

IV.2.2 Kernenergie

IV.2.2 a Wie läßt sich eine Kettenreaktion kontrollieren?

- Einerseits muss $\nu q > 1$ sein, um eine Kettenreaktion überhaupt zu ermöglichen.
- Andererseits hat man für $\nu q - 1 = \mathcal{O}(1)$ ein exponentielles Wachstum mit der „prompten“ Zeitskala $t_{\text{Zyklus}} \approx 10^{-8}$ s (für schnelle Neutronen mit $E_{n_{\text{kin}}} \simeq 2$ MeV) – 10^{-3} s (für thermische Neutronen). Technisch sind solche Zeitskalen kleiner als eine Millisekunde nicht beherrschbar.

Lösung: verzögerte Neutronen! Im Mittel werden sie nach $t_{\text{verz.}} \simeq 20$ s emittiert.

Idee: wähle Reaktordesign so, dass

$$\nu_{\text{pr.}} q < 1 \quad (\text{IV.5})$$

und ermögliche die Kettenreaktion mit Hilfe der verzögerten Neutronen, d.h.

$$(\nu_{\text{pr.}} + \nu_{\text{verz.}}) q > 1. \quad (\text{IV.6})$$

Somit ergibt sich eine neue Zeitskala der Ordnung 0,1–1 s.

IV.2.2 b Wahl des Spaltmaterials

salopp: „Brennstoff“ (darf aber nicht brennen!!!)

Im natürlichen Uran ist der ^{235}U -Anteil $C = 0,72\%$. Für $E_{n_{\text{kin}}} \simeq 2$ MeV, Spaltung mit Wahrscheinlichkeit $q \approx Cq_{235} + (1 - C)q_{238} \approx q_{238} \approx 0,05$. Inelastische Stöße führen jedoch schnell zu $E_{n_{\text{kin}}} < 1,4$ MeV, d.h. unterhalb der Schwelle für ^{238}U : Spaltwahrscheinlichkeit nimmt schnell ab, denn die Neutronen werden durch ^{238}U absorbiert (Neutroneneinfang), bevor sie eine neue Spaltung mit ^{235}U induzieren können.

⇒ zwei Möglichkeiten:

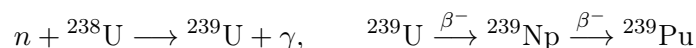
- Hohe Anreicherung (20% oder mehr) an ^{235}U . Dann sind schnelle Neutronen nutzbar ⇒ „schnelle Reaktoren“
- Thermische Reaktoren: Neutronen werden durch *Moderation* — mithilfe eines leichten (für die Kinematik), neutronenreichen (damit der Wirkungsquerschnitt für Neutroneneinfang niedrig sei) Material: H_2O , D_2O , BeO , C (Graphit) — in vielen Stößen auf thermische Energie ($E_{n_{\text{kin}}} \simeq 0,025$ eV) abgebremst, um den großen Wirkungsquerschnitt von ^{235}U bei solchen Energien zu Nutzen zu machen.

Moderation muss schnell stattfinden, um die Absorptionsverluste durch Uran zu minimieren. Um eine stabile Kettenreaktion zu erhalten ist nur eine geringe Anreicherung an ^{235}U (2–3%) nötig.

Andere mögliche Spaltmaterialie (entsprechende Reaktoren erfordern eine hohe Anreicherung):

- Plutonium ^{239}Pu ($T_{1/2} = 24110$ Jahre)

⇒ muss zunächst produziert werden (findet in jedem Kernreaktor statt!):



wobei $T_{1/2}(^{239}\text{U}) = 23 \text{ s}$, $T_{1/2}(^{239}\text{Np}) = 2,35 \text{ Tage}$.
 - ^{233}U ($T_{1/2} = 1,59 \cdot 10^5 \text{ Jahre}$)
 \Rightarrow wird produziert über



wobei $T_{1/2}({}^{233}\text{Th}) = 22 \text{ min}$, $T_{1/2}({}^{233}\text{Pa}) = 27 \text{ Tage}$.

IV.2.2 c Regelung des Reaktors

Variable Absorption von Neutronen durch einen *Absorber*: mechanisch bewegliche Stäbe aus einem Material mit großem Wirkungsquerschnitt für Neutroneneinfang: ${}^{113}_{48}\text{Cd}_{65}$, ${}^{155}_{64}\text{Gd}_{91}$, ${}^{10}_{5}\text{B}_5$.

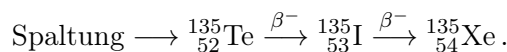
Mit steigender Temperatur T im Reaktor nimmt die thermische Bewegung der Uran-Kerne zu, was effektiv zu einer Verbreiterung der Resonanzlinien für Neutroneneinfang führt. Somit nimmt die Absorption von Neutronen automatisch zu, d.h. die Wahrscheinlichkeit dafür, dass ein Neutron eine neue Spaltung induziert, wird geringer: $dq/dT < 0$. Dies ist wesentlich für die Sicherheit des Reaktors.

Bemerkung: In einem Reaktor befinden sich auch viele Photonen, Elektronen und Positronen, und α -Teilchen — die aus den Zerfällen der Spaltprodukte stammen —, sowie Protonen (insbesondere in H_2O -moderierten Reaktoren, denn die Neutronen zerbrechen leicht die Wassermoleküle). Zum Glück induzieren diese Teilchen selbst keine weitere Spaltung, oder nur in vernachlässigbarer Menge: Positronen, Protonen und α -Teilchen sind positiv geladen und damit abgestoßen durch die Kerne; die Elektronen und Photonen haben eine zu geringe kinetische Energie, um eine Spaltung zu induzieren. Somit kann man sich nur um die Neutronenbilanz kümmern.

IV.2.2 d Vergiftung des Reaktors

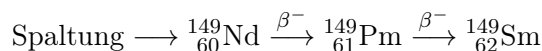
Normalerweise bleiben die Spaltprodukte im Reaktor, was sich als schlecht für die Neutronenbilanz herausstellt. Insbesondere können sich stabile oder langlebige Kerne mit hohem Wirkungsquerschnitt für Neutroneneinfang anhäufen. Solche Nuklide werden als zusätzliche Absorber fungieren, entsprechend einer *Vergiftung des Reaktors*, und müssen somit sorgfältig berücksichtigt werden. Beispiele davon sind:

- ${}^{135}_{54}\text{Xe}$ (mit Neutroneneinfangsquerschnitt⁽⁶³⁾ $\sigma_{(n,\gamma)} = 2,65 \cdot 10^6 \text{ b}$): wird entweder direkt in der Spaltung erzeugt (mit Wirkungsgrad $\gamma = 0,001$) oder indirekt ($\gamma = 0,064$) über



${}^{135}_{54}\text{Xe}$ kann dann entweder Neutronen einfangen (was zum stabilen ${}^{136}_{54}\text{Xe}$ führt), oder mit Halbwertszeit $T_{1/2} = 9,17 \text{ Stunden}$ über β^- -Emission in ${}^{135}_{55}\text{Cs}$ und dann ${}^{135}_{56}\text{Ba}$ zerfallen.

- ${}^{149}_{62}\text{Sm}$ (mit Neutroneneinfangsquerschnitt⁽⁶³⁾ $\sigma_{(n,\gamma)} = 4,1 \cdot 10^4 \text{ b}$): wird über



mit Wirkungsgrad $\gamma = 0,01$ erzeugt. ${}^{149}_{62}\text{Sm}$ ist gegenüber Zerfall stabil, kann also nur über Neutroneneinfang zerstört werden — was aber genau die Vergiftung des Reaktors darstellt.

Betrachte man z.B. ein Nuklid i ; es kann

- (primäres) Spaltprodukt sein, mit Wirkungsgrad γ_i ;
- Produkt des Zerfalls eines Nuklids j sein, mit Zerfallskonstante $\lambda_{j \rightarrow i}$;
- Produkt des Neutroneneinfangs durch ein Nuklid k , mit Wirkungsquerschnitt $\sigma_{k,n}$;

⁽⁶³⁾Dieser Wert sollte mit dem „interessanteren“ Spaltquerschnitt von ${}^{235}\text{U}$ mit thermischen Neutronen $\sigma_{\text{Sp.}} = 582 \text{ b}$ verglichen werden.

- zerfallen, mit Zerfallskonstante λ_i ⁽⁶⁴⁾
- Neutronen einfangen, mit Wirkungsquerschnitt $\sigma_{i,n}$.

Somit genügt die Dichte $n_i(t)$ der Nuklide vom Typ i der Gleichung

$$\frac{dn_i(t)}{dt} = \gamma_i n_{\text{Sp.-K.}}(t) \sigma_{\text{Sp.}} \Phi_n(t) + \lambda_{j \rightarrow i} n_j(t) + n_k(t) \sigma_{k,n} \Phi(t) - \lambda_i n_i(t) - n_i(t) \sigma_{i,n} \Phi_n(t), \quad (\text{IV.7})$$

mit $n_{\text{Sp.-K.}}$ der Dichte der Spaltkerne und Φ_n dem mittleren Neutronenfluss, d.h. der durchschnittlichen Anzahl von Neutronen, die pro Zeiteinheit eine Einheitsfläche durchqueren.

IV.2.3 Reaktortypen

(Druckwasserreaktor, Siedewasserreaktor, Hochtemperaturreaktor, schneller Brüter)

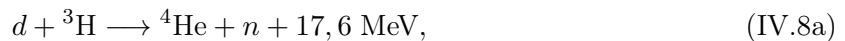
→ werden ein andermal diskutiert!

IV.3 Kernfusion

Da die Bindungsenergie pro Nukleon der leichtesten Nuklide kleiner als diejenige von schwereren Kernen ist, kann prinzipiell Energie durch Kernverschmelzung, auch *Fusion* genannt, gewonnen werden. Wegen ihrer positiven elektrischen Ladung stoßen sich die Kerne jedoch ab, entsprechend einer Coulomb-Potentialbarriere, proportional zum Produkt $Z_1 Z_2$ der Ladungszahl der zu fusionierenden Kerne. Daher ist Kernfusion leichter mit den ganz leichten Kernen.

Zum Überwinden der Coulomb-Barriere müssen die Kerne eine hohe kinetische Energie haben, für leichte Atomkerne $E_{\text{kin}} \gtrsim 1$ keV. Somit bilden die Atome ein heißes „Gas“ mit Temperatur $T \gtrsim 10^7$ K: bei dieser Temperatur sind die Atome ganz ionisiert, so dass sie eher ein (elektromagnetisches) *Plasma* bilden.

Die Bindungsenergie hat ausgeprägte Spitzen — lokale Maxima — bei ${}^4\text{He}$, ${}^8\text{Be}$, ${}^{12}\text{C}$: Fusionsprozesse, die solche Kerne erzeugen, sind somit besonders exothermisch. Beispiele solcher Prozesse sind



Dabei wird die angegebene freigesetzte Energie jeweils durch die zwei Endprodukte als kinetische Energie mitgenommen.

Dagegen sind Prozesse, die zu anderen Nukliden führen, weniger exothermisch, wie es z.B. der Fall der sonst günstigen — da die teilnehmenden Kerne die leichtesten sind — Reaktionen



wobei der erstere Prozess, der die β^+ -Umwandlung eines Protons in ein Neutron erfordert, über die schwache Wechselwirkung vermittelt wird.

Neben der hohen Temperatur benötigt man auch ein Plasma mit einer hohen genug Teilchendichte n , damit die zu fusionierenden Kerne sich oft genug treffen, d.h. um die Reaktionsrate zu erhöhen. Somit definiert man das *Fusionsprodukt* $nT\tau$, mit τ der *Energieeinschlusszeit* — Zeitdauer, während deren die hohe Energiedichte erreicht wird. Um ein Plasma dauerhaft zu entzünden soll dieses Produkt eine Schwelle von etwa $3 \cdot 10^{27} \text{ K}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-3}$ überschreiten — wobei heutige Experimente Werte von ca. $10^{27} \text{ K}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-3}$ erreicht haben.

Solche Werte lassen sich erreichen

⁽⁶⁴⁾oder allgemeiner, zerstört werden, durch einen anderen Prozess als Neutroneneinfang.

- in der Sonne (und allgemeiner in noch „lebenden“ Sternen), vgl. Kap. Nukleare Astrophysik;
- auf der Erde (hoffentlich...): 2 aktiv untersuchte Möglichkeiten, mit Deuterium–Tritium-Gemisch, entsprechend dem Prozess (IV.8a):
 - „Plasmafusion“: soll in durch elektromagnetische Felder aufgeheizten und gleichzeitig räumlich eingeschlossenen Plasmen stattfinden.
Schon viele Experimente seit 40 Jahren (die letztere und bisher erfolgreichste: JET in Culham, UK).
Nächste große Schritte: ITER (Typ Tokamak, in Cadarache, Frankreich) & Wendelstein 7-X (Typ Stellarator, in Greifswald).
 - „Trägheitsfusion“ (oder „Laser-Fusion“): kleine Kugelchen von d - ^3H -Gemisch werden durch Laserstrahlen stark und schnell komprimiert; somit wird eine sehr hohe Energiedichte erreicht, bevor das Gemisch Zeit hat, zu expandieren.
Aktuelle Experimente am NIF (National Ignition Facility, Lawrence Livermore Laboratory, Kalifornien) und (bald) am Laser Mégajoule (Bordeaux, Frankreich).

Wirtschaftlich ist das Plasmaprodukt nicht der einzige Faktor, man muss auch im ganzen Fusionsprozess — einschließlich des angewendeten Stroms, um das Plasma zu erhitzen — Energie gewinnen. Daher soll man den wie folgt definierten *Leistungsverstärkungsfaktor* Q

$$Q \equiv \frac{\text{erzeugte Fusionsleistung}}{\text{aufgewendete Heizleistung}} \quad (\text{IV.10})$$

berücksichtigen. In JET wurden Werte $Q \simeq 0,65$ erreicht, Ziel für ITER ist $Q \simeq 10$ — die Wärme des Plasmas muss noch wieder in Strom umgewandelt werden, was automatisch mit einem nicht so hohen Wirkungsgrad einhergeht, weshalb Q erheblich größer als 1 sein sollte.

Vorteile der Energieproduktion durch Kernfusion sind

- die Existenz vom Brennstoff in praktisch unbegrenzter Menge.
Es gibt 40 mg Deuterium je Liter Meerwasser, und das erforderliche Tritium könnte direkt im Fusionsreaktor erbrütet werden, über die Reaktion $n + {}^6\text{Li} \rightarrow {}^4\text{He} + {}^3\text{H} + 4,56 \text{ MeV}$, wobei die Neutronen Produkte vom Spaltprozess (IV.8a) sind.
- Der Reaktor lässt sich ohne Gefahr schnell abschalten, ohne wegfallende Nachwärme hinterzulassen.
- Keine radioaktive Endprodukte werden erzeugt.
Na, mal sehen: es wird doch mehr als ein paar Neutronen — die durch elektromagnetische Felder nicht eingeschlossen werden — überall fliegen, die mit den Materialien in deren Umgebung wechselwirken werden: hier sind Absorber nötig (vgl. Kernspaltung), und die technischen Lösungen sind noch zu entwickeln. Daher soll nach ITER noch ein DEMO-Experiment kommen.