

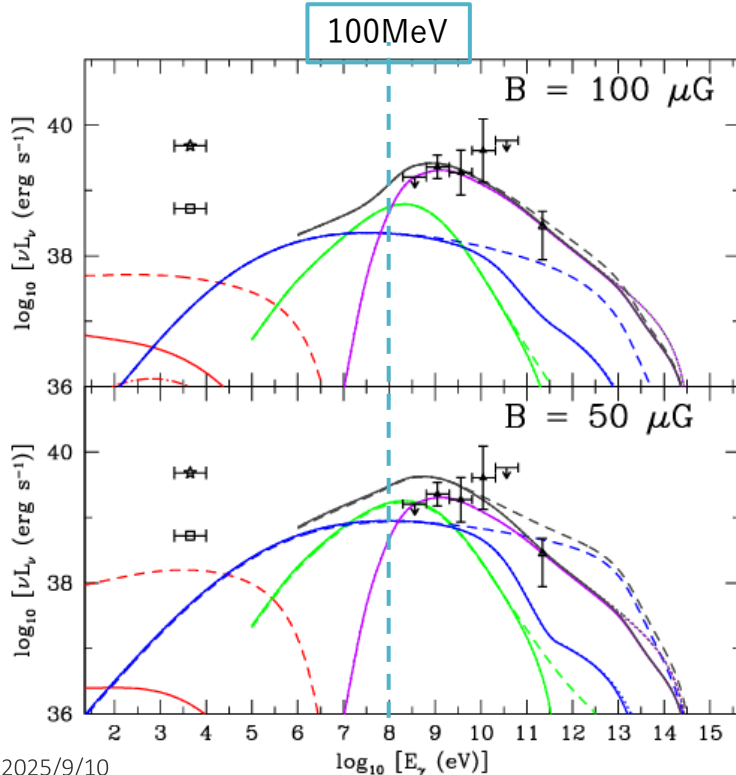
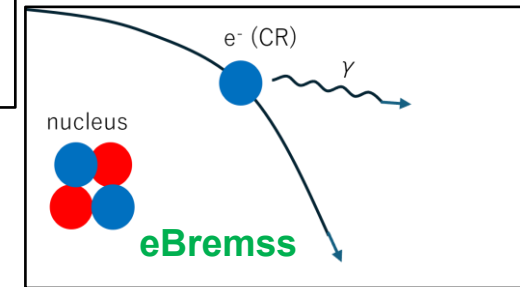
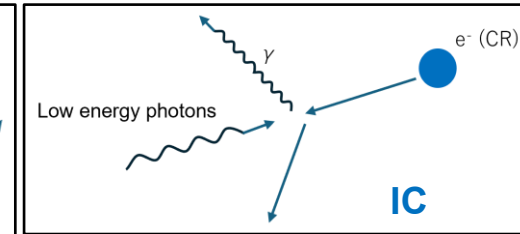
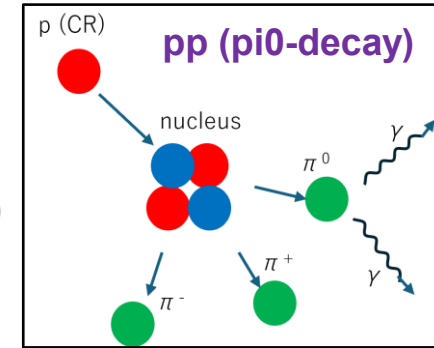
# GeVガンマ線を用いた近傍の星形成銀河の 宇宙線の研究

越智日向子, 水野恒史, 深沢泰司 (広島大学),  
岩切渉, 井上進, BARNIER Samuel (千葉大学)

# Introduction

銀河内には宇宙線加速器(超新星残骸など)で生成された宇宙線が存在  
宇宙線と星間媒質の相互作用によるガンマ線

1. 宇宙線陽子と星間物質中の核子が衝突→生成された $\pi^0$ が崩壊(pp)
2. 宇宙線電子と星間光子の逆コンプトン散乱(IC)
3. 宇宙線電子による非熱的制動放射(eBremss)



ガンマ線スペクトルを解析 → 宇宙線について調べられる

- eBremssとICの寄与がsub-GeVで大きい
- 近傍の星形成銀河(SFG/SBG)のガンマ線を100MeV以下まで解析  
→ 宇宙線電子/陽子の比を正確に決定する, 宇宙線輸送について理解する

← NGC 253のSED (Lacki+13)  
synchrotron, IC, eBremss, pp(pi0-decay), and total.

# Fermi Gamma-ray Space Telescope performance

- 2008年6月, NASAにより打ち上げ
- 二つの検出器を搭載(LAT & GBM)

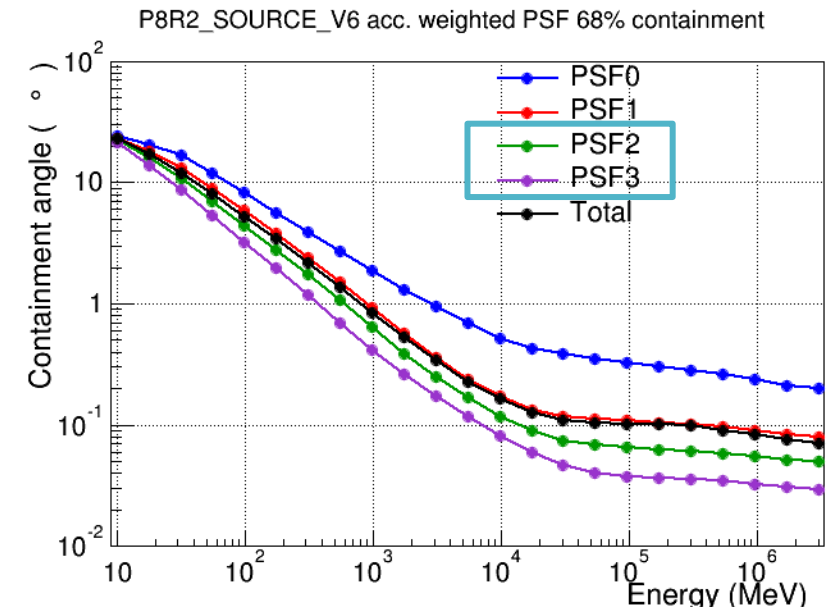
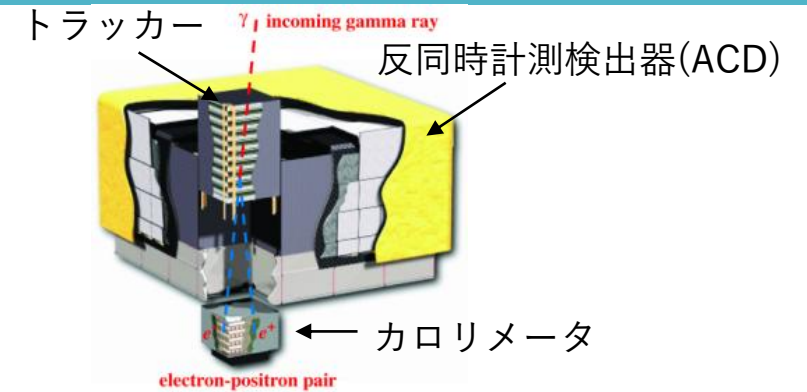
## LAT(Large Area Telescope)

- 電子陽電子対生成型ガンマ線検出器
- 有効面積: >8000cm<sup>2</sup>
- 視野: >2sr
- 観測帯域: 20MeV-300GeV
- **角度分解能はエネルギーに大きく依存**(~ 1 deg @500 MeV)

⇒ 各エネルギー帯で最適なPSFイベントタイプを選択

Energy range (GeV)	PSF0	PSF1	PSF2	PSF3
0.05-0.1	-	-	○	○
0.1-0.4	-	○	○	○
0.4-102.4	○	○	○	○

PSF イベントタイプ:  
再構成された方向の品質を表す. PSF0 は最も低精度, PSF3 は最も高精度.



↑ Fermi-LATの角度分解能のエネルギー依存性(PSFイベントタイプ別)

# Previous study

## 13個の星形成銀河のガンマ線解析(Ajello+20)

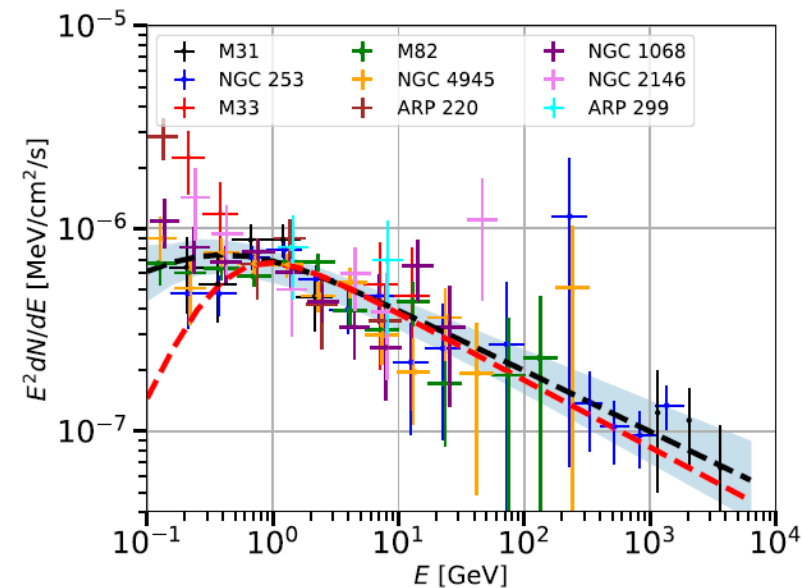
- pp相互作用モデル(赤線)はデータ(SED)と一致せず
- 低エネルギー側(~ 100 MeV)は, pp 相互作用によるガンマ線だけでなく  
超過成分が存在する可能性

(ただし PowerLaw-model のみ用いた評価)

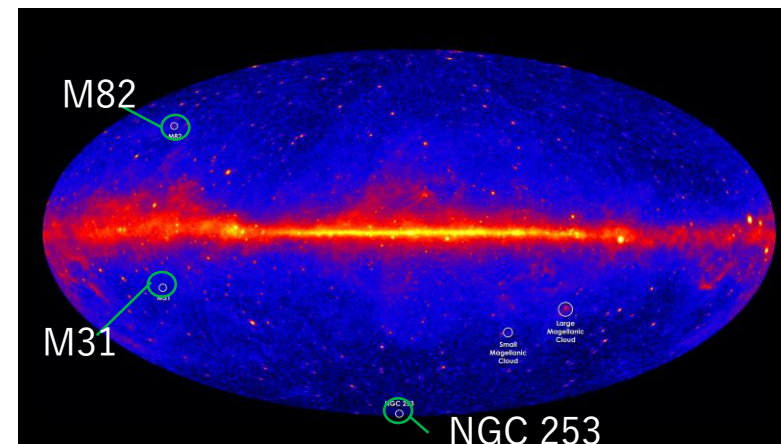
## 本研究のターゲット

Name	R.A. (J2000) (deg)	Decl. (J2000) (deg)	Dist. (Mpc)
M82	148.97	69.68	3.7
NGC253	11.89	-25.28	3.3
M31	10.69	41.27	0.78
M33	23.47	30.67	0.85
Arp220	233.74	23.51	79.9
Arp299	172.13	58.57	47.7
NGC2146	94.66	78.36	18

- Fermi衛星で個別に検出された星形成銀河  
(セイファート銀河を除く)



↑ SFG/SBGsのSEDとモデル(pp)  
(Ajello+20)



Fermi-LAT 全天マップ

# Analysis methods

## Fermiの15年分のデータを使用した解析

- Binned likelihood, 50 MeV-102.4 GeV  
(15 deg x 15 deg ROI, 0.1 deg bin-size)
- **各エネルギー帯毎に異なるPSFイベントタイプを組み合わせる**
- BGモデル:  
Gal. Diffuse + isotropic emission(Extra Gal. Diffuse) + 4FGL-based sources
- **Bright source はLog-Parabola(LP)とPowerLaw(PL) の両方のモデルを,**  
weak source はPLのみをテストする

Energy range (GeV)	PSF0	PSF1	PSF2	PSF3	Zmax (deg)
0.05-0.1	-	-	○	○	80
0.1-0.4	-	○	○	○	90
0.4-102.4	○	○	○	○	105

↑ 各エネルギー帯で使用したPSFイベントタイプと最大天頂角 (zmax)

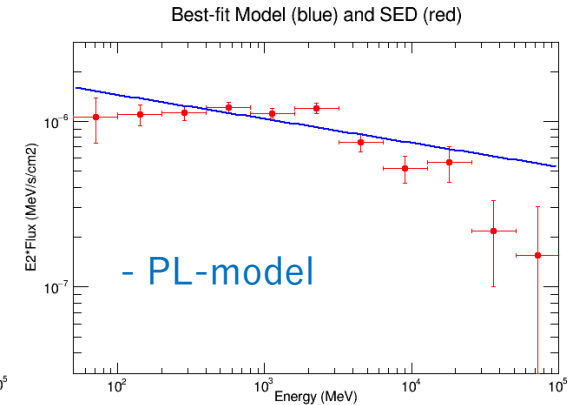
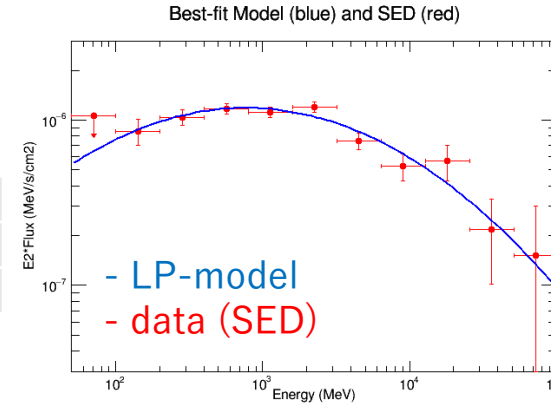
$$\text{LogParabola:}$$
$$\frac{dN}{dE} = N_0 \left( \frac{E}{E_b} \right)^{-(\alpha + \beta \ln(E/E_b))}$$

$$\text{PowerLaw:}$$
$$\frac{dN}{dE} = N_0 \left( \frac{E}{E_0} \right)^{-\gamma}$$

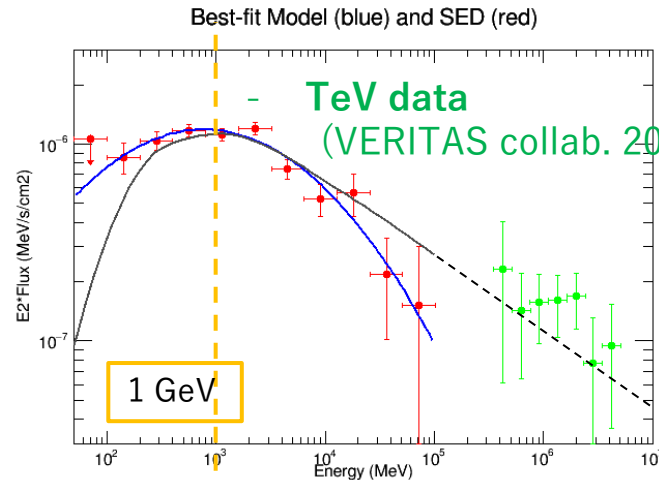
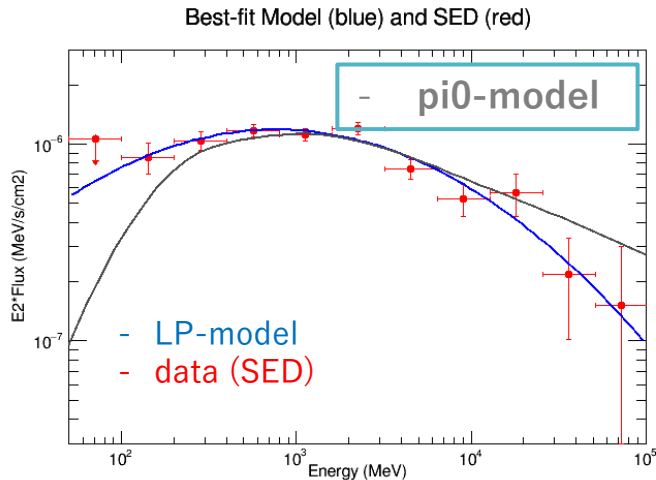
# Result : M82

- LPの方がPLよりもデータ(SED)をより良く再現する
- スペクトルは明らかに曲線的な形状である  
→ 今後LPのSEDを採用

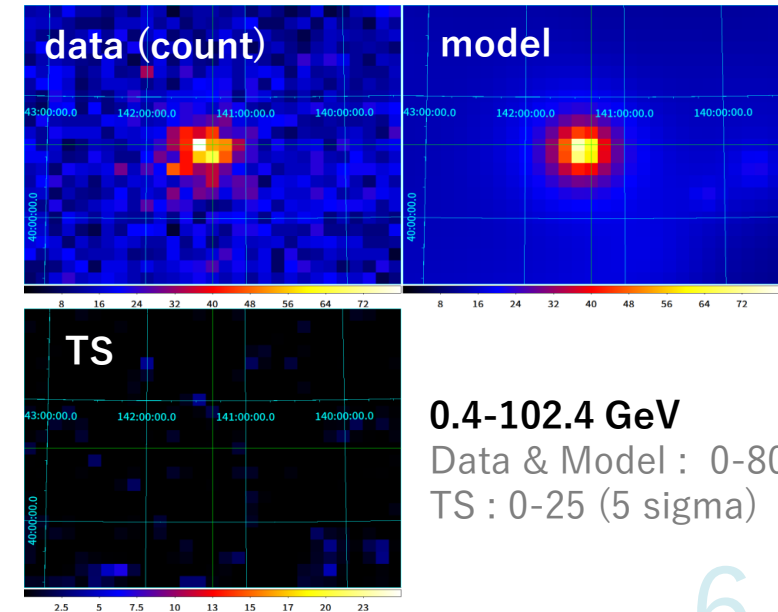
	TS
PL	1574
LP	1753



## 物理モデル(pp相互作用のpi0-model)と比較

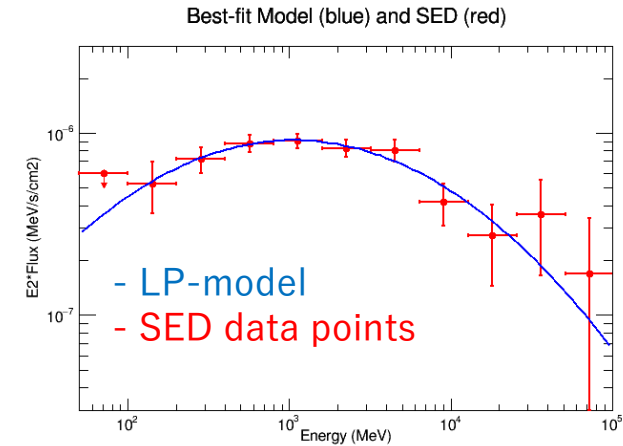


- GeV-TeVでpi0-model (運動量のindex 2.4)はデータを良く再現する
- 低エネルギー側(~ 100 MeV)ではデータの超過が見られる  
→ 制動放射や逆コンプトン散乱の寄与の可能性



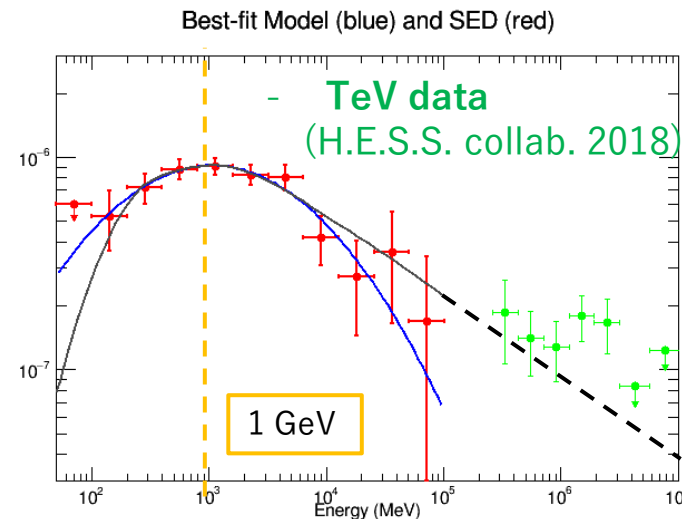
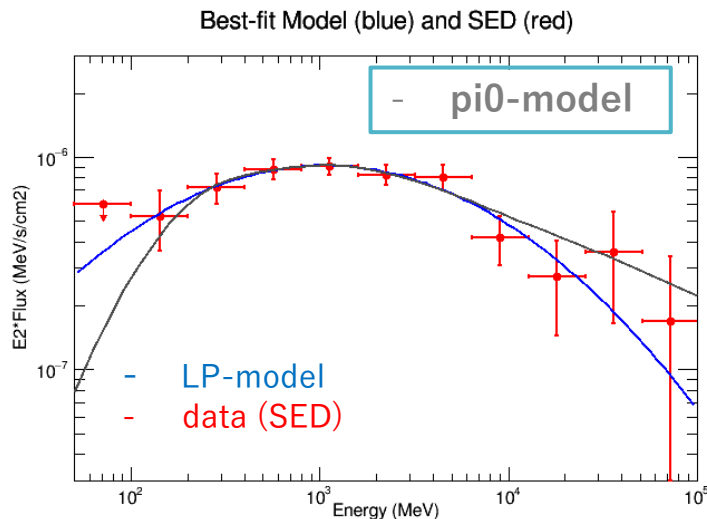
# Result : NGC 253

- M82と同じくLPの方がデータ(SED)を良く再現する
- スペクトルは明らかに曲線的な形状である  
→今後LPのSEDを採用



	TS
PL	899
LP	904

## 物理モデル(pp相互作用のpi0-model)と比較

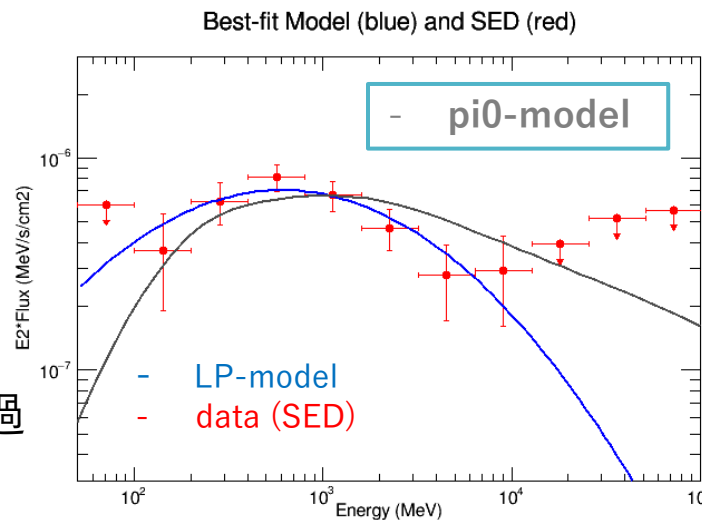


- GeV-TeVでpi0-model (index 2.4)はデータ(SED)を良く再現する
- 低エネルギー側(~ 100 MeV)ではデータがやや超過の兆し  
→制動放射や逆コンプトン散乱の寄与の可能性

# Result : other SBGs/SFGs

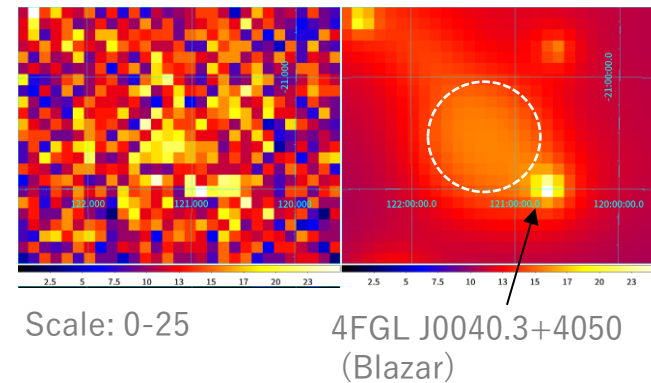
## M31

- 「半径0.4 degのuniform Disk」でモデル化 (Ackermann et al. 2017)
- データはpi0-model(index 2.4)よりソフト
- 低エネルギー側(~ 100 MeV)はデータがやや超過



M31	TS
Disk-LP	159
PS-LP	116

## 0.4-102.4 GeV data vs. model



## Bright objectsの比較(M82, NGC 253, M31)

- スペクトルは曲線的, ガンマ線生成にはpp相互作用(pi0-decay)が支配的
- 低エネルギー側(~ 100 MeV)はpi0-modelに対してデータが超過  
→ 制動放射や逆コンプトン散乱の寄与の可能性
- M31のスペクトルはM82, NGC 253と比べてソフト

## Weak objects(M33, Arp220, Arp299, NGC 2146)

- PLモデルのみ採用
- M33のスペクトルは他と比べてソフト, NGC 2146はハード

Weak objects	index	TS
M33	2.20+/-0.12	45
Arp220	2.19+/-0.16	54
Arp299	2.16+/-0.16	56
NGC 2146	2.00+/-0.13	53

# Summary and Prospect

## まとめ

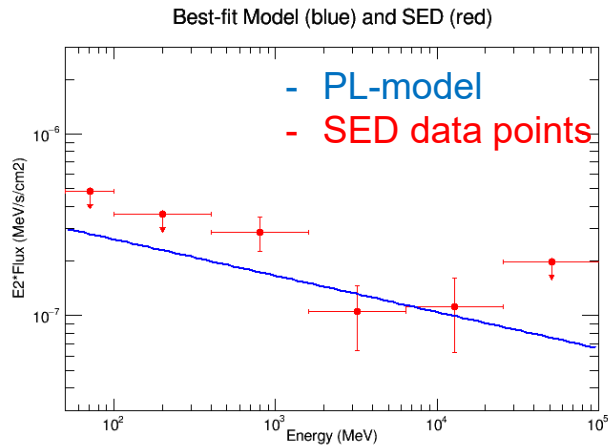
- **明るい天体はLog-Parabola modelを新しく採用**
- 明るい天体は曲がったスペクトルを示し, ガンマ線生成には pp相互作用(pi0-decay)が支配的
- **明るい天体は低エネルギー側(~ 100 MeV)でpi0-modelに対するデータの超過が見られる**  
→宇宙線電子による制動放射や逆コンプトン散乱(IC)の寄与が必要
- SFG(M31, M33)はSBGに比べスペクトルがソフト  
→ 宇宙線の逃げ出しが支配的(SFG) vs. カロリメータ(SBG)

## これから

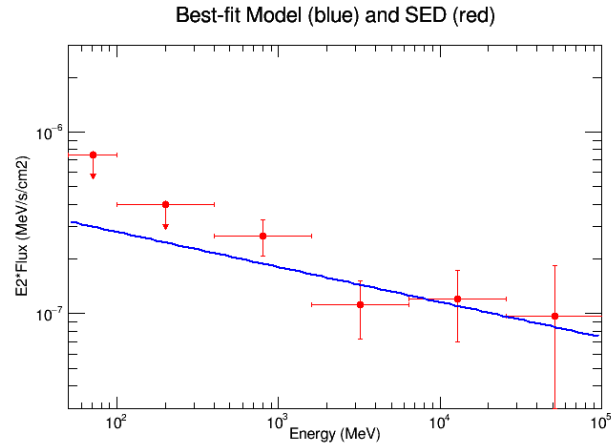
- **pp相互作用以外の物理モデル(宇宙線電子の制動放射, IC)との比較, SEDのモデリング**  
→ 宇宙線電子/陽子の比を議論する
- セイファート銀河のスペクトルと比較

# Backup Slide

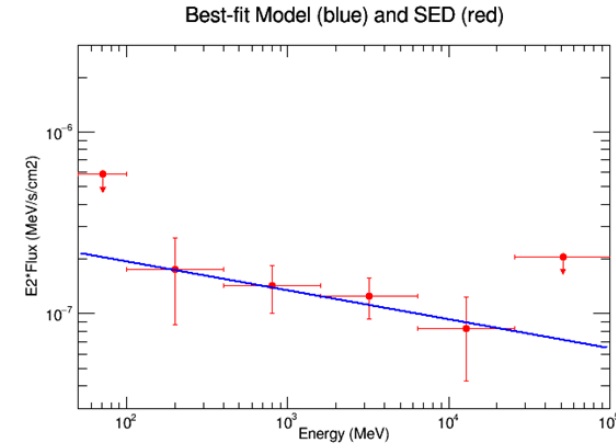
# Result : Weak objects



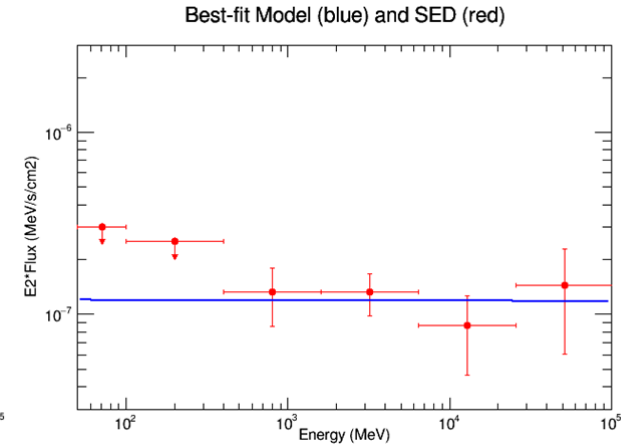
	TS	index
M33	45	2.20+/-0.12



	TS	index
Arp220	54	2.19+/-0.16



	TS	index
Arp299	56	2.16 +/- 0.16

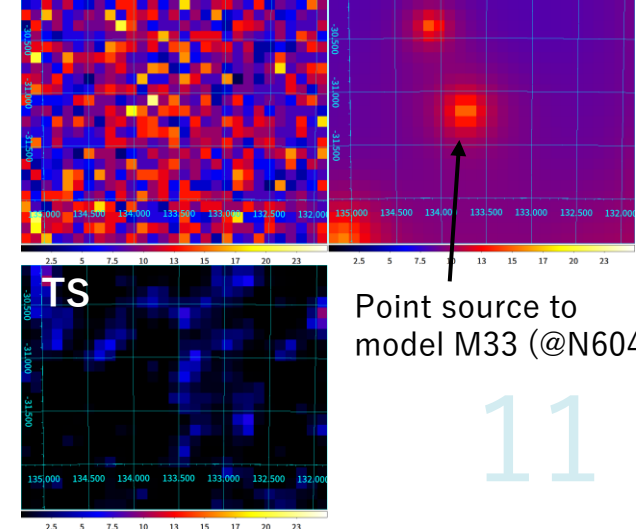


	TS	index
NGC2146	53	2.00+/-0.13

## Weak objects (M33, Arp220, Arp299, NGC 2146):

- M33は中心ではなく、N 604 (M33内のH II領域) に点源としてモデル化 (Xi et al. 2020)
- PLモデルを採用, TSが小さいのでenergy binningを適用
- M33のスペクトルは他と比べてソフト, NGC 2146はハード

M33 0.4-102.4 GeV data vs. model



Point source to model M33 (@N604)

# TS map

## TS (Test Statistic):

各ピクセル位置におけるガンマ線源の有意性を評価する検定統計量

## TS map:

データ（カウントマップ）からモデル(BGモデル+点源モデル)を差し引いた残差マップの各ピクセルでのTSを計算し、空間マップとして表示するイメージ. TSが0に近いほどデータに対するモデルの当てはまりが良い.

$$TS = 2 \sum_k \underbrace{\ln L(\mu, \theta | n_k)}_{\text{Dataのlikelihood}} - \underbrace{\ln L(0, \theta | n_k)}_{\text{modelのlikelihood}}$$

