

Bild 5.4: Simulierte Emissionshöhe in Abhängigkeit der Auslenkung der Emitter ^{33}P von der $\langle 110 \rangle$ Kristallachse mit einer Elektronenenergie von 150 keV.

6. Radioaktive Sondenatome

6.1 Der Beta - Zerfall und die schwache Wechselwirkung

1914 wurde von Chadwick gezeigt, daß Kerne Elektronen mit einer kontinuierlichen Energieverteilung emittieren. Die Kernladungszahl ändert sich dabei um Eins. Da es sich um einen Übergang zwischen Grundzuständen mit fest definierter Energie handelt, wäre der Energieerhaltungssatz verletzt. Ähnlich verhält es sich mit dem Drehimpuls: Die Spins von Mutter- und Tochterkern unterscheiden sich um Null oder Eins, während man bei der Emission von Elektronen eine halbzahlige Spinänderung erwarten würde. Daher forderte Pauli 1930 die Existenz des Neutrinos. Der direkte Nachweis konnte jedoch erst in den 50er Jahren ausgeführt werden.

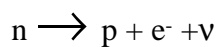
Da β - Zerfallsprozesse sehr viel kleinere Übergangswahrscheinlichkeiten haben als Prozesse, die durch Kernkräfte oder elektromagnetische Kräfte verursacht werden, spricht man auch von der schwachen Wechselwirkung.

Innerhalb einer Reihe isobarer Kerne (Nuklide mit gleichem A aber unterschiedlichem Z) tritt β - Zerfall immer dann auf, wenn es einen Nachbarkern mit geringerer Masse gibt. Je nach Ladung der beiden Kerne, zwischen denen ein Übergang energetisch möglich ist, wird ein Elektron oder ein Positron ausgesandt.

Für die Masse des Atoms der Ladung Z müssen drei Fälle unterschieden werden:

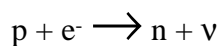
1. Elektronenzerfall (Masse größer als bei Z + 1):

Die Zerfallsenergie verteilt sich auf Elektron und Antineutrino. Ein Neutron wird zum Proton:



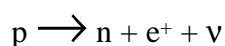
2. K - Einfang (Masse kleiner als bei Z + 1, jedoch größer als $m_{Z+1} - 2m_0$):

Obwohl die Masse des Atoms Z tiefer liegt als die des Atoms Z + 1, ist Positronenzerfall nicht möglich. Dafür müssen zwei Elektronenmassen aufgewendet werden: die Masse des emittierten Positrons und die Masse des zusätzlichen Elektrons vom neutralen Atom Z + 1. Diese Energie steht aber aufgrund der Massendifferenz nicht zur Verfügung. Experimentell beobachtet man in solchen Fällen die Emission eines charakteristischen Röntgenquants des Atoms Z, meist aus der K-Schale oder die entsprechenden Auger - Elektronen. Ein Elektron wird aus der K-Schale des Atoms Z eingefangen. Die Zerfallsenergie verteilt sich auf die Energie des Neutrinos und die Bindungsenergie des Elektrons. Ein Proton wird zum Neutron:



3. Positronenzerfall (Masse ist kleiner als $m_{Z+1} - 2m_0$):

Der Zerfall unter Emission eines Positrons ist jetzt energetisch möglich; es wird von der Zerfallsenergie aber ein Betrag von $2m_0c^2$ verbraucht, der für die fehlenden zwei Elektronenmassen aufkommt. Der Rest der Energie verteilt sich auf die Energien des Positrons und das Neutrinos. Ein Proton wird zum Neutron:



Die gesamte Zerfallsenergie E_0 ist folgendermaßen gegeben:

β^- - Zerfall:

$$\begin{aligned} E_0 &= \{[m(Z,A) - Zm_0] - [m(Z+1,A) - (Z+1)m_0 + m_0]\}c^2 \\ &= \{m(Z,A) - m(Z+1,A)\}c^2 \end{aligned}$$

β^+ - Zerfall:

$$E_0 = \{m(Z,A) - m(Z-1,A) - 2m_0\}c^2$$

Dem kontinuierlichen Spektrum eines β^- -Strahlers überlagern sich häufig Linien mit scharfer Energie. Sie rühren von zwei völlig verschiedenen Effekten her:

a. Auger-Elektronen:

Wird durch K - Einfang oder durch Konversion ein Elektron aus einer inneren Schale des Atoms entfernt, verbleibt die Hülle in einem angeregten Zustand. Diese Anregungsenergie kann entweder als elektromagnetische Strahlung abgegeben oder auf ein anderes Hüllenelektron übertragen werden. Letzteren Prozeß nennt man Auger - Effekt. Die Energie der Auger - Elektronen ist durch Bindungsenergieunterschieden in der Hülle gegeben.

b. Konversionselektronen:

Ein angeregter Kern verliert seine Energie normalerweise durch Emission eines γ - Quants. Die Anregungsenergie kann jedoch auch auf ein Hüllenelektron direkt übertragen werden, so daß es vom Atom emittiert wird. Der Prozeß verläuft ähnlich wie die Aussendung von Auger - Elektronen aus der Hülle. Die Energie E_e des emittierten Elektrons ist gleich der Anregungsenergie E des Kerns minus der Bindungsenergie B_e des betreffenden Hüllenelektrons: $E_e = E_\gamma + B_e$

Man spricht von K - Konversion, L - Konversion, usw., je nachdem, aus welcher Elektronenschale die Emission erfolgt. Es wird also ein Linienspektrum der Elektronen beobachtet.

6.2 Das Isotop ^{32}P

Beim ^{32}P haben wir einen β^- -Emitter mit einer maximalen Energie von 1.71 MeV. Es zerfällt mit einer Halbwertszeit von 14.28 Tagen in das ^{32}S . Phosphor mit der Masse 32 ist gelöst in HCl-freier, verdünnter Phosphorsäure kommerziell erhältlich. Er kann also in ein Schiffchen eingetrocknet und in einer Sideniusquelle ionisiert, dann beschleunigt und massensepariert werden. Die Ausgangsdosis in der Quelle betrug 185 Mbq (5mCi).

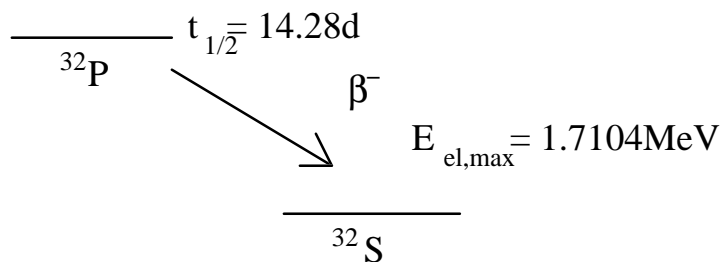


Bild 6.1: Zerfallsschema von ^{32}P

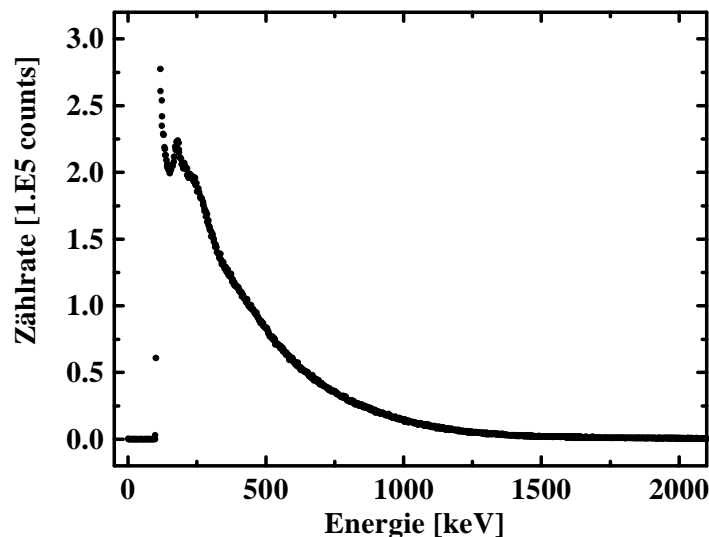


Bild 6.2: Energiespektrum von in Diamanten implantiertem ^{32}P , gemessen mit einem Halbleiterdetektor. Zu niedrigen Energien hin steigt der Untergrund der inelastisch gestreuten Elektronen an.

6.3 Das Isotop ^{33}P

Das ^{33}P zerfällt mit einer Halbwertszeit von 25,3 Tagen durch einen β^- -Zerfall mit einer maximalen Energie von 249 keV in das ^{33}S (siehe Zerfallschema 6.3 und Energiespektrum 6.4). Hier benutzten wir eine Ausgangsaktivität von nur 2 mCi. Wie ^{32}P ist auch ^{33}P in verdünnter Phosphorsäure kommerziell erhältlich.

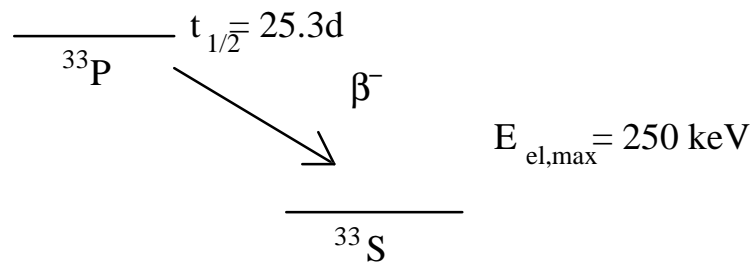


Bild 6.3: Zerfallsschema von ^{33}P

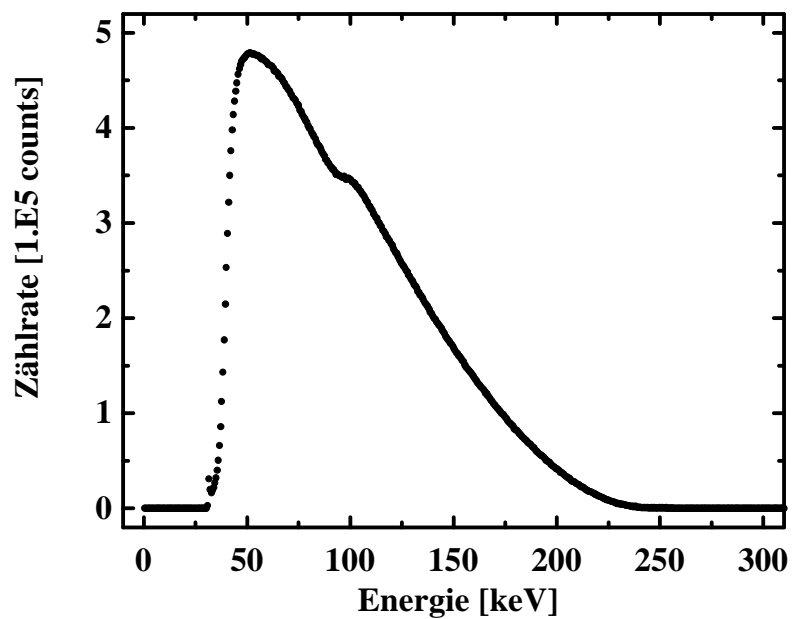


Bild 6.4: Energiespektrum von in Diamanten implantiertem ^{33}P , gemessen mit einem Halbleiterdetektor.

6.4 Das Isotop ^{73}As

Das ^{73}As ist nur an Isotopenseparatoren wie der ISOLDE am CERN in Genf erhältlich. Die Probe wurde also in Genf implantiert und dann in Konstanz ausgemessen. Am CERN wird hierzu ein Nb-Hot-Plasma-Target mit einem gepulsten 1 GeV Protonenstrahl bestrahlt. Dabei laufen Reaktionen ab, bei denen verschiedene Isotope entstehen. Diese werden dann auf 60 keV beschleunigt und mit einem Massenseparator separiert. Um am ^{73}As zu messen, implantiert man ^{73}Se , das mit einer Halbwertszeit von 7.1 Stunden zu ^{73}As zerfällt. ^{73}As hat eine Halbwertszeit von 80.3 Tagen. Das Arsen zerfällt in einen angeregten Zustand des ^{73}Ge . Dieser geht mit einem hochkonvertierenden γ -Übergang in einen niederenergetischeren Zustand über. Die K-Konversionselektronen haben eine Energie von 43 keV. An diesen kann nun der Channelingeffekt gemessen werden. In Bild 6.5 sehen wir das Zerfallsschema von ^{73}Se . In Bild 6.6 das Energiespektrum des Zerfalls ^{73}As in das ^{73}Ge . Das Anlassen der Probe fand nach dem Zerfall des ^{73}Se ins ^{73}As statt.

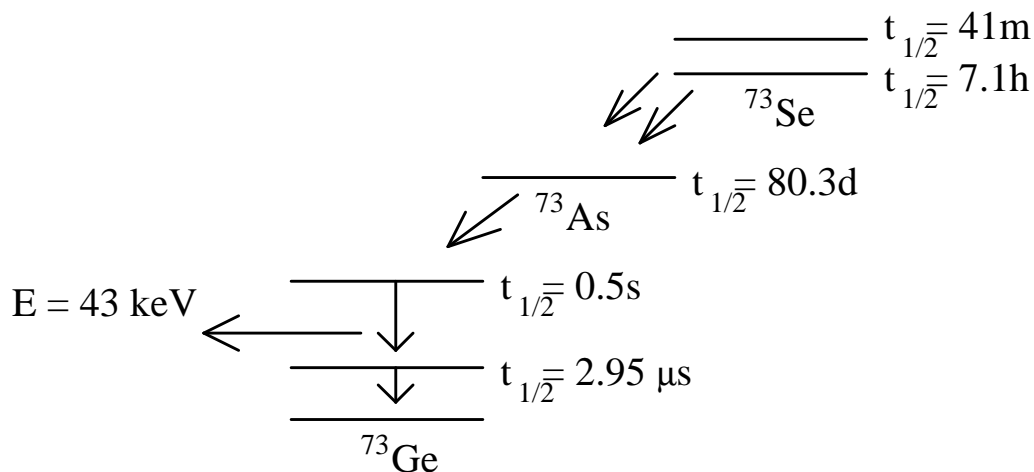


Bild 6.5: Zerfallsschema von ^{73}Se - ^{73}As

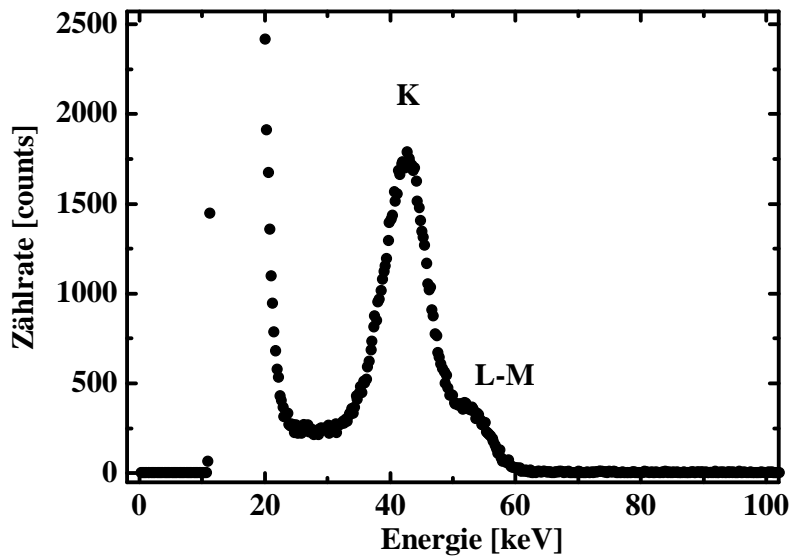


Bild 6.6: Energiespektrum der K, L und M Konversionselektronen von ^{73}As bzw. ^{73}Ge

7. Durchführung der Experimente

7.1 Implantation von ^{32}P und ^{33}P am Schwerionenbeschleuniger in Konstanz

Als radioaktives Isotop wurde in Konstanz in erster Linie ^{111}In verwendet. So lag es nahe, das radioaktive Phosphor auf die gleiche Weise wie das Indium zu implantieren. Hier trocknet man das Indium, welches als Indiumchlorid in verdünnter HCl-Lösung geliefert wird, in ein Stahlschiffchen ein, ionisiert anschließend das Indium in einer Sideniusquelle zusammen mit dem Trägergas (Ar^+H_2), in die das Schiffchen mit einem Motor durch ein Karamikrohr eingeschoben wird. Die Ionen werden auf 30 keV beschleunigt, damit sie in einem Massenseparator getrennt werden können. Nach der Massenseparation können die Ionen auf die gewünschte Energie nachbeschleunigt (max. 350 keV) werden. In einer Implantationskammer direkt nach dem Switchermagnet, mit dem der Strahl in das gewünschte Strahlrohr geleitet werden kann, werden die Ionen dann implantiert. Eine Beschreibung des Schwerionenbeschleunigers in Konstanz ist in Bild 7.1 gezeigt.

Da das Dechanneling, wie in Kap. 5.1 diskutiert, sehr stark von der Implantationstiefe abhängt, und Phosphor zu den leichteren der bisher verwendeten Emmissionchannelingsonden gehört, mußte die Implantationsenergie so gering als möglich gehalten werden. Um dies an unserem Schwerionenbeschleuniger zu ermöglichen, mußte eine Implantationskammer direkt