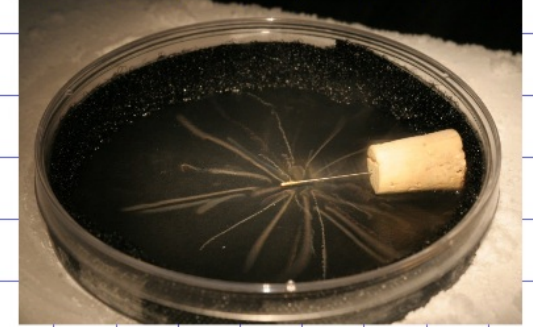
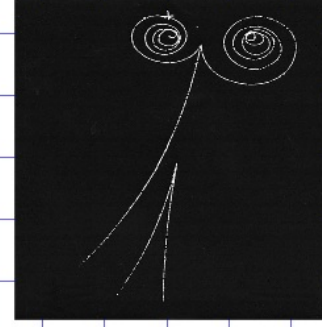
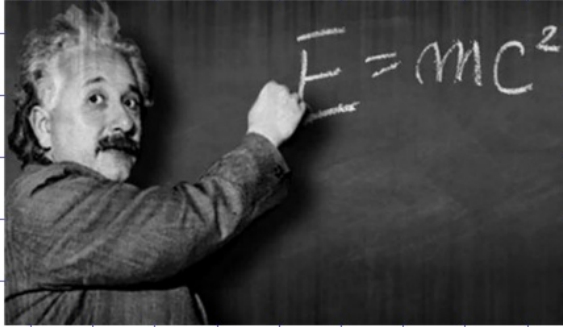
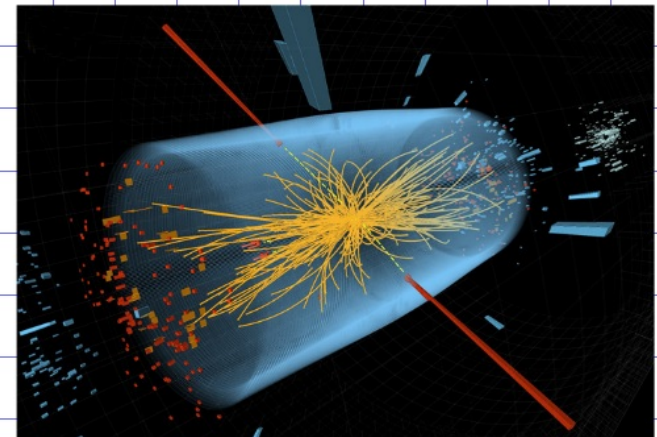
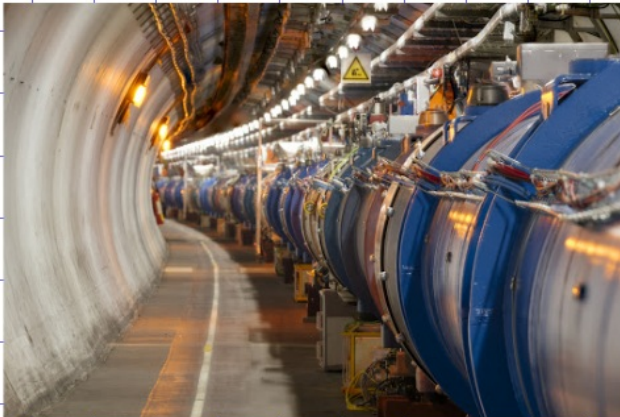




Hoofdstuk 14 Kern- en deeltjesfysica



Leerdoelen bij hoofdstuk 14

§14.1

B. Je kunt uitleggen welke **behoudswetten** er zijn en wat ze betekenen.

A. Je hebt een (superglobaal) historisch overzicht van de geschiedenis van de deeltjesfysica.

§14.2

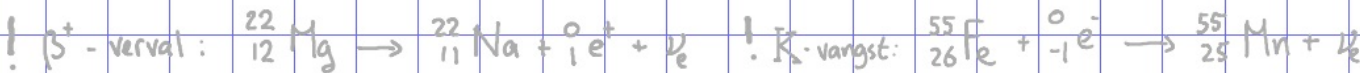
D. Je kunt rekenen met de relatie $E = mc^2$.

E. Je kunt van een isotoop uitrekenen wat de **bindingsenergie per nucleon** is.

F. Je kunt van **vervalsreacties** uitrekenen welke **energie er bij vrijkomt** (m.b.v. het massaverschil).

§14.3

G. Je weet wat deze **begrippen** inhouden: subatomaire deeltjes, nevelkamer, krentebolmodel vs. Rutherfordmodel, antimaterie, annihilatie, paarcreatie, neutrino, muon, sterke kernkracht, wisselwerking, zwakke kernkracht.



§14.6

K. Je kunt uitleggen hoe de verschillende **baryonen** samengesteld zijn uit **quarks** en hoe het **baryongetal** behouden is bij

L. Je kunt uitleggen welke **leptonen** er zijn en hoe het **leptongetal** behouden is bij reacties.

centrale vaardigheid: elektronmassa's in de gaten houden bij kernreacties!

"Ontstaat er bij de reactie een extra elektron uit bindingsenergie of verdwijnt er een en komt daardoor energie vrij?"

relativiteit: in de tekst en in opgaven is soms sprake van "relativistische snelheid" of andere aspecten van Hfd20 die je nog niet hoeft te begrijpen.

subkopjes 27 en 28
opg. 67, 68, 70, 72

Leerdoelen bij hoofdstuk 14

§14.2

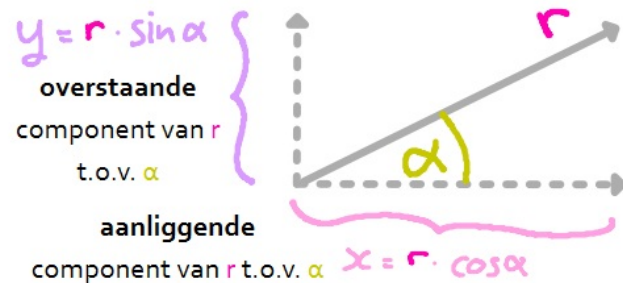
D. Je kunt rekenen met de relatie $E = mc^2$.

E. Je kunt van een isotoop uitrekenen wat de **bindingsenergie per nucleon** is.

F. Je kunt uitrekenen welke **energie er bij vrijkomt bij vervalsreacties** m.b.v. het massaverschil.

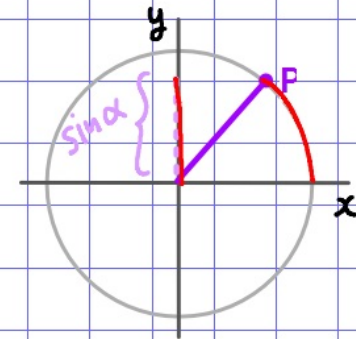
Welke wiskundige technieken kunnen van pas komen bij dit hoofdstuk?

HERHALING GONIOMETRIE



kleine hoeken-

"Voor hoeken α tot 0,2 rad
(oftewel 10 graden) geldt: $\sin \alpha = \alpha$ en ook $\tan \alpha = \alpha$."
*LET OP: Dit geldt alleen als
je in radialen werkt.*



lineairiseren van functies

opgave 24

b) rechte lijn, want: c) $T^2 = \frac{4\pi^2}{c} \cdot m$

$$T^2 = (2\pi)^2 \cdot \frac{m}{c}$$
$$T^2 = 4\pi^2 \cdot \frac{m}{c}$$
$$y = a \cdot x + b$$

de afgeleide v.e. functie

$$u = A \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{T} \cdot t\right)$$
$$\frac{du}{dt} = v = A \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{T} \cdot t\right) \cdot \frac{2\pi}{T}$$

wordt maximaal 1 dus $v_{\max} = 2\pi \cdot \frac{A}{T}$

Welke basistypen van opgaven keren elk hoofdstuk terug?

$$\sigma = \frac{2 \cdot (3,14)^5 \cdot (1,38 \cdot 10^{-23})^4}{15 \cdot (3,00 \cdot 10^8)^2 \cdot (6,626 \cdot 10^{-34})^3}$$

$$\sigma = \frac{610 \cdot 1,38^4 \cdot (10^{-23})^4}{15 \cdot 3,00^2 \cdot (10^8)^2 \cdot 6,626^3 \cdot (10^{-34})^3}$$

$$\sigma = \frac{2212 \cdot (10^{-92})}{135 \cdot (10^{16}) \cdot 291 \cdot (10^{-102})}$$

$$\sigma = \frac{2212}{135 \cdot 291} \cdot \frac{10^{-92}}{10^{16} \cdot 10^{-102}}$$

$$\sigma = 0,0563 \cdot 10^{-6} = 5,63 \cdot 10^{-6}$$

natuurconstante uit binas
narekenen

$$J = \text{kg} \cdot \left(\frac{\frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2}}{\text{J} \cdot \text{s}} \right)^2$$

$$J = \text{kg} \cdot \left(\frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{J} \cdot \text{s}} \right)^2$$

$$J = \text{kg} \cdot \left(\frac{\cancel{\text{N}} \cdot \text{m}^2}{\cancel{\text{N}} \cdot \cancel{\text{m}} \cdot \text{s}} \right)^2$$

$$J = \text{kg} \cdot \left(\frac{\text{m}}{\text{s}} \right)^2 = \text{kg} \cdot \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}$$

$$J = \text{kg} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot \text{m} = \text{N} \cdot \text{m}$$

tabel 3A en 4

uit binas:

$$J = \text{N} \cdot \text{m}$$

en

$$\text{N} = \text{kg} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

dimensie-analyse (aantonen dat een bepaalde
eenheid bij een bepaalde grootheid hoort)

Welke basistypen van opgaven keren elk hoofdstuk terug?

$$v^2 = \frac{2 \cdot U \cdot e}{m}$$

$$r = \frac{v \cdot m}{B e}$$

$$v = \frac{r B e}{m}$$

$$v^2 = \frac{r^2 B^2 e^2}{m^2}$$

$$\frac{2 U e}{m} = \frac{r^2 B^2 e^2}{m^2}$$

$$2 U = \frac{r^2 B^2 e}{m}$$

$$\frac{e}{m} = \frac{2 \cdot U}{r^2 B^2}$$

goal!

naar een formule toewerken met andere formules die je al had door substituties etc.

Welke natuurkundige principes keren regelmatig terug?

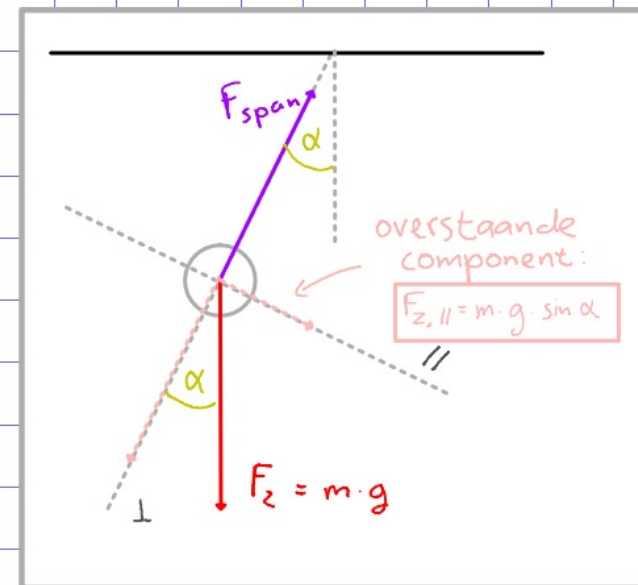
behoud van energie



nettokracht en eerste wet van Newton

"Als de **nettokracht** op een voorwerp nul is, dan beweegt het voorwerp **eenparig** of staat het

nettokracht in twee dimensies
(x/y) en krachten onder hoeken

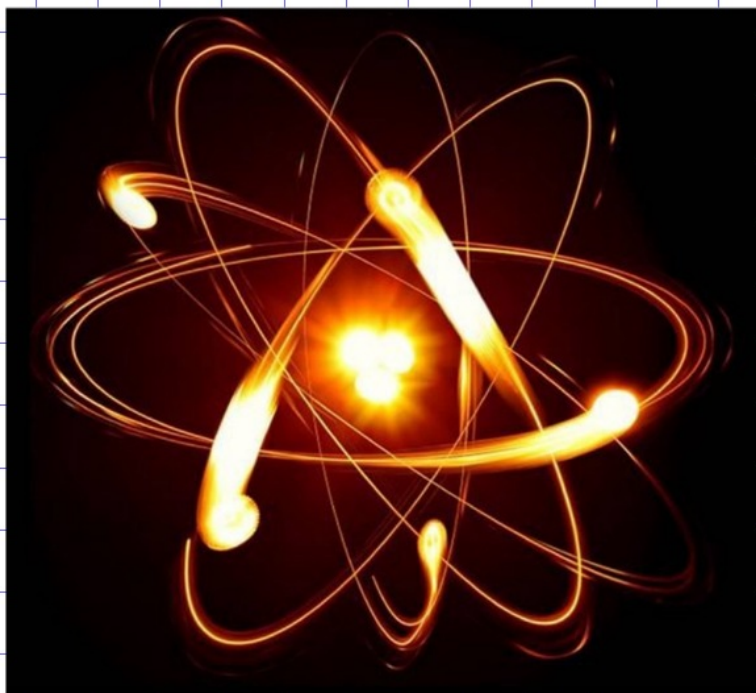


Hoofdstuk 14: Kern- en deeltjesfysica

- *CONTEXT* -

De volgende pagina's geven interessante achtergrondinformatie bij de stof van dit hoofdstuk zoals voorbeelden uit de natuur van de verschijnselen of technische toepassingen van de natuurkundige inzichten bij deze verschijnselen. Zulke achtergrond informatie heet ook wel context. Het is niet noodzakelijk om deze pagina's te bestuderen voor het proefwerk maar het is wel interessante kennis!

"Welke grote mijlpalen zijn er geweest in het ontdekken van de bouw van materie?"



A HISTORY OF THE ATOM: THEORIES AND MODELS

How have our ideas about atoms changed over the years? This graphic looks at atomic models and how they developed.

SOLID SPHERE MODEL	PLUM PUDDING MODEL	NUCLEAR MODEL	PLANETARY MODEL	QUANTUM MODEL
JOHN DALTON	J.J. THOMSON	ERNEST RUTHERFORD	NIELS BOHR	ERWIN SCHRÖDINGER
1803	1904	1911	1913	1926
Dalton drew upon the Ancient Greek idea of atoms (the word 'atom' comes from the Greek 'atomos' meaning indivisible). His theory stated that atoms are indivisible, those of a given element are identical, and compounds are combinations of different types of atoms.	Thomson discovered electrons (which he called 'corpuscles') in atoms in 1897, for which he won a Nobel Prize. He subsequently produced the 'plum pudding' model of the atom. It shows the atom as composed of electrons scattered throughout a spherical cloud of positive charge.	Rutherford fired positively charged alpha particles at a thin sheet of gold foil. Most passed through with little deflection, but some deflected at large angles. This was only possible if the atom was mostly empty space, with the positive charge concentrated in the centre: the nucleus.	Bohr modified Rutherford's model of the atom by stating that electrons moved around the nucleus in orbits of fixed sizes and energies. Electron energy in this model was quantised; electrons could not occupy values of energy between the fixed energy levels.	Schrödinger stated that electrons do not move in set paths around the nucleus, but in waves. It is impossible to know the exact location of the electrons; instead, we have 'clouds of probability' called orbitals, in which we are more likely to find an electron.
RECOGNISED ATOMS OF A PARTICULAR ELEMENT DIFFER FROM OTHER ELEMENTS	RECOGNISED ELECTRONS AS COMPONENTS OF ATOMS	REALISED POSITIVE CHARGE WAS LOCALISED IN THE NUCLEUS OF AN ATOM	PROPOSED STABLE ELECTRON ORBITS; EXPLAINED THE EMISSION SPECTRA OF SOME ELEMENTS	SHOWED ELECTRONS DON'T MOVE AROUND THE NUCLEUS IN ORBITS, BUT IN CLOUDS WHERE THEIR POSITION IS UNCERTAIN
ATOMS AREN'T INDIVISIBLE - THEY'RE COMPOSED FROM SUBATOMIC PARTICLES	NO NUCLEUS; DIDN'T EXPLAIN LATER EXPERIMENTAL OBSERVATIONS	DID NOT EXPLAIN WHY ELECTRONS REMAIN IN ORBIT AROUND THE NUCLEUS	NOTHING ELECTRONS SHOULD EMIT ENERGY AND COLLAPSE INTO THE NUCLEUS; MODEL DID NOT WORK WELL FOR HEAVIER ATOMS	STILL WIDELY ACCEPTED AS THE MOST ACCURATE MODEL OF THE ATOM

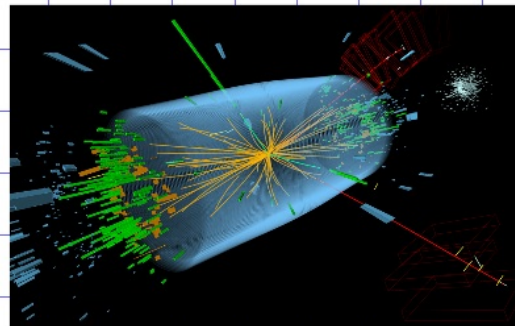
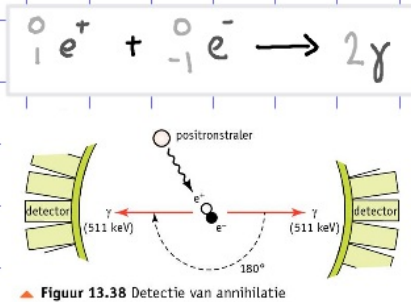
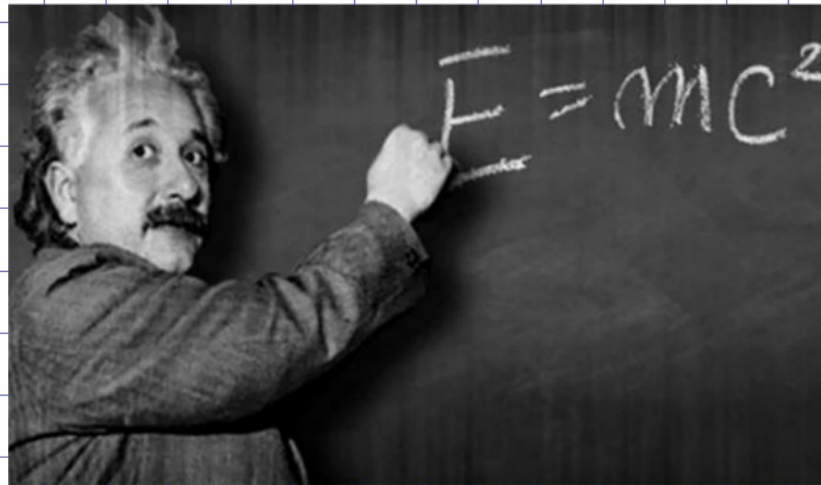


© COMPOUND INTEREST 2016 - WWW.COMPOUNDCHEM.COM | Twitter: @compoundchem | Facebook: www.facebook.com/compoundchem

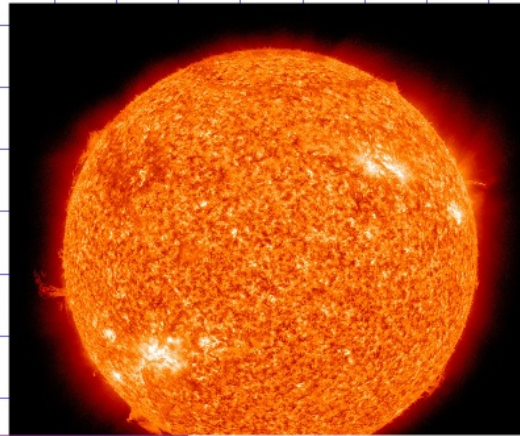
This graphic is shared under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives licence.



"Wat is de betekenis van $E = mc^2$?"

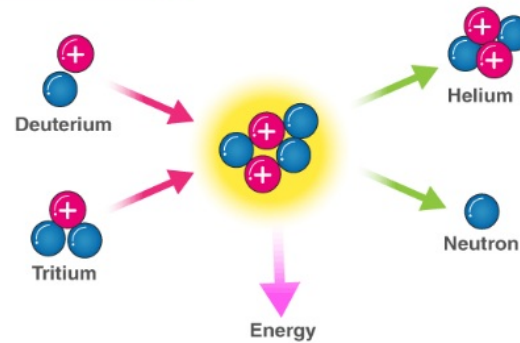


"Hoe produceren sterren hun licht ..."



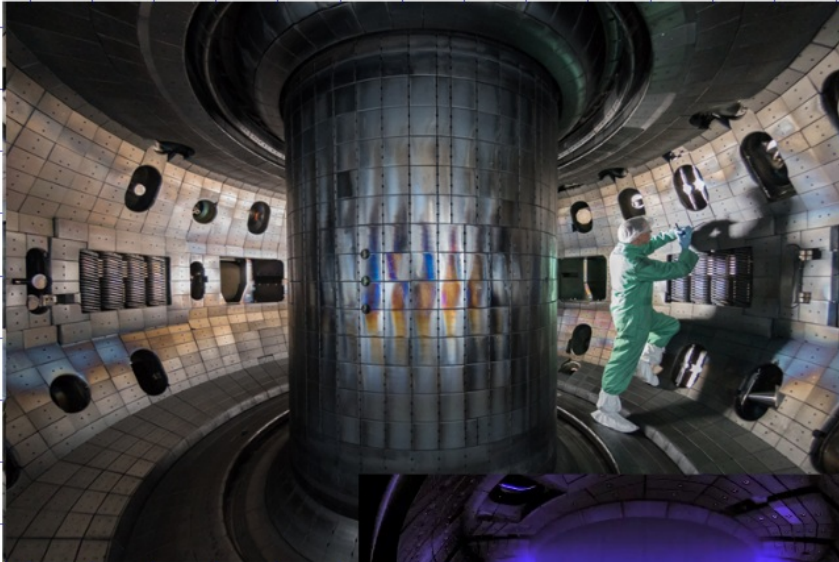
NUCLEAR FUSION

BYJU'S
The Learning App



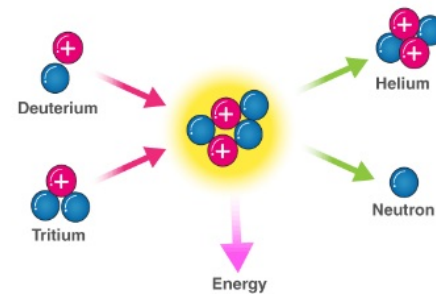
U^{235}
 U^{238}

"... en hoe proberen natuurkundigen dat na te doen?"

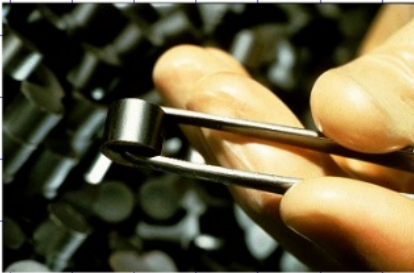


NUCLEAR FUSION

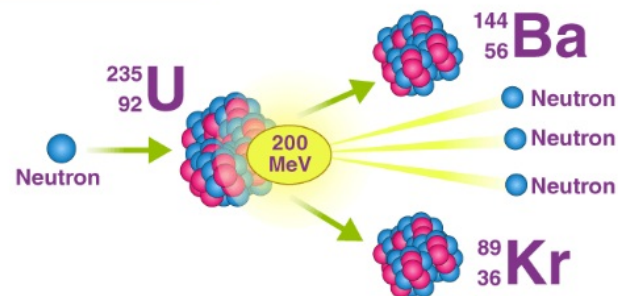
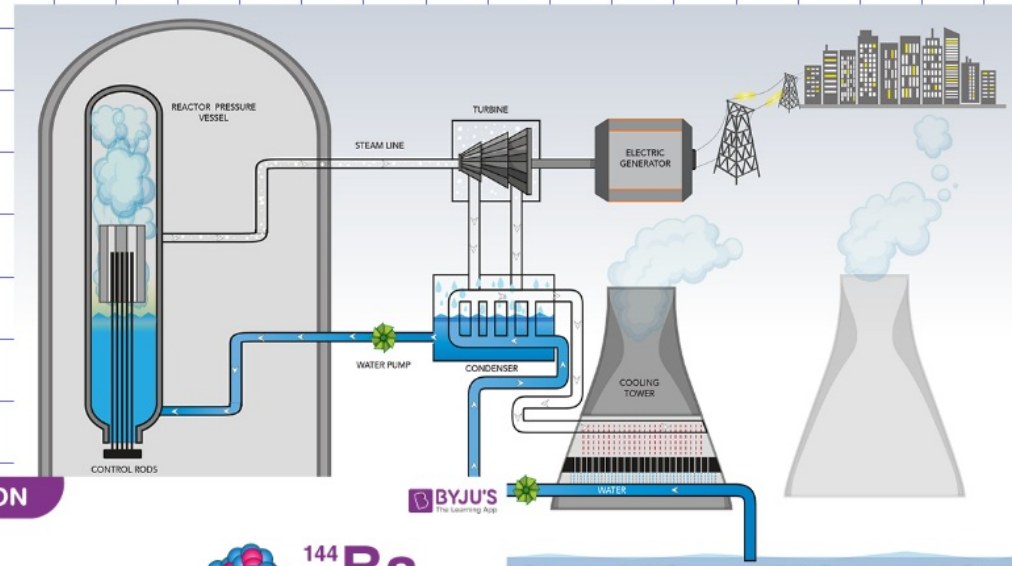
BYJU'S
The Learning App



"Waar komt de energie bij kernenergie vandaan?"



NUCLEAR FISSION



"Welke deeltjes bestaan er?"

The Standard Model of Particle Physics

FERMIONS (matter particles)

BOSONS (force carriers)

QUARKS

u

up

c

charm

t

top

g

gluon

H

Higgs boson

d

down

s

strange

b

bottom

γ

photon

LEPTONS

e

electron

μ

muon

τ

tau

Z^0

Z boson

ν_e

electron neutrino

ν_μ

muon neutrino

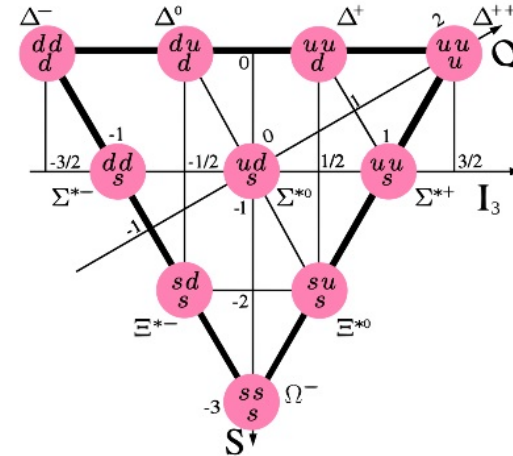
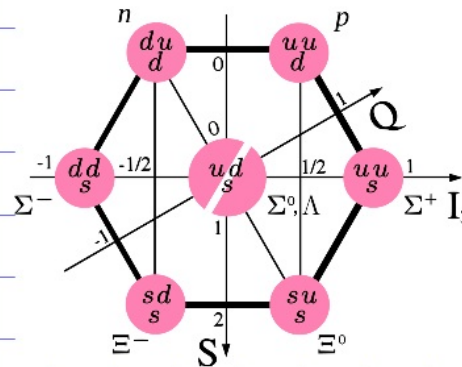
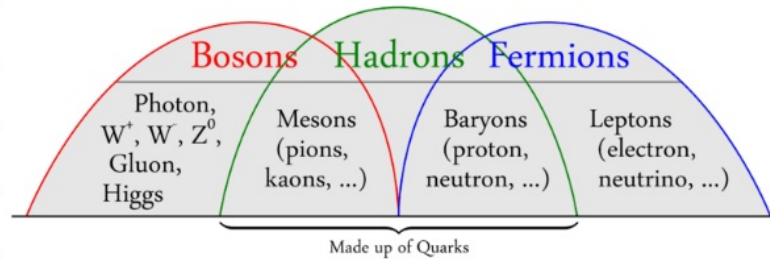
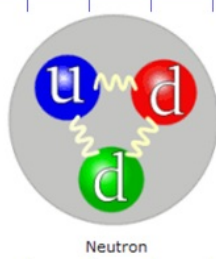
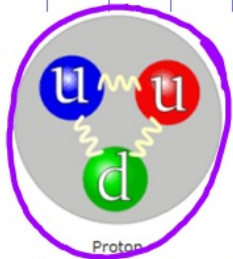
ν_τ

tau neutrino

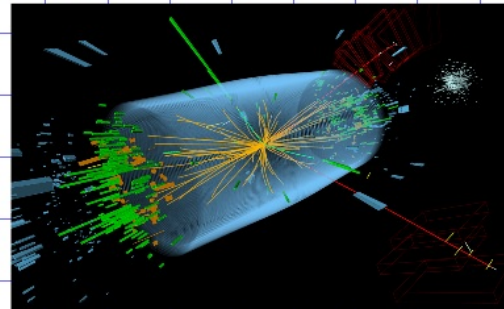
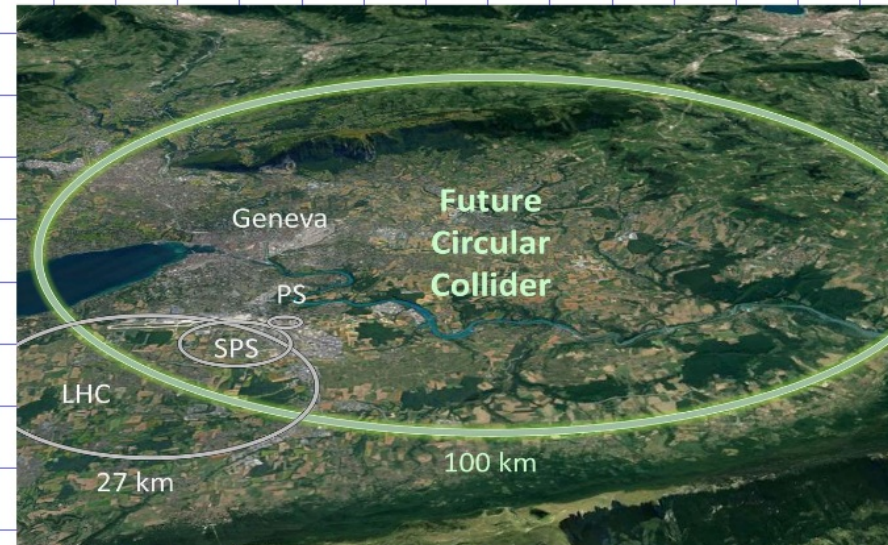
$W^\pm$

W boson

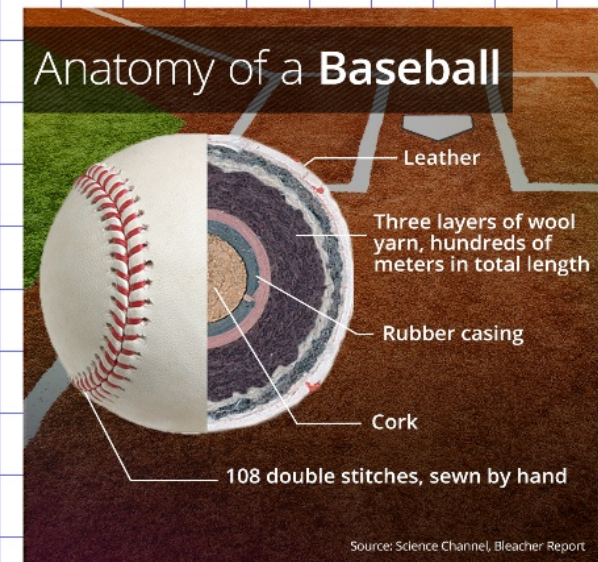
sciencealert



"Waarvoor gebruiken natuurkundigen deeltjesversnellers zoals bij CERN?"



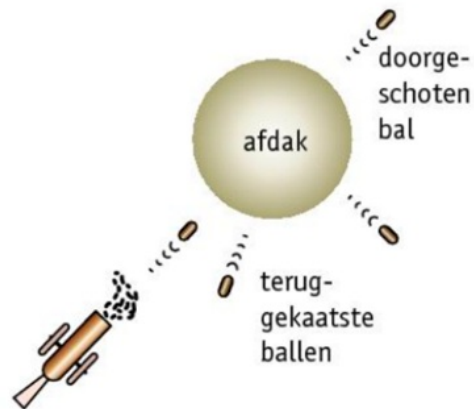
"Hoe kom je achter de substructuur van een bal die je niet open kunt snijden?"



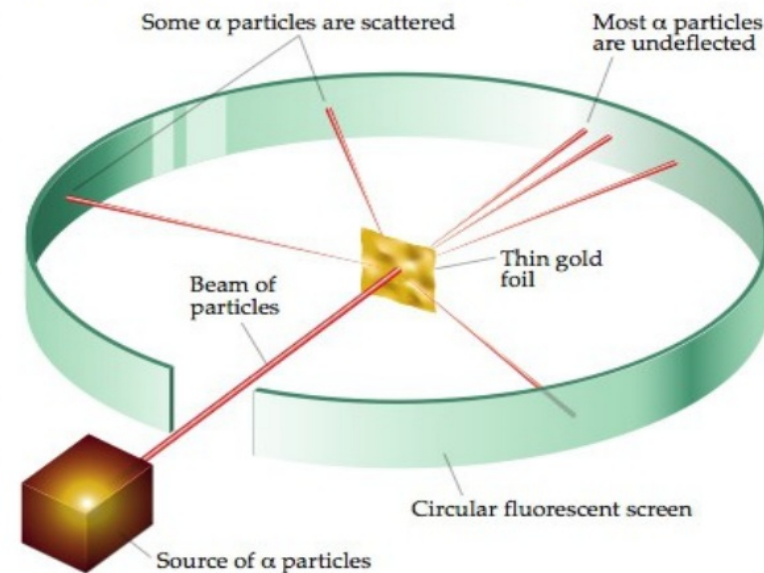
"Hoe kom je achter de substructuur van een bal die je niet open kunt snijden?"



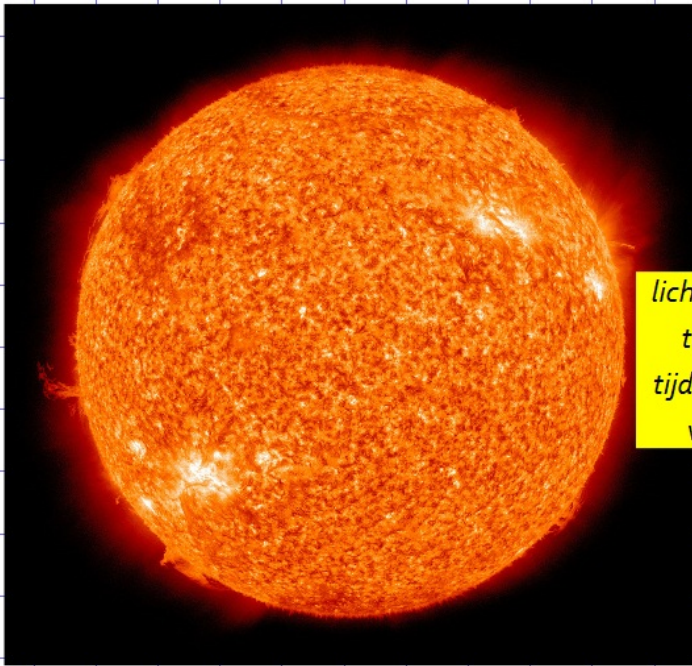
31 Je schiet met een tennisballenkanon op een voorwerp dat verdekt staat opgesteld onder een afdak.



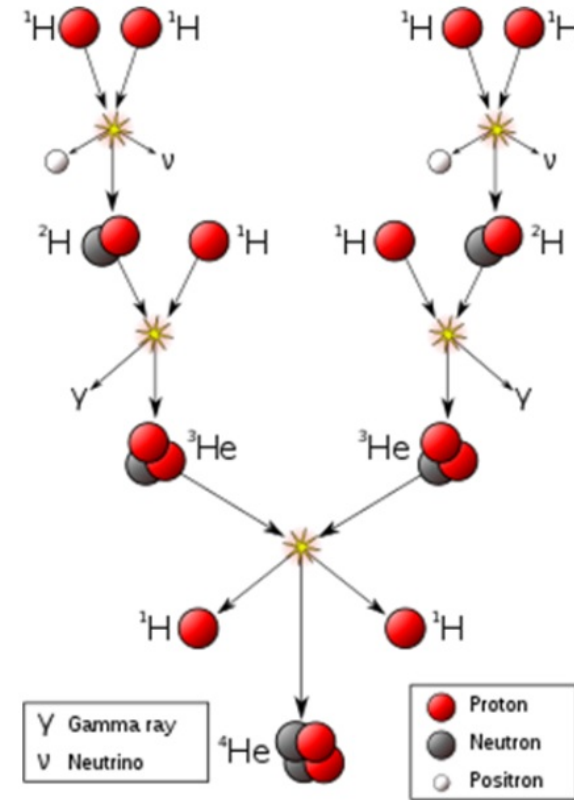
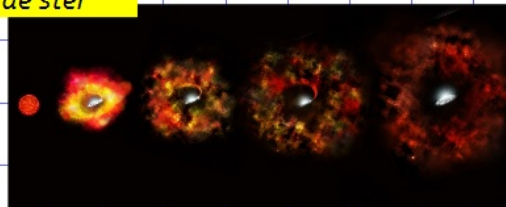
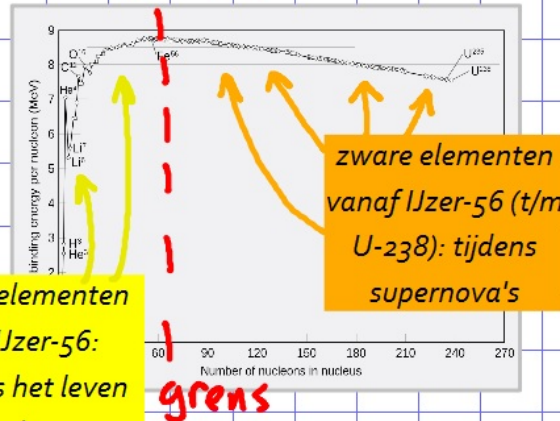
▲ Figuur 14.21



"Hoe produceren sterren hun licht ..."

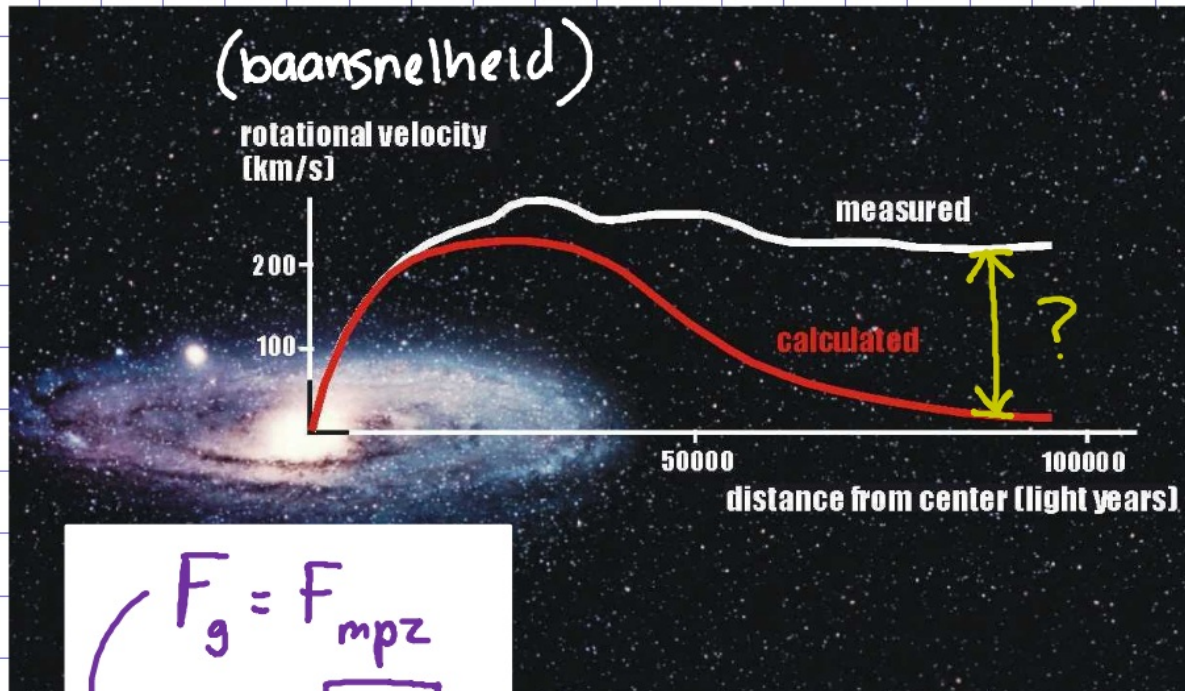


lichte elementen
tot IJzer-56:
tijdens het leven
van de ster



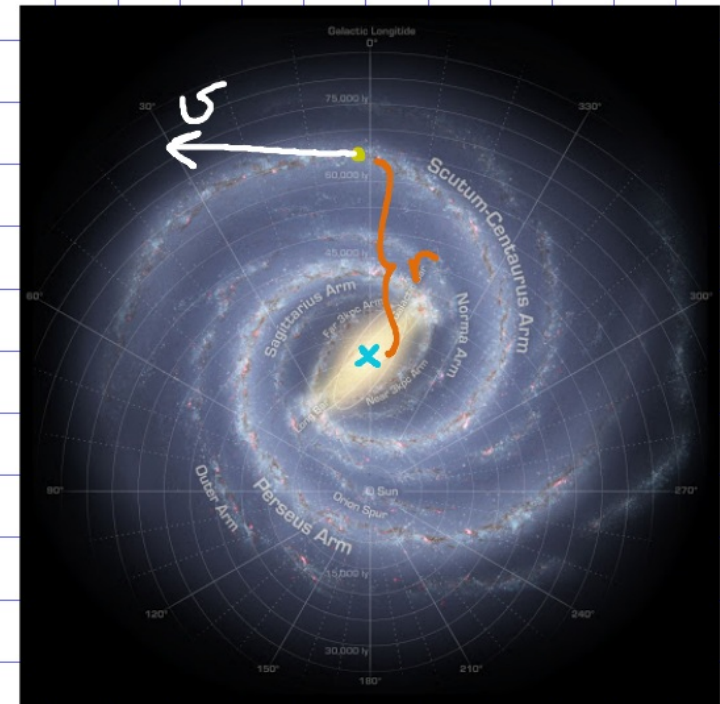
"... en alle elementen uit het periodiek systeem?"

"Onopgeloste kwestie: wat is donkere materie?"



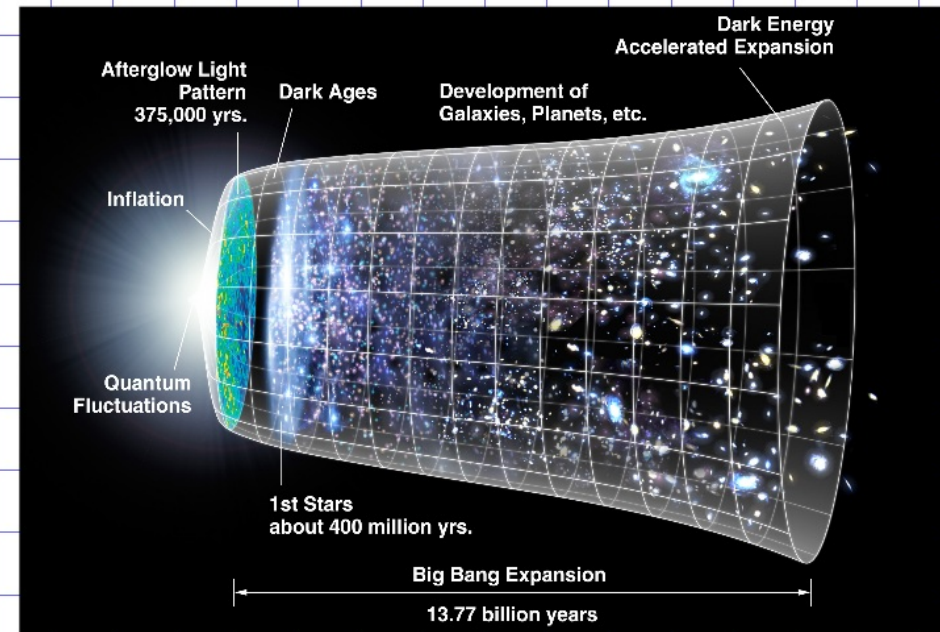
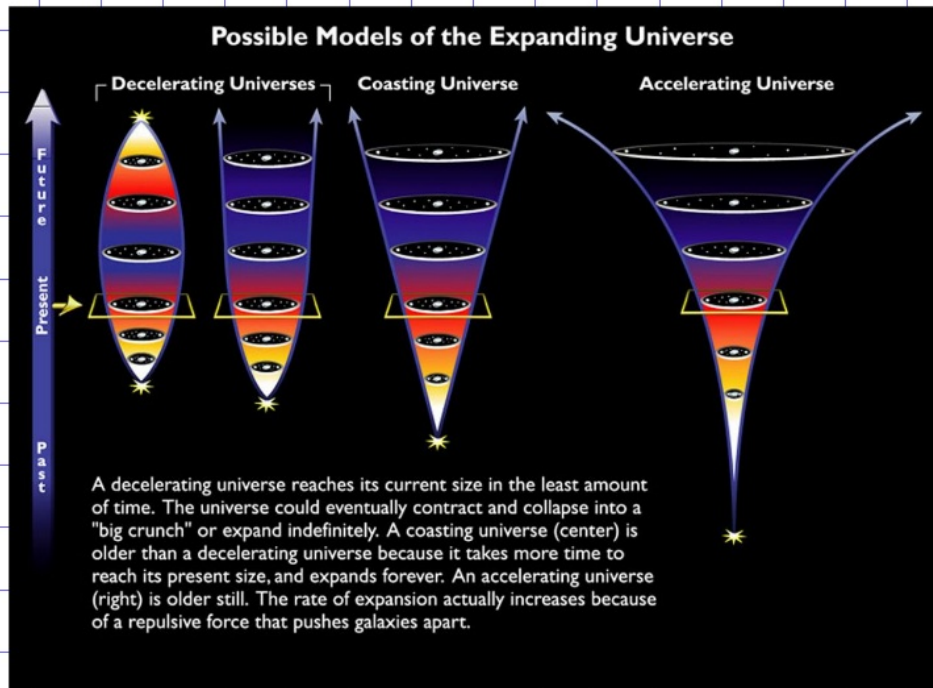
$$F_g = F_{mpz}$$

$$v = \sqrt{\frac{GM}{r}}$$



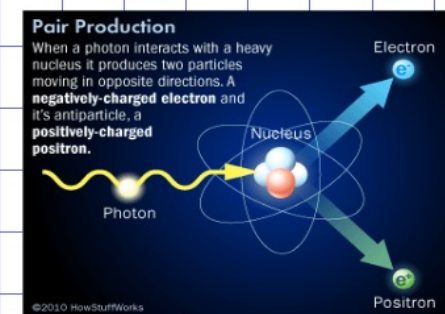
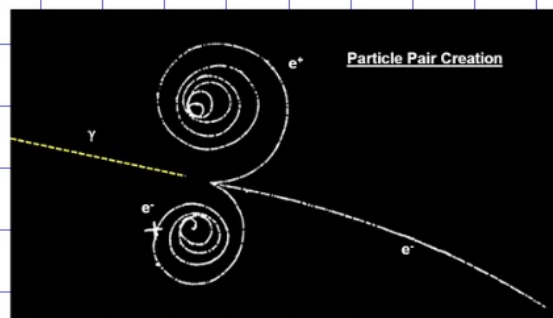
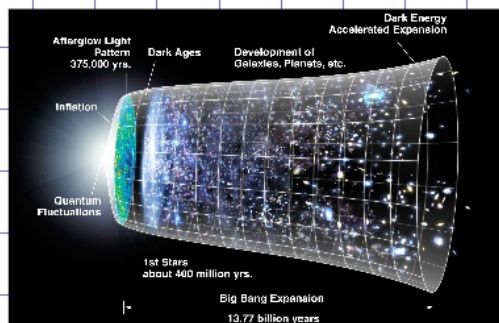
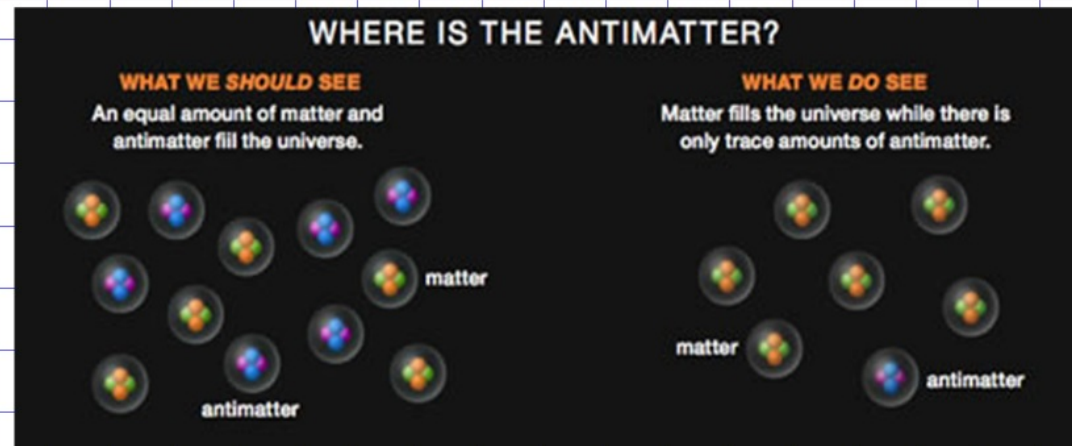
rotatie van sterrenstelsels

"Onopgeloste kwestie: wat is donkere energie?"

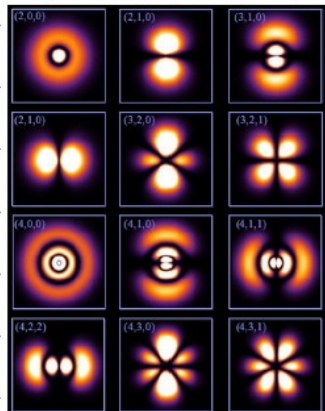
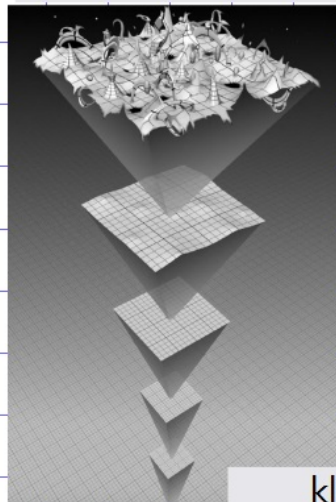


rotatie van sterrenstelsels

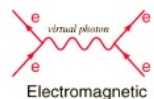
"Onopgeloste kwestie: waarom was er aan het begin vñ universum een kleine onbalans tussen materie en antimaterie?"



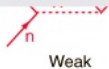
"Onopgeloste kwestie: hoe zijn kwantummechanica en relativiteit te verenigen tot een **theorie van alles**?"



kleine dingen:
kwantummechanica



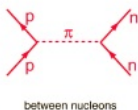
Electromagnetic



Weak



Strong Interaction

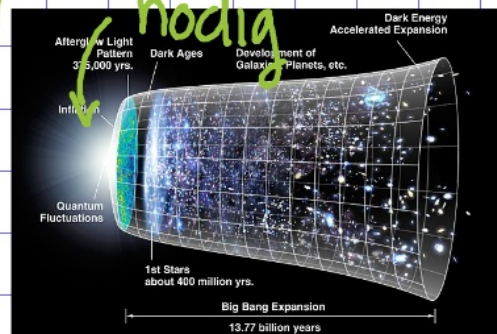


between nucleons



beide theorieën

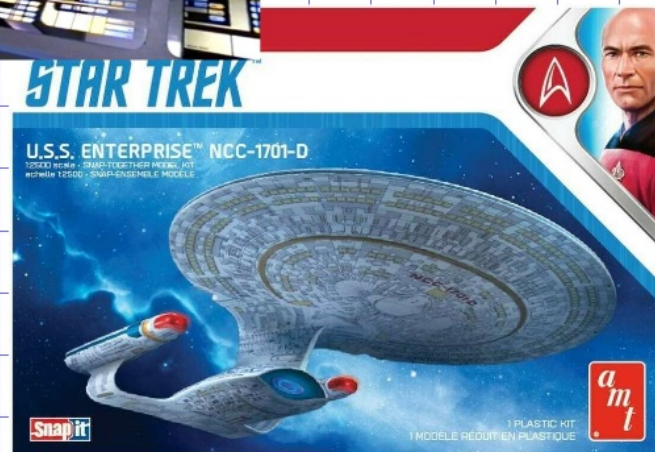
nodig



grote dingen:
relativiteit
(zwaartekracht)

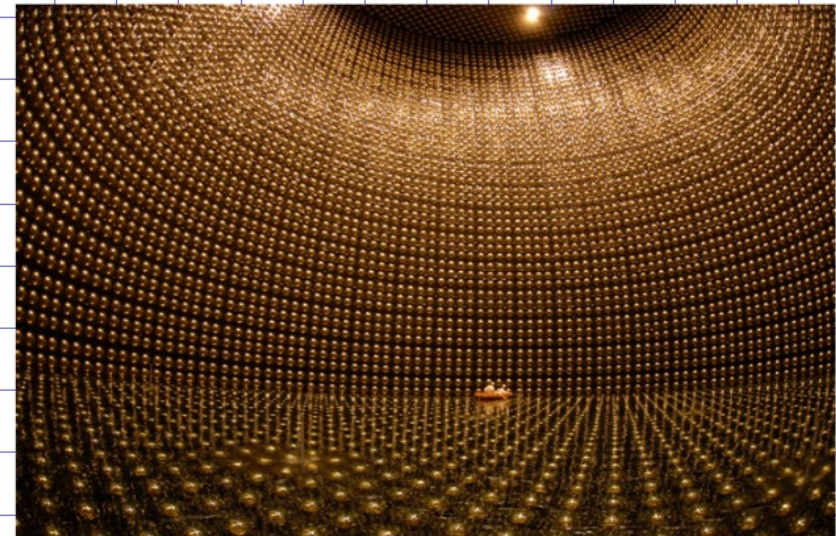
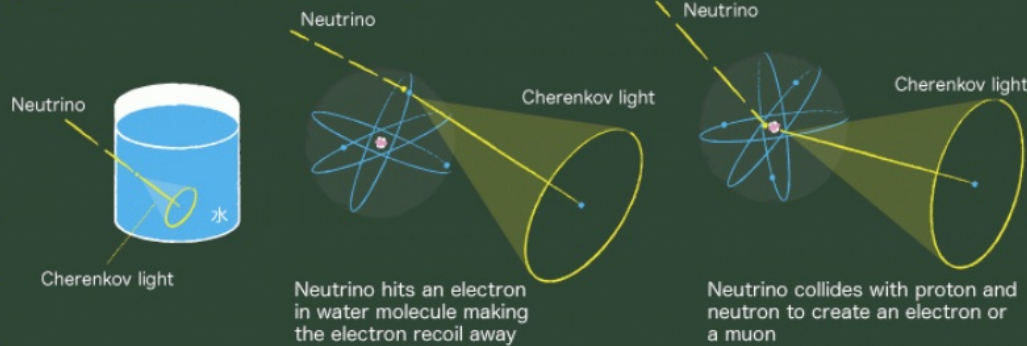


"Welke fictieve toepassingen van antimaterie zijn er?"



"Wat zijn neutrino's?"

Super-Kamiokande experiment

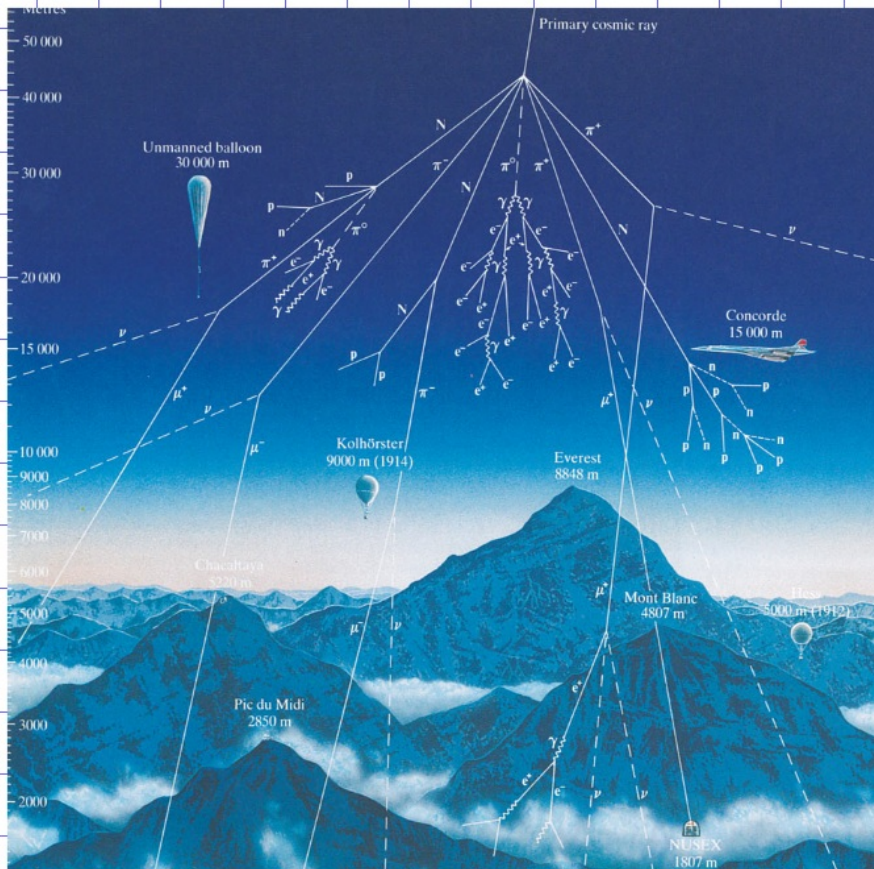


The Standard Model of Particle Physics

FERMIONS (matter particles)			BOSONS (force carriers)	
QUARKS	u up	c charm	t top	g gluon
	d down	s strange	b bottom	H Higgs boson
	e electron	μ muon	τ tau	γ photon
LEPTONS	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	Z^0 Z boson
				$W^\pm$ W boson

sciencealert

"Wat zijn muonen?"



The Standard Model of Particle Physics

FERMIONS (matter particles)

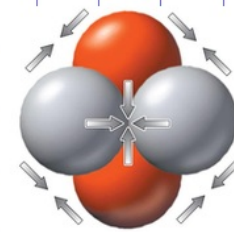
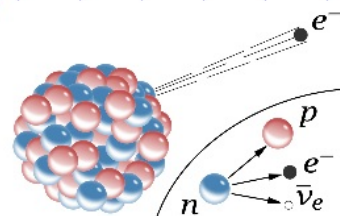
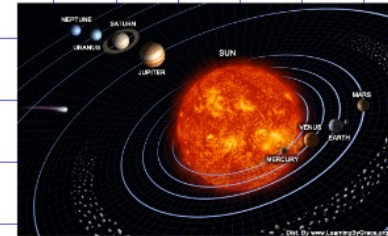
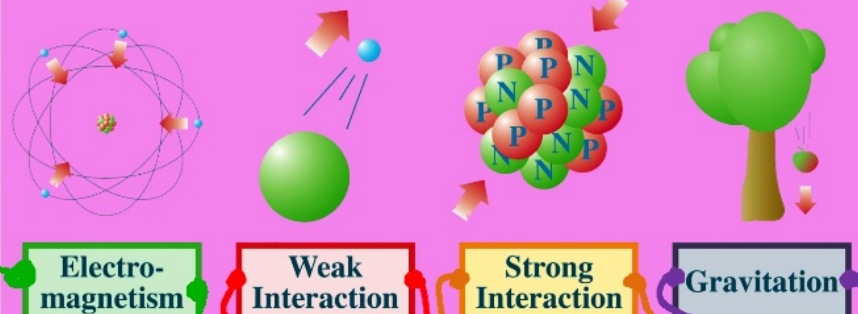
BOSONS (force carriers)

QUARKS	u up	c charm	t top	g gluon	H Higgs boson
	d down	s strange	b bottom	γ photon	
LEPTONS	e electron	μ muon	τ tau	Z^0 Z boson	
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	$W^\pm$ W boson	

sciencealert

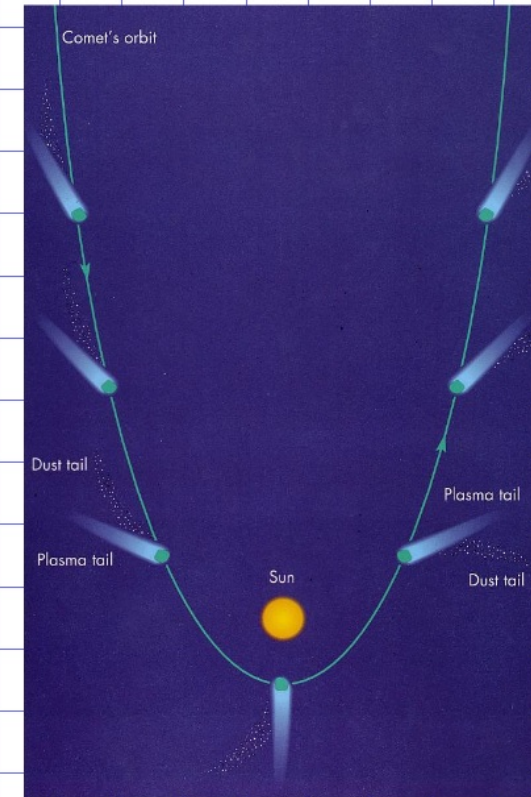
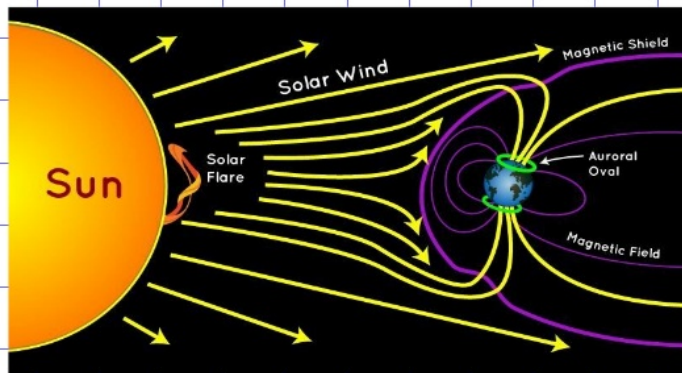
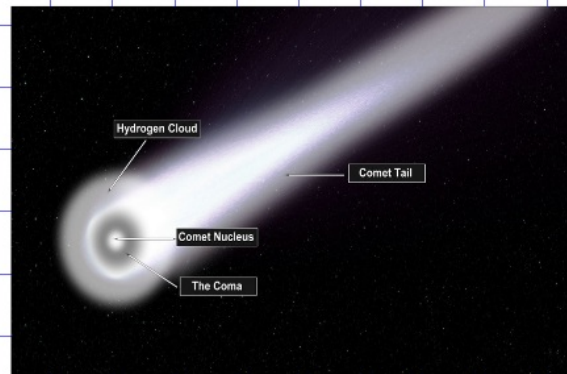
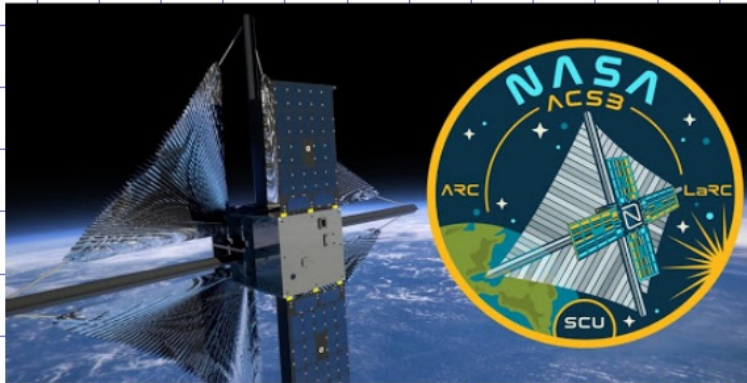
"Welke fundamentele krachten zijn er in het universum?"

FUNDAMENTAL FORCES OF NATURE

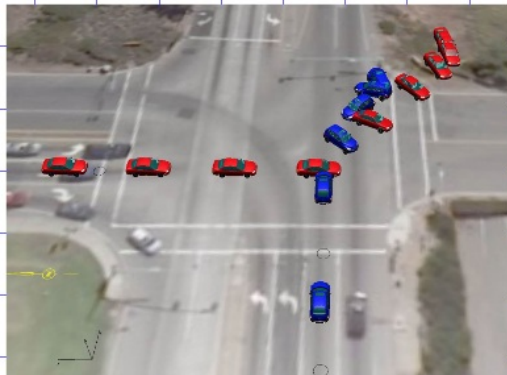
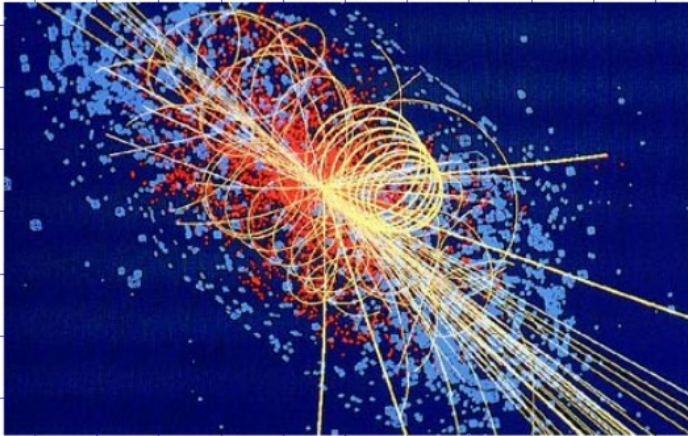


All nucleons, both protons and neutrons, attract one another by the strong nuclear force.

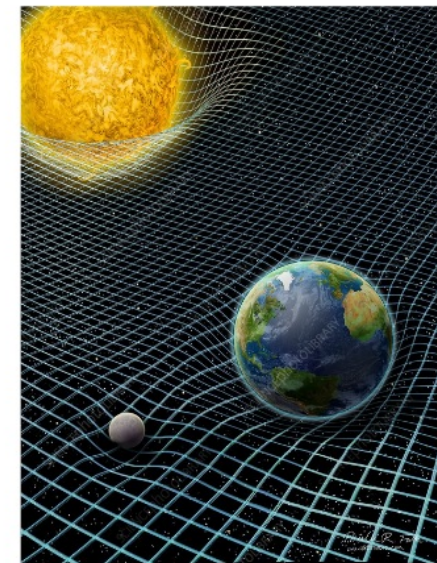
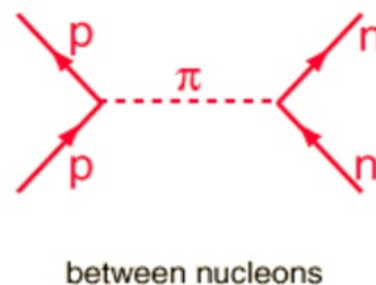
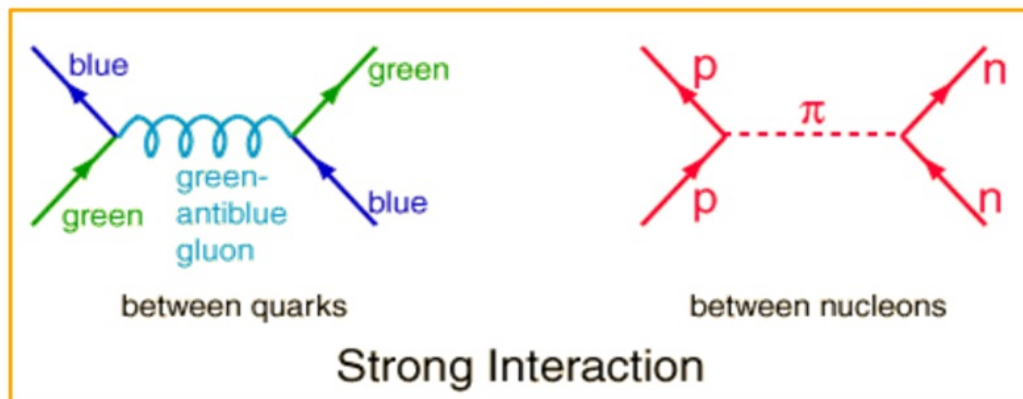
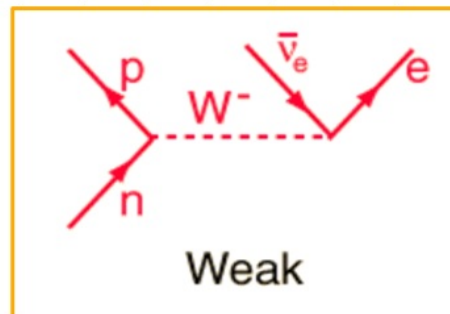
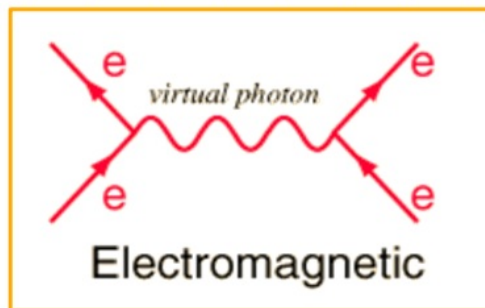
"Hoe kan licht een kracht uitoefenen?"



"Waar komen botsingen voor?"

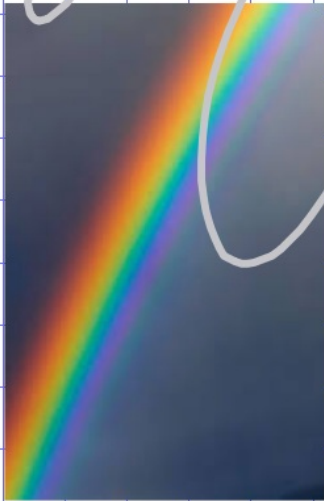


"Hoe worden in het standaardmodel de krachten overgebracht?"



"Wat is het verschil tussen klassieke en moderne natuurkunde?"

deeltjes

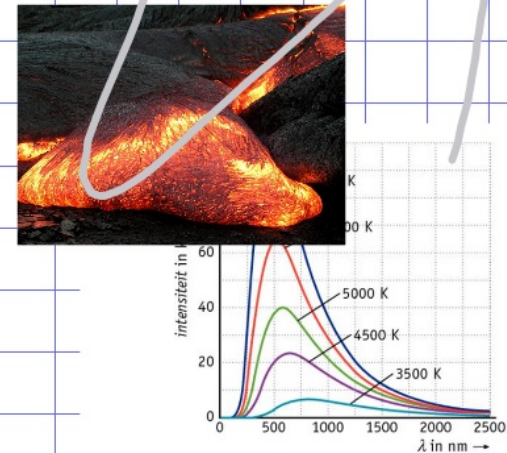
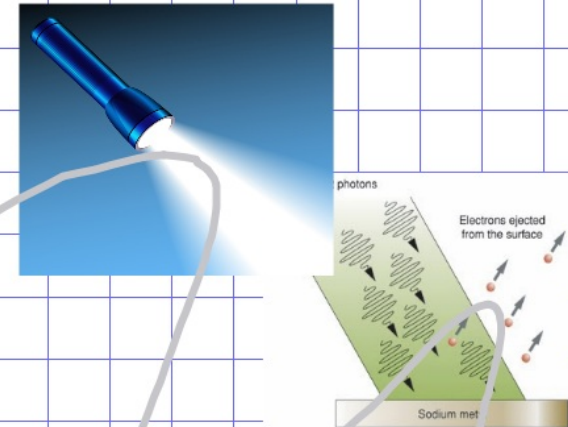
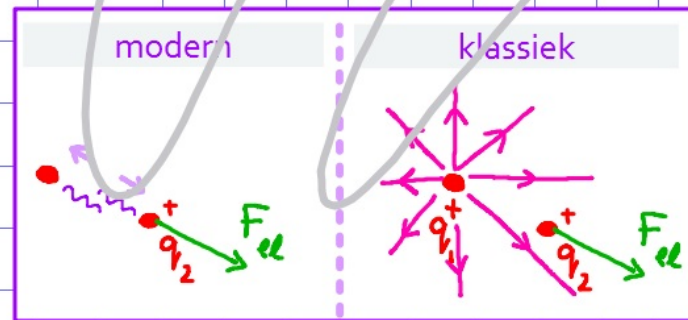


Wave-Particle Duality

$c = 299\,792\,458 \text{ m/s}$

wave

particle



Hoofdstuk 14: Kern- en deeltjesfysica

- UITLEG & AANTEKENINGEN -

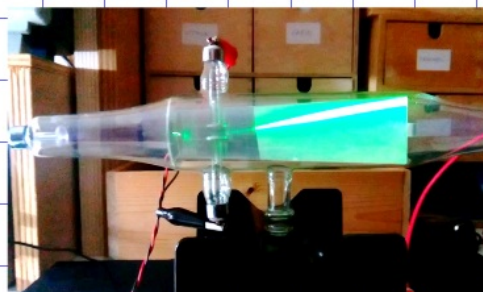
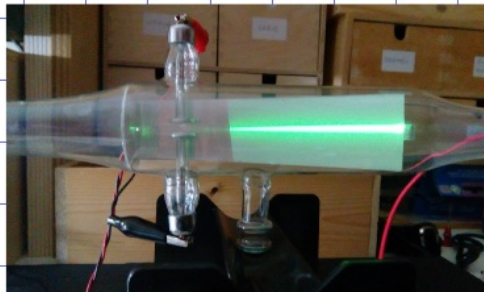
De volgende dia's zijn de aantekeningen die je in de les overgenomen hebt. Alles wat hier tussen de rode lijnen staat zou ook in je schrift moeten staan. Dit is de essentiële stof voor het proefwerk en deze moet je proberen volledig te begrijpen. Je vindt hier ook de tekst bij de bordoefeningen waarvan je als het goed is alleen de uitwerkingen hebt opgeschreven.

Hoofdstuk 14: Kern- en deeltjesfysica

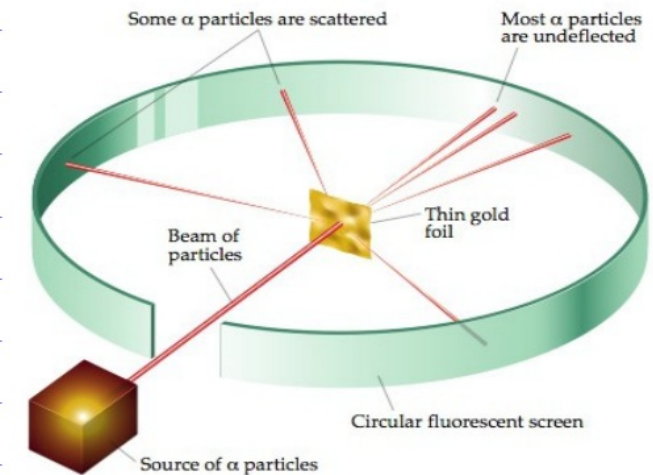
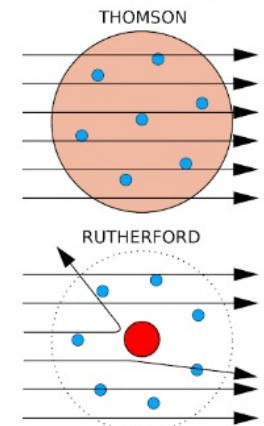
§ 14.1 Deeltjesreacties en behoudswetten

1. Belangrijkste ontdekkingen omtrent de aard van materie:

- idee van atomen: griekse oudheid (2000+ jaar geleden);
- atomen als **harde biljartballen**, moleculen, chemische reacties met behoud van atomen en behoud van massa: John Dalton (1803);
- atomen hebben toch substructuur (**elektronen**): John Thomson (1897);
- atomen hebben een **kern**: Ernest Rutherford (1914);
- in de atoomkern zitten ook **neutronen**: James Chadwick (1932);
- de neutronen en protonen bestaan uit **quarks**: Murray Gell-Man (1968);



ELEMENTS			
Hydrogen	1	Strontian	46
Nitrogen	5	Barites	68
Carbon	5	Iron	50
Oxygen	7	Zinc	56
Phosphorus	9	Copper	56
Sulphur	13	Lead	90
Magnesia	20	Silver	190
Lime	24	Gold	190
Soda	28	Platina	190
Potash	42	Mercury	167



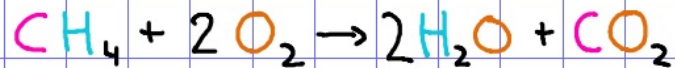
2. Bij processen of reacties in de natuur zijn sommige grootheden behouden.
De regels die dit beschrijven heten **behoudswetten**.

absolute behoudswetten: energie, elektrische lading, impuls, impulsmoment, bariongetal en leptongetal.

voorwaardelijke behoudswetten:

behoud van massa: blijkt bij kernreacties (verval, splijting, fusie) niet behouden te zijn.

behoud van atoomsoort: dit leek zo te zijn bij chemische reacties totdat ontdekt werd dat atoomsoorten door kernreacties toch konden veranderen.



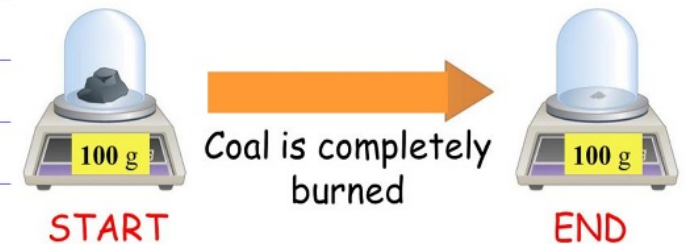
Hoofdstuk 14: Kern en deeltjesfys.

§ 14.1 Deeltjesreacties en behoudswetten

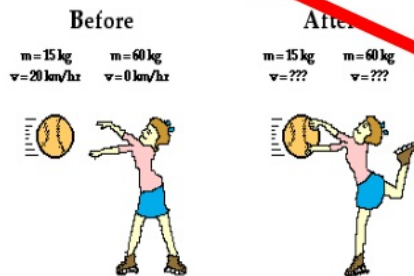


Behoud van massa
Gaaf NIET op voor kernreacties
(splijting, verval en fusie)

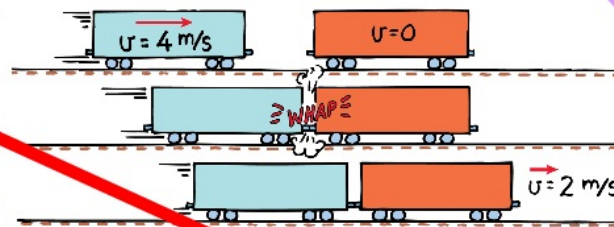
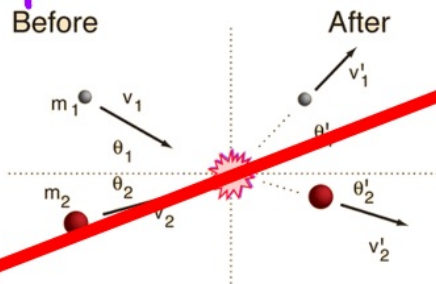
Law of Conservation of Mass
Lavoisier (1743-1794)



3. Herhaling 4V: **behoud van impuls** kende je al van botsingen tussen voorwerpen als biljartballen en auto's. Voorbeelden:

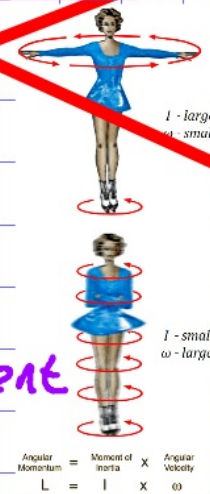


impuls $\rightarrow p = m \cdot v$



$L = I \cdot \omega$

↑
impulsmoment



Hoofdstuk 14: Kern en deeltjesfys.

§ 14.1 Deeltjesreacties en behoudswetten

Definitie: de term **wisselwerking** wordt gebruikt voor elke interactie tussen deeltjes, zoals:

- foton slaat een atoom aan, betadeeltje komt vrij bij verval
- botsing tussen auto's

Let op deze definities:

- **elastisch botsen** is zoals biljartballen botsen: *kinetische energie en impuls behouden*
- **inelastisch botsen** is zoals ballen van klei botsen: *impuls wel behouden, kinetische energie niet*

Botsingen tussen atomen of atomen die deeltjes uitstoten zijn altijd elastisch

3 (vervolg). Nieuw: **fotonen hebben ook impuls**, net zoals voorwerpen als auto's en stenen of deeltjes als atomen en elektronen. Er geldt:

	energie	impuls
voorwerpen (kogel, atoom)	$E_k = 1/2 * m * v^2$	$p = m * v$
fotonen	$E = f * h$ $E = h * c / \lambda$	$p = h / \lambda$
lichtsnelheid: $3,00 \times 10^8$ m/s	constante van Planck: $6,626 \times 10^{-34}$ Js	

Nu: opg 1 t/m 4

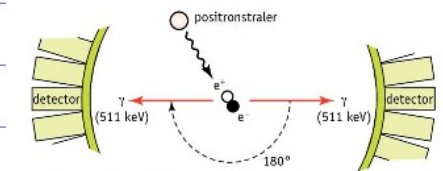
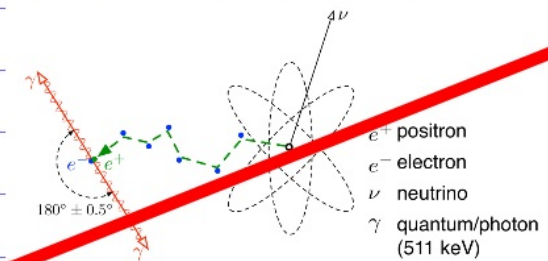
Bord oefening 1/Opgave 13:

a) van $n=3$ naar $n=1$

$$b) E = \frac{h \cdot c}{\lambda} = \frac{6,626 \cdot 10^{-34} \cdot 3,00 \cdot 10^8}{102,6 \cdot 10^{-9}} = 1,937 \cdot 10^{-18} \text{ J} = 12,1 \text{ eV}$$

Hoofdstuk 14: Kern en deeltjesfys.

§ 14.1 Deeltjesreacties en behoudswetten



▲ Figuur 13.38 Detectie van annihilatie

Bord oefening 1/Opgave 13:

13 Een waterstofatoom zendt een foton uit met een golflengte van $102,6 \text{ nm}$.

a Bij welke spectraallijn behoort dit foton?

Geef de bijbehorende energieniveaus.

b Bereken de energie van het foton.

✗ Bereken de impuls van het foton.

✗ Bereken de snelheid die het atoom krijgt door het uitzenden van dit foton.

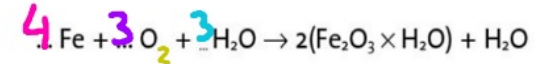
§ 14.1 Deeltjesreacties en behoudsw.

Hoofdstuk 14: Kern en deeltjesfys.

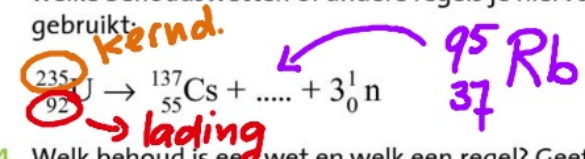
Opgaven bij § 14.1

Opdrachten

- 1 Maak de volgende reactievergelijking af en schrijf erbij welke behoudswetten of andere regels je hiervoor gebruikt:



- 3 Maak de volgende reactievergelijking af en schrijf erbij welke behoudswetten of andere regels je hiervoor gebruikt:



- 4 Welk behoud is een wet en welk een regel? Geef in geval van een regel een tegenvoorbeeld.

- a behoud van energie *✓*
- b behoud van ellende *✗*
- c behoud van massa *✗*
- d behoud van warmte *✗*
- e behoud van lading *✓*
- f behoud van het aantal protonen *✗*
- g behoud van het aantal neutronen *✗*

§ 14.2 Massa en energie

4. Massa is een vorm van energie die bij processen omgezet kan worden in een andere energievorm. Dit gebeurt bij kernreacties zoals splijting, verval en fusie.

De energie die vrijkomt uit een hoeveelheid massa reken je uit met:

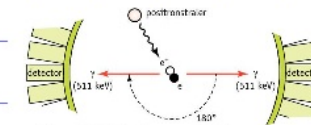
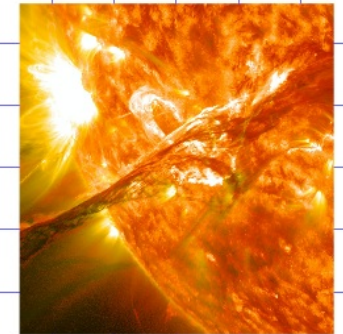
$$\text{energie in J} \rightarrow E = m \cdot c^2 \leftarrow \begin{array}{l} \text{lichtsnelheid} \\ 2,997 \cdot 10^8 \text{ m/s} \\ \uparrow \\ \text{massa in kg} \end{array}$$

Bordoeffening 2:

$$\begin{aligned} \text{a. } E &= m \cdot c^2 = 1,0 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot (3,00 \cdot 10^8)^2 \\ &= 9,00 \cdot 10^{13} \text{ J} = 2,5 \cdot 10^7 \text{ kWh} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{b. } E &= m \cdot c^2 = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \cdot (3,00 \cdot 10^8)^2 = 1,49 \cdot 10^{-10} \text{ J} \\ &= 931,5 \text{ MeV} \end{aligned}$$

Hoofdstuk 14: Kern en deeltjesfys.



▲ Figuur 13.38 Detectie van annihilatie

Bordoeffening 2:

Reken uit wat het energie-equivalent is van:

- 1,00 g aan massa, geef in J en in kWh.
- 1,00 u aan massa, geef in eV.

$$1 \text{ u} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \quad 1 \text{ eV} = 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

$$15) Q = m \cdot c \cdot \Delta T = 0,998 \cdot 4,18 \cdot 10^3 \cdot 70^\circ\text{C}$$

$$Q = 2,92 \cdot 10^5 \text{ J}$$

$$\Delta m = \frac{E}{c^2} = \frac{2,92 \cdot 10^5}{(2,997 \cdot 10^8)^2} = 3,2 \cdot 10^{-12} \text{ kg}$$

1,0 L water, $m = 0,998 \text{ kg}$

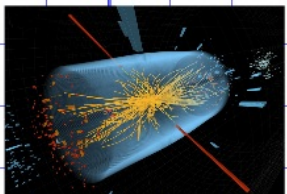
$$17) \quad \text{energie voor} = \text{energie na}$$

$$2 \times E_{0, \text{proton}} + E_{\text{kin, tot}} = E_{0, A} + E_{0, B}$$

$$2 \times (938,272 \text{ MeV}) + E_{\text{kin}} = 1116 \text{ MeV} + 1230 \text{ MeV}$$

$$1876,5 \text{ MeV} + E_{\text{kin, tot}} = 2346 \text{ MeV}$$

$$E_{\text{kin, tot}} = 469 \text{ MeV}$$



Hoofdstuk 14: Kern en deeltjesfys.

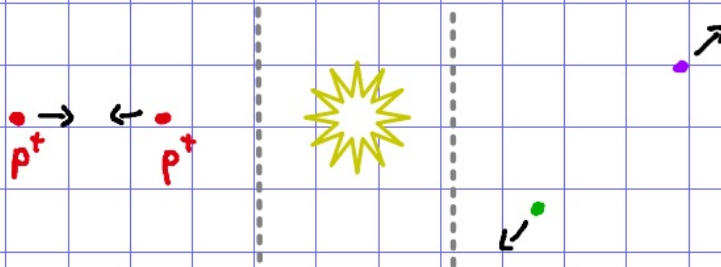
§ 14.2 Massa en energie

- 15 Een liter water wordt verwarmd van 10 tot 80 °C. Om een kilogram water 1 °C warmer te maken is $4,18 \cdot 10^3 \text{ J}$ warmte nodig. Er is energie toegevoerd, dus is de massa toegenomen. Bereken hoeveel de massa van het water is toegenomen.
- 16 Bereken hoeveel procent van de massa van twee protonen en twee neutronen er bij de vorming van een α -deeltje wordt omgezet in energie.
- 17 Twee protonen met gelijke snelheid botsen frontaal en worden daarbij omgezet in een ongeladen deeltje A met een rustenergie van 1116 MeV en een deeltje B met een rustenergie van 1230 MeV. $\rightarrow$ geen E_{kin}
- a Bereken de lading van deeltje B.
- b Bereken de minimale kinetische energie van de twee protonen.

19 a) inelastisch

$$\begin{aligned} b) E_{\text{tot}} &= 2 \times E_{0, \text{prot}} + E_{\text{kin, tot}} \\ &= 2 \times 938,272 \text{ MeV} + 2000 \text{ MeV} \\ &= 3876 \text{ MeV} \leadsto \frac{3876 \text{ MeV}}{931,494 \text{ MeV}} = 4,16 \text{ u} \end{aligned}$$

c)



d)



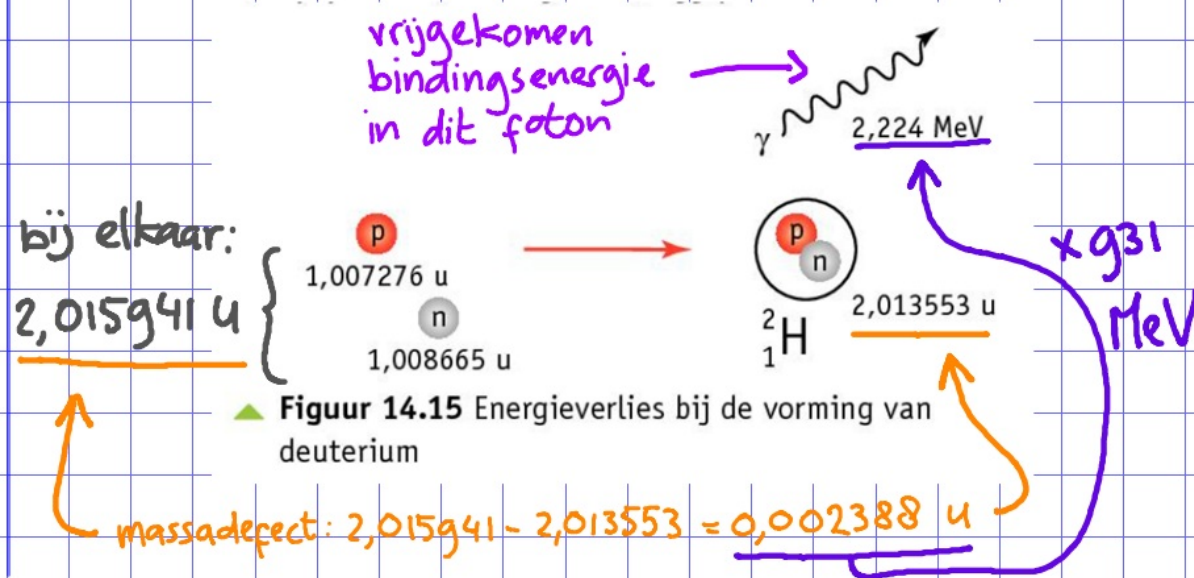
Hoofdstuk 14: Kern en deeltjesfys.

§ 14.2 Massa en energie

- 19 Twee protonen, beide met een kinetische energie van 1000 MeV, botsen frontaal op elkaar. Hierbij worden de protonen omgezet in nieuwe deeltjes. Voor de creatie van deze nieuwe deeltjes is zowel de massa als de energie van de protonen beschikbaar.
- a Leg uit of de botsing tussen de protonen een elastische of inelastische botsing is.
 - b Bereken hoe groot de totale massa van de nieuwe deeltjes maximaal kan zijn.
 - c Waarom gaat het hier om de *maximale* massa van de nieuwe deeltjes?
 - d In een ander experiment botst een proton met een energie van 2000 MeV tegen een stilstaand proton. Leg uit dat er nu veel minder energie beschikbaar is voor de vorming van nieuwe deeltjes.

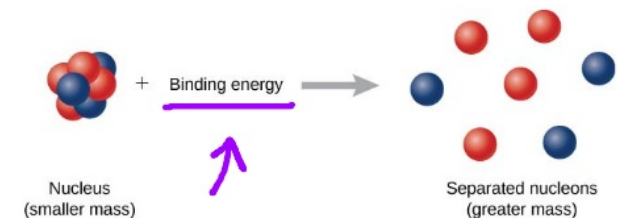
5. De energie die *vrijkomt* als kernen worden samengesteld uit losse protonen en neutronen heet de **bindingsenergie**. Om een samengesteld deeltje zoals een kern weer te scheiden in losse protonen en neutronen moet deze energie weer teruggeleverd worden.

De energie die een kern verliest als bindingsenergie bij het ontstaan resulteert in een **massadefect** in de ontstane kern: deze kern heeft een kleinere massa dan de losse deeltjes waar de kern gevormd werd.



Hoofdstuk 14: Kern en deeltjesfys.

§ 14.2 Massa en energie



deze energie moet je leveren om de kern uit elkaar te trekken

Speciale vaardigheid: bindingsenergie per nucleon van een isotoop. Je kunt voor elke isotoop uit tabel 25A uitrekenen wat de bindingsenergie per nucleon is. Voorbeeld: Kalium-40.

Stap 1: Zoek de massa (in u) van de isotoop op in tabel 25A.

$$\hookrightarrow m = 39,96400 \text{ u}$$

Stap 2: Haal de totale massa vd elektronen af van de isotoopmassa (massa elektron = $5,4858 \times 10^{-4} \text{ u}$).

massa van alleen
de kern: $m = 39,95357 \text{ u}$

Kalium-40 heeft 19 elektronen, dus
 $19 \times 5,4858 \cdot 10^{-4} \text{ u} = 0,01042302 \text{ u}$

Stap 3: Reken de totale massa uit van de losse kerndeeltjes waar de isotoop uit bestaat (massa proton = $1,00728 \text{ u}$ en massa neutron = $1,00866 \text{ u}$).

$$\left. \begin{array}{l} 19 \times m_p = 19 \times 1,00727647 = 19,13825 \text{ u} \\ 21 \times m_n = 21 \times 1,00866492 = 21,181963 \text{ u} \end{array} \right\} \text{ totaal, } m = 40,32022 \text{ u}$$

Stap 4: Bepaal het massadefect uit het verschil tussen de waarde die je hebt uitgerekend bij stap 2 en stap 3.

$$\text{massadefect} = 40,32022 \text{ u} - 39,95357 \text{ u} = 0,36663 \text{ u}$$

Stap 5: Reken het massadefect om naar de bindingsenergie met $E = mc^2$.

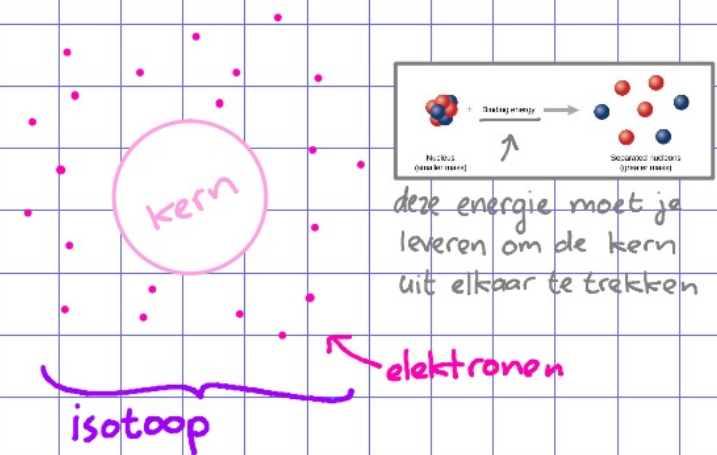
$$0,36663 \text{ u} \times 931,494061 \text{ MeV} = 341,522247 \text{ MeV}$$

Stap 6: Deel de bindingsenergie door het aantal nucleonen in de isotoop.

$$341,522247 \text{ u} / 40 = 8,5 \text{ MeV/nuc}$$

Hoofdstuk 14: Kern en deeltjesfys.

§ 14.2 Massa en energie



Bord oefening 4:

Bepaal de bindingsenergie per nucleon voor de isotoop IJzer-56.

$$1 \text{ u} \leftrightarrow 931,494061 \text{ MeV}$$

Gave denkvraag: wat betekent het als een isotoop een grote bindingsenergie per nucleon heeft?

Speciale vaardigheid: bindingsenergie per nucleon van een isotoop. Je kunt voor elke isotoop uit tabel 25A uitrekenen wat de bindingsenergie per nucleon is. Voorbeeld: Kalium-40.

Stap 1: Zoek de massa (in u) van de isotoop op in tabel 25A.

$$\rightarrow m = 39,96400 \text{ u}$$

Stap 2: Haal de totale massa vd elektronen af van de isotoopmassa (massa elektron = $5,4858 \times 10^{-4} \text{ u}$).

Kalium-40 heeft 19 elektronen, dus
 $19 \times 5,4858 \cdot 10^{-4} \text{ u} = 0,01042302 \text{ u}$

massa van alleen
de kern: $m = 39,95357 \text{ u}$

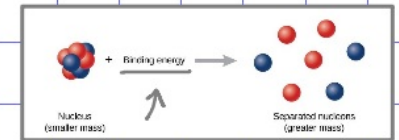


Stap 3: Reken de totale massa uit van de losse kerndeeltjes waar de isotoop uit bestaat (massa proton = 1,00728 u en massa neutron = 1,00866 u).

$$\left. \begin{array}{l} 19 \times m_p = 19 \times 1,00727647 = 19,13825 \text{ u} \\ 21 \times m_n = 21 \times 1,00866492 = 21,181963 \text{ u} \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{totaal,} \\ m = 40,32022 \text{ u} \end{array}$$

Hoofdstuk 14: Kern en deeltjesfys.

§ 14.2 Massa en energie



deze energie moet je leveren om de kern uit elkaar te trekken

Bordoeffening 4:

Bepaal de bindingsenergie per nucleon voor de isotoop IJzer-56.

$$1 \text{ u} \leftrightarrow 931,494061 \text{ MeV}$$

Stap 4: Bepaal het massadefect uit het verschil tussen de waarde die je hebt uitgerekend bij stap 2 en stap 3.

$$\text{massadefect} = 40,32022 \text{ u} - 39,95357 \text{ u} = 0,366639 \text{ u}$$

Stap 5: Reken het massadefect om naar de bindingsenergie met $E = mc^2$.

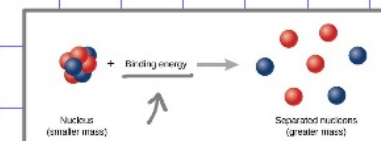
$$0,366639 \text{ u} \times 931,494061 \text{ MeV} = 341,522247 \text{ MeV}$$

Stap 6: Deel de bindingsenergie door het aantal nucleonen in de isotoop.

$$341,522247 \text{ u} / 40 = 8,5 \text{ MeV/nuc}$$

Hoofdstuk 14: Kern en deeltjesfys.

§ 14.2 Massa en energie



deze energie moet je leveren om de kern uit elkaar te trekken

Bordoeffening 4:

Bepaal de bindingsenergie per nucleon voor de isotoop IJzer-56.

$$1 \text{ u} \leftrightarrow 931,494061 \text{ MeV}$$

Bordoefening 4:

Stap 1: Zoek de massa (in u) van de isotoop op in tabel 25A.

$$m = 55,93494 \text{ u}$$

Stap 2: Haal de totale massa vd elektronen af van de isotoopmassa (massa elektron = $5,4858 \times 10^{-4} \text{ u}$).

$$26 \times 5,4858 \cdot 10^{-4} \text{ u} = 0,0142631 \text{ u}$$

$$55,93494 - 0,0142631 = 55,9206769 \text{ u}$$

Stap 3: Reken de totale massa uit van de losse kerndeeltjes waar de isotoop uit bestaat (massa proton = $1,00728 \text{ u}$ en massa neutron = $1,00866 \text{ u}$).

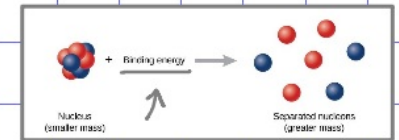
$$26 \times m_p = 26 \times 1,00727647 = 26,189188 \text{ u}$$

$$30 \times m_n = 30 \times 1,00866492 = 30,259948 \text{ u}$$

$$56,449136 \text{ u}$$

Hoofdstuk 14: Kern en deeltjesfys.

§ 14.2 Massa en energie



deze energie moet je leveren om de kern uit elkaar te trekken

Bordoefening 4:

Bepaal de bindingsenergie per nucleon voor de isotoop IJzer-56.

$$1 \text{ u} \leftrightarrow 931,494061 \text{ MeV}$$

Bordoeffening 4:

Stap 4: Bepaal het massadefect uit het verschil tussen de waarde die je hebt uitgerekend bij stap 2 en stap 3.

massadefect =

$$56,449136 \text{ u} - 55,920676 \text{ u} \\ = 0,528458 \text{ u}$$

Stap 5: Reken het massadefect om naar de bindingsenergie met $E = mc^2$.

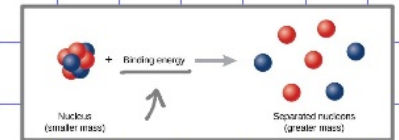
$$0,528458 \text{ u} \times 931,494061 \text{ MeV} \\ = 492,256 \text{ MeV}$$

Stap 6: Deel de bindingsenergie door het aantal nucleonen in de isotoop.

$$\frac{492,256 \text{ MeV}}{56} = 8,8 \text{ MeV/nucleon}$$

Hoofdstuk 14: Kern en deeltjesfys.

§ 14.2 Massa en energie



deze energie moet je leveren om de kern uit elkaar te trekken

Bordoeffening 4:

Bepaal de bindingsenergie per nucleon voor de isotoop IJzer-56.

$$1 \text{ u} \leftrightarrow 931,494061 \text{ MeV}$$

Bordoefening 4-X:

Stap 1: Zoek de massa (in u) van de isotoop op in tabel 25A.

$$m = 7,016004 \text{ u}$$

Stap 2: Haal de totale massa vd elektronen af van de isotoopmassa (massa elektron = $5,4858 \times 10^{-4} \text{ u}$).

$$3 \times 5,4858 \cdot 10^{-4} \text{ u} = 0,00164574 \text{ u}$$

$$7,016004 \text{ u} - 0,00164574 \text{ u} = 7,01435826 \text{ u}$$

Stap 3: Reken de totale massa uit van de losse kerndeeltjes waar de isotoop uit bestaat (massa proton = $1,00728 \text{ u}$ en massa neutron = $1,00866 \text{ u}$).

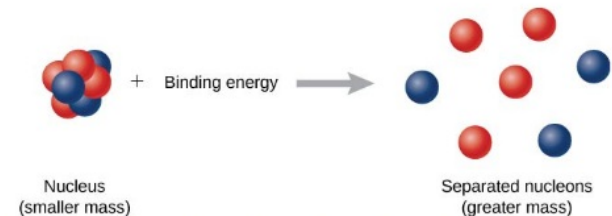
$$3 \times m_p = 3 \times 1,00727647 = 3,02182941 \text{ u}$$

$$4 \times m_n = 4 \times 1,00866492 = 4,03465968 \text{ u}$$

$$7,05648909 \text{ u}$$

Hoofdstuk 14: Kern en deeltjesfys.

§ 14.2 Massa en energie



Bordoefening 4-X:

Bepaal de bindingsenergie per nucleon voor de isotoop Lithium-7.

Gave denkvraag: wat betekent het als een isotoop een grote bindingsenergie per nucleon heeft?

Bordoeffening 4-X:

Stap 4: Bepaal het massadefect uit het verschil tussen de waarde die je hebt uitgerekend bij stap 2 en stap 3.

$$7,05648909 \text{ u} - 7,01435826 \text{ u} = 0,04213083 \text{ u}$$

Stap 5: Reken het massadefect om naar de bindingsenergie met $E = mc^2$.

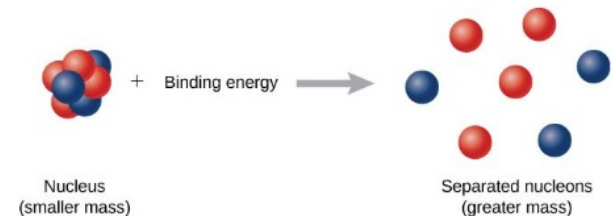
$$0,04213083 \text{ u} \times 931,494061 \text{ MeV} = 39,24461793 \text{ MeV}$$

Stap 6: Deel de bindingsenergie door het aantal nucleonen in de isotoop.

$$\frac{39,24461793 \text{ MeV}}{7} = 5,6 \frac{\text{MeV}}{\text{nuc}}$$

Hoofdstuk 14: Kern en deeltjesfys.

§ 14.2 Massa en energie

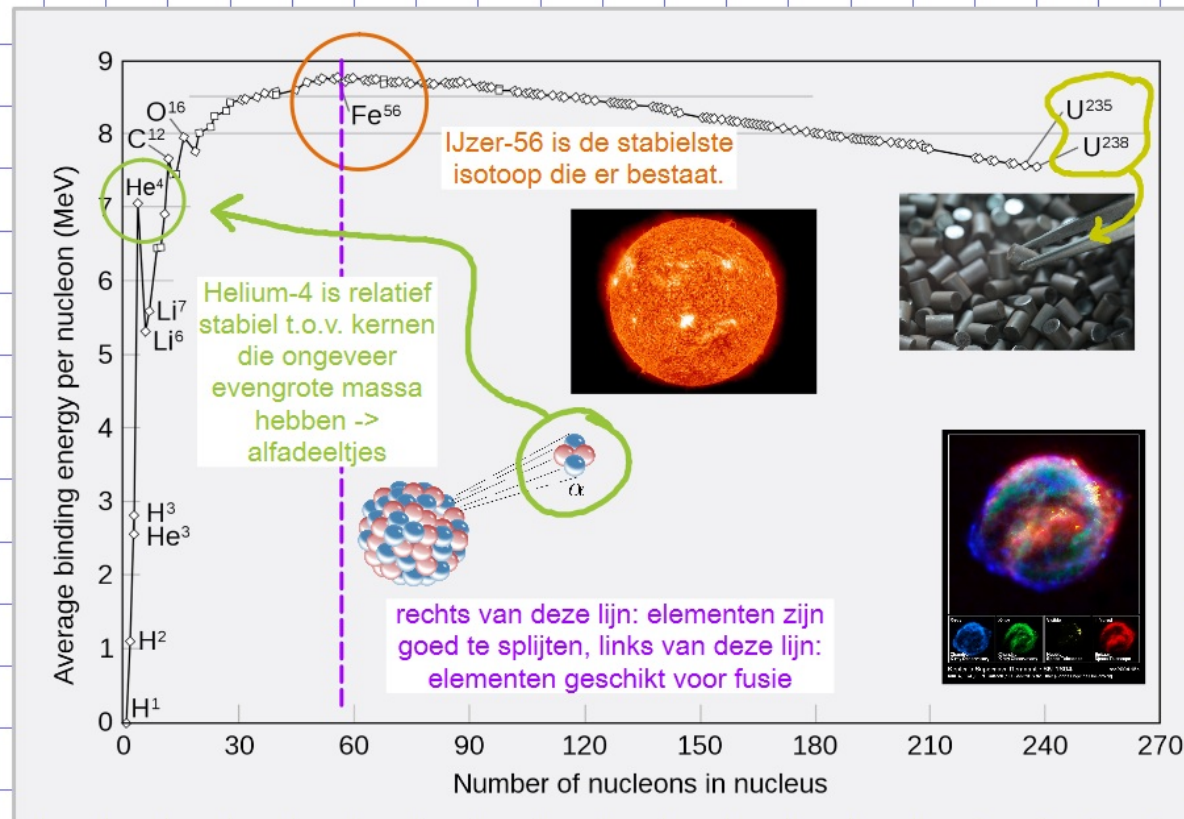


Bordoeffening 4-

Bepaal de bindingsenergie per nucleon voor de isotoop Lithium-7.

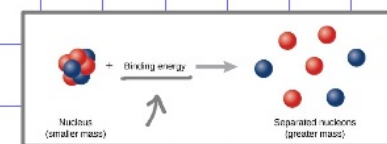
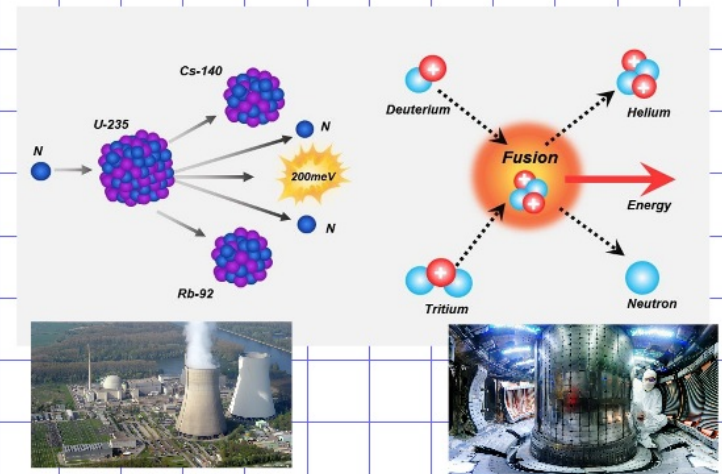
Gave denkvraag: wat betekent het als een isotoop een grote bindingsenergie per nucleon heeft?

6. Een grote **bindingsenergie per nucleon** betekent dat de kern stevig in elkaar zit. Uit de bindingsenergie per nucleon (proton of neutron) kun je (ondermeer) voor elke isotoop afleiden hoeveel netto-energie er vrijkomt bij een splijtings- of fusiereactie.



Hoofdstuk 14: Kern en deeltjesfys.

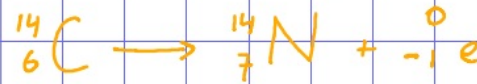
§ 14.2 Massa en energie



deze energie moet je leveren om de kern uit elkaar te trekken

7. Je kunt m.b.v. het massadefect uitrekenen hoeveel energie er vrijkomt bij verval van een instabiele isotoop. Voorbeeld, Koolstof-14:

Stap 1: Stel de reactievergelijking op.



Stap 2: Reken uit wat de massa van de kern voor de reactie was en wat de massa van de kern na de reactie is. Let er op dat je de massa van de elektronen niet meetelt. Deze zitten wel inbegrepen in de isotoopmassa in tabel 25A en moet je daar dus van aftrekken. Het elektron dat ontstaat bij betaverval is nieuw en moet je juist weer wel optellen bij de totale massa na de reactie.

NA: ${}^{14}_7\text{N}, m = 14,00307 \text{ u} - (7 \times 5,4858 \cdot 10^{-4} \text{ u}) = 13,99923 \text{ u}$
 ontstane elektron, $m = 5,4858 \cdot 10^{-4} \text{ u}$
 $m = 13,99978 \text{ u}$

VOOR: ${}^{14}_6\text{C}, m = 14,003242 \text{ u} - (6 \times 5,4858 \cdot 10^{-4} \text{ u}) = 13,99995 \text{ u}$

Stap 3: Reken het verschil uit en beredeneer of er tijdens de reactie massa bijgekomen is of dat er massa verdwenen is (dus energie vrijgekomen).

massaversch. = $13,99978 \text{ u} - 13,99995 \text{ u} = -1,72 \cdot 10^{-4} \text{ u}$

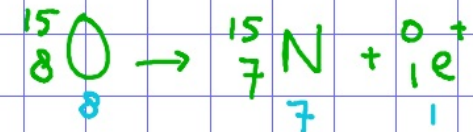
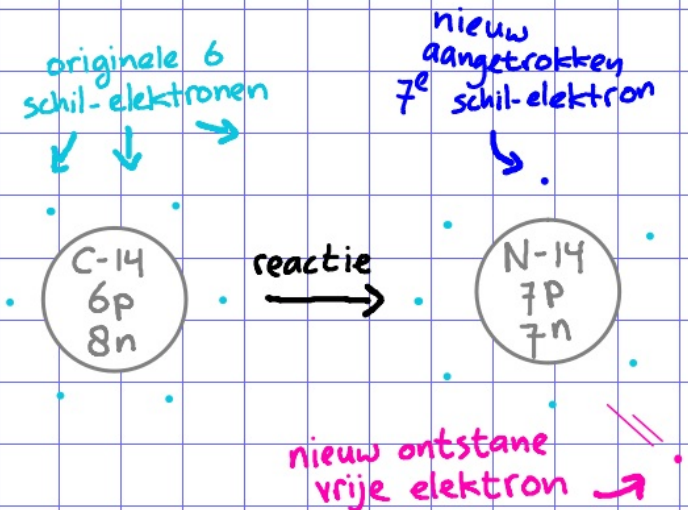
er is massa verdwenen dus energie vrijgekomen

Stap 4: Reken het massaverschil om naar energie met $E = m \cdot c^2$.

$1,72 \cdot 10^{-4} \text{ u} \times 931,494 \text{ MeV} = 0,1602 \text{ MeV}$

Hoofdstuk 14: Kern en deeltjesfys.

§ 14.2 Massa en energie



Snelle denkvraag: waarom moet je de massa van de elektronen voor en na de vervalsreactie van de isotoopmassa's af halen?

Bord oefening 5 / voorbeeld blz. 236:



$${}^{40}_{20}\text{Ca}, m = 39,96259 - (20 \times 5,4858 \cdot 10^{-4}) = 39,9516184 \text{ u}$$

$$\text{ontstane elektron}, m = 5,4858 \cdot 10^{-4} \text{ u}$$

$$\text{totale massa na reactie}, m = 39,952167 \text{ u}$$

$${}^{40}_{19}\text{K}, m = 39,96400 - (19 \times 5,4858 \cdot 10^{-4}) = 39,953577 \text{ u}$$

totale massa voor de reactie

$$\text{massaverschil} = 39,953577 \text{ u} - 39,952167 \text{ u} = 0,00141 \text{ u}$$

$$E = 0,00141 \cdot 931,494 \text{ MeV} = 1,31 \text{ MeV}$$

Hoofdstuk 14: Kern en deeltjesfys.

§ 14.2 Massa en energie

Stap 1: Stel de reactievergelijking op.

Stap 2: Reken uit wat de massa van de kern voor de reactie was en wat de massa van de kern na de reactie is. Let er op dat je de massa van de elektronen in de schillen om de kern niet meetelt.

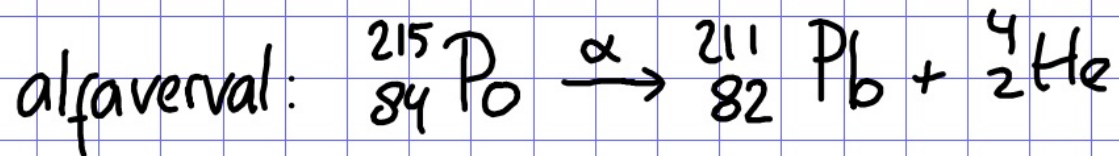
Let er op dat je het ontstane elektron bij betaverval weer wel meetelt.

Stap 3: Reken het massaverschil uit.

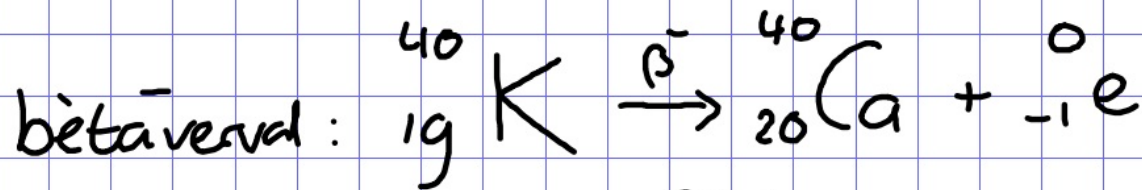
Stap 4: Reken het massaverschil om naar energie met $E = m \cdot c^2$.

Bord oefening 5 / voorbeeld blz. 236:

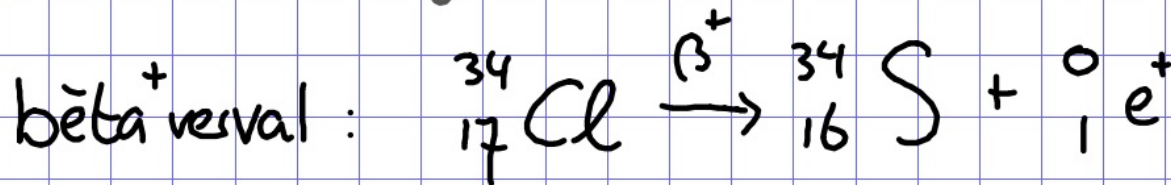
Reken uit hoeveel energie er vrijkomt bij het verval van kalium-40.



elektronen vergeten: OK



elektronen vergeten: OK



elektronen vergeten: NA $2 \times m_e$ te veel

Hoofdstuk 14: Kern en deeltjesfys.

§ 14.2 Massa en energie

Stap 1: Stel de reactievergelijking op.

Stap 2: Reken uit wat de massa van de kern voor de reactie was en wat de massa van de kern na de reactie is. Let er op dat je de massa van de elektronen in de schillen om de kern niet meetelt. Let er op dat je het ontstane elektron bij betaverval weer wel meetelt.

Stap 3: Reken het massaverschil uit.

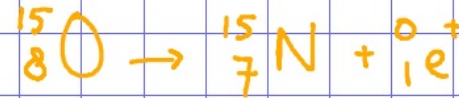
Stap 4: Reken het massaverschil om naar energie met $E = m \cdot c^2$.

Bordoefening 5 / voorbeeld blz. 236:

Reken uit hoeveel energie er vrijkomt bij het verval van kalium-40.

Bordoefening 5-X:

Stap 1: Stel de reactievergelijking op.



Stap 2: Reken uit wat de massa voor de reactie was en wat de massa na de reactie is.

$$\text{VOOR: } {}^{15}_{8}\text{O}, m = 15,00307 \text{ u} - (8 \times 5,4858 \cdot 10^{-4} \text{ u}) = 14,998681 \text{ u}$$

$$\text{NA: } {}^{15}_{7}\text{N}, m = 15,00011 \text{ u} - (7 \times 5,4858 \cdot 10^{-4} \text{ u}) = 14,996270 \text{ u}$$

$$\text{ontstane elektron, } m = 5,4858 \cdot 10^{-4} \text{ u}$$

$$\underline{14,996819 \text{ u}}$$

$$\Delta m = 14,996819 \text{ u} - 14,998681 \text{ u} = -0,001863 \text{ u}$$

$$E = 0,001863 \text{ u} \cdot 931,494 \text{ MeV} = 1,7343 \text{ MeV}$$

Hoofdstuk 14: Kern en deeltjesfys.

§ 14.2 Massa en energie

Stap 1: Stel de reactievergelijking op.

Stap 2: Reken uit wat de massa van de kern voor de reactie was en wat de massa van de kern na de reactie is. *Let er op dat je de massa van de elektronen in de schillen om de kern niet meetelt.*

Let er op dat je het ontstane elektron bij betaverval weer wel meetelt.

Stap 3: Reken het massaverschil uit.

Stap 4: Reken het massaverschil om naar energie met $E = m \cdot c^2$.

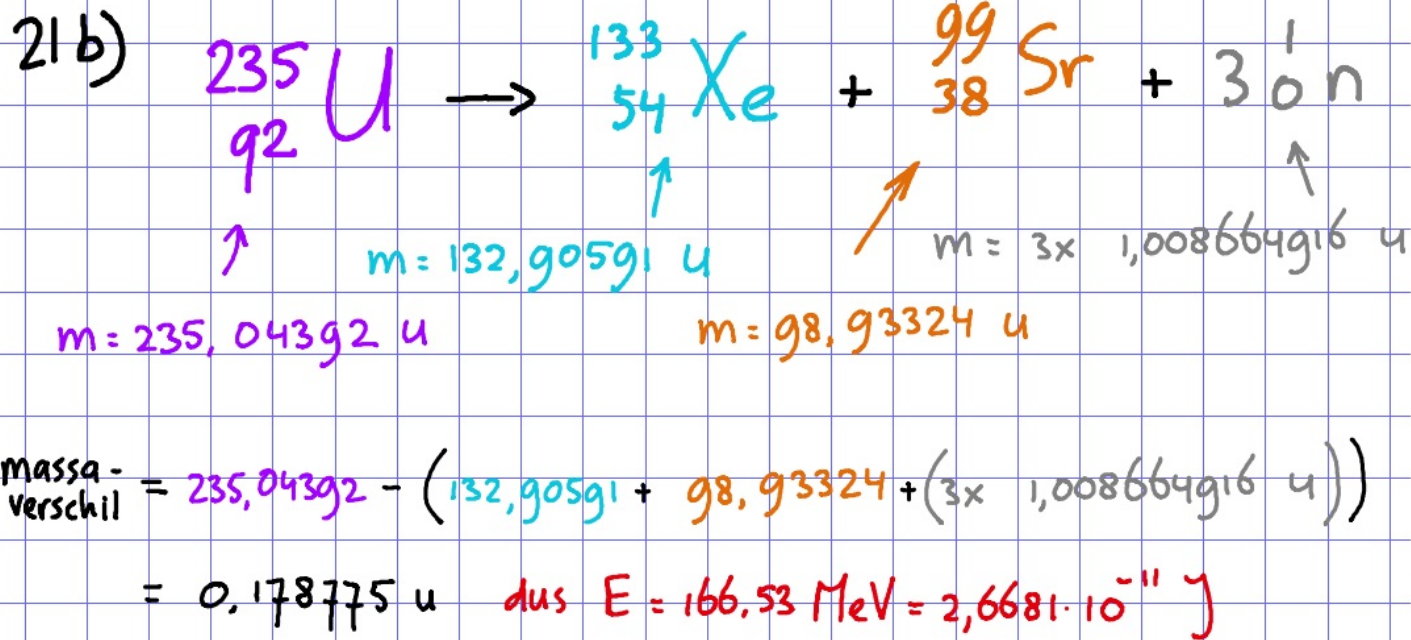
Bordoefening 5-X:

Reken uit hoeveel energie er vrijkomt bij het verval van zuurstof-15.

§ 14.2 Massa en energie

Hoofdstuk 14: Kern en deeltjesfys.

Opgaven bij § 14.2

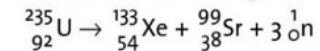


extra vaardigheid:
elektronmassa's in de
gaten houden bij
kernreacties!

20 Onderzoek met behulp van de isotopentabel in *Binas* welk ijzer-isotoop de kleinste massa per nucleon heeft.

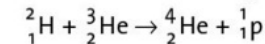
21 De aanwezigheid van uranium en thorium op aarde geeft de mogelijkheid om via kernsplijting energie op te wekken. Aan figuur 14.16 is te zien dat met de kernfusie van lichte elementen veel meer energie per nucleon vrijkomt dan met de splijting van zware elementen.
a Leg uit hoe dit blijkt uit de grafiek.

b Bereken hoeveel energie er vrijkomt bij de reactie



De atoommassa van Sr-99 is 98,93324 u.

c Bereken hoeveel energie er vrijkomt bij de reactie



22 Radium-226 is een vervalproduct van uranium-238 en het komt zodoende voor in uraniumhoudende ertsen. Het is zelf ook radioactief.

a Geef de vervalvergelijking van radium-226.

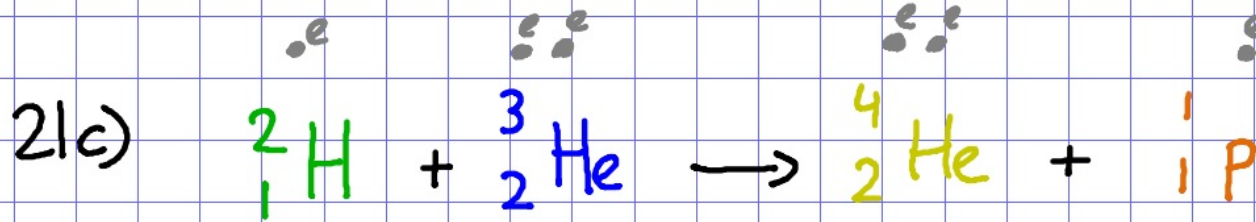
b Bereken de energie van het α -deeltje door het massaverschil te berekenen tussen radium en de vervalproducten.

Vergelijk je uitkomst met de waarde in *Binas*.

§ 14.2 Massa en energie

Hoofdstuk 14: Kern en deeltjesfys.

Opgaven bij § 14.2



$m = 2,014102 \text{ u}$ $m = 3,016029 \text{ u}$ $m = 4,002603 \text{ u}$ $m = 1,0072765 \text{ u}$

(tabel 7)

let op: hier 1 elektronmassa
($m = 5,485799 \cdot 10^{-4} \text{ u}$) in mindering
brengen!

$m = 5,029582 \text{ u}$

$m = 5,0098795 \text{ u}$

massa-
verschil = $5,029582 \text{ u} - 5,0098795 \text{ u} = 0,019703 \text{ u}$

dus $E = 18,353 \text{ MeV} = 2,9405 \cdot 10^{-12} \text{ J}$ ←

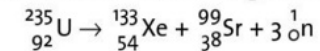
extra vaardigheid:
elektronmassa's in de
gaten houden bij
kernreacties!

20 Onderzoek met behulp van de isotopentabel in *Binas* welk ijzer-isotoop de kleinste massa per nucleon heeft.

21 De aanwezigheid van uranium en thorium op aarde geeft de mogelijkheid om via kernsplijting energie op te wekken. Aan figuur 14.16 is te zien dat met de kernfusie van lichte elementen veel meer energie per nucleon vrijkomt dan met de splijting van zware elementen.

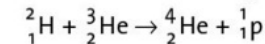
a Leg uit hoe dit blijkt uit de grafiek.

b Bereken hoeveel energie er vrijkomt bij de reactie



De atoommassa van Sr-99 is 98,93324 u.

c Bereken hoeveel energie er vrijkomt bij de reactie



22 Radium-226 is een vervalproduct van uranium-238 en het komt zodoende voor in uraniumhoudende ertsen. Het is zelf ook radioactief.

a Geef de vervalvergelijking van radium-226.

b Bereken de energie van het α -deeltje door het massaverschil te berekenen tussen radium en de vervalproducten.

Vergelijk je uitkomst met de waarde in *Binas*.

§ 14.2 Massa en energie

Hoofdstuk 14: Kern en deeltjesfys.

Opgaven bij § 14.2

22 a)



$$m = 226,02540 \text{ u} \quad m = 222,01757 \text{ u} \quad m = 4,002603 \text{ u}$$

massaverschil =

$$\begin{aligned} \text{b) } & 226,02540 \text{ u} - (222,01757 \text{ u} + 4,002603 \text{ u}) \\ & = 0,005227 \text{ u} \end{aligned}$$

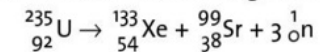
$$E = 0,005227 \text{ u} \cdot 931,494 = 4,87 \text{ MeV}$$

20 Onderzoek met behulp van de isotopentabel in *Binas* welk ijzer-isotoop de kleinste massa per nucleon heeft.

21 De aanwezigheid van uranium en thorium op aarde geeft de mogelijkheid om via kernsplijting energie op te wekken. Aan figuur 14.16 is te zien dat met de kernfusie van lichte elementen veel meer energie per nucleon vrijkomt dan met de splijting van zware elementen.

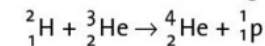
a Leg uit hoe dit blijkt uit de grafiek.

b Bereken hoeveel energie er vrijkomt bij de reactie



De atoommassa van Sr-99 is 98,93324 u.

c Bereken hoeveel energie er vrijkomt bij de reactie



22 Radium-226 is een vervalproduct van uranium-238 en het komt zodoende voor in uraniumhoudende ertsen. Het is zelf ook radioactief.

a Geef de vervalvergelijking van radium-226.

b Bereken de energie van het α -deeltje door het massaverschil te berekenen tussen radium en de vervalproducten.

Vergelijk je uitkomst met de waarde in *Binas*.

§ 14.2 Massa en energie

Hoofdstuk 14: Kern en deeltjesfys.

Opgaven bij § 14.2



massaverschil =

$$(2,014102 \text{ u} + m = 219,00948 \text{ u}) - 221,01425 \text{ u}$$

$$= 0,009332 \text{ u}$$

23b) Een deutron is een kern van ${}_1^2\text{H}$.

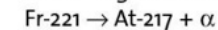
- c Radium behoort, chemisch gezien, tot de zeldzame aardes en kan terecht komen in kalkhoudende gesteenten en vervolgens in bouwmaterialen. Leg uit waarom dit een gevaar oplevert voor de gezondheid, ook al is het radium opgesloten binnen een kalkhoudende muur.
- d Leg uit via welke tussenstappen radium ontstaat uit uranium-238.
- e Leg uit welke stoffen je dus nog meer verwacht te vinden in uraniumhoudend erts.

23 Van een kern die via α -verval vervalft kun je je afvragen waarom er nooit eens andere deeltjes worden uitgezonden, bijvoorbeeld deutronen (H-2 -kernen) of losse protonen.

a Onderzoek waarom de volgende reacties niet mogelijk zijn:



en de volgende reactie wel:



b Stel je voor dat er een kern zou bestaan die kan vervallen door het uitzenden van twee deutronen. Leg uit dat er minder energie zou vrijkomen dan door het uitzenden van één α -deeltje.

extra vaardigheid:
elektronmassa's in de
gaten houden bij
kernreacties!

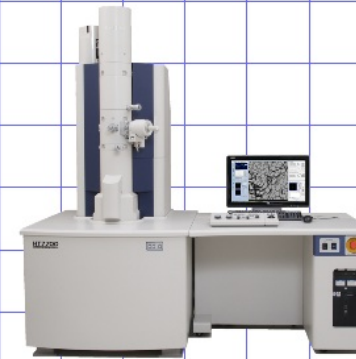
§ 14.3 Subatomaire deeltjes

9. In de 20^e eeuw is de substructuur van atomen stapje voor stapje ontdekt tot de kennis die we nu in 2020 hebben.

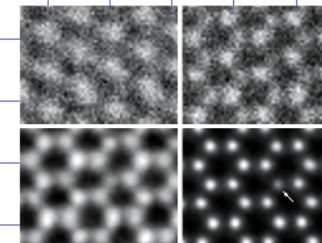
- atomen hebben toch substructuur (**elektronen**): John Thomson
- atomen hebben een **kern**: Ernest Rutherford
- in de atoomkern zitten ook **neutronen**: James Chadwick
- de neutronen en protonen bestaan uit **quarks**: Murray Gell-Man (1968);

Omdat atomen en sub-atomaire deeltjes veel te klein zijn om onder een optische microscoop te zien zijn deze ontdekkingen gedaan via **indirecte waarnemingen**.

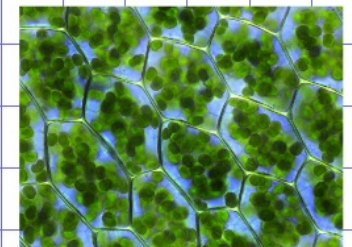
Hoofdstuk 14: Kern en deeltjesfys.



elektronenmicroscoop
maximale vergroting: $10^9\times$
maximale resolutie: 10^{-12} m



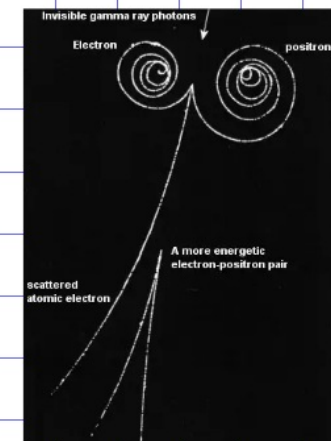
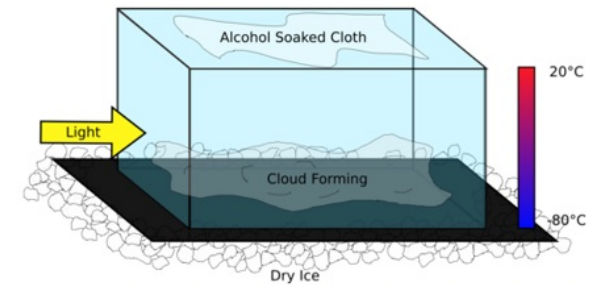
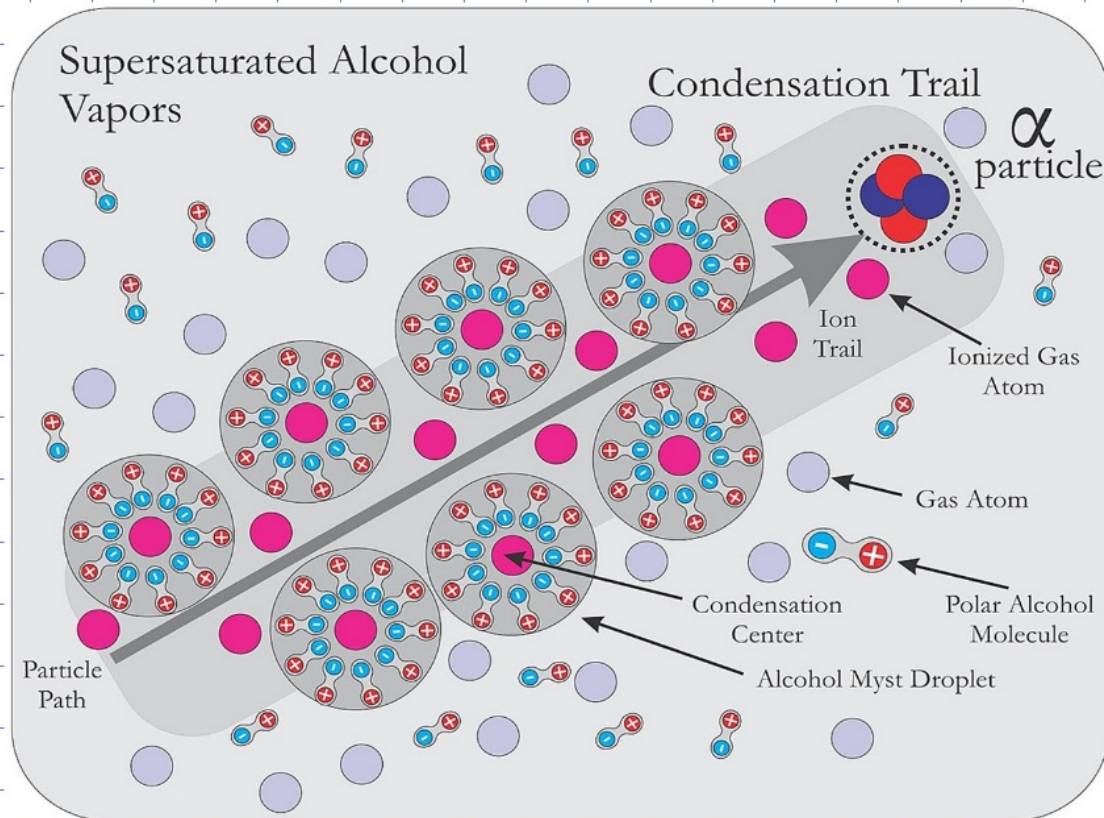
optische microscoop
maximale vergroting: $1000\times$
maximale resolutie: 200 nm



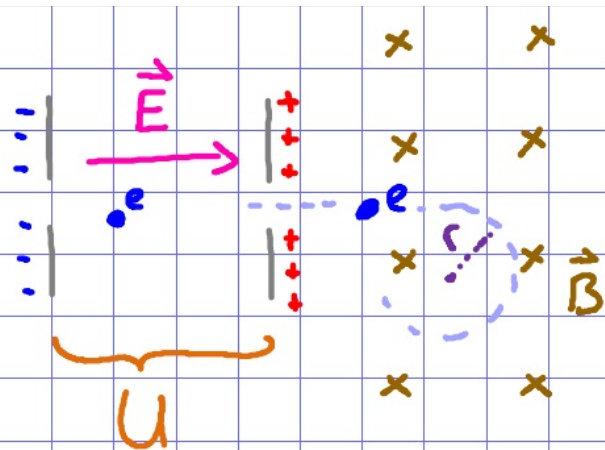
10. Een eerste deeltjesdetector was de **nevelkamer** van Wilson. Als een geladen deeltje door een oververzadigde alcohol damp beweegt veroorzaakt het ionisaties in de lucht die als nucleatiecentra dienen voor condensatie.

Hoofdstuk 14: Kern en deeltjesfys.

§ 14.3 Subatomaire deeltjes



28



$$a) \quad E_{el} = U \cdot q$$

$$E_{kin} = \frac{1}{2} m v^2$$

$$U \cdot e = \frac{1}{2} m \cdot v^2$$

$$v^2 = \frac{2 \cdot U \cdot e}{m}$$

$$b) \quad (B, e, v, m) \quad r = \frac{v \cdot m}{B e}$$

$$c) \quad [r] = \frac{[v] \cdot [m]}{[B] \cdot [e]} = \frac{m \cdot s^{-1} \cdot kg}{T \cdot C}$$

$$= \frac{\cancel{m} \cdot \cancel{s}^{-1} \cdot \cancel{kg}}{\cancel{kg} \cdot \cancel{m} \cdot \cancel{s}^{-2} \cdot \cancel{m} \cdot \cancel{C}^{-1} \cdot \cancel{s} \cdot \cancel{m}^{-2} \cdot \cancel{C}} = m$$

Hoofdstuk 14: Kern en deeltjesfys.

§ 14.3 Subatomaire deeltjes

Opdrachten

28 Elektronen worden vanuit stilstand versneld in een elektrisch veld, en doorlopen hierbij een spanning U . Ze bereiken geen relativistische snelheid.

a Leg uit dat de elektronen nu een snelheid hebben, gegeven door

$$v^2 = 2eU/m.$$

b De elektronen komen met deze snelheid een magneetveld binnen. Ze worden hierdoor afgebogen en beschrijven een cirkelbaan, die wordt gegeven door een van de volgende formules:

$$A r = mv/Be$$

$$B r = Be/mv$$

$$C r = Bev/m$$

Leg uit welke van deze formules het meest geloofwaardig is.

c Controleer of je gelijk hebt door de eenheden te controleren.

d Leg uit dat voor de verhouding tussen e en m nu geldt dat:

$$\frac{e}{m} = \frac{2U}{B^2 r^2}$$

e Thomson gebruikte een Wilsonvat om een schatting te maken van de lading van het elektron, zie bron 10. Hoe kan in de tekst gezegd

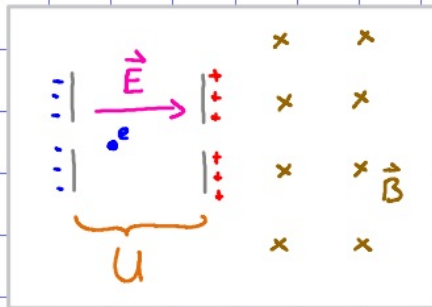
binas 3A en 4

$$T = Wb \cdot m^{-2} = V \cdot s \cdot m^{-2} = J \cdot C^{-1} \cdot s \cdot m^{-2}$$

$$= N \cdot m \cdot C^{-1} \cdot s \cdot m^{-2} = kg \cdot m \cdot s^{-2} \cdot m \cdot C^{-1} \cdot s \cdot m^{-2}$$

elektron.

28



$$v^2 = \frac{2 \cdot U \cdot e}{m}$$

$$r = \frac{v \cdot m}{B e}$$

$$v = \frac{r B e}{m}$$

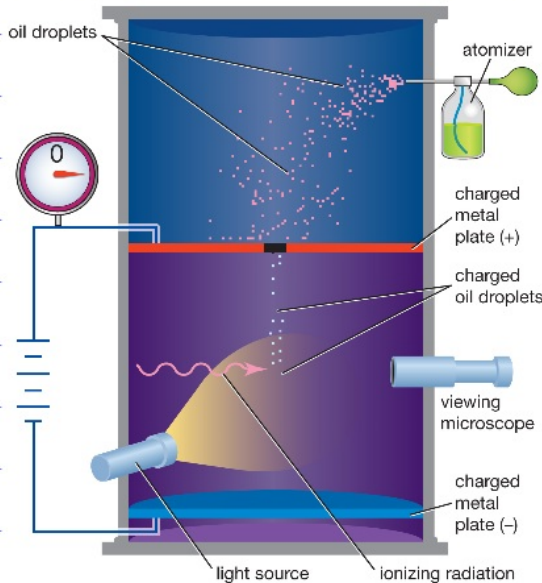
$$v^2 = \frac{r^2 B^2 e^2}{m^2}$$

$$\frac{2Ue}{m} = \frac{r^2 B^2 e^2}{m^2}$$

$$2U = \frac{r^2 B^2 e}{m}$$

$$\frac{e}{m} = \frac{2 \cdot U}{r^2 B^2}$$

goal!



© 2012 Encyclopædia Britannica, Inc.

Hoofdstuk 14: Kern en deeltjesfys.

§ 14.3 Subatomaire deeltjes

Opdrachten

28 Elektronen worden vanuit stilstand versneld in een elektrisch veld, en doorlopen hierbij een spanning U . Ze bereiken geen relativistische snelheid.

a Leg uit dat de elektronen nu een snelheid hebben, gegeven door $v^2 = 2eU/m$.

b De elektronen komen met deze snelheid een magneetveld binnen. Ze worden hierdoor afgebogen en beschrijven een cirkelbaan, die wordt gegeven door een van de volgende formules:

$$A r = mv/Be$$

$$B r = Be/mv$$

$$C r = Bev/m$$

Leg uit welke van deze formules het meest geloofwaardig is.

c Controleer of je gelijk hebt door de eenheden te controleren.

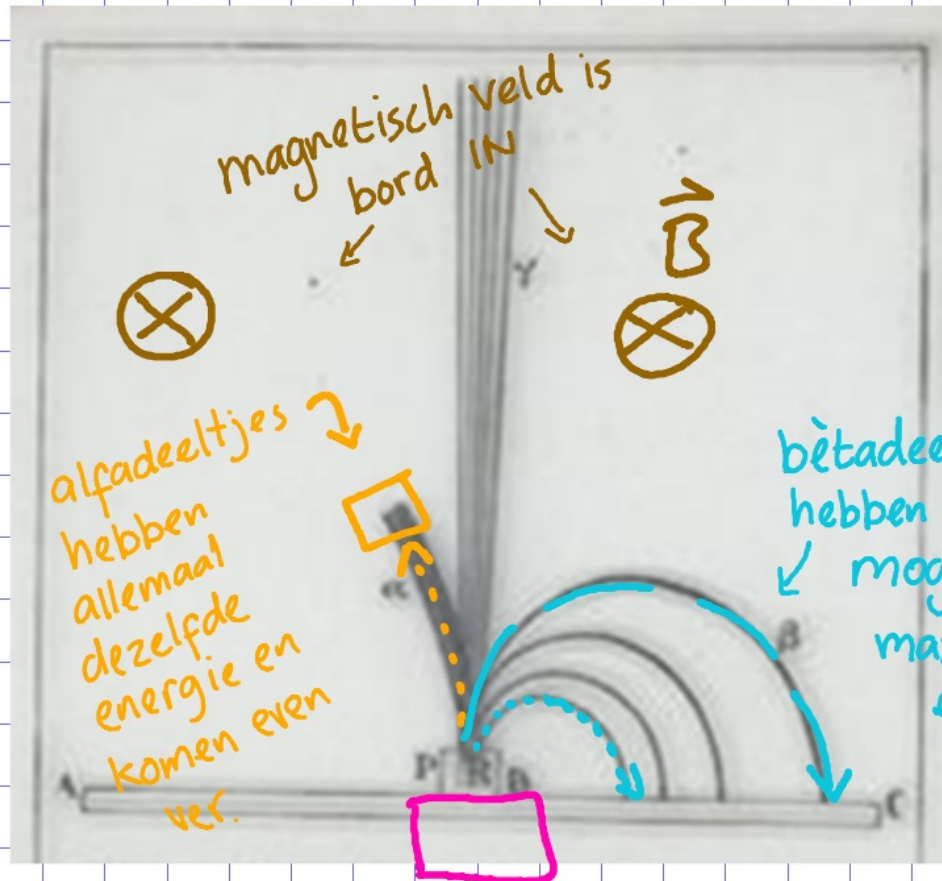
d Leg uit dat voor de verhouding tussen e en m nu geldt dat:

$$\frac{e}{m} = \frac{2U}{B^2 r^2}$$

← goal

e Thomson gebruikte een Wilsonvat om een schatting te maken van de lading van het elektron, zie bron 10. Hoe kan in de tekst gezegd worden dat hij daarmee ook een schatting kreeg van de massa van het elektron?

f Thomson gebruikte een elektrisch veld om de daalsnelheid van de damp in het Wilsonvat te beïnvloeden. Geef in een aantal stappen aan hoe dit kan leiden tot een schatting van de lading van een elektron.



Hoofdstuk 14: Kern en deeltjesfys.

§ 14.3 Subatomaire deeltjes

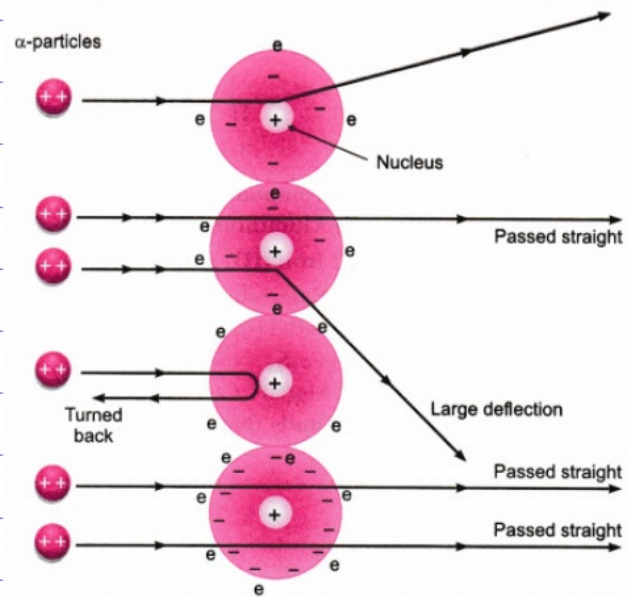
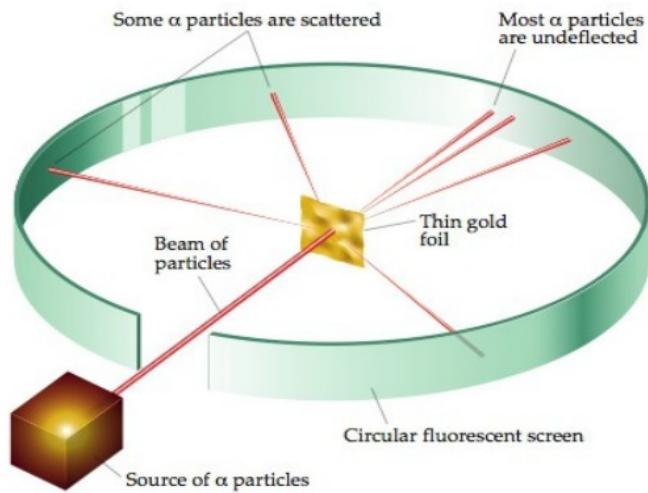
29 Figuur 14.19 is een illustratie uit het proefschrift van Marie Curie, bij de uitleg van α -, β -, en γ -straling



▲ Figuur 14.19

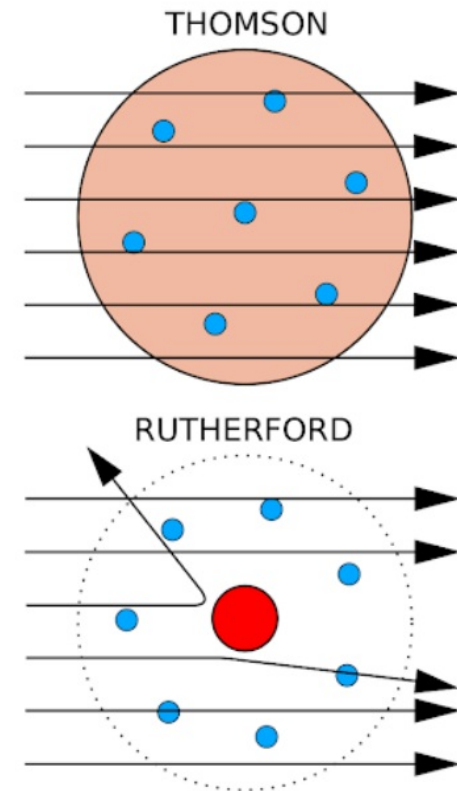
- De bundel α -straling houdt opeens op in figuur 14.19. Is dit een toevallig kenmerk van de figuur of heeft het te maken met een eigenschap van de α -straling?
- De α -deeltjes in de figuur doorlopen in het magnetisch veld allemaal dezelfde baan. De bundel β -deeltjes ziet er heel anders uit. Wat zegt dit verschil over de snelheden van die deeltjes? (Gebruik hierbij de juiste formule uit opdracht 28b).

11. Atoomkernen: Thomson's kerntebol vs Rutherford's nucleus.



Hoofdstuk 14: Kern en deeltjesfys.

§ 14.3 Subatomaire deeltjes

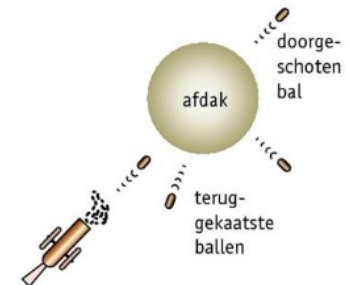


Hoofdstuk 14: Kern en deeltjesfys.

§ 14.3 Subatomaire deeltjes

Opgaven

- 30 Een α -deeltje met een snelheid van $1,52 \cdot 10^7$ m/s botst frontaal op een stilstaand goudatoom.
- a Schat de snelheid die het goudatoom krijgt door te veronderstellen dat het α -deeltje na de botsing met ongeveer dezelfde snelheid terugkaatst.
 - b Leg uit of de werkelijke snelheid van het goudatoom groter of kleiner is dan deze schatting.
 - c Bereken de snelheid van het goudatoom met het rekenblad dat hoort bij het werkblad 'impuls' (zie opdracht 14).
- 31 Je schiet met een tennisballenkanon op een voorwerp dat verdukt staat opgesteld onder een afdak.

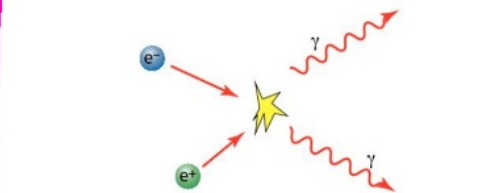
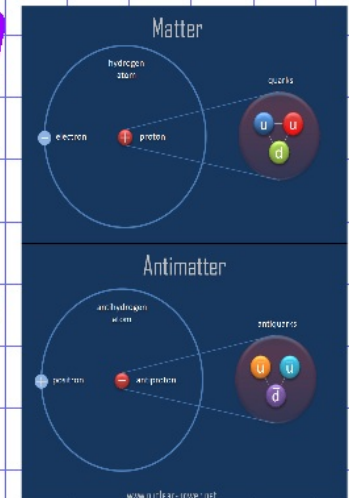
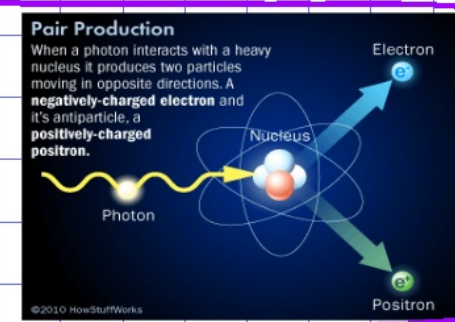
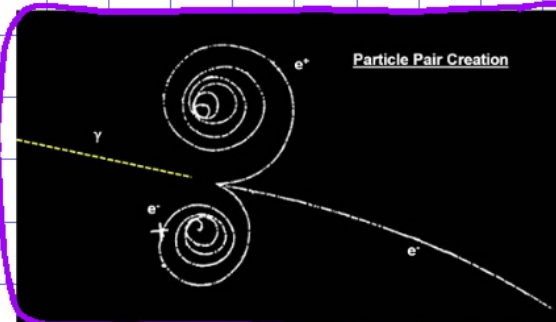
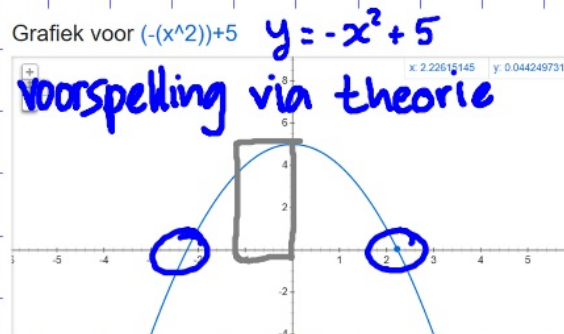


▲ Figuur 14.21

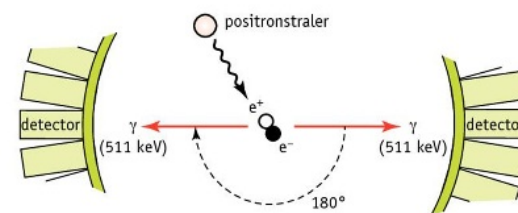
12. Elk deeltje zoals elektronen, protonen, neutronen en fotonen hebben een **antideeltje** dat dezelfde massa heeft, maar de omgekeerde elektrische lading. Deze antideeltjes vormen **antimaterie**. Deeltjes kunnen **annihileren** met hun eigen antideeltje. Ook kunnen deeltje en antideeltje ontstaan bij **paarcreatie**.

Hoofdstuk 14: Kern en deeltjesfys.

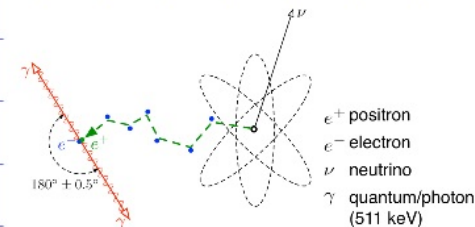
§ 14.3 Subatomaire deeltjes



▲ **Figuur 14.23** De annihiliatie van een electron en een positron, onder uitzending van twee gamma-fotonen



▲ **Figuur 13.38** Detectie van annihiliatie



annihilatie

$$\begin{aligned}
 33) \quad E &= mc^2 \\
 &= 2 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot (3,0 \cdot 10^8 \text{ m/s})^2 \\
 &= 2 \cdot 10^{14} \text{ J}
 \end{aligned}$$

Hoofdstuk 14: Kern en deeltjesfys.

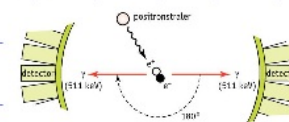
§ 14.3 Subatomaire deeltjes

Opdrachten

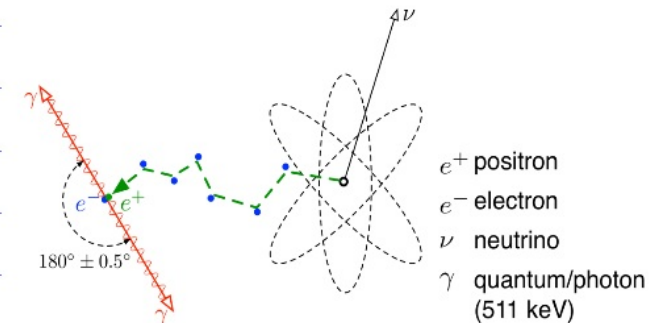
33 Bereken hoeveel energie er vrijkomt bij de annihilatie van 1 gram antimaterie. + 1 g *gewone materie*

✗ Als een elektron en een positron annihileren komen er altijd (minstens) twee fotonen vrij. Leg uit waarom. Ga er bij je uitleg vanuit dat het elektron en het positron een even grote, maar tegengestelde impuls hebben.

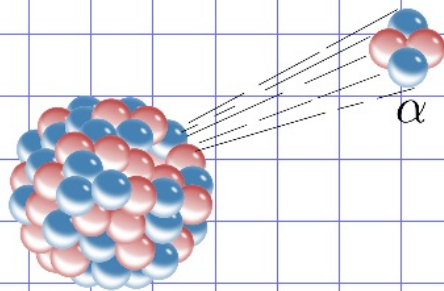
impuls



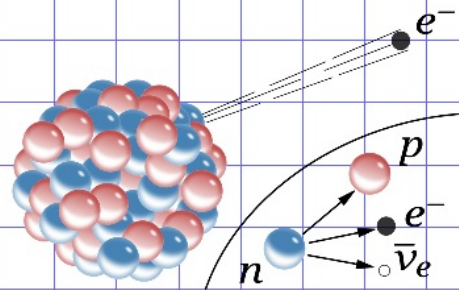
▲ Figuur 13.38 Detectie van annihilatie



13. Neutrino's ontstaan bij kernreacties zoals betaverval als een extra deeltje naast het ook al ontstane elektron.



Alfaverval: het alfadeeltje schiet altijd met dezelfde energie weg.

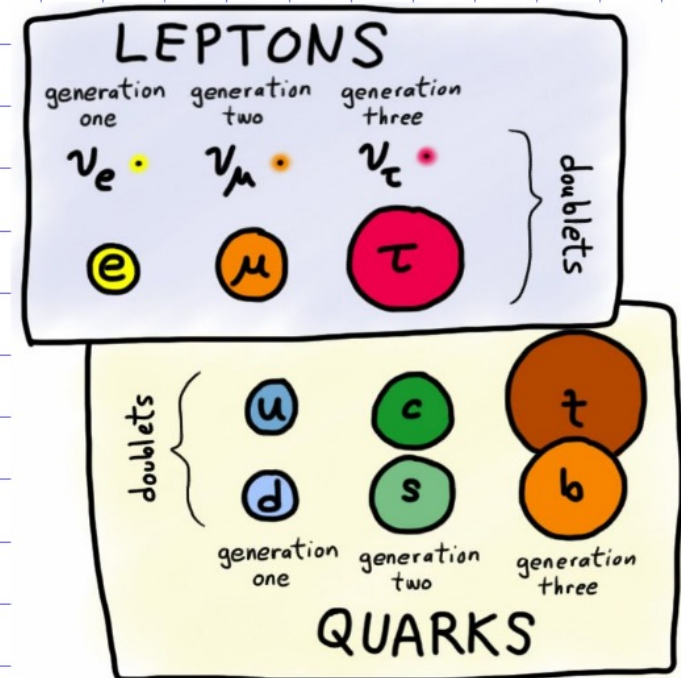


Betaverval: de energie in tabel 25A is de maximale energie die het ontstane elektron meekrijgt. In een kansproces wordt deze energie verdeeld tussen het elektron en het neutrino.

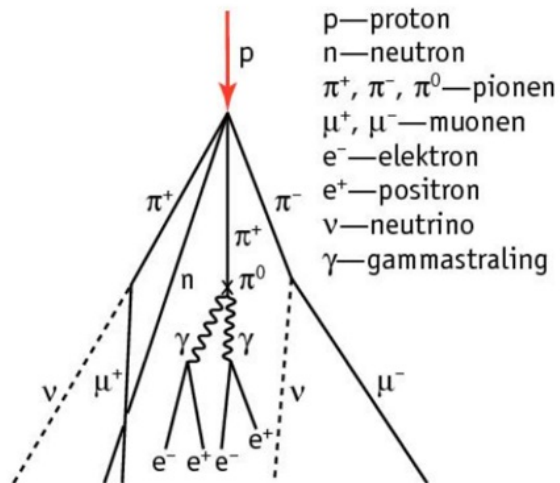
officieel bij beta-min-
verval ontstaat een
"elektron-antineutrino"

Hoofdstuk 14: Kern en deeltjesfys.

§ 14.3 Subatomaire deeltjes



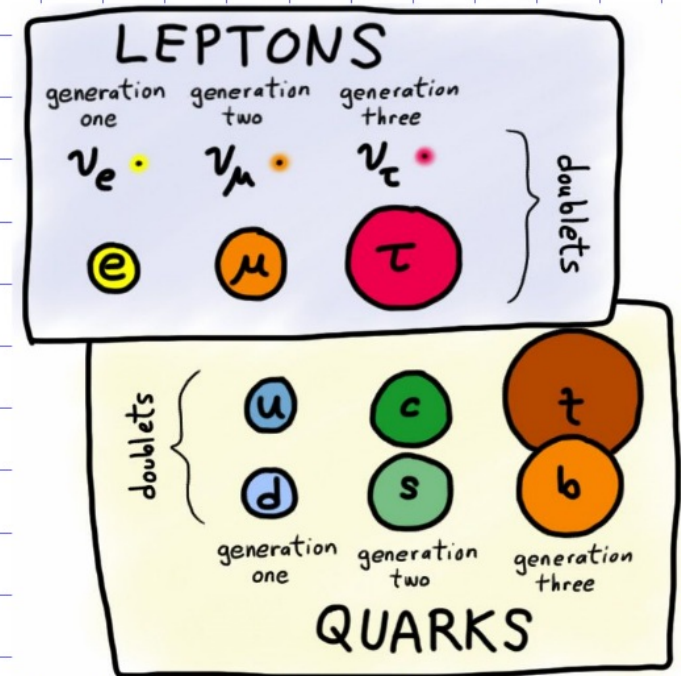
13 (vervolg). Muonen zijn een soort zware elektronen die bij kernprocessen gevormd kunnen worden. Op aarde ontstaan ze hoog in de atmosfeer als hoog-energetische deeltjes uit de ruimte inslaan op moleculen in de dampkring. Hierbij ontstaan de showers die we aan het aardoppervlak meten als kosmische straling



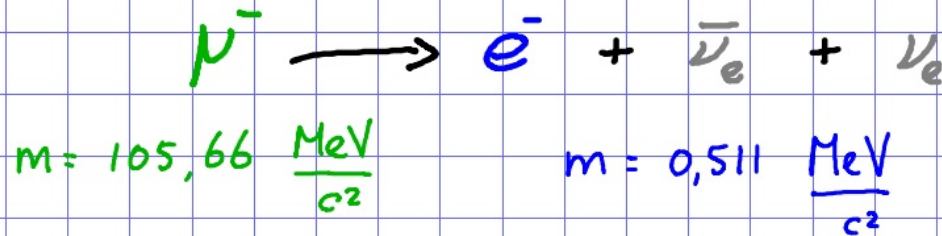
▲ **Figuur 14.25** Airshower, na de botsing van een kosmisch proton met een luchtmeecuul.

Hoofdstuk 14: Kern en deeltjesfys.

§ 14.3 Subatomaire deeltjes

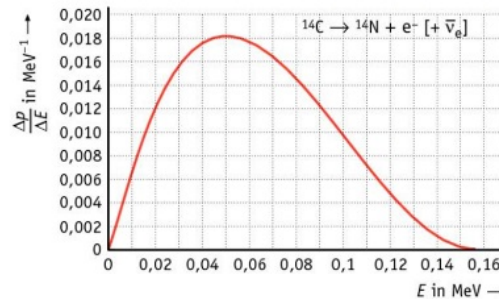
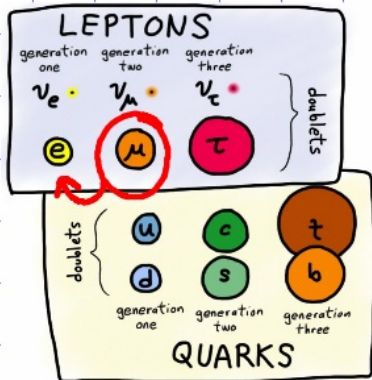


35



massa-
verschil

$$= 105,66 - 0,511 = 105,15 \frac{\text{MeV}}{c^2}$$



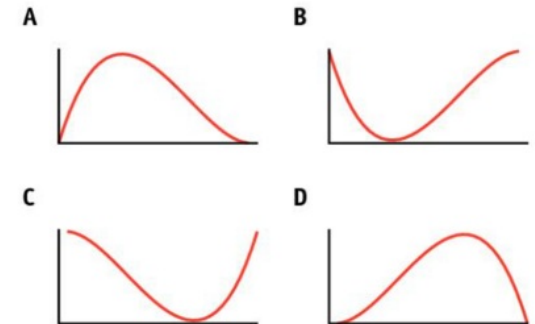
▲ **Figuur 14.24** Waarschijnlijkheidsverdeling voor de energie van het β -deeltje bij het verval van C-14

Hoofdstuk 14: Kern en deeltjesfys.

§ 14.3 Subatomaire deeltjes

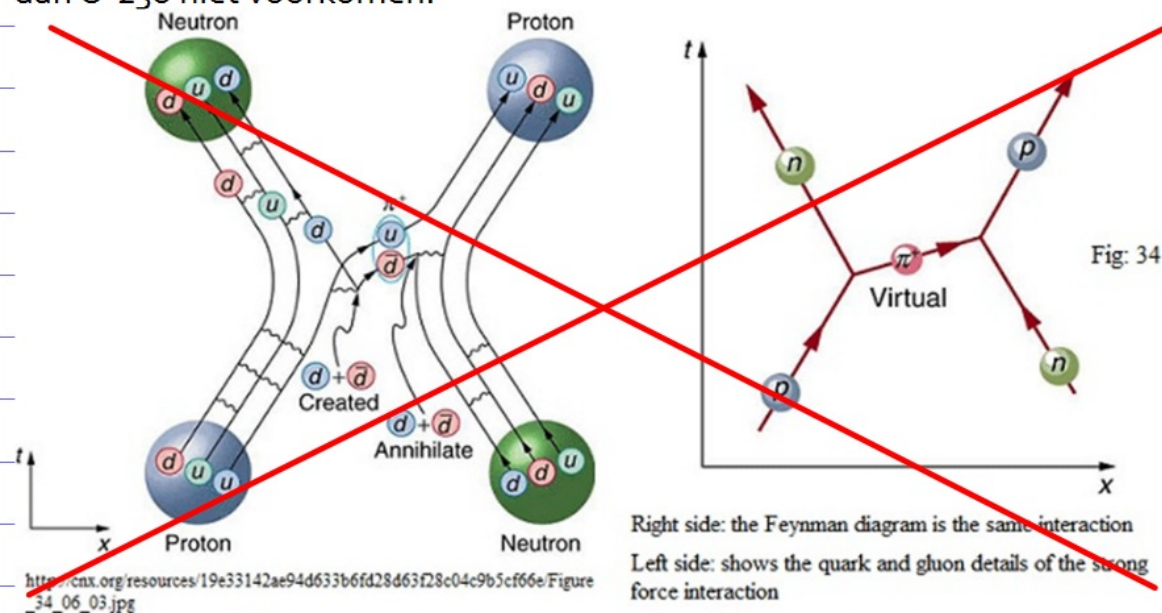
Opdrachten

- 35 Een stilstaand muon vervalt. Bereken de totale kinetische energie van het elektron en de twee neutrino's die hierbij vrijkomen. Verwaarloos hierbij de massa van de neutrino's.
- 36 Figuur 14.24 geeft de kansverdeling om bij het verval van een C-14 kern een β -deeltje met een bepaalde energie te vinden. De kansverdeling voor de energie van het vrijkomende neutrino ziet er dan uit als:



▲ **Figuur 14.26**

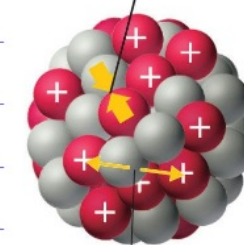
14. De coulombkracht (hfd 11) maakt dat de protonen in een atoomkern elkaar hard afstoten. Toch blijft de kern bij elkaar door de **sterke kernkracht**. Deze heeft maar een zeer kort bereik, namelijk 10^{-15} m en reikt dus ongeveer twee nucleonen diep. Dit verklaart waarom kernen groter dan U-238 niet voorkomen.



Hoofdstuk 14: Kern en deeltjesfys.

§ 14.3 Subatomaire deeltjes

Strong nuclear force



Electrostatic repulsion

§ 11.1 Elektrische lading

$$F_d = f \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2}$$



The Standard Model of Particle Physics

	FERMIONS (matter particles)			BOSONS (force carriers)	
QUARKS	u up	c charm	t top	g gluon	H Higgs boson
	d down	s strange	b bottom	γ photon	
	e electron	μ muon	τ tau	Z^0 Z boson	
LEPTONS	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	$W^\pm$ W boson	

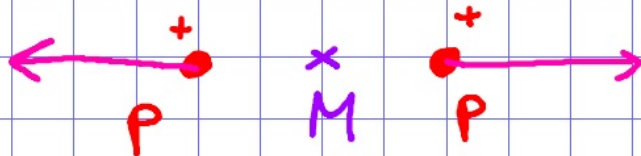
sciencealert

38a)

$$F_{el} = f \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2} = 8,99 \cdot 10^9 \cdot \frac{e^2}{(1 \cdot 10^{-15} \text{ m})^2}$$

$$= 8,99 \cdot 10^9 \cdot \frac{(1,60 \cdot 10^{-19} \text{ C})^2}{(1 \cdot 10^{-15} \text{ m})^2} = 2,3 \cdot 10^2 \text{ N}$$

$$b) \quad a = \frac{F}{m} = \frac{2,3 \cdot 10^2 \text{ N}}{1,673 \cdot 10^{-27} \text{ kg}} = 1,4 \cdot 10^{29} \text{ m/s}^2$$



Hoofdstuk 14: Kern en deeltjesfys.

§ 14.3 Subatomaire deeltjes

Opdrachten

- 38 a Bereken de elektrische afstoting tussen twee protonen op een onderlinge afstand van $1 \cdot 10^{-15} \text{ m}$.
 b Bereken de versnelling die de protonen zouden ondervinden als dit ook de enige kracht zou zijn.

X De kracht tussen protonen of neutronen onderling wordt overgenomen door het neutrale π^0 -deeltje. Geef hiervan de reactievergelijkingen.

- 40 a Zoek in Binas het atoom- en het massanummer van de lichtste kern die via α -val verval. Reken Be-8 niet mee, want dat is een speciaal geval.
 b Zoek ook het atoom- en massanummer van de zwaarste stabiele kern.

§ 11.1 Elektrische lading

7A

$$F_d = f \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2}$$

Hoofdstuk 14: Kern en deeltjesfys.

§ 14.3 Subatomaire deeltjes

 Lees eerst bron 15. Het verband tussen het bereik R van een kracht en de massa m van het deeltje dat de kracht overbrengt, wordt gegeven door de formule:

$$R = \frac{h}{4\pi mc}$$

- a** Leg uit hoe Yukawa het bestaan en de massa van het pion kon voorspellen zonder dat deze deeltjes waren gevonden en zonder dat de verdere details van de sterke kernkracht bekend waren.
- b** Bereken zelf de massa van een pion. Ga ervan uit dat het bereik van de sterke kernkracht ongeveer gelijk is aan de maximale grootte van een atoomkern. (10^{-15} m)
- c** Behalve de pionen zijn er later nog soortgelijke maar zwaardere deeltjes gevonden, zoals de ρ -deeltjes met een massa van $770 \text{ MeV}/c^2$. Bereken ook het bereik van de bijdrage van deze deeltjes aan de sterke kernkracht.

15. Drie van de vier fundamentele natuurkrachten worden ook wel **interacties** of **wisselwerkingen** genoemd. Voorbeelden zijn: afstoting van gelijke elektrische ladingen of het bijeen blijven van een atoomkern door de sterke kernkracht.

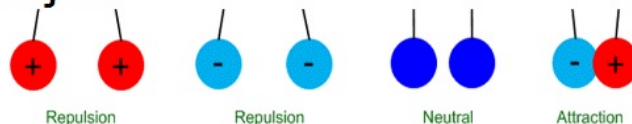
Bij elk van de fundamentele krachten/wisselwerkingen/interacties hoort een **wisselwerkingsdeeltje**:

fotonen: elektromagnetische

gluonen en pionen: sterke

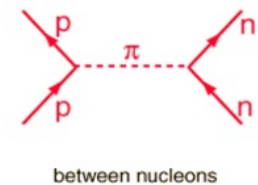
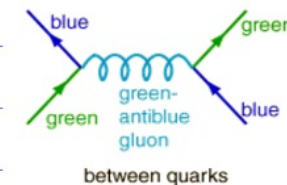
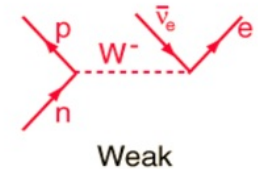
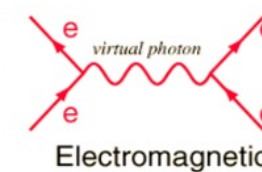
W- en Z-deeltjes: zwakke wisselwerking

Bij uitoefening van krachten tussen twee voorwerpen kun je je de kracht voorstellen als een continue uitwisseling van wisselwerkingsdeeltjes die *de hele tijd uit het niets voor korte duur gemaakt worden en weer verdwijnen*. Deze wisselwerkingsdeeltjes heten **virtuele wisselwerkingsdeeltjes**.

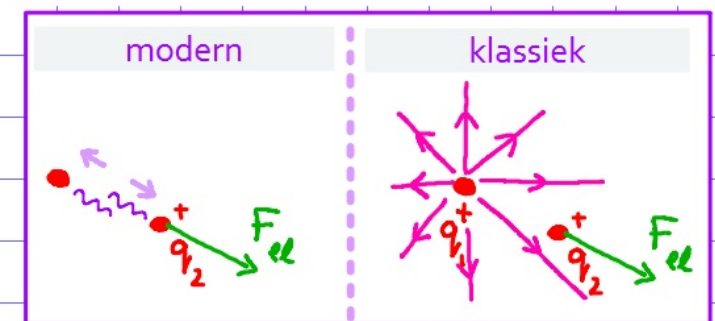


Hoofdstuk 14: Kern en deeltjesfys.

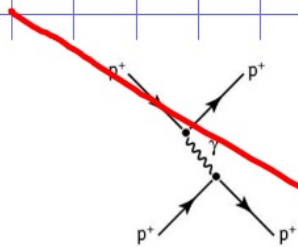
§ 14.3 Subatomaire deeltjes



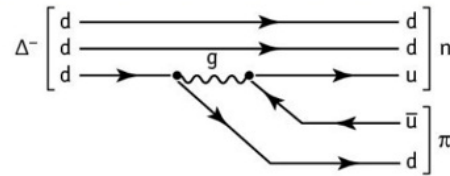
Strong Interaction



Extra overzicht (26): reactiediagrammen (Feynmandiagrammen)



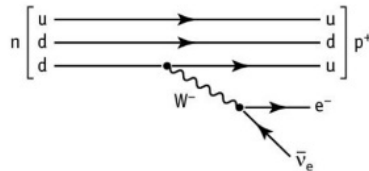
▲ **Figuur 14.38** Weergave van de elektrische kracht tussen twee protonen, overgebracht door uitwisseling van een foton



▲ **Figuur 14.45**

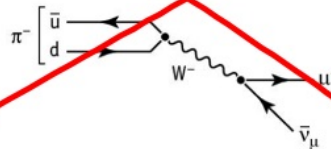
Baryon (qqq) $\rightarrow$ baryon (qqq) + meson ($q\bar{q}$).
Een reactie via de sterke wisselwerking.

Op het niveau van quarks en leptonen wordt het β -verval van een neutron nu beschreven door het reactiediagram:



▲ **Figuur 14.46**

en het verval van het π^- wordt:

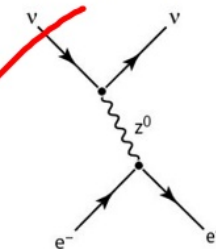


▲ **Figuur 14.47**

Bij het neutronverval verandert een down-quark in een up-quark en wordt er een elektron gevormd samen met een anti-neutrino.

Hoofdstuk 14: Kern en deeltjesfys.

§ 14.6 Het standaardmodel



▲ **Figuur 14.48** Interactie tussen twee leptonen

The Standard Model of Particle Physics

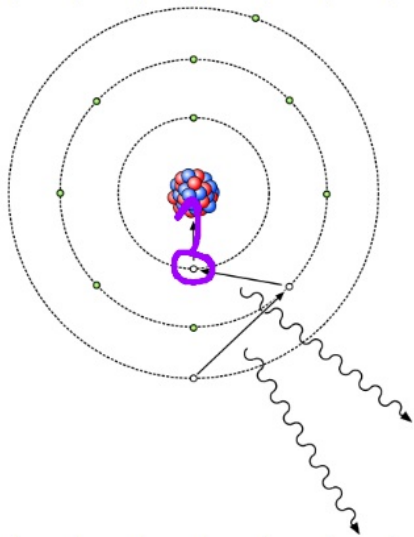
FERMIONS (matter particles)			BOSONS (force carriers)	
QUARKS	u up	c charm	t top	g gluon
	d down	s strange	b bottom	γ photon
	e electron	μ muon	τ tau	Z^0 Z boson
LEPTONS	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	$W^\pm$ W boson
				H Higgs boson

sciencealert

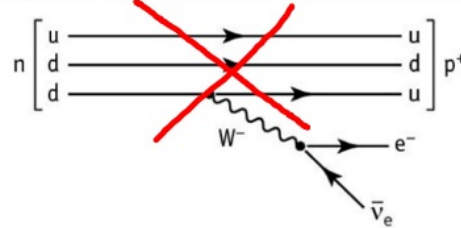
16. De **zwakke wisselwerking** is verantwoordelijk voor beide vormen van betaverval en voor K-vangst.



elektronen-
vangst:



Op het niveau van quarks en leptonen wordt het β -verval van een neutron nu beschreven door het reactiediagram:



▲ Figuur 14.46



Hoofdstuk 14: Kern en deeltjesfys.

§ 14.3 Subatomaire deeltjes

Opdrachten

- 42 Zoek in *Binas* een kern op die zowel β^- als β^+ -verval vertoont en ook nog K-vangst. Schrijf voor elk van deze reacties de reactievergelijking op.
- 43 In tabel 25B in *Binas* kun je zien dat in het algemeen de lichte isotopen van een element vervallen via β^- -verval en de zware isotopen door β^+ - of door α -verval.
- Leg uit waarom.
 - Zoek drie uitzonderingen op deze regel.

The Standard Model of Particle Physics

	FERMIONS (matter particles)			BOSONS (force carriers)	
QUARKS	u up	c charm	t top	g gluon	H Higgs boson
	d down	s strange	b bottom	γ photon	
	e electron	μ muon	τ tau	Z^0 Z boson	
LEPTONS	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	$W^\pm$ W boson	

§ 14.3 Subatomaire deeltjes

Hoofdstuk 14: Kern en deeltjesfys.

Opgaven bij § 14.3

§ 14.6 Het standaardmodel

27. Het **standaardmodel** is een overzicht van de **elementaire deeltjes** die bekend zijn. Alle andere deeltjes die we kennen (protonen, pionen, gluonen, enz.) zijn opgebouwd uit deze elementaire deeltjes en heten **samengestelde deeltjes**. Samengestelde deeltjes die uit quarks bestaan heten **hadronen**. Hiervan zijn twee soorten:

Hadronen die uit drie quarks bestaan heten **baryonen** (bijv. het proton en het neutron)

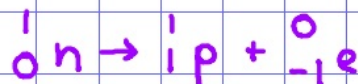
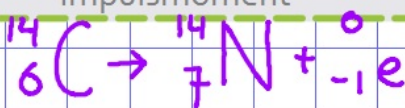
Hadronen die uit twee quarks bestaan heten **mesonen** (bijv. de pi-deeltjes: π^+ , π^- en π^0).

Het **baryongetal** is bij reacties behouden, maar het mesongetal niet. Voorbeelden:



absolute behoudswetten:

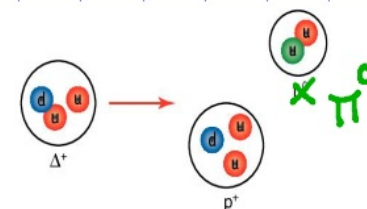
energie
 elektrische lading
 baryongetal
 leptongetal
 impuls
 impulsmoment



Hoofdstuk 14: Kern en deeltjesfys.

eerste generatie							
e	-1	ν_e	0	d	$-\frac{1}{3}$	u	$\frac{2}{3}$
tweede generatie							
μ	-1	ν_μ	0	s	$-\frac{1}{3}$	c	$\frac{2}{3}$
derde generatie							
τ	-1	ν_τ	0	b	$-\frac{1}{3}$	t	$\frac{2}{3}$

▲ **Figuur 14.43** De materiedeeltjes van het standaardmodel



▲ **Figuur 14.44** Een proton heeft structuur, net zoals een atoom. Een proton in aangeslagen toestand noem je een Δ^+ -deeltje.



LEP
 generation gen
 one t
 $\nu_e \cdot \nu_\tau$

Bordoeffening 6:

a) proton, baryon

$$\left. \begin{array}{l} u, q = +\frac{2}{3}e \\ u, q = +\frac{2}{3}e \\ d, q = -\frac{1}{3}e \end{array} \right\} q = +e$$

b) π^+ -deeltje,
meson

$$\left. \begin{array}{l} u, q = +\frac{2}{3}e \\ \bar{d}, q = +\frac{1}{3}e \end{array} \right\} q = +e$$

c) K^0 -deeltje,
meson

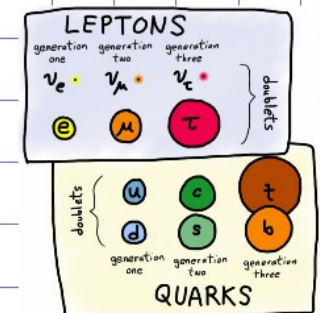
$$\left. \begin{array}{l} d, q = -\frac{1}{3}e \\ \bar{s}, q = +\frac{1}{3}e \end{array} \right\} q = 0$$

Hoofdstuk 14: Kern en deeltjesfys.

§ 14.6 Het standaardmodel

eerste generatie							
e	-1	ν_e	0	d	$-\frac{1}{3}$	u	$\frac{2}{3}$
tweede generatie							
μ	-1	ν_μ	0	s	$-\frac{1}{3}$	c	$\frac{2}{3}$
derde generatie							
τ	-1	ν_τ	0	b	$-\frac{1}{3}$	t	$\frac{2}{3}$

▲ Figuur 14.43 De materiedeeltjes van het standaardmodel



Bordoeffening 6:

Noteer van deze deeltjes:

- Uit welke quarks ze bestaan.
- Of ze baryon of mesonen zijn.
- Schrijf de lading bij de quarks.

- proton
- π^+ -deeltje ("pion-plus")
- K^0 -deeltje ("kaon-nul")
- neutron
- σ^+ -deeltje

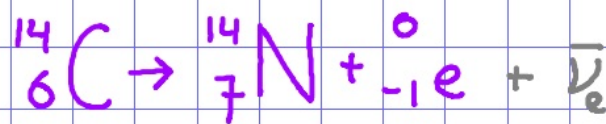
28. Elektronen, muonen en tau-deeltjes zijn **leptonen**, net als hun bijbehorende neutrino's.

Muonen en tau-deeltjes zijn **instabiel** en vervallen na een tijdje. Neutrino's zijn stabiel, maar kunnen wel overgaan van de ene soort (bijv. elektronneutrino) naar een andere (bijv. tau-neutrino).

Voorbeeld, verval van een muon waarbij een elektron ontstaat, een elektronneutrino en een elektron-antineutrino:



Leptonen zijn elementaire deeltjes en hebben dus geen substructuur. Het **leptongetal** is **behouden**, dus het aantal leptonen voor en na de reactie moet hetzelfde zijn.



absolute behoudswetten:

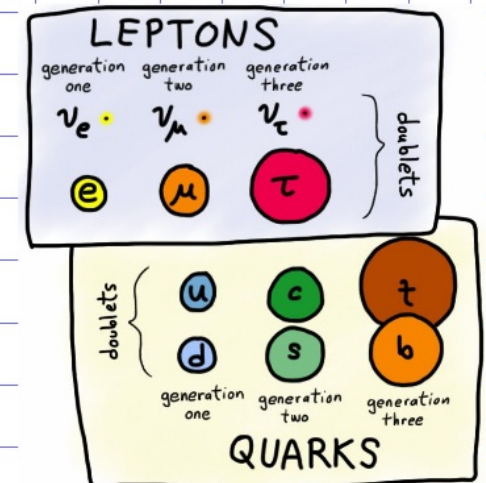
energie
elektrische lading
→ baryongetal
leptongetal
impuls

Hoofdstuk 14: Kern en deeltjesfys.

§ 14.6 Het standaardmodel

eerste generatie							
e	-1	ν_e	o	d	$-\frac{1}{3}$	u	$\frac{2}{3}$
tweede generatie							
μ	-1	ν_μ	o	s	$-\frac{1}{3}$	c	$\frac{2}{3}$
derde generatie							
τ	-1	ν_τ	o	b	$-\frac{1}{3}$	t	$\frac{2}{3}$

▲ Figuur 14.43 De materiedeeltjes van het standaardmodel

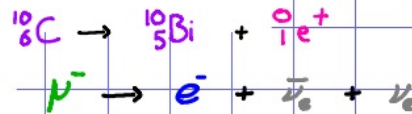


Bord oefening 7:

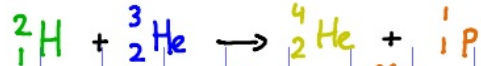
Bereken of deze reactie mogelijk is

Extra overzicht: welke kern- en deeltjesreacties zijn er

mc kernverval (alfa, beta⁺, beta⁻ en K-vangst):



verval van instabiele deeltjes (zoals muonen):



kernsplijting: ${}^{235}_{92}\text{U} \rightarrow {}^{133}_{54}\text{Xe} + {}^{99}_{38}\text{Sr} + 3 {}^1_0\text{n}$

deeltje invangen: ${}^{10}_5\text{B} + {}^1_0\text{n} \rightarrow {}^7_3\text{Li} + {}^4_2\text{He}$ ${}^{16}_8\text{O} + {}^3_2\text{He} \rightarrow {}^{18}_9\text{F} + {}^1_1\text{p}$

annihilatie: ${}^0_{+1}\text{e}^+ + {}^0_{-1}\text{e}^- \rightarrow 2\gamma$

paarcreatie: $\gamma \rightarrow \mu^- + \mu^+$

materie-energie-materie-reacties: $2 p^+ \rightarrow e^- + e^+ + \pi^0$

quark-reacties: $\Delta^+ \rightarrow p^+ + \pi^0$

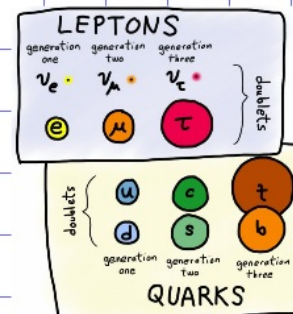
NU:

eerste generatie							
e	-1	V_e	o	d	$-\frac{1}{3}$	u	$\frac{2}{3}$
tweede generatie							
μ	-1	V_μ	o	s	$-\frac{1}{3}$	c	$\frac{2}{3}$
derde generatie							
τ	-1	V_τ	o	b	$-\frac{1}{3}$	t	$\frac{2}{3}$

▲ Figuur 14.43 De materiedeeltjes van het standaardmodel

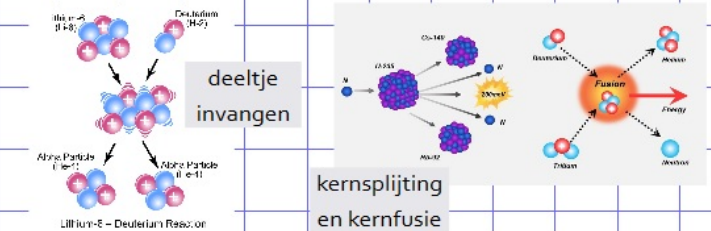
absolute behoudswetten:

energie
elektrische lading
baryongetal
leptongetal
impuls
impulsmoment

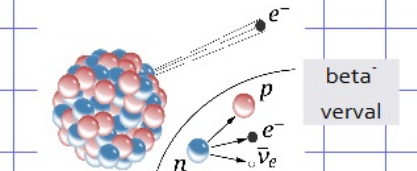
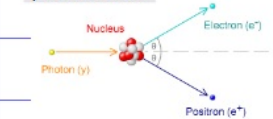


Hoofdstuk 14: Kern en deeltjesfys.

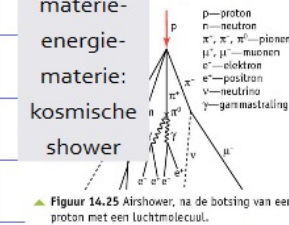
§ 14.6 Het standaardmodel



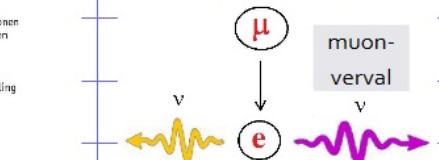
paarcreatie



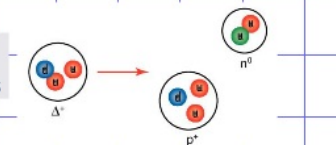
materie-energie-materie: kosmische shower



▲ Figuur 14.25 Airshower, na de botsing van een kosmisch proton met een lucht molecuul.



quark-reacties



67 a) neutron: udd $m = 5 \frac{\text{MeV}}{c^2}$
 proton: uud $m = 3 \frac{\text{MeV}}{c^2}$
 $\rightarrow m = 938,272 \frac{\text{MeV}}{c^2}$
 $\rightarrow m = 939,565 \frac{\text{MeV}}{c^2}$

68 b) $\Delta^+ \rightarrow p^+ + \pi^0$
 $m = ?$ $m = 938,272 \frac{\text{MeV}}{c^2}$ $m = 134,98 \frac{\text{MeV}}{c^2}$
 samen, $m = 1078 \frac{\text{MeV}}{c^2}$

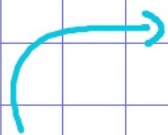
67, 68, 70b, 72

Hoofdstuk 14: Kern en deeltjesfys.

§ 14.6 Het standaardmodel

- 67 Bij β -verval verandert een neutron in een proton.
 a Welk quark verdwijnt er en welk quark ontstaat er?
 b Zoek in *Binas* tabel 26 de massa op van beide quarks. Levert β -verval inderdaad energie op?
- 68 Het Δ^+ -deeltje heeft dezelfde quarksamenstelling als het proton, en is in die zin te beschouwen als een aangeslagen toestand van het proton.
 a Waarom kan een proton aangeslagen toestanden hebben?
 b Het Δ^+ -deeltje heeft een levensduur van rond de 10^{-24} s en het vervalt naar een proton en een π^+ . Het staat niet vermeld in *Binas* tabel 26. De massa van dit deeltje kun je daar dus niet opzoeken. Bereken welke massa het deeltje minimaal moet hebben om te kunnen vervallen tot een p^+ en π^+ .
 c Zoek de echte massa op via internet.
- 69 a Leg uit dat het baryongetal hetzelfde is als 3x het quarkgetal.
 b Leg uit dat het baryongetal van een kern hetzelfde is als het massagetal.
 c Controleer of het baryongetal behouden is in α -verval en in β -verval.
- 70 a Het π^0 -meson vervalt bijna altijd in twee γ -fotonen. Een foton heeft een impuls $p = \frac{hf}{c}$. Leg uit waarom het π^0 niet kan vervallen naar een enkel foton.
 b Bereken de frequentie van de twee fotonen. Ga uit van een stilstaand π^0 .

6g a)
c)



voor:

baryongetal = 1

quarkgetal = 3

na:

baryongetal = 1

quarkgetal = 3

neutron

u
d
d

proton

u
d
u



reactie
(β^- verval)

Hoofdstuk 14: Kern en deeltjesfys.

§ 14.6 Het standaardmodel

- 67 Bij β^- -verval verandert een neutron in een proton.
a Welk quark verdwijnt er en welk quark ontstaat er?
b Zoek in *Binas* tabel 26 de massa op van beide quarks. Levert β^- -verval inderdaad energie op?
- 68 Het Δ^+ -deeltje heeft dezelfde quarksamenstelling als het proton, en is in die zin te beschouwen als een aangeslagen toestand van het proton.
a Waarom kan een proton aangeslagen toestanden hebben?
b Het Δ^+ -deeltje heeft een levensduur van rond de 10^{-24} s en het vervalt naar een proton en een π^+ . Het staat niet vermeld in *Binas* tabel 26. De massa van dit deeltje kun je daar dus niet opzoeken. Bereken welke massa het deeltje minimaal moet hebben om te kunnen vervallen tot een p^+ en π^+ .
c Zoek de echte massa op via internet.
- 69 a Leg uit dat het baryongetal hetzelfde is als 3x het quarkgetal.
b Leg uit dat het baryongetal van een kern hetzelfde is als het massagetal.
c Controleer of het baryongetal behouden is in α -verval en in β^- -verval.
- 70 a Het π^0 -meson vervalt bijna altijd in twee γ -fotonen. Een foton heeft een impuls $p = \frac{hf}{c}$. Leg uit waarom het π^0 niet kan vervallen naar een enkel foton.
b Bereken de frequentie van de twee fotonen. Ga uit van een stilstaand π^0 .

70 b) $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$ ← wat is de frequentie van deze fotonen?

$$m = 134,98 \frac{\text{MeV}}{c^2}$$

$$E_0 = 134,98 \cdot 10^6 \text{ eV} \cdot 1,60 \cdot 10^{-19} = 2,16 \cdot 10^{-11} \text{ J}$$

$$\text{dus } \frac{2,16 \cdot 10^{-11} \text{ J}}{2} = 1,07 \cdot 10^{-11} \text{ per foton}$$

$$E = h \cdot f \rightarrow f = \frac{E}{h} = \frac{1,07 \cdot 10^{-11}}{6,626 \cdot 10^{-34}} = 1,63 \cdot 10^{22} \text{ Hz}$$

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3,00 \cdot 10^8}{1,63 \cdot 10^{22} \text{ Hz}} = 1,84 \cdot 10^{-14} \text{ m} = 0,0184 \text{ pm}$$

Hoofdstuk 14: Kern en deeltjesfys.

§ 14.6 Het standaardmodel

- 67 Bij β -verval verandert een neutron in een proton.
 a Welk quark verdwijnt er en welk quark ontstaat er?
 b Zoek in *Binas* tabel 26 de massa op van beide quarks. Levert β -verval inderdaad energie op?

- 68 Het Δ^+ -deeltje heeft dezelfde quarksamenstelling als het proton, en is in die zin te beschouwen als een aangeslagen toestand van het proton.

a Waarom kan een proton aangeslagen toestanden hebben?

b Het Δ^+ -deeltje heeft een levensduur van rond de 10^{-24} s en het vervalt naar een proton en een π^+ . Het staat niet vermeld in *Binas* tabel 26. De massa van dit deeltje kun je daar dus niet opzoeken. Bereken welke massa het deeltje minimaal moet hebben om te kunnen vervallen tot een p^+ en π^0 .

c Zoek de echte massa op via internet.

- 69 a Leg uit dat het baryongetal hetzelfde is als 3x het quarkgetal.

b Leg uit dat het baryongetal van een kern hetzelfde is als het massagetal.

c Controleer of het baryongetal behouden is in α -verval en in β -verval.

- 70 a Het π^0 -meson vervalt bijna altijd in twee γ -fotonen. Een foton heeft een impuls

$p = \frac{hf}{c}$. Leg uit waarom het π^0 niet kan vervallen naar een enkel foton. **impulsbehoud**

b Bereken de frequentie van de twee fotonen. Ga uit van een stilstaand π^0 .

72 a) $d \rightarrow u + e^- + \bar{\nu}_e$ ← is hier geen $\bar{\nu}_e$

$m = 5 \frac{\text{MeV}}{c^2} \rightarrow m = 3 \frac{\text{MeV}}{c^2}$ $m = 0,511 \frac{\text{MeV}}{c^2}$ $m < 2 \frac{\text{eV}}{c^2}$
 $q = -\frac{1}{3}e \rightarrow q = +\frac{2}{3}e$ $q = -e$ $q = 0$

baryongetal = 0
 leptongetal = 0

baryongetal = 0
 leptongetal = 2

absolute behoudswetten:

- ↗ energie
- ↘ elektrische lading
- ↗ baryongetal
- ↘ leptongetal
- impuls
- impulsmoment

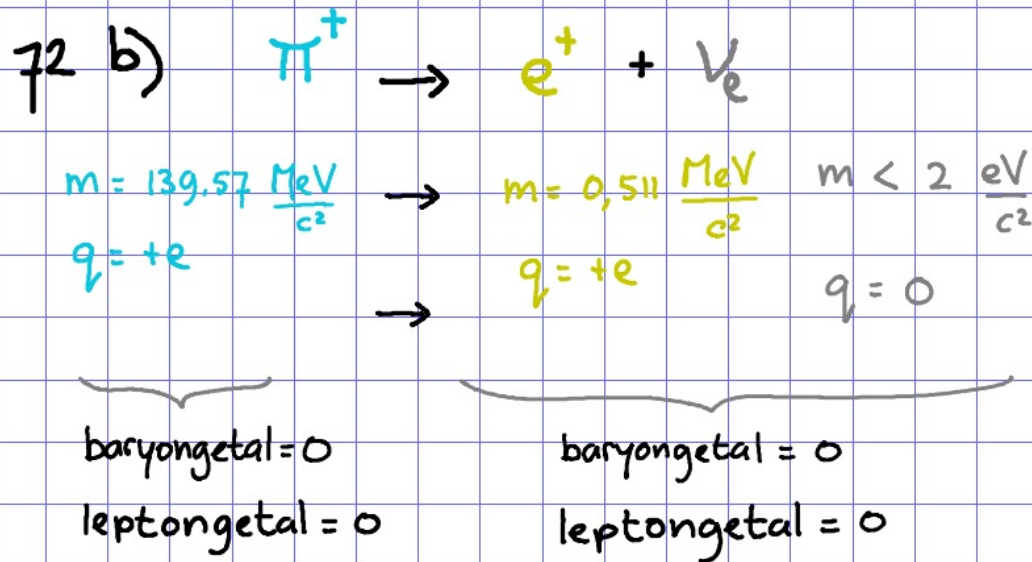
Hoofdstuk 14: Kern en deeltjesfys.

§ 14.6 Het standaardmodel

eerste generatie							
e	-1	ν_e	0	d	$-\frac{1}{3}$	u	$\frac{2}{3}$
tweede generatie							
μ	-1	ν_μ	0	s	$-\frac{1}{3}$	c	$\frac{2}{3}$
derde generatie							
τ	-1	ν_τ	0	b	$-\frac{1}{3}$	t	$\frac{2}{3}$

▲ Figuur 14.43 De materiedeeltjes van het standaardmodel

- 71 a Leg uit hoeveel baryonen je quarks, als je alleen rekening houdt met de baryonmenstelling
- b Leg uit hoeveel mesonen je quarks, als je alleen rekening houdt met de baryonmenstelling
- 72 Leg met behulp van behoudswetten uit of de volgende reacties mogelijk zijn:
- a $d \rightarrow u + e^- + \bar{\nu}_e$
- b $\pi^+ \rightarrow e^+ + \nu_e$
- c $p^- + \pi^0 \rightarrow \pi^- + \nu_\mu$
- 73 Het β -verval van een neutron kun je op verschillende manieren weergeven.
- a Schrijf de reactievergelijking voor verval van het neutron op, waarbij je rekening houdt met baryonbehoud en leptonbehoud (zonder vermelding van quarks).
- b Schrijf de reactievergelijking voor β -verval op als een proces voor één quark dat verandert in een andere quark.



absolute behoudswetten:

-  energie
-  elektrische lading
-  baryongetal
-  leptongetal
- impuls
- impulsmoment

Hoofdstuk 14: Kern en deeltjesfys.

§ 14.6 Het standaardmodel

eerste generatie							
e	-1	V_e	0	d	$-\frac{1}{3}$	u	$\frac{2}{3}$
tweede generatie							
μ	-1	V_μ	0	s	$-\frac{1}{3}$	c	$\frac{2}{3}$
derde generatie							
τ	-1	V_τ	0	b	$-\frac{1}{3}$	t	$\frac{2}{3}$

▲ Figuur 14.43 De materiedeeltjes van het standaardmodel

- 71 a Leg uit hoeveel baryonen j quarks, als je alleen rekeni menstelling
- b Leg uit hoeveel mesonen j quarks, als je alleen rekeni menstelling
- 72 Leg met behulp van behoudswetten uit of de volgende reacties mogelijk zijn:
- a $d \rightarrow u + e^- + \nu_e$
- b $\pi^+ \rightarrow e^+ + \nu_e$
- c $p^- + \pi^0 \rightarrow \pi^- + \nu_\mu$
- 73 Het β -verval van een neutron kun je op verschillende manieren weergeven.
- a Schrijf de reactievergelijking voor verval van het neutron op, waarbij je rekening houdt met baryonbehoud en leptonbehoud (zonder vermelding van quarks).
- b Schrijf de reactievergelijking voor β -verval op als een proces voor één quark dat verandert in een andere quark.



$m = 938,272 \frac{\text{MeV}}{c^2}$

$q = -e$

$m = 134,98 \frac{\text{MeV}}{c^2}$

$q = 0$

$m = 139,57 \frac{\text{MeV}}{c^2}$

$q = -e$

$m = 0,19 \frac{\text{MeV}}{c^2}$

$q = 0$

baryongetal = -1

leptongetal = 0

baryongetal = 0

leptongetal = 1

absolute behoudswetten:

-  energie
-  elektrische lading
-  baryongetal
-  leptongetal
- impuls

Hoofdstuk 14: Kern en deeltjesfys.

§ 14.6 Het standaardmodel

eerste generatie							
e	-1	V_u	0	d	$-\frac{1}{3}$	u	$\frac{2}{3}$
tweede generatie							
μ	-1	V_μ	0	s	$-\frac{1}{3}$	c	$\frac{2}{3}$
derde generatie							
τ	-1	V_τ	0	b	$-\frac{1}{3}$	t	$\frac{2}{3}$

▲ Figuur 14.43 De materiedeeltjes van het standaardmodel

71 a Leg uit hoeveel baryonen j quarks, als je alleen rekeni menstelling

b Leg uit hoeveel mesonen j quarks, als je alleen rekeni menstelling

72 Leg met behulp van behoudswetten uit of de volgende reacties mogelijk zijn:

a $d \rightarrow u + e^- + \nu_e$

b $\pi^+ \rightarrow e^+ + \nu_e$

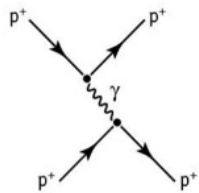
c $p^- + \pi^0 \rightarrow \pi^- + \nu_\mu$

✗ Het β -verval van een neutron kun je op verschillende manieren weergeven.

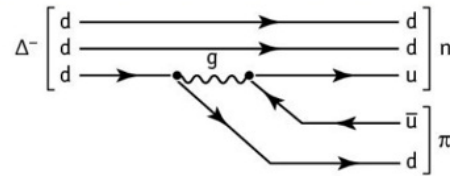
a Schrijf de reactievergelijking voor verval van het neutron op, waarbij je rekening houdt met baryonbehoud en leptonbehoud (zonder vermelding van quarks).

b Schrijf de reactievergelijking voor β -verval op als een proces voor één quark dat verandert in een andere quark.

29. De sterke, de zwakke en de elektromagnetische wisselwerking.

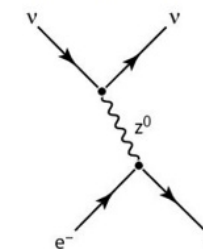


▲ **Figuur 14.38** Weergave van de elektrische kracht tussen twee protonen, overgebracht door uitwisseling van een foton



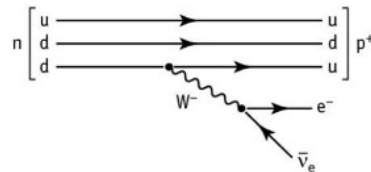
▲ **Figuur 14.45**

Baryon (qqq) $\rightarrow$ baryon (qqq) + meson ($q\bar{q}$).
Een reactie via de sterke wisselwerking.



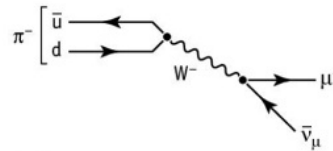
▲ **Figuur 14.48** Interactie tussen twee leptonen

Op het niveau van quarks en leptonen wordt het β -verval van een neutron nu beschreven door het reactiediagram:



▲ **Figuur 14.46**

en het verval van het π^- wordt :



▲ **Figuur 14.47**

Bij het neutronverval verandert een down-quark in een up-quark en wordt er een elektron gevormd samen met een anti-neutrino.

Hoofdstuk 14: Kern en deeltjesfys.

§ 14.6 Het standaardmodel

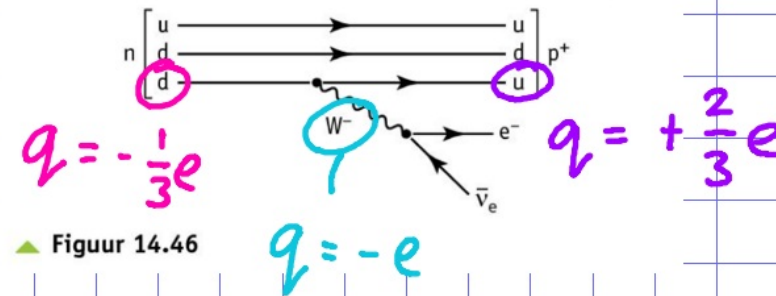
absolute behoudswetten:

energie
elektrische lading
baryongetal
leptongetal
impuls

niet behouden: massa, atoomsoort, mesongetal

75

Op het niveau van quarks en leptonen wordt het β -verval van een neutron nu beschreven door het reactiediagram:



▲ Figuur 14.46

Hoofdstuk 14: Kern en deeltjesfys.

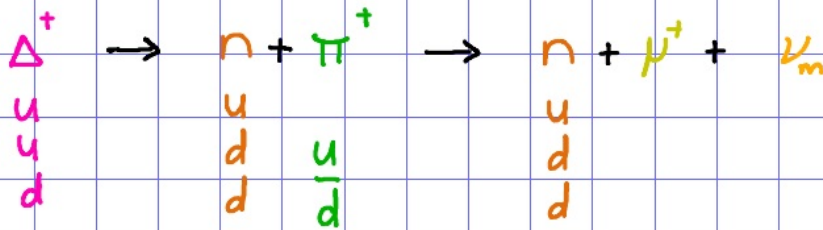
§ 14.6 Het standaardmodel

- 75 Het W-deeltje gaat in de voorbeelden van figuur 14.46 en 14.47 over in een elektron en een neutrino of een muon en een neutrino. Leg uit dat het W-deeltje een lading moet hebben.
- 76 Leg van de volgende reacties uit of, en via welke tussenstappen, ze kunnen verlopen via de sterke en/of de zwakke en/of de elektromagnetische wisselwerking. Zo ja, teken het bijbehorende reactiediagram:
- $\Delta^+ \rightarrow n + \mu^+ + \nu_\mu$
 - $\Lambda^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$
 - $\Sigma^+ \rightarrow p^+ + \mu^+ + \mu^-$
 - $n + \mu^+ \rightarrow p^+ + \pi^0$
- 77 Geef de onderstaande reacties weer in een reactiediagram, op het niveau van quarks, leptonen en wisselwerkingsdeeltjes, zoals in diagram 14.46.
- $n \rightarrow p^+ + e^- + \bar{\nu}_e$
 - $\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$
 - $\mu^- \rightarrow e^- + \nu_\mu + \bar{\nu}_e$
- 78 Behoud van quarkgetal is zichtbaar in diagram 14.46, doordat er bij iedere vertex evenveel quarkpijlen naar de vertex toewijzen als ervan af. Controleer op deze manier of in alle diagrammen in deze paragraaf voldaan is aan behoud van quark-, baryon- en leptongetal.

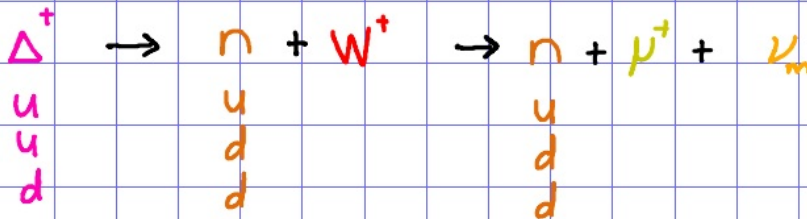
76
a)



via de sterke wisselwerking:



via de zwakke wisselwerking:

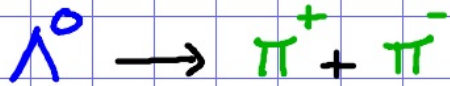


Hoofdstuk 14: Kern en deeltjesfys.

§ 14.6 Het standaardmodel

- 75 Het W-deeltje gaat in de voorbeelden van figuur 14.46 en 14.47 over in een elektron en een neutrino of een muon en een neutrino. Leg uit dat het W-deeltje een lading moet hebben.
- 76 Leg van de volgende reacties uit of, en via welke tussenstappen, ze kunnen verlopen via de sterke en/of de zwakke en/of de elektromagnetische wisselwerking. Zo ja, teken het bijbehorende reactiediagram:
- $\Delta^+ \rightarrow n + \mu^+ + \nu_\mu$
 - $\Lambda^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$
 - $\Sigma^+ \rightarrow p^+ + \mu^+ + \mu^-$
 - $n + \mu^+ \rightarrow p^+ + \pi^0$
- 77 Geef de onderstaande reacties weer in een reactiediagram, op het niveau van quarks, leptonen en wisselwerkingsdeeltjes, zoals in diagram 14.46.
- $n \rightarrow p^+ + e^- + \bar{\nu}_e$
 - $\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$
 - $\mu^- \rightarrow e^- + \nu_\mu + \bar{\nu}_e$
- 78 Behoud van quarkgetal is zichtbaar in diagram 14.46, doordat er bij iedere vertex evenveel quarkpijlen naar de vertex toewijzen als ervan af. Controleer op deze manier of in alle diagrammen in deze paragraaf voldaan is aan behoud van quark-, baryon- en leptongetal.

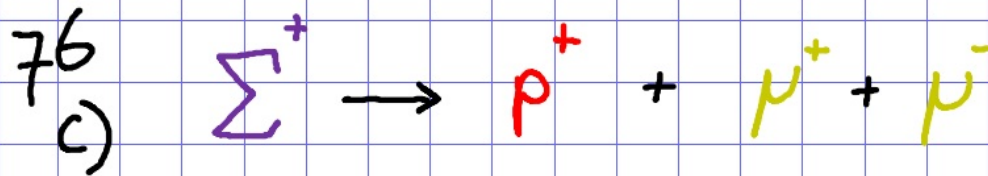
76
b)



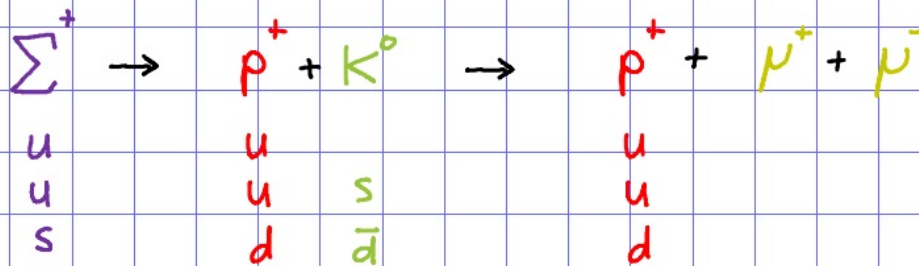
Hoofdstuk 14: Kern en deeltjesfys.

§ 14.6 Het standaardmodel

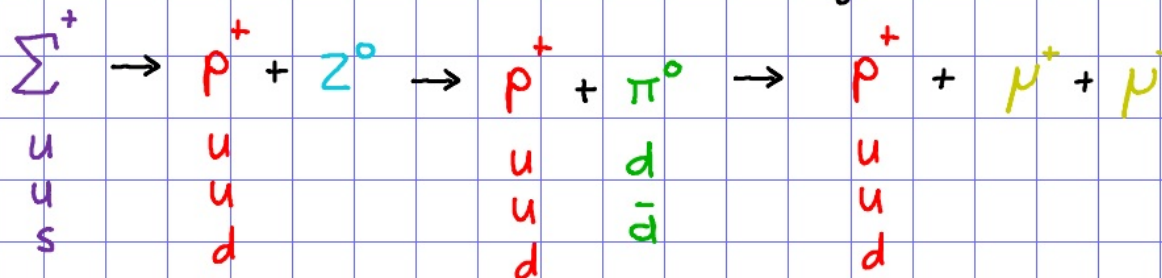
- 75** Het W-deeltje gaat in de voorbeelden van figuur 14.46 en 14.47 over in een elektron en een neutrino of een muon en een neutrino. Leg uit dat het W-deeltje een lading moet hebben.
- 76** Leg van de volgende reacties uit of, en via welke tussenstappen, ze kunnen verlopen via de sterke en/of de zwakke en/of de elektromagnetische wisselwerking. Zo ja, teken het bijbehorende reactiediagram:
- a $\Delta^+ \rightarrow n + \mu^+ + \nu_\mu$
 - b $\Lambda^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$
 - c $\Sigma^+ \rightarrow p^+ + \mu^+ + \mu^-$
 - d $n + \mu^+ \rightarrow p^+ + \pi^0$
- 77** Geef de onderstaande reacties weer in een reactiediagram, op het niveau van quarks, leptonen en wisselwerkingsdeeltjes, zoals in diagram 14.46.
- a $n \rightarrow p^+ + e^- + \bar{\nu}_e$
 - b $\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$
 - c $\mu^- \rightarrow e^- + \nu_\mu + \bar{\nu}_e$
- 78** Behoud van quarkgetal is zichtbaar in diagram 14.46, doordat er bij iedere vertex evenveel quarkpijlen naar de vertex toewijzen als ervan af. Controleer op deze manier of in alle diagrammen in deze paragraaf voldaan is aan behoud van quark-, baryon- en leptongetal.



via de sterke wisselwerking:



via de zwakke wisselwerking:



Hoofdstuk 14: Kern en deeltjesfys.

§ 14.6 Het standaardmodel

- 75 Het W-deeltje gaat in de voorbeelden van figuur 14.46 en 14.47 over in een elektron en een neutrino of een muon en een neutrino. Leg uit dat het W-deeltje een lading moet hebben.
- 76 Leg van de volgende reacties uit of, en via welke tussenstappen, ze kunnen verlopen via de sterke en/of de zwakke en/of de elektromagnetische wisselwerking. Zo ja, teken het bijbehorende reactiediagram:
- $\Delta^+ \rightarrow n + \mu^+ + \nu_\mu$
 - $\Lambda^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$
 - $\Sigma^+ \rightarrow p^+ + \mu^+ + \mu^-$
 - $n + \mu^+ \rightarrow p^+ + \pi^0$
- 77 Geef de onderstaande reacties weer in een reactiediagram, op het niveau van quarks, leptonen en wisselwerkingsdeeltjes, zoals in diagram 14.46.
- $n \rightarrow p^+ + e^- + \bar{\nu}_e$
 - $\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$
 - $\mu^- \rightarrow e^- + \nu_\mu + \bar{\nu}_e$
- 78 Behoud van quarkgetal is zichtbaar in diagram 14.46, doordat er bij iedere vertex evenveel quarkpijlen naar de vertex toewijzen als ervan af. Controleer op deze manier of in alle diagrammen in deze paragraaf voldaan is aan behoud van quark-, baryon- en leptongetal.

76
d)

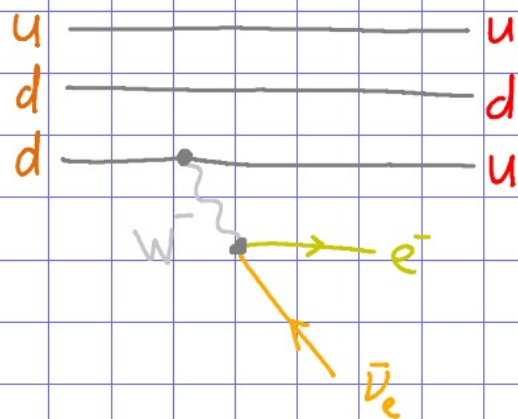


Hoofdstuk 14: Kern en deeltjesfys.

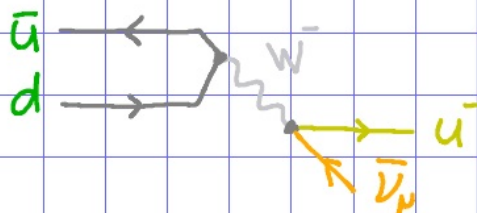
§ 14.6 Het standaardmodel

- 75 Het W-deeltje gaat in de voorbeelden van figuur 14.46 en 14.47 over in een elektron en een neutrino of een muon en een neutrino. Leg uit dat het W-deeltje een lading moet hebben.
- 76 Leg van de volgende reacties uit of, en via welke tussenstappen, ze kunnen verlopen via de sterke en/of de zwakke en/of de elektromagnetische wisselwerking. Zo ja, teken het bijbehorende reactiediagram:
- a $\Delta^+ \rightarrow n + \mu^+ + \nu_\mu$
 - b $\Lambda^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$
 - c $\Sigma^+ \rightarrow p^+ + \mu^+ + \mu^-$
 - d $n + \mu^+ \rightarrow p^+ + \pi^0$
- 77 Geef de onderstaande reacties weer in een reactiediagram, op het niveau van quarks, leptonen en wisselwerkingsdeeltjes, zoals in diagram 14.46.
- a $n \rightarrow p^+ + e^- + \bar{\nu}_e$
 - b $\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$
 - c $\mu^- \rightarrow e^- + \nu_\mu + \bar{\nu}_e$
- 78 Behoud van quarkgetal is zichtbaar in diagram 14.46, doordat er bij iedere vertex evenveel quarkpijlen naar de vertex toewijzen als ervan af. Controleer op deze manier of in alle diagrammen in deze paragraaf voldaan is aan behoud van quark-, baryon- en leptongetal.

77 a) $n \rightarrow p^+ + e^- + \bar{\nu}_e$



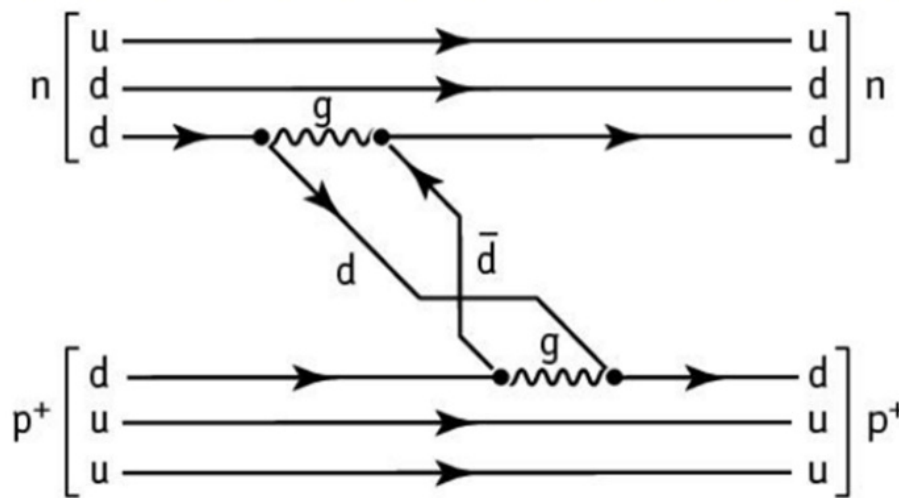
b) $\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$



Hoofdstuk 14: Kern en deeltjesfys.

§ 14.6 Het standaardmodel

- 75 Het W-deeltje gaat in de voorbeelden van figuur 14.46 en 14.47 over in een elektron en een neutrino of een muon en een neutrino. Leg uit dat het W-deeltje een lading moet hebben.
- 76 Leg van de volgende reacties uit of, en via welke tussenstappen, ze kunnen verlopen via de sterke en/of de zwakke en/of de elektromagnetische wisselwerking. Zo ja, teken het bijbehorende reactiediagram:
- a $\Delta^+ \rightarrow n + \mu^+ + \nu_\mu$
 - b $\Lambda^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$
 - c $\Sigma^+ \rightarrow p^+ + \mu^+ + \mu^-$
 - d $n + \mu^+ \rightarrow p^+ + \pi^0$
- 77 Geef de onderstaande reacties weer in een reactiediagram, op het niveau van quarks, leptonen en wisselwerkingsdeeltjes, zoals in diagram 14.46.
- a $n \rightarrow p^+ + e^- + \bar{\nu}_e$
 - b $\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$
 - c $\mu^- \rightarrow e^- + \nu_\mu + \bar{\nu}_e$
- 78 Behoud van quarkgetal is zichtbaar in diagram 14.46, doordat er bij iedere vertex evenveel quarkpijlen naar de vertex toewijzen als ervan af. Controleer op deze manier of in alle diagrammen in deze paragraaf voldaan is aan behoud van quark-, baryon- en leptongetal.

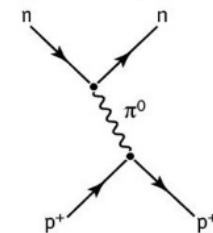


▲ **Figuur 14.50**

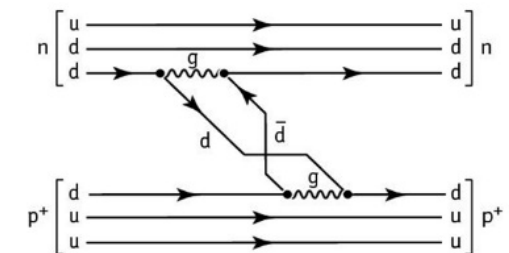
Hoofdstuk 14: Kern en deeltjesfys.

§ 14.6 Het standaardmodel

79 De gluonen zorgen voor de wisselwerking tussen de quarks. De sterke kernkracht, door de uitwisseling van pionen (figuur 14.49) kan nu worden begrepen door het proces nauwkeuriger te bekijken, zoals in diagram 14.50.



▲ **Figuur 14.49**



▲ **Figuur 14.50**

- Leg uit dat diagram 14.50 inderdaad een meer gedetailleerde versie te zien geeft van diagram 14.49.
- Vertel in eigen woorden wat er gebeurt in diagram 14.50.

Hoofdstuk 14: Kern- en deeltjesfysica

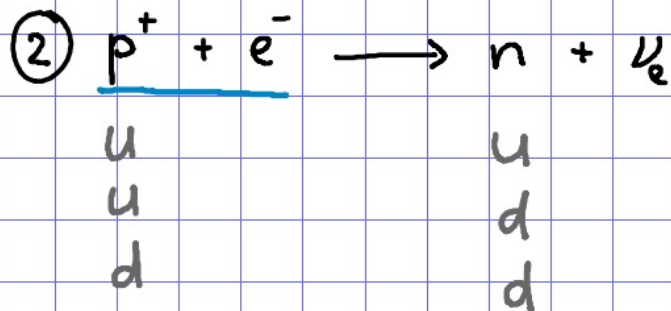
- Toepassingen -

Hoofdstuk 14: Kern en deeltjes toepassingen

$$\textcircled{1} V = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r^3 = 1,33 \cdot 3,14 \cdot (8 \cdot 10^{10} \text{ m})^3 = 2,138 \cdot 10^{33} \text{ m}^3$$

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{5 \cdot 10^{31} \text{ kg}}{2,138 \cdot 10^{33} \text{ m}^3} = 0,02338 \text{ kg/m}^3$$

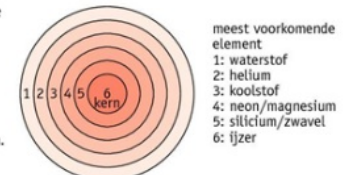
$$p = \rho \cdot g \cdot h = 0,02338 \cdot 0,5 \cdot 8 \cdot 10^{10} = 9 \cdot 10^8 \text{ Pa}$$



alleen de complete reactievergelijking
+ quarksamenstelling
→ dus ook behoud
van leptongetal

Opgave 1 Supernova

Een middelzware ster zoals de zon krijgt zijn energie uit de fusie van waterstof tot helium in zijn kern. Bij zwaardere sterren gaat de fusie verder. De kern van een zware ster bestaat na een tijd voornamelijk uit ijzer in de vorm van plasma. Het fusieproces stopt dan omdat de vorming van nog zwaardere elementen geen energie meer oplevert, maar juist energie kost. De sterkern begint dan te krimpen. Zonder energiebron is de druk in de kern namelijk niet hoog genoeg om het gewicht van de buitenlagen te weerstaan.



▲ Figuur 14.51

Figuur 14.51 geeft de schematische opbouw van een zware ster, Rigel-A, een 'blauwe superreus' met een massa van $5 \cdot 10^{31} \text{ kg}$ en een straal van $8 \cdot 10^{10} \text{ m}$. De straal van de kern is in vergelijking hiermee verwaarloosbaar.

Een ruwe schatting van de druk op de kern kan worden gemaakt met de formule:

$$p = \rho g h$$

Hierin is:

- ρ de gemiddelde dichtheid van de ster;
- g de valversnelling aan het steroppervlak van Rigel-A, deze bedraagt $0,5 \text{ ms}^{-2}$;
- h de straal van de ster.

- 1 Bereken met bovenstaande formule de druk op de kern van Rigel-A.

Naarmate de sterkern krimpt, zal met name de druk van de elektronen steeds verder toenemen. Hierdoor treedt in sommige atoomkernen elektronvangst op en wordt een proton omgezet in een neutron en een neutrino.

- 2 Teken het reactiediagram van de elektronvangst door een proton.

Een kernreactie waarbij elektronvangst plaatsvindt is de vorming van ijzer-59 uit kobalt-59.

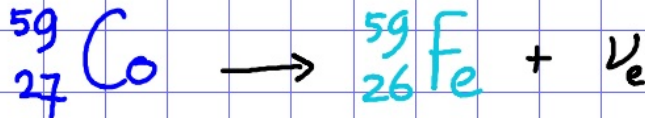
- 3 Bereken hoeveel energie het elektron minimaal moet hebben om deze reactie tot stand te brengen. Neem aan dat de kobaltkern stilstaat.

Ijzer-59 verval via β^- -verval terug naar kobalt-59. Op een bepaald moment wordt de energie van de elektronen zo groot, dat deze reactie-cyclus op grote schaal heel vaak herhaald wordt. Door de enorme hoeveelheid energie die nu binnen enkele seconden ontsnapt, stort de kern in. In de buitenlagen zorgt dit voor een schokgolf die tevens een kernfusiegolf veroorzaakt. Samen met de zwaartekracht op de naar binnen vallende lagen levert dit de energie voor een supernova-explosie, waarbij het stralingsvermogen van de ster met een factor 10^{10} toeneemt. Daarna dooft de ster geleidelijk uit.

- 4 Leg uit waardoor een groot deel van de energie die bij de elektronverval- en elektronvangstreacties vrijkomt direct uit de ster kan ontsnappen.

Hoofdstuk 14: Kern en deeltjes toepassingen

③



af: 27 schil-elektronen

af: 26 schil-elektronen

↳ 1 elektron uit de schil wordt ingevangen en speelt een rol bij de transitie $p^+ \rightarrow n$ en moet dus wel weer bij de massa voor opgeteld worden.

$${}_{27}^{59}\text{Co}, m = 58,93320 \text{ u}$$

$$27 \cdot m_e = 27 \times 5,485799 \cdot 10^{-4} \text{ u} = 0,0148117 \text{ u}$$

$$1 \cdot m_e = 5,485799 \cdot 10^{-4} \text{ u}$$

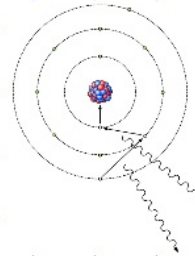
$$\text{totaal voor, } m = 58,9189369 \text{ u}$$

$${}_{26}^{59}\text{Fe}, m = 58,93488 \text{ u}$$

$$26 \cdot m_e = 26 \cdot 5,485799 \cdot 10^{-4} \text{ u} = 0,0142631 \text{ u}$$

$$\Delta m = 0,00168 \text{ u}$$

$$\Delta E = 931,494 \cdot 0,00168 = 1,57 \text{ MeV}$$



Opgave 1 Supernova

Een middelzware ster zoals de zon krijgt zijn energie uit de fusie van waterstof tot helium in zijn kern. Bij zwaardere sterren gaat de fusie verder. De kern van een zware ster bestaat na een tijd voornamelijk uit ijzer in de vorm van plasma. Het fusieproces stopt dan omdat de vorming van nog zwaardere elementen geen energie meer oplevert, maar juist energie kost. De sterkern begint dan te krimpen. Zonder energiebron is de druk in de kern namelijk niet hoog genoeg om het gewicht van de buitenlagen te weerstaan.



Figuur 14.51

Figuur 14.51 geeft de schematische opbouw van een zware ster, Rigel-A, een 'blauwe superreus' met een massa van $5 \cdot 10^{31} \text{ kg}$ en een straal van $8 \cdot 10^{10} \text{ m}$. De straal van de kern is in vergelijking hiermee verwaarloosbaar.

Een ruwe schatting van de druk op de kern kan worden gemaakt met de formule:

$$p = \rho g h$$

Hierin is:

- ρ de gemiddelde dichtheid van de ster;
- g de valversnelling aan het steroppervlak van Rigel-A, deze bedraagt $0,5 \text{ ms}^{-2}$;
- h de straal van de ster.

1 Bereken met bovenstaande formule de druk op de kern van Rigel-A.

Naarmate de sterkern krimpt, zal met name de druk van de elektronen steeds verder toenemen. Hierdoor treedt in sommige atoomkernen elektronvangst op en wordt een proton omgezet in een neutron en een neutrino.

2 Teken het reactiediagram van de elektronvangst door een proton.

Een kernreactie waarbij elektronvangst plaatsvindt is de vorming van ijzer-59 uit kobalt-59.

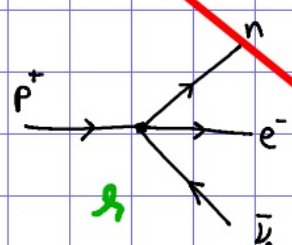
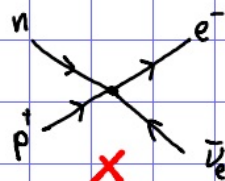
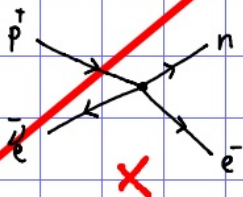
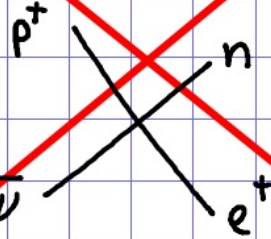
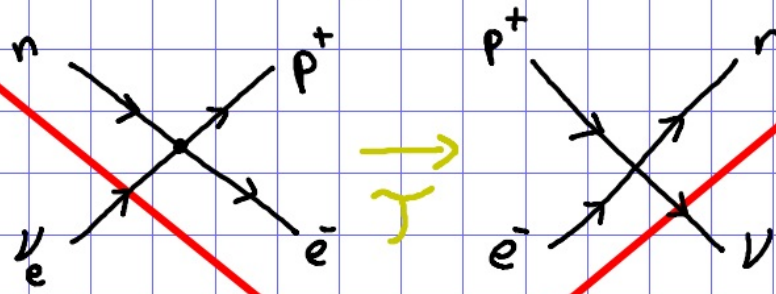
3 Bereken hoeveel energie het elektron minimaal moet hebben om deze reactie tot stand te brengen. Neem aan dat de kobaltkern stilstaat.

Ijzer-59 verval via β^- -verval terug naar kobalt-59. Op een bepaald moment wordt de energie van de elektronen zo groot, dat deze reactie-cyclus op grote schaal heel vaak herhaald wordt. Door de enorme hoeveelheid energie die nu binnen enkele seconden ontsnapt, stort de kern in. In de buitenlagen zorgt dit voor een schokgolf die tevens een kernfusiegolf veroorzaakt. Samen met de zwaartekracht op de naar binnen vallende lagen levert dit de energie voor een supernova-explosie, waarbij het stralingsvermogen van de ster met een factor 10^{10} toeneemt. Daarna dooft de ster geleidelijk uit.

4 Leg uit waardoor een groot deel van de energie die bij de elektronverval- en elektronvangstreacties vrijkomt direct uit de ster kan ontsnappen.

Hoofdstuk 14: Kern en deeltje toepassingen

5

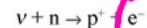


dit ontstane elektron is sneller dan het licht

↑
in water!

Opgave 2 Antares

Neutrino's kunnen alleen indirect worden waargenomen, door de kernreacties die ze veroorzaken. Een zo'n reactie betreft de botsing tussen een neutrino en een neutron:



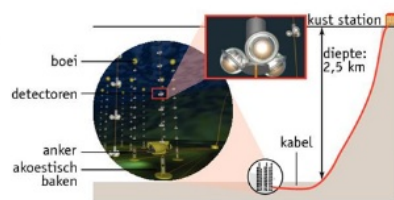
Er is een soortgelijke reactie die de wisselwerking van antineutrino's met materie beschrijft. Deze reactie kan worden gebruikt voor het waarnemen van antineutrino's.

- 5 Gebruik symmetrieën om uit de gegeven vergelijking een reactievergelijking af te leiden voor een proces waarmee antineutrino's kunnen worden waargenomen.

Neutrino-detectoren zijn altijd groot. Antares, een neutrino-detecteur in de Middellandse Zee, zal bijvoorbeeld op den duur zelfs enkele miljoenen kubieke meter zee water gaan omvatten.

- 6 Leg uit waarom neutrino-detectoren groot moeten zijn.

Antares ligt in een diep gedeelte van de Middellandse Zee, in de buurt van de Franse kust. Op een diepte van 2,5 km zijn zeer gevoelige lichtdetectoren bevestigd aan verticale kabels, die zijn verankerd op de zeebodem.



Figuur 14.52

Deze detectoren nemen de lichtflitsjes waar die kunnen vrijkomen als een neutrino via de gegeven reactie een elektron produceert. Hoewel een opstelling in ondiep water veel goedkoper zou zijn is hier bewust niet voor gekozen. Bovendien staan de lichtdetectoren niet naar boven gericht, maar naar beneden.

- 7 Leg uit waarom de detectoren naar beneden gericht staan.

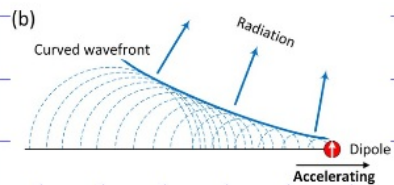
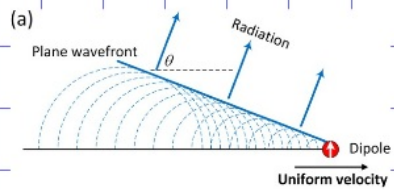
De lichtflitsjes bestaan uit zogenaamde Cherenkov-straling, die vrijkomt als de snelheid van het elektron groter is dan de lichtsnelheid in water. De lichtsnelheid in water wordt gegeven door:

$$c_{\text{water}} = \frac{c}{n_{\text{water}}}$$

Hierin is n_{water} de brekingsindex van water. Deze staat voor een aantal kleuren licht vermeld in Binas.

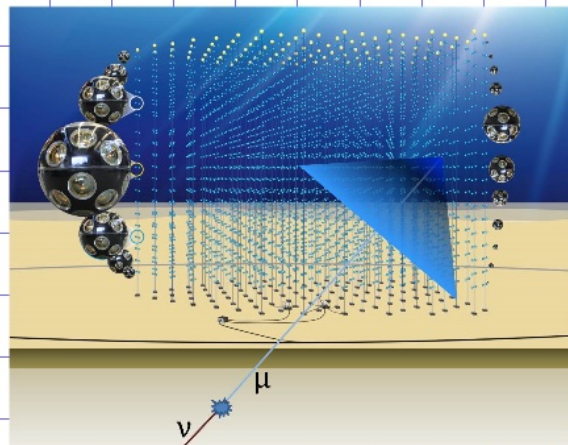
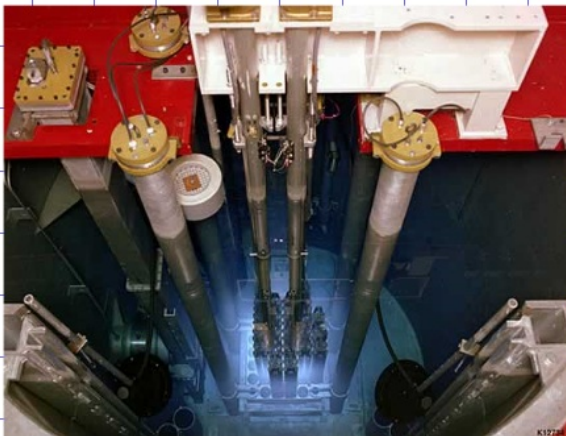
- 8 Bereken de lichtsnelheid in water. Ga hierbij uit van blauw licht.

Hoofdstuk 14: Kern en deeltje toepassingen



⑧
$$c_{\text{water}} = \frac{c}{n_{\text{water}}} = \frac{3,00 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{1,337}$$

$$= 2,24 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$



Deze detectoren nemen de lichtflitsjes waar die kunnen vrijkomen als een neutrino via de gegeven reactie een elektron produceert. Hoewel een opstelling in ondiep water veel goedkoper zou zijn is hier bewust niet voor gekozen. Bovendien staan de lichtdetectoren niet naar boven gericht, maar naar beneden.

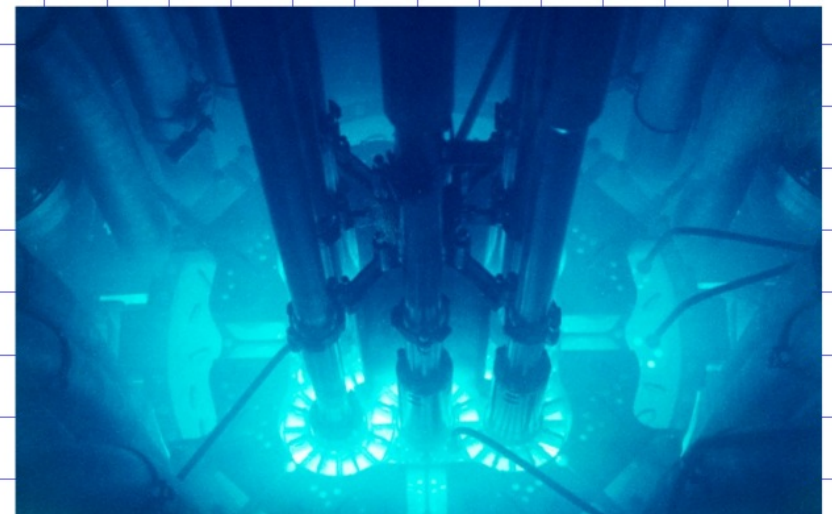
7 Leg uit waarom de detectoren naar beneden gericht staan.

De lichtflitsjes bestaan uit zogenaamde Cherenkov-straling, die vrijkomt als de snelheid van het elektron groter is dan de lichtsnelheid in water. De lichtsnelheid in water wordt gegeven door:

$$c_{\text{water}} = \frac{c}{n_{\text{water}}}$$

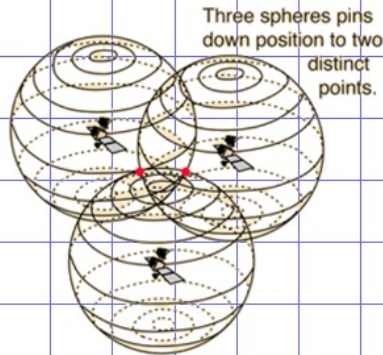
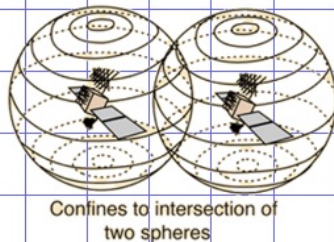
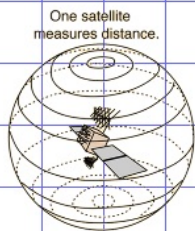
Hierin is n_{water} de brekingsindex van water. Deze staat voor een aantal kleuren licht vermeld in *Binas*.

8 Bereken de lichtsnelheid in water. Ga hierbij uit van blauw licht.



Hoofdstuk 14: Kern en deeltjes toepassingen

9



10



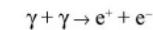
alleen mogelijk als $E_1 \cdot E_2 \geq m_e^2 \cdot c^4$

$$m_e^2 \cdot c^4 = (9,11 \cdot 10^{-31} \text{ kg})^2 \cdot (2,99 \cdot 10^8)^4 = 6,7 \cdot 10^{-27} \text{ J}$$

De positie van de lichtdetectoren verandert door de stroming van het water, en moet voortdurend worden geijkt. Dit gebeurt met microfoons die bij de detectoren op de kabel zijn aangebracht. Rondom de opstelling staan op vaste plaatsen op de zeebodem een aantal 'akoestische bakens'. Ieder baken zendt een karakteristiek geluidssignaal uit. De positie van een microfoon kan worden bepaald door de aankomsttijden van deze signalen te meten. Drie bakens zijn in principe voldoende om de positie van een microfoon vast te stellen, maar dit volgt niet direct uit de voor de hand liggende reden dat de ruimte drie dimensies heeft.

9 Leg uit waarom drie bakens inderdaad wel voldoende zijn.

Antares is vooral bedoeld voor het bestuderen van hoogenergetische processen ver weg in het heelal. Bij die processen komen weliswaar, behalve neutrino's, ook gammafotonen vrij, maar deze worden onderweg geabsorbeerd doordat ze reageren met de 'kosmische achtergrondstraling'. Dit zijn radiofotonen met een frequentie in de orde van grootte van 10^8 Hz. Bij deze reactie wordt een elektron-positron paar gevormd:



Paarvorming door de interactie van een gammafoton, met energie E_1 , en een radiofoton, met energie E_2 , kan volgens de relativiteitstheorie alleen plaatsvinden als:

$$E_1 \cdot E_2 \geq m_e^2 \cdot c^4$$

10 Bereken de orde van grootte van de energie die een gammafoton minstens moet hebben om deze paarvorming mogelijk te maken.

$$E_2 = h \cdot f_2 = 6,626 \cdot 10^{-34} \cdot 10^8 \text{ Hz} = 6,6 \cdot 10^{-26} \text{ J}$$

$$E_1 = \frac{6,7 \cdot 10^{-27} \text{ J}}{6,6 \cdot 10^{-26} \text{ J}} = 10^{-4} \text{ J of groter}$$

Hoofdstuk 14: Kern en deeltjesfysica

toepassingen

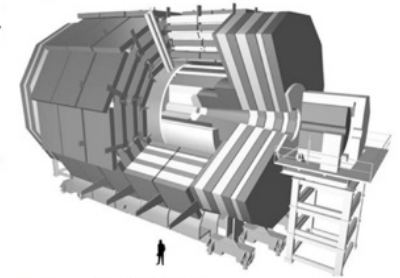
$$\textcircled{11} \quad E = m \cdot c^2 \quad \text{of} \quad 1,0 \text{ u} = 931,494 \text{ MeV}/c^2$$
$$m = \frac{E}{c^2}$$

$$\frac{125 \cdot 10^9 \text{ eV}/c^2}{931 \cdot 10^6 \text{ eV}/c^2} = 134 \text{ u}$$
$$= 2,23 \cdot 10^{-25} \text{ kg}$$

Opgave 3 Op zoek naar Higgs (examen vwo 2013-I)

Bij het CERN in Geneve laten natuurkundigen in de LHC (Large Hadron Collider) protonen met een zeer hoge snelheid op elkaar botsen. Hierbij ontstaan verschillende deeltjes, waarbij vooral het Higgsdeeltje in de belangstelling staat.

Het Higgs-deeltje is niet rechtstreeks te detecteren, maar alleen via de deeltjes waarin het kan vervallen. Als bepaalde combinaties van vervalproducten vaak genoeg worden waargenomen, met iedere keer een totale energie die in de buurt ligt van de verwachte massa van het Higgs-deeltje, dan geldt dat als aanwijzing voor het bestaan ervan.

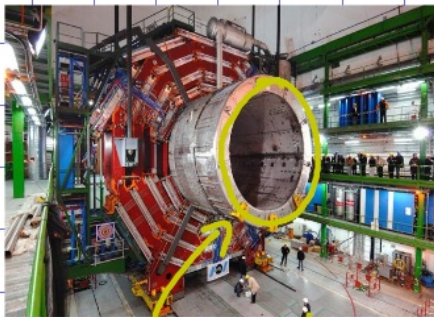


▲ Figuur 14.53 De CMS-detector

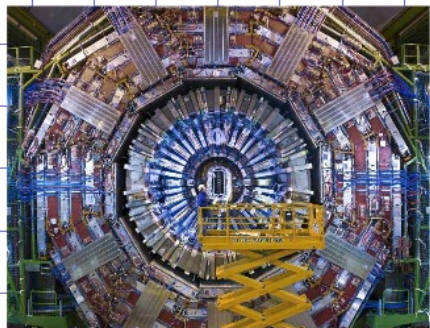
De metingen geven dan bovendien nauwkeuriger informatie over de werkelijke massa. In april 2013 waren er genoeg waarnemingen verzameld om te concluderen dat er bewijs was voor het bestaan van het Higgs-deeltje, met een massa van 125 GeV/c².

11 Bereken de massa van het Higgs-deeltje in kg.

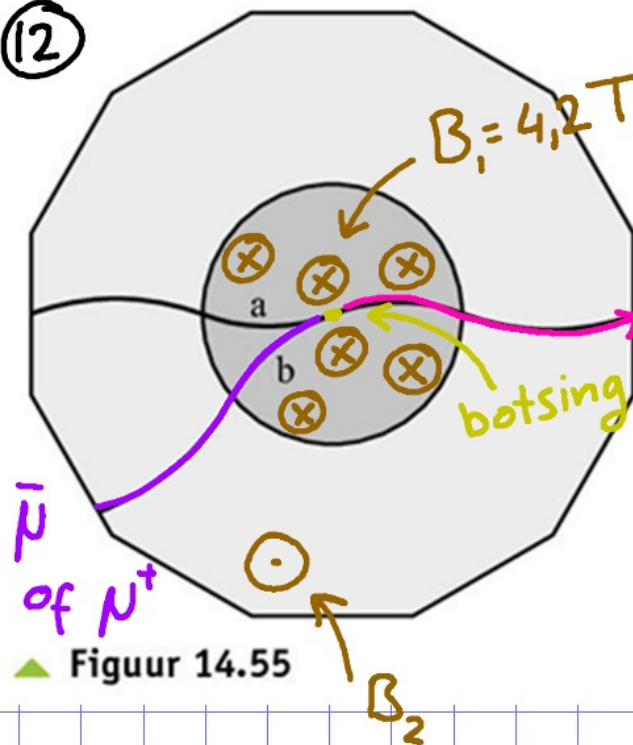
Hoofdstuk 14: Kern en deeltje toepassingen



spoel



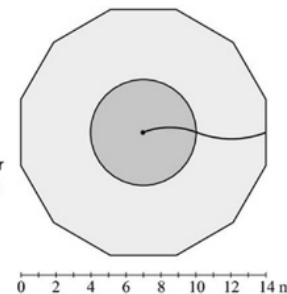
12



▲ Figuur 14.55

11 Bereken de massa van het Higgs-deeltje in kg.

Soms valt het Higgs-deeltje via een vervalreactie uiteen in twee muonen en twee antimuonen. De (anti-)muonen worden waargenomen in de CMS-detector (Compact Muon Solenoid). Deze 14 meter hoge cilindervormige detector bestaat uit vele lagen waarin de banen van de deeltjes worden vastgelegd, zie figuur 14.53. In het centrum van de detector vinden de botsingen van de protonen plaats. In de detector heerst een magnetisch veld, gemaakt door een grote supergeleidende spoel.



▲ Figuur 14.54

In figuur 14.54 is de dwarsdoorsnede CMS-detector getekend. De cirkel stelt de spoel voor. Daarbinnen (aangegeven met donkergrijs) heerst een homogeen magnetisch veld van 4,2 T. Midden in deze cirkel vindt de botsing plaats. De veldlijnen in die cirkel staan loodrecht op het vlak van tekening en zijn het papier in gericht. Ook buiten de spoel heerst een magnetisch veld (aangegeven met lichtgrijs). De baan van een wegschietend deeltje binnen en buiten de spoel is getekend.

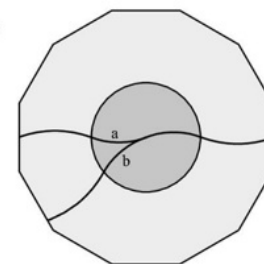
12 Leg met behulp van figuur 14.54 uit of het deeltje een muon of een anti-muon is. Neem hiertoe de figuur over en geef de richting van het magnetisch veld en van de lorentzkracht binnen de spoel aan.

In figuur 14.55 zijn twee banen getekend van een ander wegschietend deeltje. Dit deeltje is een antimuon met dezelfde energie als het muon uit de vorige vraag maar een tegenovergestelde beginrichting.

13 Leg uit welke van de aangegeven banen de juiste is.

Voor een wegschietend deeltje geldt: $E = Bqcr$
Hierin is:

- E de totale energie van het deeltje;
- B de sterkte van het magnetisch veld;
- q de lading van het deeltje;
- c de lichtsnelheid;
- r de straal van (het deel van) de cirkelbaan van het deeltje.



▲ Figuur 14.55

Hoofdstuk 14: Kern en deeltjes toepassingen

14

$$E = B q c r$$

$$[E] = [B] \cdot [q] \cdot [c] \cdot [r]$$

$$Nm = T \cdot C \cdot m \cdot s^{-1} \cdot m$$

$$T = Wb \cdot m^{-2} \quad | \quad Wb = V \cdot s \quad | \quad V = J \cdot C^{-1} \quad | \quad J = N \cdot m$$

$$Nm = \cancel{m^{-2}} \cdot \cancel{s} \cdot \cancel{C^{-1}} \cdot Nm \cdot \cancel{C} \cdot \cancel{m} \cdot \cancel{s^{-1}} \cdot \cancel{m}$$

$$Nm = Nm$$

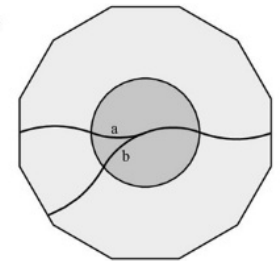
- 12 Leg met behulp van figuur 14.54 uit of het deeltje een muon of een anti-muon is. Neem hiertoe de figuur over en geef de richting van het magnetisch veld en van de Lorentzkracht binnen de spoel aan.

In figuur 14.55 zijn twee banen getekend van een ander wegschietend deeltje. Dit deeltje is een antimuon met dezelfde energie als het muon uit de vorige vraag maar een tegenovergestelde beginrichting.

- 13 Leg uit welke van de aangegeven banen de juiste is.

Voor een wegschietend deeltje geldt: $E = B q r$
Hierin is:

- E de totale energie van het deeltje;
- B de sterkte van het magnetisch veld;
- q de lading van het deeltje;
- c de lichtsnelheid;
- r de straal van (het deel van) de cirkelbaan van het deeltje.



▲ Figuur 14.55

- 14 Toon aan dat het deel van de formule links van het = teken dezelfde eenheid heeft als het deel rechts van het = teken.

In figuur 14.54 is te zien dat buiten de spoel de straal van de cirkelbaan die het deeltje beschrijft groter is dan binnen de spoel. Twee onderzoekers noemen hiervoor een oorzaak.

Oorzaak I: De deeltjes hebben buiten de spoel een kleinere snelheid omdat ze door botsingen met de materie van de detector zijn afgeremd.

Oorzaak II: Het magnetisch veld buiten de spoel is kleiner dan het magnetisch veld binnen de spoel.

- 15 Leg voor beide oorzaken uit of ze de grotere straal van de cirkelbaan kunnen verklaren.

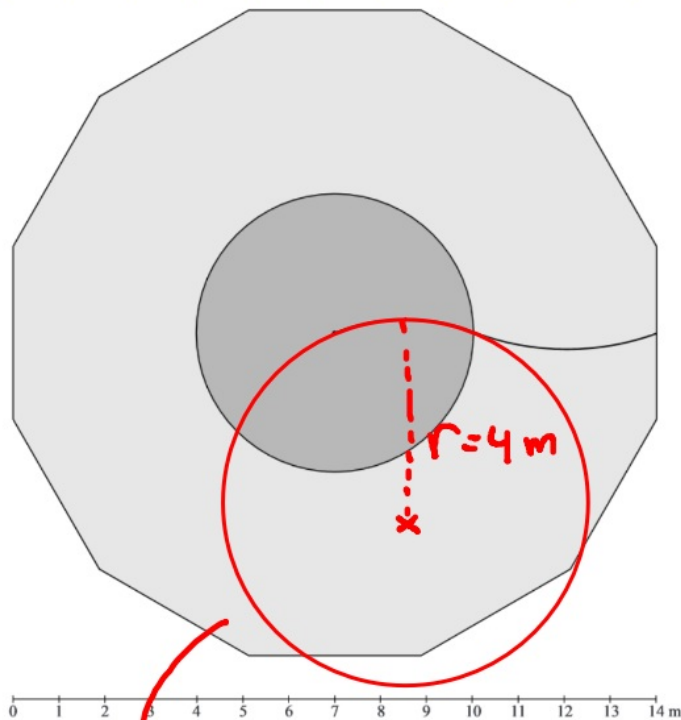
Op basis van de energieën van de wegschietende deeltjes (twee muonen en twee anti-muonen) kan een schatting gemaakt worden van de maximale massa van het Higgs-deeltje. Ga ervan uit dat de gehele massa van het Higgs-deeltje omgezet wordt in de energie van de vier wegschietende deeltjes en dat de vier wegschietende deeltjes dezelfde energie hebben als het deeltje in figuur 14.54 (zie uitwerkbijlage).

- 16 Maak hiermee een schatting van de massa van het Higgs-deeltje. Bepaal hiertoe eerst in figuur 14.54 de straal van de baan die het wegschietend deeltje binnen de spoel beschrijft.

- 17 Vergelijk je uitkomst van vraag 16 met het antwoord op vraag 11 en concludeer of deze waarneming de hypothese van een Higgs-deeltje met een massa van 125 GeV/c² ondersteunt.

einde

Hoofdstuk 14: Kern en deeltjes toepassingen



→ boek zegt $r = 5 \text{ m}$

Op basis van de energieën van de wegschietende deeltjes (twee muonen en twee anti-muonen) kan een schatting gemaakt worden van de maximale massa van het Higgs-deeltje. Ga ervan uit dat de gehele massa van het Higgs-deeltje omgezet wordt in de energie van de vier wegschietende deeltjes en dat de vier wegschietende deeltjes dezelfde energie hebben als het deeltje in figuur 14.54 (zie uitwerkbijlage).

16 Maak hiermee een schatting van de massa van het Higgs-deeltje. Bepaal hiertoe eerst in figuur 14.54 de straal van de baan die het wegschietend deeltje binnen de spoel beschrijft.

17 Vergelijk je uitkomst van vraag 16 met het antwoord op vraag 11 en concludeer of deze waarneming de hypothese van een Higgs-deeltje met een massa van $125 \text{ GeV}/c^2$ ondersteunt.

16

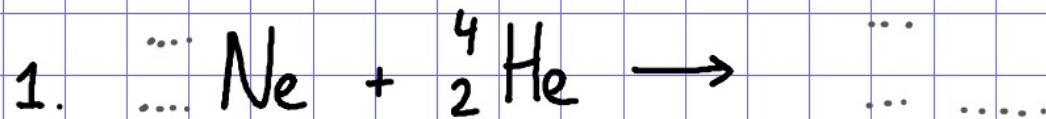
$$E = Bqrc = 4,2 \text{ T} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot 5,0 \text{ m} \cdot 3,00 \cdot 10^8 \text{ m/s} = 1 \cdot 10^{-9} \text{ J}$$

$$m = \frac{E}{c^2} = \frac{1 \cdot 10^{-9} \text{ J}}{(3,00 \cdot 10^8)^2} = 1,1 \cdot 10^{-26} \text{ kg}$$

$$4 \times 1,1 \cdot 10^{-26} \text{ kg} = 4,4 \cdot 10^{-26} \text{ kg}$$

17 officiële massa, $2,23 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$

Hoofdstuk 14: Kern en deeltjesfysica



Stap 1: Zoek de massa (in u) van de isotoop op in tabel 25A.

Stap 2: Haal de totale massa vd elektronen af van de isotoopmassa (massa elektron = $5,4858 \times 10^{-4}$ u).

Stap 3: Reken de totale massa uit van de losse kerndeeltjes waar de isotoop uit bestaat (massa proton = 1,00728 u en massa neutron = 1,00866 u).

Stap 4: Bepaal het massadefect uit het verschil tussen de waarde die je hebt uitgerekend bij stap 2 en stap 3.

Stap 5: Reken het massadefect om naar de bindingsenergie met $E = mc^2$.

Stap 6: Deel de bindingsenergie door het aantal nucleonen in de isotoop.

tijd tot 14^{40}u

Hoofdstuk 13: Straling



Stap 1: Stel de reactievergelijking op.

Stap 2: Reken uit wat de massa van de kern voor de reactie was en wat de massa van de kern na de reactie is.

Stap 3: Reken het verschil uit en beredeneer of er tijdens de reactie massa bijgekomen is of dat er massa verdwenen is (dus energie vrijgekomen).

Stap 4: Reken het massaverschil om naar energie met $E = m \cdot c^2$.