

チャンドラ衛星を用いた超新星残骸 RX J1713.7-3946の膨張測定

2015年9月9日(水)

日本天文学会2015年秋季年会 特別セッション(CTA)

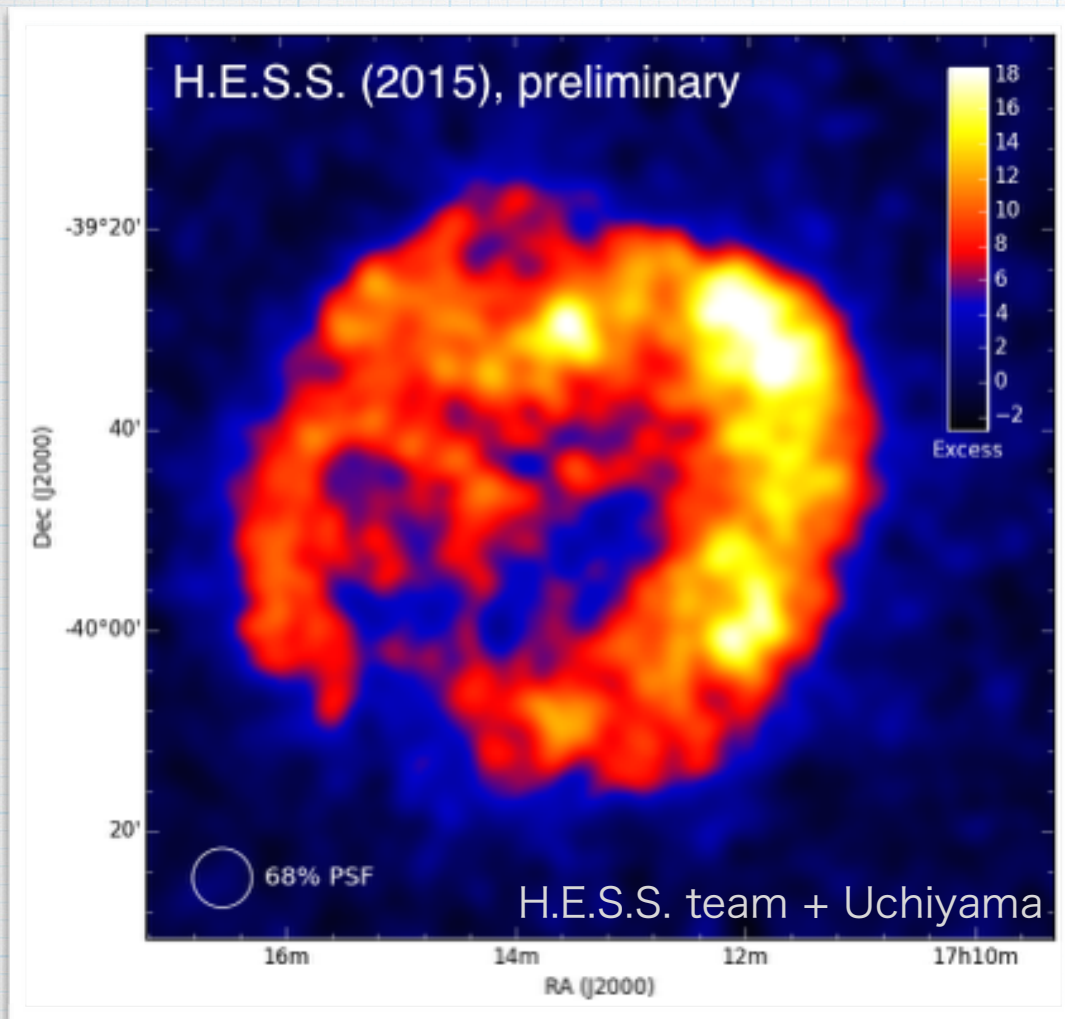
～ガンマ線天文台 CTA で切り拓く次世代の高エネルギー天文学～

立教大学

辻 直美, 荒川 真範, 内山 泰伸

高エネルギー天文学 宇宙線の起源

RXJ1713.7-3946の新しい
TeVガンマ線イメージ(H.E.S.S.)



* 宇宙線の起源

knee以下→銀河系内の**超新星残骸**

kneeからankle→不明

ankle以上→銀河系外？

* SNR 粒子加速機構

衝撃波加速(フェルミ加速)が最有力

エネルギーゲイン； $\varepsilon \sim V_{sh}/c$

(一往復, V_{sh} ; 衝撃波速度, c ; 光速)

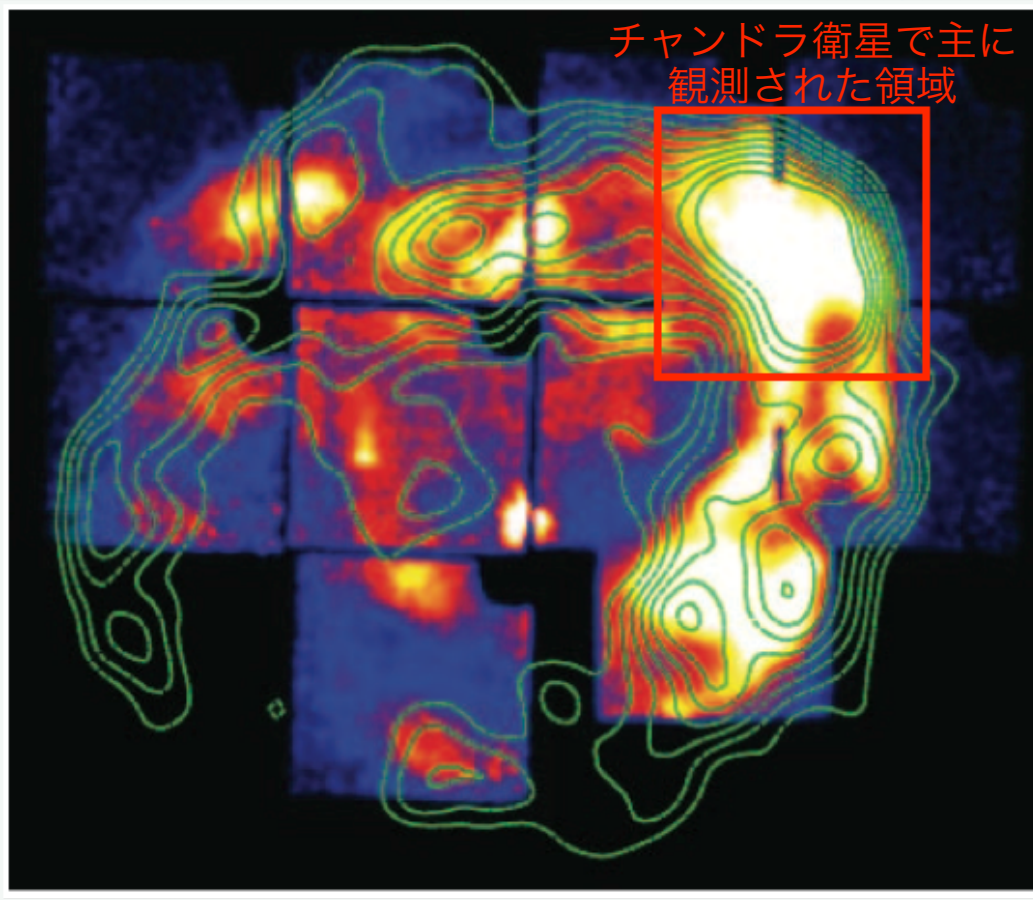
加速電子の最大エネルギー； 10-100 TeV

* 多波長観測

X線(すざく) + γ 線(Fermi, H.E.S.S)

CTAでも重要な観測対象

超新星残骸RX J1713.7-3946

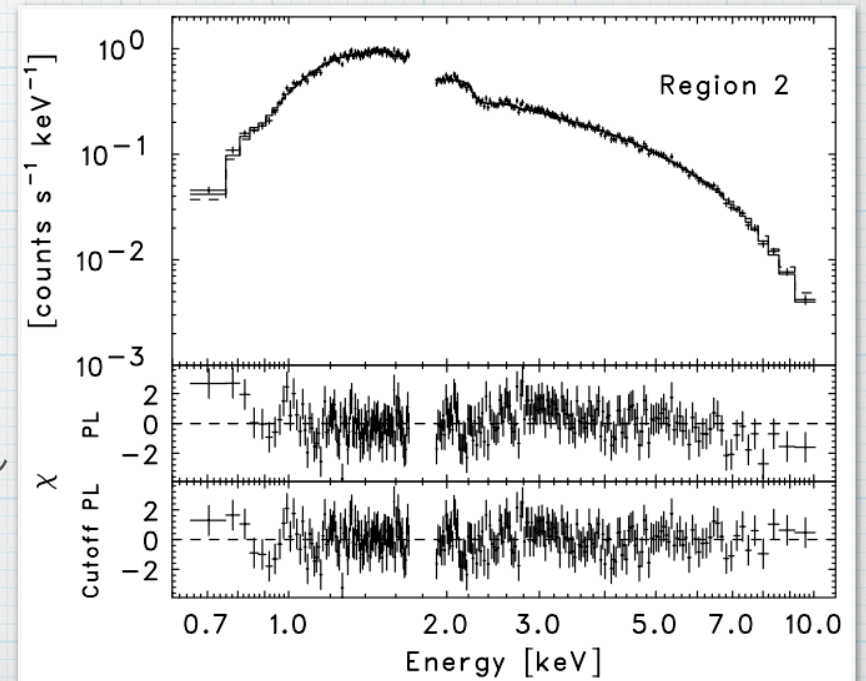


上図；すざくによるX線イメージ
等高線はH.E.S.S.によるガンマ線
(Tanaka et al., 2008)

右図；RX J1713NWのスペクトル
(Tanaka et al., 2008)

- ・ 輝線が見つかっていない
- ・ べき関数でフィットされる

年齢	~2000 yr ?
距離	~1 kpc
サイズ	65'x55'
中心座標	17 ^h 13 ^m 33.1 ^s -39°45'44"
タイプ	shell型
特徴	<ul style="list-style-type: none"> ・ シンクロトロン放射が支配的 ・ TeVガンマ線も観測されている ・ 銀河面上に位置している



Proper motion 測定概要

* 解析内容

エッジ、フィラメントに沿った領域(box1~6)におけるproper motionの測定

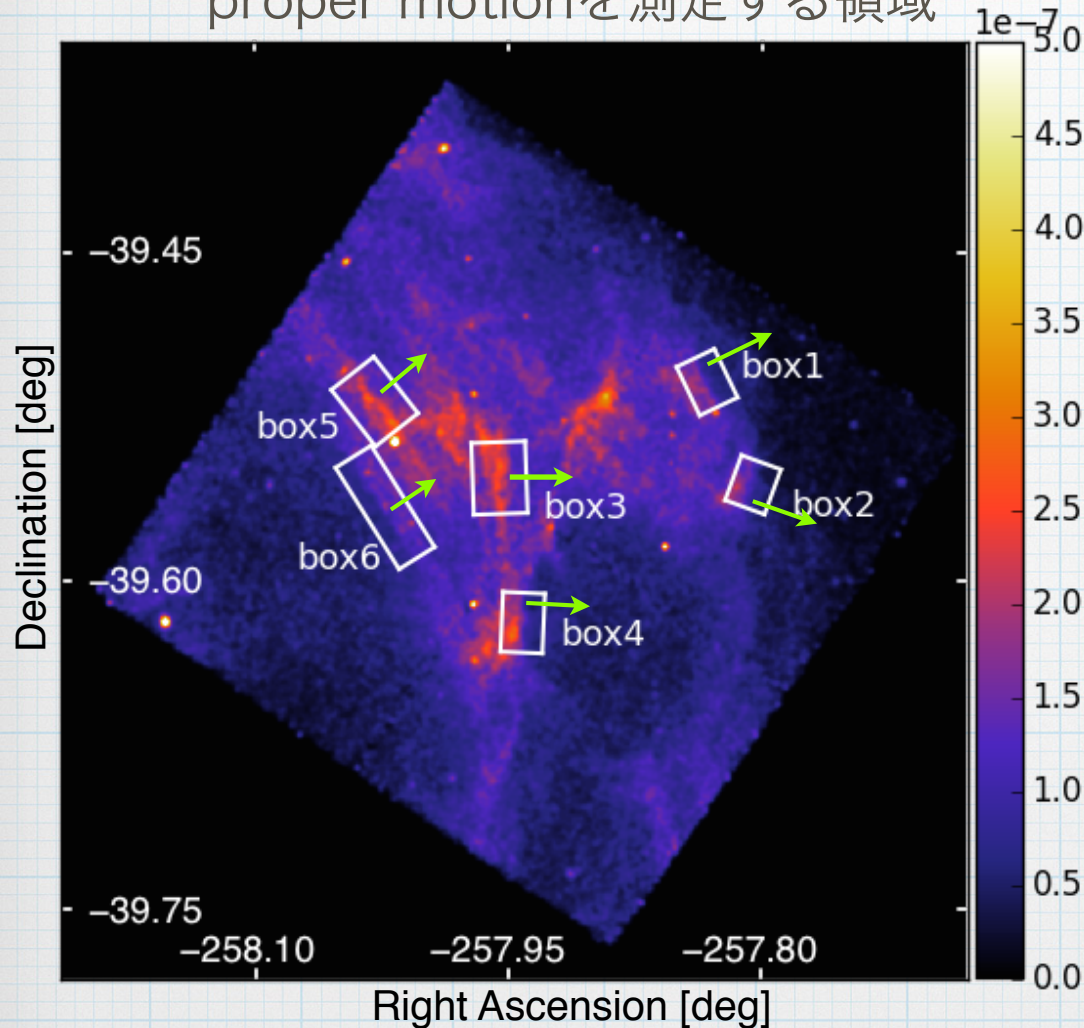
* 目的

衝撃波速度の測定→フェルミ加速で重要
年齢の測定 → SNR進化過程で重要

観測データ (RX J1713 NW)

Obs ID	Start Date	Exposure [ks]
12671	2011-07-01	89.87
10092	2009-09-10	29.21
10091	2009-05-16	29.65
10090	2009-01-30	28.40
6370	2006-05-03	29.77
5560	2005-07-09	29.03
736	2000-07-25	29.62

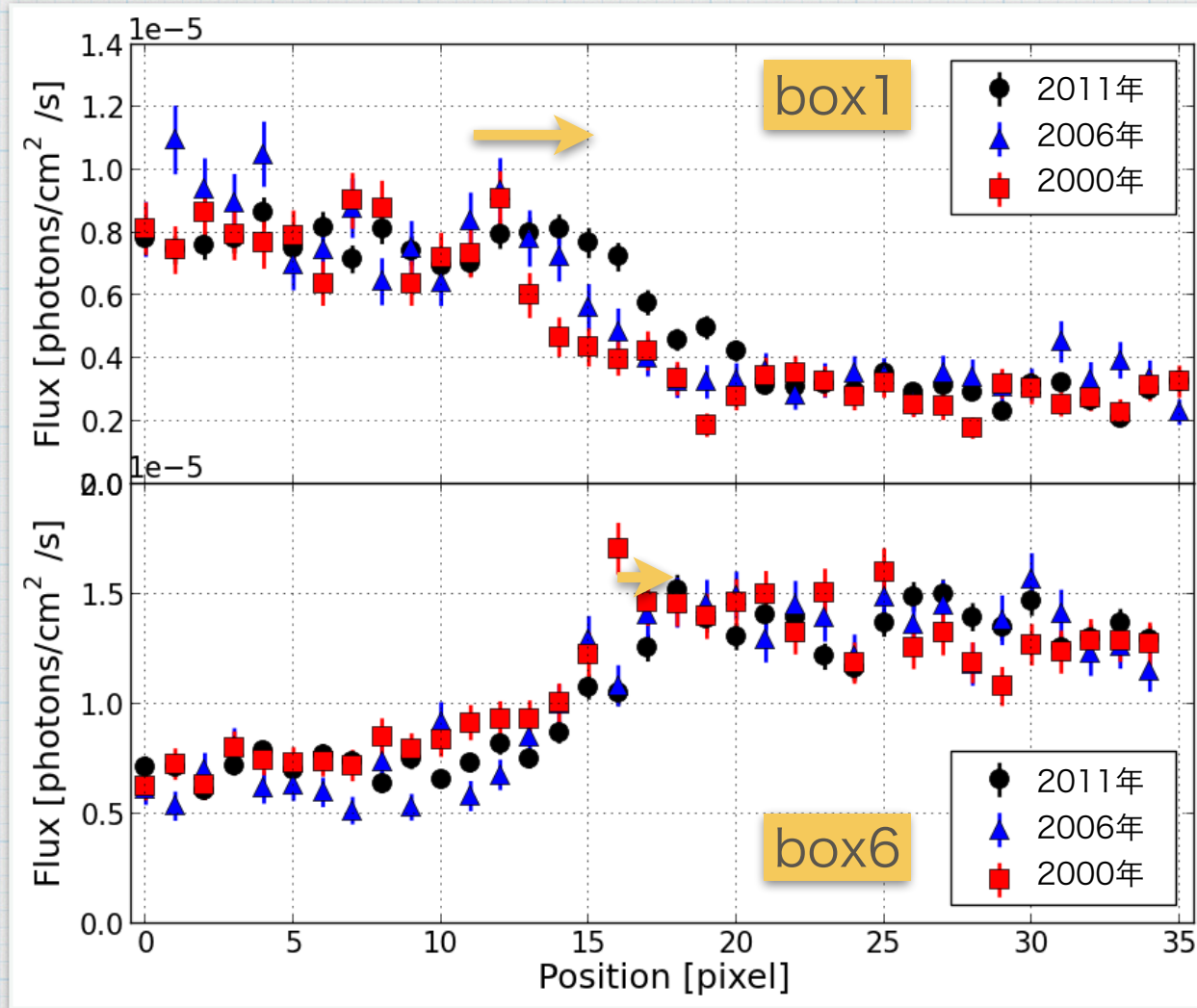
proper motionを測定する領域



フラックスイメージ(0.5-5keV)

Proper motion 測定結果

投影プロファイル(上;box1, 下;box6)



* カイ二乗検定

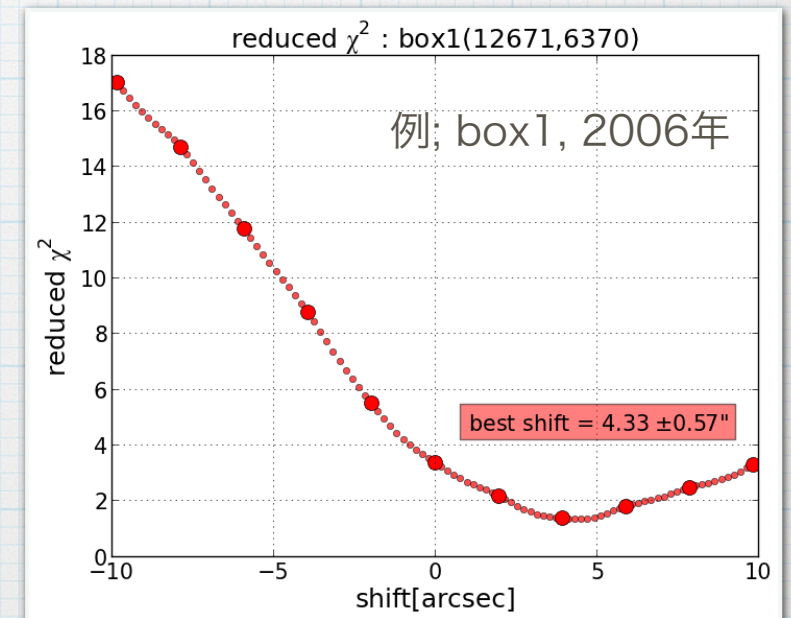
$$\chi^2 = \sum_i \frac{(p_i - q_i)^2}{\sigma_i^2}$$

p_i ; モデル(2011年のデータ)

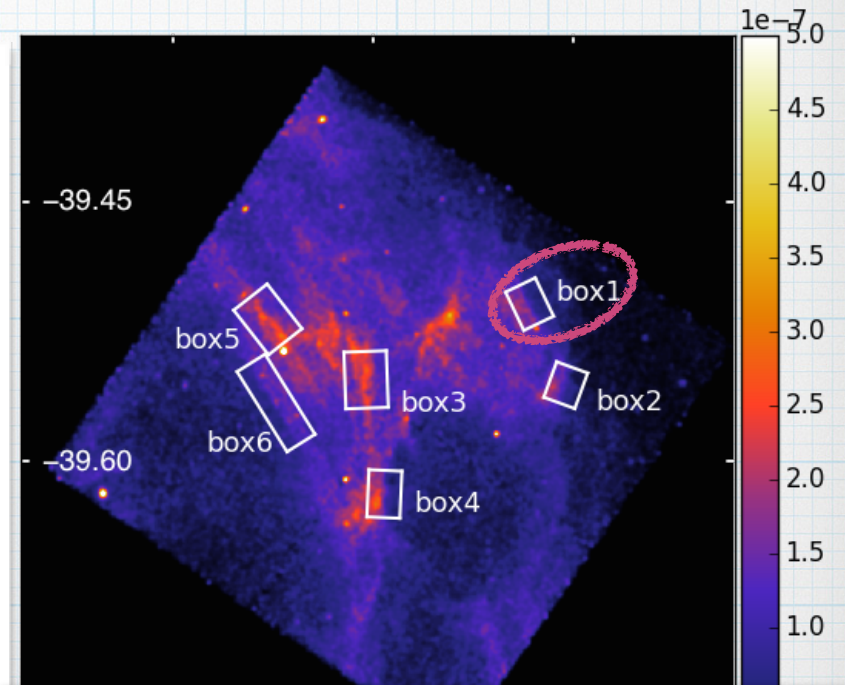
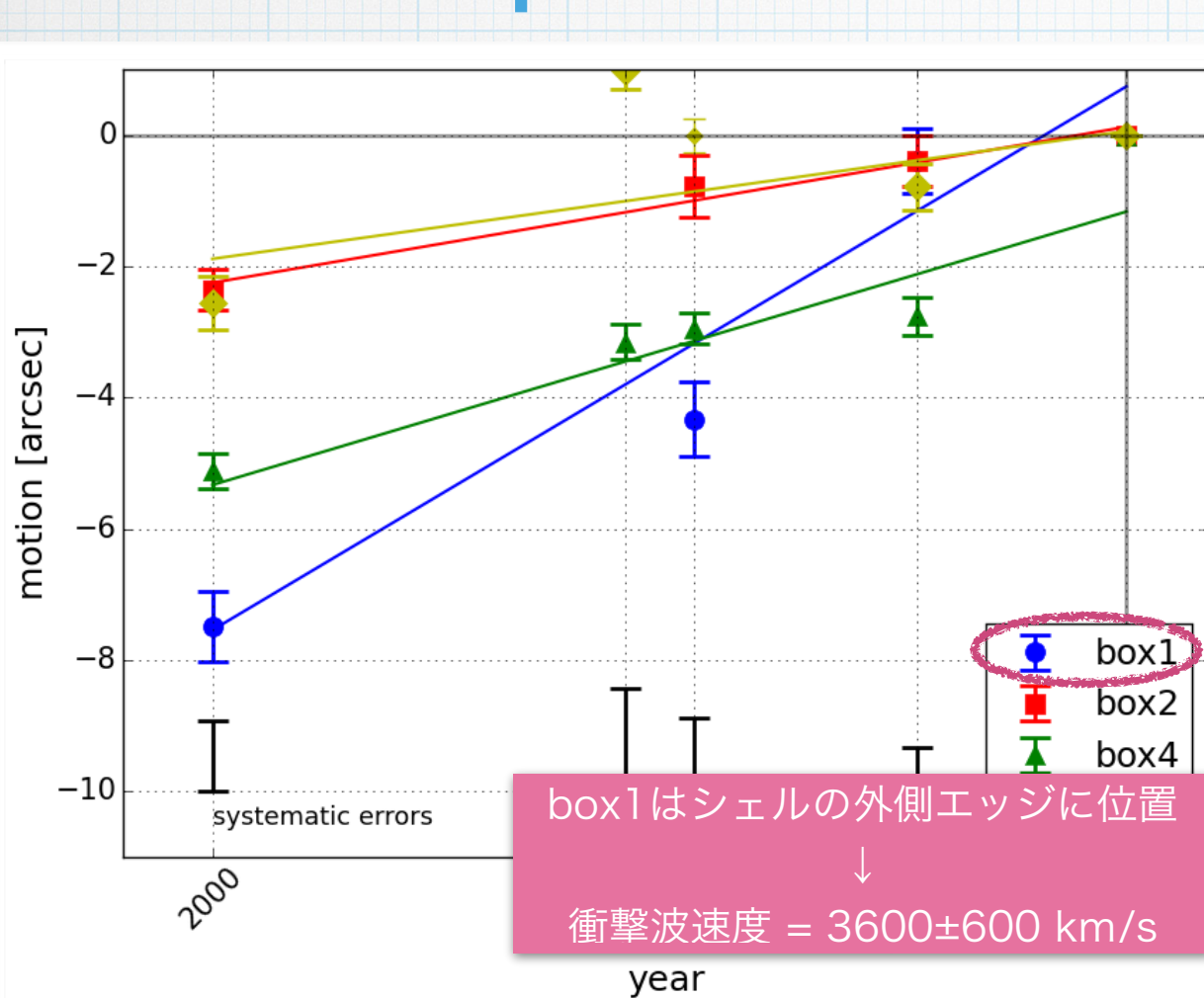
q_i ; 比較するデータ

σ_i ; q_i の誤差

換算カイ二乗(= χ^2 /自由度)の最小値を与えるシフト数を動いた距離とする



Proper motion 測定結果



直線の傾きから角速度["/yr]を求める



速度[km/s]を計算する(距離を1 kpcと仮定)

box ID	angular velocity ["/yr]	velocity [km/s]
1	0.76 ± 0.12	3600 ± 600
2	0.22 ± 0.12	1000 ± 600
3	0.34 ± 0.12	1600 ± 500
4	0.38 ± 0.13	1800 ± 600
5	0.12 ± 0.12	600 ± 500
6	0.18 ± 0.13	800 ± 600

* 系統誤差について

いくつかの点源の位置座標のずれ(rms)を系統誤差としている。

超新星残骸の進化過程

* 自由膨張期(0-10³年)

超新星爆発による噴出物質(イジェクタ)が星間空間に初速度~10,000 km/sで自由膨張する



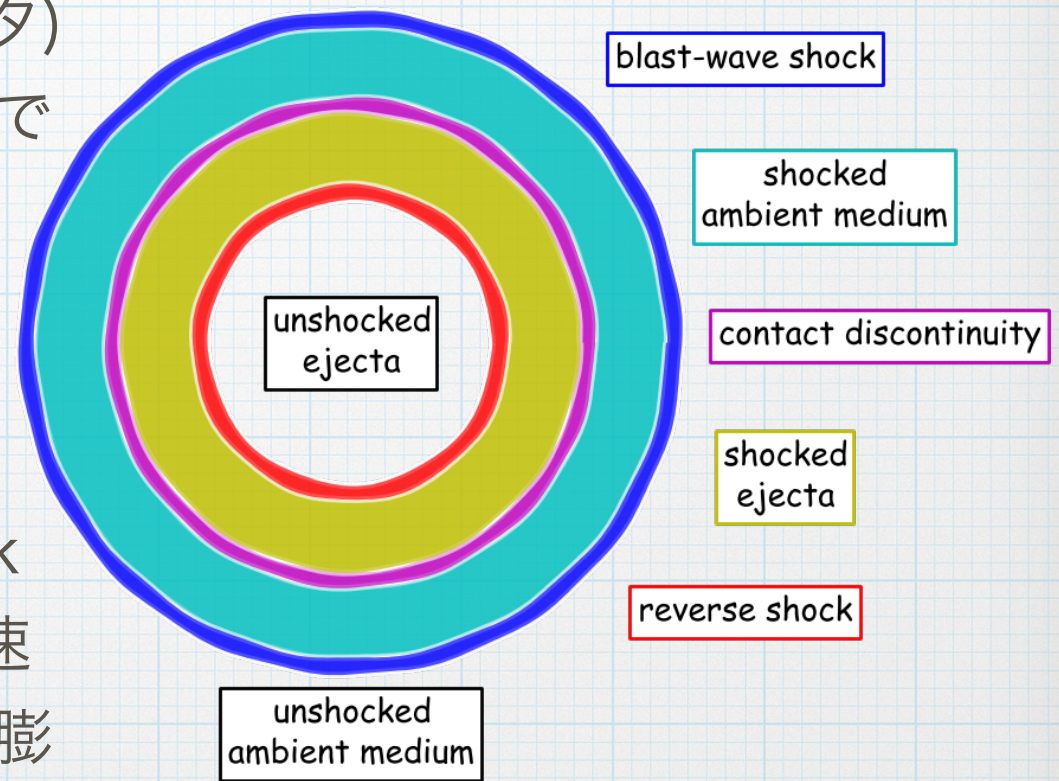
* セドフ期(10³-10⁴年)

(イジェクタ質量) = (forward shockで加熱された星間物質の質量) → 減速
自己相似解 $R \propto t^{2/5}$, $V \propto t^{-3/5}$ に従って膨張する



* 雪かき期(10⁴-10⁵年)

* 消滅期(10⁵- 年)



* RX J1713 の現状

衝撃波速度、年齢に関する正確な情報がない



X線観測から年齢、どの進化過程にあるかを調べる

進化過程モデル 解析概要

* まわりの星間物質

密度プロファイル； $\rho_{\text{amb}} = \rho_s r^{-s}$

$s=0$ → 一様な星間物質
(Truelove & McKee, 1999)

$s=2$ → 星風によって形成された物質
(Laming & Hwang, 2003)

* イジェクタ

密度プロファイル； $\rho_{\text{ej}} \propto r^{-n}$

構造；二重構造 (内部の均一コア + 外部のべき乗(指数 n)のenvelope)

* 初期条件

M_{ej} ；イジェクタの質量

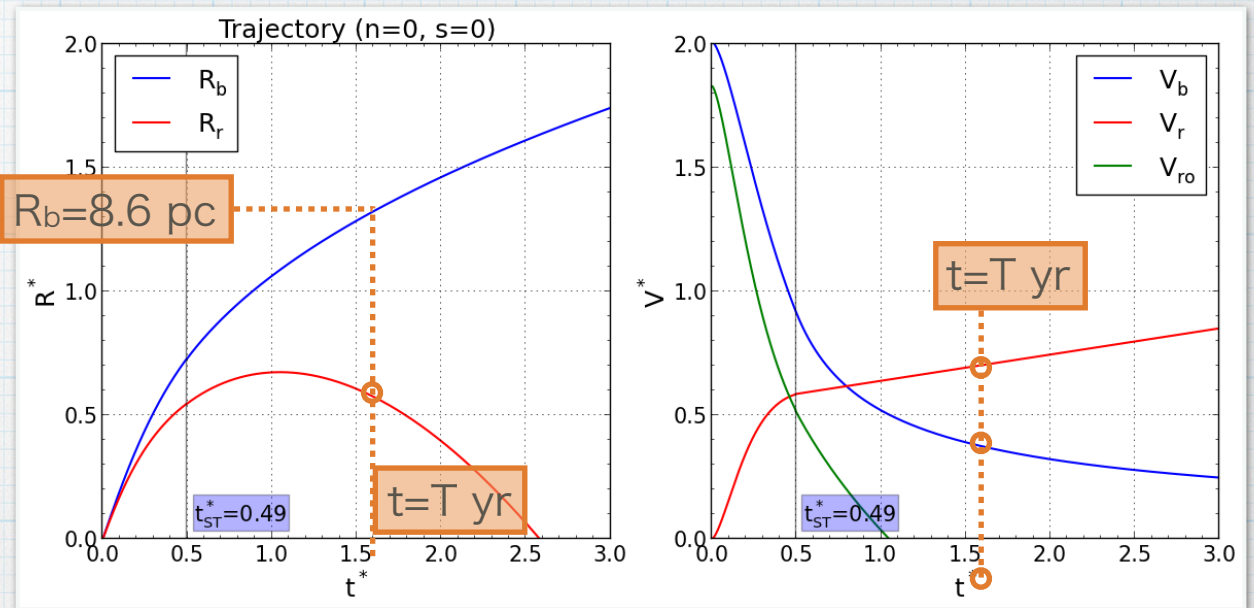
E_{ej} ；イジェクタのエネルギー

ρ_s ；まわりの星間物質の密度

$$\leftrightarrow n_s = (\rho_s / m_H) / (1 \text{ cm}^{-3})$$

進化過程モデルの
パラメータ
($s, n, M_{\text{ej}}, E_{\text{ej}}, \rho_s$)

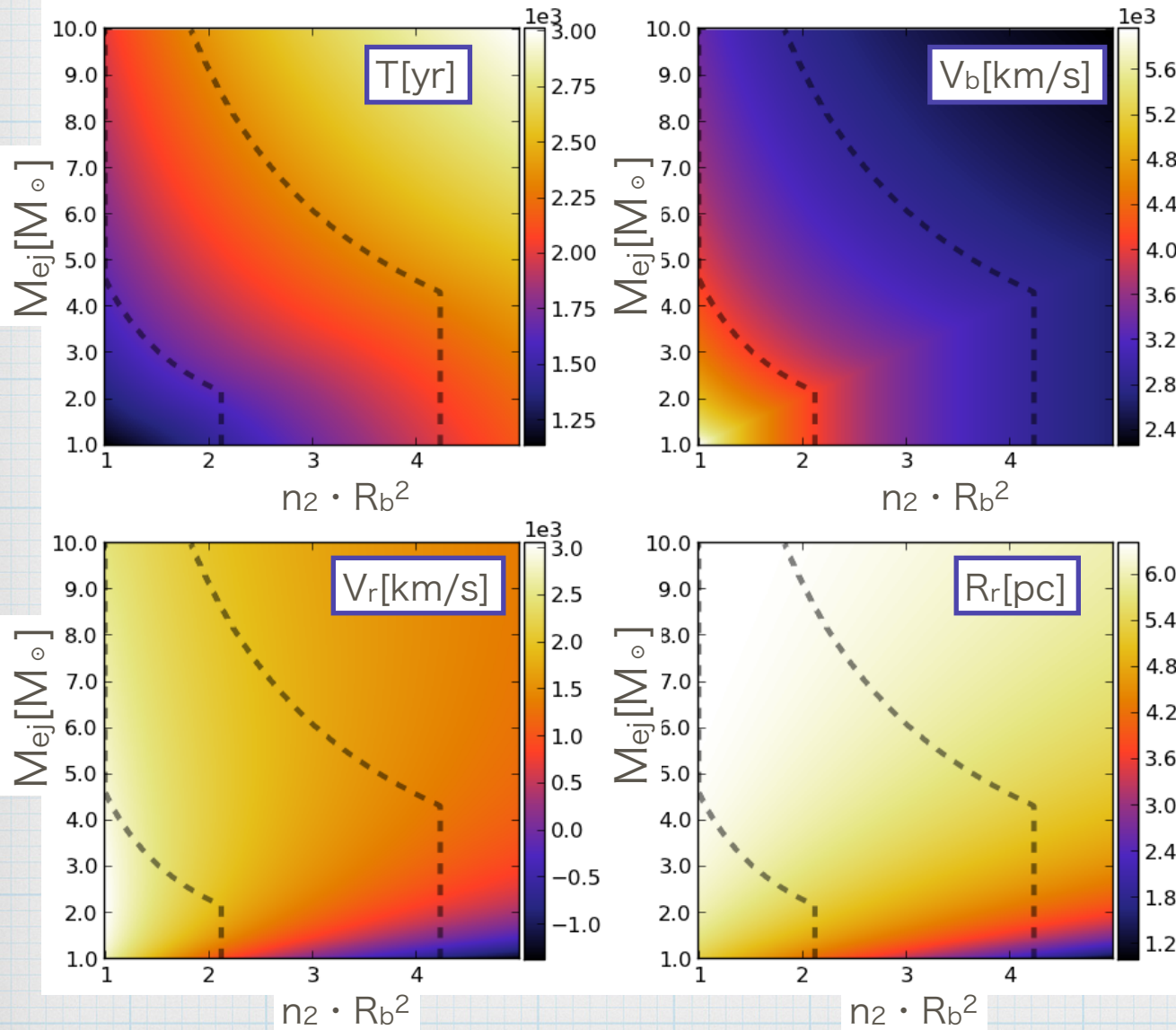
blast-shock の位置； $R_b(t)$
blast-shock の速度； $V_b(t)$
reverse shockの位置； $R_r(t)$
reverse shockの速度； $V_r(t)$



$E_{\text{ej}} / (10^{51} \text{ erg}) = 1, 2$ で固定。 M_{ej}, ρ_s を適当な値で振って、現在の半径 ($R_b = 8.6 \text{ pc}$) を与える時間 $t = T$ を求め、その時の V_b, V_r, R_r を求める

進化過程モデル 解析結果

* $s=2$ (星風モデル), $n=7$, $E_{ej,51}=1$ の場合



- M_{ej} (縦軸), ρ_s (横軸)を適当な値で振って観測($R_b=8.6$ pc)に合う年齢；左上
blast-wave 速度；右上
reverse shock 速度；左下
reverse shock 位置；右下
を2次元プロットした

- 衝撃波速度 3600 ± 600 km/sの範囲を点線で表示した



- 点線内の数点を選択して、パラメータを表にまとめる

進化過程モデル 解析結果

* $s=2$ (風モデル), $n=7, 9, 10$, $E=10^{51}$ erg

s	n	年齢 (yr) [pc] [km/s]			R_r [pc]	密度 ($r=R_0$)			E [10^{51} erg]	自由膨張期の可能性もある		
		[yr]	[pc]	[km/s]		[m_H/cm^3]	[M_\odot]	(Stage)		(Reverse shock)		
2	7	1580	8.68	3670	0.89	3140	0.049	0.5	1	270	(in ST)	10 (in core)
2	7	1840	8.68	3690	6.37	2700	0.013	7	1	51540	(in ED)	1670 (in core)
2	9	1560	8.68	3670	2.94	-290	0.049	0.5	1	270	(in ST)	0 (in core)
2	9	1600	8.68	3670	4.63	1330	0.049	1	1	750	(in ST)	10 (in core)
2	9	1820	8.68	3670	5.51	2090	0.049	3	1	3910	(in ED)	50 (in core)
2	9	2000	8.68	3630	6.1	2310	0.034	5	1	11970	(in ED)	150 (in core)
2	10	1580	8.68	3620	4.65	950	0.05	0.5	1	260	(in ST)	0 (in core)
2	10	1610	8.68	3620	5.64	2070	0.05	1	1	730	(in ST)	10 (in core)
2	10	1920	8.68	3620	5.91	2330	0.05	4	1	5860	(in ED)	50 (in core)
2	10	2060	8.68	3600	6.45	2520	0.027	6.5	1	23060	(in ED)	210 (in core)

1600-2000年
SN393 (Wang et al., 1997)
とコンシステント

密度 ($r=R_0$)
0.01-0.05 m_H/cm^3
ガンマ線の放射機構を
考える上で重要

自由膨張期の
可能性もある

ST; セドフ期
ED; 自由膨張期

まとめ

- * 超新星残骸RX J1713.7-3946のNW領域のproper motionを測定した
- * 衝撃波速度が、 3600 ± 600 km/sであるという結果を得た
- * シェル内の構造における見かけの速度は ~ 1000 km/s程度であった
- * 解析結果① 年齢が、 $1600-2000$ 年
↔ SN393とコンシステント
- * 解析結果② 衝撃波位置での星間物質の密度が、 $0.01-0.05$ m_H/cm^3
↔ ガンマ線の起源を考える上で非常に重要
- * 今後、ガンマ線の起源(leptonic or hadronic?)について議論する