

# Kosmiske forstørrelsesglas

Af Claudio Grillo, Lise Christensen og Jens Hjorth, Dark Cosmology Centre, Niels Bohr Institutet, Københavns Universitet

Einsteins almene relativitetsteori brød fundamentalt med Newtons teori for tyngdekraften. I Einsteins formulering giver masse anledning til krumning af rummet og rummets krumning bestemmer, hvordan partikler bevæger sig. Dette gælder også de masseløse lyspartikler, fotonerne. I anledning af 100-året for Einsteins teori og i anledning af Lysets År 2015 beskriver vi her nogle bemærkelsesværdige konsekvenser af den almene relativitetsteori for lysets passage gennem Universet og en unik test af teoriens rigtighed, som vi vil kende resultatet af omkring årsskiftet 2015/2016.

## Einsteins teori

Albert Einsteins almene relativitetsteori fra 1915 er den teori, der bedst beskriver vores viden om tyngdekraften (gravitation). Med teorien kan man på enkel vis forudsige afbøjningsvinklen  $\alpha$  af en lysstråle, som passerer gennem tyngdefeltet af en punktkilde med massen  $M$  inden for en vinkelafstand  $\xi$

$$\alpha = \frac{4GM}{c^2\xi}, \quad (1)$$

hvor  $G$  er Newtons gravitationskonstant og  $c$  er lysets hastighed. Den første måling af denne afbøjning blev udført af Sir Arthur Eddington i 1919. Ved en total solformørkelse kunne han måle en tilsyneladende positionsændring af baggrundsstjerner tæt ved solens overflade, som illustreret i figur 1. Afbøjningen af lys som følge af tyngdekraften kaldes *gravitationslinseeffekten*.



**Figur 1.** Original illustration af den første måling af gravitationsafbøjningen af lyset fra en stjerne ved den totale solformørkelse i 1919. Fra: *The Illustrated London News*, 22. november 1919.

I 1936 publicerede Einstein en artikel, hvori han beskrev flere aspekter af gravitationslinseeffekten for fjerne stjerner. I artiklen diskuterede han muligheden for at observere flere billeder af *den samme baggrundsstjerne*, hvis denne ligger direkte langs synslinien mod en stjerne i forgrunden. På grund af den meget lille vinkelafbøjning (nogle tusindedele buesekunder<sup>1</sup>) konkluderede Einstein, at der var en “meget lille sandsynlighed for at observere dette fænomen”. Det efterfølgende år foreslog astronomen Fritz Zwicky, at man i stedet for stjerner kunne se på ekstragalaktiske “tåger” (hvad der senere viste sig at være fjerne galakser), hvorved den forventede vinkelafstand mellem to billeder af den samme kilde ville blive stor nok til at man kunne observere den med teleskoper. Zwicky mente, at sådanne observationer kunne teste den almene relativitetsteori. Han estimerede, at 1 ud af 400 fjerne kilder ville blive udsat for en gravitationslinseeffekt fra en forgrundsgalakse, og forudså at man snart ville begynde at observere gravitationslinser ved at studere galakser.

Det varede dog næsten 40 år før Zwickys forudsigelse blev gjort til virkelighed. I 1979 fandt og identificerede man den første gravitationslinse. Astronomen Dennis Walsh brugte radio-teleskoper til at studere en “dobbelt kvasar”, hvis to billeder tilsyneladende ligger 6 buesekunder fra hinanden. Han fandt, at deres farver og spektre var ens, og at kvasarerne havde den samme afstand fra os. Samtlige observationer ved forskellige bølgelængder viste, at de to kvasarer havde nøjagtigt de samme egenskaber. Den bedste forklaring på dette fænomen var, at de to kvasarer rent faktisk var to billeder af én og samme fjerne kvasar. Man fandt efterfølgende en meget tung galakse imellem de to kvasarbilleder. Dette var begyndelsen til et hurtigt voksende forskningsfelt inden for astronomien, som omhandler gravitationslinser.

Afbøjningen af lys fra en fjern kilde omkring en tung massekoncentration (dvs. linsen) giver astronomer en spændende mulighed for at undersøge både den fjerne kilde samt selve linsen. Gravitationslinseeffekten kan undersøges ved alle bølgelængder fra radiobølger, synligt lys, infrarødt lys til røntgenstråling. Effekten giver astronomer et redskab til at undersøge forskellige typer objekter med vidt forskellige størrelser: fra planeter, over stjerner og galakser til hobe af galakser. For

<sup>1</sup>Et buesekund er 1/3600 af en grad. Månens udstrækning på himlen er ca. en halv grad.

eksempel har astronomer kunnet finde planeter omkring fjerne stjerner ved at studere stjernelinser. Man har også kunnet måle, hvor tunge enkelte stjerner egentlig er, samt bestemt massen af både spiral- og elliptiske galakser. Nedenfor beskriver vi, hvordan man på endnu større skalaer kan bestemme massefordelingen af lysende og såkaldt "mørkt" stof.

### Massebestemmelse

Galakser befinder sig sjældent i et isoleret område af Universet. Vores egen Mælkevej ligger i en gruppe af galakser som også omfatter Andromeda-galaksen og de mindre dværggalakser, De Magellanske Skyer. Ved endnu større afstande fra vores lokale gruppe finder man områder som kan indeholde tusinder af galakser – de såkaldte galaksehobe.

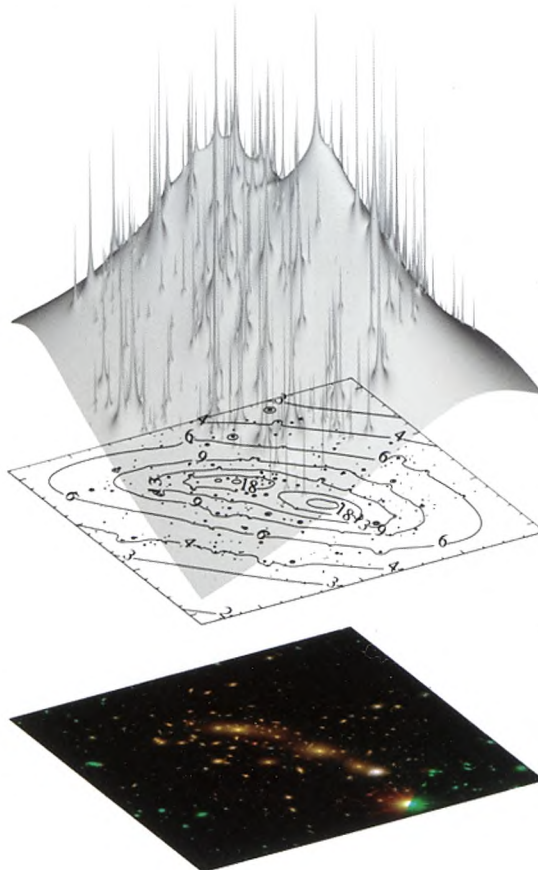
Galaksehobe fungerer som effektive gravitationslinser (for fjerne bagvedliggende galakser), fordi de er meget tunge. I 1990'erne kom der fart på udforskningen af gravitationslinser, som kræver observationer fra store teleskoper og instrumenter, som benytter sig af lysfølsomme chips. Nu til dags benytter astronomer de allerstørste teleskoper fra Jorden til at måle hastighederne af galakserne i en hob, samt superskarpe billeder fra Hubble Rumteleskopet til at se detaljer i de fjerne gravitationelt linsede galakser, som illustreret i figur 2.



**Figur 2.** Billede fra Hubble Rumteleskopet af galaksehoben Abell 383. Omkring den store centrale hvid-gule galakse kan man se andre galakser der har den samme karakteristiske farve. Galakserne befinder sig i samme afstand fra os og er en del af den tunge galaksehob. På billedet ser man også galakser med forskellige farver, og nogle er udstrakt i kæmpebuer som et synligt tegn på gravitationslinseeffekten. Disse linsede galakser ligger meget længere væk end galaksehoben, og nogle af galakserne kan endda vise sig at være nogle af de allerførste galakser, der blev dannet i Universet (NASA/ESA).

Man kan bruge Einsteins ligning til at 'veje' en galaksehob (se figur 3). Når man har fundet en linset galakse og kender afstanden til både hoben samt den linsede galakse, kan man ved at måle afbøjningsvinklen (ligning 1) bestemme den totale masse i galaksehoben. Man kan også måle den totale mængde af lys som hoben udsender og dermed bestemme den totale masse

af stjerner i hoben. Når man sammenligner med den totale vægt af hoben finder man, at stjernerne kun udgør en lille brøkdel. Derfor er vi sikre på, at der er stof til stede som vejer noget, men som ikke udsender lys. Vi ved altså, at rummet mellem galakserne ikke bare er tomt, det er fyldt med usynligt stof. Fordi ingen endnu ved hvad det består af, kalder vi det for mørkt stof. Mørkt stof kan ikke ses, for det hverken udsender, reflekterer eller absorberer lys. Faktisk udgør de synlige himmellegemer – planeter, stjerner og galakser – kun omkring fem procent af Universet. Resten består af mørkt stof og mørk energi.



**Figur 3.** Rekonstrueret model af massen i galaksehoben MACS J0416.1-2403. Øverst: massefordeling og konturplot; nederst: Hubble billede. Modellen bygger på observationer af 10 multipelt linsede baggrundgalakser og mere end 100 galakser i hoben. Det mørke stof ligger blandt alle galakserne og bidrager i meget stor grad til gravitationslinseeffekten for hoben.

### Fjerne forstærkede galakser

Lyset fra en linset galakse bliver forstærket gennem afbøjningen og fokuseringen. Galaksehobe fungerer derfor som naturens egne gigantiske teleskoper og kan bruges til at finde nogle af de allerfjerneste galakser i Universet. Lyset fra dem kan i nogle tilfælde blive forstærket med op til 100 gange. Det vil sige, at vi kan bruge gravitationslinser til at finde fjerne galakser som ellers ville have været alt for svage til at kunne detekteres selv med de allerstørste teleskoper på Jorden. Vi kan også bruge billedrekonstruktionsteknikker til at bestemme, hvordan galaksen så ud før dens lys blev afbøjet, som illustreret i figur 4.

Da lysets hastighed er konstant, ser vi samtidig tilbage i tid, når vi undersøger de fjerne galakser. Den allerfjerneste galakse observeret til dato er blevet fundet via gravitationslinser. Galaksen er så fjern, at lyset fra den blev udsendt, da Universet kun var omkring 450 millioner år gammelt (Universet er i dag 13,8 milliarder år gammelt). Gravitationslinser kan derfor bruges i vores udforskning af dannelsen af de allerførste galakser og deres udvikling gennem Universet.



**Figur 4.** Det øverste billede viser et billede af en galakse, der har gennemgået gravitationel lensning. Det nederste billede viser hvordan galaksen ville se ud, hvis den ikke var linset. Detaljerigheden i billedet er langt større end i andre billeder af fjerne galakser.

### Tidsforsinkelse og supernova Refsdal

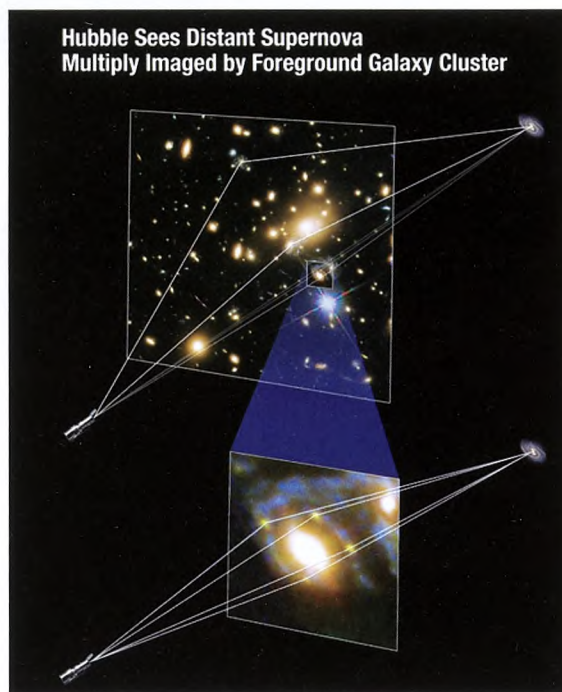
De forskellige billeder, der dannes af en gravitationslinse kommer fra det samme objekt. Men da lyset passerer lidt forskellige veje rundt om gravitationslinsen, tilbagelægger det lidt forskellige afstande, og det påvirkes også forskelligt af linsens tyngdepotentiale. Da lysets hastighed er konstant, betyder det, at et linset lysglimt udsendt fra en kilde vil ankomme til Jorden på lidt forskellige tidspunkter i de forskellige billeder.

I 1962 viste den 26-årige norske astronomistudenten Sjur Refsdal i den ene halvdel af sin specialeafhandling, at hvis man kunne måle på en gravitationelt linset supernova ville man se den eksplodere på forskellige tidspunkter i de forskellige billeder. Ved bestemmelse af

forskellen i disse tidspunkter (tidsforsinkelsen) kunne man bestemme afstanden til supernovaen. Dette var en så revolutionær tanke på det tidspunkt, at censor ikke ville godkende den del af specialet! Men i 1964 publicerede han ikke desto mindre sine resultater i *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* [1].

Få år efter Sjur Refsdals artikel opdagede man kvasarerne (kraftige lyskilder fra aktive galaksekerner), og det blev klart, at man også kunne bestemme afstande ved at måle tidsforsinkelser for variable kvasarer. Det var dog først i 1990'erne, at det lykkedes at måle den første tidsforsinkelse, netop i den førnævnte "dobbelt-kvasar".

I slutningen af 2014 opdagede vi så for første gang en *multipelt linset supernova* [2]. Til ære for Sjur Refsdal opkaldte vi den SN Refsdal. Supernovaen ligger bag en enorm galaksehob, hvoraf en af galakserne er en stor ellipseformet galakse, som har afbøjet lyset fra den bagvedliggende supernova, så lyset ses i fire gengivelser, der er formet som et kors omkring den ellipseformede galakse. Det kaldes et "Einstein Kors" efter Albert Einsteins forudsigelse. De fire lys-stråler fra supernovaen er dukket frem én efter én med få dages mellemrum indenfor et par uger, omend vi først opdagede dem efter, at alle fire billeder var blevet synlige (figur 5).



**Figur 5.** Lyset fra den bagvedliggende supernova bliver afbøjet af tyngdekraften fra en galaksehob og en elliptisk galakse, der derved virker som et forstørrelsesglas, og forstærker lyset fra den fjerne supernova. Det særlige fænomen virker som naturens eget gigantiske teleskop, og supernovaen fremstår 20 gange mere lysstærk end dens normale lysstyrke. Det er den første multipelt linsede supernova, man nogensinde har observeret, og supernovaen er opkaldt efter den norske astronom Sjur Refsdal, som teoretisk forudsagde dette fænomen for 50 år siden. Den midterste synsline, der passerer tæt gennem hobens centrum illustrerer, hvor vi forudsiger SN Refsdal vil 'eksplodere igen' omkring december 2015 (NASA/ESA/GLASS).

Galaksehoben ligger fem milliarder lysår fra Jorden, og supernovaen ligger ni milliarder lysår væk. En supernova i den afstand ville normalt være meget lyssvag, men på grund af den særligt gunstige beliggenhed forstærkes dens lys. Supernovaen fremstår faktisk 20 gange mere lysstærk end dens normale lysstyrke. Det skyldes den kombinerede effekt af to overlappende 'lenser' (figur 5). Den massive galaksehob fokuserer lyset fra supernovaen langs mindst tre separate veje, og én af disse lysveje rammer tilfældigvis præcist sammen med en stor elliptisk galakse i hoben, og det bevirker, at der opstår endnu en linse-effekt, der splitter lyset i fire.

Supernovaer kommer i forskellige typer. Hvad var SN Refsdal? Pga. forstærkningen af lyset lykkedes det os at tage et spektrum af supernovaen, både med Hubble Rumteleskopet og med X-shooter og MUSE-spektrograferne på ESOs Very Large Telescope. Sjovt nok viser disse observationer, at SN Refsdal er en meget fjern analog til den nærmeste supernova vi har observeret i vores levetid, den usædvanlige SN 1987A i den Store Magellanske Sky – den bedst observerede supernova nogensinde.

Når de fire lys-gengivelser aftager i styrke, vil vi desuden få en sjælden mulighed for at få et tilbageblik på supernovaen, for det nuværende mønster med fire billeder er kun den ene del af det gravitationelle linsefænomen. For 20 år siden har man formentligt kunnet se supernovaen i et enkelt billede et andet sted i galaksehoben, og beregninger viser, at det vil fremkomme igen i en tredje afbildning af galaksen nogenlunde samtidig med udgivelsen af denne artikel (figur 5). Hubble Rumteleskopet kigger derfor mod det forudsagte sted jævnlige for at se, hvornår vi ser endnu et da capo af SN Refsdal [3, 4], og denne gang er vi parat til at følge den forudsagte eksplosion. Hvis SN Refsdal ikke kommer til syne skal vi være parate til at skrotte Einsteins almene relativitetsteori. Men mon ikke Refsdal dukker op? Hold øje med DARK's og ESA's facebooksider [5, 6] hvor vi vil sige til, når det sker!



Claudio Grillo er lektor og Villum Foundation Young Investigator med henblik på at studere mørkt stof i galaksehobe.



Lise Christensen er lektor og leder af YDUN-programmet til at studere dværggalakser ved høj rødforskydning, bl.a. gennem gravitationel lensning.



Jens Hjorth er professor og leder af DARK. Han har målt mange tidsforsinkelser for linsede kvasarer, bl.a. sammen med Sjur Refsdal.

## Litteratur

- [1] Refsdal, S. (1964), On the possibility of determining Hubble's parameter and the masses of galaxies from the gravitational lens effect, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Vol. **128**, p. 307; <http://adsabs.harvard.edu/abs/1964MNRAS.128..307R>
- [2] Kelly, Patrick L. et al (2015), Multiple images of a highly magnified supernova formed by an early-type cluster galaxy lens, *Science*, Volume **347**, Issue 6226, pp. 1123-1126 (2015); <http://adsabs.harvard.edu/abs/2015Sci...347.1123K>
- [3] ESA/Hubble 13. nov. 2015, Astronomers get once-in-a-lifetime opportunity to predict supernova; <https://www.spacetelescope.org/announcements/ann1526/>
- [4] ESA 25. nov. 2015, MUSE Observations Enable Prediction of Once-in-a-lifetime Supernova Replay; <http://www.eso.org/public/announcements/ann15088/>
- [5] ESA/Hubble vil følge SN Refsdals re-appearance på: twitter, [https://twitter.com/hubble\\_space](https://twitter.com/hubble_space) facebook, <https://www.facebook.com/hubbleESA/>
- [6] DARK's websider, <http://dark-cosmology.dk>, <https://www.facebook.com/darkcosmologycentre>

## KVANT søger nye redaktører

Redaktionen af KVANT stræber mod at skabe et blad af høj kvalitet. Manuskripterne læses først igennem med henblik på faglige og pædagogiske forbedringer og derefter læses der korrektur på sproget. Dette arbejde udføres for en stor del af frivillige kræfter.

Der er plads til flere redaktører. Hvis du har lyst til at bidrage til én eller flere af følgende opgaver, så skriv til [kvant@kvant.dk](mailto:kvant@kvant.dk) og hør nærmere.

- Ideer til kommende artikler og temanumre
- Fagkorrektur og sprogkorrektur
- Sælge annoncer
- Anmelde fysikfaglige bøger

Det er en fordel, hvis du er fysikstuderende, forsker eller fysiklærer i gymnasiet. Redaktionen holder møder i København, men man kan evt. deltage via Skype eller få refunderet rejseudgifterne.