

Quantum Chromodynamics at WorkEuropean Research Council
Scientific Council**Waar gaat dit ERC voorstel over?**

De materie in onze wereld inclusief de zichtbare materie in het heelal bestaat uit atomen en hun bestanddelen, de atoomkernen en elektronen. De atoomkernen zijn opgebouwd uit nucleonen, positief geladen protonen en neutronen, die geen elektrische lading dragen. Nucleonen zijn erg klein, met een straal iets minder dan 1 femto-meter (dat is 10^{-15} meter of voluit 0,000 000 000 000 001 meter). In de atoomkern zitten de nucleonen min of meer op elkaar gepakt (afmetingen van 1 - 10 fm), terwijl de lading in een atoom geneutraliseerd wordt door de elektronen die in quantumbanen zitten met afmetingen van de orde van 10^{-10} meter (0.1 nano-meter). Een waterstofatoom bestaat uit een enkel proton en een elektron. Helium bestaat uit een atoomkern met twee protonen en twee neutronen (samen ook wel een alpha-deeltje genoemd) en twee elektronen. Zuurstof heeft een atoomkern bestaande uit 8 protonen en 8 neutronen en 8 elektronen complementeren het atoom. Deze atomen zijn weer de bouwstenen van moleculen zoals H_2O (water) en een enorm aantal andere mogelijke chemische stoffen.

De krachten in een atoom zijn de aantrekkende en afstotende krachten tussen de elektrische ladingen in de atoomkern en de elektronen. Zelfs tussen neutrale atomen blijven deze krachten een rol spelen in de vorm van het uitwisselen of delen van elektronen tussen de atomen. Een belangrijk ingrediënt in de atomaire wereld komt van de spin van de deeltjes. Nucleonen en elektronen gedragen zich als minuscule tolletjes met de minimale hoeveelheid draaiing (impulsmoment). De enige mogelijke variatie in de tolbeweging is dat de deeltjes linksom of rechtsom kunnen draaien (ook wel linkshandig en rechtshandig genoemd). Deze quantisatie van de draaiing is ideaal geschikt om ze als een 'nul' of 'een' in een computer te gebruiken. Dat ligt ten grondslag aan het werk aan quantum computers. Voor ons, illustreert het hoe een paar simpele bouwstenen (met een lading en twee mogelijke spintoestanden) een enorme complexiteit kunnen opbouwen.

De theorie van de elektrische en magnetische krachten in de atomaire wereld wordt beschreven binnen het theoretische raamwerk van de quantumelektrodynamica (QED). Dit is de quantum versie van de theorie van Maxwell voor elektromagnetisme. De krachten worden beschreven via de uitwisseling van fotonen (licht-quanta) tussen geladen deeltjes. De theorie is in staat om met verbazingwekkende nauwkeurigheid berekeningen en voorspellingen te doen, zoals de berekening van het magnetisch moment van een elektron tot 14 decimalen, ook al vereiste dit vele jaren van theoretische berekeningen en het gebruik van supercomputers.

Terug naar het voorstel, wat niet direct te maken heeft met de elektrodynamica maar met een ander soort krachten, die daar echter verwantschap mee vertonen. Deze krachten werken in de subatomaire wereld binnen en tussen de nucleonen. Nucleonen blijken zelf weer te bestaan uit twee soorten quarks, up quarks met lading $+2/3 e$ en down quarks met lading $-1/3 e$ (vergelijk dit met de lading $-e$ van een elektron en $+e$ van een proton). Twee up quarks en een down quark vormen een proton, twee down quarks en een up quark vormen een neutron. De belangrijkste krachten tussen de quarks zijn echter niet de elektrische krachten, maar komen van een nieuw soort lading welke de naam kleurlading heeft gekregen. Deze lading komt namelijk in drie soorten geassocieerd met drie kleuren, want net als bij kleuren levert een combinatie van drie verschillend 'gekleurde' quarks een neutrale (kleurloze) toestand op. Net als neutrale atomen elkaar voelen, zo voelen kleur-neutrale nucleonen elkaar door de uitwisseling of het delen van gekleurde quarks en hun anti-deeltjes.

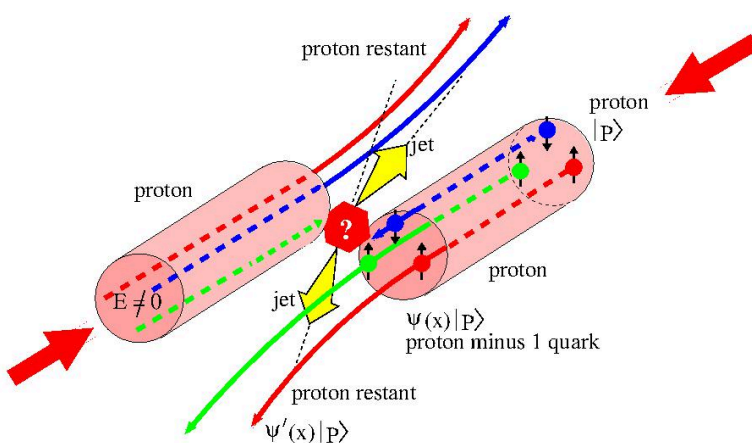
Sinds de jaren '70 bestaat er ook een raamwerk voor deze krachten dat bekend staat als de quantumchromodynamica (QCD) en in pracht niet onderdoet voor de quantumelektrodynamica. Het beschrijft de krachten via de uitwisseling van gluonen tussen kleurladingen. Gluonen transporteren kleur maar om dat te doen voor drie verschillende kleuren en ook nog eens drie tegengesteld anti-kleuren moeten gluonen zelf ook 'gekleurd' zijn (waarin ze dus wezenlijk verschillen van fotonen die zelf geen elektrische lading dragen). Gluonen kunnen daarom ook onderling weer gluonen uitwisselen wat een enorm web van krachten veroorzaakt. Dit creëert bubbels waar geen kleur uit kan ontsnappen, behalve in de vorm van nieuwe deeltjes zoals pionen, die bestaan uit een quark en een antiquark met tegengestelde kleurladingen. De uitwisseling van pionen is dan ook de manier waarop de quarks en antiquarks tussen nucleonen pendelen. Afgezien van het feit dat ze opgesloten zitten, blijken de quarks binnen in een nucleon wel nagenoeg ongehinderd te kunnen bewegen. Ze bewegen bovendien met praktisch de snelheid van het licht. De massa's van up en down quarks vormen maar ongeveer 1% van de massa van een proton, iets zwaarder maar in orde van grootte vergelijkbaar met de massa van het elektron. Het is de kinetische energie van de quarks die de rust-energie Mc^2 van het proton

oplevert. De quarks in een proton hebben niet alleen elektrische en kleur-ladingen, maar net als elektronen hebben ze ook een spin, ook weer de kleinst mogelijke met twee opties (links- en rechthandig). Ook de gluonen hebben spin, net als bij fotonen polarizatietoestanden genoemd. Deze wirwar van opgesloten bewegende spinnende quarks en gepolarizeerde gluonen maakt het proton.

De up en down quarks en de leptonen, met naast elektron ook het nog niet genoemde elektron-neutrino, vormen samen de eerste generatie van elementaire deeltjes. Het is deze generatie waaruit de ons bekende materie in het heelal is opgebouwd. Het neutrino speelt een rol bij het zwakke verval van deeltjes door de uitwisseling van nog weer andere krachtdeeltjes, die in tegenstelling tot massaloze fotonen en gluonen, hun massa ontleen aan het Higgs veld. Het recentelijk met grote waarschijnlijkheid ontdekte Higgs deeltje is een manifestatie van dit veld en dat is een belangrijke stap in de zoektocht naar de fundamentele van het standaardmodel van de deeltjesfysica, dat het geheel van de krachten beschrijft. Deze zoektocht was al geïnitieerd met de ontdekking dat er drie generaties van quarks en leptonen bestaan. De tweede en derde generatie bevatten quarks en leptonen met zwaardere massa's die maar heel kort leven. Ze zijn ontdekt doordat ze in versnellers opnieuw gecreeerd konden worden.

Om te begrijpen wat er gebeurt in versnellers waar elektronen op hun antideeltjes, de positronen, elektronen op protonen, of, zoals in de Large Hadron Collider bij CERN, protonen op protonen botsen, worden berekeningen gedaan gebruikmakend van het standaardmodel voor de elementaire deeltjesfysica. QED en QCD zijn een onderdeel van dat model. Voor elektronen, fotonen, quarks en gluonen kunnen binnen dat model precieze berekeningen worden gedaan, maar de botsende deeltjes zijn geen quarks maar protonen, net zoals de deeltjes die in de detectoren gezien worden zijn samengesteld uit drie quarks of quarks en antiquarks. De berekeningen werken omdat de botsende en uitgewisselde deeltjes zo'n hoge energieën hebben dat hun golflengtes veel kleiner zijn dan de afmetingen van het proton, waarbinnen de quarks en gluonen min of meer vrijelijk bewegen.

Nu komen we bij het centrale punt van het ERC voorstel. Ook al bewegen de quarks en gluonen min of meer vrij, dat wil niet zeggen dat hun specifieke vrijheidsgraden willekeurig verdeeld zijn. Er blijken interessante verbanden te bestaan tussen met name de beweging loodrecht op de richting van de botsende deeltjes en de spins en polarizaties van quarks en gluonen. Deze correlaties zijn het specifieke veld van expertise van de PI. Deze correlaties zijn aan de ene kant input voor fysici die de substructuur van nucleonen willen modelleren of berekenen, bijvoorbeeld door gebruik te maken van grootschalige computerberekeningen waarin QCD wordt gesimuleerd op een rooster van punten. Maar omgekeerd kan de informatie over correlaties in de quark- en gluonstructuur van nucleonen ook worden gebruikt om versnellers effectief te gebruiken als gespecialiseerde quark-quark, quark-gluon of gluon-gluon botsers. Bijvoorbeeld, gluon-gluon botsingen kunnen het Higgs veld aanslaan via een tussenstap waarbij een zwaar quark-antiquark paar wordt gevormd. In eerste instantie zijn de spins en polarizaties van quarks en gluonen hierbij niet van belang. Knal protonen gewoon hard genoeg op elkaar. Maar stel je eens voor dat je in staat bent om alle vrijheidsgraden te gebruiken. Dat geeft je een unieke gelegenheid om een beter inzicht in het proton te krijgen en meer gedetailleerd de fundamentele van het standaardmodel te onderzoeken. Net als voor medische beeldvorming nieuwe methodieken worden ontwikkeld om weefsel te onderzoeken en quantumoptica gebruikt wordt op de nano-schaal, zo wordt dit project gedreven door nieuwsgierigheid en wil het theoretisch onderzoek verrichten naar nieuwe manieren om er achter te komen wat er gebeurt op de atto-schaal van 10^{-18} meter en zo te ontdekken hoe het weefsel van het universum in elkaar zit.



Figuur: correlaties tussen gekleurde quarks en gluonen, hun polarizaties en hun banen binnen in de protonen geven aanleiding tot heel specifieke hoekverdelingen voor de geproduceerde jets, die weer informatie kunnen geven over wat er in de botsingen gebeurt. Omdat de protonen zelf geen polarizatie hebben, moet hierbij gebruik gemaakt worden van speciale correlaties waarbij zowel spins, baan-bewegingen als kleurladingen van de quarks en gluonen een rol spelen.