X-ray Deep Fields

Jesper Rasmussen, Astronomisk Observatorium, Københavns Universitet

1995 offentliggjordes de såkaldte Hubble Deep Field observationer, som var nogle dybe optiske eksponeringer af udvalgte områder på himlen, observeret med NASA's rumteleskop Hubble. Siden fremkomsten af disse billeder og i kraft af den rivende udvikling indenfor astronomisk instrumentteknik er det blevet populært at anvende både jord- og rumbaserede teleskoper til lignende dybe eksponeringer, der bl.a. giver mulighed for at se tilbage til de tidligste faser i galaksernes udvikling. Indtil for nylig har det dog ikke været frugtbart at anvende teleskoper som kunne observere i røntgenområdet til dette formål, men med opsendelsen af NASA's røntgensatellit *Chandra* i 1999 og efterfølgende ESA's *XMM–Newton* er det blevet videnskabeligt relevant at lave sådanne "X-ray Deep Fields". Denne nye generation af røntgenteleskoper har nemlig langt større følsomhed og billedopløsning end tidligere satellitter (sidstnævnte specificeret bl.a. ved den såkaldte punktsprednings-funktion, som beskrevet i [1]).

Her vil vi diskutere nogle karakteristika ved to af disse X-ray Deep Fields taget med hhv. *XMM* og *Chandra* samt beskrive igangværende arbejde relateret til detektion af fjerne galaksehobe i et af felterne.

Dybe røntgenobservationer

De offentliggjorte X-ray Deep Fields er alle stykket sammen af individuelle, kortere eksponeringer. Med *XMM* er på denne måde opnået i alt 100 kilosekunders (100 ks) brugbar eksponeringstid af et område på himlen kaldet Lockman-Hullet, vist i figur 1. Dette felt er tidligere blevet observeret af den nu "pensionerede" røntgensatellit *ROSAT* og er i det hele taget populært for røntgenobservationer pga. dets meget lave forekomst af neutralt brint, som ellers ville absorbere en del af den langbølgede røntgenstråling. Tilsvarende er der med *Chandra* lavet to X-ray Deep Fields; det ene overlapper det såkaldte Hubble Deep Field North, et felt som blev observeret af Hubble-teleskopet, mens det andet (med en samlet eksponeringstid på 1 Ms) er synligt fra den sydlige halvkugle og derfor har fået navnet Chandra Deep Field South (CDFS), se figur 2. Der er desuden planlagt yderligere observationer, dels *Chandra*–eksponeringer af Nord-feltet (omkr. 1 Ms om året) og dels opfølgende *XMM*–eksponeringer af CDFS, men i det følgende vil vi koncentrere os om observationerne vist i figur 1 og 2. For at forstå vigtigheden af de nye resultater fra disse X-ray Deep Fields skal vi dog først lave en lille afstikker til en kort beskrivelse af røntgenbaggrundsstrålingen.

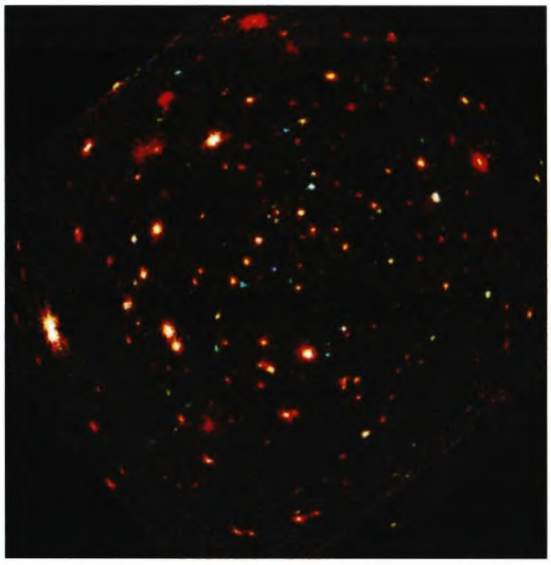
Selv nogle af de allerførste astronomiske røntgenobservationer, udført først i 1960'erne med bl.a. raketbårne teleskoper, pegede på at der udover tydelige individuelle kilder på himlen også syntes at komme et vist niveau af røntgenstråling fra alle andre retninger. Dette blev senere bekræftet med stadig større præcision af efterfølgende satellitter. Men selvom den faktisk blev opdaget eksperimentelt et par år før den kosmiske mikrobølge-baggrundsstråling, har denne kosmiske *røntgenbaggrund* i alt væsentligt unddraget sig observationel forklaring indtil for ganske nylig. Som mikrobølgebaggrunden ses den i alle retninger på himlen og er ved fotonenergier over 2–3 keV (bølgelængder under 5 Å) ganske homogent fordelt. Det viste sig, at den spektrale fordeling (intensitet I som funktion af fotonenergi E i keV) af røntgenbaggrunden kan beskrives ganske godt ved et udtryk af formen $I(E) = A[E/3]^{-\alpha} exp(-E/W)$ over et stort interval i fotonenergier. Her er A, α og W konstanter, som kan bestemmes ud fra observationer (se f.eks. [2] for en udførlig – men teknisk – beskrivelse af røntgenbaggrunden). Et sådant spektrum minder meget om det man kunne forvente fra en tynd, varm gas i termodynamisk ligevægt, hvilket gav anledning til spekulationer om at røntgenbaggrunden primært skyldes en homogen fordeling af varm gas spredt ud gennem Universet. Som vi nu skal se, kan dette dog kun være en meget lille del af forklaringen.

En ny population af objekter

I både figur 1 og 2 ses mange punktlignende kilder; specielt ses i figur 1 mange røde og grønne punktkilder, dvs. punktkilder som udsender relativt "blød" røntgenstråling med fotonenergier mellem 0.5 og 4.5 keV. Mange af disse kilder i Lockman-Hullet kunne også ses i *ROSAT*'s tidligere 1.3 Ms eksponering af området og var således kendt i forvejen. Langt størstedelen af dem vides at være aktive galaksekerner i form af supermassive sorte huller (formentlig på adskillige millioner solmasser), som i centeret af deres værtsgalakser er i færd med at sluge enorme stofmængder. I processen opvarmes det indfaldende stof til millioner af grader og udsender herved intens røntgenstråling. Detektionen af store mængder blød røntgenstråling fra disse kilder viser, at det meste af strålingen passerer næsten uhindret igennem til teleskoperne uden at blive absorberet af f.eks. neutralt brint omkring det sorte hul.

Da både *XMM* og *Chandra* har langt større følsomhed for "hård" røntgenstråling med fotonenergier på 5–10 keV (1.2–2.4 Å) end tidligere satellitter, kunne man på forhånd forvente interessante nye resultater i dette spektralområde. De blå objekter i

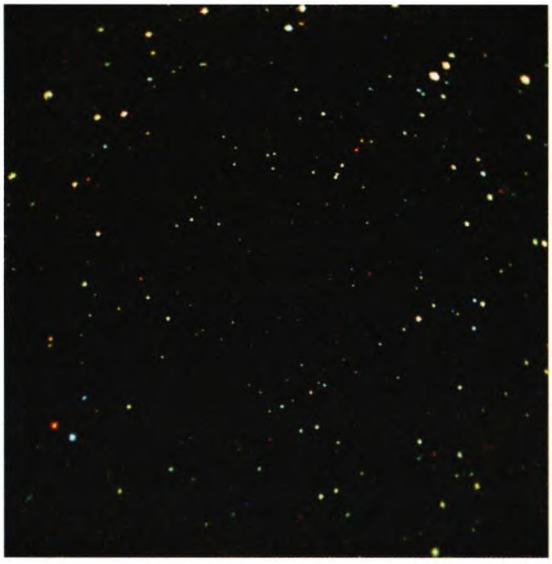
figur 1 er netop eksempler på punktkilder som ikke har været detekteret før med hverken *ROSAT* eller andre instrumenter. Disse kilder repræsenterer faktisk en helt ny population af objekter, hvis eksistens var forudsagt af visse teoretiske modeller til forklaring af den kosmiske røntgen–baggrundsstråling [3]. Kilderne er relativt svage og udviser meget "hårde" spektre, hvor langt det meste af den detekterede røntgenstråling er i form af fotoner med energier over 2–3 keV (se figur 3). Spektralanalyse af de nye objekter kunne tyde på, at også de er aktive galaksekerner, hvis røntgenstråling – i modsætning til de blødere punktkilder – er voldsomt absorberet af bl.a. neutralt brint.



Figur 1. Kombineret 100 ks *XMM* eksponering af Lockman-Hullet (skala: 30 × 30 buemin.). Farverne angiver fotonenergier: Rød svarer til "blød" røntgenstråling med energier mellem 0.5–2 keV, grøn til 2–4.5 keV, og blå til "hård" røntgenstråling med energier 4.5–10 keV.

Men hvad adskiller fysisk de bløde og hårde punktkilder? I den såkaldt forenede model for aktive galaksekerner (engelsk: *unified AGN model*) er både de bløde og hårde punktkilder i virkeligheden forskellige repræsentationer af det samme objekt: Et supermassivt sort hul omgivet af en torus af gas og støv (se figur 4). Hvis sigtelinien til objektet tilfældigvis passerer gennem torus'en, vil stort set al den bløde røntgenstråling absorberes i vores synsretning, og vi detekterer objektet som en hård røntgenkilde (altså de blå kilder i figur 1). Ser vi derimod torus'en fra oven, har vi mere eller mindre frit udsyn mod stoffet omkring det sorte hul, og dermed kan også den bløde røntgenstråling nå os (de røde og grønne kilder).

I det meget dybe CFDS billede, figur 2, ses så svage og fjerne punktkilder at op mod 90% af 0.5–10 keV røntgen-baggrundsstrålingen på basis af både *XMM*– og *Chandra*–resultaterne nu kan tilskrives det integrerede strålingsbidrag fra individuelle kilder, nemlig først og fremmest disse to "udgaver" af aktive galaksekerner [4]. Dette er et yderst vigtigt resultat: Dels har det bidraget meget væsentligt til at løse det 40 år gamle mysterie om oprindelsen af røntgenbaggrunden (som nu altså viser sig primært at komme fra individuelle objekter fremfor f.eks. en homogen fordeling af varm gas spredt ud gennem Universet), og dels viser det at det tidlige univers myldrede med supermassive sorte huller i centeret af unge galakser – og det med en grad af røntgenaktivitet, der langt overgår hvad vi ser i det nære Univers i dag. De forskellige X-ray Deep Fields tillader os således på een gang at "opløse" det meste af røntgenbaggrunden i enkelte kilder og samtidig se tilbage til tidspunkter, hvor almindelige galakser som f.eks. Mælkevejen var mange mia. år yngre. For første gang har vi altså mulighed for at udnytte røntgendata til at studere dannelsen og udviklingen af galakser på en kosmologisk (tids-)skala.



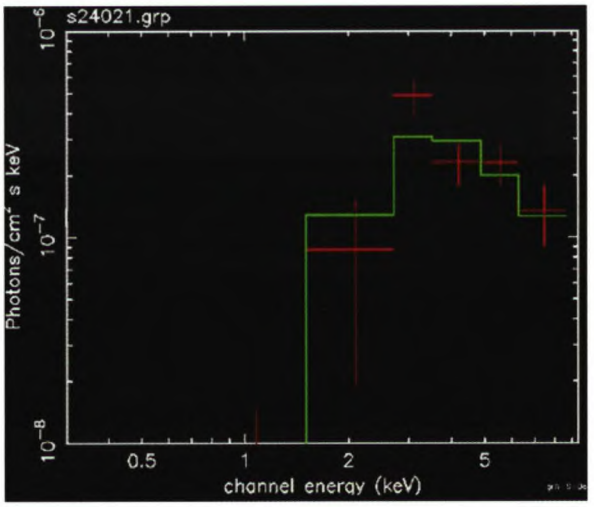
Figur 2. Kombineret 1 Ms *Chandra* eksponering af Chandra Deep Field South (skala: 16 × 16 buemin.). Dette var på tidspunktet for offentliggørelsen det hidtil dybeste røntgenbillede af noget område på himlen (nu overgået af Chandra Deep Field North) og indeholder objekter mere end 12 mia. lysår væk (rødforskydning $z > 5$). Farverne angiver intensitet: Rød svarer til lav intensitet, gul til middel og blå til høj intensitet.

Galaksehobe i Chandra Deep Field South

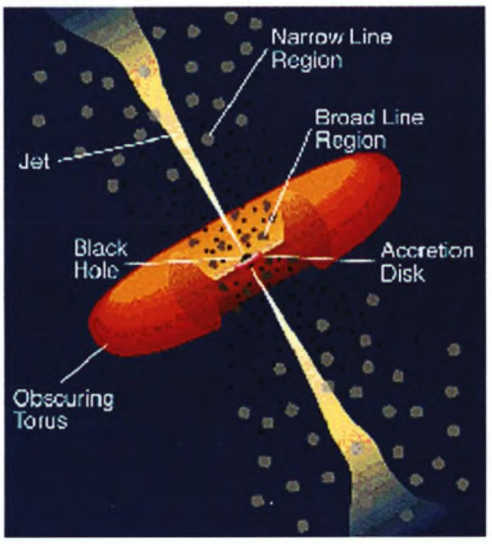
Foruden de diskuterede punktkilder er der også udstrakte røntgenkilder i de to Deep Fields, repræsenteret ved grupper og hobe af galakser (disse bidrager naturligvis også til røntgenbaggrunden, omend i et relativt beskedent omfang). Med *Chandra*'s instrumentfølsomhed og billedopløsning samt den lange eksponeringstid er det f.eks. realistisk at håbe på, at meget fjerne galaksehobe kan detekteres i dataene vist i figur 2 (se også boks 1).

I denne sammenhæng er CDFS-feltet blevet komplementeret af jordbaserede observationer i det nær-

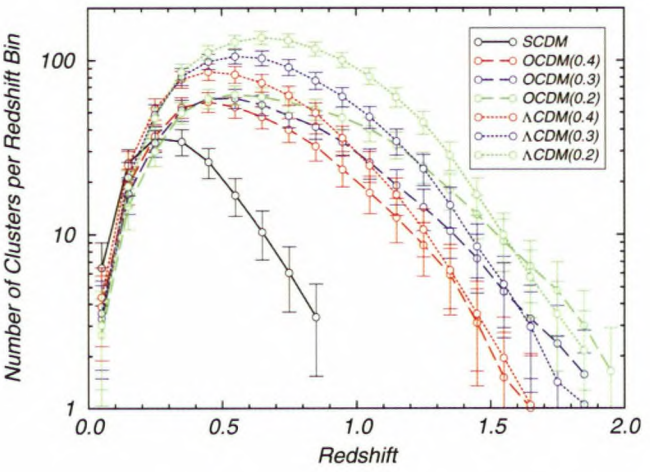
infrarøde. Selvom relativt nære galaksehobe er optisk meget klare objekter, kan eftersøgninger af fjerne hobe nemlig bedre betale sig i det nær-infrarøde pga. rødforskydningen. Som et led i det såkaldte ESO Imaging Survey–projekt [6, 7] er der foretaget observationer af CDFS i de infrarøde J- og K-filtre ved ESO's NTT-teleskop. Analyse af disse billeder burde kunne afsløre tilstedeværelsen af eventuelle hobkandidater med rødforskydninger $z \simeq 0.5 - 1.2$, uafhængigt af røntgendataene.



Figur 3. Spektrum af et af de nye (blå) objekter i figur 1. De røde punkter er røntgendataene inkl. de formelle usikkerheder, den grønne kurve et modelfit til dataene. På trods af den begrænsede fotonstatistik (bemærk f.eks. den store usikkerhed på målepunkterne, angivet ved størrelsen af "krydserne") er det tydeligt, at der detekteres meget lidt stråling med energier under 2 keV.



Figur 4. Den forenede model for aktive galaksekerner. I centeret befinder sig et supermassivt sort hul, som omgives af opvarmet, røntgenstrålende gas. Omkring dette befinder sig en torus (en "vanillekrans") af kold gas og støv, som absorberer røntgenstrålingen med højere og højere effektivitet jo nærmere synslinien til objektet er på torus'ens plan. Vinkelret herpå udgår en jetstrøm af ladede partikler.



Figur 5. Det forventede antal galaksehobe i intervaller af $\Delta z = 0.1$ som funktion af rødforskydningen z (for hobe klarere end 5×10^{-15} erg cm^{-2} s^{-1} i energiintervallet 0.1–12 keV). Kurverne er resultater af kosmologiske simulationer [5] for et 64 kvadratgraders område på himlen og repræsenterer forskellige kosmologiske modeller. De røde, blå og grønne kurver angiver modeller, hvori den gennemsnitlige stoftæthed i Universet er hhv. 40%, 30% og 20% af værdien i modellen angivet ved den sorte kurve. Man ser, at for høje rødforskydninger afhænger den rumlige tæthed af hobe afgørende af Universets stoftæthed (figuren venligst gengivet med tilladelse fra forfatterne).

Søgning efter fjerne galaksehobe i infrarød og røntgen

I det optiske/infrarøde ses en galaksehob typisk som en tilsyneladende overtæthed af galakser i et givent område på himlen. Derfor kan der ledes efter galaksehobe ved f.eks. at søge efter overtætheder i den projicerede fordeling af observerede objekter og teste hvorvidt sådanne overtætheder matcher en forventet tæthedsprofil for en typisk hob. Har man observationer i to eller flere filtre kan man alternativt (eller i kombination med den første metode) udnytte muligheden for tildeling af en infrarød "farve" til alle detekterede objekter. Teoretisk forhåndskendskab til farverne af bestemte hobgalakser ved en given rødforskydning tillader så, at man ved at lede efter overtætheder af objekter med en bestemt farve potentielt kan identificere disse med en galaksehob ved en given rødforskydning (sidstnævnte får man altså "gratis" med i købet ud fra farven af galakserne). Denne farvemetode, hvor man simpelthen søger at isolere en karakteristisk population af hobgalakser ved en bestemt rødforskydning (den såkaldte "røde sekvens" af elliptiske galakser), danner i øvrigt basis for et igangværende hob-eftersøgningsprojekt (*The Red Sequence Cluster Survey* – se [8]). Metoden kan desuden bidrage til at eliminere hobkandidater som fejlagtigt er blevet detekteret som hobe pga. projektionseffekter: Hvis der i det pågældende område er mange galakser langs synslinien – uden at disse nødvendigvis er fysisk tæt på hinanden, endsige gravitationelt bun-

det – kan det ofte umiddelbart se ud som en hob. Men finder man samtidig den omtalte røde sekvens af galakser, er den fysiske realitet af hoben straks på lidt mere sikker grund. Under alle omstændigheder skal der dog generelt opfølgende observationer til for sikkert at fastslå hobens eksistens – f.eks. spektroskopi af de enkelte hobgalakser (for at måle deres rødforskydninger præcist) og/eller røntgenbilleder af hoben.

I modsætning til det infrarøde tilfælde ser man i røntgen (i hvert fald for fjerne hobe) nemlig ikke de individuelle galakser i hoben, men derimod den varme gas *mellem* galakserne. Denne gas har typisk en temperatur på $\sim 10^7$ K og er blevet opvarmet primært i forbindelse med gassens indfald og komprimering i hobens tyngdepotential. Denne væsensforskel på hobes udseende i de to bølgelængdeområder betyder, at der også er forskel på de metoder man anvender til at detektere hobene. Eksempelvis kan man i røntgen sjældent tillade sig den luksus at begrænse sig til at kigge på et bestemt interval i fotonenergier, når man skal detektere svage objekter. Dette skyldes ganske enkelt at der i forvejen ofte er meget få fotontællinger i de enkelte pixels i billederne. Man kan derfor ikke tillade sig at smide nogle af fotonerne væk, så her må bruges andre metoder (interesserede henvises til f.eks. [9], men det vil føre for vidt at komme ind på de tekniske detaljer her). Røntgenobservationer har til gengæld den fordel, at de stort set udelukker projektionseffekter, fordi tilstedeværelsen af store mængder varm, røntgenstrålende gas samtidig indikerer tilstedeværelsen af et dybt gravitationspotential og dermed en fysisk struktur i rummet. Med *ROSAT* og ikke mindst *XMM* og *Chandra* er røntgenobservationer derfor blevet et vigtigt værktøj til søgning efter fjerne hobe eller opfølgning på allerede detekterede kandidater.

Boks 1. Hvorfor er det interessant at finde fjerne galaksehobe?

Galaksehobe er interessante objekter af mange grunde, ikke mindst i kraft af det faktum at de er de største gravitationelt bundne strukturer i Universet. Men selvom mange nære galaksehobe efterhånden er ganske velstuderede og deres overordnede egenskaber forstået, kan antallet af kendte hobe med rødforskydninger $z > 1$ stadig tælles på to hænder. En af de vigtigste grunde til at lede efter sådanne hobe er, at deres egenskaber og rumlige fordeling sætter meget stærke bånd på kosmologiske modeller. Numeriske simulationer viser eksempelvis, at den rumlige tæthed af galaksehobe omkring en given (høj) rødforskydning afhænger stærkt af den samlede stofmængde i universet (se figur 5). Observationer og analyse af fjerne hobe kan derfor bidrage til en forståelse af Universets "startbetingelser" såvel som af dannelsen og udviklingen af strukturer frem mod de nære galakser og hobe, vi ser i dag.

De første resultater: En hobkandidat i røntgen/-infrarød?

Som et led i vores eget arbejde relateret til detektion af galaksehobe i CDFS blev der ud fra de infrarøde (IR) data fra NTT kompileret en foreløbig liste på 20 hobkandidater, på basis af ovennævnte farvemetode. Målet er så dels at undersøge hvad vi uafhængigt heraf kan finde af udstrakte røntgenkilder i *Chandra* dataene med forskellige teknikker, og dels at forsøge at korrelere de infrarøde hobkandidater med nogle af disse røntgenkilder. Pointen med sidstnævnte skridt er bl.a. at dette netop kan frembringe en uafhængig bekræftelse på, at IR-hobkandidaterne reelt *er* galaksehobe. Det stod dog med det samme klart at ikke alle 20 kandidater kunne være individuelle hobe, bl.a. fordi der var flere dobbeltdetektioner hvor den automatiserede detektionsproces havde fundet to hobe på stort set samme position.

De tre mest signifikante IR–kandidater viste sig at ligge indenfor et relativt lille område (et kvadratbueminut) – to af dem netop så tæt på hinanden at der formentlig reelt er tale om den samme hob. Som en første øvelse har vi derfor forsøgt at detektere udstrakte røntgenkilder i området omkring disse tre kandidater ud fra *Chandra* observationerne. Resultatet i form af røntgen-intensitetskonturer efter en "rå" baggrundsfratrækning er vist i figur 6 for den samlede *Chandra*–eksponering. Tæt på to af hobkandidaterne ses ganske rigtigt en røntgenkilde, med en udstrækning i størrelsesordenen 20 buesekunder. Men de to IR-kandidater ligger ved en omtrentlig rødforskydning på $z \simeq 0.8 - 0.9$, og selv i denne afstand ville en typisk hob fylde flere hundrede buesekunder. Den tredje IR-kandidat øverst i billedet er endog en anelse tættere på, så den kan umiddelbart heller ikke identificeres med røntgenkilden. Kilden er således næppe en hob, men dens natur er dog noget usikker; opfølgende Hubble-optagelser af feltet afslører et meget svagt objekt som i mangel af dybere data er blevet karakteriseret som en optisk svag spiralgalakse [10].

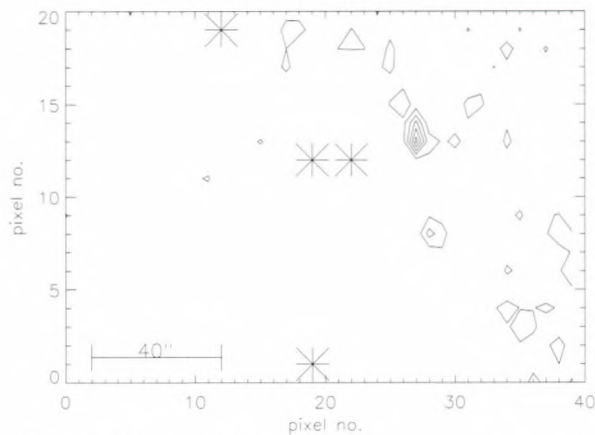
Det skal dog nævnes at figur 6 er produceret på basis af en "rå" sammenlægning af de individuelle *Chandra*–eksponeringer, uden at skele til at disse er taget med varierende *rotationsvinkel* af teleskopet. Det svarer lidt til at tage en serie billeder med et kamera, hvor man for hvert billede holder kameraet lidt mere skråt end det i foregående billede – og så til sidst lægge hele serien sammen til eet billede uden at tage hensyn til dette. Derfor kan man ikke umiddelbart slutte af figur 6, at der ikke synes at være nogen udstrakte røntgenkilder som kan kædes sammen med de "bedste" IR–hobkandidater. En langt mere omhyggelig analyse af røntgendataene må gennemføres, før vi kan udtale os om tilstedeværelsen og naturen af svage, diffuse røntgenkilder i dette område, og hvorvidt disse eventuelt kan identificeres med galaksehobe. Arbejdet er langt fra simpelt, ikke mindst fordi der kræves en god del forbehan-

dling af *Chandra* dataene for at få samlet de individuelle eksponeringer til eet enkelt billede som det fremstår i figur 2.

Status og fremtidigt arbejde

På nuværende tidspunkt er den oprindelige liste på 20 infrarøde hobkandidater reduceret til blot fire (ved bl.a. at eliminere de omtalte dobbeltdetektioner), hvoraf en er "dobbelthoben" i centrum af figur 6. På lidt længere sigt er det desuden tanken at forsøge at få spektroskopiske observationer af galakserne i de enkelte hobkandidater for at be- eller afkræfte at galakserne rent faktisk ligger ved nogenlunde samme rødforskydning (som man naturligvis ville forvente, hvis der var tale om en hob).

I forbindelse med røntgenanalysen skal vi som nævnt først have samlet *Chandra* dataene til et "pænt" billede, før vi kan begynde det omfattende arbejde med at afprøve forskellige metoder til detektion af udstrakte røntgenkilder og karakterisering af de detekterede kilder. Det er samtidig også planen at teste disse metoder på *XMM*'s data for Lockman-Hullet.



Figur 6. Røntgen-intensitetskonturer i den samlede 1 Ms *Chandra* eksponering af området omkring de tre mest signifikante IR-hobkandidater (de tre øverste '$*$'-er). Den nederste '$*$' er en fjerde, mindre signifikant hobkandidat. Den formelle usikkerhed på hobkandidaternes positioner er for overskuelighedens skyld ikke indikeret. Skalaen er markeret i buesekunder med en "lineal" nederst i billedet.

Vores arbejde med at detektere fjerne galaksehobe i røntgen og infrarød i de omtalte felter kan betragtes som et forstudie til et ambitiøst *XMM*–projekt, nemlig det såkaldte XMM Large-scale Structure Survey [11]. Dette sigter mod at kortlægge et 8 $\times$ 8 graders område på himlen med i alt 576 *XMM*–eksponeringer á 10 ks, dvs. i alt mere end to måneders eksponeringstid. De første data for den centrale del af feltet blev taget i juli–august i år, og næste serie forventes taget i februar–marts 2002. I dette projekt deltager danske forskere ved bl.a. Astronomisk Observatorium, og et af hovedformålene er netop at lede efter fjerne hobkandidater i røntgendataene og at følge op på disse med infrarøde optagelser. Nogle af forventningerne til projektet er illustreret i figur 5 i form af det forventede antal hobe i dette survey i forskellige kosmologiske modeller. Givet en tilstrækkelig høj succesrate i detektionen af især fjerne hobe kan dette projekt i sidste ende bidrage betydeligt til bestemmelsen af vigtige kosmologiske parametre, som f.eks. den gennemsnitlige stoftæthed – og dermed den samlede stofmængde – i Universet.

Referencer:

[1] P. Møller og J. P. U. Fynbo (2001) *Kvant*, 12. årg., nr. 2, s. 3.

[2] E. Boldt (1987) *Physics Reports*, bind **146**, nr. 4, side 215

[3] R. Gilli, M. Salvati og G. Hasinger (2001) *Astronomy & Astrophysics*, bind **366**, side 407.

[4] P. Tozzi m.fl. (2001) *Astrophysical J.*, bind **562**, side 42.

[5] J. Sommer-Larsen og M. Götz (2001), http://xxx.lanl.gov/abs/astro-ph/0109226

[6] http://www.eso.org/science/eis/index.html

[7] M. Nonino m.fl. (1999) *Astronomy & Astrophysics Supplement*, bind **137**, side 51.

[8] http://www.astro.utoronto.ca/~gladders/RCS/

[9] I. Valtchanov, M. Pierre og R. Gastaud (2001), *Astronomy & Astrophysics*, bind **370**, side 689.

[10] E. J. Schreier m.fl. (2001) *Astrophysical J.*, bind **560**, side 127.

[11] http://vela.astro.ulg.ac.be/themes/spatial/xmm/LSS/index_e.html

Jesper Rasmussen er ph.d.-studerende ved Astronomisk Observatorium og er tilknyttet en forskergruppe, der bl.a. arbejder med røntgenkosmologi (se www.astro.ku.dk/xcosmos/). Arbejdet beskrevet i denne artikel er under udførelse i samarbejde med Lisbeth F. Olsen og Kristian Pedersen ved Observatoriet.