

Molekyler berättar om Universum

Onsala rymdobservatorium firar

60-årsjubileum 2009

Carina M. Persson &
Åke G. Hjalmarson

Onsala rymdobservatorium har sedan grundandet 1949 bidragit till att lösa Universums gåtor. Atomer och molekyler kan användas som mätsonder och strålning från dem ger oss information om Universum: hur stjärnor och galaxer bildas och utvecklas, och vilka egenskaper de har. Studier av stjärnors bildande kräver observationer med radioteleskop i stället för optiska teleskop, eftersom stjärnor föds inuti stora, kalla och täta gasmoln som effektivt absorberar allt synligt ljus. Idag har över 160 molekyler säkert detekterats i rymden, varav många är stora och komplexa. Vägen till dessa upptäckter har gått såväl via teknisk utveckling av stora radioantennor och radiomottagare, som genom utveckling av nödvändig molekylfysik och spektroskopi.

Inledning

Oändligt. Tyst. En stjärnklar natt kan man se tusentals stjärnor. Med en kikare kan man se ännu fler av alla hundratals miljarder stjärnor, som hör hemma i vår egen galax Vintergatan.

Frågorna om Universum och vårt ursprung lämnar få oberörda. Hur stort är Universum egentligen? Vad finns därute? Har Universum alltid sett likadant ut eller finns det en början? Ett slut? Hur föds stjärnor och galaxer och hur ser deras utveckling ut? Vad har gjort vår egen existens möjlig och finns det liv på andra planeter?

En del av svaren har astronomerna, som arbetar med att utforska och förstå Universum. Man lär sig allt mer om hur Universum tillkommit, hur stjärnor föds och utvecklas och, inte minst, om hur rymdens kemi och fysik påverkat vår utveckling här på jorden.

År 1609 togs det första steget mot modern astronomisk forskning av Galileo Galilei, och detta firas i år genom att FN utlyst 2009 som det internationella astronomiåret. Galileo använde sig av det då nyuppfunna teleskopet, som han själv vidareutvecklade, och tittade för första gången i människans historia ut mot rymden, utan att ha en aning om vad han skulle se. Han såg fläckar på solen, att vår grannplanet Venus uppvisar faser precis som månen, att det fanns kratrar på månen och han upptäckte att Jupiter har månar som kretsar kring Jupiter och inte kring jorden.

Allt detta blev starten på en vetenskaplig revolution som förändrade hela vår världsbild. Vi bebodde inte längre universums centrum utan blev plötsligt bara en liten del i ett mycket stort, förmodligen oändligt, universum.

Lade grunden för all modern astronomiforskning

Galileos upptäckter och tillvägagångssätt blev också starten på den experimentella astronomin – från och med denna tid så måste *teori stämma överens med noggrant utförda observationer*. Detta är grunden för all modern forskning. Ju noggrannare observationer, desto mer information kan vi få om universum. Ett fundamentalt verktyg i Galileos framgångar var naturligtvis hans teleskop. Utan teleskop hade astronomiforskningen varit mycket begränsad. Men fler upptäckter väntade.

År 1800 upptäckte William Herschel att vår sol även emitterade infraröd strålning utöver det vanliga synliga ljuset. På 1870-talet visade dessutom James Clerk Maxwells ekvationer att elektromagnetisk strålning finns vid alla våglängder. Några år senare visade Heinrich Hertz experimentellt att radiovågor verkligen existerar, vilket inspirerade Guglielmo Marconi och Karl Ferdinand Braun att utforska deras användning. I år är det hundra år sedan dessa radioteknikens pionjärer tilldelades Nobelpriset i fysik för sina insatser för utvecklingen av trådlös telegrafi.

Ljusets egenskaper – ett första steg

På 1800-talet började man dessutom förstå ljusets egenskaper. Upptäckten att varje atom och molekyl har ett eget spektralt ”fingeravtryck”, det vill säga strålning vid specifika våglängder inom ett mycket smalt våglängdsband, har varit oerhört viktig för forskningen. När elektronerna ändrar läge sänds/absorberas strålning vid en våglängd som bestäms av energiskillnaden mellan de inblandade tillstånden. Molekyler kan dessutom vibrera och rotera i kvantiserade tillstånd och därigenom sända/absorbera ännu mer långvågig strålning än när elektronerna ändrar läge. Man kallar tillståndsändringarna för övergångar och dessa ger upphov till spektrallinjer.

Radioastronomin föds

Men fanns det då någon anledning att bygga detektorer för längre våglängder än infraröd strålning för observationer av rymden? Svaret gavs av radioingenjören Karl Jansky i början av 1930-talet när han för Bell Telephone Laboratories studerade störningar på radiokommunikation. Han observerade då för första gången radiostrålning från vår hemgalax Vintergatan. För Jansky var kosmiska radiovågor störningar för kommunikationssystemen, medan situationen idag är den omvända – dessa system medför störningar för radioastronomin vilket allvarligt begränsar astronomiska radioobservationer.

Janskys upptäckt öppnade dörren för ett helt nytt universum eftersom andra typer av objekt och fysikaliska processer strålar i



Fig. 1. Onsala rymdobservatoriums 25,6-meterteleskop som invigdes 1965 för observationer av centimeter- till decimeter-långa radiovågor.



Fig. 2. Astronomer från hela världen använder Onsala rymdobservatoriums 20,1-meterteleskop. Det invigdes 1976 för observationer av centimeter- och millimeterlånga radiovågor. Teleskopet är skyddat för väder och vind av radomen. I ungefär 10 år var detta världens största teleskop för observationer av millimetervågor, och det spelar fortfarande en viktig roll inom radioastronomin.

radioområdet jämfört med optiskt/IR. Radioastronomin tog dock inte fart förrän efter andra världskriget då pionjärer och ingenjörer började använda ”överblivna” radarantennor och mottagare. I Onsala utanför Göteborg grundade Chalmersprofessorn Olof Rydbeck år 1949 Onsala rymdobservatorium, som sedan 1990 är en nationell anläggning för radioastronomi. I Kosmos 2008 kan man läsa om dessa tidiga år i ”Olof Rydbeck och den tidiga svenska radioastronomin: En personlig reflektion av V. Radhakrishnan” och i Kosmos 1983 kan man läsa om ”Interstellära molekylnmoln och stjärnbildning” av Å. Hjalmarson och A. Winnberg.

När de första pionjärerna inom radioastronomin tittade på himlen i radiovågor så hade man nog ingen aning om vad man skulle se, hur starka signalerna kunde vara, eller på vilka våglängder man borde observera. I början observerade man mest på våglängder längre än 10 cm, som den överblivna krigsutrustningen var byggd för. I USA hade man även börjat bygga radarutrustning för 1,3 cm våglängd, men detta visade sig senare vara ett stort misstag eftersom vattenångan i vår atmosfär har en starkt absorberande spektrallinje vid precis denna våglängd.

Inom radioastronomin idag observerar man allt från meter till sub-mm (tiondelar mm) vågor med markbaserade teleskop och satelliter. Ofta bygger man de markbaserade teleskopen högt upp i bergen för att få bättre observationer och för att mycket strålning inte kommer ner till marken över huvud taget eftersom den effektivt absorberas av atmosfären.

Från Onsala till Atacamaöknen

Onsala rymdobservatorium (OSO) har idag två teleskop med diametrarna 25 och 20 meter i Onsala utanför Göteborg för observationer av dm och cm, respektive cm och mm-vågor. Dessutom är OSO delägare i 12-meterteleskopet APEX (Atacama Pathfinder Experiment) tillsammans med ESO (European Southern Observatory) och Max Planck Institut für Radioastronomie i Tyskland. APEX togs i bruk 2005 och är ett av de högst belägna teleskopen i världen: på 5100 meters höjd i Atacamaöknen i Chile. Där observeras mm och sub-mm vågor som är helt omöjliga att detektera från Onsala.

Odin – ett svenskt satellitprojekt

Ett annat projekt OSO deltagit i är Odinsatelliten som är en svenskbyggd liten satellit med 1,1 m spegel. Odin observerar sub-mm vågor som inte går att utföra med markbundna teleskop. Samarbetspartners här är rymdstyrelsen i Sverige, Frankrike, Kanada och Finland.

Odin sköts upp 2001 och har sökt efter vattenånga och molekylärt syre vid 0,5 och 2,5 mm i vår egen och andra galaxer. Idag är Odin fortfarande i bruk, men utför sedan 2007 endast astronomiobservationer av bland annat ozon, kolmonoxid och vatten i jordens atmosfär. Odins resultat har varit viktiga för planeringen av observationer med ESA:s (European Space

Agency) nya, stora rymdteleskop som sändes upp i maj 2009: Herschelrymdobservatoriet. Detta teleskop kommer att användas för undersökningar av det interstellära mediet, bildandet av stjärnor och planetsystem, den kemiska sammansättningen hos kometer och planeter, liksom galaxernas utveckling. För första gången någonsin kommer ett teleskop kunna observera hela våglängdsområdet från infrarött till sub-mm (0,06-0,7 mm).

Ny spännande forskning med LOFAR

Byggandet av en LOFAR-station (LOw Frequency ARray) 2010 i Onsala med två fält med 96 stycken dipolantennerna kommer att leda OSO tillbaka till långvågiga observationer. Dessa fält kommer att ingå som en del av ett nät av många teleskop där ett antal europeiska länder medverkar med centrum i Holland. Med interferometritekniken (se s 38) ska atomer och molekyler, bland annat den kända 21-cm linjen från väte, observeras i tidiga universum, vilket får dem att bli rödförskjutna till meterlånga vågor.

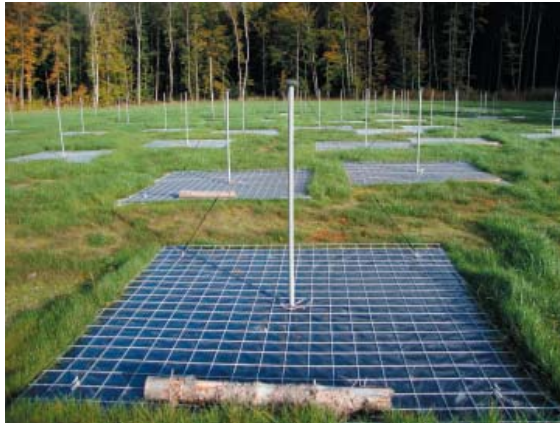


Fig. 3. LOFAR (Low Frequency Array) är ett nytt, stort system av enkla dipolantennerna på flera olika platser i Europa. Onsalas station kommer att byggas år 2010.

Unikt laboratorium i rymden

I denna artikel kommer vi att ge några exempel på radioastronomisk forskning med fokus på utvalda delar av det arbete som genomförts vid Onsala rymdobservatorium från dess grundande 1949 och 60 år framåt. Här observeras molekyler i rymden vilka genom åren har visat sig vara mycket effektiva mätsonder av Universum. Genom deras emission/absorption kan man till exempel kartlägga fysikaliska förhållanden i den nästan tomma rymden mellan stjärnorna – *det interstellära mediet (ISM)* – i både vår egen och andra galaxer.

Det interstellära mediet utgör ett unikt kemiskt och spektroskopiskt laboratorium eftersom den låga densiteten och temperaturen gör att molekyler som är kemiskt ostabila och reaktiva här på jorden naturligt finns i rymden. Många ”radiomolekyler”, t ex CH och HCO⁺, upptäcktes i ISM långt innan de detekterades

på jorden. Till exempel gjordes mikrovågsspektroskopin för den reaktiva CN-molekylen i rymden 1970 – sju år innan den kunde genomföras i ett jordiskt laboratorium.

Genom observationer av molekyler kan astronomer få information om täthets- och massfördelningar, temperaturstruktur, magnetfält via molekyllinjernas Zeemanuppplåtning, gasrörelser via Dopplereffekten, samt även molnens laddningstäthet (jonisationsgrad) genom förekomsten av molekyljoner. Allt detta kan ge oss kunskap om stjärnors födelse, liv och död liksom även galaxers uppkomst och utveckling.

Kontinuerlig strålning över ett mycket brett våglängdsband från stjärnbildande områden, gamla stjärnor, upphettat stoft i det interstellära mediet, gas- och stoftdiskar kring nybildade stjärnor, och galaxer observeras också vid Onsala rymdobservatorium. Detta kommer dock inte att behandlas i denna artikel som fokuserar på molekyler, deras spektrallinjer och stjärnbildning.

Hur bildas stjärnor?

Stjärnor möjliggör livets uppkomst genom att de bildar alla andra grundämnen tyngre än litium genom fusion av lätta grundämnen i sitt heta inre: väte blir till helium i proton-protonkedjan, helium blir till kol och syre i trippel-alfaprocessen som kräver temperaturer på över 100 miljoner grader, kol blir till syre, magnesium, natrium och neon ($T > 500$ miljoner grader) och så vidare. De tre lättaste grundämnena bildades själva några minuter efter Big Bang.

Stjärnorna har därmed en nyckelroll både för att bygga upp den komplexa kemi som finns överallt i Universum och för livets uppkomst. Denna kemi påverkar i sin tur bildandet av nya stjärnor och planeter – en process som äger rum i de tätaste klumparna av jättelika gasmoln i det interstellära mediet, som oftast hittas i spiralarmarna i vår galax. Fysikaliska förhållanden som densitet, temperatur, strålning och magnetfält påverkar dessutom kemien i ISM i hög grad. Om man förstår hur olika molekyler reagerar på dessa parametrar så kan de ge oss värdefull information om desamma.

Stjärnbildningsprocessen - svår att studera

Stjärnbildningens tidiga stadier är svåra att studera eftersom de äger rum djupt inne i de tätaste och mörkaste molnen, som effektivt absorberar det synliga ljuset från de nybildade stjärnorna. Om man däremot observerar i infrarött ljus så kan man se strålning från upphettade stoftkorn i det omgivande molnet. Dessutom kan man observera spektrallinjer från atomer och molekyler som befinner sig på olika djup i gasmolnet. Detta ger oss möjlighet att observera olika lager av det stjärnbildande området.

Men molekylerna är inte bara ovärderliga mätsonder för oss astronomer utan även viktiga för stjärnorna själva. Utan dem så skulle det faktiskt vara omöjligt för dagens stjärnor att kunna bildas. I radioastronomins barndom visste man ännu ingen-

ting om detta. Man visste inte ens att det fanns molekyler ute i rymden.

Redan 1755 hade den preussiska filosofen Immanuel Kant föreslagit att stjärnor kunde bildas genom att ett gasmoln drar ihop sig. Men hur detta kunde fungera i rymdens tomrum var svårt att förklara. Tidiga förslag före 1850-talet om att solen bestod av ett särskilt material som fick den att lysa gick inte heller att bevisa. I slutet av 1800-talet föreslog Lord Kelvin och Hermann von Helmholtz en process där gravitationell energi sakta omvandlades till strålning när solnebulosan krympte. Detta skulle ge vår sol en maximal ålder av högst 100 miljoner år. Denna teori blev dock motbevisad i början av 1900-talet då kärnfysikens fader Ernest Rutherfords studier av radioaktivt sönderfall visade att jorden var betydligt äldre än så.

Tunneeffekten - en nyckelupptäckt

Det var i stället kvantmekaniken som gav svaren i slutet av 1920-talet och början av 1930-talet. George Gamow upptäckte tunneeffekten som förklarar hur alfapartiklar lämnar atomkärnan. I slutet av 1930-talet visade Hans Bethe och Carl Friedrich von Weizsäcker arbeten den reaktion som dominerar vår egen sols energiproduktion: proton-protonreaktionen. Dessutom fann de, oberoende av varandra, en annan reaktionskedja som fungerar vid ännu högre temperaturer i mer massiva stjärnor: CNO-cykeln. Här deltar kol i fusionen som katalysator. Bethes bidrag för förståelsen av stjärnors energiproduktion gav honom Nobelpriset i fysik 1967.

Dessa arbeten hade nu visat att stjärnor har ett ändligt liv eftersom gasen i fusionsprocesserna inte kan räcka för evigt. Frågan var då: hur föds stjärnorna? Det naturliga svaret var givetvis genom gravitationens inverkan. Men vid den tiden trodde man att det interstellära mediet hade oerhört låg densitet – många gånger lägre än vårt bästa vakuum på jorden. I ett sådant medium blir det svårt, rentav omöjligt, att bilda stjärnor och dessutom borde det vara helt omöjligt för molekyler att existera.

Ändå så upptäcktes de första diatomära molekylerna CN (cyanidradikal), CH (metylcyanid) och CH⁺ (kolvätejonen) under 1937-1941 genom sin absorption av synligt och ultraviolett ljus. Detta visade att enkla molekyler faktiskt kunde existera trots den mycket låga densiteten. De flesta molekyler strålar dock i radioområdet genom rotationsövergångar i den kalla rymden så deras upptäckter fick vänta tills tekniken för radiomottagare utvecklats efter andra världskriget. Den molekylära radioastronomin sägs starta 1963 då OH-molekylen (väteoxid) detekterades.

Täta och iskalla gasmoln - en sentida upptäckt

Men fortfarande visste man inget om de täta gasmoln som finns i vår galax förrän ammoniak (NH₃) upptäcktes 1968. Då kom äntligen bevisen på att det fanns stora och mycket täta interstellära gasmoln överallt i vår Vintergata som genom gravita-

tionell kollaps kan bilda stjärnor. Vi får dock inte glömma att när astronomer talar om täta moln så är densiteten ändå bara jämförbar med våra bästa vakuum på jorden: ca en miljon partiklar per kubikcentimeter.

Det fanns dock fler problem med teorierna för stjärnbildning. Det är nämligen inte bara tätheten i molnet som är viktigt utan även temperaturen som behöver vara riktigt låg, helst inte mer än 10 K. Men när ett stort, kallt och tätt gasmoln kollapsar under sin egen tyngd genom gravitationen, så stiger temperaturen så småningom. Denna temperaturökning skapar ett ökat tryck utåt och därmed kommer kollapsen att avstanna om gasmolnet inte på något sätt kan bli av med sin ökande temperatur.

Hjälpen kommer i form av molekyler – molekylerna omvandlar kinetisk energi till strålning och därmed kan temperaturen hållas konstant i ett tidigt skede och kollapsen fortsätter. När temperaturen stiger i senare skeden av kollapsen är tätheten tillräckligt hög för att fusionsprocesserna kan starta. Observationer av molekyler som kyler det stjärnbildande området kan alltså ge mycket värdefull information om hur själva stjärnbildningsprocessen går till.

De viktigaste molekylerna och atomerna i kylningsprocessen är H_2 (molekylärt väte), C^+ (joniserat kol), C (kol), O (syre), Si^+ (joniserat kisel), CO (kolmonoxid), OH och H_2O (vatten). Men vägen till de första detektionerna av dessa och andra molekyler var svår på grund av att det fattades både teknik och molekylfysik. Man behövde först utveckla och bygga en ofta komplicerad teknisk utrustning för att kunna ta emot de extremt svaga radiosignalerna på bästa sätt. Sedan kom nästa problem när man skulle kunna tolka vad man observerat och identifiera signalerna.

Hur upptäcker man molekyler i rymden?

Observationer av de långa radiovågorna är inte enkla. Det finns två stora problem: signalerna som är extremt svaga, och de långa våglängderna som omöjliggör användandet av normal optik. I stället måste man bygga radiomottagare, det vill säga i stället för optik använder man elektronik. De observerade signalerna behöver dessutom förstärkas kraftigt och mottagarna behöver kylas till några få Kelvin för att själva inte orsaka strålning som är många gånger starkare än det som ska observeras.

Ett annat bekymmer är vinkelupplösningen som är många gånger sämre i radioområdet eftersom den beror på två parametrar: våglängden och teleskopets diameter. Korta våglängder och stora teleskop ger bra upplösning medan långa våglängder och mindre teleskop ger sämre upplösning. Stora teleskop är bra även för att de samlar in mer ljus än små. Problemet är bara att bygga tillräckligt stora teleskop som har bra yt noggrannhet och samtidigt inte är större än att de går att styra. De största styrbara teleskopen idag är strax över 100 m i diameter och finns i Greenbank, USA och Effelsberg, Tyskland.

Det finns dock ett alternativ som ger mycket hög upplösning: interferometri. Med denna teknik används flera teleskop samtidigt och skapar på så sätt ett artificiellt större teleskop. Antingen är de lokaliserade på samma plats eller så kan de vara stationerade runtom i världen. Då är det möjligt att få extremt hög upplösning. Observationerna måste också noggrant synkroniseras med hjälp av atomklockor. VLBI (Very Long Baseline Interferometry) observationer har varit en viktig del av verksamheten på OSO sedan 1960-talet. Redan år 1968 deltog OSO i det första transatlantiska interferometri-experimentet. Idag ingår rymdobservatoriet i EVN (European VLBI Network) som har en upplösning av några millibågsekunder, och även i globala VLBI-mätningar med ännu bättre upplösning. Observatoriet deltar också i utvecklingen av e-VLBI-tekniken (electronic VLBI) som sänder data i realtid över internet med hastigheter av 1-4 Gbps.

Dopplereffekten påverkar signalerna

När man väl har teknik som kan observera svaga radiosignaler så återstår nästa problem – att tolka vad man ser. Oftast är inte alla övergångar för en molekyl kända och observerade i laboratorier på jorden så fullständig information om vilovåglängder kan saknas. Dessutom så har de observerade källorna ute i rymden en egen hastighet relativt jorden vilket får spektrallinjerna att dopplera förskjutas. Linjernas observerade våglängd blir då förflyttade relativt sin vilovåglängd (laborativ våglängd). Om inte källans hastighet är känd blir det alltså betydligt svårare att säkert identifiera en signal.

Även om källans hastighet är känd så kan det finnas flera molekyler som strålar på samma våglängd vilket ytterligare försvårar en identifiering. För att vara helt säker så behöver man observera flera linjer från varje molekyl i varje källa. Då kan man med hjälp av mönsterigenkänningsmetoder säkrare identifiera en molekyl. Om en molekylsignal saknas, som borde ha observerats i ett förväntat signalmönster, blir en annars möjlig identifiering mindre trolig.

Man kan även observera isotopologer, som är molekyler där en eller flera atomer är utbytt mot sina mera sällsynta atomära isotoper. Men detta medför också att signalerna blir svagare och därmed svårare att detektera. Observationer av flera linjer försvåras också av att det kan vara stora avstånd i frekvens emellan dem. Då kan man behöva använda flera teleskop både på marken och från rymden.

När man sedan har fått bra observationer och har en säker identifiering av molekyl och övergång så väntar ofta en komplicerad tolkning av signalen. Det tunna och iskalla interstellära mediet är nämligen långt ifrån jämvikt. Därför behövs ofta komplicerade uträkningar för att få information om de observerade objekten. I dag kan vi använda våra kraftfulla datorer och stora datorprogram, men detta hade man inte i radioastronomins barndom.

Sökmetoder

Sökandet efter nya molekyler i rymden kan huvudsakligen göras på två olika sätt:

- i) *Dedikerad sökning efter en specifik molekyl.*
- ii) *Spektrumavsökning av ett stort våglängdsområde.*

Den första metoden innebär att man söker efter en specifik molekyl med känt laboratoriespektrum, gärna väglett av teoretiska kemimodeller. Detta anses ofta vara mest effektivt. Eftersom våglängden är känd kan man på relativt kort tid få bra signal-till-brusförhållande, vilket gör att svaga signaler lättare kan upptäckas.

Den andra metoden är en förutsättningslös spektrumavsökning efter nya molekyler över ett mycket brett frekvensband. Observationerna måste då utföras stegvis genom många observationer av ett smalare frekvensband där bredden på varje ”steg” avgörs av spektrometerns bredd. Alla dessa små delar läggs senare ihop till ett långt spektrum. Nackdelen med denna metod är att den tar mycket tid i anspråk. Metoden medför också att det blir svårare att upptäcka svaga signaler eftersom bruset vanligtvis blir betydligt högre än i en dedikerad sökning vid en specifik frekvens.

Spektrallinjeavsökningar tar mycket tid

När databearbetningen av en spektrallinjeavsökning är klar börjar man med att kontrollera om det finns några signaler av redan kända molekyler. När dessa är identifierade så finns det ofta kvar ett antal oidentifierade linjer, så kallade U-linjer (U = unidentified). Dessa linjer kan antingen spegla okända övergångar av redan observerade molekyler eller nya molekyler som inte observerats tidigare. Vissa av dessa molekyler kanske inte ens varit påtänkta av andra forskare än de ”fysikaliska kemister” som beräknat deras grundtillstånd och molekylkonstanter med hjälp av orbitalteori för kemisk bindning. (Detta måste man göra för att ta reda på om de nya, tänkta atomkombinationerna kan hålla ihop som kemiska föreningar i en molekyl.)

Förutom en möjlighet att hitta nya molekyler så får man med en spektrallinjeavsökning även mycket välkalibrerade mångsignalobservationer från många olika molekyler. Detta möjliggör noggrann bestämning av både gasmolnens tätheter och temperaturer och de redan kända molekylernas koncentrationer. Allt detta har bidragit till att göra spektrumavsökningmetoden mycket attraktiv trots att den kräver mycket teleskop-tid.

Komplex kemi upptäckt i rymden

Med upptäckten av den atomära vätagasens 21-cm linje 1951 fick man en viktig sond för den tunna och utbredda interstellära gasen. Denna linje har bland annat använts för kartläggning av Vintergatans spiralarmar. Molekylära observationer tog sin början under 1937 med upptäckten av CH, CH⁺ och CN i

optiskt/UV, och 1963 av OH i radioområdet. Därefter upptäcktes snart rader av molekyler: NH_3 , H_2O , H_2CO , CO , CN , HCN , HC_3N , CH_3OH , och HCOOH . Dessutom detekterades ett antal isotopologer från 1970-talet och framåt, till exempel $^{12}\text{C}^{16}\text{O}$, $^{13}\text{C}^{16}\text{O}$, $^{12}\text{C}^{17}\text{O}$ och $^{12}\text{C}^{18}\text{O}$. Med tiden identifierades även molekylljoner som HCO^+ och isomerer som HCN och HNC , HCO^+ och HOC^+ (deras molekylstrukturer är olika).

Alla dessa upptäckter visade att trots den låga densiteten så finns det en komplex kemi i ISM och även att täta gasmoln existerar. Dessa moln visade sig dessutom innehålla ännu mindre och tätare klumpar inbäddade i en utbredd tunn gas. Detta ger ISM både en stor- och småskalig struktur.

En annan viktig upptäckt var maserstrålning som orsakar att vissa spektrallinjer strålar mycket intensivare än vad de borde kunna göra. Det sker genom stimulerad emission och fungerar precis som en laser i synligt ljus fast i mikrovågsområdet (*microwave amplification by stimulated emission of radiation*). Masersignaler kommer från olika områden, till exempel mycket små regioner av högt exciterad gas i stjärnbildande områden, i den expanderande atmosfären hos gamla stjärnor, kometer och planetatmosfärer. Analysen av sådan strålning är ofta svår och kräver sofistikerade modeller. Vattenångesignalen vid 1,35 cm och OH-signalen vid 18 cm är starka masrande linjer. Eftersom förstärkningsgraden är okänd blir dock vatten- och OH-halterna svårbestämbara.

Trots alla dessa upptäckter, och att teoretiska astrokemimodeller som tydde på att radikalen CH, liksom OH, borde vara allmänt förekommande i de interstellära gasmolnen, dröjde det ända fram till hösten 1973 innan en sådan allmän CH-förekomst påvisades.

Den stora svårigheten bestod i att mikrovågsspektroskopi inte kunde göras på grund av CH-radikalens korta livslängd i laboratoriet. I stället gjordes ett antal kvantmekaniska beräkningar av vilka våglängder mikrovågsövergångar i CH skulle ha. Dessa beräkningar baserades på laboratoriespektroskopi vid ultravioletta våglängder. Liknande beräkningar hade redan gett ganska hög precision för CN, men i fallet CH blev de tyvärr mycket osäkra. Orsaken var bland annat att UV-spektroskopiresultaten måste extrapoleras till 30 gånger längre våglängder än i CN-fallet. De resulterande frekvenserna blev därför inte bättre bestämda än 3030 ± 60 MHz och 3400 ± 30 MHz.

Forskningsgenombrott på Onsala – bevis på allmän CH-förekomst

Resultatlösa sökningar gjordes tidigt både i Australien och i USA, samt på Onsala rymdobservatorium både i september 1968 i bandet 3000-3135 MHz, och i okt-nov 1971 i bandet 3361-3385 MHz. Den dåliga kännedomen om CH:s våglängder utgjorde ett stort problem eftersom en tidskrävande spektrumavsökning av nästan hela frekvensbandet 3000-3400 MHz (9-10 cm) krävdes. Sökningen måste dessutom göras med en

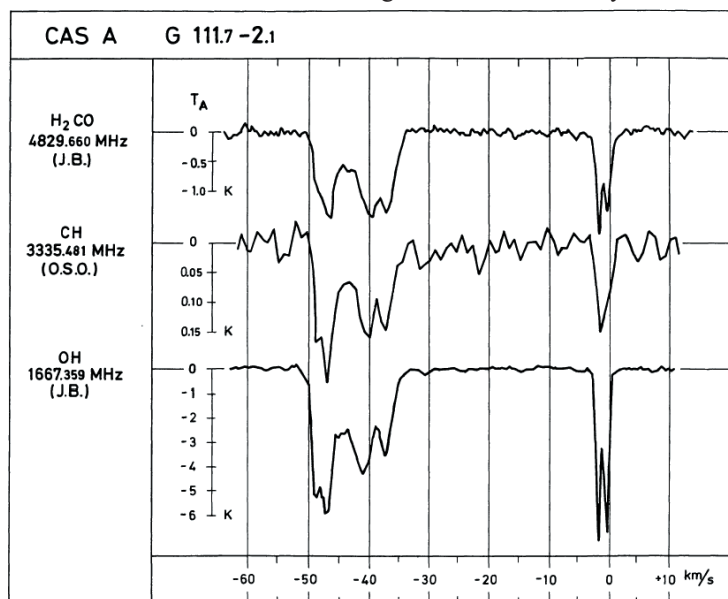
spektrometer vars totala bandbredd bara var 1 MHz. Mottagaren bestod av hundra kanaler där frekvensbredden hos varje spektral enhet var 0,01 MHz. Denna spektralupplösning motsvarar enligt Dopplerprincipen en hastighetsbredd av $300\,000\text{ km/s} \times 0,01\text{ MHz}/3200\text{ MHz} \sim 1\text{ km/s}$.

I oktober 1973 fortsatte man sökandet i Onsala på frekvenser lägre än 3361 MHz, men nu med en förbättrad och ännu känsligare maserförstärkare. Denna förstärkartyp utnyttjade masereffekten och hade utvecklats och byggts i observatoriets mottagarlaboratorium på Chalmers. Masern är en delikat förstärkare som måste frekvensavstämmas med en supraledande magnet och fungerar bara brusfritt när den kyls till 2 K.

De fortsatta ansträngningarna på Råö ledde denna gång till ett positivt resultat. CH kunde nu identifieras i sitt grundtillstånd via detektioner av både dess huvudlinje vid $3335,481 \pm 0,002\text{ MHz}$ och de två svagare satellitlinjerna vid $3349,193 \pm 0,003\text{ MHz}$ och $3263,794 \pm 0,003\text{ MHz}$. Resultaten publicerades i Nature i december 1973. Konkurrenten om att upptäcka CH först var verkligen knivskarp vilket illustreras med att i januari 1974 publicerades i Astrophysical Journal en detektion av CH:s övre satellitlinje gjord med NRAO:s 42 meters teleskop av Barry Turner och Ben Zuckerman.

Detektionen och den säkra identifieringen av CH gjordes genom mönsterigenkänning av signaler observerade med den starka radiostrålningen från supernovaresten Cassiopeia A som bakgrundskälla. Detta var på samma sätt som OH (1963) och H_2CO (1969) hade identifierats genom sin spiralarmsabsorption och sedan jämförts med absorptionsmönstret från vätetets 21 cm linje. Men CH-signalerna syntes överraskande inte som absorptionslinjer utan i emission. Först misstänkte Råöforskarna något fel i mottagarkedjan eller i databearbetning men till slut kunde det visas att CH var en svag maserförstärkare i rymden.

Fig. 4. Jämförelse av tre olika molekylers spektra mot Cassiopeia A: H_2CO och OH observerat med Jodrell Bank-observatoriet i England, och CH observerat med OSO:s 25-m-teleskop. CH-linjerna har inverterats för att lättare kunna jämföras med de andra molekylerna eftersom de i själva verket var emissionslinjer. I varje molekyls spektrum syns samma övergång vid flera olika hastigheter. Spektrallinjerna uppkommer när gasmoln, på olika hastigheter relativt jorden, absorberar ljuset från Cas A. Dessa gasmoln hör hemma i Orions spiralarm (hastighet = 0 km/s) och Perseus spiralarm (hastigheter mellan -35 och -50 km/s). (Rydbeck, O., et al. 1976, Astrophysical Journal Supplement Series, Vol. 31, s. 333.)



De fortsatta CH-observationerna visade även andra underliga egenskaper i signalerna. Medan den övre satellitlinjen vid 3349,193 MHz ofta var något svagare jämfört med huvudlinjen än vad den kvantmekaniskt beräknade linjekvoten förutspådde, så var den undre satellitlinjen vid 3263,794 MHz ofta lika stark eller mycket starkare än huvudlinjen. Efter en ingående teoretisk analys av molekylens energinivådiagram och strålningsmöjligheter kunde man dra slutsatsen att molekylernas fördelning på sina olika energinivåer kraftigt påverkats av långvågig infraröd strålning. Denna strålning kommer från stoft upphettat av nyfödda stjärnor.

Känsliga observationer kan ge oväntade upptäckter

Som ett resultat av känsliga sökningar 1970 och 1971 efter andra molekyler med kända vilovåglängder med NRAO:s 11-meters-teleskop i USA upptäcktes helt oväntat mycket starka signaler i millimetervågor. Signalerna kunde fem år senare visas komma från de nya interstellära molekylerna HCO^+ och HNC . Dessa molekyler är särskilt intressanta eftersom den förra ger ett mått på jonisationsgraden i ISM och båda två spårar täta gasmoln.

Sådana upptäckter motiverade spektrallinjeavsökningar. Men för att man skall kunna genomföra detta på rimlig tid så behövs bredast möjliga spektrometer. Ytterligare en anledning till att ha en bred spektrometer är att vissa linjer, t ex CO från andra galaxer eller i kraftiga gasutflöden med hög hastighet kring nybildade stjärnor, kan ha en bredd på upp till flera hundra km/s. Om linjen är bredare än spektrometers detektionsområde så blir den mycket svår att observera. Så var fallet vid de första observationerna av ammoniak 1968 av C.H. Townes och medarbetare vid University of California, Berkeley. Ammoniaklinjen från Vintergatans centrala delar var så bred, och spektrometern så smalbandig, att flera närliggande våglängdsband behövde observeras. Detta medför naturligtvis betydande osäkerheter.

Högteknologiskt nytt teleskop på Råö blev världens främsta

När OSO:s 20-m-teleskop år 1979 kunde tas i bruk för observationer av millimetervågor utrustades det därför med en mångkanalmottagare med 512 kanaler där varje kanal hade 1 MHz bandbredd. Konstruktionen och byggandet skedde på observatoriet. Vid färdigställandet hade OSO då en spektrometer som var dubbelt så bred som den på Kitt Peak-teleskopet nära Tuscon, Arizona. Med detta teleskop hade man till exempel under 1970 upptäckt $^{12}\text{C}^{16}\text{O}$, HCN och HCO^+ . Dessutom var 20-m-teleskopets yta ca 3,3 gånger större. Det var därmed både det största och känsligaste teleskopet i världen under ca 10 års tid, och det är idag fortfarande mycket konkurrenskraftigt.

Omedelbart efter installationen av den bredbandiga mångkanalmottagaren påbörjades flera spektrallinjeavsökningar. På senare tid har fortsatta observationer av samma område gjorts från rymden med Odinsatelliten. Dessutom har ett teleskop beläget högt upp i bergen i La Silla i de Chilenska Anderna använts för spektrallinjeavsökningar. Det är 15-m-teleskopet SEST (Swedish ESO Submillimeter Telescope) som togs i bruk 1987. Detta teleskop ägdes gemensamt av Onsala rymdobservatorium och European Southern Observatory (ESO) och användes fram till år 2003.

Världens första “spectral scan” 1979-1982

De första spektrumavsökningarna på Råö gjordes i frekvensbandet 72-91 GHz (3,3 - 4,2 mm) mot det redan välstuderade syrerika stjärnbildningsmolnet Orion A och i det expanderande gas/dammhöljet kring den åldrade kolrika stjärnan IRC+10 216 (CW Leonis). Detta hölje har en mycket stark infrarödstrålning från upphettat damm.

Onsalas spektrumavsökning i Orion var den första i sitt slag som publicerades och har blivit mycket citerad. Orionnebulosan är ett stjärnbildande kemiskt reaktivt område med tusentals nybildade stjärnor – varav många mycket massiva – och här har en rik flora av molekyler observerats. Dessutom är det rätt närbeläget, endast ca 1500 ljusår bort, vilket gör det lättobserverat. Området är mycket välstuderat i många våglängder och har ofta betraktats som prototyp för ett stjärnbildande område.

OSO:s spektrumavsökning ledde till detektion av 170 spektrallinjer från 24 redan kända interstellära molekyler. Dessutom observerades 15 stycken H-alfa, beta, gamma, delta och He-alfa rekombinationslinjer. Med dessa linjer kunde därmed den kosmologiskt viktiga He/H-masskvoten mätas upp till ett värde av 28 ± 2 procent.

Viktiga resultat trots få nya molekyler

Även om fler än 100 av Orionlinjerna inte hade detekterats i rymden tidigare, så återstod till Råöforskarnas besvikelse endast fem ganska svaga oidentifierade signaler som kunde vara nya molekyler. Identifieringsarbetet omfattade studier av publicerade laboratorieresultat, diskussioner med ett antal molekylspektroskopister och flitig användning av deras nya opublicerade resultat.

Bland de vid den tiden viktiga resultaten finns upptäckterna i Orionmolnet av HCOOCH_3 (metylformiat), HNCO , HC_5N , CH_2CHCN och H_2CCO . Dessutom syntes metylformiats isomer CH_3COOH (ättiksyra) inte till, vilket innebar att den måste ha minst 10 gånger lägre koncentration än sin släkting. Råöforskarnas säkra identifiering av HCOOCH_3 innebar dessutom att en alltför stark signal från CH_3OCH_3 (dimetyleter) kunde förklaras med en förväntat stark HCOOCH_3 -signal vid samma frekvens. Dessutom innebar detta att den av andra forskare tidigare publicerade identifieringen av signaler från CH_4 (metan) måste

vara felaktig. Interstellärt metan detekterades senare på 90-talet genom sin infrarödabsorption vid 7,6 mikrometer mot unga stjärnor i molekyln.

Identifieringen av $l\text{-C}_3\text{H}$ – en astronomisk detektivhistoria

I spektrumavsökningen mot stjärnhöljet av IRC+10 216 kunde även här de flesta spektrallinjerna identifieras. Man fann 45 linjer från 12 astronomiskt redan kända molekyler, även om CH_3CN var en ny och oväntad kemiupptäckt i ett stjärnhölje.

Till slut fanns bara fem svaga U-linjer kvar. Den starkaste av dessa var U76,202 som även hade ett annorlunda utseende. Signalens bredd och form i ett stjärnhölje bestäms nämligen främst av gashöljets expansionshastighet och Dopplereffekten. Utgående från publicerade *ab initio*-beräkningar av de påtänkta molekylnas grundtillstånd och molekylnkonstanter, samt den redan kända kemin i denna kolrika källa, fanns nu ett antal möjliga identifieringskandidater. Det var HNSi, som hade beräknats vara mera stabil än HSiN, SiCH, C_2NC , HC_2NC , samt $l\text{-C}_3\text{H}$ som är en linjär kolkedjemolekyl. Av dessa kunde de fyra första alternativen avskrivas. Deras högre rotationsövergångar hade nämligen inte synts till i OSO-observationerna. Andra astronoms observationer av denna källa hade inte heller påvisat dessa linjer. Den molekyl som återstod var alltså $l\text{-C}_3\text{H}$. Om detta var den reaktiva radikal som sände ut U76,202 så måste det enligt kvantmekaniken vara en ${}^2\Pi_{1/2}$, $J = 7/2 - 5/2$ Λ -dubblätt". En sådan övergång skulle även kunna förklara den ovanliga linjeformen som resultatet av en addition av två mycket närbelägna expansionsbreddade spektrallinjer.

För att avgöra om detta var rätt identifiering så beslöt sig Råöforskarna för att försöka detektera nästa högre rotationsövergång. Enligt molekylns kvantmekanikmodell borde den finnas vid ca 97,97 GHz, alltså strax under CS vid 97,981 GHz. Inverkan av centrifugaldistortion borde flytta den beräknade frekvensen till något under 97,97 GHz så att linjen skulle ligga helt utanför CS-linjen. Observationen innebar dock en överraskning. Man såg som förväntat två svaga spektrallinjer nära CS-signalfrekvensen, men vid något högre frekvenser (97,995 och 98,011 GHz). Det visade sig att för den linjära C_3H -molekylen motverkade en högre ordningens spin-bankopplingsterm mer än väl centrifugaldistortionen vilket åstadkom en förskjutning mot högre frekvenser. Molekylen blev i praktiken kortare när den roterade snabbare. I en omfattande artikel 1983 presenterades huvudresultaten från Onsalas spektrumavsökning och $l\text{-C}_3\text{H}$ föreslogs som en trolig, men inte säker identifiering.

OSO-forskarna upptäckte vid denna tid att det fanns tre ännu oidentifierade linjer i en spektrumavsökning kring 140 GHz gjord av Pat Thaddeus vid Columbia University, New York, med Bell Laboratoriets 7m millimetervågsteleskop. En möjlig kandidat till dessa U-linjer var $l\text{-C}_3\text{H}$. I artikeln från 1983 påpekade Råöforskarna dock att den enda möjliga vägen till en säker iden-

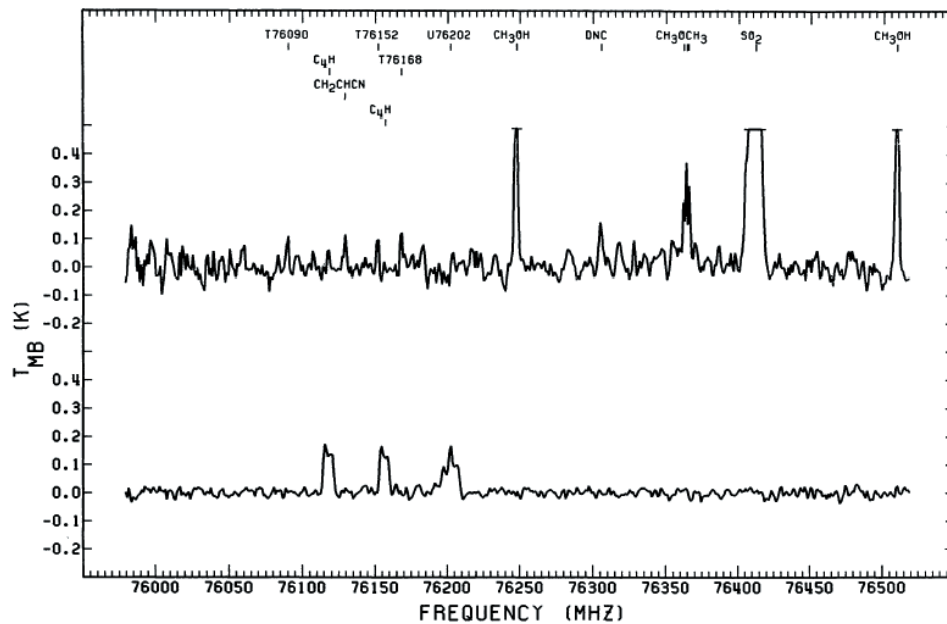


Fig. 5. Exempel på molekylers signaler ur spektrallinjeavsökningen mot Orion A och gas/dammhöljet kring den åldrade kolrika stjärnan IRC+10 216. Kemin i dessa O- respektive C-rika gasmoln är mycket olika. De identifierade C_4H -linjerna i IRC+10 216 är nästan fyrkantiga och har som väntat en bredd av $2 \times$ stjärnhöljets expansionshastighet. Den oidentifierade linjen vid 76,202 GHz är däremot bredare och har en central topp. Flera år senare blev den säkert identifierad som $l-C_3H$. (Johansson, L.E.B, et al. 1985, *Astronomy & Astrophysics*, Vol. 60, s. 60.)

tifiering var en detektion av flera rotationsövergångar. Tyvärr kan de två närmaste linjerna vid 54 och 120 GHz inte observeras med markbaserade teleskop på grund av nära nog total absorption av syrgasen i atmosfären. Det fortsatta arbetet koncentrerades i stället på sökningar efter linjer vid 32 och 142 GHz. Övergången vid 32 GHz förväntades dessutom ha en hyperfinuppspaltning som helt skulle kunna säkerställa en identifiering. Det kalla gasmolnet TMC-1 observerades och fyra hyperfinlinjer upptäcktes. Identifieringen av $l-C_3H$ var äntligen säker.

Ungefär vid samma tid hade Pat Thaddeus lyckats identifiera en av sina tre signaler nära 142 GHz med en av många spektrallinjer från den lilla ringmolekylen SiCC. Hans två övriga U-linjer passade nu perfekt med $l-C_3H$. Thaddeusgruppen hade även lyckats med verifierande laboratoriespektroskopi. Allt detta detektivarbete avslutades med att Råöforskarna och Thaddeusgruppen gemensamt skrev två artiklar om resultaten från observationerna och laboratoriespektroskopin under 1985.

Nya resultat från spektrumavsökningar av tre positioner i Sgr B2 med SEST

En omfattande spektrumavsökning gjordes av OSO-forskare 1990-1997 med SEST vid våglängder kring 1,3 mm (218-263 GHz). Objekten denna gång var tre närbelägna positioner i det jättelika molekyll- och stjärnbildningsmolnet Sagittarius B2 (Sgr

B2) nära Vintergatans Centrum. Bandbredden på spektrometern var först 500 MHz, men byttes ut 1992 till 1 GHz vilket underlättade observationerna betydligt. Spektralupplösningen var 1,4 MHz vilket motsvarar en hastighet på 1,8 km/s vid 230 GHz.

En av de observerade positionerna var ett redan känt, upphettat och tätt område rikt på molekyler och den andra var en känd källa med ett massivt gasutflöde från en eller flera nyfödda stjärnor. Den tredje positionen valdes för att representera en lugnare gas i området. Avståndet till Sgr B2 är 28 000 ljusår och därmed är det svårare att observera detaljer på samma sätt som i Orion. Som förväntat visade det sig ändå att de två aktiva stjärnbildande områdena har olika kemi och struktur; en blandning av upphettad gas och gasutflöden i helt olika proportioner.

I de tre olika källorna detekterades 1730, 660 och 110 spektrallinjer från 42 redan kända interstellära molekyler, inklusive 337, 51 och 8 U-linjer. I den första källan nåddes vad som brukar kallas "confusion limit". I genomsnitt 40 spektrallinjer med bredder mellan 20 och 40 MHz per 1000 MHz observerades. Det här medförde att signaler från två eller flera molekyler ofta överlappade varandra. När så är fallet får man göra en teoretisk anpassning av de olika molekylernas signalmönster och göra en modell över det observerade spektrumet.

Bland U-linjerna har ett hundratal svaga signaler från vibrationsexciterat C_2H_3CN (vinylcyanid) räknats bort då de kunde identifieras via då nypublicerade spektroskopitabeller. Även vibrationsexciterat C_2H_5CN (etylcyanid) borde ha ett stort antal linjer, men i avsaknad av publicerad laboratoriespektroskopi kunde sådana identifieringar inte göras.

Var finns allt syre i rymden?

Syre är det tredje mest förekommande grundämnet i Universum (efter väte och helium) och ingår i många molekyler som t ex: CO , CO_2 , H_2O , OH , CH_3OH , SO , SO_2 , O_2 och många fler. Flera av dessa molekyler är dessutom viktiga i stjärnbildningsprocessen. Detta gör syre till en viktig komponent i det interstellära mediet och dess kemi.

Men var finns då allt syre i rymden? Kemimodeller har förutspått att mycket, eller det mesta, av syret borde finnas i form av O_2 och H_2O . Om det stämmer så borde det vara lätt att observera dessa molekyler. De har även förutspåtts vara viktiga kylagenter i stjärnbildningens tidiga stadium. Detta grundades på deras förutspådda rikliga mängd och förekomsten av rotationsövergångar mellan lågt liggande energiövergångar.

I många år var detta dock bara teorier eftersom få observationer var gjorda. Syret skulle kunna vara atomärt till stor del eller finnas bundet i andra molekyler. Dessutom saknades information om i vilka sorts områden dessa molekyler fanns: utbredd och tunn gas, tät och kompakt gas, kalla eller varma källor? En annan viktig relaterad fråga rörde deras tillstånd: existerar de som gas eller som is på ytan av stoftkorn?

Satelliter behövs för att studera vatten i rymden

Vatten, som först upptäcktes 1969 av C.H. Townes och medarbetare, och molekylärt syre är svåra att observera från jorden eftersom jordens atmosfär effektivt absorberar den mesta strålningen. De spektrallinjer från vatten som når markbaserade teleskop är mer eller mindre masrande i sin natur och är därmed inte lätta att analysera. Lösningen blir då att skicka upp satelliter. Den första satellit som observerade vatten var ISO (the Infrared Space Observatory) 1995-1998. ISO observerade vatten i en mängd objekt både i form av is på stoftkorn och från vattenånga i varma områden.

Men fortfarande kunde man inte detektera vattenånga i kallare och mera utbredda områden. Det motiverade NASA att skicka upp en specialbyggd satellit 1998: SWAS (Submillimeter Wave Astronomy Satellite). SWAS uppdrag var att observera den lägsta rotationsövergången hos vatten vid 557 GHz (0,54 mm) som endast behöver 27 K för att exciteras. Man kunde även observera H_2^{18}O vid 549 GHz, ^{13}CO vid 551 GHz och C vid 492 GHz. Alla dessa linjer behövdes för att korrekt kunna analysera vattensignalerna.

SWAS var också designad för att kunna observera O_2 vid 487 GHz. Trots omfattande observationer såg man dock inte ett spår av molekylärt syre och därmed antogs O_2 -halten vara rejält lägre än väntat. Vatten observerades däremot i många objekt även om också den halten var överraskande låg.

Odin – ny fart i sökandet efter H_2O och O_2

Odinsatelliten, som är en uppföljare till SWAS, sändes upp 2001. Odins spegel är större än SWAS, 1,1 m mot 55×71 cm, vilket gör att Odins antennlob är mindre än SWAS, 2,1 bågminuter mot $3,3 \times 4,5$ bågminuter vid vattenfrekvensen. Dessutom är Odins mottagare inställningsbara mellan 486-504 och 541-581 GHz, vilket möjliggör observationer av betydligt fler linjer och molekyler.

Odin fick även med sig en specialbyggd mottagare bara för observationer av den lägsta rotationsövergången hos O_2 vid 119 GHz (2,5 mm). Denna linje förutspåddes vara starkare än den SWAS försökte hitta. Och mycket riktigt så hittade Odin till slut en mycket svag signal av O_2 mot molekylnolnet Rho Ophiuchi genom kontinuerliga observationer under 34 dagar 2002-2003. Halten av O_2 relativt H_2 inom Odins antennlob bestämdes till 5×10^{-8} – en koncentration som var ca 1000 gånger lägre än förutspåddelsen av de existerande kemiska modellerna.

Vid denna frekvens är dock Odins antennlob 10 bågminuter stor. Det betyder att O_2 -halten skulle kunna vara betydligt högre inom ett mindre område. De kommande O_2 -observationerna på kortare våglängder med rymdteleskopet Herschel ägnas åt denna frågeställning. Att ISM inte är homogent utan har småskalig struktur utgör ofta ett stort problem. Man behöver då ha information om hur ”klumpat” mediet är innan man kan beräkna korrekta halter. Det kan även hända att när man vill jämföra halten



Fig. 6. Odinsatelliten sköts upp 20 februari 2001 med en Start-1 raket från Svobodny i Ryssland. Banan är sol-synkron med en höjd av ca 600 km. Detta projekt är svensklätt i samarbete med Frankrike, Kanada och Finland. Odins tid delades av astronomer och aeronomer som observerar vatten, ozon och kolmonoxid i jordens atmosfär. Åke Hjalmarson har varit astronomikoordinator för astronomiobservationerna. (Bild: Rymdbolaget.)

av två molekyler så kommer signalerna inte från samma gas även om de är observerade inom samma område. Hur mycket den strålände gasen fyller upp antennloben kallas för "beam-filling". Om den är liten blir naturligtvis signalerna svagare.

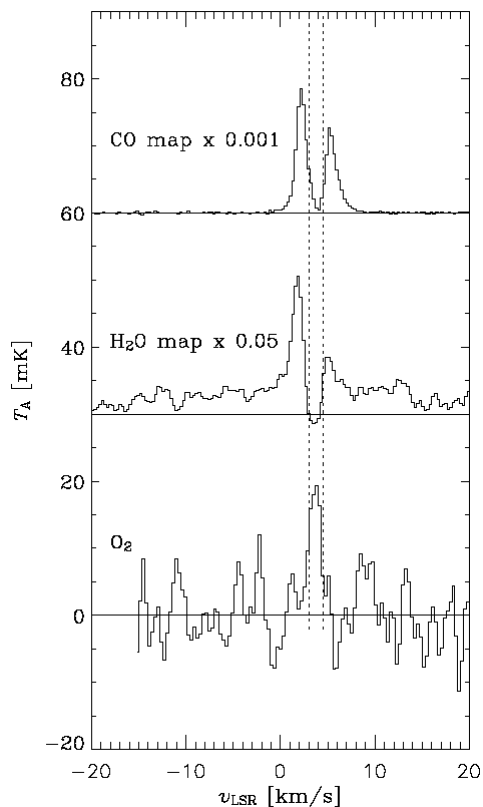


Fig. 7. Odinsatelliten har för första gången någonsin detekterat molekyllärt syre, (O_2), i ett interstellärt gasmoln. I spektrumet visas jämförelser mellan CO, H_2O och O_2 från molnet Rho Ophiuchi. (Larsson, B., et al. 2007, *Astronomy & Astrophysics*, Vol. 466, s 999.)

Ännu en spektralavsökning av Orion – nu med Odinsatelliten kring 0,5 mm

Odins inställningsbara mottagare var perfekta för att utföra en spektrallinjeavsökning för första gången från rymden. Detta utfördes under 2004-2005 mot Orionnebulosan mellan 486-492 GHz (0,61-0,62 mm) och 541-577 GHz (0,52-0,55 mm). Under 1100 banvarv runt jorden (ca 1100 timmar) tittade Odin på Orion för detta ändamål. Databearbetningen var omfattande och tog lång tid, liksom identifieringen av alla 344 möjliga linjer. Till slut var 280 linjer identifierade från 21 olika molekyler och 17 isotopologer. Bland annat såg man vatten i dess båda former: *ortho*- $H_2^{16}O$ och *para*- $H_2^{16}O$, liksom isotopologerna *ortho*- $H_2^{18}O$, *ortho*- $H_2^{17}O$ och HDO. Detta var första gången som $H_2^{17}O$ observerades i rymden. Andra intressanta linjer som dessutom är viktiga för analysen av vattenobservationerna är kolmonoxid:

$^{12}\text{C}^{16}\text{O}$, $^{13}\text{C}^{16}\text{O}$, $^{12}\text{C}^{17}\text{O}$ och $^{12}\text{C}^{18}\text{O}$; ammoniak: $^{14}\text{NH}_3$ och $^{15}\text{NH}_3$; metanol: $^{12}\text{CH}_3\text{OH}$ och $^{13}\text{CH}_3\text{OH}$; svaveldioxid: $^{32}\text{SO}_2$ och $^{34}\text{SO}_2$, svaveloxid: ^{32}SO , ^{33}SO och ^{34}SO ; formaldehyd: H_2^{12}CO , H_2^{13}CO och HD^{12}CO . Alla 344 linjer blev dock inte identifierade: 64 linjer återstod, även om några blev preliminärt identifierade som bland annat SO^+ , ND , SH^- , CH_3CHO , CH_3OCHO och HNCO .

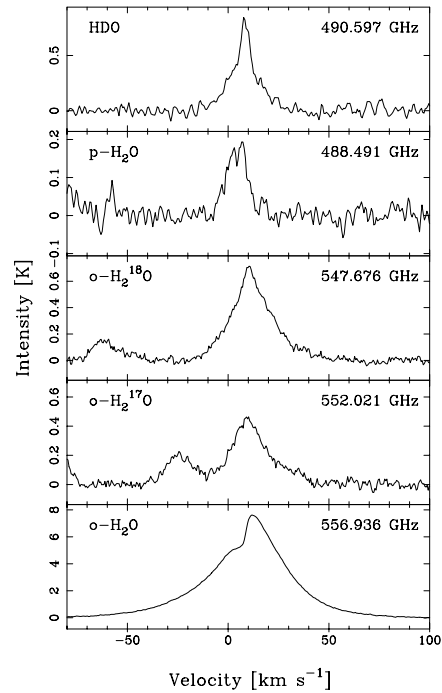


Fig. 8. Flera olika vattenisotopologer observerades med Odinsatelliten i spektrallinjeavsökningen mot Orionnebulosan. Den starka och mycket breda H_2^{16}O signalen uppkommer från kraftiga gasutflöden från nyfödda stjärnor. (Persson, C.M., et al. 2007, *Astronomy & Astrophysics*, Vol. 476, s. 807.)



Fig. 9. Orionnebulosan M42 observerad i infraröd strålning. Den centrala delen, som observerades med Odin vid spektrallinjeavsökningen, är markerad. Den röda emissionen (strålning vid $2\ \mu\text{m}$) har sitt ursprung i chockexciterad H_2 -gas (ESO PR foto 03a/01 2001).

Flera molekyler med samma instrument

En av fördelarna med en spektrallinjeavsökning är att man ofta kan observera många spektrallinjer från ett flertal molekyler med samma teleskop och instrument. Detta är till stor hjälp vid analysen av data eftersom de olika molekylerna kan ge kompletterande information om området. Vattenlinjen som Odin och SWAS observerat är ofta optiskt mycket tjock och därmed kan den inte ge information om totala vatteninnehållet i det observerade objektet. En optiskt tjock linje strålar nämligen från ”ytan” av ett objekt, medan optiskt tunna linjer tränger rakt igenom. Vattenemissionen är dessutom ofta självabsorberad. Detta fenomen orsakas av att vattenmolekyler från exempelvis en tunn gas i förgrunden absorberar vattenstrålningen från djupare lager i molnet. Om man har möjlighet att även observera de båda oftast optiskt tunna vattenisotopologerna H_2^{17}O och H_2^{18}O så underlättas analysen betydligt.

För att korrekt kunna bestämma en vattenhalt relativt H_2 måste man dessutom få reda på hur mycket H_2 som finns i området. Denna information kan man få från optiskt tunna CO-linjer (mer om detta på s. 52). I Odins spektrallinjeavsökning observerades inte mindre än fyra CO-isotopologer. Analysen av dessa linjer ger ett bra värde på mängden H_2 och därmed kunde vattenhalten uppskattas relativt noggrant. Man fann att i områden där temperaturen och tätheten var hög så var också vattenhalten betydligt högre än i kalla och mindre täta områden.

När man väl har fått en bra uppskattning av mängden en molekyl har i gasfas kan den jämföras med molekylens halt i stoftkornens isar. Detta ger viktig information som ökar vår förståelse av om molekylerna bildas i gas- respektive isfas.

Astrokemi & molekyler i rymden

Hela vår förståelse av ISM baseras på observationer av interstellära atomer, joner och molekyler och studier av deras bildnings- och förstörelseprocesser – astrokemi. För 26 år sedan hade ett 60-tal molekyler upptäckts via flera hundra spektrallinjer. Ett 100-tal av dessa var nya linjer som upptäcktes med OSO:s 20 meters teleskop. Idag har fler än 160 molekyler säkert identifierats i rymden med hjälp av många tusen signaler. I medeltal har 4 nya molekyler per år upptäckts sedan 1968. Signalerna har observerats med hög spektral upplösning från 834 MHz (CH_3OH vid våglängden 36 cm) till 4000 GHz (CO vid våglängden 75 mikrometer).

I tabell 1 finns en sammanställning över de molekyler som fram till oktober 2009 har identifierats i interstellära och circumstellära gasmoln. De sistnämnda objekten är expanderande gashöljen kring åldrande stjärnor. Molekyler har även observerats i kometer och planeter. Tabellen baseras på vår egen katalogisering och all information finns på ett antal internetsidor. Notera att i denna tabell är bara den vanligaste isotopologen hos varje molekyl listad. Några av de molekyler som man hittat flera isotopologer hos är CO, H_2CO , HCO^+ , H_2O , NH_3 , SO_2 , och SO.

Tabell 1. 175 detekterade molekyler i rymden (oktober 2009)^a. Cykliska och linjära molekyler benämns med *c*- respektive *l*-. Ett frågetecken markerar icke bekräftade detektioner.

Hydrogen compounds						Oxygen
H ₂ ^{b,e}	HD ^b	H ₃ ⁺	H ₂ D ⁺	HD ₂ ⁺	O ₂	
Hydrogen & Carbon compounds						
C ₂ ^{b,e}	CH ₂	C ₈ H	C ₂ H ₂ ^e	CH ₃ C ₂ H	<i>l</i> -C ₃ H	
C ₃ ^e	CH ₃	C ₂ H	C ₂ H ₄ ^d	CH ₃ C ₄ H	<i>c</i> -C ₃ H	
C ₄	CH ₄ ^e	C ₄ H ^e	C ₂ H ₆ ^f	CH ₃ C ₆ H	<i>l</i> -C ₃ H ₂	
C ₅ ^d	C ₅ H	C ₄ H ⁻	C ₃ H ₆	CH ₂ D ⁺ ?	<i>c</i> -C ₃ H ₂	
CH ^{c,e}	C ₆ H	C ₆ H ⁻	C ₆ H ₆ ^{d?}	CH ₂ CHCH ₃	<i>l</i> -H ₂ C ₄	
CH ⁺ ^{b,e}	C ₇ H ^d	C ₈ H ⁻	H ₂ C ₆	<i>l</i> -HC ₄ H ^{d?}	<i>l</i> -HC ₆ H ^{d?}	
Hydrogen, Oxygen & Carbon compounds						
CO ^{c,e}	OH ^{c,e}	H ₂ O ⁺ ^f	HC ₂ CHO	CH ₃ OH ^e	(CH ₃) ₂ O	
CO ⁺ ^e	OH ⁺ ^f	H ₃ O ⁺ ^e	(CH ₂ OH) ₂ ^e	CH ₃ CHO ^e	(CH ₃) ₂ CO	
CO ₂ ^e	HCO ^e	H ₂ CO ^e	CH ₂ CHOH	CH ₃ OCHO ^e	<i>c</i> -C ₂ H ₄ O	
CO ₂ ⁺ ^f	HCO ⁺ ^e	H ₂ COH ⁺	CH ₂ CHCHO?	CH ₃ COOH	<i>c</i> -H ₂ C ₃ O?	
C ₂ O	HOC ⁺	HOCO ⁺	CH ₂ OHCHO	CH ₃ CH ₂ OH	C ₂ H ₅ OCH ₃ ?	
C ₃ O	H ₂ O ^e	H ₂ C ₂ O	HCOOH ^e	CH ₃ CH ₂ CHO	HC(O)OCH ₃ ^e	
				C ₂ H ₅ OCHO		
Hydrogen, Nitrogen & Carbon compounds						
N ₂ ^{b,g}	CN ^{c,e}	HNC ₃ ^e	HC ₂ N	CH ₂ CN	CH ₃ CN ^e	
N ₂ H ⁺	C ₃ N	HC ₃ N ^e	HC ₂ NC	CH ₂ NH	CH ₃ NC	
NH ^{b,e}	C ₃ N ⁻	HC ₅ N	H ₂ CN	CH ₂ CHCN	CH ₃ NH ₂	
NH ₂ ^{b,e}	C ₅ N	HC ₇ N	H ₂ NCN	CH ₂ CCHCN	CH ₃ C ₃ N	
NH ₃ ^e	C ₅ N ⁻	HC ₉ N	H ₂ NCH ₂ CN	CH ₂ CNH?	CH ₃ C ₅ N	
HNC ^e	HCN ^e	HC ₁₁ N	HCNH ⁺	<i>l</i> -HC ₄ N ^d	C ₂ H ₅ CN	
			HC ₃ NH ⁺		C ₃ H ₇ CN	
Hydrogen, Nitrogen, Oxygen & Carbon compounds						
NO	N ₂ O	HNO	HNCO ^e	NH ₂ CHO ^e	CH ₃ C(O)NH ₂	
	HCNO	HOCN	HC(O)CN	NH ₂ CH ₂ COOH ^h	NH ₂ CH ₂ CN	
Species containing: S, Si, Na, K, Cl, F, Al, Mg, Fe, P						
S ₂ ^f	C ₂ S	PN	SiC ^d	CF ⁺	AlCl ^d	
SO ^e	C ₃ S	PH ₃ ?	SiN	HF	AlNC ^d	
SO ⁺	HCS ⁺	PO	SiH?	NaCN ^d	NaCl ^d	
SO ₂ ^e	H ₂ CS ^e	CP ^d	SiO	MgNC ^d	KCl ^d	
NS ^e	OCS ^e	CCP	SiNC ^d	MgCN ^d	AlF ^d	
H ₂ S ^e	CS ^e	HCP	C ₄ Si ^d	SiH ₄ ^d	AlO ^d	
H ₂ S ⁺ ^f	CS ₂ ^f	FeO?	<i>c</i> -SiC ₂	SiCN ^d	HCl	
CH ₃ SH	HSCN	HNCS	<i>c</i> -SiC ₃	SiS		
Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs)						

^aData från <http://www.cdms.de>, <http://www.astrochymist.org/>, <http://www.cv.nrao.edu/~awotten/allmols.html> och NASA:s cosmic ice laboratory. ^bDetekterad i synligt ljus & UV absorption. ^cDetekterad i synligt ljus, UV absorption, samt i radio. ^dEndast circumstellära molekyler. ^eÄven detekterad i komet. ^fEndast detekterad i komet. ^gÄven i och på planeterna i vårt solsystem. ^hEndast detekterad i kometen Wild 2 med NASA:s Stardust mission.

Det finns även deutererade molekyler i rymden där en väteatom är utbytt mot ”tungt väte” deuterium, till exempel HDO, NH₂D och ND₂H.

Försumbara bidrag till molnens massa

Fastän den här provkartan av molekyler i rymden är imponerande så är ändå deras bidrag till ett tätt interstellärt gasmolns totala massa i princip försumbar. Molekylerna kan i själva verket betraktas som föroreningar i moln som till största delen består av väte och helium. I täta molekylnmoln utgör H₂ 99,99 procent av alla molekyler. Tyvärr är H₂ svår att observera direkt eftersom den inte har något dipolmoment. Det betyder att de lägsta övergångarna i infrarött är förbjudna övergångar och blir därmed extremt svaga. Dessutom så kräver dessa övergångar rätt varma moln för att kunna bli exciterade, mer än 100 K. Man kan också observera dem i absorption mot en ljusstark bakgrundsstjärna. Nackdelen med den sistnämnda metoden är att man då är begränsad till vissa siktlinjer och med den första metoden att man inte spårar täta och kalla molekylnmoln. Den första detektionen av H₂ utanför vårt solsystem skedde med en raketburen ultraviolet spektrrometer 1970. Då detekterades absorptionslinjer av Lymanband i H₂ med en stjärna som bakgrund.

Om man vill kartlägga de täta och kalla molekylnmolnen i Vintergatan använder man sig ofta i stället av en annan betydligt enklare metod. Man observerar CO-molekylen, och dess isotopologer, som i de flesta fall samexisterar med H₂. Kolmonoxid är mycket lätt att observera och dessutom den i gasfas näst mest förekommande molekylen. Halten är vanligtvis 1/10 000 relativt H₂ i täta, molekyllära moln. Alla andra molekyler har ännu lägre eller betydligt lägre halter.

Bara tre grundämnen efter Big Bang

De mest förekommande grundämnena efter väte och helium är syre, kol, neon, kväve, kisel, järn och svavel med halter i antal atomer relativt väte mellan ca 2×10^{-6} och 6×10^{-4} . Resterande grundämnen i rymden existerar i ännu mycket lägre halter.

Alla dessa ämnen har dock inte funnits i hela universums historia. Kort efter Big Bang existerade bara väte och helium med masskoncentrationer av 76 respektive 24 procent. Dessutom hade mycket små mängder av helium-3, deuterium och litium bildats: ungefär en deuterium- och en helium-3-atom per 10^5 väteatomer och en litiumatom per 10^{10} väteatomer. Övriga grundämnen har bildats senare inuti stjärnor och utgör idag sammanlagt endast 1-2 procent av den totala massan av vanlig materia.

De allra flesta molekylerna är föreningar av de mest förekommande grundämnena som dessutom är reaktiva: väte, kol, kväve, syre, kisel och svavel. Endast åtta molekyler har hittats i ISM som innehåller andra ämnen: CF⁺, HF, PN, PO, HCl, FeO, CCP och HCP. Ytterligare ett fåtal har hittats i cirkumstellära höljen hos gamla stjärnor, till exempel: NaCN, MgNC, MgCN, AlCl,

AINC, NaCl, KCl och AlF. Även om det finns gott om helium så är detta ämne mycket stabilt och bildar inte så lätt molekyler. Ingen heliumförening är hittills upptäckt. Enligt teoretiska kemi-modeller så är dock den första molekyl som bildades i tidiga Universum He_2^+ . Molekyler där tyngre ämnen som svavel, kisel och magnesium ingår finns ofta i stoftkorn.

Döende stjärnor trolig orsak till PAH

En annan klass av mycket stabila organiska molekyler kallas Polycykliska Aromatiska vätekarbonater (PAH, där H står för Hydrocarbon) och är ett mellanting mellan stora molekyler och små solida stoftpartiklar. De kan bestå av 50-100 kol- och väteatomer och är platta med ett antal hoplänkade bensenringar av sex kolatomer (ex $\text{C}_{24}\text{H}_{12}$). Ibland kan även andra atomer som kväve, svavel eller syre ingå. PAH:s syns ofta i stjärnbildande områden, i ytterdelarna av gamla stjärnor, kometer och meteoriter. Troligtvis bildas de i gasutflöden från gamla döende stjärnor som är extra kolrika, eller från stoftkorn som brutits ner av supernovachocker. Dessa stora molekyler är förmodligen ursprunget till de tidigare oidentifierade infraröda banden och diffusa interstellära band omkring 3-11 mikrometer som förbryllade astronomer i många år. Signalerna är mycket breda och svåra att identifiera.

Ger ovärderlig information

Trots de otroligt låga halterna av alla dessa rymdens molekyler så är de ändå av fundamental betydelse. Både för att kemin påverkar moln och stjärnbildning i vår och andra galaxer, och för att molekylerna är ovärderliga informationsbärare för oss astronomer. Anledningen till att molekyler är så utmärkta mätsonder är att de kan reagera mycket olika på fysikaliska parametrar som densitet, temperatur och strålning. Vissa strålar starkt i ett tunt medium medan andra kräver högre täthet för att synas, t ex CN, HCN och CS. Kolmonoxid är däremot lätt att excitera och kräver bara låg densitet och temperatur och kan därför lätt ses i stora områden.

Molekyler har svårt att bildas i rymden

Det stora problemet i rymden som motverkar bildandet av molekyler är naturligtvis den låga densiteten. Även i täta gasmoln är densiteten otroligt låg: omkring 10^5 - 10^7 molekyler/cm³ vilket är jämförbart med de bästa vakuum vi har på jorden. I diffusa och tunna moln sjunker densiteten och kan nå ofattbart låga 100 atomer/cm³ eller ännu lägre. Dessutom är miljön i rymden ogästvänlig med stark strålning från stjärnor och chockvågor i gasen som förstör molekylerna. En annan orsak till låga molekylkoncentrationer är naturligtvis den låga halten av tunga grundämnen.

Molekylbildning – i gas eller i is

Det finns trots alla svårigheter flera sätt för molekyler att bildas i rymden. Antingen äger detta rum i gasen eller i den is som finns på ytan av stoftkorn. Isen består till största delen av vatten, koldioxid, metanol, kolmonoxid, metan, ammoniak och karbonylsulfid (OCS).

Stoftkornen själva består till största delen av kiselföreningar, grafit och sot (kol). De bildas i de yttre delarna av gamla stjärnor, är mellan 0,01 – 1 mikrometer i storlek och utgör ungefär en procent av den totala gasmassan. Även om det är en liten del är den mycket viktig för molekylnas bildande. Utan stoftkorn skulle det knappast finnas så många molekyler i rymden. De absorberar och sprider nämligen energirik ultraviolett och optisk strålning och skyddar därmed molekylna. Stoffkornen värmer sedan upp gasen genom strålning i infrarött.

En rik produktion av molekyler sker dessutom i isen på stoftkornens yta, där atomer som kondenserats från gasen möts. Den största produktionen av molekyllärt väte sker till exempel på detta sätt. På jorden är is annars inte en miljö som möjliggör produktion av molekyler. Men när is befinner sig i den tomma rymden så beter den sig annorlunda än på jorden och får egenskaper som liknar flytande vatten. Den blir till amorf is. Molekyler som bildas på stoftkorn kan också lämna ytan om de får tillräckligt med energi. Vissa molekyler gör detta med hjälp av den energi som släpps ut vid deras bildande, t ex H_2 .

När molekyler bildas i gasfas är det problematiskt att bli av med energin som frigörs. I jordens täta atmosfär sker detta med trekroppars kollisioner, men detta är omöjligt i ISM som i princip är tomt. I ytterdelarna av gamla stjärnor, där det är lagom varmt och mycket tätt, sker dock sådana kollisioner. Där produceras förutom stoftkorn även rikligt med molekyler. Vissa molekyler som t ex $AlCl$, $NaCl$, KCl och $MgCN$ har hittills bara hittats i sådana källor.

Molekyler bildas i gasfas med hjälp av jon-molekyl- och neutral-neutralreaktioner. Molekyler, atomer, joner eller kosmisk strålning utgör de kolliderande partiklarna i jon-molekyllkemin. Den kosmiska strålningen består i huvudsak av protoner, heliumkärnor eller elektroner som färdas nära ljusets hastighet. Dessa partiklar är mycket viktiga för kemin i ISM, speciellt för gasfasproduktionen av molekyler. Neutral-neutralreaktioner har energibarriärer och kräver ofta temperaturer över 100 K. Därför bildas relativt lite molekyler vid låga temperaturer i denna process, men den ökar i betydelse med ökande temperatur.

Molekyler kan naturligtvis även förstöras genom stark strålning från stjärnor, kosmisk strålning eller starka chockvågor. Stoffkorn utgör ett bra skydd. Ett annat sätt är att de olika molekylna skyddar sig själva genom så kallad "selfshielding". Molekyler i yttre delar av ett moln absorberar då den strålning som annars skulle ha dissocierat molekylna längre in.

All forskning om vatten och syre pekar nu på att syret till stor del är bundet på stoftkornsytor genom effektiv bildning av

vattenis. Vatten kan även bildas i gasfas vid låga temperaturer i jon-molekylreaktioner, men detta sker mycket långsamt och ineffektivt. Om temperaturen stiger och kommer över omkring 100 K sublimerar vattnet från stoftkornen. Då ökar gasfashalten av vattnet rejält. Om temperaturen stiger upp över 300-400 K kan neutral-neutralreaktionerna dessutom snabbt omvandla allt tillgängligt syre till vatten. Det här scenariot kan förklara den mycket låga O_2 och H_2O -halten i utbredda områden med kall gas, liksom den höga vattenhalten i mindre områden med hög temperatur och i områden där lågenergetiska chockvågor svept fram. Hög temperatur och chockvågor finns ofta i anslutning till stjärnbildande områden.

Joner och komplexa molekyler i rymden

Många positivt laddade joner har upptäckts med start 1970 av HCO^+ . En av de senaste upptäckterna skedde 2006 då en detektion av CF^+ publicerades. Observationerna utfördes med dedikerade sökningar efter en rotationslinje med kvanttal $J = 3-2$ vid 307,7 GHz med OSO:s APEX-teleskop. Kompletterande observationer av $J = 2-1$ (205,2 GHz) och $1-0$ (102,6 GHz) övergångarna gjordes med ett 30 meters teleskop i Sierra Nevada, Spanien (IRAM). Före denna upptäckt så hade bara en enda fluorbärande molekyl upptäckts i rymden, HF, så denna detektion var viktig. De observerade signalerna stödde de teoretiska kemimodellerna för fluor, som tidigare haft få möjligheter att bekräftas genom observationer.

Den första negativt laddade jonen upptäcktes så sent som 2006; C_6H^- . Upptäckten skedde genom dedikerade sökningar i stjärnhöljet IRC+10 216 och det täta molekylnolnet TMC-1. Mängden C_6H^- i båda källorna var överraskande hög: ca 1-5 procent av den neutrala molekylen C_6H . Detta skulle kunna innebära att även andra molekyllära joner kan ha hög halt jämfört med sina neutrala kollegor. I så fall bör de kunna observeras både i rymden och i laboratorium. Upptäckterna av negativa molekyllä joner har fortsatt med C_4H^- , C_3N^- och C_5N^- . Alla sökningarna har varit baserade på laboratoriespektroskopi.

Några av ovanstående upptäckter har möjliggjorts genom att USA:s National Radio Astronomy Observatory (NRAO) fick ett nytt känsligt instrument 2001: ett mer än 100 meter stort centimetervågsteleskop kallat Green Bank Telescope (GBT) beläget i West Virginia. Byggandet av detta teleskop påskyndades av att NRAO:s gamla 90 meters antenn för längre våglängder kollapsade 1988.

Svårt att hitta komplexa molekyler

Det är svårare att upptäcka stora och komplexa molekyler jämfört med mindre, även om de finns i hög koncentration. En molekyl kan nämligen stråla i många olika övergångar och styrkan på varje övergång bestäms både av omgivningen och molekylen egenskaper. Dessa egenskaper bestäms av molekylen storlek, symmetri och vilka atomer som ingår i föreningen och bestäm-



Fig. 10. Onsala rymdobservatorium är delägare i APEX (Atacama Pathfinder Experiment) 12-metersteleskop på 5100 meters höjd i Atacamaöknen i Chile. Här kan man observera kontinuumstrålning vid 345 och 810 GHz, liksom spektrallinjer mellan 211-370 och 1250-1384 GHz. (Foto: ESO.)

mer även antalet tillåtna övergångar. Små molekyler har färre tillåtna övergångar än stora och komplexa molekyler. De stora molekylernas många linjer blir då svaga och förväxlas lätt med brus i observationerna.

Den största molekylen som är upptäckt idag består av 13 atomer: HC_{11}N . Även ett antal komplicerade organiska molekyler, t ex $\text{HOCH}_2\text{CH}_2\text{OH}$ (etylenglykol) och CH_3CONH_2 (acetamid) hör till senare GBT-detektioner i täta molekylnmoln genom dedikerade sökningar baserade på laboratoriespektroskopi.

Interstellär kemi och eventuell betydelse för livets uppkomst – astrobiologi

Mycket tyder på att stora delar av både det vatten vi har idag i världshaven, och kvävgasen i jordens nuvarande atmosfär, måste ha kommit till den unga jorden genom ett intensivt bombardemang av kometer och meteoriter. Ett tecken på detta är den höga halten av tungt vatten, HDO, som mätts upp både i världshaven och i flera kometer. Eftersom kometererna består av utfrusna rester från solsystemets ursprungliga gasmoln, kan vi ganska lätt förstå den höga HDO halten. Vi observerar nämligen ofta en mycket hög halt av deutererade molekyler i de kalla interstellära molnen. Detta beror på den kemi som existerar i gasen vid mycket låga temperaturer. Man kan då dra slutsatsen att alla de andra interstellära molekylerna samtidigt måste ha förts till den unga jorden genom bombardemangen av kometer. Flera av dessa molekyler kan ha haft betydelse för livets uppkomst som byggstenar, katalysatorer eller lösningsmedel.

Intensivt sökande efter livets byggstenar

Den enklaste och lättaste aminosyran, $\text{NH}_2\text{CH}_2\text{COOH}$ (glycin, aminoättiksyra), som är en byggsten i proteiner, eftersöktes för första gången 1979 med Onsals 20-m-teleskop utan framgång. Med åren så har sökningarna utförts med allt högre känslighet. Fastän ett antal oidentifierade interstellära signaler har haft de rätta frekvenserna, så saknades länge fler glycin signaler med den förväntade intensiteten. Glycin har många svaga linjer och är svår att hitta.

Under hösten 2009 annonserade NASA-forskare en överraskande upptäckt – en säker identifiering av glycin. Glycinet upptäcktes i det material som hämtats till jorden från kometen Wild 2 med NASAs rymdsond "Stardust" under 2004. Analysen av det inhämtade materialet tog flera år eftersom man behövde vara helt säker på att glycinet verkligen kom från kometen och inte från den aerogelplatta den samlats in med, eller blivit förorenad på jorden. Livets molekyler verkar sannerligen vara vitt spridda i Universum.

Två molekyler som upptäcktes under 2008 med IRAM:s 30-m-teleskop är $\text{C}_2\text{H}_5\text{OCHO}$ och $\text{C}_3\text{H}_7\text{CN}$. Dessa molekyler sågs i en het och mycket tät del av ett stjärnbildande område nära Vintergatans centrum, Sagittarius B2. De är båda jämförbara med glycin i storlek och komplexitet. Så här stora molekyler

verkar inte bildas på samma sätt som mindre molekyler. De bildas i stället troligen sektionvis med mindre molekyler som byggstenar – till exempel av metanol som redan finns på stoftkornen. Ingen uppenbar övre gräns för bildandet av ännu större och mer komplexa molekyler på detta sätt verkar finnas.

Etylenoxid – släkt med RNA- och DNA-molekyler

En annan biomolekyl som identifierats i rymden, med hjälp av bland annat OSO-forskare och spektrallinjeavsökningen mot Sgr B2 med SEST i Chile, är etylenoxid ($c\text{-C}_2\text{H}_4\text{O}$). Identifieringen är speciellt intressant i astrobiologisammanhang. Etylenoxid är en stabil cyklisk molekyl och den leder omedelbart tankarna till nästa större stabila ringmolekyl av samma slag: $c\text{-C}_4\text{H}_4\text{O}$ (furan). Furanringen är en central beståndsdel i de enkla sockerarterna ribos och deoxiribos som utgör ryggraden i de ”genetiska spiralmolekylerna” RNA och DNA (ribonukleinsyra, respektive deoxiribonukleinsyra). Än så länge har dock inget interstellärt furan detekterats.

Observationer av täta interstellära gasmoln i andra galaxer

På Onsala rymdobservatorium observeras inte bara det interstellära mediet i vår egen galax Vintergatan, utan även i andra galaxer. Observationer av ett antal molekyler, inklusive spektrallinjeavsökningar, i andra galaxer har gjorts med både 20-m- och 25-m-teleskopen, APEX och SEST. Några exempel på källor är våra galaxgrannar Stora och Lilla Magellanska molnen, kolliderande galaxer, galaxer med stjärnbildningsutbrott, och så kallade AGN:s (galaxer med aktiva centrala delar). Exempel på observerade molekyler är CO, CS, CN, HCN, HNC, HCO^+ och HC_3N .

Ett annat exempel är observationer av vatten och ammoniak i en spiralgalax i PKS 1830-211 gravitationslinssystem på ett avstånd av ca 10^{10} ljusår med APEX (2008). Denna galax absorberar ljuset från en bakomliggande kvasar (extremt ljusstark galax) och linjerna syns då i absorption. Med observationer av detta slag kan man få information om hur kemien i interstellära mediet förändrats med tiden eftersom vi ser tillbaka i tiden ju längre bort vi tittar. Det är dessutom intressant att observera det interstellära mediet i olika typer av galaxer under olika tidsepoker för att studera galaxernas bildande och utveckling.

Omfattande kartläggning av Malströmgalaxen

Spiralgalaxen M51, även kallad Malströmgalaxen, som befinner sig på ett avstånd av ca 27 miljoner ljusår, är en av de allra mest kända och fotograferade galaxerna (även av amatörastronomer). Den upptäcktes så tidigt som 1774 av Charles Messier. Galaxen är riktad så att spiralstrukturen syns mycket tydligt, samtidigt som gasrörelserna längs siktlinjen fortfarande är stora och därmed observerbara.

Dessutom så har M51 en mindre kompanjonggalax (NGC 5195) som den växelverkar med. Dessa galaxer är därför även lämpliga objekt för studier av galaxkollisioner.

Redan vintern 1981-82 påbörjades många år av CO-observationer med OSO:s 20-m-teleskop som har lett till den känsligaste och mest omfattande kartläggning som någonsin gjorts av denna galax. Observationerna har dessutom i efterhand bearbetats med en statistisk dekonvolveringsmetod. Detta förbättrar upplösningen från 33 till ca 11 bågsekunder. Metoden har utvecklats av Gustaf Rydbeck på OSO.

Tydlig stjärn- och gasbildning i spiralarmarna

En diskformad galax roterar kring sitt centrum. Medelhastigheten av rotationen beror på avståndet till dess centrum. Lokala massansamlingar, i till exempel spiralarmarna i en spiralgalax, kan göra att hastigheterna nära spiralarmen avviker från medelrotationen. Sådana avvikelser kallas för strömning och dess förändringar kallas för differentiell strömning.

Det finns olika teorier om hur spiralarmarna uppstår och utvecklas. En sådan teori är täthetsvågsteorien. M51-galaxen har kraftigt markerade spiralarmar, som man tror delvis har uppstått på grund av en nära förbifart av den något mindre galaxen NGC5195. Denna galax syns högst upp i figur 11 i slutet av spiralarmen, även om den i själva verket befinner sig ungefär en galaxdiameter bakom M51.

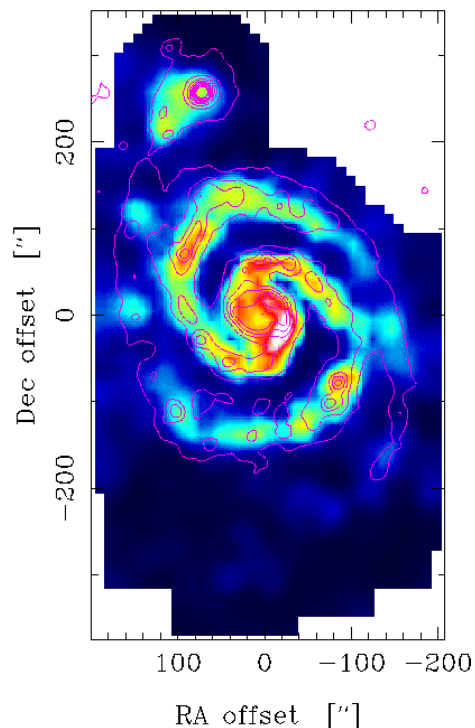


Fig. 11. Denna färgkodade bild av M51 visar CO-emissionen och konturerna visar den infraröda (15 μ m) strålningen från varmt stoft. CO-emissionen är tydligt korrelerad med stoftet, även om CO syns längre ut från galaxens centrum.

Eftersom M51 ligger så nära oss har man i stor detalj gjort otaliga observationer och undersökningar av spiralarmarna med tillhörande strömningar. Enligt täthetsvågsteorien så når den differentiella strömningen ett minimum i spiralarmens mitt där inkommande små molekylgasmoln på så vis packas tätt och kan slås ihop till stora moln på omkring 10^7 solmassor och en utsträckning av ca 100 ljusår. Gasen i delar av dessa stora moln börjar på grund av den låga differentiella strömningen och tyngdkraften att kollapsa och bilda stjärnor. Strålningstrycket från de nybildade massiva stjärnorna, plus den ökande differentiella strömningen, sliter sedan isär de stora molnen när de lämnar spiralarmen efter några tiotals miljoner år. Strålningen kan då också dissociera molekylgasen och på så vis leda till en nybildning av neutral atomär vätgas som observeras i M51.

Bildning av stora moln och stjärnor sker också i irreguljära galaxer som är galaxer utan spiralarmar eller struktur. Genom att jämföra moln och stjärnbildning i dessa olika typer av galaxer kan man bättre förstå mekanismerna bakom dessa fenomen.

Molekyler i det tidiga Universum

Upptäckten av de första interstellära molekylerna 1937-1941 visade inte bara att det fanns en interstellär kemi som kunde skapa reaktiva radikaler och molekyler (CH , CN och CH^+) utan var faktiskt den första upptäckten av CMB-strålningen (*Cosmic Microwave Background radiation*). Excitationstemperaturen för CN bestämdes nämligen till ungefär 2,3 K, men konsekvensen förstod man inte och denna temperatur glömdes snabbt bort. Det var inte förrän efter upptäckten av den kosmiska 2,7 K bakgrundsstrålningen av Arno Penzias & Robert Wilson 1965 som man förstod att detta var den första detektionen av strålningsresten från Big Bang.

Universums utveckling från ett extremt hett och tätt tillstånd startade för 13,7 miljarder år sedan. Alltsedan dess har Universum expanderat. När volymen ökar så sjunker temperaturen och densiteten, och några minuter efter Big Bang hade temperaturen sjunkit tillräckligt för att de lättaste grundämnena skulle kunna bildas. Men det dröjde ändå omkring 380 000 år innan materian kunde övergå från joniserat till neutralt tillstånd.

Kosmiska mikrovågor ger oss Universums historia

Temperaturen var då ca 3000 K och denna tidpunkt markerar den sista kontakten mellan materian och den överblivna strålningen från Big Bang: CMB-strålningen. Denna strålning är naturens mest perfekta exempel på svartkroppsstrålning, och har max intensitet vid 1,9 mm (160 GHz). Efter denna epok har CMB-strålningen i princip gått obehindrad rakt igenom Universum. Genom att studera temperaturskillnaderna över hela himlen som är 1/100 000 grad eller mindre, beroende på upplösning, kan man få en bild av det tidiga Universum och förstå hur dagens strukturer bildats.

CMB-strålningen förutspåddes redan 1946 av Georg Gamow och hans student Ralph Alpher. Några år senare utvecklades teorin av Alpher och Robert Herman med antaganden att Universum expanderar och att nukleosyntesen pågick överallt i tidiga Universum. I sin doktorsavhandling beräknade Alpher även mängden helium till 25 procent av den totala baryonmassan i Universum. Men eftersom det inte fanns radiomottagare vid denna tid så dröjde det ända till 1965 innan den blev observerad av en händelse av Penzias and Wilson med Bell Labs Horn Antenna. Denna upptäckt har betytt oerhört mycket för kosmologin. CMB-strålningen är ett av de absolut starkaste stöden för Big Bangteorin. För sin upptäckt delade Penzias och Wilson 1978 års Nobelpris i fysik.

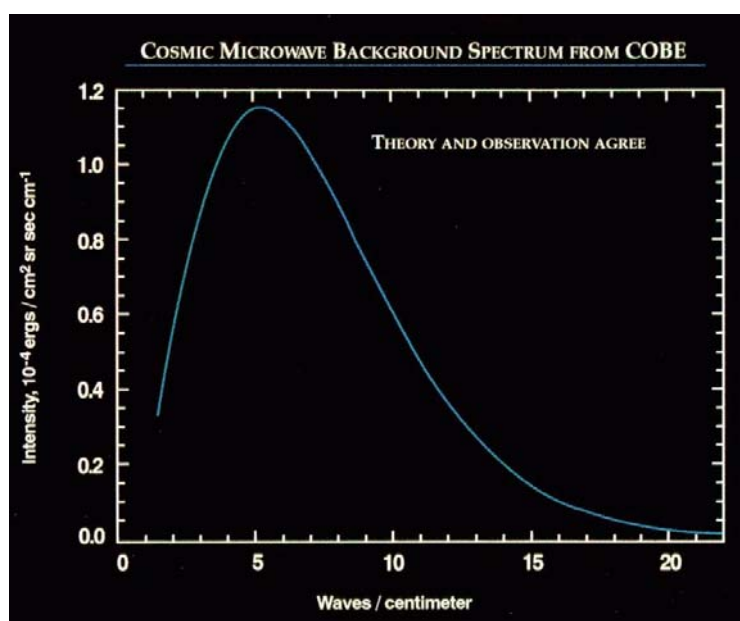


Fig. 12. Den kosmiska mikrovågsbakgrundsstrålningens spektrum observerat med NASA:s COBE-satellit. Den observerade strålningen matchas av en perfekt svartkroppskurva med en temperatur på $2,725 \pm 0,001$ K. Osäkerheterna är mindre än den teoretiska kurvans tjocklek. (http://lambda.gsfc.nasa.gov/product/cobe/slide_captions.cfm)

CMB-strålningen har sedan dess studerats i detalj av till exempel NASA:s satelliter COBE (*CO*smic *B*ackground *E*xplorer) och WMAP (*W*ilkinson *M*icrowave *A*nisotropy *P*robe). För sina insatser för COBE:s observationer fick John Mather och George Smoot ta emot Nobelpriset i fysik 2001. Enligt Nobelpriskommittén kan COBE betraktas som startpunkten för kosmologin som precisionsvetenskap.

Med samma Ariane 5-raket som skickade upp Herschel rymdobservatorium sände ESA upp sitt första teleskop i rymden som ska observera CMB – Planck. Detta ska göras med hittills oöverträffad känslighet och upplösning med mottagare kylda till otroliga 0,1 K och på ett avstånd av 1,5 miljoner km från jorden i riktning bort från solen. Observationer av hela himlen kommer att pågå i 15 månader.

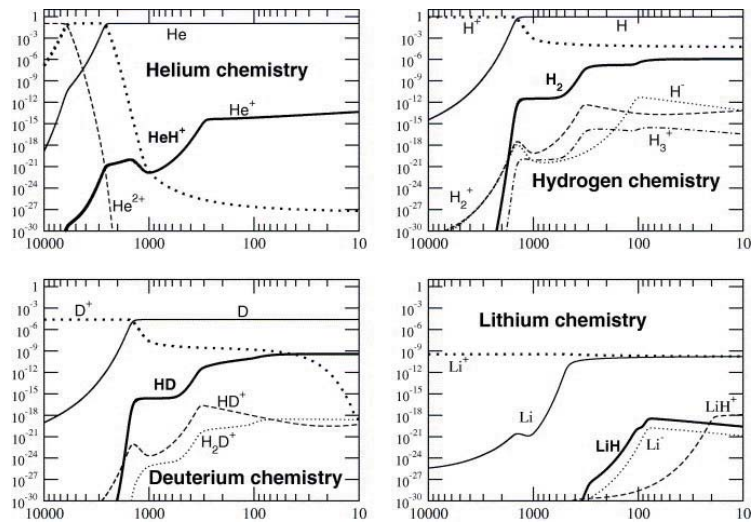


Fig. 13. Kemisk utveckling av helium, väte, deuterium och litium som funktion av tiden (Puy & Signore, New Astron. Review, 2007, Vol. 51, s 411). Här betecknas tiden som rödförskjutning: $z = (\lambda_{\text{obs}} - \lambda_0) / \lambda_0$ där λ_0 är vilovåglängden och λ_{obs} är den rödförskjutna observerade våglängden. Dagens värde är noll och tiden för CMB:s ursprung har $z = 1080$.

I tidiga Universum fanns bara väte, deuterium, helium, helium-3 och litium. Det fanns inga stoftkorn, tätheten var låg och densiteten sjönk dessutom stadigt med Universums expansion. Allt detta motarbetade naturligtvis molekylproduktion. Trots detta så bildades ändå molekyler som, trots sin extremt låga halt, var mycket viktiga för bildandet av de första stjärnorna. Men eftersom det inte fanns molekyler som kunde kyla molnen mer än till några hundra Kelvin, resulterade detta i att de första stjärnorna förmodligen mer än 100 gånger mer massiva än vår egen sol. Dessa stjärnor producerade tyngre grundämnen, stoftkorn och molekyler och skapade därmed förutsättningar för det Universum vi lever i idag.

De kosmiska mörka åren - hittills inga detektioner

Tiden mellan CMB-strålningens uppkomst och de första stjärnorna, som bildades några hundra miljoner år efter Big Bang, kallas de kosmiska mörka åren. Under denna epok var hela Universum mörkt. Allt som fanns var en tunn och jämn gas med extremt små täthetsfluktuationer som miljoner år senare bildade de första stjärnorna.

Ingen har någonsin detekterat något från denna tid. Många frågetecken finns fortfarande kring utvecklingen av de första stjärnorna och Universums struktur. Flera försök har dock gjorts, nu senast med Odinsatelliten, att observera strålning från molekyler under de kosmiska mörka åren, men utan positivt resultat. Signalerna är mycket svåra att upptäcka, liksom att teoretiskt beräkna. I princip så vet man inte vilka molekyler man letar efter, var på himlen man ska titta eller på vilka frekvenser man ska observera. De primordiala "gasmolnen" är dessutom i ökad

evolutionärt tillstånd, vilket betyder att det är omöjligt att förutsäga styrkan eller linjernas bredd och form.

Trots dessa svårigheter går sökandet vidare med bland annat OSO:s 20m-teleskop under vintern 2010, och ESA:s rymdteleskop Herschel under 2010. Om man lyckas med en sådan detektion har man för första gången fått en direkt signal från de kosmiska mörka åren i tidiga Universum.

Finns det något kvar att upptäcka?

En revolution av radioastronomin och vår kunskap om stjärnbildning och det interstellära mediet skedde 1968-1969 då de första större molekylerna i rymden upptäcktes. Trots den oerhört låga densiteten och ogästvänliga omgivningen så pågår en komplex och förvånande rik kemi i rymden, totalt olik den på jorden. Idag har över 160 molekyler i rymden säkert detekterats, vissa även innan de upptäckts på jorden. Dessa rymdens molekyler finns överallt: i enormt stora gasmoln mellan stjärnorna, i ytterdelar av gamla stjärnor, i isen på små stoftkorn, planeter, kometer och asteroider, liksom i tidiga Universum innan de första stjärnorna bildades.

Många molekyler är stora och komplexa såsom en ny NASA-upptäckt av den prebiotiska molekylen glycin som är spännande ur ett perspektiv av livets uppkomst. Andra är små och till synes obetydliga, såsom CF^+ , men tillför ändå värdefull information. Upptäckten av negativa molekylljoner under de senaste tre åren ger också nya insikter om den pågående kemien i rymden.

Man kan fråga sig om det finns fler upptäckter att göra? Hur stora kan rymdens molekyler bli egentligen? Hur svaga signaler kan vi ta emot? Finns det möjlighet att upptäcka fler molekyler i nya utforskade områden både i tid och rum, som de primordiala molekylerna i tidiga Universum?

Ingenting är säkert förutom att vi genom att titta ut i rymden kan få tillgång till ett unikt laboratorium som ständigt överraskar. Och tack vare både den tekniska och teoretiska utvecklingen ser vi fram emot en spännande framtid. Nya teleskop och satelliter, som till exempel ALMA och rymdteleskopet Herschel, utrustade med extremt känsliga instrument i nya våglängdsområden kommer förhoppningsvis återigen att leda till epokgörande upptäckter som låter oss förstå ännu mer av Universums hemligheter.

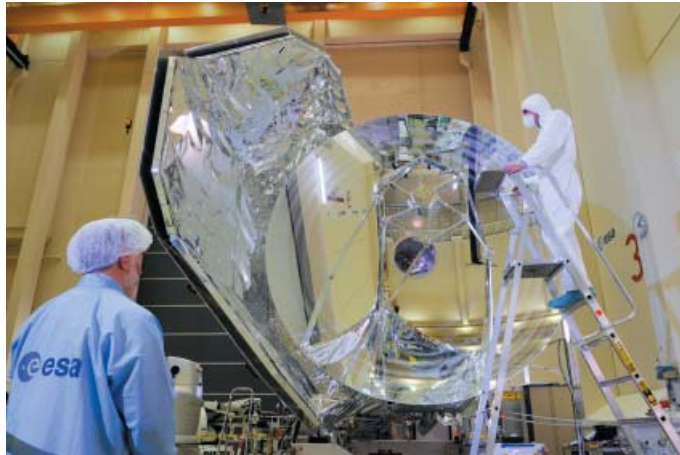


Fig. 14. ESA:s Herschel rymdobservatorium sköts upp i maj 2009 och observerar rymden i infraröd strålning med extremt känsliga instrument. Spegeln är den största någonsin i rymden: 3,5 meter. (Foto: ESA.)



Fig. 15. En konstnärs vision av ALMA (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array) som är under konstruktion i Chile på 5100 meters höjd. Vid färdigställandet kommer 66 stycken antenner att ingå i observatoriet som kommer att bli världens största och känsligaste. APEX teleskopet är en prototyp till ALMA:s antenner. (Foto: ESO.)

Referenser

Uppslagsordet *interstellära mediet* i Nationalencyklopedien, Åke Hjalmarsen.

Interstellära molekyln och stjärnbildning, Åke Hjalmarsen och Anders Winnberg, Kosmos, 1983, s. 95.

Kemi i tomma världsrymden, Åke Hjalmarsen & Hans Olofsson, Forskning och Framsteg, 1986, nr. 4, s. 44.

The Chemically Controlled Cosmos, Tom Hartquist & David Williams, 1995 (Cambridge University Press).

Kosmiska moln gömmer livets gåta, Hans Olofsson, Forskning och Framsteg, 1996, nr 3, s. 4.

Odin blickar uppåt, Åke Hjalmarsen & Aage Sandqvist, Forskning och Framsteg, 2009, nr. 4, s. 28.

De tidiga molekylupptäckterna har diskuterats i betydligt större detalj av bland annat:

Interstellar molecules and dense clouds, Rank, D.M., Townes, C.H., & Welch, W.J., 1971, Science, Vol. 174, s. 1083.

Interstellära molekyler, Olof Rydbeck, Kosmos, 1974.

Astrobiologireferenser:

Radioastronomi och livets uppkomst, Roy Booth & Åke Hjalmarsen, Naturvetenskapliga forskningsrådets årsbok 1997 (Livets ursprung), s. 93.

Astrophysical and astrochemical insights into the origin of life, Ehrenfreund, Irvine m.fl. 2002, Reg. Prog. Phys., Vol. 65, s. 1427.

ASTROBIOLOGY: The study of the living Universe, Chyba, C.F. & Hand, K.P., 2005, Annual Reviews of Astronomy & Astrophysics, Vol. 43, s. 31.



Carina Persson disputerade vid Onsala rymdobservatorium januari 2009. Hennes avhandling baserades till största delen på observationer gjorda med Odinsatelliten. Forskningen inkluderade bland annat spektrallinjjeavsökningen mot Orionnebulosan och sökandet efter primordiala molekyler i tidiga Universum. Under 2010 och några år framåt kommer hon att arbeta med forskning baserad på observationer med rymdteleskopet Herschel.



Åke Hjalmarsen, professor emeritus sedan 2009 i molekylär astrofysik vid Onsala rymdobservatorium. Hans specialområde har varit det interstellära mediets fysik och kemi i vår egen och andra galaxer, inklusive astrobiologi och molekylspektroskopi. Han har sedan 1999 varit koordinator av astronomiforskningen med Odinsatelliten som är ett samarbetsprojekt mellan Sverige, Frankrike, Kanada och Finland.