

ISTITUTO NAZIONALE DI FISICA NUCLEARE

Sezione di Padova

INFN/AE-88/7

9 Settembre 1988

G. Zanella, R. Zannoni:

**Uso di Fibre Ottiche Scintillanti nella Rivelazione di Immagini X da
Luce di Sincrotrone**

**USO DI FIBRE OTTICHE SCINTILLANTI
NELLA RIVELAZIONE DI IMMAGINI X
DA LUCE DI SINCROTRONE**

Giovanni ZANELLA e Roberto ZANNONI
Dipartimento di Fisica dell'Universita' di Padova,
Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Padova,
v. F. Marzolo 8, 35131 Padova

Riassunto

Viene messo in evidenza come l'uso di matrici di fibre ottiche (o di guide ottiche alluminate) di vetro scintillante possa fornire sistemi di rivelazione di immagini X di energia superiore ai 2 KeV, con elevata efficienza, elevata risoluzione spaziale e con capacita' di acquisizione linearmente dipendente dal flusso degli X, nella formazione di singole immagini.

1.- Introduzione

L'avvento delle macchine di "terza generazione" per luce di sincrotrone, come la macchina di Trieste, prevista funzionante per il 1992⁽¹⁾ e la macchina ESFR di Grenoble, prevista funzionante per il 1993⁽²⁾, pone delle nuove esigenze ai rivelatori di raggi X sensibili alla posizione, al fine di poter sfruttare le potenzialità sperimentali insite negli elevati flussi di raggi X in uscita dagli ondulatori e dai wiggler (brillanza fino a 10^{18} fotoni/s \cdot mm² \cdot mrad² - 0,1% BW). Per esempio, in uscita dal wiggler della macchina di Trieste (versione 2.0 GeV) sono previsti circa 10^{14} fotoni/s \cdot mrad - 1% BW, all'energia di 30 KeV, che corrispondono a circa $2.5 \cdot 10^{11}$ fotoni/mm² \cdot s e a $1,5 \cdot 10^{10}$ fotoni/mm² \cdot s, rispettivamente alla distanza di 20 m e 80 m dalla sorgente; mentre per raggi X da 10 KeV i flussi aumentano di un ordine di grandezza. Ciò significa, come mostreremo in seguito, che i rivelatori sensibili alla posizione che possono rivelare immagini X, a una velocità compatibile con tali flussi, non possono essere rivelatori con gli elementi sensibili a una sola coordinata (o a due coordinate), come le MWPC o i rivelatori a "microstrip", bensì rivelatori a integrazione, con strutture a "pixel" come i CCD o gli "array" di fotodiodi, accoppiati a opportuni convertitori.

2.- Limiti dei rivelatori a "microstrip"

Tali rivelatori al silicio hanno tipicamente "strip" larghe 20 μ m con un passo di 40 μ m e uno spessore di 300 μ m \div 500 μ m. Tenendo conto di un tempo di raccolta, per gli elettroni rilasciati, di circa 5 ns⁽³⁾, il limite fisico nel "rate" di lettura degli eventi, per "strip", è di circa 10^8 eventi/s. C'è però il limite tecnologico attuale nella velocità di acquisizione dati pari a circa 10^8 Mb/s, per piano di lettura⁽⁴⁾.

Questo comporta che dovendo questi rivelatori leggere la coordinata di un singolo X per volta, il flusso sul rivelatore non può superare i 10^8 fotoni/s.

Un altro limite dei rivelatori a "microstrip" risiede nel fatto che tali rivelatori essendo attualmente sviluppati per la lettura di una sola coordinata e rilasciando i raggi X la loro energia solo in una ristretta regione dello spazio entro lo spessore sensibile del rivelatore, è impossibile localizzare bidimensionalmente il singolo X. Rivelatori a "microstrip" a lettura bidimensionale sono attualmente in fase di studio⁽⁵⁾. In ogni caso, anche con un rivelatore a "microstrip" a lettura bidimensionale non vengono fornite le coordinate dei singoli "pixel" interessati dall'evento, ma le coordinate, tra loro non correlate, delle proiezioni degli eventi sugli assi ortogonali del piano di lettura. Ciò comporta la presenza di ambiguità di lettura quando ci sono più eventi contemporanei.

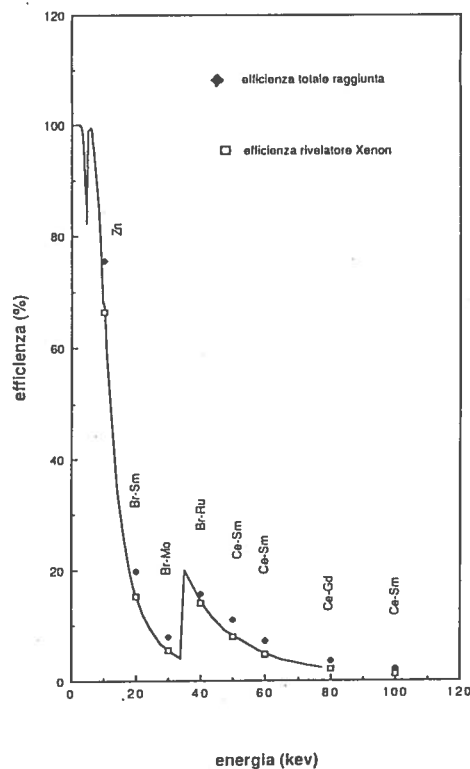
Infine per raggiungere efficienze quantiche non inferiori al 20%, nel "range" di energia 30 KeV ÷ 60 KeV e' necessario usare un telescopio di rivelatori a "microstrip" con uno spessore pari a 10 mm (circa 30 piani di rivelazione a lettura bidimensionale) con la conseguente enorme complicazione del sistema di acquisizione dati.

3.- Limiti della MWPC e dei rivelatori ibridi a gas

Le MWPC, anche nella loro versione piu' spinta⁽⁶⁾, presentano esattamente le stesse limitazioni dei rivelatori a "microstrip" per quanto riguarda il "rate" di acquisizione e i problemi di lettura delle coordinate degli eventi. Nel "range" di energia 10 KeV ÷ 100 KeV l'efficienza e' decisamente bassa.

Fig. 1

Andamento dell'efficienza, in funzione dell'energia degli X incidenti, di uno strato rivelatore allo xenon, spesso 1.2 cm, alla pressione atmosferica e a 300 K. I punti pieni rappresentano il miglioramento dell'efficienza che si otterrebbe utilizzando un film convertitore (ottimizzando lo spessore e la scelta degli elementi al variare dell'energia)



In Fig. 1 si vede l'andamento dell'efficienza, in funzione dell'energia degli X incidenti, per uno strato rivelatore di Xenon, spesso 1.2 cm, alla pressione atmosferica e a 300 K (linea continua).

I punti pieni rappresentano il miglioramento dell'efficienza che si otterrebbe ponendo sopra lo strato di Xenon un film convertitore (conversione in X di fluorescenza a piu' bassa energia e fotoelettroni) fatto di vari elementi, ottimizzando lo spessore del film e la scelta degli elementi al variare dell'energia.

Un rivelatore ibrido a gas e' costituito invece da uno strato di 5 mm di gas (praticamente xenon), che serve per una conversione primaria X-elettroni, e da un secondo strato convertitore che converte gli elettroni primari (accelerati da un campo

elettrico) in fotoni UV. La radiazione UV e' infine letta attraverso un CCD accoppiato al rivelatore mediante fibre ottiche⁽⁷⁾. Un tale sistema di rivelazione praticamente non presenta limiti nel "rate" di acquisizione degli eventi, nella formazione di singole immagini X, a causa delle proprieta' d'integrazione dei "pixel" del CCD e del metodo di lettura sequenziale. La risoluzione spaziale di questo sistema e' limitata a circa 1.5 mm⁽⁷⁾.

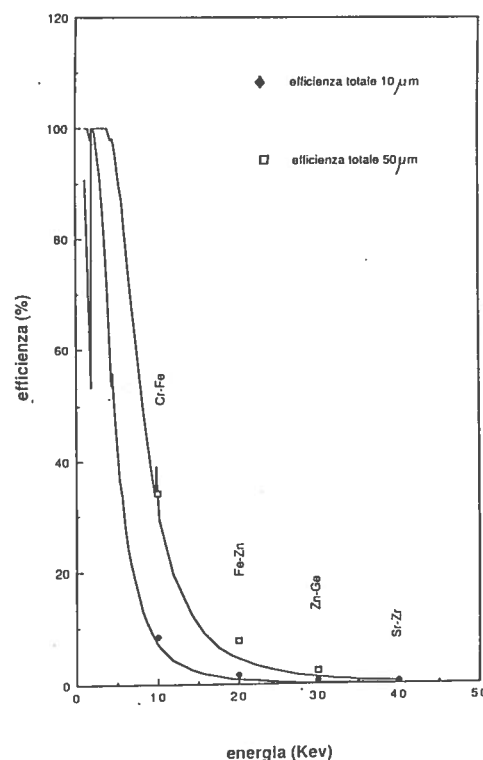
L'efficienza quantica e' invece al di sotto del 10% per le energie degli X maggiori di 20 KeV (Fig. 1).

4.- Limiti nell'uso diretto dei CCD

Come e' noto i CCD permettono la rivelazione diretta⁽⁸⁾ di raggi X, con buona efficienza, nell'intervallo di energia 1KeV-10KeV (Fig. 2).

Fig. 2

Efficienza di uno strato di silicio spesso 10 μm (CCD) e 50 μm (Reticon) nella rivelazione diretta di raggi X. I quadrangoli mostrano l'aumento di efficienza dovuto all'uso contemporaneo di film convertitori ottimizzati nello spessore e nella scelta dell'elemento convertitore.

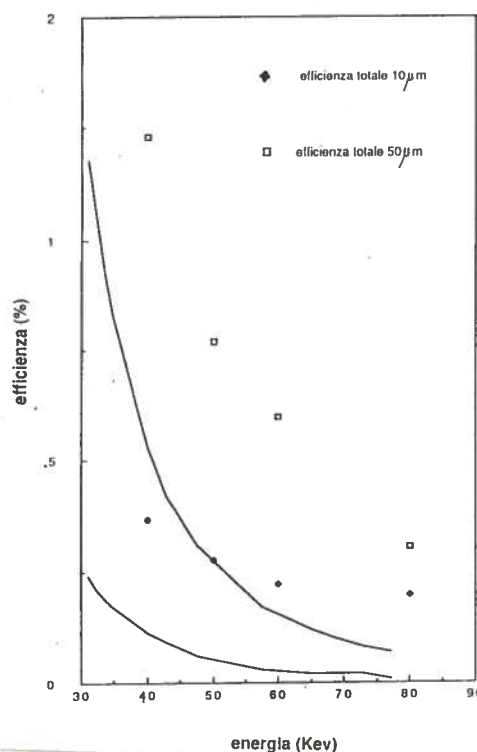


L'uso di strutture convertitrici (per la conversione degli eventi X incidenti in X di fluorescenza di piu' bassa energia e fotoelettroni) al fine di ottimizzare l'efficienza di rivelazione nell'intervallo di energia 10 KeV-100 KeV e' stato proposto da tempo⁽⁹⁾.

Calcoli sistematici, fatti per tutti i possibili elementi, hanno permesso, dopo aver scelto per lo strato di conversione lo spessore ottimale e gli elementi ottimali al variare dell'energia, di trovare le nuove efficienze in funzione dell'energia (Fig. 2). In Fig. 3 si puo' vedere come l'uso di questi film convertitori migliori l'efficienza di rivelazione per gli X di piu' elevata energia, per piu' di un ordine di grandezza, ma anche con questi miglioramenti l'efficienza del sistema di rivelazione rimane sempre troppo bassa.

Fig. 3

Visualizzazione dei risultati di Fig. 2, utilizzando una scala espansa alle più elevate energie degli X.



5.- Limiti nell'uso di strutture convertitrici fatte di fosfori o di "microchannel plates"

I fosfori, pur fornendo un elevato numero di fotoni visibili per ogni X interagente, presentano l'inconveniente di essere poco trasparenti alla luce da loro prodotta. Questo comporta che, pur potendo fabbricare litograficamente matrici coerenti di fosforo con le celle spaziate di circa $2,5 \mu\text{m}^{(10)}$, l'efficienza di rivelazione non aumenta all'aumentare della lunghezza delle celle (spessore del fosforo), in quanto lo spessore del fosforo utile alla rivelazione rimane sempre costante e dipendente dalla sua trasparenza alla luce di fluorescenza.

I "microchannel plates" possono essere usati per convertire raggi X in elettroni, ma presentano i seguenti inconvenienti:

- 1) devono essere mantenuti sotto un buon vuoto;
- 2) l'efficienza quantica è molto bassa (<1%) per energie degli X superiori a 6 KeV ⁽¹¹⁾.

6.- Vantaggi nell'uso di fasci coerenti di fibre ottiche scintillanti

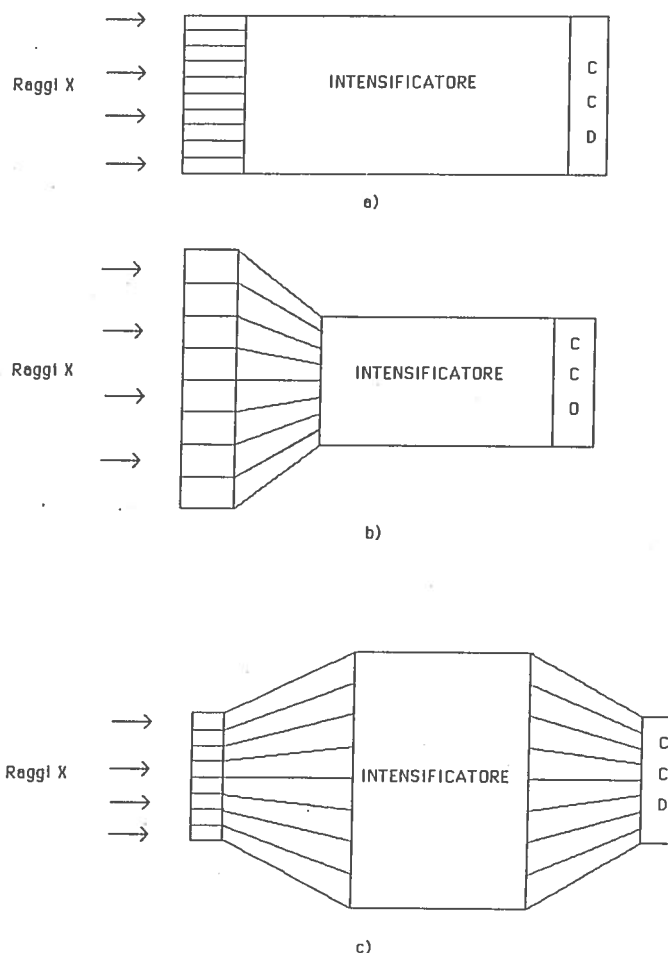
L'uso di fibre ottiche di vetro o plastica scintillante è una tecnica da tempo proposta e sviluppata, per i rivelatori di vertice, nella fisica delle alte energie [per una rassegna sull'argomento vedi il riferimento ⁽¹³⁾]. Invece l'uso di fasci coerenti di fibre ottiche di vetro, o plastica, scintillante come rivelatori, a elevata efficienza di immagini X, è stata solamente accennata ⁽¹²⁾, ma non sviluppata. L'idea è quella di confinare la luce fluorescente nella direzione dei raggi X incidenti, quando questi sono altamente collimati come nei fasci di luce sincrotrone. Noi proponiamo lo studio solo per le fibre di vetro.

scintillante, perché, nel caso della rivelazione degli X, gli elementi costituenti lo scintillatore plastico non presentano una buona sezione d'urto.

La Fig. 4 mostra i possibili schemi di utilizzazione di questi fasci coerenti di fibre ottiche di vetro scintillante, a seconda del grado di risoluzione spaziale richiesto, tenendo appunto presente che attraverso l'intensificatore d'immagine si ha una perdita di risoluzione. I fasci di fibre ottiche non scintillanti di sezione variabile permettono variazioni di sezione secondo un rapporto 5:1.

Fig. 4

Possibili schemi di utilizzazione dei fasci coerenti di fibre ottiche di vetro scintillante. La soluzione a) può presentare una perdita di risoluzione spaziale. La soluzione b) è indicata per ampie aree di rivelazione e con bassa risoluzione spaziale. La soluzione c) permette su piccole aree una elevata risoluzione spaziale (vedi il testo per altre spiegazioni). Il disegno non è in scala.



Ciascuna fibra fluorescente può essere fatta abbastanza lunga da assicurare una buona efficienza quantica di rivelazione per gli X incidenti.

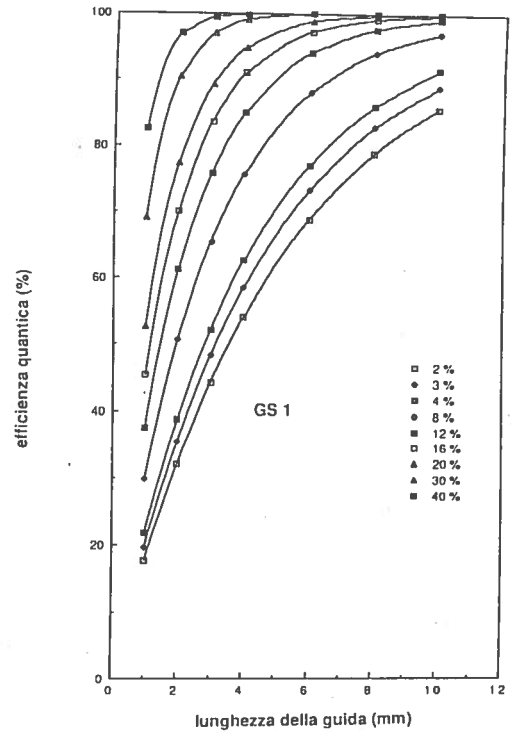
I migliori vetri scintillanti sviluppati, nella fisica delle alte energie, sono quelli indicati con la sigla GS1 e con la percentuale (in peso) di Ce_2O_3 del 4% o del 2% (vetro GS1/2) (13).

La presenza del Ce_2O_3 è importante perché è l'elemento attivatore della scintillazione, però la sua presenza attenua la trasmissione della luce di scintillazione. Da questo punto di vista, nella rivelazione di particelle ionizzanti al minimo il vetro GS1/2 fornisce migliori risultati del GS1. Il tempo di decadimento della luce di scintillazione è di circa 50 ns in questi vetri.

Nel caso della rivelazione degli X è preferibile aumentare il contenuto di Ce_2O_3 , in quanto aumentando l'efficienza quantica si può lavorare con fibre più corte (Fig. 5).

Fig. 5

Efficienza quantica nel vetro GS1 con varie percentuali di Ce_2O_3 , per X di energia pari a 30 KeV.



Le fibre ottiche hanno un rivestimento (cladding) che e' inefficace ai fini della rivelazione dei raggi X e tale rivestimento occupa circa il 20% del volume di una fibra ottica.

Una soluzione a questa perdita di efficienza si puo' ottenere utilizzando fibre senza "cladding" e rivestite da un sottile film di alluminio, per riflettere i raggi luminosi di fluorescenza. Un film riflettente s'intende applicato anche all'estremita' d'ingresso delle guide di luce in modo da recuperare la luce di scintillazione che si propaga all'indietro. La Fig. 6 mostra l'attenuazione ϵ_r che la luce subisce in una guida di questo tipo (diametro=0.25 mm), fatta in vetro GS1, con varie percentuali di Ce_2O_3 (in peso), in seguito alle perdite dovute alle successive riflessioni sulla parete riflettente e all'attenuazione vera e propria.

Fig. 6

Attenuazione ϵ_r della luce in una guida alluminata di vetro GS1, con varie percentuali di Ce_2O_3 , di diametro 0.25 mm e con l'ingresso riflettente.

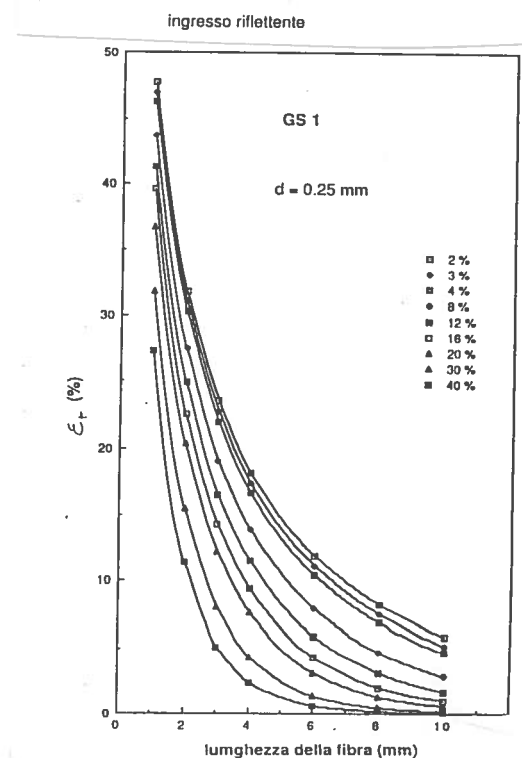
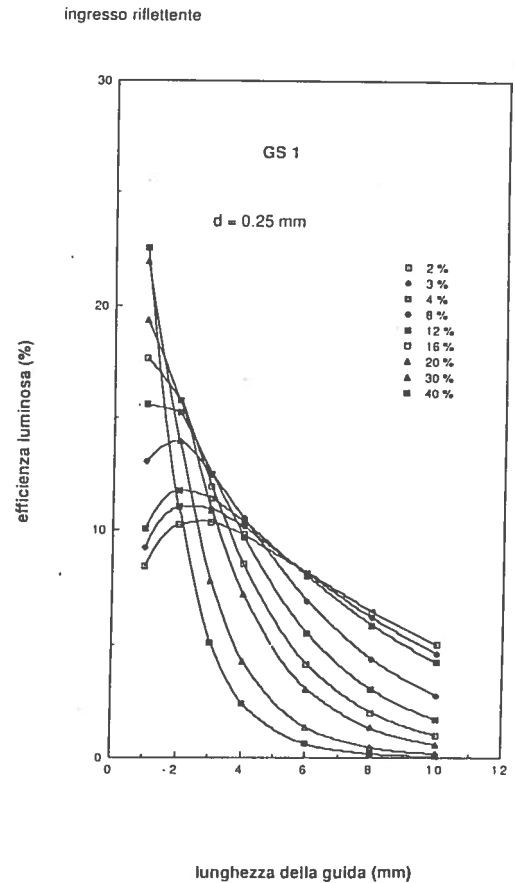


Fig. 7

Lunghezza ottimale della guida di luce alluminata ($d=0.25$ mm), con ingresso riflettente, per varie percentuali di Ce_2O_3 nel vetro GS1 e per raggi X da 30 KeV.



La Fig. 7 mostra invece quale sia la lunghezza ottimale, della guida in esame, per avere la maggior produzione di luce in uscita, tenendo conto (per raggi X da 30 KeV) dell'efficienza quantica e dell'attenuazione. Cio' equivale a introdurre un nuovo parametro al quale diamo il nome di "efficienza luminosa" (ϵ_l). Esso e' inteso come il rapporto tra il numero di fotoni luminosi rivelati e il numero di fotoni luminosi che sarebbe prodotto dallo stesso fascio X se tutti gli X interagissero. Ovvero:

$$\epsilon_l = \frac{\phi_0 \beta \epsilon_q \epsilon_r}{\phi_0 \beta}$$

dove

ϕ_0 e' il flusso di raggi X che colpiscono le guide;

β e' il numero di fotoni visibili prodotto per X assorbito;

ϵ_q e' l'efficienza quantica;

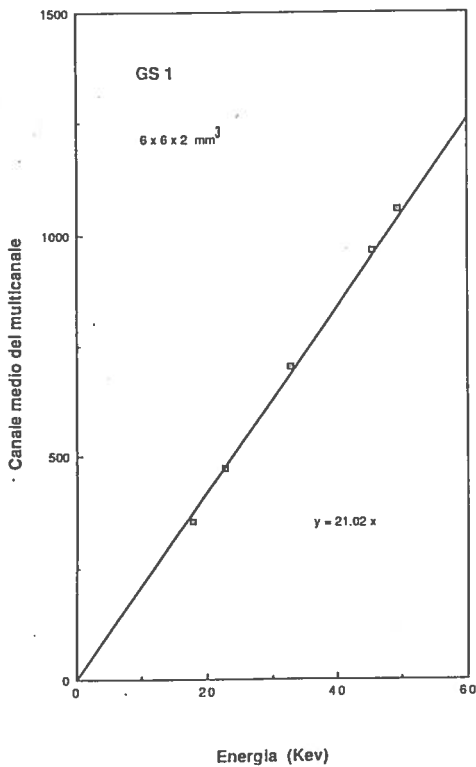
ϵ_r e' l'attenuazione o efficienza di raccolta.

7.- Accoppiamento fibre scintillanti - CCD. Limiti energetici

Abbiamo sperimentalmente verificato che, nel caso della rivelazione di X di circa 44 KeV, accoppiando un volumetto di vetro scintillatore di tipo GS1 a un fototubo, c'e' una produzione media di fotoni pari a circa 5 fotoni/KeV contro i 1,5 fotoni/KeV prodotti da particelle ionizzanti al minimo (13).

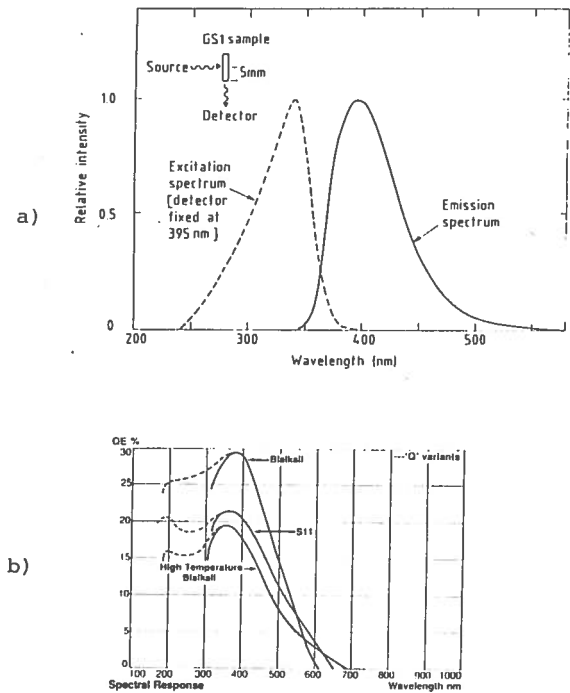
La Fig. 8 mostra la risposta del sistema rivelatore a varie energie degli X incidenti. Si puo' notare la buona linearita' di risposta. La risoluzione energetica invece pari al 25%÷30%.

Fig. 8



Risposta del vetro GS1 a varie energie degli X incidenti.

Fig. 9



Accoppiamento del vetro scintillante GS1 con l'intensificatore d'immagine. a) Spettro di emissione e di assorbimento del vetro GS1; b) Efficienza quantica di un fotocatodo a bialcoli (KCs).

Accettando un'efficienza quantica dell'80% e usando vetro GS1 con un contenuto di Ce_2O_3 pari al 12%, dobbiamo ricorrere a guide di luce lunghe 4 mm ($d=0,25$ mm), con un'efficienza di raccolta della luce del 10%. Pertanto in uscita da queste guide di luce avremo almeno 15 fotoni per ogni X interagente. Usando un intensificatore d'immagine con un fotocatodo a bialcoli (KCs), che ha un'efficienza quantica a 400 nm pari al 25% (Fig. 9), per ogni evento X almeno 3 fotoni sono attivi sul fotocatodo dell'intensificatore. Nel caso delle fibre scintillanti con il "cladding" (necessario per una risoluzione spaziale dell'ordine di alcuni μm), a parita' delle altre condizioni bisogna tener conto di un 20% in meno nell'efficienza quantica e quindi di un'efficienza del 60% per X da 30 KeV, usando sempre fibre lunghe 4 mm con il 12% in Ce_2O_3 . Poiche' in queste fibre c'e' un'efficienza di raccolta della luce pari al 5% ⁽¹³⁾, ci sono almeno 1.5 fotoni sul fotocatodo per X interagente.

Il limite inferiore di energia per la rivelabilita' degli X nel caso delle guide alluminate e' dell'ordine di 2 KeV (50% di efficienza di raccolta con il 2% di Ce_2O_3 e 100% di efficienza quantica). Usando invece fibre ottiche con il "cladding" il limite inferiore e' 16 KeV, in quanto l'efficienza di raccolta della luce di scintillazione e' del 5%, con l'80% di efficienza quantica.

Il limite superiore nell'energia degli X praticamente non esiste in quanto le perdite lungo le fibre, se sono sufficientemente lunghe, e' compensata da una piu' elevata produzione di fotoni di scintillazione al crescere dell'energia degli X stessi.

8.- Conclusioni

La proposta qui' presentata per l'utilizzo di fasci coerenti di fibre ottiche, o di guide di luce, di vetro scintillante, per la rivelazione di immagini X nel "range" tipico delle macchine per luce di sincrotrone e' alla sua prima stesura e si basa sull'utilizzo di vetri scintillanti di tipo GS1 con varie percentuali di Ce_2O_3 , al fine di migliorare l'efficienza quantica di rivelazione dai raggi X.

Composizioni diverse da quelle per il vetro GS1 possono essere sperimentate al fine di migliorare l'efficienza quantica senza ricorrere all'aumento del Ce che rende il vetro piu' opaco alla luce di scintillazione.

Per quanto riguarda la resistenza al danno per radiazione i vetri scintillanti possono sopportare fino a 10^8 rad ⁽¹³⁾, con possibilita' di un sostanziale "annealing" a 400° C. Da questo punto di vista le guide alluminate saranno ancora piu' resistenti perche' non vengono poste limitazioni per il danno che subirebbe il "cladding". Inoltre poiche' il danno da radiazione si manifesta con una maggior attenuazione della luce di scintillazione lungo le fibre, il fatto di lavorare con fibre molto corte alzerà ancora questo limite.

Bibliografia

- (1) M. Cornacchia et al., Nucl. Instr. and Meth., A266, 74-76 (1988).
- (2) R. Haensel, Nucl. Instr. and Meth., A266, 68-73 (1988).
- (3) C.J.S. Damerell, RAL86-077 (1986).
- (4) A.E. Baumbaugh and K.L. Knickerbocher, IEEE Trans. on Nucl. Sc., vol.35, 253-256 (1988).
- (5) L. Bosisio et al. INFN PI/AE, 87/2 (1987).
- (6) J. Fischer, V. Radeka and G.C. Smith, Nucl. Instr. and Meth., A246, 511-516 (1986).
- (7) A. La Monaca, LNF-87/70 (R) (1987).
- (8) A. Benetello, G. Calvelli, G. Zanella and R. Zannoni, Nucl. Instr. and Meth., vol. A258, 235-241 (1987).
- (9) G. Zanella e R. Zannoni, INFN/TC-87/10 (1987).
- (10) P. Brian et al., Science, vol. 237, 1439-1444 (1987).
- (11) J.E. Mack, F. Paresce and S. Bowyer, Appl. Opt., vol. 15, 861 (1976).
- (12) E. Bigler and F. Polack, Appl. Opt., vol. 24, 994-997 (1985).
- (13) J. Kirkby, CERN-EP/87-60 (1987).