
2

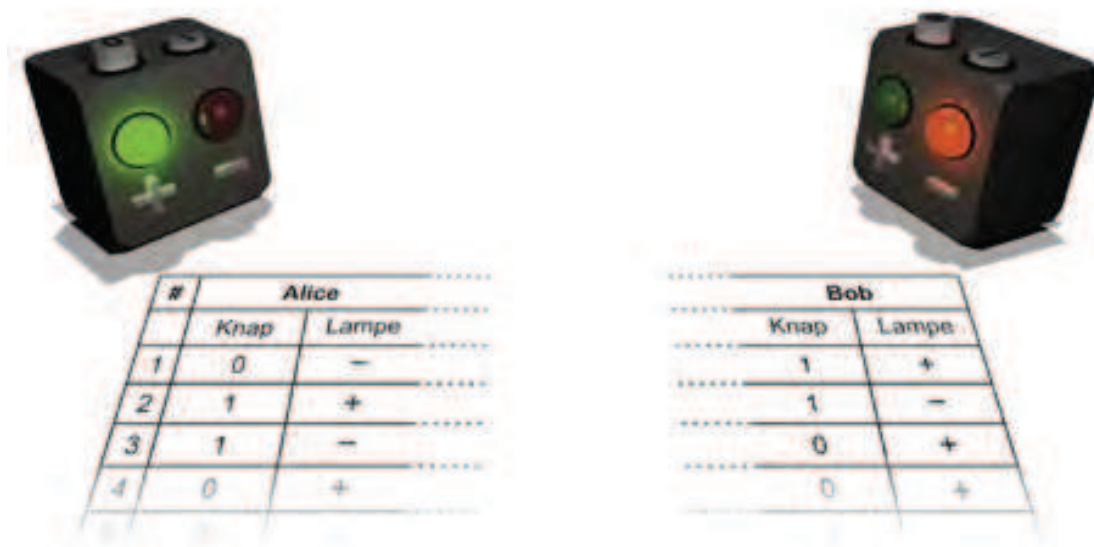
REALISERING AF UMULIGE KORRE- LATIONER

EN REALISTISK FORSØGSOPSTILLING
TIL TESTS AF BELLS ULIGHED

Af
JONATAN BOHR BRASK
POSTDOCTORAL
RESEARCHER
ICFO - INSTITUTE OF
PHOTONIC SCIENCES
CASTELLDEFELS,
BARCELONA

På trods af 40 års forsøg mangler vi stadig et eksperiment, som definitivt påviser eksistensen af ikke-lokale korrelationer. Vi har udviklet en idé til en forsøgsopstilling, som måske kan muliggøre sådan et eksperiment.

De ikke-lokale korrelationer finder anvendelse i nye informationsteknologier, f.eks. ultrasikker kvantekryptering, og bryder med den intuitive idé om, at fysiske størrelser eksisterer uafhængigt af, om vi måler dem.



Lad os forestille os to modstandere af et grumt, dystopisk diktatur. De har brug for at udveksle beskeder udenom Generalens hemmelige politi. Det eneste udstyr, de kan få fat i, er imidlertid stjålet fra det hemmelige politi selv. De kan ikke vide, om der er fusk med udstyret; om det er manipuleret til at overvåge dem. Kan de på en eller anden måde sikre sig, at deres beskeder ikke aflæses?

Svaret er 'ja', hvis apparaterne er baseret på kvantemekanisk ikke-separabilitet og kan bryde en såkaldt Bellulighed. Disse uligheder har deres navn efter John Bell, som introducerede den første i 1964 og viste, at det var muligt eksperimentelt at skelne mellem to beskrivelser af naturen (hvis berømteste fortalere var henholdsvis Albert Einstein og Niels Bohr) - en hvor fysiske størrelser er virkelige og eksisterer uafhængigt af målinger, og en hvor det målte ikke kan tillægges nogen bestemt værdi, før målingen udføres. Vores arbejde handler om at finde en realistisk metode til at bryde en Bellulighed. Det vil muliggøre et eksperiment, som kan afgøre det gamle spørgsmål om, hvilken beskrivelse af naturen der kommer sandheden nærmest, og som samtidigt vil være et første skridt i retning af nye kommunikationsteknologier baseret på kvantemekanik.

Lamper, knapper og kasser - et tankeeksperiment

For at forstå, hvad en Bellulighed er, må man først tænke over, hvordan grundlæggende fysiske begrænsninger påvirker eksperimentel data. Vi kan tage det simplest mulige eksperiment, illustreret i Fig. 1. Alice og Bob har hver et helt enkelt apparat - en kasse med to knapper og to lamper. Når en knap trykkes ned, lyser en

lampe. Det kan være forskelligt, hvilken lampe der lyser, hver gang den samme knap trykkes ned. Eksperimentet består nu i, at Alice og Bob hver vælger en knap, trykker, og skriver ned hvilken lampe, der lyste. Når den grønne lampe lyser, noterer de +1, for den røde -1. Det gentager de et antal gange; hver gang vælger de tilfældigt en knap. Når de er færdige kan de sammenholde deres data. De har så en tabel som vist på figuren. Ved hjælp af tabellen kan Alice og Bob nu for hver runde udregne produktet af deres udfald. Hvis Alice har fået -1 og Bob +1 får de f.eks. $-1 \cdot 1 = -1$. Lad os kalde produktet for P . Alice og Bob tager gennemsnittet P_{00} af P for alle de runder, hvor de begge valgte knap 0, og ligeledes beregner de gennemsnittene P_{01} , P_{10} , P_{11} . Til sidst udregner de

$$S = P_{00} + P_{01} + P_{10} - P_{11}$$

Hvor stor kan S blive? Hvert af leddene P_{00} etc. i S er positive, hvis Alice og Bob for det meste får det samme udfald for den tilsvarende kombination af knapper, og negative hvis de for det meste får forskellige udfald. For at maksimere S gælder det derfor om at få Alices og Bobs udfald til at være korrelerede, medmindre de begge vælger knap 1 - så skal de være antikorrelerede (fordi sidste led har negativt fortegn). Hvis apparaterne har indbyggede instruktioner, som bestemmer udfaldene ud fra begges valg af knap, f.eks. "når Alice og Bob begge trykker 1 fås 1 for Alice og -1 for Bob, ellers giver alle udfald +1", så er det nemt at se, at S kan antage den maksimale værdi 4. Men lad os nu gøre en enkelt antagelse: Lad os antage, at (ANT) Alices apparat ingen information har om Bobs valg af knap, og omvendt. Instruktionerne i Alices maskine kan nu kun afhænge af hendes egne valg, dvs. de består i at fastlægge værdier ± 1 for hendes udfald for hver knap, og

Fig. 1
Tankeeksperiment: I hver runde noterer Alice og Bob hvilke lamper, der lyser, når de trykker på knapperne på deres apparater. De genererer på den måde en tabel af korreleret data.

“
John Bell viste, at det var muligt eksperimentelt at skelne mellem to beskrivelser af naturen - en hvor fysiske størrelser er virkelige og eksisterer uafhængigt af målinger, og en hvor det målte ikke kan tillægges nogen bestemt værdi før målingen udføres.
”

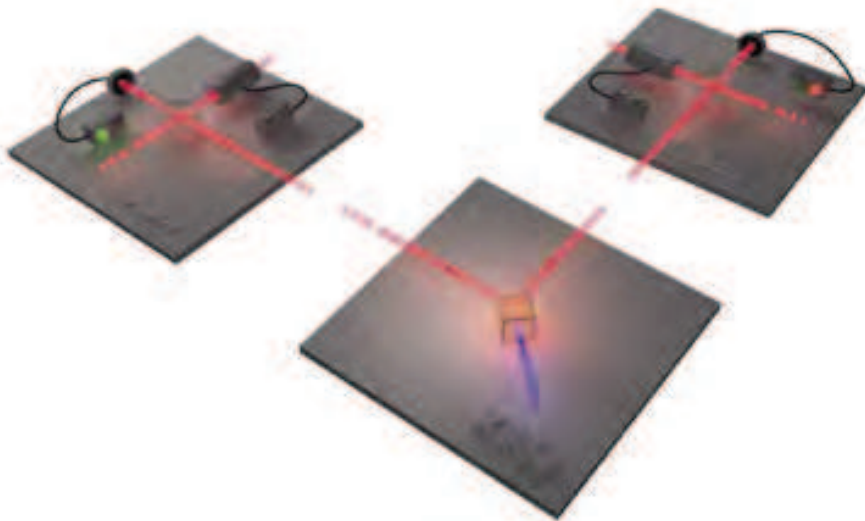


Fig. 2
Blåt laserlys omdannes i en ulineær krystal til to stråler af rødt lys, som sendes til Alice og Bob. Hos Alice og Bob blandes lyset med endnu en laserstråle og måles v.h.a. en fotodetektor.

ligesådan for Bob. Det er nemt at tjekke, at $S_{\text{højt}}$ kan blive 2. Selv hvis man ændrer strategien fra runde til runde, kan man ikke gøre det bedre (den skeptiske læser opfordres til at forsøge!). For ethvert eksperiment som opfylder antagelsen (*ANT*) har vi altså $S \leq 2$. Dette er det mest berømte eksempel på en Bellulighed.

Overraskelsen er nu, at i kvantemekanikken kan uligheden brydes. Hvis de to apparater deles om en såkaldt ikke-separabel tilstand forudsiger kvantemekanikken, at det er muligt med Alice og Bobs data at nå $S = 2\sqrt{2} = 2.828\dots$ Når uligheden bliver brudt betyder det, at eksperimentet ikke kan forklares ved nogen teori, hvor Alices og Bobs udfald er fastlagt ved en forhåndsbestemt strategi, og som opfylder antagelsen (*ANT*). Vi siger, at korrelationerne i eksperimentets data er *ikke-lokale*.

Svært at realisere det umulige

Mange eksperimenter har forsøgt at påvise de ikke-lokale korrelationer, som kvantemekanikken forudsiger, og der er også gode indikationer på, at Belluligheder er blevet brudt. I eksperimenterne arrangerer man det sådan, at antagelsen (*ANT*) følger af, at intet signal kan bevæge sig hurtigere end lysets hastighed. Hvis vi sørger for, at Alices udfald sker så kort tid efter Bobs valg af knap, at lys ikke kan nå fra Bob til Alice, så er uafhængigheden af de to begivenheder garanteret. Et brud på en Bellulighed betyder derfor, at enten er der noget, som bevæger sig hurtigere end lyset – hvilket strider mod praktisk talt alle eksperimentelle tests – eller også er forhåndsbestemte instruktioner for Alices og Bobs udfald udelukket. På grund af lysets høje hastighed kræver det hurtige detektorer og en god afstand mellem parterne at overholde (*ANT*). Samtidigt skal detektorerne og kilden, som producerer den ikke-separabel tilstand, være tilstrækkeligt effektive. Når ef-

fektiviteten er under en vis tærskelværdi, som afhænger af det konkrete eksperimentelle design, kan forhåndsbestemte instruktioner ikke længere udelukkes.

Det er teknologisk meget krævende at overholde disse to betingelser (*ANT* og tilstrækkelig effektivitet) på samme tid. På trods af at de første tests af Belluligheder blev udført for ca. 40 år siden, er det endnu ikke lykkedes i noget eksperiment at opfylde begge krav samtidigt, selvom de er blevet opfyldt hver for sig i forskellige forsøgsopstillinger. Lys vekselvirker kun svagt med omgivelserne og kan sendes over lange afstande med relativt lille tab. Samtidigt kan lys detekteres hurtigt. Det er altså fordelagtigt at arbejde med lys, når man vil overholde (*ANT*). Det er imidlertid problematisk at detektere lyset effektivt, og kilder, som producerer ikke-separable tilstande, har også begrænset effektivitet. For enkelt-atomer eller -ioner fanget i en optisk eller elektrisk fælde kan man måle med meget høj effektivitet, men det er på den anden side svært at skabe ikke-separable tilstande mellem to atomer, medmindre de er tæt på hinanden, og dermed svært at overholde (*ANT*). Derfor er det udfordrende at finde et eksperimentelt design, som tillader en tærskelværdi for effektiviteten, der kan realiseres med de kilder og detektorer, som er tilgængelige i moderne laboratorier.

En simpel idé som fungerer

Vi har udviklet et nyt eksperimentelt design, som sænker tærskelværdien for effektiviteten betydeligt, og som baserer sig på en simpel ikke-separabel tilstand af lys. Vores design benytter en kilde, som producerer par af fotoner, altså lyspartikler. En laserstråle med høj energi (blåt lys) sendes gennem en ulineær krystal, som vist på Fig. 2. I krystallen kan en blå foton omdannes til to fotoner med lavere energi (rødt lys), som udsendes i hver deres retning. Processen sker med lille sandsynlighed, og der er således mulighed for at danne nul, et, eller to, osv. røde fotonpar. Antallet af par kan variere, men antallet af fotoner er altid ens i de to retninger. Kvantemekanikken forudsiger, at de to stråler af rødt lys vil antage en ikke-separabel tilstand. Den ene røde stråle sendes nu til Alice og den anden til Bob. I Alices og Bobs laboratorier blandes lyset fra kilden med strålen fra endnu en laser på et halvgennemsigtigt spejl og måles. I hver runde indstiller de hver styrken og faseren af deres laser og noteret, om detektoren registrerer en foton eller ej. Laserens styrke og fase spiller rollen som 'knap' og detektorens to udfald (klik/intet klik) som 'lampe' i Fig. 1.

“
Forsøgsopstillingen er nærmest den simplest tænkelige og opnår alligevel en optimal tærskelværdi.
”

Med denne simple opstilling regner vi os frem til en god tærskelværdi for effektiviteten – vi kan tåle op til 33,3% tab, inklusive tab i kilden og detektorerne. Samtidigt kan vi bevise, at vores tærskelværdi er optimal – ingen test, hvor Alice og Bob har ens tab, kan opnå en bedre tolerance. Vores design er i den forstand meget lovende. Forsøgsopstillingen er nærmest den simplest tænkelige – generering af fotonpar i en ulineær krystal er en standardteknologi i moderne optiklaboratorier – og opnår alligevel en optimal tærskelværdi. Kigger man på effektiviteten af moderne kilder og detektorer kan man se, at 33,3% i dag er meget tæt på at kunne realiseres. Sammen med andre nylige fremskridt indenfor optiske Bell tests tyder det på, at der er gode muligheder for i en nær fremtid at gennemføre den første definitive test af en Bellulighed, siden John Bell fremsatte sin idé for næsten 50 år siden.

Som et alternativ til den rent optiske test, har vi desuden vist, at tærskelværdien kan forbedres yderligere, hvis Alice i stedet for lys måler på et enkelt atom, som illustreret i Fig. 3. Atomets tilstand kan måles med meget høj effektivitet (så Alice har nu mindre tab end Bob). Ved at eksitere atomet med en laserpuls skabes en ikke-separabel tilstand mellem atomet og en lyspuls, som sendes videre til Bob, der måler på samme måde som før. I denne opstilling kan vi tåle op til 56% tab mellem atomet og Bob. Belluligheden kan altså brydes, selv når over halvdelen af fotonerne går tabt. Det er temmelig krævende at opnå en god kobling mellem atomet og det udsendte lys, men i de mest moderne eksperimenter med atomer i optiske fælder nærmer man sig nu dette tal. Samtidigt er tærskelværdien i dette tilfælde ikke optimal – det er muligt, at den kan sænkes yderligere. Dette asymmetriske design er derfor et interessant supplement til det rent optiske.

Ny tænkning, ny teknologi

Lad os til sidst vende tilbage til vores oprørere. Hvordan kan et brud på en Bellulighed hjælpe dem til at sikre sig imod aflytning? Vi kan tænke os at oprører-Alice og -Bob (i hver deres sikre skjulested) ved hjælp af to apparater genererer en tabel som i Fig. 1, der bryder en Bellulighed, mens de sørger for at overholde (ANT). Så er forudbestemte instruktioner for Alices og

Bobs udfald udelukket. Det er derfor umuligt for andre end dem selv at ligge inde med viden om deres data, fordi en sådan viden ville være ensbetydende med instruktioner. De kan nu benytte deres tabel til at generere en krypteringsnøgle, som kan bruges til at udveksle sikre beskeder. Dette intuitive argument er indenfor de seneste år blevet eftervist matematisk, sammen med andre såkaldte apparat-uafhængige protokoller. Fælles for disse anvendelser er, at Alice og Bob ikke behøver nogen viden om hvordan eller af hvem deres apparater er fremstillet, så længe de bare bryder en Bellulighed. En eksperimentel eftervisning af et brud vil være første skridt på vej mod en realisering af disse nye informationsteknologier. Samtidigt har Alice og Bob lært noget fundamentalt nyt om naturen: De fysiske størrelser, som svarer til knapperne på deres apparater, *kan ikke tilskrives nogen værdi, før målingerne udføres* (hvis den specielle relativitetsteori holder). Dette er et brud med den gængse tænkning i fysik før kvantemekanikken og vel også med de fleste menneskers intuitive opfattelse af verden. Fysikere i dag er ikke i tvivl om, at den kvantemekaniske forudsigelse er korrekt, men det er alligevel vigtigt at efterprøve den med et definitivt eksperiment. Måske vi kan komme lidt nærmere et svar på Mermins berømte spørgsmål: Er månen der, når ingen kigger på den?

Note

At intet kan bevæge sig hurtigere end lyset følger af den specielle relativitetsteori, som mange tests bekræfter. Nye resultater fra neutrinoeksperimentet OPERA peger på et brud med den, men på nuværende tidspunkt ser det ud til, at der kan være tale om en teknisk fejl i eksperimentets GPS-forbindelse.



Sammen med andre nylige fremskridt tyder det på, at der er gode muligheder for at gennemføre den første definitive test af en Bellulighed siden John Bell fremsatte sin idé for næsten 50 år siden.



Fig. 3

Alice har et enkelt atom fanget i en fælde mellem to spejle. Lys udsendes fra atomet og videre til Bob. Alice kan måle tilstanden af sit atom med høj effektivitet (hendes måleudstyr er ikke vist).

