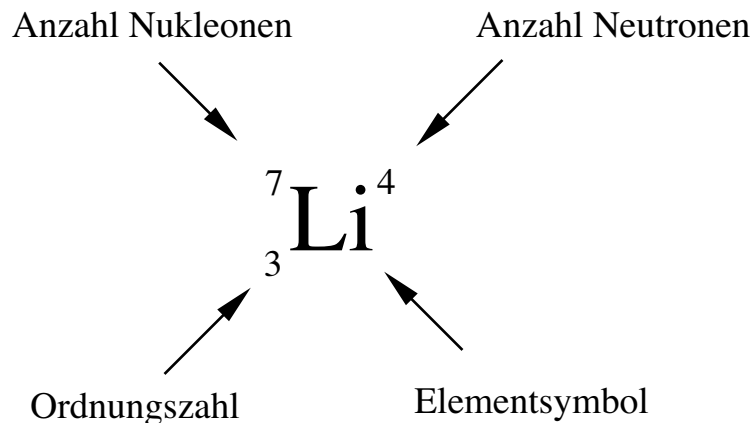


Aufbau und Eigenschaften der Atomkerne

Atomkerne sind aus Protonen und Neutronen zusammengesetzt, die durch sehr starke Kräfte (Kernkräfte) zusammengehalten werden. Es gibt stabile Kerne und instabile (radioaktive). Neutronen sind nur im Kernverband stabil. Freie Neutronen hingegen zerfallen mit einer Halbwertszeit von 10,25 Minuten in ein Proton, ein Elektron und ein Antineutrino. Freie Protonen sind vermutlich stabil. Ihre Halbwertszeit ist jedenfalls grösser als 10^{29} Jahre. Protonen tragen eine positive Elementarladung, Neutronen sind ungeladen. Protonen und Neutronen bezeichnet man als Nukleonen.

Eine Kernsorte mit einer bestimmten Anzahl Protonen und Neutronen bezeichnet man als Nuklid. Man bezeichnet die Ordnungszahl mit Z , die Anzahl Neutronen mit N und deren Summe, die Massenzahl oder Anzahl Nukleonen mit A . Für Nuklide hat sich die folgende Schreibweise eingebürgert:



Diese Darstellung ist redundant. Die Anzahl Neutronen wird meist weggelassen, da sie durch die Differenz der anderen beiden Zahlen gegeben ist. Ebenso verzichtet man meist auf die Angabe der Ordnungszahl, weil durch sie das Elementsymbol definiert wird. Der Einfachheit halber wird auch oft die Schreibweise Li-7 verwendet. Dadurch vermeidet man die hoch- und tiefgestellten Indizes.

So wie die chemischen Elemente im Periodensystem sinnvoll angeordnet werden können, kennt man auch eine entsprechende Anordnung für die Nuklide. Dabei wird die Anzahl Neutronen in der Horizontalen aufgetragen, die Ordnungszahl in der Vertikalen. Im deutschen Sprachraum wird im Allgemeinen die so genannte "Karlsruher Nuklidkarte" verwendet. Sie wurde letztmals 2006 aufgelegt und ist mittlerweile längst nicht mehr auf dem jüngsten Stand. Es gibt einige hervorragende Websites, die zwar ebenfalls nicht immer korrekt sind, aber laufend aktualisiert werden.

Für die Beziehungen, in denen Nuklide untereinander stehen können, werden die folgenden Begriffe verwendet:

Isotope

Nuklide mit gleicher Ordnungszahl Z . In der Nuklidkarte liegen Isotope auf einer Horizontalen.

Isobare

Nuklide mit gleicher Massenzahl A . In der Nuklidkarte liegen Isobare auf einer Diagonalen von links oben nach rechts unten.

Isotone

Nuklide mit gleicher Neutronenzahl N . In der Nuklidkarte liegen Isotone auf einer Vertikalen.

Isodiaphere

Nuklide mit gleichem Neutronenüberschuss $N-Z$. In der Nuklidkarte liegen Isodiaphere auf einer Diagonalen von links unten nach rechts oben.

Isomere

Vertreter des gleichen Nuklids, aber in unterschiedlichen Energiezuständen.

Oft werden die Begriffe Isotop und Nuklid nicht sauber auseinandergehalten. Die Vorsilbe "iso" bedeutet "gleich", was eine Relation darstellt. Man kann also von Isotopen nur reden, wenn von mehr als einer Kernsorte die Rede ist. Ein Kern allein kann nicht "gleich" sein. Wann immer man nur eine individuelle Kernsorte bezeichnen will, verwende man den Begriff "Nuklid".

Es gibt 80 chemische Elemente, bei denen mindestens ein Nuklid stabil ist. Das schwerste stabile Nuklid ist ^{208}Pb , nachdem im Jahr 2003 entdeckt wurde, dass das bis dahin als stabil angesehene Nuklid ^{209}Bi ein α -Strahler mit einer Halbwertszeit von $2 \cdot 10^{19}$ a ist. Insgesamt sind gegenwärtig 39 Elemente bekannt, bei denen nur radioaktive Nuklide vorkommen (Stand 2010). Die höchste Ordnungszahl ist 118. Das schwerste Nuklid ist $^{294}118$ mit einer Halbwertszeit in der Gegend von 2 ms. Das Element mit der grössten Ordnungszahl, das in der Natur vorkommt, ist Uran mit $Z = 92$, wenn man von Spuren der Nuklide ^{239}Np und ^{239}Pu absieht, die durch Neutronenbeschuss von ^{235}U in natürlichen Kernreaktoren entstehen.

Nuklide mit sowohl gerader Ordnungszahl als auch gerader Anzahl Neutronen sind besonders häufig stabil. Man bezeichnet sie als g,g-Nuklide. Analog dazu haben g,u-Nuklide eine gerade Ordnungszahl und eine ungerade Anzahl Neutronen. Auch die beiden anderen Kombinationen sind bekannt. Eine Zusammenstellung der Häufigkeiten für stabile Nuklide ist aufschlussreich (Stand 2006):

Stabil sind	137	g,g-Nuklide
	51	g,u-Nuklide
	50	u,g-Nuklide
	4	u,u-Nuklide

Es gibt also nur vier stabile Nuklide mit ungerader Ordnungszahl und ungerader Neutronenzahl (und damit gerader Massenzahl), nämlich ${}^2\text{H}$, ${}^6\text{Li}$, ${}^{10}\text{B}$, ${}^{14}\text{N}$. Die Nuklide ${}^{50}\text{V}$, ${}^{138}\text{La}$, ${}^{176}\text{Lu}$ und ${}^{180}\text{Ta}$, ebenfalls u,u-Nuklide, sind metastabil mit Halbwertszeiten von über 10^{10} Jahren.

Form und Grösse der Atomkerne lassen sich aus Streuexperimenten bestimmen. Dabei ist das Ergebnis von der eingesetzten Strahlung abhängig. Elektronen etwa reagieren nur auf Coulombkräfte, während Neutronen nur auf Kernkräfte reagieren. Protonen zeigen beide Wechselwirkungen. Es lässt sich aber festhalten, dass die Dichte der Kerne weitgehend unabhängig vom Nuklid etwa $1,4 \cdot 10^{17} \text{ kg/m}^3$ beträgt. Die Abmessungen der Kerne liegen also etwa vier Grössenordnungen unterhalb jener der Atome, vergleichbar mit einer Fliege in einer Kathedrale. Die Masse der Elektronen ist zudem gegenüber der Kernmasse verschwindend klein. Fast die ganze Masse eines Atoms ist daher im vergleichsweise winzigen Kern konzentriert.

Vergleicht man die Masse eines Atomkerns mit der Masse der Nukleonen, aus denen er zusammengesetzt ist, so stellt man eine Differenz fest. Die Kernmasse ist durchwegs kleiner als die Summe der Nukleonenmassen. Die Differenz bezeichnet man als Massendefekt. Er ist eine Folge der berühmten Äquivalenz von Masse und Energie, die Einstein in seiner speziellen Relativitätstheorie 1905 postuliert hat:

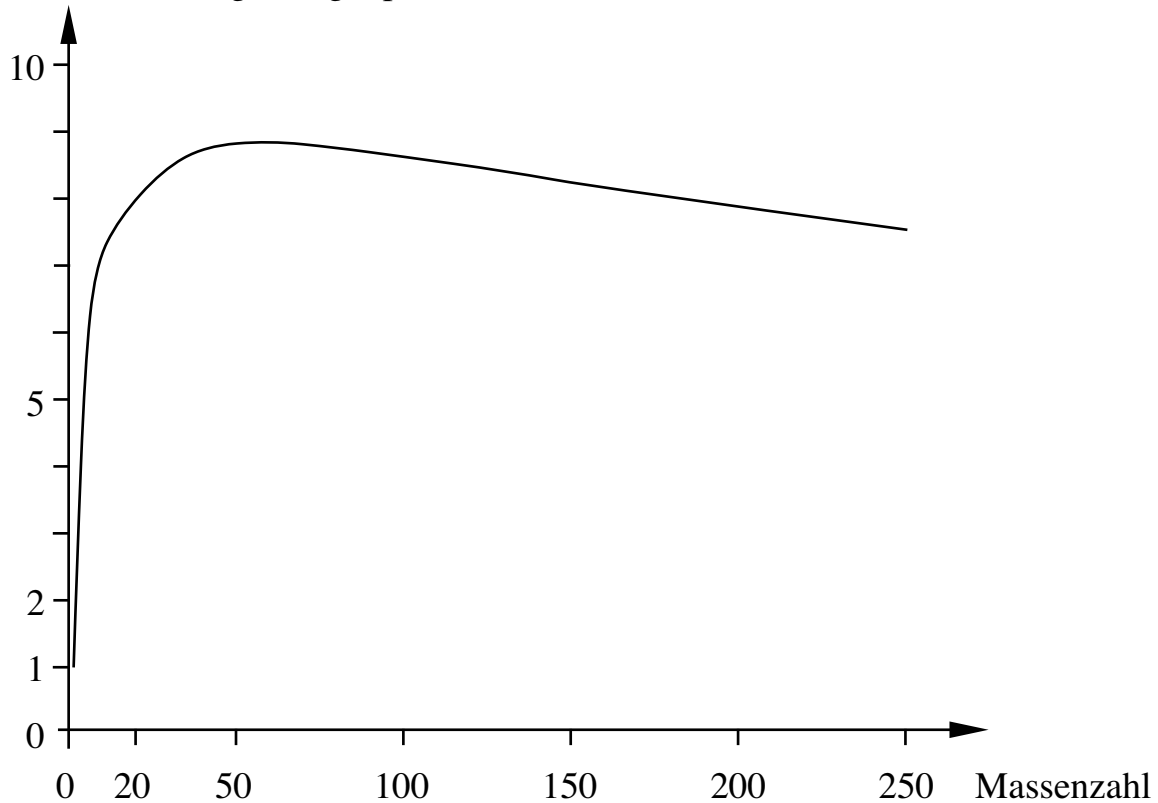
$$\Delta E = \Delta m \cdot c^2$$

Man misst die Masse von Nukleonen in der atomaren Masseneinheit u, die definiert ist als ein Zwölftel der Masse des Nuklids ${}^{12}\text{C}$. Dabei gelten die folgenden Relationen:

$$1 \text{ u} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \hat{=} 931,5 \text{ MeV}$$

Verschmilzt man in Gedanken die Nukleonen zu einem Kern, wird dabei eine grosse Energiemenge frei. Man kann diese Energie als Bindungsenergie bezeichnen. Sie ist so gross, dass die zugehörige Masse messbar ist, im Gegensatz zu den Bindungsenergien zwischen Atomen in einem Molekül. Trägt man für viele Nuklide die Bindungsenergie pro Nukleon gegen die Massenzahl A auf, so ergibt sich grob folgender Verlauf:

Mittlere Bindungsenergie pro Nukleon in MeV



Die Bindungsenergie pro Nukleon ist sehr klein für die leichtesten Nuklide wie ^2H , ^3H und ^3He . Sie nimmt sehr rasch zu mit steigender Massenzahl. Das Maximum liegt im Bereich des Eisens. Danach nimmt die Bindungsenergie wieder langsam ab.

Man kann durch Spaltung schwerer Kerne in kleinere Bruchstücke zusätzliche Bindungsenergie freisetzen. Dies wird in nuklearen Anlagen zur Energieproduktion ausgenutzt, indem die leicht zugänglichen Nuklide ^{235}U und ^{239}Pu gespalten werden (Fissionskraftwerke). Wesentlich mehr Energie lässt sich freisetzen, wenn sehr kleine Kerne zu grösseren verschmolzen werden. Technisch wird dies bisher nur in der Wasserstoffbombe beherrscht. An der Entwicklung von Fusionskraftwerken zur friedlichen Nutzung dieser Art der Energieerzeugung wird seit Jahrzehnten mit enormem Aufwand gearbeitet. Dabei wird seit etwa 50 Jahren vorhergesagt, der erste Demonstrationsreaktor werde innerhalb der nächsten 30 Jahre gebaut.

Kernspin

Atomspektren zeigen eine Hyperfeinstruktur, die 1924 erstmals von Wolfgang Pauli auf eine Kerneigenschaft zurückgeführt wurde, die man als Kernspin bezeichnet. Der Spin ist ein Vektor, den man klassisch als Folge einer Rotationsbewegung von Teilchen oder dergleichen mehr zu verstehen versucht. Solche Modellvorstellungen stossen aber sehr schnell an Grenzen. Es handelt sich letztlich um einen Quanteneffekt, der in der makroskopischen Welt kein Gegenstück hat. Der Spin hat die Einheit eines Dreh-

moments. Die Nukleonen, aus denen der Kern zusammengesetzt ist, besitzen einen intrinsischen Spin \vec{s} mit dem Betrag

$$s = \frac{1}{2} \cdot \hbar \quad \text{wobei } \hbar = \frac{h}{2\pi}$$

mit dem Planckschen Wirkungsquantum $h = 6,624 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$

Im Kernverband kann zusätzlich ein Spin \vec{l} entstehen, den man sich als Folge einer Bahnbewegung der Nukleonen vorstellen kann. Man nennt ihn Bahndrehimpuls. Er hat den Betrag

$$l = \hbar$$

Der Gesamtdrehimpuls eines einzelnen Nukleons im Kern ist die Vektorsumme der einzelnen Spins:

$$\vec{j} = \vec{l} + \vec{s} \quad j = \frac{\hbar}{2}, \frac{3\hbar}{2}, \frac{5\hbar}{2} \dots$$

Den Gesamtdrehimpuls \vec{L} eines Kerns bildet die Vektorsumme über die Gesamtdrehimpulse der Nukleonen:

$$\vec{L} = \sum \vec{j}$$

Der Gesamtdrehimpuls ist offensichtlich gequantelt. Beobachtbar ist die Projektion des Momentvektors auf eine vorgegebene Achse, meist als z-Achse definiert:

$$L_z = \hbar \cdot m_l$$

Die Magnetquantenzahl m_l kann nur eine bestimmte Anzahl Werte annehmen:

$$m_l = -l, -l+1, -l+2, \dots, l \quad \text{total } 2l+1 \text{ Werte}$$

Die Spinquantenzahl l ist eine kernspezifische Grösse. Sie ist ein ganzzahliges Vielfaches von $\frac{1}{2}$.

Man stellt fest, dass alle Kerne mit gerader Nukleonenzahl eine geradzahlige Spinquantenzahl haben. Man kann das verstehen, indem man annimmt, dass die Nukleonen im Kern Paare bilden und sich mit ihren intrinsischen Spins antiparallel ausrichten. Das Analoge geschieht mit den Elektronen in der Atomhülle. Das Pauli-Prinzip gilt also auch im Kern für die Nukleonen.

Für g,g-Kerne im Grundzustand ist $I = 0$. Die g,u-Kerne und u,g-Kerne haben eine halbzahlige Spinquantenzahl.

Magnetisches Dipolmoment

Kerne mit einem Spin besitzen ein magnetisches Dipolmoment $\vec{\mu}$.

$$\vec{\mu} = \gamma \cdot \vec{L}$$

Das gyromagnetische Verhältnis γ ist für jede Kernsorte eine individuelle Konstante. Man kann sich vorstellen, dass rotierende Ladung für das Moment verantwortlich ist. Allerdings besitzen auch Neutronen ein magnetisches Moment, was man allenfalls mit der Quarkstruktur des Neutrons verstehen kann. Modellvorstellungen aus der klassischen Physik stossen schnell an Grenzen.

In einem äusseren Magnetfeld wird die Energie eines Kerns in $2I+1$ Niveaus aufgespalten, wodurch Kernresonanz-Experimente möglich werden. Jedes Niveau ist durch ein m_I charakterisiert. Daher die Bezeichnung Magnetquantenzahl für m_I .

Elektrisches Quadrupolmoment

Kerne mit einer Spinquantenzahl $I \geq 1$ haben ein elektrisches Quadrupolmoment. Es ist ein Mass für die Abweichung von der Kugelsymmetrie der Ladungsverteilung. Weder magnetische noch elektrische Momente haben in der Radiochemie eine grosse Bedeutung.

Parität

Kann man den Spin eines Teilchens noch einigermaßen durch ein makroskopisches Drehmoment verstehen, so gibt es für die Parität keinerlei Gegenstück in der klassischen Physik. Dennoch ist die Parität eine wichtige Grösse zur Charakterisierung eines Kernzustandes. Man definiert die Parität eines Teilchens durch das Verhalten seiner Wellenfunktion Ψ :

$$\Psi(-x,-y,-z) = \Psi(x,y,z) \quad \text{Parität gerade oder positiv}$$

$$\Psi(-x,-y,-z) = -\Psi(x,y,z) \quad \text{Parität ungerade oder negativ}$$

Die Parität von Elektron, Nukleonen und Neutrino ist gerade. Das Photon hat eine ungerade Parität. Man findet die Parität eines Mehrteilchensystems, indem man die Einzelparitäten (positiv oder negativ) multipliziert.

Man bezeichnet die Parität eines Teilchens im allgemeinen zusammen mit dem Spin. Dabei hängt man der Spinquantenzahl I ein "+" oder "-" an. Die Bezeichnung $2+$ bedeutet also eine Spinquantenzahl von 2 und eine gerade Parität.

Kernmodelle

Der Aufbau von Atomkernen ist einiges komplizierter als jener der Atomhülle. Für letztere steht mit der Quantenelektrodynamik eine in sich geschlossene Theorie zur Verfügung. Innerhalb von Kernen wirken aber neben der elektromagnetischen auch noch die starke und die schwache Wechselwirkung. Eine akzeptierte Theorie zur vollständigen Beschreibung aller drei Wechselwirkungen gibt es bis heute nicht. Man behilft sich mit Modellen, von denen jedes einige Eigenschaften der Kerne gut beschreiben kann. Kein Modell kann aber alle Eigenschaften befriedigend erklären. Von den gängigsten Modellen seien zwei einfache kurz erwähnt.

Schalenmodell

In Anlehnung an das Bohr'sche Atommodell bewegen sich die Nukleonen im Kern auf Bahnen um ein Zentrum. Vollständig gefüllte Schalen bedeuten grosse Stabilität. Das Modell erklärt die Tatsache, dass Kerne besonders stabil sind, wenn ihre Protonen- oder Neutronenzahl einer sogenannten magischen Zahl entspricht. Wenn sogar beide Zahlen magisch sind, ist die Stabilität ganz besonders gross. Magische Zahlen sind 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126, 152, 184. Das schwerste stabile Nuklid, ^{208}Pb , ist doppelt magisch. Es wird vermutet, dass sich das Nuklid $^{126+184}126$ durch besondere Stabilität auszeichnet. Alle Versuche, es künstlich herzustellen oder in der Natur nachzuweisen, sind allerdings bisher gescheitert.

Tröpfchenmodell

Der Kern wird als Flüssigkeitstropfen verstanden. Vorstellungen aus der makroskopischen Welt werden grosszügig auf den Atomkern übertragen. Mit diesem sehr einfachen Modell, das auf Bethe und Weizsäcker zurückgeht, lassen sich Kollektiveigenschaften des Kerns gut beschreiben. Dazu gehören etwa die Bindungsenergie pro Nukleon und die Stabilität gegenüber Spontanspaltung. Die Bindungsenergie eines Kerns wird durch eine Summe von Einzeleffekten beschrieben:

$$E = E_V + E_C + E_O + E_S + E_P$$

Ein Volumenterm beschreibt die Anziehung der Nukleonen durch Kernkräfte. Man kann die Anzahl Nukleonen A als Kernvolumen verstehen.

$$E_V = -aA \qquad a = 14,1 \text{ MeV}$$

Ein Coulombterm beschreibt die elektrostatische Abstossung der Protonen. Man kann den Nenner als Mass für den Kernradius verstehen:

$$E_C = b \frac{Z^2}{\sqrt[3]{A}} \qquad b = 0,585 \text{ MeV}$$

Ein Oberflächenterm berücksichtigt, dass Nukleonen auf der Oberfläche nur von einer Seite gebunden sind. Man kann den Wurzelausdruck als Mass für die Kernoberfläche verstehen.

$$E_O = c \sqrt[3]{A^2} \quad c = 13,1 \text{ MeV}$$

Ein Asymmetrieterm berücksichtigt den steigenden Neutronenüberschuss (N-Z) bei ansteigender Ordnungszahl. Der Neutronenüberschuss wirkt destabilisierend.

$$E_s = d \frac{(N - Z)^2}{N + Z} \quad d = 19,4 \text{ MeV}$$

Ein Paarungsterm schliesslich beschreibt die grössere Stabilität von g,g-Kernen gegenüber den anderen Kombinationen:

$$E_p = \frac{e}{A} \quad e = \begin{array}{lll} -135 \text{ MeV} & (\text{g,g}) & 0 \text{ (g,u), (u,g)} \\ & & 135 \text{ MeV (u,u)} \end{array}$$