

# Populaire samenvatting

## Onderdrukte betoverde *B*-meson vervallen

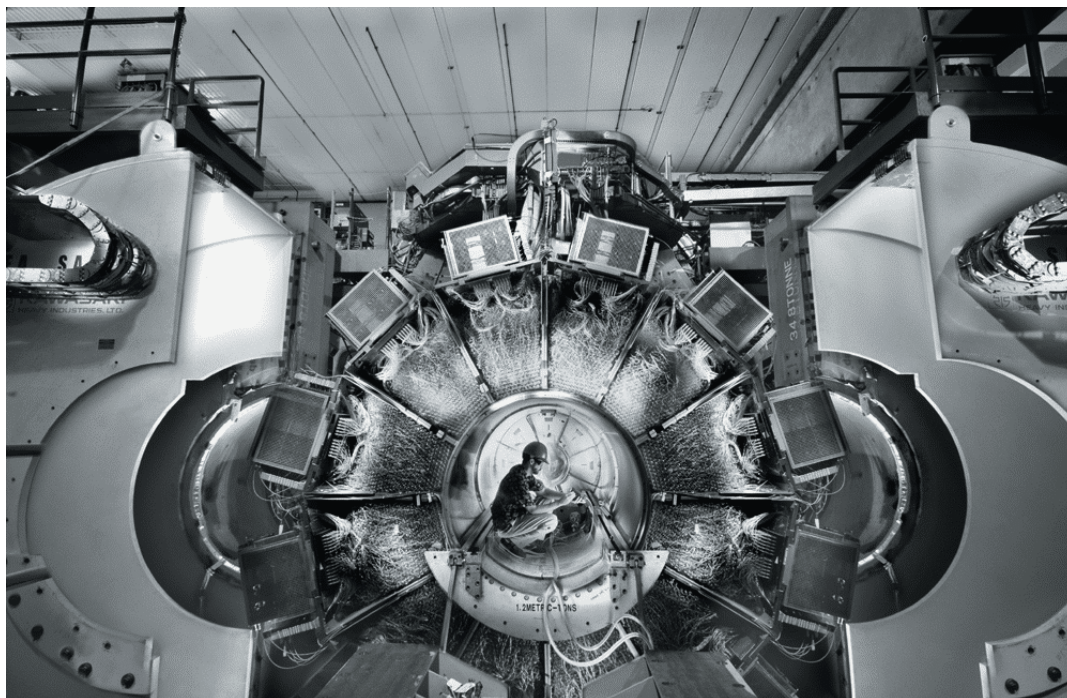
In de komende pagina's zal ik proberen om enige uitleg te geven over dit proefschrift. Allereerst begin ik met het opzetten van het raamwerk van de elementaire deeltjesfysica. Hierna zal ik een korte introductie geven van het *BABAR* experiment. Tenslotte volgen een samenvatting van de onderzoeksvraag en het onderzoek dat beschreven wordt in dit proefschrift.

### Elementaire deeltjesfysica

Het zal velen bekend zijn dat de wereld om ons heen bestaat uit kleine deeltjes. Op moleculair niveau wordt bepaald wat voor eigenschappen verschillende stoffen hebben. De moleculen zelf zijn weer opgebouwd uit atomen, waarvan er op dit moment 112 bekend zijn. Die atomen bestaan op hun beurt uit een kern en elektronen die daaromheen draaien. Een elektron is een elementair deeltje, dat wil zeggen we kunnen het niet langer opsplitsen. De atoomkern kan echter nog wel verder worden opgesplitst in zogeheten protonen en soms ook neutronen. Zowel de protonen als neutronen zijn opgebouwd uit quarks. Van quarks denken we dat ze elementair zijn, dat we ze niet meer kunnen opdelen.

Protonen en neutronen zijn allebei opgebouwd uit twee verschillende soorten quarks, uit 'op' en 'neer' quarks (up en down in het Engels). Eigenlijk bestaat alles wat we op aarde hebben uit elektronen en op en neer quarks. We kennen nog vier andere quarks: tover, vreemd, top en bodem (charm, strange, top, bottom). Deze deeltjes kunnen we maken in deeltjesversnellers. Deeltjes die een toverquark bevatten noemen we betoverd, vandaar het woord in de titel.

Een positron is een anti-elektron. Het heeft alle eigenschappen van een elektron, zoals de massa, maar het deeltje heeft precies de omgekeerde lading. Een elektron heeft een negatieve lading ( $-1e$ ) en een positron dus een positieve lading ( $+1e$ ). Positronen zijn voor het eerst ontdekt in straling die uit de ruimte komt. We kunnen de lading van deeltjes bepalen door ze in een magnetisch veld af te buigen. Als we elektronen materie noemen, dan zijn positronen antimaterie. Positronen zijn geen lang leven beschoren op aarde, zodra ze in contact komen met materie gaan ze een reactie aan en komt er warmte en licht vrij.

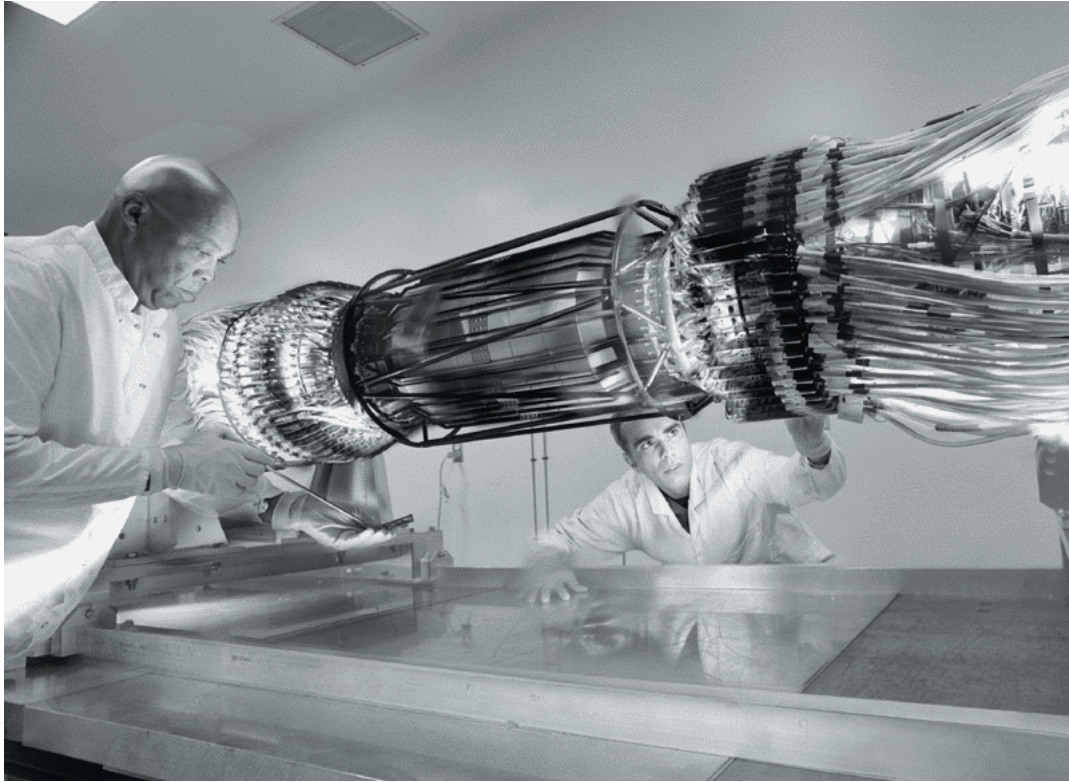


**Figuur 1:** De *BABAR* detector tijdens de opbouwfase.

Er bestaan ook antiquarks. Elk van de 6 soorten quarks heeft een eigen antitype. Dus we hebben ook een anti-op en een anti-neer quark. Een proton bestaat uit 2 op quarks en 1 neer quark. Samen geeft dat een positieve lading van  $+1e$ . Als we nu elk van de quarks vervangen door antiquarks krijgen we een deeltje dat veel lijkt op een proton, maar met precies de omgekeerde lading van  $-1e$ . Een antiproton dus! Het grappige is dat we dit ook kunnen doen met een neutron, ondanks dat deze geen lading draagt. Een neutron bestaat uit 1 op quark en 2 neer quarks. Als we deze vervangen door antiquarks worden het antineutronen. Op het eerste gezicht zijn er geen verschillen te zien tussen het neutron en zijn antideeltje. Maar het is toch mogelijk om ze te onderscheiden.

In het leven van de quarks spelen verschillende krachten een rol. Er is de sterke kracht, die quarks bij elkaar houdt en ze tot bijvoorbeeld protonen en neutronen vormt. Dan is er de elektrische kracht die er voor zorgt dat geladen deeltjes elkaar afstoten of juist aantrekken. De zwaartekracht speelt voor de kleine quarks nauwelijks een rol. Maar er is ook nog de zwakke kracht. De zwakke kracht kan ervoor zorgen dat quarks om worden gezet in andere quarks, dus bijvoorbeeld een op quark kan veranderen in een neer quark. Er wordt dan nog een elementair (geladen) deeltje uitgezonden: een zogeheten *W*-boson. Dit boson is niet stabiel en vervalt naar bijvoorbeeld een elektron met een antineutrino deeltje.

Ook een vrij neutron is instabiel. Het vervalt door de zwakke kracht. Eén van de twee neer quarks verandert hierdoor in een op quark. Het neutron verandert dan in een proton! Bij dit verval wordt vaak een elektron en een antineutrino deeltje uitgezonden.



**Figuur 2:** De binnenste detectorlaag van de *BABAR* detector vlak voordat deze werd geplaatst. De botsingen vinden plaats binnenin deze detector.

Neutrino's en hun antideeltjes zijn nogal moeilijk te zien, maar elektronen en positronen zijn door hun lading en massa gemakkelijk waar te nemen. Het verval kunnen we opschrijven als  $n \rightarrow p^+ e^- \bar{\nu}_e$ . Door dit verval kunnen we onderscheid maken tussen neutronen en antineutronen. In een antineutron zou namelijk het antineer quark zijn veranderd in een anti-op quark en zou het antineutron dus naar een antiproton zijn vervallen. In het proces was dan niet een elektron maar een positron ontstaan!

### Het *BABAR* experiment

Het *BABAR* experiment bestaat uit twee onderdelen, de PEP-II versneller en de *BABAR* detector, zie ook figuur 1. Het gehele experiment staat bij de Stanford Universiteit in Menlo Park in de staat Californië van de Verenigde Staten van Amerika. In de PEP-II versneller worden elektronen en positronen met grote snelheid in botsing gebracht. De energie die hierbij vrijkomt wordt heel precies afgeregeld op de resonantie van het  $\Upsilon(4S)$  deeltje en bij sommige botsingen wordt er een dergelijk deeltje gemaakt. Het deeltje bestaat uit een bodem en een antibodem quark. Een deeltje dat uit een quark en antiquark bestaat noemen we een meson.

Het  $\Upsilon(4S)$  deeltje is niet stabiel en vervalt naar twee  $B$  mesonen. Er bestaan geladen  $B$  mesonen (combinatie van antibodem en op) en neutrale  $B$  mesonen (antibodem en neer). Van beide type bestaan ook weer antimessen. In elk verval wordt precies een van elk type gemaakt, dus voor elk geproduceerd  $B$  meson is er ook een geproduceerd anti- $B$ -meson. De PEP-II versneller is dus eigenlijk een grote  $B$ -meson fabriek. Het experiment heeft meetgegevens verzameld van oktober 1999 tot en met april 2008 en in die tijd zijn er ongeveer 1 miljard  $B$  mesonen gemaakt.

Op de plek waar de botsingen van de versneller plaatsvinden is de *BABAR* detector gebouwd. Met de detector kunnen we de botsingen onderzoeken. Het apparaat bestaat uit verschillende onderdelen. Een van de onderdelen van de detector is afgebeeld in figuur 2. Allereerst hebben we een grote magneet die ervoor zorgt dat we de negatieve van de positieve deeltjes kunnen onderscheiden. Dan zijn er detectoren waarin de deeltjes sporen achterlaten als ze er doorheen vliegen. Vervolgens zijn er apparaten die de energie van de deeltjes meten. Alles bij elkaar kunnen we dan precies bepalen wat voor lading, massa en energie de deeltjes hebben die door de detector vliegen. Genoeg om precies te weten wat voor soort deeltjes het zijn.

## De onderzoeksvraag

Nu we weten wat voor soort deeltjes er worden gemaakt en hoe we die waarnemen zal ik vertellen wat we nu eigenlijk precies te weten willen komen.

De geproduceerde  $B$  mesonen zijn op hun beurt ook weer instabiel en vervallen onder invloed van de zwakke kracht weer in andere deeltjes. Met behulp van de  $B$  mesonen proberen we meer te weten te komen van de werking van de zwakke kracht. In de natuur lijkt de zwakke kracht onderscheid te maken tussen materie en antimaterie. Dat wil zeggen dat materie deeltjes iets anders reageren op de zwakke kracht dan antimaterie deeltjes doen. Tot nu toe is dit de enige plek in de natuurwetten die we kennen waar er verschillen zijn tussen materie en antimaterie. De andere krachten, zoals de zwaartekracht en de elektrische kracht, maken bijvoorbeeld geen onderscheid tussen de geaardheid van materie.

Een  $B$  meson kan vervallen naar verschillende combinaties van deeltjes. We kunnen niet voorspellen naar welke combinatie een enkel  $B$  meson zal vervallen. Net als dat we niet kunnen voorspellen hoeveel ogen je gooit bij een enkele worp van een dobbelsteen. Dit betekent niet dat de Natuurkunde geen exacte wetenschap meer is. Met behulp van de kwantummechanica kunnen we wel uitrekenen wat de kans is dat het  $B$  meson naar een bepaalde combinatie vervalt. Bij het uitrekenen van deze kans komt onze kennis over zowel de sterke als de zwakke kracht kijken.

Zoals ik eerder schreef willen we in het *BABAR* experiment meer te weten komen over de zwakke kracht. Maar bij de vervalsprocessen spelen ook sterke krachten een rol. Dit proefschrift gaat over een meting van een specifiek  $B$ -meson verval. Bij dit verval komen de onzekerheden die er bestaan over de werking van de sterke kracht extra naar boven. Je kunt deze meting zien als een test van onze kennis van de rekenmethodes die we gebruiken om de kansprocessen te voorspellen.

Het soort  $B$ -meson verval dat ik onderzoek in dit proefschrift is nog niet eerder

---

waargenomen. Onder de werking van de zwakke kracht vervalt het  $B$  meson naar twee andere mesonen. De ene is een  $D$  meson, die bestaat uit een tover en een anti-neer quark, en de andere een  $a_0$  meson, die bestaat weer uit een op en anti-neer quark. We schrijven dit dan als  $B^0 \rightarrow D^{(*)\pm} a_0^\mp$ . Eigenlijk zijn dit twee vervallen, de haakjes geven aan dat we ook zoeken naar een  $D^*$  meson. Het sterretje geeft aan dat de twee quarks in dit meson op een bijzondere manier om elkaar heen draaien.

Het verval,  $B^0 \rightarrow D^{(*)\pm} a_0^\mp$ , is sterk onderdrukt, wat betekent dat de kans op het proces erg klein is. De uitgerekende kans is in de orde van één op een miljoen. Door precies te meten hoe vaak het verval voorkomt testen we de rekenmethodes. Op hetzelfde moment is het interessant of we het  $B$ -meson verval vaak genoeg zien. Als dit namelijk het geval is kan er in de toekomst wellicht een erg precieze meting van een eigenschap van de zwakke wisselwerking mee worden verricht. Andere pogingen om die precieze eigenschap te meten zijn tot nog toe niet goed gelukt.

## Het onderzoek

De  $B$  mesonen zelf nemen we niet waar in de detector, wel de deeltjes waar ze naartoe vervallen. We nemen dus eigenlijk de brokstukken waar. Om te zien wat voor brokstukken we over houden in ons verval moeten we kijken naar de gevormde  $D$  en  $a_0$  mesonen. Het  $a_0$  meson vervalt naar een zogeheten pion en een eta meson, beide bestaan uit op en neer quarks. Het pion kunnen we direct waarnemen in de detector. Het eta meson vervalt naar twee fotonen (lichtdeeltjes). Het  $D$  meson kan naar allerlei toestanden vervallen. We reconstrueren in dit proefschrift 6 verschillende eindtoestanden. Een voorbeeld is een kaon-pion-pion combinatie (een kaon bestaat uit een antivreemd en een op quark). De uiteindelijke combinatie van deeltjes die in mijn  $B$ -meson verval ontstaan zijn dus: 1 kaon, 2 fotonen en 3 pionen. Dat zijn de deeltjes die we uiteindelijk in de detector waarnemen. Het lastige is nu dat deze eindtoestand ook kan worden gemaakt door andere  $B$ -meson vervallen die veel vaker voorkomen.

Om ons  $B^0 \rightarrow D^{(*)\pm} a_0^\mp$  verval ('signaal') te onderscheiden van de andere vervallen, die misschien wel duizend keer vaker voorkomen, kijken we naar verschillende eigenschappen. We bedenken allerlei criteria waar de signalen in de detector aan zouden moeten voldoen. Eerst kijken we of we kaonen, pionen en fotonen zien in de botsing. Vervolgens of we van de brokstukken de originele deeltjes kunnen reconstrueren. Bijvoorbeeld of het kaon en twee van de pionen wel van één plek in de detector afkomen. En zo bedenken we nog veel meer criteria. Door het toepassen hiervan proberen we zoveel mogelijk botsingen weg te gooien waar we niet in geïnteresseerd zijn. Maar we verliezen soms toch ook wat van onze signaalvervallen.

Om nu precies te bepalen hoe de set van criteria werkt, maken we gebruik van door de computer gesimuleerde botsingen. Zo kunnen we precies zien hoeveel van de achtergrond botsingen we kwijt raken en hoeveel signaal we overhouden. Een van de achtergrondvervallen bleek lastig te onderscheiden van de signaalvervallen met behulp van alleen de set van opgestelde criteria. Het verval heeft exact dezelfde eindtoestand als het signaalverval. In plaats van dat een pion en twee fotonen van een  $a_0$  meson afkwamen, zijn deze direct ontstaan in het verval:  $B^0 \rightarrow D^{(*)\pm} \eta \pi^\mp$ . Dit probleem hebben we opgelost

door tegelijkertijd een meting te doen van beide processen, zowel van  $B^0 \rightarrow D^{(*)\pm} a_0^\mp$  als van  $B^0 \rightarrow D^{(*)\pm} \eta \pi^\mp$ .

Uiteindelijk hebben we de volgende kansen gemeten:

$$\begin{aligned} \mathcal{K}(B^0 \rightarrow D^- a_0^+) \times \mathcal{K}(a_0^+ \rightarrow \eta \pi^+) &= (-0.11_{-0.67-0.76}^{+0.93+0.29}) \cdot 10^{-5}, \\ \mathcal{K}(B^0 \rightarrow D^{*-} a_0^+) \times \mathcal{K}(a_0^+ \rightarrow \eta \pi^+) &= (5.93_{-1.48-1.52}^{+1.64+2.22}) \cdot 10^{-5}, \\ \mathcal{K}(B^0 \rightarrow D^- \eta \pi^+) &= (13.41_{-3.25-1.94}^{+3.54+2.42}) \cdot 10^{-5}, \\ \mathcal{K}(B^0 \rightarrow D^{*-} \eta \pi^+) &= (33.91_{-5.11-5.14}^{+5.47+6.86}) \cdot 10^{-5}, \end{aligned}$$

waarbij  $\mathcal{K}$  voor kans staat. Zoals je ziet is er voor het verval  $B^0 \rightarrow D^- a_0^+$  geen positieve kans bepaald. Dit is misschien wat lastig te interpreteren maar het betekent dat we het verval niet hebben waargenomen. We hebben daarom een bovenlimiet bepaald, met 90% waarschijnlijkheid, dat de kans op het proces kleiner is dan  $2.3 \cdot 10^{-5}$ . Voor de andere vervallen,  $B^0 \rightarrow D^{*-} a_0^+$ ,  $B^0 \rightarrow D^- \eta \pi^+$  en  $B^0 \rightarrow D^{*-} \eta \pi^+$ , is dit de eerste keer dat ze zijn waargenomen.

We hebben uiteindelijk 30 botsingen gevonden waarin we het  $B^0 \rightarrow D^{*-} a_0^+$  verval kunnen reconstrueren. Dit zijn er waarschijnlijk niet genoeg om de interessante meting te doen van de zwakke kracht. Toch zou dit in de toekomst moeten worden geprobeerd. Als het wel lukt zou het een belangrijke bijdrage kunnen leveren aan de kennis van de zwakke kracht.

De gemeten kans in het  $B^0 \rightarrow D^{*-} a_0^+$  verval is tien maal hoger dan de voorspelde kans. Dit is een erg bijzonder resultaat, er zijn op dit moment geen rekenmodellen die dit kunnen verklaren. Wel zijn er processen te bedenken, waarvan we altijd dachten dat ze zeer klein waren, die kunnen bijdragen aan de kans. Helaas zijn er op dit moment geen manieren om precies te berekenen hoe groot deze bijdragen aan de kans zijn.