

Het mysterie van de protondans

In het binnenste van protonen gaat een miniuniversum schuil dat natuurkundigen voor grote vragen stelt. Met slim ontworpen deeltjesversnellers en neurale netwerken proberen ze deze piepkleine wereld te verkennen.

Alles om ons heen bestaat uit atomen. Die atomen zijn opgebouwd uit elektronen, protonen en neutronen. Protonen zelf bestaan uit nog kleinere, elementaire deeltjes: quarks en gluonen. Wat deze subatomaire wereld, bijna een eigen mini-universum, bijzonder maakt, is dat de wetten van de klassieke natuurkunde hier niet meer gelden. In plaats daarvan bepaalt de quantummechanica hoe deze deeltjes zich gedragen. Een van de grote raadsels die hieruit voortkomt, is: hoe komt het proton aan zijn draaiing, zijn interne dans, oftewel zijn spin?

Dit klinkt als een futiele vraag maar het antwoord heeft enorme gevolgen voor ons begrip van fundamentele natuurwetten. Als het proton sneller of langzamer zou draaien, zouden atomen niet meer stabiel zijn, en het beroemde periodieke systeem van elementen zou er compleet anders eruitzien.

Een groep natuurkundigen, waaronder onderzoekers van het Nikhef, wil deze vraag beantwoorden [1]. Hun werk levert belangrijke nieuwe inzichten op over de interne draaiing van quarks en gluonen in het proton, en daarmee over een van de meest belangrijke puzzels in de moderne natuurkunde en de deeltjesfysica.

In eerste instantie dachten natuurkundigen dat de spin van het proton simpelweg de optelsom was van de spins van de drie quarks (twee up-quarks en een down-quark) waaruit een proton bestaat (figuur 1). Maar in de jaren tachtig kwam een grote verrassing. Experimenten lieten zien dat die drie quarks samen maar een klein deel van de spin konden verklaren. Dat resultaat werd bekend als de 'proton-spin crisis'. Waar kwam dan de protonspin vandaan? Sindsdien proberen natuurkundigen de ontbrekende spin te vinden. Draagt het gluon – het deeltje dat de quarks bijeenhoudt, een soort minilijm – meer bij dan gedacht? Zijn er andere vormen van draaiing die meespelen, zoals baanbeweging van de quarks? En kunnen we die verschillende bijdragen afzonderlijk meten? Deze vragen zijn cruciaal, niet alleen voor de deeltjesfysica, maar ook voor ons begrip van de opbouw van materie in het universum. Als het proton een andere spin zou hebben, zou de wereld er volledig anders uitzien, misschien zou zelfs het leven zoals wij dat kennen onmogelijk zijn.

De kracht van botsingen

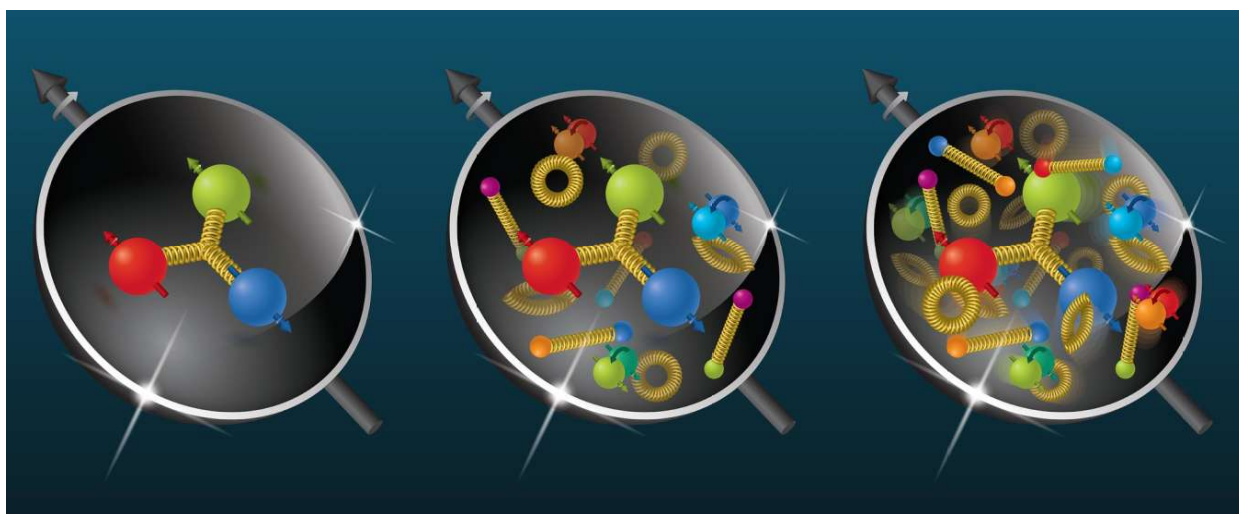
Om iets te leren over wat zich binnenin een proton afspeelt, gebruiken natuurkundigen geen vergrootglas

De spin van het proton

De spin van een deeltje is een soort quantummechanische draaiing. Het is geen draaiing in de klassieke zin van het woord – alsof het deeltje echt om zijn as tolt – maar eerder een fundamentele eigenschap, net zoals massa en elektrische lading. Elementaire deeltjes zijn wiskundige 'punten', objecten zonder uitbreidheid, en die kunnen niet draaien, zoals kleine balletjes dat wel kunnen. Protonen hebben een spin van een half, dat geldt ook voor elektronen, maar elektronen zijn elementair, protonen zijn deeltjes die samengesteld zijn uit quarks.

of microscopen, maar heel krachtige deeltjesversnellers. In deze apparaten worden deeltjes zoals elektronen of protonen met hoge snelheden, bijna de lichtsnelheid, op elkaar afgeschoten, zodat ze met hoge energie tegen elkaar botsen.

Tijdens zo'n botsing krijgen we een kortstondige blik in het binnenste van het proton. Door goed te kijken naar de restanten van zo'n botsing – welke deeltjes vrijkomen, in welke richting, en met welke energie – kunnen onderzoekers afleiden hoe quarks en



Figuur 1. In een proton kijken is een miniuniversum verkennen met allerlei soorten deeltjes, voornamelijk (maar niet uitsluitend) quarks en gluonen. Hoe groter de resolutie van onze 'microscopen' (de deeltjesversnellers) hoe beter we dit universum kunnen bestuderen (beeld: Brookhaven National Laboratory, BNL).

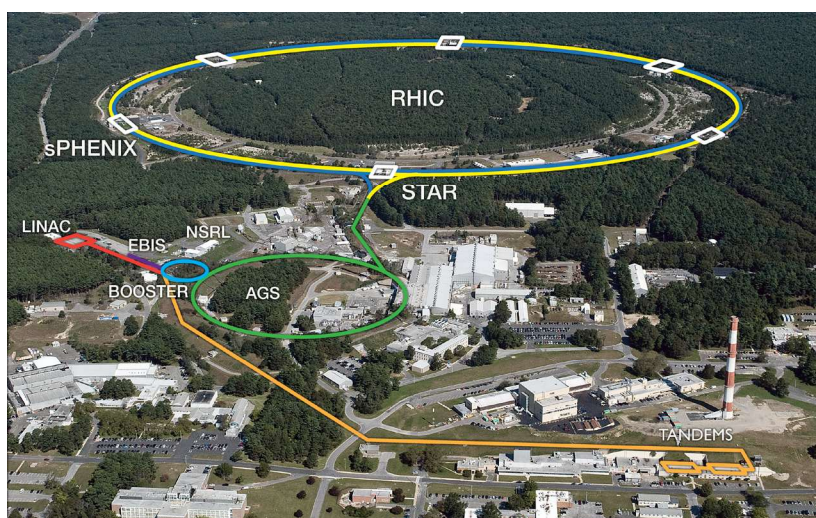
gluonen zich in het proton gedragen. Verschillende soorten botsingen leveren elk andere informatie op. Botsingen tussen elektronen en protonen (diepinelastische verstrooiingen) geven inzicht in de verdeling van energie en spin tussen de quarks. Botsingen tussen twee protonen (zoals bij CERN in Genève of RHIC in de VS, zie figuur 2) geven inzicht in het gedrag van gluonen. In sommige gevallen worden de protonen zó geprepareerd dat hun spinrichting bekend is. Dit noemen we gepolariseerde botsingen. Dit is een ingewikkelde experimentele techniek, maar de enige manier om de oorsprong van de protonspin te onderzoeken. Protonen kunnen gepolariseerd worden bij hun productie, door waterstofatomen (of -ionen) te gebruiken met een bepaalde spinoriëntatie, met behulp van een optisch gepompte bron of een bron met lambverschuiving. Hierbij worden protonen geselecteerd in een bepaalde spintoestand met behulp van elektromagnetische velden. Door gebruik te maken van gegevens uit vele jaren aan experimenten met gepolariseerde botsingen konden de onderzoekers een zeer gedetailleerd beeld opbouwen van hoe quarks en gluonen zich binnenin een draaiend proton gedragen.

De Nederlandse bijdrage
Nederlandse natuurkundigen,

verbonden aan Nikhef, de Vrije Universiteit Amsterdam en de Universiteit Utrecht hadden een opvallende rol in deze studie. Samen met collega's van onder meer CERN, Finland en Italië werkten zij samen binnen de zogenaamde NNPDF Collaboration (figuur 3). Nederland bracht niet alleen theoretische expertise in bij de studie – zoals de wiskundige beschrijving van botsingen – maar ook kennis van data-analyse, kunstmatige intelligentie en software-ontwikkeling. Nikhef speelt hierin een sleutelrol als nationaal knooppunt voor fundamenteel onderzoek naar deeltjesfysica.

Neurale netwerken analyseren data

De gegevens die gebruikt zijn in deze studie zijn met grote inspanning gedurende vele jaren verzameld bij verschillende experimenten bij CERN, DESY, RHIC en de Thomas Jefferson National Accelerator Facility. Vernieuwend in deze studie is het zeer precies niveau waarmee de berekeningen zijn uitgevoerd met de quantumchromodynamica (QCD), de wiskundige theorie die de interacties van quarks en gluonen beschrijft. Door mee te nemen hoe deeltjes zich



Figuur 2. De Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC) is de enige deeltjesversneller ter wereld waar botsingen tussen gepolariseerde protonen mogelijk zijn.



Figuur 3. Leden van het NNPDF Collaboration tijdens hun jaarlijkse werkoverleg in Noord-Italië (beeld: NNPDF Collaboration).

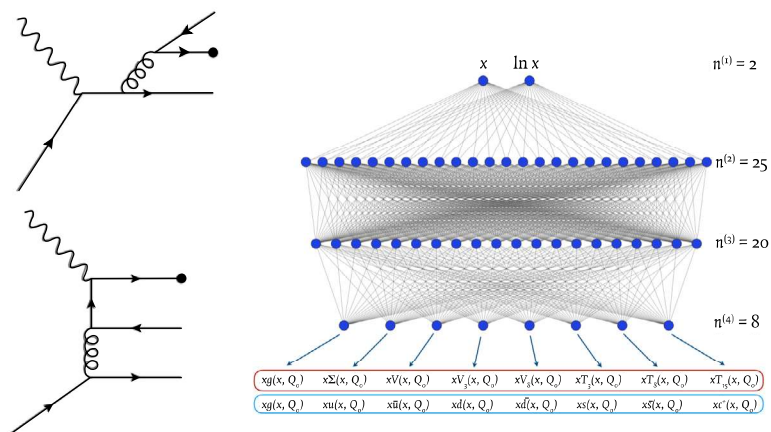
gedragen op het zogeheten next-to-next-to-leading order (NNLO) niveau van quantumeffecten (figuur 4), én door de massa-effecten van zware quarks zoals de charm-quark (zwaarder dan het proton zelf) in rekening te brengen, werd de nauwkeurigheid van de analyse sterk verbeterd ten opzichte van alle eerdere studies. Zonder deze hogere-orde quantumeffecten is het niet mogelijk om te bepalen hoe robuust de resultaten zouden zijn, en aangezien de onderzoekers op zoek zijn naar zeer subtiële effecten met betrekking tot de oorsprong van de protonspin, zouden gebrekkige

theoretische berekeningen de analyse simpelweg onbetrouwbaar maken. Deze data zijn allemaal met elkaar gecombineerd in één groot model met behulp van kunstmatige intelligentie. Om daaruit duidelijke conclusies te trekken, gebruikten de onderzoekers bijzonder geavanceerde wiskundige technieken. Met een zogenaamd neurale netwerk (figuur 4), een algoritme geïnspireerd op de werking van het menselijk brein, werd geleerd hoe de interne structuur van het proton het beste kan worden beschreven. Hierbij werd ook rekening gehouden met meetfouten, theoretische

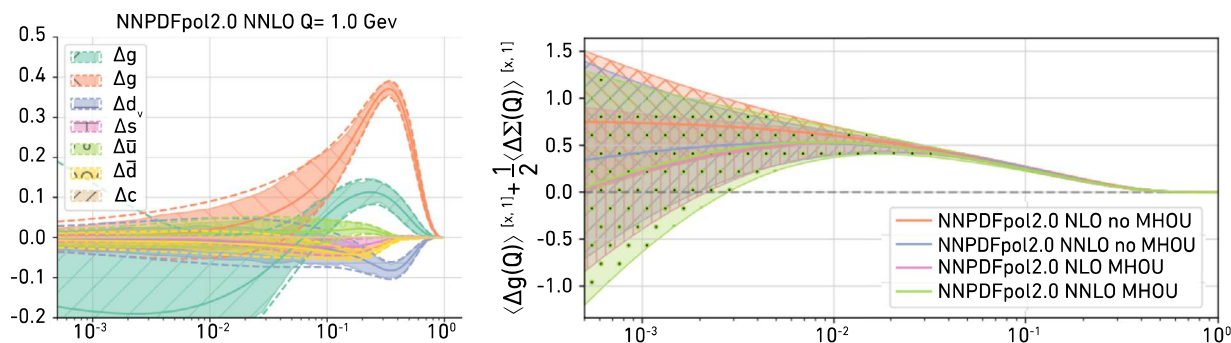
onzekerheden en de noodzaak dat het model niet té nauwkeurig wordt afgestemd op toevallige fluctuaties. Belangrijk is dat het neurale netwerk niet vooraf veronderstelt hoe deeltjes zich zouden moeten gedragen, dat alles wordt geleerd uit de gegevens zelf. Dat maakt de aanpak bijzonder objectief en datagedreven. Dezelfde methodologie is in het verleden gebruikt voor andere NNPDF-studies, zoals de ontdekking van intrinsieke charm-quarks in het proton [2].

De hoofdvragen en de antwoorden

Het centrale doel van deze studie was om vast te stellen welk deel van de spin van het proton afkomstig is van de draaiing van quarks, de draaiing van gluonen en de baanbeweging van deze deeltjes binnenin het proton. Een van de opvallendste kwantitatieve resultaten van de studie is de bijdrage van gluonen aan de spin van het proton. Die bijdrage komt dus bovenop de bekende bijdrage van de drie quarks. Uit deze analyse blijkt dat gluonen verantwoordelijk zijn voor ongeveer een derde van de totale spin van het proton. Dit is een belangrijke aanwijzing dat deze 'lijmdeeltjes', die vooral bekend zijn omdat ze quarks bij elkaar houden, ook een directe bijdrage leveren aan de draaiing van



Figuur 4. Links: quantumeffecten van hogere orde in quantumchromodynamica worden meegenomen in het NNPDF-studie van de spin van het proton (bron: 10.1103/PhysRevD.111.094007). Rechts: de neurale-netwerk-architectuur gebruikt in dezelfde studie (bron: NNPDF Collaboration)



Figuur 5. Links: de resultaten van de recente NNPDFpol2.0 analyse kwantificeren de verschillen tussen de polarisaties van quarks en gluonen in het proton met hoge nauwkeurigheid. Hier staat 'x' voor de energiefractie van de verschillende componenten van het proton. Rechts: de bijdrage van quarks en gluonen aan de totale spin ($\frac{1}{2}$) van het proton (beeld: NNPDF Collaboration).

het proton zelf. Meer precies: de onderzoekers schatten dat het aandeel van gluonen in de spin rond 29 ± 10 procent ligt (figuur 5). Dat betekent dat gluonen mogelijk net zoveel of zelfs meer bijdragen dan de quarks – die zelf naar schatting ongeveer 20 tot 30 procent van de spin voor hun rekening nemen. Dit is een zeer opmerkelijke ontdekking. Een tweede conclusie is dat het gedrag van de verschillende soorten quarks (bijvoorbeeld up-, down- en strange-quarks) in het proton subtiele verschillen vertoont, afhankelijk van de energie die gebruikt wordt om het proton te verkennen (figuur 5). Hoe die specifieke draaiing afhangt van de energie kunnen we nauwkeurig berekenen met de quantumchromodynamica. Dus elke soort quark toont een eigen draaiing en er is geen gezamenlijke dans van alle quarks.

Hoewel er nog altijd onzekerheden bestaan, is het beeld nu veel scherper dan voorheen. En belangrijker: de methode biedt een solide basis om nieuwe data, bijvoorbeeld van toekomstige experimenten, direct in het model op te nemen. De inzichten uit deze studie zijn ook belangrijk voor nieuwe experimenten. In de VS wordt de Electron-Ion Collider (EIC) gebouwd, een nieuwe versneller van gepolariseerde deeltjes, die speciaal ontworpen is om de spinstructuur van protonen en neutronen tot in detail te meten (figuur 6). De voorspellingen uit deze NNPDF-studie zullen een belangrijke rol spelen in het voorbereiden van de EIC-experimenten en het interpreteren van de resultaten.

Waarom is dit belangrijk?

Het kan abstract klinken: onderzoek naar de draaiing van quarks in een proton. Maar dit soort fundamentele wetenschap vormt de basis van alles wat we weten over de opbouw van materie, energie en krachten in het universum.

Zonder onderzoek in elementaire deeltjesfysica zouden we geen nauwkeurige modellen hebben van kernfusie (zoals in de zon), geen betrouwbare stralingsbeveiliging en geen cruciale medische technologieën zoals MRI- of PET-scanners. Sterker nog, zonder ons begrip van de spin van deeltjes hadden we veel van de moderne technologie nooit kunnen ontwikkelen.

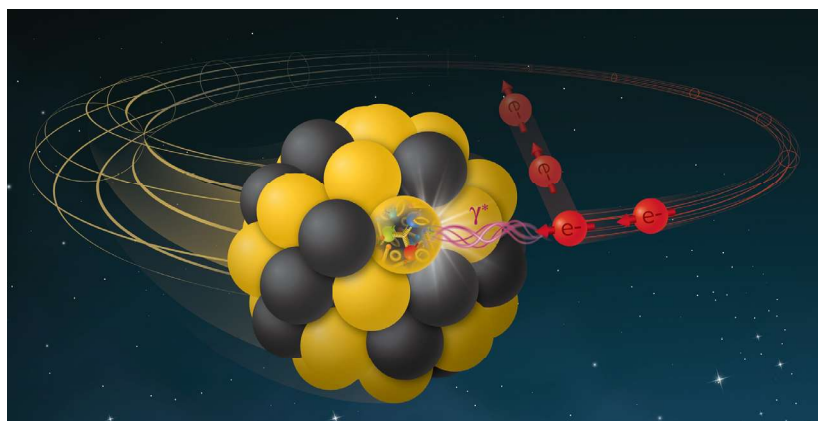
Het werk van deze groep natuurkundigen met een sterke Nederlandse inbreng is dus niet alleen een intellectuele prestatie, maar ook een belangrijke bouwsteen in het grotere

bouwwerk van de wetenschap. En het laat zien hoe ver we kunnen komen wanneer data, theorie, kunstmatige intelligentie en samenwerking samenkomen.

Juan Rojo is hoogleraar theoretische fysica aan de Vrije Universiteit Amsterdam en onderzoeker bij de theoriegroep van Nikhef. Hij promoveerde aan de Universiteit van Barcelona. Zijn onderzoek richt zich op precisiefysica bij hoogenergetische deeltjesversnellers zoals de Large Hadron Collider (LHC) bij CERN in Genève.

REFERENTIES

1. J. Cruz-Martinez et al., NNPDFpol2.0: unbiased global determination of polarized PDFs and their uncertainties at next-to-next-to-leading order, arXiv:2503.11814 (2025).
2. The NNPDF Collaboration. Evidence for intrinsic charm quarks in the proton. *Nature* **608**, 483–487 (2022).



Figuur 6. In de toekomst kunnen gepolariseerde elektronen en protonen botsen, zoals op deze tekening. Daarvoor wordt de de Electron-Ion Collider (EIC) gebouwd, de opvolger van RHIC.