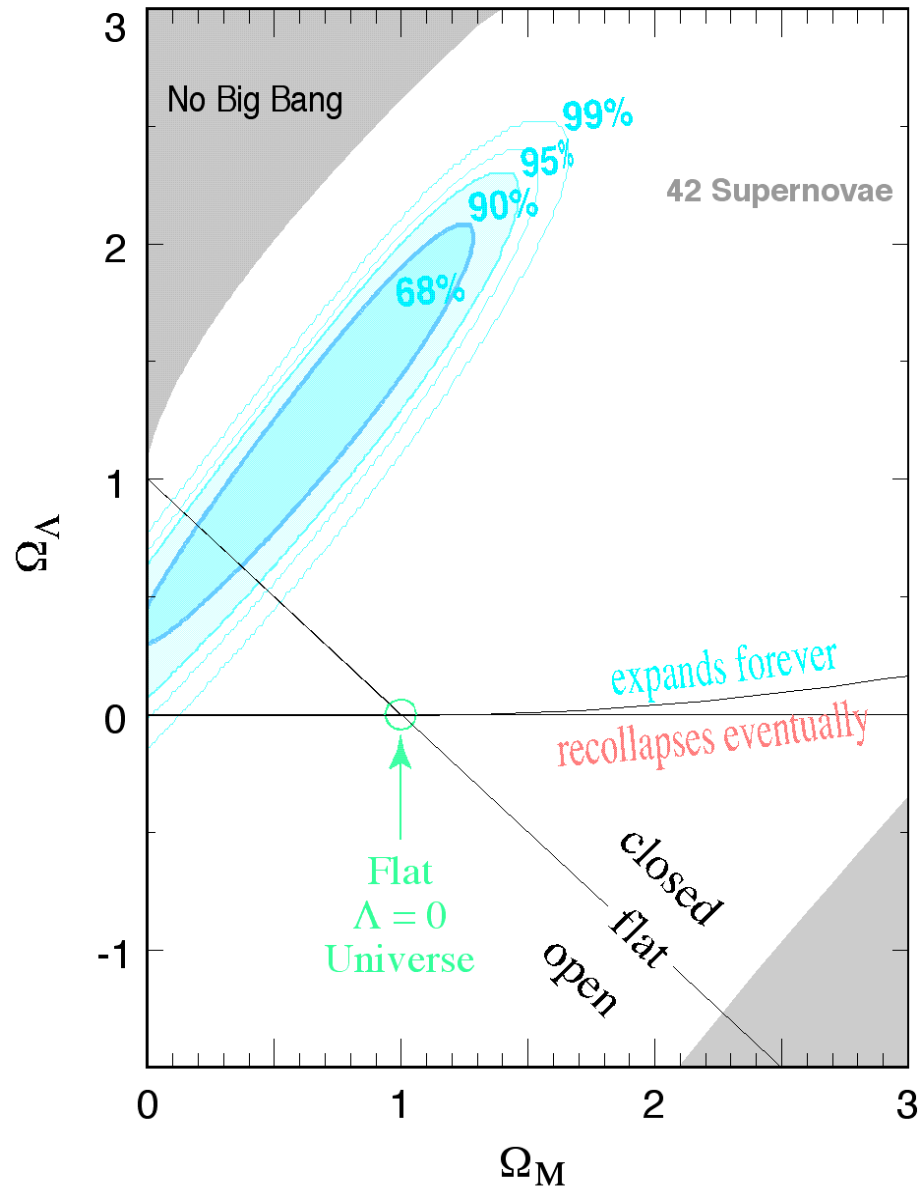


Supernovor Ia

Mätningar av 42 supernovor



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



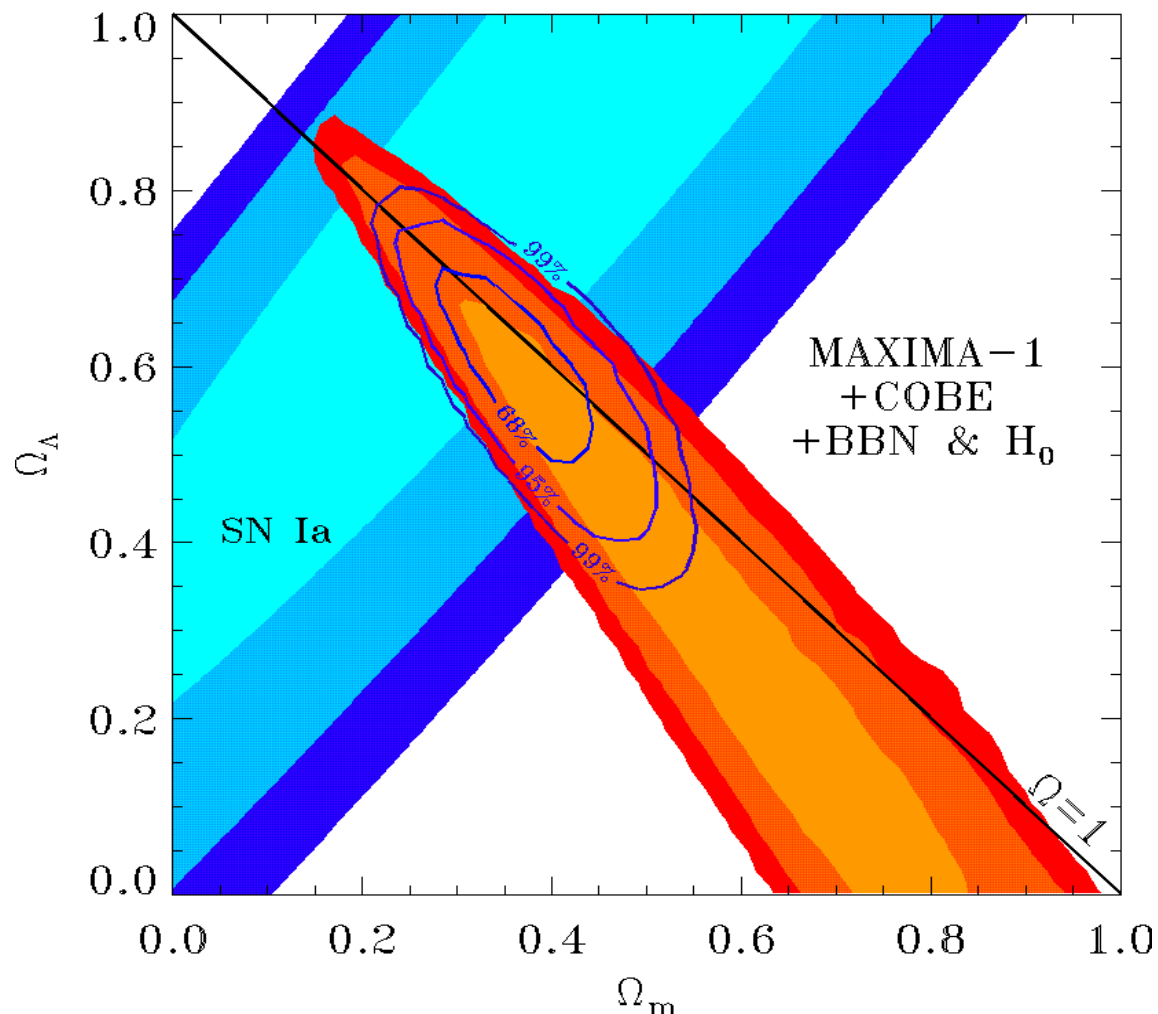
Supernovor Ia och de kosmologiska parametrarna

- Mätningarna av supernovornas ljusstyrkor visar att universum **accelererar**.
- Det innebär att universum innehåller **vakuumenergi**, t.e.x. en **kosmologisk konstant**.

Universums geometri

Supernovor och kosmisk bakgrundsstrålning

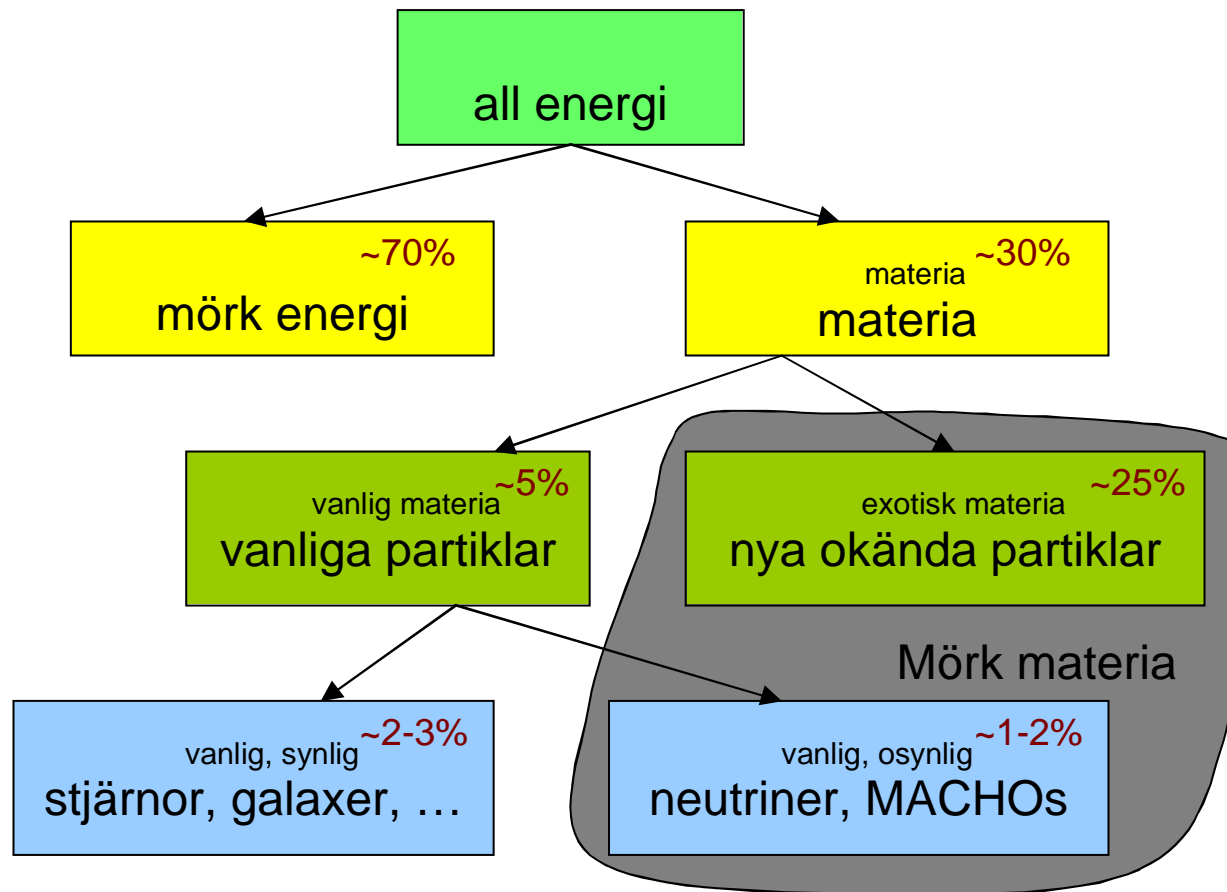
The MAXIMA Collaboration (Balbi et al. 2000)



Båda mätningarna är konsistenta och de överlappar varandra vid

<i>materia</i>	0.3
	0.7

Energibalans för universum



Är all materia “vanlig” materia?

- Vi har sett att $\Omega_{\text{materia}} \sim 30\%$
- Är all den materian “vanlig” materia?
- Big Bang Nukleosyntes: *baryoner kan utgöra maximalt* $\Omega_{\text{baryoner}} \sim 3-4\%$
- Galaxbildning: $\Omega_{\text{neutriner}} \leq 5\%$
- Någon ny “exotisk” materia behövs
- Denna exotiska materia kan utgöra universums mörka materia

Sammanfattning

- Mätningar av den kosmiska bakgrundsstrålningen och supernovor Ia visar att

total	1	varav	0.7
		materia	0.3

- Big Bang Nukleosyntes: **All materia kan inte vara "vanlig" materia.**
- Rotationskurvor, gravitationslinser m.m.: **mörk materia utgör ca 0.25 och det mesta av den är troligen en ännu upptäckt elementarpartikel (t ex en neutralino).**

Internetsajter om astronomi / kosmologi

- <http://www.quarkstothecosmos.org/>
- <http://www.astro.ucla.edu/~wright/cosmolog.html>
- <http://antwarp.gsfc.nasa.gov/apod/>
- <http://imagine.gsfc.nasa.gov/>
- <http://photojournal.jpl.nasa.gov/>
- <http://www.seds.org/nineplanets/nineplanets/>