

位置天文観測によるガンマ線連星の 高密度星決定法と、小型JASMINEへの適用

国立天文台 JASMINE検討室

山口 正輝

光赤天連シンポジウム@三鷹 2013/8/6

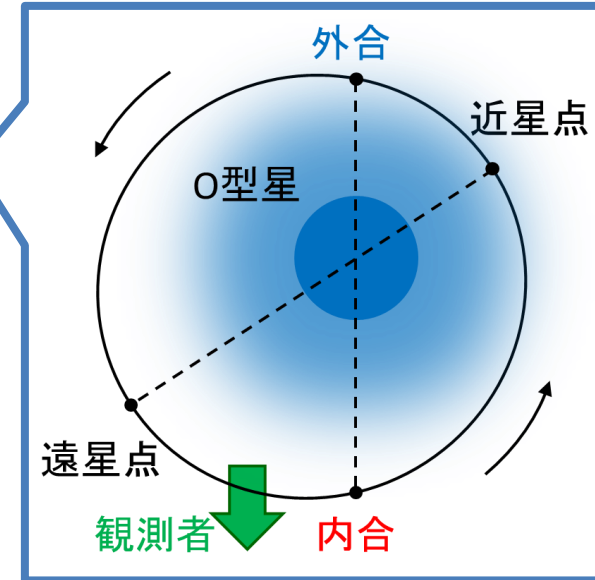
目次

- ①ガンマ線連星
- ②軌道要素決定法
- ③誤差の計算結果
- ④考察
- ⑤まとめ

ガンマ線連星

- ガンマ線が連星周期に同期して変動している連星

Object	Period	Scale	Consists of ...
LS 5039	3.9d	5×10^{12} cm	O7 + ?? (BHorNS)
1FGL J1018.6-5856	16d	10^{13} cm	O6 + ??
LS I +61°303	26d	10^{13} cm	B0e + ??
HESS J0632+057	320d	10^{14} cm	B0e + ??
PSR B1259-63	3.4yr	10^{14} cm	O9.7e + NS



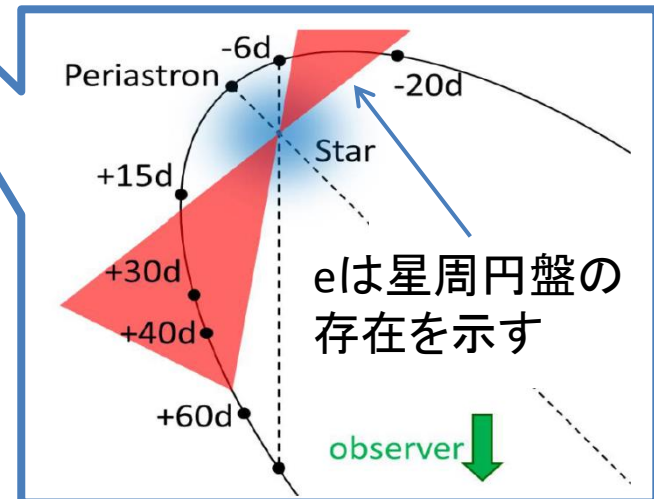
- X線γ線が連星周期で変動

→ 連星スケール(AU程度)で放射

高密度星の近くの物理状態を
調べられる(パルサー風やジェット)

問題 ① 高密度星の正体が分からない

② 非熱的放射機構が分からない

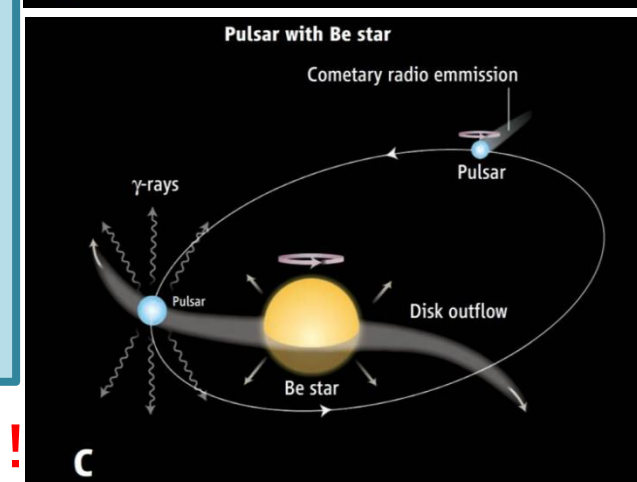
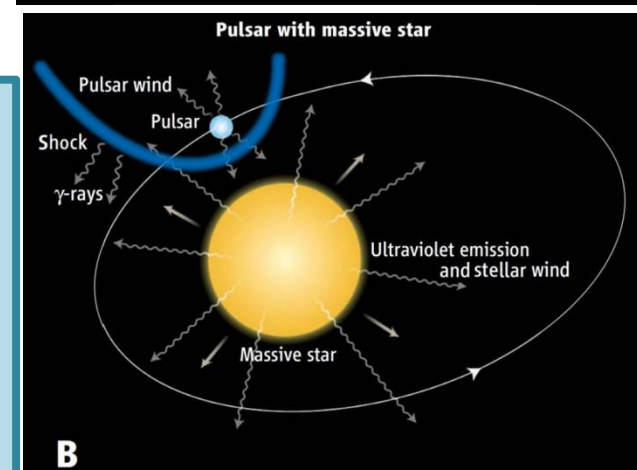
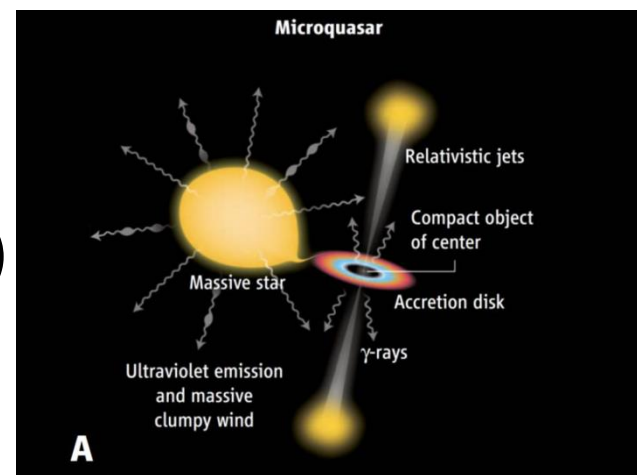


非熱的放射モデル

- X線γ線は非熱的放射(べき型スペクトル)
→ 加速粒子からの放射
↳ 衝撃波でのフェルミ1次加速
↓
でき方に対するモデル

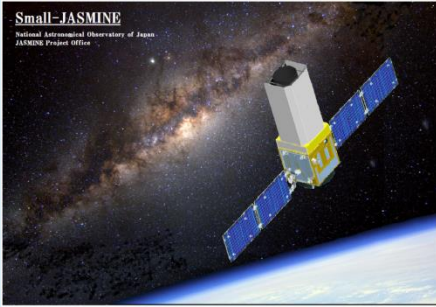
- マイクロクエーサーモデル (A)
 - 高密度星: ブラックホール
 - Jetに付随した衝撃波
- 星風衝突モデル (B)
 - 高密度星: 中性子星
 - 星風衝突でできる衝撃波
- 円盤相互作用モデル (C)
 - 高密度星: 中性子星
 - 円盤とパルサー風の衝突→衝撃波

高密度星が分かると放射モデルが決まる！！



位置天文観測を用いた高密度星決定

位置天文観測



$N(\sim 10^5)$ 個の光学
中心位置データ

軌道要素

①

②

高密度星
の質量

BHかNSを判定

- ① 本発表の本題(以降のスライド)
- ② 高密度星質量と軌道要素の関係

$$M_c = \left(\frac{4\pi^2}{G} \right)^{1/3} \left(\frac{M_{\text{sum}}}{P_{\text{orb}}} \right)^{2/3} a_*$$

M_c : 高密度星質量
 M_{sum} : 連星の質量和
 P_{orb} : 軌道周期
 a_* : 星の軌道長半径
 G : 重力定数

- P_{orb} はよい精度で分かっている(以後既知とする)
- M_{sum} は $20-30M_\odot$ としても誤差1割程度
- M_c 決定精度は a_* の精度で決まる

➡ BH/NSの判定可否は軌道要素の決定精度による

軌道要素決定法(多変量最小二乗法)

- 二乗和を最小にする軌道要素列ベクトル $\vec{\theta}$

① 楕円軌道の線形化...

$$\vec{r}(\varphi; \vec{\theta}) = \vec{r}_0(\varphi; \vec{\theta}) + \sum_{i=1}^5 \vec{a}_i(\varphi; \vec{\theta}) d\theta_i$$

② N個のデータ... $\vec{X} = \vec{r}_0 + A d\vec{\theta} + \vec{e}$

③ 残差 \vec{e} のノルムを最小にする $d\vec{\theta}$

$$d\vec{\theta} = (A^t A)^{-1} A^t d\vec{X} \quad (d\vec{X} = \vec{X} - \vec{r}_0)$$

→ $d\vec{\theta}$ が 0 に収束するまで繰り返す

- 各軌道要素の誤差

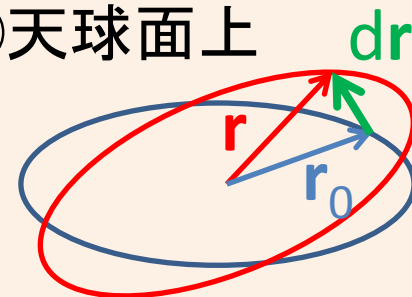
$$V(\vec{\theta}) = (A^t A)^{-1} \sigma^2 \quad (\sigma^2 \text{ は 1 データ の 残差 の 分散})$$

- 行列 A の成分は上で得た推定値を使う

観測装置固有

- $1\sigma_i (= \sqrt{V_{ii}})$ を誤差とする → ある $\vec{\theta}$ に対し σ_i を計算

① 天球面上



a_i : θ_i によって楕円がどう変わるかを表す

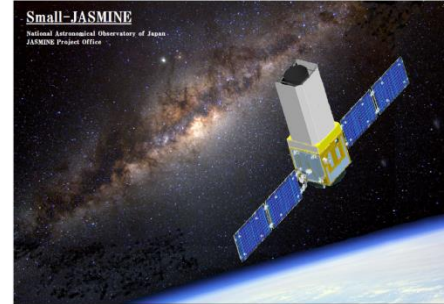
$$A = \begin{pmatrix} \vec{a}_{11} & \cdots & \vec{a}_{15} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \vec{a}_{N1} & \cdots & \vec{a}_{N5} \end{pmatrix} \quad d\vec{\theta} = \begin{pmatrix} d\theta_1 \\ \vdots \\ d\theta_5 \end{pmatrix}$$

$\vec{X}, \vec{r}_0, \vec{e}$ は $(N, 1)$ の列ベクトル
(成分は 2D 位置ベクトル)

r₀を更新

小型JASMINEへの適用と考察

ガンマ線連星LS 5039とLS I+61 303を対象



- a には大きな不定性(主に質量比由来)

→ 考え得る範囲をとる

→ LS 5039: 10-70 μas , LS I+61: 100-300 μas

- 小型JASMINE ... $\sigma \sim 3\text{mas}$ のデータ
 $N \sim 10^5$ 個から10 μas の中心位置
決定精度を達成する



計算結果

a の誤差割合(= S/N^{-1})

Object	a 最小	a 最大
LS 5039	2-3	0.3-0.4
LS I +61 303	0.17-0.2	0.06-0.07

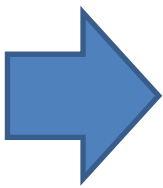
(値の範囲は他軌道要素の不定性由来)

高密度星の判定可能性

- LS 5039
 - a 最小(M_c 小)だと誤差大きくて決定できない
 - a 最大(M_c 大)なら4割程度の誤差で a を決定できる
→ 典型的に $M_c = 5 \pm 2M_\odot$ となりBHと判定できそう
- LS I +61 303
 - a 小さくても誤差2割程度 → 典型的に $M_c = 2 \pm 0.4M_\odot$
 - a 大きいと誤差小さくなりBHの場合は確実に判定可

まとめ(と展望)

- ガンマ線連星は一般に高密度星の正体が不明
- 位置天文観測により高密度星の質量に制限可
- 各連星パラメータの誤差を計算した
 - 多変量最小二乗法により分散行列を導出→誤差
 - 計算結果(小型JASMINEの精度を適用)
 - LS 5039: **重いBHなら判定可能**
 - LS I +61 303: **BHなら判定可能**(NSでもおおよそ可能)

- 
- ガンマ線連星での放射機構に強い制限
 - 高密度星周りの高エネルギー現象を明らかにする鍵

(現在はこの方法を系外惑星に応用し、サイエンスを検討中)

ガンマ線連星の視角

観測するのは伴星軌道の視角

$$\phi = \frac{a_*}{d} = \frac{qa}{d} = \frac{q \sqrt[3]{GM_{\text{sum}}} P_{\text{orb}}^{2/3}}{d}$$

$$= 0.10 \text{ mas } q M_{\text{sum}, 25}^{1/3} P_{\text{orb}, d}^{2/3} d_{2\text{kpc}}^{-1}$$

視角: ϕ 伴星のa: a_*
 距離: d 軌道周期: P_{orb}
 質量の和: M_{sum} 比: q

Objects	Porb	d (kpc)	q(<1)	Type	ϕ (mas)
Cyg X-1	5.6d	2.5	6-10/~20	O9.7	0.07-0.12
LS 5039	3.9d	2.5	2-7/20-26	O7	0.01-0.07
J1018	16d	5 ± 2	2-7/20-26	O6	0.01-0.15
LS I +61	26d	2	2-7/~20	B0e	0.1-0.3
J0632	320d	1.4 ± 0.3	2-7/~20	B0e	0.6-3
B1259	3.4yr	2.3	1.4/20	O9.7e	0.7

- P短いγ線連星でも軌道要素制限できそう
- P長いものは精度よく決められそう

計算結果

a: 軌道長半径
b: 軌道短半径
 θ, Ω, ω : 軌道の
オイラー角

- a, b, $\cos\theta(\equiv\mu)$, ω, Ω に対し σ_i/σ' を計算 ($\sigma' = \sigma/\sqrt{N}$) \rightarrow 天体固有の量
- 対象は LS 5039、LS I +61 303

代入するパラメータ

- a: 予想される視角の最大と最小
 - 質量比に不定性があるため幅をとる (a最大は M_c 最大に対応)
- b, ω : 分光観測の結果
- θ : 20-60°

結果

- a, b の σ_i/σ' は予想される a によらない \rightarrow a が大きいほど精度高
- σ_i/σ' の値は θ にあまりよらない

結果① σ_i/σ' の値

LS 5039 (Ω, ω は省略)

予想a	a	b	μ
10 μ as	2-3	~ 1.7	~ 0.2
70 μ as	2-3	~ 1.7	~ 0.03

LS I +61 303

予想a	a	b	μ
100 μ as	1.7-2	~ 2	~ 0.02
300 μ as	1.7-2	~ 2	$\sim 6e-3$

各軌道要素の誤差

σ_i/σ' の値

LS 5039

予想 a	a	b	μ	$\Omega(\text{rad}/\mu\text{as})$	$\omega(\text{rad}/\mu\text{as})$
10 μas	2-3	1.6- 1.7	~ 0.2	0.1- 0.2	0.1- 0.2
70 μas	2-3	1.6- 1.7	~ 0.03	~ 0.02	~ 0.02

LS I +61 303

予想 a	a	b	μ	$\Omega(\text{rad}/\mu\text{as})$	$\omega(\text{rad}/\mu\text{as})$
100 μas	1.7-2	1.8- 2.2	~ 0.02	0.01- 0.02	0.01- 0.02
300 μas	1.7-2	1.8- 2.2	$\sim 6e-3$	$\sim 5e-3$	$\sim 5e-3$

分散と各パラメータ誤差

分散共分散が与えられたとき
それらと誤差の関係は？

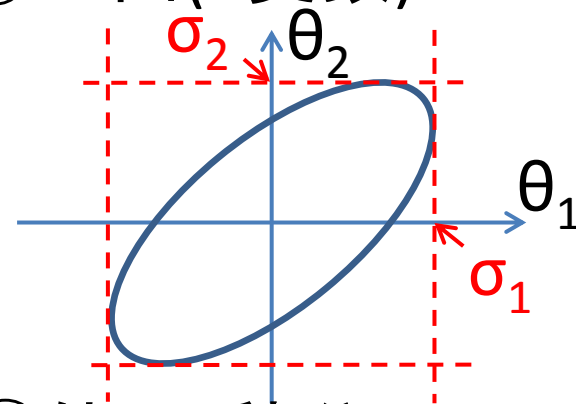
- Normal(0, V)の多変量正規分布を考える [$f \propto \exp(-\theta^t V^{-1} \theta / 2)$]
 - 共分散を考慮に入れて各 θ の分散を求めるには
 - ① 1 σ 面の各 θ に対し最大値をとる
($\theta^t V^{-1} \theta = 1$ を満たす最大の θ_i を求める)
 - ② 他の θ で積分して1 σ の値をとる
- いずれにせよ σ_i と求まる

➡ σ_i (Vの対角成分)を計算すればよい

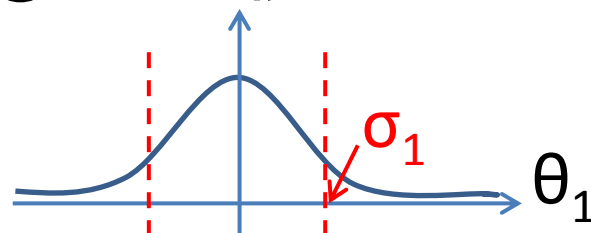
$$V = \begin{pmatrix} \sigma_1^2 & \cdots & \sigma_1 \sigma_5 \rho_{15} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \sigma_1 \sigma_5 \rho_{15} & \cdots & \sigma_5^2 \end{pmatrix}$$

σ : 分散、 ρ : 相関係数

① 1 σ 面(2変数)



② 他 θ で積分



分散の計算

- ゴールは $V(\vec{\theta}) = (A^t A)^{-1} \sigma^2$ の対角成分

① 楕円 $\vec{r}(\xi)$ の計算

② 行列Aの係数 $\partial \vec{r} / \partial \theta_i$

③ 行列 $A^t A$ の成分計算 →

④ 行列 $A^t A$ の逆行列計算

$$\sum_{i=1}^N \vec{a}_{ij} \cdot \vec{a}_{ik} \sim N \int \frac{\partial \vec{r}}{\partial \theta_j} \cdot \frac{\partial \vec{r}}{\partial \theta_k} \frac{d\varphi}{d\xi} d\xi$$

例) 11成分なら

$$(A^t A)_{11} = \frac{1}{2} (\cos^2 i \cos^2 \omega + \sin^2 \omega)$$

- **すべて解析的に計算可能**

- ただ、ややこしいので計算機に代入計算させる