

Loi des déplacements de Duane et Hunt et détermination de la constante de Planck

Objectifs expérimentaux

- Détermination de la longueur d'onde limite λ_{\min} du spectre continu du rayonnement de freinage en fonction de la haute tension U du tube à rayons X.
- Vérification de la loi des déplacements de Duane et Hunt.
- Détermination de la constante de Planck.

Notions de base

Le spectre continu du rayonnement de freinage dans le spectre d'émission d'un tube à rayons X se caractérise par la longueur d'onde limite λ_{\min} (voir fig. 1) qui diminue au fur et à mesure que la haute tension U du tube augmente (voir expérience P6.3.3.2). En 1915, les physiciens américains *William Duane* et *Franklin L. Hunt* constatèrent une proportionnalité inverse entre la longueur d'onde limite et la haute tension du tube :

$$\lambda_{\min} \sim \frac{1}{U} \quad (I).$$

De simples réflexions en mécanique quantique suffisent à expliquer cette loi des déplacements de Duane et Hunt: Comme la longueur d'onde λ et la fréquence ν sont reliées comme suit pour chaque rayonnement électromagnétique

$$\lambda = \frac{c}{\nu} \quad (II)$$

$c = 2,9979 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$: vitesse de la lumière,

une fréquence maximale ν_{\max} ou une énergie maximale

$$E_{\max} = h \cdot \nu_{\max} \quad (III)$$

h : constante de Planck

des quanta de rayons X émis correspond à une longueur d'onde minimale λ_{\min} . Mais un quantum de rayons X reçoit une énergie maximale précisément lorsqu'il réceptionne la totalité de l'énergie cinétique

$$E = e \cdot U \quad (IV)$$

$e = 1,6022 \cdot 10^{-19} \text{ A s}$: charge élémentaire

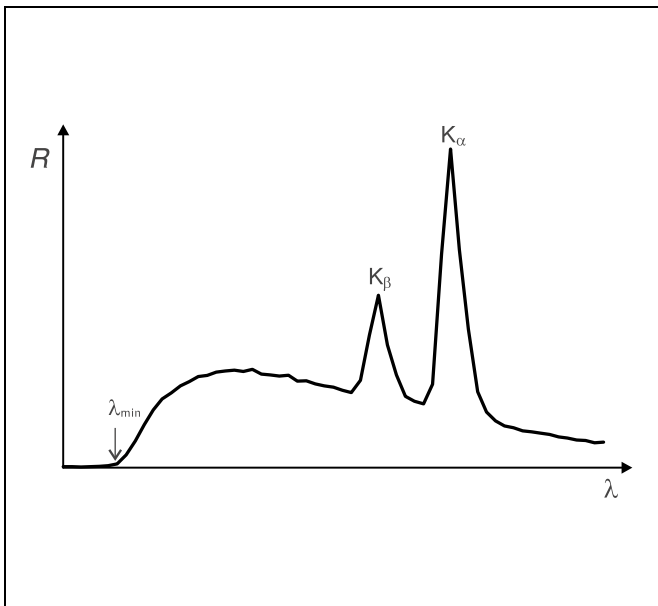
d'un électron freiné dans l'anode. Il s'ensuit donc

$$\nu_{\max} = \frac{e}{h} \cdot U \quad (V)$$

et

$$\lambda_{\min} = \frac{h \cdot c}{e} \cdot \frac{1}{U} \quad (VI).$$

Fig. 1 Spectre d'émission d'un tube à rayons X avec la longueur d'onde limite λ_{\min} du spectre continu du rayonnement de freinage et les raies caractéristiques K_{α} et K_{β} .



Matériel

1 appareil à rayons X 554 811

1 tube compteur à fenêtre
pour rayonnements α , β , γ et X 559 01*Supplément:*

1 PC avec Windows 95/98 ou Windows NT

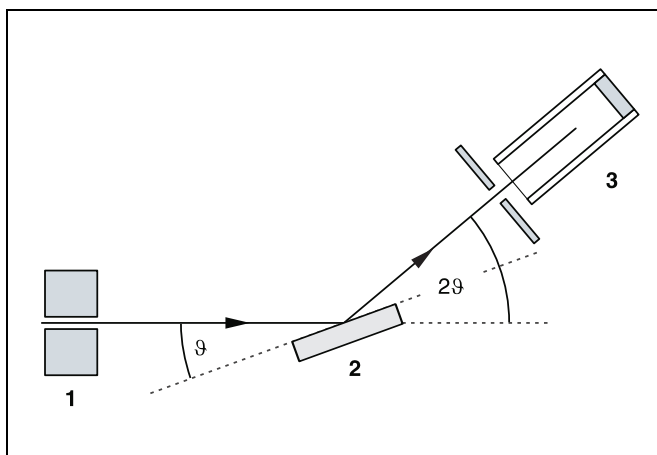


Fig. 2 Schéma de principe pour la diffraction de rayons X sur un monocristal et pour le couplage 2ϑ entre l'angle du tube compteur et l'angle de diffusion (angle de brillance)
1 collimateur, 2 monocristal, 3 tube compteur

L'équation (VI) correspond à la loi des déplacements de Duane et Hunt. La constante de Planck h peut être déterminée d'après le facteur de proportionnalité

$$A = \frac{h \cdot c}{e} \quad (\text{VII})$$

lorsque les grandeurs c et e sont connues.

Dans l'expérience, un goniomètre avec un cristal de NaCl et un tube compteur de Geiger-Müller en disposition de Bragg sert de spectromètre. Le cristal et le tube compteur sont orientés dans un couplage 2ϑ par rapport au rayonnement X incident (cf. fig. 2).

Conformément à la loi de la réflexion de Bragg, la longueur d'onde

$$\lambda = 2 \cdot d \cdot \sin \vartheta \quad (\text{VIII})$$

$d = 282,01$ pm: écartement des plans du réseau du NaCl

correspond à l'angle de diffusion ϑ dans le premier ordre de diffraction.

Conseils de sécurité

L'appareil à rayons X respecte les consignes relatives à la construction d'un appareillage à rayons X pour l'enseignement et d'un appareil à protection totale et est homologué en tant que tel (d'après le règlement allemand sur les rayonnements X).

Grâce aux mesures de protection et de blindage incorporées par le constructeur, le taux de dose hors de l'appareil est réduit à moins de $1 \mu\text{Sv/h}$, une valeur d'un ordre de grandeur correspondant à la dose d'irradiation naturelle.

- Avant la mise en service, s'assurer du bon état de l'appareil à rayons X et vérifier que la haute tension est bien coupée à l'ouverture des portes coulissantes (voir mode d'emploi de l'appareil à rayons X).
- Tenir l'appareil à rayons X à l'abri des personnes non autorisées.

Eviter une surchauffe de l'anode dans le tube à rayons X Mo.

- A la mise en marche de l'appareil à rayons X, vérifier si le ventilateur dans la partie tube fonctionne.

Le goniomètre s'ajuste exclusivement par le biais de moteurs pas à pas électriques.

- Ne pas bloquer le bras de cible et le bras de capteur du goniomètre et ne pas modifier le réglage par force.

Montage**Réalisation de la disposition de Bragg:**

Certains détails importants pour le montage expérimental sont représentés sur la fig. 3. La marche à suivre est la suivante (voir aussi mode d'emploi de l'appareil à rayons X):

- Placer le collimateur dans le logement du collimateur **(a)** (faire attention à la rainure de guidage).
- Fixer le goniomètre sur les barres de guidage **(d)** de manière à avoir une distance s_1 d'environ 5 cm entre le diaphragme à fente du collimateur et le bras de cible. Enficher le câble plat **(c)** pour la commande du goniomètre.
- Enlever le capuchon protecteur du tube compteur à fenêtre, placer le tube compteur à fenêtre dans le logement du capteur **(e)** et brancher le câble du tube compteur à la douille GM-Tube.
- En déplaçant le porte-capteur **(b)**, régler une distance s_2 d'environ 5 cm entre le bras de cible et le diaphragme à fente du logement pour capteur.
- Monter le porte-cible avec le plateau pour cible **(f)**.
- Desserrer la vis moletée **(g)**, poser le cristal de NaCl à plat sur le plateau pour cible, soulever prudemment le plateau

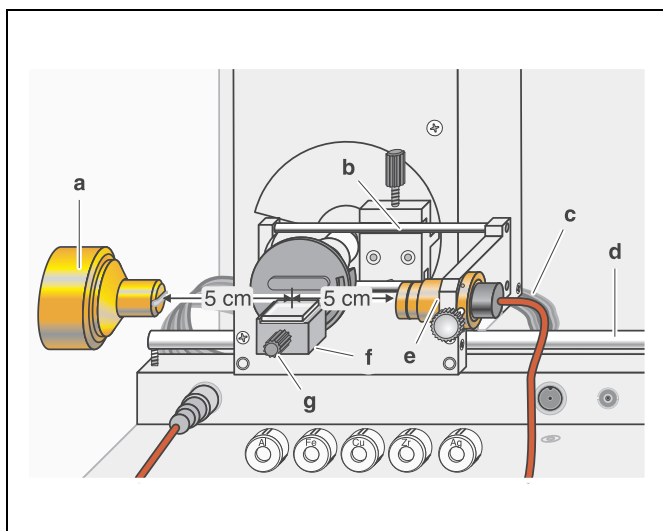


Fig. 3 Montage expérimental en disposition de Bragg

- pour cible avec le cristal jusqu'à la butée et serrer la vis moletée en faisant bien attention (visser bien dans l'axe).
- Eventuellement ajuster la position zéro du goniomètre (voir mode d'emploi de l'appareil à rayons X).

N.B.:

Les cristaux de NaCl sont hygroscopiques et fragiles:


Ranger le cristal dans un endroit aussi sec que possible, éviter si possible toute sollicitation mécanique sur le cristal, ne s'emparer du cristal que par les fronts.

Si le taux de comptage est trop faible, la distance s_2 entre la cible et le capteur peut être légèrement réduite mais elle ne doit pas être trop petite sous peine d'avoir une résolution angulaire du goniomètre qui ne suffirait plus.

Préparation de l'acquisition des valeurs mesurées avec le PC:



- Relier la sortie RS232 et le port série du PC (en principe COM1 ou COM2) via le câble V24 à 9 pôles (livré avec l'appareil à rayons X).
- Eventuellement installer le programme «Appareil à rayons X» sous Windows 95/98/NT (voir mode d'emploi de l'appareil à rayons X) puis sélectionner la langue désirée.

Réalisation

- Lancer le programme «Appareil à rayons X», vérifier que l'appareil à rayons X est bien branché et éventuellement effacer les données de mesure existantes avec le bouton  ou la touche F4.
- Sélectionner une haute tension du tube $U = 22$ kV, un courant d'émission $I = 1,00$ mA, un temps de mesure par pas angulaire $\Delta t = 30$ s et un pas de progression angulaire $\Delta\beta = 0,1^\circ$.
- Activer le bouton-poussoir Couplé pour le couplage 2 θ de la cible et du capteur puis régler la valeur limite inférieure de l'angle de la cible sur $5,2^\circ$, la valeur limite supérieure sur $6,2^\circ$.
- Lancer la mesure et la transmission des données vers le PC avec le bouton-poussoir SCAN.

Tab. 1: Paramètres recommandés pour le tracé des séries de mesure


$\frac{U}{\text{kV}}$	$\frac{I}{\text{mA}}$	$\frac{\Delta t}{\text{ms}}$	$\frac{\beta_{\min}}{\text{grd}}$	$\frac{\beta_{\max}}{\text{grd}}$	$\frac{\Delta\beta}{\text{grd}}$
22	1,00	30	5,2	6,2	0,1
24	1,00	30	5,0	6,2	0,1
26	1,00	20	4,5	6,2	0,1
28	1,00	20	3,8	6,0	0,1
30	1,00	10	3,2	6,0	0,1
32	1,00	10	2,5	6,0	0,1
34	1,00	10	2,5	6,0	0,1
35	1,00	10	2,5	6,0	0,1

- Relever en supplément des séries de mesures avec les hautes tensions du tube $U = 24$ kV, 26 kV, 28 kV, 30 kV, 32 kV, 34 kV et 35 kV, utiliser pour cela les paramètres donnés dans le tableau 1 (afin de gagner du temps).
- Ouvrir la fenêtre de dialogue pour la représentation en fonction de la longueur d'onde avec le bouton  ou la touche F5 et inscrire l'écartement des plans du réseau du NaCl.
- Une fois la mesure terminée, enregistrer la série de mesures sous un nom approprié à l'aide du bouton  ou de la touche F2.

Exemple de mesure et exploitation

Détermination de la longueur d'onde limite λ_{\min} en fonction de la haute tension U du tube:

Pour chaque spectre de diffraction tracé (voir fig. 4):

- Appeler les possibilités d'exploitation du programme «Appareil à rayons X» en cliquant dans le graphe avec la touche droite de la souris puis sélectionner le point de menu «Droite de régression».
- Avec la touche gauche de la souris, marquer la section de courbe dans laquelle une droite de régression doit être modélisée pour la détermination de la longueur d'onde limite λ_{\min} .
- Enregistrer les exploitations sous un nom approprié avec le bouton  ou la touche F2.

Vérification de la loi des déplacements de Duane et Hunt et détermination de la constante de Planck:

- Pour l'exploitation ultérieure des longueurs d'onde limites λ_{\min} ainsi déterminées, cliquer le registre «Planck».
- Cliquer dans le graphe avec la touche droite de la souris, modéliser la droite passant par l'origine selon les données $\lambda_{\min} = f(1/U)$ et relever la pente A dans le coin inférieur gauche de la fenêtre d'exploitation (voir fig. 5).

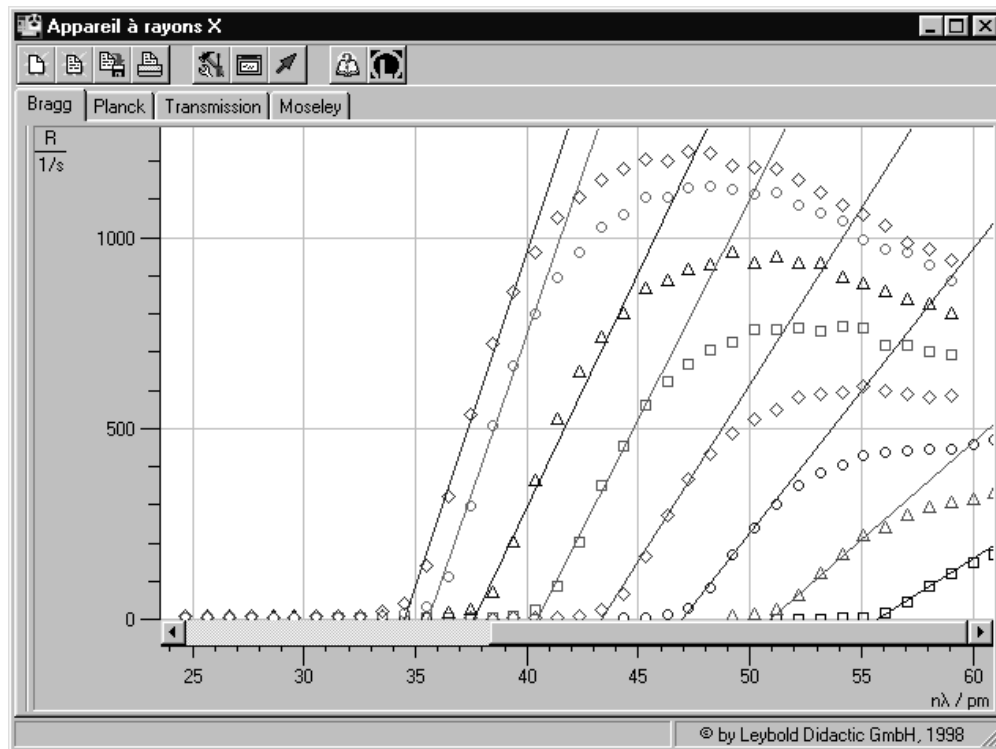


Fig. 4 Extraits des spectres de diffraction du rayonnement X pour les hautes tensions du tube $U = 22, 24, 26, 28, 30, 32, 34$ et 35 kV (de droite à gauche) avec droites de régression pour la détermination de la longueur d'onde limite λ_{\min}

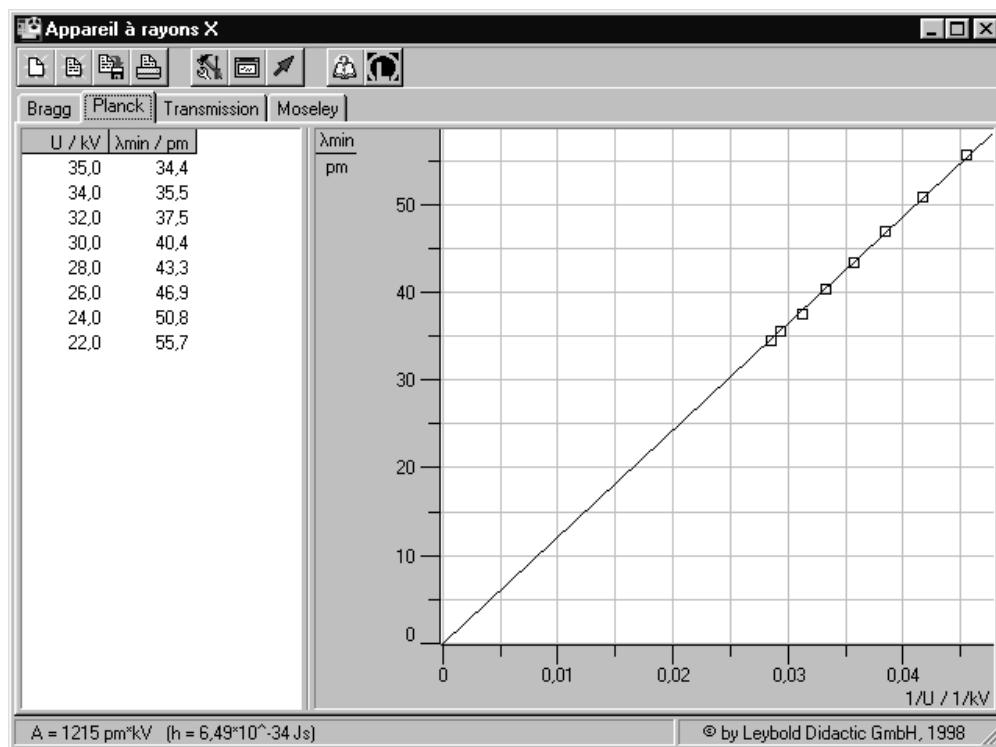


Fig. 5 Exploitation des données $\lambda_{\min} = f(1/U)$ pour la vérification de la loi des déplacements de Duane et Hunt et pour la détermination de la constante de Planck

A partir de la modélisation de la droite, on obtient

$$A = 1215 \text{ pm kV}$$

Pour la constante de Planck, on calcule alors conformément à (VII)

$$h = 6,49 \cdot 10^{-34} \text{ J s}$$

Valeur littéraire:

$$h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J s}$$