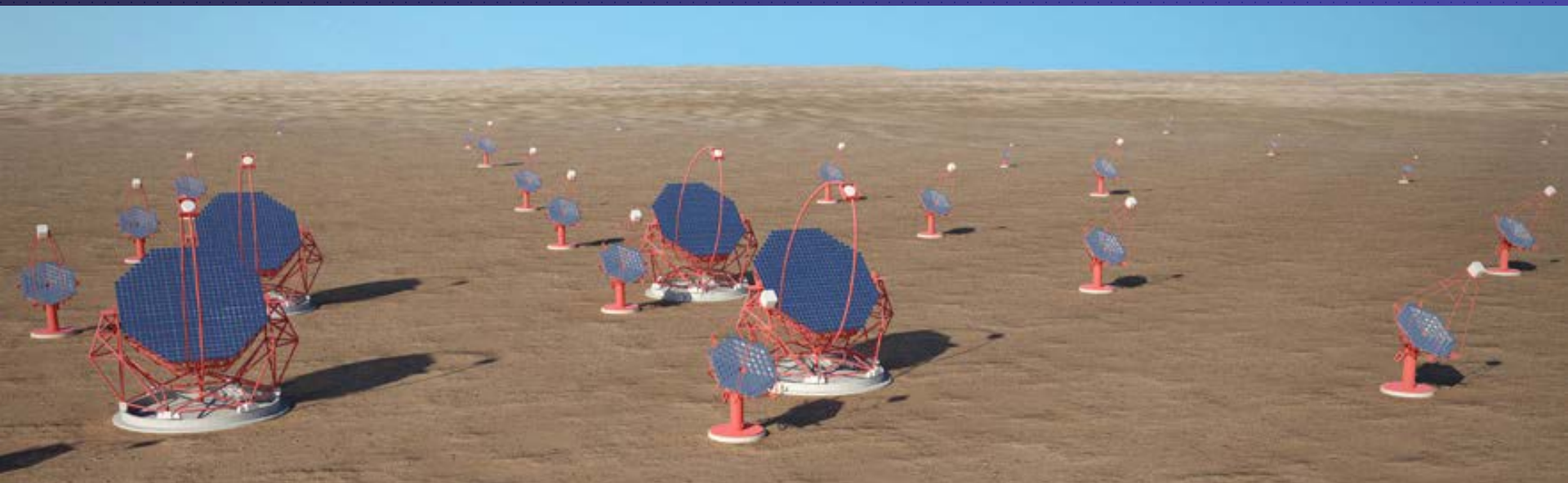


# 高エネルギーガンマ線天文学の新展開

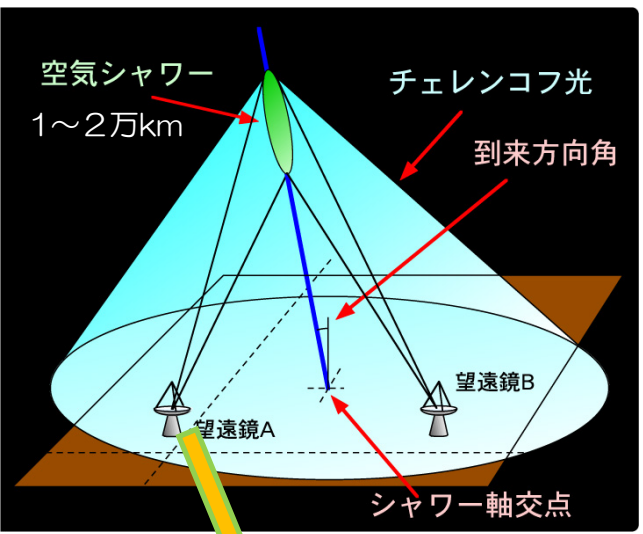
窪 秀利 (京都大学)

- 高エネルギーガンマ線(特にTeV領域)観測の現状
- Cherenkov Telescope Array (CTA)計画
- CTAで狙うサイエンス



# 超高エネルギーガンマ線観測—大気チェレンコフ望遠鏡

( $E > \text{数十 GeV}$ )



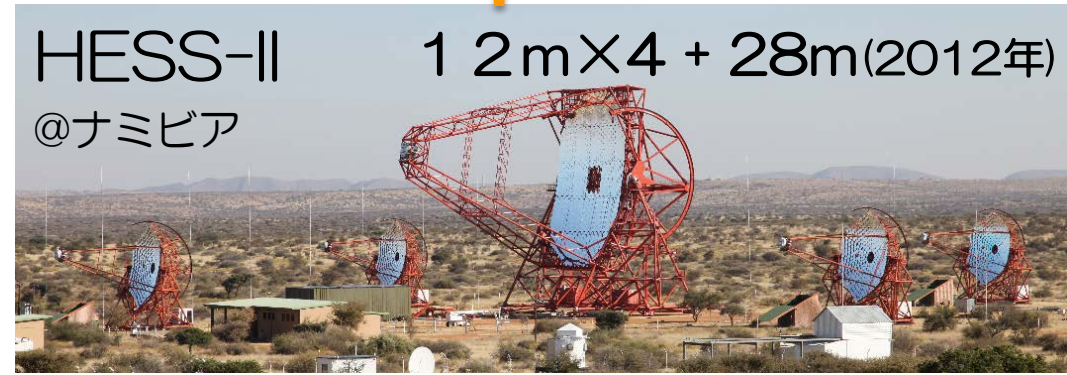
17mX2

MAGIC-II  
@カナリア諸島



12mX4

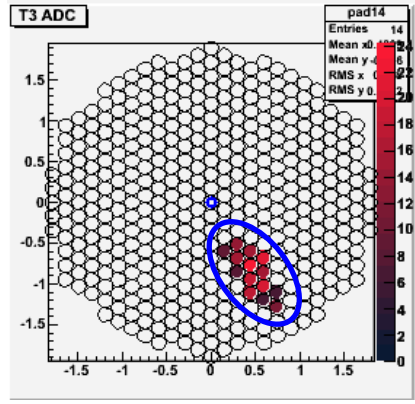
VERITAS  
@US アリゾナ



HESS-II  
@ナミビア

12mX4 + 28m(2012年)

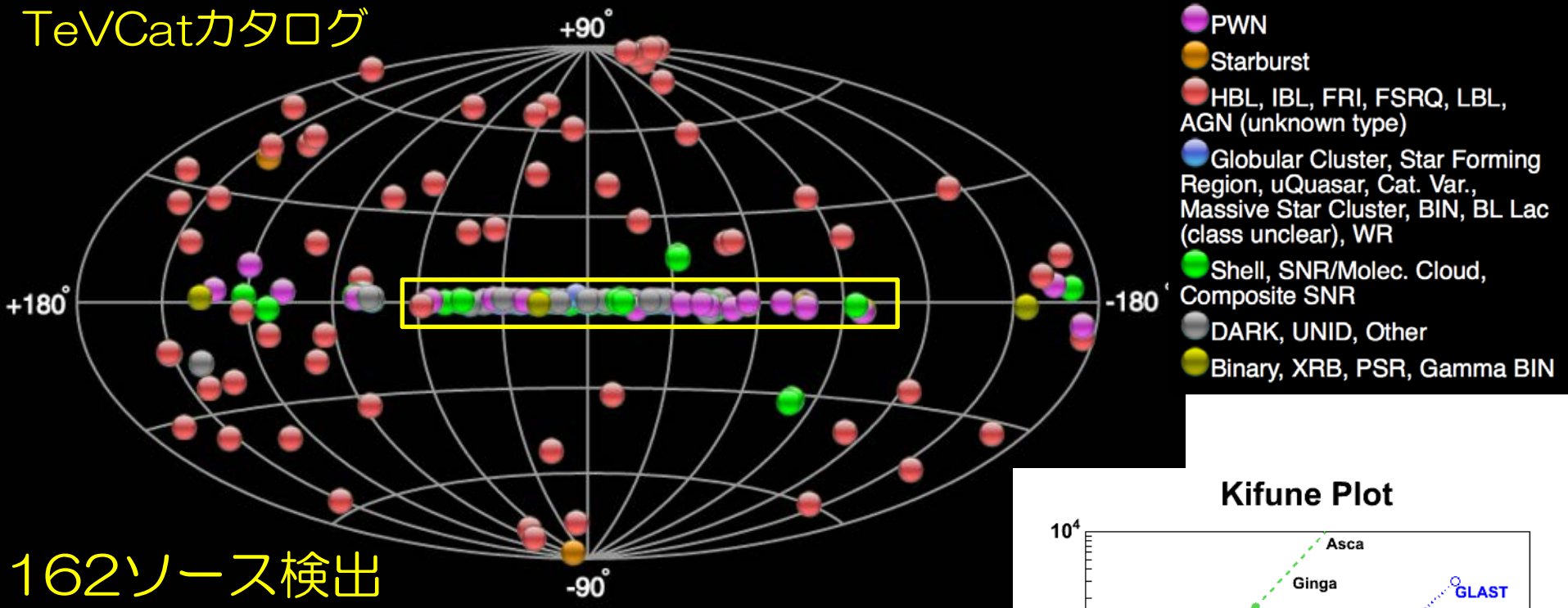
焦点面カメラ





# TeVガンマ線天体数の増加

## TeVCatカタログ



## 162ソース検出

□ 銀河系外 68

活動銀河核63, スターバースト銀河 2,  
 パルサー星雲 1, スーパーバブル1 超新星残骸1

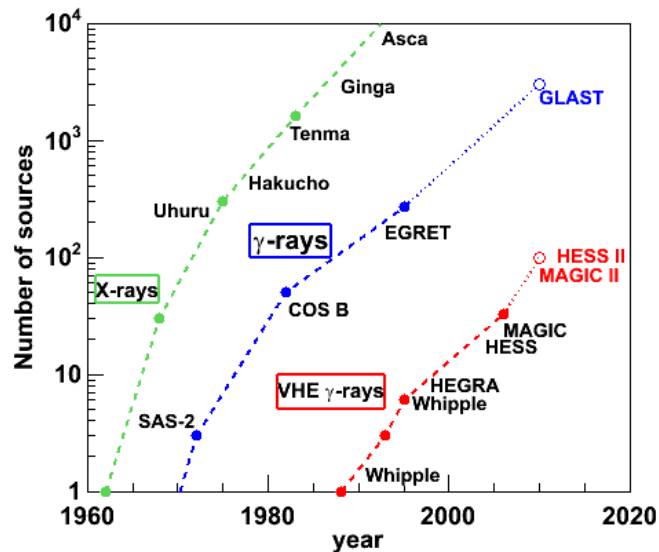
□ 銀河系内 67

パルサー星雲 33, 超新星残骸22, 連星系 5,  
 大質量星団4, パルサー2, 球状星団1

□ 未同定 27

ガンマ線バーストは未検出

## Kifune Plot

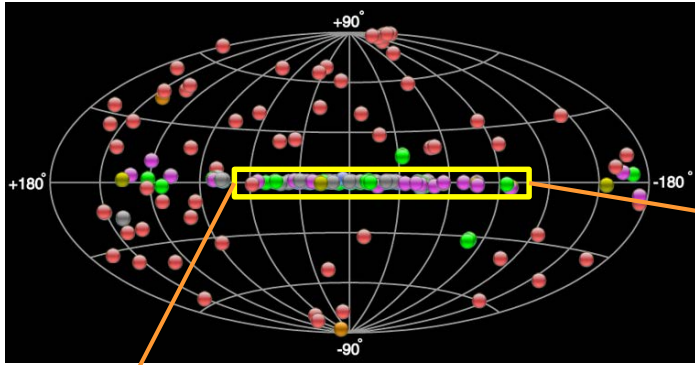
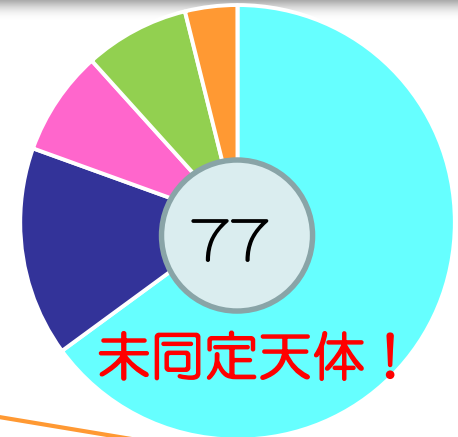


1989年 かに星雲の検出

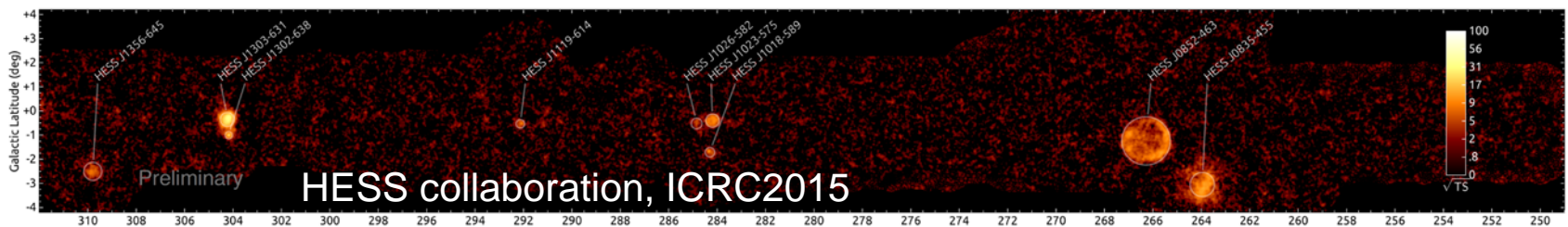
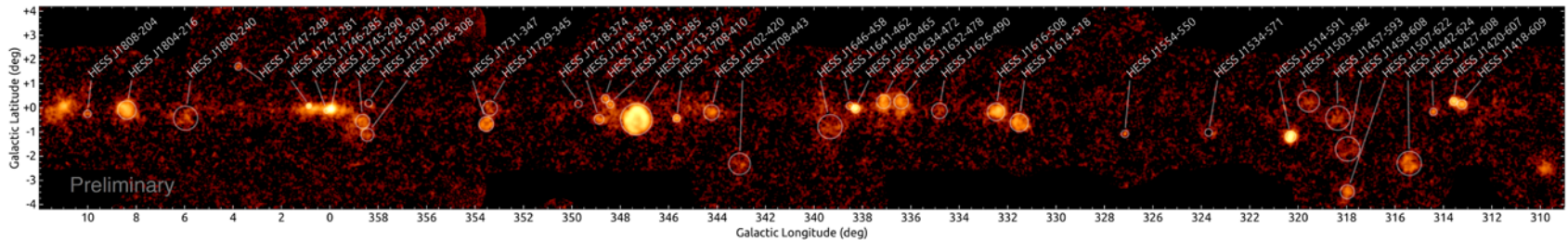
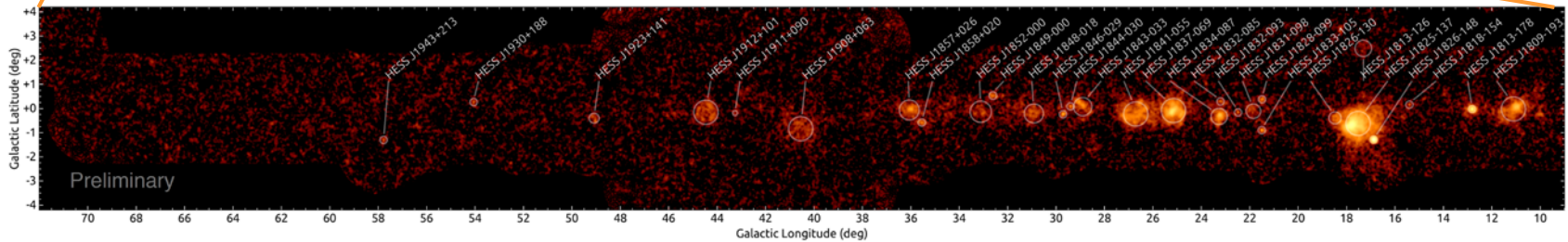
# 銀河面サーベイによる多数の天体の発見

- H.E.S.S.望遠鏡 2004-2013年 3000時間
- $250^\circ < l < 65^\circ$   $-3.5^\circ < b < 3.5^\circ$

- 未同定
- PWN
- SNR
- 複合
- Binary



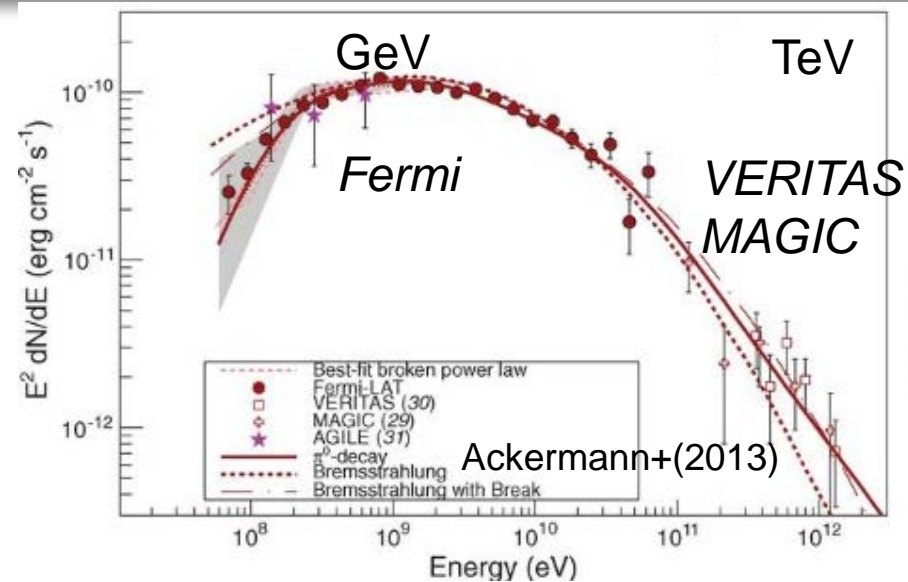
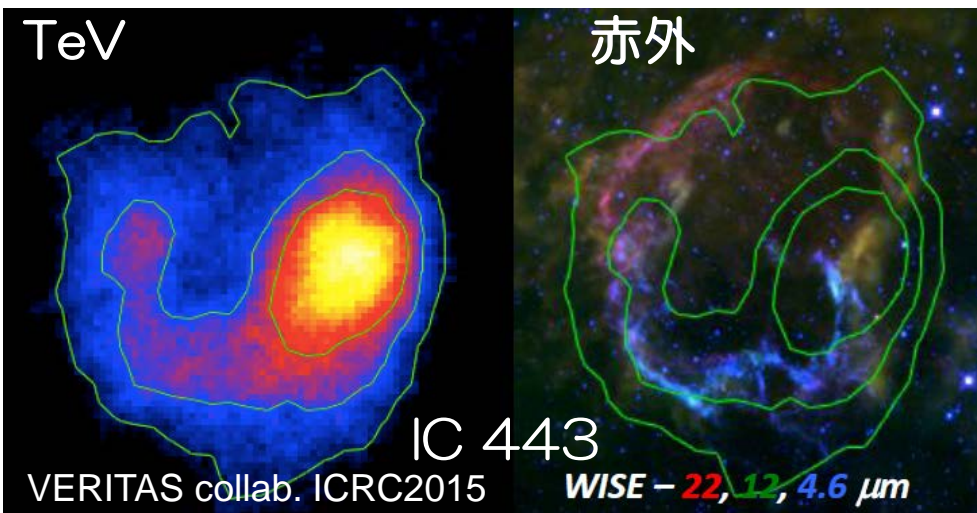
角度分解能0.07度(rms)



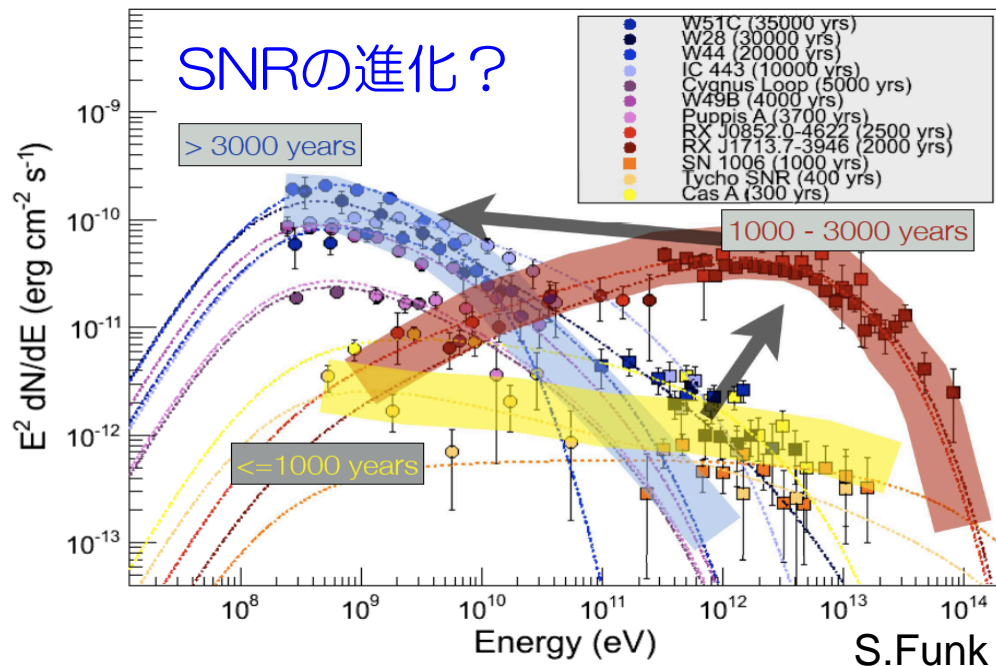
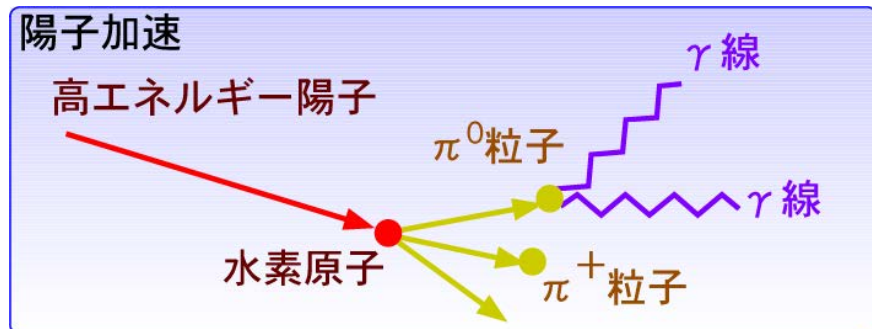


# 超新星残骸のGeV-TeVガンマ線放射

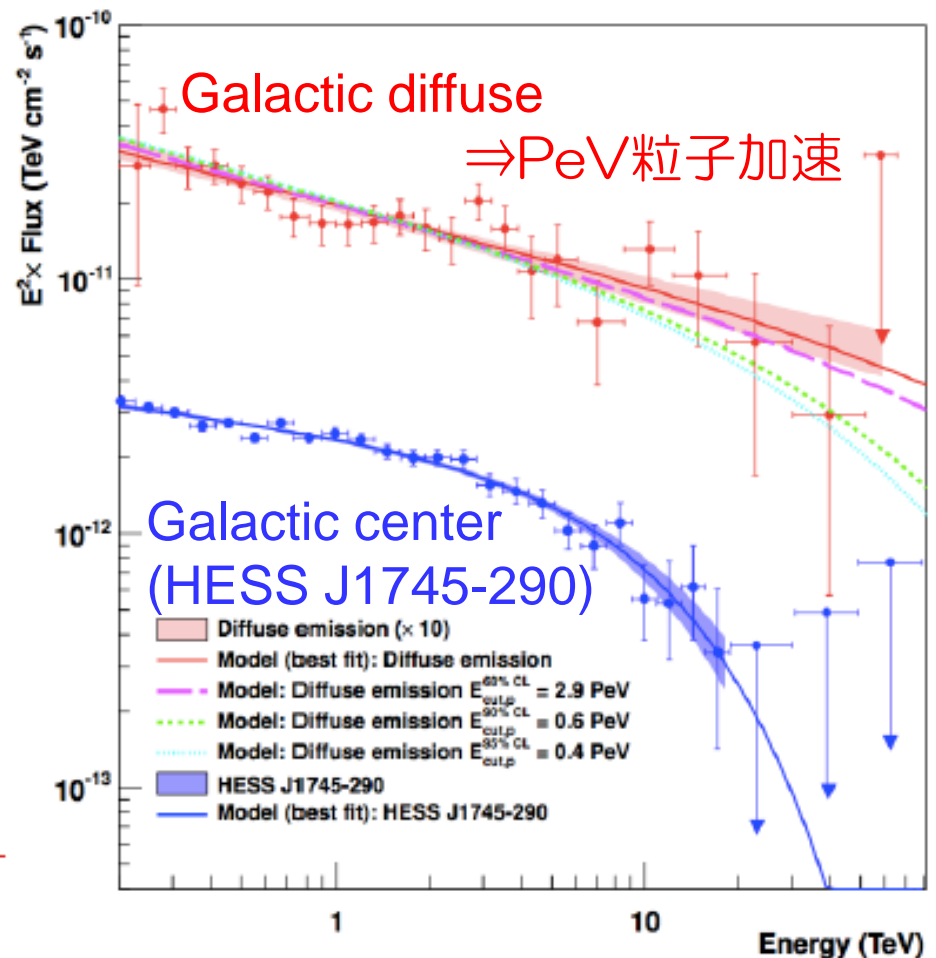
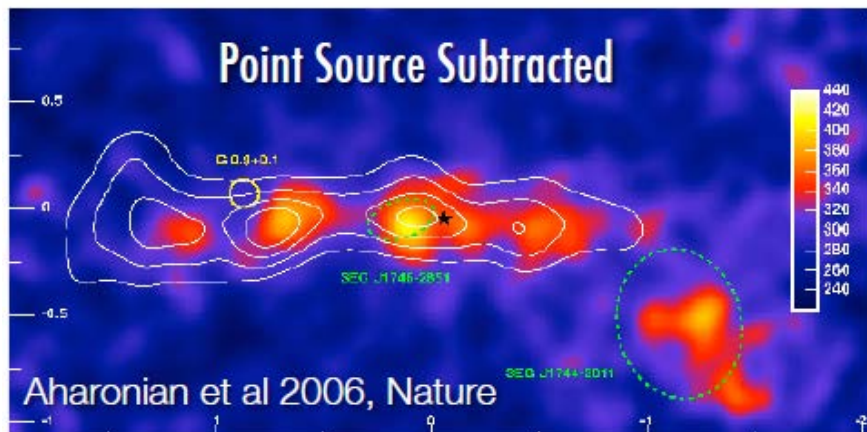
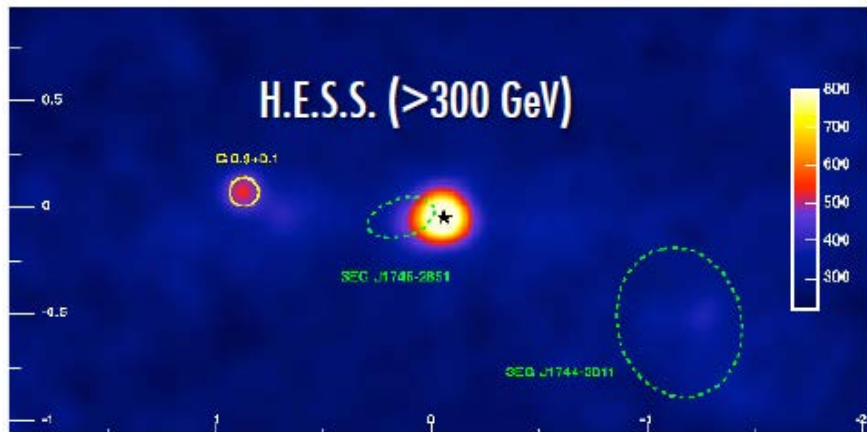
SNR : 銀河内宇宙線起源の候補



## ガンマ線放射機構



# 銀河中心領域からのTeVガンマ線

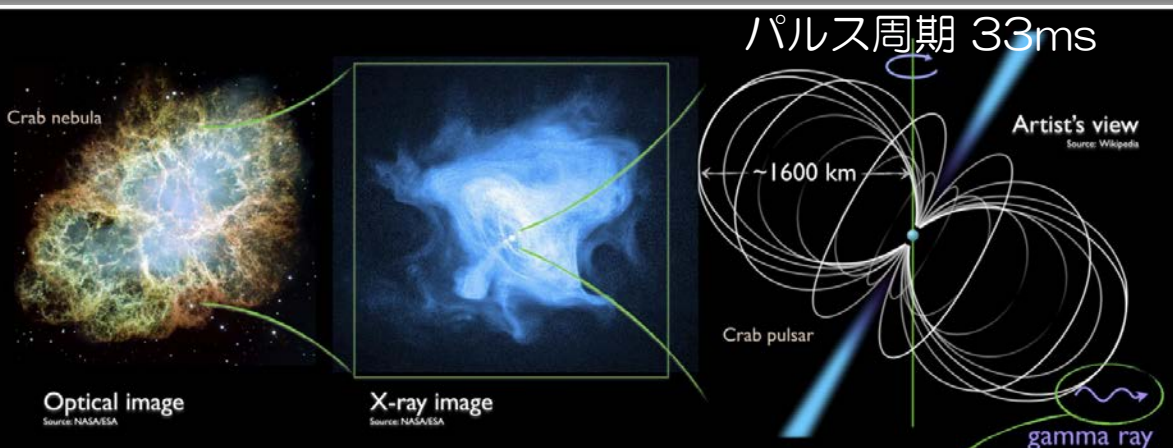


拡散ガンマ線強度は、CS輝線強度と相関⇒宇宙線と分子雲の相互作用

Viana+, ICRC2015



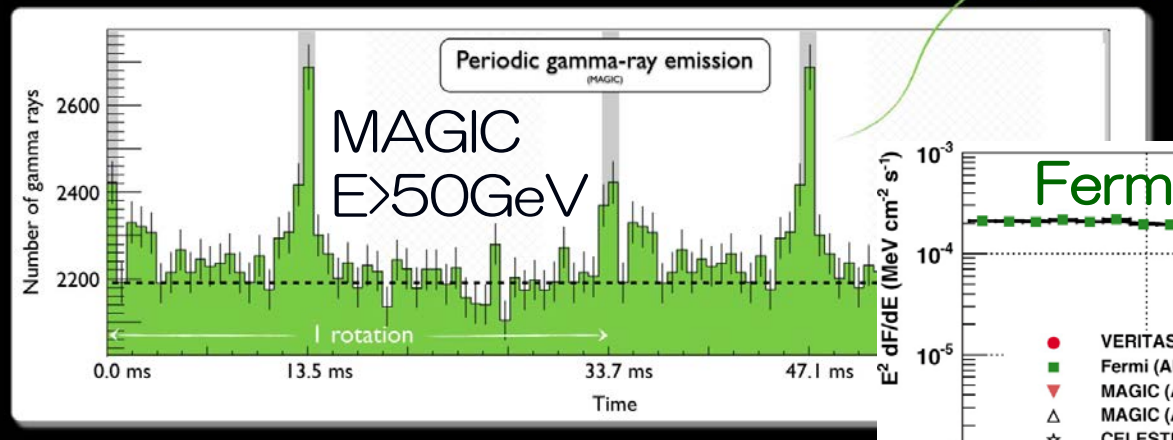
# かにパルサーからのサブTeV $\gamma$ 線パルス



$\gamma + \text{磁場} \rightarrow e^+e^-$  による吸収過程を考えると、放射領域は表面から  $>100$  km 離れている  
発生機構は謎

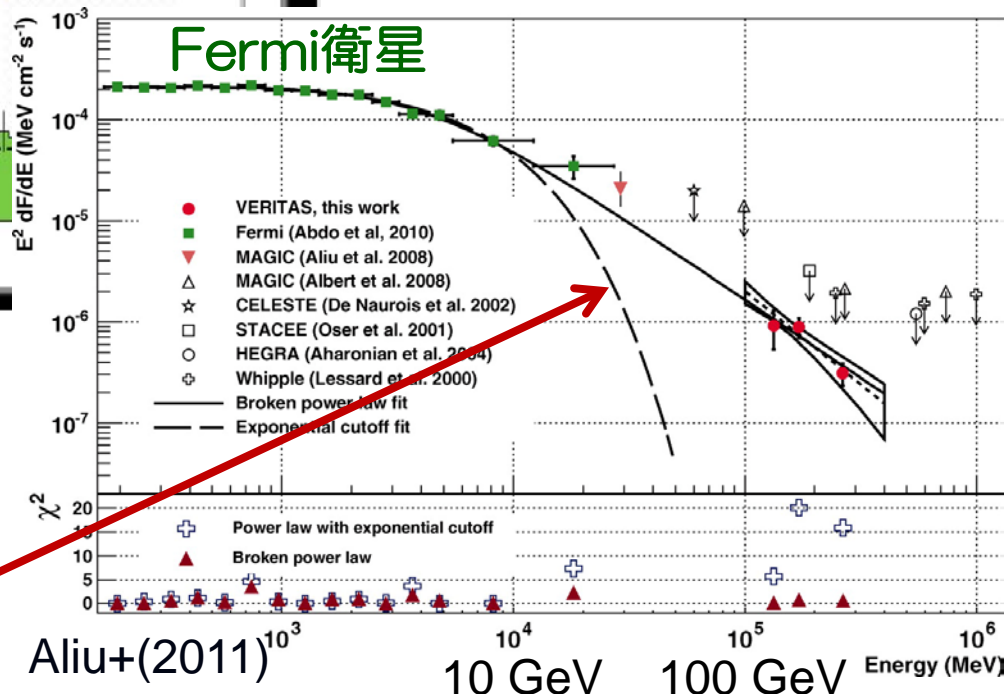


パルス放射  $E > 400$  GeV に伸びていた

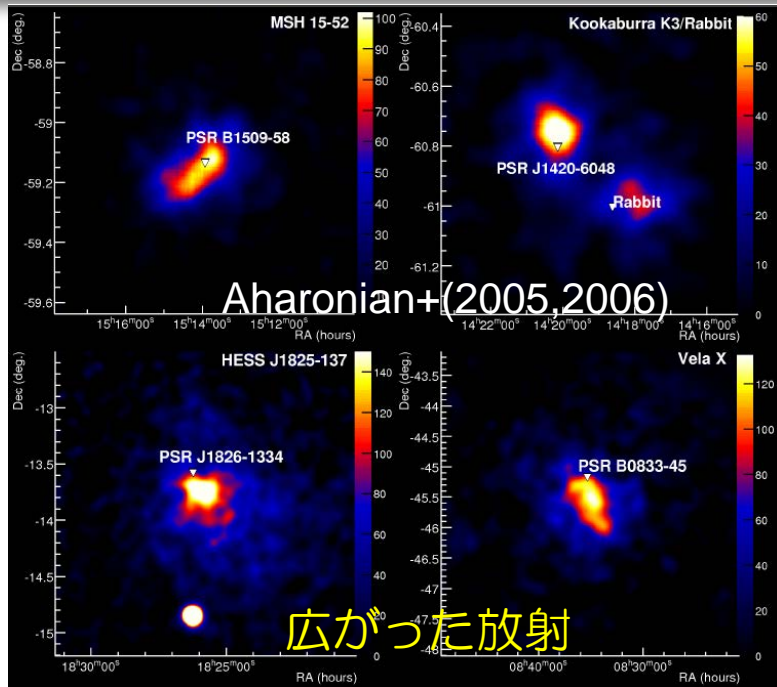


Aleksic+(2012)

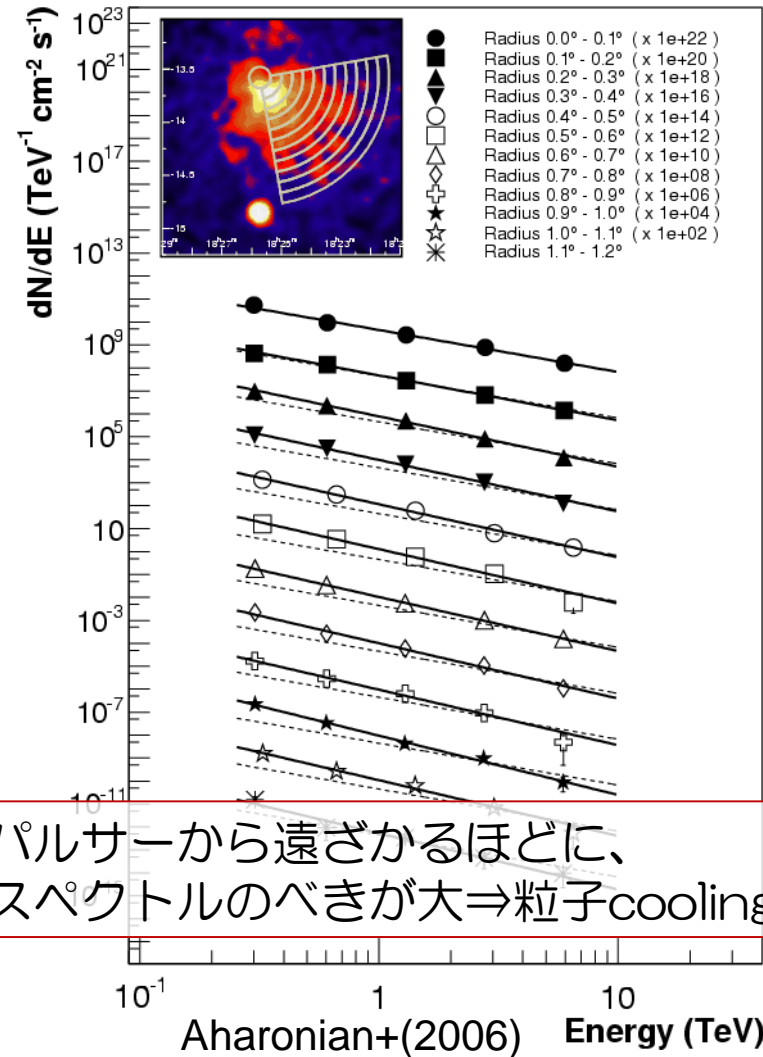
- 中性子星磁気圏の静電場により粒子を加速。曲率輻射によりGeVガンマ線を放射する 従来のモデル



# パルサー星雲からのTeVガンマ線

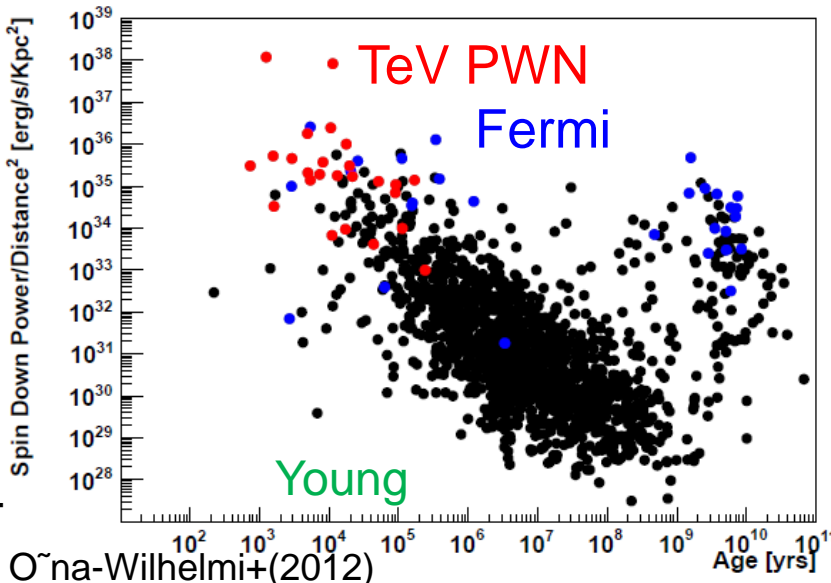


## HESS J1825-137



パルサーから遠ざかるほどに、  
スペクトルのべきが大⇒粒子cooling

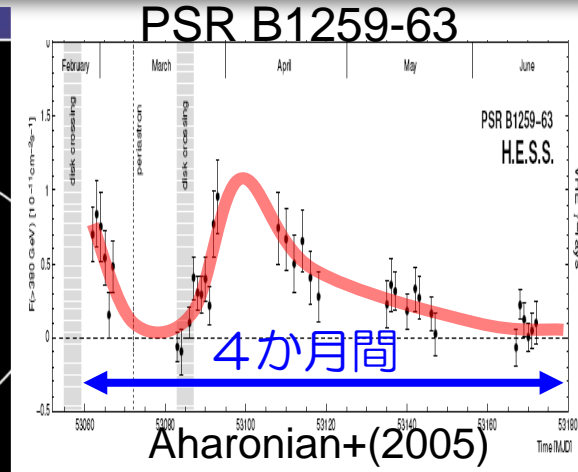
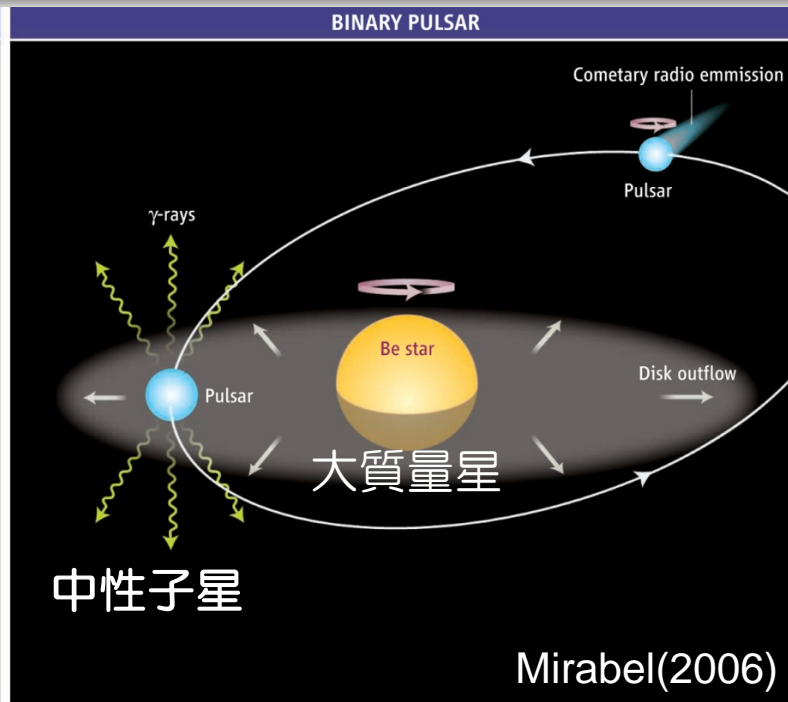
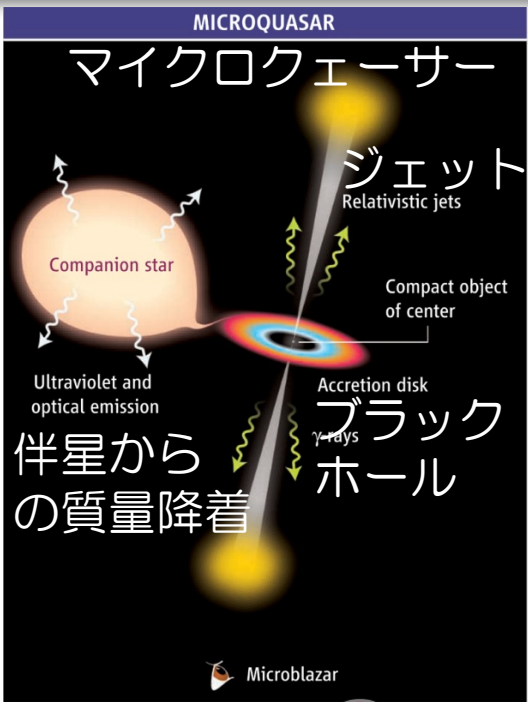
Spin-down Power/Distance<sup>2</sup>  
de Oña-Wilhelmi+(2012)



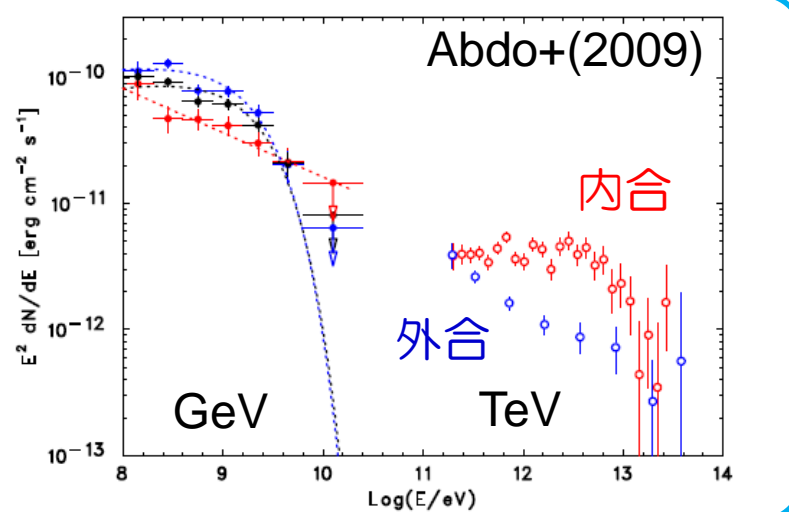
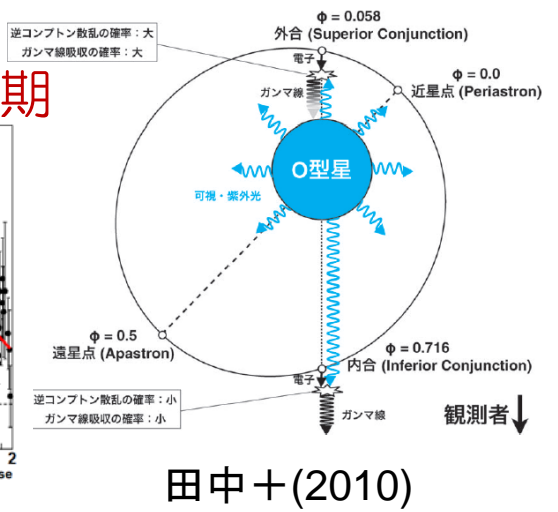
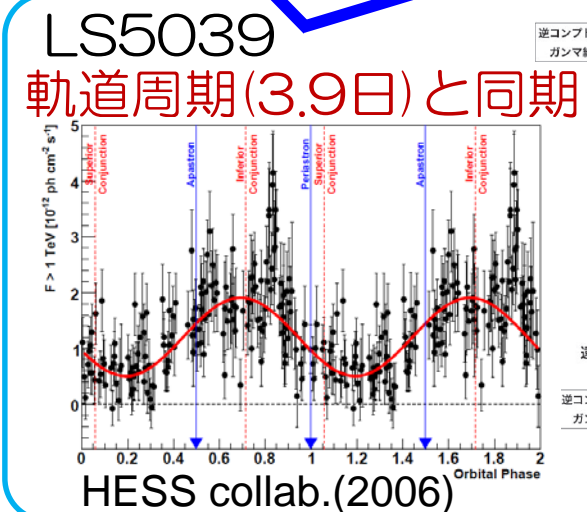
Crabフレア 齋藤講演



# 連星系からの周期的ガンマ線放射



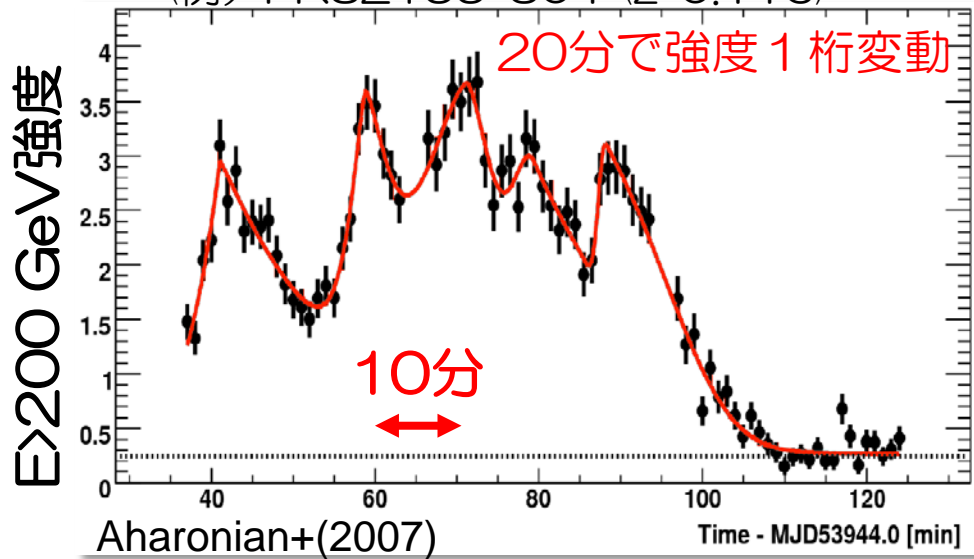
- パルサー風と恒星風の衝突により衝撃波が形成され粒子を加速。



# 活動銀河核からのTeVガンマ線

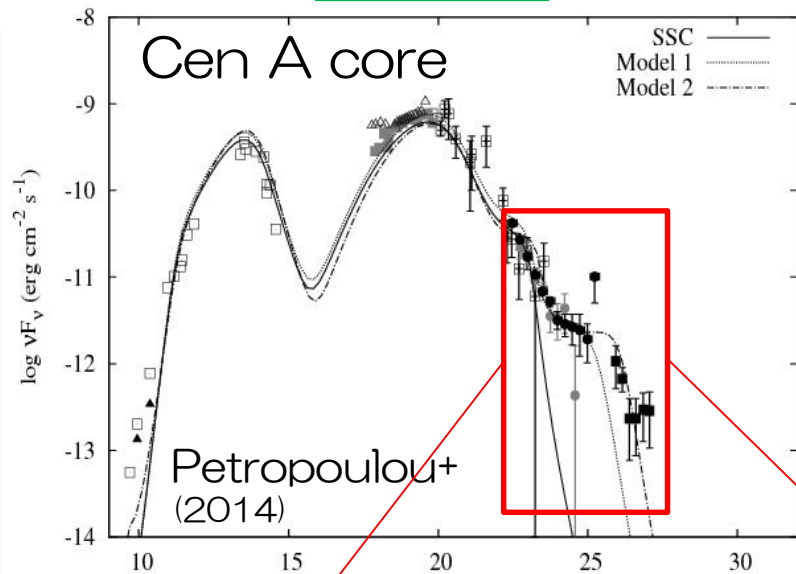
- 短時間変動

(例) PKS2155-304 ( $z=0.116$ )



- 別成分？

井上講演



Fermi観測からの放射機構への制限⇒齊藤講演

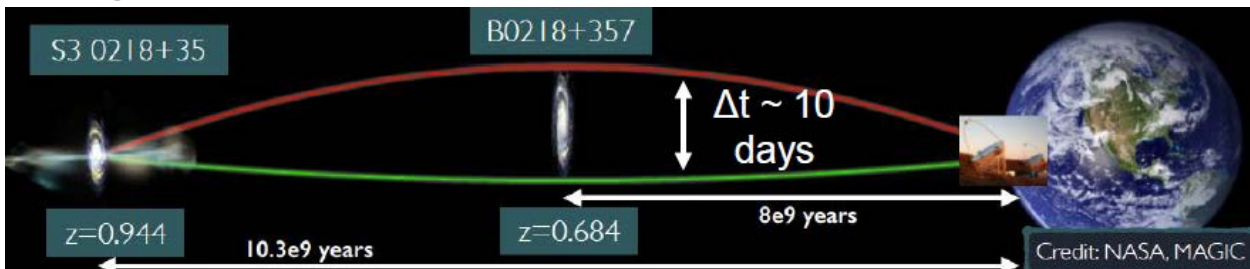
- 多波長観測

田中講演

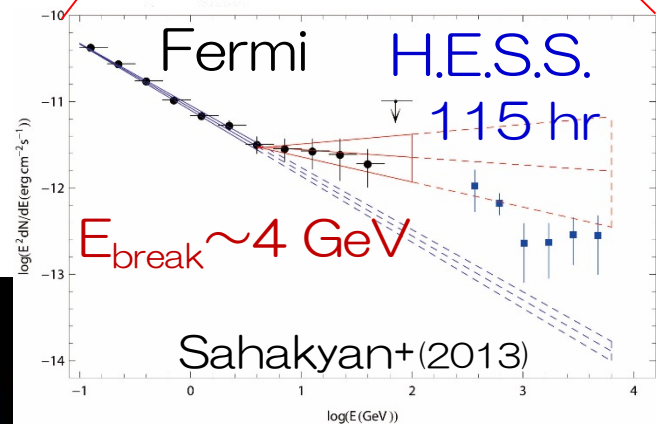
- 遠方TeV天体

MAGICで検出

① S3 0218+35 重カレンズBlazar ( $z=0.944$ )



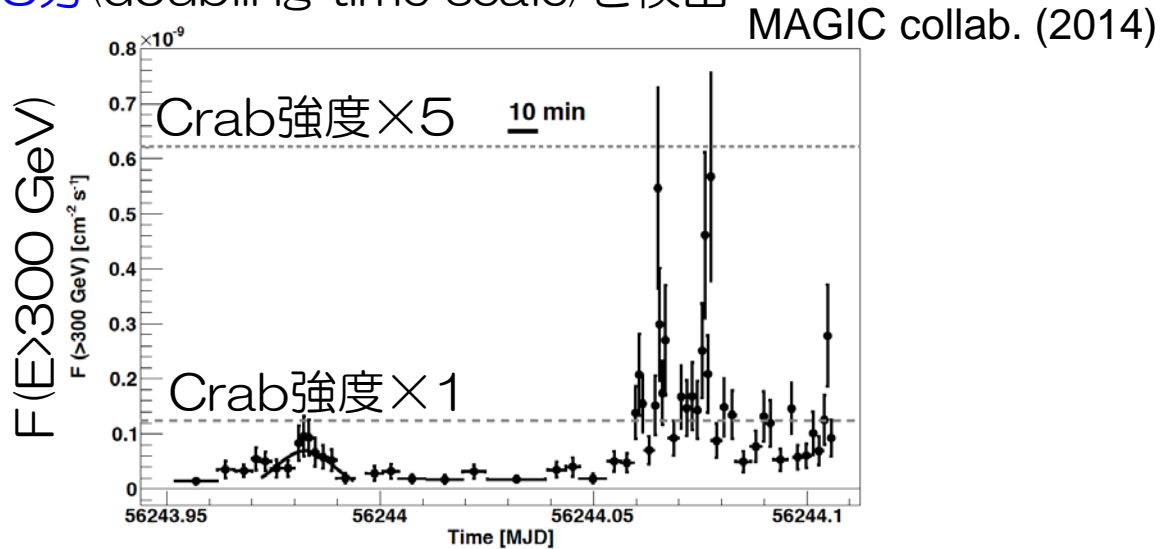
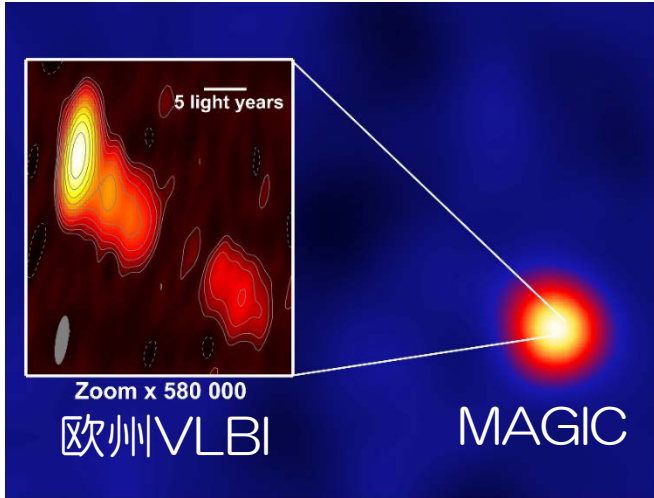
② PKS1441+25 FSRQ ( $z=0.939$ )



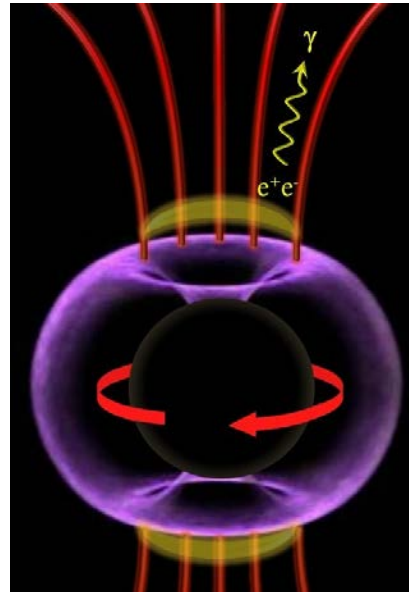


# ブラックホール極冠からのガンマ線放射

- 電波銀河 IC310 ( $z=0.019$ )
- $E>300\text{GeV}$ で、強度変動  $< 4.8$ 分 (doubling time scale) を検出



- もし、放射領域サイズ=ブラックホールサイズ ( $3 \times 10^8 M_\odot \rightarrow \sim 3\text{AU}$ ) ならば、ジェットによる相対論的時間短縮効果を考慮しても **20分** 相当  
 $\Rightarrow$  **ガンマ線放射がブラックホールサイズより狭い領域で起こっていることを発見。**



## 放射機構

回転ブラックホール極軸付近の磁気圏に、電位ギャップが生成

$\rightarrow$  電子・陽電子 (降着トーラス・コロナからの光子・光子衝突で対生成) が加速  
 $\rightarrow$  逆コンプトン散乱によりガンマ線が放射

# 銀河間可視赤外背景放射(EBL)による $\gamma$ 線吸収

Mazin講演

遠方の天体  
blazar

Extragalactic Background Light

地球  
IACT

$\gamma$ VHE

$\gamma$ EBL

$e^+$

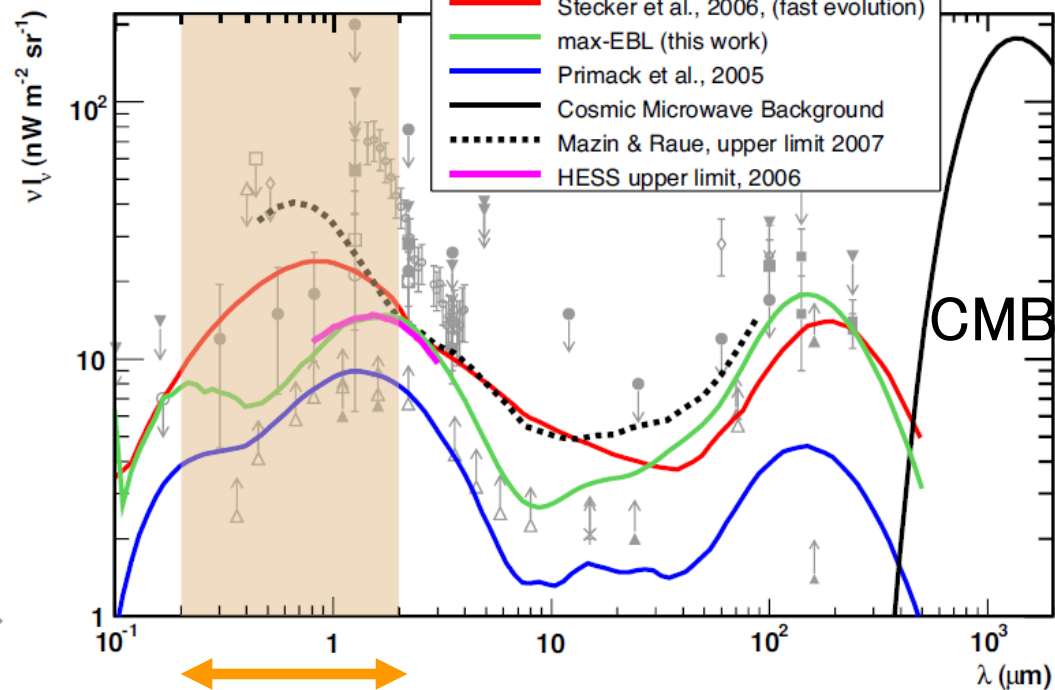
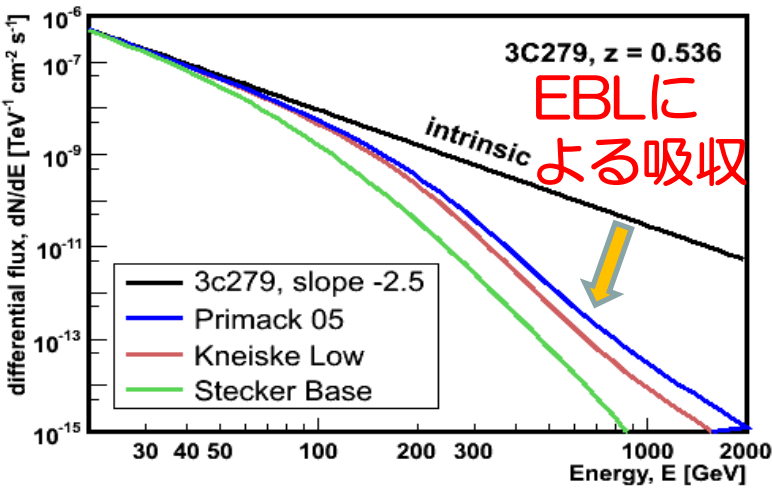
$e^-$

ガンマ線+可視赤外線→電子+陽電子

◆宇宙の星・銀河形成史のトレーサー

◆可視赤外観測では1桁の不定性あり

銀河間可視赤外背景放射  
MAGIC collaboration(2008)

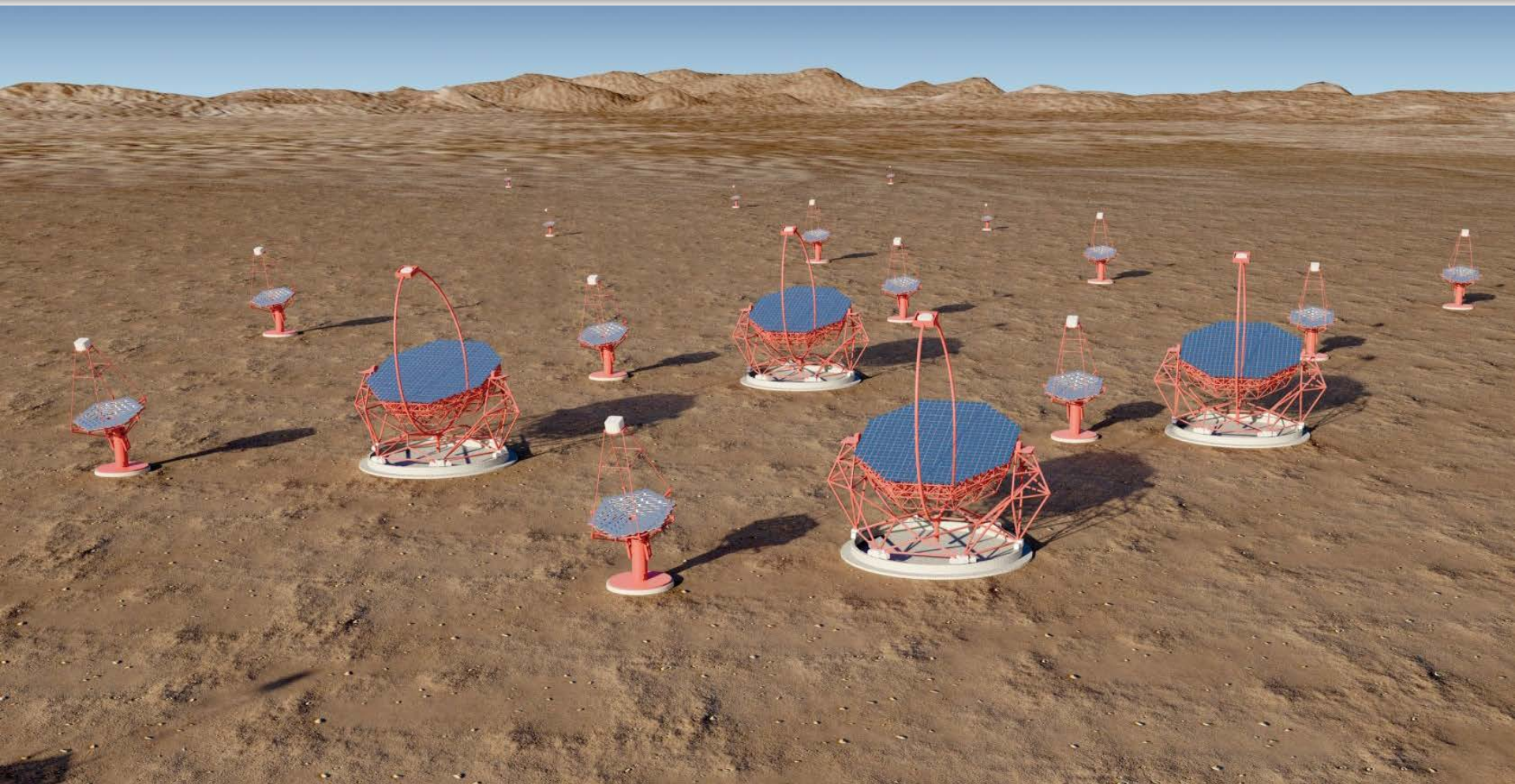


- 観測された $\gamma$ 線スペクトルから吸収量を求め、EBLを算出
- 遠方3C279( $z=0.5$ )の結果

TeVガンマ線観測から星・銀河形成史を研究



# Cherenkov Telescope Array (CTA)計画



CTA Consortium 31か国 ~1200名 (日本107名)



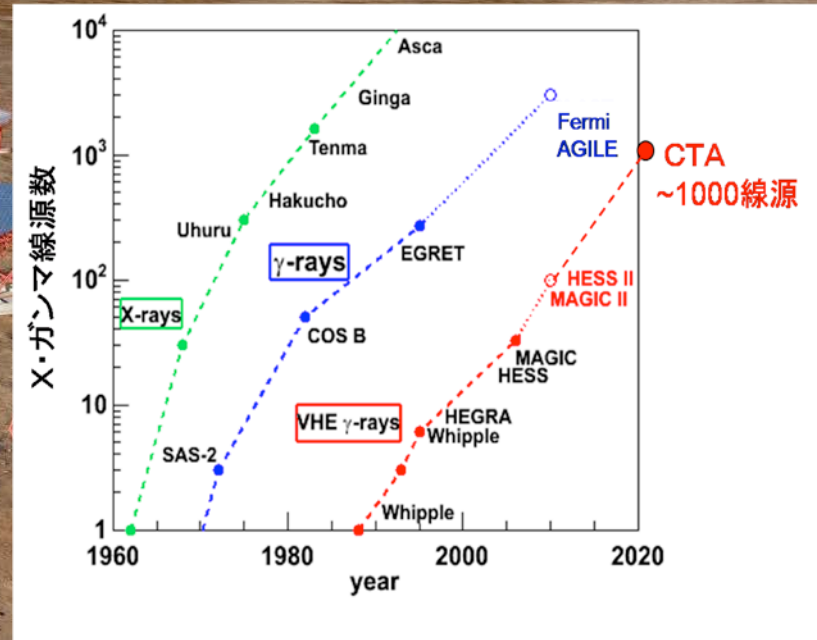
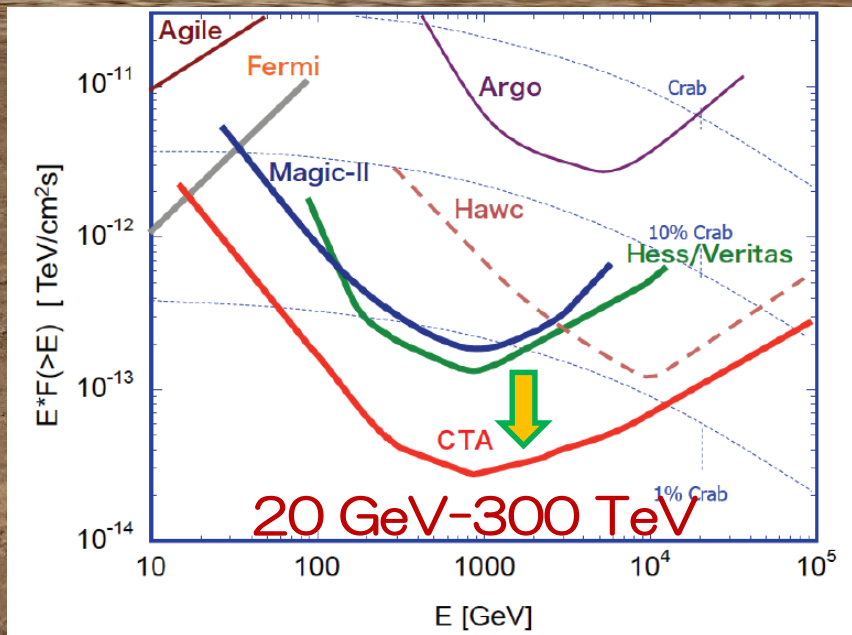
サイト建設2016年~ ⇒ 部分観測 ⇒ フルアレイによる観測 2021年~ (公開天文台)



# Cherenkov Telescope Array (CTA)計画

現行望遠鏡に比べ

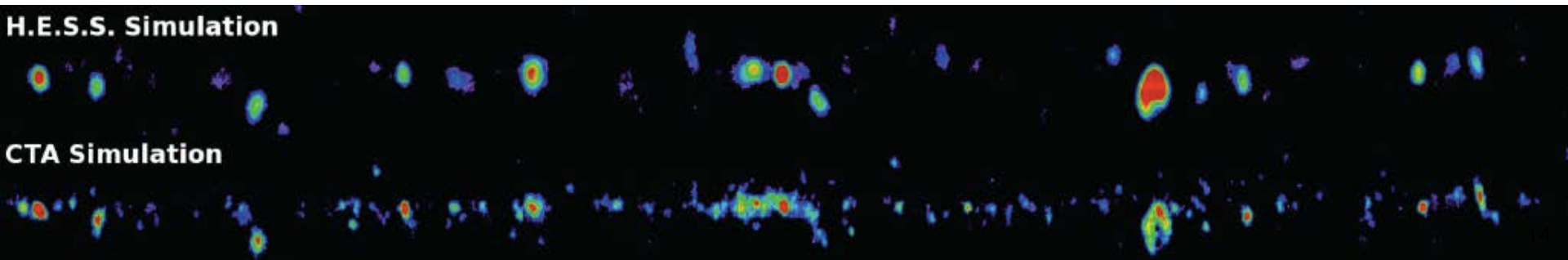
- 感度 10倍
- エネルギー帯域 10 倍



- 角度分解能 2 倍 (2分角@1TeV)

H.E.S.S. Simulation

CTA Simulation



LST×(北4+南4)

23m口径

20 GeV - 1 TeV

FOV=4.5°

SST×(0+70)

4m口径

5 TeV - 300 TeV

FOV~10°

MST×(15+25)

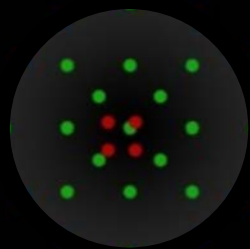
12m口径

100 GeV - 10 TeV

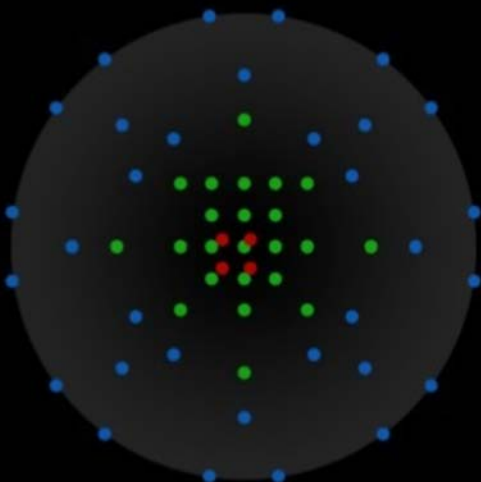
FOV=6 - 8°

CTA - North

CTA - South



1 km<sup>2</sup>

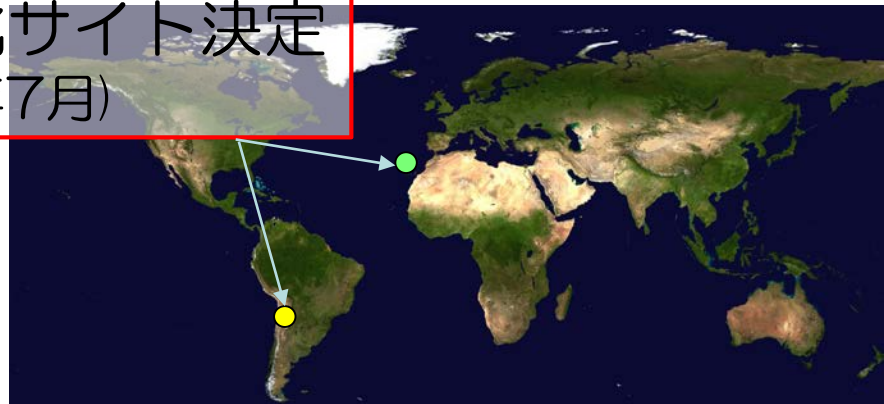


3 km<sup>2</sup>

LST MST SST

南北に2ステーション⇒全天観測

南北サイト決定  
(今年7月)





# CTA 北サイト@スペイン



MAGIC 望遠鏡@標高2200 mに隣接してLST 4台+外側にMST 15台建設

LST 1号機(2016)

LST 2-4号機(2017-2020)



MAGIC-II

MAGIC-I

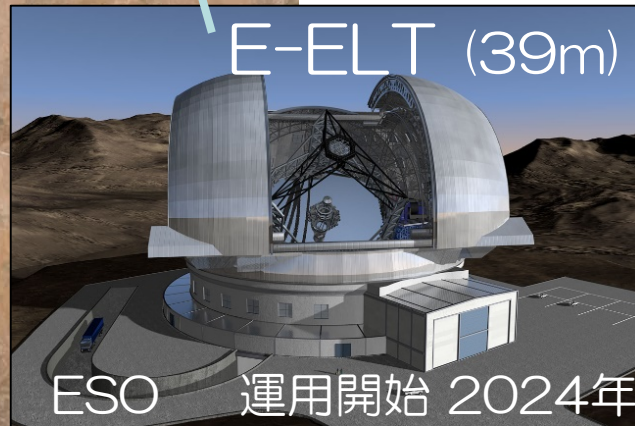
今年10月 鋤入式⇒2016年度 LST 1号機の望遠鏡組上とファーストライト



# CTA 南サイト@チリ



アタカマ砂漠



## CTA南サイト



ESOと協力し建設・運用



# 大口径望遠鏡 (LST) 仕様

観測帯域 20 GeV - 1 TeV



日本グループ  
鏡・カメラ 開発の中心的役割  
ポスター@企画セッション  
観測機器セッション

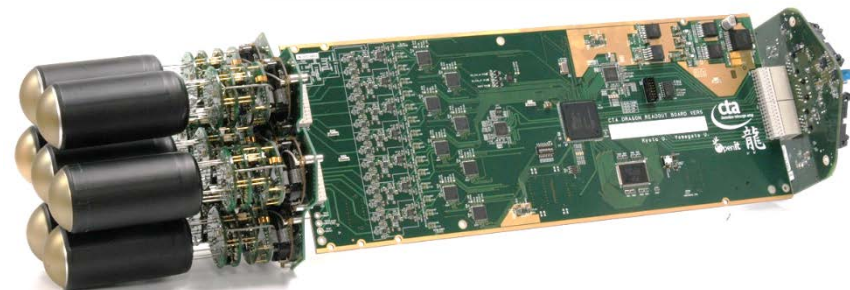


## ➤ 望遠鏡構造

- 口径 23m
- 総重量 100トン
- 回転速度  $180^\circ / 20$ 秒  
←GRBなどの観測

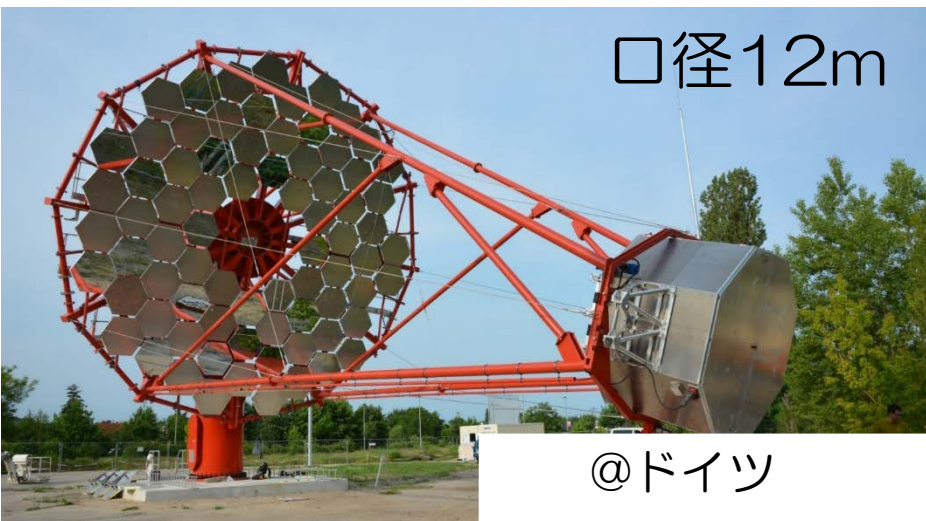
## ➤ 主焦点カメラ

- 視野 4.5度
- 光電子増倍管 1855本



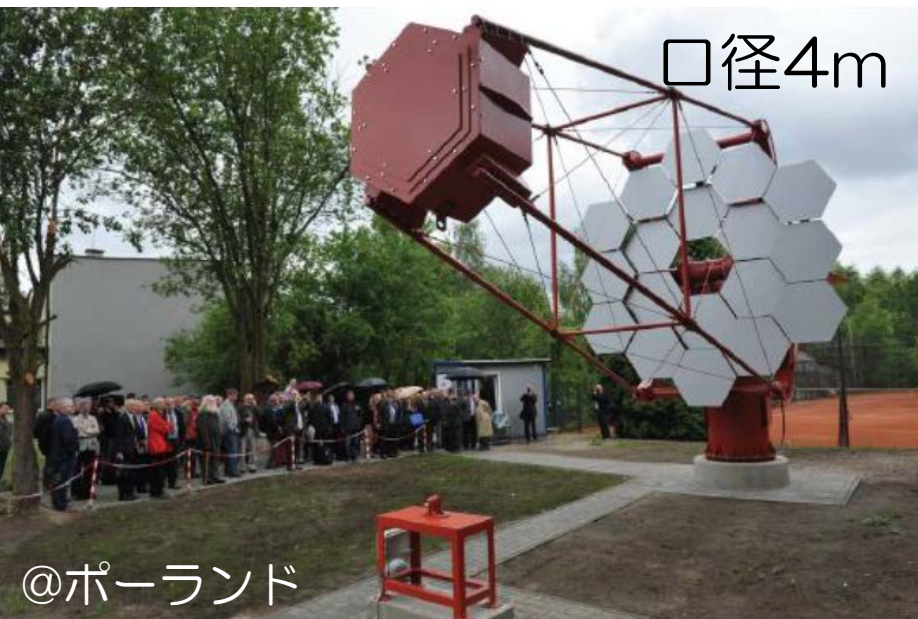


# 中口径・小口径望遠鏡プロトタイプ



口径12m

@ドイツ



口径4m

@ポーランド

口径4.2+1.8m

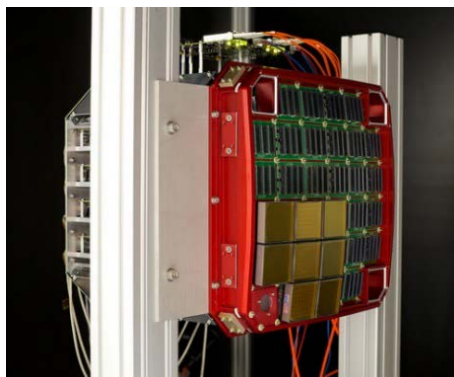


@フランス

口径4+2m



@イタリア



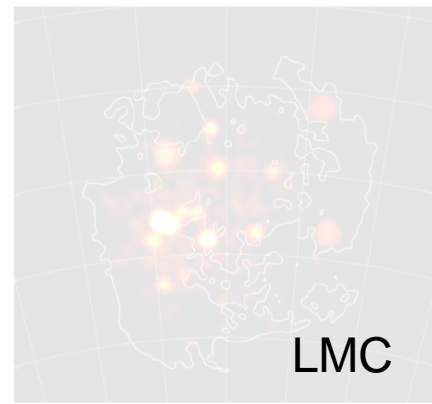
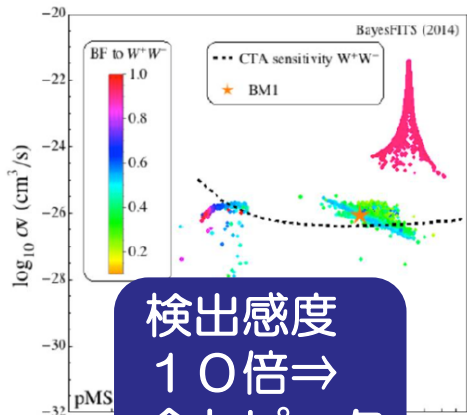
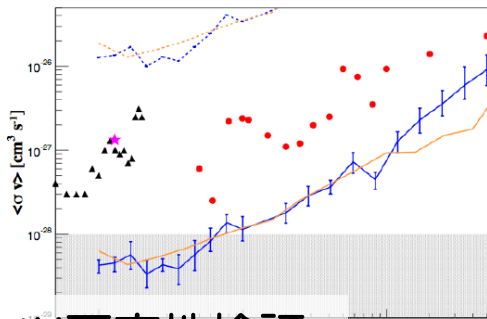
SiPMカメラ(2048ch)

名大らで開発  
ポスター

@企画セッション

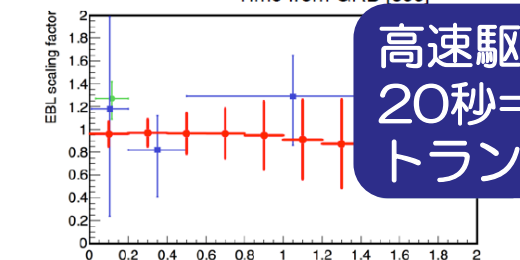
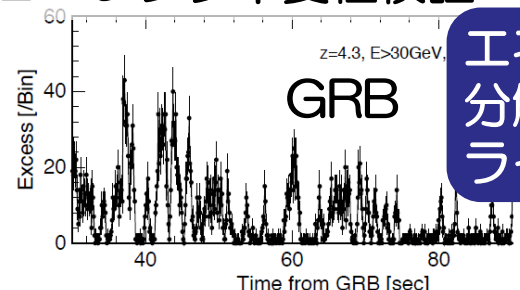


# 暗黒物質対消滅 $\gamma$ 線探索



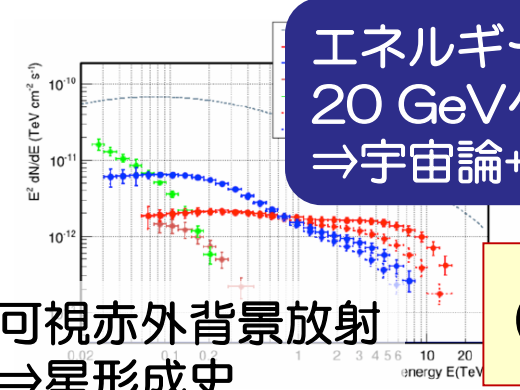
LMC

# ローレンツ不変性検証



エネルギー  
分解能 $\sim 10\%$  $\Rightarrow$   
ライン、構造

高速駆動  
20秒 $\Rightarrow$   
トランジェント



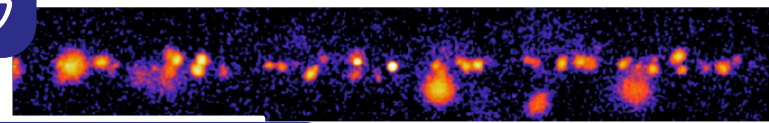
可視赤外背景放射  
 $\Rightarrow$ 星形成史

検出感度  
10倍 $\Rightarrow$   
全トピック

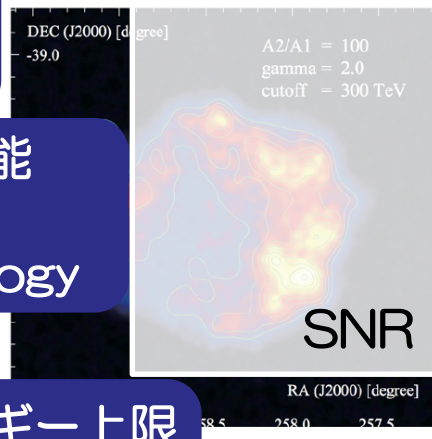
視野 $\sim 8$ 度 $\Rightarrow$   
サーベイ、  
広がった天体

角度分解能  
数分角 $\Rightarrow$   
Morphology

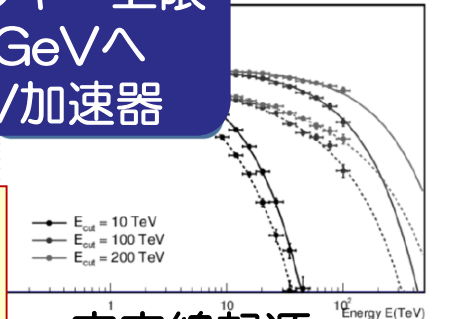
エネルギー上限  
300 GeV $\wedge$   
 $\Rightarrow$ PeV加速器



銀河面



SNR



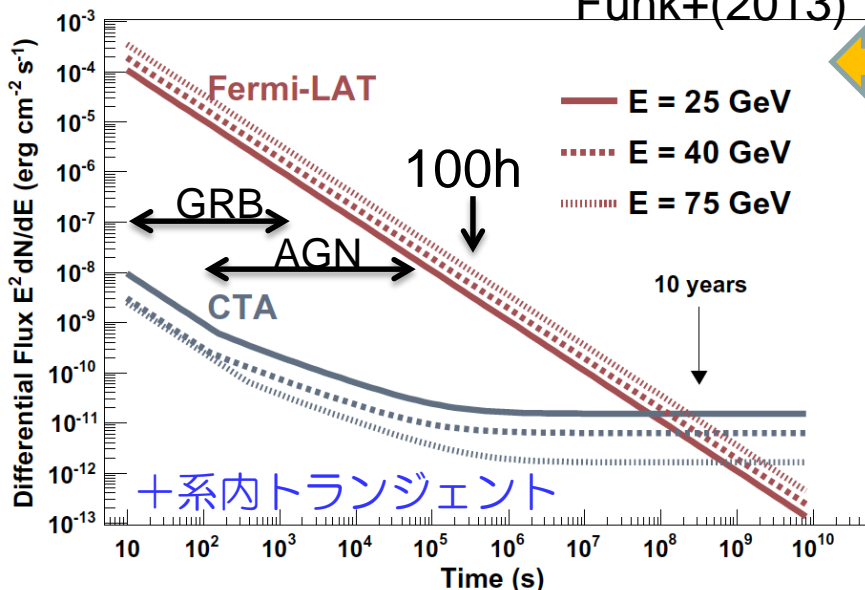
宇宙線起源

# CTAの性能とサイエンス

# CTAで短時間変動を捉える

悪  
感  
度  
良

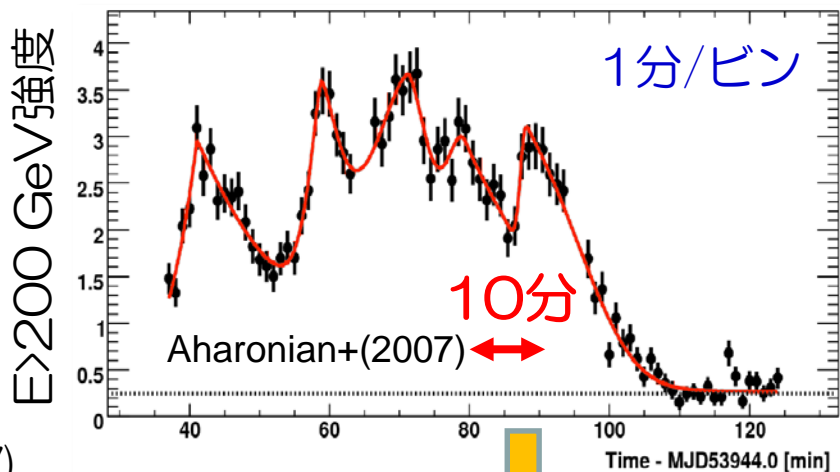
Funk+(2013)



CTA有効面積:

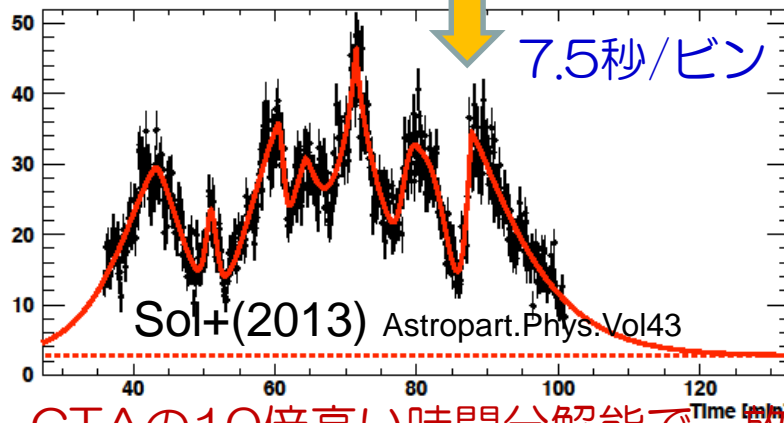
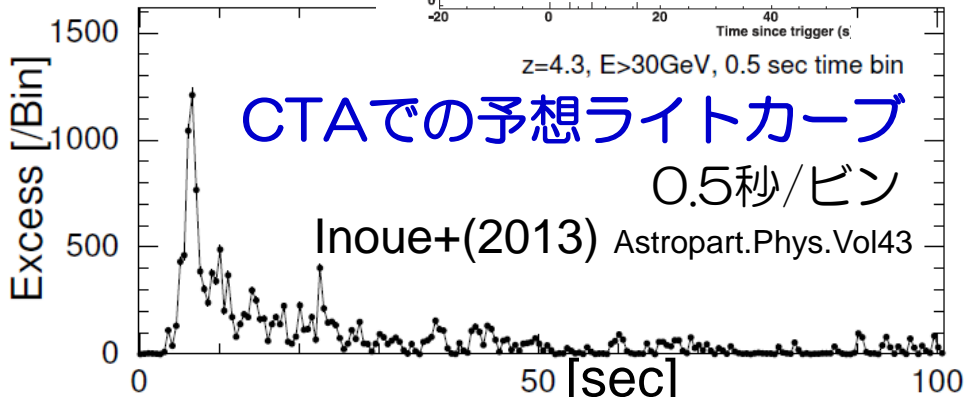
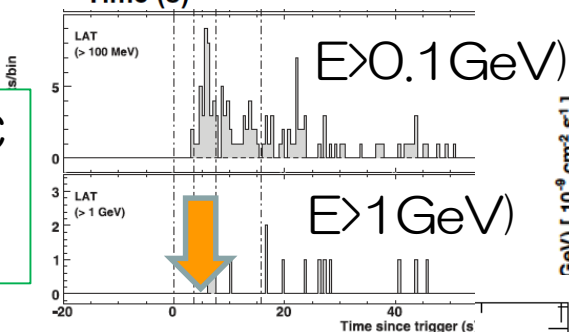
Fermi LATの1万倍@30 GeV

● AGN



● GRB

GRB080916C  
Fermi観測結果  
Abdo+(2009)



CTAの10倍高い時間分解能で、放射領域・加速機構に強い制限

MST広視野モード⇒井上講演

# CTAによる銀河面サーベイ (simulation)



- 300-500のソース発見 (PWN, SNR, Binary, New transients, Dark accelerators...)
- PeV加速候補天体の発見 (宇宙線起源解明へ)
- diffuse成分の精密測定

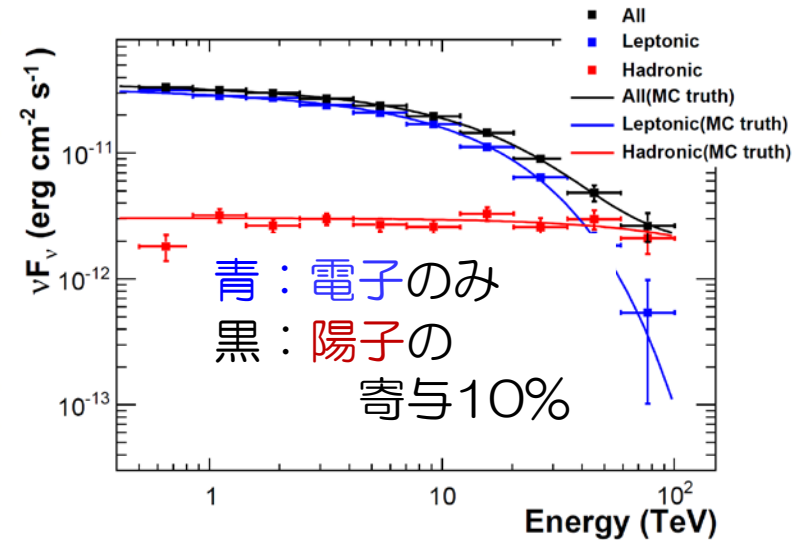
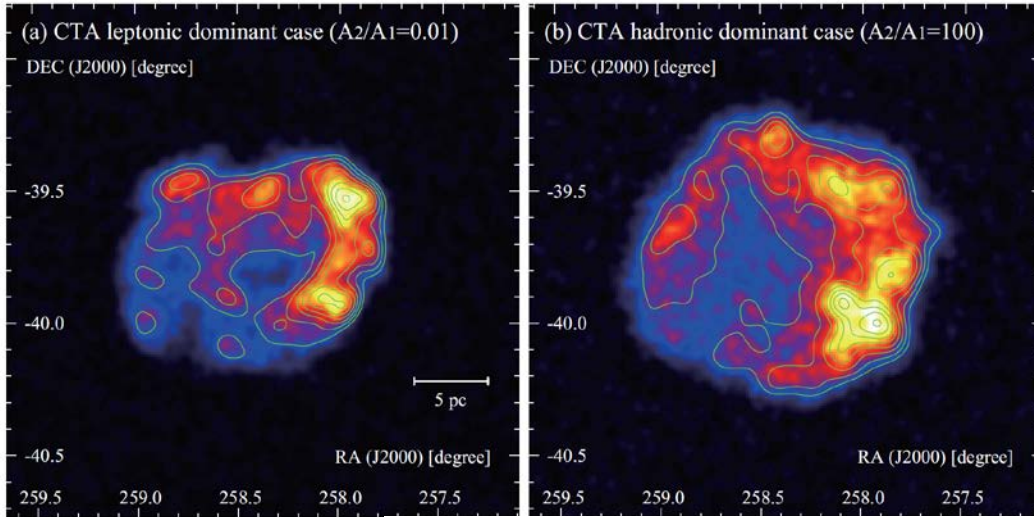


# 電子起源 or 陽子起源の解明

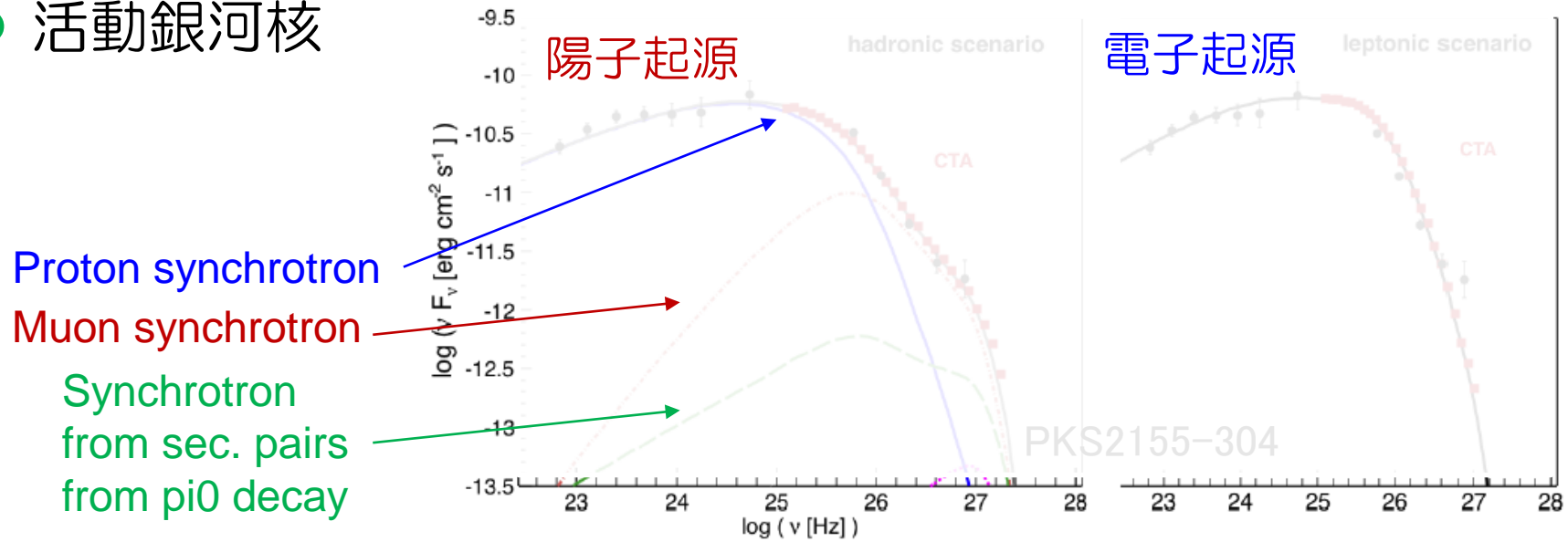
- 超新星残骸 RXJ1713.7-3946 ⇒ 佐野講演  
シミュレーション Nakamori+, ICRC2015

電子起源

陽子起源

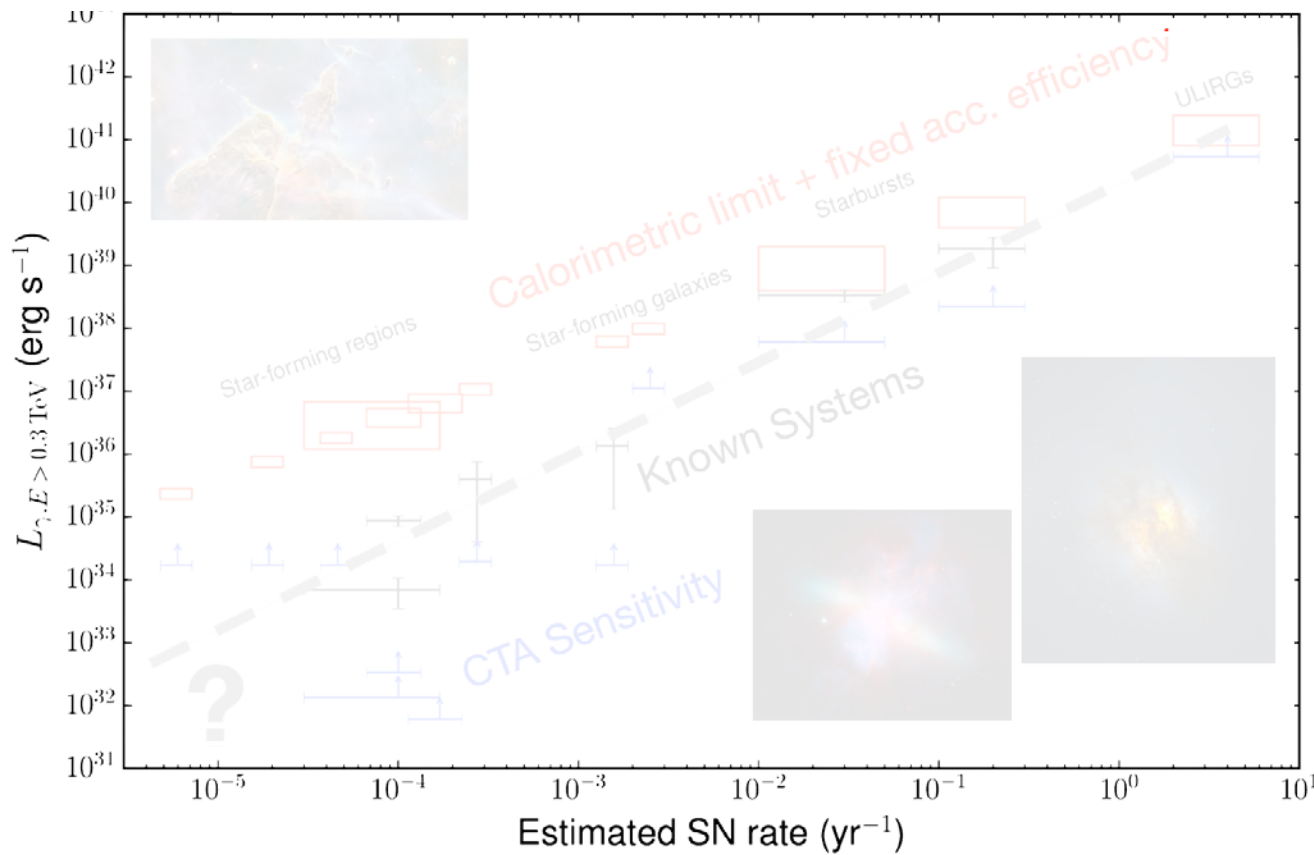
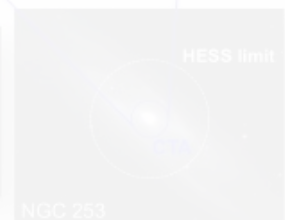
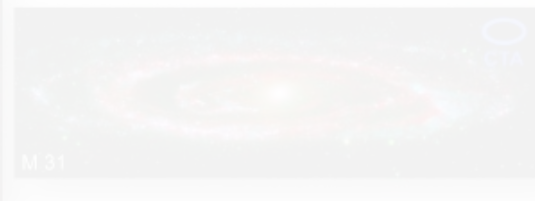
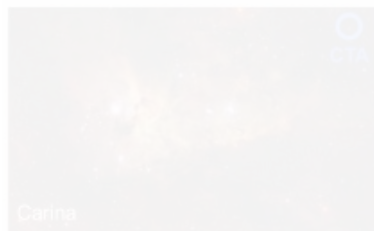
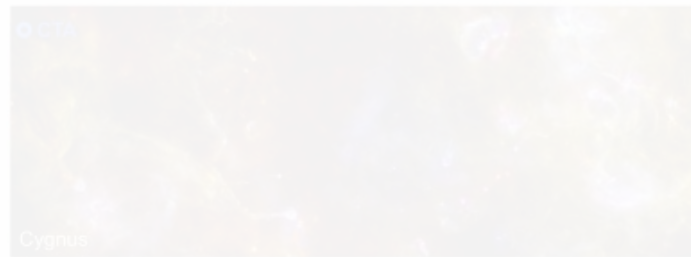


- 活動銀河核

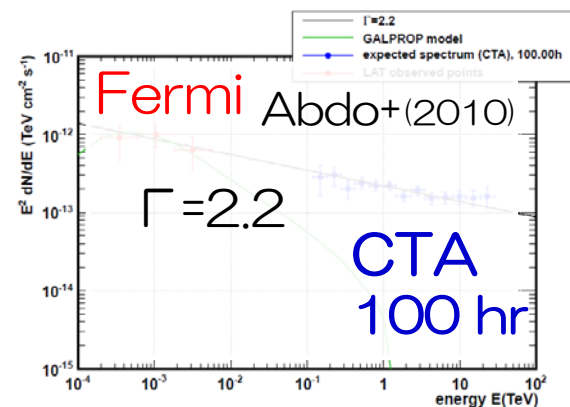


# 星形成系

- 加速粒子の星形成における役割は？
- SFRと粒子加速・輸送との関係は？



(例) M31

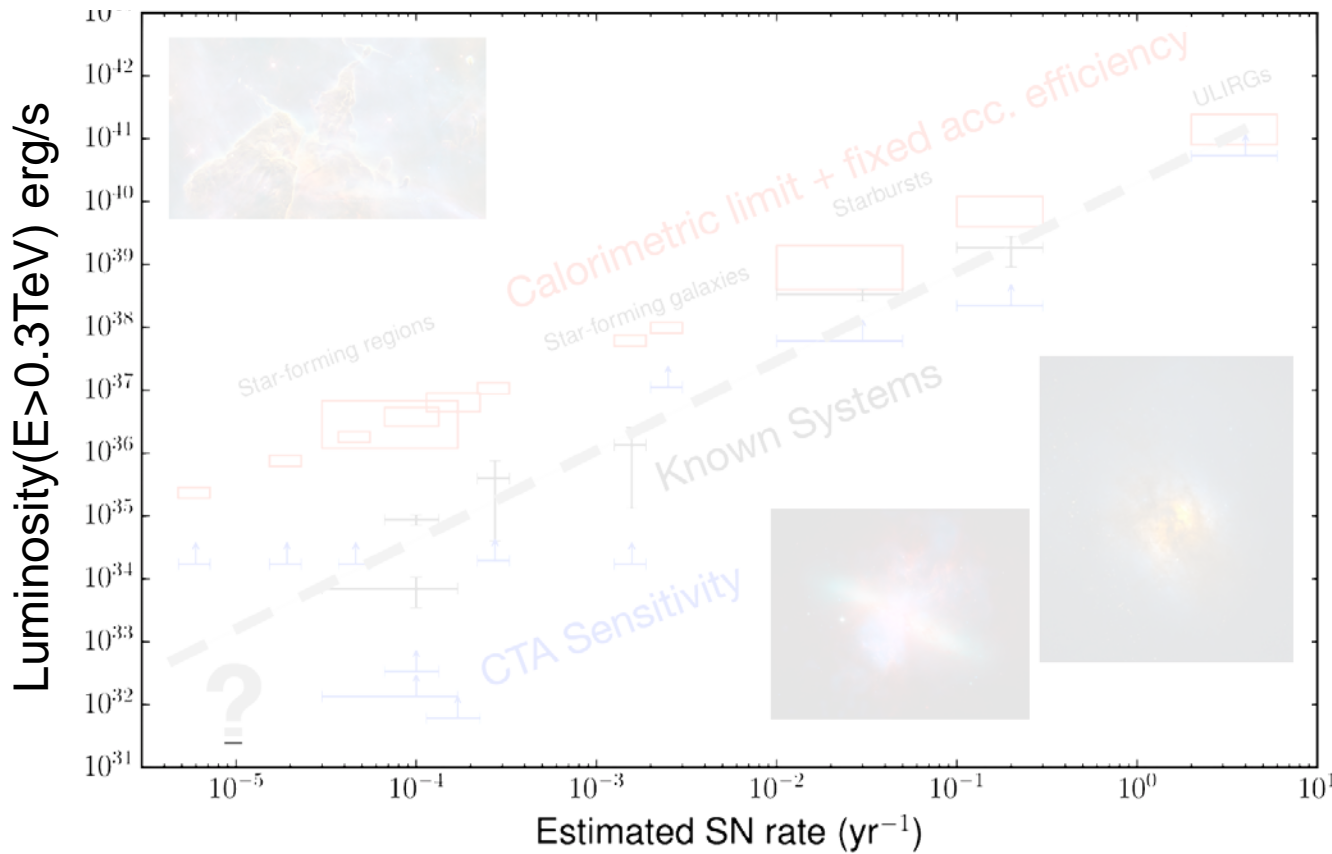
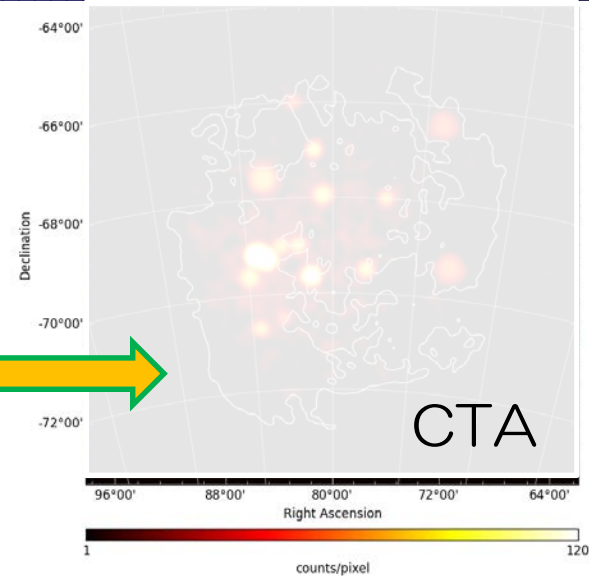
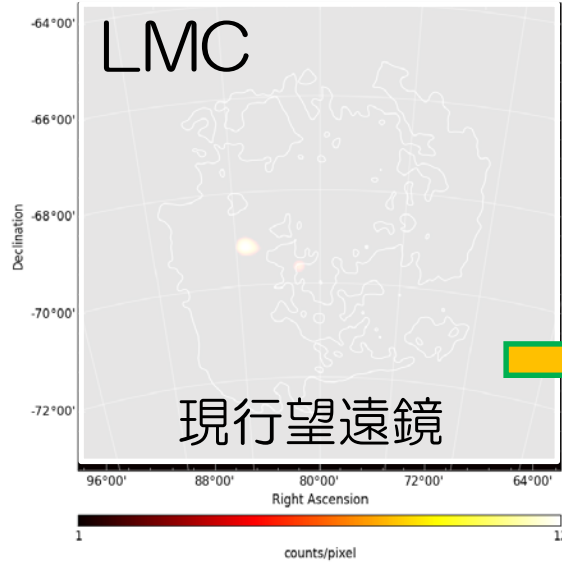


by 林田

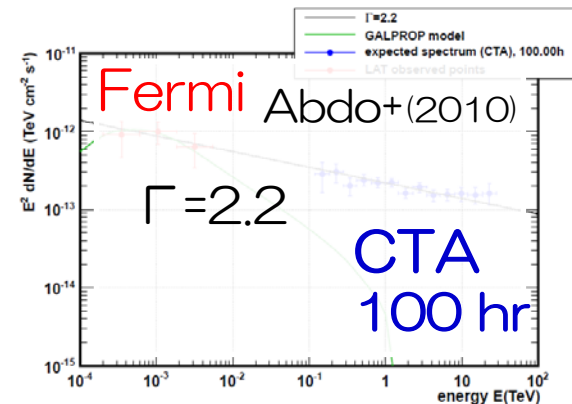


# 星形成系

- 加速粒子の星形成における役割は？
- SFRと粒子加速・輸送との関係は？

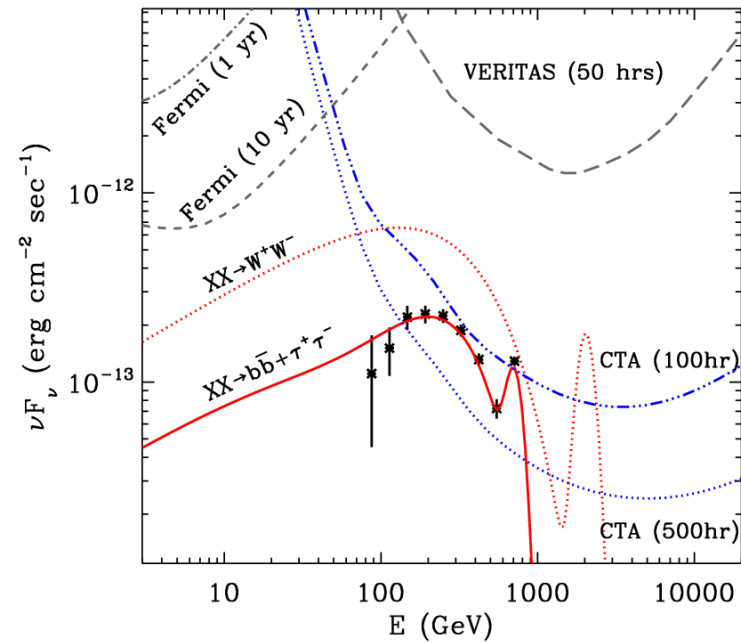


(例) M31

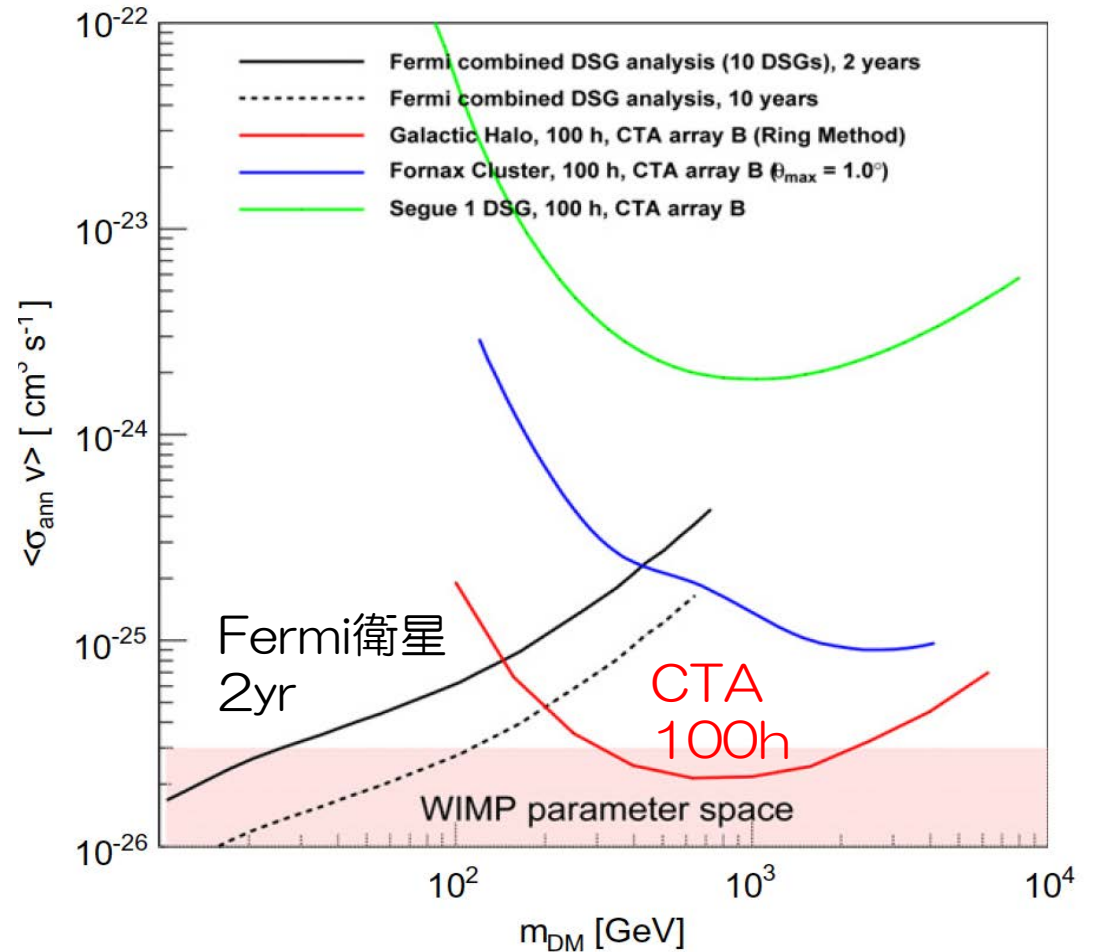


by 林田

# 暗黒物質対消滅 $\gamma$ 線探索



Buckley+(2013)



CTA Collaboration(2013)

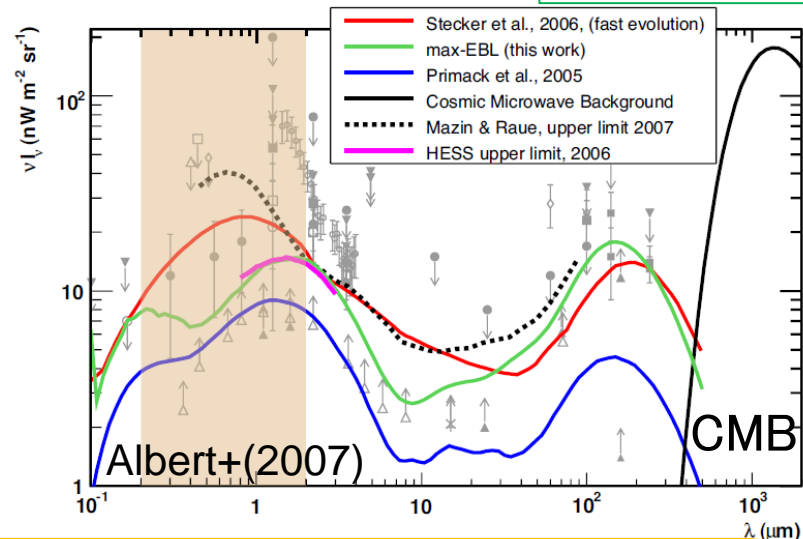
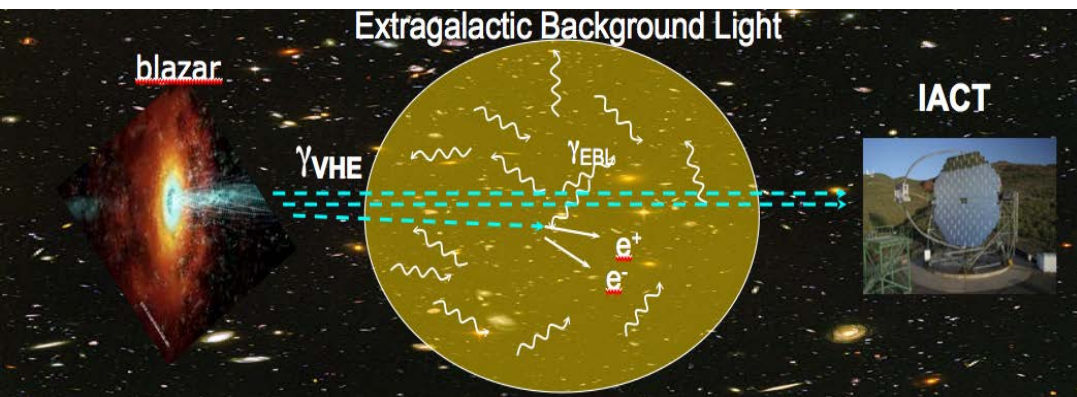
- 現行チェレンコフ望遠鏡では感度が足りないが、CTAで探れる。
- CTAは、<数100GeV探索のFermi衛星やLHC実験と相補的



# 銀河間可視赤外背景放射(EBL)

Mazin講演

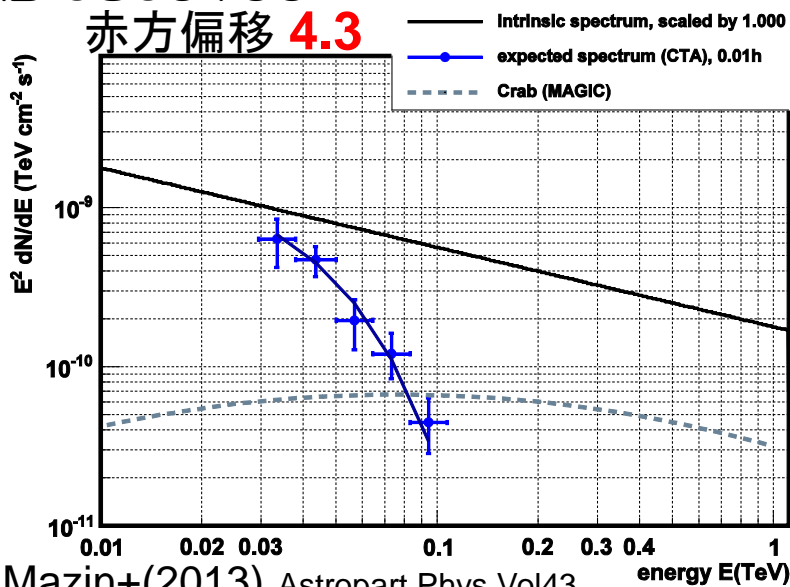
宇宙の星・銀河形成史のトレーサー



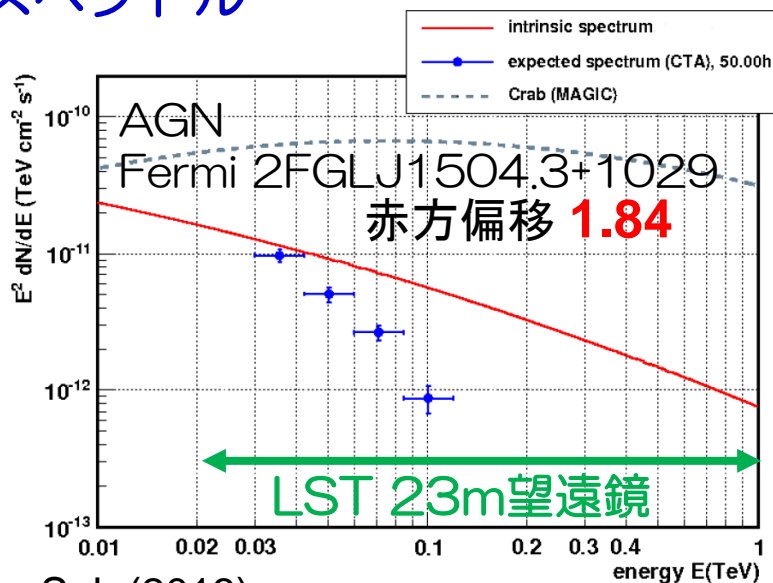
CTAの遠方天体 (AGN, GRB) スペクトルで強い制限

GRB 080916C

赤方偏移 **4.3**



CTAでの予想スペクトル



# まとめ

- TeVガンマ線天体～160検出（最遠方 $z = 0.94$ ）。銀河面サーベイによる多数の未同定天体の発見。超新星残骸からの陽子起源ガンマ線。活動銀河核の短時間変動による放射領域・粒子加速機構への制限。遠方天体のガンマ線吸収量からの銀河間可視赤外背景放射の算出。パルサーからのVHEガンマ線パルス発見。連星系からの周期的ガンマ線放射の発見など。
- CTA計画：大(23m)中(10-12m)小(4m)口径からなる大気チェレンコフ望遠鏡群を設置（北：スペイン・ラパルマ島、南：チリ）し、全天観測。31か国 1200名以上の国際協力。公開天文台。2021年フルアレイ観測開始。日本グループは、大口径望遠鏡の鏡・カメラ、2回反射型望遠鏡のカメラ開発、サイエンス検討に大きく貢献。
- CTAは、20GeV-100TeV領域で従来より一桁良い感度で、1000を超えるガンマ線源が銀河系内・系外( $z < \sim 4$ )に検出されると予想。粒子加速機構・宇宙線起源・宇宙の星形成史の解明、ローレンツ不変性検証、暗黒物質対消滅 $\gamma$ 線探索。