

GRAVITATIONS LINSER

– naturens egna teleskop

Ljusstrålar böjs av på sin väg genom rymden när de passerar materia i form av stjärnor och galaxer. Detta är en effekt av Einsteins allmänna relativitetsteori. Normalt märker vi inte av detta, men när ljusets väg blir lång och massorna det passerar blir stora uppstår överraskande fenomen.

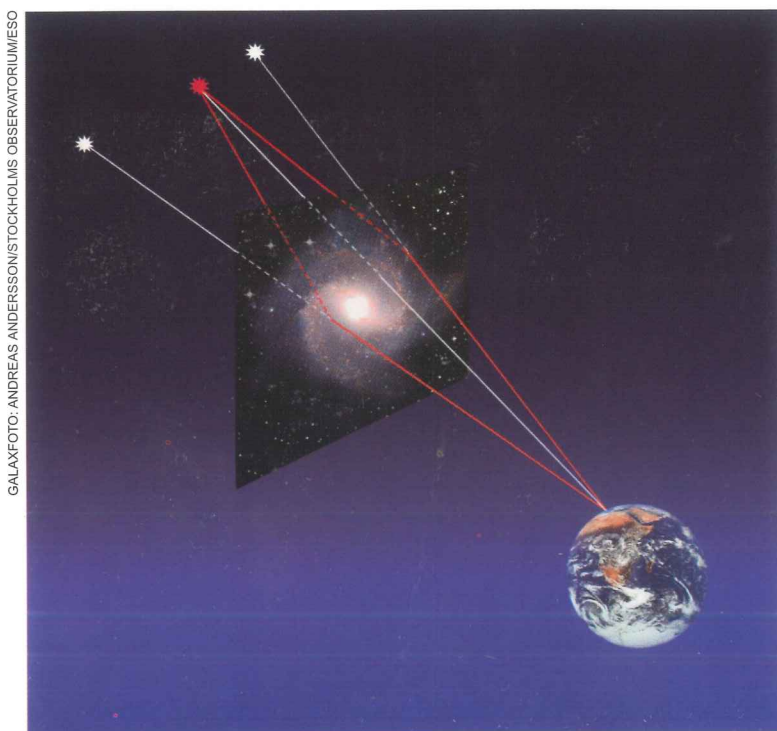
*av Tommy Wiklund
och Françoise Combes*

NÄR DET GÄLLER UNIVERSUM som helhet antar man vanligen att energiformerna materia och strålning är jämnt fördelade och att universum därför ser likadant ut oavsett var man befinner sig vid varje given tidpunkt. Detta antagande verkar stämma för områden som är tillräckligt stora, 300 miljoner ljusår och större i utsträckning. På mindre avstånd är materian ojämnt fördelad. Exempel på detta är naturligtvis stjärnor, galaxer och galaxhopar. Eftersom ljuset påverkas av tyngdkraften från stora massansamlingar leder detta till att ljus som når oss från avlägsna delar av universum "bryts" på ungefär samma sätt som ljus som passerar genom en lins. Detta fenomen kallas därför *gravitationell linsning* och är

en effekt som kan utnyttjas för att observera detaljer i avlägsna galaxer, bestämma massan hos både galaxer och galaxhopar samt för att bestämma den viktiga Hubblekonstanten.

ALBERT EINSTEIN BLEV FÄRDIG med sin allmänna relativitetsteori 1915. Då fanns det endast ett fåtal experiment som kunde göras för att testa den nya teorin, och dessa var dessutom svåra att genomföra. Ett av dessa var just hur mycket ljuset böjs av i närheten av en stor massa, exempelvis solen. Enligt den gamla newtonska uppfattningen skall en ljusstråle som passerar nära förbi solen böjas av med 0,8 bågsekunder (0,000 22 grader), men enligt Einstein böjs ljuset av dubbelt så mycket! Denna avböjning hade emellertid aldrig kunnat observerats, främst på grund av svårigheten med att observera stjärnor nära den ljusa solen. För att försöka mäta denna effekt, och på så vis avgöra om Newton eller Einstein hade rätt, gav sig de brittiska astronomerna Arthur Eddington och A.C.D. Crommelin ut på varsin expedition för att observera stjärnor nära solen under den totala solförmörkelsen 1919. Trots svåra observationsförhållanden fann man verkligen att stjärnor vars synlinje nästan berörde solytan böjdes av med just det värde som Einstein hade förutsagt! Detta var en stor triumf för Einsteins relativitetsteori.

Ljustrålar böjs! Vi tänker oss en avlägsen ljuskälla, t.ex. en kvasar, här avbildad som en röd prick. Dess ljus passerar på sin väg mot jorden förbi en mellanliggande galax. Galaxens stora massa böjer då av ljuset. Vi här på jorden ser då flera bilder av kvasaren, på bilden visat som de två vita prickarna i synlinjernas riktning.



GALAXFOTO: ANDREAS ANDERSSON/STOCKHOLMS OBSERVATORIUM/IESO

Till höger ses galaxhopen Abell 2218 tagen med Hubbleteleskopet. De enskilda medlemmarna av hopen ses som gulaktiga, ganska stora runda eller ellipsformade galaxer. De avlånga bågarna, de flesta röda eller blå, är bilder av bakomliggande galaxer som påverkas av gravitationell linsning orsakad av galaxhopens stora massa. Flera av de återgivna bågarna är i själva verket bilder av samma bakomliggande galax.

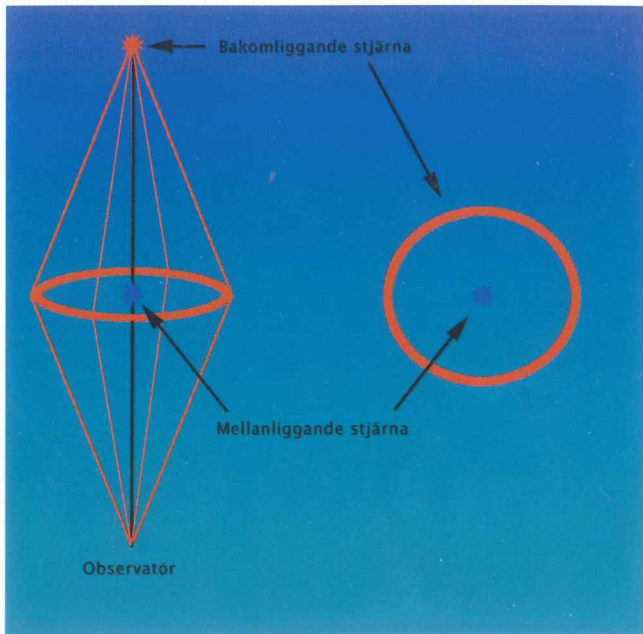
SPACE TELESCOPE SCIENCE INSTITUTE

ATT LJUSET PÅ SÅ SÄTT böjs beror på, enligt Einsteins relativitetsteori, att själva rummet är krökt. Krökningen ökar i närheten av en tung kropp. Den kortaste vägen mellan två punkter på en krökt yta kallas för en *geodetisk linje* och är den linje som en ljusstråle rör sig utefter. Jordens yta kan ses som en tvådimensionell krökt yta, även om den i själva verket är tredimensionell. Eftersom vi av praktiska skäl inte kan borra oss igenom jordens inre för att ta oss mellan olika platser blir den kortaste vägen mellan två punkter på jordens yta längs en storcirkelbåge (en godtycklig cirkel på jordens yta som har jordens centrum som medelpunkt). Detsamma sätt gäller för en ljusstråle i den krökta tredimensionella rymden, den rör sig längs en geodetisk linje.

DENNA GRAVITATIONELLA

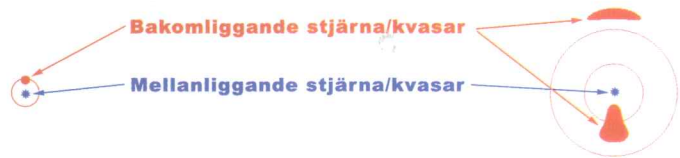
avböjning av ljus fascinerade forskarna under 1920-talet. O.D. Chowlsön visade 1924 att det för två stjärnor som ligger på linje finns ett oändligt antal vägar som ljuset kan ta för att uppfylla kravet att de rör sig längs geodetiska linjer. Alla dessa linjer kommer dock att befinna sig på samma avstånd från den mellanliggande stjärnan, och effekten för en observatör på jorden blir att den bakomliggande stjärnan ser ringformig ut med den mellanliggande stjärnan i centrum (se figur på nästa sida). Detta kallas en *gravitationslins*. Einstein räknade ut att effekten inte enbart bestod i en förvrängd avbildning av den bakomliggande stjärnan, men att även dess ljusstyrka skulle





TECKNINGAR: TOMMY WIKLIND

Gravitationslinsen bevarar ytljusstyrkan. Till vänster ses "verkligheten", till höger hur det kan se ut för oss. Märk att bilderna av den bakomliggande stjärnan är större än den verkliga utsträckningen. Effekten blir större om stjärnorna byts ut mot kvasarer (större massa).



Verklig konfiguration

Observatörens bild

öka. Detta kommer sig av att en gravitationslins bevarar ytljusstyrkan samtidigt som den avbildande ytan kan öka i omfattning (figuren ovan t.h.). För att energin skall bevaras måste således bilden av stjärnan krympa i andra riktningar. Gravitationell linsning kan både förstärka och försvaga ljusstyrkan hos den bakomliggande stjärnan, allt beroende på läget i förhållande till oss.

CHANSEN FÖR EN SÅDAN PERFECT upplinjerad av stjärnor ansågs i det närmaste försumbar och skulle förmodligen aldrig kunna observeras. Fritz Zwicky insåg dock 1937 att det blir precis samma effekt om man byter ut de två stjärnorna mot två galaxer. Det var dessutom en betydligt större chans att galaxer skulle ge en observerbar linseffekt under de rätta förhållandena. Detta observerades dock inte, och fenomenet med gravitationslinser föll i glömska under närmare fyrtio år. Men en observation 1979 av de amerikanska astronomerna D. Walsh, R.F. Carswell och R.J. Weymann kom att ändra historien. Dessa observerade en avlägsen kvasar som vid närmare betraktande visade sig bestå av två delar, separerade från varandra med 6 bågsekunders vinkel. Dessa två komponenter visade sig ha exakt likadana spektra och ha exakt samma rödförskjutning. En sådan dubbelkvasar hade aldrig tidigare setts. Slutligen upptäcktes en galax mellan kvasardelarna, på ett betydligt mindre avstånd från oss. Då insåg man att det här måste vara en effekt av

gravitationell linsning av det slag som hade diskuterats långt tidigare.

FLERA NYA GRAVITATIONS LINSER upptäcktes under de följande åren, och 1987 såg man dessutom en ny typ av linsningseffekt, en så kallad gravitationell båge. Detta fenomen är samma sak som när en galax ligger emellan oss och en mer avlägsen kvasar, men här är det en hel galaxhop som fungerar som en lins. I början av 1990-talet upptäcktes slutligen den gravitationseffekt som hade blivit förutsagd allra först: gravitationell linsning när två stjärnor är upplinjerade längs samma synlinje sedda från jorden. Separationen av linsbilderna är i det här fallet av storleksordningen mikrobågsekunder, och fenomenet kallas därför för *mikrolinsning*. Den förvrängda bilden av bakgrundsstjärnan kan inte observeras direkt, eftersom dagens optiska teleskop inte har tillräcklig upplösning, men kan observeras genom att den bakomliggande stjärnans ljusstyrka ändras. Förändringen av ljusstyrkan äger rum under några dagar eller veckor, och kommer sig av att de två stjärnorna långsamt rör sig gentemot varandra.

GRAVITATIONS LINSNING ÄR INTE BARA en spännande och spektakulär effekt utan är även en kraftfull metod att studera universum. Mikrolinsningseffekten har till exempel använts för att söka efter *mörk materia* i Vintergatans

utkanter. En teori om den mörka massa som orsakar att rotationshastigheten i spiralgalaxer är mer eller mindre konstant är att den utgörs av små men tunga kroppar som inte utsänder någon påvisbar strålning. Den enda mätbara effekten av dessa kroppar är deras gravitation, och de kan därför fungera som gravitationslinser och förstärka bakomliggande stjärnors ljusstyrka när de råkar linjera upp sig i förhållande till oss här på jorden. I ett par stora projekt, där man har använt sig av bakgrundsstjärnor i Stora magellanska molnet, har man funnit många mikrolinser, men inte tillräcklig många för att Vintergatans dynamik ännu ska kunna förklaras.

DET KANSKE MEST INTRESSANTA användningsområdet för gravitationslinser är möjligheten att bestämma massan hos den kropp (stjärna, galax eller galaxhop) som fungerar som lins. Det finns mycket få metoder att direkt bestämma massan hos himlakroppar. Mätningar av t.ex. stjärnornas eller gasens rörelse i en galax kan ge ett mått på den så kallade dynamiska massan. Sådana observationer är endast möjliga att göra för närbeläggna ting. Oftast är det endast möjligt att mäta ljusstyrkan, vilket inte säger mycket om massan. I vår egen galax, Vintergatan, domineras den lysande massan av lätta stjärnor, som dock bara bidrar med en mycket liten del av Vintergatans totala ljus. De tyngsta stjärnorna, som bidrar med nästan allt ljus, utgör en försvinnande liten

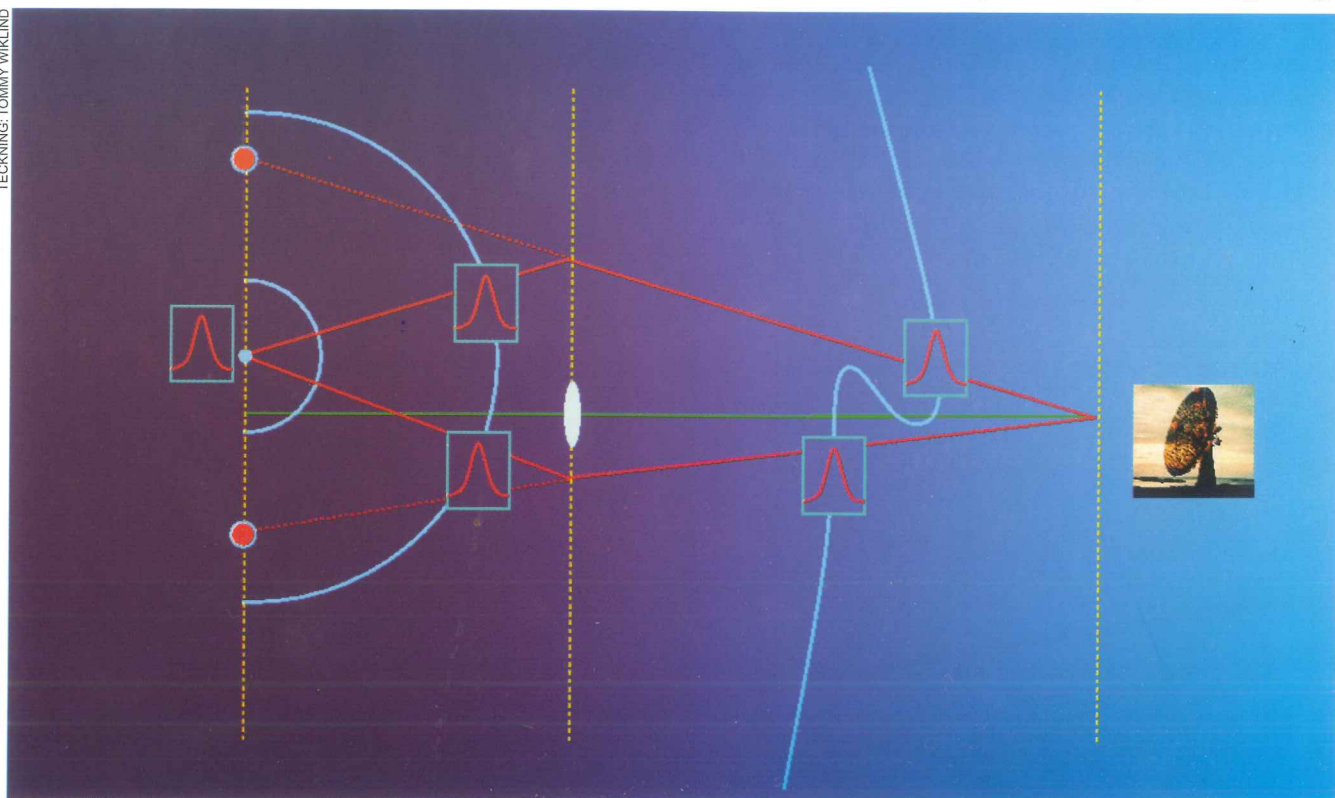
del av den totala massan. Sedan tillkommer den mörka massan, som vi ännu inte vet vad den består av eller hur den är fördelad.

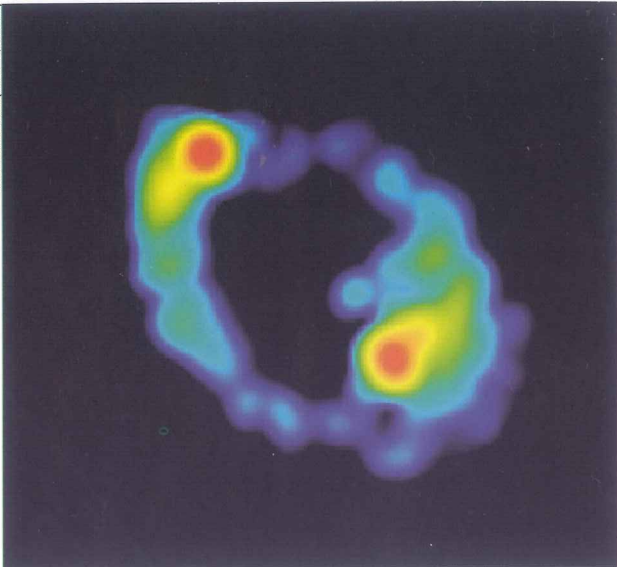
VID GRAVITATIONELL LINSNING beror den observerade effekten av avståndet till både bakgrundskällan och linsen och hur stor *gravitationspotential* linsen har. Om vi således känner till avstånden för lins och bakgrundskälla kan vi bestämma hur linsens gravitationspotential måste se ut för att ge den observerade linseffekten. Ur detta går det sedan att beräkna massan hos linsen. Det är ingen lätt sak, men det är en av de ytterst få metoder som står till förfogande att bestämma massan hos avlägsna galaxer och på så stora massansamlingar som galaxhopar. Resultaten för galaxhopar har visat att de till största delen verkligen tycks bestå av mörk materia! Med hjälp av gravitationslinsningen har man dessutom kunnat se att den mörka massan är mer jämnt fördelad än den lysande materian (dvs. galaxerna, som är det vi kan se), men att den har ungefär samma utsträckning som galaxerna.

YTTERLIGARE ETT ANVÄNDNINGSSOMRÅDE för gravitationslinser är att bestämma värdet på den s.k. Hubblekonstanten, som bestämmer hur snabbt universum utvidgar sig. Detta presenterades i den norske astronomen Sjur Refsdals doktorsavhandling 1964, redan

Så här kan man beskriva hur en gravitationslins verkar för att förorsaka en tidsfördröjning. Vi tänker oss att en ljuspuls (ritad som en vågtopp) sänds ut av en kvasar längst till vänster i bilden. Ljuset förflyttar sig utåt i alla riktningar (varav två är utritade). I närheten av en galax, den ljusblå "linsen" i mitten, kommer ljusvägen att förvrängas. Detta leder till att flera bilder av kvasaren uppkommer för observatören, som befinner sig vid teleskopet längst till höger, samt att pulsen kommer att nå observatören vid olika tidpunkter beroende på vilken väg den tagit.

TECKNING: TOMMY WIKLIND





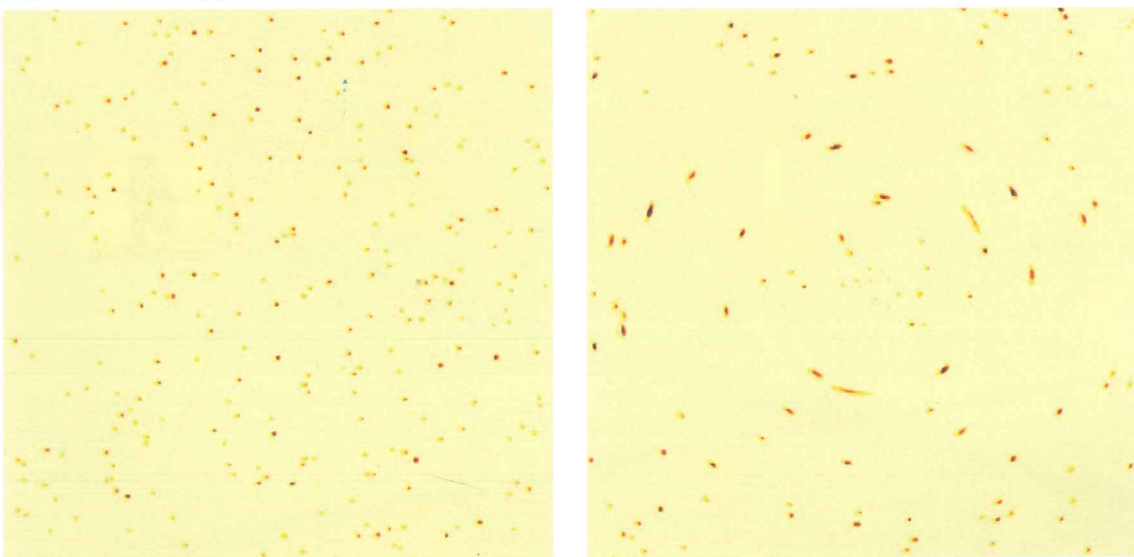
En radiobild av kvasaren PKS 1830-211. Den består av ett punktförmigt centrum och en utskjutande jetstråle och har avsevärd rödförskjutning (= befinner sig på stort avstånd) och sänder ut kraftig strålning i radioområdet. En betydligt mer närbelägen galax, med mindre rödförskjutning, befinner sig mellan oss och kvasaren. Den är osynlig i bilden (den är "radiotyst") och ligger mitt i ringen, men på grund av galaxens linseffekt på kvasarens strålning erhåller vi denna ring. Färgkoden är så att rött avser kraftigast strålning och blått svagast.

femton år innan den första gravitationslinsen upptäcktes. På den tiden togs resultatet som en ren teoretisk övning och ingen trodde att metoden skulle få någon praktisk användning. Tekniken utnyttjar det faktum att när flera bilder av den bakomliggande galaxen (eller kvasaren) uppkommer, så når ljuset från ett och samma föremål observatören längs olika vägar. Vi ser med andra ord den bakomliggande kroppen vid något olika tidpunkter (se bilden på föregående sida). Refsdals metod är beroende av hur vi antar att linsens massfördelning är och ger därför en osäkerhet på Hubblekonstanten på 10–20 procent. Det viktiga är dock att denna metod är helt oberoende av andra avståndsbestämningar som ingår i det vanliga sättet att bestämma denna för kosmologin fundamentala konstant. Jag har själv bidragit med sådana bestämningar (se bilden ovan), där observationerna är

gjorde med millimetervågsteleskopet SEST, beläget på La Silla-observatoriet i Chile. I förgrunden fanns en spiralgalax och i bakgrunden en kvasar. Bakgrundskvasaren är variabel och under 1998 hade den ett kraftigt utbrott som kunde följas med SEST. Det visade sig att ljuskurvan för den ena komponenten var förskjutet med 26 dygn i förhållande till den andra. Med dessa observationer kunde Hubblekonstanten uppskattas till cirka 59 ± 12 km/s/Mpc. Detta värde överensstämmer väl med mätningar gjorda med hjälp av andra metoder men som har helt andra felkällor.

GRAVITATIONSLINSER HAR TROTS sin korta historia visat sig vara utomordentligt betydelsefulla. Dels genom att de ger en direkt metod att mäta massan hos kroppar på mycket stora avstånd, dels genom den förstärknings-


En simulerad bild som beskriver hur det kommande ALMA-teleskopet kan användas för att studera svag linsning. Till vänster ses (i falska färger) en liten del av himlen på vilken ungefär 200 galaxer med avsevärd rödförskjutning (belägna på stora avstånd) kan observeras. Om det nu skulle vara så att en stor (och tung) galaxhop ligger i förgrunden i mitten av bilden ser vi samma område till höger. Galaxerna har förskjutits ur läge och de har blivit avlånga eller bågformade. Med sådana verkliga observationer kan man bestämma massan hos galaxhopen i förgrunden med stor noggrannhet.



effekt som gör det möjligt att utföra detaljerade studier av de bakomliggande föremålen. Man har också kunnat mäta mycket små gravitationslinseffekter, där linsningen av bakgrundskällorna bara kan mätas i ett statistiskt sammanhang. Denna s. k. svaga linsning är emellertid mycket viktig och tillåter en kartläggning av fördelningen av den mörka materien över stora volymer av universum. Man kan göra en direkt jämförelse av verkligheten med resultat från simuleringar av hur strukturer bildades i det unga universum. Utifrån en djup exponering med ett av de nya teleskopen på Paranalobservatoriet i Chile har till exempel en fransk grupp av astronomer lyckats mäta hur den totala massan är fördelad, det vill säga både den synliga och den mörka delen. Man lyckades med bedriften genom att studera den statistiska fördelningen av avplattningen hos de ljussvagaste galaxerna. Dessa är troligen de mest avlägsna, återigen i ett statistiskt sammanhang, och därmed också mest påverkade av en ojämn fördelning av massan längs synlinjen.

NÄSTA GENERATIONS submillimeterteleoskop, ALMA (se PA nr 1, 2002), kommer att användas för dessa studier såväl som det s.k. NGST (*Next Generation Space Telescope*) och de 50- och 100-m jordbundna teleskop, försedda med s.k. aktiv optik, som är under projektering. Med dessa nya instrument, med avsevärt förbättrad upplösning, kommer i stort sett alla avlägsna galaxer att se lite förvrängda ut. Detta kan jämföras med att observera universum genom ett råglasfönster! Men detta behöver inte alls vara av ondo. Själva förvrängningen innehåller i sig viktig information om hur materia, både mörk och lysande, är fördelad i universum och är dessutom den enda till buds stående metoden att studera den mörka massan i stor skala. ♦

TOMMY WIKLIND arbetar vid Onsala rymdobservatorium och **FRANÇOISE COMBES** vid Parisobservatoriet.



När vi observerar de avlägsnaste delarna av universum ser vi dem som genom ett råglasfönster. Men denna till synes störande effekt av gravitationslinser kan användas för goda syften.