

Gravitationelle linser i galaksehobe

Af Michael F. Hansen, Dark Cosmology Centre, Niels Bohr Institutet, Københavns Universitet

En af de største gåder indenfor kosmologien er bestemmelsen af det mørke stofs fordeling og natur, da det spiller en central rolle i forbindelse med strukturdannelsen i Universet, i galakser hvor det påvirker hastighedsfordelingen samt i galaksehobe, hvor alt tyder på, at galaksehobe ganske enkelt burde blive splittet ad uden mørkt stof. I denne artikel vil jeg give en kort introduktion til, hvordan gravitationelle linser kan bruges til at modellere fordelingen af stof i galaksehobe, herunder mørkt stof.

Indledning

I forlængelse af artiklen om “Kosmiske Forstørrelsesglas” i forrige nummer af Kvant [1], vil jeg i denne artikel forsøge at give et nærmere indblik i, hvordan man kan udlede viden om det mørke stof ved hjælp af gravitationelle linser.

Helt tilbage i 1937 forudsagde Fritz Zwicky, at afstanden imellem to afbøjninger af den samme lyskilde, omkring en galakse, burde være stor nok til, at den kunne opløses med et teleskop. Alligevel skulle vi vente helt til 1979, før den første reelle gravitationelle linse blev opdaget af Dennis Walsh. Han opdagede at et sæt kvasarer i samme område havde samme farve, rødforskydning og spektre. Herefter gik det også stærkt. Året senere opdagede Weymann m.fl. en triple-kvasar (PG 1115+080), hvor et af billederne havde langt højere lysstyrke end de andre. Det viste sig, at det var en kombination af to billeder.

I 1986 opdagede to uafhængige grupper (Lynds og Petrosian, samt Soucail m.fl.), at der fandtes langstrakte bøjede fænomener omkring to galaksehobe. Disse bøjede fænomener har senere fået betegnelserne *buer* og *lysstærke kæmpebuer*¹.

Da det allerede tidligt blev vurderet, at et linsefænomen, hvor en kilde er så perfekt placeret bag linsen, således at en “Einstein-ring” fremstår, ville være temmelig usandsynligt, var det derfor en stor overraskelse da Hewitt m.fl. i 1988 opdagede en ring i radiokilden MG 1131+0456. I 1989 opdagede Langston m.fl. endnu en ring, fra kvasaren PG 1115+080, og Einstein-ringe er nu et ganske velkendt observationelt fænomen. Alt hvad der har været nævnt indtil nu, har drejet sig om stærk linsning, hvilket betyder at der kommer flere billeder fra samme kilde.

I 1990 blev det første eksempel på svag linsning opdaget, hvor der kun fremstår et enkelt billede af samme kilde. Opdagelsen blev gjort af Tyson m.fl. i to galaksehobe. Vi kender nu til adskillige galaksehobe med svag linsning og store hobe, såsom Abell 2218, som også er rig på stærk linsning, buer mv.

Derudover har man i samme periode opdaget fænomener som mikrolinsning, både via stjerner i galakser og via galakserne selv.

Overordnet findes der tre måder, hvorpå man kan benytte gravitationel linsning i praksis. Man kan enten benytte de linsede billeder til at modellere det gravitationelle potentiale og dermed massen og massefordelingen i linsen selv, eller man kan benytte de linsede billeder til at undersøge kilderne, hvorfra de linsede billeder kommer. Den tredje er mikrolinsning, se fx [2]. Det er førstnævnte fænomen, som vil blive introduceret i denne artikel.

Gravitationel linsning

Selvom gravitationel linsning er et felt i rivende udvikling, og mængden af tilgængelig viden nærmest vokser eksplosivt, må man desværre konstatere, at andelen som udgør en decideret generel indføring i teorien, er ret sparsom. Af gode bøger findes dog den lidt ældre “Gravitational Lenses” [3], og der findes derudover en række forelæsningsnoter, hvor et af de nyere sæt [4] er fra 2006. Fælles for dem er, at de er på universitetsniveau.

Selve den grundlæggende ide bag gravitationel linsning bygger på Einsteins generelle relativitetsteori (GR), og skal derfor i princippet løses via Einsteins Feltligninger

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}, \quad (1)$$

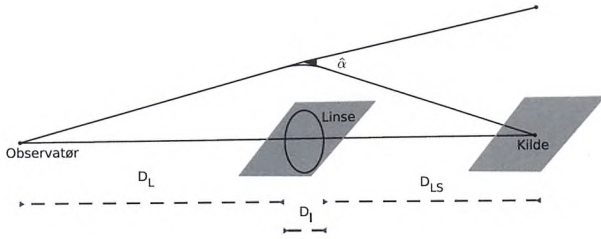
hvilket betyder løsningen af ti koblede ligninger. Heldigvis kan vi benytte nogle relativt enkle antagelser til at linearisere feltligningerne og dermed forsimple teorien betragteligt.

Vi starter med at antage, at vi kan arbejde i det svage gravitationelle regime. Indenfor GR kan man inddele tyngdekraften i to regimer, det stærke og det svage. Det stærke kender vi fra neutronstjerner, sorte huller mv. og betyder generelt, at vi regner med store vinkler og voldsomme afbøjninger af lyset. I det svage regime kan vi derimod regne med afbøjninger i små vinkler, hvilket medfører at $\sin \alpha \approx \alpha$.

Dernæst benytter vi et andet princip, illustreret på figur 1, som kaldes *Tynd-linse*-approksimationen. Fordi afstandene D_L og $D_{LS} \gg D_l$, kan vi anse massefordelingen i linsen for at være 2-dimensionel. Dette

¹På engelsk: “Arcs” og “Giant Luminous Arcs”.

medfører, at den rumlige afbøjning omkring linsen kan approksimeres til en enkelt vinkel $\hat{\alpha}$.



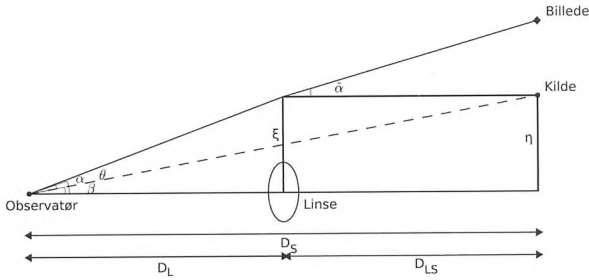
Figur 1. Illustration af Tynd-linse-approksimationen. Illustrationen viser, hvordan vi ved at forsimple den tredimensionelle masse ned på to dimensioner, kan antage, at den rumlige bøjning kan approksimeres til at være en skarp kantet vinkel $\hat{\alpha}$, kaldet afbøjningsvinklen.

Ray-tracing-ligningen

Med disse to antagelser på plads kan man introducere den mest centrale ligning indenfor gravitationel linse, linse- eller ray-tracing-ligningen

$$\vec{\beta}(\vec{\theta}) = \vec{\theta} - \hat{\alpha}(\vec{\theta}) \quad (2)$$

hvor $\vec{\beta}$ er kildens vinkel-position, $\vec{\theta}$ er det linsede billedes vinkel-position og $\hat{\alpha}$ er afbøjningsvinklen. Dette er illustreret på figur 2.



Figur 2. Illustration som viser en typisk linseopsætning. Her er ξ afstanden fra den optiske akse til billedet og η afstanden fra den optiske akse til kildens sande position. α er vinklen imellem kildens sande position og billedet, β er vinklen fra den optiske akse til kildens sande position og θ er vinklen fra den optiske akse til billedet. D_L , D_S og D_{LS} udgør vinkeldiameter-afstandene imellem hhv. observatør og linse(plan), observatør og kilde(plan) og linse(plan) og kilde(plan).

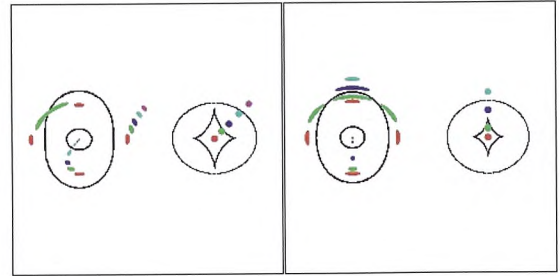
Derudover har vi afstanden fra den optiske akse til billedet, ξ , afstanden fra den optiske akse til kildens faktiske position, η , samt afstandene D_{LS} , D_L og D_S , som hhv. angiver afstanden mellem linse og kilde, observatør og linse og observatør og kilde. Der gælder generelt at $D_S \neq D_{LS} + D_L$, hvilket skyldes måden man beregner den kosmologiske afstand, kaldet vinkeldiameter-afstanden.

Som ligningen er opskrevet her, er den lineær, mens den inverterede udgave er ikke-lineær. Det betyder, at hvis vi kender mindst et billede, kan vi udlede at der må findes en kilde, men vi kan ikke udlede antallet af billeder, hvis vi kender en kilde. Dette er særligt relevant ift. numeriske løsninger, da en invertering vil medføre mange mulige løsninger for samme system og dermed flere beregninger.

Ved at indføre afbøjnings-potentialet $\psi(\vec{\beta}; \vec{\theta})$, kan man finde ray-tracing-ligningen ved at udregne gradienten $\nabla_{\theta} \psi(\vec{\beta}; \vec{\theta}) = 0$ og ved at udregne den dobbelte afledte $\nabla_{\theta}^2 \psi(\vec{\beta}; \vec{\theta})$ kommer man frem til Jacobian matricen

$$\underline{A} = \begin{bmatrix} 1 - \kappa - \gamma_1 & -\gamma_2 \\ -\gamma_2 & 1 - \kappa + \gamma_1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

som er en symmetrisk matrix bestående af konvergen- sen κ og deformationen $\gamma = \gamma_1 + i\gamma_2$, også kaldet "shear". Konvergenzen medfører en ensartet forstørrelse af billedet, mens deformationen vil skævvride billedet i en elliptisk form og i en bestemt vinkelretning. Positionen og formen af billeder ved forskellige positioner af en kilde, er illustreret på figur 3.



Figur 3. Illustration af, hvordan billeder dannes, ændrer sig og transformeres i relation til positionen. Her er det positionen af kilden til højre og billedernes position og form, til venstre. De overordnede kasser, angiver to forskellige scenarier for kildens position. Ligger både kilde og linse tæt på den optiske akse, vil der optræde fem linsede billeder.

Her ser man to overordnede kasser som angiver to forskellige scenarier for kildens placering (til venstre krydser kilden en fold caustic, til højre en cusp caustic). Inde i hver kasse udgør venstre del linseplanet og højre del kildeplanet. De forskellige kurver i figuren kaldes for kritiske linjer og caustics, hvor de kritiske linjer findes i linseplanet og caustics er de kritiske linjer projiceret ned i kildeplanet. De kritiske linjer fortæller os, hvorhenne der vil dannes store buer (to/tre billeder mødes og forstørres voldsomt), samt hvor der dannes flere billeder. Caustics fortæller det samme, blot ud fra positionen af kilden. Generelt gælder der, at når en kilde krydser en caustic, udefra, dannes der to nye billeder. Modsat, krydser en kilde en caustic indefra, forsvinder to billeder. I selve krydset over en caustic, vil to/tre billeder forstørres, smelte sammen og to af dem vil forsvinde. Er kilden placeret uden for den yderste caustic, dannes der kun ét billede. Den inderste kritiske linje projiceres ned som den yderste caustic og omvendt. De forskellige farver indikerer forskellige placeringer af billederne (linseplan) og forskellige positioner af kilden (kildeplan), hvor farver på billeder og kilde hører til samme model.

Grundlæggende set består en modellering af en numerisk løsning af ray-tracing-ligningen.

Observationer og modeller

Las os nu kigge på hvordan man kan benytte numeriske modeller/simuleringer til at sige noget om fordelingen af stoffet i hobene. Jeg tager udgangspunkt i den

Det vigtigste er dog at være sikker på, at billederne stammer fra samme kilde, og at afstanden til billederne er præcis. Dette gøres ved at kigge på farve, form og evt. spektre fra billederne. Selvom afstanden er vigtig, kan modellen optimere for denne, hvilket dog medfører flere frie parametre. I figur 4 ses Hubble-observationer af Abell 1703, hvor de multiple billeder er markeret med hvide cirkler.

²Som udvælger galakser med en specifik farve.

Figure 1 consists of two vertically stacked scatter plots. The top plot shows the relationship between F850LP (x-axis, ranging from 16 to 26) and F625W-F850LP (y-axis, ranging from -2 to 2). The bottom plot shows the relationship between F850LP (x-axis, ranging from 16 to 26) and F775W-F850LP (y-axis, ranging from -2 to 2). Both plots display a dense cloud of black points representing galaxies. A red box in each plot highlights a region of interest, approximately between F850LP = 17 and 21 and color index = 0.5 and 1.0. The red box in the top plot is slightly tilted, while the one in the bottom plot is more horizontal.

17

Da man antager, at fordelingen af varm gas i en hob følger fordelingen af det mørke stof, kan man benytte data fra røntgen-teleskoper til at verificere modellen. Der findes dog undtagelser [7]. I figur 6 kan man se en observation af Abell 1703 fra Chandra-teleskopet, overlagt konturer fra optiske data.

En sammenfatning af resultaterne fra den bedste model af Abell 1703 kan ses på figur 7, som viser konturlinjer fra Chandra-data og modellens massefordeling af masse overlagt optiske data. Her kan man kvalitativt se, at modellens fordeling af masse og fordelingen af gas følger hinanden. Man kan også se, at massefordelingen er elliptisk, hvilket har vist sig at være generelt for galaksehobe.



Figur 7. Et F775W filter billede af Abell 1703 med observationerne fra Chandra samt modellens massefordeling, overlagt som hhv. røde og hvide konturer. Billedet er roteret i en anden retning end i figur 4 og 6 (normalt Nord-op, Øst-venstre) for at undgå at skære billedet uhensigtsmæssigt.

Derudover kan man konkludere, at Abell 1703 er en unimodal relakseret hob. Uden at gå i for mange detaljer, kan det siges, at for en sådan hob gælder, at den har én central top i massefordelingen, og at det mørke stof er samlet om ét centralt punkt. Et eksempel på en bimodal ikke-relakseret hob kunne være Abell 2218. Hvis man derudover kan bestemme massen af baryonisk stof³ og gas i hoben, kan man bestemme massen af det mørke stof meget præcist.

Afrunding

Jeg har i denne artikel givet et kort indblik i de mange anvendelsesmuligheder gravitationelle linser har. De kan derudover anvendes til at finde exo-planeter, undersøge fjerne galakser, bestemme fordelingen af mørkt

stof i galakser, samt bestemme de kosmologiske parametre.

I en relativt kort artikel som denne kan jeg kun dække en brøkdel af de mange anvendelsesmuligheder gravitationelle linser har, selv ved en indsnævring til kun at behandle galaksehobe. Jeg håber dog, at den kan være med til at tænde en interesse hos både fysiklærere, gymnasie- og fysikstuderende for dette spændende felt, som er med til at give os helt central indsigt i det univers, som omgiver os.

Litteratur

- [1] Jens Hjort, Lise Christensen, og Claudio Grillo (2015), Kosmiske forstørrelsesglas. *KVANT*, årgang 26, december 2015, side 19-22.
- [2] Kennet Bomann West Harpsøe. Jagten på Jordlignende planeter med gravitationel mikrolinsning. *KVANT*, årgang 23, maj 2012, side 22-26.
- [3] J. Ehlers E.E. Falco P. Scheider. *Gravitational Lenses*. Springer-Verlag, New York, 1st. edition, 1992.
- [4] J. Wambsganss C.S. Kochanek P. Scheider (2006), *Gravitational Lensing: Strong, Weak and Micro*, volume 33 of *Sass-Fee Advanced Course*. Springer-Verlag, Berlin.
- [5] M. Limousin, J. Richard, J.-P. Kneib, et al. (2008), Strong lensing in Abell 1703: constraints on the slope of the inner dark matter distribution. *A&A*, 489, pp. 23-35, October 2008. doi: 10.1051/0004-6361:200809646.
- [6] J. Richard, L. Pei, Limousin, et al. (2009), Keck spectroscopic survey of strongly lensed galaxies in Abell 1703: further evidence of a relaxed, unimodal cluster. *A&A*, 498, pp. 37-47, April 2009. doi: 10.1051/0004-6361/200811366.
- [7] Steen H. Hansen, Kristian Pedersen, Jesper Sollerman, et al. (2009), Mørkt stof – Vi ved så meget og dog så lidt. *KVANT*, årgang 20, maj 2009, side 14-18.



Michael Hansen er kandidatstuderende på *Dark Cosmology Centre* og hans speciale omhandler modelleringen af gravitationelle linser i galakser og galaksehobe, for bl.a. at kunne bestemme fordelingen og massen af mørkt- og baryonisk stof, samt gas.

³Ved at bestemme massen i de enkelte galakser og summe op.