

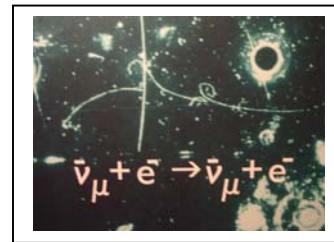
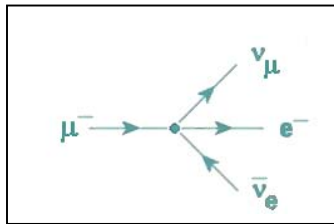


Veluws College
Walterbosch met
PMN excursie op
CERN

Drie tot Vijf Lessen over Deeltjes Fysica

I. Experimentele Aspecten

II. Behoudswetten, Symmetrieën, en Reactiediagrammen



d.j.hoekzema
e. van den berg
g.j. schooten

Woudschoten 2005

project

Moderne Natuurkunde

op het **VWO**

Inhoud

Inhoud.....	1
Drie tot Vijf Lessen over Deeltjes Fysica.....	1
Les 1: Werkblad 4.2: Beta verval.....	3
A Desperate Remedy.....	4
Les 2 Werkblad 4.3: Bellenvat foto's en deeltjes.....	6
Les 3 – 5 Werkblad 4.4: Behoudswetten, Symmetrieën en Reactiediagrammen met Antwoorden.....	10
Appendix A: Tekst over Standaardmodel uit PMN.....	15
Appendix B: Tekst Behoudswetten, Symmetrieën, en Elementaire Deeltjes uit PMN.....	17
Antwoorden Werkblad 4.3 Bellenvat Foto's en Deeltjes.....	24
Werkblad Behoudswetten, Symmetrieën en Reactiediagrammen.....	26

Drie tot Vijf Lessen over Deeltjes Fysica ¹

Dick Hoekzema, Ed van den Berg, Gert Schooten
 Project Moderne Natuurkunde, Centrum voor Betadidactiek
 Universiteit Utrecht

Nee, elementaire deeltjes staan niet of nauwelijks in het examenprogramma. Dan maar niet doen dus, of toch? In 3 lessen kan men het standaardmodel doen en de cruciale behoudswetten en reactiediagrammen. We voegen dan geen stukje versplinterde kennis toe, maar iets dat eenheid heeft en generalisatiekracht. In nog twee extra lessen aan de start kunt u ook aandacht besteden aan de experimentele kant, maar deze twee extra lessen zijn niet noodzakelijk om het standaardmodel en de behoudswetten/symmetrieën te begrijpen. Natuurlijk kunt u nog meer doen, daarvoor verwijzen we naar ons Project Moderne Natuurkunde. Maar nu eerst: de lessen.

Lessen

1. (Optioneel, niet vereist) Rond 1930 leek het erop alsof energiebehoud niet gold voor betaverval. 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 deeltje ontdekt werd. In werkblad 4.2 worden leerlingen door dit stukje geschiedenis geleid door de originele brief van Pauli en maken ze meteen kennis met typische methoden van de deeltjesfysica.
2. (Optioneel, niet vereist) Een les over interpretatie van een bellenvatfoto, deze les introduceert deeltjes reacties experimenteel, vooral via creatie en annihilatie van elektronen en positronen. De les wordt gegeven aan de hand van werkblad 4.3.

¹ Docenten die niet deelnemen aan het Project Moderne Natuurkunde (PMN) maar wel iets aan deeltjes en behoudswetten/symmetrieën/reacties willen doen, volgen dit pakket. PMN deelnemers voegen tussen les 3 en 4 een les toe over detectoren en versnellers.

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 gaan we direct door met een voorbeeld van een reactievergelijking en lading en tijdomkeer. Dan opgaven 1a en 1b in de klas. Huiswerk: bestuderen van p73-76 van het PMN materiaal (Appendix A), p 81-84 (Appendix B). De opgaven worden juist in de klas gedaan.
4. Even herinneren aan de vorige les, dan een voorbeeld van kruisen en direct opgaven 1c t/m 1d, 2, en mogelijk 3. Ondertussen gaat de docent rond, ziet waar leerlingen fout gaan, en reageert daarop in de korte klassikale besprekingen tussen opgaven in. Huiswerk: studie van p71-73 (Appendix A) en 81-88 (Appendix B).
5. Even een klassikale terugblik, wat hebben we geleerd? Vervolgens reactie diagrammen en de oefeningen van opgaven 3, 4, en 5. Opgave 3 kan met snelle feedback worden gedaan. Bij opgaven 4-6 werken leerlingen in eigen tempo. Tenslotte: samenvatting... Wat hebben we geleerd over deeltjes? Wat hebben we geleerd over behoudswetten? Wat hebben we geleerd over de interactie tussen theorie en experiment in de natuurkunde?

Voor bespreking van het **standaardmodel** kan gebruik worden gemaakt van pagina 71-73 van hoofdstuk 4 van het PMN materiaal. Zie Appendix A. Voor behoudswetten, reactiediagrammen en symmetrieën gebruiken we een werkblad met snelle feedback en kunnen leerlingen de zaak nog eens nalezen in Appendix B.

De snelle feedback methode (les 3 – 5)

Snelle feedback is een klassikale methode waarin de docent een serie opdrachten geeft die meestal een individuele schets, tekening, of grafiek als antwoord vereisen (Berg, 2001). De opdrachten worden één voor één gegeven. Bij elke opdracht loopt de docent rond, inspecteert wat leerlingen er van maken. De docent stelt een snelle vraag hier en daar. Als leerlingen eerder klaar zijn, dan kunnen ze hun oplossing vergelijken met die van anderen. Dan keert de docent terug naar het bord, bespreekt zeer kort één of twee veel gemaakte fouten, en geeft een nieuwe opdracht. Het is belangrijk de vaart erin te houden. De opdracht voor leerlingen en het rondlopen van de docent kan 2 of 3 minuten duren. Nabespreking duurt 1 of 2 minuten en het is tijd voor de volgende opdracht. Over een serie van 6 – 8 opdrachten kan een vaardigheid zeer effectief worden “ingeslepen”. Bovendien heeft de docent op elk moment een redelijk goed beeld van wat leerlingen wel en niet begrijpen, hoever ze zijn. Daarvoor is het noodzakelijk dat de docent voortdurend over de schouders van de leerlingen meekijkt en indrukken baseert op echt leerlingewerk, dus *niet* gokken op ervaring zonder te kijken naar leerlingewerk. Men zou behoudswetten en symmetrieën uitgebreid kunnen behandelen of de leerlingen de betreffende pagina's goed laten doorlezen en dan overgaan op de snelle feedback oefeningen. Wijzelf geven er de voorkeur aan om uitleg en oefening te integreren in de volgende stappen:

1. (Docent) We beginnen met de reactievergelijking: $p^+ + e^- \rightarrow H$ en geven een voorbeeld van **C**-symmetrie door de deeltjes door anti-deeltjes te vervangen: $p^- + e^+ \rightarrow \bar{H}$. Deze anti-waterstofatomen kunnen inmiddels gemaakt worden in Geneve. De reactie kan dus echt.
2. Leerlingen doen opgave 1a en eventueel nog een ander door de docent gekozen voorbeeld. De docent loopt rond en identificeert eventuele problemen.
3. (Docent) Even 1a bespreken. Vervolgens kunnen we de tijdsymmetrie operatie illustreren door de ionisatie van het waterstof atoom: $H \rightarrow p^+ + e^-$.

4. Leerlingen doen opgave 1b, docent kijkt over de schouder mee.
5. (Docent) Bespreek voorbeeld 1b voorzover nodig en leg kort de symmetrieoperatie en geef het voorbeeld uit Appendix B.
6. Leerlingen doen opgaven 1c en 1d.
7. Docent bespreekt 1c en 1d.
8. Etc.

Zie verder het werkblad.

Les 1: Werkblad 4.2: Beta verval²

Benodigde voorkennis:

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

Inleiding

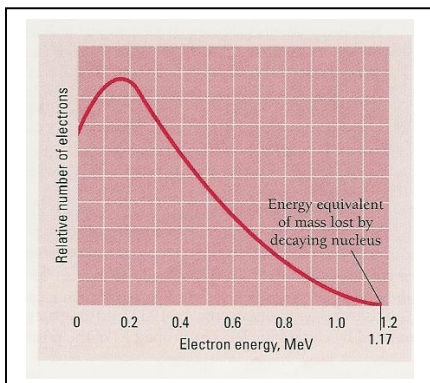
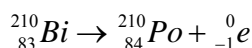
Er is een groot verschil tussen bètaverval en alfaverval. Bij alfaverval zendt een kern een alfadeeltje uit en heeft dat deeltje altijd dezelfde energie, kenmerkend voor die kern.

Bijvoorbeeld:

${}_{92}^{238}\text{U} \rightarrow {}_{90}^{234}\text{Th} + {}_2^4\text{He}$ en hierin heeft het alfadeeltje (Helium kern) een energie van 4,2 MeV

in ${}_{94}^{239}\text{Pu} \rightarrow {}_{92}^{235}\text{U} + {}_2^4\text{He}$ en in deze reactie heeft het alfadeeltje altijd een energie van 5,1 MeV

Bij bètaverval is dat anders, een typisch voorbeeld is:



In de praktijk blijkt de kinetische energie die het elektron meekrijgt, nogal te variëren. Bij het verval van ${}^{210}\text{Bi}$ van 0 tot 1,17 MeV zoals figuur 1³ laat zien. Dat zou kunnen doordat de energie zich verdeelt over de polonium kern en het elektron en dat die energie zich op verschillende manieren kan verdelen. In de praktijk blijkt de kinetische energie van de polonium kern verwaarloosbaar te zijn. Op grond van dit soort metingen, die ook bij andere bètastralers gevonden werden, kwam Bohr tot de conclusie dat de wet van behoud van energie niet zou gelden bij kernprocessen.

Deze noodsporging laat goed zien hoe groot de verwarring was, want de wet van behoud van energie is een van de centrale wetten van de natuurkunde.

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?

Andere reacties zijn die van neptunium isotoop ${}_{93}^{239}\text{Np}$ die elektronen uitzendt met een energie variërend van 0 tot 0,7 MeV en de natrium isotoop ${}_{11}^{24}\text{Na}$ die elektronen uitzendt met een energie tussen 0 en 1,4 MeV.

² Werkblad door Ed van den Berg en Hubert Biezeveld

³ Uit Beiser: Concepts of Modern Physics (5th edition), McGraw-Hill.

Vraag

1. Laat met een berekening⁴ zien dat de maximum energie van het elektron inderdaad 1,17 MeV moet zijn. (Gebruik o.a. $E=mc^2$ en BINAS tabel 25).

In 1930 zond de Zwitserse fysicus Wolfgang Pauli een brief naar een conferentie die hij zelf niet kon bijwonen.

A Desperate Remedy

In 1930, the Zwitserse fysicus Wolfgang Pauli zond de volgende brief^{5,6} naar een conferentie die hij zelf niet bij kon wonen.

This letter is about a fundamental particle whose existence was predicted in 1930 in an answer to a problem about beta decay, but whose effect on other particles was not detected directly until 26 years later. This was despite the fact that the Sun emits them at a prodigious rate, and about 10^{12} of them pass through your body every second of the day and night.

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 Debeye, 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.

⁴ Als leerlingen $E=mc^2$ nog niet hebben gebruikt bij radioactiviteit, dan eerst introduceren en voordoen.

⁵ Toen in 1932 het neutron ontdekt werd, dat ongeveer evenveel massa heeft als het proton, stelde de Italiaan Fermi voor om het neutron van Pauli neutrino te noemen – klein neutron. Het neutrino wordt aangeduid met ν , de Griekse letter n, de *nu*

⁶ De slotwoorden *obedient servant* zijn een grapje van Pauli, want iedereen wist dat Pauli allerminst als *obedient* bekend stond.

Vragen

2. Bestudeer de brief van Pauli en leg uit hoe zijn voorstel het probleem van energiebehoud en impulsbehoud oplost.
3. In het kader naast de brief staat dat: *the Sun emits them at a prodigious rate and about 10^{12} of them pass through your body every second of the day and night*. Als die deeltjes van de zon komen, klopt dat wel, dag en nacht? Leg uit.
4. Schrijf de verval reacties voor neptunium en natrium

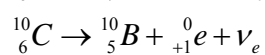
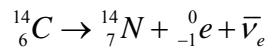
De voorspelling en ontdekking van het neutrino is een typisch voorbeeld van elementaire-deeltjesfysica. Veel deeltjes zijn op een soortgelijke manier ontdekt:

- Er lijkt iets niet te kloppen met behoudswetten.
- We nemen aan dat die wetten toch gelden.
- De missende energie, lading, massa kan dan berekend worden.
- Met die gegevens gaan we experimenteel zoeken naar het deeltje.

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.

Als voorbeeld geven we twee beta verval reacties:



${}^{14}\text{C}$ heeft teveel neutronen en zendt elektronen uit (β^- straling) plus een antineutrino. ${}^{10}\text{C}$ heeft te weinig neutronen en zendt positronen uit (β^+ straling). In het eerste geval wordt een antineutrino uitgezonden en in het tweede een neutrino. Waarom zal duidelijk worden in §4.5.

Voorbeeld van een energieberekening: bij ${}^{14}\text{C}$ heeft het uitgezonden elektron een energie van tussen de 0 en 0,156 MeV. Volgens energiebehoud moeten massa + energie voor de reactie gelijk zijn aan na de reactie. Met BINAS tabel 25 krijgen we:

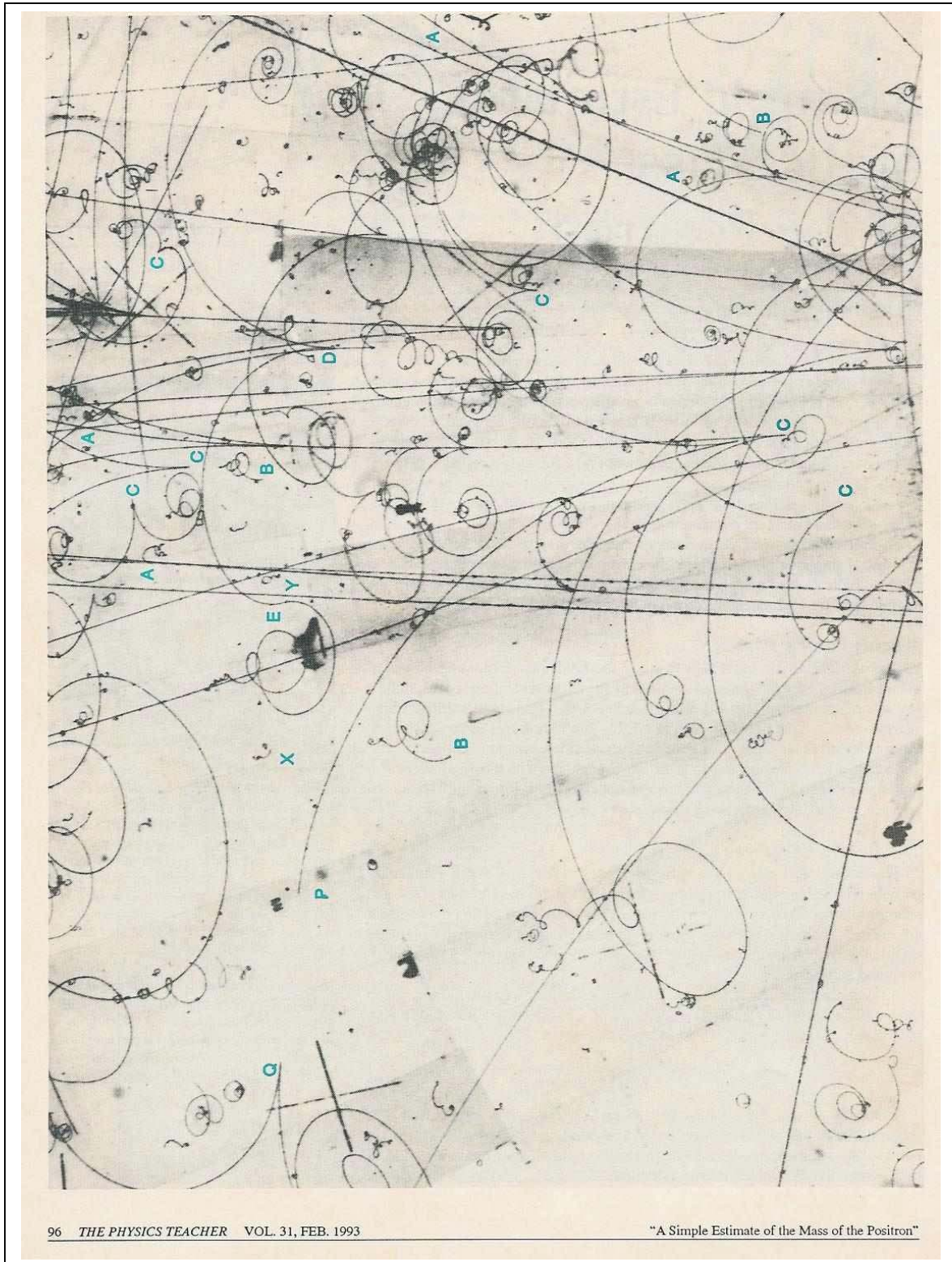
$$14,003242 - 6m_e + E_{\text{kin, voor reactie}}/c^2 \text{ (in u, neem aan } E_{\text{kin, voor reactie}} = 0) = 14,00307 - 7m_e + m_e + m_\nu \text{ (kiezen we 0) + } E_{\text{kin, maximaal elektron}}/c^2 \text{ (in eenheid u)}$$

$$E_{\text{kin, maximaal elektron}} \text{ (in Joules)} = (14,003242 - 14,00307) \cdot u \cdot c^2 = 2,57 \times 10^{-14} \text{ J} = 0,16 \text{ MeV} \text{ en dat klopt (BINAS)}$$

Les 2 Werkblad 4.3: Bellenvat foto's en deeltjes

Doel: Kennismaken met deeltjesfysica via bellenvatfoto's

Figuur 1: Bellenvatfoto uit *The Physics Teacher*, February 1993



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 1. 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. Door de druk boven de vloeistof ineens te verminderen, gaat de vloeistof koken. De eerste kookbellen blijken gevormd te worden langs de ionensporen. Die bellensporen kunnen dan gefotografeerd worden.

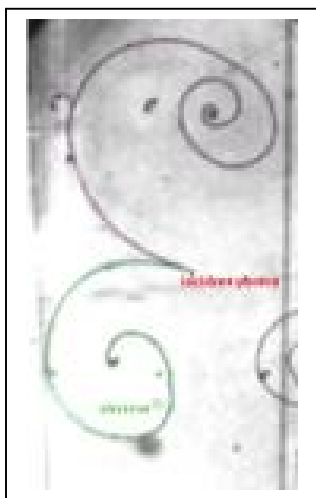
Draai de foto zodat je de letters rechtop ziet. Een aantal tamelijk rechte sporen loopt van onder naar boven. Dit zijn sporen van geladen deeltjes die na een botsing het bellenvat zijn binnengekomen. Er is een sterk magneetveld dat het papier in wijst.

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?
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?
5. Bij de letters B zien we steeds "kringels" die uit het niets ontstaan en in niets eindigen. De sporen buigen altijd rechtsom. Wat voor deeltjes zijn dat? Hoe zijn ze gevormd?

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

6. Welk deeltje is dat? Is de lading + of -?
7. Verandert er iets met de lading na punt E?
8. Wat kan er gebeurd zijn?
9. Waaraan kun je zien dat de deeltjes voor en na E dezelfde impuls zouden kunnen hebben en dus mogelijk dezelfde massa?

Uit deze foto kan men een ruwe schatting maken van het massa verschil van de twee deeltjes. Via een methode die veel nauwkeuriger is, heeft Steven Chu in 1984 bepaald dat het massa verschil tussen dit deeltje en het antideeltje minder is dan $3 \times 10^{-8} \text{ MeV}/c^2$.



Figuur 2

10. Een deeltje eindigt zijn vlucht in P. Wat voor deeltje is dat? Wat kan er gebeurd zijn?
11. In het verlengde van de baan van dit deeltje begint bij Q weer een elektron-positron paar. Welk deeltje hebben we tussen P en Q?

De bellenvaten zijn inmiddels al lang met pensioen. Men gebruikt nu dradenkamers waarmee sporen veel preciezer kunnen worden gemeten en gegevens direct de computer in kunnen.

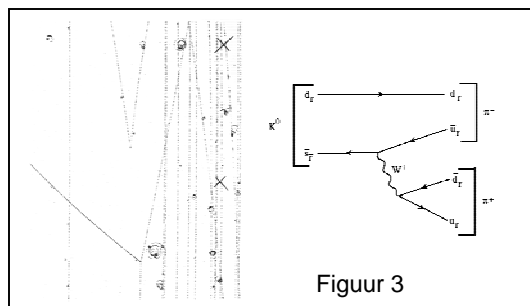
Nog even een paar typische sporen:

Figuur 2 is typisch voor paarvorming van een elektron en positron. In het begin is de kromming van beide banen vrijwel gelijk maar daarna verliest de één blijkbaar sneller energie dan de ander. De sporen

beginnen uit het “niets”. De energie voor de vorming van het paar moet komen uit een neutraal deeltje dat onzichtbaar is in het bellenvat. Voor een elektron en positronpaar is dat dan een γ foton.

12. Een foton heeft geen massa, maar blijkt wel impuls. Hoe zie je dat?

In figuur 3 bewegen deeltjes van onder naar boven. We zien we twee V's. De bovenste V wordt gezien als een verval van een neutraal deeltje het K^0 Kaon.



Figuur 3

niet op te lossen maar geef wel aan welke grootheden uit de bellenvatfoto bepaald kunnen worden.

13. Waarom denk je dat het deeltje dat vooraf gaat aan de V neutraal is?

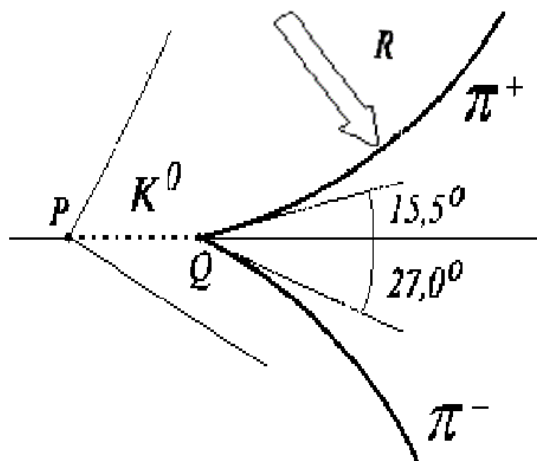
14. Het Kaon vervalt in twee geladen pionen, het π^+ en het π^- . Welke behoudswetten gelden in de onderste punt van de V?

15. Stel dat je de kromming van de pion banen zou kunnen vaststellen, zou je dan de massa van het Kaon kunnen berekenen? Schrijf eens een paar vergelijkingen op om te zien of dat mogelijk zou zijn (je hoeft de vergelijkingen

De figuur rechts geeft een tussenreactie. In werkelijkheid vervalt het Kaon op een complexe manier, maar in het bellenvat zien we alleen de eindproducten, de twee pionen.

Hieronder volgt nu een typische examensom waarin je kennis van diverse onderdelen van de natuurkunde moet combineren.

1. K^0 - deeltje (PMN school examen 2003 herkansing)



figuur 1

Bij een deeltjesbotsing in een detector wordt een gebeurtenis waargenomen waarbij onder andere een neutraal K^0 - deeltje ontstaat. Zie figuur 1. In de tekening gebeurt dit in punt **P**. Het K^0 - deeltje vervalt in het punt **Q**, in een positief π^+ -meson en een negatief π^- -meson. Omdat er loodrecht op

het vlak van tekening een magneetveld B is aangebracht, beschrijven de geladen deeltjes cirkelvormige banen die in het vlak van tekening liggen.

2p **1** Leg met behulp van de figuur uit wat de richting van het magneetveld is: papier in of papier uit.

Voor de straal R van een cirkelbaan geldt de formule:

$$R = \frac{p}{qB} \quad \text{waarin } p \text{ de impuls is van het deeltje en } q \text{ de lading}$$

De impuls van het π^+ -meson bedroeg $562 \text{ MeV}/c$. De straal van de cirkelbaan was $10,7 \text{ cm}$.

3p **4** Bereken de magnetische veldsterkte.

De impuls van het π^- -meson bedroeg $331 \text{ MeV}/c$.

4p **5** Bereken de impuls van het K^0 -deeltje.

Bij het verval van het K^0 in pionen zijn geen andere deeltjes ontstaan. Uitgaande van deze en soortgelijke reacties is bepaald dat het K^0 een meson is.

3p **6** Leg aan de hand van de gegeven reactie uit waarom het K^0 -deeltje geen lepton of baryon zou kunnen zijn.

Les 3 – 5 Werkblad 4.4: Behoudswetten, Symmetrieën en Reactiediagrammen met Antwoorden⁷

1. *Betaverval*



Vraag 1	Antwoord 1
a) Controleer baryon, lepton, en ladingsbehoud in reactie (1)	a) Baryon: $+1 = +1$ Lepton: $0 = +1 - 1$ Lading: $0 = +1 - 1$
b) Pas C -symmetrie toe op (1) en schrijf de resulterende vergelijking	b) $\bar{n} \rightarrow p^- + e^+ + \nu_e$ let op, n bestaat uit udd en \bar{n} bestaat uit $\bar{u}\bar{d}\bar{d}$ quarks, neutron en anti-neutron zijn dus duidelijk verschillend.
c) Pas T -symmetrie toe op (1) en schrijf de resulterende vergelijking	c) $p^+ + e^- + \bar{\nu}_e \rightarrow n$
d) Pas X ($\bar{\nu}_e$)-symmetrie toe op (1)	d) $n + \nu_e \rightarrow p^+ + e^-$
e) Pas X (e^-)-symmetrie toe op (1)	e) $n + e^+ \rightarrow p^+ + \bar{\nu}_e$

2. *Reacties met pionen*



Vraag 2	Antwoord 2
a) Controleer voor baryon en ladingsbehoud in reactie (2)	a) Baryon: $0 + 1 = 0 + 1$ Lading: $-1 + 1 = 0 + 0$
b) Pas C -symmetrie toe op (2), waarbij π^+ als antideeltje van π^- genomen wordt en π^0 als antideeltje van zichzelf.	b) $\pi^+ + p^- \rightarrow \pi^0 + \bar{n}$
c) Pas T -symmetrie toe op (2)	c) $\pi^0 + n \rightarrow \pi^- + p^+$
d) Pas X (n) toe op (2)	d) $\pi^- + p^+ + \bar{n} \rightarrow \pi^0$
e) Waarom is de laatste reactie tamelijk onwaarschijnlijk?	e) Het is tamelijk onwaarschijnlijk die drie deeltjes toevallig binnen 1 fm (10^{-15} m) bij elkaar te krijgen.
f) Het π^0 deeltje bestaat uit een up quark en zijn antideeltje ($u\bar{u}$) of een down quark en zijn antideeltje ($d\bar{d}$). Zal het deeltje lang bestaan? Leg uit.	f) Annihilatie kan plaatsvinden tussen u en \bar{u} of tussen d en \bar{d} maar niet tussen twee quarks van verschillende smaak zoals u en \bar{d} en \bar{u} en d .

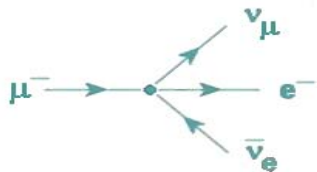
⁷ Een deeltjes tabel is opgenomen aan het eind van dit werkblad.

3. *Muonverval*

De reactie voor muonverval is:



Het reactiediagram⁸⁹ kan als volgt getekend worden (docent legt uit):



Vraag 3	Antwoord 3
a) Controleer leptonbehoud in (3)	a) μ -leptons: $+1 = +1$
b) Pas C symmetrie toe op (3)	e- leptons: $0 = +1 - 1$
c) Pas $X(\nu_\mu)$ toe op (3)	b) $\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$
d) Pas $X(\bar{\nu}_e)$ toe op (3)	c) $\mu^- + \bar{\nu}_\mu \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e$
e) Teken het reactiediagram van 3b	d) $\mu^- + \nu_e \rightarrow e^- + \nu_\mu$
f) Teken het reactiediagram van 3c	
g) Teken het reactiediagram van 3d	

4. *Nogmaals beta verval*

We gaan nu weer terug naar het betaverval:

⁸ De reactiediagrammen die hier gebruikt worden zijn *gesimplificeerde* Feynmandiagrammen, die een grafische voorstelling van een reactievergelijking geven, maar zonder de wiskundige betekenis ervan en het verband met wisselwerkingen uit te werken. Wel geven de pijlen een verband aan met behoudswetten: Pijlen van gewone deeltjes wijzen naar rechts, pijlen van antideeltjes naar links. Een foton krijgt geen pijl, omdat het zijn eigen antideeltje is.

⁹ De docent introduceert de reactie diagrammen en de leerlingen beantwoorden vragen 3a-3g met snelle feedback. Na elke twee of drie items, worden antwoorden even snel centraal besproken.



Vraag 4	Antwoord 4
a. Gebruik symmetrieën om een vergelijking af te leiden voor beta+ verval die resulteert in de emissie van een positron en een neutrino ¹⁰ .	a) $X(e^-, \bar{\nu}_e)$ levert een positron op links van de pijl. Dan passen we T toe en keren de pijl om: $p^+ \rightarrow n + e^+ + \nu_e$
b. Laat zien dat het niet mogelijk is om met symmetrieën uit (4) een reactie af te leiden waarin uit een neutron o.a. een positron geproduceerd wordt.	b) Door kruisen kunnen we met alleen de deeltjes in vergelijking (4) kunnen we alleen een positron krijgen aan <i>dezelfde</i> kant van de pijl als het neutron, NIET aan tegenovergestelde kant.
c. Gebruik de symmetrieën en probeer een reactievergelijking af te leiden waarin een elektron dichtbij de kern wordt ingevangen. (Dit kan in de natuur spontaan gebeuren bij een kern met hoge Z. Niet spontaan kan het ook bij beschieting van kernen met elektronen).	c) Als <i>input</i> moeten we een elektron hebben. Dus we passen tijdsomkeer toe op (4) en verhuizen het antineutrino naar rechts door kruisen: $p^+ + e^- \rightarrow n + \nu_e$ We krijgen dit ook door tijdsomkeer toe te passen op het antwoord van 1c.
d. Bekijk de vergelijkingen nog eens. Met welk proces zouden we elektron neutrino's kunnen detecteren? Met welk proces elektron antineutrino's? ¹¹	d) We kunnen elektronneutrino's detecteren door botsing met neutronen $n + \nu_e \rightarrow p^+ + e^-$ en elektron-antineutrino's door botsing met protonen: $p^+ + \bar{\nu}_e \rightarrow n + e^+$
e. Reactie (4) kan plaatsvinden in een "los" neutron, maar meestal gebeurt de reactie juist in een neutron dat deel uit maakt van een kern, bv ${}^{37}_{17}\text{Cl}$. Schrijf reactie (1) op voor Chloor-37.	e) ${}^{37}_{17}\text{Cl} \rightarrow {}^{37}_{18}\text{Ar} + e^- + \bar{\nu}_e$
f. Door kruising van de reactie in chloor 37, krijgen we een reactie die het mogelijk maakt neutrino's te ontdekken wanneer die botsen met een chloor kern. Schrijf die reactie op en voeg een diagram toe.	f) ${}^{37}_{17}\text{Cl} + \nu_e \rightarrow {}^{37}_{18}\text{Ar} + e^-$

¹⁰ Bij vragen a) en b) wordt het interessant, we kunnen alle vormen van beta verval afleiden uit die ene vergelijking (4). We kunnen ook direct beoordelen of een bepaalde variatie mogelijk is of niet. We kunnen hier dus ook voorspellen dat het invangen van elektronen door een zware kern inderdaad moet kunnen. Wel kan dat elektron dan geen elektron meer blijven. Elektronen in een atoom hebben zo'n grote golflengte dat ze niet in de kern passen. Maar die kennis gaat te ver voor leerlingen die het quantum hoofdstuk van PMN niet gedaan hebben.

¹¹ Deze vraag laat opnieuw zien hoe gebruik van symmetrieën kan leiden tot belangrijke voorspellingen. Het is inderdaad mogelijk gebleken neutrino's via bovenstaande reacties te detecteren.

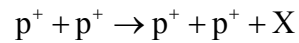
5. *Botsingsprocessen*

Voor de volgende reactie vergelijkingen ga na of de betreffende reactie mogelijk is of niet en geef aan waarom.

Vraag 5	Antwoord 5
a) $\pi^+ + p^+ \rightarrow p^+ + p^+ + \bar{n}$	a) baryonbehoud klopt: $0 + 1 = 1 + 1 - 1$. Ook ladingsbehoud is ook OK.
b) $p^+ + p^+ \rightarrow p^+ + p^+ + n$	b) geen baryonbehoud: $2 \neq 3$

6. *Wat voor deeltjes?*

Een reactie is als volgt:



X is een onbekend deeltje.

Vraag 6	Antwoord 6
a) Is het een meson of een baryon? Waarom?	a) X kan geen baryon of antibaryon zijn want dan klopt het baryonbehoud niet, het kan wel een neutraal meson zijn.
b) Heeft X lading of niet? Waarom?	b) X kan geen lading hebben want dan klopt het ladingsbehoud niet
c) Kan X een lepton zijn?	c) Het kan geen lepton zijn, want dan klopt het leptonbehoud niet
d) Beantwoord a), b), en c) voor het geval dat er twee deeltjes (X en Y) gevormd worden.	d) Een baryon en een antibaryon zou ook kunnen. Om aan ladingbehoud te voldoen moeten X en Y dan neutraal zijn, of een tegengestelde lading hebben. Leptonen zou kunnen maar ook dan moeten het een lepton en zijn antideeltje zijn

Tabel 1: Elementaire deeltjes

Elementaire Deeltjes: Fermionen							
Quarks				Leptonen			
Generatie	Deeltje/smaak	Massa (GeV/c ²)	Lading (e)	Generatie	Deeltje/smaak	Massa (GeV/c ²)	Lading (e)
1	u up quark	0,003	2/3	1	ν_e elektron neutrino	$<1 \times 10^{-5}$	0
	d down quark	0,006	-1/3		e^- elektron	0,000511	-1
2	c charm quark	1,3	2/3	2	ν_μ muon neutrino	<0,0002	0
	s strange quark	0,1	-1/3		μ^- muon	0,106	-1
3	t top quark	175	2/3	3	ν_τ tau neutrino	<0,02	0
	b bottom quark	4,3	-1/3		τ^- tau	1,7771	-1
Elementaire Deeltjes: Bosonen							
Sterke interactie				Elektrozwakke interactie			
	g gluon	0	0		γ photon	0	0
					W^- W-min-boson	80,4	-1
Gravitatie					W^+ W-plus-boson	80,4	+1
	graviton (hypothetisch)				Z^0 Z boson	91,2	0

- Ieder deeltje heeft een antideeltje, met dezelfde massa en met tegengestelde lading, en tegengesteld baryon- of leptongetal.
- Alle genoemde quarks hebben baryongetal 1/3 en leptongetal 0
- Alle genoemde leptonen hebben baryongetal 0 en leptongetal 1
- Leptonbehoud geldt apart voor elektron/neutrino, muon/neutrino, en tau/neutrino¹²

Tabel 2: Enkele samengestelde deeltjes

deeltje	samenstelling	baryongetal	leptongetal
p^+ proton	uud	1	0
p^- anti-proton	$\bar{u}\bar{u}\bar{d}$	-1	0
n neutron	udd	1	0
\bar{n} anti-neutron	$\bar{u}\bar{d}\bar{d}$	-1	0
π^- pi-min-meson	$\bar{u}d$	0	0
π^+ pi-plus-meson	$u\bar{d}$	0	0
π^0 pi-nul-meson	$u\bar{u} / d\bar{d}$	0	0
H waterstofatoom	p^+e^-	1	1

¹² Voor de specialist: we hebben het nog niet over mixing waarbij neutrinos van de ene soort in de andere kunnen overgaan.

Appendix A: Tekst over Standaardmodel uit PMN

Subatomaire deeltjes

Het atomisme, de theorie dat materie uit ondeelbare kleinste bouwstenen bestaat, stamt uit de Griekse oudheid. Eeuwenlang zijn er voornamelijk filosofische en theologische discussies over dit idee geweest, zonder eigenlijk enig uitzicht op de mogelijkheid om er ooit via waarnemingen meer concrete uitspraken over te kunnen doen.

Met de opkomst van de moderne natuurwetenschap veranderde dat. Verschijnselen, bijvoorbeeld op het gebied van scheikunde, elektrochemie en gastheorie, wezen steeds meer op het bestaan van atomen. Het bleek zelfs mogelijk iets te zeggen over de eigenschappen ervan, en een indeling te maken van atoomsoorten, een indeling die wij kennen als het periodiek systeem. Rond het begin van de twintigste eeuw werd duidelijk dat atomen ook deelbaar zijn. Ze bestaan zelf weer uit nog kleinere deeltjes. In 1896 werden elektronen ontdekt, in 1919 protonen en in 1932 neutronen, waarvan het bestaan overigens al door Rutherford voorspeld was.

De bouwstenen van 'normale' materie

Met proton, neutron en elektron kennen we de bouwstenen voor de atomen en daarmee voor de 'normale' materie waar wijzelf en alle dingen om ons heen uit bestaan. Daarnaast kennen we het foton, dat dienst doet bij het beschrijven van elektromagnetische verschijnselen.

Bij waarnemingen aan kernreacties rond het eind van de twintiger jaren van de 20^e eeuw bleek dat het nodig was nog een extra deeltje in te voeren. De reden was dat er bij β -verval energie verloren leek te gaan. De ontsnappende β -deeltjes hebben in het algemeen minder energie dan verwacht mag worden op grond van het massaverschil tussen de oude en de nieuwe kern. In 1930 suggereerde Pauli dat er bij β -verval nog een tweede deeltje vrijkomt, het neutrino (ν).

Neutrino's bleken inderdaad te bestaan, maar ze zijn erg moeilijk waar te nemen. Het duurde tot 1956 voor ze werden gevonden. Het neutrino is een soort broertje van het elektron maar dan zonder lading en met een heel kleine massa. De

kans op een reactie met andere materie is zo klein, dat ze vrijwel ongehinderd door de aarde of zelfs door de zon heen kunnen vliegen. Er zijn er echter wel heel veel van. Een procent of drie van de energie die de zon per seconde verliest ontsnapt bijvoorbeeld in de vorm van neutrino's.

Een stortvloed van nieuwe deeltjes

De vijf deeltjes die we tot nu toe zijn tegengekomen (γ , p^+ , n , e^- , ν), zijn genoeg om het overgrote deel van de bekende fysische verschijnselen mee te beschrijven. Maar wie denkt dat de natuur zuinig is en het dus hier wel bij zal laten, komt bedrogen uit. In 1937 werd een nieuw deeltje ontdekt, dat veelvuldig voorkomt in de kosmische straling en dat het *muon* (μ) wordt genoemd. Het is een soort kopie van het elektron, maar dan 207 maal zo zwaar.

"Wie heeft dit besteld?", was de reactie van Pauli op de ontdekking van het muon, maar dit bleek slechts het begin. In de decennia rond het midden van de twintigste eeuw werd nog eens een hele stortvloed van enkele honderden andere *subatomaire deeltjes* ontdekt.

Een meer systematische bestudering van deze deeltjes in de tweede helft van de twintigste eeuw werd mogelijk door drie ontwikkelingen:

- Ten eerste leerde men ze zelf te maken, met behulp van versnellers.
- Ten tweede werden de waarnemingsinstrumenten steeds beter.
- Ten derde was dat het door de ontwikkeling van de quantumveldentheorie mogelijk om de betere waarnemingen ook te interpreteren, gericht te zoeken, het bestaan van nieuwe deeltjes te voorspellen en nieuw waargenomen deeltjes ook als zodanig te herkennen.

Het standaardmodel

Inmiddels kunnen alle nu bekende deeltjes in een min of meer eenvoudige ordening worden ondergebracht, een soort subatomair periodiek systeem. De theorie achter dit systeem wordt het *standaardmodel* genoemd.

Misschien het meest opvallend is dat het proton en het neutron ontbreken in deze lijst. In de jaren na 1960 werd ontdekt dat deze deeltjes niet elementair zijn maar samengesteld uit deeltjes die *quarks* genoemd worden. Een proton is samengesteld uit twee up-quarks, met lading $2/3e$ en een down-quark, met lading $-1/3e$. Een neutron is samengesteld uit twee down-quarks en een up-quark.

Een tweede opvallend kenmerk van de tabel is de herhaling. Er zijn drie zogenaamde *generaties* van steeds twee leptonen (elektronachtige deeltjes) met lading 0 en -1 en twee quarks met lading $2/3$ en $-1/3$. De normale materie om ons heen bestaat geheel uit deeltjes van generatie 1. Waarom de andere generaties er zijn en waarom er in totaal precies drie zijn is niet bekend. De herhaling suggereert dat er nog weer een onderliggend systeem is. Hierover bestaan wel allerlei hypothesen maar alleen verder onderzoek kan uitwijzen wat er echt aan de hand is.

De materiedeeltjes die, voor zover nu bekend, elementair zijn worden onderverdeeld in drie *generaties*. De eerste generatie bestaan uit twee *leptonen*, het elektron en het elektron-neutrino en uit twee quarks, het up-quark en het down-quark.

De gewone materie om ons heen bestaat geheel uit deeltjes van de eerste generatie, protonen (uud), neutronen (udd) en elektronen (en heel veel neutrinos, waar we echter niets van merken).

De deeltjes uit de tweede en derde generatie hebben een grotere massa en zijn instabiel. Ze vervallen binnen korte tijd naar deeltjes uit de eerste generatie (behalve misschien de neutrinos, waarvan de eigenschappen nog niet precies bekend zijn, maar die waarschijnlijk kunnen wisselen van identiteit.)

Wisselwerkingsbosonen

Alle leptonen en quarks zijn fermionen. Daarnaast bestaan er nog de zogenaamde wisselwerkingsbosonen, die te maken hebben met de wisselwerkingen tussen deeltjes.

Voor de elektromagnetische wisselwerking kennen we het foton. Ook de deeltjes die horen bij de sterke wisselwerking zijn inmiddels bekend, deze worden gluonen genoemd.

De leptonen zijn niet gevoelig voor de sterke wisselwerking. Er bestaat echter nog een kracht die de zwakke wisselwerking genoemd wordt en waar zowel leptonen als quarks gevoelig voor zijn. De zwakke wisselwerking is bijvoorbeeld verantwoordelijk voor het β -verval van het neutron. Ook bij deze wisselwerking horen bosonen. Het Z^0 -deeltje is een soort foton met massa en het W^+ - en het W^- -deeltje hebben behalve massa zelfs ook lading.

In de negentiende eeuw bleek dat elektriciteit en magnetisme zoveel met elkaar te maken hebben dat er sindsdien wordt gesproken over de elektromagnetische wisselwerking. Eind twintigste eeuw bleek ook de zwakke wisselwerking zeer nauwe familie te zijn van elektriciteit en magnetisme, en wordt er ook wel gesproken over de *elektrozwakke wisselwerking*. Er wordt gezocht naar een theorie die alle krachten verenigt onder dezelfde noemer, maar dit is nog niet gelukt. Met name de zwaartekracht blijkt zeer weerbarstig bij pogingen om deze kracht quantum fysisch te beschrijven.

De reden voor de naam gluon (lijmdeeltje) is dat de sterke wisselwerking tussen quarks zo sterk is dat er geen losse quarks voorkomen. Ze zitten altijd in de vorm van samengestelde deeltjes zoals proton en neutron die met betrekking tot de sterke wisselwerking neutraal zijn. Dat protonen en neutronen in een atoomkern elkaar desondanks aantrekken is vergelijkbaar met de aantrekkingskracht tussen elektrisch neutrale atomen in een molecuul of kristal.

Het PMN materiaal gaat hier verder met 5 pagina's over waarnemingsinstrumenten zoals detectoren en versnellers. Dit materiaal kan gemakkelijk gekopieerd worden van de website: www.phys.uu.nl/~wwwpmn. Vervolgens komt paragraaf 4.4 over behoudswetten en symmetrieën (Appendix B).

Appendix B: Tekst Behoudswetten, Symmetrieën, en Elementaire Deeltjes uit PMN

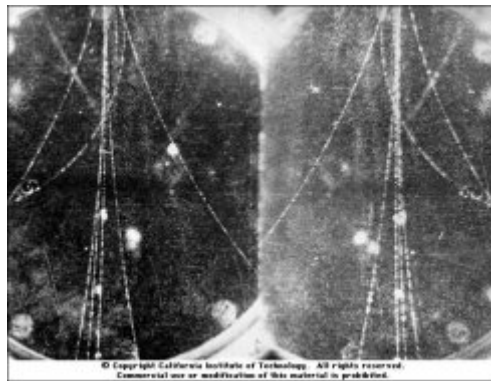
Behoudswetten en symmetrieën

Antideeltjes

In 1928 voorspelde de Engelse fysicus Paul Dirac, op theoretische gronden, dat het elektron een *antideeltje* zou moeten hebben, een deeltje met dezelfde massa als het elektron, maar met tegengestelde lading. In 1932 werd dat deeltje, het positron (e^+), inderdaad gevonden op een nevelkamer-foto.

figuur 1

De eerste opname van een positron



Het bestaan van het anti-elektron toonde de eerste glimp van een belangrijke *symmetrie* in de natuur: Na de succesvolle voorspelling van het positron ging men er al snel van uit dat ook ieder ander deeltjes een bijbehorend antideeltje zou moeten hebben.

De antideeltjes van protonen, neutronen en vele andere deeltjes werden op den duur ook inderdaad gevonden. Omdat antiprotonen door hun grotere massa minder makkelijk ontstaan dan positronen, duurde het wel langer. Het antiproton en het antineutron werden gevonden in 1955, na de bouw van een versneller die de vereiste energie kon bereiken.

Iedere type deeltje heeft een bijbehorend antideeltje, waarvan de lading tegengesteld is. Antideeltjes geven we meestal aan met een streepje, dus het antideeltje van een X is een \bar{X} maar er zijn uitzonderingen. Het antideeltje van het elektron wordt meestal geschreven als e^+ , in plaats van \bar{e}^- , en het antideeltje van het proton als p^- , in plaats van \bar{p}^+ ; en zo zijn er nog enkele.

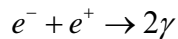
Proton en antiproton bijvoorbeeld zijn duidelijk verschillende deeltjes, want het antiproton is negatief geladen. Het foton, daarentegen, heeft geen lading en blijkt ook geen andere eigenschappen te hebben waarin het zou kunnen verschillen van een antifoton. Het foton is zijn eigen antideeltje. Hetzelfde geldt voor nog een aantal andere deeltjes maar niet voor ieder neutraal deeltje. Neutron en antineutron zijn bijvoorbeeld verschillend, wat begrijpelijk is omdat het neutron een samengesteld deeltje is. Het neutron bestaat uit quarks (udd) en het antineutron uit anti-quarks ($\bar{u}\bar{u}\bar{d}$).

Annihilatie en paarvorming

Antimaterie lijkt in allerlei opzichten sterk op gewone materie. Antiprotonen en positronen vormen samen, bijvoorbeeld, ook antiwaterstofatomen, met dezelfde energieniveaus en dezelfde spectraallijnen als gewoon waterstof. In principe zouden er zelfs antimensen kunnen bestaan. Met hen zouden we ruzie kunnen maken over wie nu normaal is en wie anti, want antimaterie is de antimaterie van gewone materie maar gewone materie is net zo goed de antimaterie van antimaterie. Wat wel zo is, en

misschien is dat wel vreemd, is dat het heelal gevuld is met normale materie. Waarom zijn er niet gelijke hoeveelheden materie en antimaterie in het universum?

Een dergelijk heelal zou overigens wel een gevaarlijke plek zijn om in te leven. Het idee van antimensen klinkt wel leuk maar je kunt ze beter niet tegenkomen. Antideeltjes zijn in principe net zo stabiel als de corresponderende normale deeltjes maar deeltjes die hun antideeltje tegenkomen *annihileren* elkaar. Als positron en elektron elkaar ontmoeten vernietigen ze elkaar en hun massa wordt geheel omgezet in andere deeltjes, fotonen bijvoorbeeld:



Deeltje en antideeltje worden bij een ontmoeting vernietigd maar het omgekeerde, de creatie van deeltjes is ook mogelijk. Een foton van voldoende energie kan worden omgezet in een deeltje-antideeltje paar. Deze reactie heet *paarvorming*. De beschikbare fotonenergie moet hiervoor, volgens $E=mc^2$, minstens genoeg zijn voor de massa van beide deeltjes.

Behoudswetten

In reactievergelijkingen draait alles om behoudswetten en in verschillende gebieden gebruik je daarvoor verschillend jargon. In het dagelijks leven zeg je bijvoorbeeld dat huissleutels niet oplossen als het regent. In het natuurkundejargon zou je datzelfde uitdrukken door te zeggen dat het aantal huissleutels in interacties met regendruppels behouden blijft.

In veel soorten interacties is het aantal elektronen een behouden grootte. Er geldt echter geen absolute behoudswet, want in kernreacties en reacties met subatomaire deeltjes kan het aantal wel degelijk veranderen. Bijvoorbeeld, bij het β -min (β^{-}) verval van het neutron komt er een elektron bij:

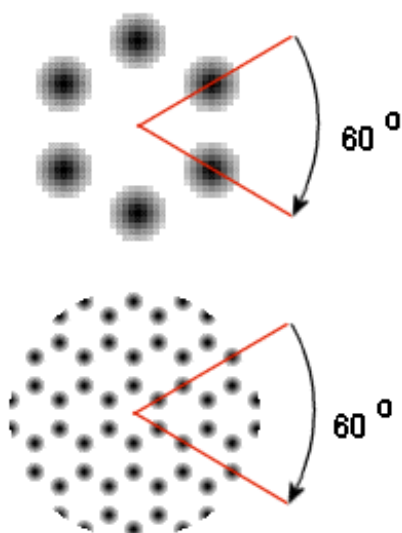


Daarom introduceren we in plaats van het aantal elektronen een ander getal, het *leptongetal*. Onder leptonen (lichte deeltjes) verstaan we de elektronachtige deeltjes en de bijbehorende neutrino's. Het leptongetal wordt nu gedefinieerd door:

$$\text{leptongetal} = \text{het aantal leptonen} - \text{het aantal antileptonen}$$

Omdat er geen enkele reactie bekend is waarbij het leptongetal wel verandert, kunnen we stellen dat het leptongetal een behouden grootte is. Voor zover bekend is dit een absolute behoudswet, vergelijkbaar met behoud van lading.

figuur 2



Al lang voordat de theorie van quarks bestond was al opgemerkt dat er een soortgelijke behoudswet bestaat voor deeltjes als protonen, neutronen en andere soortgelijke deeltjes, die samen worden aangeduid als *baryonen*. Er geldt een behoudswet voor het baryongetal:

$$\text{baryongetal} = \text{het aantal baryonen} - \text{het aantal antibaryonen}$$

Tegenwoordig is bekend dat alle baryonen bestaan uit drie quarks. Behoud van baryongetal drukt dus in feite precies het behoud van quarkgetal uit. Het baryongetal kennen we in iets andere gedaante al uit de kernfysica. Het massagetal van een kern is in feite precies het baryongetal. De andere belangrijke behouden grootte in kernreacties, het behoud van het totale

atoomgetal drukt gewoon het behoud van lading uit en wordt daarom ook wel het ladinggetal genoemd.

Symmetrieën

We hebben al gezien dat behoudswetten belangrijk zijn bij het analyseren van reacties. Een iets andere, nauw verwante en ook erg handige invalshoek is het gebruik van symmetrieën. Daarom gaan we ons eerst eens afvragen wat een symmetrie nu precies is.

Een duidelijk voorbeeld van een symmetrie zien we bij het kristalrooster van grafiet. Dat is symmetrisch onder een rotatie over 60° .

Het principe van een symmetrie is hier dat er een bepaalde eigenschap is, het patroon van het kristalrooster, die niet verandert bij bepaalde acties, in dit geval een draaiing over 60° . Zo'n eigenschap heet een *symmetrie-eigenschap* en zo'n actie heet een *symmetrie-transformatie*.

We gaan ons nu bezighouden met symmetrie-transformaties voor deeltjesreacties. De symmetrie-eigenschap die we bekijken is of een reactie fysisch mogelijk is. Bij deze symmetrie-eigenschap bekijken we nu een aantal verschillende symmetrie-transformaties. Maar het principe is dus steeds hetzelfde: Neem een bestaande reactievergelijking, verander er iets aan en kijk of het resultaat ook weer kan voorkomen.

Tijdomkeer- en ladingomkeer-symmetrie

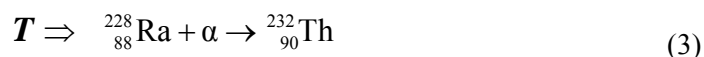
Tijdomkeer (T) is een bewerking die bestaat uit het omkeren van een proces. Anders gezegd, de pijl in de reactievergelijking wordt omgedraaid. Symmetrie onder tijdomkeer zegt dan dat deze bewerking mogelijk is zonder de werkelijkheid geweld aan te doen, dat het omgekeerde van een mogelijk proces zelf ook mogelijk is. Tijdomkeer-symmetrie zegt dus dat de pijl in een reactievergelijking inderdaad *mag* worden omgedraaid.

Voorbeeld:

Thorium-232 vervalst onder uitzenden van een α -deeltje tot Radium-228.



Omgekeerd kan het beschieten van Radium met α -deeltjes *van de juiste energie* dan ook resulteren in de productie van Thorium:



De macroscopische wereld is duidelijk niet tijdsymmetrisch. Van een videoband die wordt teruggespoeld heb je binnen een paar seconden door dat de film niet normaal draait. Op microscopische kleine schaal zijn de meeste reacties wel degelijk omkeerbaar. Er is zelfs lange tijd gedacht dat op microscopische schaal de wereld inderdaad rigoreus symmetrisch is onder tijdomkeer. De omkeerbaarheid van de tijd en alle natuurkundige en filosofische kwesties die ermee samenhangen vormen een interessant maar ingewikkeld gebied van onderzoek, waar de laatste woorden nog niet gezegd zijn.

Een tweede, en nauw verwante symmetrie is de symmetrie onder *ladingomkeer* (C , uit het Engels: *Charge conjugation*). Hiermee wordt bedoeld dat deeltjes worden vervangen door hun antideeltjes. Symmetrie onder C betekent dus dat een reactievergelijking blijft gelden als alle deeltjes die erin voorkomen worden vervangen door hun antideeltjes.

Voorbeeld:

Een proton en een elektron vormen samen een waterstofatoom:



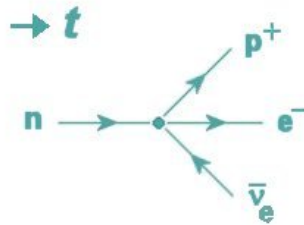
Op grond hiervan verwachten we dat een antiproton en een positron samen een anti-waterstofatoom zullen vormen:



Dergelijke anti-atomen kunnen inmiddels in redelijke aantallen geproduceerd worden op het CERN in Genève.

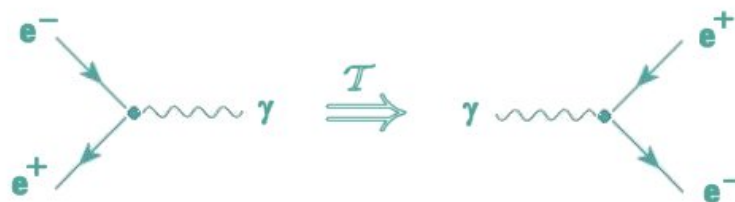
Diagrammen

figuur 3



Deeltjesreacties kunnen beeldend worden weergegeven met behulp van diagrammen, die we *reactiediagrammen* zullen noemen. In het diagram in figuur 2 loopt de tijd van links naar rechts. Lijnen staan voor deeltjes; punten waar lijnen samenkomen geven interacties weer, en pijlen in de deeltjeslijnen drukken een behoudswet uit: behoud van baryongetal in het geval van het proton, en behoud van leptongetal bij het elektron en het neutrino. Dat bij het antineutrino de pijl naar links staat heeft als betekenis dat het leptongetal (-1) tegengesteld is aan dat van het elektron (+1). Ook bij een positron zou de pijl naar links staan, evenals bij een antiproton (vanwege het baryongetal -1).

figuur 4



De diagrammen geven een beeldende weergave van een reactievergelijking en ook symmetrieën kunnen worden geformuleerd als regels voor het bewerken van diagrammen.

T-symmetrie zegt dus bijvoorbeeld dat een diagram in zijn geheel mag worden omgedraaid¹³.

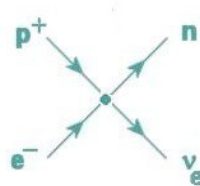
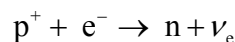
¹³ *Paarcreatie* vindt alleen plaats in de buurt van zware atoomkernen die een deel van de impuls van het foton absorberen. Anders zou er geen gelijktijdig energie-massa en impulsbehoud zijn. Neem bijvoorbeeld een foton dat net genoeg energie heeft om de massa van positron en elektron te creëren

Elektronvangst en β^+ -verval

Beta min (β^-) verval komt voor bij kernen met een overschot aan neutronen. De reactie die plaatsvindt, komt er op neer dat in de kern een neutron wordt omgezet in een proton, zie vergelijking (1) en figuur 2.

In kernen met een relatief tekort aan neutronen blijkt ook een omgekeerde reactie te kunnen optreden, waarbij een proton wordt omgezet in een neutron. Er worden zelfs twee verschillende typen verval waargenomen waarin dit plaatsvindt.

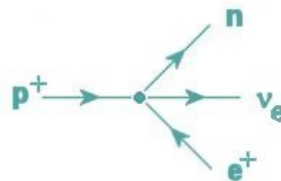
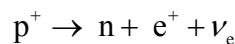
De eerste van deze reacties wordt *elektronvangst* genoemd: Een proton en elektron kunnen reageren met een neutron en een neutrino als resultaat.



(6)

Deze reactie vindt met name plaats in zware atomen. De binnenste elektronen zitten dan dicht bij de kern, wat de kans op elektronvangst groter maakt.

Als het invangen van een elektron niet mogelijk is, of een lage waarschijnlijkheid heeft, dan is er nog de mogelijkheid dat een proton vervalt naar een neutron, onder uitzenden van een positron en een neutrino:



(7)

Deze reactie zal bij een vrij proton nooit plaatsvinden, omdat hij energie kost. De massa voor de reactie (proton) is immers kleiner dan de massa na de reactie (neutron plus positron). Binnen een atoomkern kan deze energie echter aanwezig zijn als er een overschot aan protonen is. De positieve lading van alle protonen in de kern zorgt ervoor dat het neutron stabiel wordt en in principe het proton minder stabiel. Als dit ver genoeg doorgaat kan de genoemde reactie plaatsvinden, zodat inderdaad een proton kan vervallen naar een neutron in plaats van andersom. Deze reactie heet β plus verval (β^+) in tegenstelling tot β^- -verval.

Kruisen

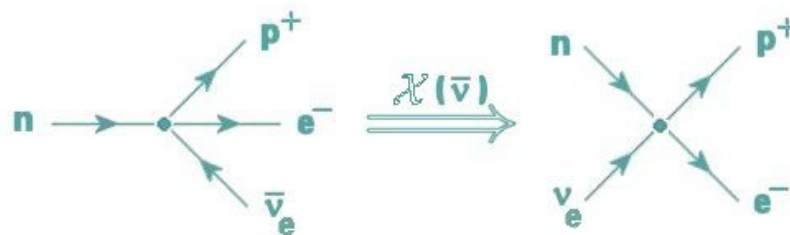
Tijdomkeer komt er op neer dat *alle* deeltjes aan de linkerkant van de reactiepijl naar rechts worden gebracht en andersom. Ladingomkeer betekent dat *alle* deeltjes die deelnemen aan de reactie worden veranderd in hun antideeltjes. Als we de diagrammen van β^- -verval, β^+ -verval en elektron-vangst met elkaar vergelijken (vergelijking 1,6,7) dan suggereert dit het bestaan van nog een verdere symmetrie, die mag worden toegepast op de *afzonderlijke* deeltjes in een reactie. De bewerking die nodig is om de verschillende reacties met elkaar in verband te brengen is een combinatie van **T** en **C** voor de afzonderlijke lijnen in een diagram.

zonder kinetische energie. Zonder absorptie door een nabije atoomkern, zou er geen impulsbehoud zijn. Paar creatie vindt dus niet plaats in vacuüm. Hoge energie fotonen kunnen dus lichtjaren door de ruimte reizen om dan pas op aarde deeltjes te creëren.

De symmetriebewerking waarbij een deeltje van de ene kant van de reactiepijl naar de andere kant wordt overgebracht en daarbij omgezet in zijn antideeltje heet *kruisen*. We zullen dit aangeven met \mathbf{X} . Symmetrie onder kruisen lijkt inderdaad geldig te zijn voor alle typen deeltjesreacties.

In een reactiediagram betekent dit dat een willekeurige lijn mag worden omgeklapt naar de andere kant, waarbij eventuele pijlen in 'dezelfde' richting blijven wijzen, dat wil zeggen naar het interactiepunt toe of van het interactiepunt af (figuur 4):

figuur 5



De reacties voor β^+ -verval en elektronvangst kunnen via een combinatie van kruisen en tijdsymmetrie worden afgeleid uit de reactie voor β^- -verval:

$$\begin{aligned} & n \rightarrow p^+ + e^- + \bar{\nu}_e \\ \mathbf{T} \Rightarrow & p^+ + e^- + \bar{\nu}_e \rightarrow n \end{aligned} \quad (8)$$

$$\mathbf{X}(\bar{\nu}_e) \Rightarrow p^+ + e^- \rightarrow n + \nu_e$$

en

$$\begin{aligned} & n \rightarrow p^+ + e^- + \bar{\nu}_e \\ \mathbf{X}(e^-, \bar{\nu}_e) \Rightarrow & n + e^+ + \nu_e \rightarrow p^+ \\ \mathbf{T} \Rightarrow & p^+ \rightarrow n + e^+ + \nu_e \end{aligned} \quad (9)$$

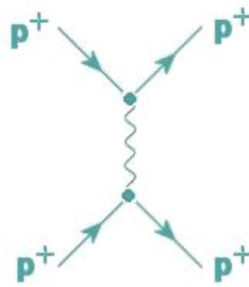
Daarnaast is er nog een groot aantal andere reacties dat op soortgelijke manier kan worden verkregen, bijvoorbeeld:

$$\begin{aligned} & n \rightarrow p^+ + e^- + \bar{\nu}_e \\ \mathbf{X}(\bar{\nu}_e) \Rightarrow & n + \nu_e \rightarrow p^+ + e^- \end{aligned} \quad (10)$$

Al deze reacties zijn inderdaad fysisch mogelijk, mits ze ook wat energie betreft kunnen verlopen. De laatstgenoemde reactie betekent bijvoorbeeld dat neutrino's kernreacties kunnen veroorzaken, wat van belang is bij het detecteren van neutrino's.

Voor natuurkundigen geven diagrammen niet alleen een afbeelding van een reactievergelijking, maar hebben ze nog veel meer betekenis. Deeltjesfysici gebruiken zogenaamde *Feynmandiagrammen*, waarin ieder onderdeel, iedere lijn en ieder punt een wiskundige betekenis heeft. Met behulp van diagrammen kan bijvoorbeeld de waarschijnlijkheid worden berekend dat een proces plaatsvindt.

figuur 6



Ook kunnen diagrammen worden gebruikt om *krachten* uit te rekenen. Figuur 5 geeft bijvoorbeeld in eerste benadering de elektrische kracht tussen twee protonen. De deeltjestheorieën waarmee deze resultaten werden bereikt hebben lange tijd te kampen gehad met grote problemen, die vaak te maken hadden met oneindigheden die optraden bij het uitrekenen van diagrammen.

Decennia lang rond de helft van de twintigste eeuw, werden klinkende resultaten afgewisseld met onbegrijpelijke raadsels. Rond het eind van de eeuw werd een aantal problemen opgelost, hetgeen heeft geleid tot wat nu het 'standaardmodel' van elementaire deeltjes genoemd wordt. De Nederlandse natuurkundigen Gerard 't Hooft en Martinus Veltman hebben in 1999 de Nobelprijs gekregen voor hun bijdrage hieraan.

De formulering van het standaardmodel wil nog niet zeggen dat alle problemen nu voorbij zijn. De voorspellingen van het standaardmodel lijken fantastisch te kloppen, maar de theorie heeft ook nog kenmerken waar natuurkundigen ontevreden over zijn. Verder ontbreken er nog belangrijke elementen, zoals een goede beschrijving van de zwaartekracht. Quantum fysica en zwaartekracht blijken tot nog toe een buitengewoon moeilijke combinatie te vormen.

De beperkingen van het standaardmodel hebben wellicht ook een relatie met een heel ander onderwerp, de kosmologie. Een belangrijk probleem in onze hedendaagse kennis over het heelal is dat een groot deel van de massa in het heelal zoek lijkt te zijn. Schattingen gebaseerd op de waarneembare materie geven maar een fractie te zien van de massa die nodig is om de beweging van sterren en sterstelsels te verklaren. Volgens de huidige gegevens is 90-95% van de massa van het heelal onvindbaar. Een mogelijke verklaring is dat er zware deeltjes zouden bestaan, die niet of nauwelijks met andere materie reageren en daardoor onzichtbaar zijn, ongeveer net als neutrino's maar dan veel zwaarder. Er zijn ook theorieën die het bestaan van dergelijke deeltjes voorspellen zoals supersymmetrie dat een "super"partner voorspelt voor elk bekend deeltje. Met de huidige meetapparatuur zijn de voorspellingen van deze 'supersymmetrische' theorieën echter nog niet te bevestigen of te ontkennen, maar een nieuwe generatie detectoren is op komst.

Antwoorden Werkblad 4.3 Bellenvat Foto's en Deeltjes

1. In welke richting worden negatieve deeltjes afgebogen? In welke richting positieve deeltjes? *Negatief naar rechts, positief naar links. Gebruik rechterhandregel.*
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? *Er zijn twee deeltjes gevormd, een positief en een negatief. Ze worden gemakkelijk afgebogen dus zijn het lichte deeltjes (zoals elektron en positron). Een ander deeltje moet de oorzaak zijn geweest, een neutraal deeltje want er is geen spoor. Een proces dat we al kennen is creatie van een elektron-positron paar uit een foton. Dat zal het zijn.*
3. Er staan veel spiralen in de foto, waarbij een deeltje steeds kleinere cirkels beschrijft. Waarom worden de cirkels steeds kleiner? *$R = mv/qB$. Lading van het deeltje en magneetveld in het bellenvat zijn constant, dus moet mv afnemen. Er is dus energieverlies. Dat gebeurt op twee manieren. Het deeltje veroorzaakt ionisatie langs zijn baan en geladen deeltjes die versneld/vertraagd worden (waaronder van richting veranderen) zenden elektromagnetische straling uit en dat kost ook energie.*
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? *Rechte sporen, dus zeer grote R , dus zeer grote impuls mv , dus zware deeltjes zoals bv protonen.*
5. Bij de letters B zien we steeds "kringels" die uit het niets ontstaan en in niets eindigen. De sporen buigen altijd rechtsonder. Wat voor deeltjes zijn dat? Hoe zijn ze gevormd? *De sporen zijn rechtsonder en zijn behoorlijk gekromd. Het gaat dus om negatieve en lichte deeltjes.....elektronen dus. De kringels ontstaan uit "niets", er moet dus een neutraal deeltje bij betrokken zijn. Hoogst waarschijnlijk is dit gewone ionisatie. Fotonen worden door een atoom van de bellenvatvloeistof geabsorbeerd en een elektron komt vrij met redelijk hoge energie, kringelt rond, verliest energie, en wordt weer ergens anders geabsorbeerd. In een omgeving met veel hoog-energetische deeltjes, is veel straling en zijn dat soort fotonen dus aanwezig.*

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

6. Welk deeltje is dat? Is de lading + of -? *Het deeltje wordt naar links afgebogen en is dus positief, ziet eruit als een positron.*
7. Verandert er iets met de lading na E? *Na E wordt het rechts omgebogen en is er dus een negatief deeltje.*
8. Wat kan er gebeurd zijn? *Alsof een positron is overgegaan in een elektron. Waarschijnlijk is een positron gebotst met een elektron van een atoom van de bellenvatvloeistof. Dat elektron is vrijgemaakt en heeft de bewegingsenergie van het positron overgenomen.*
9. Waaraan kun je zien dat de deeltjes voor en na E dezelfde impuls zouden kunnen hebben en dus mogelijk dezelfde massa? *Uit de kromming van de baan voor E en na E kan worden bepaald dat het gaat om deeltjes met vrijwel gelijke massa. Uit andere metingen is vastgesteld dat $|m_{e^-} - m_{e^+}| < 10^{-8} \text{ MeV}/c^2$ en dat bevestigt dat elektron en positron dezelfde massa hebben.*
10. Een deeltje eindigt zijn vlucht in P. Wat voor deeltje is dat? *Wat kan er gebeurd zijn? Positief deeltje want naar links afgebogen. Zal wel positron zijn en is op elektron gebotst en toen geannihileerd.*
11. In het verlengde van de baan van dit deeltje begint bij Q weer een elektron-positron paar. Welk deeltje hebben we tussen P en Q? *Het annihilatiefoton en dat is neutraal en laat geen spoor achter.*

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

12. Een foton heeft geen massa, maar blijkbaar wel impuls. Hoe zie je dat? *Bijvoorbeeld bij Q, zowel elektron als positron beginnen te bewegen in dezelfde richting, ze hebben dus een impuls in die richting en die moet van het foton komen. Golfdeeltjes als fotonen wordt een impuls toegekend van h/λ .*
13. Waarom denk je dat het deeltje dat vooraf gaat aan de V neutraal is? *Geen zichtbaar spoor, dus geen ionisatie.*
14. Het Kaon vervalt in twee geladen pionen, het π^+ en het π^- . Welke behoudswetten gelden in de onderste punt van de V? *Behoud van energie en impuls.*
15. Stel dat je de kromming van de pion banen zou kunnen vaststellen, zou je dan de massa van het Kaon kunnen berekenen? Schrijf eens een paar vergelijkingen op om te zien of dat mogelijk zou zijn (je hoeft de vergelijkingen niet op te lossen maar geef wel aan welke grootheden uit de bellenvatfoto bepaald kunnen worden. *Behoud van impuls: $(mv)_K = (mv)_{\pi 1} + (mv)_{\pi 2}$ Dit geldt zowel in x-richting als in y-richting. De v is vetgedrukt om een vector aan te geven. Verder behoud van energie: $(\frac{1}{2}mv^2)_K = (\frac{1}{2}mv^2)_{\pi 1} + (\frac{1}{2}mv^2)_{\pi 2}$ We hebben dan totaal 3 vergelijkingen. We bepalen de impuls van de twee pionen uit de foto. Als we hun massa's weten, dan kunnen we ook hun snelheden bepalen en dus de kinetische energieën van beide pionen. We hebben dan 3 vergelijkingen met 3 onbekenden: de Kaon massa en de x- en y-component van de Kaon snelheden. We kunnen dan de massa berekenen.*

De figuur rechts geeft een tussenreactie. In werkelijkheid vervalt het Kaon op een complexe manier, maar in het bellenvat zien we alleen de eindproducten, de twee pionen.

Voor meer uitgebreide informatie over deze bellenvatfoto zie: The Physics Teacher, 1(2), februari 1993.

Correctievoorschrift:

K⁰ - deeltje (PMN school examen 2003 herkansing)	
2p	<p>1 □ Antwoord: Het veld wijst het papier in</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Gebruik van de correcte handregel voor de Lorentzkacht [1] ▪ Conclusie [1]
4p	<p>2 □ Uitkomst: 836 MeV/c</p> <p>Berekening: $p(K^0) = p_x(K^0) = p_x(\pi^+) + p_x(\pi^-) = 562 \cos 15,5^\circ + 331 \cos 27,0^\circ = 836,48 \text{ MeV}/c$</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Gebruik van behoud van impuls [1] ▪ Inzicht dat de impuls in y-richting nul is [1] ▪ Gebruik van de cosinussen van beide hoeken [1] ▪ Completeren van de berekening [1]
2p	<p>3 □</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Geen lepton, want dit is in strijd met behoud van leptongetal [1] ▪ Geen baryon, want dit is in strijd met behoud van baryongetal [1]

Werkblad Behoudswetten, Symmetrieën en Reactiediagrammen

1. *Betaverval*



Vraag 1	Antwoord 1
f) Pas C -symmetrie toe op (1) en schrijf de resulterende vergelijking	a)
g) Pas T -symmetrie toe op (1) en schrijf de resulterende vergelijking	b)
h) Pas X ($\bar{\nu}_e$)-symmetrie toe op (1)	c)
i) Pas X (e^-)-symmetrie toe op (1)	d)

2. *Reacties met pionen*



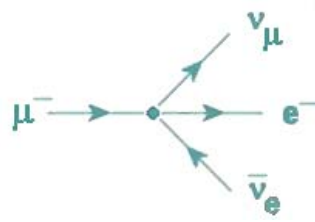
Vraag 2	Antwoord 2
g) Pas C -symmetrie toe op (2), waarbij π^+ als antideeltje van π^- genomen wordt	a)
h) Pas T -symmetrie toe op (2)	b)
i) Pas X (n) toe op (2)	c)
j) Waarom is de laatste reactie tamelijk onwaarschijnlijk?	d)
k) Het π^0 deeltje bestaat uit een up quark en zijn antideeltje ($u\bar{u}$) of een down quark en zijn antideeltje ($d\bar{d}$). Zal het deeltje lang bestaan? Leg uit.	e)

3. *Muonverval*

De reactie voor muonverval is:



Het reactiediagram kan als volgt getekend worden (docent legt uit):



Vraag 3	Antwoord 3
e) Pas C symmetrie toe op (3)	
f) Pas $X(\nu_\mu)$ toe op (3)	
g) Pas $X(\bar{\nu}_e)$ toe op (3)	

Teken de reactie diagrammen.

a) b)

c)

4. Nogmaals beta verval

We gaan nu weer terug naar het betaverval van vergelijking (1):



Vraag 4	Antwoord 4
a. Gebruik symmetrieën om een vergelijking af te leiden voor beta+ verval die resulteert in de emissie van een positron en een neutrino.	a)
b. Laat zien dat het niet mogelijk is om met symmetrieën uit (1) een reactie af te leiden waarin uit een neutron o.a. een positron geproduceerd wordt.	b)
c. Gebruik de symmetrieën en probeer een reactievergelijking af te leiden waarin een elektron dichtbij de kern wordt ingevangen. (Dit kan in de natuur spontaan gebeuren bij een kern met hoge Z . Niet spontaan kan het ook bij beschieting van kernen met elektronen).	c)
d. Bekijk de vergelijkingen nog eens. Met welk proces zouden we elektron neutrino's	d)

kunnen detecteren? Met welk proces elektron antineutrino's	
e. Reactie (1) kan plaatsvinden in een "los" neutron, maar meestal gebeurt de reactie juist in een neutron dat deel uit maakt van een kern, bv ${}_{17}^{35}\text{Cl}$. Schrijf reactie (1) op voor Chloor-35.	e)
f. Door kruising van de reactie in chloor 35, krijgen we een reactie die het mogelijk maakt neutrino's te ontdekken wanneer die botsen met een chloor kern. Schrijf die reactie op en voeg een diagram toe.	f)

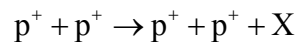
5. *Botsingsprocessen*

Voor de de volgende reactie vergelijkingen ga na of de betreffende reactie mogelijk is of niet en geef aan waarom.

Vraag 5	Antwoord 5
a) $\pi^+ + p^+ \rightarrow p^+ + p^+ + \bar{n}$	a)
b) $p^+ + p^+ \rightarrow p^+ + p^+ + n$	b)

6. *Wat voor deeltjes?*

Een reactie is als volgt:



X is een onbekend deeltje.

Vraag 6	Antwoord 6
a) Is het een meson of een baryon? Waarom?	a)
b) Heeft X lading of niet? Waarom?	b)
c) Kan X een lepton zijn?	c)
d) Beantwoord a), b), en c) voor het geval dat er twee deeltjes (X en Y) gevormd worden.	d)