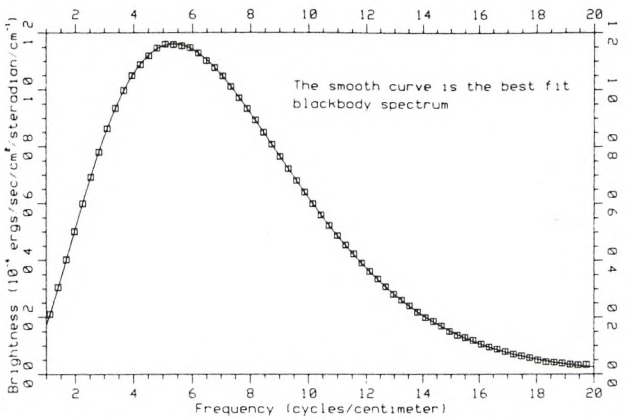
Kosmologi og partikelfysik

Charlotte Fløe Kristjansen, Niels Bohr Institutet

Ordet kosmologi er afledt af det græske ord kósmos, som betyder verden. Kosmologi er læren om universets struktur og udvikling. I kosmologien har man lige som i partikelfysikken en standardmodel. Kosmologiens standardmodel er baseret på Einsteins almene relativitetsteori og den antagelse, at universet kan betragtes som homogent og isotropt. Den almene relativitetsteori relaterer universets dynamik til dets energitæthed, men fortæller ikke på hvilken form eller i hvilken mængde, universets energi optræder. Med til Standardmodellen hører en antagelse om, hvilken type stof universet består af. Derimod må universets faktiske energitæthed (og visse integrationskonstanter) bestemmes ved observationer.

Standardmodellen er et succesrigt første skridt på vejen til forståelsen af universet. Modellen har givet anledning til adskillige forudsigelser, som er blevet bekræftet ved observationer. Den nok mest omtalte af Standardmodellens forudsigelser er den, som bygger på de færreste forudsætninger, nemlig forudsigelsen om, at universet ikke er statisk, men enten udvider sig eller trækker sig sammen. Denne forudsigelser er uafhængig af universets partikelindhold. Den blev bekræftet i 1929 af E. Hubble, som observerede, at lyset fra fjerne galakser modtages rødforskudt på jorden, og deraf sluttede, at universet ekspanderer. Med blot én yderligere, ikke særlig restriktiv antagelse om typen af stof, universet består af, følger det endvidere af Standardmodellen, at der har været et tidspunkt (for ca. 15 mia. år siden), hvor afstanden mellem alle punkter i universet var lig nul. Dette resultat udtrykkes ofte ved, at universet blev født ved et såkaldt Big Bang. I Standardmodellen antages det, at det tidlige univers bestod af en gas af relativistiske partikler i termisk ligevægt. Da tætheden var meget stor, må temperaturen have været meget høj. Denne periode i universets historie kaldes for den strålingsdominerede æra. Efterhånden som universet har udvidet sig, er dets temperatur aftaget, og kun masseløse partikler er vedblevet at være relativistiske. På et tidspunkt er energitætheden hidrørende fra ikke relativistiske partikler kommet til at dominere over energitætheden hidrørende fra relativistiske partikler, og den strålingsdominerede æra er blevet afløst af den såkaldte stofdominerede æra. Den kosmologiske standardmodel kaldes af indlysende årsager også for "The Hot Big Bang Model".

For at forstå hvorfor universet ser ud, som det gør i dag, er det nødvendigt at kende naturen af de vekselvirkninger, der fandt sted under de ekstreme forhold, som herskede i det tidlige univers. Forståelsen af vekselvirkninger ved høj energi er netop målet for partikelfysikken, så her smelter kosmologiens og partikelfysikkens interessesfærer sammen. Enhver antagelse om universets partikelindhold må naturligvis være i overensstemmelse med partikelfysikkens resultater og må modificeres i takt med, at disse modificeres. Omvendt må antagelser i partikelfysikken modificeres, hvis de har kosmologiske konsekvenser, som ved observationer viser sig ikke at være korrekte. Via denne vekselvirkning mellem de to felter har man opnået en konsistent beskrivelse af universet tilbage til $t = 10^{-10}$ s. Undervejs har der været adskillige eksempler på, at ideer eller resultater fra det ene felt har influeret kraftigt på det andet.



Figur 1. Baggrundsstrålingens spektrum observeret fra COBE satellitten. Den fuldt optrukne kurve er Planckkurven for temperaturen 2,735 K.

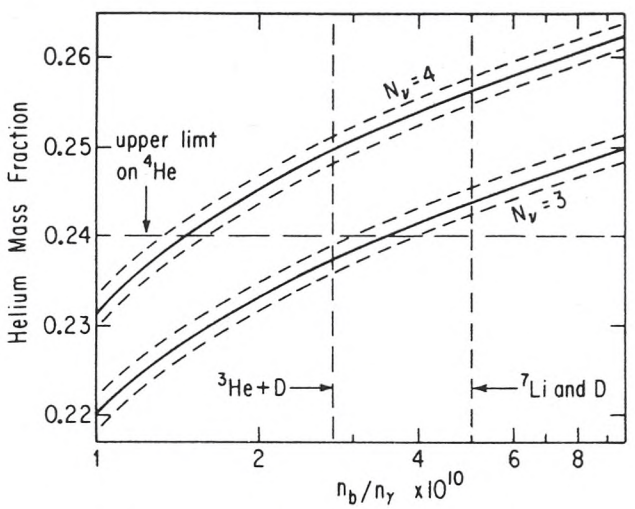
Den ide, at temperaturen i det tidlige univers var meget høj blev fremsat af Gamow i 1940'erne. Gamow havde i mange år beskæftiget sig med kernefysik og begyndte at spekulere over, hvordan dannelsen af universets grundstoffer kunne være foregået. Han indså, at de relative forekomster af brint og helium — de to grundstoffer, som udgør hovedparten af universets masse — kunne forklares, hvis man antog, at det tidlige univers havde indeholdt meget højenergetiske fotoner, og at stof og stråling havde været i termisk ligevægt. Det blev snart erkendt, at Gamows fotongas stadig måtte være til stede i universet i dag. En fotongas i termisk ligevægt med et materiale har en frekvensfordeling, som følger en Planck kurve. Den oprindeligt højenergetiske stråling bliver afkølet, efterhånden som universet udvider sig, og på et tidspunkt ophører den med at vekselvirke med stoffet. Frekvensfordelingen vil dog fortsat følge en Planck kurve, fordi alle fotoners bølgelængde under universets ekspansion forøges med samme faktor. Gamow og hans kolleger beregnede, at strålingens nuværende temperatur måtte være ca. 5 K. Denne kosmiske baggrundsstråling blev opdaget i 1961 af to radioastronomer, Penzias og Wilson. Siden da er baggrundsstrålingen blevet analyseret i stadig større detalje. Senest har man via satellit foretaget målinger af baggrundsstrålingen uden for jordens atmosfære. Målingerne har med endnu større tydelighed end tidligere bekræftet baggrundsstrålingens termiske natur (se figur 1).

Strålingens temperatur bestemtes til 2,735 K. Observationer har ligeledes vist, at baggrundsstrålingen er særdeles isotrop. Opdagelsen af baggrundsstrålingen var en stor triumf for Big Bang modellen og en tilskyndelse til fortsat samarbejde mellem partikelfysikere (dengang kernefysikere) og kosmologer.

I takt med udviklingen af kernefysikken blev forståelsen af dannelsen af kernestof (nukleosyntesen) ved universets skabelse mere nuanceret. Man indså, at kun de allerletteste grundstoffer var blevet dannet i det tidlige univers. De tungere grundstoffer opstod langt senere ved kerneprocesser i stjernernes indre. Ved hjælp af teorien for den primordiale (oprindelige) nukleosyntese er man i stand til at beregne den relative forekomst af lette grundstoffer i universet. I beregningerne indgår flere parametre, hvis værdier ikke er eksakt kendte. Det er imidlertid bemærkelsesværdigt, at den observerede relative forekomst af lette grundstoffer kan opnås uden at komme i konflikt med andre eksperimenters bånd på disse parametre.

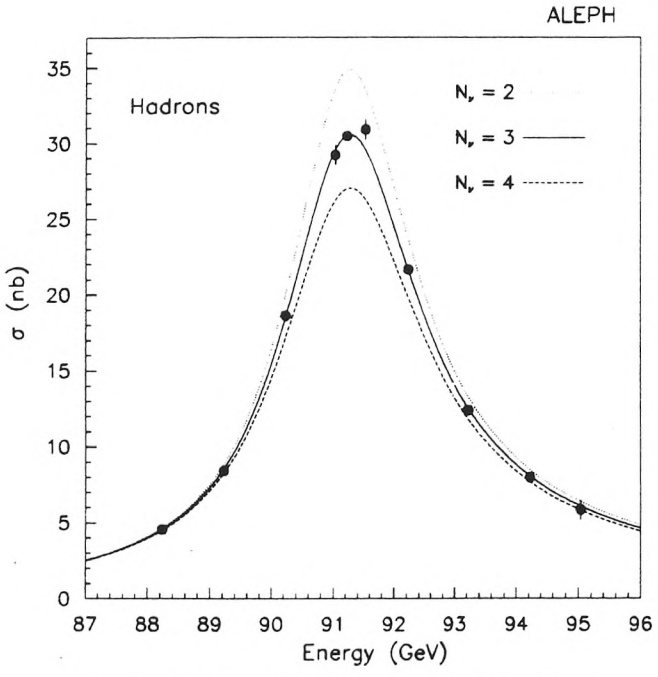
Teorien for nukleosyntesen er nu så veletableret, at man benytter den observerede relative forekomst af de lette grundstoffer til at sætte grænser for de i teorien indgående parametre. En af disse parametre er antallet af lette neutrinoer. Forekomsten af ^{4}He sætter en øvre grænse for dette antal. For at finde årsagen til denne sammenhæng skal man tilbage til de første sekunder efter Big Bang. Til tiden $t = 10^{-2}$ s var universets temperatur 10^{11} K. Energitætheden var domineret af relativistiske partikler, hvis typiske energi var af størrelsesordenen 10 MeV. Neutroner og protoner blev holdt i termisk ligevægt via vekselvirkninger med elektronneutrinoer. Til tiden t = 1s var den typiske energi for de relativistiske partikler faldet til 1 MeV, hvilket er mindre end masseforskellen mellem en proton og en neutron. Omkring dette tidspunkt ophørte neutrinoerne derfor med at inducere neutronproduktion. Da var forholdet mellem antallet af neutroner og protoner som 1:7. Endnu kunne ingen stabile kerner eksistere. Nukleosyntesen begyndte først ca. 100 s senere, hvor temperaturen var faldet til 10^9 K og den typiske energi for universets fotoner var 0,1 MeV. Stort set alle universets neutroner blev bundet i ^{4}He-kerner. Nogle få gik til dannelsen af ^{3}He, ^{2}D og ^{7}Li. De overskydende protoner forblev enlige. Efter yderligere 10^{13} s er fotonernes energi faldet til ca. 10 eV, og det bliver muligt for neutrale atomer at eksistere. Snart efter afkobler strålingen fuldstændigt fra stoffet. Efter rekombinationen består universets masse overvejende af brint.

Den relative forekomst af de øvrige lette grundstoffer afhænger af flere faktorer. En af dem er forholdet mellem tætheden af protoner og neutroner og tætheden af fotoner, n_b/n_γ. Jo større dette forhold er, jo hurtigere forløber de kernereaktioner, der leder til dannelsen af grundstoffer tungere end brint. Betydningen af denne parameter er imidlertid langt mindre for ^{4}He end for ^{3}He, ^{2}D og ^{7}Li. Det, som bestemmer den relative forekomst af ^{4}He, er n_n/n_p, forholdet mellem antallet af neutroner og protoner ved nukleosyntesens start. Når neutrinoerne afkobler fra stoffet, har n_n/n_p den værdi, som er karakteristisk for termisk ligevægt ved den pågældende temperatur. Herefter ændres n_n/n_p kun ved, at neutronerne henfalder. Hvor mange neutroner, som når at henfalde inden nukleosyntesens start, afhænger dels af neutronens henfaldstid, og dels af hvor lang tid der går, før universets temperatur er faldet tilstrækkeligt meget til, at stabile kerner kan eksistere. Sidstnævnte afhænger af universets ekspansionshastighed, som igen er bestemt af dets energitæthed. Jo større energitæthed, jo hurtigere ekspanderer universet, og jo hurtigere falder dets temperatur. Ved den temperatur, som vi her betragter, hidrører energitætheden alene fra relativistiske partikler og er desto større, des flere arter af relativistiske partikler der er til stede.



Figur 2. Kosmologiens bestemmelse af n_ν. Beregnede værdier for den relative forekomst af ^{4}He som funktion af forholdet mellem antallet af protoner og neutroner og antallet af fotoner for forskellige værdier af n_ν. Udtværingen af kurverne for n_ν=3 og n_ν=4 skyldes usikkerheden på neutronens levetid. Den horisontale og de to vertikale liner er grænser på de indgående parametre sat ved observationer.

Af lette partikler, som er til stede her ca. 1s efter Big Bang, kender vi fotonen og neutrinoerne ν_e, ν_μ og ν_τ. Målinger af den relative forekomst af ^{4}He fortæller os, at der højst er tre neutrinoer, som er relativistiske ved energien 1 MeV (se figur 2). Tallet 3 som astrofysikernes øvre grænse på antallet af lette neutrinoer, n_η, er resultatet af en analyse foretaget i 1990. Den ide, at man kunne bruge forekomsten af ^{4}He til at sætte en sådan grænse, stammer imidlertid fra midten af halvfjerdserne. Den første analyse gav $n_\nu \leq 7$. Resultatet vakte partikelfysikernes interesse. Opdagelsen af τ-leptonen ved SLAC i 1976 havde vist, at der var flere familier af partikler end to som oprindeligt antaget. Dette ledte til spekulationer om, hvorvidt antallet af familier var begrænset. Partikelfysikernes standard model gav intet svar. Eftersom hver familie af partikler i Standardmodellen indeholder netop én neutrino, kom kosmologiens standardmodel svaret nærmere. Siden 1976 har partikelfysikerne fundet yderligere to tredie familis partikler, nemlig *b*-kvarken og τ-neutrinoen. Man mangler nu blot at påvise eksistensen af den såkaldte top kvark for at have hele familien.



Figur 3. Partikelfysikkens bestemmelse af n_ν. Tværsnittet for hadronproduktion i $e^+ e^-$ kollisioner som funktion af energien i tyngdepunktssystemet.

I dag ved man, at man ikke skal forvente at finde yderligere familier af partikler med samme egenskaber som de allerede kendte: De tre neutrinoer ν_e, ν_μ og ν_τ vejer mindre end henholdsvis 12 eV, 0,27 MeV og 35 MeV — og eksperimenter ved LEP har for nyligt vist, at der kun findes tre neutrinoer med hvilemasse under 45 GeV. Dette bånd på antallet af lette neutrinoer er man kommet frem til ved at studere den såkaldte Z^0 partikel. Z^0 partiklen vejer ca. 90 GeV. Den er ikke stabil, men kan henfalde til par af kvarker, ladede leptoner eller neutrinoer, forudsat henfaldsprodukternes hvilemasse ikke overstiger 90 GeV. Henfaldet sker hyppigst til kvarker. Kvarker kan som bekendt ikke eksistere frit. At henfaldet er sket via denne kanal ses af, at slutprodukterne er hadroner. Levetiden for Z^0 partiklen afhænger af antallet af mulige henfaldskanaler. Jo flere henfaldsmuligheder, des kortere levetid. Z^0 partiklen kan produceres i e^+e^- kollisioner. I figur 3 ses, hvorledes den giver sig til kende som en resonans i tværsnittet for hadronproduktion ved sådanne kollisioner. Resonansens bredde er proportional med Z^0'ens levetid, og tværsnittets maksimum er omvendt proportionalt med kvadratet på levetiden. Det præcise udseende af resonanskurven kan beregnes for forskellige værdier af n_ν. Sammenligning med eksperimenter viser, at n_ν=3 (se figur 3). At man finder samme bånd på n_ν ved eksperimenter ved LEP som ved observationer af stjerner og galakser er et tydeligt tegn på, at både kosmologiens og partikelfysikkens standardmodel er skridt i den rigtige retning, når det gælder vor forståelse af universet.

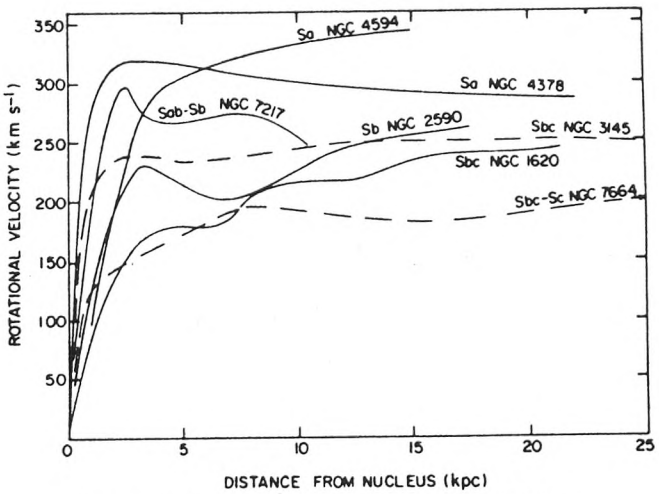
Eksperimenterne ved LEP viser endvidere, at partikelfysikkens standardmodel er gyldig ved energier på op til mindst 100 GeV. Der er derfor god grund til at tro, at modellen giver en korrekt beskrivelse af universets partikelindhold tilbage til det tidspunkt, hvor den typiske energi for de relativistiske partikler var af denne størrelsesorden, dvs. tilbage til $t = 10^{-10}$ s. Af partikelfysikkens standardmodel følger, at en vigtig begivenhed i universets historie indtraf omkring tidspunktet $t = 10^{-5}$ s. Da blev kvarkerne for evigt bundet i hadroner. Med LHC bliver det muligt at teste partikelfysikkens standardmodel op til energier på 1000 GeV — eller om man vil at genskabe forholdene i universet, som det så ud 10^{-12} s efter Big Bang.

Selv om de to standardmodeller har fejret mange store triumfer, er de langt fra endegyldige teorier. Begge efterlader mange uafklarede spørgsmål.

I kosmologien er det spørgsmål, som trænger sig mest på: ''Hvor stor er universets energitæthed?'' Det er nemlig energitætheden, som bestemmer universets fremtidige skæbne. Hvis energitætheden overstiger en vis kritisk energitæthed, ρ_c, vil universets ekspansion på et tidspunkt ophøre og efterfølges af sammentrækning. Universet vil således gå til grunde i et ''Big Crunch''. Hvis energitætheden derimod er mindre end eller lig den kritiske tæthed, vil universets ekspansion fortsætte for evigt. I tilfældet $\rho = \rho_c$ vil ekspansionshastigheden gå mod nul for $t \to \infty$, mens den for $\rho < \rho_c$ vil gå mod en konstant positiv værdi. Energitætheden udtrykkes bekvemt ved hjælp af parameteren $\Omega = \rho/\rho_c$. Ved observationer har man anslået, at synligt stof, dvs. stof, som giver sig til kende via elektromagnetiske vekselvirkninger, bidrager til Ω med 0,01. En stor del af universets masse hidrører imidlertid fra stof, som kun kan observeres i kraft af dets gravitationelle vekselvirkning med synligt stof. Dette ''usynlige'' stof benævnes ''dark matter''. Der er eksperimentelle indikationer for dark matter på alle skalaer fra nogle få kiloparsec (kpc) op til mange hundrede Mpc.

Et eksempel er de såkaldte flade rotationskurver for spiralgalakser (se figur 4). Stjernerne i en spiralgalakse roterer om galaksens centrum. Observationer viser, at luminositeten i en sådan galakse aftager eksponentielt med afstanden fra centret. Hvis massetætheden opførte sig på samme måde, ville rotationshastigheden for stjerner i galaksens yderste dele aftage med kvadratroden af afstanden fra centrum. Man observerer imidlertid ikke nogen aftagen af rotationshastigheden. Efter at være vokset op til en vis værdi synes denne at forblive konstant helt ud til kanten af den synlige galakseskive. Ud fra de flade rotationskurver for spiralgalakser følger det, at $\Omega > 0{,}1$. Der er en svag tendens til, at Ω bestemt ved såkaldte dynamiske metoder, Ω_{dyn}, vokser med de betragtede afstande. Således finder man ved anvendelse af virialteoremet på superhobe, at $\Omega_{dyn} \approx 0{,}3$.

Næste spørgsmål, som melder sig, er: ''Hvad består universets masse af ?'' Vor egen og vore nære omgivelsers masse er domineret af bidrag fra protoner og neutroner. Umiddelbart ville man forvente, at det samme gjaldt universets masse. Som det fremgår af figur 2, sætter observationer af den relative forekomst af lette grundstoffer en øvre grænse på, hvor meget protoner og neutroner kan bidrage til Ω. Denne øvre grænse er $\Omega_{n,p} < 0{,}1$. En del af universets masse må således være af ikke baryonisk natur. I denne forbindelse kan man undre sig over, hvorfor universets faktiske energitæthed er så tæt på den kritiske



Figur 4. Rotationskurver for syv forskellige spiralgalakser.

energitæthed ($\rho > 0{,}3\ \rho_c$). Den kosmologiske standardmodel giver intet svar. Energitætheden er en fri parameter i modellen. Dette er et af flere eksempler på, at Standardmodellen tillader universet at se ud, som det gør, men ikke forklarer, hvorfor det gør det. Et andet eksempel vedrører den kosmiske baggrundsstråling. Som nævnt tidligere udviser denne en særdeles høj grad af isotropi. Den relative temperaturforskel mellem stråling fra forskellige retninger i rummet er så lille som 10^{-5} uanset størrelsen af den betragtede rumvinkel. Imidlertid følger det af Standardmodellen, at to fotoner, der når os fra retninger, hvis vinkelseparation er større end ca 2°, hidrører fra områder, som ikke var i kausal kontakt, da strålingen afkoblede fra stoffet. Der er således ikke umiddelbart nogen grund til, at baggrundsstrålingen skulle være isotrop på alle vinkelskalaer. Antagelsen om isotropi og homogenitet er tydeligvis noget, som må påtvinges Standardmodellen. Vi må også selv tilvejebringe en forklaring på, hvorledes der med denne isotropi og homogenitet kunne opstå de perturbationer i energitætheden, som er nødvendige for galaksedannelsen. Endelig er det observerede overskud af stof i forhold til antistof i universet heller ikke noget, Standardmodellen forklarer.

Partikelfysikkens standard model lider af samme type utilstrækkelighed som kosmologiens. Der er utilfredsstillende mange parametre, hvis værdier man kun kan slutte sig til ved eksperimenters hjælp. Et af de vigtigste mål inden for partikelfysikken har længe været at forstå Standardmodellen som et relikt af en større, mere fuldstændig teori. Håbet er selvfølgelig, at Standardmodellens parametre så vil kunne afledes af denne, mere fuldstændige teori. I arbejdet med at udvikle en sådan teori lader man sig lede af den ide, at alle vekselvirkninger kan beskrives som forskellige sider af samme kraft. En fælles beskrivelse af de svage og de elektromagnetiske vekselvirkninger er allerede opnået i Standardmodellen. Man taler således om én, elektrosvag kraft. At denne kraft i vor verden manifesterer sig på to tilsyneladende meget forskellige måder forklares ved, at en faseovergang, som separerer kraften i to, finder sted ved energier på omkring et par hundrede GeV. Energier af denne størrelsesorden er typiske for universet 10^{-12} s efter Big Bang. Der er blevet gjort mange anstrengelser for ligeledes at opstille en fælles teori for den elektrosvage kraft og den stærke kernekraft — en såkaldt GUT (grand unified theory). I følge GUT's er vore dages forskellige fremtoning af de elektrosvage og de stærke vekselvirkninger resultatet af en faseovergang, som skete ca. 10^{-35} s efter Big Bang, hvor den typiske energi for de relativistiske partikler var 10^{15} GeV. Man har trods de mange anstrengelser endnu ikke fundet en helt tilfredsstillende GUT. Der er imidlertid adskillige eksempler på, at anstrengelserne har tilvejebragt mulige forklaringer på nogle af Den kosmologiske standard models dunkle punkter. Det vil desværre føre for vidt at komme ind på disse resultater her. Der henvises i stedet til referencerne. Det ultimative mål for partikelfysikken er at forene alle vekselvirkninger i en stor teori — en såkaldt TOE (Theory of Everything). En sådan teori må foruden de tre allerede omtalte vekselvirkninger også inkludere tyngdekraften. Tyngdekraften skiller sig allerede ud fra de andre kræfter 10^{-43} s efter Big Bang, hvor den typiske energi for universets relativistiske partikler er 10^{19} GeV. For at kunne opstille en TOE må vi kunne kvantisere tyngdekraften. Hvorledes dette skal gøres, er endnu uvist, men lykkes det, vil det sandsynligvis bringe os nærmere en forståelse af universets oprindelse.

Referencer

1) J. Horgan, *Universal Truths*, Scientific American, Oktober 1990
2) *Intersection between Elementary Particle Physics and Cosmology*, Jerusalem Winter School for Theoretical Physics, 28 Dec 1983 — 6 Jan 1984, World Scientific, 1986
3) Proceedings of Nobel Symposium 79, Gräftåvallen, Sweden, June 11-16, 1990, Physica Scripta T36, 1991



Charlotte Fløe Kristiansen Ph.D. studerende ved Niels Bohr Institutet. Arbejder med kvantegravitation.