

IIA2

Modul Atom-/Kernphysik

Franck-Hertz Versuch

Dieser Versuch von JAMES FRANCK und GUSTAV LUDWIG HERTZ aus dem Jahre 1914 (Nobelpreis 1926) zählt zu den eindrucksvollsten Versuchen der Quantentheorie: mit einer überaus einfachen Anordnung zeigt er die Existenz diskreter stationärer Energiezustände der Elektronen in den Atomen.

Versuch IIA2 - Franck-Hertz Versuch

Dieser Versuch von JAMES FRANCK und GUSTAV LUDWIG HERTZ aus dem Jahre 1914 (Nobelpreis 1926) zählt zu den eindrucksvollsten Versuchen der Quantentheorie: mit einer überaus einfachen Anordnung zeigt er die Existenz diskreter stationärer Energiezustände der Elektronen in den Atomen.

1.1 Fragen zur Vorbereitung

- Erkläre den FRANCK-HERTZ-Versuch in eigenen Worten.
- Was bedeutet die Einheit eV und wie ist sie definiert?
- Mit welchen anderen Experimenten kann die 1. Anregungsenergie verifiziert werden?
- Wozu dient die Anode in der Röhre? Warum wird der Strom nicht direkt am Gitter gemessen?

1.2 Theorie

1.2.1 Lichtheission und -absorption im Atom

Seit jeher ist die Frage nach der mikroskopischen Beschaffenheit der Materie ein zentraler Ge- genstand des physikalischen Forschens. Ein wichtiger experimenteller Zugang in die „Welt der Atome“ ist das Studium der Lichtabsorption und Lichtheission von Materie, d.h. die Untersuchung der spektralen Verteilung von Licht, das von einem bestimmten Stoff absorbiert oder emittiert wird. Dabei wurde (zuerst von FRAUNHOFER im Spektrum des Sonnenlichts) ein merkwürdiges Phänomen beobachtet, das bis zu Beginn unseres Jahrhunderts unerklärl- lich schien:

- Wird Licht eines kontinuierlichen Spektrums (z.B. das Licht einer Glühlampe) durch ein Gas einer bestimmten Atomsorte hindurchgeschickt und wird anschliessend das Spektrum beobachtet, so stellt man fest, dass Licht ganz spezieller, von der Atomsorte abhän- giger Wellenlängen vom Gas absorbiert worden sind und deshalb im Spektrum fehlen. Diese Linien heissen *Absorptionslinien*.
- Umgekehrt strahlt dasselbe Gas, wenn es nur genügend erhitzt wird, Licht genau der- selben Wellenlängen aus, die dann in einem Spektroskop als leuchtende *Emissionslinien* erscheinen.

Systematische Untersuchungen von KIRCHHOFF, BUNSEN und anderen zeigten, dass jedes Atom sein charakteristisches Emissions- bzw. Absorptionsspektrum hat. Die Spektralanalyse wurde in der Chemie bereits zu einem wichtigen Werkzeug noch bevor das Phänomen prinzipiell verstanden war. Die Lösung dieses Problems gelang dem dänischen Physiker NIELS BOHR. In seinen berühmten BOHR'schen Postulaten übertrug er die Quantenhypothese, mit der zuerst MAX PLANCK die Hohlraumstrahlung erklären konnte, auf das Atom.

1.2.2 Die BOHR'schen Postulate

Die Postulate von NIELS BOHR lauten:

1. Ein Elektron in einem Atom bewegt sich auf einer Kreisbahn um den Kern im COU- LOMB-Potential des Kerns und gehorcht den Gesetzen der klassischen Mechanik.
2. Anstelle von unendlich vielen möglichen Kreisbahnen nach der klassischen Mechanik, bewegt sich ein Elektron nur auf solchen Bahnen, für die der Bahndrehimpuls L ein ganzzahliges Vielfaches des PLANCK'schen Wirkungsquantums h ist.
3. Ungeachtet der Tatsache, dass ein Elektron eine konstante Beschleunigung erfährt (Kreis- bewegung !), emittiert es keine elektromagnetische Strahlung. Die totale Energie bleibt konstant.

4. Ein Elektron strahlt nur elektromagnetische Energie ab, wenn es seine Bahn der Energie E_i ändert und in eine Bahn der Energie E_f überwechselt. Die Frequenz ν der emittierten Strahlung ist dann gleich $\nu = (E_i - E_f)/h$.

Mit diesen Forderungen können die genannten Beobachtungen qualitativ und im Fall des Wasserstoffatoms sogar quantitativ erklärt werden. Lichtemission geschieht daher nur in „Portionen“ (Quanten) der Grösse $h\nu = E_i - E_f$. Lichtabsorption ist genauso im Umkehrprozess möglich. In einem schweren Atom wie z.B. Quecksilber (^{202}Hg), das wir im FRANCK-HERTZ-Versuch benutzen werden, sind die meisten Elektronen durch die elektrostatische Anziehung des Atomkerns stark gebunden, sodass es viel Energie braucht, um sie aus diesen Zuständen herauszubringen. Die äussersten Elektronen hingegen werden durch die inneren teilweise von der Anziehung des Kerns abgeschirmt. Ihre Bindungsenergie ist daher viel kleiner. Man nennt die entsprechenden Zustände optische Niveaus, weil bei Übergängen zwischen ihnen Licht im oder nahe dem sichtbaren Bereich emittiert bzw. absorbiert wird.

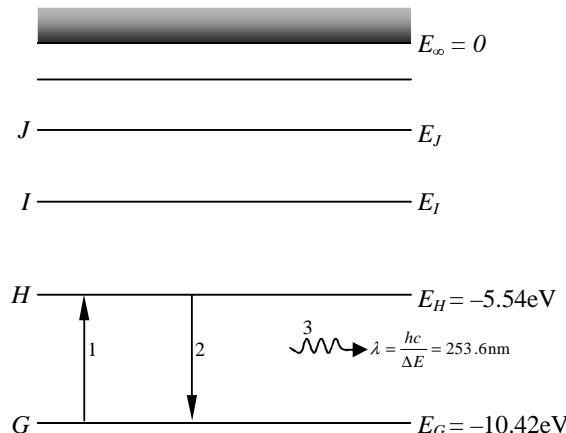


Abbildung 1.1: Energie-Niveaus von Hg

Abbildung 1.1 zeigt die wichtigsten Zustände des Valenzelektrons von ^{202}Hg . Im Grundzustand G besitzt das Valenzelektron die Energie $E_G \approx -10.42 \text{ eV}$. Der erste angeregte Zustand H hat die Energie $E_H \approx -5.54 \text{ eV}$. Weitere angeregte Zustände sind I, J, \dots . Die Energie, die gebraucht wird, um das Valenzelektron vom Grundzustand G in den niedrigsten angeregten Zustand H zu bringen, beträgt

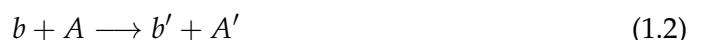
$$\Delta E = E_H - E_G = 4.88 \text{ eV} \quad (1.1)$$

ΔE ist die erste Anregungsenergie des Quecksilberatoms. Wenn durch irgendeine Ursache ein Hg-Atom in den Zustand H angeregt worden ist (1), so wird es nach einiger Zeit wieder in den Grundzustand zurückkehren (2). Dabei wird ein Lichtquant (Photon) der Energie $\Delta E = 4.88 \text{ eV}$ und der Wellenlänge $\lambda = hc/\Delta E = 253.6 \text{ nm}$ emittiert (3).

1.2.3 Streuung von Elektronen an Atomen

Die FRANCK-HERTZ-Röhre enthält Quecksilberdampf bei niedrigem Druck. Durch diese Röhre wird ein Elektronenstrahl geschickt. Auf ihrem Weg werden die Elektronen mit den Quecksilberatomen wechselwirken. Folgendes kann geschehen:

- Solange die kinetische Energie eines Elektrons kleiner ist als die erste Anregungsenergie des Hg-Atoms, kommt es zu einem elastischen Stoss und die kinetische Energie der beiden Stosspartner bleibt erhalten.



b: langsames Elektron, $E_{kin}^b < 4.88 \text{ eV}$

A: Atom in Ruhe

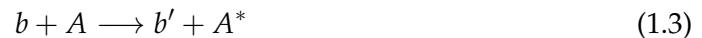
b': etwas langsamer gewordenes Elektron, $E_{kin}^{b'} = E_{kin}^b - \Delta E_{kin}$

A': Atom mit etwas Rückstossenergie

Die Rückstossenergie ΔE_{kin} ist sehr klein, weil das Elektron viel leichter ist als das Atom. Das Elektron muss deshalb mit sehr vielen Atomen zusammenstoßen, bevor es zur Ruhe kommt. Im verdünnten Gas kann es somit ohne wesentlichen Energieverlust eine grosse Strecke zurücklegen.

- Ist hingegen die kinetische Energie gross genug ($E_{kin}^b > 4.88 \text{ eV}$), so kann ein inelastischer Stoss auftreten, wobei ein Teil der kinetischen Energie des Elektrons als innere Energie in das Atom übergeht, indem das Valenzelektron vom Grundzustand G in den ersten angeregten Zustand H gehoben wird. Das Elektron ist nach einem solchen Stoss beträchtlich langsamer geworden.

In einem zweiten Prozess unmittelbar nach dem Stoss ($\Delta t \approx 10^{-8} \text{ s}$) kehrt das Atom wieder in den Grundzustand zurück und sendet dabei ein Lichtquant (Photon) der Energie $E = h\nu = 4.88 \text{ eV}$ und der Wellenlänge $\lambda = h \cdot c / \Delta E = 253.6 \text{ nm}$ aus. Schematisch sieht die Situation folgendermassen aus:



b: schnelles Elektron, $E_{kin}^b > 4.88 \text{ eV}$

A: Atom in Ruhe und im Grundzustand

b': etwas langsamer gewordenes Elektron, $E_{kin}^{b'} = E_{kin}^b - 4.88 \text{ eV}$

A^* : Atom angeregt und mit etwas Rückstossenergie

A' : Atom wieder im Grundzustand (mit etwas Rückstossenergie)

$h\nu$: Photon mit Energie: $E = h\nu$

- In einer Elektronenröhre, in der die Elektronen auf ihrem Weg durch das Gas andauernd durch ein elektrisches Feld beschleunigt werden, kann noch ein dritter wichtiger Prozess stattfinden, wenn das Feld so stark ist, dass ein Elektron auf seinem mittleren freien Weg zwischen zwei Stössen genügend kinetische Energie gewinnt, um beim nächsten Stoss ein Hg-Atom zu ionisieren, d.h. ein Elektron herauszuschlagen ($E_{kin}^b > 10.42 \text{ eV}$). Es sind dann zwei Elektronen vorhanden, die bei der nächsten Gelegenheit durch Stossionisation zwei weitere Elektronen freisetzen. Eine Kettenreaktion findet statt. Das Gas leuchtet intensiv, denn es enthält viele ionisierte Atome, die beim Einfang von Elektronen Licht (Photonen) aussenden. Bei diesem Prozess des *Zündens* sinkt der elektrische Widerstand der Röhre beträchtlich. Mittels eines Vorschaltwiderstands kann aber ein stationärer Zustand erreicht werden.

1.3 Experiment

Das Experiment von FRANCK und HERTZ aus dem Jahre 1914 lieferte eine wichtige Bestätigung des damals ganz neuen Atommodells von NIELS BOHR. Die vorliegende Anordnung entspricht im wesentlichen der ursprünglich verwendeten Apparatur.

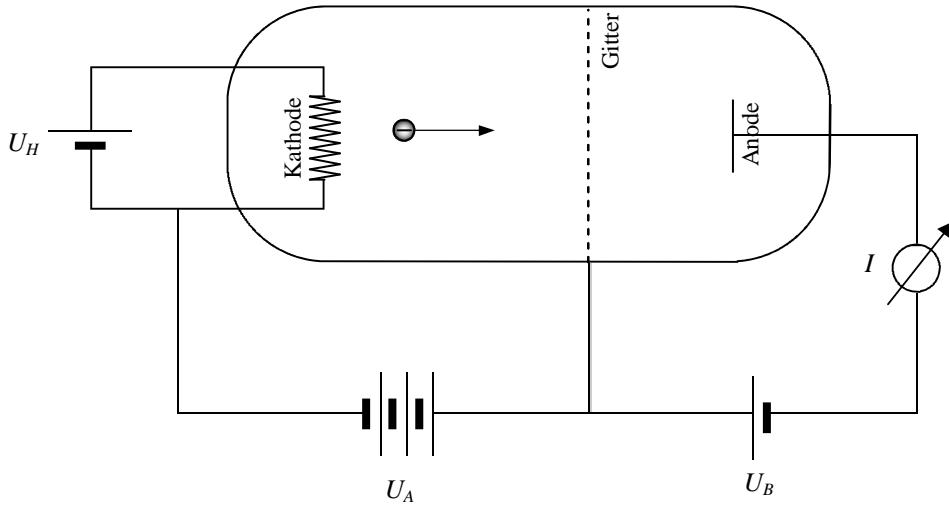


Abbildung 1.2: Schematischer Aufbau einer FRANCK-HERTZ-Röhre

In einem Heizofen wird die FRANCK-HERTZ-Röhre auf eine Temperatur zwischen 150 °C und 200 °C erhitzt. In der Röhre befindet sich etwas Quecksilber ^{202}Hg . Mit der Temperatur des Ofens kann gesteuert wieviel Quecksilber in der Dampfphase befindet. Je wärmer, desto mehr Quecksilberatome befinden sich zwischen Kathode und Gitter. Aus der Heizkathode werden Elektronen thermisch emittiert (Heizspannung $U_H = 6.3 \text{ V}$). Über eine Spannung U_A (variabel zwischen 0 und 70V) werden diese Elektronen dann zur netzförmigen Anode hin beschleunigt. Einige der Elektronen fliegen durch die Löcher in der Anode hindurch bis zur Auffängerelektrode. Voraussetzung dafür ist, dass sie schnell genug sind, um eine Bremsspannung (= Gegenspannung) von $U_B = 1.5 \text{ V}$ zu überwinden. Das Experiment besteht nun darin, den Strom I in der Auffängerelektrode als Funktion der Anodenspannung U_A zu messen, d.h. ein $I(U_A)$ -Diagramm aufzunehmen. Das Resultat lässt sich auf der Basis der klassischen Physik nicht erklären; das BOHR'sche Atommodell bietet jedoch eine befriedigende Interpretation.

1.3.1 Versuchszubehör

Komponente	Anzahl
FRANCK-HERTZ-Röhre	1
Kombiniertes Strom- und Spannungsmessgerät	1
Netzgerät (Typ Variac)	1
Thermometer	1
UV-Schutzbrille	2

1.3.2 Versuchsaufbau und Justage

Spannung [V]	Temperatur [°C]
150	155
170	170
190	200

Tabelle 1.1: Zusammenhang zwischen Temperatur und Heizspannung

- Die Röhre emittiert UV-Licht. Deshalb muss die UV-Schutzbrille getragen werden.
- Temperatureinstellung: Die Temperatur wird mit einem Variac-Transformator im Stromkreis der elektrischen Heizung gesteuert. Heize zunächst mit Vollausschlag (220 V) bis ca. 10°C unter der gewünschten Temperatur. Dann stelle den Variac auf den Richtwert der gewünschten Temperatur ein und warte bis sich ein stationärer Zustand eingestellt hat (ca. 15 min). Die Tabelle 1.1 gibt einen ungefähren Zusammenhang zwischen der Temperatur des Ofens und der Spannung am Variac an.
- Das PicoampÁlremeter hat drei Bereiche. Die angezeigten 10^{-8} A, 10^{-9} A, 10^{-10} A gelten jeweils für Vollausschlag
- Die Beschleunigungsspannung wird an Flüssigkristall-Display abgelesen.

1.3.3 Durchführung

- Wähle eine Temperatur zwischen 150°C und 200°C und warte bis sie sich eingestellt hat.
- Erhöhe die Spannung langsam bis ein Plasma in der Röhre zündet.
- Notiere fortlaufend die Strom-Spannungs-Wertepaare.
- Der Strom wird Maximas und Minimas aufweisen. Achte darauf, dass du diese ausgezeichneten Punkte nicht "verpasst".
- Achte dich auf die Leuchterscheinungen unter dem Gitter. Es können sich "Leuchtebenen" ausbilden.
- Wiederhole den Versuch mit zwei weiteren Temperaturen.

1.3.4 Aufgaben zur Auswertung

- Plotte die aufgenommene Strom-Spannungs-Kurven.
- Beschreibe qualitativ den Verlauf des Stroms als Funktion der Beschleunigungsspannung.
- Wie kommen die Minimas zustande?
- Beschreibe qualitativ wie und warum sich die Kurven für verschiedene Temperaturen unterscheiden.
- Bestimme die Spannungsdifferenzen zwischen den Minimas. Was stellst du fest?
- Mittle über alle Spannungsdifferenzen aller aufgenommenen Kurven und gib die Standardabweichung an.
- Vergleiche dein Wert mit dem Literaturwert.
- Gibt es einen Zusammenhang zwischen den "Leuchtebenen" und den Minimas? Begründe.

1.4 Literatur

- Wolfgang Demtröder, *Experimentalphysik 3 - Atome, Moleküle und Festkörper*, Springer Verlag