

GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung

# Station 9

Rutherford-Streuversuch



## Inhalt

nhalt	1
Vorwort	2
Worum es geht	5
V.1. Der Experimentierplatz	
V.2. Die Inbetriebnahme des Zählgerätes	8
V.3. Evakuieren der Streukammer	
V.4. Durchführung der Messungen	10
V.5. Die Rutherfordsche Streuformel	
V.5.1. Die Ablenkung geladener Teilchen an einzelnen Atomkernen	12
V.5.2. Der Weg der Alphateilchen durch eine Goldfolie	14
V.5.3. Der Einfluss des Detektorraumwinkels	17
V.5.4. Die Rutherfordsche Streuformel	17
V.6. Auswertung der Messung	
V.6.1. Die Symmetriekorrektur	
V.6.2. Der Vergleich mit der Rutherfordschen Streuformel	19
Hintergrundwissen	
H.1. Die Alphastrahlung von Americium-241	22
H.2. Das Am-241-Präparat	23
H.3. Abstoßung zwischen gleichnamigen Ladungen	
H.4. Impulsübertragung	
Protokollblatt	27

N:\SL\_Stand\_Februar\_10\Anleitung\_9.doc

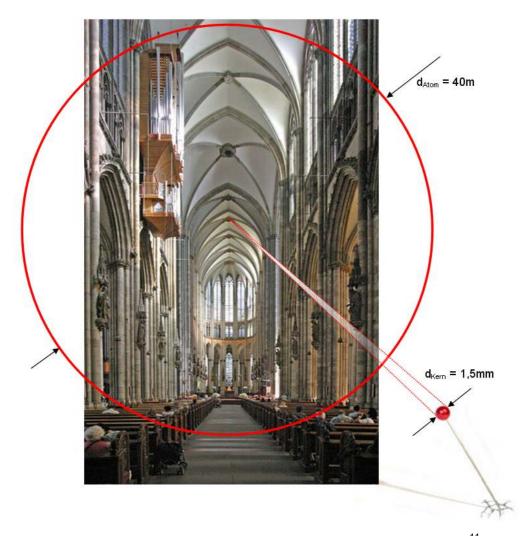
Erstelldatum 24.02.2010 13:04:00

Zuletzt gespeichert von Gruppe

Zuletzt gespeichert 01.03.2010 02:31



### **Vorwort**

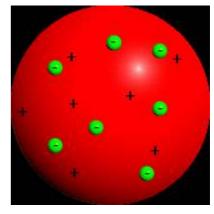


Wenn wir ein einzelnes Atom hundertmilliardenmal (d.h. um den Faktor 10<sup>11</sup>) vergrößern könnten, dann würde es mit seiner aus Elektronen bestehenden äußeren Hülle (etwa 40 m Durchmesser) gerade das Innere des Kölner Doms ausfüllen. Schaut man genauer hin, dann stellt man fest, dass dieser Raum (mit Ausnahme einiger punktförmiger innerer Elektronen vollständig leer ist – ein perfektes Vakuum, bis auf einen sehr kleinen Atomkern von 1,5 mm Durchmesser, in dem sich praktisch die gesamte Masse des Atoms konzentriert.

Herausgefunden hat das der neuseeländische Physiker Rutherford mit seinem berühmten

Streuexperiment, das uns in die spannende Zeit vor rund hundert Jahren führt, in der die Physiker in atemberaubendem Tempo die Grundlagen für unser heutiges Weltbild zusammentrugen.

Rutherfords Lehrer J.J. Thomson hatte erst 1897 das Elektron als Bestandteil des Atoms entdeckt und sich das so genannte "Rosinenkuchenmodell" (auch "Plumpudding-Modell") des Atoms ausgedacht, wonach die sehr kleinen negativ geladenen Elektronen im Inneren der gleichförmig verteilten, positiv geladenen restlichen Atommasse eingebettet seien wie Rosinen in einem Kuchenteig (Abbildung rechts).

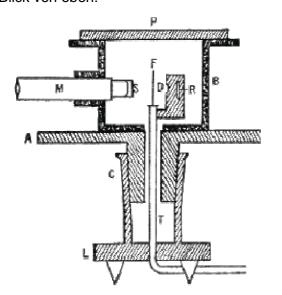


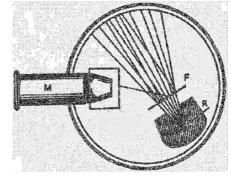


Rutherford selbst widmete sich der damals neu entdeckten Radioaktivität und formulierte u.a. das Gesetz des radioaktiven Zerfalls. Von ihm stammen auch die Bezeichnungen  $\alpha$ ,  $\beta$ , und  $\gamma$  für die bekannten Strahlungsarten.

Die Alphastrahlen wurden nun sein bevorzugter Forschungsgegenstand: 1903 gelang ihm die Ablenkung von  $\alpha$ -Teilchen im Magnetfeld und damit der Nachweis, dass diese Teilchen positiv geladen sind.

Ab 1906 untersuchten seine Assistenten Geiger und Marsden den Flug von Alphateilchen durch eine dünne Goldfolie mit der folgenden Apparatur (links die Seitenansicht, rechts der Blick von oben:





R ist das radioaktive Präparat, das als Alphateilchen-Quelle diente. Die Alphateilchen treten als enges Bündel durch das Loch D aus einer dicken Bleiabschirmung aus.

Anschließend mussten die Alphateilchen die Goldfolie F durchqueren. Im rechten Bild sieht man ein Alphateilchen, das in der Folie nach links abgelenkt wird und auf dem Leuchtschirm S (sog. Szintillationsschirm) auftrifft, der an der Einschlagstelle kurz aufleuchtet.

M ist das Mikroskop, das man brauchte, um den Szintillationsschirm S zu betrachten. Die Lichtblitze auf dem Szintillationssschirm waren so schwach, dass ein absolut dunkler Raum nötig war. Die Person, welche die Beobachtung durchführte, musste vor Beginn des Experiments eine Stunde im absolut dunkeln Raum sitzen, damit das Auge für die Messung ausreichend adaptiert war.

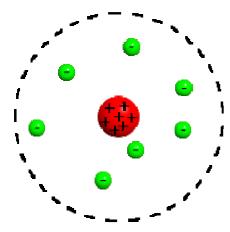
### Sie fanden folgendes heraus:

Nahezu alle Alphateilchen gingen geradlinig durch die Folie hindurch so als wäre sie nicht da. Nur einige wenige Alphateilchen wurden geringfügig abgelenkt, üblicherweise um einen Winkel von 2° und weniger. Geiger fand heraus, dass ein Alphateilchen im Durchschnitt an einem Goldatom um 0,005° abgelenkt wird. Die wahrschei nlichste Ablenkung an der ganzen Goldfolie lag unter einem Grad. Rutherford konnte sich diese geringfügigen Ablenkungen gut mit dem Rosinenkuchenmodell seines Lehrers Thomson erklären.

Aber im Jahre 1909 stießen sie auf ein Rätsel, das sich nicht mit diesem Modell erklären ließ: Ganz, ganz selten beobachteten sie Alphateilchen, die um sehr große Winkel abgelenkt wurden (in 1 von 20 000 Fällen sogar mehr als 90°).

#### Rutherford fand die Lösung:





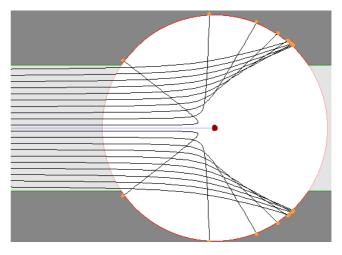
Das Rosinenkuchenmodell war falsch! Rutherford erklärte, dass die ganze Atommasse im Zentrum des Atoms auf einem sehr kleinen Raum vereinigt ist, dem positiv geladenen Atomkern. Dieser Kern ist so klein, dass sich die überwältigende Mehrheit aller Alphateilchen ohne jegliche Ablenkung durch die Goldfolie hindurchbewegt, als wäre dort nichts. Die herumschwirrenden negativ geladenen Elektronen müssen wir uns punktförmig vorstellen. Es sieht also aus, als wäre das Atom ein hauptsächlich leerer Raum (vgl. das Bild mit dem Kölner Dom ganz zu Anfang).

Fliegen nun die positiv geladenen  $\alpha$ -Teilchen auf einen positiv geladenen Atomkern zu, dann ergeben sich aufgrund der elektrostatischen Abstoßungskräfte sehr unterschiedliche Flugbahnen. In dem Bild unten fliegen  $\alpha$ -Teilchen von links kommend mit etwa 10% der Lichtgeschwindigkeit auf den rot markierten Atomkern eines Goldatoms zu. Sie werden durch dessen elektrische Kräfte vollelastisch abgelenkt wie bei einem Billardspiel mit ungleichen Kugeln: Da die Alphateilchen wesentlich leichter als der Goldkern sind, werden sie auf einer hyperbelförmigen Bahn am Goldkern "reflektiert", ohne dass der Goldkern dabei erkennbar aus seiner Ruhelage bewegt wird.

Selten kommen Alphateilchen zufällig so nahe an den Atomkern, dass die elektrische Abstoßung der beiden positiv geladenen Körperchen zu einer größeren Ablenkung der Alphateilchen führt.

Nur ganz, ganz selten fliegt ein Alphateilchen zentral auf den Goldkern zu und wird unter einem Winkel von 180° zurückgeworfen.

Rutherford berechnete die Wahrscheinlichkeit, mit der ein zufällig auf den Goldkern zufliegendes  $\alpha$ -Teilchen unter einem bestimmten Winkel abgelenkt ("gestreut") wird mit seiner berühmten "Streuformel". Der Vergleich mit den Versuchsergebnissen gab eine sehr gute Übereinstimmung!



Das rutherfordsche Atommodell wurde zur Grundlage der sich im 20. Jahrhundert rasant entwickelnden Atom- und Kernphysik bis heute. Grund genug, dieses wichtige Experiment im Schülerlabor durchzuführen!

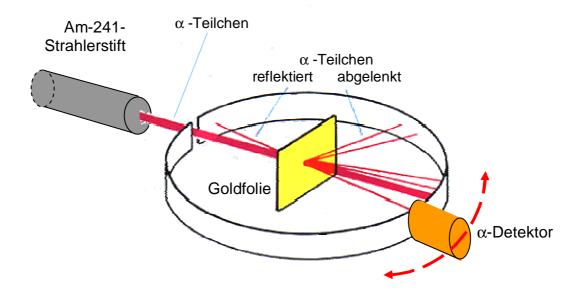


## Worum es geht

Im Jahr 1903 entwickelte der Physiker J. J. Thomson das **Thomson'sche Atommodell**, nach dem die Materie aus **gleichmäßig im Atom verteilter Masse** besteht, in der sich die Elektronen an beliebiger Position aufhalten (auch Rosinenkuchen-Modell genannt).

Seine berühmt gewordenen Streuversuche mit Alphateilchen führten Ernest Rutherford zu seinem einem neuen Atommodell auf, in dem die positiv geladene Masse in einem sehr kleinen Zentrum im Atom konzentriert ist. Der Unterschied zum späteren Bohr'schen Atommodell besteht darin, dass die Bahnen der Elektronen prinzipiell beliebige Formen und Abständen vom Kern haben können.

Wir wollen den berühmten Streuversuch, der Rutherford zu seinem Atommodell führte, mit modernen Mitteln durchführen:



Aus einem Strahlerstift werden  $\alpha$ -Teilchen auf eine etwa 5000 Atomlagen dicke Goldfolie geschossen. Um die Bremswirkung durch Luftmoleküle zu verhindern, sitzt die Goldfolie sitzt im Zentrum einer Vakuumkammer vor einem  $\alpha$ -Detektor, mit dem man das Auftreffen der  $\alpha$ -Teilchen unter verschiedenen Ablenkwinkeln beobachtet werden kann.

Untersucht man die räumliche Verteilung der abgelenkten ("gestreuten")  $\alpha$ -Teilchen, dann stellt man fest, dass die meisten von ihnen fast ungehindert durch die Folie geflogen sind, einige  $\alpha$ -Teilchen leicht abgelenkt und nur sehr wenige  $\alpha$ -Teilchen stark abgelenkt oder sogar zurückgeworfen wurden.

Dieses Ergebnis führte Rutherford zu der Erkenntnis, dass Materie offenbar **zum größten Teil aus Nichts besteht** und die Masse eines Atoms in seinem Zentrum, dem sog. **Atomkern** konzentriert ist. Es werden nur die  $\alpha$ -Teilchen gestreut oder abgelenkt, die zufällig in die Nähe eines Atomkerns geraten.

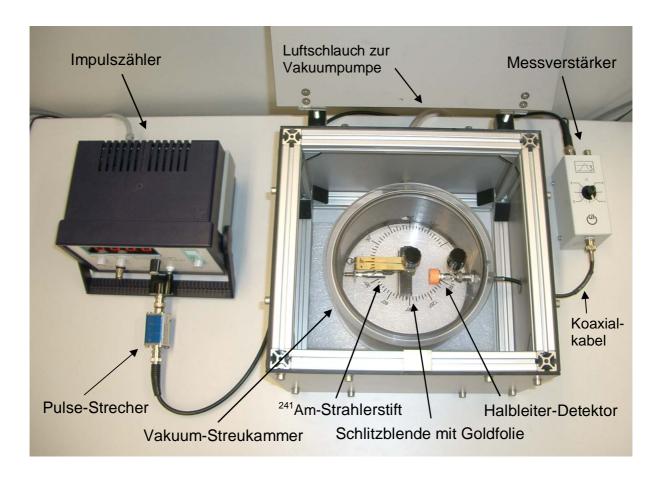
Der Rutherfordsche Streuversuch hat nicht nur die Vorstellung vom Aufbau des Atoms grundlegend geändert, er hat auch den Grundstein gelegt für eine **neue Art der Forschung**. Will man die kleinsten Bestandteile der Materie untersuchen, stellt man fest, dass man mit herkömmlichen Methoden, wie z.B. optische Mikroskopie schnell an eine Grenze stößt. Die Wellenlänge des Lichts ist größer als ein Atom, deswegen ist es unmöglich mit optischen



Instrumenten Dinge in der Größenordnung von Atomen sichtbar zu machen. Rutherford jedoch zeigte mit seinem Experiment, dass man aus der Beobachtung von gestreuten Teilchen Rückschlüsse ziehen kann auf die Eigenschaften der Materie. In diesem Fall war es die Größe des Atomkerns die man nur anhand der gestreuten Teilchen ermitteln konnte.

Diese Vorgehensweise wird bis heute praktiziert. Auch hier in der GSI beruhen praktisch alle Experimente auf dem Prinzip, dass man ein Target mit einer Vielzahl von Teilchen beschießt, um so den Fall, dass wenige der Teilchen mit Atomkernen zusammenstoßen, wahrscheinlich zu machen.

### V.1. Der Experimentierplatz

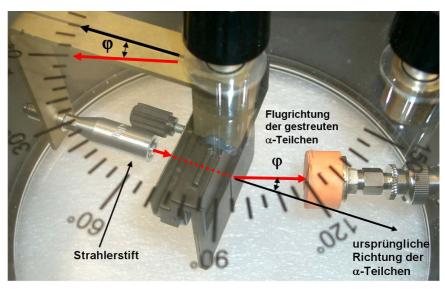


Unser Experiment wird in einer modernen **Vakuum-Streukammer** durchgeführt, die mit Hilfe einer **Pumpe** luftleer gepumpt wird, damit sich die aus dem **Strahlerstift** austretenden  $\alpha$ -Teilchen darin ungehindert bewegen können. Sie treten durch eine schmale **Schlitzblende** in die **Goldfolie** ein, in der sie an den Goldatomen gestreut werden. Anschließend fallen sie in einen **Halbleiterdetektor**, in dem sie ein elektrisches Signal erzeugen und so nachgewiesen werden können. Dieses Signal wird über ein kurzes, abgeschirmtes **Koaxialkabel** zum **Messverstärker** übertragen, der verstärkte Rechteckimpulse ausgibt, die dann über ein weiteres Koaxialkabel und einen **Pulse-Stretcher** schließlich zum **Impulszähler** weitergeleitet werden. Dieser zählt in einem einstellbaren Zeitintervall alle eingehenden Impulse und zeigt deren Anzahl auf einem Display an.



Um die Strahlungsintensität bei unterschiedlichen Streuwinkeln  $\phi$  messen zu können, ist der Strahlerstift mit dem  $\alpha$ -Strahler beweglich montiert. Er lässt sich über einen **Drehknopf auf dem Plexiglasdeckel** bewegen. Auf diesem Deckel ist auch eine Winkelskala aufgedruckt. Stellt man den Messing-Arm auf 0°, strahlt die Alpha-Q uelle senkrecht in den Teilchendetektor.

Die Goldfolie befindet sich in der geometrischen Mitte der Kammer. Sie ist fest mit dem großen Drehknopf verbunden, so dass sie sich immer zusammen mit dem Strahlerstift bewegt. Der zweite. kleinere Drehknopf ist in diesem Aufbau ohne Bedeutung.



ACHTUNG: Keinesfalls einen Winkel größer als 120° einstellen! Kollisionsgefahr Quelle - Detektor!

### Der elektrische Aufbau

Die Vakuumkammer ist über ein sehr kurzes Koaxialkabel mit dem Eingang des Messverstärkers verbunden. Dieser erhält seine Versorgungsspannung von 12 Volt über ein Steckernetzteil. Der Rechteck-Signalausgang des Messverstärkers (vgl. Bild rechts) wird über ein Koaxialkabel und einen Pulse-Stretcher an den Impulszähler angeschlossen.





Der Trigger-Level des Messverstärkers (vgl. Abbildung links) muss auf Null stehen, da sonst nur die stärkeren Impulse gezählt werden.





Beim Anschließen des Pulse-Strechers an den Zähler ist die **Polung** zu beachten. Der Masse-Pol des Adapters ist durch eine Nase gekennzeichnet (roter Pfeil) und **muss nach rechts zeigen**. Der Pulse-Stretcher dient dazu, die Dauer der Impulse zu verlängern, da das Zählgerät nur Impulse mit einer Mindestdauer von 1 µs verarbeiten kann.

Das Zählgerät wird in diesem Experiment größtenteils mit der Messzeit-Einstellung "100s" betrieben. Es zählt dann genau 100 Sekunden lang alle eingehenden Impulse.

Für längere Messzeiten stellt man auf "»" und misst die Zeit mit einer Stoppuhr. In der Datei zu diesem Versuch findet man eine kleine, einfach zu bedienende "Computerstoppuhr", die Sie gleich ausprobieren sollten:



## V.2. Die Inbetriebnahme des Zählgerätes

- Vergewissern Sie sich, dass sich die Quelle mit dem  $\alpha$ -Strahler in der Streukammer befindet und stellen Sie mit dem schwarzen Drehknopf in Kammermitte einen Winkel  $\phi$ =0° ein.
- Schließen Sie den Kammerdeckel!
- Schalten Sie den Impulszähler mit dem Kippschalter an der Rückseite ein und stellen Sie den Messzeitschalter auf "∞".
- Schalten Sie den eingebauten Lautsprecher mit der Taste mit dem Lautsprechersymbol ein. Damit wird jedes in den Halbleiterdetektor einfallende α-Teilchen durch ein lautes Knackgeräusch hörbar gemacht. Eine grüne Leuchtdiode zeigt an, ob der Lautsprecher in Betrieb ist.

Beachten Sie, dass der Detektor lichtempfindlich ist! Alle Messungen müssen daher bei geschlossenem Kammerdeckel durchgeführt werden!

Öffnen Sie den Kammerdeckel kurz und prüfen Sie die Wirkung des einfallenden Lichtes auf das Experiment.

Wenn Sie nach dem Einschalten des Zählgerätes trotz eingebauter Quelle keine Knackgeräusche hören, dann liegt dies wahrscheinlich daran, dass die Streukammer noch nicht evakuiert ist, und die  $\alpha$ -Teilchen die Luftschicht zwischen Quelle und Detektor nicht durchdringen können.

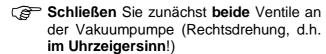


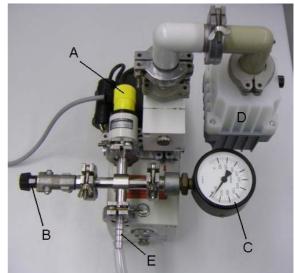
### V.3. Evakuieren der Streukammer

Die Vakuumpumpe steht unter dem Experimentiertisch.

An der Vakuumpumpe befinden sich zwei Ventile: das gelbe Hauptventil A, das die Pumpe vom restlichen Rohrsystem trennt und das schwarze Belüftungsventil B. Außerdem gibt es einen Druckmesser C, einen Ölfilter D und den Schlauchanschluss E.

Um die Streukammer luftleer zu pumpen, muss man folgendermaßen vorgehen:





Schalten Sie die Vakuumpumpe ein (Schwarzer Kipphebelschalter an dem schwarzen Schaltergehäuse, in das die elektrischen Leitungen führen). Öffnen Sie anschließend vorsichtig das gelbe Pumpventil A.



Vorsicht! Achten Sie beim Abpumpen darauf, dass die dünne Goldfolie nicht durch einen zu starken Luftstrom zerstört wird.

Warten Sie, bis der Zeiger des Druckmessers unter 10 mbar gefallen ist und lassen Sie die Pumpe noch ca. 5 Minuten weiterlaufen. Erst dann schließen Sie das Ventil A wieder und schalten die Pumpe ab.

Um die Kammer nach dem Experiment (erst vor der Mittagspause!) wieder zu belüften, muss man das Belüftungsventil B wieder vorsichtig aufdrehen.



## V.4. Durchführung der Messungen

Nun sollten Sie deutlich die Knackgeräusche im Lautsprecher hören und eine erste Messung durchführen. Eine Messung wird mit der "Start/Stop"-Taste begonnen und kann durch nochmaliges Drücken dieser Taste auch vor Ablauf der eingestellten Messzeit abgebrochen werden. Mit der "Reset" - Taste wird die Ziffernanzeige zurück auf den Wert "0000" zurückgestellt.

Achtung: Leider bietet das Zählgerät dem Benutzer keine Kontrolle darüber, ob eine Messung noch läuft oder schon beendet ist. Man merkt das nur daran, dass zwar Knackgeräusche hörbar sind, aber die Ziffernanzeige nicht mehr weiterzählt. Solange die Zählraten noch hoch sind, ist das kein Problem. Wenn allerdings bei großen Streuwinkeln nur noch selten  $\alpha$ -Teilchen in den Detektor fallen, weiß man oft nicht, ob das Gerät überhaupt noch zählt.

**Tipp:** Man sollte sich daher angewöhnen, das Gerät folgendermaßen zuverlässig zu starten:

- Wählen Sie die gewünschte Messzeit. Falls Sie "∞" gewählt haben, sollten Sie die PC-Stoppuhr betriebsbereit machen.
- Drücken Sie die Tasten am Zählgerät ganz bewusst in folgender Reihenfolge:
  - o einmal "Start/Stop"
  - o einmal "Reset"
  - einmal "Start/Stop".
     (Starten Sie ggf. gleichzeitig auch die PC-Stoppuhr durch Mausklick)

Damit ist der Zähler zuverlässig eingeschaltet. Achten Sie darauf, dass die "Start/Stop"-Taste nicht versehentlich zweimal betätigt wurde!

- Üben Sie die Bedienung von Zählgerät und PC-Stoppuhr.
- Stellen Sie an der Streukammer den Streuwinkel  $0^0$  ein und ermitteln Sie die **Anzahl N** der  $\alpha$ -Teilchen, die in 100 Sekunden in den Teilchenzähler fallen (Messzeiteinstellung "100").
- Berechnen Sie daraus die **Zählrate n**<sub>s</sub> (Anzahl der nachgewiesenen Teilchen pro Sekunde) und tragen Sie die entsprechenden Werte in das **Protokollblatt** (vgl. nächste Seite) ein.

Vordrucke der Protokollblätter liegen dem Experiment bei.

- Bestimmen Sie nun nacheinander die **Anzahlen N** und **Zählraten n**<sub>s</sub> bei den in dem Protokollblatt angegebenen Streuwinkeln in der Reihenfolge +5,0°, -5,0° usw. Die angegebenen Messzeiten sind als Mindestwerte gedacht.
- Berechnen Sie zu jeder Messung auch die **Standardabweichung**  $\sigma = \frac{\sqrt{N}}{\Delta t}$  und tragen Sie diese in das Protokollblatt ein. Sie ist ein Maß für die statistische Streuung der Messwerte und wird später bei der graphischen Darstellung der Messwerte in Form eines "Fehlerbalkens" eingezeichnet.

Die Spalten 2, 7 und 8 des Protokollblattes werden zunächst nicht ausgefüllt. Ein Beispiel finden Sie auf der nächsten Seite.



Ablenkwinkel (gemessen) φ / Grad	Ablenkwinkel (wahr) φ / Grad	Messzeit ∆t/s	Anzahl N	Zählrate n <sub>s</sub> = N / Δt	Standard- abweichung $\sigma = \frac{\sqrt{N}}{\Delta t}$	Konstante C aus Rutherfordformel $C = n_s \cdot \sin^4(\phi'/2)$	Theoriewert $n_s^{\text{theor}} = C_{\text{mittel}} / \sin^4(\phi^*/2)$				
-5.0		200									
0		100									
+5.0		200									

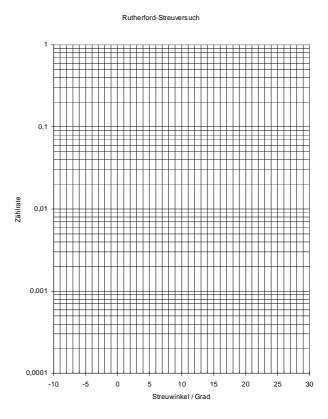
Tragen Sie in das "Lin-Log-Papier" nacheinander alle Zählraten als Funktion des Ablenkwinkels φ auf und fügen Sie die Standardabweichungen als Fehlerbalken hinzu.

Auch die Vordrucke des Lin-Log-Papiers liegen dem Experiment bei.

Man verwendet ein solches nichtlineares Millimeterpapier immer dann, wenn man Daten graphisch darstellen möchte, die über viele Größenordnungen variieren. In unserem Experiment kommen wegen des Faktors  $1/\sin^4(\phi/2)$  in der Rutherfordformel Zählraten zwischen etwa 0,0005 und 50  $\alpha$ -Teilchen /s vor, die man in "normalem" Millimeterpapier gar nicht mehr sinnvoll einzeichnen könnte.

Das Eintragen von Messpunkte in dieses Papier ist gewöhnungsbedürftig. Tragen Sie die Messpunkte daher zur leichteren Korrektur lieber mit einem Bleistift ein!

Während der Langzeitmessungen ( $\phi \ge 15^\circ$ ) sollten Sie sich mit Hilfe der Computersimulationen im nächsten Kapitel die Vorgänge in der Goldfolie genauer klarmachen.





### V.5. Die Rutherfordsche Streuformel

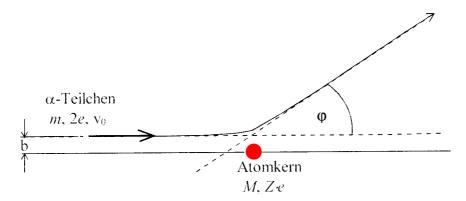
Die berühmte Rutherfordsche Streuformel sieht folgendermaßen aus:

$$\frac{n_s(\varphi)}{n_0} = \frac{1}{(4\pi \cdot \varepsilon_0)^2} \frac{Z^2 \cdot e^4 \cdot d \cdot N \cdot d\Omega}{4(E_{kin})^2} \frac{1}{\sin^4\left(\frac{\varphi}{2}\right)}$$

Sie wird in der Schule normalerweise nicht hergeleitet und auch wir wollen das gar nicht erst versuchen. Stattdessen wollen wir uns ihren physikalischen Gehalt in diesem Kapitel anhand von zwei Computersimulationen so plausibel machen, dass wir uns vorstellen können, was beim Flug der  $\alpha$ -Teilchen durch die Goldfolie passiert.

## V.5.1. Die Ablenkung geladener Teilchen an einzelnen Atomkernen

In der folgenden Skizze fliegt ein  $\alpha$ -Teilchen (mit der Masse m und der elektrischen Ladung 2e und der Geschwindigkeit  $v_0$ ) auf einen Atomkern (mit der Masse M und der elektrischen Ladung Z·e, wobei Z die Kernladungszahl, e die Elementarladung ist). Den Abstand b der "Anflugbahn" des  $\alpha$ -Teilchens vom Zentrum des Atomkerns nennt man den "Stoßparameter". Er wird üblicherweise in den Längeneinheit "Femtometer" (1 fm =  $10^{-15}$ m) oder "Picometer" (1 pm =  $10^{-12}$ m = 1000 fm) angegeben. Von seinem Wert hängt der Streuwinkel  $\varphi$  ab, unter dem das  $\alpha$ -Teilchen von seiner ursprünglichen Flugbahn abgelenkt wird. Bei großem Stoßparameter b fliegt das  $\alpha$ -Teilchens in großem Abstand am Atomkern vorbei und wird nur gering abgelenkt. Umgekehrt führt ein kleiner Wert von b zu einem großen Streuwinkel.

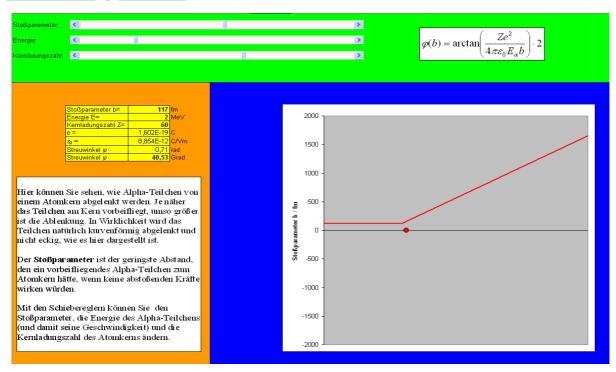


Einen solchen Einzelstoß wollen wir mit einer Computersimulation genauer untersuchen.

Starten Sie EXCEL und setzen Sie im Menü "Extras - Makros -Sicherheit" die Makrosicherheit auf "mittel".

Öffnen Sie die EXCEL- Arbeitsmappe "Rutherford\_1.xls" in Ihrem Experiment-Ordner.





Mit diesem EXCEL-Blatt kann der Streuprozess im Einzelnen studiert werden. Die  $\alpha$ -Teilchen nähern sich auf geraden Bahnen von links einem rot eingezeichneten Atomkern, und werden in seiner Nähe abgelenkt. In dieser recht einfachen Simulation in EXCEL kommt es aus Vereinfachungsgründen zu einem mehr oder weniger deutlich sichtbaren "Knick" in der Teilchenbahn vor und nach der Streuung. In Wirklichkeit ist die Bahn des  $\alpha$ -Teilchens natürlich so glatt wie auf der Skizze auf der vorigen Seite.

Der Streuwinkel  $\phi$  wird in dem gelben Feld berechnet (die Berechnungsformel für  $\phi$  ist oben rechts eingeblendet). Wie man sieht, hängt er nicht alleine vom Stoßparameter b, sondern auch von der kinetischen Energie E der  $\alpha$ -Teilchen und der Kernladungszahl Z des Atomkerns ab.

Mit den drei Schiebereglern können Sie nun einstellen, welche Energie in MeV ("Megaelektronenvolt"; 1 MeV =  $1,602\cdot10^{-13}$  Joule) das einfallende  $\alpha$ -Teilchen hat, wie nahe es am Atomkern vorbeifliegt (Stoßparameter), und wie groß die Ladung Z des Atomkerns ist.

- Probieren Sie aus, wie sich der Bahnverlauf ändert, wenn Sie über die Schieberegler Stoßparameter, Energie und Kernladungszahl variieren. Machen Sie sich den Einfluss von Stoßparameter, kinetischer Energie und Kernladungszahl plausibel!
- Ermitteln Sie, in welchem Abstand ein  $\alpha$ -Teilchen mit einer Energie von 4MeV an einem Goldkern ( $Z_{Au}$ =79) vorbeifliegen muss, um unter 20 $^{\circ}$  abgelenkt zu werden.

<u>Wichtig:</u> Der hier dargestellte Ausschnitt macht mit 4 Picometern nur etwa ein hundertstel des gesamten Atomdurchmessers aus. Wir betrachten also einen Bereich weit innerhalb der innersten Elektronenschalen des Atoms. Die meisten Teilchen, die durch ein solches Atom fliegen, werden daher noch viel schwächer abgelenkt, als in dieser Grafik dargestellt wird.



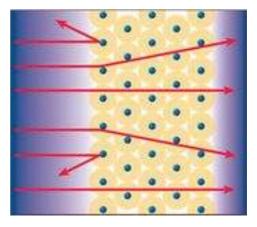
### V.5.2. Der Weg der Alphateilchen durch eine Goldfolie

In der Praxis ist es unmöglich, ein einzelnes  $\alpha$ -Teilchen so gezielt auf einen Atomkern zu schießen, wie wir das im vorigen Abschnitt simuliert haben. Dafür sind die Abmessungen, mit denen man es in der Atom- und Kernphysik zu tun hat, viel zu klein. Der Durchmesser eines Atomkerns beträgt ja nur etwa 10 fm (das sind 0,000 000 000 01 mm!). Damit macht der Atomkern räumlich nur **einen winzigen Teil des gesamten Atoms** aus. Wenn man ein Atom mit  $\alpha$ -Teilchen beschießt ist das so, als würde man Tischtennisbälle von einem Flugzeug aus auf eine Stadt fallen lassen, in der Hoffnung einen Eimer zu treffen, der irgendwo der Stadt steht. Die Chancen sind natürlich nahe Null. Um dennoch die Möglichkeit zu haben, den Eimer zu treffen muss man **sehr, sehr viele** Bälle aus dem Flugzeug abwerfen. Genau das macht man bei Streuexperimenten wie diesem und auch bei fast allen Experimenten in der GSI.

Die Am-241-Quelle hat eine Strahlungsaktivität von 330 kBq, d.h. es zerfallen pro Sekunde 330000 Americium-Kerne und senden jeweils ein Alpha-Teilchen aus. **Erst bei dieser Menge** von Teilchen kann man eine **Verteilung von gestreuten Teilchen** beobachten, die Aufschluss über das Innere eines einzelnen Atoms gibt. Um die Wahrscheinlichkeit einer Streuung noch weiter zu erhöhen, stellen wir außerdem mehrere Eimer auf, d.h. wir beschießen nicht nur einen Atomkern sondern etwa 5000 Atomlagen innerhalb einer Goldfolie mit einer Dicke von 2  $\mu$ m.

Machen wir uns den Weg eines Alphateilchens durch diese Goldfolie einmal wirklich klar.

Oft findet man dazu Abbildungen wie diejenige rechts. Dargestellt ist die dichte Packung der Goldatome (gelbe Kreisscheiben), in deren jeweiligem Zentrum der Atomkern sitzt (hier als kleiner dunkelgrüner Kreis markiert). Statt der 5000 Atomlagen sind hier nur 5 gezeichnet. Von links fallen nun die  $\alpha$ -Teilchen ein, deren weiterer Bahnverlauf mit Pfeilen dargestellt wird. Manche Bahnen (im Bild sind es nur zwei) verlaufen geradlinig von links nach rechts ohne Ablenkung, weil das  $\alpha$ -Teilchen immer nur in genügend großer Entfernung an allen Atomkernen vorbeigeflogen ist. In zwei weiteren Fällen kommt es zu geringfügigen Ablenkungen, in zwei weiteren sogar zu Reflexionen der  $\alpha$ -Teilchen an den Atomkernen.

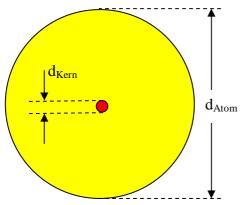


Die wirklichen Größenverhältnisse sind jedoch anders. Der Durchmesser  $d_{Atom}$  eines Goldatoms ist von der gleichen Größenordnung wie der Abstand zweier Atomlagen in der Goldfolie. Er beträgt daher etwa  $2\mu m$ : 5000 = 400 pm. Dagegen hat der Atomkern, wie wir heute wissen, nur einen Duchmesser  $d_{Kern}$  von rund 15fm!

Wenn man diese beiden Zahlen mit 10<sup>11</sup> multipliziert, dann erhält man ein anschauliches Modell des Goldatoms: Die von den äußeren Elektronen gebildete Kugelschale hätte in diesem Maßstab einen Durchmesser von 40m, in deren Zentrum der Kern mit 1,5mm Durchmesser gerade mal so groß ist wie der Kopf einer Stecknadel ist, wobei beinahe die gesamte Masse des Atoms auf diesen winzigen Kern entfällt. Um ein Gefühl für diese Dimensionen zu bekommen, denke man an eine Stecknadel im Innern des Kölner Doms (vgl. Vorwort).

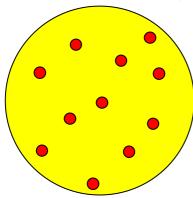


Man kann sich leicht wie Wahrscheinlichkeit p ausrechnen, mit der ein  $\alpha$ -Teilchen diesen Kern trifft, indem man sich Atom und Kern als "Zielscheiben" denkt, und deren Flächenverhältnis bestimmt.



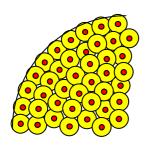
$$p_{\text{Treffer}} = \frac{A_{\text{Kern}}}{A_{\text{Atom}}} = \frac{\pi \cdot \left(\frac{d_{\text{Kern}}}{2}\right)^{2}}{\pi \left(\frac{d_{\text{Atom}}}{2}\right)^{2}}$$
$$= \left(\frac{d_{\text{Kern}}}{d_{\text{Atom}}}\right)^{2} \approx 1.4 \cdot 10^{-9}$$

Die Wahrscheinlichkeit für einen Treffer liegt bei diesem einen Goldatom also nur bei 0,00000014%! Daher ist es sehr wahrscheinlich, dass ein  $\alpha$ -Teilchen dieses eine Goldatom durchquert, ohne überhaupt etwas von dem Atomkern bemerkt zu haben.



Nun besteht die Folie aus insgesamt etwa 5000 Atomlagen, durch die das  $\alpha$ -Teilchen hindurch muss. Das bedeutet, dass wir in unserer "Zielscheibe" noch die Atomkerne der nächsten Lagen einzeichnen müssen, die auf dem Weg des  $\alpha$ -Teilchens liegen (in der Abbildung sind statt der 5000 nur 10 weitere eingezeichnet). Dadurch nimmt zwar die Trefferwahrscheinlichkeit um den Faktor 5000 zu, bleibt aber mit 0,0007% immer noch sehr gering.

Allerdings fliegen nun die  $\alpha$ -Teilchen häufig näher an den Kernen vorbei, denn in unserer Zielscheibe sind die 5000 Atomkerne im Mittel nur noch 6pm voneinander entfernt. Man kann sich, wie in der Abbildung gezeichnet, die Fläche der "Zielscheibe" durch 5000 kleine Kreisscheibchen mit dem Durchmesser d<sub>m</sub> überdeckt vorstellen. Die Fläche eines Kreisscheibchens ist damit



$$\pi \cdot \left(\frac{d_{m}}{2}\right)^{2} = \pi \cdot \left(\frac{d_{Atom}}{2}\right)^{2} : 5000$$

Wie man der nebenstehenden Abbildung entnimmt, ist  $d_m$  eine gute Abschätzung für den mittleren Abstand zweier in die Zielscheibenebene projizierter Atomkerne. Man erhält mit den bisherigen Werten

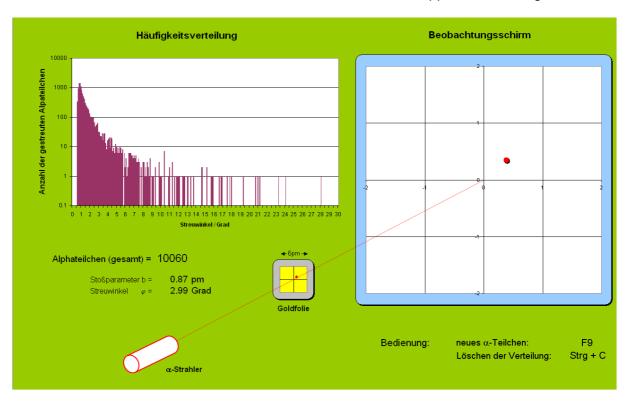
$$d_{\rm m} = \sqrt{d_{\rm Atom}^2 : 5000} \approx 6 \text{pm}$$

Fassen wir zusammen:

- Ein  $\alpha$ -Teilchen kann auf seiner Flugbahn im Mittel nicht weiter als 3pm an einem Atomkern der Goldfolie vorbeifliegen.
- Daraus folgt, dass ein  $\alpha$ -Teilchen beim Durchqueren der Goldfolie im Mittel um einen Winkel von etwa 1 $^{\circ}$  abgelenkt wird.
- Beim Durchqueren der Goldfolie kommen die α-Teilchen nur sehr, sehr selten in die unmittelbare Nähe eines Atomkernes oder stoßen sogar direkt mit einem solchen zusammen.



Starten Sie nun die EXCEL-Mappe "Rutherford\_2.xls ⇒ Häufigkeitsverteilung" (ebenfalls in Ihrem Experiment-Ordner), in dem nun der Beschuss der Goldfolie mit  $\alpha$ -Teilchen simuliert wird. Das Grafik-Blatt dieser EXCEL-Mappe ist unten abgebildet:



Links unten befindet sich der α-Strahler, der beim Drücken der Funktionstaste F9 immer ein neues α-Teilchen in Richtung der Goldfolie aussendet. Von der Goldfolie ist nur der kleine, 6pm breite Bereich um einen Atomkern dargestellt, durch den die  $\alpha$ -Teilchen zufällig verteilt hindurchfliegen. In dem oben gezeigten Screenshot wurden bereits 10060  $\alpha$ -Teilchen auf die Goldfolie geschossen. Auf der Goldfolie und dem Beobachtungsschirm ist die Lage des 10061-ten α-Teilchens dargestellt. Es hat einen Stoßparameter von 870fm und wird um 2.99 Grad abgelenkt. Bei nächsten Drücken der F9-Taste werden diese Werte in die oben links dargestellte Häufigkeitsverteilung übernommen.

Wenn man ein neues Simulationsexperiment beginnen will, kann man die alte Verteilung mit "Strg + C" löschen.

Probieren Sie den Beschuss durch Drücken der F9-Taste aus und beobachten Sie, wie manche α-Teilchen, die ganz nahe am Zentrum des Goldatoms vorbeifliegen, relativ stark abgelenkt werden und daher weit vom Zentrum entfernt auf den Beobachtungsschirm auftreffen.

Lässt man die F9-Taste eine Weile gedrückt, wird die Gesetzmäßigkeit der Verteilung sichtbar: Man kann deutlich erkennen, dass die Häufigkeit der gestreuten Teilchen bei großen Streuwinkel immer kleiner wird.

Außerdem erkennt man gut, dass – wie erwartet – kein α-Teilchen völlig unabgelenkt (Streuwinkel  $\varphi = 0^{\circ}$ ) aus der Goldfolie herauskommt.



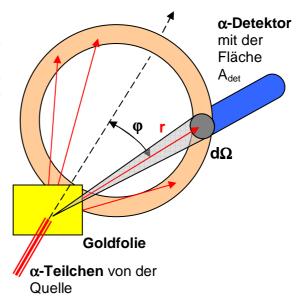
#### V.5.3. Der Einfluss des Detektorraumwinkels

Wenn man die im vorigen Abschnitt simulierte Verteilung in einem realen Experiment mit einem Teilchendetektor messen möchte, muss man noch eine Kleinigkeit bedenken. Ein solcher Detektor hat eine bestimmte Nachweisfläche A<sub>det</sub> für die einfallende Teilchenstrahlung. Bezeichnet man den Abstand vom Streuort mit r, und steht A<sub>det</sub> senkrecht auf r, dann bezeichnet man den Quotienten

$$d\Omega = \frac{A_{\text{det}}}{r^2}$$

auch als **Raumwinkel**. Je nachdem, welchen Streuwinkel man beobachtet, macht sich dieser Raumwinkel sehr unterschiedlich bemerkbar.

In der Abbildung sind 4 Bahnen von  $\alpha$ -Teilchen eingezeichnet, die alle zum



gleichen Streuwinkelbereich  $\phi$  gehören (hellbrauner Bereich), von denen aber nur eines tatsächlich im Detektor nachgewiesen wird. Man kann sich leicht vorstellen, dass die gleiche Detektorfläche  $A_{\text{det}}$  bei einem kleineren Streuwinkel einen größeren Teil des Streuwinkelbereichs abdeckt, bei größeren Streuwinkel entsprechend einen kleineren. Dies bedeutet, dass durch diesen Raumwinkeleffekt zu großen Streuwinkeln hin immer weniger Teilchen in den Detektor gelangen, obwohl sie alle den gleichen Streuwinkel haben.

### V.5.4. Die Rutherfordsche Streuformel

Die von Rutherford aufgestellte Streuformel berücksichtigt in ihrer gängigen Form alle in den vergangenen Abschnitten besprochenen Effekte:

$$\frac{n_s(\varphi)}{n_0} = \frac{1}{\left(4\pi \cdot \varepsilon_0\right)^2} \frac{Z^2 \cdot e^4 \cdot d \cdot N \cdot d\Omega}{4(E_{kin})^2} \frac{1}{\sin^4\left(\frac{\varphi}{2}\right)}$$

Hierbei bedeutet:

 $n_s$  die Zahl der unter einem Winkel  $\varphi$  in den Raumwinkel  $\Omega$  gestreuten Teilchen

dΩ den vom Detektor überdeckten Raumwinkel

n<sub>0</sub> die Zahl der einfallenden Teilchen pro Fläche und Zeit

d die Dicke des Targets

N die Anzahl der Targetatome pro Volumen

Ekin die kinetische Energie der einfallenden Alphateilchen

Z die Kernladungszahl der Targetatome

e die Elementarladung

 $\epsilon_0$  die elektrische Feldkonstante

Mit Ausnahme des Streuwinkels  $\phi$  bleiben während des Experimentes alle in der Formel vorkommenden Werte konstant. Es ist daher sinnvoll, diese in einer Konstanten C

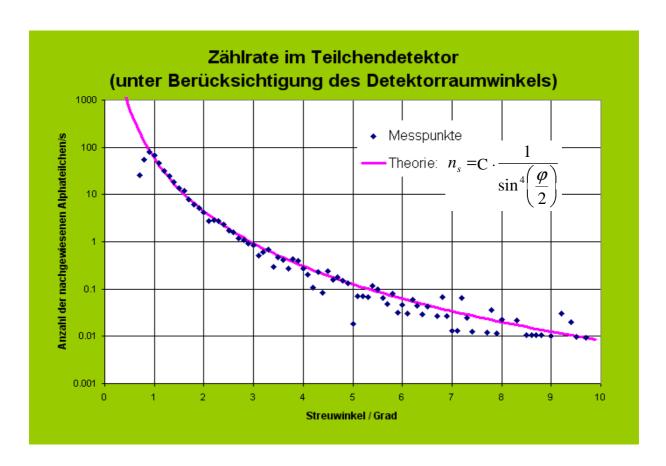


zusammenzufassen, und die Anzahl  $n_s$  der unter dem Winkel  $\phi$  gestreuten Teilchen mit Hilfe der Rutherfordformel in folgender Form aufzuschreiben:

$$n_{s} = C \cdot \frac{1}{\sin^{4}\left(\frac{\varphi}{2}\right)}$$

Charakteristisch an dieser Formel ist der zweite Faktor auf der rechten Seite. Er beschreibt die auch im realen Experiment leicht beobachtbare extreme Abnahme der Anzahl gestreuter Teilchen mit wachsendem Streuwinkel.

Die Computersimulation in dem EXCEL-Blatt "Rutherford\_2.xls ⇒ Zählrate" zeigt dies anschaulich. Pinkfarben eingezeichnet ist der theoretische Verlauf der Zählrate in Abhängigkeit vom Streuwinkel, wie ihn die Rutherfordsche Formel beschreibt. Wenn man die Simulation länger laufen lässt, erkennt man, dass sich die Messpunkte sehr gut an diese Kurve anschmiegen:



Das Ziel des von uns durchgeführten Experimentes ist der Nachweis genau dieses funktionalen Zusammenhangs zwischen der Zählrate  $n_s$  und dem Streuwinkel  $\phi$ .

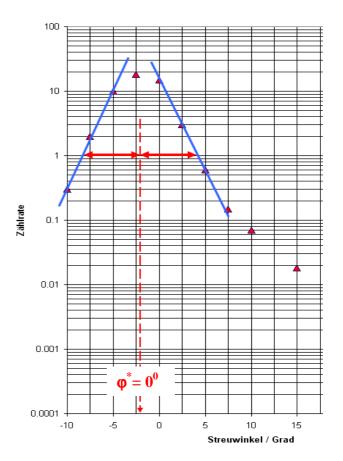


## V.6. Auswertung der Messung

## V.6.1. Die Symmetriekorrektur

Möglicherweise werden Sie bemerkt dass Ihre haben. Messwerte nicht symmetrisch um 0° herum verteilt sind. Ursache kann die ungenaue Positionierung des Strahlerstiftes und der Goldfolie in der Streukammer sein. Wenn man sich die Messwerte genauer betrachtet (siehe das Beispiel in der Abbildung rechts) dann kann man mit etwas Geschick und ein paar Hilfslinien die wirkliche Symmetrieachse finden und einzeichnen.

$$\varphi^* = \varphi + \Delta \varphi$$



Prüfen Sie, ob eine

Symmetriekorrektur nötig ist. Wenn ja, ermitteln Sie die Differenz  $\Delta \phi$  (im Beispiel sind dies rund  $2^{0}$ ) und tragen Sie die korrigierten (wahren) Winkel in die 2. Spalte des Protokollblattes ein.

Falls die Symmetriekorrektur entfällt, gilt  $\Delta \phi = 0$  und  $\phi^* = \phi$ .

## V.6.2. Der Vergleich mit der Rutherfordschen Streuformel

Im letzten Auswertungsschritt müssen Sie prüfen, ob die gemessenen Zählraten  $n_s(\phi^*)$  dem funktionalen Zusammenhang der Rutherfordformel entsprechen:

$$n_s = C \cdot \frac{1}{\sin^4 \left(\frac{\phi^*}{2}\right)}$$

Dazu muss der Parameter C aus den Messwerten berechnet werden:

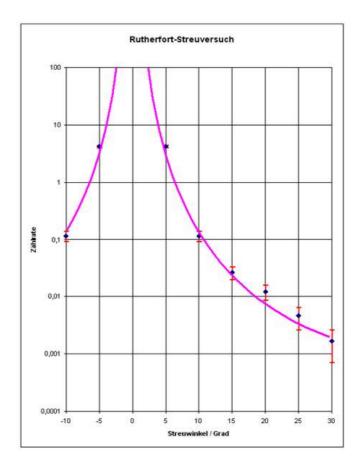
$$C = n_s \cdot \sin^4 \left( \frac{\phi^*}{2} \right)$$

Auf dem Protokollblatt ist dafür die Spalte 7 vorgesehen. Es empfiehlt sich, C nur für die mit guter Statistik gemessenen Werte bei  $\pm 5^{\circ}$ ,  $\pm 7,5^{\circ}$  und  $\pm 10^{\circ}$  zu berechnen und aus diesen den Mittelwert  $C_{\text{mittel}}$  zu bilden.

Mit  $C_{mittel}$  kann man dann für jeden Streuwinkel  $\phi^*$  den Theoriewert für  $n_s$  errechnen und ihn in das lin-log-Papier zusammen mit den Messwerten einzeichnen (nächste Seite).



Berechnen Sie C<sub>mittel</sub> und damit die Theoriewerte von n<sub>s</sub> nach der Rutherfordformel und stellen Sie diese mit den Messwerten gemeinsam in einem Diagramm dar.



**Alternative für Eilige:** Eine Besonderheit des Lin-Log-Papier ist es, dass sich die Gestalt eines Graphen nicht ändert, wenn man ihn mit einer Konstanten **multipliziert**.

Das können wir ausnutzen, und den Verlauf der Funktion  $n_s = c \cdot \frac{1}{\sin^4\!\!\left(\frac{\varphi^*}{2}\right)}$  für c=1

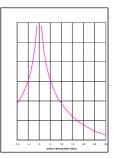
einzeichnen. Eine entsprechende Folie befindet sich in der Hülle der nächsten Seite. Um die Verträglichkeit der Messwerte mit der Rutherfordformel zu untersuchen, muss man dann nur versuchen, diese Kurve durch Verschieben der Folie in x- und y-Richtung mit den Messdaten zur Deckung zu bringen.



Folie mit dem Verlauf der Funktion

$$n_s = c \cdot \frac{1}{\sin^4 \left(\frac{\varphi^*}{2}\right)}$$

in Lin-Log-Darstellung (zum Vergleich mit den Messdaten)



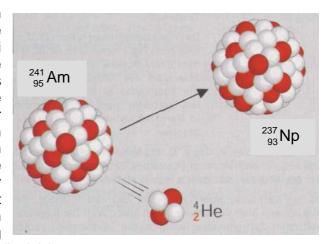
Bitte in diese Tasche zurücklegen!



## Hintergrundwissen

## H.1. Die Alphastrahlung von Americium-241

Bestimmte Nuklide (Atomkernarten) haben die Eigenschaft, sich von selbst, ohne äußere Einwirkung, umzuwandeln. Dabei wird Strahlung ausgesandt. bezeichnet Eigenschaft man als Radioaktivität. Die Kerne radioaktiver Atome heißen Radionuklide. Von den bisher etwa verschiedenen bekannten 2800 Nukliden, die Isotope der 114 chemischen Elemente sind, sind nur 264 stabil, alle anderen zerfallen spontan. Bei den in der Natur vorkommenden Radionukliden spricht man von natürlicher Radioaktivität, bei den Kernumwandlung durch künstliche



erzeugten Radionukliden von künstlicher Radioaktivität.

Manche Radionuklide senden bei ihrem Zerfall sogenannte "Alphastrahlung" aus. Die dabei aus dem Kern herausgeschleuderten  $\alpha$ -Teilchen sind nichts anderes als Heliumkerne, die aus zwei Protonen und zwei Neutronen bestehen. Die Geschwindigkeit der austretenden Alphateilchen liegt zwischen etwa 15 000 km/s und 20 000 km/s. Im vorliegenden Experiment wird als  $\alpha$ -Quelle das künstlich erzeugte Radionuklid Americium-241 verwendet. Dieser Kern enthält 95 Protonen und 146 Neutronen. Seine Kernladungszahl beträgt demnach 95, seine Massenzahl 241. Da die Kernkräfte die abstoßenden Kräfte der Protonen untereinander nicht vollständig aufheben können, ist dieser Kern nicht stabil. Er hat deshalb das Bestreben, in einen stabileren Zustand überzugehen. Dies geschieht in mehreren Stufen, von denen in der Abbildung nur eine dargestellt ist. Der Kern schleudert einen Heliumkern heraus, wodurch die Kernladungszahl um 2, die Massenzahl um 4 sinkt. Es entsteht das neue Element Neptunium-237. Dieser Vorgang kann durch eine sog. "Kernreaktionsgleichung" wie folgt beschrieben werden:

$$^{241}_{95}Am \rightarrow ^{237}_{93}Np + ^{4}_{2}He$$

In der Gleichung wird links vom Reaktionspfeil der Kernaufbau des Ausgangsatoms, rechts davon das Ergebnis des Zerfalls geschrieben. Dabei müssen auf beiden Seiten die Summe der Kernladungszahlen (95 = 93 + 2) und die Summe der Massenzahlen (241 = 237 + 4) übereinstimmen. Das beim Zerfall entstandene Neptunium gibt zwei Hüllelektronen an die Umgebung ab und wird damit nach außen wieder elektrisch neutral. Das zunächst 2-fach positiv geladene  $\alpha$ -Teilchen nimmt aus der Umgebung zwei Elektronen auf, wodurch zu guter Letzt Heliumatome entstehen. Bei alphastrahlenden Substanzen, die sich in geschlossenen Behältern befinden, kann deshalb nach einiger Zeit Heliumgas nachgewiesen werden.

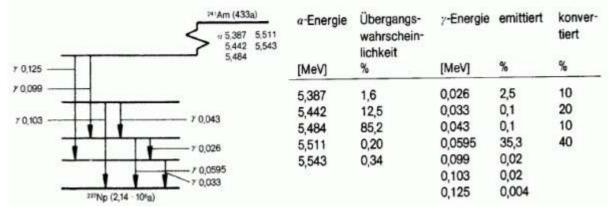


Wie ein Blick auf die Nuklidkarte zeigt, ist das beim Zerfall entstandene Neptunium-237 seinerseits ebenfalls radioaktiv und zerfällt mit einer Halbwertszeit von 2,1 Millionen Jahren wiederum durch  $\alpha$ -Zerfall.

			95	Am	Am 232 1,31 min		Am 234 2,32 min		Am 236 3,7 min	Am 237 73,0min	Am 238 1,63h	Am 239 11,9h	Am 240 50,8h	Am 241 432,2 a	Am 242 16h	Am 243 7370a
			,,,		ε α: sf		ε α: 6,46		ε α: 6.41	α: 6.0 γ: 0,280 sf	α: 5.94 γ: 0.963 st	α: 5,774 γ: 0,278 st	α: 5.378 γ: 0.988 sf	α: 5,488 γ: 0,060 sf	β : 0,6 γ sf	α: 5,275 γ: 0,075 sf
		Pu	100			Pu 232	Pu 233 20,9 min	Pu 234	Pu 235 25,3 min	Pu 236 2,858a	Pu 237 45,2d	Pu 238 87,74a	Pu 239 2,411-10 <sup>4</sup> a	Pu 240 6563 a	Pu 241 14,35 a	Pu 242 3,750 10 <sup>5</sup> a
94							e c: 6,31 y: 0,235	E	ε α: 5.85 γ: 0.049 sf	C0404207040533	e a: 5,334 y: 0,06 sf	α: 5,499 γ sf	α: 5,157 γ sf	α: 5,168 γ sf	α: 4,896 β : 0,02 γ sf	a: 4,901 Y sf
0.2	Np	Np 227 0,51 s	Np 228 61.4s	Np 229 4,0 min	Np 230 4,6 min	Np 231 48,8 min	Np 232 14,7 min	Np 233 36,2 min	Np 234 4,4d	Np 235 396,1d	Np 236 1,54-10° a		Np 238 2,117d	Np 239 2,355 d	Np 240 65 min	Np 241 13,9 min
93		α: 7,68	ε α sf	ε? α: 6,89	ε α: 6,66	ε α: 6,28 γ: 0,371	E Y: 0.327	ε α: 5,54 γ	β γ: 1.559	ε α: 5.025 γ	B	α: 4,790 γ: 0,029 sf	β : 1,2 γ: 0,984	β*: 0.3 γ: 0.106	β <sup>+</sup> : 0.9 γ: 0,566	β <sup>-</sup> : 1,3 γ: 0,175
	U	U226 0,2s	U 227	U 228 9,1 min	U229 58 min	U 230 20,8 d	U231 4.2d	U 232 68,9 a	U 233 1,592 · 10 <sup>5</sup> a	U 234 0,0055	U 235 0.7200	U 236 2,342 · 10 <sup>7</sup> a	U237 6,75d	U 238 99,2745	U239 23,5 min	U240 14.1 h
92	238,0289	α: 7.57		ε α: 6,68 γ	ε α: 6,362	α: 5,888 γ	ε α: 5,456 γ: 0,026	α: 5,320 γ sf	α: 4,824 Υ	2,455 · 10 <sup>5</sup> a a: 4,775		α: 4,494 γ sf	β-: 0.2 γ: 0.060	4,468 · 10 <sup>9</sup> a α: 4,198 γ sf	β 1.2 γ: 0,075	β <sup>-</sup> : 0,4 γ: 0,044
223 ms	Pa 224 0.95 s	Pa 225	Pa 226	Pa 227 38,3 min	Pa 228 22h	Pa 229	Pa 230 17,4d	Pa 231 3,276 10 <sup>4</sup> a	Pa 232 1,31 d	Pa 233 27,0d	Pa 234	Pa 235 24,2 min	Pa 236 9,1 min	Pa 237 8,7 min	Pa 238 2,3 min	148
	α: 7.555	a: 7.25	ε α 6,86	ε α: 6,466 γ: 0,065	ε α: 6,078 γ: 0,911	ε α: 5,580 γ	α: 5,345 β: 0,5 γ: 0,952	α: 5,014 γ: 0,027	β <sup>-</sup> : 0.3 γ: 0.969	β : 0.3 γ: 0,312	β : 2,3 γ	β : 1.4 γ:- 0.128	β <sup>-</sup> : 2,0 γ: 0,642	β-: 1,4 γ: 0,854	β <sup>-</sup> : 1.7 γ: 1.015	
222 ms	Th 223 0,66 s	Th 224	Th 225 8,72 min	Th 226 31 min	Th 227 18,72 d	Th 228 1,913a	Th 229 7880 a	Th 230 7,54 · 10 <sup>4</sup> a	Th 231 25,5h	Th 232	Th 233 22,3 min	Th 234 24,10d	Th 235	Th 236 37,5 min	147	
ž.	α: 7,29 γ: 0,140	α: 7,17 γ: 0,177	α: 6.482	α: 6,336 γ: 0,111	α: 6,038 γ: 0,236	α: 5,423 γ: 0,084	α: 4,845 γ: 0.194	Contract of the Contract of th	β : 0.3 γ: 0.026	1 405 1010.	The second second second	β : 0.2 γ: 0.063	β <sup>-</sup> : 1,4 γ: 0,417	β-: 1.0 γ: 0.111		
221	Ac 222	Ac 223	Ac 224	Ac 225	Ac 226	Ac 227	Ac 228	Ac 229	Ac 230	Ac 231	Ac 232	144	145	146		

### H.2. Das Am-241-Präparat

Das Präparat ist eine nahezu punktförmige Strahlungsquelle. Der radioaktive Stoff befindet sich in der Form  $AmO_2$  in einer Goldmatrix zwischen einer etwa  $1\mu m$  dicken Unterlage aus Gold und einer etwa  $0,2~\mu m$  dicken Deckschicht aus einer Gold-Palladium-Legierung auf einem etwa 0,2~mm dicken Träger aus Silber. Neben  $\alpha$ -Teilchen treten auch noch  $\gamma$ -Strahlen) aus, sowie durch sog. "innere Konversion" entstandene  $\beta$ -Teilchen.



Die Abbildung zeigt ein Kernniveauschema dieses Isotops, in dem die entsprechenden Strahlungsübergänge eingezeichnet sind. Das 241Am-Präparat ist in die Vertiefung eines Strahlerhalters aus Aluminium eingebettet. Seine Aktivität beträgt 340 kBq, die Ionendosisleistung in 10cm Abstand beträgt 1,5 pA kg<sup>-1</sup>.

Wegen der Abdeckung beträgt die mittlere Energie der austretenden Alphateilchen nur rund 4 MeV.



## H.3. Abstoßung zwischen gleichnamigen Ladungen

### Die elektrische Kraft zwischen Ladungen

Ungleichnamige Ladungen ziehen sich an, gleichnamige Ladungen stoßen sich ab. Wie groß die Kraft dieser Abstoßung ist, lässt sich anhand des Coulomb-Gesetzes ermitteln:

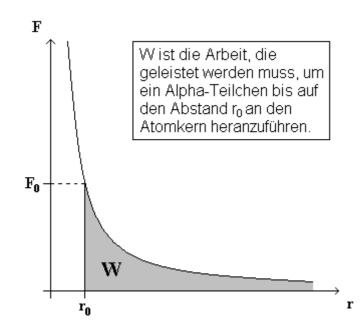
$$F = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \cdot \frac{q \cdot Q}{r^2} \quad \text{oder} \quad F = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \cdot \frac{Z_1 Z_2 e^2}{r^2}$$

 $\epsilon_0$  ist die elektrische Feldkonstante. Sie beträgt 8,854 \*  $10^{-12}$  C/Vm. q und Q sind die Ladungen von Alpha-Teilchen und Atomkern.  $Z_1$  und  $Z_2$  sind die Kernladungszahlen von Alpha-Teilchen und Atomkern.

Da jede Ladung ein ganzzahliges Vielfaches der Elementarladung e (Elektronenladung) ist, ermittelt sich die Ladung der Kerne aus dem Produkt aus Kernladungszahl und Elementarladung. Ein Alphateilchen hat die Kernladungszahl 2, die Ladung beträgt also 2\*e. Ein Gold-Atom hat die Kernladungszahl 79, also ist die Ladung 79\*e. Das Produkt beider Ladungen ist 2\*e\*79\*e = 158\*e².

r ist der Abstand zwischen Atomkern und Alpha-Teilchen. Die Formel enthält den Faktor 1/r², d.h. die Kraft nimmt quadratisch mit zunehmender Entfernung ab.

### **Energie zwischen Ladungen**



$$W = F \cdot s$$

$$W = \int F \cdot ds$$

$$W = \int_{r_0}^{\infty} \frac{Z_1 Z_2 e^2}{4\pi \varepsilon_0 r^2} dr$$

Nach Auflösen des Integrals erhält man

$$W = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{4\pi \varepsilon_0 r_0}$$

Arbeit ist Kraft entlang eines Weges. Da sich in diesem Fall aber die Kraft auf dem Weg ständig ändert muss man sie über den Weg integrieren. Dadurch erhält man den Flächeninhalt unter der Kurve, der der zu verrichtenden Arbeit entspricht.

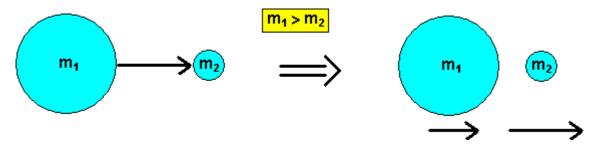
Man erkennt an der Formel, dass die Energie im Gegensatz zur Kraft nicht quadratisch, sondern linear mit der Entfernung abnimmt.



## H.4. Impulsübertragung

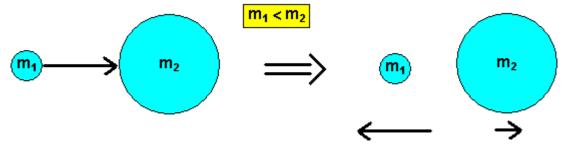
Wie viel Energie ein Teilchen bei einem Stoß mit einem anderen Teilchen abgibt hängt u.A. vom Massenverhältnis der Teilchen ab. Wir unterscheiden drei Fälle:

#### Schweres Teilchen trifft leichtes



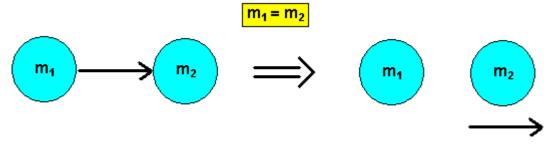
Das schwere Teilchen gibt einen Teil seiner Energie an das leichte Teilchen ab. Beide bewegen sich nach dem Stoß in die gleiche Richtung weiter. Je größer der Massenunterschied, umso weniger Energie verliert das schwere Teilchen.

### Leichtes Teilchen trifft schweres



Das leichte Teilchen gibt einen geringen Teil seiner Energie an das schwere ab und wird in die Gegenrichtung gestreut. Je größer der Massenunterschied, umso weniger Energie verliert das leichte Teilchen.

### Zwei gleichschwere Teilchen stoßen zusammen



Das erste Teilchen gibt seine komplette Energie an das zweite ab und bleibt stehen, während das zweite Teilchen sich mit der Geschwindigkeit des ersten nach rechts bewegt.



### Bedeutung für den Rutherford-Versuch

### 1. Streuung:

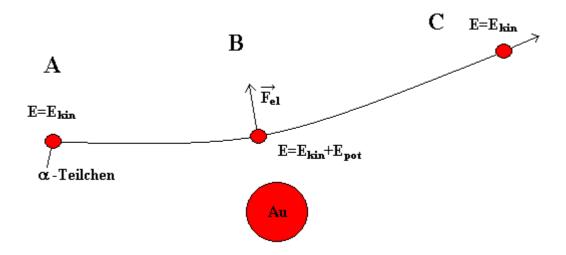
Beim Rutherford-Versuch beobachten wir, dass manche Teilchen nicht nur abgelenkt, sondern gestreut werden und in die Gegenrichtung zurückfliegen. Betrachtet man die drei Fälle des Impulsübertrages stellt man fest, dass hier der zweite Fall vorliegt. Das bedeutet, dass die gestreuten Alpha-Teilchen auf Teilchen mit wesentlich größerer Masse stoßen – ein entscheidender Hinweis auf die Richtigkeit des Rutherford'schen Atommodells, nach dem es im Atomkern ein Massezentrum gibt.

### 2. Energieerhaltung:

Alle Alpha-Teilchen, die auf die Goldfolie geschossen werden verlieren keine Energie, egal ob sie gestreut werden, ob sie abgelenkt werden, oder ob sie ungehindert durch die Folie dringen.

Auch das ist ein Hinweis darauf, dass das Thomson'sche Atommodell falsch ist, denn wenn die Masse gleichmäßig im Atom verteilt wäre, würden die Alpha-Teilchen Energie an das Atom abgeben (analog zum 1. Fall der Impulsübertragung).

Dieses Phänomen soll anhand der folgenden Grafik erklärt werden.



Das Alpha-Teilchen besitzt zunächst nur seine kinetische Energie (A). Es bewegt sich auf den Atomkern zu und wird durch die Abstoßungskräfte gebremst. Die Bewegungsenergie, die das Teilchen einbüßt ist jetzt in Form von potentieller Energie zwischen Teilchen und Atomkern vorhanden (B). Bewegt sich das Teilchen nun wieder vom Atomkern weg, beschleunigen die Abstoßungskräfte das Alpha-Teilchen, die potentielle Energie wird wieder in kinetische Energie umgewandelt, so dass das Teilchen wieder seine ursprüngliche Geschwindigkeit und damit seine ursprüngliche Energie wieder erlangt (C).

Nun wissen wir, dass  $\alpha$ -Teilchen bereits durch ein dünnes Blatt Papier vollständig abgebremst werden, d.h. ihre gesamte kinetische Energie verlieren. Das liegt an ihrer Wechselwirkung mit den Hüllenelektronen der durchquerten Atome. Diese Wechselwirkung führt zur Anregung oder zur Ionisation der Atome. Dadurch erleidet das durchquerende Teilchen einen Energieverlust, welcher durch die sog. Bethe-Bloch-Formel (vgl. http://de.wikipedia.org/wiki/Bethe-Bloch-Formel) näherungsweise berechnet werden kann.



# **Protokollblatt**

Ablenkwinkel (gemessen) φ / Grad	Ablenkwinkel (wahr) φ <sup>*</sup> / Grad	Messzeit $\Delta t/s$	Anzahl N	Zählrate $n_s = N / \Delta t$	Standard- abweichung $\sigma = \frac{\sqrt{N}}{\Delta t}$	Konstante C aus Rutherfordformel $C = n_s \cdot sin^4(\phi^*/2)$	Theoriewert $n_s^{\text{theor}} = G_{\text{mittel}} / \sin^4(\phi^*/2)$		
-10.0		300							
-7.5		200							
-5.0		200							
0		100				n.d.			
+5.0		200							
+7.5		200							
+10.0		300							
+15.0		600							
+20.0		900							
+25.0		1200							
+30.0		1800							
Mittelv	Mittelwert aus den Messungen ±5°, ±7,5° und ±10°. C mittel =								