

広島大学

硬X線偏光計PoGO+気球実験による 「かに星雲」の観測結果

高橋弘充(広島大学)、PoGO+チーム

PoGO+気球実験

PI: Mark Pearce (スウェーデン王立工科大学)



上空40kmで気球は直径100m

Jan-Erik Stromberg



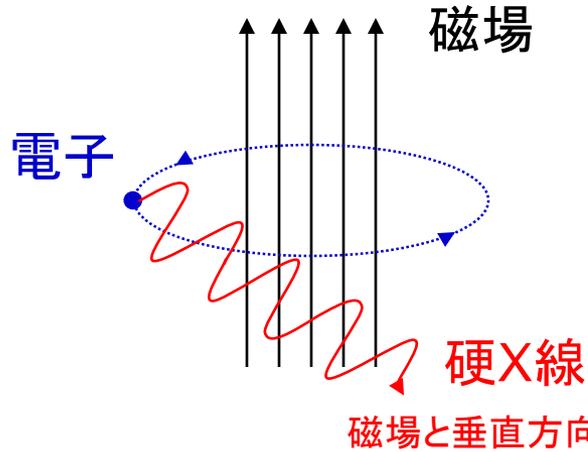
目次

- 偏光(偏波)観測
- 大気球による観測
- PoGO+気球実験による硬X線偏光の観測結果
他観測との比較
- 観測結果の考察
- IXPE衛星, X-Calibur気球による将来観測

PoGO+の論文はすべて **Chauvin et al.**
Crab, Cyg X-1の観測結果

偏光(偏波)から分かること(1)

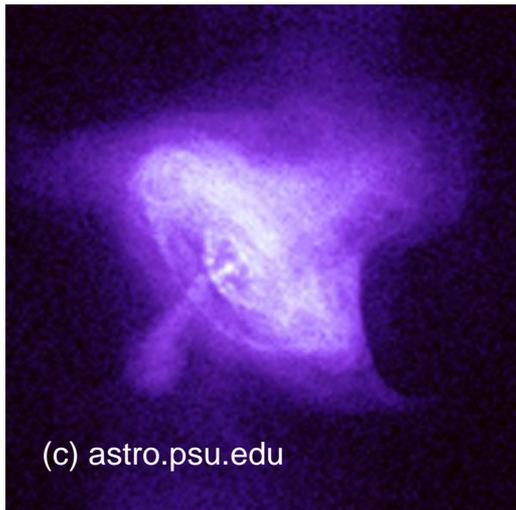
電子+磁場 => シンクロトン放射



高エネルギー粒子が磁場に巻き付いて**放射**
⇒ 放射される**硬X線**の偏光の方向は、**磁場**と垂直

天体の偏光情報が測定できると
⇒ **磁場**の方向は、**硬X線**の偏光と垂直と分かる

パルサー星雲「かに星雲」、ブラックホール天体のジェット



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、エネルギー、時間変動
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**

偏光(偏波)から分かること(2)

反射・散乱した光(水面、大気、その他なんでも)

wikipedia



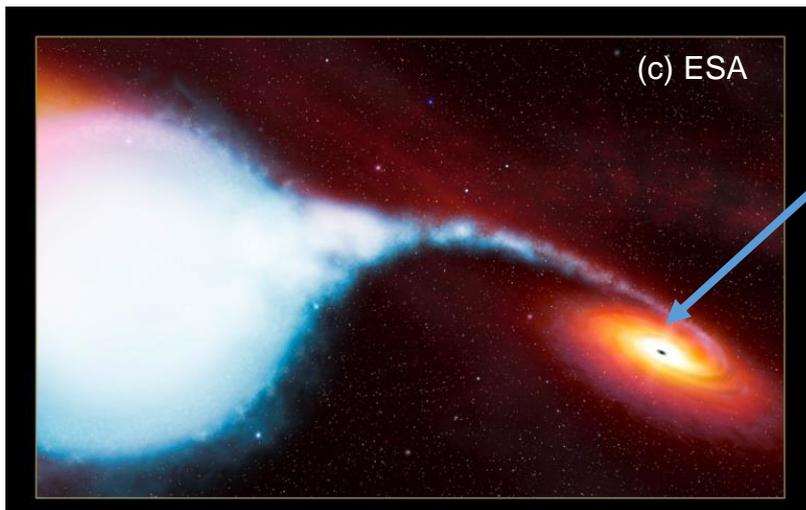
反射+川底
(偏光+無偏光)



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」



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

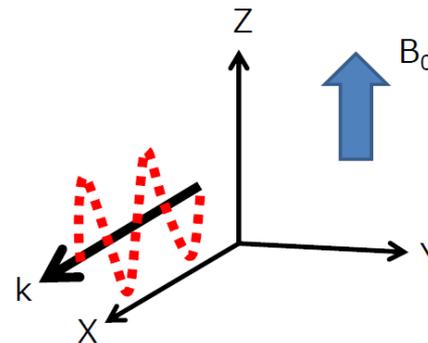
偏光(偏波)から分かること(3)

強磁場中性子星のごく近傍(表面付近)でのQED効果

Polarization Eigenmodes

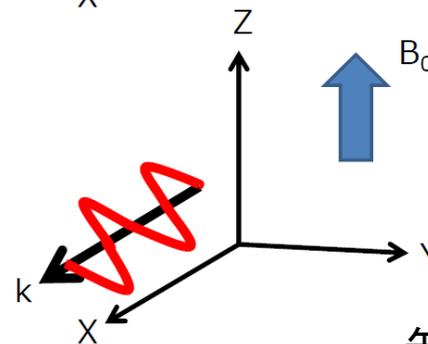
Ordinary Mode
(O-mode)

$E // k - B_0$ plane



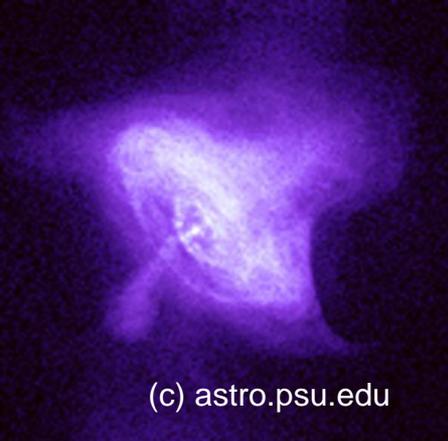
Extraordinary Mode
(E-mode)

$E \perp k - B_0$ plane



矢田部さん他

かに星雲で観測されている情報



	イメージ	時間変動	エネルギー	偏光
電波	○	○	○	○
赤外線	○	○	○	○
可視光	○	○	○	○
紫外線	○	○	○	○
X線	○	○	○	○=>数年後 40年前に1度のみ
硬X線	△	○	○	ごく最近
ガンマ線	×	○	○	? 信頼性に疑問

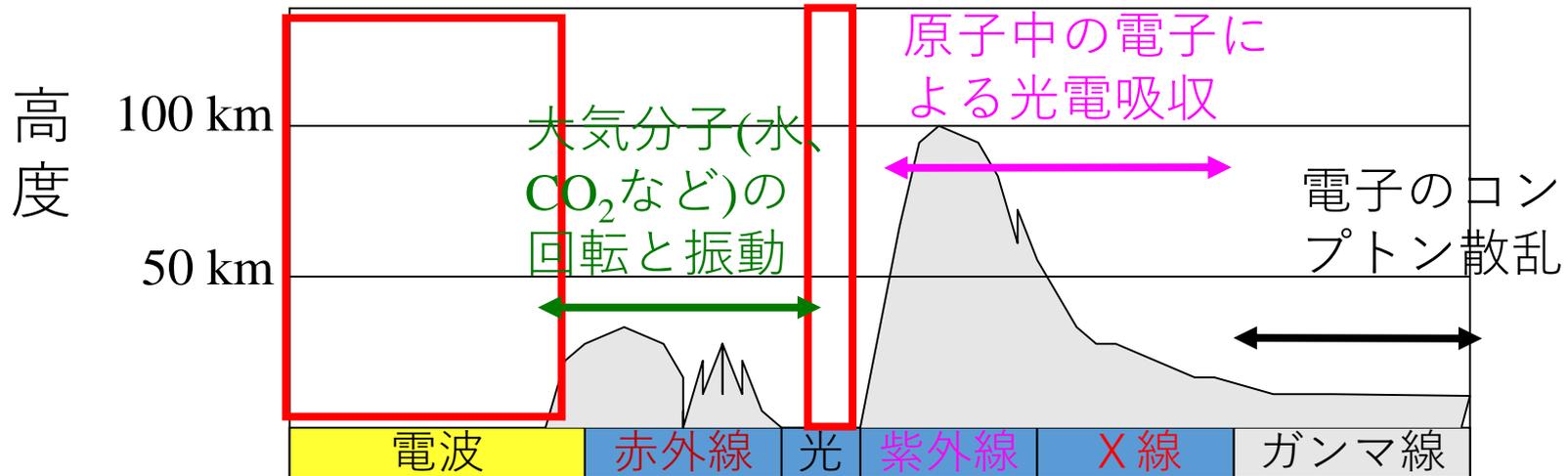
硬X線、ガンマ線はまさに開拓中の分野



なぜ人工衛星や大気球？

- ・可視光と電波という2つの窓以外では、宇宙からの電磁波は大気により吸収または散乱され、地上に届かない。
- ・大気の「2つの窓」以外の電磁波で宇宙を観測するには、**気球、ロケット、人工衛星**など飛行体を用い、**大気圏外**に出る必要がある。

電磁波に対する大気の透明さ



今回は気球で高度~40 kmから観測(飛行機は高度~10 km)



大気球による観測

打ち上げ方法	重量	費用	観測期間	
大気球	数トン	1	~1週間	繰り返して使え、性能向上 パイオニア観測
キューブサット 超小型衛星	数~数10kg	1	数年	パイオニア観測
大型衛星	数トン	100	10年	汎用天文台

- X線・ガンマ線を反応させるにはどうしても大きな体積(重量)が必要
- 大気球を1週間以上フライトできるのは、南極とスウェーデンのみ
極域は、白夜(ずっと昼)になり、気球高度を高く保てる

太陽電池でずっと発電可能

(宇宙線バックグラウンドが高い点はデメリット)

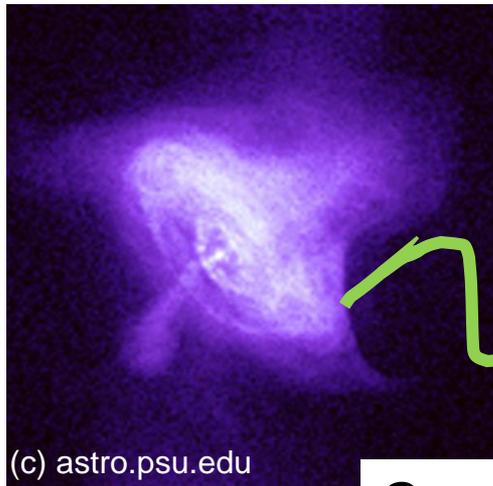
- ⇒ X線で明るい「かに星雲」、「Cyg X-1」は北天からしか観測できない
南天は、銀河中心やガンマ線で明るい「Velaパルサー」が観測可能

気球観測は、大型の装置を使ったパイオニア観測に向いている
開発スパンが短いので、人材育成にも貢献



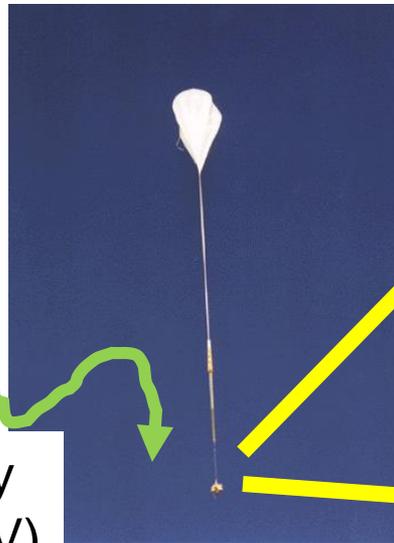
X線・ガンマ線 偏光観測

- **偏光**測定 (イメージ、タイミング、スペクトルとは異なる情報)
=> パルサーやブラックホール、活動銀河核、ガンマ線バーストなどにおける高エネルギー現象の研究で重要
- しかしながら、**X線・ガンマ線の偏光が検出された天体は、ガンマ線バースト、かに星雲** (2.6/5.2 keV と 200 keV 以上) と **Cyg X-1** (600 keV 以上) のみ
- 他のエネルギー帯域、他の天体の偏光観測が必要不可欠
PoGO+, X-Calibur, 「ひとみ」/SGD, AstroSat, IXPE, ...



(c) astro.psu.edu

Gamma-ray
(20-160 keV)



~40 km

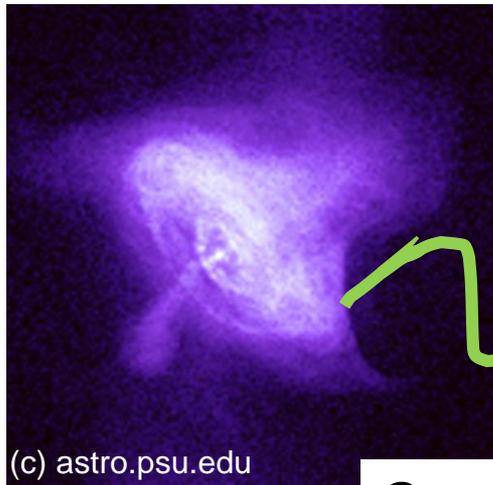


Weight (wo ballast) : ~1750 kg
Power : ~300 W (Instrument)
~200 W (Gondola, etc.)



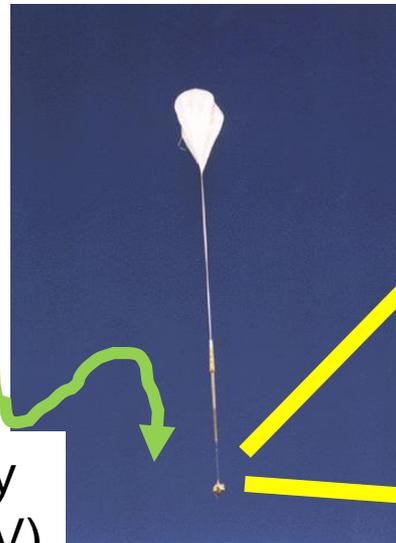
X線・ガンマ線 偏光観測

- **偏光**測定 (イメージ、タイミング、スペクトルとは異なる情報)
=> パルサーやブラックホール、活動銀河核、ガンマ線バーストなどにおける高エネルギー現象の研究で重要
- しかしながら、**X線・ガンマ線の偏光観測はこれまでほとんどなかった**、**ガンマ線バースト、かに星雲** (2.6/5.2 keV と 200 keV) **以外に200 keV以上** (2015~2021~) **のみに観測がなされてきた**
- 他のエネルギー帯域、他の天体の偏光観測がなされてきたが、PoGO+, X-Calibur, 「ひとみ」/SGD, AstroSat, IXPE, ...

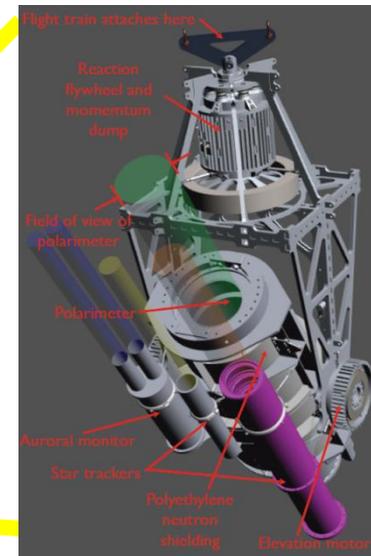


(c) astro.psu.edu

Gamma-ray
(20-160 keV)



~40 km

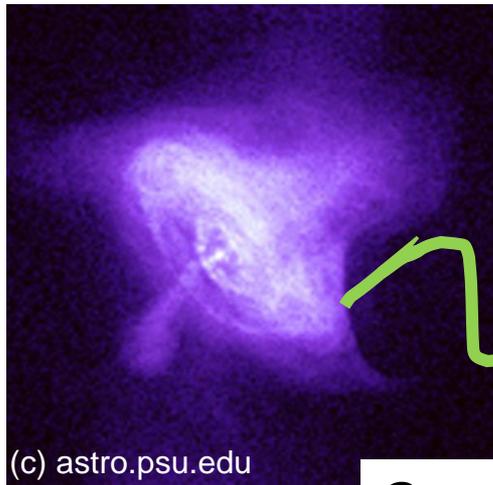


Weight (wo ballast) : ~1750 kg
Power : ~300 W (Instrument)
~200 W (Gondola, etc.)



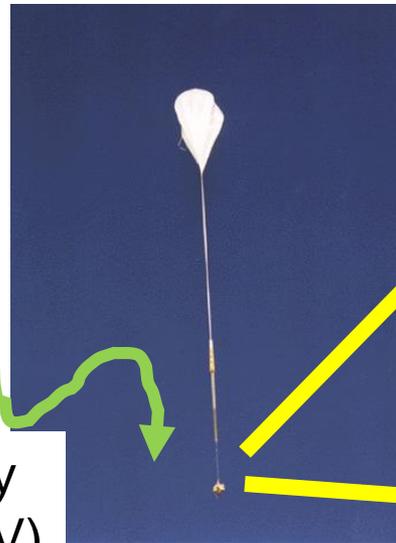
Polarized Gamma-ray Observer (PoGO+)

- **PoGO+ 気球実験は、20-160 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。

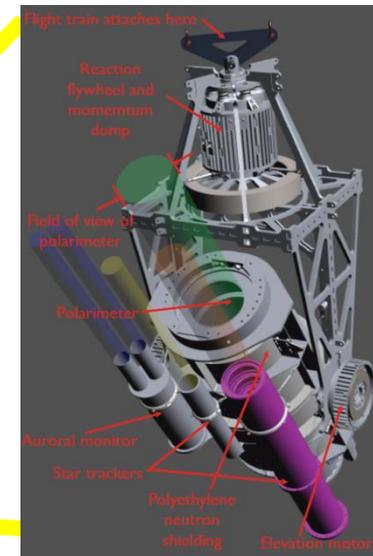


(c) astro.psu.edu

Gamma-ray
(20-160 keV)



~40 km

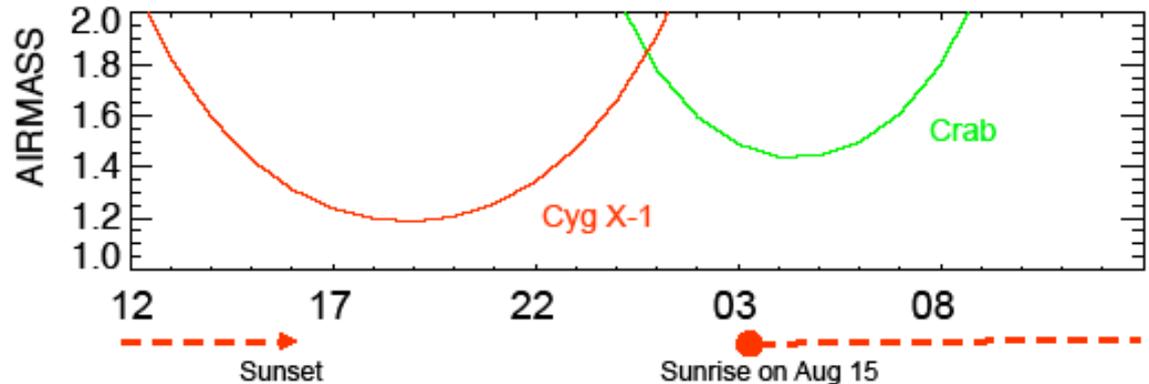


Weight (wo ballast) : ~1750 kg
Power : ~300 W (Instrument)
~200 W (Gondola, etc.)

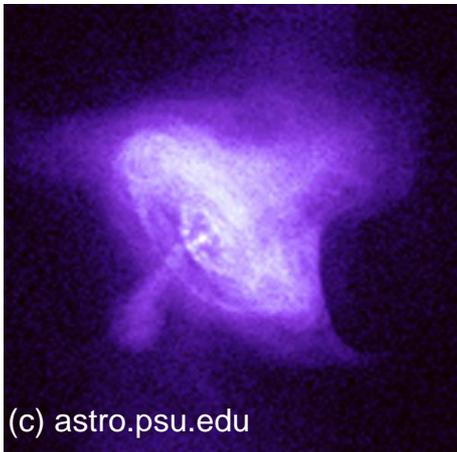


Pathfinder Flight from Sweden

Flight Plan (1-day long)



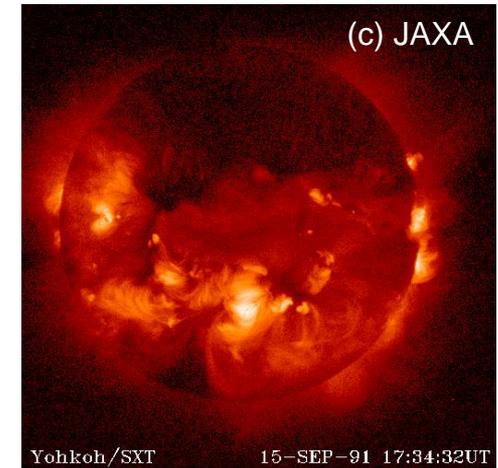
Crab nebula (Pulsar)



Cyg X-1 (Black hole binary)



Solar flare



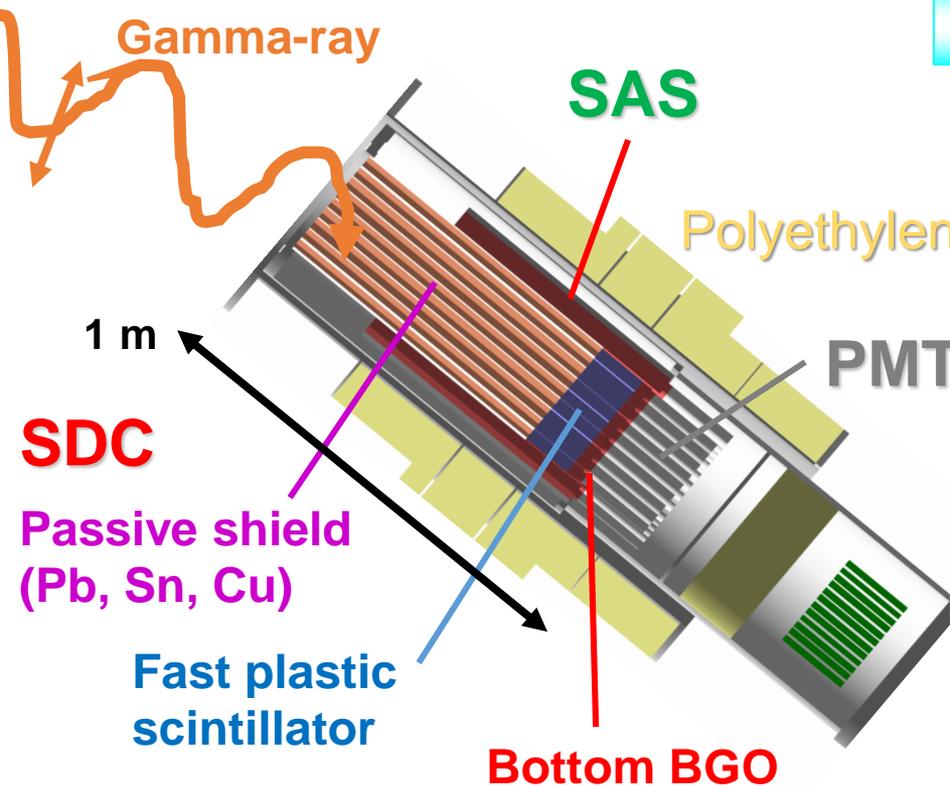
PoGO+の特徴

- 大面積、(それなりの)低バックグラウンド => 明るい天体から硬X線偏光の検出
- 長時間の連続観測(最長~2週間): 高い統計、天体の変動(かに星雲も変動)

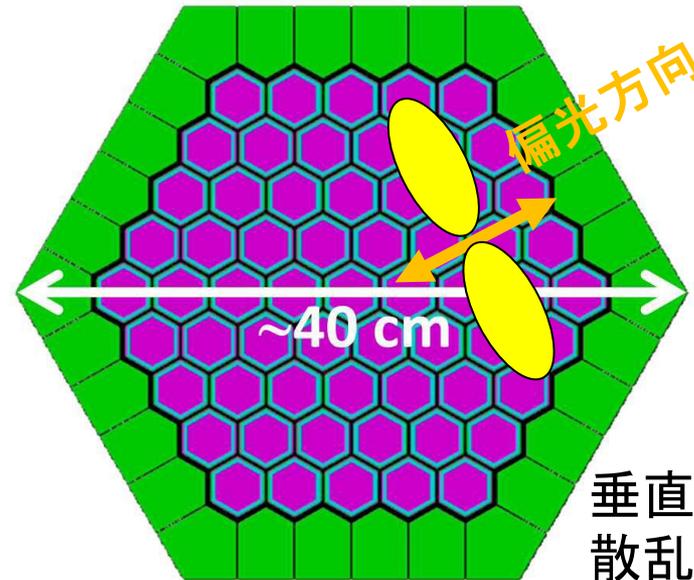


偏光検出 (コンプトン散乱: 10-1000 keV)

- **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。



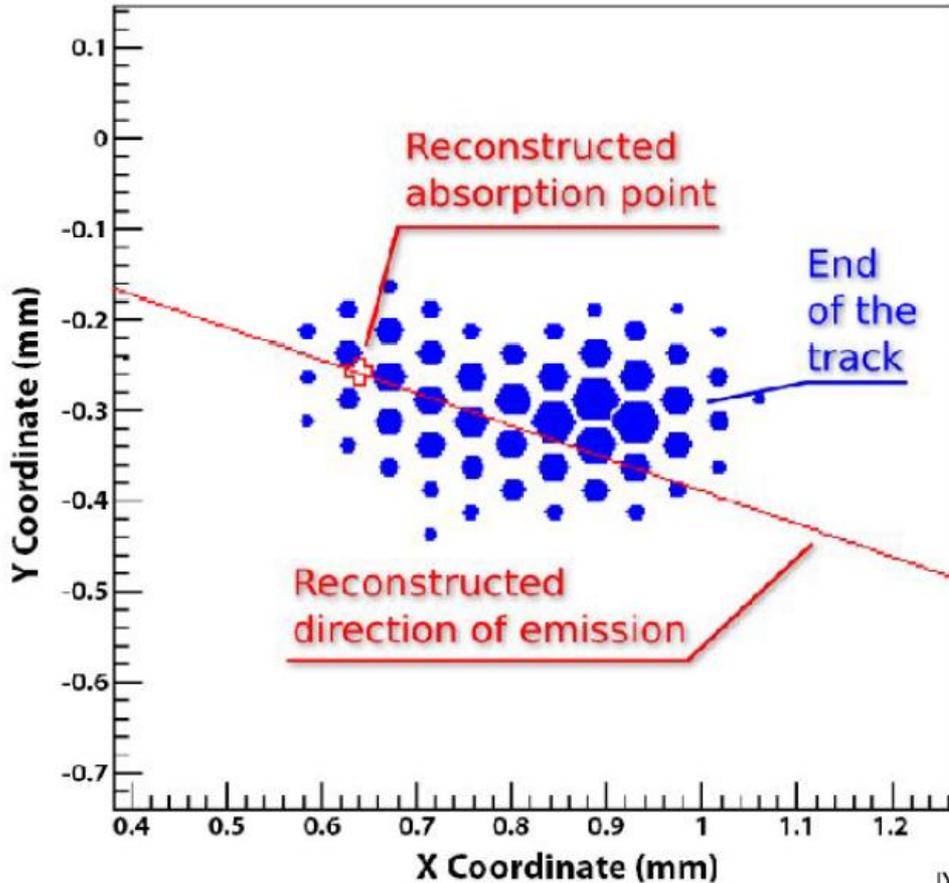
Top view



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 (光電吸収: 数 keV)



光電吸収時に
光電子は偏光方向へ飛ばされる
=> 偏光方向と平行に
多くのイベントが検出される

位置分解能の良い
ガス検出器、半導体検出器
が利用される



PoGO+ Overall View (2016)

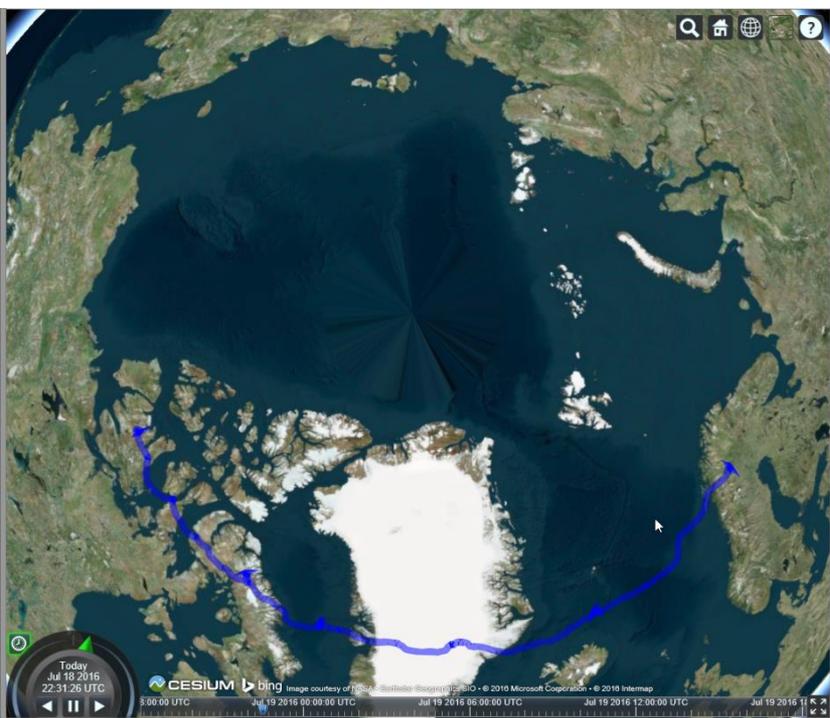


2016年

- ・国際情勢により、ロシア上空は飛行できなかったため、カナダまで最高高度は約40 km
- ・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



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



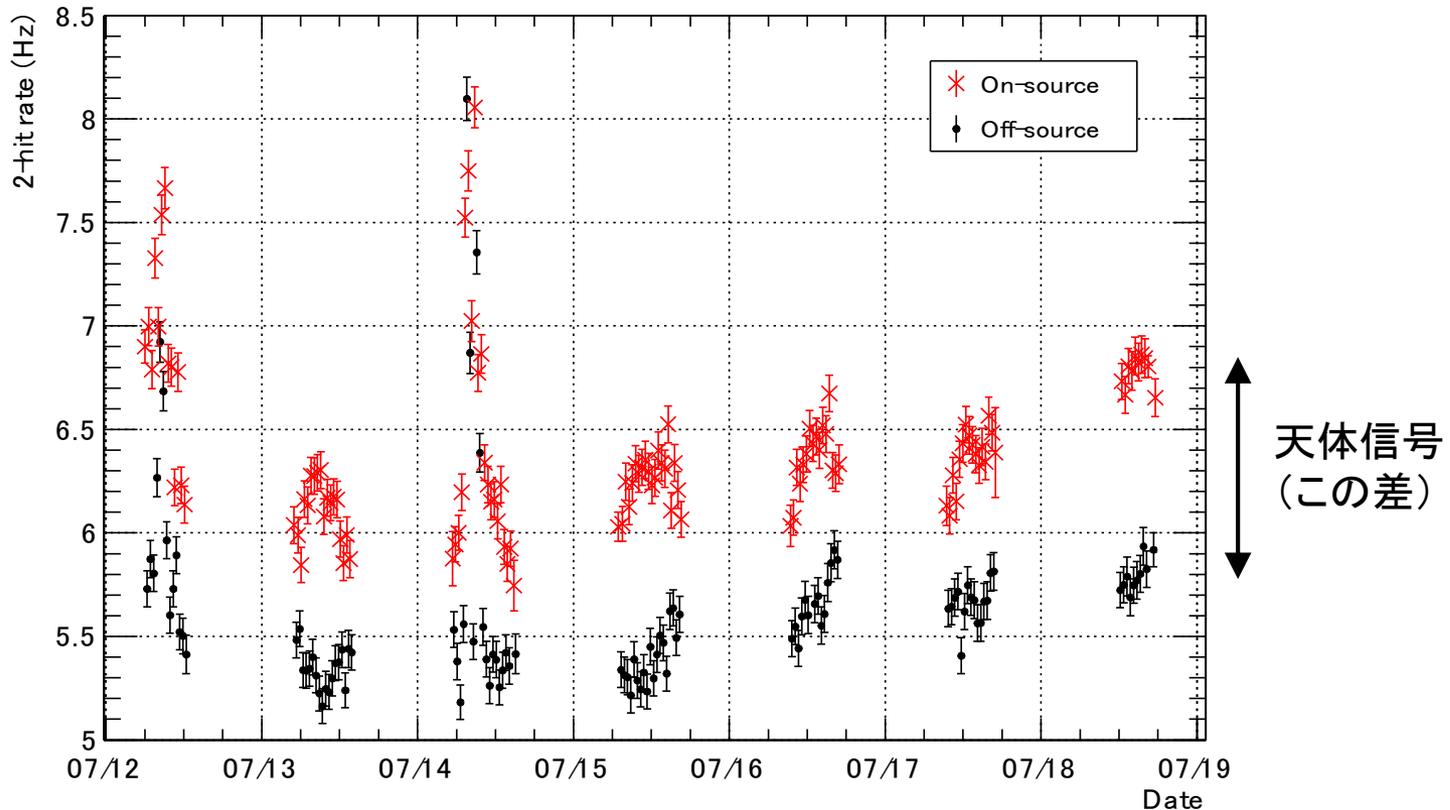
ゴンドラからの撮影

SSC:スウェーデン宇宙公社





Crab観測 (ライトカーブ)



2-hitイベント(偏光解析に利用)のライトカーブ @20-160 keV

- ・赤: Crab指向中 (92 ks)

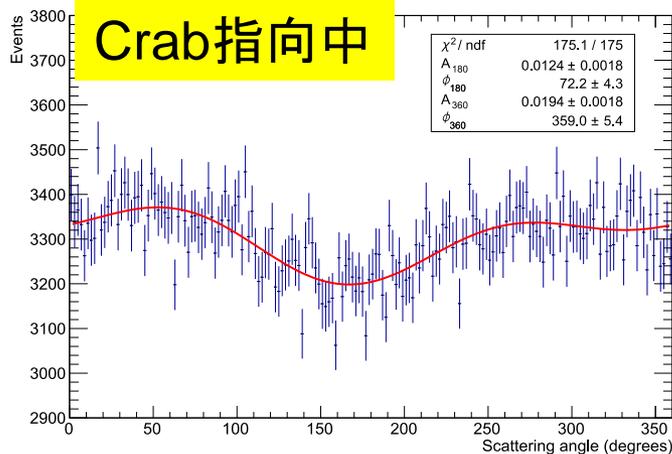
- ・黒: 左右 5° ずらしたバックグラウンド観測

#15分おきに、天体 \leftrightarrow バックグラウンド観測を行き来している

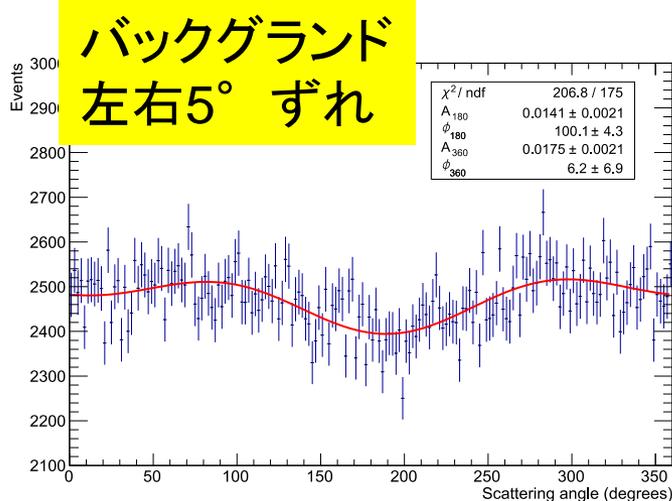
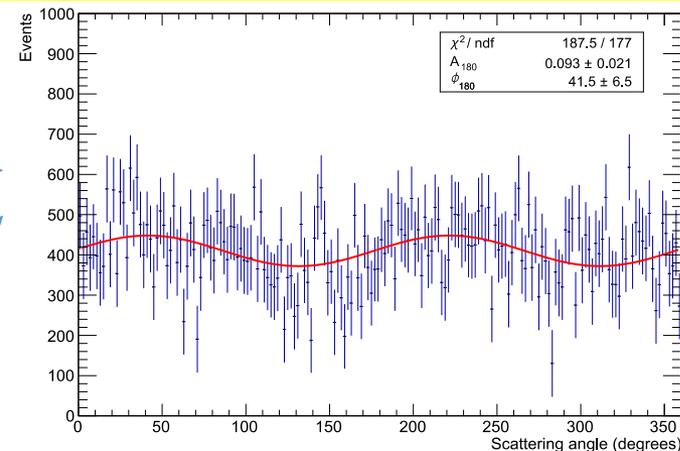


Crab観測 (モジュレーションカーブ)

偏光があると⇒コンプトン散乱すると散乱角に異方性が出る(180° 成分)



正味の天体信号 (= 左上一左下)

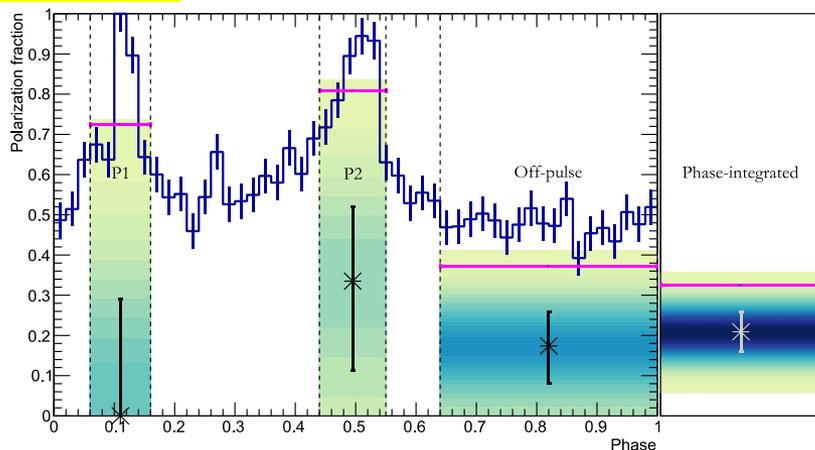


- バックグラウンドが平坦ではない
360° 成分が卓越
← 検出器に下方から中性子バックグラウンド
- 正味の天体信号:
180° 成分(偏光信号)のみで再現される
(バックグラウンドを精度良く差し引けている)

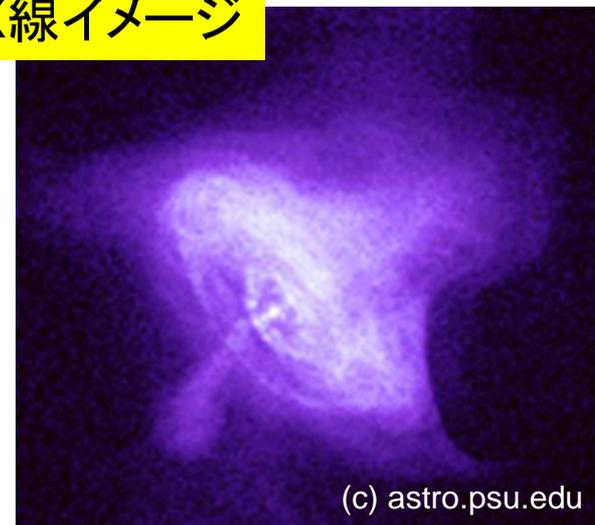


Crab観測(偏光度、偏光方位角)

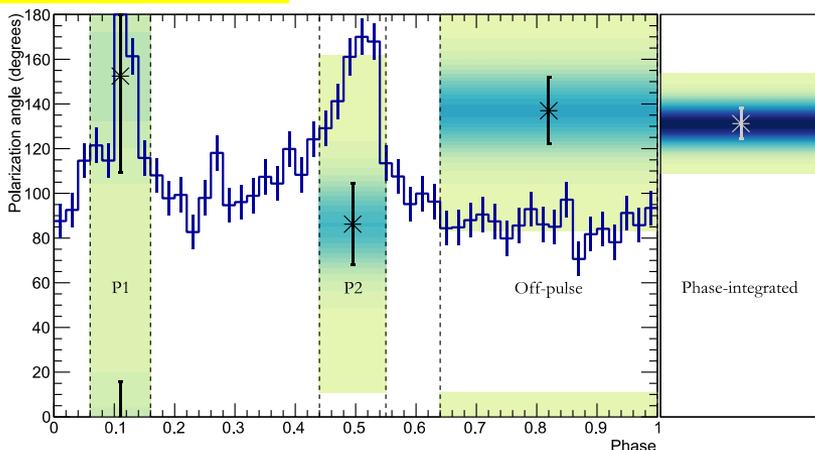
偏光度



X線イメージ



偏光方位角



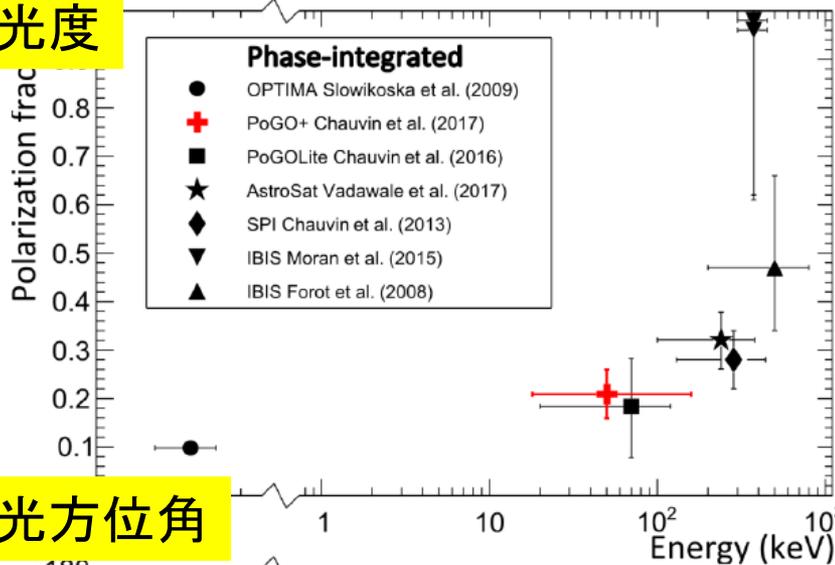
- ・偏光度 $20.9 \pm 5.0\%$
- ・偏光方位角 $131.3 \pm 6.8^\circ$
- ⇒ パルサー回転軸(ジェット方向)と一致
- ⇒ TeV電子がトーラス方向にそろった磁場によりシンクロトン放射して硬X線
- ・パルス位相に応じた変化: 統計不足



他波長との比較

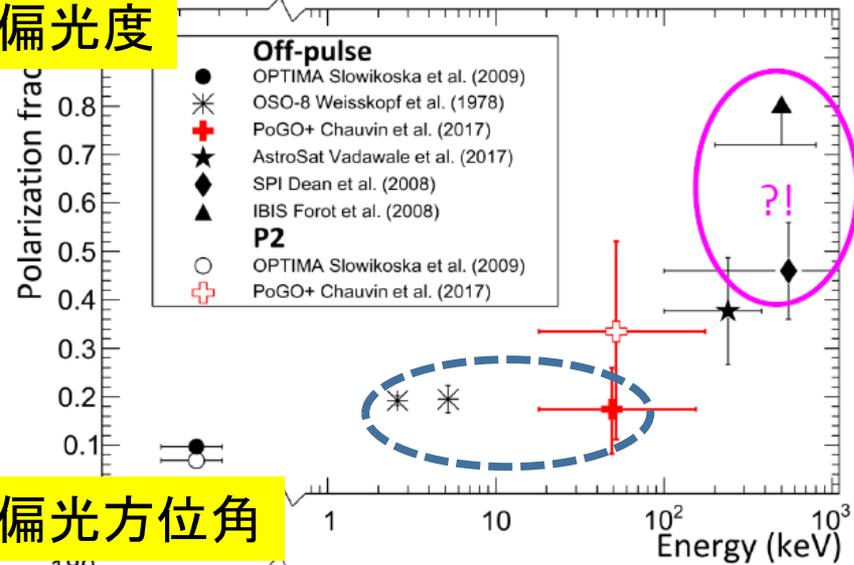
Chauvin, et al., 2017, Sci. Rep., 7, 7816.

偏光度

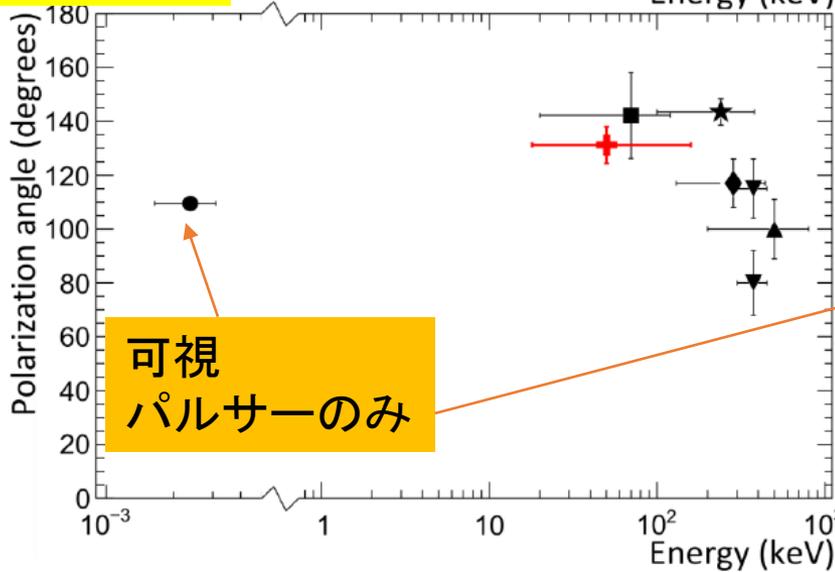


Chauvin, et al., 2017, Sci. Rep., 7, 7816.

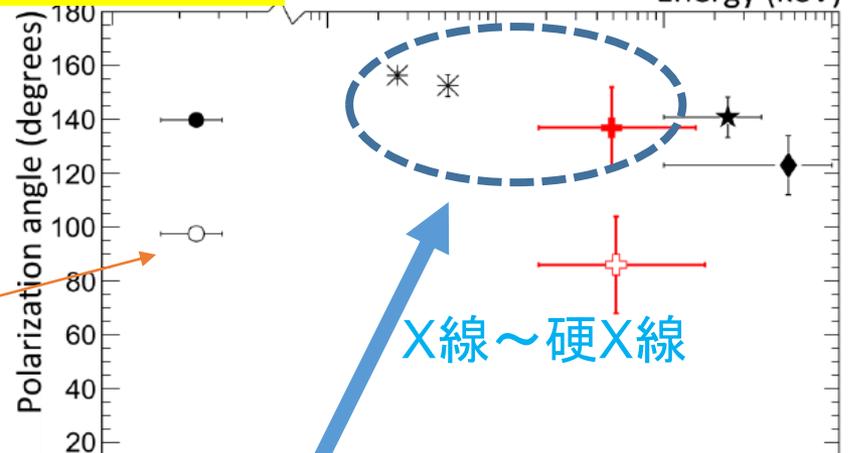
偏光度



偏光方位角



偏光方位角



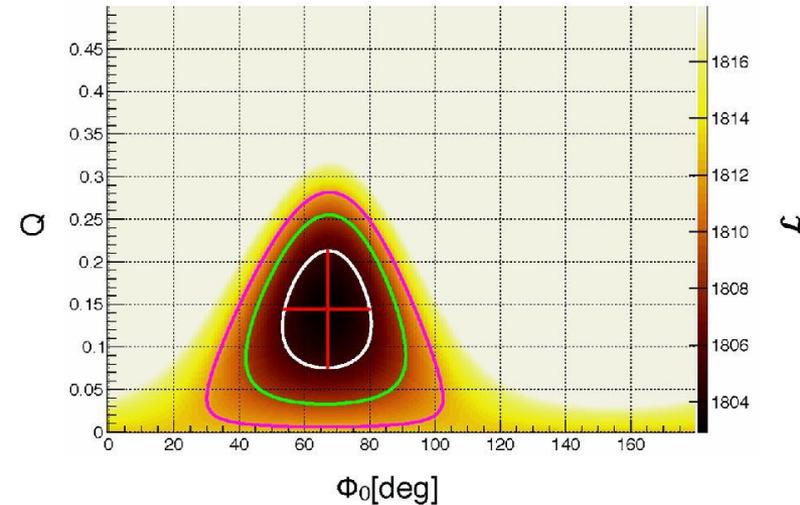
X線(OSO-8@2.6, 5.2 keV)とほぼ同じ
=> どうしてこんなに一致???

「ひとみ」軟ガンマ線検出器でも検出

Hitomi collaboration+18

Crab: 8.6 ksの観測 (60-160 keV)

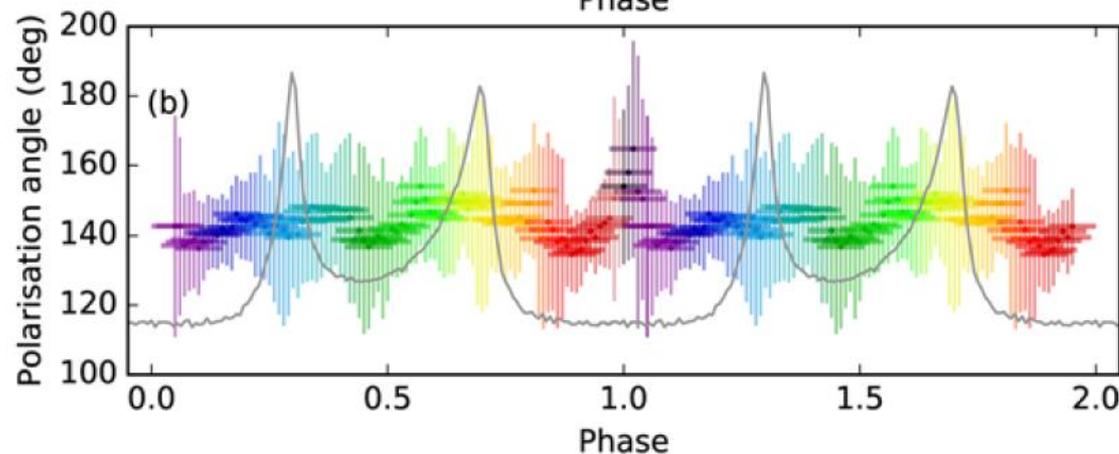
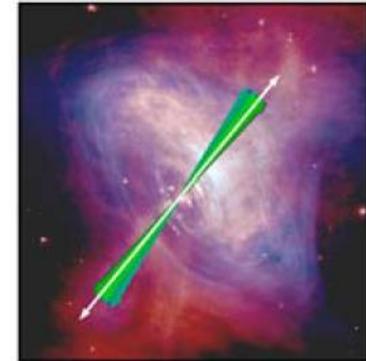
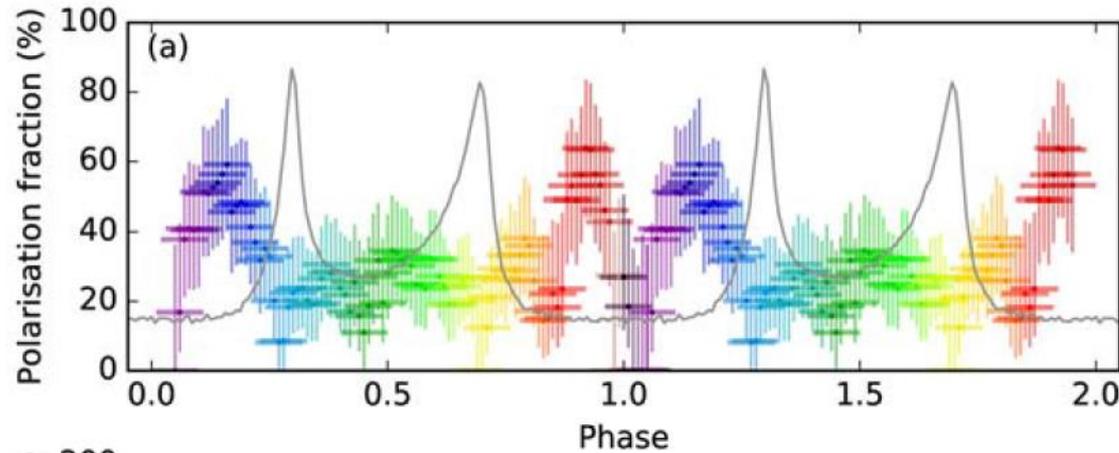
S/N比が良いので短時間で
偏光検出ができた



Satellite/instruments	Energy band	Polarization angle [°]	Polarization fraction [%]	Exposure time	Phase	Supplement
PoGO+ (Balloon exp.)	20–160 keV	131.3 ± 6.8	20.9 ± 5.0	92 ks	All	Chauvin et al. (2017)
Hitomi/SGD	60–160 keV	$110.7^{+13.2}_{-13.0}$	22.1 ± 10.6	5 ks	All	This work
AstroSat/CZTI	100–380 keV	143.5 ± 2.8	32.7 ± 5.8	800 ks	All	Vadawale et al. (2017)
INTEGRAL/SPI	130–440 keV	117 ± 9	28 ± 6	600 ks	All	Chauvin et al. (2013)
INTEGRAL/IBIS	200–800 keV	110 ± 11	47^{+19}_{-13}	1200 ks	All	Forot et al. (2008)

AstroSat衛星 (100-380 keV) の報告

Vadawale et al. 2017



Off-pulseの位相で、偏光度が変化???

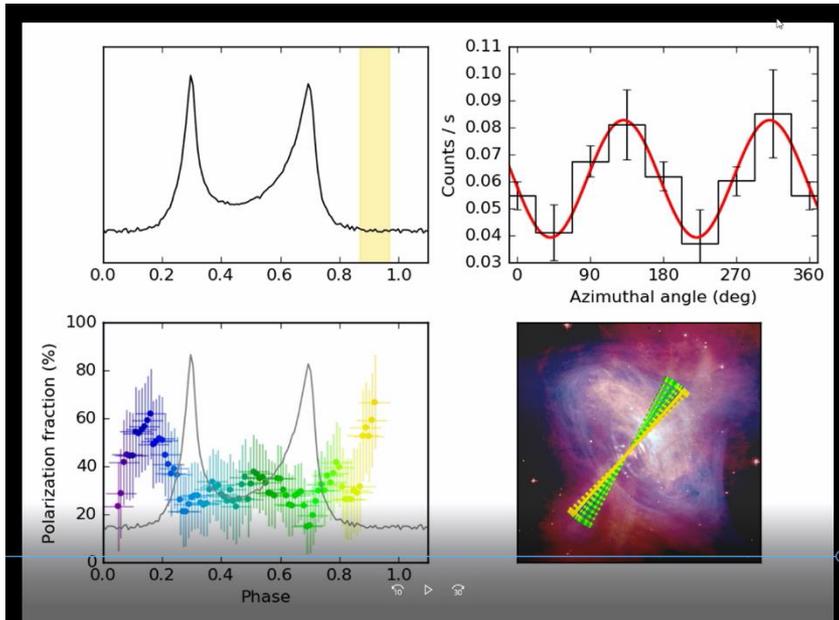
PoGO+とAstroSatの観測状況

	<i>PoGO+</i>	<i>AstroSat CZTI</i>
Platform	stratospheric balloon	satellite
Overburden	5.8 g/cm ² average	0 g/cm ²
Detector	plastic scintillator	CZT
Pixels, geometry	61, hexagonal	16384, square
Geometrical area	378 cm ²	976 cm ²
Field-of-view	~2°	~90°
Energy band	18–160 keV	100–380 keV
Observation	Jul.'16	Sep.'15–Mar.'17
t _{source}	92 ks	800 ks
t _{bkgnd}	79 ks	180 ks
Signal/Bkgnd	0.14	0.05

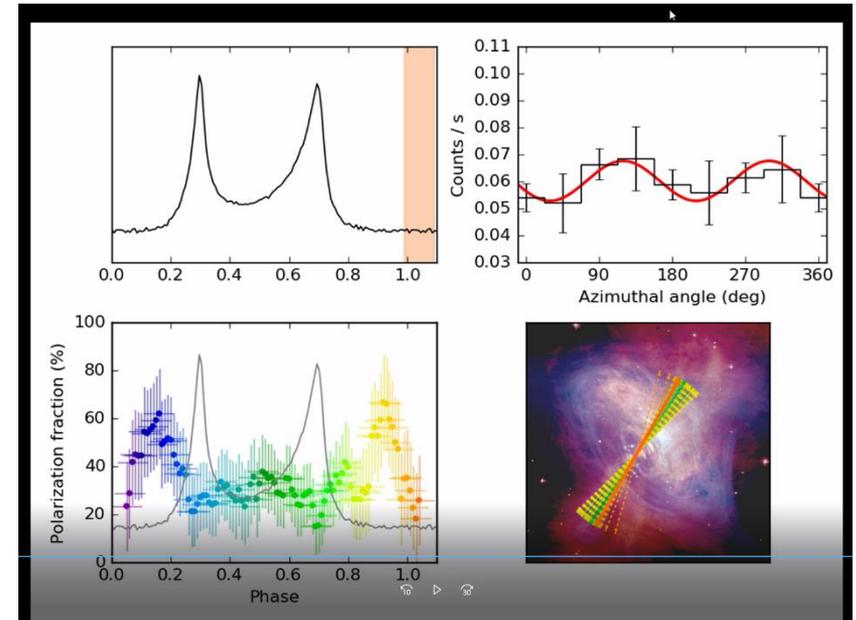
優れている点

偏光度：最大と最小の比較

Vadawale et al. 2017

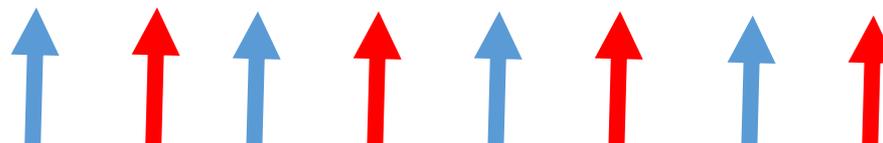
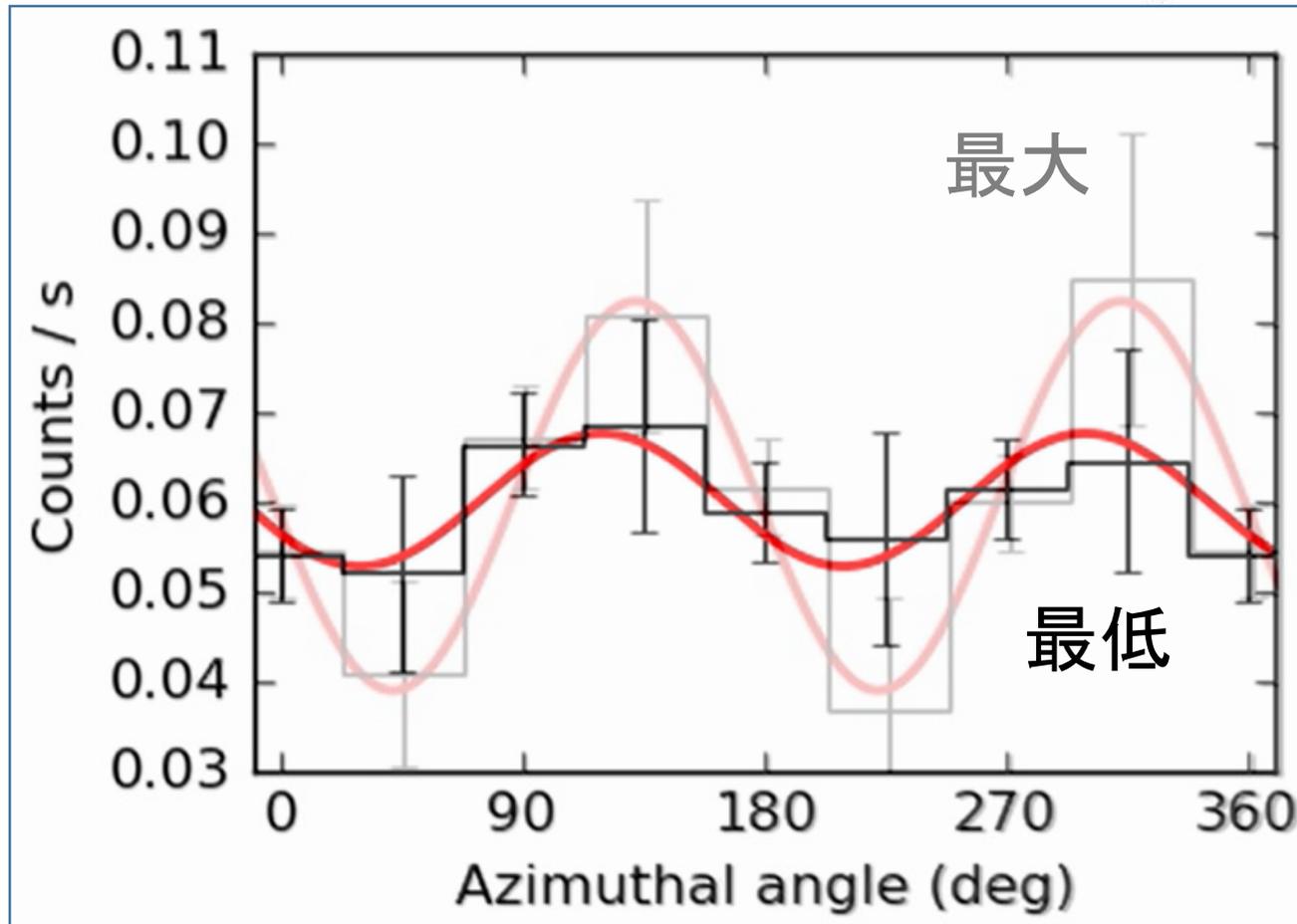


最大



最小

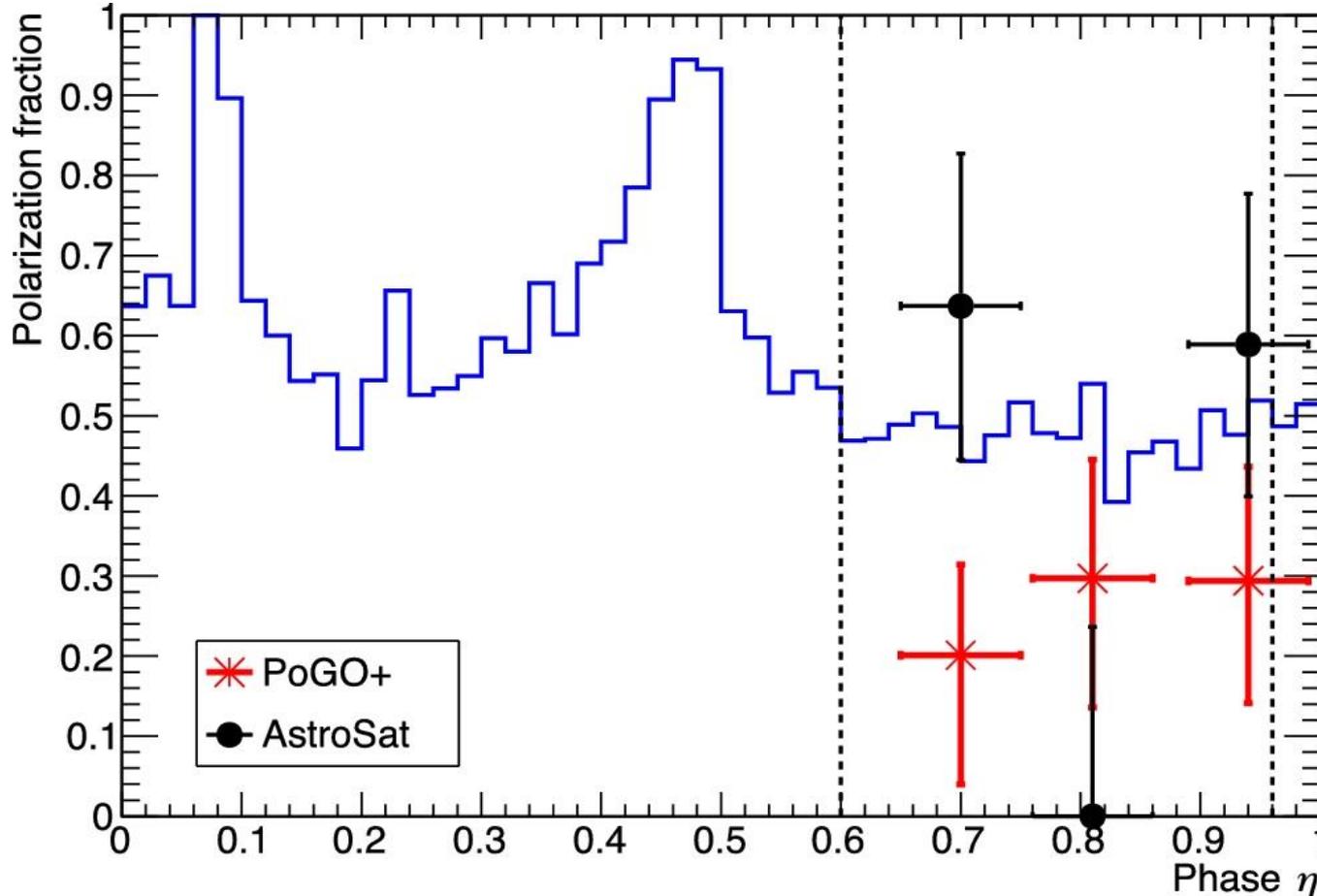
偏光度：最大と最小の比較 (モジュレーションカーブ)



ほぼ一致
1 σ で一致



PoGO+とAstroSatデータの同時解析



PoGO+のデータは、AstroSatの傾向とは一致しない
 (Off-pulseでの偏光の変動は有意ではない)
 => AstroSatは衛星なので、さらにデータを蓄積して検証中

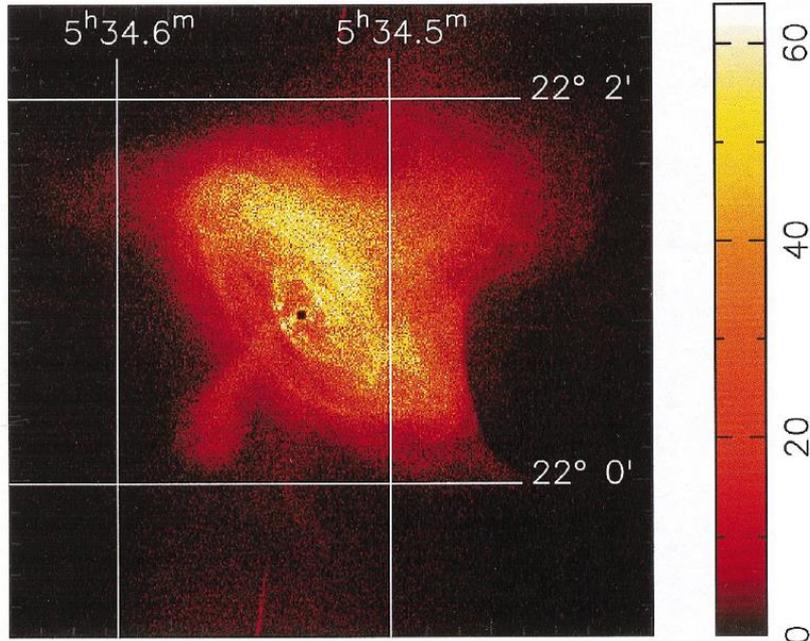


以下、個人的な考察

1年くらい進展していないので、是非コメントをお願いします

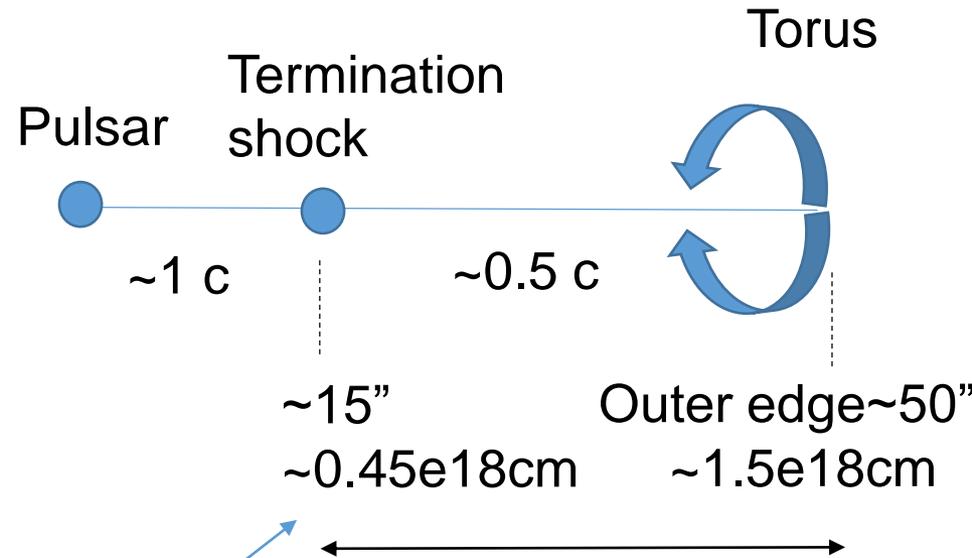
かに星雲のジオメトリ (assuming 2 kpc)

X線イメージ(Chandra)



Weisskopf+2000

View along the equatorial plane



1.05e18cm
 => With 0.5 c,
 it takes 2.2 years to travel.

- 終端衝撃波で e-/e+ はPeVまで加速され、その後はシンクロトロン冷却
 - 高エネルギー粒子ほど、早くへたる
 - 高エネルギー放射ほど、よりパルサー近傍の磁場構造を反映
- ⇒ OSO-8(X線)とPoGO+(硬X線)の結果を比較していく

シンクロトロン冷却による寿命 (寺澤先生講義)

シンクロトロン放射: 粒子エネルギー (γ) \rightarrow 放射の周波数

$$\omega_c = \frac{3\gamma^2 q B_{\perp}}{2mc} \quad \rightarrow \quad \hbar\omega_c \equiv \varepsilon = 0.066 \text{ keV} \left[\frac{B}{\text{mG}} \right] \left[\frac{E}{\text{TeV}} \right]^2$$

または逆に解いて、

$$E = 3.9 \text{ TeV} \left[\frac{B}{\text{mG}} \right]^{-0.5} \left[\frac{\varepsilon}{\text{keV}} \right]^{0.5}$$

シンクロトロン放射: 放射率 \rightarrow 粒子の寿命

$$-\frac{dE}{dt} = \frac{1}{6\pi} \sigma_T c \beta^2 \left[\frac{E}{mc^2} \right]^2 B^2$$

$$\rightarrow t_{\text{synch}} \equiv \left[-\frac{1}{E} \frac{dE}{dt} \right]^{-1} = 12.5 \text{ years} \left[\frac{B}{\text{mG}} \right]^{-2} \left[\frac{E}{\text{TeV}} \right]^{-1}$$

$$= 3.2 \text{ years} \left[\frac{B}{\text{mG}} \right]^{-1.5} \left[\frac{\varepsilon}{\text{keV}} \right]^{-0.5}$$

15

硬X線以上の高解像度な撮像はないので
 \Rightarrow 放射領域を推定

高エネルギー粒子ほど
 早くエネルギーを失う (寿命短い)

Crabの仮定

- magnetic strength $B \sim 300 \text{ uG}$
- travel speed of $0.5 c$ (wisp obs.)

Synchrotron X-ray energy (keV): ε	Particle energy (TeV): E	Life time (year)	Travel distance (10^{18} cm)	Can reach torus (>2.2 years)?
2.6 (OSO-8)	11	12	5.7	Yes
50 (PoGO+ median)	50	2.8	1.3	Just
20 (lower limit)	32	4.4	2.1	Yes
160 (upper limit)	90	1.5	0.7	No

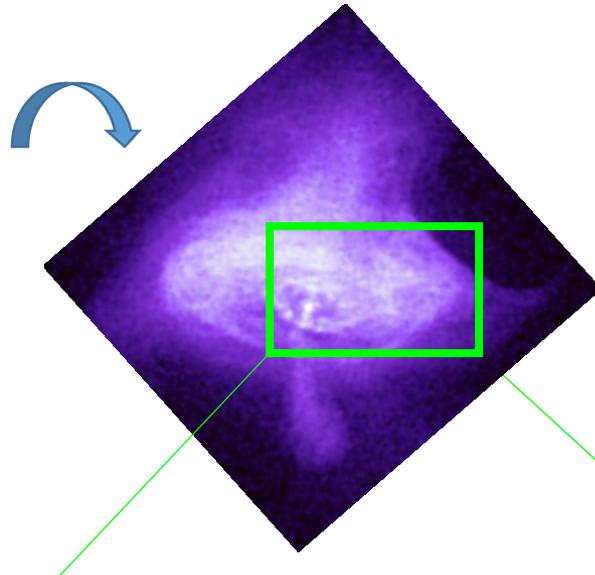
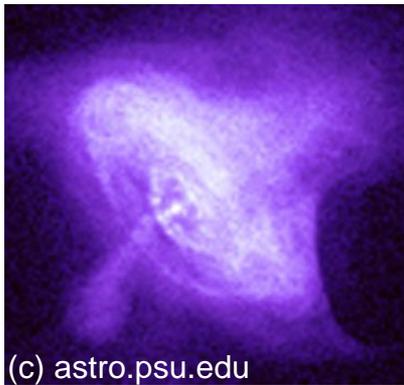
Particles emitting X-ray (OSO-8): 十分にトーラスを満たしているはず (X線イメージでも、当然トーラスまで明るい)

Those of hard X-ray (PoGO+): トーラスにギリギリ届くくらいのはず

偏光結果から分かったこと

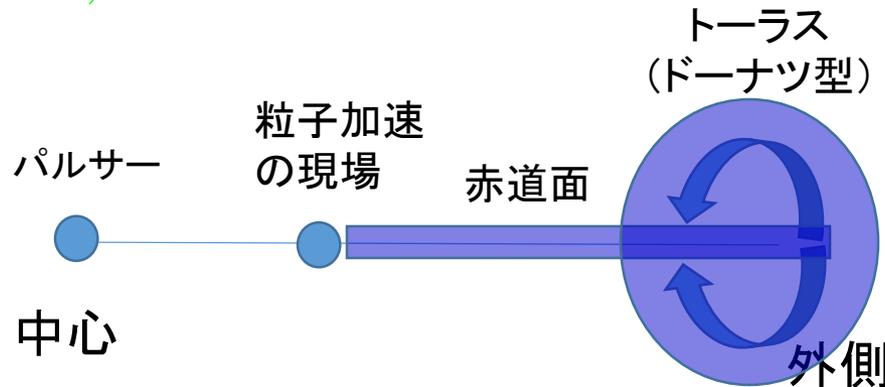
偏光 (= 磁場) 情報が、**硬X線**と**X線**でほぼ一致していた

X線イメージ



X線を放射する粒子: 寿命~12年
=> トーラスを満たしている
巻き上げられ乱れた構造

硬X線 : ~3年
=> 赤道面にしか存在しない
より中心に近く整った構造

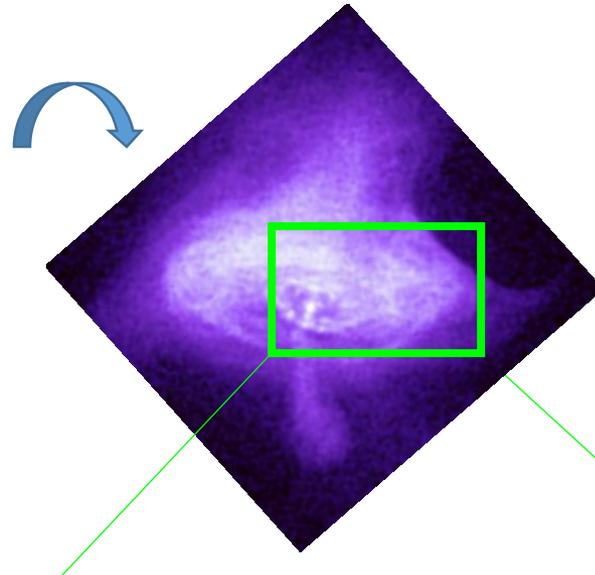
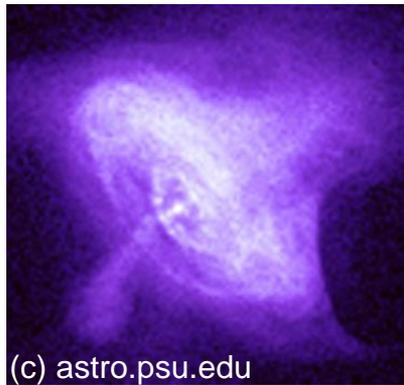


磁場の乱れ具合
X線イメージから
柴田先生他 2003

偏光結果から分かったこと

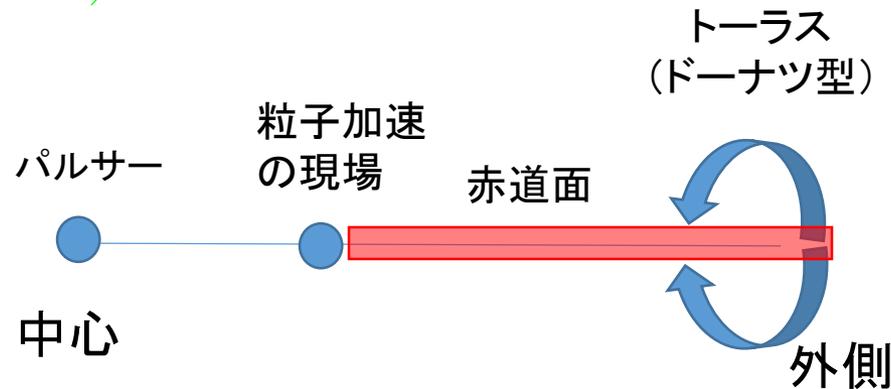
偏光 (= 磁場) 情報が、**硬X線**と**X線**でほぼ一致していた

X線イメージ



X線を放射する粒子: 寿命~12年
=> トーラスを満たしている
巻き上げられ乱れた構造

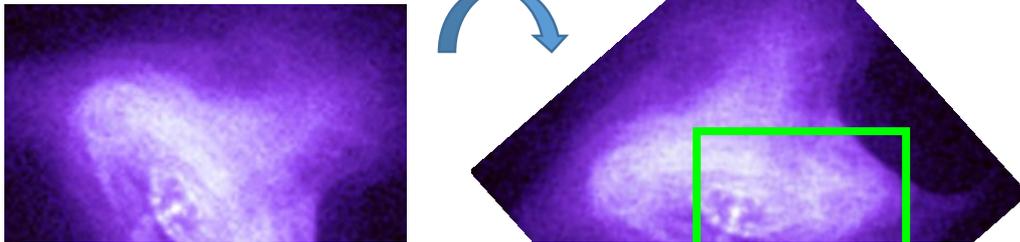
硬X線 : ~3年
=> 赤道面にしか存在しない
より中心に近く整った構造



偏光結果から分かったこと

偏光 (= 磁場) 情報が、**硬X線**と**X線**でほぼ一致していた

X線イメージ



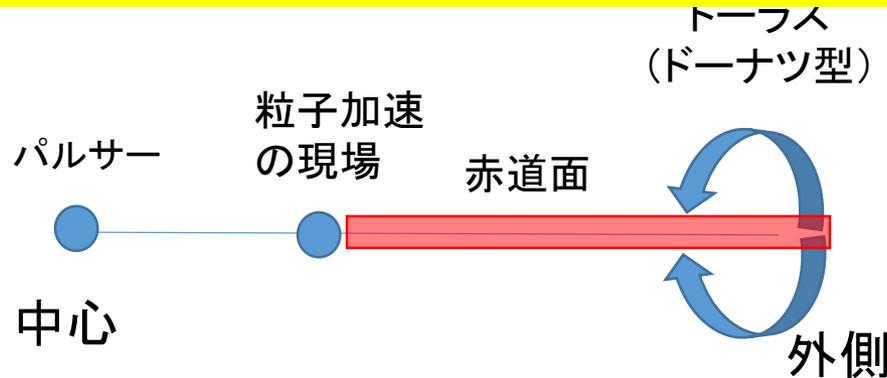
X線を放射する粒子: 寿命~12年
=> トーラスを満たしている
巻き上げられ乱れた構造

硬X線 : ~3年
=> 赤道面にしか存在しない
トーラスに近づくにつれて構造

パルサー風星雲の磁場構造は

- ・トーラスでも案外崩れない?
- ・赤道面でも案外乱れている?

⇔ 理論研究と比較していきたい
(ので、コメントお願いします)

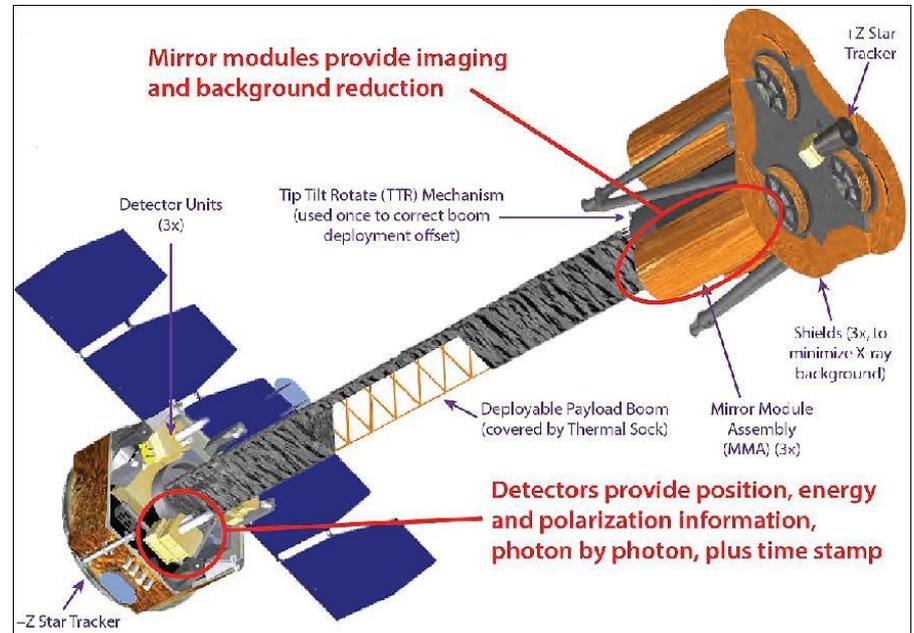


将来計画：X-Calibur気球、IXPE衛星



(PI: Krawczynski)

X-Calibur
20-80 keV

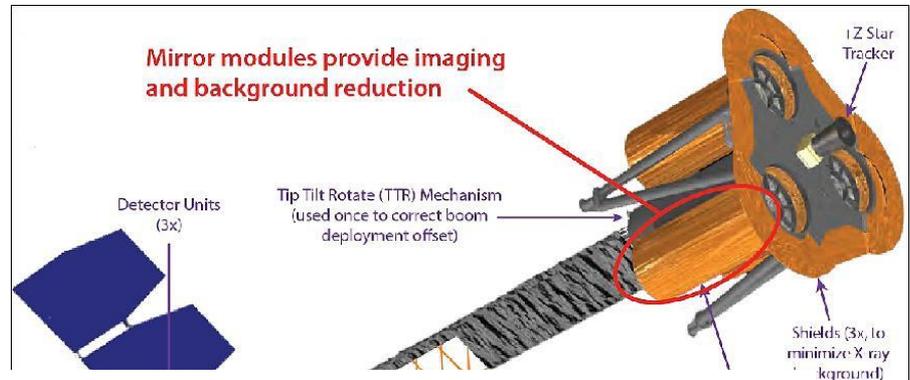
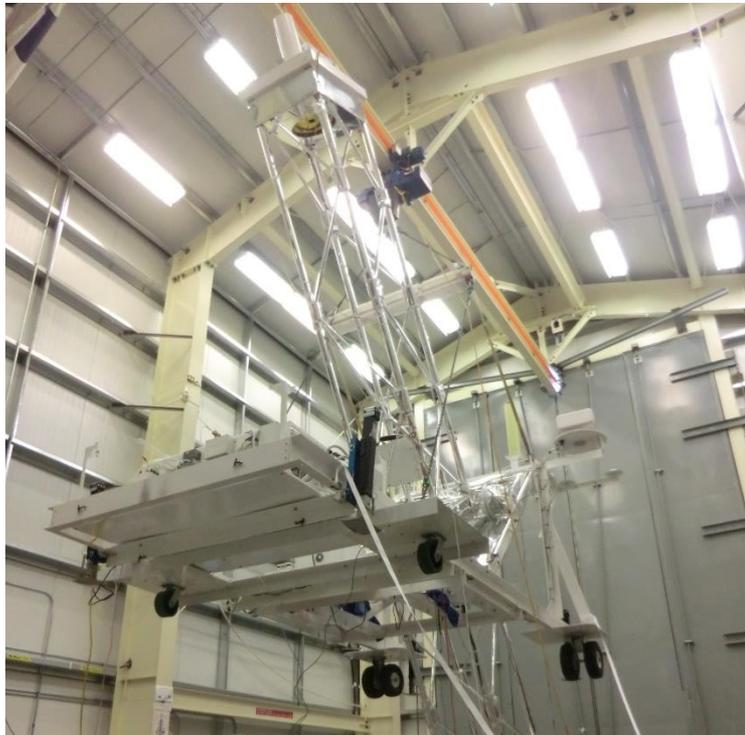


(PI: Weisskopf)

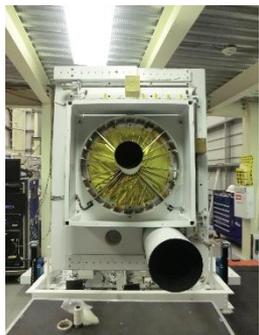
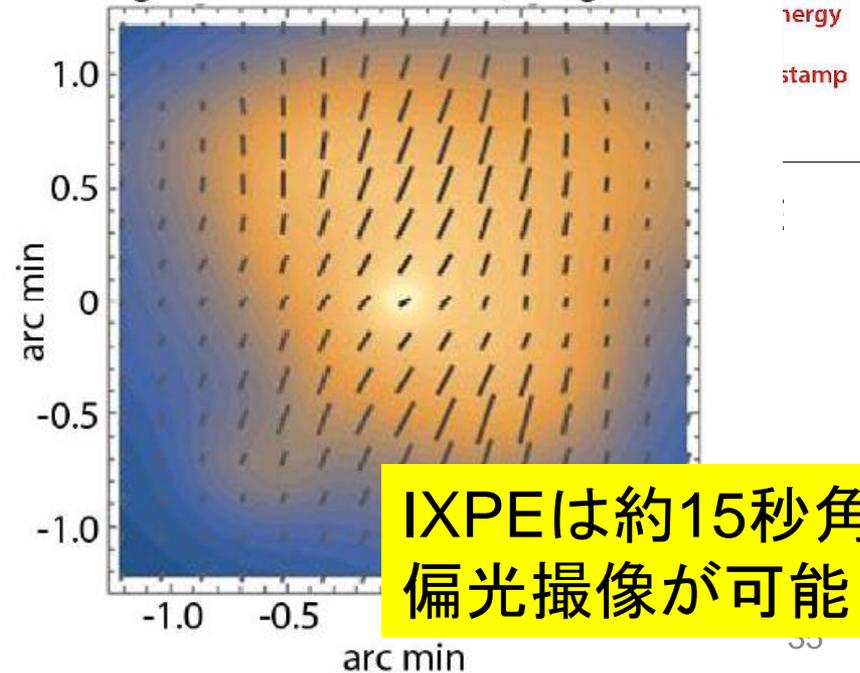
IXPE
2-8 keV

望遠鏡で集光することにより、感度を向上
日本チームも参加

将来計画：X-Calibur気球、IXPE衛星



Crab Simulated at IXPE Resolution
Segments oriented at PA; Length \propto PD



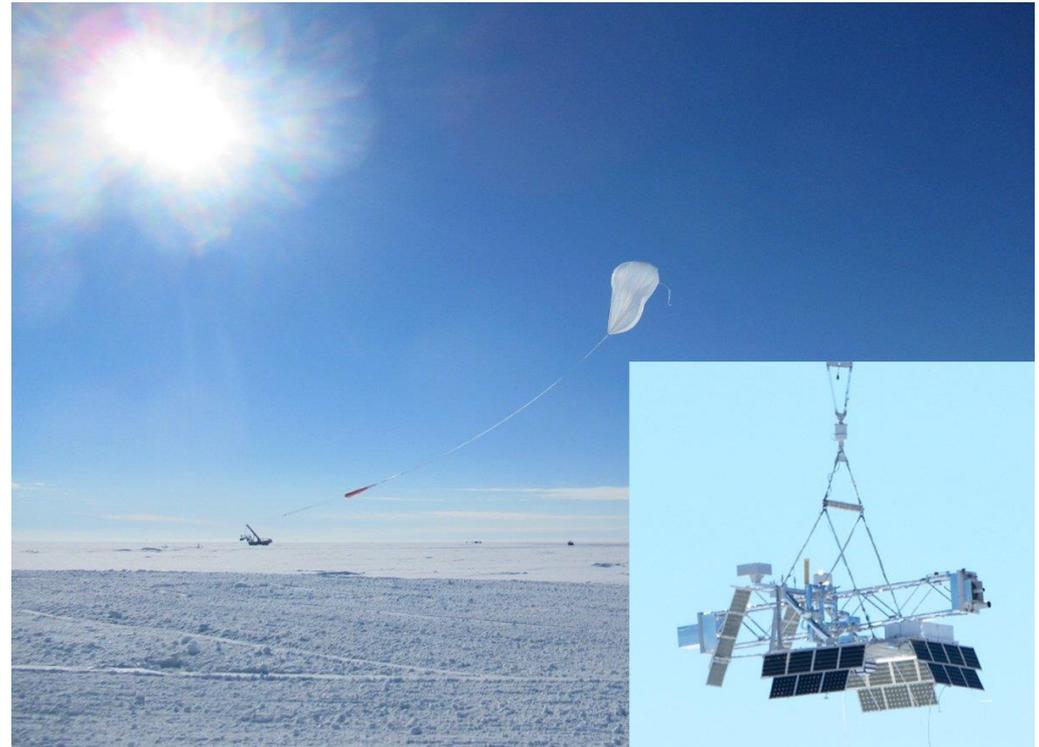
8 m





X-Calibur南極フライト(2018/12/30 – 2019/1/2)

質量降着型X線パルサー: GX 301-2, Vela X-1を観測
=> **HMXBの偏光**についても共同研究させて下さい



次回: 2021年にスウェーデン or 南極

まとめ・今後

- PoGO+は、2016年7月にスウェーデン・キルナからカナダまで7日間のフライトを実施した。
- かに星雲からの偏光を硬X線(20-160 keV)で世界で初めて検出した。
ブラックホール連星系 Cyg X-1も観測結果。
- X-CaliburのHMXBのデータ解析も進行中。
- 理論研究との比較など、是非コメントをお願いします。

**日本チームは将来計画
X-Calibur気球(20-80 keV)
IXPE衛星(2-8 keV)
に参加している。**