

Föreläsning 29/4 Universums ursprung

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 gravitationskraft som verkade mellan himlakropparna, så tänkte sig Einstein att gravitationen krökte rumtiden. I denna krökta rumtid följde planeterna de banor som det var lättast 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 är inte något 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 alla avstånd 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 beror det på 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 naturligtvis 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 stjärnorna i en galax och galaxerna i en galaxhop rör sig så snabbt att det krävs en osynlig, mörk materia, som bidrar med sin gravitation, för att galaxerna och galaxhoparna ska hålla ihop och inte flyga isär.

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 μs 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 billigare att bilda. En minut efter big bang hade temperaturen blivit så låg att protonerna och neutronerna kunde slå ihop sig till atomkärnor. Vid denna tid gick det ungefär 6 protoner per varje neutron. Det flesta neutronerna blev uppbundna i He^4 -kärnor, vilka består av två protoner och två neutroner, eftersom He^4 är exceptionellt stabil, även om en del också bildades små mängder tungt väte (deuterium), He^3 och Li^7 . Den här eran, den kosmiska nukleosyntesen, var över några minuter senare.

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 genom att fotonerna bytte riktning varje gång de kolliderade med en elektron. Därför såg universum vid den här tidpunkten ut som en het, tät dimma. Efter några hundratusen 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. Det vi ser är en värmestrålning, som kommer lika starkt från alla riktningar på himlen. Sedan denna strålning släpptes lös har universum expanderat och blivit tusen gånger större, vilket har gjort att temperaturen på denna bakgrundsstrålning har blivit tusen gånger lägre. Denna mikrovågsbakgrund upptäcktes av Penzias och Wilson på 60-talet och anses tillsammans med halterna av de lätta grundämnena vara de viktigaste argumenten för big bang.

4 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 30 miljarder ljusår, men universum är bara knappt 15 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 är praktiskt taget platt, som vi kommer att se senare. 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 positiv eller negativ krökning så får det med tiden en allt större positiv eller negativ krökning. 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 hur naturkrafterna fungerade i det tidiga universum. Denna förutsäger nämligen att det skall bildas 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 vakuumenergi. Så länge universum sitter fast i detta tillstånd kommer det att expandera allt snabbare. Till slut, vid 10^{-32} s, sönderfaller vakuumenergin 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 den fart med vilken 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, men sedan tappat kontakten. 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.

5 Hur länge kommer universum att expandera

All materia i universum utövar en gravitation som långsamt borde bromsa upp universums expansion, så kommer universum att sluta expandera i framtiden, och kanske till och med dra ihop sig igen? Om universums täthet är tillräckligt hög, så kommer expansionen att upphöra en dag. Sedan slutet av 1990-talet finns det dock observationer som tvärtom tyder på att universums expansion accelererar med tiden. Denna upptäckt har belönats med 2011 års nobelpris i fysik. Hur går det till? Einsteins kosmologiska konstant kan inte bara stoppa ett statiskt universum från att kollapsa, utan i ett expanderande universum kan den till och med skjuta på expansionen.

Det märkliga är nu att den kosmologiska konstanten inte bara accelererar universums expansion, utan den bidrar också till universums krökning. Därför är det möjligt att ha ett platt eller slutet

universum i vilket expansionen accelererar.

För att bestämma universums geometri behöver vi göra en annan form av observationer. En sådan teknik är att titta på storleken av fluktuationerna på 10^{-5} K i mikrovågsbakgrunden. Dessa fluktuationer har sitt ursprung i små kvantfluktuationer innan inflationen, men deras storlek blåstes sedan upp under inflationen. Senare i universums historia, efter rekombinationen blev de sedan fröna till galaxerna. De områden som hade ett överskott på materia kom genom sin starkare gravitation att dra till sig omkringliggande materia. Hur storleken på de här fluktuationerna utvecklas från slutet av inflationen fram till rekombinationen bestäms av universums geometri. Under det senaste decenniet har det kommit flera nya mätningar av dessa fluktuationer från experiment som WMAP och Planck. Dessa experiment tyder på att universum är praktiskt taget platt. När man lägger samman alla dessa resultat så tycks universum bestå av 5% vanlig materia, 26% mörk materia (som inte kan vara uppbyggd av atomer) och till 69% av den kosmologiska konstanten eller något som liknar den kosmologiska konstanten (kvintessens).

Det senaste framsteget på området är att man till och med har kunnat mäta en svag polarisation hos mikrovågsbakgrunden. När man studerar det mönster som polarisationen bildar på himlen ser man att en del av mönstret bara kan förklaras genom att mikrovågsbakgrunden också har påverkats av gravitationsstrålning som bildades under inflationseran.