

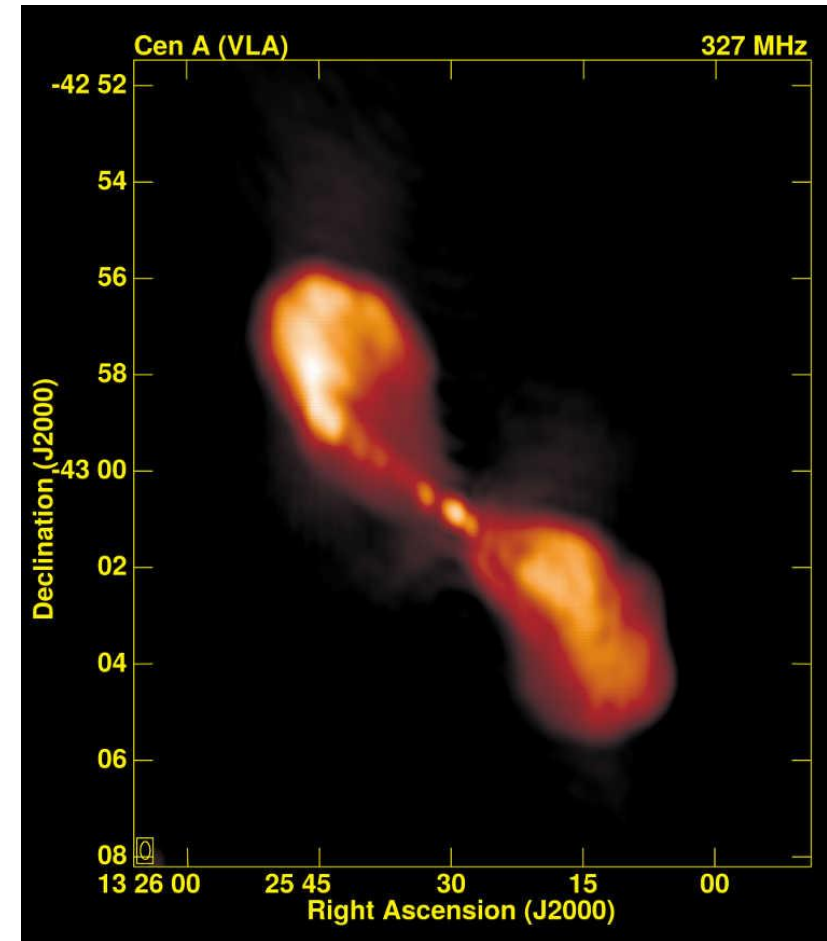
電波銀河 Cen Aのガンマ 線ジェット のFermi衛星 データの解析

大庭 伊織, 深沢 泰司 (広島大学)

Introduction

Cen A (Centaurus A)

- 最も近傍の電波銀河であり、中心のAGNから双方向に伸びる宇宙ジェットがkpcスケールで確認されている
- 外側にMpcスケールの電波ローブが存在する。
- ジェットで起こる物理過程を調べるために最適な天体！



~kpc

Cen A のkpcジェット (VLA)
Neff et al. 2015

Very high energy along the Jet of Cen A

• H.E.S.S.によって、TeV領域のガンマ線が検出

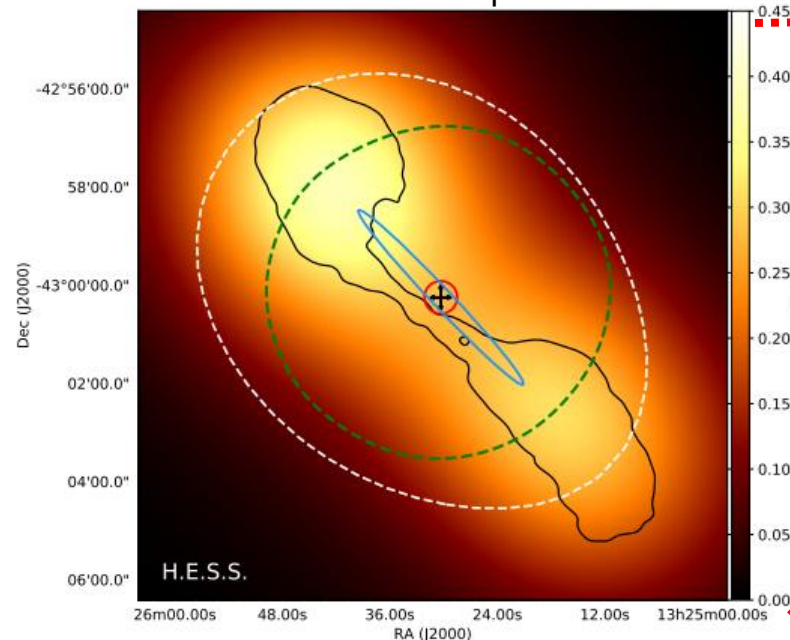
• 楕円型のガウス分布モデルが最も統計的に有意

• 楕円の半長軸がジェット方向と対応

Parameter	Value	Statistical Error
σ_{maj} (°)	0.041	0.006
σ_{min} (°)	< 0.013	-
Ellipticity ε	0.92	+ 0.08 - 0.23
Position Angle φ (°)	43.4	+ 7.7 - 7.2

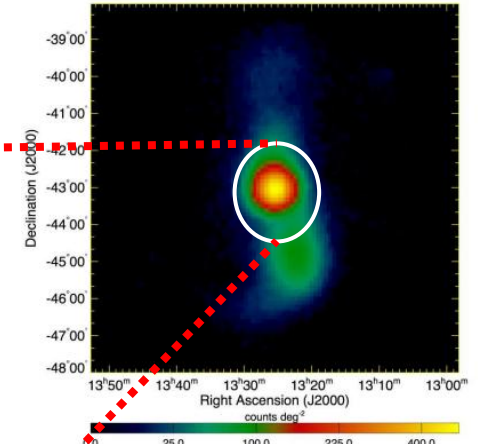
- Published in 2020
- The H.E.S.S. Collaboration, et.al

H.E.S.S.のPSFで畳みこんだVLA Map



The Fermi Collaboration, et.al
2010

Count Map(Fermi)



電波ローブ



~Mpc



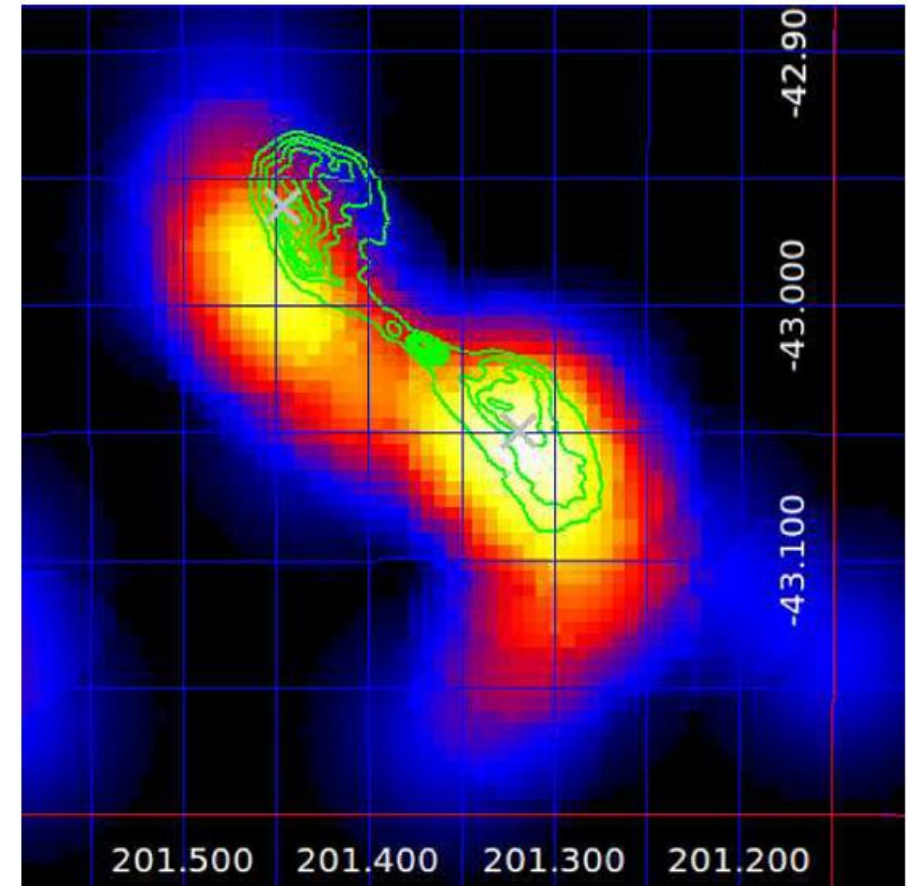
~kpc

Fermi γ -ray from Jet

Published in 2018

D. A. Prokhorov and Colafrancesco et.al

- ・ 2008年-2017年の蓄積データにより kpcジェットのガンマ線の構造を明らかにした
- ・ Fermiの検出光子の新しい再構成法を利用したデータ (Pass8)によりこの詳細な構造の解析が可能となった
- ・ コア付近で観測されたガンマ線光子がある程度、kpcジェットから生成されている



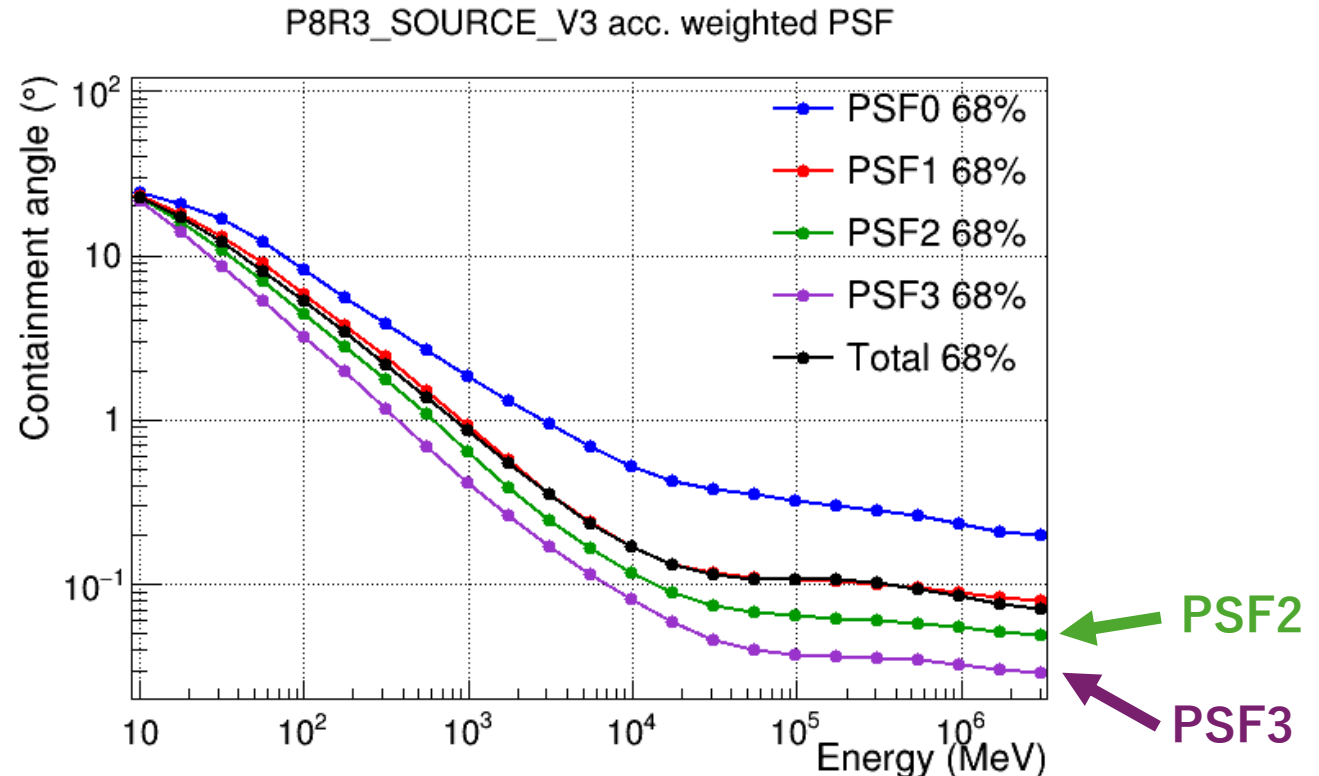
~kpc

kpcジェットのCount Map(Fermi-LAT)
smoothed with a Gaussian kernel of 0.06 °
※緑：電波(VLA)

研究目的

- ・ガンマ線での宇宙ジェットの詳細な構造やそこで起こる物理現象は未だよくわかっていない

- ・Fermiの狭いPSFを持つイベントタイプである「PSF2」, 「PSF3」かつ以前より蓄積された統計によりkpcスケールのジェット構造が調べられる



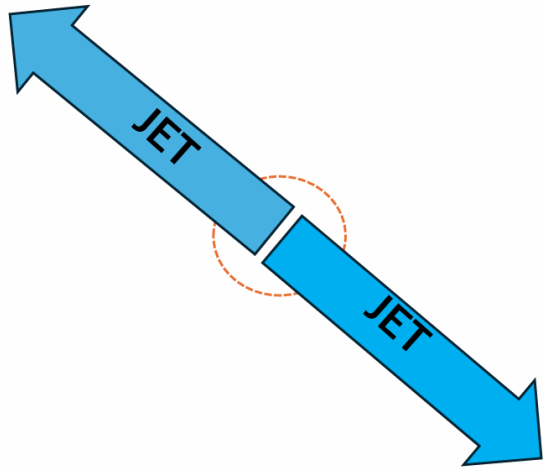
Fermi-LATの各イベントタイプのPSF

研究目的

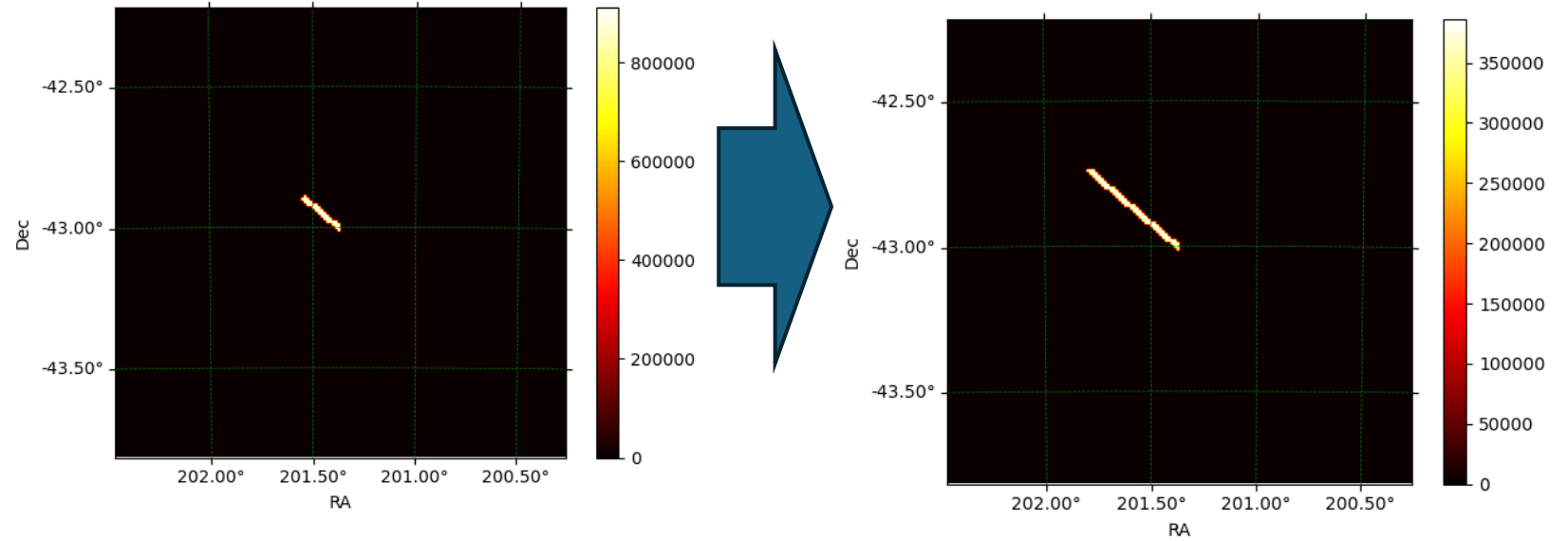
- ・2008年から現在に至るまでの蓄積されたFermiデータを用いることでkpcジェットの詳細な構造を調べる

解析手法

- Jet Modeling



↓ モデルジェットの空間マップ (北東ジェット)



TS (Test Statistic) . . . ガンマ線源の有意性を評価する検定統計量。

- 中心から徐々に外側にモデルジェットを伸ばしていき、各モデルでのジェットの有意度(TS)を比較
- 北東ジェット、南西ジェットをそれぞれモデル化

解析方法

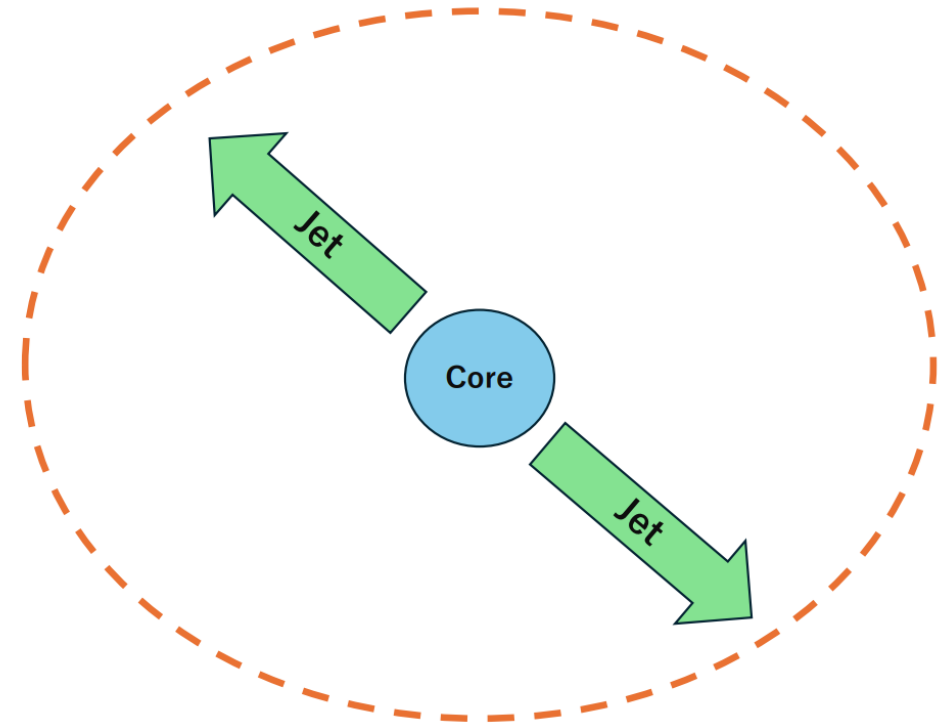
解析内容

- Jetの長さの違いによるTSの変化
- Coreのfluxの値による周辺天体のTSの変化



Core、Jet、diffuse modelとモデル
全体のTSの分布を解析

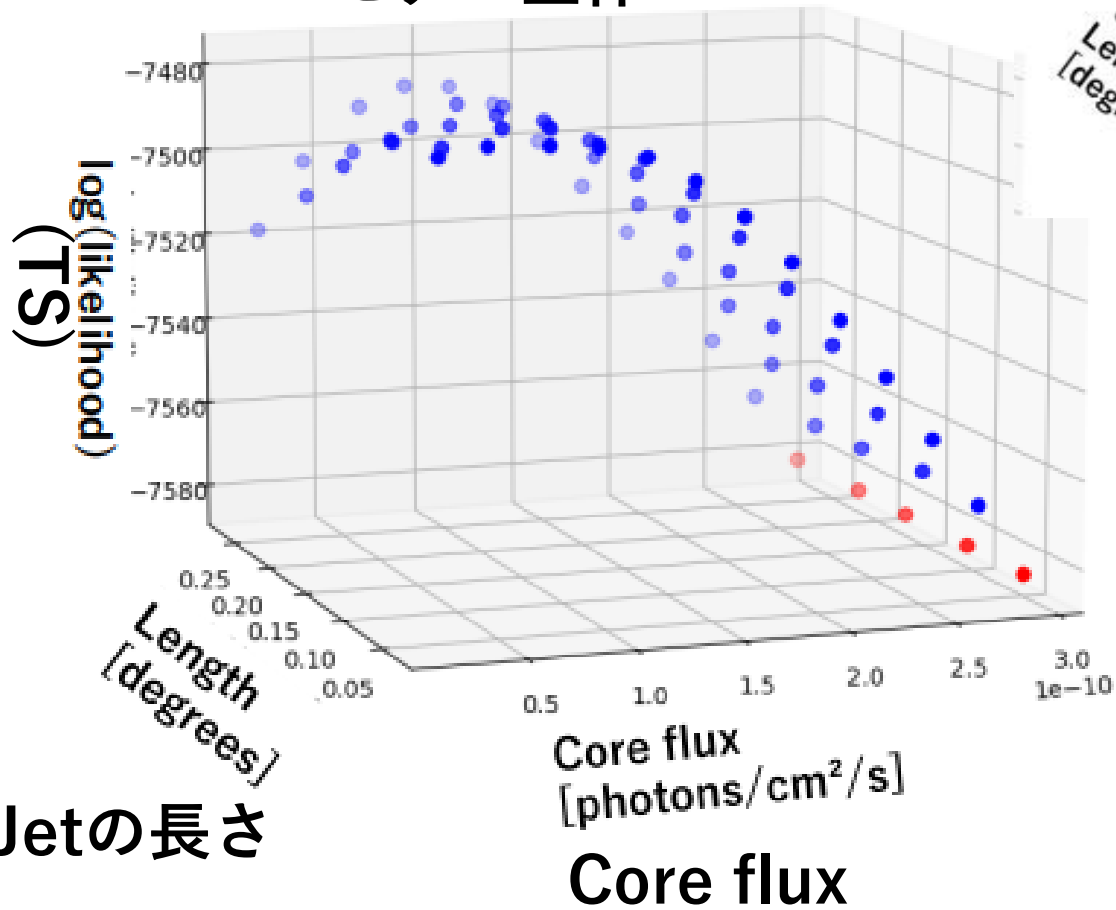
Cen A中心領域の放射



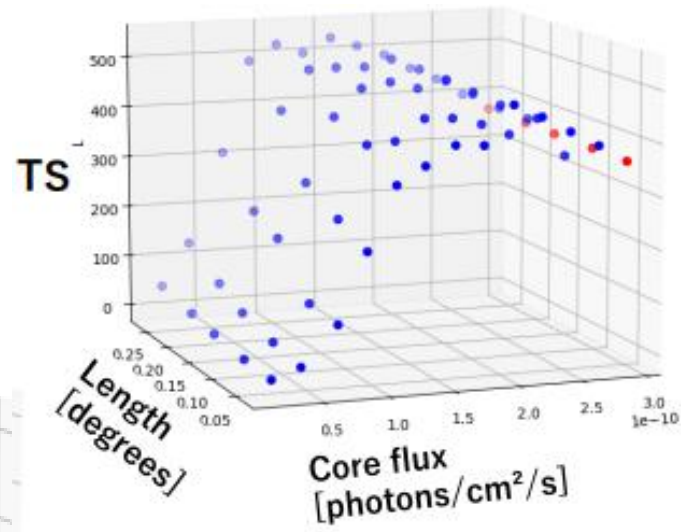
	電波	X線	GeVガンマ	TeVガンマ
Jetの長さ	4-6 kpc	4-6 kpc	?	<12 kpc (upper limit)

各天体のTS分布

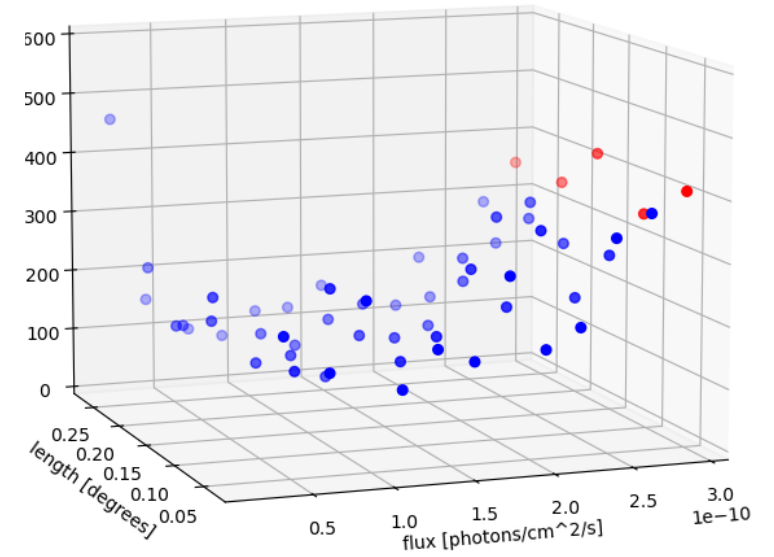
モデル全体



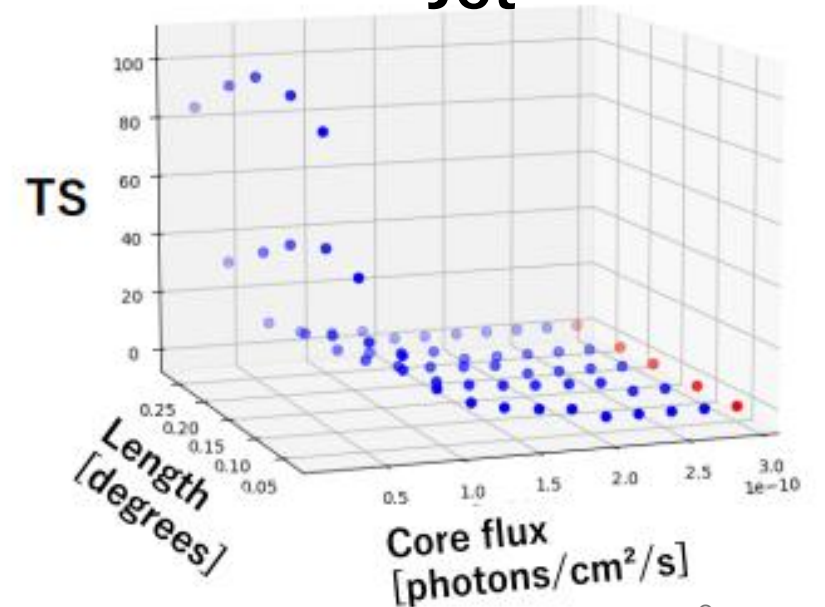
Core



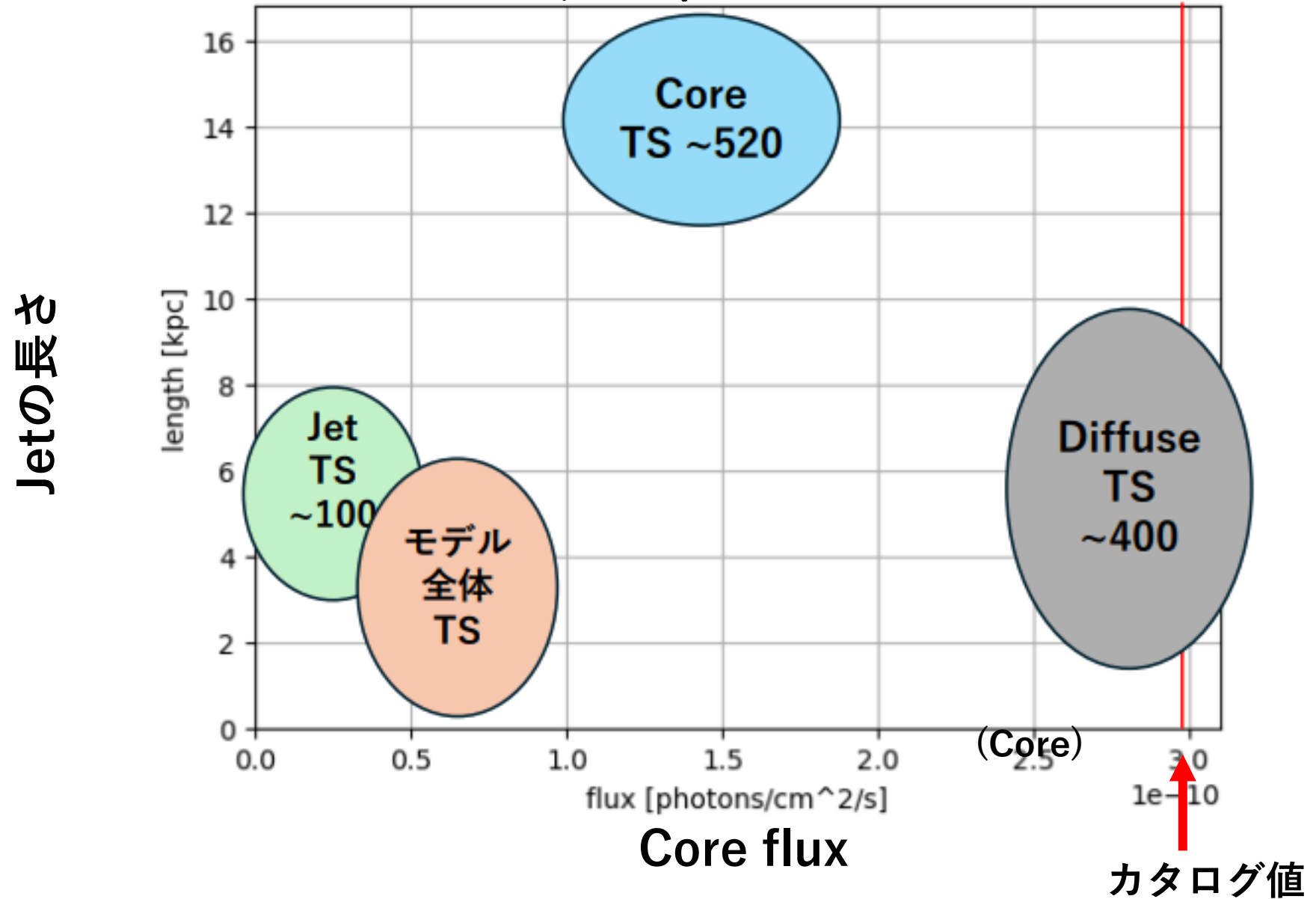
Diffuse



Jet



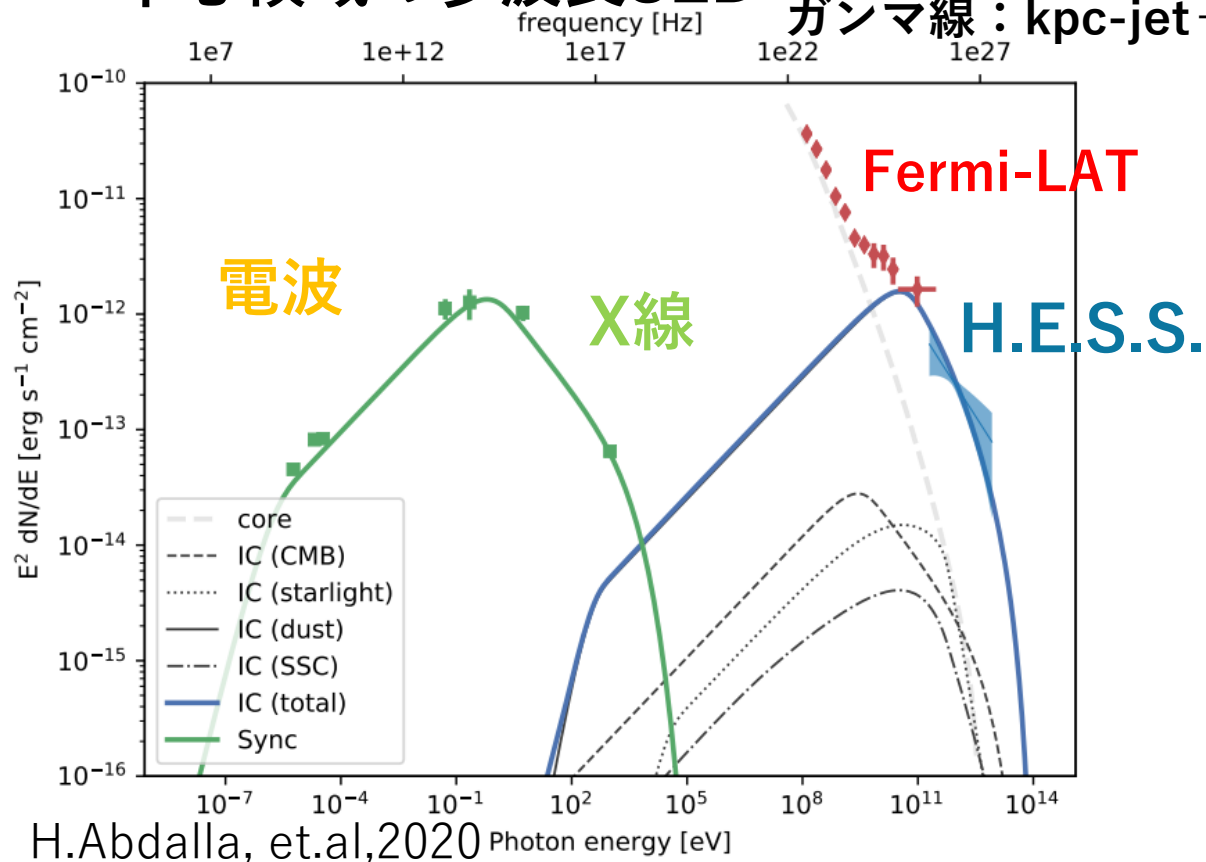
各天体のTSピークの分布



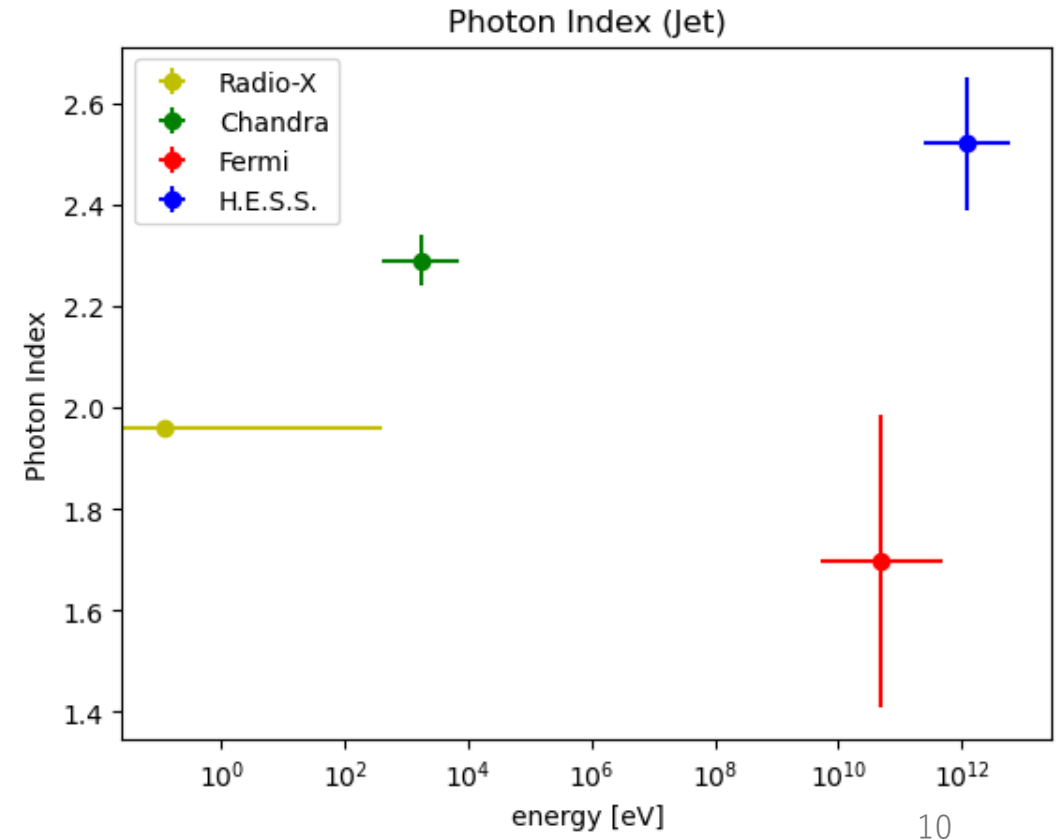
議論と結論

	電波	X線	GeVガンマ	TeVガンマ
Jetの長さ	4-6 kpc	4-6 kpc	~5kpc	<12 kpc (upper limit)

中心領域の多波長SED 電波、X線：kpc-jetのみ
ガンマ線：kpc-jet + Core



Jetの多波長photon Index



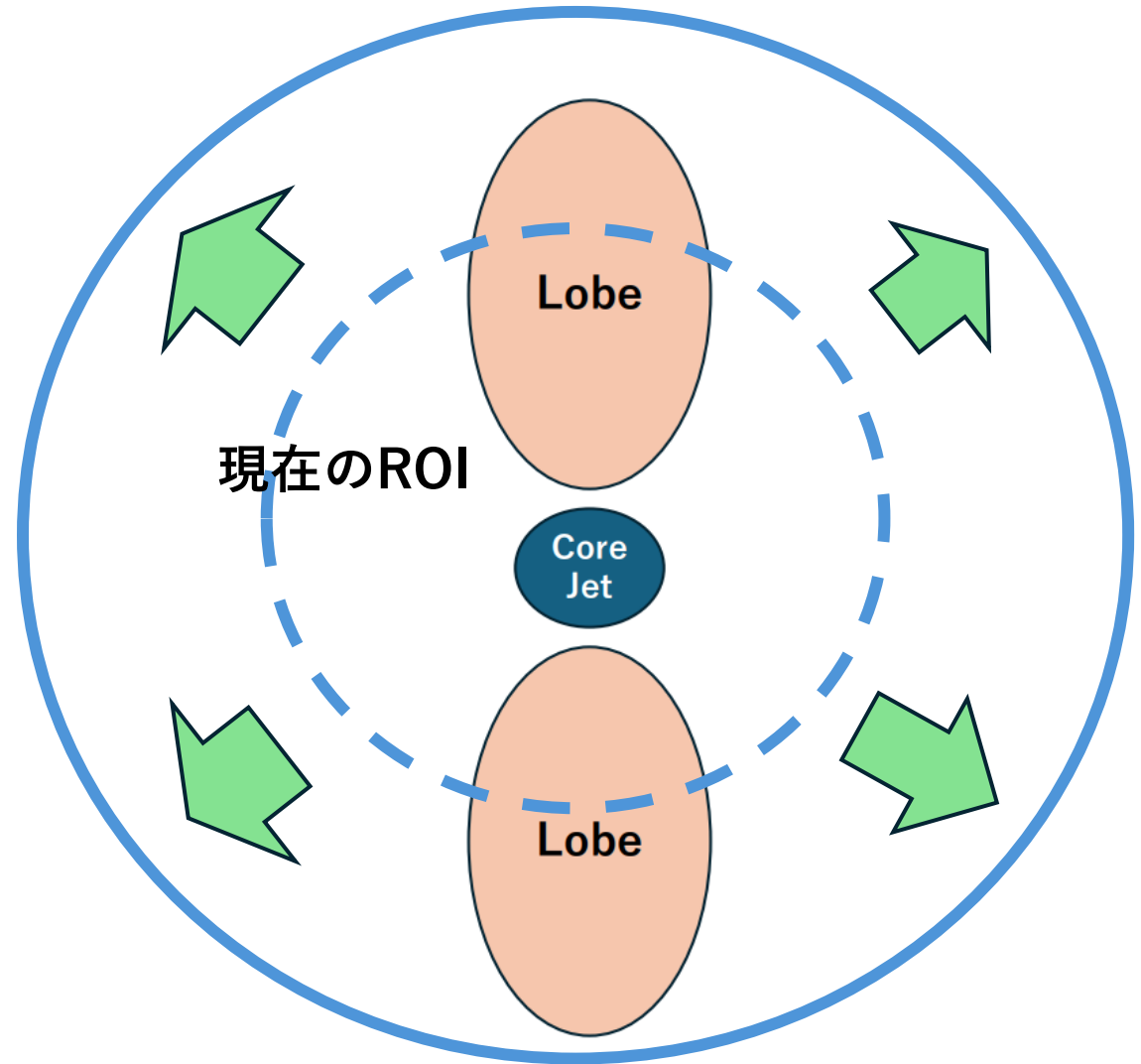
まとめ

- Fermiの観測データからGeV帯でのCen A のジェットの拡張領域とコアからの放射成分、ジェットの放射成分の両成分の放射関係を調査した。
- 各天体モデルの有意度 (TS)から観測データを最もよく再現する空間、放射モデルが得られた。
- 解析結果より、Jetのサイズ (~5 kpc)やjetによる中心領域のPhoton Indexの硬化が明らかとなった。
- ただし、誤差を含めて精度の高い結果の導出の検討が必要。
- ROIを広げ、外側の天体(ローブ等) の影響も考慮した解析

予備スライド

今後の課題

- ROIが小さく(半径 $\sim 3^\circ$)、Lobe全体を含んでいない
- 外側の領域の放射の影響が不確実



ROIを変えて空間モデルを改善

解析結果②

- Coreのfluxを弱めるにつれ、JetのTSは、全体的に上昇
- Core放射がないモデルよりjetの長さに対するTSピークが、短い方へシフト

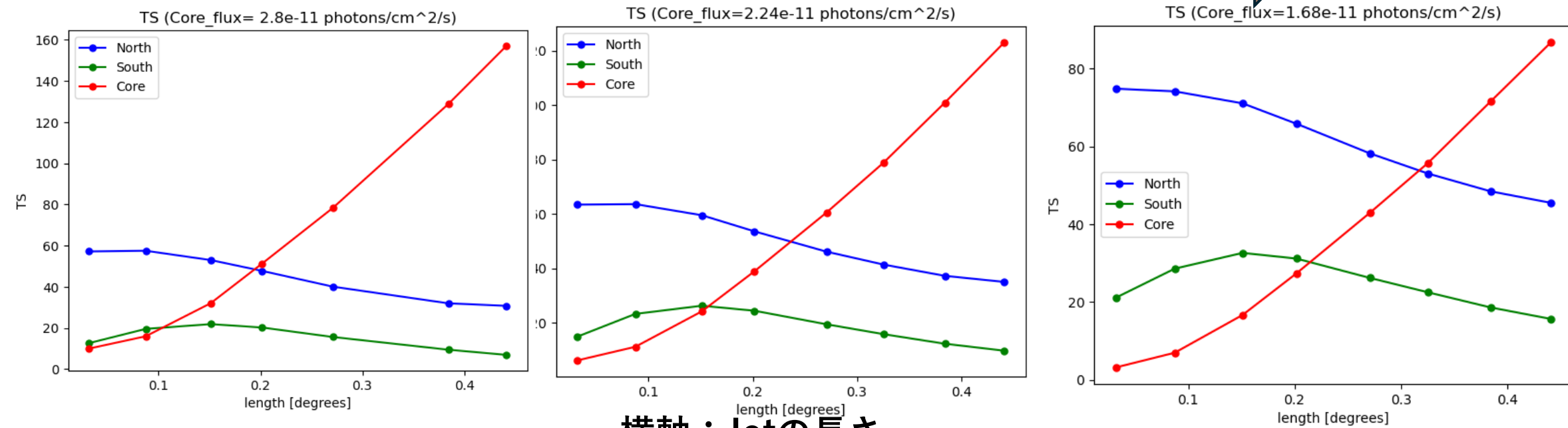
Jetの長さに対するTS変化

赤 : Core
 青 : North Jet
 緑 : South Jet

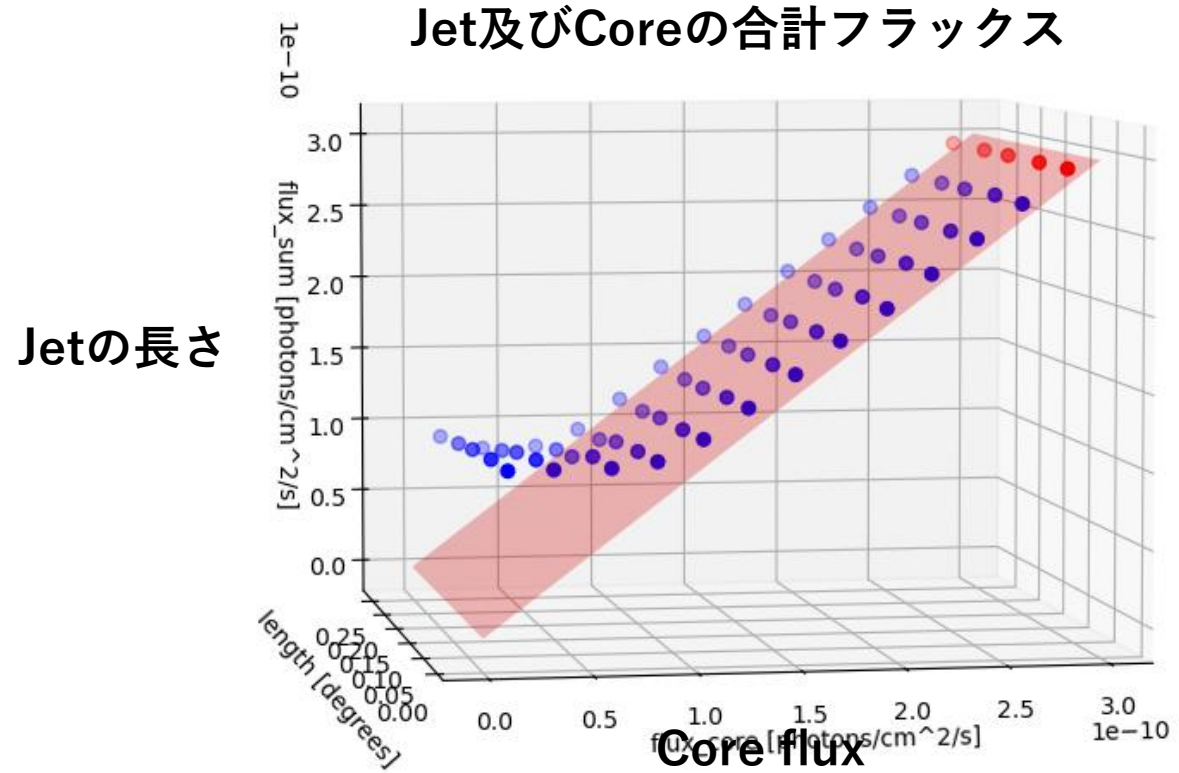


縦軸 : TS

横軸 : Jetの長さ



解析結果②



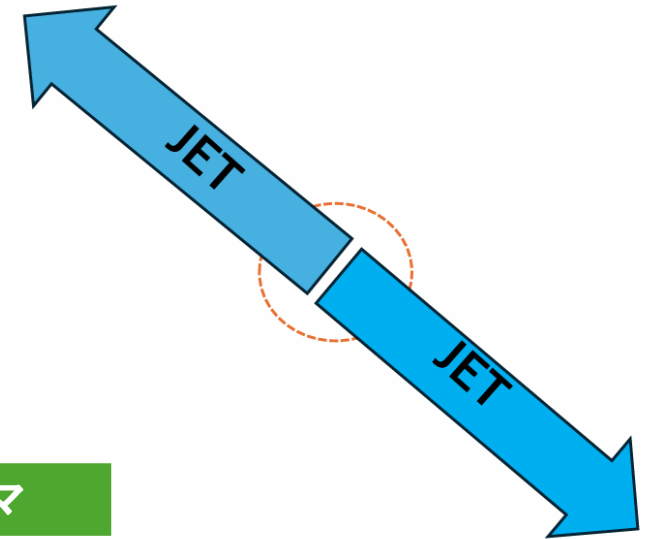
	Jet	Core
Photon flux [photons/cm ² /s]	$(6.05 \pm 0.01) \times 10^{-11}$	3.91×10^{-11}

解析手法②

これまでの解析

- コアからの放射モデルを除去
- 仮定：中心の放射がJet成分のみの放射**
- 実際には、コアからの放射も存在
 - jet成分の放射や長さを過大評価

	電波	X線	GeVガンマ	TeVガンマ
Jetの長さ	4-7 kpc	4-7 kpc	?	<12 kpc (upper limit)



解析の流れ

1. Cen Aのコアの放射モデルのfluxを固定
2. Jetの放射モデル(power-law)パラメータをfreeにし、fittingを実行
3. Core fluxを変えてfittingを繰り返す

解析方法

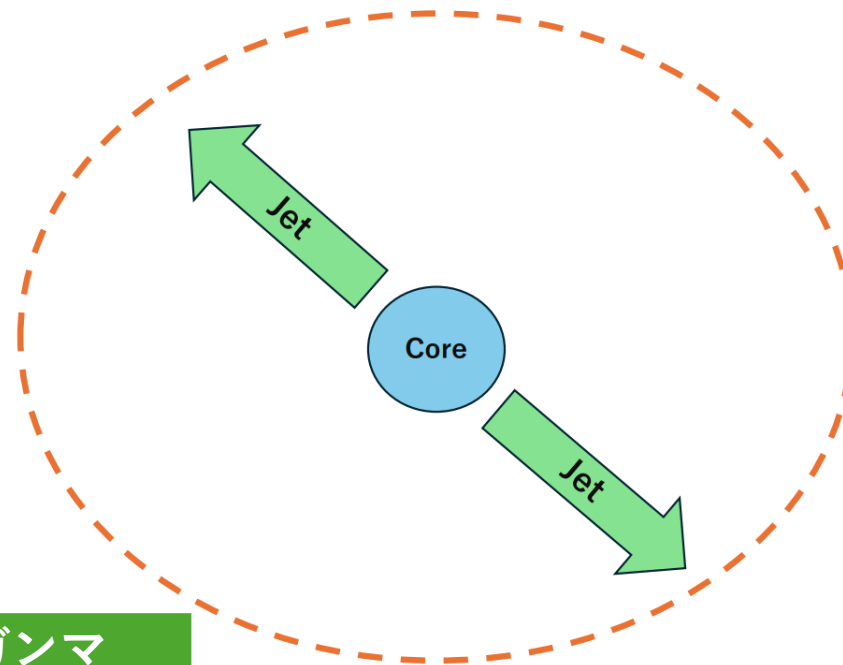
仮定：中心の放射がJetとCore成分で構成

解析内容

- ・ Jetの長さの違いによるTSの変化
- ・ Coreのfluxの値による周辺天体のTSの変化

➡ Cen A中心領域のベストモデルを探る

Cen A中心領域の放射



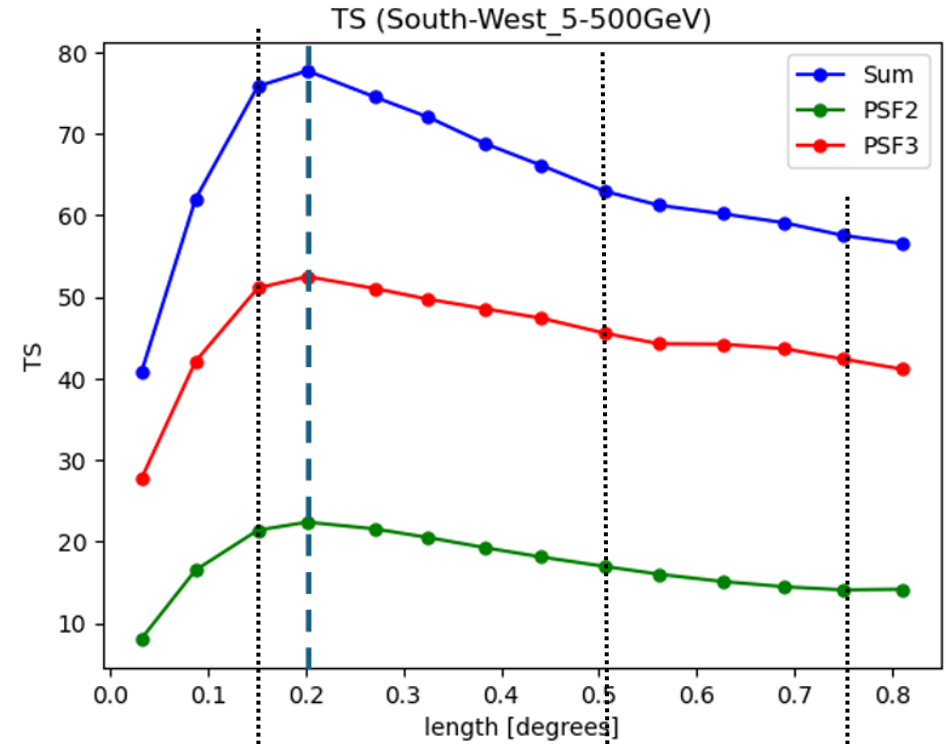
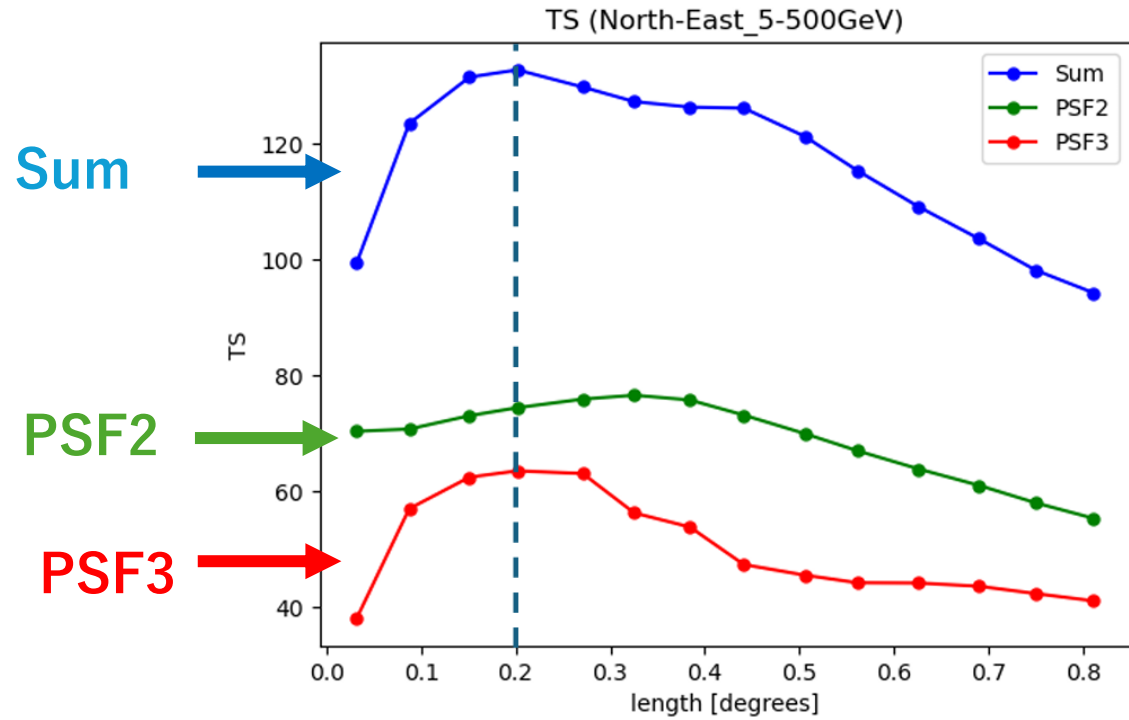
	電波	X線	GeVガンマ	TeVガンマ
Jetの長さ	4-7 kpc	4-7 kpc	?	<12 kpc (upper limit)

解析の流れ

1. Cen Aのコアの放射モデルのfluxを固定
2. Jetの放射モデル(power-law)パラメータをfreeにし、fittingを実行
3. Core fluxを変えてfittingを繰り返す

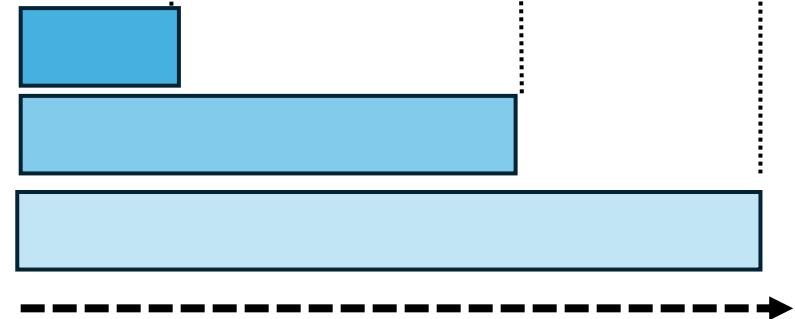
解析結果①

モデルジェットの高さに対するTSの変化 左：North-East 右：South-West



- 0.15~0.2° でTSがピークに達しその後、減少
→12kpc付近までジェットが伸びている？

↓ Jetを外側に伸ばす

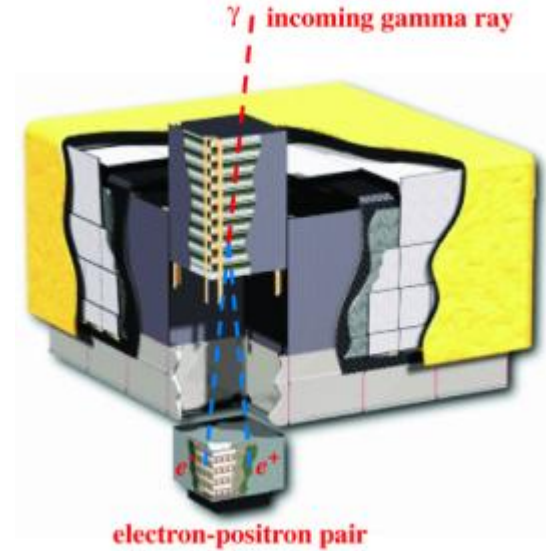


Fermi-LAT

Large Area Telescope

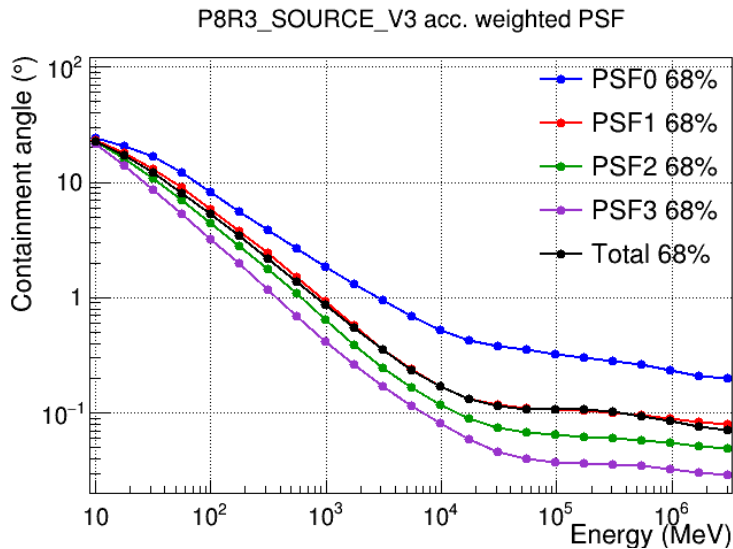
- Launched in 2008
2008年に打ち上げ
- Wide field of view and energy range

広い視野と角度分解能



https://www-glast.stanford.edu/images/LAT_cutaway.png

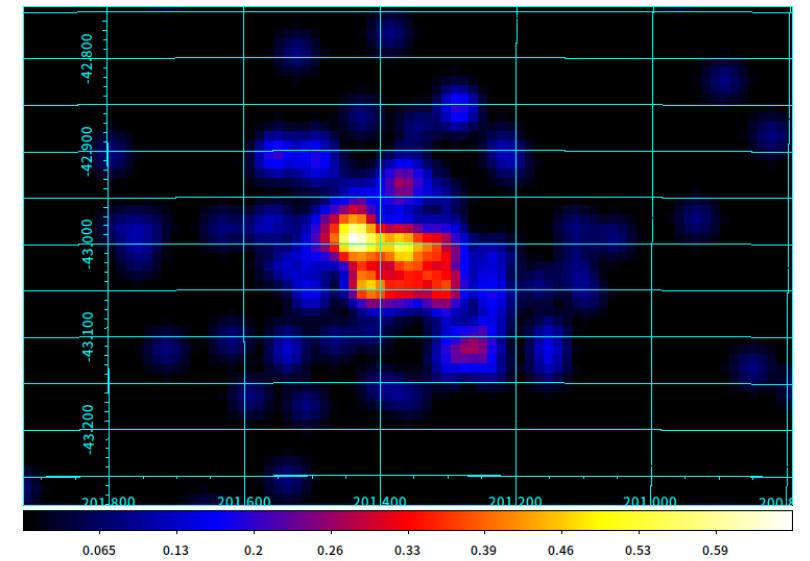
https://fermi.gsfc.nasa.gov/inc/img/spacecraft_sm.jpg



Energy range	20 MeV-300 GeV
Effective area	8000 cm ²
Energy resolution	10%
FoV	2.4 sr
Source location determination	0.5'
Timing accuracy	10 μsec

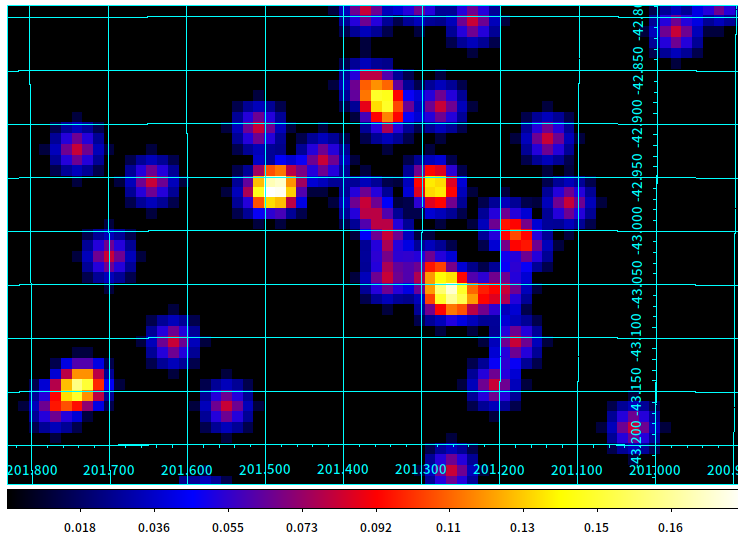
Count Map of the jet

- If the energy is too low, the psf will spread
エネルギーが低すぎるとpsfが広がる
- Select the event with the narrowest psf (PSF3)
最も狭いpsfを持つイベント(PSF3)を選択

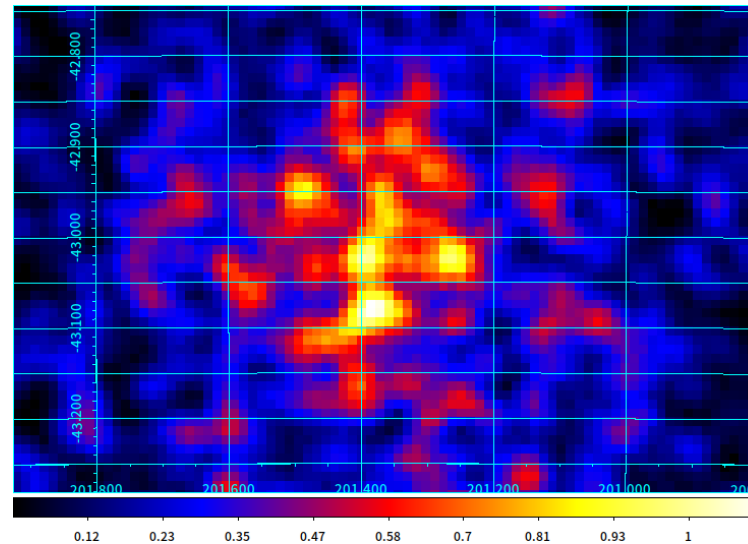


PSF2+PSF3 5-500 GeV

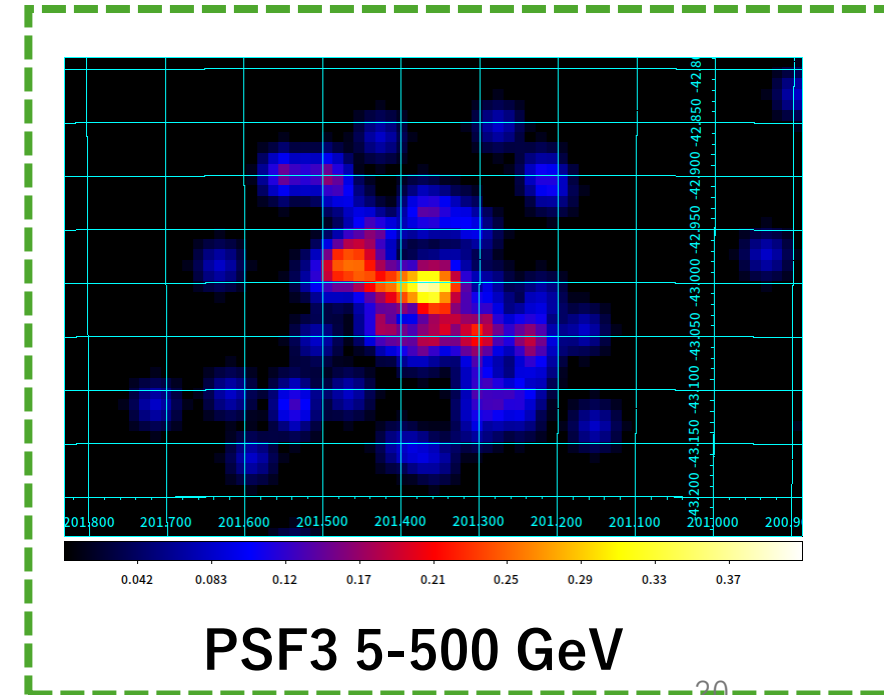
All $0.01^\circ/\text{pixels}$ $0.5^\circ \times 0.9^\circ$



PSF0 5-500 GeV



PSF3 1-5 GeV



PSF3 5-500 GeV

TS

- The number of gamma-ray counts observed in each bin is small and is characterized by a Poisson distribution.

各ビンで観測されるガンマ線のカウント頻度は、ポアソン分布に従う

- Therefore, the parameters are determined by maximum likelihood.

故に、最尤法によって、モデルの最適パラメータが決定される

TS (Test Statistic) . . . Statistics to quantify the significance of gamma-ray sources

ガンマ線源の有意性を評価する検定統計量

$$TS = 2(\ln L - \ln L_0)$$

L : The maximum likelihood value for a model with an additional source

あるモデルに対し、新たなガンマ線源を追加した場合の最大尤度

L_0 : The maximum likelihood value for a model without the additional source

追加ガンマ線源を除いた場合の最大尤度