

## Atomen in actie

**Citation for published version (APA):**

Luiten, O. J. (2012). *Atomen in actie*. Technische Universiteit Eindhoven.

**Document status and date:**

Gepubliceerd: 01/01/2012

**Document Version:**

Uitgevers PDF, ook bekend als Version of Record

**Please check the document version of this publication:**

- A submitted manuscript is the version of the article upon submission and before peer-review. There can be important differences between the submitted version and the official published version of record. People interested in the research are advised to contact the author for the final version of the publication, or visit the DOI to the publisher's website.
- The final author version and the galley proof are versions of the publication after peer review.
- The final published version features the final layout of the paper including the volume, issue and page numbers.

[Link to publication](#)

**General rights**

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal.

If the publication is distributed under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license above, please follow below link for the End User Agreement:

[www.tue.nl/taverne](http://www.tue.nl/taverne)

**Take down policy**

If you believe that this document breaches copyright please contact us at:

[openaccess@tue.nl](mailto:openaccess@tue.nl)

providing details and we will investigate your claim.

Intreerede  
prof.dr.ir. Jom Luiten  
2 november 2012



/ Faculteit Technische Natuurkunde

**TU** / **e** Technische Universiteit  
**Eindhoven**  
University of Technology

# Atomen in actie

Where innovation starts

**Intreerede prof.dr.ir. Jom Luiten**

---

# **Atomen in actie**

**Uitgesproken op 2 november 2012  
aan de Technische Universiteit Eindhoven**



# Inleiding

---

Ik wil u iets vertellen over het zichtbaar maken van wat er gebeurt op de allerkleinste afstanden en de allerkortste tijdschalen. Ik hoop u duidelijk te maken waarom dit zinvol is. Maar vooral hoop ik u iets mee te geven wat ons werkelijk drijft: de fascinatie voor ons mooie vak. En dat wat ons het grootste plezier geeft: echt snappen hoe iets zit.

## ‘There’s plenty of *time* at the bottom’

Eerst wat geschiedenis. In 1959 hield de legendarische Richard Feynman (zie Fig. 1), een van de meest invloedrijke en kleurrijke natuurkundigen van de 20<sup>e</sup> eeuw, een *after dinner speech* ter gelegenheid van een bijeenkomst van de *American Physical Society* aan de universiteit Caltech in de VS, getiteld ‘There’s plenty of room at the bottom’ [1]. In dit visionaire verhaal schetste hij op speelse wijze wat er mogelijk wordt als materie op de allerkleinste schaal, de schaal van atomen, gemanipuleerd zou kunnen worden. Deze lezing wordt wel gezien als de eerste aankondiging van het vakgebied van nanotechnologie – ruim 20 jaar voordat het echt van start ging met de uitvinding van de *Scanning Tunneling Microscope* (STM). Technologie op de schaal van een nanometer, de schaal van atomen.

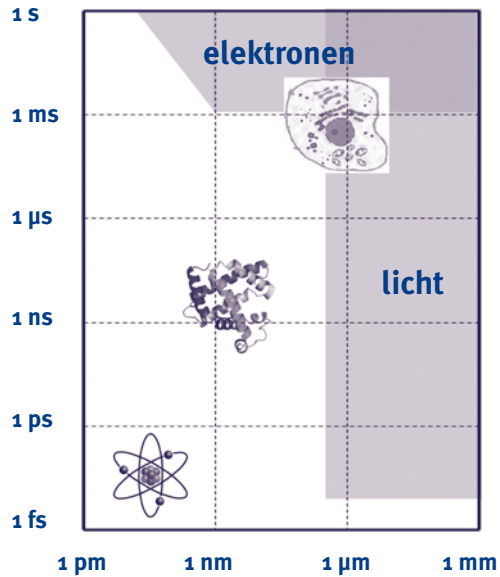


Figuur 1

Richard Feynman in 1959 [1].

Voor degenen onder u die daar wat minder vertrouwd mee zijn: een nanometer is een miljoenste millimeter, een ongelooflijk kleine afstand. Een nanometer verhoudt zich tot een meter als een knikker tot de aarde; iedere seconde dat u naar mij luistert, groeien uw haren vijf nanometer (ook als u niet luistert). De afmeting van een atoom is ongeveer een tiende nanometer. Nu, ruim 50 jaar na de lezing van Feynman aan Caltech, staat de apparatuur waarvan Feynman droomde daadwerkelijk tot onze beschikking. De apparatuur – die het mogelijk maakt materie te manipuleren op atomaire schaal – maakt zelfs deel uit van de standaarduitrusting van vele labs wereldwijd. We kunnen nu materialen bewerken, d.w.z. gaatjes boren en frezen, met ongeveer tien nanometer nauwkeurigheid, gebruikmakend van *Focused Ion Beam*-apparaten (FIB). De depositie van structuren van tien nanometer is nu standaard in de chipindustrie. U heeft daar dagelijks plezier van met uw smartphone, tablet en PC; zonder nanotechnologie geen informatierevolutie. Elektronenmicroscopen zijn nu meer dan honderd keer beter dan in 1959 en stellen ons in staat in te zoomen op details zelfs kleiner dan een atoom. Met STM en *Atomic Force Microscopy* (AFM) kunnen oppervlakken van materialen met dezelfde nauwkeurigheid afgetast worden met vlijmscherpe naaldjes en kunnen afzonderlijke atomen van plaats naar plaats gesleept worden.

Toch ontbreekt er iets. Onze nanotechnologische gereedschapskist, de 'nano-toolbox', is nog niet compleet. Sterker nog, de kist is nog bijna leeg. In feite ontbreekt er een hele dimensie, de dimensie van tijd. Wat bedoel ik daarmee? Omdat atomen zo klein zijn, zijn de relevante tijdschalen waarop ze bewegen ook ontzettend klein. Als er iets gebeurt, gebeurt dat in een heel korte tijd. Dat gaat zo snel dat de bestaande nanotechnieken in vergelijking slaapverwekkend traag zijn. Atomen, gebonden tot moleculen of in het kristalrooster van een vaste stof, trillen heen en weer in een tijd korter dan een picoseconde. Een picoseconde is een miljoenste van een miljoenste seconde. Om precies te weten wat de atomen doen zouden we hun bewegingen moeten kunnen volgen met een nauwkeurigheid korter dan een picoseconde, bijvoorbeeld een tiende picoseconde, ofwel 100 femtoseconde. Ik heb net geschetst hoe klein een nanometer is; wat moeten we ons voorstellen bij 100 femtoseconde? Zoals u wellicht weet, gaat niets sneller dan het licht. In één seconde legt een lichtstraal een afstand af die gelijk is aan ruim zeven keer de omtrek van de aarde. In 100 femtoseconde, een tiende picoseconde, legt een lichtstraal een afstand af gelijk aan een halve haardikte. Een picoseconde verhoudt zich tot een seconde als de breedte van een haar tot de omtrek van de aarde. In Fig. 2 ziet u een diagram met langs de horizontale as lengteschalen die lopen van picometers tot millimeters, ieder streepje langs de as betekent een factor duizend groter; langs de verticale as de tijdschaal, die loopt van



Figuur 2

Lengte- en tijdschalen bereikbaar met conventionele elektronentechnieken en licht. Ter illustratie zijn karakteristieke posities van atomen, proteïnen en biologische cellen in het diagram aangegeven.

femtoseconden tot seconden. Met conventionele nanotechnieken wordt het vlak aan de bovenzijde ('elektronen') bestreken. Het vlak aan de rechterkant ('licht') vormt het domein van lichtmicroscopie en ultrasnelle lasertechnieken. Er blijft een wit, onontgonnen gebied van aanzienlijke afmetingen over op de kaart, een *terra incognita*, waar de eigenlijke atomaire actie plaatsvindt. Behalve 'plenty of room' is er blijkbaar ook 'plenty of time at the bottom'.



# ‘Making the Molecular Movie’

Waarom willen we eigenlijk atomaire actie in beeld brengen? Met het huidige nanogereedschap kunnen we heel nauwkeurig condities creëren, we kunnen atomen neerzetten precies waar we willen. Als we de atomen daarna op elkaar loslaten, dan gaan ze zich, bijvoorbeeld, opnieuw onderling ordenen, of ze gaan nieuwe bindingen aan in een chemische reactie. Deze processen gaan meestal zo snel dat we ze niet kunnen volgen. Maar is dit erg? Na een tijdje bereiken de atomen een nieuw statisch evenwicht, dat weer heel precies gekarakteriseerd kan worden. Waarom zou dat niet voldoende zijn? Wat valt er te leren van het volgen van de snelle dynamica van systemen uit evenwicht? Het punt is dat *juist* het gedrag waarbij de atomen uit evenwicht zijn vaak het meest interessant is, dus de overgang van de ene stabiele toestand naar de andere. De systemen in stabiel evenwicht vormen slechts het topje van de ijsberg.

Een voorbeeld: Aan het eind van de 19<sup>e</sup> eeuw woedde er een verhitte discussie onder liefhebbers van paardenraces rond de vraag: is er een moment gedurende galop waarop alle vier de benen van de grond zijn, is er een zweefmoment? Vooral Leland Stanford, oprichter van Stanford University en eigenaar van renpaarden, wilde erg graag weten hoe de galop precies in zijn werk gaat. Hij was ervan overtuigd dat deze kennis hem zou helpen betere trainingsmethodes te ontwikkelen en snellere paarden te fokken. Hij huurde Eadweard Muybridge in, een bekende fotografiepionier in de 19<sup>e</sup> eeuw. Muybridge ontwikkelde een revolutionaire techniek waarmee het voor het eerst mogelijk werd om een serie opnamen te maken, heel kort na elkaar, met belichtingstijden van een duizendste seconde. Hiermee kon hij de prangende vraag bevestigend beantwoorden (zie Fig. 3). Bovendien bleek, heel verrassend, dat de benen tijdens het zweefmoment niet gestrekt zijn, zoals tot dan toe altijd op schilderijen werd afgebeeld, maar juist gekromd. Onbedoeld legde hij met dit experiment ook de basis voor film; een mooi voorbeeld van een spin-off en van de onvoorspelbare manier waarop fundamenteel wetenschappelijk onderzoek zich uiteindelijk terugbetaalt.

Wij zijn tegenwoordig vooral geïnteresseerd in het dynamisch gedrag van veel kleinere systemen. De fysica van de vaste stof is een voor de hand liggend gebied waar het volgen van processen met atomaire tijd- en plaatsresolutie belangrijke



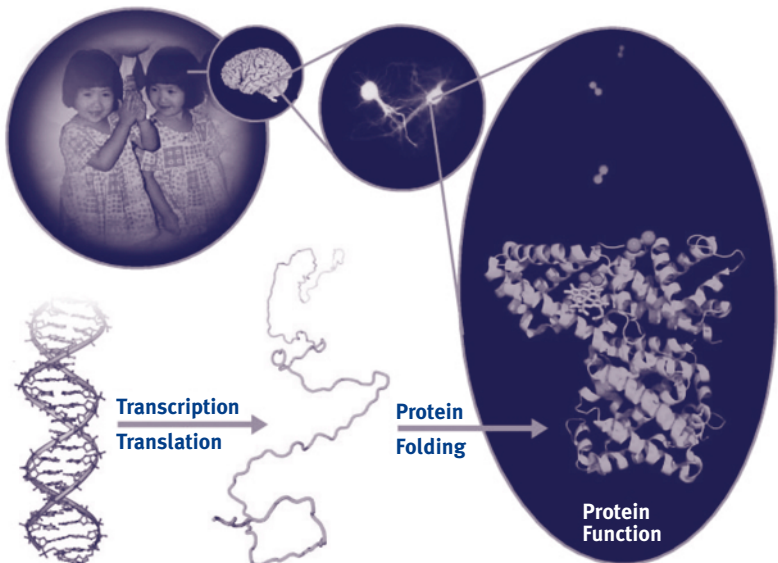
Figuur 3

Boven: galopperend paard, gefotografeerd door Muybridge in 1878.  
 Onder: galopperend paard zoals weergegeven op oudere schilderijen.

nieuwe inzichten kan geven. Vorig jaar was het 100 jaar geleden dat de Nederlander Kamerlingh Onnes supergeleiding ontdekte – weer een toevallige, ongeplande vondst – maar de vragen rond supergeleiding zijn nog steeds actueel. 26 jaar geleden ontdekten Bednorz en Müller de hoge- $T_c$ -supergeleiders. Tot op de dag van vandaag is niet bekend hoe het komt dat deze brosse keramische materialen, isolatoren bij kamertemperatuur, bij een relatief geringe verlaging van de temperatuur al hun elektrische weerstand verliezen. We weten dat supergeleiding het gevolg is van de subtiele wisselwerking van vrije elektronen in een materiaal met de collectieve trillingen van de atomen in het kristalrooster. Deze wisselwerking vindt plaats op de tijdschaal van picoseconden en korter. Voor natuurkundigen is dit een geweldig interessant en uitdagend probleem, met mogelijk belangrijke technologische toepassingen. Bij ons in de groep staat het hoog op het lijstje van materialen waar wij onze nieuwe ultrasnelle technieken op willen loslaten.

Maar ik kan me voorstellen dat het merendeel van u niet direct warmloopt voor lage temperatuur-vastestoffysica. Daarom wil ik het nu met u hebben over een ander fundamenteel probleem, dat zowel voor biologen, chemici als fysici zeer

interessant is, van groot maatschappelijk belang, en dat bovendien ook u wellicht meer zal aanspreken: het vouwen van eiwitten. Eiwitten (of proteïnen) zijn de nanomachines die alle processen in de cellen van levende organismen aan de gang houden: ze bouwen, ruimen op, transporteren, communiceren, enz. Een proteïne is in feite een lange streng van kleine bouwblockjes, de aminozuren, zoals geïllustreerd in Fig. 4. Er zijn 20 soorten aminozuren en hun volgorde in een proteïnestreng is vastgelegd in het DNA. Als er behoefte is aan een bepaald proteïne, dan wordt de gewenste streng van aminozuren gesynthetiseerd door de code in het DNA direct te vertalen in een serie aminozuren. Vervolgens zal deze trillende, kronkelende, krioelende liert – vaak bestaande uit duizenden aminozuren – zich spontaan gaan ordenen, zichzelf opvouwen tot een complexe driedimensionale structuur. Alleen als het eiwit precies de juiste driedimensionale structuur heeft gekregen kan het zijn werk gaan doen (Fig. 4). Opmerkelijk genoeg gaat dit bijna altijd goed. Evolutie heeft ervoor gezorgd dat dit een heel robuust en betrouwbaar proces is geworden. Maar het gaat niet altijd goed. Als een proteïne zich niet helemaal op de juiste manier vouwt dan kan het ook zijn werk niet goed doen. Dit kan aanleiding geven tot erfelijke aandoeningen als taaislijmziekte. Als het vouwen helemaal mis gaat klonteren de mislukte eiwitten samen, wat aanleiding kan geven tot ziektes als BSE, diabetes II, Alzheimer en Parkinson. Op dit moment is van ongeveer 75.000 verschillende soorten proteïnen de structuur bepaald,



Figuur 4

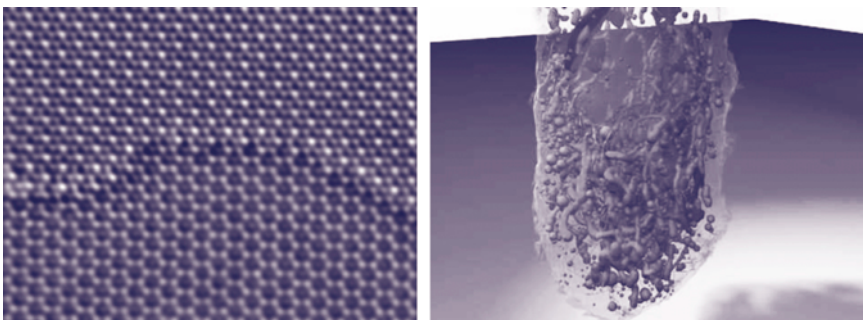
Proteïne van synthese tot functie [2].

voornamelijk d.m.v. röntgenkristallografie in synchrotrons. Maar dit zijn statische structuren, gemeten onder onnatuurlijke omstandigheden waarin de proteïnen gekristalliseerd zijn en diep bevroren. Kennis over de dynamica van proteïnen, en dan vooral van het vouwen, beperkt zich voornamelijk tot computerberekeningen die maar een heel klein stukje van dit enorm complexe proces aankunnen. Het is duidelijk dat het maken van een 'molecular movie' van vouwende eiwitten van het grootste belang is.

Ik hoop dat ik u nu voldoende gemotiveerd heb voor de rest van mijn verhaal, dat voornamelijk zal gaan over *hoe* wij momentopnamen van snelle dynamische processen willen gaan maken en uiteindelijk, door een groot aantal momentopnamen achter elkaar te plakken, hopelijk ook echte filmpjes.

# Elektronenmicroscopie

Met lichtmicroscopen kunnen we niet waarnemen wat er op de nanometerschaal gebeurt. De reden is dat de afmetingen van de kleinste details waarop we kunnen inzoomen, beperkt worden door de golflengte, die voor zichtbaar licht een paar honderd nanometer bedraagt. We moeten dan gebruik gaan maken van andere stralingsvormen met een veel kortere golflengte: röntgenstraling – licht met een golflengte kleiner dan een nanometer – of elektronen – materiedeeltjes met een kwantummechanische golflengte die nog veel kleiner kan zijn. In 1931 werd de elektronenmicroscopie uitgevonden. Sindsdien heeft de elektronenmicroscopie zich ontwikkeld tot een fantastisch apparaat, dat onmisbaar is geworden voor de wetenschap en de industrie. Ik kan hier onmogelijk recht doen aan het immense veld van geavanceerde technieken en fascinerende toepassingen. Ik ben ook geen microscopie-expert. Gelukkig hebben we al enkele jaren een heel prettige samenwerking met FEI Company, het bedrijf dat de beste elektronenmicroscopen ter wereld bouwt en ook nog op fietsafstand ligt van de TU/e, en met Pieter Kruit van de TU Delft, die ons bijstaat met zijn enorme kennis en ervaring. Hier wil ik u nu slechts een paar voorbeelden laten zien, een kleine persoonlijke selectie, van wat er tegenwoordig mogelijk is. In het linkerdeel van Fig. 5 ziet u een plaatje van grafeen, waarin de karakteristieke ordening van de koolstofatomen in een ‘kippengaas’-kristalrooster duidelijk te zien is en u gemakkelijk de atomen kunt tellen. Dit plaatje is geschoten met een transmissie-elektronenmicroscopie met



Figuur 5

Links: elektronenmicroscopie-opname van grafeen, opgenomen met atomaire resolutie. Rechts: cel uit alveesklier, opgenomen met 3D-elektronentomografie.

een oplossend vermogen van enkele honderdsten van een nanometer, d.w.z. tienduizend keer scherper dan met de allerbeste lichtmicroscopen. Met een zogenaamde rastertransmissie-elektronenmicroscopie kan de hele elektronenbundel gefocusseerd worden op een enkel atoom. Uit de manier waarop de elektronen dan door dat atoom verstrooid worden, kunnen we bepalen om welke atoomsoort het gaat en soms zelfs hoe het chemisch gebonden is met zijn burens. Voor materiaalkunde is dit vanzelfsprekend van groot belang. Elektronenmicroscopen worden ook steeds meer toegepast in de biologie. In het rechterdeel van Fig. 5 ziet u een opname van een cel uit de alvleesklier, opgenomen met elektronentomografie. De driedimensionale structuur van het inwendige van de cel kan in groot detail, met een nauwkeurigheid van enkele nanometers, worden bepaald. U begrijpt waarom biologen hier blij van worden.

Hoe komen deze schitterende plaatjes tot stand? Ik zal nu kort het principe van een transmissie-elektronenmicroscopie uitleggen, waarvan de werking erg lijkt op die van een gewone lichtmicroscopie. Uit een puntige gloeidraad, die speciaal geoptimaliseerd is voor dit doel, sproeien elektronen. Een spanningsverschil van tientallen tot honderden kilovolts versnelt de elektronen tot een strakke bundel, die vervolgens op het preparaat wordt gericht. Dit is het equivalent van de scherpe lamp die in een gewone lichtmicroscopie gebruikt wordt om te belichten. Net als in een lichtmicroscopie worden de door het preparaat verstrooide elektronen met lenzen op de detector geprojecteerd, waarop een sterk vergrootte afbeelding van het preparaat verschijnt. Een elektronenmicroscopie is in de regel wat groter van afmeting dan een lichtmicroscopie en gebruikt voor de afbeelding geen glazen lenzen maar elektrische en magnetische velden (meestal magnetische spoelen). De vergrotingsfactor die een elektronenmicroscopie bereikt, kan gemakkelijk een miljoen keer bedragen. De reis van een elektron van bron naar detector duurt slechts enkele nanoseconden. Opmerkelijk genoeg vliegt er meestal niet meer dan één elektron tegelijk door de buis. Voor een redelijk plaatje zijn al gauw 100 miljoen elektronen nodig, met als gevolg belichtingstijden van de orde van seconden. De elektronenmicroscopie bevindt zich feitelijk nog in het pre-Muybridge tijdperk van statische portretfotografie. Gedurende de lange belichtingstijden moeten de studieobjecten absoluut stilstaan; ze mogen nog geen nanometer bewegen! Vooral biologische preparaten moeten diep bevroren zijn om iedere beweging te elimineren, een techniek die mijn collega Nico Sommerdijk van Scheikundige Technologie tot in de puntjes beheerst. Een bijkomende complicatie is het feit dat elektronenmicroscopie een destructieve meetmethode is. De elektronenbundel is een vorm van harde radioactieve straling. Ieder elektron heeft

vaak voldoende energie om een atoom weg te slaan. Met elektronen erodeert het preparaat terwijl je ernaar kijkt.

De uitdaging waar wij voor staan, is de elektronenbelichtingstijd aanzienlijk terug te brengen, liefst met vele orden van grootte, zodat we zelfs de snelste bewegingen kunnen bevroren in de tijd. Dit heeft bovendien als voordeel dat stralingsschade geen tijd krijgt het preparaat aan te tasten. En dit met behoud van bundelkwaliteit, zodat we nog steeds plaatjes kunnen schieten die zo scherp zijn dat de afzonderlijke atomen zichtbaar zijn. Zoals ik zal laten zien, moeten we hiervoor geheel nieuwe technieken ontwikkelen, zowel voor het creëren van gepulste elektronenbundels als voor de manipulatie daarvan. We zullen open moeten staan voor nieuwe ideeën en eventueel bereid zijn om vertrouwde en beproefde concepten los te laten.

## Kort maar krachtig

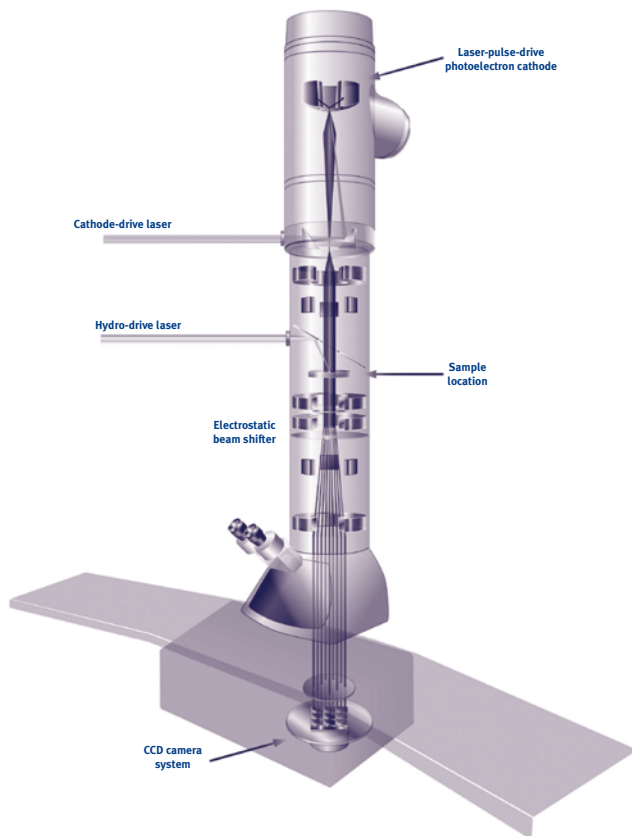
Om de extreem korte tijdschalen te kunnen bereiken, gebruiken we lasers. Al vele jaren staan femtoseconde-lasers tot onze beschikking, die met gemak de gewenste tijdsresolutie kunnen leveren. Maar helaas niet de gewenste atomaire plaatsresolutie, vanwege de lange golflengte van zichtbaar licht. Een voor de hand liggende oplossing is een laser die werkt bij veel kortere golflengtes, een röntgenlaser. Sinds 2009 is er een zeer intense femtoseconde-röntgenlaser beschikbaar, de eerste in zijn soort. Deze *X-ray Free Electron Laser* (XFEL) is ontwikkeld aan de universiteit van Stanford in de VS, toevallig dezelfde plaats waar Eadweard Muybridge een revolutie in ultrasnelle fotografie teweeg heeft gebracht. De XFEL is een fantastisch apparaat, maar is helaas vrij kostbaar en niet erg compact – in de huidige uitvoering heeft de XFEL een lengte van honderden meters en kost honderden miljoenen euro's. Wereldwijd zijn er nu verschillende in aanbouw, maar bij lange na niet genoeg om alle wetenschappers te kunnen bedienen die er gebruik van willen maken. Nu al staan ze in drommen te smeken om de schaarse bundeltijd in Stanford. Een mogelijke oplossing waar wij onder leiding van Marnix van der Wiel ook aan hebben gewerkt, is de ontwikkeling van een relatief goedkope en compacte *table top* röntgenlaser, gebaseerd op laserplasma-versnellings-technieken. Vooral mijn collega Seth Brussaard en zijn promovendi Walter van Dijk en Xavier Stragier hebben hier hard aan gewerkt en hebben mooie resultaten geboekt. Het zou fantastisch zijn als deze techniek tot volle wasdom komt. röntgentechnieken zijn op een prachtige manier complementair aan elektronentechnieken. We hebben ze beide nodig. De compacte XFEL is veelbelovend, maar staat nog in de kinderschoenen.

Wij richten ons op het directe gebruik van elektronen. Ons ideaal is het creëren van ultrakorte elektronenbundels van laserachtige kwaliteit en intensiteit en het toepassen van die bundels in een elektronenmicroscop. Op zich is het produceren van intense elektronenpulsen geen probleem: schiet met een femtoseconde laser op een metaaloppervlak en ze komen eruit. Maar dan begint de ellende. Elektronen zijn geladen en stoten elkaar af: het Coulomb-probleem. De miljoenen dicht op elkaar gepakte elektronen, die nodig zijn voor maken van een opname in een enkel schot, spatten uiteen met snelheden van kilometers per seconde, in feite een ladingsexplosie. De oorspronkelijk vlijmscherpe bundel wordt



uitgesmeerd en diffuus en is niet meer geschikt voor het schieten van scherpe plaatjes. De ladingsexplosie vindt plaats in alle richtingen, zodat de puls ook in de voortplantingsrichting wordt uitgesmeerd. Daarmee gaat ook de tijdsresolutie verloren.

Het gebruik van intense elektronenpulsen lijkt vrij hopeloos. Toch hebben ruim tien jaar geleden enkele moedige en visionaire wetenschappers het gewaagd dit pad in te gaan. Vooral Ahmed Zewail van de universiteit Caltech, winnaar van de Nobelprijs chemie in 1999, en Dwayne Miller van de universiteit van Toronto



Figuur 6

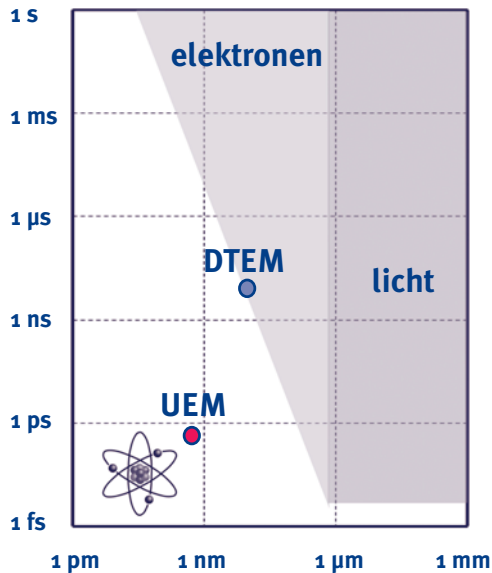
Ultrasnelle elektronenmicroscop [3]. De 'cathode-drive laser' maakt elektronen vrij uit de bron. De elektronen belichten het preparaat ('sample') en worden uiteindelijk onderaan afgebeeld op een CCD camera. De 'hydro-drive laser' zet het te bestuderen proces in gang.

hebben geweldig pionierswerk verricht. De truc die zij gebruikten, is het drastisch verlagen van de hoeveelheid elektronen in een puls, zelfs tot één elektron per puls in de aanpak van Zewail, waardoor de ladingsexplosie geen rol meer speelt. De totale belichtingstijd wordt dan gelijk aan die in traditionele elektronenmicroscopen, typisch een seconde, maar gedurende die seconde wordt dezelfde meting miljoenen malen herhaald. Zij beperken zich daarom tot het bestuderen van processen die zich in gang laten zetten met een korte laserflits, zodat het proces iedere keer op precies het juiste tijdstip geïnitieerd wordt. Bovendien is hun methode alleen geschikt voor processen die vele malen exact herhaalbaar zijn. Want voor iedere momentopname van het proces, iedere *frame* van de film, zijn vele miljoenen metingen nodig. Het opnemen van een *frame* duurt ongeveer een seconde, maar als het proces voldoende reproduceerbaar is, wordt toch een extreem korte tijdsresolutie bereikt. Het wonderbaarlijke is dat deze methode nog werkt ook! Ze zijn erin geslaagd prachtige resultaten te boeken, die vooral door Zewail met veel gevoel voor *public relations* wereldkundig zijn gemaakt. Met zijn Ultrasnelle Elektronen Microscoop (UEM, zie Fig. 6) heeft Zewail een tijdoplossend vermogen bereikt dat iets beter is dan een picoseconde, gecombineerd met een plaatsoplossend vermogen dat iets beter is dan een nanometer. Helaas kan deze techniek alleen toegepast worden op zeer robuuste materialen die niet gevoelig zijn voor stralingsschade, en op processen die vele miljoenen malen exact herhaald kunnen worden. Biologische preparaten bijvoorbeeld, voldoen aan geen van beide eisen en kunnen zo niet bestudeerd worden.

De groep rond Nigel Browning van het Lawrence Livermore National Laboratory in de VS heeft het Coulomb-probleem op een andere manier omzeild. De groep maakt elektronenpulsen met een lengte van nanoseconden, d.w.z. duizend tot tienduizend keer langer. De afstanden tussen de elektronen in de puls worden dan zo groot dat ze elkaar veel minder hard afstoten. Hierdoor hebben ze veel minder last van de ladingsexplosie. Met hun methode, die zij de Dynamische Transmissie Elektronen Microscopie (DTEM) noemen, kunnen zij in één enkel schot een microscopie-opname maken met een plaatsoplossend vermogen van ongeveer tien nanometer en een tijdoplossend vermogen van ongeveer tien nanoseconden. DTEM is tot nu toe voornamelijk toegepast op problemen in de materiaalkunde, zoals faseovergangen en de voortplanting van dislocaties. Maar DTEM lijkt bij uitstek geschikt voor toepassing in de structurele biologie, waar nanoseconde-tijdsresolutie vaak meer dan voldoende is. Gecombineerd met een vloeistofkamer zouden zelfs *in vivo* observaties mogelijk worden. DTEM zou naar mijn mening naadloos passen binnen de onderzoekspeerpunten van de TU/e, vooral in de context van het ICMS van Bert Meijer. De combinatie van de expertise in

elektronenmicroscopie van het team rond Nico Sommerdijk, in de groep van Bert de With, en de ervaring in onze groep met ultrasnelle technieken zou een vliegende start mogelijk maken.

In Fig. 7 is de huidige stand van zaken aangegeven op onze *roadmap*. De blauwe stip geeft aan waar onze collega's van het Lawrence Livermore National Laboratory nu staan met DTEM. UEM, zoals ontwikkeld in de groep van Zewail aan Caltech, maakt een hogere plaats- en tijdsresolutie mogelijk, maar is helaas geen *single shot*-techniek. Met veel kunst en vliegwerk is er het nodige bereikt door de pioniers uit de VS en Canada, maar het Coulomb-probleem is nog niet echt bij de hoorns gevat. Om nog verder te komen is een grondigere aanpak nodig.



Figuur 7

Lengte- en tijdschalen bereikbaar met huidige *single shot* ultrasnelle elektronentechnieken. De twee stippen geven aan wat nu mogelijk is met DTEM en UEM. UEM is geen *single shot* techniek.

## ‘To $c$ or not to $c...$ ’

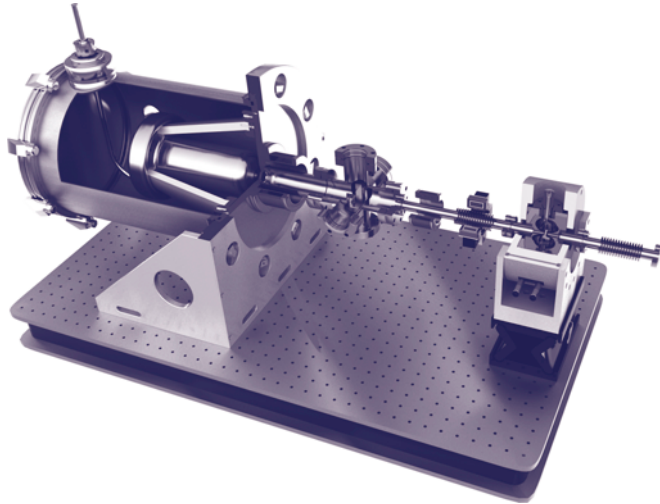
Een oplossing van het probleem van de ladingsexplosie is zo hard mogelijk versnellen. In een typische elektronenmicroscop worden elektronen opgejaagd tot ongeveer de helft van de lichtsnelheid. Als er nu fors verder wordt versneld, tot vlak aan de lichtsnelheid, dan gaan er volgens Einsteins relativiteitstheorie vreemde dingen gebeuren met ruimte en tijd. Onder andere gaat de tijd voor de voortrazende elektronen langzamer lopen. Als ze versneld worden tot bijvoorbeeld 99,5% van de lichtsnelheid, wat redelijk gemakkelijk te realiseren is in een standaard universiteitslab, dan loopt de tijd voor de elektronen tien keer langzamer. De ladingsexplosie gaat nog steeds door maar wordt ernstig vertraagd. In onze groep hebben promovendi Fred Kiewiet en Willem op 't Root gewerkt aan deze typische deeltjesversnelleraanpak, die lang gezien werd als de enige mogelijke oplossing. Deze *brute force*-benadering is nog steeds populair bij collega's in de VS, Duitsland, China en Japan. Het vereist echter zware machines en een bunker om de radioactieve straling die erbij geproduceerd wordt af te schermen. Bovendien levert het ook niet de heldere bundelkwaliteit waar we uiteindelijk naar streven. Op de vraag ‘To  $c$  or not to  $c...$ ’ – naar de lichtsnelheid of niet – is daarom ons antwoord: ‘*not to  $c$* ’ – we gaan niet meer naar de lichtsnelheid. In de afgelopen jaren hebben wij een meer subtiele aanpak bedacht, die het probleem op een fundamentele manier oplost. Deze aanpak behelst twee aspecten: ten eerste dynamische manipulatie van gepulste elektronenbundels, waarmee we onder andere de ladingsexplosie op beheerste wijze ongedaan kunnen maken. Hiervoor hebben we nieuwe ultrasnelle technieken ontwikkeld. Ten tweede een exotische manier om ultrakoude elektronenbundels van de gewenste laserachtige kwaliteit te maken. Beide vormen op dit moment belangrijke onderzoeksthema's in de groep. Ik zal daar nu kort op ingaan. Daarna zal ik schetsen waar we nu staan.

# Dynamische elektronenoptica

Om continue elektronenbundels te sturen en te focuseren, worden statische elektrische en magnetische velden gebruikt. De meest gangbare elektronenlens is een magnetische spoel. Voor gepulste bundels kunnen ook dynamische velden gebruikt worden, wat geheel nieuwe mogelijkheden biedt. Ik zal nu een voorbeeld daarvan bespreken dat erg succesvol is gebleken: het gebruik van een microgolf-trilholte – meer bekend als magnetron in huis-, tuin- en keukenjargon – om de ladingsexplosie ongedaan te maken. De dynamische velden in een microgolf-trilholte stellen ons in staat heel snel in te grijpen in de beweging van de elektronen. In een magnetron trillen elektromagnetische velden met een frequentie van ongeveer drie miljard keer per seconde. In feite is dit een elektronenlens die drie miljard keer per seconde tussen bol en hol heen en weer gaat, van positief naar negatief. Dit lijkt erg onrustig, maar de elektronenpulsen zijn nog honderd keer korter dan de trillingstijd van het microgolfveld. Zij ervaren dit als een rustige golfbeweging.

Hoe kunnen we het microgolfveld gebruiken om de ladingsexplosie ongedaan te maken? De aankomsttijd van de elektronen in de magnetron kan heel precies getimed worden, zodanig dat de voorkant van de elektronenpuls, nog steeds uitdijend ten gevolge van de ladingsexplosie, iets wordt afgeremd in de magnetron. De achterkant van de puls komt iets later aan. Tegen die tijd is het elektromagnetische veld omgedraaid en krijgen de elektronen juist een zetje mee. Als de hele elektronenpuls de magnetron gepasseerd is, is het netto resultaat dat de uitdijing van de puls omgezet is in een samentrekking; de ladingsexplosie wordt in feite teruggedraaid terwijl de puls doorvliegt. Tegen de tijd dat de elektronen bij het preparaat aankomen, is de puls weer op zijn kortst. Promovendus Thijs van Oudheusden heeft dit idee in de praktijk gebracht in de opstelling die geïllustreerd is in Fig. 8. Hij heeft op deze manier preparaten belicht met elektronenpulsen korter dan 100 femtoseconde. Deze pulsen waren van voldoende intensiteit om in één enkel schot een diffractiepatroon op te nemen van een metaalkristal. Dit werd tot voor kort niet mogelijk geacht.

Deze opstelling is het resultaat van vele jaren onderzoek en technische ontwikkeling. Ik wil hier sterk benadrukken dat dit niet mogelijk geweest was zonder de



Figuur 8

Opstelling voor ultrasnelle elektronendiffractie. Pulscompressie door microgolfvelden vindt plaats in de speciale 'magnetron' aan de rechterzijde [4].

geweldige deskundige en enthousiaste inzet van onze technici. Ad en Wim Kemper, Harry van Doorn en Iman Koole hebben elektronische hoogstandjes neergezet op het gebied van regel- en hoogspanningstechniek en microgolven. Eddy Rietman heeft met groot perfectionisme het mechanische deel voor zijn rekening genomen. De opstelling is niet alleen zeer nauwkeurig, stabiel en betrouwbaar, maar ziet er ook nog erg goed uit!

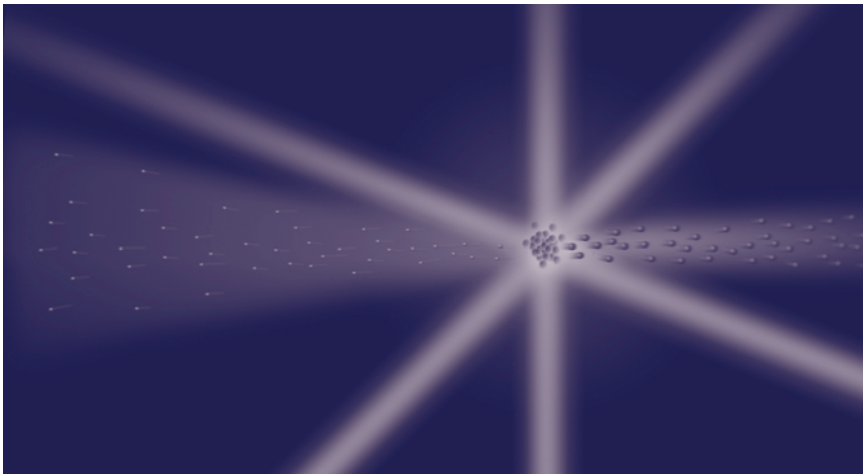
De resultaten hebben wereldwijd veel belangstelling gewekt. Enkele toonaangevende groepen (o.a. McGill University in Montréal, University of Toronto, École Polytechnique Fédérale de Lausanne en het Max Born Institute in Berlijn) hebben de techniek overgenomen en zijn er al mee aan de slag gegaan. Hier in Nederland gaat Petra Rudolf van het Zernike Institute in Groningen de techniek binnenkort toepassen op oppervlakteprocessen. In onze groep is promovendus Peter Pasmans nu bezig met deze opstelling om de dynamica van goud- en koolstofkristallen te bestuderen.

Er zijn nog vele andere snelle trucs met microgolfvelden mogelijk, waarvan er een aantal zijn verkend door promovendus Adam Lassise. Op basis van zijn proefschrift is er nu een plan gelanceerd om in samenwerking met FEI Company compacte microgolf-trilholtes te implementeren in een bestaande elektronenmicroscop.

## Koel en helder

Ik ga nu het tweede aspect van onze nieuwe aanpak toelichten: een nieuwe en nogal exotische manier om elektronenbundels te maken van laserachtige kwaliteit.

Met gepulste lasers kunnen door middel van foto-emissie op vrij eenvoudige wijze ultrakorte en zeer intense elektronenpulsen uit een metaaloppervlak getrokken worden. Maar deze bundels hebben vanaf het begin een enigszins diffuus karakter, ook al zonder de problemen geassocieerd met de onderlinge afstotende krachten. Ze komen in feite diffuus het metaal uit en hebben nog niet de gewenste laserachtige kwaliteit – de helderheid – die nodig is voor het maken van scherpe afbeeldingen. Heldere bundels noemen we ook wel koude bundels; het diffuus worden van een bundel kan als opwarming beschouwd worden. Een paar jaar geleden hebben wij een nieuwe manier ontwikkeld om koude elektronenbundels te maken. We onttrekken de elektronen aan de koudste substantie die we kennen: lasergekoelde gassen, zoals geïllustreerd in Fig. 9. Door gebruik te maken van bijvoorbeeld de techniek van de *Magneto-Optical Trap* (MOT) kunnen we atomaire



Figuur 9

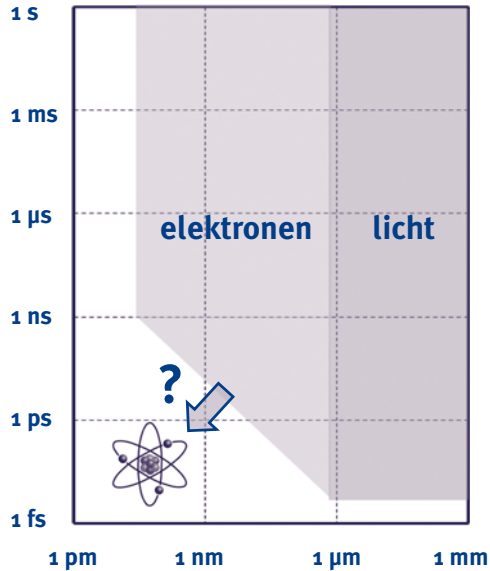
Ultrakoude, lasergekoelde elektronen- en ionenbron. De elektronen bewegen naar links, de ionen naar rechts.

gassen afkoelen tot minder dan een duizendste graad boven het absolute nulpunt. Tegelijkertijd wordt het ultrakoude gas magnetisch ingevangen in een wolkje met een afmeting van ongeveer een millimeter. Met een nauwkeurig afgestemde laser worden de atomen vervolgens heel voorzichtig geïoniseerd, d.w.z. de elektronen worden zachtjes losgemaakt van de atomen. Op deze manier creëren we een ultrakoud plasma. Het gaswolkje bevindt zich in een elektrisch versneld, dat de vrijgemaakte elektronen uit het plasma trekt en een strakke bundel vormt. Na het voorttrekkerswerk van promovendus Bert Claessens heeft promovendus Gabriel Taban enkele jaren geleden aangetoond dat deze elektronenbron duizend keer kouder is dan conventionele bronnen. Promovendus Wouter Engelen heeft onlangs samen met afstudeerders Marloes van der Heijden en Daniel Bakker laten zien dat hiermee ook ultrakoude pulsen van enkele picoseconden lengte geproduceerd kunnen worden. De piekhelderheid is daarmee duizend keer hoger dan van bundels geproduceerd door foto-emissie. Met deze bundels zijn vorige maand de eerste diffractiepatronen opgenomen van grafeenkristal, dat als testpreparaat fungeert. Daarmee is de eerste stap gezet naar daadwerkelijke toepassing.

In de ultrakoude elektronenbron zijn technieken uit twee heel verschillende werelden, die van ultrakoude kwantumgassen en die van deeltjesversnellers, succesvol gecombineerd. Dat is mogelijk geworden door de unieke combinatie van expertise in de groep CQT, die het resultaat is van de fusie van de voormalige versnellergroep FTV en de voormalige kwantumgasgroep AQT. Als Edgar Vredenburg niet naar me toe was gekomen een aantal jaren geleden met het idee van een elektronenbron gebaseerd op ultrakoud plasma, dan had deze fusie waarschijnlijk nooit plaats gevonden. Edgars geweldige kennis, ervaring, inzet en ideeën waren essentieel voor de realisatie van de ultrakoude elektronenbron. Onze ultrakoude bron heeft wereldwijd veel aandacht getrokken en verschillende groepen zijn in het onderwerp gedoken. Op conferenties en colloquia doet deze exotische bron, die met recht 'cool' genoemd mag worden, het altijd erg goed. Vorige maand heeft de eerste internationale conferentie plaats gevonden die helemaal gewijd was aan ultrakoude bundels.

Dezelfde bron produceert overigens ook ultrakoude ionenbundels, die in de tegenovergestelde richting uit het koude gaswolkje getrokken worden. Deze ionenbundels vormen een verhaal apart en een belangrijke zelfstandige onderzoeksactiviteit, die geleid wordt door mijn collega's Peter Mutsaers en Edgar Vredenburg. Promovendi Merijn Reijnders en Nicola Debernardi hebben met prachtige experimenten een aantal bijzondere eigenschappen van de ionenbundels in kaart gebracht. Promovendus Steinar Wouters werkt nu in een





Figuur 10

Lengte- en tijdschalen bereikbaar met nieuwe *single shot* ultrakoude en ultrasnelle elektronentechnieken.

samenwerkingsproject met FEI Company aan mogelijke toepassing in *Focused Ion Beam*-apparaten (FIB).

Waar staan we nu met onze elektronen? Op de *roadmap* (Fig. 10) zijn we onmiskenbaar een heel eind opgeschoten in de goede richting. Ter herinnering: het diagram geeft aan met welke plaats- en tijdsresolutie een afbeelding gemaakt kan worden in één enkele flitsbelichting. Hoever we precies zijn opgeschoten, is op dit moment moeilijk uit te drukken in harde getallen. Onze ultrakoude en ultrasnelle elektronenbundels zijn namelijk nog niet ingebouwd in een elektronenmicroscop. We kunnen dus nog niet uitproberen hoeveel beter een elektronenmicroscop presteert met de nieuwe bron. Dat is ook moeilijk te voorspellen aangezien de bijzondere bundelomstandigheden van extreme ladingsdichtheid vragen om een volledig andere optimalisatie van de conventionele elektronenlenzen, vooral als die gebruikt worden in combinatie met microgolf-compressietechnieken. Dit is nog niet goed uitgezocht. We kunnen daarom nog geen betrouwbare schattingen maken van de uiterst haalbare plaatsresolutie met femtoseconde pulsen.

Er is gelukkig wel al de nodige experimentele ervaring met *nanoseconde*-elektronenmicroscopie (DTEM) in de groep van het Lawrence Livermore National

Laboratory. Als de elektronenbron van de huidige DTEM vervangen zou worden door een ultrakoude elektronenbron, dan zou subnanometer plaatsresolutie gecombineerd met nanoseconde-tijdresolutie zeker binnen de mogelijkheden liggen. Dit zou geweldige kansen bieden voor het onderzoek naar de dynamica van macromoleculen. Met nanoseconde-resolutie kan het gekrioel van de individuele atomaire trillingen weliswaar niet meer gevolgd worden, maar wel de tragere grootschalige bewegingen van bijvoorbeeld een proteïne tijdens het vouwproces. Realisatie daarvan zal een schat aan nieuwe informatie opleveren.

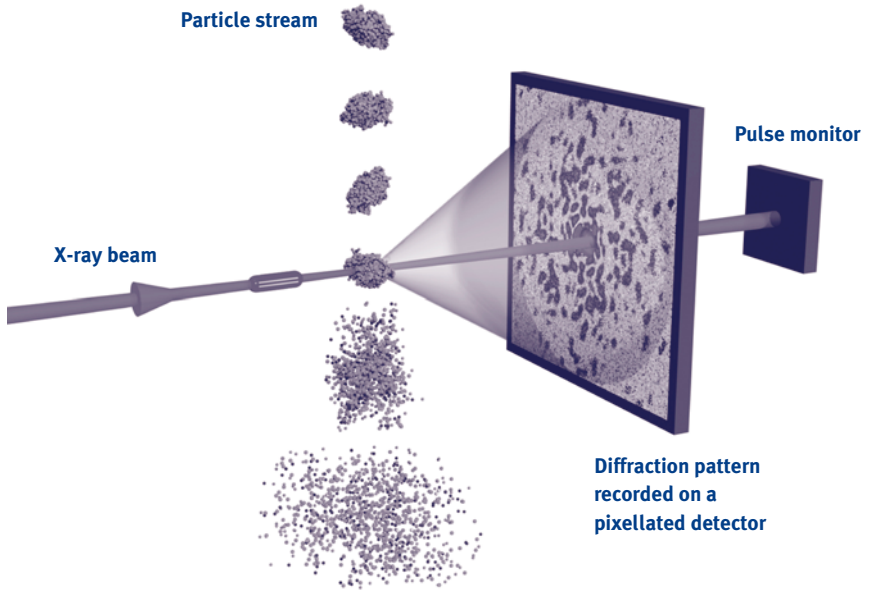
Voorlopig hebben we nog geen microscoop. Wat we nu wel kunnen doen, is tijd-opgeloste kristallografie. Met onze ultrakoude en ultrasnelle bundels is het nu in principe mogelijk de dynamica van complexe moleculaire systemen *in kristalvorm* te volgen met atomaire tijd- en plaatsresolutie, d.w.z. picoseconde en subnanometer. Dit is een enorme stap vooruit, vooral gezien het feit dat op dit moment praktisch alle informatie over proteïnestructuren gebaseerd is op kristalpreparaten. In samenwerking met Ilja Voets, verbonden aan het ICMS, zijn we nu op zoek naar geschikte eiwitkristallen om in onze opstellingen te onderzoeken. We denken in eerste instantie aan tweedimensionale kristallen, zoals membraan-eiwitten. Omdat deze structuren zo dun zijn, zijn ze bijna volledig transparant voor röntgenstralen. Daardoor is er relatief weinig van bekend van deze belangrijke klasse van proteïnen. Een prachtige kans voor elektronentechnieken!

# Holografie en kwantum bundels

Ik heb u laten zien hoever we zijn gekomen en wat er momenteel mogelijk is. Ik zou nu kort willen speculeren over toekomstige ontwikkelingen en een paar spannende nieuwe ideeën willen schetsen.

Eerst over alternatieve manieren om afbeeldingen te maken. De optica in een licht-microscop is erg goed. Zo goed dat de scherpte van de plaatjes bijna geheel beperkt wordt door de golflengte van het licht. In vergelijking daarmee is de optica in elektronenmicroscopen, meestal een stelsel van magnetische spoelen, bedroevend slecht. Als elektronenlenzen van dezelfde kwaliteit zouden zijn als lenzen van glas, dan zouden we details honderd keer kleiner dan een atoom zichtbaar kunnen maken. Gelukkig zijn er manieren om het gebruik van lenzen te omzeilen, namelijk door gebruik te maken van de zogenaamde coherente, lensloze afbeeldingstechnieken. Een voorbeeld daarvan is holografie, waar u waarschijnlijk wel enigszins vertrouwd mee bent. Wat de meesten van u waarschijnlijk niet weten is dat holografie oorspronkelijk bedacht is voor elektronenmicroscopie, door Dennis Gabor in 1947, *juist* vanwege de miserabele kwaliteit van elektronenlenzen. Holografie met licht kwam pas later. Andere varianten van coherent, lensloos afbeelden zijn *Coherent Diffractive Imaging* (CDI) en *ptychografie*. Niet alleen bieden deze methodes de kans om de elektronenlenzen naar de elektromagnetische glasbak te brengen; ze leveren ook een veel completer beeld van het preparaat. In een hologram bijvoorbeeld zit in principe de informatie opgeslagen van de volledige driedimensionale structuur.

Voor röntgenstralen bestaan helemaal geen fatsoenlijke lenzen, zeker niet voor de extreem destructieve röntgenpulsen van de XFEL. Voor de XFEL is CDI daarom de enige hoop op het maken van echte afbeeldingen van niet-kristallijne objecten. De stralingsschade door de XFEL-pulsen is zo extreem dat binnen een picoseconde na de belichting er niets meer van het preparaat over is. Het wordt volledig verdamp, geïoniseerd en weggeblazen. Voor de XFEL is succesvolle belichting binnen een femtoseconde-schot dus van levensbelang. De XFEL CDI-techniek wordt daarom ook wel aangeduid met de krijgshaftige term ‘diffract and destroy’ (zie Fig. 11).



Figuur 11

Kort maar krachtig: het opnemen van een diffractiepatroon met een XFEL-puls.  
 'Diffract and destroy' [5].

Onlangs is atomaire plaatsresolutie gerealiseerd met ptychografie, waarbij gebruik was gemaakt van een elektronenbundel van niet bijzonder hoge kwaliteit. In een reguliere elektronenmicroscop zou met deze bundel op zijn best een plaatsresolutie van enkele nanometer gehaald zijn. Onze ultrakoude elektronenbron lijkt uitstekend geschikt voor toepassing van *in-line holography*, een techniek waarmee Tatiana Latychevskaia van de universiteit van Zürich bij zeer lage elektronen-energieën afbeeldingen heeft gemaakt van een geïsoleerde DNA-streng. Wellicht dat de combinatie van een ultrakoude bron met coherente, lensloze afbeeldingstechnieken de manier is om atomaire plaats- en tijdsresolutie te bereiken. Mochten we deze richting ingaan, dan zal de kennis en ervaring van mijn collega Ton van Leeuwen op het aanverwante gebied van atoominterferometrie erg goed van pas komen.

Of er nu met of zonder lenzen wordt afgebeeld, de kwaliteit van de afbeelding wordt altijd beter als de helderheid, de coherentie van de bundel hoger wordt. De huidige ultrakoude elektronenbron is duizend keer kouder dan conventionele bronnen. Het is niet ondenkbaar dat de bron nog kouder gemaakt kan worden. Als het op één of andere manier lukt de temperatuur van de bron met *nog* een

factor duizend te verlagen, dan wordt de coherentie volledig. De bundel komt dan in een heel bijzonder regime van kwantumontaarding, dat nog niet eerder vertoond is met elektronenbundels. Elektronen zijn fermionen; de daarmee geassocieerde kwantumstatistiek gaat in dit extreme bundelregime een belangrijke rol spelen. De bundelhelderheid loopt dan tegen een fundamentele, uiterste limiet aan, die het gevolg is van het uitsluitingsprincipe van Pauli. Subtiële kwantumeffecten gaan een rol spelen. In feite weten we nog niet precies hoe we over zulke bundels moeten denken. De bundel vormt dan een kwantum-veeldeelstelsel met sterke wisselwerking, precies het soort systeem waar mijn collega Servaas Kokkelmans graag zijn theoretische tanden in zal zetten. Ik ben ervan overtuigd dat daar een grote fundamentele uitdaging ligt, die prachtig aansluit op het werk aan ultrakoude atomaire kwantumgassen. Vanuit het oogpunt van de toepassing wordt het dan ook erg interessant: met kwantumbundels moeten de traditionele ideeën van het maken van een afbeelding, die gebaseerd zijn op licht, worden herzien. Dit geldt ook voor de wisselwerking van de elektronenbundel met het preparaat. Elektronendiffractie en microscopie zullen wellicht opnieuw moeten worden uitgevonden.

# Positionering

Het is goed even stil te staan bij de positionering van ons onderzoek. Waar staat het binnen de TU/e, in Nederland en internationaal? Ik heb u voornamelijk verteld over snelle elektronentechnieken, maar binnen onze groep *Coherence & Quantum Technology* (CQT) gebeurt meer. Ultrakoude ionenbundels heb ik al genoemd. Een spannende en groeiende activiteit is het onderzoek aan roosters van koude Rydberg-atomen, het promotiewerk van Rick van Bijnen onder begeleiding van Servaas Kokkelmans en Edgar Vredenburg. Een prachtig modelsysteem, balancerend op de ragfijne grens tussen ultrakoud gas en plasma, dat wellicht de mogelijkheid biedt een kwantumplasma te genereren. Daarnaast hebben we warme belangstelling voor de optische manipulatie van deeltjes, zoals laserkoeling en laserversnelling, maar ook bijvoorbeeld voor het Kapitza-Dirac effect. Er zijn nog vele fundamentele vragen over de wisselwerking tussen deeltjes en licht: een onderwerp waar promovendus Peter Smorenburg aan werkt onder begeleiding van collega Leon Kamp.

Centraal staat het ultrakoude plasma, een geïoniseerd gas van hoge faseruimedichtheid. Wij zijn trots deel uit te maken van de plasmacluster aan de faculteit Technische Natuurkunde – een unieke concentratie van plasmaonderzoek in Nederland en daarbuiten. Wij dragen bij met onderzoek van een heel eigen karakter, gekenmerkt door een *hard core* fysische benadering en goed gedefinieerde modelsystemen. Ik hoop dat de banden met de collega's in de groepen EPG – geleid door onze decaan Gerrit Kroesen, PMP – geleid door Erwin Kessels, en Fusion – geleid door Niek Lopez Cardozo – verder versterkt zullen worden. Ik denk dat we nog veel van elkaar kunnen leren.

De technieken die wij ontwikkelen hebben een duidelijk monodisciplinair, plasmafysisch karakter. Maar we gaan ze toepassen – zoals hopelijk duidelijk is geworden – in een sterk multidisciplinaire setting. Dit is niet in strijd met elkaar. Ik ben het met Bert Meijer eens dat een multidisciplinaire samenwerking alleen optimaal kan werken als mensen bij elkaar gebracht worden die heel goed zijn in hun *eigen* vak; geen generalisten maar specialisten! Ze moeten natuurlijk wel onderling kunnen communiceren. Zoals Feynman het uitdrukte in zijn lezing in 1959:

“We have friends in other fields – in biology, for instance. We physicists often look at them and say, ‘You know the reason you fellows are making so little progress?’ (Actually I don’t know any field where they are making more rapid progress than they are in biology today.) ‘You should use more mathematics, like we do.’ They could answer us – but they’re polite, so I’ll answer for them: ‘What you should do in order for us to make more rapid progress is to make the electron microscope 100 times better.’”

Wij maken deel uit van het multidisciplinaire *Institute for Complex Molecular Systems* (ICMS). Zoals ik al vermeld heb, zijn we nu samen met Ilja Voets van het ICMS op zoek naar de meest geschikte eiwitpreparaten om onze elektronentechnieken op toe te passen. We gaan een spannende tijd tegemoet!

Binnen Nederland werken we op het gebied van elektronentechnieken samen met de TU Delft en met FEI Company. Onlangs is Erik Kieft begonnen bij FEI. Hij gaat zich *fulltime* wijden aan ultrasnelle elektronenmicroscopie. Met de inzet van Sander Henstra en Fred Kiewiet en de steun van directeur *Advanced Technology* Frank de Jong ben ik ervan overtuigd dat we er nu samen flink de vaart in gaan krijgen.

Internationaal staan we aan het front van het jonge en stormachtig groeiende veld van ultrasnelle elektronen- en röntgentechnieken. We hebben vooral naam gemaakt met vernieuwende technologie. Het wordt nu tijd dat we die ook zelf gaan toepassen. Samenwerking zoals binnen het ICMS, maar ook met Nico Sommerdijk op het gebied van biomineralisatie, en met Emiel Henstra op het gebied van katalyse, beiden van Scheikundige Technologie, zou daar een geweldige impuls aan geven.

# Onderwijs

Ik wil nog enkele woorden besteden aan onderwijs. Dit jaar is het Bachelor College van start gegaan, de grootste onderwijshervorming aan deze universiteit sinds haar oprichting. Dit heeft een enorme inspanning gevergd, die gelukkig nu al positieve effecten lijkt te hebben: een grotere instroom van studenten, met naar verhouding ook een veel groter aantal meisjes.

Ik denk dat het een goede zet is geweest de definitieve keuze van de studierichting uit te stellen tot de master. Dat had zelfs nog grondiger gekund, zoals aan de Amerikaanse universiteiten. Het belangrijkste argument daarvoor is niet van politieke of economische aard. Zoals onomstotelijk vastgesteld in de neuropsychologie, is de ontwikkeling van het brein van een jong volwassene pas voltooid rond het 21<sup>e</sup> jaar of zelfs later. Edward Witten, wereldvermaard pionier van *superstring theory* en winnaar van de *Fields Medal* voor wiskunde, deed een bachelor met als hoofdvak geschiedenis voordat hij zich met theoretische natuurkunde ging bezig houden. Het is belangrijk om de eerste jaren van de studie nog rond te kunnen kijken en te kunnen proeven van een breed keuzevakkenpakket. Bijvoorbeeld van het vak neuropsychologie. Specialisatie dient pas te gebeuren in de master, en dan moeten studenten ook echt goed de diepte in!

Alle mooie woorden ten spijt, deze tijd, en zeker deze regio, heeft specialisten nodig, geen generalisten. Met specialisten bedoel ik mensen die de diepte zijn ingegaan, die hun tanden hebben gezet in moeilijke problemen. Niet zozeer mensen opgeleid voor een bepaalde beroepsgroep. De waarde van deze mensen voor de samenleving op de lange termijn is niet *wat* ze hebben gestudeerd, maar *hoe*. Dat is naar mijn mening de echte academische vorming. Ik besef heel goed dat de toenemende complexiteit van de samenleving steeds meer eist van het vermogen tot samenwerken en onderlinge communicatie. Maar ik ben bang dat zulke sociale vaardigheden zich niet laten vertalen in een vakkenpakket, net zomin als ondernemingszin en commercieel talent.



Enigszins zorgelijk vind ik de verschoolsing van de studie. Studenten worden met steeds strakkere methodes letterlijk ‘bij de les gehouden’. Er is een grotere keuzevrijheid, maar minder gelegenheid om te *freewheelen*. We worden tot deze maatregelen gedwongen door druk van buitenaf, waar de universiteit weinig invloed op heeft. Toch wil ik ervoor pleiten om zoveel mogelijk de verantwoordelijkheid bij de studenten zelf neer te leggen. Niet iedereen heeft hetzelfde uniforme studietempo. Geef studenten de kans om te laten zien wat ze waard zijn op hun eigen manier. Ik ben dan ook benieuwd hoe de maatregelen om zelfstudie in de bachelor te bevorderen zullen uitpakken.

# Slotwoord

Ter afsluiting wil ik enkele mensen noemen die belangrijk zijn geweest voor mijn carrière.

In de eerste plaats bedank ik mijn leermeesters: Boudewijn Verhaar, die mij aan deze universiteit de schoonheid van de theoretische fysica heeft bijgebracht. Zijn school van theorie bedrijven, tegelijkertijd intuïtief, exact en elegant, is voor mij een groot voorbeeld. De aantekeningen van zijn colleges heb ik altijd bewaard. Jook Walraven heeft me de kans gegeven promotiewerk te doen aan de UvA op een heel bijzonder project. Ik heb van hem geleerd hoe geweldig het is hard te werken, met volledige overgave, aan een bijna onmogelijk experiment: de reis is belangrijker dan de bestemming. Piet de Korte heeft me geleerd hoe je leiding kunt geven met een menselijk gezicht en dat *New Age* en technische fysica niet noodzakelijkerwijs strijdige begrippen zijn. Ik denk nog altijd met warme gevoelens terug aan de tijd bij SRON en de samenwerking met mijn eerste promovendus, Marcel van den Berg, die helaas enkele jaren geleden is overleden.

Marnix van der Wiel heeft mij ruim 14 jaar geleden een geweldige kans geboden, door mij aan te nemen aan deze universiteit in zijn net opgerichte groep Fysica en Toepassingen van Versnellers. Dat getuigde van groot vertrouwen (of van moed?) aangezien ik nog nooit een deeltjesversneller van dichtbij had gezien. Ik kon meteen aan de slag in het gespreide bedje van twee prachtige projecten die hij net had binnengehaald. Eén daarvan was het project rond opwekking van zachte röntgenstraling d.m.v. het Čerenkov-effect: het promotiewerk van Walter Knulst, dat stond in het kader van een zeer plezierige samenwerking met Jan Verhoeven van AMOLF. De richting die Marnix toen heeft gedefinieerd, is nog steeds in grote mate bepalend voor ons onderzoek. Ik ben zowel Marnix als Herman Beijerinck dankbaar voor de manier waarop zij enkele jaren geleden de totstandkoming van CQT in goede banen hebben geleid. Ik ben onze voormalige decaan Klaas Kopinga en onze voormalige directeur bedrijfsvoering Tiny Verbruggen erkentelijk voor de snelheid waarmee mijn benoeming uiteindelijk is gerealiseerd. Ik ben blij dat Marnix nog steeds verbonden is met de groep via het bedrijf AccTec BV, dat hij samen met Martien de Voigt bestuurt. De steun van AccTec is belangrijk voor

ons. Het is ook ontzettend leuk dat we nu via AccTec wat verdienen aan onze technologie. Maar ik waardeer vooral hoezeer Marnix nog steeds persoonlijk betrokken is bij de groep.

De groepsleden van CQT wil ik hartelijk bedanken voor de fijne samenwerking. De wetenschappelijke staf – Seth Brussaard, Servaas Kokkelmans, Ton van Leeuwen, Peter Mutsaers en Edgar Vredenburg – vormt een unieke combinatie van expertise maar ook een hechte groep van fijne collega's. Bas van der Geer en Marieke de Loos nemen een bijzondere plaats in. Met hun bedrijf Pulsar Physics en hun code GPT zijn ze verbonden met CQT in een symbiotische relatie. Ik hoop dat we die nog lang kunnen voortzetten. Wij zijn steeds ongelooflijk verwend geweest met een fantastische technische staf: Harry van Doorn, Leo de Folter, Ad en Wim Kemper, Iman Koole, Louis van Moll, Eddy Rietman en Jolanda van de Ven. Niet alleen vanwege de schitterende technische hoogstandjes maar ook de onmisbare 'klaar terwijl u wacht'-service. Ik ben Betty Eversdijk dankbaar voor de manier waarop zij ons altijd met raad en daad bijstaat en zo nodig met beide benen op de grond houdt. En dat alles strevend naar de hoogste esthetische standaard. Jaap Corstens ondersteunt ons met rekenkracht, assistentie bij het onderwijs en vele liters koffie. Ons onderzoek drijft op de geweldige inzet van de promovendi, van wie ik er al een aantal genoemd heb, maar ook van master- en bachelorstudenten, teveel om op te noemen. De discussies met deze getalenteerde en enthousiaste jongens en meisjes, niet noodzakelijkerwijs over natuurkunde, vormen voor mij de leukste en meest leerzame momenten. Ik zie voor CQT een mooie toekomst.

Ik wil hier ook graag mijn vader Jan Luiten noemen. Zijn grote interesse in wat mij bezig houdt, heeft me altijd erg gestimuleerd. Met zijn natuurlijke fysische intuïtie heeft hij heel weinig nodig om te begrijpen waar het om gaat. Ik herinner me nog goed dat hij een rondleiding kreeg in mijn lab aan de UvA. Een collega promovendus was oprecht verbaasd te horen dat hij geen fysicus van opleiding was.

Woorden schieten natuurlijk te kort om Ing en de kinderen, Sebastiaan en Maloe, te bedanken voor hun lieve steun en geduld, vooral als ik weer eens nachten of weekenden moest doorwerken. Thuis lukte het de betrekkelijkheid van alles weer in te zien: Lekker belangrijk! Sebastiaan en Maloe, jullie zijn een jaar ingegaan van grote beslissingen. Ik ben heel benieuwd wat jullie gaan doen. Ing, op naar ons volgende avontuur!

Ten slotte wil ik dit verhaal opdragen aan mijn moeder Eileen, die mij als geen ander heeft gevormd. Zoals Dim opmerkte: Het is vandaag Allerzielen. Dat is mooi.

Ik dank u voor uw aandacht.

Ik heb gezegd.

# Referenties

---

1. [www.its.caltech.edu/~feynman/plenty.html](http://www.its.caltech.edu/~feynman/plenty.html)
2. M.M. Lin and A.H. Zewail, *Protein folding – simplicity in complexity*, Ann. Phys. **524**, 379 (2012)
3. E.E. King et al., *Ultrafast electron microscopy in materials science, biology, and chemistry*, J. Appl. Phys. **97**, 111101 (2005)
4. TU/e ICMS Animatiestudio
5. K.J. Gaffney and H.N. Chapman, *Imaging atomic structure and dynamics with ultrafast X-ray scattering*, Science **316**, 1444 (2007)

# Curriculum Vitae

**Prof.dr.ir. O.J. (Jom) Luiten is op 1 april 2011 benoemd tot voltijdhoogleraar Coherent Charged Particle Beams aan de faculteit Technische Natuurkunde van de Technische Universiteit Eindhoven (TU/e).**

Jom Luiten (1961) studeerde Technische Natuurkunde aan de TU/e. Hij promoveerde in 1993 aan de Universiteit van Amsterdam op de eerste optische experimenten met magnetisch ingevangen atomaire waterstofgas. Na zijn promotie werkte hij 4 jaar bij Stichting Ruimte Onderzoek Nederland (SRON) aan supergeleidende röntgendetectoren. Daarna werkte hij een jaar in de industrie bij ASML. In 1998 werd hij aangesteld als universitair docent bij de faculteit Technische Natuurkunde van de TU/e in de groep Fysica en Toepassingen van Versnellers. Aanvankelijk richtte zijn onderzoek zich op relativistische elektronenbundels en lichtbronnen. Maar geïnspireerd door nieuwe inzichten in bundeldynamica en ultrakoude plasma's, verschoof zijn belangstelling naar elektronendiffractie en microscopie. In 2007 werd hem een Vici-beurs toegekend uit de Vernieuwingsimpuls van de Nederlandse Organisatie voor Wetenschappelijk Onderzoek (NWO). Sinds 2011 leidt hij de groep Coherence & Quantum Technology (CQT). Zijn onderzoek richt zich nu op het maken en manipuleren van geladen deeltjesbundels en plasma's van hoge ladingsdichtheid en faseruimedichtheid. Zijn belangstelling gaat uit naar fundamentele aspecten van deze systemen en naar toepassingen in materiaalkunde, nanotechnologie en levenswetenschappen.

## Colofon

### Productie

Communicatie Expertise  
Centrum TU/e

### Fotografie cover

Rob Stork, Eindhoven

### Ontwerp

Grefo Prepress,  
Sint-Oedenrode

### Druk

Drukkerij Snep, Eindhoven

ISBN 978-90-386-3271-1  
NUR 926

Digitale versie:  
[www.tue.nl/bib/](http://www.tue.nl/bib/)

**Bezoekadres**

Den Dolech 2  
5612 AZ Eindhoven

**Postadres**

Postbus 513  
5600 MB Eindhoven

Tel. (040) 247 91 11  
[www.tue.nl](http://www.tue.nl)



Technische Universiteit  
**Eindhoven**  
University of Technology