

硬X線偏光計PoGO+気球実験にCygnus X-1の偏光観測

高橋弘充、内田和海、大橋礼恵、河野貴文、水野恒史(広大理)

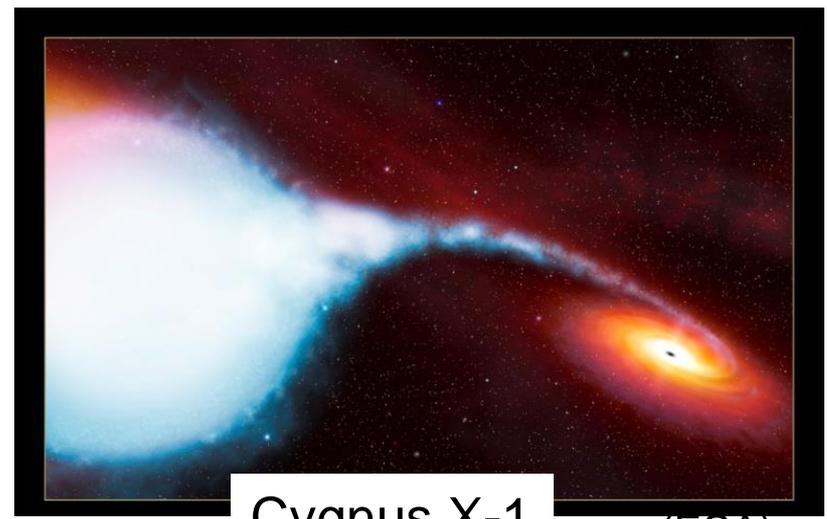
釜江常好(東大理)、片岡淳(早大理工)、田島宏康(名大ISEE)

M. Chauvin、M. Friis、M. Jackson、M. Kiss、V. Mikhalv、M. Pearce、

T. Stana(KTH)、H.-G. Floren(SU)、PoGOLite/PoGO+チーム

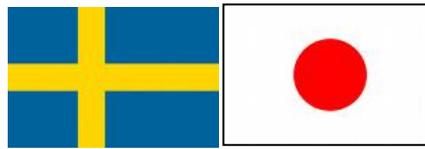
Chauvin et al. 2018 Nature Astronomy 2, 652

PI: Mark Pearce (スウェーデン王立工科大学)



Cygnus X-1

(ESA)



硬X線偏光計PoGO+気球実験にCygnus X-1の偏光観測

高橋弘充、内田和海、大橋礼恵、河野貴文、水野恒史(広大理)
釜江常好(東大理)、片岡淳(早大理工)、田島宏康(名大ISEE)
M. Chauvin、M. Friis、M. Jackson、M. Kiss、V. Mikhalv、M. Pearce、
T. Stana(KTH)、H.-G. Floren(SU)、PoGOLite/PoGO+チーム

Chauvin et al. 2018 Nature Astronomy 2, 652

PI: Mark Pearce (スウェーデン王立工科大学)



$\Phi=100\text{m}@40\text{km high}$

(Jan-Erik Stromberg)

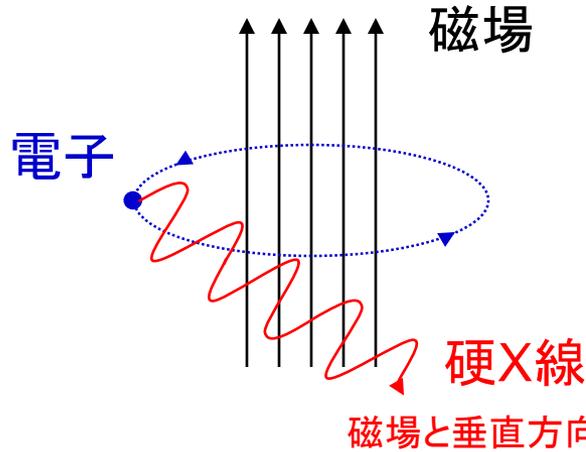


もくじ

- 偏光観測で何を？
- PoGO+気球実験：硬X線での偏光観測
- データ解析 => あとでご質問ください
- (1): ブラックホール連星 low/hard 状態のコロナ形状
- (2): ジェット(シンクロトロン)放射の寄与
- 将来ミッション: X-Calibur気球実験@南極

偏光から分かること(1): 磁場

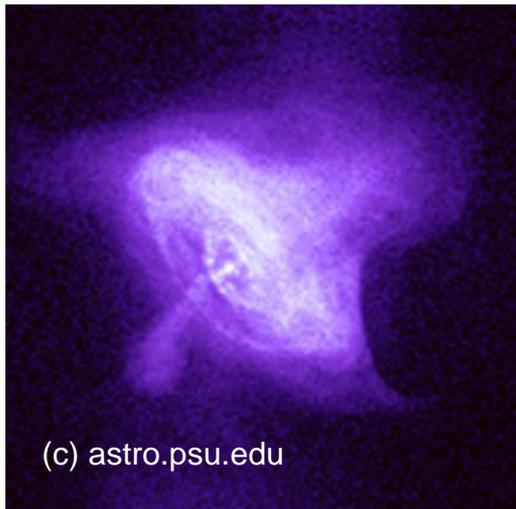
電子 + 磁場 ⇒ シンクロトロン放射



高エネルギー粒子が磁場に巻き付いて放射
⇒ 放射の偏光の方向は、磁場と垂直

粒子加速の現場、ジェットなど

パルサー星雲「かに星雲」



粒子を高エネルギーに加速するためには、
磁場が重要な役割を担っている
磁場は、イメージ、時間変動、エネルギーでは
測定できない

⇒ 偏光情報なら、磁場の向きと揃い具合を
調べられる

PoGO+の結果: Chauvin et al. 2017

偏光から分かること(2):反射

反射・散乱した光(水面、大気、その他なんでも)

wikipedia



反射+川底
(偏光+無偏光)



反射+川底
(偏光+無偏光)

左:普通に撮影
右:偏光フィルターで
偏光した光をカット
反射光がなくなり、
川底からの光のみになる
=> 偏光情報から
反射体の配置が分かる

ブラックホール連星系「はくちょう座X-1 (Cyg X-1)」



相手の恒星からの放射がどのように
ブラックホールに吸い込まれているのか?
=> ブラックホール近傍 ~100 kmは
イメージでは構造が識別できない
=> 偏光なら、(ミクロな)反射体の
配置が分かる

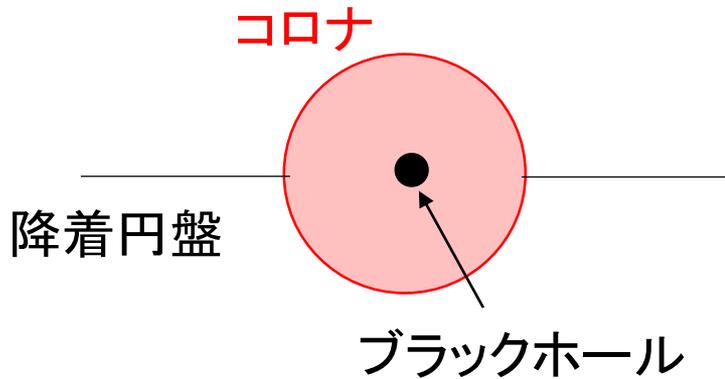
PoGO+の結果: Chauvin et al. 2018



コロナモデルの2モデル@Hard状態

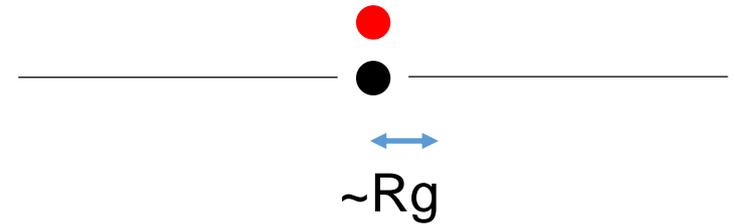
a) 広がったコロナ

Frontera et al. (2003)



b) ランプポスト型コロナ

Miniutti & Fabian (2004)

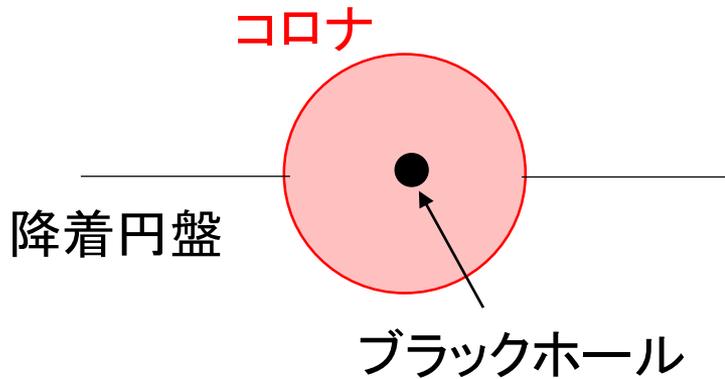




コロナモデルの2モデル@Hard状態

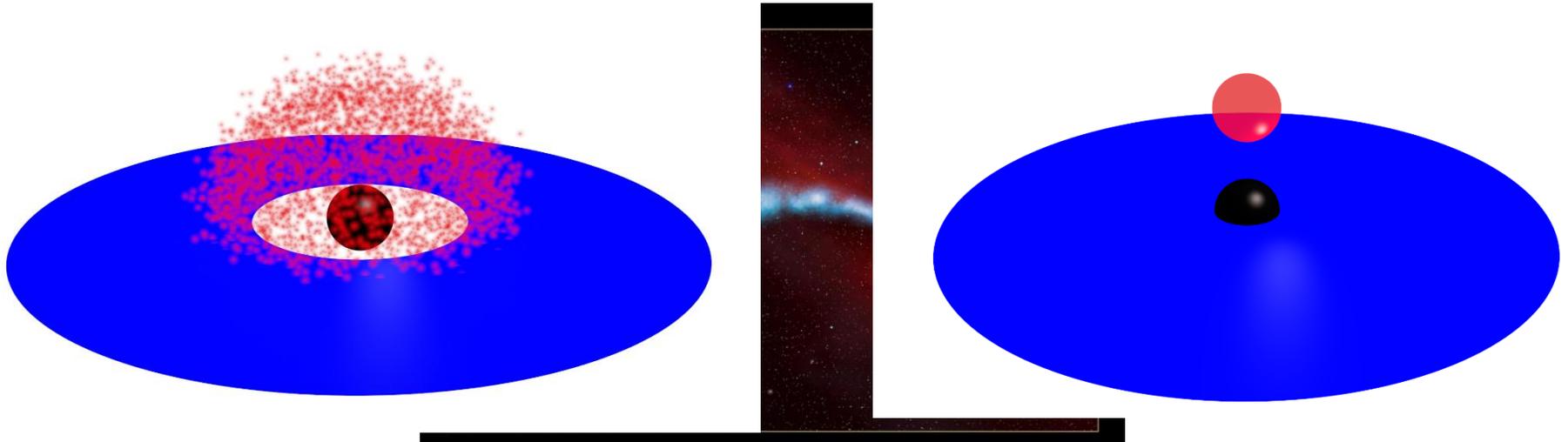
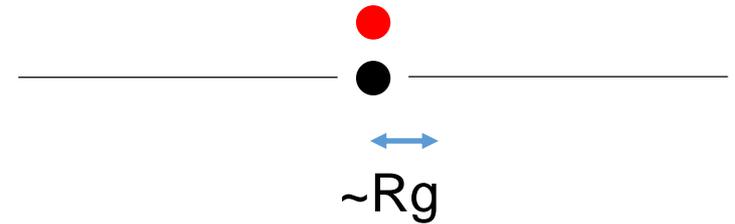
a) 広がったコロナ

Frontera et al. (2003)



b) ランプポスト型コロナ

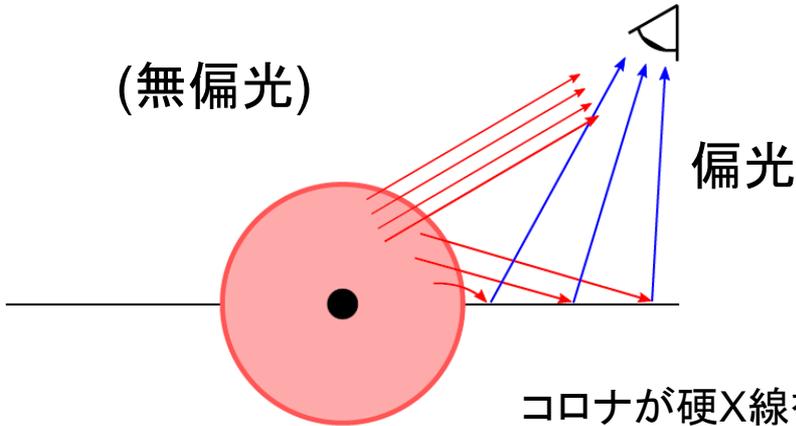
Miniutti & Fabian (2004)



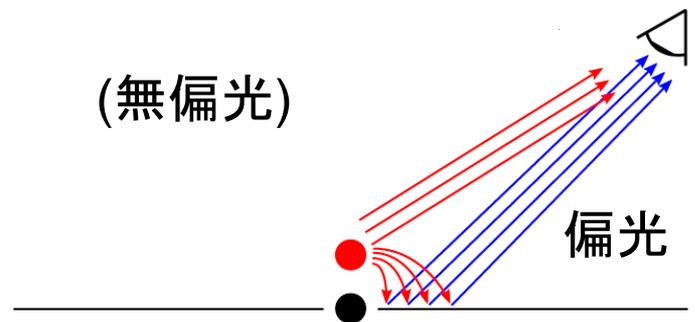


コロナモデルの2モデル@Hard状態

a) 広がったコロナ



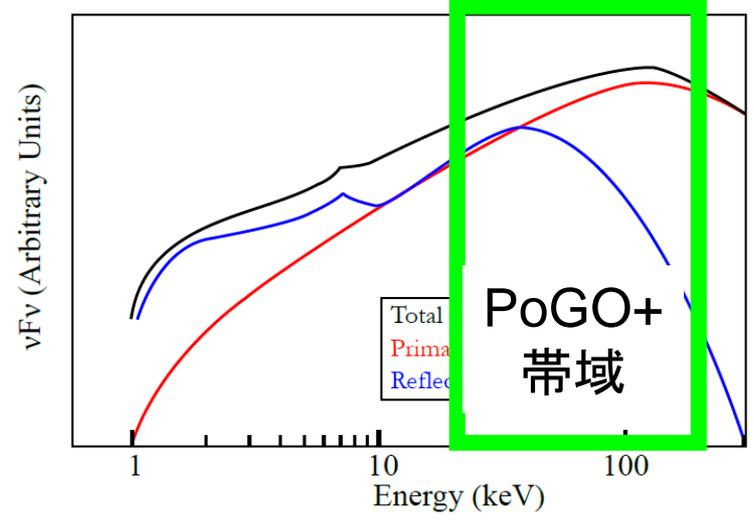
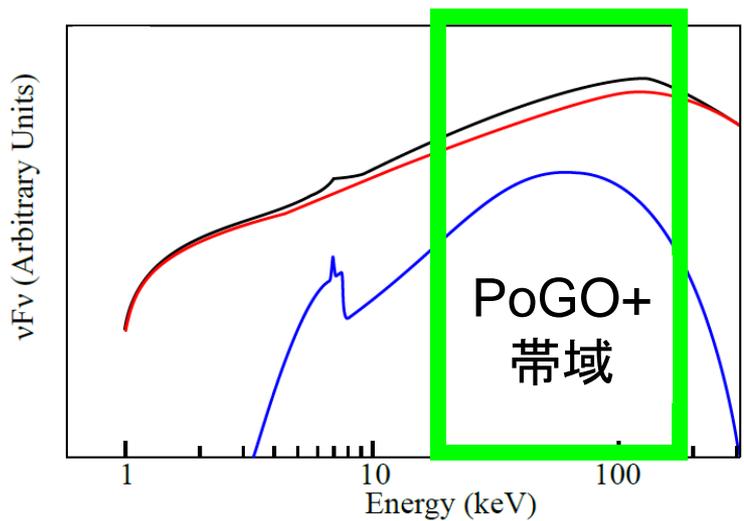
b) ランプポスト型コロナ



コロナが硬X線を放射

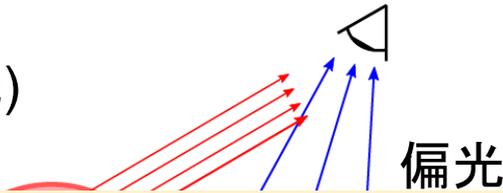
赤: 1次直接観測される(ほぼ無偏光)

青: 2次反射・散乱された放射 => 偏光する



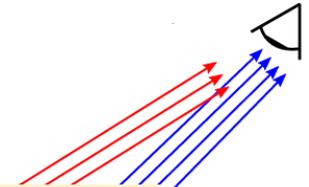
a) 広がったコロナ

(無偏光)



b) ランプポスト型コロナ

(無偏光)

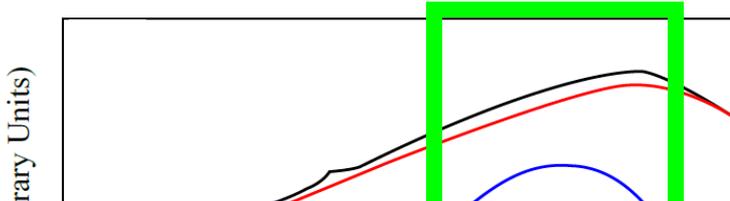


PoGO+観測

- 偏光度: ???%
- 偏光角: 円盤表面に垂直? それともズレている?

赤: 1次直接観測される(ほぼ無偏光)

青: 2次反射・散乱された放射 => 偏光する



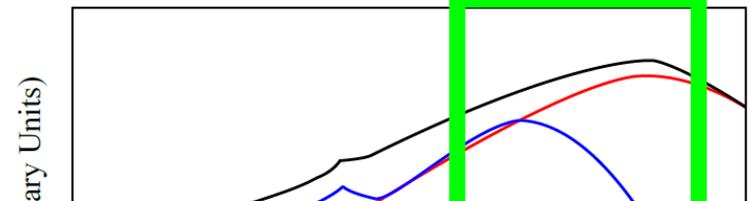
相対論的な効果: 弱い

⇒ 反射成分が少ない

⇒ 偏光度: a few %

偏光角: 円盤表面に垂直

(Schnittman & Krolik 2010)



相対論的な効果: 強い

⇒ 反射成分が多い

⇒ 偏光度: ~15%

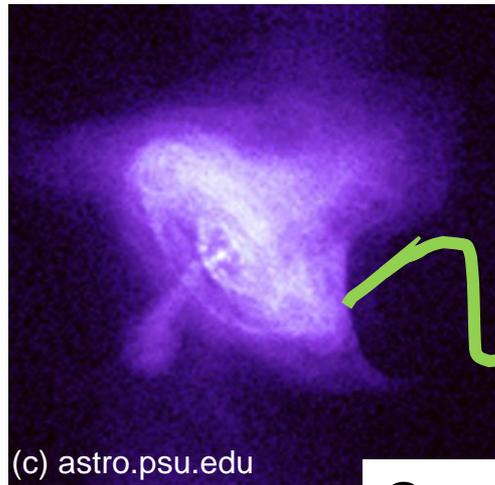
偏光角: 円盤表面とはズれる

(Dovciak et al. 2011)



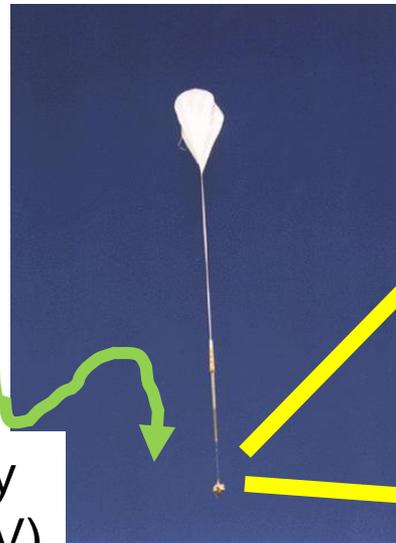
Polarized Gamma-ray Observer (PoGO+)

- 硬X線での偏光情報はほとんど観測例がない
- **PoGO+気球実験は、20-180 keV の硬X線帯域で、1 Crab の天体から10% の偏光を検出する能力を持つ。**
- 日本とスウェーデンの国際共同プロジェクト。
- スウェーデンのキルナから放球し、かに星雲と Cyg X-1 を観測。

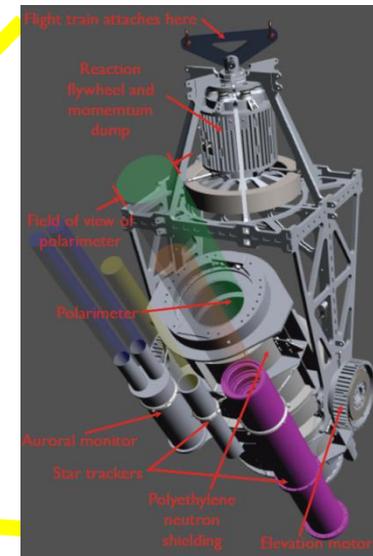


(c) astro.psu.edu

Gamma-ray
(20-160 keV)



~40 km

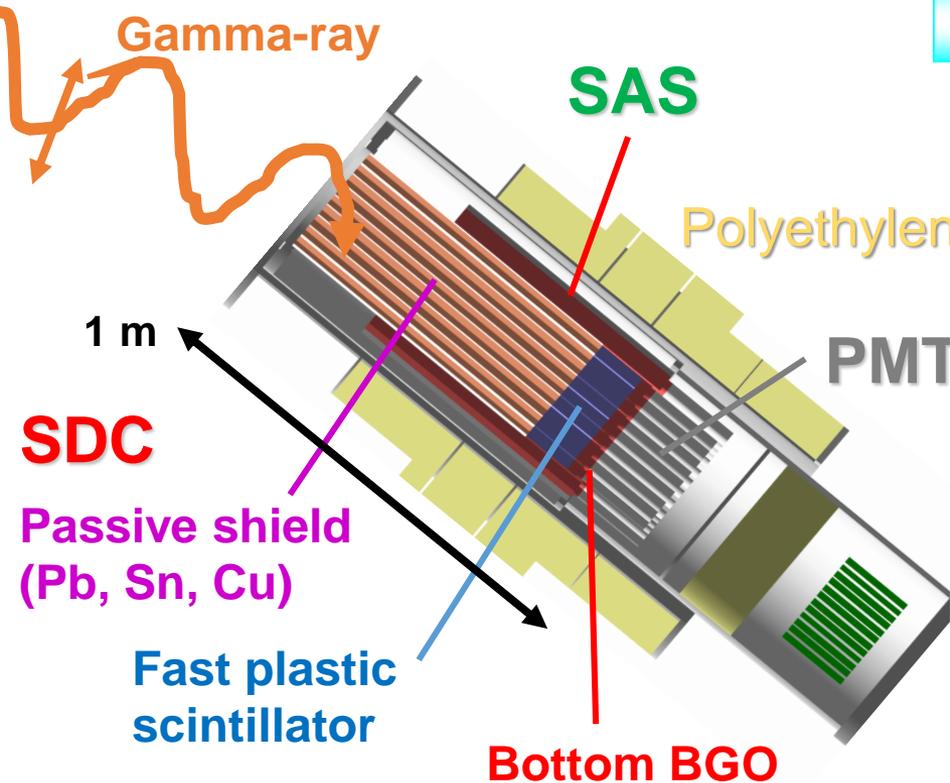


Weight (wo ballast) : ~1750 kg
Power : ~300 W (Instrument)
~200 W (Gondola, etc.)

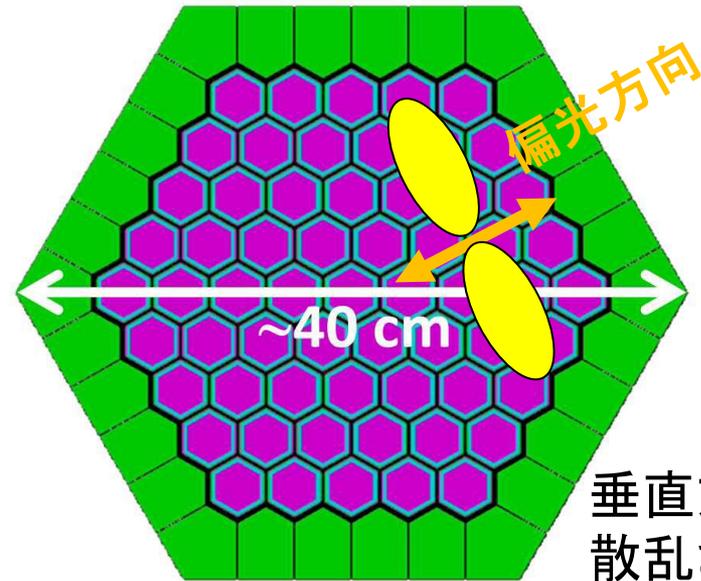


偏光検出 (コンプトン散乱: 10-1000 keV)

- **PoGOLite** ではコンプトン散乱を検出し、その散乱角の異方性から偏光を検出
主検出部 (PDC) : 61ユニット、周囲にシールド (SAS) : 30ユニット
熱中性子シンチレータ : 2ユニット
- 検出器自身の系統誤差、大気中性子フラックスの異方性をキャンセルするため、観測中は検出器が6分で1回転する。



Top view

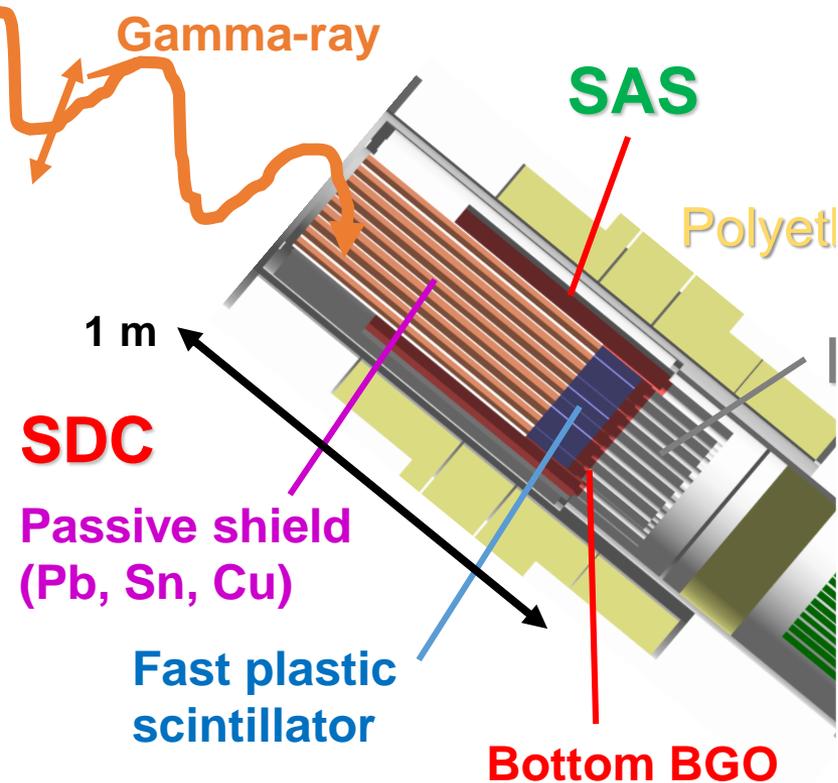


偏光方位角と直交方向に多くのイベントが検出される

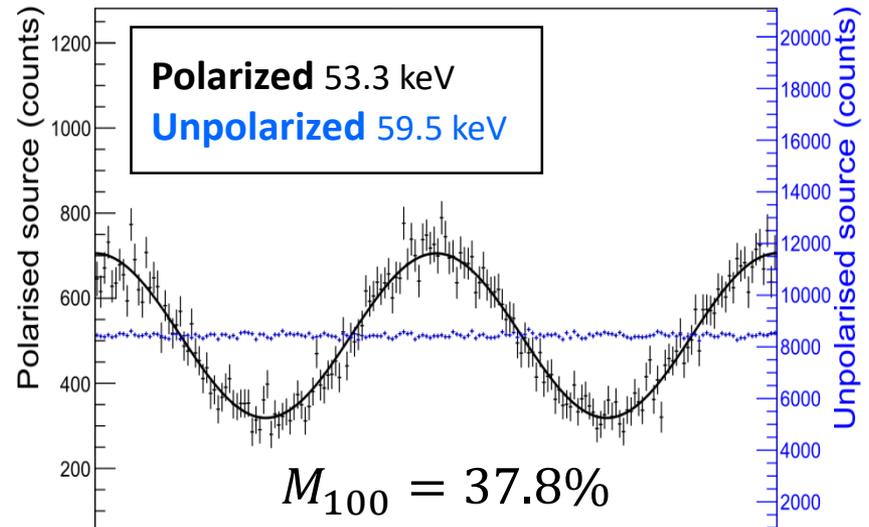


偏光検出 (コンプトン散乱: 10-1000 keV)

- **PoGOLite** ではコンプトン散乱を検出し、その散乱角の異方性から偏光を検出
 主検出部 (PDC) : 61ユニット、周囲にシールド (SAS) : 30ユニット
 熱中性子シンチレータ : 2ユニット
- 検出器自身の系統誤差、大気中性子フラックスの異方性をキャンセルするため、観測中は検出器が6分で1回転する



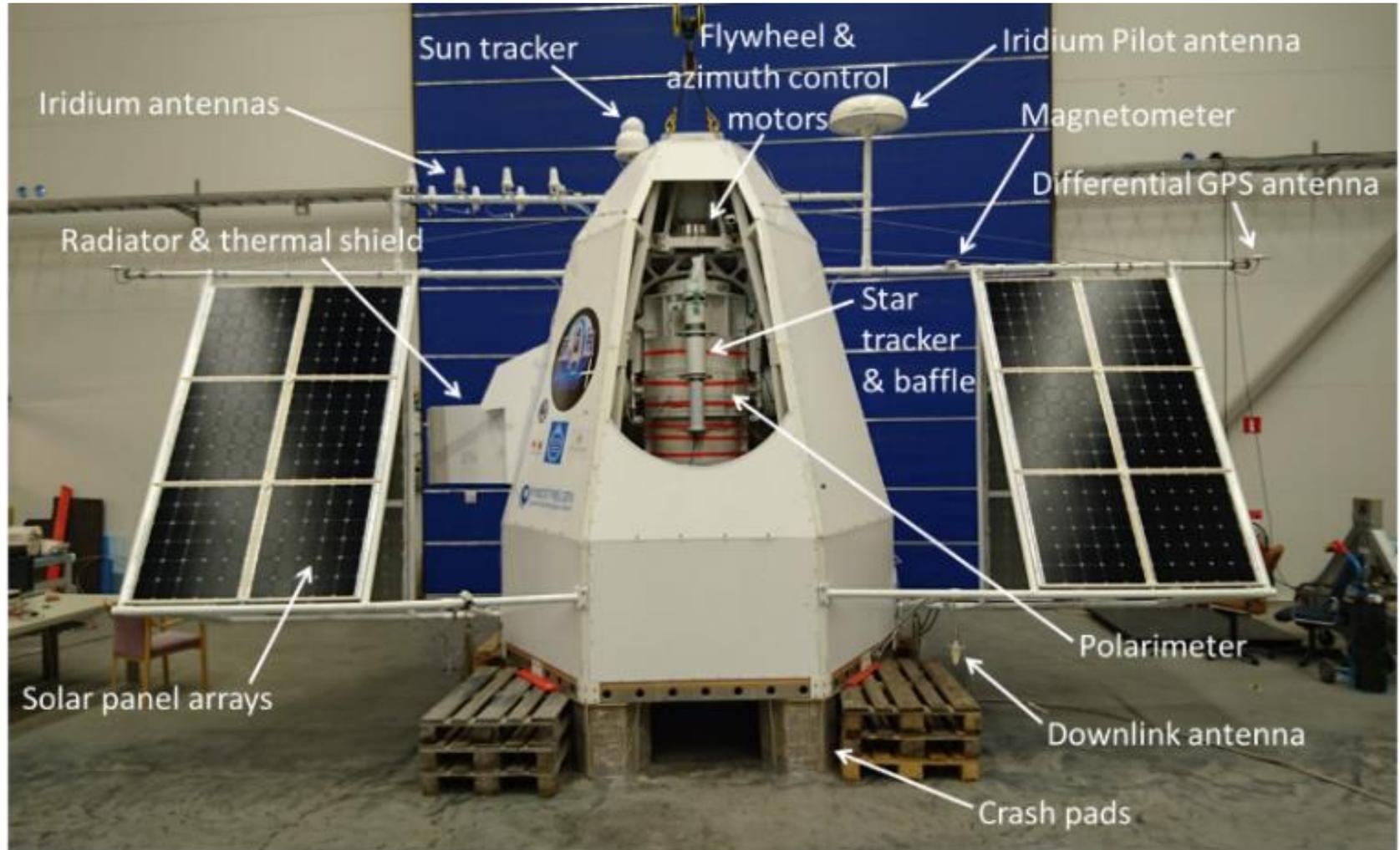
Chauvin, et al., 2017, Nucl. Inst. Meth. A, 859, 125-133.



偏光 => 変調あり
 無偏光 => なし (検出器応答がきれい)



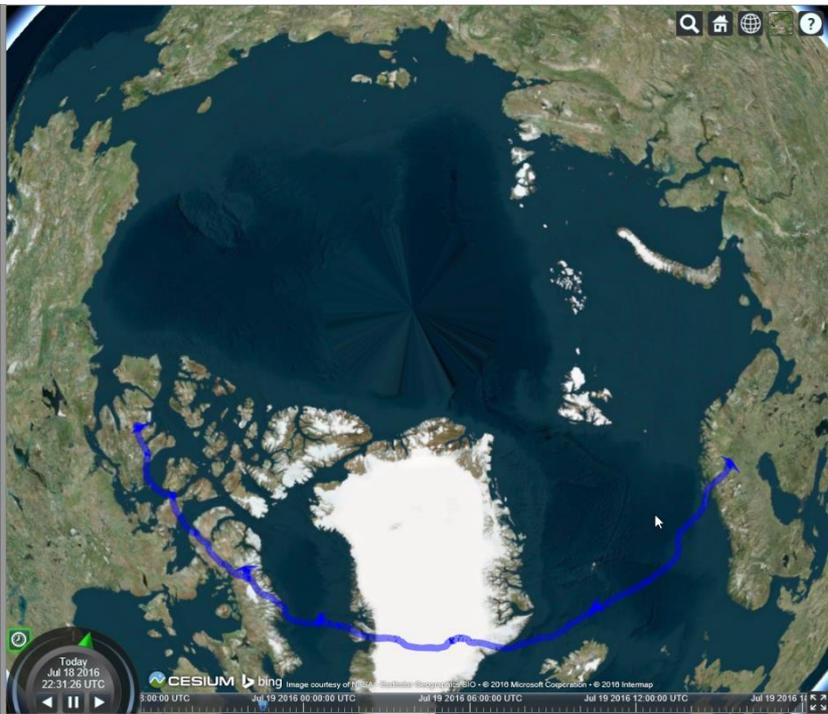
PoGO+ Overall View (2016)



~4m



2016年のフライトの軌跡(7日間)



2016年

- ・国際情勢により、ロシア上空は飛行できなかつたため、カナダまで
- ・7日間で北極圏を1/3周回(時速30km)
- ・観測天体 かに星雲:7回、Cyg x-1:6回
(計 92 ks) (計123 ks)



ゴンドラからの撮影

SSC:スウェーデン宇宙公社





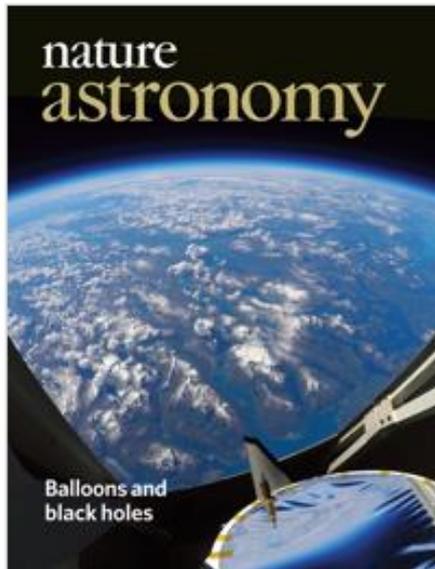
PoGO+ results in Nature Astronomy



nature
astronomy

« Previous Issue | Volume 2

Volume 2 Issue 8, August 2018



Balloons and black holes

X-ray polarization observations of the stellar black hole in Cygnus X-1 by a balloon-borne telescope revealed weak polarization, whose angle is aligned with the jet axis. Together with previous data, these findings point to an accretion disk corona that is either extended or located far from the black hole.

Chauvin et al. 2018 Nature Astronomy 2, 652

See [Chauvin et al.](#)

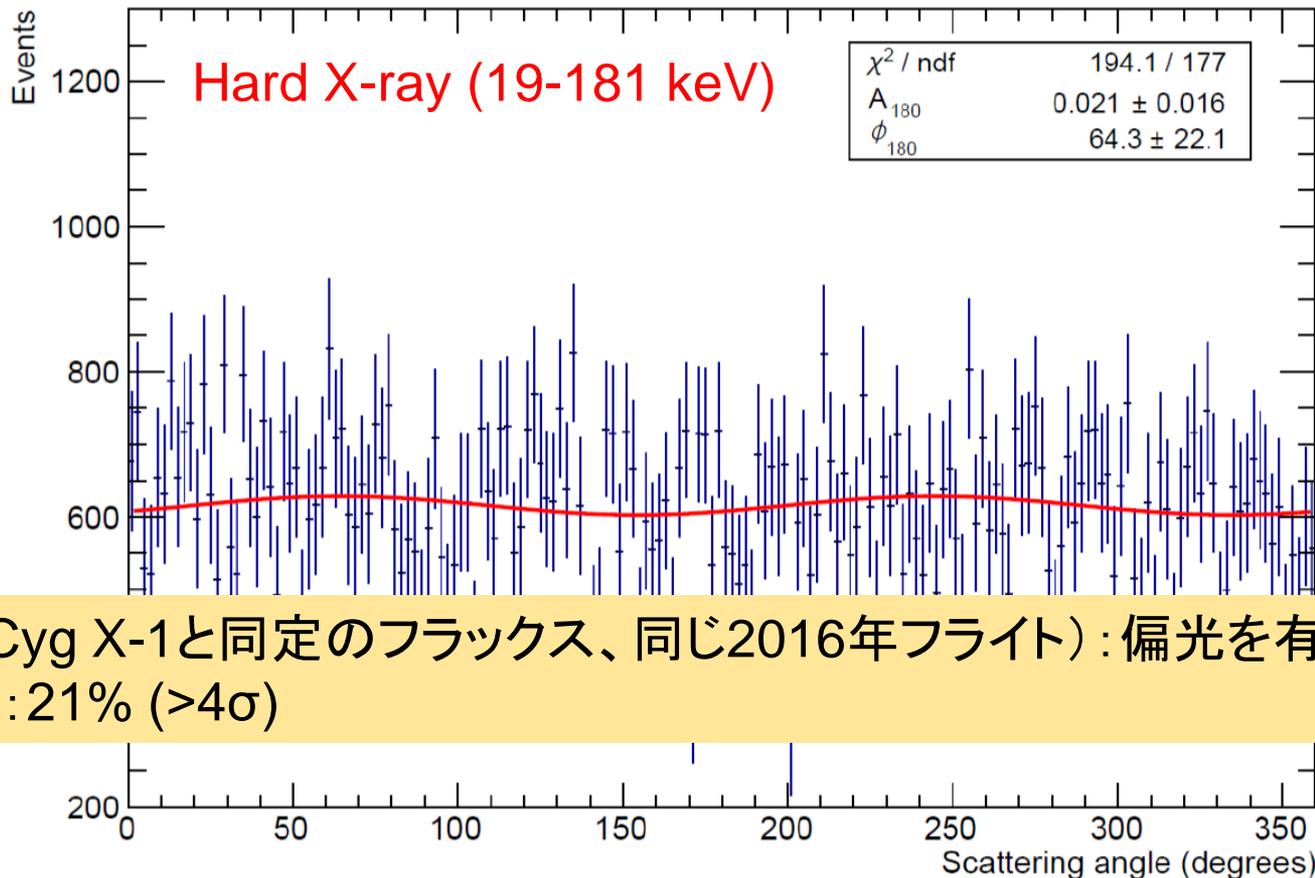


PoGO+観測結果 (Cyg X-1)

観測されたモジュレーションカーブは平坦に近い

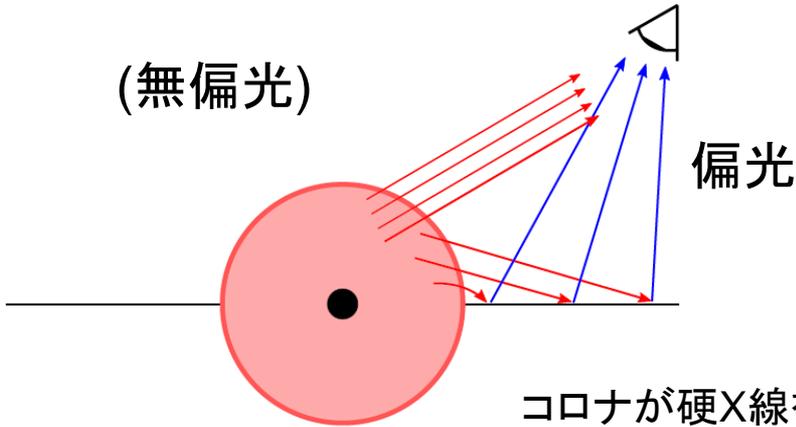
⇒ 偏光度: **<8.6% (90%上限)**

偏光角: 円盤表面に垂直方向を好む



a) 広がったコロナ

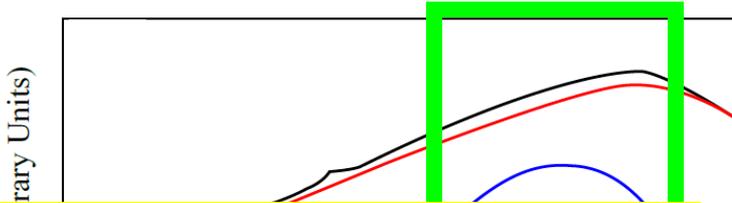
(無偏光)



コロナが硬X線を放射

赤: 1次直接観測される(ほぼ無偏光)

青: 2次反射・散乱された放射 => 偏光する



相対論的な効果: 弱い

⇒ 反射成分が少ない

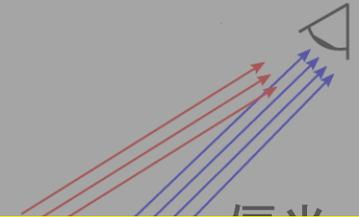
⇒ 偏光度: a few %

偏光角: 円盤表面に垂直

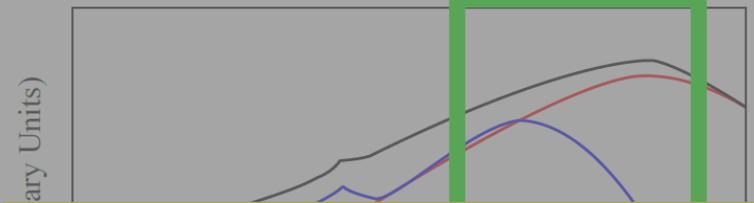
(Schnittman & Krolik 2010)

b) ランプポスト型コロナ

(無偏光)



単純な「ランプポスト型コロナ」モデルは PoGO+ の観測結果とは不一致



相対論的な効果: 強い

⇒ 反射成分が多い

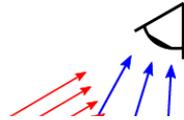
⇒ 偏光度: ~15%

偏光角: 円盤表面とはズれる

(Dovciak et al. 2011)

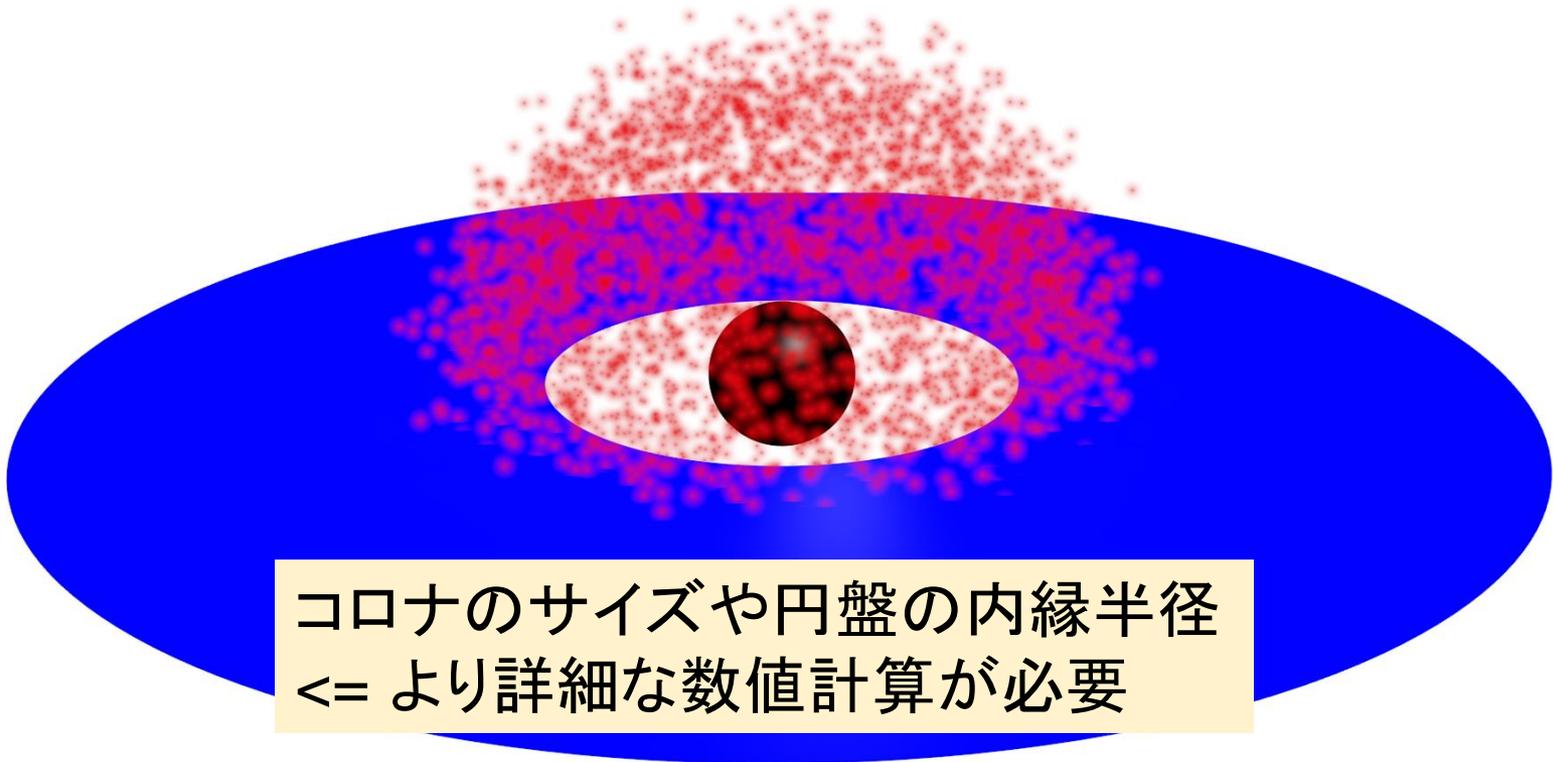
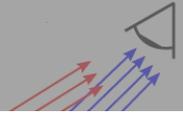
a) 広がったコロナ

(無偏光)



b) ランプポスト型コロナ

(無偏光)



コロナのサイズや円盤の内縁半径
≦ より詳細な数値計算が必要



次はX-Calibur気球実験

PI: Henric Krawczynski (Washington U.)

硬X線望遠鏡により集光 (20-80 keV)
検出器をコンパクト (バックグラウンド低減)
⇒ より高感度な観測

⇒ 質量降着型パルサー
活動銀河核



2018年12月フライト@南極 (2週間以上の長時間観測)

日本も運用・データ解析に参加

2021年に再フライトを計画 => IXPE衛星 (2-8 keV) とも同時観測

日本の貢献・FFAST望遠鏡を提供

・偏光計を高感度化 (散乱体をアクティブ)



まとめ

- 硬X線偏光計PoGO+気球実験で、ブラックホール連星「はくちょう座X-1」の hard 状態を観測した。
- 19-181 keVの偏光情報を以下に制限することに成功した。
 - ・偏光度: $< 8.6\%$ (90%上限)
 - ・偏光角: 降着円盤の表面に垂直な方向(が好まれる)
- この観測結果は、数値計算されていた「広がったコロナモデル」と一致し、「ランプポスト型モデル」の予想とは不一致であった。
=> 「広がったコロナモデル」を支持する。
- 偏光度の高いジェット(シンクロトロン)放射を制限するには、PoGO+よりも数倍感度の高い硬X線偏光計が必要である。
- 我々は、硬X線望遠鏡で集光し高感度を実現するX-Calibur気球実験を南極で実施する予定である(2018年12月、2021年...)