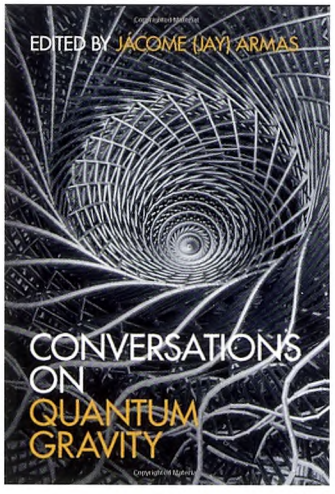
Konversationer om kvantegravitation

Michael Cramer Andersen, KVANT



Jácome (Jay) Armas, "Conversations on Quantum Gravity", 2021, Cambridge University Press, 708 sider, 365 kr (på saxo.dk).

Boganmeldelse

Denne bog er en omfattende samling af 37 interviews med forskere, der har bidraget indenfor feltet kvantegravitation. Det er en kæmpe udfordring at formulere en teori, der forener de to store teorier indenfor fysikken: kvantemekanikken, der beskriver de tre subatomare kræfter, og almen relativitetsteori, der beskriver tyngdekraften. Forventningerne til en sådan teori er store – den skal bl.a.:

- kunne forene alle fundamentale vekselvirkninger
- beskrive singulariteterne i Big Bang og i centrum af sorte huller
- være konsistent og kompatibel med standard fysik
- forklare partiklerne i Standardmodellen og styrken af koblingerne mellem dem
- kunne gøre forudsigelser som kan testes med eksperimenter
- beskrive hele vores univers på længdeskalaer fra Planck-længden til hele det synlige univers (61 størrelsesordener), inklusive mørkt stof og mørk energi.

Forfatteren har igennem flere år (2011–2020) interviewet en række forskere, der arbejder med forskellige tilgange til kvantegravitation. I den 10 sider lange introduktion beskrives mange af de spørgsmål, som forfatteren har stillet forskerne, og som de har besvaret i større eller mindre grad. Nogle interviews er således ret lange (30 sider) og har referencer til litteraturen, mens andre er korte (1 side). Nogle af de første interviews er blevet redigeret og opdateret i redaktionsprocessen.

De forskellige tilgange til kvantegravitation som berøres, er omtalt i introduktionen: strengteori, loop kvantegravitation, kausale dynamiske trianguleringer, kausale mængder, ikke-kommutativ geometri og Hořava-Lifshitz gravitation.

Bogen skal ikke ses som et resume af hele forskningsfeltet, men snarere som en diskussion af synspunkter på forskellige aspekter af kvantegravitation, og personerne er håndplukket af forfatteren. Bogen er blevet til mens forfatteren tog sin ph.d.-grad i Danmark ved Niels Bohr Institutet. I samme periode etablerede han "Science & Cocktails", der kombinerer videnskabelige foredrag med musik, kunst og iskolde drinks. Det startede på Christiania i Den Grå Hal og er siden rykket videre til DR Koncerthuset, og har filialer i Bruxelles, Amsterdam og Johannesburg. I dag arbejder Jay Armas med højeredimensionale sorte braner i Amsterdam.

I det følgende refereres nogle enkelte af de 37 forskerinterviews.

Jan Ambjørn er en dansk teoretisk fysiker, og han forklarer sin tilgang, som er kausale dynamiske trianguleringer. Her simuleres rummets kvantegeometri numerisk. Det er endnu kun tomt rum uden partikler og kun et par størrelsesordener større end Planck-længden. Når alle de mulige geometrier summeres ifølge kvantefeltteorien, fås en gennemsnitlig geometri der har samme egenskaber som de Sitter-rummet. Der er desværre langt til at beskrive partikler og interaktioner. Ambjørn erkender, at hverken strengteori eller hans tilgang har ført til nogen vigtige opdagelser, der handler om den verden, vi kan måle.

Nima Arkani-Hamed arbejder med strengteori, og han argumenterer for, at rum og tid går i opløsning på skalaer mindre end Planck-længden og Planck-tiden. Hvis man vil undersøge mindre skalaer, dannes der sorte huller, som afskærer os fra at vide noget om de små skalaer. Det glatte rum og den glatte tid vi kender, må derfor være emergent, dvs. rum og tid opstår fra nogle andre mere fundamentale størrelser. Dette er opsigtsvækkende, da al fysik bygger på en anvendelse af rum og tid. Arkani-Hamed fortsætter med at diskutere observable, spredning af partikler og korrespondancen mellem anti-de Sitter-rum og konforme feltteorier (AdS/CFT-korrespondancen), der godt kan redegøre for rum, tyngdekraft og strenge, men ikke tiden. Han kritiserer det traditionelle billede af en forenet teori, hvor de fire fundamentale kræfter forenes som i et puslespil. Han mener at gaugeteorier og tyngdekraften er én og samme ting, men man mangler at finde forbindelsen mellem dem i form af en dualitet i den holografiske beskrivelse. Dette interview udmærker sig ved, at Nima Arkani-Hamed ikke bare formidler teori, men også forklarer nogle forskelle på tilgangene samt hvilke problemer, der er dybe og hvilke, der blot er tekniske problemer omkring formalisme.

Abhay Ashtekar er en af ophavsmændene til loop kvantegravitation (LQG). LQG tager udgangspunkt i, at geometrien er kvantiseret og både tid og rum opstår fra kvantegeometrien som emergente fænomener. Det kan dog gøres på forskellige måder, og derfor kræves det at

teorien giver almen relativitetsteori i grænsen for store afstande. For at forklare partikler og vekselvirkninger studeres excitationer af kvantegeometrien, men de skal ses i forhold til en kanonisk kvantetilstand, som kan beskrive en flad baggrund af rumtid (Minkowski-rumtiden). Så for overhovedet at kunne forstå de ting, som teorien forudsiger, skal man finde et fikspunkt, som er det tomme rum, og allerede dette er vanskeligt i en fluktuerende rumtid. Indtil videre er det mest spin-2-partikler, fx gravitonen, der er studeret. Andre partikler kan måske beskrives via andre excitationer, der tilsammen danner et spin-netværk. LQG er blevet anvendt med nogen succes indenfor kosmologi, hvor singulariteten i fx Big Bang opløses. Når krumningen nærmer sig Planck-skalaen, opstår der en frastødende kraft, der stammer fra kvantegeometrien. Denne model er mest naturlig, hvis universet er cyklisk, dvs. vores Big Bang er et resultat af et tidligere kollaps eller Big Crunch. Igen testes teorien ved om den leder til en klassisk glat rumtid, når rummet udvider sig. Der begynder også at komme forudsigelser om strukturerne i den kosmiske mikrobølgebaggrundsstråling. Ashtekar kritiserer strengteoretikernes fokus på AdS/CFT, der hviler på en negativ kosmologisk konstant, og som slet ikke giver noget, der ligner tyngdekraften, men han anser det for vigtigt, at der er en kommunikation mellem de to tilgange, og at man forholder sig åben overfor nye idéer.

Alain Connes er matematiker og kendt for at have udviklet den ikke-kommutative geometri. Han har også arbejdet på at forstå, hvad renormalisering betyder matematisk. Renomalisering er en teknik, der fjerner uendelighederne i kvantefeltteori, så teorien kan give endelige – og dermed meningsfulde – resultater. Teknikken giver nu også mening matematisk, og involverer bl.a. gruppeteori, algebra og Feynman-grafer. Connes mener, at det er naivt at tro, at universet er beskrevet af et rumtidskontinuum beskrevet ved geometri. Han ønsker at udlede geometrien fra Hilbertrummet, der blev indført i kvantemekanikken af John von Neumann til at beskrive både reelle variable og diskrete tilstande, der ikke kommuterer. Denne egenskab blev allerede indført af Heisenberg til beskrivelse af impuls- (P) og positionsoperatorerne (Q), der ikke opfylder den kommutative lov: $P \cdot Q \neq Q \cdot P$. Dirac udvidede impulsoperatoren til at omfatte partiklernes spin. Connes forklarer, at i Riemanns geometri kan afstande defineres lokalt af et infinitesimalt linieelement. Men dette skal erstattes af en infinitesimal operator i Hilbertrummet, og det fører til, at afstande defineres gennem de kræfter, der binder partikler sammen, ligesom man gør i kvantefeltteori. Positionsoperatoren Q blev udvidet af bl.a. Connes i 2014, så den var mere "fleksibel", dvs. beskrevet ved komplekse tal og matricer, der ikke nødvendigvis kommuterer. Ved at indføre ikke-kommutativitet, har Connes og kolleger udledt en Lagrange-funktion, der kobler tyngdekraften med standardmodellens subatomare vekselvirkninger i et firedimensionalt rumtidskontinuum, hvor partiklerne har spin. En konsekvens er, at volumen er kvantiseret i Planck-volumener. Hvis man udregner virkningen fra den nye Lagrange-funktion, finder man Einsteins feltligninger, Yang-Mills-teorien og andre gauge-felter herunder Higgs-feltet. Den kosmologiske konstant forsvinder pga. det kvantiserede volumen. Teorien virker lovende, men den repræsenterer kun første kvantisering, og siger endnu ikke noget om, hvad der sker over Planck-skalaen.

David Gross har arbejdet med strengteori siden slutningen af 1960'erne, og er strengteoriens grand old man. Han beskriver mere strengteori som en "ramme" end en egentlig teori. Man kan i princippet finde uendelig mange modeller eller løsninger, og det kommer meget an på hvilke startantagelser, man putter ind i rammen. De fleste løsninger beskriver verdener, som er meget ustabile, men der findes også løsninger, der beskriver alle partiklerne i vores verden – og mere til. For at reducere antallet af dimensioner, skal der også være supersymmetri, som må være brudt, da man endnu ikke har observeret supersymmetriske partikler i Large Hadron Collider. Gross håber, at supersymmetri findes, da det er en smuk udvidelse af kvantefeltteori, og den hjælper til at forene styrken af de fundamentale vekselvirkninger under Planck-skalaen. Det er et stort spørgsmål, om der findes nogle principper, der definerer hvilke af de uendelig mange streng-modeller der findes i virkeligheden. Hvis man ikke kan finde sådanne principper, er man tvunget til enten at acceptere, at de uendelig mange streng-modeller eksisterer side om side i et multivers eller, at der kun findes det ene univers, som vi lever i, og det er udvalgt gennem det antropiske princip. Ingen af disse to muligheder er tilfredsstillende, da de ikke kan testes.

Gerard 't Hooft ser mere kritisk på strengteori. Den kan fx ikke forklare, hvordan der bliver netop tre generationer af kvarker og leptoner og en positiv kosmologisk konstant. Der skal også være en god forklaring på, hvordan de ekstra dimensioner som strengteorien kræver, er rullet sammen, så de ikke kan observeres, og hvordan supersymmetri er brudt. Han kritiserer også, at kvantemekanikken kun kan beskrive verden ved hjælp af sandsynligheder. Ligesom Einstein mener han ikke, at tilfældighed kan være med i en ultimativ teori for verden. Den ultimative underliggende teori kan godt være deterministisk, men for kompliceret til at vi kan regne med den i detaljer. Vi kan derfor være nødsaget til at bruge statistiske egenskaber og begreber som "partikler" og "felter" for at beskrive, hvad der sker. Vi skal bare ikke tage partiklerne og de egenskaber, vi tildeler dem, for alvorligt. Denne måde at opfatte kvantemekanikken på er tidligere kaldt for "skjulte variable", der dækker over en kompliceret, men determistisk underliggende fysik. Gerard 't Hooft har fx vist, hvordan man formelt kan beskrive et kvantesystem med et endeligt antal tilstande som et deterministisk dynamisk system, hvor de stabile periodiske baner svarer til kvantetilstandene. Dette virker for små kvantesystemer fx et heliumatom, men det bliver naturligvis alt for kompliceret at beskrive samtlige vekselvirkninger mellem alle de ca. 10^{80} partikler i Universet på denne måde. Kvantemekanikken med dens indbyggede indeterminisme kan i visse tilfælde give en statistisk beskrivelse, der er simplere. Men i bund og grund kan verden stadig godt være deterministisk.

Juan Maldacena er kendt for at have opstillet AdS/CFT-korrespondancen. Han fik idéen, da han forsøgte at finde en løsning på informationsparadokset i strengteori. Efter opdagelsen af D-braner, som minder om sorte huller, og efter at entropien af D-braner blev beregnet, fik han den idé at sammenligne entropien af D-braner med entropien af sorte huller. Det viste sig, at der i nogle tilfælde var en overensstemmelse. Ved at studere hvad der sker, når noget falder ind i et sort hul, fandt han nogle bestemte symmetrier i løsningerne på overfladen af det sorte hul, som beskrev et anti-de Sitter rum (AdS), dvs. et de Sitter rum med negativ krumning svarende til hyperbolsk geometri. Derefter fandt han ud af, at D-branen kunne beskrives ved en konform feltteori (CFT) i det indre af det sorte hul, og at løsningerne til denne teori var bestemt af de samme symmetrier. Han postulerede at der var en korrespondance mellem beskrivelsen i AdS-rummet og CFT-teorien. Denne korrespondance er senere bevist i mange andre situationer, og er blevet en central forbindelse mellem kvantefeltteorier, der beskriver partikler, og feltteorier baseret på bestemte geometriske rum, der bl.a. beskriver tyngdekraften.

Roger Penrose er matematisk fysiker. Han er ikke tilfreds med nogle af de forskellige fortolkninger af kvantemekanikken. Københavnerfortolkningen behandler måleapparatet som klassisk, selvom det er opbygget af de samme kvantepartikler, som det system man måler på. Mangeverdenfortolkningen hævder at en kat kan være død og levende samtidig, og hvis man skal måle én af delene, må observatørens opmærksomhed blive splittet op i to "verdener", der begge er lige virkelige. Penrose mener at man bør inddrage tyngdekraften i beskrivelsen af bølgefunktionen. Fx er ækvivalensprincippet ikke konsistent med superposition af kvantetilstande, der i geometrier med krumning leder til to forskellige tidslinjer. Disse to principper må tilpasses hinanden for at kvantemekanikken kan overleve. Kvantefeltteorier må også tilpasses. Penrose er desuden skeptisk overfor AdS/CFT-korrespondancen, der forbinder to vidt forskellige ting på en underlig måde, og korrespondancen er ikke bevist i matematisk forstand. Han forklarer sin idé om konform cyklisk kosmologi: I den fjerne fremtid, hvor universet er næsten tomt, kan man ikke skelne mellem store og små afstande (eller densiteter), og så kan universet som helhed sammenlignes med Big Bang-begivenheden. Dette kan føre til et nyt univers, men ikke efterfulgt af et Big Crunch som i det sædvanlige cykliske univers. En forudsigelse er, at store sorte huller, der smelter sammen i én cyklus, kan give aftryk i den kosmiske mikrobølgebaggrundsstråling i form af cirkler på store skalaer. Dette finder Penrose nogen støtte for i observationerne fra WMAP (kosmologer er dog skeptiske overfor resultaterne). Penrose grundlagde i 1967 twistor-teorien som er en kompleks geometri, der er egnet til at beskrive masseløse partikler med spin fx fotoner og gluoner.

Erik Verlinde betragter tyngdekraften som en "entropisk kraft". Einsteins feltligninger ligner ligningerne i termodynamik og hydrodynamik. Disse to teorier bygger på en mikrofysik (atomer), men man kvantiserer ikke de to teorier for at studere atomer. Man arbejder med statistiske begreber, der er en konsekvens af mange partiklers vekselvirkninger. Ved at betragte entropien, forstået som informationen i faserummet for det underliggende system, kan man beskrive den effektive kraft ud fra makroskopiske variable. Tyngdekraften er dermed et mål for al den information, vi glemmer om mikrofysikken. Dette kaster bl.a. nyt lys på mørkt stof og mørk energi.

Steven Weinberg døde i juli 2021, men interviewet fandt sted allerede i 2011. Han forklarer, at man godt kan skrive en effektiv feltteori ned, der inkluderer alle de fundamentale kræfter, men den indeholder uendelig mange led. I praksis foregår partikelkollisioner ved energier, der er meget lavere end Planck-energien, så man kan skære de fleste led væk, herunder de vekselvirkninger der involverer tyndekraften, som er ubetydelige. Effekter af kvantegravitation optræder først ved kollisionsenergier tæt på Planck-energien. Kvantefeltteori forudsiger, at vakuumenergien burde være mange størrelsesordener (120) større end den værdi, astronomer har observeret. Weinberg skrev en oversigtsartikel om dette i 1989. Han fandt ikke, at der var noget fundamentalt princip, der krævede at konstanten var omkring 120 størrelsesordener mindre end teorien forudsiger. Det bedste bud er måske det antropiske princip, der blot siger, at vi lever i et univers hvor konstanten er tilpas lille, da vi ikke ville eksistere i et univers, hvor den var meget større, idet galakser (plus stjerner og liv) så ikke ville blive dannet.

I nogle interviews berøres noget af den kritik, der bliver rettet mod forskningen, fx at strengteorien dominerer den teoretiske fysik, så det er vanskeligt at få lov til at arbejde med alternative tilgange. Hele feltet kritiseres for ikke at komme med nogle forudsigelser, der kan testes i eksperimenter. Uden resultater bliver det sværere at argumentere for bevillinger til teoretisk fysik, der konkurrerer med andre felter, som leverer resultater med en kortere tidshorisont. Strengteoretikerne forsvarer sig og kritiserer de andre tilgange for ikke at være fundamentale nok.

Det er en omfattende samling af interviews, der er meget spændende og fyldt med kritiske spørgsmål. Svarene er til tider morsomme. Forskernes forskelligartede bidrag giver et interessant billede af den aktuelle forskning, og der er mange eksempler på nogle af de brydninger, der er mellem forskellige tilgange. Forskningen er som en debat, der løber over mange år. De første interviews blev foretaget for godt ti år siden og er blevet redigeret med bl.a. tilføjelse af referencer.

Bogen henvender sig til både forskere og andre interesserede. De fleste interviews er på et ret højt niveau, og man får størst udbytte, hvis man har fulgt lidt med i forskningen. Der er stof nok til mange timers læsning. Hvis man har appetit til mere, kan man opsøge nogle af de mange referencer til den videnskabelige litteratur, hvor de omtalte teorier er beskrevet mere teknisk.