



# C02分担者研究紹介 光核反応と宇宙線観測



arXiv: 2206.03447 [astro-ph.HE]

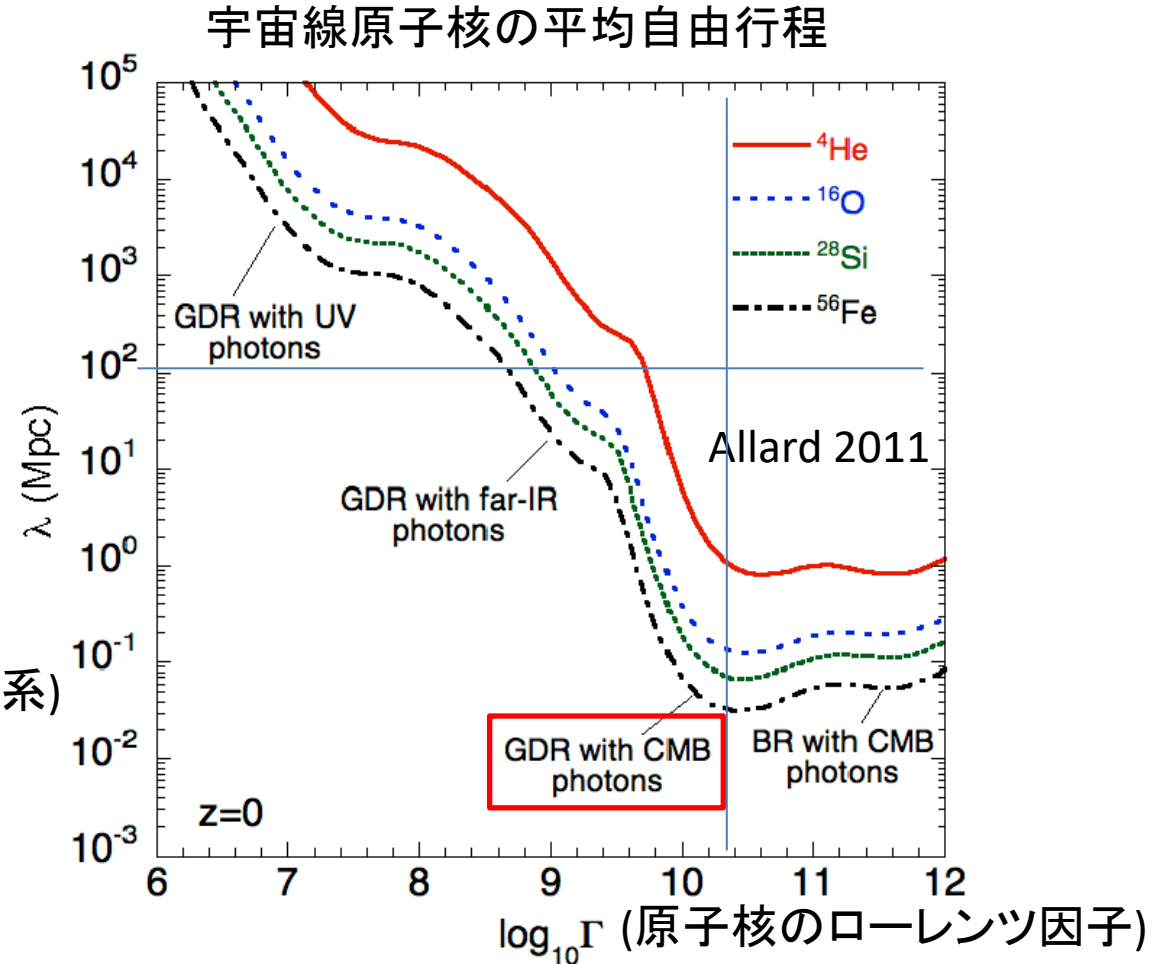
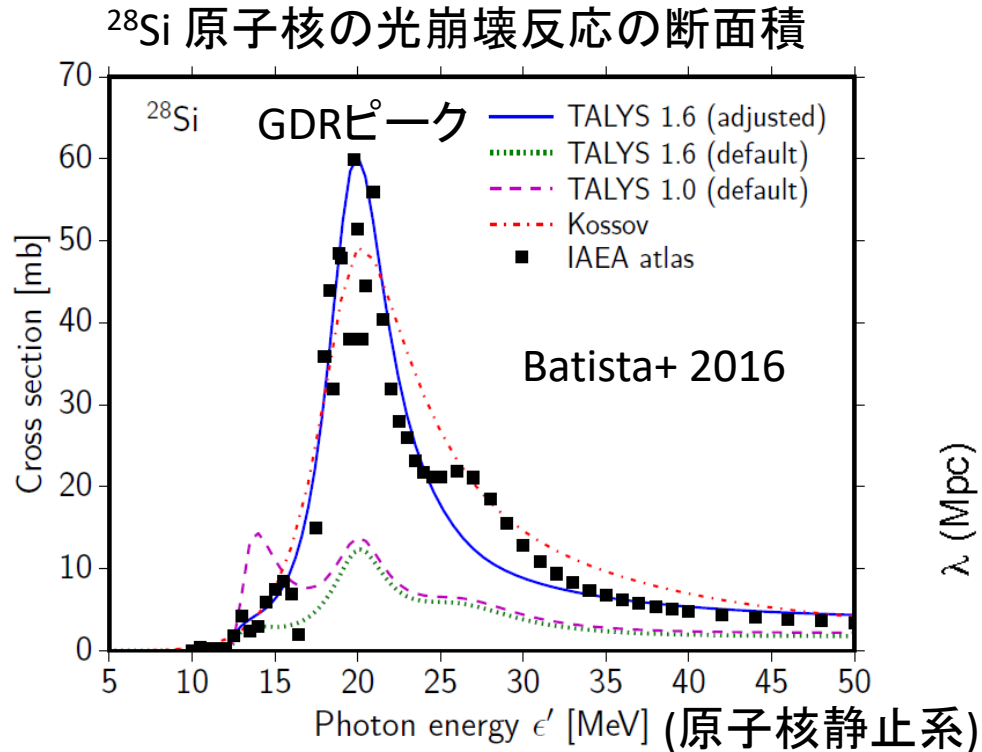
理研, 東工大ZC研<sup>A</sup>, 原子力機構<sup>B</sup>, 北大<sup>C</sup>, 阪大RCNP<sup>D</sup>, 筑波大計科七<sup>E</sup>  
木戸英治, 稲倉恒法<sup>A</sup>, 宇都野穰<sup>B</sup>, 木村真明<sup>C</sup>, 小林信之<sup>D</sup>, 清水則孝<sup>E</sup>,  
民井淳<sup>D</sup>, 長瀧重博

2023年度学変A申請「高工ネ原子核宇宙」勉強会

# 概要

- 研究の背景、動機
- 密度汎関数理論(DFT)乱雑位相近似(RPA)計算の結果を使った超高エネルギー宇宙線(UHECRs)原子核の伝播シミュレーション
- ピエールオージェ (Pierre Auger)実験の結果とシミュレーションの比較
- 今後の展望
- まとめ

# 超高エネルギー宇宙線原子核の相互作用



Pierre Auger実験による宇宙線観測

→最高エネルギーで原子核組成が重くなる傾向

宇宙の背景光子(CMBなど)と相互作用

→原子核静止系で～数10 MeVの光は吸収

→原子核の光励起: 電気双極子(E1)励起が主

**巨大双極子共鳴(GDR)のピーク～20MeV**

→陽子, 中性子, ヘリウム原子核などを

励起した原子核が放出してエネルギー損失(光崩壊)

**最高エネルギーで**

**CMB光子とのGDRを伴った光崩壊が最も**

**重要な相互作用**

平均自由行程 < 100 Mpc

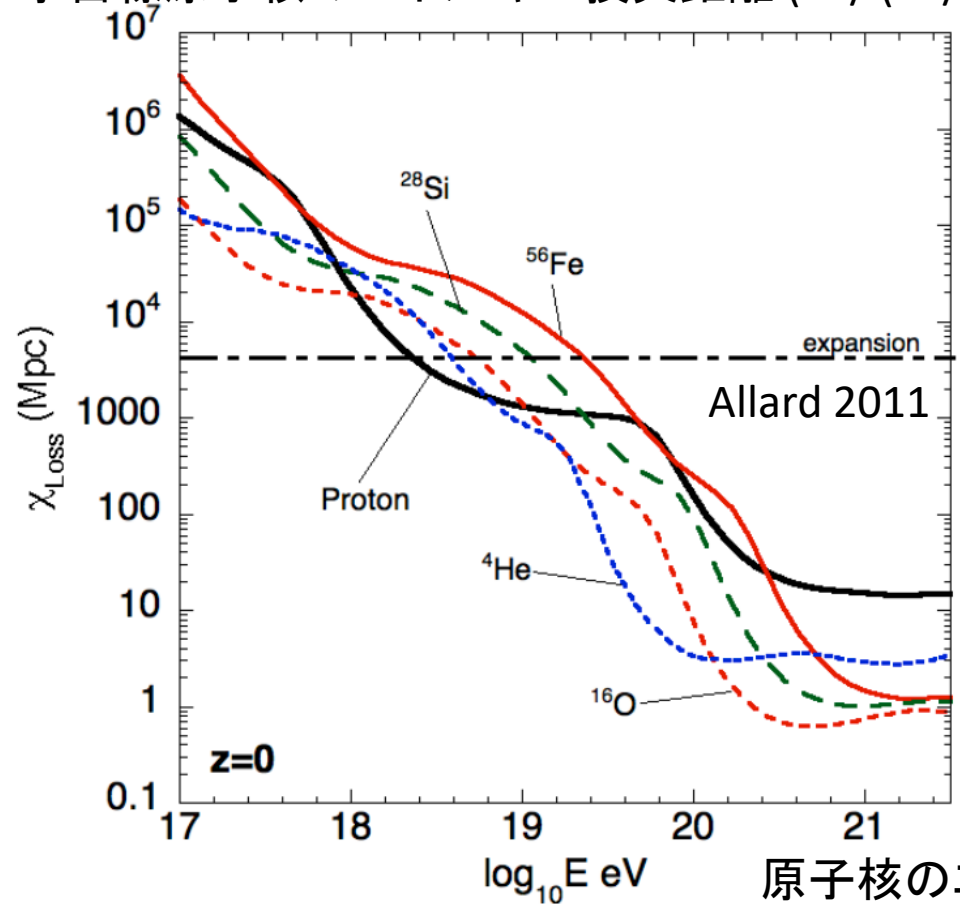
# 超高エネルギー宇宙線原子核の相互作用2

宇宙線原子核のエネルギー:  
ローレンツ因子 $\Gamma$  × 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:  
 $\sim A \times 4 \cdot 10^{18} \text{ eV}$

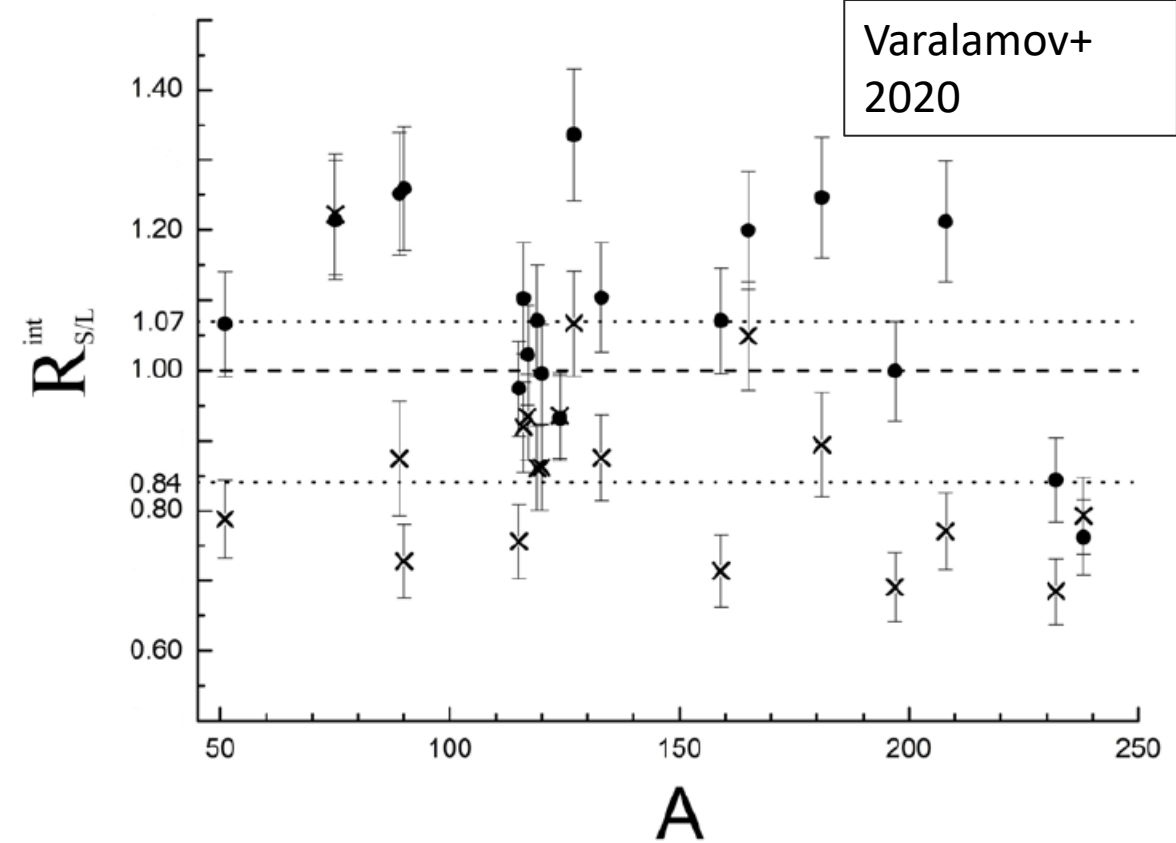
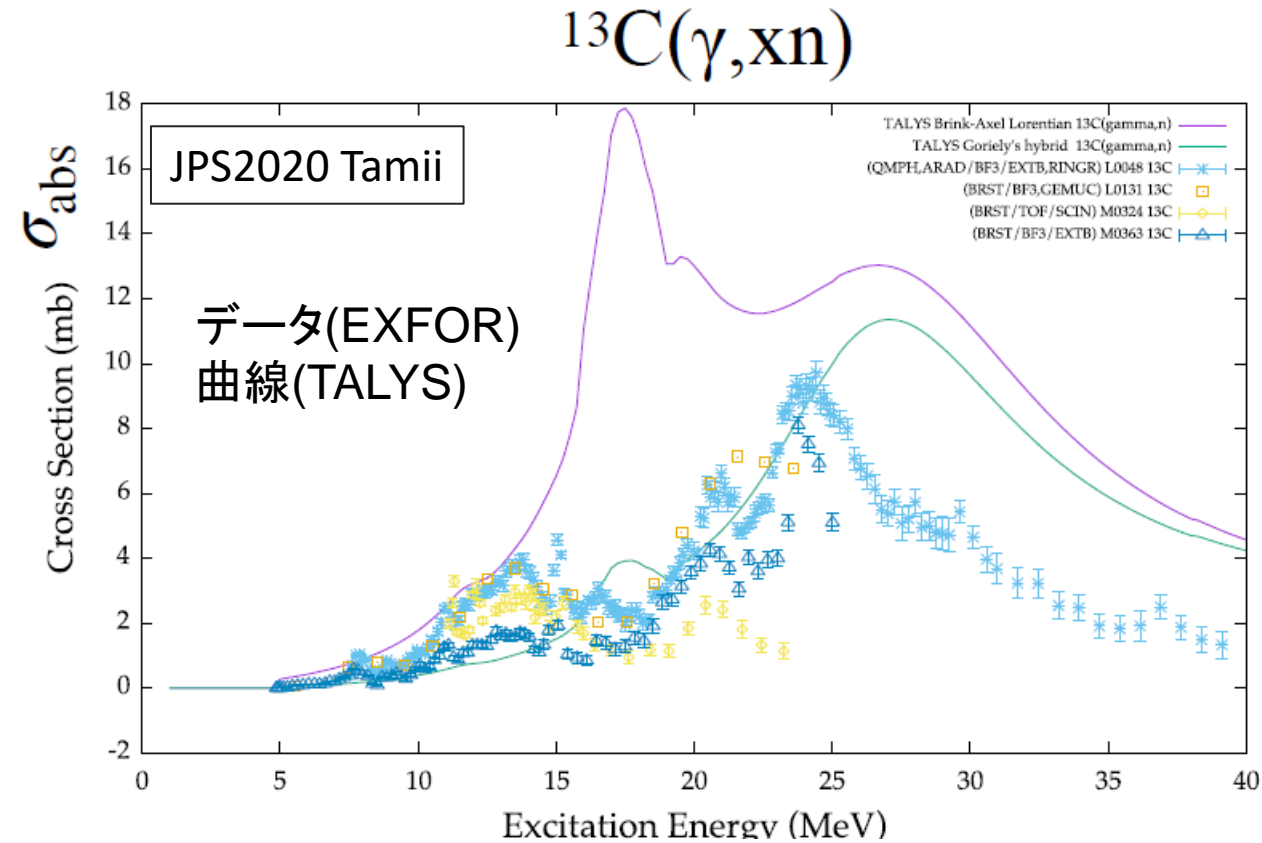
宇宙線原子核のエネルギー損失距離 ( $-E/(dE/dx)$ )



原子核のエネルギー:  
 $E_N = m_N c^2 \Gamma$   
 $= A m_p c^2 \Gamma$

# 過去の実験結果の例

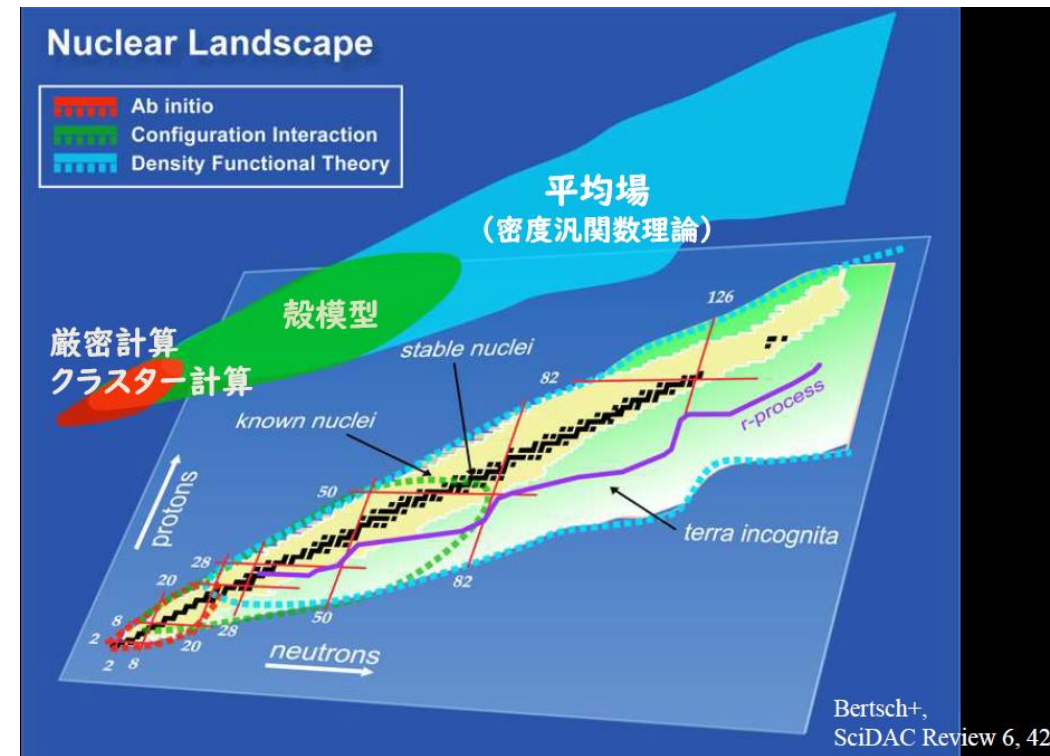
二つの加速器施設(Saclay(France)  
Livermore(USA))で測定した19原子核の  
( $\gamma, 1n$ )(●), ( $\gamma, 2n$ )(x)の反応断面積の比率



- 実験データが少ない
- 実験、理論とともに系統誤差がよく分からない

# 原子核理論モデル

- 現象論的なモデル
  - PSB  
光崩壊の娘核が一つに決められている古いモデル。
  - **TALYS**  
多くの宇宙線伝播コード(CRPropa, SimProp, Princeなど)で原子核実験結果の断面積をE1強度の関数に入力して使用  
→ 原子核実験の測定結果をそのまま反映
- 原子核理論モデル
  - 厳密計算
  - 反対称化分子動力学(AMD)
  - 殻模型
  - **密度汎関数理論(DFT) ← 今回計算**



# PANDORAプロジェクト

JPS2020 Tamii

RCNP

ELI-NP

iThemba LABS

TU-Darmstadt  
U. Milano/INFN

## Nuclear Theory

AMD

NRFT

RPA/DFT

TALYS

## UHECR Theory

Propagation  
and production

*Osaka Univ.*

A. Tamii, N. Kobayashi, T. Sudo, Z. Yang, T. Furuno, M. Murata, A. Inoue, H. Mori  
*ELI-NP*

P.-A. Söderström, D. Balabanski, L. Capponi, A. Dhal, T. Petruse, D. Nichita, Y. Xu  
*iThemba LABS, Univ. Witwatersland, Stellenbosh Univ.*

L. Pellegri, R. Neveling, F.D. Smit, J.A.C. Bekker, S. Binda, H. Jivan, T. Khumal, M. Wiedeking, K.C.W. Ki, P. Adsley, L.M. Donaldson, E. Sideras-Haddado, K.L. Malatji, S. Jongile, A. Netshiya

P. von Neumann-Cosel, N. Pietralla, J. Isaak, J. Kleemann, M. Spall

A. Bracco, F. Camera, F. Crespi, O. Wieland

M. Kimura, Y. Taniguchi, H. Motoki **Antisymmetrized Molecular Dynamics**

E. Litvinova, P. Ring, H. Wibowo **Nuclear Relativistic Field Theory**

T. Inakura

S. Goriely, E. Khan

D. Allard, B. Baret, I. Deloncle, J. Kiener, E. Parizot, V. Tatischeff

S. Nagataki, E. Kido, J. Oliver, H. Haoning

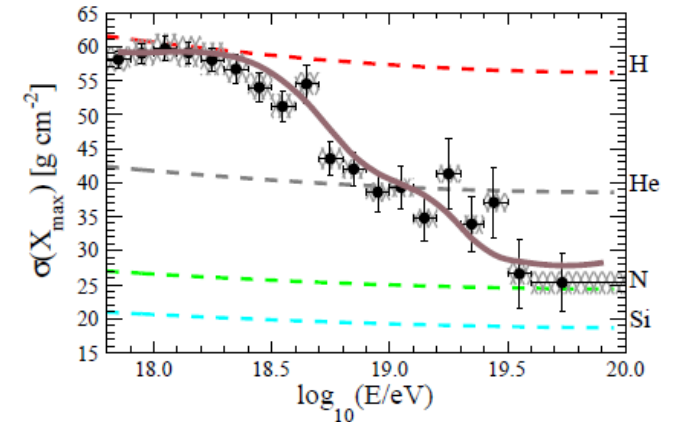
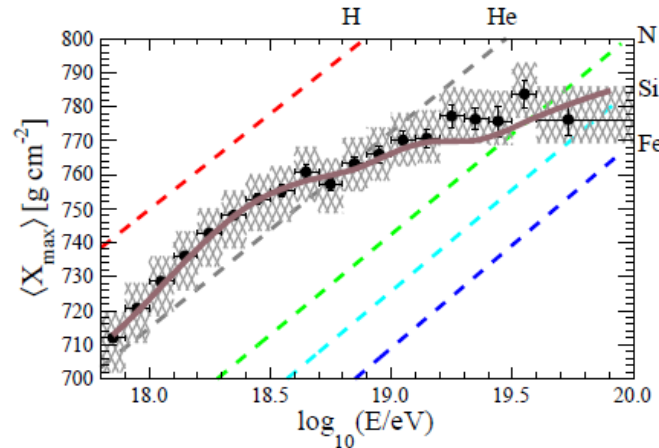
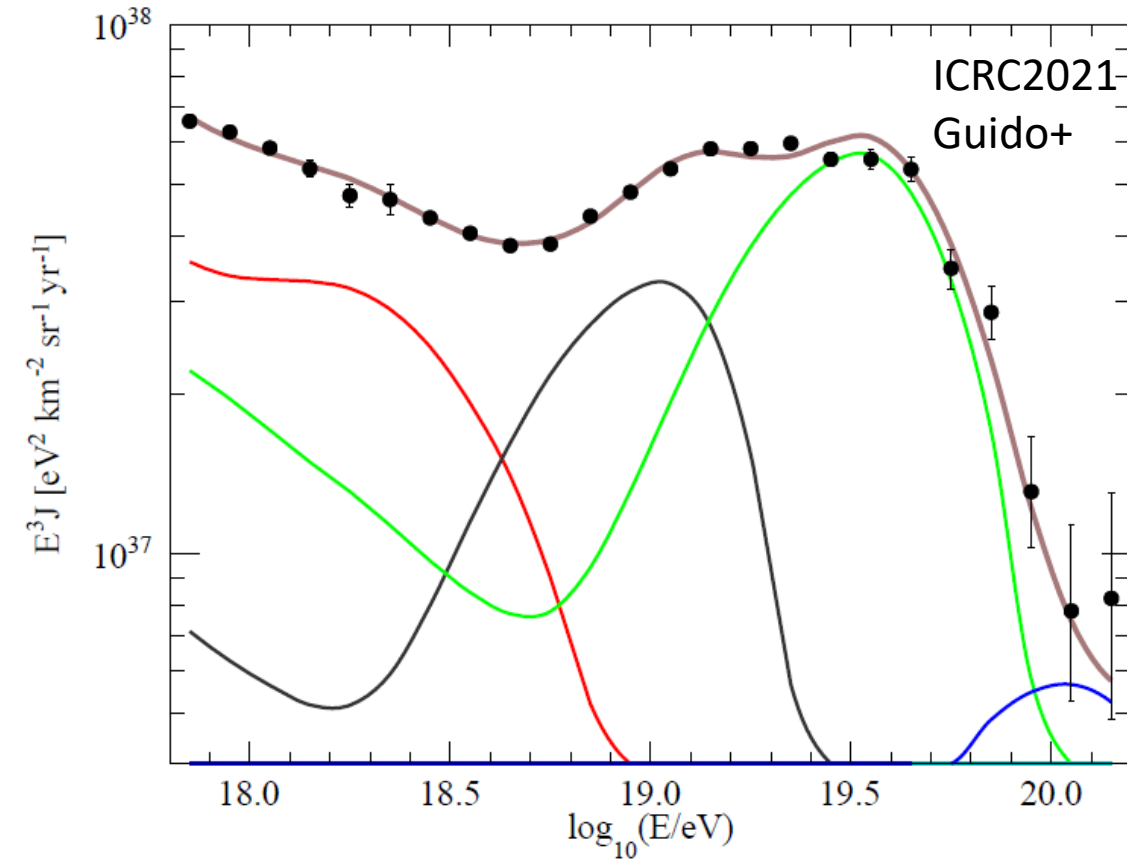
NC Neutrino Detection Y. Koshio, M. Sakuda, M.S. Reen,

- 新しい2つの実験手法
- 3つの実験施設
  - RCNP (日本)
  - iThemba LABS (南アフリカ)
  - ELI-NP (ルーマニア)
- 荷電粒子放出崩壊を含めた光核反応について世界で初めて系統的に測定を行う。(2022年-)
- 実験結果、理論モデル両方の系統誤差の理解を目指す
- 全ての原子核を測定できる訳ではない
  - 測定しない原子核のために現象論的でない
  - 理論モデルの構築が必要
- 実験で原子核理論モデルを検証する。

→ 既存の理論モデル間の違いが宇宙線原子核の伝播に与える影響を調べる。

# Pierre Auger実験による 観測結果のfit

A = 1 (red), 2 ≤ A ≤ 4 (grey), 5 ≤ A ≤ 22 (green), 23 ≤ A ≤ 38 (cyan), A ≥ 39 (blue)



Xmax: 空気シャワー最大発達の大気深さ

$$J(E) = \sum_A f_A \cdot J_0 \cdot \left(\frac{E}{E_0}\right)^{-\gamma} \cdot \begin{cases} 1, & E < Z_A \cdot R_{\text{cut}}; \\ \exp\left(1 - \frac{E}{Z_A \cdot R_{\text{cut}}}\right), & E > Z_A \cdot R_{\text{cut}}. \end{cases}$$

← 宇宙線源の  
スペクトル  
Rcut: 低い →  
光核反応の  
影響小

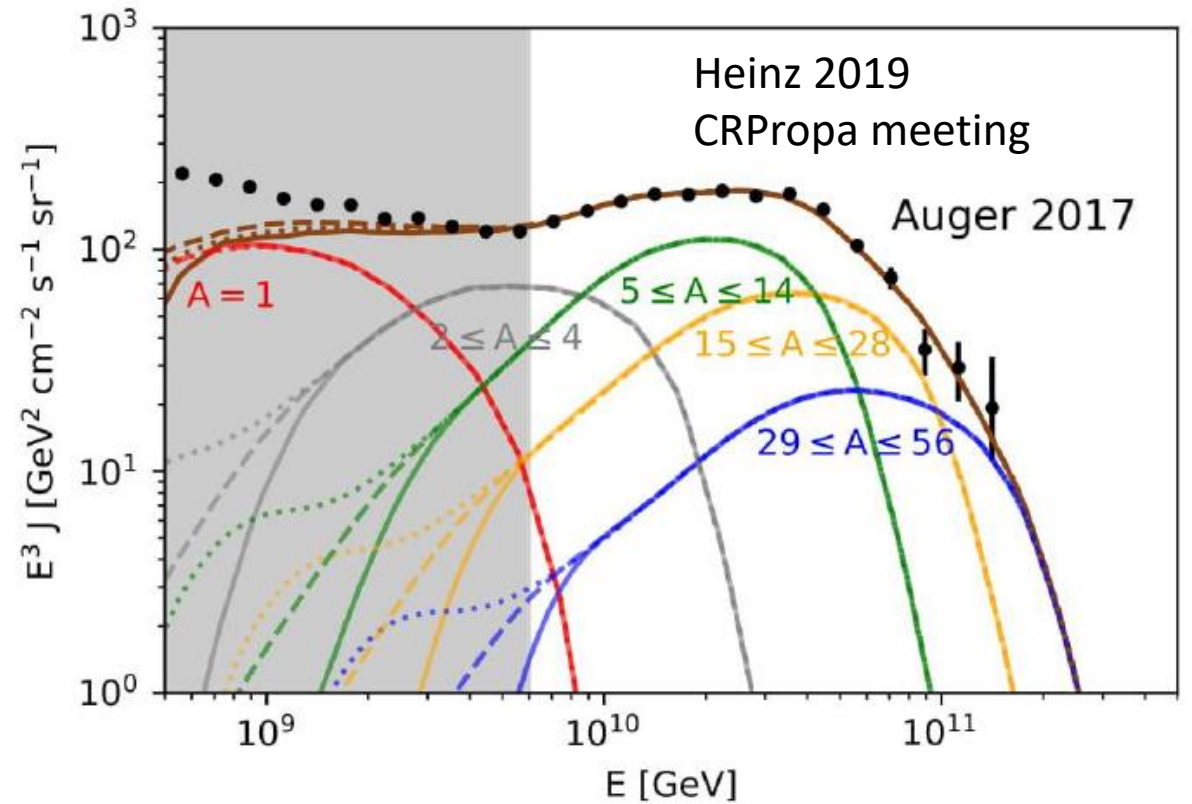
Galactic contribution (at Earth)		N+Si		-
$J_0^{\text{gal}}$ [eV <sup>-1</sup> km <sup>-2</sup> sr <sup>-1</sup> yr <sup>-1</sup> ]		(1.07 ± 0.06) · 10 <sup>-13</sup>		-
log <sub>10</sub> (R <sub>cut</sub> <sup>gal</sup> /V)		17.48 ± 0.02		-
f <sub>N</sub> (%)		93.0		-
EG components (at the sources)				
$\mathcal{L}_0$ [erg Mpc <sup>-3</sup> yr <sup>-1</sup> ]	Low energy	High energy	Low energy	High energy
$\gamma$	7.28 · 10 <sup>45</sup>	4.4 · 10 <sup>44</sup>	1.7 · 10 <sup>46</sup>	4.5 · 10 <sup>44</sup>
log <sub>10</sub> (R <sub>cut</sub> /V)	3.30 ± 0.05	-1.47 ± 0.12	3.49 ± 0.02	-1.98 ± 0.10
	24 (lim.)	18.19 ± 0.02	24 (lim.)	18.16 ± 0.01
I <sub>H</sub> (%)	100 (fixed)	0.0	49.87	0.0
I <sub>He</sub> (%)	-	27.17	10.92	28.60
I <sub>N</sub> (%)	-	69.86	36.25	69.05
I <sub>Si</sub> (%)	-	0.0	0.0	0.0
I <sub>Fe</sub> (%)	-	2.97	2.96	2.35
$D_J$ (N <sub>J</sub> )	49.5 (24)		60.1 (24)	
$D_{X_{\max}}$ (N <sub>X<sub>max</sub></sub> )	593.8 (329)		554.8 (329)	
$D$ (N)	643.3 (353)		614.9 (353)	

光核反応モデル:  
TALYS, PSB  
現象論的なモデル  
間を比較

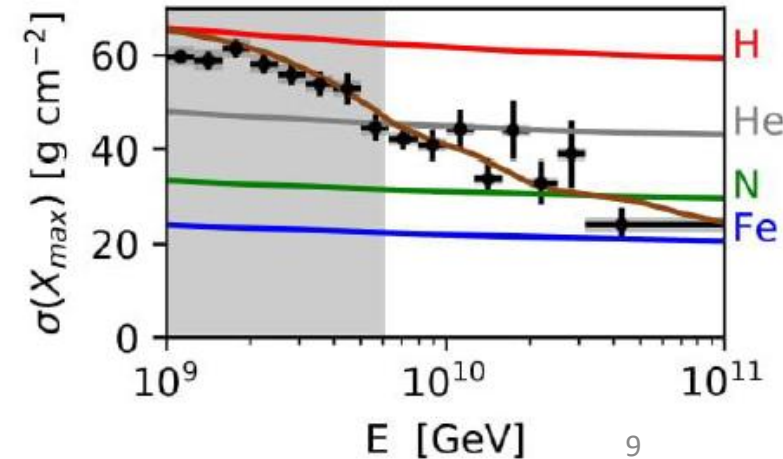
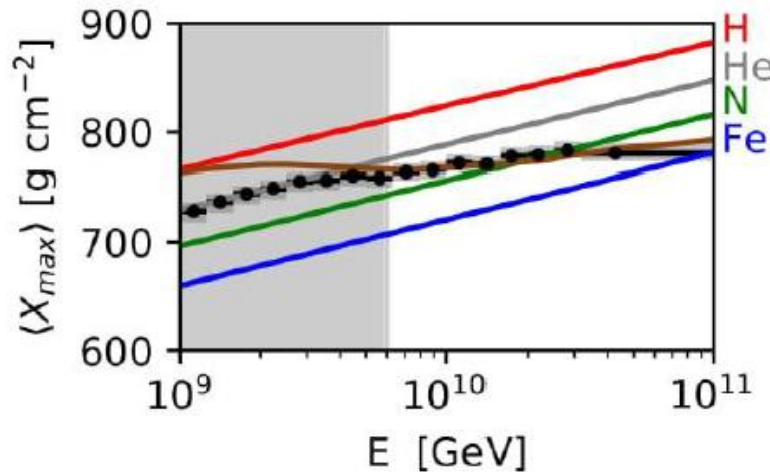
# Results: Best fit spectrum

For combination **Talys – Sibyll 2.3**

- 原子核反応モデル  
Fit mainly sensitive to envelope of cutoffs
- 空気シャワーの相互作用モデル
- Fit-range insensitive above  $z = 1!$
- Composition below ankle proton dominated (by construction) ...
- ... additional heavy component needed (galactic)



	best fit (●)		
$\gamma$	$-0.80^{+0.27}_{-0.23}$		
$R_{\max}$ (GV)	$(1.6 \pm 0.2) \cdot 10^9$		
$m$	$4.2^{+0.4}_{-0.6}$		
$\delta E$	$0.14^{+0.00}_{-0.03}$		
$f_A(\%)$	H	He	N
	$0.0^{+42.6}_{-0.0}$	$82.0^{+3.8}_{-6.4}$	$17.3^{+1.0}_{-1.1}$
	Si	Fe	
	$0.6 \pm 0.1$	$(2.0 \pm 0.8) \cdot 10^{-2}$	
$I_A^9(\%)$	H	He	N
	$0.0^{+1.2}_{-0.0}$	$9.8^{+2.8}_{-2.9}$	$69.2^{+1.5}_{-1.6}$
	Si	Fe	
	$17.9^{+3.2}_{-3.5}$	$3.2^{+1.2}_{-1.3}$	
$\chi^2 / \text{dof}$	27.0 / 21		



# Model dependence of the Fit

Compared in  $\gamma - m$  space

## Disintegration model

- Qualitatively similar fits
- PSB: **Lighter** injection
- Peanut/Talys: **Heavier** injection

## Shower model

- Epos-LHC: Two distinct minima **avoids disintegration**
- Sibyll 2.3: Larger allowed space **prefers disintegration**
- QGSjet 4 II: Overall rather **bad fit**

See also: Auger Collaboration JCAP02(2013)026  
Auger Collaboration JCAP04(2017)038

$\gamma$ : エネルギースペクトルの power index  
 $m$ : 宇宙線源の進化パラメタ

現象論的な  
光核反応  
モデル間の比較

Talys

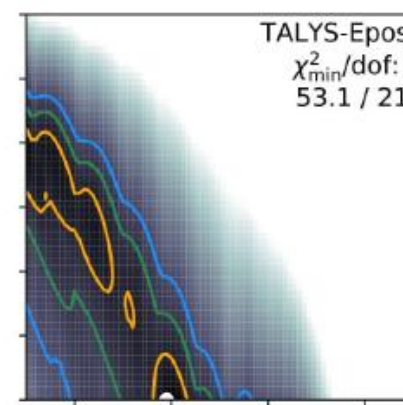
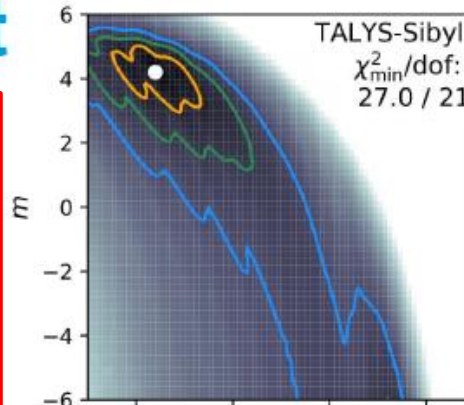
PSB

Peanut

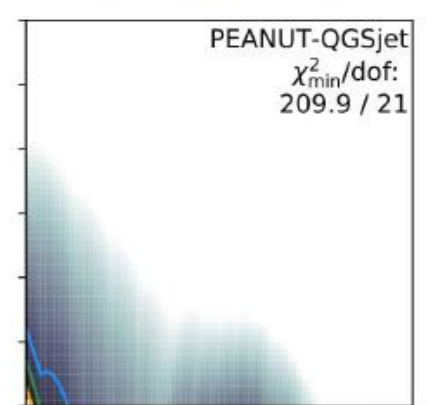
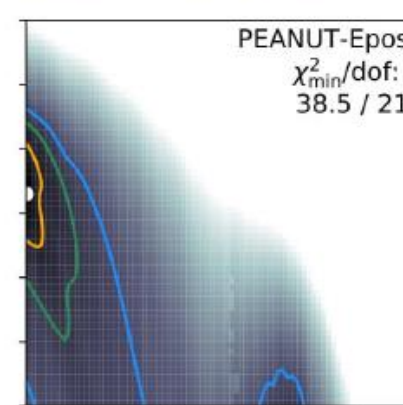
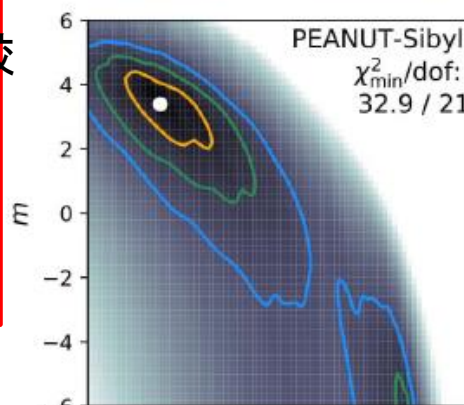
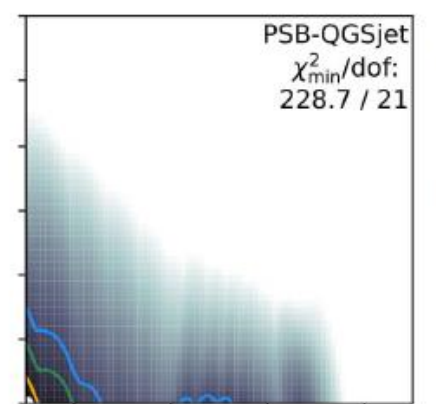
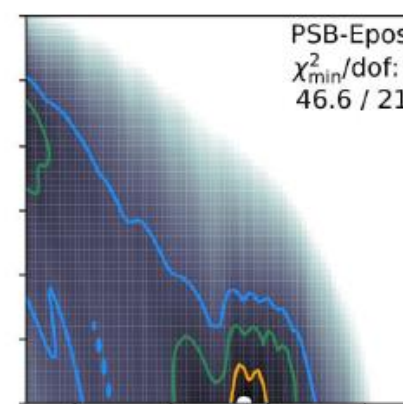
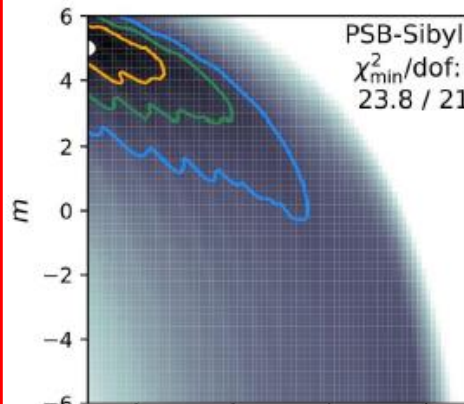
Sibyll 2.3

Epos-LHC

QGSjet-04 II



Heinz 2019  
CRPropa meeting



# DFT, RPA計算を使った宇宙線原子核伝播シミュレーション

- **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**
  - 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シミュレーション結果の違い**
  - 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**

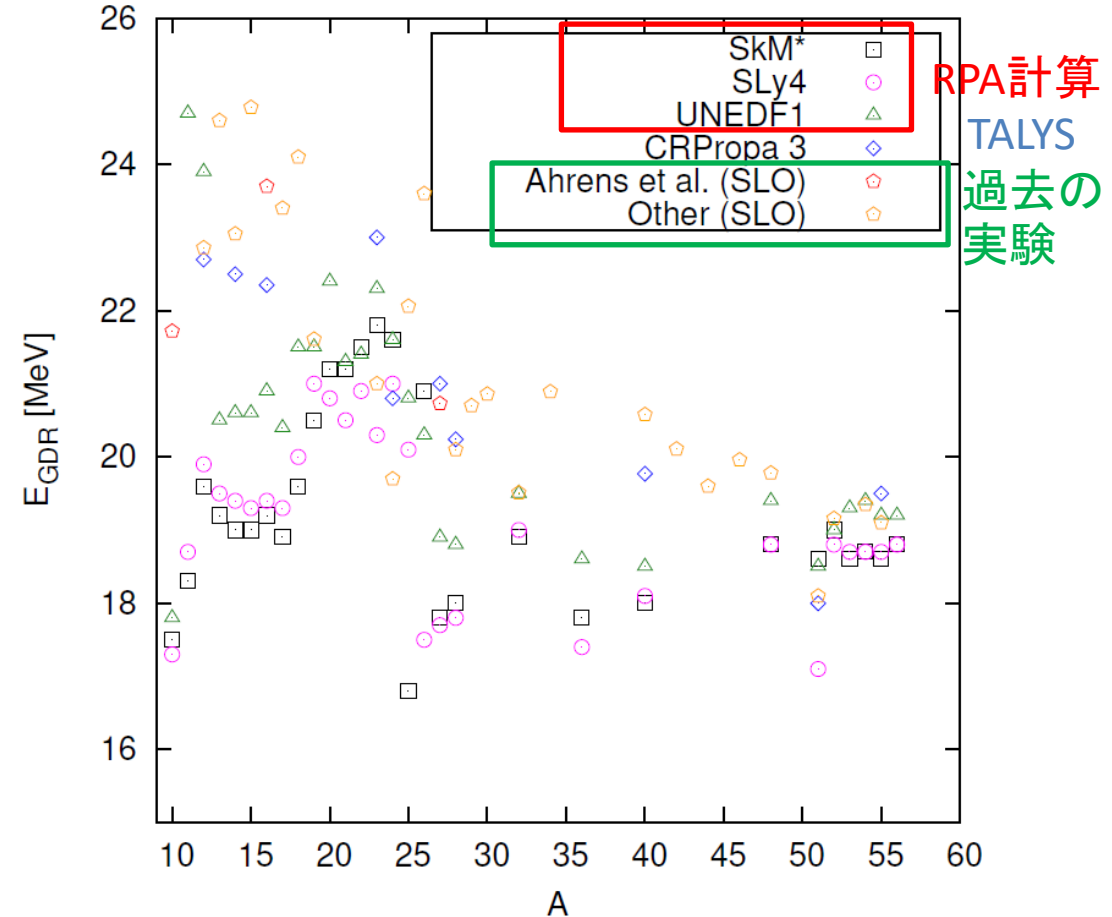
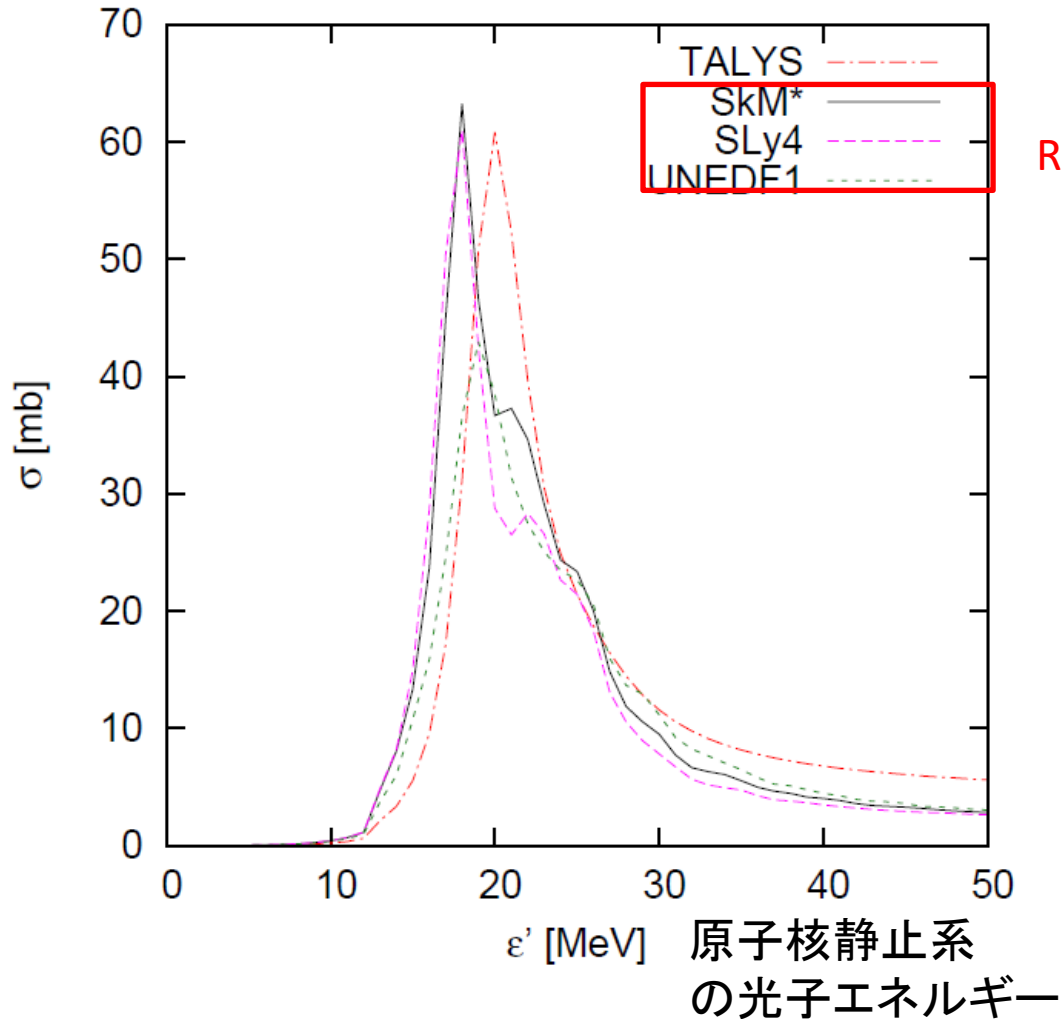
# 超高エネルギー宇宙線(UHECRs)原子核の 伝播シミュレーションのパラメタ

$$\frac{dN_A}{dE} = J_A(E) = f_A J_0 \left( \frac{E}{10^{18} \text{ eV}} \right)^{-\gamma} \times f_{\text{cut}}(E, Z_A R_{\text{cut}}), \quad f_{\text{cut}}(E, Z_A R_{\text{cut}}) = \begin{cases} 1 & (E < Z_A R_{\text{cut}}) \\ \exp\left(1 - \frac{E}{Z_A R_{\text{cut}}}\right) & (E > Z_A R_{\text{cut}}) \end{cases}$$

$$0 < z < 1$$

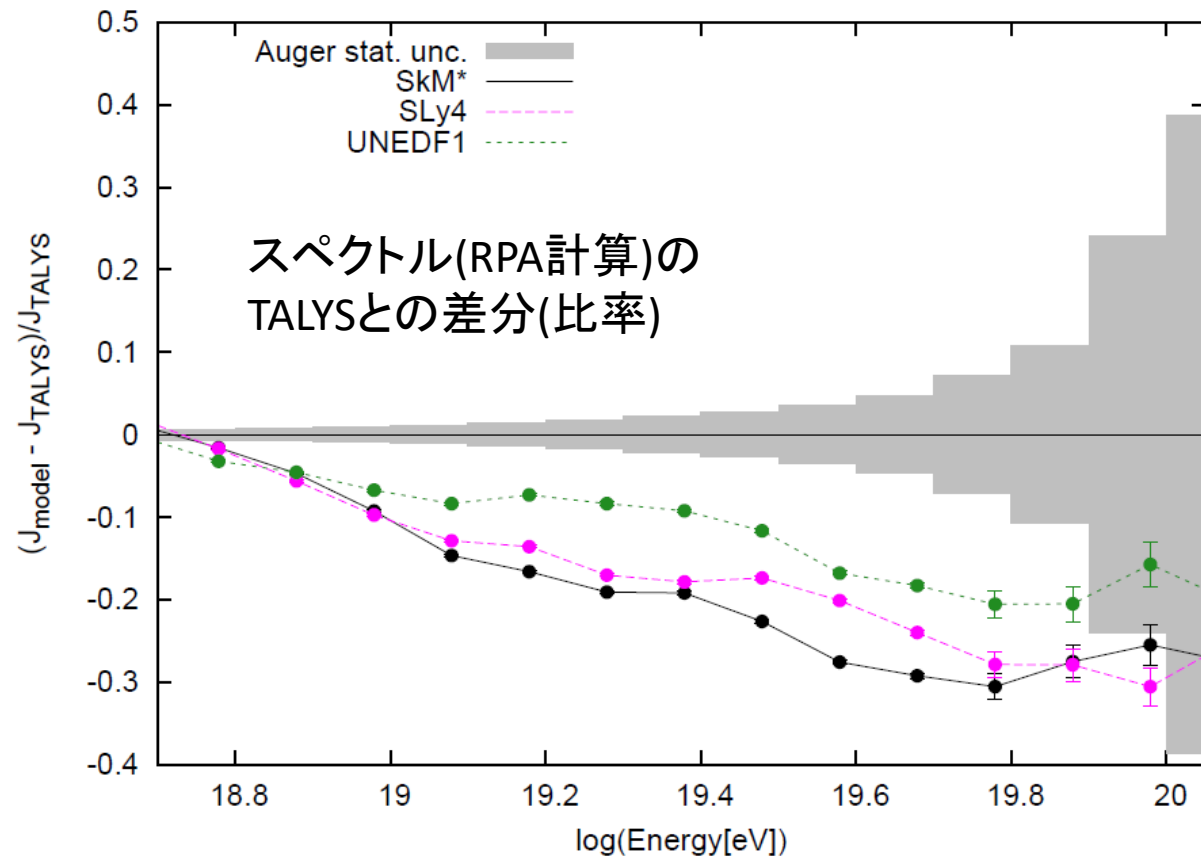
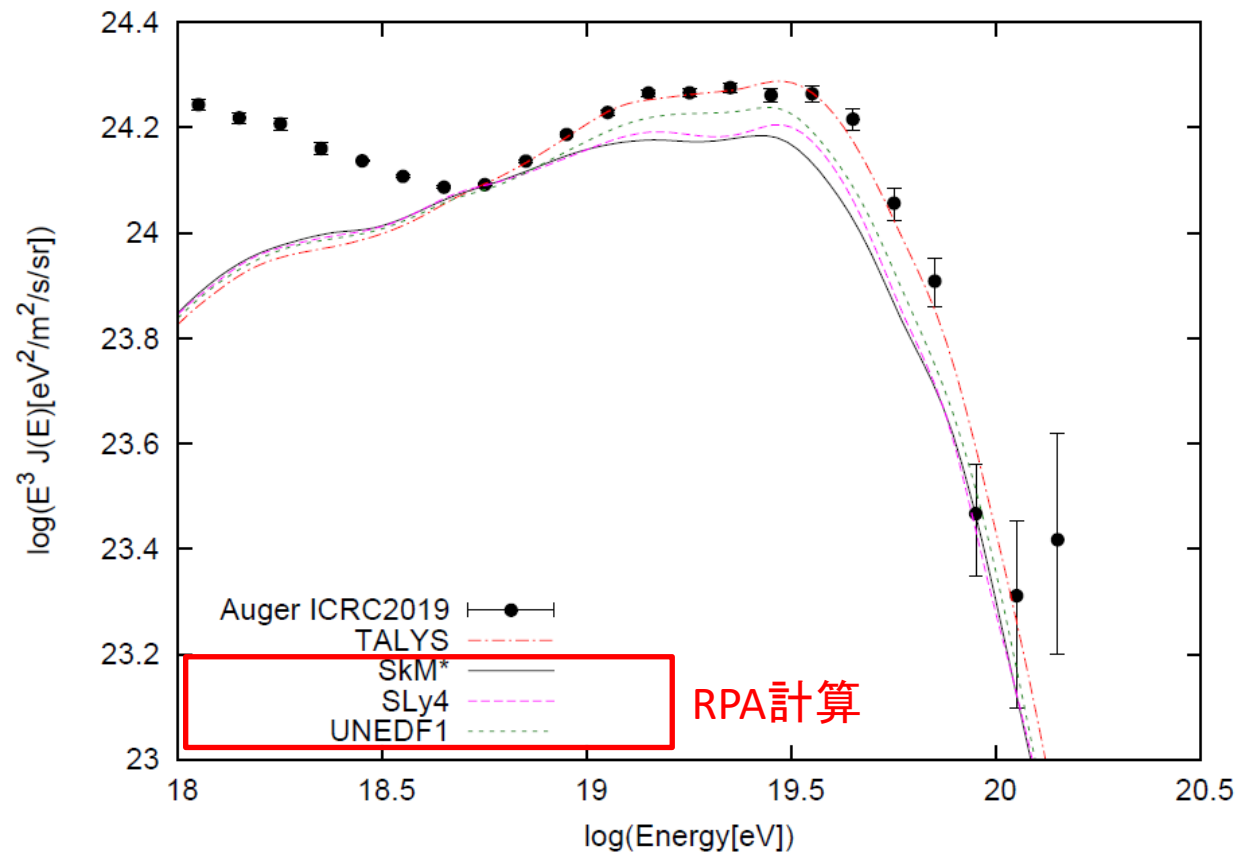
- 宇宙線源から、5 原子核を放射: **H, He, N, Si, Fe**
- 宇宙線源のエネルギースペクトル:  $dN/dE \propto E^{-\gamma}$
- リジディティ( $\sim E/eZ$ )依存のカットオフ  $\log(R_{\text{cut}}/V)$
- 宇宙線源の進化パラメータ  $(1+z)^m$  ( $z < 1$ )
- エネルギースケールをシフト +12%  
(エネルギースケールの系統誤差14%の範囲内)
- 赤外背景放射のモデル: Gilmore+ 2012
- 合計9個のフリーパラメタ

# GDRピークエネルギー

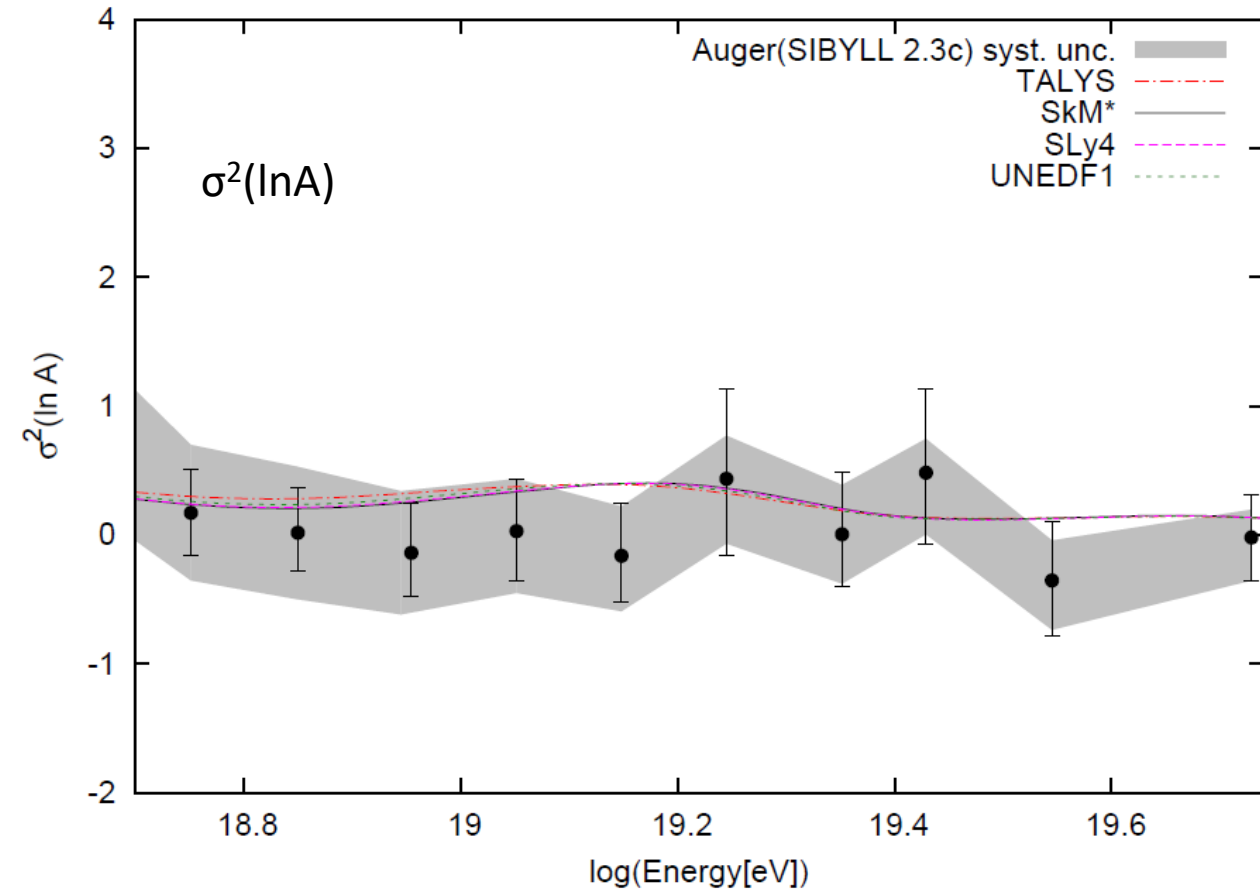
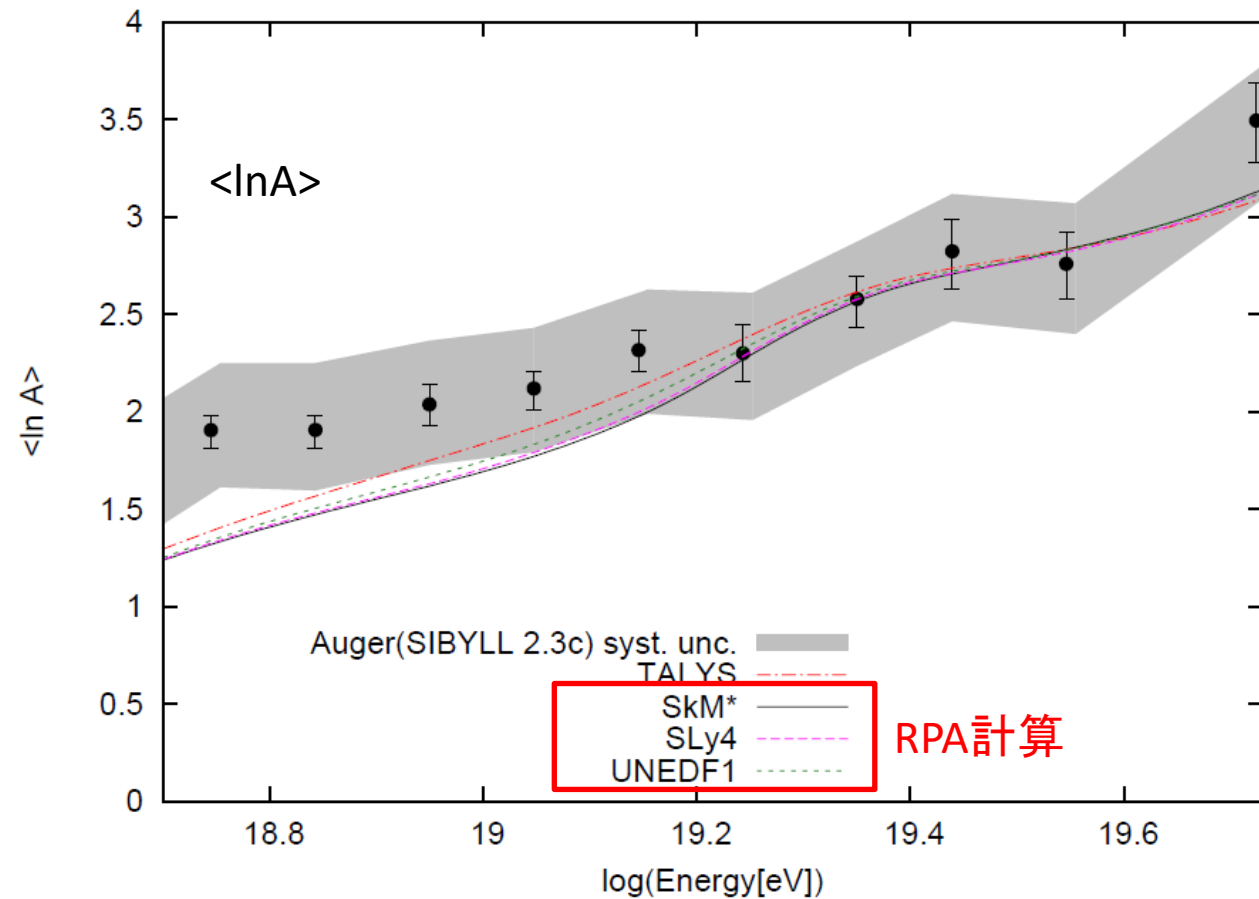


一つ一つの原子核のピークの違いは数 MeV程度だが、系統的な違い  
 →結果に最も大きな影響

# 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

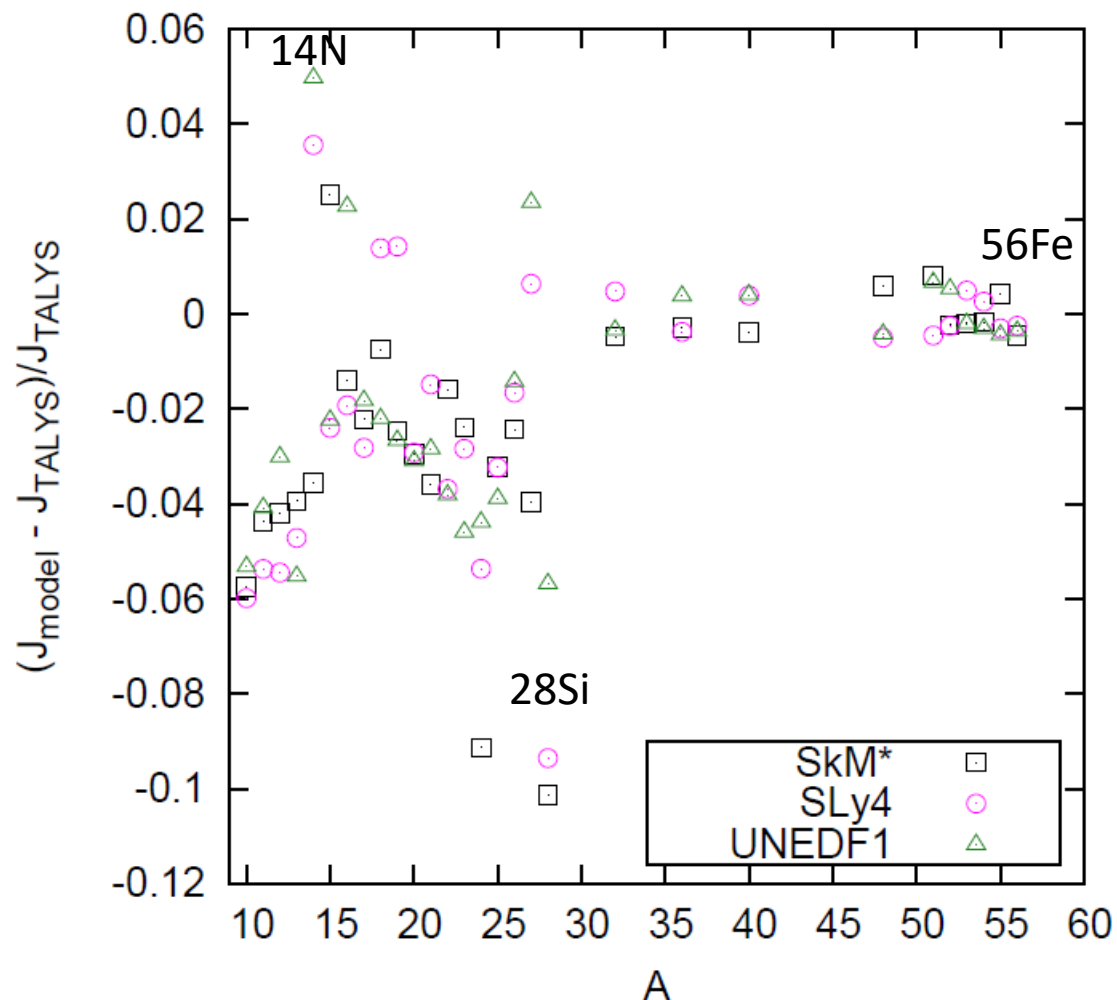


# TALYSのbest fitパラメタを使った時の シミュレーション結果の比較2



スペクトルの形状に最も  
大きな影響を与えることが分かった。

# エネルギースペクトルに影響の大きい原子核

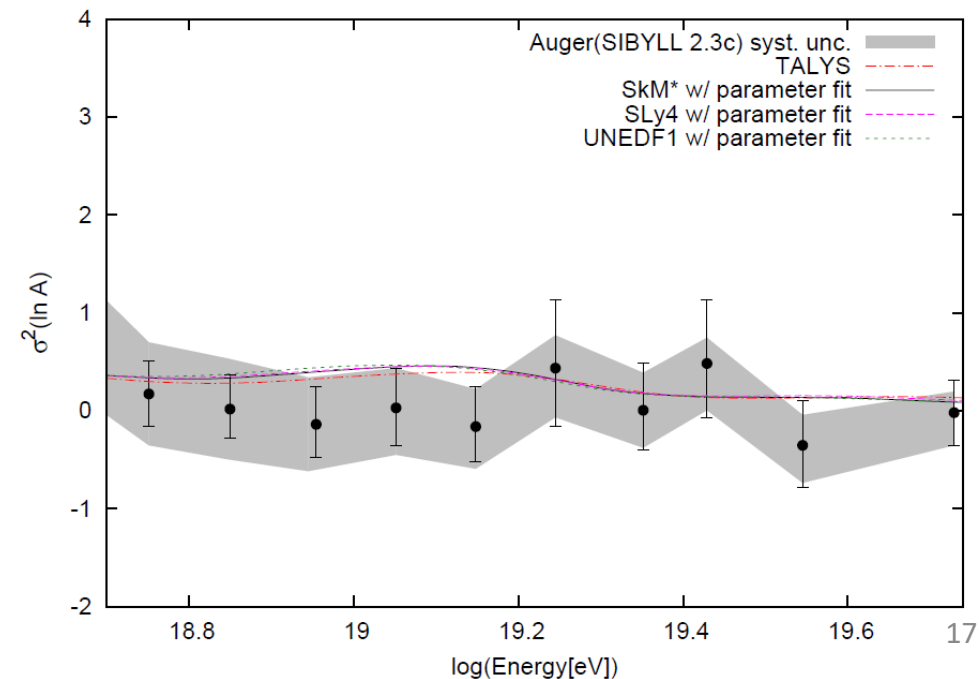
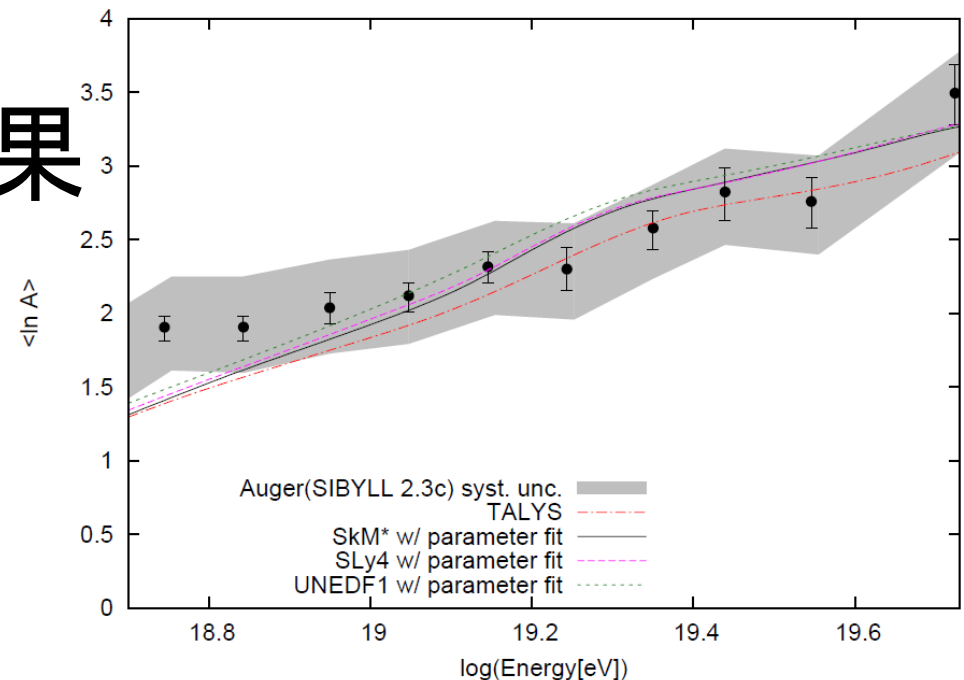
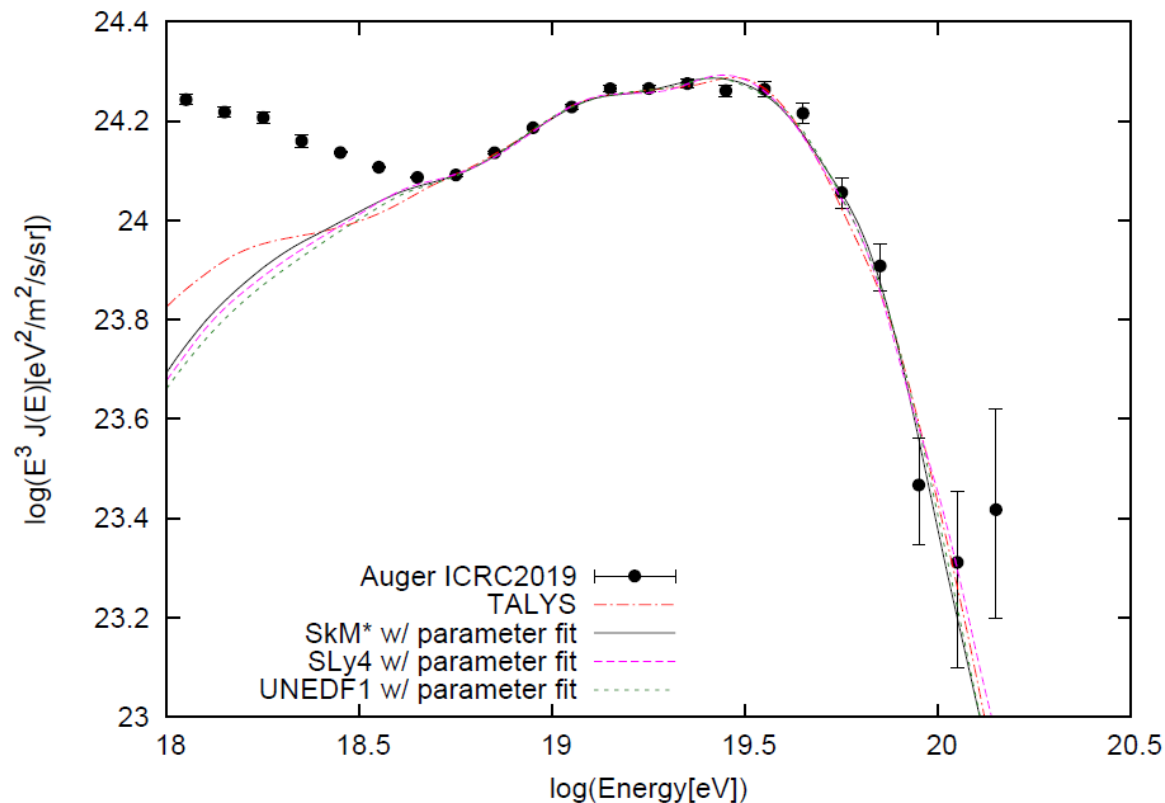


一つ一つの原子核の光核反応の断面積をTALYSから変更し、スペクトルの違いの最大値をそれぞれ調べた。

## 28Si

原子核の光核反応モデル依存性の影響が最も大きい。

# RPA計算の結果を使った シミュレーションでフィットした結果



- 各々実験結果をfitできる
- RPA計算の結果を使うと  
重い原子核組成が  
宇宙線源で有意に多い結果になる

# 今後の展望

- 実験結果の系統誤差を理解→PANDORAプロジェクトによる実験
- 理論モデルの不定性について
  - モデル間(AMD, 殻模型, DFT)の比較が今後行われる
  - RPA計算の相互作用のモデルパラメタは基底状態を再現するようにチューニングされているので、励起状態には適用できない可能性がある。  
(T. Inakura arXiv: 2205.12671)
- TA実験の観測結果の解釈

# まとめ

- **DFTのRPA計算**(T. Inakura *et al.* ) で得られた**29個**の安定核の光核反応の計算結果を宇宙線伝播コードCRPropaに組み込んで、宇宙線原子核の伝播シミュレーションをした。
- DFTによるRPA計算は現象論的なモデルではないので予言能力があり、PANDORA実験で今後測定できない原子核の光核反応を検討する上で重要である。
- 宇宙線源のパラメタを固定した時、RPA計算の結果を組み込むとエネルギースペクトルのシミュレーション結果に、実験の**統計誤差より十分大きな**違いを生じることが分かった。
- この時、 **$^{28}\text{Si}$**  原子核の光核反応が、エネルギースペクトルに最も大きな違いを生んでいることが分かった。
- RPA計算の結果を入れたシミュレーションでも実験結果はフィットすることができるが、宇宙線源の重原子核の比率が多くなることが分かった。
- 理論モデル間でも比較が行われ、RPA計算のモデルパラメタについても今後精査される。
- 将来的には宇宙線伝播シミュレーションに光核反応の実験/理論由来の系統誤差を含め、TA実験の結果の解釈も検討したい。

