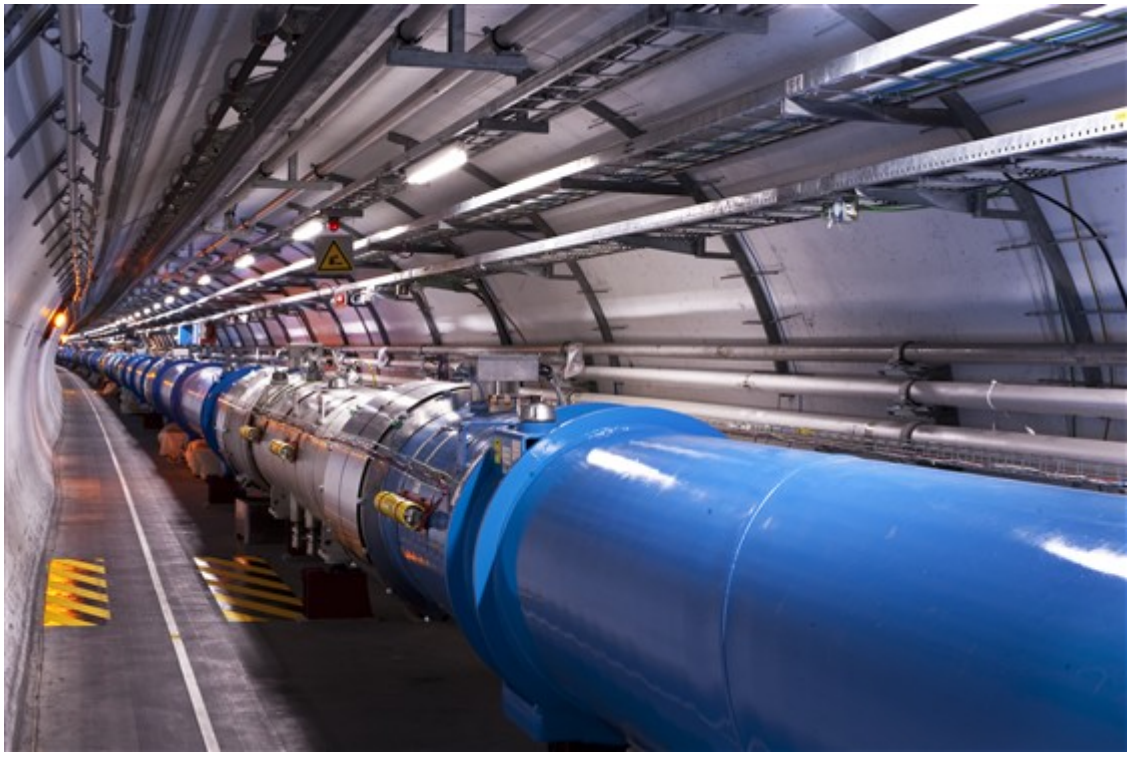
Het standaardmodel: een effectieve theorie?

Het standaardmodel van de elementaire deeltjes geeft een fantastisch nauwkeurige beschrijving van allerlei deeltjesprocessen in de natuur. Betekent dat dat dat model ook helemaal compleet is, of zou het kunnen dat we op nog kleinere schaal weer heel andere fysica aantreffen?



Afbeelding 1. De Large Hadron Collider. Een stukje van de 27 kilometer lange buis in Genève waarin deeltjes tot bijna de lichtsnelheid versneld worden, om vervolgens op elkaar te botsen. Afbeelding: CERN.

In deeltjesversnellers laten wetenschappers de fundamentele bouwstenen van onze natuur met grote snelheid op elkaar botsen om zo nieuwe deeltjes te creëren. Op de grens van Zwitserland en Frankrijk ligt de deeltjesversneller van CERN, de Europese organisatie die onderzoek doet naar fundamentele deeltjes. De data die een reeks experimenten bij het CERN oplevert, worden vaak nog jaren erna door natuurkundigen bestudeerd. Met behulp

van deeltjesversnellers zoals die van het CERN is het bestaan aangetoond van alle deeltjes die zijn voorspeld door de huidige theorie: het standaardmodel van de elementaire deeltjes. Als we al die deeltjes al hebben gevonden, dan zijn we klaar, zou je kunnen denken. Toch vinden er nog steeds experimenten plaats in CERN. Zo zijn er nog veel dingen die we kunnen leren over de deeltjes van het standaardmodel: hoe zwaar zijn ze eigenlijk als ze stilstaan? En wat voor botsingen kunnen er precies plaatsvinden?

Ook naar nieuwe deeltjes wordt nog steeds gezocht. Als die gevonden worden, betekent dat dat het standaardmodel niet voldoende meer is om de fundamentele bouwstenen van onze wereld mee te beschrijven. Om het bestaan van de nieuwe deeltjes te verklaren moet dan een nieuwe theorie bedacht worden, of moet het standaardmodel worden uitgebreid. Dit zou kunnen door het standaardmodel als een *effectieve theorie* te zien: het model beschrijft de werkelijkheid heel goed bij lagere energieën, maar wanneer je de natuurkunde van processen met hoge energieën wilt onderzoeken heb je iets nieuws nodig.

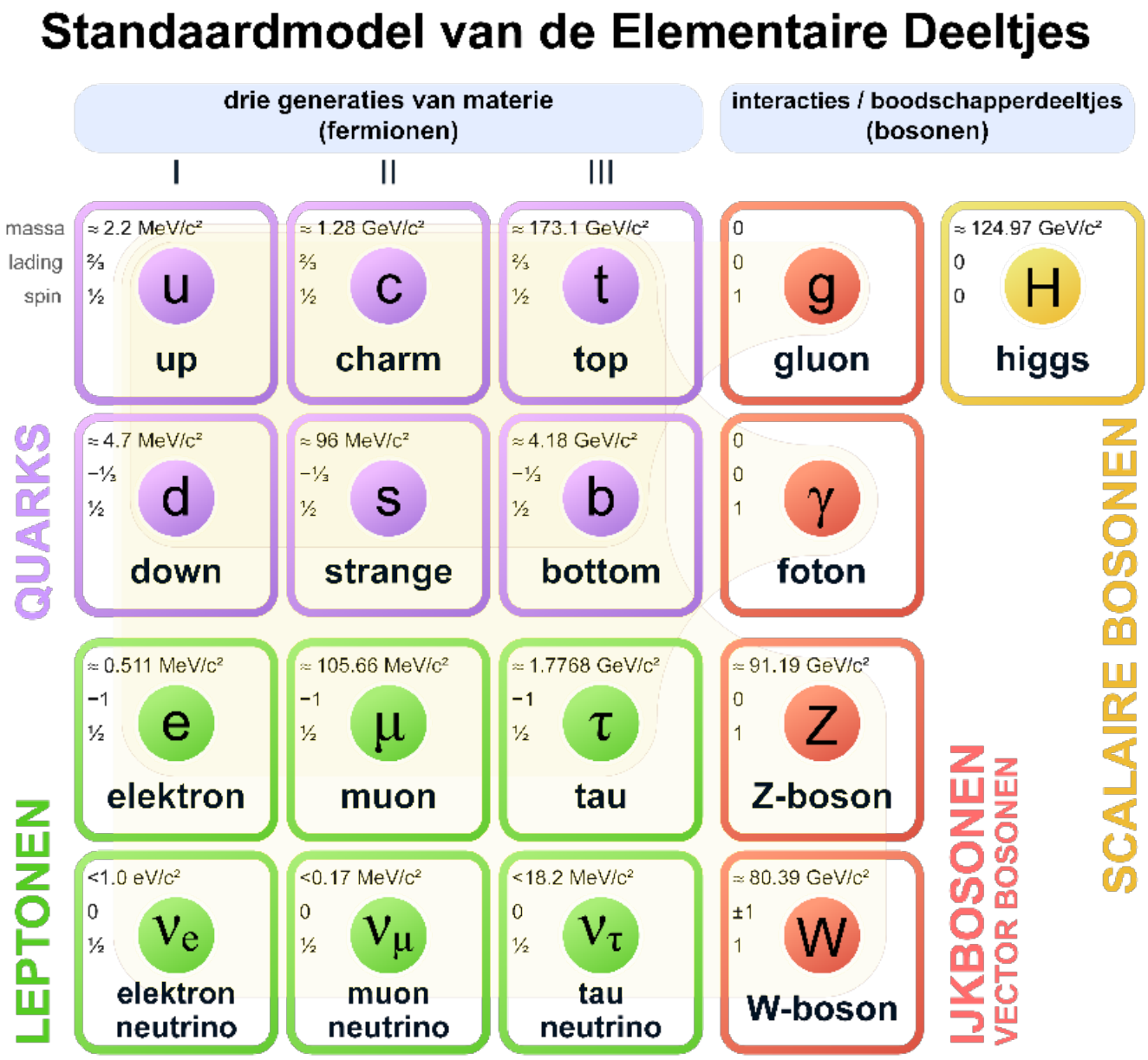
Verstopte deeltjes

Wanneer je het standaardmodel als een effectieve theorie beschouwt, is het idee dat de nieuwe deeltjes “verstopt zitten” in de onzekerheid in de waarden van de bestaande deeltjes. Wat ik hiermee bedoel is dat zo’n nieuw deeltje zó zeldzaam is, dat het maar een heel klein aandeel vormt in de mogelijke botsingen die plaatsvinden tussen deeltjes. Zo precies kunnen we niet meten, en daarom liggen de data die het bestaan van deze deeltjes zouden kunnen aantonen verscholen in de onzekerheid in de gemeten waarde. Er zit namelijk altijd een klein verschil tussen de gemeten waarden in een experiment en de theoretisch berekende waarden. De massa van een top-quark is bijvoorbeeld gemeten als grofweg 172,9 GeV/c^2, maar de precieze waarde zou ook 1,5 GeV/c^2 hoger of lager kunnen zijn.

Vaak schrijven we het verschil tussen experimentele en theoretische waarden toe aan allerlei onzekerheden in het meetproces: zo kan het zijn dat kabels ruis veroorzaken, duiven je telescoop onder gepoept hebben, of kan een magnetron signalen afgeven die je meetapparatuur per ongeluk opvangt. Maar in plaats van een gevolg van de meetapparatuur, kan het verschil ook een resultaat zijn van een theorie die niet helemaal juist is. In het geval van een lage-energie effectieve theorie is het zo dat de theorie de werkelijkheid heel goed beschrijft en voorspelt wanneer we te maken hebben met lage energieën, maar op hoge

energieën niet meer zo goed werkt. Zo kun je bijvoorbeeld met behulp van Newtons theorie van de zwaartekracht prima voorspellen hoe een balletje van een heuvel afrolt, maar als je wilt weten hoe twee sterren samensmelten, dan heb je de preciezere zwaartekrachtstheorie van Einstein nodig. Newtons theorie is dus een lage-energie effectieve theorie ten opzichte van de theorie van Einstein.

Zo kun je het standaardmodel als ook een effectieve theorie zien, die de werkelijkheid goed beschrijft op lage energieën. “Laag” is hier wel een relatief begrip: de deeltjesversneller van CERN kan deeltjes versnellen tot een energie van 13 TeV, oftewel tot een snelheid van wel 99,99% van de lichtsnelheid. Deeltjes met zo’n energie zijn goed door het standaardmodel beschreven. Het zou echter kunnen dat er ook deeltjes bestaan die – alleen al vanwege hun grote massa – een veel hogere energie hebben. Om deze deeltjes te beschrijven is een nieuwe theorie nodig.



Afbeelding 2. Het standaardmodel van de deeltjesfysica. De wisselwerkingsdeeltjes die voor krachten zorgen zijn rechts in het rood afgebeeld. Afbeelding: MissMJ, Cush.

Het standaardmodel

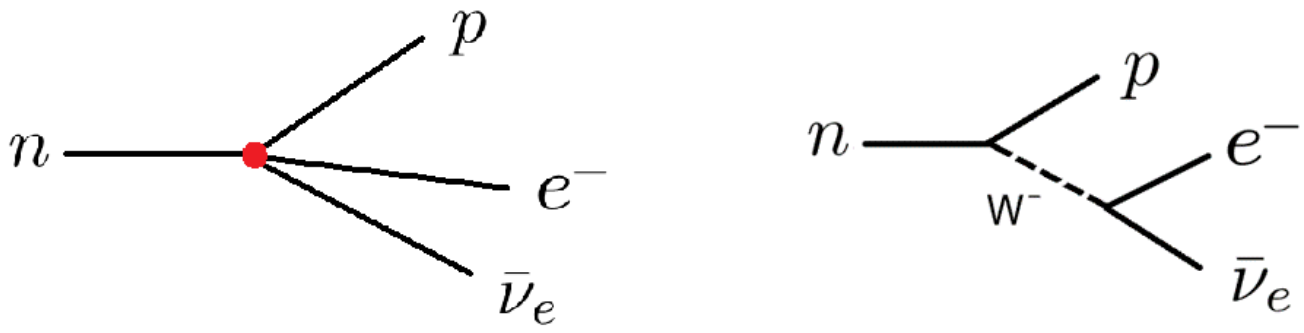
Om uit te leggen hoe natuurkundigen toch uitzoeken of deze deeltjes bestaan, zal ik eerst wat meer vertellen over de taal van het standaardmodel. Die taal is de quantumveldentheorie. Deze theorie maakt gebruik van het idee dat deeltjes zich bevinden in een “quantumveld”. Neem bijvoorbeeld het elektromagnetische veld, waarin zich deeltjes bevinden die elektromagnetisch geladen zijn. Wanneer een deeltje met een elektrische

lading, zoals het elektron, in de buurt komt van een ander geladen deeltje, dan “voelen” ze elkaar aan doordat ze zich beide in het elektromagnetische quantumveld bevinden en met dat veld wisselwerken. Wanneer de deeltjes dezelfde lading hebben, dan stoten ze elkaar af. Deeltjes met een tegengestelde lading trekken elkaar juist aan. Met andere woorden: de deeltjes zijn onder invloed van de elektromagnetische kracht.

Dit afstoten en aantrekken gebeurt volgens de deeltjesfysica ook weer door middel van het uitwisselen van een bepaald soort deeltjes, ook wel wisselwerkingsdeeltjes of krachtdeeltjes genoemd. In het geval van de elektromagnetische kracht zorgt het *foton*, oftewel het lichtdeeltje, ervoor dat twee elektronen elkaar afstoten. Op het moment dat elektronen dicht bij elkaar komen ontstaat er een foton, dat een bepaalde energie van het ene deeltje naar het andere deeltje verplaatst. Hierdoor bewegen de elektronen van elkaar af.

Als deeltjes juist naar elkaar toe bewegen, kunnen ze ook op elkaar botsen en samen een nieuw deeltje vormen. Hierbij geldt er behoud van energie. Twee deeltjes met een energie die in de experimenten van CERN gegenereerd kan worden kunnen dus samen in een nieuw deeltje veranderen dat zo’n hoge energie heeft dat het niet meer door het standaardmodel beschreven kan worden. (Daarbij is behoud van energie tijdelijk geschonden, maar dat is iets wat de quantummechanica voor heel korte tijd toestaat.) Het zware deeltje kan vervolgens weer in andere, lichtere deeltjes vervallen die wel tot het standaardmodel behoren. De vraag is nu: hoe weten we of het zware deeltje echt heeft bestaan?

Bèta-verval



Afbeelding 3. Bèta-verval. Links zie je het Feynmandiagram van bèta-verval zoals Fermi het beschreef. De rode stip “verstopt” hier het wisselwerkingsdeeltje W, dat wel is weergegeven in het rechterdiagram. Rechts zie je het diagram zoals het nu wordt begrepen

met behulp van het standaardmodel van de elementaire deeltjes.

Een manier om deze vraag te beantwoorden is door te kijken naar de kans dat een bepaalde botsing plaatsvindt onder bepaalde omstandigheden. Dit wordt de *waarschijnlijkheidsamplitude* van het proces genoemd. Voor de berekening van de waarschijnlijkheidsamplitude kun je een truc gebruiken dat de natuurkundige Richard Feynman heeft bedacht. Hij ontdekte dat je het proces van het botsen, aantrekken, afstoten en vervallen van deeltjes gemakkelijk kan weergeven in plaatjes, die we nu “Feynmandiagrammen” noemen. In afbeelding 3 zie je twee voorbeelden van zulke diagrammen. Hierin staan de strepen voor het pad dat een bewegend deeltje aflegt. De gestippelde lijn is het pad van een wisselwerkingsdeeltje. De letters die bij de paden staan geven aan om welk soort deeltje het gaat. In deze diagrammen staat de n voor een neutron, de p voor een proton, e- voor een elektron en ν_e voor een neutrino. Het proces dat je in afbeelding 3 ziet is dus het verval van een neutron in een proton, een elektron en een neutrino. Dit verval wordt ook wel *bèta-verval* genoemd. In korte notatie:

$$n \rightarrow p + e + \nu_e$$

De ontwikkeling van de theorie van bèta-verval laat goed zien wat een effectieve quantumveldentheorie inhoudt. In afbeelding 3 is het linker diagram een effectieve weergave van het proces, en het rechter diagram is een meer gedetailleerde weergave van wat er gebeurt. De effectieve weergave laat zien hoe de natuurkundige Enrico Fermi in 1933 dacht dat bèta-verval plaatsvond. De rode punt beschrijft de gebeurtenis dat het neutrondeeltje vervalt in de andere deeltjes. Volgens Fermi gebeurde het ontstaan van deze nieuwe deeltjes allemaal tegelijkertijd. Fermi’s theorie kan goed gebruikt worden om voorspellingen te doen bij lage energieën. Wanneer er hogere energie aan te pas komt, gebeuren er echter rare dingen: er verschijnen oneindigheden in de vergelijkingen. Hierdoor kunnen de berekende resultaten uit Fermi’s model nooit overeenkomen met de werkelijkheid. Om bij hogere energieën toch een goede beschrijving te krijgen van de werkelijkheid, moet de theorie “compleet” gemaakt worden: ze moet zo worden aangepast of uitgebreid dat bèta-verval ook op hogere energieën goed beschreven wordt, zonder dat de theorie resulteert in onwerkelijke oneindigheden.

In de jaren zestig van de vorige eeuw is dit gelukt voor bèta-verval, met behulp van de

theorie van het standaardmodel. Deze theorie kan bèta-verval nauwkeuriger beschrijven door gebruik te maken van een wisselwerkingsdeeltje van de zwakke kernkracht. In zekere zin kan je zeggen dat het ontstaan van dit wisselwerkingsdeeltje aangeeft dat het verval dus plaatsvindt onder invloed van de zwakke kernkracht. Bèta-verval, zoals beschreven volgens het standaardmodel, is weergegeven in het rechter diagram van afbeelding 3. Het verval is nu niet meer een instantaan proces zoals in de theorie van Fermi, maar een proces dat in twee stappen plaatsvindt. In stap één vervalt het neutron in twee deeltjes: een proton p en een wisselwerkingsdeeltje van de zwakke kernkracht, in dit geval een W-boson. In stap twee vervalt het W-boson in een elektron en een neutrino. In dezelfde korte notatie als boven:

$$n \rightarrow p + W \rightarrow p + e + \nu$$

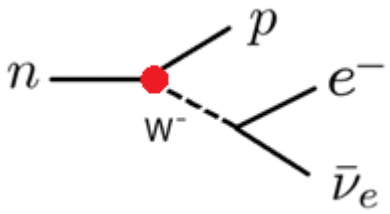
De eindproducten in Fermi's theorie en in de theorie van het standaardmodel zijn dus hetzelfde, maar het vervalproces verschilt. Doordat de theorie van het standaardmodel het wisselwerkingsdeeltje W meeneemt in de berekeningen kan het gebruikt worden om de waarschijnlijkheidsamplitude ook bij botsingen met hoge energie goed te berekenen, zonder dat er onwerkelijke oneindigheden ontstaan. Dit levert een waarde van de waarschijnlijkheidsamplitude op die op lage energieën een stuk preciezer is dan de waarde die Fermi's theorie gaf, en dus beter met de metingen overeenkomt. Je zou dus kunnen zeggen dat het W-boson voor Fermi nog "verstopt" was, maar dat de bedenkers van het standaardmodel en de experimentatoren die het verval bij hoge energieën bestudeerden erin geslaagd zijn het deeltje te vinden.

Door de theoretische waarde van het standaardmodel met de metingen van deeltjesversnellers zoals die van het CERN te vergelijken, weten we dus dat het standaardmodel een verbetering is ten opzichte van Fermi's theorie. Fermi's theorie kan als een lage-energie effectieve theorie gezien worden, die goed beschrijft welke deeltjes er ontstaan na bèta-verval. We leren echter een stuk meer van de theorie van het standaardmodel. Deze theorie laat ons zien dat er eigenlijk nog een extra deeltje in het spel is, en geeft ons een preciezere waarde voor de waarschijnlijkheidsamplitude.

Het standaardmodel als effectieve theorie

Nu is het zo dat je ook het standaardmodel als een effectieve theorie kan zien. Onder de 1 TeV beschrijft het de werkelijkheid prima, maar wanneer de energie veel groter is dan dit kan

het zijn dat de theoretische waarden beter overeenkomt met de gemeten waarden wanneer er rekening wordt gehouden met het bestaan van nieuwe deeltjes. Het zou dus opnieuw zo kunnen zijn dat er deeltjes “verstopt” zitten in de onzekerheden van de metingen aan het standaardmodel. Als voorbeeld kan je weer naar bèta-verval kijken. Wanneer we de theorie van het standaardmodel verder uitbreiden beschrijft de rode stip in afbeelding 4 opnieuw een effectieve interactie tussen deeltjes, net als de rode stip in afbeelding 3 dat in Fermi’s theorie deed. Deze interactie vertegenwoordigt nieuwe deeltjes die niet beschreven worden door het standaardmodel, en met energieën die zo hoog zijn dat ze in de deeltjesversneller vanhet CERN niet direct gemeten worden. Als ze bestaan hebben de deeltjes echter wel een kleine invloed heeft op de waarschijnlijkheidsamplitude van het proces. Wanneer de theorie van het standaardmodel wordt uitgebreid met deze deeltjes, kan dat dus een nieuwe, en hopelijk nog preciezere waarde van de waarschijnlijkheidsamplitude opleveren en dan wordt het verschil tussen de theoretische waarde en de gemeten waarde kleiner.



Afbeelding 4. Nogmaals bèta-verval. Figuur 3: Een voorbeeld van een Feyman diagram van bèta verval wanneer het standaardmodel als een effectieve theorie wordt begrepen. De rode stip “verstopt” nieuwe deeltjes die niet door het standaardmodel beschreven worden.

Hoewel het standaardmodel van elementaire deeltjes tot nu toe een succesvolle theorie is, zijn er toch redenen om te denken dat zo’n uitbreiding nodig is. Zo beschrijft het

standaardmodel bijvoorbeeld geen deeltjes voor donkere materie. Nieuwe deeltjes die alleen bij hoge energieën kunnen ontstaan kunnen mogelijke kandidaten hiervoor zijn. Het zou ook kunnen dat we met behulp van de uitgebreide theorie erachter komen dat een deeltje waarvan nu gedacht wordt dat het elementair is, eigenlijk is opgebouwd uit meerdere deeltjes. Het kan zelfs blijken dat er allerlei nieuwe vervalprocessen bestaan, die binnen het standaardmodel niet mogelijk zijn. Zo zijn er binnen recent onderzoek aanwijzingen dat neutrinoloos dubbel-bètaverval kan plaatsvinden. Het standaardmodel uitbreiden door het als een effectieve quantumveldentheorie te beschouwen kan mogelijk dus heel wat problemen oplossen en nieuwe natuurkunde opleveren!