

Détermination du débit de dose ionique du tube à rayons X avec anode en molybdène

Objectifs expérimentaux

- Introduction et explication des notions de dose ionique et de débit de dose ionique pour la quantification de l'action des rayons X.
- Détermination du débit de dose ionique dans un condensateur à plaques rempli d'air par mesure du courant d'ionisation.

Notions de base

On appelle dosimétrie la saisie quantitative des effets qui sont suscités par le rayonnement X lors de son passage à travers la matière et sont susceptibles d'être utilisés pour la mise en évidence du rayonnement X. La dosimétrie joue par conséquent un rôle important pour les diagnostics médicaux et les applications techniques ainsi que pour la radioprotection. Elle ne représente aucune mesure de l'intensité réelle des rayonnements X. Pour cela, il faudrait par ex. des mesures calorimétriques pour lesquelles tout le rayonnement X est absorbé puis converti en chaleur. Par contre, on peut déduire l'intensité du rayonnement des mesures de la dose et du temps après un calibrage approprié.

Dose de rayonnement et débit de dose de rayonnement:

La définition de la dose de rayonnement se base d'une part sur l'action ionisante et d'autre part, sur l'absorption d'énergie du rayonnement X lors de son passage à travers la matière. Dans le premier cas, c'est la dose ionique qui est saisie, dans le deuxième cas, la dose absorbée.

La dose ionique

$$J = \frac{dQ}{dm} \quad (I)$$

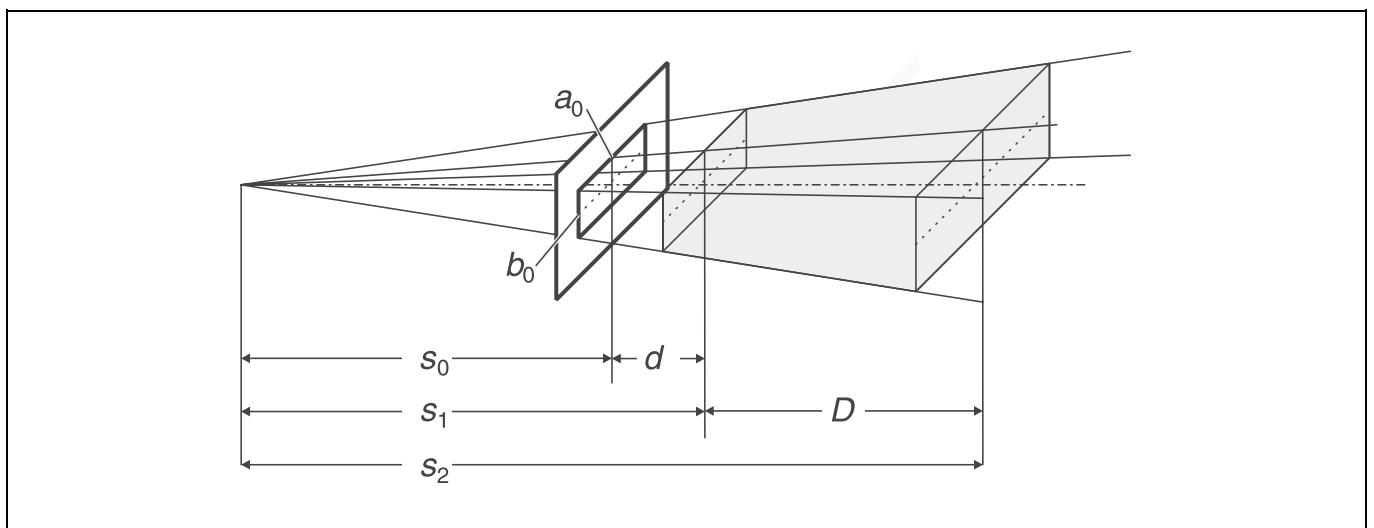
est le quotient de la charge dQ générée par des porteurs de charge d'un même signe lors de l'irradiation de l'air et de la masse dm de l'élément volumique irradié. Son unité SI dérivée est le Coulomb par kilogramme ($C\ kg^{-1}$): $1\ C\ kg^{-1} = 1\ As\ kg^{-1}$

La dose absorbée

$$K = \frac{dW}{dm} \quad (II)$$

est le quotient de l'énergie dW absorbée par la substance irradiée et de la masse dm de l'élément volumique irradié. Son unité SI dérivée est le Gray (Gy): $1\ Gy = 1\ J\ kg^{-1}$

Fig. 1 Représentation de la marche des rayons dans le condensateur à plaques pour le calcul du volume V irradié



Matériel

1 appareil à rayons X	554 811
ou	
1 appareil à rayons X	554 812
1 condensateur à plaques X-ray	554 840
1 alimentation 450 V-	522 27
1 amplificateur électromètre	532 14
1 résistance STE 1 GΩ, 0,5 W	577 02
1 voltmètre, CC, U ≤ 300 V, Résistance d'entrée 10 MΩ	par ex. 531 100
1 voltmètre, CC, U ≤ 10 V	par ex. 531 100
1 câble de mesure BNC/4 mm	575 24
Câbles d'expérimentation	

L'intensité efficace des rayons X est définie comme étant le quotient de la dose et du temps. On qualifie

$$j = \frac{dJ}{dt} \quad (III),$$

mesuré en A kg⁻¹, de débit de dose ionique et

$$k = \frac{dK}{dt} \quad (IV),$$

mesuré en Gy s⁻¹ = W kg⁻¹, de débit de dose absorbée.

Détermination du débit de dose ionique:

La mesure du débit de dose ionique peut avoir lieu dans un condensateur à plaques rempli d'air en mesurant la valeur de saturation du courant d'ionisation I_C (voir expérience P6.3.1.3). Celui-ci est donné par

$$I_C = \frac{dQ}{dt},$$

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 μSv/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.

d'où d'après (I) et (III):

$$j = \frac{dI_C}{dm} \quad (V)$$

Comme le rayonnement X se propage de manière divergente et qu'il est atténué dans l'air, le débit de dose ionique j est une grandeur subordonnée au lieu dont la mesure s'avérerait très complexe. Il est plus facile de mesurer le débit de dose ionique moyen

$$\langle j \rangle = \frac{I_C}{m} \quad (VI),$$

pour lequel tout le courant d'ionisation I_C et la masse

$$m = \rho \cdot V \quad (VII)$$

de la totalité du volume V irradiée sont à déterminer.

La densité ρ de l'air s'obtient selon

$$\rho = \rho_0 \cdot \frac{T_0}{T} \cdot \frac{p}{p_0} \quad (VIII)$$

avec $\rho_0 = 1,293 \text{ kg m}^{-3}$, $T_0 = 273 \text{ K}$ et $p_0 = 1013 \text{ hPa}$

à partir de la température T et de la pression atmosphérique p qui règnent dans la salle d'expérimentation. Le volume V se calcule à l'aide de la fig. 1.

Calcul du volume V irradié:

Sur la fig. 1, le foyer du tube à rayons X est, en bonne approximation, supposé ponctuel. Du fait du diaphragme rectangulaire devant le condensateur à plaques, un faisceau qui pénètre le volume d'air V à calculer dans le condensateur est émis du cône de rayonnement du tube à rayons X.

La distance entre le foyer et le diaphragme rectangulaire vaut $s_0 = 15,5 \text{ cm}$. Les dimensions du diaphragme sont $a_0 = 4,5 \text{ cm}$ et $b_0 = 0,6 \text{ cm}$. Le rayonnement X à propagation rectiligne éclaire un rectangle derrière le diaphragme à une distance s quelconque du foyer; ce rectangle a les dimensions

$$a(s) = \frac{s}{s_0} \cdot a_0 \text{ et } b(s) = \frac{s}{s_0} \cdot b_0 \quad (IX).$$

Le volume d'air irradié dans le condensateur à plaques correspond donc à l'intégrale

$$V = \int_{s_1}^{s_2} a(s) \cdot b(s) \cdot ds \quad (X).$$

avec les limites d'intégration

$$s_1 = s_0 + d \text{ et } s_2 = s_0 + d + D \quad (XI)$$

$d = 2,5 \text{ cm}$: distance entre le diaphragme et le condensateur à plaques

$D = 16,0 \text{ cm}$: longueur du condensateur à plaques.

On obtient

$$V = \frac{1}{3} \cdot \frac{a_0 \cdot b_0}{s_0^2} \cdot (s_2^3 - s_1^3)$$

et d'après cette équation

$$V = a_0 \cdot b_0 \cdot D \cdot \left(\frac{s_2^2 + s_2 s_1 + s_1^2}{s_0^2} \right) = 125 \text{ cm}^3 \quad (XII).$$

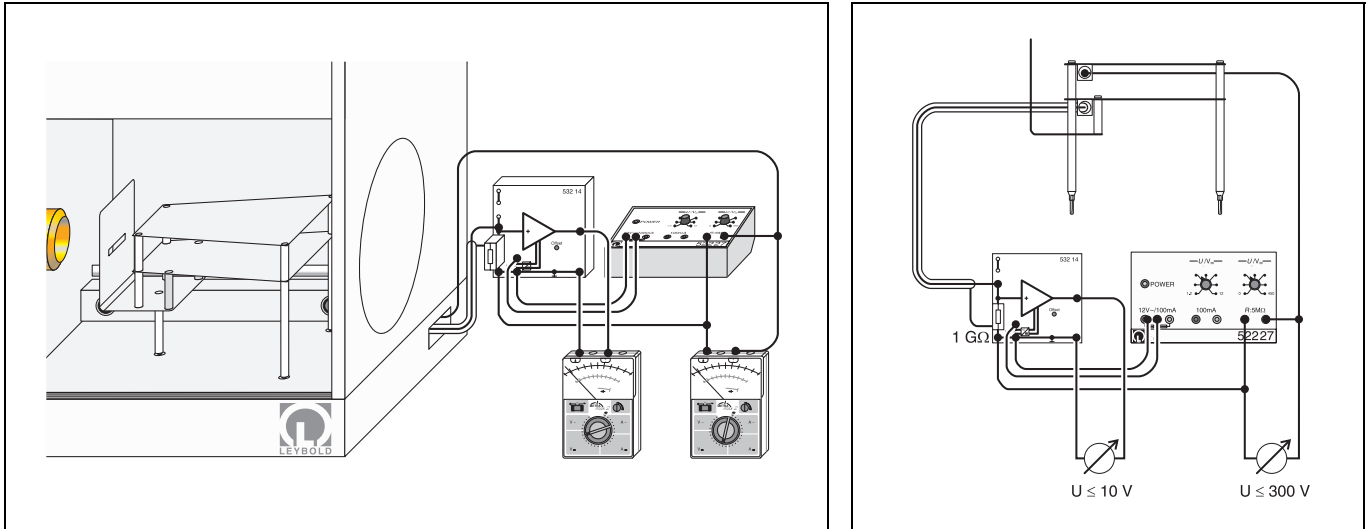


Fig. 2 Montage expérimental pour la mesure du courant d'ionisation dans un condensateur à plaques

Fig. 3 Câblage du condensateur à plaques et amplificateur électromètre pour la détermination du courant d'ionisation

Montage

Le montage expérimental est représenté sur la fig. 2. La fig. 3 montre le câblage électrique du condensateur à plaques et de l'amplificateur électromètre pour la détermination du courant d'ionisation.

Montage mécanique:

- Eventuellement démonter le collimateur de l'appareil à rayons X et enlever les dispositifs expérimentaux de la partie expérimentation de l'appareil à rayons X.
- Brancher le câble de mesure BNC/4 mm à la fiche BNC sur la plaque inférieure du condensateur (douille BNC) et le câble d'expérience à la plaque supérieure du condensateur (douille de sécurité) du condensateur à plaques X-ray.
- Soulever le condensateur à plaques dans la partie expérimentation de l'appareil à rayons X et insérer les pieds enfichables dans les douilles de fixation. S'assurer que les plaques du condensateur sont bien parallèles à la plaque de base de l'appareil à rayons X, et si nécessaire, les réajuster.
- Faire passer les deux câbles dans le canal vide jusqu'à ce qu'ils ressortent sur la droite de l'appareil à rayons X.

Montage électrique:

- Brancher le câble d'expérience au pôle positif de l'alimentation 450 V- et le câble de mesure BNC/ 4 mm à l'amplificateur électromètre équipé de la résistance 1 G Ω .
- Relier le raccord de mise à la masse de l'amplificateur électromètre avec le pôle positif de l'alimentation 450 V-.
- Brancher un voltmètre pour la mesure de la tension du condensateur U_C et pour la mesure de la tension de sortie de l'amplificateur électromètre U_E .
- Brancher l'appareil à rayons X au réseau d'alimentation puis le mettre en route

Réalisation

- Déterminer la température ϑ et la pression atmosphérique p dans la partie expérimentation et calculer à partir de ces valeurs la masse m irradiée conformément aux équations (VII) et (VIII).

a) Courant d'ionisation de saturation I_C en fonction du courant d'émission I :

- Régler une haute tension du tube $U = 35$ kV.
- Sélectionner la tension du condensateur $U_C \geq 140$ V de manière à ce que la valeur de saturation du courant d'ionisation I_C soit atteinte (voir valeurs mesurées en a).

Pour le relevé d'une série de mesures, augmenter pas à pas le courant d'émission I de 0 mA à 1 mA et déterminer à chaque fois le courant d'ionisation I_C à partir de la tension U_E à la sortie de l'amplificateur électromètre:

$$I_C = \frac{U_E}{1 \text{ G}\Omega}$$

- Etablir un protocole des résultats de mesure et du débit de dose ionique moyen calculé.

b) Courant d'ionisation de saturation I_C en fonction de la haute tension U du tube:

- Régler un courant d'émission $I = 1,0$ mA.
- Sélectionner une tension du condensateur $U_C \geq 140$ V.

Augmenter pas à pas la haute tension U du tube de 5 kV à 35 kV et déterminer le courant d'ionisation correspondant I_C .

- Etablir un protocole des résultats de mesure et du débit de dose ionique moyen.

Exemple de mesure et exploitation

$T = 303$ K et $p = 1017$ hPa:

On calcule d'après l'équation (VIII) $\rho = 1,17$ kg m⁻³ et d'après (VII) et (XII) $m = 0,147 \cdot 10^{-3}$ kg

Le débit de dose ionique moyen est donc selon (VI)

$$\frac{\langle j \rangle}{\mu\text{A} \cdot \text{kg}^{-1}} = \frac{I_C}{\text{nA}} \cdot \frac{1}{0,147 \text{ kg}}$$

a) Mesures en fonction du courant d'émission I :

Tab. 1: Valeur de saturation du courant d'ionisation I_C et débit de dose ionique moyen $\langle j \rangle$ en fonction du courant d'émission I du tube à rayons X, haute tension du tube $U = 35$ kV.

$\frac{I}{\text{mA}}$	$\frac{I_C}{\text{nA}}$	$\frac{\langle j \rangle}{\mu\text{A} \cdot \text{kg}^{-1}}$
0,0	0,02	0,14
0,1	0,48	3,27
0,2	0,92	6,27
0,3	1,30	8,86
0,4	1,72	11,7
0,5	2,10	14,3
0,6	2,45	16,7
0,7	2,80	19,1
0,8	3,20	21,8
0,9	3,55	24,2
1,0	3,90	26,6

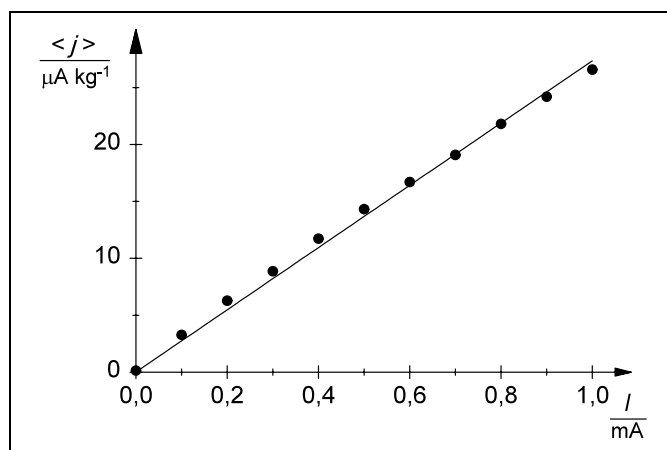


Fig. 4 Débit de dose ionique moyen $\langle j \rangle$ en fonction du courant d'émission I du tube à rayons X (pour $U = 35$ kV)

b) Courant d'ionisation de saturation I_C en fonction de la haute tension U du tube:

Tab. 2: Valeur de saturation du courant d'ionisation I_C et débit de dose ionique moyen $\langle j \rangle$ en fonction de la haute tension U du tube, courant d'émission $I = 1,0$ mA.

$\frac{U}{\text{kV}}$	$\frac{I_C}{\text{nA}}$	$\frac{\langle j \rangle}{\mu\text{A} \cdot \text{kg}^{-1}}$
5,0	0,02	0,14
7,5	0,02	0,14
10,0	0,02	0,14
12,5	0,03	0,20
15,0	0,10	0,68
17,5	0,26	1,77
20,0	0,49	3,34
22,5	0,81	5,52
25,0	1,25	8,52
27,5	1,82	12,4
30,0	2,40	16,4
32,5	3,10	21,1
35,0	3,90	26,6

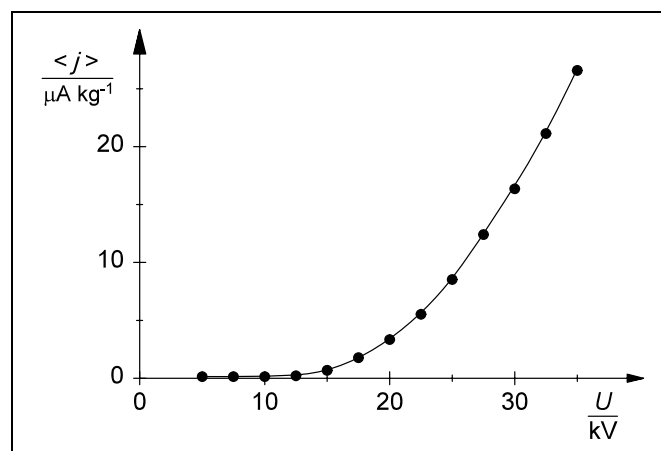


Fig. 5 Débit de dose ionique moyen $\langle j \rangle$ en fonction de la haute tension U du tube (pour $I = 1,0$ mA)

Résultat

Pour les paramètres d'exploitation maximaux du tube à rayons X ($U = 35$ kV, $I = 1$ mA), le débit de dose ionique moyen vaut dans le condensateur à plaques

$$\langle j \rangle = 26,6 \mu\text{A kg}^{-1}.$$

Information supplémentaire

Outre la dose ionique et la dose absorbée, la dose équivalente D joue elle aussi un rôle important. Son unité est le Sievert (Sv): $1 \text{ Sv} = 1 \text{ J kg}^{-1}$

Un rayonnement avec une dose équivalente bien précise suscite dans un tissu la même action biologique qu'un rayon-

nement X dur, généré pour une tension de 200 kV avec la dose absorbée correspondante. Pour les rayons X et γ , la dose absorbée K coïncide avec la dose équivalente D si K est mesurée en Gy et D en Sv. Pour la dose ionique J , on a la conversion: $1 \text{ Sv} \triangleq 0,0308 \text{ As kg}^{-1}$.

Le débit de dose ionique moyen $26,6 \text{ A kg}^{-1}$ dans le condensateur à plaques correspond donc à un débit de dose équivalente de $864 \mu\text{Sv s}^{-1}$ ou $3,11 \text{ Sv h}^{-1}$.

A titre de comparaison: Lors des mesures pour l'homologation de l'appareil à rayons X, un débit de dose équivalente de plus de 10 Sv h^{-1} a été mesuré dans le cône de rayonnement du tube à rayons X.