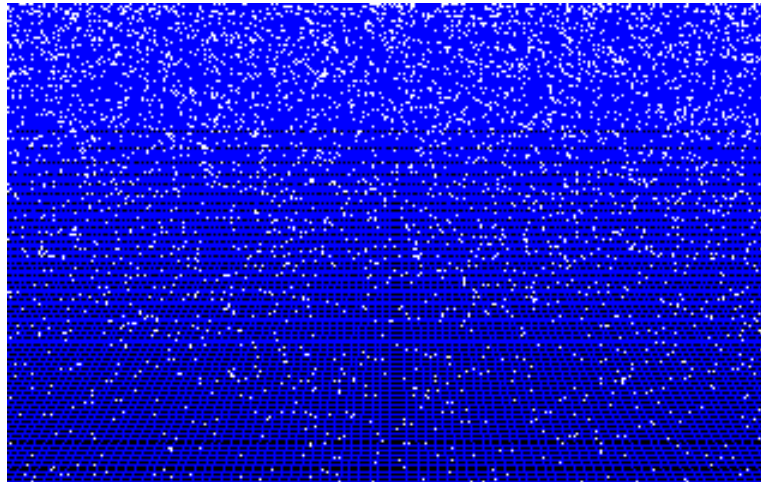


Kernenergie

FEW cursus: Uitdagingen



Jo van den Brand
6 december 2010

Inhoud

- Jo van den Brand
 - jo@nikhef.nl
 - www.nikhef.nl/~jo

- Boek

- Giancoli – Physics for Scientists and Engineers

- Week 1

41	NUCLEAR PHYSICS AND RADIOACTIVITY	1104
41-1	Structure and Properties of the Nucleus	1105
41-2	Binding Energy and Nuclear Forces	1108
41-3	Radioactivity	1110
41-4	Alpha Decay	1111
41-5	Beta Decay	1114
41-6	Gamma Decay	1116
41-7	Conservation of Nucleon Number and Other Conservation Laws	1117
41-8	Half-Life and Rate of Decay	1117
41-9	Decay Series	1121
41-10	Radioactive Dating	1122
41-11	Detection of Radiation	1124
	SUMMARY	1126
	QUESTIONS	1126
	PROBLEMS	1127
	GENERAL PROBLEMS	1129

- Week 2

42	NUCLEAR ENERGY; EFFECTS AND USES OF RADIATION	1131
42-1	Nuclear Reactions and the Transmutation of Elements	1132
42-2	Cross Section	1135
42-3	Nuclear Fission; Nuclear Reactors	1136
42-4	Nuclear Fusion	1141
42-5	Passage of Radiation Through Matter; Radiation Damage	1146
42-6	Measurement of Radiation—Dosimetry	1147
*42-7	Radiation Therapy	1150
*42-8	Tracers in Research and Medicine	1151
*42-9	Imaging by Tomography: CAT Scans and Emission Tomography	1153
*42-10	Nuclear Magnetic Resonance (NMR); Magnetic Resonance Imaging (MRI)	1156
	SUMMARY	1159
	QUESTIONS	1159
	PROBLEMS	1160
	GENERAL PROBLEMS	1162

- Werkcollege

- Vrijdag, Adrian de Nijs (1 set huiswerk: 24, 26, 80, 81)

- Tentamen: 21 december 2010 (2 vragen van de 6)

Structuur en eigenschappen van kernen

Kern: onderdeel van een atoom. Kernen worden ook nucleiden genoemd

Kern is een dicht quantumsysteem van nucleonen (verzamelnaam voor protonen en neutronen)

Proton: kern van waterstofatoom (positief geladen, spin $\frac{1}{2}$)

$$m_p = 1.67262 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

Neutron: neutraal deeltje (spin $\frac{1}{2}$) $m_n = 1.67493 \times 10^{-27} \text{ kg}$
(waarom geen gebonden toestand van p en e ?)

Atoomgetal Z is het aantal protonen in de kern $Z = N_p$

Neutrongetal N is het aantal neutronen in de kern $N = N_n$

(Atomair) massagetal A is het aantal nucleonen in de kern $A = Z + N$

Notatie voor een nucleide (met X als chemisch symbool)



Z bepaalt aantal elektronen en dus het type element (isotopen) $^{11}_6\text{C}$, $^{12}_6\text{C}$, $^{13}_6\text{C}$, $^{14}_6\text{C}$, $^{15}_6\text{C}$

Natuurlijke abundantie op Aarde is 98.9% natuurlijk $^{12}_6\text{C}$ en ongeveer 1.1% is $^{13}_6\text{C}$

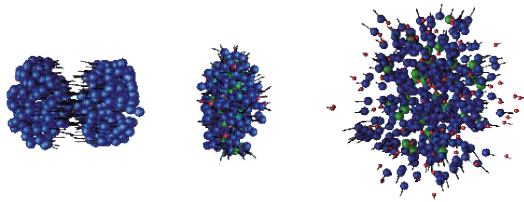
Massawaarde die je in Periodiek Systeem vindt, is het gemiddelde

Structuur en eigenschappen van kernen

Veel isotopen kunnen in het laboratorium gemaakt worden

Elementen zwaarder dan Uranium ($Z > 92$) zijn kunstmatig gemaakt

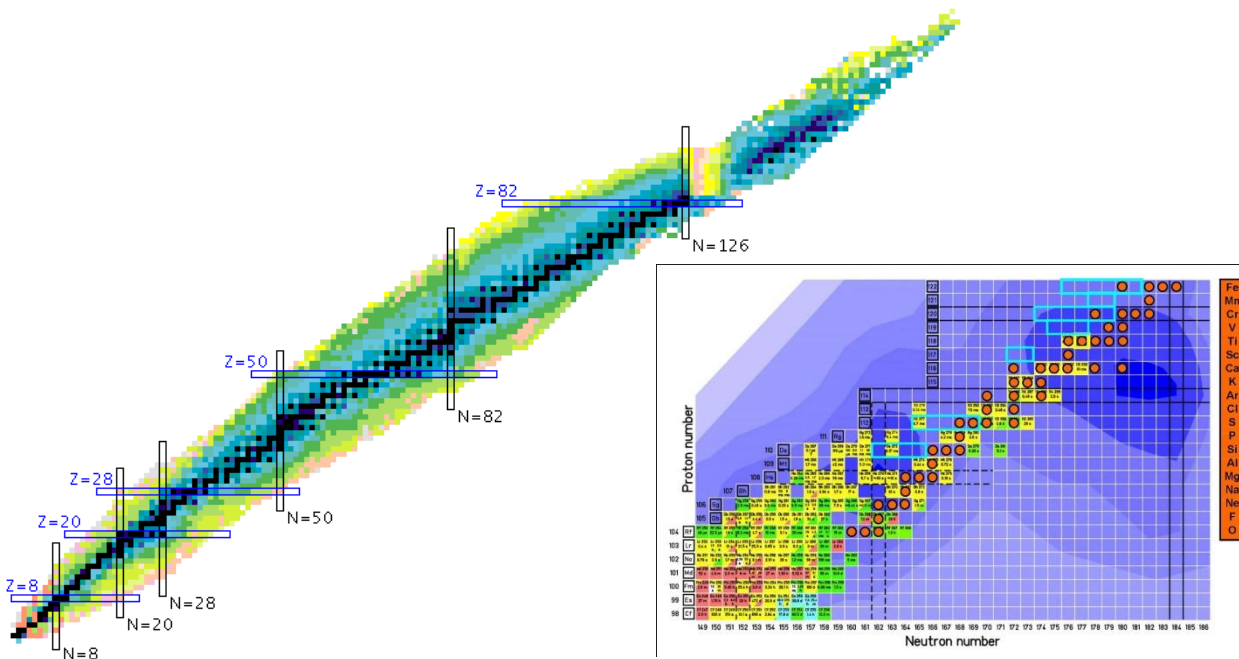
Op de VU: www.cyclotron.nl



Nuclides
for
Life!



Nucleide chart: <http://www.nndc.bnl.gov/chart/>



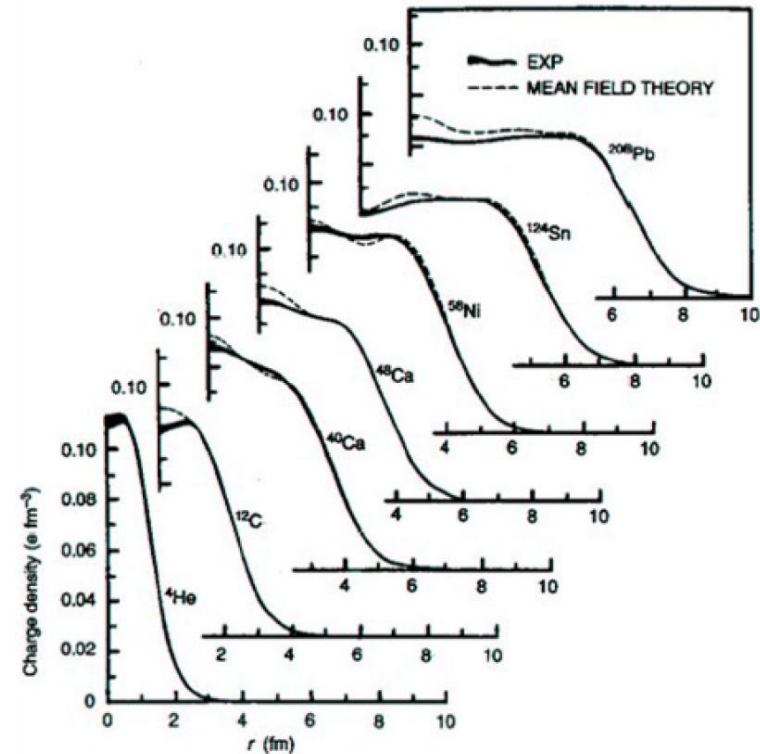
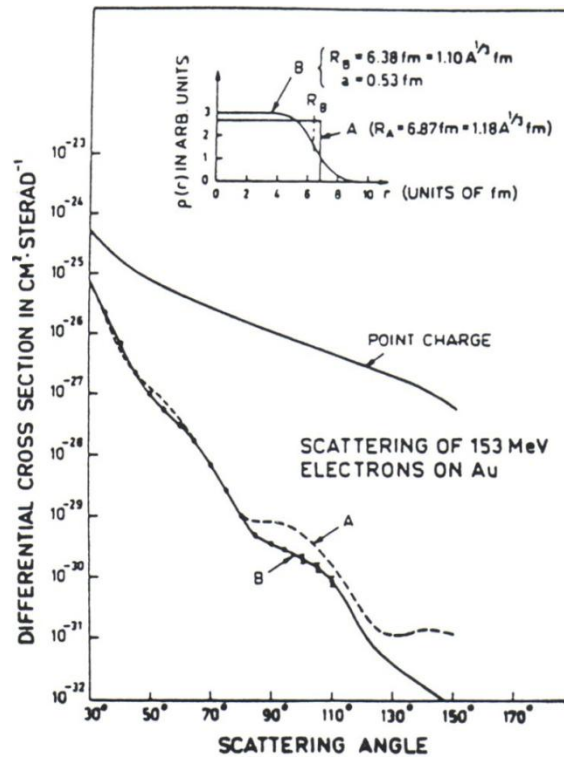
Structuur en eigenschappen van kernen

Ladingsverdeling van kernen is gemeten met elektronenverstrooiing

Ruwe benadering

$$r \approx (1.2 \times 10^{-15} \text{ m})(A^{\frac{1}{3}})$$

$10^{-15} \text{ m} = 1 \text{ femtometer} = 1 \text{ fermi}$



Structuur en eigenschappen van kernen

Massa's van isotopen zijn bepaald met massaspectrometers

Unified atomic mass unit [u]: massa $^{12}_6\text{C}$ atoom is 12.000000 u

We vinden dan

TABLE 41–1 Masses in Kilograms, Unified Atomic Mass Units, and MeV/c²

Object	Mass		
	kg	u	MeV/c ²
Electron	9.1094×10^{-31}	0.00054858	0.51100
Proton	1.67262×10^{-27}	1.007276	938.27
^1_1H atom	1.67353×10^{-27}	1.007825	938.78
Neutron	1.67493×10^{-27}	1.008665	939.57

Totaal impulsmoment van kern met spin I wordt gegeven door $\sqrt{I(I + 1)} \hbar$

Magnetische momenten van de kern worden
gegeven in nuclear magneton

$$\mu_N = \frac{e\hbar}{2m_p}$$

Metingen geven $\mu_p = 2.7928 \mu_N$

$$\mu_n = -1.9135 \mu_N$$

Neutron lijkt dus uit geladen deeltjes (quarks) te bestaan

Toepassingen als NMR en MRI zijn hierop gebaseerd

Bindingsenergie en kernkracht

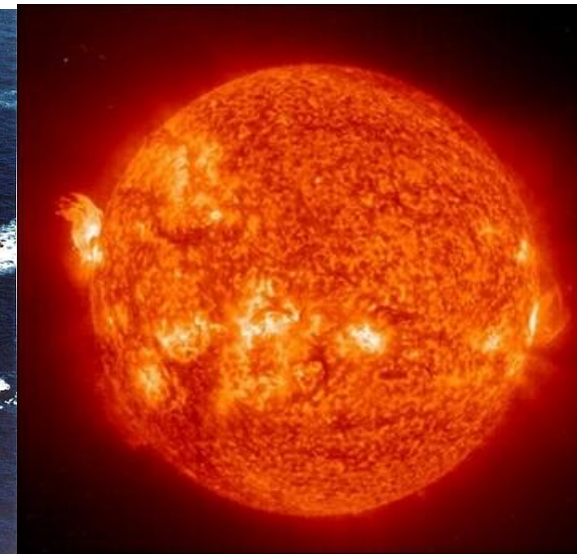
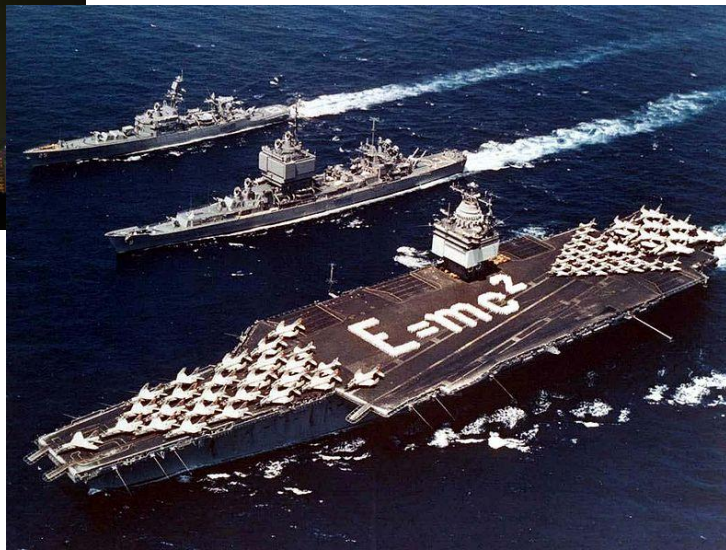
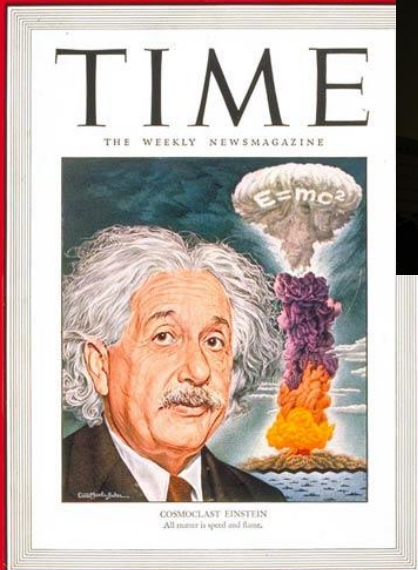
Massa kern is altijd kleiner dan de som van proton en neutron massa's

Dit massa-defect is de bindingsenergie van het systeem (voor ${}^4\text{He}$: 28.3 MeV)

Deze energie komt vrij bij de vorming van het systeem (daarom straalt de zon)

Deze energie moet je erin stoppen als je het systeem wilt opbreken in delen

Dit is eigenlijk altijd zo: massa van waterstofatoom is 13.6 eV kleiner dan de som van proton en elektron rustenergie (effect is 1 op 10^8)



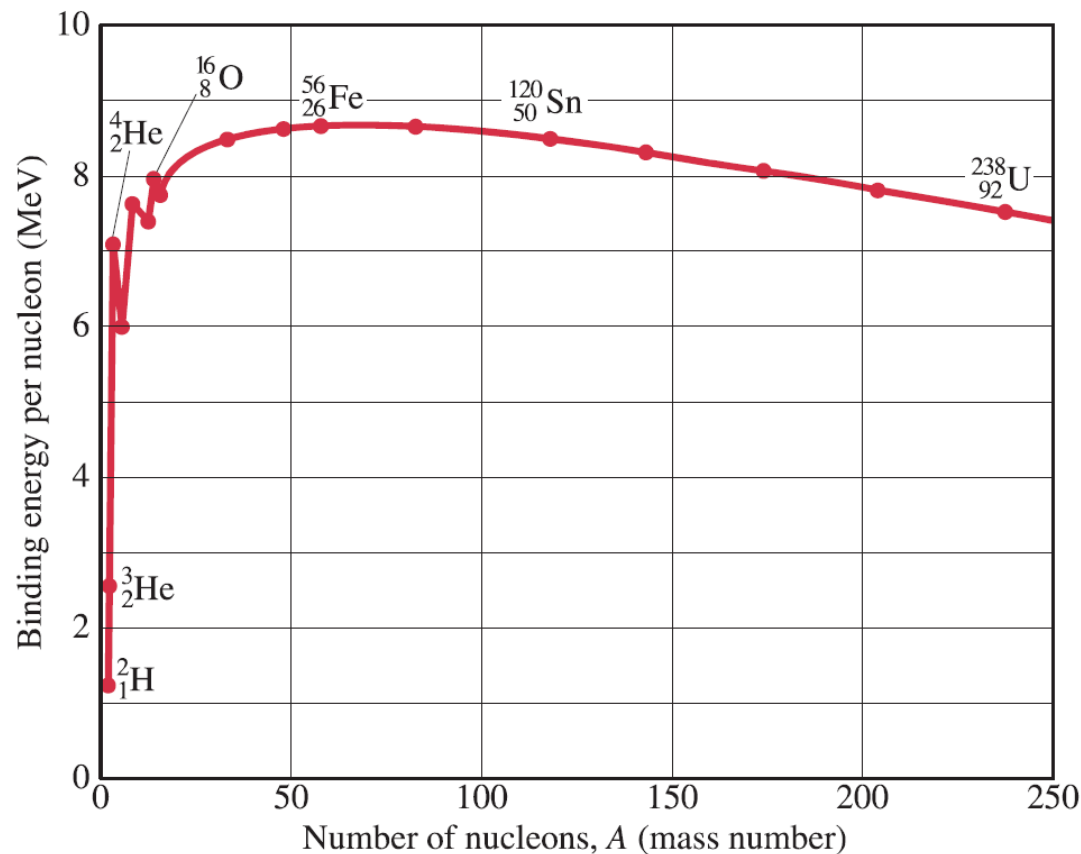
Bindingsenergie

Bindingsenergie per nucleon. Voor ${}^4\text{He}$ is dat $28.3 \text{ MeV} / 4 = 7.1 \text{ MeV}$

Curve (versus A) heeft een plateau bij 8.7 MeV per nucleon

Daling voor $A > 80$ toont dat zware kernen relatief minder gebonden zijn

Dit verband is de basis voor kernsplijting en kernfusie



Kernkracht

Nucleonen gebonden door sterke wisselwerking (kernkrachten)

Dracht: enkele femtometers

Ingewikkelde kracht: functie van $N - Z$, spin, spin-baan koppeling, etc.

Geen stabiele kernen voor $Z > 82$
vanwege elektrostatische afstoting

Stabiele kernen vervallen vanwege de
zwakke wisselwerking

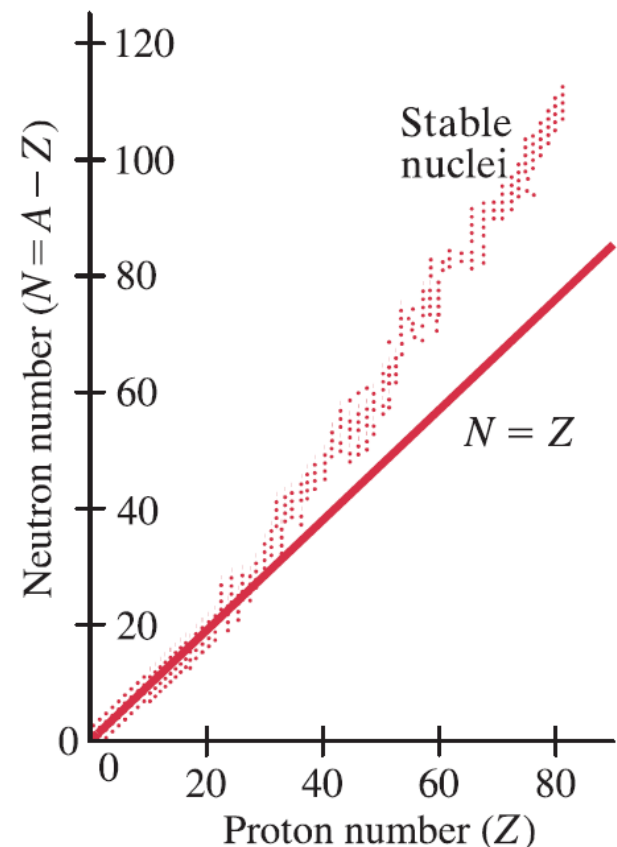
Er bestaan dus vier interacties

gravitatie

elektromagnetisme

sterke wisselwerking

zwakke wisselwerking



Radioactiviteit

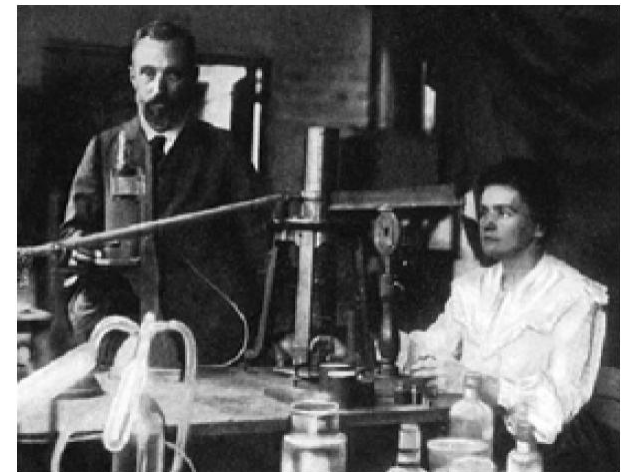
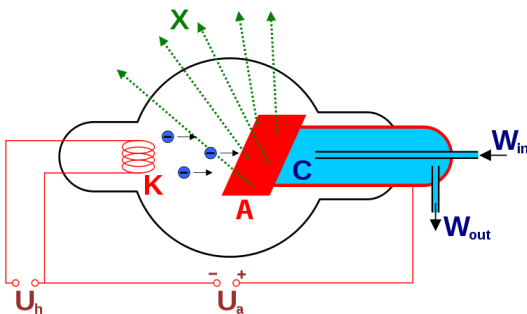
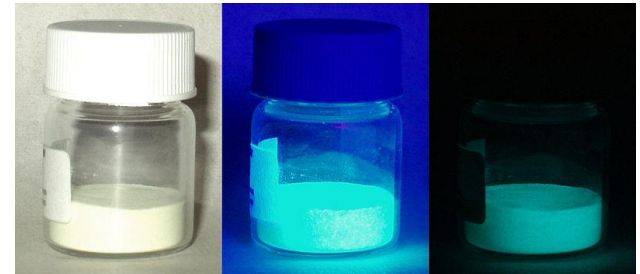
Kernfysica begon in 1896 met de ontdekking van fosforescentie (foute naam overigens) door Henri Becquerel: mineraal (dat uranium bevat) kan een fotografische plaat zwarten.

Er komt dus een of andere straling uit:
radioactiviteit (natuurlijke emissie)

Marie en Pierre Curie ontdekten radium
(voorbeeld van radioisotoop of radionuclei)

Eigenschap radioactiviteit niet makkelijk te beïnvloeden (door verhitten, magneetveld, etc.)

Rontgen had in 1896 al X-straling ontdekt,
maar dat wék je kunstmatig op



Radioactief verval

Rutherford gaf klassificatie van radioactiviteit in 1898

Type α gaat zelfs niet door papier

Type β gaat door 3 mm aluminium

Type γ gaat door een aantal cm lood

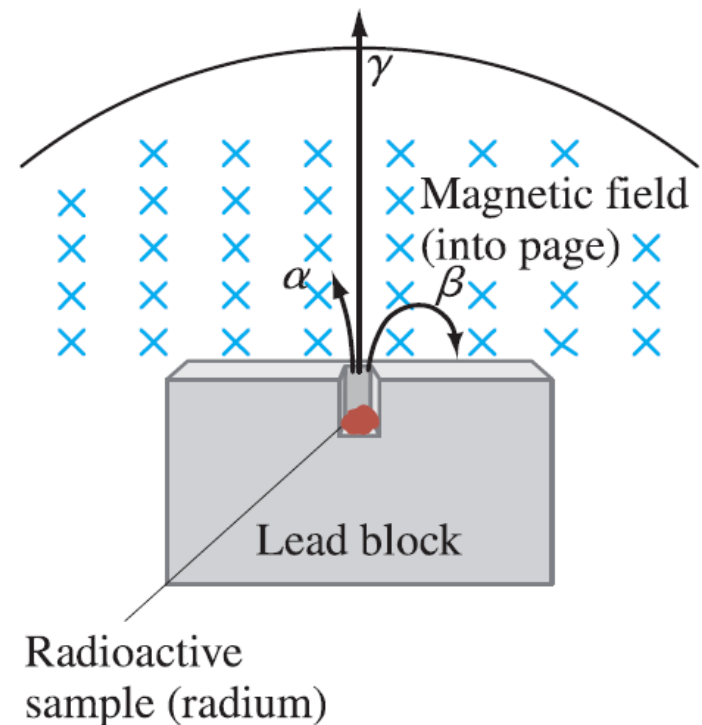
Elk type heeft bepaalde eigenschappen: bijvoorbeeld lading

Uiteindelijk bleek

α straling zijn kernen van helium atomen

β straling zijn elektronen

γ straling zijn hoogenergetische fotonen



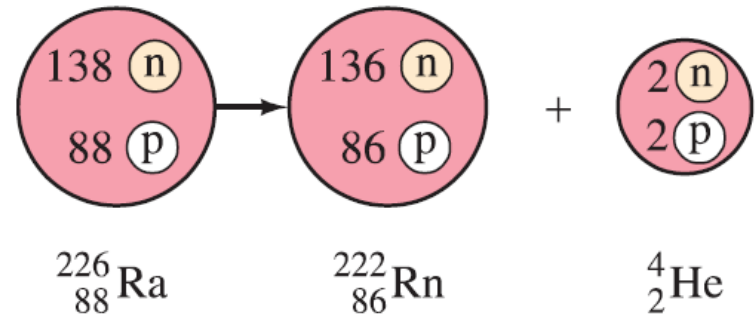
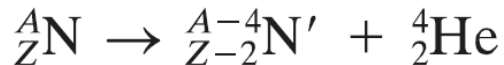
Alfa verval

Na het verval is de originele kern 2 protonen en 2 neutronen kwijt

Bijvoorbeeld ${}^{226}_{88}\text{Ra} \rightarrow {}^{222}_{86}\text{Rn} + {}^4_2\text{He}$

De dochterkern verschilt van de parent
(dit proces heet *transmutatie*)

Algemeen



Alfa verval treedt op omdat de sterke wisselwerking niet in staat is om een grote kern bij elkaar te houden. De sterke wisselwerking heeft korte dracht, terwijl de elektrostatische afstoting over de hele kern werkt

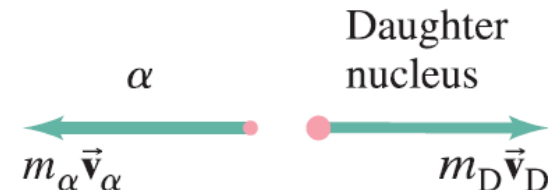
Q-waarde: totale energie die vrijkomt in het verval

$$M_P c^2 = M_D c^2 + m_\alpha c^2 + Q \quad \longrightarrow \quad Q = M_P c^2 - (M_D + m_\alpha) c^2$$

Als $Q < 0$ dan is het verval verboden vanwege energiebehoud

We hebben te maken met verval naar twee deeltjes

Dat geeft een *discreet* energiespectrum



Alfa verval: tunnелеffect

Als $Q > 0$, waarom zijn de parent kernen dan niet al vervallen?

Om dit te begrijpen, beschouw potentiële energie van alfa deeltje

De Q -waarde is de energie van het alfa deeltje op grote afstand

Tunneler effect betekent sprong van punt A naar B

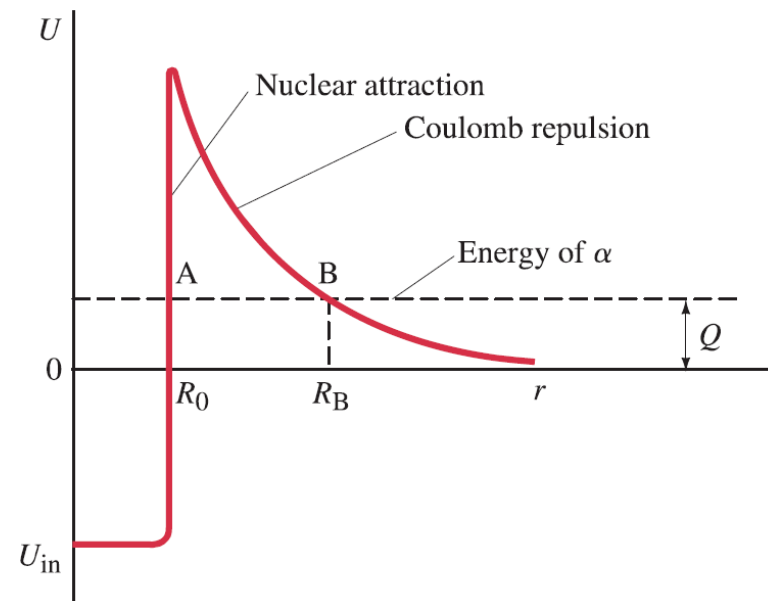
Mogelijk vanwege onzekerheidsrelatie

$$(\Delta E)(\Delta t) \approx \frac{h}{2\pi}$$

Schending van energiebehoud is mogelijk voor een tijd Δt die lang genoeg is om door de barriere heen te tunnelen

De Q -waarde, hoogte en breedte van de barriere bepaalt de levensduur van de isotoop (tot miljarden jaren)

Waarom α deeltjes? Vanwege de grote bindingsenergie! Bijvoorbeeld de reactie ${}^{232}_{92}\text{U} \rightarrow {}^{228}_{90}\text{Th} + 2n + 2p$ treedt niet op, maar naar α deeltje wel



Alfa verval: rookdetector

Bevat kleine hoeveelheid ($< \mu\text{g}$)

Americium $^{241}_{95}\text{Am}$ in de vorm van oxide

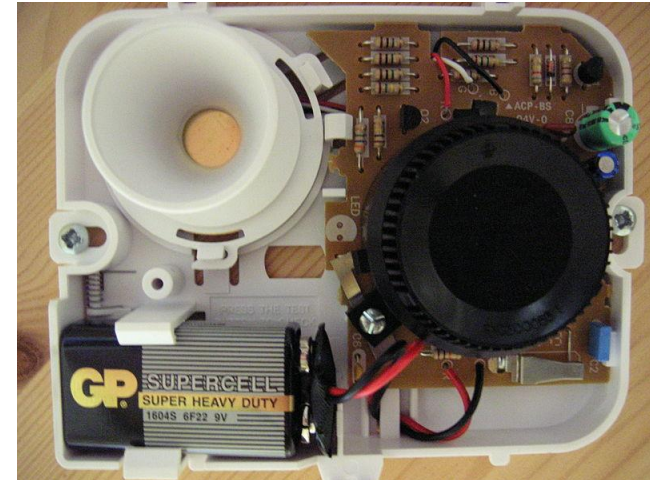
Ionisatiekamer: ioniseer lucht tussen twee tegengesteld geladen platen

Hierdoor ontstaat er een kleine continue stroom tussen deze elektroden

Rookdeeltjes absorberen de α deeltjes, waardoor de stroom afneemt

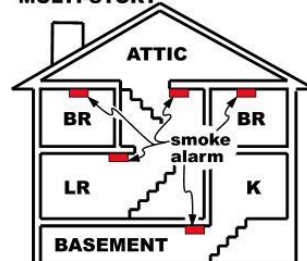
Dit wordt gedetecteerd door een elektronisch circuit

Stralingsdosis is kleiner dan die van de natuurlijke achtergrondstraling

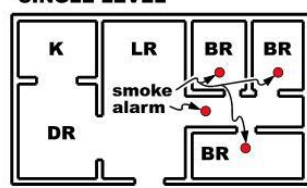


PLACE ONE SMOKE ALARM ON EVERY FLOOR AND SLEEPING ROOM

MULTI-STORY



SINGLE LEVEL



Beta verval

Transmutatie van elementen door beta verval $^{14}_6\text{C} \rightarrow ^{14}_7\text{N} + e^- + \text{neutrino}$

Neutrino was oorspronkelijk een hypothese

Atoomgetal blijft hetzelfde, maar Z (en dus ook N) verandert

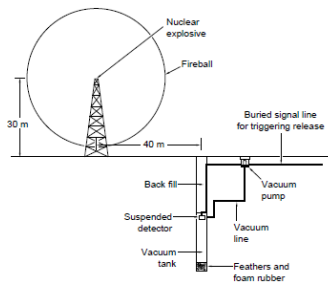
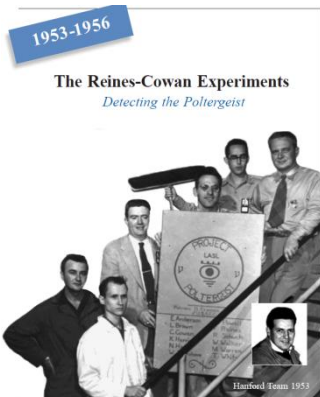
Het uitgezonden elektron is geen baanelektron!

Reactie in de kern $n \rightarrow p + e^- + \text{neutrino}$

Verval naar drie deeltjes: continue energiespectrum (daarom neutrino postulaat)

Neutron is geen gebonden toestand van proton en elektron!

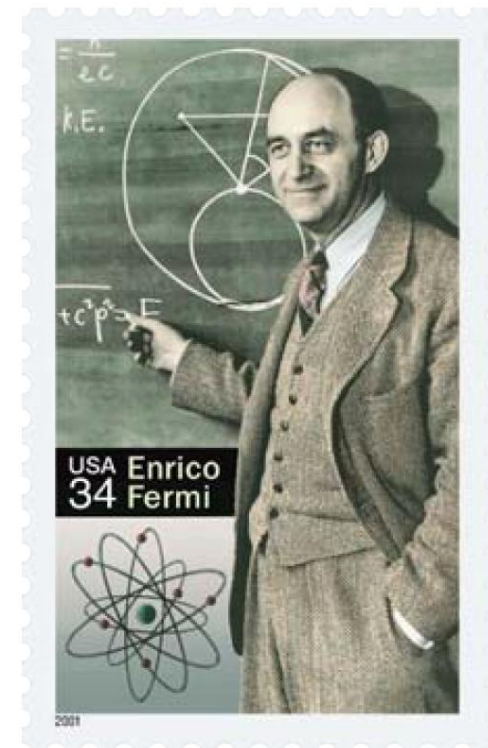
Neutrino ontdekt in 1956 (experiment Poltergeist)



Neutrino's (en antineutrino's) hebben massa en spin $\frac{1}{2}$

Correcte notatie $^{14}_6\text{C} \rightarrow ^{14}_7\text{N} + e^- + \bar{\nu}$

Beta verval is voorbeeld van zwakke wisselwerking



Beta+ verval en electron capture

Kernen met teveel neutronen tonen beta verval (elektron wordt uitgezonden)

Kernen met te weinig neutronen tonen beta+ verval (positron wordt uitgezonden)

Positron is het antideeltje van een elektron

Voorbeeld ${}^{19}_{10}\text{Ne} \rightarrow {}^{19}_9\text{F} + e^+ + \nu$

Merk op dat er nu een neutrino uitkomt

Er geldt dus

$${}^A_Z\text{N} \rightarrow {}^A_{Z+1}\text{N}' + e^- + \bar{\nu}$$

$${}^A_Z\text{N} \rightarrow {}^A_{Z-1}\text{N}' + e^+ + \nu$$

Er is nog een derde mogelijkheid: electron capture

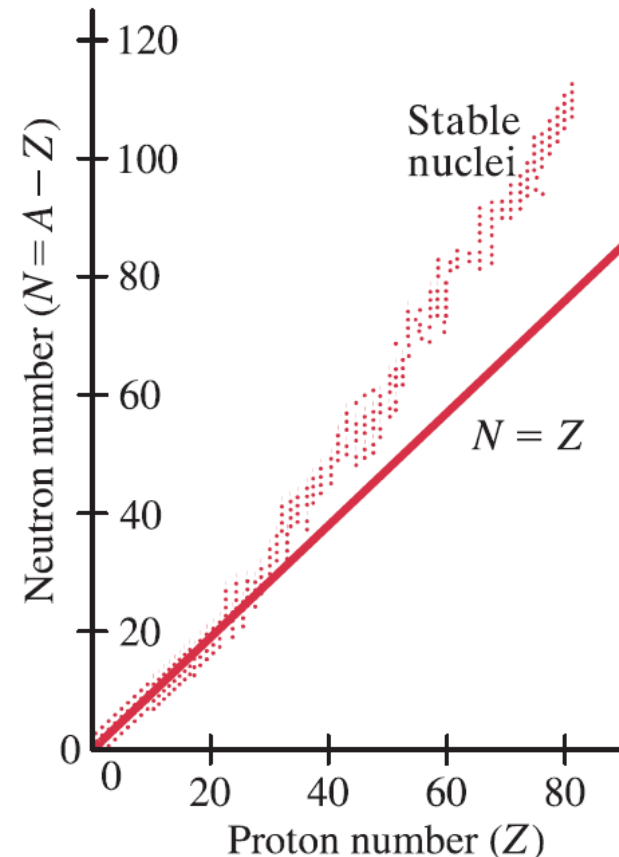
Een kern absorbeert een baanelektron

Voorbeeld ${}^7_4\text{Be} + e^- \rightarrow {}^7_3\text{Li} + \nu$

Er geldt dus

$${}^A_Z\text{N} + e^- \rightarrow {}^A_{Z-1}\text{N}' + \nu$$

Meestal wordt het elektron uit de binnenste *K*-schil gevangen. Andere elektronen springen in dit gat en er wordt karakteristieke X-straling uitgezonden

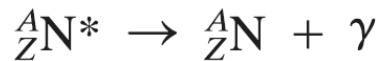


Gamma verval

Hoogenergetische fotonen worden uitgezonden door aangeslagen kerntoestanden (niveaus hebben MeVs energieverval)

Kern komt in aangeslagen toestand door
botsingen met andere deeltjes
radioactief verval

Er geldt



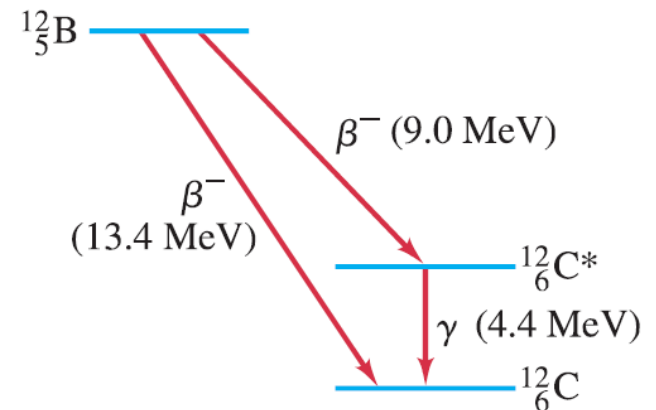
De asterik * duidt een aangeslagen toestand aan

Nomenclatuur:

X straling is van elektron-atoom interactie
gamma straling is van een kernreactie

Kern in metastabiele toestand: *isomeer*

Interne conversie: het foton stoot een
baanelektron uit de kern



Behoudswetten

Alle klassieke behoudswetten zijn van toepassing

wet van behoud van energie

behoud van impuls

behoud van impulsmoment

behoud van lading

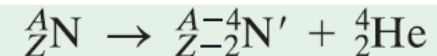
We zien ook nieuwe behoudswetten

behoud van nucleongetal (baryongetal)

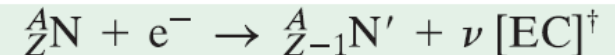
behoud van leptongetal

TABLE 41-2 The Three Types of Radioactive Decay

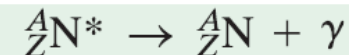
α decay:



β decay:



γ decay:



[†] Electron capture.

*Indicates the excited state of a nucleus.

Halfwaardetijd en vervalsnelheid

Radioactief verval is een random proces

Aantal vervallen kernen ΔN binnen korte tijd Δt

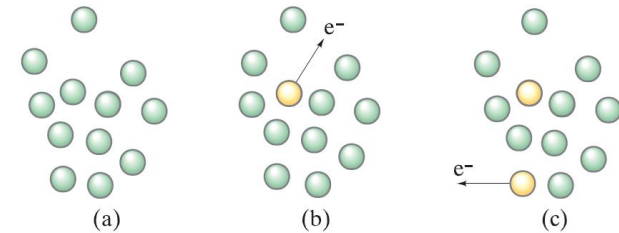
$$\Delta N = -\lambda N \Delta t$$

Dus geldt $\frac{\Delta N}{\Delta t} = -\lambda N$, met λ de vervalconstante

Radioactief verval is een 'one-shot' proces

We nemen de limiet en integreren

$$\int_{N_0}^N \frac{dN}{N} = - \int_0^t \lambda dt \quad \longrightarrow \quad \ln \frac{N}{N_0} = -\lambda t \quad \longrightarrow \quad \boxed{N = N_0 e^{-\lambda t}}$$



Dit heet de radioactieve vervalswet

Het aantal vervallen kernen per seconde $\left| \frac{dN}{dt} \right|$ noemt men de *activiteit*

Er geldt

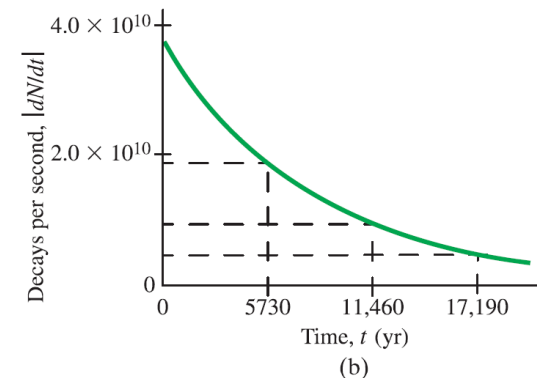
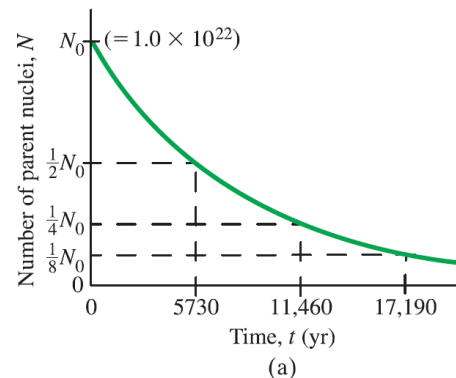
$$\left| \frac{dN}{dt} \right| = \left| \frac{dN}{dt} \right|_0 e^{-\lambda t}$$

Halfwaardetijd

$$T_{\frac{1}{2}} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0.693}{\lambda}$$

Levensduur

$$\tau = \frac{1}{\lambda} = \frac{T_{\frac{1}{2}}}{0.693}$$



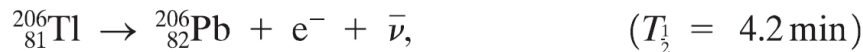
Vervalsreeksen

Een radioactieve parent kern kan vervallen naar een dochter, die ook weer vervalt, etc. Op deze wijze ontstaat een reeks van vervallen.

De figuur toont het verval van $^{238}_{92}\text{U}$

Het verval eindigt bij de stabiele isotoop $^{206}_{82}\text{Pb}$

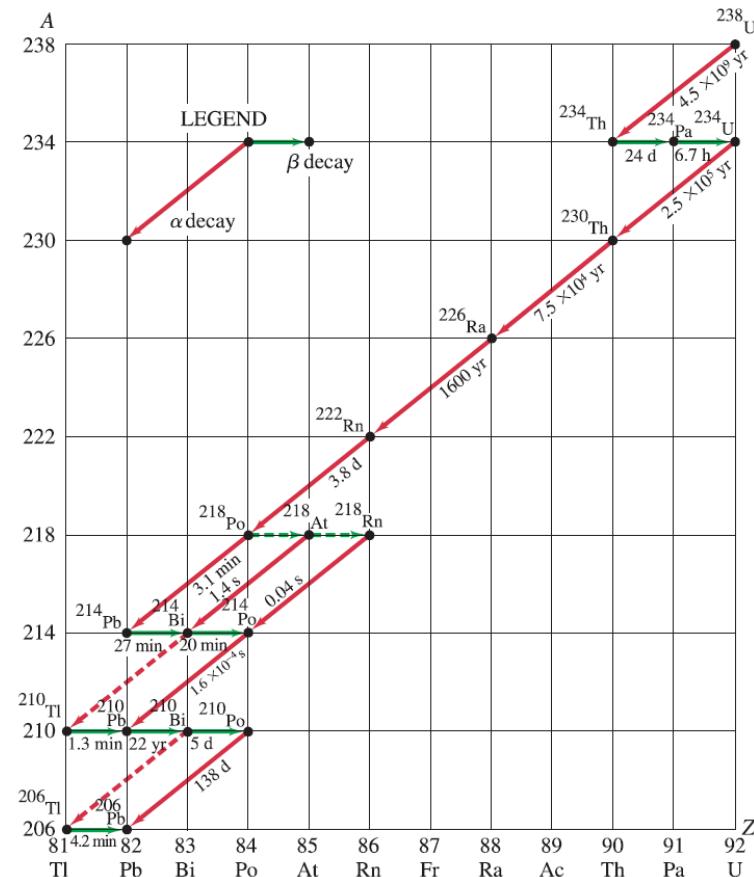
Bijvoorbeeld



Het $^{238}_{92}\text{U}$ is gevormd in de supernova die de vorming van ons zonnestelsel heeft getriggerd. Ongeveer 50% bestaat nog

Origineel radium $^{226}_{88}\text{Ra}$ met halfwaardetijd van 1600 jaar is verdwenen. Al wat voorkomt is van het verval van uranium.

Uit de abundantie (0,7%) en halfwaardetijd (700 miljoen jaar) van ^{235}U kan men afleiden dat deze supernova meer dan 6 Gj geleden is ontploft.



Radiometrische datering

Leeftijd van organisch materiaal wordt bepaald door $^{14}_6\text{C}$

Organisch materiaal zoals hout absorbeert CO_2 en produceert moleculen

Meerderheid zijn $^{12}_6\text{C}$ atomen, maar kleine fractie 1.3×10^{-12} is $^{14}_6\text{C}$

Verhouding $^{14}_6\text{C} / ^{12}_6\text{C}$ is constant en wordt bepaald door kosmische straling

De reactie is $n + ^{14}_7\text{N} \rightarrow ^{14}_6\text{C} + p$

De halfwaardetijd van $^{14}_6\text{C}$ is 5730 jaar

Een organisme kan geen verschil maken tussen $^{12}_6\text{C}$ en $^{14}_6\text{C}$

Als het organisme sterft wordt er geen CO_2 meer opgenomen

De verhouding $^{14}_6\text{C} / ^{12}_6\text{C}$ neemt af in de tijd

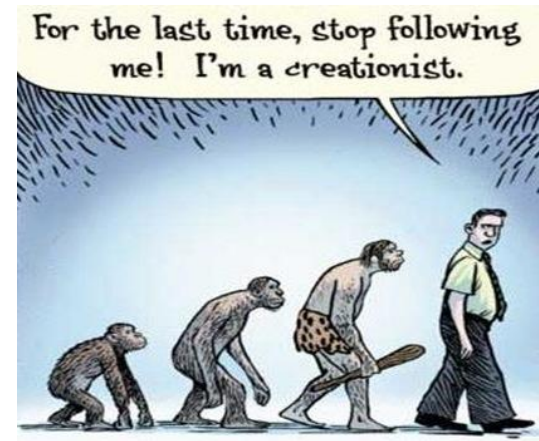
Voor precisie metingen zijn correcties van de verhouding nodig (niet constant)

Methode werkt tot leeftijden van 60.000 jaar

Datering op geologische tijdschaal

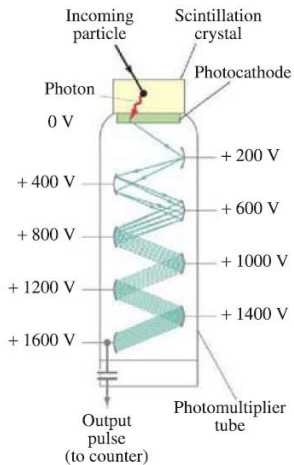
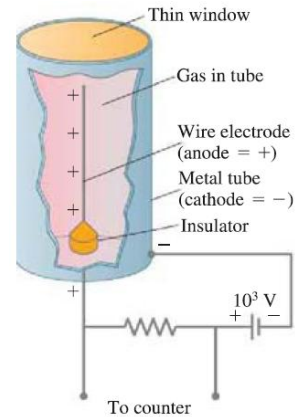
Gebruik $^{238}_{92}\text{U}$ om leeftijd van stenen te bepalen

De oudste samples hebben een leeftijd van 4 miljard jaar



Detectie van straling

Geigerteller: deeltje komt binnen via een window en ioniseert wat gasatomen. De vrijgekomen elektronen gaan naar de draad en veroorzaken een lawine aan deeltjes. Dit geeft een puls, die vertaald wordt naar een klik op een luidspreker.



Scintillator: deeltje komt binnen en maakt licht vrij in het materiaal (NaI of plastics). Het foton maakt een elektron vrij uit de foto-kathode. Dynodes versterken dit signaal. Een dergelijk systeem wordt een foto-multiplier genoemd (PMT). De versterkingsfactor is typisch 1 miljoen.

Er zijn veel verschillende soorten detectoren: tracking en calorimeters. Tracking is vaak gebaseerd op dradenkamers of halfgeleiders. Calorimeters absorberen het deeltje en geven een indicatie van de totale energie

