

# 宇宙線研究の動向

平成26年8月27日

東大宇宙線研究所

梶田隆章

# 内容

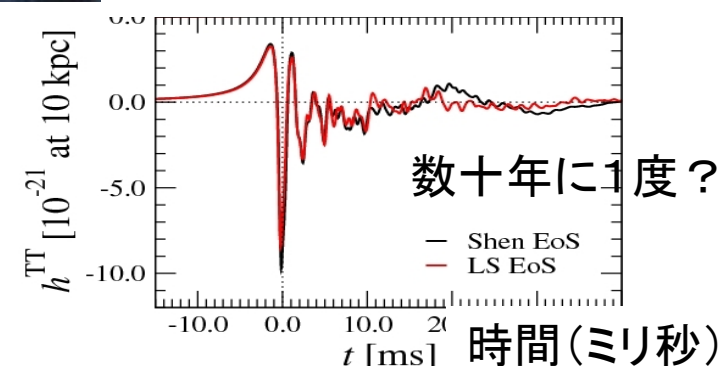
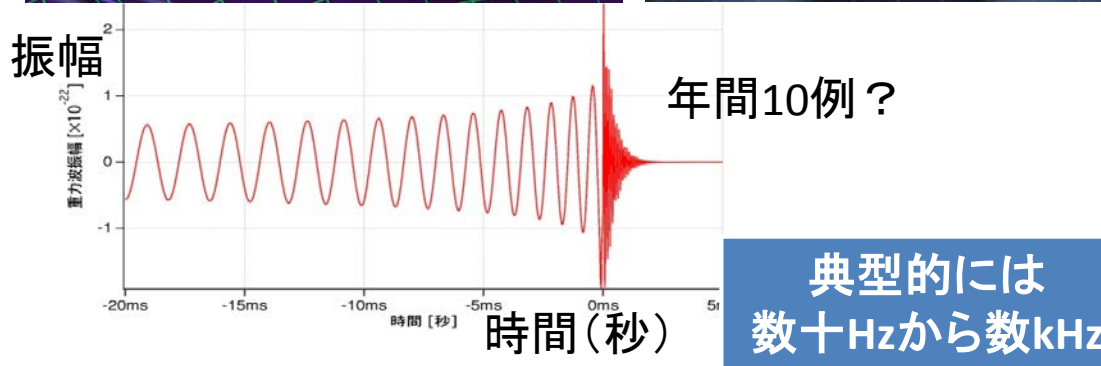
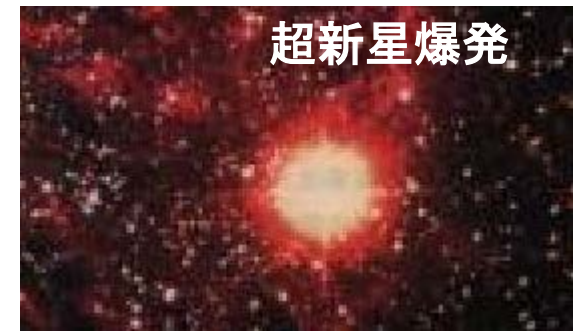
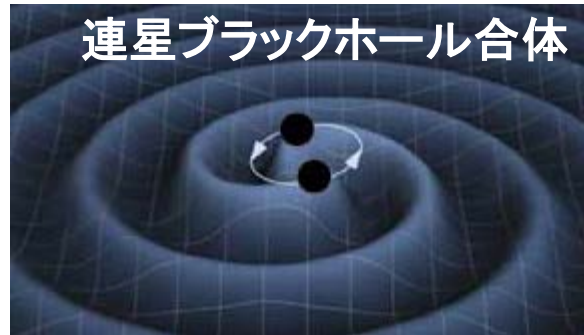
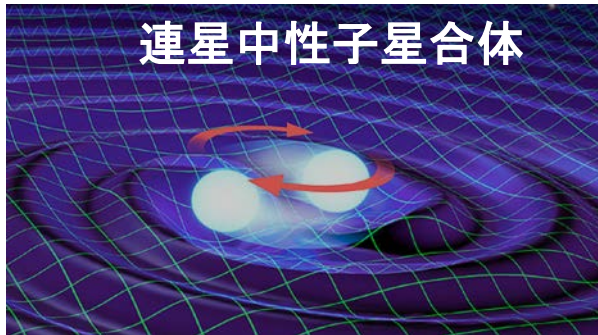
- イントロダクション
- 重力波
- ダークマター探索
- 高エネルギーガンマ線
- 最高エネルギー宇宙線
  - (含: 高エネルギー宇宙ニュートリノ)
- まとめ

# イントロダクション

- 1912の宇宙線発見(Victor Hess)以来、宇宙から飛来する高エネルギーの放射線(=宇宙線)のスペクトル、粒子の種類、発生天体、加速メカニズムなどが研究されてきた。また宇宙線の理解のために宇宙線が地球で起こす現象の解明なども進められてきた。
- また、近年、宇宙で起こっている光ではその本質が観測できない(そして、多くの場合は激しい)現象があることが判明してきた。例: 連星中性子星合体に伴う重力波、超新星爆発に伴うニュートリノ、(ビッグバンに伴う)ダークマターなど。
- 現在の宇宙線研究は、上記の2つの大きなテーマを研究する研究分野へと発展。
- この報告では、重力波、ダークマター、高エネルギーガンマ線、最高エネルギー宇宙線(高エネルギー宇宙ニュートリノを含む)について、特に2011-2012年に行われたCRC(宇宙線分野)の将来計画の検討結果をもとに報告。(このうち、特にILCと少し関係するのはダークマター関連。)
- ニュートリノは別な報告を参照。

# 重力波

- 重力波観測の目的:
  - ✓ 時空(うつわ)と物体(なかみ)の動的な関係の解明
  - ✓ 重力波でしか本質的な理解が得られない天体現象の観測(ブラックホール生成の瞬間など)
  - ✓ (将来は、インフレーションに起因する原始重力波の観測)
- 当面の重力波観測の対象となる天体現象

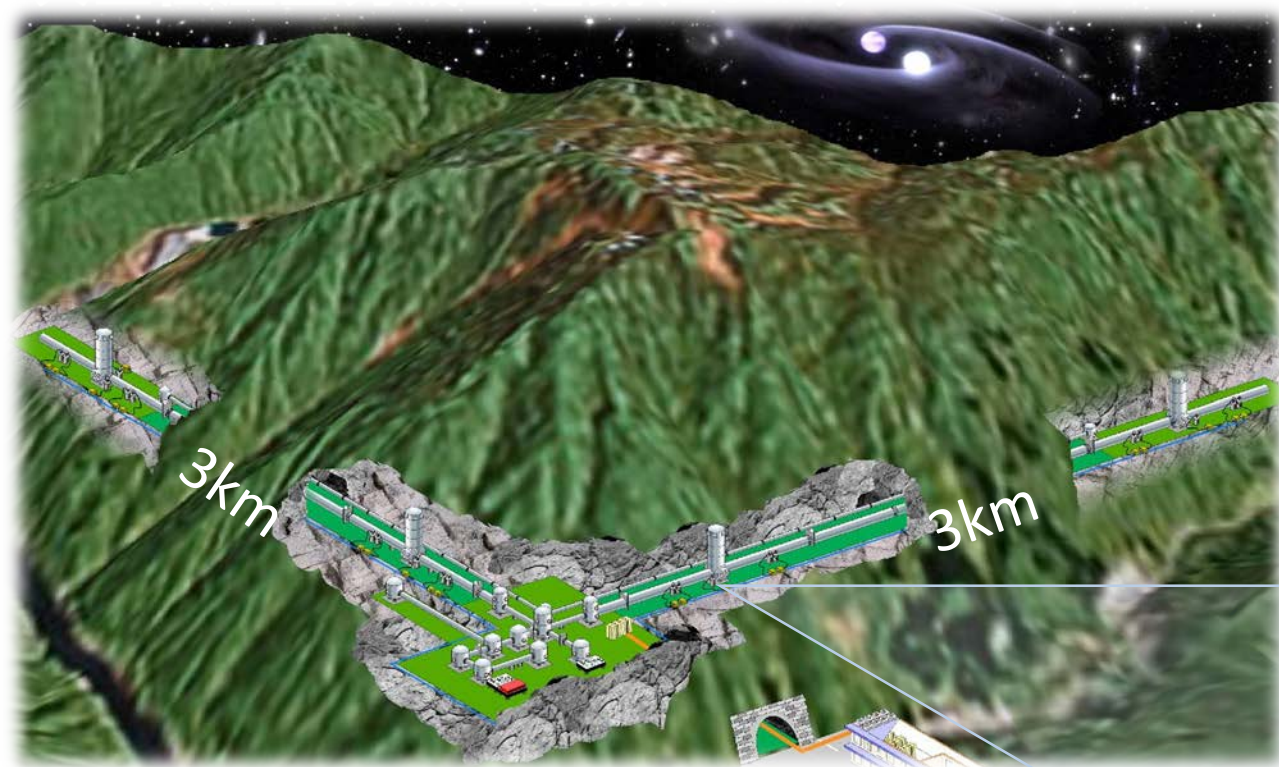


# 世界の重力波観測プロジェクト



- 現在、LIGO, Virgoでは3-4kmスケールのレーザー干渉計の高度化中。
- 日本のKAGRA(3km)は建設中。
- その他、インド、オーストラリア、中国などでこのクラスのレーザー干渉計を建設計画・希望。
- ヨーロッパでは、7-8kmクラスの次期計画(Einstein Telescope)も計画。
- また、スペースでのレーザー干渉計の計画(LISA, 基線長500万km等)もあり。

# KAGRAプロジェクト

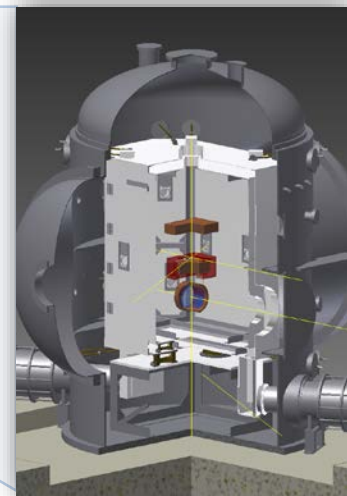


特徴1: 神岡の**地下**に設置  
→ 地面振動は約1/100に。

特徴2: 20Kの**極低温鏡**  
→ 熱雑音は問題にならない。

量子力学的揺らぎで感度が制限される干渉計  
限界の高感度で重力波の観測を目指す。  
(年間10例程度観測か？ただし予想誤差は1桁(以上))

共同研究者: 約230人



# 設計感度達成時期と重力波天文学の推進

設計感度達成予想時期: Advance LIGO --- 2019

arXiv:1304.0670

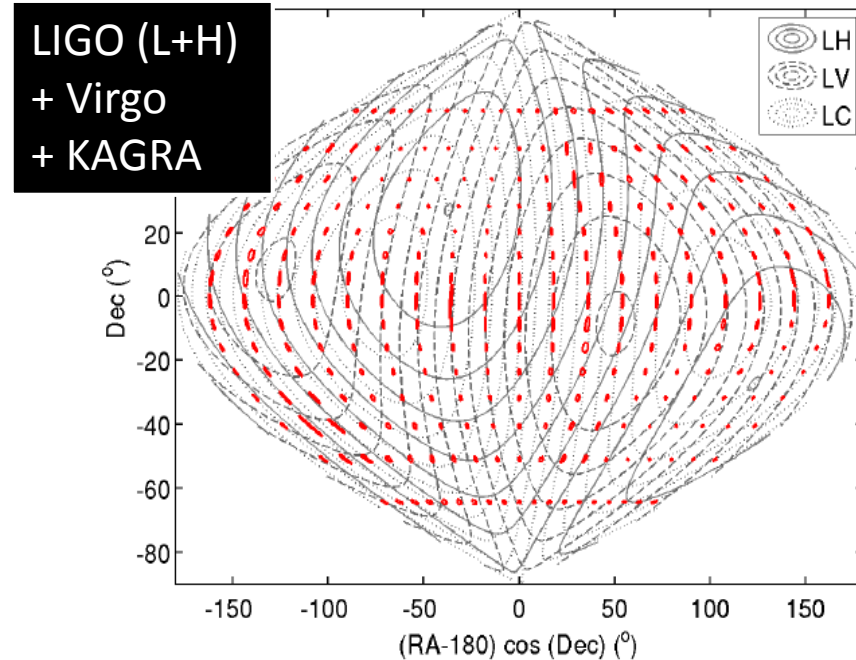
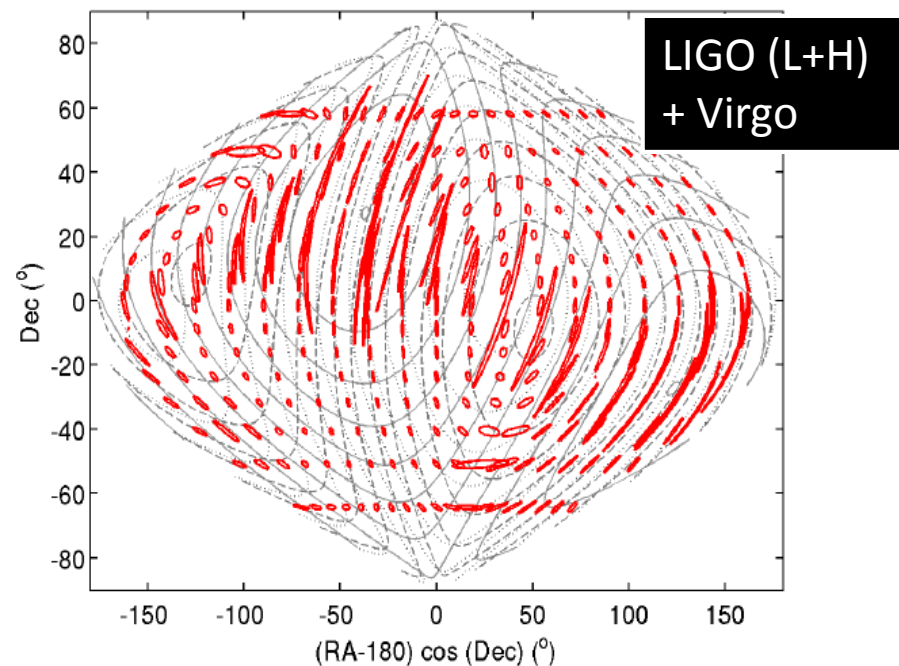
Advance Virgo --- 2021

KAGRA

---- 明確にしていない。しかし2017年度に低温観測を始めて、可能な限り早く設計感度に。

Wen and Chen, arXiv: 1003:2504

## Determination of source sky position: 95%CL, supernova, S/N =10

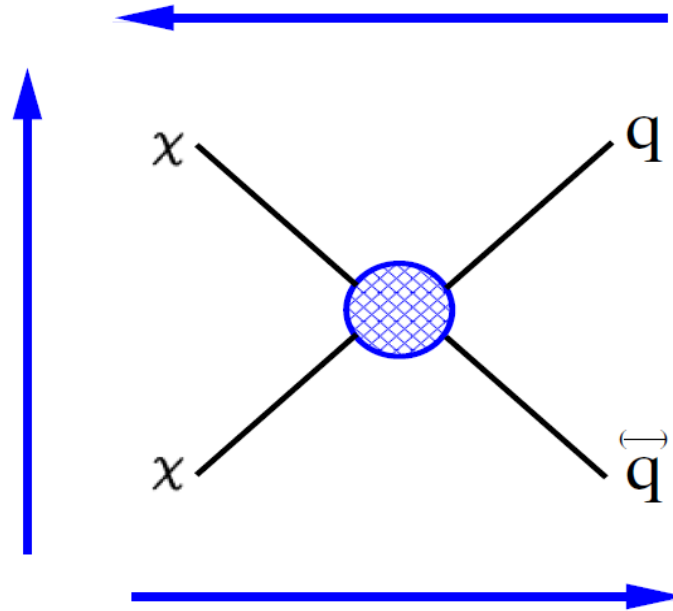


更に、光学望遠鏡、人工衛星、ニュートリノ等との共同観測

# ダークマター

加速器実験(LHC, ILC)

直接探索  
(多数)  
(このセクション)

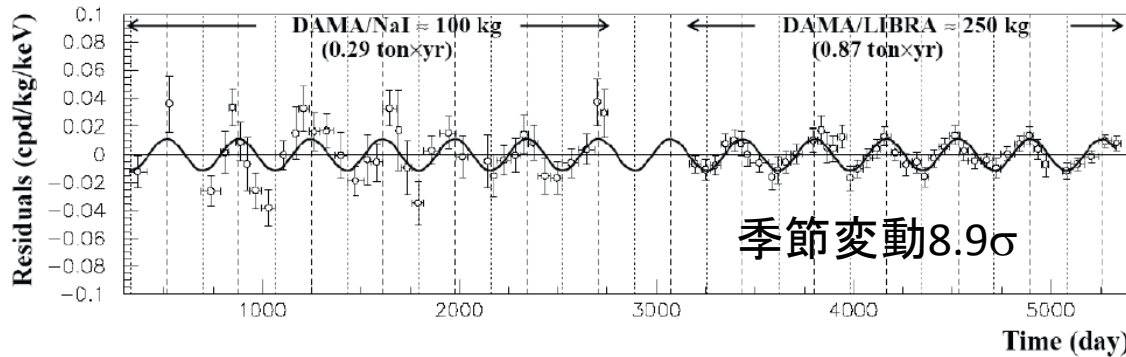


間接探索  
(ガンマ線(次のセクション)、  
ニュートリノ、  
宇宙線反粒子)

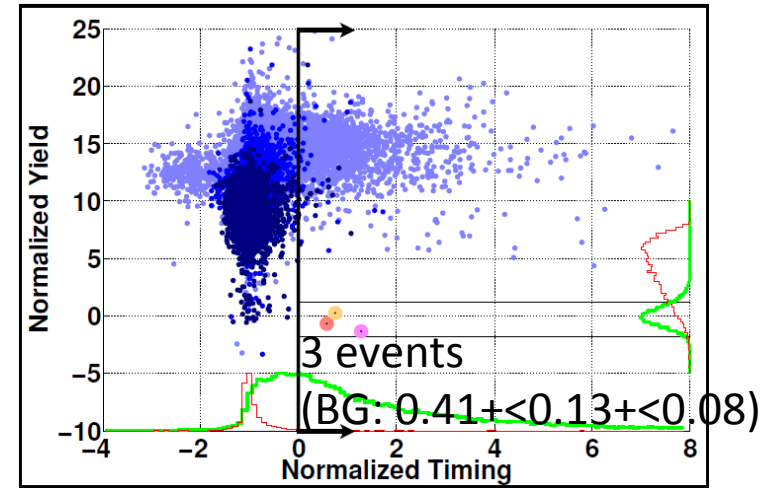


# ダークマター探索実験: DM信号と考える例

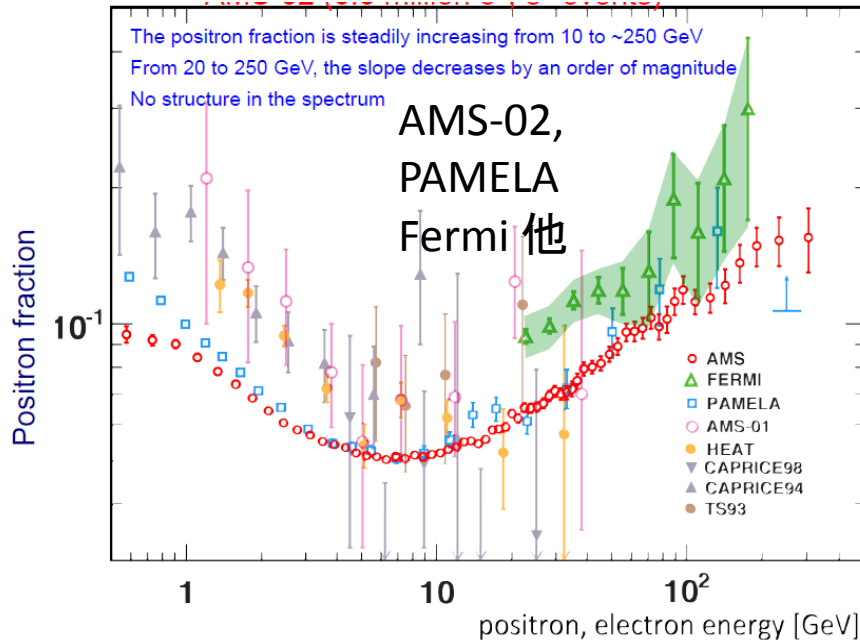
DAMA/LIBRA



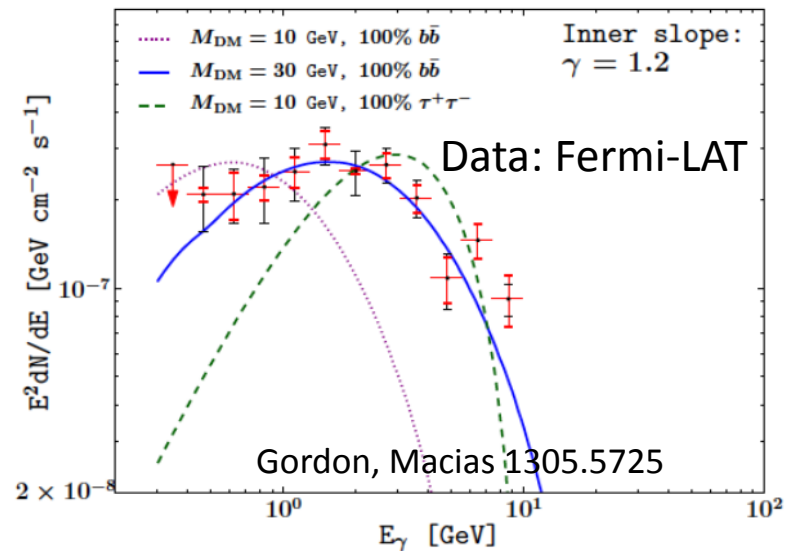
CDMS II



## 陽電子超過: 天体物理 or DM?



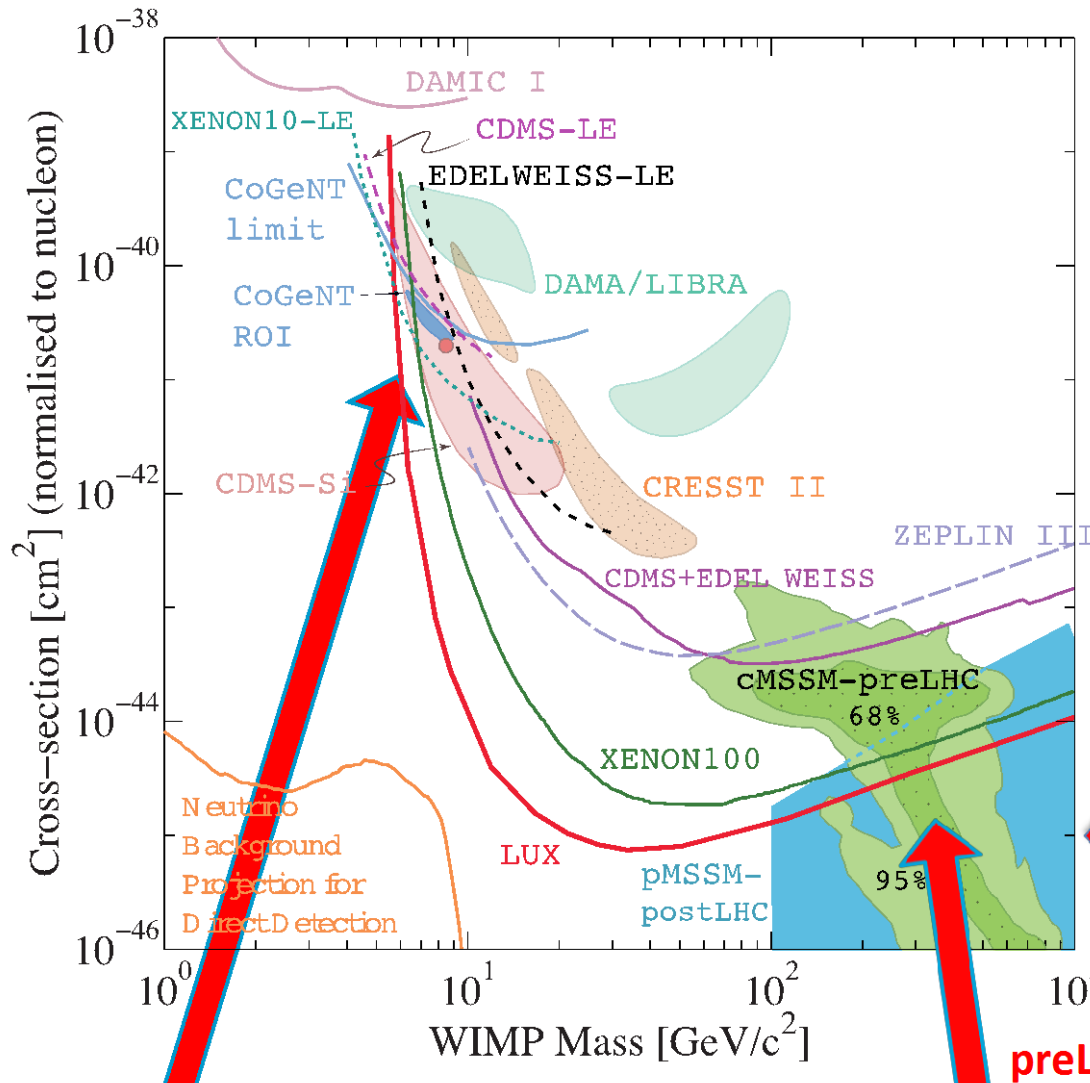
## GCからのガンマ線: 天体物理 or DM?



Caution: 一筋縄ではいきません....

# ダークマター: 直接探索実験の現状

(協力 森山茂栄氏)



ICNFP 2014, L. Roszkowski

LHC:  
theory region has  
moved down and  
right

preLHC!

motivated by theory (SUSY)

Confusion region gone

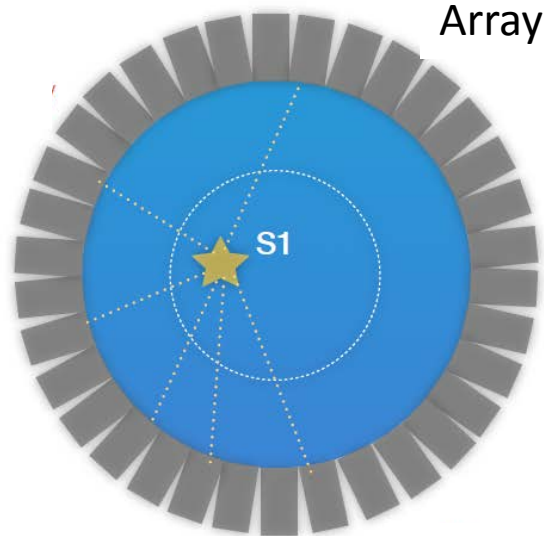
# ダークマター直接探索実験の方法

Liquid Xe or Ar

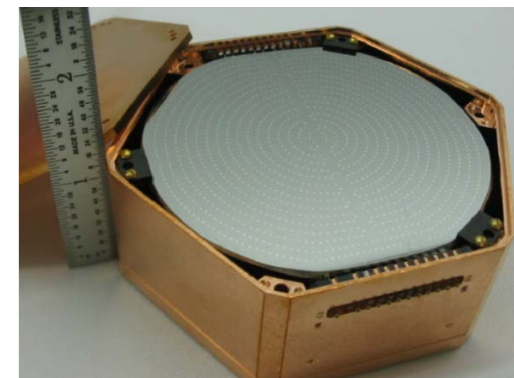
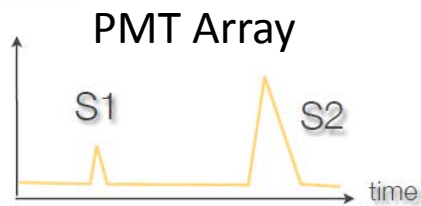
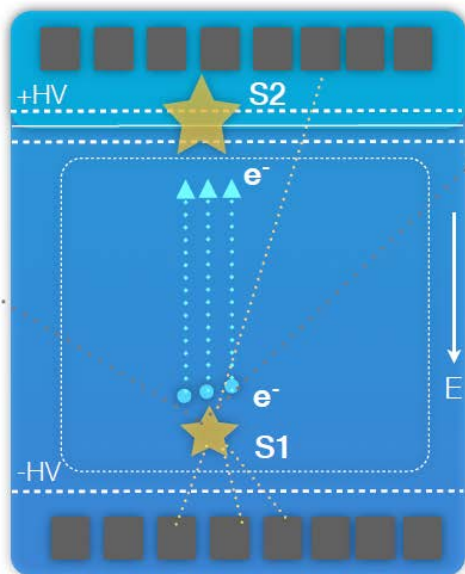
その他

Single phase

PMT  
Array



Double phase (TPC)



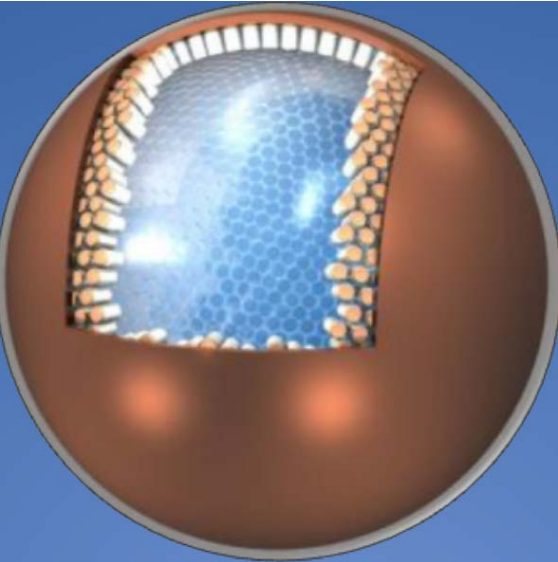
Cryogenic



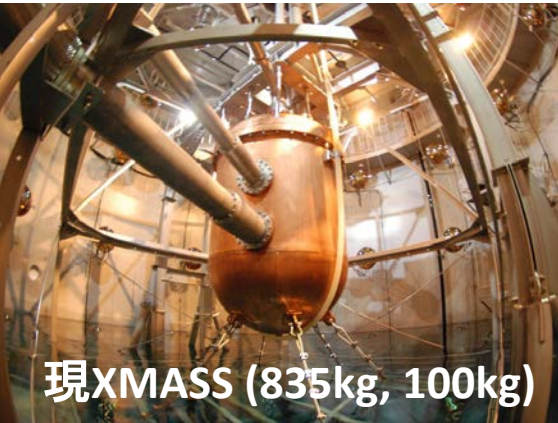
NaI

その他

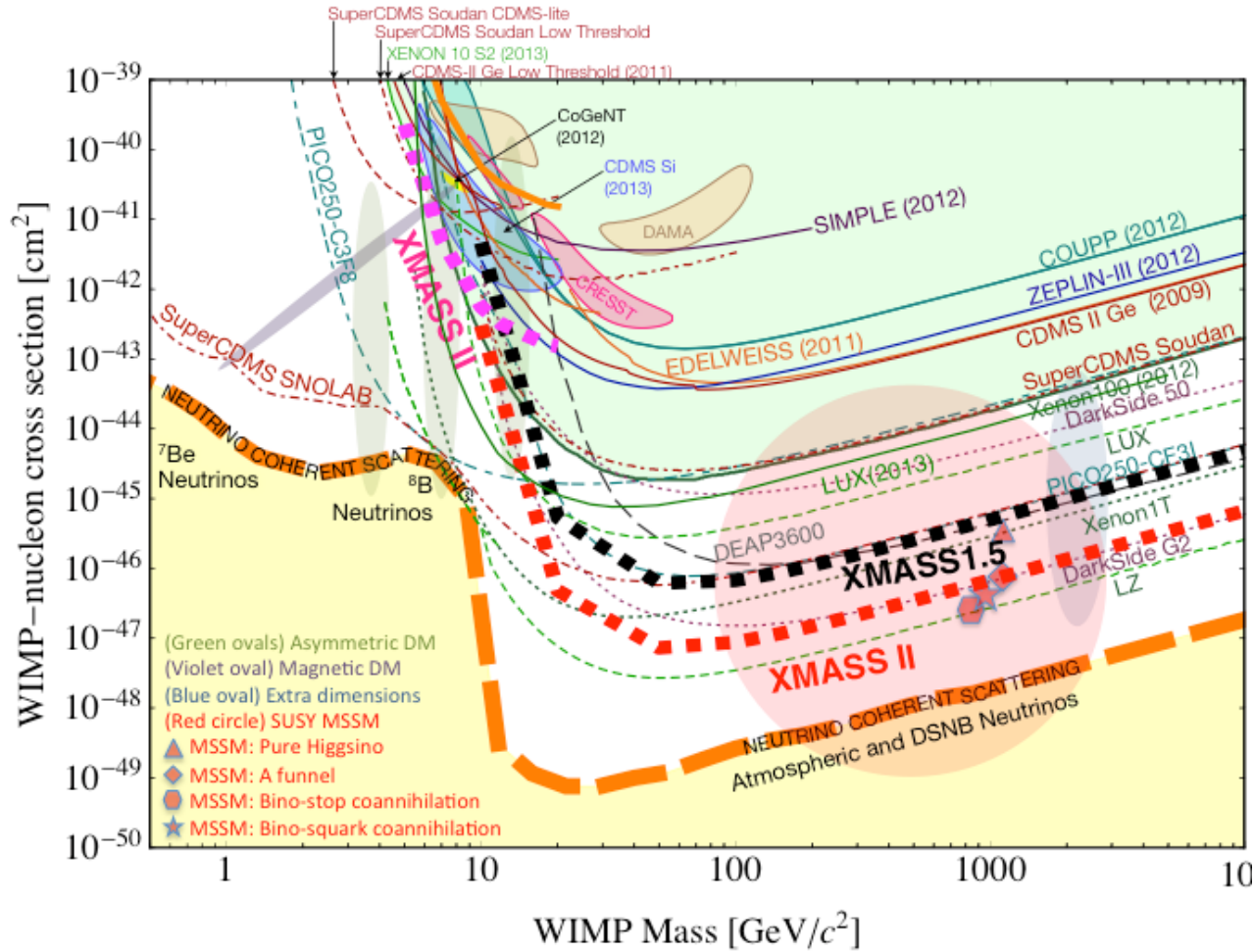
# XMASS 1.5/II (single phase LXe)と感度



- ◆ XMASS 1.5 (重量5ton、有効質量1ton)
- ◆ XMASS II (重量20ton、有効質量10ton)



現XMASS (835kg, 100kg)



- ✓ ダークマター実験もトンから10トンスケールへ大型化
- ✓ BG要求値は $10^{-2}$ /ton/keVee/dayレベル(XMASS)
- ✓ DM実験も集約の方向に向くと予想される

# 高エネルギーガンマ線

(協力 手嶋政廣氏)



(世界協力の次期計画)



# Cherenkov Telescope Array

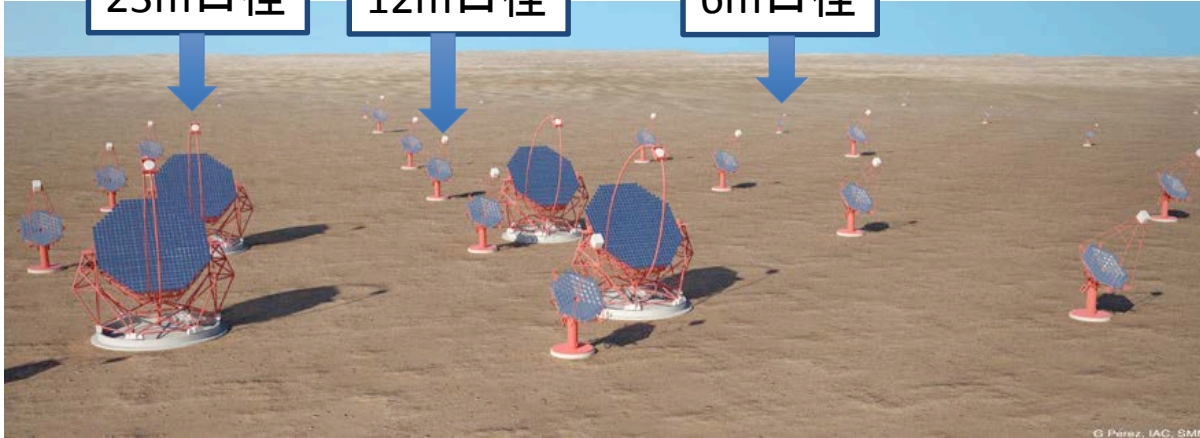
## 超高エネルギー宇宙ガンマ線(テラ電子ボルトでの新たな天文学)

- 宇宙線の起源(宇宙の巨大加速器を探す)
- ブラックホールに伴う宇宙の高エネルギー現象の研究
- 暗黒物質対消滅からのガンマ線の探索

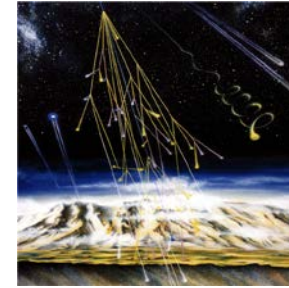
23m口径

12m口径

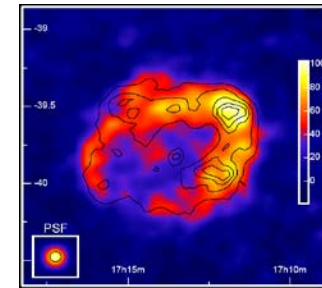
6m口径



### 狙うサイエンス



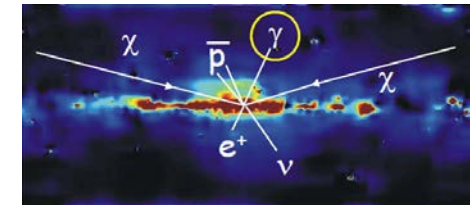
宇宙線の起源



宇宙の巨大加速器



ブラックホールと高エネルギー現象

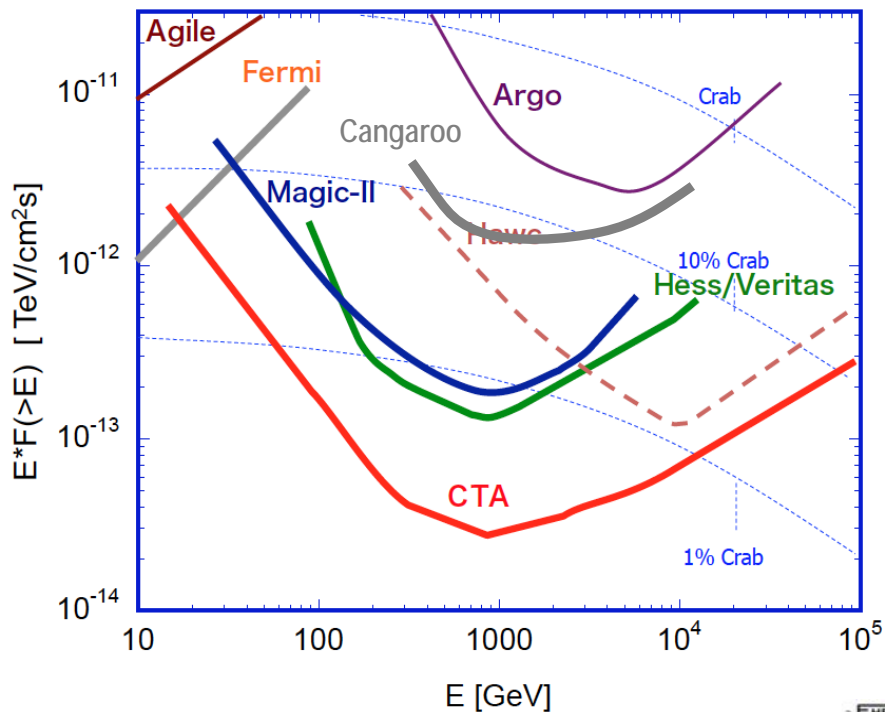


暗黒物質の探索

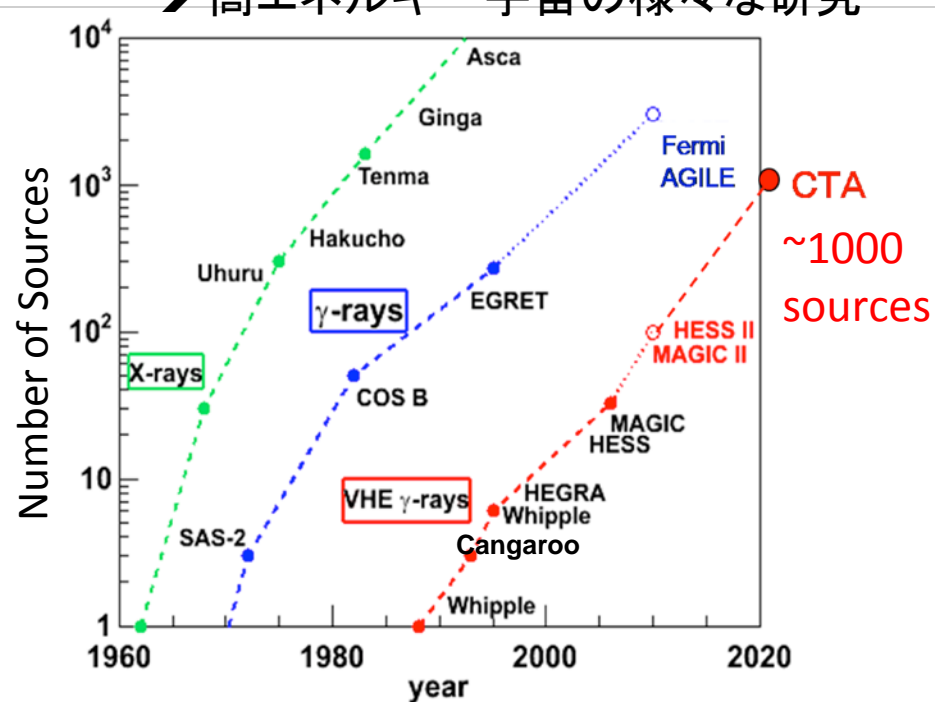
- ✓ 日本は大口径望遠鏡の鏡と撮像装置(とGRB観測のための望遠鏡駆動電源)を分担。
- ✓ 総経費の15%(分担割合はGDP, 参加者数などをinputにする公式を決めて決定)。(日本の参加者は約100人)
- ✓ 全体で200MEuro, 1200人の共同研究。

# CTA 感度

10倍優れた感度  
10倍広いエネルギー領域

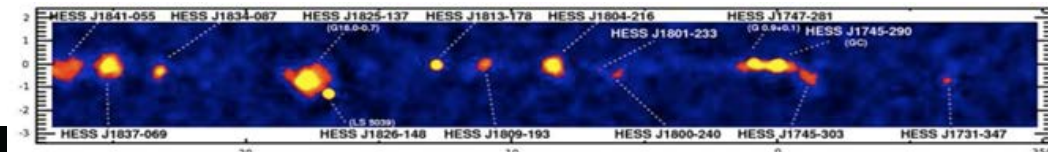


1000 以上のガンマ線源を発見  
→ 高エネルギー宇宙の様々な研究

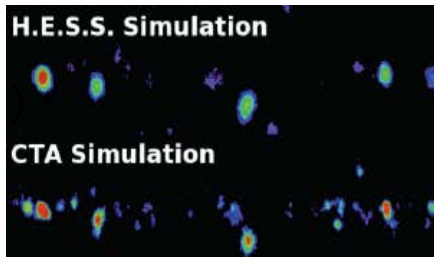


## 銀河面スキャン

HESS Data

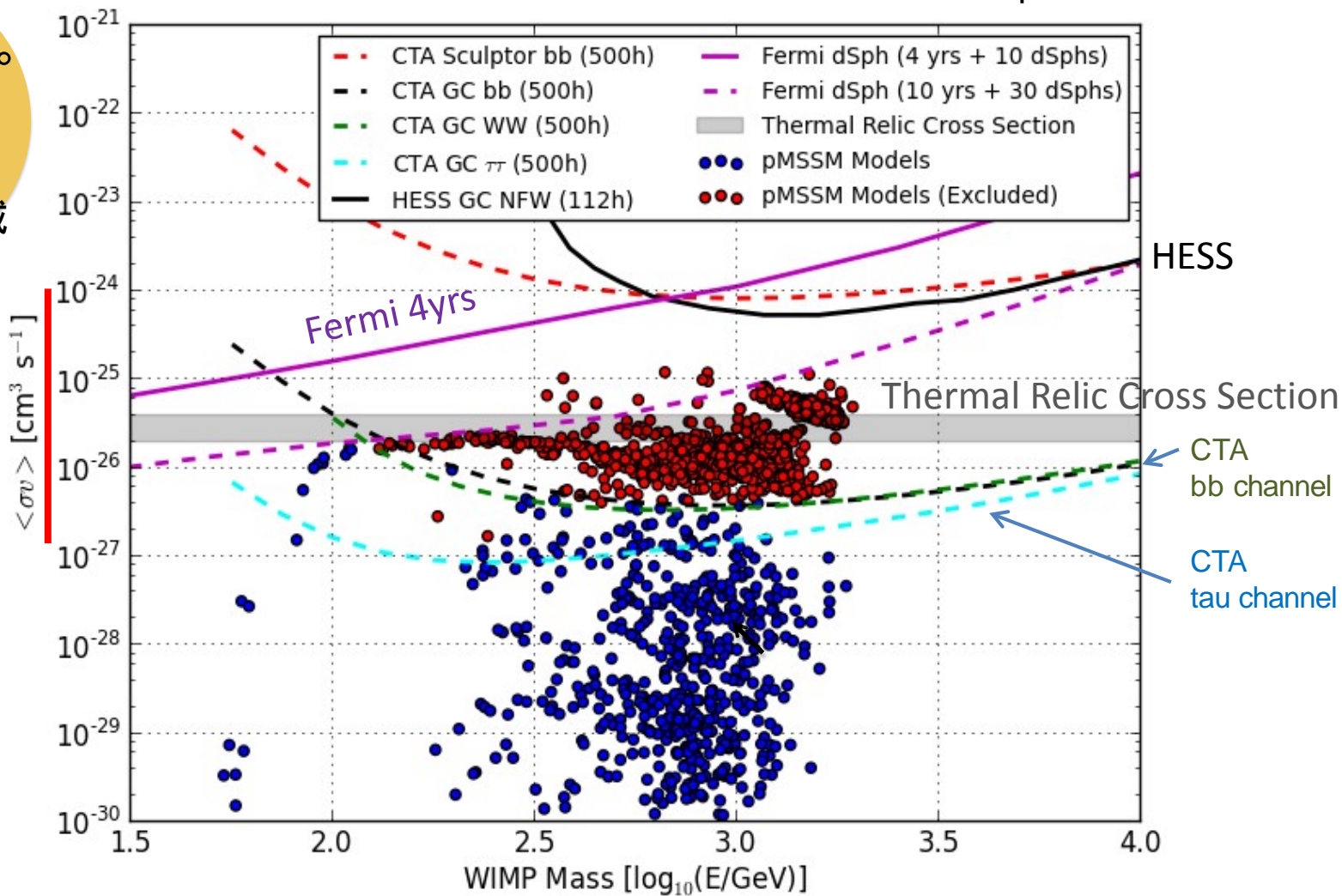


HESS  
(シミュレーション)  
CTA  
(シミュレーション)



# DM: MSSM モデルにおけるパラメータ空間とFermi, HESS 上限値、CTA 感度

Wood+ astro-ph/1305.0302





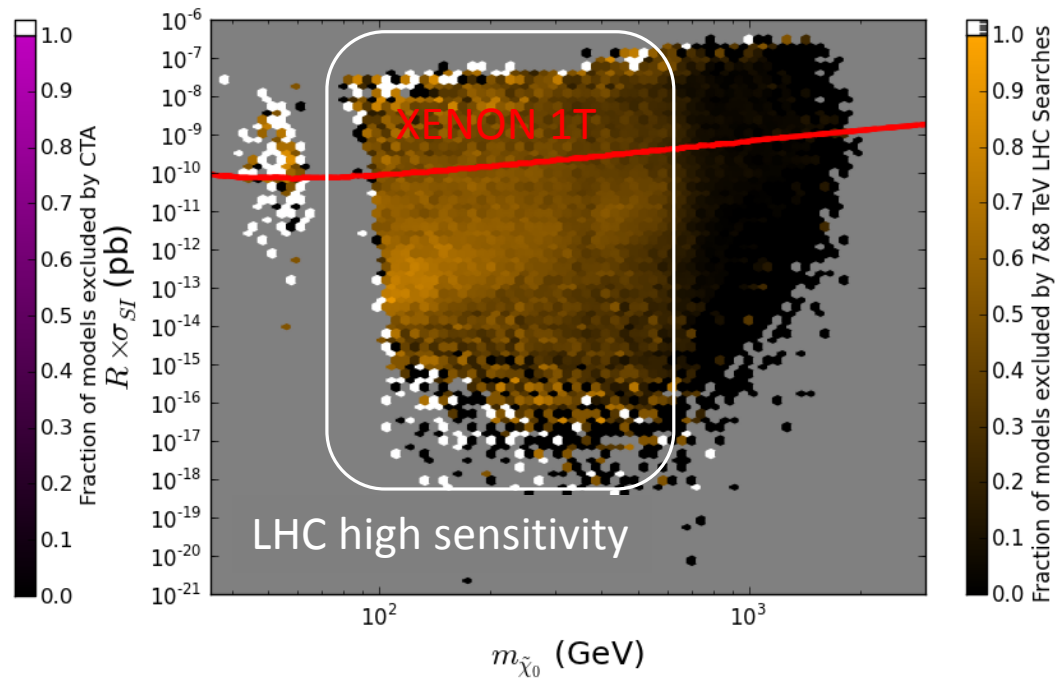
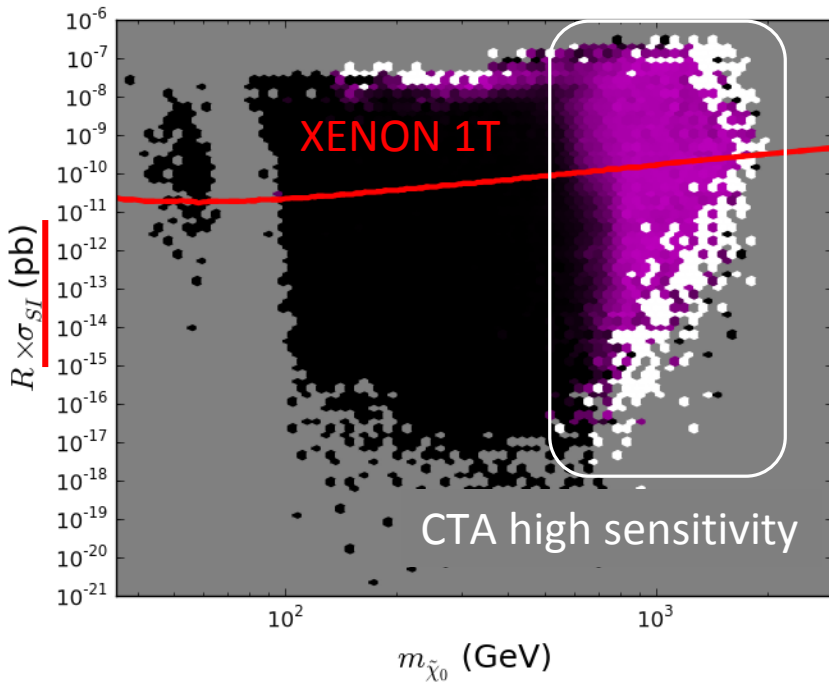
# 直接観測、間接観測、加速器実験の相補性

赤: XENON 1T 感度

紫: CTA 感度

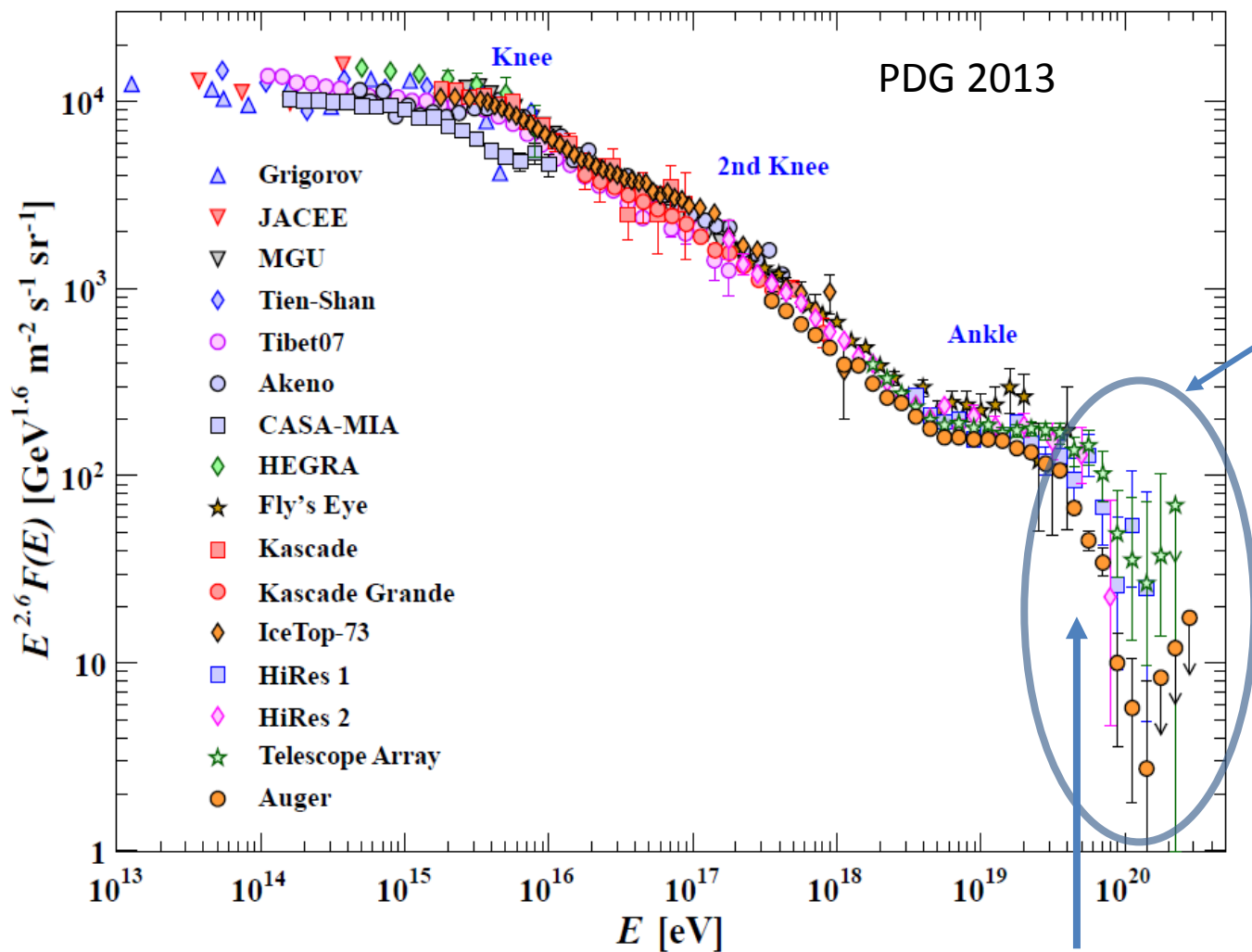
茶色: LHC 感度

Cahill-Rowley+ 1305.6921



# 最高エネルギー宇宙線

(協力 佐川宏行氏)



これらの宇宙線は；  
何が(粒子の種類)、  
どこで、  
どのように加速され、  
どのように伝搬？

$\text{CR} + \gamma(3\text{K}) \rightarrow \text{CR}' + \pi$  (GZK cutoff)

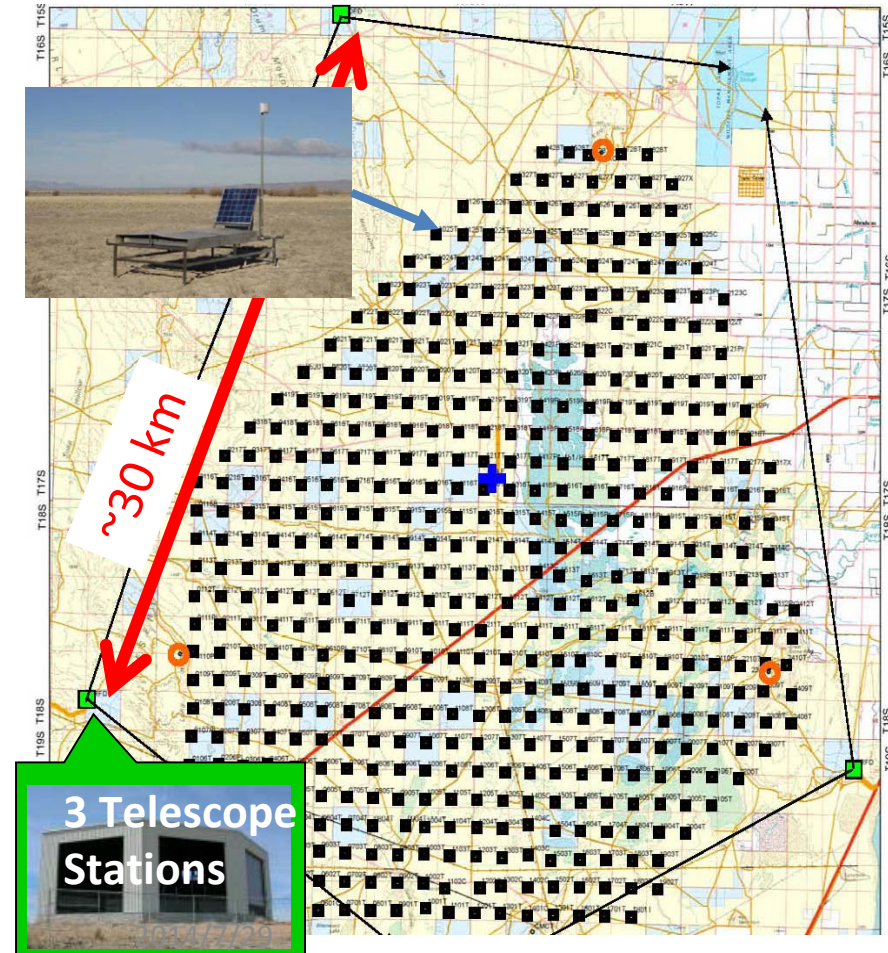
# 最高エネルギー宇宙線実験

## Pierre Auger Observatory



アルゼンチン (2004年~)  
1.5km grid, 3,000km<sup>2</sup>

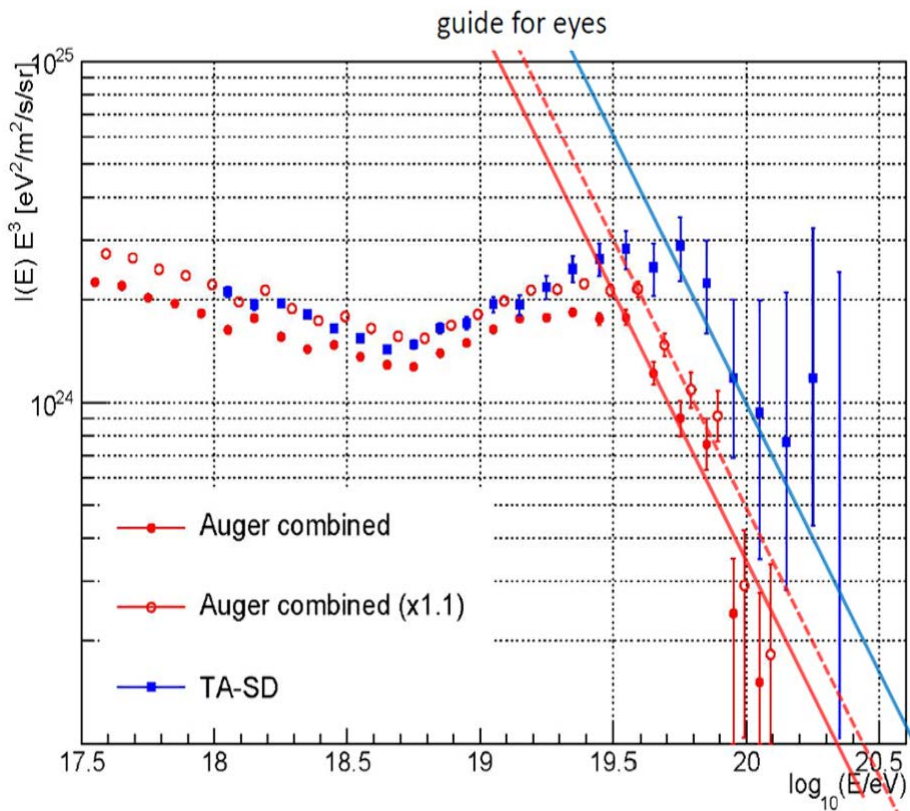
## Telescope Array (TA)



アメリカ・ユタ州 (2008年~)  
1.2km grid, 700km<sup>2</sup>

# 最高エネルギー宇宙線のサイエンス

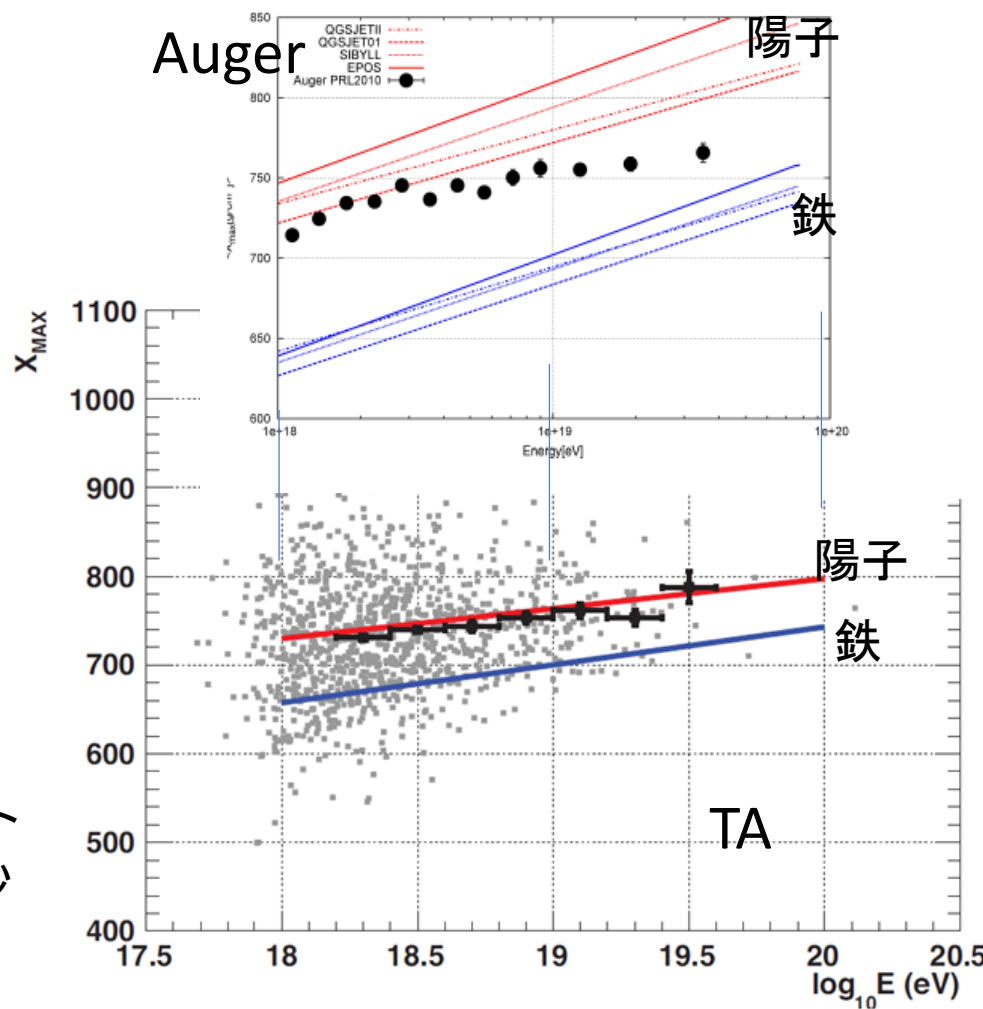
## エネルギー・スペクトル



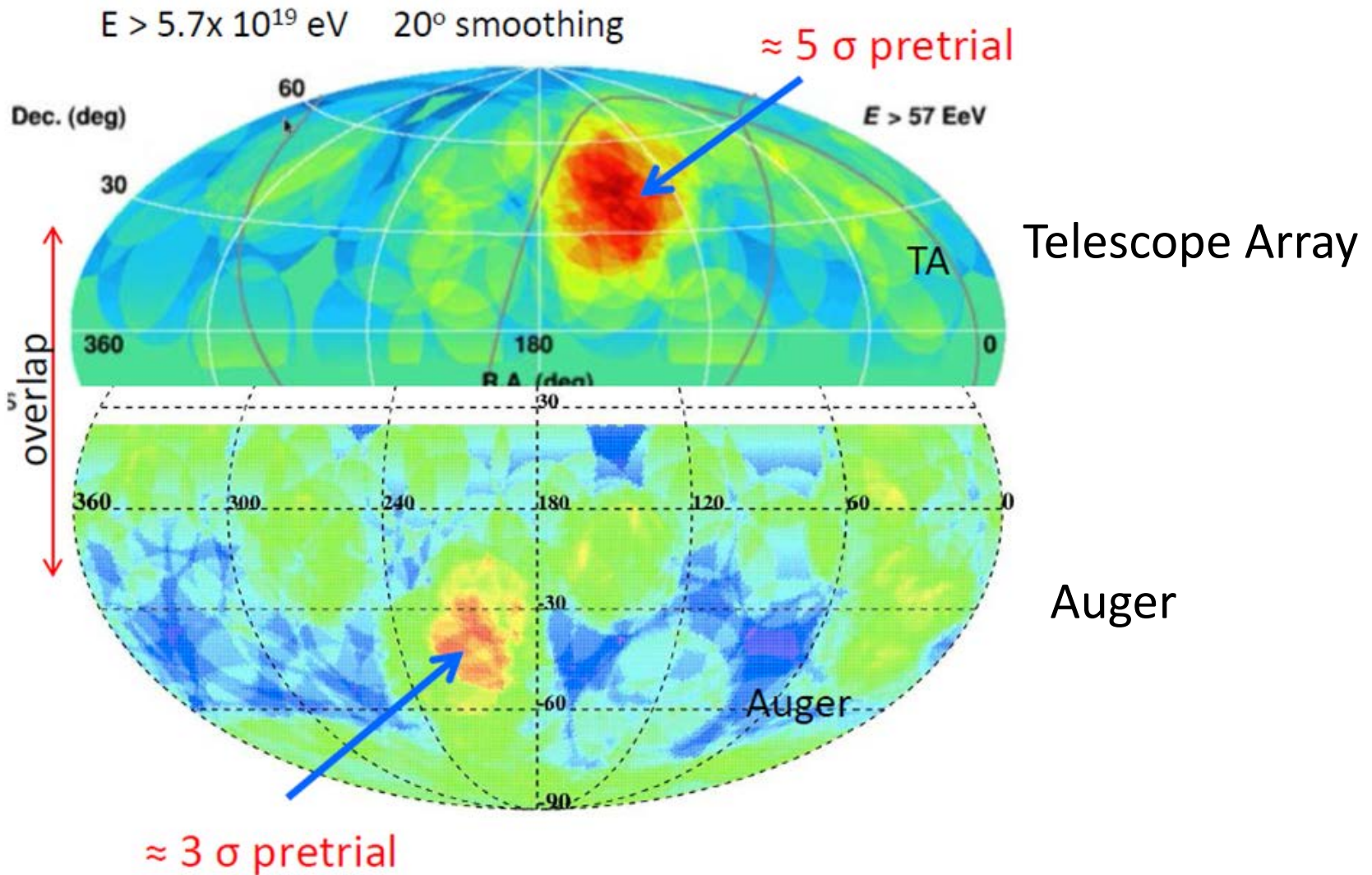
エネルギー・スペクトル: GZKと矛盾ないカットオフは確認。ただし、そのエネルギーが微妙に違う。

化学組成は18.5乗あたりから不一致。

## 化学組成



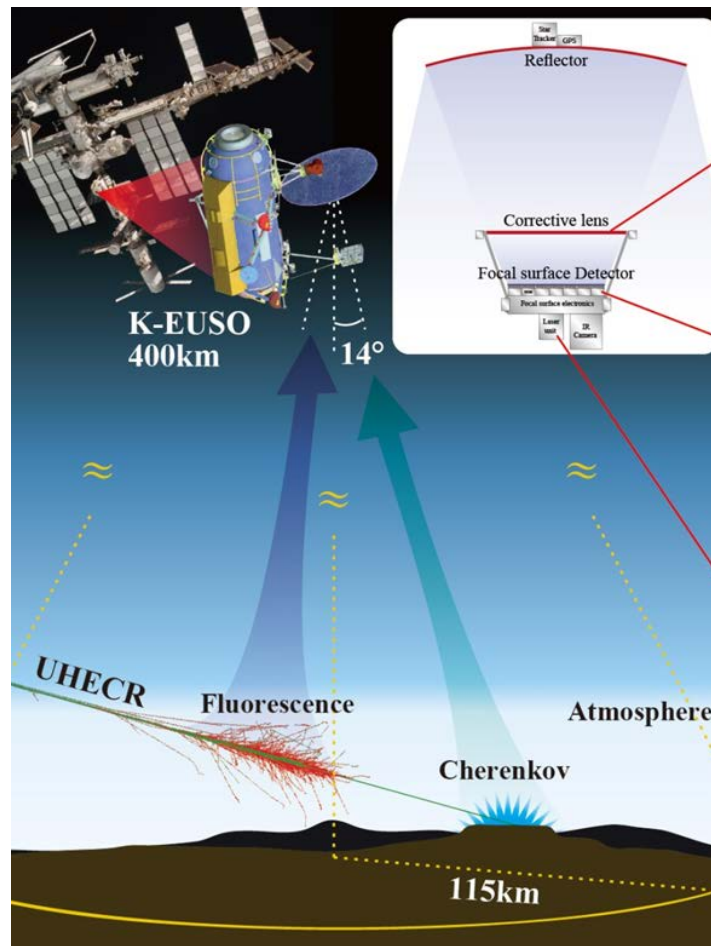
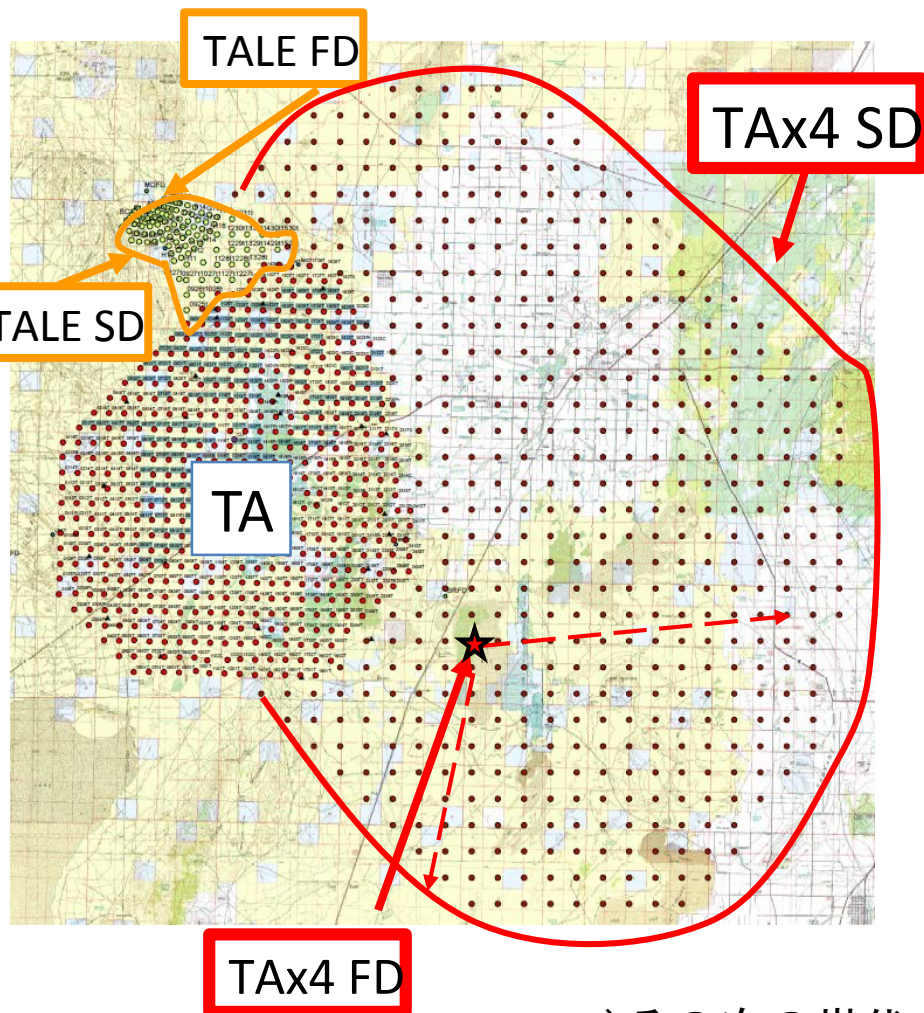
# 最高エネルギー宇宙線の加速天体？



# 最高エネルギー宇宙線将来計画

## TAX4(4倍拡張)とTALE(TA LowE extnsion)

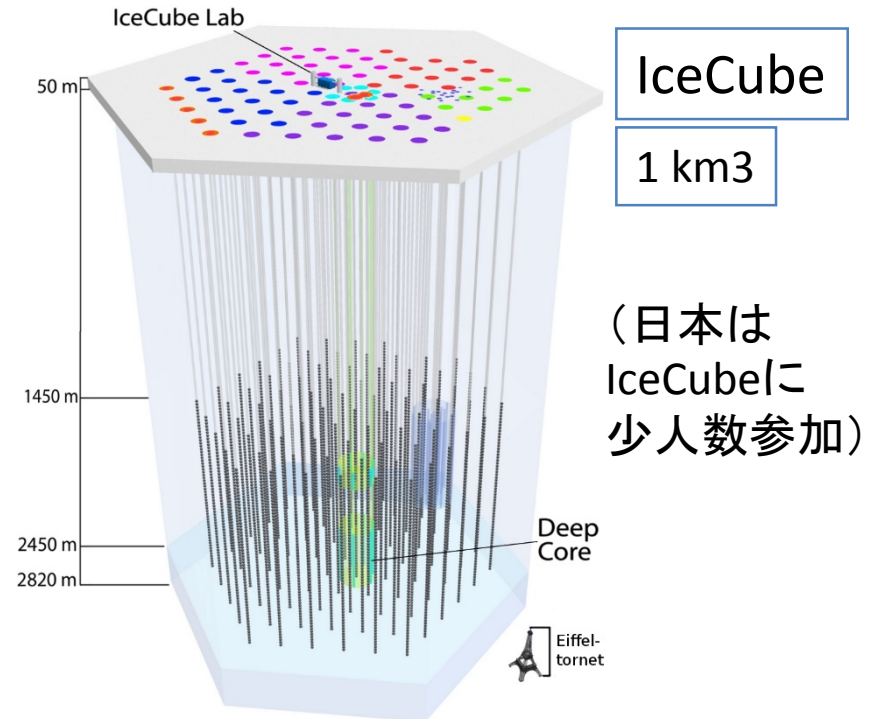
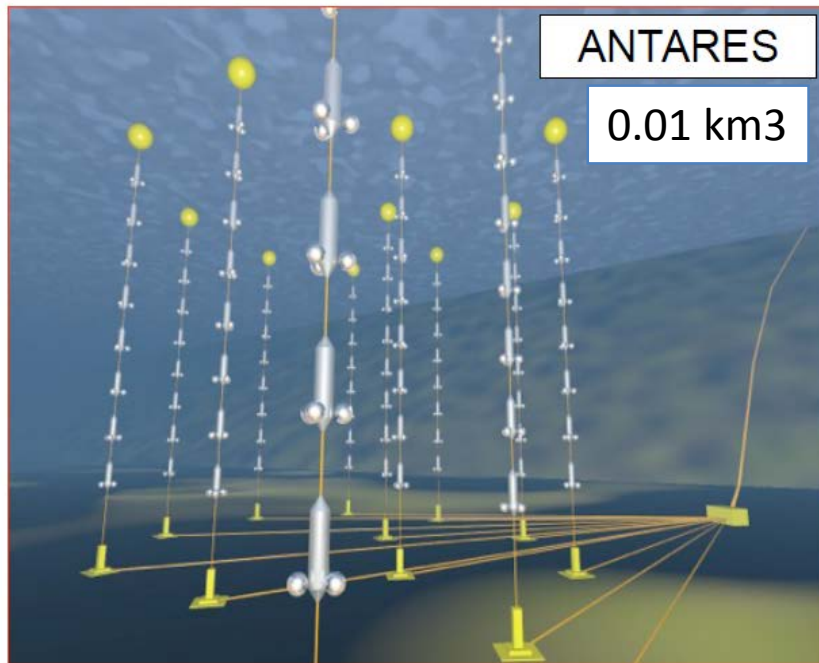
## KLYPVE-EUSO (以前はJEM-EUSO)



\*) その次の世代の実験を世界的枠組みで進める方向

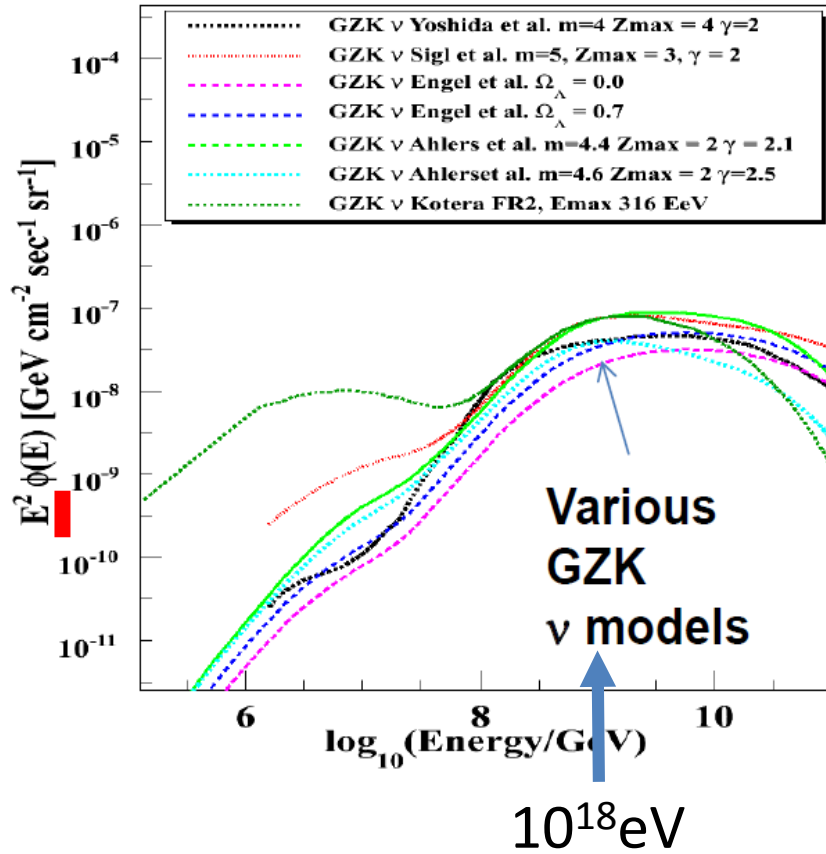
# 高エネルギー宇宙ニュートリノ

- もし、GZK効果があるなら、 $CR + \gamma(3K) \rightarrow CR' + \pi$ ,  
 $\pi^{+/-} \rightarrow \mu^{+/-} + (\text{anti-})\nu_{\mu}$
- これらのニュートリノが存在するはず (GZKニュートリノ)
- この観測ができればGZK効果の非常に強い証拠
- また、一般に高エネルギー宇宙ニュートリノは宇宙線加速現場の観測

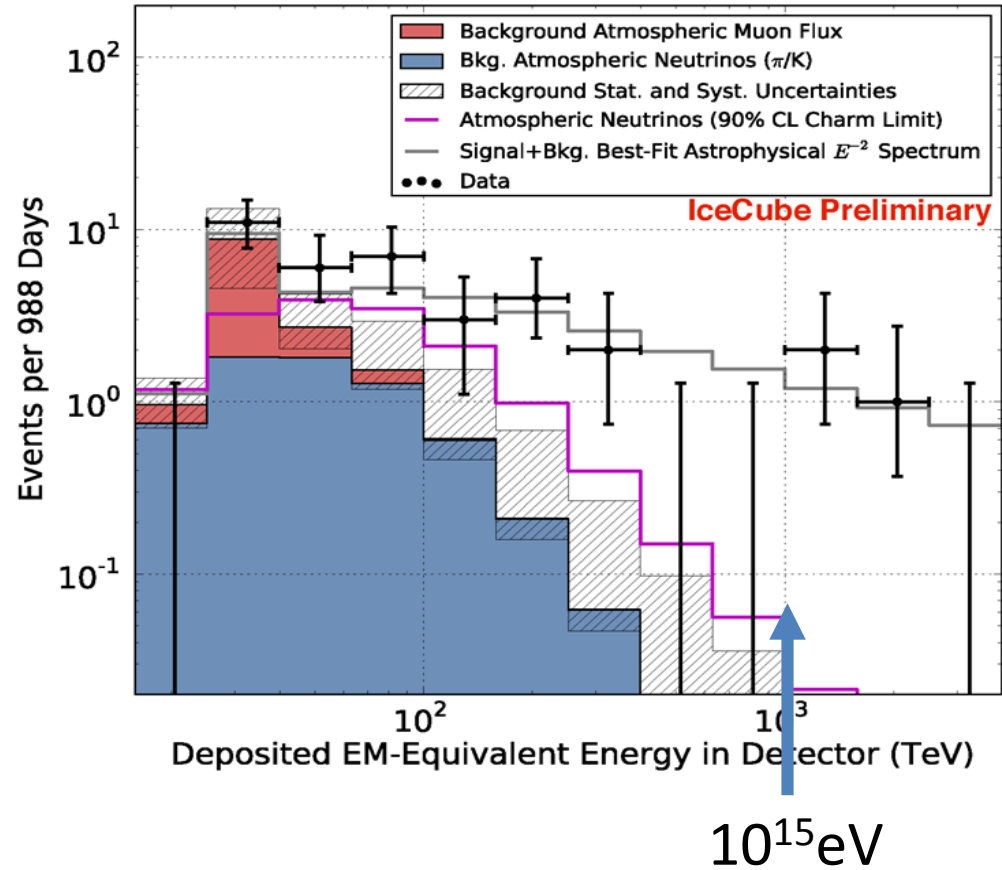


# 高エネルギー宇宙ニュートリノの発見

## GZK neutrino models...



## IceCube data (Neutrino2014)



大気neutrino, 大気muon BG より5.7 $\sigma$  excess.  
 一方、GZK ニュートリノではない様子。

→ 次世代の測定器の提案(ARA, 200km<sup>2</sup>など)



# 宇宙線分野の研究の動向:まとめ

- 100年来の宇宙線の問題の解決に向けて大きく研究が進んでいる。
- また、重力波、ダークマターなどの研究も着実に進んでいる。
- 宇宙線分野の観測研究も相当Global化がすすんでいる。
- かなりGlobalなコミュニティの一員としての考えが広がっている。