

Übungen zur Vorlesung: Integrierter Kurs Physik IV (Exp) Sommersemester 2023

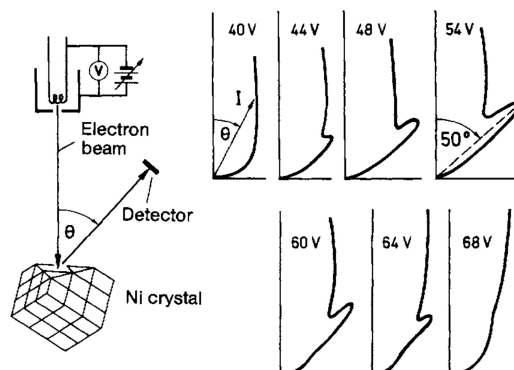
Prof. Dr. Mikhail Fonin

Übungsblatt 3, Ausgabe: 01.05.2023, Abgabe: 08.05.2023
Besprechung in den Übungen am 10.05.2023

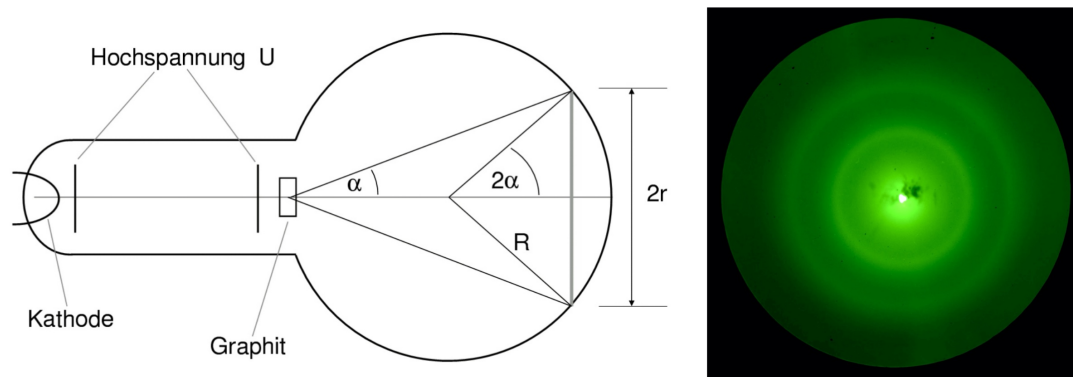
Aufgabe 1: Elektronenbeugung, Materiewellen (schriftlich, 10 Punkte)

Im Experiment von Davisson und Germer zeigte sich der Wellencharakter von Elektronen bei Beugung an Kristallen. In diesem Versuch wurde ein Elektronenstrahl senkrecht auf einen Kristall (Nickel) geschossen und die Intensität der reflektierten Elektronen winkelabhängig für verschiedene Beschleunigungsspannungen gemessen. Im Vorlesungsexperiment verwendete man eine hoch-orientierte Graphit-Probe statt Nickel-Einkristall.

- a) Nutzen Sie die relativistische Energie-Impulsbeziehung der Elektronen, um den Ausdruck für den Impuls herzuleiten. *Hinweis: Nutzen Sie für die Gesamtenergie: $E = E_{\text{kin}} + E_0 = E_{\text{kin}} + m_0c^2$.* Berechnen Sie nun die de-Broglie Wellenlänge $\lambda = h/p$ für kinetische Energien von 1 eV, 100 eV, 1000 eV und 100 keV. (2 Punkte)
- b) Im Experiment von Davisson und Germer beobachtete man ein ausgeprägtes Intensitätsmaximum bei einem Winkel von $\theta = 50^\circ$ und einer Beschleunigungsspannung von 54 V. Ist eine relativistische Betrachtung der Elektronen für dieses Ergebnis notwendig? Begründen Sie ihre Antwort mit einer kurzen Rechnung. (1 Punkt)



- c) Der Kristall kann selbstverständlich auch unter Zuhilfenahme der Bragg-Bedingung untersucht werden. Berechnen Sie den Gitterebenenabstand im Nickel-Einkristall für $\theta = 50^\circ$ und $E_{\text{kin}}=54\text{ V}$ unter Annahme $n = 1$. **(0.5 Punkte)**
- d) Nun widmen wir uns dem Vorlesungsexperiment. Hierbei wird Elektronenbeugung am hochorientierten Graphit (highly oriented pyrolytic graphite, HOPG) beobachtet. Durch Glühemission werden in einem evakuierten Glaszylinder freie Elektronen erzeugt und durch Anlegen einer Hochspannung Richtung Graphitprobe beschleunigt. Auf dem kugelförmigen Leuchtschirm ($R=65\text{ mm}$) entsteht ein Beugungsbild aus konzentrischen Ringen. Die kinetische Energie, die die Elektronen durch das Durchlaufen der Hochspannung bekommen, ist hier nicht-relativistisch (m : Ruhemasse) auszunehmen: $eU = \frac{1}{2}mv^2$. Wie bekannt gilt dann $p = h/\lambda$. Stellen Sie den Zusammenhang von λ zu U her. **(0.5 Punkte)**

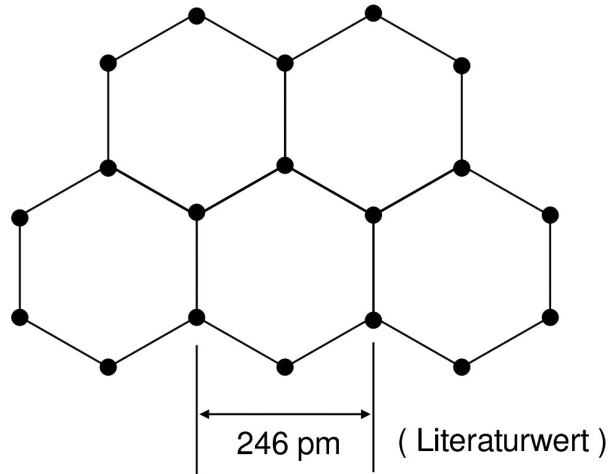


- e) Wie hängt der Winkel α aus der Versuchsanordnung mit dem Winkel θ aus der Bragg-Bedingung $2d \sin \theta = n\lambda$ zusammen? Es werden nur erste Ordnungen ($n=1$) gemessen. Zeigen Sie, dass sich die Gitterabstände zu $d = 2R\lambda/r$ ergeben. Es handelt sich bei α um kleine Winkel. **(1 Punkt)**
- f) Die folgende Tabelle gibt Messwerte für die Durchmesser zweier Ringe bei verschiedenen Beschleunigungsspannungen. (Werte für Ring 1 gehören natürlich zum selben Netzebenenabstand d_1 für alle U , so wie Werte von Ring 2 immer auf dasselbe d_2 zurückzuführen sind.) Erweitern Sie die Tabelle um Spalten für λ der Elektronen und jeweils errechneten Werten d_1 und d_2 . Bilden Sie für letztere Mittelwerte aus Messungen bei allen U . **(2 Punkte)**

U	Ø Ring 1	Ø Ring 2
3 kV	47,6 mm	26,8 mm
4 kV	41,4 mm	22,8 mm
5 kV	37,7 mm	20,7 mm
6 kV	34,2 mm	19,3 mm
7 kV	31,3 mm	17,2 mm
8 kV	29,4 mm	16,7 mm

- g) Im vorherigen Abschnitt haben Sie Werte von etwa 121 pm und 218 pm für d_1 bzw. d_2 erhalten. Finden Sie anhand der untenstehenden Zeichnung Netzebenen, deren Abstände diesen Werten entsprechen. (Der Abstand der wabenartigen Graphitebenen

in der dritten Dimension ist viel größer und spielt hier keine Rolle.) Abweichungen von einigen Pikometern dürfen Sie bei der Zuordnung zulassen. Erklären Sie, warum im Experiment Ringe und kein Punktemuster beobachtet wird. (1 Punkt)



- h) Argumentieren Sie, warum beim Rutherford-Versuch das Streumuster nicht auch durch die Kristallstruktur des beschossenen Materials beeinflusst wurde, sondern dort die Größe der einzelnen Atomkerne entscheidend war. Berechnen Sie dazu die deBroglie-Wellenlänge der α -Teilchen mit kinetischer Energie 12,75 MeV; vergleichen Sie hier die Ergebnisse, die man mit nicht-relativistischer bzw. relativistischer Energie-Impuls-Beziehung erhält, und rechnen Sie auch die Geschwindigkeit des α -Teilchens aus. Vergleichen Sie dann die erhaltene de Broglie-Wellenlänge mit den Atomabständen in Gold oder Aluminium, die (je nachdem, welche Gitterebenen man betrachtet) etwa 3-4Å betragen. (2 Punkte)

Aufgabe 2: Masse des Photons (1 Kreuzchen)

In der heutzutage gängigen physikalischen Theorie hat das Photon keine Ruhemasse. Mit Hypothesen, dass es eventuell doch eine sehr kleine Ruhemasse hat, können Experimente bzw. astronomische Messungen dann natürlich nur obere Schranken für diese ermitteln. Eine solche ist $m_0 \leq 6 \cdot 10^{-16} \text{ eV}/c^2$ (Phys. Rev. Lett. 35, 1402 (1975)).

- Rechnen Sie den Wert zunächst einmal in kg um.
- Nehmen Sie den angegebenen Grenzwert hier einmal als die Ruhemasse des Photons an. Gehen Sie von der relativistischen Energie-Impuls-Beziehung für massebehaftete Teilchen aus ($E = \sqrt{m_0^2 c^4 + p^2 c^2}$) und leiten Sie eine Formel für die Gruppengeschwindigkeit $v_{gr} = d\omega/dk$ als Funktion der Wellenzahl k bzw. der Wellenlänge λ her. $E = \hbar\omega$, $p = \hbar k$ und $k = 2\pi/\lambda$ dürfen Sie verwenden.
- Wie groß wäre die Flugzeitdifferenz zwischen blauem Licht ($\lambda_B = 400 \text{ nm}$) und rotem Licht ($\lambda_R = 800 \text{ nm}$), auf einer Distanz von 1000 Lichtjahren? Verwenden Sie $v_R v_B \approx c^2$.

Aufgabe 3: Photo-Effekt (1 Kreuzchen)

- a) Eine Materialoberfläche wird nacheinander mit Licht der beiden in der Tabelle aufgeführten Wellenlängen bestrahlt und die Bremsspannung U gemessen. Gewinnen Sie die Austrittsarbeit W_A des Materials und ermitteln Sie einen Wert für h/e . (Der Wert der Lichtgeschwindigkeit c ist als bekannt anzunehmen.)

λ [nm]	U [V]
405	1,12
546	0,33

Die folgende Tabelle gibt Literaturwerte für die Austrittsarbeiten einiger Stoffe. Um welches Material könnte es sich im Versuch gehandelt haben?

Material	W_A [eV]
Li	2,46
Na	2,28
K	2,25
Rb	2,13
Cs	1,94

- b) Eine Glühbirne mit einer Lichtleistung von 4 W beleuchtet aus einer Entfernung von 1,8 m ein Aluminiumplättchen ($W_A = 4,3$ eV, $n = 10^{23}$ Elektronen pro cm^3 , Eindringtiefe des Lichts $d = 500$ nm), das sich in einem evakuierten Gefäß befindet. Berechnen Sie, wie lange es gemäß klassischer Elektrodynamik dauert, bis ein Elektron genug Strahlungsenergie aufgesammelt hat, um das Metall zu verlassen. Gehen Sie davon aus, dass die gesamte Strahlungsenergie gleichmäßig in kinetische Energie aller Elektronen umgewandelt wird. Es soll also die gesamte Lichtleistung absorbiert werden, d.h. die Elektronen verlieren keine Energie und haben statistisch alle die selbe Energie. Welchen Zeitverzug beobachtet man statt dessen?