

### Lernaufgabe zur Vernichtungsstrahlung:

Die Abb. 1 zeigt einen Ausschnitt aus der Karlsruher

Nuklidkarte mit dem radioaktiven Isotop (Nuklid)  $^{22}_{11}\text{Na}$ .

1. Fassen Sie die Angaben zur Zerfallsart, Halbwertszeit und zu den beobachteten Gamma-Energien zusammen.
2. Formulieren Sie die Reaktionsgleichung für den  $\beta^+$ -Zerfall.

Die Massen der beteiligten Isotope sind:

Na-22	Ne-22
$m = 21,99443 \text{ u}$	$m = 21,99138 \text{ u}$

3. Zeigen Sie durch eine Berechnung des Massendefekts, wie sich die  $\gamma$ -Energie von  $W_\gamma = 1275 \text{ keV}$  ergibt.

Tatsächlich findet sich diese „1275keV-Linie“ im  $\gamma$ -Spektrum dieses Nuklids, wie Abb. 2 zeigt. (Quelle: <http://www.grossberger.net/atomphysik/Gamma/gamma2.htm>)

Daneben findet man aber in Abb. 2 mit hoher Intensität eine  $\gamma$ -Strahlung bei der Energie  $W = 511 \text{ keV}$ . Wenn wir davon ausgehen, dass auch diese Energieabgabe ihre Ursache in einer „Umwandlung von Masse in Energie“ hat, wird die Masse gesucht, die dieser Energieabgabe entspricht.

4. Berechnen Sie die Masse, die einer Energie von  $W = 511 \text{ keV}$  entspricht. Vergleichen Sie diese Masse mit der Masse von Ihnen bekannten Elementarteilchen.

Nachdem auf diese Weise das Elektron als Lieferant der Masse identifiziert wurde, bleibt noch die Frage, was dazu führt, dass es sich plötzlich in Energie umwandelt. Eigentlich sind Elektronen ja stabil.

Aufgrund von Erhaltungssätzen (wie z.B. der Erhaltung der elektrischen Ladung  $Q$ ) muss ein weiterer Partner an dieser Umwandlung beteiligt sein. Da bietet sich das positiv geladene Positron an.

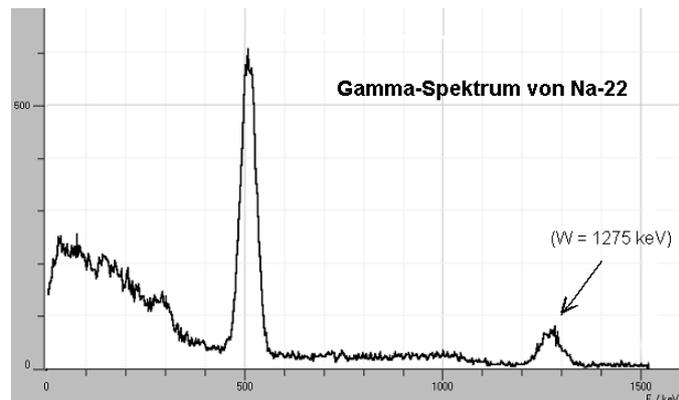
Gemäß der Reaktion  $e^- + e^+ \rightarrow 2\gamma$  entstehen zwei Photonen ( $\gamma$ -Quanten), die sich in entgegengesetzte Richtungen ausbreiten, und von denen eines registriert wird. Die Umwandlung in ein einziges Photon mit der gesamten Energie ist aus Gründen der Impulserhaltung nicht möglich.

Diese charakteristische Strahlung wird auch (ziemlich martialisch) als „**Vernichtungsstrahlung**“ (Annihilationsstrahlung) bezeichnet.

5. Erklären Sie (mit eigenen Worten) die unterschiedlichen Ursachen für die beiden „Peaks“ im Gamma-Spektrum von Na-22.

Hinweis: Die weitere Struktur des Spektrums (Comptonkanten) wird untersucht in den Lehrermaterialien zu Cornelsen „Physik Oberstufe“

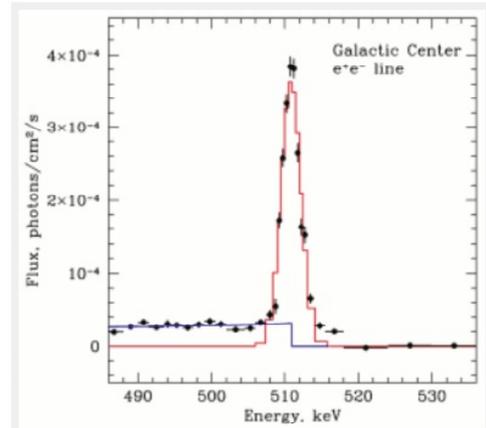
	$\beta^+$ $\beta^+$ 0,83	$\beta^+$ 3,2... $\gamma$ 583,74...	$\beta^+$ 3,1... $\gamma$ 440...	$\beta^+$ 3,3... $\gamma$ (1612...)	$\beta^+$ 3,2	$\beta^+$ 1,2 $\gamma$ 1802; 1132	$10^5 \text{ a}$
1 ns	Mg 22 3,86 s	Mg 23 11,3 s	Mg 24 76,99	Mg 25 10,00	Mg 26 1		
0 s	Na 21 22,48 s	Na 22 2,603 a	Na 23 100	Na 24 20 ms 14,96 h	Na 25 59		
14... s	$\beta^+$ 2,5... $\gamma$ 351...	$\beta^+$ 0,5; 1,8 $\gamma$ 1275 $\sigma_{n,p}$ 28000 $\sigma_{n,\alpha}$ 260	$\beta^+$ 0,43 + 0,1	$\beta^+$ 1,4... $\gamma$ 205; 1369...	$\beta^+$ 3,5 $\gamma$ 975; 585; 1		
9 s	Ne 20 90,48	Ne 21 0,27	Ne 22 9,25	Ne 23 37,2 s	Ne 24 3,0		
	$\sigma$ 0,04	$\sigma$ 0,7	$\sigma$ 0,05	$\beta^+$ 4,4... $\gamma$ 440; 1639...	$\beta^+$ 2,0 $\gamma$ 874 m		
m	F 19 100	F 20 11,0 s	F 21 4,16 s	F 22 4,23 s	F 23 2,		
	$\sigma$ 0,0095	$\beta^+$ 5,4... $\gamma$ 1634...	$\beta^+$ 5,3; 5,7... $\gamma$ 351; 1305...	$\beta^+$ 5,5... $\gamma$ 1275; 2083; 2168...	$\beta^+$ 8,5 $\gamma$ 170 1622		
	O 18	O 19	O 20	O 21	O 22		



Seit es Satelliten gibt, die in der Lage sind,  $\gamma$ -Strahlen aus dem Weltall zu registrieren, kann man ein solches Signal sogar aus dem Zentrum unserer Milchstraße erhalten (Siehe Abb. 3 bzw. Fig.1)

(Quelle: [http://www.mpa-garching.mpg.de/mpa/research/current\\_research/hl2005-5/hl2005-5-en.html](http://www.mpa-garching.mpg.de/mpa/research/current_research/hl2005-5/hl2005-5-en.html))

(Grobe Übersetzung der Legende: Spektrum der  $e^+e^-$ -Vernichtungsstrahlung, die [der Satellit] SPI aus Richtung des Galaktischen Zentrums nach einer Belichtungszeit von 3,5 Mio Sekunden gefunden hat.)

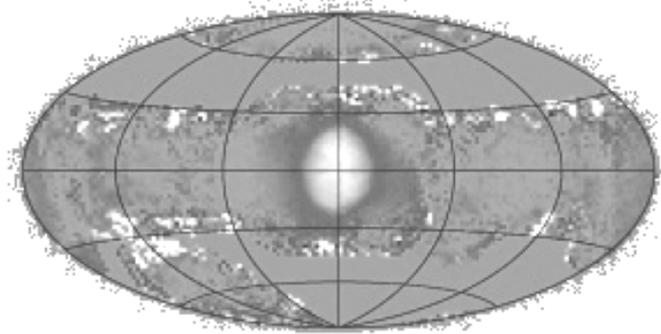


**Fig. 1:** Spectrum of the  $e^+e^-$  annihilation radiation detected by SPI towards the GC region after 3.5 million seconds exposure.

Im nächsten Bild (gleiche Quelle) hat man den gesamten Himmel nach der Vernichtungsstrahlung durchmustert und das Ergebnis in einer „Weltkarte“ dargestellt. Sie ist so orientiert, dass das Zentrum der Milchstraße in der Mitte steht. Unübersehbar ist das helle Maximum in der Mitte.

Es gibt also keinen Zweifel, dass dort Positronen und Elektronen miteinander reagieren, wesentlich mehr als in anderen Teilen der Milchstraße.

Unklar ist allerdings die Ursache dieser galaktischen Positronen...

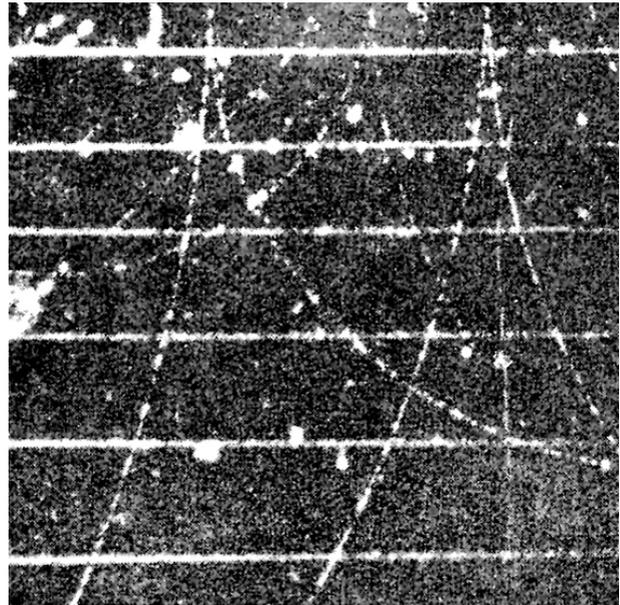


## Umkehrung der Vernichtung

Wie viele Vorgänge im subatomaren Bereich ist die hier geschilderte Reaktion in einem gewissen Rahmen umkehrbar: Ein hinreichend energiereiches Photon kann in der Nähe eines schweren Atomkerns ein Teilchenpaar erzeugen:  $\gamma \rightarrow e^+ + e^-$ .

Abb. 4 (Quelle: <http://www.physicscentral.org/explore/action/antimatter-1.cfm>) zeigt ein solches Experiment, in dem die Wirkung von  $\gamma$ -Strahlung gezeigt ist, die von oben kommend auf eine dünne Metallschicht am oberen Rand des Bildes trifft.

Es ist eine Nebelkammeraufnahme, in der die Bewegung von geladenen Teilchen sichtbar gemacht werden kann. (Die waagrechten Streifen entstehen durch den Aufbau der Kammer, die Flecken sind unvermeidbare Verunreinigungen.)



Die gesamte Apparatur befindet sich in einem kräftigen Magnetfeld  $B$ , das in die Ebene des Bildes hineinzeigt.

- Informieren Sie sich über die Funktion einer Nebelkammer.

Das eigentliche Messergebnis sind die drei V-förmigen Strukturen, jeweils zwei Spuren starten oben gemeinsam und entfernen sich auf (vermutlich) kreisförmigen Bahnen voneinander.

1. Begründen Sie, dass zwei zusammengehörende Spuren zu zwei Teilchen gehören, die entgegengesetzte Ladungen tragen. Erläutern Sie dazu die Regeln, wie geladene Teilchen abgelenkt werden, die sich in einem Magnetfeld  $B$  senkrecht zu den Feldlinien mit der Geschwindigkeit  $v$  bewegen.

Ergebnis ist, dass in der Nähe eines schweren Atomkerns ein hinreichend energiereiches  $\gamma$ -Photon in ein Paar von zusammengehörenden Teilchen umgewandelt werden kann. Elektron und Positron bezeichnet man als Teilchen und Antiteilchen. Der Kern wird bei dieser Reaktion nicht verändert, er ist aber notwendig, da auch bei diesem Prozess der Impulserhaltungssatz gilt.

- Zeigen Sie, dass die elektrische Ladung bei dieser Reaktion erhalten bleibt.
- Die Energieerhaltung gilt in der durch die Relativitätstheorie modifizierten Form. Berechnen Sie die minimale Energie und die maximale Wellenlänge, die ein  $\gamma$ -Photon haben muss, damit es ein Elektron-Positron-Paar erzeugen kann. (Vernachlässigen Sie dabei die kinetische Energie, die der Kern aufnimmt.)

vorher:



nachher:



**Fazit: Paarerzeugung und Vernichtungsstrahlung sind zwei Seiten einer Medaille, der Umwandlung von Energie in Masse.**

Ausblick: Es gibt unterschiedliche Sorten von Mikroobjekten, manche lassen sich in beliebiger Zahl einzeln erzeugen (z.B. Photon), andere müssen paarweise als Teilchen/Antiteilchen entstehen.