

Übungen zur Vorlesung Mod. Experimentalphysik I

KIT, Sommersemester 2024

Prof. Dr. T. Müller, Dr. D. Hinz



Vorlesungen	Di 9:45 + Do 11:30, Gerthsen-Hörsaal 30.21
Übungen	Mo 8:00, 9:45, 11:30 (Anmeldung im Ilias)
Sprechstunde	Dr. Hinz: nach Vereinbarung (dominic.hinz@kit.edu)
Ilias	s.kit.edu/ex4ss24

Übungsblatt 2 Bearbeitung bis 06.05.2024

(5) Wechselwirkung von Photonen und Materie

Am European x-ray free electron laser (XFEL) können Photonen mit einer Wellenlänge bis zu 0.05 nm erzeugt werden. Ein solches Röntgen-Photon trifft auf ein ruhendes Elektron, das um 90° relativ zum Photon gestreut wird.

- (a) Welche Frequenz hat das Photon vor und nach dem Stoß? Wie schnell ist das Elektron nach dem Stoß? Muss man hier relativistisch rechnen?
- (b) Rotes Licht hat eine Wellenlänge von ca. 600 nm. Um welchen Faktor x ist das Licht niederenergetischer als das Röntgen-Photon?
- (c) Nun lässt man x rote Photonen (je mit x -fach geringerer Energie) auf dieselbe Art mit dem Elektron stoßen. Ist die kinetische Energie des Elektrons nach den x Stößen gleich, größer oder kleiner als im Stoß mit dem einzelnen Röntgen-Photon? Falls es nicht gleich ist, um wieviel?
- (d) Ist der Comptoneffekt im oben genannten Beispiel eine effiziente Materie-Photonen Wechselwirkung?
- (e) Welche weiteren Wechselwirkung von Photonen mit Materie gibt es und in welchen Energiebereichen sind sie relevant (und warum)?

(6) Kristallstrukturanalyse

Eine wichtige Methode zur Untersuchung der Struktur von Kristallen ist die Beugung von Röntgenstrahlen (z.B. bei ANKA im KIT). Hierbei werden nicht nur Metalle oder anorganische Kristalle, wie Salze, untersucht. Von ebenso großem Interesse sind Proteinkristalle. Anhand des Beugungsmusters lässt sich der molekulare Aufbau nach Rekonstruktion mit aufwendigen Rechenmethoden bestimmen. Durch dieses Verfahren wurde beispielsweise die DNA entschlüsselt. Beugungseffekte treten immer dann auf, wenn das streuende Wellenpaket/Teilchen eine Wellenlänge in der Größenordnung des Objekts hat.

- (a) Es wird ein monochromatischer Röntgenstrahl erzeugt, dessen Photonen eine Energie von 10 keV besitzen. Dieser Strahl wird auf eine dünne Metallfolie fokussiert. Es werden nun Beugungsreflexe unter einem Winkel von 15.77° gemessen. Bestimmen Sie mithilfe von Abb. 1 um welches Material es sich handelt.

Ordnungszahl	Elementesymbol						
Elementenname							
Atomare Masse (in u)							
Schmelzpunkt (in °C)	Elektronegativität						
Siedepunkt (in °C)	Dichte (in g·cm ⁻³)						
29	Cu	Kupfer		47	Ag	Silber	
	63,546				107,8682		
1084,62	1,8			961,78	1,4	Gold	
2927	8,92			2162	10,49		
						196,966569	
						1064,18 1,4	
						2856 19,32	

Abbildung 1: Auszug aus dem Periodensystem.

- (b) Eine andere Möglichkeit der Strukturanalyse stellt die Neutronenstreuung dar (z.B. aus Forschungsreaktoren wie dem FRM II in München). Die Neutronen entstehen im Kernreaktor mit kinetischen Energien im Bereich von MeV und müssen zunächst durch Stöße moderiert/thermalisiert (abgebremst) werden. Warum verwendet man dazu Stoffe die Wasserstoff enthalten, wie beispielsweise Wasser, H₂O?
- (c) Wie schnell sind die Neutronen nach der Moderation (ausreichend viele Stöße!) mit Wasser bei Raumtemperatur? (Hinweis: Die mittlere thermische Geschwindigkeit beträgt $v_{\text{therm}} = \sqrt{\frac{2kT}{m}}$)
- (d) Freie Neutronen (ungeladen) sind radioaktiv und zerfallen nach einer mittleren Lebensdauer von $\tau = 881$ s in ein Proton (positiv geladen), Elektron (negativ geladen) und Antineutrino (ungeladen). Hat dieser Zerfall einen signifikanten Einfluss auf Beugungsexperimente mit Neutronen, die typische Energien (Teilaufgabe c) besitzen?
- (e) Welche kinetische Energie müssen Neutronen haben, damit Beugungsreflexe unter demselben Winkel wie in Teilaufgabe a) gefunden werden.
- (f) Was ist der Hauptunterschied zwischen der Neutronen- und Röntgenbeugung in Hinblick auf die Wechselwirkung mit den Atomen?

(7) Rutherford-Streuung

Im Jahr 1909 führte Ernest Rutherford seinen berühmten Streuversuch von Alpha-Teilchen an Goldfolie durch. Er verwendete dafür α -Teilchen aus einer Radium-Quelle mit einer Energie von $E_{\alpha} = 4,78$ MeV. Er bestimmte den differentiellen Streuquerschnitt zu

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \left(\frac{Z_1 Z_2 e^2}{16\pi\epsilon_0 E_{\text{kin}}} \right)^2 \cdot \frac{1}{\sin^4 \frac{\theta}{2}} \quad (1)$$

- (a) Skizzieren Sie den Versuchsaufbau und beschreiben Sie die Versuchsdurchführung.
- (b) Skizzieren Sie das Messresultat (Zählrate über Streuwinkel) und erläutern Sie, warum daraus eine homogene Ladungsverteilung ausgeschlossen werden kann und warum stattdessen die positive Ladung in einem kleinen Volumen (Atomkern) konzentriert sein muss.
- (c) Berechnen Sie den geringsten Abstand eines α -Teilchens ($Z = 2$) von einem Goldatom ($Z = 79$), wenn das α -Teilchen mit einer Energie E_{α} frontal auf das Goldatom geschossen wird. Bei welcher Energie berühren sich Alpha-Teilchen und Goldatom? Hinweis: Für den Atomradius gilt $r = r_0 \cdot A^{\frac{1}{3}}$ mit der Massenzahl A und dem Parameter $r_0 = 1$ fm.
- (d) Was für eine Ereignisrate erwarten Sie für einen Streuwinkel von 90°, wenn Sie dort im Abstand von 30 cm einen Detektor mit einer aktiven Fläche von 5 cm² aufbauen? Nehmen Sie einen Strom von 10 nA für einen α -Teilchenstrahl mit Querschnittsfläche von 1 cm an. Die Dicke der Goldfolie

sei 400 nm, sodass Mehrfachstreuung ausgeschlossen werden kann. Die Energie der α -Teilchen betrage E_α .

- (e) Sie möchten die Ergebnisse von Rutherford (Existenz des kleinen Kerns im Verhältnis zur Größe des Atoms) in einem eigenen Experiment bestätigen, doch Sie können sich keine Goldfolie leisten. Wählen Sie als Alternative lieber ein Material mit hohem oder mit niedrigem Z ?

(*) Punkteverteilung

Aufgabe	Teilaufgabe	Punkte
5	a, c, e	je 1
5	b, d	je 0.5
6	a, e	je 1
6	b, c, d, f	je 0,5
7	a, b, e	je 0,5
7	c	1
7	d	2

Bei Verständnisfragen gerne das Forum im ILIAS nutzen oder eine Mail an die Übungsleiter schreiben.