

Vorlesungen über Quantenmechanik - Vorlesung 7

JOCHEN GEPPERT / DIDAKTIK DER PHYSIK

Wintersemester

ABSTRACT. Als bedeutendes Beispiel für den Tunneleffekt in der Natur wird der radioaktive Zerfall von Kernen besprochen.

1. DER TUNNELEFFEKT ALS GRUNDERSCHEINUNG DER NATÜRLICHEN RADIOAKTIVITÄT¹

Im Jahre 1896 entdeckte der französische Physiker BEQUEREL (1852 - 1908), dass Uransalze die Eigenschaft haben, dauernd unsichtbare Strahlung auszusenden, die die lichtdichte Verpackung fotografischer Platten zu durchdringen und die Silberbromidschicht zu beeinflussen vermag; ferner ionisieren diese Strahlen die Luft und entladen einen Kondensator. Es ist das Verdienst des Ehepaares Marie (1867 - 1934) und Pierre CURIE (1859 - 1906), die solche Strahlen aussendenden Mineralien genau untersucht zu haben. So entdeckten sie 1898 zwei strahlensendende Elemente, die aus dem Mineral Pechblende aus Joachimsthal (Böhmen) gewonnen wurden und die ein viel stärkeres Strahlungsvermögen besaßen als Uran, nämlich zuerst das Polonium und etwas später ein zweites Element, das noch rund 10000 mal stärker strahlte als das Polonium. Dieses neue Element wurde Radium genannt. Es erwies sich als ein Erdalkalimetall, das gewisse Ähnlichkeit mit dem Barium hat. Das Radium kommt in der Pechblende nur in sehr geringen Mengen vor. Bald nach der Entdeckung des Radiums wurde das Actinium aufgefunden, das ebenfalls die Eigenschaft besitzt, dauernd Strahlen auszusenden; auch Thorium sendet, wie 1898 von SCHMIDT (1865 - 1949) gefunden wurde, solche Strahlen aus. Man bezeichnet die allen diesen Stoffen gemeinsame Eigenschaft der Strahlensendung als *Radioaktivität*. Die Strahlen aussendenden Atomarten werden als *Radionuklide* bezeichnet.

Die Erscheinungen der Radioaktivität waren so merkwürdig und neuartig, dass die Forscher auf der ganzen Welt sofort darangingen, die Vorgänge näher zu untersuchen. Dabei ergaben sich zunächst die folgenden Eigenschaften:

1. Die Aussendung radioaktiver Strahlen kann durch äußere Einwirkungen weder verstärkt noch verringert werden. So ist es weder durch Temperatur- noch durch Druckänderungen möglich, die Strahlungsabgabe zu beeinflussen. Diese Feststellung legt die Annahme nahe, dass es sich nicht um chemische Vorgänge handelt.
2. Ein radioaktives Präparat ist immer etwas wärmer als seine Umgebung. Von einem Radiumpräparat mit der Masse 1g wird stündlich die Wärmemenge

$$Q = 575 \text{ J}$$

an die Umgebung abgegeben. Eine Erklärung hierfür konnte zunächst nicht gegeben werden.

3. Die wichtigste Eigenschaft der radioaktiven Stoffe ist die Abgabe der Strahlung.

¹Die Vorlesung wurde zu wesentlichen Teilen aus Höfling, Oskar: Physik übernommen. Siehe S.16.

Eine genauere Untersuchung zeigt, dass die von einem Radiumpräparat ausgehende Strahlung aus drei verschiedenen Teilen besteht. Setzt man ein schmales Bündel dieser Strahlen der Einwirkung eines Magnetfeldes mit großer Flussdichte aus, so ergibt sich das in der folgenden Darstellung schematisierte Bild:

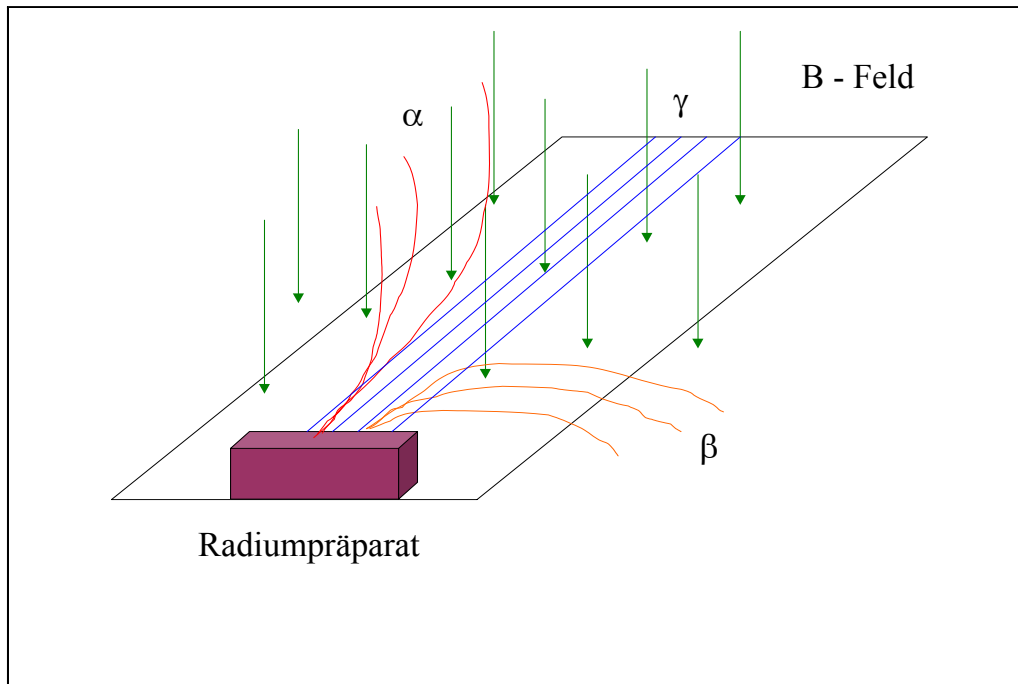


Figure 1: Radioaktive Strahlung besteht aus drei unterschiedlichen Strahlungsarten.

a) *Ein Teil der Strahlen wird nur wenig abgelenkt.* Aus der Ablenkungsrichtung entnimmt man, dass diese Strahlung aus positiv geladenen Teilchen bestehen muss². Man bezeichnet sie als Alphastrahlen (α -Strahlen) und ihre Teilchen als Alphateilchen (α -Teilchen). Eine genaue Untersuchung dieser Teilchen zeigt:

Bei den Alphateilchen handelt es sich um Heliumkerne.

Sie besitzen somit zwei positive Elementarladungen und haben die Massenzahl 4.

b) *Ein anderer Teil der Strahlen wird erheblich stärker als die Alphastrahlen abgelenkt und zwar in die entgegengesetzte Richtung.* Man bezeichnet sie als Betastrahlen (β -Strahlen). Eine genauere Untersuchung zeigt, dass sie aus Elektronen bestehen, die mit großer Geschwindigkeit (bis zu 99 % der Lichtgeschwindigkeit) ausgesendet werden. Man nennt diese Teilchen auch *Betateilchen* (β -Teilchen).

²Man kann diese Schlussfolgerung aus der Bahnentwicklung unter dem Einfluss der LORENTZ-Kraft mathematisch begründen.

Wir halten also fest:

Bei den Betateilchen handelt es sich um schnell bewegte Elektronen. Sie besitzen somit eine negative Elementarladung und haben nur eine sehr kleine Ruhemasse.

c) *Ein dritter Teil der Strahlen wird im Magnetfeld überhaupt nicht abgelenkt.* Diese Strahlen werden Gammastrahlen (γ -Strahlen) genannt. Es handelt sich um elektromagnetische Wellen, die die gleichen Eigenschaften wie RÖNTGEN-Strahlung mit sehr kurzer Wellenlänge haben. Es gilt also:

Die Gammastrahlen sind elektromagnetische Wellenstrahlen. Sie transportieren keine elektrische Ladung und werden deshalb im Magnetfeld nicht abgelenkt.

Die Gammastrahlen verhalten sich in vielen Fällen wie eine Teilchenstrahlung. Man spricht deshalb auch von *Gammaquanten* (γ -Quanten).

Die radioaktiven Strahlen sind für das Auge unsichtbar. Um ihre Eigenschaften erforschen zu können, mussten zunächst Geräte entwickelt werden, die die Strahlen der experimentellen Untersuchung zugänglich machen. Dabei wird von der Eigenschaft dieser Strahlen Gebrauch gemacht, beim Durchgang durch Materie Ionenpaare - positive Ionen und negative Elektronen - zu bilden. Man spricht daher auch von ionisierenden Strahlen.

Die erwähnte Erfahrungstatsache, dass der Ablauf radioaktiver Vorgänge durch äußere Einwirkungen, wie etwa Temperatur- oder Druckänderungen, nicht beeinflusst werden kann, sowie zahlreiche andere experimentellen Befunde haben zu der Erkenntnis geführt, dass es sich bei der Radioaktivität nicht um chemische Vorgänge, d.h. nicht um Veränderungen in der Atomhülle, handeln kann. Es steht vielmehr fest, dass die radioaktiven Erscheinungen ihren Ursprung in den Atomkernen haben. Wir halten also fest:

Die von den Radionukliden ausgestrahlten Alpha- und Betateilchen sowie die Gammaquanten kommen aus den Atomkernen.

Durch die Abgabe der Teilchen wird der Kern verändert. Der entstehende neue Kern hat natürlich eine andere Kernladungszahl Z^3 und in vielen Fällen auch eine andere Massenzahl A^4 . Damit besitzt er natürlich auch andere physikalische und chemische Eigenschaften als der Ausgangskern. Mit diesen Feststellungen ist der alte Atombegriff der Chemie, der in den Atomen unwandelbare kleinste Teilchen der Materie sah,

³Die Kernladungszahl Z gibt die Anzahl der Protonen im Atomkern an. In neutralen Atomen ist sie mit der Elektronenzahl identisch.

⁴Die Massenzahl M gibt die Zahl aller Nukleonen (Protonen und Neutronen) eines Atoms an. Man beachte, dass die Masse eines Protons praktisch gleich der eines Neutrons ist.

erstmals ins Wanken geraten.

Betrachten wir im Folgenden speziell den α -Zerfall von Kernen:

Schon wenn man die Ergebnisse des RUTHERFORD-Atommodells betrachtet, so fällt auf, dass die abstossenden Kräfte zwischen den Protonen im Kern durch irgendeine noch stärkere Kraft überlagert werden muss, die den Kern zusammenhält, obwohl die Protonen untereinander abstoßende Coulombkräfte aufeinander ausüben. Mit anderen Worten, die Protonen sind in einem Potenzial gefangen. Natürlich beruht der α -Zerfall von Kernen auf der abstoßenden Coulomb-Wechselwirkung der Protonen, aber es gibt eine ihr entgegenwirkende Kraft (die zu den starken Kräften gerechnet wird). Die heutige Physik interpretiert diesen Zerfall so, dass es für bestimmte Kerne energetisch günstiger ist, wenn sie komplette Heliumkerne aussenden⁵. Obwohl der α -Zerfall ab einer Ordnungszahl⁶ $Z \sim 65$ für praktisch alle Kerne energetisch möglich ist, sind die Halbwertszeiten⁷ trotzdem extrem lang. Dies liegt dran, dass die α -Teilchen eine Potenzialbarriere durchtunneln müssen. In der folgenden Abbildung ist der Potenzialverlauf für ein α -Teilchen im Kern schematisch dargestellt:

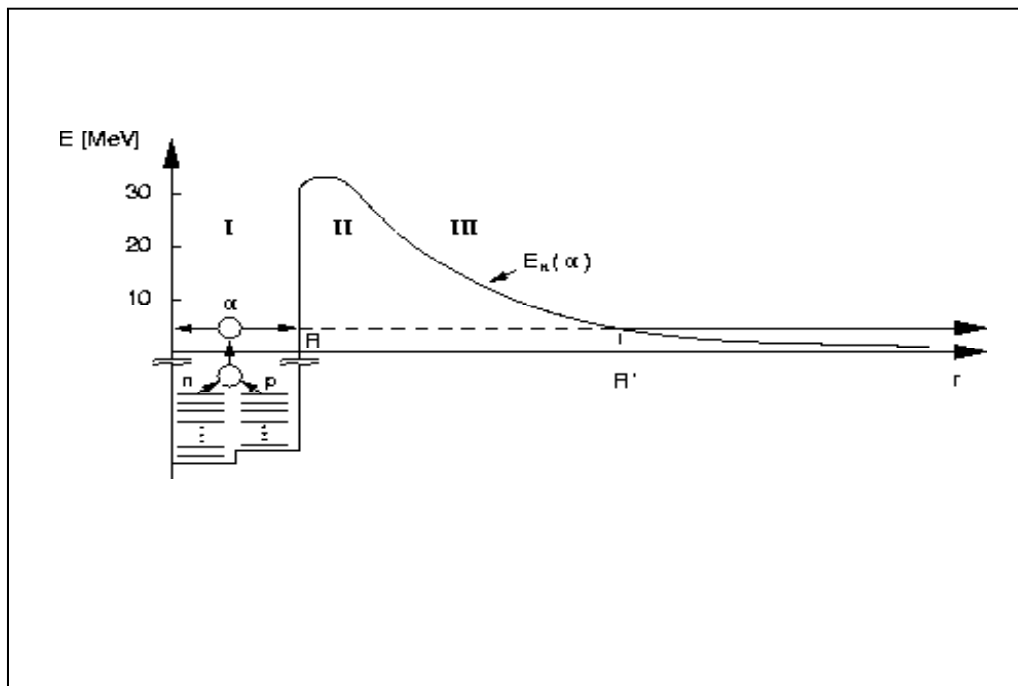


Figure 2: Zum α -Zerfall von Atomkernen.

Betrachten wir diese Potenzialdarstellung:

Obwohl die Energie des α -Teilchens im Kerninnern (I) positiv ist, kann es das Gebiet

⁵Zwei Protonen und zwei Neutronen miteinander gebunden.

⁶Sie gibt die Zahl der Elektronen in der Hülle und der Protonen im Kern an.

⁷Als Halbwertszeit wird die Zeit bezeichnet, nach der die Hälfte der zu Beginn einer Messreihe vorhandenen Kerne zerfallen sind. Sie ist unabhängig von der Zahl der instabilen Kerne.

II, in dem das Potenzial V größer als die Energie E_α ist, im Rahmen der klassischen Physik nicht durchqueren. In der Quantenmechanik kann man jedoch eine Wahrscheinlichkeit angeben, mit der das α -Teilchen in dem Gebiet außerhalb des Kerns (III) zu finden sein wird. Diese Wahrscheinlichkeit ist umso größer, je höher die Energie des α -Teilchens, da dann der "Weg" durch das klassisch verbotene Gebiet (von I nach III) kürzer ist.

Nach einem α -Zerfall kann der Restkern energetisch angeregt sein. Diese Anregungsenergie wird in Form elektromagnetischer Wellen (oder auch weiterer Teilchen) abgegeben. Diese Strahlung aus dem Kern wird mit γ -Strahlung bezeichnet.

Fazit:

Das α -Teilchen wird in einem Potenzialtopf gehalten⁸, der durch die Überlagerung der anziehenden, kurzreichweitigen Kernkräfte und der abstoßenden, langreichweitigen Coulombkräfte entsteht. Gilt die Energie eines α -Teilchens:

$$E = E_{kin} + E_{pot} > E(\infty) \quad (1)$$

so kann es mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit durch den Potenzialwall tunneln. Dabei wird seine Energie E als kinetische Energie von Kern und α -Teilchen frei.

Die Erklärung des α -Zerfalls als quantenmechanischer Tunneleffekt durch GAMOV (1928, gleichzeitig mit CONDON und GURNEY) war einer der großen Erfolge und Bestätigungen der Quantenmechanik.

Die Atomhülle ist bei den radioaktiven Vorgängen primär nicht beteiligt. Sie wird aber von den Veränderungen der Atomkerne insofern mit beeinflusst, als sich die Zahl der Hüllenelektronen der neuen Kernladungszahl des bei der radioaktiven Umwandlung entstehenden Kerns anpassen muss. Dies geschieht durch die Abgabe von Elektronen. Die auf diese Weise eventuell frei werdenden Elektronen haben aber nichts mehr mit den ausgestrahlten β -Teilchen zu tun; diese stammen vielmehr aus den Atomkernen⁹.

Es handelt sich bei dem Tunneleffekt um einen statistischen Prozess, der nicht nur bei Alphateilchen, sondern auch in anderen Bereichen der Mikrophysik auftritt. Wegen des statistischen Charakters dieser Vorgänge kann nicht vorausgesagt werden, wann ein bestimmter Kern ein Alphateilchen emittieren wird. Die Theorie zeigt lediglich, dass die Wahrscheinlichkeit für die Emission der α -Teilchen mit kleiner werdender Teilchenenergie rasch abnimmt¹⁰, dass es aber keine untere Energiegrenze für die Durchdringung des Potenzialwalles gibt.

Der schon genannte, seit 1934 in den USA lebende Physiker russischer Herkunft GAMOV (1904 - 1968) hat die Vorgänge der Alphaemission theoretisch untersucht und eine mit den experimentellen Befunden gut übereinstimmende Theorie des α -Zerfalls der Atomkerne gegeben.

⁸Man müsste diese Potenzialsituation natürlich dreidimensional zeichnen, aber der Effekt wird natürlich auch so deutlich.

⁹Dort wandeln sich Neutronen in Elektronen und Protonen und Neutrinos um, dieser Vorgang geht aber über diese Vorlesung hinaus und wird in der Kernphysik untersucht.

¹⁰Das haben wir in der letzten Vorlesung bereits gesehen.