

4

LYSET TØVER ... OG GÅR HELT I STÅ

Af
LENE VESTERGAARD HAU
PROFESSOR, PH.D.,
HARVARD UNIVERSITY.
MODTAGER AF CARLSBERG-
FONDETS FORSKNINGSPRIS
I NATURVIDENSKAB, 2011

Lys har fascineret mennesker i tusinder af år. Vi kan finde mange eksempler på dette: fra hedenske sommertilværelser, over 1600-tallets lysstudier af Isaac Newton og hans hypotese om, at lys bestod af materielle partikler, til Thomas Youngs eksperimenter, der viste, at lys kan interferere som kolliderende bølger på en vandoverflade og dermed bekræfte Christiaan Huygens tidligere teori om, at lys er bølger... og videre til kvantemekanikken i 1900-tallet, der introducerede ideen om, at lys både har partikel- og bølgenatur.

Oprindeligt troede man, at lys bevæger sig med uendelig høj hastighed. Men i slutningen af 1600-tallet observerede Ole Rømer, at tidsintervallerne mellem formørkelser af Jupiters måne Io varierede. Rømer tilskrev variationen en varierende distance mellem Jupiter og Jorden, OG at lyset har en endelig udbredelseshastighed — 'lysets tøven', som han omtalte det. Baseret på observationer af Michael Faraday, Hans Christian Ørsted, André-Marie Ampère og mange andre i 1800-tallet, forklarede James Clerk Maxwell lys som en bølge af oscillerende elektriske og magnetiske felter med en endelig udbredelseshastighed, som han beregnede til at være i fin overensstemmelse med Rømers imponerende observationer.

Og så var der Albert Michelson og Edward Morleys lyseksperimenter, der viste, at lyset har samme udbredelseshastighed i alle referencesystemer. Einstein realiserede senere, at dette nødvendigjorde en fundamental ændring i vores forståelse af rum og tid, som det blev manifesteret i den specielle relativitetsteori udviklet i begyndelsen af 1900-tallet. Einstein satte en øvre fartgrænse for partikler og for udbredelse af signaler, og der er således intet, der kan bevæge sig hurtigere end den hastighed, hvormed lyset udbreder sig i vakuum. Men denne lyshastighed er til gengæld ubegribeligt høj: 300.000 km i sekundet.

Udfordring

For nogle år siden begyndte vi at stille os selv følgende spørgsmål: Kan vi tæmme lyset — kan vi få det ned i en fart på 'menneske-skala'? Og svaret er JA — vi kan bremse lyset til cykelrytterfart, og vi kan også stoppe det helt. Vi kan endda stoppe en lyspuls på et sted og få den til at opstå et helt andet sted.

For at klargøre, hvordan det sker, er det interessant først at notere, at lys, der går igennem glas, bevæger sig lidt langsommere end lys der udbreder sig i vakuum. I glas er brydningsindekset nemlig 1,5 — dvs lidt højere end indekset for vakuum — og lys nedbremses med cirka 30 %. Derfor kunne man fristes til at foreslå, at vi kunne nedbremse

lys kraftigt ved at kreere et medium med et meget højt brydningsindeks. Det ville dog ikke virke — blandt andet fordi vi så også ville lave verdens bedste spejl og reflektere lyset tilbage. Vi ville ikke kunne få lyset ind i mediet for nedbremsning.

Så vi må gøre noget helt andet!

Vi starter med at nedkøle atomer til meget lave temperaturer — til nogle milliardedele grad over absolut nulpunkt. I eksperimenterne bruger vi natriumatomer, der kan køles meget effektivt ved brugen af laserstråler. Når laserens frekvens er tunet, så den er tæt på en atomar resonansfrekvens — som er en karakteristisk frekvens, der svarer til forskellen mellem to energiniveauer i atomet — kan vi få en kraftig vekselvirkning mellem laserstrålen og atomet. For at køle atomerne, illuminerer vi dem fra alle retninger med laserstråler, der har en frekvens lidt under resonansfrekvensen for et atom i hvile. Dopplereffekten sikrer nu, at der herved skabes en 'optisk sirup', hvor atomernes hastigheder hurtigt neddæmpes, og atomskyen afkøles.

Når de helt lave temperaturer nås, dannes en lille superflydende sky — et Bose-Einstein kondensat — hvor millioner af atomer opfører sig nøjagtigt ens — atomerne 'danser i takt' — de fase-låser og kan alle beskrives ved den præcist samme kvantemekaniske bølgefunktion. Bose-Einstein kondensatet er 0,1 mm i størrelse, indeholder 5-10 millioner atomer og hænger frit svævende i midten af et vakuumkammer, hvor det holdes på plads af et magnetfelt. Atomerne er elektrisk neutrale og vekselvirker derfor kun svagt med omgivelserne, så vakuumkammeret kan holdes ved rumtemperatur. Det giver let adgang til atomerne, og vi har placeret adskillige vakuumforseglede vinduer på kammeret og kan skyde laserstråler ind gennem vinduerne og derved ramme atomerne med laserlys. Og det er præcist, hvad vi gør, når vi begynder at manipulere kondensatet for at nedbremse lys.

Lys ved cykelrytterfart

Indtil nu har vi hovedsageligt fokuseret på atomernes bevægelse og beskrevet, hvordan denne kan dæmpes under nedkølingsprocessen. For at danne

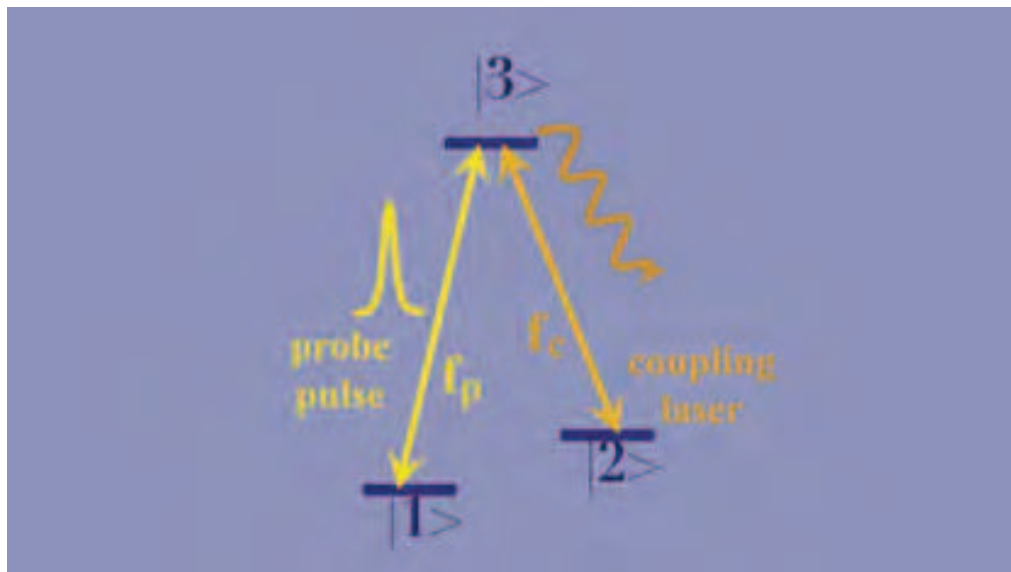


Figur 1
Einstein satte en øvre fartgrænse for partikler og for udbredelse af signaler, og der er således intet, der kan bevæge sig hurtigere end den hastighed, hvormed lyset udbreder sig i vakuum. Men denne lyshastighed er til gengæld ubegribeligt høj: 300.000 km i sekundet.
Scanpix



For nogle år siden begyndte vi at stille os selv følgende spørgsmål: Kan vi tæmme lyset – kan vi få det ned i en fart på "menneske-skala"? Og svarer er JA – vi kan bremse lyset til cykelrytterfart, og vi kan også stoppe det helt.





Figur 2
Atomets indre energiniveauer.

“
Indtil nu har vi hovedsageligt fokuseret på atomernes bevægelse og beskrevet, hvordan denne kan dæmpes under nedkølingsprocessen. For at danne langsomt lys må vi også manipulere atomernes indre struktur – og kombinationen giver os helt nye muligheder for ekstrem lysmanipulation.
 ”

langsomt lys må vi også manipulere atomernes indre struktur – og kombinationen giver os helt nye muligheder for ekstrem lysmanipulation.

Natrium er et alkaliatom, der har en enkelt løst bundet valenselektron, der cirkler om kernen og 10 andre tætbundne elektroner. Efter køleprocessen er alle atomers valenselektron i den lavest mulige indre energi-tilstand, som vi vil kalde tilstand $|1\rangle$. Atomet har andre indre tilstande, for eksempel tilstand $|2\rangle$, der har en lille smule højere energi, og tilstand $|3\rangle$ der har langt højere energi. Med alle atomerne i $|1\rangle$ illuminerer vi først kondensatet med en gul laserstråle, som vi kalder koblingslaseren. Den har en frekvens, der svarer til energiforskellen mellem tilstand $|2\rangle$ og $|3\rangle$, og bruges til at manipulere skyens optiske egenskaber – dets brydningsindeks og absorptionsegenskaber. Vi sender dernæst en lyspuls – 'probe'-puls – ind i skyen. Probelyset har en frekvens, der svarer til energiforskellen mellem tilstandene $|1\rangle$ og $|3\rangle$ – og det er denne lyspuls, vi nu vil nedbremse.

Hvis koblingslaserstrålen ikke var til stede, og vi kun sendte probe-puls ind i skyen, ville atomerne absorbere lyspuls fuldstændigt, og skyen ville opvarmes enormt og blæse fra hinanden. Eller hvis atomerne i stedet var i tilstand $|2\rangle$, og vi kun illuminerede med koblingslaseren, ville atomerne absorbere koblingslaserstrålen. De to lysfelter – fra koblingslaser og probe-puls – ændrer sammen et atoms indre tilstand, således at den bliver en kvante-superpositionstilstand af tilstandene $|1\rangle$ og $|2\rangle$. Det betyder, at atomet nu er i begge tilstande på een gang. I superpositionstilstanden foregår

begge absorptionsprocesser på en måde samtidigt, men således, at deres effekt cancelles, og der faktisk ikke er absorption fra nogen af lysfelterne. Dette er kvanteinterferens, og vi kalder den magiske superpositionstilstand for en 'dark state'. Hvad den magiske superpositionstilstand præcist er, dvs hvor meget af tilstand $|2\rangle$ og $|1\rangle$ den indeholder, afhænger helt af probepulsens elektriske feltamplitude relativt til koblingslaserfeltets.

Så med kvanteinterferensen gør vi atomskyen gennemsigtig (ingen absorption). Samtidigt kan vi ændre skyens brydningsindeks dramatisk, således at indekset varierer meget kraftigt selv med små ændringer i frekvensen af probelyset. (Værdien af brydningsindekset holdes i eksperimenterne tæt på 1, så vi undgår refleksion, men variationen med frekvens er hurtig). Og det forårsager en kraftig nedbremsning af lyspuls. Lyshastigheden kan styres direkte ved kontrol af koblingslaserens intensitet: jo lavere intensiteten er, jo langommere går lyset. Ved brug af Bose-Einstein kondensater har vi nedbremset lyset til blot 6 meter i sekundet – hvilket svarer til 20 km i timen!

I eksperimenterne bruger vi typisk en lyspuls med en varighed på nogle få milliontedel sekund. Det betyder, at den rumlige længde af lyspuls, før den sendes ind i kondensatet, er omkring en kilometer. Når lyspuls sendes ind i skyen, nedbremses lysets forende, men bagenden er stadig i frit rum, så den suser afsted med normal hastighed og vil begynde at indhente forenden. Resultatet er, at lyspuls sammenpresses meget kraftigt – nemlig med samme faktor som den, hvormed

pulsen nedbremses: en faktor 50 millioner. Fra at være en kilometer lang, bliver lyspulsens sammenskræbet til blot 0,02 millimeter. Så selvom et kondensat er ganske lille, er lyspulsens efter nedbremsning endnu mindre og kan rummes fuldstændigt i skyen. Lyspulsens går langsomt igennem skyen, og når forenden forlader skyen, vil den accelerere tilbage til den normale høje lyshastighed, så pulsen strækker sig ud igen. Til slut har den samme længde og energi, som da den startede, men den er enormt forsinket.

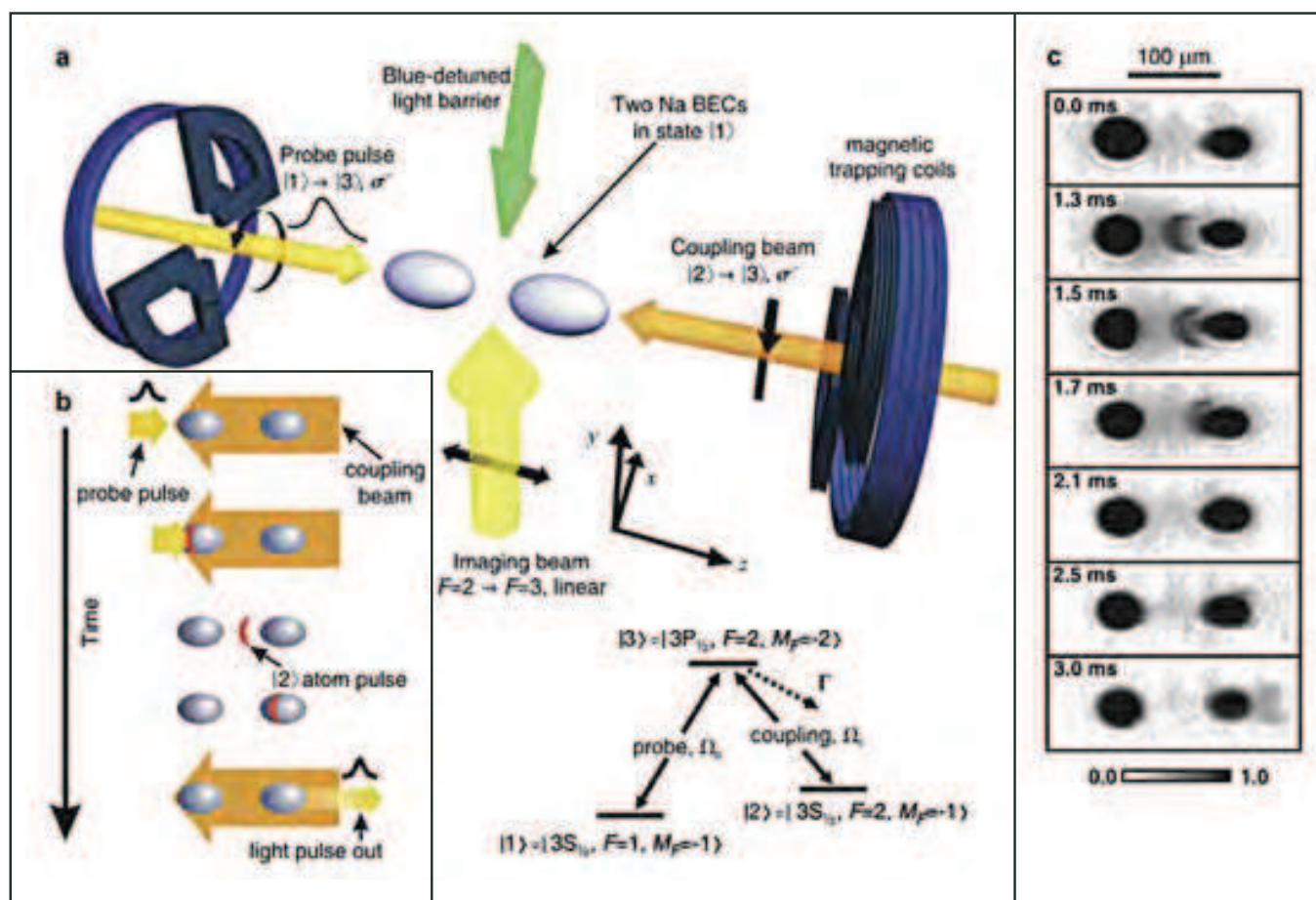
Mens lyspulsens langsomt går igennem skyen, laver den et lille imprint i atomernes bølgefunktion – som et lille holografisk aftryk. Det aftryk skabes, fordi atomerne inden for den lokaliserede region, hvor lyspulsens er, etableres i en "dark state" med en rumlig variation, der afspejler lyspulsens facon. Hvis vi i denne situation blokerer koblingslaseren, går lyspulsens i stå og slukker, men informationen, der var i lyspulsens, er ikke tabt, for den er jo allerede indkodet i atomerne.

Konvertering mellem lys og stof – og hvordan vi bærer en lyspuls rundt...

I eksperimentet vist i Figur 3 skaber vi ikke blot et men to Bose-Einstein kondensater. Begge består af atomer i indre tilstand $|1\rangle$, og er vist i figur 3c (0.0 ms). De to kondensater er dannet helt uafhængigt af hinanden. Vi sender nu en probe-puls ind i det første (venstre) kondensat, mens det illumineres med koblingslaseren, der propagerer i modsatgående retning. Lyspulsens nedbremses, komprimeres, stoppes og slukkes i dette første Bose-Einstein kondensat, og vi ender med lyspulsens lille 'holografiske' aftryk.

Lysenergi er kvantiseret i fotoner. Når et atom absorberer eller emitterer en foton, overføres det til en højere eller lavere indre energitilstand. Atomet får også et lille skub: impuls overføres. I "dark state" er atomerne både i $|1\rangle$ og $|2\rangle$ på samme tid. Den del af et atom, der er i $|2\rangle$, er overført fra $|1\rangle$ ved kombineret absorption af en probe-foton og stimuleret emission af en koblingsfoton (en foton adde-

Figur 3
3a er en tegnet og forsimplet version af Figur 1a. 3b-c: En perfekt stofkopi af en lyspuls skabes i første kondensat; det forlader kondensatet og bevæger sig ud i frit rum. Efter et par millisekunder nås det andet kondensat, og stofkopien går igennem og kommer ud på den anden side.
Lene Vestergaard Hau,
Nature 445, 623 (2007)



res til koblingslaserstrålen). Atomet har i processen fået to impulsoverførsler — en fra hver foton.

Det 'holografiske' aftryk — pulsaftrykket — formes af den del af atomernes bølgefunktion, der overføres til $|2\rangle$, og det aftryk begynder at flytte sig med omkring 200 meter i timen. Aftrykket forlader kondensatet og bevæger sig ud i frit rum. Resultatet er, at vi nu i frit rum har en perfekt stofkopi af den lyspuls, der allerede er slukket. Vi kan fotografere stofkopien, der tydeligvis har form som en boomerang (Figur 3c ved 1.3 ms). I kondensatet blev lyspulsens nedbremsning mest langs kondensatets centerlinie, hvor atomtætheden er højst. Derfor udviklede lyspulsens netop en boomerangform, før den stoppedes og slukkedes, og det afspejles præcist i stofaftrykkets form.

Kvantemekanikken forudsiger, at vi ofte ikke kan vide med sikkerhed, for eksempel, hvor i rummet en partikel er. Ligeledes er der ofte usikkerhed om, hvor mange fotoner, der er i en indkommende lyspuls — der er en kvanteusikkerhed — og i stofaftrykket vil der være nøjagtigt samme kvanteusikkerhed i antallet af atomer (i $|2\rangle$). Der er jo tale om en perfekt kopi, så form, fase og kvantestatistik overføres fra lyspuls til stofaftryk.

Efter at være opstået i det første kondensat og rejst i 2,1 millisekunder, når stofaftrykket det andet kondensat. Det bevæger sig igennem kondensatet og — hvis vi ikke foretager os noget — kommer det ud på den anden side. Hvis vi derimod — når aftrykket er godt begravet i det andet kondensat — simpelthen illuminerer med koblingslaseren, kan vi få lyspulsens til at genopstå som vist i figur 4a.

Så her har vi stoppet og slukket lyspulsens et sted i rummet og fået den til at genopstå på et helt andet sted. Det er ret underligt, for stofaftrykket og det andet kondensat består af to sæt atomer, der aldrig har set hinanden før, så hvordan kan de sammen finde ud af at genskabe lyspulsens? Det er kvantemekanikken, der er på spil!

Forklaringen ligger i, at vi har med Bose-Einstein kondensater at gøre. Når vi belyser atomer i stofaftrykket med koblingslaseren, agerer de som små antenner. Under normale omstændigheder ville disse antenner gøre hver sit og udsende stråling i alle retninger — stråling, der er kaotisk

og uden informationsindhold. Men tilstedeværelsen af kondensatet sørger for at fasselåse de små antenner, så de sammen kan genskabe lyspulsens med informationen bevaret.

Det, at vi nu kan bære rundt på lyspulser i stofform, har mange implikationer.

Når lyspulsens er i stofform kan vi samle den op og 'lægge den på hylden' — det kan gøres med optiske pincetter eller små magnetfelter for eksempel. Vi kan også begynde at modellere stofaftrykket — ændre dets form for eksempel — og manipulere dets informationsindhold. Efter manipulationerne er foretaget, kan vi bare overlape stofaftrykket med et Bose-Einstein kondensat og lave det om til lys. De ændringer, vi har lavet i stofaftrykket, vil nu være at finde i den genopståede lyspuls.

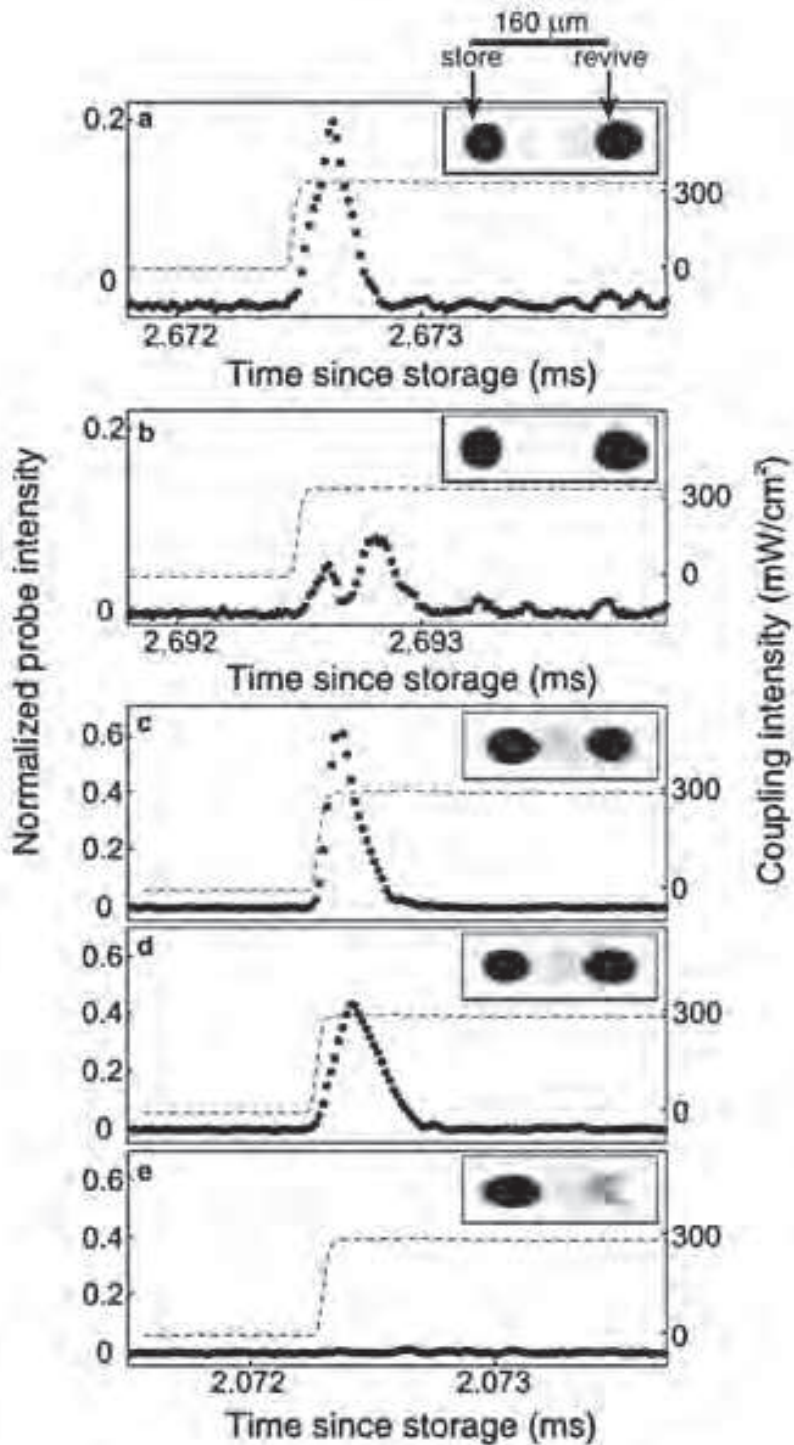
Disse metoder til ekstrem lyskontrol åbner for nye paradigmer inden for både klassisk og kvantemekanisk informationsbehandling. Information indkodet i lys kan transporteres i lyslederkabler over lange afstande med minimalt tab. Når det når et knudepunkt i netværket, kan det omdannes til stof uden informationstab, manipuleres og derefter konverteres tilbage til lys og sendes af sted i andre optiske fibre. For eksempel kan man skabe enorme ikke-lineære optiske effekter, hvor to lyspulser i stofform vekselvirker kraftigt og så konverteres tilbage til lys. Selv for lyspulser med blot en enkelt foton vil det være muligt at opnå store ikke-lineariteter — og det er effekter, der kan bruges i kvantecomputere. Også helt nye algoritmer for informationsbehandling er mulige, hvor de traditionelle enkelt- og to-bit operationer som fundamentale byggesten erstattes af 'global processing' og operationer, der udføres samtidigt på tre-dimensionelle inputmønstre.

Vi har opnået komplet symmetri mellem lys og stof. Så vi kan på en måde sige, at vi er nået 'full circle': Fra Newton over Young og Maxwell er vi nu tilbage til Newton. I Opticks, der blev publiceret i 1704, spekulerede Newton om ikke lys bestod af små partikler og ordinært stof af store partikler... og videre, at via en alkimistisk omdannelse "Are not gross Bodies and Light convertible into one another, ...and may not Bodies receive much of their Activity from the Particles of Light which enter their Composition?"



Når lyspulsens er i stofform kan vi samle den op og "lægge den på hylden" – det kan gøres med optiske pincetter eller små magnetfelter for eksempel.





Figur 4

En lyspuls konverteres til en stofkopi i et kondensat og omformes igen til lys i et helt andet kondensat. Figuren viser en måling af den genopståede lyspuls. Lene Vestergaard Hau, Nature 445, 623 (2007)

“
 I eksperimenterne bruger vi typisk en lyspuls med en varighed på nogle få milliontedel sekund. Det betyder, at den rumlige længde af lyspulsens, før den sendes ind i kondensatet, er omkring en kilometer.
 ”