B) Fortsetzung

Es gibt zwei β–Zerfälle. Beide male geht es in Richtung der stabilen Kern auf der 1. WH.
Beide male ist ein Neutrino beteiligt:

Beim β^- - Zerfall wird ein Neutron n zu einem Proton p und es entsteht ein $\beta^- = {}^{0}_{-1}e$ = Elektron.

Die genaue Gleichung lautet $\boxed{\beta^-:\ {}^{1}_{0}n \rightarrow {}^{1}_{1}p + {}^{0}_{-1}e + \overline{\nu}}$

Beim β^+ - Zerfall wird ein Proton p zu einem Neutron n und es entsteht ein $\beta^+ = {}^{0}_{1}e$ = Positron.

Die genaue Gleichung lautet $\boxed{\beta^+:\ {}^{1}_{1}p \rightarrow {}^{1}_{0}n + {}^{0}_{1}e + \nu}$

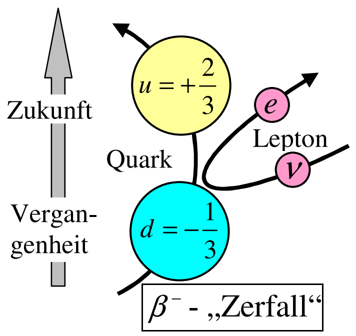
Proton und Neutron setzten sich zusammen aus Quarks *Down* = $\boxed{d}$ und *Up* = $\boxed{u}$.

Es gilt $p = \boxed{u}\boxed{u}\boxed{d}$ und $n = \boxed{u}\boxed{d}\boxed{d}$. Was geschieht mit den Quarks bei den β–Zerfälle?

β^-: $\boxed{d}$ wird zu $\boxed{u}$, dabei entsteht β^- = Elektron *und* ein $\overline{\nu}$. Also: $\beta^-:\ d \rightarrow u + {}^{0}_{-1}e + \overline{\nu}$

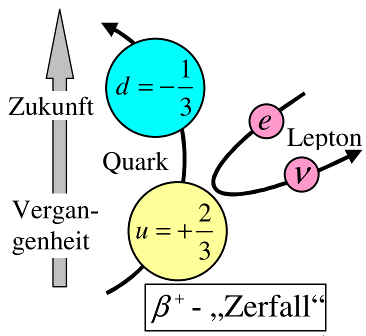
β^+ : $\boxed{u}$ wird zu $\boxed{d}$, dabei entsteht β^+ = Positron *und* ein ν . Also: $\beta^+:\ u \rightarrow d + {}^{0}_{1}e + \nu$.

Jetzt kann man sagen, dass das Antineutrino $\overline{\nu}$ ein in der Zeit rückwärts laufendes Neutrino ν ist und dass das Positron ein in der Zeit rückwärts laufendes Elektron ist. Dann stellen sich die β - Zerfälle als *Stöße* mit Eigenschaftsaustausch dar: $\beta^-:\ d + \overline{\nu} \rightarrow u + e$ und $\beta^+:\ u + \overline{e} \rightarrow d + \nu$



Das neutrale Neutrino kommt aus der Zukunft.

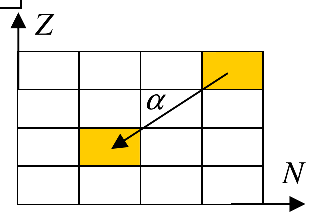
Es nimmt dem d - Quark eine Minusladung und fliegt als negatives Elektron in die Zukunft davon.



Das negative Elektron kommt aus der Zukunft.

Es gibt dem u - Quark seine Minusladung und fliegt als neutrales Neutrino in die Zukunft davon.

α - Zerfall: Für große Kerne (am Ende der Isotopentabelle) kommt es auch zum α-Zerfall, bei welchen ein stabiler Heliumkern ${}^{4}_{2}$He abgesprengt wird. In der Tabelle wandert der Kern dabei um zwei Plätze nach links *und* um zwei Plätze nach unten.



1) Radioaktivität = „Strahlungs“aktivität.

Radioaktive *Strahlen* sind eine sprachliche Tautologie = „weißer Schimmel“. Gemeint sind diejenigen Bestandteile, welcher ein instabiler Kern bei der Kernumwandlung *abstrahlt*.

a) α -Strahlung entsteht beim α -Zerfall.

α -Strahlung besteht aus α-Teilchen = Heliumkern ${}^{4}_{2}$He .

Das α-Teilchen ist daher vergleichsweise massereich und von „großem“ Durchmesser. Seine elektrische Ladung beträgt $+2e$ (doppelte Elementarladung).

Abschirmung: Auf Grund seiner Größe verfängt sich das α-Teilchen beim Durchtritt durch andere Materie schnell.
Es kann daher durch ein Stück *Pappe* abgefangen werden.

Ablenkung: Im Kondensator werden α-Teilchen zum Minuspol abgelenkt.
Die magnetische Ablenkung per Lorentzkraft: Rechte Drei-Finger-Regel.

Gleichung: ${}^{A}_{Z}\text{X} \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2}\text{Y} + {}^{4}_{2}\text{He} + (\gamma)$

Beispiele: ${}^{226}_{88}\text{Ra} \rightarrow {}^{222}_{86}\text{Rn} + {}^{4}_{2}\text{He} + (\gamma)$; Ra = Radium; Rn = Radon

${}^{222}_{86}\text{Rn} \rightarrow {}^{218}_{84}\text{Po} + {}^{4}_{2}\text{He} + (\gamma)$; Rn = Radon; Po = Polonium

Neben dem Helium fliegt auch noch ein Energiepaket (γ) heraus.

b) $\beta^{\mp}$-Strahlung entsteht beim $\beta^{\mp}$- Zerfall.

Sie besteht aus $\beta^{\mp}$-Teilchen = Elektronen e bzw. Positronen $\overline{e}$ bzw.

$\beta^{\mp}$-Teilchen ist sehr klein, ihre elektrische Ladung beträgt $-e$ bzw. $+e$..

Abschirmung: Auf Grund der kleinen Ausdehnung und der hohen Geschwindigkeit durchschlägt das β^{-}-Teilchen Pappe, bleibt aber bevorzugt in Metallen hängen. 4 *mm* Aluminium reichen zur Abschirmung aus. Das $\beta^{+}=\overline{e}$ zerstrahlt sofort mit einem Elektron der Materie (siehe PET) Magnetische Ablenkung, Lorentzkraft: Linke/Rechte Drei-Finger-Regel.

Gleichung: $\beta^{-}:\ {}^{A}_{Z}\mathrm{X} \rightarrow {}^{A}_{Z+1}\mathrm{Y} + {}^{0}_{-1}\mathrm{e} + (\gamma)$; $\beta^{+}:\ {}^{A}_{Z}\mathrm{X} \rightarrow {}^{A}_{Z-1}\mathrm{Y} + {}^{0}_{1}\overline{\mathrm{e}} + (\gamma)$

Außer dem Elektron fliegt auch noch ein Energiepaket (γ) heraus.

Beispiel: ${}^{198}_{79}\mathrm{Au} \rightarrow {}^{198}_{80}\mathrm{Hg} + {}^{0}_{-1}\mathrm{e} + (\gamma)$; Au = Gold; Hg = Quecksilber

c) γ-Strahlung entsteht beim γ-Zerfall. Sie besteht aus γ-Teilchen = hochenerget. Photonen. γ-Strahlung ist eine elektromagnetische Welle. Sie ist noch energiereicher als Röntgenstrahlung. γ-Teilchen sind wie das Licht elektrisch neutral.

γ-Strahlung entsteht beim Übergang eines angeregten Kerns X^{*} in den Grundzustand X.

In der Isotopentafel *bleibt* der Kern beim γ-Zerfall in seinem Fach, nur * geht weg.

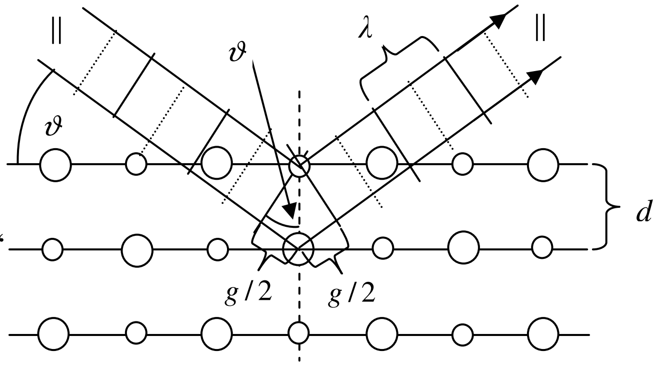
Abschirmung: Weil γ-Strahlung elektrisch neutral ist, wird sie von den Elektronen und Kernen der Atome nicht beeinflusst. Erst nach langer Durchflugstrecke kann sie in einem schweren Atomkern stecken bleiben und diesen in Schwingungen versetzen. Deshalb durchschlägt γ-Strahlung Pappe und leichte Metalle. Sie ist nur durch dicke Schichten von Schwermetallen, wie Blei, abschirmbar.

Gleichung: ${}^{A}_{Z}\mathrm{X}^{*} \rightarrow {}^{A}_{Z}\mathrm{X} + \gamma$.

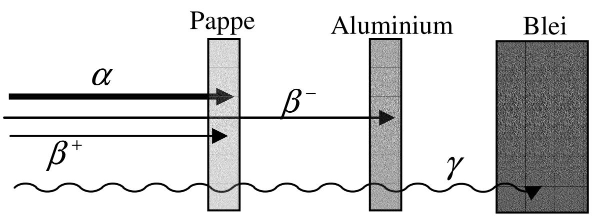
Meist wird der α- und β-Zerfall von γ-Strahlung begleitet.

Ablenkung: Wegen seiner elektrischen Neutralität wird das γ-Quant weder *elektrisch* noch *magnetisch* abgelenkt. Wie kann man trotzdem die Frequenz ermitteln?

Z.B. durch Bragg-Reflexion an einem Kristallgitter: Wie bei der normalen Reflexion gilt „Ausfallwinkel = Einfallwinkel", aber durch Interferenz löschen sich hier die Strahlen in den meisten Richtungen aus. Die Winkel der konstruktiven Interferenz heißen *Glanzwinkel*. Dominant sind die Reflexionen an der 1. und 2. Gitterebene. Ist *d* der Gitterabstand, so ist der Gangunterschied zwischen diesen beiden $g = 2 \cdot d \cdot \sin\vartheta$. Ist dieser gleich einem Vielfachen der Wellenlänge, so „glänzt" es bei ϑ. Damit ergibt sich die Wellenlänge der γ-Strahlung gemäß $\lambda = 2d \sin\vartheta_n / n$

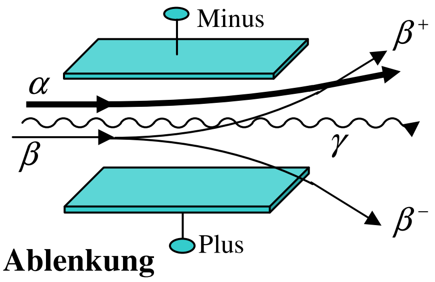


d) Abschirmung durch Material (Zusammenfassung)

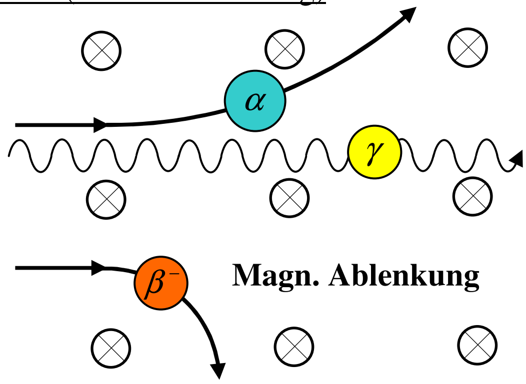


β^{+} besteht aus Positronen, also aus Antimaterie. Da überall Elektronen vorhanden sind, zerstrahlt es bei Berührung mit Materie sofort.

e) Ablenkung im elektrischen und magnetischen Feld (Zusammenfassung)

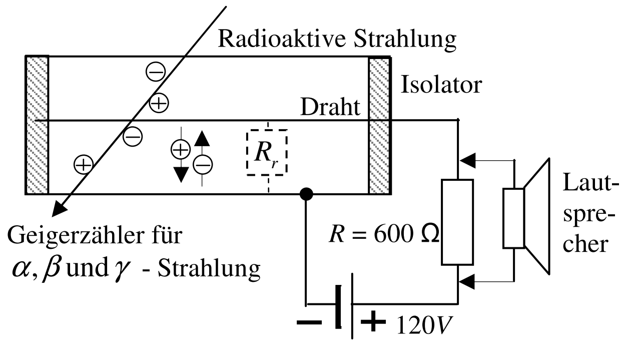


Elektr. Ablenkung



C) Nachweisgeräte

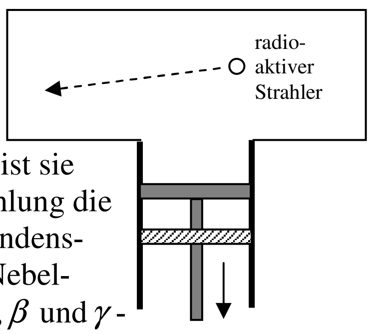
1) Geigerzähler



Durch ein mit Restgas gefülltes Rohr wird mittig ein Draht gespannt. Zwischen Draht und Gehäuse wird über einen Widerstand von z.B. $R = 600\,\Omega$ eine Spannung von z.B. $U = 120\,V$ gelegt. Auf Grund der geringen Ionisation des Gases können nur wenige Ladungsträger zwischen Draht und Gehäuse fließen. Das entspricht einem hohen Widerstand im Rohr von z.B. $R_r = 4200\,\Omega$. Der Stromkreis hat dann den Gesamtwiderstand $600\Omega + 4200\,\Omega = 4800\,\Omega$. Die Spannung verteilt sich entsprechend im Verhältnis 1 : 7 mit $15V + 105V = 120V$ auf den Widerstand R und das Rohr R_r. Fällt radioaktive Strahlung ein, so stehen plötzlich viele Ladungsträger durch Ionisation zur Verfügung. Dadurch sinkt der Rohrwiderstand auf z.B $R_r = 120\,\Omega$ und der Gesamtwiderstand wird $600\Omega + 120\,\Omega = 720\,\Omega$, so dass die Spannungsaufteilung 5 : 1 wird mit $100V$ am Widerstand und $20V$ am Rohr und. Jetzt geschieht folgendes:

2) Weil der Lautsprecher parallel zum Widerstand liegt, steigt die Spannung an ihm schlagartig von $15V$ auf $100V$. Dadurch ist ein deutliches Knacken zu hören.
3) Die Spannung im Rohr fällt von 105 V auf $20V$. Das reicht nicht mehr, um bei weiterem radioaktivem Beschuss eine Entladungslawine auszulösen. Deshalb wird die Röhre inaktiv und ihr innerer Widerstand R_r steigt wieder auf den Anfangswert von $R_r = 4200\,\Omega$.
   Nun kann das nächste ionisierende Strahlungspartikel empfangen werden.

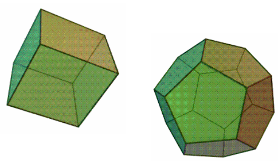
2) Nebelkammer



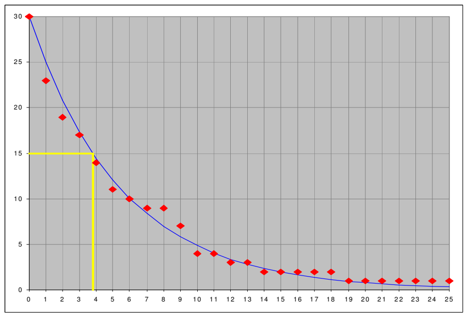
In einer mit Wasserdampf gesättigter Kammer, welche oben einen Glasdeckel besitzt, befindet sich ein radioaktives Präparat. Vergrößert man nun durch plötzliches Herausziehen des Kolbens das Volumen, so kommt es zu einer *adiabatischen* Abkühlung der Luft. Weil kältere Luft weniger Wasserdampf aufnehmen kann, ist sie nun *übersättigt*. Kondensation tritt dort ein, wo die radioaktive Strahlung die Luft ionisiert und dadurch Kondensationskeime erzeugt. An den Kondensstreifen erkennt man daher die Spur der Strahlung. Bringt man die Nebelkammer in ein elektrisches oder magnetisches Feld, so kann man α, β und γ - Strahlen an der unterschiedlichen Krümmung ihrer Kondensspuren unterscheiden. So wurden Elementarteilchen „sichtbar“ gemacht.

D) Halbwertszeit

Der radioaktive Zerfall (α, β und γ) erfolgt nach den Gesetzen der *Quantentheorie*. Diese liefert *hier* nur *zufällige* Ergebnisse, diese unterliegen einer *Wahrscheinlich*keitsverteilung. Zerfalls*zeit*punkt und Lebensdauer sind unbestimmt, es gibt nur Mittelwerte. Ein Kern kann nach einer Sekunde zerfallen oder nach tausend Jahren. Hat man viele Kerne, so wirkt das *Gesetz der großen Zahl*. Wirft man den Würfel z.B. einmal pro Sekunde, so beträgt die Wahrscheinlichkeit pro Sekunde eine 1 zu erhalten $p = 1/6$. So ist es auch beim radioaktiven Atomkern, er „würfelt" pro Zeitspanne Δt einmal auf seinen Zerfall. Hat ein „Würfel" sechs Seiten und auf einer Seite steht



„Zerfall", so beträgt die „Zerfallswahrscheinlichkeit" pro Δt $p = 1/6$. Hat der Würfel zwölf Seiten und auf einer steht „Zerfall", so beträgt die Zerfallswahrscheinlichkeit pro Zeitspanne $p = 1/12$. Jeder radioaktive Zerfall hat einen festen p-Wert. Dieser Wert ändert sich *nicht*. Auch wenn ein Kern Milliarden Zeitschritte ohne Zerfall „überstanden" hat, so nimmt die Wahrscheinlichkeit keinesfalls zu, im folgenden Schritt endlich zerfallen zu müssen: Die Kerne *altern nicht*. Man kann das „Ausscheiden" der Atomkerne gut in der Klasse mit Würfeln nachspielen. Beträgt die anfängliche Anzahl der Kerne (der Schüler) z.B. $N_0 = 30$ und ist die Zerfallswahrscheinlichkeit pro Sekunde $p = 1/6$ („eins" scheidet jeweils aus), so verbleiben im Mittel nach einer Sekunde (nach einem Wurf jedes Schülers) $N_0 \cdot (1-p) = 30 \cdot 5/6 = 25$ Kerne. Nach zwei Sekunden bleiben im Mittel $N_0 \cdot (1-p)^2 = 30 \cdot (5/6)^2 = 20{,}8\overline{3}$, nach n Sekunden $N(n) = N_0 \cdot (1-p)^n$ Kerne übrig. Diese Formel liefert die oben abgebildete Exponentialfunktion.



Wann ist die Hälfte erreicht? Ansatz: $0{,}5 \cdot N_0 = N_0 \cdot (5/6)^n \,\big|\, : N_0 \,\big|\, \log \Rightarrow n = \log 0{,}5 / \log(5/6) \approx 3{,}8$

Die *Halbwertszeit* beträgt bei diesen Beispiel also 3,8 Sekunden.

Allgemein schreibt man $N(t) = N_0 \cdot 0{,}5^{\,t/t_H}$, dabei ist t_H die Halbwertszeit.

Aufgabe: Wie groß ist t_H, wenn nach 2 sec noch $0{,}5\%$ vorhanden ist? Antwort: $t_H = 0{,}262\,s$.

<u>Formel für die Anzahl N der Teilchen:</u> $N(t)$ = Anz. der Teilchen z.Z. t. N_0 = Anz. z.Z. $t = 0$.

<u>Ansatz</u>: $N(t) = N_0 \cdot e^{-k \cdot t}$. Frage: Zu welcher Zeit ist die <u>Hälfte</u> da? $N(t_H) = ½ \cdot N_0$? $½ = e^{-k\cdot t} \,\big|\, \ln$

Ergebnis: $k = \ln(2)/t_H$. Also: $\boxed{N(t) = N_0 \cdot e^{-\ln(2)\cdot t\,/\,t_H}}$. $\boxed{\text{Maßeinheit: } \textit{Keine}}$

<u>Formel für Anzahl A der Ereignisse, also der Anzahl des Knackens im Geigerzähler:</u>
Ein Knacken tritt auf, wenn ein Teilchen zerfällt und die Anzahl N um 1 kleiner wird. A ist daher die negative Änderungsrate von N, also $A(t) = -N'(t)$ (Abl. nach der Zeit!). Nach den Abl.-Regeln gilt dann $A(t) = -N_0 \cdot e^{-\ln(2)\cdot t\,/\,t_H} \cdot \left(-\ln(2)\;/\;t_H\right)$. Da kann man wieder $N(t)$ einsetzen:

$\boxed{A(t) = \left(\ln(2)\;/\;t_H\right) \cdot N(t)}$. $\boxed{\text{Maßeinh.: Ereign}\,/\,s = Bq}$ Bq = Becquerel $= 1/s$ wie Hz = Hertz

<u>Aufgabe</u>: Kalium hat das Atommasse $m_A = 39{,}00984\,u$. Man hat $m = 10\,g$ Kalium. Der Geigerzähler knackt 310 mal / s, also $A_0 = 310\,Bq$. Das radioaktive ${}^{40}_{19}\mathrm{K}$ ist zu $0{,}0118\%$ im natürlichen Kalium enthalten, der Rest ist stabil. <u>Frage</u>: Wie groß ist die Halbwertszeit t_H von ${}^{40}_{19}\mathrm{K}$.

<u>Lösung</u>: Man hat $0{,}000118 \cdot 10g = 0{,}00118g$ ${}^{40}_{19}\mathrm{K}$. Das sind $n_{mol} = \left(0{,}00118g / 39{,}00984\right) mol$ $= 3{,}018 \cdot 10^{-5} mol$. Jedes Mol enthält $N_A = 6{,}023 \cdot 10^{23}$ Teilchen. Also hat man $N_0 = 1{,}818 \cdot 10^{19}$ radioaktive ${}^{40}_{19}\mathrm{K}$ - Isotope. Jetzt $A_0 = \left(\ln(2)\;/\;t_H\right) \cdot N_0$ nach t_H umstellen und $A_0 = 310\,Bq$ und

$$N_0 = 1{,}818 \cdot 10^{19} \text{ einsetzen: } t_H = \frac{\ln(2) \cdot N_0}{A_0} = 4{,}064 \cdot 10^{10}\,s = \frac{4{,}064 \cdot 10^{10}}{365{,}4 \cdot 24 \cdot 3600} a = \underline{\underline{1{,}287 \cdot 10^{9}\ \textit{Jahre}}}$$

<u>Die Gefährlichkeit</u> ist ambivalent: Stoffe mit großer Halbwertzeit haben eine geringe Aktivität, aber eine lange Belastungsdauer. Bei kurzer Halbwertzeit ist es umgekehrt.