

Atomfysik med synkrotronstråling: Laboratorie-astrofysik

Torkild Andersen, Finn Folkmann, Henrik Kjeldsen og Helge Knudsen, Institut for Fysik og Astronomi, Aarhus Universitet.

Studiet af objekter som Solen, stjerner eller det interstellare rum nødvendiggør ofte et indgående kendskab til forskellige fysiske discipliner for at nå frem til en rimelig forståelse af de astronomiske observationer. For eksempel spiller partikelfysikken en væsentlig rolle for forståelsen af universets fødsel, kernefysikken for energiproduktionen i Solen og stjernerne, atomfysikken for bestemmelse af grundstof indholdet i de observerede objekter, hydro-dynamikken for forståelse af Solsvingninger osv. En række af de fysiske størrelser, der er behov for at kende, forefindes allerede som resultater fra udviklingen af de fysiske discipliner, men ofte vil man også kunne stå overfor problemer, hvis løsning kræver en videreudvikling af disse.

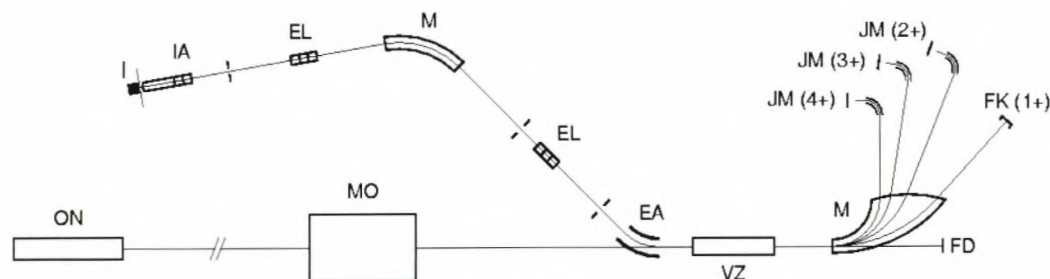
Flere steder i verden er der etableret institutter, der fokuserer på laboratorie-astrofysik, mest kendt er det amerikanske institut JILA (Joint Institute for Laboratory Astrophysics) i Boulder, Colorado, der blev grundlagt i 1950'erne og som siden da har været blandt de internationalt førende institutter indenfor atom- og molekylfysik. Forskningen på JILA er imidlertid ikke kun målrettet imod astrofysik, f.eks. var det på JILA, at Bose-Einstein kondensation af alkali metal damp for første gang blev realiseret i 1995.

Bestemmelsen af grundstofindholdet for astrofysiske objekter spiller en væsentlig rolle for mulighederne for at opstille modeller for disse og deres omgivelser. Som følge af de ekstreme temperaturer, der kan forekomme f.eks. på Solen, kan atomer forefindes i næsten alle mulige ionisationstilstande, fra negative ioner som H^- , til meget højt-ladende eller fuldt strippede

atomer. Grundstoffet jern (Fe), som spiller en væsentlig rolle i mange astrofysiske sammenhænge, findes som ioner med ladninger fra +1 til +16 i Solens ydre lag. Solatmosfærens temperatur varierer fra et minimum på ca. 4500 K lige uden for Solranden, stigende langsomt ud gennem kromosfæren for derpå at stige meget hurtigt indenfor et ca. 100 km tykt overgangslag til temperaturer på $2 \cdot 10^6$ K i koronaen, en temperatur der bibeholdes helt ud til flere Solradiers afstand.

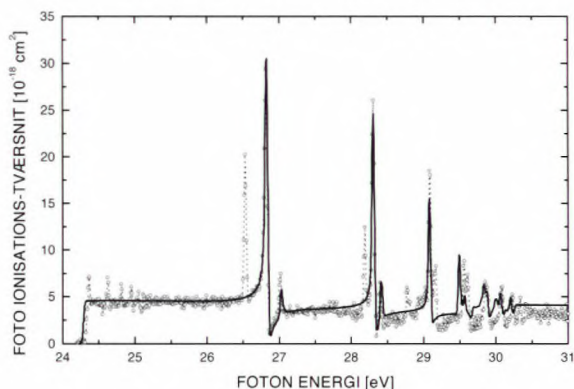
Fra observatorier på Jorden eller fra de rumbaserede observatorier kan man følge lysudsendelsen fra de astrofysiske objekter. Disse spektre indeholder information om hvilke grundstoffer, der findes i objektet, disses ioniseringsgrad og herigennem information om de fysiske omgivelser, samt i hvilken mængde grundstofferne findes. Spektralliniernes positioner angiver entydigt fra hvilket grundstof, som den observerede spektrallinie stammer, men som følge af det meget store antal spektrallinier, der findes indenfor visse grundstoffer (specielt Fe) kan der ofte forekomme to eller flere tætliggende spektrallinier, som man trods meget gode spektrografer ikke kan adskille. Det er derfor nødvendigt at kunne simulere de observerede spektre på grundlag af en viden om bølgelængder for spektrallinier, disses oscillatorstyrker (et mål for overgangssandsynlighed) samt den kontinuerte baggrunds oprindelse og intensitet.

Selvom kendskabet til spektralliniers positioner er stort, findes der fortsat uidentificerede spektrallinier fra astrofysiske objekter. Kendskabet til oscillatorstyrker er mere begrænset, idet bestemmelsen af disse kræver



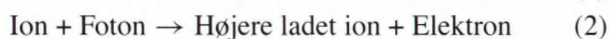
Figur 1. Layout for fotoionisationsforsøget visende ondulator (ON), monokromator (MO) vekselvirkningszone (VZ) ionaccelerator (IA), elektrostatiske linse (EL), analysemagnet (M), elektrostatisk afbøjning (EA) samt detektorer, Johnston multipliers (JM), Faraday-kop (FK) og fotondetektor (FD).

et detaljeret kendskab til levetider for anslåede tilstande i atomer og ioner samt om den relative intensitetsfordeling blandt mulige henfaldskanaler for hver anslået tilstand. Kendskabet til oscillatorstyrker er forbedret væsentligt gennem de sidste 30–40 år som følge af udviklingen af nye eksperimentelle metoder til levetidsbestemmelse, men det er fortsat en stor begrænsning, at oscillatorstyrker kun kendes for et ret så begrænset udvalg af overgange – og ofte kun for lavt ioniserede atomer. De nyere observationer fra Hubble teleskopet har aktualiseret dette problem.



Figur 2. Fotoionisationstværsnit for C^+ ionen fra tærskelværdien ved 24.4 eV til 31 eV. Den fuldt optrukne kurve er den nyeste teoretiske beregning, den stiplede kurve med punkterne illustrerer de eksperimentelle resultater.

Den baggrund, som spektrallinierne er overlejrede, skyldes fotoionisationsprocesser og benævnes opaciteten, som følgelig er en vigtig størrelse at kende for at kunne simulere de eksperimentelle spektre. Imidlertid er det vanskeligt at måle reaktionstværsnit (dvs. sandsynligheder) for fotoionisationsprocesser som:



idet der kræves et detaljeret kendskab til de indgående komponenters koncentration. For neutrale atomer (reaktion 1) er det ekstremt vanskeligt at bestemme tætheden af atomer, når der ses bort fra ædelgasserne, så kendskabet til absolutte fotoionisations tværsnit er meget begrænset for neutrale atomer. For positive ioner (reaktion 2) er der også begrænsninger, idet det er svært at fremstille intense stråler af disse, hvorimod det er let at bestemme tætheden. Da absolutte fotoionisations tværsnit for astrofysisk interessante ioner er i størrelsesordenen 10^{-18} til 10^{-19} cm^2 (eller 1 til 0.1 Mb) er disse vanskelige at måle på grund af den lave ionintensitet. Det er derfor nødvendigt at arbejde med intense fotonkilder, hvilket først er blevet muligt indenfor det sidste årti som følge af udviklingen af undulatorer til synkrotronstråling. Undulatorer har bevirket en forøgelse af fotonfluxen med to til tre størrelsesordener sammenlignet med, hvad man kan opnå fra afbøjningsmagneter. Lasere er endnu ikke

brugbare som alternative lyskilder, idet den krævede foton energi dækker et energiområdet fra ca. 10 eV til ca. 300 eV.

Ved lagringen ASTRID er der opbygget et apparatur bestående af en ion-accelerator og en vacuum ultraviolet fotonstråle, der dannes i undulatoren, se figur 1. Ionerne og fotonerne overlejres på en strækning af 50 cm, hvorefter der foretages en adskillelse af disse i et magnetfelt med efterfølgende bestemmelse af intensiteten af de forskellige typer ioner samt af fotonfluxen. Samtidigt sker der en nøje bestemmelse af den rumlige overlejring af ioner og fotoner indenfor overlappingsområdet. På grundlag heraf kan man bestemme de absolutte fotoionisationstværsnit, når de anvendte detektorers effektivitet er kendt.

Med dette udstyr er det for første gang blevet muligt at bestemme absolutte fotoionisationstværsnit for astrofysisk betydningsfulde ioner som f.eks. C^+ . Som følge af mangel på eksperimentelle data er hidtidige modeller for astrofysiske objekter blevet baseret på teoretiske forudsigelser for absolutte fotoionisations tværsnit. Disse beregninger er gennemført for samtlige grundstoffer til og med jern og for alle tænkelige ioner heraf. Det har imidlertid ikke hidtil været muligt at afprøve nøjagtigheden af disse beregninger, idet der ikke fandtes eksperimentelle resultater at sammenligne med. Af hensyn til de astrofysiske modellers egnethed ønskes de atomfysiske størrelser som oscillatorstyrker og fotoionisationstværsnit kendt med en nøjagtighed på 10% eller bedre. Det stiller store krav til såvel de teoretiske beregninger som de eksperimentelle målinger. De store teoretiske projekter som f.eks. OPACITETS-projektet blev netop startet i midten af 1980'erne for at opnå bedre data til modelberegningerne. De første resultater fra ASTRID for den vigtige C^+ ion blev opnået i dette forår. Figur 2 viser en sammenligning imellem de eksperimentelle resultater og de teoretisk forudsagte fotoionisations tværsnit i energi området 24–31 eV. Der er en fin overensstemmelse lige over ionisationstærsklen ved 24.4 eV, men med stigende foton energi opstår der afvigelser, der udgør ca. 15% ved 30 eV og 35% ved 50 eV. Samtidigt kan det bemærkes, at der er visse af de overlejrede resonanser, som ikke findes i de teoretiske beregninger (se f.eks. resonansen ved 26.5 eV). Årsagen hertil er, at beregningerne negligerer relativistiske effekter som spin-orbit effekten, der for lette atomer og ioner anses for neglignel, men som her manifesterer sig gennem spin-orbit inducerede autoionisations processer. Det igangværende forskningsprojekt udgør en del af forsknings-programmet ved Aarhus Center for Atomfysik (ACAP), der er finansieret af Danmarks Grundforskningsfond. Projektet har til formål af afprøve en række af de teoretisk forudberegnete fotoionisations tværsnit for astrofysisk betydningsfulde ioner som C^+ , C^{++} , N^+ , O^+ , Mg^+ , Si^+ og Fe^+ , men tillige at studere fotonvekselvirkningen med ioner, atomare som molekulære, positive som negative generelt, for at opnå en bedre indsigt i ion-foton

vekselvirkning omfattende indre elektroner.

Fotoionisationsprojektet udføres som et dansk-engelsk samarbejde. Med udnyttelse af den intense fotonstråle fra ondulatoren er der tillige opbygget to andre forsøgopstillinger, hvoraf den ene også har sin baggrund i laboratorie-astrofysik, idet der studeres spredning af lavenergetiske elektroner på aromatiske

molekyler. Formålet er at bestemme tværsnit for dannelse af negative ioner af aromatiske kulbrinter, en processom man mener kan spille en betydningsfuld rolle i rummet. Synkrotronstrålingen anvendes her til frembringelse af de meget lavenergetiske elektroner ved fotoionisation af argon atomer. Dette projekt gennemføres af en engelsk-dansk-fransk gruppe.

Negative ioner studeret ved ASTRID: En legeplads for grundlæggende atomfysik

Peter Balling, Institut for Fysik og Astronomi, Aarhus Universitet.

Negative ioner spiller en vigtig rolle i mange områder af astronomi, fysik og kemi. En negativ ion dannes ved, at et atom eller et molekyle binder en ekstra elektron. Dette er muligt til trods for, at det neutrale atom eller molekyle ikke påvirker den ekstra ladning med en langtrækkende tiltrækning. Bindingen skyldes et induceret dipolmoment samt den tiltrækning, atomernes positive kerne udfører på elektronen når den trænger ind i elektronskyen fra de resterende elektroner. Den resulterende binding er svag og tiltrækningen korttrækkende ($\sim 1/r^4$).

Det har længe været kendt, at negative ioner spiller en vigtig rolle i bindingen af faste stoffer (ionkrystaller som NaCl) og ved kemiske reaktioner i væsker. Denne artikel omhandler negative ioner i gasfasen. Disse systemer har været studeret eksperimentelt siden de nødvendige højvakuum teknikker blev tilgængelige i 1950'erne, idet negative ioner er forholdsvis skrøbelige atomare systemer på grund af den svage binding af den ekstra elektron. Negative ioner i gasfasen har betydning for opførslen af kolde plasmaer, som findes i områder, der spænder fra det teknologiske såsom design af gaslasere til det mere fundamentale som astronomi, hvor negative ioner influerer de optiske egenskaber (opaciteten) af de ydre dele af stjerneatmosfærer.

Set fra en atomfysisk synsvinkel er negative ioner interessante systemer på grund af deres svagtbundne natur. For de fleste negative ioner er den såkaldte elektronkorrelation af afgørende betydning for deres eksistens, hvilket vil blive beskrevet i større detalje i næste afsnit. Denne artikel beskriver, hvordan lagerringen ASTRID er et værktøj, som har muliggjort helt nye typer af eksperimenter, der bidrager til vores forståelse af negative ioner.

Atomar struktur – et resumé

For at belyse betydningen af elektronkorrelation skal her kort mindes om opbygningen af traditionel atomar

struktur. Et atom, bestående af en kerne med ladning Ze , som binder N elektroner med ladning e og masse m , beskrives ved en Hamilton operator

$$H = \sum_{i=1}^N \left(\frac{Ze^2}{r_i} + \frac{\mathbf{p}_i^2}{2m} \right) + \sum_{i < j}^N \frac{e^2}{r_{ij}},$$

hvor r_i og $\mathbf{p}_i$ angiver afstanden mellem elektron i og kernen samt dennes impuls, og hvor r_{ij} er afstanden mellem elektron i og j . Den tilhørende Schrödinger ligning kan kun løses eksakt for hydrogenatomet, mens man for flerelektron atomer må benytte tilnærmende metoder. Problemet hidrører fra elektron-elektron vekselvirkningen, der ikke er separabel i de enkelte elektroners koordinater. Den traditionelle metode er således at forsøge at beskrive effekten af de $N - 1$ elektroner på den sidste elektron ved et sfærisk symmetrisk middelpotential. Under denne antagelse kan man løse ligningen for den sidste elektron, og man kan så gentage proceduren og løse hele problemet selvkonsistent. De enkelte elektroner behandles som værende uafhængige og modellen kaldes således den uafhængige elektronmodel. Indenfor denne model kan hver elektron tilskrives et radiale og et angulært kvantetal, n og l , og de samlede $n_i l_i$ benævnes konfigurationen for en given energitilstand.

Lad os betragte den simpleste negative ion, H^- . Den består af en proton og to elektroner og er eksperimentelt påvist at have en bindingsenergi på 0.75 eV. Hvis man forsøger at beskrive dette system i den traditionelle uafhængige elektronmodel, finder man, at H^- ikke er bundet. Måske er det i virkeligheden klart nok, at man ikke bare kan smøre ladningen fra den ene elektron ud som et sfærisk symmetrisk potential, som den anden elektron så mærker. Det, der egentlig sker, er nærmere, at de to elektroner helst vil sidde på modsatte sider af protonen, så de oplever størst mulig tiltrækning fra kernen og mindst mulig indbyrdes frastødning. Et billede som dette kan aldrig inkluderes i den uafhængige elek-