

Dr P.J. van Baal

Een sterk verhaal over kleuren en smaken

Rede uitgesproken bij de aanvaarding van het ambt van gewoon
hoogleraar in de theoretische natuurkunde om werkzaam te
zijn op het vakgebied van de veldentheorie en deeltjesfysica
aan de Rijksuniversiteit Leiden op vrijdag 29 april 1994

*Mijnheer de Rector Magnificus,
Zeer Gewaardeerde Toehoorders,*

Het misverstand bestaat, dat een hoogleraar alles zou moeten weten. De uitdaging voor de wetenschapper is echter te weten waar de grenzen van onze kennis liggen, zodat deze verlegd kunnen worden. Het is de tocht naar het onbekende, die ons vak zo grenzeloos boeiend maakt. Het hoogleraarschap is aantrekkelijk door de mogelijkheid dit over te dragen aan anderen. Daarbij moeten we maar voor lief nemen dat een hoogleraar tegenwoordig naast leraar en onderzoeker, steeds meer geacht wordt ook een manager en bestuurder te zijn en dat een universiteit meer en meer gezien wordt als een hogere beroepsopleiding. De wijsheid die, vaak ook onterecht, aan het hoogleraarschap wordt verbonden zult U hier niet vinden. Wijsheid komt met de jaren zegt men, en zó oud voel ik me gelukkig nog niet. Bovendien moet U wijsheid niet zoeken in het gesproken, noch in het geschreven woord, maar in de daad.

Het is niet alleen een uitdaging, maar ook een plicht, om zo af en toe aan de geïnteresseerde leek uit te leggen wat ons vak inhoudt. Ik wil dan ook graag van de nood een deugd maken en deze plechtige gelegenheid een zinvolle inhoud geven door die uitdaging juist hier aan te gaan. Ik zal proberen U op begrijpelijke wijze een idee te geven wat in de veldentheorie en de deeltjesfysica momenteel de grenzen van onze kennis vormen, met de nadruk op wat mij de afgelopen jaren het meest in zijn greep heeft gehouden, de sterke kracht. Ik wil me daarbij niet verontschuldigen tegenover mijn vakgenoten. Niets is verfrissender dan eens vanuit een totaal ander perspectief te horen wat je al weet.

Quarks

Ruwweg bestaat de ons omringende wereld uit twee soorten deeltjes: de *krachtvoelende* en de *krachtvoerende* deeltjes. De krachtvoelende deeltjes zijn onderverdeeld in twee categorieën, de *leptonen* (zoals het elektron) en de *hadronen* (zoals het proton).

De krachtvoerende deeltjes zijn de dragers van de kracht tussen de krachtvoelende deeltjes en worden ook wel *ijkdeeltjes* genoemd, met als voorbeeld het foton (ofwel lichtquantum). De drie expliciet genoemde deeltjes, het elektron, het proton en het foton zijn de belangrijkste ingrediënten voor de opbouw van de materie. Een elektron wordt aan een proton gebonden door de electromagnetische aantrekkingskracht, die tot stand komt door de uitwisseling van fotonen tussen beide deeltjes. Het vormt zo een waterstofatoom met een afmeting van ongeveer één ångström, hetgeen 10^{-10}m is, ofwel éénhonderdmiljoenste deel van een centimeter. De electromagnetische kracht komt tot stand door de uitwisseling van fotonen tussen electron en proton. Het onderscheid tussen leptonen en hadronen volgt uit de mate waarin ze gevoelig zijn voor de verschillende krachten. Er zijn vier krachten bekend: de zwaartekracht, de zwakke kracht, de electromagnetische kracht en de sterke kracht, in volgorde van sterkte. Leptonen zijn ongevoelig voor de sterke kracht en veelal licht, terwijl hadronen wel de sterke kracht voelen en veelal zwaarder zijn. Zwaar is uiteraard een relatief begrip. Een liter water is slechts een kilo zwaar, omdat het uit ontelbaar veel water molekulen bestaat. Dit lijkt een triviale opmerking, maar de zwaartekracht is speciaal in de zin dat die kracht altijd aantrekkend is (het is daarom maar goed dat de zwaartekracht zo zwak is). Voor de drie overige krachten heeft men naast aantrekking ook afstoting (evenals in de intermenselijke relaties dus).

Zo is de sterke kracht verantwoordelijk voor het bijeenhouden van de protonen en neutronen in de kern van een atoom, men noemt het dan de kernkracht. Deze kernkracht is echter een zwak restant van de sterke kracht. De hadronen (zoals het proton en neutron) zijn namelijk weer opgebouwd uit andere, kleinere deeltjes, de zogenaamde *quarks*. Zo bestaat het proton uit twee *up* (op) en één *down* (neer) quark met een fractionele elektrische lading van resp. min tweederde en eenderde maal de elektronlading. Het is de sterke kracht die de quarks bijeenhoudt in een proton of

neutron, zoals de electromagnetische kracht de elektronen gebonden houdt aan een kern. Er is echter een fundamenteel verschil. Een atoom kan ontbonden worden in haar samenstellende delen, de ionisatie. Een fractionele lading is nog nooit waargenomen. Een proton kan dus kennelijk niet ontbonden worden in quarks.

Rutherford ontdekte dat het atoom een positief geladen kern heeft, die ca. honderdduizend maal kleiner in afmeting is dan het atoom, door het te beschieten met alpha deeltjes (helium kernen). Men kan de quarks binnen het proton precies zo waarnemen. Door de sterke afbuiging van, in dit geval, zeer snelle elektronen (die zelf nog eens een factor honderdduizend kleiner dan een kern zijn, dus 10^{-20}m) kan men zien dat het proton drie harde pitten heeft, de quarks met de eerder genoemde fractionele ladingen. Voor dit experiment uit 1967, kregen J. Friedman, H. Kendall en R. Taylor in 1990 de Nobelprijs. Oorspronkelijk was het experiment niet bedoeld om op quarks te jagen, maar het was de theoreticus James Björken die aandrong om vooral ook de sterk afgebogen elektronen te meten [1]. Ik noem dit experiment niet alleen omdat het tot de ontdekking van de quarks als de bouwstenen van het proton leidde, maar ook om te benadrukken dat experiment en theorie beide een even essentieel deel van de natuurkunde vormen. Helaas slaat de balans even vaak naar de ene als naar de andere kant door. De tweedeling die daardoor soms dreigt te ontstaan, is in het historisch perspectief bezien, gelukkig altijd van een tijdelijk karakter gebleken. Mijn experimentele stage in de zomer van 1979 inspireerde me tot het volgende gedicht, maar ongenoemd zal blijven vanuit welke gemoedstoestand ik het componeerde.

*Theorie zonder confrontatie met het Experiment is niet,
Experiment zonder vergelijking met de Theorie is net zo min.
Hand in hand vormen zij de Fysica.
Laat geen harer Beoefenaars dit ooit verachten,
Dan zal hen haar Schoonheid wachten.*

De opsluiting

We moeten dus verklaren waarom we de quarks wel binnen het proton kunnen waarnemen, maar niet daarbuiten. Kennelijk worden de quarks zo sterk gebonden dat we ze niet vrij kunnen maken. Dit heet het opsluitingsprincipe (ofwel *confinement*). De kracht wordt veroorzaakt door de uitwisseling van een ijkdeeltje, dat de toepasselijke naam *gluon* (of lijmdeeltje) heeft gekregen. Toch is hier iets vreemds gaande. Bij de binding van een elektron aan een proton krijgen we een waterstofatoom dat zich in verschillende (quantum) toestanden kan bevinden. Het kan overgaan van de ene toestand naar de andere onder het uitzenden van een foton. Maar dan zou evenzo een hadron van de ene toestand moeten kunnen vervallen in de andere, onder het uitzenden van een gluon. Ook een gluon is echter nog nooit rechtstreeks, d.w.z. buiten een hadron, waargenomen. Wel kunnen hadronen vervallen in andere hadronen onder het uitzenden van *mesonen*. Dit zijn hadronen die bestaan uit één quark en één anti-quark.

Een antideeltje is een deeltje waarvan alle eigenschappen, zoals lading en spin (d.w.z. hoeveelheid draaiing) precies tegengesteld zijn aan die van een deeltje. De noodzaak voor het bestaan van deze variant van de materie werd puur uit theoretische overwegingen door P.A.M. Dirac in 1930 voorspeld. Zonder de antideeltjes zou informatie zich met een snelheid groter dan die van licht kunnen voortplanten, en dankzij Albert Einstein weten we dat dit niet mogelijk is [2]. Einstein en Dirac (alsmede Niels Bohr, de “vader” van de quantumtheorie) zijn voor de theoretische natuurkundigen het lichtend voorbeeld bij uitstek. Hun heldendom wordt echter nogal eens onrecht aangedaan door lieden die het als rechtvaardiging zien van de vooronderstelling dat fraaie wiskunde altijd leidt tot interessante natuurkunde. Zonder afbreuk te doen aan de wiskunde, wiens schoonheid ook mij bijzonder dierbaar is, durf ik zelfs te beweren dat het omgekeerde eerder waar is. Maar vergis U niet. De wiskunde is even noodzakelijk als een goed stel hersenen voor het bedrijven van de (theoretische) natuurkunde.

Over kleuren

We hebben quarks, anti-quarks en gluonen die te samen de hadronen vormen, maar zelf niet vrij kunnen voorkomen. Deze hadronen hebben allen een heeltallige lading (in eenheden van de elektronlading). Op zo'n heeltallige lading na hebben alle quarks een lading die eenderde is van de elektronlading, immers een lading van min tweederde scheelt precies één met de lading eenderde. Evenzo hebben de anti-quarks op een heeltallige lading na allen een lading die min eenderde maal de elektronlading is. Kennelijk moet het aantal quarks en het aantal anti-quarks binnen een hadron altijd een exact drievoud verschillen. Het getal drie zou dus wel eens een diepere betekenis kunnen hebben. Inderdaad blijkt ieder quark drie varianten te hebben die van elkaar verschillen door een eigenschap die *kleur* wordt genoemd. De theorie van de sterke kracht staat dan ook bekend als de *Quantum Kleurendynamica* (Quantum Chromodynamica, QCD). De reden om deze eigenschap kleur te noemen is even fundamenteel als simpel. Er zijn ook precies drie hoofdkleuren: rood, groen en blauw. Als we die mengen krijgen we wit. Evenzo levert menging van een kleur met zijn complementaire kleur (min of meer per definitie) wit. Geven we de anti-quarks de geconjugeerde kleuren van de quarks, dus de kleuren zeegroen, violet en geel, dan is de regel dat alleen *kleurloze* combinaties direct waarneembaar zijn. Dit betekent inderdaad dat een quark of in de buurt van een anti-quark of van twee andere quarks moet zijn om zijn kleur te neutraliseren. In het eerste geval vinden we een meson, in het tweede een *baryon*. Maar het impliceert ook dat zes quarks gesplitst kunnen worden in twee kleurloze combinaties, die niet langer in elkaars buurt hoeven te blijven. De kleurloosheids hypothese verklaart evenzeer waarom het gluon van zijn vrijheid wordt beroofd. Dit komt omdat een gluon de kleur van het quark kan veranderen onder het uitwisselen van de sterke kracht met een ander quark (het draagt daarom de kleurencombinatie van een quark-anti-quark paar). De opmerkelijke toehoorder zal echter als verdediging voor de banneling aan-

voeren, dat uit de negen combinaties van kleur en complementaire kleur, er één combinatie kleurloos gekozen kan worden en dus vrij moet kunnen voorkomen. Dit is echter precies het foton dat de electromagnetische kracht uitwisselt en zich niet mengt met de sterke kracht. Er zijn dus acht verschillende gluonen. Omdat zij een kleurencombinatie dragen, kunnen ze onderling met elkaar een interactie aangaan. Ze zijn dus naast krachtvoerende deeltjes ook krachtvoelende deeltjes. Dit in tegenstelling met een foton dat niet (althans rechtstreeks) met zichzelf een interactie kan aangaan.

En smaken

De verschillende soorten quarks worden *smaken* genoemd, zodat de sterke wisselwerking, hoewel kleurloos, wel smaakvol is. De verschillende kleuren van een smaak hebben allen dezelfde massa. (Dit komt omdat de kleur samenhangt met een SU(3) symmetrie. De theorie hiervoor was in essentie al in 1954 geformuleerd door Chen Ning Yang en Robert Mills, maar werd lange tijd niet als zodanig onderkend.) Twee smaken hadden we al genoemd, het up en down. Een derde werd *strange* (vreemd) genoemd, al is het vreemde er in de tijd wel afgesleten. We zouden niet met drie (of een willekeurig aantal oneven) smaken kunnen leven. Het voert te ver er hier in detail op in te gaan, maar het komt erop neer dat de theorie niet langer consistent zou zijn [3]. Afgezien van de interne consistentie van de theorie, waren er ook subtiele discrepanties met het experiment en het is de goede gewoonte van de natuurkundigen dan maar een nieuw deeltje te postulieren. Het klinkt simpeler dan het is, want zo'n nieuw deeltje is uiteraard alleen acceptabel als het alle tegenstrijdigheden wegneemt. De oplossing was zo elegant dat de noodzakelijke vierde smaak *charm* werd genoemd. Het was een uitermate belangrijke triomf van het deeltjesonderzoek toen in 1974 het *gypsy* deeltje werd gevonden, al heeft het wat moeite gekost de charme van dit deeltje te onderkennen. Het blijkt een van de vele gebonden toestanden van een quark en anti-quark van de smaak charm te zijn. Tegenwoordig worden deze gebonden toestanden met de verzamelnaam *charmonium* aangeduid.

Het charm quark is ongeveer anderhalf maal zo zwaar als een proton, en heeft tot gevolg dat ze in charmonium op een redelijk korte afstand van elkaar zitten. Het was al bekend dat de sterke kracht op korter wordende afstand steeds meer van zijn kracht moet inleveren. Door de relatieve zwakte van de sterke kracht op zulke korte afstanden, waarbij U moet denken aan afstanden kleiner dan de helft van de grootte van het proton, bleken plotseling voor deze charmonium toestanden redelijk eenvoudige berekeningen mogelijk te zijn. Dit heeft er in sterke mate aan bijgedragen dat men (op een enkele moedige onverlaat na) niet meer twijfelt aan de theorie die de sterke wisselwerking moet beschrijven. Hoewel niemand het had besteld is er in 1977 het nog zwaardere *bottom* quark bijgekomen. Omdat we niet met een oneven aantal smaken kunnen leven is het wachten op de zesde smaak, dat men alvast de naam *top* heeft gegeven. Het bestaan ervan is na al die tijd nog steeds “topsecret”, maar we hebben goede hoop dat het ieder moment uit de achtergrond te voorschijn zal komen.

Het afnemen van de sterkte met de afstand wordt *asymptotische vrijheid* genoemd. Dit verdient wellicht enige toelichting. Nemen we weer de electromagnetische interactie als voorbeeld, dan is de kracht tussen twee geladen deeltjes evenredig met het produkt van hun elektrische ladingen en omgekeerd evenredig met het kwadraat van de afstand. De asymptotische vrijheid wil dan niets anders zeggen dan dat de lading die we aan het object toekennen van de afstand afhangt. Nu zult U terecht denken dat dit onzin is, totdat ik eraan toevoeg dat we bij het dichterbij komen ook wellicht in het object binnendringen. Wat U echter niet zult verwachten is dat het niet zo voor de hand ligt aan te geven wanneer we nu wel of niet in het object zijn binnengedrongen. Stilzwijgend gaan we ervan uit dat de ruimte buiten het object leeg is. Hoe raar dit ook moge klinken, in de moderne natuurkunde bestaat de lege ruimte niet. Het lijkt alsof we daarmee helemaal terug naar af worden gestuurd, naar de tijd vóór Einstein toen de *ether* nog in zwang was (nu gaan de radiogolven alleen nog figuurlijk door de ether).

Een van de belangrijkste triomfen van de veldentheorie was dat men toch een theorie kon formuleren die aan Einsteins voorwaarde voldeed, dat iedere waarnemer dezelfde lichtsnelheid zal meten (immers het probleem met de ether was dat de lichtsnelheid zou moeten afhangen van de snelheid van de waarnemer t.o.v. die ether).

De lege ruimte

U heeft ongetwijfeld gemerkt dat ik nu pas het woord veldentheorie in de mond heb genomen. Dat komt omdat een veld een abstract begrip is, zo U wilt een wiskundige formulering die niet in termen van onderliggende natuurkundige objecten is te bevatten. Dat is onvermijdelijk als we een lege ruimte willen beschrijven, die bij nadere beschouwing niet leeg blijkt te zijn. Waren er onderliggende concrete objecten die de leegte zouden vullen dan hadden de natuurkundigen niet zoveel moeite gehad het te beschrijven. Dit is wellicht het meest fundamentele aspect van wetenschappelijk onderzoek. Men vindt een steeds betere beschrijving van de waargenomen feiten, maar men komt altijd bij een punt waar de vraag om het waarom niet nader te beantwoorden valt. Het is het *waarom* waarmee een kleuter U blijft bestoken na ieder antwoord dat U hebt gegeven, totdat U in wanhoop uiteindelijk moet zeggen *nou daarom!* Gelukkig is de menselijke geest nog niet zo bedorven dat iedereen daarmee genoeg neemt, zelfs niet als het arme kind voor eigenwijs, of nog erger, voor arrogant wordt uitgemaakt. Maar het zij ook duidelijk dat de logica ons gebiedt in te zien dat er altijd een punt zal komen waarbij het antwoord voorlopig moet zijn *nou daarom!* Hiermee is aangetoond dat het bestaan van een *theorie van alles* niet bewijsbaar is. (De wiskundige Kurt Gödel zou me terecht [4] op de vingers tikken als ik beweerde bewezen te hebben dat zo'n theorie niet bestaat). Voor mij is de grens van onze fundamentele kennis het punt waarop iedereen met *nou daarom* moet antwoorden. Dat die grenzen in ieder geval altijd zullen liggen bij het allerkleinste of het allergrootste komt domweg doordat we geen willekeurige vergroting kunnen aanbren-

gen bij de microscopen en telescopen, die we voor ons onderzoek gebruiken.

Om U een idee te geven wat een veldentheorie nu inhoudt neem ik U mee naar het *Flatland* (Flatland) van Edwin A. Abbott [5]. In Flatland leven de flatlanders, die zo plat zijn dat ze zich nooit uit hun vlak kunnen verheffen. Bovendien kunnen ze alleen dat zien wat zich *in* hun vlak afspeelt. Zij kunnen er geen hoogte van krijgen dat ze op een oppervlak leven, dat er zoiets is als een derde dimensie. Voor hen is dat oppervlak de lege ruimte. Een verstoring op het oppervlak plant zich voort als een golf, door afwisselend te krimpen en te rekken. Zo'n golf is voor hen niets anders dan een krachtvoerend deeltje. Is hun huis niet stevig genoeg dan zal het passeren van zo'n golf tot gevolg hebben dat de muren openscheuren. Maar in de loop der tijd zijn de flatlanders er in geslaagd de rek en krimp uit hun muren te halen, en zijn ze nu relatief veilig voor bevingen. Wij bollebozen in Ruimteland, die op Flatland kunnen neerkijken, weten wel beter dat het krachtvoerend deeltje zich niet door de lege ruimte voortplant. We kunnen zelfs, met een beetje moeite, de energie van alle mogelijke toestanden van hun "lege ruimte" (oppervlak) berekenen. Een fundamenteel resultaat uit de quantum theorie is dat de laagste energietoestand niet een toestand kan zijn waarbij het oppervlak volledig in rust is. Daar merken zij niets van omdat de grootte van die rimpels in hun "lege ruimte" microscopisch van afmeting zijn [6]. Omdat het oppervlak door de krimpvrije muren van de huizen in Flatland in zijn bewegingen wordt gehinderd, is het niet moeilijk te begrijpen dat de energie van de resterende lege ruimte zal veranderen als er weer een huis wordt bijgebouwd.

Onze landgenoot Hendrik Casimir liet in 1948 zien [7] dat in onze eigen wereld precies hetzelfde gebeurt. Door twee geleidende platen in de "lege ruimte" te plaatsen, verandert de energie van het *vacuum* (zoals de natuurkundigen die "lege ruimte" zijn gaan noemen). Dit impliceert een aantrekkende kracht die afneemt met de vierde macht van de afstand. Zo voelen deze platen op een af-

stand van één micrometer per vierkante centimeter een kracht die gelijk is aan de zwaartekracht die dertien microgram water op het aardoppervlak ondervindt. Het is dus een uiterst miniem effect, zeker als U bedenkt dat bij een onderlinge afstand van eentiende millimeter deze kracht vergeleken moet worden met de zwaartekracht van het honderdmiljoenste deel van dertien microgram water. Desondanks werd het effect in 1958 experimenteel bevestigd!

Nu het eenmaal duidelijk is dat het vacuüm beïnvloed kan worden door de aanwezigheid van materie, is het niet meer zo vreemd dat de lading die we van een deeltje waarnemen kan afhangen van de afstand tot dat deeltje. Voor de electromagnetische wisselwerking is trouwens het effect omgekeerd aan dat van de sterke wisselwerking. De elektrische lading wordt door de invloed van het vacuüm afgeschermd, al moeten we tot belachelijke kleine afstanden gaan om een significant effect te zien. Het verschil met de sterke wisselwerkingen komt in belangrijke mate door het feit dat het gluon interactie met zichzelf heeft. (De electromagnetische wisselwerking zou hetzelfde effect vertonen indien we bij het foton een kompasje zouden kunnen “inbouwen”.) Asymptotische vrijheid werd onafhankelijk ontdekt door een aantal mensen, waaronder door mijn leermeester Gerard 't Hooft, die erover in 1972 op een conferentie rapporteerde en er nu spijt van heeft het nooit officieel gepubliceerd te hebben [3]. Het effect is zelfs zo sterk dat als je op steeds grotere afstand van een quark of gluon gaat kijken, op een gegeven moment kennelijk alle kleur wordt afgeschermd, althans dat is wat het opsluitingsprincipe ons vertelt. De asymptotische vrijheid bij kleine afstanden is dan ook equivalent met *slavernij* op grote afstanden. Het probleem is echter dat de interacties dan zo sterk zijn geworden dat we niet meer kunnen uitrekenen wat er precies gebeurt. Dit heeft mij er wel eens toe gebracht te zeggen dat het opsluitingsprincipe wordt bewezen door intimidatie.

Lijmballen

Ook een gluon zal zich, zoals ik al een paar keer heb betoogd, moeten laten opsluiten. Het heeft daarvoor in principe geen quarks of anti-quarks nodig. Zo'n gebonden toestand van alleen maar gluonen heeft de naam *glueball* (lijmbal) gekregen. Dit zou in principe een nieuw soort materie zijn en waarneming ervan zou een van de mooiste bevestigingen van de sterke theorie vormen. De reden waarom deze glueballs zo moeilijk experimenteel te vinden zijn is in essentie dat de up, down en strange quarks zo licht zijn. De voorspelling is dat de lichtste glueball niet erg veel zwaarder dan een proton zal zijn. Het zal dan heel snel uiteenvallen in mesonen, waarvan het lichtste (het *pion*) ongeveer het zevende deel van een proton weegt. Een theoreticus heeft echter de vrijheid om de massa's van *alle* quarks groot te kiezen, zodat hij van deze problemen geen last zal hebben, om in ieder geval aan te tonen dat zo'n glueball zou kunnen bestaan. Dat is een van de belangrijke aspecten geweest van mijn eigen onderzoek de afgelopen tien jaar. Om de asymptotische vrijheid zijn werk te laten doen, zou je geneigd zijn ook het gluon een grote massa te geven. De symmetrie verbiedt ons dat. Niet dat dit iedereen tegenhoudt, maar er zijn grenzen. Om de sterke kracht klein te krijgen sluiten we gluonen op in een doosje dat niet veel kleiner is dan de afmeting van een proton. Het is daarbij de bedoeling het doosje zo groot mogelijk te maken zonder dat de berekeningen onmogelijk worden. Hier zal dus de sterkste uiteindelijke winnen! Ik zal aan de hand van een alledaags voorbeeld illustreren wat de essentie van deze berekeningen is.

Als we een ballon opblazen weten we allemaal dat die in omvang toeneemt, omdat de druk in de ballon stijgt. In termen van die druk kunnen we de kracht op de wand van de ballon uitrekenen. Samen met de bekende elasticiteit van het materiaal waarvan de ballon is gemaakt bepalen we dan de omvang van de ballon. Toch is echter de druk een gevolg van de botsingen van de ontelbare lucht molekulen, en de elasticiteit een gevolg van de aantrekkingskracht van de polymeren (langgerekte molekulen) waaruit rubber

is opgebouwd.

Tot zover de analogie. Met een beperkt aantal vrijheidsgraden (vergelijk druk en elasticiteit) waren we nu in staat om nauwkeurig de energie van de gebonden toestanden van het gluon te berekenen (vergelijk de omvang van de ballon). Deze berekening gaat bijna precies zo als de berekening van de gebonden toestanden van het elektron aan de kern in een atoom. Omdat de energie van een gebonden toestand van gluonen de massa van de betreffende glueball geeft, spreken we ook wel van het glueballspectrum. Bovendien kunnen we die massa's bepalen als functie van de afmeting van het doosje. Om de afmeting van het doosje groter dan die van het proton te maken zijn er meerdere vrijheidsgraden nodig. Dat is waar we momenteel naarstig naar op zoek zijn. Traditioneel worden de berekeningen in de veldentheorie vanuit een deeltjesbeschrijving gegeven. Hoewel historisch begrijpelijk, is dit de omgekeerde wereld, omdat alle eigenschappen van de deeltjes en hun interacties volgen uit de correcte beschrijving van de velden. Het veld wordt dus niet altijd even serieus genomen. In de sterke theorie kunnen we daar niet langer meer omheen. De kleine rimpels in het vacuum, waar ik het in Platland over had, zijn niet langer voldoende.

Bevestiging dat we wel degelijk op de goede weg zijn kwam uit een totaal andere hoek. In 1974 had Ken Wilson de zogenaamde rooster-ijktheorie geformuleerd. Daarbij verdeelde hij ruimte en tijd in een discreet aantal punten. Als je het aantal roosterpunten ook nog eindig houdt dan kan een computer in principe de rest, ja zelfs in principe de massa's van het proton of pion berekenen. Het probleem van een numeriek onderzoek met een dergelijk aantal parameters is telkens weer dat het erg moeilijk is de systematische fouten volledig onder de knie te krijgen. We moeten immers zowel de discretisatie erg klein als het volume erg groot maken. *Beide* verhogen het aantal roosterpunten. Maar als we nu eens ons doosje nemen, dat we bewust een kleine afmeting hebben gegeven, dan zou het wel eens eenvoudiger kunnen zijn de discre-

tisatiefout voldoende klein te krijgen, zonder dat de computer op tilt slaat van een te groot aantal parameters. Dit bleek wonderlijk nauwkeurig te werken. Nadat we binnen onze berekeningen zelfs de fouten t.g.v. de discretisatie in rekening hadden gebracht was de overeenkomst beter dan twee procent, een fout die consistent was met de nauwkeurigheid waarmee de numerieke berekeningen waren gedaan. Dit gold voor alle doosjes kleiner dan een proton. Dit bevestigde zowel het feit dat onze aanpak correct was, als dat de rooster-ijktheorie een nauwkeurige beschrijving kan geven, waarbij de discretisatiefouten redelijk onder controle zijn.

Computers vormen heden ten dage ook in het theoretische onderzoek een niet meer weg te denken hulpmiddel. Dit tot grote ergernis van nogal wat collegas die opgroeide in een tijdperk zonder computers. Hun kritiek is niet altijd onterecht. Een goed doordachte benaderde berekening verschaft (of liever, vereist) altijd meer inzicht dan het draaien van een computerprogramma. Toch stelt de computer ons in staat problemen aan te pakken die niet langer meer alleen met pen, papier en een goed stel hersenen zijn op te lossen en die het wel degelijk meer dan waard zijn opgelost te worden.

Over voorspelbaarheid

Het zij opgemerkt dat we de ruimte en tijd discreet maakten als een technisch hulpmiddel. Zo de ruimte al discreet is, dan nog zal die niet van de vorm zijn die we aanbrenge om de theorie met een computer de baas te kunnen. Dat betekent dat die theorie ongevoelig moet zijn voor wat er zich op zeer kleine afstanden afspeelt (en dan bedoel ik veel kleinere afstanden dan, zeg, de afmeting van een elektron). Omdat we niet op willekeurig kleine afstanden (hetgeen synoniem is met willekeurig hoge energieën) kunnen kijken hoe de theorie in elkaar steekt, is dit vooralsnog de enige manier om een theorie met voorspellende waarde te hebben. Het is in zekere zin miraculeus dat de sterke, zwakke en electromagnetische wisselwerking zo succesvol door deze *renormaliseerbare* theorieën worden beschreven. Een wiskundig bewijs voor de noodzaak van

de renormaliseerbaarheid bestaat niet echt.

In een meer traditionele aanpak van de theorie was de renormalisatie noodzakelijk om de oneindigheden die in de theorie voorkomen te “verstoppen”. De oneindigheden komen van het gedrag van de theorie bij willekeurig hoge energie, of willekeurig korte afstanden. Dit is nog vaak de manier waarop we de veldentheorie onderwijzen, misschien niet helemaal terecht. Je zou het kunnen formuleren zoals Wilson dat deed. Neem een theorie en snijd weg wat er op hele kleine afstanden gebeurt, bijv. door de theorie op een rooster te zetten. Vervolgens laat je zien dat de theorie slechts door een eindig aantal relevante parameters bepaald wordt, zelfs en vooral als je het rooster steeds fijner maakt, en dat vergeten sommigen nogal eens te bewijzen. Hiervoor moet je in het algemeen hard blokken, maar je komt in die berekeningen nooit oneindigheden tegen. Strikt gesproken is er in de sterke wisselwerking alleen een echt bewijs voor een klein, helaas zelfs willekeurig klein, doosje. Wilsons aanpak geeft echter een andere kijk op de veldentheorie die ook heel nuttig is voor andere delen van de natuurkunde, zoals in de gecondenseerde materie, waar men ook met systemen van veel vrijheidsgraden moet werken.

Misschien denkt U dat het vervelend is dat de theorie verstopertje speelt met wat er op heel korte afstand gebeurt, het probleem is echter dat als dit niet zo zou zijn, er een oneindig aantal vrije parameters nodig is om de theorie te beschrijven. Er blijft dan niet veel meer over om te voorspellen. Althans als je voorspellingen wilt doen met willekeurig grote nauwkeurigheid. Je zou kunnen zeggen dat renormaliseerbare theorieën de meest nauwkeurige voorspellingen toelaten.

Het mooie van de wetenschap is haar dynamische karakter. Door wat we leren veranderen onze inzichten voortdurend. Voor mij is het frappantste voorbeeld daarvan het begrip van de renormaliseerbaarheid. Het is ontstaan als een puur technische truc om eindige antwoorden te krijgen en het heeft lang geduurd voordat het zinvol werd om de vraag naar het waarom te stellen. Ik kan

me nog goed herinneren hoe ik via het college van Martinus Veltman van 1978 in Utrecht voor het eerst met de veldentheorie in aanraking kwam. Zijn antwoord op het waarom was toen nog “je moet er maar mee leren leven (zucht)”. Hij heeft ons toen later wel proberen uit te leggen dat de ideeën daaromtrent volop in beweging waren, de zucht was dus kennelijk om aan te geven dat we toch nog te dom waren om het te begrijpen.

Het is niet voor niets dat de studenten altijd grote moeite met een college veldentheorie hebben. Dat ondervond ik niet alleen hier in Leiden, maar ook in Utrecht waar ik het college heb gegeven. Het is met de studie net zo als met de geboorte van een kind, waarvan het embryo eerst door alle stadia van de evolutie lijkt te gaan. Ook een student moet zich eerst door alle bestaande kennis heenwerken voordat men aan het front is gekomen. Wel heeft de evolutie zijn werk gedaan door alle wegen die doodliepen af te sluiten, maar het is niet bevorderlijk voor de gezondheid van het kind als het gedwongen wordt om beduidend eerder dan na negen maanden ter wereld te komen. Dit zou ongetwijfeld evolutionair een doodlopende weg blijken te zijn (als U begrijpt wat ik bedoel.....).

Ik wil nog één keer terug komen op die lege ruimte, die niet echt leeg is. Ik heb al genoemd dat het effect voor de electromagnetische kracht het omgekeerde is van asymptotische vrijheid. De sterkte wordt groter naarmate we dichterbij het elektron komen. Strikt gesproken zou de sterkte oneindig worden, zelfs op eindige afstand, en dat is niet echt acceptabel. Hoewel de electromagnetische kracht beschreven wordt door een veldentheorie die renormaliseerbaar is, geeft dit echter toch aanleiding tot een nogal subtiele afhankelijkheid van wat er op heel korte afstanden gebeurt. Als we namelijk in Wilsons formulering van de renormaliseerbare veldentheorie de roosterafstand naar nul laten gaan, dan is het huidige inzicht dat de sterkte, zoals we die op macroscopische afstanden waarnemen, naar nul gaat. Hetgeen in tegenspraak met de waarnemingen zou zijn. Ik heb al eerder opgemerkt dat we

naar belachelijk kleine afstanden moeten gaan om voor de electromagnetische wisselwerking echt last van dit probleem te krijgen. Het is echter onvermijdelijk dat op die allerkleinste afstanden de veldentheorie gemodificeerd moet worden. Velen geloven dat de quantumtheorie van gravitatie voor deze modificatie zal zorgdragen. Er is echter een andere interactie waar iets vergelijkbaars gebeurt, en daar bestaat wel degelijk de mogelijkheid dat we niet naar al te kleine afstanden hoeven te gaan voordat de betreffende theorie gemodificeerd zal worden. Ik doel hiermee op de interacties van het *Higgs* veld met zichzelf. U ziet dus dat de ideeën over renormalisatie nog steeds volop in beweging zijn.

Tot slot

Gevoelige *snaren* en *superlatieven* heb ik bewust vermeden, maar dat ik de zwakke wisselwerking en haar recente triomfen totaal ongenoemd gelaten heb is wellicht jammer, omdat het de smaakmaker van deze rede had kunnen zijn (haar krachtvoerende *W*-deeltjes veranderen namelijk de smaak van de quarks, weliswaar volgens net zo strakke etiquette als waarmee deze plechtigheid gepaard gaat). U kunt er echter elders veel meer over lezen [3]. Ik heb zo ook mijn reden gehad niets te vertellen over de kleurendynamica bij hoge temperatuur. Met de vrijheid die daar verkondigd wordt kan ik me niet geheel verenigen. Wel is jammer dat de tijd mij niet toelaat meer te zeggen over de rol van het Higgs *veld* in de zwakke wisselwerking en de kosmologie, te meer omdat dit de mogelijkheid had gegeven vele dwarsverbanden binnen het natuur- en sterrenkundig onderzoek aan te geven. Toch hoop ik U aan de hand van de sterke kracht enig inzicht gegeven te hebben in de deeltjesfysica en veldentheorie. Ik heb daarbij bewust het vacuum een belangrijke rol gegeven, een rol die we ook bij alle andere krachten niet moeten onderschatten.

Toen ik Veltman advies vroeg waarin ik zou afstuderen, en in die tijd twijfelde ik nog of ik misschien verder wilde in de wiskunde of de sterrenkunde, zei hij “Ga jij maar bij Gerard ’t Hooft afstuderen”. Ik heb er nooit spijt van gehad zijn advies opgevolgd

te hebben. Het was “een schitterend ongeluk” dat ik die tijd in Utrecht studeerde. Het is moeilijk recht te doen aan wat zij beiden aan ons vak hebben bijgedragen. Evenzo hebben, in een later stadium, Martin Lüscher en Chen Ning Yang een grote invloed op mijn wetenschappelijke ontwikkeling gehad.

* * *

Mijnheer de Rector Magnificus, Zeer Gewaardeerde Toehoorders,
Aan het einde van mijn betoog gekomen wil ik het College van Bestuur dank zeggen voor mijn benoeming tot hoogleraar in de theoretische natuurkunde. Ook allen die zich daarvoor hebben ingespannen ben ik meer dan erkentelijk. De steun van de stichting FOM bij het tot stand komen van deze leerstoel wordt erg gewaardeerd. Ik dank U allen voor het gestelde vertrouwen.

Hooggeleerde Berends, beste Frits, jij hebt gestreden om het deeltjesonderzoek in Leiden de plaats te geven die het verdient. Het is een voorrecht dit onderzoek in Leiden te mogen ondersteunen en verbreden. Ik heb veel respect voor jouw inzet om samen met je mensen berekeningen te doen die van rechtstreeks nut en hoge waarde voor het experimentele onderzoek zijn. Waarde Van Neerven, beste Willy, van jou grondige kennis van de veldentheorie, en de perturbatieve QCD in het bijzonder, hebben al zovelen mogen profiteren.

Hooggeleerde Van Saarloos, best Wim, door jouw collegialiteit ben ik me zeer snel in Leiden thuis gaan voelen. Jouw inspanningen voor ICAMP mogen niet onbeloond blijven. Ook alle medewerkers van de afdeling Sterrenkunde en Natuurkunde, en van het Instituut-Lorentz in het bijzonder, dank ik voor de jovialiteit waarmee ik werd ontvangen. Ik ben blij dat mijn ongedwongen stijl ook hier in goede aarde valt. De ernst van de financiële problemen binnen onze fakulteit heeft niet alleen mij verrast, maar ik heb er alle vertrouwen in dat we nog lang in goede harmonie zullen samenwerken. Dat laatste geldt zeker voor mijn promovendi en

postdocs. Door het goede voorbeeld zal ik trachten U te bewegen tot het maximum van Uw kunnen te gaan.

Hooggeleerde 't Hooft, beste Gerard, het “schitterende ongeluk” waar ik het eerder over had kan niet beter verwoorden wat het voor mij betekende jouw promovendus geweest te zijn. Ik denk ook graag terug aan de studentenseminaria, waar we samen heel wat studenten het zwarte gat in jaagden. De allerbesten daarvan vormden het bewijs dat daarbij geen informatie verloren gaat. Ik hoop dat ze me kunnen vergeven dat ik hun horizon slechts, naar ik hoop, een heel klein beetje heb verstoord.

Door de in oprichting zijnde landelijke Onderzoeksschool Theoretische Natuurkunde, betekent het vertrek naar Leiden niet echt het afscheid van Utrecht, waar ik terug kan kijken op vele vruchtbare en leerzame jaren. Iedereen die daar aan bijgedragen heeft wil ik daarvoor danken. Ik verheug me ook in de toekomst op de contacten met al mijn collegas en vrienden binnen de natuurkunde, de sterrenkunde én de wiskunde, waar zij zich ook moge bevinden. Ik verontschuldig me bij al diegenen die ik niet heb genoemd, in het bijzonder zij waarmee ik met zoveel plezier in binnen- en buitenland heb mogen samenwerken.

Tot slot richt ik me aan U, dames en heren studenten. Als U goed geluisterd hebt, leef ik met U mee. U bevindt zich in een tijd waar het onderwijsbeleid verandert met een snelheid die de causaliteit dreigt te schenden. Ik zou U geen dienst bewijzen als ik desondanks niet zou pogen ook aan U de hoogst mogelijke eisen te stellen. Ik hoop dat U naar waarde kan inschatten wat ik U daarvoor probeer terug te geven.

Zij die mij goed kennen weten dat ik er moeite mee heb stil te staan bij een gebeurtenis als deze. Niets is mij liever dan zo snel mogelijk weer aan de slag te gaan, dat is waarvoor ik deze benoeming heb mogen aanvaarden.

Ik heb gezegd.

Noten

- 1) M. Riordan, *The hunting of the quark: a true story of modern physics*, Simon and Schuster, New York, 1987.
- 2) A. Einstein, *Relativiteit, speciale en algemene theorie*, Het Spectrum, 1978 (oorspronkelijke uitgave 1916).
- 3) G. 't Hooft, *De bouwstenen van de schepping, een zoektocht naar het allerkleinste*, Prometheus, Amsterdam, 1992.
- 4) D.R. Hofstadter, *Gödel, Esher, Bach: an eternal golden braid*, Basic Books, New York, 1979, p. 15-26.
- 5) E.A. Abbott, *Flatland*, Dover Publications, New York, 1952 (oorspronkelijke uitgave 1884); Zie ook: D. Burger, *Bolland*, Veen, Utrecht, 1983 (oorspronkelijke uitgave 1957).
- 6) Dit komt omdat de constante van Planck zo klein is. Om het mysterie van de quantumwereld te doorgronden kunt U het beste op reis gaan naar Wonderland, waar deze constante niet langer klein is: G. Gamow, *Mr. Tompkins in Wonderland*, Cambridge University Press, 1978 (oorspronkelijke uitgave 1940/45).
- 7) H.B.G. Casimir, *Het toeval van de werkelijkheid, een halve eeuw natuurkunde*, Meulenhoff, Amsterdam, 1983, p. 286; H.B.G. Casimir, Proc.Kon.Ned.Akad.Wet., Ser. B 51, 1948, p. 793.