

Thomson-Röhre

UNTERSUCHUNG DER ABLENKUNG VON ELEKTRONEN IM ELEKTRISCHEN UND MAGNETISCHEN FELD

- Untersuchung der Ablenkung eines Elektronenstrahls in einem magnetischen Feld.
- Untersuchung der Ablenkung eines Elektronenstrahls in einem elektrischen Feld.
- Aufbau eines Geschwindigkeitsfilters aus gekreuztem elektrischem und magnetischem Feld.
- Abschätzung der spezifischen Ladung des Elektrons.

UE3070500

04/24 UK/UD

ALLGEMEINE GRUNDLAGEN

In der Thomson-Röhre passieren die Elektronen in horizontaler Richtung eine Schlitzblende hinter der Anode und treffen auf eine schräg in den Strahlengang gestellten Leuchtschirm, auf dem der Strahlverlauf sichtbar wird. Hinter der Schlitzblende ist ein Plattenkondensator angebracht, in dessen vertikalem elektrischem Feld die Elektronen vertikal abgelenkt werden. Zusätzlich kann mit Helmholtzspulen ein senkrecht zur Strahlrichtung verlaufendes horizontales Magnetfeld aufgebaut werden, in dem die Elektronen ebenfalls vertikal abgelenkt werden:

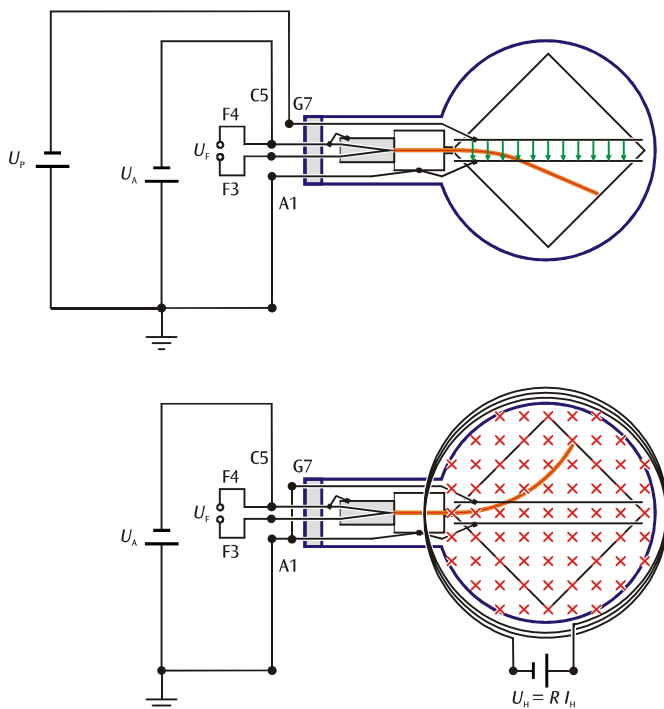


Fig. 1: Schematische Darstellung zur Thomson-Röhre. Ablenkung im elektrischen Feld (oben), (im magnetischen Feld unten)

Auf ein Elektron, das sich mit der Geschwindigkeit v durch ein Magnetfeld B bewegt, wirkt die Lorentz-Kraft

$$F = -e \cdot v \times B \tag{1}$$

e : Elementarladung

senkrecht zu der von der Bewegungsrichtung und dem Magnetfeld aufgespannten Ebene. Die Ablenkung erfolgt in vertikaler Richtung, wenn sowohl die Bewegungsrichtung wie auch das Magnetfeld in der horizontalen Ebene liegen (siehe Fig. 1 unten). Steht die Bewegungsrichtung senkrecht auf dem homogenen Magnetfeld, so werden die Elektronen auf eine Kreisbahn gezwungen, deren Zentripetalkraft durch die Lorentz-Kraft gegeben ist.

$$m \cdot \frac{v^2}{r} = e \cdot v \cdot B \tag{2}$$

m : Elektronenmasse, r : Kreisbahnradius.

Die Geschwindigkeit der Elektronen hängt von der Anodenspannung U_A ab. Es gilt:

$$v = \sqrt{2 \cdot \frac{e}{m} \cdot U_A} \tag{3}$$

Somit kann aus dem Kreisbahnradius die spezifische Ladung des Elektrons bestimmt werden, wenn das homogene Magnetfeld B und die Anodenspannung U_A bekannt sind. Aus (2) und (3) folgt für die spezifische Ladung des Elektrons:

$$\frac{e}{m} = \frac{2 \cdot U_A}{(B \cdot r)^2} \tag{4}$$

Der Krümmungsradius r lässt sich aus dem Austrittspunkt des abgelenkten Elektronenstrahls auf dem Schirm bestimmen. Das Magnetfeld B der Helmholtzspulen ergibt sich aus dem Spulenstrom I_H (siehe Auswertung).

Liegt eine Spannung U_P am Plattenkondensator an, so werden die Elektronen in dessen vertikalem elektrischem Feld E mit der Kraft

$$F = -e \cdot E \quad (5)$$

e : Elementarladung

ebenfalls vertikal abgelenkt (siehe Fig. 1 oben). Das elektrische Feld kann daher so gewählt werden, dass es die Ablenkung im magnetischen Feld gerade ausgleicht:

$$e \cdot E + e \cdot v \cdot B = 0 \quad (6)$$

In diesem Fall lässt sich die Geschwindigkeit der Elektronen leicht bestimmen. Es gilt:

$$v = \frac{|E|}{|B|} \quad (7)$$

Eine Anordnung aus gekreuztem elektrischem und magnetischem Feld, in der die Ablenkung der Elektronen zu Null kompensiert wird, wird daher als Geschwindigkeitsfilter bezeichnet.

Die Abhängigkeit der Geschwindigkeit v von der Beschleunigungsspannung U_A ergibt sich aus dem Vergleich zwischen potentieller und kinetischer Energie. Es gilt

$$e \cdot U_A = \frac{m}{2} v^2 \quad \text{bzw.} \quad v^2 = 2 \cdot \frac{e}{m} \cdot U_A \quad (8)$$

GERÄTELISTE

1	Thomson-Röhre S	1000617 (U18555)
1	Röhrenhalter S	1014525 (U185002)
1	Helmholtz-Spulenpaar S	1000611 (U185051)
1	Hochspannungs-Netzgerät, 5 kV (@230 V)	1003310 (U33010-230)
	oder	
1	Hochspannungs-Netzgerät, 5 kV (@115 V)	1003309 (U33010-115)
1	DC-Netzgerät 0-500 V (@230 V)	1003308 (U33000-230)
	oder	
1	DC-Netzgerät 0-500 V (@115 V)	1003307 (U33000-115)
1	Digital-Multimeter P1035	1002781 (U11806)
1	Sicherheitsexperimentierkabel (15 Stk.), 75 cm	1002843 (U138021)

SICHERHEITSHINWEISE

Glühkathodenröhren sind dünnwandige, evakuierte Glaskolben. Vorsichtig behandeln: Implosionsgefahr!

- Thomson-Röhre keinen mechanischen Belastungen aussetzen.

An die Thomson-Röhre wird u.U. berührunggefährliche Spannung angelegt:

- Für Anschlüsse nur Sicherheits-Experimentierkabel verwenden.
- Schaltungen nur bei ausgeschaltetem Versorgungsgerät vornehmen.
- Thomson-Röhre nur bei ausgeschaltetem Versorgungsgerät ein- und ausbauen.

AUFBAU

Einbau des Helmholtz-Spulenpaares und der Thomson-Röhre in den Röhrenhalter:

- Beide Helmholtz-Spulen – mit den Anschlussbuchsen nach außen weisend – in der Mitte des Spuleneinschubes einsetzen und ganz nach außen schieben.
- Thomson-Röhre in den Röhrenhalter einschieben. Dabei darauf achten, dass die Kontaktstifte der Röhre ganz in die dafür vorgesehenen Kontaktöffnungen des Halters einrasten. Der mittlere Führungstift der Röhre muss leicht hinten am Halter herausragen.
- Beide Helmholtz-Spulen bis zur Markierung nach innen verschieben. Der mittlere Abstand der beiden Helmholtz-Spulen beträgt dann 68 mm.

Anschluss der Heiz- und der Beschleunigungsspannung:

- Hochspannungs-Netzgerät ausgeschaltet lassen und Spannungssteller ganz zum linken Anschlag drehen.
- Die Buchsen F3 und F4 des Röhrenhalters mittels Sicherheits-Experimentierkabeln mit dem Heizspannungsausgang (blaue Buchsen) des Hochspannungs-Netzgerätes verbinden (siehe auch Fig. 1).
- Die Buchse C5 des Röhrenhalters mittels Sicherheits-Experimentierkabel mit dem Minus-Pol (schwarze Buchse) des Hochspannungs-Netzgerätes verbinden (Anschlüsse C5 und F4 sind innerhalb der Röhre miteinander verbunden).
- Die Buchse A1 des Röhrenhalters mit dem Plus-Pol (rote Buchse) des Hochspannungsausgangs und den Plus-Pol mit der gelb-grünen Erdungsbuchse verbinden.

Anschluss der Helmholtz-Spulen:

- DC-Netzgerät ausgeschaltet lassen und alle Spannungssteller ganz zum linken Anschlag drehen.
- Die Buchse A der ersten Spule mit dem Minus-Pol und Buchse Z mit dem Plus-Pol des 12-V-Ausganges verbinden.
- Zweite Spule parallel zur ersten anschließen, dazu jeweils die gegenüberliegenden Buchsen verbinden.
- Amperemeter in Reihe zu den beiden Helmholtz-Spulen schalten.

Anschluss der Ablenkspannung:

- Die Buchse G7 des Röhrenhalters mit dem Minus-Pol des 500-V-Ausganges verbinden.
- Den Plus-Pol mit der gelb-grünen Erdungsbuchse des Hochspannungsgerätes verbinden.

Hinweis: Sollen die Ablenkungen im elektrischen oder im magnetischen Feld in der entgegengesetzten Richtung erfolgen, sind die Anschlüsse am jeweiligen DC-Netzgerät zu vertauschen.

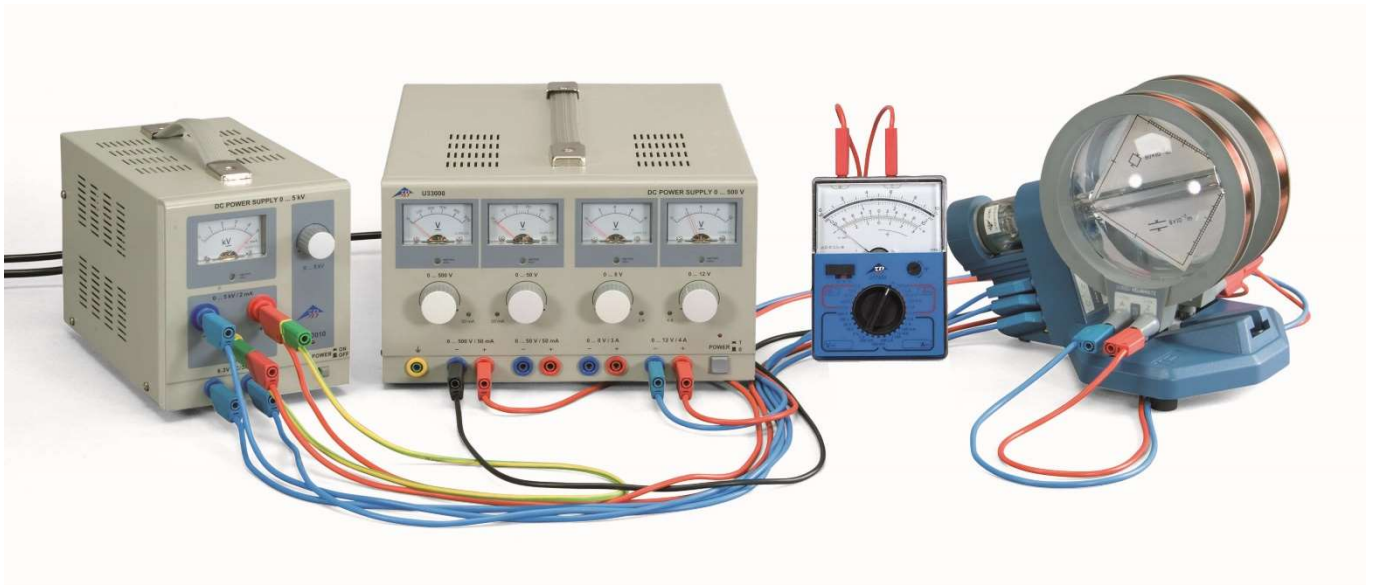


Fig. 2: Experimenteller Aufbau zur Untersuchung der Ablenkung im elektrischen und im magnetischen Feld.

DURCHFÜHRUNG

- Hochspannungsnetzgerät einschalten. Der Heizdraht beginnt sofort, rötlich zu glühen.
- Beschleunigungsspannung $U_A = 2,0$ kV einstellen und den „waagerechten“ Verlauf des Elektronenstrahls auf dem Leuchtschirm beobachten.
- DC-Netzgerät 0–500 V einschalten.
- Langsam den Strom $2 I_H$ durch das Helmholtz-Spulenpaar erhöhen, bis der Elektronenstrahl am Rand des Leuchtschirms durch Mitte der Skala verläuft (siehe Fig. 3).
- Spannung U_P an den Ablenkplatten so wählen, dass die Ablenkung des Elektronenstrahl zu Null kompensiert wird.
- Stromstärke $2 I_H$ und ggf. Spannung U_P notieren.
- Spannung U_P auf Null zurückstellen.
- Messung für $U_A = 3,0$ und $4,0$ kV wiederholen.

- Anodenspannung $U_A = 3$ kV einstellen.
- $2 I_H = 0,2$ A wählen und die Plattenspannung U_P so einstellen, dass die Ablenkung des Elektronenstrahls zu Null kompensiert wird.
- Stromstärke $2 I_H$ und Spannung U_P notieren.
- Vorgang für $2 I_H = 0,4$ A, $0,6$ A und $0,8$ A wiederholen.

MESSBEISPIEL

Tab. 1: (Zur magnetischen Ablenkung durch die Mitte der Randskala erforderlicher) Strom durch das Helmholtz-Spulenpaar $2 I_H$ und (die Ablenkung zu Null kompensierende) Plattenspannung U_P in Abhängigkeit von der Anodenspannung U_A .

U_A / kV	$2 I_H$ / A	U_P / V
2,0	0,53	240
3,0	0,62	330
4,0	0,74	470

Tab. 2: Helmholtz Spulenstrom $2 I_H$ und kompensierende Plattenspannung U_P bei der festen Anodenspannung $U_A = 3,0$ kV

Nr.	$2 I_H$ / A	U_P / V
1	0,2	100
2	0,4	225
3	0,6	360
4	0,8	440

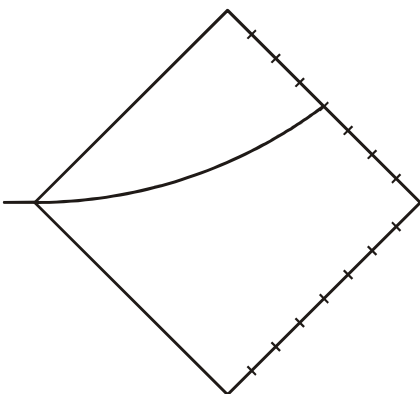


Fig. 3: Ablenkung des Elektronenstrahls durch die Mitte der Skala am Rand des Leuchtschirms

AUSWERTUNG

a) Das magnetische Feld B in einem Helmholtz-Spulenpaar ist proportional zum Strom I_H durch eine einzelne Spule. Der Proportionalitätsfaktor k kann aus dem Spulenradius $R = 68 \text{ mm}$ und der Windungszahl $N = 320$ je Spule berechnet werden:

$$B = k \cdot I_H \text{ mit } k = \left(\frac{4}{5}\right)^2 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}} \cdot \frac{N}{R} = 4,2 \frac{\text{mT}}{\text{A}}$$

b) Der Krümmungsradius r des abgelenkten Elektronenstrahls lässt sich in Fig. 4 aus dem Austrittspunkt B bestimmen.

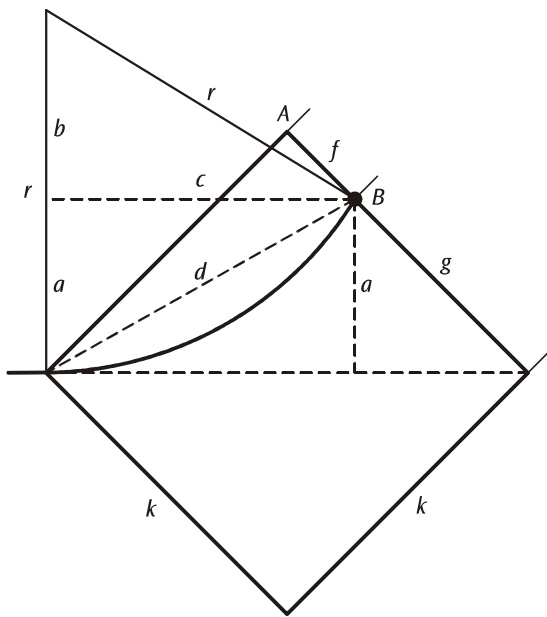


Fig. 4: Darstellung zur Berechnung des Krümmungsradius r der Elektronenbahn aus dem Abstand f zwischen dem Austrittspunkt B und dem Eckpunkt A

Nach Pythagoras gilt:

$$r^2 = c^2 + b^2 = c^2 + (r - a)^2 = c^2 + r^2 - 2 \cdot r \cdot a + a^2$$

$$c^2 + a^2 = d^2 = k^2 + f^2 \text{ mit } k = 80 \text{ mm}$$

$$a^2 = \frac{1}{2} \cdot g^2 = \frac{1}{2} \cdot (k - f)^2$$

$$\text{Somit ist } r = \frac{c^2 + a^2}{2a} = \frac{k^2 + f^2}{\sqrt{2} \cdot (k - f)}$$

Liegt der Punkt B in der Mitte der Skala, ist $f = 40 \text{ mm}$. Für diesen Fall berechnet man:

$$r = 141 \text{ mm und } \frac{1}{2} \cdot r^2 = 0,1 \text{ m}^2.$$

$$\text{Gl. (4) lässt sich damit umformen zu: } \frac{e}{m} = \frac{U_A}{0,1 \text{ m}^2 \cdot B^2}$$

c) Das elektrische Feld im Plattenkondensator lässt sich aus der Spannung U_P und dem Plattenabstand $d = 8 \text{ mm}$ berechnen:

$$E = \frac{U_P}{d}$$

d) Zur Abschätzung der spezifischen Ladung des Elektrons berechnet man das Magnetfeld B aus den in Tab. 1 angegebenen Werten für den Strom I_H und erhält die in Tab. 3 angegebenen Werte.

Fig. 5 zeigt eine grafische Darstellung des Zusammenhangs zwischen der Anodenspannung U_A und dem Quadrat des Magnetfelds B^2 für die Werte aus Tab. 3.

Die Steigung der eingezeichneten Ursprungsgeraden beträgt

$$\frac{U_A}{B^2} = 1,7 \frac{\text{kV}}{\text{mT}^2}$$

$$\text{Daraus berechnet man } \frac{e}{m} = \frac{U_A}{0,1 \text{ m}^2 \cdot B^2} = 1,7 \cdot 10^{11} \frac{\text{As}}{\text{kg}}$$

$$\text{(Literaturwert: } \frac{e}{m} = 1,76 \cdot 10^{11} \frac{\text{As}}{\text{kg}})$$

Tab. 3: Aus den Messwerten I_H der Tab.1 ermittelte Werte B und B^2 in Abhängigkeit von der Anodenspannung U_A .

U_A / kV	B / mT	B^2 / mT^2
2,0	1,11	1,24
3,0	1,30	1,70
4,0	1,55	2,41

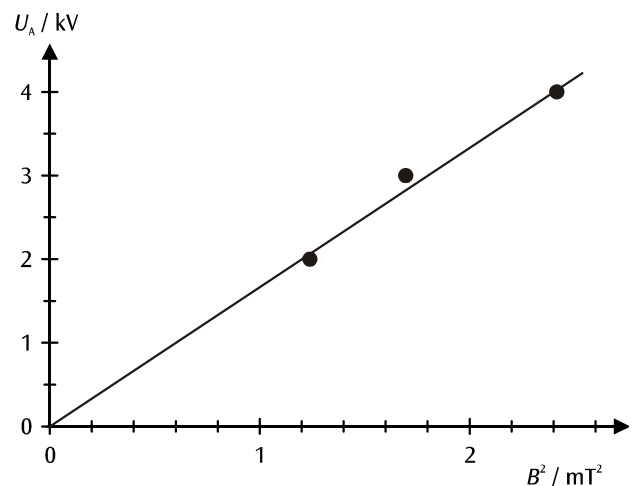


Fig. 5: Grafische Darstellung des Zusammenhangs zwischen U_A und B^2 bei konstantem Krümmungsradius $r = 141 \text{ mm}$

e) Zur Bestätigung von Gl. (7) berechnet man aus den Messwerten der Tab. 2 die Wertepaare B und E , bei denen die Ablenkung Elektronstrahls zu Null kompensiert wird (siehe Tab. 4) und stellt das Ergebnis in einem E - B -Diagramm dar. (siehe Fig. 6).

In Übereinstimmung mit Gl. (7) liegen die Messwerte im Rahmen der Messgenauigkeit auf einer Ursprungsgeraden. Deren Steigung ist die Geschwindigkeit der Elektronen.

Man erhält: $v = 3,2 \cdot 10^7 \frac{m}{s}$ (bei $U_A = 3,0 \text{ kV}$)

Tab. 4: Magnetisches Feld B und kompensierendes elektrisches Feld E bei der festen Anodenspannung $U_A = 3,0 \text{ kV}$

Nr.	B / mT	$E / \text{V/mm}$
1	0,42	12,5
2	0,84	28,1
3	1,26	41,3
4	1,68	55,0

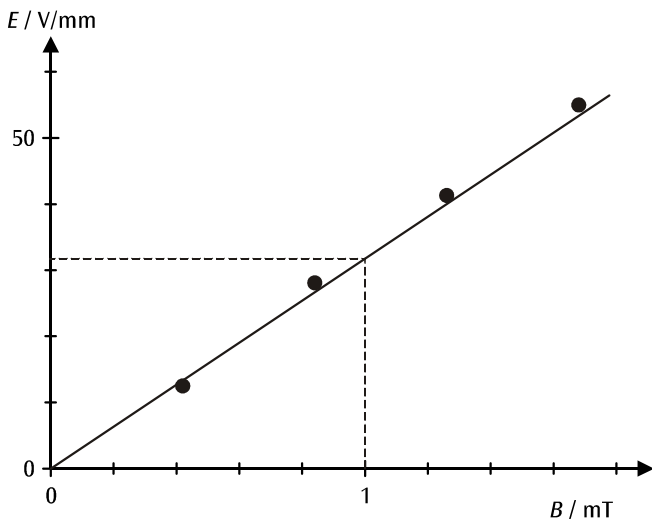


Fig. 6: Grafische Darstellung der Messwerte aus Tab. 4

f) Mit Hilfe der Messwerte aus Tab. 1 kann die Geschwindigkeit v der Elektronen für verschiedene Anodenspannungen U_A bestimmt werden. Das Ergebnis ist in Tab. 5 eingetragen.

Tab. 5: Aus den Messwerten I_H und U_P der Tab.1 ermittelte Werte B und E sowie die daraus berechnete Geschwindigkeit v und deren Quadrat in Abhängigkeit von der Anodenspannung U_A .

U_A / kV	B / mT	$E / \text{V/mm}$	$v / \text{m/s}$	$v^2 / (\text{m/s})^2$
2,0	1,11	30,0	$2,70 \cdot 10^7$	$7,3 \cdot 10^{14}$
3,0	1,30	41,3	$3,18 \cdot 10^7$	$10,1 \cdot 10^{14}$
4,0	1,55	58,8	$3,79 \cdot 10^7$	$14,4 \cdot 10^{14}$

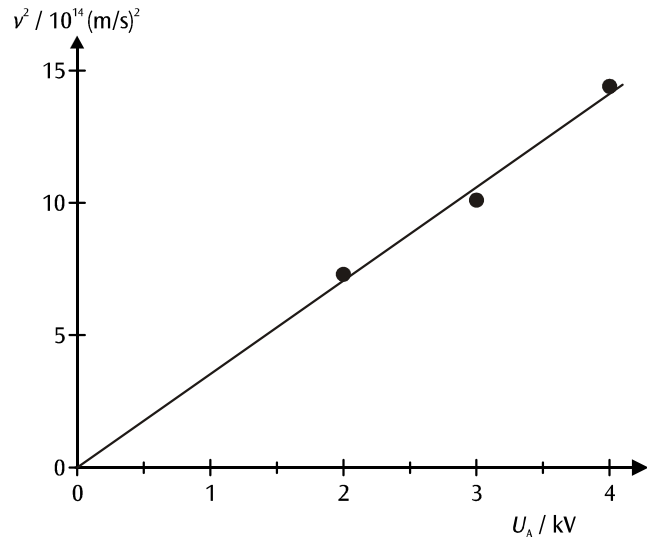


Fig. 7: Grafische Darstellung des Zusammenhangs zwischen v^2 und U_A

Fig. 7 zeigt den Zusammenhang zwischen dem Quadrat der Geschwindigkeit und der Anodenspannung. Aus der Steigung der eingezeichneten Ursprungsgeraden lässt sich nach Gl. (8) ebenfalls die spezifische Ladung des Elektrons bestimmen.

Man erhält: $\frac{e}{m} = \frac{v^2}{2 \cdot U_A} = 1,8 \cdot 10^{11} \frac{\text{As}}{\text{kg}}$

(Literaturwert: $\frac{e}{m} = 1,76 \cdot 10^{11} \frac{\text{As}}{\text{kg}}$)

Thomson Tube

INVESTIGATE THE DEFLECTION OF ELECTRONS BY ELECTRIC AND MAGNETIC FIELDS

- Investigate the deflection of an electron beam by a magnetic field.
- Investigate the deflection of an electron beam by an electric field.
- Build a velocity filter using orthogonal electric and magnetic fields.
- Estimate the specific charge of an electron.

UE3070500

04/24 UK/UD

BASIC PRINCIPLES

In a Thomson tube, electrons pass horizontally through a slit placed behind the anode and strike a fluorescent screen placed at an angle to the beam so that it shows the beam's path. A plate capacitor is also placed behind the slit so that the electric field between the plates can deflect the beam in a vertical plane. The addition of Helmholtz coils enables a magnetic field to be generated inside the tube in a plane perpendicular to the direction of the beam. This also deflects the beam in a vertical plane.

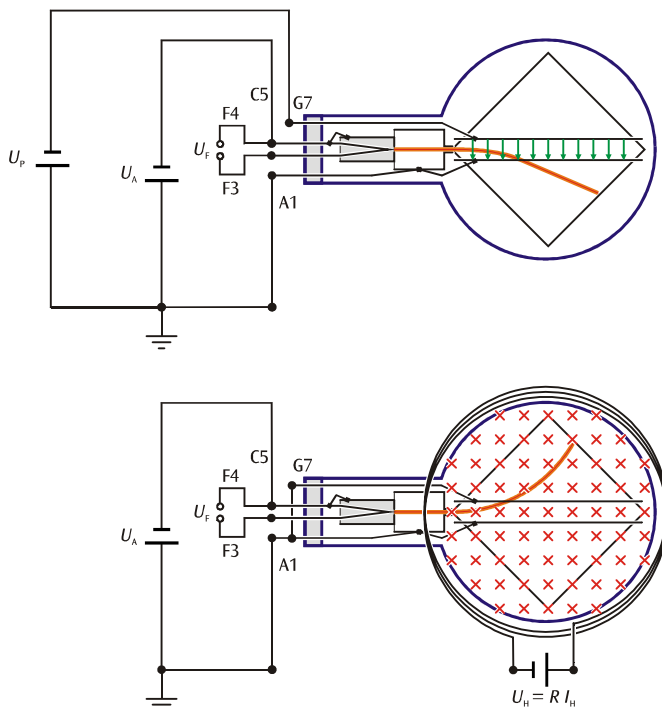


Fig. 1: Schematic diagram of a Thomson tube showing deflection by an electric field (top) and a magnetic field (bottom)

An electron moving with velocity \mathbf{v} through a magnetic field \mathbf{B} is subject to a Lorentz force

$$\mathbf{F} = -e \cdot \mathbf{v} \times \mathbf{B} \quad (1)$$

e : charge of an electron

acting perpendicular to both the direction of motion and the plane of the magnetic field. The deflection is vertical if both the motion and the field are in a horizontal plane (see bottom of Fig. 1). If the magnetic field in that plane is uniform and perpendicular to the motion, the electrons are deflected along a circular path in a vertical plane where the centripetal force is furnished by the same Lorentz force.

$$m \cdot \frac{v^2}{r} = e \cdot v \cdot B \quad (2)$$

m : mass of an electron, r : radius of circular path.

The velocity of the electrons is dependent on the anode voltage U_A according to the following relationship

$$v = \sqrt{2 \cdot \frac{e}{m} \cdot U_A} \quad (3)$$

This means that the specific charge of an electron can be determined from the radius of the circular path if the uniform magnetic field B is known as well as the anode voltage U_A . Substituting (3) into (2) results in the following equation for the specific charge of an electron:

$$\frac{e}{m} = \frac{2 \cdot U_A}{(B \cdot r)^2} \quad (4)$$

The radius of the deflection r can be deduced from the point at which the beam passes beyond the edge of screen. The magnetic field B generated by the two Helmholtz coils is calculated from the current I_H that passes through them (see Evaluation).

If a voltage U_p is applied to the capacitor plates, the electrons will be deflected by the vertical electric field \mathbf{E} between them by a force given by the following equation:

$$\mathbf{F} = -e \cdot \mathbf{E} \tag{5}$$

e : charge of an electron

This deflection is also vertical (see top of Fig. 1). The electric field can therefore be adjusted in such a way that it precisely compensates for the deflection by the magnetic field. In this case the following is true:

$$e \cdot E + e \cdot v \cdot B = 0 \tag{6}$$

The velocity of the electrons can easily be derived from this equation as follows:

$$v = \left| \frac{E}{B} \right| \tag{7}$$

For this reason, such an arrangement of orthogonal magnetic and electric fields where the deflection by the two fields cancels out to zero is called a velocity filter.

The velocity v depends on the anode voltage U_A and can be deduced by equating the potential and the kinetic energy in the system.

$$e \cdot U_A = \frac{m}{2} v^2 \text{ bzw. } v^2 = 2 \cdot \frac{e}{m} \cdot U_A \tag{8}$$

LIST OF APPARATUS

1	Thomson Tube S	1000617 (U18555)
1	Tube Holder S	1014525 (U185002)
1	Helmholtz Coils S	1000611 (U185051)
1	High Voltage Power Supply 5 kV (@230 V)	1003310 (U33010-230)
or		
1	High Voltage Power Supply 5 kV (@115 V)	1003309 (U33010-115)
1	DC Power Supply 0-500 V (@230 V)	1003308 (U33000-230)
or		
1	DC Power Supply 0-500 V (@115 V)	1003307 (U33000-115)
1	Digital Multimeter P1035	1002781 (U11806)
1	Set of 15 Safety Experiment Leads, 75 cm	1002843 (U138021)

SAFETY INSTRUCTIONS

Heated cathode ray tubes are thin-walled evacuated glass bulbs. Handle with care: danger of implosion!

- Do not expose the Thomson tube to any mechanical stress or strain.

Danger: high voltage is applied to the Thomson tube. Avoid contact with any part of the body.

- Only use safety experiment leads for connections.
- Make the connections only when the power supply unit is switched off.
- Set up or dismantle the tubes only when the power supply unit is switched off.

SET-UP

Installation of Helmholtz coils and insertion of Thomson tube into its holder:

- Attach both Helmholtz coils in the centre of the coil attachment with their connector terminals facing outwards then push them out along the guide rails.
- Insert the Thomson tube into the tube holder. Make sure that the contact pins slot fully into the openings on the holder. The central guide pin of the tube should protrude slightly beyond the back of the holder.
- Push the Helmholtz coils in as far as the markings so that the separation of the two coils is 68 mm.

Connection of heater and accelerating voltages:

- Leave the high-voltage power supply switched off with the voltage knob turned all the way to the left.
- Connect terminals F3 and F4 on the tube holder to the heater voltage output (blue terminals) of the high-voltage power supply using safety experiment leads (see Fig. 1).
- Connect terminal C5 on the tube holder to the negative terminal (black socket) of the high-voltage power supply using safety experiment leads (terminals C5 und F4 are tied together inside the tube itself).
- Connect terminal A1 on the tube holder to the positive terminal (red socket) of the high-voltage power supply using safety experiment leads and connect also this positive terminal to the green and yellow earth socket.

Connecting the Helmholtz coils:

- Leave the DC power supply 0-500 V switched off with all voltage knobs turned all the way to the left.
- Connect terminal A on the first coil to the negative terminal and terminal Z to the positive terminal of the 12 V output.
- Connect the second coil in parallel with the first so that the terminals opposite one another are connected together.
- Connect the DC Ammeter in series to the Helmholtz pair of coils.

Connecting the deflecting voltage:

- Connect terminal G7 of the tube holder to the negative terminal of the 500 V output.
- Connect the positive terminal of the 500 V output to the green and yellow earth socket of the high-voltage supply.

Note: If either the magnetic field or the electric field deflects the beam the wrong way, simply swap over the terminals on the relevant DC supply.

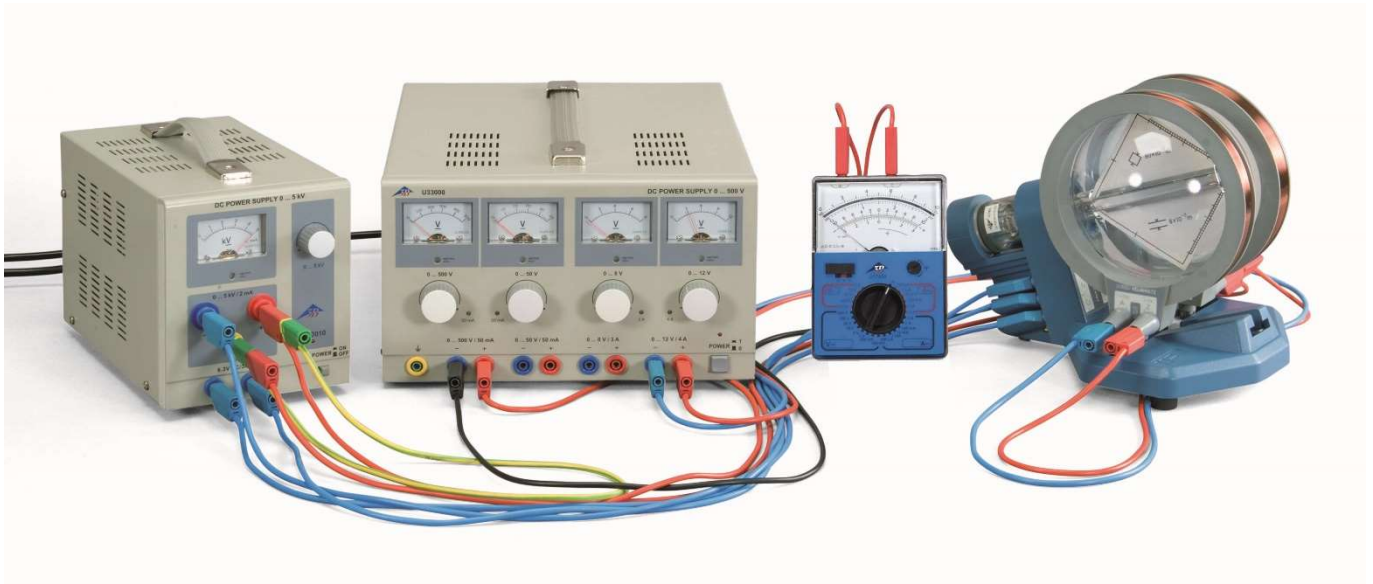


Fig. 2: Experiment set-up for investigating deflection of electrons by magnetic and electric fields.

EXPERIMENT PROCEDURE

- Turn on the high-voltage power supply. The heating filament should immediately start to glow red.
- Set an accelerating voltage of $U_A = 2.0$ kV and observe the “horizontal” path of the beam along the screen.
- Turn on the DC power supply 0–500 V.
- Gradually increase the current through Helmholtz coils ($2 I_H$) until the electron beam passes out through the centre of the scale (see Fig. 3).
- Apply a voltage U_P to the deflector plates that is just enough to cancel out the deflection of the beam by the magnetic field.
- Take note of the Helmholtz current $2 I_H$ and the voltage U_P where available.
- Reset voltage U_P to zero.
- Repeat the measurement for $U_A = 3.0$ and 4.0 kV.

- Set the anode voltage to $U_A = 3$ kV.
- Set the coil current so that $2 I_H = 0.2$ A and adjust the deflector plate voltage U_P so that the deflection of the beam by both fields cancels out to zero.
- Take note of the current $2 I_H$ and the voltage U_P .
- Repeat the process for $2 I_H = 0.4$ A, 0.6 A and 0.8 A.

SAMPLE MEASUREMENTS

Table 1: Current $2 I_H$ through the Helmholtz coils sufficient to deflect the beam through the centre of the scale and voltage U_P needed to cancel this deflection to zero, depending on anode voltage U_A .

U_A / kV	$2 I_H$ / A	U_P / V
2.0	0.53	240
3.0	0.62	330
4.0	0.74	470

Table 2: Helmholtz current $2 I_H$ and cancelling voltage U_P for a fixed anode voltage $U_A = 3.0$ kV

Nr.	$2 I_H$ / A	U_P / V
1	0.2	100
2	0.4	225
3	0.6	360
4	0.8	440

Note: here the voltage U_P is supplied by the recommended 0–450 V DC power supply.

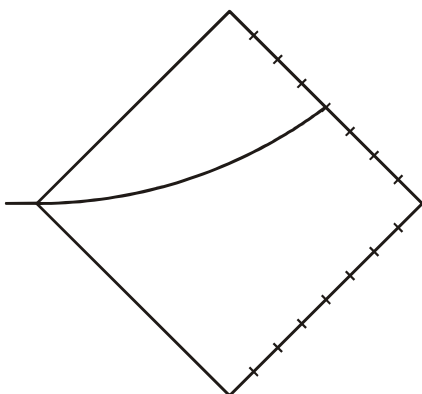


Fig. 3: Deflection of electron beam so that it passes through the centre of the scale at the edge of the screen

EVALUATION

a) The magnetic field B produced by the Helmholtz coils is proportional to the current I_H that passes through each individual coil. The coefficient of proportionality k can be calculated from the coil radius $R = 68 \text{ mm}$ and the number of windings per coil $N = 320$:

$$B = k \cdot I_H \text{ where } k = \left(\frac{4}{5}\right)^2 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}} \cdot \frac{N}{R} = 4,2 \frac{\text{mT}}{\text{A}}$$

b) The radius of deflection r for the electron beam can be determined from the exit point B as shown in Fig. 4.

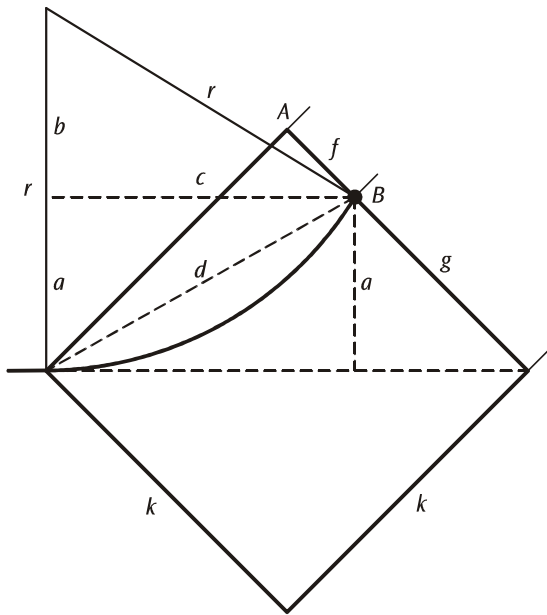


Fig. 4: Calculating radius of deflection r of electron beam exiting screen at a point B, a distance f from corner A

By Pythagoras' theorem:

$$r^2 = c^2 + b^2 = c^2 + (r - a)^2 = c^2 + r^2 - 2 \cdot r \cdot a + a^2$$

$$c^2 + a^2 = d^2 = k^2 + f^2 \text{ where } k = 80 \text{ mm}$$

$$a^2 = \frac{1}{2} \cdot g^2 = \frac{1}{2} \cdot (k - f)^2$$

$$\text{Therefore } r = \frac{c^2 + a^2}{2a} = \frac{k^2 + f^2}{\sqrt{2} \cdot (k - f)}$$

If B is in the centre of the scale, $f = 40 \text{ mm}$. In this case the calculation is as follows:

$$r = 141 \text{ mm and } \frac{1}{2} \cdot r^2 = 0,1\text{m}^2.$$

$$\text{Equation (4) can be rearranged thus: } \frac{e}{m} = \frac{U_A}{0,1\text{m}^2 \cdot B^2}$$

c) The electric field produced by the capacitor can be derived from the voltage U_P and the plate separation $d = 8 \text{ mm}$:

$$E = \frac{U_P}{d}$$

d) To estimate the specific charge of an electron, calculate the magnetic field B from the values of current I_H entered in Table 1. The results should correspond to those in Table 3.

Fig. 5 shows a graph of the relationship between the anode voltage U_A and the square of the magnetic field B^2 for the values shown in Table 3.

The graph is a straight line through the origin with the following gradient

$$\frac{U_A}{B^2} = 1.7 \frac{\text{kV}}{\text{mT}^2}$$

$$\text{This results in } \frac{e}{m} = \frac{U_A}{0,1\text{m}^2 \cdot B^2} = 1.7 \cdot 10^{11} \frac{\text{As}}{\text{kg}}$$

$$\text{(Quoted value: } \frac{e}{m} = 1.76 \cdot 10^{11} \frac{\text{As}}{\text{kg}})$$

Table 3: Values B and B^2 calculated from results for I_H given in Table 1 depending on anode voltage U_A .

U_A / kV	B / mT	B^2 / mT^2
2.0	1.11	1.24
3.0	1.30	1.70
4.0	1.55	2.41

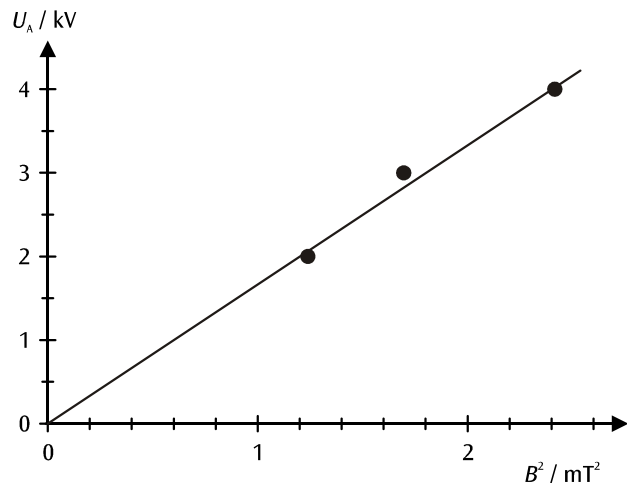


Fig. 5: Graph showing relationship between U_A and B^2 with a constant radius of deflection $r = 141 \text{ mm}$

e) To confirm Equation (7) the values of B and E , are calculated from the results in Table 2, where the deflection by both fields cancels out to zero (see Table 4). The results are then plotted on a graph of E against B (see Fig. 6).

To within the available degree of accuracy, the results lie on a straight line through the origin, which is in agreement with Equation (7). The gradient of the line corresponds to the velocity of the electrons.

Thus: $v = 3,2 \cdot 10^7 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ (where $U_A = 3.0 \text{ kV}$)

Tab. 4: Magnetic field B and cancelling electric field E for a fixed anode voltage $U_A = 3.0 \text{ kV}$

Nr.	B / mT	$E / \text{V/mm}$
1	0.42	12.5
2	0.84	28.1
3	1.26	41.3
4	1.68	55.0

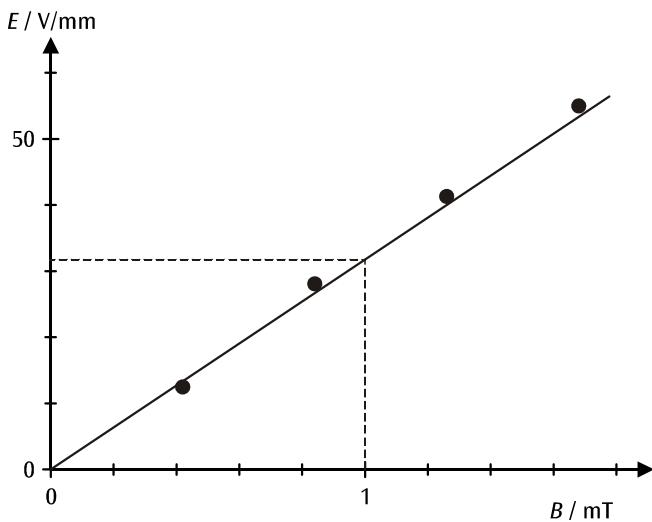


Fig. 6: Graph of results from Table 4

f) Using the results from Table 1 the electron velocity v for various anode voltages U_A can be determined. The results are shown in Table 5.

Table 5: Values of B and E derived from measurements of I_H and U_P from Table 1 plus the resulting velocity v and the square of the velocity depending on the anode voltage U_A .

U_A / kV	B / mT	$E / \text{V/mm}$	$v / \text{m/s}$	$v^2 / (\text{m/s})^2$
2.0	1.11	30.0	$2.70 \cdot 10^7$	$7.3 \cdot 10^{14}$
3.0	1.30	41.3	$3.18 \cdot 10^7$	$10.1 \cdot 10^{14}$
4.0	1.55	58.8	$3.79 \cdot 10^7$	$14.4 \cdot 10^{14}$

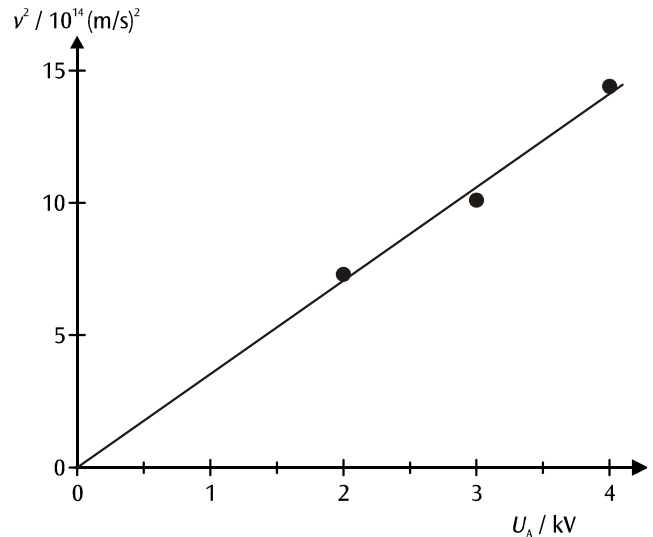


Fig. 7: Graph of v^2 against U_A

Fig. 7 is a graph of the square of the velocity against the anode voltage. The gradient of the resulting straight line through the origin also leads to a result for the specific charge of an electron according to Equation (8).

Thus: $\frac{e}{m} = \frac{v^2}{2 \cdot U_A} = 1.8 \cdot 10^{11} \frac{\text{As}}{\text{kg}}$
 (Quoted value: $\frac{e}{m} = 1,76 \cdot 10^{11} \frac{\text{As}}{\text{kg}}$)

Tubo de Thomson

ESTUDIO DE LA DESVIACIÓN DE ELECTRONES EN CAMPOS ELÉCTRICOS Y MAGNÉTICOS

- Estudio de la desviación de un rayo de electrones en un campo magnético
- Estudio de la desviación de un rayo de electrones en un campo eléctrico
- Montaje de un filtro de velocidades compuesto de un campo eléctrico y uno magnético cruzados
- Estimación de la carga específica del electrón.

UE3070500

04/24 UK/UD

FUNDAMENTOS GENERALES

En el tubo de Thomson pasan electrones horizontalmente a través de un diafragma de ranura que se encuentra detrás del ánodo e inciden sobre una pantalla fluorescente inclinada que se encuentra en la trayectoria de los electrones para poder ser observados. Detrás del diafragma de ranura se encuentra colocado un condensador de placas paralelas en cuyo campo eléctrico vertical se desvían los electrones. Además con un par de bobinas de Helmholtz es posible crear un campo magnético horizontal perpendicular a la dirección de la trayectoria de los electrones para producir también una desviación en la dirección vertical:

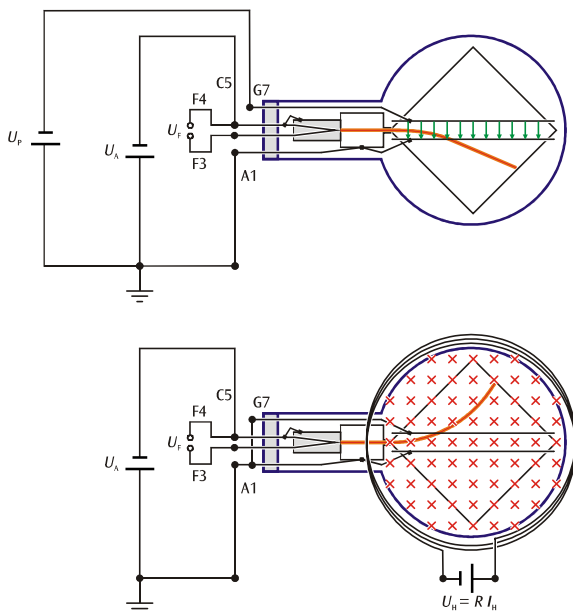


Fig. 1: Representación esquemática del tubo de Thomson. Desviación en el campo eléctrico (arriba), en el campo magnético (abajo)

Sobre un electrón que se mueve con velocidad \mathbf{v} en un campo magnético \mathbf{B} actúa la fuerza de Lorentz perpendicularmente a la dirección de movimiento y al campo magnético:

$$\mathbf{F} = -e \cdot \mathbf{v} \times \mathbf{B} \quad (1)$$

e : carga elemental

La desviación tiene lugar en dirección vertical cuando tanto la dirección de movimiento y la del campo se encuentran en la horizontal (ver Fig. 1 abajo). Si la dirección de movimiento es perpendicular al campo magnético homogéneo, los electrones son llevados a una trayectoria circular, cuya fuerza centrípeta es dada por la fuerza de Lorentz.

$$m \cdot \frac{v^2}{r} = e \cdot v \cdot B \quad (2)$$

m : Masa del electrón, r : Radio de la trayectoria circular

La velocidad de los electrones depende de la tensión del ánodo U_A . Se tiene:

$$v = \sqrt{2 \cdot \frac{e}{m} \cdot U_A} \quad (3)$$

Por lo tanto, la carga específica del electrón se puede determinar a partir del radio de la trayectoria circular, cuando se conocen la tensión del ánodo U_A y el campo magnético homogéneo B . Partiendo de (2) y (3) se obtiene la carga específica del electrón:

$$\frac{e}{m} = \frac{2 \cdot U_A}{(B \cdot r)^2} \quad (4)$$

El radio de curvatura r se puede determinar tomando como base punto de salida del rayo de electrones sobre la pantalla. El campo magnético B del par de bobinas de Helmholtz se obtiene de la corriente de las bobinas I_H (ver "Evaluación").

Si en el condensador de placas paralelas se tiene una tensión de U_p , los electrones serán desviados verticalmente en el campo eléctrico vertical E con la fuerza (ver Fig. 1, arriba)

$$F = -e \cdot E \quad (5)$$

e : Carga elemental

Por lo tanto el campo eléctrico se puede elegir de tal forma que se compense la desviación en el campo magnético:

$$e \cdot E + e \cdot v \cdot B = 0 \quad (6)$$

En este caso se puede determinar fácilmente la velocidad de los electrones. Se tiene:

$$v = \frac{|E|}{|B|} \quad (7)$$

Una ordenación de campos eléctrico y magnético cruzados en la cual las desviaciones de los electrones se compensen se denomina "Filtro de velocidades".

La dependencia de la velocidad v con la tensión de aceleración U_A se obtiene al hacer la comparación de la energía cinética y la energía potencia. Se tiene:

$$e \cdot U_A = \frac{m}{2} v^2 \text{ resp. } v^2 = 2 \cdot \frac{e}{m} \cdot U_A \quad (8)$$

LISTA DE APARATOS

1	Tubo de Thomson S	1000617 (U18555)
1	Soporte de tubos S	1014525 (U185002)
1	Par de bobinas de Helmholtz S	1000611 (U185051)
1	Fuente de alta tensión, 5 kV (@230 V)	1003310 (U33010-230)
o		
1	Fuente de alta tensión, 5 kV (@115 V)	1003309 (U33010-115)
1	Fuente de alimentación CC, 0-500 V (@230 V)	1003308 (U33000-230)
o		
1	Fuente de alimentación CC, 0-500 V (@115 V)	1003307 (U33000-115)
1	Multímetro digital P1035	1002781 (U11806)
1	Juego de 15 cables de experimentación de seguridad, 75 cm	1002843 (U138021)

ADVERTENCIAS DE SEGURIDAD

Tubos de rayos catódicos son tubos de vidrio evacuados de pared delgada: Manéjelos con sumo cuidado: ¡Peligro de implosión!

- No someta el tubo de Thomson a ningún esfuerzo mecánico.

En el tubo de Thomson se pueden encontrar posiblemente tensiones peligrosas al contacto directo.

- Para las conexiones utilice cables de experimentación de seguridad.
- Las conexiones se realizan sólo con la fuente de alimentación de tensión desconectada.
- El tubo de Thomson se monta y desmonta sólo con la fuente de alimentación desconectada.

MONTAJE

Montaje del par de bobinas de Helmholtz y del tubo de Thomson en el soporte del tubo:

- Se colocan ambas bobinas de Helmholtz – con los casquillos de conexión orientados hacia fuera – en el centro de la unidad de enchufe y se desplazan totalmente hacia fuera.
- Se inserta el tubo de Thomson en el soporte para tubo teniendo en cuenta que las espigas de contacto del tubo encajen totalmente en los orificios previstos para ello. La espiga guía del tubo debe salir un poco del soporte.
- Se deslizan ambas bobinas de Helmholtz hacia dentro hasta la marca. La distancia media entre las bobinas de Helmholtz es de 68 mm.

Conexión de las tensiones de caldeo y de aceleración:

- Se deja desconectada la fuente alimentación de alta tensión y el plato de tensión se gira hasta el extremo izquierdo.
- Se conectan los casquillos F3 y F4 del soporte de tubo con la salida de alta tensión (casquillos azules) de la fuente de alimentación de alta tensión, utilizando cables de experimentación de seguridad (ver Fig. 1)
- Se conecta el casquillo C5 del soporte de tubo con el polo negativo (casquillo negro) de la fuente de alimentación de alta tensión, utilizando cables de experimentación de seguridad (los contactos C5 y F4 están conectados entre sí dentro del tubo).
- Se conecta el casquillo A1 del soporte de tubo con el polo positivo de la salida de alta tensión (casquillo rojo) y el polo positivo con el casquillo amarillo – verde de puesta a tierra.

Conexión de las bobinas de Helmholtz:

- Se deja desconectada la fuente de alimentación de CC y se giran todos los ajustes de tensión hasta el extremo izquierdo.
- Se conecta el casquillo A de la primera bobina con el polo negativo y el casquillo Z con el polo positivo de salida de 12 V.
- La segunda bobina se conecta paralelamente a la primera y a su vez se conectan los casquillos que queden frente a frente.
- Se conecta el amperímetro en serie con las dos bobinas de Helmholtz.

Conexión de la tensión de desviación:

- Se conecta el casquillo G7 del soporte de tubo con el polo negativo de salida de 500 V.
- Se conecta el polo positivo de la fuente de alimentación de CC se conecta con el casquillo amarillo – verde de conexión a tierra de la fuente de alimentación de alta tensión.

Observación: En caso de que la desviación en el campo eléctrico o en el magnético estén en la dirección contraria, se intercambian los correspondientes contactos en las respectivas fuentes.

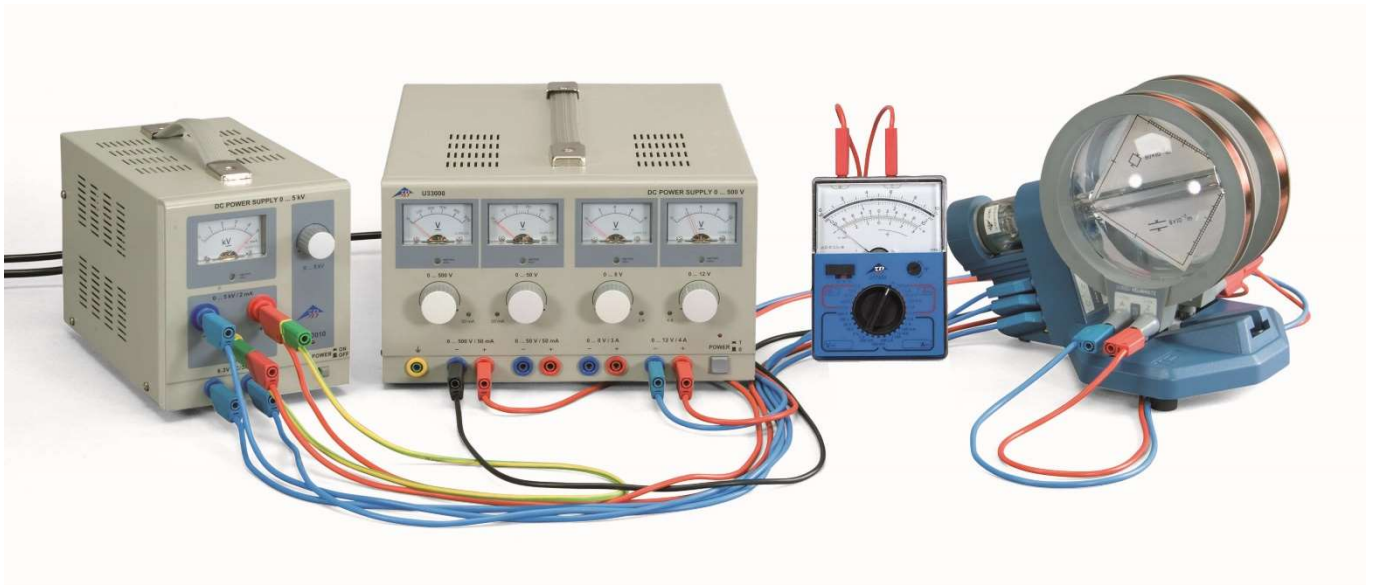


Fig. 2: Montaje experimental para el estudio de la desviación de electrones en un campo eléctrico y en un campo magnético

REALIZACION

- Se conecta la fuente de alimentación de alta tensión. El filamento se enciende inmediatamente de color rojizo.
- Se ajusta la tensión de aceleración en $U_A = 2,0$ kV y se observa en la pantalla fluorescente el curso "horizontal" del rayo de electrones.
- Se conecta la fuente de alimenta CC de 0–500 V.
- Se aumenta lentamente la corriente I_H por el par de bobinas de Helmholtz hasta que el rayo de electrones pase por el centro de la escala al borde de la pantalla fluorescente (ver Fig. 3)
- Se ajusta la tensión U_P en las placas de desviación hasta que la desviación del rayo de electrones se haya compensado a cero.
- Se anota la intensidad de corriente I_H y en su caso la tensión U_P
- Se retorna a cero la tensión U_P .
- Se repite la medición con $U_A = 3,0$ y $4,0$ kV .

- Se ajusta la tensión de ánodo en $U_A = 3$ kV.
- Se elige $2 I_H = 0,2$ A y se ajusta la tensión de las placas U_P de tal forma que la desviación del rayo de electrones se compense a cero.
- Se anotan la intensidad corriente $2 I_H$ y la tensión U_P .
- Se repite el proceso para $2 I_H = 0,4$ A, $0,6$ A y $0,8$ A.

EJEMPLO DE MEDIDA

Tabla. 1: (Para una desviación magnética por el centro de la escala en el borde la pantalla) Corriente por el par de bobinas de Helmholtz $2 I_H$ y tensión de las placas de condensador U_P (para compensar la desviación a cero) en dependencia con la tensión del ánodo U_A .

U_A / kV	$2 I_H$ / A	U_P / V
2,0	0,53	240
3,0	0,62	330
4,0	0,74	470

Tab. 2: Corriente por las bobinas de Helmholtz $2 I_H$ y la tensión de compensación de placas U_P manteniendo constante la tensión de ánodo $U_A = 3,0$ kV

No.	$2 I_H$ / A	U_P / V
1	0,2	100
2	0,4	225
3	0,6	360
4	0,8	440

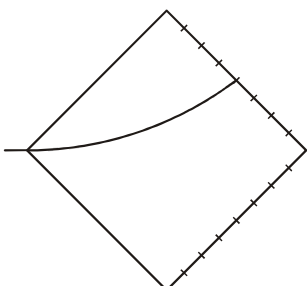


Fig. 3: Desviación del rayo de electrones por el centro de la escala al borde de la pantalla fluorescente

EVALUACIÓN

a) El campo magnético B en un par de bobinas de Helmholtz es proporcional a la intensidad de la corriente I_H por una sola bobina. El factor de proporcionalidad k se puede calcular a partir del radio de la bobina $R = 68 \text{ mm}$ y el número de espira de cada bobina $N = 320$:

$$B = k \cdot I_H \text{ mit } k = \left(\frac{4}{5}\right)^2 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}} \cdot \frac{N}{R} = 4,2 \frac{\text{mT}}{\text{A}}$$

b) El radio de curvatura r del rayo de electrones desviados se puede determinar a partir del punto de salida B en la Fig. 4.

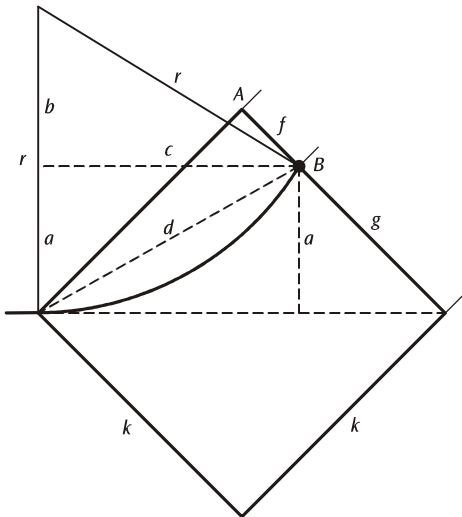


Fig. 4: Representación para el cálculo del radio de curvatura r de la trayectoria de los electrones basándose en la distancia f entre el punto de salida B y el punto de esquina A.

De acuerdo con Pitágoras se tiene:

$$r^2 = c^2 + b^2 = c^2 + (r - a)^2 = c^2 + r^2 - 2 \cdot r \cdot a + a^2$$

$$c^2 + a^2 = d^2 = k^2 + f^2 \text{ con } k = 80 \text{ mm}$$

$$a^2 = \frac{1}{2} \cdot g^2 = \frac{1}{2} \cdot (k - f)^2$$

Se obtiene:
$$r = \frac{c^2 + a^2}{2a} = \frac{k^2 + f^2}{\sqrt{2} \cdot (k - f)}$$

Con el punto B en el centro de la escala, $f = 40 \text{ mm}$. En este caso se calcula:

$$r = 141 \text{ mm y } \frac{1}{2} \cdot r^2 = 0,1 \text{ m}^2.$$

Eq. (4) se puede despejar como:
$$\frac{e}{m} = \frac{U_A}{0,1 \text{ m}^2 \cdot B^2}$$

c) El campo eléctrico en el condensador de placas se calcula a partir de la tensión U_P y la distancia entre las placas $d = 8 \text{ mm}$

$$E = \frac{U_P}{d}$$

d) Para estimar el valor de la carga específica del electrón se calcula el campo magnético B con los valores para la intensidad de corriente I_H indicados en Tab 1 y se obtienen los valores indicados en la Tab. 3.

La Fig. 5 muestra una representación gráfica de la relación entre la tensión del ánodo U_A y el cuadrado del campo magnético B^2 para los valores de la tabla 3.

La pendiente de la recta dibujada que pasa por el origen se calcula por:

$$\frac{U_A}{B^2} = 1,7 \frac{\text{kV}}{\text{mT}^2}$$

A partir de allí se calcula
$$\frac{e}{m} = \frac{U_A}{0,1 \text{ m}^2 \cdot B^2} = 1,7 \cdot 10^{11} \frac{\text{As}}{\text{kg}}$$

(Valor bibliográfico:
$$\frac{e}{m} = 1,76 \cdot 10^{11} \frac{\text{As}}{\text{kg}}$$
)

Tab. 3: Valores para B y B^2 determinados en dependencia con la tensión del ánodo U_A , determinados con los valores de la tabla 1 para corriente la I_H

U_A / kV	B / mT	B^2 / mT^2
2,0	1,11	1,24
3,0	1,30	1,70
4,0	1,55	2,41

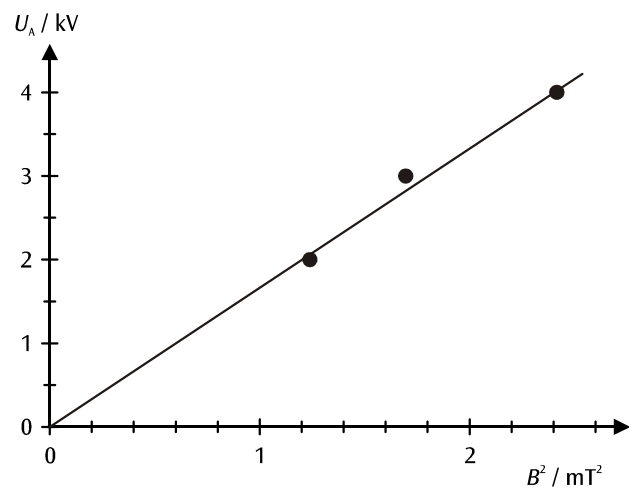


Fig. 5: Representación gráfica de la relación entre U_A y B^2 para un radio de curvatura constante de $r = 141 \text{ mm}$

e) Para confirmar la Eq. (7) se calculan a partir de los valores de medida de la Tab. 2 los pares de valores B y E con los cuales la desviación de los electrones se compensa a cero (ver Tab. 4) y se representa el resultado en un diagrama E – B (ver Fig. 6)

En concordancia con la Eq. (7) los valores de medida se encuentran sobre una recta que pasa por el origen, dentro de la exactitud de medida. Su pendiente es la velocidad de los electrones.

Se obtiene: $v = 3,2 \cdot 10^7 \frac{m}{s}$ (con $U_A = 3,0 \text{ kV}$)

Tab. 4: Campo magnético B y campo eléctrico de compensación E con una tensión de ánodo constante de $U_A = 3,0 \text{ kV}$

No.	B / mT	E / V/mm
1	0,42	12,5
2	0,84	28,1
3	1,26	41,3
4	1,68	55,0

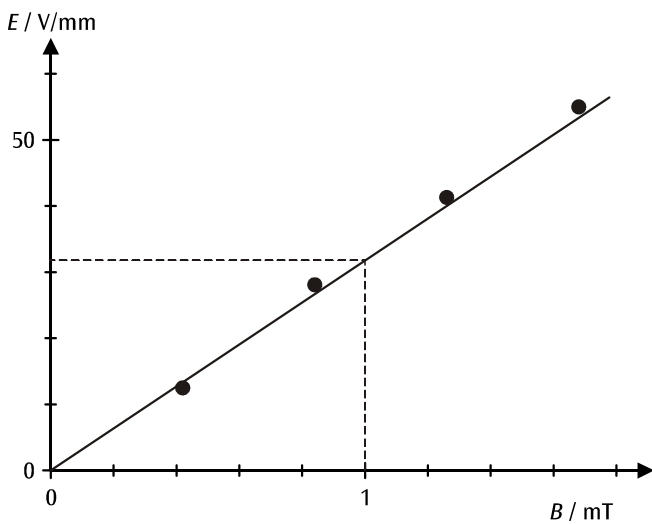


Fig. 6: Representación gráfica de los valores de medida de la Tab.4

f) Por medio de los valores de medida de la Tab. 1 se puede determinar la velocidad de los electrones para diferentes tensiones de ánodo U_A . El resultado se encuentra en la Tab. 5.

Tab. 5: Los valores determinados para B y E determinados a partir de los valores de medida para I_H y U_P de Tab.1, así como la velocidad v determinada de ellos y su cuadrado en dependencia con la tensión del ánodo U_A .

U_A / kV	B / mT	E / V/mm	v / m/s	$v^2 / (\text{m/s})^2$
2,0	1,11	30,0	$2,70 \cdot 10^7$	$7,3 \cdot 10^{14}$
3,0	1,30	41,3	$3,18 \cdot 10^7$	$10,1 \cdot 10^{14}$
4,0	1,55	58,8	$3,79 \cdot 10^7$	$14,4 \cdot 10^{14}$

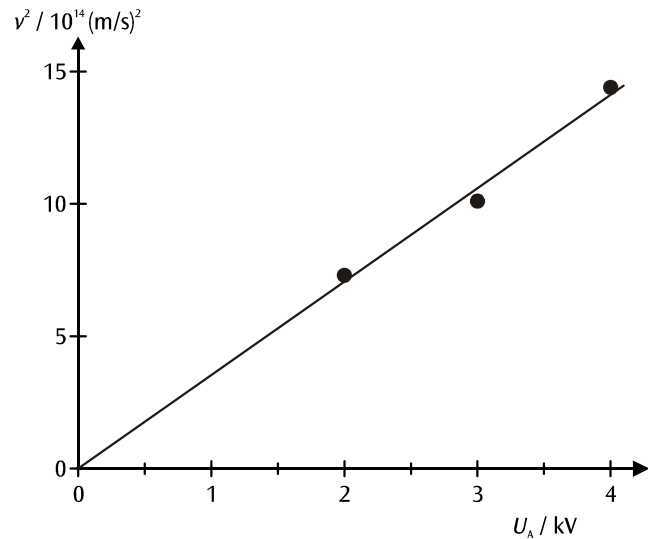


Fig. 7: Representación gráfica de la relación entre v^2 y U_A

La Fig. 7 muestra la relación entre el cuadrado de la velocidad y la tensión del ánodo. A partir de la pendiente de la recta que pasa por el origen dibujada se puede también determinar la carga específica del electrón aplicando la Eq. (8).

Se obtiene: $\frac{e}{m} = \frac{v^2}{2 \cdot U_A} = 1,8 \cdot 10^{11} \frac{\text{As}}{\text{kg}}$

(Valor bibliográfico: $\frac{e}{m} = 1,76 \cdot 10^{11} \frac{\text{As}}{\text{kg}}$)

Tube de Thomson

ÉTUDE DE LA DÉVIATION D'ÉLECTRONS DANS UN CHAMP ÉLECTRIQUE ET MAGNÉTIQUE

- Etude de la déviation d'un faisceau électronique dans un champ magnétique.
- Étude de la déviation d'un faisceau électronique dans un champ électrique.
- Montage d'un filtre de vitesse d'un champ électrique et d'un champ magnétique croisés.
- Évaluation de la charge spécifique de l'électron.

UE3070500

04/24 UK/UD

NOTIONS DE BASE GÉNÉRALES

Dans le tube de Thomson, les électrons traversent horizontalement un diaphragme à fente placé en aval de l'anode et rencontrent un écran luminescent qui, placé de biais dans la marche du rayon, rend le faisceau visible. Derrière le diaphragme se trouve un condensateur à plaques, dans le champ électrique vertical duquel les électrons sont déviés verticalement. Par ailleurs, les bobines de Helmholtz permettent de créer un champ magnétique horizontal perpendiculaire au sens du faisceau, dans lequel les électrons sont également déviés verticalement :

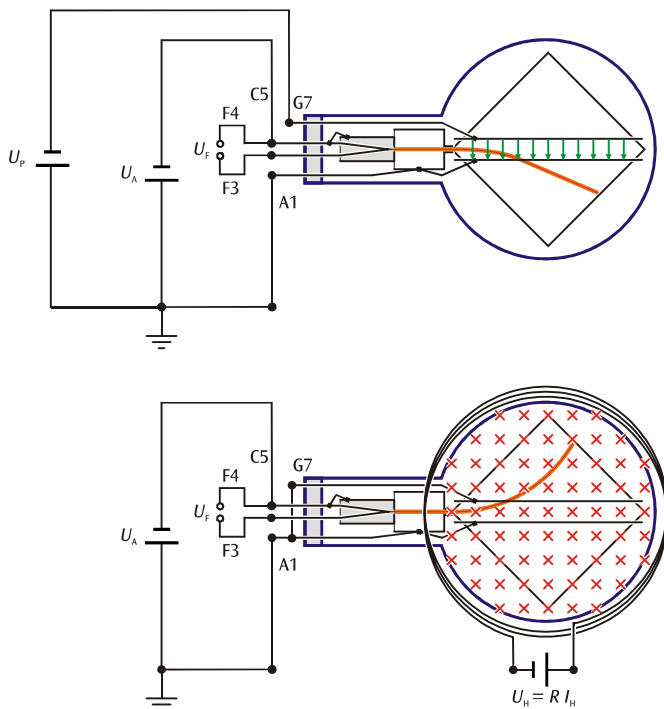


Fig. 1 : Représentation schématique du tube Thomson. Déviation dans le champ électrique (en haut) (dans le champ magnétique, en bas)

La force de Lorentz agit sur un électron qui bouge à la vitesse v à travers un champ magnétique B

$$F = -e \cdot v \times B \quad (1)$$

e : charge élémentaire

perpendiculaire au plan résultant du sens de mouvement et du champ magnétique. La déviation est verticale lorsque le sens du mouvement et le champ magnétique se situent dans le plan horizontal (cf. Fig. 1, en bas). Si le sens du mouvement est perpendiculaire au champ magnétique homogène, les électrons sont forcés sur une trajectoire circulaire dont la force centripète est imposée par la force de Lorentz.

$$m \cdot \frac{v^2}{r} = e \cdot v \cdot B \quad (2)$$

m : masse électronique, r : rayon de la trajectoire circulaire.

La vitesse des électrons dépend de la tension anodique U_A . On a l'équation suivante :

$$v = \sqrt{2 \cdot \frac{e}{m} \cdot U_A} \quad (3)$$

Le rayon de la trajectoire circulaire permet de déterminer la charge spécifique de l'électron, dans la mesure où le champ magnétique homogène B et la tension anodique U_A sont connus. (2) et (3) permettent d'établir la charge spécifique de l'électron :

$$\frac{e}{m} = \frac{2 \cdot U_A}{(B \cdot r)^2} \quad (4)$$

Le rayon de courbure r peut être déterminé à partir du point de sortie du faisceau dévié à l'écran. Le champ magnétique B des bobines de Helmholtz résulte du courant de bobine I_H (voir évaluation).

Lorsqu'une tension U_p est appliquée au condensateur à plaques, les électrons sont déviés verticalement dans son champ électrique vertical E avec la force

$$F = -e \cdot E \quad (5)$$

e : charge élémentaire

également déviée perpendiculairement (cf. Fig. 1). Aussi le champ électrique peut-il être choisi de manière à ce qu'il compense juste la déviation dans le champ magnétique :

$$e \cdot E + e \cdot v \cdot B = 0 \quad (6)$$

Dans ce cas, il est aisé de déterminer la vitesse des électrons. On a l'équation suivante :

$$v = \frac{|E|}{|B|} \quad (7)$$

Un agencement de champs électrique et magnétique croisés, dans lequel la déviation des électrons est compensée à zéro, est appelé un filtre de vitesse.

Le rapport entre la vitesse v et la tension d'accélération U_A résulte de la comparaison entre l'énergie potentielle et l'énergie cinétique. On a l'équation suivante :

$$e \cdot U_A = \frac{m}{2} v^2 \text{ et } v^2 = 2 \cdot \frac{e}{m} \cdot U_A \quad (8)$$

LISTE DES APPAREILS

1	Tube de Thomson S	1000617 (U18555)
1	Support-pour tube S	1014525 (U185002)
1	Paire de bobines de Helmholtz S	1000611 (U185051)
1	Alimentation haute tension 5 kV (@230 V)	1003310 (U33010-230)
ou		
1	Alimentation haute tension 5 kV (@115 V)	1003309 (U33010-115)
1	Alimentation CC 0-500 V (@230 V)	1003308 (U33000-230)
ou		
1	Alimentation CC 0-500 V (@115 V)	1003307 (U33000-115)
1	Multimètre numérique P1035	1002781 (U11806)
1	Jeu de 15 cordons de sécurité, 75 cm	1002843 (U138021)

CONSIGNES DE SÉCURITÉ

Les tubes thermoioniques sont des cônes en verre à paroi mince sous vide. Manipulez-les avec précaution : risque d'implosion !

- N'exposez pas le tube Thomson à des charges mécaniques.

La tension appliquée au tube Thomson peut être dangereuse au contact :

- Pour les connexions, utilisez uniquement des câbles d'expérimentation de sécurité.
- Ne procédez à des câblages que lorsque le dispositif d'alimentation est éteint.
- Ne montez et ne démontez le tube Thomson que lorsque le dispositif d'alimentation est éteint.

MONTAGE

Montage de la paire de bobines de Helmholtz et du tube Thomson dans le porte-tube :

- Placez les deux bobines de Helmholtz au milieu de la fente des bobines (les douilles de connexion étant tournées vers l'extérieur) et glissez-les vers l'extérieur.
- Insérez le tube Thomson dans le porte-tube. Veillez à ce que les contacts du tube s'engrènent complètement dans les orifices prévus à cet effet dans le porte-tube. La tige de guidage centrale du tube doit dépasser légèrement de l'arrière du porte-tube.
- Glissez les deux bobines de Helmholtz vers l'intérieur jusqu'au repère. L'écart moyen entre les deux bobines s'élève alors à 68 mm.

Connexion de la tension de chauffage et d'accélération :

- Laissez l'alimentation haute tension éteinte et tournez le diviseur de tension en butée gauche.
- Reliez les douilles F3 et F4 du porte-tube à la sortie de la tension de chauffage (douilles bleues) de l'alimentation haute tension au moyen de câbles d'expérimentation de sécurité (cf. Fig. 1).
- Reliez la douille C5 du porte-tube au pôle négatif (douille noire) de l'alimentation haute tension au moyen de câbles d'expérimentation de sécurité (les connexions C5 et F4 sont reliées entre elles dans le tube).
- Reliez la douille A1 du porte-tube au pôle positif (douille rouge) de la sortie haute tension et le pôle positif à la douille de terre jaune-vert.

Connexion des bobines de Helmholtz :

- Laissez l'alimentation CC éteinte et tournez tous les diviseurs de tension en butée gauche.
- Reliez la douille A de la première bobine au pôle négatif et la douille Z au pôle positif de la sortie 12 V.
- Branchez la seconde bobine parallèlement à la première en reliant les douilles opposées.
- Raccordez en série l'ampèremètre aux deux bobines de Helmholtz.

Connexion de la tension de déviation :

- Reliez la douille G7 du porte-tube au pôle négatif de la sortie 500 V.
- Reliez le pôle positif de l'alimentation CC à la douille de terre jaune-vert du dispositif haute tension.

Note : si les déviations ont lieu dans le champ électrique ou magnétique dans le sens opposé, inversez les connexions de l'alimentation CC correspondante.

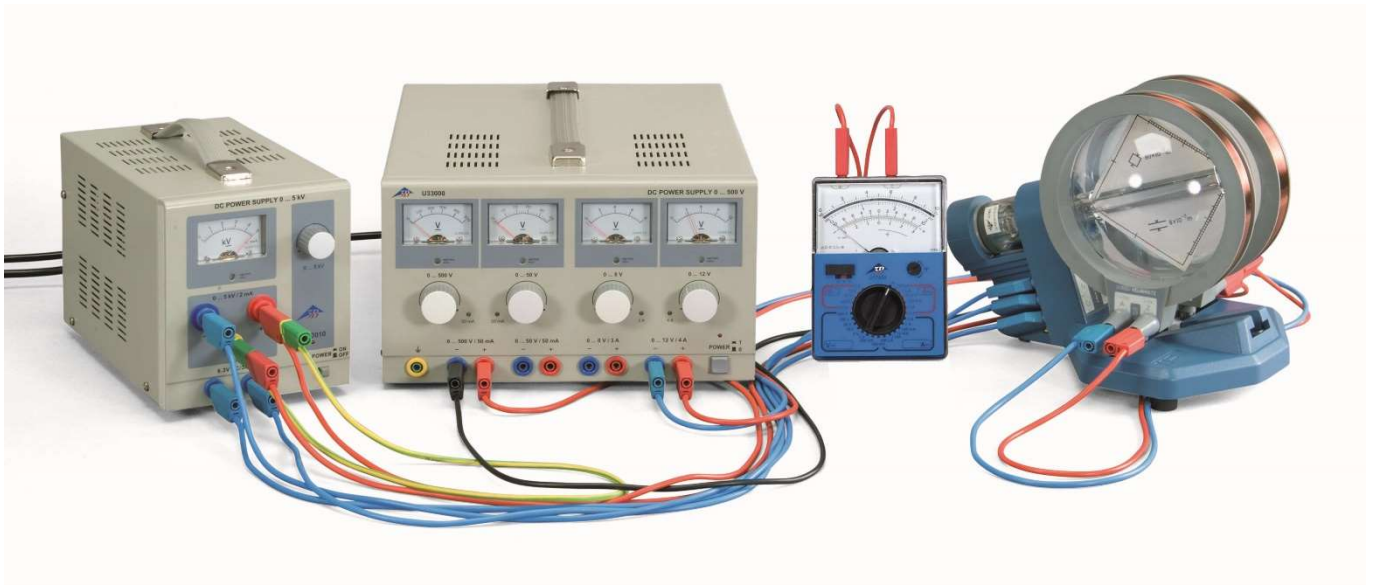


Fig. 2 : Structure expérimentale pour l'étude de la déviation d'électrons dans un champ électrique et magnétique.

RÉALISATION

- Mettez l'alimentation haute service en service. Le filament se met immédiatement à rougir.
- Réglez la tension d'accélération $U_A = 2,0$ kV et observez l'allure « horizontale » du faisceau électronique à l'écran.
- Allumez l'alimentation CC, 0-500 V.
- Augmentez lentement le courant $2 I_H$ traversant les deux bobines de Helmholtz, jusqu'à ce que le faisceau électronique au bord de l'écran passe au milieu de la graduation (cf. Fig. 3).
- Sélectionnez une tension U_P sur les plaques de manière à ce que la déviation du faisceau soit compensée à zéro.
- Notez l'intensité du courant $2 I_H$ et, le cas échéant, la tension U_P .
- Ramenez la tension U_P à zéro.
- Répétez la mesure pour $U_A = 3,0$ et $4,0$ kV.

- Répétez la tension anodique $U_A = 3$ kV.
- Sélectionnez $2 I_H = 0,2$ A et réglez la tension de plaques U_P de manière à ce que la déviation du faisceau soit compensée à zéro.
- Notez l'intensité du courant $2 I_H$ et la tension U_P .
- Répétez la procédure pour $2 I_H = 0,4$ A, $0,6$ A et $0,8$ A.

EXEMPLE DE MESURE

Tab. 1 : Courant (nécessaire à la déviation magnétique par le milieu de la graduation) traversant la paire de bobines de Helmholtz $2 I_H$ et tension de plaque (compensant la déviation à zéro) U_P en fonction de la tension anodique U_A .

U_A / kV	$2 I_H$ / A	U_P / V
2,0	0,53	240
3,0	0,62	330
4,0	0,74	470

Tab. 2 : Courant des bobines de Helmholtz $2 I_H$ et tension de plaques de compensation U_P à tension anodique fixe $U_A = 3,0$ kV

N°	$2 I_H$ / A	U_P / V
1	0,2	100
2	0,4	225
3	0,6	360
4	0,8	440

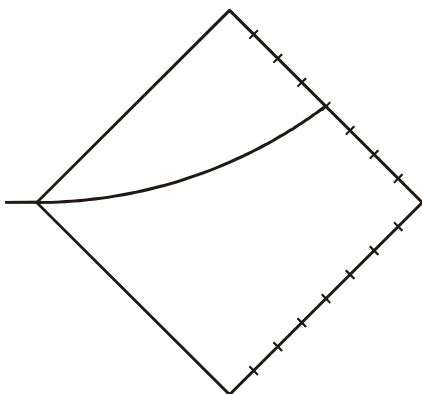


Fig. 3 : Déviation du faisceau électronique par le milieu de la graduation au bord de l'écran

ÉVALUATION

a) Le champ magnétique B dans une paire de bobines de Helmholtz est proportionnel au courant I_H traversant une seule bobine. Le facteur de proportionnalité k peut être calculé à partir du rayon de la bobine $R = 68 \text{ mm}$ et du nombre de spires $N = 320$ par bobine :

$$B = k \cdot I_H \text{ avec } k = \left(\frac{4}{5}\right)^{\frac{3}{2}} \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}} \cdot \frac{N}{R} = 4,2 \frac{\text{mT}}{\text{A}}$$

b) Le rayon de courbure r du faisceau dévié peut être déterminé dans la Fig. 4 à partir du point de sortie B.

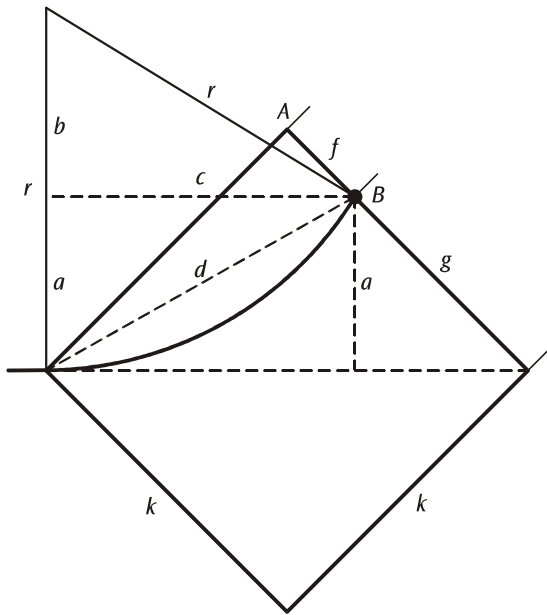


Fig. 4 : Représentation pour le calcul du rayon de courbure r du faisceau électronique à partir de l'écart f entre le point de sortie B et le point angulaire A

D'après le théorème de Pythagore :

$$r^2 = c^2 + b^2 = c^2 + (r - a)^2 = c^2 + r^2 - 2 \cdot r \cdot a + a^2$$

$$c^2 + a^2 = d^2 = k^2 + f^2 \text{ avec } k = 80 \text{ mm}$$

$$a^2 = \frac{1}{2} \cdot g^2 = \frac{1}{2} \cdot (k - f)^2$$

$$\text{Ainsi } r = \frac{c^2 + a^2}{2a} = \frac{k^2 + f^2}{\sqrt{2} \cdot (k - f)}$$

Si le point B est au milieu de la graduation, $f = 40 \text{ mm}$. Dans ce cas, on calcule :

$$r = 141 \text{ mm et } \frac{1}{2} \cdot r^2 = 0,1 \text{ m}^2.$$

$$\text{L'équation (4) peut être transformée : } \frac{e}{m} = \frac{U_A}{0,1 \text{ m}^2 \cdot B^2}$$

c) Le champ électrique dans le condensateur à plaques peut être calculé à partir de la tension U_p et de l'écart des plaques $d = 8 \text{ mm}$:

$$E = \frac{U_p}{d}$$

d) Pour évaluer la charge spécifique de l'électron, on calcule le champ magnétique B à partir des valeurs indiquées dans le tableau 1 pour le courant I_H et on obtient les valeurs indiquées dans le tableau 3.

La Fig. 5 illustre une représentation graphique du rapport entre la tension anodique U_A et le carré du champ magnétique B^2 pour les valeurs du tableau 3.

La pente de la droite d'origine dessinée s'élève à

$$\frac{U_A}{B^2} = 1,7 \frac{\text{kV}}{\text{mT}^2}$$

$$\text{Il en résulte } \frac{e}{m} = \frac{U_A}{0,1 \text{ m}^2 \cdot B^2} = 1,7 \cdot 10^{11} \frac{\text{As}}{\text{kg}}$$

$$\text{(Valeur empirique : } \frac{e}{m} = 1,76 \cdot 10^{11} \frac{\text{As}}{\text{kg}})$$

Tab. 3 : Valeurs B et B^2 déterminées à partir des mesures I_H du tableau 1 en fonction de la tension anodique U_A .

U_A / kV	B / mT	B^2 / mT^2
2,0	1,11	1,24
3,0	1,30	1,70
4,0	1,55	2,41

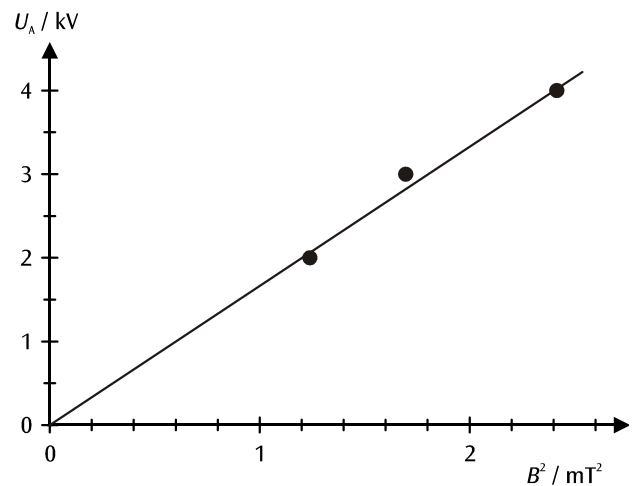


Fig. 5 : Représentation graphique du rapport entre U_A et B^2 avec un rayon de courbure constant $r = 141 \text{ mm}$

e) Pour confirmer l'équation (7), on calcule avec les valeurs de mesure du tableau 2 les paires de valeurs B et E , pour lesquelles la déviation du faisceau est compensée à zéro (cf. tableau 4), puis on représente le résultat dans un diagramme E - B (cf. Fig. 6).

En conformité avec l'équation (7), les valeurs de mesure se situent dans les limites de précision sur une droite d'origine. Sa pente correspond à la vitesse des électrons.

On obtient : $v = 3,2 \cdot 10^7 \frac{m}{s}$ (à $U_A = 3,0 \text{ kV}$)

Tab. 4 : Champ magnétique B et champ électrique compensant E pour une tension anodique fixe $U_A = 3,0 \text{ kV}$

N°	B / mT	$E / \text{V/mm}$
1	0,42	12,5
2	0,84	28,1
3	1,26	41,3
4	1,68	55,0

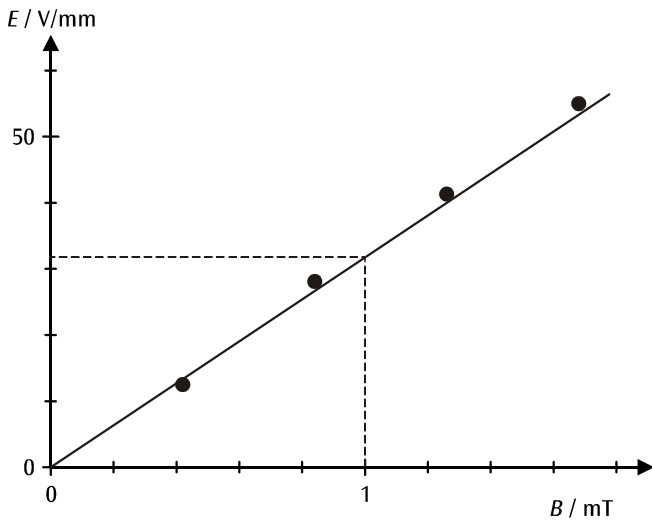


Fig. 6 : Représentation graphique des valeurs de mesure du tableau 4

f) Les valeurs de mesure du tableau 1 permettent de déterminer la vitesse v des électrons pour différentes tensions anodiques U_A . Le résultat est inscrit dans le tableau 5.

Tab. 5 : Valeurs B et E déterminées à partir des mesures I_H et U_P du tableau 1 ainsi que la vitesse v qui en résulte et son carré en fonction de la tension anodique U_A .

U_A / kV	B / mT	$E / \text{V/mm}$	$v / \text{m/s}$	$v^2 / (\text{m/s})^2$
2,0	1,11	30,0	$2,70 \cdot 10^7$	$7,3 \cdot 10^{14}$
3,0	1,30	41,3	$3,18 \cdot 10^7$	$10,1 \cdot 10^{14}$
4,0	1,55	58,8	$3,79 \cdot 10^7$	$14,4 \cdot 10^{14}$

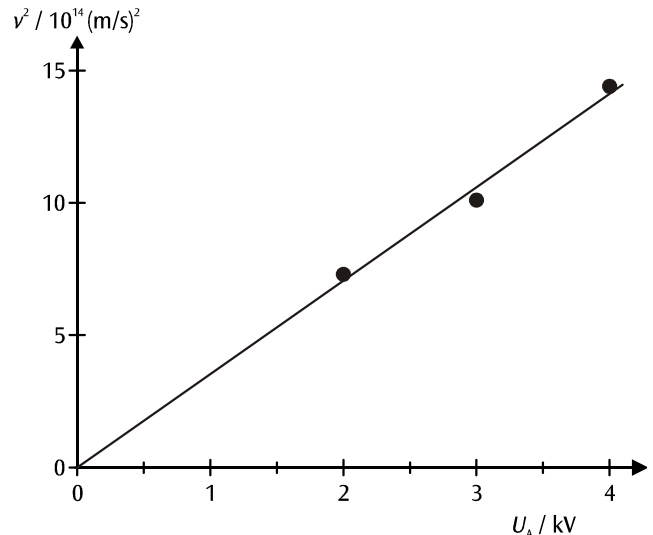


Fig. 7 : Représentation graphique du rapport entre v^2 et U_A

La fig. 7 illustre le rapport entre le carré de la vitesse et la tension anodique. À l'aide de l'équation (8), la pente de la droite d'origine permet également de déterminer la charge spécifique de l'électron.

On obtient : $\frac{e}{m} = \frac{v^2}{2 \cdot U_A} = 1,8 \cdot 10^{11} \frac{\text{As}}{\text{kg}}$
 (Valeur empirique : $\frac{e}{m} = 1,76 \cdot 10^{11} \frac{\text{As}}{\text{kg}}$)

Tubo di Thomson

ANALISI DELLA DEVIAZIONE DEGLI ELETTRONI NEL CAMPO ELETTRICO E MAGNETICO

- Analisi della deviazione di un fascio elettronico in un campo magnetico.
- Analisi della deviazione di un fascio elettronico in un campo elettrico.
- Struttura di un filtro di velocità da un campo elettrico e magnetico incrociato.
- Valutazione della carica specifica dell'elettrone.

UE3070500

04/24 UK/UD

BASI GENERALI

Nei tubi di Thomson, gli elettroni passano in direzione orizzontale attraverso un diaframma a fessura dietro l'anodo e colpiscono uno schermo fluorescente inclinato nel percorso dei raggi luminosi, sul quale risulta visibile l'andamento del fascio. Dietro al diaframma a fessura è montato un condensatore a piastre, nel cui campo elettrico verticale gli elettroni vengono deviati in direzione verticale. Inoltre, con le bobine di Helmholtz viene generato un campo magnetico ad andamento orizzontale in posizione verticale rispetto alla direzione del fascio, in cui gli elettroni vengono deviati anch'essi in direzione verticale:

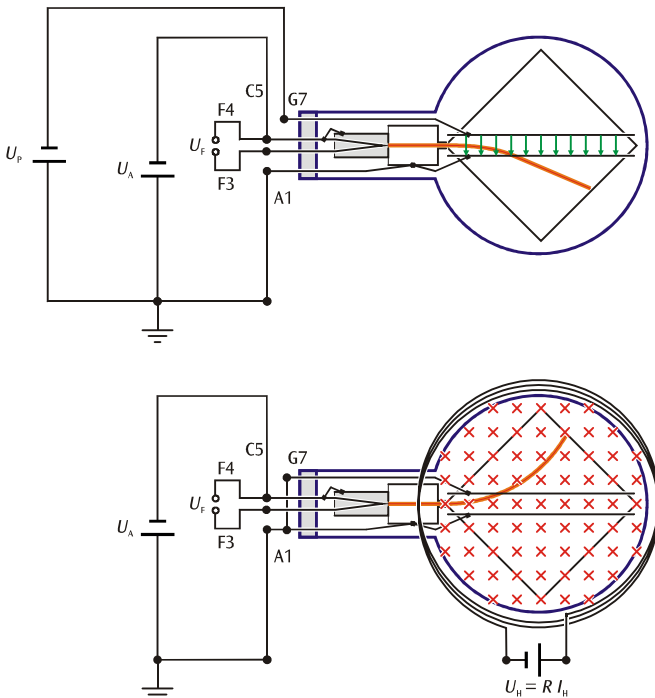


Fig. 1: rappresentazione schematica dei tubi di Thomson. Deviazione nel campo elettrico (in alto), (nel campo magnetico in basso)

Su un elettrone che si sposta nel campo magnetico B alla velocità v agisce la forza di Lorentz

$$F = -e \cdot v \times B \quad (1)$$

e : carica fondamentale

verticalmente rispetto alla direzione del movimento e al piano creato dal campo magnetico. La deviazione avviene in direzione verticale, se sia la direzione del movimento che il campo magnetico si trovano nel piano orizzontale (vedere la Fig. 1 in basso). Se la direzione di movimento è verticale sul campo magnetico omogeneo, gli elettroni vengono forzati su una guida circolare, la cui forza centripeta è data dalla forza di Lorentz.

$$m \cdot \frac{v^2}{r} = e \cdot v \cdot B \quad (2)$$

m : massa elettronica, r : raggio della guida circolare.

La velocità degli elettroni dipende dalla tensione degli anodi U_A . Vale:

$$v = \sqrt{2 \cdot \frac{e}{m} \cdot U_A} \quad (3)$$

In questo modo, dal raggio della guida circolare è possibile determinare la carica specifica dell'elettrone se il campo magnetico omogeneo B e la tensione anodica U_A sono noti. Sulla base di (2) e (3), per la carica specifica dell'elettrone ne consegue:

$$\frac{e}{m} = \frac{2 \cdot U_A}{(B \cdot r)^2} \quad (4)$$

Il raggio di curvatura r può essere determinato mediante il punto di uscita del fascio elettronico deviato sullo schermo. Il campo magnetico B delle bobine di Helmholtz deriva dalla corrente di bobina I_H (vedere la valutazione).

Se sul condensatore a piastre è presente una tensione U_p , nel campo elettrico verticale E con la forza

$$F = -e \cdot E \quad (5)$$

e : carica fondamentale

gli elettroni vengono deviati anch'essi verticalmente (vedere la Fig. 1 in alto). Il campo elettrico può quindi essere scelto in modo che la deviazione nel campo magnetico si compensi già:

$$e \cdot E + e \cdot v \cdot B = 0 \quad (6)$$

In questo caso, la velocità degli elettroni può essere facilmente determinata. Vale:

$$v = \frac{|E|}{|B|} \quad (7)$$

Una disposizione del campo elettrico e magnetico incrociato in cui la deviazione degli elettroni viene compensata rispetto allo zero viene pertanto definita come filtro di velocità.

La dipendenza della velocità v dalla tensione di accelerazione U_A deriva dal confronto tra energia potenziale e cinetica. Vale

$$e \cdot U_A = \frac{m}{2} v^2 \quad \text{o} \quad v^2 = 2 \cdot \frac{e}{m} \cdot U_A \quad (8)$$

ELENCO DEGLI STRUMENTI

1	Tubo di Thomson S	1000617 (U18555)
1	Portatubo S	1014525 (U185002)
1	Coppia di bobine di Helmholtz S	1000611 (U185051)
1	Alimentatore ad alta tensione 5 kV (@230 V)	1003310 (U33010-230)
o		
1	Alimentatore ad alta tensione 5 kV (@115 V)	1003309 (U33010-115)
1	Alimentatore CC 0-500 V (@230 V)	1003308 (U33000-230)
o		
1	Alimentatore CC 0-500 V (@115 V)	1003307 (U33000-115)
1	Multimetro digitale P1035	1002781 (U11806)
1	Set di 15 cavi di sicurezza per esperimenti, 75 cm	1002843 (U138021)

NORME DI SICUREZZA

I tubi catodici incandescenti sono bulbi in vetro a pareti sottili, sotto vuoto. Maneggiare con cura: rischio di implosione!

- Non esporre i tubi di Thomson a sollecitazioni meccaniche.

Ai tubi di Thomson viene applicata una tensione che in determinate condizioni rende pericoloso il contatto.

- Per i collegamenti utilizzare esclusivamente cavi di sperimentazione di sicurezza.
- Eseguire i collegamenti soltanto con gli apparecchi di alimentazione disinseriti.
- Montare e smontare i tubi di Thomson soltanto con gli apparecchi di alimentazione disinseriti.

MONTAGGIO

Montaggio della coppia di bobine di Helmholtz e dei tubi di Thomson nel portatubi:

- Inserire le due bobine di Helmholtz al centro del relativo scomparto con i jack di collegamento rivolti verso l'esterno e traslarle completamente verso l'esterno.
- Inserire i tubi di Thomson nel portatubi, accertandosi che gli spinotti di contatto del tubo s'innestino completamente nelle apposite aperture di contatto del portatubi. Lo spinotto di guida centrale del tubo deve sporgere leggermente sulla parte posteriore del portatubi.
- Spingere le due bobine di Helmholtz verso l'interno fino al contrassegno. La distanza centrale delle due bobine di Helmholtz ammonta quindi a 68 mm.

Collegamento della tensione di riscaldamento e di accelerazione:

- Lasciando l'alimentatore ad alta tensione disinserito, ruotare il regolatore di tensione completamente verso la battuta sinistra.
- Collegare i jack F3 e F4 del portatubi con l'uscita tensione di riscaldamento (prese blu) dell'alimentatore ad alta tensione mediante cavi di sicurezza per esperimenti (vedere anche la Fig. 1).
- Collegare il jack C5 del portatubi al polo negativo (presa nera) dell'alimentatore ad alta tensione (le connessioni C5 e F4 sono unite fra loro all'interno del tubo) mediante un cavo di sicurezza per esperimenti.
- Collegare il jack A1 del portatubi al polo positivo (presa rossa) dell'uscita per l'alta tensione e il polo positivo alla presa di terra giallo-verde.

Collegamento delle bobine di Helmholtz:

- Lasciando l'alimentatore a corrente continua disinserito, ruotare tutti i regolatori di tensione completamente verso la battuta sinistra.
- Collegare il jack A della prima bobina con il polo negativo e il jack Z con il polo positivo dell'uscita da 12 V.
- Collegare la seconda bobina parallelamente alla prima e a questo scopo allacciare di volta in volta i jack opposti.
- Collegare l'amperometro in serie rispetto alle due bobine di Helmholtz.

Collegamento della tensione di deviazione:

- Collegare il jack G7 del portatubi con il polo negativo dell'uscita da 500 V.
- Collegare il polo positivo dell'alimentatore a corrente continua con la presa di terra giallo-verde del dispositivo di alta tensione.

Nota: se le deviazioni nel campo elettrico o magnetico avvengono in direzione opposta, scambiare i collegamenti sul rispettivo alimentatore a corrente continua.

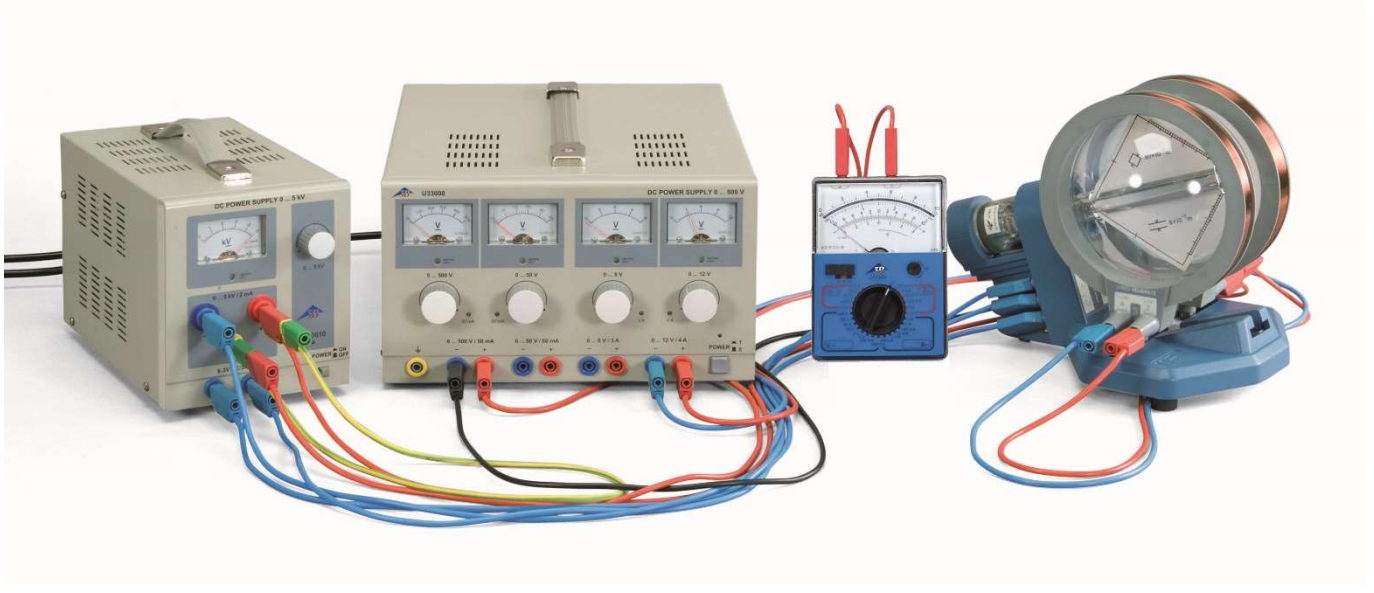


Fig. 2: struttura sperimentale per la verifica della deviazione nel campo elettrico e magnetico.

ESECUZIONE

- Inserire l'alimentatore ad alta tensione. Il filo di riscaldamento diventa immediatamente incandescente.
- Impostare la tensione di accelerazione $U_A = 2,0$ kV e osservare l'andamento "orizzontale" del fascio di elettroni sullo schermo fluorescente.
- Accendere l'alimentatore a corrente continua da 0-500 V.
- Aumentare lentamente la corrente $2 I_H$ con la coppia di bobine di Helmholtz, fino a quando il fascio di elettroni scorre sul margine dello schermo fluorescente attraverso il centro della scala (vedere la Fig. 3).
- Selezionare la tensione U_P sulle piastre di deviazione in modo che la deviazione del fascio di elettroni venga compensata rispetto allo zero.
- Annotarsi l'intensità di corrente $2 I_H$ ed eventualmente la tensione U_P .
- Azzerare la tensione U_P .
- Ripetere la misurazione per $U_A = 3,0$ e $4,0$ kV.

- Impostare la tensione anodica $U_A = 3$ kV.
- Selezionare $2 I_H = 0,2$ A e impostare la tensione delle piastre U_P in modo che la deviazione del fascio di elettroni venga compensata rispetto allo zero.
- Annotarsi l'intensità di corrente $2 I_H$ e la tensione U_P .
- Ripetere la procedura per $2 I_H = 0,4$ A, $0,6$ A e $0,8$ A.

ESEMPIO DI MISURAZIONE

Tab. 1: (necessario per la deviazione magnetica attraverso il centro della scala marginale) corrente attraverso la coppia di bobine di Helmholtz $2 I_H$ e la tensione delle piastre U_P (compensante la deviazione rispetto allo zero) a seconda della tensione anodica U_A .

U_A / kV	$2 I_H$ / A	U_P / V
2,0	0,53	240
3,0	0,62	330
4,0	0,74	470

Tab. 2: corrente delle bobine di Helmholtz $2 I_H$ e tensione delle piastre compensante U_P a tensione anodica fissa $U_A = 3,0$ kV.

N.	$2 I_H$ / A	U_P / V
1	0,2	100
2	0,4	225
3	0,6	360
4	0,8	440

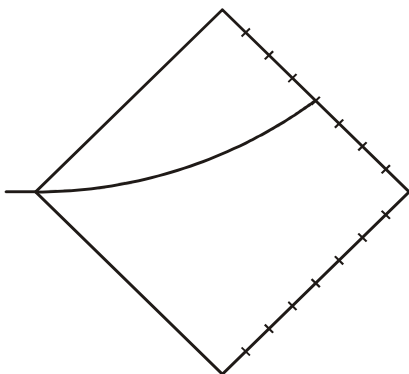


Fig. 3: deviazione del fascio di elettroni attraverso il centro della scala sul bordo dello schermo fluorescente

ANALISI

a) Il campo magnetico B in una coppia di bobine di Helmholtz ed è proporzionale alla corrente I_H attraverso una singola bobina. Il fattore di proporzionalità k può essere calcolato sulla base del raggio della bobina $R = 68 \text{ mm}$ e del numero di spire $N = 320$ per bobina:

$$B = k \cdot I_H \text{ con } k = \left(\frac{4}{5}\right)^{\frac{3}{2}} \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}} \cdot \frac{N}{R} = 4,2 \frac{\text{mT}}{\text{A}}$$

b) Il raggio di curvatura r del fascio di elettroni può essere stabilito dal punto di uscita B nella Fig. 4.

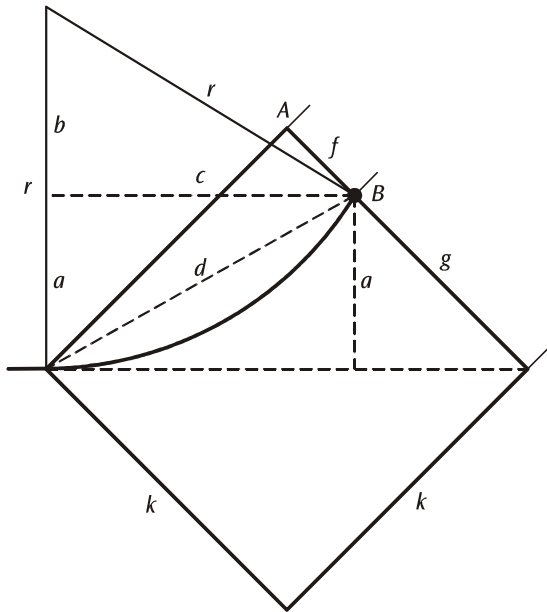


Fig. 4: rappresentazione per il calcolo del raggio di curvatura r dell'orbita degli elettroni dalla distanza f tra il punto di uscita B e il punto angolare A

Per Pitagora vale quanto segue:

$$r^2 = c^2 + b^2 = c^2 + (r - a)^2 = c^2 + r^2 - 2 \cdot r \cdot a + a^2$$

$$c^2 + a^2 = d^2 = k^2 + f^2 \text{ con } k = 80 \text{ mm}$$

$$a^2 = \frac{1}{2} \cdot g^2 = \frac{1}{2} \cdot (k - f)^2$$

$$\text{Quindi } r = \frac{c^2 + a^2}{2a} = \frac{k^2 + f^2}{\sqrt{2} \cdot (k - f)}$$

Se il punto B si trova al centro della scala, si ha $f = 40 \text{ mm}$. Per questo caso si calcola:

$$r = 141 \text{ mm e } \frac{1}{2} \cdot r^2 = 0,1 \text{ m}^2.$$

L'equazione (4) può quindi essere convertita in:

$$\frac{e}{m} = \frac{U_A}{0,1 \text{ m}^2 \cdot B^2}$$

c) Il campo elettrico nel condensatore a piastre può essere calcolato sulla base della tensione U_p e della distanza delle piastre $d = 8 \text{ mm}$:

$$E = \frac{U_p}{d}$$

d) Per la valutazione della carica specifica dell'elettrone, il campo magnetico viene calcolato sulla base dei valori indicati nella Tab. 1 per la corrente I_H e acquisisce i valori indicati nella Tab. 3.

La Fig. 5 mostra una rappresentazione grafica dell'interazione tra tensione anodica U_A e il quadrato del campo magnetico B^2 per i valori della Tab. 3.

L'incremento delle rette di origine disegnate ammonta a

$$\frac{U_A}{B^2} = 1,7 \frac{\text{kV}}{\text{mT}^2}$$

$$\text{da cui si calcola } \frac{e}{m} = \frac{U_A}{0,1 \text{ m}^2 \cdot B^2} = 1,7 \cdot 10^{11} \frac{\text{As}}{\text{kg}}$$

$$(\text{valore di letteratura: } \frac{e}{m} = 1,76 \cdot 10^{11} \frac{\text{As}}{\text{kg}})$$

Tab. 3: valori B e B^2 rilevati dai valori di misura I_H rilevati nella Tab. 1 a seconda della tensione anodica U_A .

U_A / kV	B / mT	B^2 / mT^2
2,0	1,11	1,24
3,0	1,30	1,70
4,0	1,55	2,41

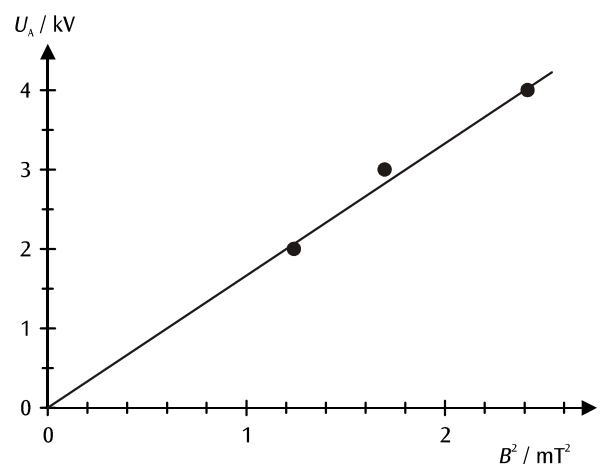


Fig. 5: rappresentazione grafica dell'interazione tra U_A e B^2 a raggio di curvatura costante $r = 141 \text{ mm}$

e) Per la conferma dell'equazione (7), dai valori di misurazione della Tab. 2 si calcola la coppia di valori B e E , in cui la deviazione del fascio di elettroni viene compensata rispetto allo zero (vedere la Tab. 4) e rappresenta il risultato in uno schema E - B (vedere la Fig. 6).

Conformemente all'equazione (7), i valori di misurazione rientrano nell'ambito della precisione di misurazione su una retta di origine. Il relativo incremento è la velocità degli elettroni.

Si ottiene: $v = 3,2 \cdot 10^7 \frac{m}{s}$ (in cui $U_A = 3,0 \text{ kV}$)

Tab. 4: campo magnetico B e campo elettrico compensante E a tensione anodica fissa $U_A = 3,0 \text{ kV}$

N.	B / mT	$E / \text{V/mm}$
1	0,42	12,5
2	0,84	28,1
3	1,26	41,3
4	1,68	55,0

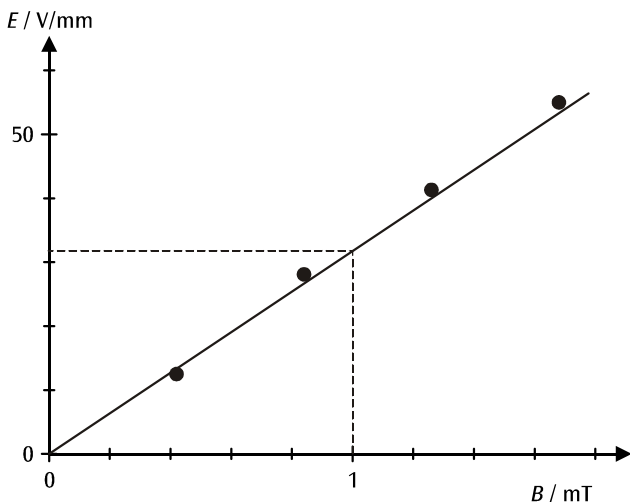


Fig. 6: rappresentazione grafica dei valori di misurazione dalla Tab. 4

f) Mediante i valori di misurazione della Tab. 1 è possibile determinare la velocità v degli elettroni per diverse tensioni anodiche U_A . Il risultato deve essere registrato nella Tab. 5.

Tab. 5: valori B e E rilevati dai valori di misurazione I_H e U_p della Tab. 1, come pure velocità v calcolata da questi e relativo quadrato a seconda della tensione anodica U_A .

U_A / kV	B / mT	$E / \text{V/mm}$	$v / \text{m/s}$	$v^2 / (\text{m/s})^2$
2,0	1,11	30,0	$2,70 \cdot 10^7$	$7,3 \cdot 10^{14}$
3,0	1,30	41,3	$3,18 \cdot 10^7$	$10,1 \cdot 10^{14}$
4,0	1,55	58,8	$3,79 \cdot 10^7$	$14,4 \cdot 10^{14}$

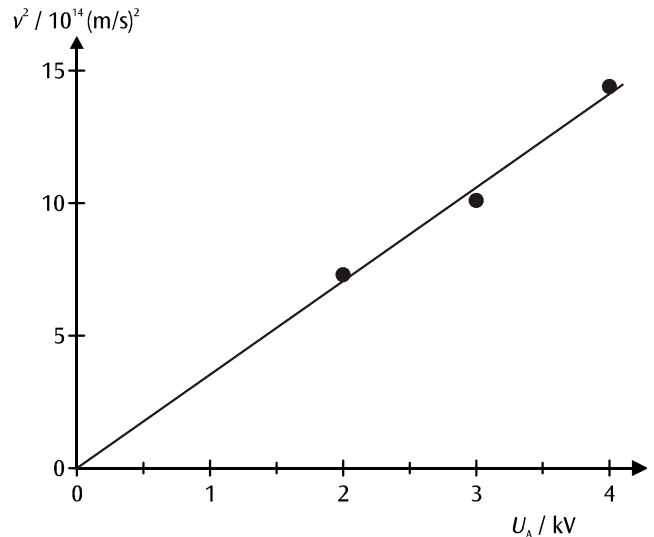


Fig. 7: rappresentazione grafica dell'interazione tra v^2 e U_A

La Fig. 7 mostra l'interazione tra il quadrato della velocità e la tensione anodica. Dall'incremento delle rette di origine disegnate, è inoltre possibile determinare la carica specifica dell'elettrone secondo l'equazione (8).

Si ottiene: $\frac{e}{m} = \frac{v^2}{2 \cdot U_A} = 1,8 \cdot 10^{11} \frac{\text{As}}{\text{kg}}$

(valore di letteratura: $\frac{e}{m} = 1,76 \cdot 10^{11} \frac{\text{As}}{\text{kg}}$)

Tubo de Thomson

ESTUDO DO DESVIO DE ELÉTRONS EM CAMPOS ELÉTRICOS E MAGNÉTICOS

- Pesquisa do desvio de um feixe de elétrons num campo magnético.
- Pesquisa do desvio de um feixe de elétrons num campo elétrico.
- Montagem de um filtro de velocidade a partir de campos elétricos e magnéticos cruzados.
- Estimação da carga específica do elétron.

UE3070500

04/24 UK/UD

FUNDAMENTOS GERAIS

No tubo de Thomson, os elétrons passam por um diafragma de fenda em direção horizontal por trás do ânodo e encontram-se numa tela posicionada obliquamente ao percurso do feixe, sobre a qual o percurso do feixe torna-se visível. Atrás do diafragma em fenda encontra-se um condensador de placa, no qual o campo elétrico vertical do mesmo os elétrons são desviados verticalmente. Adicionalmente, pode-se criar com bobinas de Helmholtz um campo magnético horizontal perpendicular à direção do feixe, no qual os elétrons são desviados também verticalmente:

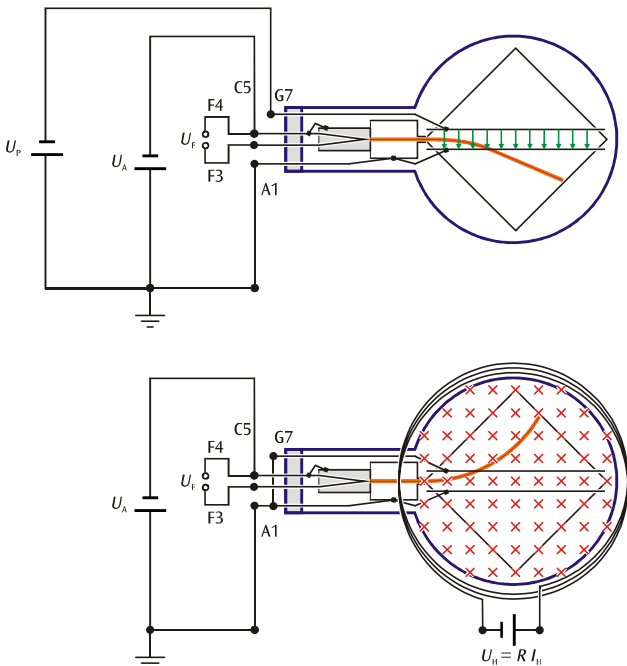


Fig. 1: Representação esquemática do tubo de Thomson. Desvio no campo elétrico (acima), abaixo, no campo magnético.

A força de Lorentz age sobre um elétron que se move com a velocidade v através de um campo magnético B

$$\mathbf{F} = -e \cdot \mathbf{v} \times \mathbf{B} \quad (1)$$

e : carga elementar

perpendicularmente à direção do movimento e do plano criado pelo campo magnético. O desvio ocorre em direção vertical quando tanto a direção do movimento como também o campo magnético se encontram no plano horizontal (veja fig. 1). Se direção do movimento é perpendicular ao campo magnético homogêneo, então os elétrons são forçados a seguir um percurso circular cuja força centrípeta é dada pela força de Lorentz.

$$m \cdot \frac{v^2}{r} = e \cdot v \cdot B \quad (2)$$

m : massa do elétron; r : raio do percurso circular.

A velocidade dos elétrons depende da tensão anódica U_A . É válido:

$$v = \sqrt{2 \cdot \frac{e}{m} \cdot U_A} \quad (3)$$

Assim pode-se determinar a carga específica do elétron a partir do rádio da órbita quando o campo magnético homogêneo B e a tensão anódica U_A são conhecidos. De (2) e (3) decorre a carga específica do elétron:

$$\frac{e}{m} = \frac{2 \cdot U_A}{(B \cdot r)^2} \quad (4)$$

O rádio de curvatura r pode ser determinado a partir do ponto de saída do elétron desviado na tela. O campo magnético B da bobina de Helmholtz resulta da corrente de bobina I_H (veja análise).

Se é produzida uma tensão U_P no condensador de placa, então os elétrons são também desviados verticalmente no seu campo elétrico vertical E com a força

$$F = -e \cdot E \quad (5)$$

e : carga elementar

(veja fig. 1 acima). O campo elétrico, portanto, pode ser escolhido para que apenas compense o desvio no campo magnético:

$$e \cdot E + e \cdot v \cdot B = 0 \quad (6)$$

Neste caso é fácil determinar a velocidade dos elétrons. É válido:

$$v = \frac{|E|}{|B|} \quad (7)$$

Uma ordenação de campos elétricos e magnéticos cruzados na qual o desvio dos elétrons é reduzido a zero por compensação é chamada de filtro de velocidade.

A dependência da velocidade v da tensão de aceleração U_A resulta da comparação entre a energia potencial e a energia cinética. É válido

$$e \cdot U_A = \frac{m}{2} v^2 \text{ ou também } v^2 = 2 \cdot \frac{e}{m} \cdot U_A \quad (8)$$

LISTA DE APARELHOS

1	Tubo de Thomson S	1000617 (U18555)
1	Suporte para tubos S	1014525 (U185002)
1	Par de bobinas de Helmholtz S	1000611 (U185051)
1	Fonte de alimentação de alta tensão 5 kV (@230 V)	1003310 (U33010-230)
ou		
1	Fonte de alimentação de alta tensão 5 kV (@115 V)	1003309 (U33010-115)
1	Fonte de alimentação DC 0 – 500 V (@230 V)	1003308 (U33000-230)
ou		
1	Fonte de alimentação DC 0 – 500 V (@115 V)	1003307 (U33000-115)
1	Multímetro digital P1035	1002781 (U11806)
1	Conjunto de 15 cabos de segurança para experiências, 75 cm	1002843 (U138021)

INDICAÇÕES DE SEGURANÇA

Tubos catódicos incandescentes são ampolas de vidro de paredes finas evacuadas. Manusear com cuidado, há perigo de implosão!

- Não submeter o tubo de Thomson a qualquer esforço mecânico.

No tubo de Thomson é produzida uma tensão que pode ser perigosa ao contato:

- Utilizar sempre cabos de segurança para experiências.
- Só efetue conexões com o aparelho de alimentação elétrica desligado.
- Só desmontar ou montar os tubos de Thomson com o aparelho de alimentação elétrica desligado.

MONTAGEM

Montagem do par de bobinas de Helmholtz e do tubo de Thomson no suporte para tubo:

- Colocar ambas bobinas de Helmholtz no meio do encaixe para bobinas com as conexões viradas para fora empurrar totalmente para fora.
- Inserir o tubo de Thomson no suporte para tubos. Ao fazê-lo, prestar atenção para que os pinos de contato estejam completamente encaixados nos orifícios de contato da tomada previstos para tal. O pino do meio deve sobressair levemente do suporte.
- Empurrar ambas bobinas de Helmholtz para dentro até a marca. A distância do meio entre ambas bobinas de Helmholtz é então de 68 mm.

Conexão da tensão de aquecimento e da tensão de aceleração:

- Deixar o aparelho de alta tensão desligado e levar o botão de ajuste da tensão até ele travar à esquerda.
- Ligar os conectores F3 e F4 do suporte para tubos com a saída de tensão de aquecimento (conector azul) do aparelho de alta tensão por meio de cabos de segurança para experiências (veja também a fig. 1).
- Ligar o conector C5 do suporte para tubos com pólo negativo (conector preto) do aparelho de alta tensão por meio de cabos de segurança para experiências (os conectores C5 e F4 estão conectados entre si por dentro do tubo).
- Ligar o conector A1 do suporte para tubos com pólo positivo (conector vermelho) do aparelho de alta tensão com o conector terra verde-amarelo.

Conexão das bobinas de Helmholtz:

- Deixar desligada a fonte de alimentação DC e virar todos os reguladores de tensão totalmente para da esquerda até o início.
- Conectar o conector A da primeira bobina com o pólo negativo, e o conector Z com o pólo positivo da saída de 12 V.
- Conectar a segunda bobina em paralelo com a primeira, para tal, conectar as tomadas que se encontram frente a frente.
- Ligar o amperímetro em fila às duas bobinas de Helmholtz.

Conexão da tensão de desvio:

- Conectar o conector Z do suporte de tubo com o pólo negativo da saída de 500 V.
- Conectar o pólo positivo do aparelho DC com o conector verde-amarelo de terra do aparelho de alta tensão.

Observação: Caso os desvios nos campos elétrico ou magnético ocorram em direções contrárias, então deve-se inverter as conexões em cada aparelho de alimentação DC.

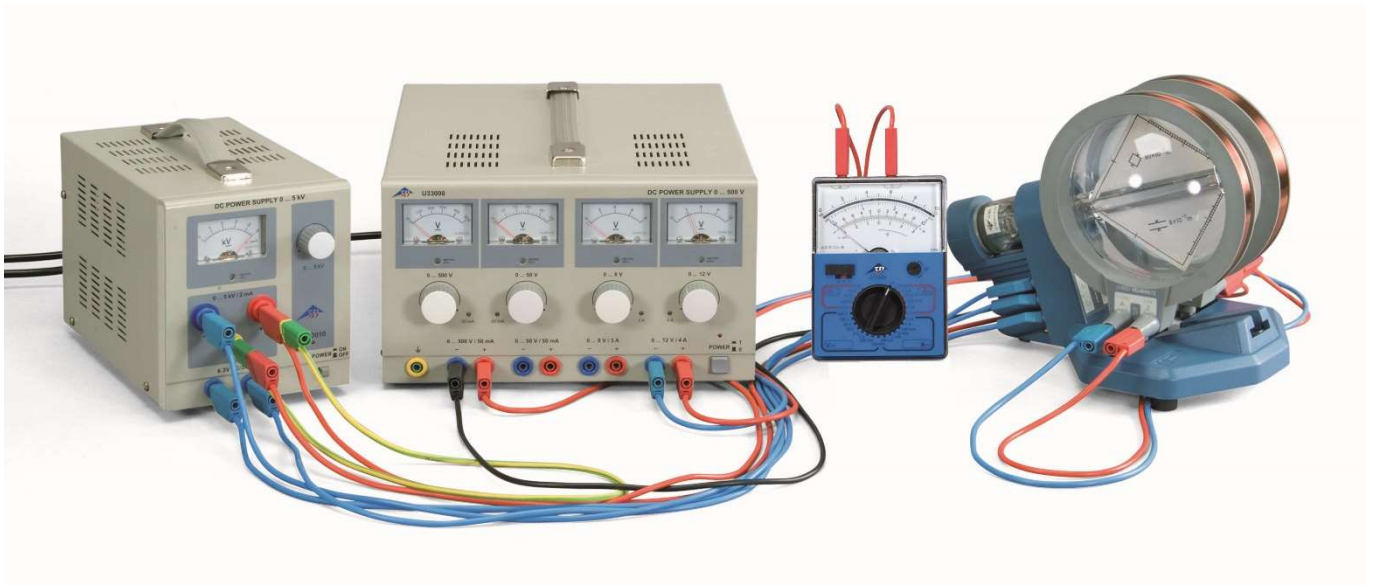


Fig. 2: Montagem experimental para a pesquisa do desvio em campos elétricos e magnéticos.

EXECUÇÃO

- Ligar o aparelho de alimentação de alta-tensão. O filamento fica imediatamente vermelho incandescente.
- Ajustar a tensão de aceleração em $U_A = 2,0$ kV e observar o percurso "horizontal" do feixe de elétrons na tela luminescente.
- Ligar o aparelho de alimentação em rede DC 0–500 V.
- Elevar lentamente a corrente que atravessa o par de bobinas de Helmholtz em $2 I_H$, até que o feixe de elétrons na beira da tela luminescente passe pelo meio da escala (veja fig. 3).
- Selecionar uma tensão U_P na placa de desvio de modo que o desvio do feixe seja compensado a zero.
- Anotar a força de corrente $2 I_H$ e caso necessário a tensão U_P .
- Baixar a tensão U_P novamente a zero U_P .
- Repetir a medição para $U_A = 3,0$ e $4,0$ kV.

- Ajustar tensão anódica $U_A = 3$ kV.
- Selecionar $2 I_H = 0,2$ e ajustar a tensão de placa U_P , de modo que o desvio do feixe de elétrons seja compensado a zero.
- Anotar a força de corrente $2 I_H$ e a tensão U_P .
- Repetir a operação para $2 I_H = 0,4$ A, $0,6$ A e $0,8$ A.

EXEMPLOS DE MEDIÇÃO

Tab. 1: (Mais necessário para o desvio magnético pelo meio da escala na aresta) corrente do par de bobinas de Helmholtz $2 I_H$ (compensar o desvio a zero) e placa de tensão U_P em função da tensão anódica U_A .

U_A / kV	$2 I_H / \text{A}$	U_P / V
2,0	0,53	240
3,0	0,62	330
4,0	0,74	470

Tab. 2: Corrente de bobina de Helmholtz $2 I_H$ e tensão de placa compensadora U_P com tensão anódica fixa $U_A = 3,0$ kV

N°	$2 I_H / \text{A}$	U_P / V
1	0,2	100
2	0,4	225
3	0,6	360
4	0,8	440

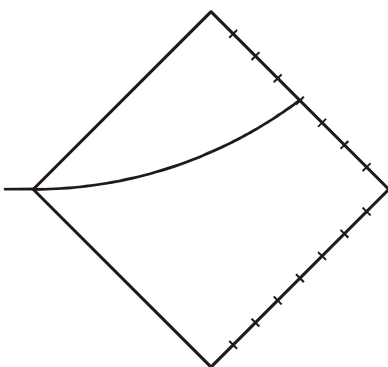


Fig. 3: Desvio do feixe de elétrons pelo meio da escala à beira da tela luminescente

ANÁLISE

a) O campo magnético B num par de bobinas de Helmholtz é proporcional à corrente I_H através de uma única bobina. O fator de proporcionalidade k pode ser calculado a partir do raio da bobina $R = 68 \text{ mm}$ e do número de espiras $N = 320$ para cada bobina:

$$B = k \cdot I_H \text{ com } k = \left(\frac{4}{5}\right)^2 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}} \cdot \frac{N}{R} = 4,2 \frac{\text{mT}}{\text{A}}$$

b) O raio de curvatura r do feixe de elétrons desviado é determinado na fig. 4 a partir do ponto de saída B.

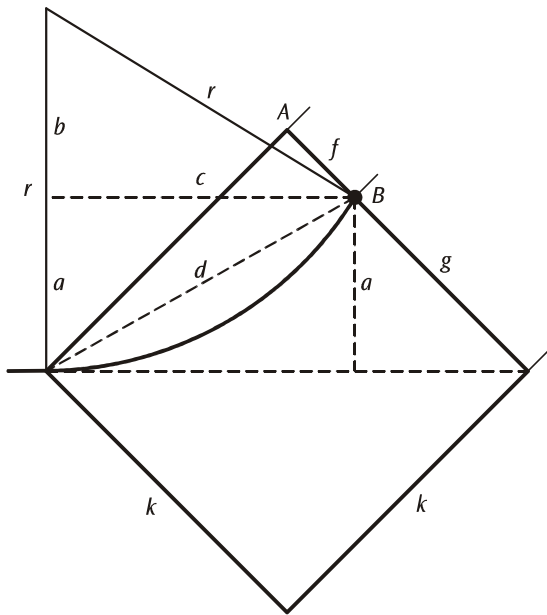


Fig. 4: Representação do cálculo do raio de curvatura r do percurso dos elétrons a partir da distância f entre o ponto de saída B e o ponto angular A

Segundo Pitágoras:

$$r^2 = c^2 + b^2 = c^2 + (r - a)^2 = c^2 + r^2 - 2 \cdot r \cdot a + a^2$$

$$c^2 + a^2 = d^2 = k^2 + f^2 \text{ com } k = 80 \text{ mm}$$

$$a^2 = \frac{1}{2} \cdot g^2 = \frac{1}{2} \cdot (k - f)^2$$

$$\text{Assim, } r = \frac{c^2 + a^2}{2a} = \frac{k^2 + f^2}{\sqrt{2} \cdot (k - f)}$$

Se o ponto B se encontra no meio da escala, então $f = 40 \text{ mm}$. Neste caso calcula-se:

$$r = 141 \text{ mm e } \frac{1}{2} \cdot r^2 = 0,1 \text{ m}^2.$$

A equação (4) pode ser assim transformada em: $\frac{e}{m} = \frac{U_A}{0,1 \text{ m}^2 \cdot B^2}$

c) O campo elétrico no condensador de placa pode ser calculado a partir da tensão U_p e da distância $d = 8 \text{ mm}$:

$$E = \frac{U_p}{d}$$

d) Para a estimativa da carga específica do elétron calcula-se o campo magnético B a partir dos valores dados na tab. 1 para a corrente I_H e recebe os valores indicados na tab. 3.

A fig. 5 mostra uma representação gráfica da relação entre a tensão anódica U_A e o quadrado do campo magnético B^2 para os valores da tab. 3.

A inclinação das retas originais desenhadas é de

$$\frac{U_A}{B^2} = 1,7 \frac{\text{kV}}{\text{mT}^2}$$

A partir disto calcula-se

$$\frac{e}{m} = \frac{U_A}{0,1 \text{ m}^2 \cdot B^2} = 1,7 \cdot 10^{11} \frac{\text{As}}{\text{kg}}$$

(Valor teórico: $\frac{e}{m} = 1,76 \cdot 10^{11} \frac{\text{As}}{\text{kg}}$)

Tab. 3: A partir dos valores de medição I_H calculados da tab.1, valores medidos B e B^2 em função da tensão anódica U_A .

U_A / kV	B / mT	B^2 / mT^2
2,0	1,11	1,24
3,0	1,30	1,70
4,0	1,55	2,41

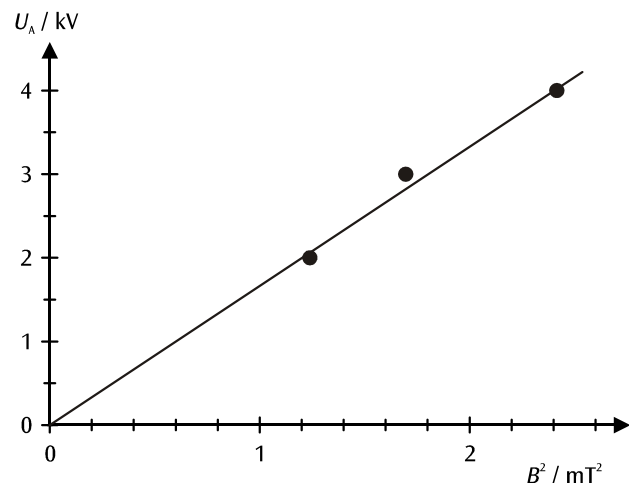


Fig. 5: Representação gráfica da relação entre U_A e B^2 com rádío de curvatura constante $r = 141 \text{ mm}$

e) Para a confirmação da equação (7) calcula-se dos valores de medição da tab. 2 os pares de valores B e E , nos quais o desvio do feixe de elétrons é compensado a zero (veja tab. 4) e representa o resultado de um diagrama E - B . (veja fig. 6).

De acordo com a equação (7) os valores de medição se encontram sobre uma das retas originais, dentro da faixa de precisão. A sua inclinação corresponde à velocidade dos elétrons.

Obtém-se: $v = 3,2 \cdot 10^7 \frac{m}{s}$ (com $U_A = 3,0 \text{ kV}$)

Tab. 4: Campo magnético B e campo elétrico compensador E com a tensão anódica $U_A = 3,0 \text{ kV}$

N°	B / mT	$E / \text{V/mm}$
1	0,42	12,5
2	0,84	28,1
3	1,26	41,3
4	1,68	55,0

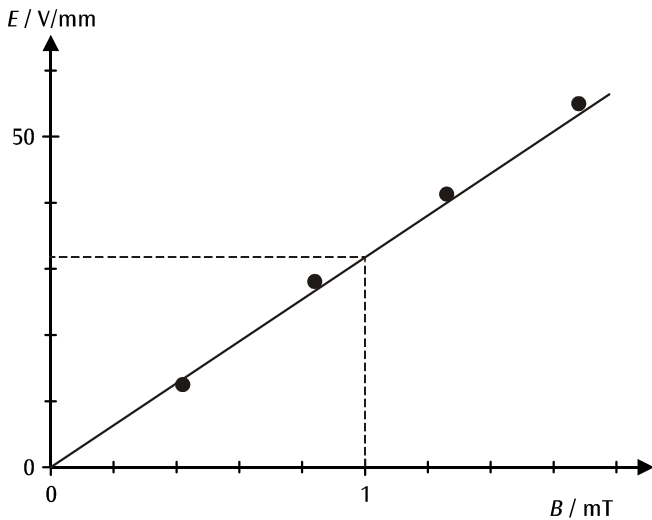


Fig. 6: Representação gráfica dos valores de medição da tab. 4

f) Com a ajuda dos valores de medição da tab. 1 pode ser determinada a velocidade v dos elétrons para diferentes tensões anódicas U_A . Inserir o resultado na tab. 5.

Tab. 5: A partir dos valores de medição I_H e U_p da tab.1 os valores calculados B e E , assim como a velocidade v daí calculada e o seu quadrado em função da tensão anódica U_A .

U_A / kV	B / mT	$E / \text{V/mm}$	$v / \text{m/s}$	$v^2 / (\text{m/s})^2$
2,0	1,11	30,0	$2,70 \cdot 10^7$	$7,3 \cdot 10^{14}$
3,0	1,30	41,3	$3,18 \cdot 10^7$	$10,1 \cdot 10^{14}$
4,0	1,55	58,8	$3,79 \cdot 10^7$	$14,4 \cdot 10^{14}$

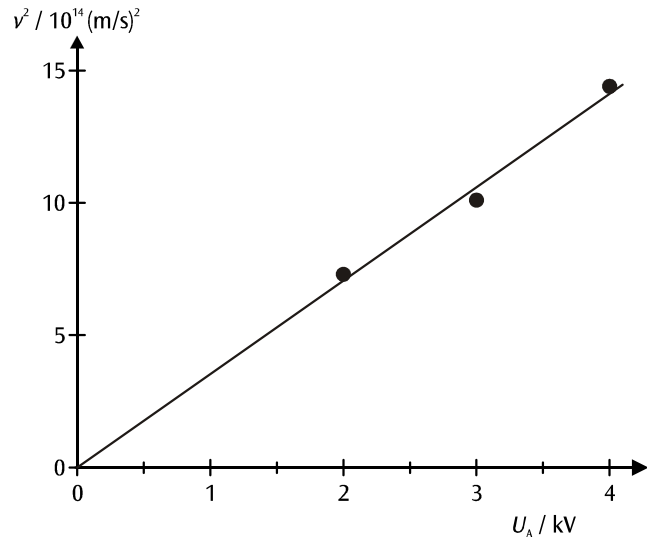


Fig. 7: Representação gráfica da relação entre v^2 e U_A

A fig. 7 mostra a relação entre o quadrado da velocidade e a tensão anódica. A partir da inclinação das retas originais inscritas pode-se, conforme a equação (8), calcular também a carga específica do elétron.

Obtém-se: $\frac{e}{m} = \frac{v^2}{2 \cdot U_A} = 1,8 \cdot 10^{11} \frac{\text{As}}{\text{kg}}$

(Valor teórico: $\frac{e}{m} = 1,76 \cdot 10^{11} \frac{\text{As}}{\text{kg}}$)



