



広島大学

高エネルギー偏光観測で探る パルサーとパルサー風星雲の磁場構造

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



広島大学

高エネルギー偏光観測で探る パルサーとパルサー風星雲の磁場構造

高橋弘充(広島大学)、PoGO+チーム

今日の話には出てきませんが、、、
Fermi/LAT で検出されたガンマ線パルサー: 226天体
他、連星系、パルサー風星雲
また次の機会に多波長観測などの議論をさせて下さい



上空40kmで気球は直径100m

Jan-Erik Stromberg



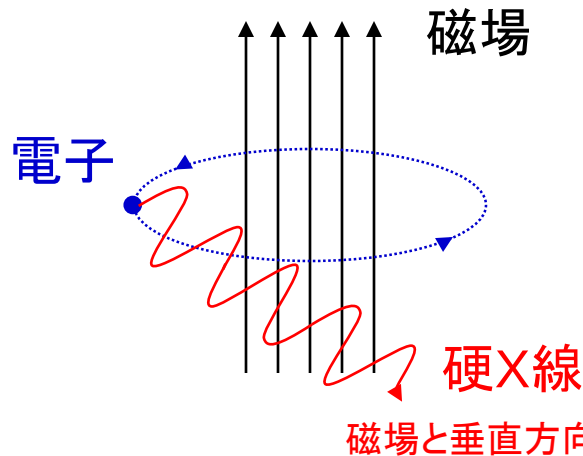
目次

- 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
AstroSat衛星の観測結果
- IXPE衛星, X-Calibur気球による将来観測



偏光(偏波)から分かること(1)

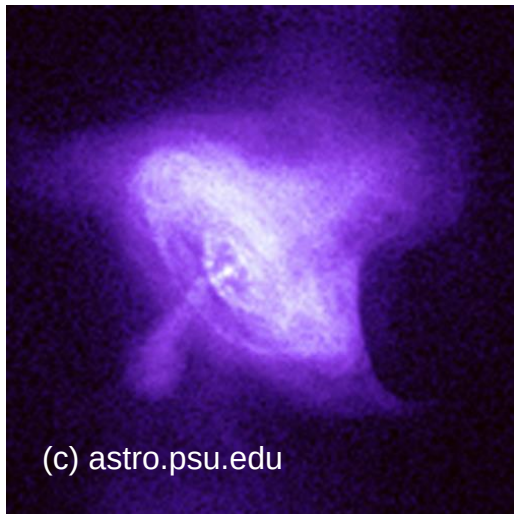
電子+磁場 => シンクロトン放射



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



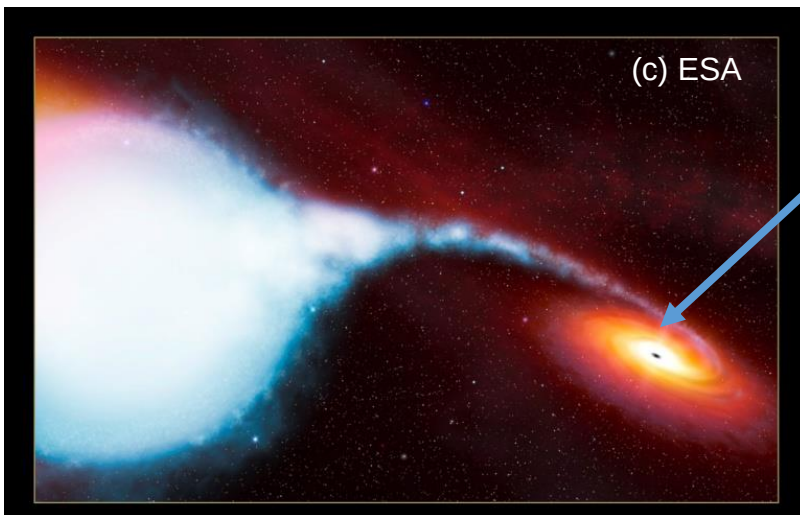
反射+川底
(偏光+無偏光)



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



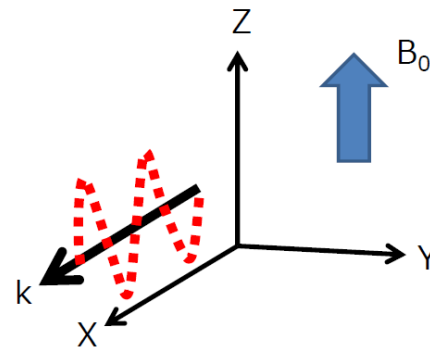
偏光(偏波)から分かること(3)

強磁場中性子星のごく近傍(表面付近)でのQED効果

Polarization Eigenmodes

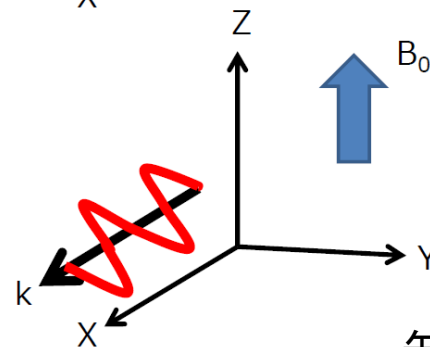
Ordinary Mode
(O-mode)

$E // k - B_0$ plane



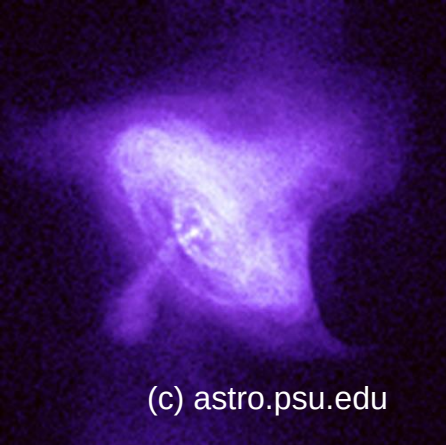
Extraordinary Mode
(E-mode)

$E \perp k - B_0$ plane



矢田部さん

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

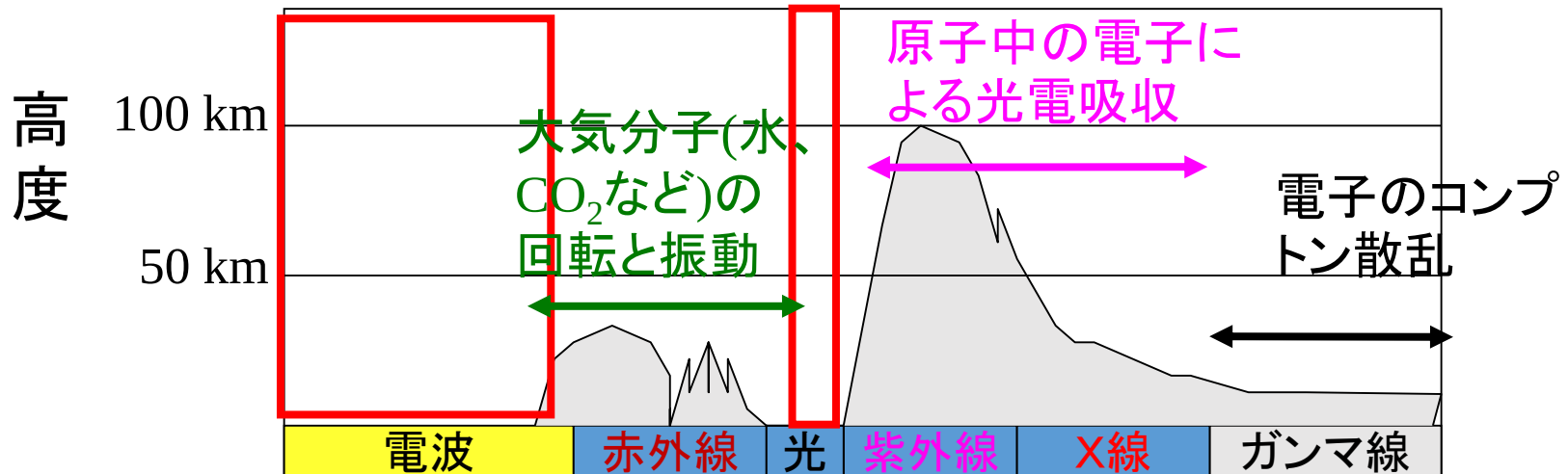
硬X線、ガンマ線はまさに開拓中の分野



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**など飛翔体を用い、**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)

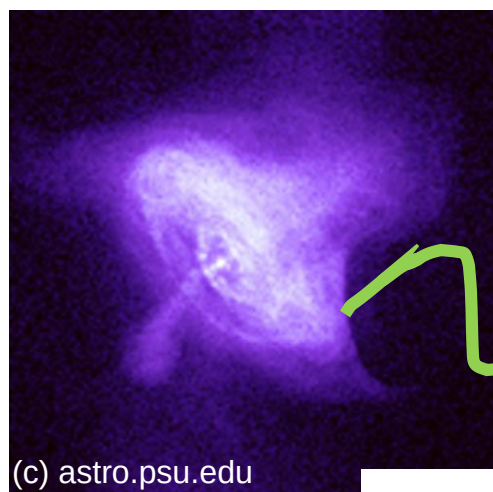
- ⇒ X線で明るい「かに星雲」、「Cyg X-1」は北天からしか観測できない
南天は、銀河中心やガンマ線で明るい「Velaパルサー」が観測可能

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



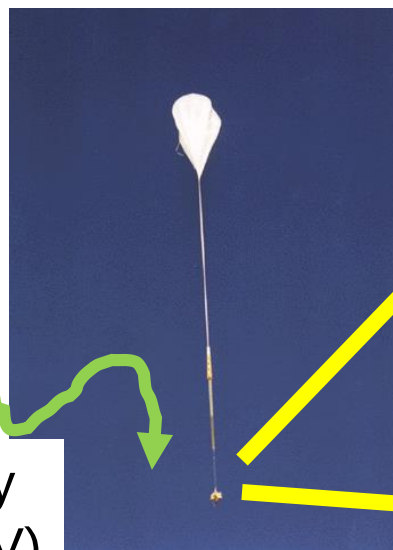
X線・ガンマ線 偏光観測

- **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, ...

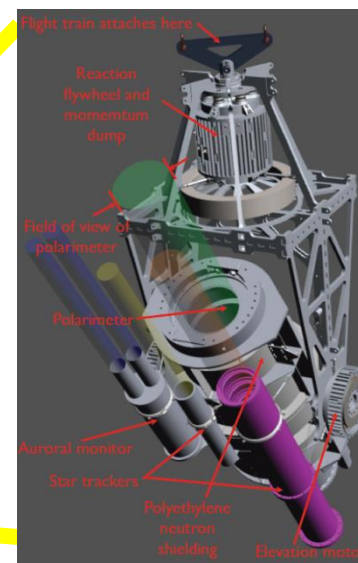


(c) astro.psu.edu

Gamma-ray
(20-160 keV)



~40 km



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



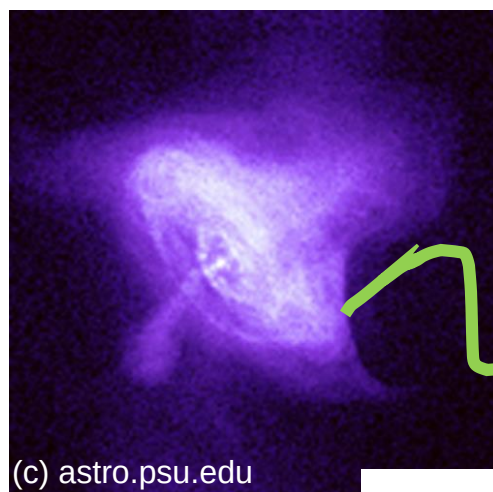
X線・ガンマ線 偏光観測

- **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
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**
- 他に星雲 (2.6/5.2 keV と 200 keV) にも観測がなされたが、PoGO+, X-Calibur, 「ひとみ」/SGD, AstroSat, IXPE, ...

SPHiNX衛星
ガンマ線
バースト用
(我々2021~)

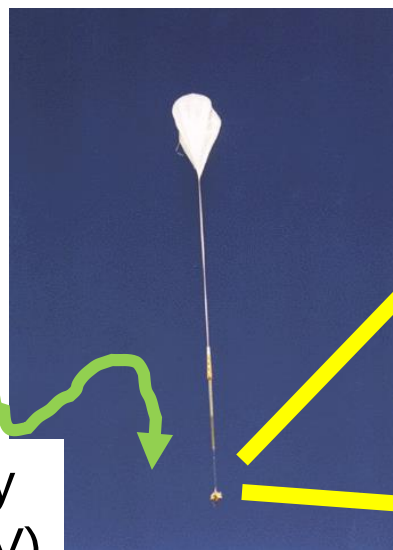
2015~

2021~

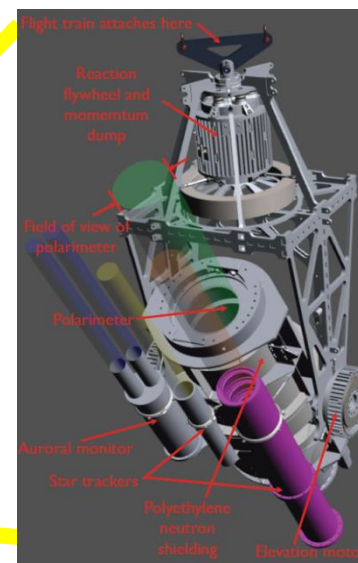


(c) astro.psu.edu

Gamma-ray
(20-160 keV)



~40 km

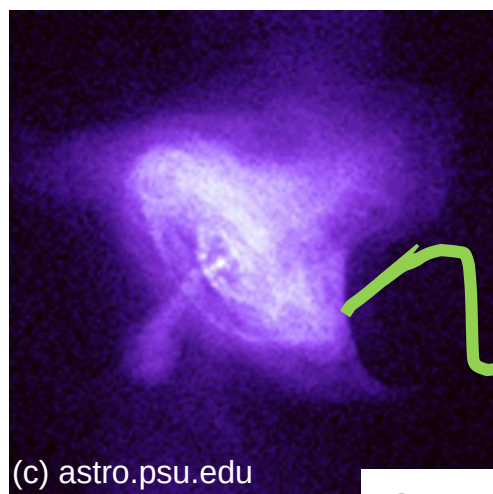


Weight (wo ballast) : ~1750 kg
Power : ~300 W (Instrument)
~200 W (Gondola, etc.)

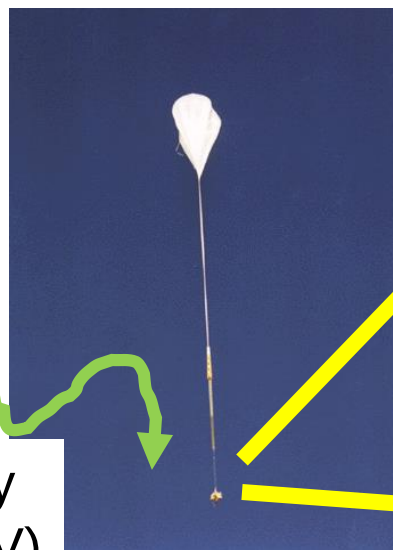


Polarized Gamma-ray Observer (PoGO+)

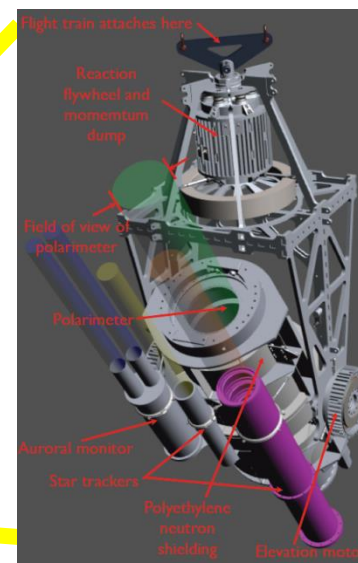
- **PoGO+ 気球実験は、20-160 keV の硬X線帯域で、1 Crab の天体から 10% の偏光を検出する能力を持つ。**
- 日本とスウェーデンの国際共同プロジェクト。
- スウェーデンのキルナから放球し、かに星雲と Cyg X-1 を観測。



Gamma-ray
(20-160 keV)



~40 km

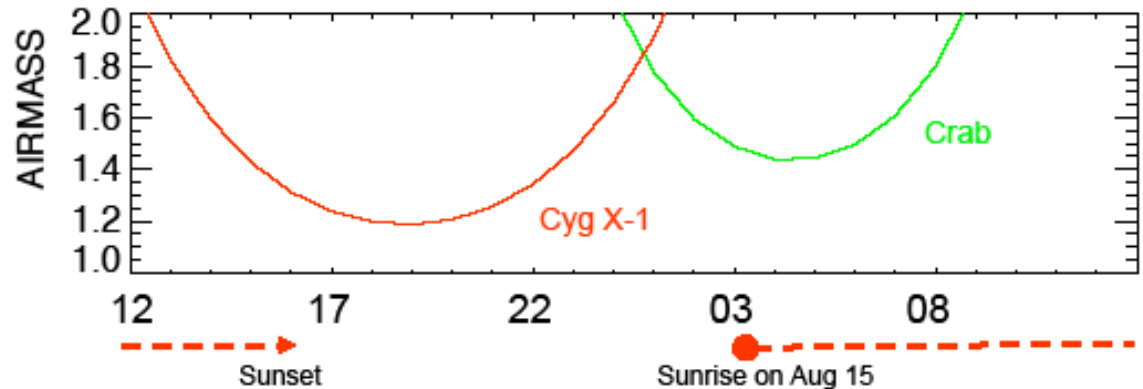


Weight (wo ballast) : ~1750 kg
Power : ~300 W (Instrument)
~200 W (Gondola, etc.)

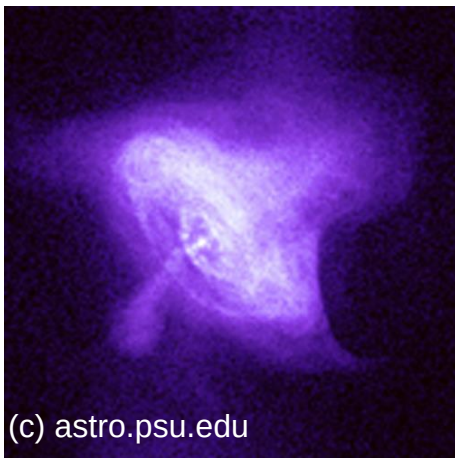


Pathfinder Flight from Sweden

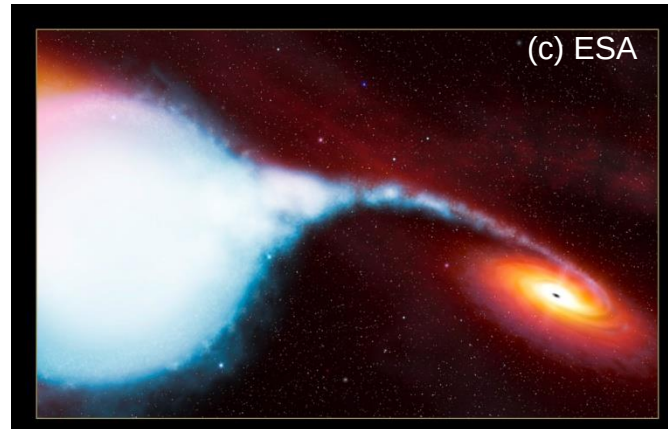
Flight Plan (1-day long)



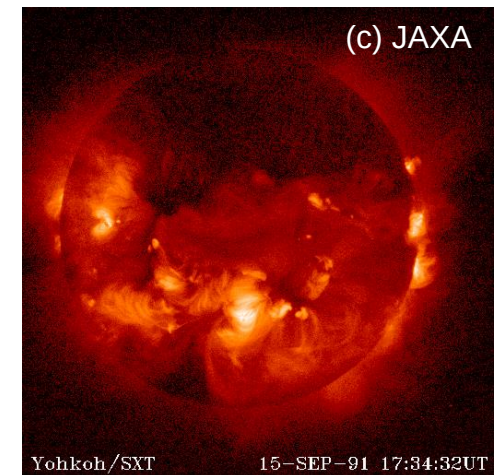
Crab nebula (Pulsar)



Cyg X-1 (Black hole binary)



Solar flare



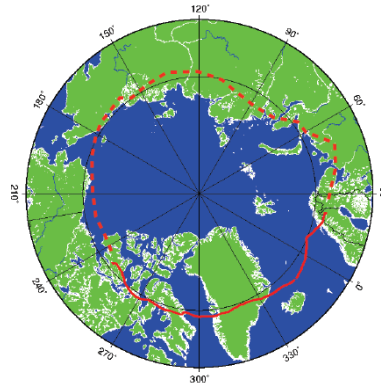
PoGO+の特徴

- 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)



PoGOLite/PoGO+の放球記録

- 2010年夏： 1-2 日間のフライト@スウェーデン、キルナ上空
→ しかしながら、2010年4月にオーストラリアであったNASAの放球失敗の事故を受けて、延期されていた。



- 2011年7月6日 23:57(UTC) 放球成功 @キルナ
フライトはカナダまでの約 5 日間を予定していた。

→ しかしながら、気球から He がリークし、約5時間で地上へ戻ってきた。
我々の検出器自身は上空でも正常に動作した。

- 2012年7月： 北極圏を周回する2週間のフライト@キルナ

→ しかしながら、悪天候のために打ち上げ機会に恵まれず。。。

- 2013年7月12日～26日：キルナ

→ 北極圏を周回する2週間のフライト(スウェーデン～ロシア)に成功！
しかし、偏光計は電源系の不具合で3日間のみ動作

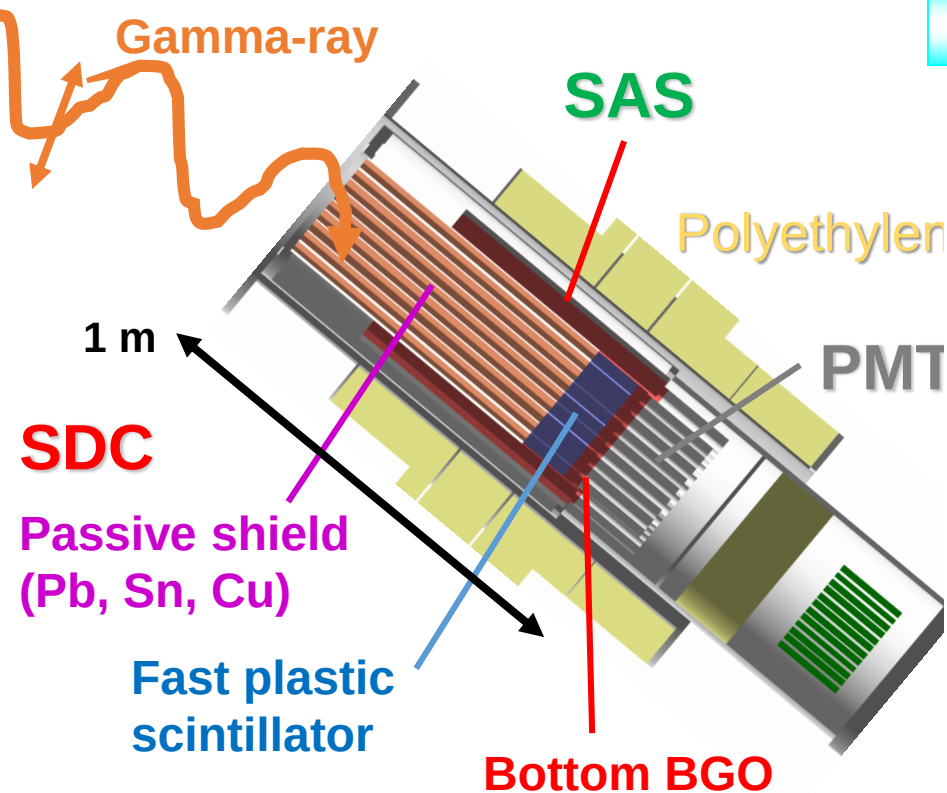
- 2016年7月12日～18日：キルナ

→ 5日間以上のフライトを予定 => 7日間(7回Crab,6回Cyg X-1)実施
2013年の不具合の解決、偏光計の改良(感度の向上)

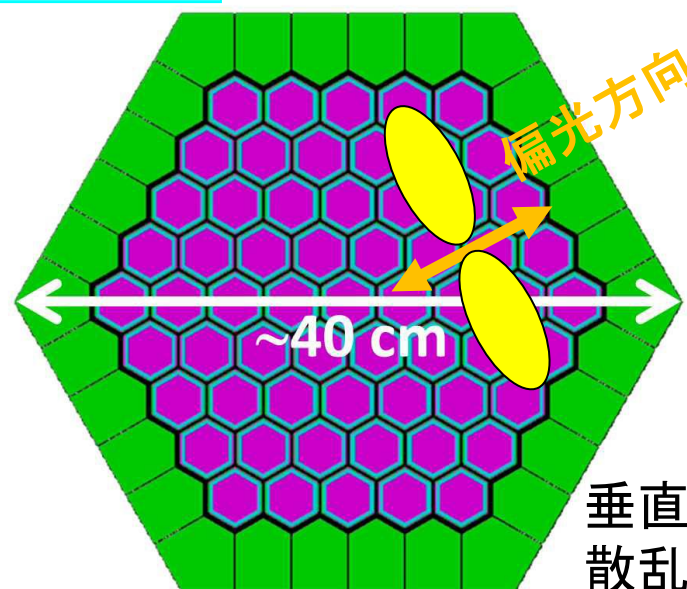


偏光検出(コンプトン散乱:10-1000 keV)

- **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。



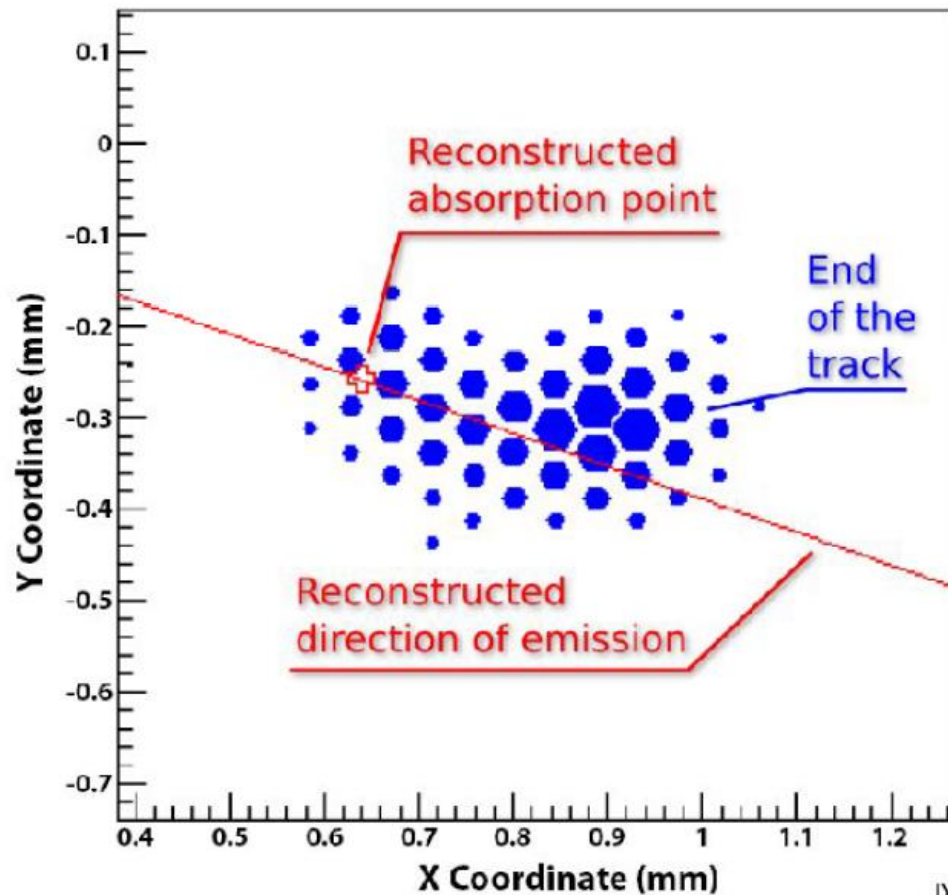
Top view



垂直方向に
散乱されやすい

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)

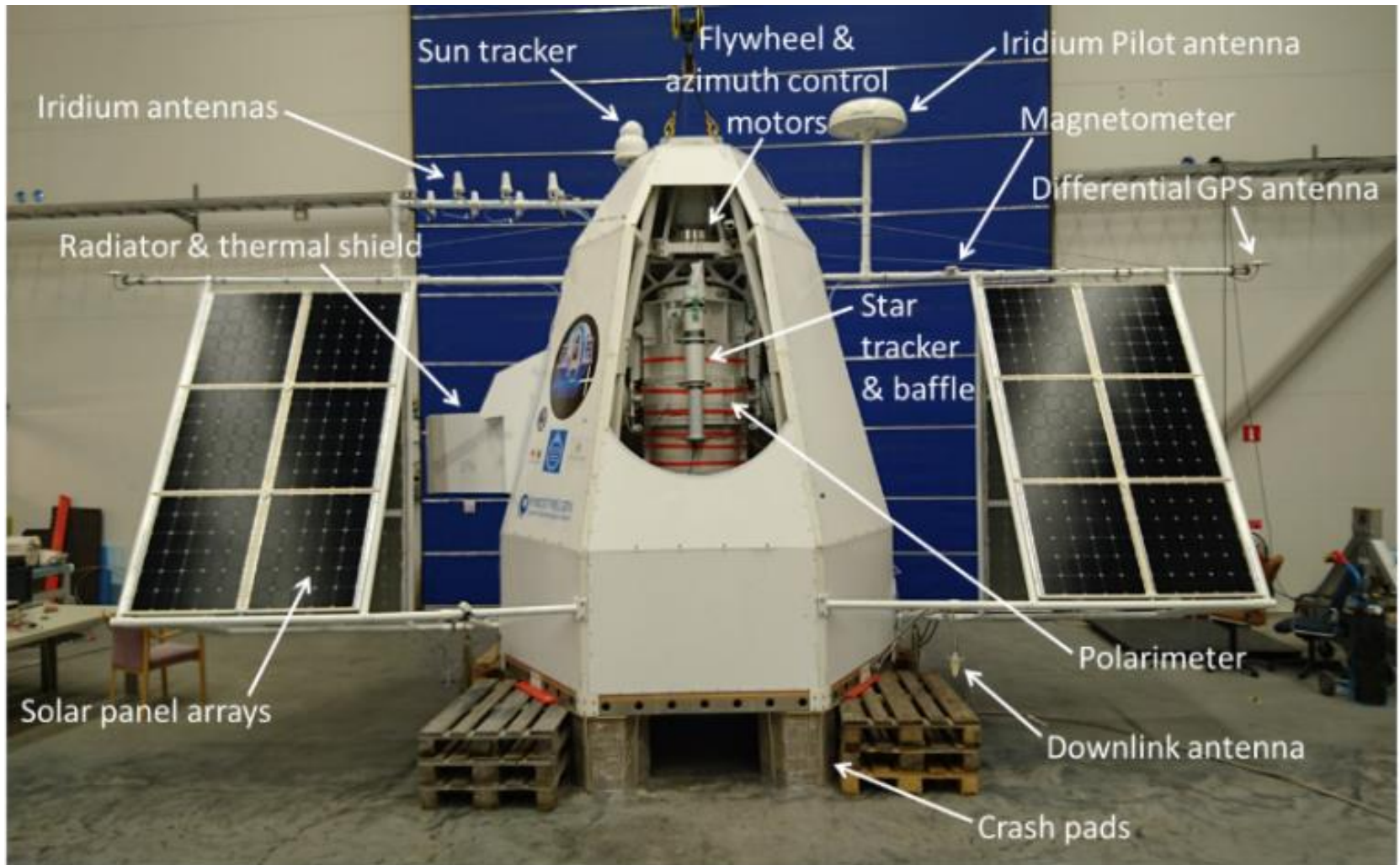


光電吸収時に
光電子は偏光方向へ飛ばされる
=> 偏光方向と平行に
多くのイベントが検出される

位置分解能の良い
ガス検出器が利用される



PoGO+ Overall View (2016)





PoGO+ Overall View (2016)

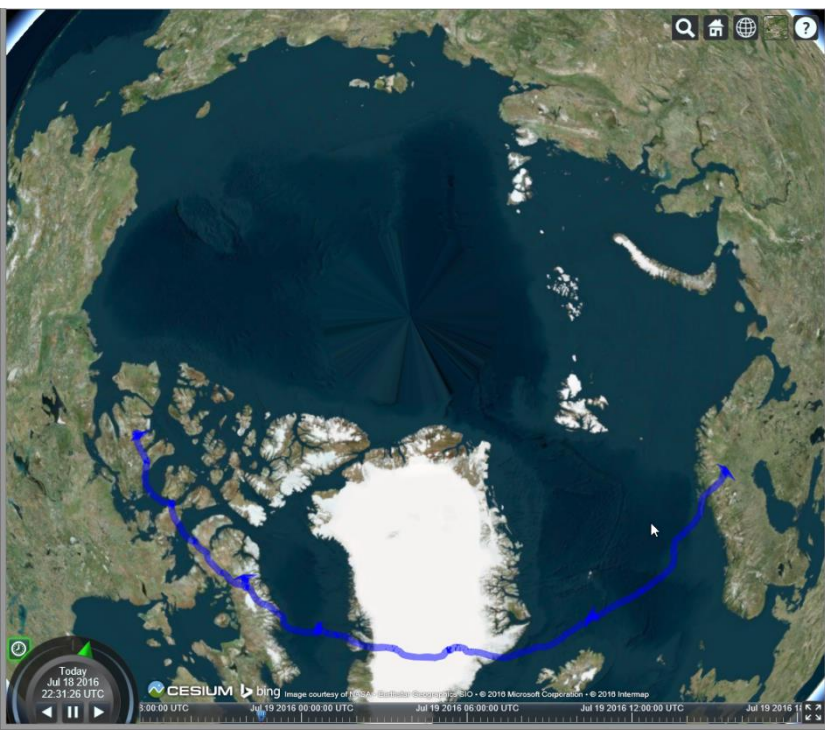


2016年

- ・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ったため、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

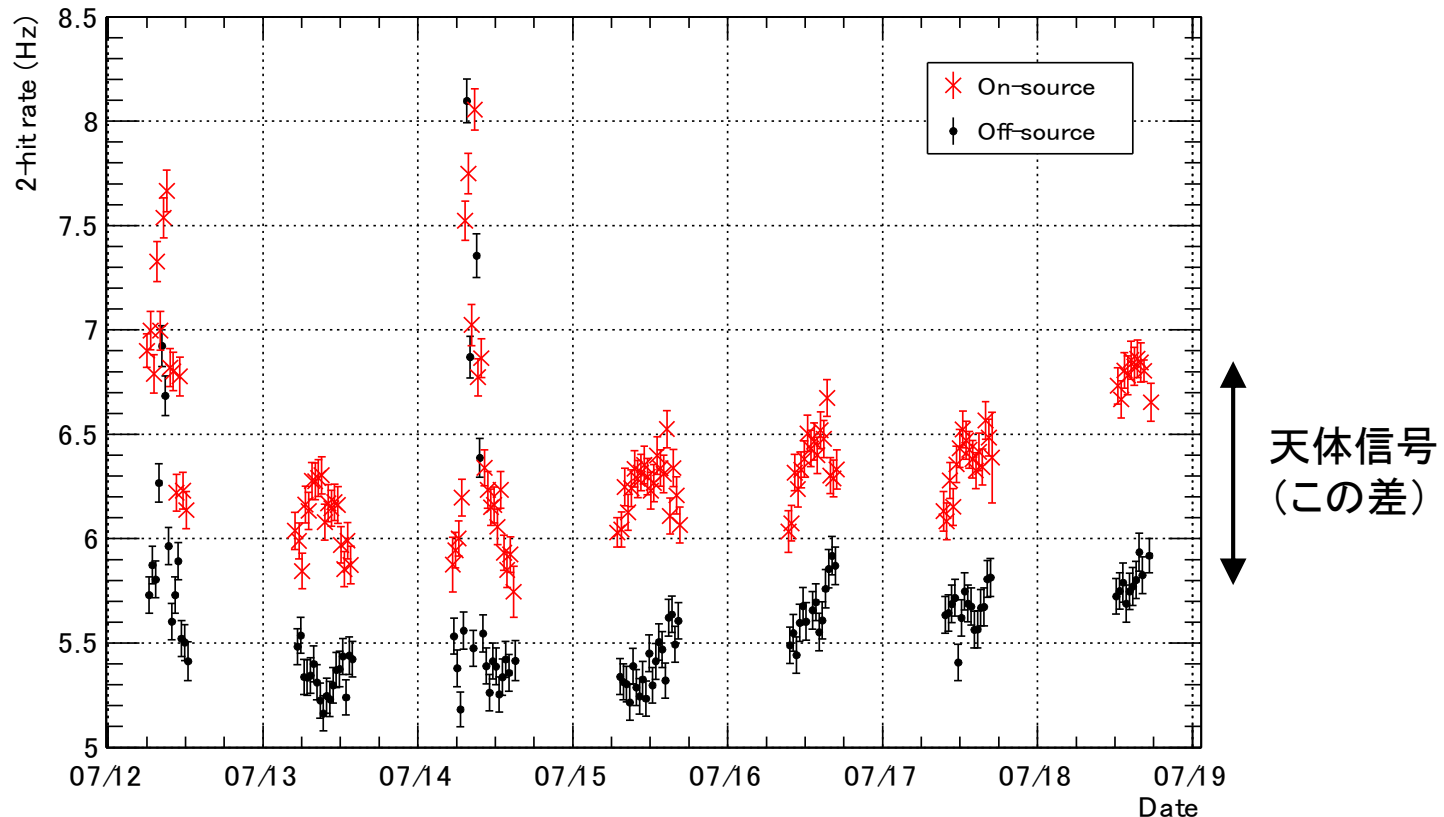




動画(Youtube):スウェーデン宇宙公社



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
- ・黒: 左右 5° ずらしたバックグラウンド観測

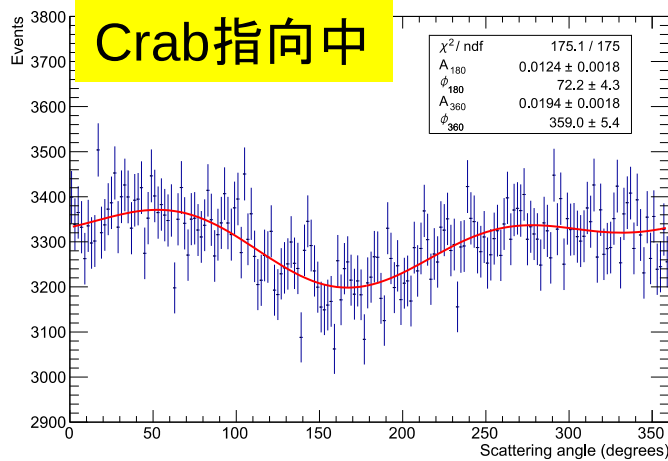
#15分おきに、天体 $\leftrightarrow$ バックグラウンド観測を行き来している



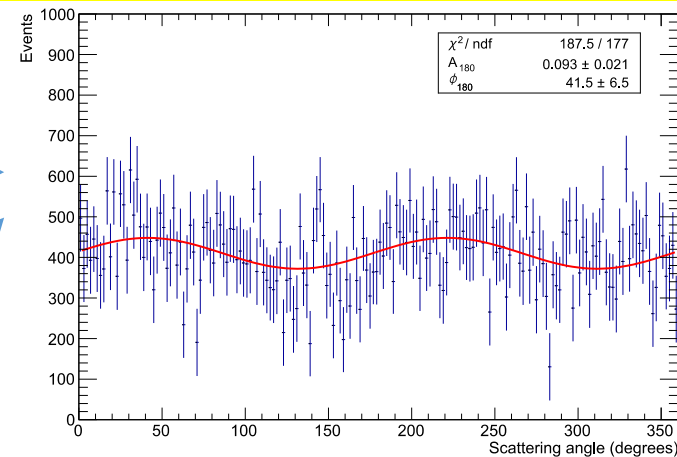
Crab観測 (モジュレーションカーブ)

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)

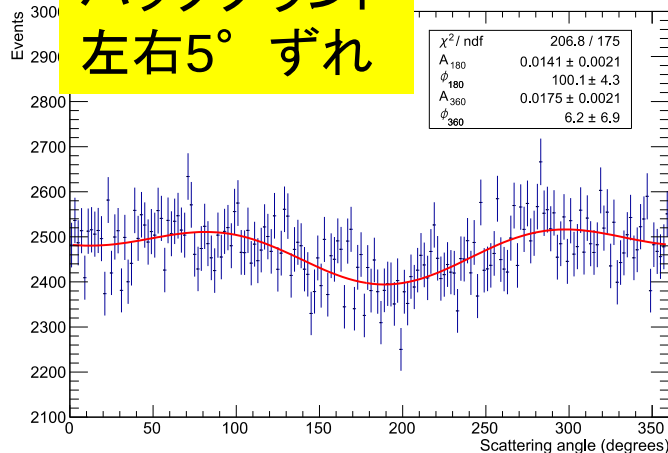
Crab指向中



正味の天体信号 (= 左上一左下)



バックグラウンド
左右5° ずれ

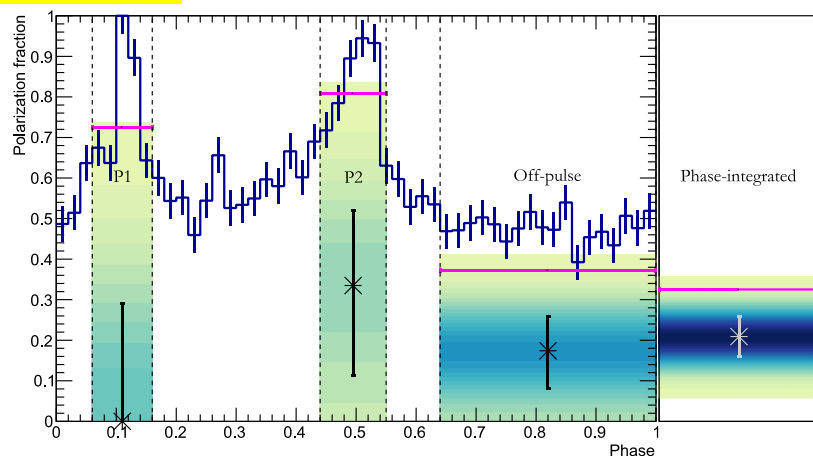


- ・バックグラウンドが平坦ではない
360° 成分が卓越
←検出器に下方から中性子バックグラウンド
- ・正味の天体信号:
180° 成分(偏光信号)のみで再現される
(バックグラウンドを精度良く差し引けている)

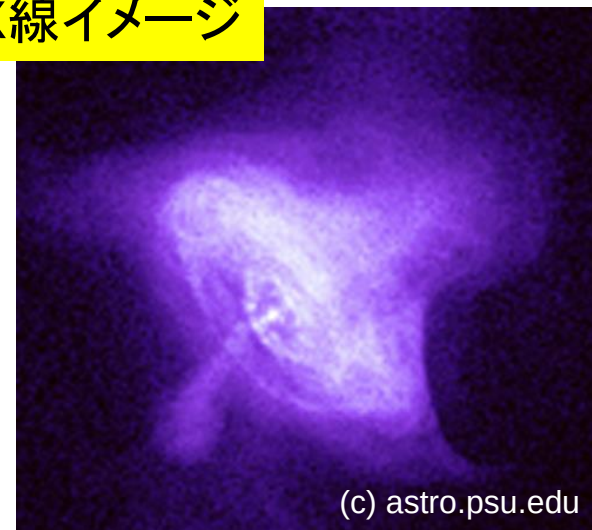


Crab観測(偏光度、偏光方位角)

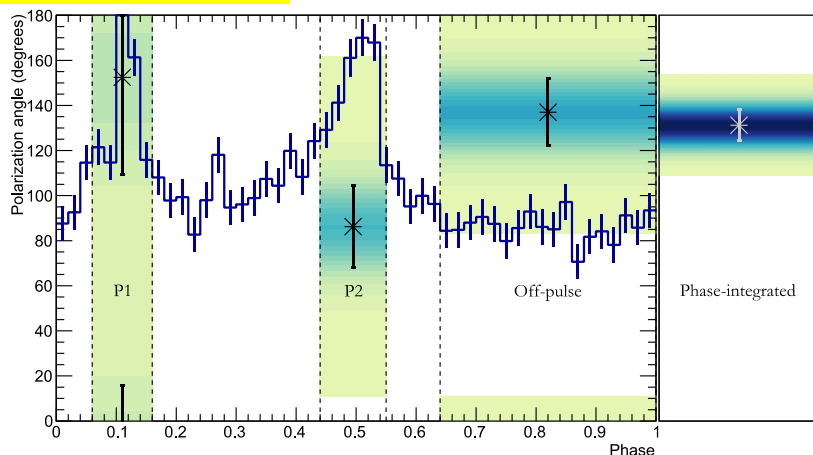
偏光度



X線イメージ



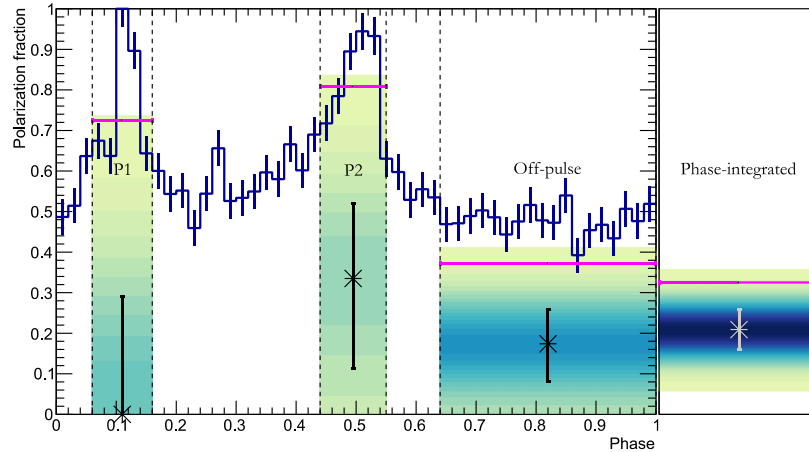
偏光方位角



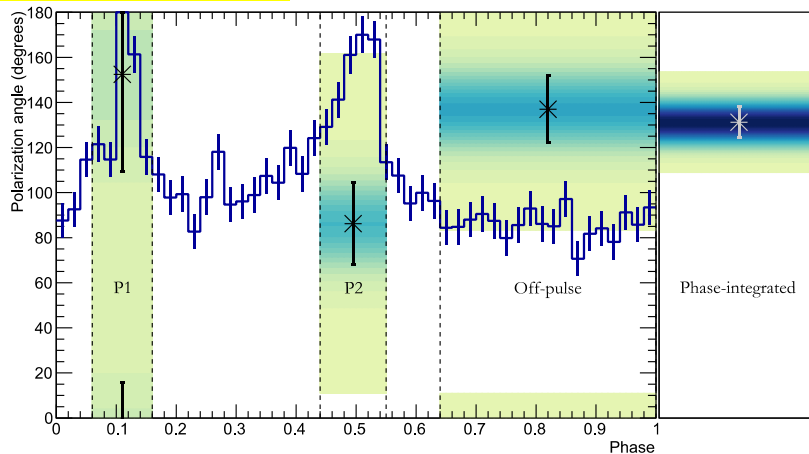
- ・偏光度 $20.9 \pm 5.0\%$
- ・偏光方位角 $131.3 \pm 6.8^\circ$
- ⇒ パルサー回転軸(ジェット方向)と一致
- ⇒ TeV電子がトーラス方向にそろった磁場によりシンクロトン放射して硬X線
- ・パルス位相に応じた変化: 統計不足

他波長との比較

偏光度



偏光方位角



偏光度

ガンマ線？

~20%

可視

偏光方位角

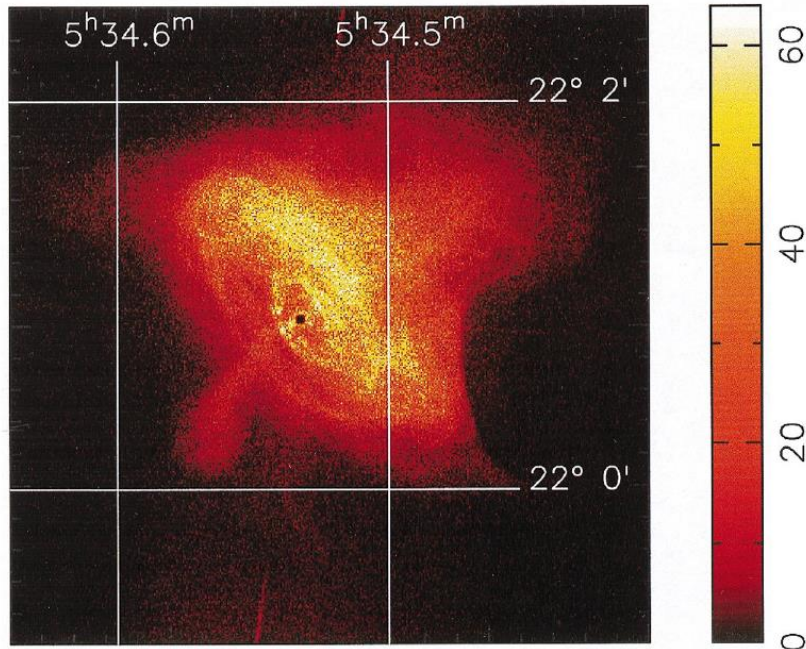
~130°

X線~硬X線

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

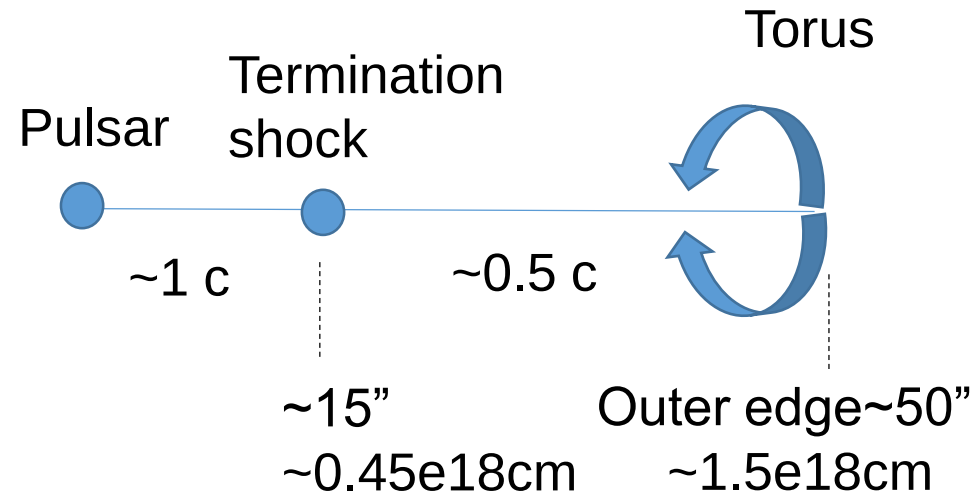
かに星雲のジオメトリ (assuming 2 kpc)

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)

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

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

または逆に解いて、

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

シンクロトロン輻射: 放射率 $\rightarrow$ 粒子の寿命

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

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

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

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): $\mathcal{E}$	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

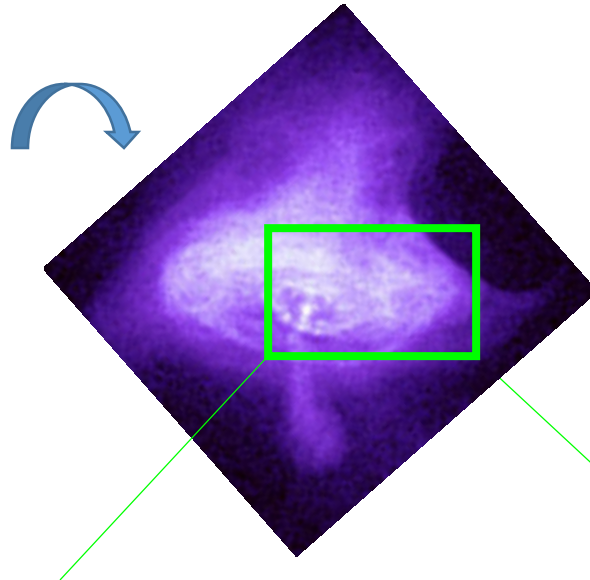
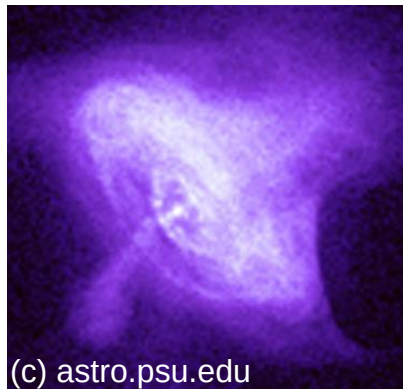
Particles emitting X-ray (OSO-8): 十分にトーラスを満たしているはず
 (X線イメージでも、当然トーラスまで明るい)

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

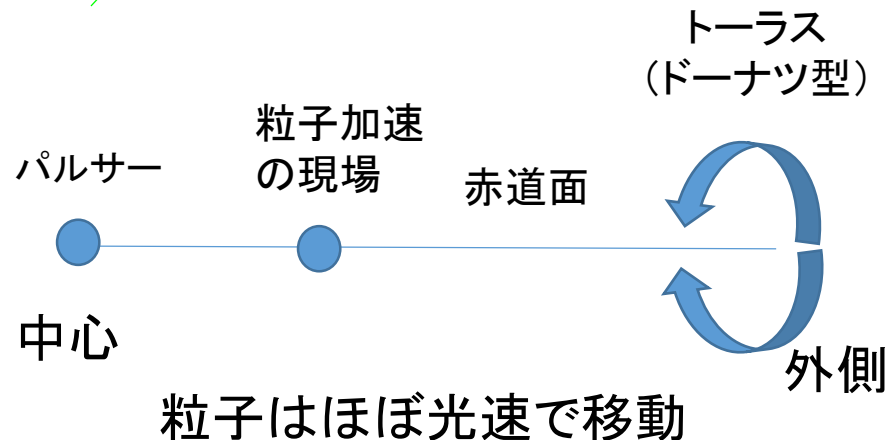


X線を放射する粒子: 寿命~12年
=> トーラスを満たしている

巻き上げられ乱れた構造

硬X線 : ~3年

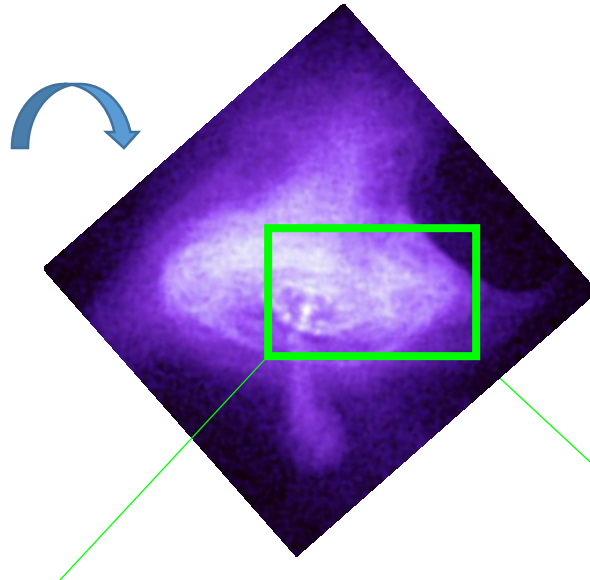
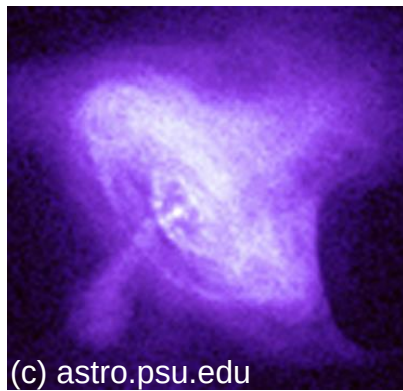
=> 赤道面にしか存在しない
より中心に近く整った構造



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

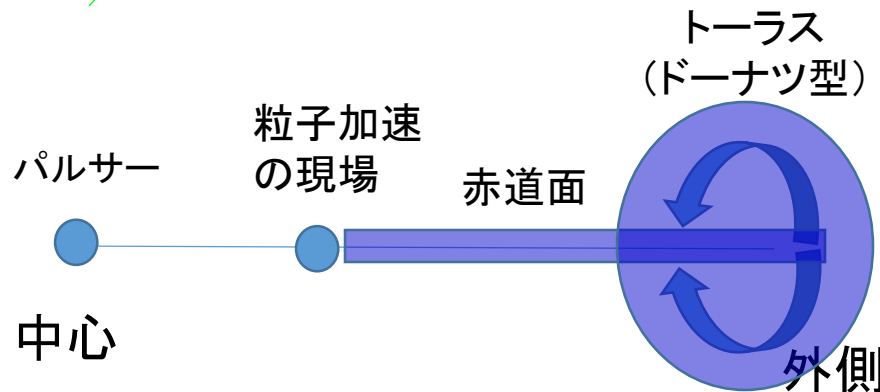


X線を放射する粒子: 寿命~12年
=> トーラスを満たしている

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

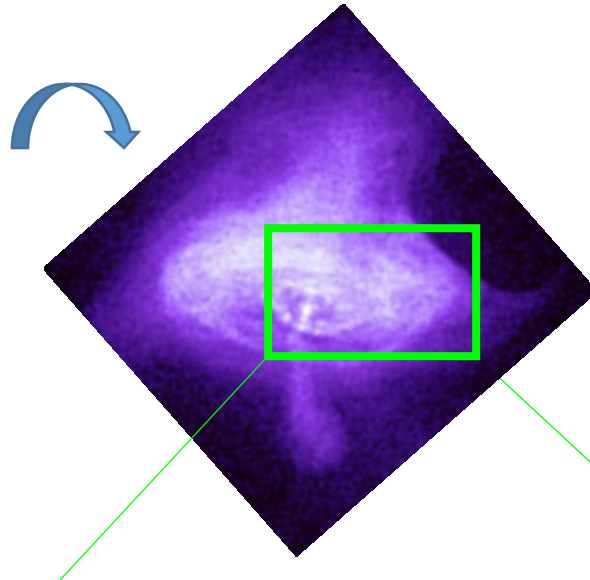
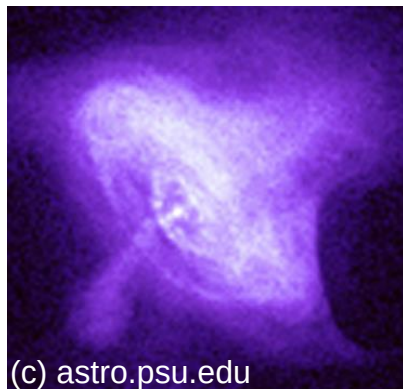


磁場の乱れ具合
X線イメージから
柴田先生他 2003

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

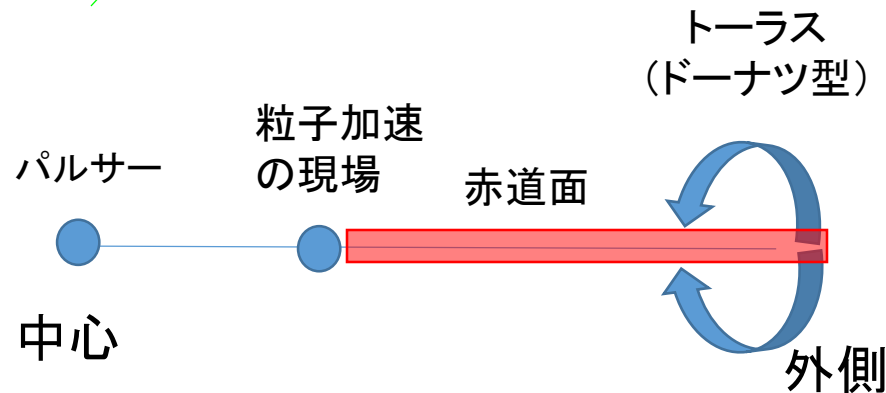


X線を放射する粒子: 寿命~12年
=> トーラスを満たしている

巻き上げられ乱れた構造

硬X線 : ~3年

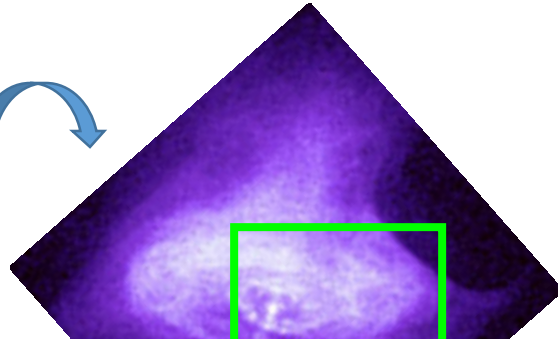
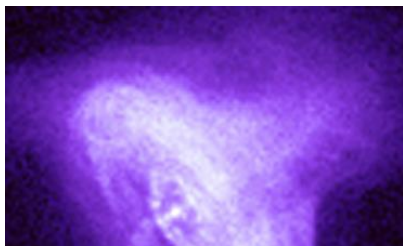
=> 赤道面にしか存在しない
より中心に近く整った構造



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



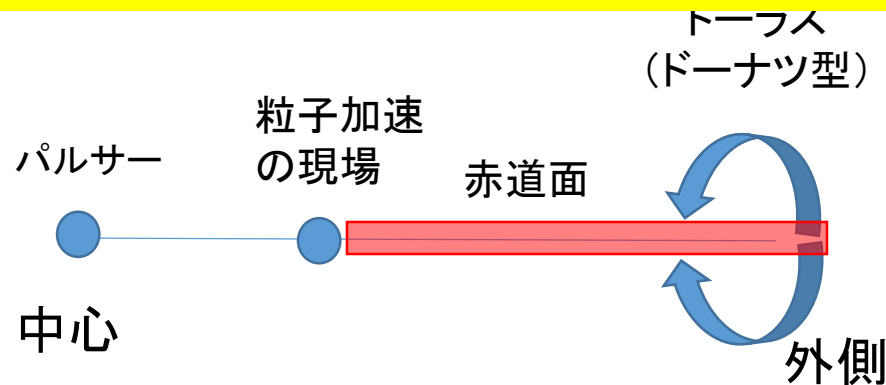
X線を放射する粒子: 寿命~12年
=> トーラスを満たしている
巻き上げられ乱れた構造

硬X線 : ~3年
=> 赤道面にしか存在しない
トーラスに近い整った構造

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？

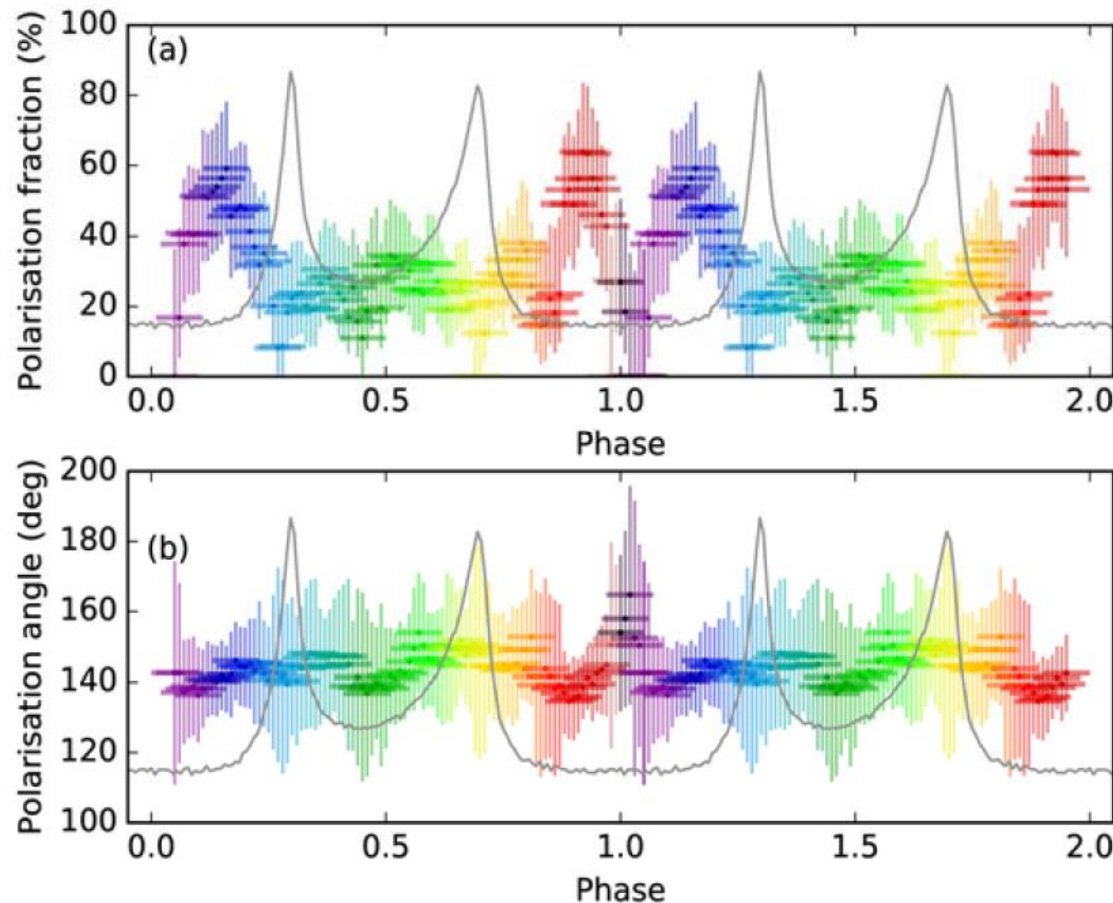
⇔ 理論研究と比較していきたい
(ので、コメントお願いします)





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

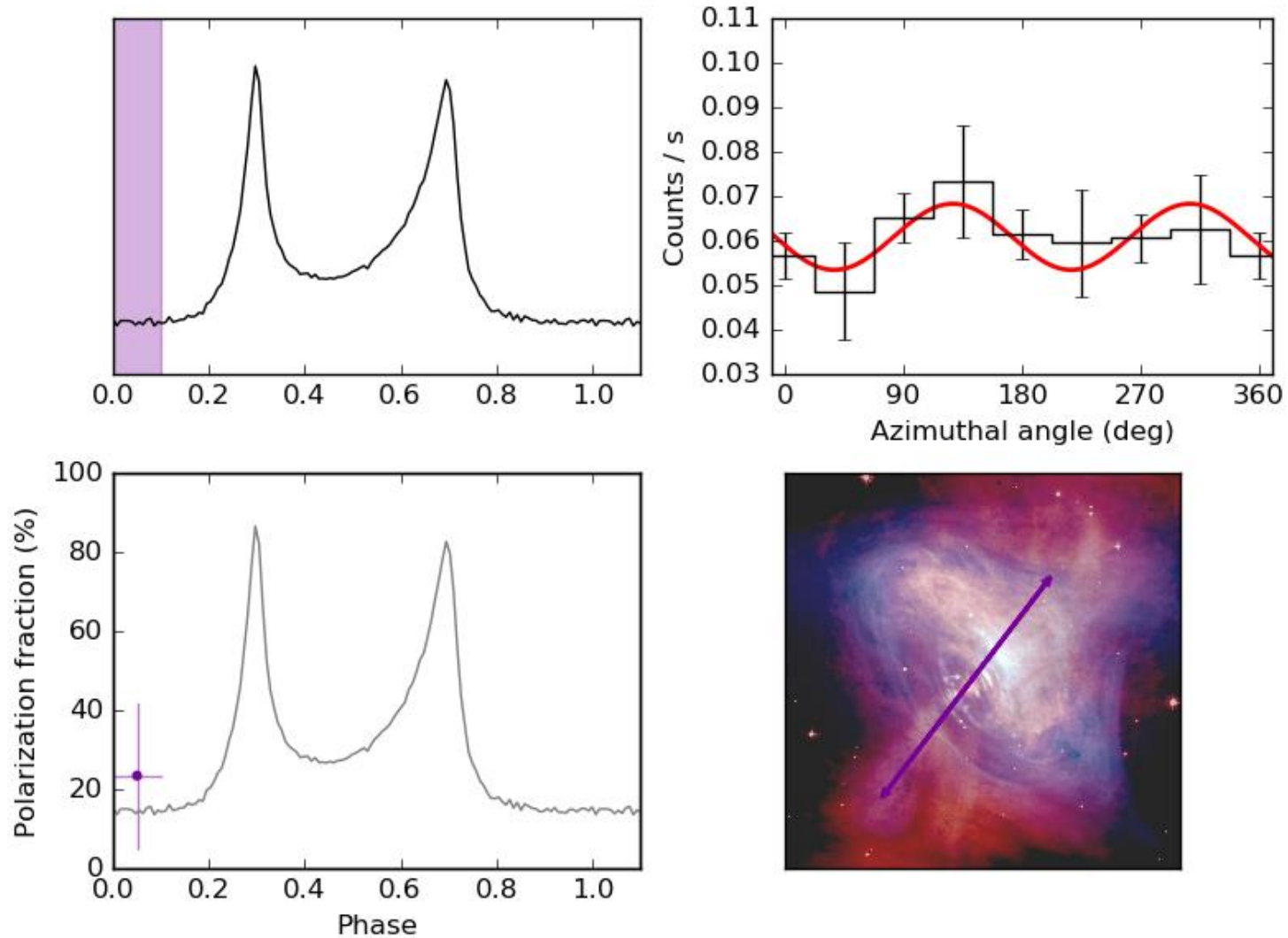
	<i>PoGO+</i>	<i>AstroSat CZTI</i>
Platform	stratospheric balloon	satellite
Overburden	5.8 g/cm ² average	0 g/cm ²
Detector	plastic scintillator	CZT
Pixels, geometry	61, hexagonal	16384, square
Geometrical area	378 cm ²	976 cm ²
Field-of-view	~2°	~90°
Energy band	18–160 keV	100–380 keV
Observation	Jul.'16	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



AstroSat衛星(100-380 keV)の報告

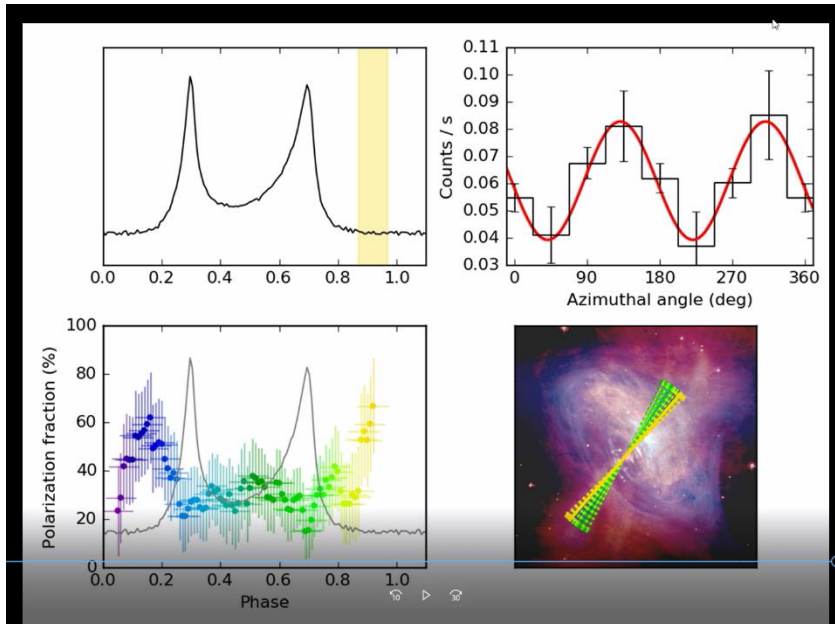
Vadawale et al. 2017



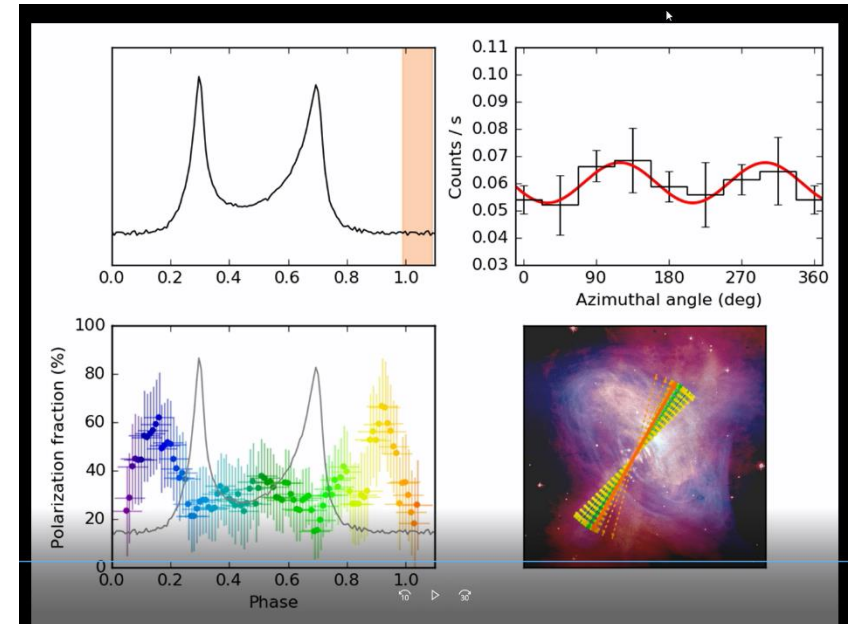
Off-pulseの位相で、偏光度が変化???

偏光度：最大と最小の比較

Vadawale et al. 2017



最大

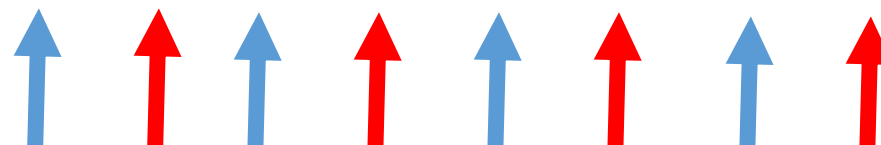
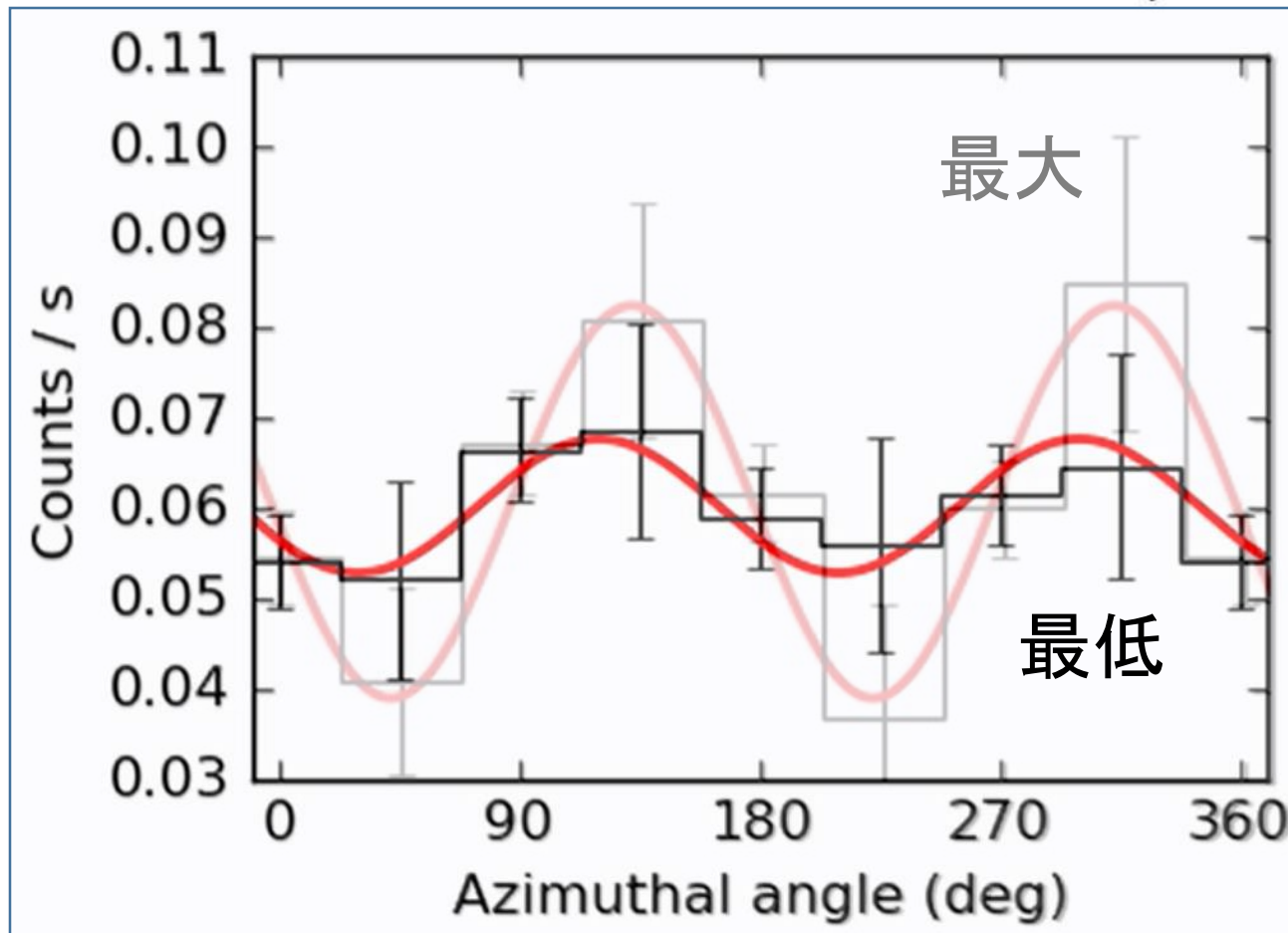


最小



偏光度：最大と最小の比較 (モジュレーションカーブ)

PoGO+の観測データで同じ兆候が見えるか論文化中



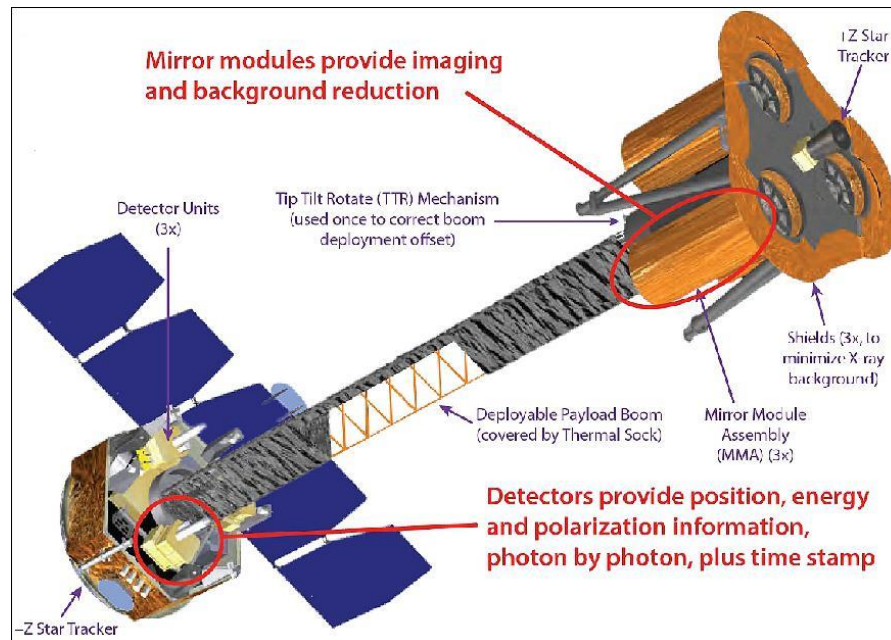
ほぼ一致
1 σ で一致

将来計画：X-Calibur気球、IXPE衛星



WUSTL

X-Calibur
20-80 keV



IXPE

IXPE
2-8 keV

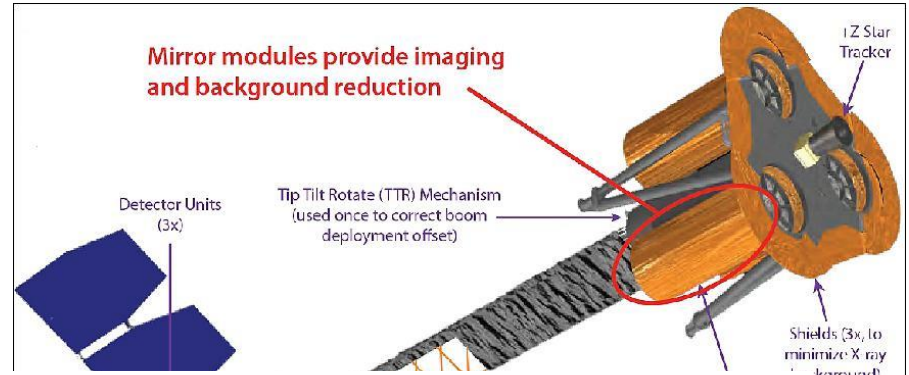
望遠鏡で集光することにより、感度を向上

将来計画：X-Calibur気球、IXPE衛星

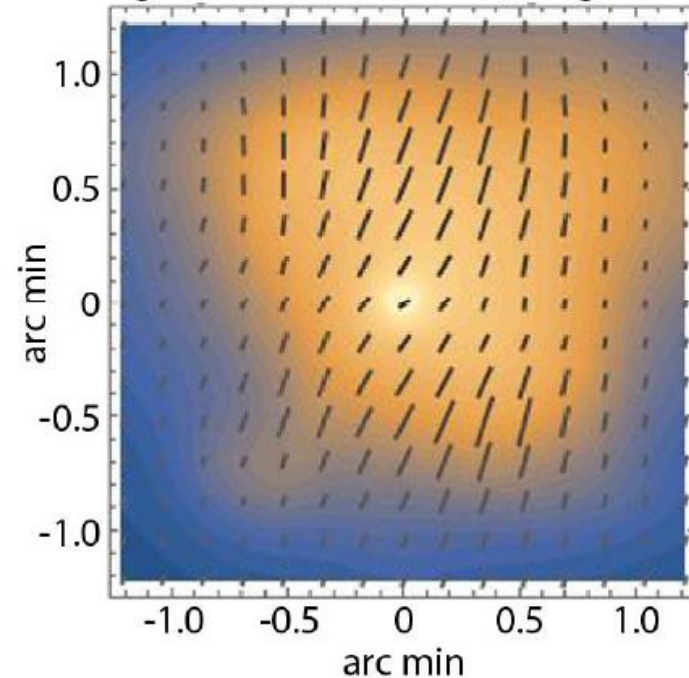


WUSTL

IXPEは約15秒角で
偏光撮像が可能



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



energy
stamp



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。はくちょう座X-1のデータ解析は進行中。
- 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
IXPE衛星
SPHiNX小型衛星
に参加している。

**Fermi/LAT で検出されたガンマ線パルサー: 226天体
=> 公開データなので、ぜひ利用して下さい**



JAXA偏光リサーチグループ

数年のうちに打ち上げ予定

- 32研究者(観測、理論)

ガンマ線バースト

- GAP => GAP2
- TSUBAME
- LEAP (US)
- SPHiNX (Sweden)

指向観測

- Hitomi/SGD
- PolariS
- **IXPE (US) => 場所ごとのX線偏光**
- e-ASTROGAM (Europe)
- AMEGO (US)

大気球

- PoGOLite/PoGO+ (Sweden)
- **X-Calibur (US) => 高感度な
硬X線偏光**

是非ご参加下さい