

een intensiteit van 2×10^{12} ppp ruimte-ladingseffecten op te treden. De 4620 pakketjes van de ronddraaiende bundel induceren spiegelstromen in de wand van de roestvrijstalen vacuümkamer. Op plaatsen waar de protonenbundel niet exact in het centrum van de vacuümkamer is, leiden deze spiegelstromen tot aantrekkende krachten tussen de bundel en de wand die bij de genoemde intensiteit tot transversale instabiliteiten leiden. Deze kunnen worden onderdrukt met niet-lineaire magnetische lenzen, zoals sextupolen en octupolen.

Het is ook mogelijk de bundel te stabiliseren met een actieve correctie, waarbij de transversale positie van de protonbundel op een geschikt punt wordt gemeten waarna dit signaal via een versterkersysteem met grote bandbreedte

wordt toegevoerd aan een paar transversale deflectie-elektroden, die de groeiende instabiliteit tegenwerken.

Beide methoden moeten tegelijkertijd worden toegepast in het SPS om de bundel te stabiliseren, maar het is gebleken dat de transversale instabiliteiten virulenter zijn dan verwacht en dat sterkere niet-lineaire lenzen zullen moeten worden geïnstalleerd om 10^{13} ppp bij 400 GeV volledig te stabiliseren.

Verder is gevonden dat in de 200 MHz versnellingstrilholtes een parasitaire resonantie met een frequentie van 628 MHz kan worden geïnduceerd door de ronddraaiende protonpakketjes. Dit veroorzaakt een longitudinale instabiliteit van de protonpakketjes die boven een intensiteit van 5×10^{12} ppp tot bundel-

verlies leidt. Er wordt verwacht dat door het aanbrengen van geschikte dempingslussen in de trilholtes deze parasitaire resonantie kan worden onderdrukt.

Tengevolge van de genoemde ruimte-ladingseffecten is de operationele bundelintensiteit nu ongeveer 5×10^{12} ppp. Er is goede reden om te verwachten dat de beloofde operationele intensiteit van 10^{13} ppp binnen afzienbare tijd zal worden bereikt, terwijl een intensiteit van verschillende malen 10^{13} ppp over enkele jaren alleszins haalbaar lijkt.

1) The 300 GeV Programme, CERN/1050, 14 January 1972.

2) W.C. Middelkoop, Het Europese 400-GeV-protonsynchrotron, NTvN, 40 (1974) 211.

Quantumchromodynamica - de nieuwe theorie voor de sterke wisselwerkingen

G. 't Hooft

Quarks hebben tegenwoordig naast de gewone elektrische lading, ook kleur. Hierbij dient men niet te veronderstellen dat quarks licht uitzenden of reflecteren. Het is een manier om verschillende quarktoestanden aan te duiden. In de laatste ontwikkelingen in de veldentheorie van de sterke wisselwerkingen neemt kleur een centrale plaats in. Naar analogie van de quantumelektrodynamica worden deze nieuwste theorieën onder de verzamelnaam quantumchromodynamica gevangen.

Er is mij gevraagd een theoretische ontwikkeling te schetsen waarop pp-verstrooiingsexperimenten bij 400 GeV betrekking zouden kunnen hebben. Welnu, het is juist dié natuurkracht die de belangrijkste bijdrage tot pp-verstrooiing geeft, waarvoor zich een boeiende nieuwe theorie aftekent: de 'sterke wisselwerkingen'. Laat mij eerst de situatie schetsen voor de andere elementaire natuurkrachten tussen elementaire deeltjes.

Een voorbeeld van een ideale theorie is wel die der elektromagnetische wisselwerkingen van de materie: de quantumelektrodynamica. Vooral waar deze theorie de krachten tussen fotonen, elektronen en muonen beschrijft, kan zij bogen op een precisie die dat van een uurwerk verre overtreft. Bovendien heeft zij nog een elegant elementair beginsel als uitgangspunt: ijkvariantie. Een derde natuurkracht is die der 'zwakke wisselwerkingen', die de (trage) vervalsprocessen van verscheidene deeltjes en atoomkernen veroorzaken alsmede de zeldzame botsingen van neutrino's tegen andere deeltjes. De

moderne theorieën voor deze derde kracht stoelen eveneens op het principe van ijkvariantie en zouden even nauwkeurig zijn geweest als de quantumelektrodynamica, ware het niet dat de experimentele gegevens te schaars zijn om de vele theoretische mogelijkheden op één na te kunnen uitsluiten. Op dit terrein is de theoreticus dus vóór op de experimentator. De theorie is klaar, de getallen moeten nog worden ingevuld.

In schril contrast hiermee staat de theorie voor de sterke interacties. De theoreticus wordt overstroomd met experimentele gegevens over de hadronen (sterk wisselwerkende deeltjes), maar weet er geen raad mee. De moeilijkheid is hier het falen van een methode die altijd goed heeft gewerkt bij de andere interacties: de benadering door middel van een storingsreeks. Deze benadering heeft als uitgangspunt de aanname dat bij zeker botsingsproces in eerste instantie een interactie met sterke g slechts één keer plaatsvindt. Daarna berekent men de correctie hierop ten gevolge van processen waarbij de interactie twee keer plaatsvindt, enz. Je krijgt dan een reeks



Prof. dr. G. 't Hooft werd op 5 juli 1946 geboren te Den Helder. Hij promoveerde in 1972 op het onderwerp Renormalisatie van Yang-Mills-theorieën. Dit baanbrekende werk heeft een geweldige invloed op de tegenwoordige hoge-energiefysica. Augustus 1976 werd 't Hooft benoemd tot persoonlijk hoogleraar in de theoretische fysica aan de RU-Utrecht. Hij verblijft thans nog op het Stanford Linear Accelerator Centre in Stanford, USA, en werkt daar onder meer op het gebied van quark-opsluiting.

van het type:

$$a_1 g + a_2 g^2 + a_3 g^3 + \dots,$$

waarbij de coëfficiënten a_1, a_2, \dots analytisch kunnen worden berekend. Nu is voor elektromagnetische en zwakke interacties g voldoende klein (bijv. $1/137$) zodat daar de reeks in de praktijk snel convergeert. Voor sterke interacties echter is g groot en in zekere zin zelfs oneindig, zodat de benadering onbruikbaar is. In andere woorden: in één enkele botsing kunnen wel honderd interacties plaatsvinden.

Etiketten

Bij gebrek aan een gedetailleerde theorie heeft men eerst andere aspecten van de sterk wisselwerkende deeltjes (hadronen) onderzocht! Allereerst de

symmetrie-eigenschappen: welke quantumgetallen zijn er die exact behouden zijn, en zijn er grootheden die bij benadering behouden zijn? Het resultaat van deze onderzoeken was zeer opmerkelijk. Het is alsof we op ieder *baryon* drie etiketten mogen plakken. Op ieder etiket mag één van de drie volgende woorden staan: 'op', 'neer', of 'vreemd'. Evenzo kunnen we aan ieder *meson* één etiket bevestigen voor de woorden 'op', 'neer' of 'vreemd' en één etiket waarop alleen mag staan 'anti-op', 'anti-neer' of 'anti-vreemd'. (Recentelijk is vast komen te staan dat er een vierde woord is dat op de etiketten mag staan: 'charme' respectievelijk 'anti-charme'.) Deze etiketten worden ook wel 'quarks' genoemd en men zegt dan dat alle baryonen zijn opgebouwd uit drie quarks en alle mesonen uit één quark en één anti-quark. Er mag willekeurig worden gekozen uit vier soorten quarks (of anti-quarks). De quarks behouden hun identiteit bij de meeste botsingen, maar kunnen van plaats verwisseld worden.

Vervolgens werden fenomenologische theorieën ontworpen die als doel hadden een ruwe beschrijving te verschaffen van de waarnemingen en niet de ambitie hadden van een elementair principe uit te gaan. Hiervoor waren en zijn de hoge-energie-versnellers onontbeerlijk. Eén der observaties die van belang zou blijken te zijn was dat alle hadronen heel ruwweg aan een massaformule gehoorzamen:

$$m^2 = a + b(s + n),$$

waarin m de massa, s de spin, n een niet-negatief geheel getal, a een constante die van andere quantumgetallen afhangt en b een universele constante, ongeveer 1 (GeV)^2 . Dit lijkt enigszins op het spectrum van een harmonisch trillende snaar en die analogie is niet zo gek, want een model waarin mesonen worden voorgesteld als trillende elastiekjes met een quark en een anti-quark aan de uiteinden, blijkt vrij goed de waarnemingen te beschrijven (de 'duale theorieën'). Pogingen om deze theorie der trillende elastiekjes te quantiseren hadden slechts gedeeltelijk succes en de berekeningen zijn enorm gecompliceerd.

Ons beeld van de sterke interacties verandert echter als we kijken naar hoge-energie elektron- en neutrinooverstrooiing tegen nucleonen. Dan blijkt duidelijk dat quarks méér zijn dan alleen een etiket voor de hadronen. Hier is het zgn. 'parton-model' succesvol. In het parton-model worden hadronen gezien als wolken van min of meer vrij bewegende 'subhadronische' deeltjes: de partons. Een hoog-energetisch elektron kan kaatsen tegen één enkel parton, dat dan de wolk verlaat maar daarbij onmiddellijk weer een wolk om zich heen creëert. De partons waartegen een elektron kan botsen, blijken precies de elektrische ladingen te hebben zoals die voor de

quarks gepostuleerd waren en ook ten opzichte van de neutrino's gedragen de partons zich als de hypothetische quarks. Op dezelfde wijze dus als Rutherford de elektrische lading van atoomkernen vaststelde met behulp van α -deeltjes, zo zijn nu de quantumgetallen van de quarks experimenteel geverifieerd met behulp van elektronen en neutrino's.

Vrije deeltjes

Er doet zich nu een interessante mogelijkheid voor. Op subhadronische schaal ($< 1 \text{ Fermi}$) zijn de interacties niet meer zo sterk; de partons gedragen zich immers als vrije deeltjes! Wellicht bestaat er een 'conventionele' veldentheorie die alleen van toepassing is op deze subhadronische schaal. De quarks zijn elementaire deeltjes van die theorie en de wisselwerkingen tussen de quarks vinden plaats door uitwisseling van een nieuw 'elementair deeltje'. Weer nemen we onze toevlucht tot een theorie met een ijkprincipe, en wel omdat we graag een kracht willen inbouwen die aantrekkend werkt tussen drie quarks en ook tussen één quark en één anti-quark, maar afstotend voor alle andere combinaties. Alleen door uitwisseling van deeltjes met spin-1 zou een vectorkracht met die eigenschap kunnen ontstaan en vereisten in verband met renormaliseerbaarheid leiden dan als vanzelf tot een ijktheorie. Preciezer: we hebben precies acht spin-1-deeltjes nodig en ieder quarktype (op, neer, vreemd en charmant) moet in drie gedaanten kunnen voorkomen, die dikwijls worden aangeduid als rood, blauw en groen. De interacties tussen deze deeltjes zijn van het ijktype. Alleen op deze wijze kunnen we een Coulombkracht opwekken met de bovengenoemde eigenschap.

Het etiket rood, blauw of groen wordt aangeduid met 'kleur' (color). Het etiket 'op', 'neer', enz. heet in de vakliteratuur 'flavor' en vertalen we gemakshalve met 'geur'. Iedere quark kan in drie kleuren en in vier geuren voorkomen. Twaalf soorten quarks dus.

Deze betrekkelijk eenvoudige theorie heeft nu enige zo opmerkelijke eigenschappen dat we tegenwoordig steeds meer geneigd zijn te geloven dat dit de *volledige* theorie is voor de sterke wisselwerkingen. De regel voor het opbouwen van hadronen uit quarks is in wezen zeer eenvoudig. Als we aan de anti-quarks de complementaire kleuren blauwgroen, geel en paars toekennen, dan kunnen alleen die combinaties die bij menging wit opleveren als hadron bestaan. Een complicatie is dan alleen dat ook de spin-1-deeltjes (de lijmdeeltjes of gluons) één kleur en één complementaire kleur dragen, maar geen geur.

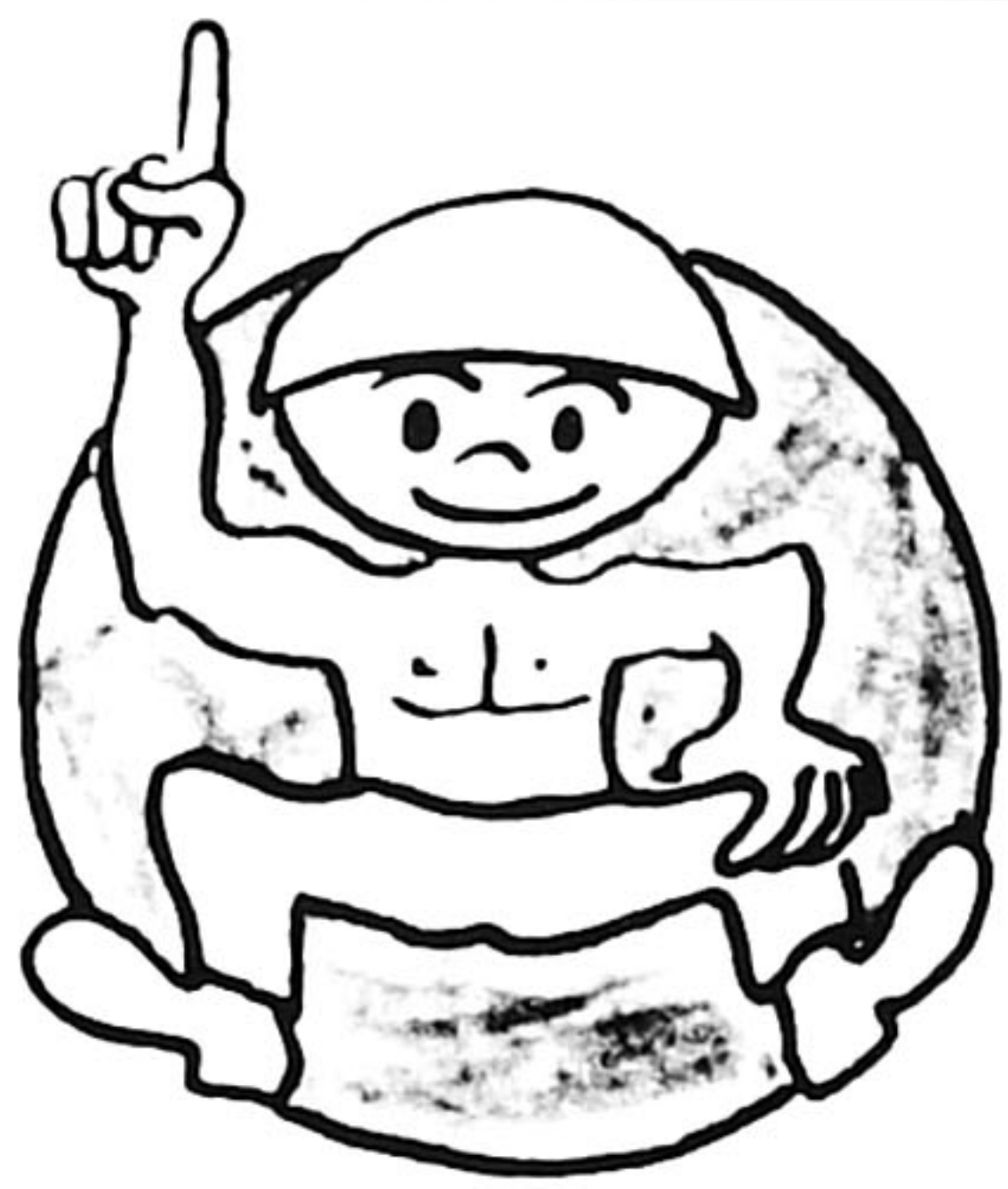
Sliert van lijmdeeltjes

De eerste opmerkelijke eigenschap is het

gedrag van deze theorie onder schaaltransformaties. De meeste deeltjetheorieën vertonen de eigenschap dat op grote afstanden de krachten tussen de deeltjes door vacuümpolarisatie worden afgeschermd. Omgekeerd, op zeer kleine afstanden worden de 'naakte' ladingen gevoeld die sterker zijn dan op grotere afstand, dus op kleine schaal zijn de interacties sterker. Onze theorie echter is één van de weinige uitzonderingen daarop. Uit een berekening blijkt dat de vacuümpolarisatie negatief is, en dus zijn de interacties op kleinere schaal zwakker en op grotere afstanden sterker. Nu is de vacuümpolarisatie zelf ook weer evenredig met de interactiesterkte, dus op grote afstanden nemen de effectieve ladingen zéér sterk toe. De mogelijkheid waar wij nu op gokken is dat de kracht tussen twee kleurladingen als functie van hun afstand niet blijft afnemen zoals de Coulombkracht, maar vanaf zeker moment constant blijft. Op plastische wijze stellen wij ons voor dat er ongeacht de afstand tussen de kleurladingen, een sliert van lijmdeeltjes de ladingen blijft verbinden. Deze sliert mag trillingen uitvoeren en dat verklaart het succes van de trillende-snaarmodellen voor de mesonen. Het feit dat op kleinere afstanden de interacties slechts zwak zijn klopt mooi met het fenomenologische partonmodel en ook met de waarnemingen dat bij hoge-energiebotsingen eenvoudige regels gelden voor schaaltransformaties.

Vervolgens beschouwen we de symmetrie-eigenschappen van de theorie. Daar we aannemen dat ieder geïsoleerd object met kleur wettelijk verboden is, behoeven we niet te postuleren dat de quarks zeer zwaar zijn zoals in vroegere theorieën. In feite nemen we nu aan dat (in zekere zin) de op-quarks en de neer-quarks zéér licht zijn (enkele MeV) en het vreemde quark ca. 150 MeV. Dan is er een bij benadering behouden grootheid: heliceiteit of chiraliteit (projectie van de spinvector op de bewegingsvector) die een symmetriegroep van de vorm $SU(3) \times SU(3)$ impliceert. Dit is inderdaad een goede symmetrie in de hadronwereld, als we de kleine massa van het pion en het kaon verwaarlozen. Een tijdlang worstelde men met de moeilijkheid dat er nog een symmetrie zou volgen uit dit quarkmodel die in werkelijkheid niet is gerealiseerd: $U(1) \times U(1)$. Deze symmetrie zou moeten impliceren dat er een zeer licht η -deeltje zou moeten bestaan, maar de waargenomen η en η' zijn veel zwaarder dan het pion. Bij nadere bestudering echter bevat onze theorie een anomalie die deze symmetrie opheft en hoewel de sterkte van deze anomalie nog niet is berekend nemen we aan dat deze de massa van het η verklaart.

Een andere moeilijkheid wordt door deze theorie ook als vanzelf opgelost:

A
R

de oorspronkelijke quarktheorieën hadden vier quarks in plaats van twaalf en verscheidene baryons met identieke quarks waren in strijd met het Pauli-uitsluitingsprincipe. Door de quarks in drie kleuren te laten voorkomen en te eisen dat baryonen wit zijn, werd echter het baryonspectrum volledig in overeenstemming gebracht met het Pauli-principe.

Het drie-kleurenprincipe voor de quarks wordt nog op andere wijze experimenteel bevestigd: bij meting van de totale botsingsdoorsnede voor de reactie $e^+e^- \rightarrow$ hadrons. Een elementaire wet uit de partontheorie zegt dat deze reactie evenredig moet zijn met de som van de kwadraten van de ladingen van de quarks. Zonder drie-kleurenprincipe zou het experimenteel bepaalde bedrag een factor drie groter zijn dan het theoretische. Nu echter is er overeenstemming. (Bij hogere energie lijkt het experiment een groter getal te geven; dit is een aanwijzing dat er nieuwe, zeer massieve deeltjes te verwachten zijn.)

De hier beschreven theorie heeft voorts van theoretisch oogpunt gezien de belangrijke eigenschap dat zij praktisch uniek is: er kan weinig aan veranderd worden. De enige willekeurige parameters zijn één koppelingsconstante en de massa's van de quarks. In principe moet alles hieruit volgen: de massa's van alle hadronen en al hun verstrooiingsmatrices. Theoretisch kun je nog wel een Yukawa-deeltje aan het systeem toevoegen, maar diens interacties zouden worden afgeschermd door vacuumpolarisatie en kunnen daarom nooit een groot effect hebben.

De nieuwe theorie lijkt in vele opzichten op de quantumelektrodynamica indien men 'elektrische lading' vervangt door het meer gecompliceerde systeem van kleur-ladingen. Vandaar de naam 'quantumchromodynamica' (het Griekse $\chi\rho\omega\mu\alpha$ = kleur). De theorie is in zoverre superieur aan de oudere fenomenologische theorieën dat er een exact te formuleren storingsreeks bestaat. Echter, deze reeks convergeert alleen voor processen waarvoor een kleine afstandsschaal en een kleine tijdsschaal geldt en dan convergeert hij nog maar tijdelijk: mathematisch gezien is diver-

De vier quarkgeuren of -smaken: op, neer, vreemd en charme, zoals die worden gezien door A. de Rújula, bekend door zijn onderzoekingen op het gebied van de quantumchromodynamica. Om geheel tot zijn recht te komen had dit plaatje uiteraard in kleur moeten worden afgedrukt.

gentie gegarandeerd wanneer de reeks erg ver zou worden voortgezet.

Hier schuilt natuurlijk een ernstige moeilijkheid: hoewel onze theorie nauw verwant is aan de ongelofelijk nauwkeurige quantumelektrodynamica, kunnen we niets erin op één systematische manier uitrekenen. Het is verleidelijk dit niet als een fundamentele tekortkoming te zien, want als de bewegingsvergelijkingen in principe bekend zijn en als we precies weten hoe de deeltjes zich in korte tijdsschalen over korte afstanden bewegen, zou dan het lange-afstandsgedrag niet in beginsel moeten vaststaan? Volgen niet uit de eigenschappen van het H_2O -molecuul (kleine afstandsschaal) in beginsel ook de eigenschappen van water (grote afstandsschaal)?

Gevaar

Het gevaar van deze redenering werd echter door een recente theoretische ontdekking onderstreept. Er blijkt een verschijnsel te zijn in ijktheorieën in het algemeen en in quantumchromodynamica in het bijzonder dat nooit is af te leiden uit de storingsreeks omdat het exponentieel afneemt voor kleinere koppeling. Het verschijnsel dat de oorzaak is van de grote massa van het η -deeltje wordt beschreven door een nieuwe *willekeurige* parameter, in de vorm van een hoek ϑ . Daar echter deze hoek ϑ een violatie van pariteitsbehoud in de sterke wisselwerkingen zou beschrijven, concluderen we uit experimentele gegevens dat $|\vartheta|$ zéér klein moet zijn.

De vragen die we nu moeten stellen zijn van tweeërlei aard:

a) Is de theorie wel volledig gedefinieerd door de ijktheorie-vergelijkingen? Is de parameter ϑ de laatste verrassing van dit type of kunnen we nog meer willekeurige parameters verwachten? Wellicht zijn er oneindig veel willekeurige parameters en dan zouden we een geheel nieuwe theorie nodig hebben om die vast te leggen.

b) Gesteld dat onze theorie formeel geheel sluitend is, hoe moeten we dan de massa's en verstrooiingsmatrices van de hadronen berekenen? We weten dat de storingsreeks ontoereikend is.

Het zijn vooral nevelige kwesties die tot grote aantallen publikaties aanleiding geven en deze spant wel de kroon. Dikwijls zonder al te duidelijke vraagstelling of rechtvaardiging worden grote aantallen intuïtieve of empirische modellen gelanceerd en we zijn weer beland in het rijk der fenomenologie. De vragen zoals ik ze hierboven heb gesteld, worden echter niet beantwoord door oncontroleerbare aannamen of ongerechtvaardigde benaderingen. Niettemin heb ik goede hoop dat nauwkeurige analyse van de theorie nieuw licht op deze problemen kan werpen. De eerder genoemde ontdekking van een verschijnsel dat niet uit de gewone storingsreeks volgt, is misschien slechts het begin van een dieper inzicht in het mathematische karakter van de theorie. Het is heel wel denkbaar dat nieuwe verbanden gevonden zullen worden tussen deze sterke-interactietheorie en de andere ijktheorieën voor elektromagnetische en zwakke interacties. Tot op heden is het een volledig mysterie, waarom de massa's van de op- en neerquarks van dezelfde orde zijn als de elektronmassa en waarom het vreemde quark ongeveer even zwaar is als het muon.

Een theorie wordt waardevoller indien zij gemakkelijker weerlegd kan worden door een experimentele toets. Voorzover we de theorie nu begrijpen doet zij nauwkeuriger uitspraken bij hogere energieën (waar de effectieve tijd- en lengteschaal kleiner zijn) mits langedracht-interacties voor en na de eigenlijke botsingen geëlimineerd kunnen worden. Dat is mogelijk bij diep-inelastische inclusieve verstrooiing van muonen aan protonen, bijvoorbeeld. Nog mooier zou het zijn, indien nieuwe, zeer zware quarks worden ontdekt, liefst in de vorm van een nieuw ψ - of J -deeltje, hetwelk te detecteren zou zijn in experimenten zoals dat van Ting in Brookhaven. Het zal duidelijk zijn dat apparaten die zeer grote energie kunnen opwekken, zoals het SPS, in dit opzicht van onschatbare waarde zullen zijn.