(19) RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

INSTITUT NATIONAL
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE

PARIS

(11) N° de publication : **2 552 887**
(à n'utiliser que pour les commandes de reproduction)

(21) N° d'enregistrement national : **84 13979**

(51) Int Cl⁴ : G 01 T 3/06.

(12) DEMANDE DE BREVET D'INVENTION A1

(22) Date de dépôt : 12 septembre 1984.

(30) Priorité : DE, 30 septembre 1983, n° P 33 35 512.6.

(43) Date de la mise à disposition du public de la demande : BOPI « Brevets » n° 14 du 5 avril 1985.

(60) Références à d'autres documents nationaux apparentés :

(71) Demandeur(s) : *Société dite : KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE GMBH.* — DE.

(72) Inventeur(s) : Karlheinz Cerff.

(73) Titulaire(s) :

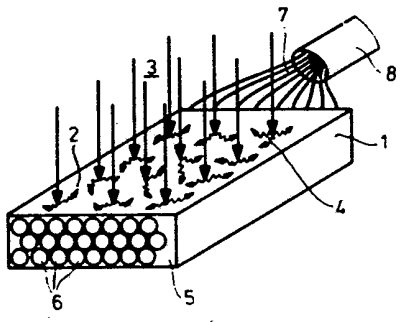
(74) Mandataire(s) : Cabinet Bert, de Keravenant et Herrburger.

(54) Système de détection des neutrons et/ou des rayons gamma.

(57) *a.* Système de détection des neutrons et/ou des rayons gamma comportant une grande surface de réception du rayonnement à détecter qui produit des photons dans la matière produisant une scintillation, photons qui sont captés dans les fibres optiques formant le conducteur.

b. Système caractérisé en ce que les fibres optiques 6 sont étendues sur toute la surface de réception 2 dans la matière produisant les scintillations 5, que le captage de la lumière 4 s'opère sur toute la surface enveloppante des fibres optiques 6 et que les fibres optiques conductrices 6 sont établies de façon à être anisotropes.

c. Ce système permet de réduire notablement les pertes par absorption de lumière dans des systèmes détecteurs étendus.



FR 2 552 887 - A1

Vente des fascicules à l'IMPRIMERIE NATIONALE, 27, rue de la Convention — 75732 PARIS CEDEX 15

"Système de détection des neutrons et/ou des rayons gamma".

L'invention concerne un système de détection des neutrons et/ou des rayons gamma, présentant une grande surface de réception pour l'irradiation à détecter qui produit dans la matière de scintillation des photons qui seront captés dans un conducteur de lumière à fibres optiques. En particulier, l'invention concerne un système pour un sas à chambre rotative.

La mise en service de la détection des neutrons est prévue dans les sas destinés au personnel, comme disposition complémentaire de la surveillance des matières nucléaires. Elle augmente la probabilité de la découverte d'un transfert non autorisé de matière nucléaire hors des zones où l'on pratique un bilan des matières, car les mesures de protection du côté de la soustraction sont beaucoup plus difficiles que dans la détection des rayons γ.

ZnS(Ag) est une des substances dont la scintillation est la plus importante parmi celles dont on dispose pour des fins de détection. La condition nécessaire pour la construction d'un détecteur efficace est aussi toutefois la collecte et la transmission optimales du courant lumineux qui sera produit à un photomultiplicateur. Jusqu'ici, on a utilisé des collecteurs de lumière dont la construction était la suivante.

On pose directement sur le PTM (PTM pouvant signifier Photomultiplicateur) un disque détecteur pour fenêtre d'entrée de PTM suivant K.H. Sun, P.R. Malmberg,

F.A. Pecjak, Scintillation Counters, Nucleonis (Juillet 1956), ce qui a l'avantage que le parcours de la lumière transmise est plus court et que, par suite, les pertes sont plus faibles. Le défaut réside dans la limitation du diamètre de la fenêtre d'entrée du photomultiplicateur utilisé. Une autre construction, W.S. Emmerich, A Fast Neutron Szintillator, Rev. Scien. Inst., Vol. 25, No. 1, Jan. 1954, assure une multiplication par cinq de la surface utilisable au moyen de plaques conductrices de la lumière intégrées dans le scintillateur, toutefois, ici aussi, il n'est possible de construire que de petites unités qui, dans un sas à chambre rotative par exemple, embrassent un angle trop faible de l'espace.

Les inconvénients des conducteurs de lumière isotropes actuels sont :

- les pertes par dispersion qui se produisent lors du contact optique direct avec la matière optiquement plus dense du scintillateur,
- les pertes par affaiblissement (absorption de lumière sur le parcours de transmission nécessaire),
- rapports défavorables des surfaces entre la section du conducteur de lumière (soit la surface de sortie) et la surface collectrice.

Le rendement de sortie des gros cristaux de scintillateur se situe, en fonction de l'indice de réfraction dans un ordre de grandeur de 5 à 11 %.

Ces valeurs données pour le rendement d'entrée et de transmission des conducteurs de lumière isotropes (surface limite par rapport à l'air, matière optiquement moins dense), montrent que pour des scintillateurs à grande surface, des systèmes optiques doivent pour convenir satisfaire aux exigences suivantes :

- découplage de la source lumineuse et du conducteur de lumière par interposition d'une couche optique intermédiaire, présentant un indice de réfraction qui soit plus petit que celui du scintillateur ($n \approx 1{,}5$) pour éviter

les pertes par dispersion sur la surface limite.

- captage d'une intensité lumineuse suffisante pour surmonter la distance de la transmission jusqu'au photomultiplicateur.

Le mode de captage de la lumière par la face frontale d'une fibre optique trouve déjà son utilisation pour la construction d'amplificateurs de lumière résiduelle, W.B. Allan, Fibre Optics, Theory and Practice, Plenum Press, LOndon, N.Y. 1973, et les écrans de projection de grand format, lors de la déviation du parcours de la lumière nécessaire pour l'utilisation du détecteur. L'inconvénient est la consommation importante de fibres, et la faiblesse du facteur de réduction obtenu pour le rapport surface d'entrée/ surface de sortie. Ces inconvénients amènent à prendre en considération un mode de captage de la lumière qui n'est pas usité jusqu'ici.

Le problème qui est à la base de l'invention consiste alors à réaliser un système de détection à grande surface du type mentionné en commençant de telle façon que l'on puisse utiliser une substance pour scintillateur efficace au point de vue de la physique nucléaire et tirer parti aussi des avantages des fibres pour la transmission de la lumière aux systèmes de détection.

A cet effet, l'invention propose un système caractérisé en ce que les fibres optiques sont étendues sur toute la surface de réception dans la matière produisant les scintillations, que le captage de la lumière s'opère sur toute la surface enveloppante des fibres optiques et que les fibres optiques conductrices sont établies de façon à être anisotropes.

On trouvera décrits dans ce qui suit, d'autres perfectionnements avantageux de l'invention.

Les avantages spéciaux de cette solution nouvelle résident dans l'utilisation de systèmes de conducteurs lumineux anisotropes, qui provoquent, contrairement aux

systèmes optiquement isotropes, une séparation des fonctions collecteur de lumière-conducteur de lumière. Par ce moyen, les pertes par absorption de lumière sont réduites dans une large mesure dans des systèmes détecteurs étendus dans l'espace. L'intensité lumineuse captée sur la surface de la fibre optique conductrice arrive alors à l'amplificateur opto-électronique, accouplé à l'extrémité de la fibre optique, sans affaiblissement notable.

Le mécanisme de captage de la lumière par la surface enveloppante de la fibre repose sur la synchronisation des :
- vitesses de phases,
- sens de polarisation,
des fractions ondes superficielles des oscillations propres qui peuvent être excitées dans le noyau des fibres.

Il a été confirmé expérimentalement qu'en utilisant des fibres cylindro-symétriques, il apparaît, en raison de la géométrie des champs électromagnétiques, des propriétés qui permettent une alimentation en lumière par la surface enveloppante de la fibre. Le mode-volume (nombre des auto-oscillations possibles) croissant avec l'augmentation du rayon du noyau central de la fibre ou du diamètre de cette fibre augmente la probabilité de la synchronisation des deux champs dans la surface enveloppante de la fibre. Ce point est particulièrement important, notamment pour l'introduction de lumière non-cohérente avec des modifications de phases aléatoires dans le temps et dans l'espace.

Ces propriétés déjà connues des fibres cylindro-symétriques se limitent jusqu'ici :

- à la mise en oeuvre de fibres optiques anisotropes en couche mince, à géométrie plane, qui conduisent à d'autres conditions marginales d'introduction de la lumière, quand on utilise l'effet optique de tunnel,

- l'introduction de sources de lumière cohérentes (Laser) qui conduisent à des conditions d'accouplement permanentes.

On n'en a toutefois pas tiré parti jusqu'ici techniquement, en particulier, on n'a pas mis en oeuvre des conducteurs en fibres optiques optiquement anisotropes pour la construction de détecteurs de neutrons.

L'invention est exposée ci-après plus en détail avec référence à des résultats théoriques et expérimentaux, ainsi qu'à un exemple de réalisation, et à l'aide des figures 1 à 4.

Le principe d'un détecteur à fibres 1 avec captage de la lumière par la surface de réception 2 du corps de base 5 (matrice ZnS (Ag) bore) est représenté schématiquement dans la fig. 1. Le flux de neutrons Ø (3) produit des éclairs lumineux 4 dans la matière scintillante du corps de base 5, éclairs qui sont collectés par les fibres 6 posées parallèlement les unes aux autres, éventuellement en couches superposées (ici 3 couches). Les fibres 6 sont ensuite rassemblées, sur les deux surfaces frontales du corps de base en faisceaux 7, et vont au photomultiplicateur 8.

La discussion suivante rend compte de la relation entre l'intensité lumineuse et les rapports de surface des surfaces collectrices de la lumière incorporées dans le scintillateur 5 (somme des surfaces enveloppantes des différentes fibres 6) pour différents rayons de ces fibres 6 isolées. Les intensités de lumière que l'on peut obtenir à l'emplacement 2 du captage de la lumière (surface limite n_1/n_2) correspondent au rapport des surfaces collectrices de la lumière A que fixent les rayons R des différentes fibres. Si l'on continue à diminuer le rayon R des fibres optiques, la surface enveloppante diminue proportionnellement à R, la surface frontale de ces fibres en revanche diminue proportionnellement à R^2. Pour maintenir une surface collectrice de lumière constante dans le scintillateur, il est nécessaire, si l'on réduit le diamètre, d'augmenter proportionnellement le nombre des fibres. Comme la surface frontale du faisceau de fibres diminue comme le carré du rayon R des fibres,

l'équation suivante est valable pour l'augmentation de la surface par introduction d'autres fibres 6 :

$$\frac{A^{R_1}_{\text{surface enveloppante}}}{A^{R_2}_{\text{surface enveloppante}}} = \frac{R_2}{R_1} \text{ pour } R_1 > R_2$$

La grandeur de la surface enveloppante incorporée provoque une diminution de la distance qui sépare les différentes sources lumineuses ponctuelles du scintillateur par rapport à la surface des fibres optiques et par suite une augmentation de l'intensité de la lumière introduite (captée) dans le câble à fibres optiques 6.

Le tableau suivant rend compte, pour des diamètres courants de fibres optiques, des distances source lumineuse/point d'introduction dans les conditions marginales indiquées.

Fibres Ø (μ)	Nombre pour le détecteur	Surface enveloppante des fibres (m^2)	Distance LQ/LLob. (*) (μ)
1500	1100	8.3	400.
1050	2270	12.0	315.
500	10 000	25.1	150.
100	250 000	126.0	30.
70	510 200	180.0	21.
30	2 777 780	420.0	9.
10	25 000 000	1257.0	3.

(*) LQ : source lumineuse
LLob : surface du conducteur optique.

Il en ressort qu'il existe entre des fibres de 1500 μ et de 70 μ un rapport d'intensité lumineuse de 1/363 à l'endroit de l'introduction de la lumière, la surface limite n_1/n_2.

Les réalisations actuelles donnent des indications pour la construction géométrique de la détection utilisant

des fibres optiques.

Des points importants sont en outre :

- le mécanisme de captage de la lumière par la surface enveloppante,
- les propriétés de transmission de l'énergie lumineuse captée par les fibres.

Les fibres optiques anisotropes sont constituées des deux composants, noyau, avec l'indice de réfraction n_1 et la surface enveloppante, n_2 : l'énergie électromagnétique est localisée, au cours de la transmission de l'énergie, principalement dans la matière dont l'indice de réfraction n_1 est le plus élevé, N.S. Kapany, J.J. Burke, Fiber Optics IX. Waveguide Effects, J. Am. Opt. Soc. Vol. 51, No. 10, Oct. 1961.

Les conditions de propagation ressortent des lois de l'optique géométrique (Snellius-Fresnellsche Gesetze der Brechung und Reflexion, W. Pohl, Optik und Atomphysik, Springer 1928), pour la réflexion totale qui se produit sur la couche limite vers le milieu optiquement plus facile à traverser. Sans revenir en détail sur la théorie, on en indiquera des conséquences importantes :

- La transmission de la lumière repose sur le principe de la réflexion totale dans la couche optiquement la plus facile à traverser n_2. Avec le diamètre final des fibres optiques, il s'établit, en fonction de la longueur d'onde de la lumière λ , de l'ouverture numérique (N.A.) et du rayon a du noyau des fibres, des conditions discrètes de propagation (modes propres) dans la fibre.

- Contrairement à la conclusion de la géométrie optique, en cas de réflexion totale, l'énergie arrive dans le milieu "interdit" n_2 optiquement plus facile à traverser suivant, M. Born, Optik, Springer, Berlin 1933. Le vecteur d'ondes k_0 s'étend ici parallèlement à la couche limite n_1/n_2 en n_2. Les pertes du noyau des fibres, du fait de pertes par rayonnement sur la matière environnante, sont déterminées par l'épaisseur S de la surface enveloppante

(région tunnel). En général, l'épaisseur de la couche se monte à environ 7 à 10 longueurs de l'onde lumineuse pour des fibres optiques multi-modales, pour des ordres de grandeur de longueur d'onde $\lambda \simeq 0,5\,\mu$ (lumière visible).

Un couplage de la lumière externe du scintillateur avec le champ d'ondes superficielles synchrone, dans la région tunnel de la matière n_2, permet, sans coupleur optique supplémentaire (prisme par exemple) que la propagation de la lumière se forme d'une façon hélicoïdale. Les rayons lumineux émis dans le scintillateur LQ_n se propagent en forme de cône, et atteignent tangentiellement la surface limite n_1/n_2 (indicence "rasante" de la lumière). En cas de concordance des conditions de synchronisation pour les

- vitesse de phases,
- sens de polarisation

correspondant au choix des angles d'incidence γ_v et θ'_v dans la zone de la couche limite n_1/n_2, l'excitation des auto-oscillations électromagnétiques de l'ordre v s'opère, dans le noyau de la fibre sur le champ d'ondes superficielles appartenant à l'auto-oscillation, par résonance.

L'introduction de la lumière en tirant parti de l'effet géométrique des surfaces limites courbes offre dans la pratique les avantages suivants :

- Tout système d'accouplement supplémentaire, tel qu'on en utilise pour le captage de la lumière sur des pellicules optiques minces (coupleur à prisme) devient superflu.

- Le mécanisme d'accouplement est anisotrope par rapport au parcours préférentiel de la lumière introduite. Il en résulte que l'énergie lumineuse captée reste dans la fibre, même sur de longs parcours de transmission.

- On dispose de la totalité de la longueur de la fibre comme zone de captage. De l'énergie lumineuse captée, il ne se perd qu'environ 10 %/m, en fonction de la qualité de la fibre optique, dans les pertes par découplage et

absorption.

Pour vérifier la conception du détecteur, on a construit un élément de surface du détecteur pour sas prévu : cet élément est représenté en coupe dans la figure 2. Le boîtier 9, de forme parallélépipédique, est constitué d'une partie formant couvercle et d'une partie formant fond, 10, 11, qui sont vissées ensemble et qui assurent, au moyen d'un joint qui en fait le tour 12, l'étanchéité par rapport à l'environnement d'une cavité 13, destinée à recevoir le corps de base 5 (figure 1). Les faisceaux 7 de fibres optiques sortent, en étant fixés par elles, par les deux bornes 14, 15, la plupart du temps décalées l'une par rapport à l'autre diagonalement.

La surface sensible du détecteur se monte à 900 cm^2. On a utilisé un diamètre de fibres isolées de 1500 μ, incorporées, en un lit à couche unique, dans une matrice ZnS(Ag)-acide borique. L'utilisation de cette importante section des fibres est, certes, défavorable au point de vue optique, mais offre toutefois des avantages techniques pour la fabrication. Pour obtenir un rendement de captage suffisant avec les fibres assez grosses utilisées, on a rendu rugueuse la surface enveloppante (surface limite extérieure n_0/n_2). Les centres de dispersion qui apparaissent sur la surface agissent à la façon d'un coupleur optique à grille, tel qu'on l'utilise en liaison avec des conducteurs de lumière plans. En raison de la dispersion de la lumière du scintillateur tombant perpendiculairement à la surface limite n_1/n_2 dans des directions d'incidence synchrones pour s'accoupler avec les ondes superficielles, on obtient une augmentation de l'intensité de lumière captée qui est environ 20 fois celle qu'on obtiendrait sur une surface lisse.

Les mesures de sensibilité aux rayons γ ont été effectuées dans les conditions marginales suivantes :

- réglage des paramètres d'amplification optimum avec référence aux spécifications indiquées dans les documents

W.S.C. Chang, Periodic Structures and their Application in Integrated Optics, IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques, Dec. 1973, p. 775 ff., et par des essais. L'électronique amplificatrice utilisée (photomultiplicateur Philips XP 2230) est indentique à celle du système à scintillateur liquide IRT pour la détection des rayons γ.

- Détermination du seuil de discrimination U_u et de la largeur de fenêtre U_w à partir du rapport S^2/B, signal/bruit mesuré pour différentes énergies γ. Le champ énergétique considéré s'étend de Am-241 ($\overline{E} \simeq 60$ keV pour $U_u \simeq 0{,}1$ V), au-delà de Ba-133 ($\overline{E} \simeq 360$ keV) jusqu'à Co-60 ($\overline{E} \simeq 1170$ keV).

Le réglage du discriminateur a été fixé comme étant le résultat de la mesure pour $U_u = 0{,}1$ V et $U_w = 3$ V.

Le rapport signal/bruit pour différents éloignements des sources par rapport à la plaque du détecteur, calculé pour le centre de la plaque, est illustré dans la figure 3, et il est également indiqué $S^2/B = 5\ 650^2$ ce qui correspond à une probabilité de détection de 95 % avec un taux de fausses alarmes de 0,01 %. Le seuil d'alarme ajusté, 4 σ , tient compte des variations de la stabilité de l'électronique. La probabilité de détection de 95 % correspond à un signal net $S = G-B$ de 1,65 σ au-dessus du seuil d'alarme.

Pour le rapport signal/bruit exigé est valable l'équation

$$S^2/B = (5{,}65\ \sqrt{B})^2 / B = 32$$

indépendamment du taux de comptage absolu B. S^2/B est un critère de qualité d'un détecteur, dans une large mesure, indépendant du réglage des paramètres de l'amplificateur.

Les résultats de mesure (fig. 3) ont été déterminés pour différentes distances z au-dessus du centre de la plaque $(x, y) = (5,5)$.

La figure 4 montre, pour z = une constante, la dépendance du rapport S^2/B signal/bruit pour différentes distances par rapport au photomultiplicateur, la position

y = 1 désignant la plus petite distance, qui est de 30 cm, y = 9, une distance d'environ 60 cm.

Les résultats de mesure confirment l'aptitude au fonctionnement de fibres optiques anisotropes, comme agents de collecte et de transmission, même si l'on utilise des fibres optiques dont la section est de grande dimension.

Les différences auxquelles on peut s'attendre de l'efficacité des taux de comptage des rayons gamma et des neutrons en raison des différences dans la puissance des signaux permettent de conclure que le détecteur ZnS(Ag)-acide borique peut être mis en service en même temps pour la détection des rayons gamma, la séparation des signaux étant obtenue en posant des seuils d'énergie différents.

REVENDICATIONS

1) Système de détection des neutrons et/ou des rayons gamma comportant une grande surface de réception du rayonnement à détecter qui produit des photons dans la matière produisant une scintillation photons qui sont captés dans les fibres optiques formant le conducteur, système caractérisé en ce que les fibres optiques (6) sont étendues sur toute la surface de réception (2) dans la matière produisant les scintillations (5), que le captage de la lumière (4) s'opère sur toute la surface enveloppante des fibres optiques (6) et que les fibres optiques conductrices (6) sont établies de façon à être anisotropes.

2) Système de détection des neutrons et/ou des rayons gamma suivant la revendication 1, caractérisé en ce que les fibres optiques (6) sont incorporées parallèlement entre elles dans la matière produisant les scintillations (5), en une ou plusieurs couches qui sont dirigées parallèlement à la surface réceptrice (2).

3) Système suivant l'une des revendications 1 et 2, caractérisé en ce que la sortie (7) de la lumière s'effectue par les faces frontales des fibres optiques (6).

4) Système suivant l'une des revendications 1 à 3, caractérisé en ce que les fibres optiques (6) sont établies de façon cylindrosymétrique, l'indice de réfraction (n_1) du noyau de ces fibres optiques étant plus grand que celui (n_2) de la surface enveloppante.

5) Système suivant l'une quelconque des revendications 1 à 4, caractérisé en ce que la surface enveloppante des fibres optiques (6) est rendue rugueuse.

6) Système suivant l'une quelconque des revendications 1 à 5, caractérisé en ce que la surface de réception (2) est de forme carrée ou rectangulaire.

2552887

Fig. 1

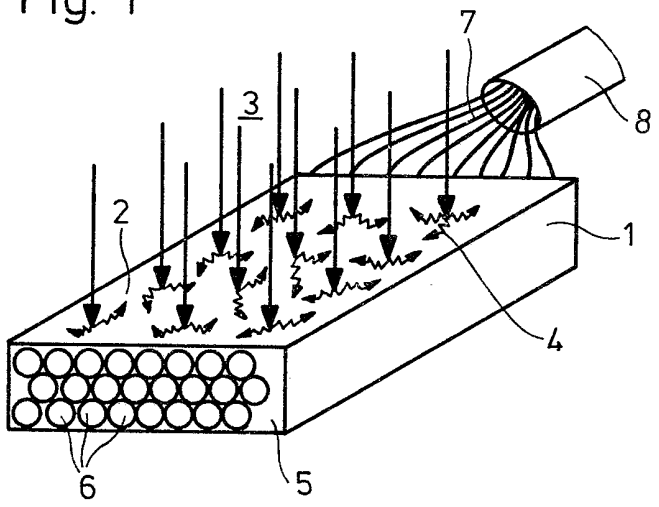


Fig. 2

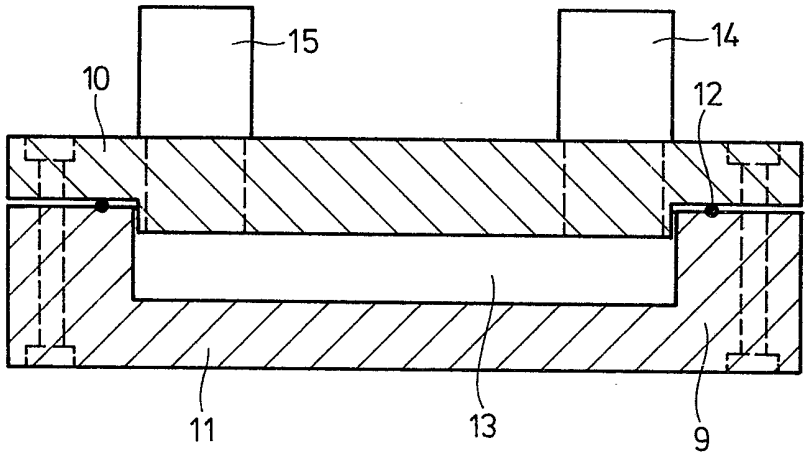


Fig. 3

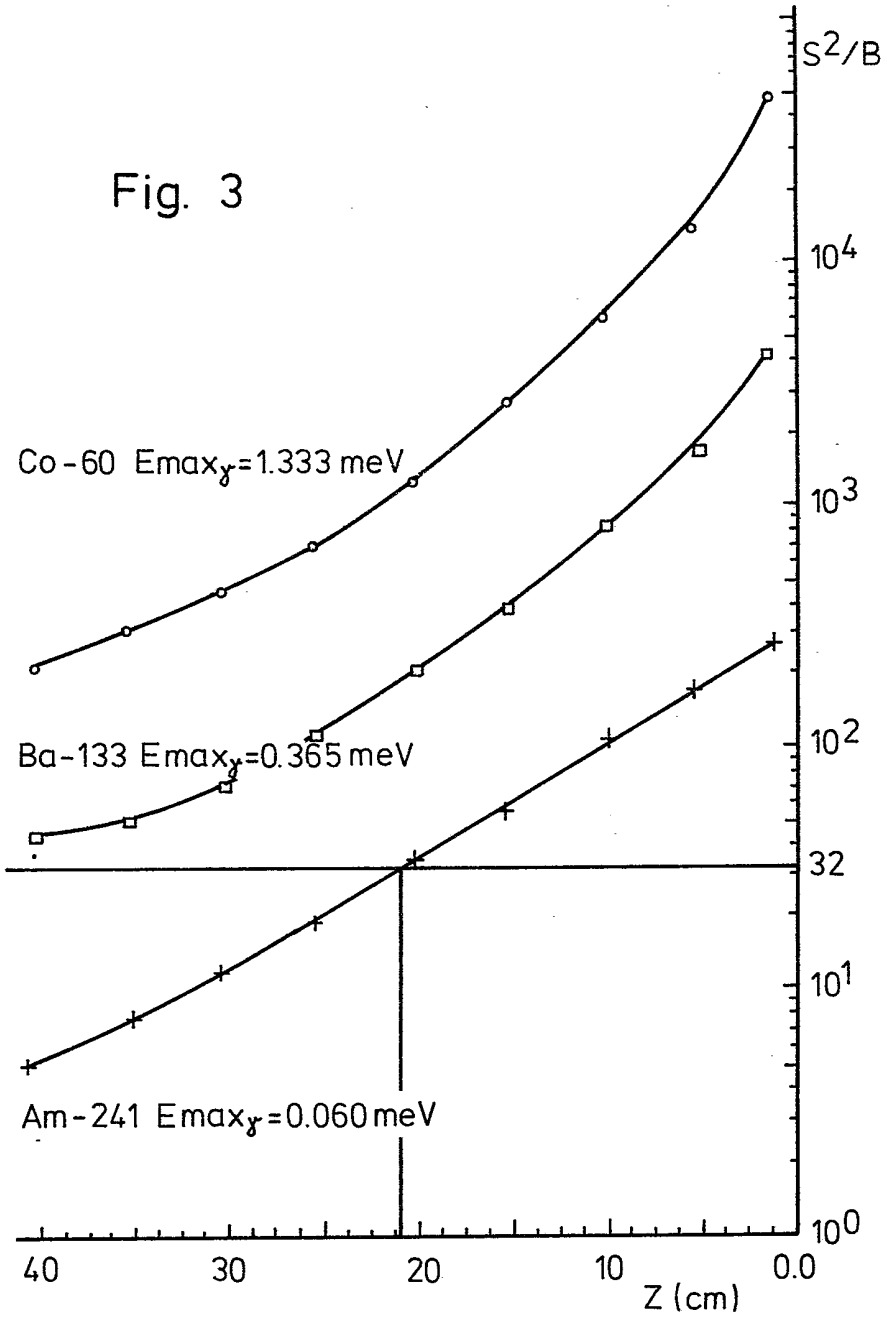
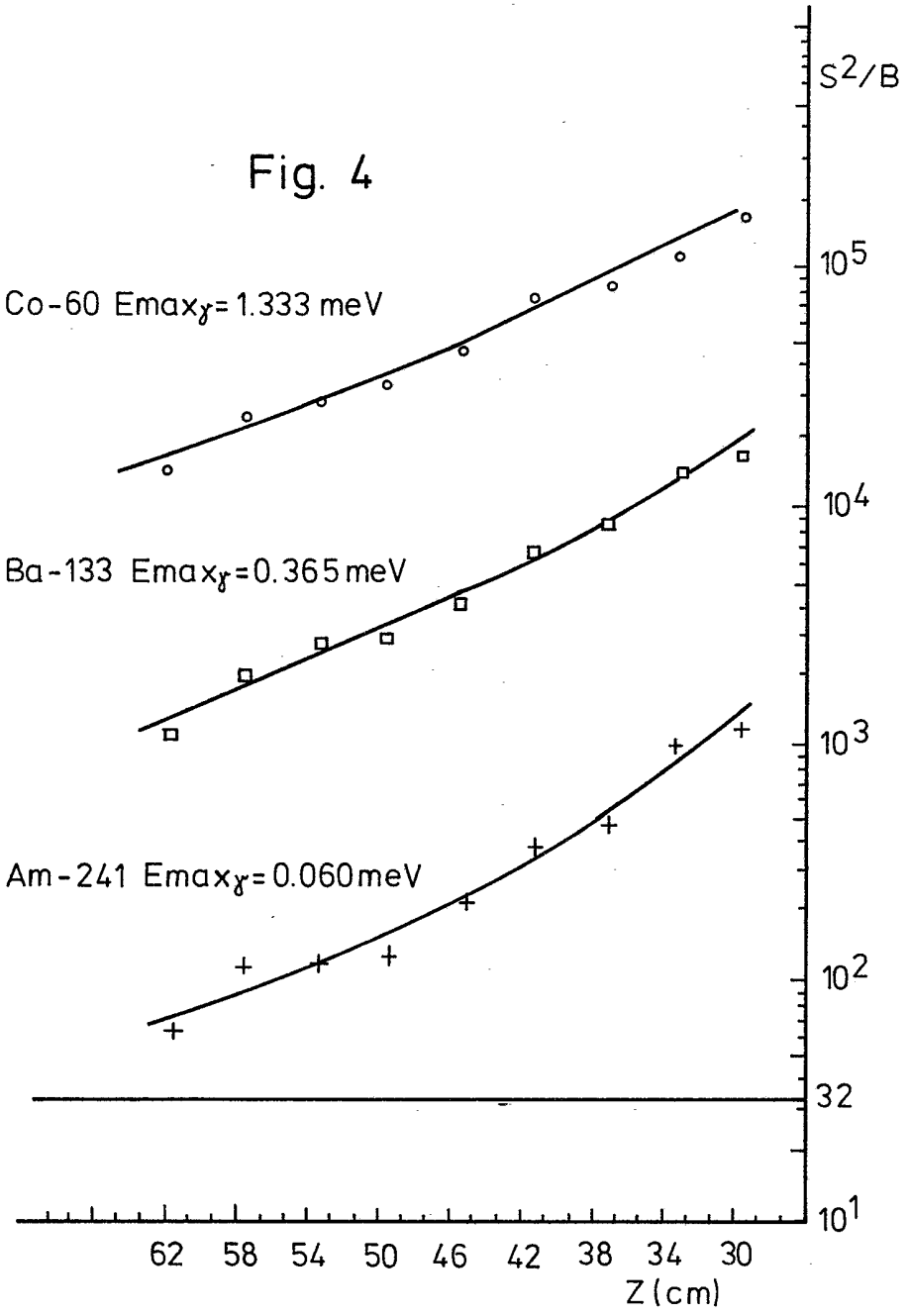

S²/B
10⁴
10³
10²
32
10¹
10⁰
Co-60 Emax$_\gamma$=1.333 meV
Ba-133 Emax$_\gamma$=0.365 meV
Am-241 Emax$_\gamma$=0.060 meV
40
30
20
10
0.0
Z (cm)

Fig. 4


S²/B
10⁵
10⁴
10³
10²
32
10¹
Co-60 Emax$_\gamma$ = 1.333 meV
Ba-133 Emax$_\gamma$ = 0.365 meV
Am-241 Emax$_\gamma$ = 0.060 meV
62 58 54 50 46 42 38 34 30
Z (cm)