

修士論文
ガス蛍光比例計数管をつかったX線偏光計の開発

埼玉大学大学院 理工学研究科 物理学専攻
05SP018 松村 哲

2007年1月31日

目 次

第 1 章 X 線偏光観測	9
1.1 X 線偏光観測の意義	9
1.2 X 線偏光の定義	9
1.3 天体からの X 線偏光	10
1.3.1 X 線の放射過程による偏光	10
1.3.2 X 線の散乱過程による偏光	11
1.3.3 X 線偏光が期待される天体	11
1.3.4 過去の X 線偏光観測	12
第 2 章 X 線偏光検出器	15
2.1 偏光検出に関する過程	15
2.1.1 ブラッグ反射	15
2.1.2 トムソン散乱	16
2.1.3 光電吸収	16
2.2 X 線偏光検出器の種類と特徴	18
2.2.1 ブラッグ反射型	18
2.2.2 トムソン散乱型	19
2.2.3 光電吸収型	20
第 3 章 ガス蛍光比例計数管 (GSPC)	25
3.1 GSPC の構造と検出原理	25
3.1.1 GSPC の構造	25
3.1.2 GSPC の X 線検出原理	26
3.1.3 GSPC のエネルギー分解能	29
3.1.4 ドリフトレス GSPC	29
3.2 現在までの基礎開発状況	30
3.2.1 EB-CCD を用いた撮像実験	30
第 4 章 ペニング混合ガス	35
4.1 ペニング効果	35
4.2 CF ₄	35
4.3 CF ₄ のガス中の相互作用	36
第 5 章 ペニング混合ガスによる基礎特性の評価	37
5.1 セットアップ	37
5.2 実験	38
5.2.1 今回用いた GSPC の性能	38
5.2.2 ペニング混合ガスによる GSPC での実験	40

5.3 ペニング混合ガスの性能評価	42
第6章 まとめと今後の課題	43
6.1 まとめ	43
6.2 今後の課題	43

図 目 次

1.1 電気双極子放射の強度の角度分布(左)とその断面図(右)	10
1.2 ペンシルビームモデル(左)とファンビームモデル(右)	12
2.1 ブラッグ反射	15
2.2 コンプトン散乱	16
2.3 トムソン散乱	17
2.4 光電吸収	18
2.5 ブラッグ反射型偏光計の概念図	19
2.6 OSO-8衛星に搭載されたブラッグ反射型偏光計	19
2.7 トムソン散乱型偏光計の概念図	20
2.8 Liの質量減衰係数のX線エネルギーによる変化	21
2.9 CCD偏光計の偏光検出原理	21
2.10 ライズタイム型偏光計の概念図	23
2.11 MPG C	23
2.12 CGPC	24
3.1 GSPC	25
3.2 「あすか」GISのガスセル部	26
3.3 「あすか」GISのPMT	27
3.4 GSPCの原理	28
3.5 EB-CCDの読み出し原理	30
3.6 ガスセルHVに伴う光量の変化	31
3.7 172nmの紫外線の大気中における減衰特性	32
3.8 EB-CCD(C7190-21)の分光感度特性	32
5.1 ペニング混合ガスによるGSPCの基礎特性を調べるためのセットアップ	37
5.2 ガスの循環システム	38
5.3 GSPCのスペクトル	39
5.4 ガスセルにかけるHV vs ピークチャンネル	39
5.5 エネルギー分解能	40
5.6 Xe・Ar指数減衰透過曲線	41

表 目 次

2.1 偏光検出の方法とそれに対する特徴	22
3.1 EB-CCD C7190-21(浜松ホトニクス社製)の仕様	30
4.1 CF ₄ の性質	35

第1章 X線偏光観測

1.1 X線偏光観測の意義

現在、X線による天体観測は、光子のエネルギー情報・時間情報・イメージ情報を測定することで行なわれている。しかし、この3つのパラメータに加えて天体からのX線は偏光情報を含んでいる。この偏光情報は、天体の輻射のメカニズム、幾何学的構造、磁場の構造を解明するために、貴重な新たな情報源となりうる。

すでに電波、可視光、赤外線などの他の波長域においては、偏光観測は通常の観測手段となっている。しかしながら、X線領域においては、1970年代にかに星雲からの偏光検出が行なわれて以来、30年以上も有意な観測が行なわれていない。このような状況の原因は、ひとえに偏光検出能力の高いX線偏光計がなかったことにある。高エネルギー天体现象のより詳細な物理過程の解明のために、高性能なX線偏光検出器は新たな扉をひらくと期待されている。

1.2 X線偏光の定義

光子として取り扱われることが多いX線領域でも、電波、可視光と同様に偏光を定義することができる。多数のX線光子に対し、その電場方向が一様に揃っているとき、そのX線は完全偏光しているといい、それぞれが全く違った向きになっているとき、そのX線は無偏光であるという。X線が偏光しているとき、その偏光度Pは、

$$P = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}} \quad (1.1)$$

で定義される。ここで I_{max}, I_{min} は、X線の強度を電場ベクトルの方向の関数として見たときの最大値、最小値である。また、X線の進行方向からみて、その電場ベクトルが直線に見えるときを直線偏光、電場ベクトルの先端が円や楕円を描くときを円偏光、楕円偏光という。なお、この論文では偏光はすべて直線偏光として考えており、電場ベクトルの方向を偏光と定義する。

また、X線偏光検出器の感度を求める式として、最小偏光感度MDPというものがある(式1.2)。

$$MDP = \frac{429}{A\eta SM} \sqrt{\frac{A\eta S + B}{T}} \quad (1.2)$$

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]

この式の中のMはモジュレーションファクター(M値)といい、入射X線の偏光度と偏光計で測

定された量を結びつける偏光検出器としての性能をあらわす量で、検出効率 η は入射 X 線のどれだけが偏光検出に用いられたかをあらわす量である。この MDP とは、これ以上の偏光度があれば 99% 偏光の検出が可能であるという指標であり、MDP が小さい検出器ほど感度が高くなる。よって、バックグラウンドを下げ、有効面積を大きくし、観測時間を長くとるのはもちろんのこと、 η と M 値を良くすることが偏光検出にとって重要である。

1.3 天体からの X 線偏光

1.3.1 X 線の放射過程による偏光

電子が力を受けて加速度を持つと、電気双極子放射により電磁波が放射される。このときの電磁波の電場ベクトル E の向きは、電子の加速度 α 、電子から観測点への単位ベクトル n を用いて、

$$E \propto n \times (\alpha \times n) \quad (1.3)$$

と表せる。すなわち、放射された X 線は α と n を含む面内で、 n に垂直な方向に偏光することになる。(図 1.1)

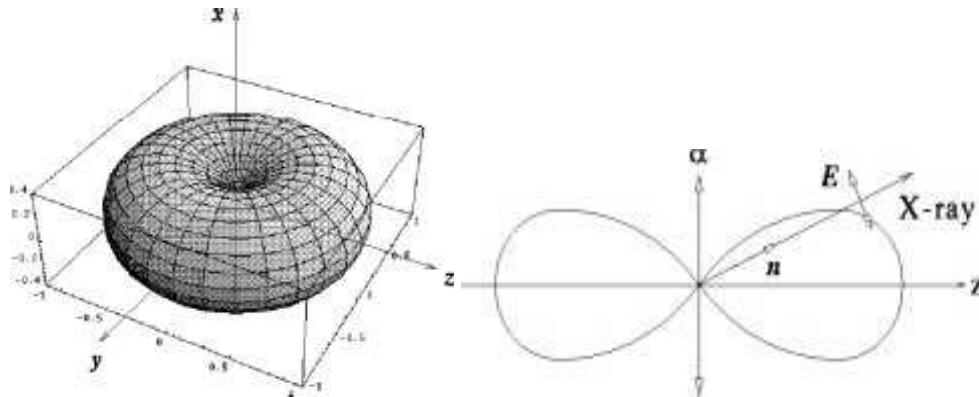


図 1.1 電気双極子放射の強度の角度分布(左)とその断面図(右)

たとえば、電子が原子核やイオンから力を受けると、制動放射が起こる。特に、電子が熱運動している場合は熱制動放射となり、光学的に薄いプラズマ内の X 線放射の主な成分となるが、運動の方向がランダムであると考えられるため、高い偏光度は期待されない。

また、電子が磁場から力を受けると、サイクロトン放射(磁気制動放射)が起こる。特に、電子が相対論的な速さで運動するときにはシンクロトン放射となり、加速度方向及び X 線放射方向が磁場に垂直になるので、この場合は強く偏光した X 線が放射される。

1.3.2 X 線の散乱過程による偏光

後で詳しく述べるが(第2章)、トムソン散乱後のX線の強度分布は入射X線の偏光方向に依存する。ある天体から放射された偏光X線が、散乱体により散乱されるとき、観測方向が入射X線の電場方向と平行でなければ(図1.1で観測方向が x 軸上になれば)、直線偏光したX線が観測される。

また、無偏光なX線を散乱体に入射させたとしても、散乱体に異方性があり、かつ観測方向と散乱前のX線方向が平行でなければ、散乱X線には偏光が期待できる。

1.3.3 X 線偏光が期待される天体

X線放射天体からのX線偏光を調べることで得られる情報が多い。以下に個々の天体の特徴と、X線偏光観測で何がわかるかを簡単に述べる。

- X線パルサー

X線パルサーは中性子星と大質量星の連星である。強い磁場を持ち回転している中性子星には磁気圏が形成されるため、大質量星から流れ込むガスは降着円盤を通してではなく、磁力線に沿って磁極に落ち込む。磁極には降着柱と呼ばれるガス雲が生成され、そこからX線が放射される。中性子星の磁軸と回転軸がずれていると、X線強度が自転と同期して周期的に変動することから、X線パルサーと呼ばれる。降着柱からのX線放射機構は、大きくペンシルビームモデルとファンビームモデルの2種類に分かれる。ペンシルビームモデルは、降着率が低い場合で降着柱の高さは低くなり、主に降着柱の上面からX線を放射する。逆にファンビームモデルは、降着率が高い場合に起こり、降着柱の側面からX線が放射される(図1.2)。

また、このような強磁場の条件下において、磁場に束縛された電子は、磁場に垂直な方向には自由に運動できない。したがって、磁場中を通過する電磁波が、磁場に束縛された電子に散乱(トムソン散乱)される際に、その断面積は、電磁波の電場ベクトルが磁場に対して平行ならば変化しないが、垂直な場合は極端に減少する。その結果、磁場と平行な電場ベクトルを持った電磁波のみが、磁場を通過して外部に放出されることになる。ファンビームモデルのパルサーの場合、電磁波は降着柱の側面から放出されるため、磁場の中を長く通過することになる。そのため、放出される電磁波は、かなりの割合で偏光していると考えられる。このように、パルサーの偏光を観測することで、どちらのモデルかを判別できると考えられる。

- 低質量連星系降着円盤

降着円盤とは、連星系を作るブラックホール、中性子星、白色矮星などのコンパクトな天体が、その強い重力で伴星からガスを奪うことによって作られるガス雲である。X線星の多くは中性子星と連星系と考えられる。伴星から吸い取られたガスは角運動量を持っているため、すぐに中性子星の表面には落ち込みます、その公転軌道を浮遊して降着円盤を形成する。この円盤内から熱制動放射により軟X線が放出されたとき、それぞれを見ると偏光しているが、全体で見ると打ち消しあって無偏光のX線が発生しているように見える。しかし、円盤内からのX線が円盤面でトムソン散乱を起こし、この散乱X線が円盤の面にほとんど平行に放射された場合、偏光が期待される。このことから、偏光を検出することによって、降着円盤の傾きを推定することができる。

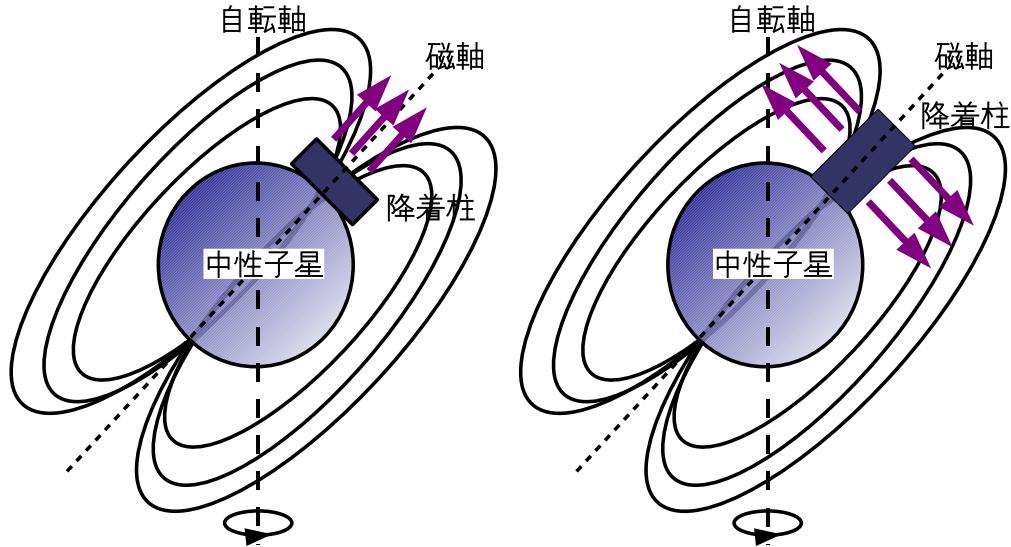


図 1.2 ペンシルビームモデル(左)とファンビームモデル(右)

- シンクロトン星雲

シンクロトン星雲とは、中心に活発なパルサーを持ち、その周辺に形成された強い磁場によって、電子がシンクロトン放射を起こす天体のことである。パルサー周辺の星雲はシンクロトン星雲と考えられており、偏光度の検出によって解明が期待されている。代表的なシンクロトン星雲はかに星雲である。

- 活動銀河核

通常の銀河からのX線は、銀河内の個々のX線星からの放射によるものだと考えられている。一方で、銀河の中心部のごく小さい領域からのエネルギー放射が際立って強く、しかも活発に変動している銀河系の中心部を活動銀河核と呼ぶ。その中心には巨大ブラックホールがあり、ジェットと呼ばれるシンクロトン放射を行なう双極子流を伴うものがある。ジェットから発生する偏光は電波や赤外線の分野でも観測されており、X線での偏光が検出できれば、より内側の構造の解明が期待できる。

1.3.4 過去のX線偏光観測

宇宙からのX線の偏光が初めて検出されたのは、1971年に行なわれたかに星雲の観測による。このときロケットにはトムソン散乱型偏光計とブレック反射型偏光計が搭載されており、それらの互いの独立なデータから、かに星雲からのX線偏光度が15%であることが観測によりわかった。(偏光度の有意性は97%であった)。この観測から、かに星雲のX線放射の起源が、可視光、電波と同様にシンクロトン放射であることが決定づけられた。

その後打ち上げられたAriel V衛星には、グラファイトとLiFの2種類の結晶が搭載され、それ

ぞれ 2.6keV、4.35keV の X 線に対するブレッカ反射型偏光計として使われた。しかし、全天でもっとも明るい X 線源である Sco X-1 と、歴史的にもっとも明るいトランジエントである A0620-00 に対しても直線偏光度の上限を与えるに留まった。

OSO-8 衛星には、やはりグラファイトの結晶を用いたブレッカ反射型偏光計が搭載された。この偏光計の M 値は、上の Ariel V 衛星のものより若干小さく、また有効面積も小さかったものの、偏光検出効率は向上していた。そのため、かに星雲、かにパルサー等から X 線偏光が有意に検出され、また、低質量 X 線連星系 Sco X-1 の偏光度として $0.39\% \pm 0.20\%$ (2.6keV)、 $1.31\% \pm 0.40\%$ (5.2keV) であるという結果が得られた。さらに、パルス周期と連星周期で平均された結果であったが、連星系パルサーである Cen X-3 の偏光度の上限が 2.6keV で 13.5%、5.2keV で 19% と決めることができた。Cen X-3 の 2.6keV での X 線偏光度はパルス位相と共に変化しているという報告もある(ただし 91% の信頼度)。同じく連星系パルサーである Her X-1 についても、2.6keV での偏光度の上限値が 60% であるとわかった。これらの上限値はそれまで予言されていた理論値と矛盾はなかったが、詳細な比較をするには至らなかった。

第2章 X線偏光検出器

X線の偏光は、X線の電場ベクトルに依存した相互作用を利用して検出可能となる。以下にX線偏光検出に用いられる主な相互作用をいくつかあげ、その特徴と、それらがどのように検出器に利用されるのかを説明する。

2.1 偏光検出に関連する過程

2.1.1 ブラッグ反射

ブラッグ反射は以下の条件式で表される。

$$2d \sin \theta = n\lambda \quad (2.1)$$

ここで d :格子間隔、 θ :X線の入射角、 n :正整数、 λ :X線の波長、である。これはブラッグの回折条件と呼ばれ、この条件を満たすとき反射X線は強め合い、この現象をブラッグ反射という。(図2.1)

ブラッグ反射では、入射X線の偏光ベクトルが入射面に対して平行な成分(σ 偏光)と垂直な成分(π 偏光)で反射率に違いがあらわれる。つまり、無偏光のX線を結晶に当ててブラッグ反射させると、偏光状態が変化する。 $\theta = 45^\circ$ で反射されるようなX線は、偏光の平行成分だけが反射されて完全偏光となる。しかし、ブラッグ条件に合ったX線しか反射しないため、偏光検出できるエネルギー範囲が限られてしまうというデメリットがある。

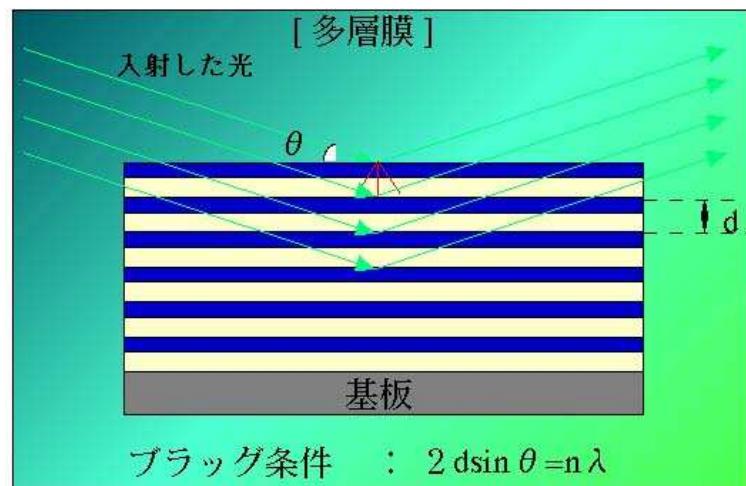


図 2.1 ブラッグ反射

2.1.2 トムソン散乱

入射X線のエネルギーが電子の結合エネルギーと比較して充分大きければ、X線は電子によりコンプトン散乱を受ける。入射X線、散乱X線のエネルギーをそれぞれ $h\nu$, $h\nu'$ 、散乱角を θ とすると、

$$h\nu' = \frac{h\nu}{1 + \frac{h\nu}{m_e c^2} (1 - \cos \theta)} \quad (2.2)$$

となる。

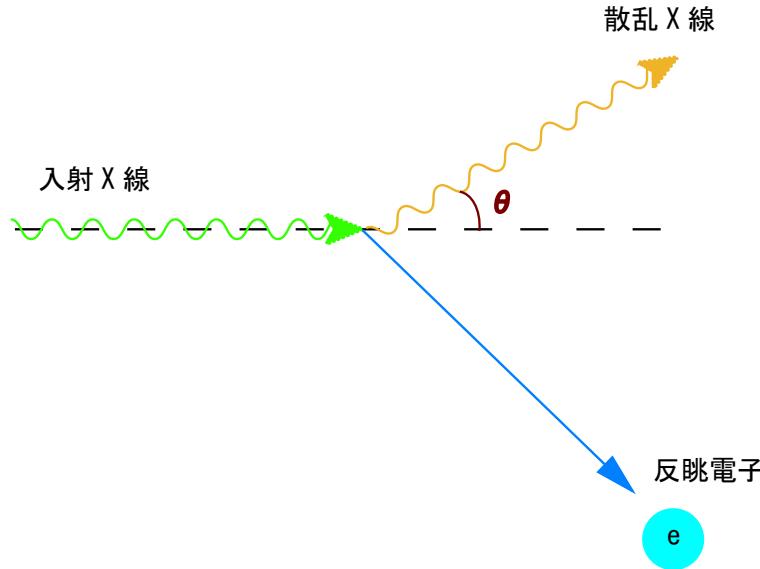


図 2.2 コンプトン散乱

入射X線のエネルギーが電子の静止エネルギーに対して小さい場合、トムソン散乱が起こる。トムソン散乱はコンプトン散乱と同様に入射X線と電子との間で起こる相互作用であるが、反跳電子が生成されない。散乱によりX線の方向が変わるだけで、エネルギーも失われない。トムソン散乱の微分断面積は

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = r_e^2 (1 - \sin^2 \theta \cos^2 \phi) \quad (2.3)$$

r_e : 電子の古典半径

θ : 入射X線と散乱X線のなす角

ϕ : 入射X線の電場方向と散乱X線のなす角

となる。

式(2.3)により、微分断面積は $\phi=90^\circ, 270^\circ$ のとき最大になり、 $\phi=0^\circ, 180^\circ$ のとき最小になる。これは散乱X線は入射X線の電場と垂直方向に放出されやすいということを示している。したがって、偏光X線に対して異方性を持つので、散乱方向を検出できればX線の偏光が求められるということになる。

2.1.3 光電吸収

軟X線領域(数 keV~数十 keV)での物質との相互作用は光電吸収が最も起こりやすい。光電吸収は、光子が吸収物質原子と相互作用して完全に消失し、光電子を放出する現象である。光子が

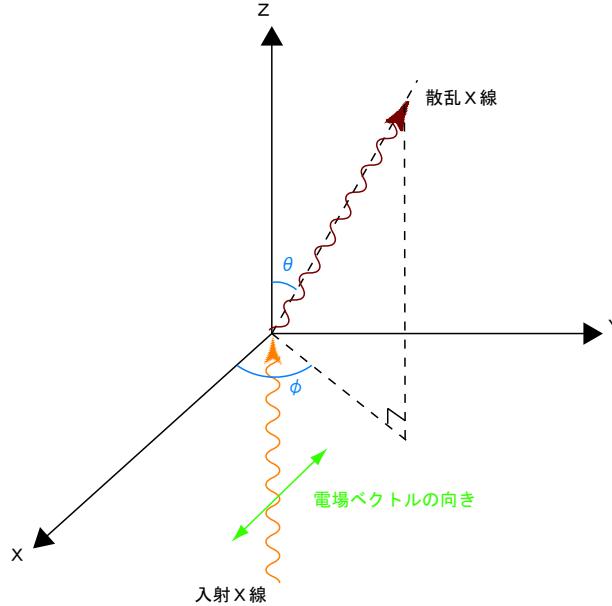


図 2.3 トムソン散乱

2keV 以上のエネルギーを持っている場合、原子の中で最も強く結合している K 裂電子が光電子として放出されやすい。このときの光電子のエネルギーは

$$E_e = h\nu - E_k \quad (2.4)$$

$h\nu$: 入射 X 線のエネルギー

E_k : 裂の束縛エネルギー

となる。

光電吸収では光電子が放出されることによって、K 裂に空孔が出来るため、原子は不安定な状態になる。この空孔は媒質中の自由電子の捕獲や、L 裂からの電子の遷移によってただちに満たされ、その際に特性 X 線が発生する。これらの X 線はほとんどが発生した近くで再び光電吸収されるが、いくらかの割合でオージェ電子を放出する。

X 線は電磁波なので、その電場はある方向に振動しており、光電子はこの電場の方向に平行に放出されやすいという性質がある。ただし、X 線のエネルギーが高いほど、前方散乱になる。X 線と 1 個の K 裂電子との散乱微分断面積は

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = r_e^2 \frac{Z^5}{137^4} \left(\frac{\mu}{k} \right)^{\frac{7}{2}} \frac{4\sqrt{2} \sin^2 \theta \cos^2 \phi}{(1 - \beta \cos \theta)^4} \quad (2.5)$$

r_e : 電子の古典半径

Z : 吸収物質の原子番号

μ : 電子の静止エネルギー

k : 入射 X 線のエネルギー

θ : 入射 X 線と光電子とのなす角

ϕ : 入射 X 線の電場ベクトルと光電子とのなす角

$$\beta = \frac{v}{c}$$

で与えられる。

式(2.5)より、 $\phi=0^\circ, 180^\circ$ のとき微分断面積は最大になり、 $\phi=90^\circ, 270^\circ$ では0になる。これは光電子は電場と平行方向に放出されやすく、垂直方向には放出されないことを示している。

したがって、光電子の放出方向を検出できればX線の偏光が求められる。

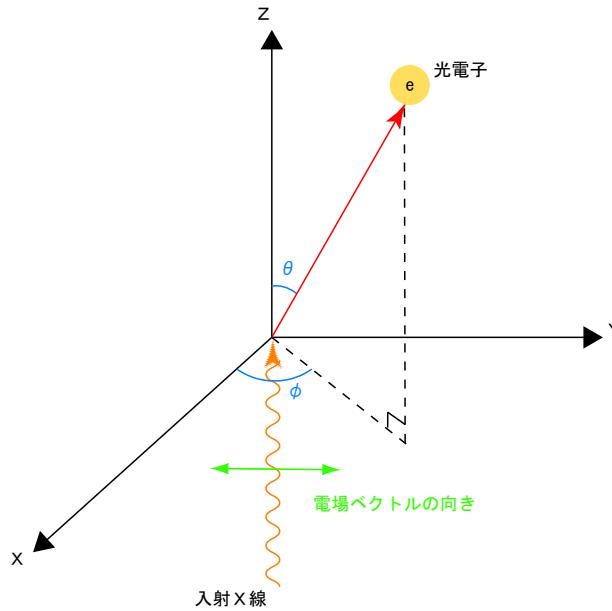


図 2.4 光電吸收

2.2 X線偏光検出器の種類と特徴

次に、以上のような相互作用を使った主なX線偏光検出器を紹介する。これらはX線天文学において用いられてきた、または現在X線天文学での応用を目標に開発が進められている。天体観測で使用するためには、天体からのX線強度が地上での放射実験のものに比べてはるかに弱いことや、天体からのX線スペクトルは一般に連続的であることから、偏光検出能力に加えて、

- 利用できるエネルギー範囲が広いこと
- 検出効率が高いこと

が要求される。

2.2.1 ブラッグ反射型

σ 偏光、 π 偏光のX線がブラッグ反射を起こしたときの反射率の違いにより、入射X線の偏光度を測定する。結晶に対する入射角を 45° にして、入射X線に平行な軸のまわりの検出器を 360° 回転させ、反射X線を測定すると、計数率の最大・最小が2回ずつ現れる。この原理を利用したブラッグ反射型偏光計は、OSO-8衛星やAriel V衛星に搭載された。中心の反射板には一般にモザイク結晶のグラファイトが用いられる。グラファイトを用いたときのブラッグ条件を満足する入射X線のエネルギーは、2.6keVと5.2keVである。ブラッグ反射型偏光計の利点は、10keV以下の低エネルギー側程強度が強いX線天体を対象にするのは良いという点である。しかし、ブラッ

グ角に相当するエネルギーからわずかにエネルギーの違うX線にはほとんど感度がない(エネルギー帯域が狭い)という点は、天体観測用としては欠点である。

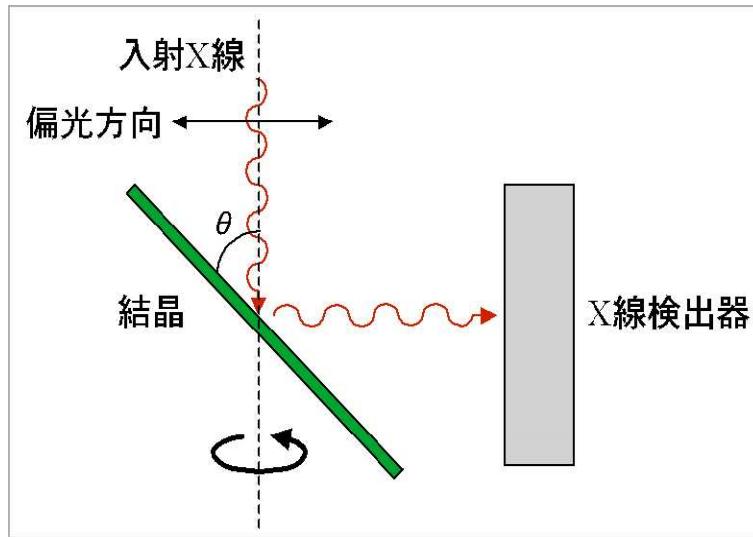


図 2.5 ブラッグ反射型偏光計の概念図

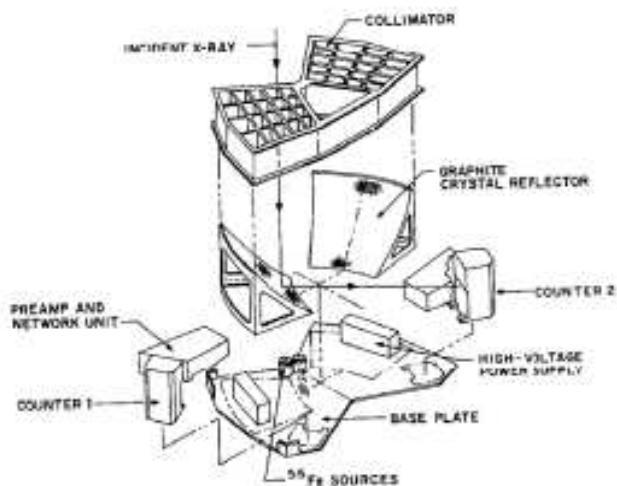


図 2.6 OSO-8衛星に搭載されたブラッグ反射型偏光計

2.2.2 トムソン散乱型

トムソン散乱では、散乱X線は入射X線の偏光方向に垂直な方向に放出されやすい。そのためトムソン散乱型偏光計は、入射X線を散乱させるための散乱体を中心に、散乱体を検出するための検出器を周りに配置する。検出器をX線の入射軸を中心にして360°回転させることによって、散乱X線は回転角度に依存した強度変動を示す。それを測定することにより、入射X線の偏光度を調べることができる(図2.7)。一般に散乱体に使われる物質は、散乱効率が高く光電吸収の少ない原子番号の低いLiやBeなどが選ばれる。トムソン散乱の効率が光電吸収の効率に対して無視

できなくなるような(図2.8)~10keV以上のX線に対してしか使えないが、プラグ反射型偏光計とは異なり利用できるエネルギー範囲は広い。また、散乱体の材質や測定装置の配置を最適化することにより、M値を大きくすることも可能である。しかし、偏光検出効率は散乱体の材質、検出器の立体角、対象エネルギーによって異なるが、1に近づけることは難しい。また、検出には散乱された光子を利用するため、撮像が困難であり、そもそも散乱される光子数も少ないという欠点がある。

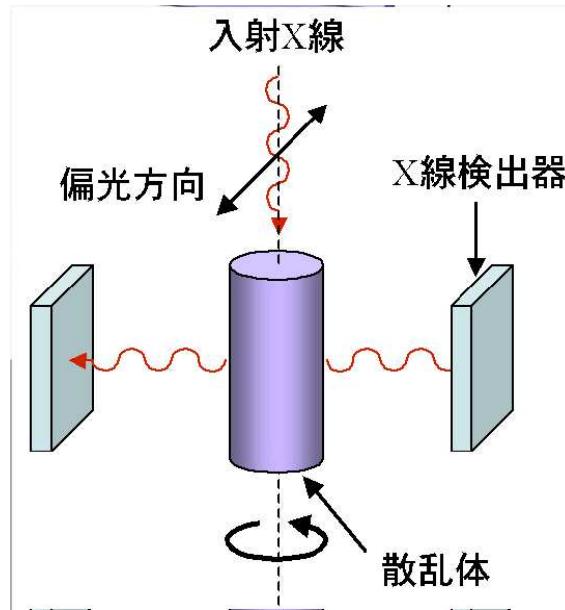


図2.7 トムソン散乱型偏光計の概念図

2.2.3 光電吸收型

光電吸収における光電子放出の異方性を通して偏光を測定する試みは、様々な検出器を利用して行われている。これらの検出器では、X線が光電吸収された際に放出する光電子が、固体あるいは検出器中のガスを電離して多数の電子の集団(1次電子雲)をつくる。1次電子雲の形は最初の光電子の飛跡を反映していると考えられるので、それを何らかの方法で情報としてとらえれば、偏光検出ができる。

これまで開発が進められてきた偏光計のうち代表的なものに、吸収する媒体として固体を用いた検出器にはCCD偏光計がある(図2.9)。CCD検出器はSiのような半導体をピクセル化して並べたもので、X線があるピクセルに入射すると、光電吸収により飛び出た光電子が周りの固体を電離して電子雲を作る。その電子雲が2ピクセル以上に跨ることにより、電子の飛び出た方向を推測することができる。これによってCCDは高い位置分解能の取得が可能である。しかし固体中の光電子の飛跡は短く、Siにおいては $(E/10)^{1.75}\mu\text{m}$ と計算されるので、~10keV程度のX線では1μm以下となる。1ピクセルのサイズが約10μmだとすると、この場合ピクセルを跨らないため、光電子の飛跡がわからず、偏光を検出することは難しい。また、CCDのX線検出効率が10keVで10%程度であり、高エネルギーのX線では検出することが難しくなるという欠点もある。[12]

吸収する媒体にガスを用いた検出器には、ライズタイム型偏光計とGEMを用いたMPGC(Micro-Pattern Gas Chamber)、キャピラリープレートを用いたCGPC(Capillary Gas Proportional Counter)

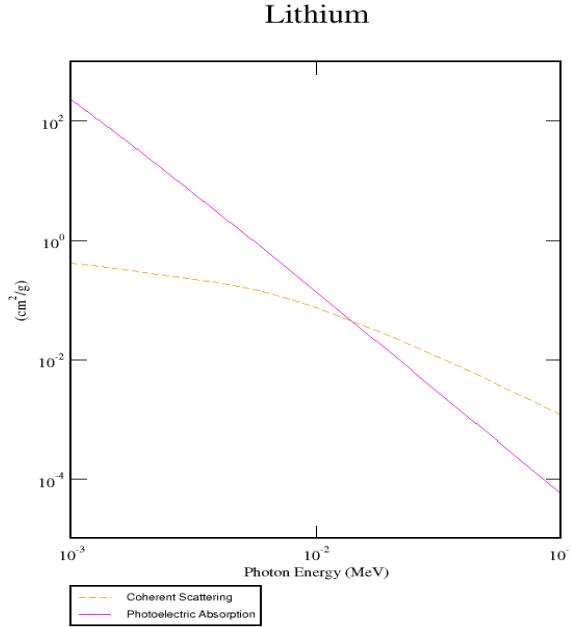


図 2.8 Li の質量減衰係数の X 線エネルギーによる変化。実線は光電吸収、破線はトムソン散乱。

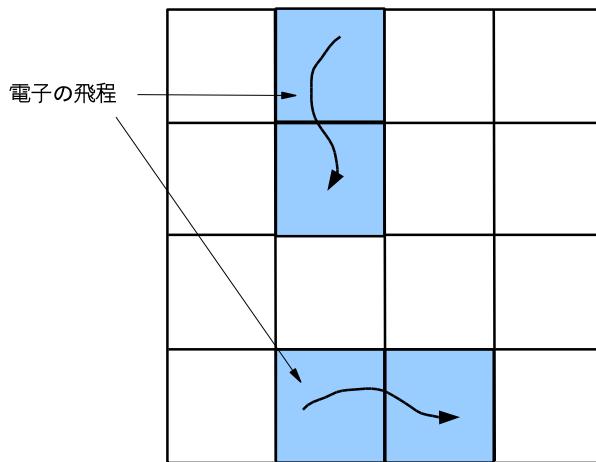


図 2.9 CCD 偏光計の偏光検出原理

がある。ライズタイム型は比例計数管を用いた、電子のガス増幅を利用した偏光計で、入射 X 線の偏光方向によってできる電子雲の広がり方の違いを、電子の収集時間の違い、つまり電荷信号の立ち上がり時間(ライズタイム)の変化でとらえるものである(図 2.10)。MPGC はガスフロー型のガス検出器で、希ガス原子と光電吸収させて 1 次電子雲を作り、その電子を GEM(Gas Electron Multiplier)によって電子増殖させる。その下に置いたピクセル状の電極によって 1 次電子雲の形を撮像検出する(図 2.11)。CGPC もこれに良く似た作りで、電極のかわりにキャピラリープレー

トを用い、そこで電子増殖中に起こる発光を CCD で撮像することにより、1 次電子雲の形を捕らえようとしている(図 2.12)。しかし、MPGC も CGPC も電子増幅をするため、エネルギー分解能は良くない。

ガス検出器の利点は、ガス中の光電子の飛程が半導体検出器の数千倍に及びはるかに長い。そのため X 線偏光検出は半導体検出器よりも容易であり、精度も高くなる。さらにガスの種類や気圧などを最適化することで、数 keV～数 10keV 程度までの X 線に感度をもつ検出器の製作が可能である。

以上の偏光度検出方法の特徴をまとめると、表 2.1 のようになる。X 線天体観測では、すべての条件を満たすガス検出器を用いた、光電吸収を利用する方法がもっとも好ましいと思われる。そして、私はガス比例計数管よりも高いエネルギー分解能の取得が可能な、ガス蛍光比例計数管を用いた偏光計についてその基礎特性を調べた。

表 2.1 偏光検出の方法とそれに対する特徴

検出原理	撮像	偏光	有効面積	エネルギー分解能
プラッグ反射	×	○	△	×
トムソン散乱	△	◎	△	○
光電吸収(ガス)	○	○	○	○
光電吸収(CCD)	◎	△	△	◎

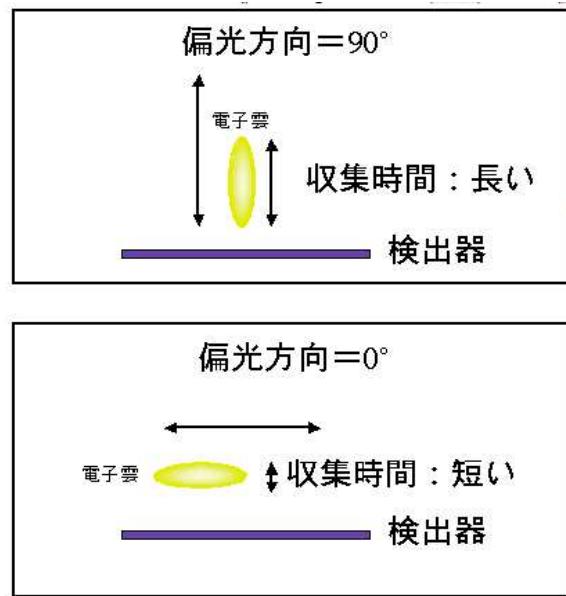


図 2.10 ライズタイム型偏光計の概念図

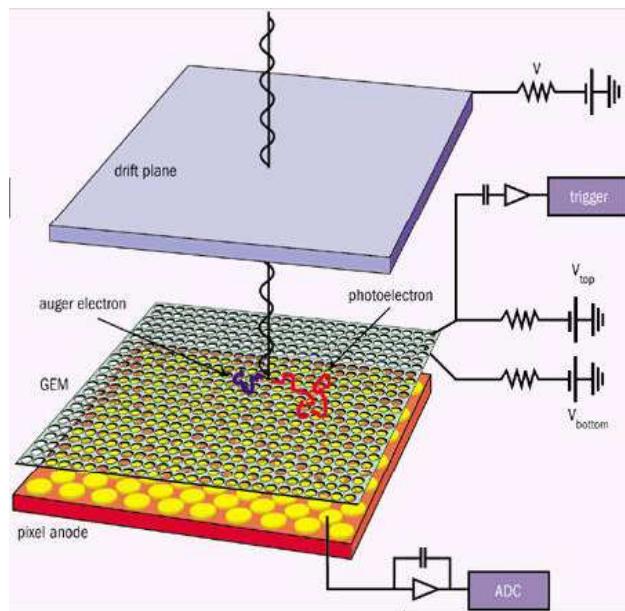


図 2.11 MPGC

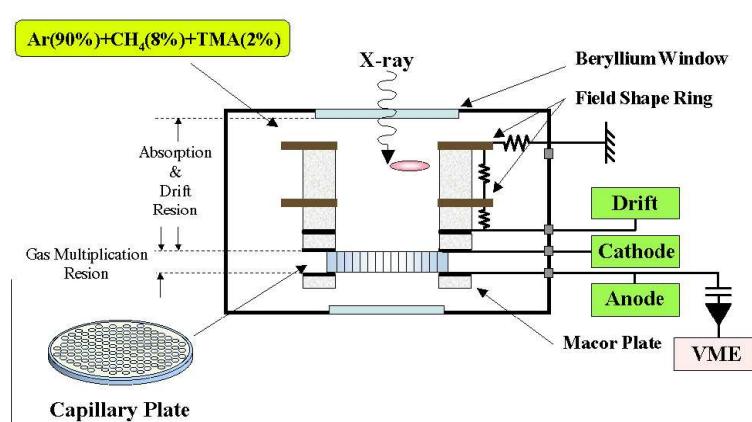


图 2.12 CGPC

第3章 ガス蛍光比例計数管(GSPC)

3.1 GSPCの構造と検出原理

3.1.1 GSPCの構造

GSPCはX線を吸収して蛍光紫外線に変換するガスセル部と、その蛍光紫外線を受け電子に変え、増幅するPMTからなる。(図3.1)

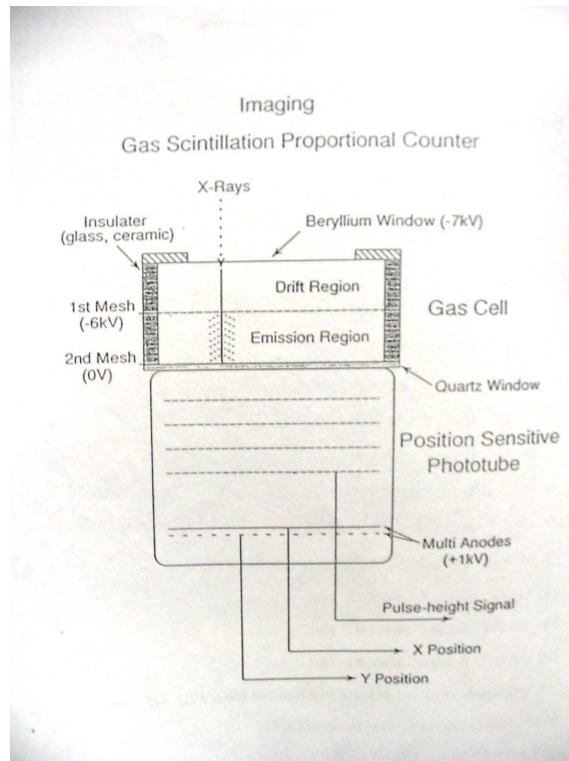


図 3.1 GSPC

ガスセル部の構造は「あすか」GISでは図3.2のようになっている。ガスセルの上部は、BeやポリプロピレンなどのX線透過率の高い物質でできた薄い膜が張られ、X線入射窓となっている。衛星で用いる場合は、X線入射窓は膜だけで真空中でガス圧を支えるには構造的に弱いため、メッシュによって支えられることが多い。特に窓の面積を大きくする場合は井桁も使われる。「あすか」GISの場合は窓に $10\mu\text{m}$ のBe膜が使われており、直径50mmの大面積をメッシュと井桁の2重構造によって支えられている。

中間にあるメッシュは適当な電位を与えられることによって、ガスセルを2つの領域に分ける役割をしている。ガスセルは、中間メッシュによって発光しない程度の弱い電場をかけたドリフト領域と、発光するのに十分でありかつ電子なだれが起きない程度の電場をかけた発光領域に分

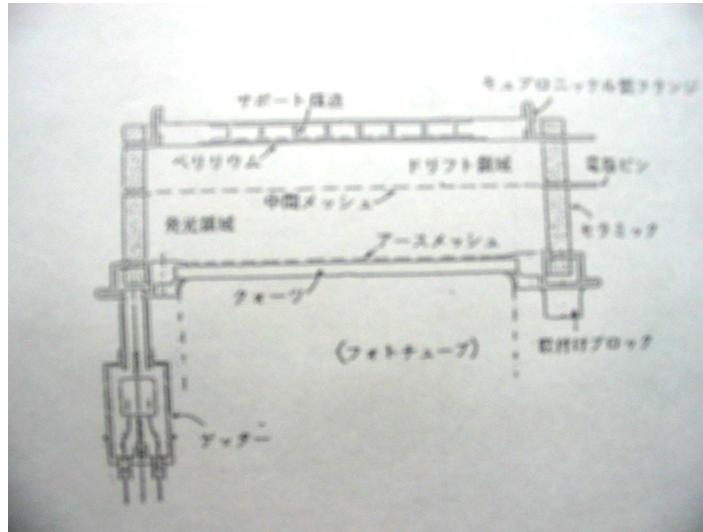


図 3.2 「あすか」 GIS のガスセル部

けられている。

ガスセルの下部はメッシュと石英窓からなる。メッシュはグラウンド電位をとるのに使われる。この下に PMT が付くようになっており、ガスセル内で発生した紫外線を PMT に送るために、紫外線の透過性と耐久性の高い石英(厚さ 2mm で透過率~0.7)が窓材として使われる。

ガスセルの内部には希ガスの Xe を詰める。Xe は化学反応を起こしにくく自由電子を吸着しにくい。また原子番号が大きく X 線に対する光電吸収断面積が大きく、平均電離エネルギーが 21.6eV と低く良いエネルギー分解能が得られる。これらの理由によって封入ガスとして Xe が選ばれる。

PMT の構造を図 3.3 に示す(「あすか」 GIS の PMT)。PMT の受光部にはガスセルの下部と同じく石英窓が使われておらず、紫外線が透過しやすいようになっている。また、石英窓の下部はバイアルカリ(Sb-Rb-Cs, Sb-K-Cs)の光電面となっており、ここで入射した紫外線が光電子に変わる。その下に電子增幅用のダイノードが並ぶ。「あすか」 GIS の場合、いろいろ試作品を試した結果ダイノードの数は 10 段が最適であることがわかった。このダイノードの間には 1kV の電圧が、入射位置を検出するため中の電場が平行になるようにかけられている。また、「あすか」 GIS には位置検出用のマルチアノード線が X, Y 両方向に 16 本ずつ張ってある。このアノードによってガスセルから来る紫外線の分布を決め、その中心を機上の CPU によって計算し入射光子の位置を決める。

3.1.2 GSPC の X 線検出原理

入射窓を透過した X 線はガスセルのドリフト領域で Xe ガスに光電吸収され、X 線のエネルギーに比例した数の 1 次電子群を形成する。1 次電子群はガスセルにかかる電場に引かれ、中間メッシュまでドリフトする。このドリフト領域にかける電場を弱くするとドリフトする速度が遅くなり、1 次電子群が拡散して広がってしまうため位置分解能が悪くなる。しかし、電場を強くし過ぎると、Xe との衝突の際に励起して発光させてしまう。ここでドリフト領域にかかる電場の適正值を求めてみる。

電場に引かれて移動する 1 次電子群は、電子の平均自由行程間に電場から受けるエネルギーと Xe との衝突の際に失う平均エネルギーとがつりあった時点で、一定の平均速度(ドリフト速度)で移動するようになる。ドリフト速度を W 、電子の平均自由行程を d 、電子の質量を m_e 、電場の強

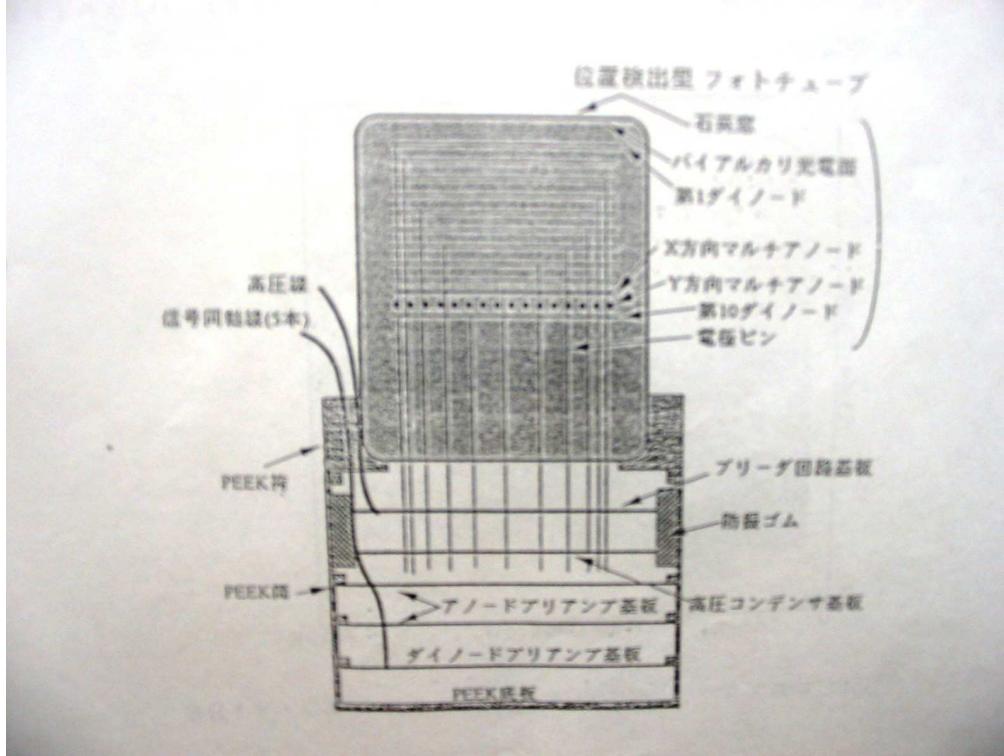


図 3.3 「あすか」 GIS の PMT

さを E とする。電子の移動速度を v とすると、平均自由行程間に電子が電場から受けとる力積と電子の運動量変化の間には、

$$eE \frac{d}{v} = m_e W \quad (3.1)$$

という関係が成り立つ。電子が Xe と弾性衝突した際に失うエネルギーの割合は平均すると $\frac{2m_e}{M}$ であり、電場から得るエネルギーと衝突で失うエネルギーの間には平衡が成り立ち、

$$eEW \frac{d}{v} = \frac{2m_e}{M} U \quad (3.2)$$

ここで U は電子の運動エネルギーである。式 (3.1) と式 (3.2) から W を消すと、

$$\frac{(eEd)^2}{m_e v^2} = \frac{2m_e}{M} U \quad (3.3)$$

となる。 $U = \frac{1}{2} m_e v^2$ だから、

$$U = \frac{eEd}{2} \sqrt{\frac{M}{m_e}} \quad (3.4)$$

また、 $d = \frac{1}{\sigma\rho}$ であり、 σ は原子のもつ断面積、 ρ は原子の密度である。 σ は原子のファンデルワールス半径 r を用いて $\sigma = \pi r^2$ で表せる。 r は Xe で 2.20\AA である。また、ガスは簡単にするため 100% Xe ガスであるとし、0 °C で 1.2 気圧あるとする。このとき、 $\rho = 3.23 \times 10^{19} \text{ 個}/\text{cm}^3$ である。これらを式 (3.4) に代入して計算すると、

$$U = 4.98E[\text{eV}] \quad (3.5)$$

となる。ただし E の単位は kV/cm で測るとして計算した。Xe の平均励起エネルギーは 8eV 程度なので、発光しないためにはドリフト領域にかかる電場は $E < 1.6\text{kV}/\text{cm}$ である必要がある。また、「あすか」 GIS の場合は Xe だけでなく He も混合したガスが用いられているため、電子の平均自由行程が長くなり、この値より少し低くなる。

中間メッシュまで来た 1 次電子群は、発光領域に入ると加速され次々と Xe ガスに衝突、励起させながらグラウンドメッシュまで到達しメッシュに吸収される。Xe の平均電離エネルギーが 21.6eV であるから、電子なだれを避けるためには発光領域にかかる電場は、式(3.5)より $4.3\text{kV}/\text{cm}$ 以下でなくてはならないことがわかる。

一方、電子によって励起された Xe ガスは基底状態に戻るときに紫外線(波長 172nm)を発する。このようにして 1 次電子群が通過した領域から大量の紫外線が放出され、その一部がガスセル下部の石英窓を通して PMT に入る。1 次電子が生成されてからグラウンドメッシュに吸収されるまで、生成された電子数は変化しないため、PC のような電子增幅過程による揺らぎがなく、PC より 2~3 倍も良いエネルギー分解能が得られる。PMT に入った紫外線は光電面で電子に変換され、ダイオードでその電子が増幅されて電気信号として検出される。「あすか」 GIS の場合はさらに、X,Y 方向に張られたマルチアノードに到達した電荷分布によって X 線入射位置も決められる(図 3.4)。

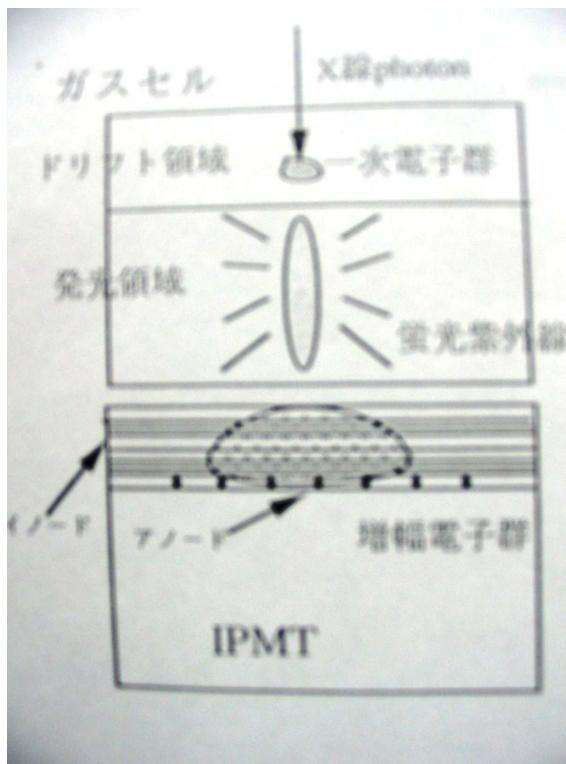


図 3.4 GSPC の原理

例として、 ^{55}Fe からの 5.9keV の X 線が「あすか」 GIS に入射した場合を考える。エネルギー E の X 線が平均電離エネルギー W のガスの詰まつたガスセルに入射するときに出来る 1 次電子の数は、 $N_0 = \frac{E}{W}$ で表される。Xe の平均電離エネルギーが 21.6eV であるから、 $N_0 = \frac{5900}{21.6} = 273$ 個の 1 次電子ができる。長さ 1.5cm の発光領域にかかる電圧を 7kV、発光開始電圧を 2.4kV とすると、発光領域で生成される光子数は $273 \times \frac{7000 - 2400}{8} = 1.57 \times 10^5$ 個の光子ができる。ドリフト領域で止まった X 線であれば、その止まった位置によらず発光領域を通過する距離や時間が同じ

になるため、発生する蛍光紫外線の量が X 線のエネルギーに比例する。逆に発光時間が長いイベントや短いイベントは、電子群が広がっているか発光領域で生成されたことを示しており、荷電粒子などによる非 X 線バックグラウンドである可能性が高い。このような非 X 線バックグラウンドを発光時間用いて区別するためにドリフト領域は有効である。

3.1.3 GSPC のエネルギー分解能

3.1.2 節でみたように、GSPC は入射 X 線が Xe ガス中で作る 1 次電子群を加速する際、電場を制限して 2 次電離を起こさないようにしているため、電子なだれによる分解能の劣化がない。これがエネルギー分解能を比例計数管より良くしている点である。

X 線が入射したときにできる 1 次電子数 N_0 の分散はポアソン分布により、 $\overline{(N - N_0)^2} = FN_0$ となる。F は Fano 因子と呼ばれ、一般に $F < 1$ のガスに固有の値で、Xe では $F \simeq 0.2$ であることが知られている。電子 1 個あたりに出される光子数を l 、発光領域で放出された光子が、PMT の光電面に入射して光電子を放出する平均効率を $\bar{\eta}$ 、PMT のダイノードの 1 段あたりの増幅率を k とすると、エネルギー分解能は、

$$\left(\frac{\delta n}{n}\right)^2 = \frac{1}{N_0} \left[F + \frac{1}{l} \left(1 + \frac{1 - \bar{\eta}}{\bar{\eta}} + \frac{1}{\bar{\eta}} \frac{2f_p}{k - 1} \right) \right] \quad (3.6)$$

となる。右辺の第 1 項は、1 次電子数 N_0 のゆらぎ、第 2 項は発光領域で発生する光子数 $N_0 l$ のゆらぎ、第 3 項と第 4 項は PMT でのゆらぎである。ここで f_p は電子増幅過程における Fano 因子であり、GIS の PMT では $f_p \simeq 0.5$ である。これらのうち第 1 項の寄与が最も大きく、ついで第 3 項の寄与が大きい。「あすか」 GIS の場合は、石英窓の紫外線透過率が~0.7、PMT の光電面の窓の透過率と量子効率をあわせて~0.2 程度である。また PMT の光電面からガスセル内の発光に対する立体角の関係上、紫外線光子の 3 分の 1 程度しか PMT 側に放出されないことも考えると、 $\bar{\eta} \simeq 5\%$ となる。5.9keV の X 線が入射した場合、先程の計算によると 1.57×10^5 個の光子ができるうことになるので、PMT の光電面では、 7.85×10^3 個の光電子ができることになる。

式 (3.6) より $\bar{\eta} l$ を大きくしていくば、分解能は $\sqrt{\frac{F}{N_0}}$ に近づく。この $\sqrt{\frac{F}{N_0}}$ を GSPC の究極分解能と呼ぶ。Xe の場合、5.9keV の X 線が入射したときは $N_0 = 273$ なので、分解能は $\sqrt{\frac{F}{N_0}} = 2.71\%$ となる。FWHM に直すと 6.4% である。GSPC では Xe ガスを使う限り、原理的に分解能はこれ以上良くすることはできない。「あすか」 GIS は PMT における増幅過程によるゆらぎ ((3.6) 式の第 3 項と第 4 項) などもあり、8% 程度の分解能を持つが、ガスカウンターとしてはこれがほぼ限界に近い。 [3]

3.1.4 ドリフトレス GSPC

ドリフトレス GSPC とは、中間メッシュを取り除き発光領域だけにした GSPC である。そうすることによって 1 次電子の拡散が抑えられ、位置分解能が良くなる。「あすか」 GIS と比較してみると、蛍光 X 線のゆらぎや PMT での増幅過程におけるゆらぎは GIS と変わらないが、1 次電子群の拡散がかなり小さくなるため、位置分解能は「あすか」 GIS より 20% 以上良くなると期待される。

また、入射した X 線が止まった深さが分かるため、低エネルギー側では深い位置に止まったイベントは全てバックグラウンドとみなして効率良く落とせるため、低エネルギー側で格段にバックグラウンド除去能力が上がるということも予想される。

しかし、ドリフトレスにすることによって、同じエネルギーの X 線が入射してもガスセルの中で止まる位置が違うため、入射 X 線のエネルギーと PMT で見るパルスハイドが比例しないとい

う問題があるが、これは1次電子がガスセル中を通過する時間(ライズタイム)の補正により解決することになる。[4]

3.2 現在までの基礎開発状況

3.2.1 EB-CCD を用いた撮像実験

私たちは今までの研究で、このようなGSPCを用いた光電吸収型ガスX線偏光計として応用するための準備として、GSPC中の電子雲の飛跡をEB-CCDで読み出す装置を試作し、その性能を確かめた。ガスセルの下部にはPMTの代わりとして、真空管による電子増幅と高い位置分解能を合わせ持つEB-CCDを使った。

EB-CCD

以下に、EB-CCDの仕様(表3.1)とEB-CCDの読み出し原理(図3.5)を示す。

表3.1 EB-CCD C7190-21(浜松ホトニクス社製)の仕様

出力	TV レート出力
撮像素子	2/3型フレームトランスマスク CCD
画素数	680 × 1000
有効画素数	680 × 480
画素サイズ	14μm × 14μm
有効素子サイズ	8.96mm × 6.72mm
ゲイン	600倍
読み出し速度	30フレーム/秒

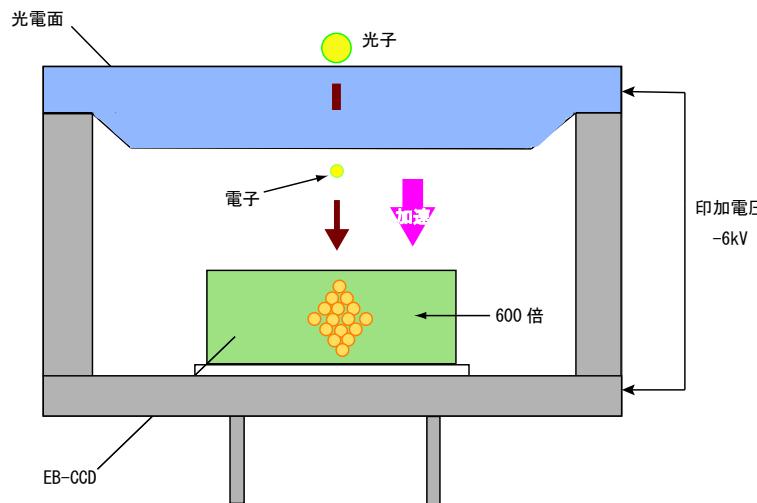


図3.5 EB-CCDの読み出し原理

GSPC + EB-CCD

ガスセルに入射させた X 線は、光電吸収されて X 線の電場方向に広がった電子雲をつくる。その電子雲を高電場で加速させ、Xe 原子に衝突させて、発生した紫外光(172nm)を CCD に入射させる。CCD の光電面で再び光電子を出し、電場加速により増幅された電子を、EB-CCD で電気信号として読み出す。GSPC から出てくる紫外光は、入射位置の近くが最も強い軸対称の分布を示す。そこで CCD を用いることで、位置と光量を測定することができる。

結果

以下に、 ^{55}Fe (5.9keV) を放射 X 線源として入射させたときの、結果を示す。

- ガスセルにかける印加電圧の増加に伴い、明るい輝度の数が増え、発生した紫外線の量が多くなったことがわかった(図 3.6)。
- ^{55}Fe の X 線を入射させたときと、X 線を入射させていないバックグラウンドとの輝度の明るさの違いもあることがわかった。

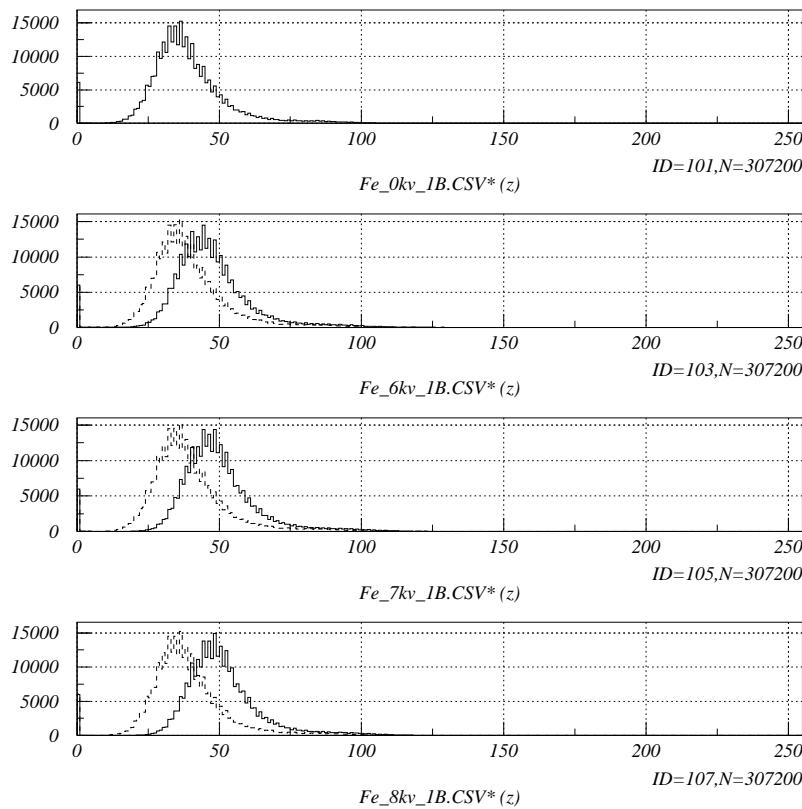


図 3.6 ガスセル HV に伴う光量の変化

CCD で見た画像(640×480 ピクセル)の 2 次元のグラフを、横軸:輝度(z)、縦軸:その z を持つ画素数、で表わしている。上からガスセル HV が 0[kv], 6[kv], 7[kv], 8[kv] で、破線は 0[kv]

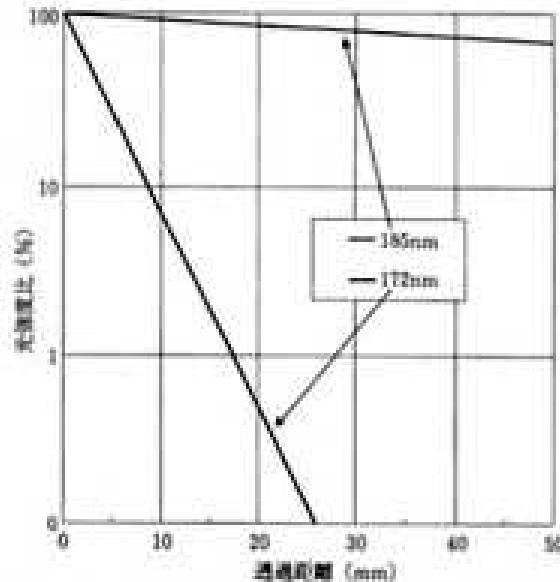


図 3.7 172nm の紫外線の大気中における減衰特性

この実験では⁵⁵Feから出たX線により、ガスセル内で紫外線の発光があることはCCDで読み取ることができた。しかし、絶対的な光量が不足しているため、CCDで電子雲の飛跡を撮像することまではできなかった。また、絶対的な光量の不足だけでなく、発光波長にも問題があると思われる。Xeの励起発光波長は172nm、Arに至っては126nmという真空紫外領域である。この短い波長の光は大気中の酸素に非常に吸収されやすい(図3.7)ほか、真空紫外領域の波長に対する石英窓の透過率やCCDの量子効率(図3.8)などにより、最終的にCCDで得られる光子数は激減してしまう。今回用いたCCDでは、最終的にガスセルで発生した紫外光子数の7%程度しかCCDで得られないことがわかった。そこで、発光量の増加、発光波長の変換等の効果が期待されるペニング混合ガスの使用を試みることを考えた。

【分光感度特性】

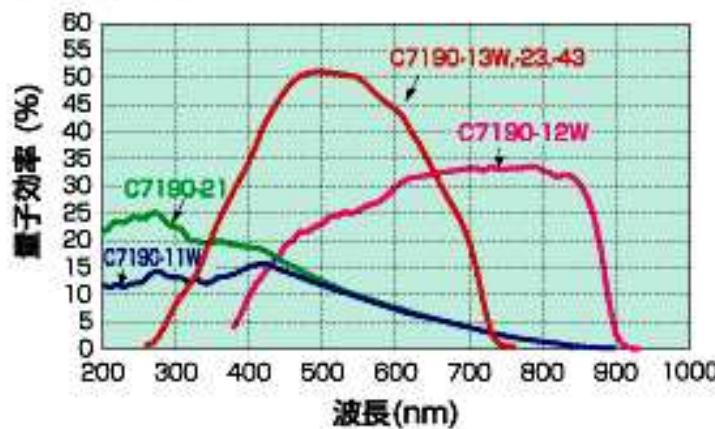


図 3.8 EB-CCD(C7190-21) の分光感度特性

ペニング効果を利用した先行研究

今までペニング混合ガスを使用した比例計数管についての研究は、いくつかのグループによつて行なわれ、電子増幅時の電子数の増加、それによる低電圧での動作、エネルギー分解能の向上など、比例計数管の基本性能の向上に大きく貢献することが発表されている。また、ペニング混合ガスの発光特性についても、発光量の増加や発光波長のスペクトルが発表され、Austin, Ramsey両氏による実験では Ar+TMA ガスを使用した比例計数管と CCD カメラを組み合わせることで X 線の偏光度の測定に成功している。さらに、キャピラリープレートを用いたガス比例計数管である CGPC(Capillary Gas Proportional Counter) での、Ar+TMA, TEA ガスを用いたペニング効果による基礎特性および撮像特性の評価実験も行なわれており、偏光計としては機能しないまでも、電子数の増加と発光波長の変換による大幅な向上が確認されている。

本研究の目的は、ペニング混合ガスを使用した GSPC の基礎特性および撮像特性の確認にある。

第4章 ペニング混合ガス

4.1 ペニング効果

ガスセル内では主に、電子やX線の衝突により励起や電離が起こる。今回の実験では、Ar,Xeといった単体の気体に混合ガスとしてCF₄を添加することにより、二種類のガスによる相互作用が期待され、そのひとつにペニング効果がある。

励起状態には準安定励起状態というものがある。これは基底準位との間の光学的遷移が量子論的に禁止されていて、光を発して励起状態を抜け出すことが出来ない比較的寿命が長い励起状態である(数μs～数s)。ペニング効果とは、この状態にある原子もしくは分子(A)と、他の原子や分子(B)との衝突の際に、Aの励起ポテンシャルがBの電離ポテンシャルを上回っている場合、Aの内部エネルギーをBに与えることによって、Aは基底準位に戻りBは電離する。このエネルギーの受け渡しによる電離をペニング電離と呼ぶ。励起状態のAをA*で表すとすると、反応式は、



と表せる。

ガス比例計数管では、この反応は主に增幅領域で起こる。ペニング効果を利用することの最大の利点は、(4.1)式でわかるように通常のガスを使用したときと比べ、電子数が増加することにある。電子数の増加は、電子增幅のゆらぎを少なくすることでエネルギー分解能の向上につながるほか、従来より低い印加電圧での高い電子增幅が可能ならば、放電やチャージアップ等の問題も解決されるなど、ガス比例計数管としての基本性能の向上につながる。

さらに今回利用したCF₄は、脱励起の際に近紫外領域での発光をすることが知られている。これらは従来のArやXeガスの脱励起による発光が、それぞれ126nm、172nmという真空紫外領域であることに比べ、CF₄添加後の発光波長は193nm、352nmとなるので、石英窓の透過率も高くPMTやCCDでの検出に非常に有利であると言える。

4.2 CF₄

CF₄は炭素のフッ化物で、常温で無色の気体である。また、フロンの一種で温室効果ガスとして知られている。以下の表にCF₄の基本的な性質を示す。

表 4.1 CF₄ の性質

融点(℃)	-184
沸点(℃)	-128
解離エネルギーのしきい値(eV)	12.5
電離エネルギー(eV)	5～6

4.3 CF₄ のガス中の相互作用

ガスセル内に入ったX線は、原子や分子と光電吸収を起こし光電子を放出する。ここではXeを中心に話を進める。



光電子は電場により加速され、原子や分子と衝突して励起や電離を次々と引き起こす。

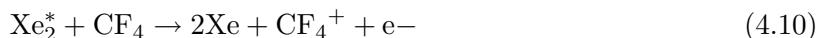


式(4.7)は解離反応である(CF₃とFはラジカル。ラジカルについては後述参照(5.3節))。式(4.7)の他にもCF₂(ラジカル)を作る解離反応もある。

Xe*は希ガス2量体のキセノンエキシマXe₂*を形成し、光子(172nm)を放出し、脱励起を行う(Arの場合は126nm)。



ペニング混合ガスの場合、キセノンエキシマ及び脱励起の際に放出された光子がCF₄と反応し、ペニング電離や励起を起こすと考えられる。



こうして励起したCF₄は光子を放出して脱励起を行う。この際に放出する光子の波長は62nmである。



また、式(4.8)のようなXe*がキセノンエキシマを形成する過程が、フッ素原子との間で起こり、希ガスハロゲン化物のフッ化キセノンエキシマを作るということも考えられる。



これも式(4.9)と同様に脱励起し光子を放出する。



このとき放出される光子の波長は352nmであり、Xe₂*が緩和する際に放出する光子の波長より長く、検出しやすい領域の光子数が増加し、光量が増加することが期待できる(Arの場合は193nm)。イメージングの際はこの光子を捕らえる事になる。

第5章 ペニング混合ガスによる基礎特性の評価

第4章からペニング効果を起こせば、波長変換による光量の増加が期待できるとわかった。そこでガスセル内に封入する希ガス(Ar,Xe)に、ペニング混合ガスとしてCF₄を加え、それによる基礎特性を調べるための実験を行なった。

5.1 セットアップ

図5.1は今回の実験のために使用したセットアップである。

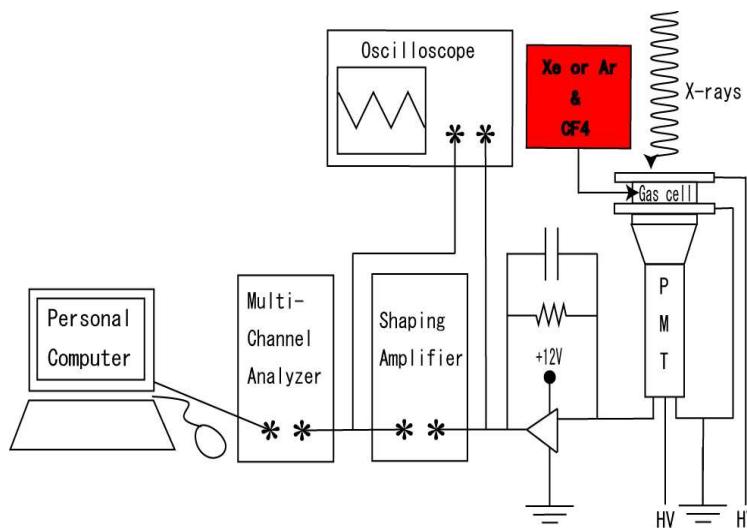


図5.1 ペニング混合ガスによるGSPCの基礎特性を調べるためのセットアップ

まずGSPCのガスセルはドリフトレス型のガスセルを使った。これは、今回の実験は第3章の3.2節で示した撮像実験の延長として、ペニング混合ガスを使った基礎特性の評価であるので、位置分解能の良いドリフトレス型で行なうこととした。ガスセルの下につくPMTは浜松ホトニクス社製の光電子増倍管を用いた。この光電子増倍管は窓材に合成石英を使用しており、紫外光に対する透過率が良くなっている。

PMTで電子増幅され電荷に変換された後、電荷感応型アンプで電荷を電圧に変換して、Shaping Amplifier(微分・積分回路)で波形整形して出力波形をガウス関数型に近づけた。その出力先は2つに分かれており、オシロスコープで波形を直接観察し、AD変換されMCA(Multi Channel Analyzer)を通してパソコン上でスペクトル測定を行う。

またガスの循環システムを図5.2に示す。GSPCではガスセル内のガスを循環ポンプで循環させ、不純物をゲッターを用いて取り除く。これは少量の酸素等の活性ガスがガスセル内に入っただけで、ゲインが下がり分解能が悪くなるためである。そのためガスを入れる際には、真空ポンプによってガスセル内の不純物を充分取り除いておく必要がある。真空ポンプはロータリーポン

プロトターボポンプになっており、 1.0×10^{-4} Pa 程度まで真空引きすれば充分である。

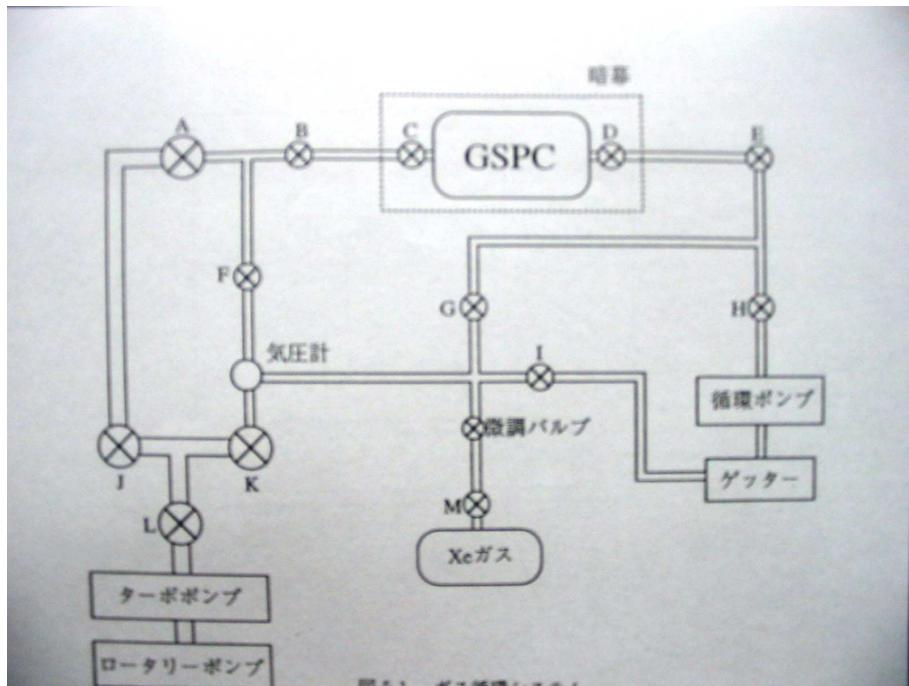


図 5.2 ガスの循環システム

5.2 実験

5.2.1 今回用いた GSPC の性能

ペニング混合ガスによる基礎特性を調べる前に、まず今回用いたドリフトレス型GSPCの性能を調べた。今回、X線源には放射性同位体の ^{55}Fe (5.9keV 特性 X 線)を用いた。なお、この X 線は無偏光である。

エネルギー分解能

ガスセルに Xe を封入したときに取得したスペクトルを図 5.3 に示す。横軸は PMT からの電気信号の強さ、つまりガスセル内で発光した紫外線光子の数に比例しており、縦軸はその信号を出した数である。ガスセルにかける印加電圧を上げていくにつれて、ピークチャンネルも右にずれていき、測定の精度が上がっていることがわかる。

図 5.4 は得られたスペクトルから、ガスセルにかける HV とピークチャンネルの関係をグラフにしたものである。その近似した値はほぼ直線上に並んでいる。この直線の x 切片が GSPC で発光を起こすのに必要な最低電圧であり、その値は 6.87kV である。

また、得られたスペクトルからピークチャンネルの逆数とエネルギー分解能の関係をグラフにした(図 5.5)。これを見ると、HV を上げる程精度が良くなっていることがわかる。この近似した直線の y 切片がドリフトレス型 GSPC の究極分解能となり、その値はおよそ 19.3% となる。理想的なガス検出器のエネルギー分解能が 20% であるので、妥当な値であると言える。

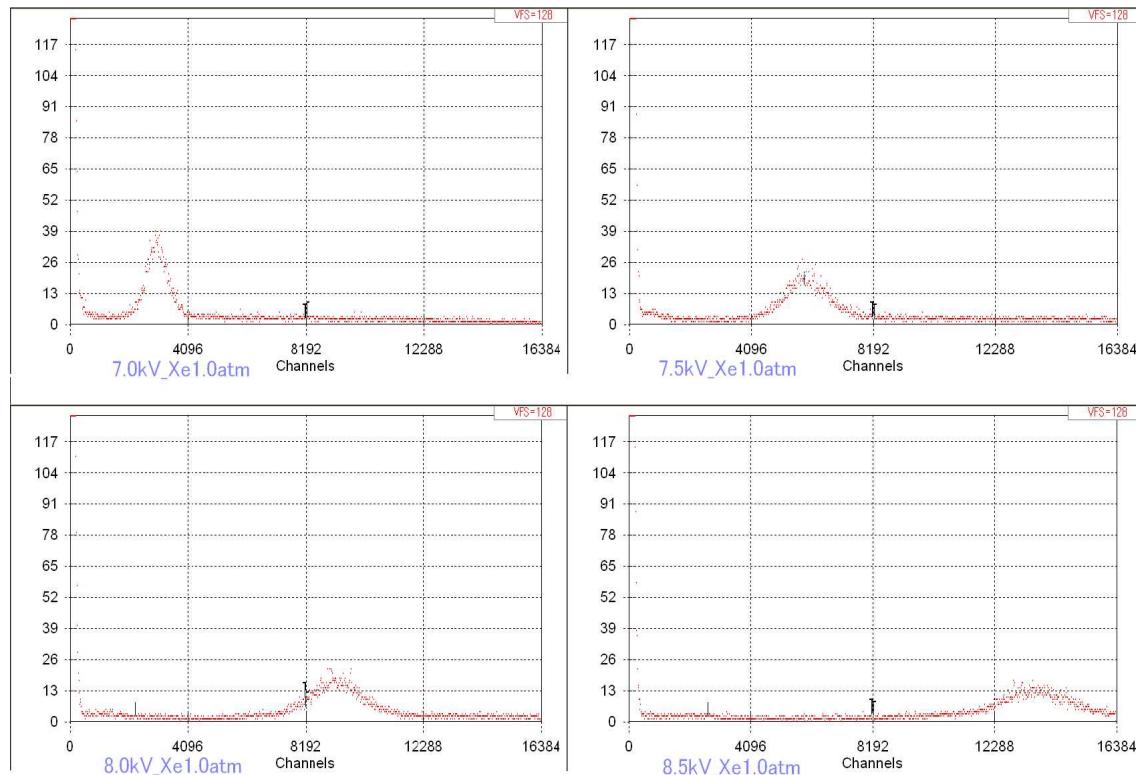


図 5.3 GSPC のスペクトル

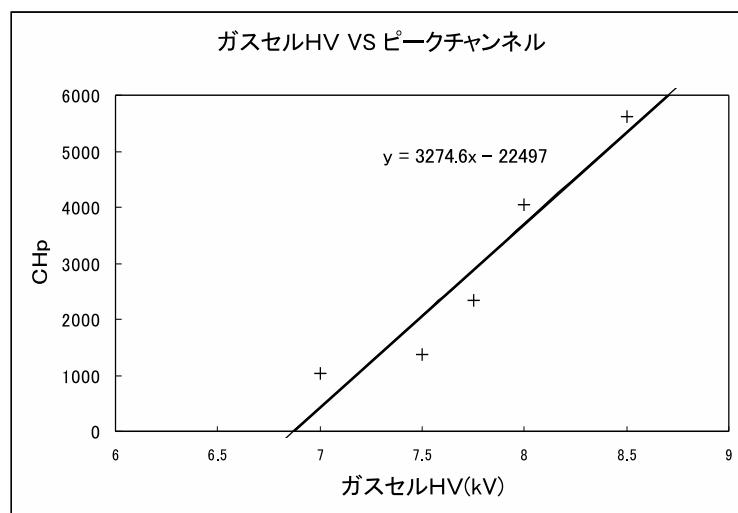


図 5.4 ガスセルにかける HV vs ピークチャンネル

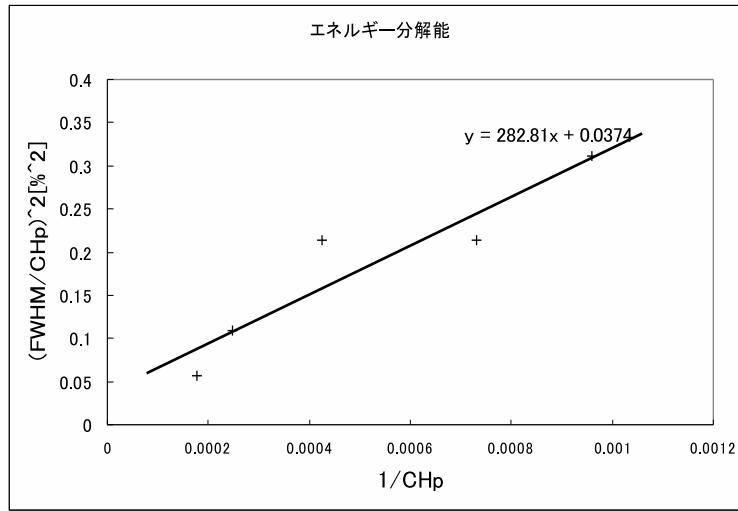


図 5.5 エネルギー分解能

ガスの厚さに対する X 線の吸収

また、ドリフトレス型 GSPC はドリフト領域のないガスセルのため、入射 X 線がどれくらいの深さでガスに吸収されるかが気になる。

5.9keV の X 線に対する、Xe と Ar の指數減衰透過曲線を以下に示す(図 5.6)。

今回の実験で使用したガスセルの厚さは 20mm であり、平均自由行程は約 65% の X 線がガスに吸収される厚さである。

Xe の場合、平均自由行程は 2.92mm であり、10mm の位置では 97% の X 線が吸収されている。つまり、入射 X 線の 97% は入射してから 10mm の位置では発光していることになり、20mm というガスセルの厚さは充分な長さであることがわかる。

Ar の場合、平均自由行程は 23.8mm であり、10mm で吸収される X 線は 35% しかない。しかも、10mm から 20mm の間でおよそ 20% の X 線が吸収されている。この 20% の X 線は充分な発光距離がないため、普通より弱い信号となり、全体的な出力信号のゆらぎを大きくしていると考えられる。

よって、Ar は Xe に比べて X 線の吸収率が小さいので、元の 1 次電子群の生成量が少なくなるのではないかと考えられる。

5.2.2 ペニング混合ガスによる GSPC での実験

このような GSPC を用いて、CF₄ を使ったペニング混合ガスの実験を、Ar と Xe に対してそれぞれ行なった。ガスセルには Ar,Xe それぞれの主ガスを 1.0 気圧入れた状態から、CF₄ を 0.05 気圧ずつ徐々に加えていき、その細かい反応をオシロスコープの波形を見ることで確認することとした。ここでも X 線源は ⁵⁵Fe を用い、ガスセルの中心部に入射させた。

- Ar+CF₄

Arのみでの GSPC での観測では宇宙線ですら捕えることはできなかったのであるが、CF₄ を加えることによりオシロスコープで波形を見る事ができるようになった。しかし、時間の経過による変化が大きく、CF₄ を混入してから 5 秒程度経過すると波形を見る事ができ

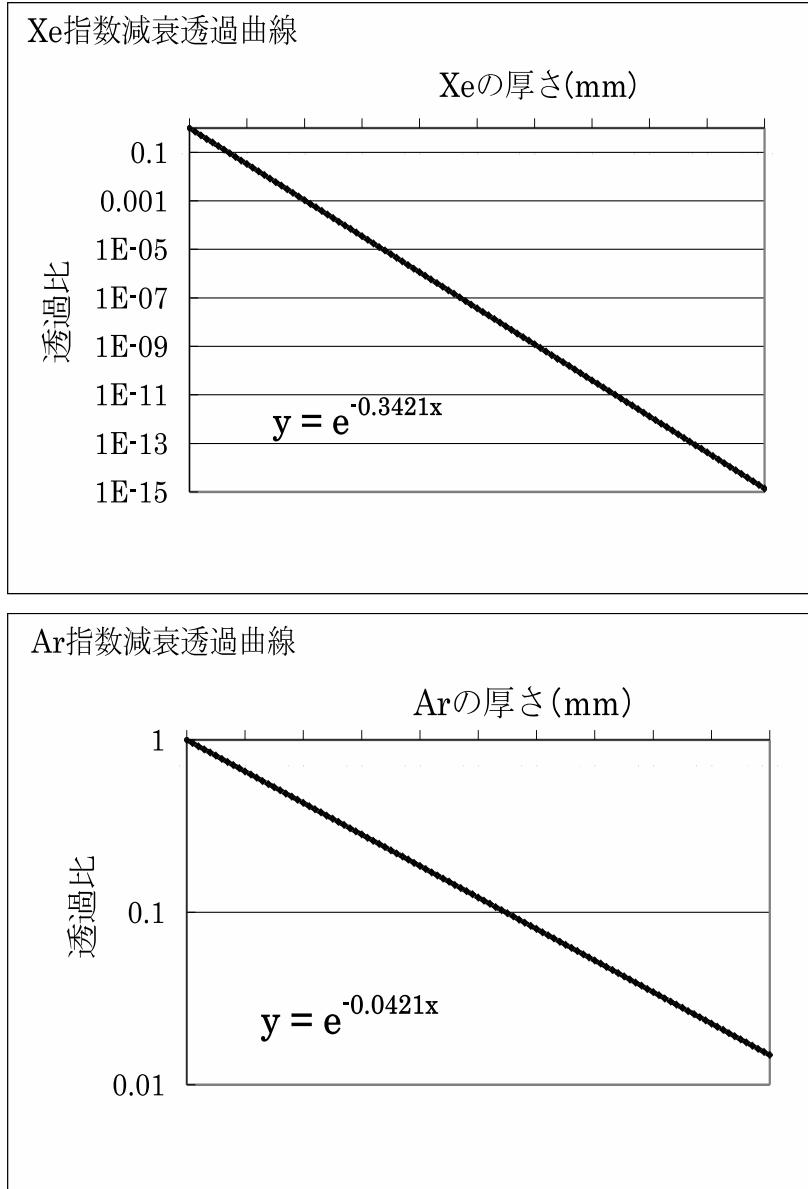


図 5.6 Xe・Ar 指数減衰透過曲線

なくなった。さらに CF_4 を加えることで、短い時間(約 5 秒)だが波形が再び見られた。そのオシロスコープで見ることのできる波形は、Mn-K 輝線の位置に表示されるのだが、定常的な波形は見られず、パルスハイトも小さいものだった。ガスセルにかける HV も変化させたが、安定しない波形のためそれによる依存性はわからなかった。また、スペクトルの測定については全てバックグラウンドだけであった。

- Xe+ CF_4

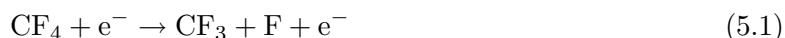
前述(5.2.1 節)の通り、Xe のみでの GSPC での観測では、Mn-K 輝線の波形を観察することはできていたのだが、 CF_4 を混入直後にオシロスコープの波形は一気に乱れ、こちらも時間が経つと波形を見ることができなくなっていった。Ar よりはパルスハイトの高い波形が多く見られたが、それ以外は Ar と同じような結果であった。

結果として、 CF_4 を加えることで、Ar,Xe共にデータとして残せるものを見ることはできなかつた。しかし、どちらの場合も、わずかではあったが Mn-K 輝線の位置に大小の波形を見ることができた。これは第4章における式(4.13)や式(4.15)の発光によるものと思われる。しかし、時間による変化からガスセル内で化学的な反応が起きていることも考えられる。この化学反応について調べ、最後に考察する。

5.3 ペニング混合ガスの性能評価

今回、主ガスに Xe,Ar を用いて、 CF_4 をペニング混合ガスとして加えた結果、Xe も Ar も光量の増加と見て取れるパルスの向上があった。しかし、それは5秒程度しか続かず、パルスも大変乱れた波形であった。この原因として考えられることは、 CF_4 を加えたことで、ペニング効果と共に CF_4 によるラジカルの生成反応が起きていることが考えられる。

ラジカルとは不対電子をもった原子や分子のこと、安定な原子や分子に光や熱などのエネルギーが加えられることで、電子が励起されて移動したり、あるいは化学結合が二者に均一に解離することによって、不対電子ができラジカルが発生する。今回は CF_4 に光電子が衝突することで、 CF_3 や F のラジカルが生成される(式5.1)。



こうしてできた CF_3 や F のラジカルが、パルスを減少させ光量の増加を妨げている原因として、2つの可能性が考えられる。

まず1つ目に、ラジカルは非常に不安定なため、まわりの生成された電子を吸着してしまっているという可能性で、この電子の吸着反応が、電子の生成反応を5秒ほどの時間で上回っていると思われる(式5.2, 式5.3)。



もう1つは、ラジカルが入射窓やガラスなど、まわりの物質に付着してしまい、5秒ほどで CF_4 が分解され無くなってしまうという可能性が考えられる。

よって、この電子の吸着反応や周辺物質への付着による分解を防ぐには、 CF_4 を絶えず流し続けて使う、ガスフロー型にする必要があると考えられる。こうすることで、ラジカルの生成が電子の増加を上回らないようにすることができ、光量の増加を維持することができるようになる。このガスフローシステムを考え、構築することが今後の課題である。

第6章 まとめと今後の課題

6.1 まとめ

今回、光電吸収型ガス X 線偏光計として、GSPC と EB-CCD を組み合わせることで、電子雲の撮像のための性能評価実験を行なった。その結果、ガスセルにかける高電圧を上げるにつれて、光量が増加することがわかり、動作確認することができた。しかし、光量が足りないため電子雲の撮像はできなかった。

そこでペニング混合ガスとして CF_4 を加えることで、発光波長の変換による光量の増加を確認することができた。しかし、 CF_4 の分解により 5 秒程度しか光量の増加を維持することができなかった。

6.2 今後の課題

今後の課題として、この光量の増加時間を延ばすために、ガスフロー型のシステムの検討が必要であることがわかった。

参考文献

- [1] G.F.knoll, “放射線計測ハンドブック 第2版”, 日刊工業新聞社
- [2] 物理学辞典 改訂版, 培風館, 1992
- [3] 深沢 泰司, 修士論文, 東京大学, 1993
- [4] 中川 健一郎, 修士論文, 東京大学, 1994
- [5] 阿部 圭一, 修士論文, 埼玉大学, 2004
- [6] 田中 祥子, 修士論文, 大阪大学, 1997
- [7] 堀川 貴子, 修士論文, 大阪大学, 2001
- [8] 中嶋 雄介, 修士論文, 大阪大学, 2002
- [9] 弁田 恒之, 修士論文, 山形大学, 2000
- [10] 井上 陽子, 修士論文, 山形大学, 2001
- [11] 前田 琢哉, 修士論文, 山形大学, 2002
- [12] 佐藤 文人, 修士論文, 山形大学, 2006

謝辞

本論文の執筆には多くの皆様のご指導、ご協力なしにはとても完成できるものではありませんでした。深く御礼申し上げます。

特に指導教官の田代先生と阿部さんには偏光計について多くのことを教わり、不出来な自分のせいでたくさんの迷惑をかけてしまったかもしれません。こうして論文を書き上げることが出来たのも、お二方がいなければ絶対に為し遂げることが出来なかっただと思います。ここにあらためてお詫びと共に感謝を致します。