

Fig. 1

Die Elektronenbeugungsröhre ermöglicht es, Interferenzen von Elektronenstrahlen, die an polykristallinem Graphit gebeugt werden, sichtbar zu machen und so die Wellen-Natur von Elektronen zu demonstrieren.

Versuchsbeispiele:

- Beugung an einem polykristallinen Gitter (Debye-Scherrer-Beugung) *)
- Wellenlängenbestimmung
- Bestätigung der de Broglie-Gleichung $\lambda = \frac{h}{m \cdot v}$
- Strukturuntersuchung (Netzebenenabstände von Graphit)

1 Sicherheitshinweise

- Hochvakuumröhre vor Fall, Stoß u. ä. schützen! Implosionsgefahr!
- Emissionsstrom I_{EM} und Graphitfolie während des Versuchs kontrollieren; bei $I_{EM} > 200 \mu A$ oder aufglühender Folie sofort Verbindung zur Anodenspannung unterbrechen (s. Abschnitt 3).
- Steckerstift ④ durch Kupplung (aus 501 641 ff) berührungssicher abdecken.

2 Beschreibung, Lieferumfang, technische Daten

- (1) Elektrodensystem mit indirekt geheizter Katode
- (2) Trägernetz, mit Graphitpulver belegt (polykristallines Beugungsgitter)
- (3) Fluoreszenzschirm
- (4) 4-mm-Steckerstift, mit der Anode verbunden
- (5) 4-mm-Buchsenpaar, mit Heizwendel verbunden
- (6) 2-mm-Buchse, über internen Widerstand mit der Katode verbunden
- (7) Adapter 2-mm-Stecker/4-mm-Buchse für Buchse ⑥

Ohne Abbildung:

Magnet zur Richtungskorrektur des Elektronenstrahls, falls dieser auf eine fertigungstechnisch bedingte oder durch Verglühen entstandene Fehlstelle in der Graphitbelegung von ② fallen sollte.

*) Empfehlenswert zur Veranschaulichung der Debye-Scherrer-Beugung mit sichtbarem Licht: Optisches Analogon zur Debye-Scherrer-Interferenz (555 19).

Elektronenbeugungsröhre

Electron Beam Diffraction Tube

The electron beam diffraction tube is used to make visible the interferences of electron beams on polycrystalline graphite and thus to demonstrate the wave properties of electrons.

Examples of Experiments:

- Diffraction at a polycrystalline lattice (Debye-Scherrer diffraction) *)
- Determination of wavelength
- Verification of de Broglie's equation $\lambda = \frac{h}{m \cdot v}$
- Structure investigations (interplanar spacings of graphite)

1 Safety Notes

- Protect the high-vacuum tube against fall, shock and similar. Risk of implosion!
- Check emission current I_{EM} and graphite foil during the experiment. If I_{EM} is higher than $200 \mu A$ or the foil glows up, immediately interrupt the connection to the anode voltage source (see Section 3).
- Cover plug pin ④ by safe-to-touch plug adapter (from 501 641 and following numbers).

2 Description, Standard Equipment, Technical Data

- ① Electrode system with indirectly heated cathode
- ② Carrier net, covered with graphite powder (polycrystalline diffraction grating)
- ③ Fluorescent screen
- ④ 4-mm plug pin, connected with the anode
- ⑤ Pair of 4-mm sockets, connected with heater filament
- ⑥ 2-mm socket connected with the cathode via internal resistor
- ⑦ Adapter 2-mm plug/4-mm socket for socket ⑥

Not shown:

Magnet for readjusting the direction of the electron beam should it fall on a spot on the carrier net ② not fully covered with graphite due to the manufacturing process or burn out.

*) Recommended for demonstrating Debye-Scherrer diffraction using visible light: Optical analogue to Debye-Scherrer interference (555 19).

Technische Daten:

Heizspannung U_F : max. 6 V~
 Heizstrom I_F : max. 0,3 A
 Anodenspannung U_A : max. 5 kV~
 Emissionsstrom I_{EM} : max. 200 μ A

Netzebenenabstände von Graphit

$$d_1 = 2,13 \cdot 10^{-10} \text{ m}$$

$$d_2 = 1,23 \cdot 10^{-10} \text{ m}$$

Abstand Graphitgitter – Fluoreszenzschirm: ca. 13,5 cm
 Glaskolbendurchmesser: ca. 13 cm

3 Versuchsbeschreibung

Debye-Scherrer-Beugung von Elektronenstrahlen (Wellenlängenbestimmung; Überprüfung von λ_{ex} mit der de Broglie-Gleichung; h-Bestimmung; Strukturuntersuchung)

Aus den von einer Glühkatode ausgesandten Elektronen wird durch eine Lochblende ein schmales Bündel ausgeblendet. Dieses fällt nach Durchgang durch ein fokussierendes elektronenoptisches System als scharf begrenztes, monochromatisches Strahlenbündel auf eine polykristalline Graphitfolie, deren raumgitterartig angeordneten Atome als Beugungsgitter wirken. Als Beugungsbild sieht man auf einem fluoreszierenden Schirm um den ungebeugten Elektronenstrahl als Zentrum zwei konzentrische Ringe, deren Durchmesser sich mit der Wellenlänge, die durch die Beschleunigungsspannung bestimmt ist, ändert; dabei entspricht jeder der beiden Ringe einer Braggschen Reflexion an den Atomen einer Netzebene des Graphits.

Für Interferenzreflexion von Elektronenstrahlen an Gitteratomen gilt in gleicher Weise wie für andere Wellenstrahlung (z. B. Röntgenstrahlen) die Braggsche Bedingung

$$2 d \sin \vartheta = n \lambda \quad (1)$$

(d = Netzebenenabstand des Raumgitters,
 ϑ = Reflexionswinkel,
 λ = Wellenlänge der Elektronenstrahlen).

Interferenzreflexion findet also dann statt, wenn der Gangunterschied $2 d \sin \vartheta$ gleich einem ganzzahligen Vielfachen der Wellenlänge ist.

Fallen nun Elektronenstrahlen auf die Graphitfolie, so werden infolge der willkürlichen Anordnung der Mikrokristalle stets solche zu finden sein, die mit der einfallenden Strahlung Winkel bilden, die der Braggschen Bedingung (1) genügen.

Alle von solchen Kristalliten ausgehenden Reflexe liegen auf Kegelmänteln mit gemeinsamer Achse. Einen Schnitt durch diese Kegel stellt der Leuchtschirm der Röhre dar, so daß die abgebeugten Elektronenstrahlen als konzentrische Kreise um den ungebeugten Elektronenstrahl erscheinen.

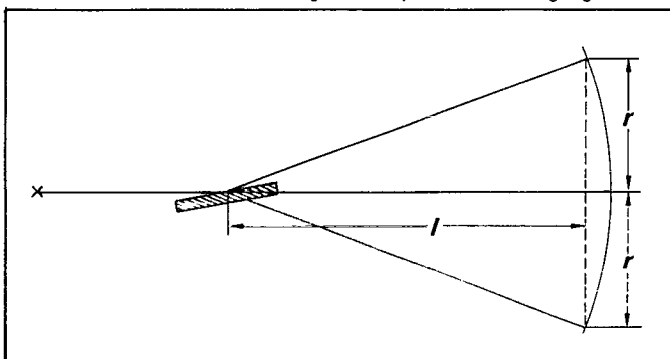
Aus der schematischen Darstellung eines reflektierten Strahls (Abb. 2) ergibt sich

$$\tan 2 \vartheta = r/l$$

Daraus folgt für kleine Winkel

$$2 \sin \vartheta = r/l \quad (2)$$

Fig. 2 Schematic representation of Debye-Scherrer diffraction
 Abb. 2 Schematische Darstellung der Debye-Scherrer-Beugung



Technical Data:

Filament voltage U_F : max. 6 V a. c.
 Filament current I_F : max. 0.3 A
 Anode voltage U_A : max. 5 kV d. c.
 Emission current I_{EM} : max. 200 μ A

Interplanar spacings of graphite:

$$d_1 = 2.13 \cdot 10^{-10} \text{ m}$$

$$d_2 = 1.23 \cdot 10^{-10} \text{ m}$$

Distance between graphite grating and fluorescent screen: approx. 13.5 cm

Diameter of glass bulb: approx. 13 cm

3 Experiment Description

Debye-Scherrer diffraction of electron beams (determination of wavelength; verification of λ_{ex} by means of de Broglie's equation; determination of h; investigation of structure)

From the electrons emitted by a hot cathode a small beam is singled out through a pin diaphragm. After passing through a focusing electron-optical system, it is incident as sharply limited monochromatic beam on a polycrystalline graphite foil the atoms of which are arranged similar to a space lattice and act as a diffraction grating. The diffraction pattern as it appears on a fluorescent screen shows two concentric rings centered around the undiffracted electron beam. The diameter of the concentric rings changes with the wavelength, determined by the acceleration voltage, whereby each of the two rings corresponds to a Bragg reflection at the atoms forming a plane of the graphite.

For interference reflection of electron beams at lattice atoms, Bragg's equation

$$2 d \sin \vartheta = n \lambda \quad (1)$$

applies as for other waves too (e. g. X-rays).

(d = interplanar spacing of space lattice
 ϑ = reflection angle
 λ = wavelength of electron beams)

Hence, interference reflection occurs when the path difference $2 d \sin \vartheta$ equals an integral multiple of the wavelength.

If now electron beams strike the graphite foil, there will always be some angles with the incident radiation that fit Bragg's equation (1) due to the arbitrary arrangement of the microcrystals.

All reflections from such crystallites lie on cone-shaped shells with a common axis. The fluorescent screen of the tube represents a section through these cones so that the diffracted electron beams appear as concentric circles round the non-diffracted electron beam.

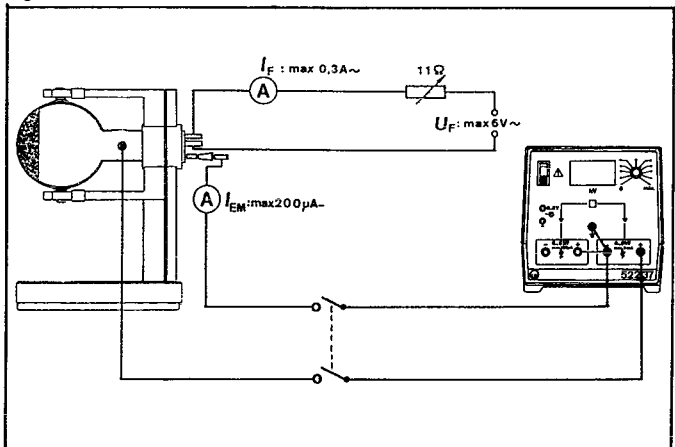
From the schematic representation of a reflected beam (Fig. 2) it follows that

$$\tan 2 \vartheta = r/l$$

From this it follows for small angles

$$2 \sin \vartheta = r/l \quad (2)$$

Fig. 3



Durch Einsetzen von (2) in (1) ergibt sich für die Wellenlänge λ (mit $n = 1$)

$$\lambda = \frac{r \cdot d}{l} \quad (3)$$

Setzt man die Wellenlänge λ , die man aus der Beschleunigungsspannung ermitteln kann (s. Teil 3 der Auswertung), als bekannt voraus, so lassen sich aus den Radien der beiden Beugungsringe die Netzebenenabstände von Graphit ermitteln:

$$d = \frac{\lambda \cdot l}{r} \quad (4)$$

Geräte:	Kat.-Nr.
1 Elektronenbeugungsröhre	555 17
1 Experimentierständer	555 05
1 Hochspannungsnetzgerät, 10 kV	522 37
1 Heizspannungsquelle, 6 V~, mit Strombegrenzung auf 0,3 A, z. B. Transformator 6 V/12 V, 30 W	562 73
Schiebewiderstand 11 Ω	537 29
Meßinstrumente für 300 μ A—, 0,3 A, z. B. Drehspul-Meßinstrument D	531 781
Demo-Multimeter	531 91
Zweipoliger Ausschalter	504 05
Kupplung	aus 501 641
Experimentierkabel	aus 501 20 ff

Aufbau (s. Abb. 3):

Stromversorgungsgeräte so anordnen, daß deren Transformatoren die Elektronenstrahlen nicht magnetisch beeinflussen können; Abstand halten;

Versuch zweckmäßigerweise im abgedunkelten Raum durchführen.

Durchführung:

Heizspannung einschalten und Heizstrom I_F auf 0,3 A begrenzen,
Anodenspannung kontinuierlich von 0 auf max. 5 kV erhöhen.

Wichtig: Emissionsstrom I_{EM} (max. 200 μ A) und Graphitfolie *ständig* kontrollieren.

Bei $I_{EM} > 200 \mu$ A oder bei aufglühender Verbindung zur Anodenspannungsquelle am zweipoligen Ausschalter *sofort* unterbrechen, U_A auf 0 V zurückstellen und Netzgerät durch Kurzschließen entladen. Justiermagneten so am Röhrenhals positionieren (z. B. mit Klebeband fixieren), daß die Elektronenstrahlen nach erneutem Anlegen der Anodenspannung (kontinuierlich erhöhen) auf eine andere Stelle der Folie treffen.

Bei unbefriedigenden Beugungsringen Richtung der Elektronenstrahlen mit dem Justiermagneten so ändern, daß sie auf einen von Fehlstellen freien Teil des Graphit-Gitters treffen und 2 Ringe (Beugung 1. Ordnung an Netzebenen mit $d_1 = 2,13 \cdot 10^{-10}$ m und $d_2 = 1,23 \cdot 10^{-10}$ m) deutlich erkennbar sind.

Bei $U_A = 5$ kV Durchmesser $2r_1$ und $2r_2$ der Beugungsringe bestimmen (Schieblehre),

Abstand l (s. Abb. 2) aus dem Glaskolbendurchmesser von 13 cm durch Schätzung ermitteln.

Meßbeispiel:

$$\begin{aligned} U_A &= 5 \text{ kV} \\ 2r_1 &= 2,15 \cdot 10^{-2} \text{ m} \\ 2r_2 &= 3,74 \cdot 10^{-2} \text{ m} \\ l &= 13 \cdot 10^{-2} \text{ m} \end{aligned}$$

When substituting (2) into (1) it follows for the wavelength λ (with $n = 1$)

$$\lambda = \frac{r \cdot d}{l} \quad (3)$$

Supposing the wavelength λ , which can be determined from the acceleration voltage (see part 3 of the evaluation), is known, it is then possible to determine the interplanar spacings of graphite from the radii of the two diffraction rings:

$$d = \frac{\lambda \cdot l}{r} \quad (4)$$

Apparatus:	Cat. No.
1 Electron beam diffraction tube	555 17
1 Stand for electron tubes	555 05
1 High-voltage power supply unit, 10 kV	522 37
1 Filament voltage source, 6 V a.c., with current limiting to 0.3 A, e. g. Transformer 6 V/12 V, 30 W	562 73
Rheostat, 11 Ω	537 29
Measuring instruments for 300 μ A d.c., 0.3 A, e. g. Moving-coil instrument D	531 781
Demonstration multimeter	531 91
Double-pole cut-out switch	504 50
Plug adapter	from 501 641
Connecting leads	from 501 20 and following numbers

Experimental set-up (see Fig. 3):

Arrange the power supply units so that their transformers do not exert any magnetic influence on the electron beams; keep them at a distance.

It is advisable to carry out the experiment in a darkened room.

Carrying out the experiment:

Switch on filament voltage and limit the heater current I_F to 0.3 A.

Gradually increase the anode voltage from 0 to 5 kV max.

Important: Check emission current I_{EM} (max. 200 μ A) and graphite foil *continuously*.

If I_{EM} is higher than 200 μ A or the foil glows up, *immediately* interrupt the connection to the voltage source via the double-pole cut-out switch, reset U_A to 0 V and discharge power supply unit by shorting. Position the adjusting magnet on the tube neck (e. g. fix it with adhesive tape) so that when applying the anode voltage again (increase gradually) the electron beams fall onto another spot on the foil.

If the diffraction rings are not satisfactory, change the direction of the electron beams by means of the adjusting magnet so that they are incident on a spot of the graphite grating which is free of defects and two rings (1st order diffraction on grate planes with $d_1 = 2.13 \cdot 10^{-10}$ m and $d_2 = 1.23 \cdot 10^{-10}$ m) are clearly visible.

Determine diameters $2r_1$ and $2r_2$ of the diffraction rings at $U_A = 5$ kV (sliding caliper).

Determine by estimation the distance l (see Fig. 2) from the glass-bulb diameter of 13 cm.

Measurement example:

$$\begin{aligned} U_A &= 5 \text{ kV} \\ 2r_1 &= 2,15 \cdot 10^{-2} \text{ m} \\ 2r_2 &= 3,74 \cdot 10^{-2} \text{ m} \\ l &= 13 \cdot 10^{-2} \text{ m} \end{aligned}$$

Auswertung:

1. Wellenlängenbestimmung

Aus den Meßwerten für r_1, r_2 sowie l und den Netzebenenabständen von Graphit

$$d_1 = 2,13 \cdot 10^{-10} \text{ m}$$
$$d_2 = 1,23 \cdot 10^{-10} \text{ m}$$

ergeben sich bei einer Beschleunigungsspannung $U_A = 5 \text{ kV}$ die Wellenlängen aus (3) zu

$$\lambda_1 = 0,176 \cdot 10^{-10} \text{ m und } \lambda_2 = 0,177 \cdot 10^{-10} \text{ m}$$

2. Vergleich von λ_{ex} mit dem theoretischen Wert, der sich aus der de-Broglie-Gleichung ergibt.

Zur Überprüfung des experimentell gewonnenen λ -Wertes zieht man die de-Broglie-Gleichung heran:

$$\lambda = \frac{h}{m \cdot v}$$

Setzt man die Elektronengeschwindigkeit v ein, die sich aus der Energiegleichung

$$\frac{1}{2} m v^2 = e \cdot U$$

für durch eine Spannung U beschleunigte Elektronen ergibt, so folgt

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2 e m U}} \quad (5)$$

$$= \frac{6,6256 \cdot 10^{-34} \text{ Js}}{\sqrt{2 \cdot 1,6021 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot 9,1091 \cdot 10^{-31} \text{ kg} \cdot 5 \cdot 10^3 \text{ V}}}$$

$$= 0,173 \cdot 10^{-10} \text{ m}$$

Die aus der Beugungsfigur experimentell gefundenen Werte von $0,176 \cdot 10^{-10}$ und $0,177 \cdot 10^{-10} \text{ m}$ stimmen hinreichend mit dem theoretischen Wert überein.

3. Berechnung von h aus der de-Broglie-Gleichung

Aus (5) ergibt sich

$$h = \lambda_{\text{ex}} \sqrt{2 e m U} \text{ mit } \lambda_{\text{ex}} = 0,1765 \cdot 10^{-10} \text{ m}$$

$$= 0,1765 \cdot 10^{-10} \text{ m} \cdot \sqrt{2 \cdot 1,6021 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot 5 \cdot 10^3 \text{ V} \cdot 9,1091 \cdot 10^{-31} \text{ kg}} = 6,743 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$$

(The comma has to be read as decimal point)

4. Bestimmung der Netzebenenabstände von Graphit

Aus den Meßwerten für r_1, r_2 sowie l und aus der Wellenlänge λ , die nach (4) aus der Beschleunigungsspannung U_A berechnet wird,

$$\lambda = \frac{h}{2 e m U_A} \quad \text{mit } h = 6,6256 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$$
$$e = 1,6021 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$
$$m = 9,1091 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$$

$$= 0,173 \cdot 10^{-10} \text{ m,}$$

ergeben sich die Netzebenenabstände

$$d_1 = \frac{0,173 \cdot 10^{-10} \cdot 13 \cdot 10^{-2} \text{ m}}{1,075} = 2,09 \cdot 10^{-10} \text{ m}$$

und

$$d_2 = \frac{0,173 \cdot 10^{-10} \cdot 13 \cdot 10^{-2}}{1,87 \cdot 10^{-2}} \text{ m} = 1,203 \cdot 10^{-10} \text{ m}$$

Evaluation:

1. Determination of wavelength

From the measured values for r_1, r_2 and l and the interplanar spacings of graphite

$$d_1 = 2,13 \cdot 10^{-10} \text{ m}$$
$$d_2 = 1,23 \cdot 10^{-10} \text{ m}$$

the resulting wavelength for an acceleration voltage $U_A = 5 \text{ kV}$ is

$$\lambda_1 = 0,176 \cdot 10^{-10} \text{ m and } \lambda_2 = 0,177 \cdot 10^{-10} \text{ m}$$

2. Comparison of λ_{ex} with the theoretical value resulting from the Broglie's equation

To verify the empirical value of λ , de Broglie's equation is applied:

$$\lambda = \frac{h}{m \cdot v}$$

When substituting the velocity of electrons v resulting from the equation of energy

$$\frac{1}{2} m v^2 = e \cdot U$$

for the electrons accelerated by a voltage U , then it follows:

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2 e m U}} \quad (5)$$

$$= \frac{6,6256 \cdot 10^{-34} \text{ Js}}{\sqrt{2 \cdot 1,6021 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot 9,1091 \cdot 10^{-31} \text{ kg} \cdot 5 \cdot 10^3 \text{ V}}}$$
$$= 0,173 \cdot 10^{-10} \text{ m}$$

The values of $0,176 \cdot 10^{-10}$ and $0,177 \cdot 10^{-10}$ as determined from the diffraction pattern agree quite well with the theoretical values.

3. Determination of h from the de Broglie equation

From (5) it follows that

$$h = \lambda_{\text{ex}} \sqrt{2 e m U} \text{ with } \lambda_{\text{ex}} = 0,1765 \cdot 10^{-10} \text{ m}$$

$$= 0,1765 \cdot 10^{-10} \text{ m} \cdot \sqrt{2 \cdot 1,6021 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot 5 \cdot 10^3 \text{ V} \cdot 9,1091 \cdot 10^{-31} \text{ kg}} = 6,743 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$$

(The comma has to be read as decimal point)

4. Determination of the interplanar spacings of graphite

From the measured values for r_1, r_2 and l as well as the wavelength λ which is calculated after eq. (4) from the acceleration voltage U_A

$$\lambda = \frac{h}{2 e m U_A} \quad \text{with } h = 6,6256 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$$
$$e = 1,6021 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$
$$m = 9,1091 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$$
$$= 0,173 \cdot 10^{-10} \text{ m}$$

interplanar spacings are:

$$d_1 = \frac{0,173 \cdot 10^{-10} \cdot 13 \cdot 10^{-2}}{1,075} \text{ m} = 2,09 \cdot 10^{-10} \text{ m}$$

and

$$d_2 = \frac{0,173 \cdot 10^{-10} \cdot 13 \cdot 10^{-2}}{1,87 \cdot 10^{-2}} \text{ m} = 1,203 \cdot 10^{-10} \text{ m}$$

7/1987 -SF-

Mode d'emploi

555 17

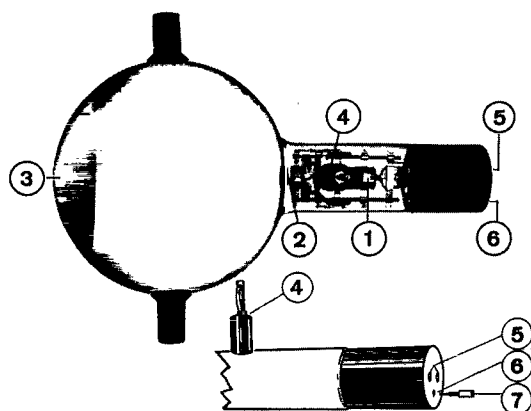


Fig. 1

Les tubes de diffraction électronique permettent de mettre en évidence les interférences de rayons électroniques diffractés sur un graphite polycristallin et de démontrer ainsi la nature ondulatoire des électrons.

Exemples d'expériences:

- Diffraction sur un réseau polycristallin (diffraction de Debye-Scherrer) *)
- Détermination de la longueur d'onde
- Vérification de l'équation de de Broglie

$$\lambda = \frac{h}{m \cdot v}$$

- Etude des structures (écartement des plans de réseaux du graphite)

1 Remarques de sécurité

- Protéger le tube à vide poussé contre les chutes, coups, etc....!
- Contrôler le courant d'émission I_{EM} et la feuille de graphite pendant l'expérience; quand $I_{EM} > 200 \mu A$ ou quand la feuille est incandescente, interrompre immédiatement la connexion avec la tension d'anode (cf. section 3).
- Protéger la fiche (4) avec une douille de raccordement (de 501 641 et suivants).

Tube de diffraction électronique

2 Description, équipement standard, caractéristiques techniques

- (1) Système d'électrodes à cathodes chauffées indirectement
- (2) Réseau-support couvert de poudre de graphite (réseau de diffraction polycristallin)
- (3) Ecran fluorescent
- (4) Fiche 4 mm reliée à l'anode
- (5) Paire de prises 4 mm reliée au filament chauffant
- (6) Prise 2 mm reliée à la cathode par une résistance interne
- (7) Adaptateur fiche 2 mm/prise 4 mm pour la prise (6)

Sans figure:

Elément pour corriger l'orientation du rayon électronique quand celui-ci tombe sur un point déficient de la feuille (2). Ce défaut peut être dû à une faute de fabrication ou à une brûlure de la feuille.

Caractéristiques techniques:

Tension de chauffage U_F : max. 6 V[~]

Courant de chauffage I_F : max. 0,3 A

Tension d'anode U_A : max. 5 kV-

Courant d'émission I_{EM} : max. 200 μA

Ecartement des plans du réseau de graphite

$$d_1 = 2,13 \cdot 10^{-10} \text{ m}$$

$$d_2 = 1,23 \cdot 10^{-10} \text{ m}$$

Distance réseau de graphite - écran fluorescent: env. 13,5 cm

Diamètre de l'ampoule: env. 13 cm

*) Recommandée pour la démonstration de la diffraction de Debye-Scherrer à la lumière visible: Analogie optique pour l'interférence de Debye-Scherrer (555 19).

3 Description de l'expérience

Diffraction Debye-Scherrer de rayons électroniques
(détermination de la longueur d'onde; vérification de λ_{ex} avec l'équation de de Broglie; détermination de h; étude structurelle)

Un étroit faisceau est diaphragmé avec un diaphragme à trou avec les électrons émis par une cathode chaude. Il est focalisé en passant par un système électronique/optique. Ce faisceau monochromatique nettement délimité est appliqué sur une feuille de graphite polycristalline dont les atomes disposés en réseau spatial font effet de réseau de diffraction. L'image de diffraction est constituée par deux cercles concentriques sur un écran fluorescent dont le centre est marqué par le rayon électronique non diffracté. Le diamètre de ces cercles varie avec la longueur d'onde déterminée par la tension d'accélération; chaque cercle correspond à une réflexion de Bragg sur les atomes d'un plan du réseau de graphite.

La condition de Bragg

$$2 d \sin \nu = n \lambda \quad (1)$$

(d = Ecartement des blancs du réseau spatial,
 ν = Angle de réflexion,
 λ = Longueur d'onde du rayonnement électronique),

est valable aussi bien pour la réflexion interférentielle de rayons électroniques sur des atomes en réseaux que pour d'autres rayonnements ondulatoires (rayons X).

Il y a donc réflexion interférentielle quand la différence de phase $2 d \sin \nu$ est égale à un multiple entier de la longueur d'onde.

Ainsi quand un rayon électronique tombe sur la feuille de graphite, la disposition arbitraire des microcristaux lui permettra toujours de trouver des cristaux dont l'orientation remplira les conditions de réflexion de Bragg (1).

Toutes les réflexions émises par de tels cristaux sont disposées sous forme d'aires latérales de cône d'axes communs. L'écran lumineux du tube représente une coupe à travers ces cônes si bien que les rayons électroniques diffractés apparaissent comme des cercles concentriques autour du rayon électronique non diffracté.

A partir de la représentation schématique d'un rayon réfléchi (2), on obtient

$$\tan 2 \nu = r/l$$

On obtient pour les petits angles

$$2 \sin \nu = r/l \quad (2)$$

En introduisant (2) dans (1), on obtient pour la longueur d'onde λ (avec $n = 1$)

$$\lambda = \frac{r \cdot d}{l} \quad (3)$$

Si l'on suppose la longueur d'onde λ connue, que l'on peut déterminer à partir de la tension d'accélération (cf. Partie 3 du calcul), on peut calculer les écartements des plans du réseau de graphite à partir des rayons:

$$d = \frac{\lambda \cdot l}{r} \quad (4)$$

Appareils:

No de cat.

1 tube de diffraction électronique	555 17
1 support universel	555 05
1 boîte d'alimentation HT, 10 kV	522 37

1 alimentation tension de chauffage, 6 V c.a., avec limitation de courant à 0,3 A, par ex.	
transformateur 6 V/12 V, 30 W	562 73
rhéostat à curseur 11 Ω	537 29

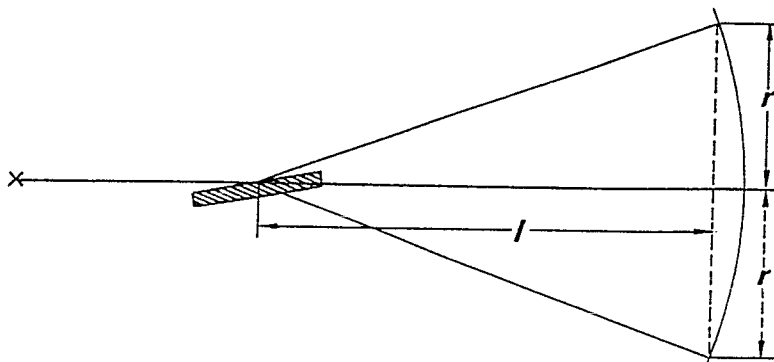
Instruments de mesure pour 300 μ A c.c., 0,3 A, par ex.

appareil de mesure à cadre mobile D	531 781
multimètre de démonstration	531 91

interrupteur à double pôle	504 50
douille de raccordement	de 501 641
câble de sécurité	de 501 20

et suivants

Fig. 2 Représentation schématique de la diffraction de Debye-Scherrer



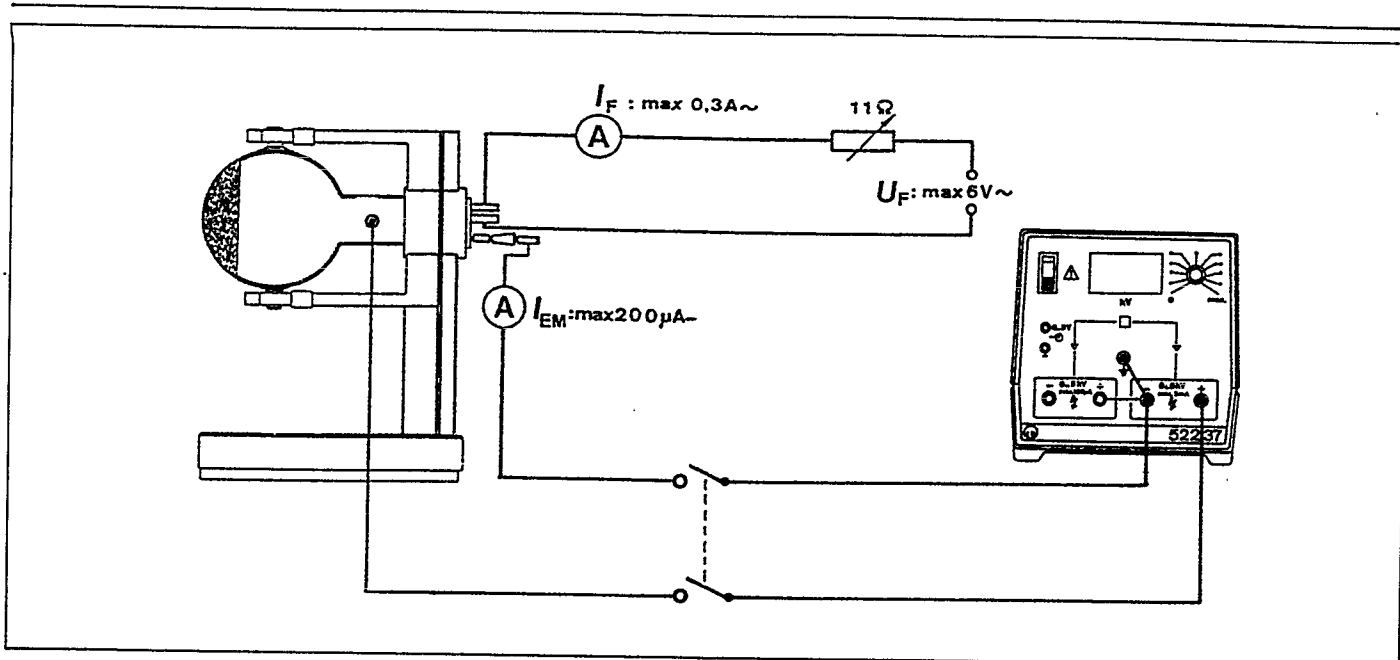


Fig. 3

Montage (cf. Fig. 3):

Disposer les alimentations en courant de telle sorte que leurs transformateurs n'influencent pas magnétiquement les rayons électroniques; maintenir à distance;

pratiquer l'expérience dans une pièce obscurcie.

Réalisation:

Brancher la tension de chauffage et limiter le courant de chauffage I_F à 0,3 A,

augmenter continuellement la tension d'anode de 0 à 5 kV max.

Important: Contrôler en permanence le courant d'émission I_{EM} 200 μ A) et la feuille de graphite.

Si $I_{EM} > 200 \mu A$ ou quand la feuille est incandescente, il faut interrompre immédiatement l'alimentation avec l'interrupteur à double pôle, remettre U_A à 0 V et décharger la boîte d'alimentation en la court-circuitant. Positionner les aimants d'orientation sur le col du tube (fixer par ex. avec une bande adhésive) de telle sorte que le

rayon électronique tombe sur un autre endroit de la feuille lorsque la tension d'anode est appliquée à nouveau (augmenter progressivement).

Si les anneaux de diffraction ne sont pas satisfaisants, modifier la direction des rayons électroniques, avec les aimants d'orientation, de manière à ce qu'ils atteignent un endroit sans défaut sur le réseau de graphite et que deux anneaux (diffraction de premier ordre sur des plans de réseau avec $d_1 = 2,13 \cdot 10^{-10}$ m et $d_2 = 1,23 \cdot 10^{-10}$ m) soient nettement visibles.

Déterminer les diamètres $2r_1$ et $2r_2$ des anneaux de diffraction pour $U_A = 5$ kV (pied à coulisse), estimer la distance l^A (cf. Fig. 2) à partir du diamètre de l'ampoule de verre de 13 cm.

Exemple de mesure:

$$U_A = 5 \text{ kV}$$

$$2r_1 = 2,15 \cdot 10^{-2} \text{ m}$$

$$2r_2 = 3,74 \cdot 10^{-2} \text{ m}$$

$$l = 13 \cdot 10^{-2} \text{ m}$$

7/1987 -Sf-

Instrucciones de Servicio

55517

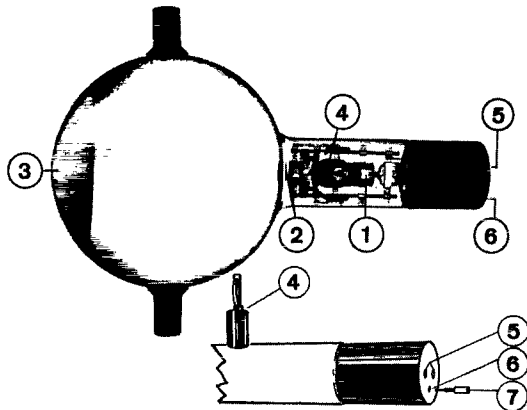


Fig. 1

tubo de difracción de electrones

El tubo de difracción de electrones permite hacer visibles las interferencias de rayos electrónicos que son difractados en grafito policristalino y de este modo se demuestra la naturaleza ondulatoria de los electrones.

Ejemplos experimentales :

- Difracción en una red policristalina (difracción de Debye-Scherrer).
Para la demostración de la difracción de Debye-Scherrer con luz visible se recomienda el análogo óptico para interferencia de Debye-Scherrer, 555 19.
- Determinación de la longitud de ondas
- Confirmación de la ecuación de de Broglie
$$\lambda = \frac{h}{m \cdot v}$$
- Análisis estructural (Distancias de planos de red del grafito)

2 Descripción, volumen de suministro, datos técnicos

- ① Sistema de electrodos con cátodo indirectamente calentado
- ② Red soporte cubierta con polvo de grafito (red de difracción policristalina)
- ③ Pantalla fluorescente
- ④ Clavija de enchufe de 4 mm, unida con el ánodo
- ⑤ Par de hembrillas de 4 mm, unidas con el filamento
- ⑥ Hembrilla de 2 mm unida con el cátodo mediante resistencia interna
- ⑦ Adaptador enchufe de 2 mm/hembrilla de 4 mm para la hembrilla ⑥

Sin ilustración : imán para corregir la dirección del rayo electrónico, en caso que éste incidiera en un lugar deficiente de la capa de grafito de ② debido a motivos técnicos de fabricación u originado por incandescencia.

1 Advertencias de seguridad

- Proteger el tubo de alto vacío contra caídas, choques y semejantes. Peligro de implosión!
- Controlar la corriente de emisión $/EM$ y la hoja de grafito durante el experimento; con $/EM > 200 \mu A$ o con la hoja al rojo vivo interrumpir inmediatamente la unión a la fuente de tensión de ánodos (véase párrafo 3).
- Cubrir la clavija de enchufe ④ a prueba de contacto mediante pieza de unión (del 501 641 y sig.).

Datos técnicos :

Tensión de filamento U_F :	máx. 6 Vc.a.
Corriente de filamento $/_F$:	máx. 0,3 A
Tensión anódica U_A :	máx. 5 kVc.c.
Corriente de emisión $/_{EM}$:	máx. 200 μA

Distancias de planos de red del grafito

$$d_1 = 2,13 \cdot 10^{-10} \text{ m}$$

$$d_2 = 1,23 \cdot 10^{-10} \text{ m}$$

Distancia red de grafito - pantalla fluorescente: aprox. 13,5 cm.

Diámetro de la ampolla de vidrio: aprox. 13 cm.

3 Descripción de los experimentos

Difracción Debye-Scherrer de rayos electrónicos (Determinación de la longitud de ondas ; verificación de λ_{ex} mediante la ecuación de de Broglie ; determinación de h (constante de Planck); análisis estructural).

Los electrones emitidos por el cátodo incandescente son concentrados a través de la abertura de un diafragma para formar un haz estrecho. Este pasa un sistema electrónico óptico enfocante e incide como rayo coherente y monocromático en una hoja de grafito policristalina cuyos átomos, dispuestos en forma de retículo espacial, forman una red de difracción. La imagen de difracción que aparece en la pantalla fluorescente muestra alrededor del rayo electrónico sin difractar en el centro dos anillos concéntricos, cuyos diámetros pueden variar en función de la longitud de ondas, dependiente de la tensión de aceleración. Cada uno de los dos anillos corresponde a la reflexión de Bragg en los átomos de un plano de red del grafito.

Para la reflexión interferencial de los rayos electrónicos en los átomos del retículo, lo mismo que para otras radiaciones ondulatorias (por ej. rayos X), es válida la condición de Bragg :

$$2 d \sin \vartheta = n \lambda \quad (1)$$

(d = distancia entre planos de red de retículo espacial

ϑ = ángulo de reflexión

λ = longitud de onda de los rayos electrónicos).

Una reflexión interferencial tiene, pues, lugar cuando la diferencia de marcha $2 d \sin \vartheta$ es igual a un múltiplo de número entero de la longitud de onda.

Si los rayos electrónicos inciden sobre la hoja de grafito, entonces, debido a la disposición arbitraria de los monocristales, podrán encontrarse siempre con aquellos que forman ángulos con la radiación incidente que satisfacen la condición de Bragg (1).

Todos los reflejos que parten de estos cristallitos se encuentran en planos formando superficies de conos con eje común. Una sección a través de estos conos representa la pantalla fluorescente del tubo, de forma

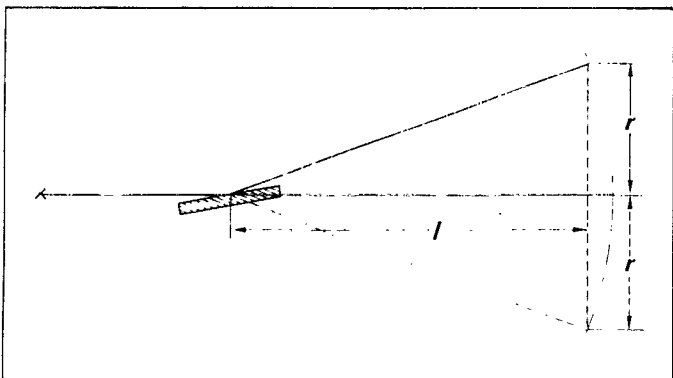


Fig. 2 Representación esquemática de la difracción de Debye-Scherrer

que los rayos electrónicos difractados aparecen como círculos concéntricos alrededor del rayo electrónico sin difractar.

De la representación esquemática de un rayo reflejado (Fig. 2) resulta

$$\tan 2\vartheta = \frac{r}{l}$$

De aquí se deduce para ángulos pequeños :

$$2 \sin \vartheta = \frac{r}{l} \quad (2)$$

Emplazando (2) en (1) resulta para la longitud de onda (con $n = 1$)

$$\lambda = \frac{r \cdot d}{l} \quad (3)$$

Suponiendo como conocida la longitud de onda λ , que puede averiguarse de la tensión de aceleración (véase párrafo 3 bajo Valoración), se puede entonces determinar de los radios de ambos anillos de difracción las distancias de planos de red del grafito:

$$d = \frac{\lambda \cdot l}{r} \quad (4)$$

Aparatos necesarios:

1 Tubo de difracción de electrones	555 17
1 Soporte de experimentación	555 05
1 Fuente de alimentación de alta tensión, 10 kV	522 37
1 Fuente de tensión de filamento, 6 V c.a., con limitación de corriente a 0,3 A, por ej. Transformador, 6 V/12 V, 30 W	562 73
Reóstato de cursor, 11 Ω	537 29

Instrumentos de medida para 300 μ A c.c., 0,3 A, por ej.

Plurímetro de demostración	531 91
Instrumento de carrito móvil D	531 781

Interruptor bipolar	504 50
Pieza de unión	del 501 641
Cables de experimentación	del 501 20 y sig.

Montaje experimental (véase Fig. 3)

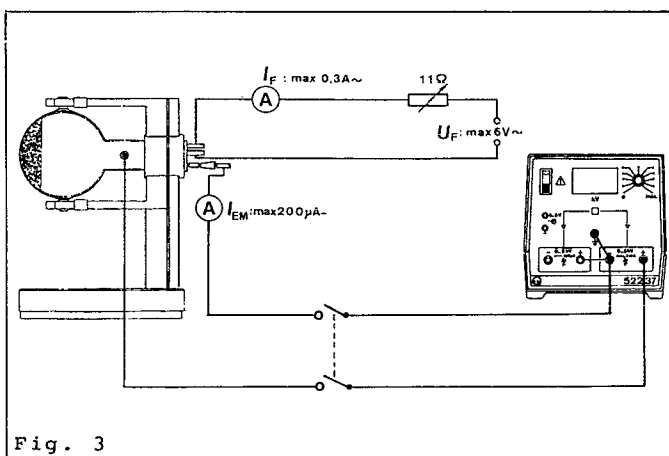


Fig. 3

Montar los aparatos de alimentación de corriente de tal forma que sus transformadores no puedan influenciar magnéticamente los rayos electrónicos. ; Mantener la distancia !

Es conveniente llevar a cabo el experimento en un recinto oscurecido.

Realización

Conectar la tensión de filamento y limitar la corriente de filamento I_F a máximo 0,3 mA ; controlar con el amperímetro.

Aumentar siempre de forma continua la tensión anódica de 0 V hasta el valor final (máximo 5 kV).

Importante : Controlar continuamente la corriente de emisión I_{EM} (máx. 200 μ A) y la hoja de grafito durante el experimento.

Cuando I_{EM} es mayor de 200 μ A o con la hoja de grafito al rojo vivo, interrumpir inmediatamente la unión a la fuente de tensión anódica en el interruptor bipolar, retroceder U_A a 0 V y descargar la fuente de alimentación cerrándola en circuito corto. Fijar el imán de ajuste de tal forma (por ej. con cinta adhesiva) en el cuello del tubo, que los rayos electrónicos, después de aplicar de nuevo la tensión de ánodo (aumentar sucesivamente), incidan en otro lugar de la hoja.

Con anillos de difracción insatisfactorios, modificar la dirección de los rayos electrónicos con el imán de ajuste, de forma que incidan sobre una parte de la red de grafito libre de lugares deficientes y permitan distinguir claramente por lo menos 2 anillos (difracción de primer orden en planos de red con
 $d_1 = 2,13 \cdot 10^{-10}$ m y
 $d_2 = 1,23 \cdot 10^{-10}$ m).

Con $U_A = 5$ kV, determinar los diámetros $2 r_1$ y $2 r_2$ de los anillos de difracción (emplear un pie de rey o calibrador). Determinar la distancia l (véase Fig. 2) por estimación a base del diámetro de la ampolla de vidrio de 13 cm.

Ejemplo de medición :

$$U_A = 5 \text{ kV}$$

$$2 r_1 = 2,15 \cdot 10^{-2} \text{ m}$$

$$2 r_2 = 3,74 \cdot 10^{-2} \text{ m}$$

$$l = 13 \cdot 10^{-2} \text{ m}$$

Valoración:

1. Determinación de la longitud de ondas

A base de los valores medidos de r_1 , r_2 así como l y las distancias de planos de red del grafito

$$d_1 = 2,13 \cdot 10^{-10} \text{ m}$$

$$d_2 = 1,23 \cdot 10^{-10} \text{ m}$$

resulta con una tensión de aceleración $U_A = 5$ kV la longitud de onda

$$\lambda_1 = 0,176 \cdot 10^{-10} \text{ m} \quad \text{y} \quad \lambda_2 = 0,177 \cdot 10^{-10} \text{ m}$$

2. Comparación de λ_{ex} con el valor teórico que resulta de la ecuación de de Broglie

Para comprobar el valor de λ conseguido experimentalmente se recurre a la ecuación de de Broglie :

$$\lambda = \frac{h}{m \cdot v}$$

Si se aplica la velocidad de electrones v , resultando de la ecuación de energía

$$\frac{1}{2} m v^2 = e \cdot U$$

para electrones acelerados por una tensión U , resulta entonces

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2 e m U}} \quad (5)$$

$$= \frac{6,6256 \cdot 10^{-34} \text{ Js}}{\sqrt{2 \cdot 1,6021 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot 9,1091 \cdot 10^{-31} \text{ kg} \cdot 5 \cdot 10^3 \text{ V}}}$$

$$= 0,173 \cdot 10^{-10} \text{ m}$$

Los valores de $0,176 \cdot 10^{-10}$ y $0,177 \cdot 10^{-10}$ averiguados experimentalmente de la imagen de difracción, corresponden con exactitud suficiente a los valores teóricos.

3. Cálculo de h de la ecuación de de Broglie

De (5) resulta

$$h = \lambda_{ex} \sqrt{2 e m U} \quad \text{con} \quad \lambda_{ex} = 0,1765 \cdot 10^{-10} \text{ m}$$

$$= 0,1765 \cdot 10^{-10} \text{ m} \sqrt{2 \cdot 1,6021 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot 5 \cdot 10^3 \text{ V}}$$

$$\sqrt{9,1091 \cdot 10^{-31} \text{ kg}} = 6,743 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$$

4. Determinación de las distancias de planos de red del grafito

A base de los valores medidos de r_1 , r_2 así como l y la longitud de onda λ , calculada según (4) de la tensión de aceleración U_A ,

$$\lambda = \frac{h}{2 e m U_A} \quad \text{con} \quad h = 6,6256 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$$

$$e = 1,6021 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

$$m = 9,1091 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$$

$$= 0,173 \cdot 10^{-10} \text{ m},$$

resultan las distancias de planos de red

$$d_1 = \frac{0,173 \cdot 10^{-10} \cdot 13 \cdot 10^{-2}}{1,075} \text{ m}$$

$$= 2,09 \cdot 10^{-10} \text{ m} \quad \text{y}$$

$$d_2 = \frac{0,173 \cdot 10^{-10} \cdot 13 \cdot 10^{-2}}{1,87 \cdot 10^{-2}} \text{ m}$$

$$= 1,203 \cdot 10^{-10} \text{ m}$$