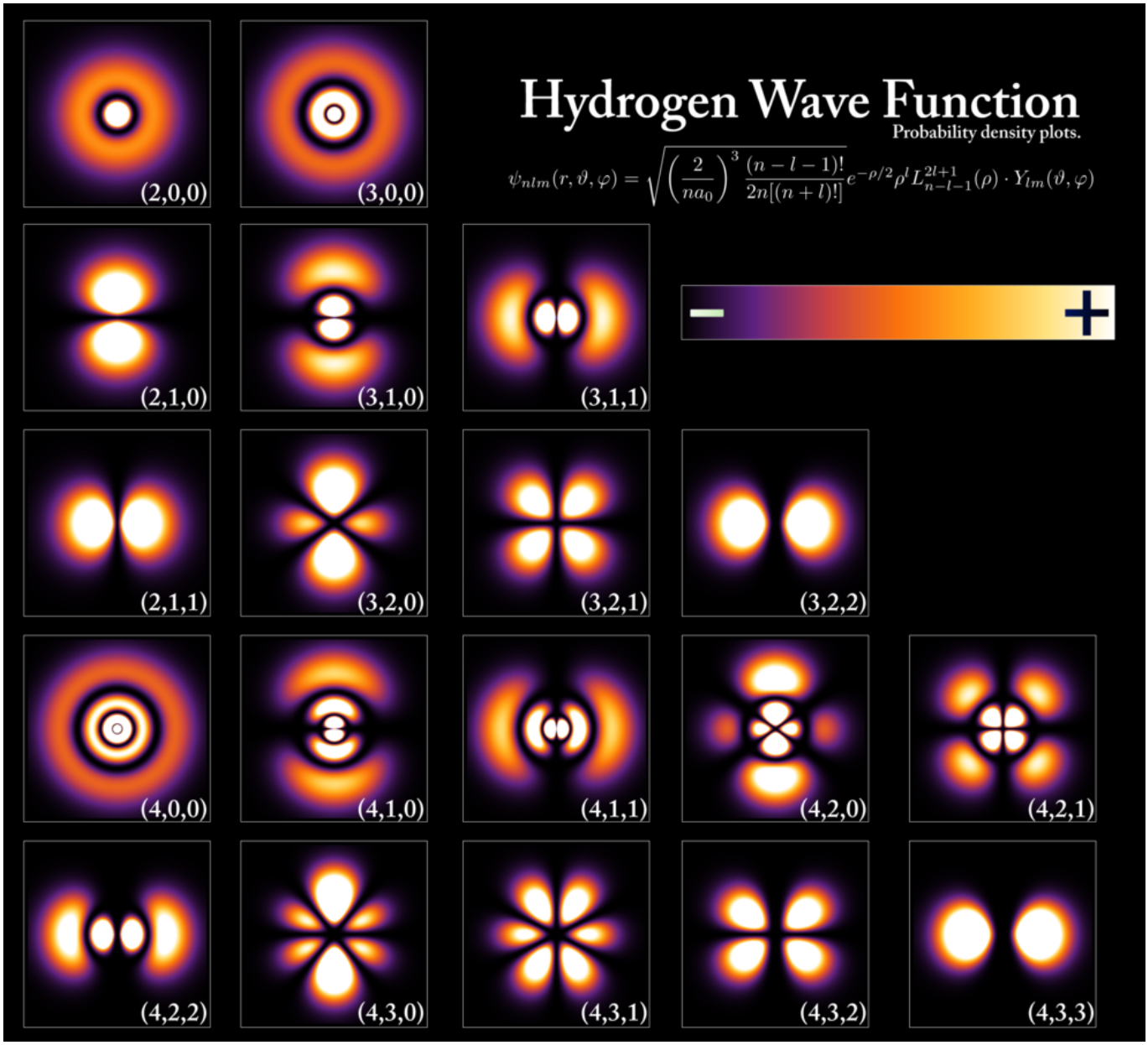
Anti-waterstof gekoeld

Antimaterie is bij veel mensen wel bekend. Het is een opmerkelijke soort materie: als een antideeltje in aanraking komt met een niet-antideeltje van dezelfde soort verdwijnen ze samen in een lichtflits en komt er een grote hoeveelheid energie vrij. Deze eigenschap maakt direct één ding heel duidelijk: het is heel moeilijk om antimatrie te bewaren. Het in een doos stoppen zal niet werken, want als je dat doet, valt de antimaterie door de zwaartekracht omlaag en verdwijnt samen met een deel van de doos.

Dat antimaterie zo moeilijk te bewaren is maakt dat veel eigenschappen ervan eigenlijk nog niet goed bekend zijn bij natuurkundigen. Los van de grote vragen rondom antimaterie, zoals “Waarom is er meer ‘normale’ materie dan antimaterie?” of “Welke rol speelt antimaterie in fundamentele symmetrieen van het universum zoals CPT-symmetrie?” zijn er ook andere vragen die we graag zouden willen beantwoorden. Een voorbeeld hiervan is bijvoorbeeld hoe zwaartekracht zich manifesteert rondom deze antideeltjes. Volgens Einsteins relativiteitstheorie zou het in principe niet uit moeten maken of een deeltje een anti-deeltje is of niet. Een ander voorbeeld van een open kwestie: antimaterie zou een handige rol kunnen spelen bij bepaalde zeer technische vormen van spectroscopie, wat weer een nieuwe tool zou kunnen vormen waarmee wetenschappelijk onderzoek kan worden gedaan op atomair niveau.

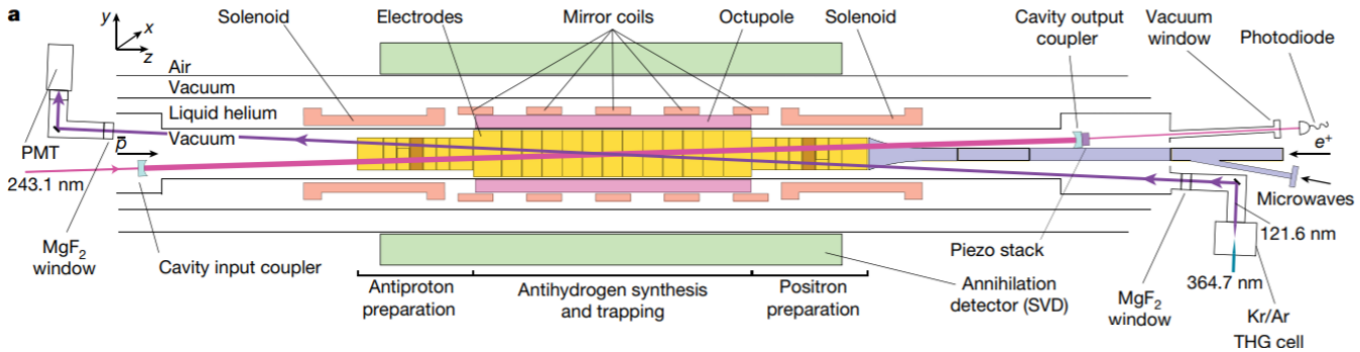


Afbeelding 1. De golffuncties van (anti-) waterstof. Waterstof wordt op quantummechanisch niveau beschreven door een golffunctie: een wiskundige formule die alles beschrijft wat we van het deeltje willen weten. Elke golffunctie uit de afbeelding hierboven komt overeen met een bepaalde hoeveelheid energie van het waterstofatoom. Een koud gas van waterstofatomen bestaat uit atomen die relatief stil staan, en zich dus in de grondtoestand (ongeveer links boven in de figuur) bevinden. Afbeelding: PoorLeno.

Dus om te beginnen: hoe behandelen we antimaterie? Laat ik eerst zeggen dat er eigenlijk maar één type anti-atoom bestaat dat we in een laboratorium gemakkelijk kunnen maken, namelijk anti-waterstof. Dit wordt gedaan door een positron en een antiproton te combineren tot een dergelijk anti-atoom. Maar dan zijn we er nog niet. In een eerder artikel op deze

website is uitgelegd dat atomen bij kamertemperatuur eigenlijk heel snel bewegen. Dat is geen probleem met een alledaags gas zoals de lucht die je inademt, maar desastreus voor experimenten op atomair niveau. De antideeltjes moeten dus op een bepaalde manier ‘gevangen’ worden gehouden. Dit gebeurt in een ultra-hoog vacuum, waar met behulp van lasers en magneetvelden de antideeltjes zwevende worden gehouden. Een typisch probleem is alleen dat naarmate de antideeltjes ‘warmer’ zijn, deze magneetvelden ook sterker moeten zijn. En zelfs als je deze velden en bijbehorende lasers sterk genoeg maakt, dan nog is het slechts een kwestie van (zeer korte) tijd voor de deeltjes ontsnappen of botsen met een normaal deeltje en voor altijd verdwijnen.

Het is dus noodzakelijk om antideeltjes te kunnen ‘afkoelen’ alvorens eraan te gaan meten. Er bestaan al een tijd lang technieken om gewone atomen af te kunnen koelen, maar desondanks is het pas zeer recent gelukt om hetzelfde trucje ook uit te halen bij anti-waterstof. Ter herinnering – zie deze serie artikelen voor meer details: atomaire gassen kunnen gekoeld worden door de atomen te laten bewegen tegen de richting van een laserstraal in. Als het laserlicht de juiste frequentie heeft, dan zullen de atomen in kwestie fotonen opnemen van de laser, en vervolgens uitzenden. Omdat het uitzenden van de fotonen in alle richtingen gebeurt, maar het opnemen van de fotonen (en dus van hun impuls) slechts van één kant gebeurt, is het netto effect dat de atomen vertragen en dus afkoelen.



Afbeelding 2. Laserkoeling van antiwaterstof. Schematische weergave van de koelopstelling zoals die is gebruikt door de onderzoekers om anti-waterstof te koelen. De Engelse benamingen van de onderdelen zijn vrij technisch, maar de belangrijkste elementen zijn relatief eenvoudig te herkennen. Helemaal rechts staat een pijl met e+. Dit is de plek waar de positronen worden aangevoerd. Aan de andere kant staat een p met een streepje erboven, wat staat voor antiprotonen. In het midden van de buis worden deze antideeltjes

samengevoegd tot antiwaterstof, en gekoeld met behulp van lasers (de lichtstraal die van rechts onder komt). Afbeelding uit ‘Laser cooling of antihydrogen atoms‘ van C. J. Baker et al. (Nature, 2021).

Waarom het zo lang duurde om antimaterie te koelen is simpel: de benodigde lasers zijn moeilijk te maken. In normale experimenten met koude gassen wordt vaak gebruik gemaakt van elementen als strontium en cesium. Deze elementen hebben een aantal eigenschappen waardoor ze gemakkelijk te manipuleren zijn met conventionele lasers. Die lasers hebben bijvoorbeeld frequenties in het bereik van het menselijk oog, waardoor wij het licht zelf kunnen zien. De frequenties en energieën van dit zichtbare licht zijn relatief laag, waardoor deze lasers eenvoudig te maken zijn. Antiwaterstof daarentegen heeft een laser nodig met een heel hoge energie. Het laserlicht dat gebruikt wordt om te koelen heeft een golflengte van 121 nanometer. Ter vergelijking: het menselijk oog is niet in staat om licht met een golflengte kleiner dan 400 nanometer te zien en strontium dient bijvoorbeeld gekoeld te worden met licht dat in golflengte varieert van 450 tot 800 nanometer. Dit probleem van het *maken* van de lasers lijkt al groot, maar is eigenlijk nog het eenvoudigst op te lossen. ASML’s EUV-machines werken bijvoorbeeld al met laserlicht van rond de 13 nm golflengte, dus het is zeker niet onmogelijk om dit soort lichtstralen te maken. Wat het ondezoek van anti-waterstof vooral lastig maakt, is dat de lasers niet goed samenwerken met optische gereedschappen (het licht wordt snel verstrooid), en dat het niet goed mogelijk is om het antideeltje te verplaatsen over grote afstanden, waardoor alles op één plaats moet worden gedaan.

Desondanks is het recent een team van wetenschappers gelukt om de spectraallijnen – de kleuren van uitgezonden licht – van gekoeld anti-waterstof met hoge precisie te meten. Gelukkig lijkt ons begrip van quantummechanica nog te kloppen, want de spectraallijnen van het anti-waterstof komen precies overeen met wat er verwacht werd: ze zijn exact hetzelfde als die van ‘gewoon’ waterstof. Het nog betere nieuws is dat deze technieken vanaf nu de weg vrij zullen maken om natuurkunde op een heel fundamentele manier te testen: door antimaterie te gebruiken.