

# Kvantegravitation og vores univers

Af Jan Ambjørn, Niels Bohr Institutet, Københavns Universitet og Utrecht Universitet

Hvorfor er vi interesserede i at forene Einsteins almene relativitetsteori, teorien for makrokosmos, og kvantemekanik, teorien for mikrokosmos? En sådan teori vil måske kunne forklare Big Bang.

Tre naturkonstanter spiller fundamentale roller i vores forståelse af naturen: gravitationskonstanten  $G$ , som optræder i Newtons tyngdelov, lysets hastighed  $c$ , som optræder i Einsteins specielle relativitetsteori, og Plancks konstant  $h$ , som først blev introduceret af Planck i beskrivelsen af termisk stråling. I kvantemekanikken bruges i dag oftest den reducerede konstant  $\hbar = h/2\pi$ .

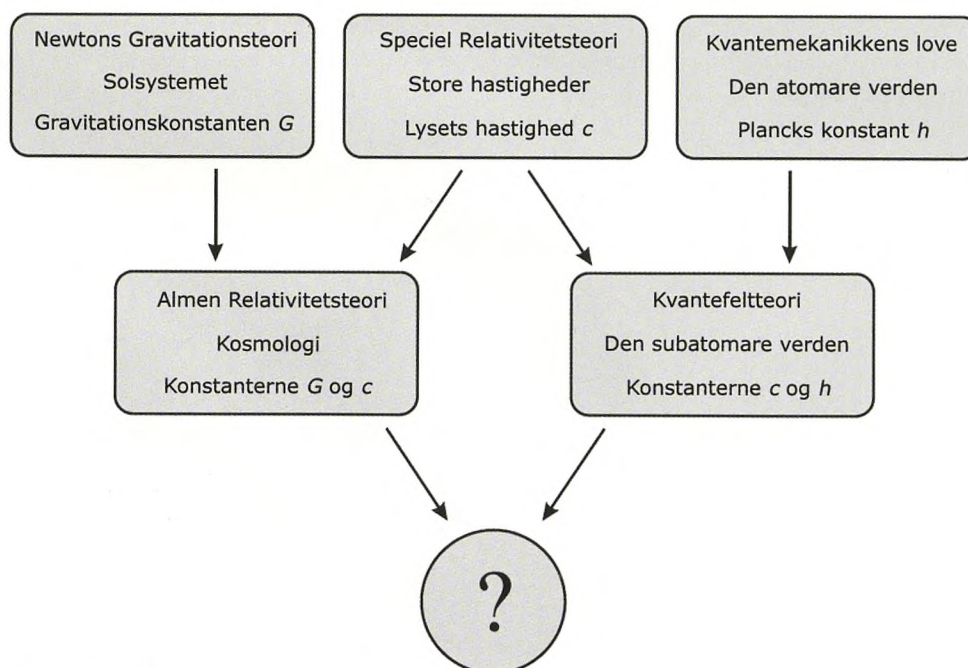
Konstanterne er associeret med fysiske love der beskriver forskellige områder af vores verden. Newtons tyngdelov beskriver vores solsystem, dvs  $G$  er relateret til store afstandes fysik. Den specielle relativitetsteori beskriver fysikken ved store hastigheder, som er tæt på den maksimale hastighed  $c$ . Endelig optræder Plancks konstant  $\hbar$  på en central måde i kvantemekanikken, dvs den beskrivelse af naturen, der hersker i mikrokosmos.

Einsteins almene relativitetsteori forener fysikken associeret med  $G$  and  $c$ . Teorien beskriver, hvordan energi kan deformere rum og tid. Teorien giver tilsyneladende en god beskrivelse ikke bare af Solsystemet, men af hele Universet på stor skala. Den specielle relativitetsteori og kvantemekanikken, dvs. teorierne med  $c$  og  $\hbar$ , er idag forenet i, hvad der kaldes kvantefeltteori. Der er mange teorier, der går under navnet kvantefeltteori, men den såkaldte "standardmodel" er udvalgt gennem eksperimenter og beskriver med forbløffende

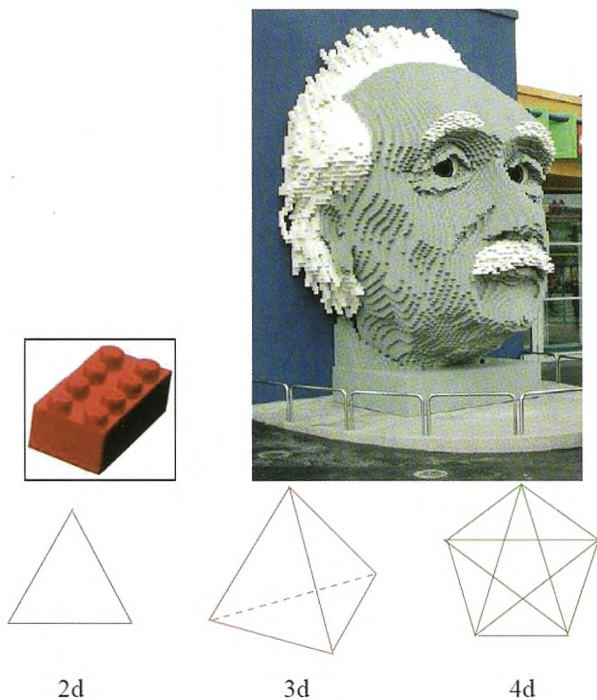
præcision den atomare og subatomare verden ned til de mindste afstande, man kan teste ( $10^{-18}$  meter).

Det er naturligt at prøve at foretage det "endelige" skridt og forene den almene relativitetsteori og kvantefeltteori, som illustreret på figur 1. Vi kalder denne hypotetiske teori for "kvantegravitationsteori". I en sådan teori vil man forvente, at  $G$ ,  $c$  og  $\hbar$  optræder på lige fod. En vis kombination af disse konstanter har dimension af længde, og man kan argumentere for, at denne længde er den "naturlige" længdeenhed i den forenede teori. Længden kaldes for Planck-længden, og den er utrolig lille:  $1,6 \cdot 10^{-35}$  meter. Da vi som nævnt kun kan teste ned til  $10^{-18}$  meter i laboratorieeksperimenter, og da vi forventer, at kvantegravitationsfænomener kun vil være rigtigt vigtige, når vi kommer ned til Planck-længden, er det usandsynligt, at vi vil kunne teste en sådan teori i laboratoriet i den nærmeste fremtid.

Der eksisterer en række kvantegravitationsteorier, der kommer med forskellige bud på, hvordan de fysiske love kan se ud, når vi betragter afstande så små som Planck-længden. Den såkaldte strengteori er måske den bedst kendte. Typisk er det dog meget svært i disse teorier at ekstrapolere til makroskopiske længdeskalaer, og vi ved derfor ikke, om de virkelig beskriver den verden, vi kender.



Figur 1. Sådan ledes vi til en kvantegravitationsteori.



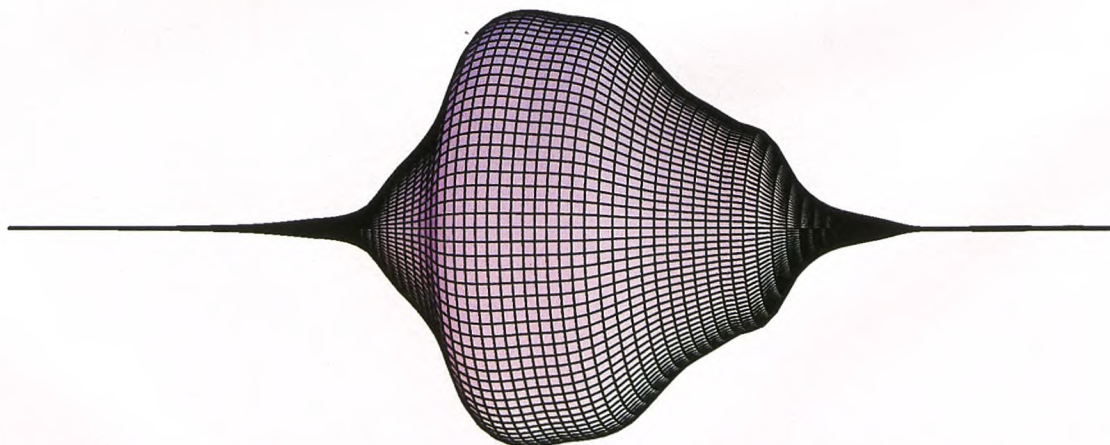
**Figur 2.** Byggesten brugt til Einsteinskulptur (legoklodser) og byggesten brugt til hhv. todimensionale geometrier (trekanter), tredimensionale geometrier (tetrahedra, der har fire trekanter, som udgør den todimensionale overflade) og firedimensionale geometrier (fire-simplekser, dvs. fem tetrahedra, som udgør den tredimensionale "overflade").

For nogle af disse teorier kan de moderne computere hjælpe os: Vi propper simpelthen de regler der beskriver "hele verden" ind i computeren og ser for den givne teori, om det, der kommer ud, ligner vores egen verden. For den teori, der kaldes CDT (en lidt teknisk betegnelse, der står for "causal dynamical triangulations"), er dette tilsyneladende tilfældet. Denne kvantegravitationsteori er forbløffende simpel. Vores verden, beskrevet ved rumtiden, er i CDT konstrueret ud fra byggeklodser, som med tre rumlige retninger og en "tidsretning" er såkaldte fire-simplekser, dvs. den firedimensionale analogi til en trekant (se figur 2).

Hver rumtid, som man kan konstruere ved at lime sådanne byggeklodser sammen, optræder med en vægt, der er bestemt ud fra generelle principper, der er kendt fra kvantefeltteori. I kvantegravitationsteorien summerer man nu over alle mulige rumtider med de givne vægte. Det er her computeren kommer os til hjælp: Vi beder den om at lime byggeklodserne sammen på alle mulige måder og derefter foretage summen. Et typisk univers vil bestå af mellem 40.000 og 360.000 fire-simplekser. Det er vigtigt at understrege, at vi ikke betragter vores byggeklodser, fire-simplekserne, som en fundamental, diskret enhed af rumtiden. De er blot bekvemme byggesten, som vi bruger til at opbygge en rumtid. I sidste ende ønsker vi, at deres størrelse skal gå mod nul. Som en illustration lad os forestille os, at vi ønsker at bruge legoklodser til at modellere f.eks. Einstein med (se figur 2). Vi opnår da en bedre og bedre approksimation til den "rigtige" Einstein ved at bruge mindre og mindre legoklodser.

I en kvantegravitationsteori fluktuerer rumtiden. Det, vi kalder vores (semiklassiske) rumtid, er en vægtet middelværdi over alle mulige rumtider, dvs. alle mulige firedimensionale geometrier. Kvantefluktuationerne kan vi observere, når vi kigger på en given geometri i computeren og sammenligner med "middelgeometrien". Jo mindre vores univers er, jo større fluktuationer. Det er derfor, kvantefluktuationer kun dominerer i mikrokosmos.

Figur 3 viser en todimensional projektion af et sådant univers genereret af computeren. Havde vi taget et andet univers genereret af computeren, ville det ligne det viste, men ikke være identisk med det. Når vi så foretager en vægtet superposition af alle disse universer, får vi vores "middelunivers", og det var en stor overraskelse for os, at dette middelunivers var en løsning til Einsteins klassiske ligninger (op til den nøjagtighed, som computeren giver os). Fluktuationerne omkring dette middelunivers er ganske store. Det er ikke i overensstemmelse med det, som vi observerer i den virkelige verden. Vores verden kan forekomme os flimrende og uklar af mange grunde, men ingen af dem er relateret til kvantefluktuationer!



**Figur 3.** Et "typisk univers" genereret af computeren. Det består af 91.000 fire-simplekser, hvor tiden (vandret) består af 40 tidsenheder. Til en given tid  $t$  er omkredsen af figuren proportional med det rumlige volumen  $V_3(t)$  af det tredimensionale rum, som approksimativt er en kugleflade.

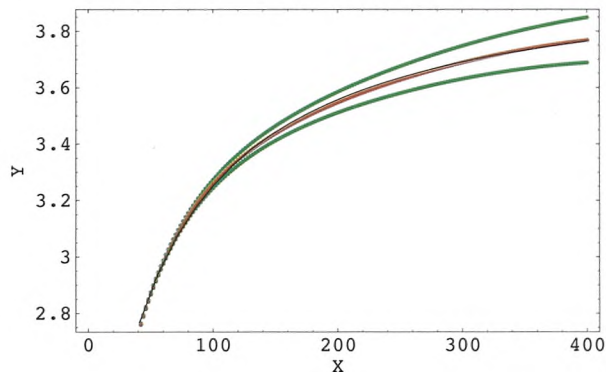
Her er det vigtigt at forstå, at computersimulationerne har deres begrænsninger. De største universer, vi kan have i computeren, består af ca. 300.000 fire-simplekser. Kald længden af kanterne i et simpleks for  $a$ . Hvor stort er et sådant univers? Prøv at arrangere fire-simplekserne i et regulært firedimensionalt gitter. Man ender da op med en kasse, hvis sidelængde er  $10 \cdot a$ . Vores univers er derfor ganske lille, og det er grunden til, at det kan have så store kvantefluktuationer. Faktisk er det meget overraskende, at vi kan se så god en semiklassisk opførsel for vores lille middelunivers.

Betragt det "typiske univers", der er vist på figur 3. Hvis vi følger tiden fra venstre mod højre, så starter Universet med ingen rumlig udstrækning at have. Derefter udvider det sig og trækker sig så sammen igen til et punkt. Til en given tid er det tredimensionale rum approksimativt en tredimensional kugleflade, og hele rumtiden er derfor tilnærmelsesvis en firedimensional kugleflade (ud fra hvilken der stikker to tynde "tråde" ud uden rumlig udstrækning). Efter at vi midler over mange geometrier, får vi en perfekt firedimensional kugleflade. En sådan geometri er netop løsningen til Einsteins klassiske ligninger med en kosmologisk konstant, der bestemmer radius af kuglefladen. Løsningen svarer dog ikke til vores almindelige rumtid, men en rumtid, hvor tiden behandles på lige fod med de rumlige retninger. Man siger, at rumtiden har Euklidisk signatur og den har ikke nogen foretrukket retning.

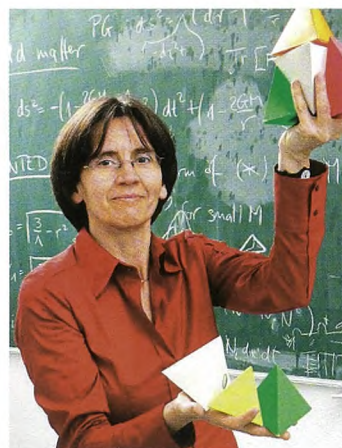
Computersimulationerne er af tekniske grunde udført med Euklidisk signatur, og det er derfor, vi har fundet en løsning med Euklidisk signatur, men når man "roterer" den Euklidiske tid tilbage til almindelig tid, vil den firedimensionale kugleflade blive til den "rigtige" rumtidsgeometri, der kaldes de Sitter-rumtid. Denne repræsenterer et univers, hvis rumlige del udvider sig eksponentielt hurtigt med tiden, hvor eksponenten er bestemt af den kosmologiske konstant. Vores univers opfører sig noget anderledes i øjeblikket, fordi det indeholder stof og stråling (som vi ikke har medtaget i vores computermode). Men den mest revolutionerende observation i kosmologien i de sidste 12 år er netop, at vores univers nærmer sig en tilstand af konstant acceleration, som måske er bestemt af en kosmologisk konstant. I vores computersimulationer har vi observeret den Euklidiske version af dette uden andet input end den simpleste kvantegravitationsteori, man kan tænke sig. Andre kvantegravitationsteorier har indtil nu haft svært ved at opnå dette resultat på en naturlig måde.

Er det muligt at "observere" (via vores computersimulationer) klare kvantefænomener på korte afstande? Svaret er ja. Vi har studeret diffusionsprocesser på vores fluktuerende rumtid. Den måde, diffusionen spreder sig på, fortæller os om dimensionen af den underliggende rumtid (se figur 4). Matematisk set definerer diffusionsprocessen, hvad der kaldes den "spektrale dimension". For ethvert "pænt" rum er den spektrale dimension den samme som den "normale" dimension, man ville tildele et sådant rum, men man kan også definere diffusion på mere fraktale strukturer og for disse opnå ikke-heltallige dimensioner. Når vi måler den spektrale

dimension ud fra vores fluktuerende kvanterumtider, ser vi, at den ændrer sig fra fire (en tidsretning og tre rumretninger) for store afstande til to for små afstande! Efter at vi først observerede dette fænomen, er det blevet reproduceret af en del af de andre kvantegravitationsteorier, så måske er det en egenskab ved enhver rimelig kvantegravitationsteori? I øjeblikket arbejder vi på at forstå, om denne observation kan forklare Big Bang som et naturligt resultat af kvantefluktuationer.



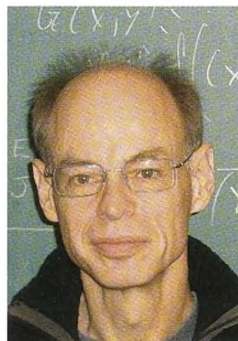
Figur 4. Den spektrale dimension ( $Y$ ) som en funktion af diffusionstiden ( $X$ ), hvor de grønne linier er error bars.



Figur 5. En fysiker der bygger Universet op vha. simple byggestene (tetrahedra). Billedet er af Renate Loll, Utrecht, som er en af de fysikere, der opfandt CDT-modellen.

## Litteratur

- [1] Jan Ambjørn, Jerzy Jurkiewicz og Renate Loll (2008), The self-organizing quantum universe, *Scientific American*, juli 2008.



Jan Ambjørn arbejder med teoretisk højenergifysik og kosmologi, herunder kvantegravitation (bl.a. statistiske og numeriske modeller), strengteori, mangepartikel-QCD, baryonasymmetri og sorte huller.