

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-

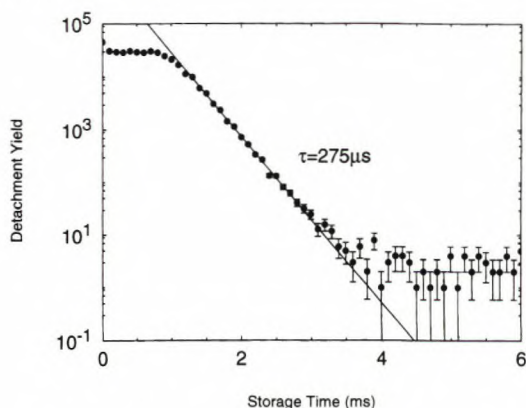
tronmodel, der således fejler i beskrivelsen af den negative hydrogenion.

Lad os slå fast, at elektronkorrelation, som beskrevet ovenfor, er en del af alle atomare og molekulære systemer. Den første eksperimentelle observation af den uafhængige elektronmodels utilstrækkelighed var således i højt anslåede tilstande i helium. Negative ioner er blot systemer, hvor signaturerne af elektronkorrelation er særligt tydelige på grund af den svage binding af den ekstra elektron.

Eksperimentelle studier af negative ioner er rettet imod bestemmelser af deres strukturelle og dynamiske egenskaber. Strukturen er bestemt ved bindingsenergien samt energien for eventuelle resonanser, som beskrevet i det næstfølgende afsnit. Dynamiske egenskaber bestemmes typisk som levetider af tilstandene.

Levetider af metastabile negative ioner

Nogle atomare systemer danner ikke bundne negative ioner. Eksempelvis kan helium i grundtilstanden ikke binde en ekstra elektron på grund af den meget lave polarisabilitet, som er karakteristisk for en ædelgas. Helium kan derimod binde en elektron til sin anslående $1s2s\ ^3S$ tilstand, men idet den negative ion, der herved dannes, ligger energetisk over et helium atom i grundtilstanden og en fri elektron, vil tilstanden ikke være stabil. Udsendelsen af den ekstra elektron er imidlertid forbudt til laveste orden, hvor spin, angulært moment og paritet skal være bevaret. Levetiden for den negative ion viser sig at afhænge af finstruktur tilstanden, og er på flere hundrede mikrosekunder for den mest langlivede ($J=5/2$).



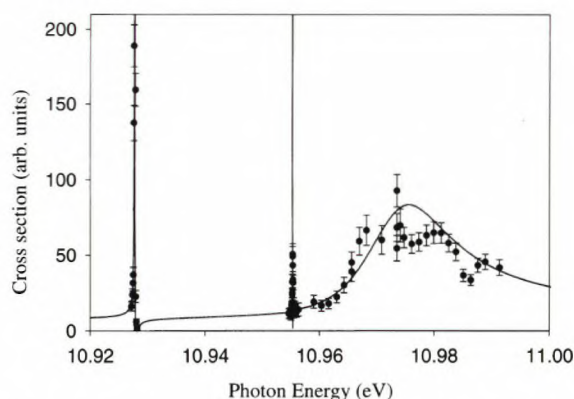
Figur 1. Typisk henfald for negative heliumioner.

Det er en stor eksperimentel udfordring at måle meget lange levetider (μs – ms området). Problemet er, at man skal observere systemet længe nok til at en betydelig del af ionerne henfalder, og samtidig skal man sikre sig, at systemet er upåvirket af systematiske effekter, som forstyrrer målingen. Lagringen ASTRID har demonstreret at kunne lagre stabile negative ioner med en lagringstid på nogle sekunder. Denne henfaldstid skyldes kollisioner med baggrundsgas på trods af det meget lave tryk i lagringen. Når nega-

tive ioner lever kortere end positive ioner skyldes det, at negative ioner har et større tværsnit for neutralisering i baggrundsgassen.

Ved at lagre en ~ 10 keV stråle af metastabile negative ioner i lagringen kan man måle henfaldet af ionerne over mange levetider. Ionernes henfald detekteres ved, at de neutrale atomer ikke afbøjes i lagringens hjørnemagneter og derfor kan ramme en detektor, der sidder efter en af disse. Tælleraten på denne detektor måles som funktion af tiden efter injektion og illustrerer ionstrålens henfald. Et typisk henfald for den negative heliumion er vist på figur 1. Det ses, at tælleraten kan beskrives som et eksponentielt henfald med en levetid på $275\ \mu s$. Bemærk, at de ioner, der henfalder efter én levetid, har fløjet 200 meter, hvilket illustrerer vanskeligheden ved at måle en så lang levetid med andre metoder. Den målte levetid afhænger af ionstrålens lagringsenergi, idet magnetfelterne i ringen blander de tre finstrukturkomponenter. Ved at ekstrapolere til intet felt fås en levetid på $350 \pm 15\ \mu s$. Dette resultat er korrigeret for et lille bidrag, der stammer fra fotoløsrivelse på grund af sort hulrumsstråling: Den negative heliumion er så løst bundet, at en del af den termiske stråling ved stuetemperatur kan løsrive elektronen. Da resultatet fra målingen på ASTRID fremkom, var der en stor spredning på de teoretiske beregninger af levetiden, og den præcise eksperimentelle måling har bidraget til at optimere beregningsmetoderne.

Den metode, der er beskrevet i dette afsnit, er siden blevet benyttet til at måle levetider af andre metastabile atomare negative ioner og nogle få negative molekyliioner.



Figur 2. Fotoløsrivelsestværsnittet for negative hydrogenioner.

Vakuumpultraviolet spektroskopi af den negative hydrogenion

Negative ioner har normalt kun en enkelt bunden tilstand, grundtilstanden. Spektroskopi af negative ioner knytter sig således til en bestemmelse af bindingsenergien for denne samt position og bredde af anslåede tilstande i kontinuet, som giver anledning til resonanser i elektronsprednings- eller fotoløsrivelses-

eksperimenter. På grund af opløsningsevnen kommer de mest præcise resultater idag fra laserspektroskopi af de negative ioner.

Den negative hydrogenion, som blev omtalt i det forrige afsnit, har et rigt spektrum af resonanser, som ligger nær ved tærsklerne for de anslåede tilstande i hydrogen. Spektroskopi af disse resonanser kræver således, at man kan benytte lys med en fotonenergi omkring 11 eV, det vil sige i det såkaldte vakuum-ultraviolette (VUV) område. Dannelse af lys med en god opløsning (lav båndbredde) i VUV området er vanskelig og dette har hindret præcise målinger på H^- .

ASTRID kan accelerere en ionstråle af negative hydrogenioner til flere MeV kinetisk energi. Ved denne energi sker der et betydeligt Doppler skift af lys fra laboratoriesystemet til ionernes hvilesystem. Dette muliggør spektroskopi med VUV lys med en *fast* bølgelængde, der lettere kan dannes med en lav båndbredde og derfor tillader en høj opløsning. Ved at ændre ionernes hastighed ændres Doppler skiftet og dermed den effektive fotonenergi, ionerne ser. Ionerne og VUV laserstrålen overlappes kollinear for at minimere bidrag til båndbredden fra vinkelspredning af de to stråler. Fotoløsrivelses tværsnittet måles ved at tælle antallet af neutrale hydrogenatomer, der dannes af laseren ved de forskellige effektive fotonenergier. Resultatet af en måling er vist på figur 2. Målingerne viser tre resonanser, hvoraf den ene (ved 10.928 eV) blev observeret med stærkt forbedret opløsning og den anden (ved 10.955 eV) blev set for første gang med den her beskrevne teknik.

Den gode opløsning, som anvendelsen af ASTRID har muliggjort, har tilladt en præcis bestemmelse af resonansernes positioner, og dette har bidraget til en kritisk test af de teoretiske beregninger. Observationen af den anden resonans, som ikke før har kunnet opløses, har fremkaldt en diskussion af antallet af resonanser, der kan forventes. Ved at studere både H^- og D^- har isotopeffekter kunnet undersøges. De fremtidige studier stiler mod en endnu højere opløsning, idet en sådan vil tillade at måle bredden af den lavestliggende resonans, som er endnu en kritisk parameter for teo-

retiske beregninger.

Konklusion

Vores eksperimentelle viden om fysiske og kemiske systemer følges i disse år tæt med de teknologiske landvindinger. For eksempel har spektroskopi af negative ioner været baseret på udvikling af højvakuum teknik, accelerator teknik og højtopløsende lasere. ASTRID er endnu et skud på stammen, der har bragt os i en position, hvor ny viden kan opnås. Tilstedeværelsen af et så unikt værktøj i Danmark har bidraget til at synliggøre Danmarks forskningsposition i international sammenhæng.

Referencer:

- [1] Metastable-ion lifetime studies utilizing a heavy-ion storage ring: Measurements on He^- , T. Andersen, L. H. Andersen, P. Balling, H. K. Haugen, P. Hvelplund, W. W. Smith and K. Taulbjerg, Phys. Rev. A **47** (1993) 890.
- [2] Positions and isotope shifts of the $H^- (^1P_o)$ dipole resonances below the $H(n=2)$ threshold, H. H. Andersen, P. Balling, P. Kristensen, U. V. Pedersen, S. A. Aseyev, V. V. Petrunin, and T. Andersen, Phys. Rev. Lett. **79** (1997) 4770.



Peter Balling er Ph.D. og forskningsadjunkt på Institut for Fysik og Astronomi, Aarhus Universitet.

Errata

“Fri-elektron laseren – Næste generation af brillante synkrotronstrålingskilder”

af Robert Feidenhans'l, Leif Gerward og Janus Staun Olsen, KVANT **10** side 16–24 (1999).

Der har desværre indsneget sig et par fejl i ovennævnte artikel.

Indledningens 2. afsnit, sidste linje: Periodiciteten skal være 1 mikrosekund i stedet for 1 millisekund.

Side 18, første linje: De højere harmoniske bidrag skyldes at elektronen på grund af dens sinusformige bevægelse i undulatoren ikke udfører en perfekt harmonisk bevægelse i sit hvilesystem (det system, hvori middelværdien af elektronens transversale hastighed er nul).

Side 19, første linje: “superledende magneter” skal være “superledende kaviteter”.