

## 宇宙 X 線偏光観測に向けた光電効果型ガス偏光計の開発

窪田 恵 (東京理科大学大学院 理学研究科)

### Abstract

我々は、宇宙 X 線偏光観測を実現させるために NASA と共同で、光電効果を利用したガス偏光計の開発を進めている。ガス中に入射した X 線は、ガスと光電効果を起こし光電子を放出する。光電子の放出方向は入射 X 線の電気ベクトルに依存する。従って、電子の飛跡を精度よく測定する事によって、入射 X 線の偏光情報を得る事ができる。一方、X 線が偏光計に入射することで生じる 1 次電子の数は少ないので、我々の偏光計では、ガス電子増幅フォイル (GEM) を用いて電子増幅を行う。また、ガス中での電子のドリフト速度の測定は、電子飛跡を正確に取得するために不可欠である。本研究では、製作した偏光計の性能評価のために 1) GEM の電子増幅率測定、2) ガス中でのドリフト速度の測定を行った。実験の結果、1) GEM は増幅率 20,000 倍程度まで、放電することなく安定して動作する事を確認した。2) 電子ドリフト速度の測定では、ドリフト速度を 0.2% の決定精度で決めることができた。また、得られたドリフト速度の結果から、必要なドリフト速度での電場を見積もる事ができた。

### 1 イントロダクション

現在の天文学では、電波、可視光など様々な波長で観測が行われている。我々は特に X 線で宇宙を観測している。X 線から得られる情報は、エネルギー、時間変動、イメージ、偏光の 4 つがあるが、X 線偏光観測は電波や可視光と違って技術的に難しく、1970 年代の OSO-8 衛星でのかに星雲に観測以来 [M. C. Weisskopf, et al. (1976)]、観測が行われていない状態が続いている。天体からの X 線偏光を観測する事で、ブラックホールの降着円盤の幾何学的構造や、天体の磁場構造が分かると期待されている。そこで、我々は宇宙 X 線偏光観測に向けて光電効果を利用したガス偏光計の開発を進めている。光電効果は、2 - 10 keV の低エネルギー側で反応断面積が卓越した相互作用である。光電子の放出方向は入射 X 線の電気ベクトルの方向 (偏光方向) に依存するので、光電子の飛跡を精度よく測定することで、入射 X 線の偏光方向と偏光度を決定することができる。

我々の所有する偏光計の構造を図 1 に示す。偏光計は、ドリフト電極、ガス電子増幅フォイル (GEM)、ストリップ電極から構成されている [J. K. Black, et al. (2007)]。衛星の場合、地上実験と比較して信号の読み出し速度が遅いので、偏光計に使用するガスは、電子のドリフト速度が遅く、かつ、拡散の少ないジメチ

ルエーテル (DME) を採用している。GEM は銅電極間に絶縁体として液晶ポリマーが充填され、小さな穴が規則正しく並んだ構造をしている [T. Tamagawa, et al. (2009)]。図 2 に GEM の電子増幅過程の概念図を示す。銅電極に高電圧をかけることで穴の中に強い電場が生じ、電子雪崩によって電子増幅する仕組みになっている。X 線はドリフト電極と GEM の間に入射し、光電効果により光電子を放出する。飛び出した光電子は周囲の DME ガスを電離しながら進み、飛跡上に 2 次電子による電子雲を形成する。これらの電子雲は、ドリフト電場によって GEM へと移動し、GEM で飛跡情報を保ったまま電子増幅される。電子増幅された飛跡は電場によって運ばれ、1 次元に配置されたストリップで読み出される。ストリップから得られる 1 次元の電子の到着位置と、到着時刻から電子飛跡の 2 次元イメージを再構成することで入射 X 線の偏光情報を得ることが可能になる。

イメージを精度よく測定するためには、1) 光電効果によって生じる 1 次電子を信号として読み出せるだけ増幅すること、2) DME 中での電子のドリフト速度を測定することが必要である。ストリップ電極一本あたりのノイズの揺らぎが 500 電子程度なので、1 つの種電子を  $S/N = 5$  以上の有意度で検出するためには、GEM での電子増幅はおよそ 2500 倍必要で

ある。またドリフト速度は、信号の読み出し速度とストリップの間隔 ( $121 \mu\text{m}$ ) から、イメージの縦横比を同じにするように選ぶ必要がある。そこで我々は、GEM の増幅率測定とドリフト速度の測定を行った。

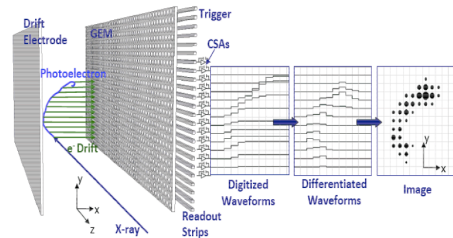


図 1: 偏光計内部の構造。発生した光電子は、電場によってドリフトし GEM で増幅されて、ストリップ電極で読み出される。右にあるイメージはストリップ方向とドリフトの時間方向で得られた電子飛跡の図

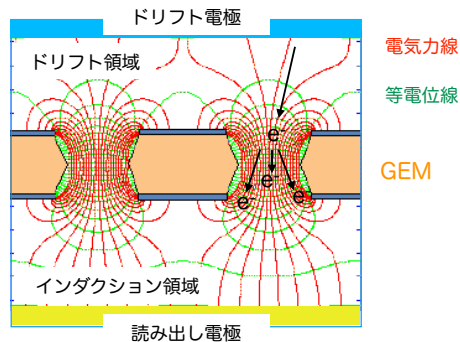


図 2: GEM の増幅過程。赤線が電気力線、緑が等電位線を表す。GEM の穴の強い電場によって電子が加速され、ガスを電離することで電子増幅する。

## 2 実験方法

今回行った 2 つの実験セットアップを図 3 に示す。検出器内は純度 99.99% 以上の DME ガス 190 Torr で満たし、Drift 電極、GEM、読み出し電極を平行に配置した。ドリフト電極と GEM 間のドリフト領域は 20 mm、GEM と読み出し電極間のインダクション領域は 1 mm とした。それぞれの領域にかける電場をドリフト電場 ( $E_d$ ) とインダクション電場 ( $E_i$ )

とする。ドリフト電極、GEM 両電極板には、各電場がかかるように電圧を印加した。使用した GEM は、厚み  $100 \mu\text{m}$ 、穴径  $70 \mu\text{m}$ 、ピッチ  $140 \mu\text{m}$ 、有効面積  $30 \times 78 \text{ mm}^2$  のものを使用した。GEM の電子増幅率測定では、入射 X 線は、X 線発生装置から得られる  $6.4 \text{ keV}$  の鉄の輝線を、ビーム径  $200 \mu\text{m}$  に絞った状態で、ドリフト電極と GEM の間に平行に入射した。読み出し電極からの信号をプリアンプと Amptek の Pocket MCA 8000D を用いて、1 測定あたり 30000 イベント取得した。電場は  $E_d = 196 \text{ V/cm}$ ,  $E_i = 3 \text{ kV/cm}$  の条件下で、GEM に印加する電圧 ( $\Delta V_{\text{GEM}}$ ) を変化させ、電子増幅率と  $\Delta V_{\text{GEM}}$  の関係を測定した。測定は放電イベントが測定イベントに対して 0.1% になる  $\Delta V_{\text{GEM}}$  まで行った。

電子のドリフト速度測定では、パルス発生器で X 線の ON/OFF を制御できる X 線源 (MXS) と、二つの入力信号の時間差を取得できる Time to Digital convertor (TDC) を使用した。MXS からチタン輝線である  $4.5 \text{ keV}$  の X 線を発生させ、ビーム径を約  $1 \text{ mm}$  に絞った状態でドリフト領域に平行に入射した。入射 X 線の位置は、Z ステージをドリフト方向に動かすことで変える事ができる。X 線が入射したタイミングと、GEM 電極から信号が検出されたタイミングを TDC に入れることで、その時間差がわかり、電子の移動時間を測定することができる。この測定では、 $\Delta V_{\text{GEM}} = 500 \text{ V}$ ,  $E_i = 1.5 \text{ kV/cm}$  に固定し、 $E_d = 95, 196, 285, 379 \text{ kV/cm}$  の 4 点で測定を行った。

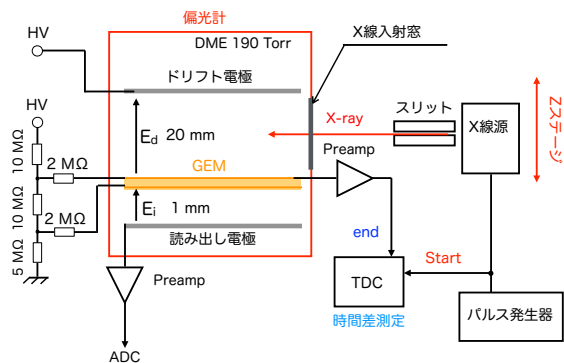


図 3: 実験セットアップ。

### 3 実験結果

#### 3.1 GEM の電子増幅率測定

読み出し電極から得られた ADC スペクトルを図 4 に示す。スペクトルの分解能 (FWHM) は約 20% である。増幅後の電荷量はスペクトルをガウス関数でフィットして得られた中心値を、取得しておいた較正曲線で電荷に変換して得られる。GEM の電子増幅率は

$$\text{増幅率} = \frac{Q_{\text{測定値}}}{e \times n} \quad (1)$$

と求める事ができる。ここで、 $e$  は素電荷量で  $1.6 \times 10^{-19}$  C、 $n$  は種電子の数である。DME のイオン化エネルギーが 23.9 eV[A. Sharma, (1998)] より、6.4 keV の X 線が入射した場合、種電子数は 268 個になる。

増幅率と GEM への印加電圧  $\Delta V_{\text{GEM}}$  の関係図を図 5 に示す。増幅率は指数関数的に増加し、 $\Delta V_{\text{GEM}} = 580$  V で増幅率は放電する事なく約 20,000 倍に達し、我々の要求値である 2500 倍は問題なく達成できることが確かめられた。

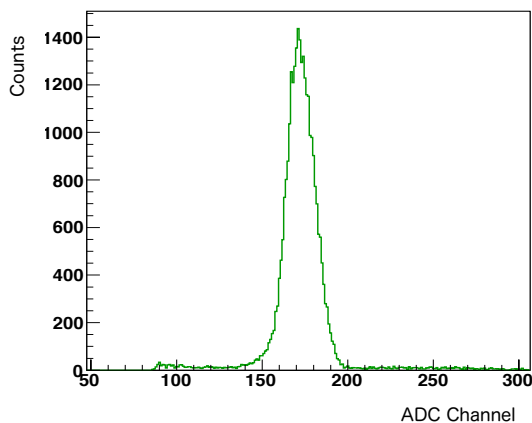


図 4: ADC スペクトル。

#### 3.2 DME 中における電子ドリフト速度の測定

$\Delta V_{\text{GEM}} = 500$  V、 $E_d = 196$  V/cm の時の、入射 X 線の位置が異なる 2 つの TDC ヒストグラムを図 6

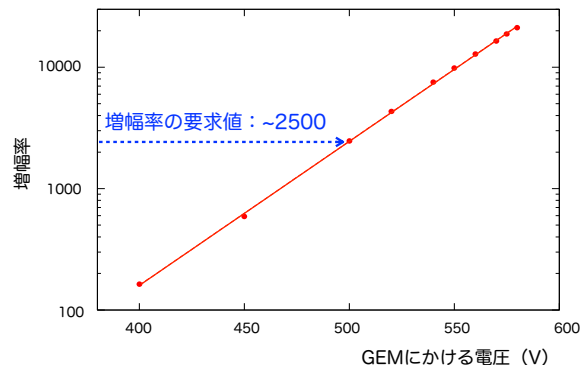


図 5: 増幅率曲線。GEM にかける電圧を 400 - 580 V まで変化させてデータ取得。

に示す。入射位置が GEM から近いほどスペクトルは左、つまり時間差が短い方向にシフトしていることが分かる。このスペクトルの中心値がパルス発生器からの信号と GEM の信号との時間差に対応しており、入射位置と時間差の関係をプロットすると図 7 の直線が得られる。直線の傾きがドリフト速度に対応している。

各電場に対するドリフト速度の測定結果を表 1 に示す。

表 1: ドリフト電場と電子ドリフト速度

電場 (V/cm)	ドリフト速度 (cm/ $\mu$ sec)
95	$0.1103 \pm 0.0002$
196	$0.2364 \pm 0.0004$
285	$0.3528 \pm 0.0007$
379	$0.4846 \pm 0.0010$

ドリフト速度と電場の関係をプロットすると、図 8 のようになる。ドリフト速度は一般に電場/圧力に依存することが知られているので、横軸は圧力で規格化している。この図から必要なドリフト速度での電場を見積もることができる。また、ドリフト速度の測定結果の中心値とエラーから見積もって、全ての測定結果において、ドリフト速度をおよそ 0.2% の決定精度で決める事ができた。

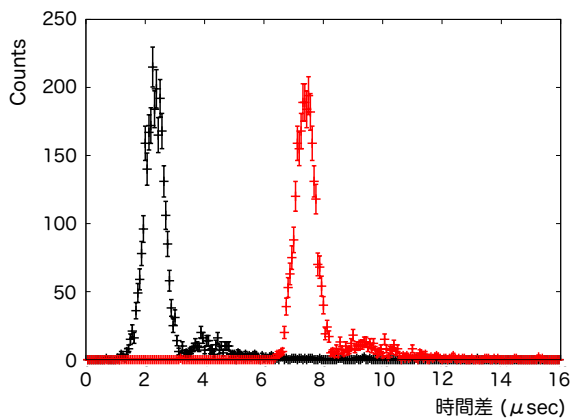


図 6: TDC ヒストグラム。X 線入射位置が間隔 12 mm 離れた 2 点におけるスペクトルを重ねて描いたヒストグラム。黒のプロットが GEM に近い側の測定点。

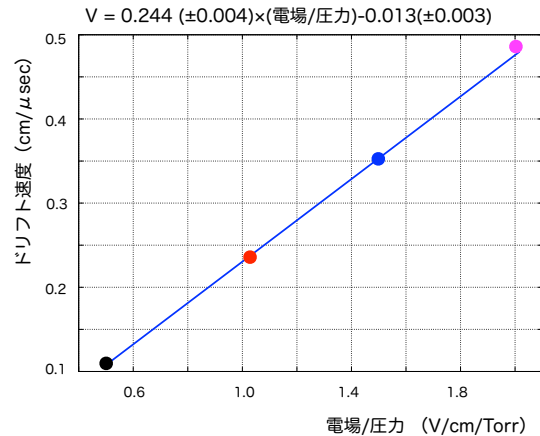


図 8: 電場によるドリフト速度の変化。プロットの色は黒、赤、青、マゼンダそれぞれ、 $E_d = 95, 196, 285, 379$  V/cm でのドリフト速度

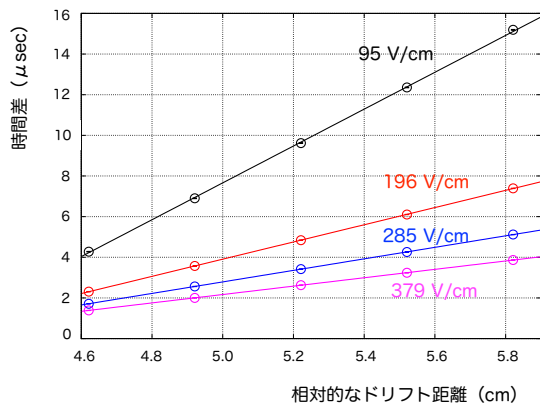


図 7: パルス発生器と GEM 信号の時間差と相対ドリフト距離。 $E_d = 95, 196, 285, 379$  V/cm での測定結果。

## 4 まとめと今後

現在、DME ガスを用いた光電効果型ガス偏光計の開発を進めている。本研究では、偏光計の性能に影響する GEM の電子増幅率と電子のドリフト速度の測定を行った。 $\Delta V_{\text{GEM}} = 580$  V で増幅率が 20,000 倍まで、放電せずに動作する事を確認し、偏光測定に十分な増幅率が得られる事がわかった。ドリフト速度の測定では、ドリフト速度を 0.2% の決定精度で

決めることができた。また、電場とドリフト速度の関係図から要求される速度での電場が決定できる。

今年度中には SPring-8 でシンクロトン放射光を用いた偏光度測定試験が控えており、現在本研究の結果を踏まえて、実験に向けて準備を進めている。

## Reference

- [1] A. Sharma, 1998, SLAC-J-ICFA-16-3, SLAC-JOURNAL-ICFA-16-3, Jul 1998. p.21-39 ICFA instrumentation Bulletin: Volume 16.
- [2] M. C. Weisskopf, et al. 1976, The Astrophysical Journal, 208:L125-L128, 1976 September 15
- [3] J. K. Black, et al. 2007, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 581, 755760 (Nov. 2007).
- [4] Y. Takeuchi, et al. 2012, JINST 7 C03042
- [5] T. Tamagawa, et al. 2009, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 608, 390
- [6] T. Tamagawa, et al. 2006, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 560, 418