

3/1 ブラックホール大研究会

相対論的ジェット中における散乱を考慮した  
一般相対論的偏光輻射輸送計算

竹林晃大（筑波大学）

大須賀健（筑波大学）、川島朋尚（東京大学）

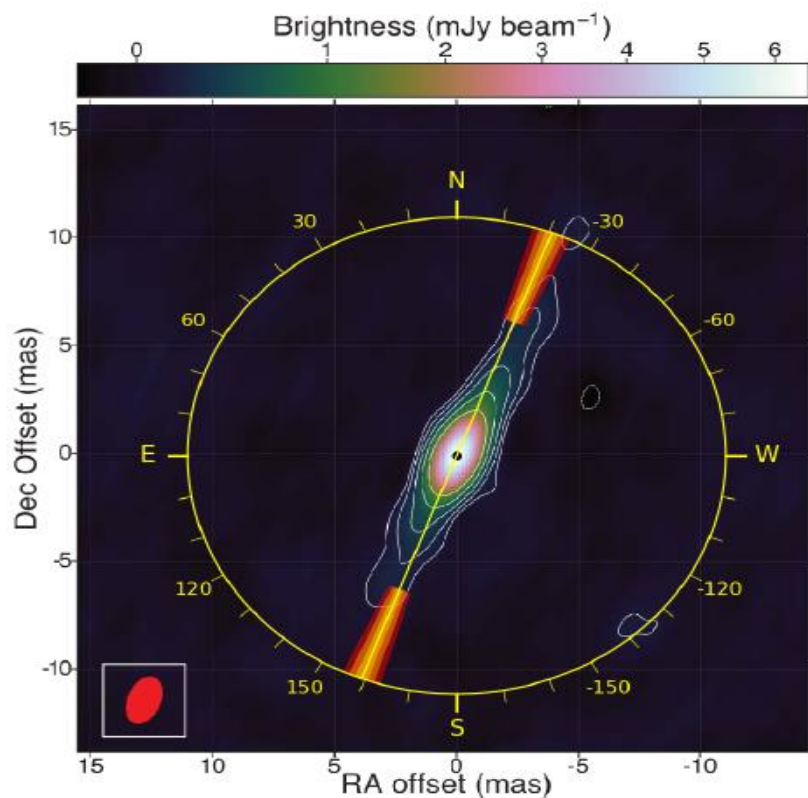
# 導入：実際の観測事例

Imaging X-ray Polarimetry Explorer (IXPE)

での観測が盛んにおこなわれている

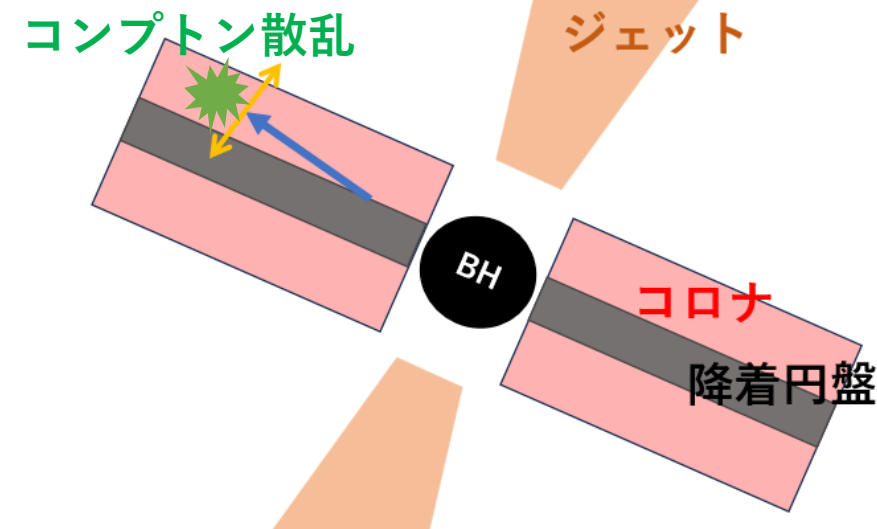


IXPE ©NASA



Cyg X-1 の偏光観測結果  
(Krawczynski et al. 2022)

電波ジェットに沿った方向の偏光角が観測  
→降着円盤に沿った方向に高温プラズマ  
が存在する事を示唆

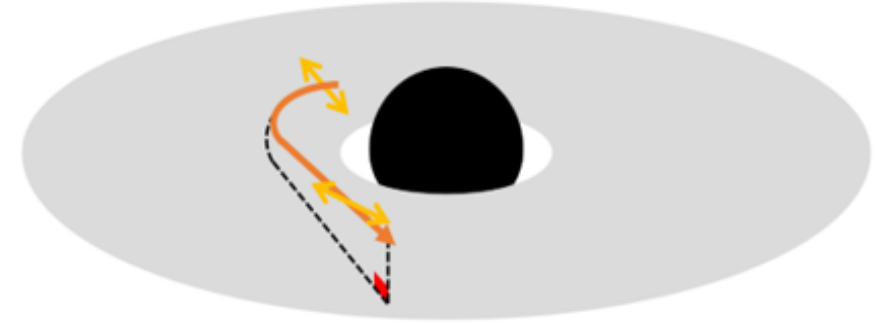


**コンプトン散乱を考慮した偏光輻射輸送計算が必要！**

# 導入：偏光X線計算における相対論効果の影響

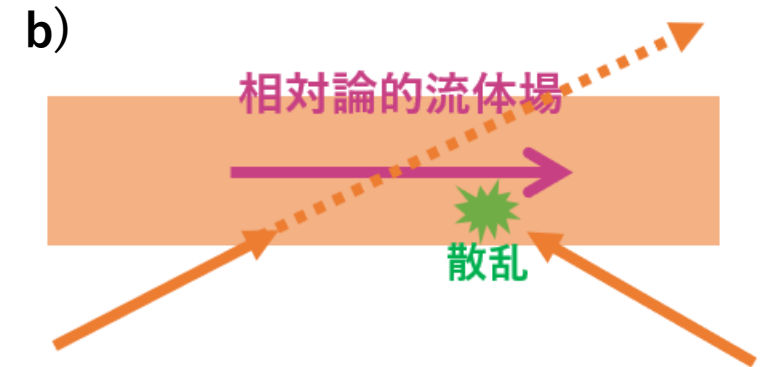
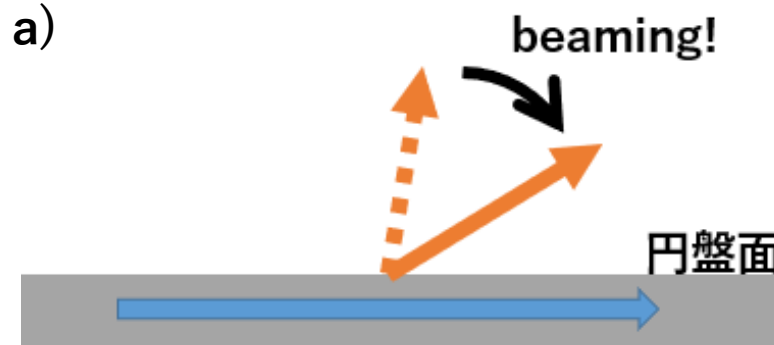
## 1. 一般相対論効果

BH近傍では、測地線に沿って移動する際に偏光角の回転が生じる



## 2. 特殊相対論効果

- a. 円盤回転する系では放射時に特殊相対論に伴うビーミング効果が生じる
- b. 相対論的流体場中では、光子の進行方向と流体の進行方向の関係が散乱確率に変化をもたらす



→計算の中にこれらの相対論的效果を組み込むことは不可欠

# 導入：偏光の理論計算の現状

- 現状考えられているモデルから想定される値は、観測結果と矛盾がある事がある
  - CygX-1の観測偏光度と想定されるモデルから得られる円盤見込み角( $45^\circ \sim 60^\circ$ )は他観測で得られた円盤見込み角( $\sim 27^\circ$ )と比較して有意な違いがある
- 相対論的ジェット中でのコンプトン散乱の影響はあまり重要視されてきていない
  - 偏光の起源はジェットでのシンクロトロン放射や円盤・コロナでのコンプトン散乱がメイン
  - 相対論的流体場中での散乱は幾何学的形状のみでは説明できない、高い偏光度を生み出す可能性がある(Poutanen et al. 2023)

→ **ジェットでの散乱モデルを始めとした、より豊富なモデルでの偏光輻射輸送計算を用いた偏光の理論予測が求められている**

# 本研究の目的

コンプトン散乱を考慮した偏光X線の一般相対論的輻射輸送計算コードを開発し、相対論的ジェットでのコンプトン散乱による偏光分布の理論予測を行う。

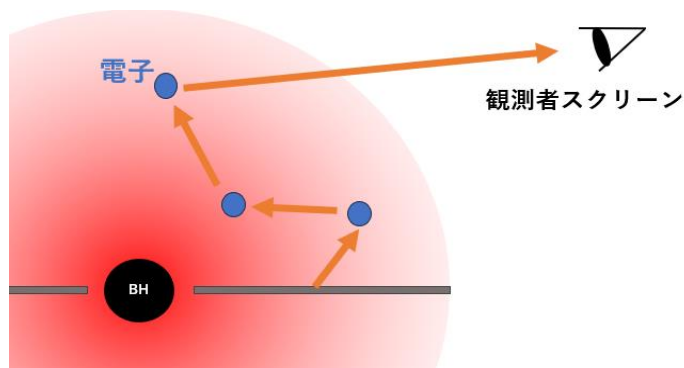
- これまで開発してきた偏光X線のコンプトン散乱コードを一般相対論的輻射輸送計算コードRAIKOU(Kawashima et al. 2023)に組み込む
- ジェットモデルで一般相対論的偏光輻射輸送計算を行い、偏光分布を調査する

# 計算手法

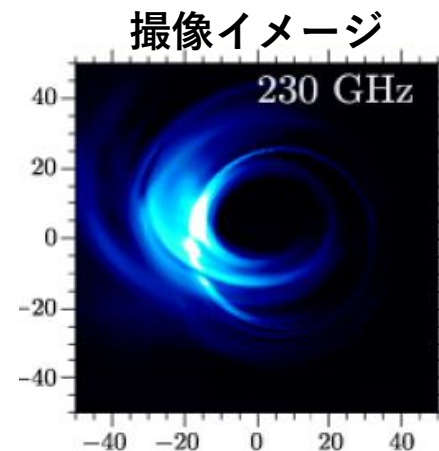
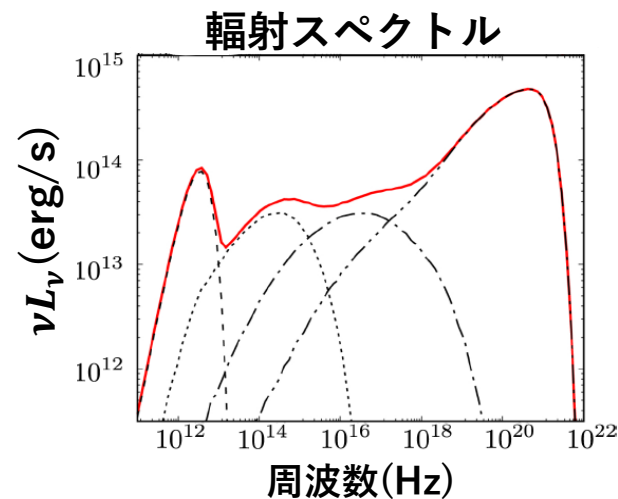
測地線にそった光子の輸送（偏光角の回転&吸収を考慮）

一般相対論的輻射輸送計算コード "RAIKOU" (Kawashima et al. 2023)

- 輻射過程（今回扱うもの）
  - 放射/吸収
    - 熱的電子 制動吸収
  - 計算アプローチ
    - 降着円盤から放射される光を追跡、観測者スクリーンでの輻射スペクトル・観測イメージを作成
- 散乱
  - 熱的電子 コンプトン/逆コンプトン



モンテカルロ法を用いた光の軌道の追跡



コンプトン散乱での偏光の計算（独自に開発）

# 計算手法

測地線にそった光子の輸送（偏光角の回転&吸収を考慮）

一般相対論的輻射輸送計算コード "RAIKOU" (Kawashima et al. 2023)

## コンプトン散乱での偏光の計算（独自に開発）

- 散乱方向の決定 (Klein-Nishina微分散乱断面積)

$$\frac{d\sigma_{KN}}{d\Omega} = \frac{3\sigma_T}{16\pi} \left(\frac{k_0^{e'}}{k_0^e}\right)^2 \left[ \frac{k_0^{e'}}{k_0^e} + \frac{k_0^e}{k_0^{e'}} - \left(1 - \frac{Q_\nu}{I_\nu}\right) \sin^2 \theta_s \right]$$

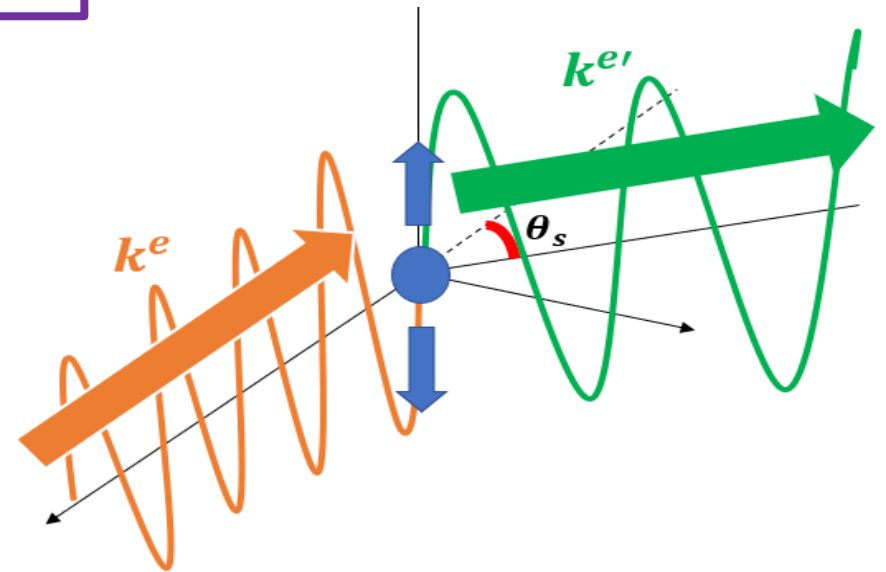
- ストークスパラメータの更新

$$I'_{\nu'} = \underbrace{\Lambda(\mathbf{k} \rightarrow \mathbf{k}', \chi, \chi')}_{\text{散乱による変換行列}} I_\nu = L(-\chi') F(\mathbf{k} \rightarrow \mathbf{k}') L(\chi) I_\nu$$

散乱による変換行列

- エネルギーの更新

$$\omega' = \frac{\omega}{1 + \omega(1 - \cos \theta_s)}$$



$k_0^e$  : 散乱前光子のエネルギー  $k_0^{e'}$  : 散乱後光子のエネルギー  
 $I_\nu = (I_\nu, Q_\nu, U_\nu, V_\nu)$  : 散乱前光子のストークスパラメータ  
 $I'_{\nu'} = (I'_{\nu'}, Q'_{\nu'}, U'_{\nu'}, V'_{\nu'})$  : 散乱後光子のストークスパラメータ  
 $\omega = k_0^e/m_e c^2$   $\omega' = k_0^{e'}/m_e c^2$   $\theta_s$  : 散乱角  $\chi, \chi'$  : 軸の回転角  
 $m_e$  : 電子質量  $c$  : 光速

# セットアップ

降着円盤上空の相対論的なジェット ( $\tau_{max} \sim 1.2$ ) での輻射輸送計算

## 初期光子(円盤表面から放射)

- 偏光：Chandrasekhar1960の解析解
- スペクトル：黒体輻射
- 降着円盤：ケプラー回転

## BH

- 質量： $10M_{\odot}$
- スピンパラメータ： $a = 0.9$

## 観測者

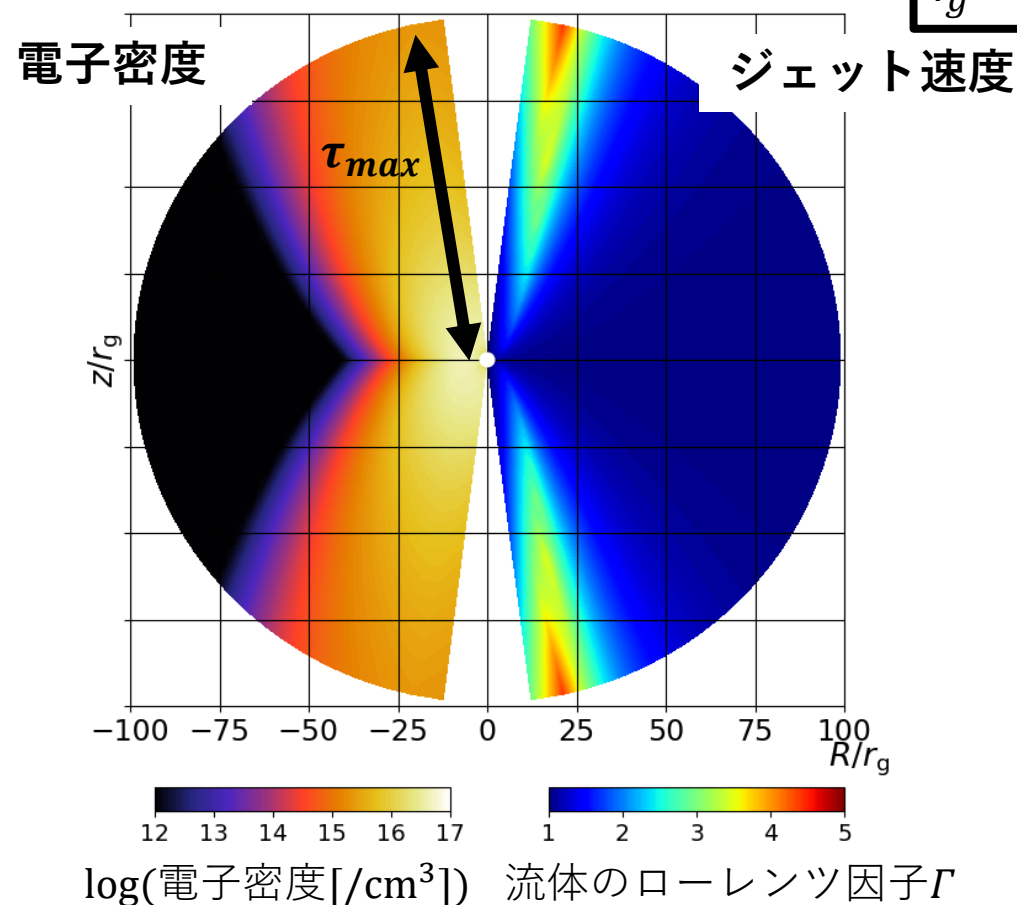
- 観測者見込み角：75度

## ジェット (Broderick and Loeb 2009)

- 温度分布： $T_e = T_0 \left(\frac{r}{r_g}\right)^{-0.5}$

$$T_0 \sim 10^{10} [\text{K}]$$

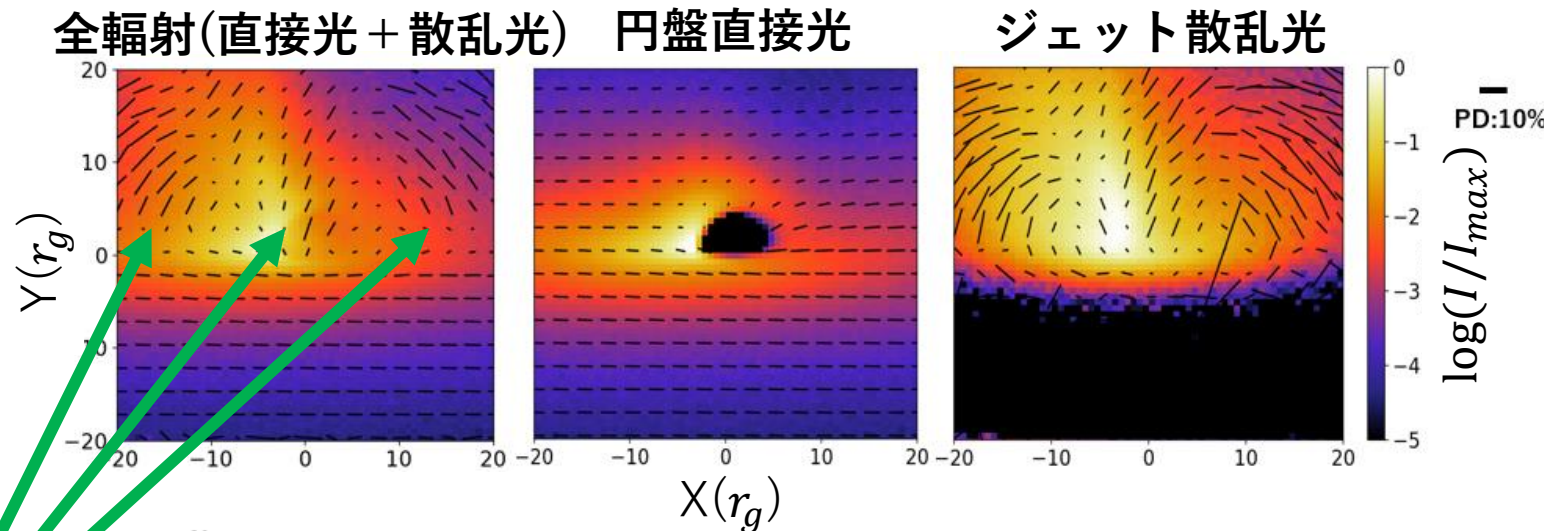
$r_g$  : 重力半径





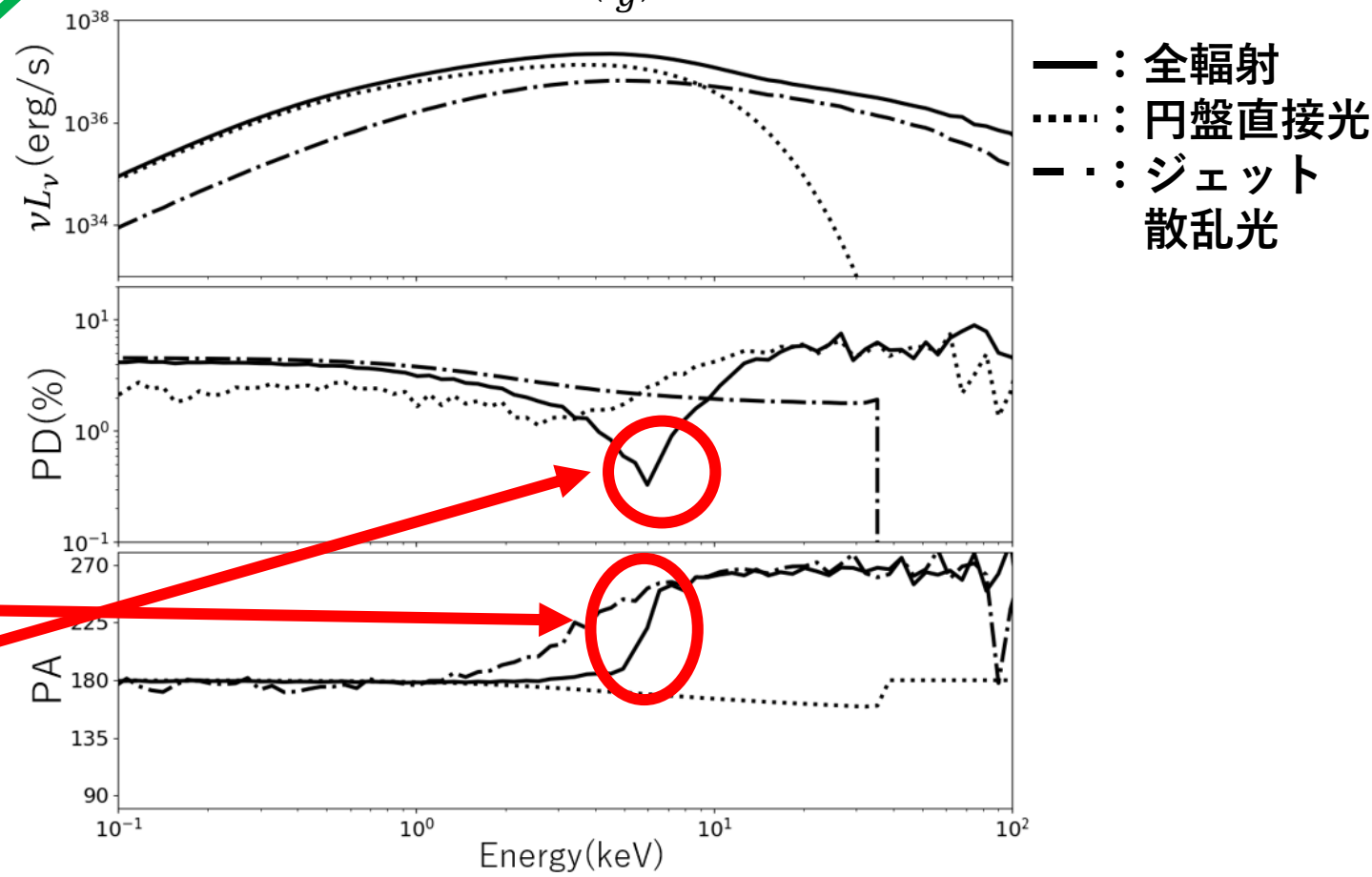
# 結果 1

色：全輻射強度（最大値で規格化）  
 直線の長さ：偏光度  
 直線の角度：偏光角



ジェット散乱光によってスクリーンの中央部・左右端に円盤面に垂直方向の偏光が作られる

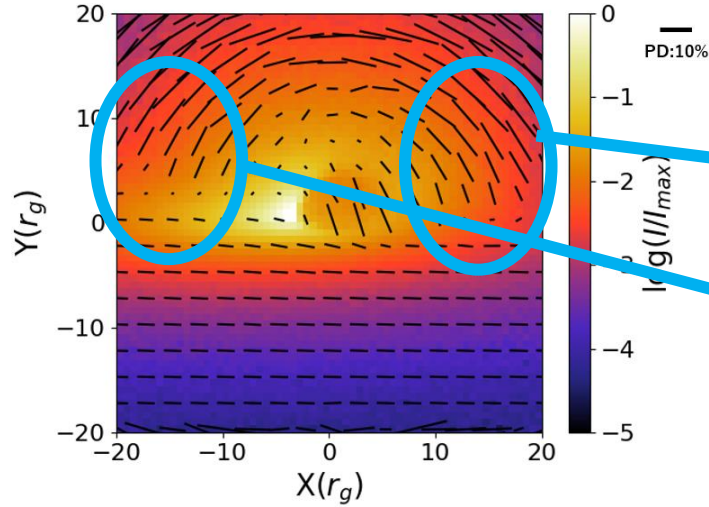
- 低エネルギー(6keV以下)：円盤面に水平な偏光方向をもつ円盤直接光が支配的
  - 高エネルギー(6keV以上)：円盤面に垂直な偏光方向を持つジェット散乱光が支配的
- 支配成分が切り替わるエネルギーで偏光の相殺により、偏光度が減少する



# 結果 2 : 偏光分布の起源

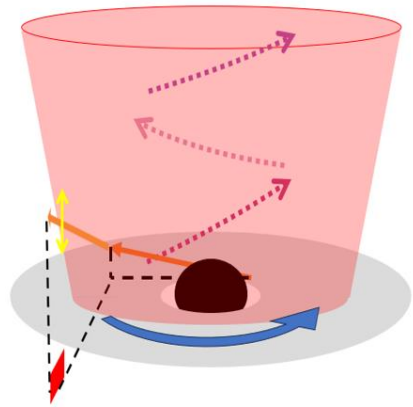
偏光マップはジェットの回転と降着円盤の回転の効果によって円盤面に垂直な偏光が生まれる

円盤のみが回転する場合

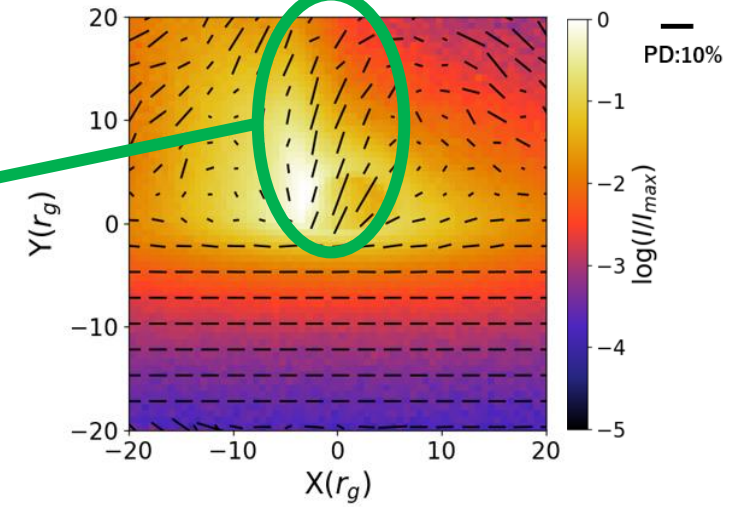


円盤の回転の効果

放射時の相対論的ビーミング効果によって円盤面に水平な方向に放射される光子が増加する

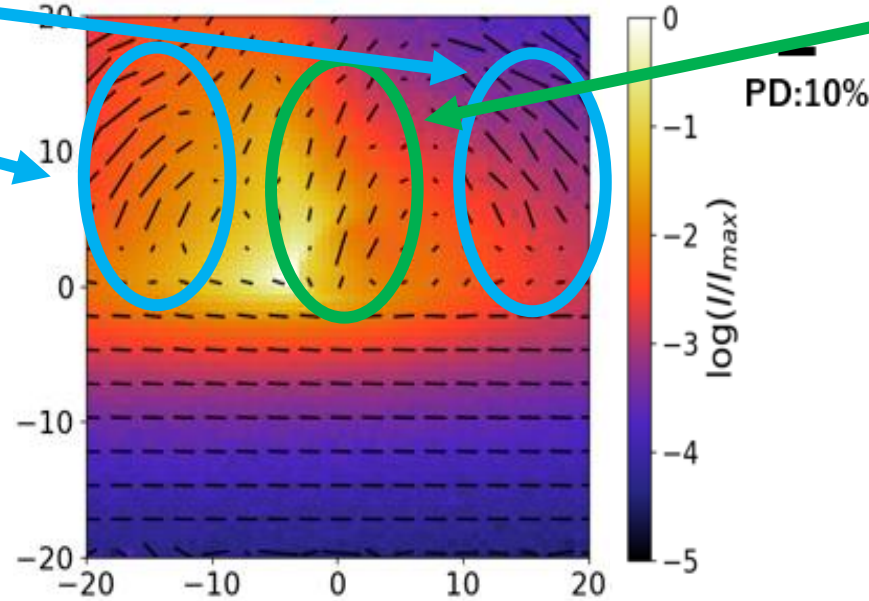
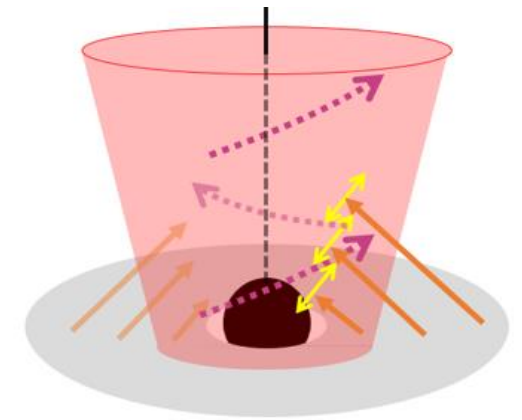


ジェットのみが回転する場合



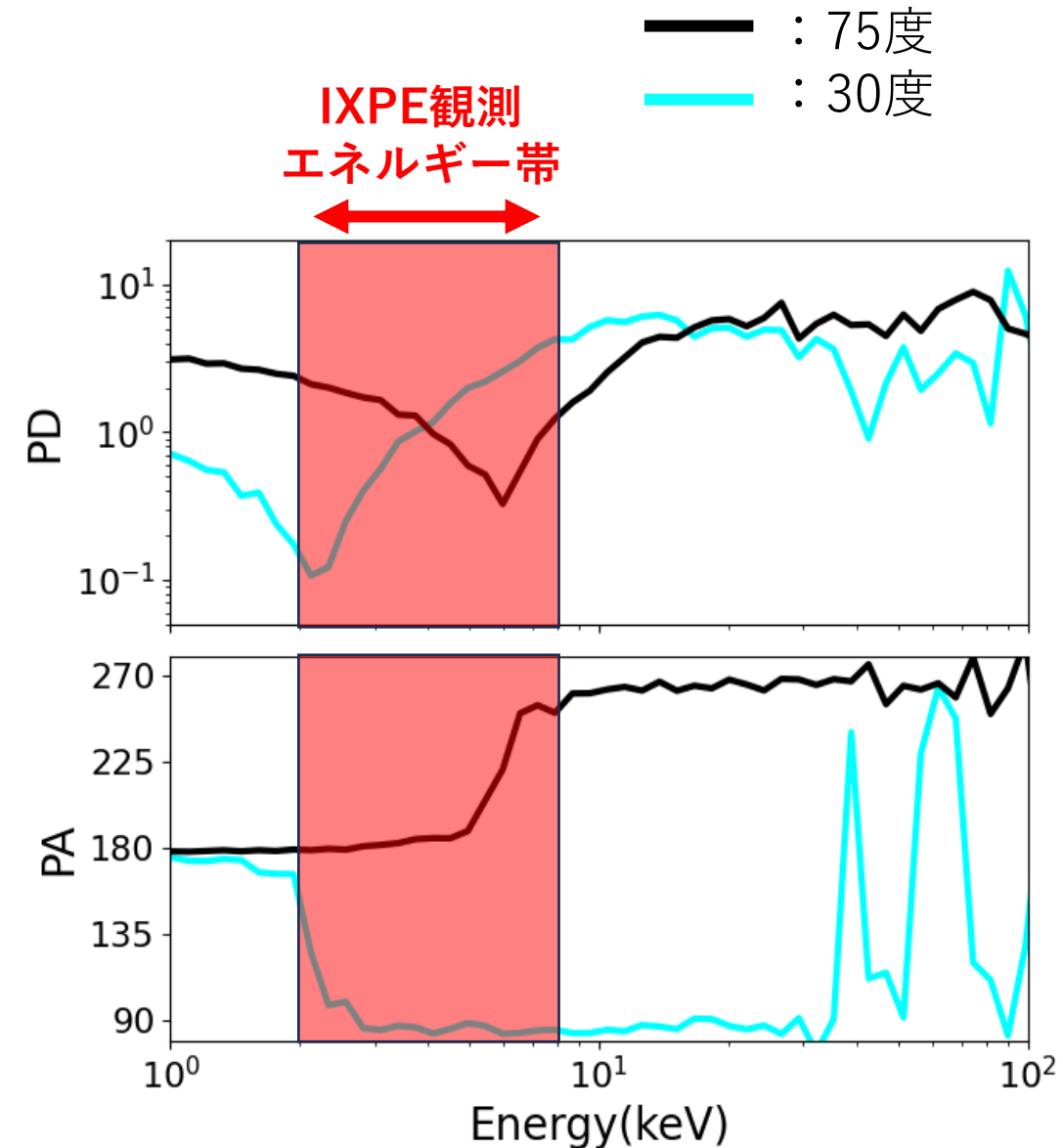
ジェットの回転の効果

ジェットの回転によってジェットの運動に向かい合った向きで入射してくる光子が散乱光となりやすい



# 結果 3 : 円盤見込み角依存性 (全輻射光)

- 円盤面に垂直な偏光が観測される  
エネルギー帯は、円盤見込み角75度で6keV以上、30度で2keV以上となる
- これは円盤に対してface-onの角度ほど散乱光がより支配的になりやすい為



# まとめ

一般相対論的偏光輻射輸送計算で、得られる偏光特性を調査した

- **相対論的ジェットモデル**で、円盤面に対して垂直気味な偏光が得られることを確認した
  - ✓ ジェットの相対論的速度により、円盤面に対して水平気味に動く光子が散乱光となりやすい為
  - ✓ 降着円盤の回転に伴う放射のビーミングにより、円盤面に対して水平な方向に放射される光子が増加する為
- 円盤見込み角を30度とすることで、IXPE観測エネルギー帯において円盤垂直な偏光方向を生み出すジェット散乱光を観測できる可能性がある