

Jagten på Jordlignende planeter med gravitationel mikrolinsning

Kennet Bomann West Harpsøe, Niels Bohr Institutet, Københavns Universitet

Det er ikke mere end 17 år siden den første planet uden for vores eget solsystem, der kredser om en hovedseriestjerne blev opdaget. Siden har vi opdaget over 600 nye exoplaneter, men langt de fleste af disse planeter er gaskæmper, med meget dårlige betingelser for liv. Vi kender flest gasplaneter simpelthen fordi de er lettest at opdage. Vi ved nu at exoplaneter er almindelige, men vi ved stadig ikke, hvor almindelige Jordlignende planeter med behagelige temperaturer, er i vores galakse. Med gravitationel mikrolinsning kan vi besvare lige netop dette spørgsmål. Dermed kan vi finde ud af hvor langt der er mellem de steder hvor E.T. kunne bo, og om dette kan forklare at han ikke har besøgt os endnu.

Einsteins artikel og udvalgs effekter

December nummeret af det videnskabelige tidsskrift Science indeholdt i 1936 en meget kort artikel af Albert Einstein: Lens-Like Action of a Star by the Deviation of Light in the Gravitational Field [1]. I denne artikel beskriver Einstein, hvordan tyngdefeltet fra en stjerne kan afbøje lyset fra en baggrundsstjerne og dermed forstærke lyset fra denne, hvis de to stjerner er noget nær perfekt oplinerede på een synsline. Den påkrævede grad af opliniering er faktisk så stor at Einsteins artikel slutter med de berømte ord: "There is no great chance of observing this phenomenon".

Heldigvis tog Einstein fejl. Han kunne ikke have forudset den enorme tekniske udvikling inden for elektronik, detektorer og optik, vi har været vidner til siden 1936. I dag kan vi med hjælp fra automatiske teleskoper og computere overvåge flere hundrede millioner stjerner i Mælkevejen om dagen og herved finde de meget sjældne mikrolinsninger.

Det mest interessante aspekt af disse mikrolinsninger er, at de kan afsløre planeter der kredser om den linsende stjerne. Denne metode til detektion af såkaldte exoplaneter udgør et yderst interessant supplement til de to dominerende exoplanetdetektionsmetoder: radialhastighedsmetoden og transitmetoden.

For både radialhastighedsmetoden og transitmetoden gælder det, at det er langt lettere at detektere tunge planeter med små baneradier. Det vil sige at detektioner fra disse to metoder vil være behæftet med en udvalgs-effekt, der dækker over, at der vil være relativt flere detektioner af denne type af planeter alene fordi de er lettere at detektere.

Gravitationel Mikrolinsning

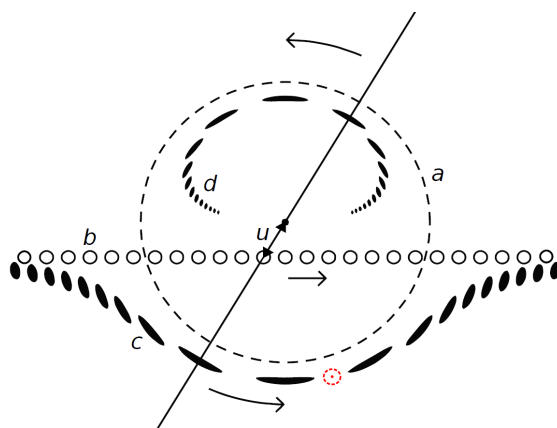
Den gravitationelle mikrolinsningsmetode er ikke i samme grad påvirket af denne udvalgs effekt. Her er der langt bedre muligheder for at detektere små planeter og planeter med store baneradier. Vi kan dermed udforske opbygningen af exosolssystemer, vi kan undersøge hyppigheden af jordlignende planeter i jordlignende baner,

og vi kan finde exoplaneter svarende til Jupiter og Saturn i vores eget solsystem. Det kan have betydning for hyppigheden af liv i universet, da det meget vel kan vise sig, at tunge planeter i de ydre dele af et solsystem er nødvendige for at få bragt vand til de indre dele.

Ifølge den almene relativitetsteori vil det mikrolinsede billede af en baggrundsstjerne, der observeres præcis på den akse, der udspændes af en given baggrundsstjerne og en given linsstjerne, have form af en ring, en såkaldt Einsteinring. Radius af denne ring er givet ved følgende udtryk:

$$\theta_E = \sqrt{\frac{4GM}{c^2} \frac{d_S - d_L}{d_S d_L}} \quad (1)$$

hvor θ_E er givet i radianer, G er gravitationskonstanten, M er massen af linsstjernen, d_S er afstanden til baggrundstjernen, og d_L er afstanden til linsstjernen.



Figur 1. Den sorte prik i midten af figuren er linsstjernen, og den stiplede cirkel (a) angiver dens tilhørende Einstein radius. Rækken af åbne cirkler (b) angiver baggrundstjernes vej gennem systemet. Baggrundstjernen vil dog ikke kunne ses her. I stedet vil der være to billeder (c og d) af baggrundstjernen modsat hinanden langs Einsteinringen på den linje, der forbinder linse- og baggrundstjerne. Når afstanden mellem baggrundstjernen og linsstjernen er stor, vil billedet inden for Einsteinringen forsvinde, og det ydre billede vil falde sammen med positionen for baggrundstjernen som vist på figuren.

For en typisk mikrolinsning der observeres ind mod Mælkevejens centrum gælder det, at $d_S \approx 24000$ lysår og $d_L \approx 12000$ lysår. Hvis vi nu sætter M til Solens masse får vi en Einsteinradius på 0,001 buesekund, hvilket er langt under opløsningsevnen af nuværende teleskoper. Vi kan altså ikke observere Einsteinringen direkte. Det viser sig dog at lyset fra baggrundstjernen også forstærkes når det er mikrolinset, og denne ændring i lysstyrke kan vi observere, selv om vi ikke kan opløse Einsteinringen.

Hvis opliniering ikke er perfekt, vil billedet af baggrundstjernen ikke blive en ring men to diskrete billeder af stjernen: et tæt på men inden for Einsteinringen og et tæt på ringen men udenfor. Se figur 1. Disse to billeder vil være diametralt modsat hinanden i forhold til linsestjernen. De vil ikke være opløselige, men lyset fra baggrundstjernen vil stadig blive forstærket, og der er et simpelt udtryk for denne forstærkning som funktion af den projekterede afstand $u = \theta/\theta_E$, i termer af Einsteinradier, mellem baggrunds- og linsestjerne:

$$A(u) = \frac{u^2 + 2}{u\sqrt{u^2 + 4}} \quad (2)$$

Den opliniering, der ligger til grund for de mikrolinsninger, vi observerer fra Jorden, opstår og forsvinder på grund af Mælkevejens rotation. Denne rotation giver stjerner egenbevægelse, og vi kan parametrisere u i termer af denne egenbevægelse via Pythagoras formel

og dermed beregne forstærkningen som funktion af tid:

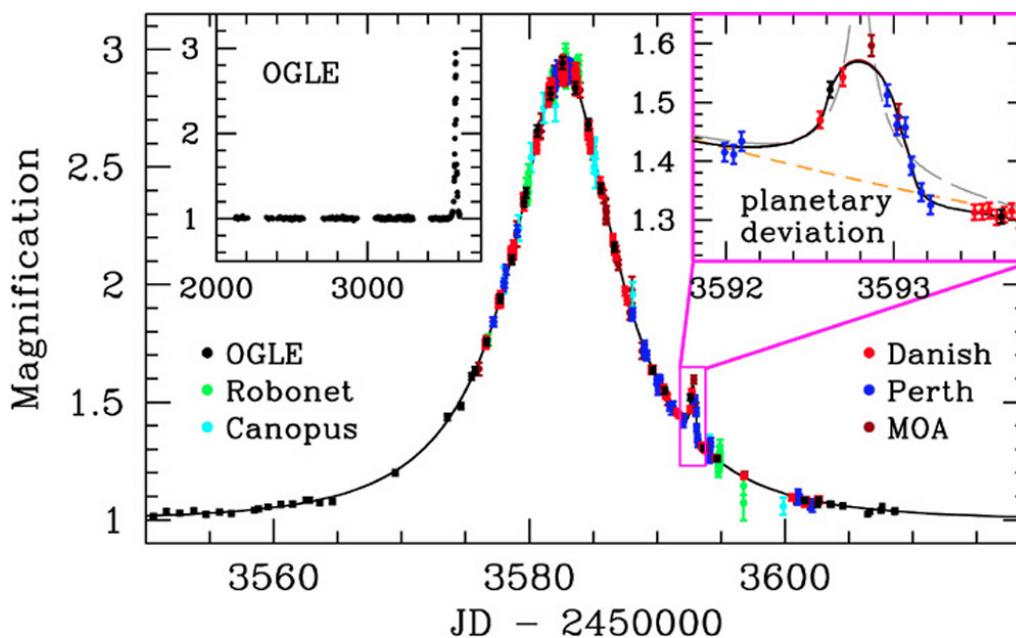
$$u(t) = \sqrt{u_{\min}^2 + \frac{(t - t_0)^2}{t_E^2}} \quad (3)$$

hvor u_{\min} er den minimale afstand (impact parameter), der opnås, t_0 er tiden for mindste afstand og t_E er den tid, det tager baggrundstjernen at krydse Einsteinringen.

Hvis man indsætter ligning (3) i ligning (2), får man udtrykket for den såkaldte Paczyński kurve, opkaldt efter den polske astronom Bohdan Paczyński (1940–2007), se figur 2.

Det spændende er nu, at hvis der er en planet i en position der overstryges af et af de to billeder, som angivet med den røde prik i figur 1, vil hele mekanismen gentage sig, nu blot med en langt mindre Einstein radius svarende til planetens masse. Det ene af billederne vil blive splittet op, og der vil for en kort stund være hele tre billeder. Disse ekstra billeder kan observeres som en ekstra top af forstærkning før eller efter den top af forstærkning, der svarer til mikrolinsningen fra linsestjernen. Se den indsatte figur øverst til højre på figur 2.

I figur 1 har vi angivet radius af baggrundstjernes skive som mange gange mindre end Einsteinradien for linsestjernen. Dette billede er korrekt, når vi taler om Einsteinradien for en stjerne, men da Einsteinradius er proportional med kvadratroden af linseobjektets masse, bliver Einsteinradien for en planet fantastisk mange gange mindre.



Figur 2. Lyskurve observeret for mikrolinsningshændelsen OGLE-2005-BLG-390L [2]. Tidsangivelsen er i Julianske dage, dvs. dage siden 1. januar 4713 f.v.t. kl. 12:00. Grafen øverst til venstre viser observationerne fra det automatiske overvågningsteleskop OGLE. Hver dag overvåger OGLE automatisk ca. 200.000.000 stjerner i et felt ind mod Mælkevejens centrum. Når dette teleskop opdager en mikrolinsningshændelse udsender det en alarm, og et stort antal observatorier og teleskoper begynder at observere denne hændelse i stor tidlig opløsning. Alle disse observatorier og deres observationer er angivet i hovedgrafen. Den 10. august 2005 observerer det danske 1.54m-teleskop på La Silla i Chile som det første, at lyskurven afviger fra det beregnede mønster. Denne afvigelse var begyndelsen på den lille top, der er vist i den lille boks. Denne top svarer til mikrolinsningen fra exoplaneten OGLE-2005-BLG390Lb. Den gule, stiplede linje angiver den beregnede lyskurve uden planet.

De helt små planeter

Det bliver nu interessant at spørge om hvad der sker, når radius af baggrundsstjernens skive bliver sammenlignelig med Einsteinradien. Noget af baggrundsstjernens skive vil stadig blive forstærket, men denne forstærkning vil blive fortyndet af de dele af baggrundsstjernens skive, der ikke bliver forstærket.

For at estimere den tilsyneladende forstærkning vil vi observere, kan vi integrere forstærkningen givet ved ligning (2) over baggrundsstjernens skive og sætte den i forhold til den lysstyrke, som vi ville se uden linsen, dvs. integralet over baggrundsstjernens skive:

$$A(r_*) = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^{r_*} I(r) A(r) r dr d\theta}{\int_0^{2\pi} \int_0^{r_*} I(r) r dr d\theta} \quad (4)$$

hvor r_* er radius af baggrundsstjernens skive og $I(r)$ er baggrundsstjernens lysstyrke per areal. Hvis vi nu antager at kildestjernens lysstyrke er uniform hen over skiven, dvs. $I(r) = 1$, kan vi løse integralerne og får:

$$A(r_*) = \frac{\sqrt{r_*^2 + 4}}{r_*} \rightarrow 1 \text{ for } r_* \rightarrow \infty \quad (5)$$

Som det ses går den tilsyneladende forstærkning mod én, dvs. mod et signal, der ikke kan observeres, når radius af kildestjernens skive vokser udover Einsteinradien af linseobjektet. Faktisk går denne funktion hurtigt mod én, f.eks. er $A(1) = 2.2$ og $A(2) = 1.4$. Der er altså en sammenhæng mellem størrelsen af baggrundsstjernens skive og massen af planeter, der kan observeres.

Hvor ser vi dem

Chancen for at tilfældige stjerner på himlen pga. deres egenbevægelse bliver oplinieret tilstrækkeligt til at udvise mikrolinsning er forsvindende lille. Derfor bliver praktisk taget alle mikrolinsninger observeret i de allertætteste felter ind mod centret af Mælkevejen af den simple grund, at her er der flest stjerner.

En beklagelig konsekvens er dog, at disse felter er overfyldt, dvs. stjernerne ligger oven i hinanden. Dette betyder at stjernerne fremtræder som et kontinuum, hvor kun de klareste stjerner kan identificeres som individuelle stjerner.

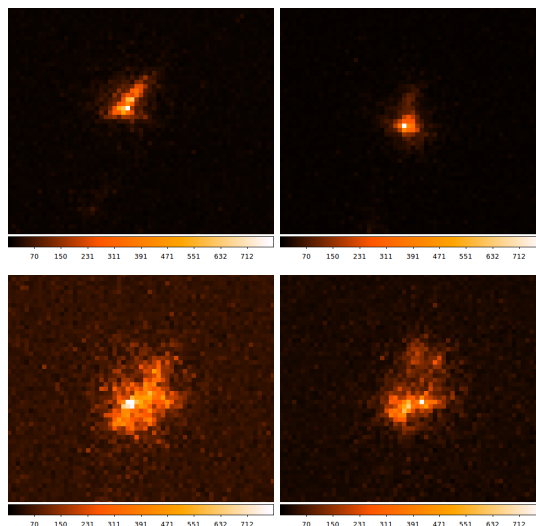
Disse klare stjerner vil oftest være røde kæmpestjerner, som er stjerner nær enden af deres liv. Disse stjerner svulmer op til flere hundrede gange deres oprindelige størrelse og bliver meget lysstærke, lige som solen vil gøre det om ca. 5 milliarder år. Men denne opsvulmen betyder, at radius af stjernens skive vil være meget stor og derfor ikke i stand til at afsløre planeter med små masser.

Den eneste vej uden om dette problem er at øge opløsningen af de billeder, som man optager gennem sit teleskop for at kunne identificere svagere stjerner, der stadig er hovedseriestjerner, og derfor meget mindre.

Lucky imaging

De fleste, der har set på stjerner vil have bemærket at de funkler. Denne funklen er udelukkende en konsekvens

af turbulens i Jordens atmosfære, og hvor romantisk det end måtte være, er funklen eller seeing overordenligt forstyrrende for astronomiske observationer. Set i forstørrelse ser det ud som om stjernerne ryster. Rysteriet giver slørede billeder på nøjagtigt samme måde, som hvis man ryster på hånden, når man tager billeder med sit håndholdte digitalkamera med zoom.



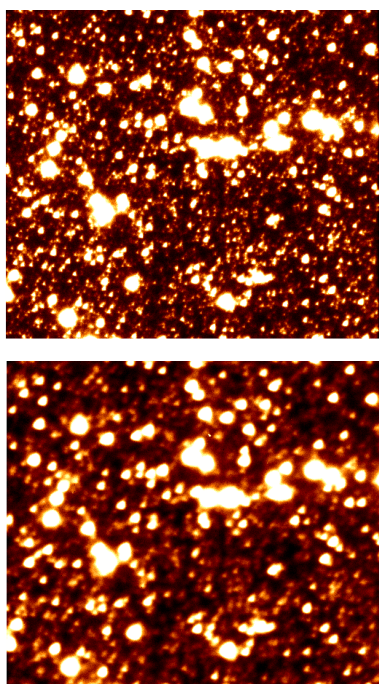
Figur 3. Fire eksempler på korttidseksponeringer af en enkelt stjerne. Eksponeringstiden i hvert billede er 30 ms. Som det ses ændrer både positionen og opløsningen, dvs. fokus, af stjernen sig meget fra billede til billede. De to fænomener, variationen i position og variationen i fokus, giver ophav til de to metoder "shift and add" og "lucky imaging". Disse billeder er optaget med det danske 1,54 m teleskop ved Det Europæiske Sydobseratoriums (ESO) La Silla Observatorium i Chile. Dette teleskop bruges til at teste SONGs teknik og til mikrolinsningsobservationer.

Hvis man nu kunne optage billeder lige så hurtigt som stjernerne ryster, kunne man fryse bevægelsen og flytte de enkelte billeder, så bevægelsen fra stjernernes rysten ophæves. Derefter kunne man lægge billederne sammen og opnå et billede med samme signal som et traditionelt billede. Men det opnåede billede vil være uden den atmosfæriske seeing, og dermed i en langt højere opløsning, denne metode kaldes for "shift and add".

Desuden vil opløsningen i de korte eksponeringer variere kraftigt, som det ses i figur 3. Man kunne derfor også forestille sig en strategi hvor man, udover at flytte billederne, kun beholder de billeder der tilfældigvis har meget høj opløsning og smider resten væk. Denne metode kendes som "lucky imaging". Med denne metode kan man opnå meget store forbedringer i opløsningen, langt bedre end "shift and add", ved at beholde omkring 1% af billederne. Men man smider altså i princippet 99% af sit lys og sin observationstid væk. Det mistede lys gør bestemmelsen af lysstyrkerne dårligere.

Heldigvis kan man kombinere de to teknikker. I figur 4 ses øverst et lucky imaging billede. På grund af den høje opløsning kan man klart adskille et meget stort antal stjerner. Et billede af det samme felt med en lavere opløsning vil i princippet indeholde lige så

mange stjerner og lige så meget lys. Men lyset fra de enkelte stjerner vil så at sige være sløret sammen. Specielt vil lyset fra svage stjerner være sløret sammen med lyset fra langt klarere stjerner og være domineret af disse. Derfor vil det være meget svært at finde svage stjerner og beregne deres lysstyrke.



Figur 4. To billeder af centeret af kuglehoben ω Centauri i stjernebilledet Kentaurer. I det øverste billede er opløsningen øget med lucky imaging. Det nederste billede er en konventionel langtidseksposering af det samme felt, altså uden hverken shift and add eller lucky imaging. Forskellen i opløsning er slående. Størrelsen af feltet er 45 gange 45 buesekunder, hvilket er et SONG teleskops synsfelt. Dette svarer til at en tennisbold set i en afstand af 4,5 km vil dække feltet. Opløsningen i det øverste billede er ca. 0,4 buesekund FWHM og opløsningen i det nederste billede er ca. 1,2 buesekund.

Men hvis man forlods kender positionerne af alle stjerner i feltet fra et lucky image, kan man rent matematisk beregne udseendet af det samme billede i lavere opløsning. Dermed kan man også, givet et billede i lavere opløsning, regne baglæns til alle de oprindelige lysstyrker. Så man kan finde lysstyrkerne i billeder genereret med shift and add, som har lavere opløsning, men ikke smider billeder væk, hvis man kan lave et lucky image og finde alle stjernerne i dette. Denne kombination gør det muligt at bestemme lysstyrken nøjagtigt af svage stjerner i overfyldte felter.

Fremkomsten af nye højhastigheds-lavstøjskameraer har muliggjort netop denne strategi. Dermed er mikrolinsningsteknikken nu klar til at tælle antallet af Jordmasseplaneter i Mælkevejen.

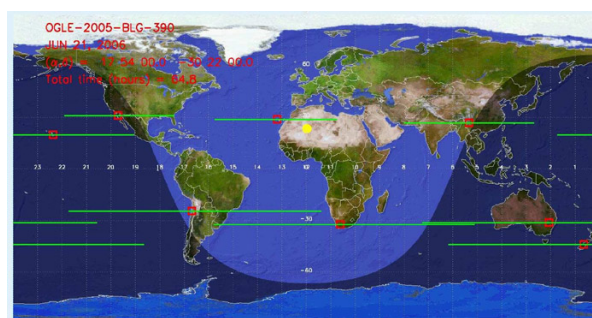
SONG

Derfor har astronomer fra Niels Bohr Institutet og Aarhus Universitet i samarbejde med bl.a. Beijing Normal University taget initiativ til SONG (Stellar Oscillations Network Group) [3], der består af et planlagt netværk

af 8 automatiske 1 m-teleskoper, placeret på strategiske steder Jorden rundt i to ringe, en på den nordlige og en på den sydlige halvkugle. Se figur 5. Herved kan enhver stjerne, der ikke står tæt på solen, observeres døgnet rundt, idet teleskoperne afløser hinanden, når solen går ned og står op på pågældende sted.

SONG er udelukkende beregnet til mikrolinsobservationer og stjernesisnologi. Disse metoder kræver lange ubrudte tidsserier, men behøver ikke meget store teleskoper. Observationer med et globalt netværk af 1 m-teleskoper er derfor ideelt. For mikrolinsninger gælder det, at signalet fra en Jordmasseplanet vil vare omkring en halv time. Det er derfor vigtigt at kunne observere mikrolinsninger meget tæt, hele tiden.

I skrivende stund er det første SONG ved at blive stillet op på Teide Observatoriet på Teneriffe.



Figur 5. Planlagt placering af alle 8 SONG teleskoper. De grønne streger angiver over hvilket tidsrum en stjerne, på himlens ækvator, kan følges af hvert enkelt teleskop. Der er et betydeligt overlap, specielt på den sydlige halvkugle, hvor der i tillæg er fuld 24 timers dækning. Mikrolinsnings-signalet fra en Jordlignende planet vil vare ca. en halv time pga. den meget lille Einsteinradius for så lille en masse. Så det gælder om at være på pletten når tid er.

Litteratur

- [1] Albert Einstein (1936), Lens-Like Action of a Star by the Deviation of Light in the Gravitational Field, *Science*, **84**, 506-507, DOI:10.1126/science.84.2188.506.
- [2] Beaulieu et. al. (2006), Discovery of a cool planet of 5.5 Earth masses through gravitational microlensing, *Nature*, **439**, 437-440, DOI: 10.1038/nature04441.
- [3] Song Network Homepage, <http://song.phys.au.dk/>.
- [4] MiNDSTeP Homepage, Online interactive data, <http://www.mindstep-science.org/>



Kennet Bomann West Harpsøe er ph.d.-studerende ved Niels Bohr Institutet. Hans ph.d.-projekt omhandler mikrolinsning og lucky imaging, specielt metoder til at udtrække nøjagtige lyskurver fra svage mikrolinsninger i jagten på Jordmasse-exoplaneter.