

“Spooky action at a distance”: Er tyngdekraften endelig blevet kvantemekanisk?

Daniel Skipper Rasmussen

I jagten på at finde en kvantemekanisk teori for gravitationskraften har en ny idé meldt sig på banen. I denne nye teori er tyngdekraften slet ikke fundamental, men emergent. Hvis teorien er sand, vil den løse et af de største problemer inden for fysikken.

Seniorforsker i fysik Jens Olaf Pepke Pedersen beskriver i sin artikel “Jagten på urkraften”, udgivet den 19. december 2019 i Weekendavisen, naturvidenskabens ønske om at forene naturens kræfter i en simpel helhed. Den teori venter vi stadig på, og måske er en del af årsagen hertil en forfejlet reaktion på et velkendt fænomen inden for fysikken: teorier, der synes at virke med god tilnærmelse i én størrelsesorden, bryder ned, når teorien flyttes til en anden størrelsesorden. I jagten på at finde en kvantemekanisk teori for tyngdekraften har en række forskere fremsat en ny idé: Måske er løsningen ikke at dykke stadigt dybere ned i jagten på universets enhed, men at bevæge os højere op?

Det uendelige tårn af skildpadder

Fysikken har længe søgt at studere stadigt mindre afstande i jagten på det fundamentale i universet. Partikelacceleratoren Large Hadron Collider (LHC) er manifestationen af dette ønske. Ved at slå partikler sammen ved ekstremt høje energier undersøger acceleratoren stadigt mindre skalaer i universet. Men der er både et praktisk og et filosofisk problem med den reduktionistiske hypotese og metode. Det praktiske problem er, at det kræver omvendt proportionalt meget energi at studere de mindste afstande i universet. I skrivende stund kan LHC studere afstande ned til 10^{-19} m. Den mindste målbare skala i universet, den såkaldte Planck-skala, måler 10^{-35} m. At studere denne skala kræver så meget energi, at processen uundgåeligt skaber et sort hul. At studere højere energiniveauer og mindre størrelsesordener, vil blot skabe et større sort hul. På dette plan gælder fysikkens love, som succesfuldt beskriver fænomener større end Planckskalaen, ikke længere, og Planckskalaen sætter således en praktisk øvre grænse for, hvor langt ned vores forståelse af universet rækker med vores nuværende teorier.

Men der er også et andet, mere drilsk problem: for hvad vil det overhovedet sige at nå det “laveste niveau”, og er der i det hele taget et sådant (reduktionistisk) hierarki? Problemet er ofte afbildet som et uendeligt tårn af skildpadder. Med andre ord: hvis enhver skildpadde er støttet af en anden skildpadde, når vi så nogensinde bunden? Hvis vi for et øjeblik forestiller os, at der rent faktisk findes en skildpadde nederst i hierarkiet, som ikke støttes af andet end den selv, så siger den reduktionistiske hypotese, at hele skildpaddetårnet kan bygges fra bunden, skildpadde for skildpadde. Men begge hypoteser – at større størrelsesordener bygges op

af mindre størrelsesordener på lineær vis, og at der rent faktisk er noget sådant som den mindste størrelsesorden – er netop kun hypoteser og derfor åbne for kritik. At den reduktionistiske metode dør med disse problemer har givet forskere den idé, at svaret måske slet ikke skal findes i jagten på det mindste element, hvorfra alt andet opstår og bygges. Måske er svaret i stedet, at universets fænomener er emergente nærmere end fundamentale.

Emergente fænomener skiller sig ud ved, at de ikke kan forklares alene ved nogle af egenskaberne hos dets mindre dele og byggesten. Der dukker nye, overraskende “emergente” egenskaber op ved samspillet mellem delene. Fænomenet beskriver eksempelvis, hvorfor stærreflokke bevæger sig i tilsyneladende koordinerede og komplekse mønstre på trods af, at den enkelte stær ikke har noget begreb om den større struktur, den er en del af. Men er tyngdekraften et sådant fænomen? Det er i hvert fald, hvad en række prominente forskere fra forskningsgruppen *It from Qubit* nu arbejder på at finde ud af. Ifølge denne forskningsgruppe er tyngdekraften ikke én skildpadde i det tårn, der forklarer naturens fænomener, eller én skildpadde, der forklarer skildpadden ovenover. Vi må nærmere forstå tyngdekraften som et fænomen, der opstår på et højere makroniveau som en relation mellem de forskellige skildpadder i tårnet. Dette står i direkte modsætning til Einsteins teorier, som ser tyngdekraften som værende en af de fire fundamentale kræfter i universet. Hvis den nye teori er sand, vil det revolutionere vores forståelse af universets love.

Tyngdekraften som emergent

En af de store opdagelser i det 20. århundredes fysik var idéen om *renormalisering* – den proces, hvor en teori ændres i takt med, at størrelsesordenen for de fænomener, den skal beskrive, ændrer sig. Renormalisering var en nødvendig introduktion i kvantefeltteorier for at slippe af med uendeligheder på det mikroskopiske plan. Renormalisering kan illustreres som en si af mere eller mindre grovkornet art, som filtrerer de informationer væk, der ikke er relevante for den givne størrelsesorden. Ved denne filtreringsproces skabes en såkaldt *effektiv teori*, som via renormalisering er i stand til at skabe robuste forudsigelser henover et større spektrum af observationer. Standardmodellen for partikelfysik plus Einsteins generelle relativitetsteori, som redegør for tyngdekraften, udgør tilsammen en effektiv teori for alle naturens fænomener. At dette er tilfældet hænger sam-

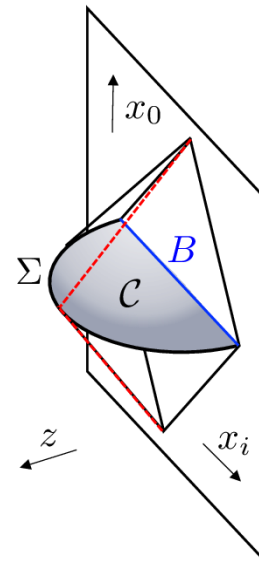
men med, at kvanteeffekter er ubetydelige henover store afstande, mens tyngdekraften er ubetydelig henover små afstande. Men selvom vores klassiske teori for tyngdekraften og vores kvantefeltteori for partikelfysik tilsammen udgør en effektiv teori, er den ikke komplet – den virker med god præcision i praksis, men ikke henover alle skalaer. Ideelt set vil forskerne gerne finde en teori, som ikke blot virker på effektiv vis, men som også er komplet. En sådan teori, der virker gnidningsfrit henover både den makroskopiske og mikroskopiske skala, kaldes en UV-komplet teori. Men hvis tyngdekraften er emergent, så indeholder denne UV-komplette teori slet ikke tyngdekraften. I stedet må tyngdekraften ses som et emergent resultat af en effektiv teori, hvis UV-komplette teori ser ganske anderledes ud. Idet vi ved, at det mikroskopiske plan i universet er styret af kvantemekaniske processer, er opgaven, fysikerne står overfor, lige så svær, som den er veldefineret: hvorledes kan det gå til, at vores kurvede, klassiske rumtidsgeometri opstår ud fra kaotiske kvantefænomener på mikroplanet? Man kan se på problemet på følgende vis: hvis vores virkelighed er kvantemekanisk, så er problemet med at trække klassisk geometri ud af kvantefænomener et problem, naturen selv har skullet løse. Men hvilken algoritme har naturen anvendt? Hvis man skal tro forskningsgruppen *It from Qubit*, er fænomenet kvantemekanisk sammenfiltrering en vigtig brik.

Kvantemekanisk sammenfiltrering som basis for vores rumtid

Kvantemekanikken er fundamentalt forskellig fra vores klassiske univers. Partikler og partikelinteraktioner er lokale forstyrrelser i et underliggende, fluktuerende kvantefelt eller “skum”, som på rodet, kaotisk og kompleks vis langt fra ligner det klassiske univers, vi observerer i vores dagligdag. Schrödingers såkaldte bølgefunktion beskriver, hvorledes disse felter udvikler sig. Til forskel fra klassiske teorier beskriver denne funktion dog ikke systemets tilstand som sådan, men en sandsynlighed for, at et system er i en bestemt tilstand. En partikel har altså ikke en bestemt position, men forskellige mulige positioner på samme tid. Men dette er blot én type af spøjss adfærd, vi må døje med på kvanteplanet. Tænk nu, at vi vil beskrive blot en del af systemet. Vi kan spørge: ved vi alt om delsystemet, hvis vi kender alt om det fulde system? Nej! Vi kan vide alt om det fulde system uden at vide alt om delsystemet.

Årsagen er, at det at vide noget om én partikels tilstand kan have direkte effekt på vores viden om en anden partikels tilstand. Som Schrödinger formulerede det: “the best possible knowledge of a whole does not necessarily include the best knowledge of its parts” [1]. Dette kaldes entanglement eller kvantemekanisk sammenfiltrering. Ironisk nok var det Einstein selv, der opdagede fænomenet. Einstein var skeptisk og kaldte fænomenet “spooky action at a distance”, men dets eksistens er senere påvist eksperimentelt. I den nye teori om tyngdekraften er vores rumtidsgeometri et direkte produkt af dette sammenfiltringsfænomen. For at kunne se, hvorledes sammenfiltrering kan lede til lokal rumtidsgeometri, må vi træde et skridt tilbage og forklare tre

store fund i fysikken i de seneste 20 år.



Figur 1. Illustration af Takanagis opdagelse. Ethvert lokalt punkt i rumtiden C kan beskrives udelukkende via ikke-lokalt fordelt information på overfladen B. Information indkodes altså på redundant vis. Dette har den fordel, at hvis information slettes i ét område, er informationen stadig tilgængelig globalt set.

Universet som et hologram

Det største frø blev sået i 1997 af den argentinske fysiker Juan Maldacena, som viste, at vores klassiske rumtidsgeometri, som lever i tre dimensioner, kan beskrives som en kvanteteori uden tyngdekraft på et holografisk 2D-plan – eksempelvis på overfladen af vores rumtid [2]. Dette går derfor under navnet *det holografiske princip*. Vi kan altså begynde at ane en sammenhæng mellem geometri og kvantefænomener. Længere tilbage, i 1972, viste fysikeren Jacob Bekenstein [3], at entropien af et sort hul – altså den mængde af information, som et sort hul kan indeholde – ikke afhænger direkte af hullets volumen, men af dets overfladeareal. Dette kan være svært at finde intuitivt. Hvor mange ærter, en skål kan indeholde, afhænger af volumen, ikke areal. Men dette gælder altså ikke for sorte huller. I 2006 blev noget endnu mere bemærkelsesværdigt vist, nemlig at Bekensteins teori kan generaliseres til alle typer af rumtid. Den såkaldte Ryu-Takayanagi-sætning viste, at den kvantemekaniske entropi af overfladen af ethvert stykke rumtid er ansvarlig for, eller “indkoder”, en bestemt del af den geometriske 3D-struktur:

$$S_A = \frac{Y_A}{4G}. \quad (1)$$

I formlen ovenfor er S_A den kvantemekaniske 2D-overfladeentropi, mens Y_A er overfladearealet af den korresponderende 3D-rumtid og G er gravitationskonstanten.

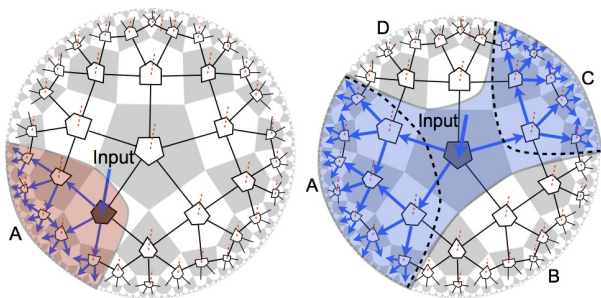
Vi har altså med andre ord en direkte måde at udvinde geometri ud fra en kvanteteori. Det næste skridt, som bragte forskerne tættere på en fuld teori, var opdagelsen, at entropi i en kvantefeltteori på direkte vis skalerer med mængden af sammenfiltrering. Ved at kombinere dette med Takanagis opdagelse kan

vi se, at forskellige grader af sammenfiltrering leder til forskellige typer af geometri. Der er altså evidens for, at vores rumtidsgeometri opstår ud fra kvantemekanisk sammenfiltrering på overfladen af vores rumtid.

Sammenfiltrering bygger rumtiden op bid for bid

Spørgsmålet er nu, hvorledes denne sammenfiltrering kan beskrives, og hvorledes forskellige grader af sammenfiltrering på kvanteplanet leder til forskellige geometriske former i vores rumtid. Problemet er, at kvantemekaniske systemer er ekstremt svære at beskrive på klassisk vis. Mindsteden i et kvantemekanisk system er den såkaldte *qubit*, der til forskel fra en klassisk bit kan befinde sig i en *superposition* af de to klassiske tilstande 1 og 0. Denne forskel har dog eksponentiel betydning. Et n -qubit system indeholder 2^n mulige konfigurationer, og et 300-qubit kvantesystem kræver altså flere klassiske bits at beskrive end der findes atomer i vores synlige univers!

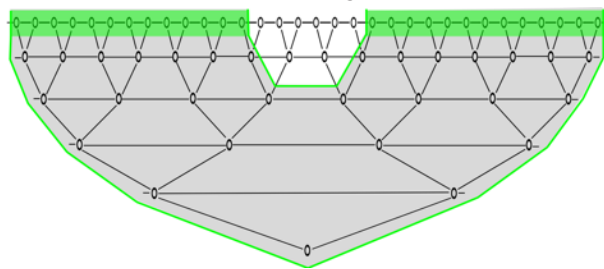
Forskergruppen *It from Qubit* har dog for nyligt foreslået en ny metode til at indkode sådanne astronomiske mængder af information. Idéen er, at man i stedet for at indkode informationen på klassisk vis, repræsenterer den som en kondenseret form for kvanteinformation distribueret i et såkaldt *tensor-netværk*. Ved trinvis sammenfiltrering af enkelte kvantetilstande opbygges den komplekse bølgefunktion bid for bid, repræsenteret som et netværk af sammenfiltrede kvantetilstande. Sammenfiltreringsprocessen foregår på følgende måde: Start med en simpel tilstand af usammenfiltrede tilstande, fx 8 qubits, som vi kan kalde A, B, C, D, E, F, G, H . Vi sammenfiltrer nu gradvist de enkelte qubits med hinanden på en måde, så kun korrelationerne (altså sammenfiltringerne) mellem kvantesystemerne gemmes fra trin til trin. Forbind først A med B , C med D , osv.



Figur 2. Illustration af tensor-netværk. Overfladen af cirklen repræsenterer kvantesystemet. Arealet repræsenterer rumtiden.

Dernæst, forbind AB med CD og til sidst $ABCD$ med $EFGH$. Via denne iterative proces af sammenfiltrering bygger vi et komplekst kvantenetværk op på simpel vis. Ved at smide al den information væk, som ikke er væsentlig for den givne størrelsesorden, foretager netværket en type af renormalisering. I figur 2 illustreres det, hvorledes denne renormaliseringsproces gradvist bygger rumtiden op. Renormaliseringen af de to kvantesystemer A og C fører de to korresponderende rumtider sammen. Vi har dog endnu ikke beskrevet den måske største fordel ved at føre kvantesystemer og rumtid sammen på denne vis. Vi må her først beskrive fænomenet *decoherence*, som vi blot her vil kalde

kvantefejl. (Her skal det pointeres, at rumtiden altså kan opbygges ved hjælp af tensor-netværk, og en geometrisk struktur kan opstå ud fra komplicerede vekselvirkninger mellem informationen fra mange mindre dele).



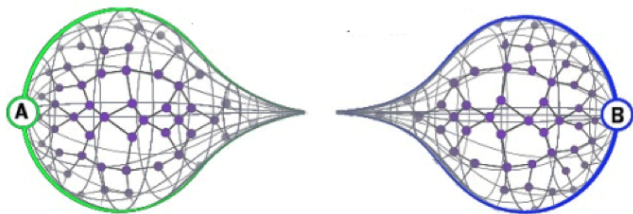
Figur 3. Vi ser her, at to regioner hurtigt vil overlapse rent geometrisk efter blot et par renormaliserings-skridt, hvor de gradvist sammenfiltreres. Altså kan (mindre områder af) uforenethed på kvanteplanet godt lede til sammenhængende geometri på det klassiske plan. Situationen ser dog noget anderledes ud, hvis sammenfiltreringen fjernes helt.

Kvantefejl bliver udjævnet

Kvantesystemer er ikke blot komplekse at håndtere, fordi de indeholder astronomiske mængder af information. De er også svært u håndterbare, fordi den information, de indeholder, er notorisk ustabil. Årsagen er, at enhver uønsket interaktion mellem en qubit og dets miljø “kollapser” dens sammenfiltrede tilstand og får den til at agere som en klassisk bit. Dette fænomen er den primære årsag til, at vi endnu ikke har formået at bygge en kvantecomputer med over 50 bits. Hvis det, som beskrevet, er tilfældet, at sammenfiltrering er vores rumtids byggesten, så har rumtiden nødvendigvis måttet beskytte sig selv mod disse uønskede kvantefejl. Idéen er, at netop den sammenfiltreringsproces, vi beskrev ovenfor, kan agere som en sådan beskyttelseskode. Ved at sammenfiltrere de enkelte qubits indkodes de enkelte korrelationer mange gange, altså “redundant”, på overfladen. Med andre ord: hvis en enkelt qubit kollapser og mister en del af sin kvanteinformation, er denne information stadig tilgængelig et andet sted på overfladen. Des mere sammenfiltreret, kvantesystemet er, des bedre beskyttet er det mod kvantefejl, og des bedre beskyttet er vores rumtid mod “huller” i dens geometri.

I figur 2 gælder således følgende: Jo tættere vi er på overfladens usammenfiltrede kvantesystem, des mere usikker og distribueret er informationen, og jo tættere vi er på den maksimalt sammenfiltrede tilstand i midten, des bedre beskyttet er informationen mod kvantefejl på overfladen. Dette korresponderer med det, vi observerer i vores fysiske virkelighed, nemlig, at der er mange kvantefluktuationer på det mikroskopiske plan, men meget lidt fluktuation på det makroskopiske plan. Rumtiden har altså “sikret” sig selv mod kvantefejl ved at indkode kvanteinformation redundant på overfladen via sammenfiltrering. Det er en ret vild idé. Vi kan nu se, hvorledes sammenfiltrede tilstande på overfladen kan forbinde geometrier i 3D-rummet og dermed “lime” vores rumtid sammen. Takayanagi [4] viste, at sammenfiltrering på overfladen ledte til geometrier i rumtiden. Hvis vi sammenfiltrer to systemer på overfladen, er resultatet, at de to korresponderende rumtidsgeometrier overlapper eller “limes” sammen.

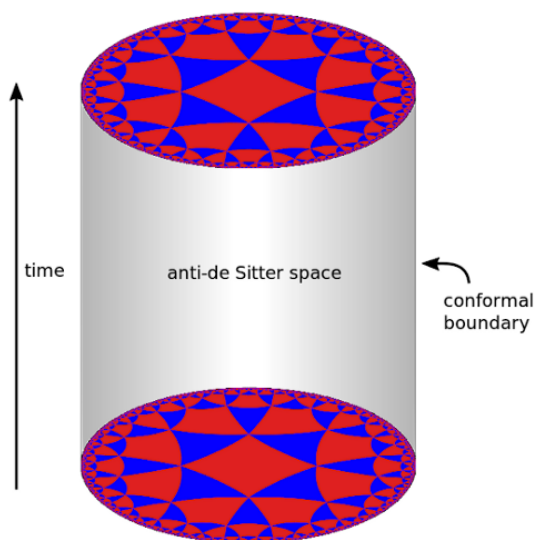
Men dette må lede til det naturlige spørgsmål: bryder vores rumtid sammen, hvis vi fjerner sammenfiltringen helt mellem de underliggende kvantesystemer?



Figur 4. Uden sammenfiltring på kvanteplanet bryder vores rumtid sammen. Figuren her illustrerer det tilfælde, hvor sammenfiltring fjernes helt, hvorved en førhen sammenhængende rumtid nu rives fra hinanden.

Kan vores rumtid bryde sammen?

Hvis sammenfiltring mellem to kvantesystemer på overfladen af vores rumtid forsvinder helt, vil den lokale information i rumtiden ikke længere være beskyttet mod fejl på kvanteniveauet. Konsekvensen er, at geometrierne ikke længere vil overlappende, og at vores rumtid rives fra hinanden. Vi kan altså forestille os, at den delte geometri mellem de to løsrevne rumtider bliver mindre og mindre i takt med, at sammenfiltringen fjernes, indtil sammenfiltringen forsvinder helt og de to klassiske rumtider ikke længere overlapper. Konklusion er, at sammenfiltring af kvantemekanisk kaos på mikroplanet i vores rumtid er nødvendigt for at skabe lokalitet og forbundethed på makroplanet. Tyngdekraften, når den ses som emergent, nærmere end fundamental, er ikke længere i modstrid med kvantemekanikken – men er blevet direkte afhængig af den.



Figur 5. Illustration af AdS-rumtid. Tiden løber opad. Kvantemekanisk sammenfiltring på overfladen af rumtiden leder til klassisk geometri inde i rumtiden.

Har teorien hold i virkeligheden?

Forskergruppen *It from Qubit* har fremsat et bud på, hvorledes Einsteins generelle relativitetsteori kan forenes med kvantemekanikkens love. I denne teori er

tyngdekraften ikke længere en af de fire fundamentale kræfter i universet, men et emergent produkt af renormaliserede, sammenfiltrede kvantesystemer. Der er dog en hage ved teorien. Maldecenas korrespondance mellem et holografisk kvantesystem og en 3D-rumtid, som meget af denne nye teori bygger på, gælder nemlig kun for en bestemt type rumtid – en såkaldt hyperbolsk rumtid kaldet Anti-de Sitter- eller AdS-rumtid.

Idet vores egen rumtid er de Sitter- eller dS-rumtid, og har positiv krumning, gælder teorien ikke for det univers, vi lever i. Det er et åbent spørgsmål, i hvilken grad teorien kan overføres til vores egen rumtid. AdS-rumtid er praktisk at arbejde med, fordi den med sin naturlige overflade egner sig godt til holografiske teorier. For yderligere bemærkninger om arbejdet med at overføre denne teori til vores egen rumtid, se da artiklen [8] af Swingle m.fl. Hvis dette arbejde giver frugt, og teorien påvises i laboratoriet, er tyngdekraften endelig blevet kvantemekanisk.

Litteratur

- [1] E. Schrödinger (1935) Discussion of Probability Relations between Separated Systems, *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, bind 31, side 555–563.
- [2] J. Maldacena (1999) The large-N limit of superconformal field theories and supergravity, *International Journal of Theoretical Physics*, bind 38, side 1113–1133.
- [3] J. Bekenstein (1973) Black holes and entropy, *Physical Review D*, bind 7, side 2333.
- [4] S. Shinsei og T. Takayanagi (2006), Holographic derivation of entanglement entropy from the anti-de sitter space/conformal field theory correspondence, *Physical Review Letters*, bind 96, side 181602.
- [5] F. Pastawski m.fl. (2015) Holographic Quantum Error-Correcting Codes: Toy Models for the bulk-boundary correspondence, *Journal of High Energy Physics*, bind 2015, side 149.
- [6] M. van Raamsdonk (2010) Building up Spacetime with quantum entanglement. *General Relativity and Gravitation*, *Gen Relativ Gravit*, bind 42, side 2323–2329.
- [7] B. Swingle (2012) Entanglement Renormalization and Holography, *Physical Review D*, bind 86, side 065007.
- [8] B. Swingle (2019) Quantum gravity in the lab: Teleportation by size and traversable wormholes, arXiv:1911.06314.



Daniel Skipper Rasmussen er videnskabsjournalist og freelance skribent. Han er særligt optaget af kvantemekaniske fænomener og spørgsmålet om, hvilken rolle information spiller i vores univers. I forhold til nærværende artikel gør han opmærksom på, at sammenfiltring ikke er en fysisk materie, men abstrakt information, som lejes i et fysisk system.