

Steeds maar hogere energie-fysica

G. 't Hooft

Causaliteit is een centraal beginsel in de theorie van de elementaire deeltjes, en één der gevolgen ervan is de onmogelijkheid de toekomst te voorspellen. Een schets van de stand van zaken nu, en de richting waarin het onderzoek van deze deeltjes zich nu lijkt te begeven, is echter heel goed te geven. Ik zal dus maar het aan mij gevraagde als zodanig opvatten, en een tijdschaal van 15 jaar aanhouden.

De situatie rond 1970

Het is instructief ons eens te verplaatsen naar 15 jaar geleden. Tegen 1970 kende men één fundamenteel 'krachtvoerend' deeltje, het foton, zo goed dat men de uitwerkingen van de hierbij behorende kracht, het 'elektromagnetisme', in detail kon berekenen en experimenteel verifiëren. Er waren vier 'lichte' deeltjes, ofwel leptonen bekend, deeltjes waarvan gebleken was dat ze immuun zijn voor de sterke kernkrachten. Een schier oneindig aantal andere deeltjes registreerde men welke wél sterke wisselwerkingen onderling uitvoeren, de z.g. hadronen.

Een schitterende reeks onderzoeken had de symmetriestructuur van de sterke krachten tussen de hadronen onderling, en die van de 'zwakke krachten' tussen de leptonen en hadronen reeds grotendeels vastgelegd, maar allerlei details leken nog geheel ongrijpbaar. Voor de zwakke kracht bestonden een aantal rivaliserende maar geenszins bevredigende theoretische modellen. Voorts wezen regelmatigheden in de eigenschappen van de hadronen er sterk op dat deze uit 'quarks' en 'anti-quarks' zijn opgebouwd, maar de grilligheid van de kennelijk zéér sterke krachten die hun bewegingen beheersen leek nog geheel ondoorgrondelijk.

Zowel experimentatoren als theoretici zijn na 1970 op de door hen ingeslagen wegen voortgegaan: de experimentatoren bleken in staat de deeltjes verder te versnellen, zodat er méér structuur zichtbaar zou worden; de theoretici zochten naar betere veldentheoretische beschrijvingen. Het is belangrijk op te merken dat van beide succes bij lange niet verzekerd was: hebben de deeltjes bij hogere energie wel een structuur die zich door een simpele theorie laat formuleren? Het was niet moeilijk pessimistisch te zijn en een onpeilbare onberekenbaarheid van de natuur te voorspellen.

Ik geloof nog steeds dat het niet onjuist was dat men met dergelijke meer grimmige mogelijkheden rekening hield, maar gelukkig werd die gedachte door de feiten achterhaald. Sneller dan men durfde hopen

werden inspanningen van diverse kanten met succes bekroond. Het begon, maar hier ben ik wellicht niet objectief, met de doorbraak van de ijktheorieën, begin jaren zeventig. Toen bekend werd hoe het ijkprincipe mathematisch gehanteerd moest worden beschikte de theoreticus ineens over een uitgebreid scala van werkmodellen en voorschriften dat ruim genoeg bleek om vele ogenschijnlijk zeer verschillende deeltjessystemen in te beschrijven, en aan de andere kant beperkt genoeg om vele van de vroegere ideeën uit te sluiten en vrij nauwkeurige voorspellingen te doen.

Ook voor de experimentatoren braken er gouden tijden aan. Niet alleen leverden de nieuwe theorieën talloze voorspellingen en toetsingsmogelijkheden die door hen konden worden geverifieerd of weerlegd; zij konden ook voor verrassingen zorgen waar zij verschijnselen detecteerden die door de theoretici niet waren voorzien. De uitzonderlijke eigenschappen van het J/ψ deeltje waren hier een voorbeeld van. Wel dra leverde dit deeltje en de kort daarna ontdekte aanverwanten een rijke verzameling van waarnemingsmogelijkheden, een uiterst leerzame speeltuin die zowel voor theorie als experiment van essentiële betekenis is geweest.

De krachtsinspanningen zijn sindsdien niet verminderd, en nog onlangs werd de kroon op dit werk gezet door de zeer fundamentele identificatie van de dragers van de zwakke kracht, de W en Z bosonen, door teams van het Europese versnellers-laboratorium CERN. Terecht werd hiervoor ook de Nederlandse ingenieur Simon van der Meer in de bloemetjes gezet.

Toch was reeds vóór 1980 de ergste storm geluwd en de meeste rook opgetrokken. Het beeld dat we nu hebben van de elementaire deeltjes verschilt niet zoveel meer van toen. We weten sinds die tijd dat ook de zwakke en de sterke krachten door een fundamenteel ijkprincipe worden beheerst, net zoals elektromagnetisme, en we kunnen nu ook voor deze krachten gedetailleerde berekeningen doen, al zijn er nog wat donkere hoekjes: nog steeds is niet bekend hoe het 'Higgs deeltje', een noodzakelijke ingrediënt voor de zwakke interactie, eruit zal zien, en voorts kennen we weliswaar de vergelijkingen voor de sterke krachten, maar zelfs de snelste supercomputers zijn nog niet in staat met redelijke nauwkeurigheid deze op te lossen.

De huidige ontwikkelingen

Daar staan we nu. Een belangrijke periode ligt er achter ons. Maar er zijn nog problemen, zult u zeggen. Hoe vergelijken we die met datgene waar we vóór 1970 mee worstelden? Want nu willen wij de vraag stellen hoe de komende 15 jaren er uit zullen zien.

Echter, ook al zou er een parallel te trekken zijn tussen de situatie nú en die van 15 jaar geleden, dan nog mag men niet aannemen dat de vóór ons liggende periode wel weer een vergelijkbare vooruitgang te zien zal geven. Want niet alleen zijn er toevallige factoren zoals financiële moge-

lijkheden bepaald door de politiek, en individuele enkelingen die met bruikbare geheel nieuwe ideeën komen; het is vooral niet te voorzien of de natuur ons enerzijds vergelijkbare barrières zal opwerpen en anderzijds vergelijkbare mogelijkheden zal leveren deze te overwinnen.

Bovendien, een parallel met 15 jaar geleden is nauwelijks te zien. Vooral de positie van de theoreticus ten opzicht van de experimentator is nu geheel anders dan toen. En er is een derde groep die vroeger slechts toekeek maar nu een steeds belangrijker rol gaat spelen: de zuivere wiskundigen. Laat ik dit toelichten. Rond 1970 leverden de experimenten ons talloze deeltjes en interactieconstanten waar de theoretici maar nauwelijks raad mee wisten. Het gissen en proberen om hier structuur in te zien leverde allereerst rekenregeltjes die voor de zuivere wiskunde weinig interessant leken. Gaandeweg echter is het theoretische raamwerk zo hecht en stringent geworden dat enerzijds de experimentatoren ons steeds moeilijker echt kunnen verrassen, en anderzijds de belangstelling van de zijde der wiskundigen zeer sterk is gegroeid. In sommige gevallen lijkt grof computergeweld, waarover ik al eerder repte, het enige antwoord te kunnen geven, en in andere gevallen is het een zeer hoogstaande tak van de wiskunde, zoals de z.g. 'algebraïsche topologie', waarvoor overigens mathematen langere tijd gedacht hadden wel nooit toepassingen te zullen vinden.

Nu zoudt u de gevolgtrekking kunnen maken dat ik het 'brandpunt' van ons onderzoeksterrein zich zie verplaatsen van de experimenten, via de theoretische natuurkunde in de richting van de zuivere wiskunde, maar dat zou toch niet correct zijn. De waarheid zal moeten komen uit een combinatie van deze drie. Want wat zijn nu de èchte vragen die ons bezighouden? .

Een essentiële parameter bij de beschrijving van elementaire deeltjes is de energie die men aan deze deeltjes toe kan voegen door ze te versnellen. Of liever: het bruikbare gedeelte daarvan, nl. datgene wat er bij botsingen vrijkomt. Als men een deeltje laat botsen tegen een stilstaand object dan is dit bruikbare gedeelte maar een klein percentage van de versnellingsenergie. Bij frontale botsingen van tegen elkaar in gerichte bundels kan het bijna 100% zijn, waarbij ik u even herinner aan de techniek van Van der Meer, die essentieel was voor het produceren van zulke bundels. Die bruikbare energie correspondeerde in 1970 met enkele GeV, d.w.z. de energie die een geladen deeltje meekrijgt als het een spanningsverschil van enige miljarden Volts doorloopt. Heden is deze voor wat betreft de experimenten opgelopen tot ruim 100 GeV, zodat men de W (80 GeV) en Z (90 GeV) heeft kunnen detecteren. De theoreticus zoekt zijn Higgs deeltje 'ergens' tussen de 100 en 2000 GeV. Verschillende theoretisch mogelijke modellen beginnen volledig te divergeren voorbij 2000 GeV. Mathematisch mogelijke maar niet geheel bevredigende theorieën hebben we die bruikbaar zouden kunnen zijn tot 10^{19} GeV.

Het behoeft geen betoog dat men deze laatste theorieën wel nimmer langs directe weg zal kunnen toetsen, maar een enkele keer kan dit

langs indirecte weg. Zo voorspelde de eenvoudigste van deze theorieën dat protonen een eindige vervalstijd hebben van minder dan 10^{31} jaar gemiddeld. In vaten met méér dan 10^{31} protonen kon men dit nagaan en thans beschouwt men deze voorspelling als zo goed als weerlegd. Dit soort indirecte controlemogelijkheden blijkt echter uiterst beperkt (andere voorbeelden zijn het zoeken naar neutrino-oscillaties en elektrische eigenschappen van neutronen). Het is dus zaak voor experimentatoren naar hogere energie te gaan.

Nu zal het magische gebied van 2000 GeV voorlopig nog niet bereikt worden. Men verwacht namelijk dat de botsingen niet zeer effectief zullen zijn en dat de deeltjes wel tot het tienvoudige daarvan versneld zouden moeten worden. Maar de experimentatoren behoeven vóór die tijd niet stil te zitten. De huidige opstelling levert ons slechts enkele eigenschappen van de W en de Z met relatief grote onzekerheden vanwege de kleine aantallen en grote achtergrondsrui. Dit zal anders worden wanneer men elektronen en positronen neemt in plaats van protonen en antiprotonen. Het versnellen van de lichtere elektronen en positronen tot zulke energieën is technisch veel moeilijker, maar een versneller die dit zal doen is in aanbouw bij CERN in Genève. Het is LEP (Large Electron-Positron collider). Ook Nederland draagt bij en we verwachten over enige jaren zeer veel belangrijke nieuwe gegevens van deze machine. Men hoopt dat deze nauwkeurig genoeg zullen zijn om vele details van het 'standaard-model' vast te leggen en meer te weten te komen over het 'Higgs' (nog mooier, maar wel onwaarschijnlijk, zou het zijn als zou blijken dat de theorie grondige revisies nodig heeft!).

Het model dat de op dit ogenblik bekende zwakke, elektromagnetische en sterke krachten beschrijft (het 'standaard-model') laat nog allerlei varianten toe (zoals nog meer ijkbosonen, Higgs deeltjes, quark- en/of lepton-families) waaruit LEP en daarop volgende generaties van versnellers uit zal kunnen selecteren. Maar de echte problemen beginnen pas bij 2000 GeV. Er zijn plannen om de LEP-tunnel nà de elektronpositron experimenten te gaan gebruiken voor een hadron-versneller die enige duizenden GeV zal kunnen halen. Men mag hopen dat hiermee al een staartje van de 'nieuwe fysica' kan worden gevonden. De poging zal belangwekkend genoeg zijn.

De uitdaging aan de experimentatoren om het 10 TeV (10.000 GeV) gebied te veroveren ligt er. In de V.S. liggen plannen gereed voor een versneller van honderden km omtrek die inderdaad 10 TeV moet kunnen halen. De vraag is gesteld of er geen alternatieve technieken die minder ruimte innemen denkbaar zouden zijn. De moeilijkheid is dat hiervoor veel sterkere dan de tot nu toe gebruikte velden nodig zouden zijn. Men denkt aan versnelling met behulp van een laser-bundel in een heet plasma waarmee inderdaad in principe zeer sterke longitudinale velden bereikt zouden kunnen worden. Het klinkt als science-fiction maar ook in het verleden zijn de ingenieurs in staat gebleken zuiver theoretische ideeën in werkende machines om te zetten.

De uitdaging aan de theoretici is niet minder groot. Zij wachten niet

af tot de experimentator kan gaan werken met de plasma-machine. Uiteraard is er nog heel wat te doen om de huidige experimentele resultaten met de theorie te vergelijken. Met de snel toenemende vermogens van de supercomputers (een groei die naar mijn persoonlijke overtuiging nog langere tijd zal aanhouden) zal dit steeds beter kunnen. En dan is er het probleem het standaardmodel te extrapoleren voorbij de magische 2000 GeV grens. Als meest kanshebbend beschouwt men op dit ogenblik modellen met 'supersymmetrie', maar een reeks problemen hierin zijn nog niet opgelost. De supersymmetrische theorieën gaan er dikwijls van uit dat er tussen 2000 en 10^{19} GeV betrekkelijk weinig structuur is in het gedrag van de deeltjes. Hun gedragingen zouden slechts gradueel variëren in dat gehele gebied. Een alternatief is de z.g. 'technicolor' theorie, waarbij men de deeltjes veeleer opvat als gelijkend op de bekende Chinese doosjes: ieder doosje bevat weer andere, kleinere doosjes. Filosofisch gezien lijkt zulk een gedachte wel aantrekkelijk maar zij zou ook kunnen getuigen van eenzelfde pessimisme als dat wat in de jaren zeventig ongegrond is gebleken. De theoreticus is pragmatisch: de filosofie mag de weg aanwijzen, maar de wiskunde en het experiment moeten uitsluitsel geven.

Toekomstige mogelijkheden

Een toenemend aantal theoretici werpt zich nu op de nieuwe problemen die zich voordoen voorbij die andere magische grens: 10^{19} GeV, in de hoop een antwoord te construeren van de andere kant uit. De moeilijkheid is hier dat ook gravitatiekrachten mee gaan spreken. Ondanks het feit dat de gravitatietheorie van Einstein veel gelijkenis vertoont met ijktheorieën falen hier alle ons bekende technieken. Dat de theoretici aardig gefrustreerd raken door de schijnbare onoplosbaarheid van dit probleem moge blijken uit de steeds drastischer klinkende ideeën en de steeds bombastischer holle frasen waarmee ze worden gelanceerd. Populair, vooral in de V.S., is de zeer recent gesuggereerde 'superstring' theorie, een combinatie van al enige tijd bekende 'duale string'-theorieën, met supersymmetrie- en Kaluza-Klein-theorieën. Nu al zeggen enthousiaste aanhangers dat dit de beste theorie zal worden sinds de quantummechanica. Gezien het feit dat de superstring-theorie nog geen enkele bruikbare voorspelling of verklaring heeft opgeleverd lijkt mij deze bewering wat voorbarig. Toch is het goed denkbaar dat de 'superstring' onze ideeën over de elementaire bouwstenen van de natuur in de komende 15 jaar drastisch zal beïnvloeden.

Zelf ben ik eens gaan kijken naar het gebied nog veel *verder* dan 10^{19} GeV, waar gravitatiekrachten domineren en alle deeltjes 'zwarte gaten' zijn geworden. De fysica en de wiskunde lijken weer wat eenvoudiger en slechts weinig vooronderstellingen behoeven te worden gemaakt. Maar ook hier klopt er iets niet en extrapolatie via 10^{19} GeV via 2000 GeV naar 1 GeV lijkt een onhaalbare droom. Het zal duidelijk zijn dat we niet kunnen voorzien welk beeld experiment en theorie ons uiteinde-

lijk zullen opleveren. Op wat bescheidener schaal kunnen we ons wel wagen aan enige voorspellingen.

- Het experiment zal tegen 2000 het standaard-model (beneden 2000 GeV) grotendeels bevestigd of waar nodig gecorrigeerd hebben. Misschien, hopelijk, zal men nèt kunnen nippen aan de magische 2000 GeV grens en iets van de 'nieuwe fysica' daar ontwaren. Voor de theorie zal dit uiterst belangwekkend zijn, maar, zeker voor een Europa als dat mee wil doen, zal het hiervoor benodigde geld niet gemakkelijk zijn op te brengen. Een verregaande internationale samenwerking lijkt zeer gewenst. Wellicht zou men zelfs met Rusland en/of Japan tot een akkoord kunnen komen.
- In hoeverre 'theoretical theory' in staat zal zijn haar hinderpalen weg te ruimen valt niet te voorspellen. Eén enkele nieuwe ontwikkeling kan een omwenteling ontketenen. Wellicht is mijn persoonlijke argwaan ongegrond en zal de 'superstring' dit voorrecht beschoren zijn. Het is echter gebleken dat de jongste onderzoekers, in de leeftijdsgroep van 25-35 jaar de meest originele en bruikbare ideeën kunnen produceren. Nationaliteit behoeft geen enkele belemmering te zijn zolang het onderwijssysteem in hun land maar goed functioneert. Wij in Nederland kunnen bogen op een lange en rijke Nederlandse traditie in de natuurwetenschappen die in het verleden zeer inspirerend is geweest. Maar een bureaucratie die een tèt compact en tèt schools studiepakket wil opdringen kan verlamdend werken. In een college van drie maanden kan een student soms dezelfde stof gedoceerd krijgen als die hij zich na twee jaar zelfwerkzaamheid kan meester maken. Maar hij is drie maanden later alles wel weer vergeten terwijl de autodidact zijn kennis inmiddels al zelf kan toepassen en uitbreiden. Wetenschappelijke kennis is niets zonder wetenschappelijke vaardigheid en niemand kan die toegediend krijgen op de wijze waarmee men een auto volgooit met benzine.

De nieuwe rol van de supercomputers in dit vak zal zeker belangrijker worden. Er is wel eens geopperd dat aan supercomputers evenveel geld en energie zou moeten worden besteed als aan de grote deeltjesversnellers. De huidige resultaten rechtvaardigen zulke ideeën niet, maar het ligt voor de hand dat men eruit haalt wat er in zit en met de steeds verdere voortschrijdingen van de chiptechnologie zal dat steeds meer zijn.

Tot slot de 'zuivere' wiskunde. Tot voor kort leek de wiskunde waar ik het nu over heb een spel. Zonder grenzen en zonder toepassingen. Dit is dus nu veranderd. Theoretici kunnen en moeten veel van de moderne wiskunde leren, en dit bleek zelfs omgekeerd ook het geval te zijn. Het ligt voor de hand te vermoeden dat dit in de nabije toekomst nog sterker zal gaan gelden.

Verder dan het jaar 2000 begeven zich alleen de science-fiction auteurs. En zij doen dat meestal verkeerd want geen van onze theorieën zal 'antigravitatie', 'tijdreizen', of hun ideeën over 'superruimte' ooit toelaten. Voor de rest zal de natuurkunde genoeg te bieden hebben.