

Kemi mellem stjernerne

Stjernetåger kan populært sagt opfattes som en tynd "suppe" af molekyler. En udsædelt type molekyle her på Jorden bærer måske en del af svaret på, hvordan den kemiske mangfoldighed opstår i disse områder af rummet.

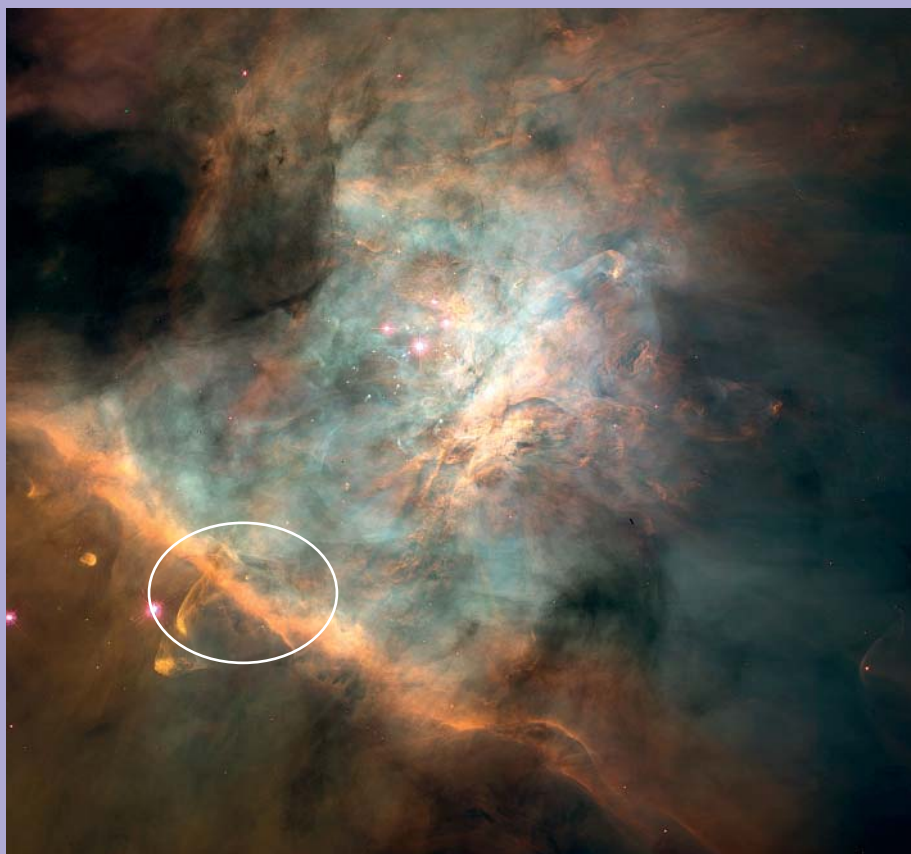
Af Carsten R. Kjaer, Aktuel Naturvidenskab

← Orion stjernetågen er et af de mest undersøgte og fotograferede objekter på nattehimmelen. Det er en diffus tåge af gas og støv beliggende i stjernebilledet Orion, og den lyser så klart på nattehimmelen, at den er synlig med det blotte øje. En stjernetåge er populært sagt en stjernevugge, for her fødes helt nye stjerner. Oriontågen er samtidig den nærmeste kendte region i Mælkevejen, hvor der foregår stjernedannelse i massivt omfang. Dog er den med en afstand af godt 1300 lysår fra Jorden ikke just en tæt nabo.

Foto: NASA, ESA, M. Robberto (Space Telescope Science Institute/ESA) and the Hubble Space Telescope Orion Treasury Project Team

En region i tågen kaldes Orion Bar, og denne repræsenterer den dramatiske overgang mellem den unge, varme del af tågen med helt nye stjerner og den kolde molekyllære sky, ud fra hvilken de oprindeligt blev dannet. →

Foto: NASA, C.R. O'Dell and S.K. Wong (Rice University)



Hvori består ligheden mellem stjernetågen Orion Bar i Mælkevejen og udstødningsgassen fra en bil? Svaret er, at begge medier er fyldt med polycykliske aromatiske hydrocarboner – eller PAH'er, som de sædvanligvis blot kaldes. Her på Jorden forbinder vi sædvanligvis disse PAH'er med noget negativt, da de er kræftfremkaldende. Som navnet antyder, består de af kulstof (carbon) og hydrogen, hvor kulstofatomerne er arrangeret i ringformede strukturer. De dannes bl.a. som et produkt af ufuldstændig forbrænding, og derfor findes de fx i udstødningsgasserne fra benzin- og dieselbiler og bidrager dermed til luftforureningen.

I det interstellare rum, altså rummet mellem stjernerne, spiller PAH'er måske en helt anden og meget mere positiv rolle som katalysatorer for kemiske reaktioner. De kan således være en vigtig brik i at forklare, hvordan de mere end 150 forskellige molekyler, som astronomerne hidtil har detekteret i det interstellare rum, er blevet dannet. Umiddelbart er det svært at forstå, hvordan der kan opstå en sådan grad af kemisk kompleksitet under de ekstremt lave temperaturer og tryk, der hersker i rummet. Men ved at koble observationerne med eksperimenter her på jorden, kan vi nærme os en forståelse af, hvad der foregår.

Netop det er Liv Hornekær i fuld gang med på Aarhus Universitet. I en årrække har hun sammen med sine kolleger forsket i, hvordan molekyllært hydrogen (H_2) kan dannes på overfladen af interstellare

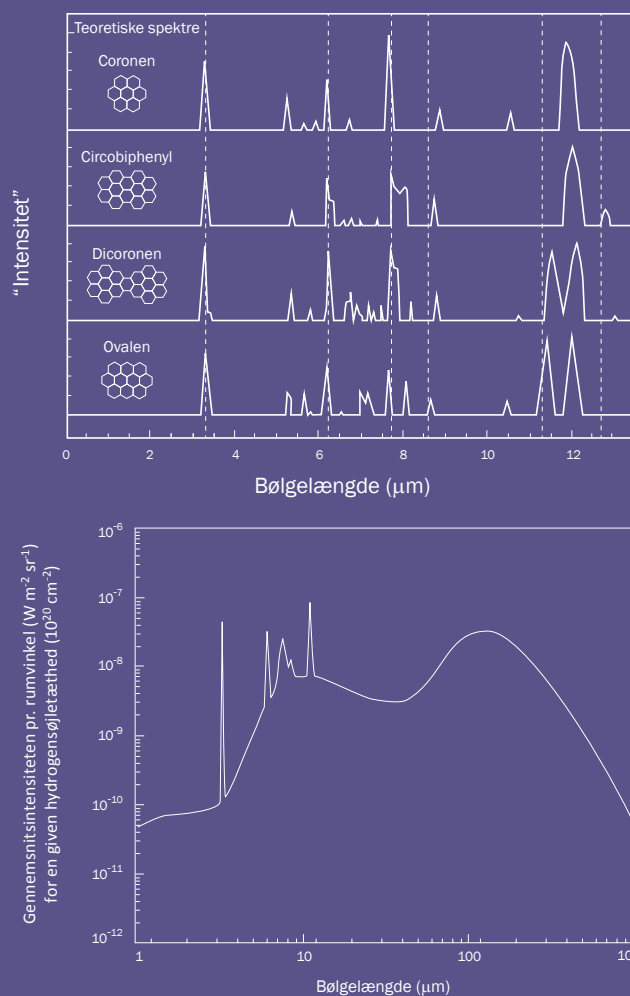
støvkorn i rummet. De seneste år har hun fokuseret specielt på PAH'er som mulige katalysatorer for denne proces. Og nu skal hun i gang med en ny serie eksperimenter, som også skal inddrage effekten af UV-stråling. Nye forskningsresultater tyder nemlig på, at UV-stråling kan have en afgørende finger med i spillet.

Kemi i rummet

Drivkraften for Livs forskning er som nævnt ønsket om at forstå, hvordan kemisk kompleksitet kan opstå i det interstellare rum. Og det er et emne, der optager mange forskere inden for et bredt spekter af fagområder. De fleste molekyler, man har detekteret i det interstellare rum, er simple. Det gælder fx molekyllært hydrogen (H_2) og vand (H_2O). Andre er mere komplekse, fx kulstofmolekyler som "buckyballs" (C_{60}), hvor 60 kulstofatomer sidder i en kugleformet struktur, eller molekyler som formaldehyd ($HCHO$) og glykolaldehyd ($C_2H_4O_2$), som er et simpelt sukkermolekyle. De to sidstnævnte er interessante, fordi de er, hvad man kalder *præbiotiske* molekyler – dvs. grundlæggende byggestene nødvendige for at kunne opbygge levende organismer i den form, man finder det på Jorden.

Molekyllært hydrogen er det mest almindelige molekyle i universet, og det spiller en nøglerolle i de kemiske netværk, som leder til mere komplekse molekyler. Derfor er et vigtigt skridt i forståelsen af de kemiske processer i rummet at kunne forklare, hvordan hydrogenmolekyler bliver dannet. Man

Observation af PAH-molekyler i det interstellare rum



Vores viden om kemisk kompleksitet i det interstellare rum, kommer fra studier af elektromagnetisk stråling (lys, mikrobølger og radiobølger) der kommer derfra. Hvis man ser på intensiteten af strålingen som funktion af bølglængden eller frekvensen (strålingens spektrum), kan man se at der ved nogle bølglængder er for meget lys og ved andre for lidt. Fra laboratoriestudier på jorden ved vi, at alle atomer og molekyler udsender og absorberer lys ved bestemte bølglængder. Hvis vi sammenligner de spektre, der er målt i laboratorierne med dem, der er observeret fra det interstellare rum, kan vi se, om der er sammenfald mellem spektrene fra specifikke atomer og molekyler og de bølglængder i de interstellare spektre, hvor der er for meget eller for lidt stråling.

Et eksempel på en sådan sammenligning er vist i figurerne. Her sammenligner man teoretisk beregnede spektre fra forskellige PAH-molekyler (øverst) med et spekter, der viser den typiske intensitetsfordeling i det interstellare rum (nederst). Man kan se, at der er god overensstemmelse mellem de bølglængder, hvor PAH'erne udsender stråling (fx ved 3,3 μm , mellem 6-8 μm og omkring 12 μm) og de bølglængder, hvor der er forøget stråling i det interstellare rum. Det indikerer, at det kunne være varme PAH-molekyler i det interstellare rum, der udsender den observerede stråling. Havde molekylerne været kolde, ville vi i stedet have set absorption af stråling (resulterende i lavere intensitet) ved de samme bølglængder.

Man kan også se, at de teoretiske spektre for de forskellige PAH-molekyler har store ligheder. Det gør det svært at identificere præcist, hvilke PAH-molekyler der findes i det interstellare rum.

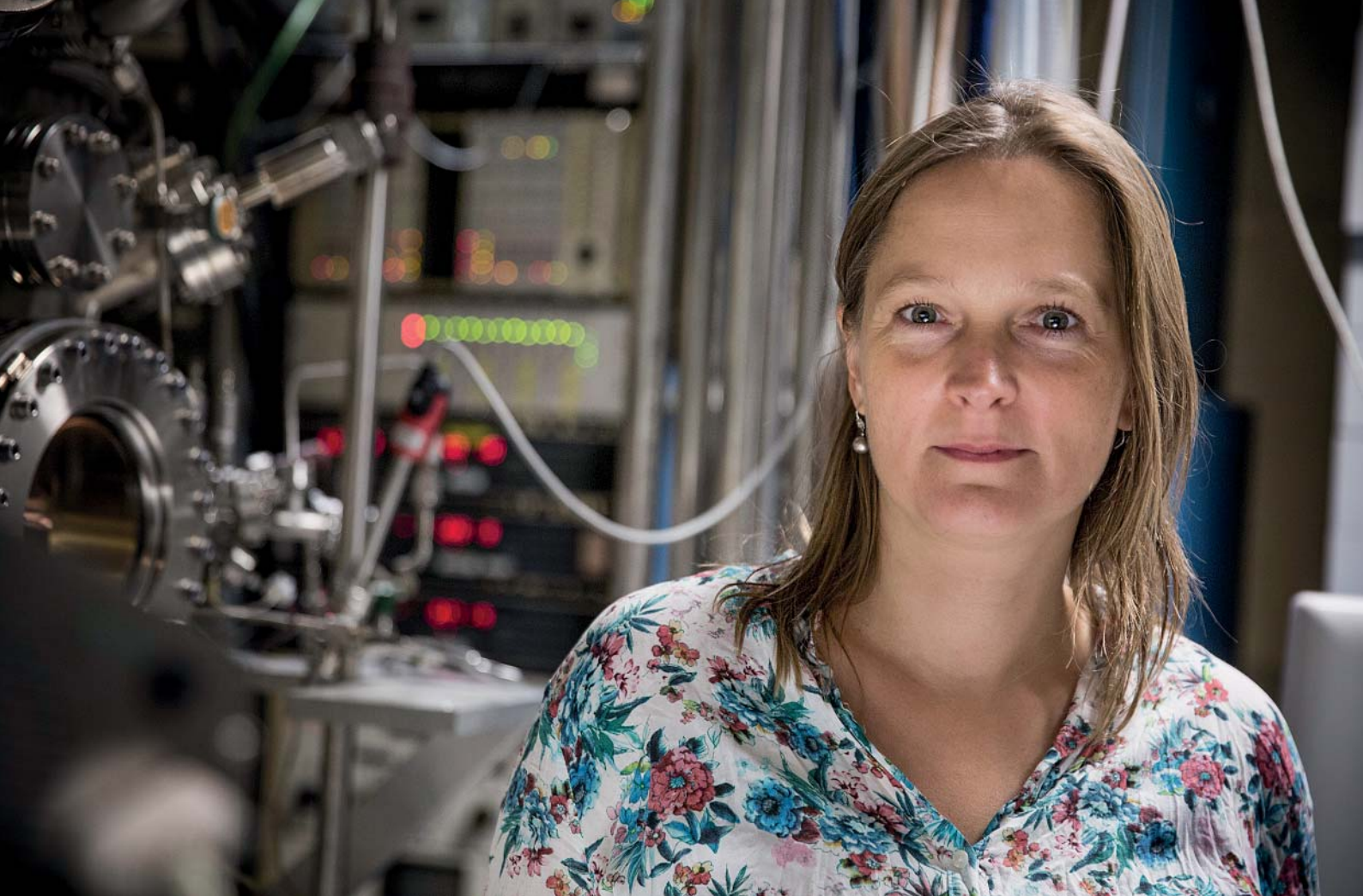
ved, at i de stjernetaåger, hvor nye stjerner fødes, findes næsten alt hydrogen på molekylær form. Men ved de lave tætheder af stof, der hersker i det interstellare rum, findes der ikke nogen effektiv måde at danne molekylært hydrogen ud fra to hydrogenatomer. Hvis to hydrogenatomer tilfældigvis "bumper" sammen i rummet og danner molekylært hydrogen, vil der ved reaktionen frigives så megen energi, at molekylet straks rives fra hinanden igen. Samtidig vil kosmisk stråling og UV-stråling konstant bombardere de hydrogenmolekyler, der måtte være blevet dannet, og splitte dem ad. Med andre ord må der eksistere en højst effektiv mekanisme, der er i stand til at producere molekylært hydrogen i en takt, så det kan holde trit med de destruktive processer.

I dag er de fleste forskere enige om, at denne mekanisme involverer reaktion mellem to hydrogenatomer på overfladen af interstellare støvkorn. Man mener også, at disse støvkorn fungerer som katalysator for dannelsen af mere komplekse molekyler som vand og methanol.

Et godt spørgsmål er, hvad disse interstellare støvkorn selv består af. Og det er her, at vores PAH'er træder ind på scenen.

Kunsten at opdage en PAH

Interstellart støv findes formentlig på mange former. En stor del af det menes at være kulstofholdigt som amorft kulstof, partikler af grafit med en "løgagtig" struktur – og så netop PAH'er. Det er dog ikke let at afgøre med 100 % sikkerhed, hvad støvet består af. Eksistensen af PAH'er i det interstellare rum har således været heftigt debatteret blandt forskere de seneste 20 år. Efterhånden er selv de mest hårdnakkede skeptikere dog blevet overbevist om, at PAH'er findes i rummet, og at de bærer så meget som 5-10 % af det kulstof, der findes i det interstellare rum. Grunden til debatten er, at man ikke entydigt har kunnet identificere en enkelt unik type af PAH via observationer. Betegnelsen PAH dækker over en hel zoologisk have af molekyler, som dog har fællestræk i den måde atomerne er arrangeret i såkaldte aromatiske ringe. Det er derfor PAH som en generel struktur, man er enige om eksistensen af.



Liv Hornekær er lektor i eksperimentel overfladefysik ved Institut for Fysik og Astronomi og Interdisciplinært Nanoscience Center – iNANO, Aarhus Universitet. Hun har en ph.d.-grad i fysik og har de seneste 15 år studeret, hvordan kemiske reaktioner på overflader kan bidrage til interstellar kemisk kom-

pleksitet. Viden fra de studier har gjort det muligt for hendes forskningsgruppe at udvikle nye metoder til at kontrollere de elektriske egenskaber i materialet grafen (2D- versionen af grafit) samt igangsat studier af potentielle nye metoder til at beskytte metaloverflader mod rust. liv@phys.au.dk

Foto: Jesper Rais

Kemiske stoffer i rummet afsløres ved at studere strålingen fra rummet i særlige bølglængdeområder. Man mener nu, at bestemte bånd i det infrarøde område er signaturer for egenskaber ved de aromatiske ringe i PAH'er. Man mistænker også PAH'er for at være årsagen til andre "mærkværdigheder" i spektrene fra det interstellare rum, som forskerne hidtil har undret sig over. Fx har en gruppe internationale forskere i et nyligt studie publiceret i *Nature Communications* argumenteret for, at de såkaldte diffuse interstellare bånd (en større gruppe af mere end 400 absorptionsbånd i de interstellare spektre) stammer fra PAH'er. En af komplikationerne ved PAH'er er, at deres spektre afhænger af deres størrelse, om de findes som neutrale molekyler eller ioner, og om der er andre kemiske stoffer fasthæftet til dem.

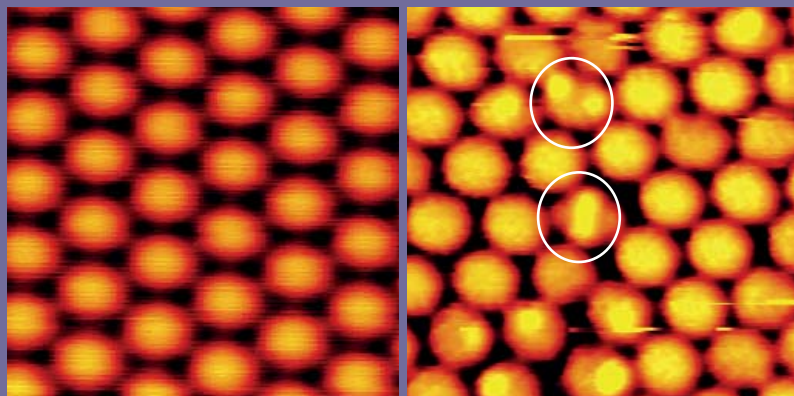
Fra observationer til eksperimenter

I nogle særlige "miljøer" i det interstellare rum med meget kraftig UV stråling kan man se, at der dannes molekylært hydrogen i stort omfang, og at der i de samme miljøer også er store mængder PAH'er

til stede. Det antyder, at PAH'er kan spille en aktiv rolle i de interstellare kemiske processer.

Liv har med sin forskningsgruppe som de første eksperimentelt kunnet vise, at PAH-molekyler faktisk kan katalysere dannelsen af molekylært hydrogen. Eksperimenterne foregik ved at bombardere neutrale molekyler af PAH'en coronen med en stråle af hydrogenatomer. Herved bliver coronen "superhydrogeneret", hvilket vil sige, at der optages ekstra hydrogenatomer på kulstofatomerne i coronen-molekylet. Den ultimative grad af superhydrogenering er således, hvis samtlige kulstofatomer har optaget et ekstra hydrogenatom. Med eksperimenterne kunne Liv og kolleger vise, at man faktisk kunne nærme sig denne teoretiske grænse i praksis, hvilket man hidtil ikke havde troet muligt. Endvidere kunne de ved at bombardere coronen med deuterium (en lidt tungere isotop af hydrogen) vise, hvordan hydrogenatomer blev udskiftet med deuteriumatomer i processen. Den eneste sandsynlige reaktion, der rent energimæssigt kan forklare observationerne, er, at der i processen dannes hydrogenmolekyler.

Eksperimentelle teknikker



De to vigtigste eksperimentelle metoder til at studere PAH-molekylernes katalytiske aktivitet er masse-spektrometri og skanning-tunnel-mikroskopi (STM). Begge typer målinger foregår i vacuum-kamre under ekstremt lavt tryk (10^{-10} mbar) for at efterligne betingelserne i det interstellare rum.

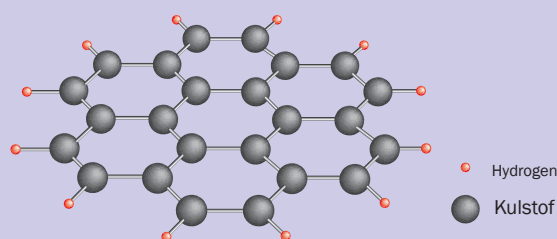
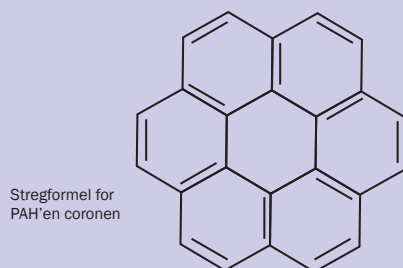
Masse-spektrometri-målingerne bruges til at bestemme hvor

mange ekstra hydrogen- eller deuteriumatomer, der har bundet sig til coronenmolekyler. Det foregår ved, at PAH-molekylerne sendes ind på en grafitoverflade og derefter bombarderes med hydrogen eller deuterium. Herefter opvarmes grafitoverfladen, og når PAH-molekylerne så fordampes, opfanges de i et massespektrometer, hvor deres masse, og dermed også graden af superhydrogenering, bestemmes.

Skanning-tunnel-mikroskopi bruges til at bestemme, hvor de ekstra hydrogenatomer sidder på PAH-molekylerne. Et eksempel på STM-billeder af PAH-molekylet coronen på en kobberoverflade med og uden superhydrogenering er vist på billederne.

Coronen-molekylerne fremstår som lysende runde former. Når coronenmolekylerne hydrogeneres kan hydrogenatomernes position bestemmes ved at se på den substruktur (de nye lyse strukturer), der pludselig bliver synlig i molekylerne. Når de hydrogenerede molekyler efterfølgende bestråles med UV stråling, er håbet, at man direkte i STM'et vil kunne se deres substruktur ændre sig, efterhånden som de ekstra hydrogenatomer rystes af.

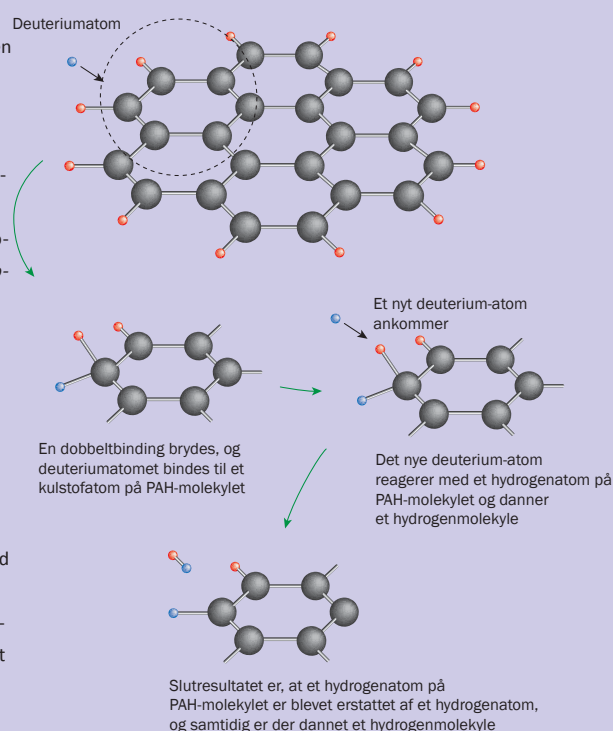
PAH-molekylet coronen som en generel model



I liv Hornekærs eksperimenter bruges PAH-molekylet coronen som en generel model for PAH'er. Figuren øverst viser strukturen af dette molekyle på to forskellige måder – dels som en stregformel og dels mere grafisk. Som det fremgår, sidder hydrogenatomerne rundt i kanten på molekylet. Det vigtige at bemærke er, at alle kulstofatomer har en dobbeltbinding. Hvis en dobbeltbinding brydes, er der mulighed for, at et ekstra hydrogenatom kan binde sig til molekylet. Når coronen har ekstra hydrogenatomer i forhold til grundtilstanden siger man, at det er *superhydrogeneret*. I det ekstreme tilfælde vil samtlige dobbeltbindinger være brudt, og alle kulstofatomer derfor have et ekstra hydrogenatom.

Liv Hornekærs eksperimenter har vist, at det reelt er muligt at opnå en sådan grad af *superhydrogenering*.

Figurene til højre viser i skematisk form, hvordan dannelsen af hydrogenmolekyler tænkes at foregå. Ud fra eksperimenter med at bombardere coronen med deuterium (en tung isotop af hydrogen) har Livs forskningsgruppe vist, hvordan hydrogenatomer udskiftes på coronen-molekylet. Den eneste energimæssigt sandsynlige forklaring på observationerne er, at der samtidig dannes hydrogenmolekyler.



Fotokatalyse

Der, hvor forskningen er i dag, ved man altså, at PAH-molekyler kan blive superhydrogenerede, når de bombarderes med hydrogenatomer. Og jo mere superhydrogenerede molekylerne er – dvs. jo flere hydrogenatomer, der er koblet til dem – jo hurtigere vil dannelsen af molekylært hydrogen kunne foregå.

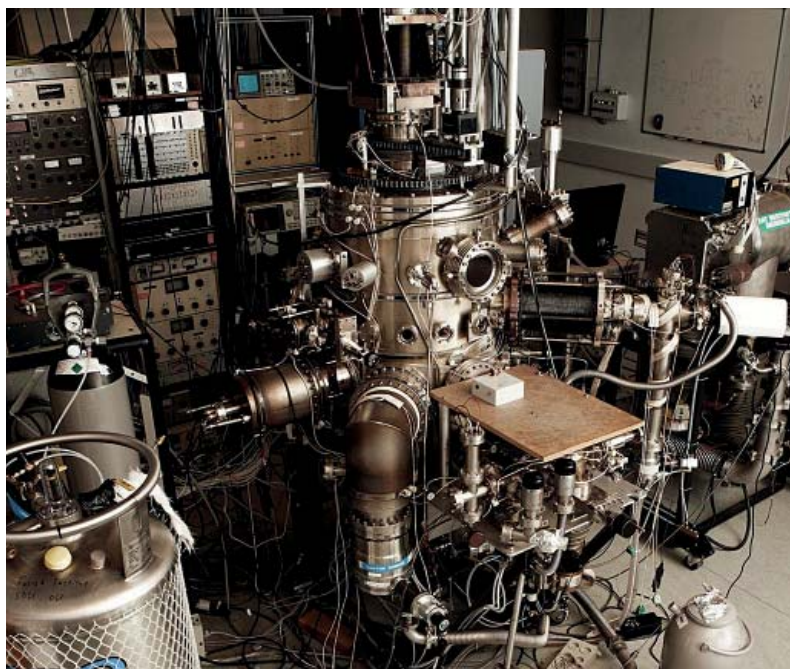
Som allerede nævnt vil kosmisk stråling og UV-stråling imidlertid konkurrere med de processer, der fører til superhydrogenering af PAH-molekyler ved hele tiden at ryste de overskydende hydrogenatomer af igen. Men i denne konkurrence ligger måske også nøglen til at forstå dannelsen af molekylært hydrogen. Nogle forskningsresultater tyder nemlig på, at hydrogen, der rystes af PAH-molekylet af UV-strålingen, er på molekylær form og ikke atomart hydrogen. Dermed kan UV-strålingen spille en aktiv rolle i dannelsen af molekylært hydrogen, og der vil så være tale om en såkaldt fotokatalytisk proces.

At undersøge netop dette samspil mellem UV-stråling og PAH-molekyleres evne til at katalysere dannelsen af molekylært hydrogen er kernen i Livs forskningsprojekt, som er finansieret via en bevilling fra Forskningsrådet for Natur og Univers under Det Frie Forskningsråd. Ved hjælp af et særligt tilpasset STM-mikroskop (Scanning Tunnel Mikroskop) kan hun undersøge overfladen på PAH-molekyler med en præcision på molekyleskala, samtidig med at de udsættes for UV-lys. På den måde kan hun præcist bestemme de steder på overfladen af PAH-molekylerne, hvor hydrogenmolekylerne rystes løs af UV-strålingen. Ved samtidig at måle på de molekyler, der kommer ud af reaktionerne og kombinere målingerne med teoretiske overvejelser, vil hun kunne kortlægge reaktionsvejene.

I første omgang handler eksperimenterne primært om, hvordan PAH-molekyler kan katalysere (og måske fotokatalysere) dannelsen af molekylært hydrogen. Det næste skridt i projektet bliver at udvide eksperimenterne til reaktioner mellem PAH-molekyler og oxygen. Målet er her at undersøge den mulige fotokatalytiske aktivitet af PAH'er i dannelsen af molekylært oxygen (O_2), hydroxyl (OH), hydrogenperoxid (H_2O_2), vand og forskellige kulstofholdige molekyler.

Mod stadig større kompleksitet

Hvis PAH'er virkelig spiller en stor rolle i de kemiske processer i rummet, er et naturligt spørgsmål, hvor disse PAH'er selv kommer fra. Det kan forskerne endnu ikke give noget endegyldigt svar på, og der er flere teorier i omløb. De kan fx tænkes at blive dannet ved forbrændingsprocesser, når stjernerne afstøder materiale fra deres overflade i de sene faser af deres "livscyklus".



Men hvorfor udfolde disse store anstrengelser på at forstå, hvordan specifikke molekyler dannes i rummet milliarder og atter milliarder af kilometer fra Jorden? Grundlæggende handler det om at besvare nogle meget fundamentale spørgsmål om vores univers. De processer, der her bliver undersøgt, foregår i de regioner i rummet, hvor nye stjerner og planeter bliver født. Resultaterne er dermed med til at kaste lys over, hvilke kemiske komponenter der så at sige er til rådighed ved opbygningen af en ny planet.

Og så føjer det små brikker til den store fortælling, der i sidste ende handler om os selv: Spørgsmålet om, hvordan livet er opstået på jorden. Er livets byggesten primært blevet til her på jorden? Eller var mange af de nødvendige byggesten allerede støbt i rummet forud for dannelsen af planeterne i vores solsystem? Hvis det sidste er tilfældet, øger det sandsynligheden for, at liv kan være et generelt fænomen i universet.

Alle eksperimenterne foretages ved meget lavt tryk (10^{-10} mbar) i et såkaldt ultra-høj vakuum kammer.

Videre læsning:

Liv Hornekær og Arnd Baurichter: Støvkorn påvirker stjernefødsler. *Aktuel Naturvidenskab* nr. 3-2005



DET FRIE FORSKNINGSRÅD
DANISH COUNCIL FOR
INDEPENDENT RESEARCH

Artiklen bringes i samarbejde med Det Frie Forskningsråd. Liv Hornekærs projekt er finansieret af en bevilling fra Det Frie Forskningsråd | Natur og Univers (DFF-Forskningsprojekt 1). DFF-Forskningsprojekter har til formål at støtte banebrydende forskning af høj international kvalitet og fremme forsknings-samarbejde nationalt og internationalt.

Det Frie Forskningsråd dækker alle videnskabelige hovedområder og uddeler hvert år godt 1 mia. kr. til forskningsprojekter baseret på forskernes egne ideer. Det Frie Forskningsråd består af 84 anerkendte forskere udpeget på baggrund af deres høje faglige kompetence.