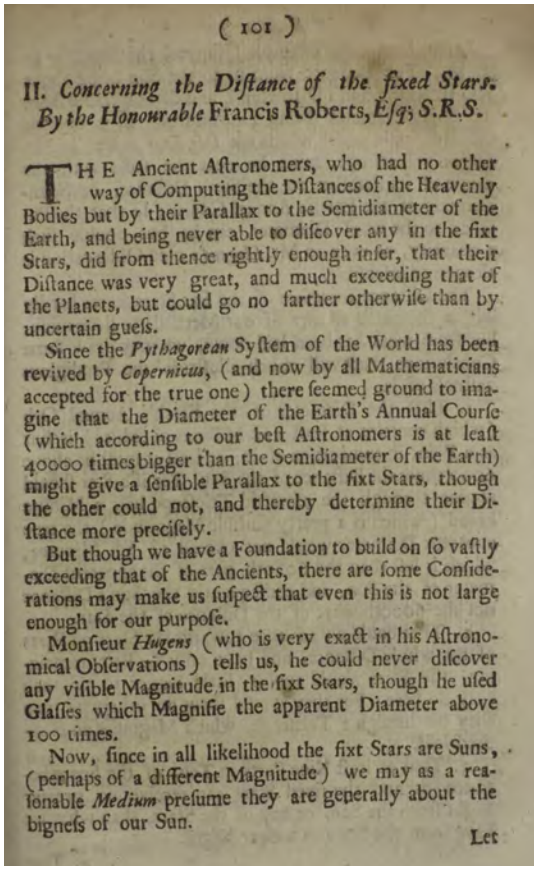
Rømers opdagelse og dens naturfilosofiske konsekvenser

Helge Kragh, Niels Bohr Institutet, Københavns Universitet

Opdagelsen af lysets endelige hastighed for 350 år siden kastede lange skygger. Ikke blot åbnede den op for nye udviklinger i fysik, astronomi og kosmologi, den gav også anledning til filosofiske refleksioner over, hvordan lyshastigheden er koblet til fundamentale begreber som rum, tid og kausalitet. Ved at se på udviklingen i et langt historisk perspektiv får Rømers opdagelse en helt anden status, end den oprindeligt blev tillagt.

Fra Rømer til Herschel

Da Ole Rømer rapporterede sin opdagelse af lysets tøven i *Journal des Sçavans* fra 7. december 1676, havde han ingen anelse om de videre konsekvenser af opdagelsen. Han fandt, at lyset tilbagelagde en jordbanediameter på 22 minutter svarende til en hastighed på ca. 227.000 km/s, men talværdien var ikke i sig selv af stor betydning. Det afgørende var, at lyset ikke udbreder sig momentant, men med en endelig hastighed. På trods af modstand i det franske videnskabelige miljø, der var præget af cartesianske forestillinger om lyset, vandt hans påstand accept blandt ledende naturfilosoffer som Christiaan Huygens i Holland og Isaac Newton i England. I *Principia* fra 1687 henviste sidstnævnte til Rømer, sådan som han også gjorde i *Opticks* fra 1704.



(101)

II. *Concerning the Diſtance of the fixed Stars.* *By the Honourable* Francis Roberts, *Eſq;* S.R.S.

THE Ancient Aſtronomers, who had no other way of Computing the Diſtances of the Heavenly Bodies but by their Parallax to the Semidiameter of the Earth, and being never able to diſcover any in the fixt Stars, did from thence rightly enough infer, that their Diſtance was very great, and much exceeding that of the Planets, but could go no farther otherwiſe than by uncertain gueſs.

Since the *Pythagorean* Syſtem of the World has been revived by *Copernicus*, (and now by all Mathematicians accepted for the true one) there ſeemed ground to imagine that the Diameter of the Earth's Annual Courſe (which according to our beſt Aſtronomers is at leaſt 40000 times bigger than the Semidiameter of the Earth) might give a ſenſible Parallax to the fixt Stars, though the other could not, and thereby determine their Diſtance more preciſely.

But though we have a Foundation to build on ſo vaſtly exceeding that of the Ancients, there are ſome Conſiderations may make us ſuſpect that even this is not large enough for our purpoſe.

Monſieur *Hugens* (who is very exact in his Aſtronomical Obſervations) tells us, he could never diſcover any viſible Magnitude in the fixt Stars, though he uſed Glaſſes which Magnifie the apparent Diameter above 100 times.

Now, ſince in all likelihood the fixt Stars are Suns, (perhaps of a different Magnitude) we may as a reaſonable *Medium* preſume they are generally about the bigneſs of our Sun.

Let

Figur 1. Første side af Francis Roberts (ca. 1650–1718) artikel om lysets høje hastighed.

Endnu mens Rømer levede, blev hans opdagelse opfattet som en kobling mellem astronomisk rum og tid. I en artikel i *Philosophical Transactions* fra 1694 påpegede forfatteren, den lærde Francis Roberts, medlem af Royal Society, lysets forbavsende store hastighed i forhold til stjernernes forbavsende store afstande (som man dengang ikke kendte). Som han skrev: "Det tager længere tid for lyset at nå os fra stjernerne end den tid, vi bruger på en rejse til De Vestindiske Øer (som normalt varer seks uger)" [1]. Roberts sammenlignede lysets hastighed med lydens, idet han mente, at det ville tage 50.000 år før en lyd fra stjernerne nåede Jorden. Han havde tydeligvis ingen anelse om, hvor langt stjernerne i virkeligheden er fra Jorden. For lydens hastighed brugte han Newtons værdi på omkring 298 m/s.



Figur 2. James Bradley (1692–1762).

Skulle der være tvivl om lysets tøven, forsvandt den med den engelske præst og astronom James Bradleys påvisning fra 1728 af stjernernes aberration. Da alle stjerner viste den samme aberration, måtte lysets hastighed være den samme, uanset hvilken afstand lyset havde tilbagelagt gennem universets dybder. Lyset fra enhver stjerne bevæger sig med samme hastighed som det reflekterede sollys, Rømer havde baseret sin konklusion på. Lyshastigheden var altså en universel og langt mere fundamental størrelse end fx lydens hastighed.

Måske den ligefrem var en naturkonstant af samme ophøjede status som Newtons gravitationskonstant? I øvrigt fandt Bradley en talværdi for lysets hastighed, der kan oversættes til c = 279.939 km/s, blot nogle få procent fra den moderne værdi.

Uanset om der er tomrum eller en æterisk substans mellem himmellegemerne, tager det tid for lyset at komme fra en fjern stjerne til Jorden. Universet har en historie, som er bestemt af lysets hastighed. Denne skelsættende erkendelse, der stammer fra den sene oplysningstid, blev fremhævet af den tyskfødte astronom William Herschel, opdageren af planeten Uranus. "Ud fra lysets kendte hastighed kan det vises," skrev han i 1802, "at når vi ser på Sirius, så kan strålerne, der går ind i øjet, ikke have været undervejs fra stjernen i mindre end 6 år og 4,5 måneder." For det, vi i dag kalder de fjerne galakser, "må lysstrålerne, som overfører billedet til øjet, have været der i næsten to millioner år" [2, s. 87]. Vi ved i dag, at Sirius befinder sig i en afstand af 8,611 lysår fra Jorden, og at afstanden til Andromedagalaksen er omkring 2,5 millioner lysår. Desuden gjorde Herschel det klart, at vi ser ting på himlen, som i bogstavelig forstand ikke eksisterer (men engang *har* eksisteret). Om nogle af de fjerne himmellegemer skrev han, at hvis de var "ophørt med at eksistere for millioner af år siden, så ville vi stadig se dem, da lyset fra dem ville fortsætte selv efter legemet var forsvundet."



Figur 3. James Clerk Maxwell (1831–1879).

Med andre ord, når vi ser ud i rummet, ser vi nødvendigvis tilbage i tiden. Vi kan derfor bruge nutidige observationer til at få indblik i universets historie, på omtrent samme måde, som historikeren eller arkæologen får indblik i de menneskelige samfunds fortid. Faktisk er der en vidtgående analogi mellem historikerens metode baseret på overleverede kilder og astronomens metode, hvor kilderne blot er meget langt væk. Herschels pointe er ikke begrænset til de fjerne himmellegemer, den gælder også for fx Solen. Når vi ser Solen skinne, ser vi jo vores stjerne, som den var for omtrent 8 minutter siden. Omvendt, hvis Solen pludselig forsvandt, ville det vare 8 minutter, før vi lagde mærke til det. Mere generelt er det en konsekvens af lysets endelige hastighed, at en hændelse altid iagttages senere end den faktisk sker. Kun på grund af den meget store lyshastighed er forholdet normalt uden betydning. Men i streng forstand gælder, at vi kun kan iagttage fortiden. Det absolutte nu er ikke iagttageligt.

En ny naturkonstant

Idéen om naturlove udtrykt ved visse konstante størrelser, naturkonstanter, optræder først i det 19. århundrede. Det var først da, at lysets hastighed kom til at tilhøre den eksklusive gruppe af naturkonstanter, hvilket i væsentlig grad skyldes Maxwells elektromagnetiske feltteori. Elektriske og magnetiske egenskaber kunne ifølge Maxwell og andre af datidens fysikere føres tilbage til to karakteristiske størrelser for æteren, som vi idag opfatter som knyttet til vakuum og betegner med symbolerne ϵ_0 og μ_0. Ved eksperimentelt at fastlægge værdierne for de to konstanter fandt Maxwell, at kombinationen

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \qquad (1)$$

resulterede i en beregnet værdi på 2,88 $\times$ 10^8 m/s, hvilket var omtrent det samme som den dengang målte lyshastighed. Som Maxwell formulerede det i 1862 [3, s. 500]:

> Hastigheden af transversale svingninger i vort hypotetiske medium [æteren] ... stemmer så godt overens med lyshastigheden som beregnet af M. Fizeau ud fra optiske eksperimenter, at vi næppe kan undgå at slutte, at lys består af transversale svingninger i det samme medium, som er årsagen til elektriske og magnetiske fænomener.

Henvisningen er til den franske fysiker Hippolyte Fizeau, der i laboratorieforsøg fra 1849 bestemte lyshastigheden i luft til 3,133$\times$ 10^8 m/s.

For Maxwell var de elektromagnetiske bølger begrænset til synligt lys, men hans teori er gyldig også for helt andre bølgelængder, fra de meget kortbølgede røntgenstråler til de meget langbølgede radiobølger. Modsat hvad tilfældet er, når lys forplanter sig i et stofligt medium, fx vand, så er hastigheden i vakuum præcis den samme for alle bølgelængder. Når senere fysikere talte om"'lys" mente de ofte "elektromagnetiske bølger" i generel forstand.

Ved slutningen af århundredet blev elektrodynamikken baseret på Maxwells teori betragtet som den måske mest fundamentale af alle fysiske teorier. Inden for rammerne af det "elektromagnetiske verdensbillede" var lyshastigheden en helt central naturkonstant på linje med gravitationskonstanten G, den elektriske elementarladning e, elektronens masse m_e og – efter 1900 – Plancks konstant h. Men det var i det mindste tænkeligt,

at der fandtes endnu større hastigheder end lysets. Ikke blot var der spekulationer om at tyngdekraften udbredte sig med større hastighed end lyset, fysikere som Oliver Heaviside i England og Arnold Sommerfeld i Tyskland arbejdede også med modeller af elektronen, der tillod sådanne "superluminale" hastigheder. Hvad angår tyngdekraften, ved vi i dag, at den netop udbreder sig med lysets hastighed.



Figur 4. Albert Einstein (1879–1955).

Relativitetsteori, lys og kausalitet

Albert Einstein var livet igennem fascineret af lyset og dets egenskaber. I sine selvbiografiske noter fra 1946 fortalte han om et tankeeksperiment, han først havde overvejet som 16-årig: "Hvis jeg følger efter en lysstråle med hastigheden c (lysets hastighed i vakuum) skulle jeg iagttage en sådan lysstråle som et rumligt svingende elektromagnetisk felt i hvile. Men et sådant system synes ikke at findes ... i dette paradoks findes allerede kimen til den specielle relativitetsteori" [4, s. 53].

Den specielle relativitetsteori fra 1905 var baseret på to postulater, der ikke kunne diskuteres inden for teoriens rammer og kun begrundes via deres empiriske konsekvenser. Det ene af postulaterne var, som Einstein formulerede det i sin skelsættende artikel i *Annalen der Physik*, at "lys altid udbredes i det tomme rum med en bestemt hastighed c som er uafhængig af bevægelsestilstanden af det legeme, der udsender lyset." Hermed blev lyshastighedens fundamentale status yderligere cementeret. Einstein viste desuden, at hvis en partikel (lyskvantum, foton) bevæger sig med $v = c$ må dens masse være nul. Lyset vejer ingenting – absolut ingenting, og det samme gælder for tyngdebølger.

Som Einstein understregede, var postulatet om den konstante lyshastighed nødvendig for at synkronisere ure og dermed at definere begrebet om samtidighed af to hændelser. Dertil kom, at lyshastigheden ikke kan overskrides, hvilket Einstein illustrerede med relativitetsteoriens formel for sammensætning af hastighederne v_1 og v_2:

$$w = \frac{v_1 + v_2}{1 + v_1 v_2)/c^2} \qquad (2)$$

Som formlen viser, kan lysbarrieren $v = c$ ikke overskrides ved at addere hastigheder mindre end eller lig med lysets. Selv for det ekstreme tilfælde $v_1 = v_2 = c$ bliver resultatet $w = c$. Faktisk var Einsteins konklusioner vedrørende lyset ikke helt nye, for ud fra ganske andre forudsætninger havde Henri Poincaré, den franske matematiker og fysiker, sagt omtrent det samme. I et foredrag fra 1904 profeterede han således, at den nye fysik "først og fremmest vil være karakteriseret ved reglen om, at ingen hastighed kan overskride lysets hastighed" [5, s. 89]. Poincarés idéer om lys og bevægelse var dog væsentligt anderledes end Einsteins relativitetsteori.

Det afgørende for den einsteinske definition af samtidighed, og dermed for den specielle relativitetsteori som helhed, er i virkeligheden ikke synkronisering af ure ved hjælp af *lys*signaler. Derimod er det afgørende, at selve begrebet samtidighed forudsætter eksistensen af signaler mellem kausalt forbundne hændelser som udbreder sig med en konstant maksimal hastighed c. Uden en sådan grænse ville samtidighed være absolut og universel – med den bliver begrebet relativt og afhængigt af iagttagerens bevægelse. Den konstante hastighed genfindes i naturen, hvor den kaldes "lysets hastighed" og har værdien ca. 3×10^8 m/s. Men relativitetsteorien er ikke kritisk afhængig af lys, blot af konstanten c som udtryk for overførsel af fysiske signaler. Selv i en hypotetisk verden, hvor der ikke er og aldrig har været lys, vil relativitetsteoriens formler være de samme. I vores virkelige verden kan vi dog trygt forlade os på ligningen c = lysets hastighed.

I en anden artikel i *Annalen der Physik*, denne gang fra 1907, fremkom Einstein med endnu et stærkt argument imod fysiske signalers udbredelse med overlyshastighed. Denne gang var det af begrebsmæssig karakter, idet det vedrørte noget så fundamentalt som årsagssætningen, altså at en årsag nødvendigvis må komme før den virkning, den forårsager. Ud fra et *reductio ad absurdum* tankeeksperiment konkluderede han, at overlyshastighed medfører en virkning, der er før årsagen! Han kommenterede [6]: "Ganske vist så indeholder dette resultat efter min mening ikke en modsætning i et rent logisk forstand, men det er i så absolut modstrid med karakteren af al vor erkendelse, at resultatet er tilstrækkeligt til at bevise umuligheden af antagelsen [nemlig $v > c$]."

Einsteins kausalitetsparadoks, der i en mere udviklet form blev gentaget af den amerikanske fysiker Richard Tolman (og derfor er kendt som "Tolmans paradoks"), blev bredt accepteret som det endegyldige bevis imod signaler med overlyshastighed. Det viste sig dog senere, at såfremt sådanne signaler altid bevæger sig hurtigere end lyset – aldrig krydser lysbarrieren $v = c$ – er de ikke i modstrid med relativitetsteorien. Dette blev først påvist i 1926, uden at det vakte opmærksomhed.

Teorien om de hypotetiske $v > c$ partikler kaldet *tachyoner* blev først udviklet langt senere. Den var populær i 1960'erne og 1970'erne, men er i dag opgivet.

Som antydet er begreberne kausalitet og tid intimt forbundet med lysets hastighed. Hvis hændelsen A er årsag til hændelsen B (dens virkning), vil B forekomme og kun forekomme såfremt A forekommer. En anden formulering er: Hvis vi ved at ændre på A kan forhindre B i at forekomme, men ikke omvendt, er A årsag til B. For alle kendte kausale sammenhænge gælder det desuden, at virkningen B kommer *senere* end årsagen A, således at man kan bruge tiden til at fastlægge den kausale rækkefølge. Alligevel kan man godt *forestille* sig det modsatte i form af såkaldt "baglænskausalitet", hvor virkningen kommer før årsagen. Uanset diverse filosofiske diskussioner om kausalitet og tid, vil man i fysikken typisk sige, at hændelserne A og B er kausalt forbundne, såfremt (og kun såfremt) et lyssignal fra A kan nå B, eller omvendt. Hvis afstanden mellem A og B er så stor, at en lysstråle fra A ikke kan nå B, inden B indtræder, kan der ikke være nogen kausal forbindelse mellem de to hændelser.

Lyshastigheden som grænse for kausal påvirkning kom til at spille en central rolle i Einsteins kritik af kvantemekanikken. I det i dag så berømte EPR tankeeksperiment fra 1935 forestillede de tre forfattere – Einstein, Boris Podolsky og Nathan Rosen – sig to vekselvirkende partikler, der adskilles og fjerner sig vilkårligt langt fra hinanden. Einstein argumenterede nu, at ifølge kvantemekanikken vil en måling af den ene partikels kvantetilstand øjeblikkeligt indvirke på den andens tilstand, også selv om den befinder sig trillioner af lysår væk. Der er, hævdede han, tale om en mystisk fjernvirkning, hvor information overføres kausalt med en hastighed langt større end lysets og derfor i eklatant modstrid med relativitetsteorien. Lysets hastighed nævnes dog ikke eksplicit i EPR-artiklen i *Physical Review*, hvor ordet "lys" slet ikke optræder.

Det ekspanderende univers

Som nævnt spillede den endelige lyshastighed allerede en rolle i Herschels kosmologiske overvejelser fra slutningen af 1700-tallet. Det samme gjaldt i det følgende århundrede, hvor astronomer søgte at forklare Olbers' optiske paradoks om den mørke nattehimmel. Hvorfor er det mørkt om natten? Den tyske astronom Johann Mädler fremkom i 1858 med et originalt argument, der byggede på hypotesen om et univers af endelig alder, altså med en tidslig begyndelse. I så fald ville også lyset fra stjernerne kun have eksisteret i en endelig tid. "I den endelige tid lyset kunne rejse, før det mødte vores øje, vil en lysstråle kun passere et endeligt rum uanset lysets hastighed" [2, s. 85]. På denne måde mente Mädler at kunne demontere Olbers' paradoks.

Med erkendelsen af, at universet udvider sig i overensstemmelse med Einsteins generelle relativitetsteori, ændrede den kosmologiske videnskab helt karakter og lyshastigheden optrådte i et nyt perspektiv [2; 7]. Som Georges Lemaître og andre pionerer fremhævede, så er det rummet, der udvider sig og ikke det materielle univers. Selv et helt tomt kosmisk rum vil udvide sig, sådan som tilfældet er med den kosmologiske model, den hollandske astronom Willem de Sitter foreslog i 1917. Rummet, der ikke selv er et fysisk legeme, kan udvide sig med vilkårlig stor hastighed uden at komme i konflikt med relativitetsteorien. Dette forhold optræder endnu mere vildt i den noget kontroversielle men dog bredt anerkendte inflationsteori for det ultratidlige univers, der stammer fra omkring 1980. I den meget kortvarige inflationsfase umiddelbart efter Big Bang vil universet efter denne teori udvides med en svimlende hastighed, der er fantasillioner af gange større end lysets.



Figur 5. Arthur Stanley Eddington (1882–1944).

Afstanden mellem fjerne galakser kan altså vokse med en hastighed, der er større end lysets, hvilket fører til bemærkelsesværdige konsekvenser. Den berømte astronom Arthur Eddington var tilhænger af en model oprindeligt foreslået af Lemaître, hvor ekspansionshastigheden vokser med tiden. Dette medfører, at kun en del af universet kan observeres, mens lys fra fjernere egne aldrig vil nå frem til Jorden. Størrelsen af det principielt observerbare univers svarer i dag til en horisont, der ligger omkring 10^{11} lysår væk. I sin populære bog *The Expanding Universe* fra 1933 udtrykte Eddington forholdet ved en analogi: "Lys er ligesom en løber på en bane, der udstrækkes og hvor målstregen fjerner sig hurtigere, end han kan løbe." Ved en anden lejlighed påpegede han, at den accelererede udvidelse vil føre til en situation, hvor universet spaltes i adskilte del-universer eller i et slags multivers: "Legemer, der adskilles hurtigere end lysets hastighed, er afskåret fra nogen kausal indflydelse på hinanden; så universet vil engang komme til at bestå af, hvad der praktisk taget er et antal adskilte universer uden nogen indbyrdes fysisk forbindelse" [8].

En variabel lyshastighed?

Det er umiddelbart absurd at hævde, at naturkonstanter – som jo per definition er konstante – kan ændres i tiden. En konstant størrelse er selvsagt uforanderlig. Ikke desto mindre har der gennem det 20. århundrede været talrige forslag om, at naturkonstanters værdi i fortiden var anderledes, end de er i dag. Det bedst kendte eksempel er måske Paul Diracs hypotese om en langsomt aftagende gravitationskonstant, $G = G(t)$, som han forsvarede gennem mere end 30 år. Andre fysikere har foreslået teorier for $e = e(t)$ og $h = h(t)$. Kunne det være, at også lysets hastighed har ændret sig gennem tiden, $c = c(t)$? Der var faktisk idéer af den slags allerede i 1930'erne, men de blev resolut afvist af Eddington som meningsløse og selvmodsigende.

Alligevel dukkede teorier om en variabel lyshastighed op igen ved århundredets afslutning og denne gang blev de taget alvorligt og for en tid diskuteret af prominente fysikere [9]. Der er en hel klasse af VSL-teorier (Varying Speed of Light) som kun har til fælles, at de opererer med en tidsafhængig lyshastighed. Ifølge den portugisisk-engelske fysiker João Magueijo kan VSL-teori erstatte inflationsscenariet og bør af denne grund foretrækkes for det meget tidlige univers. Teorien antager, at lyshastigheden oprindeligt var enormt meget større end i dag (fx 10^{40} m/s), hvorefter den hurtigt kollapsede til den nuværende kendte værdi på blot 3×10^8 m/s. Når VSL-teorier stadig er af en vis interesse, skyldes det hovedsageligt, at de fremprovokerede en række metodologiske og filosofiske diskussioner i fysikermiljøet.

I lighed med Eddingtons tidligere indvending påpegede VSL-kritikere, at lyshastigheden er grundlag for enhver måling af afstande, hvorfor den nødvendigvis må være konstant. I denne forbindelse må man huske på, at i 1983 blev enheden meter defineret som den afstand lyset tilbagelægger i løbet af 1/(299.792.458) af et sekund. Nævneren er naturligvis lysets hastighed, der altså også er en defineret størrelse og ikke længere noget, der kan måles. Andre VSL-kritikere fremførte, igen i Eddingtons ånd, at det er meningsløst eller i det mindste forvirrende at tale om en variabel lyshastighed. Ifølge den amerikanske fysiker Michael Duff [9]:

> Bortset fra at c er endelig, så har udsagnet $c = 3 \times 10^8$ m/s ikke andet indhold end en omregning fra én menneskeskabt størrelse (meter) til en anden (sekund) ... Spørgsmålet om hvorvidt c har ændret sig gennem den kosmiske historie ... er som at spørge, om hvorvidt forholdet mellem antal liter per gallon har ændret sig.

Uanset hvad der er op og ned i denne diskussion, så understreger den det konventionelle element i den nutidige definition af lysets hastighed, en størrelse der måske bedre burde benævnes "lysets" hastighed.

Andre moderne teorier har ligesom VSL rejst tvivl om den autoriserede forståelse af lysets hastighed i vakuum, der ikke blot indebærer, at hastigheden er konstant men også at den er uafhængig af frekvensen ν eller den tilsvarende energi $E = h\nu$. Alle eksperimenter viser, at dette er tilfældet, men ifølge LQG (Loop Quantum Gravity) skulle der være en lillebitte forskel, sådan at højfrekvent lys, fx gammastråling, bevæger sig ganske lidt langsommere end lavfrekvent lys. Den drastiske forudsigelse kan i princippet testes, men indtil videre tyder ingen målinger på, at den er korrekt [10].

Afslutningsvist er det værd at bemærke, at de problemer om lysets hastighed, der her er nævnt, i det væsentlige er uafhængige af spørgsmålet om lysets natur. Er der tale om små partikler, som lysgiveren udsender (fotoner), eller forplanter lyset sig som bølger i enten æteren eller det tomme rum? Eller måske begge dele? Svaret på disse spørgsmål har ændret sig voldsomt siden Rømers tid, men uden at det har påvirket eksperimenter og teorier om lysets hastighed i nævneværdig grad.

Litteratur

[1] F. Roberts (1694) "Concerning the Distance of the Fixed Stars", *Philosophical Transactions*, bind **18**, side 101–103.

[2] H. Kragh (2019), "Conceptions of Cosmos", Oxford University Press.

[3] W. Niven, red. (1965) "The Scientific Papers of James Clerk Maxwell", Dover Publications.

[4] P. Schilpp, red. (1949) "Albert Einstein: Philosopher-Scientist", Library of Living Philosophers.

[5] H. Kragh (1999) "Quantum Generations", Princeton University Press.

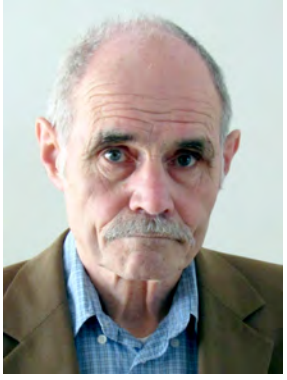
[6] A. Einstein (1907) "Über die vom Relativitätsprinzip geforderte Trägheit der Energie", *Annalen der Physik*, bind **23**, side 371–384.

[7] H. Kragh (2006) "Universe: A Guide to Everything", Reaktion Books.

[8] A. Eddington (1931) "The expansion of the universe", *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, bind **91**, side 412–416.

[9] M. Duff (2015) "How fundamental are fundamental constants?", *Contemporary Physics*, bind **56**, side 35–47.

[10] A. A. Abdo m.fl. (2009) "A limit on the variation of the speed of light arising from quantum gravity effects", *Nature*, bind **462**, side 331–334.



Helge Kragh er professor emeritus ved Niels Bohr Institutet og arbejder især med de fysiske videnskabers nyere historie.