

Opdagelsen af en supernova med gravitationel linse-effekt – en ny æra inden for kosmologien

Af Ariel Goobar, Oskar Kleincentret, Fysikum, Stockholms Universitet

Den gravitationelle linseeffekt virker som naturens eget gigantiske teleskop, muligheden for at finde billeder af samme supernova ved den kosmiske linseeffekt betyder, at man også kan måle tidsforskellen mellem ankomsttiderne af billederne. Tidsforskellen mellem billederne kan anvendes til at måle universets udvidelsehastighed, og det kan åbne en ny æra inden for kosmologien.

Det er en del af grundlaget for Einsteins generelle relativitetsteori, at rumtiden krummer omkring de tunge legemer. En konsekvens af teorien er, at lysstråler, der passerer tæt på stjerner eller galakser, kan ændre retning. Gravitation fungerer således som en optisk linse, der afbøjer og fokuserer lys. Derfor var det en stor triumf for Einstein, da en ekspedition under ledelse af den britiske astronom Arthur Eddington i maj 1919 kunne måle afbøjningen af lys, der passerede tæt på Solen i løbet af en solformørkelse.

Eddington var i stand til at vise, at den målte afbøjning af lyset, $\theta = 1,74$ buesekunder, passer med relativitetsteoriens forudsigelse,

$$\theta = \frac{4GM}{bc^2} \quad (1)$$

hvor G er Newtons gravitationskonstant, M er massen af "linsen", og b er den tætteste afstand mellem lysstrålen og midtpunktet af gravitationslinsen. I Eddingtons eksperiment var M Solens masse, og b var Solens radius.

Fritz Zwicky, der ellers er bedst kendt for at have postuleret eksistensen af mørkt stof i universet, var den første til at forstå, at den gravitationelle afbøjning af lys ikke bare var en sjældenhed, der bekræftede relativitetsteorien, men også kan bruges til at veje himmellegemer. Hans idé, som han offentliggjorde i 1937, var, at man kunne estimere massen af hele galakser og endda galaksehobe ved at måle vinklen på afbøjningen af lyset fra bagvedliggende galakser. Problemet er dog, at det er yderst sjældent, at galakser med forskellige rødforskydninger ligger tæt nok på sigtelinjen, til at effekten kan måles. Men i de heldige tilfælde, hvor dette forekommer, kan der opstå et fascinerende optisk fænomen: der kan forekomme flere billeder af en enkelt kilde, hvilket normalt kaldes "stærk linsning". For at dette skal være muligt, bør vinkelseparationen være inden for den såkaldte Einstein-radius

$$\theta_E = \left(\frac{4GM}{c^2} \cdot \frac{D_{LS}}{D_L D_S} \right)^{1/2} \quad (2)$$

hvor D_L og D_S er afstandene¹ fra Jorden til henholdsvis linsen (L) og kilden (S), mens D_{LS} er afstanden mellem linsen og kilden.

For typiske galaksemasser og kosmologiske afstande er Einstein-radius omkring et buesekund, hvilket er

¹Der findes forskellige afstandsmål i kosmologien. Her benyttes vinkeldiameterafstanden.

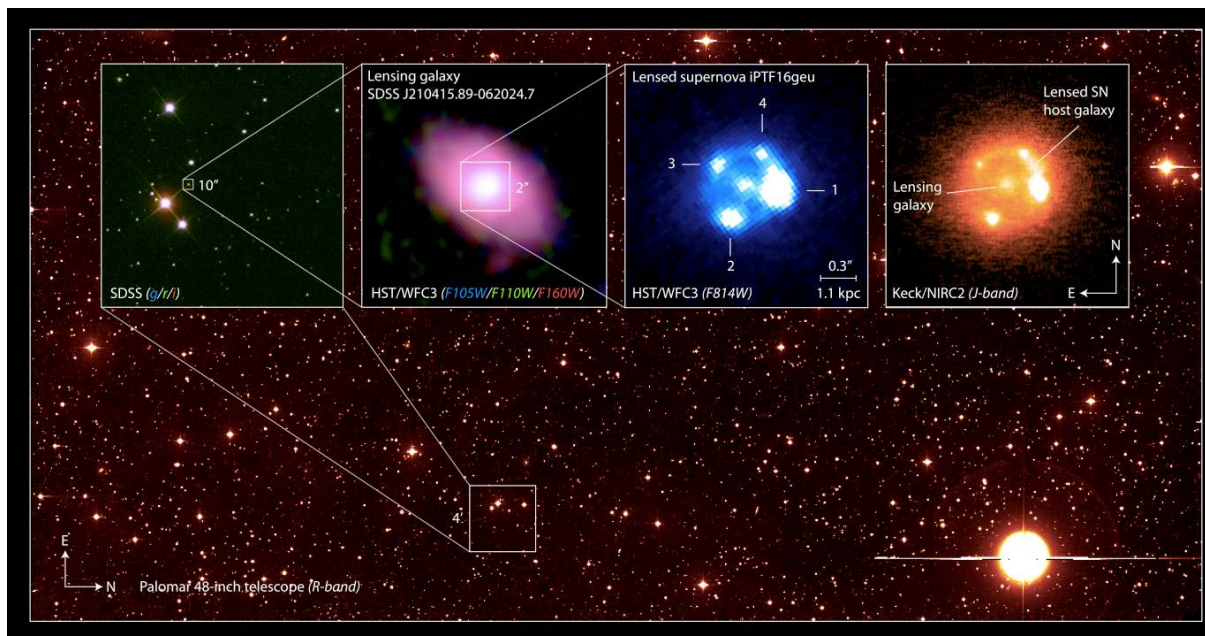
cirka 2.000 gange mindre end den vinkel, som Månen fylder på himlen, dvs. at den er meget lille i forhold til hele himmelkuglen, hvorpå galakserne er fordelt.

Vi skal helt frem til 1979, før astronomerne kunne vise, at to tilstødende kvasarbilleder, QSO 0957 + 561A og QSO 0957 + 561B, som lå 6 buesekunder fra hinanden og begge med en kosmologisk rødforskydning på $z = 1,41$, faktisk var to billeder fra en og samme kvasar og resultatet af en gravitationel linseeffekt fra en forgrundsgalakse med en rødforskydning på $z = 0,355$.

Siden er der fundet flere eksempler på "multiple billeder" af en og samme kilde af kvasarer og galakser, som er blevet detekteret i optiske billeder med høj vinkelopløsning. Zwicky's foreslåede metode anvendes nu rutinemæssigt til at veje nogle af universets galaksehobe med et større antal stærkt linsende baggrundsgalakser, sædvanligvis med hjælp fra Hubble-teleskopet.

Den norske astronom Sjur Refsdal var en af dem, der var meget påvirkede af Zwicky's argumentation, og i 1964 fremsatte han endnu en revolutionerende idé: Hvis man kunne finde "flere" billeder af en supernovaeksplosion, så skulle man udover at måle vinkelseparationen mellem billederne, også være i stand til at måle tidsforskellen mellem ankomsttiderne af billederne. Billederne ankommer ikke samtidigt for en observatør på Jorden, fordi strålerne tilbagelægger forskellige afstande. Hertil kommer, at strålernes relativistiske tidsdilatation varierer, afhængigt af hvor tæt de passerer på centrum af linsegalaksen. Refsdal viste, at målingen af tidsforskellen mellem billederne kan anvendes til at måle universets udvidelsehastighed, Hubble-konstanten, H_0 . Dette er især vigtigt i dag, hvor forskellige teknikker til at bestemme H_0 giver modstridende resultater, hvilket nogle kosmologer mener skyldes forskellige fejl i den måde, man modellerer universets sammensætning på. Hvis dette bekræftes, vil det være et af de største gennembrud i grundlæggende fysik i et par årtier.

Refsdals idé var revolutionerende, men ikke uden praktiske vanskeligheder. Når det nu var så svært at finde flere billeder af himmellegemer med næsten uendelig levetid som kvasarer og galakser, hvordan ville man så nogensinde kunne finde noget så sjældent og kortvarigt, som en linset supernova, som kun kan observeres i en måned før intensiteten igen daler betydeligt? Desværre nåede Refsdal, som døde i 2009, ikke at opleve det fænomen, han beskrev, men til sidst blev



Figur 1. S sammensat billede, der viser den gravitationelt linsede Type Ia-supernova iPTF16geu, observeret med forskellige teleskoper. Baggrundsbilledet er et vidvinkelbillede fra Palomar Observatoriet i det sydlige Californien. Billedet til venstre blev taget af Sloan Digital Sky Survey og viser linsegalaksen og dens omgivelser. De øvrige billeder viser en 20-gange forstørrelse med Hubble-teleskopet i optiske bølgelængder og med Keck-teleskopet i det nærinfrarøde område. Teleskoperne fanger de fire billeder af supernovaen iPTF16geu og dens værtsgalakse, som er gravitationelt linset af forgrundsgalaksen. Billedet er lavet af Joel Johansson.

der fundet en supernova med flere billeder, som blev opkaldt efter ham. Takket være et af de største observationsprogrammer, som blev gennemført med Hubble-teleskopet, blev “supernova Refsdal” opdaget i 2015 bag den gigantiske galaksehob MACS J1149.6 + 2223, der fungerede som en kæmpelinse. Dette var faktisk en stor succes, men for at kunne besvare kosmologiske spørgsmål med stor nøjagtighed er det ikke nok med en enkelt begivenhed – der skal langt flere til for at få den nødvendige statistiske nøjagtighed. Derudover var Refsdal-supernovaen et kollaps af stjernens kerne, hvis intensitet varierer meget fra en begivenhed til en anden, og som ikke let modelleres.

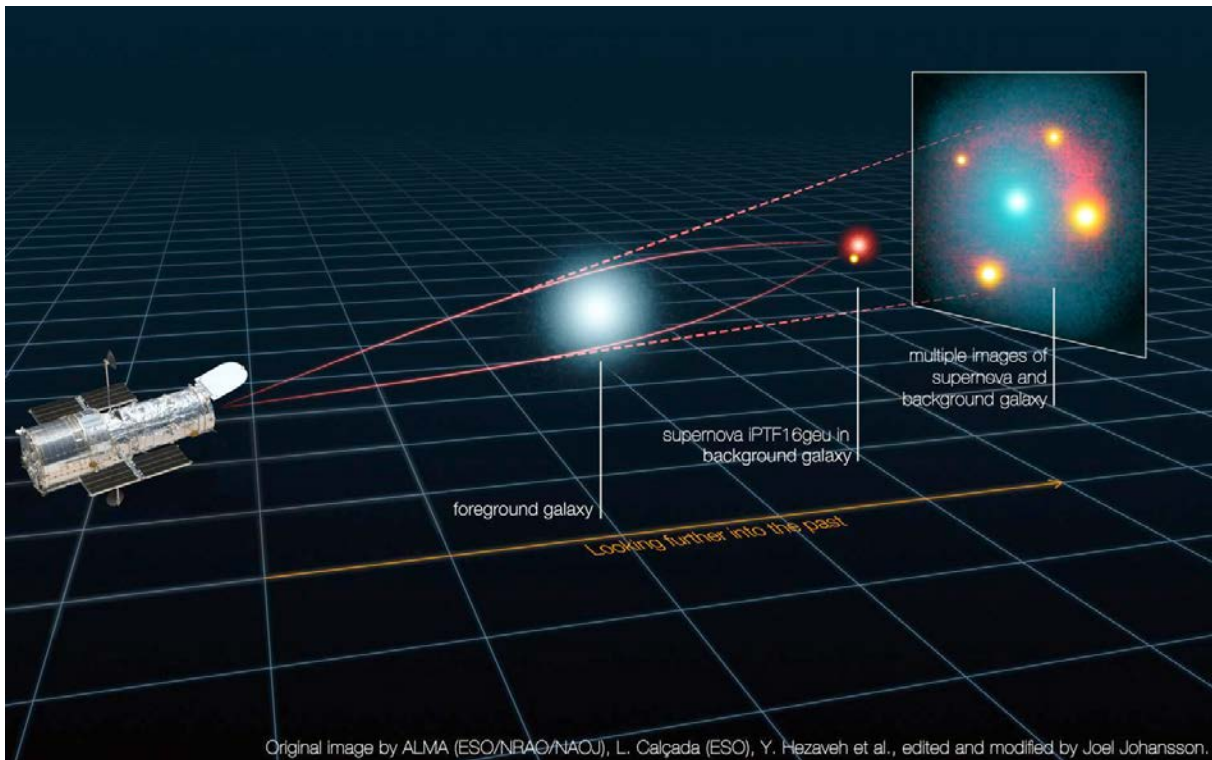
Idealet er derfor at finde et system, hvor den linsede supernova er af “Type Ia”, dvs. den type, der anvendes som standardlys til afstandsmålinger i kosmologien. Det var for eksempel ved afstandsmålinger af Type Ia-supernovaer, at man opdagede, at universets udvidelse accelererer, hvilket blev belønnet med Nobelprisen i fysik i 2011.

Det er her, at det nye gennembrud fandt sted. For at finde sjældne fænomener i universet er det nødvendigt at lede over store kosmiske volumener. Dette er vanskeligt at kombinere med brugen af Hubble-teleskopet, som har et meget lille kamerafelt på blot nogle få kvadrantbueminutter. Derudover bliver rumteleskopet brugt til mange andre projekter, så dets tilgængelighed er stærkt begrænset. På Palomar i Californien findes til gengæld et 1,2 meter-teleskop (P48, hvor 48 indikerer spejldiameteren målt i tommer), der er fuldstændig dedikeret til at finde supernovaer og andre tidsafhængige fænomener. Projektet “Palomar Transient Factory” (iPTF) brugte et robotteleskop med et kamera med et meget stort felt på 7,2 kvadratgrader. Efter et minuts dataindsamling i en retning blev kameraet rettet mod et

nyt felt og fortsatte således i hele nætter og fotograferede meget store dele af himlen. I de følgende nætter observerede teleskopet de samme dele af himlen og kunne derfor hurtigt opdage ændringer mellem billeder fra forskellige nætter, såkaldte “transiente” fænomener, herunder lidt over 3.000 supernovaeksplosioner. Fordi galakserne kun ændrer sig over meget lange tidsskalaer – tæt på en milliard år – kan en supernova opdages blot få timer efter eksplosionen, når den lyser op næsten lige så meget som en hel galakse.

Supernovaopdagelserne fra P48 blev fulgt op af målinger med et 60-tommers teleskop i Palomar (P60). Teleskopet kunne ved spektroskopiske observationer bestemme supernovaernes rødforskydning, og ved også at måle deres atomare sammensætning (ved hjælp af emissions- og absorptionslinjer) kunne det afgøres, hvilken type supernova, der var fundet, for eksempel om det drejede sig om kosmologiens favorit, nemlig Type Ia-supernovaen.

Søndag den 2. oktober 2016, under en rutinemæssig gennemgang af aftenens observationer, så jeg noget meget bemærkelsesværdigt i dataene fra Palomar. En Type Ia-supernova, iPTF16geu, med rødsifte $z = 0,409$, hvilket var lidt over 50 gange lyskraftigere, end den burde have været. Statistisk var dette ekstremt signifikant med 30 standardafvigelse. Ved nærmere undersøgelse kunne man også se, at mellem supernovaværtsgalaksen og Jordan var der en anden galakse med $z = 0,216$. Efter yderligere observationer var sagen klar: det måtte være en gravitationel linse, der fokuserede lyset fra supernovaen! Imidlertid var vinkelopløsningen i Palomars billeder meget grov, omkring 2 buesekunder, så eventuelle multiple billeder kunne ikke registreres med de data, vi havde. Der fulgte nu en hektisk tid med ansøgninger om tidskritiske observationer med Hubble-



Figur 2. Lys fra supernovaen iPTF16geu og dens værtsgalakse afbøjet og fokuseret af krumningen af forgrundsgalaksen, der virker som en linse. Lyset fra den punktlignende supernova splittes op i fire billeder, der kunne observeres med Hubble-teleskopet. Originalt billede fra ALMA (ESO / NRAO / NAOJ), L. Calçada (ESO), Y. Hezaveh m.fl., behandlet af Joel Johansson.

teleskopet og de største jordbaserede teleskoper, VLT i Chile og Keck-teleskopet på Hawaii. Efter et par dramatiske dage med tekniske vanskeligheder, lykkedes det at få billederne fra Keck- og Hubble-teleskopet, som bekræftede, at vi havde opdaget den første stærkt linsede Type Ia-supernova, med hele fire multiple billeder, som vist i figur 1 og forklaret skematisk i figur 2. Opdagelsen blev offentliggjort i tidsskriftet *Science* [1].

Observationer med høj vinkelopløsning som på figur 1 viser et andet interessant fænomen: Udover “galakselinsen” viser forskellene mellem de fire supernovabilleder, at mindst én af lysstrålerne er blevet yderligere fokuseret, sandsynligvis fra kompakte strukturer i sigtelinjen, muligvis sorte huller. I det hele taget rummer opdagelsen mange interessante supplerende spørgsmål, hvoraf den ene er forbundet med den store forstærkning, mere end 50 gange forstørrelse, som er meget større, end vi kunne have forventet. Er iPTF16geu bare en statistisk afvigelse, eller er der noget fundamentalt galt med vores gravitationsmodel?

Målingerne af tidsforskellen mellem supernovabillederne er endnu ikke afsluttet. Selvom målinger af universets udvidelse fra denne supernova ikke giver os et bedre estimat af Hubble-konstanten end det, vi allerede har i dag, kan vi være meget optimistiske. Den lethed, hvormed vi har fundet den gravitationelt linsede supernova, får mig til at tro, at vi bør være i stand til at finde mange flere ved hjælp af den samme teknik, og nu

med et 10 gange bedre kamera på P48 i et projekt kaldet Zwicky Transient Facility (ZTF). Alt tyder på, at vi nu har en ny måde at studere krumningen af rumtiden og udvidelsen af universet på. Det kan være til stor gavn for at forstå de særlige egenskaber ved det “mørke univers”, et af vor tids største videnskabelige mysterier.

Litteratur

- [1] A. Goobar m.fl. (2017) “iPTF16geu: A multiply imaged, gravitationally lensed type Ia supernova”, *Science*, bind 356, side 291.

Artiklen er oversat fra svensk af Jens Olaf Pepke Pedersen.



Ariel Goobar er professor på Fysikum ved Stockholms Universitet. Hans primære forskningsområde er observationskosmologi og brugen af Type Ia-supernovaer til måling af afstande i universet. Han er medlem af Supernova Cosmology Project, der opdagede universets accelererede ekspansion og den tilhørende “mørke energi”.