

Generel relativitet: Træk af udviklingen 1920-1970

Af Helge Kragh, Niels Bohr Institutet, Københavns Universitet

Med Einsteins generelle relativitetsteori fra 1915 startede et nyt kapitel i fysikkens historie. Men allerede 10 år senere forekom det, at teorien befandt sig i et dødvande. Først i 1950'erne oplevede den noget slumrende teori en genfødsel, og siden da er dens betydning stedse vokset.

I december-nummeret af KVANT fra 2014 beskrev jeg, hvordan Einstein nåede frem til sin almene eller generelle relativitetsteori [1]. Herværende artikel er en slags fortsættelse, idet den giver en episodisk oversigt over dele af teoriens udvikling og betydning indtil omkring 1970, da den havde opnået den paradigmatisk status, den stadig har.

En tvivlsom bekræftelse

Den generelle relativitetsteori var baseret på ækvivalensprincippet, der allerede i 1911 førte Einstein til at forudsige en gravitationel forårsaget formindskelse af en spektrallinjes frekvens ν . Hvis φ_1 er gravitationspotentialet for det sted, hvor lyset udsendes, og φ_2 den samme størrelse for stedet, hvor det modtages, viste Einstein, at rødforskydningen kan udtrykkes ved den simple formel

$$\frac{\Delta\nu}{\nu} = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{c^2} \quad (1)$$

Her er c lysets hastighed. Einstein opfattede en test af formelen som et "crucialt eksperiment" i den forstand, at hvis målinger klart stred imod forudsigelsen, måtte relativitetsteorien opgives. I slutningen af 1919 skrev han til Arthur Eddington: "Jeg er overbevist om, at spektrallinjernes rødforskydning er en aldeles uundgåelig konsekvens af relativitetsteorien. Hvis det skulle vise sig, at denne effekt ikke findes i naturen, må hele teorien skrottes."



Figur 1. Einstein ved Mount Wilson-observatoriets 100" kikkert i 1931. I midten er Hubble og til højre Adams (California Institute of Technology).

Eddington havde netop bekræftet en anden af Einsteins forudsigelser, nemlig lysets afbøjning omkring Solen, og i 1924 foreslog han, at den hvide dværgstjerne Sirius B var velegnet til at teste den gravitationelle rødforskydning. Sirius B var først blevet observeret i omløb om sin langt større og mere lysstærke partner Sirius A i 1862, og ifølge Eddington var der tale om et himmellegeme med ekstrem høj densitet, måske op

til 70 kg/cm^3 . Sirius B måtte derfor have et meget stærkt gravitationsfelt, hvis rødforskydning (på formen $c \cdot \Delta\nu/\nu$) han estimerede til 20-25 km/s. På opfordring fra Eddington undersøgte den ansete astronom Walter Adams fra Mount Wilson-observatoriet spektret fra Sirius B (se figur 1). Målingerne var vanskelige, da det var svært at skelne linjerne fra dværgstjernen fra dem, der stammede fra Sirius A, men i 1925 nåede Adams frem til en værdi på ca. 21 km/s, altså i nydelig overensstemmelse med den teoretiske værdi. Eddington var henrykt, og i sit klassiske værk *The Internal Constitution of the Stars* fra 1926 skrev han:

Professor Adams har slået to fluer med et smæk. Han har testet Einsteins generelle relativitetsteori på en ny måde og har vist ikke blot muligheden af stof, der er 2000 gange tættere end platin, men at det faktisk eksisterer i stjernernes verden.

Eddingtons optimisme var tilsyneladende velbegrunder, for to år senere blev Adams' resultat bekræftet af Joseph Moore ved Lick-observatoriet, der rapporterede en rødforskydning på $21 \pm 5 \text{ km/s}$. En teoretisk forudsigelse, der stemmer med to uafhængige observationer – hvad mere kan man ønske sig?

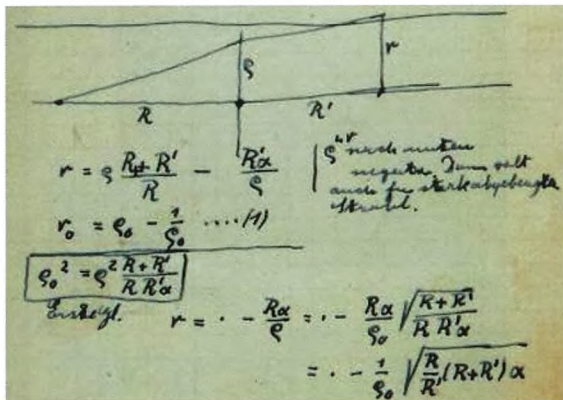
Men bekræftelsen var aldeles forkert, hvilket skyldtes fejl i såvel målingerne (især optisk forurening fra Sirius A) som i de data, Eddington byggede sin teori på. Mens Eddington vurderede dværgstjernen til at have en radius på 19.600 km og masse på 0,85 solmasser, ved vi i dag, at de korrekte værdier er 5840 km og 0,98 solmasser. De to typer af fejl ophævede hinanden. Den moderne observationsværdi for rødforskydningen fra Sirius B er $80,42 \pm 4,83 \text{ km/s}$ og helt i overensstemmelse med Einsteins teori. Først 1971 var man i stand til at måle rødforskydningen pålideligt, nemlig til $89 \pm 16 \text{ km/s}$, men da var den endelige bekræftelse af den einsteinske effekt ikke længere af stor betydning. Den var nemlig allerede blevet bekræftet i laboratorieeksperimenter (se nedenfor). Hele historien om Sirius B og den gravitationelle rødforskydning er instruktiv som et videnskabsfilosofisk eksempel på det komplekse forhold mellem teori og målinger [2].

Gravitationsbølger og linseeffekt

Einsteins teori havde tre klassiske forudsigelser, hvoraf den tredje var forklaringen af Merkurs perihelbevægelse [1]. Men der var flere andre konsekvenser, hvoraf nogle i princippet – og måske endda i praksis – kunne testes via astronomiske observationer. Einstein indså i 1916, at der for svage gravitationsfelter findes løsninger svarende til udbredelsen af bølger med lysets hastighed,

men også at sådanne bølger måtte være af en ganske anden type end de elektromagnetiske bølger udsendt af accelererede elektriske ladninger. To år senere viste han, at selv om der ikke fandtes "gravitationelle dipoler", så var tilsvarende kvadrupoler mulige. Einstein var dog usikker på, om gravitationsbølger faktisk fandtes, og de få fysikere, der interesserede sig for spørgsmålet, delte hans skepsis. En af dem var Eddington, der i 1922 skrev, at bølgerne nok snarere udbredte sig "med tankens fart."

Først i 1936, efter at have bosat sig i Princeton i USA, vendte Einstein tilbage til det komplicerede emne. Med sin assistent Nathan Rosen – kendt fra EPR (Einstein-Podolsky-Rosen) paradokset – skrev han til *Physical Review* en artikel med titlen "Do Gravitational Waves Exist?" De to forfattere var tilbøjelige til at svare nej. I øvrigt udkom artiklen aldrig i tidsskriftet, da Einstein blev fornærmet over, at den blev kritisk bedømt af en referent. I stedet udkom den i 1937 under en anden titel i det langt mindre kendte *Journal of the Franklin Institute*. Det matematisk komplekse spørgsmål om gravitationsbølger påkaldte sig først stor interesse efter Einsteins død i 1955. Og muligheden for at påvise disse umådeligt svage bølger hører til en endnu senere tid. I dag er de endnu ikke påvist, men fysikere er sikre på, at de eksisterer.



Figur 2. Udsnit af Einsteins noter fra 1912 med formler for den gravitationelle linseffekt.

Omkring samme tid som Einstein sammen med Rosen undersøgte spørgsmålet om gravitationsbølger, skrev han i *Science* en ganske kort artikel om, hvad der i dag kendes som den gravitationelle linseffekt, dvs. at en fjern lyskilde via gravitationel afbøjning af lyset viser sig som to eller flere billeder [3]. Faktisk havde Einstein så tidligt som 1912 indset denne konsekvens af relativitetsteorien (eller rettere af ækvivalensprincippet), men da uden at publicere sit resultat (se figur 2). Ja, han synes at have glemt det, for i sin artikel fra 1936 genopfandt han sine gamle argumenter. Einstein, der forestillede sig de himmelske linser som massive stjerner, tvivlede på, at effekten nogensinde ville blive observeret, hvorefter han mistede interessen for den. Hans lille artikel var dog ikke uden virkning. Den foranledigede astronomen Fritz Zwicky til at undersøge linseffekten nærmere og i 1937 at foreslå, at galakser var langt bedre kandidater end stjerner. Som tilfældet var med andre af Einsteins ideer, blev ideen om gravitationslinser først bekræftet efter hans død. Den første

linse blev påvist i 1979 – hundredåret for Einsteins fødsel – da astronomer viste, at et system af to kvasarer adskilt 6" i virkeligheden var et dobbelt billede af den samme kvasar.

Gravitationsbølger og -linser var hypotetiske fænomener, der udsprang af den generelle relativitetsteori og potentielt var af astrofysisk interesse – men kun potentielt. Til samme kategori hører de "sorte huller", der i en matematisk forstand går tilbage til 1916, da Karl Schwarzschild fandt løsninger til Einsteins feltligninger for en stationær og kuglesymmetrisk masse. Et vigtigt arbejde af J. Robert Oppenheimer og Hartland Snyder fra 1939 betragtes i dag som et gennembrud i forståelsen af sorte huller som resultatet af en imploderende stjerne, men i datiden vakte det ikke videre interesse. Samme år konkluderede Einstein, at et kollaps til en singularitet ganske vist var en matematisk mulighed, men at "en 'Schwarzschild singularitet' eksisterer ikke i den fysiske verden." Både datidens og eftertidens fysikere ignorerede dog Einsteins argumenter, der i dag vides at være forkerte. Indtil hans død i 1955 blev artiklen i *Annals of Mathematics* blot citeret to gange.

Relativistisk kosmologi

Den generelle relativitetsteoris største betydning i mellemkrigstiden var, at den skabte grundlaget for en helt ny og frugtbar teori for Universet i dets helhed. I 1917 formulerede Einstein sine kosmologiske feltligninger på formen

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R - \lambda g_{\mu\nu} = \kappa T_{\mu\nu} \quad (2)$$

De adskilte sig fra de oprindelige ligninger ved leddet $\lambda g_{\mu\nu}$, hvis væsentligste funktion var at sørge for et statisk, positivt krummet og derfor endeligt univers. Den nye konstant λ blev snart kendt som den "kosmologiske konstant."

Opdagelsen af Universets ekspansion medførte ikke en krise for den relativistiske kosmologi, men tværtimod en styrkelse af den, da det viste sig, at ekspanderende og andre dynamiske modeller var indeholdt i feltligningerne. Den belgiske fysiker Georges Lemaître havde forudsagt det ekspanderende univers to år før, det fik observationel støtte i form af Edwin Hubbles relation mellem galaksernes afstande og deres rødforskydning. Efter 1930 besluttede Einstein og flertallet af de få fysikere og astronomer, der bidrog til kosmologien, at den kosmologiske konstant var overflødig, dvs. $\lambda = 0$. Andre holdt dog fast ved den, bl.a. Eddington og Lemaître.

Kosmologien i perioden 1920-1960 er et alt for omfattende emne til at kunne behandles her. Det afgørende er, at dette forskningsområde var en af de få vedvarende succeser – måske den eneste – for den generelle relativitetsteori. I en oversigtsartikel fra 1957 vurderede den ledende teoretiker Valentine Bargmann, der i en periode var assistent for Einstein, situationen således: "Kosmologien er det område, hvor generel relativitetsteori har haft langt den mest frugtbare og stimulerende indflydelse. ... Hvis vi ser bort fra kosmologien, har generel relativitetsteori ikke haft nær samme betydning for fysikken som den specielle relativitetsteori."

Selv om der i perioden var flere alternative teorier for Universet, havde relativistisk kosmologi status som en bredt anerkendt standardteori. Et paradigme, som man kan tale om i dag, var der dog langt fra tale om. På trods af den autoritet, generel relativitetsteori havde i kosmologien, var der ikke tale om, at den kosmologiske videnskab var en test af Einsteins teori på samme måde, som fx påvisningen af lysets gravitationelle afbøjning om Solen var det. Indtil 1960'erne var der ingen observationer, der utvetydigt kunne skelne mellem relativistisk kosmologi og alternative teorier som fx steady-state-teorien.

Desuden var området ganske lille og afsondret fra, hvad det store flertal af fysikere og astronomer beskæftigede sig med. Data fra *Physics Abstracts* taler deres eget sprog: I starten af 1950'erne omfattede den fysiske forskningslitteratur omkring 10.000 publikationer per år, hvoraf blot ca. 30 hørte til generel relativitetsteori og et tilsvarende antal til kosmologi.

En teori på sidelinjen

I en 30-årig periode havde generel relativitetsteori lavstatus i fysikken og førte en skyggetilværelse i astronomien. Einsteins teori blev ganske vist beundret for sin matematiske skønhed og sublime tankeverden, men de færreste fysikere fandt det nødvendigt at sætte sig ind i dens matematiske og begrebsmæssige mysterier. De havde ikke brug for teorien, der af mange blev opfattet som irrelevant matematik snarere end egentlig fysik, der kunne testes i laboratoriet. Der var en verden til forskel mellem den prestigefyldte kvantemekanik og Einsteins teori for tyngdekraften. Begge teorier var fundamentale, men det var også det eneste, de havde til fælles. Så sent som 1961 undrede George Gamow sig over misforholdet mellem de to teorier:

Mens hundreder, ja tusinder af videnskabsmænd studerer kvantemekanikkens forskellige grene og udnytter den i masser af eksperimentelle undersøgelser, er det kun ganske få, der helliger deres tid og interesse til studiet af tyngdekraftens videre udvikling... Fuldførte Einsteins geni alt, hvad der i vor tid kan gøres ved tyngdekraften, og berøvede derved en generation håbet om videre udvikling?

Gamow betegnede den generelle relativitetsteori som "et videnskabernes Taj Mahal, der kun har lidt om overhovedet noget at gøre med den hurtige udvikling af fysikkens andre grene." De ret få fysikere, der alligevel undersøgte og udviklede Einsteins teori, var afsondret fra fysikersamfundet i både en videnskabelig og social henseende. Da den polske fysiker Leopold Infeld kom til Princeton for at arbejde med Einstein, bemærkede han at antallet af fysikere, der var interesseret i relativitetsteorien, kunne tælles på én hånd.

Situationen ændredes ikke efter 2. Verdenskrig, hvor fysikken i især USA oplevede en eksplosiv vækst. Relativitets- og gravitationsfysik var dog ikke en del af væksten og glimrede ved sit fravær i undervisningen ved selv de bedste europæiske og amerikanske universiteter. Lærebøger var der næsten ingen af. I Princeton kunne studerende ganske vist følge et kursus i generel

relativitetsteori, men indtil 1954, da John Wheeler overtog det, var kurset henlagt til matematik og ikke fysik. Først i 1967 blev et kursus i relativitetsteori tilbudt de fysikstuderende ved Harvard University. Robert Dicke var blandt de få fysikere, der i 1950'erne tog springet fra kvantefysik til gravitationsfysik. Som specialestuderende ved Princeton University i starten af 1940'erne fik han af sin professor at vide, "at jeg ikke skulle bekymre mig om Einsteins generelle relativitetsteori." Professorens argument var, at "den gravitationelle vekselvirkning var alt for svag til at have nogen betydning inden i atomet, der var hjemstedet for fysikkens store mysterier."

Relativitetsteoriens isolation fra den fysiske frontforskning, og den skepsis som mange fysikere nærrede med hensyn til teorien, illustreres af en episode fra midten af 1950'erne. *Physical Review* var da verdens ubestridt vigtigste tidsskrift for fysik og dets indhold nærmest definerede, hvad der var ny og spændende forskning i fysik. Dets chefredaktør var den prominente hollandsk-amerikanske fysiker Samuel Goudsmit, der i 1925 sammen med George Uhlenbeck havde opdaget elektronens spin. Goudsmit overvejede seriøst at forbyde artikler i *Physical Review*, der vedrørte "gravitation eller andre fundamentale teorier", hvilket i praksis betød generel relativitetsteori! Det var jo et emne, der hørte hjemme i den matematiske litteratur og ikke i den fysiske. Når det påtænkte forbud ikke blev til noget, skyldtes det hovedsageligt indvendinger og energisk lobbyarbejde fra Wheeler, der netop på den tid var begyndt at koncentrere sig om udviklingen af Einsteins teori.

Gravitational Research Foundation

Goudsmit ville bitterligt have fortrudt, hvis hans planlagte forbud mod generel relativitetsteori i *Physical Review* var blevet iværksat, for i løbet af 1960'erne skete en dramatisk ændring i teoriens status og fysikernes interesse for den. Den genoplivede interesse for gravitationsfysik havde mange rødder, hvoraf en er mindre kendt og mere bizar end andre [4].



Figur 3. Mindesten for Babson og GRF ved Gordon College, Massachusetts. Stenen minder de studerende om "de velsignelser der vil komme, når videnskaben finder ud af, hvad tyngdekraften er, hvordan den virker og hvordan den kan kontrolleres." (Wikimedia Commons).

Den velhavende og excentriske amerikanske forretningsmand Roger Babson (se figur 3) brød sig slet ikke

om tyngdekraften, der for ham at se var menneskenes fjende nr. 1 og ansvarlig for drukneulykker, nedstyrtning af fly og mange andre kalamiteter. Så hvorfor ikke gøre noget ved det? Det oprindelige formål med den *Gravitational Research Foundation* (GRF) han stiftede i 1948, var at udforske tyngdekraften med henblik på at tæmme den – gøre den til menneskehedens ven i stedet for fjende. Blandt de forskningsprojekter GRF rundhåndet sponserede, var udvikling af materialer, der kunne absorbere tyngdekraften og teknologier til at skabe en frastødende “anti-gravitation”. For at stimulere interessen for den slags uortodokse gravitationsstudier organiserede GRF konferencer og indstiftede en årlig pris til det bedste essay om tyngdekraften. Det lyder unægteligt som fantasi og pseudovidenskab, hvad det da også var.

Men kun for en stund, for efter nogle år fik GRF en mere videnskabelig drejning og blev stueren, ja ligefrem eftertragtet blandt fysikere og astronomer med en interesse i gravitationsstudier. I 1954 vandt Bryce DeWitt prisen for et essay, hvor han slog fast, at gravitationsfysik betød generel relativitetsteori og at man kunne glemme alt om anti-gravitation og gravitationsisolatorer. Blandt de tidlige vindere af GRF-prisen var kapaciteter som Wheeler, Thomas Gold, Roger Penrose, Hermann Bondi og Stephen Hawking. I 1950'erne var GRF en mindre men ikke uvæsentlig faktor i den voksende interesse, der snart gjorde generel relativitetsteori til et af fysikkens varme forskningsområder. Prisen fra GRF, der økonomisk set er beskednen (blot \$4.000), har stadig stor prestige. I 2015 gik den til den hollandske fysiker Gerard 't Hooft, som i 1999 blev tildelt Nobelprisen for sine vigtige bidrag til kvantefeltteorien.

Renæssance

Hvad den canadisk-amerikanske veteran i gravitationsfysik Clifford Will i 1986 kaldte “den generelle relativitets renæssance” gav sig udtryk i en række vigtige konferencer og institutionelle tiltag. Anledningen for den første store konference, der fandt sted i Bern i 1955, var 50-året for den specielle relativitetsteori og uofficielt også Einsteins død tidligere på året. Blandt deltagerne var Peter Bergmann, Wolfgang Pauli, Pascual Jordan og Felix Pirani. Mens Bern-konferencen var domineret af europæiske fysikere, var en videnskabeligt set vigtigere konference om gravitationsfysik i Chapel Hill, North Carolina, primært en workshop for amerikanske fysikere. Initiativet til konferencen, der fandt sted i 1957, kom fra Bryce og Cécile DeWitt med indirekte støtte fra GRF. Blandt deltagerne var ikke blot eksperter i generel relativitet som Wheeler, Bondi og Dicke, men også kvantefysikere som Richard Feynman. De fleste af bidragene blev publiceret i et særnummer af *Reviews of Modern Physics*, der i dag er en vigtig kilde til den relativistiske renæssances historie [5].

Andre vigtige konferencer fra samme periode fandt sted i Royamont uden for Paris (1959), Warszawa (1962) og Dallas (1963). Som resultat af mødet i Royamont blev der oprettet en *International Commission on General Relativity and Gravitation* (ICGRG) og senere et

tilsvarende selskab med omkring 200 medlemmer. Af særlig betydning var det prestigefyldte Solvaymøde (se figur 4), der for 11. gang blev afholdt i Bruxelles i 1958. For første gang i Solvayinstitutionens historie var et møde dedikeret til astrofysik, gravitation og kosmologi. Mødet var forberedt af bl.a. Lemaître, Pauli, Oppenheimer og Christian Møller, der alle var overbeviste om, at Einsteins gravitationsteori stod over for en gylden fremtid. Selv om den generelle relativitetsteori stod højt på dagsordenen i Bruxelles, var der også plads til steady-state teorien, der på mødet blev forsvaret af Gold, Bondi og Fred Hoyle.



Figur 4. Deltagere i Solvaymødet fra 1958. På første række ses bl.a. G. Lemaître, W. Pauli, R. Oppenheimer og C. Møller, og på anden række O. Klein, F. Hoyle, W. Baade, J. Wheeler, H. Bondi og L. Rosenfeld.

Konferencerne blev fulgt op af et væld af videnskabelige publikationer, der igen skabte et behov for et specialiseret tidsskrift, der henvendte sig til det nye og blomstrende forskningsområde. Resultatet blev *General Relativity and Gravitation*, der på initiativ af ICGRG blev søsat i 1970 og hurtigt udviklede sig til det foretrukne tidsskrift for eksperter i området. Også på universiteterne slog renæssancen igennem i form af nye kurser i gravitationsfysik og særskilte forskningsafdelinger, der fokuserede på emnet. Behovet for undervisningsmateriale resulterede i en række nye lærebøger, hvor den massive *Gravitation* fra 1973, skrevet af Wheeler, Charles Misner og Kip Thorne, satte nye standarder for både omfang og indhold. Kontrasten til tidligere lærebøger, som fx Møllers *The Theory of Relativity* fra 1952, er slående.

Den vigtigste grund til renæssancen var, at Einsteins abstrakte teori nu endeligt blev forbundet med eksperimentel fysik og astrofysiske observationer [6]. Men nye teorier spillede også en rolle, især forsøg på alternative gravitationsteorier der gik ud over Einsteins kanoniske feltligninger fra 1915. Den vigtigste af disse var en “skalar-tensor-teori” foreslået af Carl Brans og Dicke i 1961, der dog i det væsentlige allerede var formuleret af Jordan nogle år tidligere. Brans-Dicke-teorien var i 1960'erne og 1970'erne et seriøst alternativ til Einsteins teori og tiltrak sig stor opmærksomhed, fordi dens astronomiske og geofysiske forudsigelser kunne testes. For eksempel gav den for Merkurs anomale præcession et lidt anderledes resultat end Einsteins. Resultatet af mange års eksperimenter og målinger var dog, at Einsteins teori var bedre end både Brans-Dicke-teorien og andre alternativer.

Ekspirerter og observationer

For fysikere i 1930'erne ville begrebet “eksperimentel generel relativitet” knap nok have givet nogen mening.



Figur 5. Jefferson Physics Laboratory ved Harvard University, hvor Pound og Rebka udførte deres eksperiment i den tåmlignende bygning til venstre.

Hvordan skulle man dog kunne teste Einsteins teori i laboratoriet? Det var netop hvad Robert Pound og hans studerende Glen Rebka fra Harvard University (se figur 5) gjorde i 1960, da de målte “fotoners relative vægt” ved at sammenligne frekvensen af gammastråler over en forskel i Jordens gravitationsfelt på blot $h = 22,6$ meter [7]:

$$\frac{\nu_2 - \nu_1}{\nu_1} = \frac{2hg}{c^2} \approx 4,9 \cdot 10^{-15}. \quad (3)$$

Den relative frekvensændring er blot af størrelsesordenen 10^{-15} , hvorfor det kræver fotoner med meget høj energi til at påvise ændringen. Pound og Rebka brugte 14keV-fotoner fra gammakilden Fe-57 og målte frekvensen ved at anvende den nye Mössbauereffekt, der netop var blevet opdaget af den tyske fysiker Rudolf Mössbauer (som i 1961 blev tildelt Nobelprisen for sin opdagelse). Resultatet af de to fysikers omhyggelige målinger var en frekvensændring $\Delta\nu_e$, der forholdt sig til den teoretisk forudsagte $\Delta\nu_t$ som

$$\Delta\nu_e/\Delta\nu_t = 1,05 \pm 0,1 \quad (4)$$

Allerede tre år senere var denne 10 % usikkerhed blevet reduceret til 1 % og i dag er den blot 0,01 %. Pound-Rebka-eksperimentet har en klassisk status i eksperimentalfysikkens historie, men dets betydning for den generelle relativitetsteori var begrænset, da Einsteins forudsigelse for længst var anerkendt. Alligevel er det bemærkelsesværdigt, at man i 1960 i et relativt simpelt laboratorieeksperiment kunne verificere den effekt, der havde voldt Eddington, Adams og deres samtidige så store problemer.

Langt vigtigere end Pound-Rebka-eksperimentet var de nye astronomiske opdagelser, der for alvor gjorde Einsteins gravitationsteori til et uudværligt redskab i astrofysikken. I 1963 opdagede Maarten Schmidt og andre astronomer en helt ny slags “radiostjerner”, der snart blev kendt som kvasarer og hvis enorme udstråling af energi det var vanskeligt at forklare. Ifølge Hoyle og William Fowler skyldtes energien ikke kernereaktioner, men snarere et gravitationelt kollaps af en kæmpestjerne. Kunne der være tale om de samme objekter, som Oppenheimer havde studeret i slutningen af 1930’erne, altså sorte huller?

Naturen af de mystiske kvasarer var et hovedtema på den nævnte konference i Dallas i slutningen af 1963, der er kendt som det første “Texas Symposium om Relativistisk Astrofysik.” Selve termen “relativistisk astrofysik” stammer fra dette symposium, hvor fysikere og astronomer enedes om, at generel relativitet var nøglen til at forstå kvasarer og flere andre ekstragalaktiske fænomener. I en tale ved symposiet udtrykte Gold astrofysikernes nye tillid til den generelle relativitetsteori, der ikke længere blot var “et storslået kulturelt ornament”, men faktisk havde vist sig nyttig:

Vi er alle tilfredse: Relativisterne fordi de bliver værdsat og pludseligt anses som eksperter i et felt, de knap nok var klar over fandtes; og astrofysikerne fordi de har udvidet deres imperium ved at annektere den generelle relativitetsteori. Det er alt sammen meget godt, så lad os håbe, at det også er sandt. Sikken en skam det ville være, hvis vi igen måtte afvise relativisterne.

Men det skete ikke. Tværtimod, relativistisk astrofysik var kommet for at blive, og med Jocelyn Bells opdagelse af pulsarer i 1967 blev forbindelsen mellem astrofysik og generel relativitetsteori endnu tættere. Mens omkring 300 fysikere og astronomer var samlet ved det første Texas symposium, tiltrak det niende symposium i 1974 mere end 800 deltagere.

Ønsker man yderligere indsigt i den massive indflydelse, Einsteins 100 år gamle teori har på den nutidige fysik og astronomi, kan man få den i septembernummeret af *Scientific American*, der indeholder en imponerende visuel og interaktiv dokumentation baseret på bibliometriske data.

Litteratur

- [1] H. Kragh (2014), Einsteins odysseé: Fra speciel til almen relativitetsteori, KVANT **25** nr. 4, 20-25 (2014).
- [2] N. Hetherington (1988), *Science and Objectivity*, Ames: Iowa State University Press.
- [3] T. Sauer (2010), A brief history of gravitational lensing, http://www.einstein-online.info/spotlights/grav_lensing_history
- [4] Gravity Research Foundation, <http://www.gravityresearchfoundation.org>
- [5] The Role of Gravitation in Physics. Report from the 1957 Chapel Hill Conference, <http://edition-open-access.de/sources/5/index.html>
- [6] C. Will (1993), *Was Einstein Right?*, New York: Basic Books.
- [7] R.V. Pound, G.A. Rebka, Apparent weight of photons, *Phys. Rev. Lett.* **4**, 337-341, (1960).



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