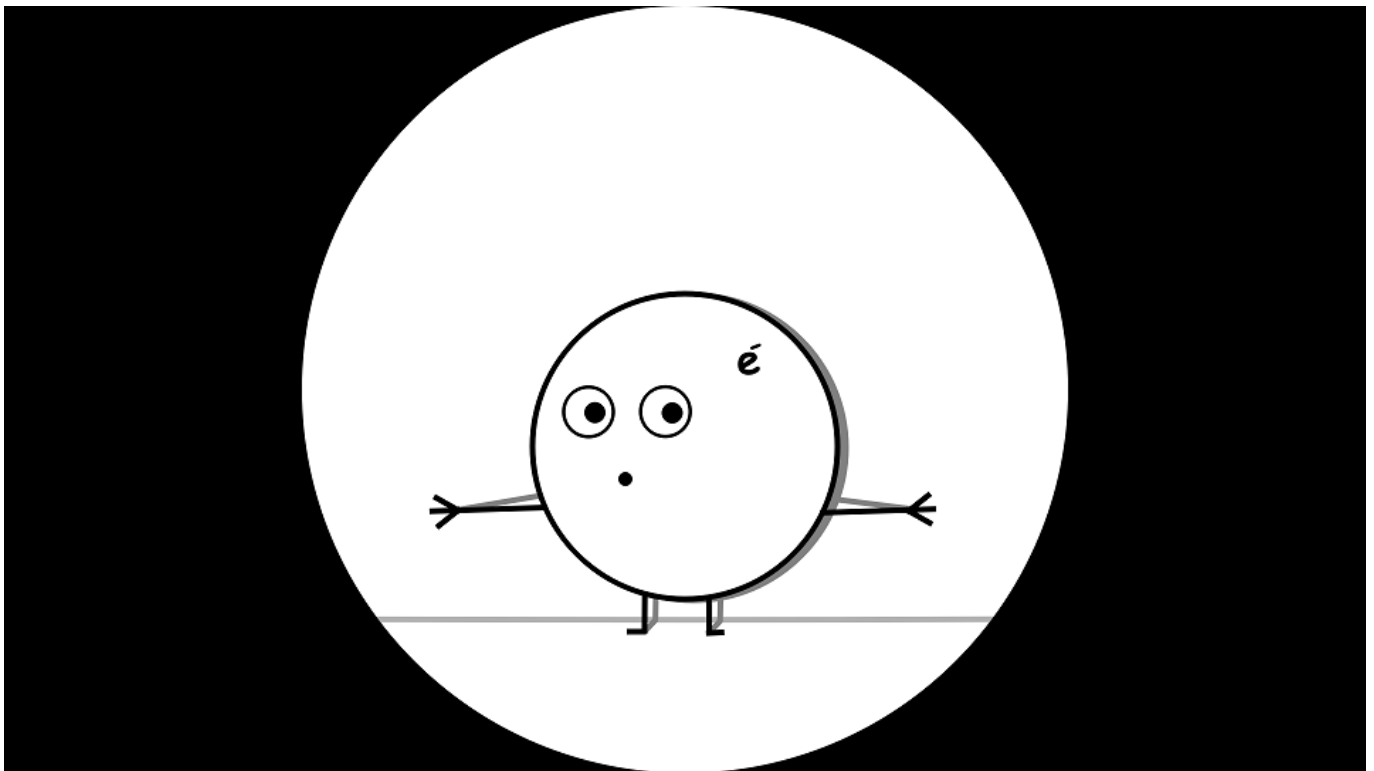


De wereld in attoseconden

Deze week zijn de winnaars van de Nobelprijzen weer bekend gemaakt. De natuurkundeprijs gaat dit jaar naar Pierre Agostini, Ferenc Krausz en Anne L'Huillier, voor de technologie achter de allerkortste lichtpulsen, die gebruikt kunnen worden om de quantummechanica op extreem korte tijdschalen in beeld te brengen.

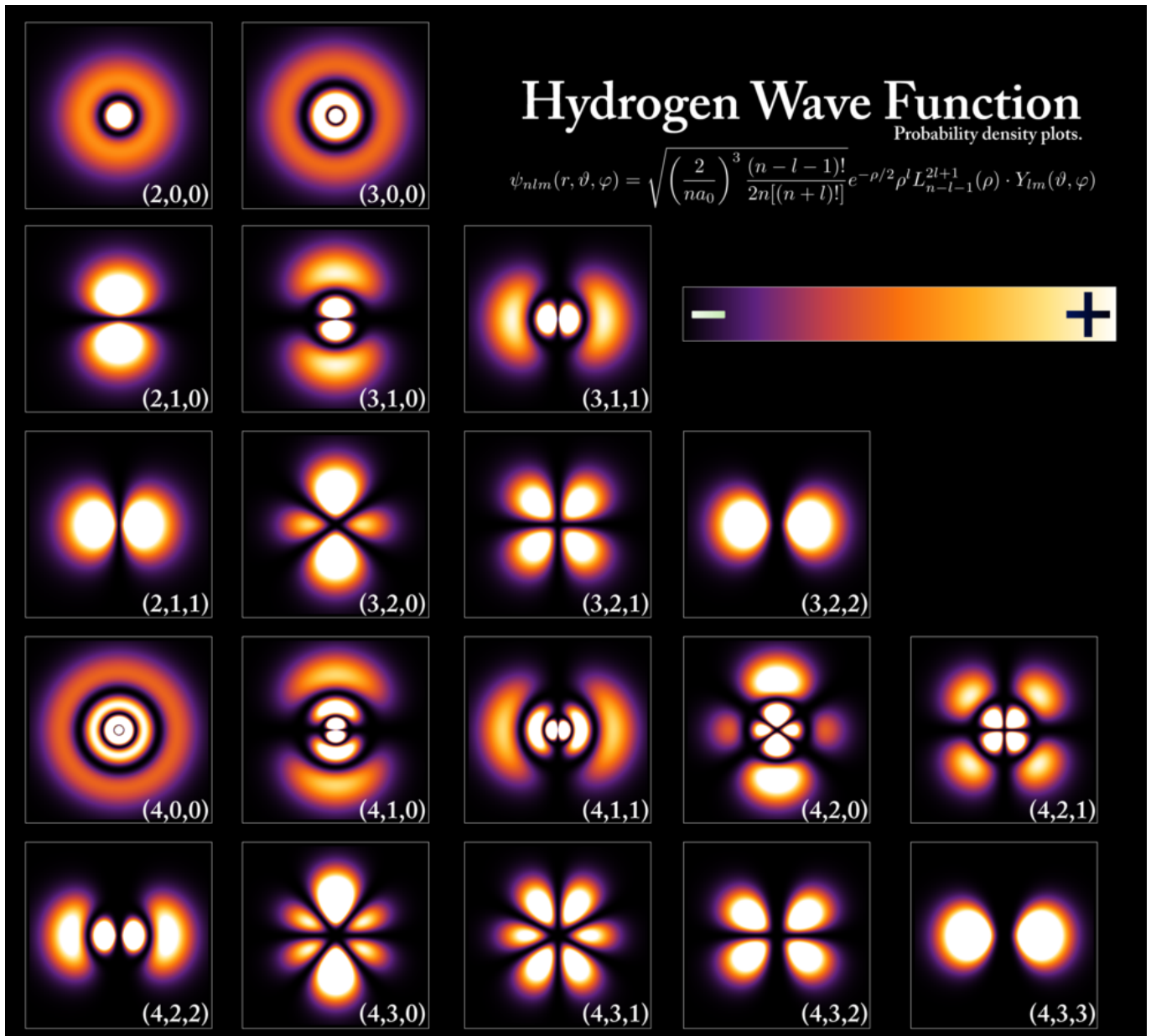


Een elektron zichtbaar gemaakt. Met de technieken van de nieuwe Nobelprijswinnaars kunnen we op extreem kleine - en extreem korte - schaal de quantumwereld bekijken. Afbeelding: Renske Wierda.

Wanneer we het over quantummechanica hebben, dan hebben we het meestal over golffuncties, de oplossingen van de [Schrödingervergelijking](#) die ons vertellen hoe quantumdeeltjes zich voortbewegen. Uit de oplossingen van de Schrödingervergelijking volgen bijvoorbeeld de bekende [atoomorbitalen](#) van het waterstofatoom, die ons vertellen waar rond de atoomkern een elektron zich kan bevinden. De golffunctie (in het kwadraat, om

precies te zijn) bepaalt namelijk de kans om het elektron op een bepaalde positie aan te treffen, en de resulterende kansverdelingen definiëren de orbitalen, zoals te zien in afbeelding 1 voor het waterstofatoom. Orbitalen zijn in deze afbeeldingen *statische* configuraties. De golffunctie is een staande golf, die wel op zijn plaats oscilleert, maar deze oscillatie speelt geen rol bij het berekenen van de kansverdeling¹.

Er bestaan echter nog veel meer quantumsystemen dan alleen geïsoleerde atomen met een enkel elektron. Zodra interacties tussen meerdere deeltjes een rol spelen, is een statische configuratie niet meer mogelijk en belanden we in de studie van de bewegingen van elektronen, de elektrondynamica (niet te verwarren met elektrodynamica, zonder n , de studie van elektriciteit). Denk aan het [foto-elektrisch effect](#), waar een atoom de energie van een foton absorbeert en deze energie overdraagt aan een elektron, dat daarbij vrijkomt. De theorie voorspelt dat bij atomen met meerdere elektronen er kleine tijdsverschillen zijn tussen elektronen die worden losgelaten uit verschillende orbitalen. Deze tijdsverschillen zijn echter ongelooflijk klein: enkele tientallen *attoseconden*. Een attoseconde (afgekort tot as) duurt 10^{-18} seconden, oftewel een miljardste nanoseconde, oftewel oftewel een miljardste van een miljardste van een seconde. Lange tijd werd dit tijdsverschil gezien als onmeetbaar klein, maar met de ontdekkingen van de nieuwste Nobelprijswinnaars is zo'n meting toch realiteit geworden.



Enkele orbitalen van het waterstofatoom. De afbeelding toont tweedimensionale weergaves van de driedimensionale kansverdelingen, die dus het kwadraat van de golf functie zijn. De kleur geeft aan hoe waarschijnlijk het is om het elektron op die positie aan te treffen. Afbeelding: [PoorLeno](#).

Bijna al onze waarnemingen van de wereld maken we met licht, en om veranderingen te meten (zoals een verplaatsing) moeten we snel genoeg meerdere waarnemingen achter elkaar kunnen doen. Om dus processen waar te nemen die plaatsvinden op de attosecondenschaal moeten we lichtpulsen maken die ongeveer even lang zijn. Door slim gebruik te maken van interferentie kunnen pulsen met een lengte van een paar femtoseconden (1 fs = 1000 as) gemaakt worden, maar dat was ook de theoretische

onderlimiet.

De lengte van een puls wordt bepaald door twee technische eigenschappen: de *breedte van het emissiespectrum in het frequentiedomein* en de *centrale golflengte*. Met [Fourieranalyse](#) kunnen we afleiden dat naarmate er meer verschillende frequenties in een puls zitten, de puls korter kan zijn. Dit komt doordat de verschillende golven binnen de puls dan zodanig kunnen interfereren dat ze de puls steeds smaller maken. De onderlimiet van dit proces is de centrale of grootste golflengte van de puls. De meeste femtoseconde-lasers pulsen in het infrarode licht, met een golflengte (λ) van bijvoorbeeld 800 nm. Via de relatie tussen golflengte en pulsduur, ($t = \lambda / c$) (met c de lichtsnelheid) vinden we dat de minimale lengte van een puls dan 2,67 fs is. Een infraroodlaser kán dus geen kortere pulsen produceren.

De oplossing: *high-harmonic generation (HHG)*. Wanneer een materiaal (gas, plasma, vaste stof of vloeistof) wordt beschoren door een infrarode laserpuls met een hoge intensiteit, dan zal dat materiaal zelf pulsen gaan uitzenden van de bovenfrequenties van de originele laser. Een bovenfrequentie kun je vergelijken met de boventonen in de muziek: het zijn trillingen met een frequentie die 2, 3, 4, ... of een ander geheel aantal maal zo groot is als de oorspronkelijke frequentie. Deze bovenfrequentie-pulsen nemen in eerste instantie af qua intensiteit bij hogere ordes van de bovenfrequenties, maar het bijzondere gebeurt vanaf de vijfde bovenfrequentie: de intensiteit blijft constant over een groot aantal ordes. In het eerste experiment in 1988 waar dit 'plateau' werd waargenomen, liep het plateau al tot op de 33e orde! Anne L'Huillier was betrokken bij dit onderzoek, en publiceerde daarna in 1991 de theorie achter dit plateau-verschijnsel, waarbij ze aantoonde dat dit soort breed-spectrum pulsen alleen gemaakt konden worden met infraroodlasers.

Met HHG kan je dus uit een infraroodlaser een set pulsen in het extreem ultraviolet (XUV) halen, met een breed emissiespectrum. Precies wat we nodig hebben voor attoseconde-pulsen! De laatste (en vrij cruciale) stap is het verifiëren dat je inderdaad attoseconde-pulsen hebt gemaakt. De techniek die hiervoor is ontwikkeld heet RABBIT (*Reconstruction of Attosecond Beating By Interference of Two-photon transitions*), waarbij gekeken wordt naar de interferentie tussen de pulsen gemaakt met HHG en de oorspronkelijke laser. Met deze techniek werd in 2001 in twee experimenten het bestaan van attoseconde-pulsen bewezen: in het eerste experiment werd een reeks van pulsen met een lengte van 250 as gemaakt

door de groep van Pierre Agostini, en de groep van Ferenc Krausz maakte in een tweede experiment een geïsoleerde puls van 650 as.

Het mooie van de RABBIT-techniek is dat die ook gebruikt kan worden voor het doen van metingen aan stoffen met behulp van attoseconde-pulsen. De eerder onmeetbare tijdsverschillen bij het foto-elektrisch effect zijn ondertussen gemeten door de groep van Anne L'Huillier, die verschillen van 10 as konden meten tussen de uitzendtijdstippen van elektronen. Een hele reeks aan Nobelprijswaardig onderzoek, dus, en nu hebben L'Huillier, Agostini en Krausz die prijs dan ook gekregen.

Met dit onderzoek is de wereld van elektrondynamica voor ons opengegaan. Door atomen, moleculen en kristallen waar te nemen op de attosecondeschaal kunnen we vragen beantwoorden over de bewegingen en interacties van elektronen. Het begrijpen van de bewegingen van elektronen binnen kristallen is van groot belang voor de elektronica, waar computerchips met halfgeleiders steeds kleiner en compacter worden. Met attoseconde-pulsen kunnen ook de moleculaire orbitalen bekeken worden, wat zou kunnen leiden tot een non-invasieve test van biologisch materiaal op bepaalde molecuulgroepen, iets waar de groep van Ferenc Krausz zich nu mee bezig houdt. Het ultieme doel is uiteindelijk het volgen van de beweging van elektronen binnen atomen, de kleinste schaal – gewoon omdat we het willen begrijpen.

^[1] De reden dat een oscillatie geen invloed heeft op de kansverdeling ligt in de wiskunde van de [complexe getallen](#). Een complex getal kun je zien als een punt in een tweedimensionaal vlak weergeeft. Er zijn dus heel veel complexe getallen met dezelfde grootte – die liggen allemaal op een cirkel, op gelijke afstanden van het getal 0. De oscillaties van de golffunctie kun je zien als het draaien langs zo'n cirkel. Daarbij verandert de grootte van het complexe getal niet, en die grootte in het kwadraat bepaalt de kansverdeling.