

MESSUNG DER LEBENSDAUER VON POSITRONEN IN MATERIE

Ausarbeitung von Erik Brambrink

Betreuer: Manfred Mutterer

Ziel des Versuches

In diesem Versuch soll die Lebensdauer von Positronen in Materie gemessen werden. Da es sich bei den zu messenden Zeiten um sehr kurze handelt, kann man bei diesem Versuch auch Erfahrungen für die Messung im ns-Bereich sammeln.

Grundlagen

Ein Positron hat, da es ein Antiteilchen ist, nur eine kurze Lebensdauer, da es sich nach kurzer Zeit mit einem Elektron unter Aussendung von γ -Strahlung vernichtet. Der Zerstrahlungsprozess kann jedoch sehr unterschiedlich verlaufen. Zuerst wird das Positron durch elastische Stöße an Elektronen auf thermische Geschwindigkeit gebremst. Dieser Vorgang dauert typischerweise einige ps. In Metallen zerstrahlen Positronen vorzugsweise durch direkte Stöße mit den freien Elektronen unter Aussendung von zwei entgegengesetzt polarisierten, in entgegengesetzte Richtung „fliegende“ 511 keV- γ -Quanten.

In Isolatoren dagegen können Positronen mit Elektronen eine kurzfristige Bindung, das Positronium, eingehen. In diesem „kreist“ ein Elektron um das Positron gleichsam einem Elektron um ein Proton im Wasserstoffkern. Es gibt zwei Arten von Positronium, Parapositronium und Orthopositronium. Im Parapositronium sind die Spins entgegengesetzt (Gesamtspin 0), im Orthopositronium dagegen gleichgerichtet (Gesamtspin 1). Da es drei Orthopositronium-Zustände aber nur einen Parapositronium-Zustand gibt, werden diese im Verhältnis 3:1 gebildet. Während Parapositronium genauso wie beim direkten Stoß des Positrons in zwei 511 keV- γ -Quanten zerstrahlt, kann Orthopositronium aus Gründe der Spin-Erhaltung nur in drei γ -Quanten, die eine kontinuierliche Energieverteilung haben. Aufgrund dieses komplizierten Zerfalls ist die Lebensdauer von Orthopositronium 1115 mal so lang wie die von Parapositronium. Der Literaturwert für die Lebensdauer von Orthopositronium ist $1,4 \cdot 10^{-7}$ s.

Die Lebensdauer von Orthopositronium hängt jedoch auch von dem es umgebenden Material ab. Das Positronium kann nämlich mit Elektronen aus der Umgebung wechselwirken. Einerseits durch Vernichtung des Positrons durch ein Elektron des Material. Andererseits durch Austausch des Elektrons im Positronium durch ein Elektron des Materie, wodurch wieder Parapositronium gebildet werden kann, was dann wieder schneller zerfällt. So kann eine Lebensdauerbestimmung von Orthopositronium auch zur Bestimmung der Elektronendichte im umgebenden Material benutzt werden.

Versuchsaufbau

Um die Lebensdauer von Positronen zu bestimmen, braucht man ein Signal für die Entstehung des Positrons und ein Signal für dessen Vernichtung. Der Zerfall von ^{22}Na ist für solch eine Mesung gut geeignet, da 5 ps, eine Zeitspanne, die im Vergleich zu den zu messenden zeiten vernachlässigbar ist, nach der Emission des Positrons ein 1275 keV- γ -Quant emittiert wird. Damit haben wir ein Signal für die Entstehung des Positrons (Start-Signal), das auch einen deutlich anderen Energiebereich hat als die bei der Vernichtung entstehenden γ -Quanten. Als Signal für die Venichtung dient die Vernichtungsstrahlung (Stop-Signal). Mit diesen beiden Signalen könnte man dann die Lebensdauer der Positronen messen.

Um die γ -Quanten zu registrieren, wurden in dem Versuch Plastic-Szintillatoren verwendet. Diese zeichnen sich durch eine kurze Abklingzeit aus, was bei der Messung solch kurzer Zeiten wichtig ist. Leider liefert der Szintillator jedoch nur die Compton-Verteilung im Pulshöhenspektrum, man kann also das Start-Signal nicht auf die Totalabsorptionslinie eichen, sondern muß als Schwelle für das Start-Signal etwa 600 keV einstellen. Die Lichtsignale des Szintillators werden wie gewohnt mittels Photomultiplier und Verstärker in elektrische Signale umgewandelt. Damit die Detektoren sich nicht gegenseitig durch Rückstreuungen beeinflussen können, stehen sie zueinander gewinkelt.

Da die Anstiegszeit des Ausgangssignals 5-8 ns beträgt, ist es nötig, mit einem Trigger kürzere Pulse zu erzeugen, mit denen man dann auch präzise Zeitmessungen machen kann. Ein gewöhnlicher Trigger, der nur auf einen Schwellwert anspricht, ist jedoch ungeeignet, da der Triggerzeitpunkt von der Amplitude des Eingangssignals abhängt. Deshalb wurde in diesem Versuch ein Constant Fraction Trigger (CFT) verwendet, dessen Triggerzeitpunkt von der Amplitude nahezu unabhängig ist. Die Arbeitsweise des CFT basiert darauf, daß man den Trigger auslöst, wenn das Signal einen bestimmte Prozentsatz seines Maximalwertes überschreitet. Erreicht wird dieses Verhalten, indem man das Signal teilt und den einen Teil invertiert und abschwächt, den anderen Teil dagegen verzögert. Summiert man nun beide Signal wieder, so ist dessen Nulldurchgang der Zeitpunkt, an dem das ursprüngliche Signal den bestimmte Prozentsatz seines Maximalwertes erreicht hat. Bei geeigneter Einstellung kann man so eine triggerung des Signals erhalten, die von der Amplitude des Signals praktisch unabhängig ist. Die in diesem Versuch verwendeten CFT hatten zusätzlich noch einen Fensterdiskriminator zu Ausblendung der „flachen“ Signale beim Start-Signal und eine Blockierschaltung, die einen zeitlichen Mindestabstand zwischen zwei Signalen einhält, um zu verhindern, daß ein durch die dichte Folge verfälschter Impuls auch registriert wird. Mit diesen Zusatzeigenschaften heißt der Trigger dann „Constant Fraction Differential Diskriminator“ (CFDD).

Mit dem Start-Signal und dem Stop-Signal wird dann ein Zeit-Amplituden-Konverter (tac) versorgt, der die Zeitdifferenz zwischen den beiden Signalen proportional in die Amplitude des Ausgangssignals umwandelt. In der Leitung des Stop-Signals wurde noch eine feste Verzögerung eingebaut. Diese stellt einerseits sicher, daß das Stop-Signal nach dem Start-Signal ankommt, andererseits ermöglicht es die Messung „negativer“ Zeiten und, da es so was nicht gibt, eine Abschätzung für die zufälligen Koinzidenzen. Die Signale des tac werden dann mit einem Vielkanalanalysator ausgewertet.

Versuchsdurchführung

Zuerst einmal wurde eine Zeiteichung vorgenommen. Zu diesem Zweck wurde die Positronenquelle in Aluminium in die Versuchssperatur eingespannt. Im Rahmen unserer Meßgenauigkeit sollte dies eine prompte Kurve liefern. Es wurden dann drei verschiedene Verzögerungen in das Stop-Signal eingebaut (32 ns, 40ns, 48 ns). Mit diesen drei Zeiten können dann die Kanäle des VKA geeicht werden.

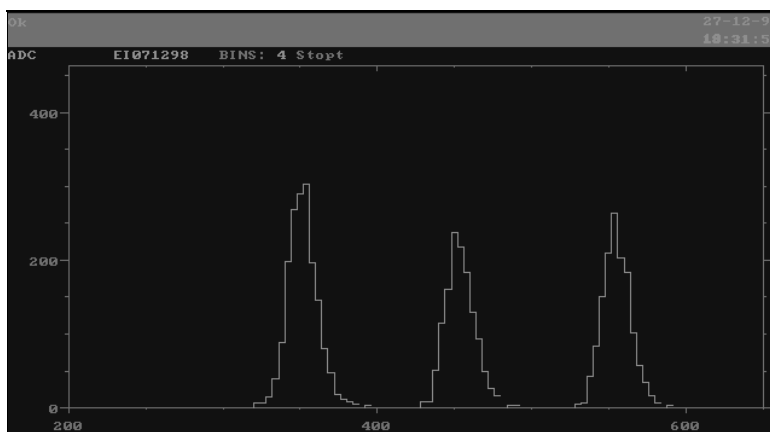
Als zweites wurde die Lebensdauer von Positronen in Teflon über einen Zeitraum von zwei Stunden gemessen.

Abschließend wurde noch einmal eine prompte Kurve mit der Positronenquelle in Aluminium über 43 Minuten aufgenommen, um zu überprüfen, ob die Kurve die gewünschte Gauß-Form hat.

Auswertung

Bestimmung der Zeitauflösung und Zeiteichung

Für die Zeiteichung wurden die Schwerpunkte der drei Peaks bestimmt. Sie liegen bei 351,3 (32 ns), 453,5 (40 ns) und 555 (48 ns). Daraus folgt mittels linearer Regression, daß 1 ns etwa 12,731 Kanälen entspricht. Da später mit einer festen Verzögerung von 32 ns gearbeitet wird, liegt der „Zeitnullpunkt“ auf dem Kanal 351,3. Der Kanal 0 entspricht einer Zeit von -27,6 ns. Als Fehler liefert die Regression 2,5 %.

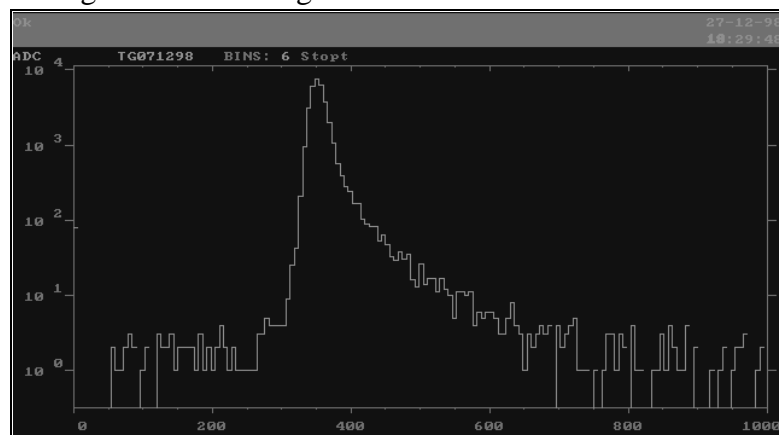


Eichspektrum

Für die Zeitauflösung ist die FWHM entscheidend, da sich zwei Peaks, die enger als die FWHM zusammenliegen, zu einem neuen Peak überlagern und somit nicht mehr auflösbar sind. Bei allen prompten Kurven betrug die FWHM rund 23 Kanäle. Daraus folgt, daß Zeiten, die kleiner als 1,8 ns sind, nicht mehr auflösbar sind.

Lebensdauerbestimmung

Um die Lebensdauer bestimmen zu können, muß man zuerst die durch zufällige Koinzidenzen verursachten Ereignisse herausrechnen. Zufällige Koinzidenzen treten auf, wenn Start- und Stop-Signal von verschiedenen Zerfällen registriert werden oder Untergrundzerfälle Signale liefern. Da zwischen Positronen verschiedener Zerfälle kein Zusammenhang besteht, sind diese Ereignisse nicht von Interesse. Als durch zufällige Koinzidenz verursacht werden alle Ereignisse, die entweder „negative“ Zeiten aufweise, oder mit großer zeitlicher Verzögerung registriert werden.



Lebensdauer in Teflon

Die Zählraten der Kanäle 0-200 und 800-1000 werden also zur Bestimmung der zufälligen Koinzidenzen benutzt. Es ergibt sich daraus, daß ca. 0,41

Ereignisse pro Kanal durch zufällige Koinzidenzen verursacht werden. Diese sind von den eigentlichen Zählraten abzuziehen. Zur grafischen Bestimmung der Lebensdauer wurden dann immer 8 Kanäle zusammengefaßt. Aus den Zählraten z und dem Zufallereignissen z_0 wurden dann die effektiven Ereignisse bestimmt:

$$n = z - z_0 \pm \sqrt{z + z_0}$$

Diese wurden dann logarithmiert und graphisch ausgewertet. Dies ist zwar nicht ganz exakt, da durch die Verbreiterung der Kurve (Gauß-Verteilung) die Kurve insgesamt abflacht. Außerdem überlagert sich die abfallende Kurve mit der Kurve der spontanen Vernichtung

(prompte Kurve). Diese Effekte zu berücksichtigen übersteigt jedoch meine technischen Möglichkeiten.

Die Steigung der Geraden ist der Kehrwert von τ . Die Steigung der Geraden beträgt $-0,0416 \pm 0,00875/\text{Kanal}$. Damit ergibt sich τ zu 1,8 ns.

Da der Fehler der Steigung und der Fehler der Zeiteichung linear eingehen, kann man die Fehlerprocente addieren. Der Gesamtfehler liegt damit bei 23,5 %.