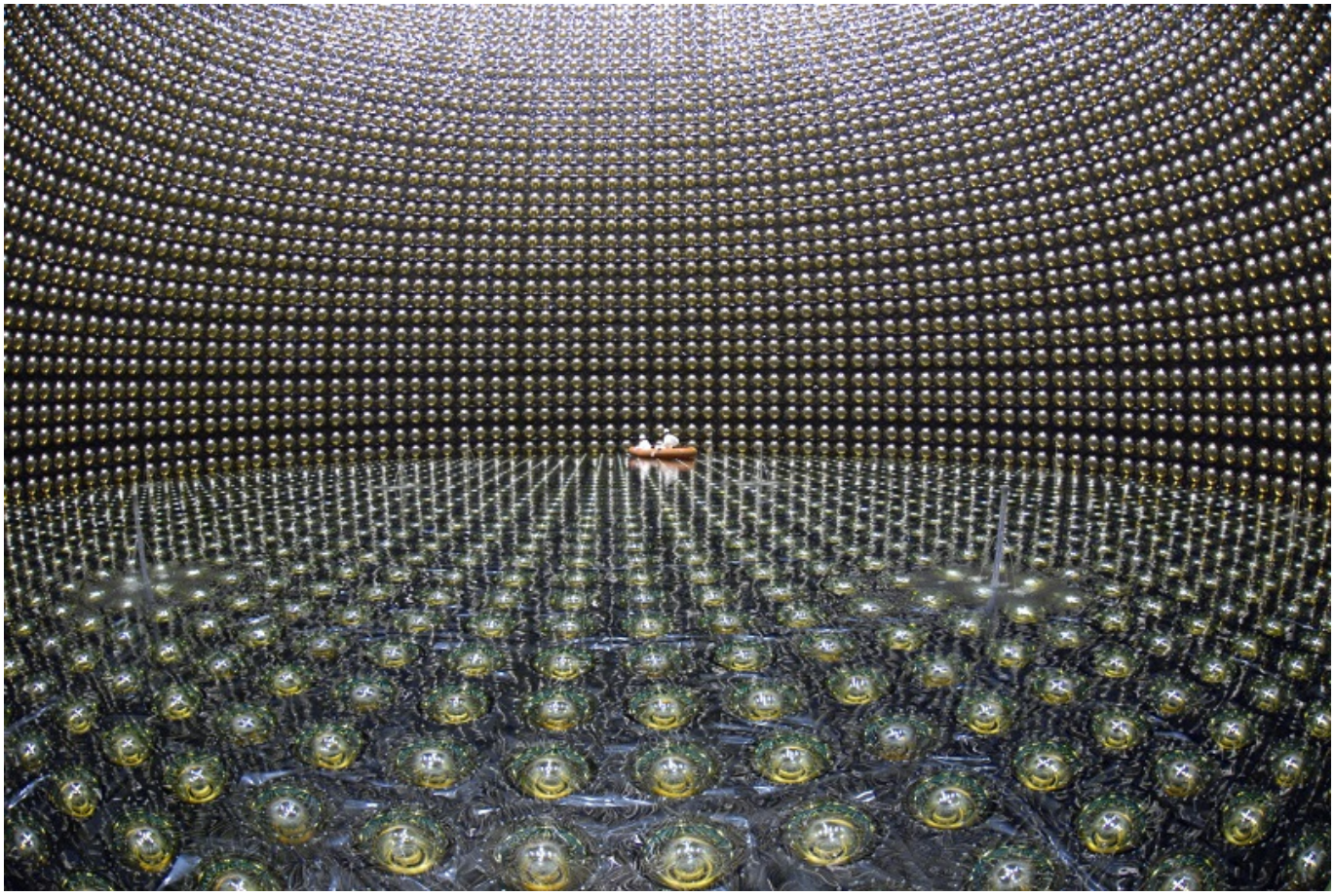
Protonverval: op zoek naar nieuwe fysica

Protonen horen tot de belangrijkste bouwstenen van de wereld om ons heen – waaronder wijzelf. Gelukkig vallen deze deeltjes niet zo snel uit elkaar, anders zou er niet veel van ons overblijven. Tot nu toe is het verval van protonen zelfs nog nooit waargenomen. Desalniettemin zou een waarneming van protonverval een frisse blik op onze modellen voor deeltjesfysica geven. Binnen het huidige standaardmodel is verval van protonen namelijk niet mogelijk, maar in uitbreidingen daarvan met nog onontdekte deeltjes zou dit wel kunnen! Dit maakt de zoektocht naar protonverval bijzonder interessant.

Laten we beginnen met de bouwstenen van protonen zelf, want ook protonen zijn geen fundamentele deeltjes: ze zijn samengesteld uit *quarks*. Dit zijn fundamentele deeltjes die invloed op elkaar uitoefenen via de sterke kernkracht, vaak zó sterk dat de quarks samenbundelen tot grotere deeltjes zoals protonen en neutronen. Quarks komen voor in verschillende soorten, ook wel “smaken” genoemd: up, down, charm, strange, top en bottom. Deze naamgeving lijkt te suggereren dat quarks in paren komen: de up-quark heeft bijvoorbeeld de down-quark als tegenhanger. De namen zijn bewust zo gekozen, omdat quarks in dezelfde *generatie* soortgelijke eigenschappen hebben, zoals bijvoorbeeld hun massa. Hierin zijn de up- en down-quark veruit het lichtst, terwijl de top- en bottom-quark zó zwaar zijn dat we ze eigenlijk nauwelijks tegenkomen. Materie die is opgebouwd uit quarks wordt vervolgens in twee soorten onderverdeeld: *mesonen*, deeltjes die zijn samengesteld uit een quark en een anti-quark, en *baryonen*, deeltjes die zijn samengesteld uit drie quarks. Een proton blijkt een baryon te zijn, opgebouwd uit twee up-quarks en een down-quark. Dit maakt het proton tot het lichtste baryon dat er bestaat.



Afbeelding 1. De super-Kamiokande-detector. Afbeelding: super-Kamiokande.

Met behulp van detectoren proberen natuurkundigen nu onderzoek te doen naar het verval van protonen. Zo staat er in Japan een detector die de Super-Kamiokande heet. Oorspronkelijk was deze detector zelfs uitsluitend bedoeld om het verval van protonen en nucleonen te bestuderen, maar hij bleek ook bijzonder succesvol te zijn in het detecteren van neutrino's. De Super-Kamiokande is een enorm bassin gevuld met gepurificeerd water, omringd door meetapparatuur die de vervalproducten van de protonen probeert te meten, via onder andere hun Cherenkovstraling. De detector is afgeschermd van kosmische en aardse radioactieve straling, zodat er geen signaal van buitenaf per ongeluk voor protonverval kan worden aangezien. Zo bevindt de detector zich bijvoorbeeld een kilometer diep onder de grond in een voormalige mijn.

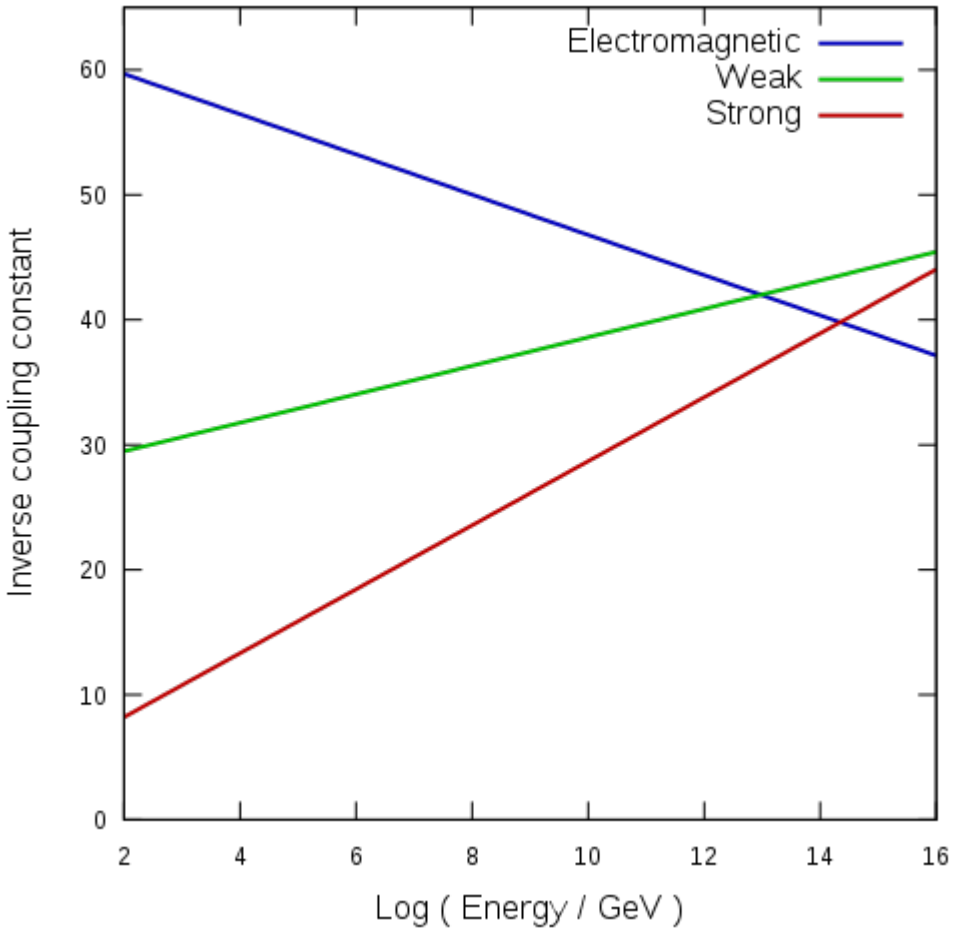
Tot nog toe hebben wetenschappers met deze detector van nog geen enkel proton een verval waargenomen. De kans dat een enkel proton vervalt is dus in elk geval heel klein: uit het uitblijven van metingen hebben natuurkundigen kunnen afleiden dat protonen gemiddeld minimaal 10^{34} jaar lang stabiel zijn, terwijl de leeftijd van ons heelal op maar 14 miljard jaar

wordt geschat! In eerste instantie klinkt dit misschien wat verwarrend, want de vervaltijd van protonen is hiermee vele ordes groter dan de tijd dat deze deeltjes überhaupt hebben kunnen bestaan. De verklaring zit hem in het feit dat het verval van deeltjes een *kansproces* is, aangezien deeltjesverval door quantummechanica wordt beschreven. Dit betekent dat, als je ruwweg 10^{34} protonen hebt, er gemiddeld één deeltje per jaar moet vervallen. Dit getal is vergelijkbaar met het aantal protonen dat in dit enorme bassin zit: het water in de detector is natuurlijk opgebouwd uit protonen en neutronen.

Als we het mogelijke verval van protonen binnen het huidige standaardmodel proberen te beschrijven, komen we er al snel achter dat dit eigenlijk helemaal niet lukt. Binnen dit model moet bij een botsingproces namelijk het totaal aantal baryonen altijd gelijk blijven. Dit betekent dat een proton moet vervallen in een ander baryon, om zowel voor als na het vervalproces één baryon te hebben. We weten echter ook dat energie altijd behouden moet blijven in fysische processen, wat betekent dat een proton alleen uiteen kan vallen in *lichtere* baryonen. Aangezien protonen de lichtste baryonen zijn, volgt dan dat er geen verval mogelijk lijkt te zijn.

Waarom zijn we dan tóch geïnteresseerd in het verval van protonen, als dit voor zover we weten helemaal niet mogelijk lijkt? De reden is dat verval wél mogelijk lijkt in uitbreidingen van onze huidige modellen voor deeltjesfysica. Sterker nog, protonverval blijkt een karakteristieke eigenschap te zijn in theorieën die de fundamentele krachten proberen de *unificeren*. In onze huidige beschrijving van de natuurkunde zijn er vier fundamentele krachten: de zwaartekracht, de elektromagnetische kracht, de zwakke en de sterke kernkracht. Hiervan worden de elektromagnetische kracht en de kernkrachten op een vergelijkbare manier beschreven door dezelfde wiskundige structuur, namelijk groepentheorie. Op zichzelf roept dit al de vraag op of er binnen dit raamwerk ook een manier is om de verschillende krachten te beschrijven als onderdelen van één overkoepelende kracht, op basis van één wiskundige ‘groep’. Daarbovenop blijkt dat de sterktes van de drie genoemde krachten variëren met de energie die botsende deeltjes hebben, en dat deze sterktes naar elkaar toe bewegen als de energieën hoger worden. Ook het ‘even groot worden’ van de krachten maakt het voor natuurkundigen aantrekkelijk om te speculeren hoe deze krachten precies kunnen worden gecombineerd. Tot op een zekere hoogte is dit zelfs al gelukt, want we weten al dat de elektromagnetische en de zwakke

kernkracht gecombineerd kunnen worden tot de zogenaamde elektrozwakke kracht. Of we de sterke kernkracht ook aan dit plaatje kunnen toevoegen, is een vraag die protonverval voor ons kan beantwoorden.



Afbeelding 2. Krachten en energie. Naarmate de energie van botsende deeltjes groter wordt (horizontale as) komen de groottes van de verschillende natuurkrachten (verticale as) dichter bij elkaar. Betekent dit dat er in feite sprake is van één kracht met drie verschijningsvormen? Afbeelding: Victor Blacus.

Hoe werkt protonverval dan precies in deze geünificeerde theorieën? De bouwstenen voor baryonen in het standaardmodel waren alleen quarks, maar in een theorie die de zwakke, sterke en elektromagnetische kracht unificeert vallen quarks en bijvoorbeeld elektronen onder dezelfde noemer. Voorheen konden quarks door botsing- en vervalprocessen alleen in andere quarks veranderen, maar in deze nieuwe theorieën is een transformatie in deeltjes zoals elektronen dan ook theoretisch mogelijk. Dit betekent dat een proton dan bijvoorbeeld in een positron (de positief geladen tegenhanger van het elektron) en een pi-meson (een meson opgebouwd uit een een up- en anti-down-quark) uit elkaar mag vallen, terwijl een

dergelijk verval in het standaardmodel eerst niet kon. Doordat detectoren zoals de Super-Kamiokande dit soort vervalprocessen nog niet hebben waargenomen, worden natuurlijk wel hoge ondergrenzen gesteld aan de stabiliteit van protonen. Dat is niet alleen een probleem, maar ook een hulpmiddel: deze grenzen kunnen vervolgens omgezet worden in eisen waar deze nieuwe theorieën aan moeten voldoen. Sterker nog, sommige van deze modellen zijn daardoor zelfs al van tafel geveegd!

Kortom, protonverval geeft ons een interessante kijk op wat voor nieuwe natuurkunde we kunnen verwachten. Detectie van dit verval zou een goede hint zijn dat de verschillende krachten die wij waarnemen eigenlijk voortkomen uit één en dezelfde fundamentele kracht, beschreven door een overkoepelend wiskundig raamwerk. In Japan denken ze er zelfs over na om een opvolger van de Super-Kamiokande, de Hyper-Kamiokande, te bouwen, die vervaltijden tot wel 10^{35} jaar zou kunnen meten. Of dit tot meer duidelijk leidt rond het verenigen van de fundamentele krachten blijft – net zoals op het verval van de protonen – een kwestie van afwachten.