

Astronomi utan synligt ljus

Josefin Larsson

De första riktigt övertygande bevisen för att svarta hål existerar kom från observationer av en ljuskälla i stjärnbilden Svanen på 1970-talet. Svarta hål hade förutsagts av Einsteins allmänna relativitetsteori redan i början av 1900-talet, men både Einstein själv och majoriteten av forskarsamhället hade länge trott att de bara var en teoretisk kuriositet. Upptäckten att de faktiskt existerar gjordes tack vare att man observerade himlen med röntgenteleskop. Med hjälp av röntgenteleskopen framträdde ljus som vi tidigare inte kunnat se. Idag vet vi att det faktiskt är svarta hål som ligger bakom de flesta ljuskällor vi ser när vi observerar röntgenstrålning från universum. Detta hade ingen förutsagt när man började med astronomiska röntgenobservationer i slutet av 1940-talet.

Röntgenkällan i Svanen, ett svart hål som vi astronomer kallar Cyg X-1¹, är ett bra exempel på hur stora forskningsgenombrott har skett inom astronomin. De största framstegen sker oftast när nya observationsmetoder blivit tillgängliga, i det här fallet röntgenteleskop, och i många fall så har upptäckterna varit oväntade. Upptäckten av Cyg X-1 är också ett utmärkt exempel på grundforskning, det vill säga när någonting utforskas utan att det i förväg bestämts vad det ska leda till.

¹ Cyg X-1: Cyg står för Cygnus ("svanen" på latin) och X-1 betyder att det är den starkaste röntgenkällan i stjärnbilden.

Observationen bekräftade en av förutsägelseerna från relativitetsteorin och förändrade samtidigt vår bild av universums innehåll. Även om framsteg i grundforskningen ofta saknar omedelbara praktiska tillämpningar så kan de vara så fundamentala att de påverkar hela vår världsbild. Astronomins historia innehåller flera sådana exempel. Allra mest känt är kanske motsättningarna med den katolska kyrkan som bottnade i att astronomiska observationer visat att jorden rör sig runt solen. Pionjären Galileo Galilei dömdes till husarrest på livstid efter att ha gjort sina iakttagelser kända. Sedan dess har vi även lärt oss att solen är en väldigt alldaglig stjärna och att vi bor i en vanlig galax i ett expanderande universum som bildades för över 13 miljarder år sedan. Det är inte heller något speciellt ovanligt med att solen har planeter.

En viktig lärdom från astronomins historia sedan 1900-talets mitt är att vi bara ser en väldigt liten del av universum i synligt ljus. I det här kapitlet kommer jag att berätta om vad vi lär oss om universum när vi observerar det på andra sätt. Jag kommer att fokusera på höga energier, så kallad röntgen och gammastrålning, där svarta hål och andra typer av extrema objekt framträder. Dessutom kommer vi in på de alldeles nya observationerna med gravitationsvågor som börjat ge resultat de senaste åren. Samtidigt ger historien om upptäckterna en intressant inblick i vilka olika faktorer som ligger bakom stora genombrott i forskningen. Innan vi kommer till observationer vid höga energier så behöver vi dock påminna oss om vad ljus är och vad vi ser på himlen i synligt ljus.

Ljus och astronomi med synligt ljus

Astronomi är en observationell vetenskap. De experimentella verktyg som används i andra vetenskaper är med andra ord inte tillgängliga. Vi kan inte flytta på gasmoln, plocka isär en planet i sina beståndsdelar eller höja temperaturen i en stjärna för att se vad som händer. Istället måste vi försöka svara på våra frågor genom att observera universum på olika sätt. Den allra vanligaste signal vi observerar är ljus. Ljus kan beskrivas som en våg som färdas genom universum med en hastighet på tre hundra tusen kilometer per sekund. Avståndet mellan två toppar

i vågen kallas våglängd och denna är i sin tur kopplad till ljusets energi. Ju kortare våglängd desto högre energi.

Våra ögon är känsliga för ljus med våglängder mellan ungefär 400 och 700 nanometer. Detta är med evolutionens hjälp väl anpassat till solen, som strålar som starkast i samma intervall. De kortaste våglängderna ser de flesta av oss som blått och de längsta ser vi som rött. En del djur ser ljus som ligger något utanför vårt synliga intervall. Det finns till exempel fåglar och insekter som ser ultraviolett ljus med kortare våglängder och fiskar som ser infrarött ljus vid längre våglängder. Oavsett om man är fågel, fisk eller människa ser man dock bara en bråkdel av allt ljus som når oss från universum. Det ljus som har längst våglängder kallas radiovågor. De längsta våglängder som observerats med radioteleskop är ungefär 10 meter, vilket motsvarar energier som är mer än en miljon gånger lägre än synligt ljus. I den andra extremen så observerar vi istället ljus med våglängder så korta som 10^{-20} meter, vilket motsvarar närmre en biljard så mycket energi som synligt ljus. Den här extrema strålningen kallar vi för gammastrålning. Det enda som skiljer radiovågor, gammastrålning och allt ljus däremellan är energin. Ljus med olika energier har helt enkelt fått olika namn på grund av historiska anledningar kopplade till hur den upptäcktes, detektionsmetoder och användningsområden.

Astronomiska observationer i det smala lilla våglängdsintervall som våra ögon är känsliga för går av naturliga anledningar långt tillbaka i historien. Natthimlen är som bekant full av ljuskällor som vi ser utan att ens behöva använda teleskop, och de första nertecknade stjärnkartorna är över tre tusen år gamla. En speciellt intressant historisk observation gjordes av kinesiska astronomer år 1054. De noterade en "gäststjärna" som plötsligt dök upp och lyste tillräckligt starkt för att synas mitt på dagen. Ljusstyrkan avtog sedan med tiden tills "stjärnan" inte längre gick att se. Vad de hade sett var i själva verket en exploderande stjärna, en så kallad supernova. När vi idag observerar positionen som kineserna antecknade ser vi den spektakulära krabbnebulosan, som utgör resterna av stjärnan som exploderade just 1054.

Att kunna observera en supernova med blotta ögat tillhör minst sagt

ovanligheterna. Det vanligaste objekt vi ser när vi tittar på himlen är stjärnor. Stjärnor är gasklot som till allra största delen består av väte. De lyser på grund av den energi som frigörs när lättare grundämnen slås tillsammans till tyngre. Genom denna så kallade fusionsprocess slås väte ihop till helium, helium till kol och syre, och så vidare. Utan stjärnor hade vi bara haft väte och helium i universum. När vi tittar på natthimlen ser vi med andra ord signaturen av hur tyngre grundämnen bildas.

Med blotta ögat ser vi framförallt närbelägna stjärnor i vår egen galax, Vintergatan, men också några andra galaxer, som helt enkelt är avlägsna, stora samlingar av stjärnor. Om man har tur kanske man också ser någon av de närbelägna planeterna som lyser på grund av reflekterat solljus. När vi istället observerar himlen med ett bra teleskop för synligt ljus, ser vi mest galaxer.

Bild 1 som tagits med rymdteleskopet Hubble visar just detta. Området i bilden motsvarar bara en tiondel av fullmånens diameter. Med blotta ögat ser vi nästan ingenting alls i det här området, men med hjälp av Hubble ser vi närmre tio tusen galaxer med olika storlekar, färger och former.

Nästan alla grundläggande läroböcker i astronomi börjar med att introducera just den här typen av astronomi i synligt ljus. Vi får lära oss hur ett optiskt teleskop fungerar och om stjärnors egenskaper. Men detta är bara en väldigt liten del av det som idag ryms inom astronomin. Vi har numera teleskop och instrument för att observera himlen i alla våglängder, från radio- till gammastrålning. Intressant nog öppnar sig ett helt annorlunda universum när vi går till de energirika kortare våglängderna.

Röntgenstrålning från universums mest extrema platser

De flesta associerar nog röntgenstrålning med medicinsk diagnostik, men röntgenstrålning är helt enkelt mycket kortvågig strålning som produceras vid höga temperaturer. Den studerades först av fysikern Wilhelm Röntgen i slutet av 1800-talet. Sett i historiens ljus är det kanske överraskande att röntgenstrålning kom att användas inom sjukvår-

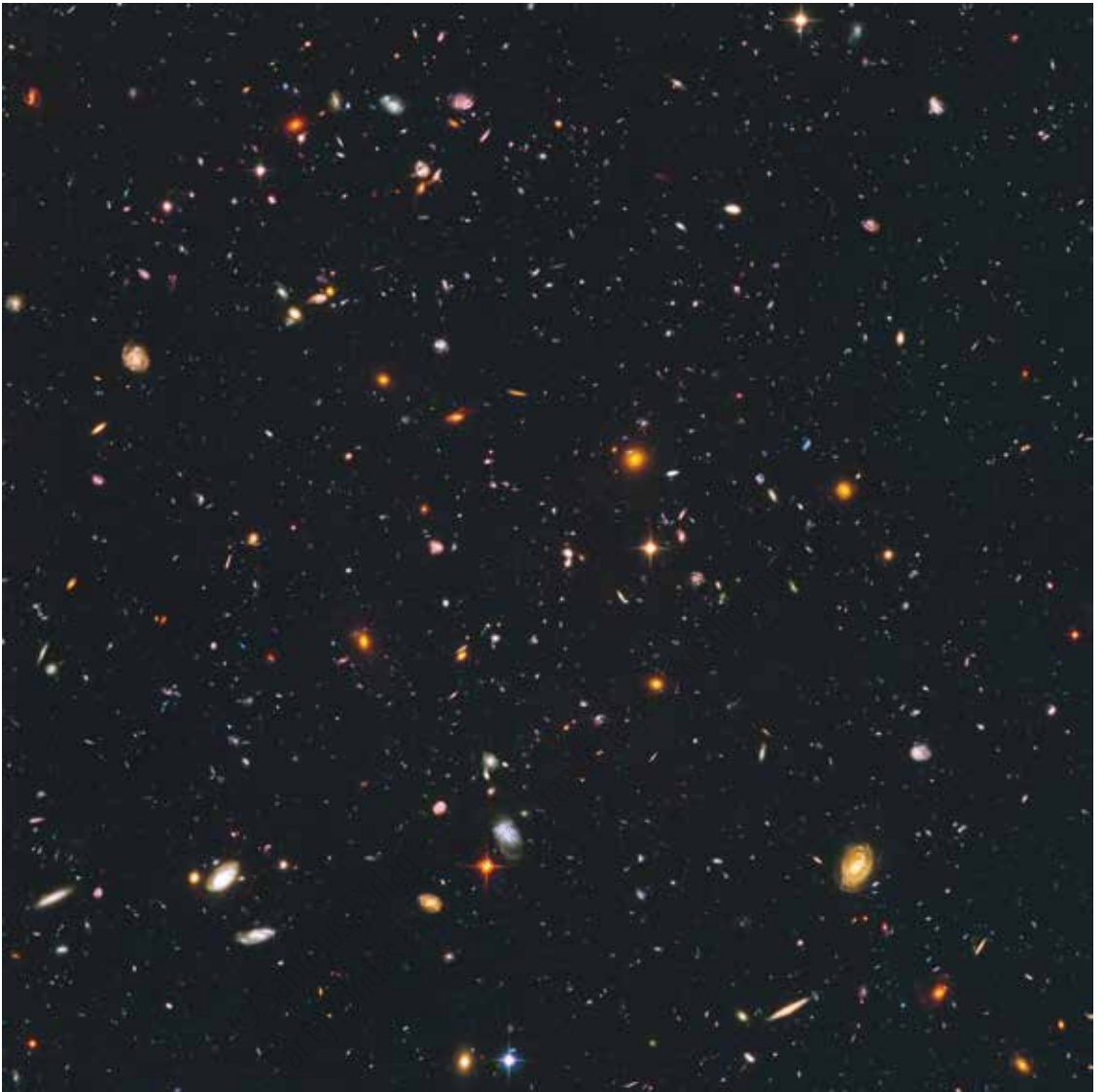


Bild 1. Hubble ser galaxer galore.

Bild: NASA, ESA, and S. Beckwith (STScI) and the HUDF Team

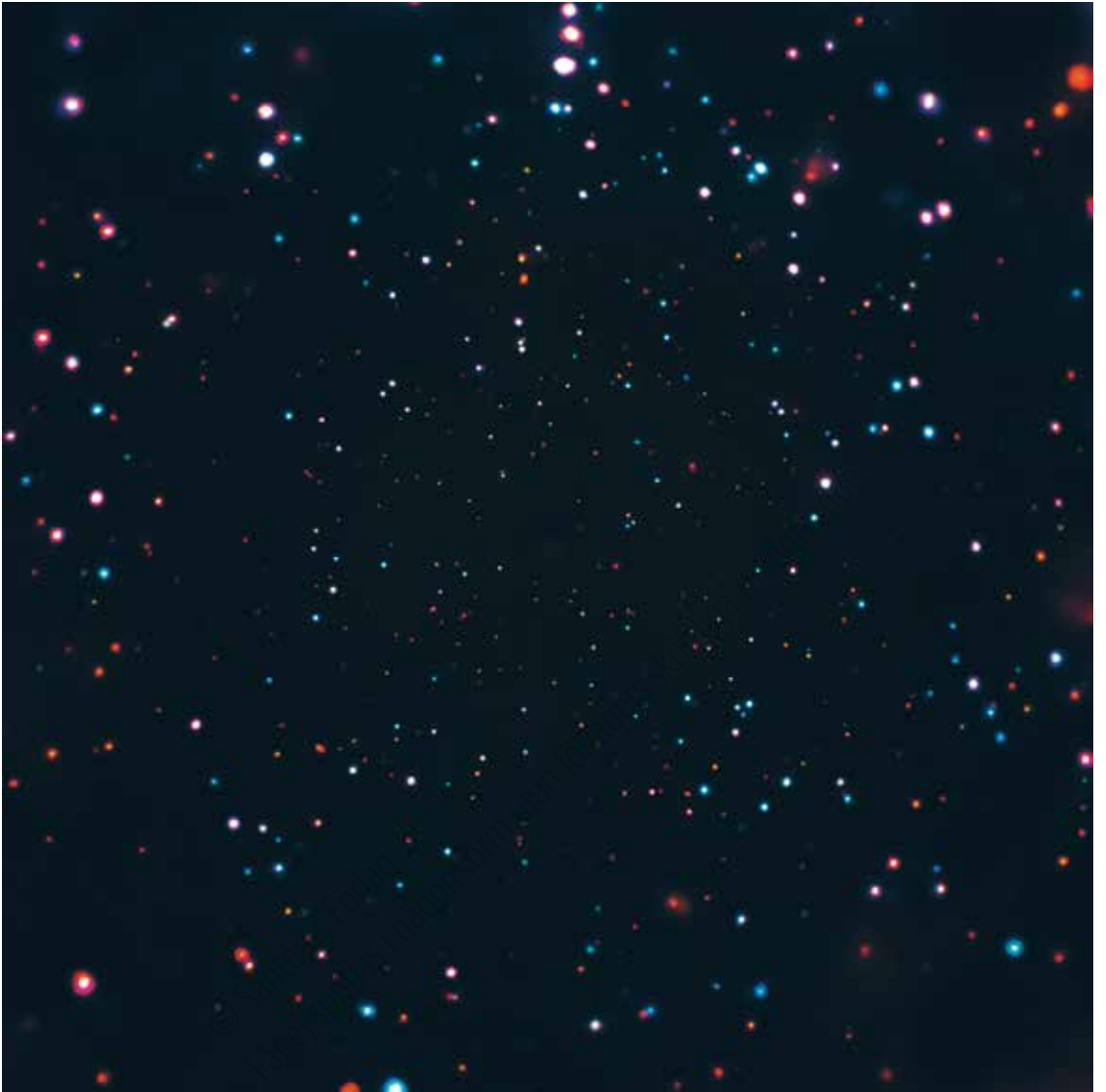


Bild 2. Chandra Deep Field-South, eller CDF-S. X-ray/bild: NASA/CXC/Penn State/B.Luo et al.

den, men det utgör ett av många exempel på hur grundforskning inom fysik har lett till viktig medicinsk diagnostik. De flesta har också fått lära sig att det inte är bra att röntga sig för ofta eftersom det ökar risken för att den energirika strålningen orsakar skador. Just därför är det en förutsättning för liv på jorden att röntgenstrålning från universum stoppas av atmosfären. Detta innebär dock också svårigheter för astronomer, som måste ta sig upp högt i eller ovanför atmosfären för att kunna göra observationer med röntgenteleskop. Detta kräver raketer, ballonger eller satelliter. Röntgenastronomins första stapplande steg sammanfaller därför med att dessa tekniker blev tillgängliga.

De första astronomiska röntgenobservationerna utfördes med hjälp av små raketer i slutet av 1940-talet. Det var riskfyllda experiment där man skickade upp raketer som bara kunde observeras ovanför atmosfären några minuter. Sedan hoppades man på att hitta sina instrument oskadda på marken efter kraschlandningen. Den första källa man observerade under dessa flygningar var solen. Röntgenstrålningen från solen kommer från den så kallade koronan – en region med en temperatur på över en miljon grader som ligger utanför den del av solen vi ser med synligt ljus. Beräkningar visade att man på liknande sätt borde kunna se svag röntgenstrålning från andra närbelägna stjärnor. Inga andra röntgenkällor förutsades och man konstaterade att det inte fanns någon poäng med att satsa på förbättrade röntgenobservationer. Trots de dystra förutsägelseerna så fanns det några hängivna astronomer som fortsatte med sina raketer. De hittade något mycket mer intressant än närbelägna stjärnor. De upptäckte att ett objekt vid namn Sco-X1 lyste ungefär 1 000 gånger starkare än solen i röntgen. Idag vet vi att Sco-X1 är ett extremt kompakt objekt, en så kallad neutronstjärna, som håller på att dra till sig gas från en vanlig stjärna. Detta blev startskottet för röntgenastronomi.

Mycket av det vi ser när vi observerar himlen med röntgenteleskop är på ett eller annat sätt kopplat till kompakta objekt. Dessa är slutprodukterna av stjärnor. För att förstå hur kompakta objekt bildas behöver vi gå tillbaka till stjärnorna som lyser upp natthimlen med synligt ljus på grund av sina fusionsprocesser. Fusionen hindrar nämligen också

stjärnor från att kollapsa. Vår sol, som är en ganska typisk stjärna, har en massa på nästan 2×10^{30} kg eller 333 000 jordklot. En så stor massa innebär att en stark gravitationskraft verkar för att dra ihop stjärnan. Denna kraft balanseras av det tryck som uppstår på grund av energin som frigörs i fusionen. Fusionen kan dock inte hålla på i all oändlighet. Antingen tar bränslet slut i den del av stjärnan som har tillräckligt hög temperatur, eller så bildar stjärnan järn, vilket är slutpunkten för hur tunga grundämnen man kan bilda med fusion. I båda fallen kommer stjärnan att börja dra ihop sig när fusionen tar slut. För de allra tyngsta stjärnorna leder kollapsen dessutom till en supernova.

För att en stjärna ska explodera som en supernova behöver den ha en massa som är minst åtta gånger större än solens. Så massiva stjärnor är ovanliga, och i en galax som Vintergatan väntar man sig bara en explosion ungefär vart hundra år. Den senaste supernovan som vi observerat i Vintergatan inträffade i början av 1600-talet² och det börjar bli hög tid för en ny. En sådan supernova skulle vara en fantastisk möjlighet för astronomer, som idag är utrustade med betydligt bättre teleskop än man hade när det begav sig på 1600-talet. I en supernova slungas de yttre delarna av stjärnan iväg, medan den allra innersta delen kollapsar till en neutronstjärna eller ett svart hål. Precis som namnet antyder består en neutronstjärna till största delen av neutroner. Det finns inga objekt i universum som ens kommer i närheten av att vara så kompakta som neutronstjärnor. En tesked av en neutronstjärna har ungefär lika stor massa som Mount Everest och ytgravitationen är över hundra miljarder gånger starkare än på jorden!

Neutronstjärnor kan lysa i röntgenstrålning av flera olika anledningar: för att de har höga temperaturer, för att de har starka magnetfält eller för att de håller på att dra till sig gas. Det senare var till exempel fallet för den berömda Sco-X1. En annan mycket känd neutronstjärna finns i de innersta delarna av krabbnebulosan (kom ihåg supernovan som de kinesiska astronomerna noterade år 1054). ”Krabban” är den

² Keplers ”stjärna” 1604 var faktiskt en helt annan typ av supernova som beror på att en så kallad vit dvärg exploderar. En massiv stjärna exploderade troligen i Vintergatan kring 1670 (Cassiopea A), men den missade vi på jorden.

starkaste stadigt lysande ljuskällan i röntgen och används flitigt för att kalibrera röntgenteleskop. Det är till och med vanligt att använda krabban som en enhet för att mäta ljusstyrka. Så kommer det sig att man kan höra astronomer prata om att olika röntgenkällor lyser med så eller så många ”millikrabor”.

Trots att tätt packade neutroner kan stå emot starka gravitationskrafter så finns det gränser även för vad de kan klara av. Om massan blir alltför stor kommer neutronstjärnan att kollapsa och slutdestinationen är oundvikligen ett svart hål. Ett svart hål är helt enkelt ett objekt som har så stark gravitation att inte ens ljus kan ta sig därifrån. Vi har därför ingen möjlighet att observera vad som finns innanför den så kallade händelsehorisonten. Detta gör onekligen svarta hål till ganska konstiga objekt, och det är därför inte förvånande att de har blivit så populära i filmer och böcker. I praktiken är svarta hål emellertid inte alls så mystiska som de ofta framställs i populärkulturen. Det är till exempel helt och hållet rutinmässigt för astronomer att mäta både massor och rotation för svarta hål. Som en illustration kan man tänka sig den hypotetiska (och helt orealistiska) situationen att solen plötsligt blir ett svart hål. Jorden kommer då helt enkelt fortsätta i sin bana och en utomjordisk astronom skulle kunna bestämma massan hos det svarta hålet genom att kartlägga jordens bana. För att märka av några underliga relativistiska effekter eller sugas in i ett svart hål så behöver man komma mycket, mycket nära. Jorden i sin bana runt det svarta hålet (före detta solen) skulle inte vara i närheten av att påverkas av några sådana effekter.

Exemplet med solen och jorden visar hur vi indirekt kan observera svarta hål genom att studera banor hos närbelägna objekt. Svarta hål ”syns” dessutom när gas håller på att falla in i dem. När stora mängder gas faller in mot ett svart hål eller ett annat kompakt objekt lägger sig gasen nämligen i en roterande skiva, en *ackretionsskiva*, som blir mycket het. Den heta skivan ger upphov till stark röntgenstrålning. Precis detta ser vi i så kallade *röntgenbinärer*. Dessa system består av en vanlig stjärna och ett kompakt objekt som rör sig runt varandra på mycket kort avstånd. Om gas från den vanliga stjärnan överförs till

det kompakta objektet uppstår stark röntgenstrålning. Detta är precis vad som händer i röntgenkällan Cyg-X1, som på 1970-talet gav det första övertygande beviset för att svarta hål existerar. Från den vanliga stjärnans periodiska rörelse kunde man räkna ut att massan hos det kompakta objektet var för stor för att vara en neutronstjärna. Den enda möjligheten som återstod var ett svart hål.

Vi känner idag till ett 20-tal liknande svarta hål i vår galax. De tros alla ha bildats i samband med att stjärnor har kollapsat. Det finns dock också betydligt större svarta hål, så kallade supermassiva svarta hål. Astronomins definition på *supermassiv* innebär här massor som är större än en miljon gånger solens massa. Hur svarta hål med så stora massor har bildats vet vi ännu inte. Till skillnad från de små svarta hålen så finns det bara ett supermassivt svart hål i varje galax. Det sitter dessutom precis i centrum av galaxen. När gas faller in mot sådana massiva svarta hål så syns de på mycket stora avstånd i universum. Majoriteten av alla ljuskällor som vi ser när vi tittar på himlen med röntgenteleskop är just sådana supermassiva svarta hål.

Detta är precis vad vi ser i bild 2. Den är tagen av röntgenteleskopet Chandra med en total exponeringstid på hela 81 dagar. Arean av himlen som täcks är bara två tredjedelar av fullmånens storlek, men på grund av den långa exponeringstiden ser vi tusentals svarta hål i bilden. De flesta av dessa befinner sig på mycket stora avstånd. Om man jämför med bilden i synligt ljus tagen av Hubble är det uppenbart att vi ser en radikalt annorlunda bild av universum när vi tittar med ett röntgenteleskop. Istället för en massa galaxer och stjärnor är det svarta hål och neutronstjärnor vi ser. Till skillnad från det ljus som uppstår på grund av fusionsprocesser, ser vi här ljus som skickas ut när gas faller in mot de kompakta objekten.

Gammablixtar – om hur säkerhetspolitik bidrog till astronomin

Om vi förflyttar oss till de allra högsta energierna, gammastrålningen, dominerar himlen till stor del av samma typer av objekt som i röntgen, även om det delvis är andra processer som ger upphov till strålningen. Ett speciellt intressant fenomen är gammablixtar, vars uppträckt egent-

ligen är en politisk historia. I början av 1960-talet skrev USA, Sovjet och Storbritannien på ett avtal om förbud mot tester av kärnvapen på marken, i haven och i rymden. För att försäkra sig om att Sovjet inte bröt mot det sistnämnda skickade USA upp ett antal militära satelliter. Dessa hade detektorer som var känsliga för den gammastrålning som man väntade sig från kärnvapentester. Några kärnvapen i rymden upptäckte man dock aldrig. Istället upptäckte man astronomiska gammablixtar.

Som namnet antyder så är en gammablixt ett kortvarigt utbrott av gammastrålning. Utbrotten varar mellan bråkdelar av en sekund till ett par minuter. Under den korta tiden frigörs lika mycket energi som solen avger under hela sin livstid. Efter att ha förbryllat astronomer i årtionden vet vi idag att gammablixtarna kommer från smala utflöden som rör sig rakt emot oss med hastigheter mycket nära ljusets. Dessa utflöden är troligtvis en signal från alldeles nybildade svarta hål. Som en följd av detta kan gammablixtar uppstå i samband med vissa supernovor och även när neutronstjärnor kolliderar. Eftersom blixtarna är så ljusstarka kan vi se dem på mycket stora avstånd. Ljuset från den mest avlägsna gammablixt man har observerat skickades ut när universum bara hade uppnått 4 procent av sin nuvarande ålder.

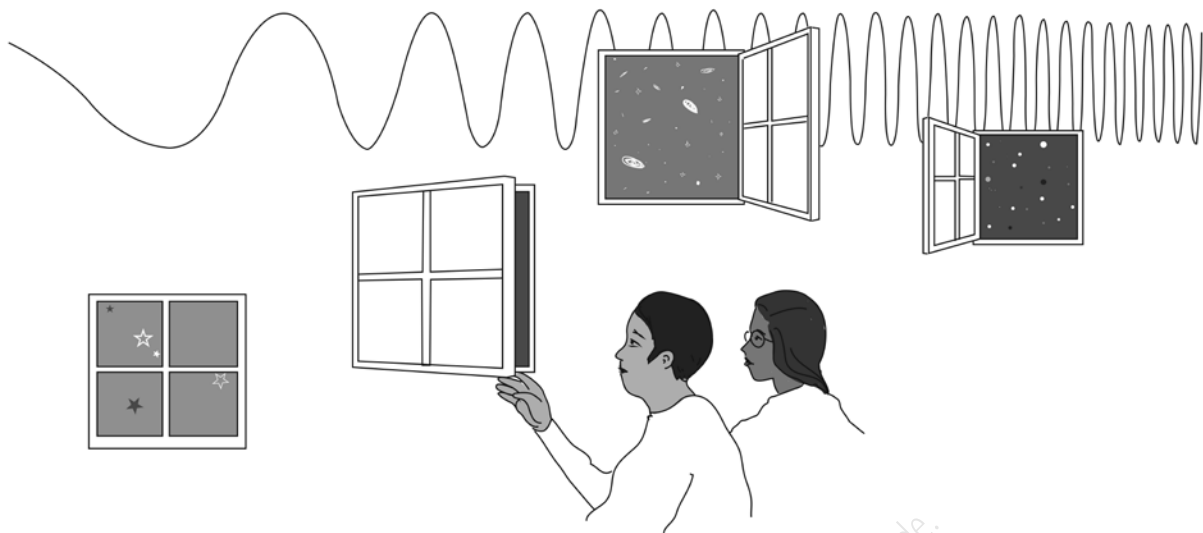
Gravitationsvågor – det allra senaste fönstret mot universum

Röntgen- och gammaastronomi är unga forskningsfält om man jämför med optisk astronomi. De är dock närmast historiska när man jämför med gravitationsvågor, där de alla första observationerna gjordes år 2015. Gravitationsvågor är vågor i själva rumtiden som gör att rummet tänjs och komprimeras. De skiljer sig alltså fundamentalt från ljus. De starkaste gravitationsvågorna produceras när kompakta objekt är inblandade i dramatiska händelser, som exempelvis att två svarta hål kolliderar. Det var just en sådan signal som LIGO-detektorn i USA observerade år 2015. Signaturen var precis som man hade väntat sig, och upptäckten belönades med Nobelpris år 2017. Den ovanligt korta tiden mellan upptäckt och Nobelpris visar både hur betydelsefull och hur tillförlitlig den observerade signalen var. Hittills har en handfull

liknande sammanslagningar av svarta hål rapporterats. På grund av hur LIGO-detektorn är konstruerad kan den inte se sammanslagningar av supermassiva svarta hål. De flesta svarta hål den har observerat har dock haft större massor än de små svarta hål vi ser med röntgenobservationer i vår egen galax. De största massorna hos de senare är runt 20 solmassor, medan LIGO sett så höga massor som 60 solmassor. Det verkar som att vi nu med hjälp av gravitationsvågor ser toppen på isberget av en hittills okänd population av svarta hål.

I augusti år 2017 togs ännu ett stort kliv framåt. LIGO observerade för första gången gravitationsvågor från två neutronstjärnor som slogs ihop. Detta sammanföll dessutom med observationer av ljus! Ungefär en sekund efter att gravitationsvågorna hade detekterats observerades en kort gammablixt. Detta väckte intresset hos astronomer runt hela jorden, och inom kort observerades händelsen i alla våglängder från radio till optiskt till röntgen. Runt 70 olika teleskop på jorden och i rymden pekade till slut alla samtidigt mot samma plats på himlen. Detta innebar att de flesta astronomer kände till händelsen fastän den officiellt var hemlig under de två månader det tog innan LIGO presenterade sina resultat.

Upptäckten är ett fantastiskt exempel på så kallade *multi-messenger-observationer*, där de olika observationerna alla bidrog med olika information om fysiken. Från gravitationsvågorna kunde massorna hos neutronstjärnorna bestämmas. Samtidigt bekräftade gammaobservationerna att korta gammablixtar kommer från just sammanslagning av neutronstjärnor, medan de optiska observationerna visade att tunga grundämnen som guld och silver bildades i kollisionen. Det har idag, mindre än ett halvår senare, redan publicerats över hundra artiklar om den här händelsen. De flesta av dem nämner att detta är början på en ny era inom astronomin. Ännu vet vi dock inte hur vanlig eller ovanlig just den här signalen var. Möjligen hade vi en enorm tur som såg en så närbelägen sammanslagning just nu, men kanske kommer vi se mängder av liknande händelser i framtiden.



Vad finns det kvar att upptäcka?

Som exemplen ovan visar kan vår bild av universum ändras dramatiskt när vi öppnar nya områden för observationer. Från observationer av röntgen, gamma och gravitationsvågor har vi sett hur svarta hål och neutronstjärnor bildas, växer och kolliderar. Trots sina exotiska namn och egenskaper så visade sig dessa objekt vara väldigt vanligt förekommande i universum. För astronomer så utgör de också en fantastisk möjlighet att studera stjärnors slutfaser. Eftersom dessa objekt erbjuder både extremt starka gravitationsfält, magnetfält och höga hastigheter kan de också fungera som ett slags naturliga laboratorier för att testa fysik i extrema miljöer som inte kan återskapas här på jorden.

Historien om astronomiska observationer vid höga energier har också lärt oss något om förutsättningarna för stora forskningsgenombrott. Ibland när vi utför nya typer av observationer hittar vi precis det som teorierna förutsade. Gravitationsvågor från svarta hål som slås ihop är just ett sådant exempel. Upptäckterna av gammablixtar och röntgenstrålning från svarta hål visar dock att vi också hittar saker som ingen hade förutsagt. I själva verket har många av de allra viktigaste framstegen i astronomi varit helt oväntade. Detta visar på vikten av att helt enkelt utforska nya områden även när det saknas teoretiska förutsägelser för vad man kan tänkas se.

De stora framstegen inom astronomi är också starkt kopplade till teknikutveckling. För att överhuvudtaget kunna studera röntgen- och gammastrålning behövs satelliter. Den banbrytande upptäckten av gravitationsvågor krävde en mätprecision på 10^{-20} , vilket har uppnåtts med ingenjörskonst på hög nivå. Nya tekniker i kameror och detektorer ligger bakom de flesta stora framsteg. Alla dessa förbättringar leder också till att datamängden växer, vilket ställer nya krav på datahantering och analysmetoder. Just observationstekniker och analysmetoder är områden där astronomin på ett direkt sätt kopplar till andra forskningsområden och praktiska tillämpningar. Kopplingarna går på båda hållen och teknik som utvecklats för astronomi har fått tillämpningar i allt från digitalkameror till trådlösa nätverk.

Slutligen kan man ställa sig frågan om vad har vi kvar att upptäcka när vi observerat i alla våglängdsområden och öppnat alla tänkbara ”fönster” mot universum. En sak vi kan göra är att helt enkelt gå djupare, med bättre upplösning för såväl bilder, spektra och tidsserier. Drastiska förbättringar i dessa avseenden kan få liknande effekter som att öppna upp nya våglängdsområden för observationer. Det kanske enklaste exemplet är att bygga ett betydligt större teleskop som samlar in mer ljus. Vi kommer då se mängder av objekt som var för ljussvaga för att se med våra gamla teleskop och som kommer ge oss nya insikter om universum. **A**

JOSEFIN LARSSON

är docent i astronomi vid Kungliga Tekniska högskolan. Ledamot i Sveriges unga akademi 2017–2022.