

University of Groningen

## Pathways to charge equilibration following multiple electron exchange between highly charged ions and atoms

de Nijs, Gerardus

**IMPORTANT NOTE:** You are advised to consult the publisher's version (publisher's PDF) if you wish to cite from it. Please check the document version below.

*Document Version*

Publisher's PDF, also known as Version of record

*Publication date:*

1996

[Link to publication in University of Groningen/UMCG research database](#)

*Citation for published version (APA):*

de Nijs, G. (1996). *Pathways to charge equilibration following multiple electron exchange between highly charged ions and atoms*. s.n.

### Copyright

Other than for strictly personal use, it is not permitted to download or to forward/distribute the text or part of it without the consent of the author(s) and/or copyright holder(s), unless the work is under an open content license (like Creative Commons).

The publication may also be distributed here under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license. More information can be found on the University of Groningen website: <https://www.rug.nl/library/open-access/self-archiving-pure/taverne-amendment>.

### Take-down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

*Downloaded from the University of Groningen/UMCG research database (Pure): <http://www.rug.nl/research/portal>. For technical reasons the number of authors shown on this cover page is limited to 10 maximum.*

# Atomic Units

quantity	value
Mass	$9.11 \cdot 10^{-31}$ kg
Charge	$1.60 \cdot 10^{-19}$ C
Length	$5.29 \cdot 10^{-11}$ m
Velocity	$2.19 \cdot 10^6$ m/s
Energy	$4.36 \cdot 10^{-18}$ J 27.2 eV
Time	$2.42 \cdot 10^{-17}$ s
Angular momentum	$1.05 \cdot 10^{-34}$ Js

Conversion of atomic units to SI-units. All atomic units are related to the 1s-electron in ground-state hydrogen.

The relation between non-relativistic energy  $E$  in keV  $\text{amu}^{-1}$  and the velocity  $v$  in atomic units is:

$$v = 0.2\sqrt{E}$$

# Publications

The work presented in this thesis is based on the following articles:

**A coincidence study of multiple-electron capture in  $^{15}\text{N}^{7+}$ -Ar collisions**

G de Nijs, R Hoekstra and R Morgenstern  
1994 *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* **27** 2557  
Chapter 4

**Target excitation in bare ion Xe/Ar collisions studied by electron target ion coincidences**

G de Nijs, R Hoekstra and R Morgenstern  
1995 *Nucl. Instrum. Methods B* **98** 307  
Part of chapter 5

**Pathways to charge equilibration in  $\text{C}^{6+}$ -Ar collisions studied by electron target-ion coincidences**

G de Nijs, R Hoekstra and R Morgenstern  
1996 to be published  
Part of chapter 5

**Multiple target ionization in collisions between highly charged ions and Ar**

G de Nijs, H O Folkerts, R Hoekstra and R Morgenstern  
1996 *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* **29** 85  
Chapter 6

# Samenvatting

*Een leeuw (Simba), een meerkat (Timon) en een wrattenzwijn (Pumbaa) liggen in de nacht te kijken naar de sterrenhemel.*

*Pumbaa: "Vragen jullie je ook weleens af wat dat voor twinkellende lichtjes zijn daarboven?"*

*Timon: "Dat zijn vuurvliegjes. Vuurvliegjes die, uh.. vastgeplakt zitten aan dat grote zwarte ding."*

*Pumbaa: "Oh, ik dacht altijd dat dat ballen van gas waren, brandend miljoenen kilometers verderop."*

*Simba: "Iemand heeft me ooit eens verteld dat het allemaal leeuwenkoningen van vroeger zijn, die over ons waken..."*

*Timon: "Bedoel je dat daar een stelletje dooie leeuwen naar ons zit te koekeloeren? Ha! Wie heeft je dat wijsgemaakt, Simba?"*

*Simba: "Ach, ja... belachelijk, eigenlijk... Hakuna Matata"<sup>1</sup>*

In de natuurkunde weten we dat de sterren, zoals Pumbaa zegt, hete gasbollen zijn; plasmas waarin atomen, ionen en elektronen kris kras door elkaar heen bewegen. Een deel van het licht dat wordt uitgezonden is afkomstig van botsingen tussen (hooggeladen) ionen en neutrale gasdeeltjes die zich in dat plasma bevinden.

In dit proefschrift worden botsingen beschreven tussen hooggeladen ionen en atomen. Atomen zijn neutrale deeltjes die bestaan uit een *positief* geladen kern waar *negatief* geladen elektronen in *schillen* omheen draaien. Kenmerkend aan deze schillen is dat er maar een eindig aantal elektronen in passen en dat de *energie* waarmee de elektronen in die schil zitten een unieke, vaste waarde heeft. De elektronen zijn zodanig verdeeld dat er een energetisch optimale situatie is ontstaan, de grondtoestand. Als één of meerdere elektronen in andere schillen terecht komen, ontstaat er een *aangeslagen* toestand, die energetisch *ongunstig* is.

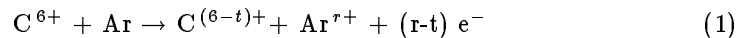
Ionen, atomen met een tekort aan elektronen, kunnen neutraliseren door het oppikken van elektronen. Dit hebben we bestudeerd worden door ionen te laten botsen met gasatomen. De negatief geladen elektronen in het neutrale gasdeeltje 'voelen' een extra positief geladen kern in hun buurt en zullen daarom in hun beweging worden beïnvloed. Afhankelijk van verschillende factoren kunnen

---

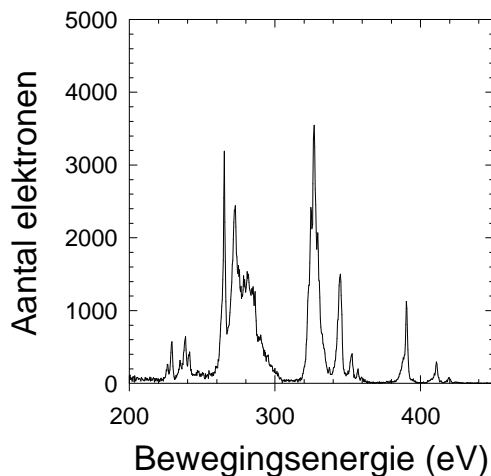
<sup>1</sup> Fragment uit "De Leeuwenkoning", "The Lion King" - 1994 © The Walt Disney Company

elektronen overspringen van het atoom naar het ion, waar ze weer in schillen terecht komen en zo in het algemeen een aangeslagen toestand zullen vormen. Het atoom blijft geïoniseerd achter. De aangeslagen toestand vervalt door het uitzenden van licht of van elektronen. Dit laatste is alleen mogelijk indien er twee of meer elektronen gevangen zijn, omdat er alleen maar een elektron kan worden uitgestoten indien er wisselwerking is geweest met een ander elektron. Dit effect heet het Auger-effect of autoïonisatie. De bewegingsenergie van het uitgestoten elektron is een indicatie voor de schillen die in het botsingsproces bevolkt zijn. In dit proefschrift worden experimenten beschreven waarin de bewegingsenergie van de elektronen gemeten wordt om informatie te verkrijgen over de voorafgaande botsingsprocessen.

De botsing tussen bijvoorbeeld zesvoudig geladen koolstof ( $C^{6+}$ ) en argon (Ar) ziet er als volgt uit:

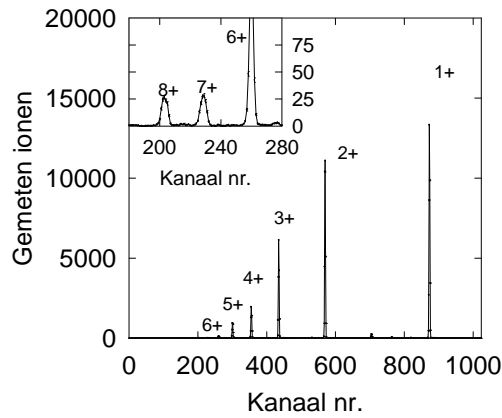


$6 - t$  en  $r$  geven de lading aan van respectievelijk het koolstof en het argon-ion na de botsing. Bij de botsing komen dus  $r - t$  elektronen, aangeduid met  $e^{-}$ , vrij.



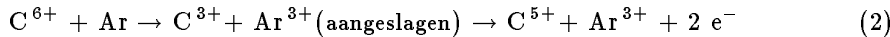
**Figuur 1:** Een gemeten elektronenspectrum na botsingen tussen  $C^{6+}$  en Ar.

In figuur 1 zijn de resultaten getoond van zo'n energiemeting. In een bepaald energiebereik zijn verschillende scherpe structuren zichtbaar. Deze pieken komen overeen met de elektronenemissie als gevolg van het verval van elektronen vanuit verschillende schillen. Uit de energiepositie van deze pieken is het mogelijk om informatie te krijgen over de bevolkte schillen tijdens de botsing. Er is echter een complicatie. Uit het gemeten spectrum is niet direct duidelijk *hoeveel* elektronen tijdens de botsing zijn gevangen zoals ook blijkt uit vergelijking 1. Om dit te ondervangen hebben we ook de ladingsverdeling van Ar gemeten.



**Figuur 2:** De ladingsdistributie van Ar naar botsingen van  $^{13}\text{C}^{6+}$  op Ar. In de inzet van het figuur is het lage gedeelte van het spectrum vergroot.

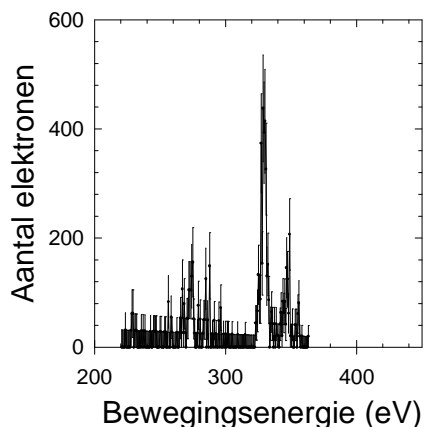
In figuur 2 is een voorbeeld van zo'n meting getekend. De verdeling laat zien dat de vangst van één, twee of drie elektronen de grootste kans heeft. Met deze informatie kan het proces beschreven met vergelijking 1 beter geanalyseerd worden. Wanneer bijvoorbeeld drie argon-elektronen zijn gevangen door  $\text{C}^{6+}$ , dan verandert de lading tot  $3+$ . Echter doordat het koolstof-ion vervalt, kan zijn lading weer veranderen omdat er elektronen worden uitgestoten. Het is dus mogelijk dat er twee elektronen uitgezonden worden waardoor de lading van het koolstof-ion niet met drie maar slechts één ladingstoestand afneemt. De balans ziet er dan als volgt uit:



Door tegelijkertijd met de elektronenenergie de lading van het resulterende argon-ion te meten is het mogelijk om het elektronenspectrum zoals gepresenteerd in figuur 1 op te splitsen in deelspectra die coïncident zijn met bepaalde ladingstoestanden van argon. De elektronen die gemeten zijn in coïncidentie met  $\text{Ar}^{3+}$ , het proces beschreven met vergelijking 2, zijn getekend in figuur 3.

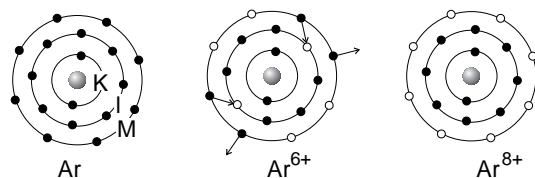
Als we dit spectrum vergelijken met het totale spectrum zoals gemeten in figuur 1 dan valt op dat alleen de elektronen tussen 310 eV en 350 eV afkomstig zijn van drie-elektronenvangst. Op een zelfde manier valt ook voor twee-, vier- en meervoudig geladen argon-ionen deelspectra te bepalen.

Vanuit de deelspectra als deze is het mogelijk om een nagenoeg volledige reconstructie te maken van de processen die plaatsvinden tijdens of na de botsing. In het proefschrift wordt de volledige analyse gepresenteerd van  $\text{C}^{6+}$ -Ar botsing. Vanuit de reconstructie is het mogelijk om een model te testen dat dit type botsingen beschrijft.



**Figuur 3:** In dit figuur is het aantal elektronen in coïncidentie met  $\text{Ar}^{3+}$  getekend voor botsingen tussen  $\text{C}^{6+}$  en Ar. Vergelijk dit figuur met het totale (niet-coïncidente) spectrum van figuur 1. Duidelijk is dat de elektron gemeten tussen 310 en 350 eV afkomstig zijn van drie elektronenprocessen.

Uit de ladingsverdeling van Ar na botsing met  $\text{C}^{6+}$  komt een verrassend effect naar voren. In de inzet van figuur 2 wordt getoond dat Ar achttvoudig geladen kan zijn na de botsing. Het neutraliseren van  $\text{C}^{6+}$  vereist echter slechts zes elektronen, terwijl Ar acht elektronen heeft afgestaan. Dit lijkt in tegenspraak met vergelijking 1 omdat er vanuit gegaan was dat de lading van Ar aangeeft hoeveel elektronen er zijn gevangen door het  $\text{C}^{6+}$ . De verklaring voor dit fenomeen is in te zien met behulp van figuur 4. In het linker deel van de figuur is Ar getekend voor de botsing met  $\text{C}^{6+}$ . De elektronen in neutraal argon zijn verdeeld in drie schillen, de K-, L- en M-schil. In de middelste figuur is de situatie geschetst voor het geval dat er zes elektronen zijn gevangen door het  $\text{C}^{6+}$  waaronder twee uit de L-schil van argon. Dit leidt tot een  $\text{Ar}^{6+}$  in een *aangeslagen* toestand. In de rechter figuur is die getekend. Twee elektronen vullen de binnenschilgaten onder wisselwerking met twee andere elektronen. Deze twee anderen worden uit het argon gestoten en verhogen daardoor de lading van argon met twee.



**Figuur 4:** Een eenvoudige voorstelling van een mogelijk verval van Ar. Links is voor de botsing, midden als er zes elektronen zijn gevangen door  $\text{C}^{6+}$  en links na de botsing als er twee extra autoïoniserende stappen zijn geweest wat  $\text{Ar}^{8+}$  tot als resultaat heeft.

Het creëren van aangeslagen atomen in langzame botsingen tussen hoogge-

laden ionen en atomen is een effect wat tot nu toe meestal verwaarloosd is in de interpretatie van dit type botsingen. De metingen gepresenteerd in dit proefschrift, laten echter voor het eerst duidelijk zien dat dit effect zeer belangrijk kan zijn.

Concluderend, in het proefschrift is aan de hand van metingen het belang aangetoond van het intensief analyseren van de verschillende wegen die naar een ladingevenwicht leiden na botsingen tussen hooggeladen ionen en neutrale gassen. Of het direkt meer licht zal werpen op de sterren is een vraag, maar de mechanismen die naar ladingevenwicht leiden zijn wel een stuk beter zichtbaar geworden.



# Dankwoord

Zonder de hulp van anderen zou dit proefschrift nooit tot stand zijn gekomen. Ik wil daarom een aantal mensen met name bedanken. Om te beginnen wil ik Ronnie Hoekstra bedanken voor zijn begeleiding. De discussies die we gevoerd hebben over de metingen en de interpretaties daarvan zijn van wezenlijk belang geweest voor het gepresenteerde werk. Ook Reinhard Morgenstern speelde daarin een hoofdrol. Als promotor en begeleider heeft hij door middel van zijn inzicht, enthousiasme en kennis van de atoomfysica mij sterk gemotiveerd.

De mede-(atoom)fysici Bart Schlatmann, Hein Otto Folkerts, Han Limburg, Frits Blik, Sjirk Boon, Jayani Das, Stefan Schippers, Hans Beijers hebben op de 'zaal' altijd een sfeer weten te kweken waarin het leuk was om te werken. Speciaal wil ik Stefan nog bedanken voor de inwijding in het programma 'Cowan' en de nooit verminderde motivatie om te helpen bij de uitvoering ervan. Die inbreng is niet alleen voor mij maar ik denk ook voor de rest van de groep van onschatbare waarde geweest. Ook alle studenten die zich hebben ingezet voor de experimenten, met name Arjen Amelink, wil ik van harte bedanken.

Ook vele andere KVI-medewerkers hebben hun inbreng geleverd. Van tekenkamer tot werkplaats, van receptie tot softwarehuis en alle mede oio's. Bedankt. Speciaal wil ik Anne Drentje, Rob Kremers en Jans Sijbring bedanken voor hun grote inzet voor de ionenbron en altijd de bereidheid tot het helpen bij het maken van de ionenbundels.

Ik wil nog een aantal mensen bedanken die een speciale betekenis voor mij hebben. In de eerste plaats zijn dat mijn ouders. Ik ben hun dankbaar voor hun onvoorwaardelijke steun in de keuzes die ik gemaakt heb. Altijd kan ik voor een wijs woord en een goede raad bij hun terecht. Ten tweede natuurlijk mijn dochter Nienke. Jouw lieve gezichtje en mooie glimlach maakten de laatste loodjes een stuk minder zwaar. Tot slot, lieve Monique bedankt voor alles.

april 1996

Gert Jan