

Samenvatting

Spin? Wat is dat eigenlijk?

In de zomer van het jaar 1925 werd door twee Nederlandse promovendi, Samuel Goudsmit en George Uhlenbeck, de spin van het elektron ontdekt. Deze ontdekking werd mogelijk gemaakt door de formulering van het zogeheten ‘uitsluitingsprincipe’ door Wolfgang Pauli eerder dat jaar. Dit principe zegt dat twee identieke elementaire materiedeeltjes (fermionen) zich nooit op dezelfde plek kunnen bevinden. Hiermee kon Pauli verklaren waarom elektronen in schillen op verschillende afstand om de atoomkern heen draaien. Indirect verklaart dit uitsluitingsprincipe daarmee ook veel van de chemische eigenschappen van atomen. Goudsmit was goed op de hoogte van deze nieuwe ontwikkelingen en had een wiskundig formalisme bedacht waarmee de implicaties van het uitsluitingsprincipe voor het atoommodel eenvoudiger te begrijpen zijn. Toen hij dit aan Uhlenbeck uitlegde, merkte deze op: “Maar zie je niet wat dat betekent? Dat betekent dat er nog een vierde vrijheidsgraad van het elektron is¹. Dat betekent eenvoudig een spin van het elektron, dat het roteert!” [1]

Sinds die ontdekking is spin niet meer uit de fysica weg te denken. Spin is een intrinsieke eigenschap van alle elementaire deeltjes, net zoals massa of elektrische lading. Maar vraag aan een natuurkundige om uit te leggen wat spin precies is en het antwoord zal enigszins vaag zijn, namelijk dat het een soort rotatie is, met de kanttekening dat dat eigenlijk een slechte metafoor is. Eén van de problemen met het beeld van spin als een soort rotatie wordt veroorzaakt doordat het elektron een elementair deeltje is, wat betekent dat we denken dat het elektron oneindig klein is. Maar als het elektron oneindig klein is, wat draait er dan en met welke snelheid? De spin van elementaire deeltjes neemt ook alleen specifieke waarden aan, zoals 0, 1/2, en 1 (uitgedrukt in de eenheid \hbar). Voor elektronen is de spin 1/2 en deze waarde kan niet veranderen. Je kunt bijvoorbeeld het elektron niet een duwtje geven om het sneller te laten draaien, wat wederom aangeeft dat spin geen alledaagse vorm van rotatie is.

¹Naast de bekende vrijheidsgraden die de grootte, de vorm en de oriëntatie van de baan van het elektron om de atoomkern beschrijven.

Vrijwel alle materie die we op aarde tegenkomen bestaat uit protonen, neutronen, en elektronen en het is dan ook niet verwonderlijk dat de spin van deze deeltjes een prominente rol speelt in tal van toepassingen. Een bekend voorbeeld hiervan is de MRI scanner, tegenwoordig onmisbaar in ziekenhuizen. Wanneer de spinrichting van een proton in een magnetisch veld omklapt, zendt het proton een klein beetje elektromagnetische straling uit. Dit wordt bij MRI scanners gebruikt om een driedimensionaal plaatje te maken van de dichtheid van waterstofatomen in het menselijk lichaam. Een ander voorbeeld ligt op het gebied van de ‘scanning tunneling’ microscopie (STM), een techniek waarmee individuele atomen kunnen worden waargenomen. Bij recente ontwikkelingen wordt gebruik gemaakt van de spin van elektronen om de verandering in de tijd van de spinrichting van individuele atomen in een materiaal te kunnen observeren [2]. Een totaal andere toepassing van de spin van elektronen waar onderzoek naar wordt gedaan is de zogenoemde ‘spintronica’, waarmee men een nieuwe generatie computers van ongekeerde snelheid hoopt te kunnen maken. Bij deze techniek fungeert de oriëntatie van de spin van een elektron als een bit in een computer.

De spincrisis

Protonen, neutronen en elektronen zijn alle drie deeltjes met spin $1/2$. Toch bestaat er een wezenlijk verschil tussen de spin van elektronen en die van protonen en neutronen. Protonen en neutronen zijn namelijk geen elementaire deeltjes, maar bestaan beide uit drie quarks bijgehouden door gluonen (van het Engelse ‘glue’). Dit impliceert dat de spin van protonen en neutronen verklaard moet kunnen worden uit de eigenschappen van deze bouwstenen. Oorspronkelijk dacht men dat de drie quarks samen volgens een eenvoudige som verantwoordelijk zijn voor de totale spin van het proton en het neutron. Voor protonen zijn dit twee ‘up’ quarks die in dezelfde richting draaien als het proton en één ‘down’ quark dat in tegengestelde richting draait, zoals is aangegeven in de linker afbeelding in figuur S.1. Aangezien ook de quarks deeltjes zijn met spin $1/2$, is deze som: $2 \times 1/2 + 1 \times (-1/2)$, wat inderdaad $1/2$ oplevert.

De ontdekking op CERN, eind jaren tachtig, dat slechts 30% van de spin van het proton herleid kan worden tot de spin van deze drie quarks, leidde dan ook tot de zogeheten ‘spincrisis’. Het betekent dat een groot gedeelte van de protonspin een andere oorsprong moet hebben. Hiervoor zijn verschillende mogelijkheden, zoals is aangegeven in de rechter afbeelding in figuur S.1. De figuur geeft aan dat ook de spin van gluonen (deeltjes met spin-1) een rol kan spelen. Daarnaast is er mogelijk ook een bijdrage van de spin van ‘virtuele’ quarks. Dat zijn quarks die in het proton continu ontstaan en na zeer korte tijd weer verdwijnen. Tot slot kan ook de rotatie van de quarks en gluonen om een gezamenlijk middelpunt, de zogeheten baanbeweging, een rol spelen. Om de spin van het proton beter te doorgronden is in het begin van de jaren negentig als reactie op de spincrisis het HERMES experiment gebouwd.



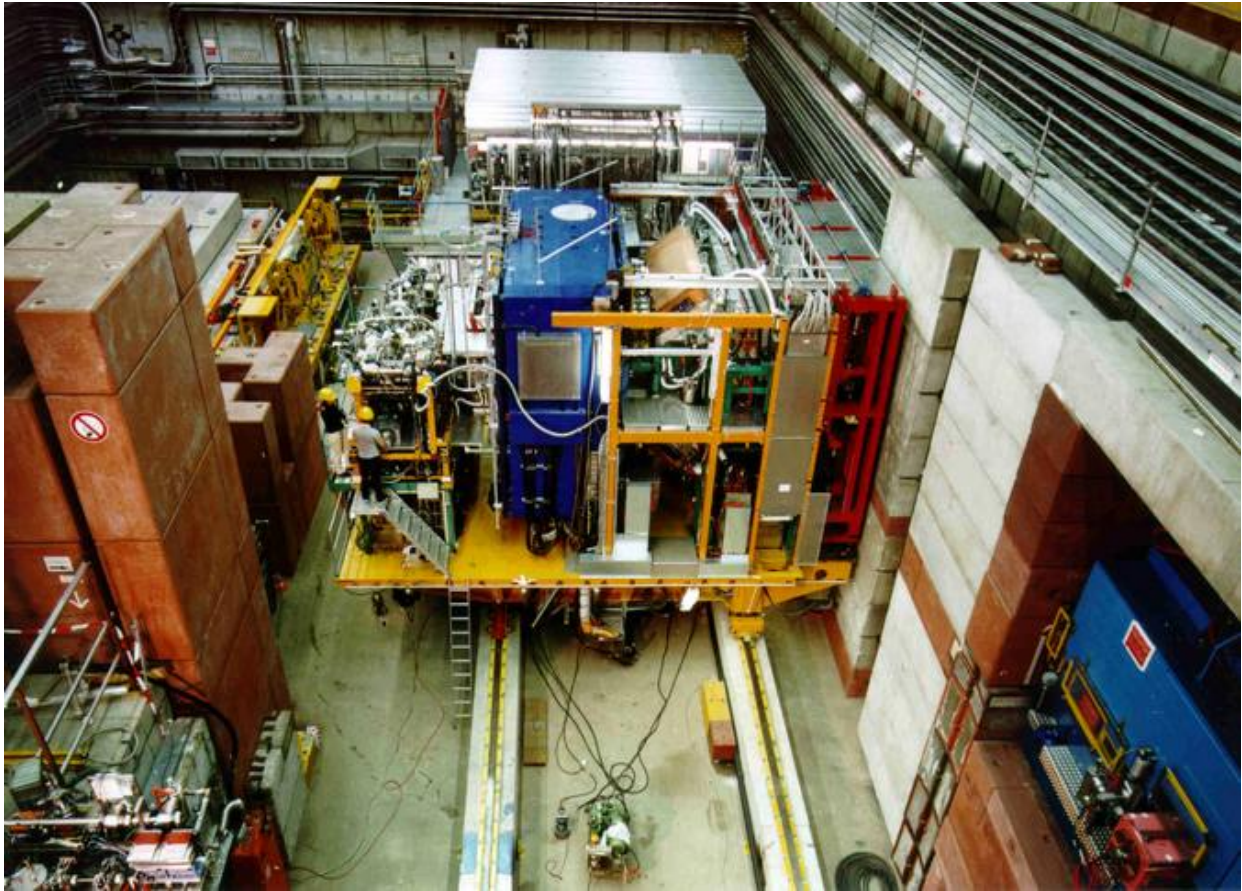
Figuur S.1: Schematische afbeeldingen van de opbouw van de spin van het proton. De pijlen geven de spinrichting van het proton en de quarks weer. Links is aangegeven hoe men voor de spin crisis dacht dat de spin van het proton kon worden gerelateerd aan de spin van de quarks. De rechter afbeelding geeft ons huidige beeld weer, namelijk dat ook de spin van de gluonen (de gele 'veertjes'), de virtuele quarks (iets kleiner afgebeeld) en de baanbeweging van quarks en gluonen (aangegeven door de oranje pijl) een belangrijke bijdrage kunnen leveren aan de totale spin van het proton.

HERMES

Het HERMES experiment staat in Hamburg, Duitsland, bij het onderzoeksinstituut DESY. Het experiment bestaat uit drie onderdelen: de deeltjesversneller, het target, en de spectrometer. De deeltjesversneller is een ring met een omtrek van 6 km waarin elektronen versneld worden totdat ze zo'n hoge snelheid bereikt hebben dat ze ongeveer 47000 rondjes per seconde door de versneller vliegen. Vervolgens botsen de elektronen op protonen in waterstofgas (het target). Met deze snelheid zijn de elektronen in staat een quark uit het proton weg te slaan. In de spectrometer worden vervolgens zoveel mogelijk eigenschappen gemeten van de brokstukken van de botsing, zoals elektrische lading, massa, snelheid en bewegingsrichting. Aan de hand van de eigenschappen van de brokstukken, kunnen bepaalde eigenschappen van de interne structuur van het proton gereconstrueerd worden. Deze 'brute force' methode is vooralsnog de enige manier waarop de structuur van materie op subatomaire schaal bestudeerd kan worden. In figuur S.2 is een foto te zien van het HERMES experiment. HERMES is een samenwerkingsverband tussen 33 instituten uit 12 landen, waar door de jaren heen meer dan 500 natuurkundigen aan meegewerkt hebben.

Spinfysica met HERMES

Het type proces dat met het HERMES experiment wordt onderzocht is geïllustreerd in figuur S.3. Het laat twee schematische afbeeldingen zien van een elektron (groen) dat met hoge snelheid op een quark in het proton botst. Deze botsing vindt plaats via de uitwisseling van een foton (γ^* , geel). Nu is het zo dat elektronen bij zeer hoge energie vrijwel alleen kunnen botsen met quarks met tegengestelde spinrichting. Hier wordt bij het HERMES experiment gebruik van gemaakt door

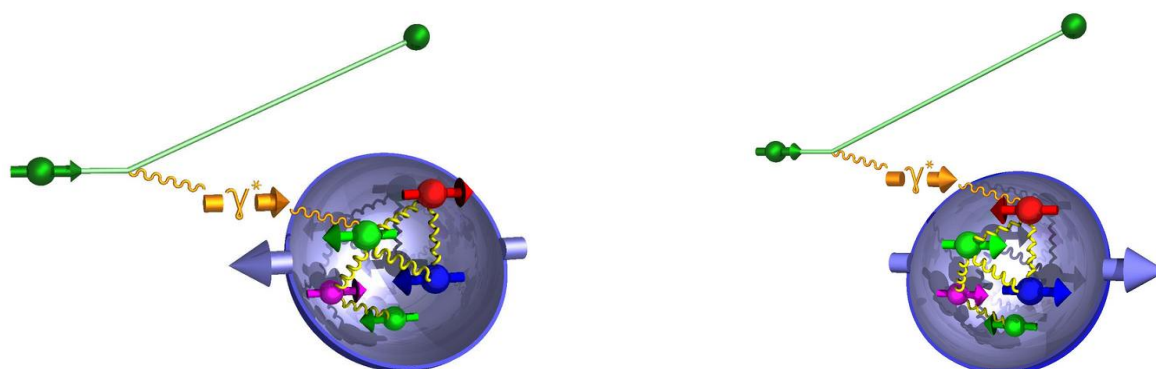


Figuur S.2: Het HERMES experiment (HERA meting van spin). Op deze foto is te zien dat het target en de spectrometer op rails staan en uit de ring van de deeltjesversneller (HERA) gereden kunnen worden (zoals hier in 2001). Linksonder in de foto is een stuk buis van de versneller te zien waar de elektronen doorheen bewegen (naar rechts). De grote betonblokken worden om de versneller en het experiment heen gezet om mensen en elektronica tegen hoogenergetische foton- en neutronstraling te beschermen.

de spinrichting van alle protonen in het waterstofgas in één richting vast te zetten (te *polariseren*) met behulp van een grote magneet die om het hele target heen staat. Wanneer de protonspinrichting wordt omgeklapt, botst het elektron met andere quarks, zoals is aangegeven in de twee afbeeldingen van figuur S.3. Door de botsingen voor deze twee oriëntaties te vergelijken, kan een goed beeld verkregen worden van het aantal quarks dat dezelfde spinrichting heeft als het proton en dus van de manier waarop de verschillende quarks bijdragen aan de spin van het proton.

Met behulp van dit soort metingen door het HERMES experiment is nu de bijdrage van de ‘up’ quarks en ‘down’ quarks aan de spin van het proton nauwkeurig bepaald. Een ander belangrijk resultaat van metingen bij HERMES is dat virtuele quarks niet of nauwelijks een bijdrage blijken te leveren. Dit betekent dat het grootste gedeelte van de spin van het proton geleverd wordt door een combinatie van de spin van gluonen en de baanbeweging van de quarks en/of gluonen.

De afbeeldingen in figuur S.3 corresponderen met een experimentele opstelling waarin het pro-



Figuur S.3: Schematische afbeeldingen van een botsing tussen een elektron en een proton. In de linker afbeelding is de spinrichting van het proton tegengesteld aan die van het elektron en in de rechter afbeelding zijn de spinrichtingen van het proton en het elektron gelijk. Op welke quarks het elektron kan botsen is afhankelijk van de spinrichting van de quarks, zoals het verschil tussen de twee afbeeldingen laat zien (zie ook tekst).

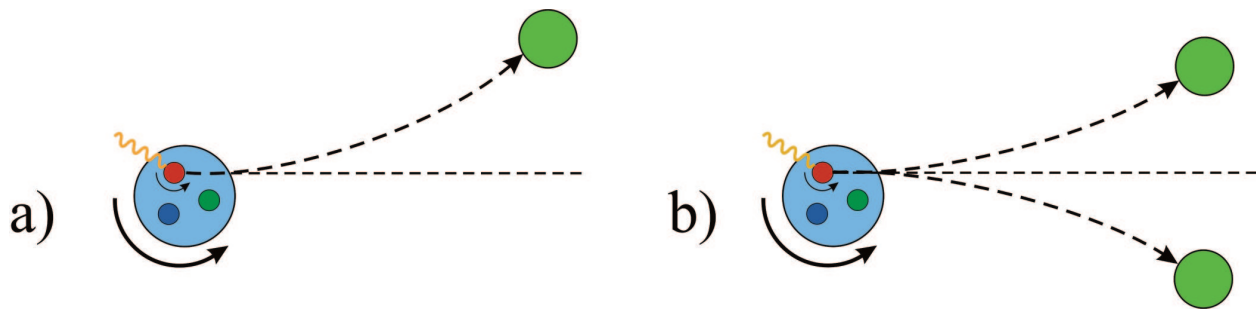
ton *longitudinaal* gepolariseerd is, wat wil zeggen dat het proton gepolariseerd is in dezelfde of tegengestelde richting als de richting waarin het elektron beweegt. Hiermee wordt een soort longitudinale doorsnede van de spinstructuur van het proton verkregen. Wanneer het proton *transversaal* wordt gepolariseerd (loodrecht op de richting waarin het elektron beweegt) kan een transversale doorsnede van de spinstructuur worden verkregen. Dat geeft niet alleen een complementair beeld van de spinstructuur van het proton, maar is ook interessant omdat in deze configuratie de spin van gluonen niet kan bijdragen. De transversale spin van quarks in een transversaal gepolariseerd proton heet ook wel ‘transversaliteit’. Over deze grootheid is nog nauwelijks iets bekend. In dit proefschrift is een methode onderzocht om transversaliteit te meten.

Transversaliteit

Met het HERMES experiment kan transversaliteit op verschillende manieren worden onderzocht. Om dit te kunnen begrijpen moet iets beter uitgelegd worden hoe de botsing tussen een elektron en een quark in een proton in zijn werk gaat.

Zoals eerder gezegd, kan een elektron in het HERMES experiment met zoveel energie op een quark botsen dat die uit het proton schiet. Maar dit betekent niet dat we vervolgens een quark kunnen waarnemen in de spectrometer. Een eigenschap van quarks is namelijk dat ze nooit los voorkomen, maar alleen in paren en drietallen (deze deeltjes worden hadronen genoemd)². Wat er gebeurt wanneer een quark uit een proton wordt geschoten is dat de energie van de botsing

²In 2003–2004 hebben wereldwijd een aantal experimenten, waaronder het HERMES experiment, aanwijzingen gevonden voor het bestaan van pentaquarks, deeltjes die bestaan uit vijf quarks. Of pentaquarks daadwerkelijk bestaan wordt op dit moment nader onderzocht.



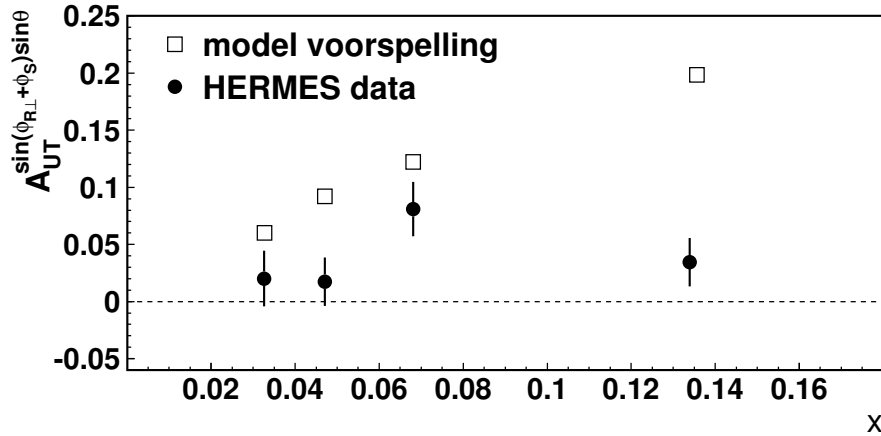
Figuur S.4: Een schematische weergave van twee verschillende manieren waarop het proton kan ‘breken’, waarbij één of twee van de brokstukken (groen) eigenschappen hebben die gerelateerd kunnen worden aan de transversale spin van de quarks in een transversaal (loodrecht op het vlak van de tekening) gepolariseerd proton. Het foton dat een quark uit het proton wegslaat is in geel weergegeven.

gedeeltelijk wordt omgezet in nieuwe quarks die samen met de getroffen quark een nieuw deeltje vormen (het vormen van zo’n nieuw deeltje heet ‘fragmentatie’). Dit deeltje kan vervolgens door de spectrometer waargenomen worden en zo gebruikt worden om iets te leren over de structuur van het beschoten proton.

Wanneer je een bord tegen de muur gooit kan het op ontzettend veel verschillende manieren breken. Hetzelfde geldt voor het proton wanneer het kapot wordt geschoten door een elektron. Bij het onderzoek naar transversaliteit is één van de grootste uitdagingen om juist die brokstukken (nieuw gevormde deeltjes) te vinden die eigenschappen hebben die iets leren over de transversaliteit van de getroffen quark.

Bij HERMES worden verschillende soorten ‘brokstukken’ gebruikt om transversaliteit te onderzoeken. Eén van de mogelijkheden is dat een deeltje gevormd wordt dat tengevolge van de transversale spin van het getroffen quark weggeslingerd wordt, zoals is aangegeven in figuur S.4a. De mate van afbuiging is dan een maat voor de transversaliteit van de getroffen quarks. Dit is te vergelijken met een pingpongballetje dat tegen een ventilator aan wordt gegooid. Het balletje wordt weggeslingerd ten gevolge van de rotatie van de ventilator. Hoe ver het balletje wordt weggeslingerd is een maat voor de rotatiesnelheid van de ventilator. Deze methode om transversaliteit te meten is zeer succesvol gebleken en op basis van recente HERMES meetgegevens is het mogelijk gebleken transversaliteit voor ‘up’ quarks en ‘down’ quarks te bepalen. HERMES is het eerste experiment dat deze metingen heeft uitgevoerd, maar de onzekerheden in de bepaling van transversaliteit zijn nog wel vrij groot.

Om transversaliteit met grotere precisie te bepalen is het nodig om verschillende methoden te combineren. In dit proefschrift is daarom een alternatieve methode onderzocht, waarbij na de botsing twee hadronen gevormd worden die beide een tegengestelde kant op worden geslingerd, zoals is aangegeven in figuur S.4b. Eén van de belangrijkste resultaten van dit proefschrift is weergegeven in figuur S.5. De daarin getoonde variabele $A_{UT}^{\sin(\phi_{R\perp} + \phi_S) \sin \theta}$ is een maat voor het product van transversaliteit en de kans dat uit de getroffen quark twee hadronen gevormd worden.



Figuur S.5: Eén van de belangrijkste resultaten van dit proefschrift: de variabele $A_{UT}^{\sin(\phi_{R\perp} + \phi_S) \sin \theta}$ versus de impulsfractie x van het proton dat ‘gedragen’ wordt door het getroffen quark. De variabele $A_{UT}^{\sin(\phi_{R\perp} + \phi_S) \sin \theta}$ is een maat voor het product van transversaliteit en de waarschijnlijkheid dat twee hadronen uit het getroffen quark worden gevormd. Ook weergegeven is een voorspelling voor $A_{UT}^{\sin(\phi_{R\perp} + \phi_S) \sin \theta}$ uit een berekening door Alessandro Bacchetta en Marco Radici [3].

In de grafiek staat $A_{UT}^{\sin(\phi_{R\perp} + \phi_S) \sin \theta}$ uitgezet tegen de fractie (x) van de impuls van het proton die ‘gedragen’ wordt door het getroffen quark. De gemeten waarden verschillen enerzijds duidelijk van nul (geen transversaliteit), maar zijn anderzijds kleiner dan een theoretische voorspelling [3]. In elk geval is dit de eerste meting ooit die aantoont dat fragmentatie naar twee hadronen inderdaad gebruikt kan worden om transversaliteit te bepalen, ook al zijn de foutenvlaggen nog relatief groot. Om deze resultaten te verkrijgen zijn meer dan 3 miljoen botsingen van een elektron en een proton onderzocht, waarvan ongeveer honderdduizend keer hadronparen gevormd werden die volgens het principe van figuur S.4b gebruikt zijn om de grootte $A_{UT}^{\sin(\phi_{R\perp} + \phi_S) \sin \theta}$ te bepalen!

Om uiteindelijk de transversaliteit van quarks uit deze resultaten af te leiden is een onafhankelijke meting nodig van de genoemde kans om twee hadronen te vormen. Metingen van deze functie zijn in volle gang bij het BELLE experiment in Japan. Meer (toegankelijke) informatie over de spinstructuur van protonen is te vinden in Refs. [4–7].

Bibliografie

- [1] S. A. Goudsmit, *De ontdekking van de electronenrotatie*, Nederlands Tijdschrift voor Natuurkunde **37**, 386 (1971).
- [2] H. C. Manoharan, *Applied physics: Spin spotting*, Nature **416**, 24 (2002).
- [3] A. Bacchetta and M. Radici, *Modeling dihadron fragmentation functions*, Phys. Rev. **D74**, 114007 (2006), [hep-ph/0608037](#), [[SPIRES](#)].
- [4] S. D. Bass, *How Does the Proton Spin?*, Science **315**, 1672 (2007), [[SPIRES](#)].
- [5] E. Gabathuler, *Where is the nucleon spin?*, Nature Phys. **2**, 303 (2006), [[SPIRES](#)].
- [6] K. Rith and A. Schafer, *The Mystery of Nucleon Spin*, Scientific American **281**, 42 (July 1999).
- [7] G. van der Steenhoven, *De nieuwe kernfysica. Een spel van quarks en gluonen*, Nederlands Tijdschrift voor Natuurkunde **67**, 322 (2001).