

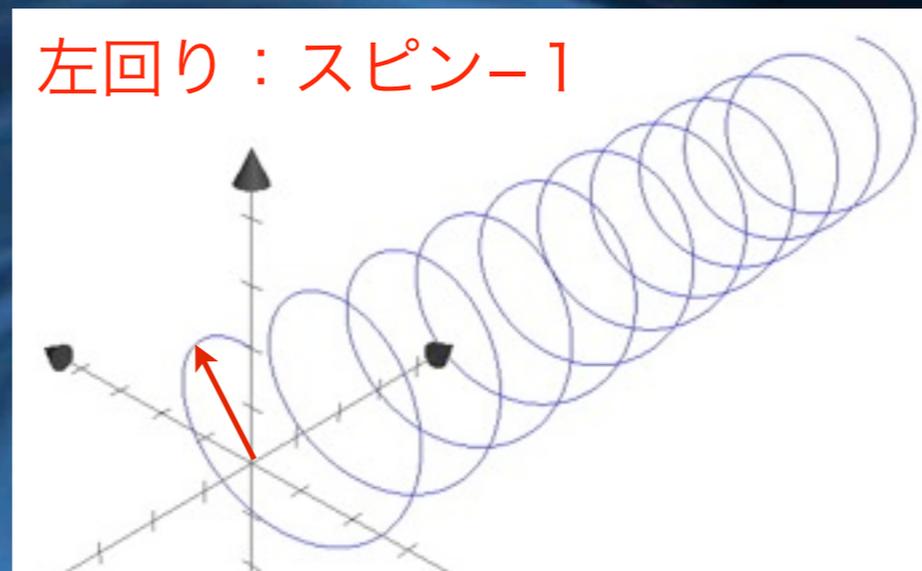
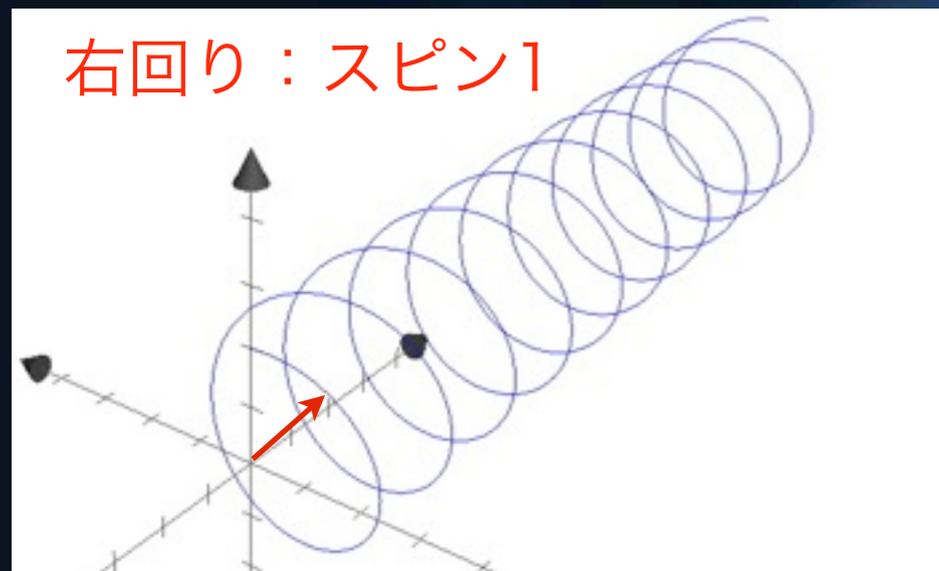
# 偏光をプローブとした 高エネルギー天体の観測

2011年10月 第2回総合スピン科学シンポジウム

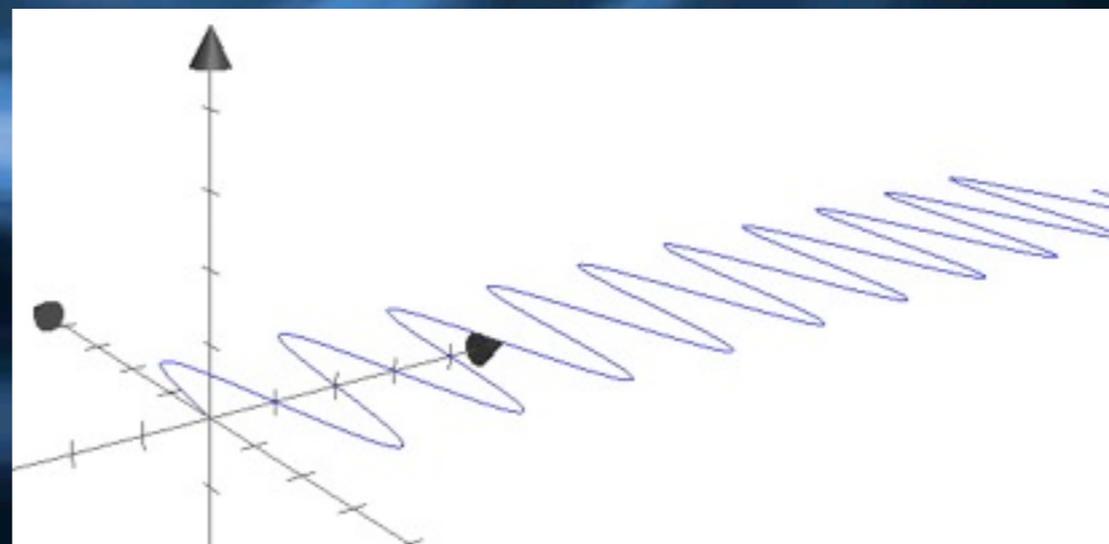
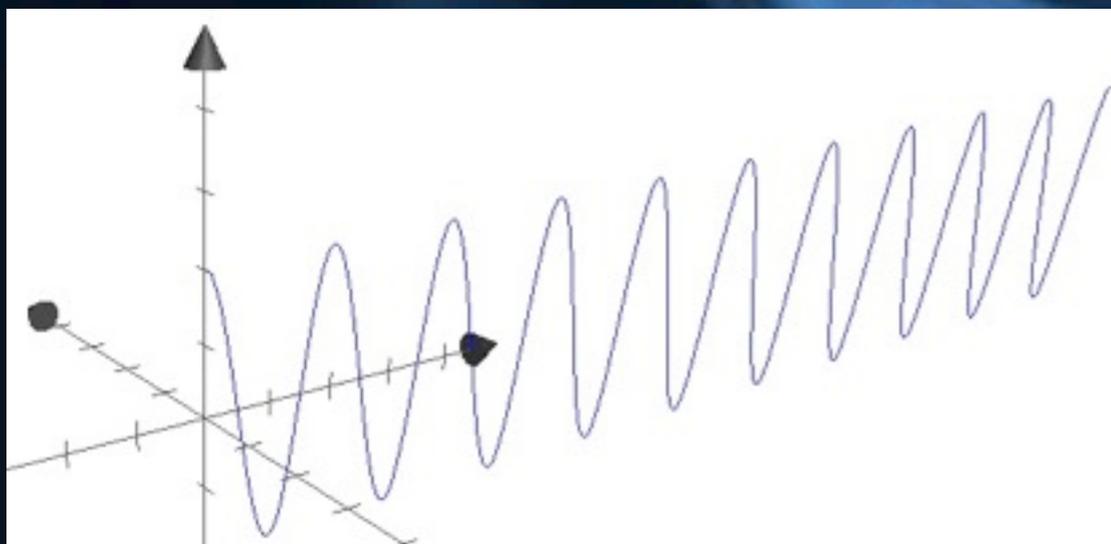
山形大学・理学部 郡司修一

# 1. 偏光に関して(イントロ)

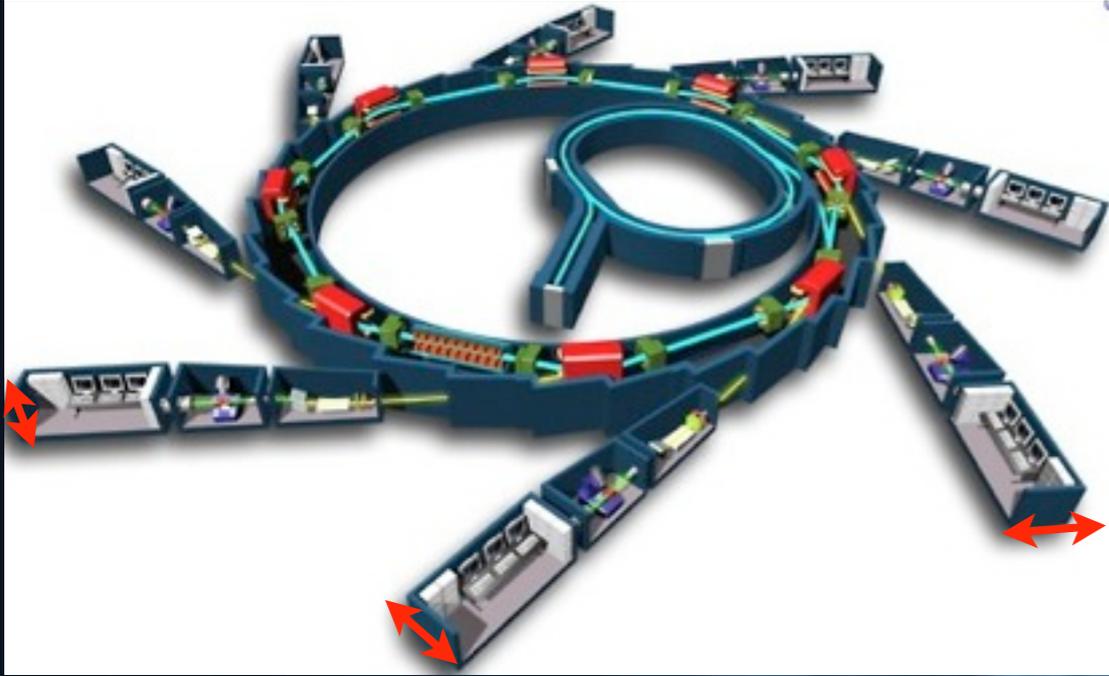
電磁波は電場と磁場が交互に振動しながら空間を伝わる現象。  
しかし、その振動の仕方には様々な場合がある。



しかし、このような固有状態だけでなく、直線偏光という固有状態も存在する。これが今回のお話のテーマ。



宇宙の高エネルギー現象を探るには、直線偏光の検出の方が円偏光よりも都合が良い場合が多い。



電子を高速で回すと、シンクロトロン放射によりX線が放出される。X線の放出方向は前方に偏る。そして、前方で観測されるX線は強く直線偏光する。

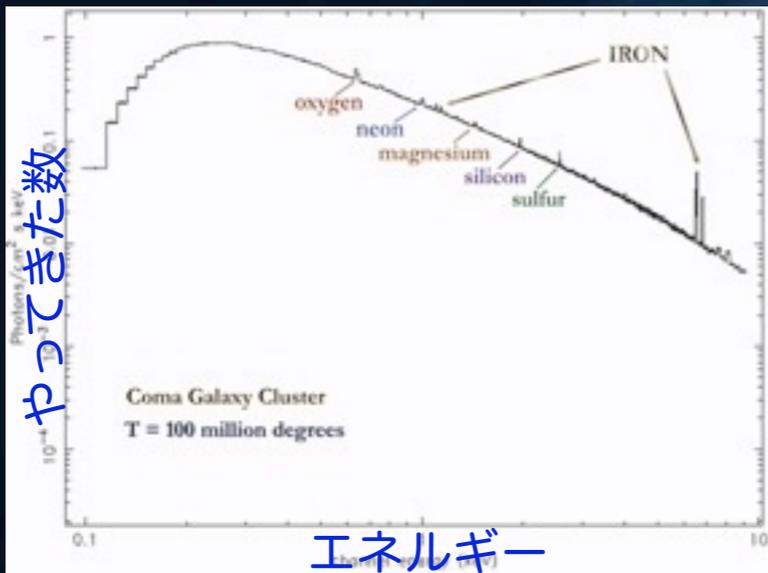
宇宙にも磁場が存在し、加速された電子がその磁場でシンクロトロン放射を起こしているのが頻繁に観測されている。

宇宙に存在する天然の加速器から放出されるX線も強く直線偏光している。

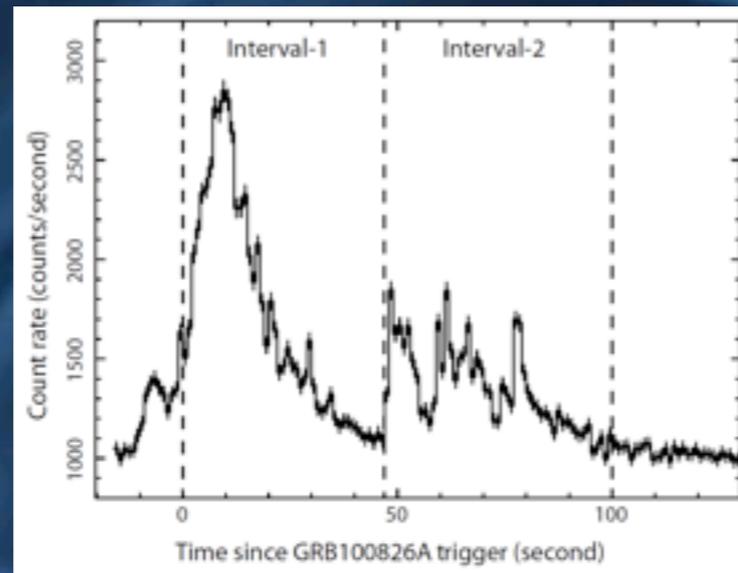


# 2. 高エネルギー宇宙物理学

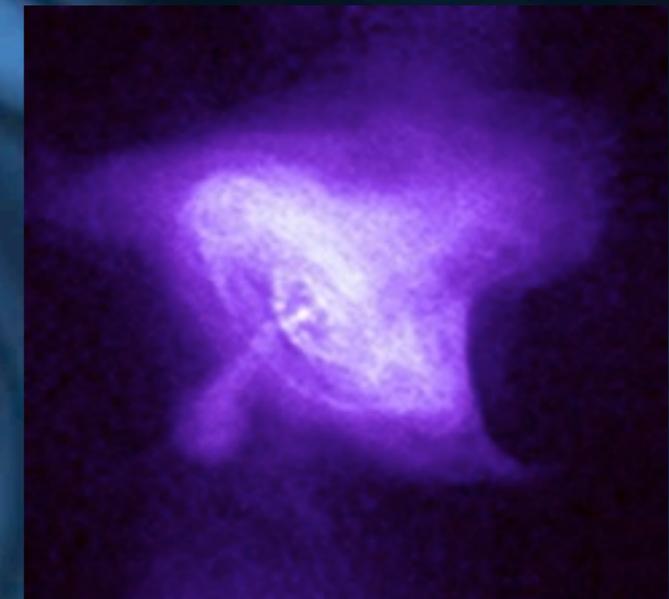
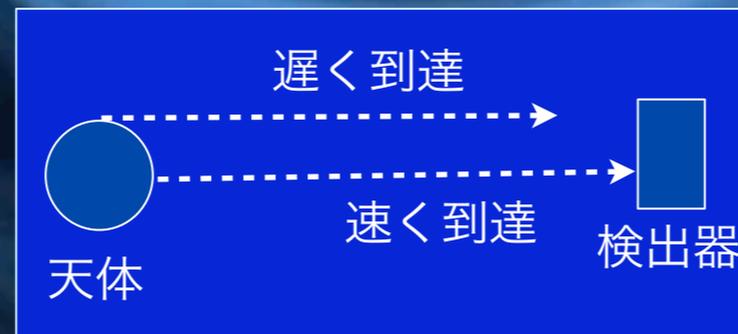
宇宙の高エネルギー現象を探る学問分野が高エネルギー宇宙物理学。天体から来るX線のエネルギー、タイミング、イメージの観測で大きく進展してきた。



エネルギーの観測により天体に存在する元素、天体の温度などが測定可能



タイミングの解析から放射領域のサイズが分かる



エネルギーがどこから出てくるか詳しく分かる。

現在は10万個以上のX線天体が発見され、3つの観測手法による3次元解析手法で様々な高エネルギー現象が解き明かされた。

この先、3つのパラメーターの精密観測だけが行われ  
学問分野にquantum jumpは無いのだろうか？



偏光観測こそが高エネルギー宇宙物理学の最後の鍵。

今まで偏光観測は検出器開発の困難さから殆ど  
行われて来なかったが、近年新しいデバイスの  
開発により大きく進展してきた。

今までの3次元的観測から一挙に5次元的な観測が  
実現する時代が来ている。



X線の偏光観測はそんなに難しいの？

光の偏光を測定できる装置なら、数千円払えばすぐには買える  
じゃないか？

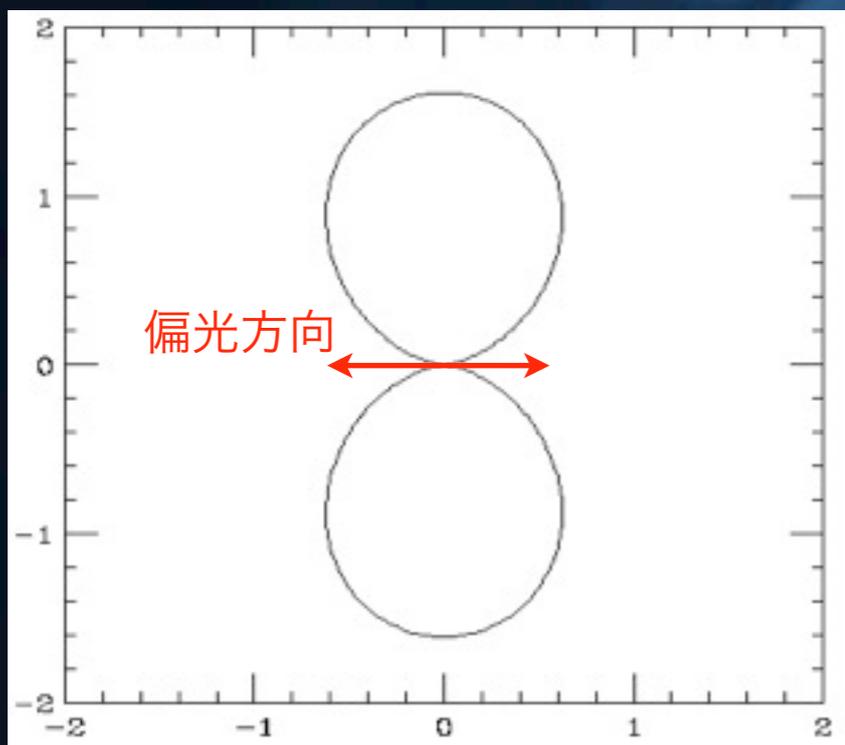
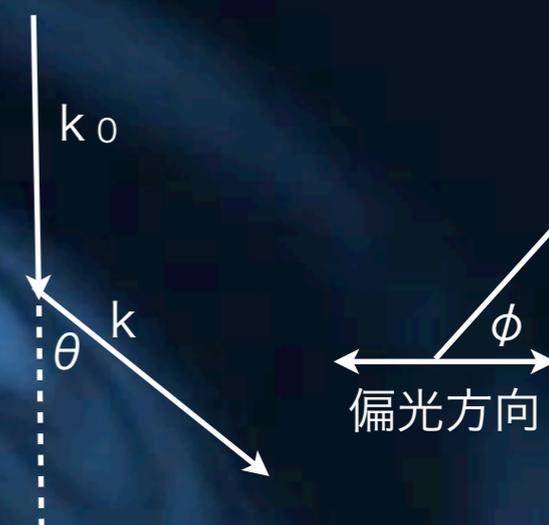
光に比べて波長が1000倍以上短いため、回折格子の様な  
技術がほとんど使えない。

# 偏光検出の原理：コンプトン散乱の異方性を使う。

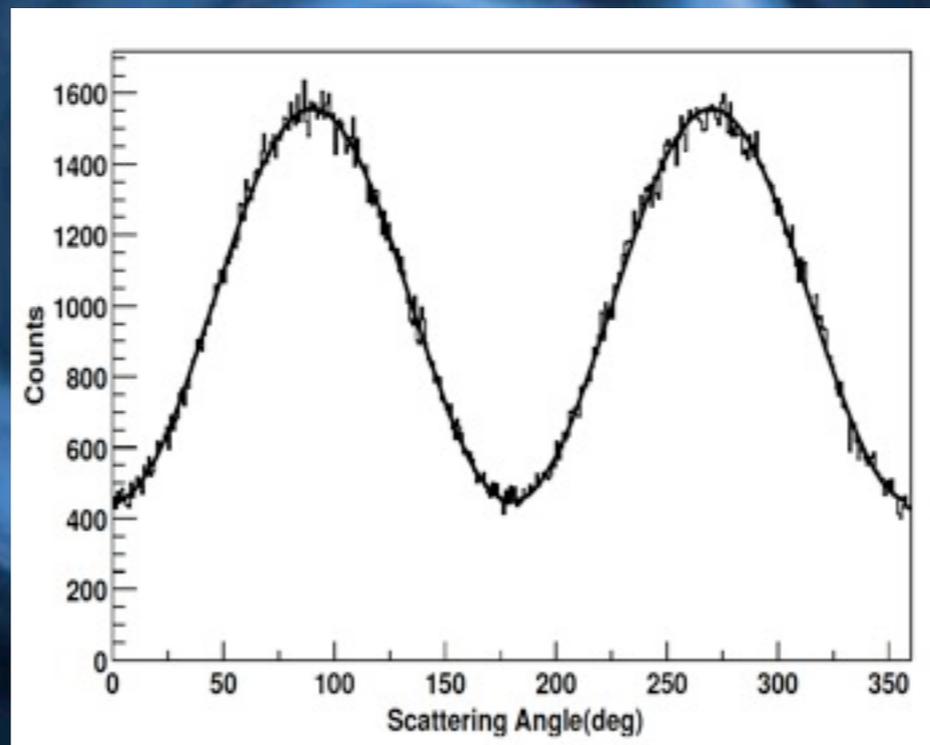
$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{r_0^2 k^2}{2 k_0^2} \left( \frac{k_0}{k} + \frac{k}{k_0} - 2 \sin^2 \theta \cos^2 \phi \right)$$

- $r_0$  : 電子の古典半径
- $\theta$  : 入射 X 線に対する散乱 X 線の散乱角
- $\phi$  : 入射 X 線の電場ベクトルを基準にした場合の散乱 X 線の方位角
- $k_0$  : 入射 X 線のエネルギー
- $k$  : 散乱 X 線のエネルギー

## Klein-Nishinaの式



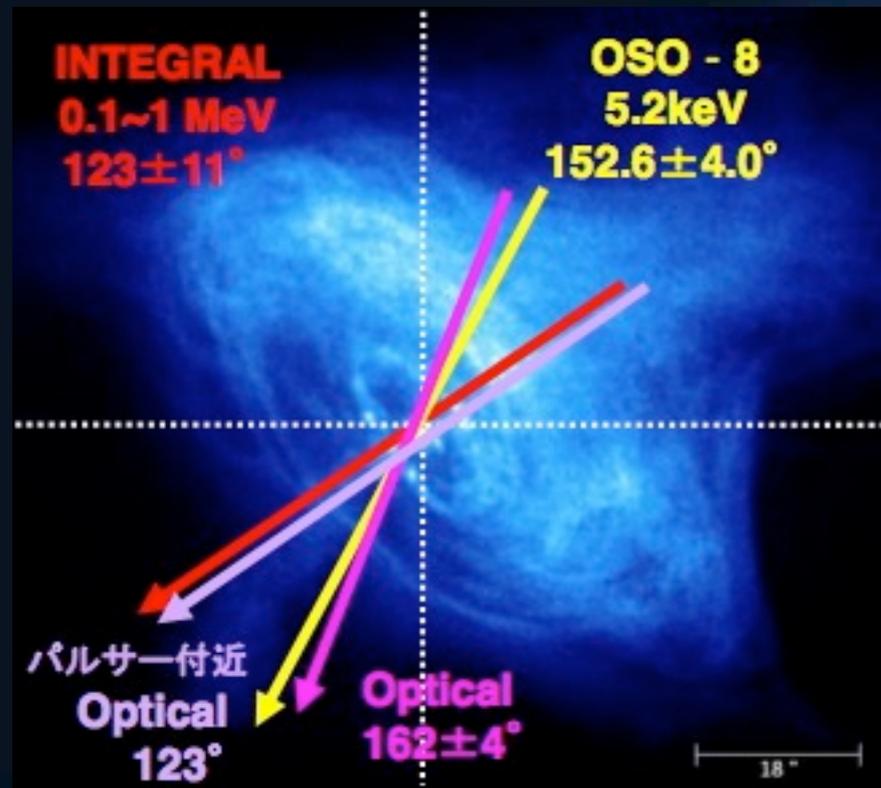
偏光方向と垂直に  
散乱されやすい



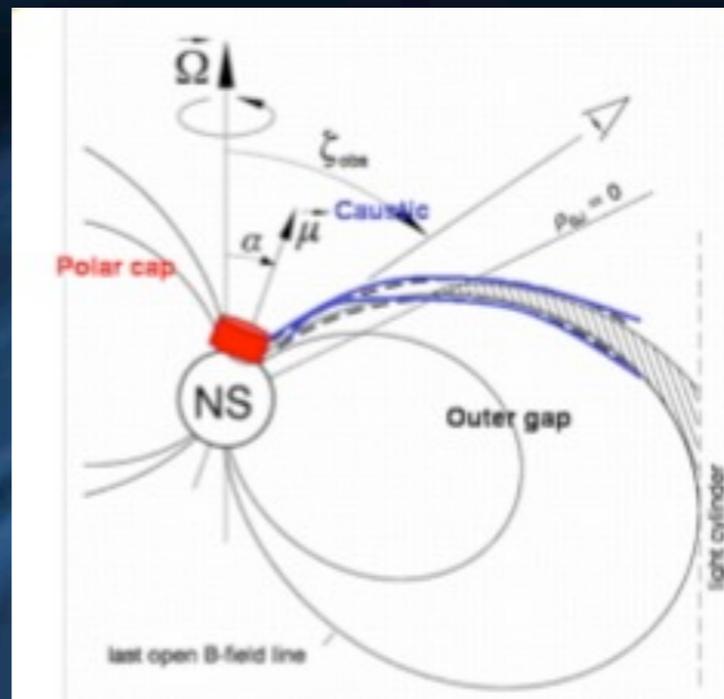
散乱角  $\phi$  の分布

散乱角  $\phi$  の分布から偏光方向を調べる

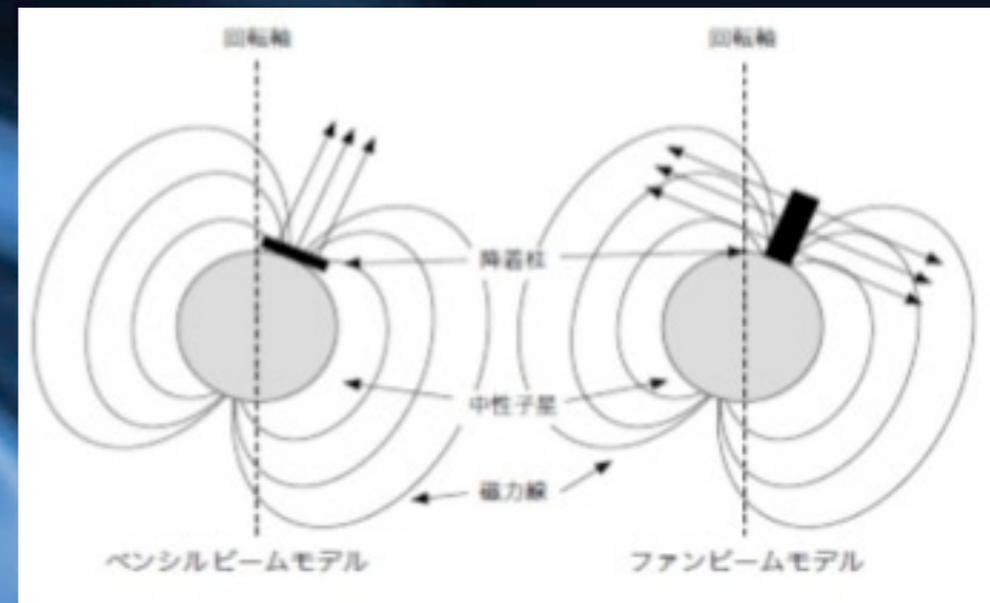
# 3. 偏光観測で開かれる物理



超新星残骸の磁場構造



孤立系パルサーの  
輻射メカニズム



バイナリーパルサーの降着柱構造



ガンマ線バースト



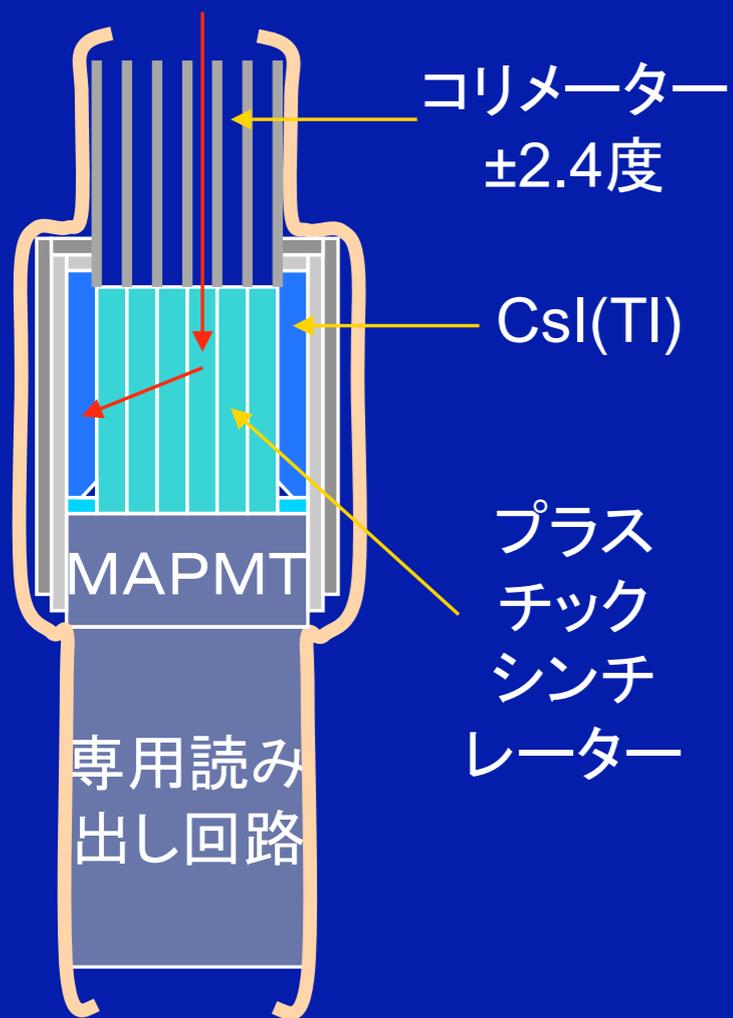
ブラックホールの時空構造

# 4. 山形大の取り組み

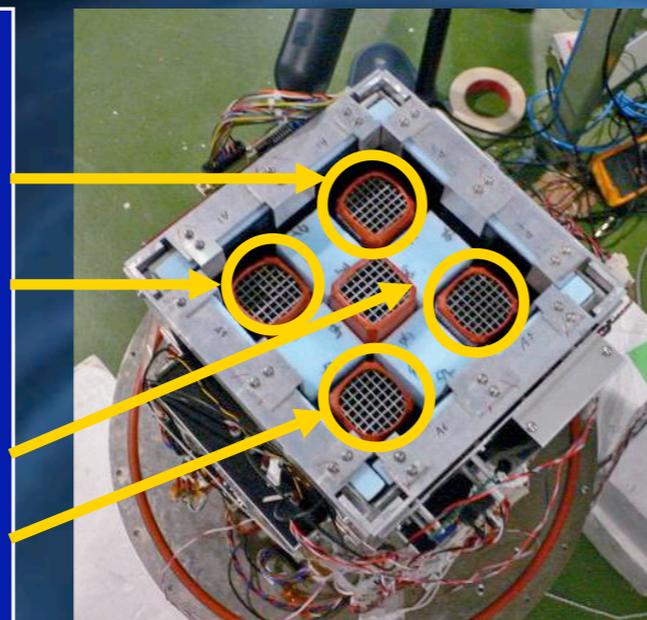
PHENEXプロジェクト：山形大、阪大、理研、JAXA/ISAS

世界に先駆けて、硬X線領域での偏光観測を実現するためのプロジェクト

## ユニットカウンター

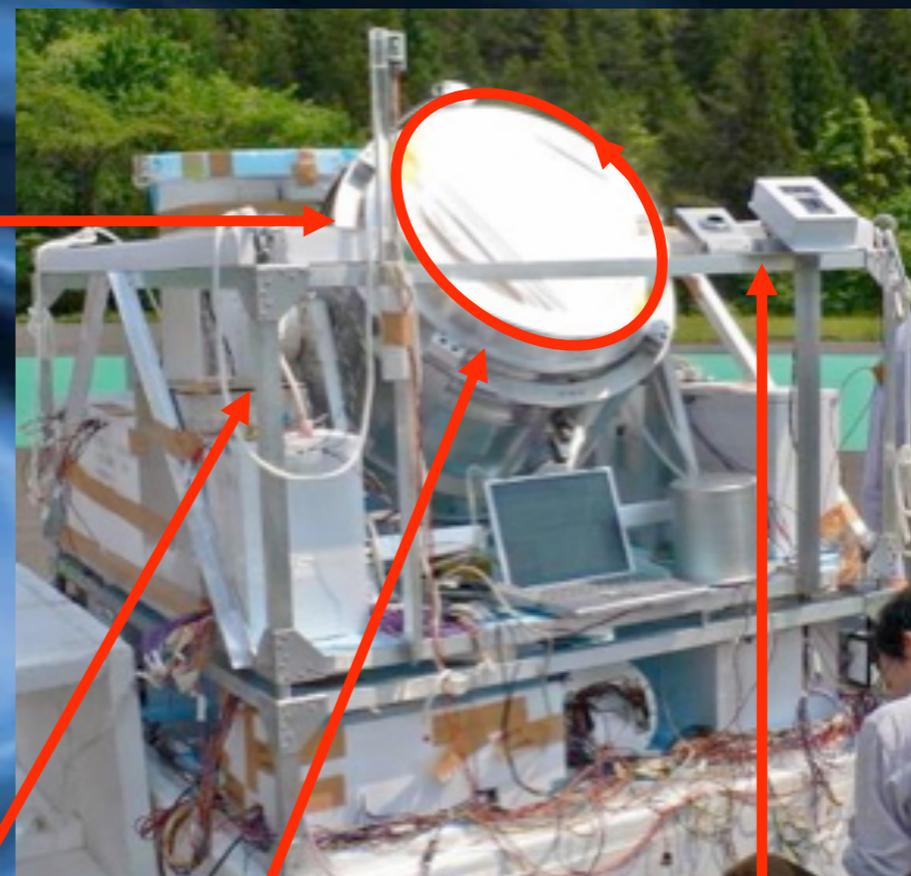


Mファクター: 53%  
検出効率: 20%



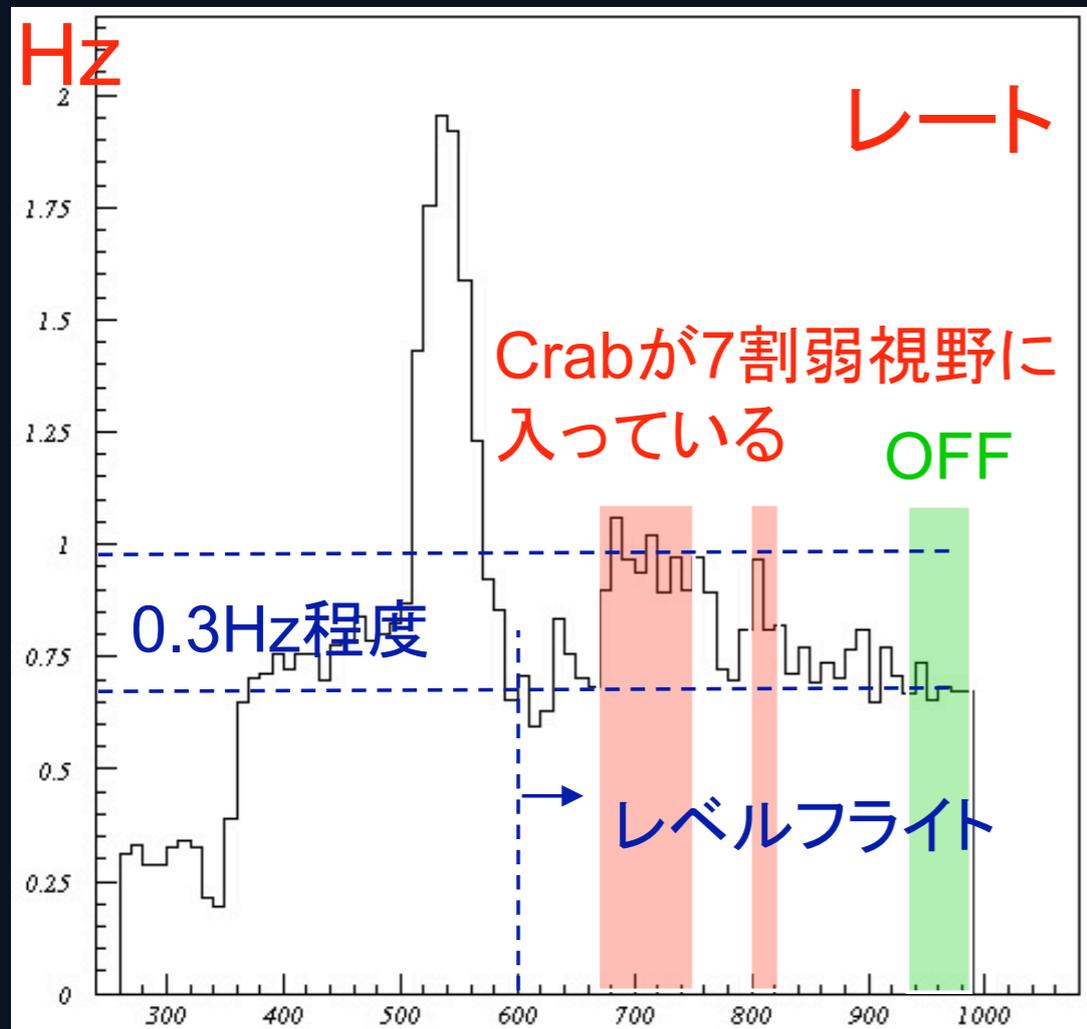
中心にはモニターカウンターを搭載。ユニットカウンターを9台まで拡張可能

エレベーションとアジマス制御し天体を自動追尾するシステムを搭載。

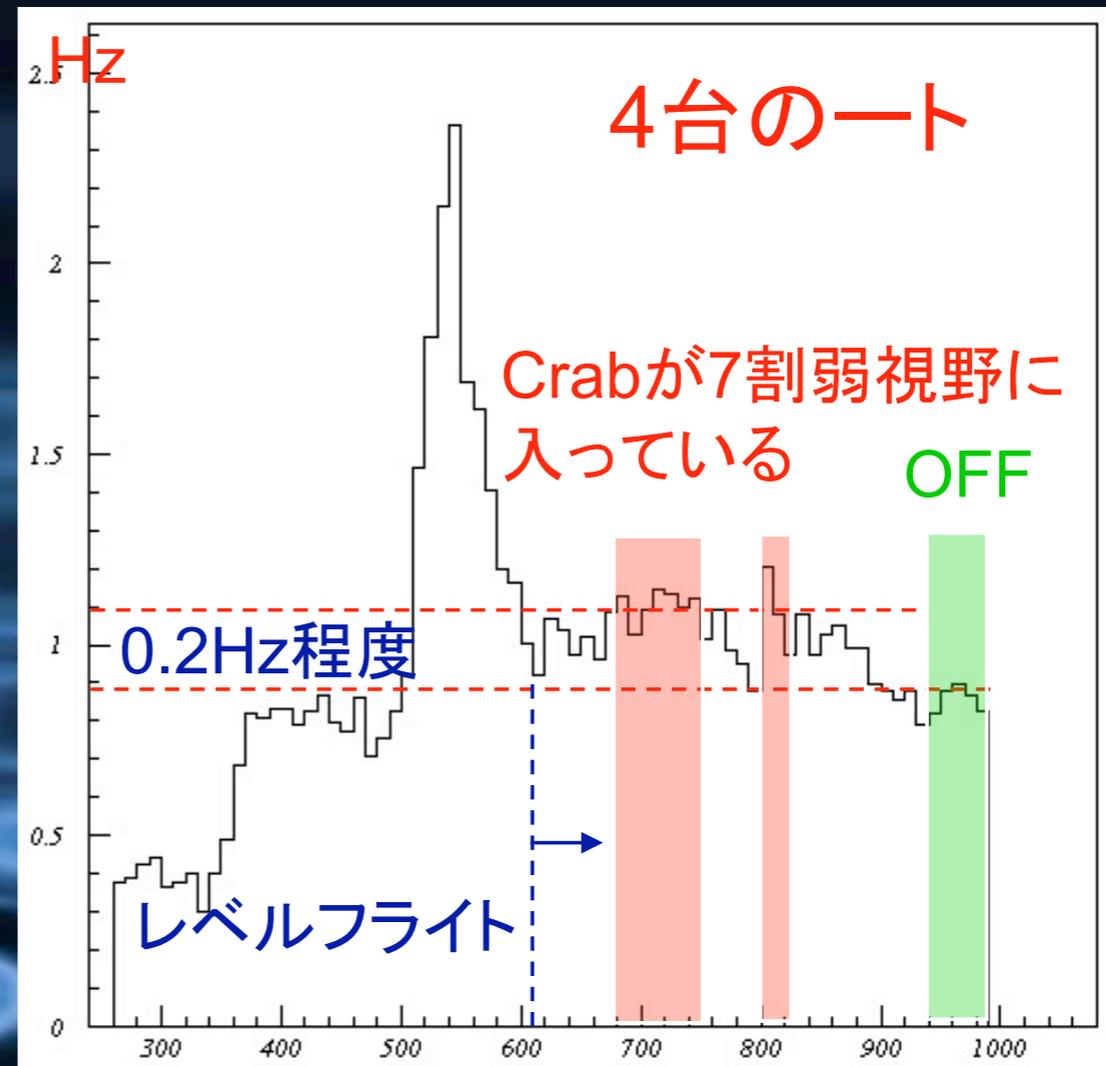


視線方向回転機構  
フェイクなモジュレーションを低減

太陽センサー  
視線方向を確認



時間[min]  
モニターカウンター



時間[min]  
ユニットカウンター

10 $\sigma$ 程度以上で、両方の検出器共にカニ星雲を捕らえていた。

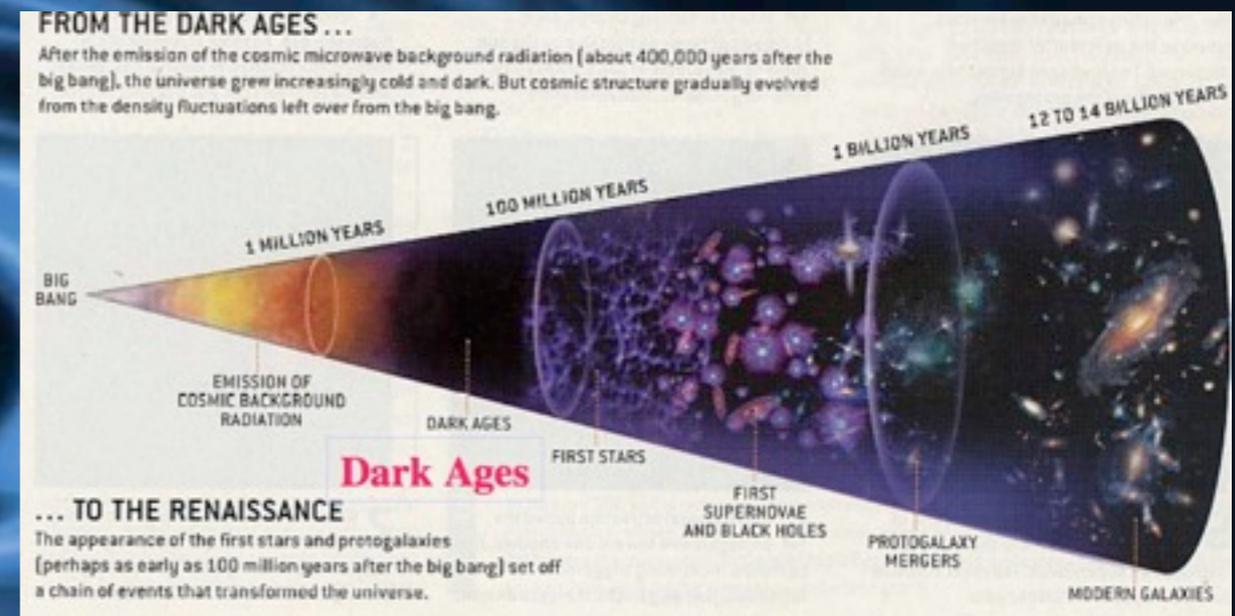
誤差は大きいものの偏光度(33 $\pm$ 26%)と偏光方向(154 $\pm$ 43度)という結果を出すことができた。岸本祐二君(京大の研究者を経て、現在KEKの研究者)のドクター論文となる。

# 5. 最近の成果 (GRBの偏光観測)

ガンマ線バーストとは宇宙最大の爆発現象であり、宇宙の果てで起こっている現象である (131億光年離れたものも見つかった)。つまり、GRBを観測するという事は過去の宇宙を観測すること。

↓

その時代では最初の星や銀河が形成されたと考えられている。さらにその前は宇宙の暗黒時代。GRBを使えば、このような研究を大きく進めることができると期待されている。



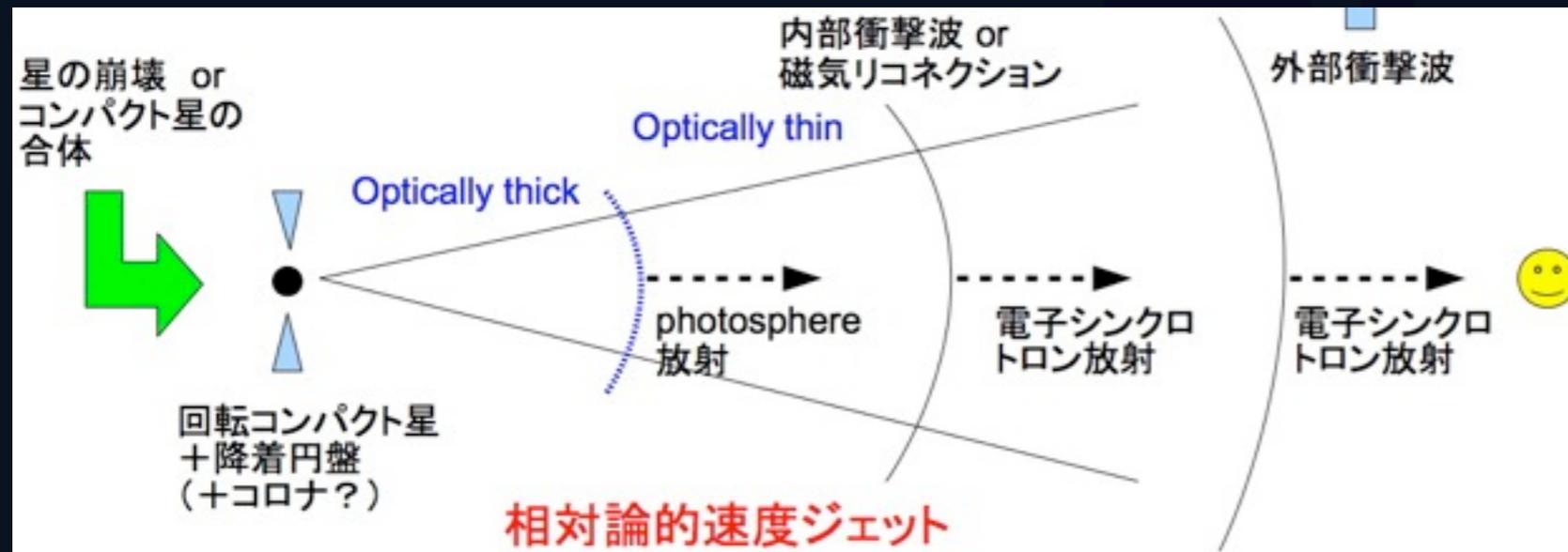
↓

GRBをプローブとして詳細な研究を行うには、GRBの輻射メカニズム、ひいては絶対光度を理解する必要があるが、まだ理解されていない。

↓

偏光観測はGRBの輻射メカニズムを詳細に調べる非常に強力な方法である。

# GRBの輻射メカニズム

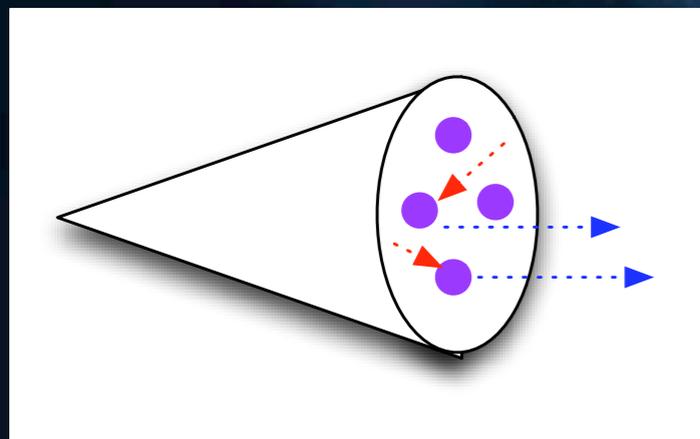


中心から高速のジェットが出てきて光学的にthinになり出した頃にプロンプトの放射が起こり、ジェットが星間物質とぶつかって、アフターグローが出る。

## 分かっていないこと

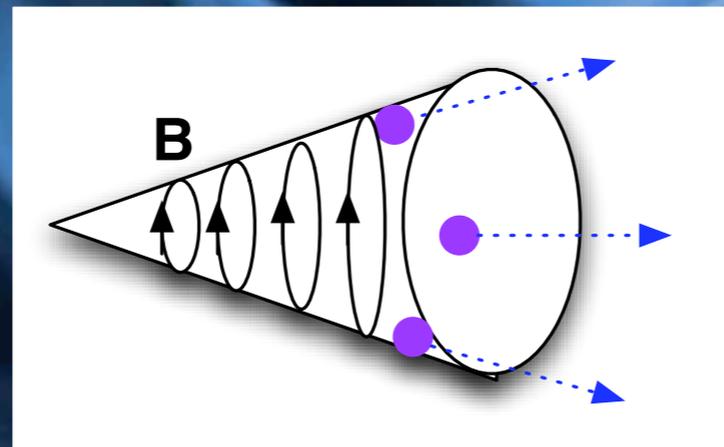
- ・ プロンプト成分は光球からの放射か、シンクロトロン放射か？
- ・ シンクロトロンだとすれば、磁場はどんな形状なのか？
- ・ ジェットは一様かそれともパッチ状か？

### 光球からの放射

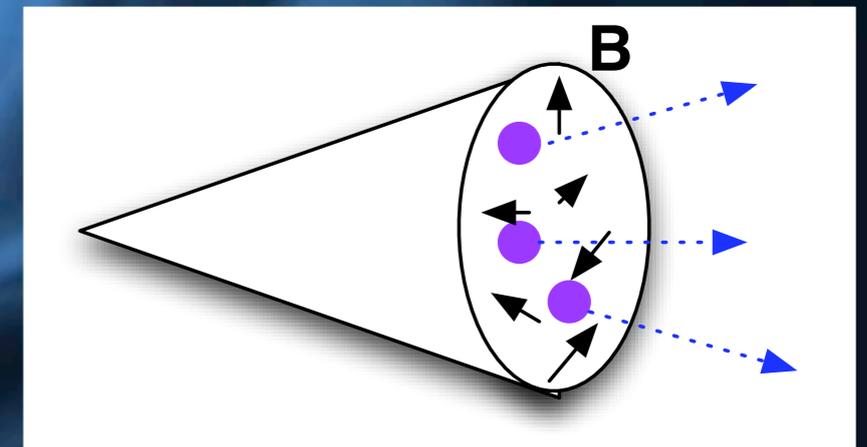


光球表面の光子が電子によって散乱される。**Phモデル**

### シンクロトロン



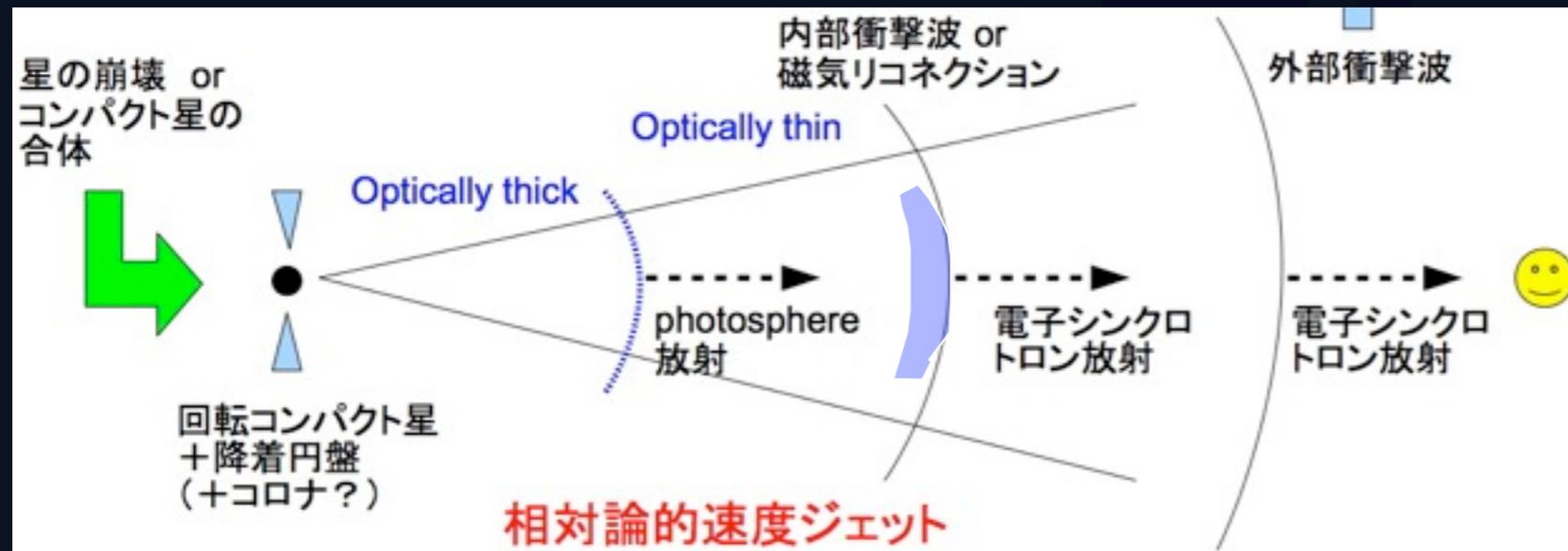
螺旋状の磁場でシンクロトロン。**SOモデル**



ランダムな磁場でシンクロトロン。**SR(SH)モデル**

偏光観測により、モデルに厳しい制限を与える事ができる

# GRBの輻射メカニズム

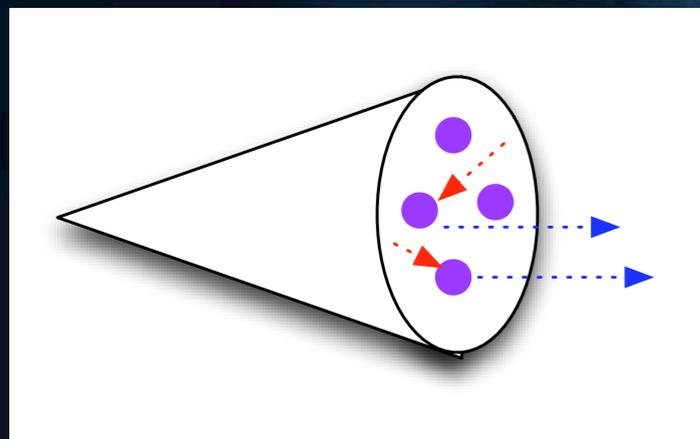


中心から高速のジェットが出てきて光学的にthinになり出した頃にプロンプトの放射が起こり、ジェットが星間物質とぶつかって、アフターグローが出る。

## 分かっていないこと

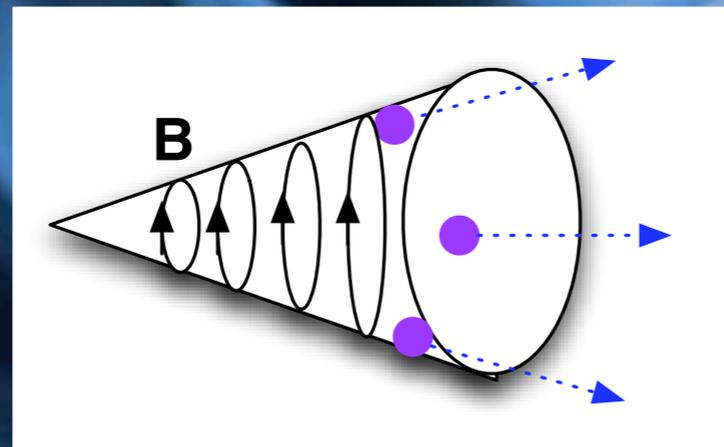
- ・ プロンプト成分は光球からの放射か、シンクロトロン放射か？
- ・ シンクロトロンだとすれば、磁場はどんな形状なのか？
- ・ ジェットは一様かそれともパッチ状か？

### 光球からの放射

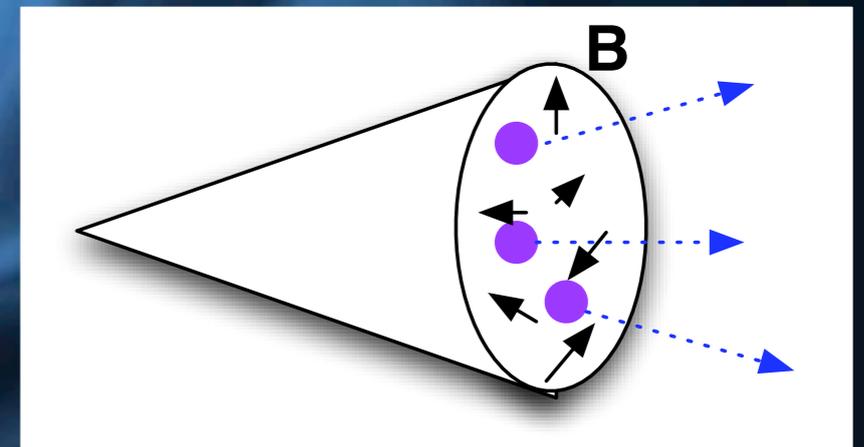


光球表面のフォトンが電子によって散乱される。**Phモデル**

### シンクロトロン



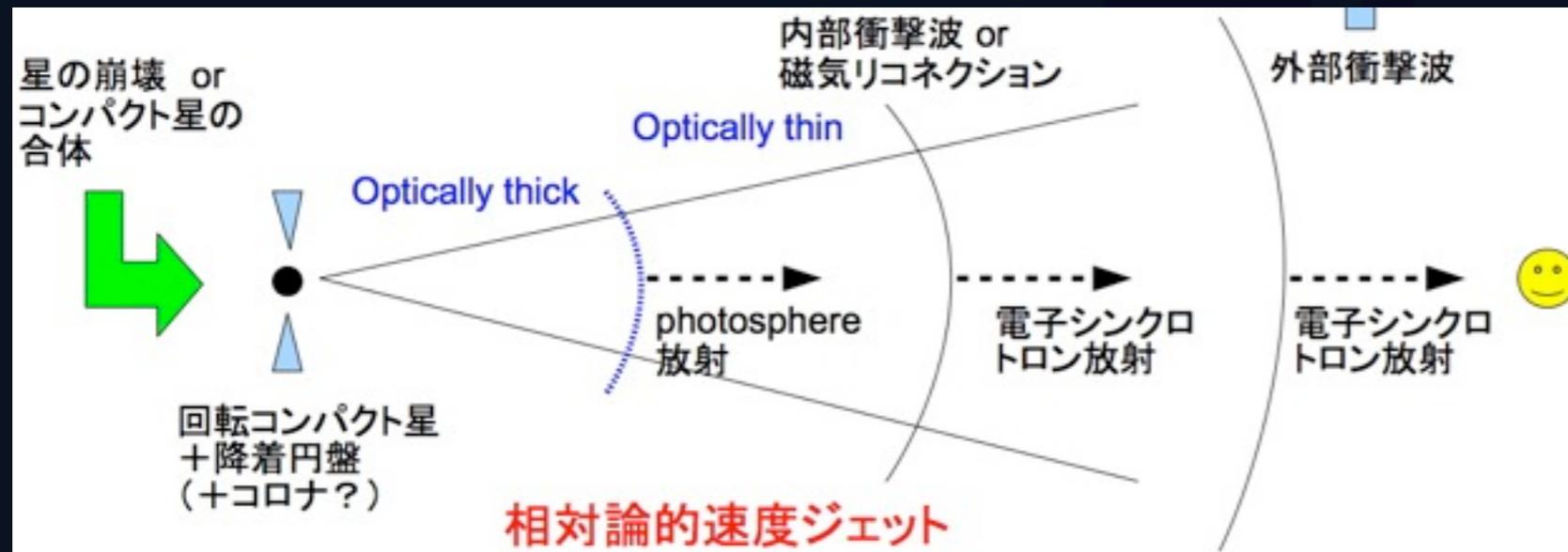
螺旋状の磁場でシンクロトロン。**SOモデル**



ランダムな磁場でシンクロトロン。**SR(SH)モデル**

偏光観測により、モデルに厳しい制限を与える事ができる

# GRBの輻射メカニズム

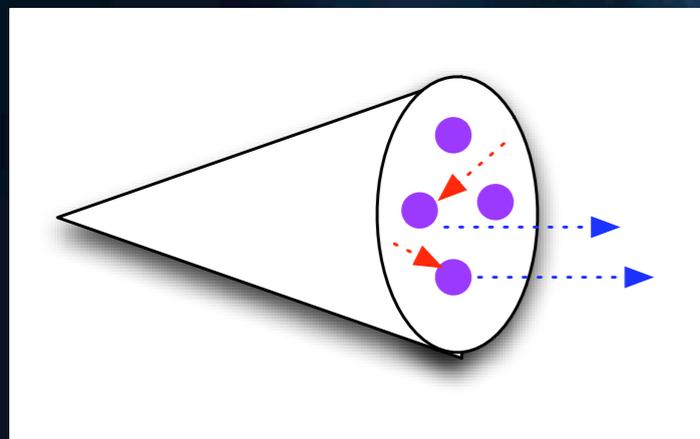


中心から高速のジェットが出てきて光学的にthinになり出した頃にプロンプトの放射が起こり、ジェットが星間物質とぶつかって、アフターグローが出る。

## 分かっていないこと

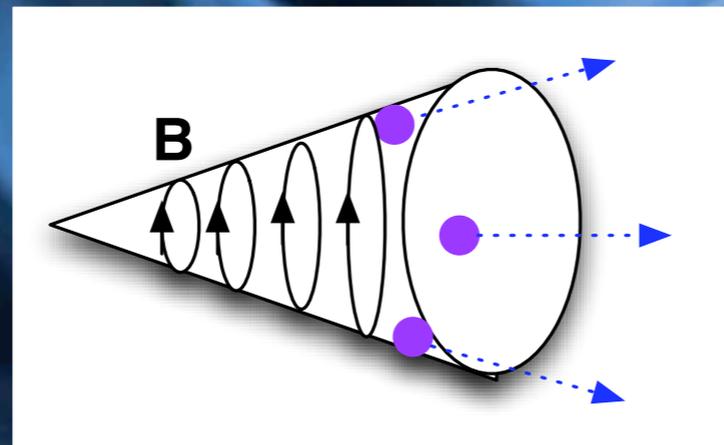
- ・ プロンプト成分は光球からの放射か、シンクロトロン放射か？
- ・ シンクロトロンだとすれば、磁場はどんな形状なのか？
- ・ ジェットは一様かそれともパッチ状か？

### 光球からの放射

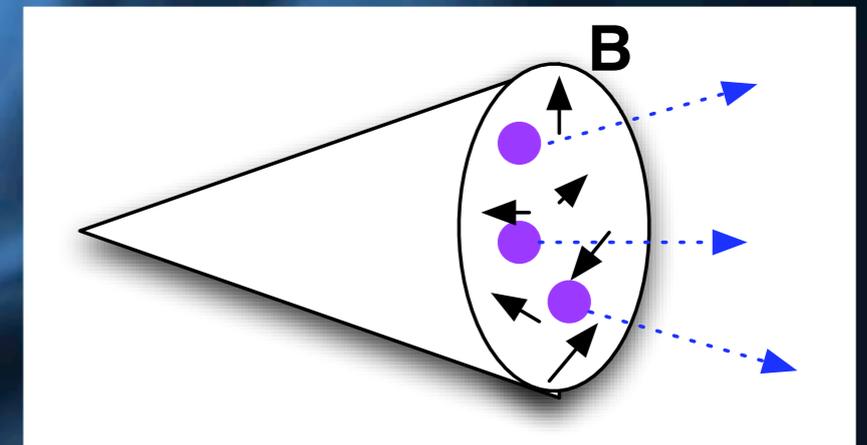


光球表面のフォトンが電子によって散乱される。**Phモデル**

### シンクロトロン



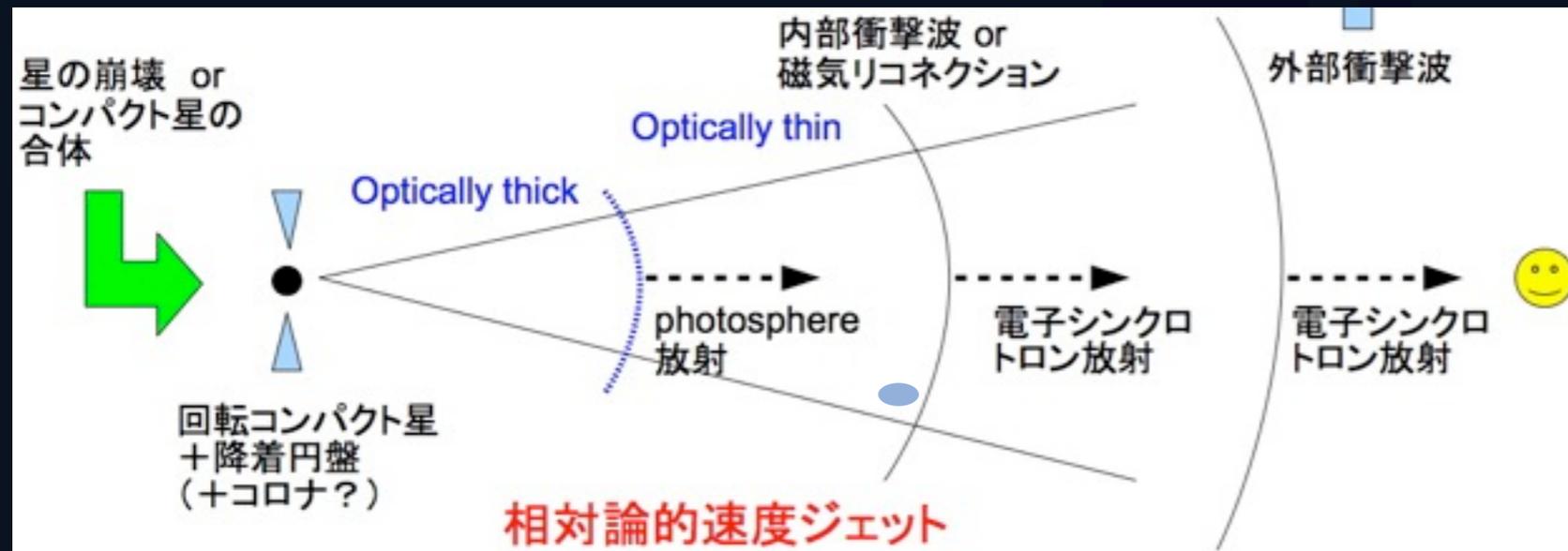
螺旋状の磁場でシンクロトロン。**SOモデル**



ランダムな磁場でシンクロトロン。**SR(SH)モデル**

偏光観測により、モデルに厳しい制限を与える事ができる

# GRBの輻射メカニズム

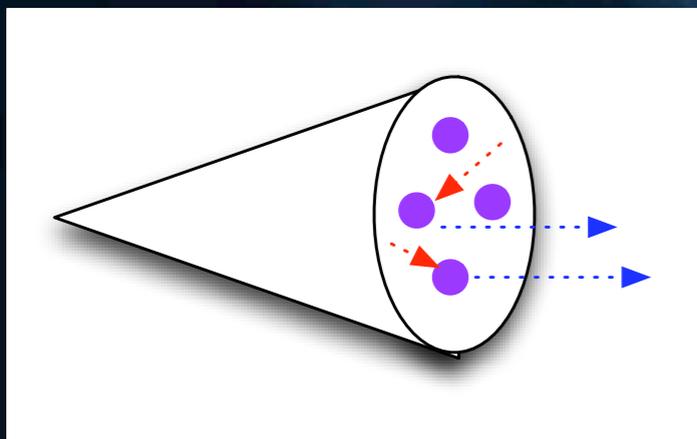


中心から高速のジェットが出てきて光学的にthinになり出した頃にプロンプトの放射が起こり、ジェットが星間物質とぶつかって、アフターグローが出る。

## 分かっていないこと

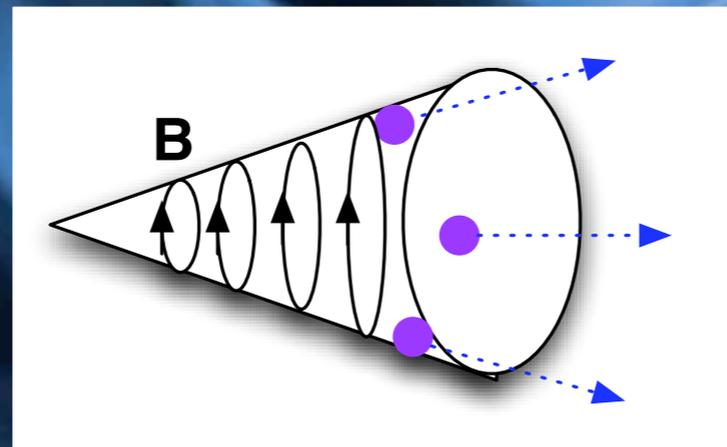
- ・ プロンプト成分は光球からの放射か、シンクロトロン放射か？
- ・ シンクロトロンだとすれば、磁場はどんな形状なのか？
- ・ ジェットは一様かそれともパッチ状か？

### 光球からの放射

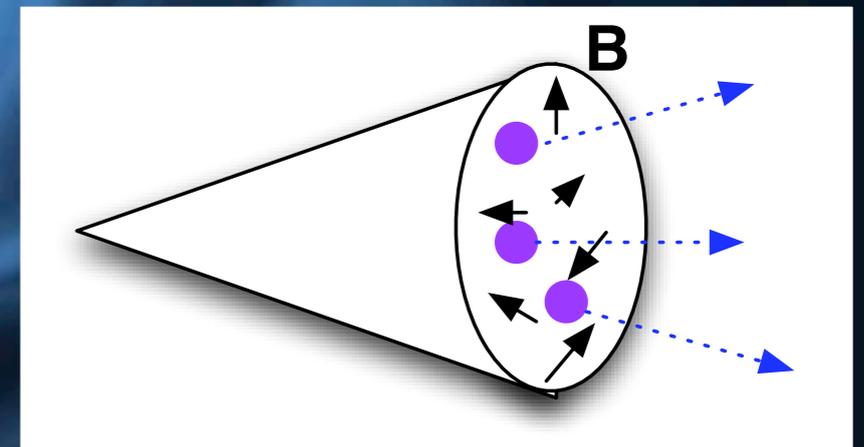


光球表面のフォトンが電子によって散乱される。**Phモデル**

### シンクロトロン



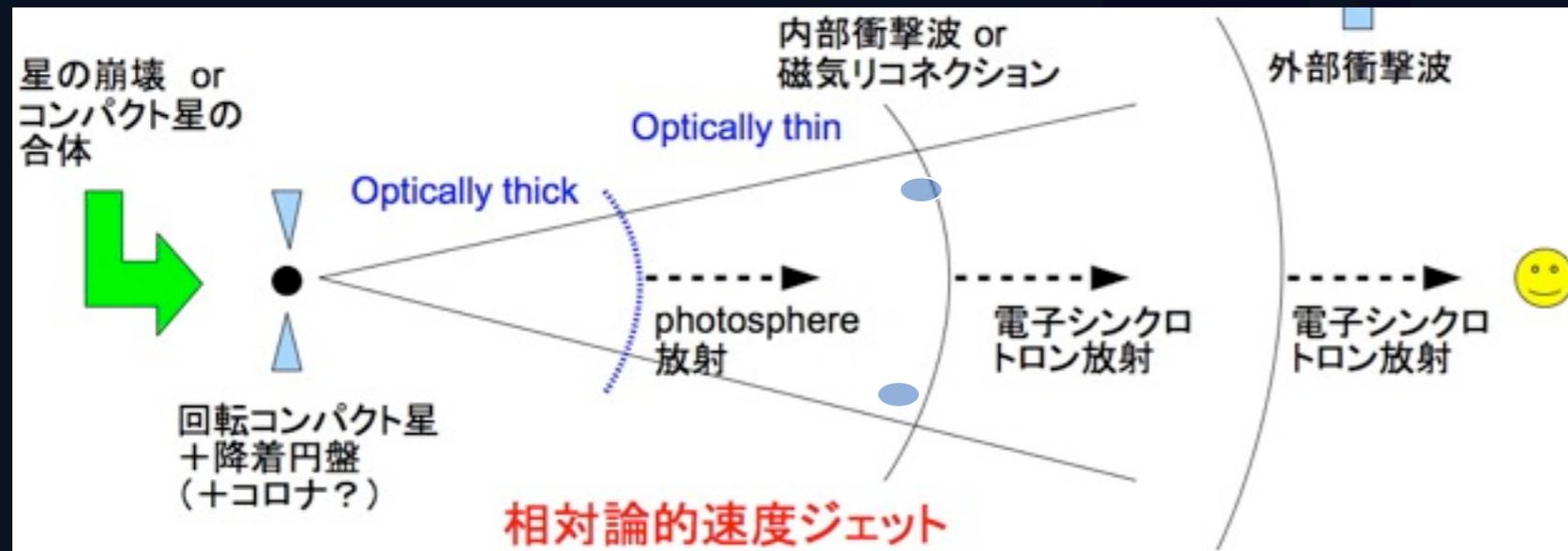
螺旋状の磁場でシンクロトロン。**SOモデル**



ランダムな磁場でシンクロトロン。**SR(SH)モデル**

偏光観測により、モデルに厳しい制限を与える事ができる

# GRBの輻射メカニズム

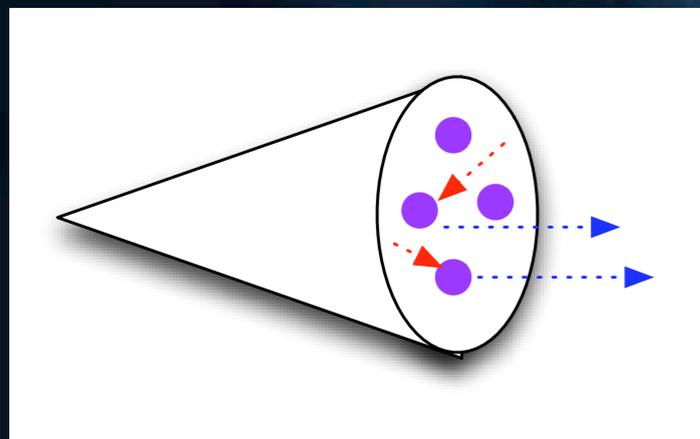


中心から高速のジェットが出てきて光学的にthinになり出した頃にプロンプトの放射が起こり、ジェットが星間物質とぶつかって、アフターグローが出る。

## 分かっていないこと

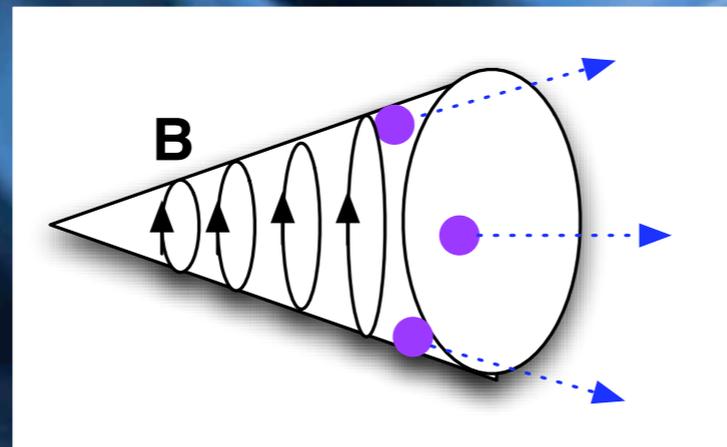
- ・ プロンプト成分は光球からの放射か、シンクロトロン放射か？
- ・ シンクロトロンだとすれば、磁場はどんな形状なのか？
- ・ ジェットは一様かそれともパッチ状か？

### 光球からの放射

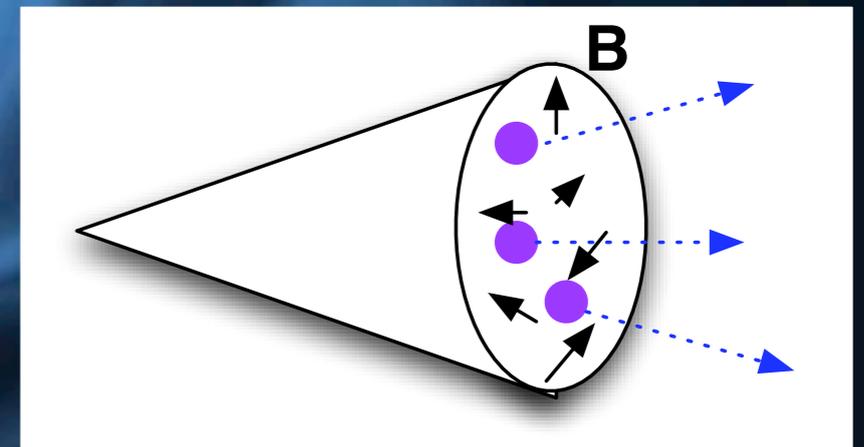


光球表面の光子が電子によって散乱される。**Phモデル**

### シンクロトロン



螺旋状の磁場でシンクロトロン。**SOモデル**

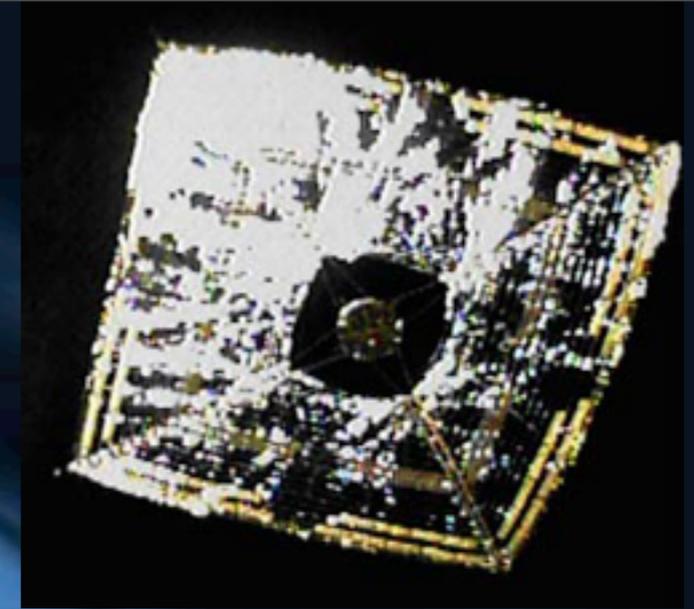


ランダムな磁場でシンクロトロン。**SR(SH)モデル**

偏光観測により、モデルに厳しい制限を与える事ができる

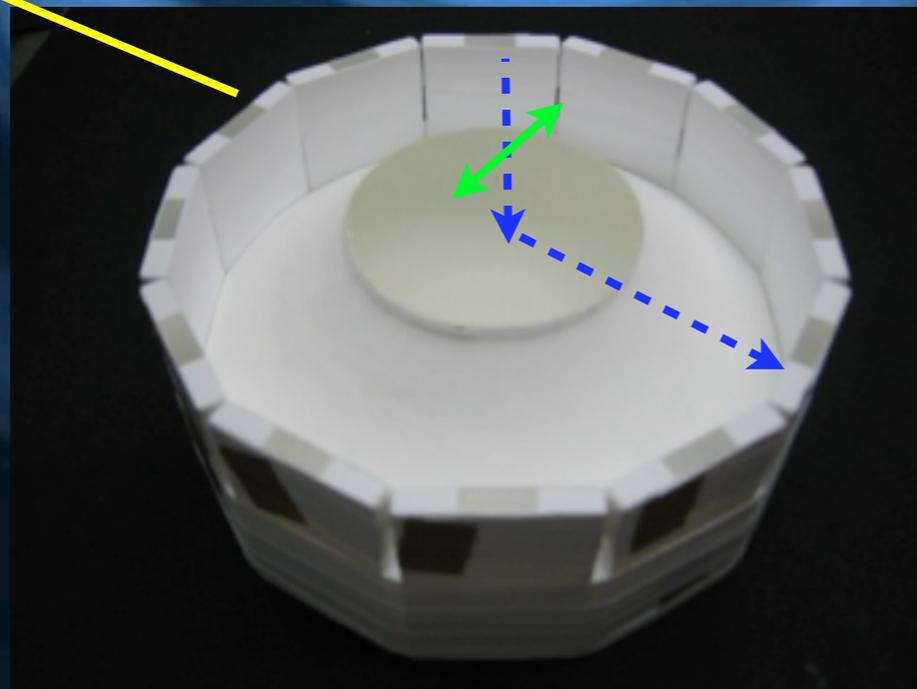
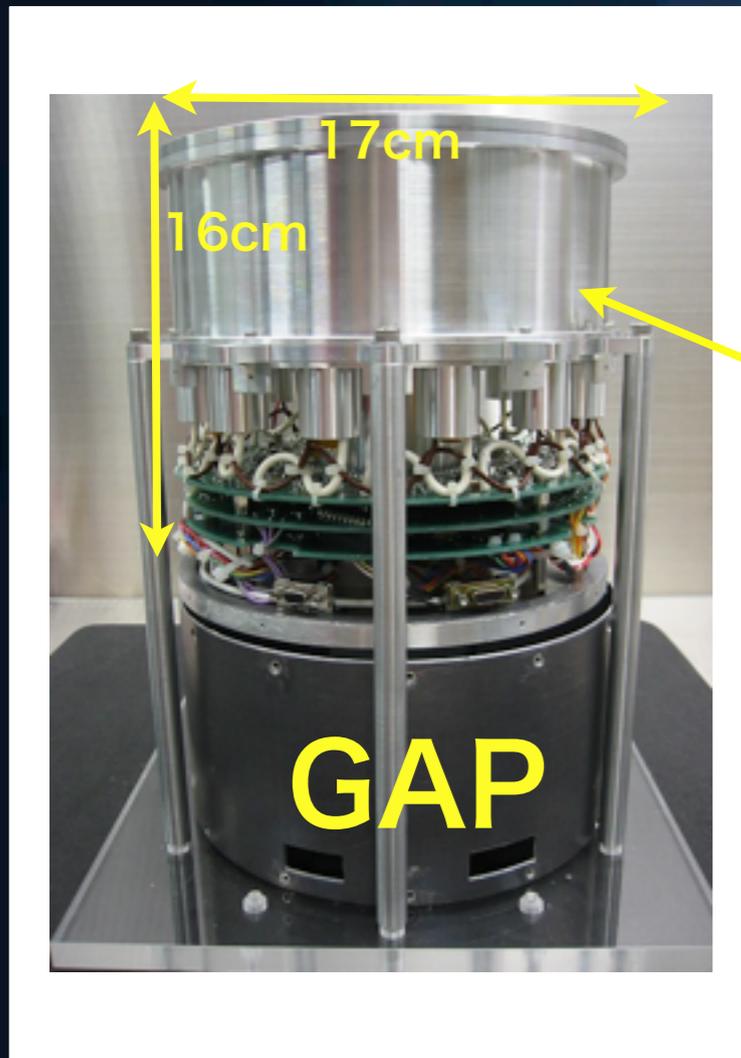
# GAP検出器

宇宙ヨットIKAROSに小型のGRB偏光度検出器を取り付けた。それがGAPである。2010年5月に打ち上げられ、7月から運用開始。現在もまだ生きている。



**全重量3.9kg、電力5W。**

コンプトン散乱型の偏光度検出器で中心にプラスチックシンチレーター、周りに12個のCsI(Tl)が取り付けられている。

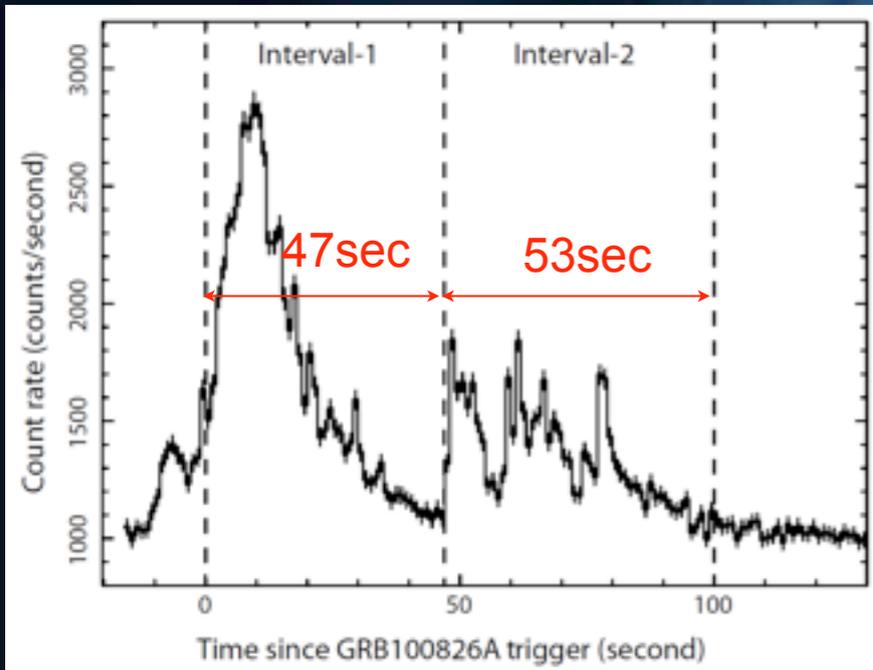


入射硬X線の方向と垂直に散乱されやすい事を利用して、偏光の情報を取得。

# GRB100826の偏光観測



- 2010年8月26日 22:57:20.8(UT)にGRBが発生。他の検出器により**GAPの視野中心から20度**の方向である事が分かった。
- **上位1%に入る強いバースト。**

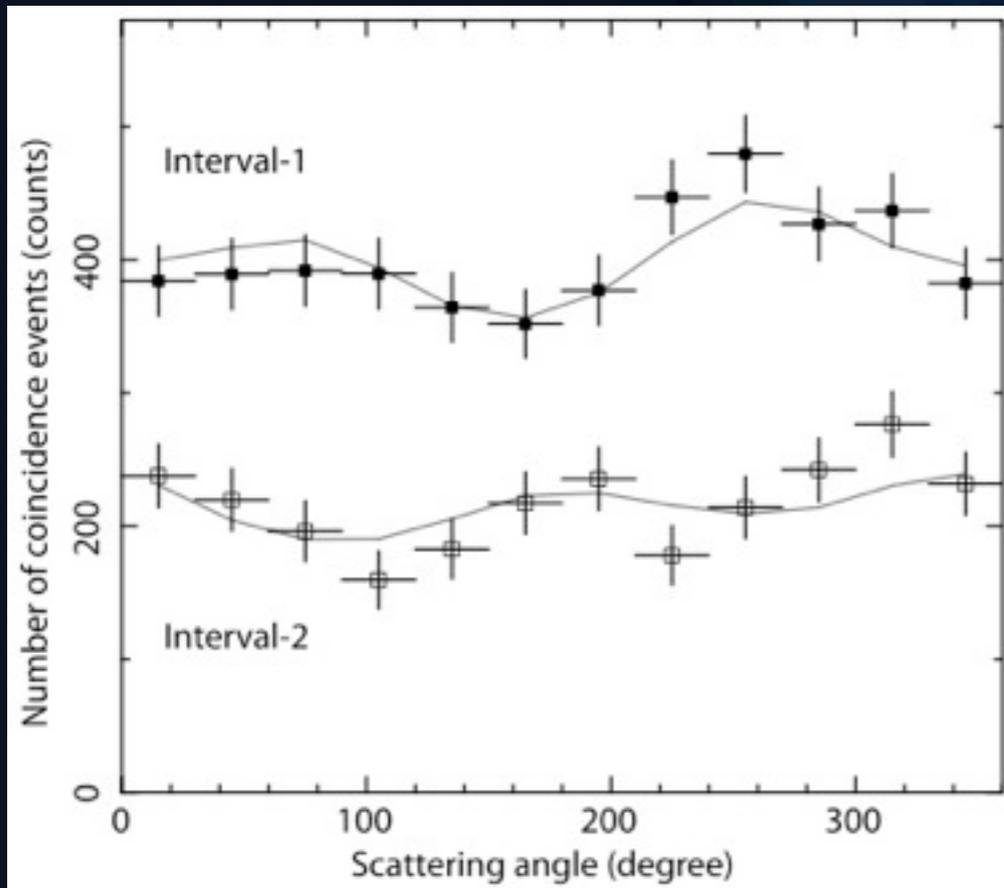


バーストのタイミングプロファイル  
最初のピークから47秒程度後に、小さいバーストが3回程度続いている。  
バックグラウンド差し引き後のフォトン数。  
Interval-1 : 32924counts → **4821counts**  
Interval-2 : 19007counts → **2733counts**

コインシデンスイベント数

偏光解析に耐えうるイベント数が残っている！

# 偏光解析の結果



偏光度と偏光角をフリーパラメーターとして、GEANT4を使ってシミュレーションする。

Interval-1 偏光度: $25 \pm 15\%$ 、偏光角: $159 \pm 18$ 度

Interval-2 偏光度: $31 \pm 21\%$ 、偏光角: $75 \pm 20$ 度

偏光検出の信頼度は、それぞれ95.4%、89%だが、偏光方向の変化の有為度は $3.5\sigma$ レベル。

**明らかに偏光方向が変わっている！**



平均的な偏光度を計算するため、Interval-1と-2のデータを位相の違いを考慮してシミュレーションする。 **$2.9\sigma$ の信頼度で $27 \pm 11\%$ という偏光度が得られた。**



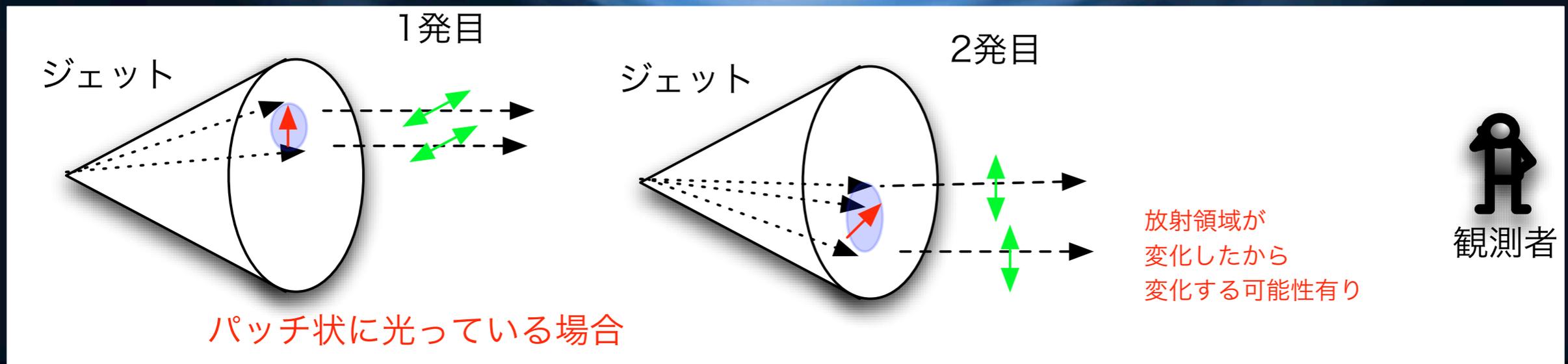
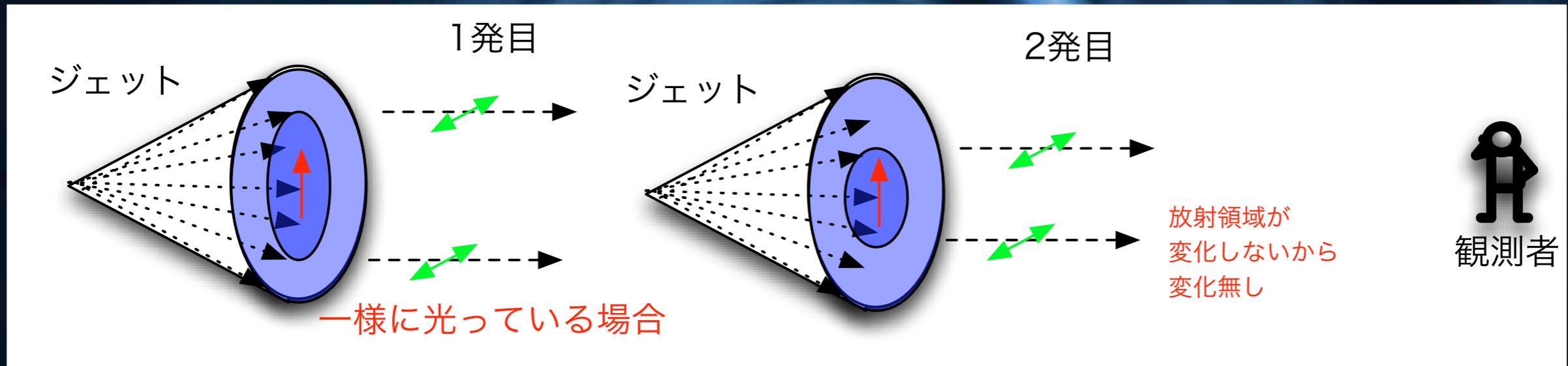
GRBの偏光は過去にRHESSI衛星やINTEGRAL衛星で報告された事がある。GAPはわずか4kgにも満たない重量であるにも関わらず、数トンの衛星よりも精度良く偏光情報を取得した。確かに運も味方しているが、**GAPが偏光に特化した検出器であり、地上で精密なキャリブレーションを行ったからこそ成し遂げられた事である。**

# 物理的解釈

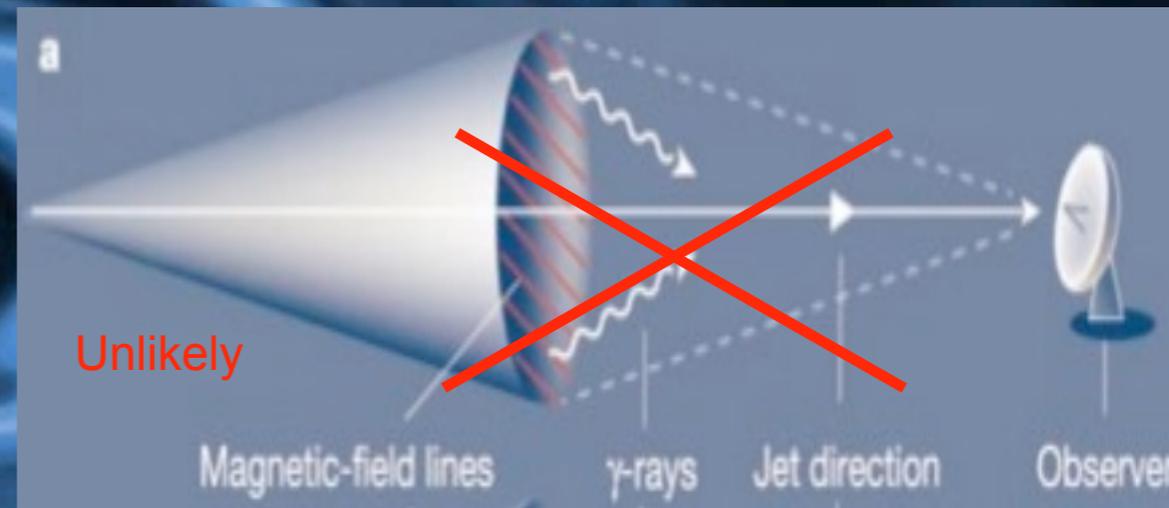
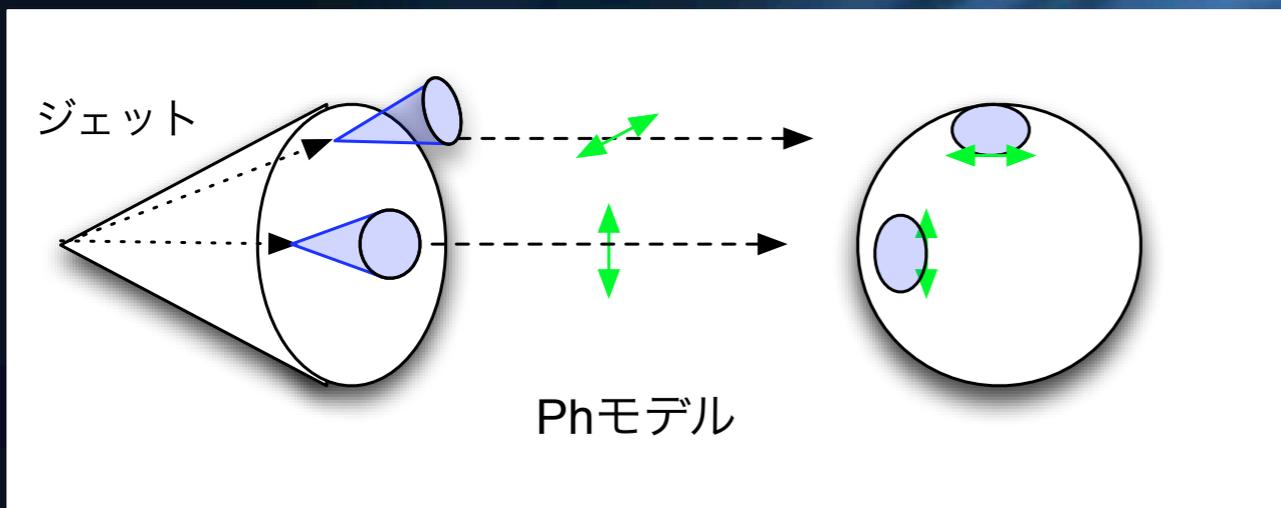
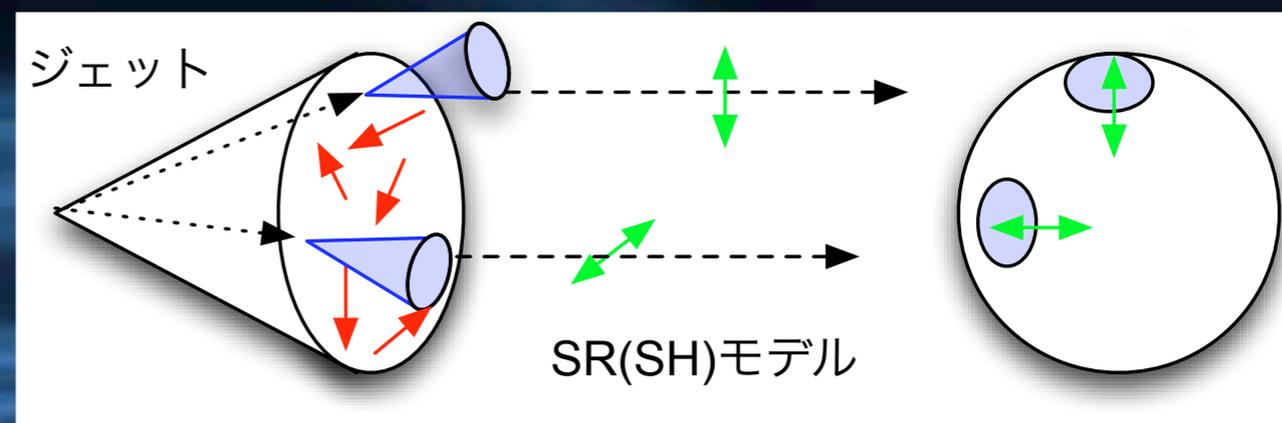
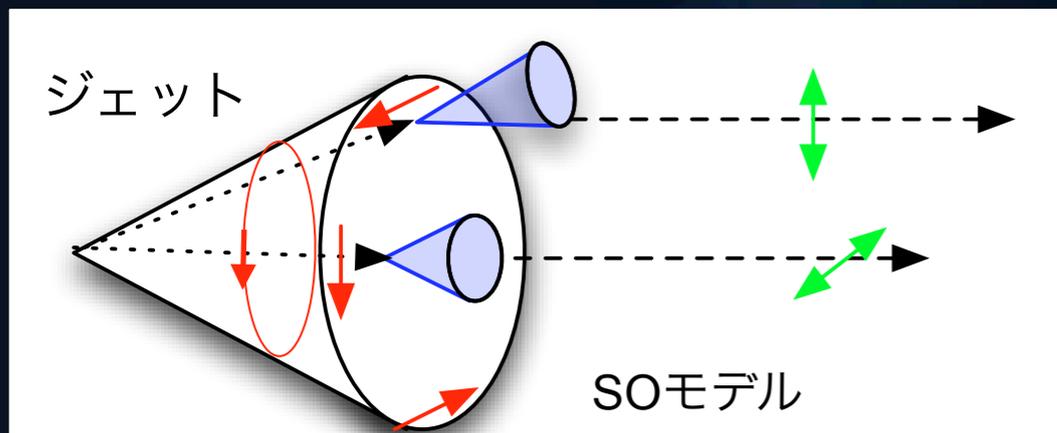
「偏光度27%程度、偏光角の変化が84度程度」から何が分かるのか？

1) ジェットが一様で、一様にガンマ線が2回出ている場合には、偏光方向が84度も変化する事はない。しかしジェットがパッチ状になっていて、違った場所から2回ガンマ線が出ている場合には、偏光方向が大きく変わる可能性がある。

ジェットはパッチ状になっていたはずである。



2)パッチ状に放射が起こっている場合には、SO、SR(SH)、Phモデルの  
 どれが正しいかは分からないが、ジェットの開き角には制限が付くだろう。



より沢山のガンマ線バーストを観測する事で、どのモデルが正しいのかが  
 分かるようになるであろう。

「ニュートリノが光の速度を超えて運動する」という話題  
 みたいに、7時のニュースでは取り上げられていませんが、  
 多くの新聞で取り上げてくれました。

日本経済新聞 2011年(平成23年)9月20日(火曜日) ☆12版 社会 34

## 宇宙最大級の爆発 強い磁場が存在

### 金沢大・山形大など

宇宙最大級の爆発現象「ガンマ線バースト」で、大量に放出されるガンマ線が作り出される際に強い磁場が関与しているというメカニズムの一端を、金沢大や山形大などの研究チームが観測で突き止めた。19日から鹿児島市で始まった日本天文学会の中で発表する。

ガンマ線バーストは、主に地球から100億光年以上離れた宇宙で発生し、ガンマ線で非常に明るく輝く現象。重い星の超新星爆発などが原因と考えられているが、ガンマ線発生メカニズムはよく分かっていない。チームは、宇宙航空研究開発機構が昨年5月に打ち上げた宇宙ヨット実証機「イカロス」に搭載した観測装置で、同8月に発生したガンマ線バーストを観測。ガンマ線の波長の振動が一方方向にそろった「偏光」という現象を検出した。

偏光は、ガンマ線がつかられる際に、強い磁場が関与していることの証拠となる。観測では、偏光の方向が短時間で変化し、複数の磁場が存在するとみられることも分かった。

金沢大の米徳大輔助教は「理論では予想されていたが、観測で磁場の存在を立証できた。メカニズムの解明につながる成果」としている。

同大創立125周年を記念したシンポジウム「豊かな社会・平和な世界を築くための科学・技術・教育の役割」を東京都内、東洋大がシンポ

東洋大は19日、日本経済新聞社との共催で、講演するフクロトロー米ロリ夕州立大教授(19日、東京・大手町)

講演後のパネル討論はフクロトロー教授のほかベンチャーキャピタルデフタ・パートナースグループの原丈人、や、田井一郎東芝常任、東洋大の竹村牧男

で開いた。1996年ノーベル化学賞を受賞したハリイ・クロトローリ夕州立大教授が科学と教育をテーマに講義し、「科学者は、若い頃から科学だけでなく、いろいろな分野に興味を持つことが重要だ」と主

を、金沢大や山形大などの研究チームが観測で突き止めた。19日から鹿児島市で始まった日本天文学会の中で発表する。

ガンマ線バーストは、主に地球から100億光年以上離れた宇宙で発生し、ガンマ線で非常に明るく輝く現象。重い星の超新星爆発などが原因と考えられているが、ガンマ線発生メカニズムはよく分かっていない。チームは、宇宙航空研究開発機構が昨年5月に打ち上げた宇宙ヨット実証機「イカロス」に搭載した観測装置で、同8月に発生したガンマ線バーストを観測。ガンマ線の波長の振動が一方方向にそろった「偏光」という現象を検出した。

偏光は、ガンマ線がつかられる際に、強い磁場が関与していることの証拠となる。観測では、偏光の方向が短時間で変化し、複数の磁場が存在するとみられることも分かった。

金沢大の米徳大輔助教は「理論では予想されていたが、観測で磁場の存在を立証できた。メカニズムの解明につながる成果」としている。

同大創立125周年を記念したシンポジウム「豊かな社会・平和な世界を築くための科学・技術・教育の役割」を東京都内、東洋大がシンポ

東洋大は19日、日本経済新聞社との共催で、講演するフクロトロー米ロリ夕州立大教授(19日、東京・大手町)

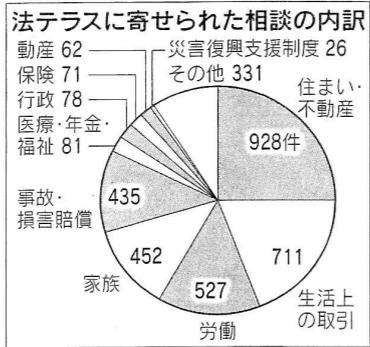
講演後のパネル討論はフクロトロー教授のほかベンチャーキャピタルデフタ・パートナースグループの原丈人、や、田井一郎東芝常任、東洋大の竹村牧男

で開いた。1996年ノーベル化学賞を受賞したハリイ・クロトローリ夕州立大教授が科学と教育をテーマに講義し、「科学者は、若い頃から科学だけでなく、いろいろな分野に興味を持つことが重要だ」と主

## 東日本大震災

# 被災者相談「住居」が最多

## 法テラスまとめ「相続」も増加



泳ぎ切り、台湾の海岸に到着した鈴木さん(前)ら3人目)ら日本人青年6人(19日)＝共同

## 湾まで110キロ泳ぎ横断 援金に感謝、6人がリレー

震災後に多額の送ってくれた台湾の青年スイマーがリレーで挑戦していた「泳ぎ横断」千前10時前(日本)

り中断することはあったが、約52時間かけて約110キロを泳ぎ切った。東日本大震災で被災した岩手、宮城、福島県の知事から託されたメッセージを無事に台湾側に手渡し、同

「日本司法支援センター」(法テラス)が東日本大震災の被災者から受け付けた相談電話は、住居に関する問題が約4分の1と最も多かったことが、同センターの19日までのまとめで分かった。相続に関する問い合わせも増加。電話は依然月300件以上のペースで、同センターは被災者が抱えている課題は多く、引き続き支援が必要としている。

同センターは法的トラブルが生じた場合、弁護士や司法書士会など、解決に適切な機関を紹介することなどを業務とした公的な法人。3月14日を受け付けを始め、今月4日までの半年の間で寄

「日本司法支援センター」(法テラス)が東日本大震災の被災者から受け付けた相談電話は、住居に関する問題が約4分の1と最も多かったことが、同センターの19日までのまとめで分かった。相続に関する問い合わせも増加。電話は依然月300件以上のペースで、同センターは被災者が抱えている課題は多く、引き続き支援が必要としている。

同センターは法的トラブルが生じた場合、弁護士や司法書士会など、解決に適切な機関を紹介することなどを業務とした公的な法人。3月14日を受け付けを始め、今月4日までの半年の間で寄

# 6. 将来展望

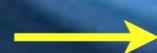
2006～：気球搭載用硬X線偏光度検出器PHENEXによる  
高エネルギー天体の偏光観測

2010～：GAPによるガンマ線バーストの偏光観測

お次はどうする？

日本のアクティビティを結集し、X線から軟ガンマ線までの広い領域で、様々な天体からの偏光観測を行うプロジェクトPolarisを実現する。大阪大学、山形大学、金沢大学、理化学研究所、JAXA、名古屋大学、広島大学、京都大学、立教大学による数10人のチームによって開発が行われており、小型衛星に現在提案している。

X線天文学が産声を上げた時期  
Sco X-1、Crab程度の天体のみ  
観測



アメリカのUhuru衛星が100個のX線源  
を検出。X線天文学という分野の確立

現状の偏光観測

Crab、Cygnus X-1、数個の  
GRBのみが観測されている。



日本のPolaris衛星により100個程度の  
高エネルギー天体に対して、偏光観測を  
実現。偏光をプローブとした新しい高エ  
ネルギー天文学の創成。

高宇連から中規模計画として学術会議に推薦された

# 7.他の分野への貢献

## 原子物理学への貢献

電気通信大学の中村研究室への技術供与

Phys. Rev. Lett. 103, 113001 (2009) [4 pages]

### Dominance of the Breit Interaction in the X-Ray Emission of Highly Charged Ions Following Dielectronic Recombination

多価イオンから放出されるX線の偏光を測定すると、Breit Interactionという効果に関して重要な知見が得られるらしい。

The Breit interaction typically appears as a—more or less small—correction to the Coulomb repulsion acting among the electrons. We here propose two x-ray measurements on the angular distribution and linear polarization of the  $1s2s^22p_{1/2} J=1 \rightarrow 1s^22s^2 J=0$  electric-dipole radiation of high-Z, beryllium-like ions, following the resonant electron capture into initially lithium-like ions, for which the Breit interaction strongly dominates the Coulomb repulsion and leads to a qualitative change in the expected x-ray emission pattern. The proposed measurements are feasible with present-day x-ray detectors and may serve a stringent test on relativistic corrections to the electron-electron interaction in the presence of strong fields.

完全に専門外なので物理的な意義は分かりませんが、偏光検出の技術的な相談に乗っています。

# 素粒子物理学への貢献

量子重力理論によれば、右円偏光と左円偏光ではスピードが異なる。



直線偏光は右円偏光と左円偏光の重ね合わせである。従って、もし両方でスピードが異なれば、空間を伝搬する際に偏光方向が回転する。



またエネルギーによってそのスピードの差が違う。従って、エネルギーによって偏光方向の回転の角度が異なる。

量子重力の効果は非常に小さくて観測できないと思うかもしれないが、宇宙の果てから飛んでくるX線では、その効果が検出できると期待されている。もしこの効果を検出できれば、量子重力理論の実験的な検証に繋がる大発見になるであろう。

# 8.まとめ

- 1) 偏光をプローブとした高エネルギー宇宙物理学の研究を行っている。  
この研究を通して、総合スピン科学研究所のアクティビティの一端を担っている。
- 2) PHENEXプロジェクトにより世界に先駆けてX線の偏光観測に道をつけた。GAPプロジェクトによりガンマ線バーストの精度の高い偏光観測を実現した。数年後にはPolarisプロジェクトを実現し、高エネルギー宇宙物理学の新しい分野を切り開いていきたい。
- 3) 原子核実験や素粒子の分野にも多少の貢献はしている。