

Vijf lessen over deeltjesfysica (1)

Inleiding

Nee, elementaire deeltjes staan niet of nauwelijks in het examenprogramma. Dan maar niet doen dus, of toch? In vijf lessen kan men een experimentele inleiding doen, gevolgd door het standaardmodel met de cruciale behoudswetten en reactiediagrammen. We voegen dan geen stukje versplinterde kennis toe, maar iets dat eenheid heeft en generalisatiekracht. Natuurlijk kunt u meer doen, daarvoor verwijzen we naar hoofdstuk 4 van het Project Moderne Natuurkunde (PMN: www.phys.uu.nl/~wwwpnm). Hoofdstuk 4 met een kleine uitbreiding is zelfs zeer geschikt als module in het nieuwe bèta-vak.

Tabel 1. Overzicht van lessen.

Les	Beschrijving	Werkblad
1	Rond 1930 leek het erop alsof energiebehoud niet gold voor bètaverval. De uitgezonden elektronen hadden wisselende energieën maar wel met een maximum. Pauli kwam met een typische oplossing: er moet een ander deeltje zijn (neutrino) dat een deel van de energie meeneemt. Het duurde 26 jaar voordat het neutrino ontdekt werd. In werkblad 4.2 worden leerlingen door dit stukje geschiedenis geleid met o.a. de originele brief van Pauli.	4.2
2	Een les over interpretatie van een bellenvatfoto; deze les introduceert deeltjes reacties experimenteel.	4.3
3	In een klassikale inleiding geven we een kort overzicht (20 minuten) van het standaardmodel. Daarna besteden we 10 minuten aan behoudswetten en symmetrieën en kunnen we direct doorgaan met een voorbeeld van een reactievergelijking en lading en tijdromp. Dan opgaven 1a en 1b van werkblad 4.4.	4.4
4	Doorgaan met behoudswetten, symmetrieën, en reactievergelijkingen aan de hand van werkblad 4.4.	4.4
5	Afronding van het werkblad en terugblik: wat hebben we geleerd over deeltjes? Wat hebben we geleerd over behoudswetten? Wat hebben we geleerd over interactie tussen theorie en experiment in de natuurkunde?	4.4

Les 1: Bètaverval

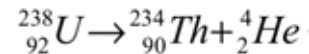
Benodigde voorkennis:

$E = mc^2$ en berekening van massadefect in u en in MeV met behulp van tabellen 25 en 7 uit *Binas*.

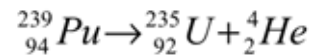
Inleiding

Er is een groot verschil tussen bètaverval en alfaverval. Bij alfaverval zendt een kern een alfadeeltje uit en heeft dat deeltje altijd dezelfde energie, kenmerkend voor die kern.

Bijvoorbeeld:

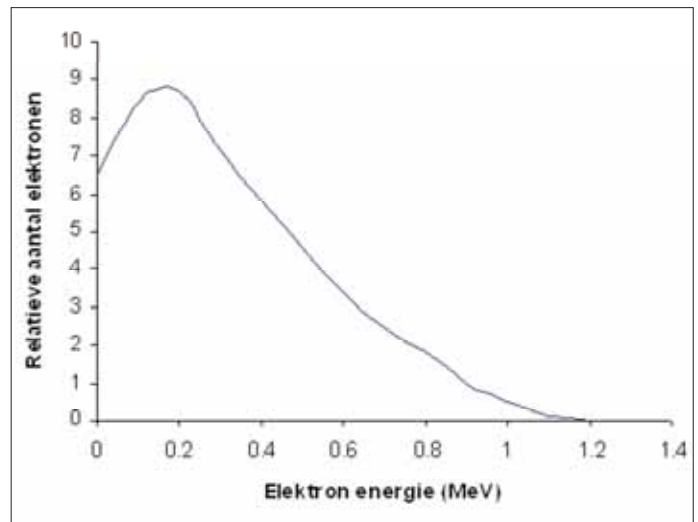
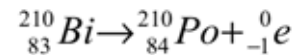


Hierin heeft het alfadeeltje (heliumkern) een energie van 4,2 MeV.



In deze reactie heeft het alfadeeltje altijd een energie van 5,1 MeV.

Bij bètaverval is dat anders, een typisch voorbeeld is:



Figuur 1. Energiespectrum van het bètaverval van bismut-210.

De kinetische energie die het elektron meekrijgt varieert in deze reactie van 0 tot 1,17 MeV, zoals figuur 1 laat zien. Op grond van dit soort metingen, ook bij andere bètastralers, kwam Bohr tot de conclusie dat de wet van behoud van energie niet zou gelden bij kernprocessen.

We zitten nu met een probleem. Geldt energiebehoud in deze reactie? Geldt behoud van impuls? Nee toch, als dat elektron zo maar met willekeurige energie weg kan vliegen. In 1930 zond de Zwitserse fysicus Wolfgang Pauli een brief naar een conferentie die hij zelf niet bij kon wonen (figuur 2). Onze leerlingen hadden weinig moeite met de Engelse versie van deze brief. Het Engels maakt het juist meer interessant.

Vraag

1. Laat met een berekening zien dat de maximumenergie van het elektron inderdaad 1,17 MeV moet zijn. (Gebruik o.a. $E=mc^2$ en Binas tabel 25).
2. Bestudeer de brief van Pauli en leg uit hoe zijn voorstel het probleem van energiebehoud en impulsbehoud oplost.

Zürich, December 4, 1930

Dear radioactive ladies and gentlemen,

I beg you to listen most favourably to the carrier of this letter. He will tell you that, in view of the 'wrong' statistics of the N and Li nuclei and of the continuous beta spectrum, I have hit upon a desperate remedy to save the laws of conservation of energy and statistics. This is the possibility that electrically neutral particles exist which I will call neutrinos, which exist in nuclei,... and which differ from the photons also in that they do not move with the speed of light. The mass of the neutrinos should be of the same order as that of the electrons and should in no case exceed 0,01 proton masses. The continuous beta spectrum would then be understandable if one assumes that during beta decay a neutrino is emitted with each electron in such a way that the sum of the energies of the neutrino and electron is constant...

I admit that my remedy may look very unlikely, because one would have seen these neutrinos long ago if they really were to exist. But only he who dares wins and the seriousness of the situation caused by the continuous beta spectrum is illuminated by a remark of my honoured predecessor, mr Debye, who recently said to me in Brussels: "O, it is best not to think at all, just as with the new taxes." Hence one should seriously discuss every possible path to rescue. So dear radioactive people, examine and judge. Unfortunately I will not be able to appear in Tübingen personally, because I am indispensable here due to a ball which will take place in Zurich during the night of December 6 to 7.

Your most obedient servant,

W. Pauli

N.B. Pauli gebruikte zelf het woord neutrino nog niet, hij stond ook bepaald niet bekend als 'obedient'.

Figuur 2. Pauli's brief.

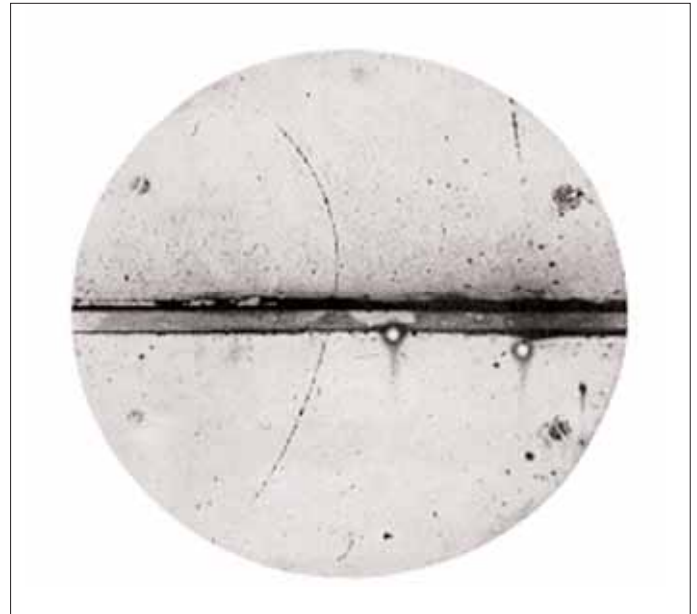
De voorspelling en ontdekking van het neutrino is een typisch voorbeeld van elementairedeeltjesfysica. Veel deeltjes zijn op

een soortgelijke manier ontdekt:

- Er lijkt iets niet te kloppen met behoudswetten.
- We nemen aan dat die wetten toch gelden.
- De missende energie, lading, massa kan dan worden berekend.
- Als we de eigenschappen van het deeltje kennen, dan kunnen we er experimenteel gemakkelijker naar zoeken.

Vaak blijkt dat we die deeltjes dan nog vinden ook, al is het soms 26 jaar later zoals bij het neutrino. Pauli had een kist champagne uitgelooft voor de ontdekker van het neutrino. Kort voor zijn dood was hij die kist tot zijn grote vreugde kwijt.

Les 2: Nevel- en bellenvatfoto's en deeltjes



Figuur 3. Ontdekking van het positron (1932).

Les 2 start klassikaal met de foto van de ontdekking van het positron in een nevelvat door Anderson in 1932. De foto laat een klein nevelvat zien van ongeveer 10 cm doorsnede. Er zit oververzadigde damp in die condenseert langs de banen van passerende geladen deeltjes. In het midden staat een loden plaat van 6 mm dikte. We zetten die foto op de beamer of de OHP, leggen even iets uit over nevelkamers en stellen dan de volgende vragen in een onderwijsleergesprek: [opsomming met cijfers 1 t/m 3 hieronder]

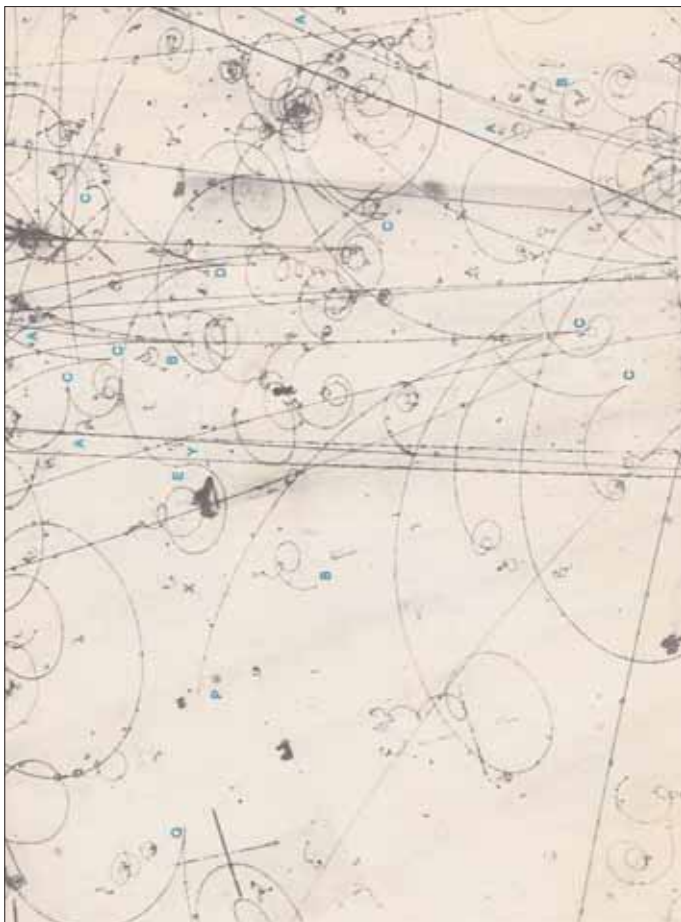
1. Het deeltje gaat van onder naar boven, hoe zie je dat? (*baan wordt krommer, dus boven in de foto heeft het deeltje de laagste energie*)
2. Het magnetveld wijst in het scherm, dus de lading van het deeltje is.....? (*positief*)
3. Lichte deeltjes zijn gemakkelijker af te buigen dan zware deeltjes, waarom? (*Een bewegend steentje is gemakkelijker af te buigen dan een bewegend rotsblok, of via de formule $R=mv/Bq$, grotere massa dan grotere kromtestraal bij gelijke B, q, v .*)

Verder maken we de volgende opmerkingen:

1. Als dit een proton was, dan zou bij deze kromming de energie zo laag zijn dat het binnen 5 mm alle energie kwijt zou zijn en zou stoppen.
2. Het energieverlies in lood is afhankelijk van de lading en massa van het deeltje en zo berekende Anderson dat de lading niet groter kon zijn dan $2e$ en de massa zeker kleiner zou zijn dan $20x$ de elektronmassa. Dat waren erg ruwe schattingen dus.

Dan gaan we verder met werkblad 4.3 waarvan enkele delen hieronder zijn afgedrukt.

Een bellenvat is gevuld met vloeistof, bijvoorbeeld vloeibare waterstof op $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$ (20 K) of Freon, of een mengsel van neon en waterstof zoals het bellenvat van figuur 3. We schieten deeltjes door de vloeistof heen. Geladen deeltjes veroorzaken ionisatie en dus laten deze deeltjes sporen van ionen achter, maar die kunnen we nog niet zien. Wanneer de druk boven de vloeistof ineens wordt verminderd, gaat de vloeistof koken. De eerste kookbellen blijken te worden gevormd langs de ionensporen. Die bellensporen kunnen dan worden gefotografeerd.



Figuur 4. Bellenvatfoto uit *The Physics Teacher*², februari 1993.

Draai de foto zo dat je de letters rechtop ziet. Een aantal tamelijk rechte sporen loopt van onder naar boven maar niet evenwijdig. Dit zijn sporen van geladen deeltjes die na een botsing het bellenvat zijn binnengekomen. Er is een sterk magneetveld dat het papier in wijst.

1. In welke richting worden negatieve deeltjes afgebogen? In welke richting positieve deeltjes?
2. In de foto staan een aantal C's bij V-vormige sporen. Wat denk je dat er bij het onderste puntje van de V is gebeurd? Welke deeltjes gaat het hier over?
3. Er staan veel spiralen in de foto, waarbij een deeltje steeds kleinere cirkels beschrijft. Waarom worden de cirkels steeds kleiner? (*energieverlies door bremstrahlung en ionisatie*)
4. In contrast tot de spiraalachtige sporen staan er ook tamelijk dikke bijna rechte sporen op de foto. Wat zal het belangrijkste verschil zijn van deze 'rechte' deeltjes met de deeltjes die de spiralen vormen? (*massa, dit zijn zware deeltjes, zoals protonen, die moeilijk afgebogen worden*)
5. Bij de letters B zien we steeds 'kringels' die uit het niets ontstaan en in niets eindigen. De sporen buigen altijd rechtersom. Wat voor deeltjes zijn dat? Hoe zijn ze gevormd? (*elektro-*

nen, vrijgemaakt uit atomen door fotonen of door andere neutrale deeltjes die in een bellenvat geen sporen achterlaten)

Volg het deeltje dat bij D geproduceerd wordt en naar E toe gaat.

6. Welk deeltje is dat? Is de lading + of -? (*buigt linksaf, dus positron*)
7. Verandert er iets met de lading na punt E? (*buigt nu rechtsaf, dus negatieve lading, misschien elektron*)
8. Wat kan er gebeurd zijn? (*een zeldzame elastische botsing tussen een positron en een gebonden elektron dat wordt vrijgemaakt i.p.v. geannihileerd*)
9. Waar aan kun je zien dat de deeltjes voor en na E dezelfde impuls zouden kunnen hebben en dus mogelijk dezelfde massa? (*ongeveer zelfde initiële kromming*)

Uit deze foto kan men een schatting maken van het maximale massa verschil van de twee deeltjes². Via een veel nauwkeurigere methode heeft Steven Chu³ in 1984 bepaald dat het massaverschil tussen elektron en positron minder is dan $3 \times 10^{-8} \text{ MeV}/c^2$.

1. Een deeltje eindigt zijn vlucht in P. Wat voor deeltje is dat? Wat kan er gebeurd zijn? (*positron, annihilatie*)
2. In het verlengde van de baan van dit deeltje begint bij Q weer een elektron-positronpaar. Welk deeltje hebben we tussen P en Q? (*ongeladen deeltje, foton*)

Deze gebeurtenis is tamelijk ongewoon op bellenvatfoto's. Meestal worden positronen geremd en stoppen ze voordat uiteindelijk annihilatie plaatsvindt. De resulterende fotonen hebben dan afzonderlijk niet genoeg energie om een nieuw $e^+ e^-$ paar te creëren. Voor meer informatie over de bellenvatfoto verwijzen we naar *The Physics Teacher*². Daar moet u trouwens toch eens een abonnement op nemen, prachtig blad. Voor 90 euro heeft u een abonnement op papier en digitaal toegang tot alle artikelen vanaf 1998. Voor informatie zie: www.aapt.org.

De bellenvaten zijn inmiddels al lang met pensioen. Men gebruikt nu dradenkamers waarmee sporen veel preciezer in de tijd en continue in drie dimensies kunnen worden gemeten en waarin metingen direct de computer in kunnen.

Voor verdere vragen en een gerelateerd schoolexamenprobleem verwijzen we naar de complete werkbladen op de PMN-website.

Dankbetuiging

De bellenvatfoto (figuur 4) is afkomstig van Goronwy Tudor Jones van de University of Birmingham en werd gemaakt in experiment E362 op het Fermilab. Wij danken hem voor zijn toestemming voor gebruik van de foto.

Noten

1. Hubert Bieveveld werkte mee aan het werkblad over bèta-veral.
2. Jones, G.T. (1993). A simple estimate of the mass of the positron. *The Physics Teacher*, 31(2), 95-101.
3. Chu, S. Et al. (1984). Measurement of the positronium $1^3 S_1 - 2^3 S_1$ interval by Doppler-free two-photon spectroscopy. *Phys. Rev. Lett* 52, 1689.