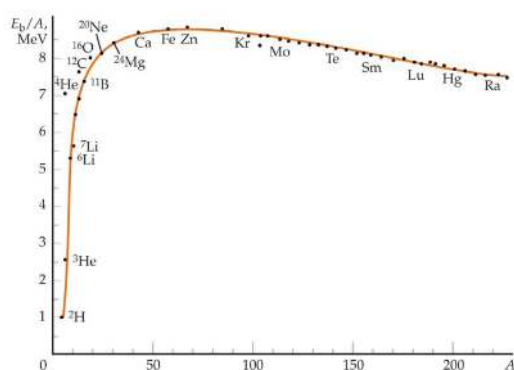


Hoofdstuk 40: Kernfysica

1. Wat houdt de neutronen en protonen samen in de kern?

De kern van een atoom bestaat uit 2 type deeltjes, de protonen en neutronen. Deze worden samengehouden door de sterke kernkracht. Deze kracht heerst tussen de nucleonen (verzamelnaam voor neutronen en protonen) en is sterker dan de repulsieve Coulomb kracht tussen de protonen. Maar deze sterke kernkrachten worden snel kleiner als functie van de afstand tussen de nucleonen.

2. Maak een schets van de bindingsenergie als functie van het massagetal A. Welke conclusies kan je trekken uit deze grafiek i.v.m. de winning van energie uit atoomkernen?



6. Bereken de gemiddelde levensduur van een kern. Wat is de halfwaardetijd?

De gemiddelde levensduur τ van een kern berekenen we op de volgende manier.

$\tau = \langle t \rangle = \int_0^\infty t f(t) dt$ waarbij $f(t)$ een kansverdeling is. Deze wordt gegeven door een vergelijking.

De kans om te vervallen op tijdstip $t \sim N = N_0 \exp(-\lambda t)$ □ Moet wel nog genormaliseerd worden want voor de kansverdeling moet gelden dat $\int_0^\infty f(t) dt = 1$.

De normalisatieconstante c wordt gevonden uit $1 = \int_0^\infty c N_0 e^{-\lambda t} dt = \frac{c N_0}{\lambda} \rightarrow c = \frac{\lambda}{N_0}$.

De kansverdeling is dan $f(t) = \lambda e^{-\lambda t}$.

De gemiddelde levensduur is dan $\tau = \langle t \rangle = \int_0^\infty t f(t) dt = \lambda \int_0^\infty t e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda}$.

De halfwaardetijd wordt gedefinieerd als de tijd die nodig is om het aantal kernen te halveren.

$$t = t_{\frac{1}{2}} \leftrightarrow N = \frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda t_{\frac{1}{2}}} \rightarrow t_{\frac{1}{2}} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda}$$

7. Wat zijn de drie belangrijkste types van radioactieve straling? Geef de kernreacties weer.

α -straling: Uitzenden van ${}^4\text{He}$ kernen.

□ α -verval: Zwaardere kernen zijn onstabiel omdat de massa van de oorspronkelijke kern groter is dan de som van de massa's van de vervalproducten (α -deeltje + dochterkern).

Kernreactie: ${}_Z^AX \rightarrow {}_{Z-2}^{A-4}X + {}_2^4\alpha$

β -straling: Uitzenden van elektronen.

□ β -verval: Gebeurt bij kernen die te veel of te weinig neutronen hebben om stabiel te zijn. A blijft constant, maar $Z \rightarrow Z + 1$ of $Z \rightarrow Z - 1$. In het eerste geval wordt een elektron uitgezonden vanuit de kern. In het tweede geval wordt er een positron e^+ uitgezonden vanuit de kern.

Kernreactie: ${}_Z^AX \rightarrow {}_{Z+1}^AX + \beta^- + \bar{\nu}_e(\text{anti} - \text{neutrino})$; ${}_Z^AX \rightarrow {}_{Z-1}^AX + \beta^+ + \nu_e(\text{neutrino})$

γ -straling: Uitzenden van fotonen.

□ γ -verval: Een kern in geëxciteerde toestand gaat over in een energetisch lagere toestand door het uitzenden van hoog-energetische fotonen (EM-straling). Het massagetal A en atoomnummer Z blijven onveranderd.

Kernreactie: ${}_Z^AX^* \rightarrow {}_Z^AX + \gamma$

8. Wat is het principe van de koolstof-14 methode om de ouderdom van een afgestorven organisme te bepalen (gegeven dat er 15 desintegraties zijn per min. per gram koolstof en dat men een zekere vervalsnelheid meet in het dode weefsel)?

${}^{14}\text{C}$ wordt geproduceerd in de atmosfeer en zijn chemisch gedrag is analoog aan dat van ${}^{12}\text{C}$ en reageert bv. met O_2 tot CO_2 . Levende organismen wisselen steeds CO_2 uit met de omgeving. Bij een dood organisme stopt de continue opname van ${}^{14}\text{C}$ en treedt er enkel radioactief verval op. Door het aantal desintegraties te meten in een dood organisme kan men de ouderdom van dit organisme bepalen. ${}^{14}\text{C} \rightarrow {}^{14}\text{N} + \beta^- + \bar{\nu}_e$

$$R_0 = \frac{15 \frac{\text{desintegraties}}{\text{minuut}}}{x \text{ gram koolstof}} ; R_n = \text{gemeten waarde} = \left(\frac{1}{2}\right)^n R_0 \rightarrow n = \frac{\ln \frac{R_n}{R_0}}{\ln 2} \rightarrow t = n t_{\frac{1}{2}}$$

9. Wat verstaat men onder thermische neutronen en werkzame doorsnede?

Kernen kunnen met elkaar botsen en kernen kunnen radioactief vervallen. Hierbij kunnen nieuwe deeltjes en kernen ontstaan. Deze kernreacties kunnen exotherm of endotherm zijn, m.a.w. er kan energie vrijkomen of er kan energie nodig zijn om de reactie te laten plaatsgrijpen. De hoeveelheid energie die vrij komt bij een kernreactie of de hoeveelheid die nodig is om ze te doen doorgaan wordt uitgedrukt d.m.v. de Q-waarde van de reactie: $Q = -\Delta mc^2$ (Δm = totale massa deeltjes na de reactie – totale massa deeltjes voor de reactie).

Bij een exotherme reactie is $Q > 0$, bij een endotherme is $Q < 0$. Bij energieën $> 1\text{MeV}$ zal het neutron elastisch of inelastisch botsen met kernen. Zelfs bij een elastische botsing zal het neutron energie verliezen omdat een gedeelte zal opgenomen worden door de kern. Na vele botsingen zal de energie van het neutron gedaald zijn tot een waarde $\sim kT$, i.e. de energie die correspondeert met de thermische beweging ($\sim 0.025\text{eV}$). Neutronen met een kinetische energie $\sim kT$ noemt men thermische neutronen. Zij zullen vervolgens nog botsingen ondergaan, maar de kans om energie te verliezen is even groot als de kans om energie te winnen bij een botsing. Bij lagere energieën bestaat er een aanzienlijke kans dat de neutronen geabsorbeerd worden door de kern. Deze vangst wordt meestal uitgedrukt door te kijken naar de zg. werkzame doorsnede van de kern voor neutronenvangst. De dimensie van de werkzame doorsnede is $(\text{lengte})^2$. Hoe groter deze oppervlakte voor een welbepaalde kern, hoe groter de kans dat die reactie plaatsgrijpt. Bij een welbepaalde energiewaarde van het neutron is er een sterke toename van de kans op absorptie, deze piek noemt men een resonantie.

10. Wat verstaat men onder het verrijken van uranium? Waarom wordt het gebruikt?

Natuurlijk uranium bestaat uit 99,3% ^{238}U en 0,7% ^{235}U . Onder het verrijken van uranium verstaat men dat het percentage van het splijtbaar ^{235}U verhoogt van 0,7% naar 1% - 4%. ^{235}U is de isotoopvorm van ^{238}U en het is voornamelijk deze isotoop die splits bij neutronenabsorptie. Deze kernsplijting wordt gebruikt om energie op te wekken.

11. Waarom wordt een moderator gebruikt indien men uranium als brandstof gebruikt? Geef enkele voorbeelden van moderators.

Om een kettingreactie aan de gang te houden moet gemiddeld één van de uitgezonden neutronen geabsorbeerd worden door een ^{235}U kern. De vrijgekomen neutronen bij kernsplijting hebben echt een zeer grote kinetische energie $\sim 1\text{MeV}$. De kans dat deze neutronen geabsorbeerd worden door ^{235}U is zeer klein, we moeten ze dus eerst vertragen tot thermische neutronen. Bij energie $\sim 1\text{MeV}$ gebeurt energieverlies voornamelijk via elastische botsingen (energieoverdracht is maximaal wanneer botsende lichamen dezelfde massa hebben). Massa $^{235}\text{U} \gg$ massa neutron, dit is ver van optimaal. Daarom voegen we een moderator toe aan de kernreactor, deze doet de snelle neutronen op efficiënte wijze energie verliezen. Men kan als moderator water (H) of grafiet (C) gebruiken omdat deze massa's \sim massa neutron. Echter de werkzame doorsnede voor neutronenabsorptie voor H is relatief hoog, er gaan dus neutronen verloren voor de reactie met U. Daarom gebruikt men ofwel zwaar water (deuterium) als moderator, ofwel gewoon water maar verrijkt uranium.

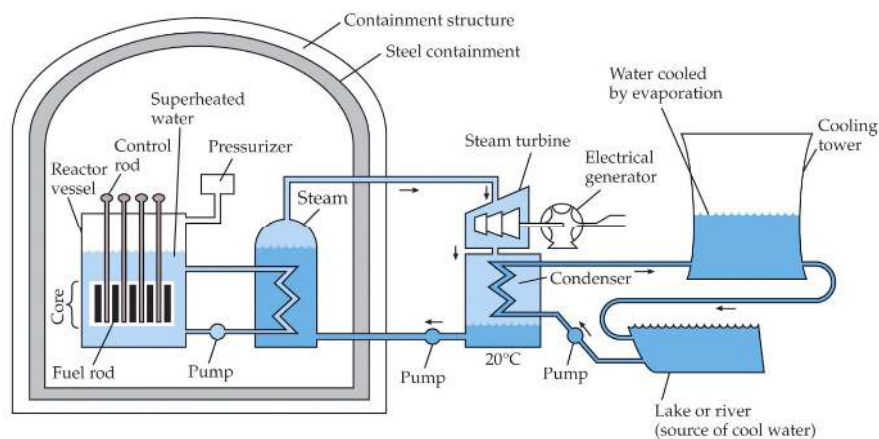
12. Wat verstaat men onder de reproductieconstante van een kernreactor?

De reproductieconstante k van de reactor is gedefinieerd als het gemiddeld aantal neutronen van elke splitsing dat opnieuw een splitsing veroorzaakt. k is maximaal $\sim 2,5$, maar in de praktijk is deze lager. Dit omdat sommige neutronen ontsnappen uit het splijtstofmateriaal, andere worden geabsorbeerd door niet-splijtbare kernen. Als $k = 1$, dan kan de reactie zichzelf onderhouden. Indien $k < 1$, dan dooft de reactie uit. Indien $k > 1$, dan neemt de energieproductie zeer snel toe.

13. Maak de vergelijking tussen de energie die vrijkomt bij het splijten van uranium-235 en klassieke fossiele brandstof (enkel orde van grootte is belangrijk).

Typische energie die vrijkomt bij een kernsplijting van ^{235}U is ~ 200 MeV, bij een chemische verbrandingsreactie komt er $\sim 4\text{eV}$ per molecule O_2 vrij. De energie die vrijkomt bij de splitsing van 1kg uranium is evenveel als bij de verbranding van 2 miljoen liter petroleum.

14. Bespreek de verschillende onderdelen van een klassieke PWR fissie-reactor. Maak een schets v/e kernreactor.



De brandstofstaven zijn uranium of plutonium. Water in de primaire kringloop, dat tevens dienst doet als moderator, wordt op t.g.v. de vrijgekomen energie en wordt naar een warmtewisselaar gestuurd. Het water staat onder hoge druk om te vermijden dat het gaat koken. Dit water verwarmt dan water van de secundaire kringloop, dit laatste wordt dan stoom. Deze stoom dient om de turbines aan te drijven die elektriciteit produceren. Water van de secundaire en primaire kringloop zijn volledig van elkaar gescheiden om contaminatie te vermijden. Het water in de secundaire kringloop wordt gekoeld d.m.v. het water uit de tertiaire kringloop. Deze kringloop staat in contact met de buitenwereld.

k moet ~ 1 zijn, als $k > 1$ dan moet het aantal kernreacties verminderen. Dit wordt bewerkstelligd op 2 manieren. De natuurlijke manier, als het aantal kernsplijtingen toeneemt dan staat de temperatuur, de dichtheid van het water zal afnemen waardoor het water minder effectief wordt als moderator en k zal dus afnemen. Maar afremming gebeurt vooral door gebruik te maken van controlestaven, deze staven bevatten materiaal (bv. cadmium) dat sterk neutronen absorbeert. De staven worden geheel of gedeeltelijk in het brandstofmateriaal geschoven. Bij het invoegen van de staven daalt k , bij het optrekken van de staven stijgt k terug.

15. Leg het principe van kernfusie uit. Wat is de energieproductie bij kernfusie t.o.v. kernfissie?

Bij kernfusie smelten twee kleinere kernen samen tot een grotere kern. Hierbij komt energie vrij. Een typische kernfusiereactie is $^2\text{H} + ^3\text{H} \rightarrow ^4\text{He} + n + 17,6\text{MeV}$. Dit is minder energie dan in een fissiereactie, maar is wel meer energie per eenheid van massa. Andere voordelen van kernfusie zijn dat de nodige brandstof in grote hoeveelheden aanwezig is (water) en er is minder radioactief afval. Technologisch vormt dit nog een probleem want om de Coulomb repulsie tussen de kernen ^2H en ^3H te overwinnen moeten de kernen een enorme kinetische energie hebben bij het botsen zodat ze dicht genoeg bij elkaar kunnen komen opdat de sterke kernkrachten de fusie zouden kunnen bewerkstelligen. De kinetische energie die de H-kernen moeten hebben is $\sim 1\text{MeV}$. Momenteel moet men meer energie stoppen in de reactie dan dat ze produceert. Om een netto energiewinst te realiseren moet men de temperatuur zo hoog krijgen dat reeds bij willekeurige botsingen deze fusiereactie optreedt. Een temperatuur van $\sim 10^8\text{K}$ is nodig opdat de dichtheid aan deeltjes voldoende hoog is. Deze temperatuur komt voor in het inwendige van sterren en kernfusie is dan ook de voornaamste energieproductie in sterren. Bij deze temperatuur komt de materie voor in de vorm van plasma (vrije elektronen en protonen). Één van de problemen om een gecontroleerde kernfusie reactie te verkrijgen is om het plasma lang genoeg te kunnen opsluiten opdat de reactie zou plaatsgrijpen. Hiervoor worden twee schema's gevolgd. Magnetische opsluiting en inertiele opsluiting. Bij magnetische opsluiting wordt een magnetisch veld gebruikt om plasma op te sluiten in een toroïde. Bij inertiele opsluiting wordt een mengsel van deuterium en tritium in vaste vorm van alle zijden beschoten met laserbundels met een energie $\sim 10^4\text{J}$ en dit gedurende 10^{-8}s . Deze tijdschalen zijn zo kort dat opsluiting gewoon bereikt wordt door de inertie van het plasma, i.e. het plasma heeft onvoldoende tijd om te expanderen.

