



Universum nu

10. Kosmologi

Universum nu 10.4 & 19.4 2024, TH



10. Kosmologi

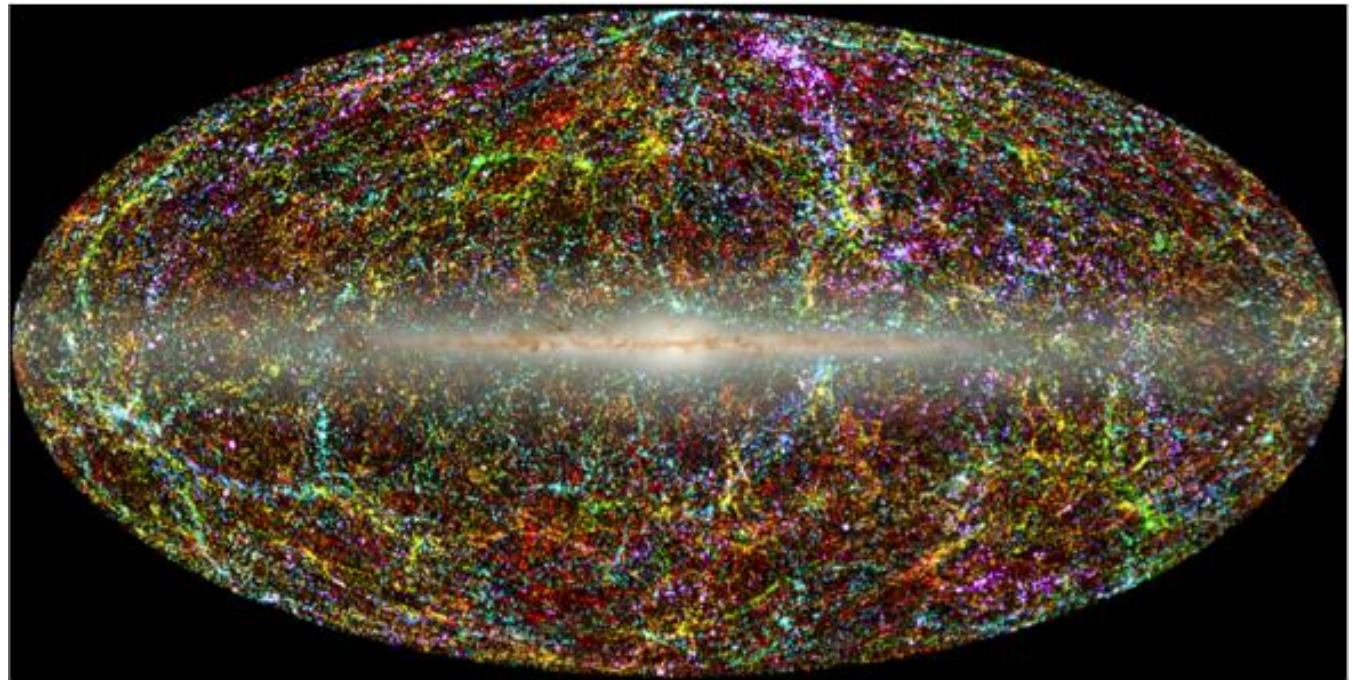
- Kosmologi studerar hela universum:
 - Hur uppkom universum?
 - Hur gammalt är universum?
 - Hur är materian och energin fördelad?
 - Hur uppkom elementarpartiklarna?
 - Hur uppkom grundämnena?
 - Hurdan är universums framtid?
- Modern astronomi och fysik har gjort kosmologin till en exakt vetenskap.



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.

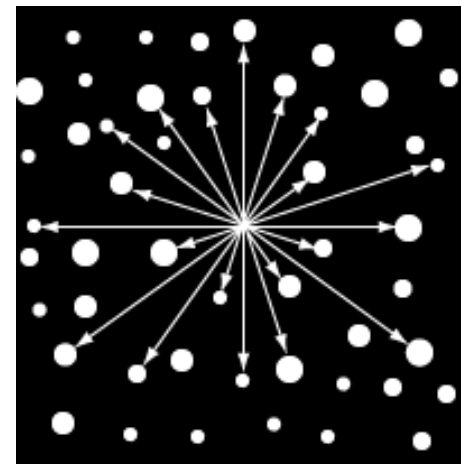
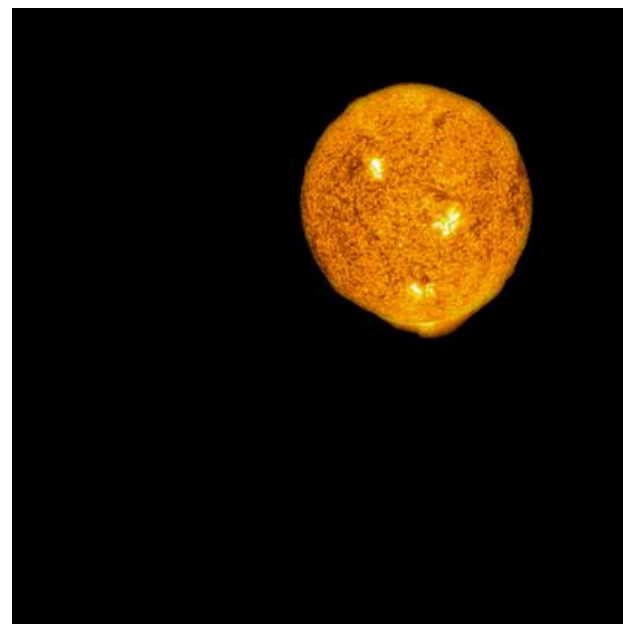


Bild:<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu>



Animation: Wikipedia



Uppgift

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



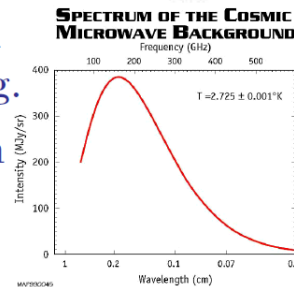
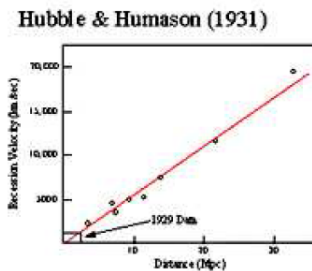
10.3 Vägen till den moderna kosmologin

- 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.

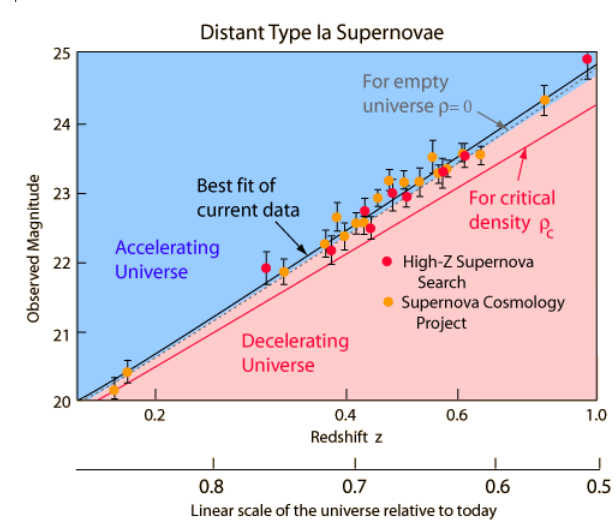
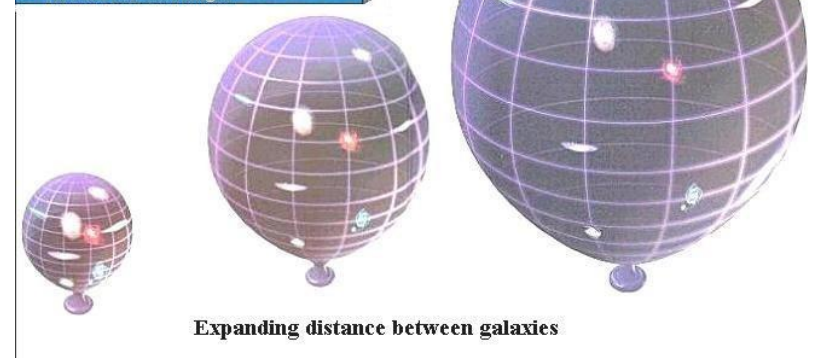
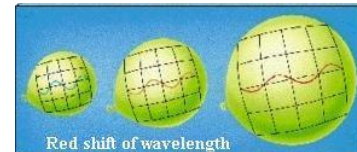


5. Väte- och helium förekommer i ungefär lika stora mängder överallt i universum.
6. De äldsta radioaktiva isotoperna är mindre än ca 14 miljarder år gamla.
7. Galaxernas fördelning verkar vara lika överallt i universum.
8. Evolutionseffekter syns på galaxer på stora avstånd (dvs. bakåt i tiden).



10.5 Universums expansion

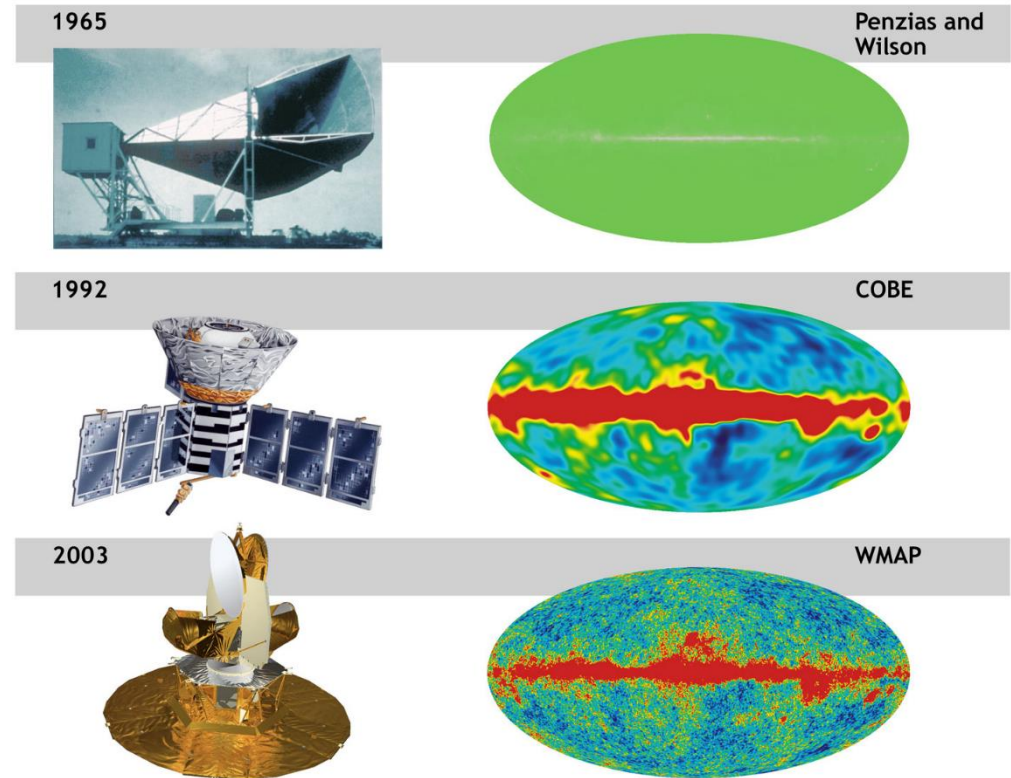
- I universums expansion är det rummet mellan galaxerna som expanderar.
- Observationer under senaste ca 20 åren => expansionen accelererar.





10.6 Kosmiska bakgrundsstrålningen

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

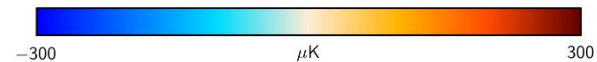
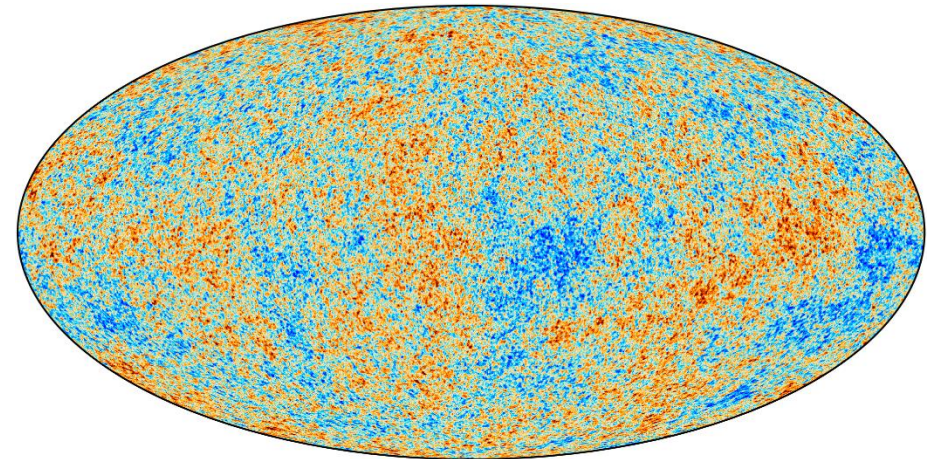


Vintergatan syns som ett band mot bakgrundsstrålningen.

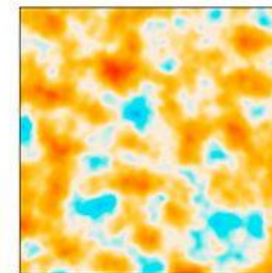


10.6 Kosmiska bakgrundsstrålningen (forts.)

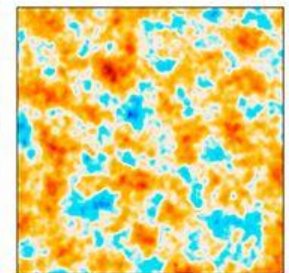
- Planck-satelliten utförde noggranna mätningar av bakgrundsstrålningen år 2010 – 2013.
- => Noggrannare värden för kosmologiska parametrar.



COBE



WMAP



Planck



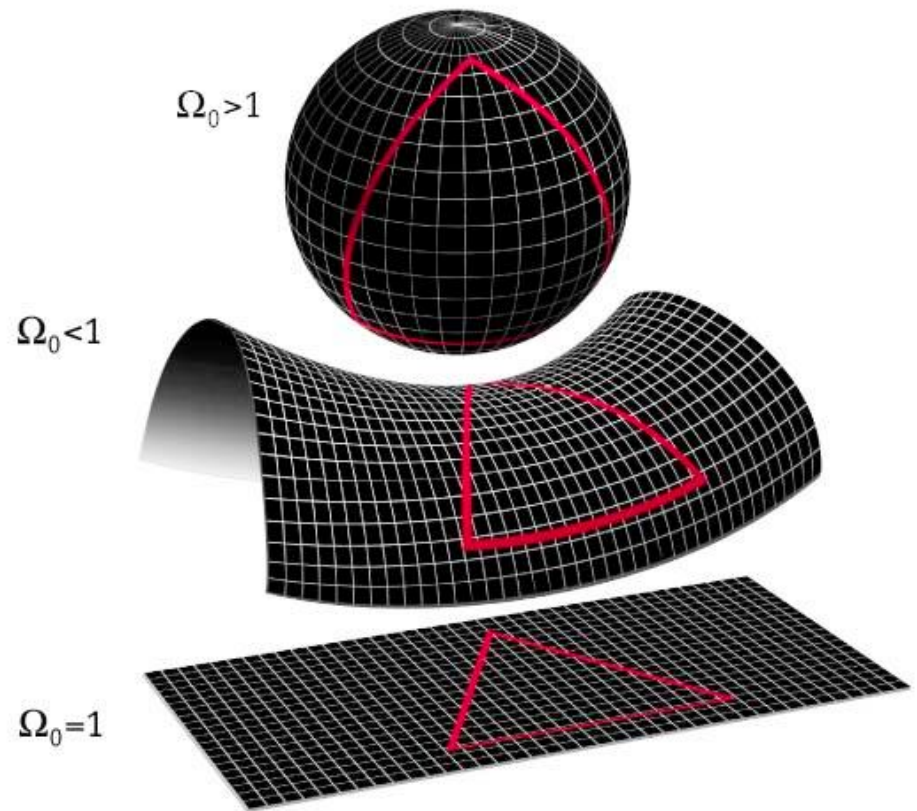
10.7 Universums geometri

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"), $\Omega_0 = 1$

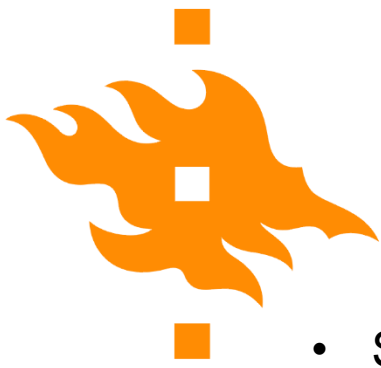


MAP990006



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.

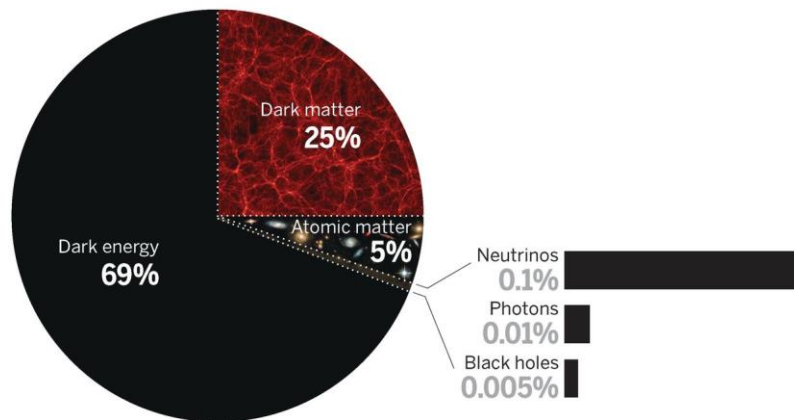


10.9 Nuvarande kosmologiska modellen

- 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).

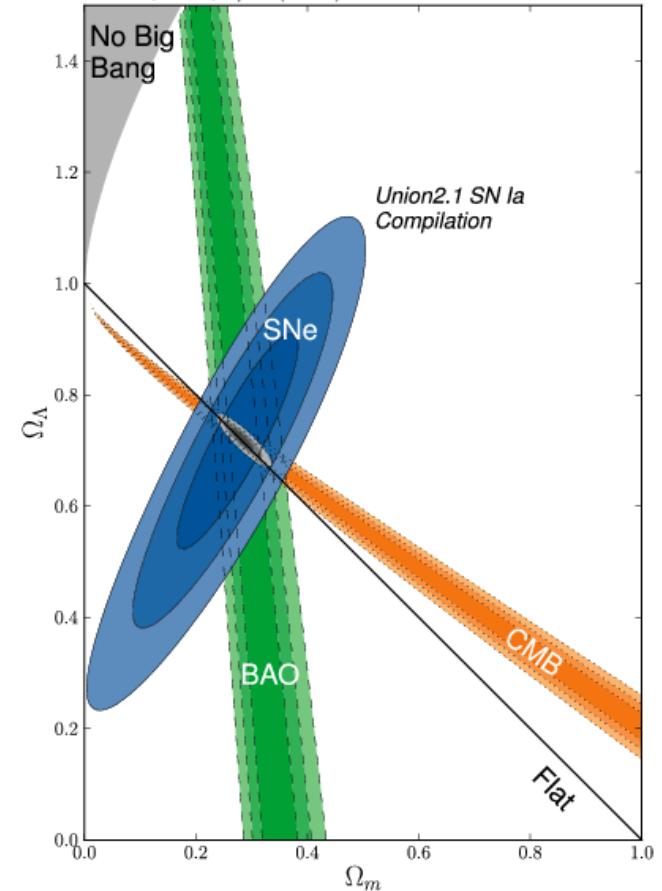
The multiple components that compose our universe

Current composition (as the fractions evolve with time)



Spergel (2015)

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



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

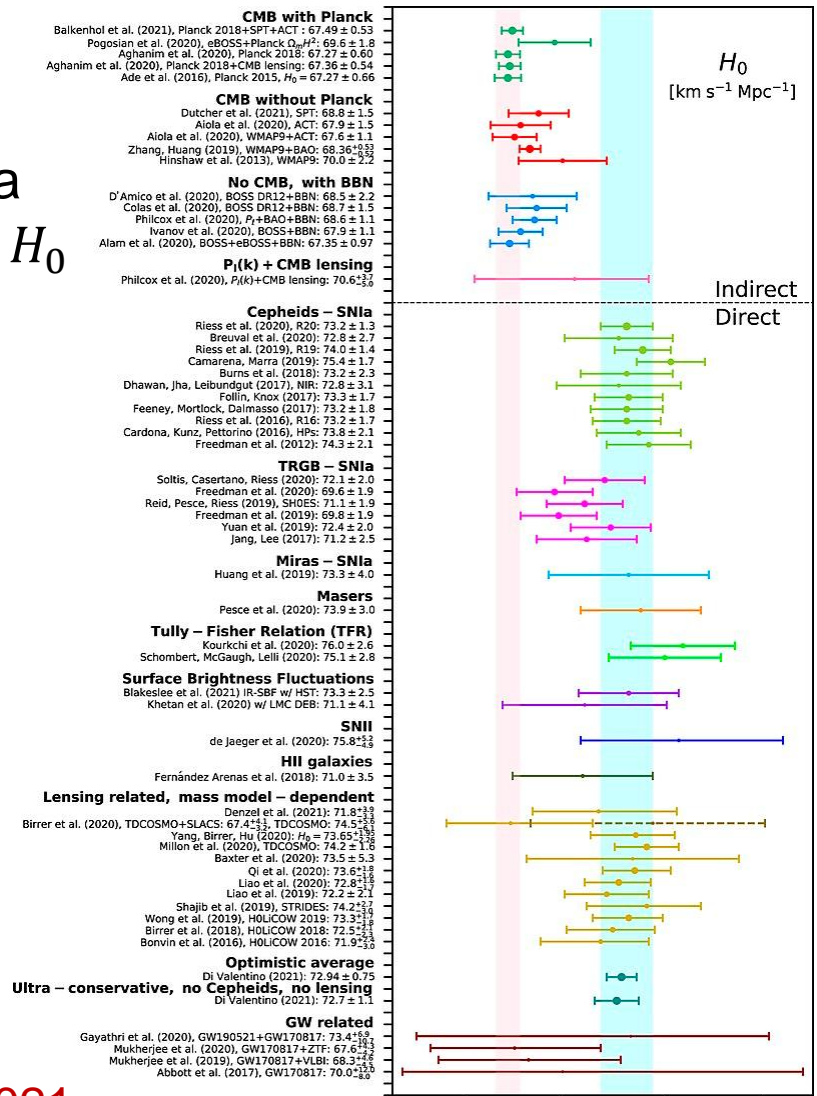
$$v = H_0 r$$

- Indirekta mätningar från bakgrundsstrålningen och big bang-nukleosyntesen ger

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

- ”Direkta” mätningar från nuvarande universum ger

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

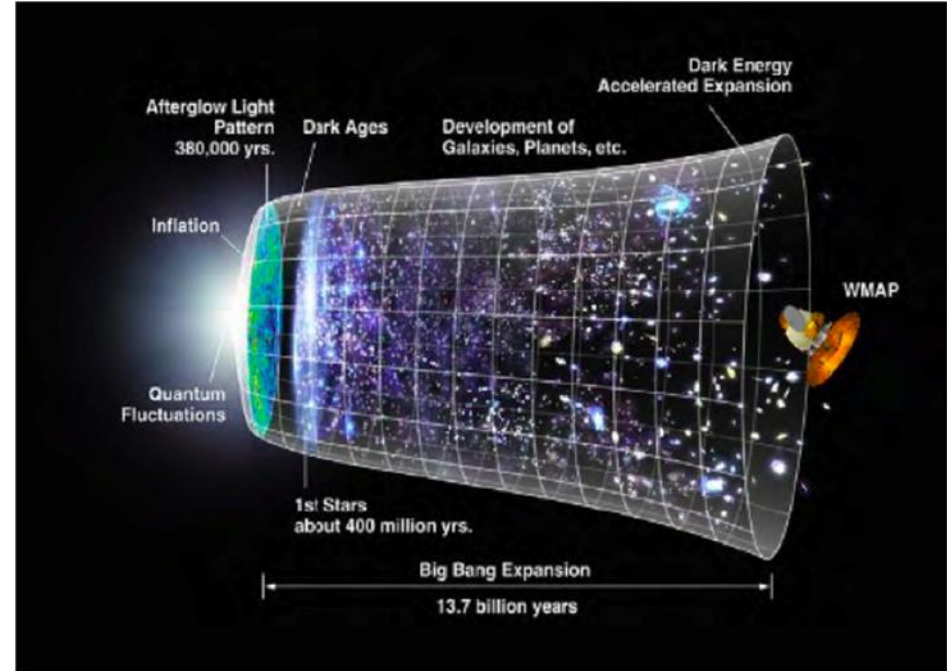


Di Valentino et al. 2021



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.





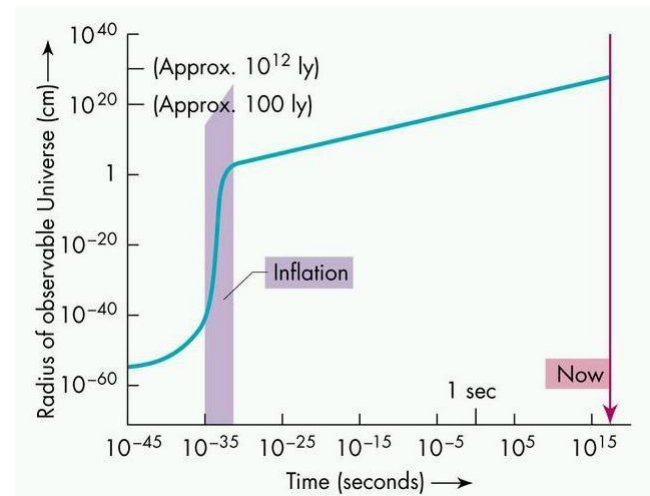
10.10.1 Universums epoker

- Temperaturen \Leftrightarrow energin/volymp 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: Kvarkepoken.
 - 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.

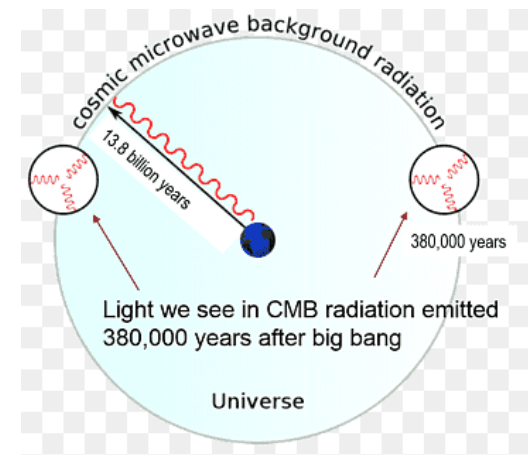


10.10.2 Inflation

- 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**

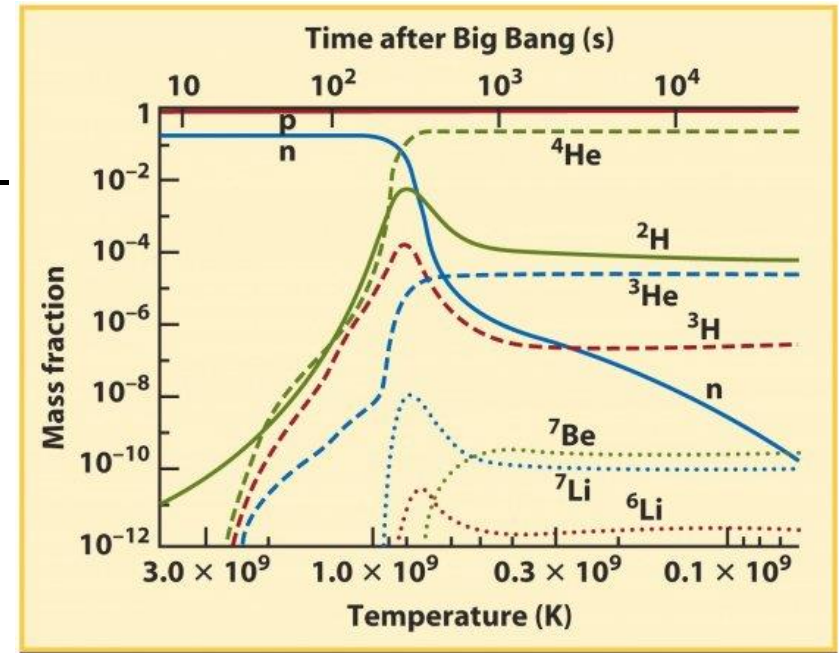


Horisontproblemet



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.



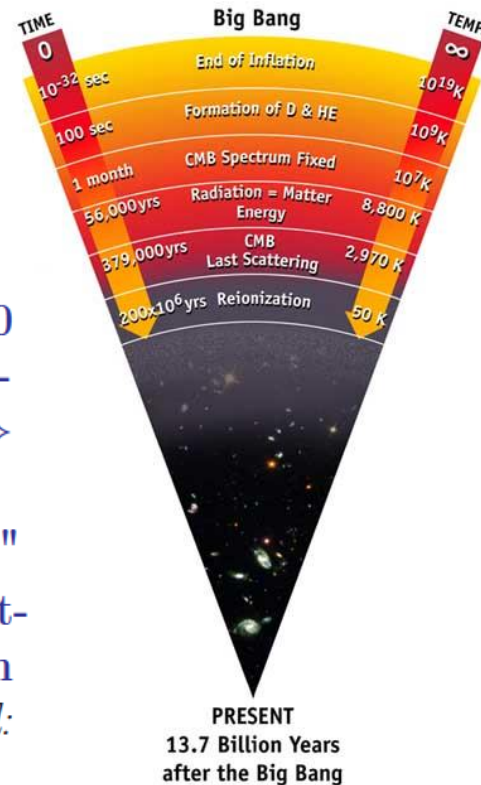
Big-bang nukleosyntes: H och He uppkommer i förhållandet 3:1.



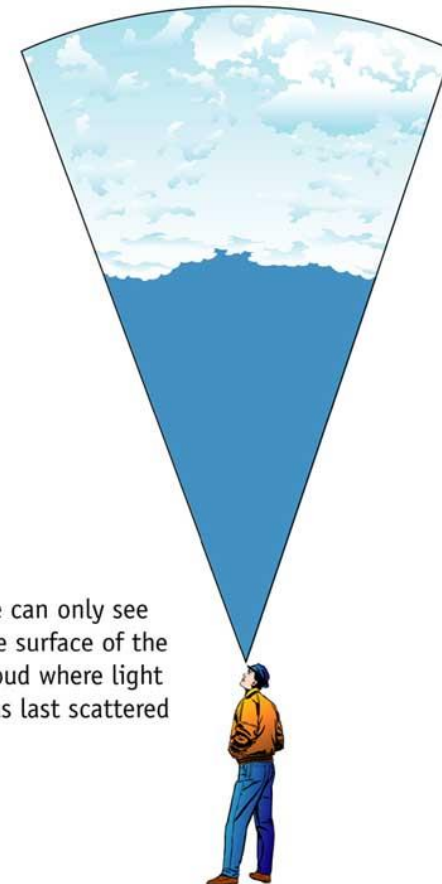
10.10.4 Bakgrundsstrålningen

- 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)



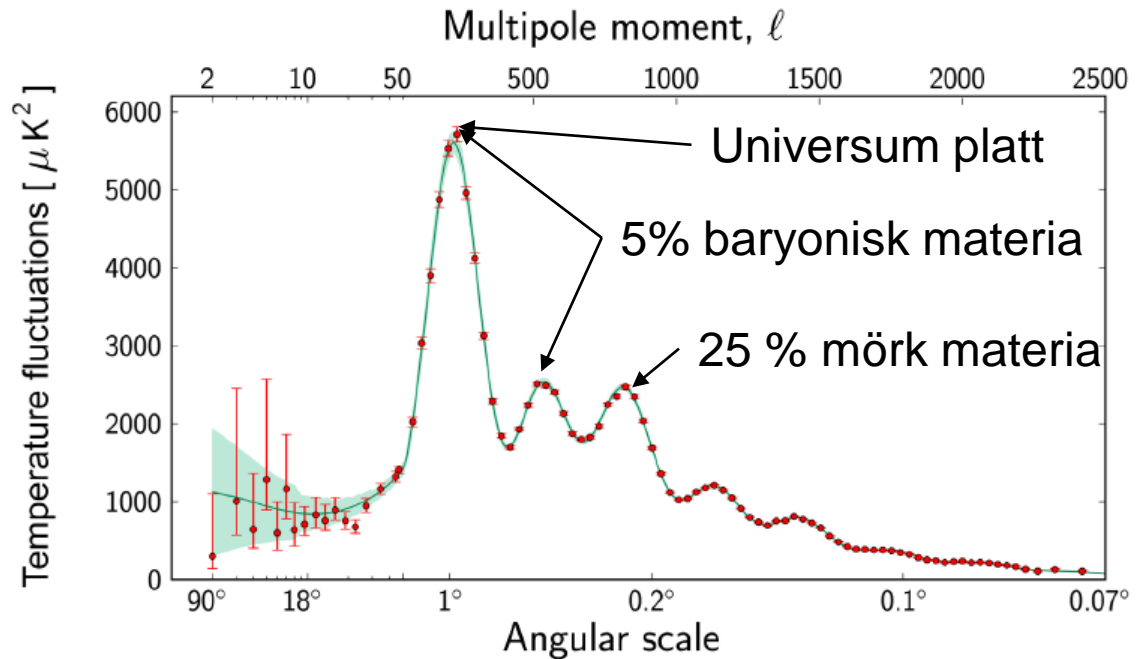
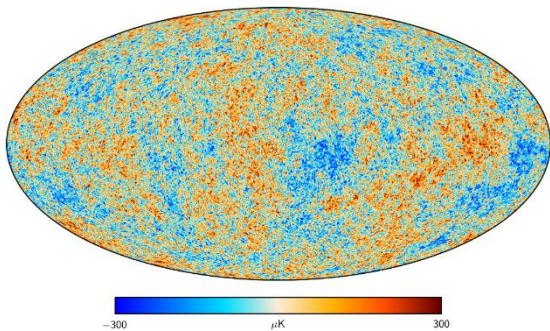
The cosmic microwave background Radiation's "surface of last scatter" is analogous to the light coming through the clouds to our eye on a cloudy day.



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.

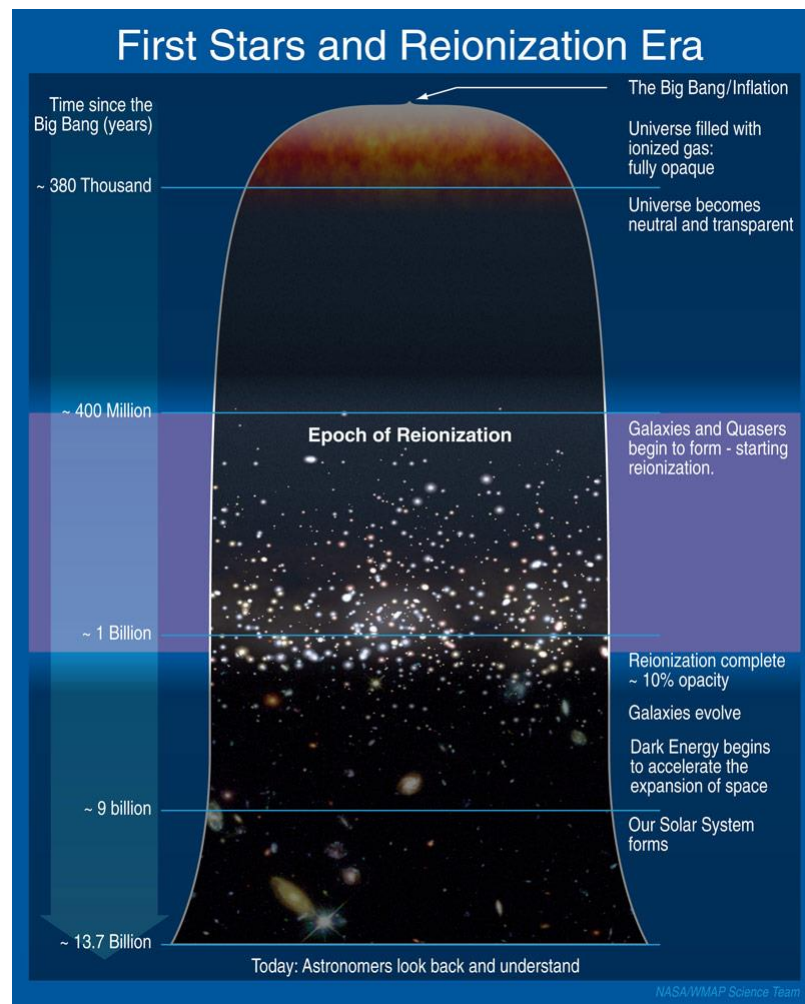
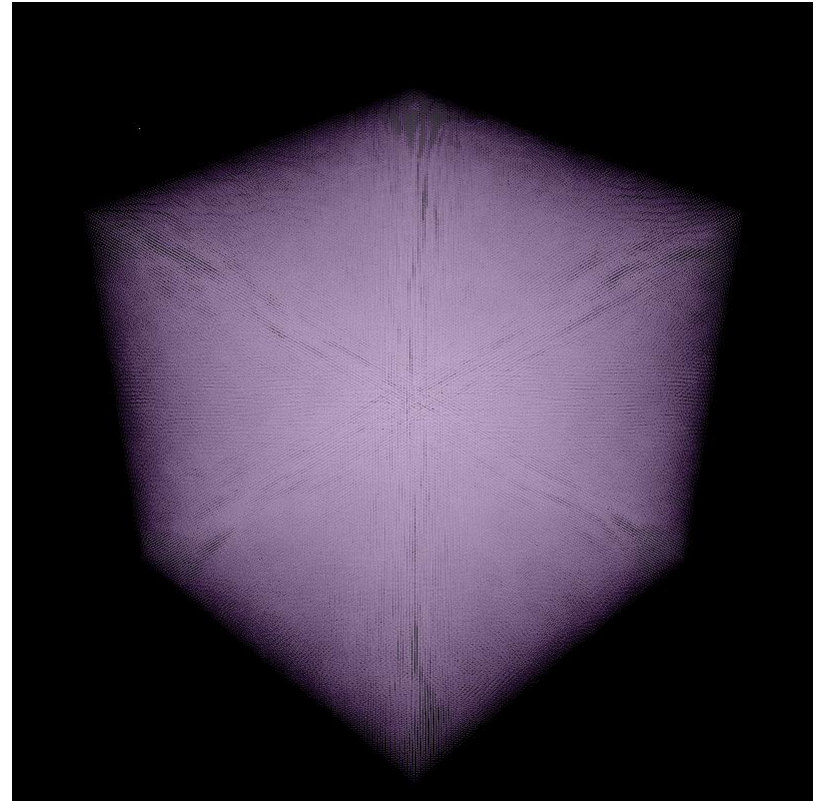


Bild: NASA



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.



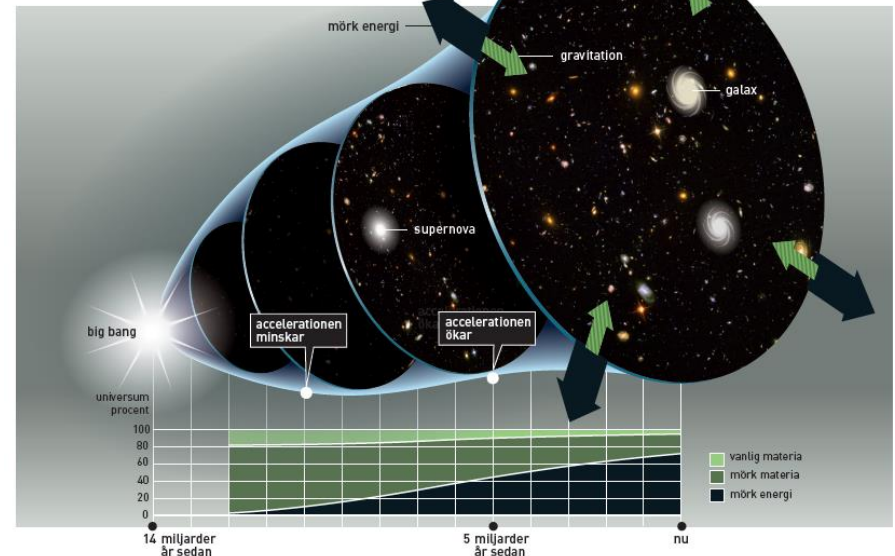
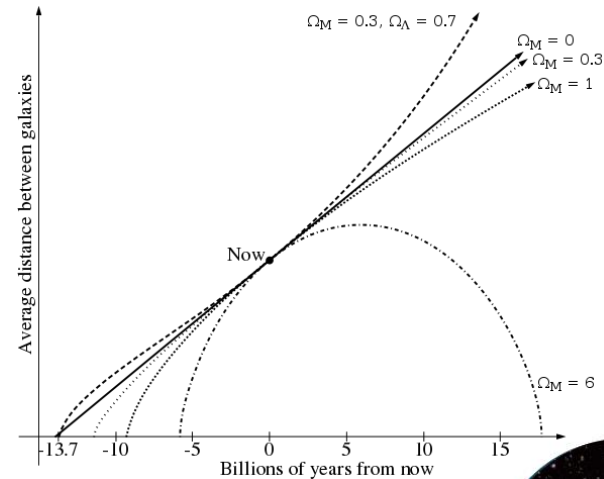
Animation av universums storskaliga evolution.



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.