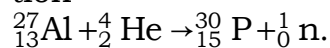
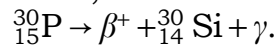

6.8 β^+ -Zerfall, K-Einfang; Teilchen und Antiteilchen

β^+ -Zerfall

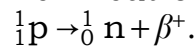
Heute kennt man viele Radioisotope (künstlich radioaktive Isotope), die beim Zerfall ein Positron, ein Teilchen, das dieselbe Masse, aber entgegengesetzte Ladung wie das Elektron hat, emittieren (β^+ -Zerfall). Den ersten derartigen Prozess entdeckte das Ehepaar Joliot bei der Untersuchung der Kernreaktion



Der entstehende Radiophosphor zerfällt mit der Halbwertszeit von $T = 2,5$ min unter Emission eines Positrons in einen stabilen Si-Kern:

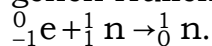


Dieser Zerfall entsteht durch Umwandlung eines Kernprotons in ein Kernneutron unter Emission eines Positrons:



K-Einfang

Neben den beiden β -Zerfällen gibt es noch eine Kernreaktion, die zu einer Verminderung der Kernladungszahl führt, den Elektroneneinfang. Diesen Prozess deutet man als Umwandlung eines Kernprotons mit einem eingefangenen Hüllenelektron zu einem Kernneutron:



Die Wahrscheinlichkeit für den Elektroneneinfang wächst mit abnehmendem Bahnradius; sie ist daher für Elektronen der K-Schale am größten. Der Elektroneneinfang führt zu einem Loch in der betreffenden Schale der Hülle. Dieses wird entweder strahlungslos aufgefüllt (Auger-Effekt), meist aber unter Aussendung der charakteristischen Röntgenstrahlung des Tochterkerns.

Anmerkungen:

1. In den nachfolgenden Kapiteln wird noch genau besprochen werden, dass alle drei β -Zerfälle nur durch Einführung eines weiteren Teilchens, des Neutrinos, befriedigend gedeutet werden können.
2. Ebenfalls in den nächsten Kapiteln wird darauf eingegangen werden, dass wohl der Elektroneneinfang, nicht aber der Zerfall eines Protons in ein Elektron und ein Positron energetisch möglich ist.

Teilchen und Antiteilchen

Im Kernfeld kann aus einem energiereichen γ -Quant ein Elektron-Positron-Paar entstehen, wobei die Masse der beiden neu gebildeten Teilchen nach $W = m \cdot c^2$ aus der Quantenenergie stammt. Andererseits kann auch der umgekehrte Vorgang, die Zerstrahlung eines abgebremsten Positrons mit einem eingefangenen Elektron in zwei γ -Quanten, beobachtet werden.

Theoretisch wurde schon vor der Entdeckung des Positrons vorausgesagt, dass auch zu anderen Elementarteilchen sog. Antiteilchen existieren, die aus Quanten hoher Energie entstehen. Man vermutete, dass es möglich sein sollte, auch Zwillinge aus positiven und negativen Protonen zu erhalten, wenngleich der dafür nötige Energieaufwand bedeutend höher ist. Man erhielt derartige Zwillinge beim Beschuss von Kupfer mit höchstenergetischen Protonen. In den entstandenen Kerntrümmern fand man unter je 105 μ -Mesonen 2 Antiprotonen. Sie entstehen nach der Gleichung $p^+ + \text{Kern} \rightarrow p^+ + p^+ + p^- + \text{Kern}$, indem die kinetische Energie des aufgeschossenen Protons sowohl Ruheenergie als auch kinetische Energie des Protonenpaares zu decken hat.

Aufgrund der experimentellen Ergebnisse lassen sich folgende Sätze formulieren:

1. Zu jedem Teilchen gibt es ein Antiteilchen.
2. Teilchen und Antiteilchen haben genau gleiche Masse und entgegengesetzte elektrische und magnetische Momente.
3. Teilchen und Antiteilchen entstehen auf dem Wege der Paarbildung im Kernfeld und zerstrahlen unter Freiwerden einer ihrer Masse entsprechenden Energiemenge.
4. Jede bei einem System von Teilchen mögliche Reaktion läuft mit gleicher Wahrscheinlichkeit auch bei dem System der entsprechenden Antiteilchen ab.
5. Eine für Elementarteilchen gültige Reaktionsgleichung ergibt eine neue gültige Gleichung, wenn ein Teilchen als Antiteilchen auf die andere Gleichungsseite übergeführt wird (vorausgesetzt, dass dieser Prozess auch energetisch möglich ist).
6. Die algebraische Summe von Teilchen und Antiteilchen muss auf beiden Seiten der Reaktionsgleichung gleich sein, wobei die Antiteilchen bei der Addition negative Vorzeichen erhalten.

Nach den skizzierten Sätzen muss z. B. auch ein Antineutron existieren.

Paarbildung und Zerstrahlung

Die Frage, ob Energie nach der Einsteinschen Gleichung $W = m \cdot c^2$ vollständig in Masse verwandelt werden kann und umgekehrt, wurde durch Experimente im Jahr 1932 geklärt. Im Coulombfeld eines Kerns kann aus einem energiereichen γ -Quant ein Elektron-Positron-Paar entstehen. Der Energiesatz liefert

$$W = h \cdot f = 2 \cdot m_{e,0} \cdot c^2 + W_{\text{kin,ges}} = 2 \cdot m_{\text{rel}} \cdot c^2.$$

Das γ -Quant muss also mindestens die doppelte Ruheenergie eines Elektrons ($1,02 \text{ MeV} = 2 \cdot 510 \text{ keV}$) haben, um die Paarbildung auslösen zu können.

Die Paarbildung erfordert einen dritten Stoßpartner. Es lässt sich nämlich ein Bezugssystem angeben, in dem der Gesamtimpuls von Elektron und Positron Null ist. Vor der Paarbildung wäre aber der Gesamtimpuls (= Quantenimpuls) von Null verschieden, da das Quant in jedem Bezugssystem die Geschwindigkeit c und damit einen von Null verschiedenen Impuls $p = \frac{hf}{c}$ hat. Um den Impulssatz zu erfüllen, muss das Quant Impuls noch anderweitig abgeben, etwa an einen Kern. Ohne einen solchen Stoßpartner - also im Vakuum - ist Paarbildung unmöglich.

Die Paarbildung ist umkehrbar. Das radioaktive Na-22 etwa liefert Positronen. In Materie werden diese fast ganz abgebremst und können mit Elektronen reagieren und Photonen bilden. Die abgebremsten Positronen und die ruhenden Elektronen haben im Laborsystem die Impulssumme Null, so dass mindestens 2 Photonen entstehen müssen, um den Impulssatz zu retten.

Zusammenfassung: Ein Quant mit der Energie $h \cdot f > 2 \cdot m_{e,0} \cdot c^2 = 1,02 \text{ MeV}$ kann in Materie verschwinden und ein Elektron-Positron-Paar bilden. Die Ruhemasse des Paares ist der Energie $1,02 \text{ MeV}$ äquivalent; die restliche Quantenenergie gibt dem Paar kinetische Energie. Ein Positron kann mit einem Elektron zerstrahlen. Dabei bilden sich mindestens zwei Quanten. Bei solchen Umwandlungen von Teilchen gelten die Erhaltungssätze für Energie, Impuls und Ladung.