

CALETによる重原子核の高精度観測



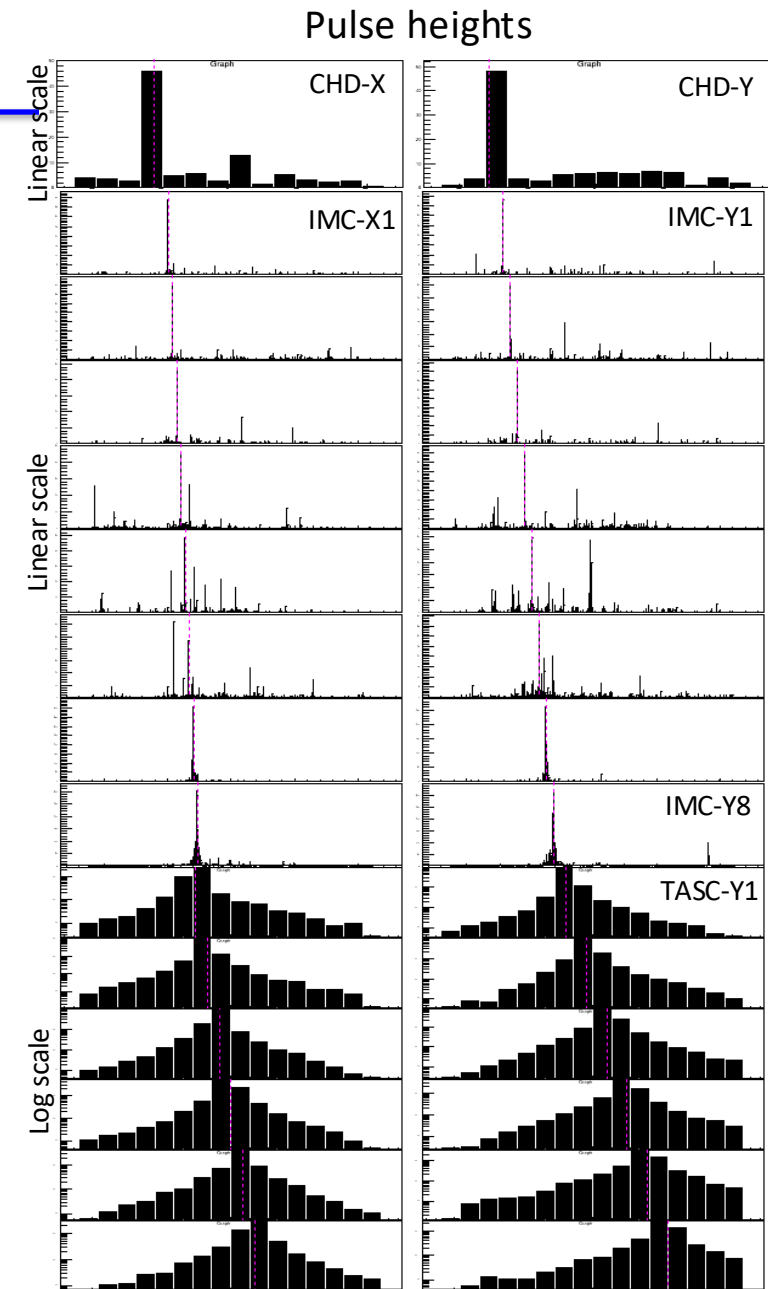
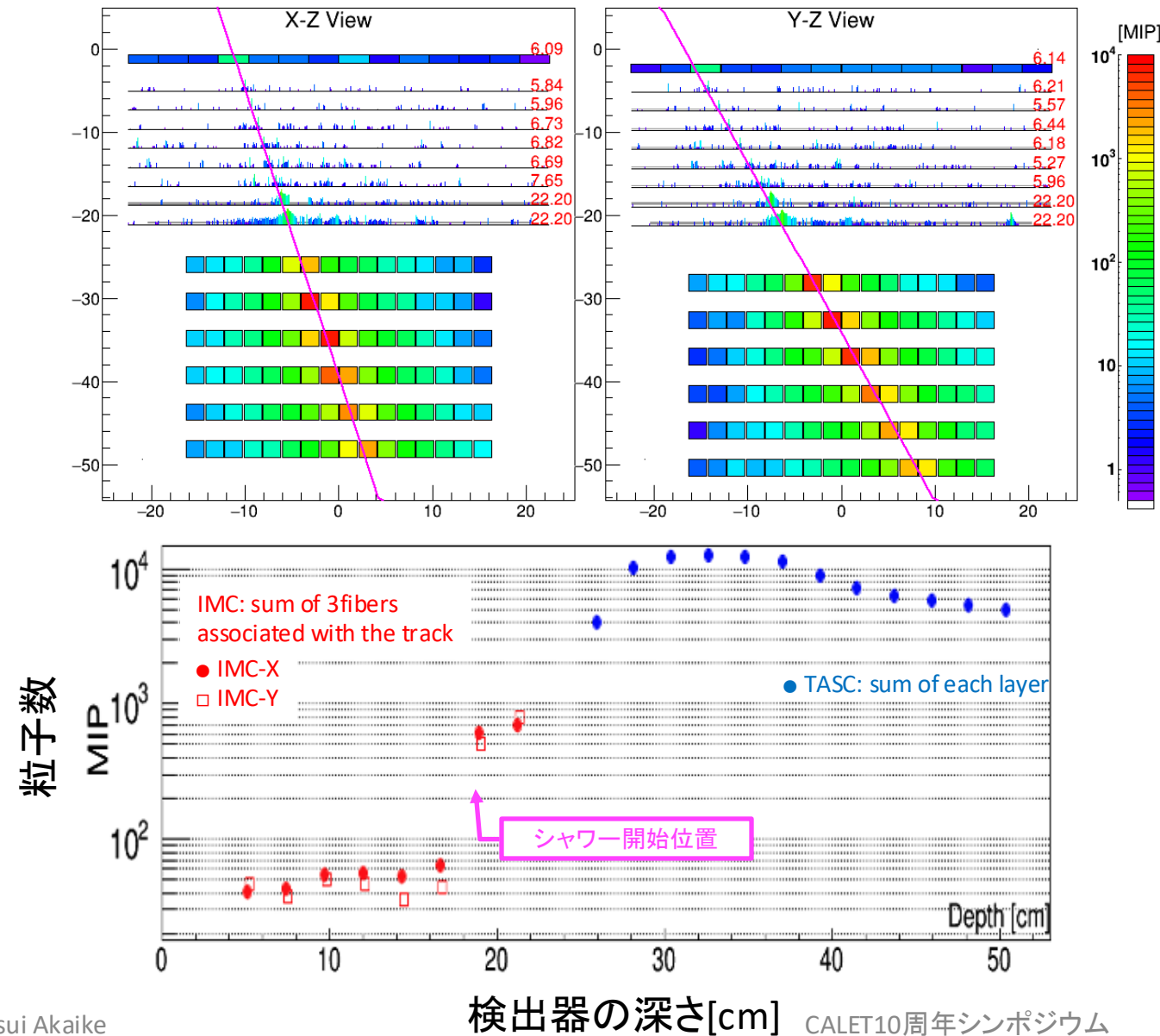
早稲田大学理工学術院総合研究所

赤池陽水

(早稲田大学 鳥居研究室2011年度博士卒)

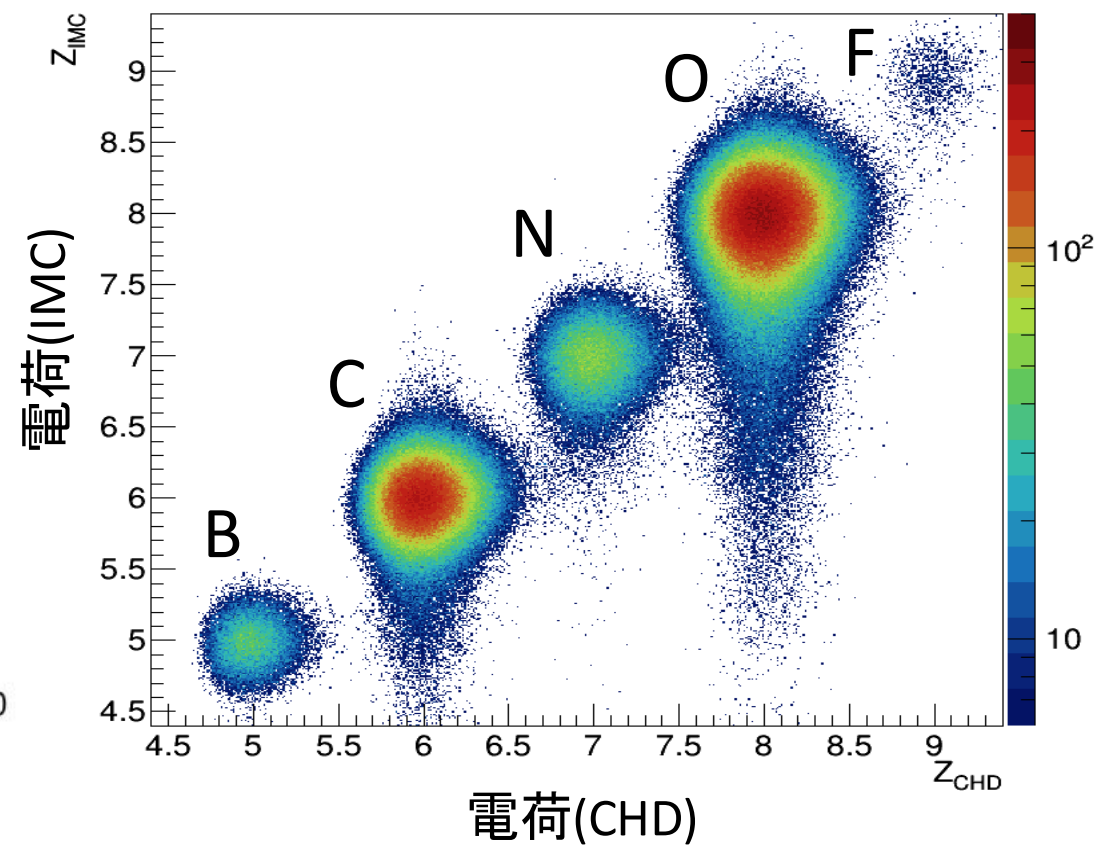
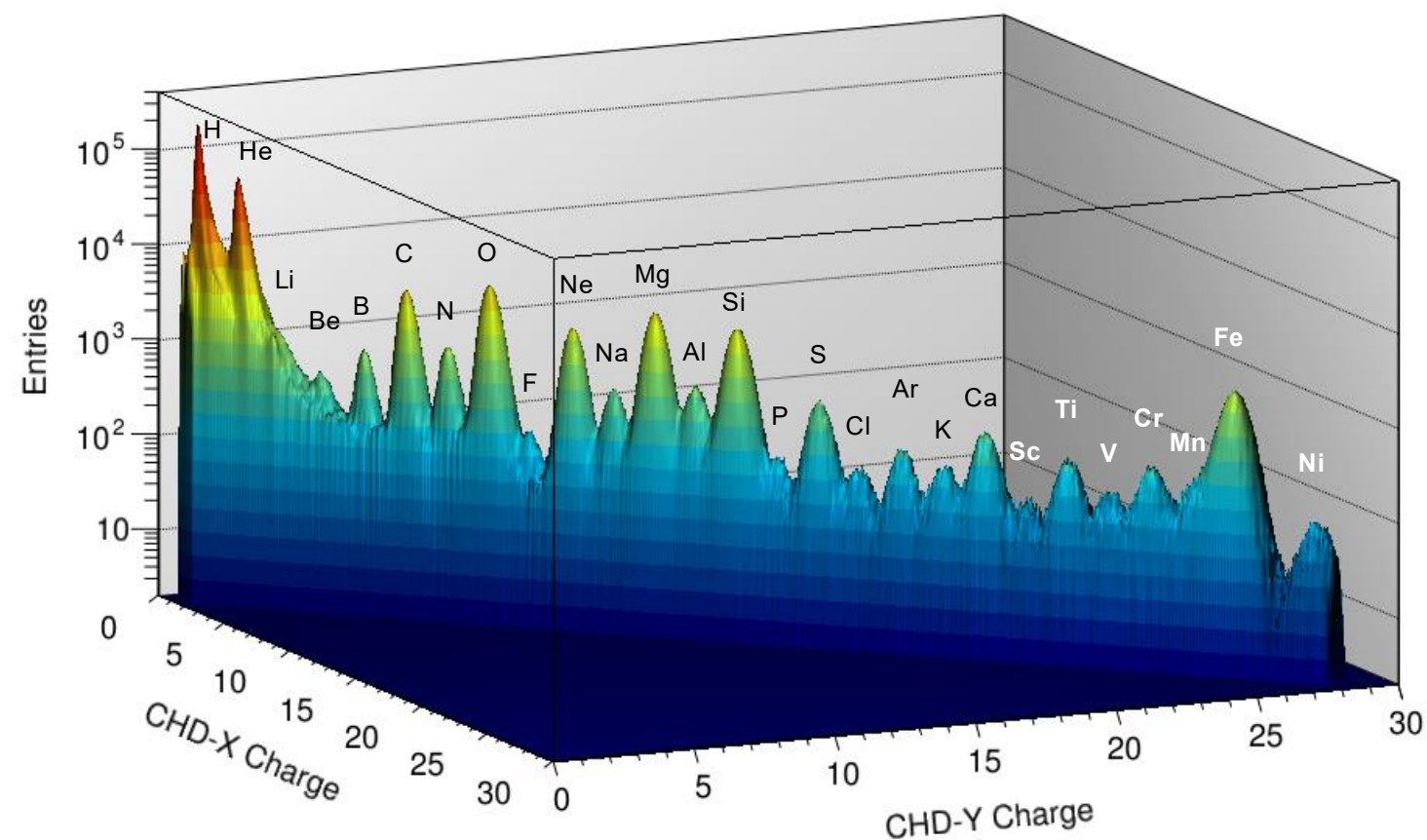


原子核観測例: 炭素 $\Delta E_{TASC}=2\text{TeV}$



電荷測定性能

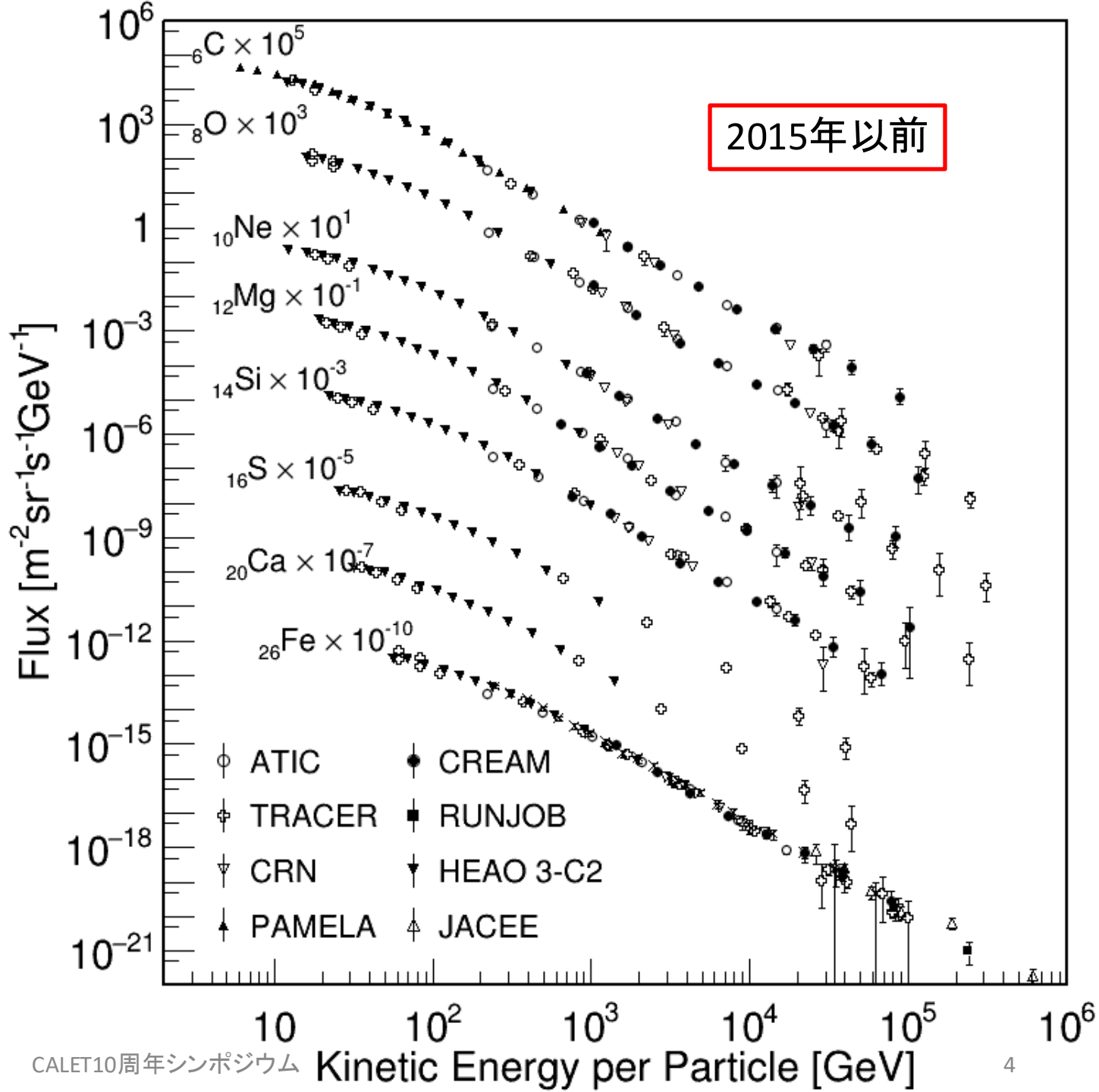
電荷 $Z=1-40$ の各原子核を識別
宇宙空間における直接観測だからこそ実現できる観測性能



エネルギースペクトル

CALETによる原子核の観測成果:

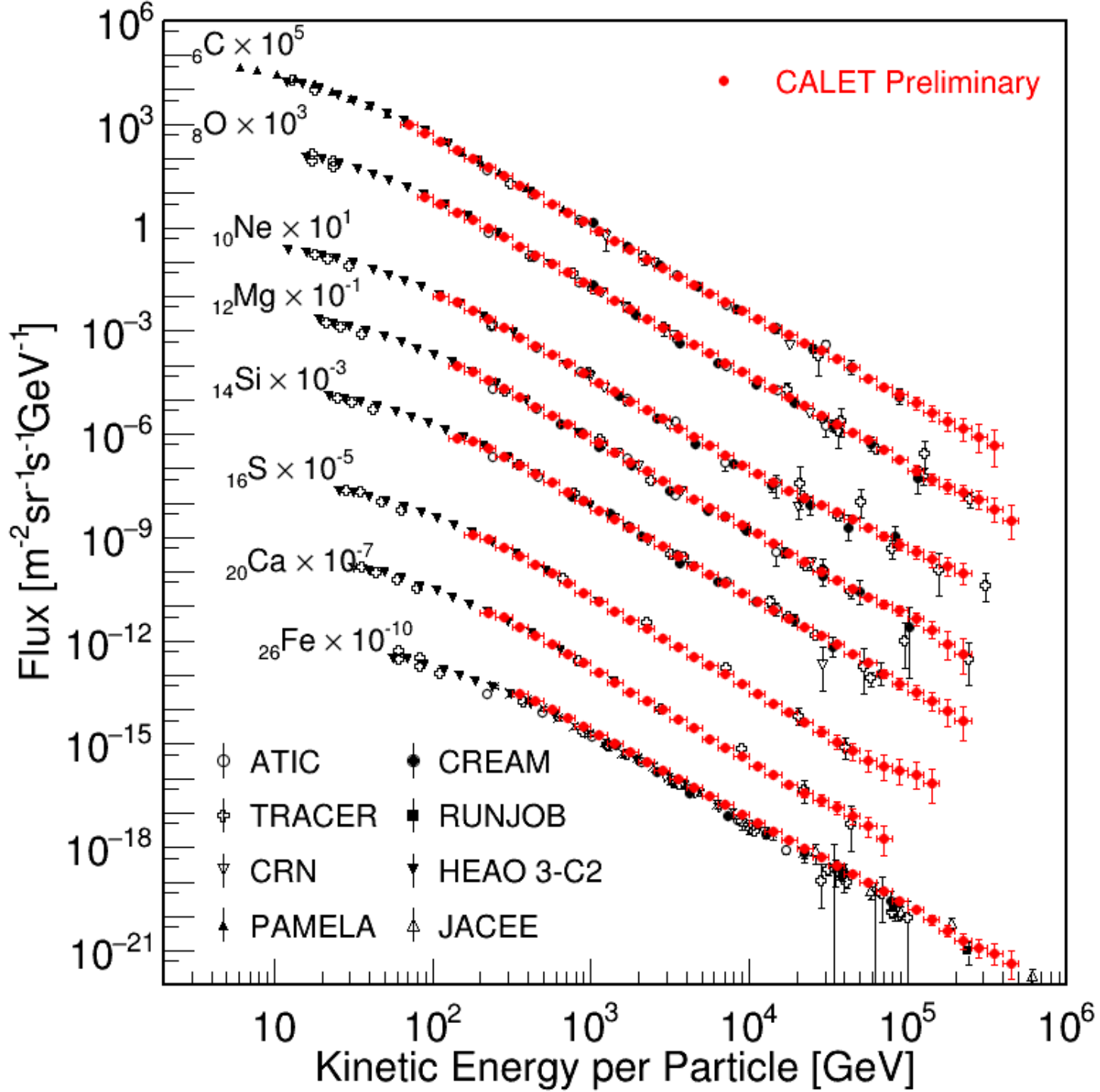
- ${}^6\text{C}$, ${}^8\text{O}$ のエネルギースペクトル
Phys.Rev.Lett. **125**, 251102 (2020)
- ${}^{26}\text{Fe}$ のエネルギースペクトル
Phys.Rev.Lett. **126**, 241101 (2021)
- ${}^{28}\text{Ni}$ のエネルギースペクトル
Phys.Rev.Lett. **128**, 131103 (2022)
- B/Cの観測
Phys.Rev.Lett. **129**, 251103 (2022)
- subFe(Ti, Cr)/Fe の観測
Phys.Rev.Lett. **135**, 021002 (2025)
- 超重核(電荷 $Z \leq 44$)の観測
Astrophys. J. **988**, 148 (2025)



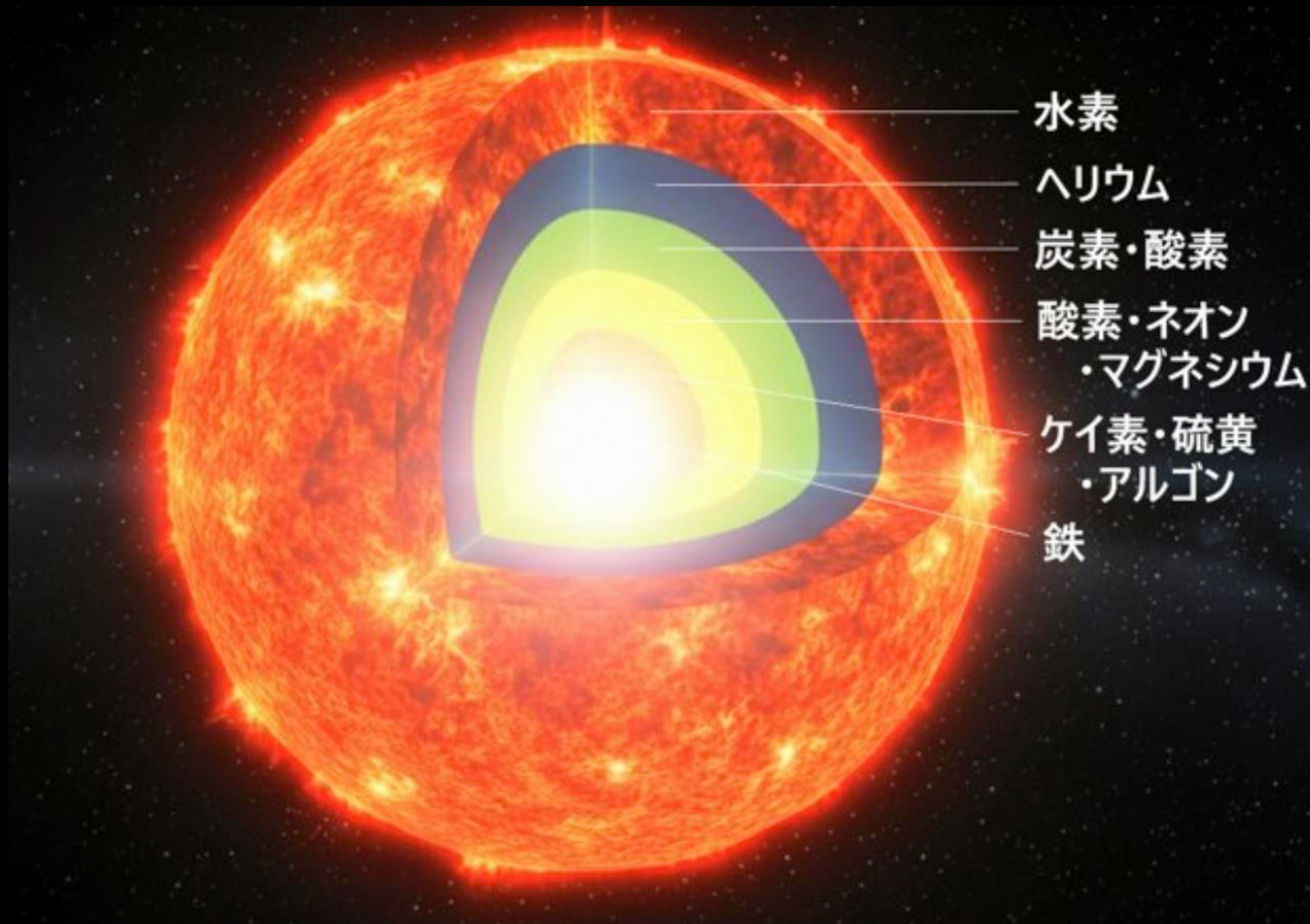
エネルギースペクトル

CALETによる原子核の観測成果:

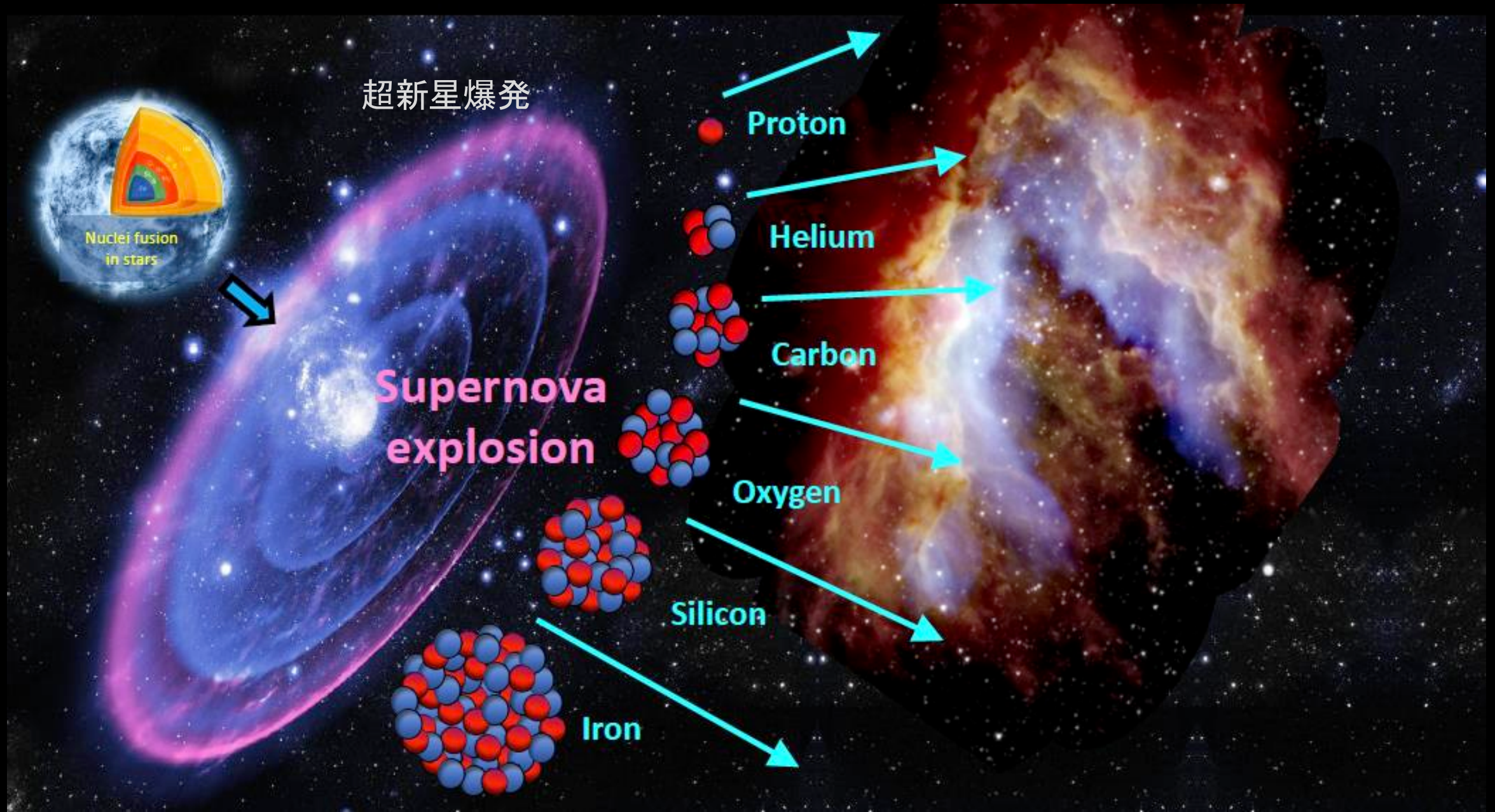
- ${}^6\text{C}$, ${}^8\text{O}$ のエネルギースペクトル
Phys.Rev.Lett. **125**, 251102 (2020)
- ${}^{26}\text{Fe}$ のエネルギースペクトル
Phys.Rev.Lett. **126**, 241101 (2021)
- ${}^{28}\text{Ni}$ のエネルギースペクトル
Phys.Rev.Lett. **128**, 131103 (2022)
- B/Cの観測
Phys.Rev.Lett. **129**, 251103 (2022)
- subFe(Ti, Cr)/Fe の観測
Phys.Rev.Lett. **135**, 021002 (2025)
- 超重核(電荷 $Z \leq 44$)の観測
Astrophys. J. **988**, 148 (2025)



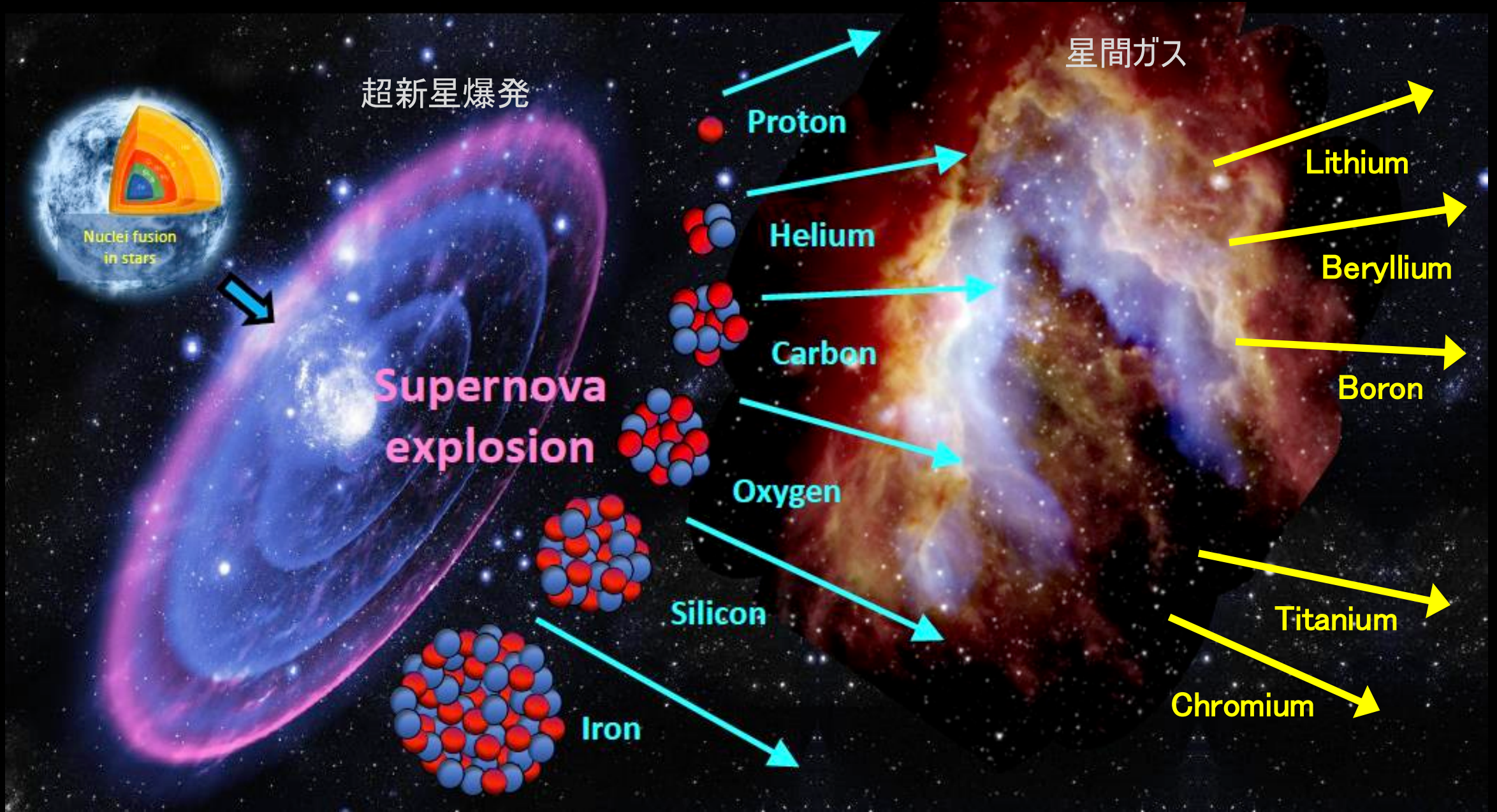
原子核の起源: 恒星内元素合成



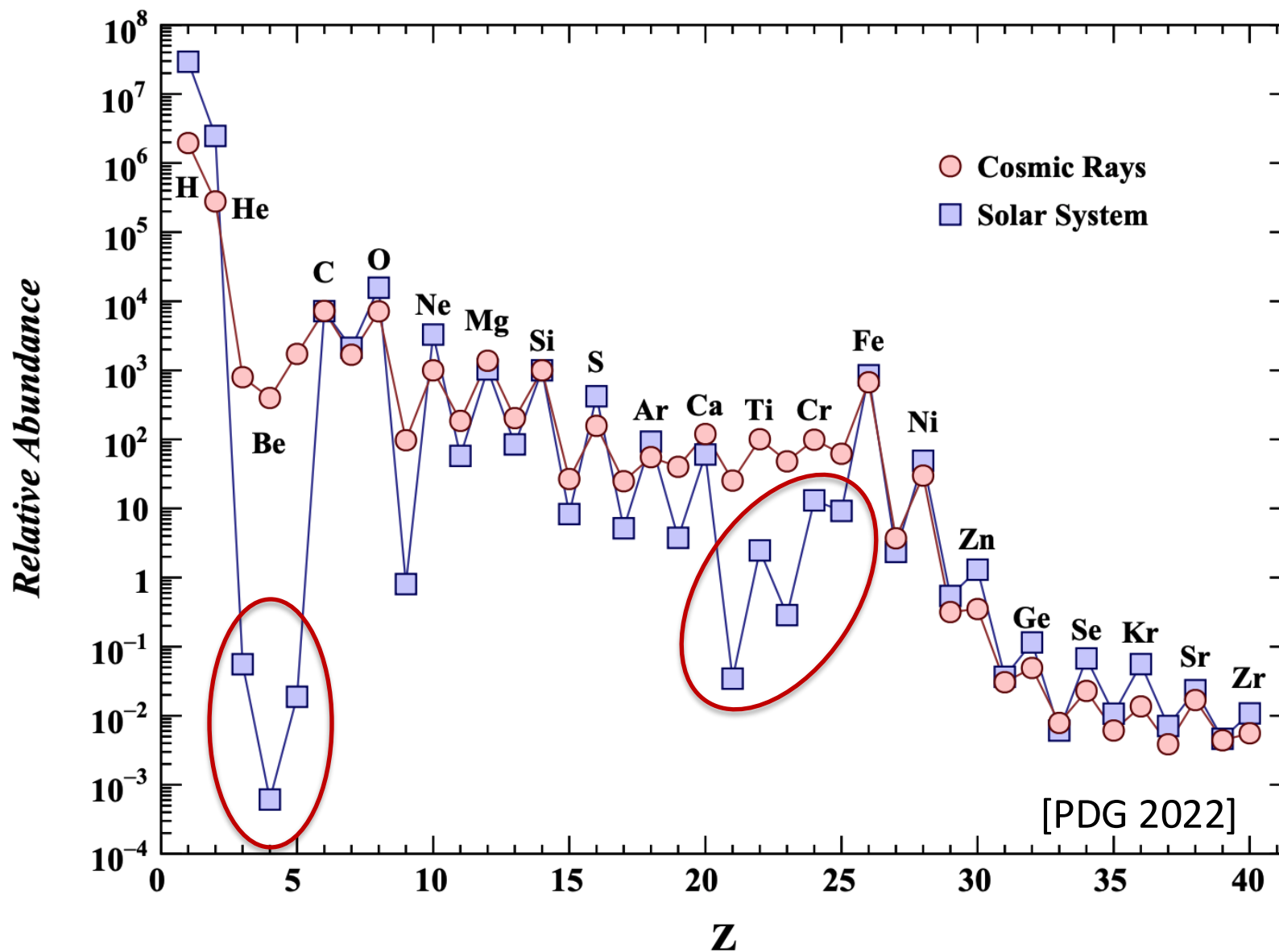
一次宇宙線



二次宇宙線



宇宙線の組成比



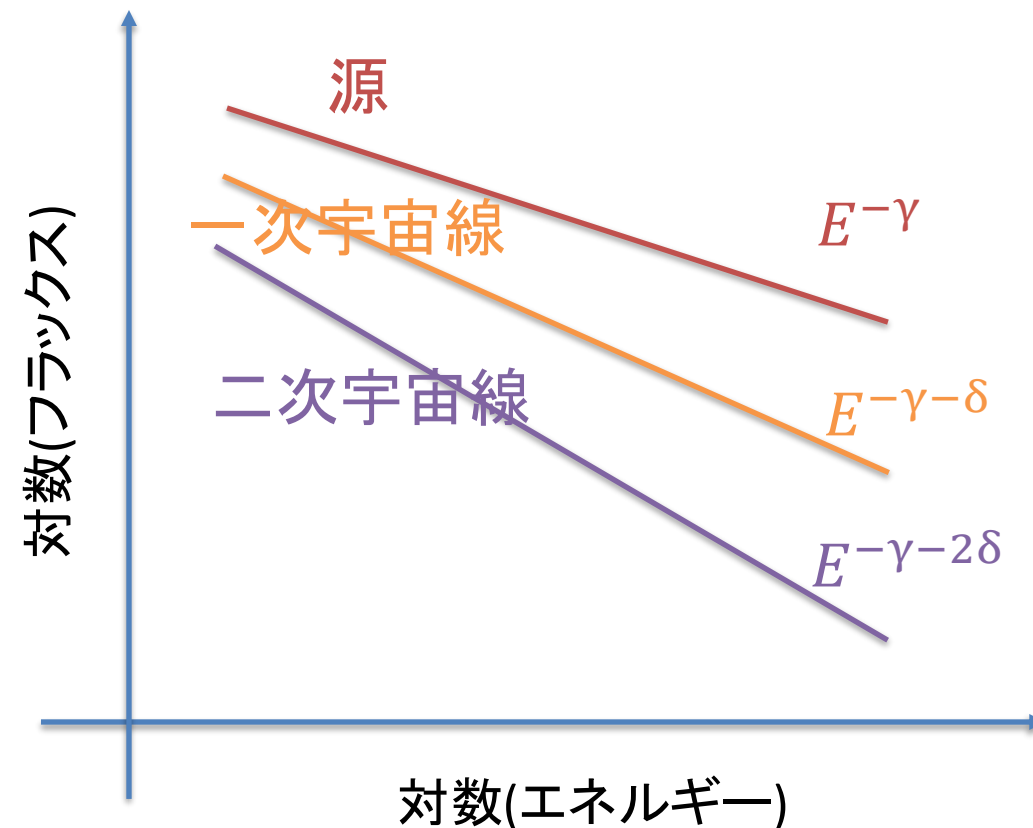
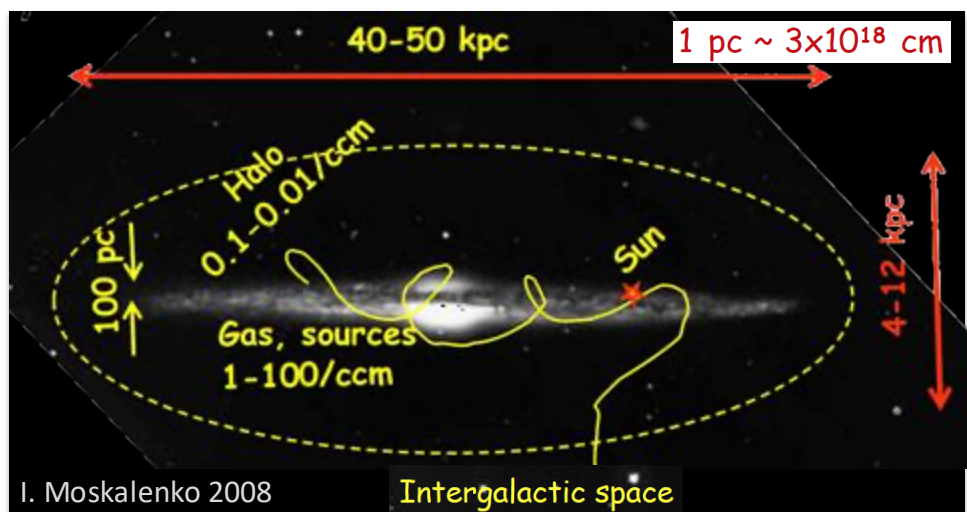
銀河宇宙線の加速・伝播の”標準モデル”

超新星残骸における衝撃波加速

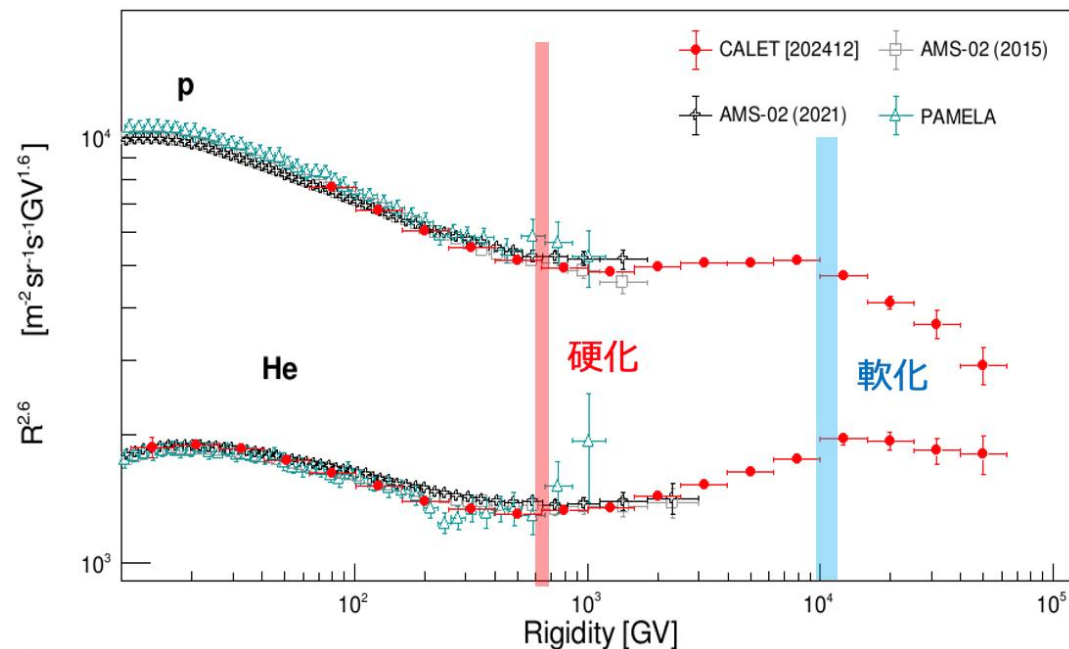
- ・ **冪型エネルギースペクトル**: $\frac{\Delta N}{\Delta E} \propto E^{-\gamma}$
- ・ 電荷に比例した加速限界: $E_{\max} \sim 100 Z \text{ TeV}$

銀河磁場による拡散的伝播

- ・ **銀河磁場からの漏れ出し効果**: $\frac{\Delta N}{\Delta E} \propto E^{-\gamma-\delta}$
(Leaky Box Model)



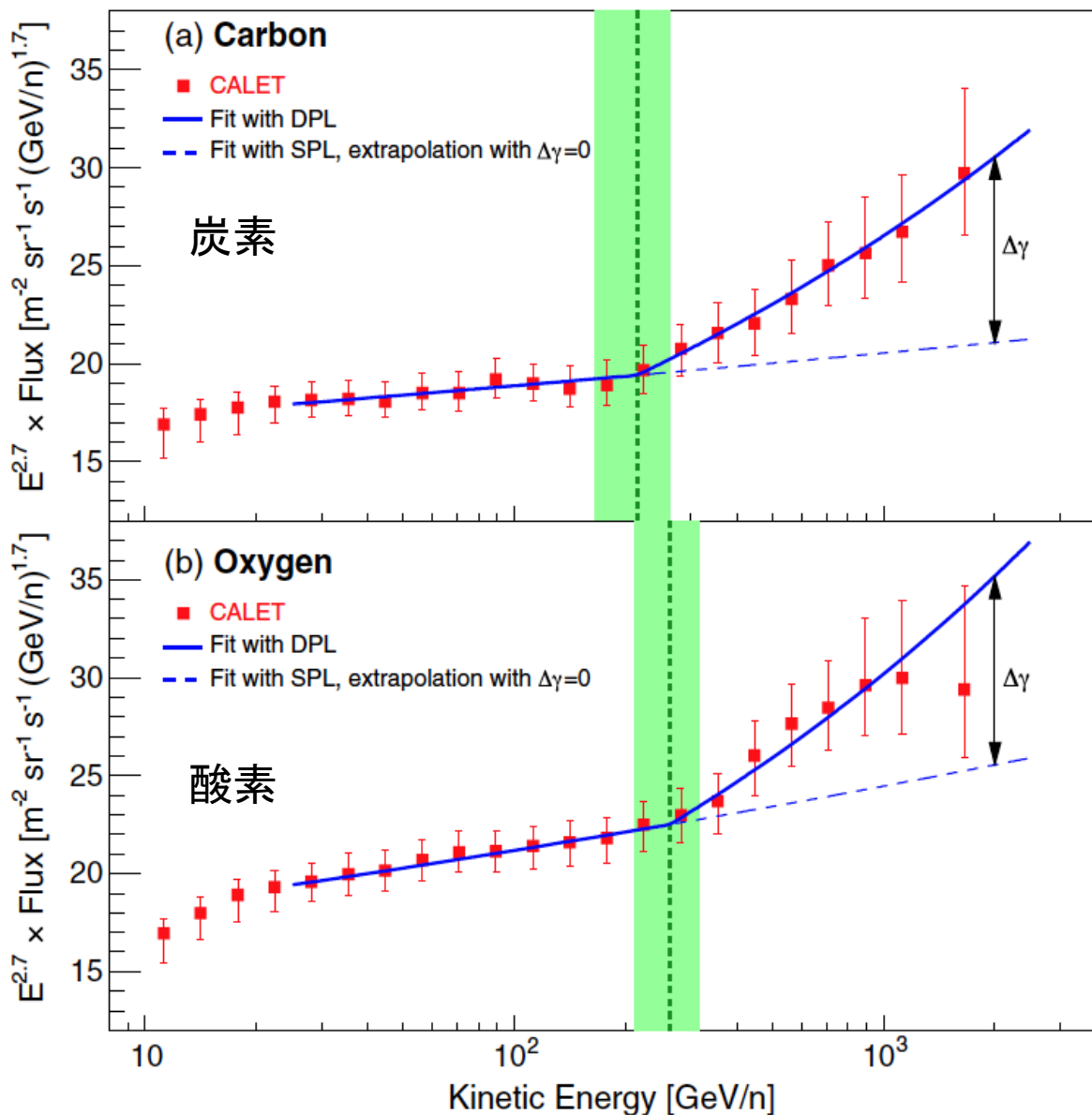
陽子とヘリウムのエネルギースペクトル



陽子・ヘリウムのスペクトル硬化は
原子核にも存在

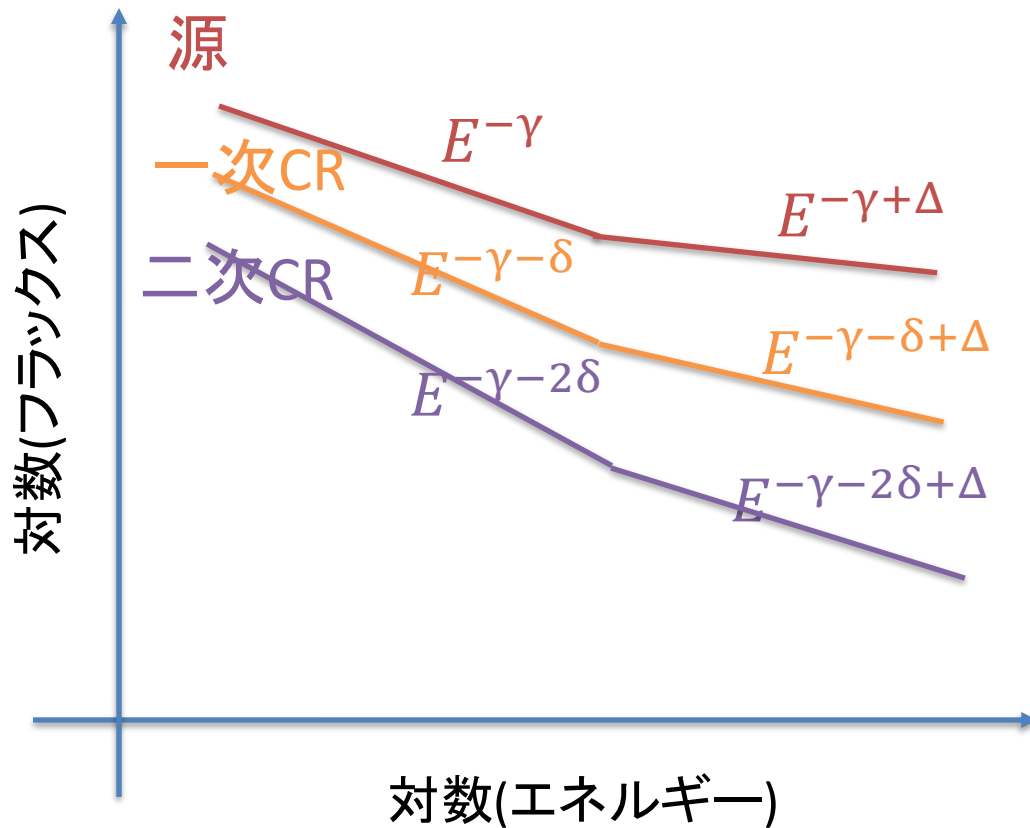
スペクトル硬化の原因は、
加速？ 伝播？

⇒ 二次宇宙線の測定

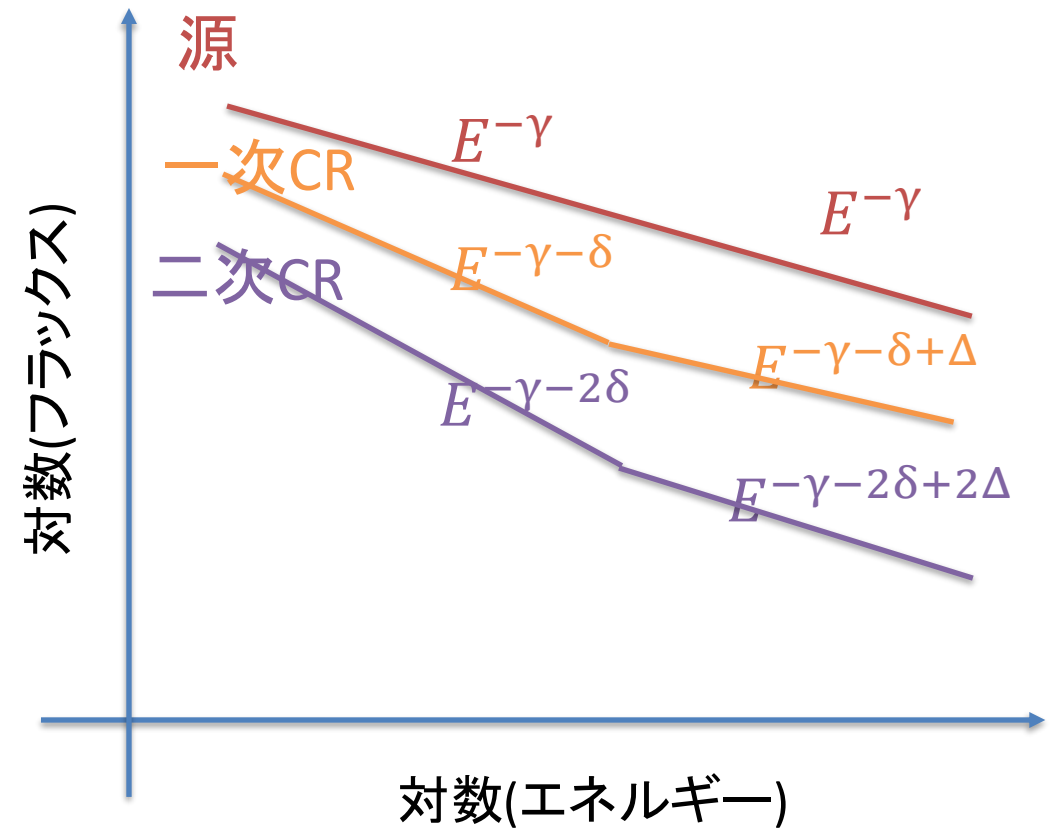


スペクトル硬化の原因: エネルギースペクトル

加速領域でスペクトルが硬化

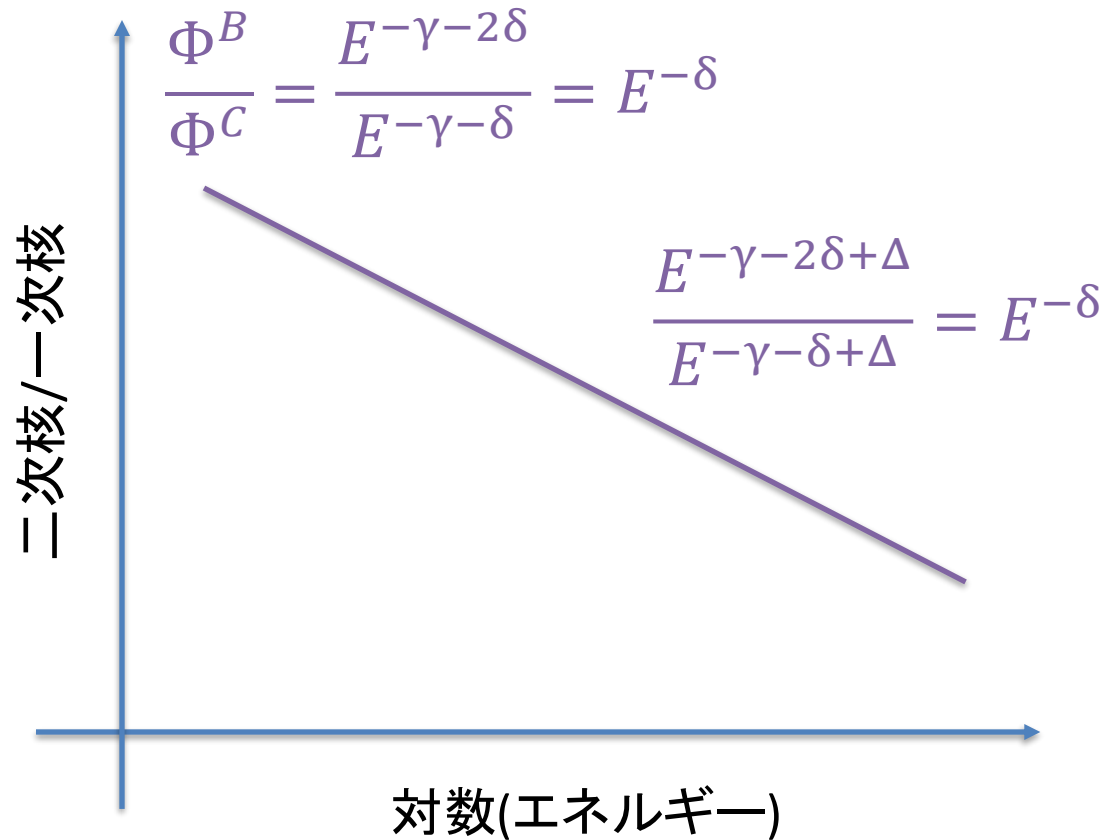


伝播過程でスペクトルが硬化

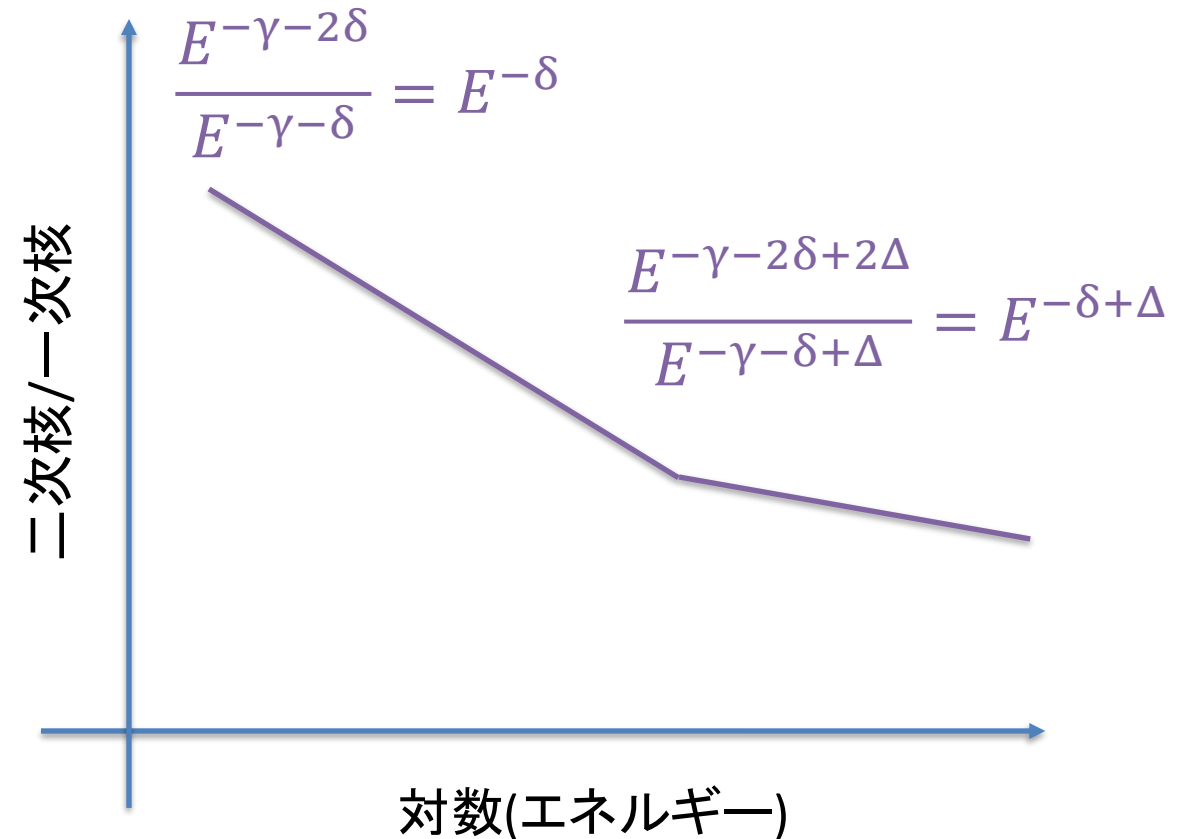


スペクトル硬化の原因: 二次核/一次核比 (B/C比など)

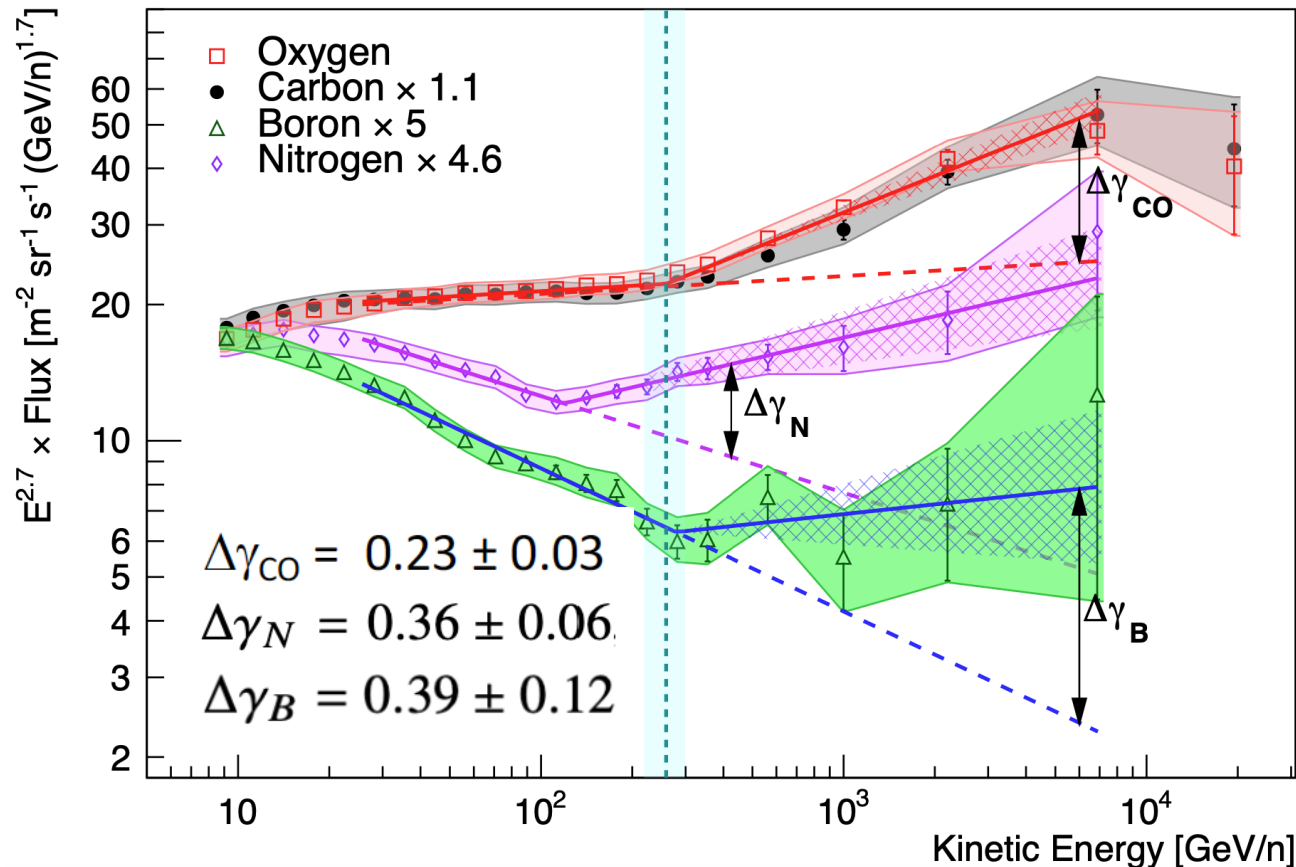
加速源でスペクトルが硬化



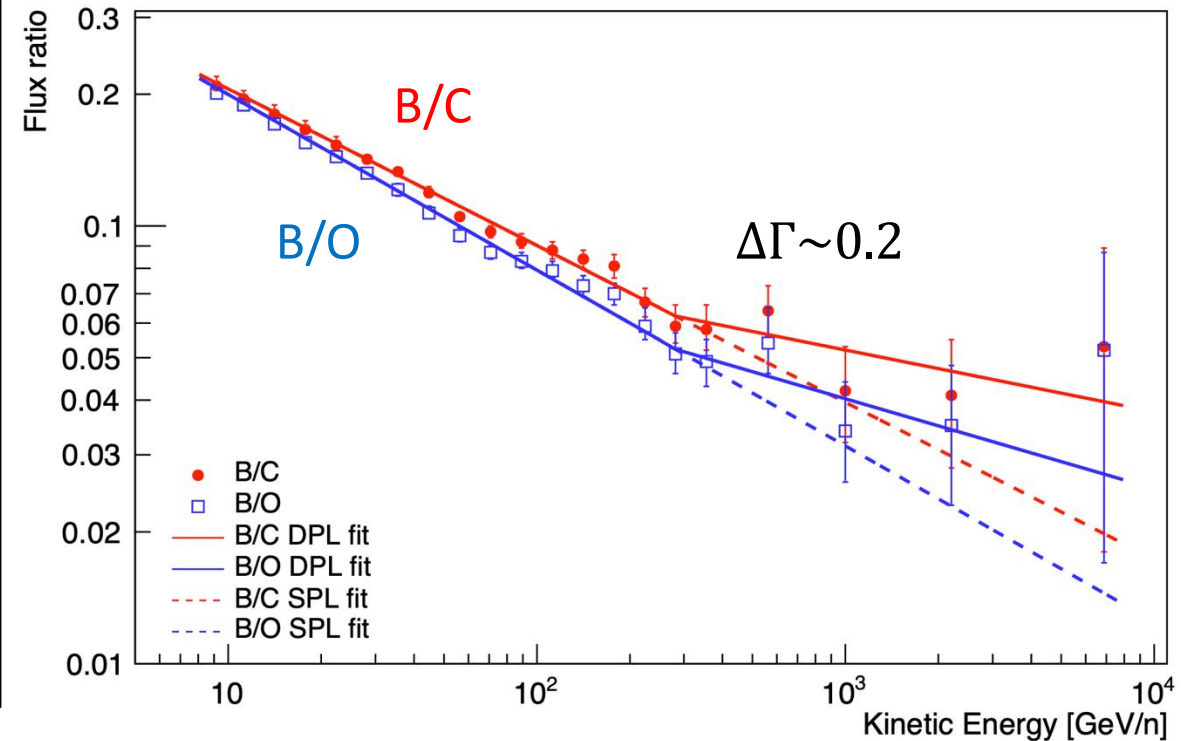
伝播過程でスペクトルが硬化



B, C, N, Oのエネルギースペクトル



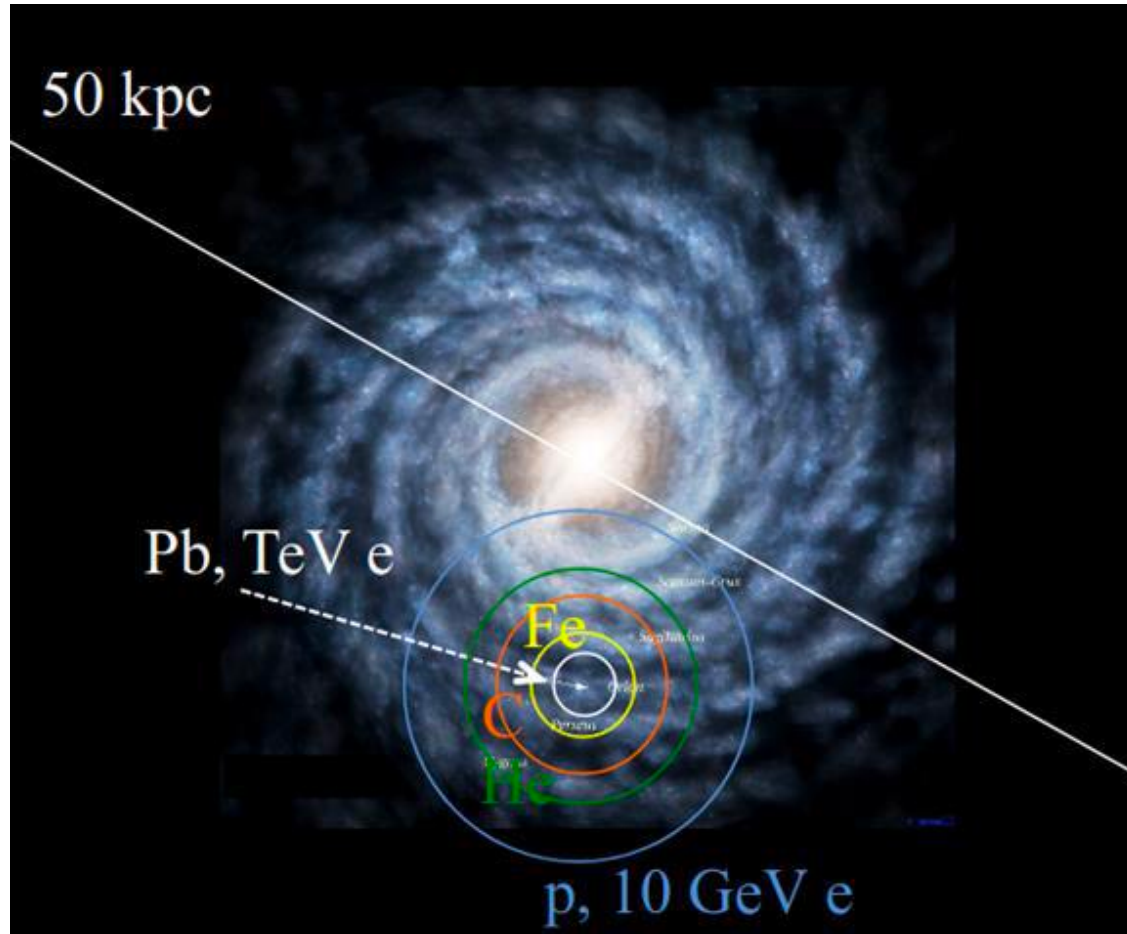
B/C, B/O のエネルギー依存性



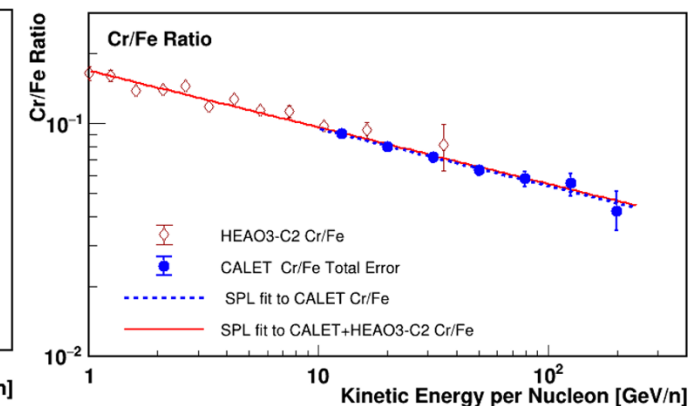
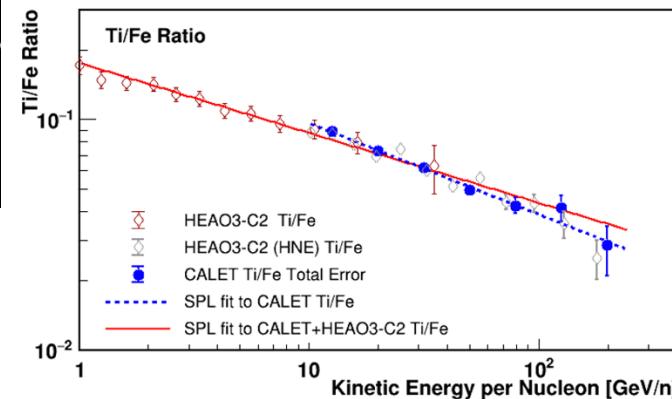
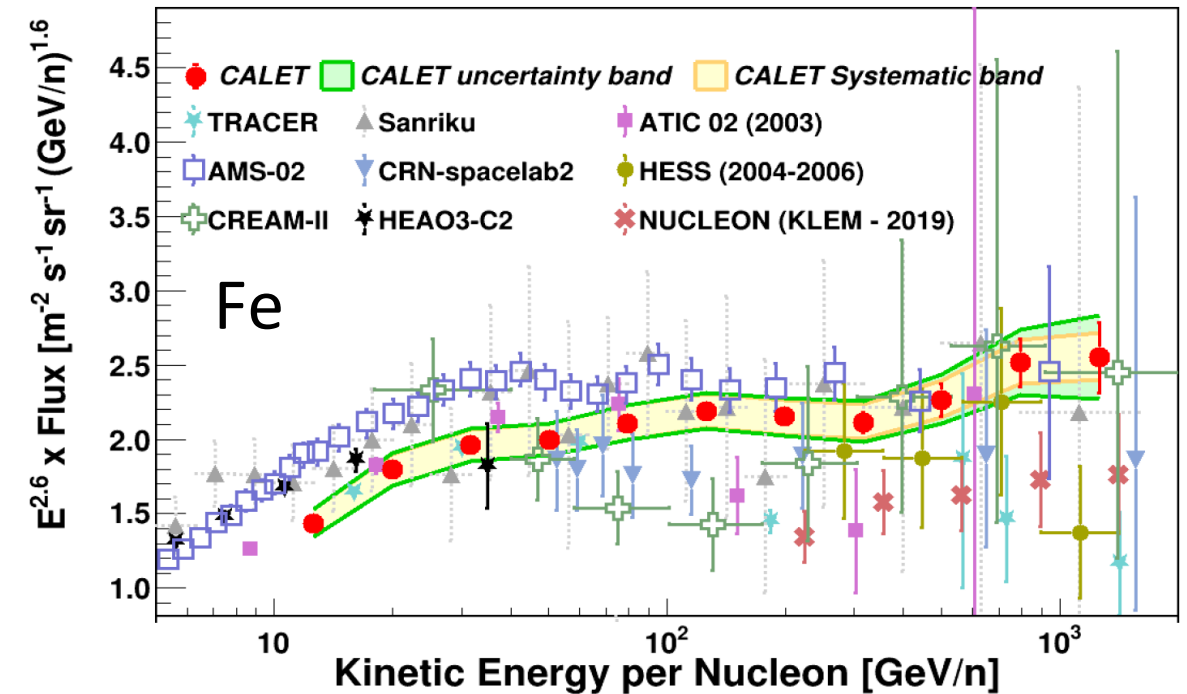
二次粒子(ホウ素: B) のスペクトル硬化は一次粒子(炭素・酸素: C, O)の約2倍
 $\Rightarrow$ スペクトル硬化は銀河内伝播過程に由来する可能性が高い

重原子核の観測: Fe, Sub-Fe(Ti,Cr)

PRL 135, 021002 (2025)



Feは断面積が大きく平均自由行程が短いため、
より地球近傍の伝播過程の理解に寄与可能



標準モデルの検証: 電荷に応じた加速限界

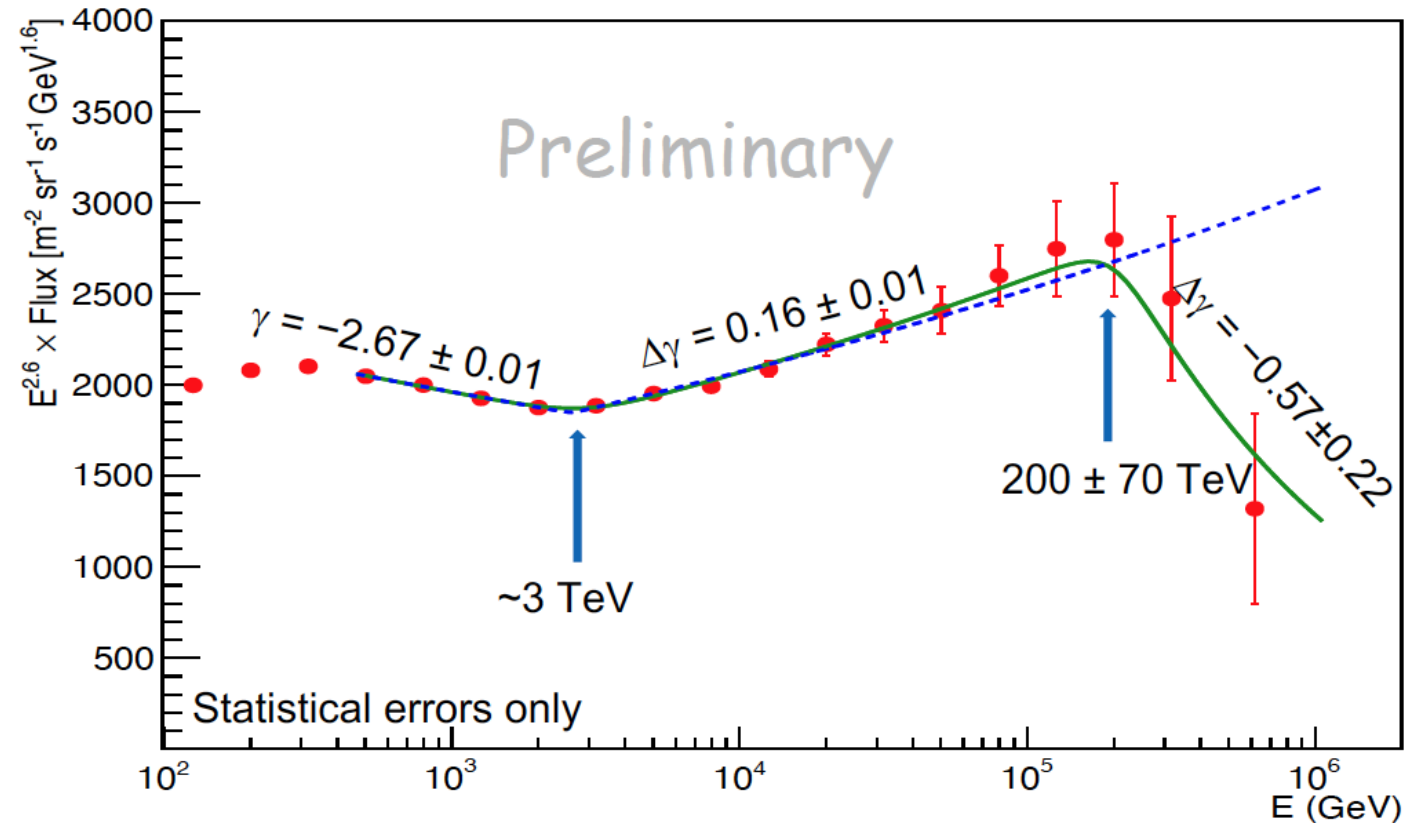
超新星残骸における衝撃波加速

- ・ 冪型のエネルギースペクトル: $\frac{\Delta N}{\Delta E} \propto E^{-\gamma}$
- ・ **電荷に応じた加速限界**: $E_{\max} \sim 100 Z \text{ TeV}$

銀河磁場による拡散的伝播

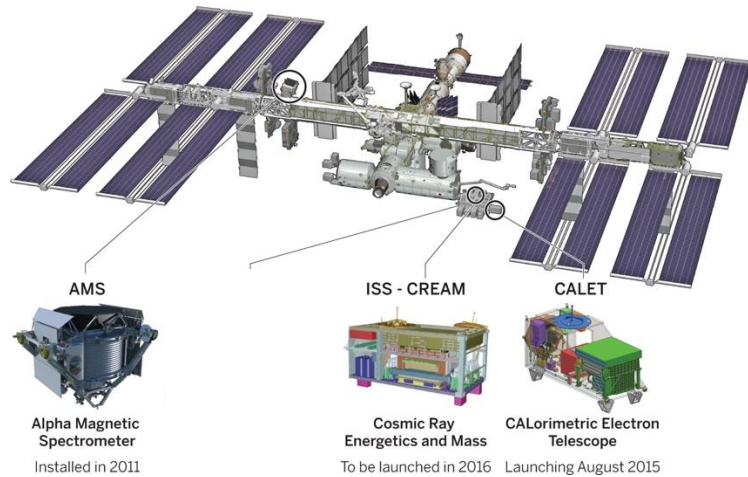
- ・ 銀河磁場からの漏れ出し効果: $\frac{\Delta N}{\Delta E} \propto E^{-\gamma-\delta}$
(Leaky Box Model)

CNOのエネルギースペクトル

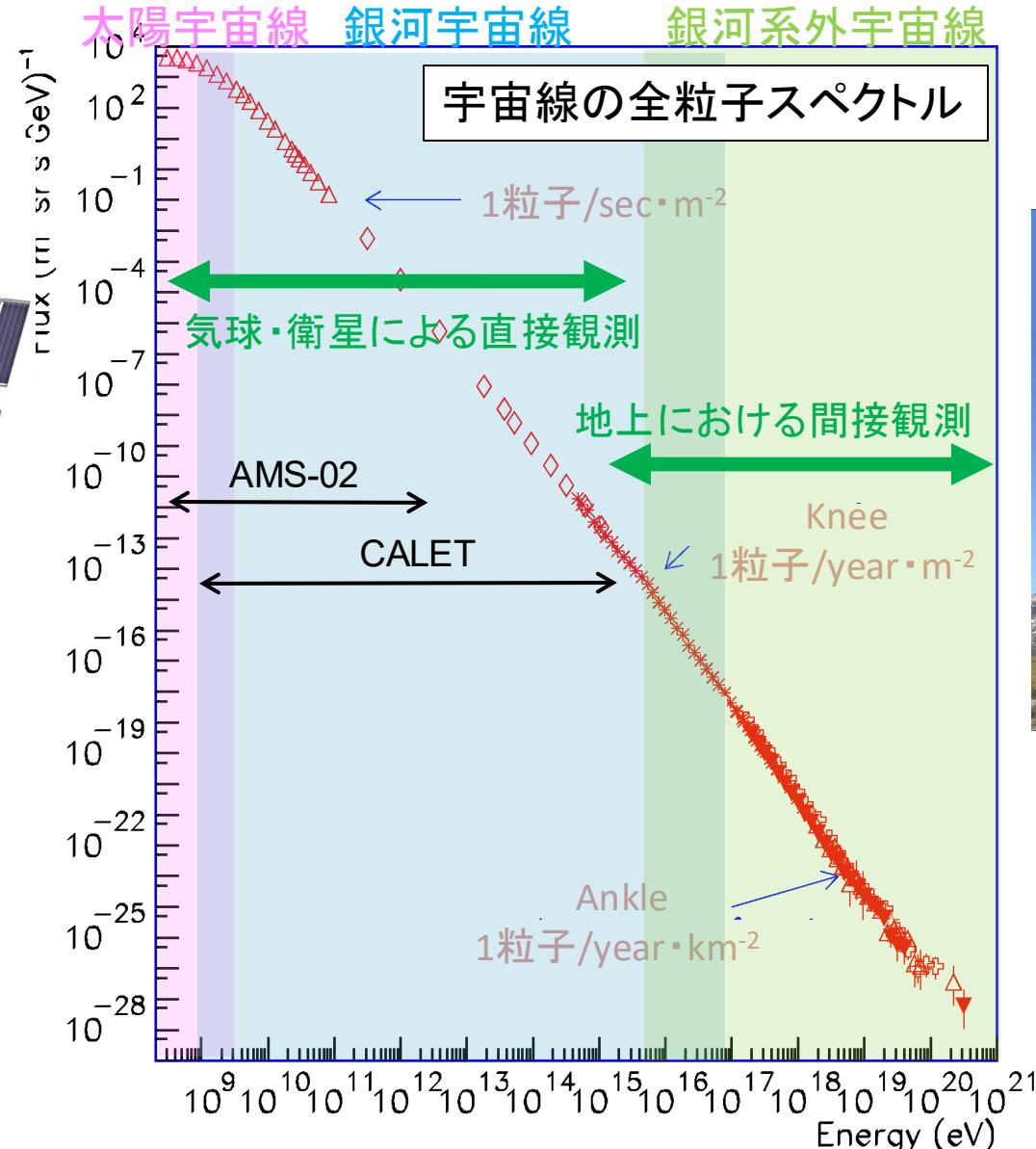


地上間接観測への接続

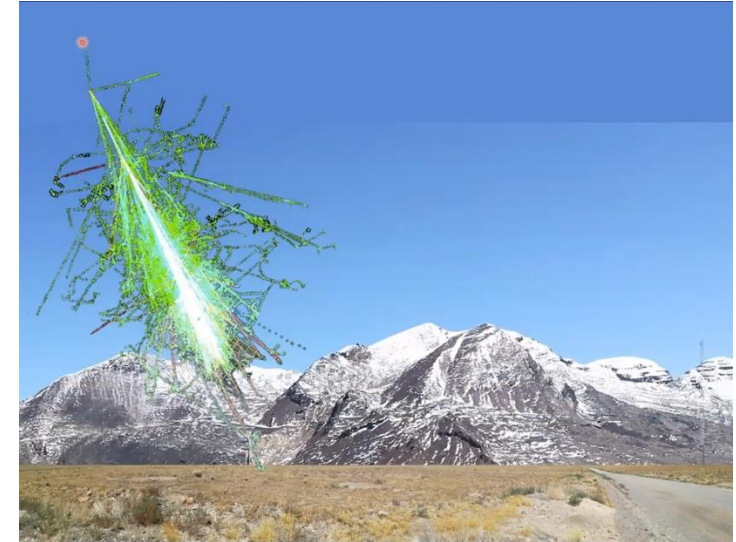
人工衛星, 国際宇宙ステーション



- ・ 元素組成が測定可能
- ・ 検出器の大きさに制限



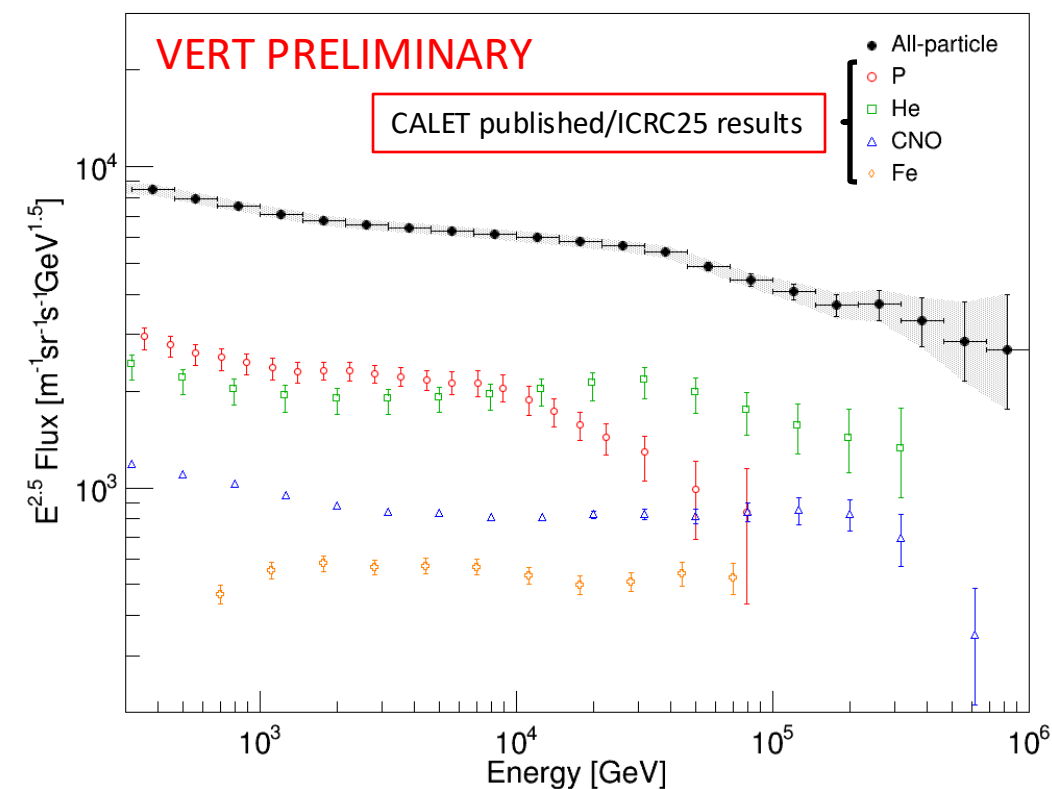
空気シャワーを利用する地上観測



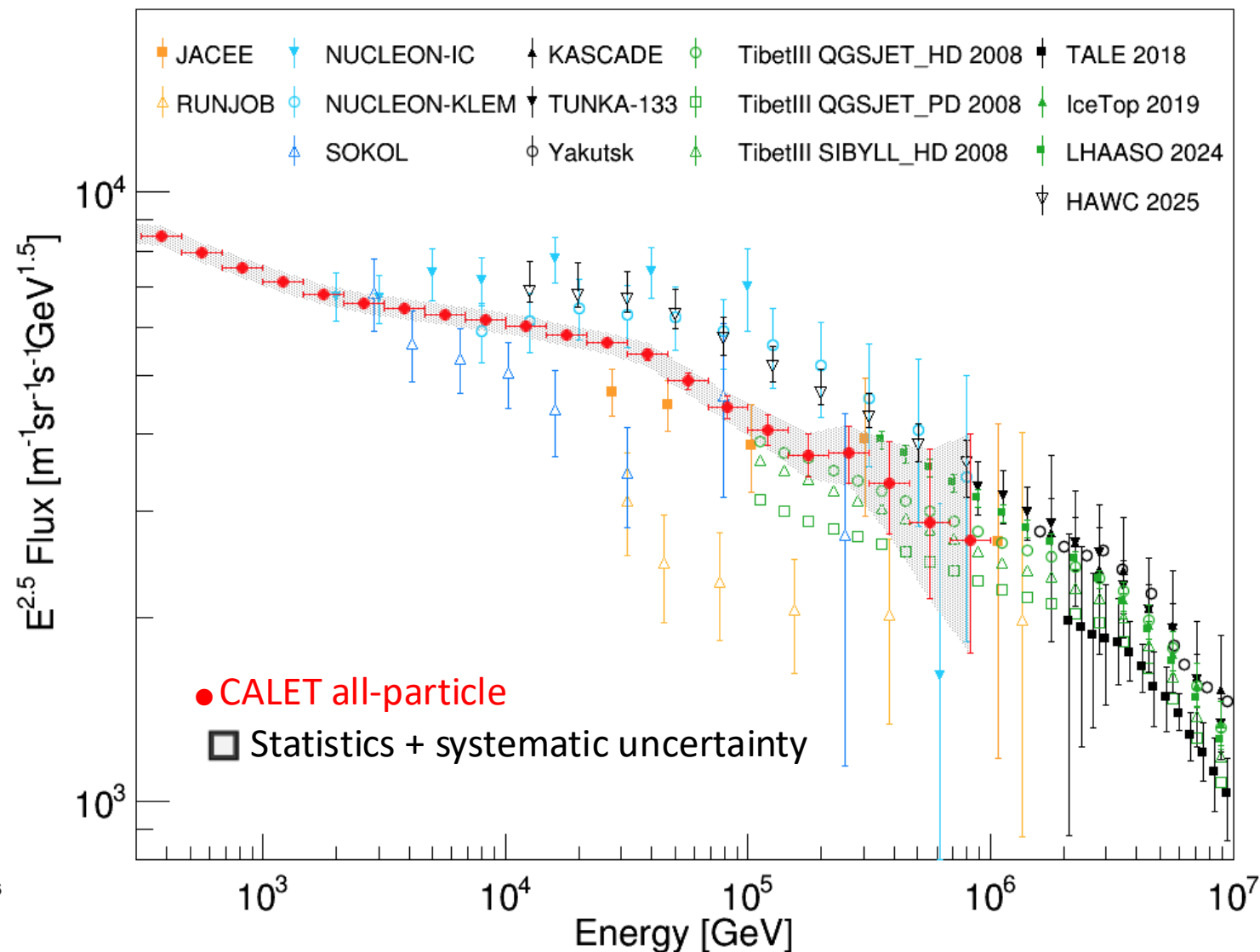
- ・ 大きな検出面積
- ・ 元素組成の精密測定は難しい

CALETによる全粒子スペクトル

CALETの測定領域は、
1PeV(10^{15} eV)に到達
⇒ 地上間接観測へ接続



気球 衛星 地上実験



まとめ

- 地球で観測される宇宙線は、加速と伝播が複雑に絡み合った結果であり、各原子核を測定することで、加速と伝播を切り分けて理解することが可能
- CALETは、個々の元素のエネルギースペクトルを測定することが可能な直接観測実験
- CALETのこれまでの観測により、銀河宇宙線の加速・伝播に関する標準モデルの検証を可能にし、さらに標準モデルを超える観測結果から、理論モデルに制約を与えることが可能
- CALETの幅広いエネルギー領域の観測は、地上の間接観測へ接続可能