



Universum nu

10. Kosmologi

Universum nu 12.4 & 19.4 2024, TH



10. Kosmologi

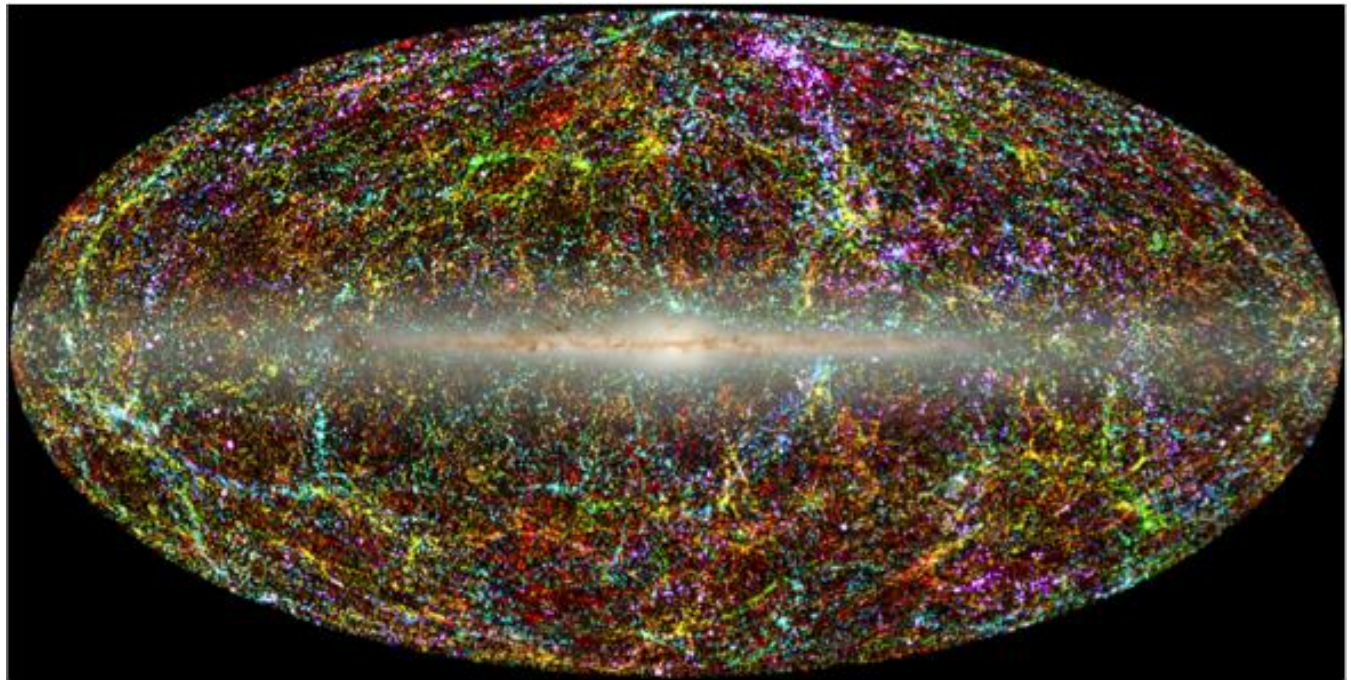
- Kosmologi studerar hela universum:
 - Hur uppkom universum?
 - Hur gammalt är universum?
 - Hur är materian och energin fördelad?
 - Hur uppkom elementarpartiklarna?
 - Hur uppkom grundämnena?
 - Hurdan är universums framtid?
- Modern astronomi och fysik har gjort kosmologin till en exakt vetenskap.



10.1 Kosmologiska principen

- • Kosmologiska principen: Universum är *homogent* och *isotropiskt*. => Universum ser likadant ut oberoende av observationspunkten.
- Baserar sig på observationer av fördelningen av materia i universum.

Panorama i infrarött över hela himmelen visar distributionen av galaxer (T. Jarrett, IPAC/Caltech)





10.2 Olbers' paradox

- Oändligt universum =>
 - I varenda riktning en stjärna.
 - Stjärnornas antal inom radien R proportionellt mot R^3 .
 - Varje stjärnas ljus minskar omvänt proportionellt mot R^2 .
- => Hela himmelen borde lysa med samma intensitet som stjärnorna.

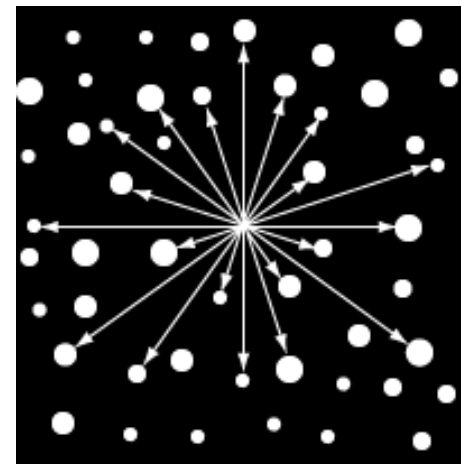
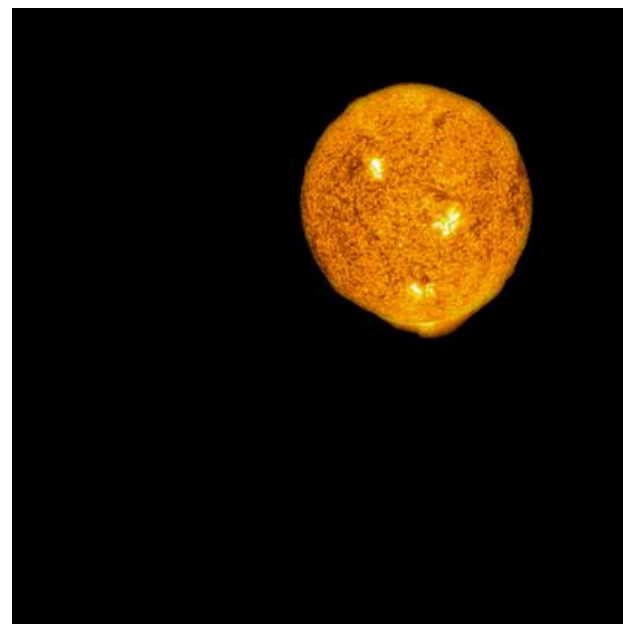


Bild:<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu>



Animation: Wikipedia



Uppgift

- Gå genom Olbers' paradox.
- Fundera ut olika förklaringar till paradoxen.



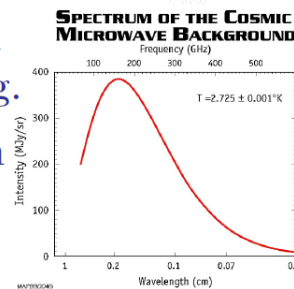
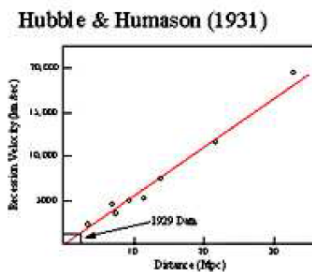
10.3 Vägen till den moderna kosmologin

- Albert Einstein (1920-talet): Ett statiskt universum kollapsar av gravitationen \Rightarrow *Kosmologiska konstanten* (Λ).
- Georges Lemaitre (1927): Expanderande universum \Rightarrow Behövs ingen Λ .
- Edwin Hubble (1929): Galaxernas rödförskjutning större ju mer avlägsna de är \Rightarrow Universum expanderar.
- Fritz Zwicky (1934): Mörk materia
- George Gamow (1948): *Big-bang* -modellen.
- Arno Penzias och Rober Wilson (1964): Upptäckt av den kosmiska bakgrundstrålningen
- Vera Rubin mm. (1960-70 -talen): Mörk materia i andra galaxer
- Stephen Hawking, Steven Weinberg, Alan Guth mm. (1960-80 -talen): Noggrannare beskrivning av Big-bang -händelseförloppet, inflationsteorin mm.
- Saul Perlmutter, Adam Riess, Brian Schmidt mm. (1998): Accelererande utvidgning av universum \Rightarrow mörk energi?
- COBE, WMAP och Planck -satelliterna (1990-2010 -talen): Noggranna uppskattningar för universums ålder och andra parametrar.



10.4 Kosmologins observationer

1. Universum utvidgas enligt Hubbles lag
 $z = (H/c)r$, där z är rödförskjutningen och $H \approx 70 \text{ kms}^{-1}\text{Mpc}^{-1}$.
2. Överallt finns en termisk 2.7 K bakgrundsstrålning.
3. Materien och strålningen är isotropisk.
4. Inga stjärnor är äldre än 13-14 miljarder år.

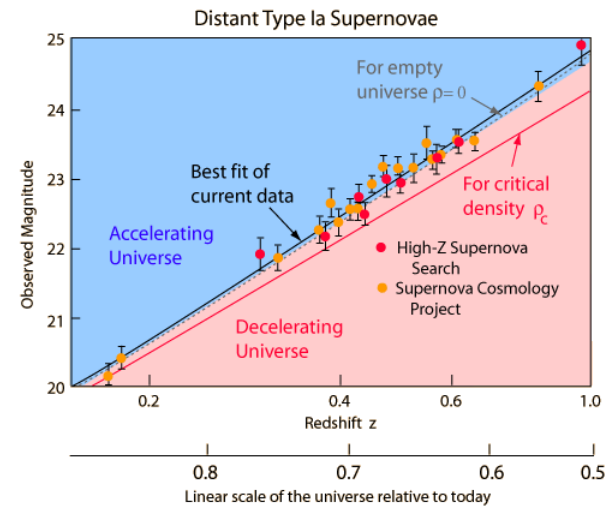
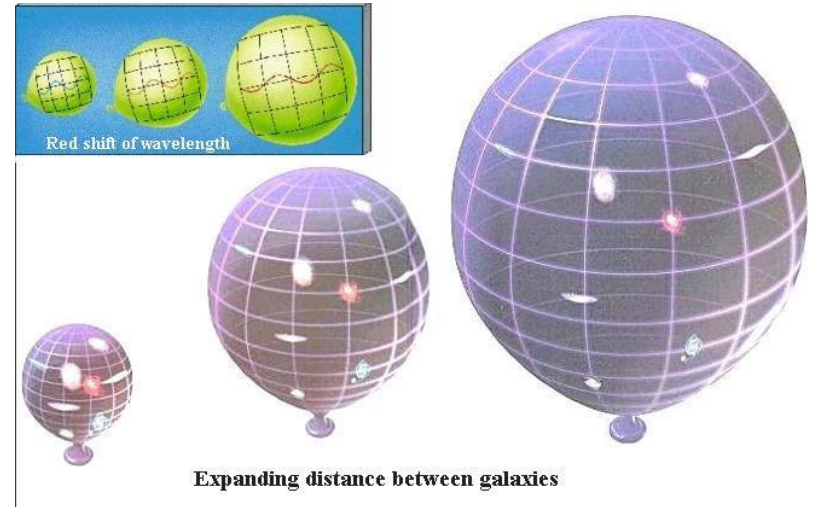


5. Väte- och helium förekommer i ungefär lika stora mängder överallt i universum.
6. De äldsta radioaktiva isotoperna är mindre än ca 14 miljarder år gamla.
7. Galaxernas fördelning verkar vara lika överallt i universum.
8. Evolutionseffekter syns på galaxer på stora avstånd (dvs. bakåt i tiden).



10.5 Universums expansion

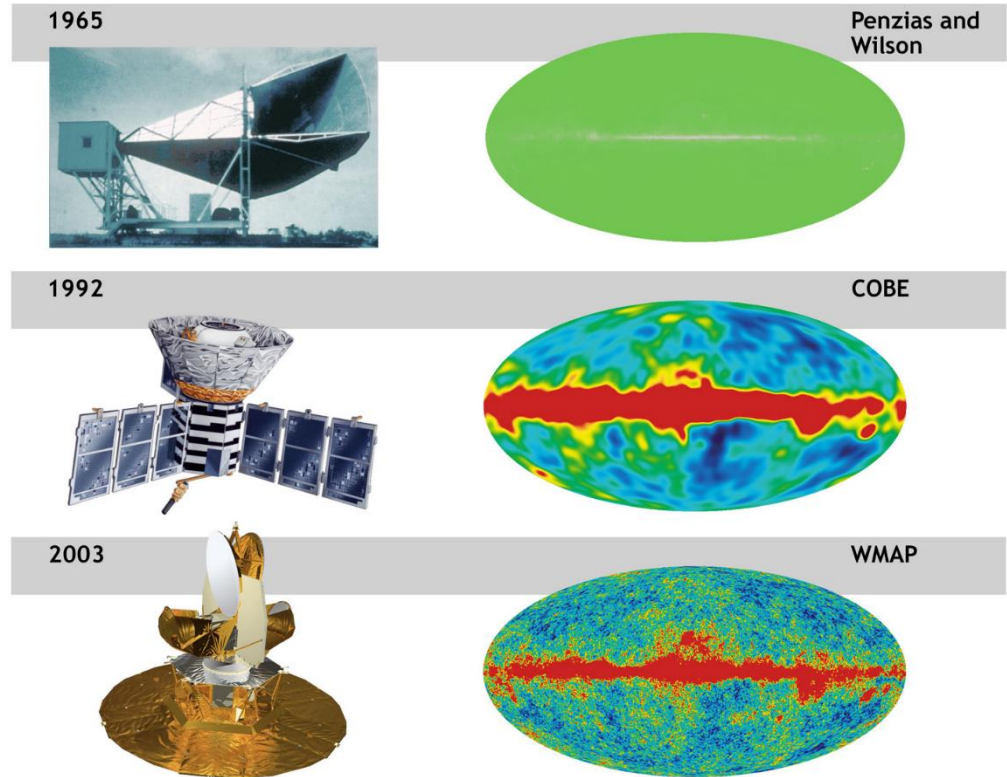
- I universums expansion är det rummet mellan galaxerna som expanderar.
- Observationer under senaste ca 20 åren => expansionen accelererar.





10.6 Kosmiska bakgrundsstrålningen

- Små temperaturskillnader (ca 10^{-5} grader) i bakgrundsstrålningen.
- Återspeglar fördelningen materia i universum vid en ålder av 380000 år.

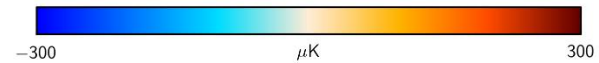
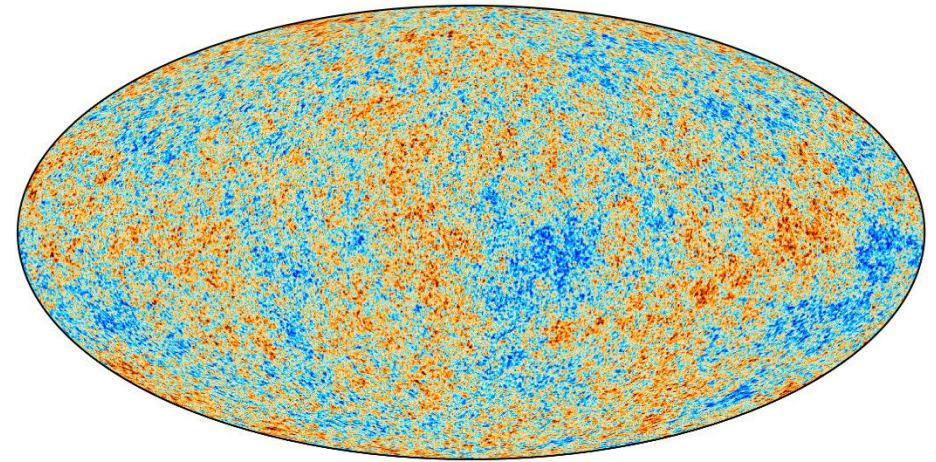


Vintergatan syns som ett band mot bakgrundsstrålningen.

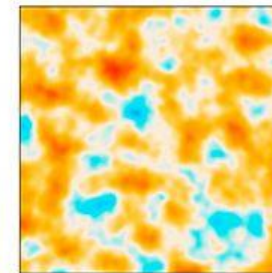


10.6 Kosmiska bakgrundsstrålningen (forts.)

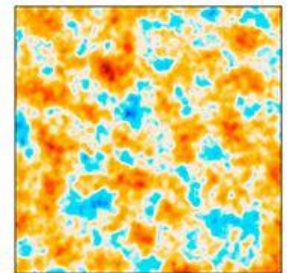
- Planck-satelliten utförde noggranna mätningar av bakgrundsstrålningen år 2010 – 2013.
- => Noggrannare värden för kosmologiska parametrar.



COBE



WMAP



Planck



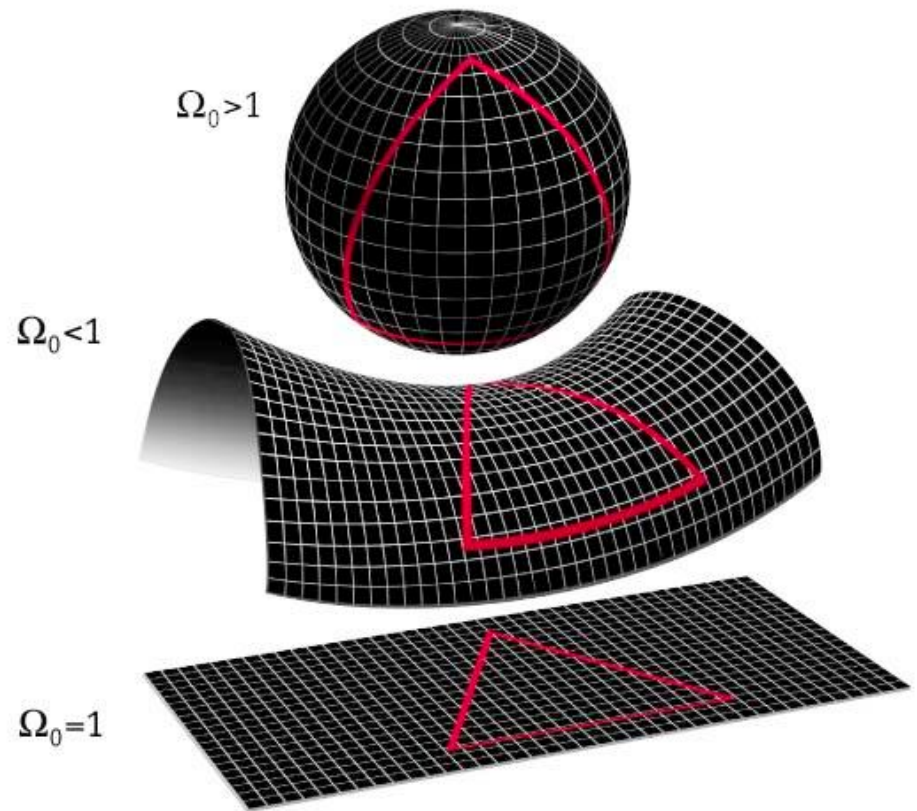
10.7 Universums geometri

För att beskriva universums geometri krävs (minst) fyra dimensioner, dvs. rymd- och tidskoordinater. Geometrin beror av densitetsparametern

$$\Omega_0 = \frac{\rho_{\text{medel}}}{\rho_{\text{kritisk}}}$$

Universum kan vara (*Friedmanns modeller*):

- *sfäriskt*, $\Omega_0 > 1$
- *hyperboliskt*, $\Omega_0 < 1$
- *euklidiskt* ("platt"), $\Omega_0 = 1$

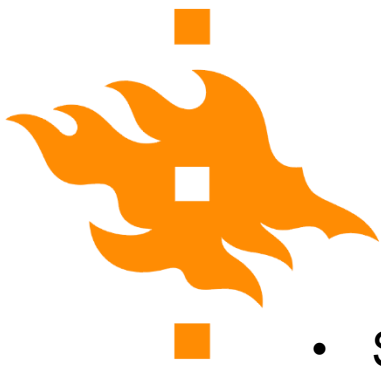


MAP990006



10.8 Öppet eller slutet universum?

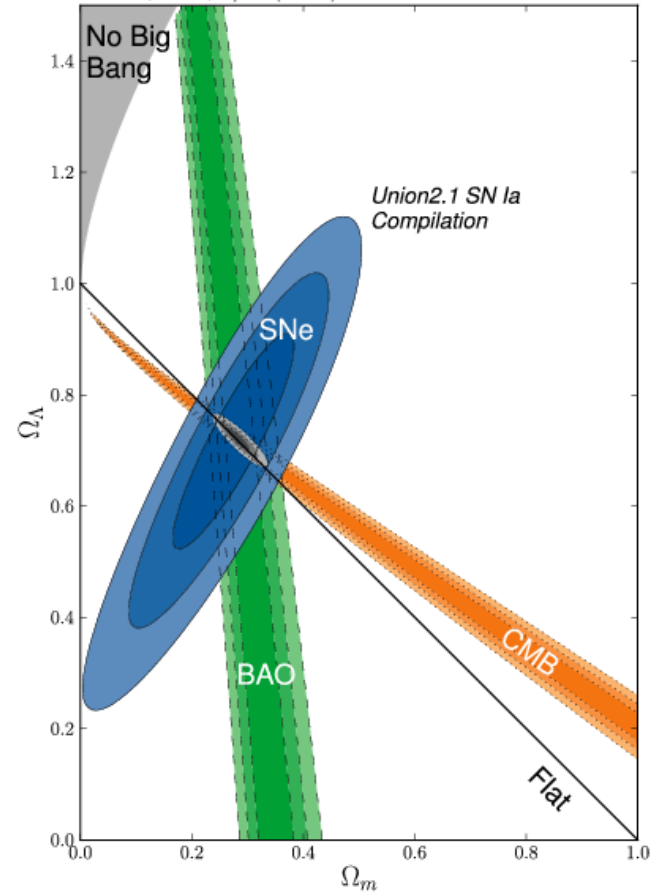
1. Medeldensitet: Om densiteten överstiger den *kritiska densiteten* är universum slutet.
2. Magnitud - rödförskjutning: I ett slutet universum verkar galaxer med stor rödförskjutning att lysa starkare.
3. Vinkeldiameter - rödförskjutning: I ett slutet universum ser avlägsna galaxer större ut.
4. Halten av deuterium: Liten halt av deuterium \Rightarrow större kosmologisk densitet.
5. Ålder: Ett slutet universum är yngre.
6. Fluktuationer i bakgrundsstrålningen: Vinkelstorleken på fluktuationerna \Rightarrow modell för universums struktur.



10.9 Nuvarande kosmologiska modellen

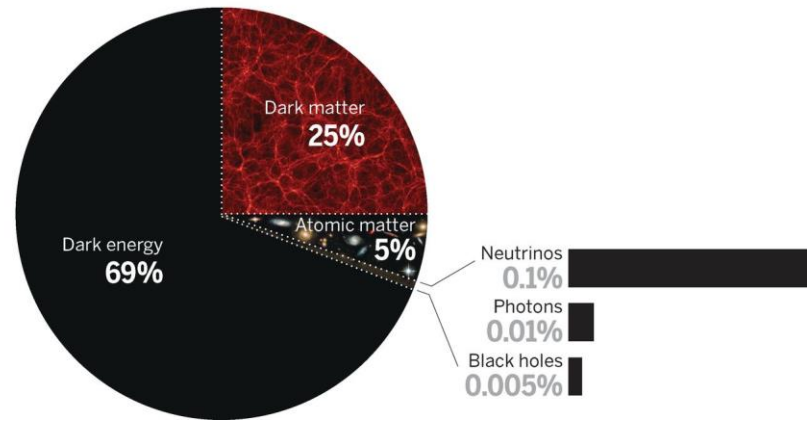
- Standardmodellen: Λ CDM, dvs. Kosmologisk konstant (Λ) och mörk materia (*cold dark matter*).
- Universum är öppet.
- Densiteten \approx kritiska densiteten.
- Universums utvidgning accelererar (mörk energi).

Supernova Cosmology Project
Suzuki, et al., *Ap.J.* (2011)



The multiple components that compose our universe

Current composition (as the fractions evolve with time)



Spergel (2015)

Genom att kombinera olika mätningar kan man bestämma Universums parametrar med en noggrannhet på < 5-10 %



"Hubble-krisen"

- Olika mätningar ger något olika resultat för Hubble konstanten H_0

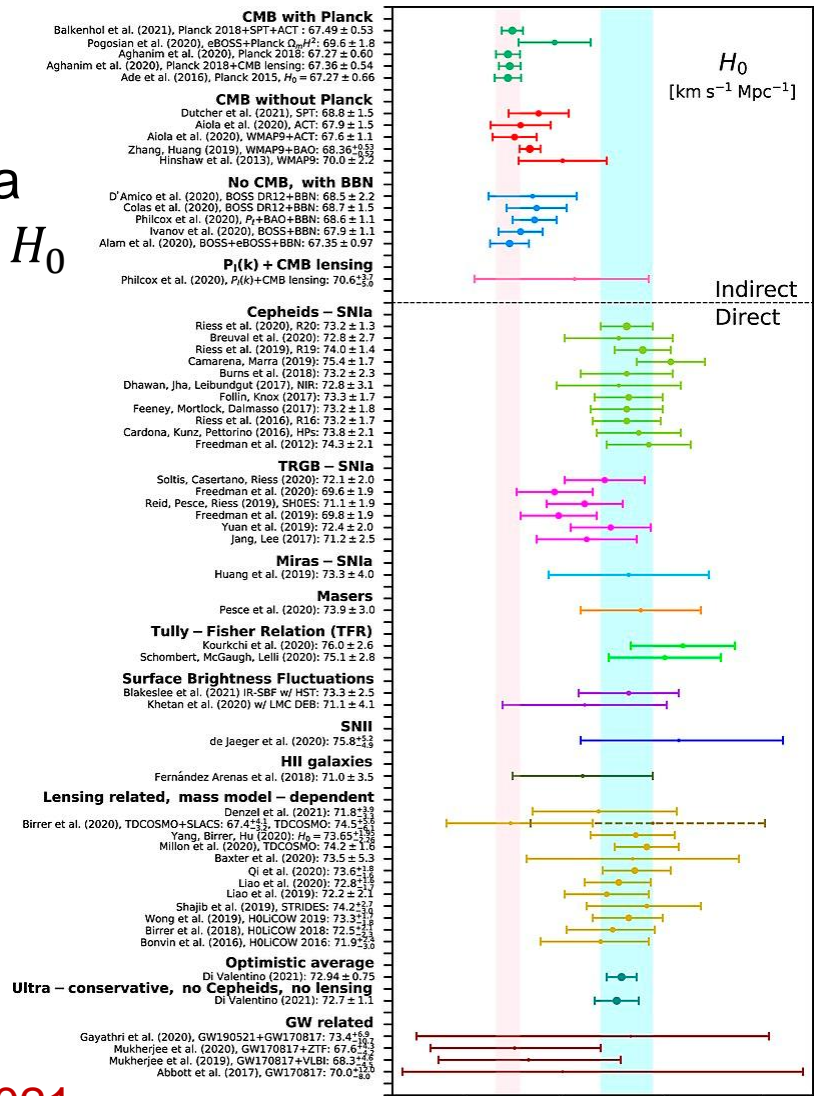
$$v = H_0 r$$

- Indirekta mätningar från bakgrundsstrålningen och big bang-nukleosyntesen ger

$$H_0 \approx 67,7 \text{ km/s/Mpc.}$$

- "Direkta" mätningar från nuvarande universum ger

$$H_0 \approx 73 \text{ km/s/Mpc.}$$

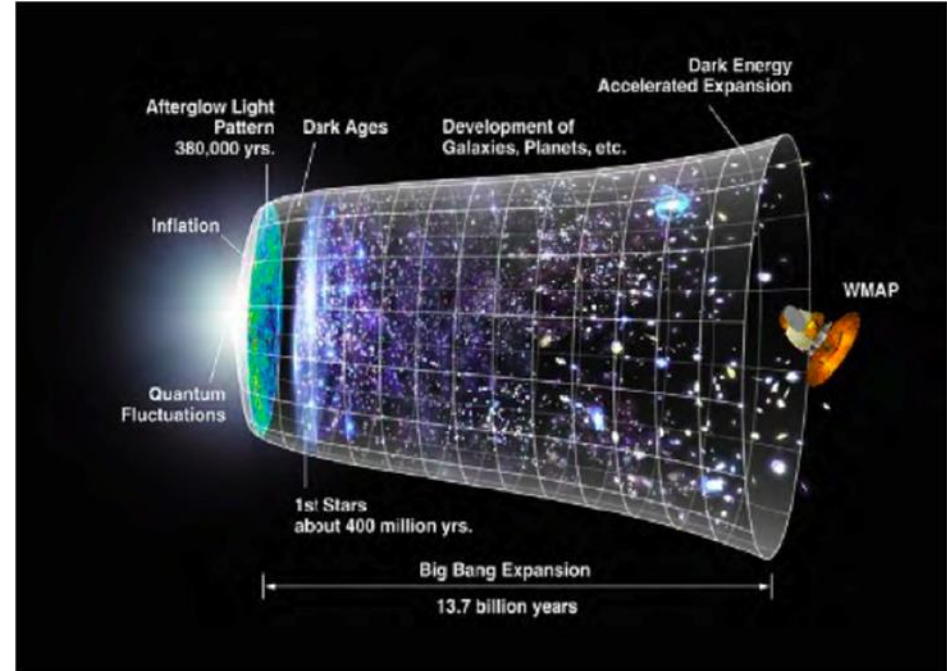


Di Valentino et al. 2021



10.10 Big bang teorin

- Big bang (BB) = “ursmällen”.
- Universums ålder är ca 13,8 miljarder år.
- Universum uppkom ur ett extremt hett och komprimerat tillstånd.
- Sedan dess har universum utvidgats.
- => Teoretiska beräkningar gäller tiden efter Planck-epoken $t_P \sim 10^{-43}$ s.





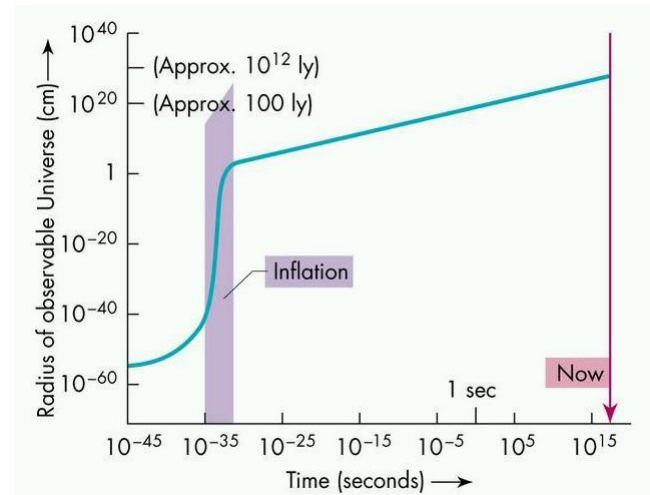
10.10.1 Universums epoker

- Temperaturen \Leftrightarrow energin/volym avgör epoken
 - $t < 10^{-43}$ s: Planck-tiden.
 - 10^{-43} s $< t < 10^{-36}$ s: Storförenade epoken.
 - 10^{-36} s $< t < 10^{-32}$ s: Inflation & symmetribrott.
 - 10^{-12} s $< t < 10^{-6}$ s: Kvarkepok.
 - 10^{-6} s $< t < 1$ s: Hadronernas epok: Protoner och neutroner uppstår.
 - 1 s $< t < 10$ s: Leptonernas epok: Elektroner uppstår.
 - 10 s $< t < \text{ca } 47\,000$ år: Strålningens era.
 - $47\,000$ år $< t < 9,8$ miljarder år: Materians era.
 - $t > 9,8$ miljarder år: Mörka energins era.

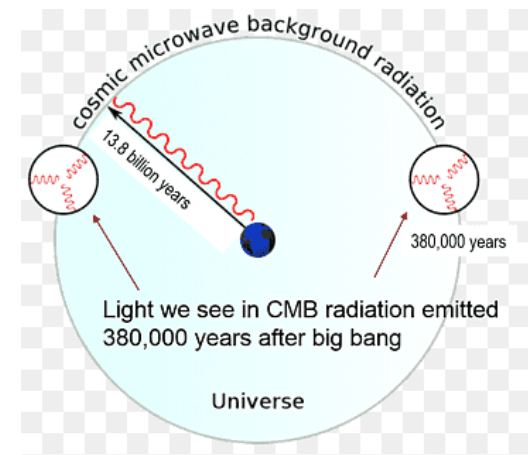


10.10.2 Inflation

- Vid ca 10^{-36} s fasövergång => *kosmisk inflation*.
- Universum utvidgas med en faktor av $>10^{26}$ under ca 10^{-33} - 10^{-32} s och vakuumenergi frigörs.
- Lokala *kvantfluktuationer* uppblåses => frön till masskoncentrationer => möjligt för galaxer och stjärnor att bildas.
- *Symmetribrott* => litet överskott materia jämfört med antimateria.
- Inflationen behövs bl.a. för att lösa *horisontproblemet*.



Kosmisk inflation:
Exponentiell utvidgning

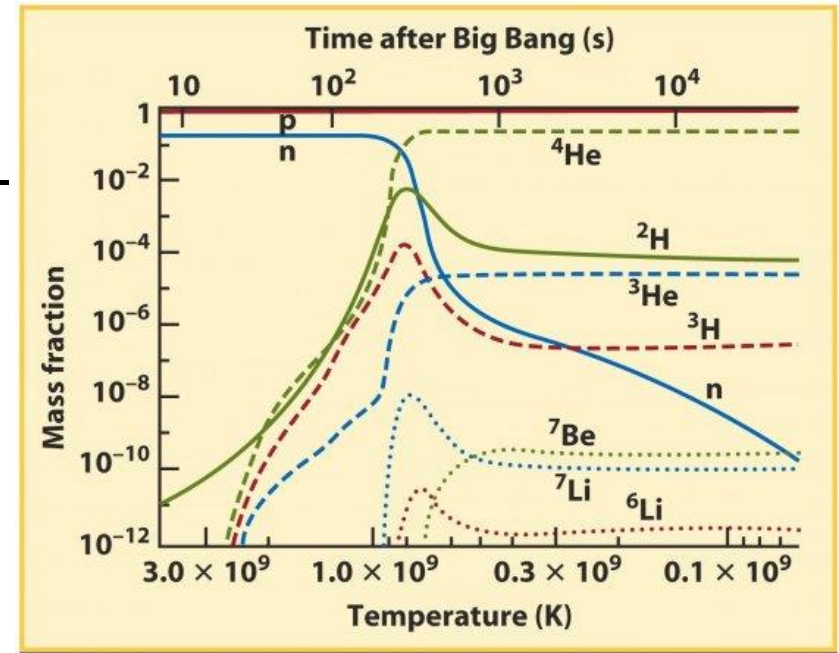


Horisontproblemet



10.10.3 Atomkärnor uppkommer

- Hög temperatur \Leftrightarrow elementarpartiklar är instabila.
- Temperaturen sjunker \Rightarrow elementarpartiklarna blir stegvis stabila.
- $10^{-12} \text{ s} < t < 10^{-6} \text{ s}$: *Kvarkepoken*.
- $10^{-6} \text{ s} < t < 0.1 \text{ s}$: Kvarkarna bildar neutroner (som sönderfaller) och protoner.
- $t \sim 1 \text{ s}$: Elektronerna stabila.
- $t \sim 200 \text{ s}$: He-kärnor uppkommer.
- Halten av He jämfört med H bestäms av neutronernas halveringstid.



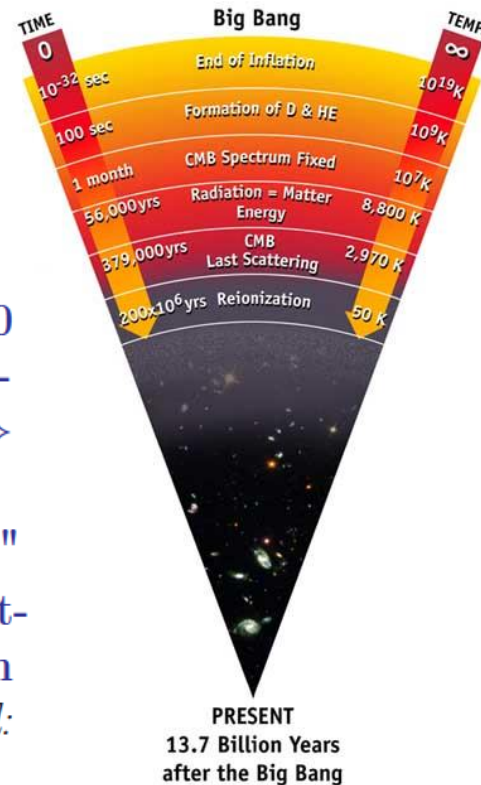
Big-bang nukleosyntes: H och He uppkommer i förhållandet 3:1.



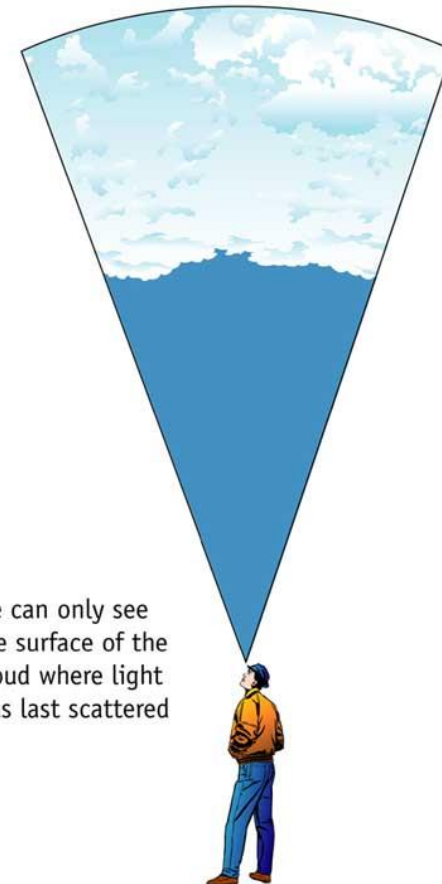
10.10.4 Bakgrundsstrålningen

- Ca 380 000 år:

- Universums temperatur ca 3000 K, väteatomer bildas \Rightarrow strålningen absorberas inte effektivt \Rightarrow universum blir "genomskinligt".
- Bakgrundsstrålningen "frisläpps"
- Materian klumpar sig kring "gjut-fel" som uppkom vid inflationen \Rightarrow förstadier till galaxer. (Bild: Nasa)



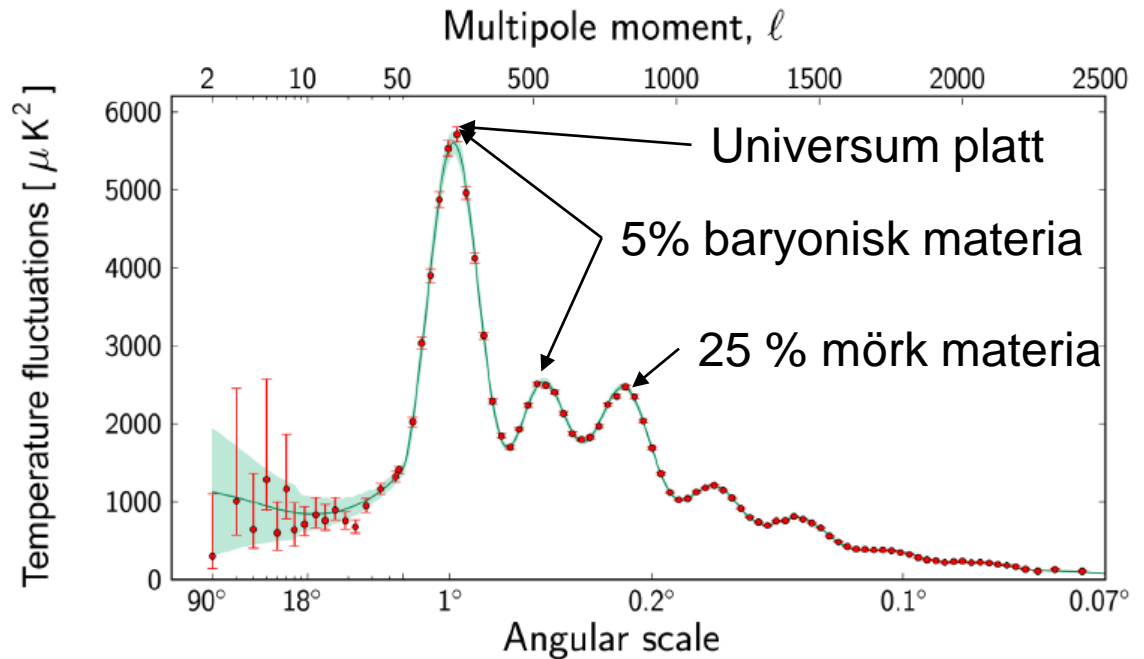
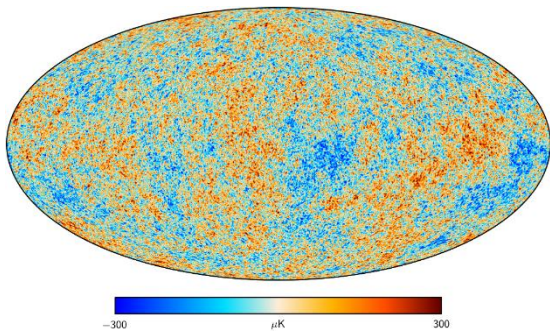
The cosmic microwave background Radiation's "surface of last scatter" is analogous to the light coming through the clouds to our eye on a cloudy day.



We can only see the surface of the cloud where light was last scattered



10.10.4 Analys av den kosmiska bakgrundsstrålningen (CMB)



Akustiska toppar i Planck satellitens mätningar



10.10.5 Förhållandena i det unga universum

- Efter frisläppningen av den kosmiska bakgrundsstrålningen var universum "mörkt" ända tills de första stjärnorna uppkom.
- Första stjärnorna uppkom senast vid 100-180 miljoner år efter BB.
- Nästan bara väte och helium => de första stjärnorna mycket större än vad som är möjligt nuförtiden.
- Stark strålning från stora nyfödda stjärnor => molekylärt väte bryts ned till atomärt.
- Avsaknad av molekyler och stoft => nedkylning av interstellära moln ineffektiv => stora moln kan kollapsa direkt till svarta hål.



Animation av de första stjärnorna (NASA)



10.10.6 Rejonisering

Rejoniseringsperioden räckte från ca 100-1000 milj. år efter ursmällen:

- Intensiv stjärnbildning + kvasarer.
- => stark UV-strålning i universum.
- => rejonisering av väte.
- Rejoniseringen tar gradvis slut, när mängden UV-strålning minskar.

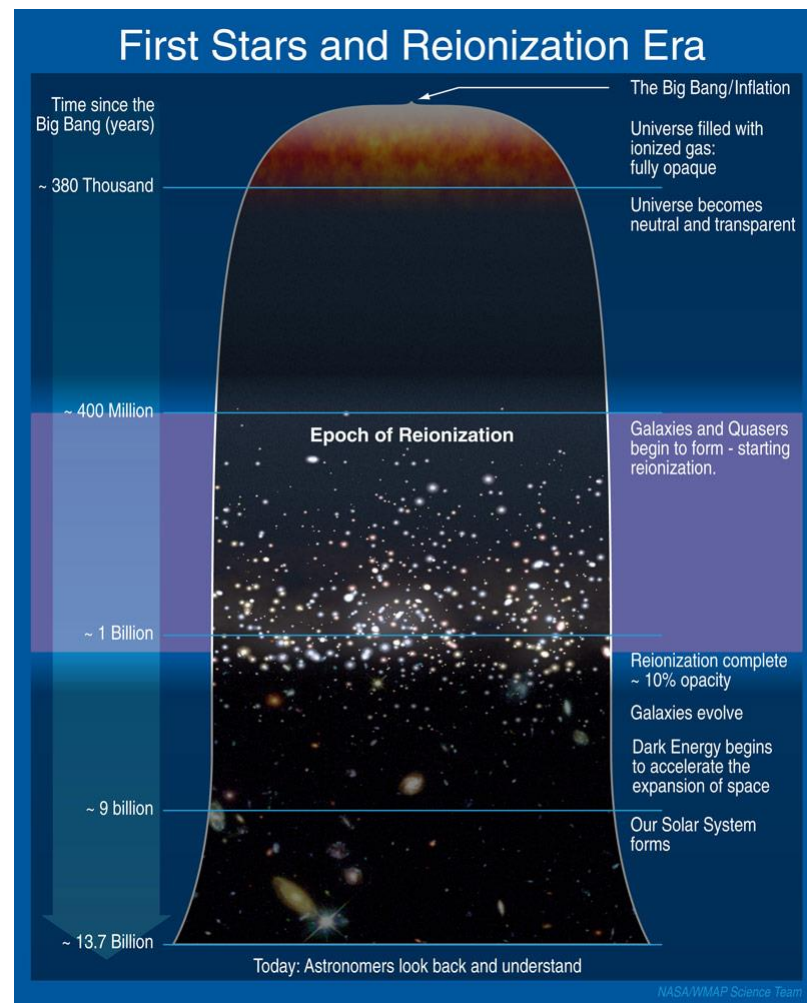
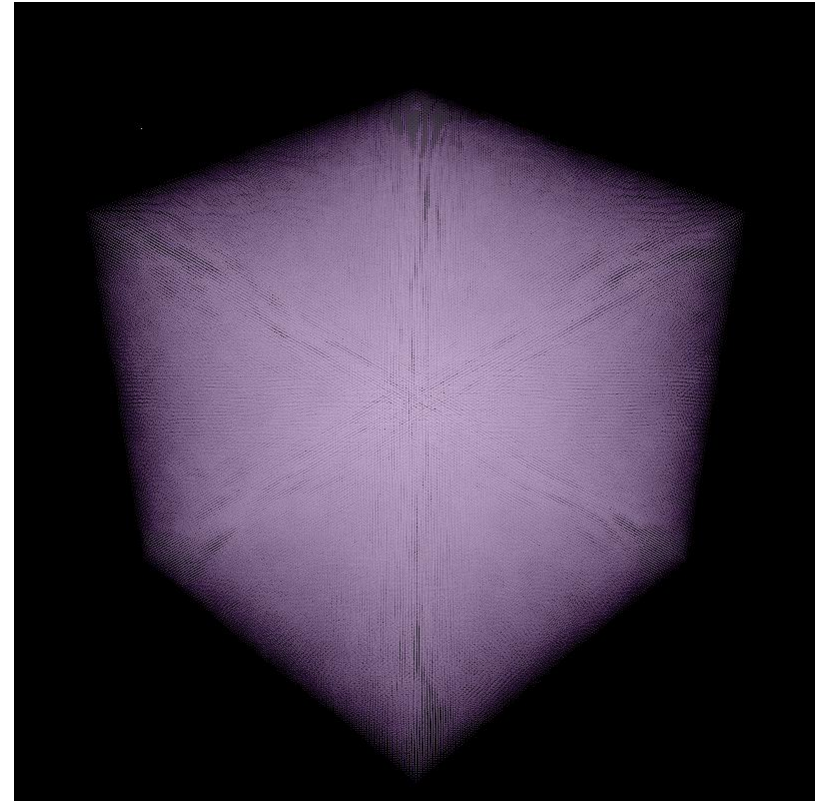


Bild: NASA



10.11 Nuvarande universum

- Med de första stjärnornas utveckling sprids nya grundämnen.
- => Nya stjärnor uppstår med mångsidigare sammansättning
- Större galaxer utvecklas bl.a. genom fusioner av små galaxer.
- Ca 2 miljarder år: Massiva svarta hål i centrum av galaxerna => kvasarer.
- Nutid:
 - Stjärnproduktionen avtagit.
 - Aktiva galaxer sällsyntare.



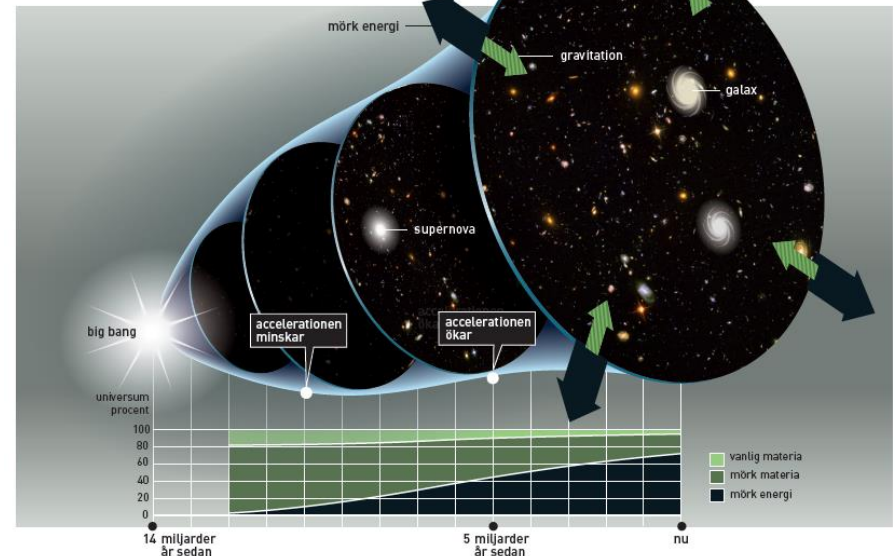
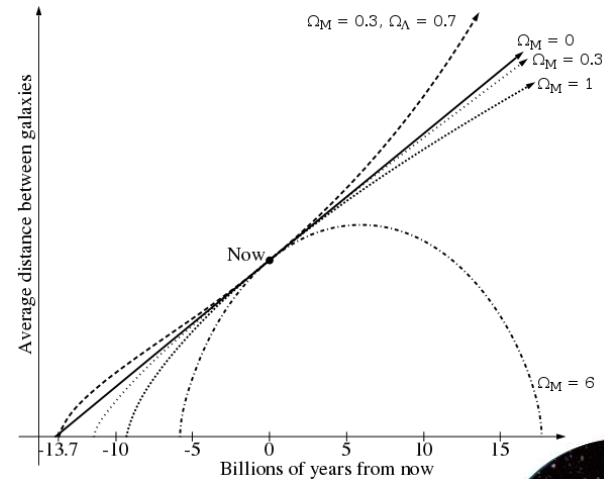
Animation av universums storskaliga evolution.



10.12 Universums framtid

Universums framtid bestäms av dess densitet, dvs. om universum är öppet eller slutet:

- Om densiteten skulle vara tillräckligt stor skulle universum dra ihop sig i en "big crunch" (= stora krossen).
- I annat fall kommer utvidgningen att fortsätta i all oändlighet.
- Nuvarande observationer antyder att universums utvidgning fortsätter och accelererar.
- Ett öppet universum passar även bäst in i vår uppfattning om universums uppkomst (inflations-teorin mm.).





10.13 Slutet (?)

Alternativ I: Värmedöden

- Stjärnproduktionen minskar => efter 10^{14} år har alla stjärnor brunnit slut => universum blir mörkt
- Efter 10^{27} år har massiva svarta hål samlat största delen av all materia
- Efter $10^{90} - 10^{150}$ år har svarta hålen "avdunstat" (Hawkings process)
- Efter $10^{10^{26}}$ år bara strålning kvar

Andra alternativ: Bl.a. "big slurp"

Alternativ II: "Stora rivet" (big rip)

- Om universums expansion accelererar tillräckligt fort => till slut rivs allt sönder.
- Processen går gradvis: Först splittras galaxhoparna, sedan galaxerna, solsystemet och till sist atomerna.
- Om och när det händer beror på okända parametrar.



10.14 Öppna frågor

- Vad är *mörk materia*?
- Vad är *mörk energi*?
- Är universum i ett *falskt vakuum*?
- Kan man sammanföra *gravitationen*, den *elektromagnetiska* kraften och *kärnkrafterna* (*stark* och *svag växelverkan*) i en *universalteori*?
- Hur många dimensioner behövs för att förklara universum?
- Gäller naturlagarna lika överallt?
- Är vi en del av ett *multiversum*?



10.15 Multiversum (?)

- Mångvärldshypotes.
- Vårt universum är känsligt för balansen mellan olika krafter och konstanter.
- T.ex. en rubbning av balansen mellan fundamentala växelverkan => universum utan stjärnor.
- Är detta en slump eller finns det parallella universum med olika grundlagar?
- Matematiska modeller => nya universum kan uppkomma.