

導電性プラスチックを電極に応用した ガス電子増幅フォイルの研究開発

東京理科大学 理学研究科 物理学専攻 修士過程 1年
理化学研究所 玉川高エネルギー宇宙物理研究室
吉川 瑛文 (Yoshikawa Akifumi)
平成22年8月31日

概要

NASA が 2014 年に打ち上げを計画している世界で初めての X 線変光観測用衛星 GEMS に、我々が開発したガス電子増幅フォイル (GEM) が搭載される。GEM は電圧をかけることで電子増幅するという最大の特徴があるが、高い電圧をかけると放電して壊れる。放電に耐性をもたせるために、電極に導電性プラスチックのレジスティブカプトンを利用した Resistive-GEM が、欧州原子核研究機構 (CERN) で提案されたが、開発に成功していなかった。私は、Resistive-GEM を世界で初めて制作することに成功した、そして Resistive-GEM が実際に動作することを確かめた。

1 X 線偏光観測

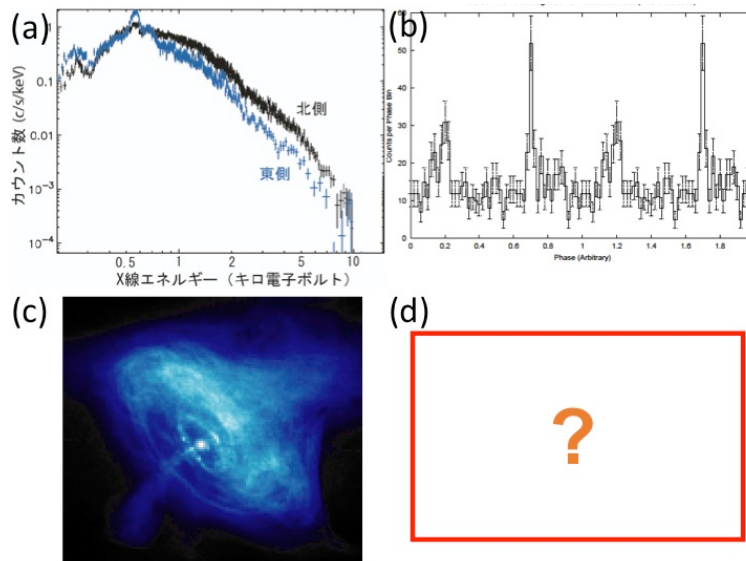


図 1.1: (a)X 線スペクトル。(b)X 線の時間変動。(c)天体の X 線イメージ。(d)X 線の偏光の情報は未だに観測されていない。

X 線天文学は、天体からのエネルギーや時間変動やイメージを取得してきた。ところが、天体からの X 線がどの程度偏光しているかについては、観測機器の技術的問題によって観測することはできなかった。X 線偏光を観測することができれば、全く新しい天体からの情報を得ることができる。X 線偏光を観測して新たにわかると期待されていることは、中性子星の磁場構造や降着円板の幾何学構造やブラックホール周辺の時空の歪みなどが挙げられる。X 線の偏光を観測することによって、天文学に新しい 1 ページを書き加えることになるのである。

2 ガス電子増幅フォイルを利用した X 線偏光計

X 線の偏光を観測する偏光計の 1 つとして、ガス電子増幅フォイルを利用した X 線偏光計がある。この X 線偏光計は、検出ガスと X 線とを光電効果を起こさせて出てきた光電子の飛跡から、X 線の偏光方向を観測する偏光計である。

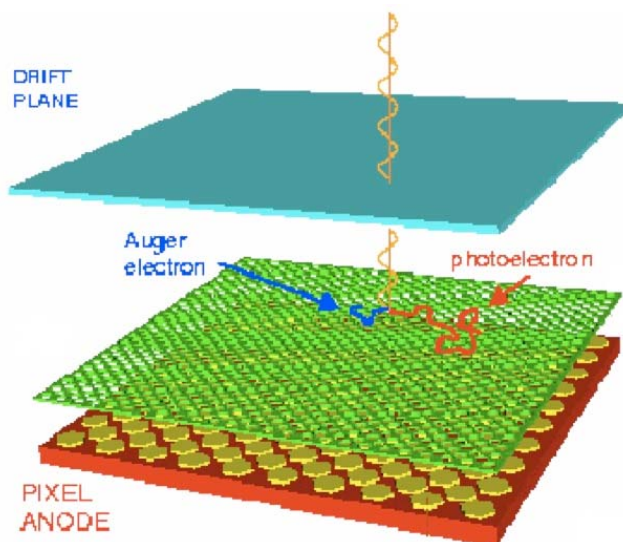


図 2.1: ガス電子増幅フォイル (GEM) を利用した X 線偏光計の概略図。上からドリフトプレーン、ガス電子増幅フォイル、電荷読み出しパッドの順に設置されている。

偏光 X 線がガスと光電効果を起こすと、X 線の電場の方向にそって光電子が飛び出す。飛び出した光電子は、ガスを電離しながらガス中を進むので、光電子の飛跡にそって電子雲が形成される。発生した電子雲を電荷読み出しパッドで、信号として読み出す。この発生した電子雲の 2 次元的な広がり測定することができれば、X 線の偏光を観測することができる。ところが、発生した電子だけでは電荷があまりに小さいために、電荷を信号として読み出すことができない。そこで、ガス電子増幅フォイルを利用して発生した電子雲を形を崩さずに電子増幅させるのである。形を崩さずに電子増幅することが出来れば、X 線の偏光方向の情報を損うことなく電荷を信号として読み出すことができるので、電子雲を 2 次元的な広がりとして測定し、X 線の偏光を観測することができるのである。

3 ガス電子増幅フォイル (Gas Electron Multiplier; GEM)

ガス電子増幅フォイルの最大の特徴は 2 次元情報を損うことなく電子雲を増幅することができるという点である。ガス電子増幅フォイルは、Gas Electron Multiplier を略して GEM と呼ぶのが一般的である。この我々の使う GEM の概観は、図 3.1 に載せてたものである。この GEM の表面を拡大すると、図のように小さな穴が大量にあることがわかる。絶縁体 $100 \mu\text{m}$ 程度のシートを $5 \mu\text{m}$ の銅の板で狭んだ平行平板コンデンサの様な板に、直径 $70 \mu\text{m}$ 程度の穴を $140 \mu\text{m}$ ピッチで規則正しく空けられているのが GEM である。

銅で出来た電極に電圧をかけると、穴の中に密な電磁力線が生れて強い電場が生じる。図 3.1 の赤い線は電気力線で、緑の線は等電位面を表している。電子が電気力線に沿って穴のなかに移動してくると、穴のなかにある検出ガスと衝突してガスが電離されて、ガスから電子が飛び出す。飛び出した電子は、最初の電子と共に電場によって加速されて、他のガスと衝突してさらに電子が発生する。結果的に、最初に穴のなかに飛び込んだ電子が穴の外に出てくると増幅されている。この現象が、シート状の GEM の全ての穴でおきるために、2 次元的に電子が増幅されるのである。

NASA が 2014 年打ち上げを計画している世界初の X 線偏光観測用衛星 GEMS に、この GEM を利用した X 線偏光計が搭載される。図 3.2 が GEMS の概略図である。この GEMS 衛星には、我々の研究室で開発された GEM が搭載される。衛星に搭載される GEM は、高い電子増幅を要求されている。

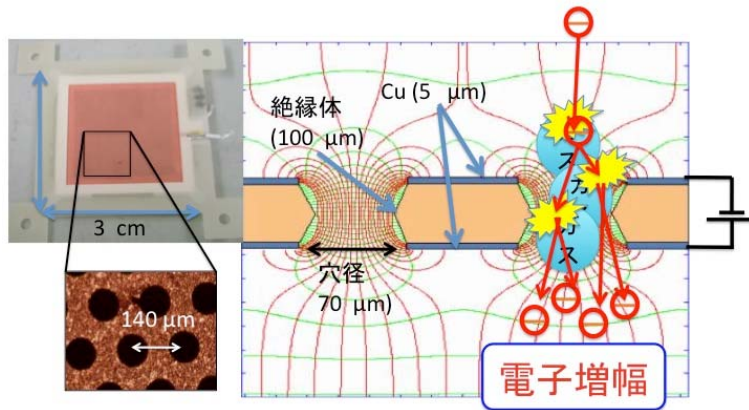


図 3.1: 断面の様子と電子増幅の様子。



図 3.2: Gravity and Extreme Magnetism Small Explorer(GEMS)

4 GEMの問題点

GEMには放電と呼ばれる現象があり、放電のためにGEMが壊れてしまうという問題がある。GEMは平行平板コンデンサの様な構造をしているため、両電極間に電圧をかけると、銅電極に電荷がたまる。このたまった電荷が、何かしらの原因によって、一瞬にしてもう片方の電極に流れ込むことによって放電が発生する。この放電によってGEMの絶縁体が破壊されてしまい、破壊された絶縁体にそって電荷が流れ、両電極間に電圧をかけることができなくなってしまう。図 4.1 は、放電後のGEM電極の様子を拡大して撮影したものである。

高い電子増幅を達成するために一番容易な方法は、より強い電圧をGEMの両電極間にかけることである。強い電圧をかければ、穴の中の電気力線が密になり電場が強くなることで、電子がガスを電離する確率が大きくなり、電子増幅が高くなる。高い電圧をかければ電極にはより多くの電荷が蓄積される。そのため、1回の放電で流れる電荷量が大きくなり、GEMが破壊される可能性がたかくなる。高い電子増幅を達成させようとするほど、GEMが放電によって壊れる確率がおおくなる。

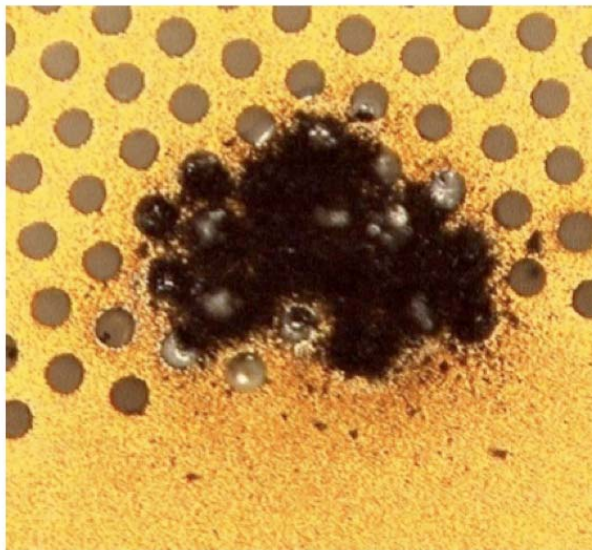


図 4.1: 放電後の GEM の電極の様子。

5 放電に対する対策

放電の対策として、以前から電極に電気抵抗が大きい素材を利用することが提案されていた。放電が起きると、電極にたまっていた電荷が放電した場所へ集中する。放電した場所に電荷が集中することで、局所的に大電流が流れ GEM の絶縁体が破壊されてしまう。電極の電気抵抗が大きければ、放電が発生したとしてもその電気抵抗によって、電荷が一瞬にして放電ポイントへ集らないように電子の移動をさまたげる。電気抵抗が大きい素材を電極に利用することで、放電した際の電荷の集中を防ぐことを考えた。

6 Resistive-GEM

ここまでの話をまとめる。電子増幅を大きくするために、GEM の電極間により高い電圧をかけるが、その分大きな電荷を電極にためることになり、放電した時に GEM を壊す可能性が大きくなる。そこで、放電した際に電荷が集中することを防ぐために、電極の素材に電気抵抗が大きいものを利用することが提案されていた。

銅よりも電気抵抗が大きい導電性プラスチックの Resistive-Kapton を利用した GEM を開発することが、欧州原子核研究機構 (CERN) によって提案された。銅の電気抵抗は $155 \Omega/\text{cm}$ であり、Resistive-Kapton の電気抵抗は $2 \text{ M}\Omega/\text{cm}$ である。圧倒的に Resistive-Kapton の方が電気抵抗は大きい。この Resistive-GEM の製造方法が全く違うため、技術的に難しく開発が進んでいなかった。そこで、今回我々の開発グループが開発に挑戦して、世界ではじめて Resistive-GEM の製造と開発に成功した。図 6.1 の写真は、従来の銅電極の GEM と Resistive-GEM である。図をみれば、GEM とは違い Resistive-GEM の表面は黒色をしていることがわかる。電極に使われている Resistive-Kapton の色が黒いためである。

7 電子増幅調査

製造した Resistive-GEM が、実際に電子増幅をするのかを調査をした。Ar と CO_2 を体積比率 70/30 の混合ガスで満たされたのガスチャンバー内に、電場を発生させるドリフトプレーン、Resistive-GEM と電荷を読み出すパッドをそれぞれ図 7.1 のように設置した。チャンバーの外から、 ^{55}Fe 線源からの X 線 (5.9 keV) を入射させ、混合ガスとを光電効果を起こさせて電荷を発生させる。発生した電荷量は、計算することができるので増幅前の電荷量 Q_i を求めることができる。測定量は、Resistive-GEM によって増幅後の電荷量 Q_f である。 Q_f は電荷読み出しパッドから取得した信号を処理することでえることができる。ここから、Resistive-GEM の両電極間にかけ

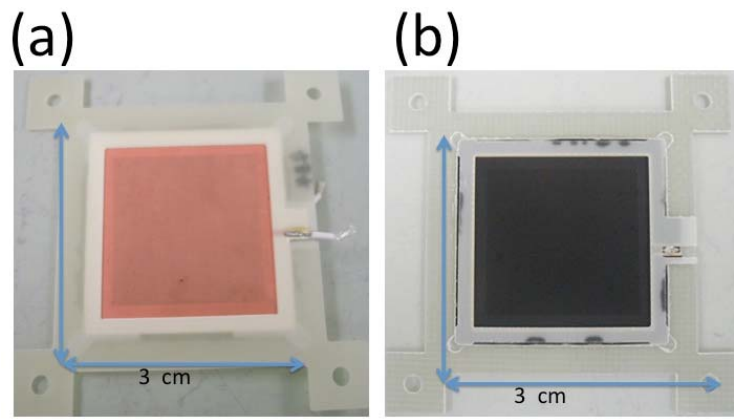


図 6.1: (a) 銅電極の GEM の様子。(b) Resistive-Kapton を電極に利用された、Resistive-GEM の様子。

る電圧 ΔV_{GEM} と電子増幅度 (gain) とよばれる値との関係をもとめた。gain の定義を以下に示すように、電荷が何倍に増幅されるかを示す量である。

$$gain = Q_f / Q_i \quad (7.1)$$

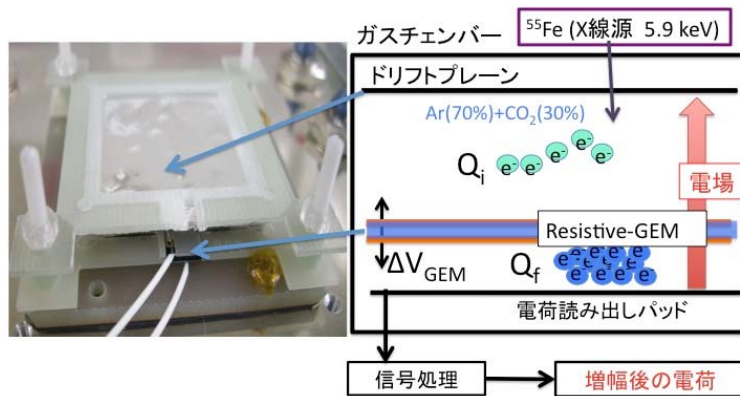


図 7.1: 実験セットアップの概略図。

8 実験結果

図にしめたのが、Resistive-GEM の ΔV_{GEM} と gain の関係である。測定した ΔV_{GEM} の範囲は、650 V から 730 V の範囲である。実際に電子増幅されていることがわかり、世界で初めて Resistive-GEM が動作することが確かめられた。

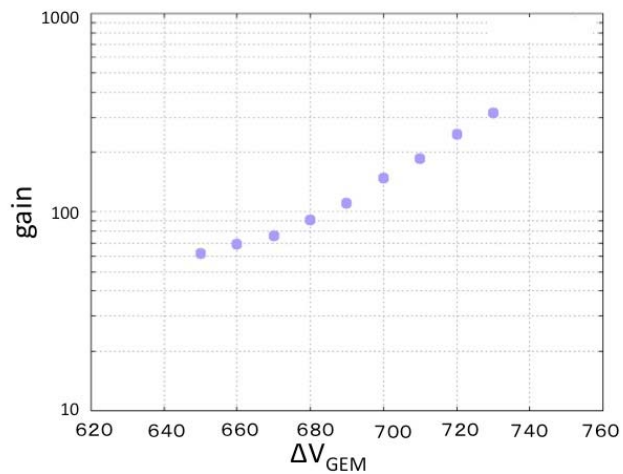


図 8.1: ΔV_{GEM} と gain の関係。縦軸にログスケールで gain をとり、横軸にはリニアで ΔV_{GEM} をとり、プロットした。

9 まとめ

世界で初めて、Resistive-GEM の制作に成功した。そして Resistive-GEM が電子増幅する様子を実際に私自身で実験を行い、確かめることに成功した。今後は、Resistive-GEM の期待されている放電に対する耐性について研究していきたい。

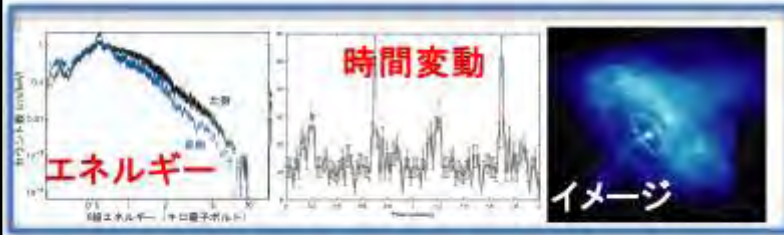


導電性プラスチックを電極に応用した ガス電子増幅フォイルの研究開発

東京理科大学
理化学研究所 玉川研究室
修士課程 1年
吉川瑛文
(Yoshikawa Akifumi)



X線偏光観測



?? 偏光 ??

偏光観測でわかること

- ◆ 中性子星の磁場構造
- ◆ 降着円盤の幾何学構造
- ◆ ブラックホール周辺の時空の歪み

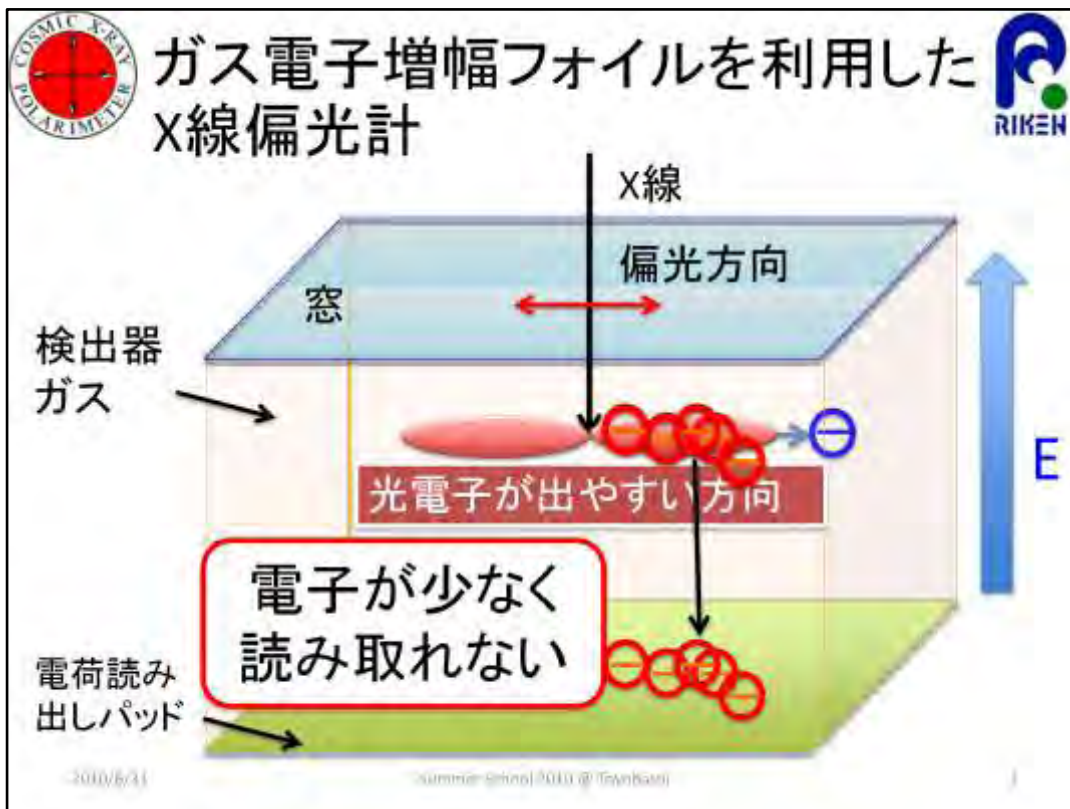


天文学に新しい 1 ページ

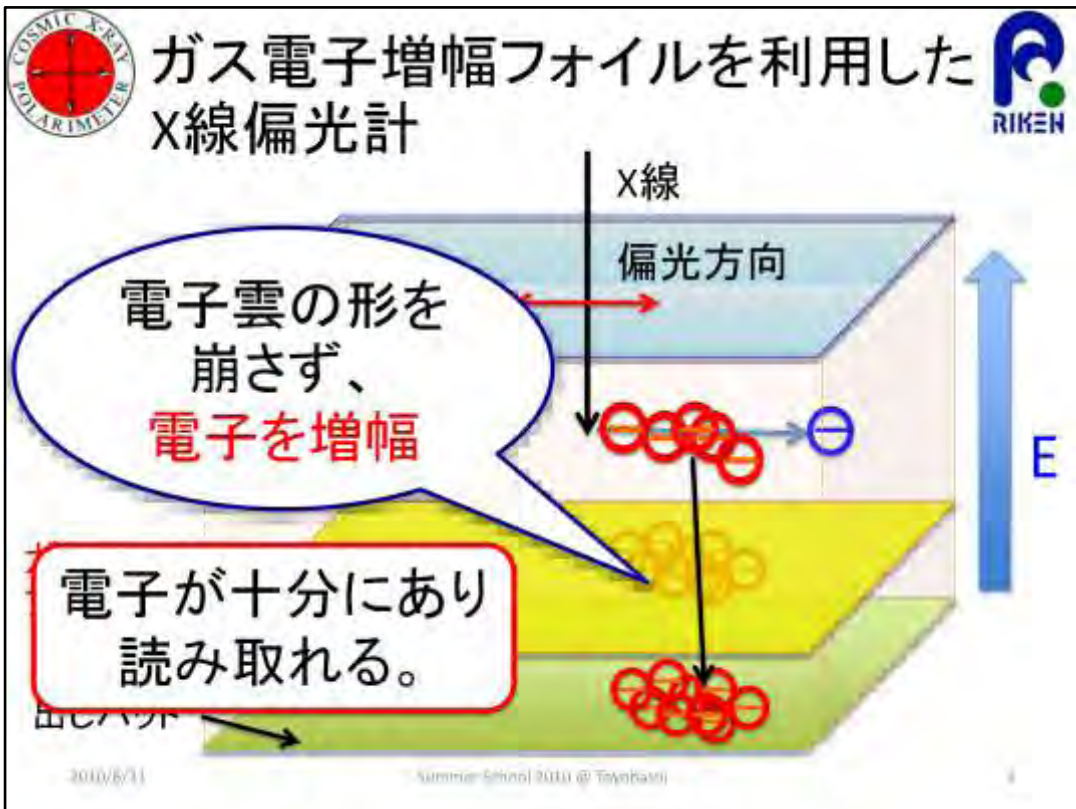
2010/5/31

Summer School 2010 @ Toyohashi

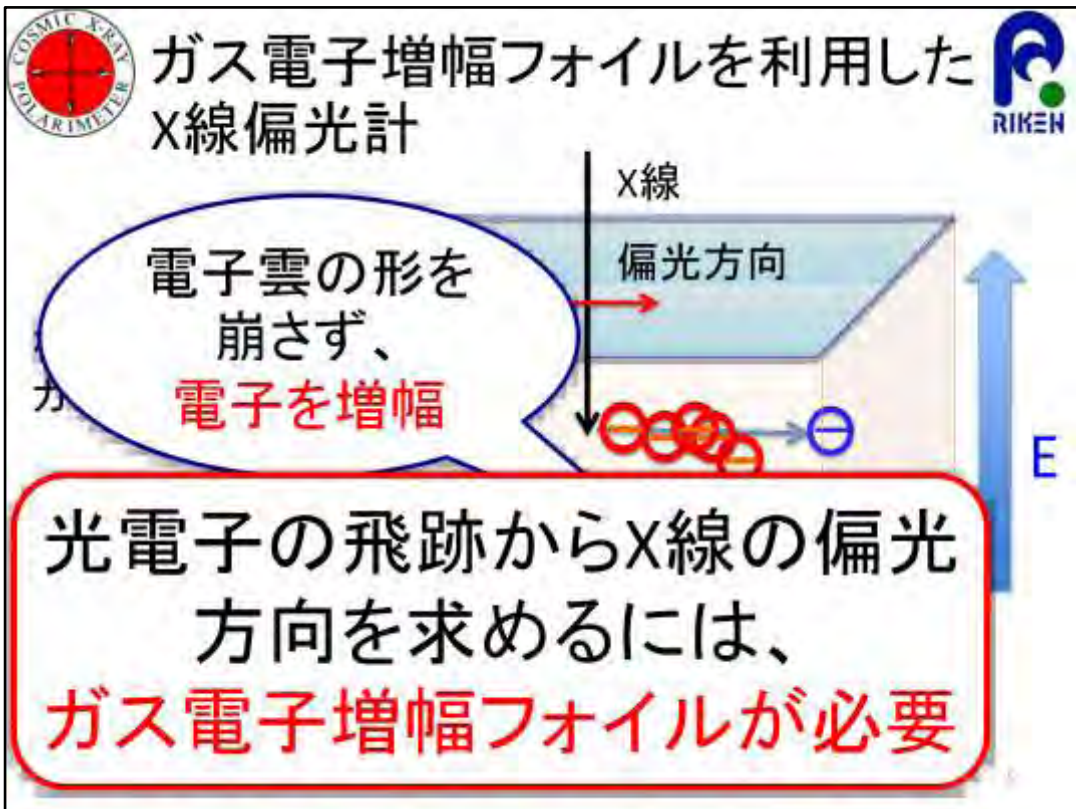
X線天文学は、天体からのエネルギーや時間変動やイメージを取得してきた。ところが、天体からのX線がどの程度偏光しているかについては、観測機器の技術的問題によって観測することはできなかった。X線偏光を観測することができれば、全く新しい天体からの情報を得ることができる。X線偏光を観測して新たにわかると期待されていることは、中性子星の磁場構造や降着円板の幾何学構造やブラックホール周辺の時空の歪みなどが挙げられる。X線の偏光を観測することによって、天文学に新しい1ページを書き加えることになるのである。



X線の偏光を観測する偏光計の1つの、ガス電子増幅フォイルを利用したX線偏光計について説明する。このX線偏光計は、検出ガスとX線とを光電効果を起こさせて出てきた光電子の飛跡から、X線の偏光方向を観測する偏光計である。偏光X線がガスと光電効果を起こすと、X線の電場の方向にそって光電子が飛び出す。飛び出した光電子は、ガスを電離しながらガス中を進むので、光電子の飛跡にそって電子雲が形成される。発生した電子雲は電場によって電荷読み出しパッドまで移動させられる。電荷読み出しパッドで、発生した電子雲を信号として読み出す。この発生した電子雲の2次元的な広がりを測定することができれば、X線の偏光を観測することができる。ところが、発生した電子だけでは電荷があまりに小さいために、電荷を信号として読み出すことができない。



そこで、ガス電子増幅フォイルを利用して発生した電子雲を形を崩さずに電子増幅させるのである。形を崩さずに電子増幅することが出来れば、X線の偏光方向の情報を損うことなく電荷を信号として読み出すことができるので、電子雲を2次元的な広がりとして測定し、X線の偏光を観測することができるのである。



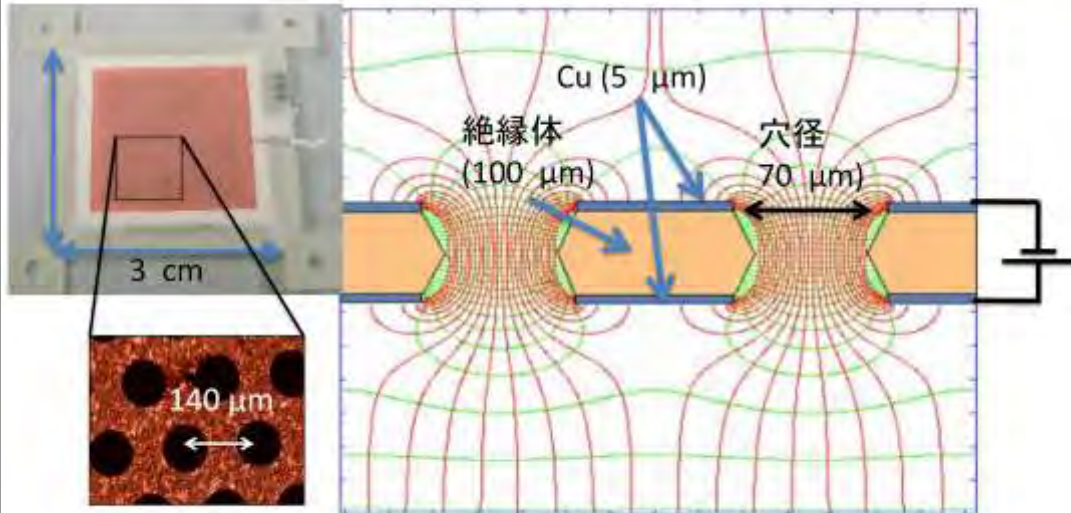
つまり、光電子の飛跡からX線の偏光方向をもとめるには、ガス電子増幅フォイルが必要である、ことがわかる。



ガス電子増幅フォイル(GEM)



最大の特徴 **2次元で電子増幅**



2010/5/11

Summer School 2010 @ Toyohashi

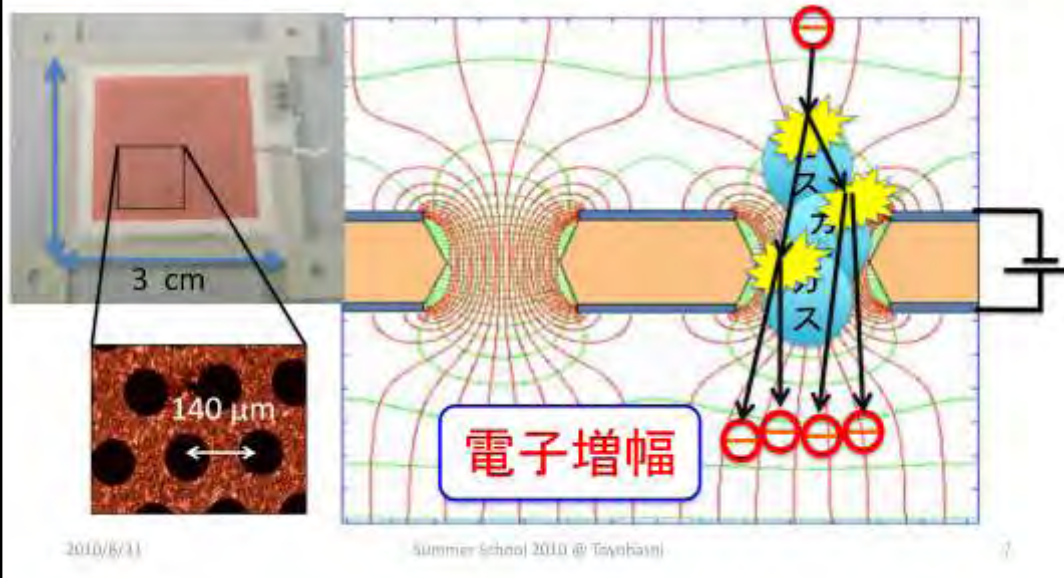
ガス電子増幅フォイルの最大の特徴は2次元情報を損うことなく電子雲を増幅することができるという点である。ガス電子増幅フォイルは、Gas Electron Multiplierを略してGEMと呼ぶのが一般的である。この我々の使うGEMの概観は、図に載せてたものである。このGEMの表面を拡大すると、図のように小さな穴が大量にあることがわかる。絶縁体100 μm 程度のシートを5 μm の銅の板で挟んだ平行平板コンデンサの様な板に、直径70 μm 程度の穴を140 μm ピッチで規則正しく空けられているのがGEMである。



ガス電子増幅フォイル(GEM)



最大の特徴 **2次元で電子増幅**



2次元的に電子を増幅することができる、というのが最大の特徴である。赤い線が電気力線で、緑が等電位面である。銅で出来た電極に電圧をかけると、穴の中に密な電磁力線が生れて強い電場が生じる。電子が電気力線に沿って穴のなかに移動してくると、穴のなかにある検出ガスと衝突してガスが電離されて、ガスから電子が飛び出す。飛び出した電子は、最初の電子と共に電場によって加速されて、他のガスと衝突してさらに電子が発生する。結果的に、最初に穴のなかに飛び込んだ電子が穴の外に出てくると増幅されている。この現象が、シート状のGEMの全ての穴でおきるために、2次元的に電子が増幅されるのである。

ガス電子増幅フォイル(GEM)

Gravity and Extreme Magnetism Small Explorer (GEMS)

電子増幅

我々のGEMが搭載される!

高い電子増幅を要求される

世界初のX線偏光観測用衛星

- NASAが計画
- 2014年に打ち上げ予定

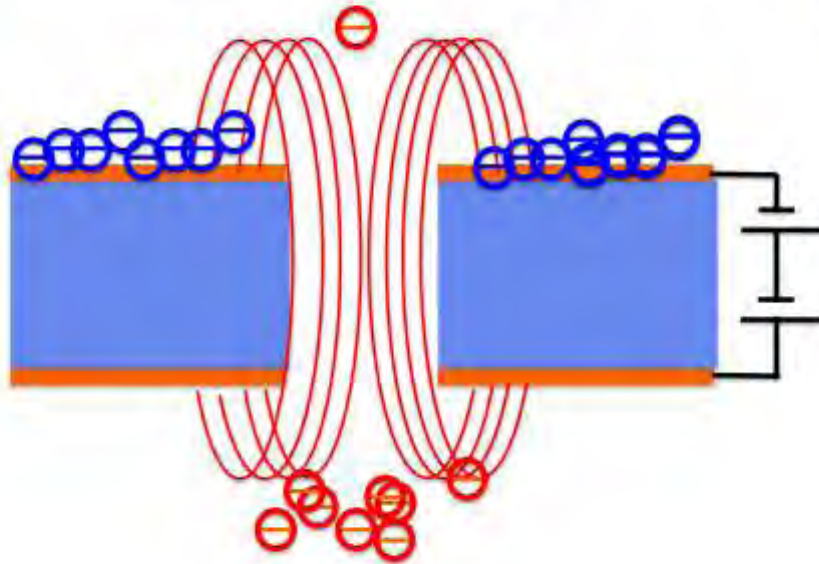
幅

© 2010 @ Tsuyoshi

Gravity and Extreme Magnetism Small Explorer、GEMSという、NASAが2014年打ち上げを計画している世界初のX線偏光観測用衛星がある。この衛星にGEMを利用したX線偏光計が搭載される。さらに、GEMS衛星に我々の研究室で開発されたGEMが搭載される。衛星に搭載されるGEMは、高い電子増幅を要求されている。



GEMの問題点



2010/6/11

Summer School 2010 @ Tsuyubashi

衛星に搭載されるGEMには、高い電子増幅が要求される。高い電子増幅を達成するために、高い電圧をかけるようとする。強い電圧をかければ、穴の中の電気力線が密になり電場が強くなることで、電子がガスを電離する確率が大きくなり、電子増幅が高くなる。



GEMの問題点



©2010/06/11

>Summa (etno) 2010 @ TkyUtsu

19

この状態で、貯まっていた電荷がもう片方の電極に、一瞬で移動することがある。これを我々は放電と呼んでいる。



GEMの問題点



この放電によってGEMの絶縁体が破壊されてしまうことがある。この左上の図が、放電して壊れたGEMの表面の様子である。この破壊された部分を通して電荷が流れてしまうために、電圧をかけることができなくなり、もはや電子増幅しなくなる。



GEMの問題点



高い電子増幅を要求する

放電の電荷量が多くなる

GEMが壊れやすくなる！

©2010/6/11

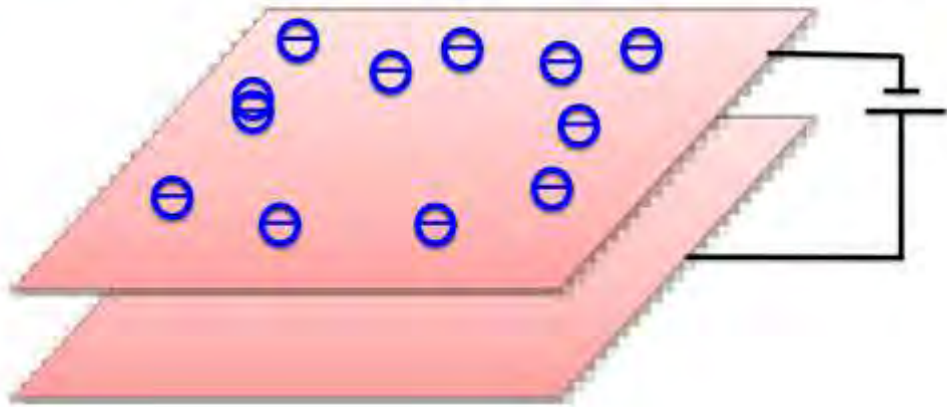
Summer School 2010 @ Tsuyubashi

12

ここで話をまとめる。高い電子増幅を要求すれば、高い電圧をかけて電極に多くの電荷をためることになる。この状態で放電がおきると、放電した時の電荷量がおおくなる。そのため、GEMが壊れやすくなる。



放電に対する対策



2010/6/31

Summer School 2010 @ Tsuyubashi

13

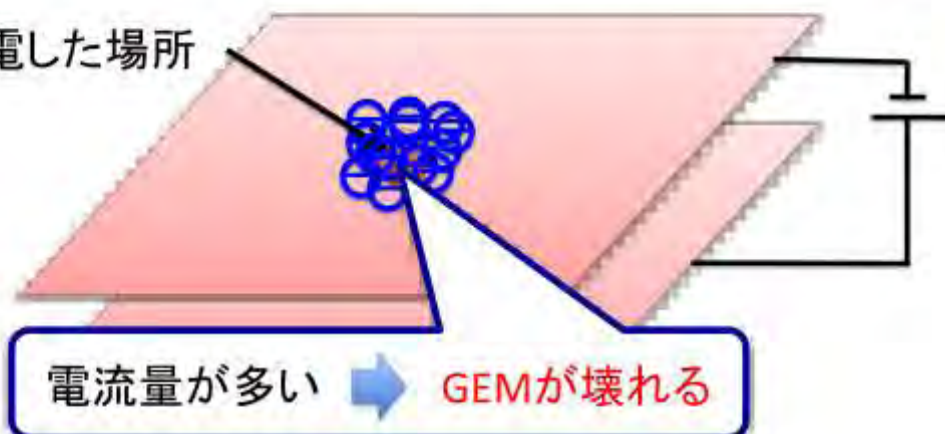
GEMが電子増幅させるために、両電極間に電圧をかけると、電極の表面に電荷が蓄えられる。GEMの電極が放電した時に、電極にためられていた電荷は、放電した場所へ一瞬にして移動する。



放電に対する対策



放電した場所



2010/6/31

Summa (et al) 2010 @ Toyoko

14

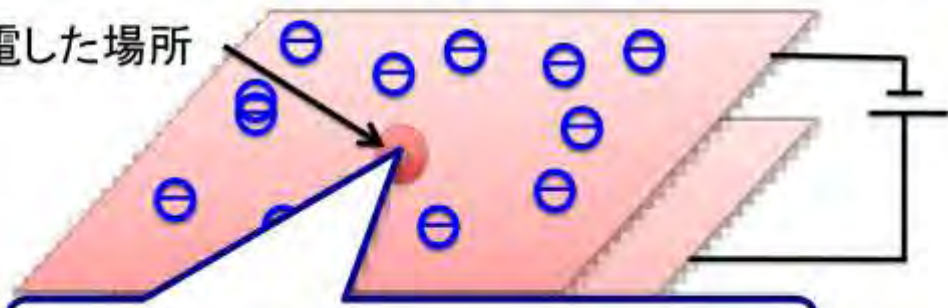
この時、放電するポイントへ集中することによって、放電した場所での電流量が大きくなる。放電した場所での電流量が大きいと、銅電極板に挟まれている絶縁体が破壊されやすくなる。



放電に対する対策



放電した場所



電流量が小さい → GEMが壊れない

放電するのは、あきらめる。
放電の電荷量を小さくすれば...

2010/6/11

Summer School 2010 @ Tsuyubaki

15

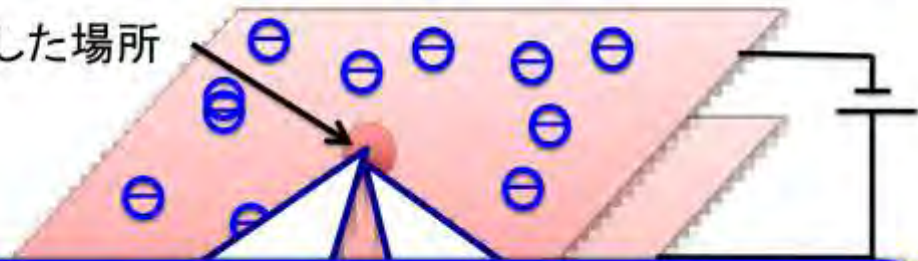
そこで、放電すること自体はあきらめるが、放電した場所への電流量を減らすことができれば、GEMが壊れにくくなるのではないかと考えた。



放電に対する対策



放電した場所



電気抵抗が大きい素材を電極に利用

$$V = R \times I$$

放電時の電荷量をへらせる！！

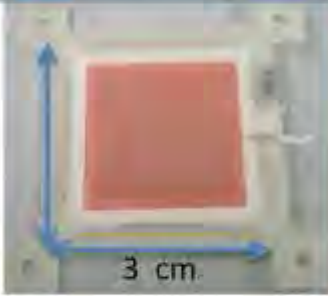

放電したときの電流量を減らすために、GEMの電極の素材を、電気抵抗が大きなものにすることを考えついた。V=R×Iという関係から、放電したときに電荷の移動をさまたげるだろうと、考えたのである。



Resistive-GEM

電極に、導電性プラスチックの
Resistive-Kaptonを利用



素材	銅	Resistive-Kapton
電気抵抗	$155\Omega\text{cm}^{-1}$	$2\text{M}\Omega\text{cm}^{-1}$
GEMの外観		

010/6/71 Summer School 2010 @Tsuyubashi 17

銅よりも電気抵抗が大きい導電性プラスチックのResistive-Kaptonを利用したGEMを製作した。銅の電気抵抗は $155\Omega/\text{cm}$ であり、Resistive-Kaptonの電気抵抗は $2\text{M}\Omega/\text{cm}$ である。圧倒的にResistive-Kaptonの方が電気抵抗は大きい。銅電極で作られてGEMの表面は銅の色をしているが、Resistive-Kaptonは黒い素材なので、Resistive-GEMの表面は黒くなっていることが分かります。



Resistive-GEM

RIKEN

製作に成功！！
世界初！！！！
特許取得中

- ・ CERNも製作したが、失敗
- ・ 銅電極GEMとは製造方法が違う


3 cm


2010/6/31

Summer School 2010 @ Toyohashi

実は、Resistive-Kaptonを利用したGEMを開発することが、欧州原子核研究機構(CERN)によって提案されていたが、このResistive-GEMの製造方法が全く違うため、技術的に難しく開発が進んでいなかった。具体的には、この穴をあけることが難しくかった。今回我々の開発グループが開発に挑戦して、世界ではじめてResistive-GEMの製造と開発に成功した。私はこのResistive-GEMの製作に貢献しました。さらに、このResistive-GEMが実際に電子増幅するのかを、私が直接実験をおこなって確かめました。

電子増幅調





◆ 電子増幅度

$$\text{gain} = \frac{\text{増幅後の電荷}}{\text{増幅前の電荷}}$$

gain VS ΔV_{GEM}

◆ 実験セットアップ

ガスチェンバー ^{55}Fe (X線源 5.9 keV)

ドリフトプレーン

Ar(70%)+CO₂(30%)


電場 ↑

Resistive-GEM

ΔV_{GEM}

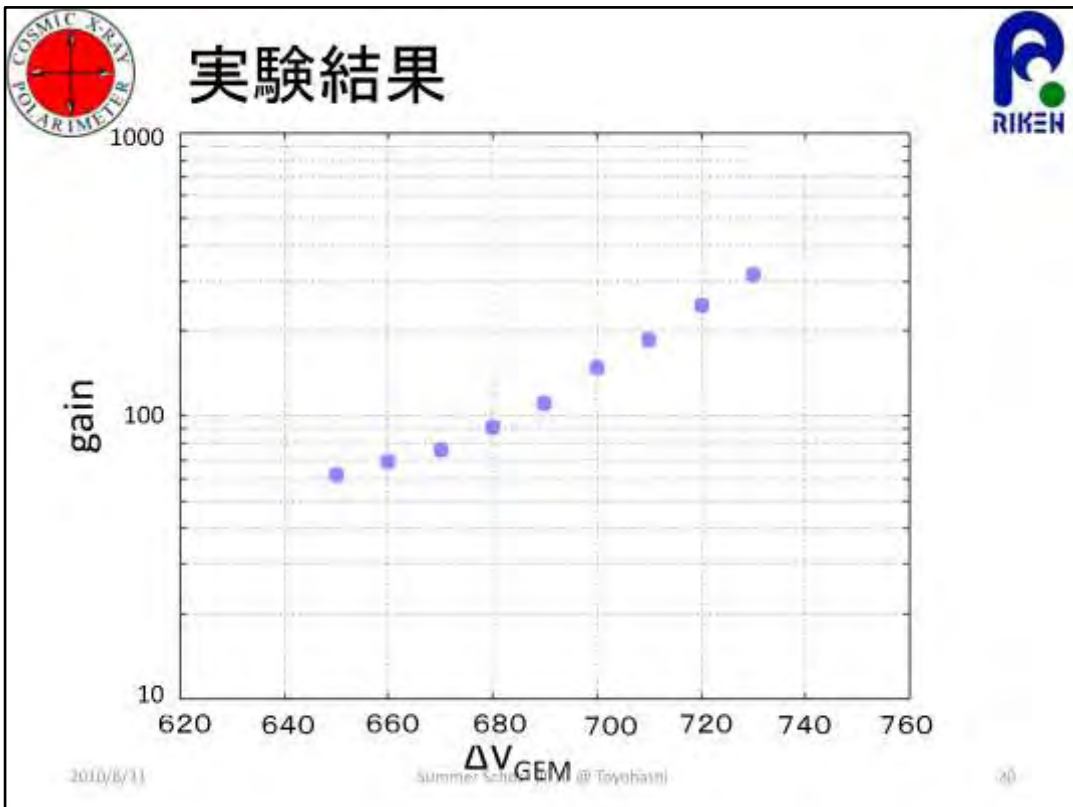
電荷読み出しパッド

信号処理 → 増幅後の電荷



2010/6/11 Summer School 2010 @ Tsuytatschi 18

製造したResistive-GEMが、実際に電子増幅をするのかを調査をした。ArとCO₂を体積比率70対30の混合ガスで満されたのガスチェンバー内に、電場を発生させるドリフトプレーン、Resistive-GEMと電荷を読み出すパッドをそれぞれ図のように設置した。チェンバーの外から、⁵⁵Fe線源からのX線(5.9 keV)を入射させ、混合ガスとを光電効果を引き起こさせて電荷を発生させる。発生した電荷量は、計算することができるので増幅前の電荷量を求めることができる。測定量は、Resistive-GEMによって増幅後の電荷量である。増幅後の電荷量は、電荷読み出しパッドから取得した信号を処理することで測定する。ここから、Resistive-GEMの両電極間にかかる電圧 ΔV_{gem} と電子増幅度とよばれる値との関係をもとめた。電子増幅度の定義は電荷が何倍に増幅されるかを示す量である。電子増幅度は一般的にgainと呼ばれている。



縦軸にログスケールでgainをとり、横軸にリニアで ΔV_{gem} をとりました。 Δv_{gem} はどれだけ Resistive-GEMに電圧をかけたかという値です。実際に測定した範囲は、 Δv_{gem} が650Vから730Vの範囲で測定しました。



これが、世界で初めて、Resistive-GEMが電子増幅する様子をとらえたことをしめしている。



まとめ

世界初

- Resistive-GEMの製作に成功した。
- 電子増幅する様子をとらえた。

開発に成功！

これから

- 放電に対して耐性があるのかを調査する。

©2010/05/11

astromin@cosmos.s.u-tokyo.ac.jp

今回のわたしの発表では、二つ世界ではじめてのことがあります。1つがResistive-GEMを実際に製作することに成功したことである。もう1つが電子増幅している様子をとらえたことである。

これからは、このResistive-GEMが放電に対して具体的にどの程度耐性があるかを調査したい。