

<b>Zeitschrift:</b>	Bulletin de la Société Fribourgeoise des Sciences Naturelles = Bulletin der Naturforschenden Gesellschaft Freiburg
<b>Herausgeber:</b>	Société Fribourgeoise des Sciences Naturelles
<b>Band:</b>	65 (1976)
<b>Heft:</b>	1: Mélanges en l'honneur du professeur Otto Huber à l'occasion de son 60e anniversaire = Festschrift zum 60. Geburtstag von Professor Otto Huber
 <b>Artikel:</b>	 Spectromètres à cristal incurvé : développements récents et applications
<b>Autor:</b>	Beer, W. / Dousse, J.-C. / Kern, Jean
<b>DOI:</b>	<a href="https://doi.org/10.5169/seals-308524">https://doi.org/10.5169/seals-308524</a>

### Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 25.01.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# Spectromètres à cristal incurvé: Développements récents et applications<sup>1</sup>

par W. BEER, J.-CL. DOUSSE, JEAN KERN, O. PILLER et W. SCHWITZ,  
Institut de Physique, Université, 1700 Fribourg, Suisse

## 1. Introduction

Plusieurs types de spectromètres à cristal ont été proposés pour l'étude des rayons X et  $\gamma$ , principalement les spectromètres plats, simples et doubles, et les spectromètres à cristal incurvé, abrégés ci-après SCI. Parmi ces derniers, et pour des photons d'énergie supérieure à 30 keV environ, les appareils à transmission des types CAUCHOIS (1934) et DUMOND (1947) se sont imposés. Au cours de ces dernières années un certain nombre de développements importants a donné un nouvel élan à l'utilisation de tels instruments. Nous nous proposons dans cet article de présenter l'évolution en cours et les perspectives qui sont ainsi ouvertes.

Si le cristal est orienté de telle manière que la diffraction ait lieu sur les plans (hkl) dont l'espacement est  $d$ , seuls les rayons dont la longueur d'onde  $\lambda$  satisfait la relation de Bragg

$$\lambda = \frac{2d}{n} \sin \theta_n \quad (1)$$

<sup>1</sup> Travail subventionné par le Fonds National Suisse de la Recherche Scientifique.

seront diffractés sélectivement. A partir de (1) et en passant des longueurs d'onde aux énergies, on montre que

$$\left| \frac{\Delta E}{E} \right| \approx \frac{2d}{hc} \Delta\theta \frac{E}{n} \quad (2)$$

Cette relation peut être interprétée de deux manières:

a)  $\Delta\theta$  représente l'erreur angulaire dans la détermination de l'angle de Bragg. Elle résulte de deux contributions, l'une provenant de l'imprécision de l'échelle angulaire (calibration de l'appareil), l'autre étant l'erreur statistique dans l'évaluation de la position des réflexes. Lorsque l'angle est déterminé par des moyens mécaniques (engrenages de précision) ou à l'aide d'un théodolite, on arrive à une erreur de calibration d'environ 0,2 à 0,3 sec d'arc. Pour les plans (110) du quartz, par exemple, la relation (2) donne numériquement pour  $\Delta\theta = 0,26$  sec d'arc ( $d = 2,46$  Å):

$$\Delta E = 5 \times 10^{-4} E^2/n \quad (3)$$

où  $\Delta E$  est exprimé en eV et  $E$  en keV. Pour une raie de 100 keV observée en 5<sup>e</sup> ordre, on obtient ainsi une précision de 1 eV. C'est pourquoi les SCI peuvent être utilement employés pour la détermination de standards d'énergie (voir chiffre 2).

b)  $\Delta\theta$  représente la largeur angulaire à mi-hauteur d'un réflexe. La formule (2) donne alors la résolution du spectromètre. Si la diffraction a lieu sur les plans (110) du quartz et que la largeur des réflexes est 5,2 secondes, on obtiendra numériquement

$$\Delta E = 10^{-5} E^2/n \quad (4)$$

où  $E$  et  $\Delta E$  sont exprimés en keV. On aura ainsi pour des photons de 100 et 300 keV en 2<sup>e</sup> ordre des résolutions de 50 et 450 eV respectivement. Ces performances sont bien supérieures à celles des meilleurs détecteurs semiconducteurs. C'est pourquoi les SCI sont utilisés avec avantage pour l'observation de spectres présentant une grande densité de lignes (voir chiffre 3).

Lorsque le problème est celui de mesurer «en ligne» les énergies de photons produits dans une réaction où le projectile provient d'un accélérateur, certains phénomènes rendent difficiles les mesures de précision avec des détecteurs semiconducteurs: présence de particules de haute énergie qui créent de très grandes impulsions, structure temporelle différente du spectre produit dans la réaction et de celui utilisé pour la calibration, par exemple. Le SCI n'est pas sensible à ces effets et trouve donc ici aussi des applications intéressantes (voir chiffre 4).

## 2. Mesure de standards d'énergie

Comme le montre la relation (2), la précision des mesures dépend de l'ordre de réflexion  $n$ , de la constante du réseau  $d$  et de la précision angulaire  $\Delta\Theta$ .

### 2.1. Choix des Plans cristallins

Le choix de cristaux que l'on peut obtenir avec des perfections suffisantes est assez limité. Dès les origines, on a souvent utilisé le plan (310) du quartz. La constante  $d$  est petite ( $d = 1,18 \text{ \AA}$ ). La réflectivité est bonne aux basses énergies. Malheureusement, seuls les réflexes du premier ordre sont pratiquement observables. L'énergie de quelques lignes de la désintégration de  $^{192}\text{Ir}$  observées par BERGVALL (1960) avec un tel cristal sont reportées dans le tableau 1.

La constante  $d$  des plans (110) du quartz est notablement plus grande ( $2,46 \text{ \AA}$ ), par contre des réflexes d'ordre élevé peuvent être observés: celui en 12<sup>e</sup> ordre de la ligne à 316 keV dans le  $^{192}\text{Pt}$  (BEER et KERN, 1974) constitue probablement le record en la matière. Avec une précision angulaire similaire à celle de l'appareil de BECKMAN et al (1959), BEER et KERN (1974) ont pu améliorer considérablement l'exactitude des énergies des principales transitions dans la désintégration de  $^{192}\text{Ir}$ , en les observant à des ordres de diffraction élevés (tableau 1).

En ce qui concerne le quartz, seuls des cristaux naturels ont été utilisés jusqu'ici. SEPPI et al. (1962) ont proposé d'utiliser du germanium et PILLER et al. (1973) du silicium. Des monocristaux de Ge

*Tableau 1* Energie de quelques transitions dans la désintégration de  $^{192}\text{Ir}$ . Les valeurs originales ont été adaptées à une échelle où la raie de  $^{198}\text{Au}$  vaut  $411,806 \pm 0,002$  keV. (DESLATTES, communication privée, 1975)

Bergvall (1960)		Beer et Kern (1974)		Borchert et al. (1975)	
$E_\gamma$ (keV)	$\Delta E_\gamma$ (eV) <sup>a)</sup>	$E_\gamma$ (keV)	$\Delta E_\gamma$ (eV)	$E_\gamma$ (keV)	$\Delta E_\gamma$ (eV)
295,963	21	295,957	2	295,960	1,6
308,448	22	308,456	2	308,456	2,7
316,512	20	316,507	2	316,510	1,6
468,087	50	468,066	4	468,074	2,4
589,165	230	588,568	9	588,590	5
604,538	240	604,414	9	604,416	4
612,771	250	612,464	10	612,469	4

a) Erreurs reportées dans le travail original.

et de Si ayant jusqu'à 80 mm de diamètre sont actuellement produits pour les besoins de l'industrie électronique. Les propriétés de réflectivité de plusieurs des plans de ces cristaux ont été récemment étudiées par BEER (1974). Certains de ces résultats sont reproduits dans les figures 1 et 2.

## 2.2. Interféromètres à laser

La meilleure précision angulaire que l'on ait pu atteindre avec un système mécanique ou un théodolite est de l'ordre de 0,2 sec. d'arc. Récemment ont été mis au point des interféromètres à laser qui permettent d'atteindre des précisions de l'ordre de 10 à 20 millisec. d'arc. La figure 3 montre une vue de l'interféromètre monté sur le spectromètre de Fribourg. Utilisant un système similaire, BORCHERT et al. (1975b) ont observé en plusieurs ordres les raies les plus intenses

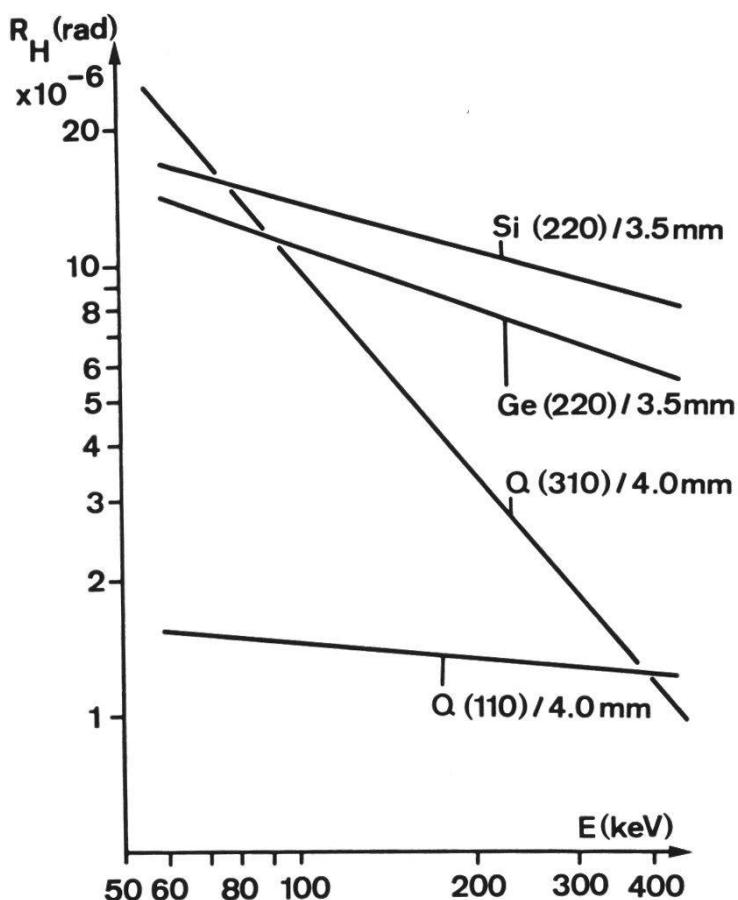


Fig. 1

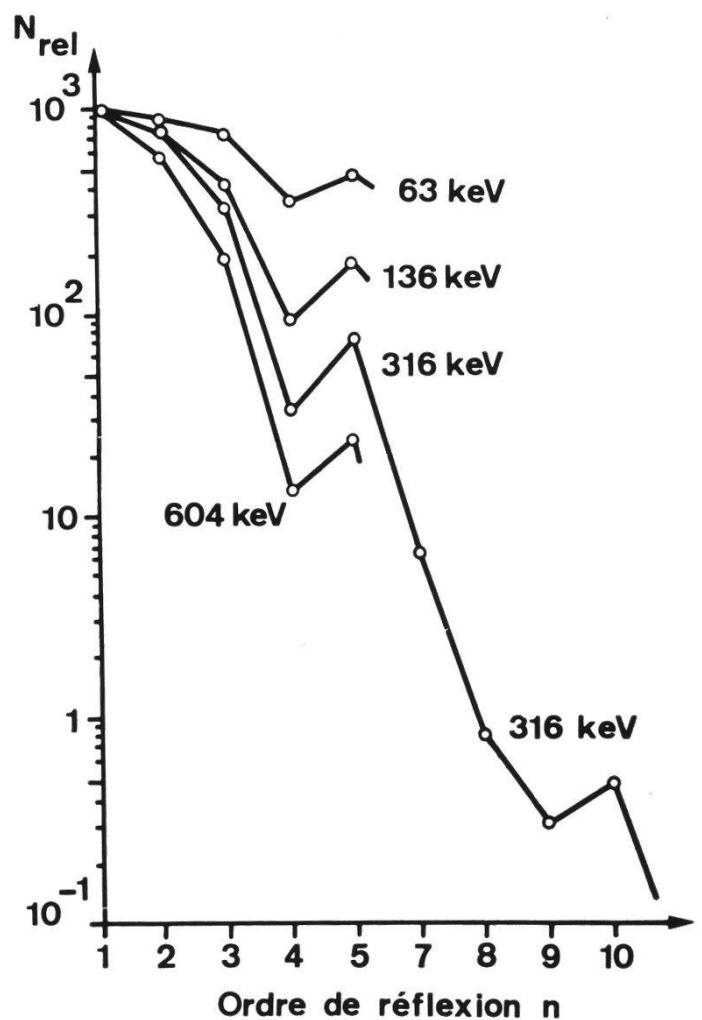


Fig. 2

Fig. 1: Réflectivité intégrale en premier ordre observée en fonction de l'énergie pour les plans (220) du silicium et du germanium et (310) et (110) du quartz. Les résultats sont corrigés pour l'absorption. Tandis que la source avait une largeur apparente de 2 sec d'arc, les largeurs des réflexes étaient de 7,5 sec pour Ge(220), 14,5 sec pour Si(220), 3,0 sec pour Q(110) et 12,5 sec pour Q(310) (BEER, 1974).

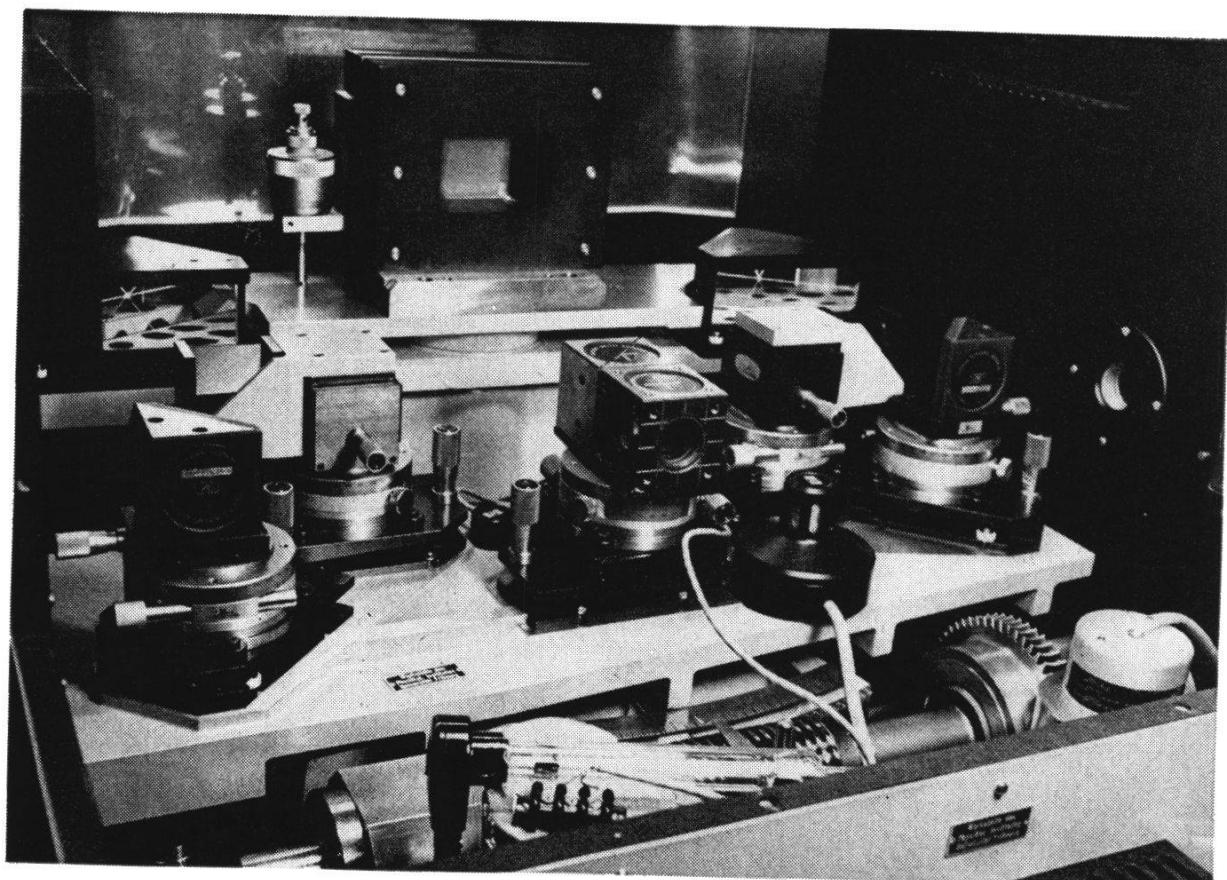
Fig. 2: Comparaison de la réflectivité des plans (110) du quartz en fonction de l'ordre de réflexion pour quelques énergies. La réflectivité en premier ordre est normée à 1000 (BEER, 1974).

dans la désintégration de  $^{192}\text{Ir}$  diffractées sur les plans (110) d'une lame de quartz et ainsi amélioré à nouveau la précision en énergie de ces transitions, comme le montre le tableau 1.

Les mesures de SCHWITZ et KERN (1974) et de BORCHERT et al. (1975b) sur les raies les plus intenses de la désintégration de  $^{169}\text{Yb}$  ont par ailleurs vérifié la loi de Bragg avec une précision de l'ordre de 0,3 ppm.

### 2.3. Méthodes de traitement des données

Pour ne pas commettre d'erreur systématique par suite d'une imprécision sur l'origine des angles, il est usuel de mesurer les réflexes vers la gauche et vers la droite, ou, si l'on préfère, d'ordre positif et négatif. Une des méthodes les plus courantes consiste alors à



*Fig. 3:* Vue de l'interféromètre à laser monté sur le spectromètre à cristal incurvé de Fribourg (SCHWITZ et KERN, 1974).

approximer les profils obtenus par des courbes analytiques et à déterminer par la méthode des moindres carrés l'angle correspondant à chacun des réflexes. Cette méthode se heurte à une difficulté: les cristaux ne sont jamais parfaits; il y a toujours des domaines qui sont légèrement désorientés, ce qui rend les profils asymétriques. Il n'est pas facile de trouver une courbe analytique qui les décrive exactement. Par contre, avec un degré d'exactitude élevé, une paire de réflexes gauche et droit a la même forme. L'angle par lequel il faut translater un des réflexes pour l'amener à se superposer avec le réflexe correspondant vaut précisément le double de l'angle de Bragg  $2\Theta$ . Cette superposition peut se faire graphiquement (MÜLLER et al. 1952). Récemment, KERN et DUBLER (1974) ont montré que ce travail pouvait se faire numériquement et ont donné une formule pour déterminer l'erreur statistique sur la position. Cette méthode a l'avantage d'être objective et de déterminer l'angle de Bragg avec une erreur sensiblement plus petite que par la méthode analytique conventionnelle lorsque la précision statistique des points de mesure est élevée.

Tirant parti de ces nouveaux développements, les groupes de Fribourg et Jülich ont déterminé une série de raies de calibration entre 50 et 1500 keV avec des précisions relatives allant de quelques centièmes d'électron-Volt en bas de l'échelle à 5 eV en haut du domaine.

### 3. Mesure de spectres denses

#### 3.1. Obtention de réflexes étroits

Comme pour les mesures de précision, il est important de choisir des plans cristallins qui ont une réflectivité importante à des ordres élevés: Non seulement on obtient ainsi des énergies précises, particulièrement utiles pour l'application du principe de combinaison de Ritz, mais encore de bonnes résolutions qui permettent de séparer des composantes rapprochées. Ce n'est pourtant pas suffisant. On souhaite également que la valeur  $\Delta\Theta$  des réflexes soit aussi étroite que possible, d'une part afin de pouvoir séparer des multiplets peu intenses qui ne peuvent être observés à des ordres de réflexion élevés, et aussi pour améliorer le rapport signal sur fond.

La largeur d'un réflexe dépend principalement

- de la largeur intrinsèque  $W_i$  caractéristique du cristal non courbé
- de l'élargissement  $\Delta W_e$  dû à la courbure,

les contributions venant de la géométrie de la source étant adaptées à la largeur  $W_i + \Delta W_e$  et la largeur naturelle des transitions  $\gamma$  pouvant être négligée.

La largeur  $W_i$  d'un cristal parfait dépend de l'énergie du photon. Elle est de l'ordre d'une fraction de seconde d'arc. Comme cela a déjà été dit plus haut (chiffre (2.3)), les cristaux réels ne sont pas parfaits et se comportent comme un assemblage de blocs parfaits plus ou moins grands, légèrement désorientés les uns par rapport aux autres. Nous avons constaté que par des traitements thermiques, il était possible d'obtenir une certaine recristallisation et par là une amélioration de la largeur des réflexes et de l'aire utilisable du cristal. On remarque nettement dans l'exemple de la figure 4 la disparition d'une asy-

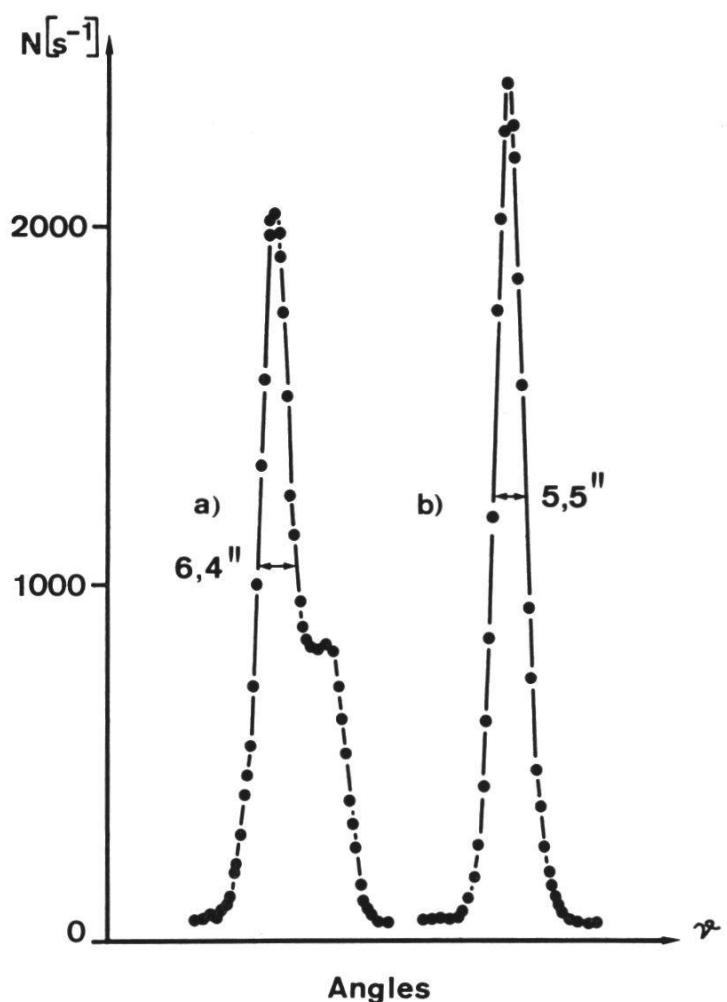


Fig. 4 · Réflexes observés avec un cristal de quartz de  $0,25 \times 10,5 \times 10,5 \text{ cm}^3$ , courbé dans un bloc ayant une fenêtre de  $42 \text{ cm}^2$  a) avant le traitement, b) après le traitement thermique.

métrie due à une région mal orientée du cristal, l'amélioration de la résolution et l'augmentation de hauteur du réflexe après le traitement. Cette technique fait actuellement l'objet d'investigations à Fribourg pour déterminer d'une façon aussi précise que possible la puissance et les limites de cette méthode.

L'élargissement  $\Delta W_c$  provient lui-même de deux effets. Le premier, l'effet SUMBAEV (1957) est dû à une déformation des plans du cristal lorsqu'on le courbe. Il peut être minimisé par une orientation judicieuse de la direction cristalline parallèle au rayon de courbure. Le second vient des imperfections dans la courbure du cristal, imperfections dues en grande partie à celles des blocs de serrage. DU MOND et al. (1947) ont proposé un appareil pour fabriquer de tels blocs. BEER et al. (1973) ont développé une méthode plus simple et plus rapide, qui a l'avantage de garantir non seulement des surfaces cylindriques, mais encore le rayon désiré: Les blocs sont fixés à un pendule, dont la longueur correspond au rayon désiré, et qui oscille au dessus d'une meule que l'on déplace lentement et parallèlement à l'axe de l'oscillation. Un court rodage des pièces concave et convexe l'une contre l'autre suffit à obtenir des blocs de très bonne qualité, mais pas toujours aussi parfaits qu'il serait souhaitable. Des tests et mesures doivent donc encore être effectués. H. R. KOCH a construit un appareil pour la mesure de la flèche en chaque point de la surface, avec lequel il est possible de déterminer des différences par rapport à la surface idéale inférieures à un  $\mu\text{m}$ . Il existe aussi des tests optiques. Il serait important de développer encore ces méthodes de contrôle.

Dans la pratique il est possible d'obtenir des réflexes de quelques secondes d'arc de largeur à mi-hauteur. La meilleure performance est celle de KOCH et al. (1969) qui ont obtenu une résolution effective (c'est-à-dire comprenant l'élargissement dû à l'épaisseur finie de la source) de 1,2 sec. d'arc.

### 3.2. *Expériences ( $n, \gamma$ )*

Comme nous l'avons montré dans l'introduction, les SCI ont un pouvoir de résolution bien supérieur à celui des détecteurs semi-conducteurs pour des énergies de photon allant jusqu'à plusieurs centaines de keV, la limite dépendant de la largeur des réflexes et des ordres de réflexion encore visibles, compte tenu de l'intensité des raies à observer. Les spectres émis à la suite de la capture de

neutrons thermiques sont très denses. Comme les réacteurs nucléaires constituent des sources très intenses de neutrons, le SCI est particulièrement indiqué pour les observer. Peu de groupes ont cependant exécuté de telles expériences, qui sont assez difficiles. Celui de Risø (SCHULT et al., 1964) s'est distingué par sa productivité et la qualité de ses résultats. Réalisée en partie comme test d'automatisation de son SCI, une expérience de ce type a été exécutée par le groupe de Fribourg (RAEMY et al., sous presse) auprès du réacteur SAPHIR à Würenlingen, expérience qui consistait à étudier les réactions  $^{191}\text{Ir}(n,\gamma)$  et  $^{193}\text{Ir}(n,\gamma)$ . La figure 5 montre deux portions de spectre

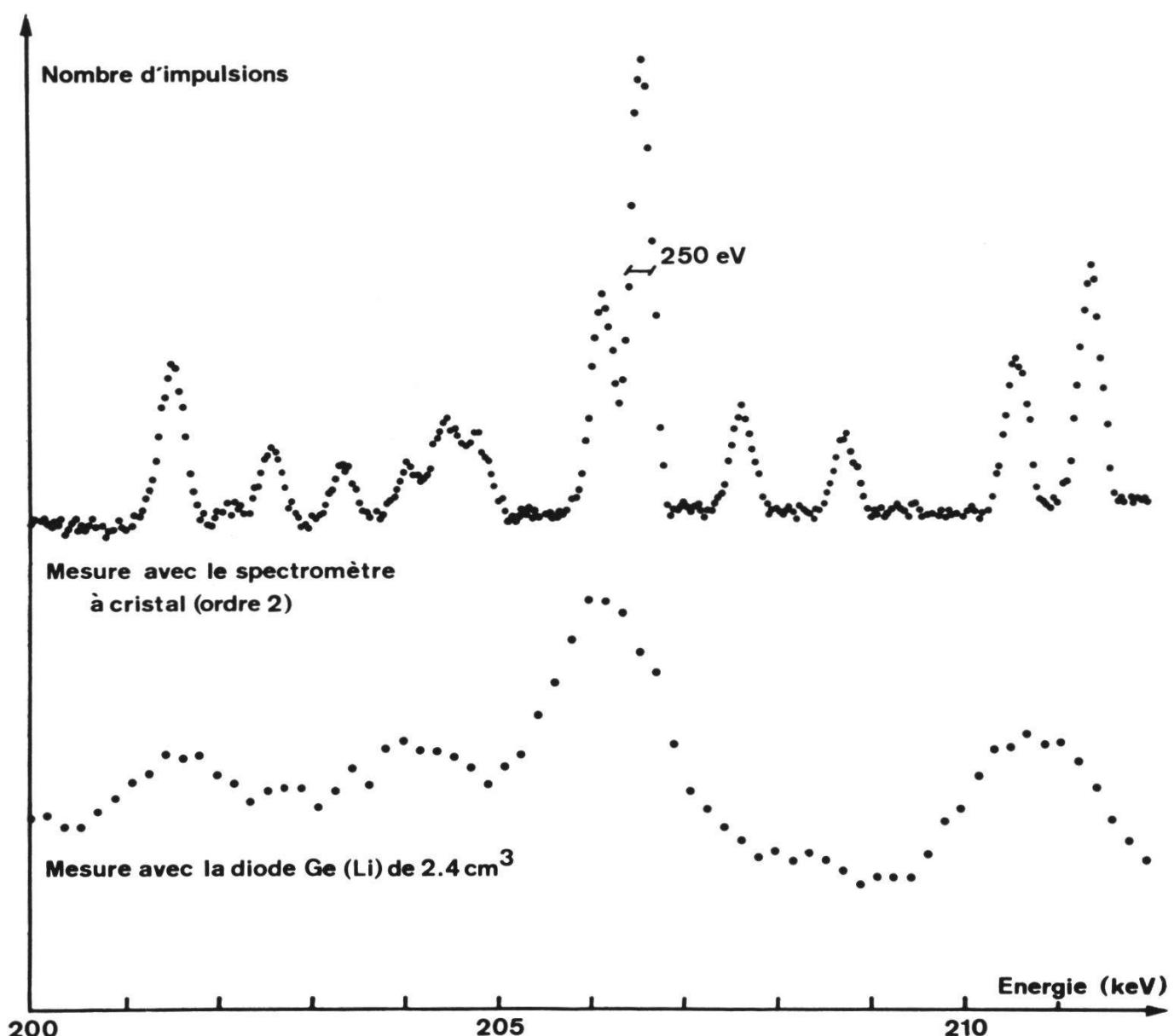


Fig. 5: Portion du spectre de la réaction  $\text{Ir}(n, \gamma)$  observée à l'aide d'une diode Ge(Li) de  $2,4 \text{ cm}^3$  et avec le spectromètre à cristal de Fribourg (RAEMY et al., 1975).

observées par ce groupe, l'un obtenu avec une diode Ge(Li) de très bonne résolution, l'autre à l'aide du SCI. Cet exemple illustre la nécessité de travailler avec des appareils de haute résolution dans ce type d'expérience.

Récemment, la mise au point d'un SCI conventionnel a été achevée à l'Institut Laue-Langevin de Grenoble (DAVIDSON, 1975), tandis qu'un spectromètre double à grand rayon de courbure y est en développement. Grâce au flux particulièrement élevé du réacteur de cet institut, aux bonnes conditions géométriques (distance entre le canal et le cœur du réacteur, dimension de la halle d'expérience) et la mise en œuvre des techniques les plus avancées dans la construction des spectromètres, les performances de ces installations surpassent tout ce qui a été fait jusqu'à ce jour dans ce domaine.

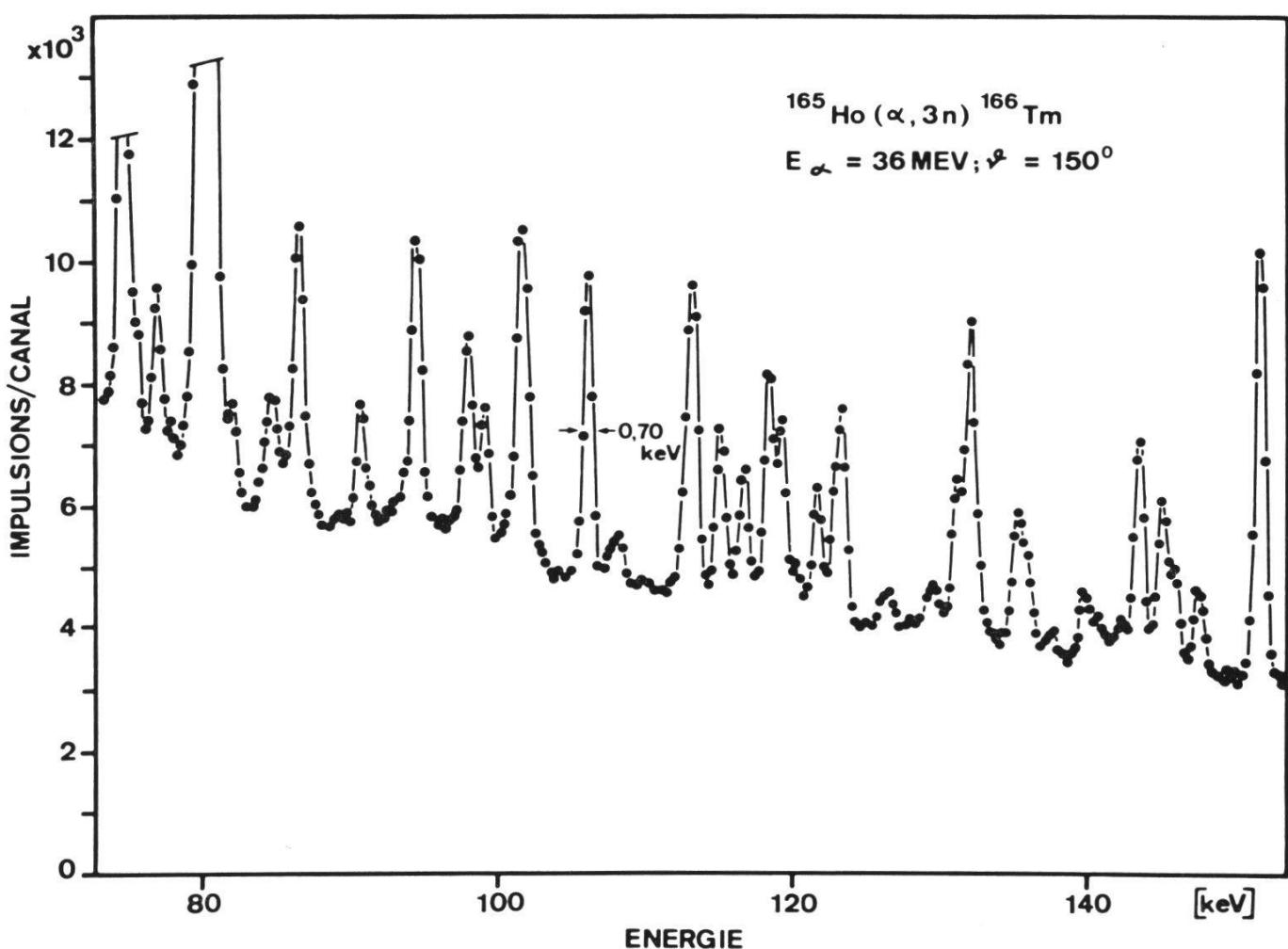


Fig. 6: Portion de spectre émis à la suite de la réaction  $^{165}\text{Ho} (\alpha, 3n) ^{166}\text{Tm}$ .  
(IONESCU, KERN, NORDMANN et OLBRICH, résultats non publiés.)

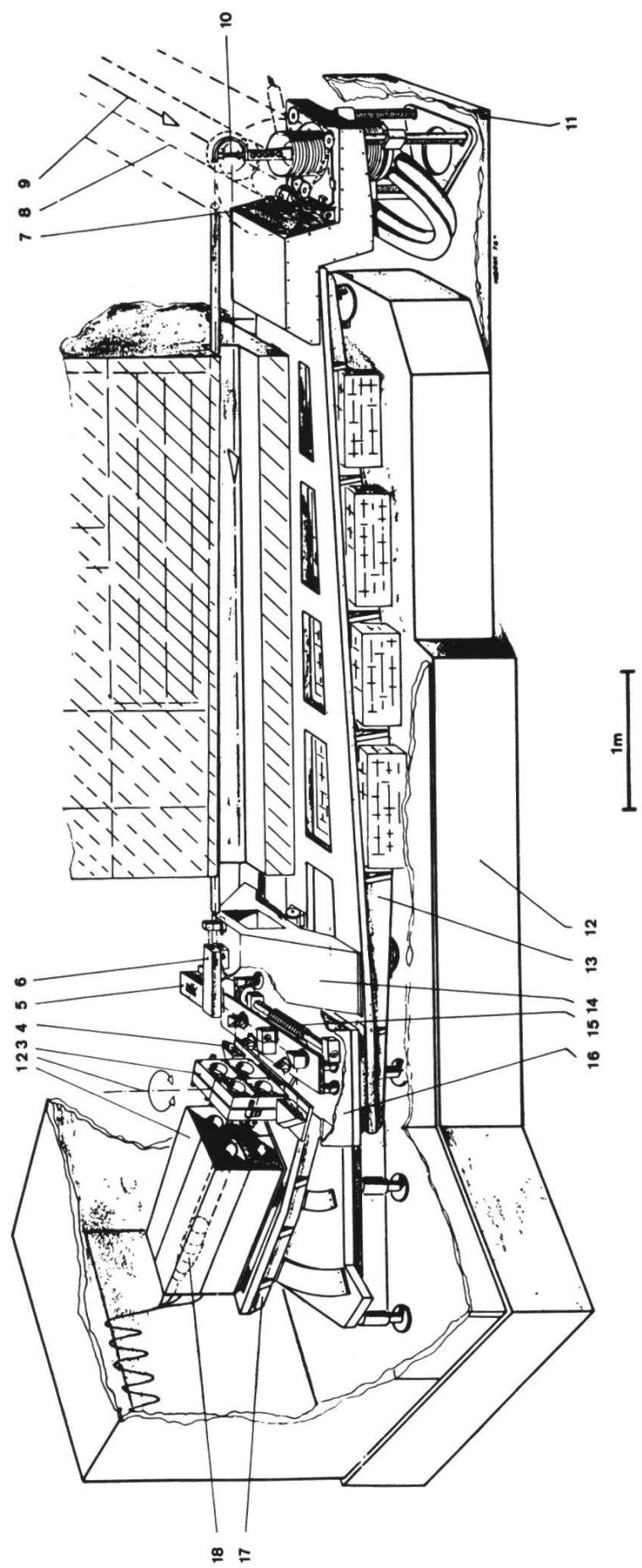
## 4. Mesure de rayons X d'atomes exotiques

### 3.3. Autres expériences en ligne

Du fait de la faible luminosité de l'appareil, le relevé d'un spectre complet avec un SCI est assez long. Vu le prix d'exploitation des accélérateurs, peu d'expériences auprès de telles machines ont été réalisées avec des SCI. KNOWLES (1965) en a fait l'inventaire en 1965. Comme expérience récente, on mentionnera celle de JETT et al. (1974). Dans tous ces travaux, seules quelques lignes particulièrement intéressantes ont été mesurées. Il y a cependant des réactions où les spectres produits sont si denses qu'ils ne peuvent guère être analysés convenablement avec des diodes Ge(Li). Ce sont par exemple les réactions du type  $(\alpha, xn\gamma)$ , lorsque le noyau final a un nombre impair de neutrons et de protons. La figure 6 montre une portion du spectre émis à la suite de la réaction  $^{165}\text{Ho}(\alpha, 3n)^{166}\text{Tm}$  (IONESCU, KERN, NORDMANN et OLBRICH, résultats non publiés), observé à l'aide d'une diode Ge(Li) de  $3 \text{ cm}^3$  ayant une résolution de 700 eV à 100 keV. Ce spectre est extrêmement dense et il est évident qu'un grand nombre de transitions ne sont pas résolues. Le groupe de Fribourg étudie la possibilité d'observer de tels spectres avec un SCI.

### 4.1. Conditions d'expérience

Au cours des dernières années, trois nouveaux accélérateurs ont été construits dans le monde auquel on a donné le nom de «fabriques de mésons». L'une de celles-ci, le SIN, qui est située à Villigen dans le canton d'Argovie, devrait, lorsque l'accélérateur aura atteint l'intensité maximale prévue, fournir des densités d'absorption de muons environ trois ordres de grandeur plus élevées que celle disponible au CERN avant l'exécution du programme d'amélioration. Tandis que l'observation de rayons X émis par des atomes mésiques ne pouvait avoir lieu au CERN qu'avec des détecteurs Ge(Li), il était raisonnable de penser que certaines expériences de ce type pourraient être réalisées au SIN avec un SCI. Les données publiées dans le travail de SHAFER (1967), où est décrite la seule expérience dans laquelle des rayons X d'un atome  $\pi$ -mésique aient jamais été observés, à utilement servi de référence pour la préparation de l'utilisation du SCI de Fribourg au SIN.



Il y a plusieurs arguments qui peuvent faire pencher pour le choix d'un spectromètre CAUCHOIS ou DU MOND. La décision s'est finalement portée sur le type DU MOND qui utilise des cibles de beaucoup plus petit volume: Non seulement il est ainsi plus facile de travailler avec des isotopes séparés, mais on peut les placer dans le champ magnétique intense du canal supraconducteur de mésons et obtenir des densités d'absorption de pions ou de muons beaucoup plus élevées qu'avec une grande cible. Parmi les inconvénients, on peut noter la nécessité d'utiliser des détecteurs de plus grand volume (donc avec un bruit de fond plus élevé) et de devoir surveiller la dérive de la cible. Pour limiter le plus possible ce dernier effet, le spectromètre et le porte-cible sont montés sur un châssis en fonte qui repose lui-même sur une dalle en béton, comme le montre le schéma du dispositif expérimental représenté dans la fig. 7. Un système de mesure de la dérive par des moyens optiques est en cours de développement.



*Fig. 7:* Vue schématique du dispositif expérimental pour l'utilisation du spectromètre à cristal de Fribourg auprès du canal de muons du SIN (collaboration Université de Fribourg – Laboratoire des Hautes Energies de l'EPF-Z).

1. Collimateur
2. Axe de cristal
3. Bloc mosaïque pour 4 cristaux. Surface utile par cristal:  $27 \text{ cm}^2$
4. Réflecteur coin-de-cube de l'interféromètre
5. Laser de l'interféromètre
6. Laser du système de contrôle de dérive de la cible.
7. Mécanisme pour ajuster l'orientation des cibles
8. Canal de muons
9. Direction du faisceau de muons
10. Cible
11. Enceinte thermostatisée à  $\pm 0,1 \text{ }^\circ\text{C}$
12. Base en béton, amovible sur coussin d'air
13. Châssis en fonte
14. Support du système de contrôle de dérive de la cible
15. Entraînement du cristal
16. Enceinte thermostatisée à  $\pm 0,02 \text{ }^\circ\text{C}$  pour le cristal et l'interféromètre
17. Table tournante du collimateur
18. Détecteur.

Vu l'ampleur des problèmes expérimentaux à résoudre, les expériences sont exécutées par une collaboration Laboratoire des Hautes Energies de l'EPF-Z (groupe du professeur H. J. LEISI) – Université de Fribourg.

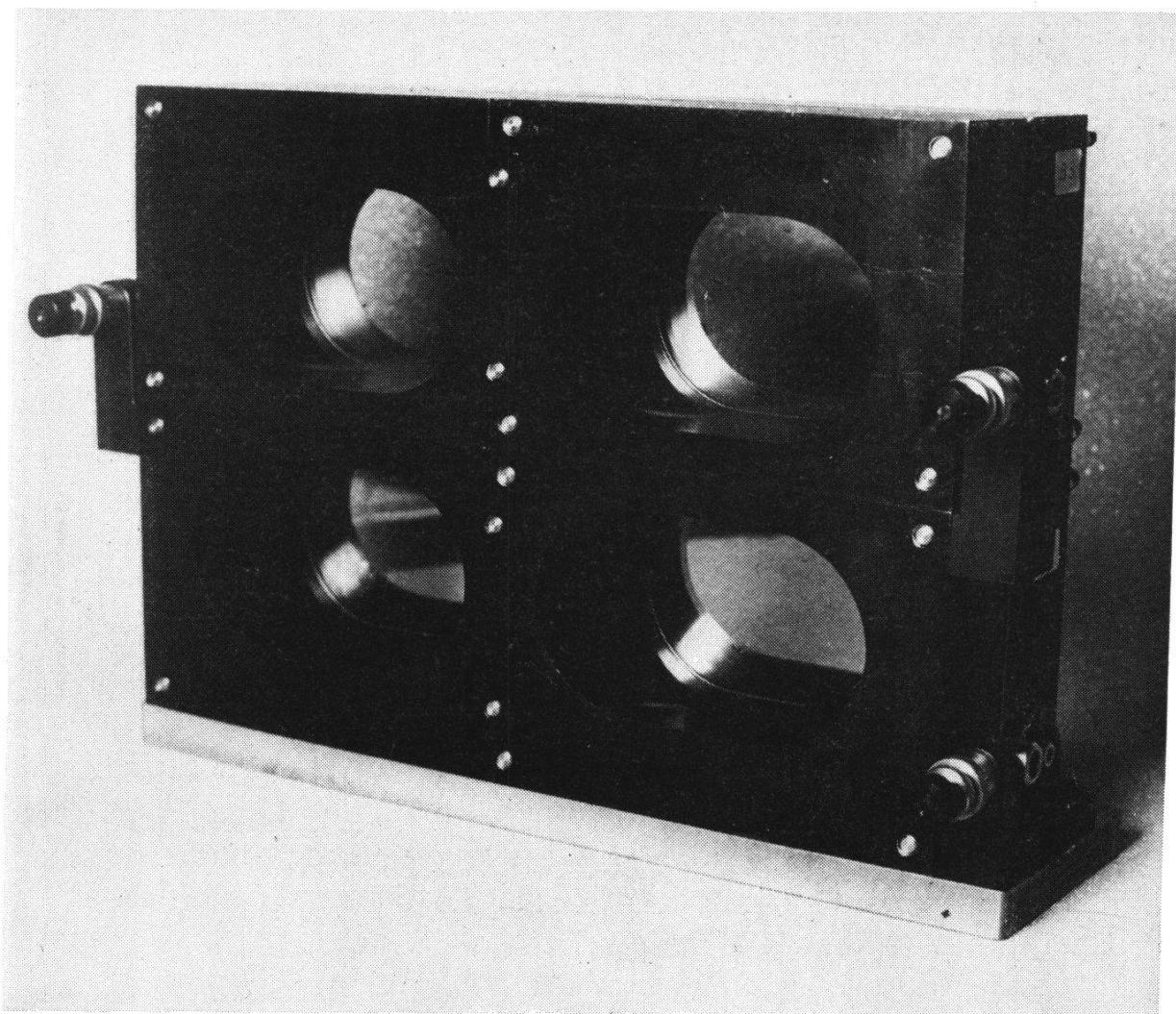
D'autres chercheurs se proposent d'utiliser un spectromètre du type CAUCHOIS auprès de la fabrique de mésons de Los Alamos. HENRIKSON et BOEHM (1974) ont montré que la luminosité de cet appareil pouvait être augmentée considérablement en utilisant un détecteur dont la courbure compense les aberrations dues à sa hauteur; il est ainsi possible d'utiliser un détecteur plusieurs fois plus grand (long) que s'il était droit, sans perte de résolution.

#### *4.2. Problèmes de luminosité et de bruit de fond*

En dépit du nombre relativement élevé de muons produits par l'accélérateur du SIN, il est facile de prévoir que le taux de comptage que l'on peut attendre dans le détecteur du SCI doit être extrêmement faible. Il est donc nécessaire de prendre toutes les mesures possibles pour diminuer le fond et pour augmenter la luminosité de l'appareil.

a) Une réduction du fond peut évidemment être obtenue par l'utilisation de blindages. Toutes les mesures possibles, compatibles avec la place à disposition ont été prises afin de protéger le système aussi bien contre le rayonnement naturel que contre celui dû à l'opération de l'accélérateur lui-même. L'influence du fond résiduel peut encore ensuite être abaissée par le choix de détecteurs appropriés. L'utilisation de détecteurs Ge(Li) de grande surface a été envisagée. Les difficultés techniques et le prix se sont avérés considérables, de sorte qu'on y a renoncé. Il eut aussi été possible d'utiliser des cristaux de NaI(Tl) avec un grand scintillateur en anti-coïncidence, pour obtenir un effet anti-Compton. Les détecteurs «Phoswich» développés récemment par Harshaw, permettent d'obtenir le même résultat d'une manière très élégante et ont été choisis. Ces scintillateurs sont constitués de deux couches, l'une de NaI et l'autre de CsI. Par une discrimination sur la forme des impulsions, il est possible de trier les événements qui ont été détectés dans le NaI seulement. On a obtenu ainsi un bruit de 0,04 c/s lors de la mesure de rayons X d'atomes  $\mu$ -mésiques d'environ 50 keV, taux total dans les quatre détecteurs (voir plus loin).

b) Une bonne luminosité peut être obtenue par l'utilisation de grandes surfaces utiles de réfraction et par le choix de plans cristallins ayant une forte réflectivité. Les cristaux de grande dimension et de perfection suffisante sont rares et onéreux. Il est particulièrement difficile d'obtenir une orientation uniforme des plans cristallins sur toute la surface et donc des réflexes très étroits avec de tels cristaux. Comme solution, on peut envisager d'utiliser une mosaïque de blocs dont l'orientation réciproque peut être ajustée. Un premier essai avec un bloc quadruple (voir figure 8) s'est avéré très concluant: une résolution de 12 sec. d'arc a été obtenue avec quatre lames de



*Fig. 8:* Bloc mosaïque permettant de courber 4 cristaux. Chacun des éléments peut être orienté avec une précision de 1 sec. d'arc par rapport au bloc de référence (l'un des quatre) au moyen d'une vis micrométrique.

quartz de  $3 \times 100 \times 100$  mm<sup>3</sup> orientées pour utiliser les plans (310) et qui individuellement avaient une résolution d'environ 11 sec. d'arc (mesurée avec la même source). La surface utile était de 108 cm<sup>2</sup>.

Comme nous l'avons vu plus haut, le silicium présente une réflectivité plus grande que celle du quartz (cf. fig. 1). Il n'est cependant pas possible pour le moment d'obtenir des cristaux de très grande dimension. La technique des blocs multiples ouvre ici des perspectives très intéressantes. Un phénomène tout nouveau, découvert à Fribourg, est particulièrement excitant et prometteur. Il a été constaté que la réflectivité du quartz pouvait être augmentée dans des proportions importantes en appliquant au cristal un champ électrique. La figure 9 démontre l'importance de cet accroissement, observé (DOUSSE et KERN, résultats non publiés) sur une lame de 2,5 mm d'épaisseur. Une étude détaillée du phénomène est actuellement en cours pour obtenir une description plus complète du phénomène et pour l'interpréter.

#### 4.3. Premières observations de rayons X d'atomes $\mu$ -mésiques

Les premières expériences avec le SCI de Fribourg auprès du canal supraconducteur de muons du SIN ont pour but l'observation des transitions 3d–2p dans les atomes de <sup>24</sup>Mg, <sup>28</sup>Si, <sup>31</sup>P et <sup>32</sup>S. On peut montrer que lorsque  $10 < Z < 20$ , les corrections d'énergie dues aux dimensions finies du noyau, à l'effet d'écran des électrons et à la polarisation du noyau sont petites par rapport à celles dues à la polarisation du vide. Une mesure de précision doit permettre de déterminer la grandeur de ce dernier effet et de tester si elle est en accord avec les calculs de l'électrodynamique quantique (QED). Un désaccord éventuel pourrait signifier la présence d'une interaction anomale entre le muon et les nucléons et établir l'existence d'un méson  $\Phi$ , postulé par JACKIW et WEINBERG (1972), nécessaire pour unifier les théories des interactions faibles et électromagnétiques.

A l'aide du dispositif expérimental décrit plus haut (fig. 7), il a été possible d'observer pour la première fois des rayons X d'atomes  $\mu$ -mésiques avec un SCI. La figure 10 montre une observation de la ligne  $3d_{5/2} - 2p_{3/2}$  dans le magnésium. L'énergie du rayon X est de 56,22 keV. Une évaluation des premiers résultats obtenus sur le silicium (EICHLER et al., 1976) donne  $270,6 \pm 2,3$  eV pour les correc-

tions de l'électrodynamique quantique, en accord avec la valeur théorique de  $272,0 \pm 0,5$  eV. D'autres résultats récents sur l'hélium (BERTIN et al., 1975) et sur des noyaux lourds (TAUSCHER et al., 1975) démontrent également que les énergies des rayons X des atomes muoniques ont bien les valeurs prévues.

## 5. Conclusion

Depuis la parution en 1965 de l'article de KNOWLES (1965) sur les spectromètres à cristal, un certain nombre de progrès significatifs ont été réalisés, tant dans la mesure des angles, par l'introduction d'interféromètres à laser, que dans le choix et la mise en œuvre des cristaux. L'application de ces méthodes à la détermination de standards d'énergie et à l'observation de spectres  $(n,\gamma)$  a donné des résul-

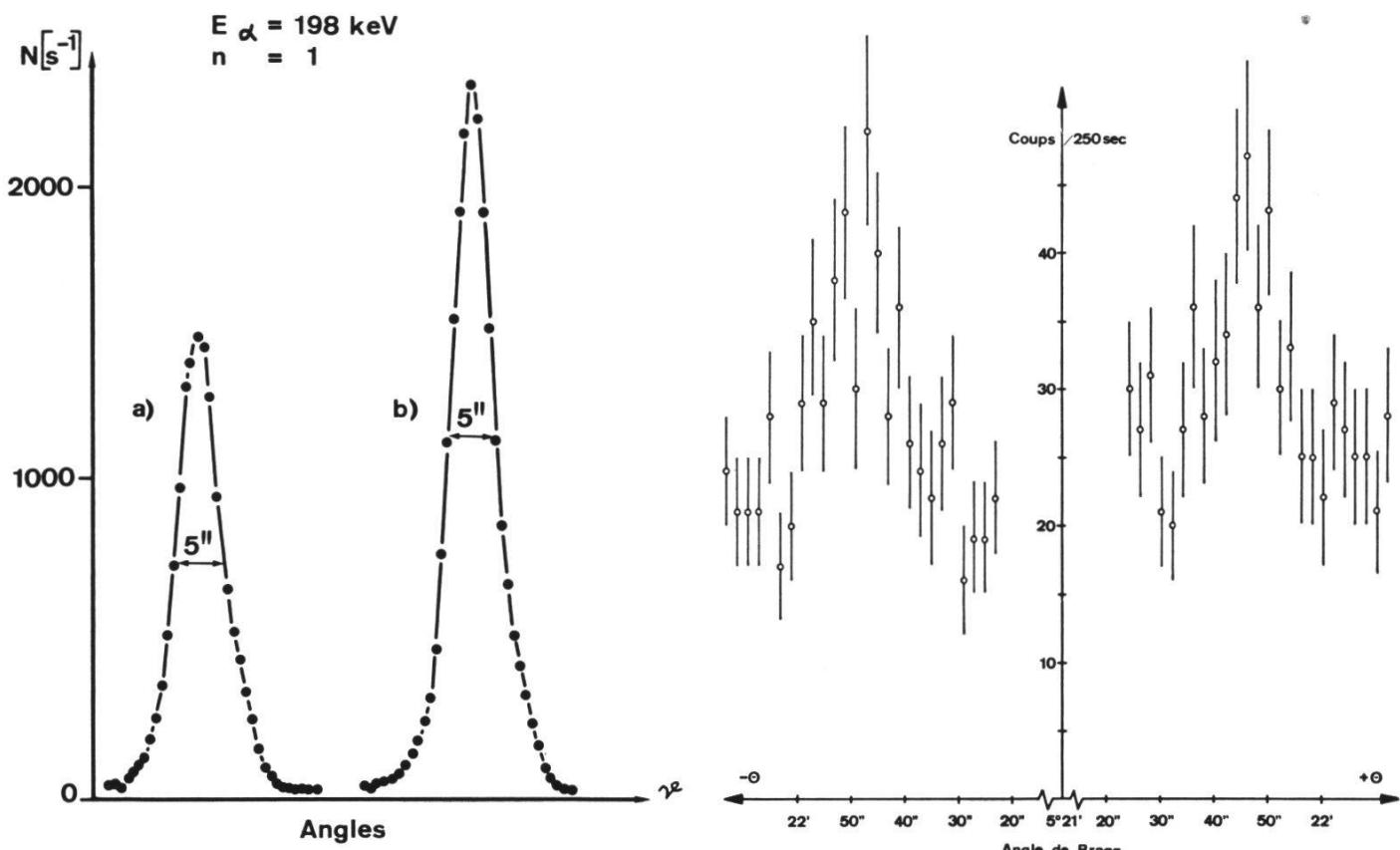


Fig. 9: Accroissement de l'intensité d'un réflexe d'une lame de quartz soumise à l'action d'un champ électrique: a) réflexe avec champ nul, b) réflexe avec un champ de 2000 V/mm.

Fig. 10: Transition  $3d_{5/2} \rightarrow 2p_{3/2}$  dans le  $\mu^{-24}\text{Mg}$  observée avec le spectro mètre à cristal au SIN. Durée de la mesure: 6 heures (EICHLER et al., 1976).

tats remarquables. Pour la première fois des rayons X d'atomes muoniques ont récemment pu être observés. Plusieurs développements encore en cours, tels que la technique des blocs multiples ou l'utilisation d'un nouvel effet pour augmenter la réflectivité du quartz, sont prometteurs et permettent d'entrevoir un emploi toujours plus large pour ce type d'instrument.

### **Summary**

Several important progresses give a new impetus to crystal diffraction spectrometry: development of laser interferometers for more precise angle measurements, use of crystal planes having a good reflecting power in higher order, availability of new high quality crystals, for instance silicon, improvement of the reflex widths by thermal processing of the crystals, simultaneous use of several reflecting crystals, finally, discovery of a new effect which increases the reflectivity of quartz. As a consequence more precise  $\gamma$ -energy standards are determined, complicated spectra, like those from  $(n, \gamma)$  reactions, can be resolved. For the first time X-rays from muonic atoms could be observed with a curved crystal spectrometer.

### **Zusammenfassung**

Einige wichtige Fortschritte geben neue Impulse zur Kristalldiffraktions-Spektroskopie: Entwicklung von Laser-Interferometern, die genauere Winkelmessungen gestatten, Benützung von Kristallebenen, die eine gute Reflektivität in höheren Ordnungen aufweisen, Verfügbarkeit von neuen Kristallen hoher Qualität wie Silikon, Verbesserung der Reflexbreiten durch Kristallwärmebehandlung, Konstruktion von Mehrkristallblöcken, schließlich Entdeckung eines neuen Effektes, durch den die Quarzreflektivität erhöht wird. Somit lassen sich neue genauere Gamma-Energie Standards bestimmen, und komplizierte Spektren, wie sie z. B. bei der  $(n, \gamma)$  Reaktion auftreten, können aufgelöst werden. Zum ersten Mal konnten auch myonische Röntgenstrahlen mit einem Kristallspektrometer beobachtet werden.

### **Résumé**

Des progrès importants donnent un nouvel élan à la spectrométrie par diffraction cristalline: développement d'interféromètres à laser permettant des mesures angulaires plus précises, utilisation de plans cristallins ayant une bonne réflectivité dans les ordres supérieurs, disponibilité de nouveaux cristaux de haute qualité, par exemple de silicium, diminution de la largeur des réflexes par des traitements thermiques des cristaux, emploi de blocs de serrage multiples et découverte d'un nouvel effet qui augmente la réflectivité du quartz. En conséquence, des standards d'énergie plus précis sont déterminés, des spectres très denses, comme ceux qui sont émis à la suite de réactions de capture de neutrons, peuvent être résolus. Pour la première fois des rayons X d'atomes muoniques ont pu être observés avec un spectromètre à cristal incurvé.

## Références

- BECKMANN, O., BERGVALL, P., et AXELSSON, B.: A precision curved crystal X-ray and  $\gamma$ -ray spectrometer. *Ark. Fys.* **14**, 419–437 (1958).
- BEER, W., KERN, J., et PILLER, O.: Biegevorrichtungen für fokussierende Kristallspektrometer. *Nucl. Inst. Meth.* **107**, 79–83 (1973).
- BEER, W. et KERN, J.: The precision determination of some  $\gamma$ -ray energies using the Fribourg curved-crystal spectrometer. *Nucl. Instr. Meth.* **117**, 183–187 (1974).
- BEER, W.: Gamma-Reflektivität von Kristallen. Rapport IPF-SP-004 (1974).
- BERGVALL, P.: Precision measurements of gamma energies and intensities by crystal diffraction. *Ark. Fys.* **17**, 125–147 (1960).
- BERTIN, A. et al.: Measurement of the  $2P_{3/2} - S_{1/2}$  energy difference in the  $(\mu^{-4}\text{He})^+$  muonic ion by means of a tunable infrared dye-laser. *Phys. Lett.* **55B**, 411–414 (1975).
- BORCHERT, G. L., SCHECK, W., et SCHULT, O. W. B.: Curved crystal spectrometer for precise energy measurements of gamma-rays from 30 to 1500 keV. *Nucl. Instr. Meth.* **124**, 107–117 (1975a).
- BORCHERT, G. L., SCHECK, W., et WIEDER, K. P.: Precision Measurement of the  $\gamma$ -ray energies from radioactive decay of  $^{51}\text{Cr}$ ,  $^{169}\text{Yb}$ ,  $^{170}\text{Tm}$ ,  $^{192}\text{Ir}$  and  $^{203}\text{Hg}$ . *Z. Naturforsch.* **30a**, 274–276 (1975b).
- CAUCHOIS, Y.: Extension de la spectrographie des rayons X. Spectrographie à focalisation par cristal courbé. *Ann. de Phys.* 11<sup>e</sup> série, **1**, 215–266 (1934).
- DAVIDSON, W. F.: The curved crystal diffraction spectrometers GAMS 1, 2 and 3. ILL Report **75A186**, 10–20 (1975).
- DUMOND, J. W. M.: A high resolving power, curved-crystal focusing spectrometer for short-length X-rays and gamma-rays. *Rev. Sci. Instr.* **18**, 626–638 (1947).
- DUMOND, J. W. M., LIND, D. A., et COHEN, E. R.: A precision method of generating circular cylindrical surfaces of large radius of curvature for use in the curved-crystal spectrometer. *Rev. Sci. Instr.* **18**, 617–626 (1947).
- EICHLER, R., AAS, B., BEER, W., BELTRAMI, I., EBERSOLD, P., von LEDEBUR, T., LEISI, H. J., SAPP, W. W., DOUSSE, J.-CL., KERN, J., RAEMY, A., et SCHWITZ, W.: Kristallspektrometermessung des  $3d_{5/2} \rightarrow 2p_{3/2}$ -Röntgenübergangs in myonischem  $^{28}\text{Si}$ . Exposé à la réunion de printemps de la Société Suisse de Physique (avril 1976). Sous presse.
- HENRIKSON, H. E., et BOEHM, F.: A two meter curved-crystal spectrometer with improved efficiency for use at LAMPF. *Nucl. Instr. Meth.* **121**, 269–273 (1974).
- JACKIW, R., et WEINBERG, S.: Weak-interaction corrections to the muon magnetic moment and to muonic-atom energy levels. *Phys. Rev. D5*, 2396–2398 (1972).
- JETT, J. H., KING, N. S. P., LIND, D. A., et HENNING, P.: A diffraction spectrometer for studies of particle excited radiative transitions. *Nucl. Instr. Meth.* **114**, 301–312 (1974).

- KERN, J., et DUBLER, T.: Numerical reference line method in crystal diffraction spectrometry. Proceedings of the 2nd. Internat. Sympos. on Neutron  $\gamma$ -Ray Spectroscopy, Petten, 702–705 (1974).
- KNOWLES, J. W.: Crystal diffraction spectroscopy of nuclear  $\gamma$ -rays. Dans «Alpha-, Beta- and Gamma-Ray Spectroscopy» (édité par K. Siegbahn), North Holland Publ., Amsterdam, 203–243 (1965).
- KOCH, H. R., BAADER, H. A., BREITIG, D., MUHLBAUER, K., GRUBER, U., MAIER, B. P. K., et SCHULT, O. W. B.: The automatization of the curved spectrometer at Risö. Int. Conf. on Neutron Capture  $\gamma$ -Ray Spectroscopy at Studsvik, 65–74 (1969).
- MÜLLER, D. E., HOYT, H. C., KLEIN, D. J., et DUMOND, J. W. M.: Precision measurements of nuclear  $\gamma$ -ray wavelenghts on Ir<sup>192</sup>, Ta<sup>182</sup> RaTh, Rn, W<sup>187</sup>, Cs<sup>137</sup>, Au<sup>195</sup> and annihilation radiation. Phys. Rev. 88, 775–793 (1952).
- PILLER, O., BEER, W., et KERN, J.: Das fokussierende Kristallspektrometer der Universität Fribourg. Nucl. Instr. Meth. 107, 61–77 (1973).
- RAEMY, A., DOUSSE, J.-CL., KERN, J., et SCHWITZ, W.: Mesure des réactions <sup>191</sup>Ir(n,  $\gamma$ )<sup>192</sup>Ir et <sup>193</sup>Ir(n,  $\gamma$ )<sup>194</sup>Ir au moyen de plusieurs spectromètres, Rapport IPF-SP-006 (1975).
- RAEMY, A., BEER, W., DOUSSE, J.-CL., EICHLER, R., KERN, J., von LEDEBUR, T., et SCHWITZ, W.: Dispositif pour la mesure de réactions (n,  $\gamma$ ) à l'aide d'un spectromètre à cristal incurvé. Helv. Phys. Acta (sous presse).
- SCHWITZ, W., et KERN J.: Large angle optical interferometer for a crystal spectrometer. Proceedings of the 2nd Internat. Sympos. on Neutron  $\gamma$ -Ray Spectroscopy, Petten, 697–701 (1974) et résultats non publiés.
- SHAFER, R. E.: Pion-mass measurement by crystal diffraction of mesonic X-rays. Phys. Rev. 163, 1451–1461 (1967).
- SCHULT, O. W. B., GRUBER, U., MAIER, B. P., et STANEK, F.: Energieniveaus und Gammaübergänge in Dy<sup>164</sup>. Z. Phys. 180, 298–316 (1964).
- SESSI, E. J., HENRIKSON, H., BOEHM, F., et DUMOND, J. W. M.: A germanium bent-crystal monochromator for nuclear spectroscopy. Nucl. Instr. Meth. 16, 17–28 (1962).
- SUMBAEV, O. I.: Reflection of gamma-rays from bent quartz plates. Soviet. Phys. JEPT 5, 1042–1044 (1957).
- TAUSCHER, L., BACKENSTOSS, G., FRANSSON, K., KOCH, H., NILSSON, A., et DE RAEDT, J.: Test of quantum electrodynamics by muonic atoms: an experimental contribution. Phys. Rev. Lett. 35, 410–412 (1975).