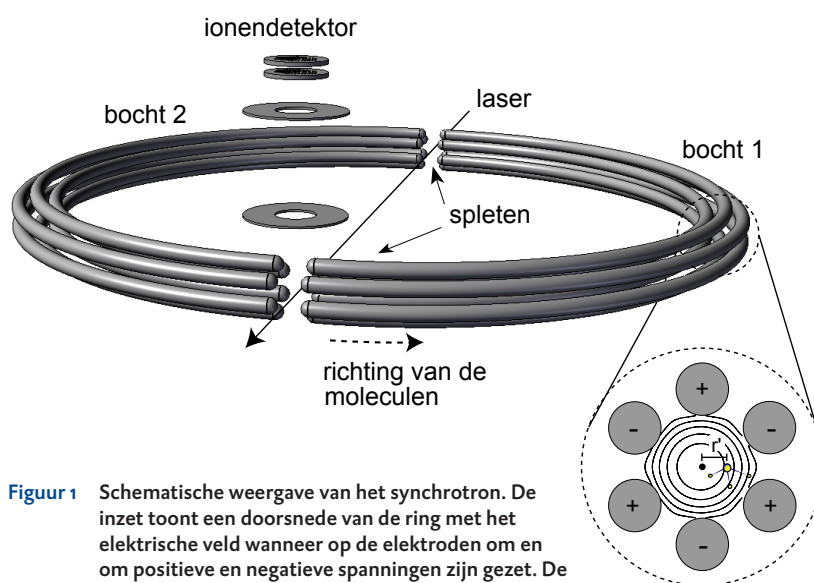


Een synchrotron als arena voor koude botsingen

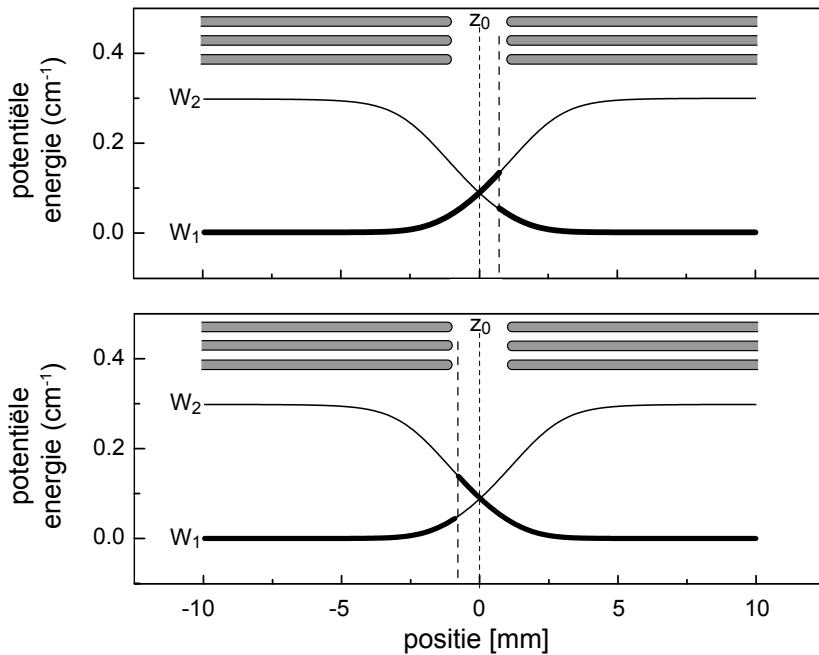
Natuurkundigen over de hele wereld wachten met spanning totdat in Genève, Zwitserland de LHC – met 27 kilometer omtrek veruit het grootste synchrotron ter wereld – operationeel wordt. In de LHC worden geladen deeltjes met behulp van elektrische velden tot uiterst hoge energieën opgezweept en op elkaar gebotst. Bij het Fritz-Haber-Institut (FHI) in Berlijn hebben wij een synchrotron gebouwd voor neutrale moleculen om juist botsingen met uiterst lage energieën te kunnen bestuderen. In dit onontgonnen energie-regime botsen moleculen op een fundamenteel andere manier dan bij normale temperaturen. Ons synchrotron gebruikt elektrische velden om neutrale moleculen in een cirkelbaan te dwingen en heeft slechts een omtrek van 80 centimeter. Maar laat je door deze kleine afmetingen niet misleiden; het manipuleren van neutrale moleculen is veel moeilijker dan het manipuleren van geladen deeltjes. Wij zijn er in geslaagd om wolkjes ammoniakmoleculen tot honderd keer rond te laten gaan in het synchrotron [1,2]. Rick Bethlem en Cynthia Heiner

40

Ammoniak is een zogenaamd polair molecuul. Dat wil zeggen dat hoewel ammoniak als geheel neutraal is, de lading niet homogeen verdeeld is over het molecuul: de ene helft is meer negatief en de andere helft meer positief geladen. In een elektrisch veld zal de positieve kant van het ammoniakmolecuul een kracht ondervinden in de richting van het elektrisch veld en de negatieve kant een kracht tegen de richting van het elektrische veld in. In een inhomogeen elektrisch veld zullen deze aantrekkende en afstotende krachten elkaar niet precies opheffen. De netto kracht op het molecuul is klein – zo'n honderd miljoen keer kleiner dan de kracht op een geladen deeltje – maar groot genoeg om complete controle te krijgen over de beweging van het mo-



Figuur 1 Schematische weergave van het synchrotron. De inzet toont een doorsnede van de ring met het elektrische veld wanneer op de elektroden om en om positieve en negatieve spanningen zijn gezet. De evenwichtstraal, r' , is de positie waar de centrifugale kracht op het molecuul gecompenseerd wordt door de elektrostatische kracht.



Figuur 2 Potentiële energie van ammoniakmoleculen als alleen spanningen zijn gezet op de rechterhelft (W_1) of alleen op de linkerhelft (W_2), 1 cm^{-1} komt overeen met $0,12 \text{ meV}$. Door tussen deze twee situaties te schakelen wanneer het wolkje moleculen zich in de spleet bevindt, worden moleculen die iets vooruit zijn netto afgeremd (bovenste panel), terwijl moleculen die iets achter zijn netto worden versneld (onderste panel).

lecuul. Dit maakt het mogelijk om de technieken die zijn ontwikkeld voor geladen deeltjes toe te passen op neutrale moleculen. Eerder hebben we een afremmer voor polaire moleculen – de tegenhanger van een lineaire versneller voor geladen deeltjes – een elektrostatische val en een opslagring gedemonstreerd [3,4]. Hier beschrijven wij de ontwikkeling van de tegenhanger van een synchrotron – waarschijnlijk het meest bejubelde speeltje uit de versnellerfysica.

Radiële opsluiting

Ons synchrotron wordt gevormd door twee in een halve cirkel gebogen hexa-

polen die op 2 millimeter afstand van elkaar zijn geplaatst (zie figuur 1). De kromtestraal van de hexapolen is 125 millimeter. Door op de zes elektroden van de hexapolen om en om positieve en negatieve spanningen te zetten – typisch tot 5 kilovolt – ontstaat een elektrisch veld dat in het midden van de hexapool nul is en dat toeneemt naar de elektroden toe. Een ammoniakmolecuul waarvan het elektrische dipoolmoment anti-parallel aan het elektrische veld staat ondervindt een kracht naar het minimum van het elektrische veld toe. Wanneer dit molecuul met een niet al te hoge snelheid tangentieel in de ring wordt geïnjecteerd, dan zal het de kromming van de hexapool volgen en een cirkelbaan afleggen. De straal van deze cirkel – de positie waar de centrifugale kracht precies gelijk is aan de elektrostatische kracht – hangt af van de snelheid van het molecuul; hoe hoger de snelheid, hoe groter de straal. Moleculen met een te hoge snelheid kunnen niet ingevangen worden. Wanneer een constante spanning wordt aangelegd, ondervinden de moleculen weliswaar in de radiële en in de verticale richting een kracht die hen bij elkaar houdt, maar in de voorwaartse richting

is dit niet het geval. Dit zorgt ervoor dat een geïnjecteerd compact wolkje moleculen na een korte tijd de hele ring zal vullen. Om dit tegen te gaan schakelen we de spanningen om op het moment dat de moleculen zich in de spleet tussen de twee halve ringen bevinden.

Longitudinale opsluiting

In figuur 2 is de potentiële energie van een ammoniakmolecuul – het absolute elektrische veld maal het effectieve dipoolmoment – getoond als het zich in de buurt van de spleet bevindt. Aanvankelijk worden de spanningen op de linkerhelft van de ring zo geschakeld dat er een constant elektrisch veld ontstaat terwijl de spanningen op de rechterhelft van de ring uitgeschakeld worden. De potentiële energie van het molecuul langs zijn baan in deze situatie is aangeduid met W_1 . Als het molecuul de spleet in beweegt neemt zijn potentiële energie toe; het molecuul wordt afgeremd. Op het moment dat het molecuul zich in de spleet bevindt worden de spanningen op de rechterhelft uitgeschakeld en op de linkerhelft aangeschakeld. De potentiële energie in deze situatie is aangeduid met W_2 . De potentiële energie van het molecuul neemt nu af als het de spleet uit beweegt; het molecuul wordt versneld. Of het molecuul een netto versnelling of vertraging ondervindt, hangt af van zijn precieze positie op het moment dat de spanningen geschakeld worden. Een molecuul dat zich precies in het midden tussen de twee halve ringen bevindt als de spanningen worden geschakeld wordt evenveel afgeremd als versneld en zal zijn oorspronkelijke snelheid behouden. Een molecuul

Rick Bethlem (1972) promoveerde in 2002 aan de Katholieke Universiteit Nijmegen op het gebied van moleculen- en laserfysica. Vervolgens werkte hij als postdoc aan het Imperial College London en als postdoc en groepsleider (deeltijd) bij het Fritz-Haber-Instituut der Max-Planck-Gesellschaft in Berlijn. Sinds 2005 is hij in dienst van de Vrije Universiteit Amsterdam waar hij werkt aan de ontwikkeling van precisietests met behulp van koude moleculen.



rick@few.vu.nl

Cynthia Heiner (1980) behaalde haar Bachelor's diploma natuurkunde aan de University of New Hampshire in de Verenigde Staten en haar Master's diploma natuurkunde aan de Freie Universität Berlin, in Duitsland. Op 22 januari 2009 promoveerde zij aan de Radboud Universiteit Nijmegen op het proefschrift *A molecular synchrotron*. Het onderzoek hiervoor voerde zij uit aan het Fritz-Haber-Instituut der Max-Planck-Gesellschaft in Berlijn onder begeleiding van Rick Bethlem en Gerard Meijer.

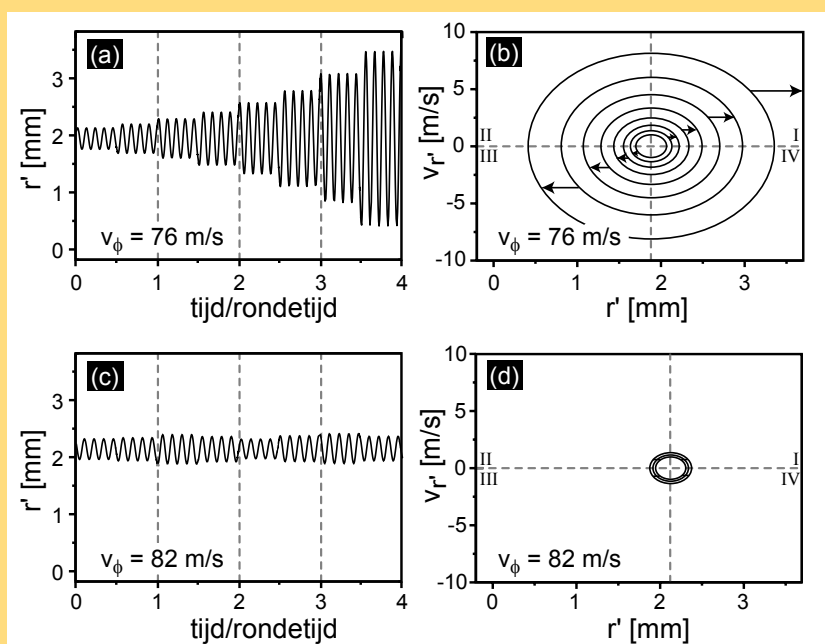


Stopbanden

In de spleet tussen de twee ringhelften, ondervinden de moleculen tijdelijk even geen focuserende kracht. De verstoring van de transversale beweging als gevolg van één spleet is klein en niet persé een probleem. Als de verstoring echter versterkt wordt elke keer dat de moleculen een spleet passeren dan leidt dit tot instabiliteit. Of dit gebeurt hangt af van het aantal oscillaties dat een molecuul maakt per ringhelft. Om dit te verduidelijken zijn in de figuur de banen getoond van een molecuul met een voorwaartse snelheid van 76 m/s (paneel a en b), en een molecuul met een voorwaartse snelheid van 82 m/s (paneel c en d). Bij 76 m/s is de evenwichtsbaan – de positie waar de centrifugale kracht gecompenseerd wordt door de elektrostatische kracht – 1,9 mm verschoven van het

molecuul precies 4,5 oscillaties maken in één ringhelft. Dit betekent dat als het molecuul de volgende spleet passeert het nu een negatieve snelheid en uitwijking heeft; het bevindt zich in het derde kwadrant in fase-ruimte. Het molecuul zal opnieuw een grotere uitwijking krijgen en de amplitude van zijn transversale oscillatie groeit. Iedere keer dat het molecuul een spleet passeert bevindt het zich of in het eerste of in het derde kwadrant en de amplitude zal groeien tot het molecuul uiteindelijk uit de ring ontsnapt.

In paneel c en d is de baan geplot van een molecuul dat een voorwaartse snelheid van 82 m/s heeft. Het molecuul oscilleert opnieuw rond de evenwichtsbaan die nu 2,1 mm verschoven is van het geometrische hart van de hexapool.

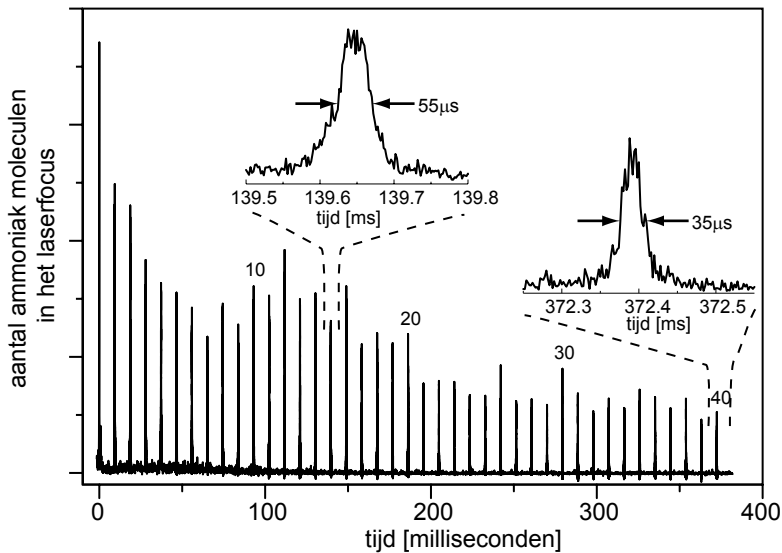


Figuur 3 Banen van moleculen die vier rondjes maken in het synchrotron. In paneel a en c wordt de positie van de moleculen ten opzichte van het geometrische hart van de ring getoond als functie van tijd. In paneel b en d zijn dezelfde banen getoond, maar nu is de transversale snelheid van de moleculen uitgezet tegen hun positie.

geometrische hart van de hexapool. Het molecuul waarvan de baan in paneel a is geplot begon op een andere positie en oscilleert om de evenwichtsbaan met een frequentie van ongeveer 850 Hz (afhankelijk van het potentiaalverschil tussen de elektroden). Als we de transversale snelheid van het molecuul uit zetten tegen de positie van het molecuul (paneel b) dan resulteert dit in een ellips. Als het molecuul zich in een spleet bevindt, ondervindt het geen kracht in de transversale richting en beweegt het in een rechte lijn; dit is aangeduid met een horizontale pijl. De lengte en richting van de verplaatsing wordt bepaald door de transversale snelheid van het molecuul als het de spleet passeert. Het molecuul van paneel a en b heeft een positieve snelheid en positieve uitwijking als het de eerste keer een spleet passeert; het bevindt zich in het eerste kwadrant in fase-ruimte. Het zal dus een grotere uitwijking van de evenwichtsbaan krijgen. Na de spleet zal het molecuul weer gevangen worden in de ring en opnieuw in een – nu grotere – ellips bewegen in fase-ruimte. Bij een voorwaartse snelheid van 76 m/s zal het

Bij een voorwaartse snelheid van 82 m/s maakt het molecuul 4,1 oscillaties per ringhelft. De eerste twee keer dat het molecuul een spleet passeert bevindt het zich respectievelijk in het eerste en het derde kwadrant en zal zijn transversale amplitude groeien. Als het echter de derde keer een spleet passeert, bevindt het zich in het vierde kwadrant en zal zijn amplitude afnemen. Als het molecuul rondjes draait in de ring zal zijn amplitude afwisselend groeien en afnemen, maar het effect van de spleten middelt uit en de baan van het molecuul is stabiel.

Uit deze discussie zien we dat het aantal oscillaties dat het molecuul maakt per ringhelft bepaalt of de baan van het molecuul stabiel is of niet. We moeten er voor zorgen dat dit aantal niet te dicht bij een geheel of halftalig getal ligt – in versnellerfysica worden deze gebieden stopbanden genoemd. Wij hebben laten zien dat we de snelheid van de moleculen in de ring tussen 60 en 90 m/s kunnen verstemen als de spanning op de juiste manier mee veranderd wordt. Dit is essentieel voor botsingsexperimenten.



Figuur 4 Meting die een pakketje ammoniakmoleculen toont dat tot veertig rondjes maakt in het synchrotron.

dat een beetje vooruit is (zie bovenste paneel van figuur 2) zal meer energie verliezen dan het terugkrijgt en zal netto worden afgeremd, terwijl een molecuul dat een beetje achter is meer energie zal terugkrijgen dan het verloor en zal netto worden versneld (zie onderste paneel van figuur 2). Op deze manier wordt het wolkje moleculen bij elkaar gehouden. Dit mechanisme staat bekend als *fasestabiliteit* in de versnellerfysica en werd aan het einde van de tweede wereldoorlog onafhankelijk ontwikkeld in de Sovjetunie door Vladimir Veksler [5] en in de Verenigde Staten door Edwin McMillan [6]. Fasestabiliteit onderscheidt een synchrotron van een cyclotron. In een cyclotron kunnen geladen deeltjes tot zo'n 15 MeV worden versneld, in een synchrotron kunnen geladen deeltjes tot – in principe – ongelimiteerd hoge energiën worden versneld – de LHC is ontworpen om protonen te versnellen tot 7 TeV.

In figuur 4 wordt een meting getoond van een pakketje ammoniakmoleculen dat is afgeremd tot zo'n 90 m/s en vervolgens in het synchrotron geïnjecteerd. Om de ammoniakmoleculen te detecteren ioniseren we ze met een intense laserbundel en meten de resulterende stroom. Een piek is te zien elke keer als de moleculen de detectiezone passeren. In deze meting maken de moleculen tot veertig rondjes. Na veertig rondjes – de moleculen hebben dan een afstand van zo'n dertig meter afgelegd in de ring – houden we de moleculen in een compact pakketje van zo'n 3 mm lang.

Koude botsingen

Een synchrotron biedt unieke mogelijkheden voor een aantal experimenten. De meest voor de hand liggende – en meest belovende – toepassing is om het synchrotron te gebruiken voor het bestuderen van botsingen. De snelheid van de moleculen in de ring kunnen wij variëren tussen 60 en 90 m/s (zie kader). Dit komt overeen met een kinetische energie (in temperatuur-eenheden uitgedrukt) tussen de 4 en 9 K – de snelheidsspreiding van de moleculen komt overeen met minder dan één mK. Botsingen bij deze temperaturen zijn fundamenteel anders dan botsingen bij kamertemperatuur. Bij kamertemperatuur kunnen we botsingen nog redelijk adequaat beschrijven als botsende knikkers, bij zeer lage temperaturen wordt het golfkarakter van de moleculen dominant en zijn de botsingen beter voor te stellen als interfererende golven. De mogelijkheid om dit soort exotische botsingen en reacties te bestuderen is de voornaamste drijfveer achter het onderzoek aan koude moleculen. Recentelijk zijn in het FHI de eerste botsingsexperimenten uitgevoerd tussen een afgeremde bundel OH-moleculen en een warme bundel van xenonatomen [7]. De volgende stap is om botsingen te bestuderen tussen twee afgeremde bundels moleculen. Het is een grote uitdaging om de benodigde dichtheden in de afgeremde bundels te bereiken; het gebruiken van de moleculaire synchrotron biedt hier misschien een uitweg.

In het synchrotron kunnen we koude botsingen meten door meerdere pakketjes moleculen in beide richtingen in de ring te laten ronddraaien en deze met elkaar te laten botsen. Het aantal botsingen dat plaatsvindt neemt toe als het aantal pakketjes in de ring toeneemt. Op dit moment wordt een nieuwe synchrotron getest die bestaat uit veertig hexapolen. In deze synchrotron kunnen 20 pakketjes in beide richtingen opgesloten worden. Als een pakketje 100 rondjes heeft afgelegd dan komt dit pakketje 4000 maal een ander pakketje tegen dat in de andere richting beweegt. De kans op een botsing neemt toe met dezelfde factor. Omdat de snelheid van de moleculen afstembaar is kunnen wij de werkzame doorsnede meten als functie van de botsingsenergie. Het is voorspeld [8] dat de werkzame doorsnede enorm toeneemt als de botsingsenergie precies gelijk is aan een gebonden toestand in het botsingscomplex. Deze gebonden toestand – een nieuw molecuul – is zichtbaar als een resonantie wanneer men de werkzame doorsnede uitzet tegen de botsingsenergie. Een molecuul fysica experiment bij lage energie als de ultieme replica van een hoge-energiefysica experiment.

Referenties

- 1 C.E. Heiner, *A molecular synchrotron*, Proefschrift Radboud Universiteit Nijmegen (2009).
- 2 C.E. Heiner, D. Carty, G. Meijer en H.L. Bethlem, *A molecular synchrotron*, *Nature Physics* **3**, blz. 513 (2007).
- 3 R. Bethlem, *Koude Materie*, *NTvN* **69**, blz. 74 (2003).
- 4 F. Cromptoets, R. Bethlem en R. Jongma, *Moleculen doorgedraaid*, *NTvN* **67**, blz. 172 (2001).
- 5 V.I. Veksler, *A new method for acceleration of relativistic particles*, *Comptes Rendus de l'Academie des Sciences URSS* **43**, blz. 329 (1944).
- 6 E.M. McMillan, *The Synchrotron – a proposed high energy particle accelerator*, *Physical Review* **68**, blz. 143 (1945).
- 7 J. Gilijamse, S. Hoekstra en B. van de Meerakker, *Moleculaire botsingen in slow motion*, *NTvN* **73**, blz. 4 (2007).
- 8 N. Balakrishnan, A. Dalgarno, and R.C. Forrey, *Journal of Chemical Physics* **113**, blz. 621 (2000).
- 9 C.E. Heiner, G. Meijer en H.L. Bethlem, *Motional resonances in a molecular synchrotron*, *Physical Review A*, **78**, artnr. 030702(R) (2008).