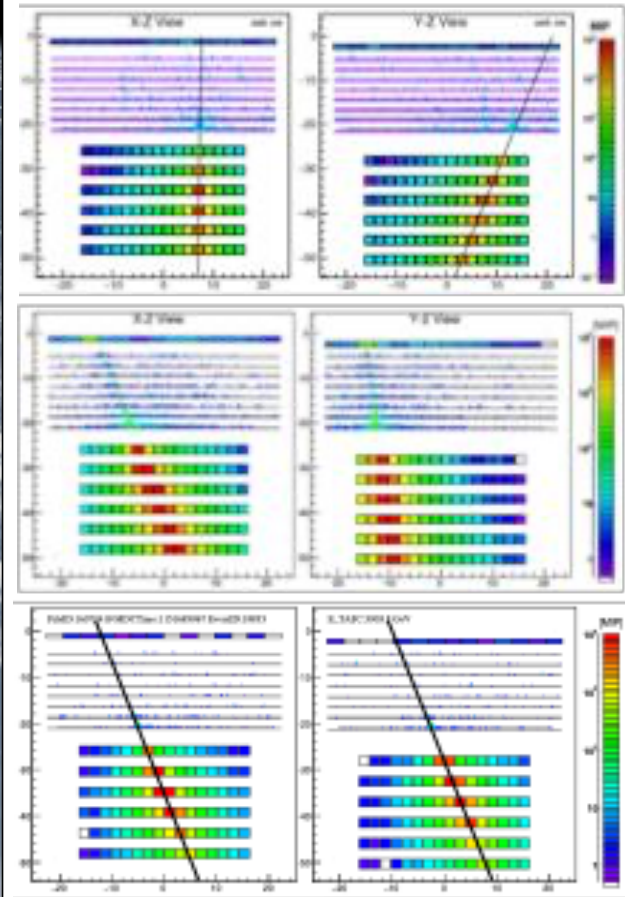
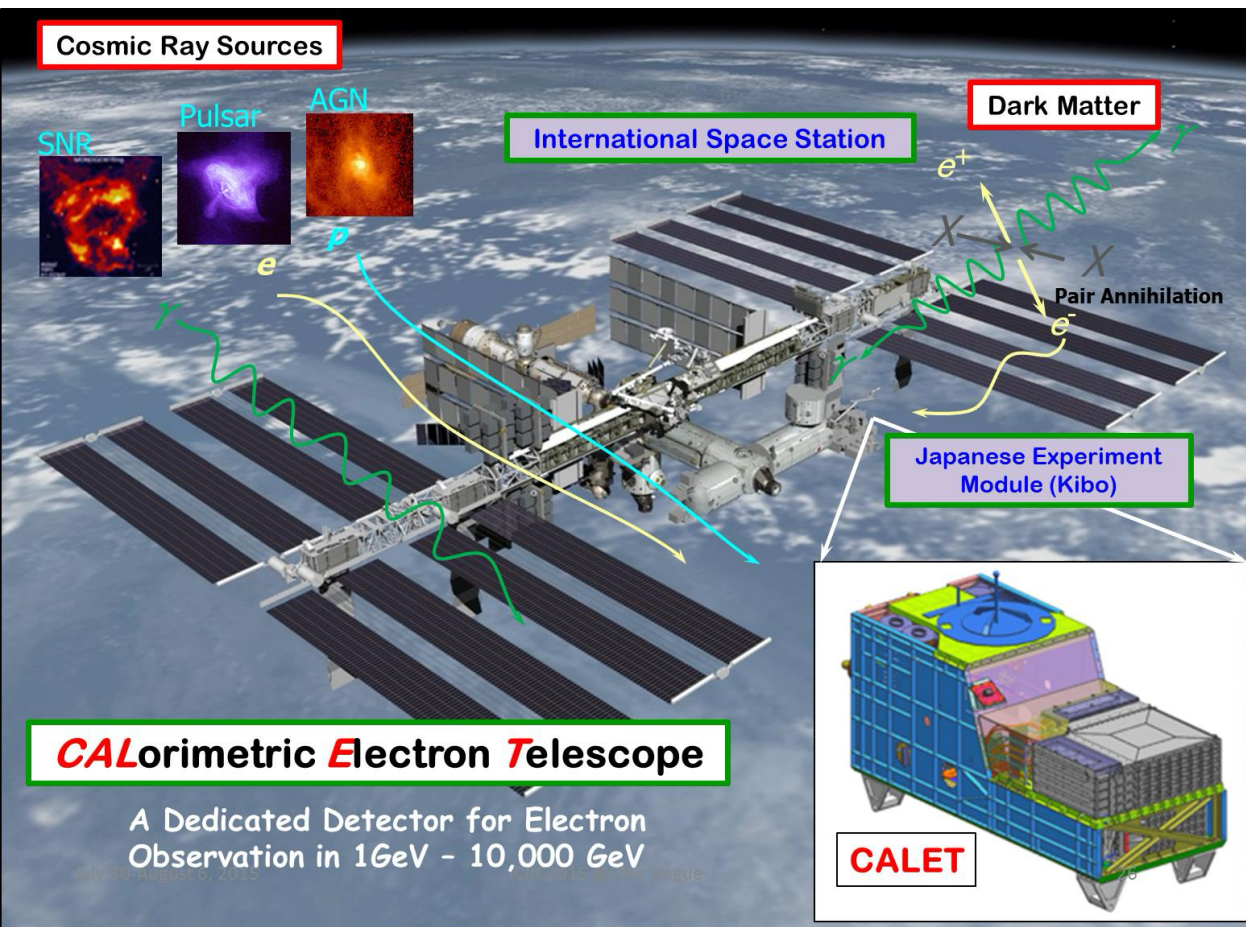


日本の宇宙線観測と CALETの成果への期待

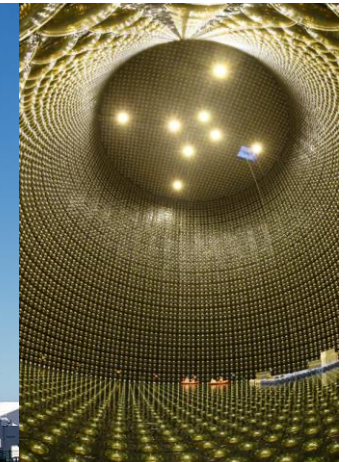


宇宙線物理学における世界の中核機関

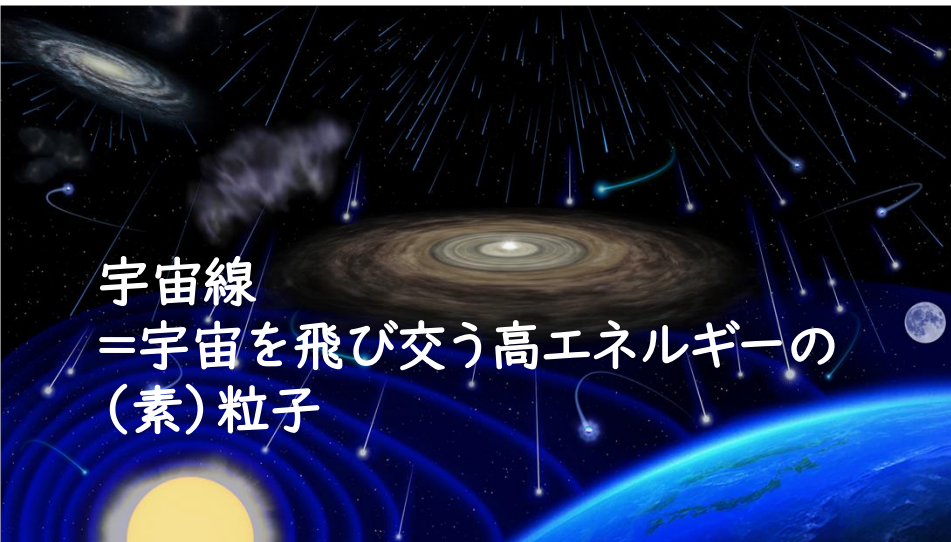
宇宙線・ガンマ線・ニュートリノ・重力波研究などを
国際的な共同利用・共同研究体制により推進



宇宙線国際研究拠点



宇宙線



宇宙線は宇宙を飛び交う高エネルギー(一粒あたりのエネルギーは可視光の一粒(=光子)の100億倍以上)の(素)粒子。主成分は水素原子核(=陽子)で、1912年に発見された。

宇宙線研究所は宇宙からのさまざまな形態の放射を広い意味の「宇宙線」と定義して、宇宙からのさまざまな「メッセンジャー」を検出し、ブラックホールなどが関係した宇宙の高エネルギー現象の研究、宇宙を支配する基本法則の研究で世界をリードする。



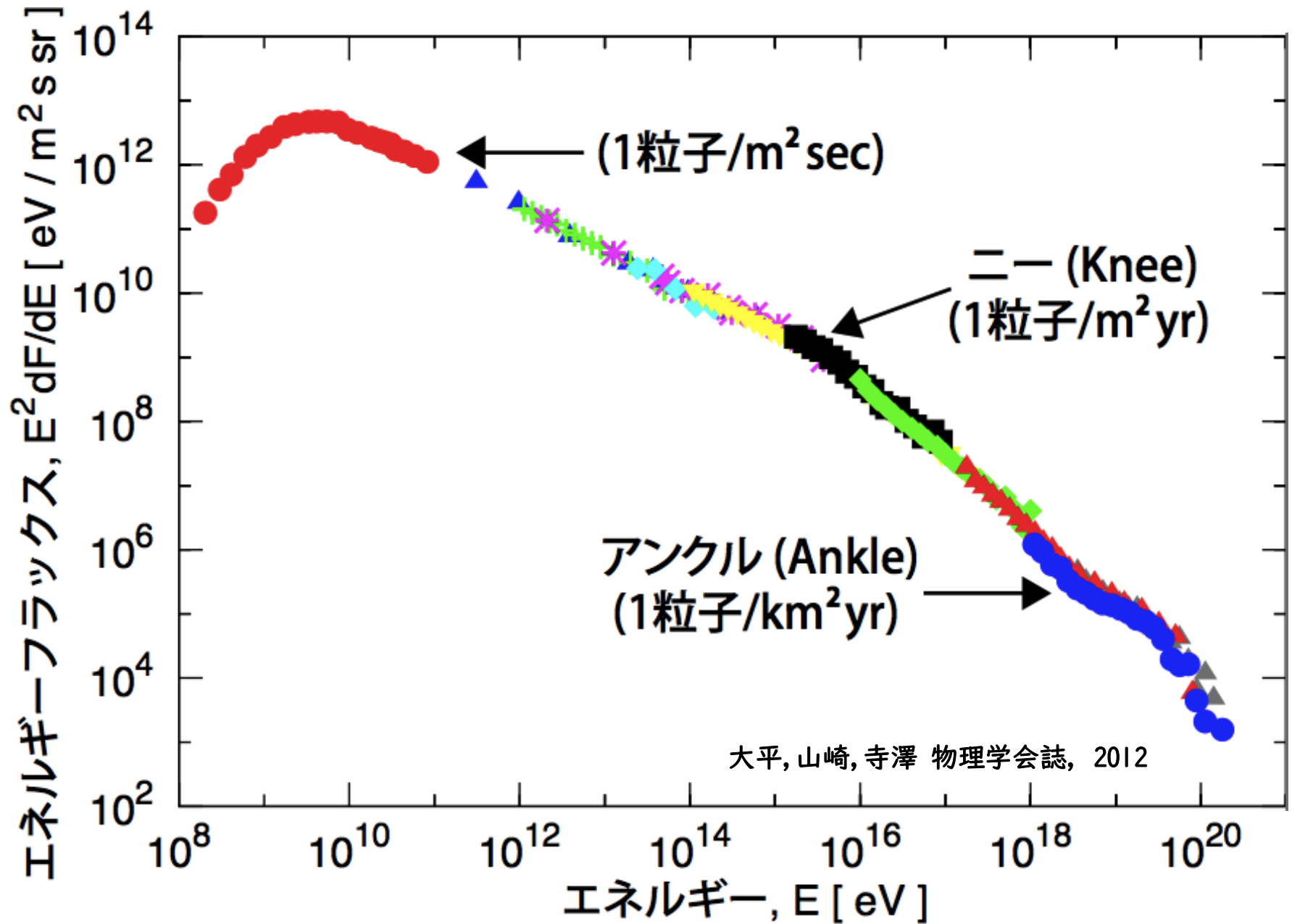
宇宙からのさまざまな形態の放射
=宇宙からの「メッセンジャー」

あらためて（狭い意味の）宇宙線

宇宙線
=宇宙を飛び交う高エネルギーの（素）粒子



宇宙線のエネルギースペクトル



銀河系（天の川銀河）



宇宙線は銀河系のメインプレイヤー

宇宙線

エネルギー $\sim 10^9$ eV

数密度 $\sim 10^{-9}$ 個/cm³

エネルギー密度 ~ 1 eV/cm³

銀河内の熱的粒子

エネルギー ~ 1 eV

数密度 ~ 1 個/cm³

エネルギー密度 ~ 1 eV/cm³

銀河内の光

~ 1 eV/cm³



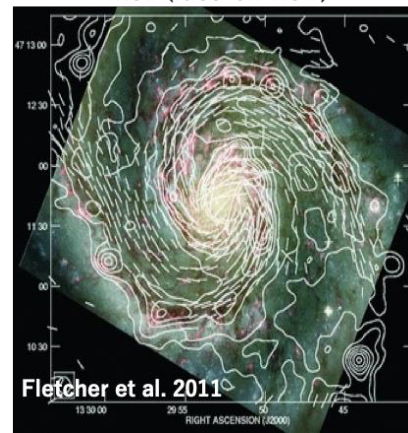
Credit: ESA/Gaia/DPAC, Stefan Payne-Wardenaar

銀河内の磁場

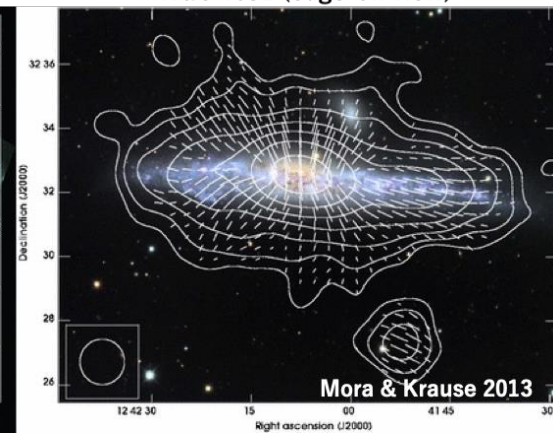
磁束密度 $\sim 3 \times 10^{-10}$ テスラ

エネルギー密度 ~ 1 eV/cm³

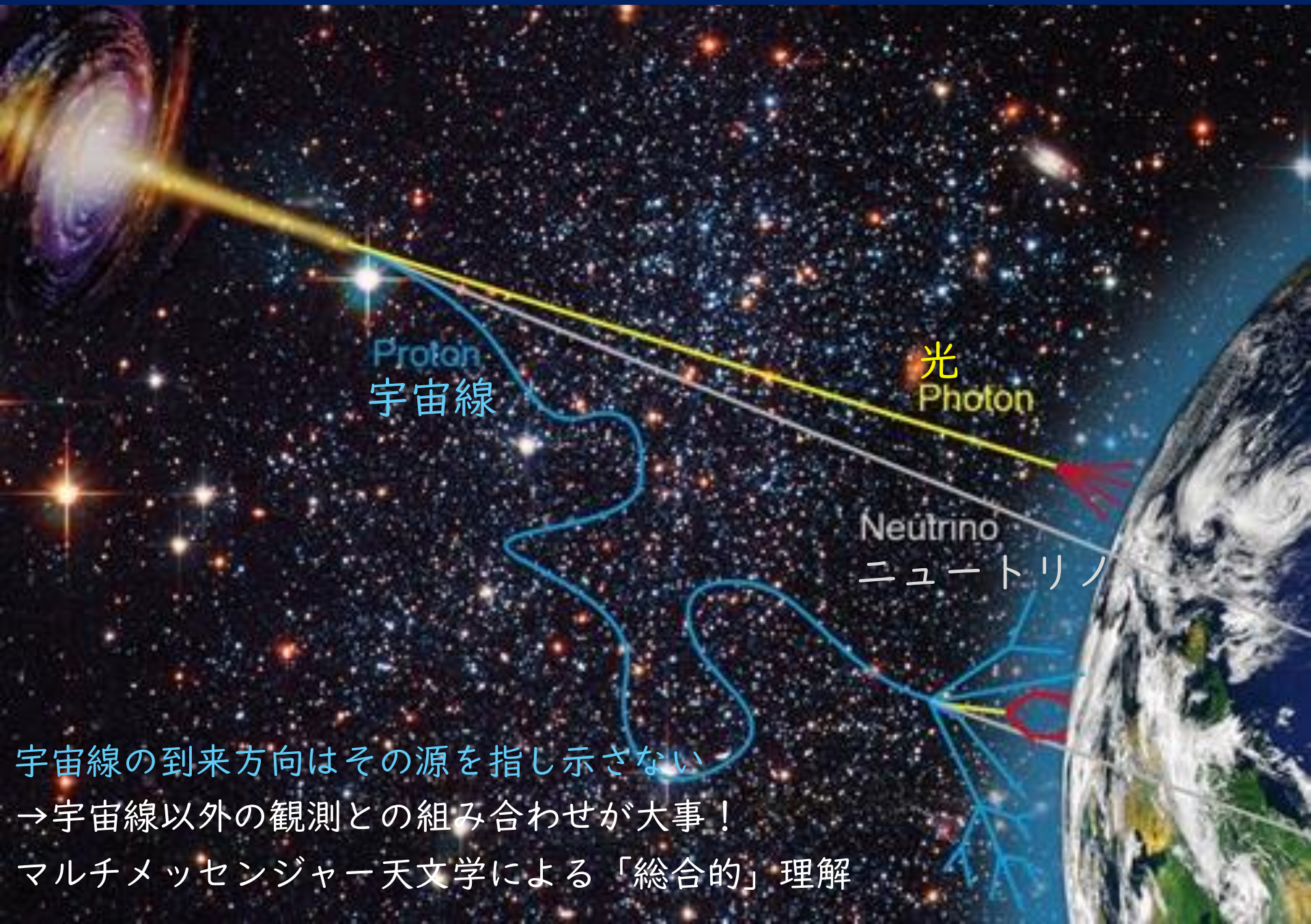
M51 (face-on view)



NGC 4631 (edge-on view)



宇宙線は宇宙を真っ直ぐ飛べない



Proton
宇宙線

光
Photon

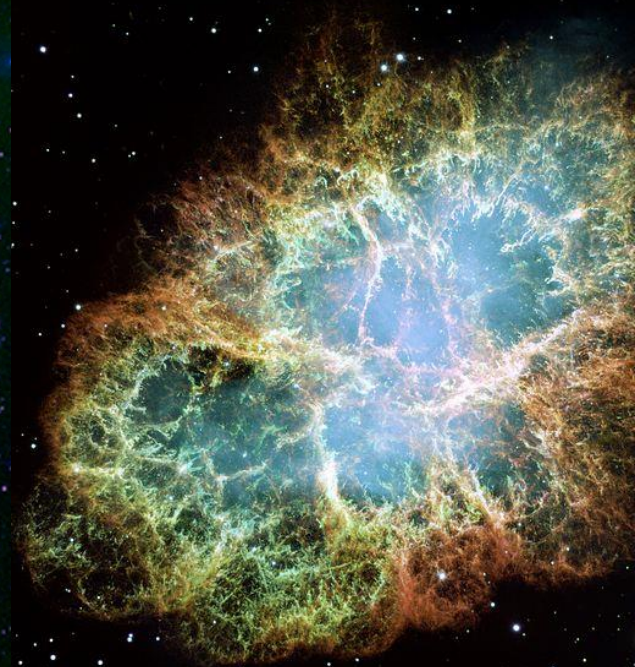
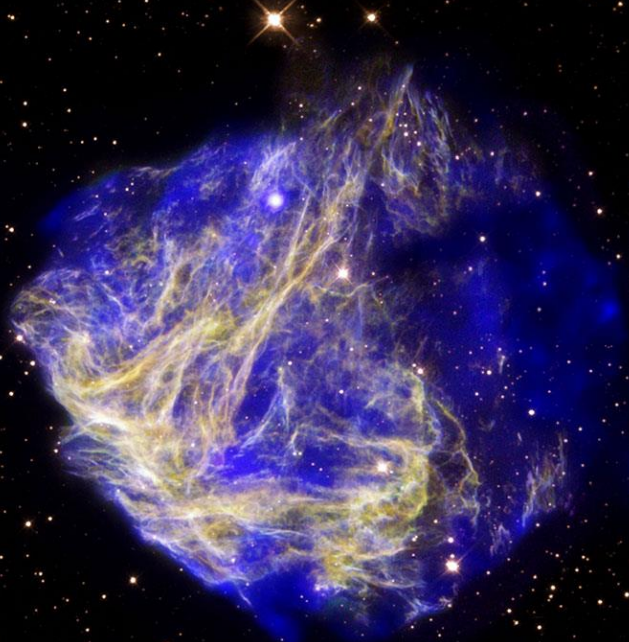
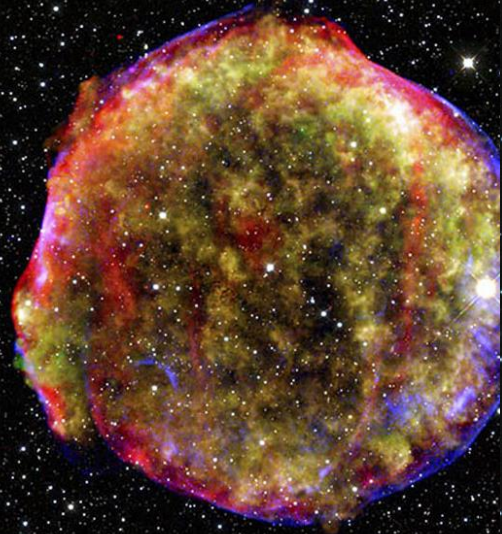
Neutrino
ニュートリノ

宇宙線の到来方向はその源を指し示さない
→宇宙線以外の観測との組み合わせが大事！
マルチメッセンジャー天文学による「総合的」理解

とはいえ、候補あるでしょ？

あります！

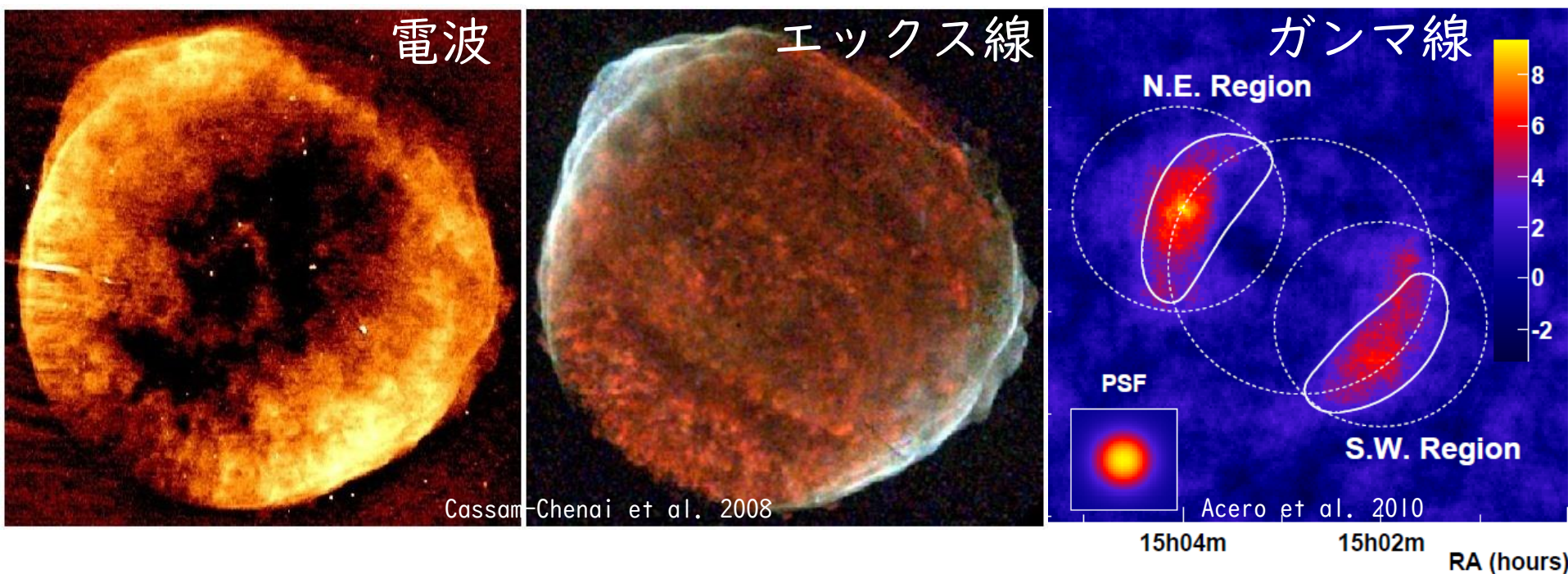
超新星残骸



銀河宇宙線の源は超新星残骸？

超新星残骸とは星の大爆発(超新星爆発)の残骸

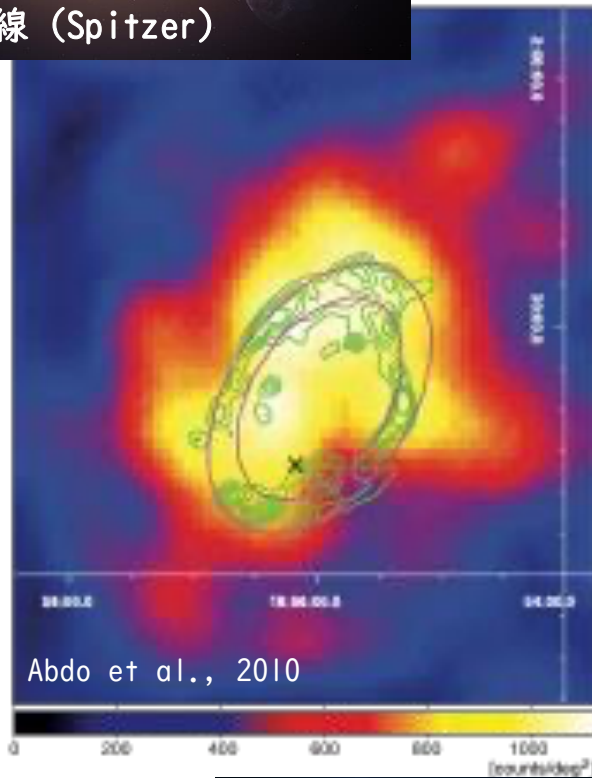
広がり：1～100光年、膨張速度：300～10,000 km/s、
爆発エネルギー： 10^{44} ジュール、頻度：銀河系内で30年に1度



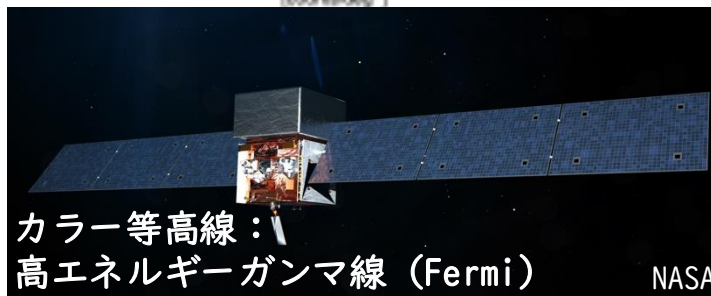
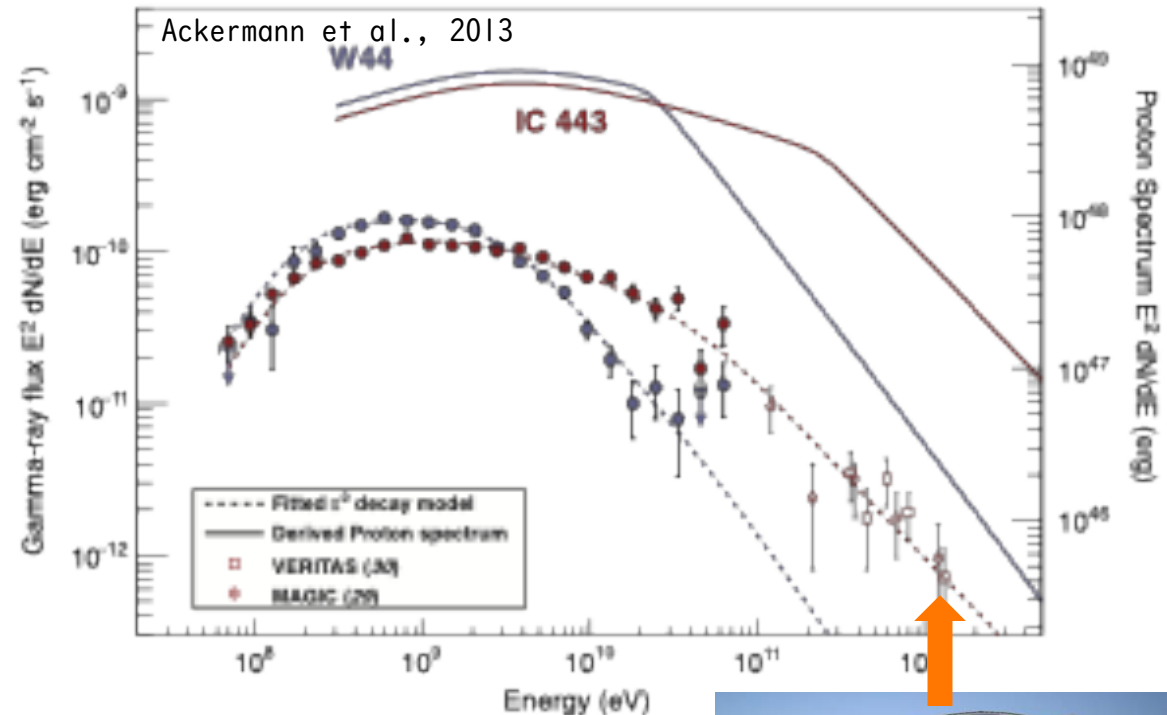
宇宙線源として有力視される理由：

- ガンマ線観測結果は 10^{13} eVまでの荷電粒子加速を示唆
- 爆発エネルギーの10%を宇宙線に渡せばよい
- 太陽組成と宇宙線組成の違い

宇宙線原子核加速の証拠



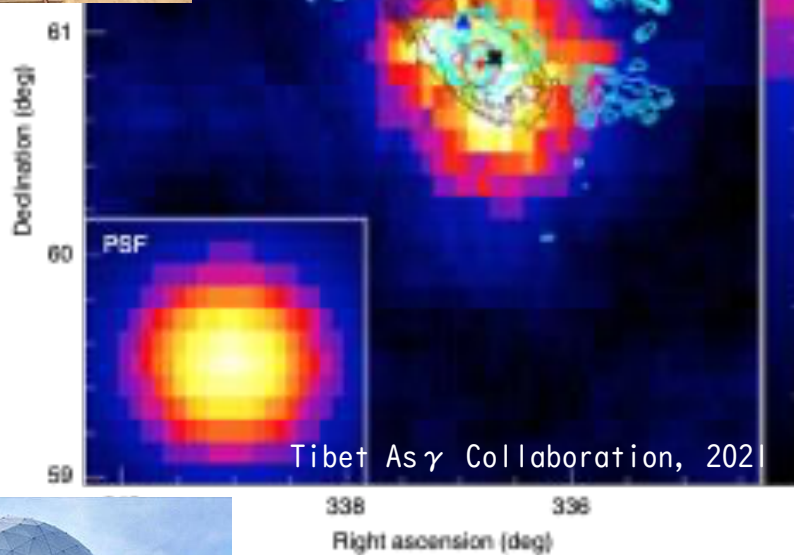
- 衝撃波を受けた水素分子ガスから高エネルギーガンマ線が放射されている
- $10^{11} \sim 10^{12}$ eVまでの宇宙線陽子の存在を示唆



10^{15} eVまで加速！ (PeVatron)



黒等高線：
1.42GHz電波

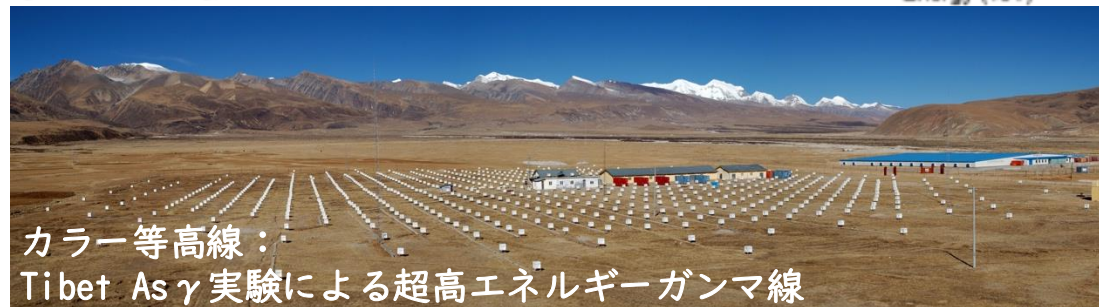
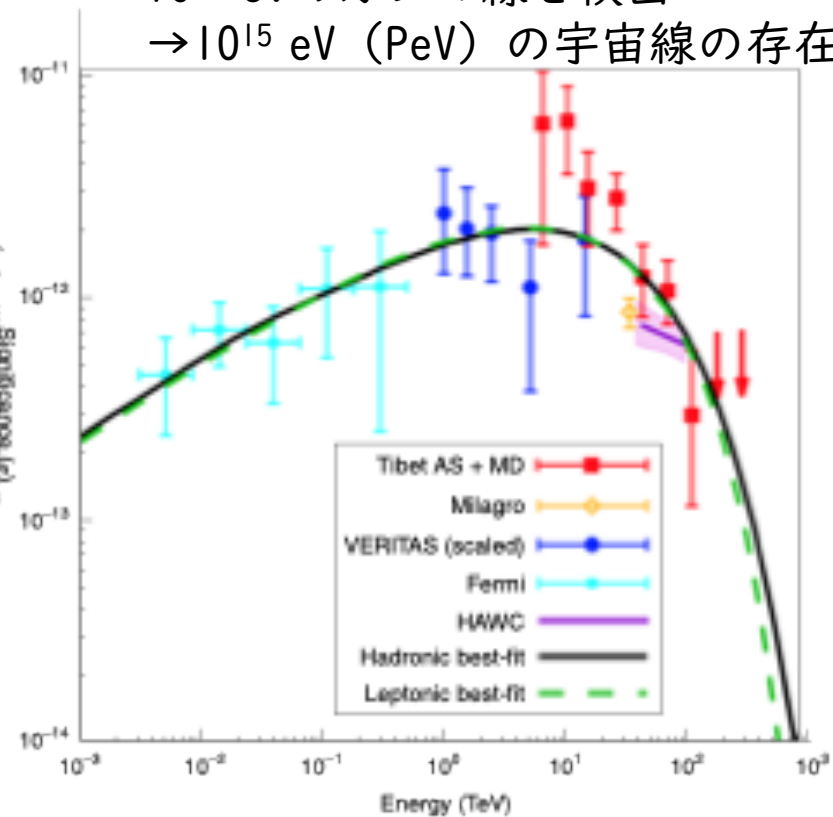


Tibet As γ Collaboration, 2021



青等高線：
CO分子雲電波

10^{14} eVのガンマ線を検出
→ 10^{15} eV (PeV) の宇宙線の存在



カラー等高線：
Tibet As γ 実験による超高エネルギーガンマ線

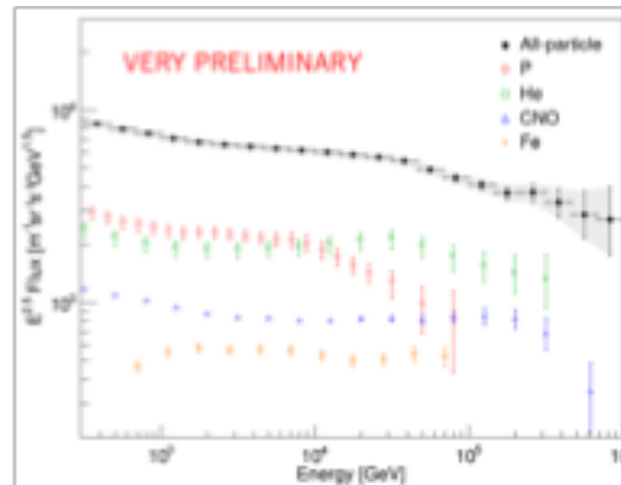
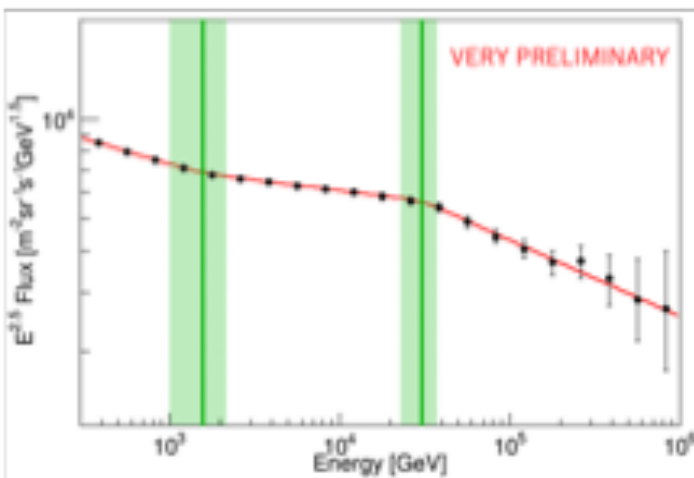
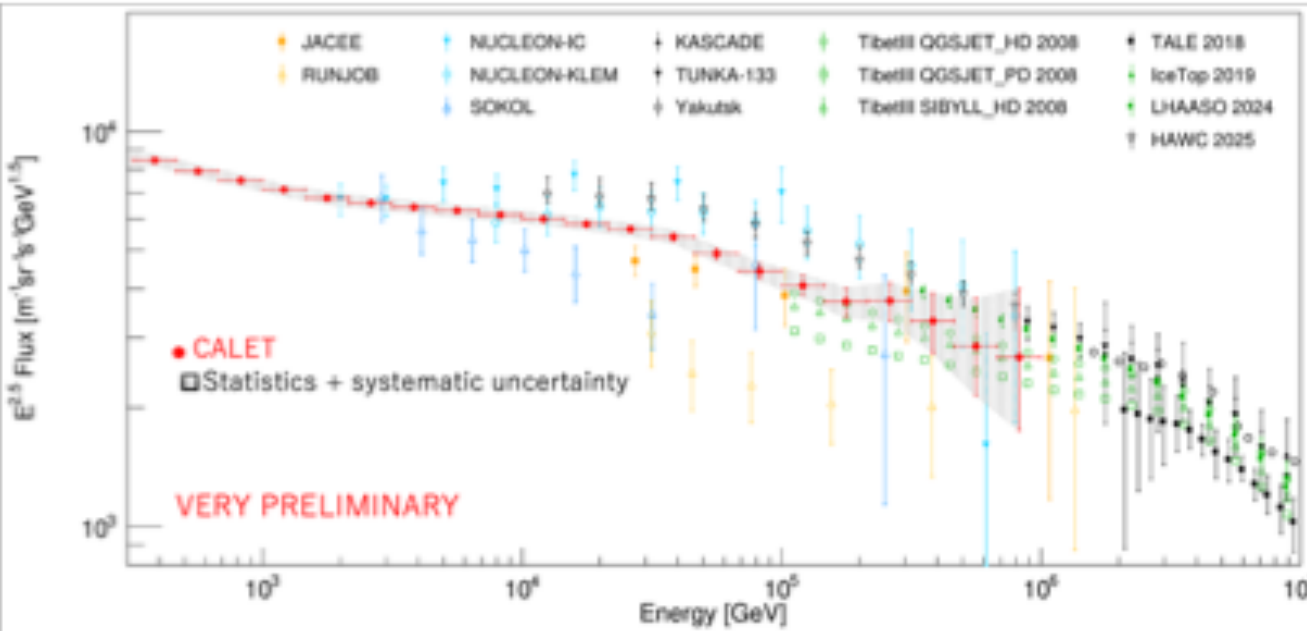
CO分子雲観測：Five College Radio Astronomy Observatory

1.42GHz電波観測：The Synthesis Telescope at the Dominion Radio Astrophysical Observatory

CALETへの期待：宇宙線の起源、伝播機構←組成比の精密測定

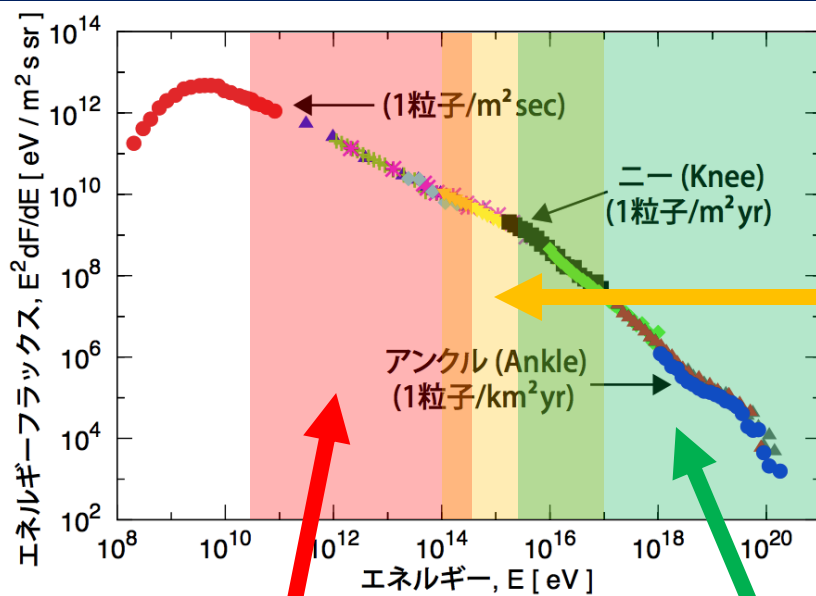
CALETの観測に基づく
全粒子スペクトル
 $3 \times 10^{11} - 10^{15}$ eV
広いエネルギー範囲
地上間接測定領域に到達

単一のべきではなく、
折れ曲がり構造がある
@ 2×10^{12} eV, 3×10^{13} eV



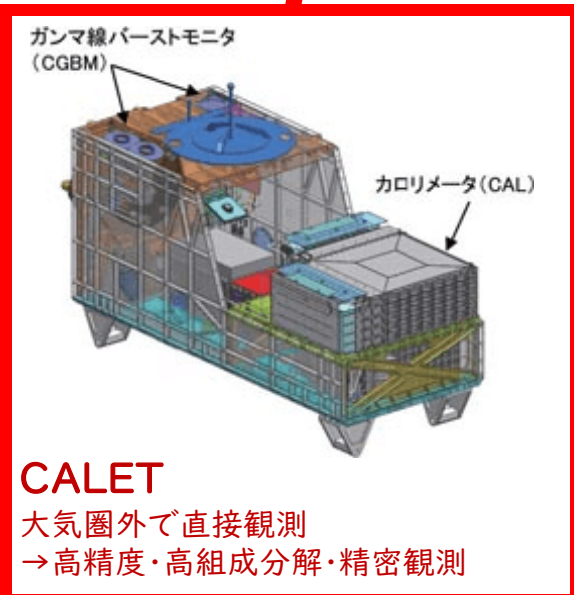
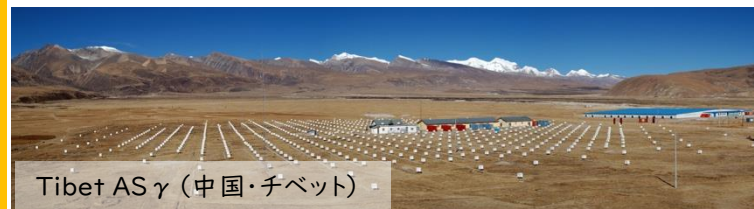
折れ曲がり構造と
宇宙線原子核組成の関係
←組成比のエネルギー変化
=組成ごとのスペクトル

CALETへの期待：宇宙線の起源、伝播機構←組成比の精密測定



Tibet As γ ・ALPACA実験

海拔4千メートル超、高密度配置空気シャワーアレイ+地下ミュオン検出器
→ガンマ線に高い感度。原子核組成測定も可能

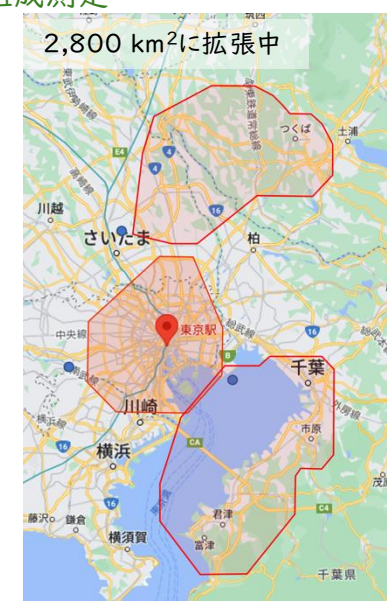
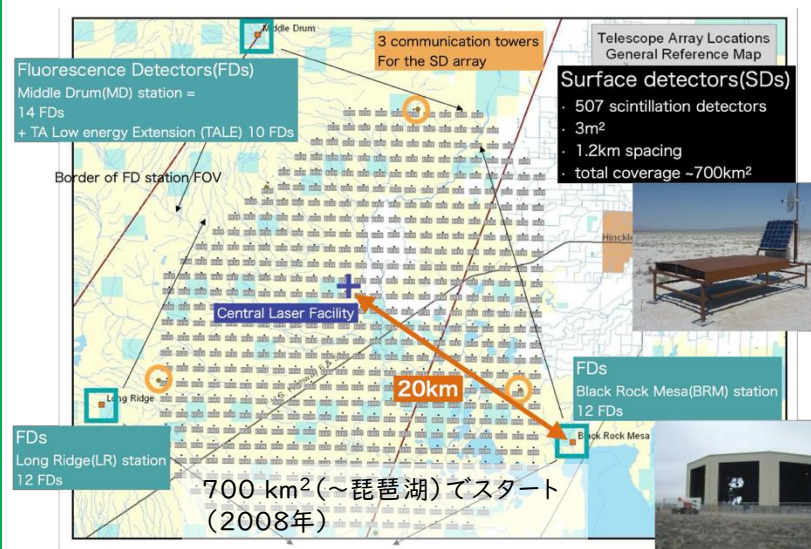


CALET

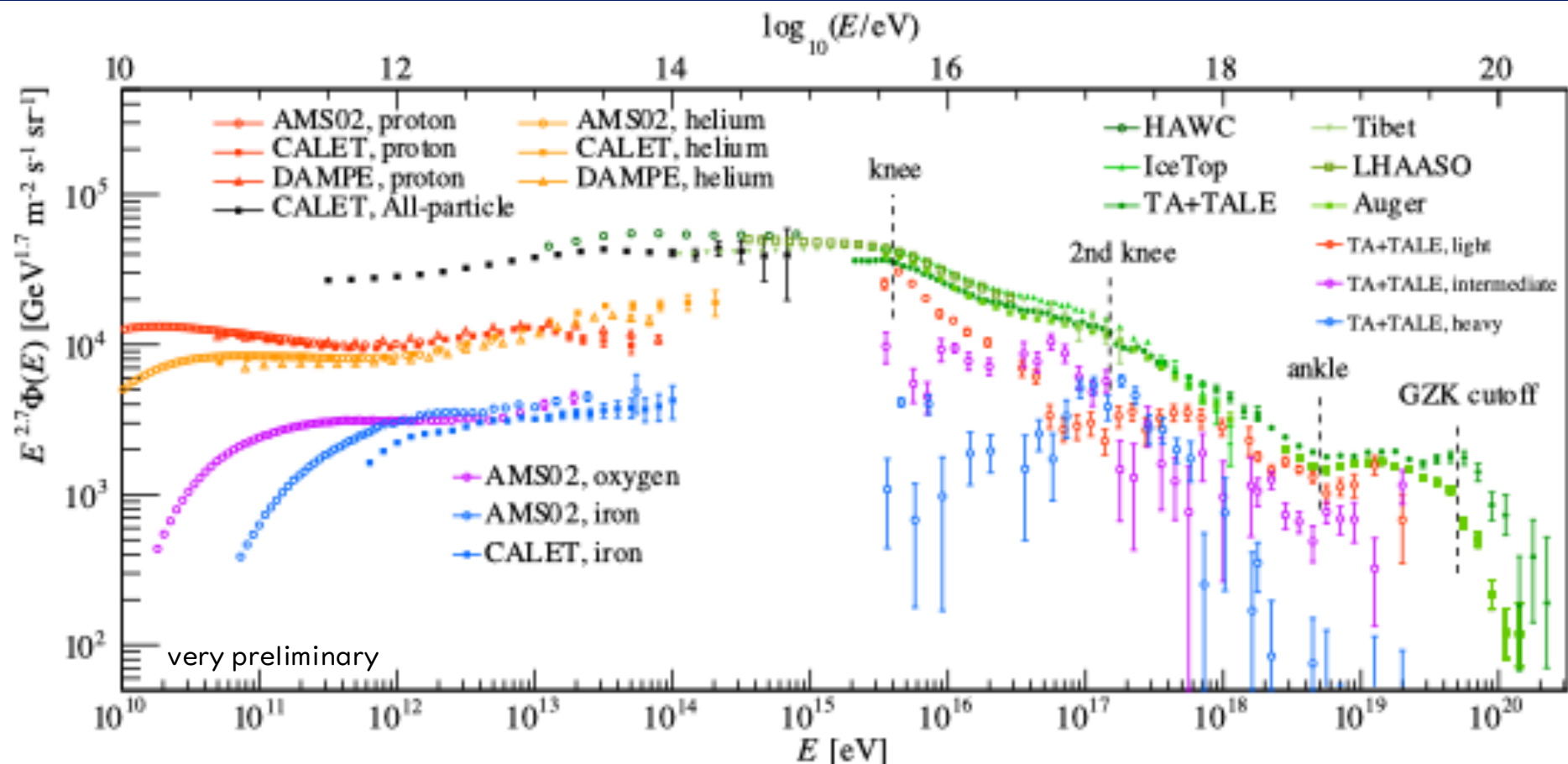
大気圏外で直接観測
→高精度・高組成分解・精密観測

テレスコープアレイ実験 (米国・ユタ州)

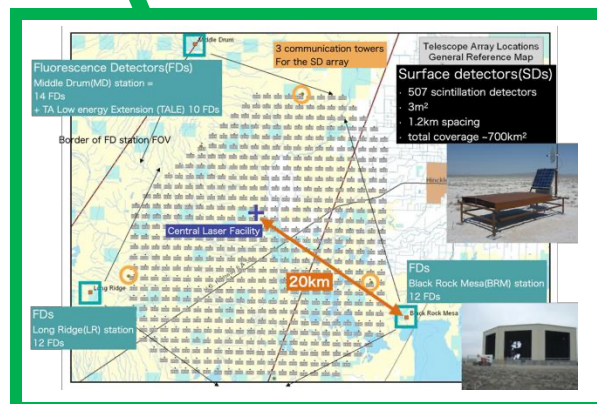
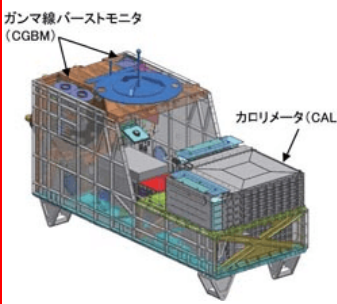
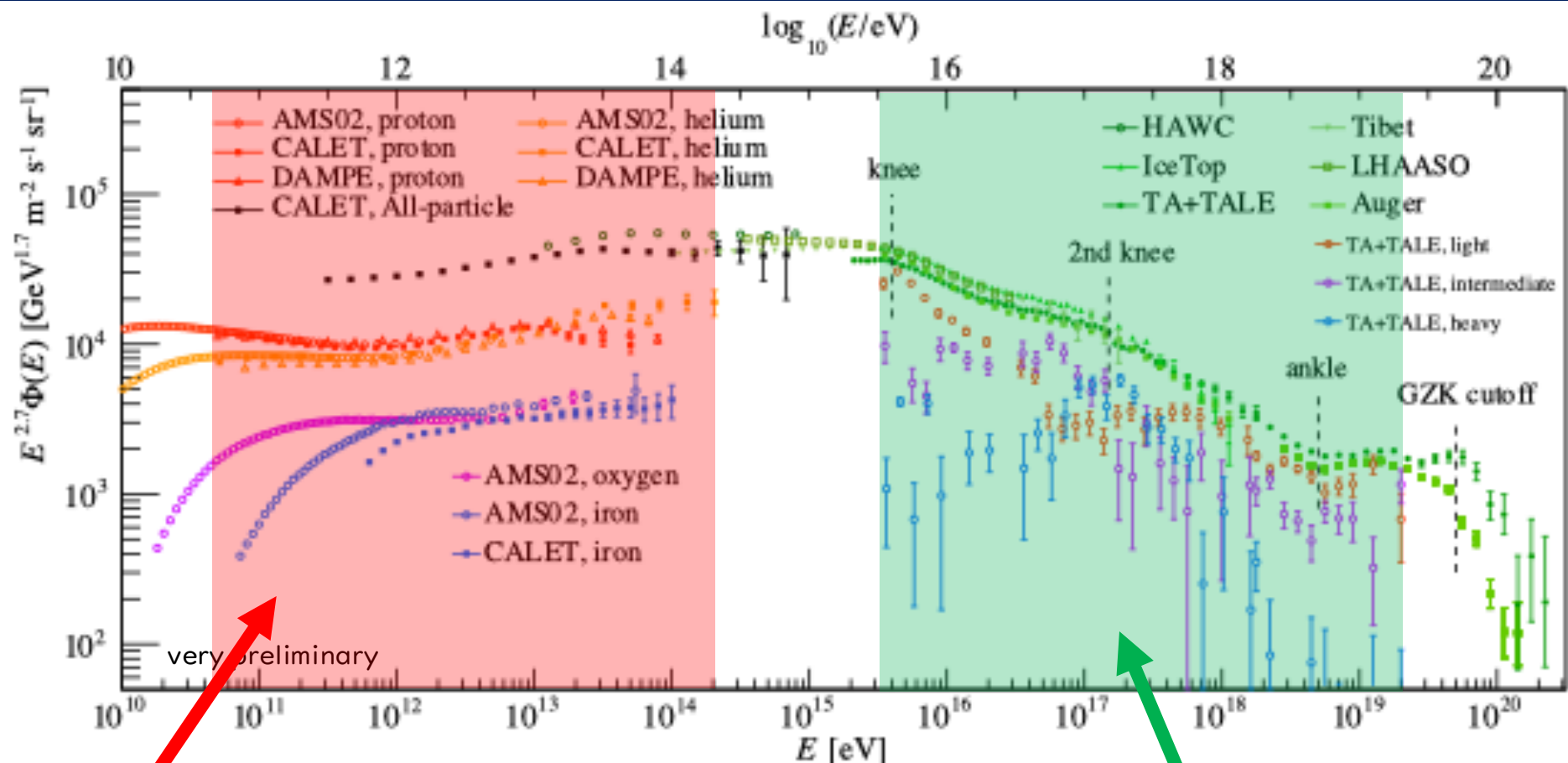
世界最大級の宇宙線観測装置、ハイブリッド観測による原子核組成測定
→ $10^{15.5} \text{ eV}$ から 10^{20} eV 超まで広いエネルギー範囲をカバー



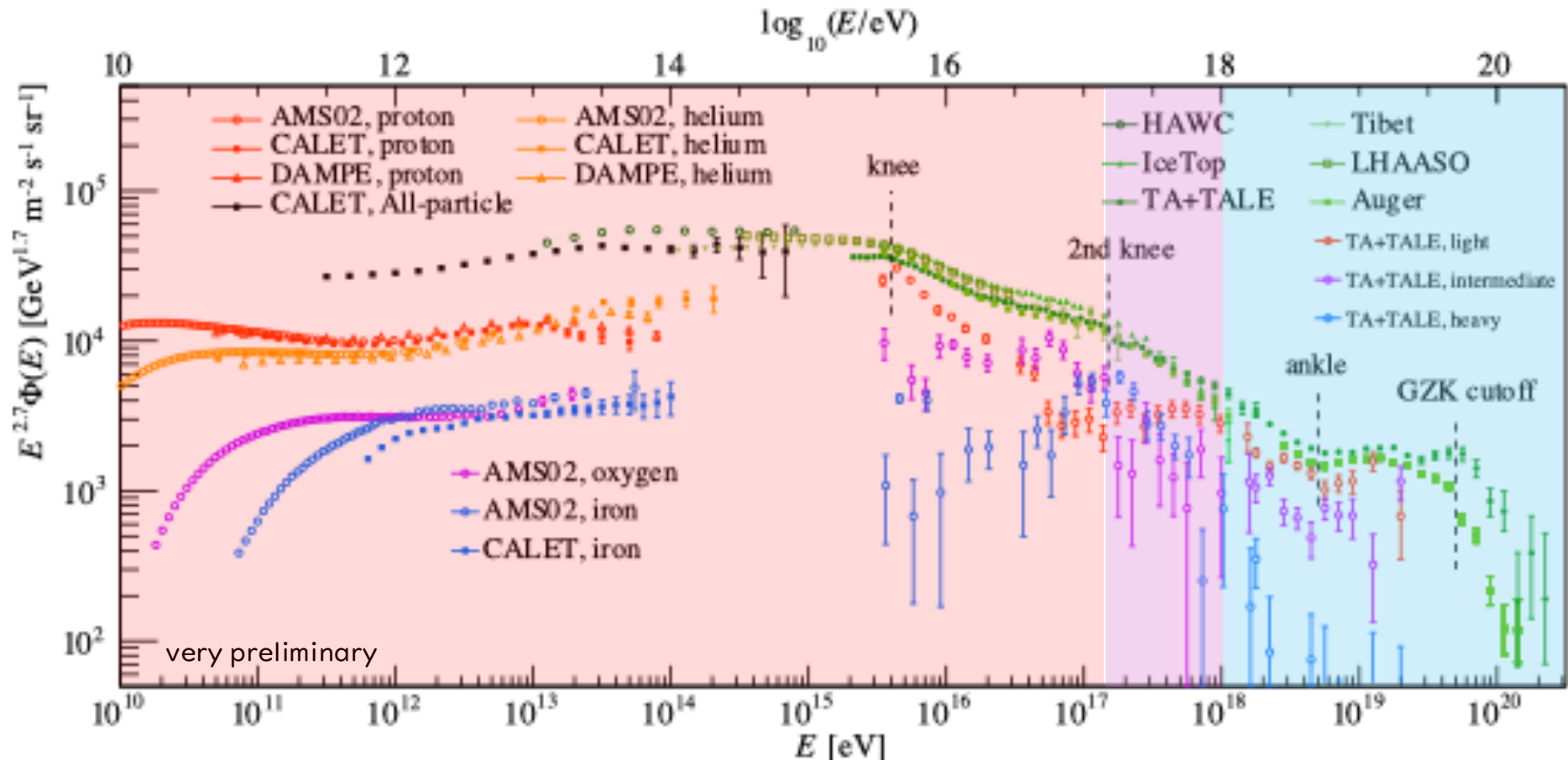
CALETへの期待：宇宙線の起源、伝播機構←組成比の精密測定



CALETへの期待：宇宙線の起源、伝播機構←組成比の精密測定



CALETへの期待：宇宙線の起源、伝播機構←組成比の精密測定



銀河系内 (PeVatron?)

遷移領域

銀河系外

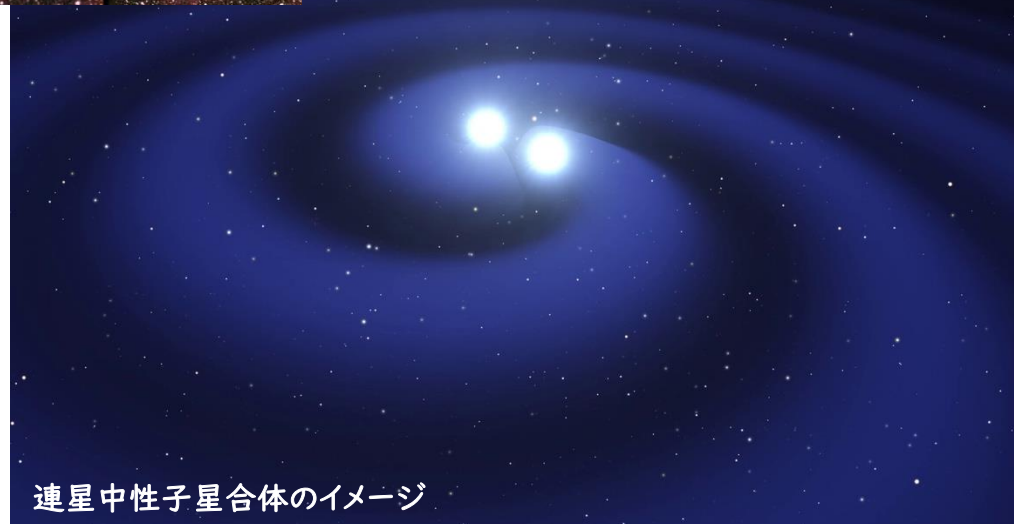
(個人的な考え)

- 銀河系内源は1成分 (PeVatron) のみで良いか (TeV $\sim$ 10TeVでの折れ曲がり構造)?
- スペクトルの折れ曲がり、加速機構／伝播機構、どちらを反映?
- 銀河系外源も1成分で説明できるか?
- 遷移領域できれいに繋がっているのはなぜ?
- 最高エネルギー端の組成は重原子核なのか? 混合組成の可能性は?

CALETへの期待：マルチメッセンジャー天文学の一翼を



宇宙突発現象の
「マルチメッセンジャー観測」

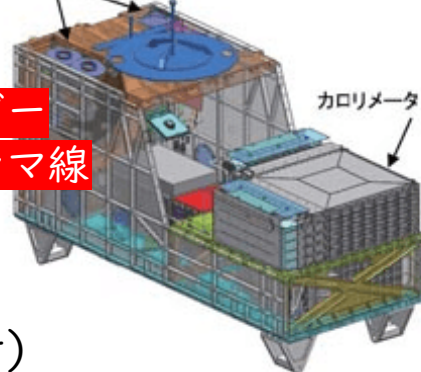


ガンマ線バーストモニター
(CGBM)

カロリメータ (CAL)

高エネルギー
宇宙線・ガンマ線

CALET実験
(ISS, 日米伊)



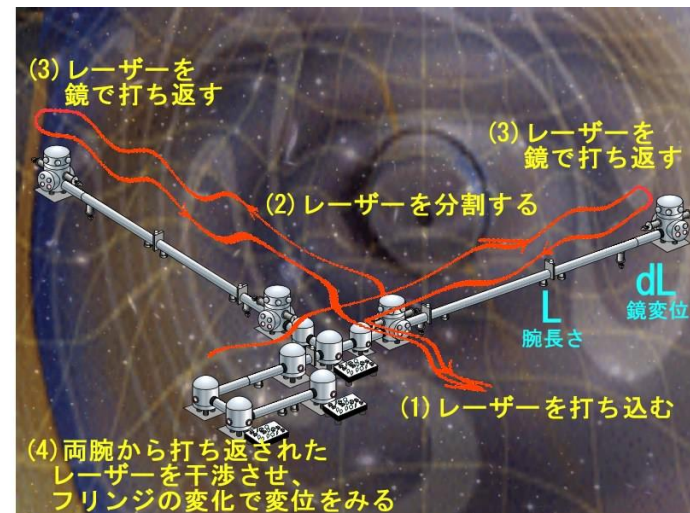
高エネルギー
ガンマ線

CTAO (スペイン/チリ)

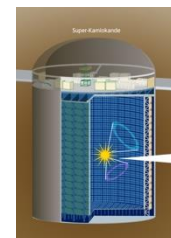


重力波

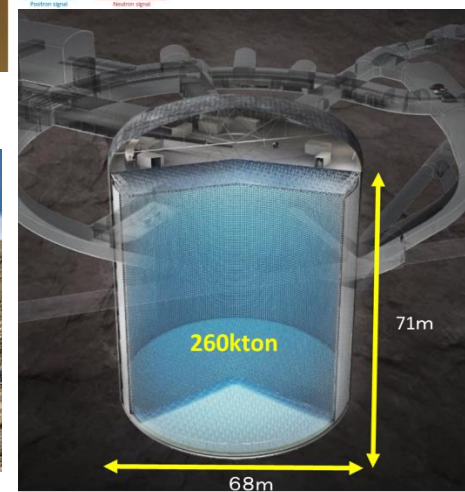
KAGRA (岐阜県飛騨市)



ニュートリノ



SK・HK
(岐阜県飛騨市)



まとめ・CALETの今後に期待すること

- 地球大気外での直接観測の大きな意義
 - スペクトルの変化など、精密観測で初めて見えてくる構造（地上間接観測では到達できない高精度と高信頼度）
- 原子核種ごとのエネルギー・スペクトル
 - 宇宙線生成・加速源解明への重要な手がかり
- 地上間接観測（空気シャワー観測）領域への接続も大切
 - 空気シャワー観測の較正・高精度化
- 電子成分観測は近傍加速天体の検出や暗黒物質の探索の貴重なデータ
- 1次宇宙線と2次宇宙線の存在比、それらのエネルギー変化
 - 宇宙線の伝播（源や銀河系内における閉じ込め機構）の解明への重要な手がかり
- マルチメッセンジャー天文学の一翼を！
- 太陽活動周期に対応する11年程度の長期観測による太陽磁気圏現象の研究にも期待

CALETの成果への期待 ーメッセージー

梶田隆章

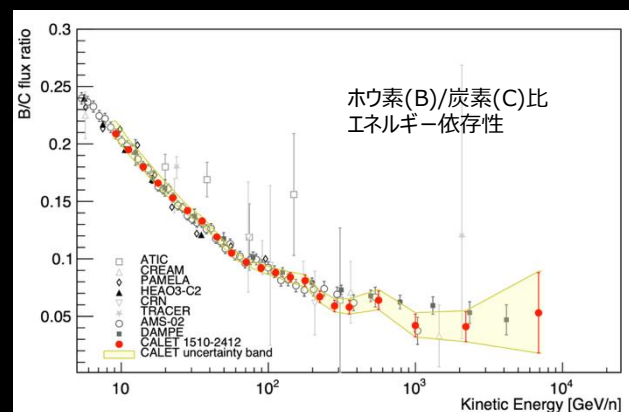
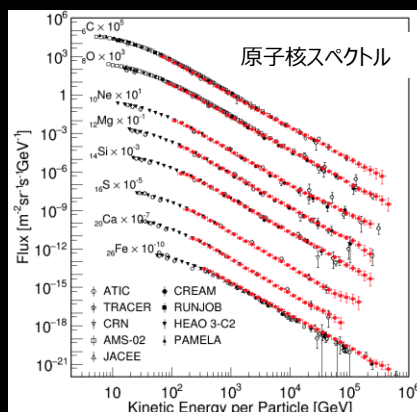
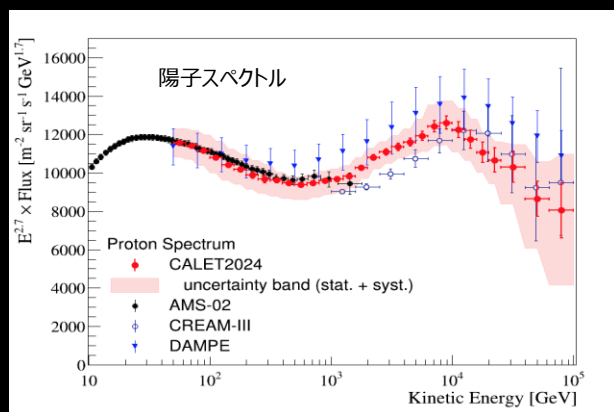
次世代ニュートリノ科学・マルチメッセンジャー天文学
連携研究機構（NNSO） 機構長

「国際宇宙ステーション搭載CALET観測10 周年記念シンポジウム」
の開催、おめでとうございます。

CALETは、2015年に宇宙ステーションに設置されて以来、10年以上
にわたって高エネルギー宇宙線を精密に観測してきたことは本当に素晴
らしいと思います。

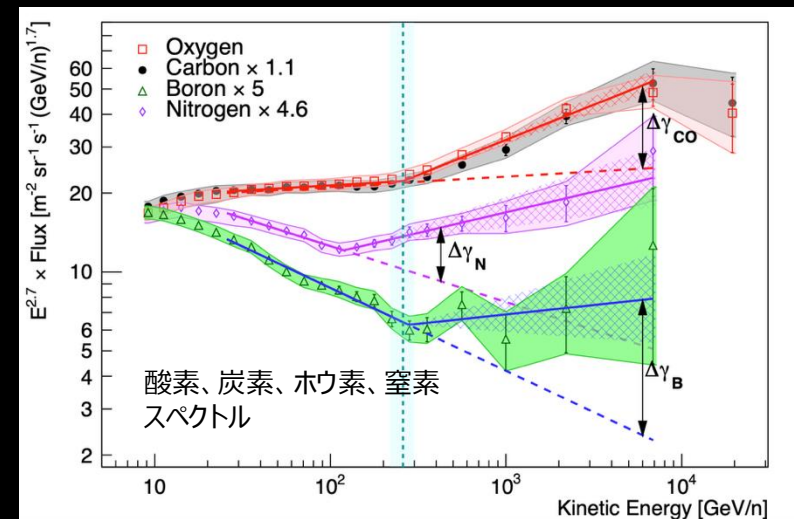
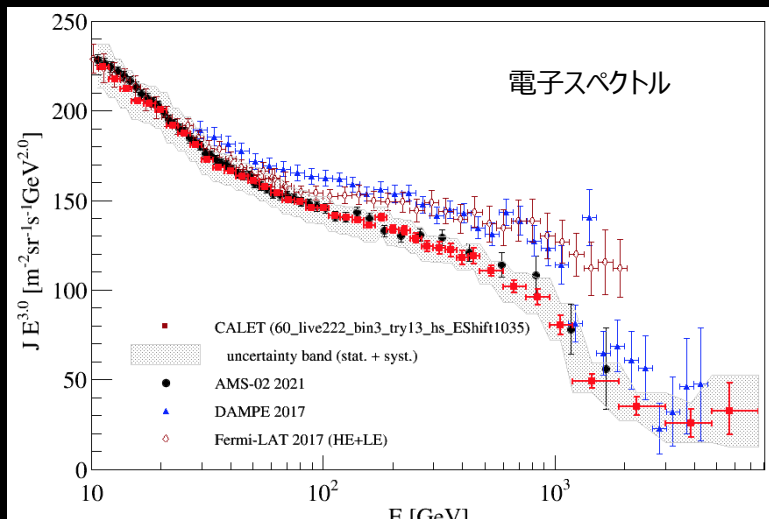
私たちが若い頃は、宇宙線陽子のスペクトルとしては、シンプルな冪で数PeVあたりにいわゆるkneeがあって、エネルギースペクトルが折れ曲がって急になるように聞いてました。しかし、CALETはその高いエネルギー分解能と粒子識別能力により、これまでの観測では見えなかった宇宙線エネルギースペクトルの構造を明らかにしてきました。陽子スペクトルでは670 GeVあたりで冪が緩やかになり、更に10TeVあたりで冪が急になることを示しており、ひと昔前の理解とは隔世の感があります。

また、鉄にいたるまでの各宇宙線核種のエネルギースペクトルを100TeVを超える範囲まで精密に測定したことも我々の宇宙線の理解にとって非常に貴重なデータとなっています。特にB/C比のエネルギー依存性の精密測定は宇宙線の伝搬の理解にとって極めて重要です。



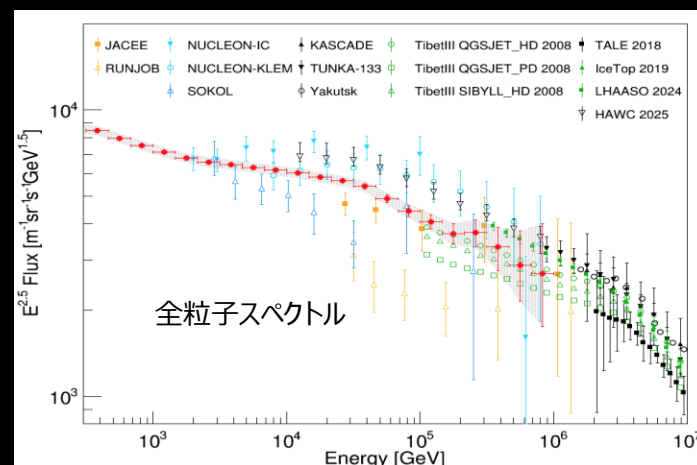
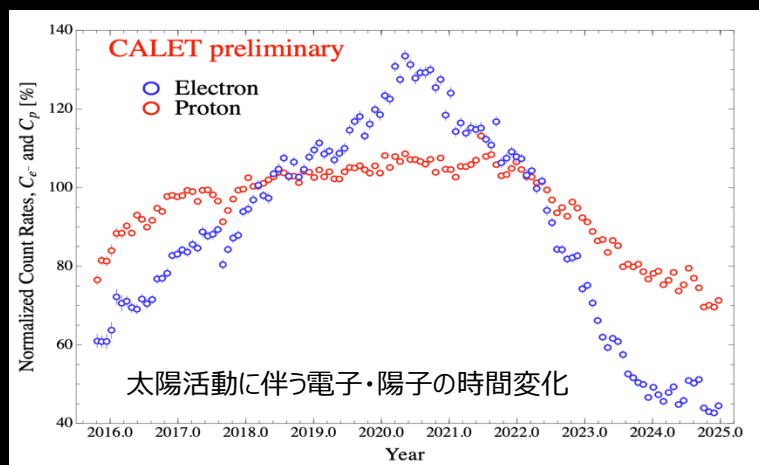
また宇宙線電子のエネルギースペクトルを広い範囲で精密に測定し、1TeVあたりで冪が急になり、そして見方によっては、数TeV以上で冪が緩やかになっているように見えることも非常に興味をそそられます。なぜ電子のエネルギースペクトルは1TeV付近で急激に冪が急になっているのか、数TeVで冪が緩やかになっているように見えるのは何故なのか？

また、先ほど話した各宇宙線核種のエネルギースペクトルも、今までの観測でいろいろな面白い構造が見えているので、更に高いエネルギーまで調べてもらいたいとの思いもあります。



更には、これらの高エネルギー宇宙線には、標準的に太陽活動の影響と考えられている時間変化以外の時間変化がないのかなどの点も長期に亘る観測で調べてほしいと思います。

是非CALETには今後も観測とデータ解析を続けて、宇宙線の理解に不可欠なデータを提供し続けてほしいと思います。



今までのCALETの活躍に敬意を表すると共に、今後のCALETの更なる活躍に期待をしています。