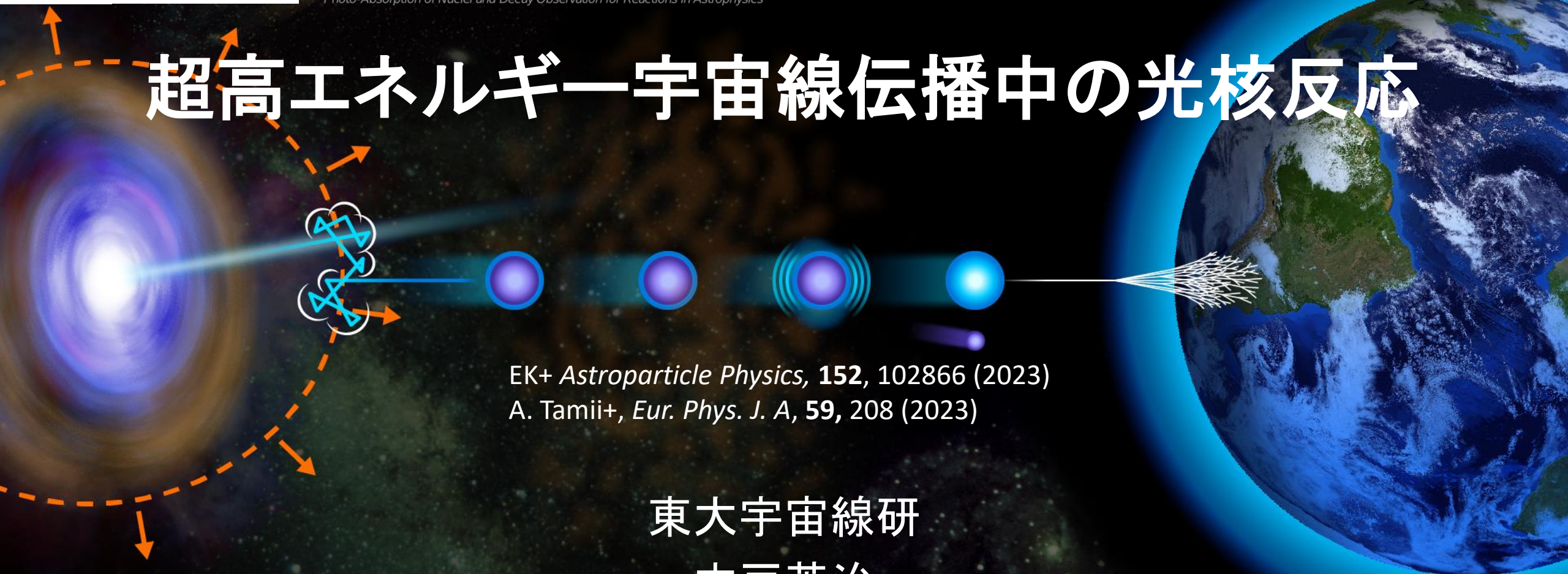




PANDORA

Photo-Absorption of Nuclei and Decay Observation for Reactions in Astrophysics

超高エネルギー宇宙線伝播中の光核反応



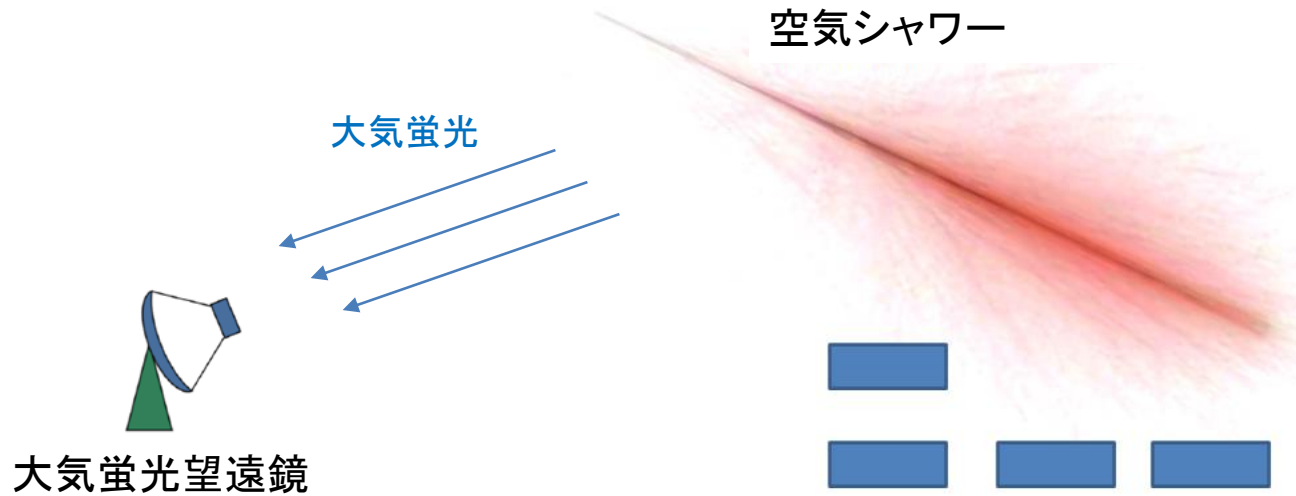
EK+ *Astroparticle Physics*, **152**, 102866 (2023)
A. Tamii+, *Eur. Phys. J. A*, **59**, 208 (2023)

東大宇宙線研
木戸英治

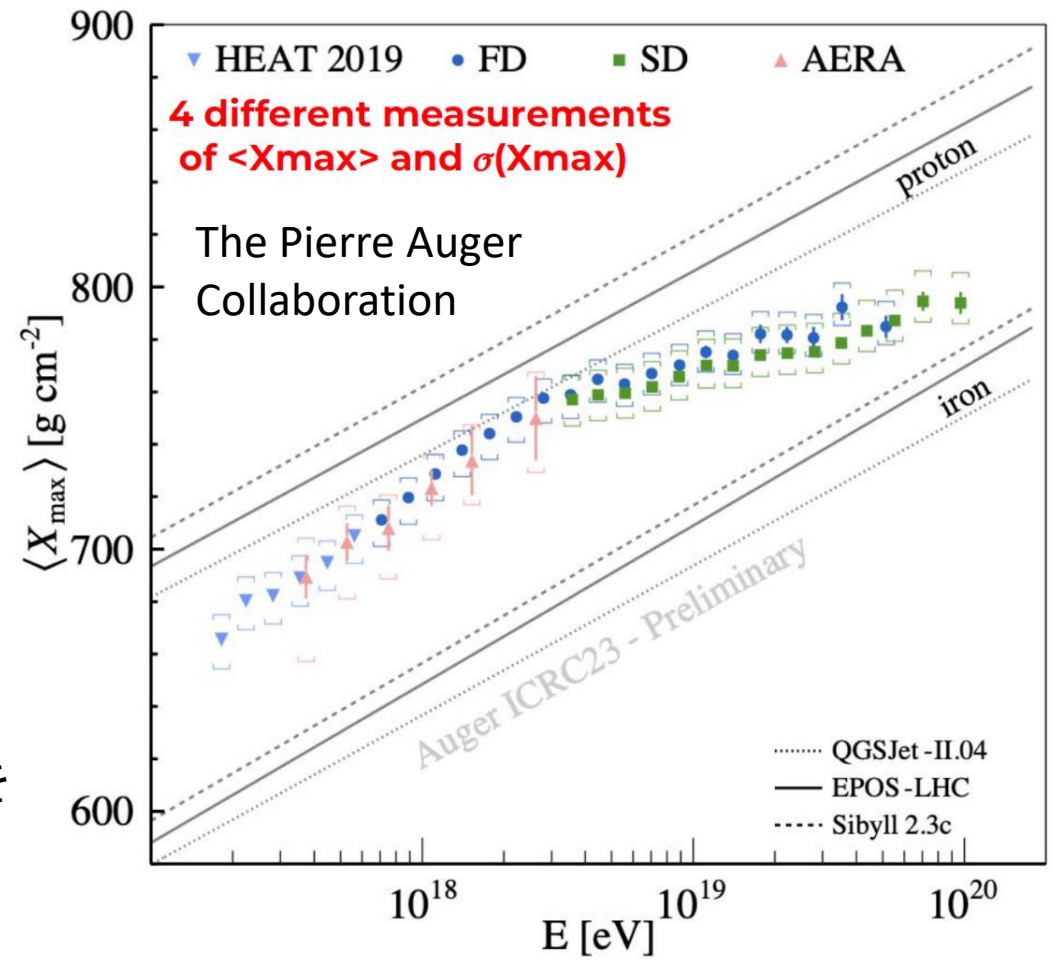
概要

- 宇宙線原子核の相互作用
- PANDORAプロジェクトによる光核反応測定
- 光核反応のモデル
- 宇宙線伝播シミュレーションを用いた宇宙線実験結果の解釈
- まとめと展望

超高エネルギー宇宙線観測

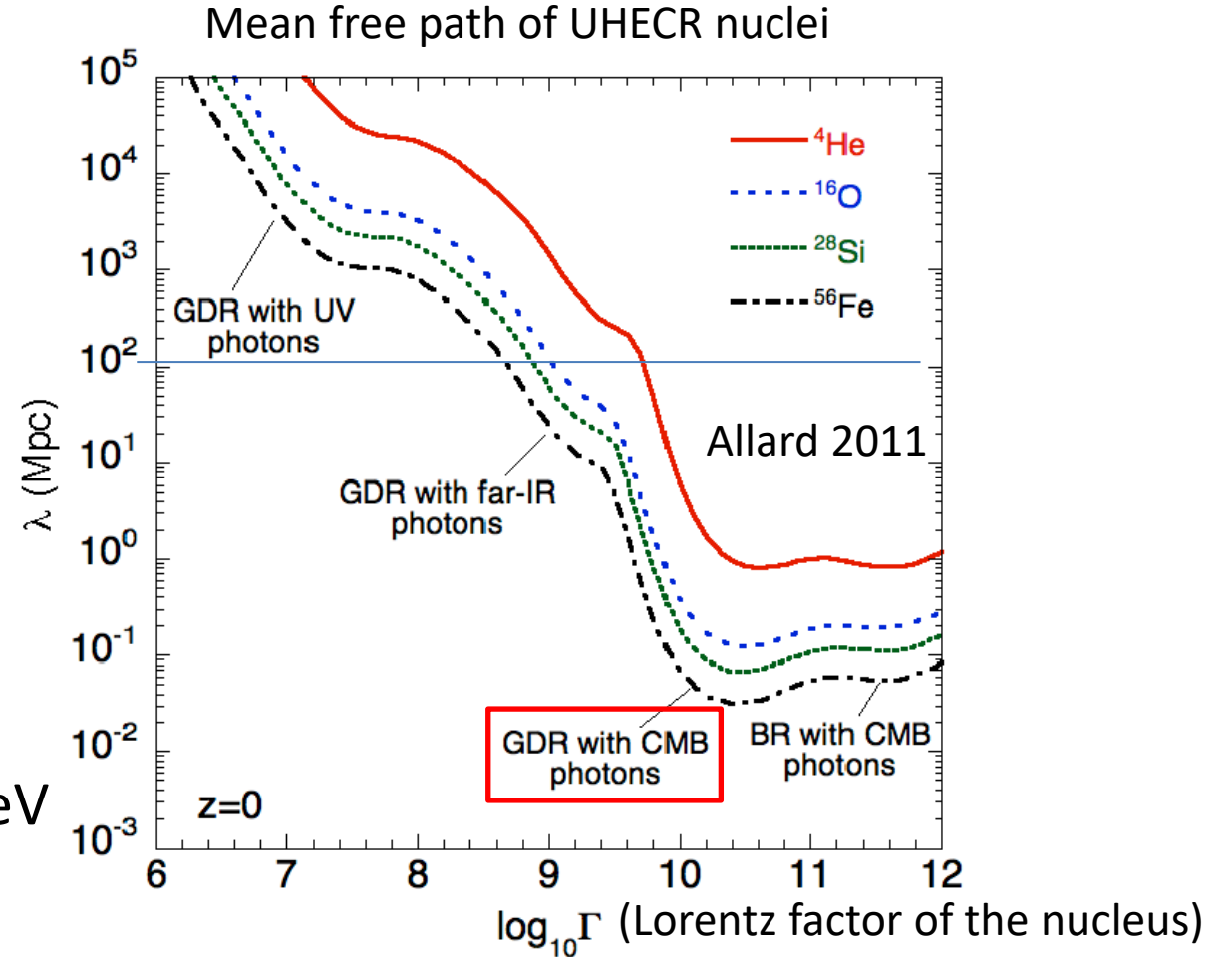
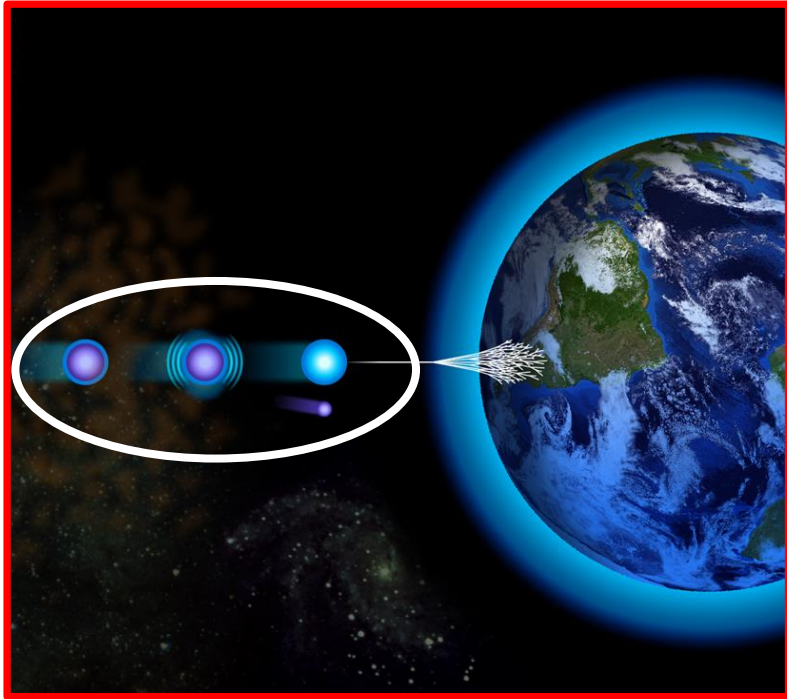


F. Salamida, ICRC2023



- 超高エネルギー宇宙線(エネルギー: 10^{18} eV (1 EeV)以上)によって、大気中に2次粒子を大量生成→ 空気シャワー
 - 大気蛍光望遠鏡による最大発達大気深さ X_{max} の観測
- 約 $2 \cdot 10^{18}$ eVからエネルギーが高くなるほど原子核が重くなる傾向を観測 (Pierre Auger実験).

超高エネルギー宇宙線原子核の相互作用



Interaction with CMB photons (IR photons are also important)

→ Energy of CMB photons: ~ 1 MILI eV $\rightarrow \sim 10$ MEGA eV
in the UHECR nucleus's rest frame
(^{12}C with $\sim 10^{20}$ eV ($\Gamma \sim 10^{10}$) for example)

→ Giant Dipole Resonance(GDR) (peak energy ~ 20 MeV)

→ Energy loss by emitting protons, neutrons, helium etc.

The most important interaction

at the highest energies: GDR with CMB photons

CMB:Cosmic Microwave Background

超高エネルギー宇宙線原子核の相互作用2

宇宙線原子核のエネルギー:
ローレンツ因子 Γ × 質量数 A に比例

1回の光崩壊によるエネルギー損失:
 $A \rightarrow A-1$ の時

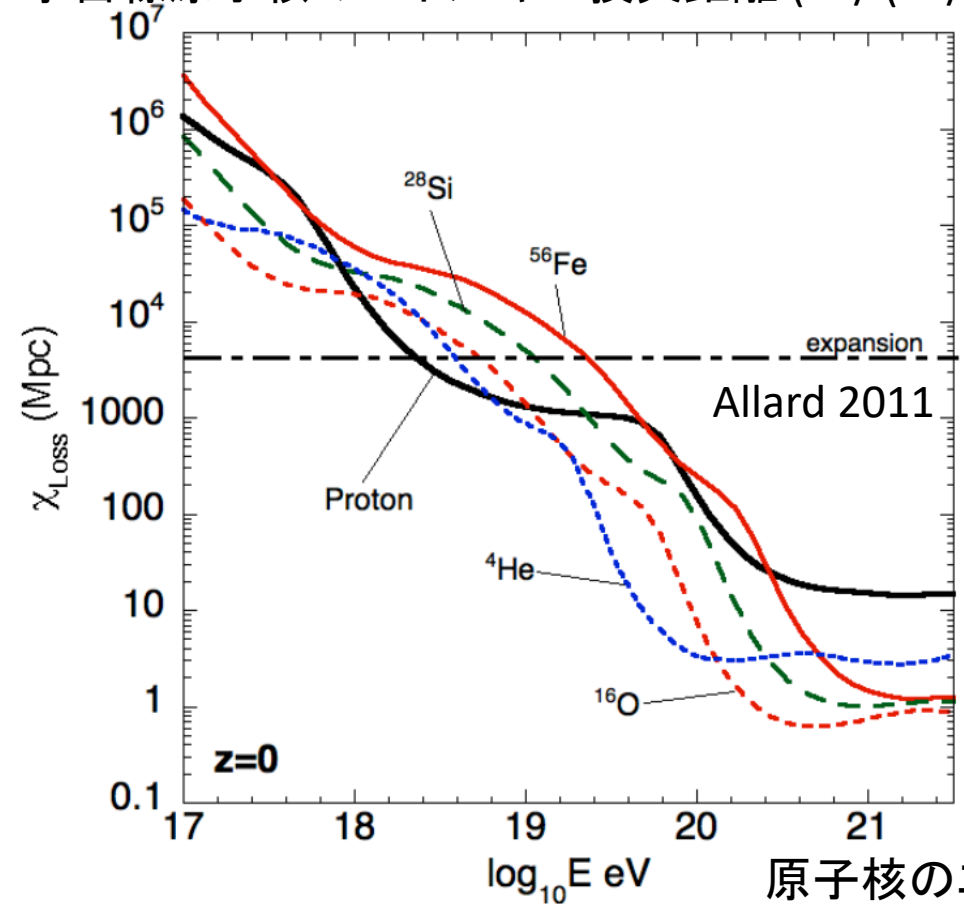
$E \rightarrow E - E/A$

軽い原子核で比較的影響が大きい

CMB($z=0$)とのGDRによる
エネルギー損失距離の減少:

$\sim A \times 4 \cdot 10^{18} \text{ eV}$

宇宙線原子核のエネルギー損失距離 ($-E/(dE/dx)$)



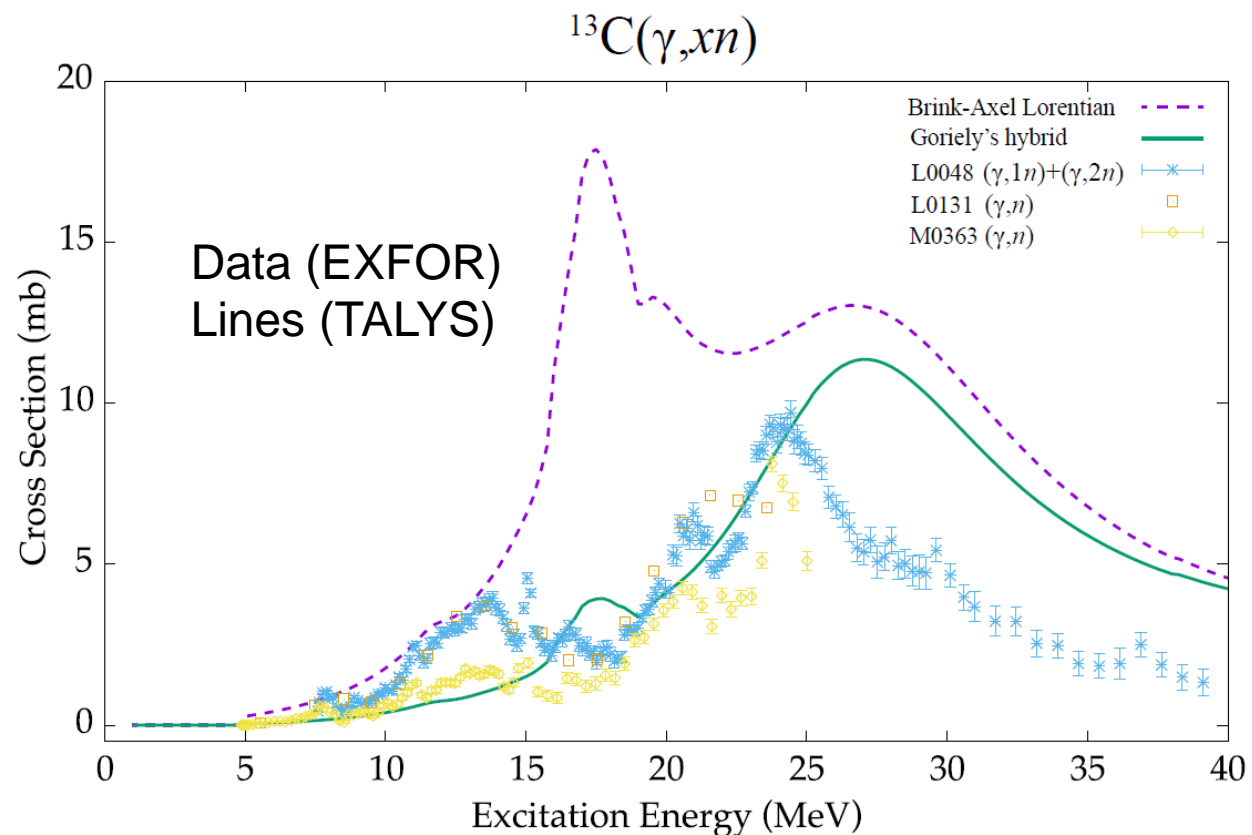
原子核のエネルギー:

$$E_N = m_N c^2 \Gamma$$
$$= A m_p c^2 \Gamma$$

Motivation of measurements of photo-nuclear reactions by the PANDORA project

- GDRs **can be measured** with accelerator facilities.
- Systematic uncertainty of photo-nuclear reactions in both theory and experiment of many nuclei with $A < 90$ is **not** known well.
- Neutron-emitting reactions were mainly studied.
- Proton and α particle emitting reactions are **not** ignorable for light nuclei.

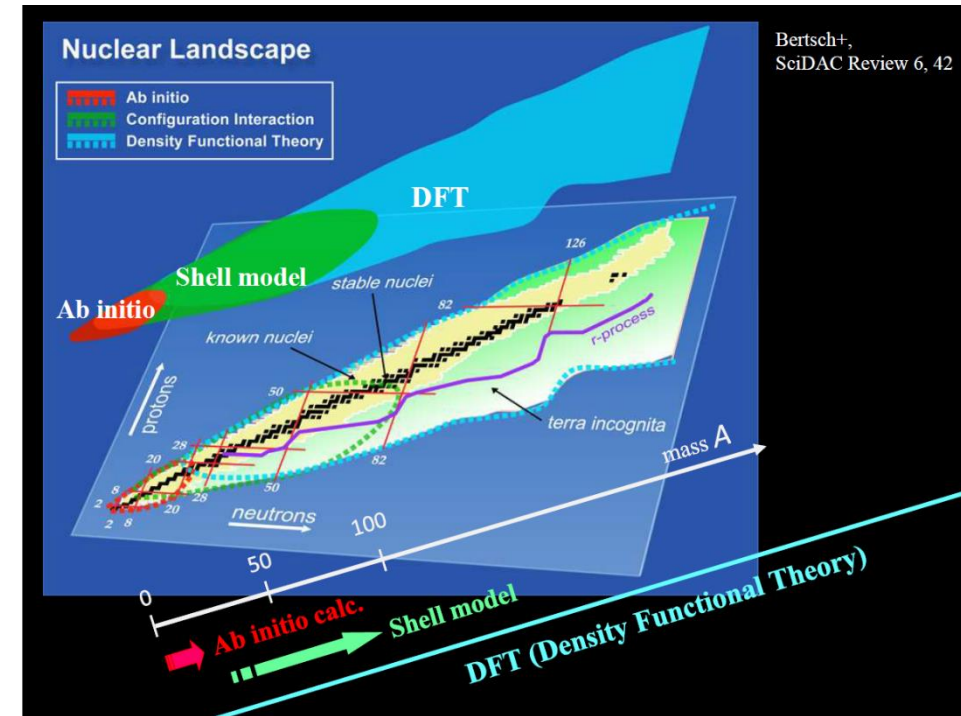
→ Motivation of (re-)measurements



A. Tamii+
The European
Physical Journal A, **59**,
208 (2023).

光核反応のモデル

- Models reflecting measured cross sections
 - PSB
 - A single decay chain is implemented.
 - **TALYS**
 - Many decay chains and α -particle production are included.
- Theoretical models
 - Ab initio
 - AMD
 - Shell model
 - Density functional theory(DFT)



Cross sections of nuclear experiments are directly reflected in TALYS for the propagation of UHECRs. Theoretical models were **not** used for the propagation of UHECRs. Theoretical models will be used to **predict** photo-nuclear reactions **of nuclei that will not be measured** by the PANDORA project.

観測結果のフィットから宇宙線源モデルパラメタの制限 (forward-folding 解析)

宇宙線源(仮定):
原子核組成: H, He, N(CNO), Si, Fe
Power law: $dN/dE \propto E^{-\gamma}$
Cutoff rigidity: R_{cut}
進化パラメタ: $(1+z)^m$

背景光子:
CMB, IRB, URB

宇宙線観測結果:
Pierre Auger Collab.
Telescope Array 実験

伝播シミュレーション:
CRPropa
SimProp
PRINCE
その他独自コード

光核反応:
TALYS
PSB他

空気シャワー
シミュレーション
(CORSIKA)中
ハドロン
相互作用モデル:
SIBYLL2.3c
EPOS-LHC
QGSjetII-04

- 同じ宇宙線源が分布していることを仮定
- 伝播シミュレーション
TALYSなどで伝播中の光核反応他相互作用計算
→ 宇宙線の平均的なエネルギースペクトル, $\langle X_{max} \rangle$, $\sigma(X_{max})$ を計算
→ 観測結果をフィット
→ 宇宙線源の γ , R_{cut} , m , 原子核組成を調べる。

- Pierre Auger Collab. (2017) (ICRC2017-2021)
- Telescope Array Collab. (ICRC2019, ICRC2021)
- Heinz+ (2019)
- Batista+ (2019)
- Allard+ (2023)
- 他

DFT, RPA計算を使った宇宙線原子核伝播シミュレーション

- 同じ宇宙線源(Power law, cutoff rigidity, 原子核組成(H, He, N, Si, Fe))が分布していることなどを仮定
- 現象論的でない光核反応モデルを使って宇宙線伝播シミュレーション
→モデル依存性を評価
- 密度汎関数理論 (DFT) 乱雑位相近似 (RPA) 計算
 - T. Inakura *et al.*, *PRC* **80**, 044301 (2009)
 - T. Inakura *et al.*, *PRC* **84**, 021302(R) (2011).
- 3 相互作用モデル
 - **SkM*** : J. Bartel *et al.*, *Nucl. Phys. A* 386, 79 (1982).
 - **SLy4** : E. Chanbanat, P. Bonche, P. Haensel, J. Mayer, and R. Schaeffer, *Nucl. Phys. A*627, 710 (1997).
 - **UNEDF1** : M. Kortelainen *et al.*, *Phys. Rev. C* 85, 024304 (2012).
- 29 安定原子核

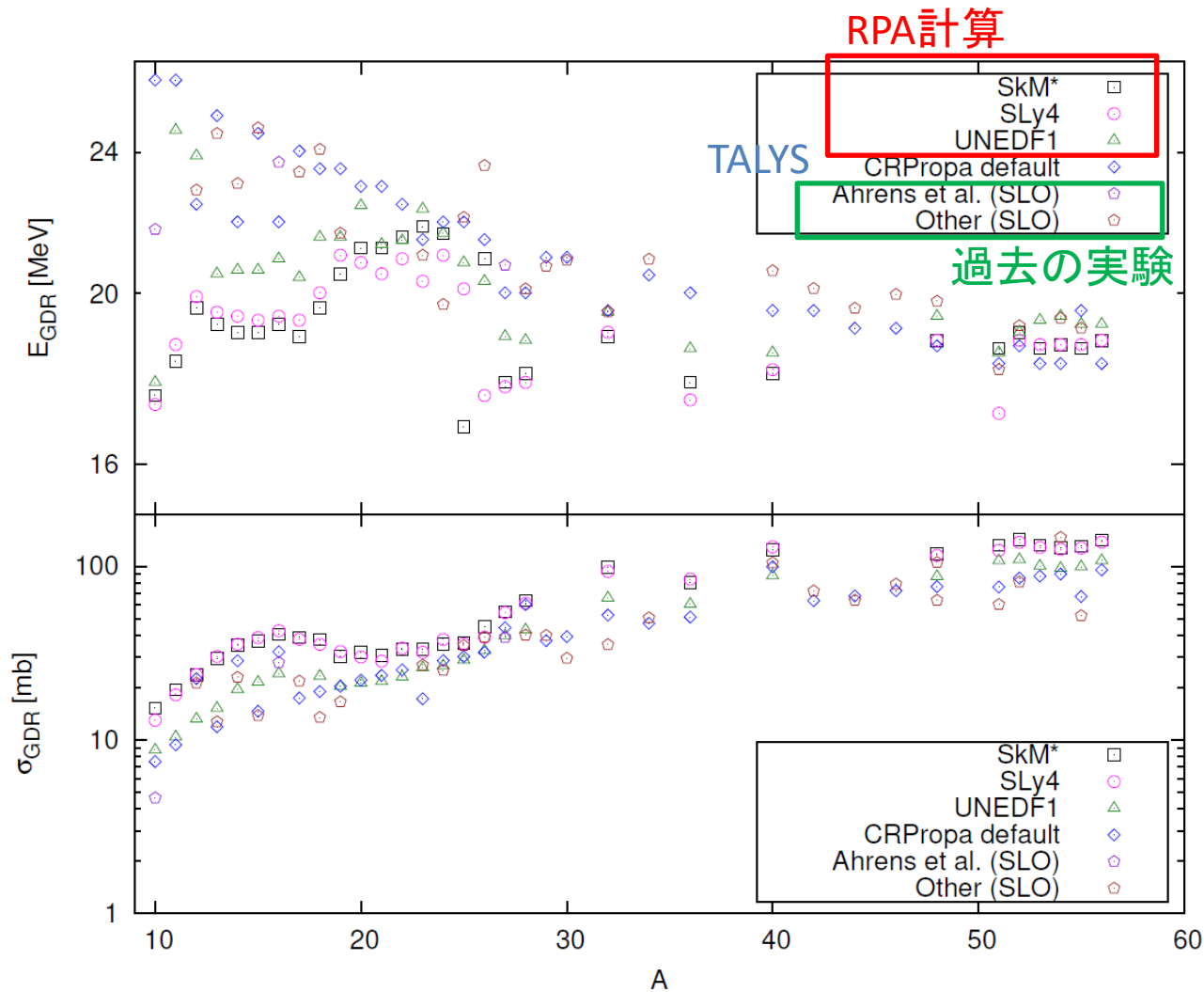
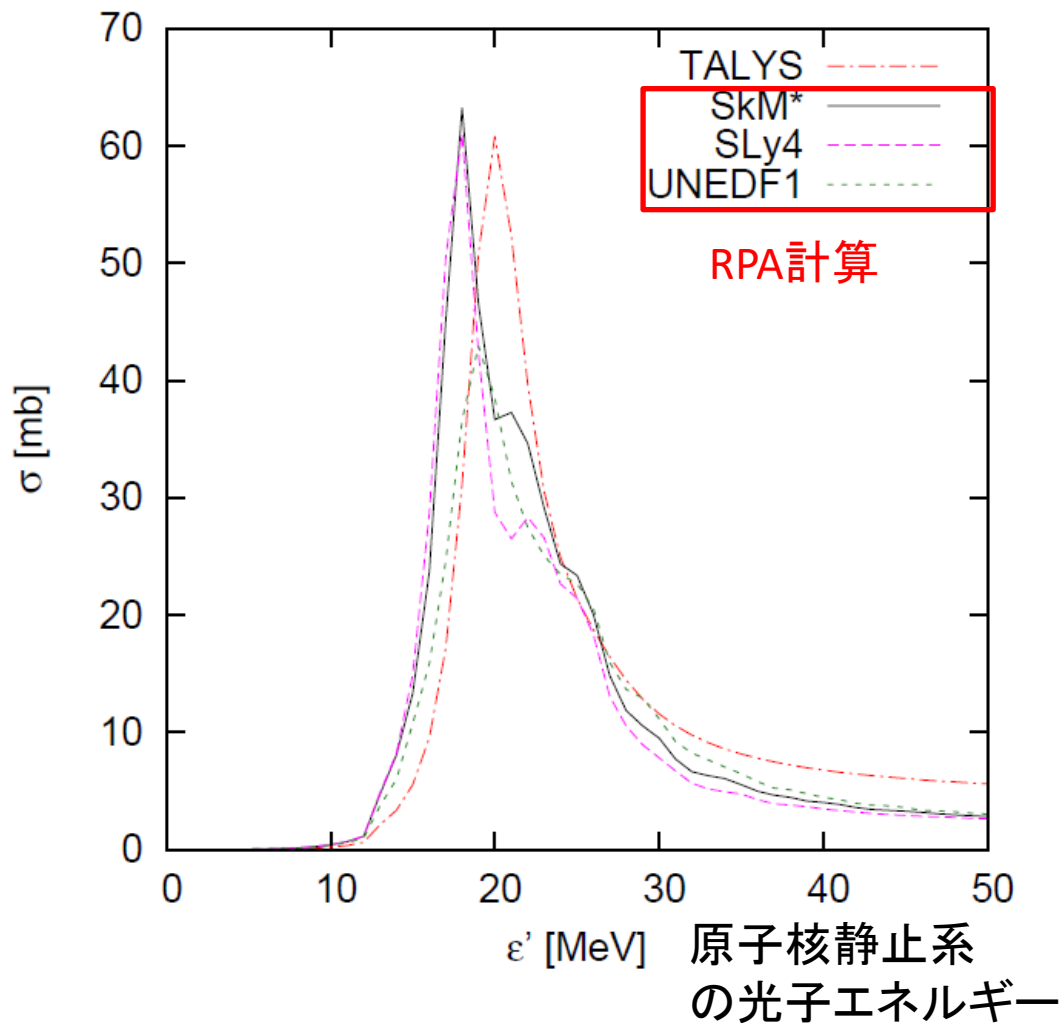
EK+
*Astroparticle
Physics*, **152**,
102866 (2023)

→ 反応断面積の計算結果を宇宙線伝播計算コード CRPropaに入れて宇宙線伝播シミュレーション

→ $E > 10^{18.7}$ eV のAuger実験の結果(エネルギースペクトル, $\ln A$ の平均, $\ln A$ の分散)と比較

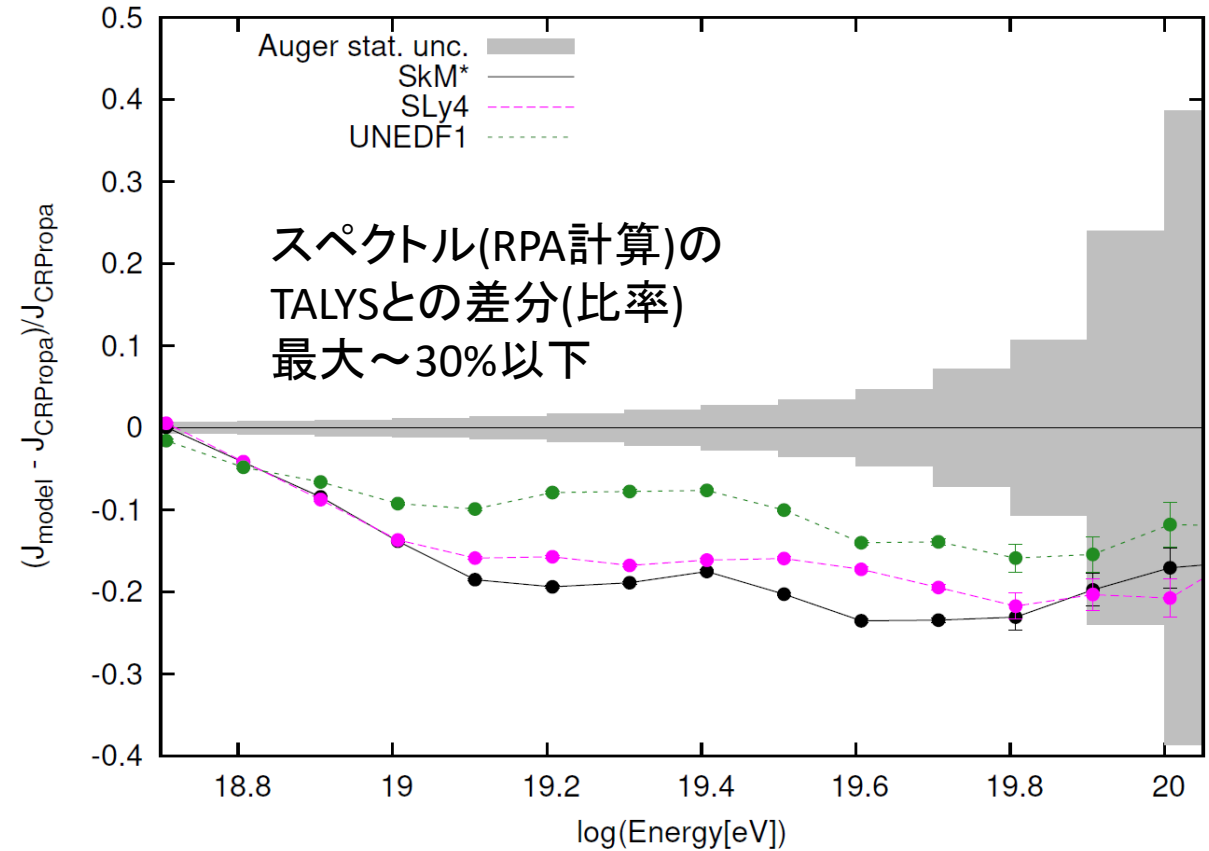
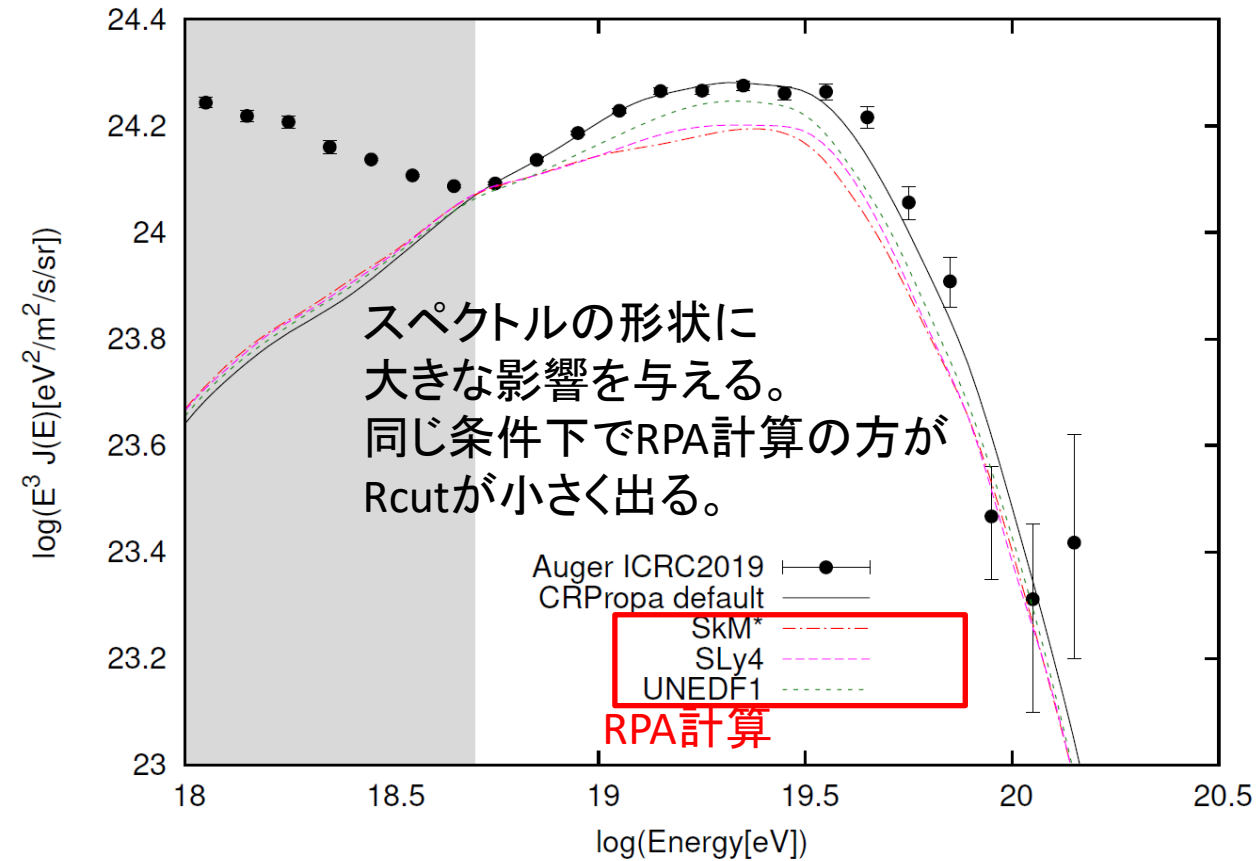
1. TALYSのbest fitパラメタを使った時の宇宙線スペクトルの違い
2. RPA計算の結果を使ったシミュレーション結果でフィット
3. どの原子核が大きな違いを生むのか

GDRピークエネルギー

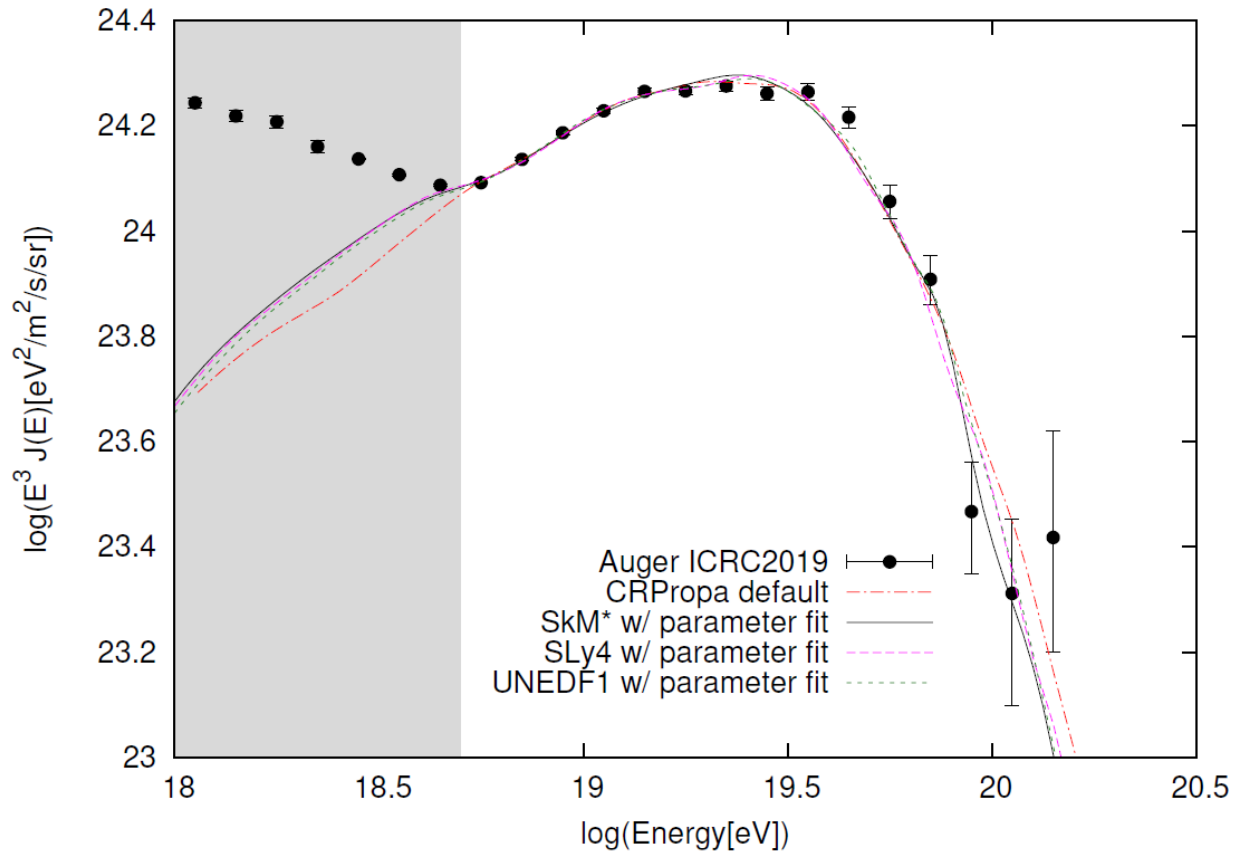


一つ一つの原子核のピークの違いは数 MeV程度だが、系統的な違い
 →結果に最も大きな影響

TALYSのbest fitパラメタを使った時の シミュレーション結果の比較

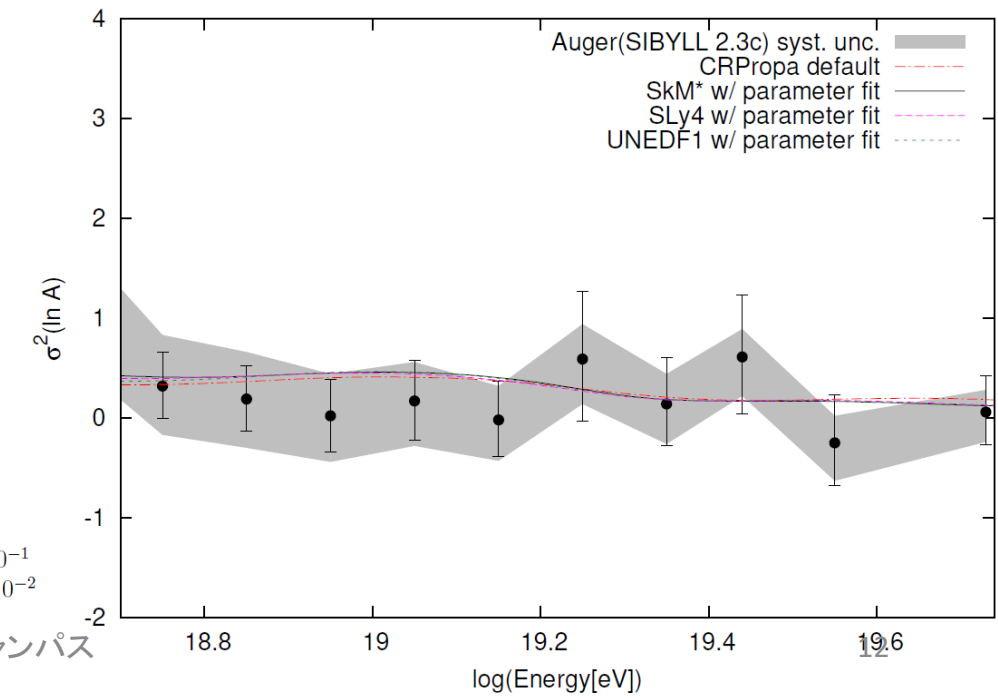
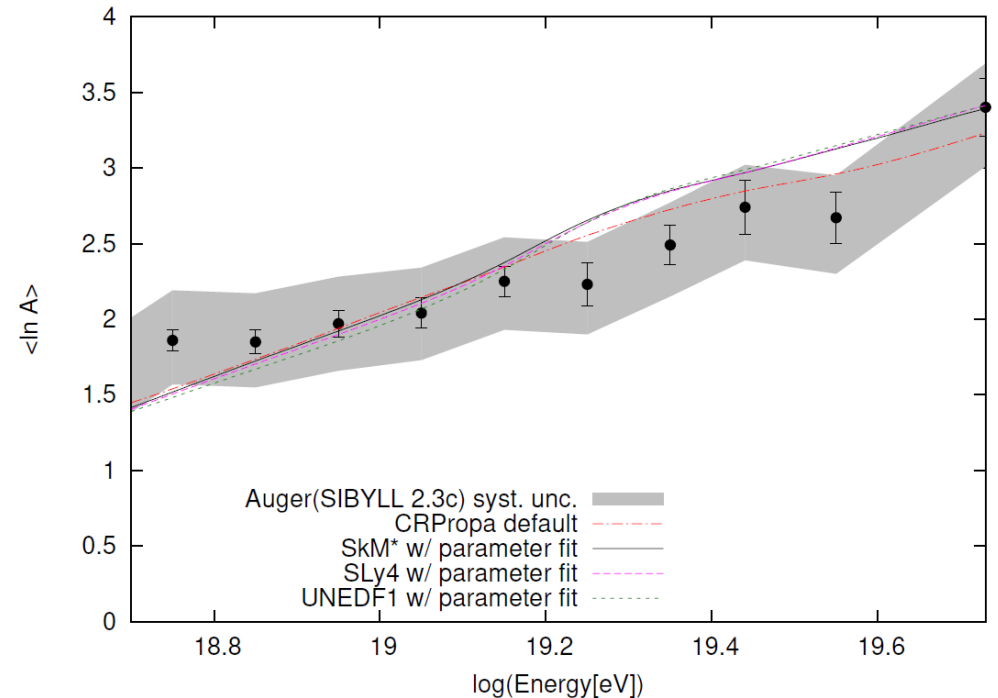


RPA計算を使った シミュレーションでフィットした結果

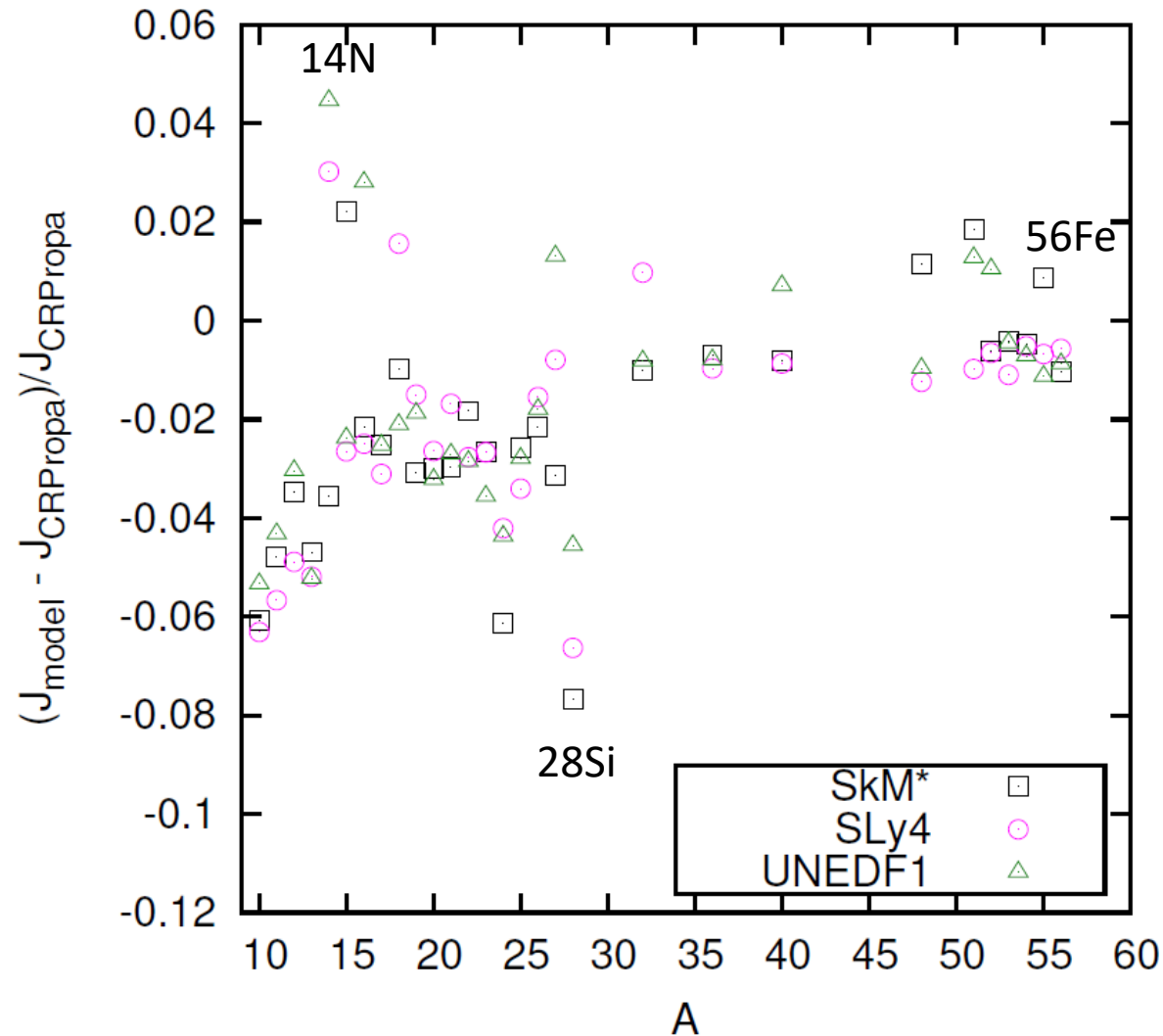


RPA計算の結果を使ってフィットすると、
スペクトルの違いを補うために
高いRcut ($10^{18.1}$ vs $10^{18.2}$ V)になり、
重い原子核組成が宇宙線源で
比較的多い傾向になった。

| | TALYS | SLy4 |
|---------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| $f_A(^1\text{H})$ (%) | 0 | 0 |
| $f_A(^4\text{He})$ (%) | 94.8 ± 0.4 | 92.9 ± 0.7 |
| $f_A(^{14}\text{N})$ (%) | 5.0 ± 0.4 | 6.6 ± 0.7 |
| $f_A(^{28}\text{Si})$ (%) | $(1.9 \pm 0.3) \cdot 10^{-1}$ | $(5.3_{-0.8}^{+0.9}) \cdot 10^{-1}$ |
| $f_A(^{56}\text{Fe})$ (%) | $(4.8_{-1.1}^{+1.4}) \cdot 10^{-3}$ | $(1.7 \pm 0.4) \cdot 10^{-2}$ |



エネルギースペクトルに影響の大きい原子核



- 一つ一つの原子核の光核反応の断面積をTALYSから変更し、スペクトルの違いの最大値を調査
- スペクトルの違いには、**28Si**の影響が最も大きいことが分かった。

今後の展望

Assumption: **Identical** UHECR sources are **isotropically** distributed.
Composition: **H, He, N(CNO), Si, Fe**
Power law: $dN/dE \propto E^{-\nu}$
Cutoff rigidity: **R_{cut}**
Evolution parameter: $(1+z)^m$

Observed results of air showers:
Pierre Auger Collab.
Telescope Array Collab.

Simulation of the propagation of UHECRs such as CRPropa

Photo-nuclear reaction model: TALYS etc.

- 観測結果とシミュレーションの改善
 - **PANDORA プロジェクト**
→ 光崩壊反応の改善
伝播シミュレーションに反映
 - 宇宙線到来方向の異方性解析の進展
 - $E > 8 \text{ EeV}$ 調和解析 dipoleの発見
 - $E > 41 \text{ EeV}$ スターバースト銀河との相関
→ 同じ宇宙線源の等方分布という仮定の修正
- 超高エネルギー宇宙線原子核の伝播シミュレーションを使って、更に精密な観測結果の解釈

まとめ

- 超高エネルギー宇宙線による空気シャワー最大発達大気深さ X_{max} の観測
→ 約 $2 \cdot 10^{18}$ eVからエネルギーが高くなるほど原子核が重くなる傾向を観測 (Pierre Auger実験).
- 特に軽原子核の光核反応は、実験と理論のどちらも系統誤差を再検討する必要がある。
→ PANDORAプロジェクト
- 宇宙線伝播シミュレーション
 - 過去の実験結果を使ったTALYSと理論的なDFT-RPAモデルを使って、宇宙線伝播シミュレーションの結果を比較した。
 - エネルギースペクトルへの影響が大きく、光核反応による違いはPierre Auger実験の統計誤差よりも大きい。
→ 仮定したモデルでは ^{28}Si の光核反応の影響が最も大きい。
- 今後の展望
 - PANDORAプロジェクトの加速器実験による詳細な測定。
 - DFTの相互作用パラメタ調整や平均場近似を超えた補正など、理論的なモデルにも進展が期待される。
 - 超高エネルギー宇宙線観測の進展
→ 将来、宇宙線伝播シミュレーションに反映

