

# ガンマ線による活動銀河核の解析

高エネルギーガンマ線天文学グループ

川上凌太・橋山和明・西川奏・今澤遼・北川英西音

齋藤隆之・HADASCH Daniela  
高橋 光成・小林 志風・岩村 由樹

ガンマ線天文学

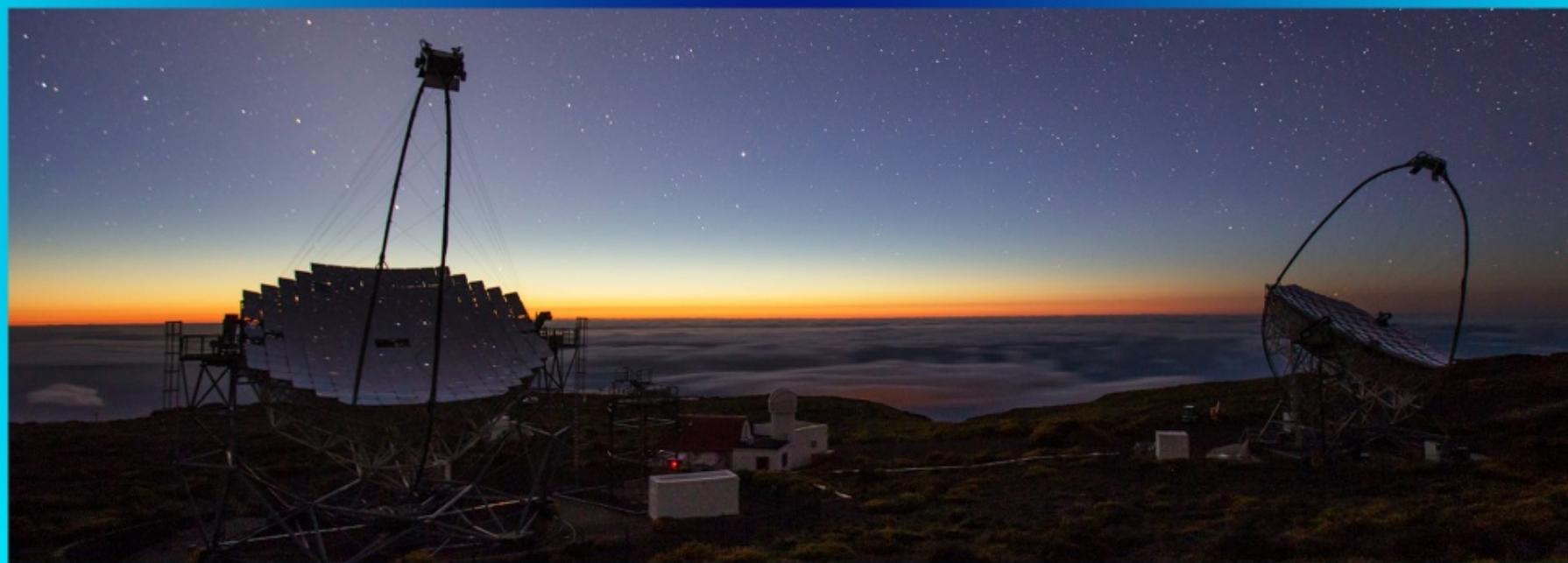
観測手段・メカニズム

Ogle & casper

中心部・核構造詳細

質量の推定

まとめ



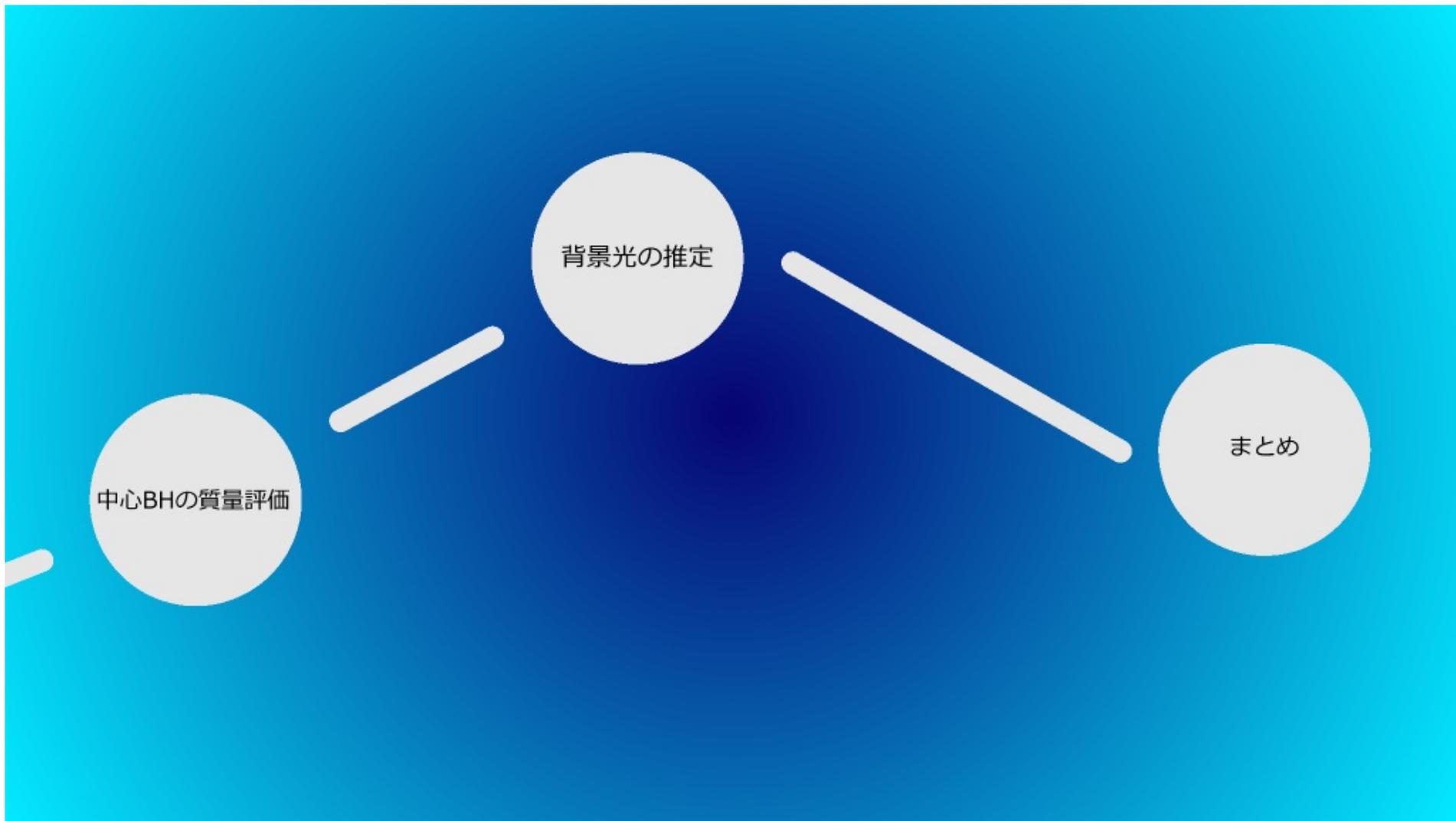
# ・北川 芙西音

・ HADASCH Daniela  
小林 志鳳・岩村 由樹

解析手法・メカニズム

ガンマ線天文学

Odie & caspar



# ガンマ線天文学

# 1.ガンマ線天文学



- ガンマ線の特徴
- 本研究における観測天体
- MAGIC望遠鏡の構造と観測メカニズムについて
- 解析結果から分かること

# 1.ガンマ線天文学

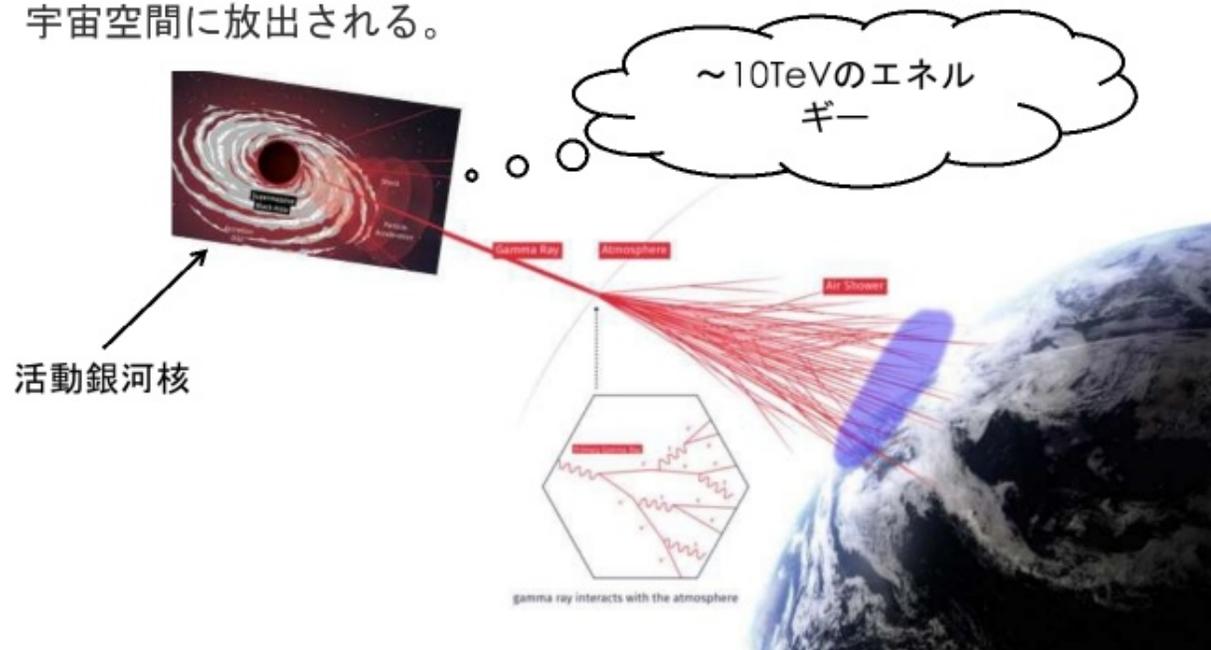


- ガンマ線の特徴
- 本研究における観測天体
- MAGIC望遠鏡の構造と観測メカニズムについて
- 解析結果から分かること



## ガンマ線は高エネルギーの宇宙線！

- 活動銀河核(AGN)によるジェットやガンマ線バーストによって宇宙空間に放出される。



ICRR

High energy gamma-ray astronomy

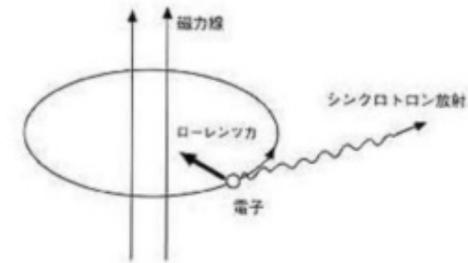
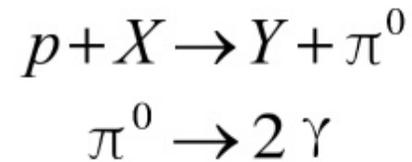


## ガンマ線の発生メカニズム

- シンクロトロン放射

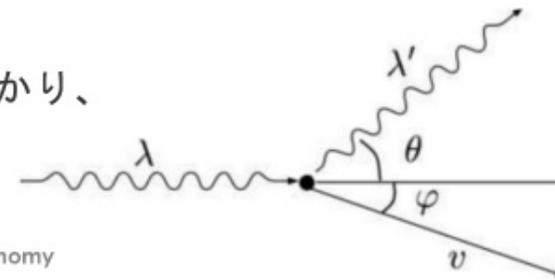
相対論的速度を持った荷電粒子が強い磁場によって進行方向が変化する時、ガンマ線を放射する。

- パイオンの崩壊



- 逆コンプトン散乱

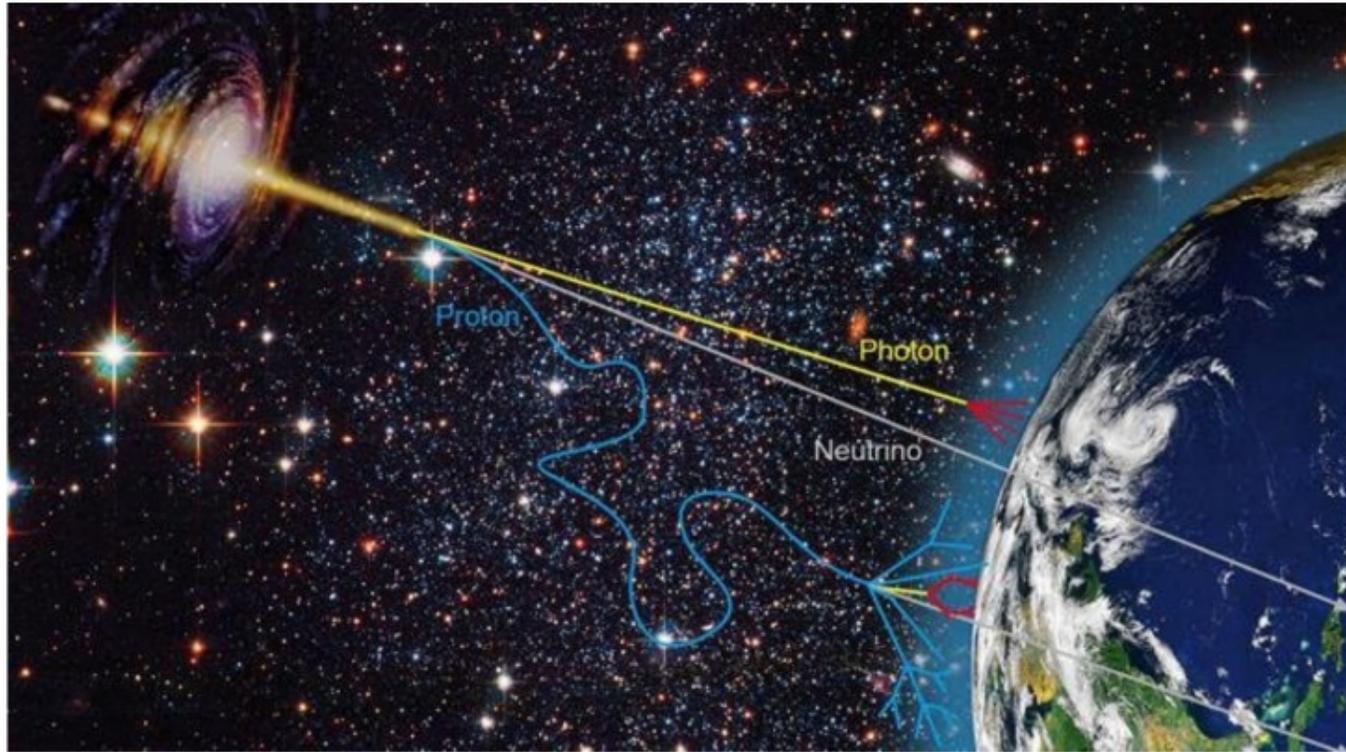
高エネルギー電子が低エネルギー光子にぶつかり、光子が高エネルギー状態になること。



ICRR

High energy gamma-ray astronomy

# ガンマ線は宇宙空間を直進できる！



ICRR

High energy gamma-ray astronomy



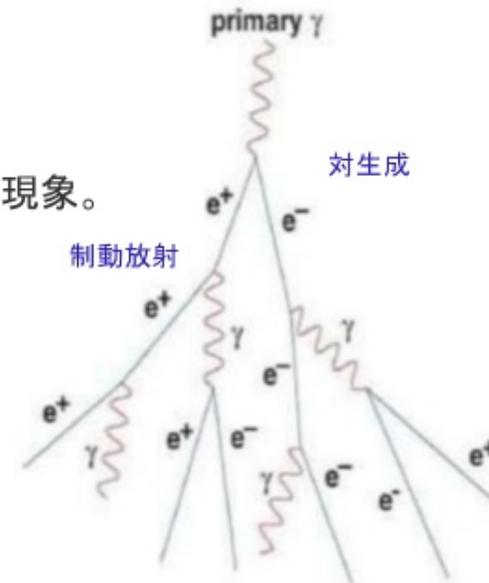
## ガンマ線の大気中での振る舞い

- 宇宙から飛来したガンマ線は大気中の原子と衝突して、  
空気シャワー(電磁シャワー)を作る。

対生成：エネルギーから粒子と反粒子が生まれる現象。

制動放射：荷電粒子の運動方向が変化する時に  
エネルギーを放射する現象。

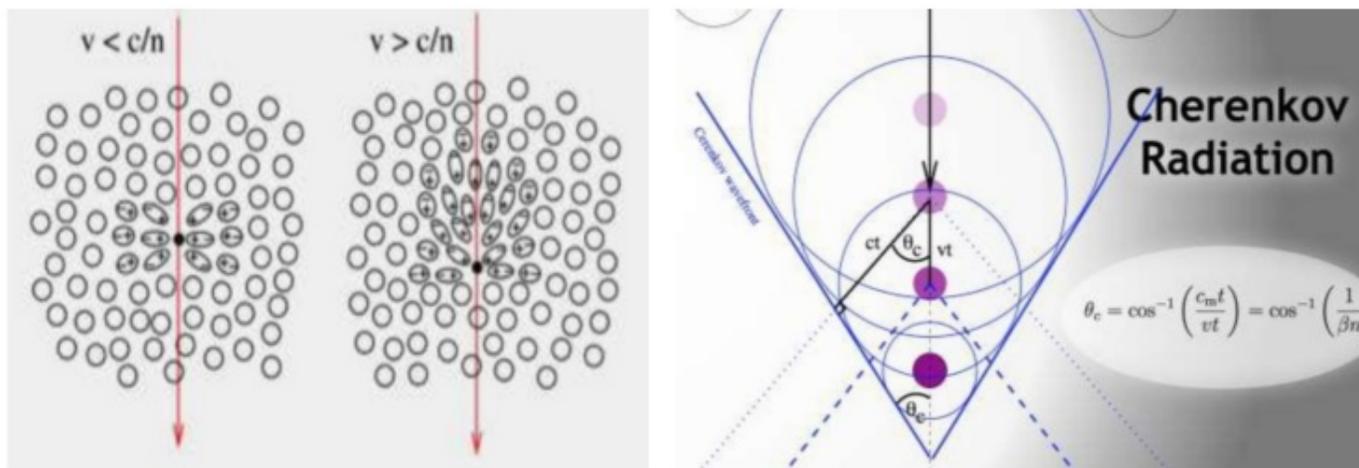
対生成に必要なエネルギー以下になると対生成は終了する！



# チェレンコフ光



- 衝撃波のようなイメージ



ICRR

High energy gamma-ray astronomy

# 1.ガンマ線天文学

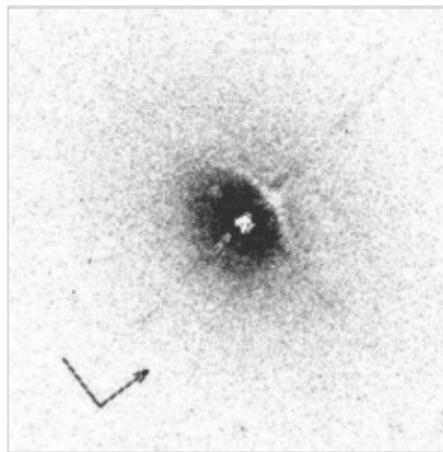


- ガンマ線の特徴
- **本研究における観測天体**
- MAGIC望遠鏡の構造と観測メカニズムについて
- 解析結果から分かること

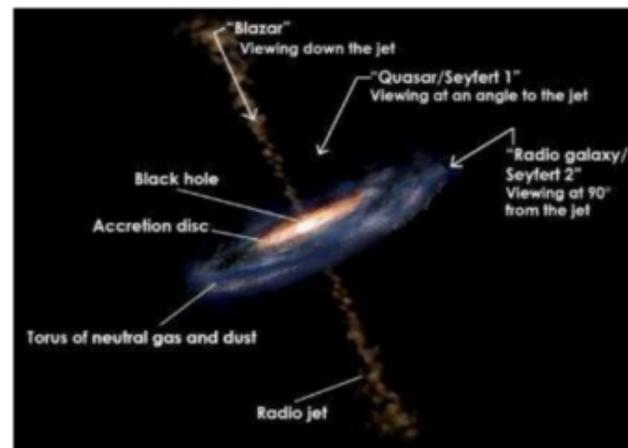
# 今回の観測天体



1ES 1959+650



銀河の姿



中心の降着円盤イメージ

ICRR

High energy gamma-ray astronomy

# 1.ガンマ線天文学

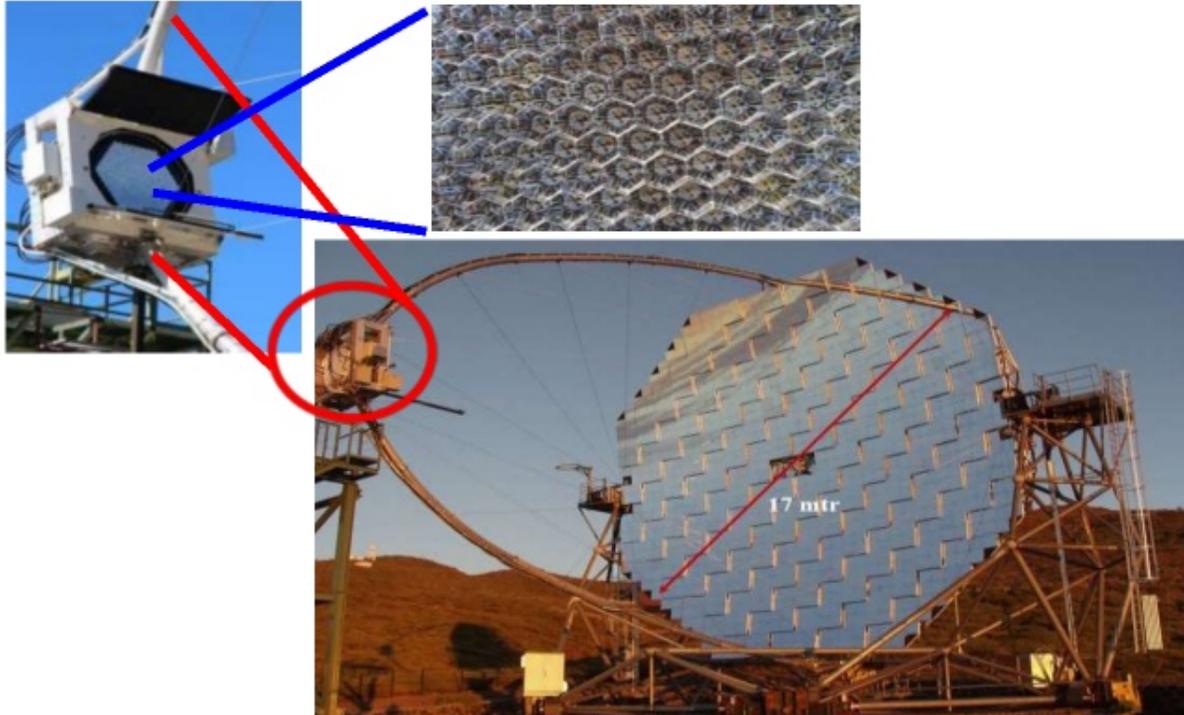


- ガンマ線の特徴
- 本研究における観測天体
- MAGIC望遠鏡の構造と観測メカニズムについて
- 解析結果から分かること



# MAGIC望遠鏡の構造

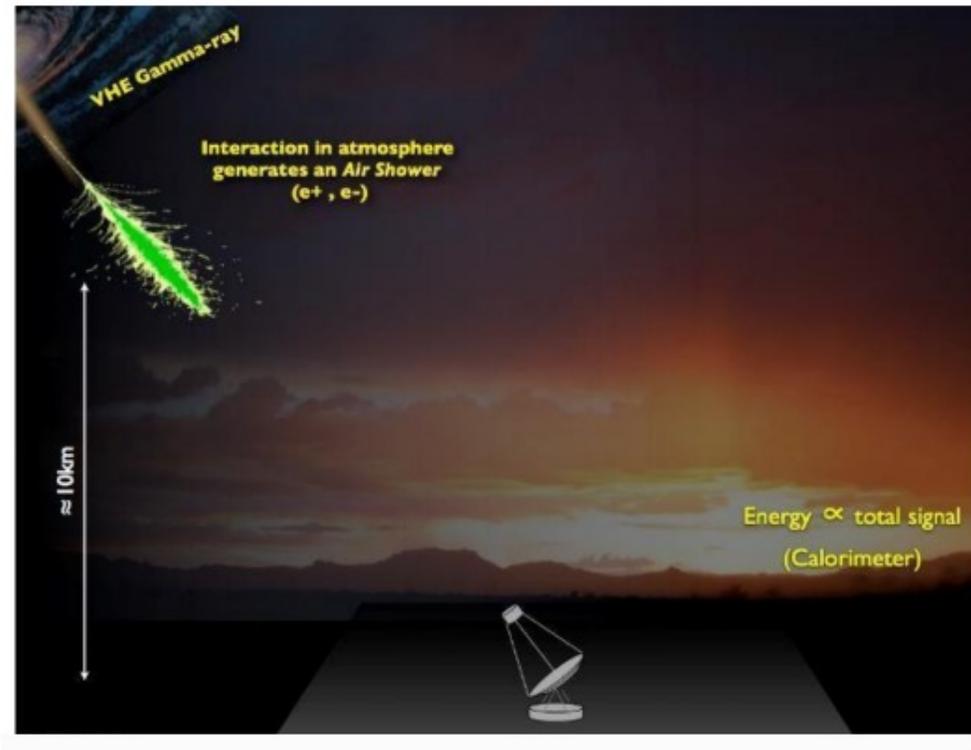
- 口径17mのガンマ線望遠鏡(=チェレンコフ望遠鏡)



ICRR

High energy gamma-ray astronomy

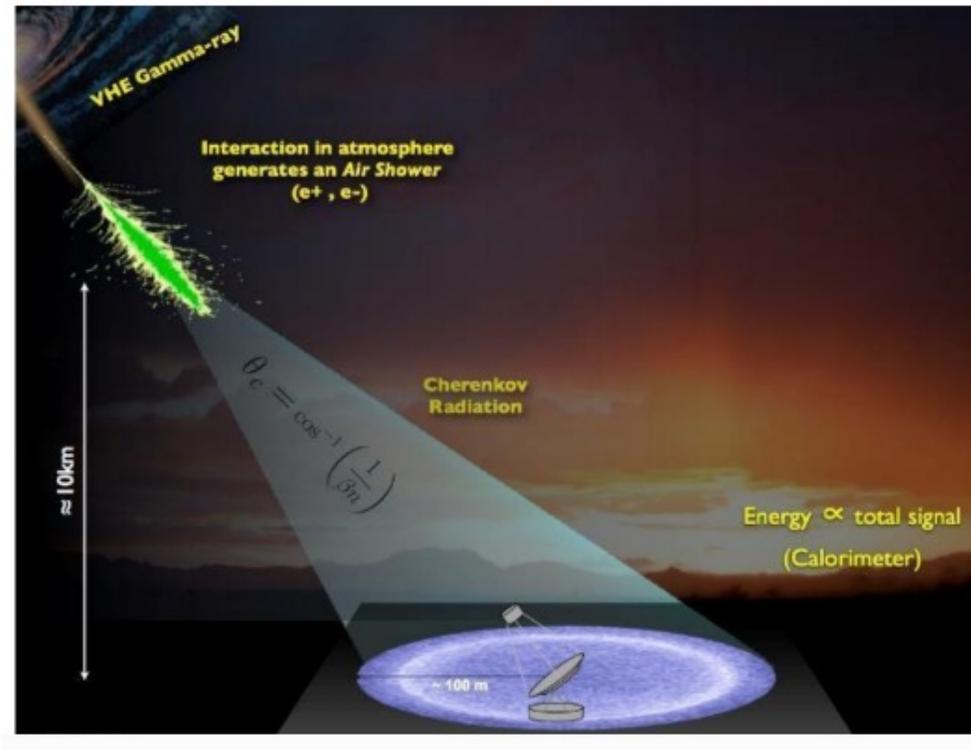
# ①空気シャワーが起こる



ICRR

Spring School 2019

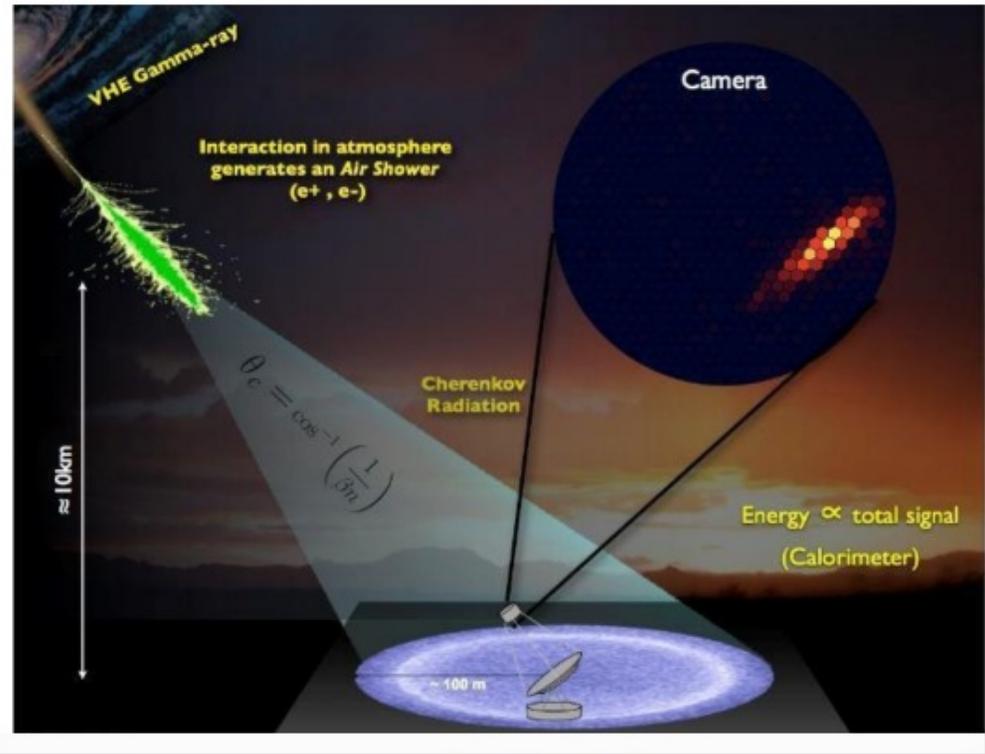
## ②チェレンコフ光が到来する



ICRR

Spring School 2019

### ③カメラで撮像する



ICRR

Spring School 2019

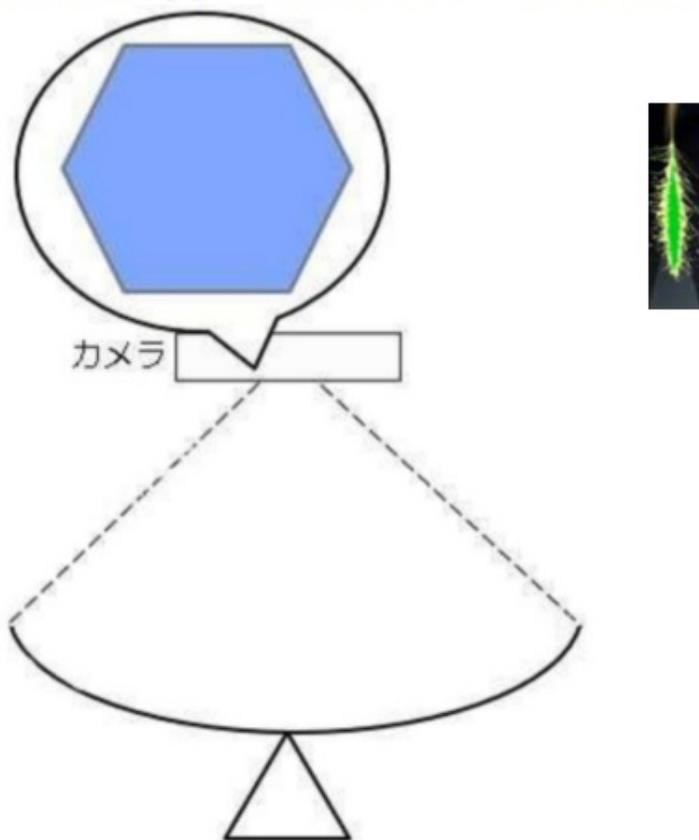


# なんで楕円型になるの？

ICRR

High energy gamma-ray astronomy

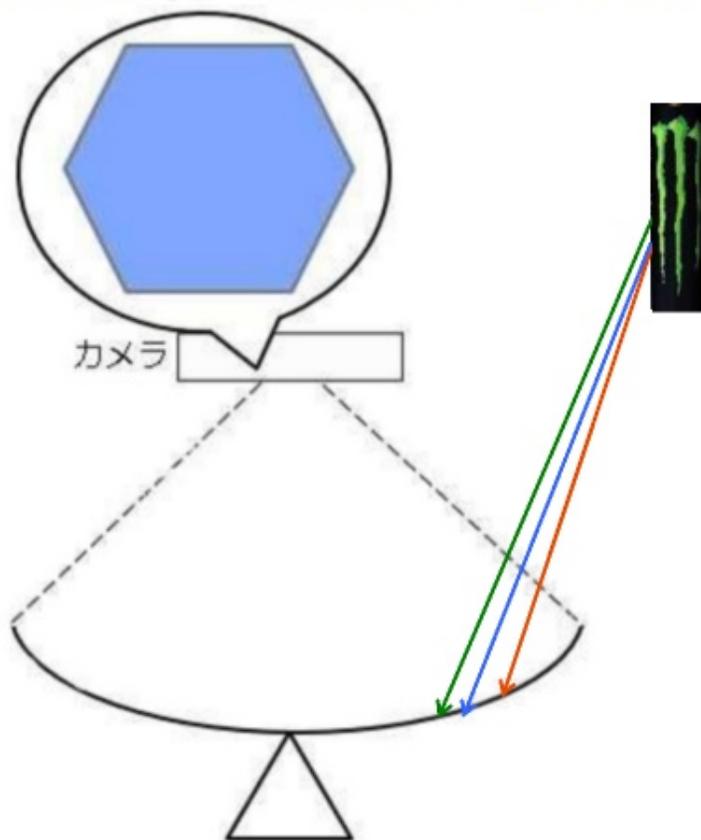
# 望遠鏡で起きてること



ICRR

High energy gamma-ray astronomy

# 望遠鏡で起きてること



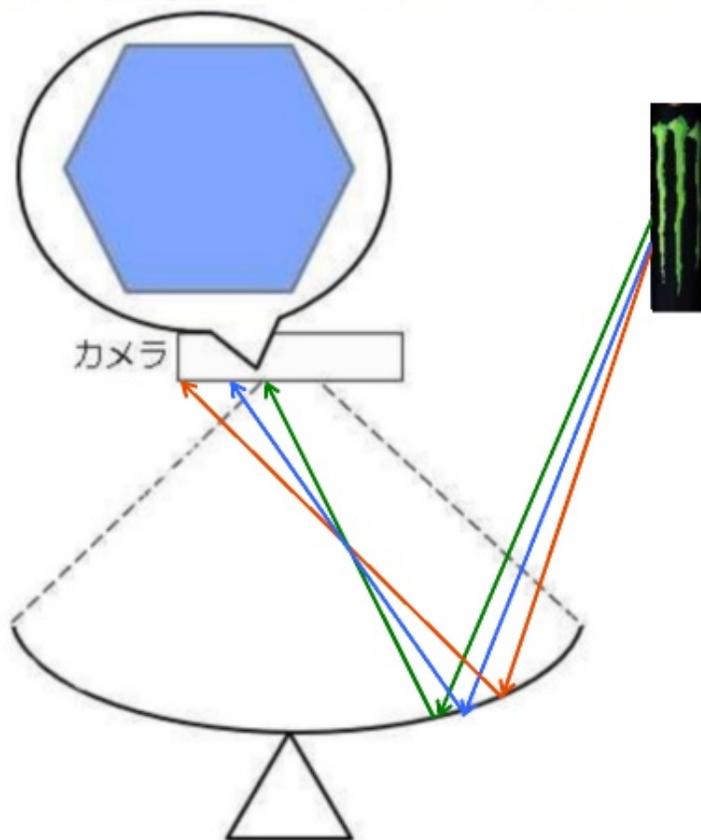
カメラ

ICRR

High energy gamma-ray astronomy



# 望遠鏡で起きてること

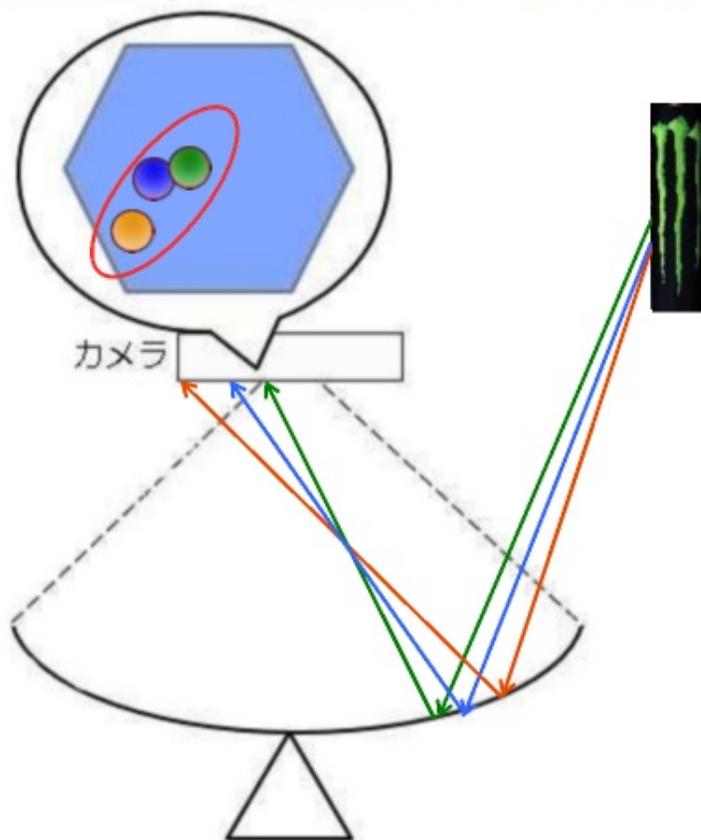


ICRR

High energy gamma-ray astronomy



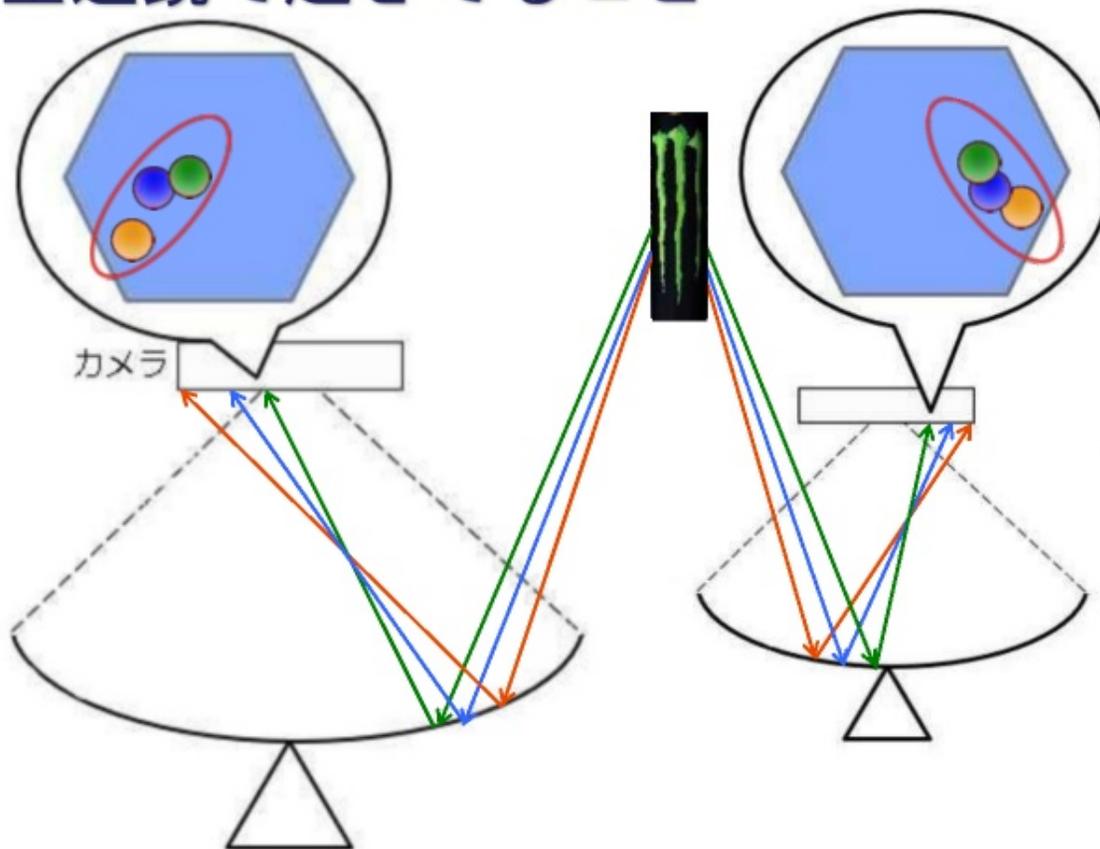
# 望遠鏡で起きてること



ICRR

High energy gamma-ray astronomy

# 望遠鏡で起きてること



ICRR

High energy gamma-ray astronomy

# 1.ガンマ線天文学



- ガンマ線の特徴
- 本研究における観測天体
- MAGIC望遠鏡の構造と観測メカニズムについて
- 解析結果から分かること

# 解析結果から分かること



- 活動銀河核(=ガンマ線放射源)の位置特定

- ブラックホールの質量推定

- ブラックホールのサイズ推定

エディントン光度

ドップラー効果, 超光速現象

- ガンマ線のエネルギー減衰量の推定

→背景光の密度の推定ができる

# ガンマ線による活動銀河核の解析

高エネルギーガンマ線天文学グループ

川上凌太・橋山和明・西川奏・今澤遼・北川英西音

齋藤隆之・HADASCH Daniela  
高橋 光成・小林 志風・岩村 由樹

ガンマ線天文学

観測手段・メカニズム

Oddie & casper

中心部・核構造詳細

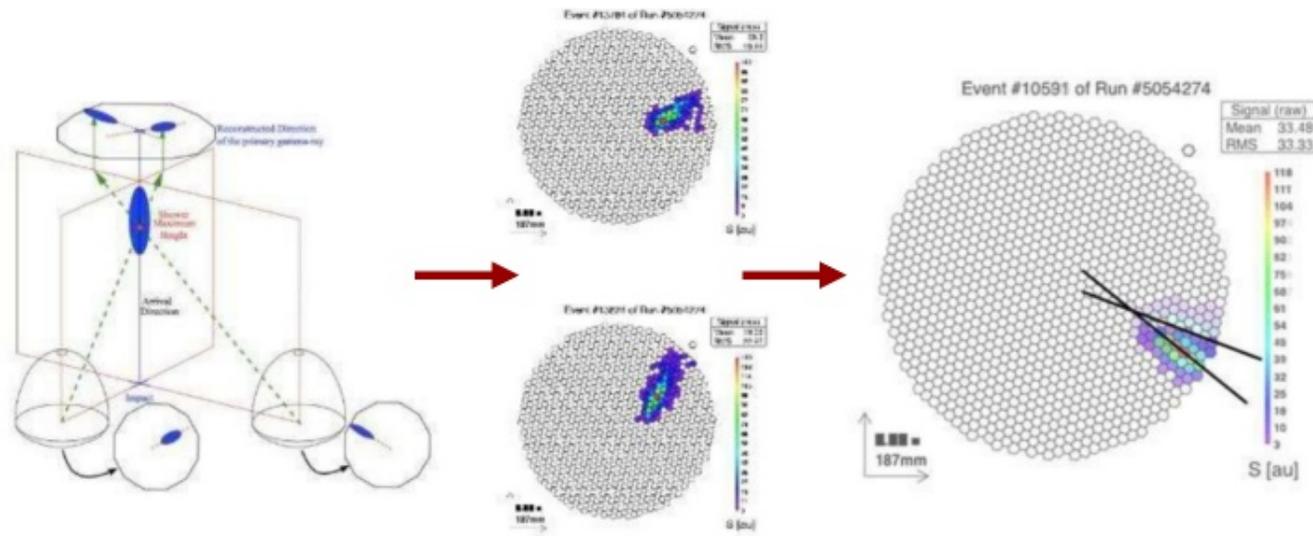
質量の推定

まとめ



# 解析手法・メカニズム

# 解析[原理]



空気シャワーの像を取得

→ 像の軸の交点から到来方向を推定

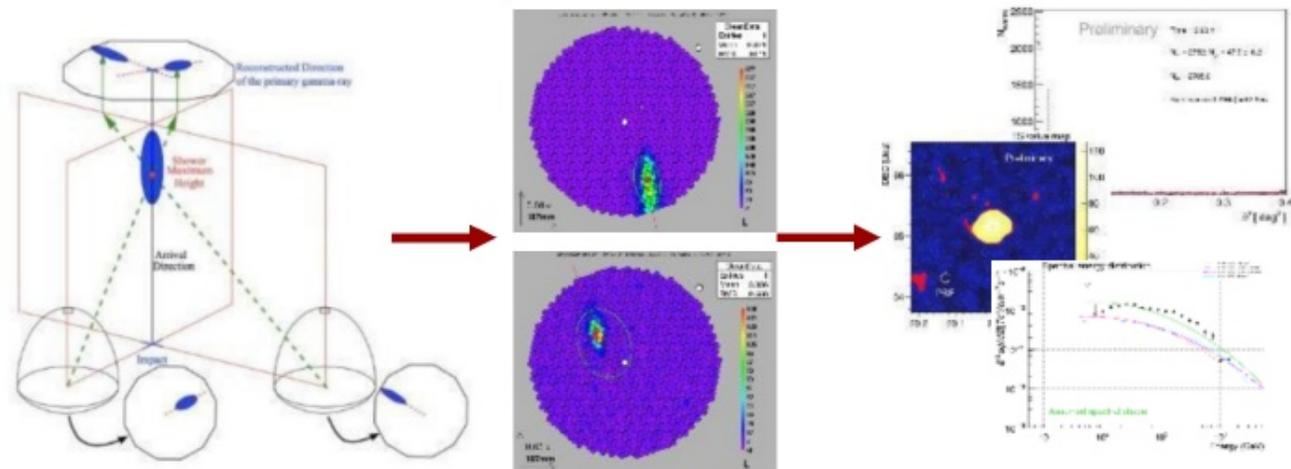
ICRR

High energy gamma-ray astronomy

# 解析ツール



## MARS: MAGIC Analysis Reconstruction Software



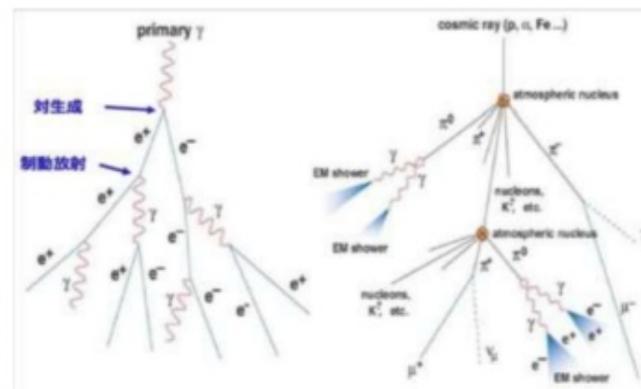
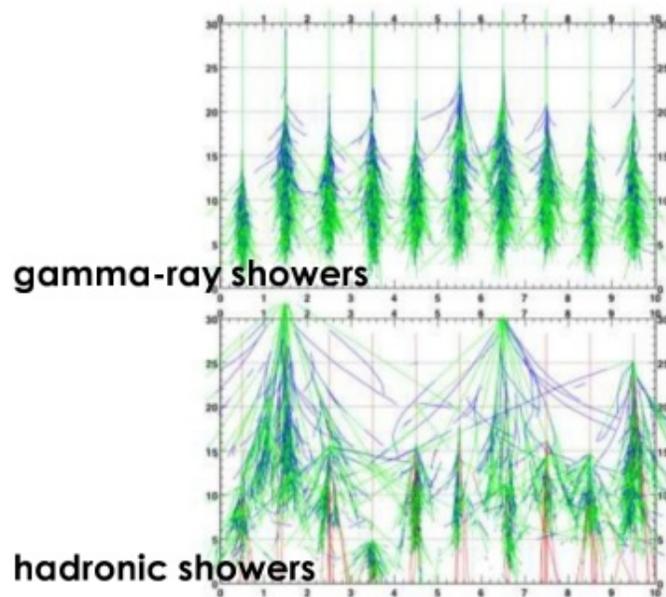
空気シャワーの像を取得

- $\gamma$ 線の到来方向
- $\gamma$ 線のフラックス、エネルギー

ICRR

High energy gamma-ray astronomy

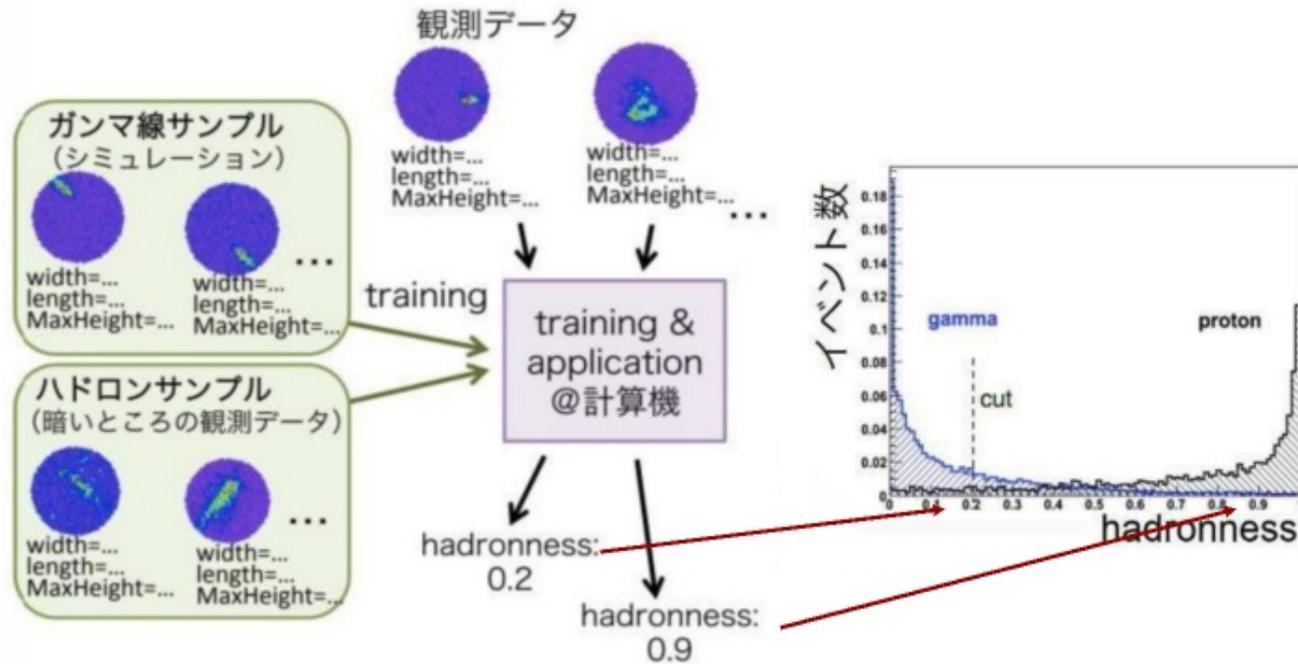
# Gamma-ray vs Hadronic



ICRR

High energy gamma-ray astronomy

# 解析メカニズム



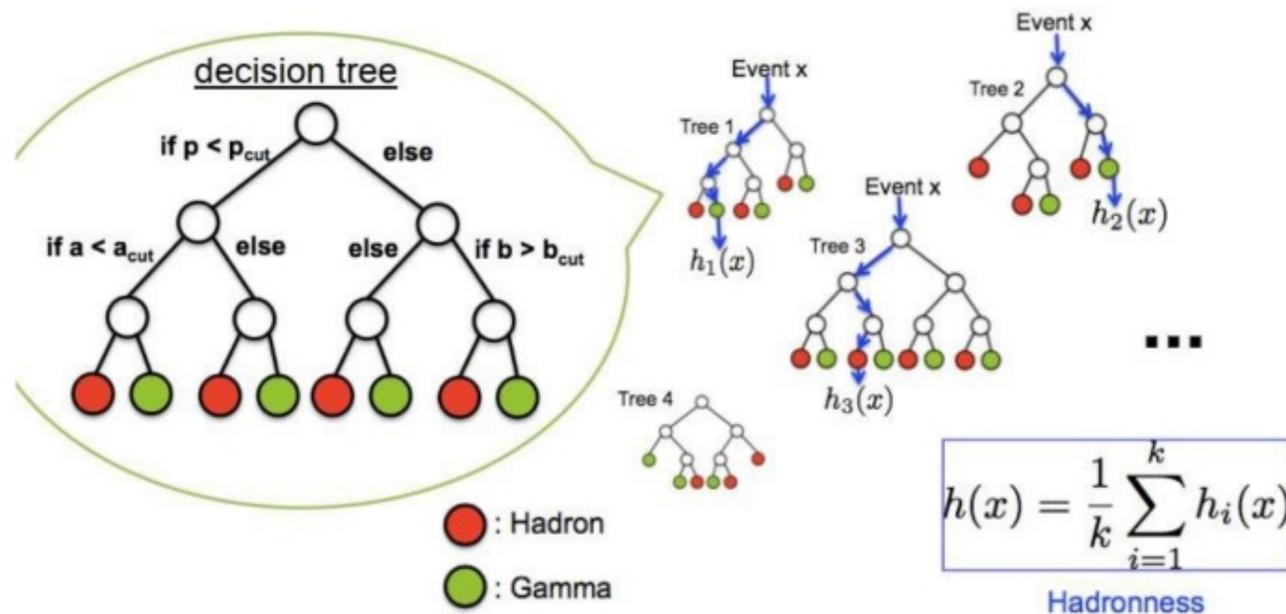
ICRR

High energy gamma-ray astronomy



# Random Forest法

機械学習の一種である Random Forest 法を利用。  
重要なパラメータ： width, length, shower max height, etc.



ICRR

High energy gamma-ray astronomy

# ガンマ線による活動銀河核の解析

高エネルギーガンマ線天文学グループ

川上凌太・橋山和明・西川奏・今澤遼・北川英西音

齋藤隆之・HADASCH Daniela  
高橋 光成・小林 志風・岩村 由樹

ガンマ線天文学

観測手段・メカニズム

Ogle & casper

中心部・核構造詳細

質量の推定

まとめ





Odie & caspar

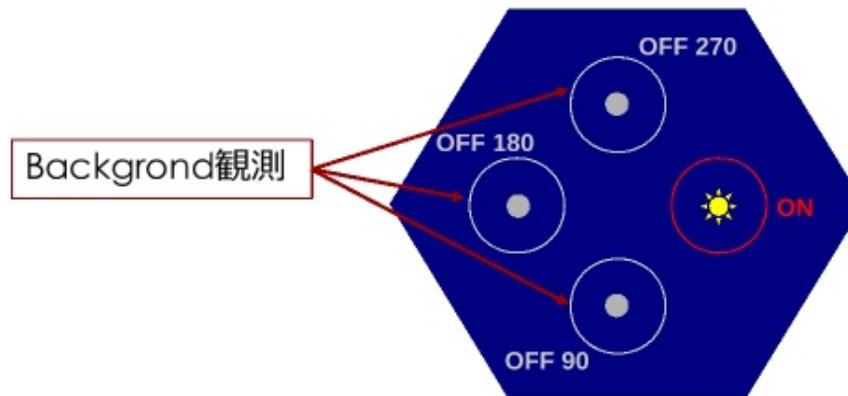
## γ線の信号と天体との角度θの定義



✓ γ線( $\gamma \rightarrow e^+ + e^-$ )とBackgroundによる信号の識別

$$\rightarrow N_{\text{excess}} = N_{\text{on}} - a \cdot N_{\text{off}}$$

$$= \gamma\text{線} + \text{Background} - \text{Background} = \gamma\text{線}$$

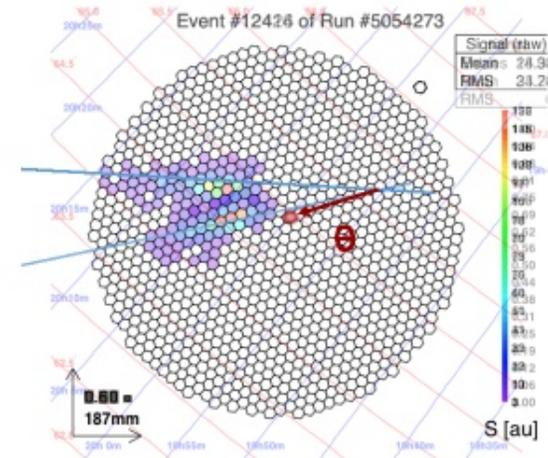
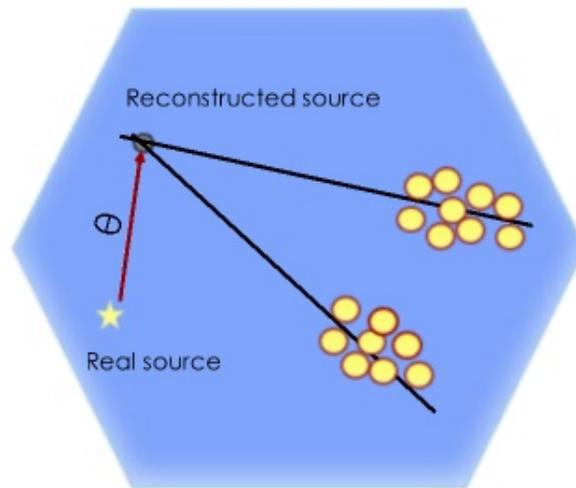


ICRR

High energy gamma-ray astronomy



✓再構成された $\gamma$ 線到来方向と天体との角度 $\theta$ の算出



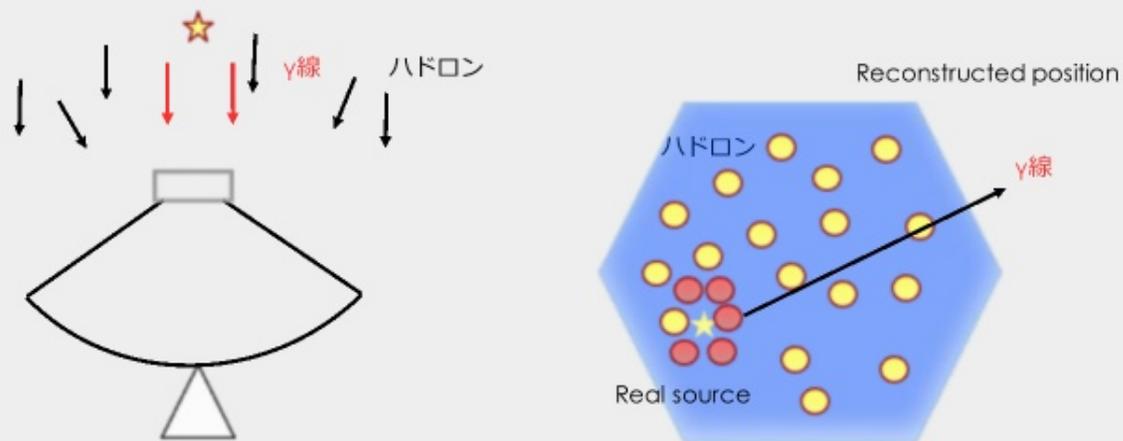
ICRR

High energy gamma-ray astronomy



## γ線とハドロン到来方向の違い

- ✓ ハドロンは一様に広範囲に分布する
- ✓ 一方で、γ線はγ線源中心に分布をする



High energy gamma-ray astronomy

ICRR

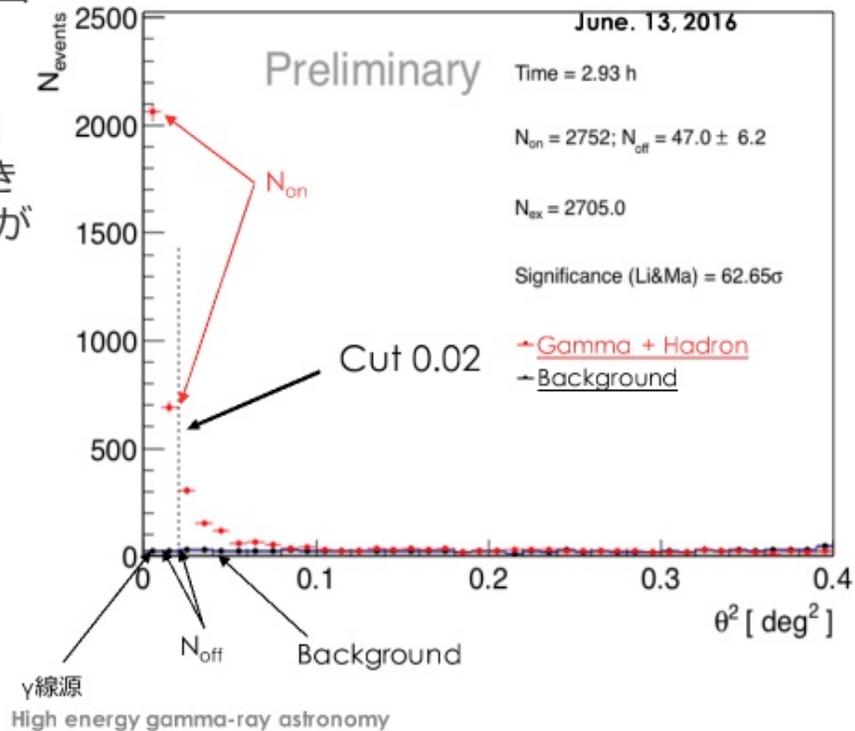
## γ線到来方向と天体との角度 $\theta$ ・γ線の有意度



✓  $\theta^2 < 0.02$ の範囲内においてγ線が62.65 $\sigma$ の確率で検出された。

✓  $\theta = 0$ 付近においてγ線のevent数が多く、 $\theta$ が大きくなるに従ってevent数が小さくなる。

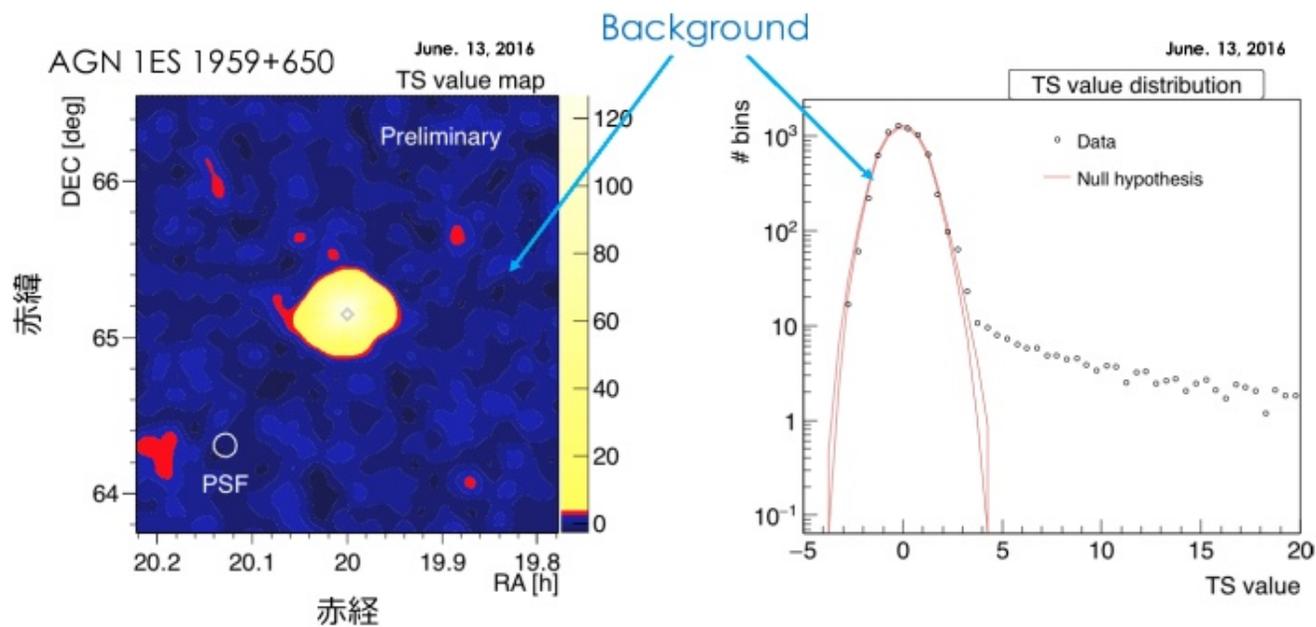
Parameter  
 $\theta^2$  (Signalcut) : 0.02  
 Size: 300  
 Hadronness : 0.16  
 Energy cut : 250GeV



## CasparによるGamma-Excess分布- $\gamma$ 線SKYMAP



- ✓ Background を推定し、 $\gamma$ 線SKYMAP (Significance (Li&Ma)) を作製する。



ICRR

High energy gamma-ray astronomy

# ガンマ線による活動銀河核の解析

高エネルギーガンマ線天文学グループ

川上凌太・橋山和明・西川奏・今澤遼・北川英西音

齋藤隆之・HADASCH Daniela  
高橋 光成・小林 志風・岩村 由樹

ガンマ線天文学

観測手段・メカニズム

Ogle & casper

中心部・核構造詳細

質量の推定

まとめ



# 中心BHの質量評価

# AGN中心のBH質量推定

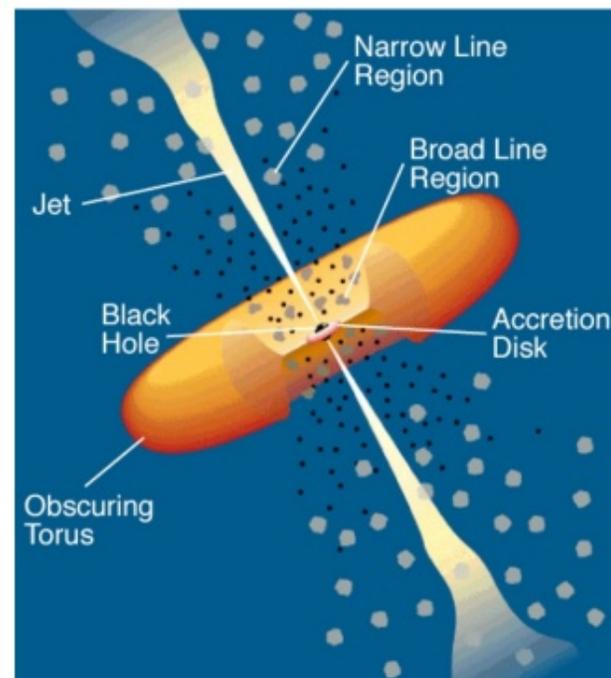


[目標]

AGN中心のBHの質量を推定する

[方法]

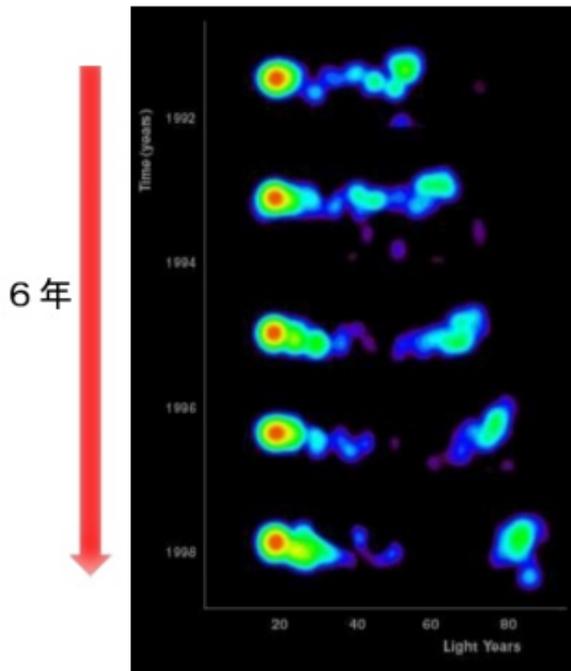
解析ソフトFluteを用いた。



ICRR

High energy gamma-ray astronomy

# AGNの相対論的効果



6年

ジェットが光速以上で動いているように見える

→相対論的効果

(今回の解析で効いてくる相対論的効果)

- ・ドップラー効果の補正
- ・系による時間の進み方の違い etc...

20光年

High energy gamma-ray astronomy

ICRR

# 上限の見積もり 1



## ■ 方針

(使う3つの関係式)

$$R_{\text{BH}} < R_{\text{light}}$$

$$R_{\text{light}} < \Delta t_{\text{light}} \cdot c$$

$$\Delta t_{\text{light}} < \Delta t_{\text{flare}}$$

$$M_{\text{BH}} < \frac{c^2}{2G} \frac{c\delta\Delta t_{\text{flare}}}{1+z}$$

(備考)

$R_{\text{BH}}$  : BHの半径

$R_{\text{light}}$  : 明るくなる領域の大きさ

$\Delta t_{\text{light}}$  : 明るくなる領域を光が通過する時間

$\Delta t_{\text{flare}}$  : 明るさが変化する時間

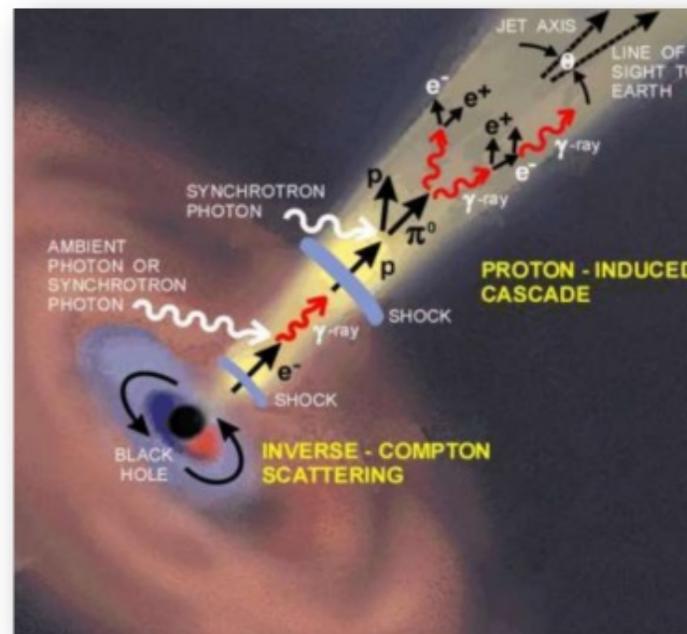
$z$  : 赤方偏移

$\delta$  : 相対論的補正

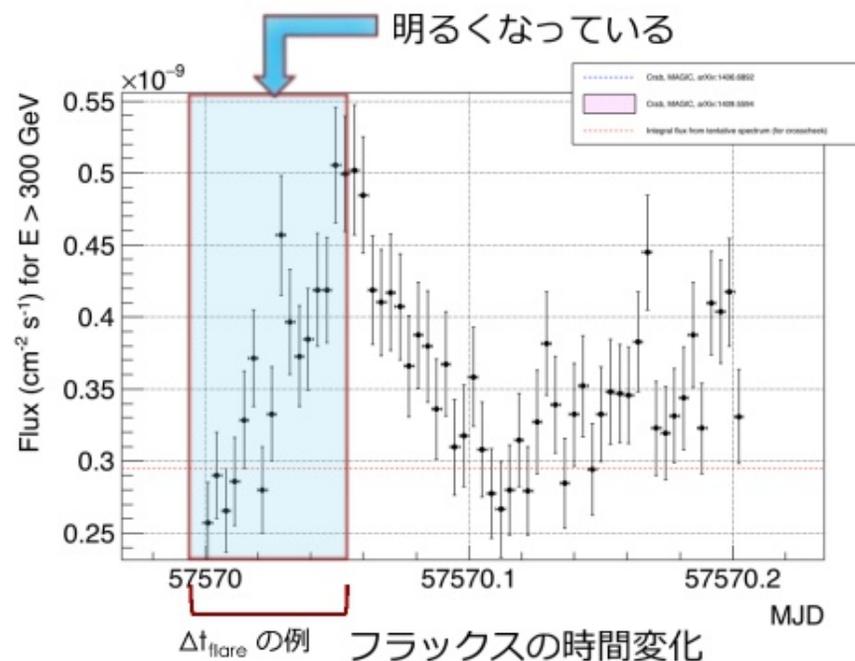
また、Schwarzschild BHを仮定している。

ICRR

High energy gamma-ray astronomy



## 上限の見積もり 2

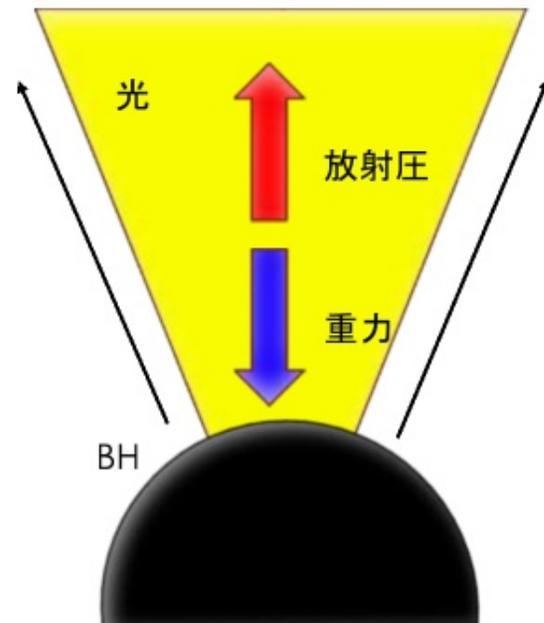


$\Delta t_{\text{flare}}$  (~数十分) → BH質量の上限を計算



# 下限の見積もり 1

- 方針
  - Eddington luminosityを用いる。



ICRR

High energy gamma-ray astronomy

Eddington luminosityとは...

放射圧 = 重力

となる光度

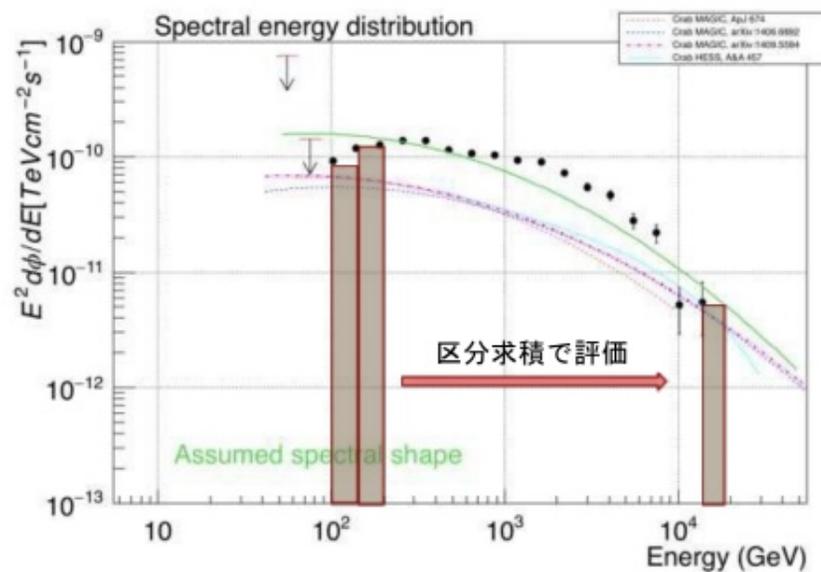


星が崩壊しない、最大の光度

$$M_{\text{BH}} > M_{\text{edd}} > \frac{\sigma_T}{4\pi G c m_p} L$$

(備考)  
L : ルミノシティ

## 下限の見積もり 2



エネルギーとフラックスの関係

フラックスからミノシティ（BH自体の光強度）を計算  
 →BHの質量の下限を計算

## 結果



BHの質量推定  $6 \times 10^3 M_{\odot} < M_{BH} < 10^{10} M_{\odot}$

BHの大きさ推定  $2 \times 10^4 [km] < R_{BH} < 3 \times 10^{10} [km]$

(参考) 銀河内の星の速度分散から推定したBH質量  $\sim 10^8 M_{\odot}$   
天の川銀河系の総質量  $\sim 10^{12} M_{\odot}$   
地球の直径  $\sim 10^4 [km]$   
太陽系の直径  $\sim 10^{10} [km]$

## 考察

- ・ 今回の推定は、計算方法の簡潔さを考慮すれば、良い近似と言える。
- ・ 観測者に届くまでの間に $\gamma$ 線の減少する量などを考慮していないので、それらを考慮することで、更に良い精度の推定が行えると考えられる。

# ガンマ線による活動銀河核の解析

高エネルギーガンマ線天文学グループ

川上凌太・橋山和明・西川奏・今澤遼・北川英西音

齋藤隆之・HADASCH Daniela  
高橋 光成・小林 志風・岩村 由樹

ガンマ線天文学

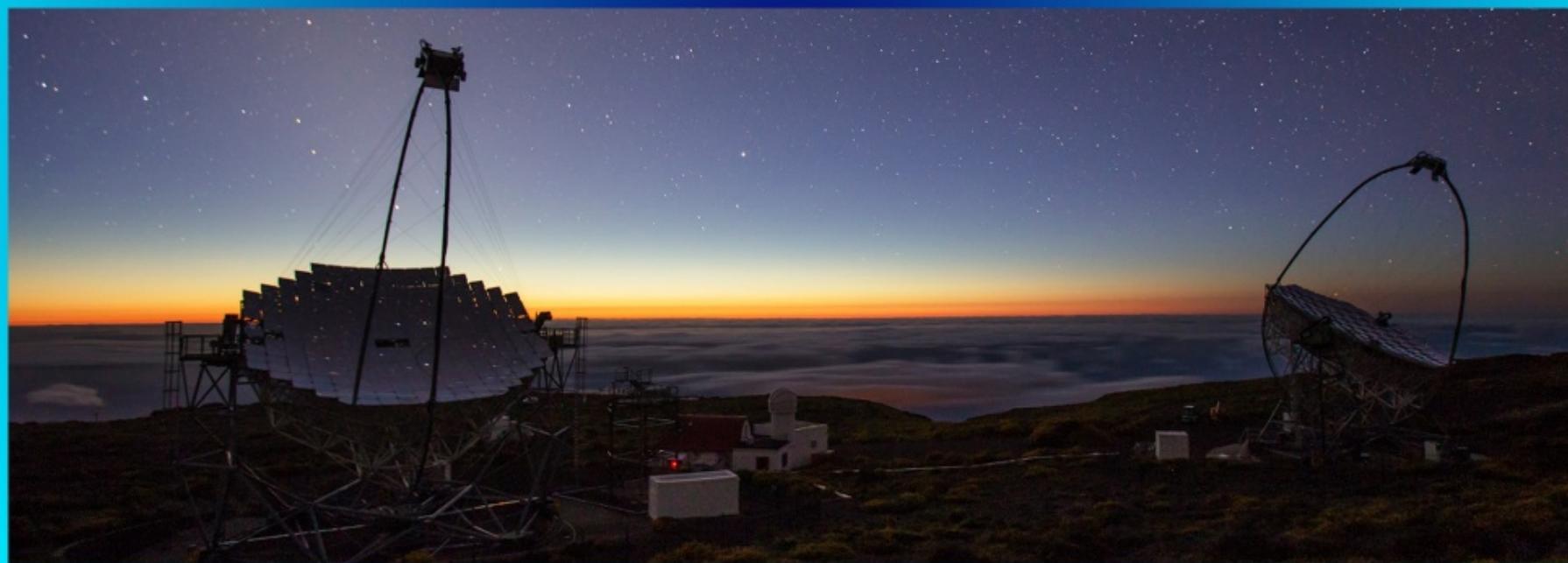
観測手段・メカニズム

Oddie & casper

中心部・核構造詳細

質量の推定

まとめ



# 背景光の推定

# 背景光の推定

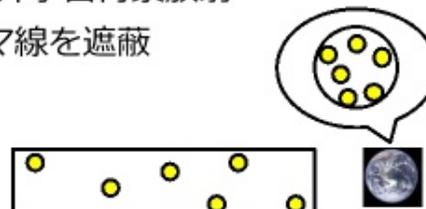
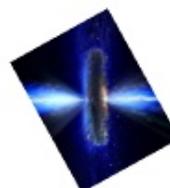


## ■ ガンマ線減衰の仕組み

- **EBL(Extragalactic Background Light)** : 銀河系外宇宙背景放射

→ ガンマ線と電子対生成を起こし、ガンマ線を遮蔽

CIB, COB  
(銀河や星の進化の歴史を反映)



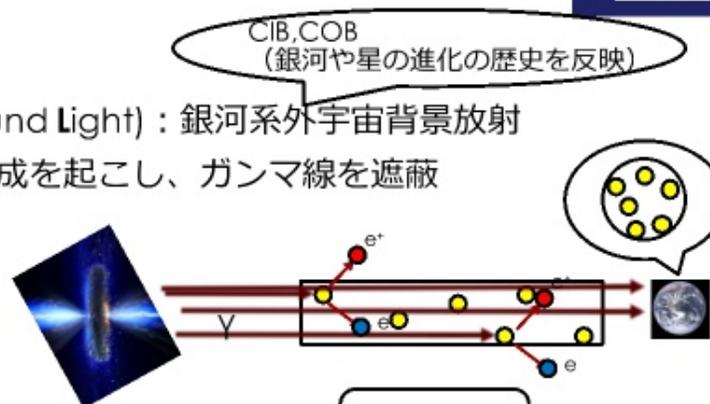
# 背景光の推定



## ■ ガンマ線減衰の仕組み

- **EBL(Extragalactic Background Light)** : 銀河系外宇宙背景放射

→ ガンマ線と電子対生成を起こし、ガンマ線を遮蔽



## ■ 遮蔽され具合の指標

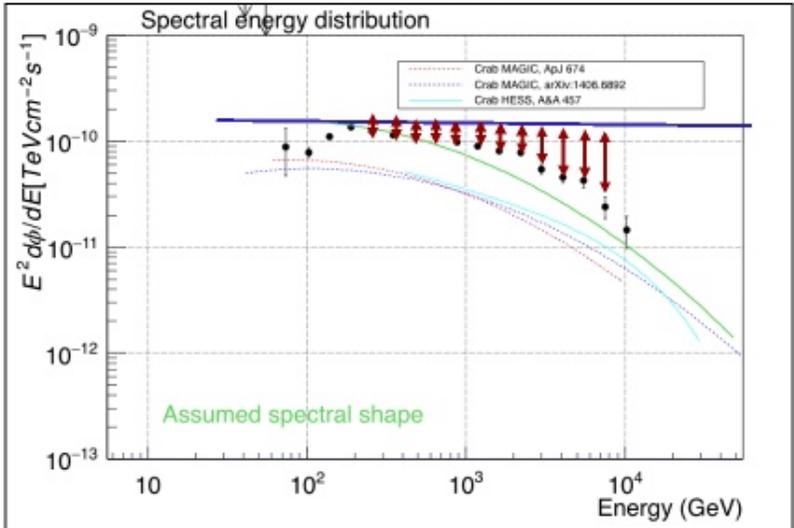
減衰率 = 単位面積当たりのEBLの散乱断面積の合計

↳ EBLの性質 (スペクトル) の推定



# 背景光の推定

- 計算
  - 仮定したところで . . .
    - 実際には右肩下がり ➡ EBLによる減衰



ICRR

High energy gamma-ray astronomy

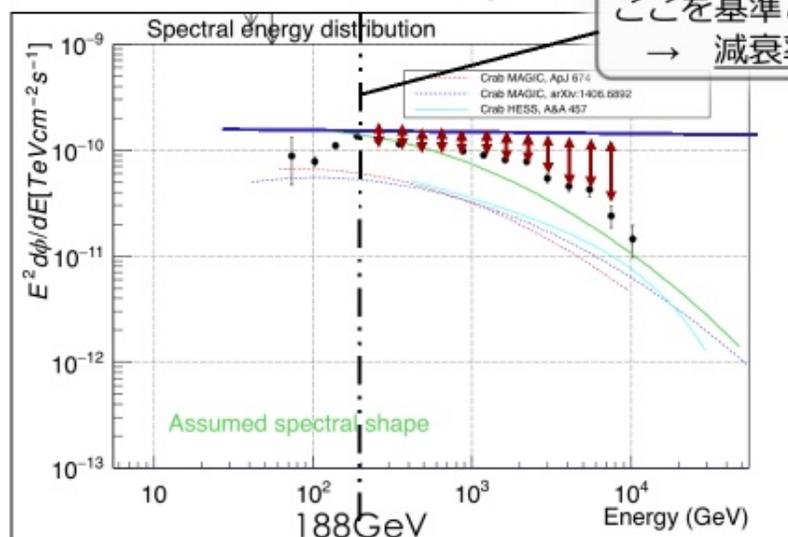
# 背景光の推定



## ■ 計算

- 仮定したところで . . .

→ 実際には右肩下がり → EBLによる減衰



ここを基準として、各点との比をとる  
→ 減衰率 がわかる

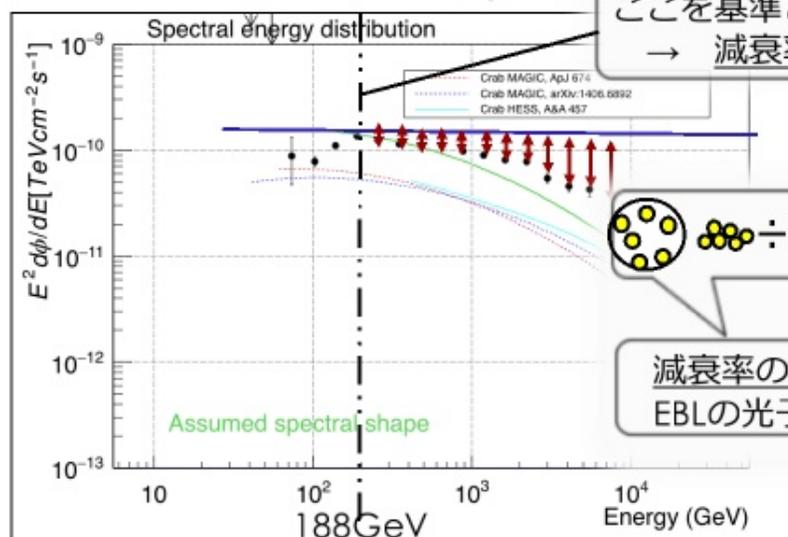
# 背景光の推定



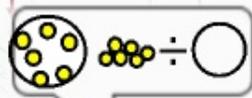
## ■ 計算

- 仮定したところで・・・

→ 実際には右肩下がり → EBLによる減衰



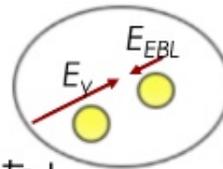
ここを基準として、各点との比をとる  
→ 減衰率 がわかる



減衰率の式より、線源と地球の間の  
EBLの光子数密度がわかる

光子の断面積は、  
トムソン断面積を仮定

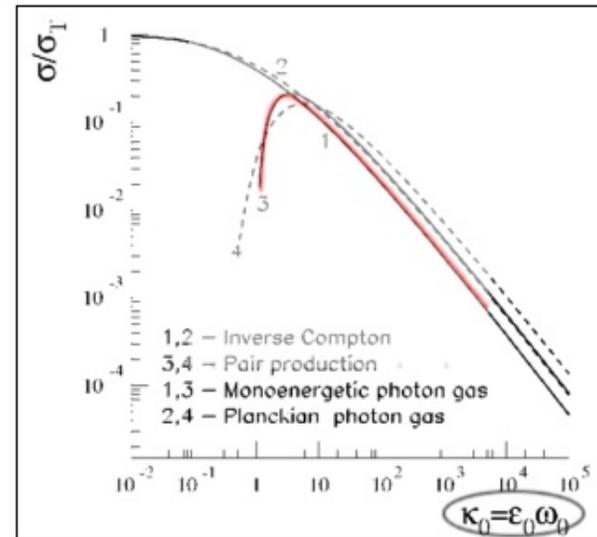
# 背景光の推定



## ■ 結果

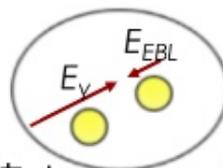
- EBLの光子数密度がわかった！
- 次にEBL光子のエネルギーを算出

2粒子の衝突による各反応のしやすさ



2粒子のエネルギーの積

# 背景光の推定



## ■ 結果

- EBLの光子数密度がわかった！
- 次にEBL光子のエネルギーを算出

$$E_\gamma \cdot E_{EBL} = 4 (mc^2)^2 \cdot \dots \cdot \star$$

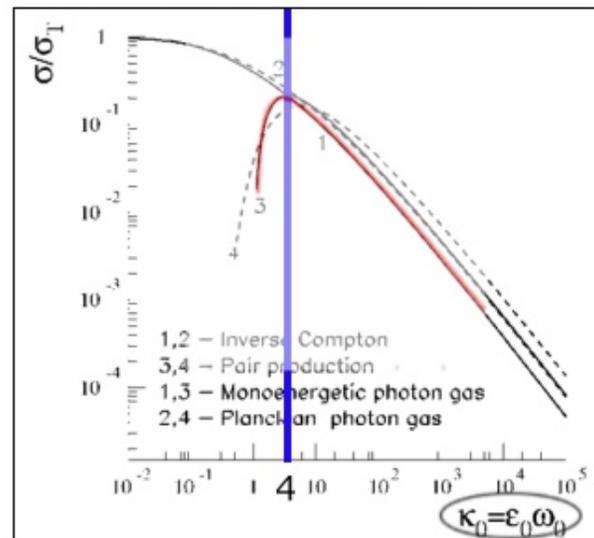
付近でピーク

- 全てのガンマ線とEBL光子の衝突は☆式を満たすと仮定



各 $E_\gamma$ について $E_{EBL}$ を算出  
→ EBLのスペクトル取得

2粒子の衝突による各反応のしやすさ



2粒子のエネルギーの積

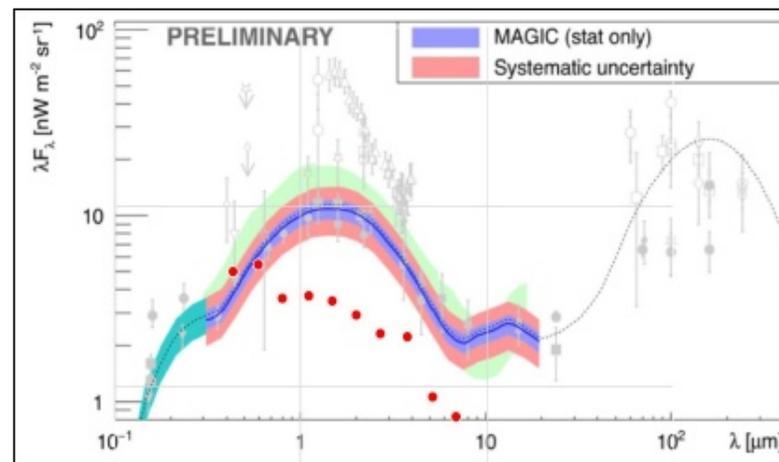
# 背景光の推定



## ■ 結果

- 測定結果をプロット（赤丸）  
& 過去のデータと比較

... かなりずれている。  
なぜか。



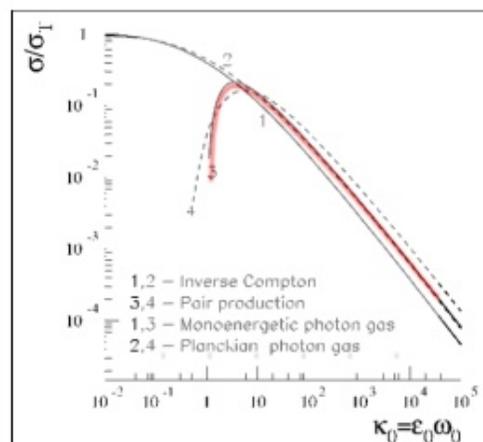
# 背景光の推定



## ■ なぜずれたのか

$$E_{\gamma} * E_{EBL} = 4 (mc^2)^2 \dots \star$$

の近似式がざっくりしすぎ  
特にピークの右側（高エネルギー側）



# 背景光の推定



## ■ なぜずれたのか

$$E_\gamma * E_{EBL} = 4 (mc^2)^2 \dots \star$$

の近似式がざっくりしすぎ  
特にピークの右側 (高エネルギー側)

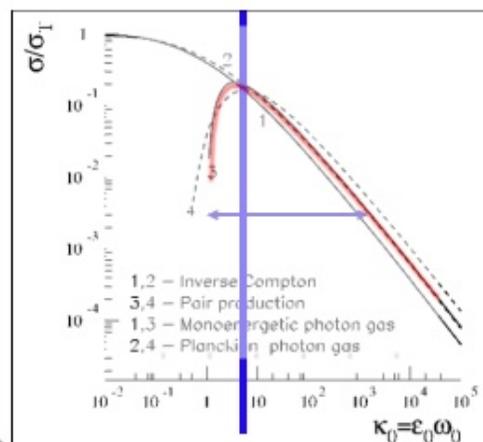


ピークの幅に応じた $E_{EBL}$ の算出方法の確立

+

そもそものフラットの仮定のずれの解決

が課題



# ガンマ線による活動銀河核の解析

高エネルギーガンマ線天文学グループ

川上凌太・橋山和明・西川奏・今澤遼・北川英西音

齋藤隆之・HADASCH Daniela  
高橋 光成・小林 志風・岩村 由樹

ガンマ線天文学

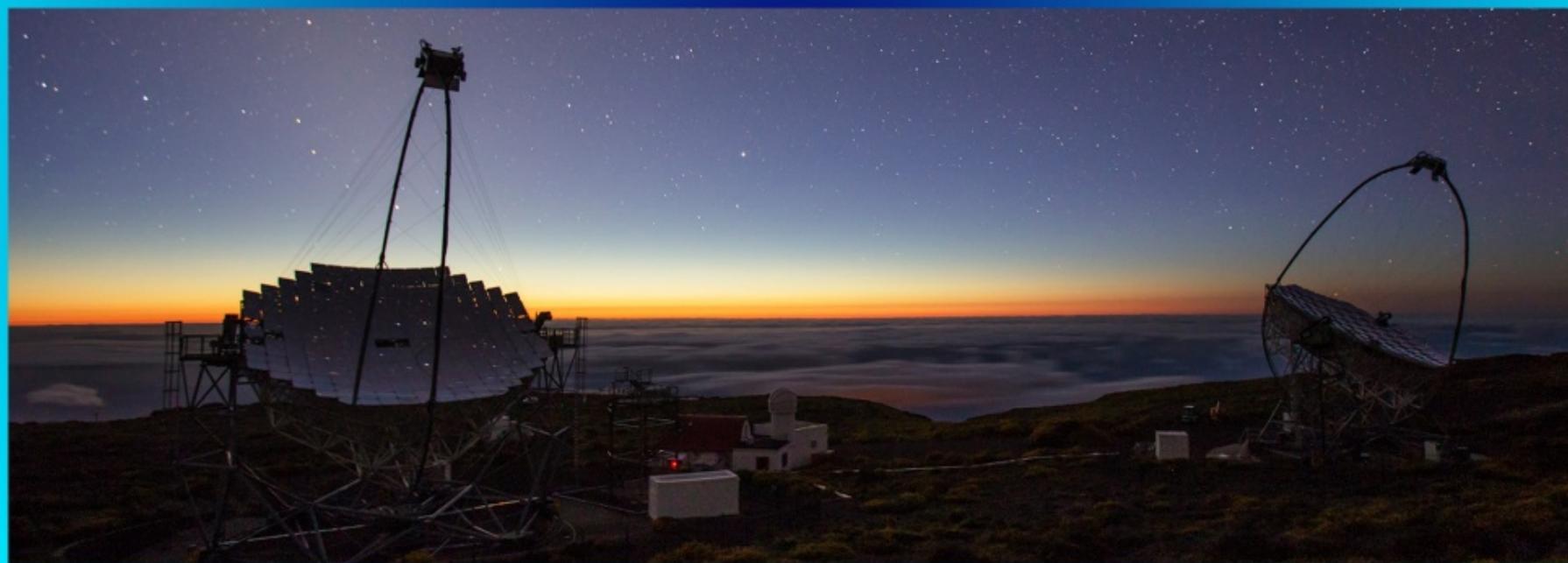
観測手段・メカニズム

Ogle & casper

中心部・核構造詳細

質量の推定

まとめ

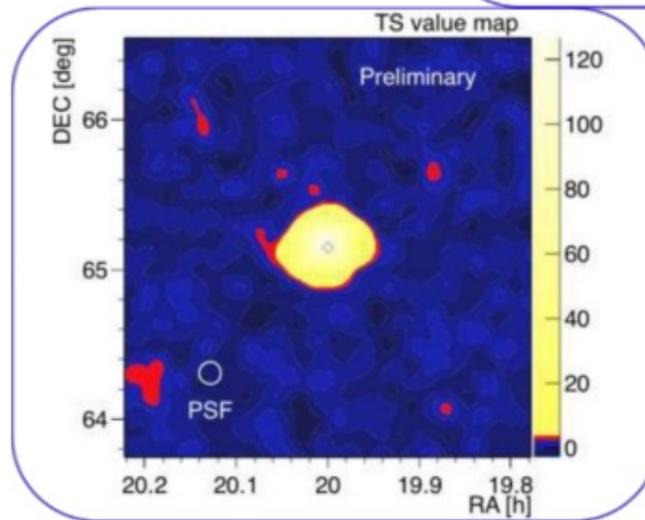
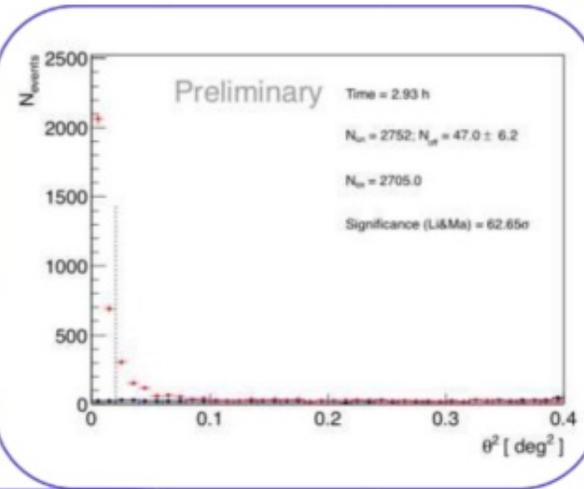




まとめ

# まとめ 1

- Odieでの解析
  - $\theta^2$ プロットを行った
  - 有意度の計算を行った



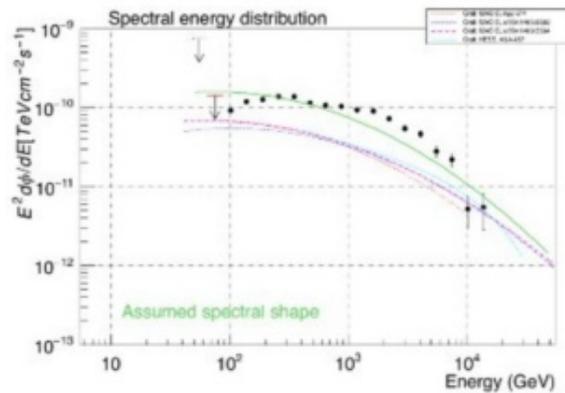
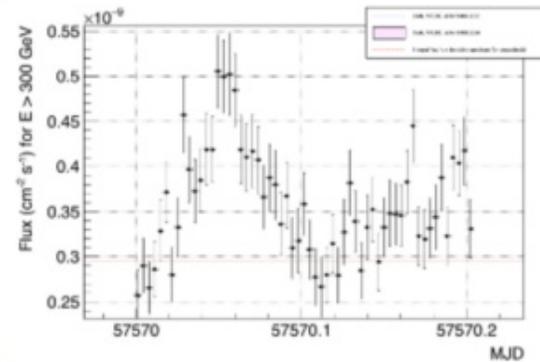
- Casparでの解析
  - $\gamma$ 線天体のsky plotを行った

ICRR

High energy gamma-ray astronomy

## まとめ2

- Fluteでの解析
  - エネルギースペクトルや光度曲線を描いた

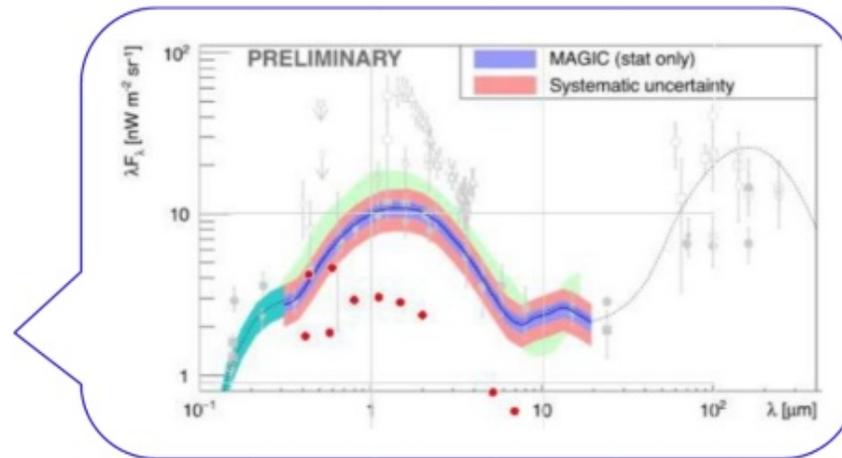


- BHの質量推定
  - AGN中心のBH質量推定を行った
  - $6000 M_{\odot} < M_{BH} < 10^{10} M_{\odot}$

# まとめ3



- 背景光の推定
  - $\gamma$ 線の減少量から、背景光の推定を行った



# ガンマ線による活動銀河核の解析

高エネルギーガンマ線天文学グループ

川上凌太・橋山和明・西川奏・今澤遼・北川英西音

齋藤隆之・HADASCH Daniela  
高橋 光成・小林 志風・岩村 由樹

ガンマ線天文学

観測手段・メカニズム

Oddie & casper

中心部・核構造詳細

質量の推定

まとめ

