

15. Vorlesung

13. 6. 1991.

# Positronenvernichtung

$e^+$  : Antiteilchen des Elektrons.

Entsteht z.B. beim  $\beta^+$ -Zerfall.

Im Festkörper:  $e^+ \div \mu^+ \div p$

(Leichtes H-Isotop).

Methode:  $e^+ + e^- \rightarrow 2\gamma$  ( $3\gamma, \dots$ )

- Aus der
- Zeit des Zerfalls,
  - Richtung der  $\gamma$ -Quanten
  - Energie der  $\gamma$ -Quanten

kann man Rückschlüsse auf die Dichte und die Geschwindigkeit der Elektronen im Festkörper ziehen kann.

Positronen werden im Festkörper innerhalb ca.  $10^{-12}$  s thermalisiert. Danach: Diffusion mit thermischer Energie, später Zerfall.

## 1 $\gamma$ -Annihilation ist unmöglich:

Im Schwerpunktsystem gilt:

$$\text{Energie: } 2m_e c^2 = p_r c$$

$$\text{Impuls: } 0 = p_r$$

Der Rückstoßimpuls könnte auf den Festkörper übertragen werden (à la Mößbauer Effekt), die Rückstoßenergie wäre aber

$$R = \frac{(2m_e c^2)^2}{2Mc^2} = \frac{m_e}{M} 2m_e c^2 \approx 1 \text{ keV}$$

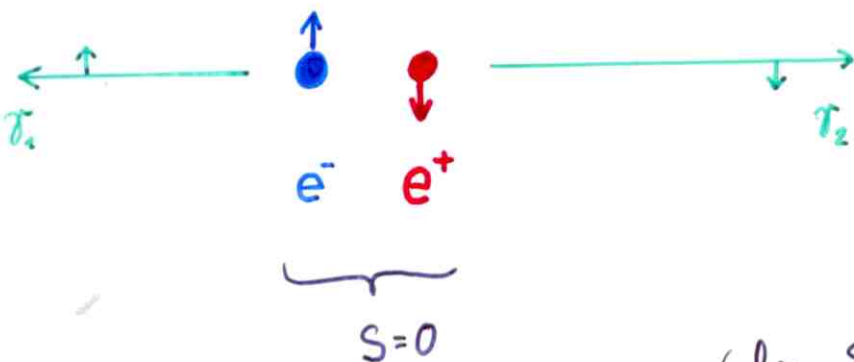
so daß die Wahrscheinlichkeit eines solchen Prozesses

$$f \approx e^{-\frac{R}{\Theta_0}} \approx e^{-10^6}$$

verschwindend klein ist.

## 2 $\gamma$ -Annihilation:

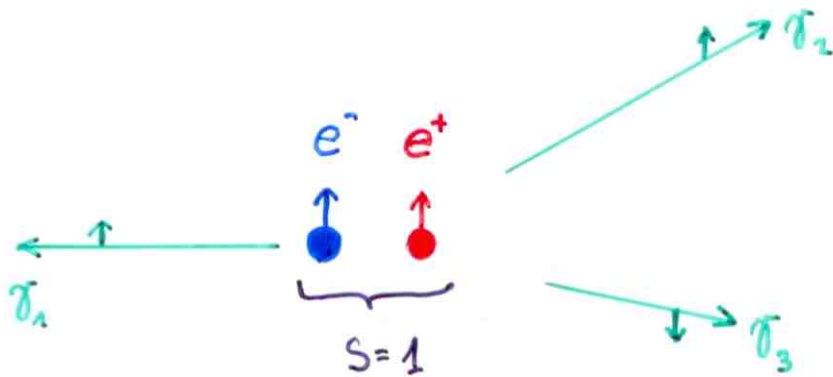
Häufigster Prozess. Voraussetzung:



(für  $S=1$  unmöglich)

## 3 $\gamma$ - Annihilation:

Um Faktor 372 seltener Zerfall, als die 2 $\gamma$ -Annihilation. Voraussetzung:



(für  $S=0$  unmöglich)

## Positronium

Vor dem Zerfall kann ein wasserstoffähnliches gebundenes System gebildet werden:  $e^-e^+$ .

Statistisches Gewicht

Singlett-Zustand (Para-Positronium):  $1^1S_0$  1

Triplet-Zustand (Ortho-Positronium):  $1^3S_1$  3

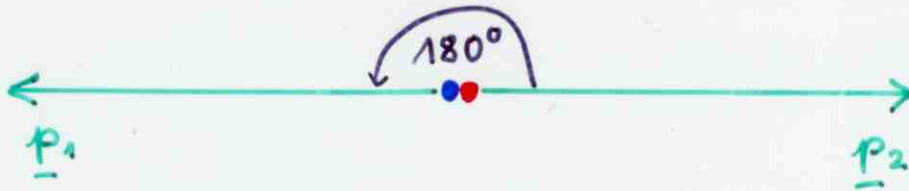
## Zerfall:

	2 $\gamma$	3 $\gamma$
Para-Positronium	125 ps	unmöglich
Ortho-Positronium	< 142 ns (nur im Medium)	142 ns

In Metallen wird kein Positronium gebildet (Abschirmung durch die Leitungselektronen).

# Annihilationswinkelkorrelation beim $2\gamma$ -Zerfall

$2\gamma$ -Annihilation im Schwerpunktsystem:



Energie:  $2m_e c^2 = p_1 c + p_2 c$

Impuls:  $\underline{0} = \underline{p}_1 + \underline{p}_2$



$$\underline{p}_2 = -\underline{p}_1$$

$$p_1 c = p_2 c = m_e c^2 = 511 \text{ keV}$$

Energie der Positronen (thermisch)  $\approx 10 \text{ meV}$  *vernachlässigbar*

Energie der Elektronen ( $\lesssim E_F$ )  $\lesssim 10 \text{ eV}$  *signifikant, aber nicht relativistisch*

Impuls des  $e^+e^-$ -Paares im Laborsystem:  $\underline{p}$

Geschwindigkeit des Schwerpunktsystems im Laborsystem:

$$\underline{v} = \frac{\underline{p}}{2m_e}$$



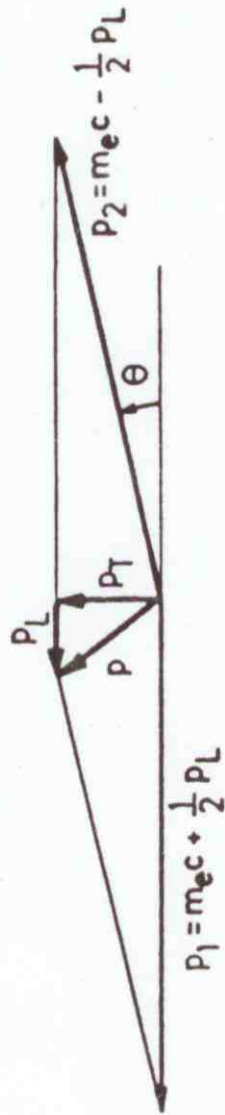


Abb. 9.1: Impulserhaltung bei der  $2\gamma$ -Vernichtung des Positrons.  $\vec{p}$  ist der Impuls des  $e^+e^-$ -Paares und  $p_L$  bzw.  $p_T$  die zugehörige longitudinale bzw. transversale Komponente

Energie des ersten  $\delta$ -Quanten (Doppler Effekt):

$$p_1 c = m_e c^2 \left( 1 + \frac{v_L}{c} \right) =$$
$$= m_e c^2 + \frac{m_e c^2 v_L}{2 m_e c} =$$
$$= m_e c^2 + \frac{1}{2} p_L c$$

L: longitudinaler  
Komponent



Impuls:

$$p_1 = m_e c + \frac{1}{2} p_L$$

und ähnlich:

$$p_2 = m_e c - \frac{1}{2} p_L$$

Abweichung des Korrelationswinkels von  $180^\circ$ :

$$\theta \approx \frac{p_T}{m_e c} \approx 10 \text{ mrad}$$

T: transversaler  
Komponent

Energie der Vernichtungsquanten

$$\Delta E = \pm \frac{v_L}{c} m_e c^2 = \pm \frac{c p_L}{2} \approx 1 \text{ keV}$$

Die Verbreiterung kann mit Halbleiterdetektoren nachgewiesen werden. Information ist ähnlich wie bei Winkelkorrelationsmessungen, Auflösung jedoch deutlich schlechter.

## Lebensdauer des Positrons

Nichtrelativistisch:

Zerfallsrate  $\sim$  Elektronendichte am Positronenort

Das Positron ist eine empfindliche Probe der Elektronendichte in Festkörpern (Leerstellen!).

## Positronenquellen und Meßanordnungen

Quellen:  $^{22}\text{Na}$ ,  $^{55}\text{Co}$ ,  $^{57}\text{Ni}$ ,  $^{58}\text{Co}$ ,  $^{64}\text{Cu}$ ,  $^{68}\text{Ge}$ ,  $^{90}\text{Nb}$

- hohe Ausbeute an  $e^+$ -Strahlung
- hinreichend große Energie der Positronen

## Meßanordnungen:

- Winkelkorrelationsapparatur
- Doppler-Spektrometer
- Lebensdauer-Spektrometer



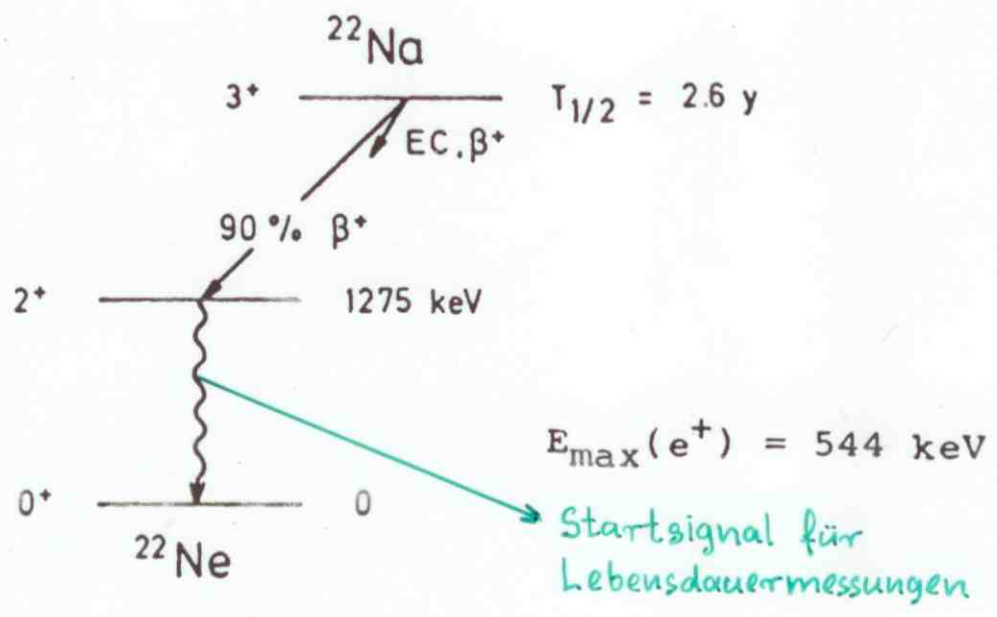


Abb. 9.2: Zerfallsschema von  $^{22}\text{Na}$  (LED 78)

Herstellung:  $^{24}\text{Mg} (d, \alpha) ^{22}\text{Na}$

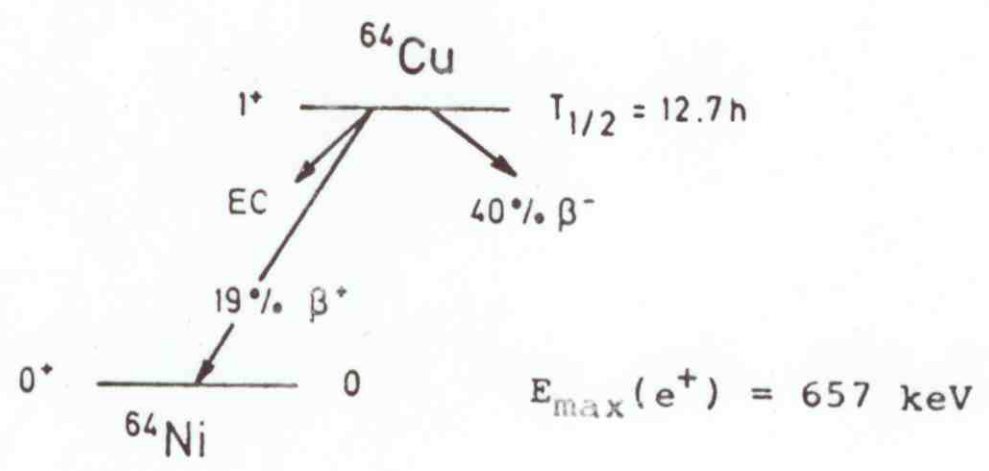


Abb. 9.3: Zerfallsschema von  $^{64}\text{Cu}$  (LED 78)

Herstellung:  $^{63}\text{Cu} (n, \gamma) ^{64}\text{Cu}$

