

WATCH - et vidvinkel røntgenkamera.

Niels Lund og Søren Brandt
Dansk Rumforskningsinstitut.

På Dansk Rumforskningsinstitut i Lyngby er der udviklet et kompakt vidvinkel kamera, WATCH, til astronomiske observationer i røntgen området. WATCH står for "Wide Angle Telescope for Cosmic Hard X-rays", og har til formål at observere variable røntgenstjerner indenfor et stort felt på himlen.

Den foranderlige røntgenhimmel

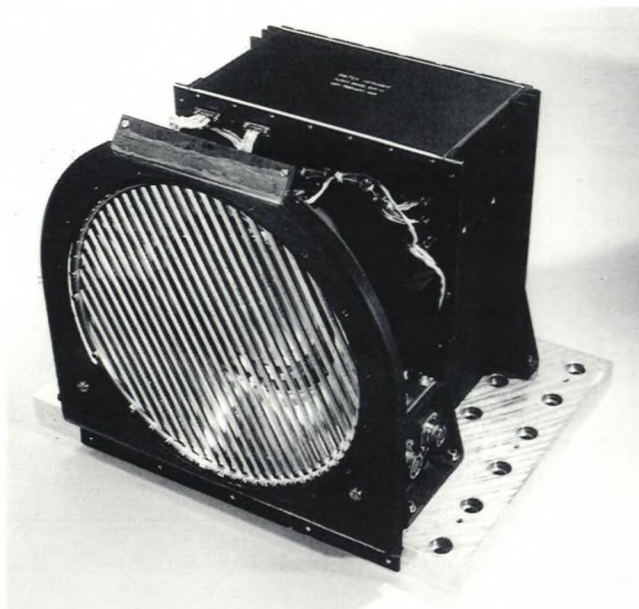
Stjernehimlen i røntgenstråling er meget forskellig fra den synlige stjernehimmel. De stjerner, som lyser stærkest i almindeligt lys er ganske uanselige i røntgenstråling, og omvendt: de typiske, stærke røntgenstjerner er næsten ikke til at få øje på i en normal kikkert. Den nærmeste stjerne, Solen, er normalt helt usynlig for et instrument som WATCH, men den kan dog en gang i mellem blusse op også i røntgenområdet, og - for nogle minutter - komme til at dominere røntgenhimlen, ligesom den dominerer den synlige himmel.

Det er karakteristisk for røntgenstjerner at de varierer voldsomt i lysstyrke indenfor kort tid. Det skyldes, at røntgenstråling kun udsendes fra stof som er meget varmere end gasserne i en almindelig stjerneatmosfære. På en stjerne som Solen, opstår sådanne varme områder lokalt i forbindelse med eksplosive begivenheder, "flares", men det opvarmede stof afkøles hurtigt, og røntgenstrålingen dør ud.

Eksistensen af egentlige røntgenstjerner kom som en fuldstændig overraskelse for den etablerede astronomi. Røntgenstjerner er en umulighed hvis man tager sit udgangspunkt i konventionelle stjernemodeller. Energifrigørelsen i stjernerne sker hovedsagelig ved fusion af lette atomkerner til tungere kerner. Fusion forudsætter både høj stoftæthed og høj temperatur. Disse forhold kan kun realiseres under stationære betingelser i centrum af en stor gasboble - en stjerne. Hvis denne gasboble skal være i hydrodynamisk ligevægt kan overfladetemperaturen ikke stige meget over 100 000 K. Ved sådanne temperaturer udsendes kortbølget ultraviolet stråling, men ikke røntgenstråling. Ergo - røntgenstjerner findes ikke!

Da vi så alligevel i begyndelsen af tresserne blev præsenteret for disse "umuligheder", blev vi tvunget til genvurdere forudsætningerne for ræsonnementet ovenfor. Løsningen kom gennem erkendelsen af at "kom-pakte" objekter, neutronstjerner og sorte huller, ikke kun var kuriositeter, opfundet af højtflyvende teoretikere, men normale, endda hyppigt forekommende, medlemmer af stjernernes talrige familie. Medvirkende til den almindelige accept af specielt neutronstjernernes realitet var opdagelsen af radiopulsarerne i 1968. Men selv i dag opfatter mange astronomer

sorte huller som ikke helt stuerene - den sædvanlige sprogbrug er stadig: "dette objekt er en troværdig sort hul kandidat", ikke: "dette objekt er et sort hul".



Figur 1. WATCH instrumentet vejer 11 kg og forbruger 12 W effekt. Det cirkulære gitter har en diameter på 25 cm og roterer under hele flyvningen med en omdrejning per sekund. Detektoren bag gitteret registrerer et lys- og skyggemønster hvis tidsforløb éntydigt angiver hvor røntgenkilderne befinder sig inden for synsfeltet.

Hvorfor er kompakte objekter så vigtige for forståelsen af røntgenstjernerne? Fordi energiudstrålingen per fladeenhed, ved de temperaturer som er nødvendige for termisk udstråling i røntgenområdet, er uhyrligt høj. Termisk udstråling vokser med 4. potens af temperaturen, så hvis man forestiller sig en stjerne af Solens størrelse med en temperatur på 10 000 000 K, i stedet for de faktiske ca 6000 K, ville udstrålingen langt overstige den totale udstråling fra alle andre stjerner i vores Galakse. Kun et meget lille objekt kan vedligeholde en overfladetemperatur på nogle millioner grader, og det endda kun, hvis objektet kan trække på energiressourcer der er fuldt sammenlignelige med hvad vi finder hos normale stjerner.

I det følgende skal vi omtale nogle af de modeller for røntgenstjerner som er resultatet af de sidste 30 års forskning indenfor røntgenastronomien.

Røntgenstjerner, som er i stand til at udsende stærk røntgenstråling over længere tid, har næsten altid vist sig at være dobbeltstjernesystemer (binære systemer) hvor en normal stjerne kredser om et meget kompakt objekt, f.eks.

en neutronstjerne eller et sort hul. Observerer vi systemet i synligt lys ser vi blot en normal stjerne, som går i bane omkring et massivt objekt. Dette er normalt usynligt med almindelige kikkerter. Røntgenstrålingen kommer ofte fra en glødende skive af gas, der cirkulerer omkring det kompakte objekt. En sådan skive udviser kraftig differentiell rotation; de inderste dele roterer langt hurtigere end de yderste (Keplers 3. lov). Den indre friktion i skiven kan, specielt meget nær det kompakte objekt, opvarme gassen til en temperatur på mange millioner grader, og den frigivne energi bliver så udstrålet i røntgenområdet. Skiven får stadig tilført nyt stof fra den normale stjerne, og stoffet i skiven falder gradvis ind mod det kompakte objekt og opsuges. Det er således fra tyngdefelterne omkring de kompakte objekter at de binære røntgenstjerner henter deres energi. Den glødende gasskive ses kun dårligt i synligt lys fordi den er meget lille, kun få hundrede km i diameter.

Om neutronstjerner og sorte huller.

En "standard" neutronstjerne har en radius på cirka 10 km og en masse lidt større end solens. Den gravitationelle bindingsenergi for atomer på overfladen af en neutronstjerne er ca 10% af atomets hvilemasse. Det er altså den energimængde der frigøres når atomerne regner ned på stjernens overflade. Til sammenligning kan det bemærkes, at den kerneenergi der frigøres ved fusion af heliumkerner til kul og ilt er under 1% af hvilemassen.

I modsætning til neutronstjernen har et sort hul ikke nogen fast overflade, men dets fysiske udstrækning karakteriseres af den såkaldte Schwarzschild-radius, som er proportional med hullets masse. Området indenfor Schwarzschild-radius kan ikke kommunikere med omverdenen, dvs her går "grænsen" for det sorte hul. Et sort hul på 5 solmasser har en Schwarzschild-radius på 15 km. Når stof opsluges af et sort hul frigives en endnu større brøkdel af hvilemassen end tilfældet er for neutronstjerner.

Hvis det kompakte objekt i det binære system er en neutronstjerne med et magnetfelt af størrelsen 10^8 Tesla, vil dette felt kunne forhindre opsamlingsskiven i at nå helt ned til neutronstjernens overflade. I en vis afstand fra overfladen vil de magnetiske kræfter være stærke nok til at tvinge det indfaldende ioniserede stof til at følge feltlinierne, således at stoffet herfra ledes ned mod neutronstjernens magnetiske poler. Det bliver i så fald ved polkalotterne, snarere end ved skivens inderkant at hovedparten af den potentielle energi omsættes til varme. Et sådan system udviser ofte karakteristiske pulsationer i røntgensignalet, disse skyldes at de glødende polkalotter periodisk roterer om på bagsiden af neutronstjernen.

Fra binære røntgenstjerner ser vi ofte hurtige og voldsomme udsving i lysstyrken; mængden af stof der

overføres fra den normale stjerne kan variere, der kan opstå hvirvler i det cirkulerende stof og der optræder ikke sjældent formørkelser, hvor det kompakte objekt med sin lysende gasskive forsvinder om bagved den normale stjerne. Svingningerne i røntgenstjernernes lysstyrke kan således give mange oplysninger om forholdene omkring neutronstjerner og sorte huller.

Helt ekstreme variationer i lysstyrken udvises af kilderne til de såkaldte kosmiske gammaglimt. (Se Holger Pedersens artikel herom i KVANT 1994 no 1) Det har været et hovedformål med WATCH projektet at foretage hurtige positionsbestemmelser af kosmiske gammaglimt for at muliggøre eftersøgning af optiske modparter til kilderne kort tid efter at gammaglimtet er observeret.

WATCH – detektoren

WATCH detektoren er vist på figur 1. WATCH er følsom for røntgenkvanter med energier mellem 9 og 150 keV. I dette energibånd er det ikke muligt at benytte linser eller spejle som vi kender det fra almindelige optiske kikkerter. Den eneste type kamera, der er anvendelig her, er en form for hulkamera eller skyggekamera. WATCH opbygger et billede af himlen ved hjælp af et roterende gitter. Synsfeltet har en åbning på 130° og dækker således ca en fjerdedel af hele himlen. Indenfor synsfeltet kan vi ved hjælp af det lys-og-skygge mønster, "modulationsmønster", der fremkaldes af det roterende gitter, bestemme positionen af klare røntgenstjerner med en nøjagtighed på ca $1/3^\circ$. Gitteret roterer med én omdrejning per sekund, så selv meget kortlevende røntgenudbrud, f.eks. fra gammaglimt, kan stedbestemmes.

Tællehastigheden for et WATCH instrument er typisk ca 500 røntgenkvanter per sekund. Størstedelen af kvanterne stammer fra den diffuse baggrund af røntgenstråling i rummet. Signalet fra kilderne udgør normalt kun nogle få procent af baggrunden. Dette ændrer sig fuldstændigt under et gammaglimt, her kan tællehastigheden fra en enkelt kilde stige til mange tusind per sekund.

WATCH instrumenter har været fløjet på to satellitter. Den første var den russiske satellit, GRANAT, den anden var ESA-satellitten, EURECA. GRANAT blev opsendt i 1989 med fire WATCH instrumenter om bord, satellitten fungerer stadig, omend reserveparterne af styregas næsten er opbrugt. EURECA er en "genbrugssatellit", beregnet til flere flyvninger med udskiftelig instrumentlast. Den første EURECA mission varede 11 måneder fra juli 1992 til juni 1993. EURECA bliver opsendt og bjerget igen med den amerikanske rumfærge.

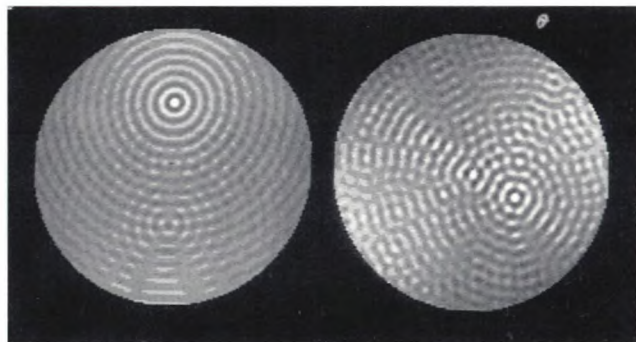
Mængden af data vi kan transmittere fra WATCH er ganske lav, kun ca 40 bits per sekund fra hver af de fire instrumenterne på den russiske GRANAT satellit og 100 bits per sekund fra det enlige instrument på EURECA satellitten. Det er derfor nødvendigt at foretage en omfattende databehandling og -kompression i instrumenterne. Den følgende beskrivelse illustrerer datafangsten på EURECA. Under rolige forhold transmitteres billeder af himlen (modulationsmønstre) i tre energibånd

hvert minut. Desuden transmitteres tællehastigheden, også i tre energibånd, med en tidsopløsning på nogle sekunder. Når der registreres et gammaglimt opsamles data med bedre tidsopløsning i en hukommelse, disse data transmitteres så i et roligt tempo når glimtet er overstået.

Når satellitten passerer de bæltet af intens partikelstråling, der er fanget i Jordens magnetfelt, stiger tællertallet voldsomt, og vi må afbryde målingerne indtil tællertallet igen er faldet til et mere normalt niveau.

Data fra GRANAT satellitten blev modtaget på en jordstation på Krim, herfra blev de hentet til Moskva og København med kurer. For at kunne foretage en hurtig dataanalyse var det nødvendigt selv at være til stede på jordstationen, kurerforbindelsen til København kunne til tider være meget langsom.

I sammenligning hermed var dataforsendelsen fra EURECA ekstremt effektiv. Alle data fra EURECA sendtes først til ESA's kontrolcenter i Darmstadt i Tyskland, herfra kunne vi efter ca. en halv time hente dem via de internationale datanetværk. Hver dag blev de nye data analyseret for at kontrollere aktiviteten af de kendte røntgenkilder og for at se om nye kilder var dukket op.



Figur 2. To billeder af himlen baseret på ca. 8 timers observation med WATCH-GRANAT. Billedet til venstre viser en meget stærk røntgenkilde, Sco X-1, i stjernebilledet Skorpionen. De koncentriske cirkler omkring kildens position er en karakteristisk ulempe ved denne type af skyggekamera. På grund af dette ringmønster er det ikke muligt, umiddelbart, at afgøre om der overhovedet er andre kilder i billedet. På billedet til højre er signalet fra Sco X-1 blevet subtraheret, og nu kommer en ny kilde frem: Cyg X-1, i stjernebilledet Svanen. Denne proces kan gentages nogle få gange mere før stjernen i restbilledet bliver for stærk.

Figur 2 viser et billede af himlen som WATCH registrerer det. Det ses at signalet fra en enkelt stærk kilde forårsager forstyrrelser over hele billedfeltet. Det er prisen for det meget simple detektorprincip, uden en egentlig billeddannende detektor. Vi opbygger et billede dækkende en fjerdedel af himlen på basis af et modulationsmønster med blot 256 målepunkter. Det må naturligvis gå galt! Fordelen er, at vi er i stand til hurtigt

at lokalisere den stærkeste punktkilde indenfor synsfeltet med en nøjagtighed på under en grad ud fra en minimal datamængde. Vi kan godt studere mere end én kilde ud fra et givet mønster. Analysen foretages så som en stadig gentaget proces: først findes positionen og styrken af den kraftigste kilde, så subtraheres det tilsvarende signal fra det samlede mønster, og restmønsteret analyseres igen for at se om der er flere kilder. På denne måde er det ofte muligt at identificere fire-fem kilder i et mønster.

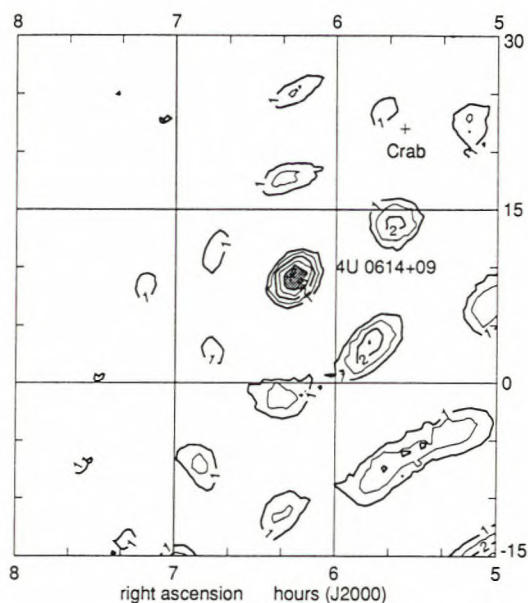
De svagere kilder træder først klart frem efter længere tids observation. For at studere disse kilder må vi derfor addere data fra mange dage, og her må vi naturligvis tage hensyn til at satellitten drejer sig i rummet, således at stjernerne flytter sig indenfor vores synsfelt.

Resultater

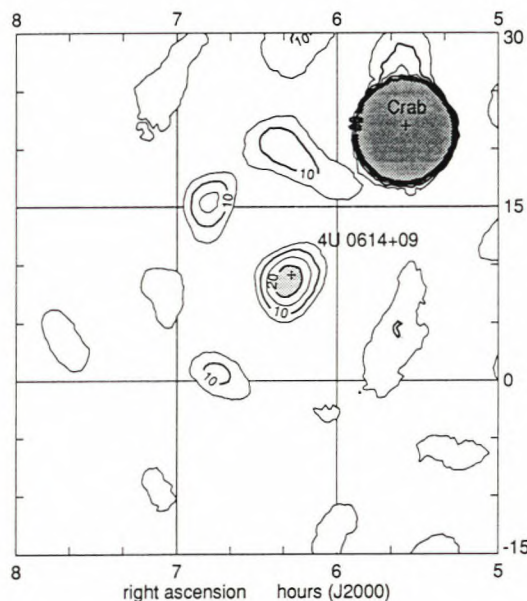
I det følgende vil vi hovedsageligt omtale resultater opnået med WATCH instrumentet på EURECA. I de første måneder efter opsendelsen var WATCH rettet mod de centrale områder i vores Mælkevej. Dette var et lykkeligt tilfælde, for EURECA's orientering i rummet er dikteret af andre forhold end vore observationsønsker, specielt nødvendigheden af at få sollys på solpanelerne. Mælkevejens centrum er meget interessant for os, fordi der her findes særligt mange røntgenstjerner, både stabile og tidsvariable.

På Kvants forside er gengivet to himmelkort omfattende de centrale dele af vores Mælkevej. Kortene er opbygget på basis af data fra EURECA-WATCH fra perioden august til oktober 1992. Det øverste kort viser røntgenhimlen ved lave energier: 8-15 keV. Det nederste kort svarer til højere energier: 15-150 keV. Bemærk hvordan flertallet af røntgenkilderne samler sig omkring Mælkevejens plan. Bemærk også hvor forskellige kilderne er i henseende til energifordelingen i strålingen. De fleste kilder har et "blødt" spektrum, dvs. de taber meget hurtigt i styrke når vi bevæger os opad på energiskalaen. Undtagelserne er den stærkeste røntgenkilde i Cygnus (Cyg X-1, et formodet sort hul), den ejendommelige røntgentransient GRS 1915+10 (omtalt nedenfor) samt en kilde nær Mælkevejens centrum (formodentlig også et sort hul).

I den periode vi observerede Mælkevejens centrum blev fem nye røntgenkilder observeret, disse har fået navne som: "EU 1841-40", hvor EU står for EURECA, og tallene angiver kildens position på himlen: rektascension 18 timer 41 minutter, deklination -40° . WATCH registrerede også usædvanlig kraftig variation af flere af de kendte røntgenkilder. I dagene umiddelbart før opsendelsen af EURECA var en ny, stærk røntgenkilde, blevet opdaget med WATCH instrumenterne på GRANAT satellitten. Denne kilde, kaldet GRS 1915+10, var så heldigt placeret på himlen at WATCH-EURECA kunne følge den kontinuert i mere end tre måneder fra begyndelsen af august 1992. Desværre lykkedes det ikke i første omgang, trods en stor indsats med optiske teleskoper på Jorden, at finde den tilsvarende optiske stjerne, da den



Figur 3. WATCH himmelkort af et område på $45^\circ \times 45^\circ$ omkring 4U 0614+09 kilden. Billedet rummer ialt 3 minutters data fra 3 røntgenglimt i foråret 1993.



Figur 4 Himmelkort af samme område som Fig. 3, men baseret på cirka 3 måneders observationer. Den meget stærke kilde er Krabbetågen (Crab), men også 4U 0614+09 træder frem som en permanent kilde med en styrke svarende til 2.5% af Krabbetågens.

tilsyneladende ligger skjult bag nogle af de tætte støvskyer som der er mange af i Mælkevejen. Men senere er en meget interessant variabel radiokilde, tilsyneladende med nogle meget usædvanlige radiojets blevet fundet i samme retning.

Røntgen udbrud fra 4U 0614+09

Nogle røntgenkilder udviser kortvarige, men kraftige, udbrud af røntgen stråling (røntgenglimt). Intensiteten vokser måske 1000 gange nogle få sekunder. Strålingen falder så til det normale i løbet af cirka et minut. Intervallet mellem de kraftige udbrud kan variere fra under en time til flere uger.

I modsætning til de mystiske gammaglimt er disse røntgenglimt relativt velforståede. Kilderne til røntgenglimt er altid neutronstjerner i kredsløb om en let stjerne med masse omtrent som Solens. Neutronstjernens magnetfelt skal være lavt, hvilket for neutronstjerner vil sige mindre end 10^4 Tesla. I sådanne tilfælde kan der opstå en instabilitet i det tynde lag af stof som neutronstjernen har opsamlet fra sin makkerstjerne. Under opsamlingen forbrændes de indfaldende brintkerner løbende til helium. Når dette lag af helium opnår en kritisk tykkelse sker der en eksplosivt forløbende omdannelse til tungere grundstoffer. Denne eksplosion observerer vi som et glimt af røntgenstråling.

De fleste kendte kilder til røntgen glimt i vores Mælkevej er lokaliseret omkring Mælkevejens centrum. WATCH detektoren er ikke følsom nok til at observere røntgen glimt fra så fjerne kilder. (ca. 30000 lysår herfra). Imidlertid har vi opdaget fire glimt fra en gammelkendt røntgenkilde, 4U 0614+09, der ikke tidligere var sikkert

identificeret som kilde til røntgenglimt. Styrken af disse udbrud gør det sandsynligt at 4U 0614+09 er den nærmeste kendte glimtkilde i en afstand mindre end 10000 lysår. Det første udbrud blev observeret med WATCH-GRANAT i januar 1990, og det var en af de første rigtigt interessante begivenheder efter at WATCH var blevet "køreklar" tidligere samme måned. Stedbestemmelsen af kilden med en nøjagtighed bedre end 1° gjorde det ganske sikkert at udbruddet kom fra 4U 0614+09. Denne var nemlig, indenfor vores fejlcircel, den eneste permanente røntgenkilde der var stærk nok i sin konstante udstråling til at udsende et røntgenglimt af den observerede styrke. De tre øvrige udbrud fra denne kilde blev alle observeret med WATCH på EURECA indenfor cirka en måned i foråret 1993. Se figur 3.

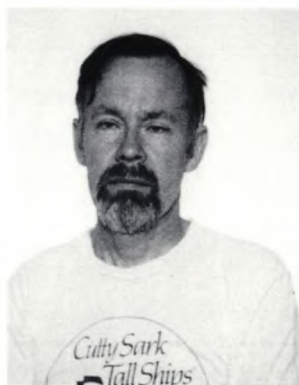
Med WATCH-EURECA var det også muligt at observere den permanente udstråling fra 4U 0614+09 som vist i figur 4. Vi kan bruge de 3 glimt til at illustrere energiregnskabet i den model, der er skitseret ovenfor. Vi vil sammenligne energien i den permanente udstråling og energien i glimt. Dette forhold skal nemlig svare til forholdet mellem den gravitationelle bindingsenergi på overfladen af en neutronstjerne og energien vundet ved kerneforbrænding af helium i det opsamlede overfladelag. Et problem i analysen er dog at vi ikke kunne observere kilden kontinuert med WATCH. EURECA var i et lavt (620 km) kredsløb om Jorden, og Jorden dækkede derfor udsynet en periode hvert omløb. Observationerne blev også fra tid til anden afbrudt af satellittens passager gennem strålingsbælterne. Derfor kan der have været udbrud, som vi ikke observerede, men vi kan bruge simple statistiske argumenter. Kilden var i synsfeltet fra midten af jan-

uar til slutningen af april '93 og med en effektivitet på ca. 40% svarer det til 40 dages observationstid. Derfor er den gennemsnitlige tid mellem to udbrud ca. 14 dage, hvilket faktisk svarer til intervallet mellem de observerede udbrud. Så måske har vi ikke mistet nogle udbrud imellem dem vi så. Hvis vi antager det, så bliver forholdet mellem den permanent udstrålede energi over en 14 dages periode og energien i et glimt cirka 100. Det svarer ganske nøje til, at den gravitationelle energi frigjort ved stoffets nedfald på neutronstjernens overflade er cirka 100 gange større end den frigjorte kerneenergi ved forbrænding af helium til kul og ilt.

Har WATCH en fremtid?

Der arbejdes til stadighed på at fremstille bedre detekortyper, så ethvert instrument bliver før eller siden overhalet af udviklingen. I dag er det muligt at oplagre langt

flere data ombord i satellitterne end for ti år siden, og det giver muligheder for at bygge vidvinkelkameraer med bedre følsomhed end WATCH. Så vi skal nok ikke forvente at se WATCH flyve igen ombord på en ny satellit. Men måske beslutter ESA at flyve EURECA igen, og det kan måske give WATCH en ny chance, fordi instrumentet kan gøres flyveklar med en begrænset arbejdsindsats. WATCH har dog egenskaber som stadig gør den konkurrencedygtig i forbindelse med mikrosatellitter. Mikrosatellitter er ofte spinstabiliseret, dvs. de udnytter gyroskopvirkningen til at bevare en stabil stilling i rummet; det er en simpel og effektiv metode. De nye typer vidvinkelkameraer bliver rundtossede af at sidde på sådan en platform, men WATCH har det fint, instrumentet kan ligefrem forenkles i forhold til dem, vi har fløjet på GRANAT og EURECA. Så helt skal vi måske ikke lægge WATCH på hylden.



Niels Lund er mag.scient i fysik og ansat på Dansk Rumforskningsinstitut. Har interesseret sig for sammensætningen af den kosmiske stråling og røntgenastronomi.



Søren Brandt er Ph.D i astronomi fra KU 1994 på arbejde med røntgendata fra WATCH. Efter en ansættelse ved DRI arbejder han nu som research fellow ved European Space Technology Center i Holland.