

Übungen zur Vorlesung Moderne Experimentalphysik I

KIT, Sommersemester 2019



Prof. Dr. G. Drexlin, Dr. K. Valerius, Dr. M. Schlösser, Dr. H. Seitz-Moskaliuk

Vorlesungen	Di 9:45 + Do 8:00, Gerthsen-Hörsaal
Sprechstunde	Prof. Drexlin: Di 11:30-12:30, Raum F2-34 (Flachbau)
Übungen	Mo 8:00, 9:45, 11:30
Sprechstunde	Dr. Schlösser, Dr. Seitz-Moskaliuk: nach Vereinbarung (magnus.schloesser@kit.edu, hendrik.seitz-moskaliuk@kit.edu)
Ilias	https://ilias.studium.kit.edu/goto_produkativ_crs_946736.html

Übungsblatt 2 – Bearbeitung bis 06.05.2019

(3) Elektronenstoßanregung von Atomen¹

Der Wirkungsquerschnitt für eine Elektronenstoßanregung eines Atoms für einen bestimmten Übergang von Grundzustand $|g\rangle$ in einen angeregten Zustand $|e\rangle$ beträgt $\sigma_A = 1.4 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$. Der angeregte Zustand hat eine Lebensdauer von $\tau = 2 \cdot 10^{-8} \text{ s}$. Ein Dampf aus diesen Atomen bei einem Druck von 0.05 mbar wird mit einem Elektronenstrahl der Stromdichte $J = 5 \text{ mA/cm}^2$ beschossen.

- Berechne die Besetzungsdichte des angeregten Zustand $|e\rangle$ (pro cm^3) im Gleichgewichtszustand. (Hinweis: Diese Aufgabe kann analog der Betrachtung des zwei Niveau-Systems gelöst werden (siehe Herleitung der Planck-Formel aus der Vorlesung). Wie bei den Photonen müssen auch dieselben drei Prozesse berücksichtigt werden.)
- Die Übergangsenergie zwischen den Zuständen entspricht einer Photonenwellenlänge von $\lambda = 500 \text{ nm}$. Das Wechselwirkungsvolumen des Elektronenstrahls in den Atomen beträgt 1 cm^3 . Wie viel Leistung wird durch die fluoreszierenden Atome abgestrahlt?

(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.

- 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.

¹Diese Aufgabe war bereits auf Blatt 1 und wird im zweiten Tutorium besprochen.

Ordnungszahl	Elementesymbol						
Elementename							
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		
2927	8,92			2162	10,49		
79	Au	Gold					
	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 ?

(8) Photo-Effekt

Sie haben ein unbekanntes Material erhalten und haben die Aufgabe zu bestimmen, worum es sich dabei handelt. Sie beschließen die Austrittsarbeit (engl. work function) mittels der Gegenfeldmethode zu messen. Die tabellierten Austrittsarbeiten entnehmen Sie der Veröffentlichung von H. B. Michaelson, "The work function of the elements and its periodicity", *Journal of Applied Physics* 48, 4729 (1977) - auch im ILIAS zu finden. Hinweis: Die Austrittsarbeit ist sehr von der Kristallorientierung und der Oberflächenkontaminationen abhängig. Sie kann daher oft vom Literaturwert abweichen. Verwenden Sie für diese Aufgabe dennoch die Werte aus der Veröffentlichung.

- (a) Sie haben mehrere Lichtquellen zur Auswahl. Diskutieren sie die Vor- und Nachteile der einzelnen Quellen für die geplante Messung.
- Eine Kerze.
 - Ein durchstimmbarer (d.h. die Wellenlänge kann verändert werden) IR-Laser mit sehr guter Energieauflösung und hoher Laserleistung.
 - Ein großer Satz LEDs (255 nm bis 808 nm) in einem weiten Wellenlängenbereich.
 - Eine UV Lampe mit nachgeschalteten Gittermonochromator.
 - Eine Röntgenröhre.
- (b) Sie zeichnen folgende Gegenspannungen als Funktion der Wellenlänge auf. Bestimmen Sie aus dieser Messung die Austrittsarbeit und das dazugehörige Metall.

λ (nm)	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600
U_0 (V)	5,97	3,90	2,66	1,83	1,24	0,80	0,46	0,18	0	0

- (c) Wieso kann man mit dieser Messungen ebenfalls den Wert des Heisenbergschen Wirkungsquantums bestimmen? Welchen Wert erhalten Sie und stimmt dieser mit dem Literaturwert überein?
- (d) Nun verdampfen Sie das Material und wollen auch in diesem Aggregatzustand den Photoeffekt messen. Überlegen Sie sich anhand ihrer bisherigen Physikkenntnisse, wie eine solche Apparatur aussehen könnte, um diese Messung durchzuführen.
- (e) Nun bemerken Sie, dass Sie für das verdampfte Material viel höhere Energien brauchen, um Elektronen zu erzeugen. Woher kommt dieser Unterschied?
- (f) Sie messen, dass der Wirkungsquerschnitt eine Kante bei 4,3 eV, eine weitere Kante bei 31,6 eV und sogar eine Kante bei 45,7 eV aufweist. Skizzieren und erläutern Sie den energieabhängigen Wirkungsquerschnitt.

(*) Punkteverteilung

Aufgabe	Teilaufgabe	Punkte
3	a, b	je 2
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
8	a, e	je 0,5
8	b, c, d, f	je 1

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