

# Föreläsning 2/4 Big bang

Ulf Torkelsson

## 1 Enkla observationer om universums kosmologiska egenskaper

Oberoende av i vilken riktning på himlen vi tittar, så ser universum i stort sett likadant ut. Det tycks inte finnas någon riktning som är speciell i universum. Man säger att universum är isotropt. Det tycks också vara så att universum ser i stort sett likadant ut överallt. Man säger att universum är homogent. Antagandet att universum är isotropt och homogent kallas för den kosmologiska principen.

En mycket enkel observation är också att det är mörkt på natten, men varför är det mörkt på natten? Antag att universum är oändligt stort. I så fall spelar det ingen roll åt vilket håll vi tittar, förr eller senare skär vår synlinje ytan på en stjärna. Alltså borde hela himlen vara lika ljus som ytan på en stjärna. Detta kallas för Olbers paradox.

Den amerikanske astronomen Edwin Hubble upptäckte 1929 att ljuset från nästan alla galaxer är rödförskjutet. Denna rödförskjutning kan tolkas som en Dopplereffekt och då kan vi uttrycka den som en hastighet med vilken galaxen flyger bort från oss. Hubble upptäckte att denna hastighet ”är proportionell mot avståndet till galaxen

$$v = Hr \tag{1}$$

där  $H$  är Hubbles konstant. Detta är den typ av hastighetsfält vi förväntar oss att hitta om alla galaxer en gång i tiden har slungats ut från Jorden i en gigantisk explosion, fast vi ska senare se att denna naiva tolkning är fel. Om vi antar att galaxen har rört sig med en konstant hastighet  $v$  sedan begynnelsen, så kan vi skriva avståndet till galaxen som  $r = vt$ . Om vi sätter in detta i ekvationen får vi att

$$t = \frac{1}{H}. \tag{2}$$

Vi kan här tolka  $t$  som universums ålder. Hubbles konstant har uppmätts till  $20 \text{ km s}^{-1} \text{ Mly}^{-1}$  (vilket är ungefär tio gånger mindre än det värde Hubble uppmätte från början), vilket ger att universums ålder blir 14 miljarder år.

## 2 Teoretiska modeller

1916 publicerade Einstein sin allmänna relativitetsteori. Den gav ett nytt sätt att se på gravitationen. Istället för att tala om en kraft som verkade mellan himlakropparna, så tänkte sig Einstein att gravitationen krökte rumtiden. I denna krökta rumtid följde planeterna de banor som det var enklast att komma fram längs. När Einstein försökte att hitta en lösning som beskrev universum i stort uppstod det ett problem. Alla hans lösningar antingen expanderade eller kontraherade, fast de astronomer, som han pratade med, sa att universum var statiskt, det varken expanderade eller kontraherade. För att skapa ett statiskt universum la Einstein till en extra term, en kosmologisk konstant, till sina ekvationer. Effekten av den termen var att den motverkade gravitationen på stora avstånd. När Hubble senare annonserade att universum expanderar, så kallade Einstein den kosmologiska konstanten för sitt största misstag.

Vad betyder det då att universum expanderar? Väldigt naivt ser det ut som om alla galaxerna en gång i begynnelsen var samlade här på Jorden, och sedan i en plötslig explosion slängdes ut från Jorden. Så är det inte. Det finns inget speciellt med Jorden enligt den kosmologiska principen. Oberoende av i vilken punkt i universum som vi utför våra observationer så ser det ut som om galaxerna rusar iväg från just den punkten. Det finns inget centrum för den explosion ur vilken universum skapades, helt enkelt för att det inte var en explosion. Galaxerna i universum är helt

enkelt som russinen i en kaka som jäser. Galaxerna (russinen) rör sig egentligen inte, men avstånden i universum (kakan) växer med tiden, vilket får det att se ut som om galaxerna (russinen) rör sig bort från varandra.

Rödförskjutningen som Hubble observerade 1929 beror inte på att galaxerna verkligen rör sig utan på att avstånden i universum växer med tiden. Då växer också avstånden mellan vågtopparna i en elektromagnetisk våg. Det vill säga om ljuset som vi tar emot från en atom har en våglängd som är 10 % för lång, så betyder det att universum har blivit 10 % större sedan vågen sändes ut.

Genom att materien i universum kröker rumtiden runt sig så kan universum ha olika geometrier. Om det finns väldigt mycket massa i universum, så blir krökningen stor, och universum kommer att se ut som en tre-dimensionell motsvarighet till ytan på en sfär. Universum har i så fall en begränsad storlek, men saknar en rand. Vi säger då att universum är slutet. Motsatsen är förstås ett öppet universum. Om densiteten i universum är tillräckligt liten, så kommer universum istället att ha en negativ krökning och likna en sadelyta. Gränsfallet mellan de här två modellerna är det platta universumet, vilket saknar krökning och där Pythagoras sats gäller. Om vi räknar samman all ljus materia som vi ser i universum, så är mängden materia så liten att universum måste vara öppet, men vi har redan sett att det kan finnas mörk materia i universum, och den räcker kanske till för att göra universum slutet.

Universums geometri förändras inte medan universum expanderar, utan om universum är öppet idag, så har det alltid varit öppet och vice versa. Ett öppet universum kan vara oändligt stort, och har i så fall alltid varit oändligt stort, även vid tidpunkten för big bang. Det är bara så att avståndet mellan två godtyckliga punkter i universum blir mindre och mindre och går till slut mot noll om vi följer dem baklänges tillbaka till ögonblicket för big bang.

### 3 Big bang

Om vi skulle följa universums utveckling baklänges i tiden, så skulle vi se att universum blev tätare och tätare ju längre tillbaka vi kom. Om man komprimerar en gas så blir den varm, och på samma sätt var universum varmare när det var ungt. Faktum är att vid den tidpunkten då big bang började så var universum enligt nuvarande modeller oändligt varmt och oändligt tätt. Vi kan dock inte beskriva detta allra första ögonblick med våra nuvarande fysikaliska teorier.

Ungefär en  $\mu\text{s}$  efter big bang blev temperaturen så låg att det bildades protoner och neutroner. I början fanns det ungefär lika många protoner som neutroner, men när temperaturen sjönk så blev det fler protoner än neutroner. Protonerna är nämligen lite lättare och därför enklare att bilda. En sekund efter big bang gick det därför sex protoner på varje neutron. En minut efter big bang hade temperaturen blivit så låg att protonerna och neutronerna kunde slå ihop sig till atomkärnor. Det flesta neutronerna blev då uppbundna i  $\text{He}^4$ -kärnor, vilka består av två protoner och två neutroner, eftersom den är exceptionellt stabil, även om en del istället bildade tungt väte (deuterium),  $\text{He}^3$  eller  $\text{Li}^7$ . Den här eran, den kosmiska nukleosyntesen, var över 3 minuter efter big bang.

En av de stora triumferna för big bang teorin var att den på det här viset kunde förklara varför ungefär 23 viktsprocent av den vanliga materien i universum är helium. Halterna av de andra lätta atomkärnorna beror på hur tätt universum var vid tiden för nukleosyntesen. Vi kan därför använda observationer av förekomsterna av dessa atomkärnor för att bestämma densiteten av vanlig materia i universum. Deuterium är speciellt bra i det här fallet, eftersom deuterium inte kan bildas i stjärnorna. Vi kan på så sätt få en uppfattning om huruvida universum är öppet eller slutet. Densiteten av vanlig materia i universum är omkring 4 % av den kritiska densiteten som krävs för att universum skall bli platt. Slutsatsen borde därför bli att universum är öppet, men det kan finnas mörk materia som inte består av vanliga atomer.

Efter nukleosyntesen bestod universum av lätta atomkärnor, fria elektroner och fotoner. De fria elektronerna begränsade högst väsentligt hur långt fotonerna kunde gå genom universum så universum såg vid den här tidpunkten ut som en het, tät dimma. Efter några hundra tusen år så hade temperaturen sjunkit till 3 000 K, och elektronerna hade då förlorat så mycket energi att de fångades in av atomkärnorna, så att vi fick vanliga atomer. Utan elektronerna kunde fotonerna röra sig fritt och universum blev nu genomsynligt. Detta är därför den första tidpunkten i universums historia som vi direkt kan observera. Sedan dess har universum expanderat och blivit tusen gånger större,

vilket har gjort att temperaturen på den isotropa bakgrundsstrålning som bildades har blivit tusen gånger lägre. Den mikrovågsbakgrund som vi då får upptäcktes av Penzias och Wilson på 60-talet och anses tillsammans med halterna av de lätta grundämnena vara ett av de viktigaste argumenten för big bang.

## 4 Materiens uppbyggnad

Atomerna består av elektroner och atomkärnor, vilka i sin tur är sammansatta av protoner och neutroner, vilka i sin tur är uppbyggda av kvarkar. Protonen består av två upp-kvarkar (laddning  $2e/3$ ) och en ner-kvark (laddning  $-e/3$ ), medan neutronen består av en upp-kvark och två ner-kvarkar. Elektronen är å andra sidan så vitt vi vet en fundamental partikel. För att bygga upp hela det kosmos vi ser runt omkring oss så behöver vi bara dessa partiklar och neutriner.

Kvarkarna som bygger upp protoner och neutroner hålls samman av den starka kraften eller färgkraften. Kraften kallas för färgkraft, eftersom kvarkarna kan förekomma i tre typer, färger, vilka ofta betecknas med röd, gul och blå. Färgkraften fungerar så att kvarkarna alltid kombinerar ihop i vita, färglösa konfigurationer, vilka antingen består av en röd, en gul och en blå kvark, baryoner, eller en kvark med en färg och en antikvark med motsvarande antifärg, mesoner. En del av denna starka kraft, som håller ihop kvarkarna, läcker ut ur partiklarna och håller också samman protonerna och neutronerna i atomkärnan.

Elektroner och neutriner påverkas inte av den starka kraften, men precis som kvarkarna känner de av den svaga kraften. Sådana partiklar kallas för leptoner. Den svaga kraften är ansvarig för vissa typer av radioaktiva sönderfall, till exempel neutronens sönderfall

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e. \quad (3)$$

Man har också upptäckt två tyngre leptoner, myonen och tauonen, vilka liknar elektronen. Var och en av dessa partiklar har en motsvarande neutrino, så idag känner vi till tre typer av neutrinos, elektron-, myon- och tau-neutrino, vilka alla har mycket små massor. Man har också upptäckt fler kvarkar, så att man idag kan konstruera lepton-kvark-familjer, vilka ordnade efter familjernas massor blir:

1. Elektron, elektronneutrino, ner- och uppkvark.
2. Myon, myonneutrino, sär- och charmkvark.
3. Tauon, tauneutrino, botten- och toppkvark.

Det finns goda skäl bland annat från kosmologin att anta att det inte kan finnas fler lepton-kvark-familjer. Antalet typer av neutrinos som förekommer i det unga universum påverkar universums expansionshastighet. Ju fler neutrino typer det finns desto snabbare expanderar universum och svalnar av så mycket att det kan bildas helium. Om helium bildas tidigare har färre neutroner hunnit sönderfalla, och därmed kan mer helium bildas. Den observerade heliumhalten i universum visar att det inte kan finnas mer än tre typer av lätta neutriner.

Det finns fyra typer av fundamentala naturkrafter, gravitation, elektromagnetism, den starka och svaga kraften. Var och en av dessa krafter förmedlas av en typ av partikel, kraftbärare. Den elektromagnetiska kraften förmedlas av fotonen, gravitationen av gravitonen, den svaga kraften av W- och Z-partiklarna, och den starka kraften av gluonen. Teorin för den svaga växelverkan har visat att egentligen så är den svaga och den elektromagnetiska kraften olika aspekter på samma elektrosvaga kraft. Inspirerade av detta har man försökt konstruera så kallade storförenade teorier som förenar den starka och den elektrosvaga kraften till en kraft. Det finns också ambitiösa försök att skapa teorier om allting (TOE *Theory of Everything*) som förenar alla fyra krafterna.

Den storförenade teorin beskriver nya växelverkningar som omvandlar kvarkar till leptoner och vice versa. Dessa växelverkningar leder till att protonen blir instabil med en livstid på minst  $10^{30}$  år. Man har letat efter sönderfallande protoner, men utan att någonsin hitta några, vilket betyder att man kan utesluta några av de enklaste varianterna av storförenade teorier.

Den storförenade kraften har också en kosmologisk betydelse. Universum tycks vara fullständigt dominerat av materia, medan det mest naturliga från partikelfysikalisk synpunkt hade varit att det hade funnits lika mycket materia som antimateria i universum, men i så fall hade det bildats stora mängder gammastrålning då materia och antimateria hade annihilerat varandra, och denna gammastrålning observerar vi inte. En annan märklighet med universums uppbyggnad är att mikrovågsbakgrunden bidrar med omkring  $10^9$  fotoner per baryon. Lösningen på dessa problem är att den storförenade kraften beskriver X-partiklar som kan sönderfalla till antingen ett par kvarkar eller ett par av en antikvark och en antilepton. Hastigheten för X-partikeln och anti-X-partikeln sönderfall skiljer sig åt något, och detta kan leda till att vi får ett överskott av en partikel per  $10^9$  partikel-antipartikelpar. Partikel-antipartikelparen kommer senare att annihilera varandra och producera de fotoner, vilka idag bygger upp mikrovågsbakgrunden, medan den extra partikeln blir det som bygger upp materien runt oss.

## 5 Problem med big bang-modellen; inflationsmodellen

Ett allvarligt problem med big bang-modellen blev tydligt i och med upptäckten av den isotropa mikrovågsbakgrunden. Om vi tittar i två diametralt motsatta riktningar på himlen, så ser vi två områden som är separerade med nästan 28 miljarder ljusår, men universum är bara knappt 14 miljarder år gammalt. Det betyder att dessa två punkter på himlen ännu inte kan känna till varandras existens, eftersom ljuset från den ena punkten ännu inte har nått fram till den andra punkten. Hur kan de då veta att de skall sända ut mikrovågsstrålning med samma temperatur?

En del forskare uppfattar det också som ett problem att universums krökning är så liten. Argumentet är att man kan visa att för de vanliga kosmologiska modellerna så växer universums krökning med tiden. Om universum från början hade en liten negativ krökning så får det med tiden en mer negativ krökning och vice versa. Om vi då idag har en omätbart liten krökning i kosmos, så måste universums krökning från början ha varit osannolikt nära 0.

Ytterligare ett problem uppstår när man kopplar ihop big bang-modellen med teorin för den storförenade kraften. Den sistnämnda förutsäger nämligen att det skall finnas magnetiska monopoler, isolerade magnetiska nord- eller sydpoler, och dessa borde ha producerats i stora mängder under big bang, men inga sådana monopoler har någonsin observerats.

Man kan förklara alla dessa fenomen genom att universum ungefär  $10^{-35}$  s efter big bang gick igenom en fas då det dominerades av vakuumentergi enligt de storförenade teorierna. Så länge universum sitter fast i detta tillstånd kommer det att expandera exponentiellt. Till slut, vid  $10^{-32}$ s, sönderfaller vakuumentergerin i vanliga partiklar och antipartiklar, och expansion kommer att sakta av. Man talar om denna snabba expansion då universums storlek ökar med en faktor  $e^{1000}$  som inflation, uppblåsning. Det viktiga här är att expansionen sker snabbare än lineärt, vilket är det sätt på vilket ljuset breder ut sig. Det innebär att delar av universum som tidigare låg så nära varandra att de hade haft tid att utbyta ljussignaler kommer att transporteras så långt bort från varandra att tiden för en ny ljussignal att gå mellan dem blir större än universums nuvarande ålder. Alltså har de båda diametralt motsatta områdena, som vi idag tar emot mikrovågsbakgrunden ifrån, en gång i tiden befunnit sig i kontakt med varandra. Detta förklarar varför de kan ha samma temperatur. En annan konsekvens av uppblåsningen är att universum blir platt. Genom uppblåsningen följer det också att de magnetiska monopolerna som bildades innan uppblåsningen blir så utspridda att vi inte kan räkna med att hitta mer än en monopol inom det observerbara universum.

Om man vill utforska universums tidigaste utveckling innan inflationsfasen så behöver man till slut någon form av TOE, och före  $10^{-43}$  s kommer kvantmekaniska effekter att påverka rumtiden och därmed gravitationen. Än så länge finns det inte någon färdigutvecklad kvantgravitation, även om en del tror att strängteorin kommer att leda fram till en sådan teori.

## 6 Anisotropier i bakgrundsstrålningen och uppkomsten av storskaliga strukturer i universum

Under de sista tio åren har man sett små fluktuationer, anisotropier, på  $10^{-5}$  K i mikrovågsbakgrunden. Dessa fluktuationer har förmodligen också sitt ursprung i inflationen. Under inflationen förstörades små kvantfluktuationer upp i storlek och dessa utvecklades sedan till de anisotropier vi ser i mikrovågsbakgrunden. Dessa anisotropier, som vi mäter som variationer i mikrovågsbakgrundens temperatur, är i grund och botten variationer i både den baryoniska och den mörka materiens densiteter vid tiden för rekombinationen.

Innan rekombinationen är den baryoniska materien kopplad till strålningen, vilket leder till att fluktuationer i den baryoniska materien på korta längdskalor dämpas ut. Däremot kommer fluktuationerna i den mörka materien inte att dämpas ut på samma sätt genom strålningens inverkan, så den mörka materien kommer att bevara fluktuationerna på de små längdskalorna. (Strängt taget beror det här på egenskaperna hos den mörka materien. Om den mörka materien består av lätta partiklar som rör sig snabbt kommer deras slumpmässiga rörelser att dämpa ut fluktuationerna på små längdskalor. Idag tror vi dock att den mörka materien består av tunga partiklar som rör sig långsamt.) Efter rekombinationen är den vanliga materien fri att röra sig utan att påverkas av fotonerna. Då kommer materien att falla in mot de områden som har lägst gravitationell potential, det vill säga de områden där tätheten av den mörka materien är högst. Under kollapsen kommer materien att kylas ner genom att den sänder ut elektromagnetisk strålning. Detta leder till att den till slut blir mer koncentrerad än den mörka materien, och där koncentrationen är tillräckligt stor kommer det att bildas galaxer.

Hubble Space Telescope har direkt observerat galaxer ut till ett rödskifte  $z \sim 6$ , vilket betyder att det finns galaxer redan en miljard år efter big bang. Dessa galaxer är dock i allmänhet förhållandevis små och oregelbundna till strukturen. Man misstänker därför att dessa galaxer sedan kommer att kollidera med varandra och smälta samman, och på detta vis bygga upp de stora galaxer vi ser idag. För att vi skall kunna se de här galaxerna så måste universum också vara genomskinligt ända från den här tiden, men om den lilla mängd av baryonisk materia som finns mellan galaxerna fortfarande hade bestått av neutral gas, som den gjorde omedelbart efter rekombinationen, så hade gasen absorberat ljuset från de här galaxerna. Därför måste gasen återigen ha blivit joniserad.

Satelliten *Wilkinson Microwave Anisotropy Probe* (WMAP) har mätt upp en svag polarisation hos mikrovågsbakgrunden. Denna polarisation uppstår när fotonerna sprids mot elektronerna i den joniserade gasen mellan galaxerna. Polarisationmätningarna visar att gasen var joniserad redan vid ett rödskifte på 10. Eftersom det är den ultravioletta strålningen från heta stjärnor som joniserar gasen, så betyder det att det hade börjat bildas stjärnor redan några hundra miljoner år efter big bang.