

チャンドラX線天文衛星を用いた かに星雲の研究

森 浩二 (Pennsylvania State University)

共同研究者

- David N. Burrows, George G. Pavlov (PSU)
- J. Jeff Hester (Arizona State University)
- 柴田 晋平 (山形大学)
- 常深 博 (大阪大学)

本日の講演の概要

1. かに星雲とその物理
2. かに星雲の観測的進展
3. かに星雲の理論的進展
4. まとめ

The Crab Nebula
Multi-wavelength view

X-rays (Chandra)
Optical (HST)
Radio (VLA)

1.1 カニ星雲とは

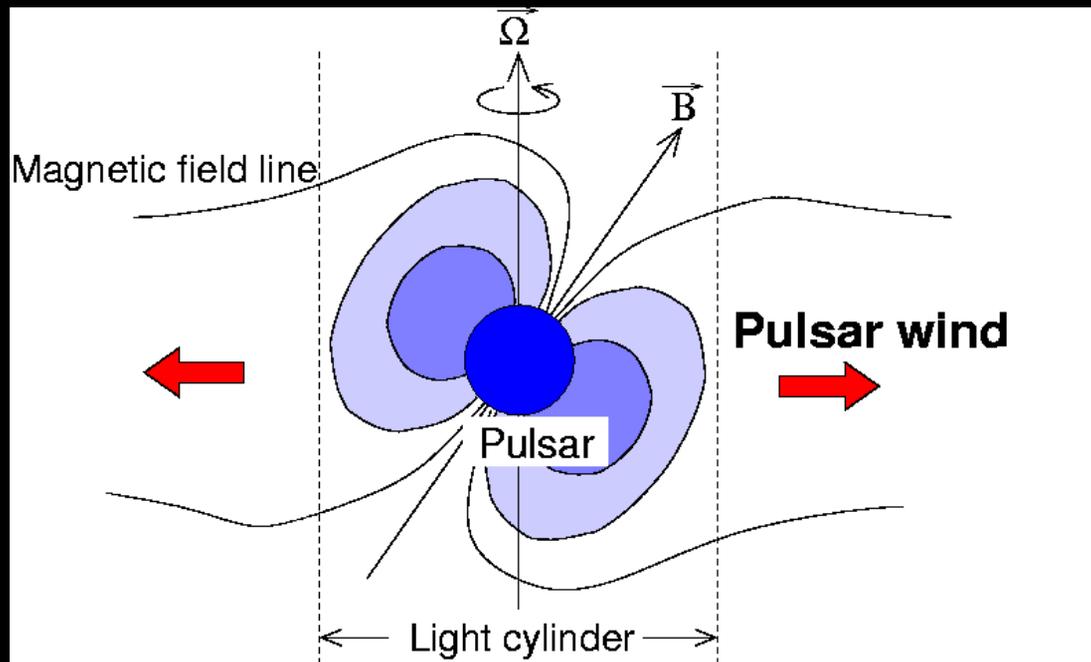


カニ星雲の可視光画像

ヨーロッパ南天天文台 (1999)
青 (429 nm), 緑 (657 nm),
赤 (673 nm; [S II])

- 西暦1054年に爆発した超新星の残骸
- 銀河中心と反対に位置し、光度 10^{38} erg/s、距離 2kpc (1 kpc = 0.01 pc)
- カニ星雲の構成要素
 - パルサー (中性子星)
 - イジェクタ (星の破片)
 - **パルサー星雲**
–*Pulsar wind nebula*–

1.2 パルサー風 *-Pulsar wind-*



- パルサーの高速回転 (30Hz) と強い磁場 (10^{12}G) により生成された粒子が、磁場と共に回転し、遠心力により加速される (ローレンツ因子 $\sim 10^6$!)
- 回転速度が光速を超えるところ (Light cylinder) で、粒子と磁場が外向きに吹き出す

パルサー風

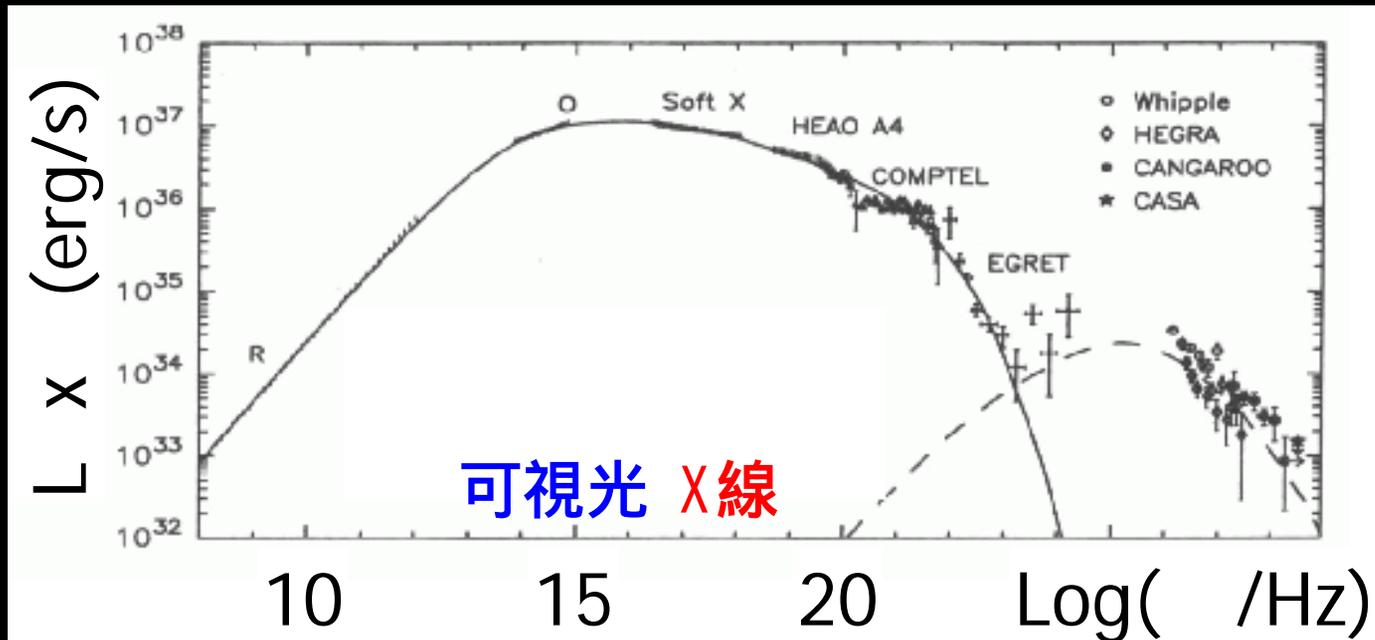
1.3 パルサー星雲 *-Pulsar wind nebula-*



- 周囲のガス圧とバランスするところで衝撃波が形成され、圧縮加熱されたパルサー風がシンクロトロン放射で輝く

パルサー星雲

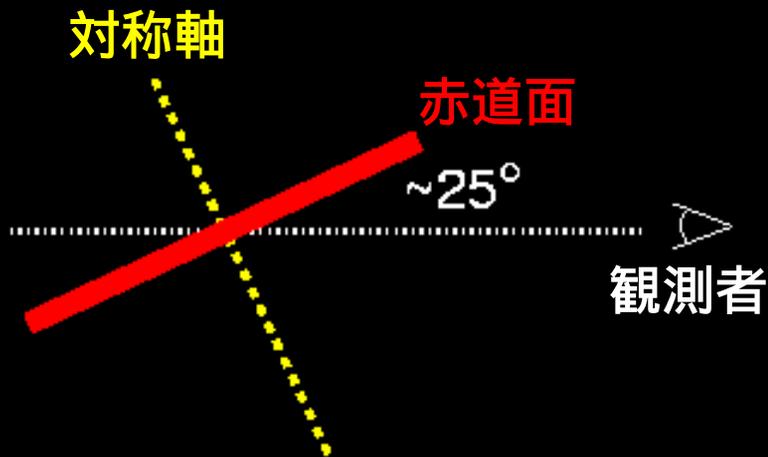
1.4 かに星雲のスペクトル



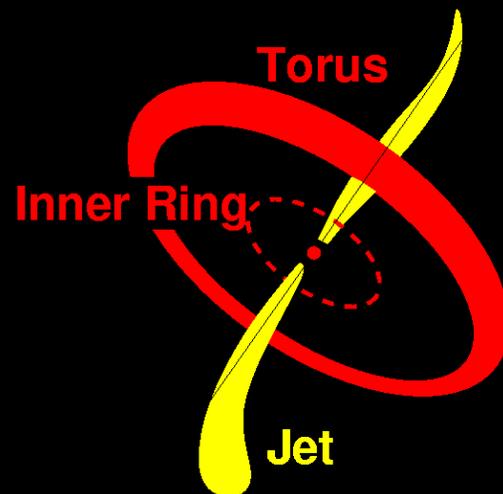
(Aharonian 1998)

- ベキ型 ($N=E^{-a}$) のシンクロトロン放射
 - カットオフエネルギーは $\sim 10 \text{ MeV}$
- 1 GeV 以上では 逆コンプトン放射

1.5 X線で見たカニ星雲



真横から見た図

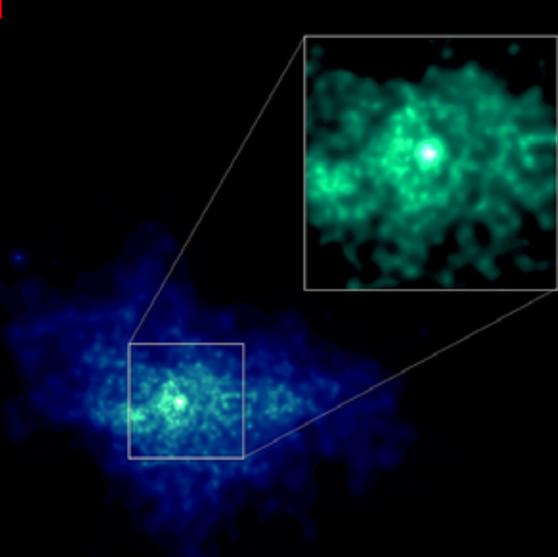


左の図の模式図

- ジェットに対して軸対称の構造
- 赤道面には インナーリング (衝撃波面に対応) とトーラス
- ジェットの形成メカニズムは不明

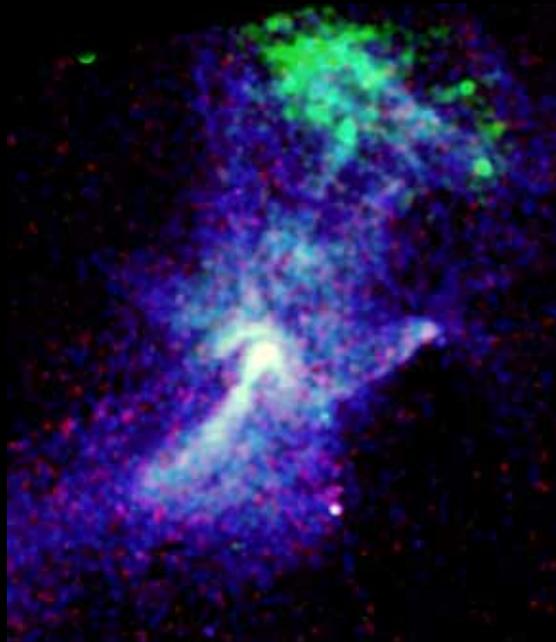
1.6 他のパルサー星雲

- 赤道面のトーラスと、対称軸に噴出すジェットが他のパルサー星雲にも共通に見られる



G54.1+0.3

(Lu et al. 2002)



G320.4-1.2

(Gaensler et al. 2002)



Vela

(Pavlov et al. 2001)

1.7 さまざまな波長でみたカニ星雲

電波 > 可視光 > X線

- 観測波長が短くなるほど（高エネルギーになるほど）、ひろがり小さくなる
 - 高エネルギーの粒子ほど寿命が短いため
 - 衝撃波近傍の観測には高エネルギー領域での観測が適している



1.8 パルサー星雲の標準モデル

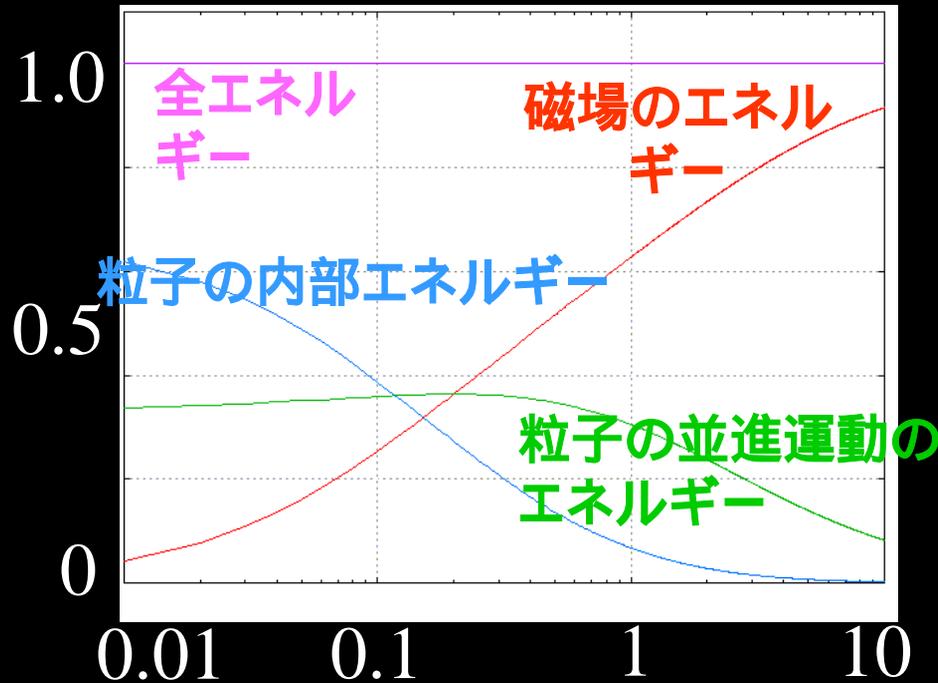
- Kennel & Coroniti (1984a,b) はカニ星雲の解析的なモデルを構築した。現在のパルサー星雲の標準理論と見なされている
- KCモデルの概要
 - 衝撃波直前のエネルギーフラックスを、磁場と、粒子の運動エネルギーフラックスに分けて、その比をモデルのパラメータとする

$$= \frac{\text{磁場のエネルギーフラックス}}{\text{粒子の運動エネルギーフラックス}} @ \text{衝撃波直前}$$

- Ideal MHD、球対称の仮定の下に、衝撃波をランキンゴニオの式で、下流の流れを断熱膨張で近似して、解を得る
- 下流の流れ(パルサー星雲)が上流(パルサー風)から流れる。により一意的に決まる場所での比は β と定義する

1.9 パルサー星雲の標準モデル

■ 衝撃波直後のエネルギー分布の依存性

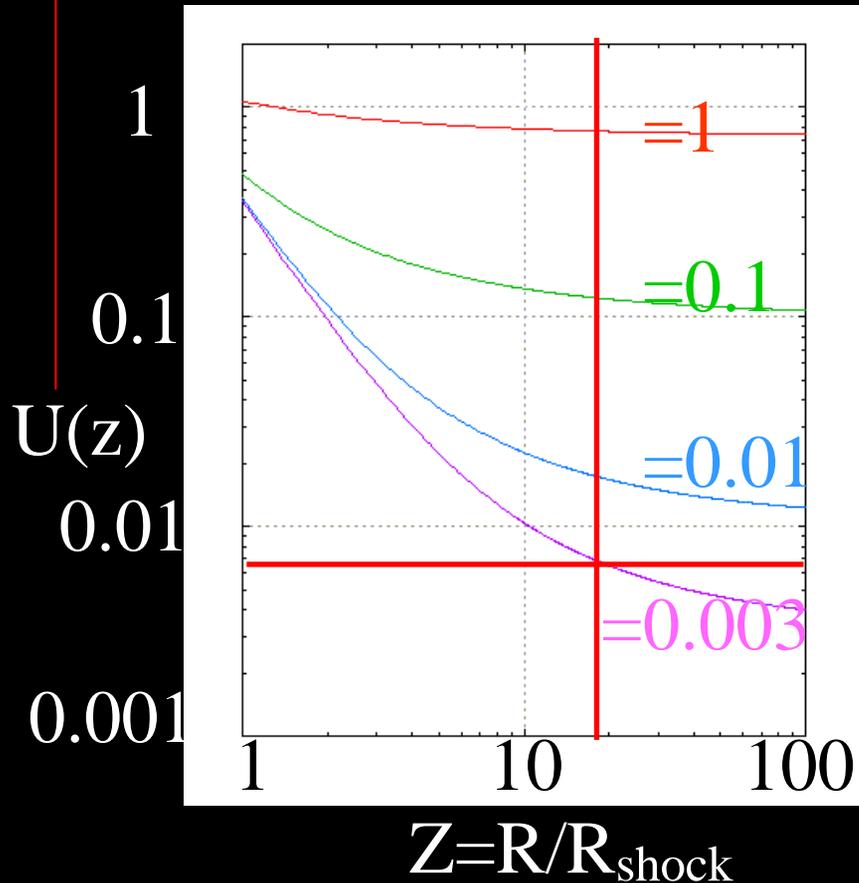


- $\gg 1$
 - 衝撃波の前後でほとんど状態が変化しない
 - 速度は依然、相対論的
- $\ll 1$
 - 粒子の並進運動エネルギーが内部エネルギーに変換される
 - 速度は非相対論的に

は1より小さい値が妥当

1.10 パルサー星雲の標準モデル

- 衝撃波面からの距離の関数としての、下流の流れの速度



- $= 1$
 - 速度は光速に近く、ほぼ一定
- $\ll 1$
 - 衝撃波直後の速度が $1/3c$ に近づき、その後減速する
- カニ星雲(電波)の膨張速度 $\sim 2000 \text{ km/s}$ at 2 pc,

~ 0.003

1.11 = 0.003 の意味

- Light cylinder (パルサーから 10^8 cm) の内側では磁場がエネルギー的に支配的である ($\gamma \gg 1$) (Coroniti 1990)
- モデルより得られた γ の値は 0.003 (パルサーから 10^{17} cm)

Light cylinder から衝撃波面までに γ が減少
効率的な粒子加速 (磁場のエネルギーを粒子の運動エネルギーへ変換) が必要

そのような粒子加速はこれまでの理論では説明つかず

は粒子加速に関係するパラメータであり
その小さな値は、20年来の謎

1.12 研究の目的

- $\tau = 0.003$ という値は空間的に積分した観測量 (光度、境界での膨張速度等) から決められている
- 我々は、空間的に分解した観測量 (ショック下流の流れの速度や表面輝度の動径方向の変化) をもちいて、パルサー風の $\tau = 0.003$ という値を観測的に検証したい

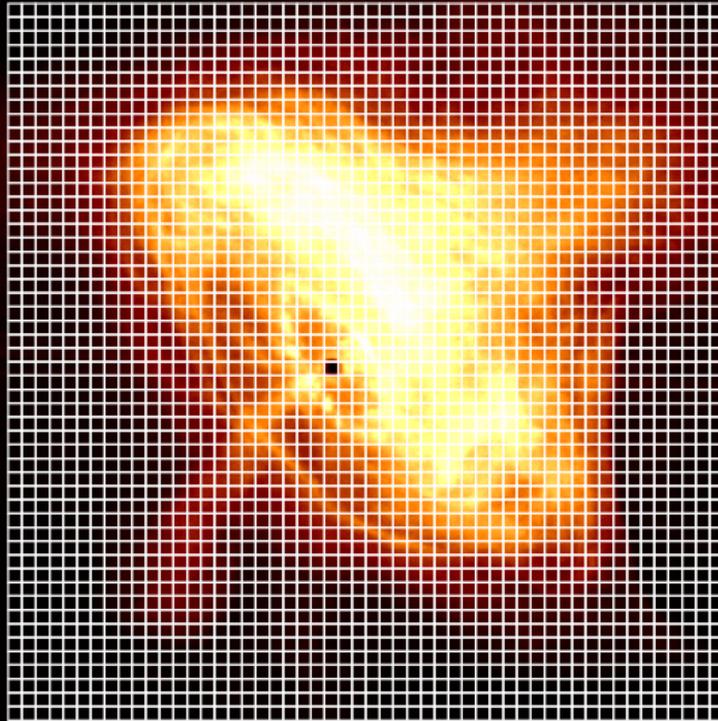
本日の講演の概要

1. かに星雲とその物理
2. かに星雲の観測的進展
 1. スペクトル情報から
 2. イメージ情報から
3. かに星雲の理論的進展
4. まとめ

*The Crab Nebula
Embedded in supernova ejecta*

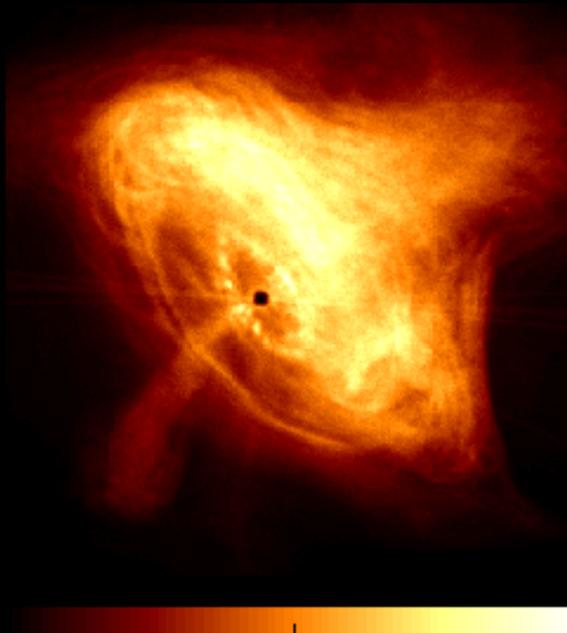
[O III]
[S II]
[O I]

2.1.1 空間分解したスペクトル



- かに星雲を $2.5'' \times 2.5''$ の領域に分割
- 各領域を power-law でフィッティングし、Photon index (ベキ) の変化を調べた

2.1.2 photon index map



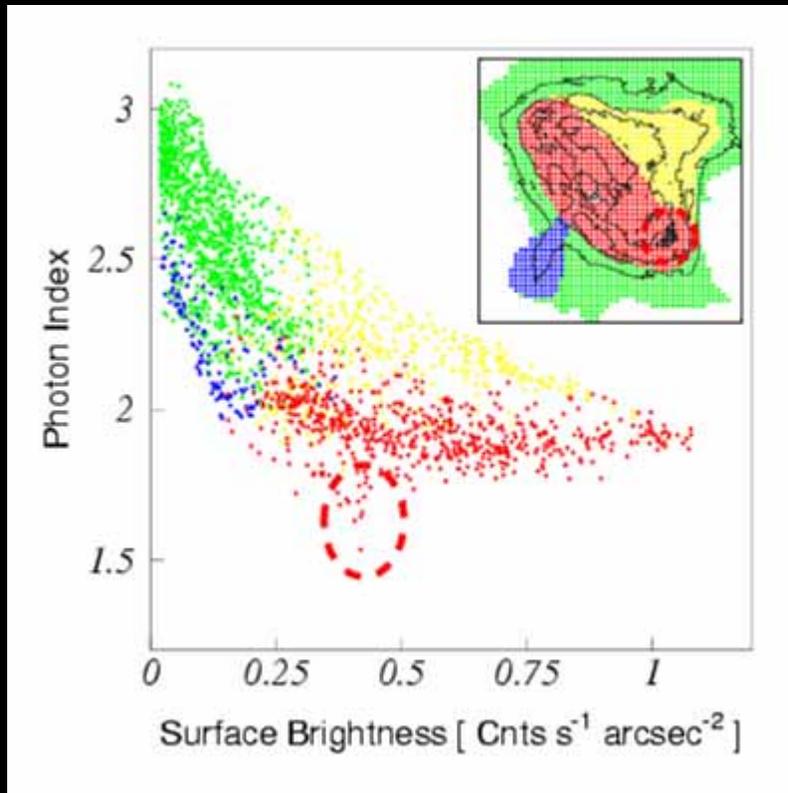
0 2000 4000
Counts (sec⁻¹ pix⁻¹)



2.0 2.5 3.0
Photon Index

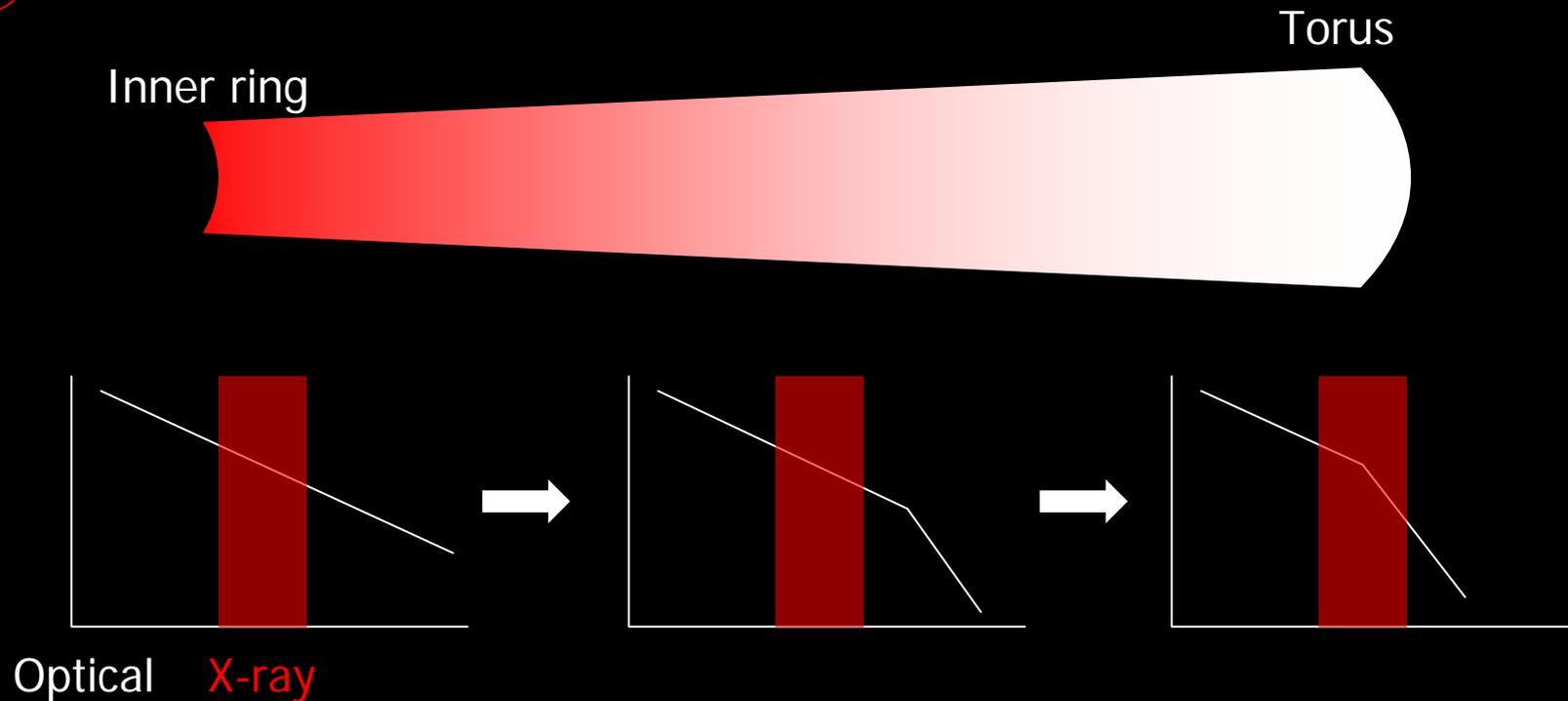
- トーラスの外側の領域ではソフトニングが見られるが、トーラス内部ではスペクトルの冪がほぼ一定
- P.I.マップはイメージと比較してパルサーに対して対象

2.1.3 スペクトルの空間変化 -赤道面方向-



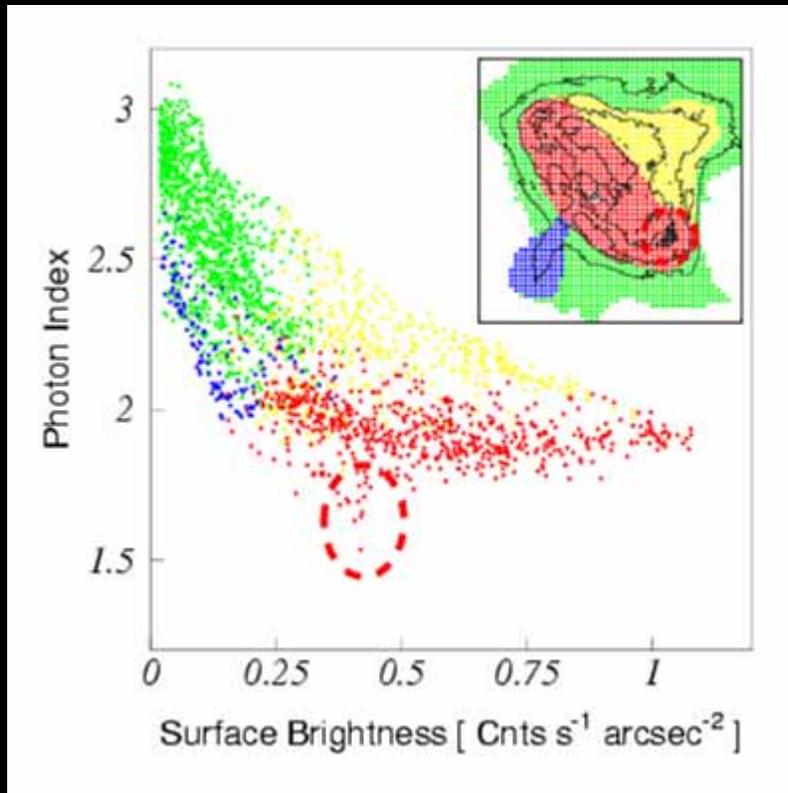
- 全体を4つに分ける: **torus**, **peripheral region**, **jet** and **umbrella**
- **Torus**: スペクトルはもっともハードで、表面輝度によらず ~ 1.9 で一定
- **Periphery**: スペクトルは外側の暗い領域に行くにつれソフトになっていく、 ~ 3.0
- トーラスのところで、シンクロトロップクーリングが効いている

2.1.4 スペクトルの空間変化 -赤道面方向-



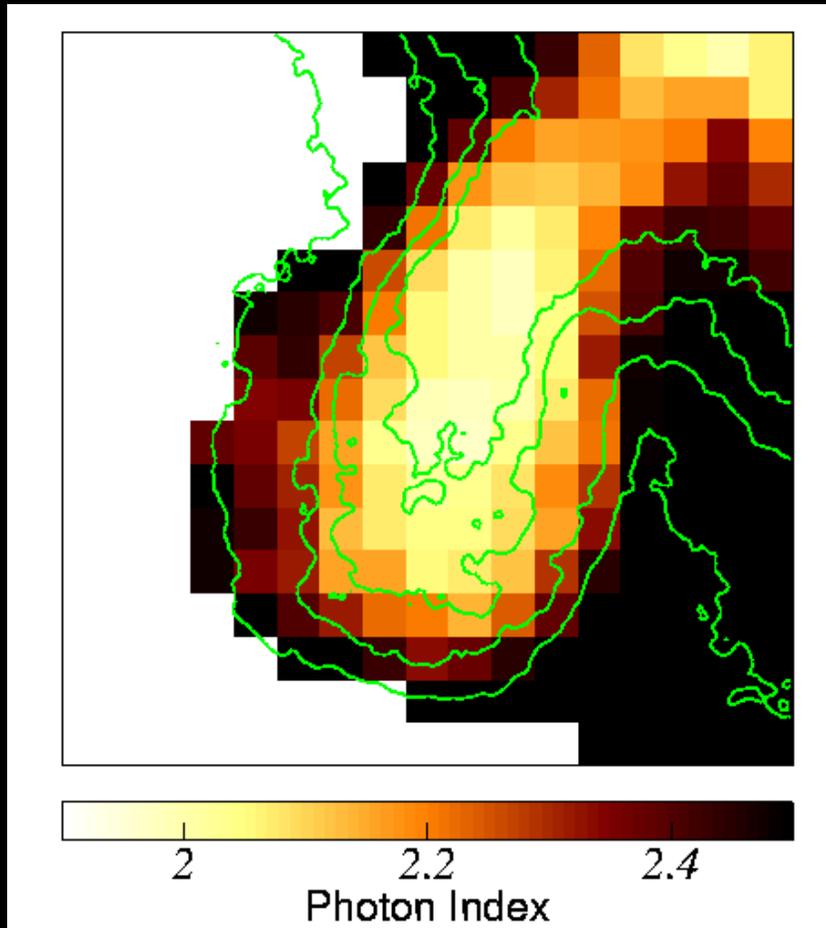
- シンクロトロン放射の場合、高エネルギーの粒子ほど寿命が短い
- 軟X線領域では、冪の折れ曲がりがトーラスのところで観測される

2.1.5 スペクトルの空間変化 -回転軸方向-



- 全体を4つに分ける: **torus**, **peripheral region**, **jet** and **umbrella**
- **jet**: 周辺領域と同程度の表面輝度だが、スペクトルはハード
- **umbrella**: トーラスと同程度に表面輝度の分布に広がりがあるが、スペクトルはソフト
- なぜ、北側だけに傘状の構造があるかは不明

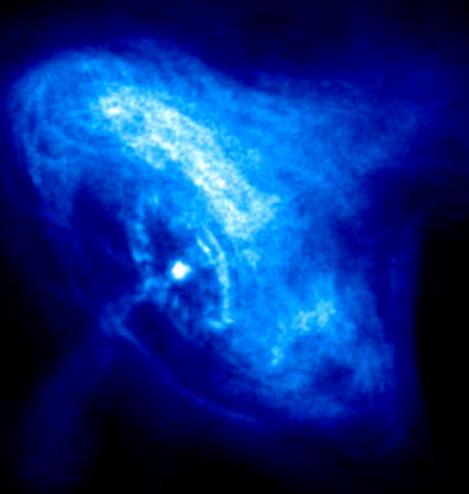
2.1.6 スペクトルの空間変化 -回転軸方向-



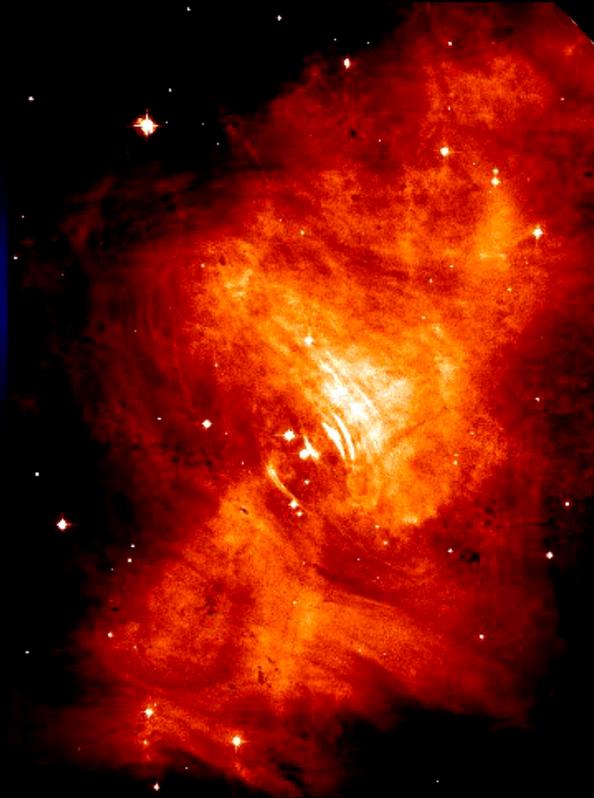
- スペクトルの変化は軸対象
- 軸の中心部で ~ 2.0
 - 手前と奥のよりソフトな放射との重ね合わせなので、おそらくよりハード、 < 2.0
- 軸の中心とトーラス内部のはほぼ同じ
 - 赤道面と回転軸の二方向に噴き出しているパルサー風の粒子のスペクトルは同じ
 - ショック加速のメカニズムも同じ？

2.2.1 カニ星雲がみせる時間変動

X-ray
(Chandra)

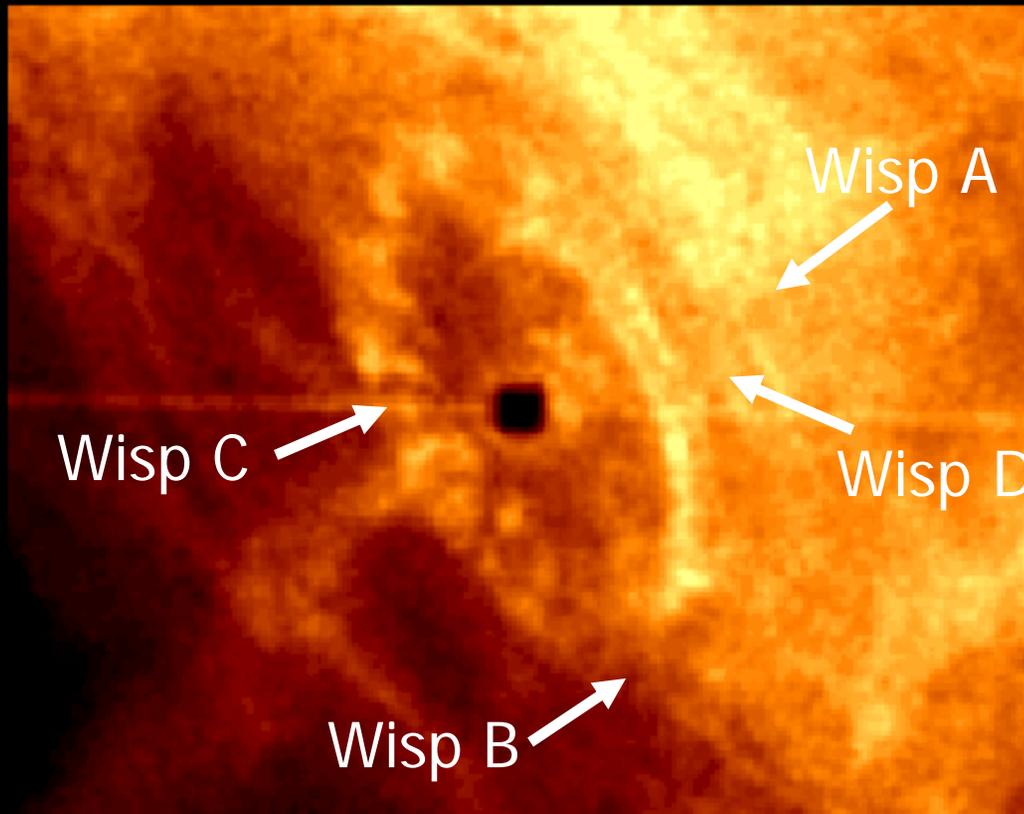


Optical
(Hubble)



- X線と可視光での同時観測
- 変動するインナーリング、そこから波紋状に広がる波 (wisp)、ジェットに沿った流れ、膨張するトーラス、等々

2.2.2 インナーリング周辺の拡大図

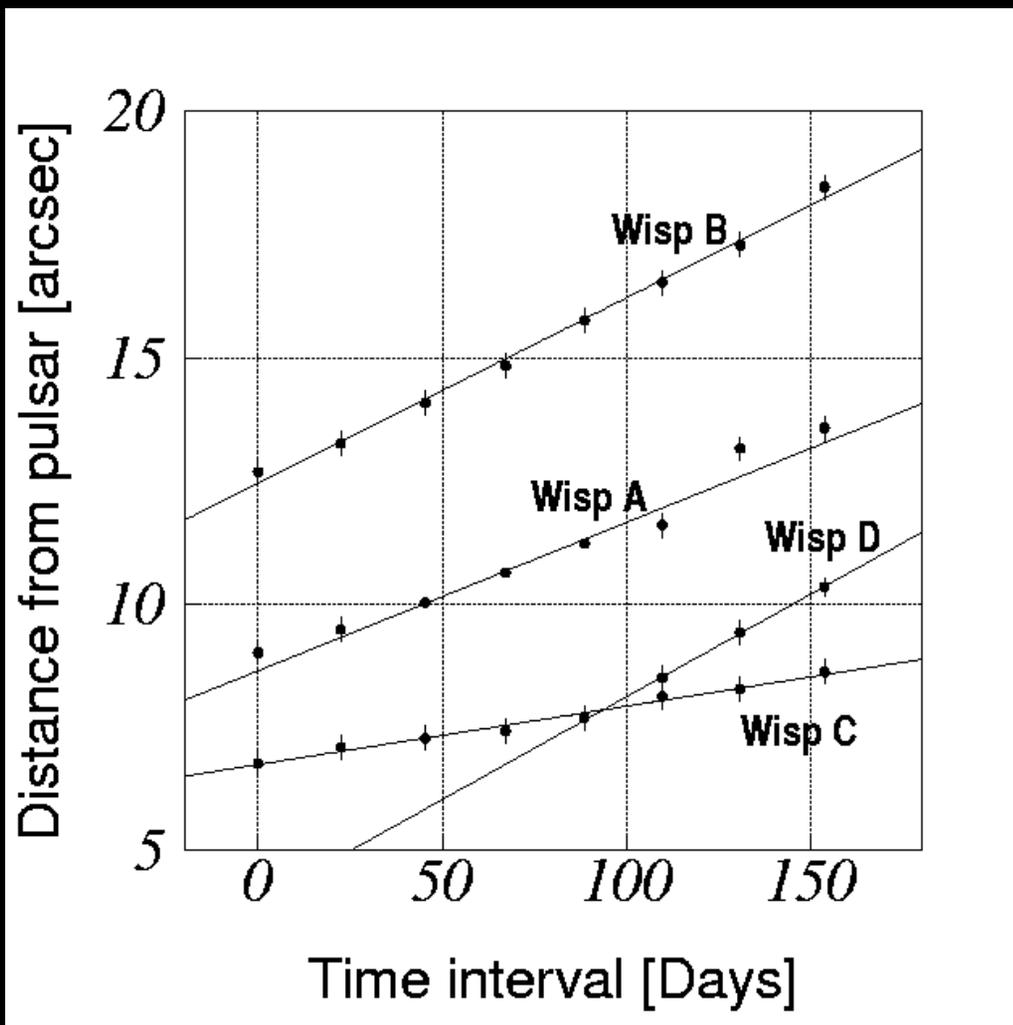


X-ray
(Chandra)

1st 2nd 3rd 4th 5th 6th 7th 8th

- 5ヶ月間のモニター観測で4つの wisp を検出

2.2.3 下流の流れの速度



- 赤道面の傾きを考慮して、補正した速度

$$A \quad 0.47 \pm 0.02c$$

$$B \quad 0.43 \pm 0.03c$$

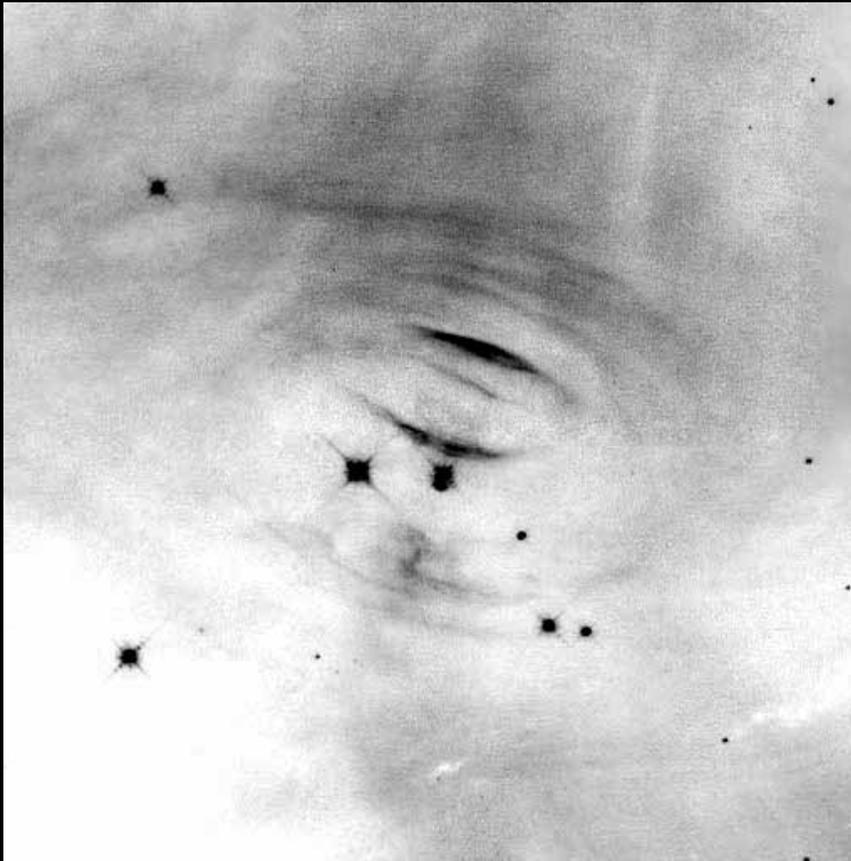
$$C \quad 0.46 \pm 0.16c$$

$$D \quad 0.56 \pm 0.07c$$

- 見た目の明るさや、生まれた時間、進む方向によらず、速度は同じ

- ショックの下流の流れに異方性は

2.2.4 下流の流れの速度(2)



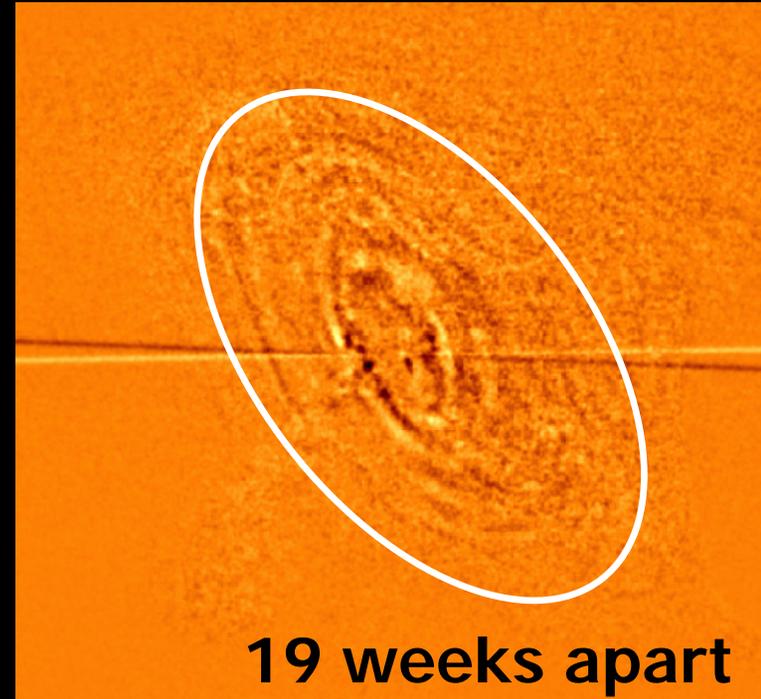
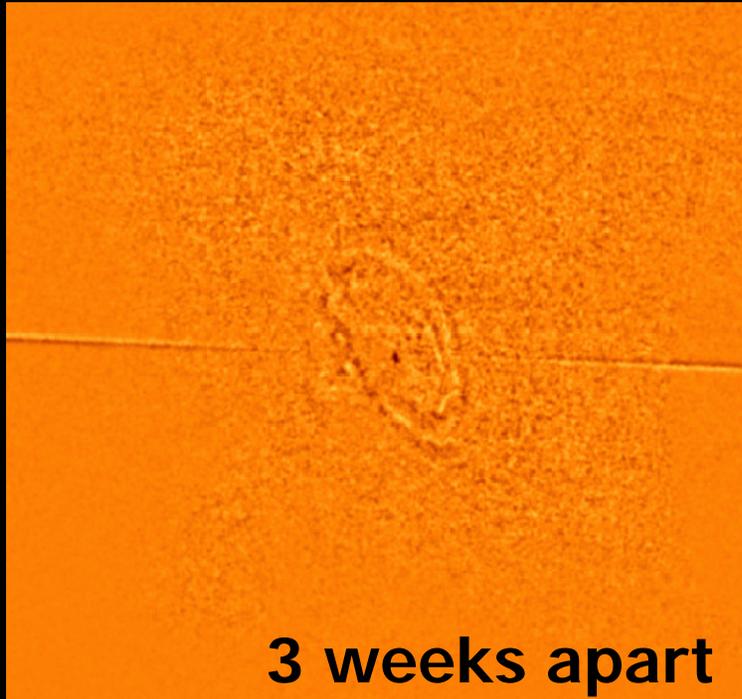
*Optical
(Hubble)*

注・南北がずれてます

北
↙

- wisp は等速でなく、徐々に減速していく

2.2.5 下流の流れの速度(3)

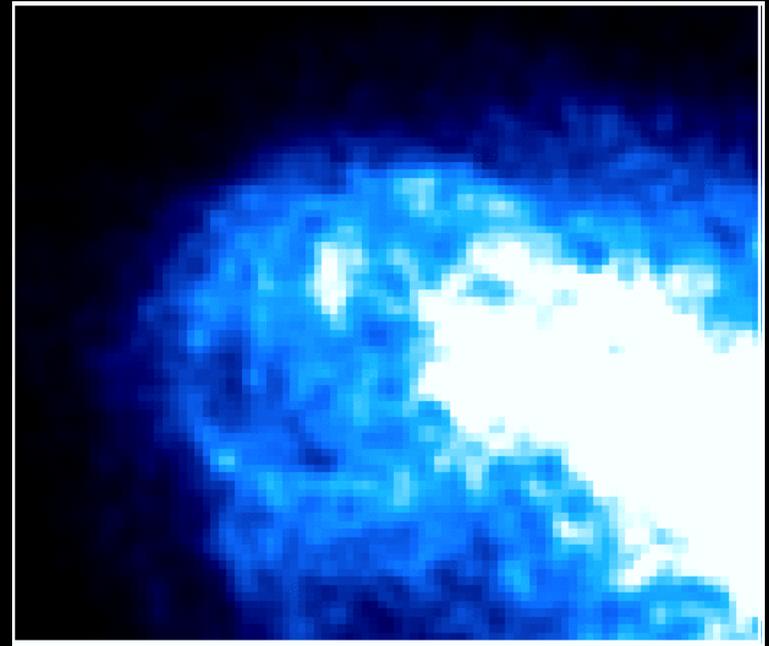
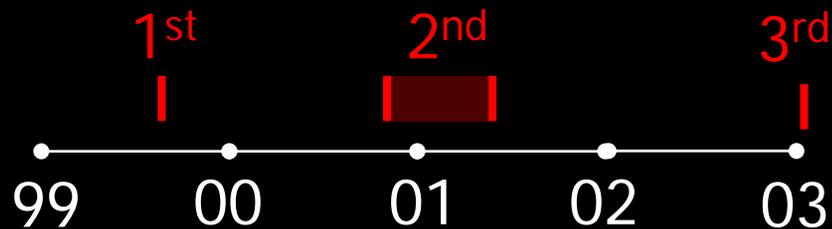


- 内側の変化に比べてゆるやかであるが、トーラスも膨張している
- 速度は $\sim 0.15c$ (補正後)

2.2.6 トーラスの時間変動

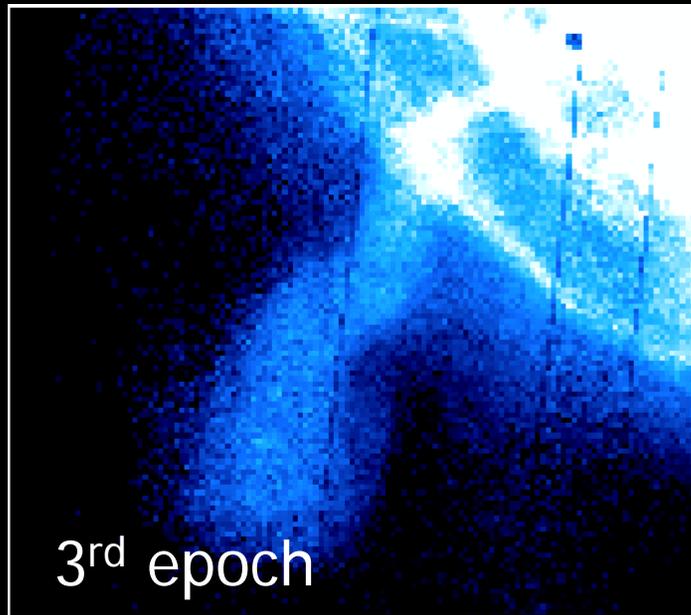
This movie consists of

1. *1st epoch observation*
2. *First obs. in 2nd epoch*
3. *Last obs. in 2nd epoch*
4. *3rd epoch observation*

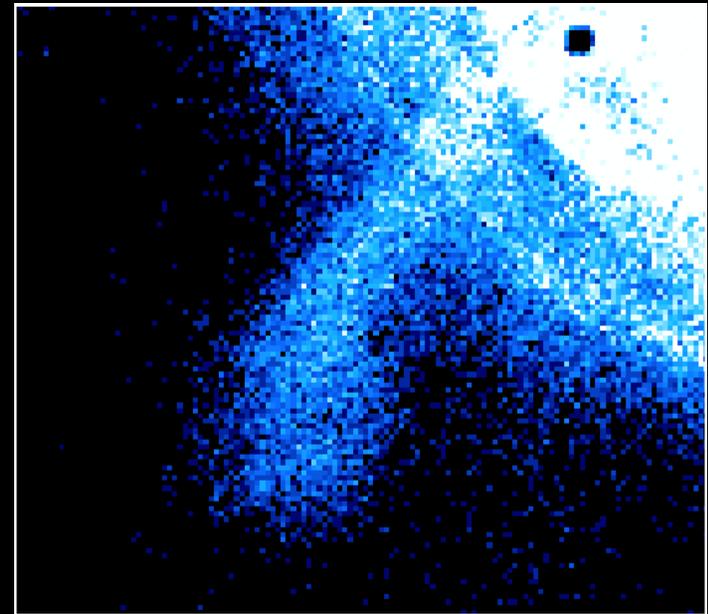


- 2001年の夏までは単調に膨張していたトーラスは、2003年の観測では一転して収縮していた
- トーラスは膨張、拡散、収縮をくりかえしているようだ

2.2.7 ジェットの時間変動



1st + 2nd + 3rd epoch obs.



- ジェットの全体的な形も時間ともに変化していく
- 曲率が大きくなり、伸張している？

2.2.8 ベラ星雲のジェットの変動

- ベラ星雲でも似たようなジェットの変動がみられる



Vela

(Pavlov et al. 2003)

2.2.9 ジェットの時間変動

- Vela のジェットの時間変動との比較

- 時間変動のタイムスケールと実際の物理的な大きさの比がほぼ同じ

	Crab	Vela
Time scale (day)	150-500	10-30
Width (cm)	2.9×10^{17}	3×10^{16}

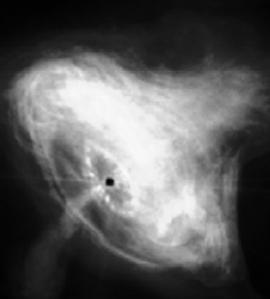
- 相対論的なプラズマ中の音速はほぼ同じであることを考慮すると、Crab と Vela のジェットの時間変動のメカニズムは共通であることが示唆される

- 相違点もある

- Vela のジェットに比べて、Crab のジェットのほうが diffuse であり less clumpy

本日の講演の概要

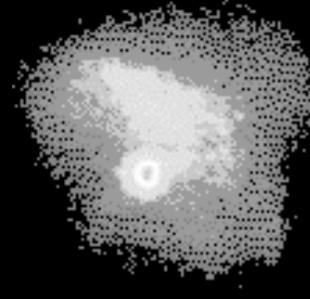
1. かに星雲とその物理
2. かに星雲の観測的進展
3. かに星雲の理論的進展
4. まとめ



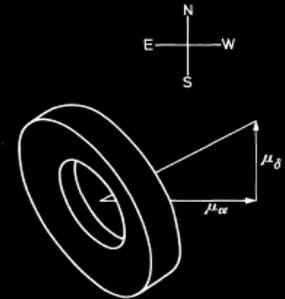
Chandra
(1999~)



ROSAT
(1990~1999)



Einstein
(1978~1981)

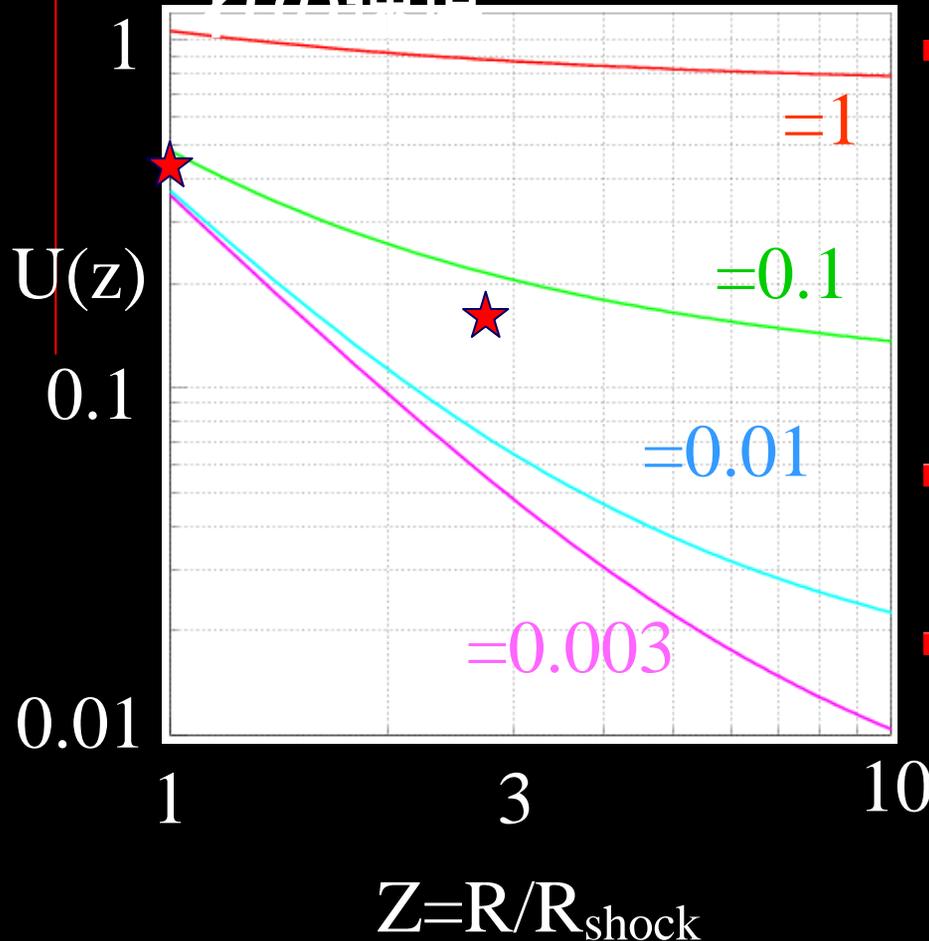


Lunar occultation
(Aschenbach & Brinkmann 1975)

*The Crab Nebula
back in time of the X-ray observations*

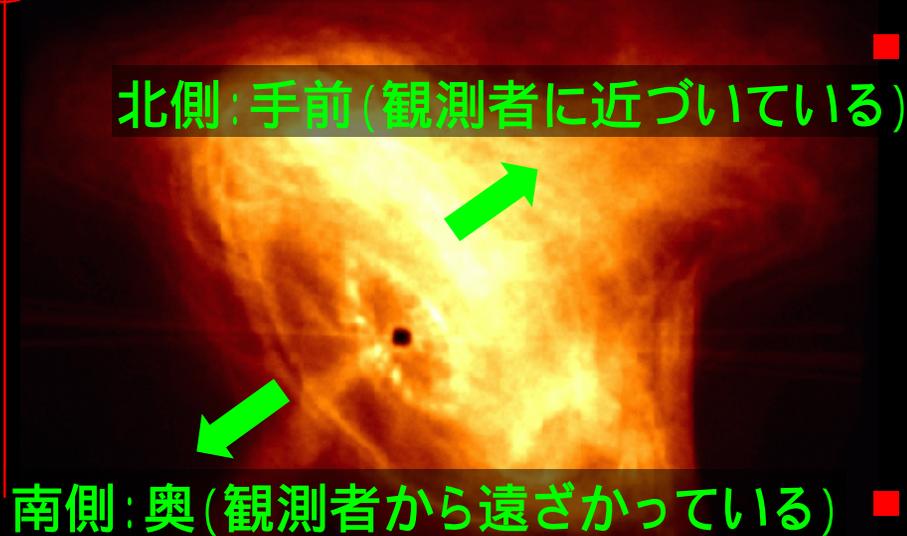
3.1 の検証

- 衝撃波面からの距離の関数としての、下流の流れの速度



- 観測された下流の流れの速度
 - $\sim 0.45c$ at $z=1$ (inner ring)
 - $\sim 0.15c$ at $z=2.7$ (torus)
- 観測された流れは、KCモデルの予測値よりも速い
- $=0.003$ の流れでは再現できず、 ~ 0.05 が適当

3.2 の検証



$$\left(\frac{1 + \beta \cos \theta}{1 - \beta \cos \theta} \right)^{\alpha + 2}$$

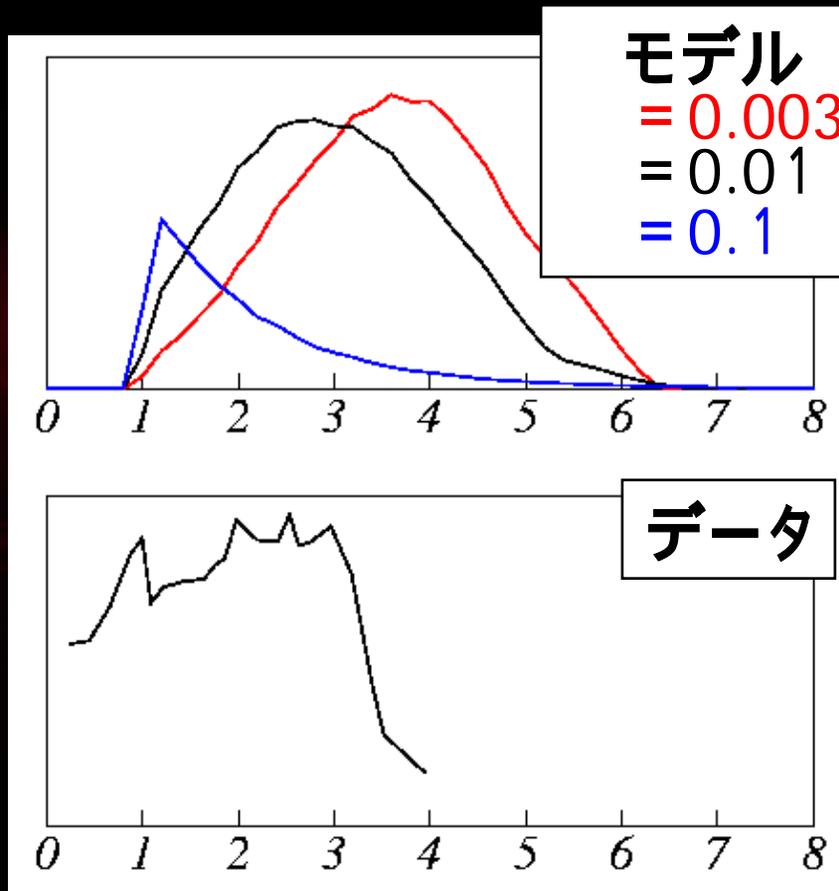
: 流れの速度@トーラス

: 視線方向と赤道面のなす角

: photon index

- トーラスは北側が明るく、南側が暗い
 - ドップラーブーストによる
 - 表面輝度の比は左式により与えられる
- 観測からトーラスの北側と南側の比は~3.4
 - 左式から ~0.17
 - 観測されたトーラスの速度(~0.15c) とほぼ一致
- KCモデルでのトーラスの位置での流れの速度は0.05c、強度比は高々

3.3 の検証

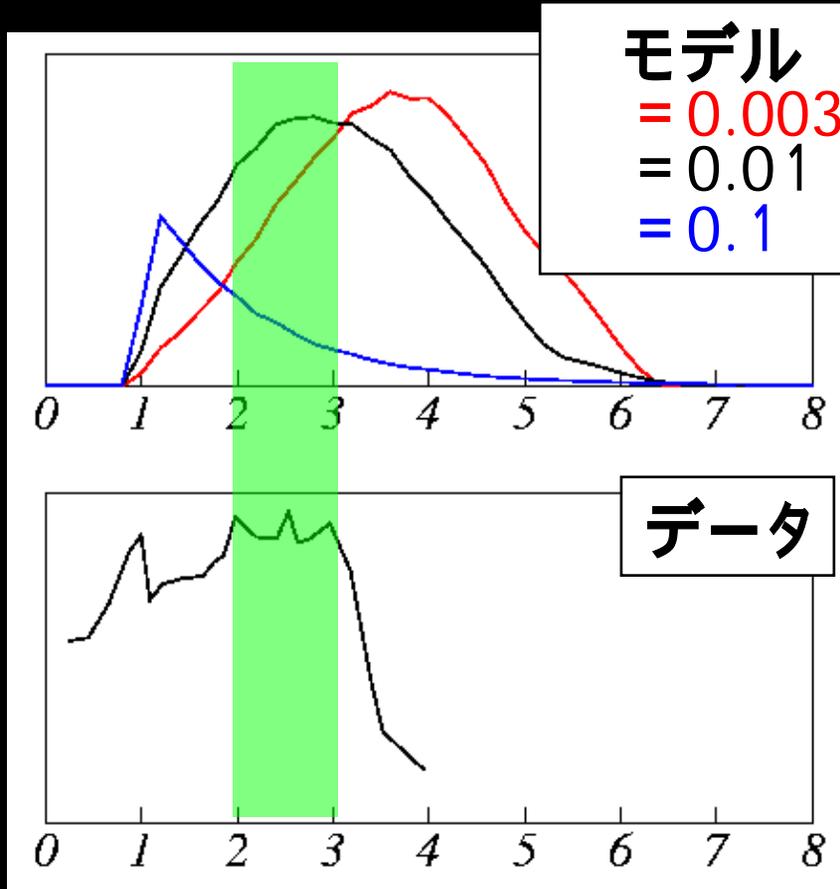


- トーラスの長軸方向に沿って表面輝度を調べ、KCモデルと比較
- ドップラーブーストの影響はうけない

縦軸：表面輝度

横軸：パルサーからの距離、 z

3.3 の検証



縦軸：表面輝度

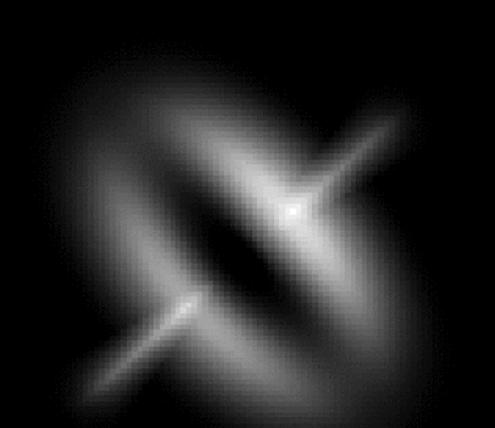
横軸：パルサーからの距離、 z

- トーラスの長軸方向に沿って表面輝度を調べ、KCモデルと比較
 - ドップラーブーストの影響はうけない
- $=0.003$ のモデルでは実際よりも外側にピークができる
- $=0.01$ のモデルでトーラスのピークを再現

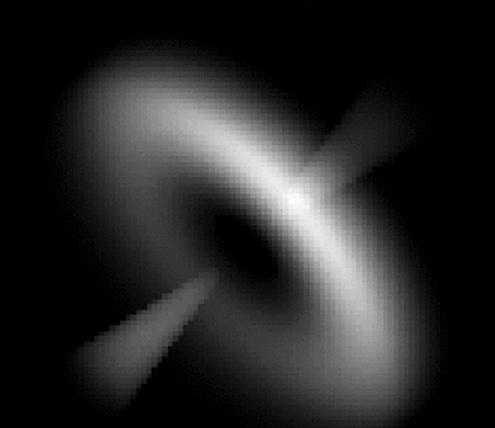
3.4 ~ 0.01-0.05 について

- KCモデルの最適値よりも一桁程大きい、依然1より小さい
 - 流体加速の問題は解消されない
- KCモデルは空間的に積分した値(光度、スペクトル)はよく説明するが、空間的に分解した流れの値(表面輝度の変化)は説明しない
 - パルサーから供給されるエネルギーが粒子の内部エネルギーに変換される割合は説明するが、変換する場所(衝撃波)の仮定がシンプルすぎるのか？
 - 例えば、磁気リコネクションによる磁場のエネルギーから粒子の内部エネルギーへの変換

3.5 KCモデルを超えて...



純粋トロイダル磁場 +
KCモデルの流れ



乱流磁場 +
より高速の流れ

- トロイダル磁場だけでは、トーラスのイメージは再現 できない
 - シンクロトロン放射では放射率は $(\sin \theta)^2$ に比例
 - トーラスの端ではピッチ角が小さくなるため、表面輝度が下がる (粒子のピッチ角分布を一様と仮定した場合)
 - 南北の表面輝度の比も小さい
- トーラスを再現するため

まとめ

- スペクトルの空間的な変化を秒角のスケールではじめて示した
 - トーラス内部で $\omega = \text{const.}$ 、外にいくにつれ ω が増えるという結果はシンクロトロンクーリングの描像と一致
 - トーラスとジェットのスเปクトルの類似性から、赤道面と回転軸方向へふく粒子のエネルギースペクトルの同一性が示唆される
- ショック下流の流れの空間的な変化をとらえた
 - トーラス、ジェットもよりゆるやかな変動をみせる
- 電磁流体加速パラメータ β は今まで思われていた値 (0.003) よりも一桁大きな値 (0.01-0.05) へ
 - ショック下流での磁場から粒子への直接のエネルギー変換 (例えば磁気リコネクション) を考慮する必要がある
 - トーラスのイメージの再現には、乱流磁場の存在とより高速の流れが必要