



超高エネルギー宇宙線の伝搬と光核反応



木戸英治
理研



概要

- 理論モデルによる原子核の光吸収断面積の計算結果の比較
- 超高エネルギー宇宙線(UHECRs)原子核の伝搬のシミュレーション
- まとめ

理論モデルによる原子核の光吸収断面積の計算結果の比較

- T. Inakura *et al.*, *PHYSICAL REVIEW C* **80**, 044301 (2009)
and T. Inakura *et al.*, *PHYSICAL REVIEW C* **84**, 021302(R) (2011).
 - σ_{GDR} (GDR: Giant Dipole Resonance 巨大双極子共鳴)
 - 12 原子核 (4He 12C 16O 20Ne 24Mg 28Si 32S 36Ar 40Ca 48Ti 52Cr 56Fe)
 - 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).
 - 4He: 断面積のエネルギースケールを補正
- TALYS-1.95 https://tendl.web.psi.ch/tendl_2019/talys.html
 - $\sigma_{\text{GDR}} + \sigma_{\text{QD}}$ (QD: Quasi Deuteron)
 - Default (パラメタ変更なし) : 11 原子核
(12C 16O 20Ne 24Mg 28Si 32S 36Ar 40Ca 48Ti 52Cr 56Fe)
 - Restored (E1(電気双極子)-強度関数が宇宙線伝搬計算コードCRPropa, SimPropのためにパラメタの変更))
: 5 原子核 (12C 16O 24Mg 28Si 40Ca)

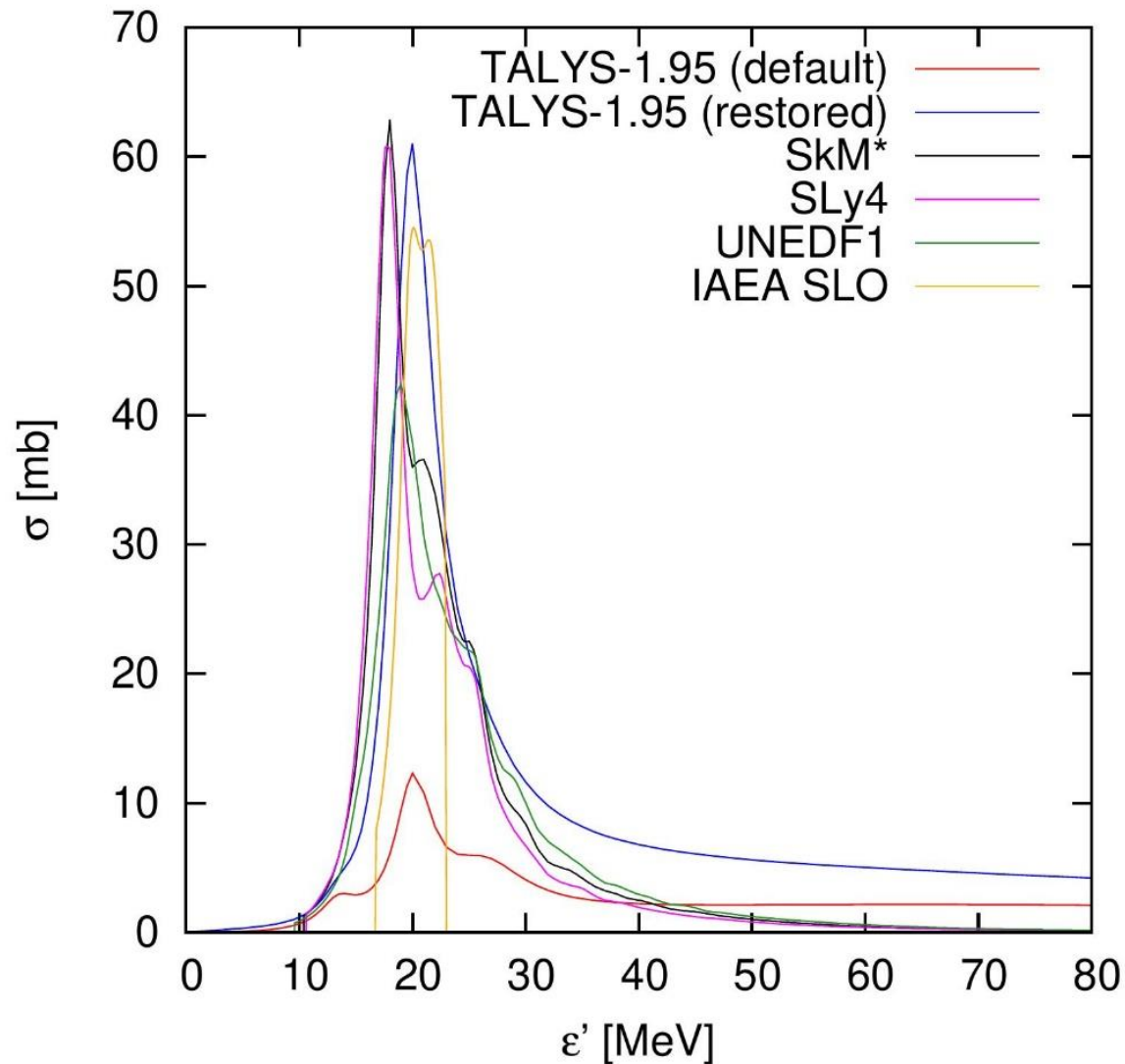
過去の測定結果

- IAEA Photonuclear Data Library 2019
- T. Kawano *et al.*, *Nuclear Data Sheets* **163**, 109–162 (2020).
- Table III Recommended Experimental GDR parameters
- Standard Lorentzian (SLO):

$$\sigma_{\text{GDR}}(E_{\gamma}) = \sigma_R \frac{E_{\gamma}^2 \Gamma_R^2}{(E_R^2 - E_{\gamma}^2)^2 + E_{\gamma}^2 \Gamma_R^2}$$

σ_R : 断面積ピーク
 E_R : 共鳴エネルギー
 Γ_R : 共鳴幅

^{28}Si 光吸收断面積

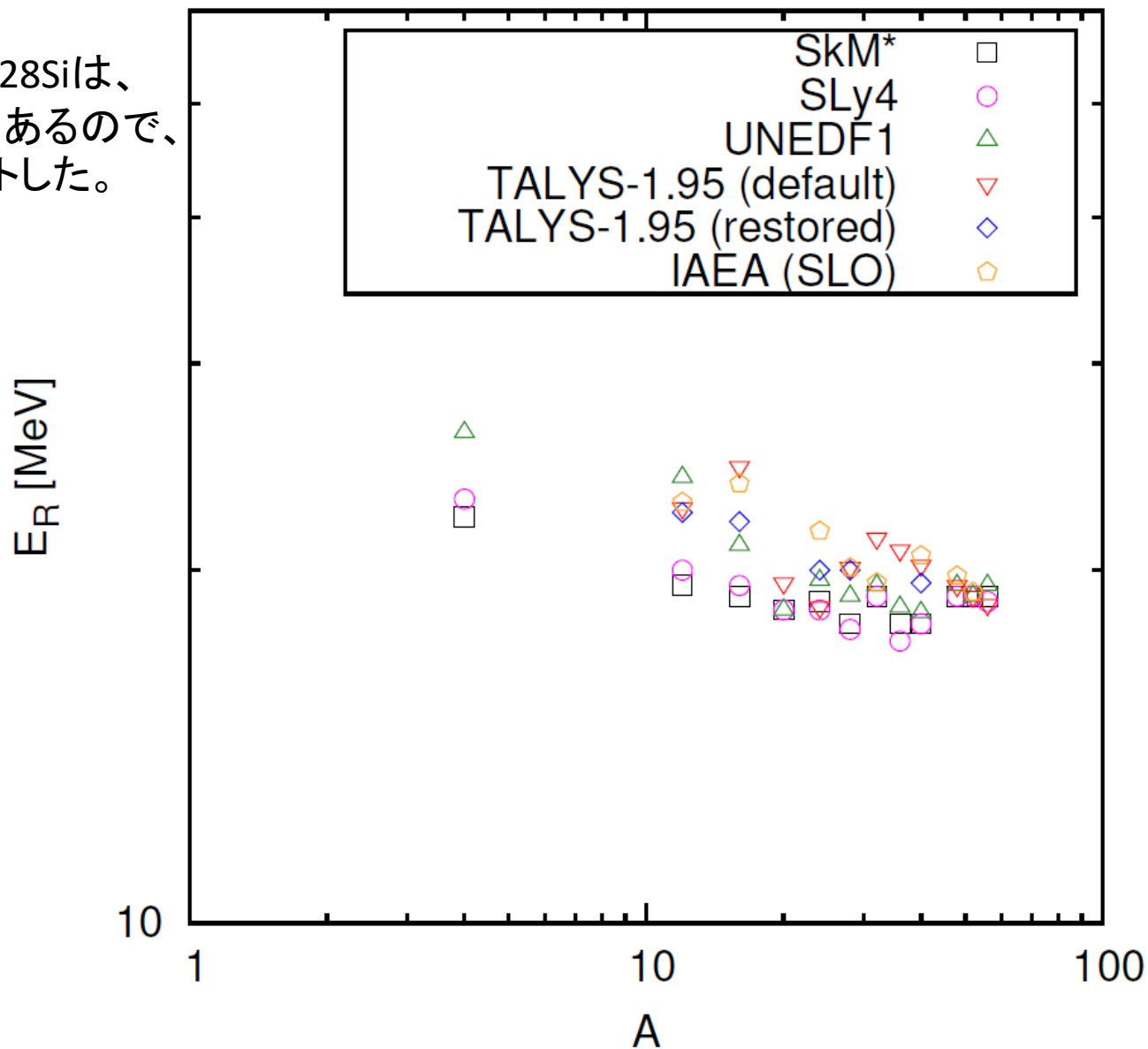


GDR ピークエネルギー (MeV)

| | IAEA (SLO) | SkM* | SLy4 | UNEDF1 | TALYS default | TALYS restored |
|------|---------------|------------|------------|------------|------------------|-------------------|
| 4He | NONE | 22.2 | 23.0 | 26.2 | NONE | NONE |
| 12C | 22.9 | 19.4 | 20.0 | 24.0 | 22.6 | 22.4 |
| 16O | 23.7 | 19.0 | 19.4 | 21.0 | 24.5 | 22.0 |
| 20Ne | NONE | 16.0, 21.0 | 16.0, 21.0 | 16.0, 21.0 | 15.2, 23.8 | |
| 24Mg | 19.7, 23.5 | 16.0, 21.6 | 16.0, 21.0 | 17.6, 21.6 | 14.4, 22.8 | 20.0 |
| 28Si | 20.1 | 18.0 | 17.8 | 19.0 | 20.1 | 20.0 |
| 32S | 19.5 | 19.0 | 19.0 | 19.4 | 21.3 | |
| 36Ar | NONE | 18.0 | 17.4 | 18.6 | 20.8 | |
| 40Ca | 20.6 | 18.0 | 18.0 | 18.4 | 20.2 | 19.5 |
| 48Ti | 19.8 | 19.0 | 19.0 | 19.4 | 19.4 | |
| 52Cr | 19.2 | 19.0 | 19.0 | 19.0 | 19.0 | |
| 56Fe | NONE | 19.0 | 18.8 | 19.4 | 18.7 | |

GDR ピークエネルギー

^{20}Ne , ^{24}Mg , ^{28}Si は、
ピークが二つあるので、
平均をプロットした。

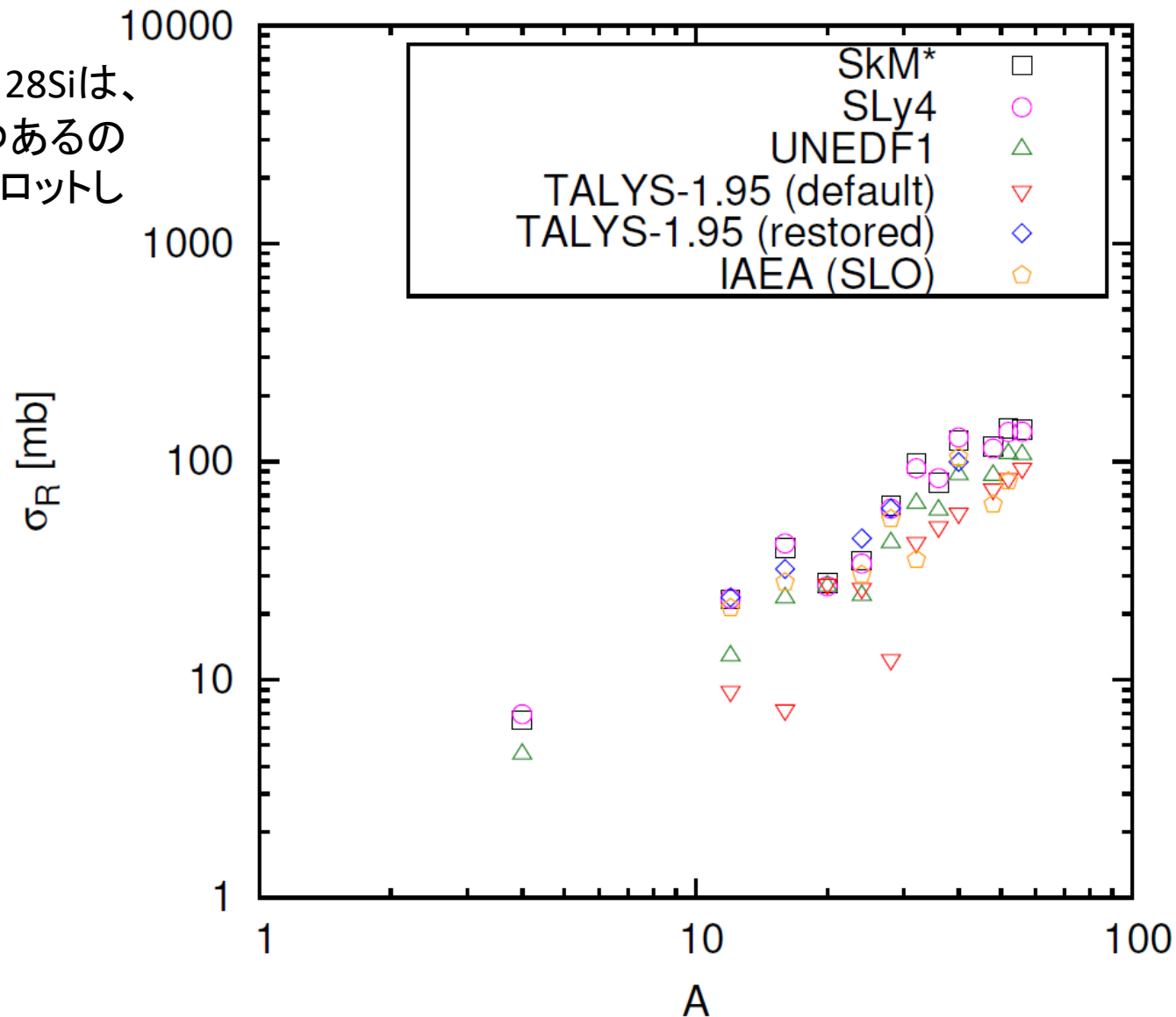


GDR ピークの光吸収断面積 (mb)

| | IAEA (SLO) | SkM* | SLy4 | UNEDF1 | TALYS default | TALYS restored |
|------|---------------|------------|------------|------------|------------------|-------------------|
| 4He | NONE | 6.5 | 6.9 | 4.5 | NONE | NONE |
| 12C | 21.30 | 23.3 | 23.5 | 12.8 | 8.9 | 23.8 |
| 16O | 27.96 | 40.2 | 42.1 | 23.7 | 7.3 | 32.2 |
| 20Ne | NONE | 24.1, 31.3 | 23.4, 30.2 | 23.4, 30.2 | 27.9, 27.1 | |
| 24Mg | 33.05, 27.60 | 34.4, 35.7 | 30.9, 37.3 | 21.9, 26.7 | 23.9, 28.7 | 44.5 |
| 28Si | 54.52 | 62.9 | 60.8 | 42.4 | 12.4 | 61.0 |
| 32S | 35.43 | 97.7 | 93.0 | 64.1 | 42.6 | |
| 36Ar | NONE | 80.0 | 83.8 | 59.7 | 50.2 | |
| 40Ca | 104.78 | 124.4 | 128.9 | 86.8 | 58.2 | 99.5 |
| 48Ti | 63.74 | 117.4 | 114.8 | 86.3 | 74.8 | |
| 52Cr | 81.34 | 141.7 | 136.5 | 108.3 | 83.9 | |
| 56Fe | NONE | 140.3 | 137.0 | 107.2 | 93.3 | |

GDRピークの光吸収断面積

20Ne, 24Mg, 28Siは、
ピークが二つあるの
で、平均をプロットし
た。



宇宙線原子核の光崩壊の平均自由行程の計算

平均自由行程 λ (Stecker 1969)

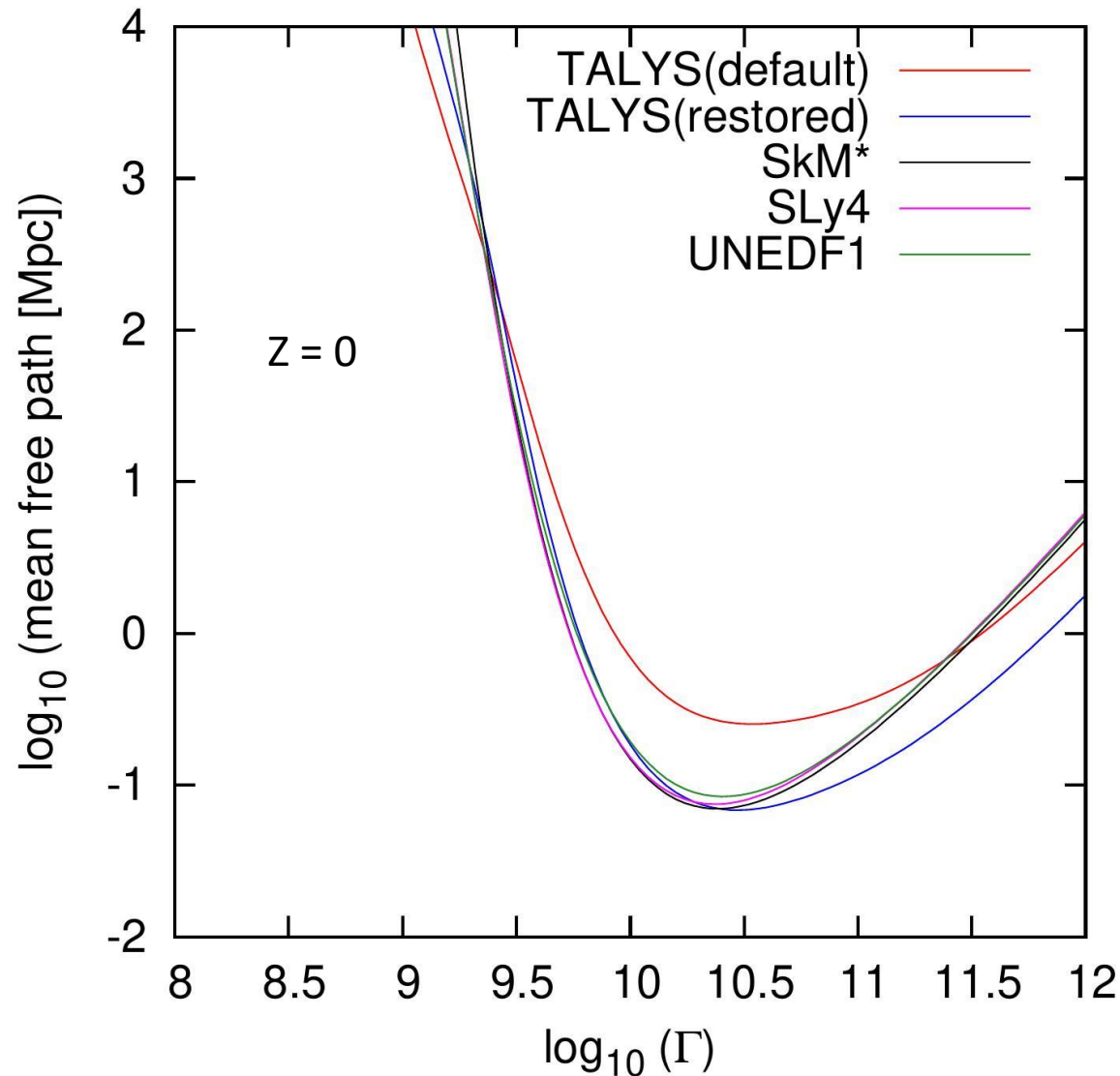
$$\lambda^{-1}(\Gamma, z) = \frac{1}{2\Gamma^2} \int_0^\infty \int_0^{2\Gamma\epsilon} n(\epsilon, z) \frac{1}{\epsilon^2} \epsilon' \sigma(\epsilon') d\epsilon' d\epsilon,$$

- n : 背景光子の個数密度のスペクトル (CMB, IRB(Gilmore+, 2012))
- Γ : 宇宙線原子核のローレンツ因子
- ϵ : 光子のエネルギー
- $\epsilon' = \Gamma \epsilon (1 - \cos \Theta)$: 原子核静止系の光子のエネルギー
- Θ : 光子と原子核の運動量の間の開き角
- σ : TALYSの非弾性散乱断面積 or SkM*, SLy4, UNEDF1モデルを使った σ_{GDR}

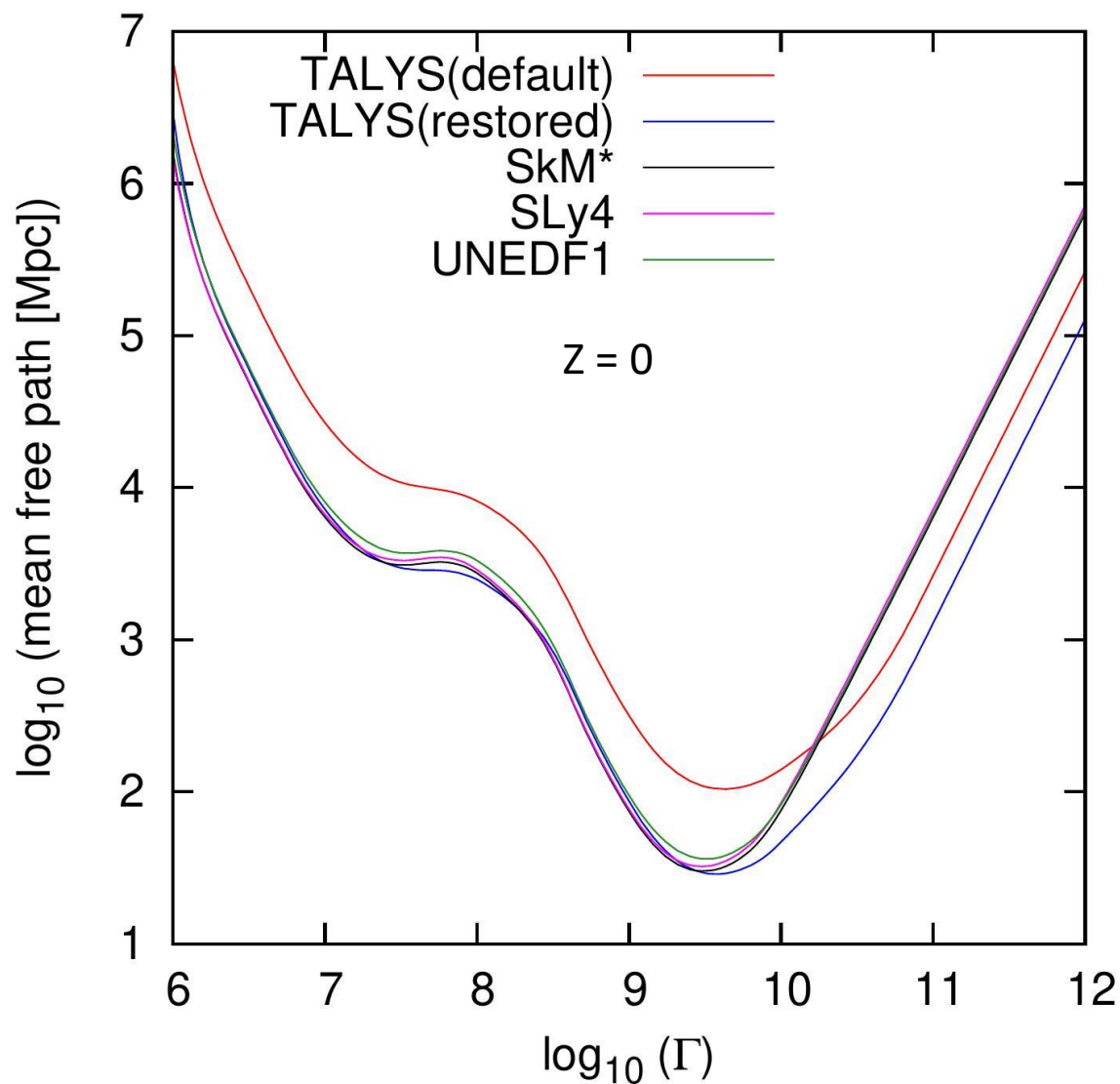
$$\sigma_{non-el} = \sum_Z \sum_N \sigma_{prod}(Z, N).$$

$$\sigma_{prod}(Z, N) = \sum_{i_n=0}^{\infty} \sum_{i_p=0}^{\infty} \sum_{i_d=0}^{\infty} \sum_{i_t=0}^{\infty} \sum_{i_h=0}^{\infty} \sum_{i_\alpha=0}^{\infty} \sigma^{ex}(i_n, i_p, i_d, i_t, i_h, i_\alpha) \delta_N \delta_Z,$$

CMB 光子による ^{28}Si の光崩壊の平均自由行程



IRB光子(Gilmore+, 2012)による ^{28}Si の光崩壊の平均自由行程



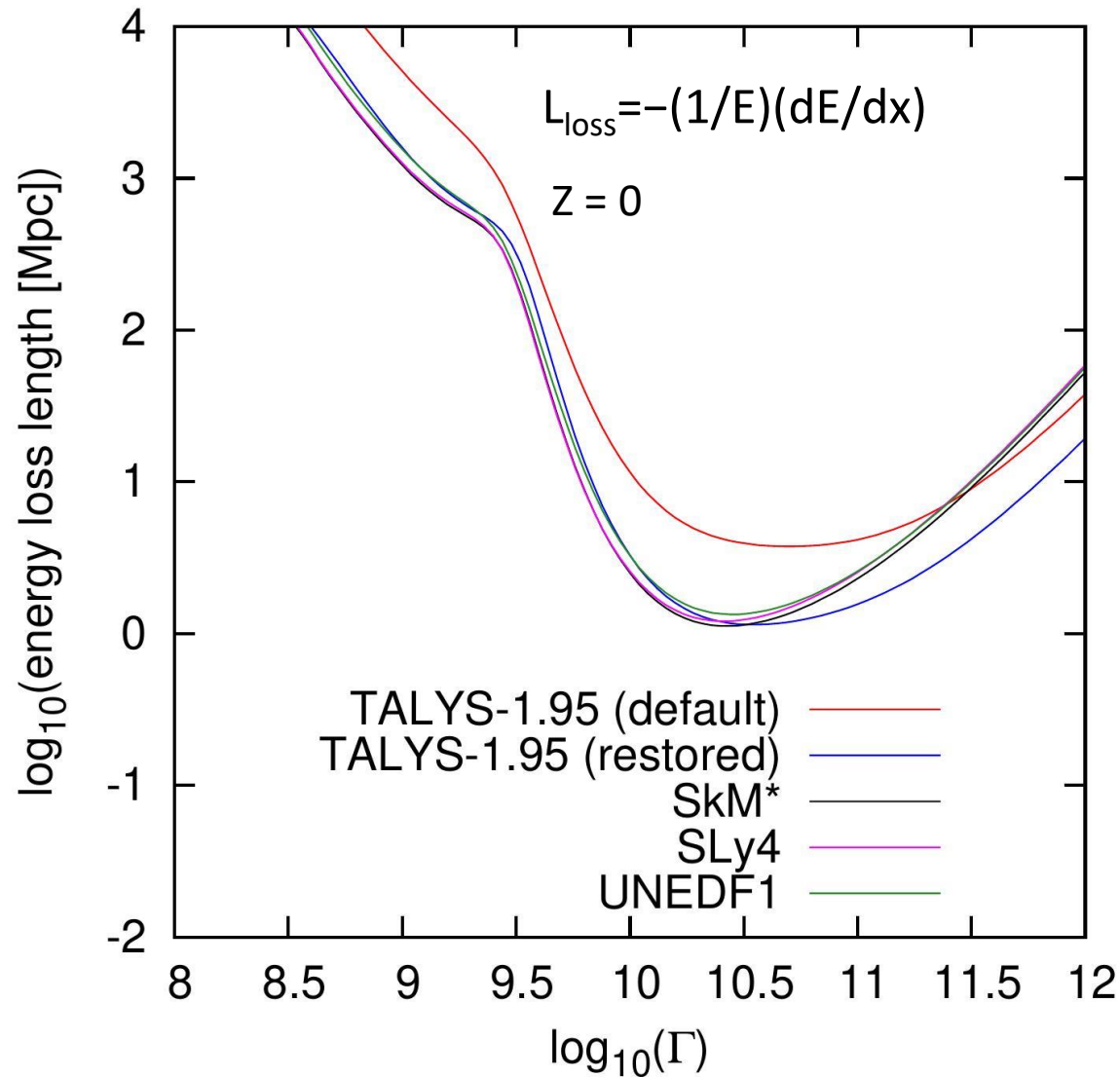
UHECRsの伝搬のシミュレーション

$$dN/dE \propto E_{\text{inj}}^{-\gamma} \exp(-E_{\text{inj}}/Z R_{\text{cut}})$$

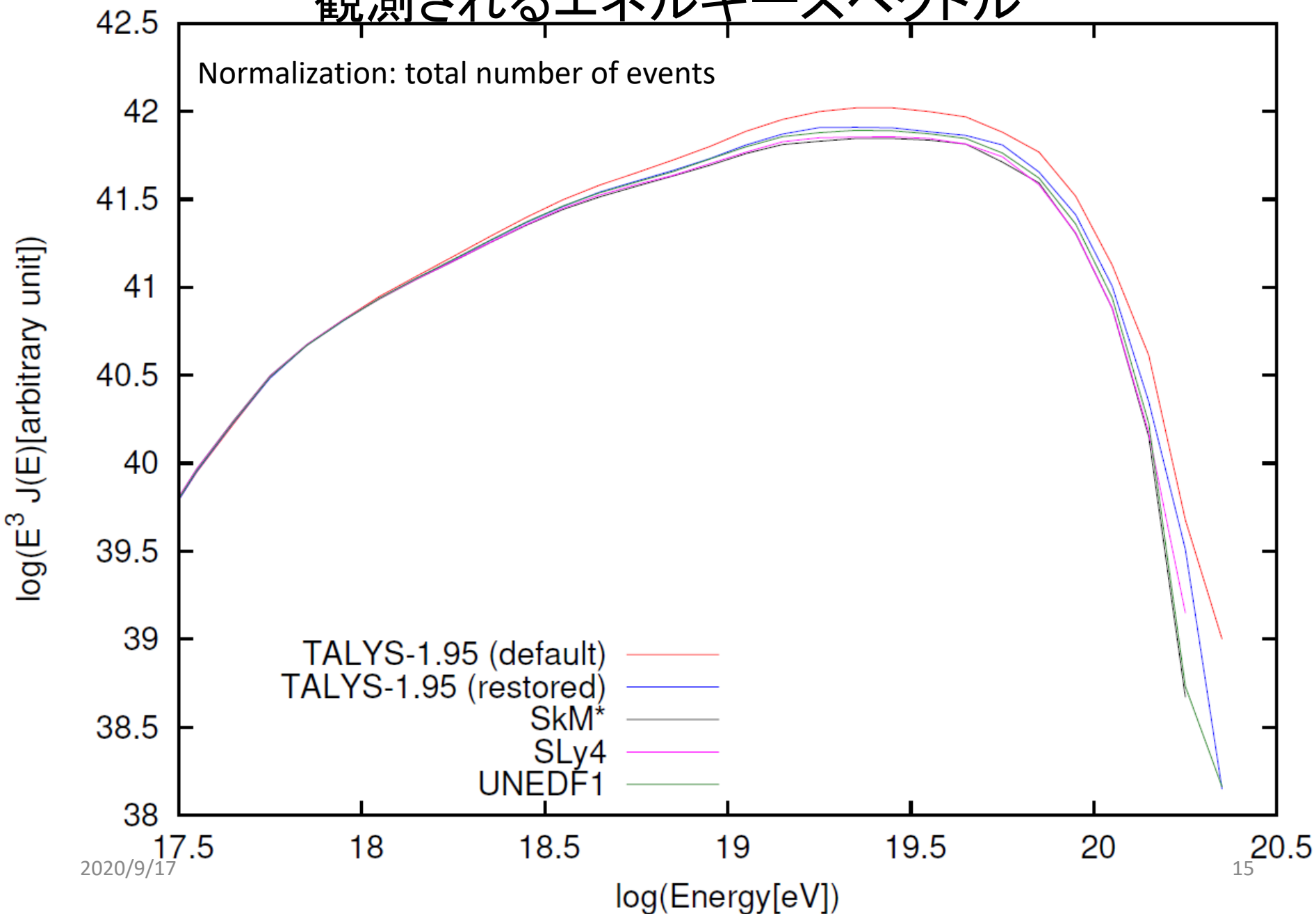
$$0 < z < 1$$

- $\gamma = 1$, $R_{\text{cut}} = 5 \times 10^{18} \text{ V}$
- 宇宙線源は単位共同体的要素当たり一様分布
- CRPropa3
- IRB: Gilmore+ 2012
- 1次元の伝搬を計算
- CRPropa3のdefaultの平均自由行程のテーブル (TALYS (restored)) を他のモデルに変更 (TALYS (default), SkM*, SLy4, UNEDF1).
- 分岐比のテーブルは変更していない

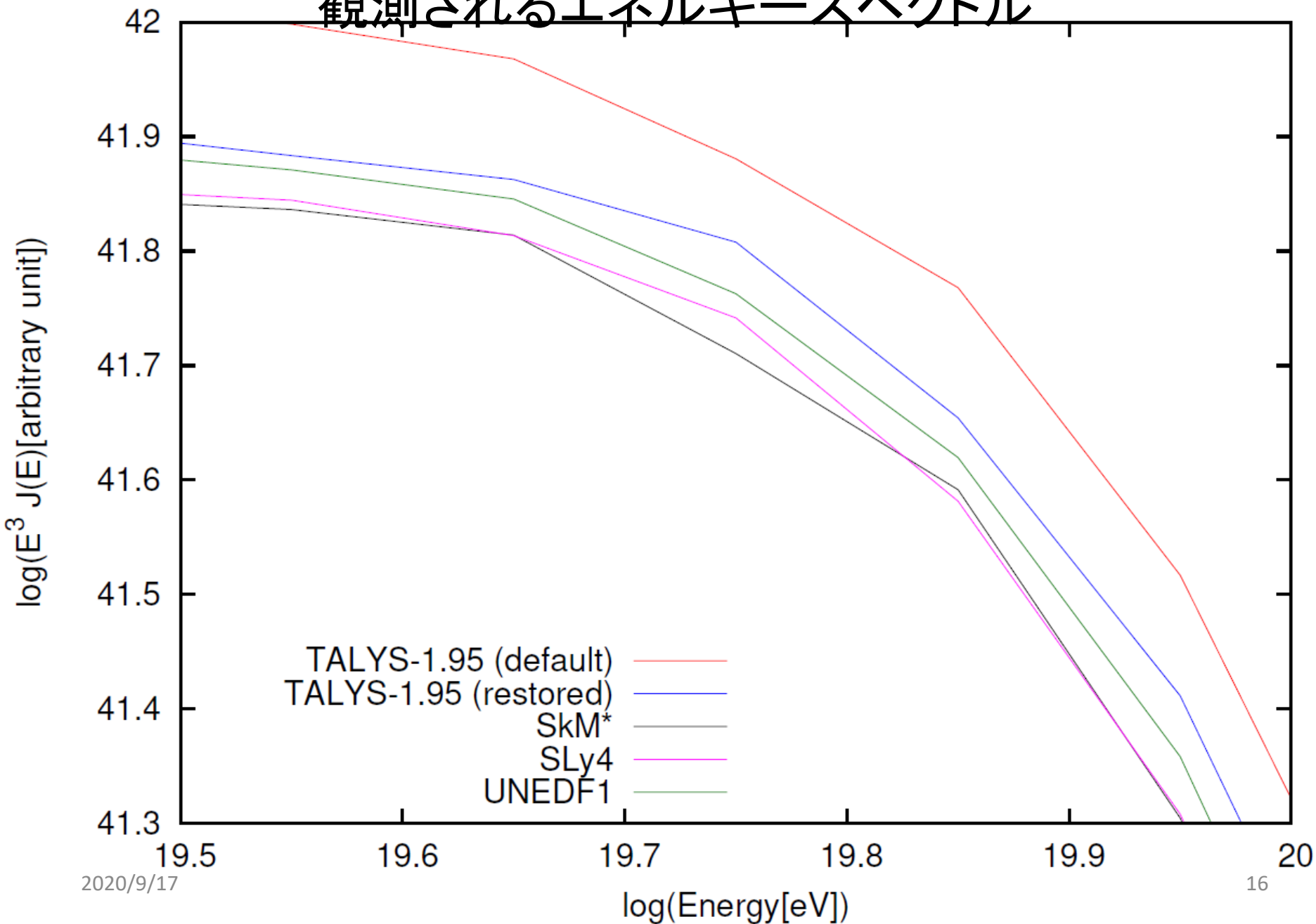
^{28}Si の光崩壊によるエネルギー損失長 (CMB + IRB(Gilmore+, 2012))



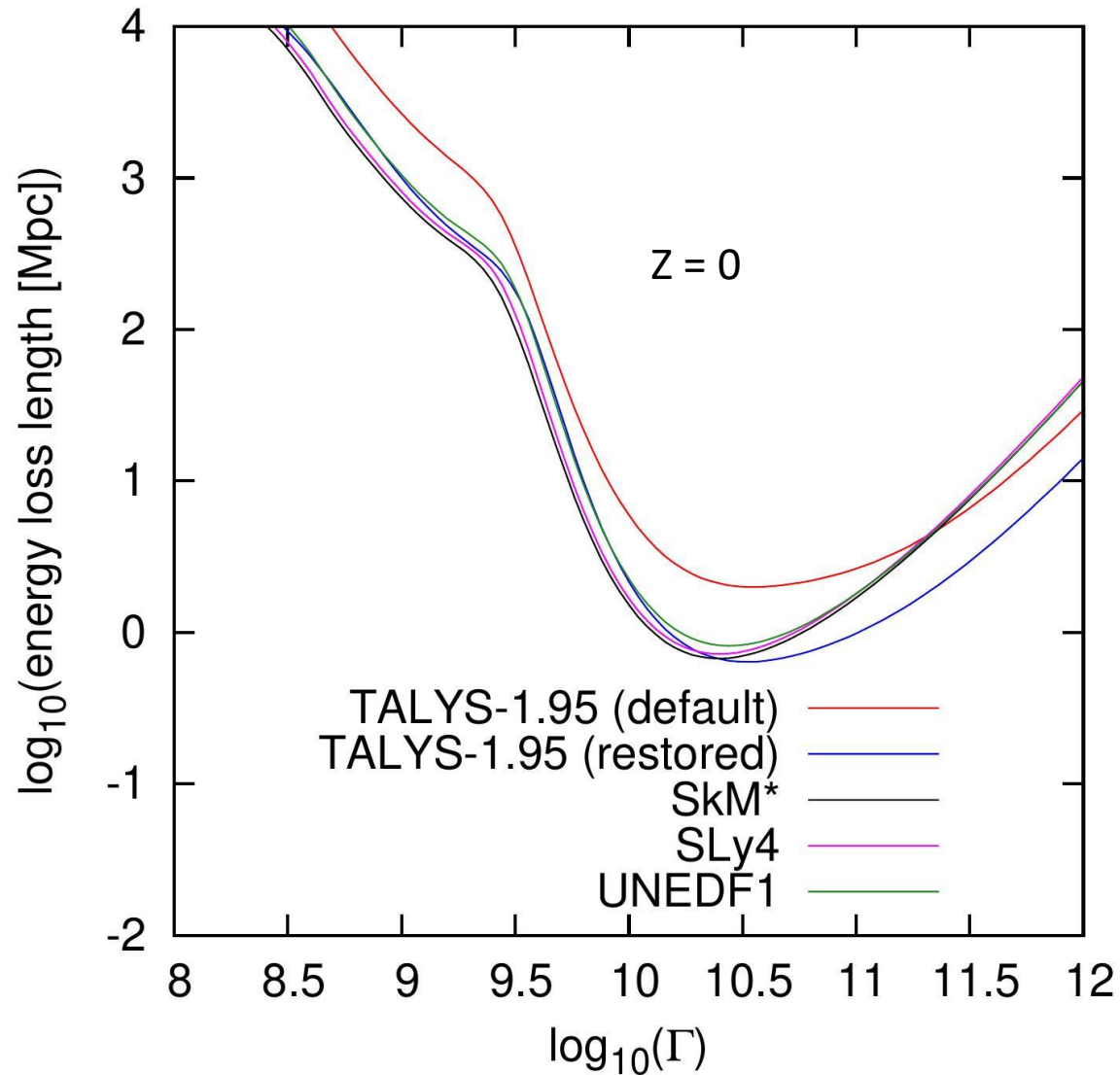
宇宙線源から ^{28}Si の原子核のみ放射された時 観測されるエネルギースペクトル



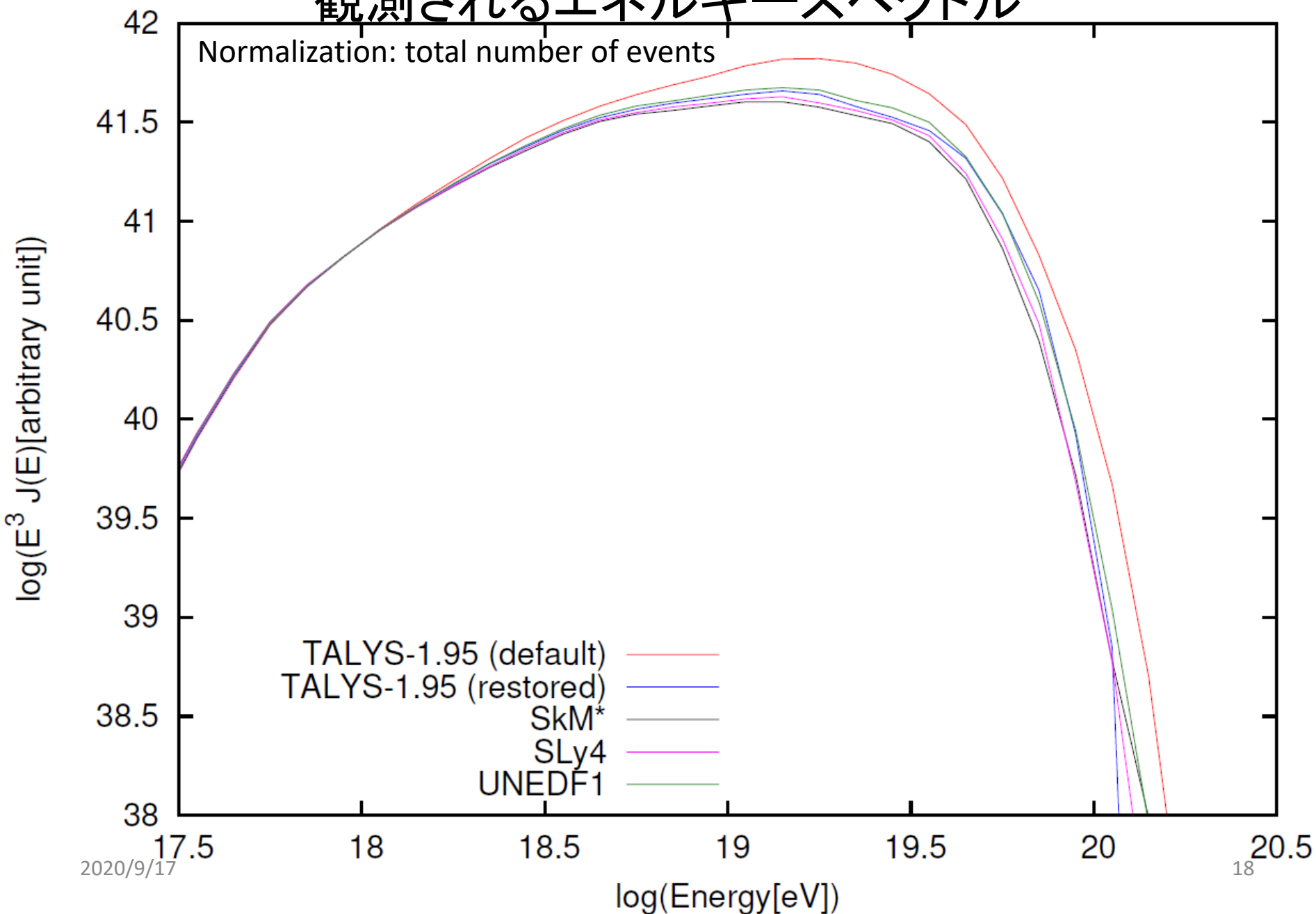
宇宙線源から ^{28}Si の原子核のみ放射された時 観測されるエネルギースペクトル



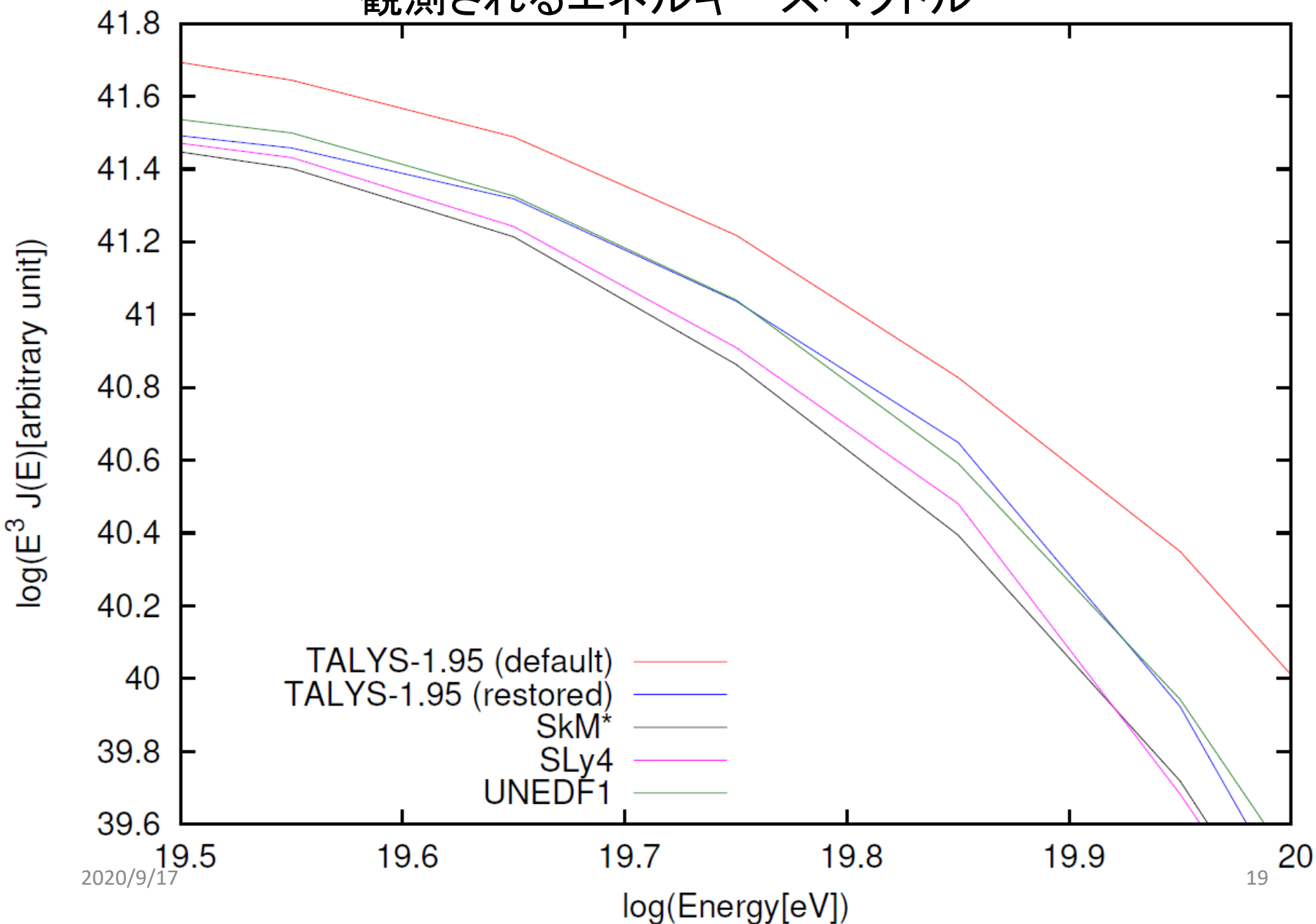
^{16}O の光崩壊によるエネルギー損失長 (CMB + IRB(Gilmore+, 2012))



宇宙線源から160の原子核のみ放射された時 観測されるエネルギースペクトル



宇宙線源から160の原子核のみ放射された時 観測されるエネルギースペクトル



まとめ

- 5つの理論モデル (T. Inakura *et al.* and TALYS) で12 種類の原子核(4He 12C 16O 20Ne 24Mg 28Si 32S 36Ar 40Ca 48Ti 52Cr 56Fe)の光吸収断面積を計算した。
 - GDRのピークエネルギーの違いは最大で、**29%** (16O)
 - GDR の断面積の違いは最大で、**580%** (16O)
- 計算した光吸収断面積とCRPropa3を使って、UHECRsの伝搬をシミュレーションした。
 - UHECRの宇宙線源の仮定:
$$dN/dE \propto E_{\text{inj}}^{-\gamma} \exp(-E_{\text{inj}}/Z R_{\text{cut}})$$

 $R_{\text{cut}} = 5 \times 10^{18} \text{ V}$, $0 < z < 1$ で宇宙線源は一様に分布
 - 最高エネルギーのエネルギースペクトルは、主に宇宙線源から放射した原子核のGDRのピークエネルギーに依存してシフトすることを確認した。