

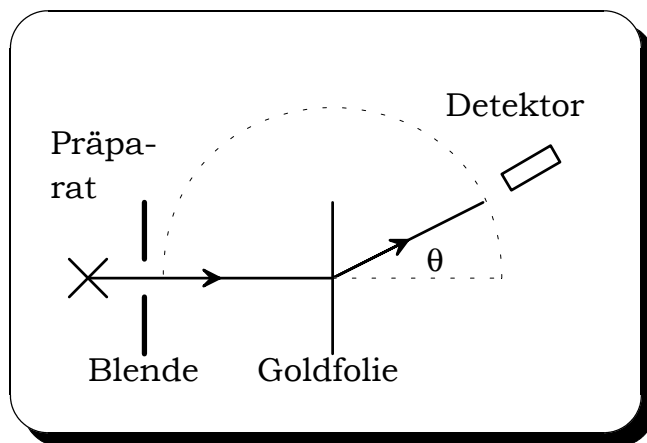
6 Eigenschaften stabiler Kerne, Kernzerfall und Kernreaktionen

6.1 Größe von Atomkernen; Protonen, Neutronen, Isotopie; Kernkräfte

Der Atomkern

Das letzte Atommodell, das nicht von der Existenz von Kern und Hülle ausging, war das von Thomson ("Rosinenkuchenmodell") mit all seinen bekannten Mängeln. 1911 wollte Rutherford dieses Modell überprüfen und beschloss dazu eine dünne Goldfolie mit α -Teilchen aus der radioaktiven Strahlung. Den Raum um die Folie tastete er mit einem Detektor ab, um die Abhängigkeit der Streustrahlung vom Ablenkwinkel zu ermitteln.

Skizze:



Wider Erwarten durchsetzten die meisten α -Teilchen die Folie geradlinig, jedoch wurden bei allen Winkeln gestreute α -Teilchen beobachtet.

Rutherford konnte das Versuchsergebnis nur so erklären: Die gesamte positive Ladung und damit die Masse des Atoms ist in einem Atomkern mit dem Durchmesser von weniger als 10^{-14} m konzentriert. Der größte Teil des Atoms ist also leer und nur von Elektronen erfüllt.

Der Radius eines Atomkerns lässt sich mit den Vorstellungen von Rutherford, allein die Coulombkraft wirke zwischen Geschöß und Zielkern, abschätzen: Die größte Annäherung erfährt ein α -Teilchen bei einer Ablenkung von $\theta = 180^\circ$. Dann ist das Geschöß am kernnächsten Punkt in Ruhe, und seine ursprüngliche kinetische Energie hat sich vollständig in potentielle Energie verwandelt. Dann gilt:

$$W_{\text{kin}} = W_{\text{pot}} \Rightarrow W_{\text{kin}} = \frac{(Z \cdot e) \cdot (2 \cdot e)}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot r},$$

woraus sich ein minimaler Abstand r_{\min} zu

$$r_{\min} = \frac{(Z \cdot e) \cdot (2 \cdot e)}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot W_{\text{kin}}}$$

errechnen lässt.

Für Alpha-Teilchen mit der kinetischen Energie $W_{\text{kin}} = 7,7 \text{ MeV}$ und Gold als Zielkern ($Z = 79$) findet man z. B. $r_{\min} = 3 \cdot 10^{-14} \text{ m}$.

Bei Annahme eines kugelförmigen Kerns gilt in guter Näherung die Abschätzung

$$r_K \approx 1,4 \cdot 10^{-15} \text{ m} \cdot {}^3\sqrt{A} .$$

Führt man derartige Streuversuche mit hochenergetischen α -Teilchen durch, so treten ab $W_{\text{kin}} = 24 \text{ MeV}$ Abweichungen von den oben skizzierten, nur auf die Coulombkraft zurückgeführten theoretischen Ergebnissen auf. α -Teilchen können dann dem Kern so nahe kommen, dass dieser mit einer anderen ihm eigenen Kraft, der Kernkraft, die Teilchenbahn stört. Von dieser Kernkraft, für die man bisher noch keinen mathematischen Ansatz hat, weiß man lediglich, dass sie

1. nur zwischen Nukleonen auftritt und anziehend ist,
2. ladungsunabhängig ist,
3. zwischen benachbarten Protonen viel stärker ist als die Coulombkraft (im Abstand von 10^{-15} m ist die Kernkraft zwischen zwei Protonen ca. 35-mal so stark wie die elektrischen Abstoßungskraft),
4. kurzreichweitig ist (beschränkt auf den Abstand zwischen zwei Nukleonen),
5. einen Sättigungscharakter hat; daher ziehen sich Atomkerne nicht immer weiter zusammen, sondern haben ein konstantes Volumen pro Nukleon.

Weitere Erkenntnisse über Atomkerne

Aus der Chemie ist bekannt, dass es etwa 100 in der Natur vorkommende chemische Elemente gibt, aus denen alle überhaupt vorkommenden Stoffe zusammengesetzt sind.

Bei Messungen mit dem Massenspektrographen fand man fast 2000 verschiedene Kerne mit jeweils verschiedenen Massen, obwohl es nur etwa 100 verschiedene Elemente gibt, die sich in ihrem chemischen Verhalten unterscheiden. Weiterhin deutet alles darauf hin, dass alle diese 2000 verschiedenen Nuklide (von nucleus, lat; Kern) nur aus zwei verschiedenen Arten von Kernbausteinen (Nukleonen) zusammengesetzt sind, den Protonen und den Neutronen.

Protonen (p) sind einfach positiv geladene, Neutronen (n) elektrisch neutrale Elementarteilchen. Beide Teilchen haben etwa dieselbe Masse $m_p \approx m_n \approx 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 1 \text{ u}$ (atomare Masseneinheit).

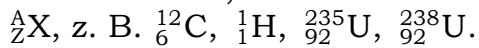
Bezeichnet man die Kernladungszahl (Zahl der Protonen) mit Z und die Zahl der Neutronen mit N , so gilt für die sog. Massenzahl A

$$A = Z + N.$$

Für die tatsächliche Masse eines Atomkerns gilt dann näherungsweise

$$m = A \cdot u.$$

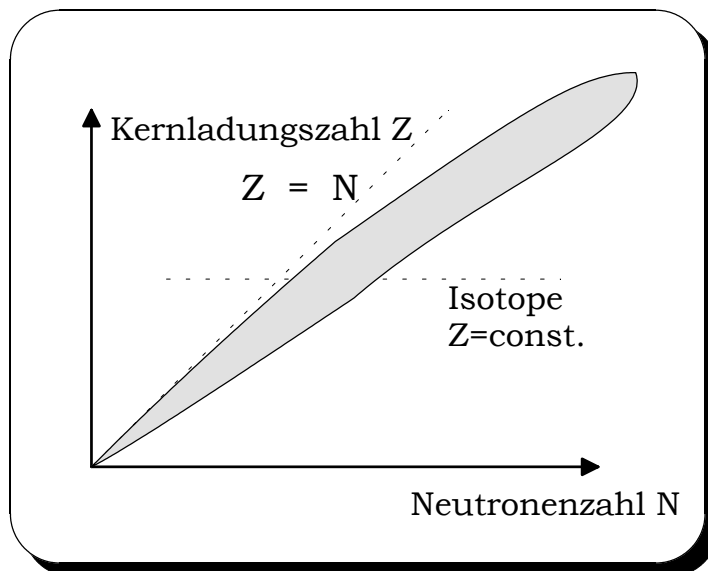
Für die Kennzeichnung der wichtigsten Daten eines Kerns hat sich folgende Nomenklatur eingebürgert: Links über dem Namen des Elements steht die Massenzahl A , links unter dem Kern die Kernladungszahl Z :



Die Nuklidkarte

Einen Überblick über die bekannten Kerne zeigt die sog. Nuklidkarte. In einer Zeile stehen alle Kerne mit gleicher Kernladungszahl, aber verschiedenen Neutronenzahlen, die Isotope (ἴσος, griech.; gleich, und τόπος, griech.; Ort). Alle neutralen Atome mit gleichen Kernladungszahlen haben dieselbe Elektronenanzahl und gleiches chemisches Verhalten. Isotope unterscheiden sich nur in der Neutronenzahl N und damit auch in der Massenzahl A . Diese sind weitere Ordnungskriterien. Entsprechend heißen Kerne mit gleichem N Isotone und Kerne mit gleichem A Isobare.

Skizze:



Die Nuklide sind durch verschiedene Farben gekennzeichnet, die die Stabilität anzeigen (schwarz) oder die Art des radioaktiven Zerfalls. Bei den stabilen Nukliden ist der Prozentanteil des Vorkommens, bei den radioaktiven die Halbwertszeit und die Energien der emittierten Strahlung angegeben.

Die stabilen Nuklide erstrecken sich in der Nuklidkarte von links unten nach rechts oben. Sind bei den leichteren Nukliden N und Z annähernd gleich, so überwiegt bei den schwereren Nukliden eindeutig die

Neutronenzahl. Dadurch vergrößert sich nämlich der mittlere Abstand zwischen zwei Protonen, ihre elektrostatische Abstoßungskraft wird durch zwischenliegende Neutronen "ausgedünnt". Kerne bleiben dann bis $Z = 92$ stabil.

Isotopentrennung

Die in der Natur vorkommenden Elemente sind Gemische stabiler Isotope. Die Darstellung der einzelnen Isotope ist in naturwissenschaftlicher wie in technischer Hinsicht von großem Interesse.

Wegen der gleichen chemischen Eigenschaften der Isotope eines Elements scheiden chemische Prozesse zur Isotopentrennung aus. Es eignen sich nur physikalische Eigenschaften, die von der Masse abhängen. Entsprechende Geräte müssen außerdem sehr empfindlich sein, da z. B. bei den Isotopen ^{238}U und ^{235}U der Massenunterschied nur 1,2 % beträgt.

Im Grunde ist jeder Massenspektrograph ein Gerät zur vollständigen Isotopentrennung. Hierbei werden Ionen gleicher spezifischer Ladung, bei Isotopen also auch gleicher Masse, auf einer Stelle einer photographischen Platte vereinigt.

Isotope lassen sich auch durch Diffusion trennen. Soll zum Beispiel ein Gasgemisch aus zwei verschiedenen Isotopen, das sich im thermischen Gleichgewicht befindet, getrennt werden, so gilt, da die mittleren kinetischen Energien der Teilchen beider Sorten gleich sind,

$$\frac{1}{2} \cdot m_1 \cdot v_1^2 = \frac{1}{2} \cdot m_2 \cdot v_2^2.$$

Daraus folgt, dass die mittleren Geschwindigkeiten den Quadratwurzeln aus den Massen umgekehrt proportional sind:

$$\frac{v_1}{v_2} = \sqrt{\frac{m_2}{m_1}}.$$

Daher werden die leichteren Teilchen bei der Diffusion vorlaufen und die schwereren zurückbleiben.

Bereits 1896 wurde von Raleigh auf die Möglichkeit der Trennung von Gemischen zweier Gase auf dem Weg der Diffusion durch poröse Wände hingewiesen.

In der Praxis erreicht man beste Ergebnisse durch die Hintereinanderschaltung von Trennzellen. So lässt man z. B. zur Gewinnung von ^{235}U UF_6 Tausende von Diffusionskaskaden durchlaufen.