



FOTO MAXIMILIEN BRICE/CERN

## NATUURKUNDE

# De mysterieuze binnenwereld van het proton

Protonen lijken zo eenvoudig. Maar deze bouwstenen van atomen hebben tal van onverwachte eigenschappen.

Door onze medewerker **Dorine Schenk**

**H**et proton is een van de meest alledaagse deeltjes in het heelal. Het zijn de belangrijkste bouwstenen van atomen. Je vindt ze in de lucht die je inademt, de koffie die je drinkt en het binnenste van sterren en planeten.

Hoewel fysici al meer dan een eeuw weten dat dit deeltje bestaat, worstelen ze nog steeds om er grip op te krijgen. „Het proton ziet er eenvoudig uit aan de buitenkant, maar als je dieper graaft, kom je interessante en onverwachte dingen tegen”, zegt Juan Rojo, hoogleraar theoretische natuurkunde aan de Vrije Universiteit Amsterdam. „We leren er nog steeds nieuwe dingen over.”

Atomen, waaruit bijna alles in en om ons is opgebouwd, bestaan uit een kern

van protonen en neutronen waar omheen negatief geladen elektronen cirkelen. Neutronen zijn ladingloos, protonen zijn positief geladen. Middelbareschoolcentra presenteren het proton als een structuurloos bolletje. Zodra je natuurkunde gaat studeren leer je dat dat bolletje bestaat uit drie kleinere bouwsteentjes genaamd quarks.

„Wat we eerstejaars natuurkundestudenten vertellen is nog steeds een oversimplificatie”, zegt Amanda Cooper-Sarkar, emeritus hoogleraar deeltjesfysica aan de Universiteit van Oxford. Het proton is een quantumobject dat meer weg heeft van een wazige wolk van vluchtige, ronddoende deeltjes. En hoe de samenstelling er precies uitziet, hangt af van de opstelling waarmee je ernaar kijkt. Hoe beter fysici het proton bestuderen,

hoe meer nieuwe, onbevattelijke dingen ze erover ontdekken. Binnen in dit alledaagse deeltje blijkt een complexe, bizarre wereld schuil te gaan. Zo ontdekten Rojo en zijn collega's in 2022 dat er waarschijnlijk een deeltje in kan opduiken dat zwaarder is dan het proton zelf.

### Hulpmiddel

„We willen protonen begrijpen omdat bijna alles eruit bestaat”, zegt Rojo. „Minuscule veranderingen in de protoneigenschappen zouden geleid hebben tot een compleet ander universum. Als ze bijvoorbeeld iets lichter of zwaarder waren, dan hadden sommige atomen niet kunnen bestaan.”

Fysici hebben nog een andere motivatie om protonen in kaart te brengen. In de LHC-deeltjesversneller bij CERN in Genève laten fysici protonen met bijna de lichtsnelheid op elkaar botsen om nieuwe deeltjes te maken en te bestuderen om zo de natuurwetten op de kleinste schaal te begrijpen. Zo ontdekten fysici in 2012 het higgsdeeltje met de LHC. „Als je niet goed weet hoe de bouwsteentjes van die botsende protonen zich gedragen, dan kun je je theoretische modellen niet goed vergelijken met je meetresultaten”, zegt Rojo. Meer begrip van protonen is daarom belangrijk voor natuurkundig onderzoek.

„De meestgebruikte techniek om het proton te onderzoeken is door er andere deeltjes op te schieten”, vertelt Cooper-Sarkar. Dat is ook de manier waarop het proton in 1919 ontdekt werd door Ernest Rutherford, die eerder de atoomkern ontdekte. Rutherford en zijn assistent Ernest Marsden vuurden zogeheten alfadeeltjes (heliumkernen) af op onder meer stikstofatomen. De alfadeeltjes bleken positief geladen deeltjes uit deze atomen te knikkeren. Rutherford realiseerde zich dat dit protonen zijn en dat atoomkernen bestaan uit protonen en neutronen.

Enkele decennia later, in de jaren zestig en zeventig, sloegen deeltjesfysici weer

aan het knikkeren. Deze keer lieten ze de veel kleinere elektronen op protonen botsen. Eerst leverde dat weinig op: ze ketsen af als een biljartbal op een bowlingbal. Dat veranderde toen de Amerikaanse deeltjesversneller SLAC (Stanford Linear Accelerator Center) elektronen eerst flink versnelde waardoor ze met zo veel energie op protonen knalden dat die versplinterden. De elektronen weerkaatsen daarvoor op bouwsteentjes: de quarks.

Deze SLAC-metingen wezen er eind jaren zestig op dat het proton bestaat uit veel kleine deeltjes. De vraag was of dit dezelfde deeltjes waren die de fysici Murray Gell-Mann en George Zweig een paar jaar eerder hadden voorgesteld. Volgens hun theorie bestaat het proton uit twee typen quarks: twee 'upquarks', met elk een elektrische lading van +2/3, en een 'downquark' met lading -1/3. Die ladingen tellen keurig op tot de lading van +1 van het proton.

In de jaren zeventig en tachtig lieten metingen bij CERN - waarbij er geknik-

kerd werd met superlichte, ongeladen neutrino-deeltjes - zien dat het proton vol zit met paren van quarks en hun antimaterie-tegenhangers, de antiquarks. Die eigenschappen van antiquarks zijn precies tegengesteld aan die van de quarks, waardoor ze elkaar opheffen. Het anti-upquark heeft bijvoorbeeld lading -2/3. Als je alle quarks tegen hun antiquarks wegstreep, blijf je netto de drie quarks over te houden die Gell-Mann en Zweig voorspellen: twee upquarks en één downquark.

### Een zee van quarks en antiquarks

Het quarkmodel van Gell-Mann en Zweig verklaart niet waarom protonen naast die drie quarks een zee van quark-antiquarkparen lijken te bevatten. Er volgden meer knikkerexperimenten, met verschillende deeltjes en verschillende energieën. Hoe hoger de energie van de „knikkers”, hoe gedetailleerder het protonplaatje.

Naast een scherper beeld riepen de experimenten ook nieuwe vragen op. Het

### Uiterlijk

Hoe groot is een proton?

De samenstelling is niet het enige complexe aan het proton. Ook de grootte is niet meteen duidelijk. **Protonen hebben geen gladde, duidelijke buitenkant**, zoals een bowlingbal. Daarom bepalen fysici de doorsnee door de verdeling van elektrische lading te meten. Verschillende meettechnieken, die bijvoorbeeld kijken naar de energie van een elektron dat om een proton cirkelt, komen met verschillende resultaten. De laatste metingen, uit 2022, lijken erop te wijzen dat de straal onge-

veer 0,8 bijeenste van een millimeter is.

**Naast de lading, kun je de straal ook meten door de massaverdeling te kijken.** Waar de lading vooral bepaald wordt door de quarks, spelen de gluonen de hoofdrol in de 'massastraal'. Eerder dit jaar bleek dat de massastraal kleiner is dan de ladingstraal. De gluonen lijken naar het midden van het proton te zakken, terwijl de quarks zich verder naar buiten bevinden.

**De tunnel van de LHC-deeltjesversneller** van CERN in Genève, waar natuurkundigen protonen op elkaar laten botsen.

proton zag er bijvoorbeeld bij verschillende metingen verschillend uit. Dat kwam doordat de impuls van het proton - een combinatie van zijn snelheid en massa - in verschillende experimenten op verschillende manieren over de quarks en antiquarks verdeeld lijkt. Soms dragen de twee upquarks en het ene downquark elk ongeveer een derde van de protonimpuls. Het proton lijkt dan bijna uitsluitend uit die drie quarks te bestaan. Maar in andere experimenten lijken die drie quarks en alle quarks en antiquarks uit de quarkzee allemaal een klein deel van de protonimpuls te hebben. Het proton lijkt dan meer een verzameling van talloze rondkroeiende quarks en antiquarks.

### Lijmachtige krachtdeeltjes

Ook nu stond er een theorie klaar om de gekke protonmetingen te verklaren: de quantumchromodynamica. Volgens deze theorie houden lijmachtige krachtdeeltjes genaamd gluonen de twee upquarks en de downquark in het proton bij elkaar. Die gluonen zouden volgens de nieuwe theorie tijdelijk kunnen splitsen in een quark en antiquark. Omdat die elkaars perfecte tegenhanger zijn, heffen ze elkaar op en verdwijnen weer. Daardoor ontstaat er een zee van kortstondig opborrelende quarks en antiquarks.

Hoewel het de quark-antiquarkparen verklaart, is quantumchromodynamica een zeer complexe theorie en fysici kunnen niet alle eigenschappen van quarks en gluonen in het proton berekenen. Ze kunnen bijvoorbeeld de situatie goed beschrijven waarin quarks en antiquarks allemaal een klein deel van de impuls dragen en dicht op elkaar zitten, maar de berekeningen lopen vast in de situatie waarin de twee upquarks en de downquark op relatief grote afstand van elkaar lijken te zitten en ze met z'n drieën bijna de hele impuls voor hun rekening nemen. Maar de situaties die ze niet kunnen berekenen zijn fy-

sici aangewezen op experimenten.

Maar hoe ziet een proton er nu echt uit? Als drie quarks? Of als een borrelende zee van quarks en antiquarks? „Het proton is een quantumobject”, zegt Rojo. „Dat betekent dat hoe het eruitziet, afhangt van de meting die je doet.”

Het proton voldoet aan de wetten van de quantummechanica, die stellen dat deeltjes bijvoorbeeld op meerdere plekken tegelijk kunnen zijn. Of in verschillende toestanden tegelijkertijd, zoals Schrödingers kat die tegelijkertijd dood en levend is totdat je kijkt. Je kunt het proton zien als een soort wazige quantumwolk die meerdere gedaantes tegelijk heeft. Afhankelijk van bijvoorbeeld de energie van de elektronen en de manier waarop je naar de teruggekaatste deeltjes kijkt, heb je meer of minder kans om een bepaalde samenstelling te zien.

Dat quantumgedrag lijkt misschien gek en onmogelijk, maar is het niet. Het wordt keurig beschreven door de quantummechanica. Rojo: „Dat het gek lijkt, komt doordat we geen intuïtie hebben ontwikkeld voor de quantumwereld.”

### Charmant

De onderzoeksgroep van Juan Rojo ontdekte in 2022, met internationale collega's, nog vreemder quantumgedrag bij het proton. Door duizenden protonmetingen te analyseren met behulp van kunstmatige intelligentie ontdekten ze een signaal dat erop wijst dat een proton bij experimenten waarbij het zich meestal gedraagt als drie quarks en er soms uitziet als een samenstelling van vijf quarks. Die twee 'extra' quarks zijn een charmquark en een anti-charmquark, de zware broertjes van de up- en downquarks en antiquarks. Dit zijn geen quarks uit de quarkzee. Ze bestaan net zo volwaardig als de twee upquarks en de downquark.

Dat is opmerkelijk, want een enkel charmquark is zwaarder dan een proton. Het is alsof je een doos met een kilogram appels opent en daar ineens ook nog twee meloenen van ruim een kilo in aantreft. Ook dit onvoorstelbare verschijnsel is toegestaan volgens de quantummechanica. „In de quantumwereld mag het proton deeltjes bevatten die zwaarder zijn dan hijzelf, mits dat extreem kort duurt.” Het proton bestaat dus meestal uit twee upquarks en een downquark, maar mag heel af en toe kort veranderen in een charmant systeem met vijf quarks.

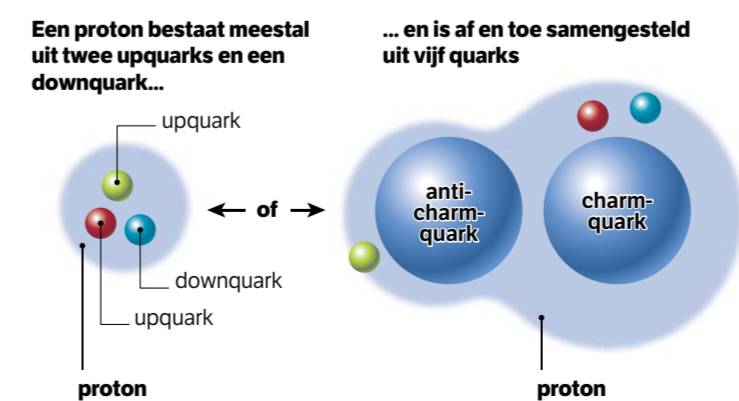
„Er is nog wel discussie over dit idee”, zegt Cooper-Sarkar. „Er zijn fysici die vinden dat de analyses nog te onzeker zijn en twijfelen aan het bewijs. Ik denk dat we over een paar jaar weten wie er gelijk heeft, dan hebben we meer data en meer begrip over de samenstelling van het proton.”

Een experiment dat daaraan kan gaan bijdragen is de EIC-deeltjesversneller (electron-ion collider) die gebouwd wordt bij het Amerikaanse onderzoeksinstituut Brookhaven National Laboratory. De EIC, die op z'n vroegst in 2030 kan gaan meten, zal versnelde elektronen laten botsen met versnelde protonen of zwaardere atoomkernen.

Naast de samenstelling van het proton, zal de EIC quarks en gluonen onderzoeken in protonen in zware atoomkernen, waar ze omringd zijn door andere protonen en neutronen. Daar lijken ze zich anders te gedragen dan in vrije protonen, maar het is nog onduidelijk waarom. Een andere belangrijke taak voor de EIC is achterhalen hoe de spin-eigenschap van het proton ontstaat. Net als de lading is de spin waarschijnlijk een optelsom van de spin van de quarks, antiquarks en gluonen, maar het is nog niet duidelijk hoe de verdeling ligt.

„De EIC is dus een belangrijk experiment. De komende decennia worden een spannende tijd voor het protononderzoek”, zegt Rojo. „Het is misschien een bekend en alledaags deeltje, maar het zal ons de komende tijd nog bezighouden.”

Protonen kunnen vreemd quantumgedrag vertonen



NRC120823 / RvS / Bron: Quantomagazine

» Minuscule veranderingen in de proton-eigenschappen zouden geleid hebben tot een compleet ander universum

Juan Rojo  
hoogleraar