

## Übungen zur Kernphysik

# Serie 3: Kernbindungsenergien und weitere Energierrechnungen bei Kernreaktionen

### 1. Ein Vergleich zweier Kernbindungsenergien

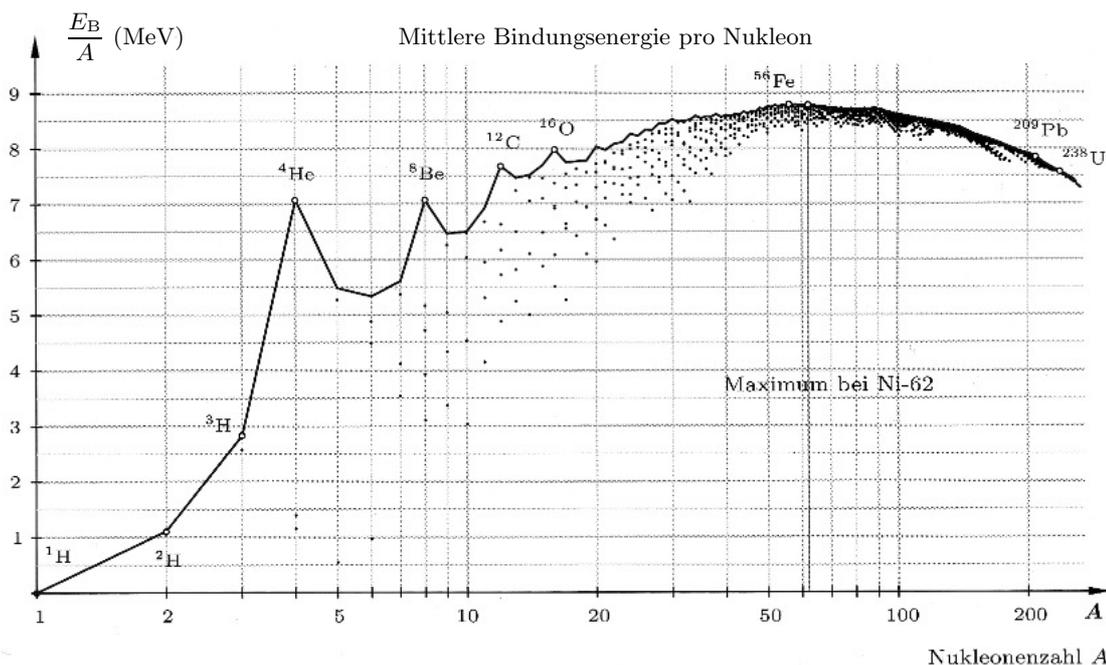
Nachfolgend sehen wir das aus dem Skript bekannte Diagramm, in dem für jeden möglichen Atomkern ein Punkt eingetragen ist. Aufgetragen ist die **mittlere Bindungsenergie pro Nukleon**  $\frac{E_B}{A}$  in Abhängigkeit von der **Massenzahl**  $A$  des Kerns.

- (a) Die beiden Peaks bei He-4 und Be-8 scheinen praktisch gleich hoch zu sein. Welcher ist denn nun der höhere?

Berechne für beide Kerne  $\frac{E_B}{A}$  und beantworte damit die Frage.

**Nuklidmasse des Berylliums:**  $m_A(^8\text{Be}) = 8.005\,3051\text{ u}$

- (b) Bestimme die mittlere Bindungsenergie pro Nukleon in der bestmöglichen Kernbindung, die es gibt.
- (c) Der schwerste absolut stabile Kern ist Pb-208. Wie gross ist bei diesem Kern die mittlere Bindungsenergie pro Nukleon?
- (d) Wie gross ist die Bindungsenergie des kleinstmöglichen Atomkerns?



### 2. Drei mittlere Kernbindungsenergien

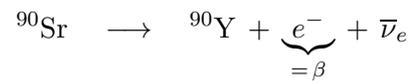
- (a) Berechne unter Verwendung der nachfolgenden Nuklidmassen je den **Massendefekt**  $\Delta M$ , die **Bindungsenergie**  $E_B$  und die **mittlere Bindungsenergie pro Nukleon**  $\frac{E_B}{A}$ :

$$m_A(^{20}\text{Ne}) = 19.992\,440\text{ u} \quad m_A(^{20}\text{O}) = 20.004\,075\text{ u} \quad m_A(^{20}\text{Mg}) = 20.018\,763\text{ u}$$

- (b) Die drei Nuklide  $^{20}\text{Ne}$ ,  $^{20}\text{O}$  und  $^{20}\text{Mg}$  besitzen allesamt dieselbe Massenzahl  $A = 20$ , aber nur eines davon ist stabil. Erkläre – ausgehend von den Resultaten unter (a) und ohne im Tabellenanhang A nachzuschauen – welches das stabile Nuklid sein muss. Begründe deine Antwort möglichst präzise (Fachausdrücke, Argumentation!).
- (c) Wo entdeckst du diese drei Nuklide im Diagramm oberhalb dieser Aufgabe?

### 3. Energetisches zu $\beta^-$ -Zerfällen

- (a) Strontium-90 ( $\text{Sr-90}$ ) findet sich in der Auswahl radioaktiver Nuklide im Tabellenanhang A. Wir lesen ab, dass sich dieser Kern via  $\beta^-$ -Zerfall umwandeln wird. Das bedeutet, dass der  $^{90}\text{Sr}$ -Kern tendenziell zu viele Neutronen besitzt um stabil zu sein. Früher oder später wird sich deswegen ein Neutron in ein Proton umwandeln. Dabei entstehen auch noch zwei weitere, viel leichtere Teilchen, die den Grossteil der kinetischen Energie abbekommen. Das eine ist ein **Elektron**  $e^-$ , das in diesem Zusammenhang auch als  **$\beta$ -Teilchen** bezeichnet wird. Das andere Teilchen ist ein sogenanntes **Elektron-Antineutrino**  $\bar{\nu}_e$ . Die vollständige Zerfallsreaktion lautet also:



Wie gross ist die bei diesem Zerfall **frei gesetzte Energiemenge** (in MeV)?

**Nuklidmasse von Yttrium-90:**  $m_A(^{90}\text{Y}) = 89.907152 \text{ u}$

**Anmerkungen zum Neutrino:** (Anti-)Neutrinos sind sehr spezielles Teilchen: Sie besitzen nämlich eine Masse, die so wahnsinnig klein ist, dass sie bis heute nicht genau gemessen werden konnte. Für die Berechnung der frei gesetzten Energie setzen Sie  $m_{\bar{\nu}_e} = 0$ .

Überhaupt sind Eigenschaften von Neutrinos schwer messbar, denn diese Teilchen reagieren mit fast keiner anderen Materie. Einmal losgelassen, saust so ein Neutrino mit nahezu Lichtgeschwindigkeit in der Regel einfach durch alle anderen Körper hindurch ohne mit irgendwas zu wechselwirken. Demzufolge ist dann eben auch die kinetische Energie, die so ein Neutrino mitnimmt, nicht weiter gefährlich, egal wie gross sie ist.

- (b) Betrachten wir mit Argon-41 noch einen zweiten  $\beta^-$ -Zerfall. Wie lautet hier die Zerfallsreaktion und wie gross ist die dabei frei gesetzte Energie?



- (c) Im Tabellenanhang A wird zu Beginn der Auswahl radioaktiver Nuklide darauf hingewiesen, dass die angegebene Energie bei  $\beta$ -Zerfällen stets einen Maximalwert (für die kinetische Energie des  $\beta$ -Teilchens) angibt.

Bestätige mit dem unter (a) berechneten Energiebetrag diesen Maximalwert für  $^{90}\text{Sr}$ . Bei  $^{41}\text{Ar}$  stimmt das so nicht mehr, denn dieser Zerfall wird von einem  $\gamma$ -Zerfall begleitet. Die unter (b) berechnete freigesetzte Energie entspricht der Summe aus maximaler  $\beta$ -Energie und  $\gamma$ -Energie, wie du leicht überprüfen kannst.

Aber weshalb wird hier im Tabellenanhang eigentlich über Maximalwerte für die kinetischen Energien der  $\beta$ -Teilchen gesprochen? Offensichtlich können  $\beta$ -Teilchen auch geringere Energiemengen abbekommen. Was passiert dabei mit der überschüssigen Energie?

#### 4. Zuwachs der mittleren Bindungsenergie pro Nukleon bei der Kernspaltung

Eine mögliche Kernspaltungsreaktion von U-235 lautet:



- (a) Welcher andere Tochterkern ( $\square$ ) entsteht neben  ${}^{90}\text{Sr}$  bei dieser Spaltung?
- (b) Berechne zunächst die bei der Reaktion frei werdende Kernenergie auf die gewohnte Art und Weise.

**Massen der radioaktiven Tochternuklide:**

$$m_{\text{A}}(\square) = 143.938\,945 \text{ u} \quad \text{und} \quad m_{\text{A}}({}^{90}\text{Sr}) = 89.907\,738 \text{ u}$$

- (c) Überlege dir vor den Berechnungen in den weiteren Aufgaben, in welchem der drei in der Reaktion auftretenden Kerne die Nukleonen wohl am besten gebunden sind.
- (d) Berechne nun die **Bindungsenergien** aller Edukte und aller Produkte dieser Spaltungsreaktion.

**Frage:** Wie gross ist wohl die Bindungsenergie eines einzelnen Neutrons  $E_{\text{B}}(n)$ ?

- (e) Berechne mit den Resultaten aus (d) die **mittlere Bindungsenergie pro Nukleon** für jeden der drei in der Reaktion vorkommenden Kerne und überprüfe mit dem Resultat deine Aussage zu Teilaufgabe (c).
- (f) Berechne die mittlere Bindungsenergie aller Edukte zusammen. Mache anschliessend dasselbe für die Produkte.

**Achtung!** Ganz korrekt ausgeführt lautet diese Berechnung für die Eduktseite:

$$\frac{E_{\text{B}}}{A} = \frac{E_{\text{B}}({}^{235}\text{U}) + E_{\text{B}}(n)}{235 + 1}$$

Analoges gilt für die mittlere Bindungsenergie pro Nukleon auf Seite der Produkte.

- (g) Wo befinden sich alle in der Reaktionsgleichung auftretenden Teilchen im Diagramm auf Seite 1 dieser Übungsserie?
- (h) Überlege dir, was das Resultat von Aufgabe (b) rechnerisch mit dem Resultat von Aufgabe (f) zu tun hat!

#### 5. $E = mc^2$ im KKW

Die thermische Leistung des Reaktors im KKW Gösgen beträgt bei Normalbetrieb gerade etwa 3000 MW. Während eines Jahres läuft das KKW während elf Monaten mit dieser Leistung. (Einmal pro Jahr muss das Werk für ca. einen Monat zu Revisionszwecken abgeschaltet werden.)

Diese gesamte thermische Leistung ist auf den Masseverlust des Spaltmaterials bei Kernreaktionen, also auf die Einstein'sche Äquivalenz von Masse und Energie zurückzuführen.

Berechne aufgrund dieser Angaben, wie viel Masse der Reaktor des KKW's Gösgen während einem Betriebsjahr demzufolge etwa verliert.

