



Niort, le mardi 5 septembre 2006

Absorption des rayons X et des neutrons par la matière.

La perte d'intensité du faisceau incident est appelée absorption du rayonnement. Si I_0 est l'intensité du faisceau incident (nombre de particules par unité de surface et par unité de temps) perpendiculaire au plan d'une plaque (avec des faces parallèles figure I-5) d'épaisseur x l'intensité du faisceau sortant de la plaque est reliée à l'intensité incidente par la relation suivante :

$$I = I_0 \exp - \mu x \quad (1)$$

μ = coefficient d'absorption linéaire du matériau constituant la plaque (cm⁻¹)

x = épaisseur de la plaque (cm)

Fig. I-5 Absorption du rayonnement par une plaquette.

I. Absorption par les rayons X.

L'expression (1) peut s'écrire également

$$I = I_0 \exp - \left(\frac{\mu}{\rho} \rho x \right) \quad (2)$$

où μ/ρ est le coefficient d'absorption massique (cm²g⁻¹)

et ρ la masse volumique du matériau constituant la plaque (g cm⁻³)

Ce coefficient d'absorption massique varie beaucoup au voisinage des longueurs d'onde d'absorption (K et L) de l'élément considéré. Pour une longueur d'onde légèrement inférieure à la longueur d'onde d'absorption ce coefficient est élevé: si la longueur d'onde devient plus grande que la longueur d'onde d'absorption la valeur du coefficient chute brutalement. La fluorescence est la principale cause de l'absorption. Entre deux seuils d'absorption le coefficient est proportionnel à λ^3 . Les éléments lourds absorbent beaucoup les rayons X.

Conséquences expérimentales : Dans une expérience de diffraction que ce soit aux rayons X ou aux neutrons, le choix de la longueur d'onde est important : l'absorption et la fluorescence associée (rayons x) qui va donner du bruit de fond seront importants si on est près d'un seuil d'absorption d'un atome de l'échantillon.

S'il y a plusieurs types d'atomes dans l'échantillon l'intensité transmise va dépendre de l'absorption de chacun des types d'atomes dans l'échantillon et de leurs proportions pondérales w :

$$I = I_0 \exp - \left(\sum_i \left(\frac{\mu}{\rho} \right)_i w_i \rho x \right)$$

où w_i est la proportion massique de l'atome i de coefficient $(\mu/\rho)_i$

\sum_i est la sommation qui porte sur tous les constituants de l'échantillon

Les coefficients d'absorption des éléments du tableau périodique sont donnés dans les Tables Internationales Volume IV PP47 pour un certain nombre de longueurs d'onde.

II. Absorption du rayonnement neutronique par la matière.

Dans le cas des neutrons l'absorption est mesurée par ce qu'on appelle la section efficace d'absorption qui est exprimée en barns (1 barn = 10^{-24} cm²). Cette section représente une sorte de surface de capture. Pour l'élément i du tableau périodique cette surface est notée σ_i . Cette section efficace d'absorption est reliée au coefficient d'absorption massique par la relation :

$$(\mu/\rho)_i = \sigma_i N_0 / A_i \text{ où } N_0 \text{ est le nombre d'Avogadro et } A_i \text{ est la masse de l'élément } i$$

L'absorption est due par -la diffusion cohérente

- la diffusion incohérente élastique ou la diffusion inélastique,

- la vraie absorption.

$$\sigma \text{ (section efficace d'absorption totale)} = \sigma_{coh} + \sigma_{inc} + \sigma_{abs}$$

où σ_{coh} = section efficace de diffusion = $4\pi b^2$ (où b est la longueur de diffusion)

σ_{inc} = section efficace de diffusion incohérente

σ_{abs} = section efficace d'absorption réelle.

L'absorption due à la diffusion incohérente est due principalement à la diffusion incohérente du spin des neutrons par les spins des atomes des échantillons et par le désordre du fait que les atomes des échantillons sont un mélange d'isotopes. Par exemple, du fait de la diffusion incohérente du spin du neutron par l'hydrogène ^1H , la section efficace d'absorption (35 barns) est plus grande que la section efficace de diffusion cohérente (1.76 barns) pour une longueur d'onde de 1\AA . Pour éviter la diffusion incohérente des atomes d'hydrogène qui donne du bruit de fond les échantillons peuvent être deutérés, les atomes d'hydrogène étant remplacés par le deutérium ^2H .

L'absorption réelle (σ_{abs}) des neutrons (similaire à la fluorescence pour les rayons X) est principalement due à une capture du neutron par un atome de l'échantillon.

Par exemple le cadmium capture un neutron pour donner un isotope avec émission de rayons γ selon la réaction suivante: $113\text{Cd} + n \rightarrow 114\text{Cd} + \text{rayons } \gamma$

Pour quelques éléments tels que B, Cd, Gd, ... l'absorption est importante aux longueurs d'onde usuelles car un noyau résonnant se forme. D'un isotope à l'autre la section efficace d'absorption peut varier de plusieurs ordres de grandeur: par exemple $\sigma = 0.25$ barn pour ^{162}Dy et 306 barns pour ^{164}Dy .

Les valeurs des sections efficaces de diffusion et d'absorption des différents éléments et de leurs isotopes sont données dans les Tables internationales Vol IV . Des données plus récentes sont dans Neutron News 1992 Vol" N° 3. . Renvoyer à fiche interactions neutrons matière et longueurs de Fermi.

Conséquences expérimentales: la forte absorption du cadmium et ses bonnes propriétés mécaniques en feront un matériau de choix pour les protections dans les réacteurs à neutrons ainsi que le bore dans les composés contenant B_4C . Les protections sur les lignes de lumière du synchrotron seront faites à l'aide de plomb qui arrête fortement les rayons X. En général, la forte pénétration des neutrons permet l'utilisation d'un environnement expérimental complexe (ex: cryostat, cryostat à dilution, haute pression...). Le vanadium qui a une faible longueur de Fermi, apparaît comme transparent aux neutrons, c'est un matériau de choix pour faire les porte-échantillons.

III.Absorption des rayonnements par l'air

Le tableau ci-dessous donne la composition pondérale de l'air avec les coefficients d'absorption massique des différents éléments pour une longueur d'onde de 1.5418 \AA pour les rayons X et les neutrons ($\lambda = 1.08 \text{ \AA}$).

Composition de l'air	O	N	Ar
% massique	23,2	75,2	1,3
$(\mu/\rho)_i$ (cm ² g ⁻¹) RX $\lambda = 1.5418 \text{ \AA}$	12,7	8,5	113
$(\mu/\rho)_i$ (cm ² g ⁻¹) Neutrons $\lambda = 1.08 \text{ \AA}$	0.0001	0.048	0.006

Tableau 2 : Composition massique de l'air et les coefficients d'absorption massique des éléments

L'absorption par l'air est très importante pour les faisceaux de rayons X alors que les neutrons thermiques sont très peu absorbés. Le tableau ci-dessous permet de comparer l'absorption des rayonnements X et neutroniques pour différents trajets dans l'air.

Trajet dans l'air	10cm	100 cm	10m	100m
% d'intensité restant (rayons x)	87%	25%	8.10^{-7}	0
% d'intensité restant (Neutrons)	100%	99,5%	95%	62%

Tableau 3 Absorption des rayonnements par l'air

Conséquences expérimentales: ces résultats montrent que les lignes du synchrotron devront être sous un vide poussé (secondaire) alors qu'un vide primaire est suffisant pour les lignes de neutrons qui sont plus pénétrants. Signalons cependant que dans la pratique l'air est chargé d'humidité en conséquence l'absorption de neutrons par l'air humide est de l'ordre de 2 à 3 % par mètre d'air contre 0,5% pour l'air sec, ce qui reste plus d'un ordre de grandeur inférieur à l'absorption des rayons X.

IV. Absorption des rayonnements par un échantillon solide ou liquide.

Prenons comme échantillon un cristal de corindon (Al₂O₃) qui cristallise dans une maille hexagonale dont les paramètres de maille sont : a = 4,76 Å et c = 13,00 Å.

Cette maille hexagonale contient 6 unités de formule Al₂O₃, sachant que les masses sont 16 et 27 pour l'oxygène et l'aluminium on détermine la masse volumique qui est 4,00 gcm⁻³.

Pour la longueur d'onde du K_α (1,5418 Å) du cuivre les coefficients d'absorption massique sont 11,5 et 48 cm²g⁻¹ pour O et Al et pour une même longueur d'onde d'un faisceau de neutrons les sections efficaces d'absorption (totale) sont 4,24 et 1,5 barns pour les mêmes éléments.

	Neutrons	rayons x	
Coefficient d'absorption linéaire	0,407 cm ⁻¹	125,76 cm-1	
épaisseurs d'Al ₂ O ₃	1 cm	1cm	10-1mm
Transmission	66,5%	0.0	28%

Tableau 4 Absorption des faisceaux de neutrons et de rayons X par du corindon.

Pour le rayonnement neutronique le coefficient d'absorption linéaire μ est de l'ordre de 0,4 cm⁻¹ pour les échantillons solides (sauf pour les composés contenant du bore, du cadmium,...) alors que pour les rayons X ce coefficient est de l'ordre de la centaine ou plus de cm⁻¹.

Conséquences expérimentales : pour les échantillons étudiés avec les neutrons l'absorption est un effet faible même pour les gros échantillons: on peut utiliser des échantillons de plusieurs mm³. Leur coefficient d'absorption est généralement mesuré avant chaque expérience. En revanche, les cristaux étudiés avec les rayons X devront avoir des dimensions de l'ordre du 1/10 de mm.

V. Facteur de diffusion atomique au seuil d'absorption d'un atome du composé.

Lorsque l'énergie du photon-X est très proche d'un seuil d'absorption(K,L,..) il y a résonance . Cela signifie qu'il y a des changements dans la phase et l'amplitude du photon diffusé. Le facteur de diffusion s'écrit alors:

$$f(H) = f_0(H) + f'(\lambda) + if''(\lambda)$$

où - f' (λ) + if''(λ) est la dispersion anormale complexe chacun des termes f' et f'' variant de façon importante au seuil d'absorption où f' est négatif.

– f_0 est le facteur de diffusion indépendant de la longueur d'onde.

Cet effet anomal est souvent utilisé en diffraction de rayons X afin d'améliorer le contraste de diffusion entre atome voisin, c'est un point fort des rayons X. Ainsi l'étude des structures des macromolécules biologiques, la méthode MAD (Multiplewavelengths-Anomalous Diffraction) la mesure des intensités de diffraction à trois longueurs d'onde différentes (ou plus) au seuil d'absorption d'un atome lourd (naturellement dans le cristal ou introduit par trempage) à forte diffusion anormale conduit à des intensités différentes et permet de déterminer directement les phases des facteurs de structure des cristaux des macromolécules biologiques.

Pour les éléments qui ont une absorption correspondant à une capture de neutrons comme Cd, B,.. la longueur de Fermi présente aussi une dispersion avec une partie complexe et on obtient :

$$b = b_0 + i b''$$

Pour le bore $b = 5,30 + -0,213i$. En diffraction neutronique il est donc en principe aussi possible de recourir à la diffraction anormale bien que ce soit en pratique moins fréquent.

Jean-Henry BOUFFARD
Ancien Adjoint au Chef de l'Équipe Scientifique
C.E.A-Service Mixte de Contrôle Biologique
Ancien Radio Biologiste
Essais Nucléaires Aériens de Polynésie
Formation en Physique Nucléaire et N.B.C.R
Nucléaire, Bactériologie, Chimie et Radiologie

