

X線及びガンマ線領域での 偏光度検出器

山形大学・理学部
郡司修一

1.はじめに

X線、ガンマ線天文学は、エネルギー、時間、位置(イメージ)の3つの観測により発展してきた。しかし、偏光という最後のパラメーターの観測は未だ、精度の良い観測が行われていない。

1970年代後半にかに星雲でX線領域の偏光が測定されたただけ。それ以降、偏光に特化した検出器は打ち上げられなかった。



SNRの磁場構造、パルサーの輻射メカニズム、AGN、GRB、BH等物理的な意義は計り知れない。しかし、感度の高い検出器を開発することが困難なため、観測が遅れていた。しかし近年感度の高い検出器の開発にいくらかのめどがついた。



検出原理や簡単な開発の歴史、最近の発展を紹介。またこれからの話は直線偏光の検出に話を限る。円偏光に関しては、現在X線以上のエネルギーでほとんどなされていない。

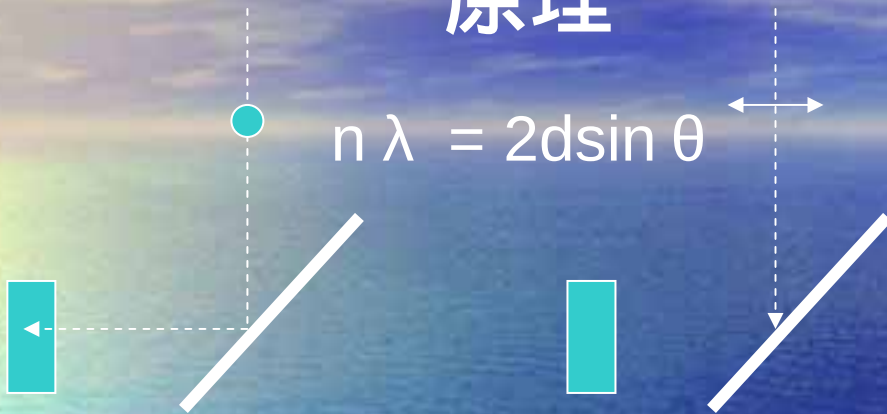
X線領域 (0.1keV ~ 10keV)	硬X線領域 (10keV ~ 数100keV)	ガンマ線領域 (1MeV<)
ブラッグ反射		電子対生成
トムソン散乱		
光電吸収		コンプトン散乱

光電吸収型の検出器とコンプトン散乱型の検出器をメインに紹介する。ブラッグ反射型の検出器、トムソン散乱型の検出器、電子対生成に関しては簡単に触れるだけ。

限られた時間で全部は紹介不可能です。
多少バイアスがかかることをお許し下さい

2.ブラッグ反射型(10keV以下)

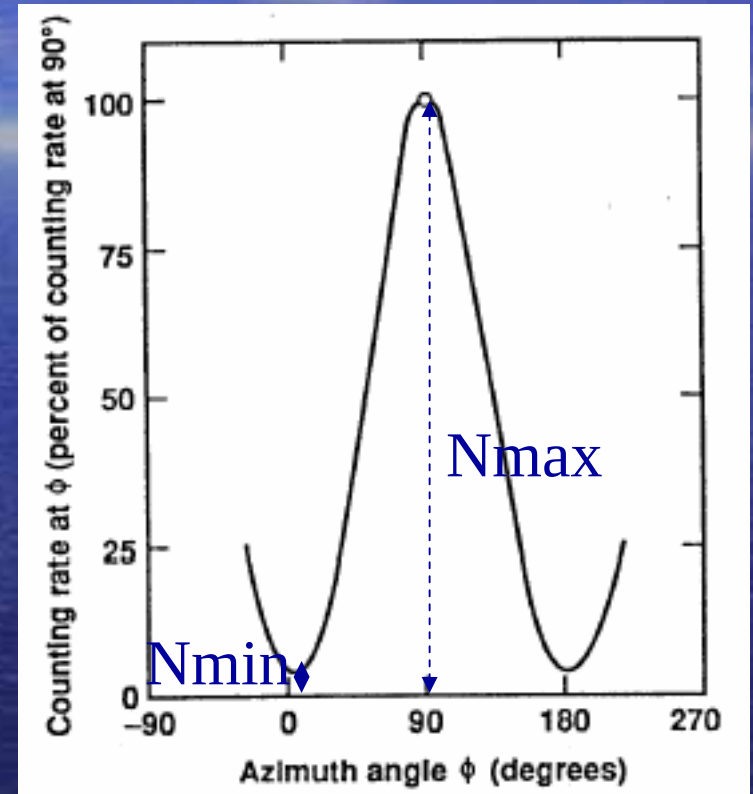
原理



ブラッグ結晶を45度に傾けて、
X線を反射させる。偏光方向に
よって、反射率が異なる。検出器
全体を回転すると....

モジュレーションファクターMが大き
ければ、大きいほど偏光に対する
感度が高い。ブラッグ型は100%に近いが
エネルギーレンジを広くとれない。

OSO8でかにを観測20%の偏光を検出



検出器の回転角



$$M = \frac{N_{\max} - N_{\min}}{N_{\max} + N_{\min}}$$

3.・・・偏光度検出器の感度を求める式

$$MDP = \frac{429}{A\eta SM} \sqrt{\frac{A\eta S + B}{T}}$$

A: 検出面積[cm²]

η: 検出効率

M: モジュレーションファクター

S: 信号のレート[cm⁻²sec⁻¹]

B: バックグラウンドのレート[sec⁻¹]

MDP: 最小偏光感度[%]

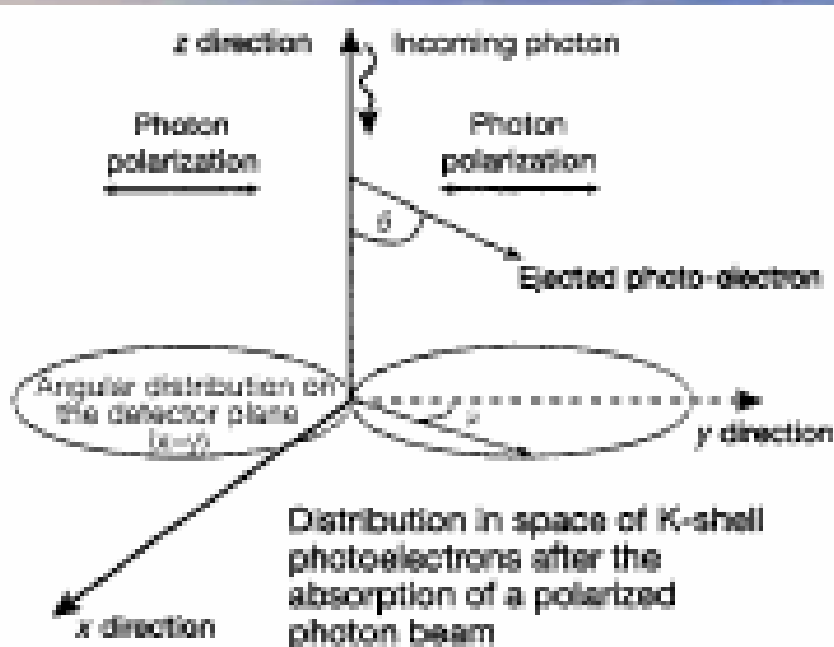
T: 観測時間[sec]

最小偏光感度とは、これ以上の偏光度があれば、99%CLで偏光の検出が可能であるという指標。MDPが小さい検出器が感度が高いと言える。

検出効率、モジュレーションファクターを高くして、バックグラウンドのレートを下げる。検出面積を大きくし、観測時間を長くする。

4. 光電吸収型(数keVから数10keV)

原理

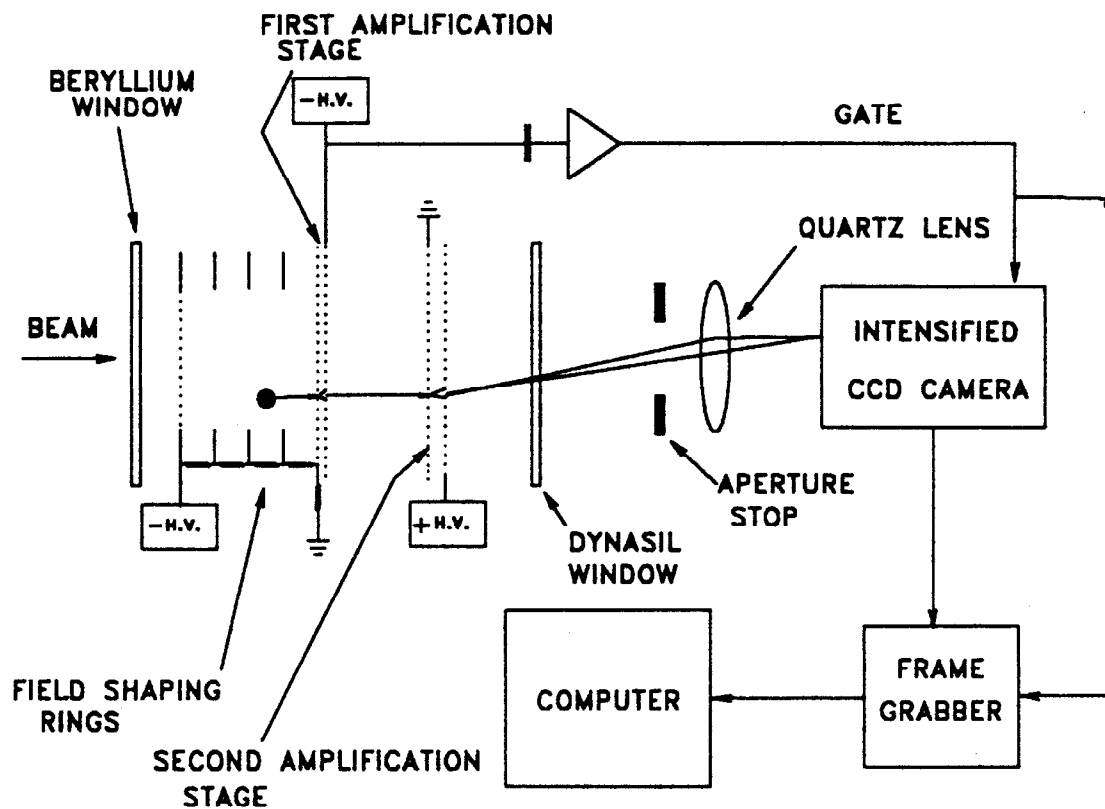


X線が原子のs軌道の電子と光電吸収を起こすと、電子はX線の偏光方向と同方向に飛び出しやすい。

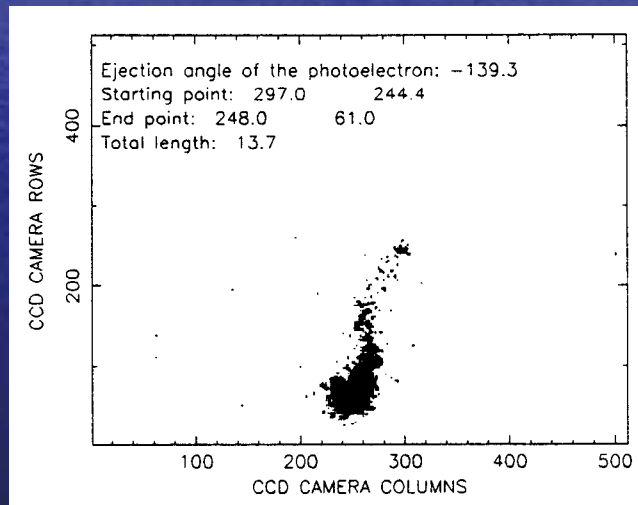
$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = r_0^2 \frac{Z^5}{137^4} \left(\frac{\mu}{k}\right)^{7/2} \frac{4\sqrt{2} \sin^2 \theta \cos^2 \phi}{(1 - \beta \cos \theta)^4}$$

原理的には100%のモジュレーションファクターが得られる。
しかし、電子の飛程はガス中で精々数mm程度。
固体の場合、数 μm である。また電子は散乱されやすい。
最初の射出方向をどのように同定するかが鍵となる。

光電吸収型の最初の検出器



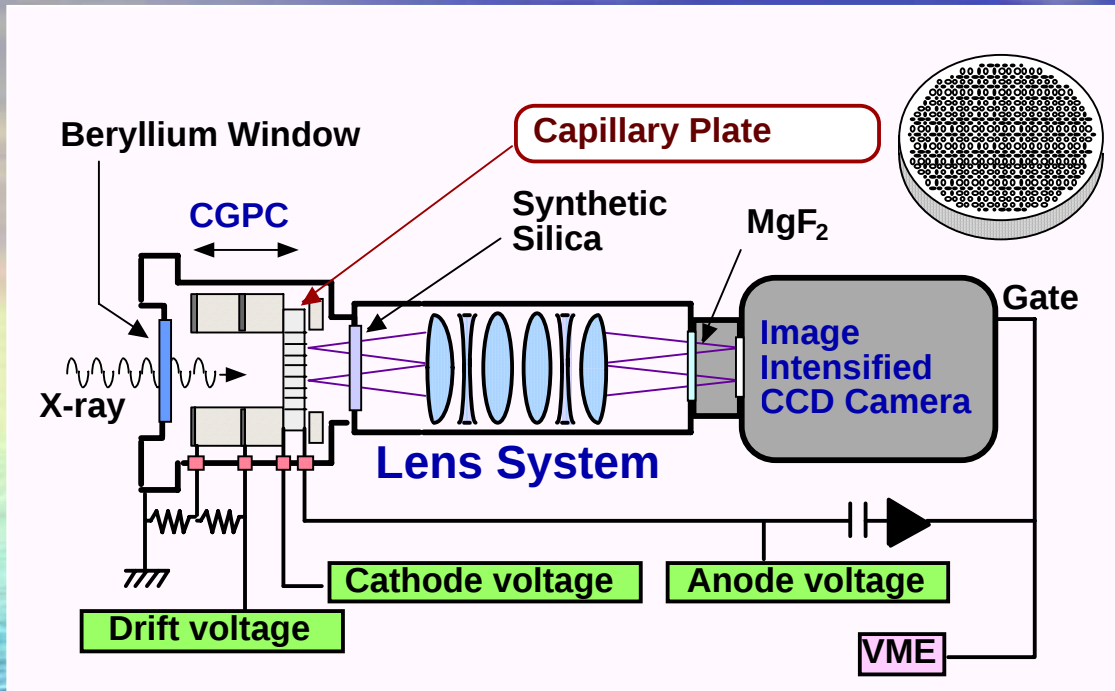
Ar+TMAのガスチェン
バーで54keVの
電子の撮像に成功



$M \sim 30\%$

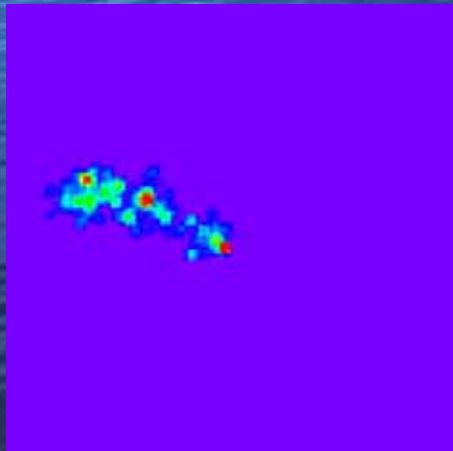
60keV程度では検出効率が低すぎる。より低エネルギーのレンジに感度を持たせるには、像をよりクリアに捕らえることが必要になる。

Tsukaraha et al IEEE 1997年 by 山形大学 (櫻井先生).



キャピラリープレートと呼ばれる毛細管を束ねたものを使用。各毛細管が独立した比例係数管として働く。各管から光が出て来て、これをIICCDで撮像。使用ガスはAr+TMA

19keVの電子雲の像



20keV程度

20～25%程度のモジュレーションファクター

1.5～3.5%程度の検出効率

その後、TMAの代わりにCF₄を用い、発光波長を長くして、光をより集める事を目指す。

光ではなく、電荷を直に読み、偏光を検出する。

2次元マイクロストリップ検出器による
偏光の測定(Ochi etal NIM 1997)

QuickTimeý Ç²
TIFFÅiLZWÅj êLÍ£EvĚçÉOÉâÉÄ
Ç™Ç±ÇÃÉsÉNÉ`ÉÉÇ¾ä©ÇÈÇŽÇ½Ç...ÇÕïKónÇ-Ç ÅB

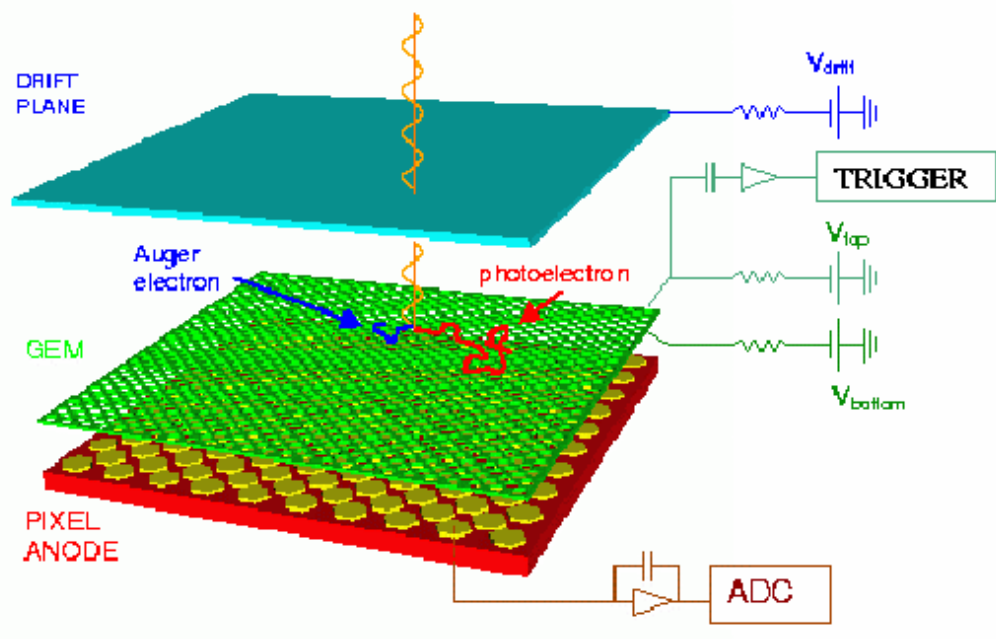
X方向に張られた
ストリップとY方向に
張られたストリップで
それぞれ何本信号が
あったかを検出する。
その本数の比から、
偏光方向を割り出す。

中間増幅器として、Capillaryプレートを使用

20keV程度で、20%程度のモジュレーションファクターを得ている。



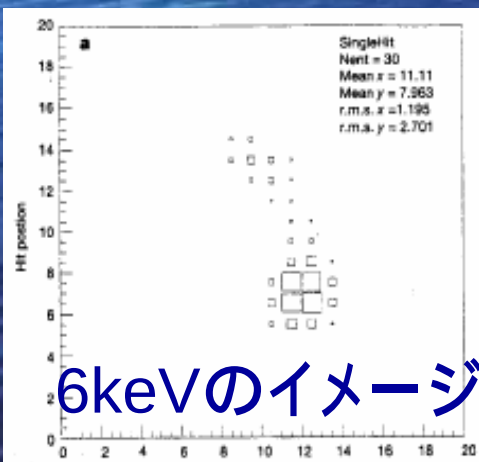
後に紹介する μ -PICに繋がっていく



Ne+DMEを使用、中間増幅器としてGEMを使用。

- 1)電極をピクセル化して、電氣的に電子雲のイメージを撮像。
- 2)ディフュージョンの小さいガスを使用。

10keV以下に感度を持たせた検出器を開発



現在Mは40%程度
検出効率は、3.8%

ピクセル検出器は $200\mu\text{m}$ から $50\mu\text{m}$ へ
(現在 $80\mu\text{m}$)。ガス圧やチェンバーの深さを最適化。
1mCrabでMDP=1%を目指す

最近の日本での進展

京大: 鶴さん



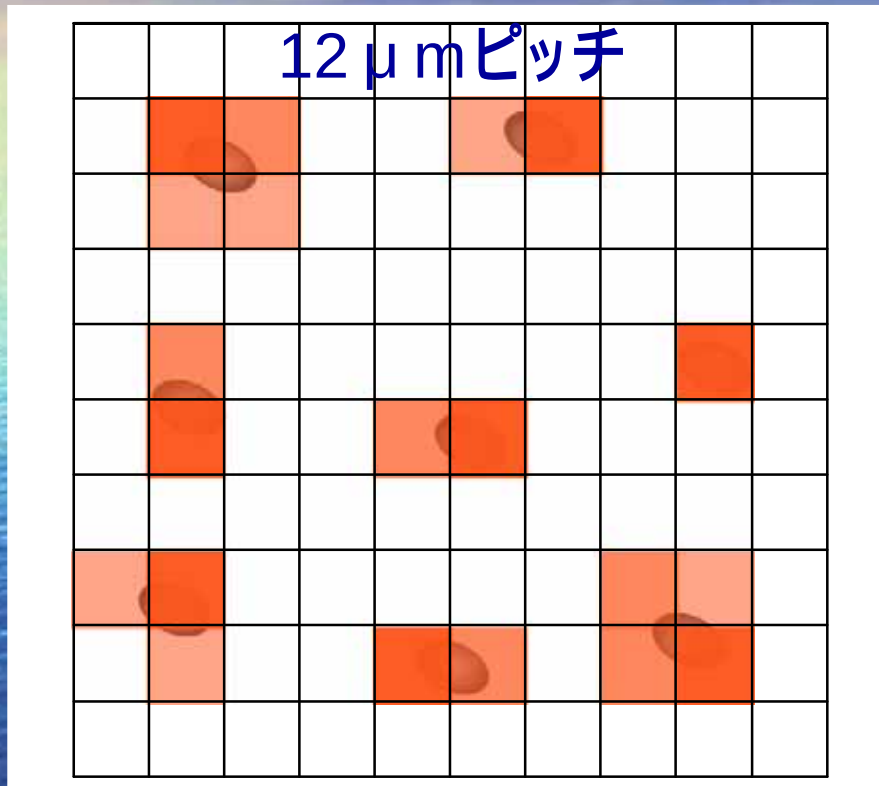
京大の谷森先生 and 窪さんにより開発されたMPGDである μ -picを利用した偏光度検出器。気球搭載用、人工衛星搭載用として、開発を進めている。現在試作品をテスト中

理研の玉川さん: 中間増幅器であるGEMの製作。
偏光度検出器に応用。

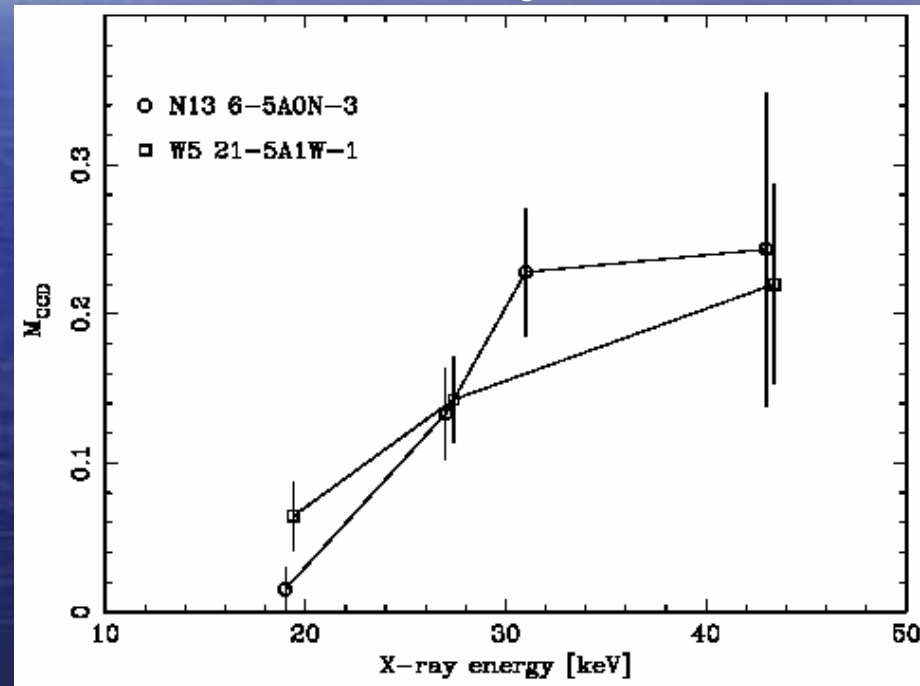
ガスを使った光電吸収タイプの偏光度検出器の基礎技術が、出揃ってきた。しかし、検出効率を高くするとモジュレーションファクターが落ちるという原理的な部分は克服しがたい。10keV以下を狙い、Neを主ガスとし、気圧とチェンバーの深さを最適化する事が今後必要。

CCDを使った偏光度検出器(大阪大学:常深研)

光電吸収によって放出された電子が、どのようなピクセルパターンを作るかで偏光を測定



1999 NIM Hayashida et al

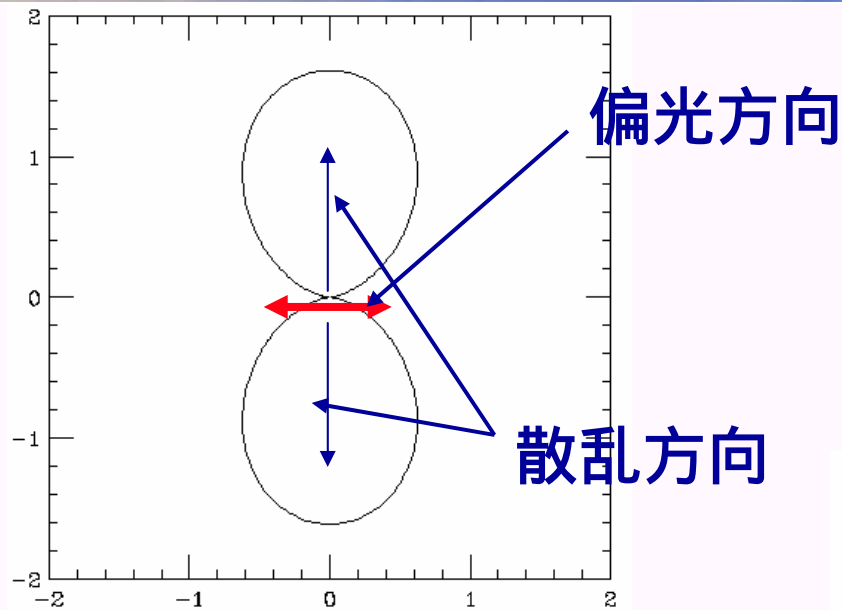


40keVで25%程度のモジュレーションファクター

エネルギー分解能がガスよりよいが、電子が数 μm しか飛ばない。
検出効率はまだよくない。

5. トムソン、コンプトン散乱型

原理



トムソン散乱

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = r_0^2 (1 - \sin^2 \theta \cos^2 \phi)$$

コンプトン散乱

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{r_0^2}{2} \frac{k^2}{k_0^2} \left(\frac{k_0}{k} + \frac{k}{k_0} - 2 \sin^2 \theta \cos^2 \phi \right)$$

入射方向に垂直に硬X線は散乱されやすい

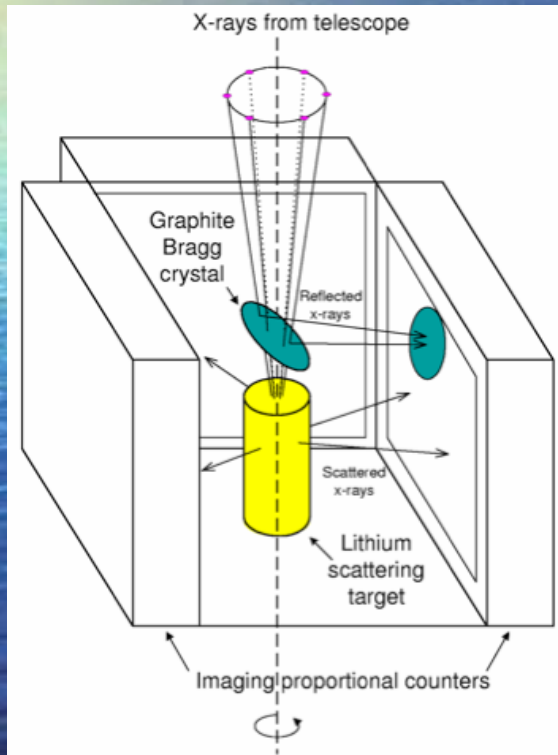
トムソン散乱は、 θ が90度のものだけ捕らえれば、 $M=100\%$ になる。
コンプトン散乱の場合には、同様に $\theta = 90$ 度程度で M が高くなる。

トムソン散乱計

散乱体として、ベリリウムやリチウム等の軽い元素を使用する。
エネルギーレンジも数keVから20keV程度まで。

SXRP(ミラー集光タイプ)

Karret et al



衛星搭載用に開発され、実際のものもできたのだが、結局は打ち上げられなかった。

6 ~ 12 keV

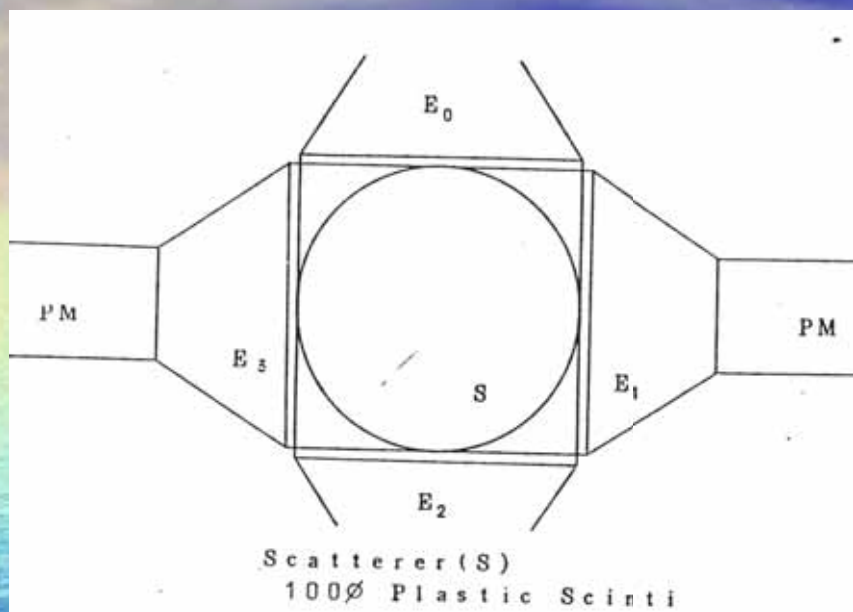
$\eta = \sim 20\%$ 、 $M=70\%$

散乱が起こったのか確証がない。
バックグラウンドを受けやすい。

↓
散乱体でのエネルギーデポジットが
取ればバックグラウンドがあがる

コンプトン散乱型偏光度検出器(20keV ~ 数100keV)

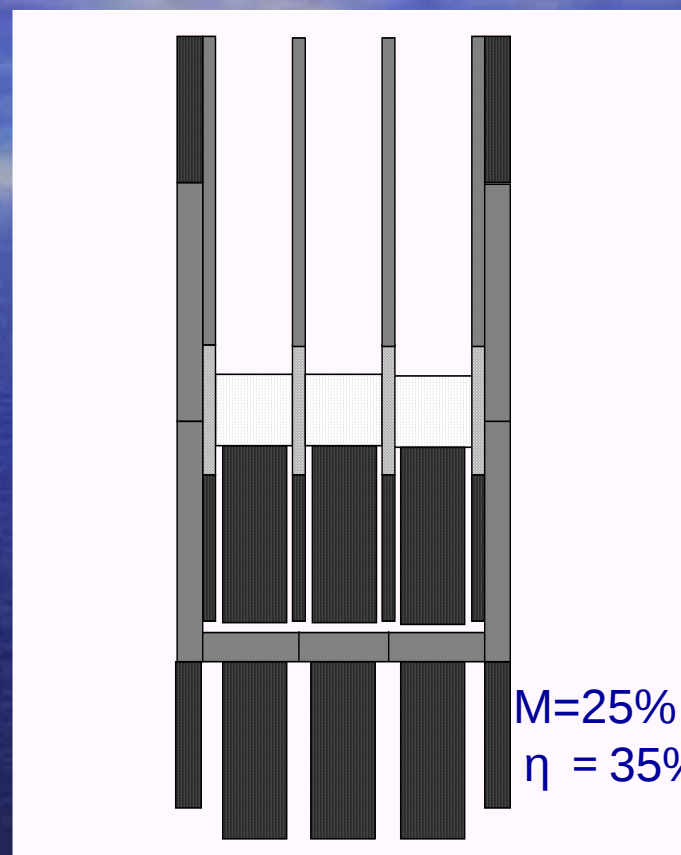
名古屋大学(1960年代)



気球に搭載された実績がある

散乱体として、プラスチックシンチレーター。吸収体にNaI(Tl)。散乱体と吸収体でコインシデンスを取る

Gunji etal. IEEE 1994年



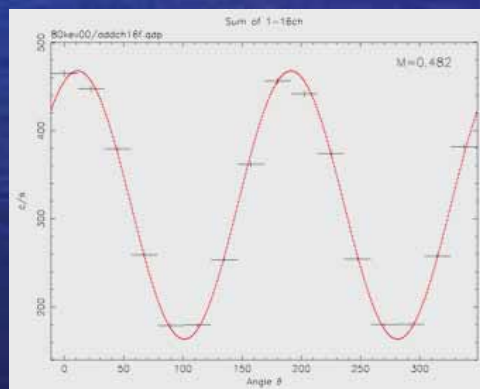
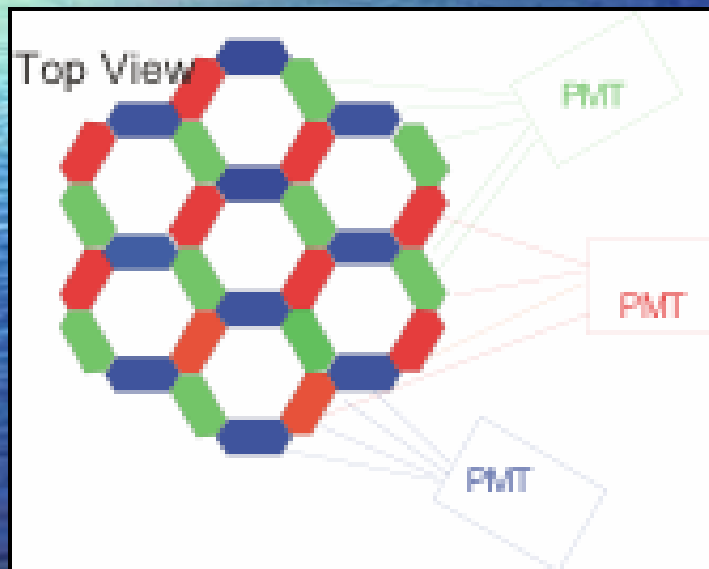
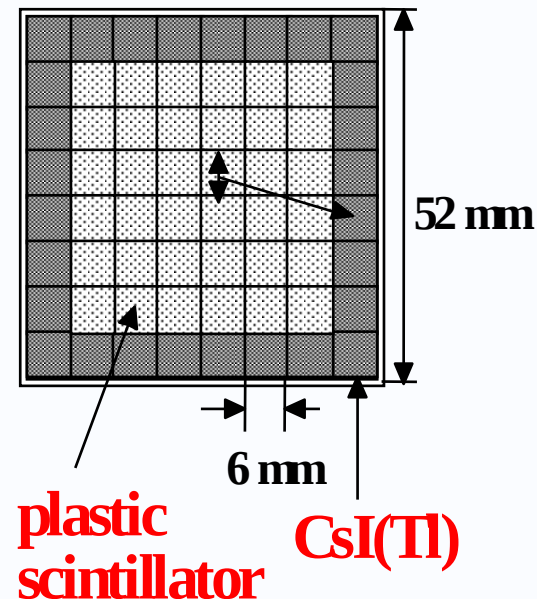
ユニット化し、検出面積を上げつつMを保つ。アクティブコリメーターを付けてバックグラウンドを落とす。プロトタイプを実験室でテスト。

散乱体と吸収体を細分化して、Mを高める。

1995年 Costa et al IEEE

1996年 Gunji et al IEEE Conf. Rec.

GRBのようなTransient天体を観測するための
の広い視野の検出器が開発される。



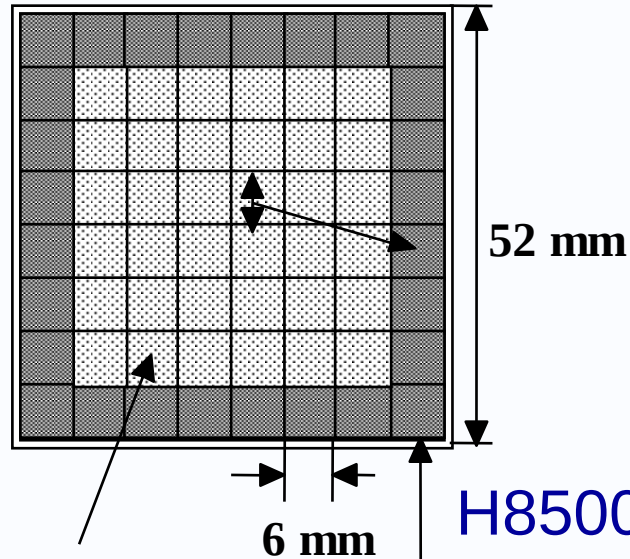
80keVでM=48%

三原さん(2001年)
GAPOM

PHENEX (Polarimeter for High ENergy X-ray) by 山形大学

2006年頃

一つのユニット



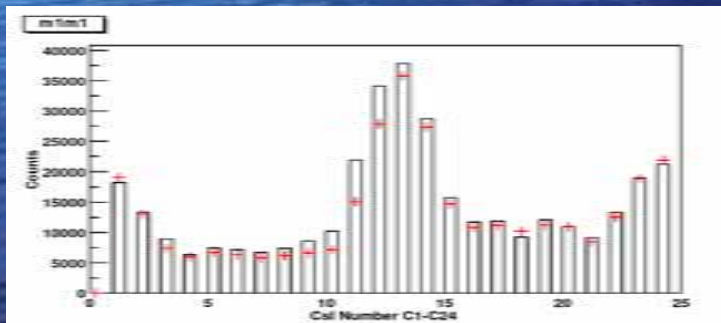
plastic
scintillator

CsI(Tl)

散乱体と吸収体の
コインシデンスは
バックグラウンドの
低減に役立つ



QuickTimey C2
TIFFAILZWAI êlîEEVÊEOÉâÉÁ
Ç™Ç±ÇÄÊsÊNE`EEÇ¾â©ÇEÇZÇ½Ç...ÇÖîKónÇ-Ç AB



M=60%、検出効率=21%

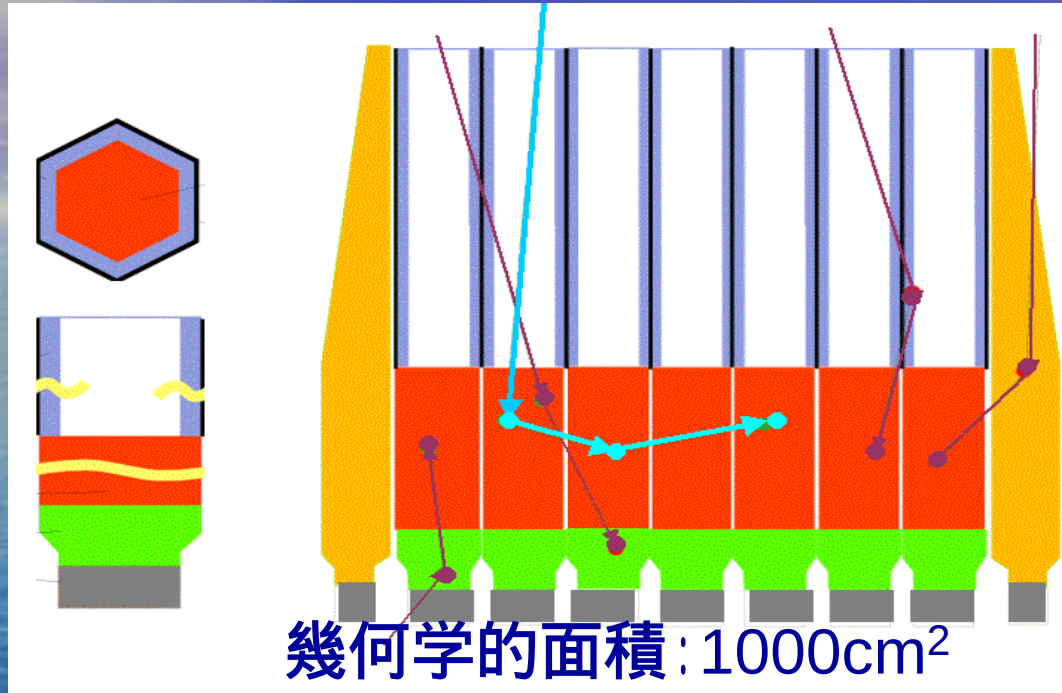
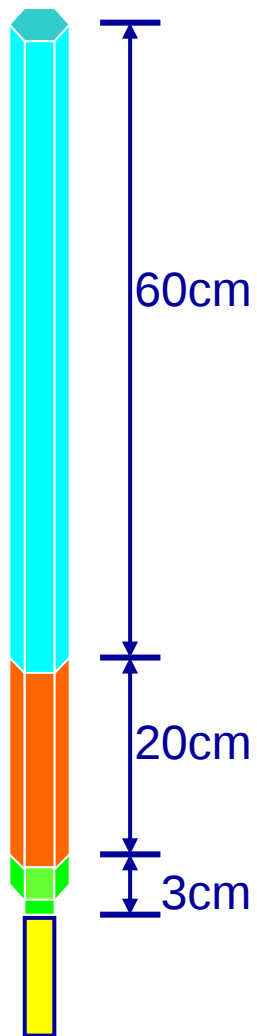
2004年に
気球搭載



3時間で、Crab
に対してMDP
10%程度

硬X線で初の偏光観測

PoGO by 釜江先生(Stanford)、片岡さん(東工大)



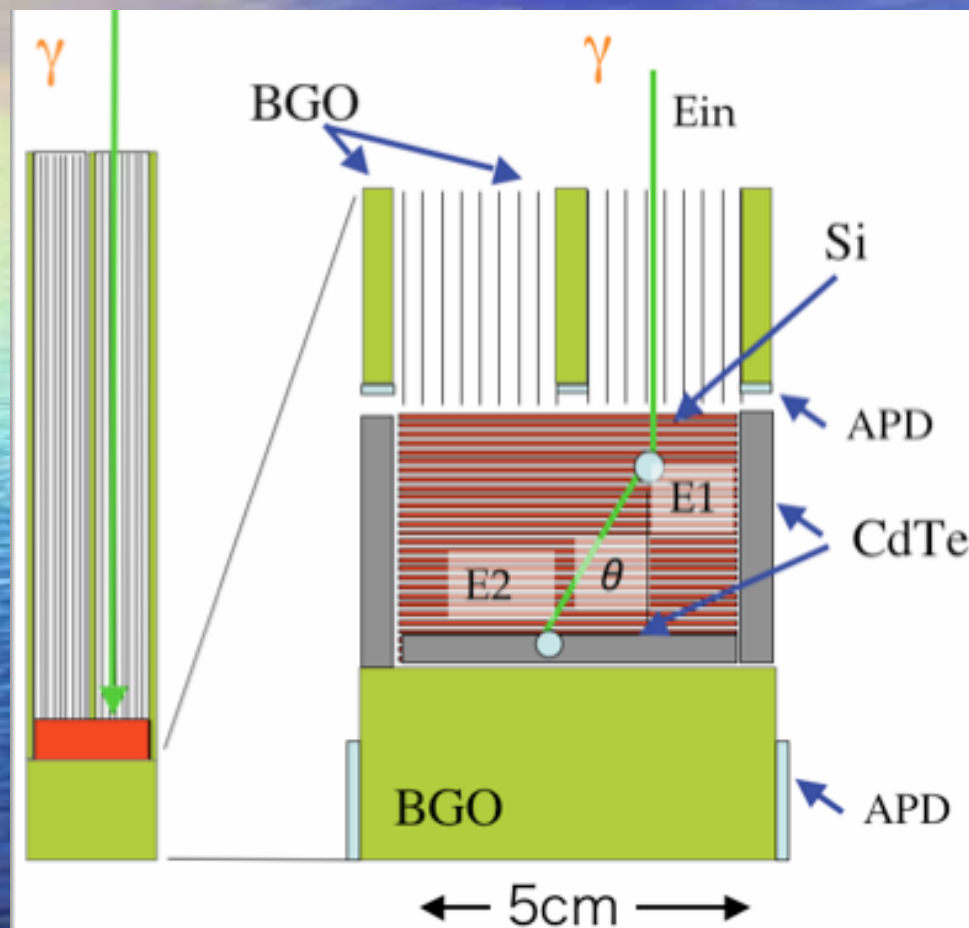
散乱体と
吸収体共に
プラスチック。

BGOとFast
プラスチックと
Slow プラス
チックで、
フォスウィッチ

アクティブコリメーターを搭載した徹底的な
低バックグラウンド化を目指す。

Mは30%程度、検出効率は20~30%程度
2007年頃、かにパルサーの偏光度観測を行う予定。

Siストリップを使ったコンプトンカメラが釜江先生により提唱される(1987年 NIM)。JAXA高橋研によりCdTeの開発が進む。



JAXA 高橋研

NeXTのSGD検出器として開発

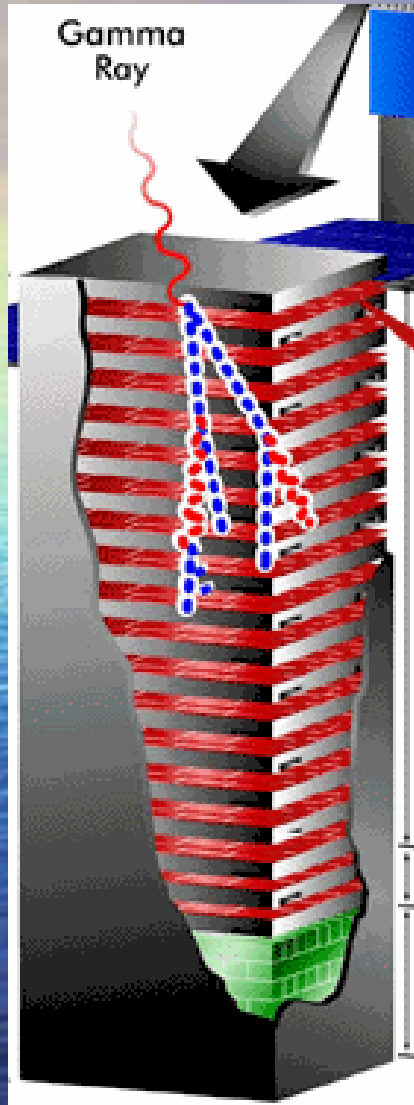
散乱体としてSiを24層、
吸収体としてCdTe。

散乱体として、Siを使っ
ている事から、偏光に対して
高感度なのは70~200keV。
Plastic scintiよりエネルギー
レンジは高め。

Mは40%程度@170keV
(Mitani 2004年IEEE)

2006年程度に気球実験で
性能評価を行う計画があり

6. 電子対生成型



電子と陽電子がどの面に対して、ペアを作るかは、入射ガンマ線の偏光方向に依存している。

$$\sigma(\phi) \propto (1 + R \cos(2(\phi - \phi_0)))$$

理想的なケースで $R \sim 0.1$
電子陽電子の多重散乱を
考慮すると、0.05以下程度



電子対生成を使った偏光度検出器は、かなり難しい。そのため、数MeVを越えたエネルギーレンジでは、偏光の測定はまだ行われていない。

7.まとめ

- 1keV以下ではブラッグ反射計が妥当。
- 数keVから10keVまでは、ネオンガスを使った光電吸収型の性能が最も高い。中間増幅器やピクセル検出器の基礎開発が着実に進んでいる。検出器の最適化が今後の課題。ミラーを使う事が必須。しかしミラーのシステムティックエラーをどう評価すれば良いか？
- 10keVから20keV程度ではトムソン型が有利。しかしミラーが必要でシステムチックをどうするか。
- 20keVから数100keVの中で低エネルギーはプラスチックシンチを使ったコンプトン散乱タイプが有利。エネルギーが高くなれば、SGDタイプが有利。プラスチック散乱型の気球計画は幾つか存在、水面下で衛星搭載を目指す。SGDはNeXT用なので、衛星搭載として開発。
- 1MeVを越えた領域では、電子対生成の原理はほぼ使えない。1MeV以上はほぼ無理か？