

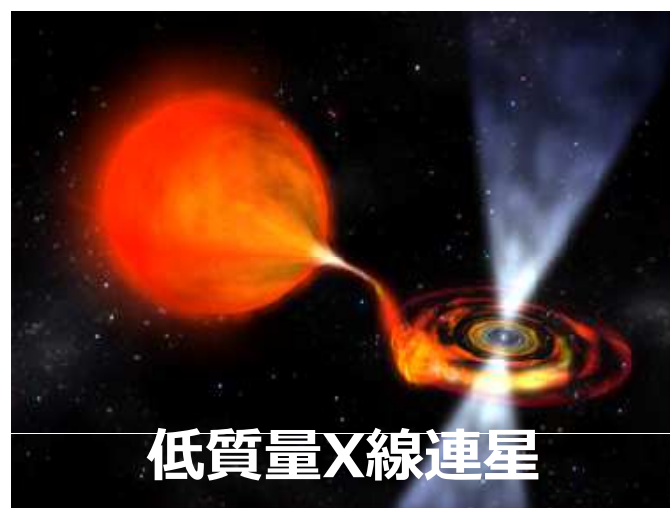
OISTER・すざくによる 2FGL J2339.6-0532 の観測

東工大・理 谷津 陽一

橘優太郎、有元誠、河合誠之（東工大）、
片岡淳、高橋洋介（早稲田大）、柴田晋平（山形大）、
関口和寛（国立天文台）ほか OISTERチーム

本研究の目的

Black widow = ミリ秒パルサー（MSP）リサイクル過程の最終段階



数億?年後



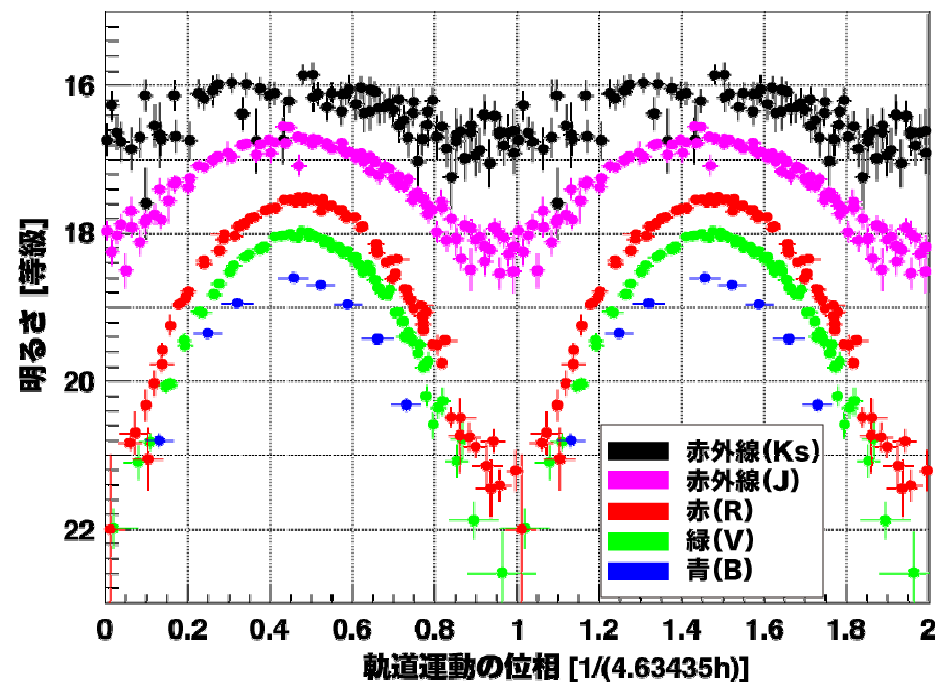
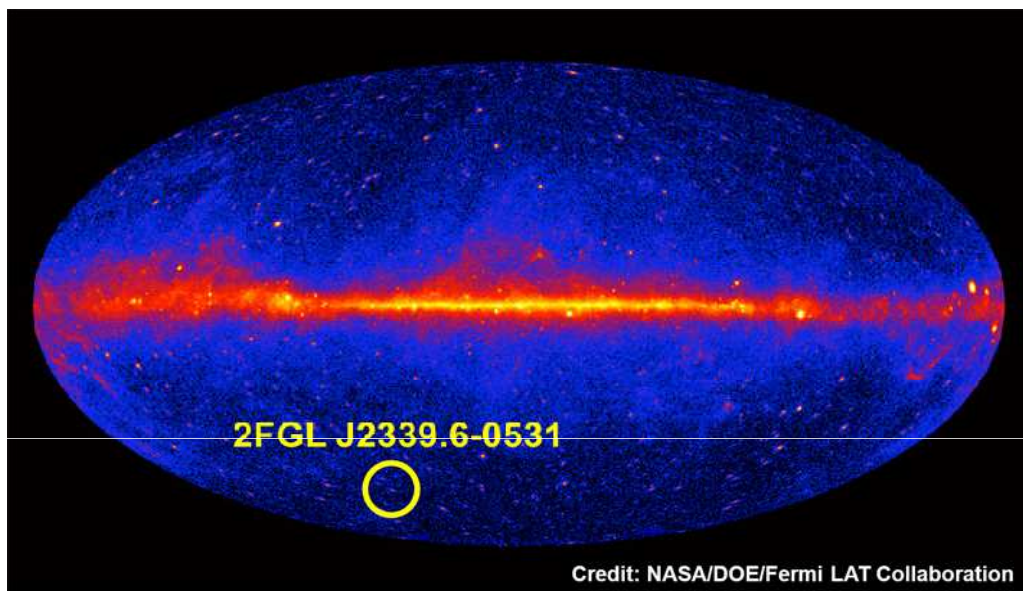
Black widowはMSPの進化史を探る上で貴重なサンプル

(1) 素性の解明（軌道要素）

(2) パルサーへの質量降着・伴星の蒸発状況解明

(3) 伴星とパルサー風の相互作用・ σ -パラドックスへ制限

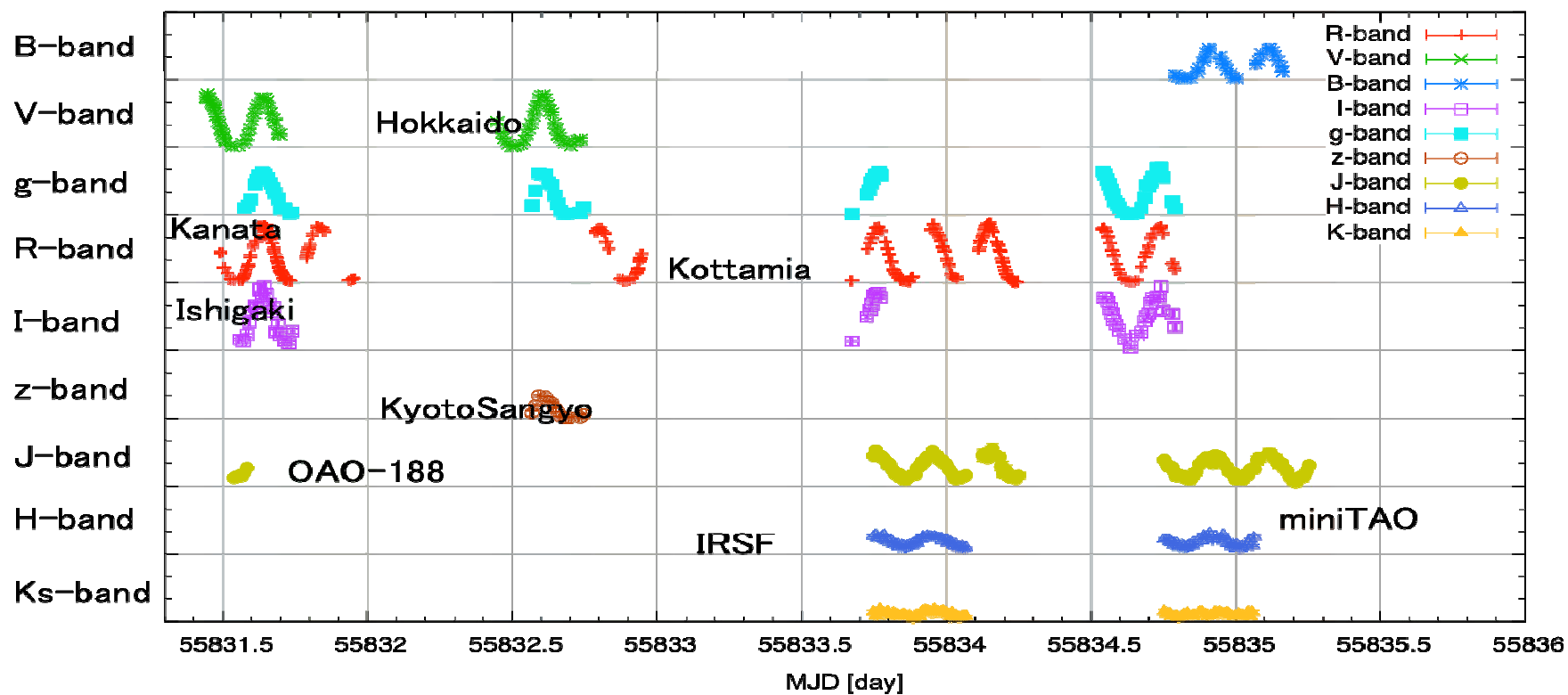
2FGL J2339.6-0532



- Fermiで発見された明るいガンマ線源
 - X線対応天体 ⇒ 冪型スペクトル
 - 可視 ~5等級の周期的光度変化
- ⇒ **Black widow**であると解釈
- ⇒ **2.88msの電波パルス発見 (時折パルス消失)**

Romani& Shaw (2011); Kong et al. (2012), Ray et al. 2013

OISTERによる多波長観測 (Ks~B)

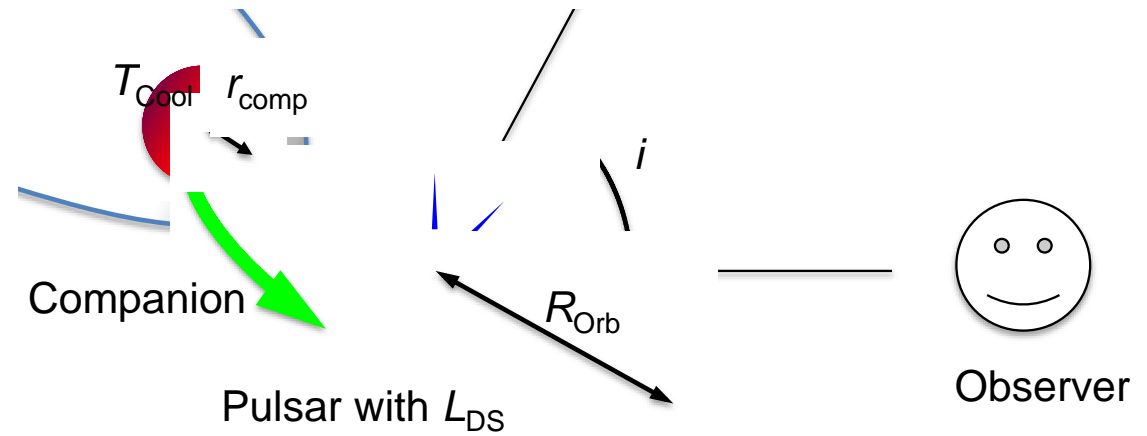


軌道パラメータの推定

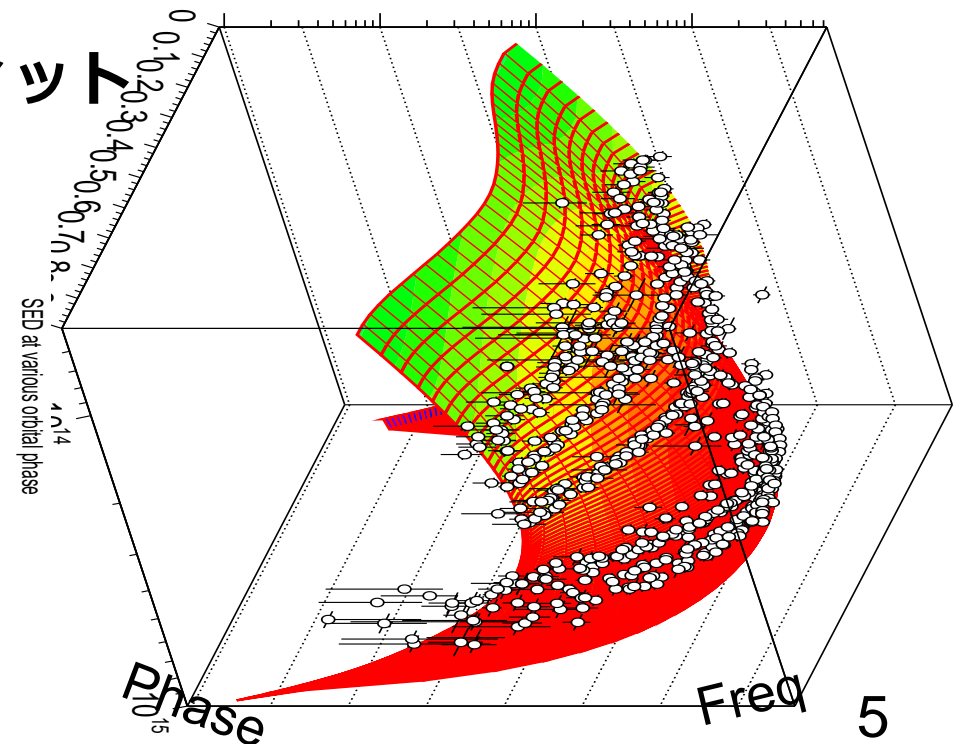
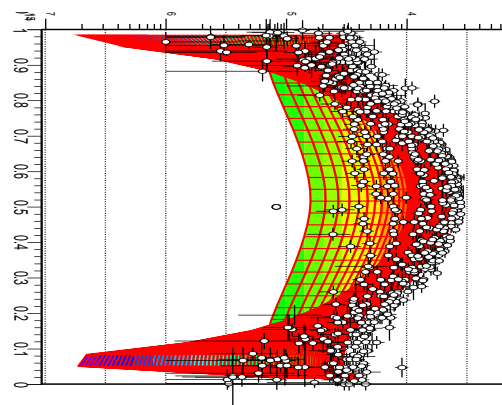
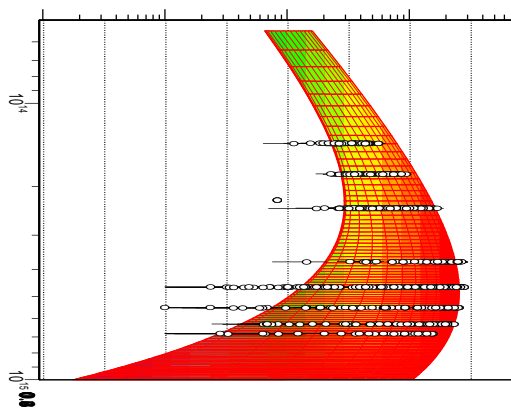
簡単なジオメトリを仮定

未知数

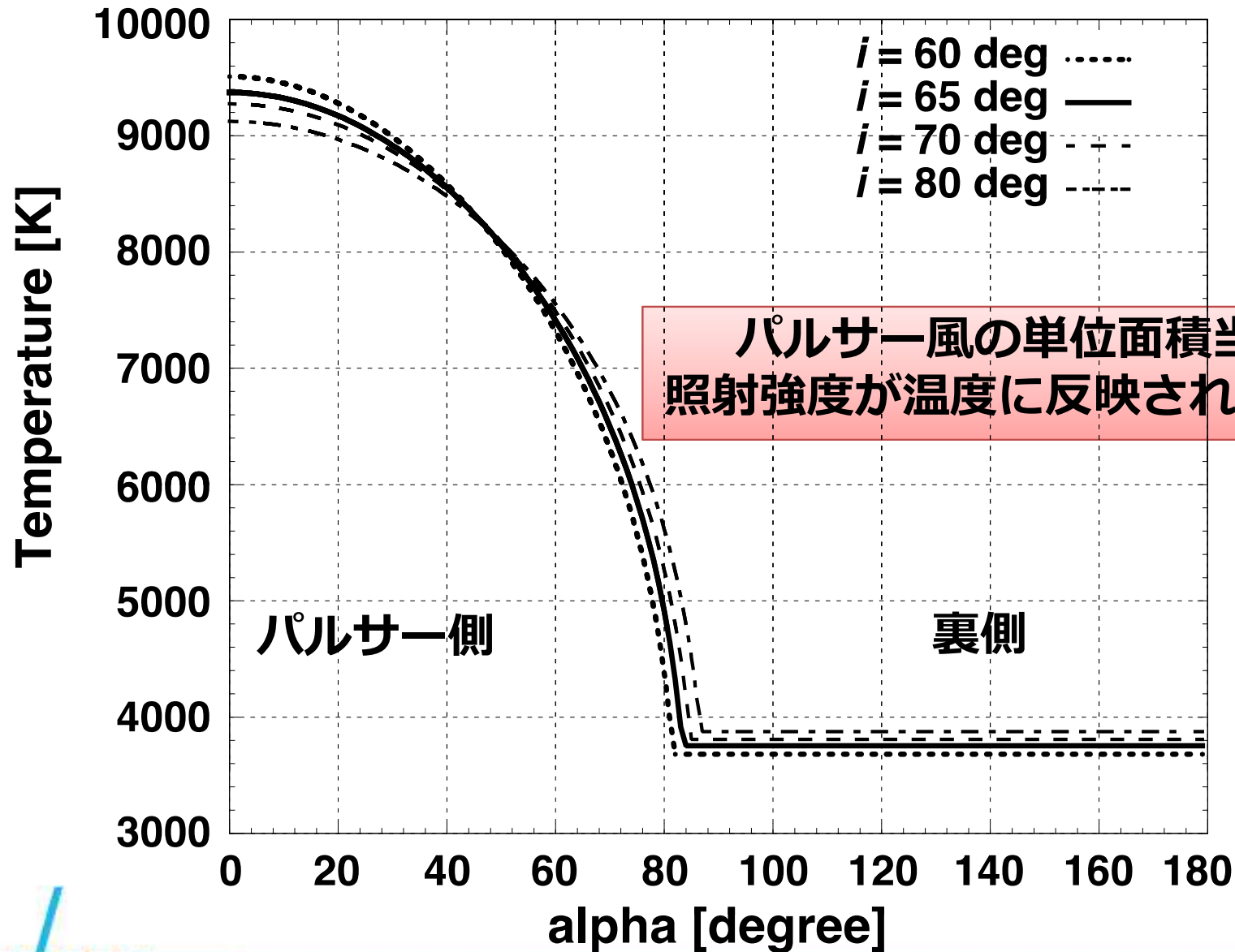
- 軌道傾斜角
- 軌道半径
- 伴星半径
- 伴星温度 (低温側)
- Spin-down Luminosity

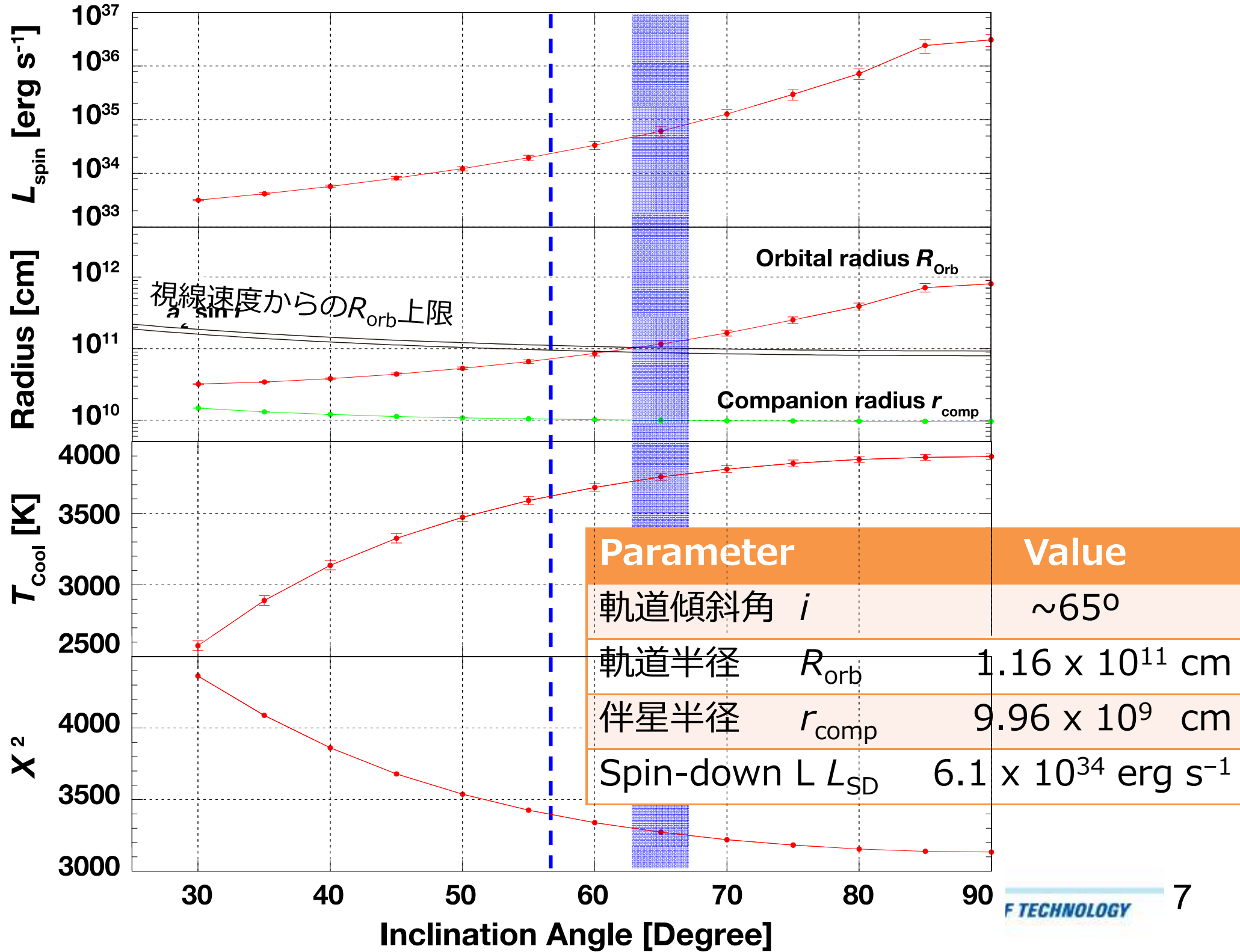


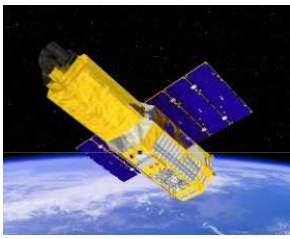
軌道位相毎のSED をモデル関数でフィット



伴星表面の温度分布モデル

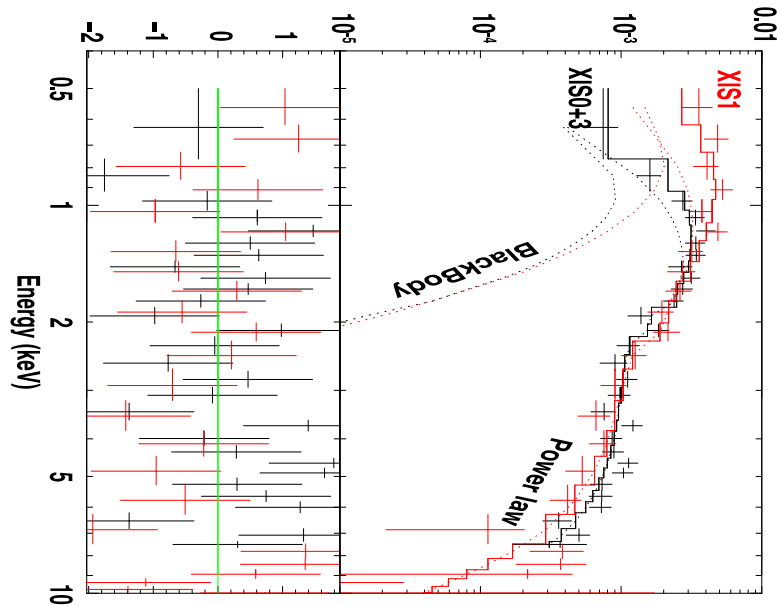






すざくによるX線観測

100 ks XISによる撮像観測



Component	Param	Value
Black Body	kT	0.15 ± 0.06 keV
	R_{bb}	$0.28^{+1.00}_{-0.16}$ km
Power law	Ph Index	1.14 ± 0.16
	Flux	$2.50 \pm 0.16 \times 10^{-13}$ erg/s/cm ²
χ^2/dof		52.35/52 (=1.007)

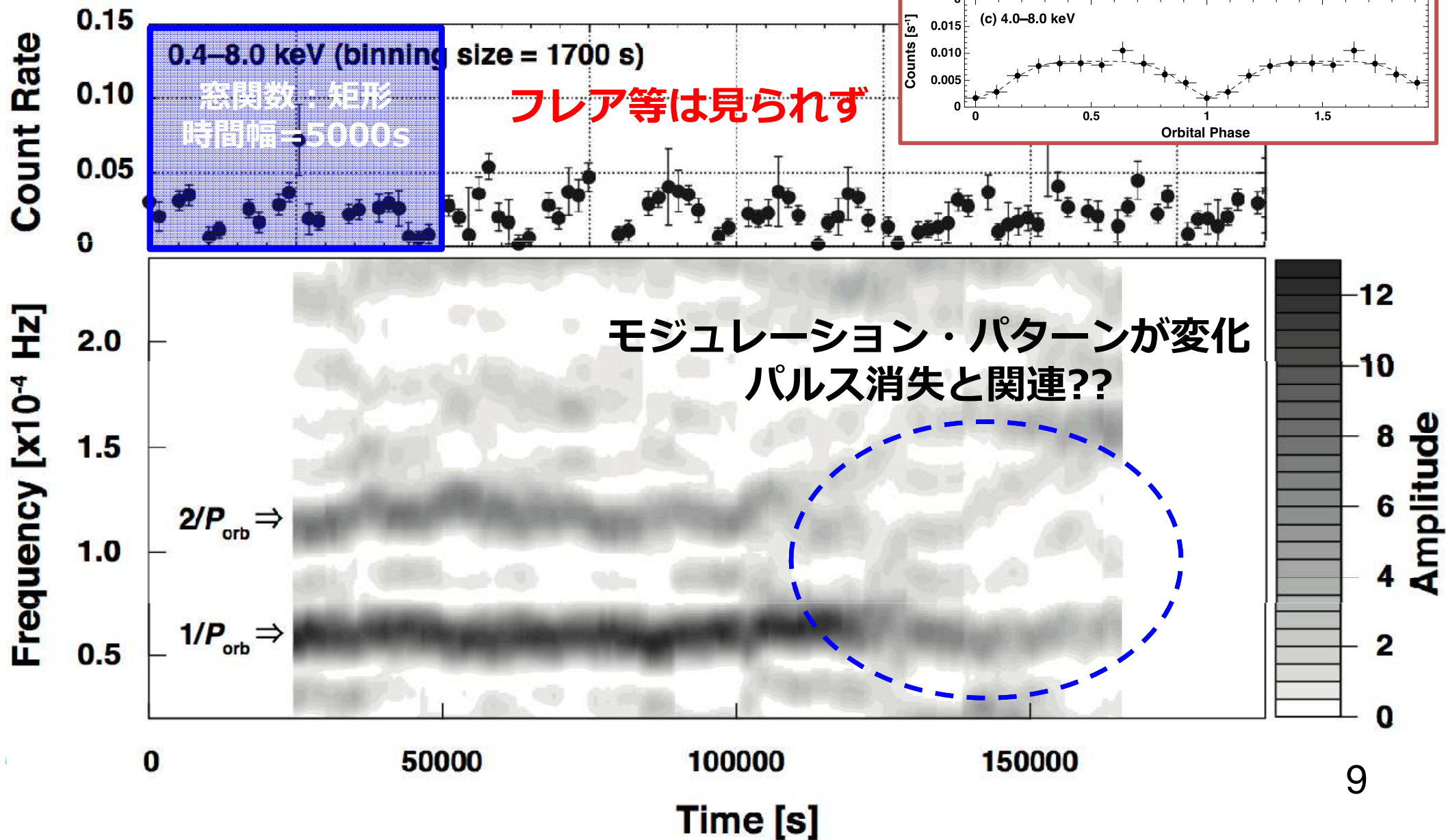
$N_H = 0$ (fixed)

1 keV以下に超過成分あり ⇒ 黒体放射?

温度 = 0.15 keV, 半径 = 0.28 km (@1.1 kpc)

⇒ 中性子星表面からの放射

X線パワースペクトルの時間変化



質量降着の可能性

モジュレーション変化...電波パルス消失(降着?)との関係はを検証

■ プロペラ効果から予想される降着率

$$\dot{m} > \frac{B_*^2 r_*^6 \omega_*^{7/3}}{2^{3/2} G^{5/3} M_*^{5/3}} = 3.3 \times 10^{16} f^{-1} \left(\frac{d}{1.1 \text{ kpc}} \right)^2 \left(\frac{r_*}{10 \text{ km}} \right)^8 \left(\frac{M_*}{1.4 M_\odot} \right)^{-2/3} \text{ g s}^{-1}$$

■ 実際の明るさ

- 上記計算より5桁暗い
- 類似天体（降着している時）は100倍明るい

■ ロツシュローブの充填率（軌道要素から）

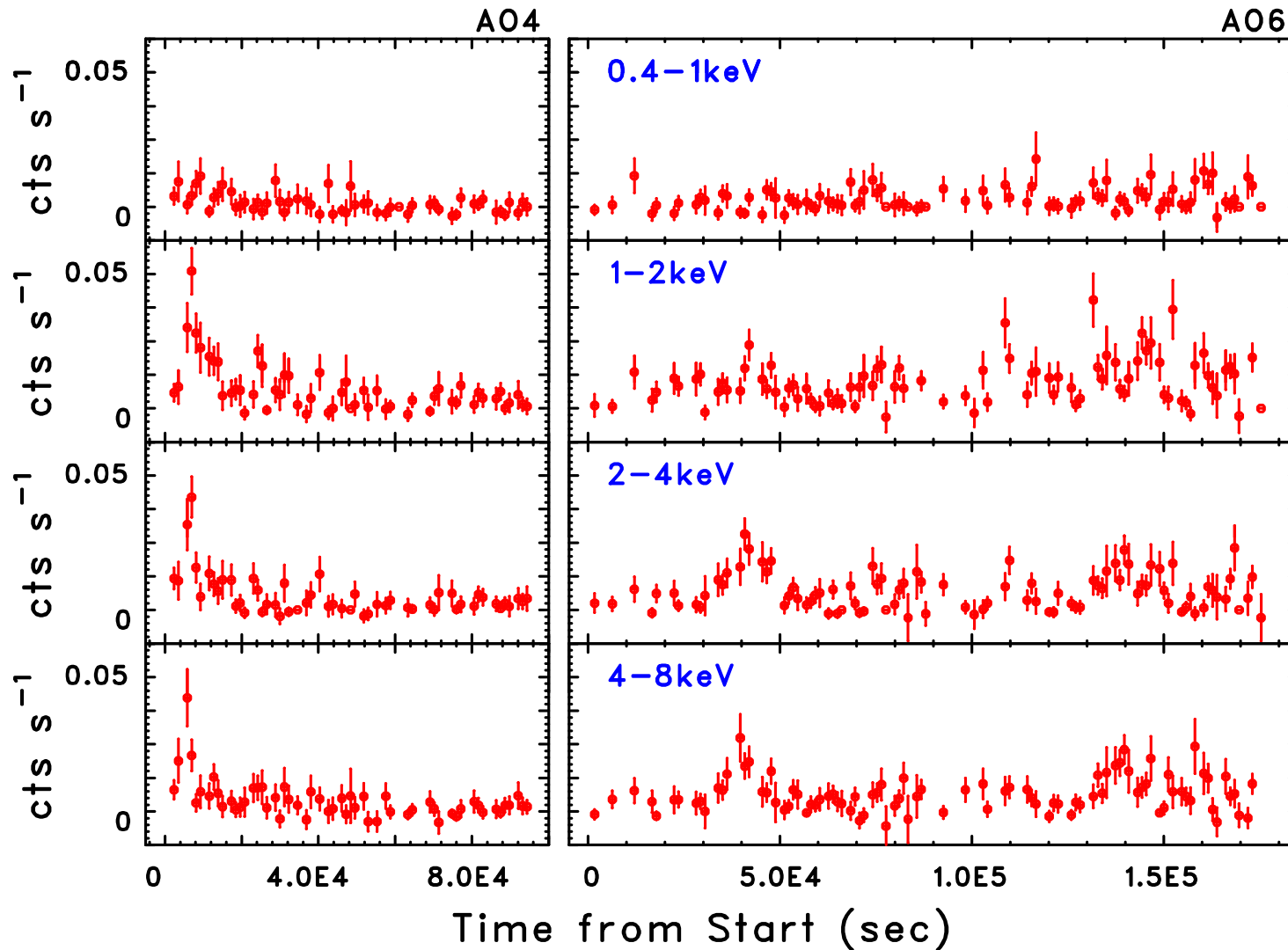
- ~1/3以下 ⇒ ラグランジュ点を越えられず**安定した降着不可**

- 伴星表面でのフレア等による突発的な質量供給
- パルサー風の生成自体が不安定

まとめ

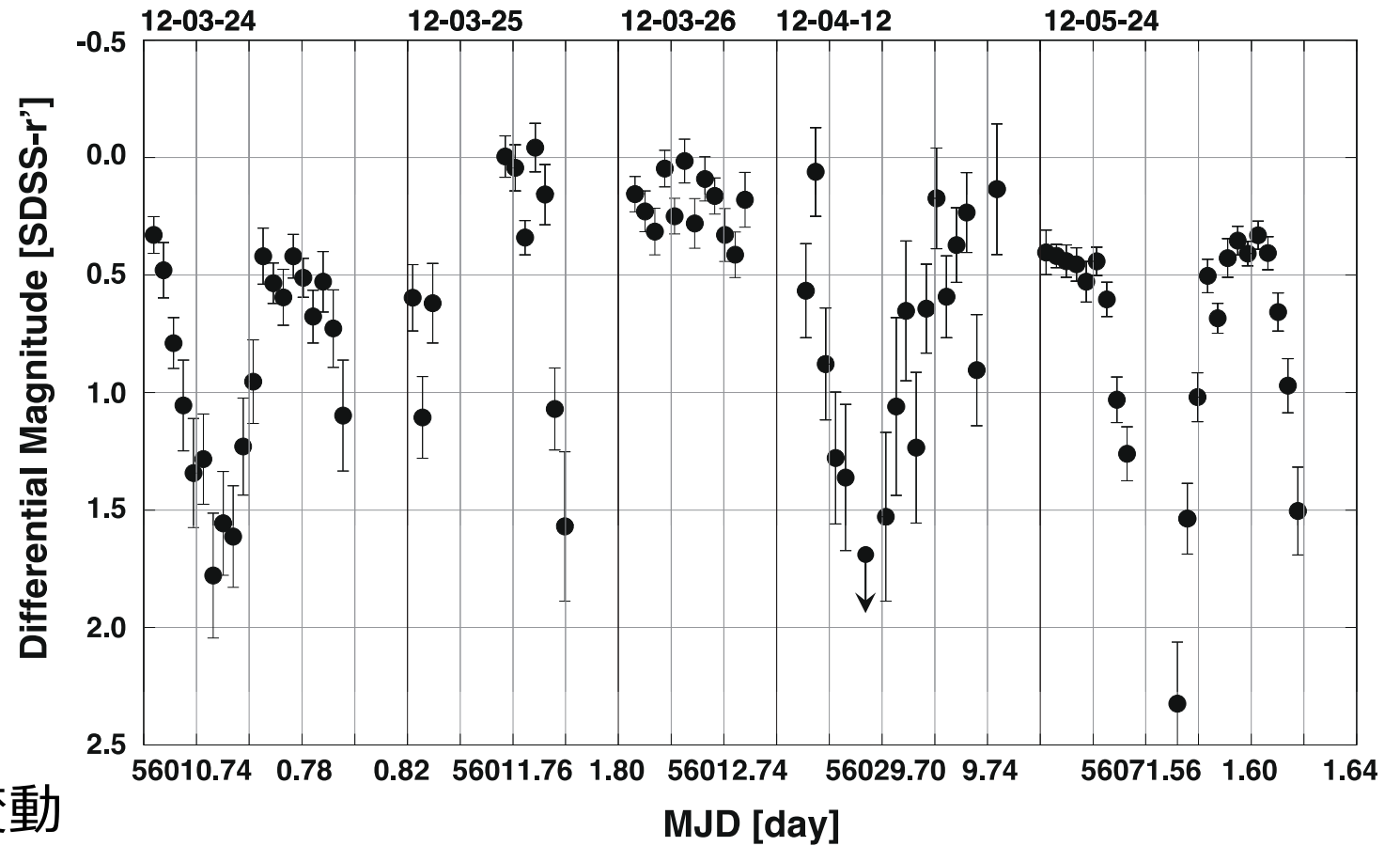
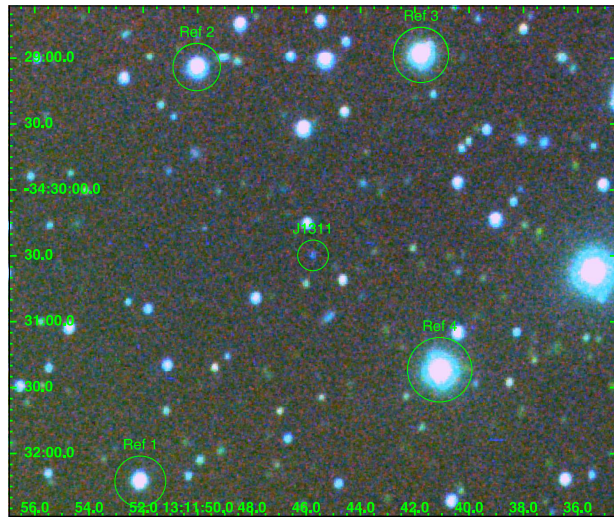
- 2FGL J2339.6-0532 を OISTER とすざく で観測
- 可視光 (OISTER) :
 - 4日にわたる多色観測 ⇒ 軌道位相で分解したSEDを作成
 - 軌道要素を制限 軌道傾斜角 $\sim 65^\circ$ を
- X線 (すざく) :
 - ライトカーブのパワースペクトルを追跡
 - 観測中に周期成分 (とくに倍周期はほぼ消滅)
- 現時点で質量降着は終わっていると結論
 - X線ライトカーブの倍周期変化は
 - 伴星フレア等による突発的・少量の物質降着
 - もしくはパルサー風の生成自体の不安定性の可能性

2FGL J1311.6-3429 X線観測



~10000秒の激しく不規則なフレア現象 ⇒ AGN??

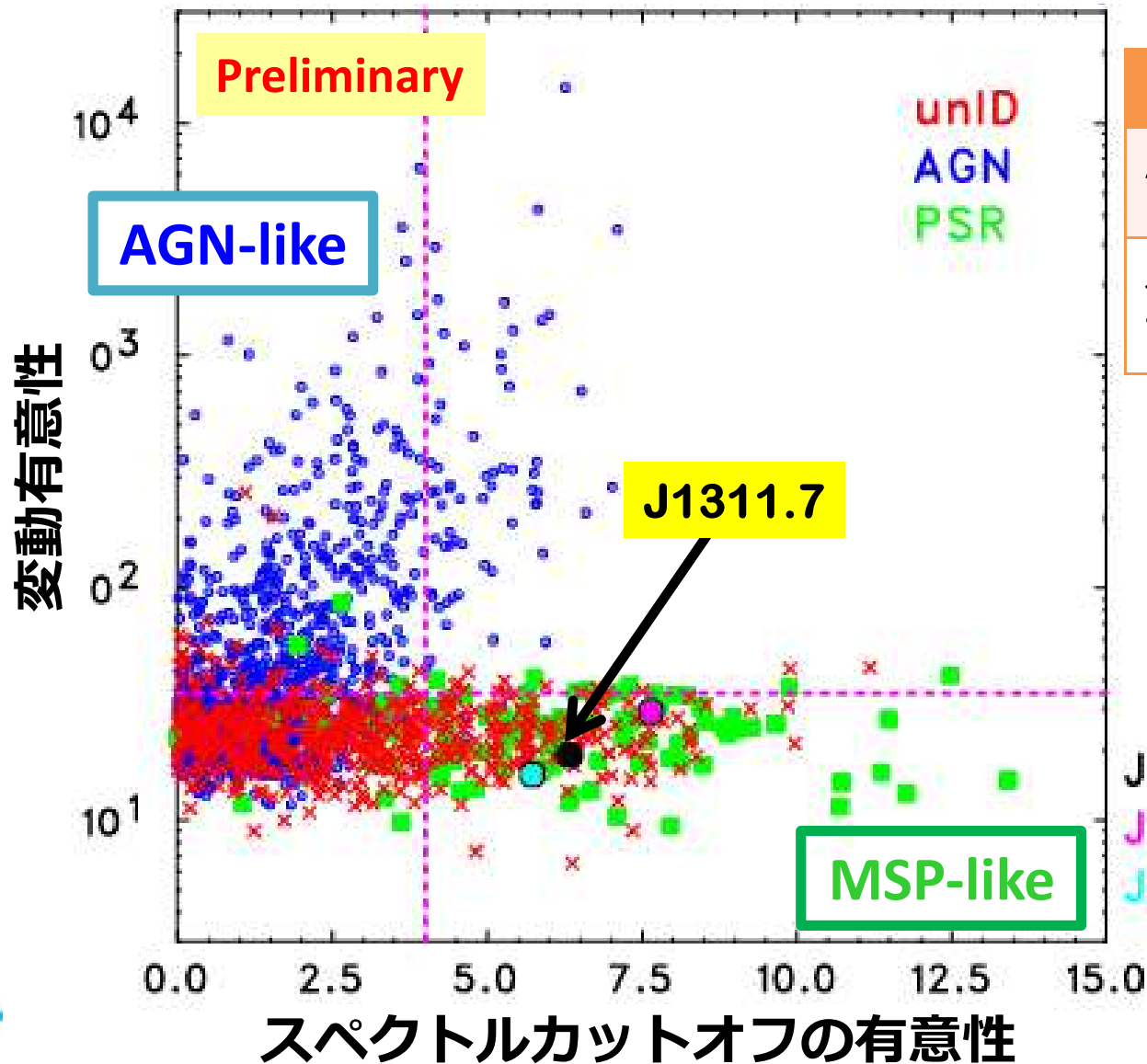
石垣・鹿林天文台(台湾)での可視光観測



- 周期~1.55時間の変動
- 最高温度 $\sim 10^4$ K
- 不規則なフレア

もう一つのBlack widow

今後の展開 (期待)

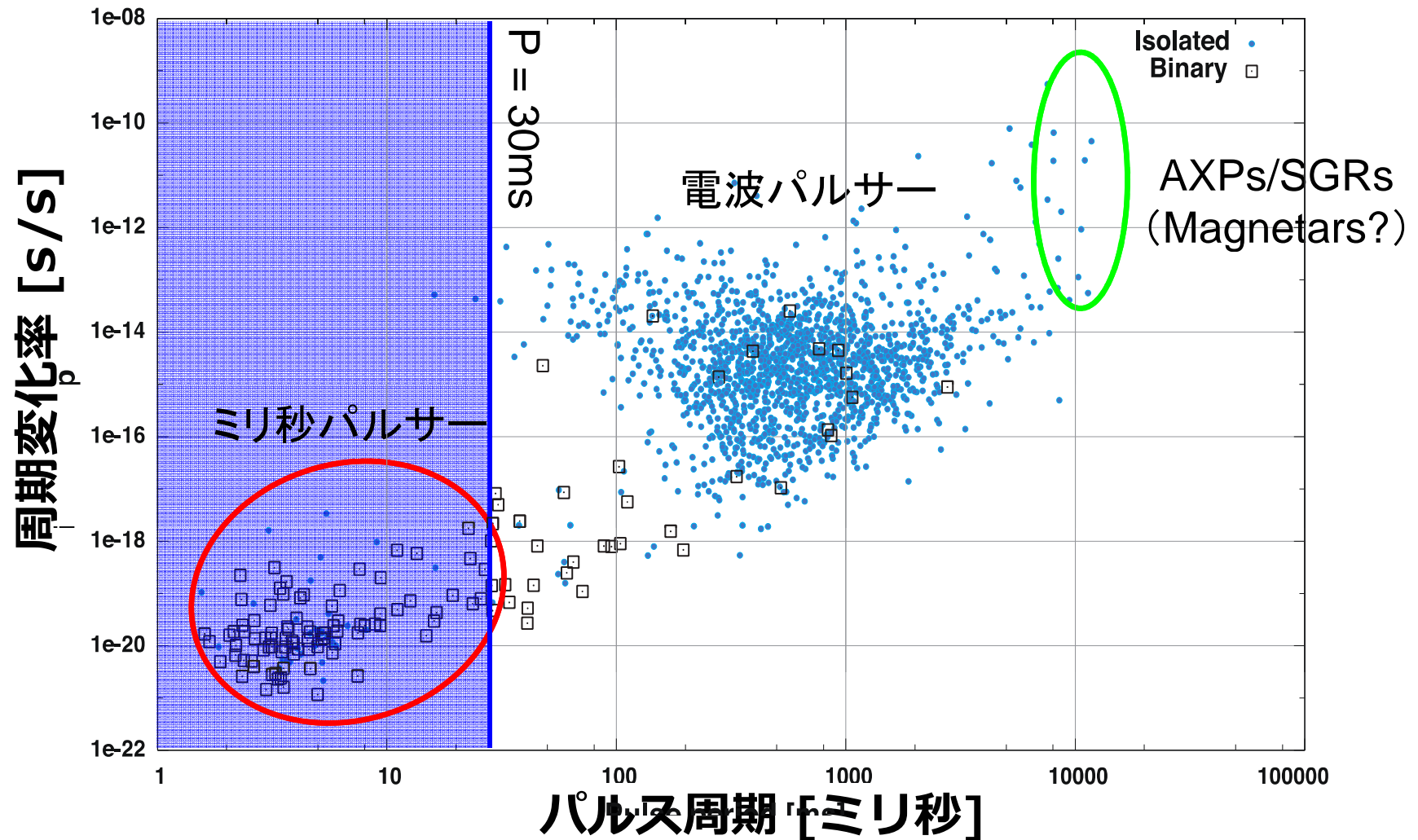


	長期変動	カットオフ
AGN	○	×
パルサー	×	○

ガンマ線MSPは
まだまだいるはず!!

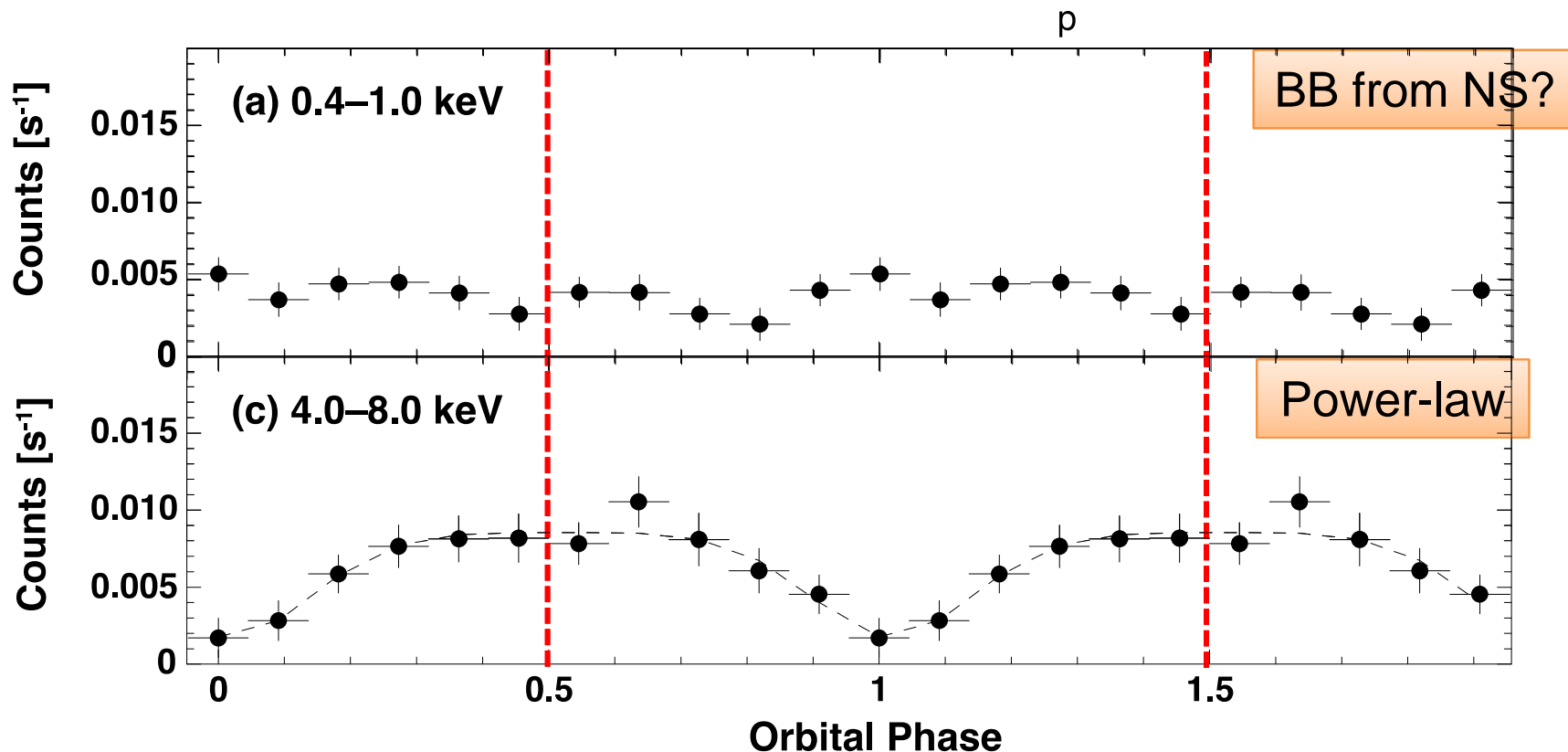
J1311.7
J1231.2
J2339.6

ミリ秒パルサー



- ミリ秒パルサー $P < 30$ ms
- ほとんどは連星系に存在 (図中□マーク)
- 一度回転エネルギーを失ったあと降着により再生? (Alpar 1982)

Phase-folded X-ray light curves

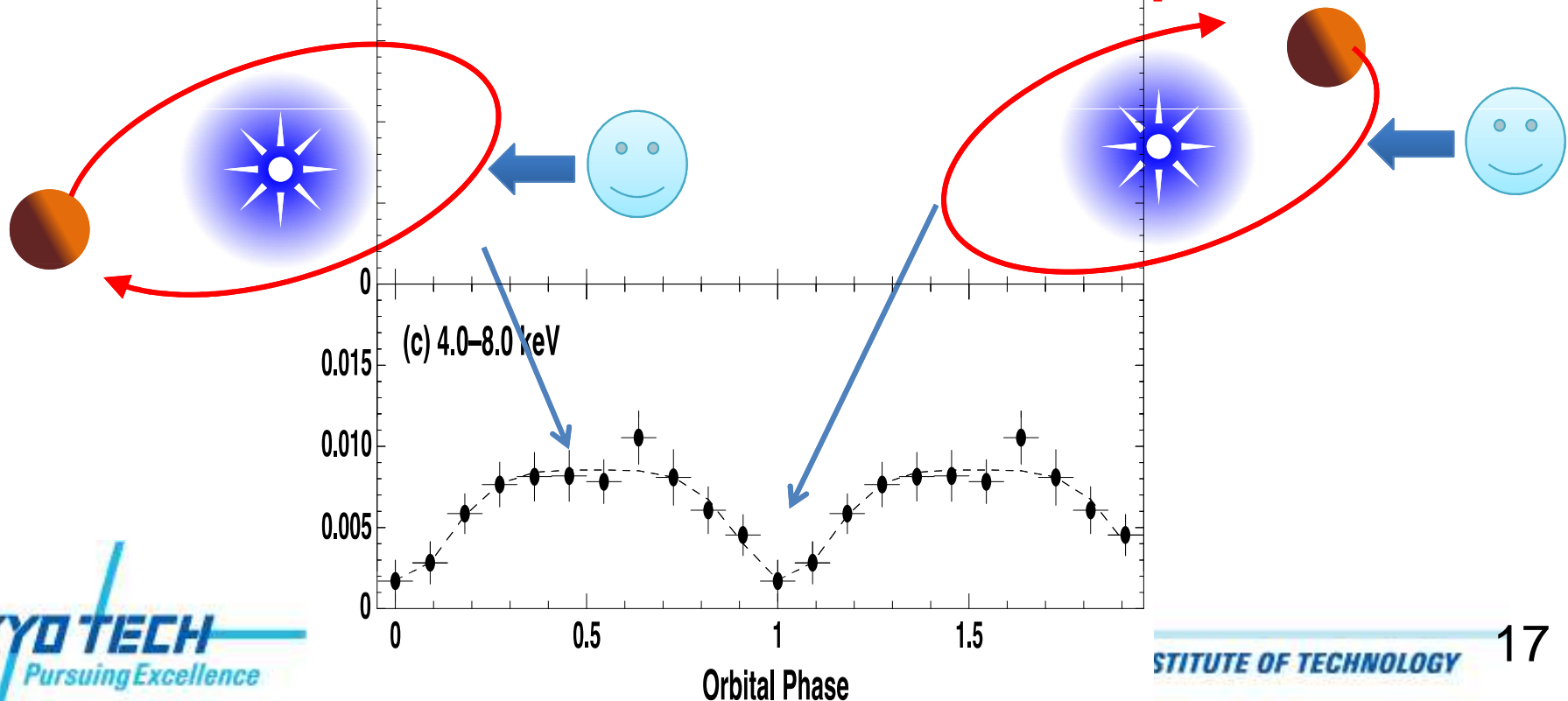


- Varies with the orbital motion (Brightest at the optical maximum)
- Synchronized with the optical light curve (Max@ Phase=0.5)
- Flat top light curve

Emitting region of the hard X-rays (1)

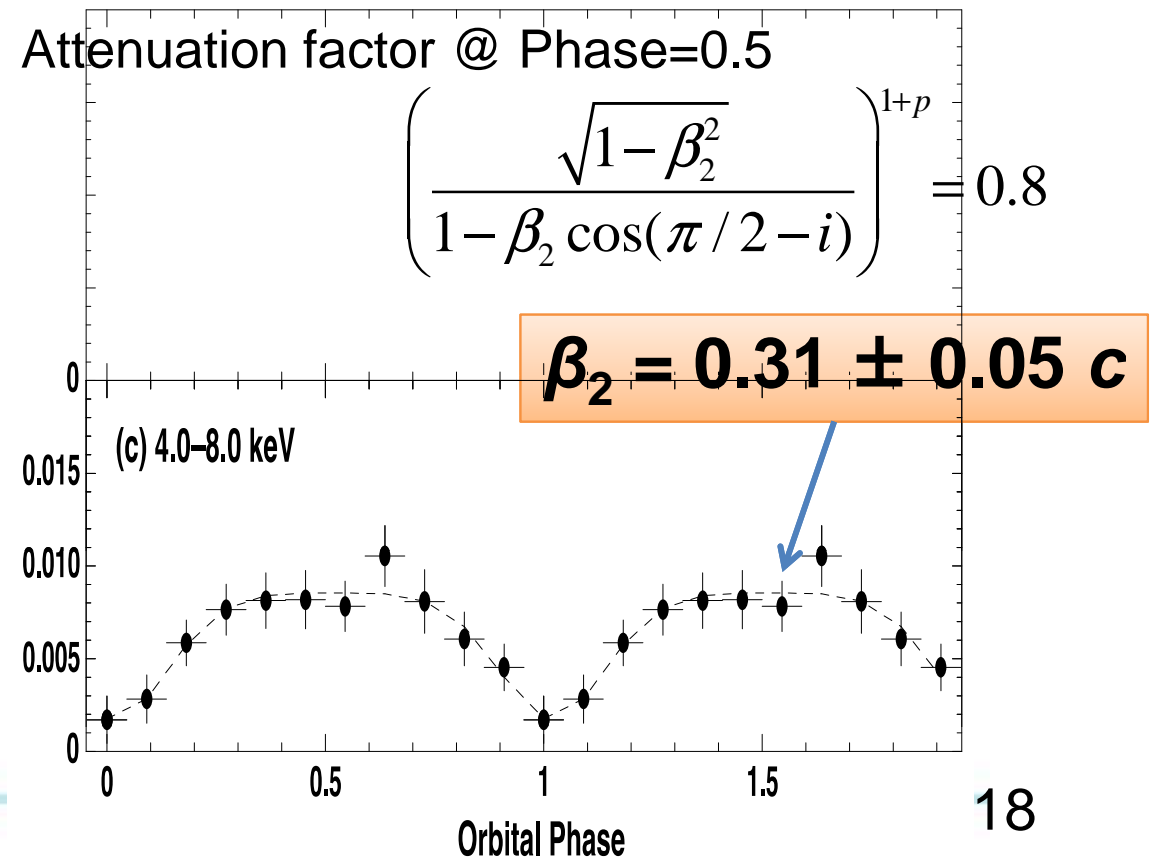
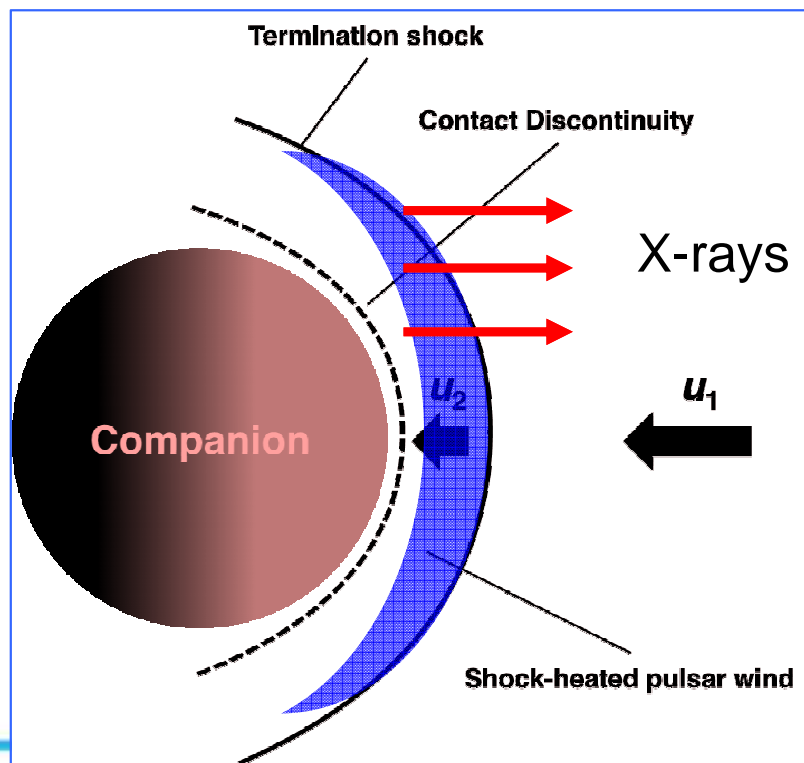
- A Pulsar wind nebula or a halo of the pulsar
 - Modulation due to eclipse of the halo??
 - ⇔ There is no gamma-ray eclipse (inclination $\sim 60^\circ$)

Inconsistent with the observed Orbital parameters



Emitting region of the hard X-rays (2)

- A thin layer of the shocked pulsar wind
 - Brightest at the superior conjunction
 - Flat-top modulation curve with Lorentz boost



Sigma-paradox

$$\sigma = \frac{B_1^2}{4\pi n_1 u_1 \gamma_1 m_e c^2}$$

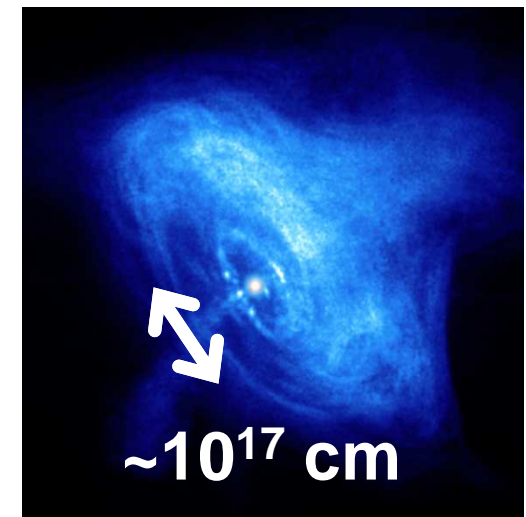
■ Magnetization parameter

- @Light Cylinder: $\sigma > 10000$ (Poynting flux dominant)
- @Termination Shock: $\sigma \ll 1$ (Kinetic energy dominant)

How / Where is the magnetic energy converted into the kinetic energy of particles?

■ The standard sample : Crab pulsar

- un-shocked pulsar wind is invisible
 - We cannot investigate the inside of the Termination Shock.
- ↔ Aharonian et al. (2012)



An evidence for particle acceleration

Chandra

Constraint on the σ -parameter

- σ : Ratio of Poynting flux to kinetic energy(KC84)

$$\sigma = \frac{B_1^2}{4\pi n_1 u_1 \gamma_1 m_e c^2}, \text{ where } 1 + u_1^2 = \Gamma_1^2$$

- Rankine-Hugoniot relation

$n_1 u_1 = n_2 u_2$	(Particle Flux),
$\frac{u_1 B_1}{\gamma_1} = \frac{u_2 B_2}{\gamma_2} = E$	(Electric Field),
$\gamma_1 \mu_1 + \frac{EB_1}{4\pi n_1 u_1} = \gamma_2 \mu_2 + \frac{EB_2}{4\pi n_2 u_2}$	(Energy),
$\gamma_1 u_1 + \frac{p_1}{n_1 u_1} + \frac{B_1^2}{8\pi n_1 u_1} = \gamma_2 u_2 + \frac{p_2}{n_2 u_2} + \frac{B_2^2}{8\pi n_2 u_2}$	(Momentum).

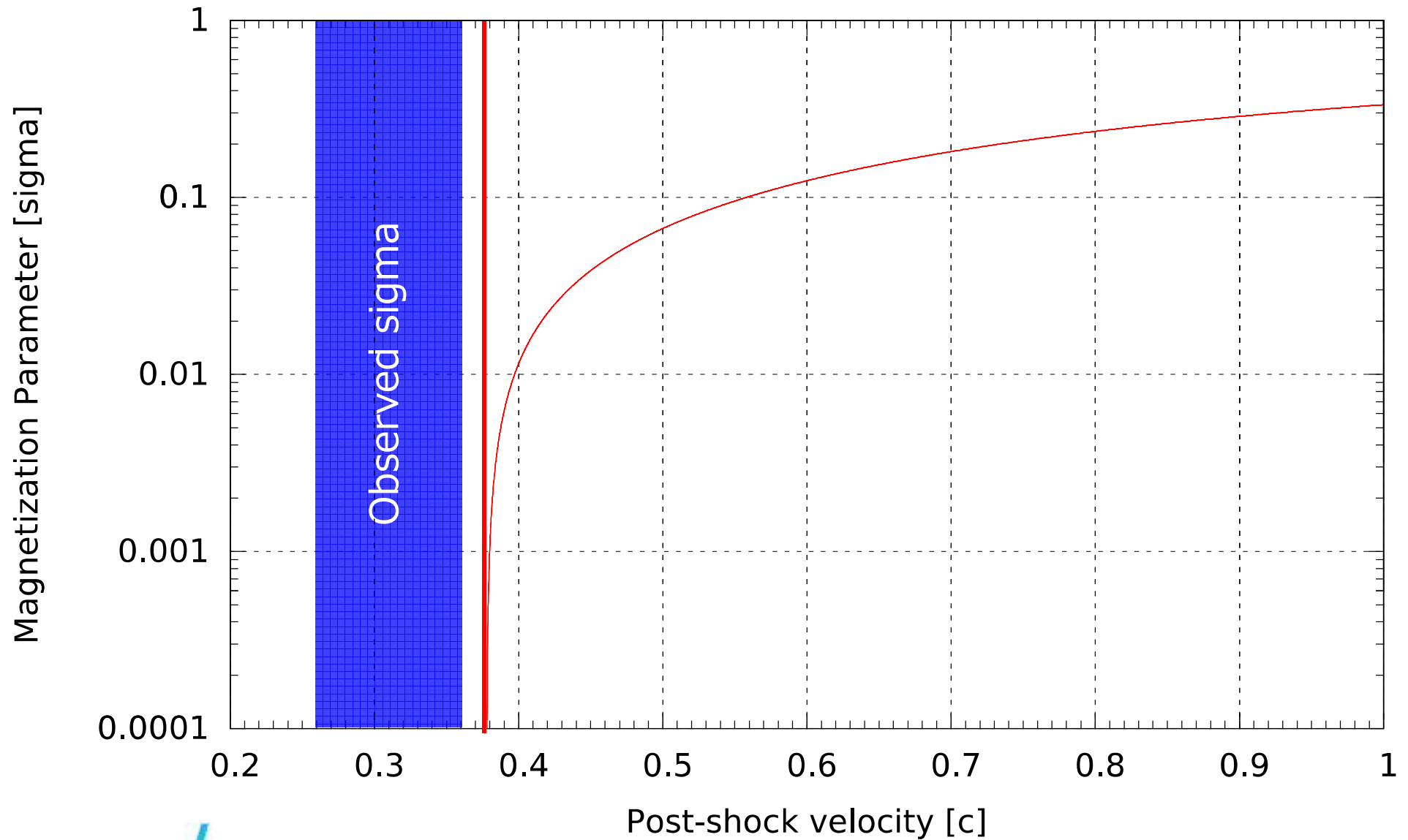
$$\beta_2 = \sqrt{\frac{1+9\sigma}{7-9\sigma}} > 0.38 @ \sigma = 0$$

Velocity of the post shock flow as a function of σ

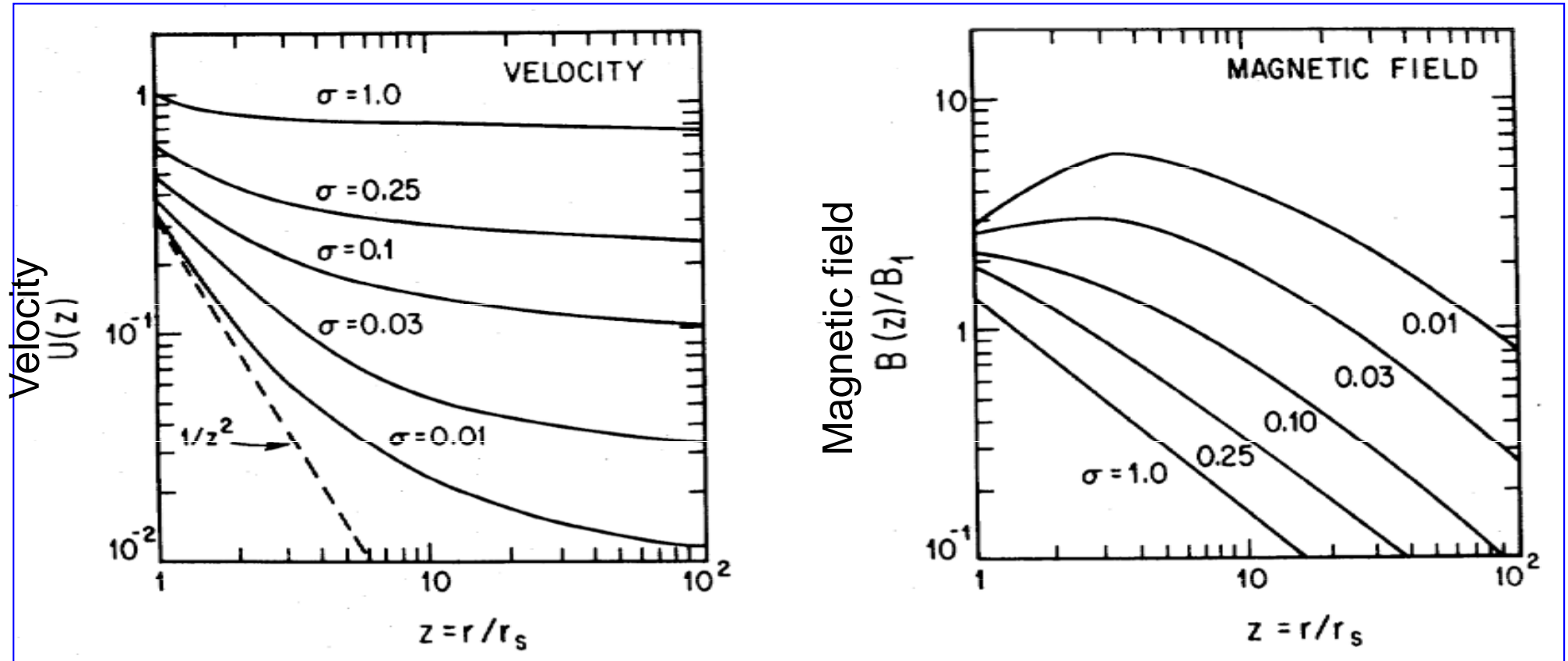
- $\beta_2 = 0.31 \pm 0.05$ from the observation

$\sigma \sim 0 \Rightarrow$ The pulsar wind is already in “particle dominant state” at 1.1×10^{11} cm apart from the pulsar (consistent with Aharonian et al. 2012)

σ as a function of β_2

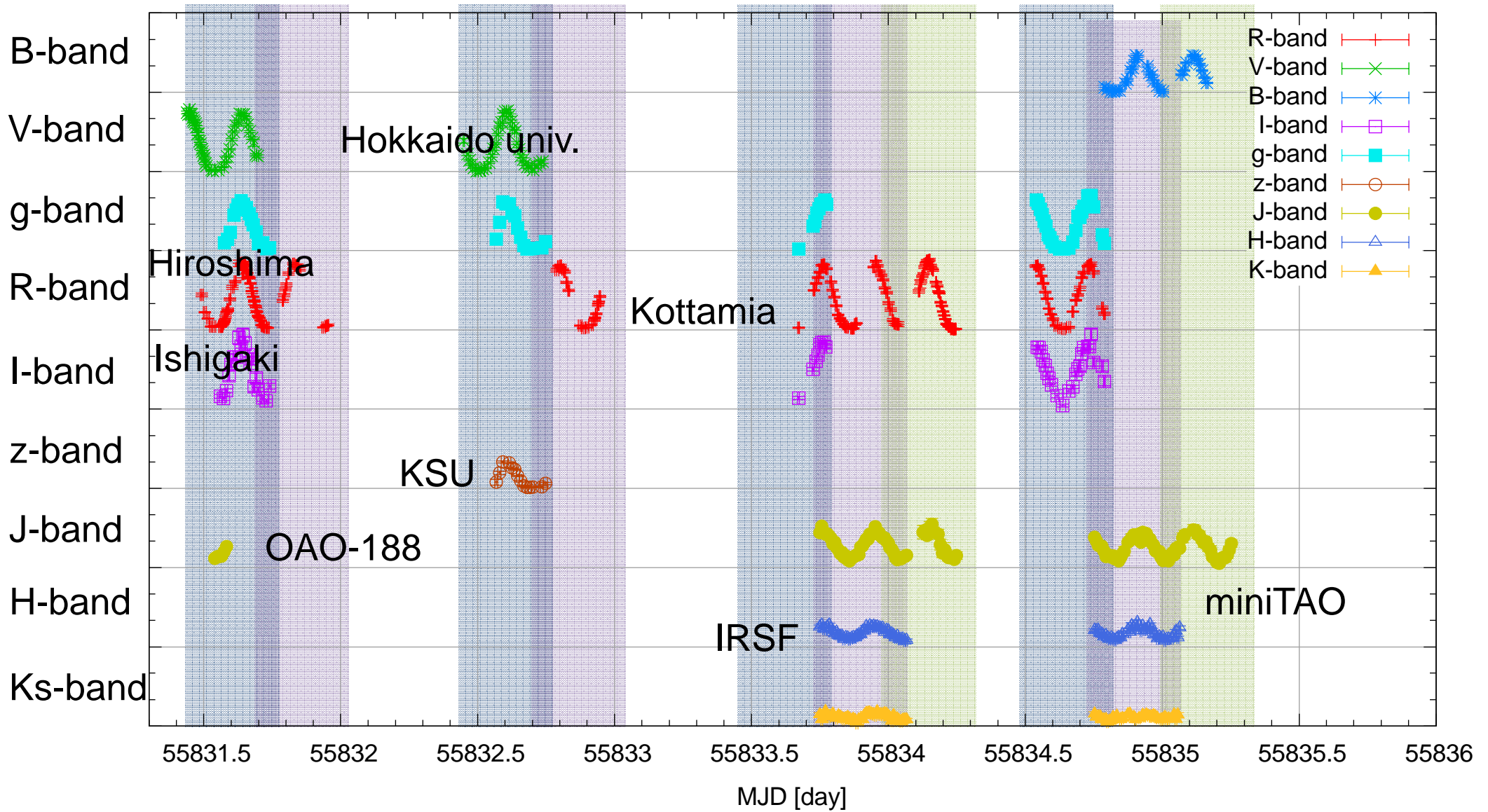


u_2 and B_2 for various σ as functions of r



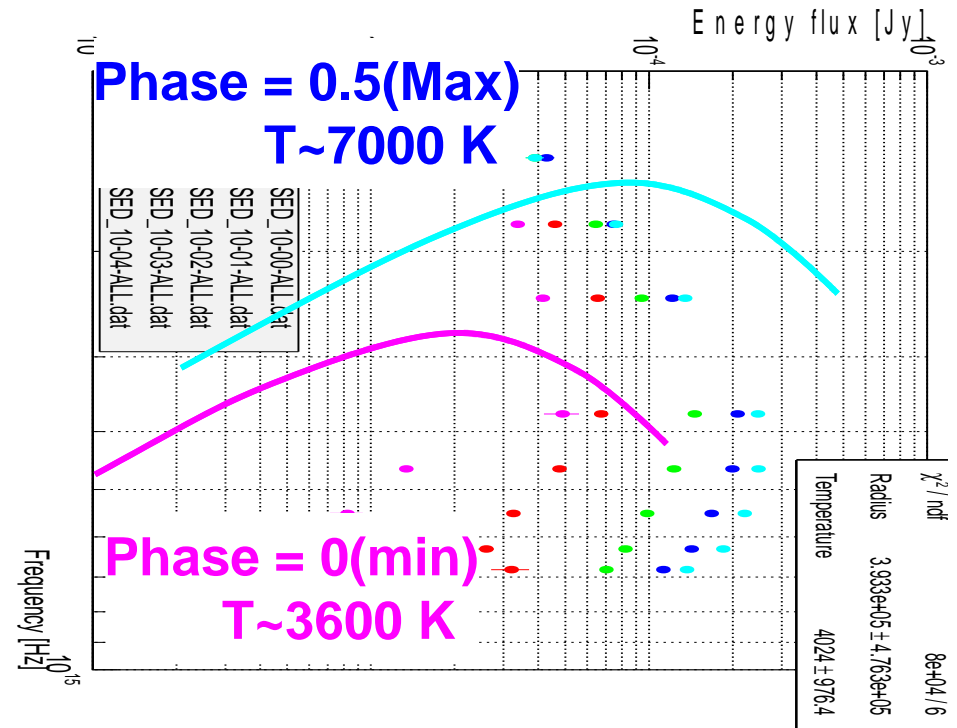
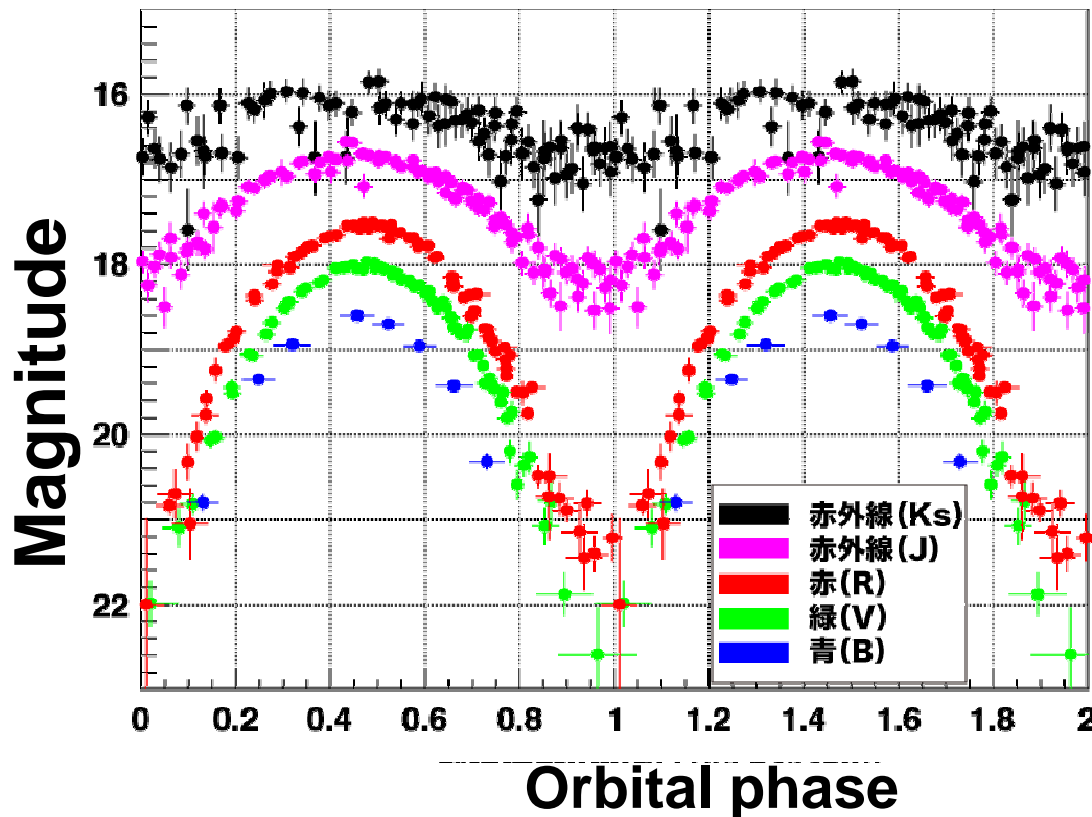
Kennel and Coronitii 1984

NIR/Optical observations



Optical counter part shows periodic variability

Folded light curves and SEDs



- Modulation period of 4.6h \rightarrow very close binary system
 - 4 mag variability \rightarrow Temperature variation 4000~7000
- These features resemble the proto-type black widow!!