



CALETの観測によって得られた 10GeV/n 以下の鉄核強度

市村雅一，赤池陽水^A，笠原克昌^B，小林兼好^A，鳥居祥二^A，
他CALETチーム

弘前大理工，早大理工総研^A，芝工大シ工^B



Iron Flux

CALET実験ではカロリメータによりエネルギーが10GeV/n以上の領域で鉄核の flux を算出している



地球磁場を用いて10GeV/n 以下の flux を求める

- 手順
- (1) CALETの観測地点毎に、全入射方向について Cutoff Rigidity を計算
 - (2) Cutoff Rigidity の bin毎の入射粒子数をカウント
 - (3) 積分強度算出
 - (4) 微分強度へ変換



Cutoff Rigidity

地球磁場モデル

- IGRF13 + TS05(Tsyganenko 05) GEOPACK-2008 code を使用

内部磁場：IGRF13 (main field)

外部磁場：TS05 (太陽風による擾乱)
太陽風の観測値が必要



Cutoff Rigidity

反陽子の Back Tracing

- 観測地点（緯度、経度、高度）からある方向 (θ, ϕ) へある Rigidity で反陽子を射出
- 運動方程式を解きながら追跡
- 以下のいずれかを満たしたら追跡終了
 - 地球に衝突 : forbidden region
 - 磁気圏界面に到達 : allowed region
 - 地球半径の15倍以上に到達 : allowed region

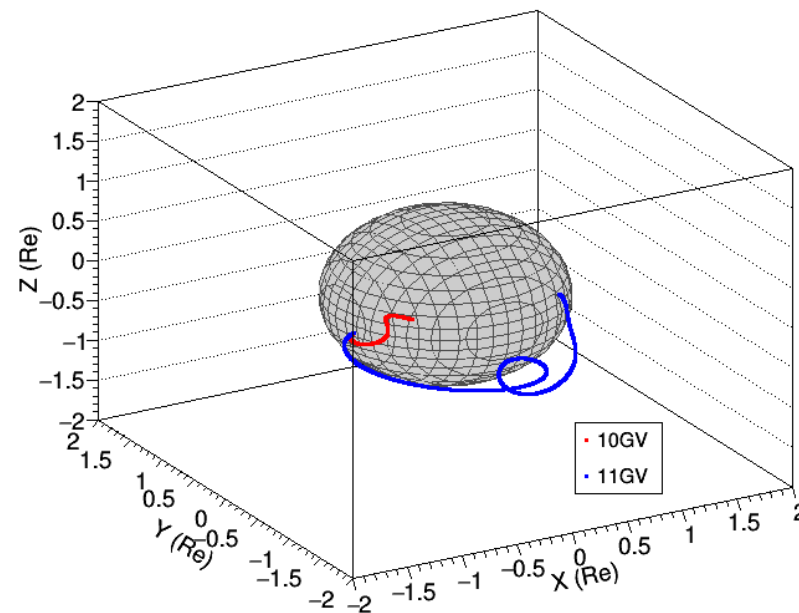
Rigidity : 1GV~50GVを log10 スケールで 0.01 刻みで変化
(100 steps per decade)

Allowed region と Forbidden region の境目が Cutoff Rigidity R_c

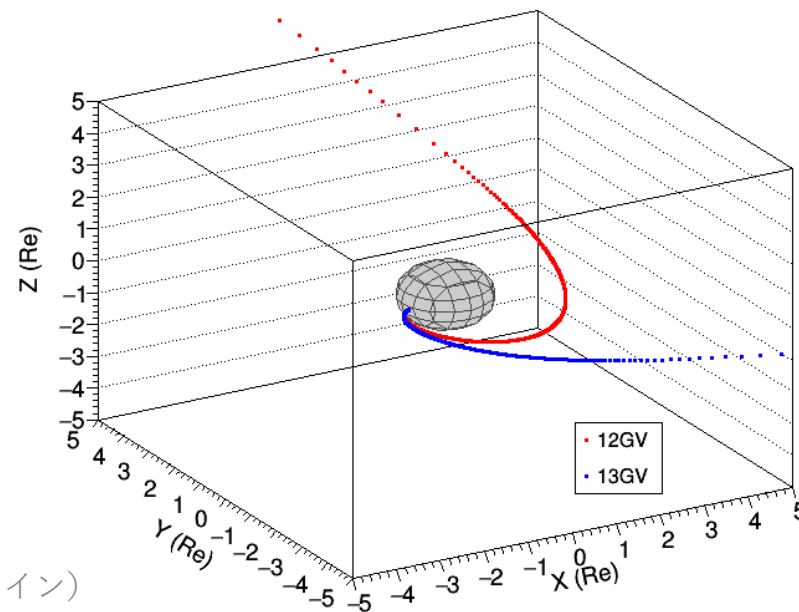
2024/3/18

日本物理学会2024年春季大会（オンライン）

Trajectory of Antiproton (LONG:0, LAT:0, ALT:400km, 20170908 01:05)



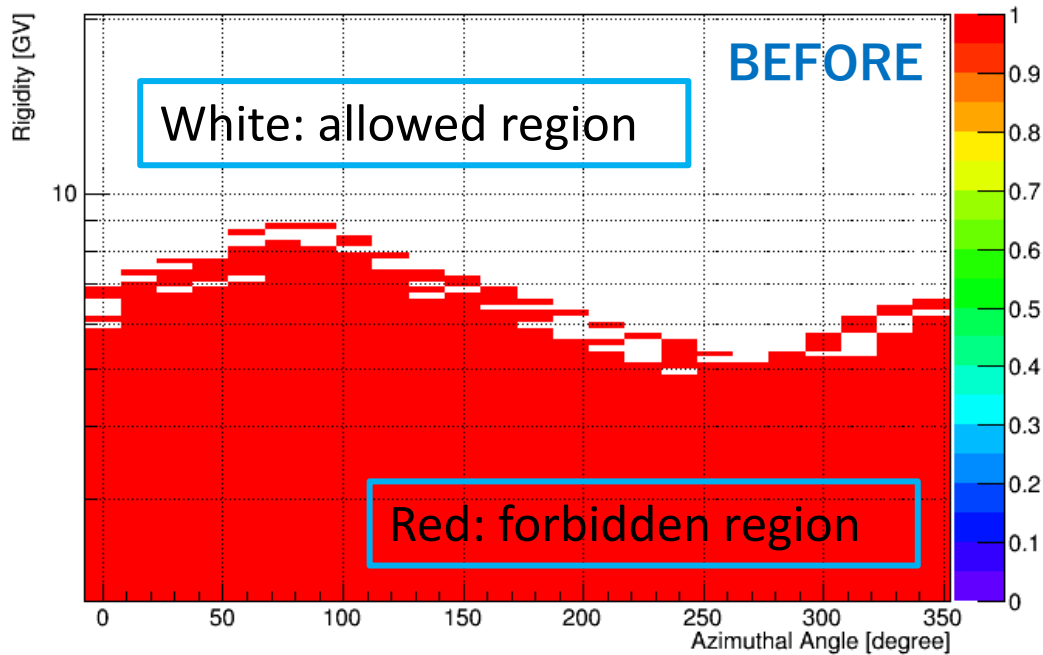
Trajectory of Antiproton (LONG:0, LAT:0, ALT:400km, 20170908 01:05)



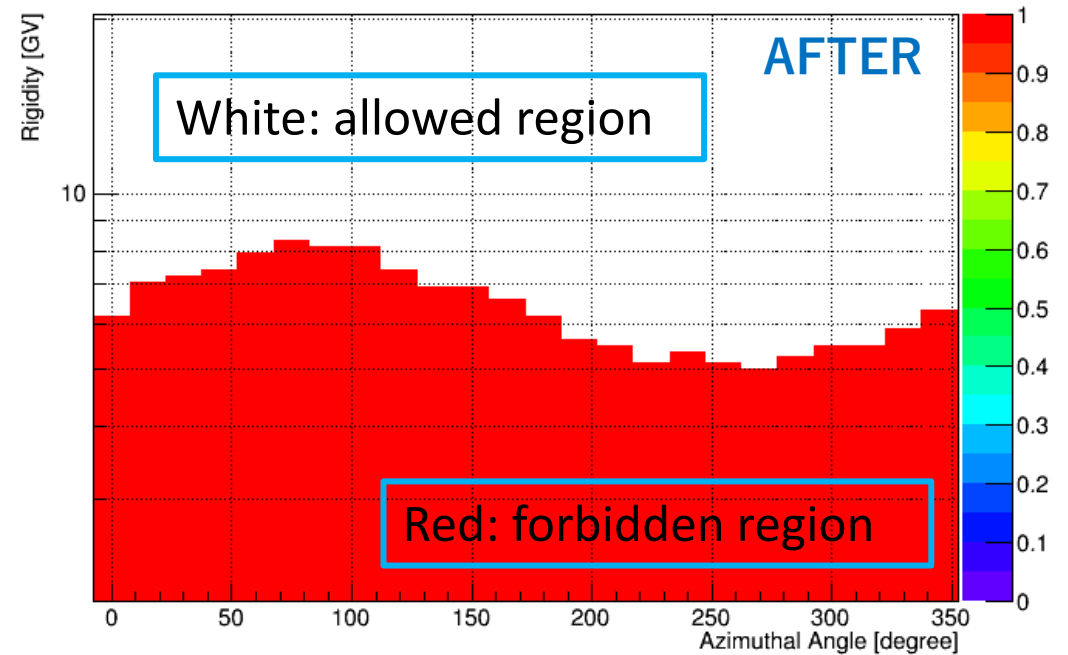


Cutoff Rigidity

LON 161 LAT 42 θ : 41.6 degree
Penumbra Structure



LON 161 LAT 42 θ : 41.6 degree
Effective Cutoff Rigidity



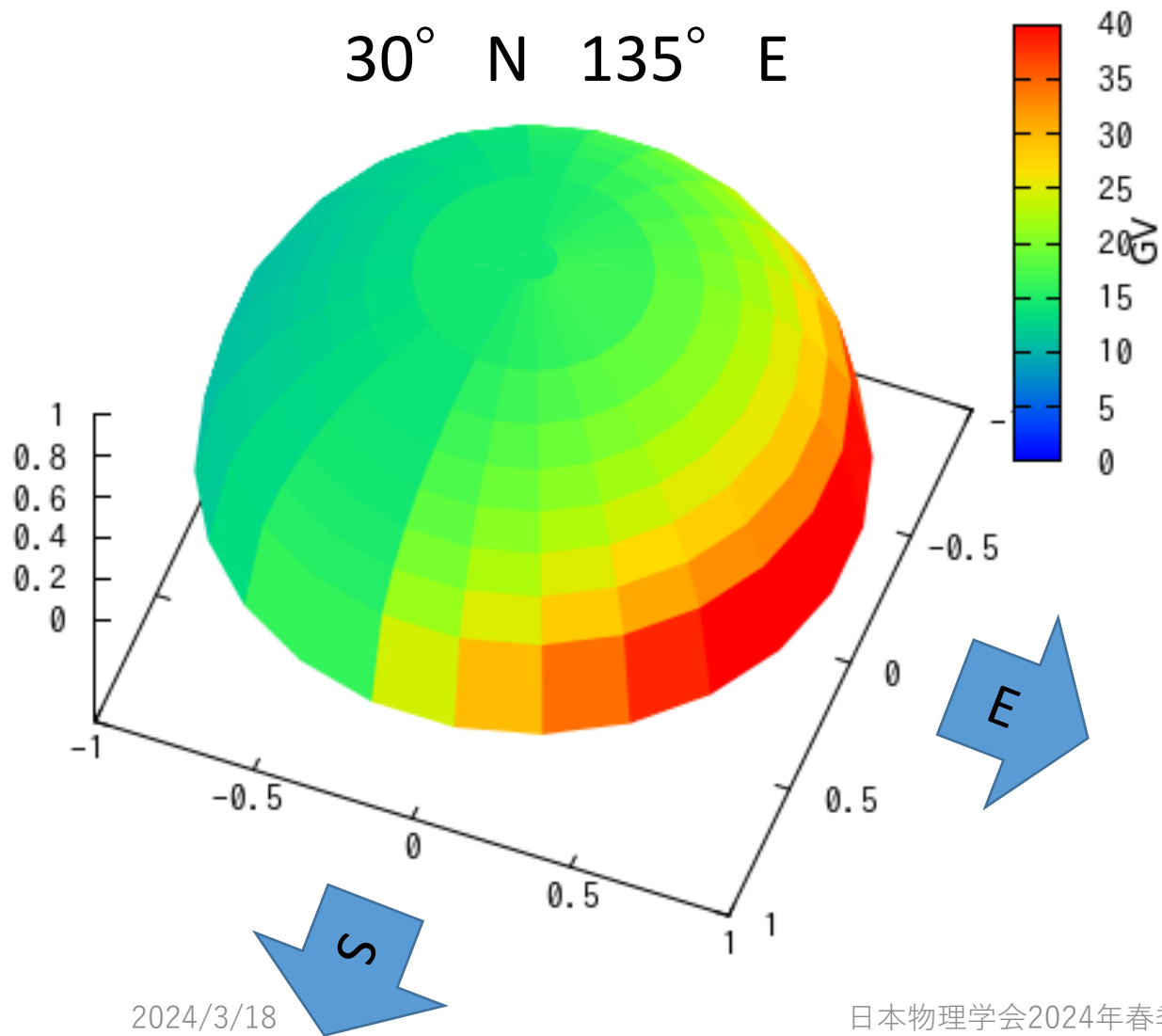
Effective cutoff Rigidity (R_c)

スペクトルの重みをかけて penumbra をつぶし、その境目を R_c とした

E. Kamioka et al., *Astroparticle Physics*, 6, 155(1997)



Cutoff Rigidity



- 1つの観測点につき、193方向に反陽子を射出、tracingして、Cutoff Rigidity R_c を算出

- 立体角のbinは
方位角：15° step 24等分
天頂角：9分割

0.0° ~ 4.1° ~ 21.1° ~ 30.3°
~ 38.0° ~ 45.1° ~ 52.4°
~ 60.1° ~ 69.4° ~ 90.0°
($\cos\theta d(\cos\theta)d\phi$ で等分)
 $1\text{bin}=\pi/193$

天頂角 $\theta < 45.1^\circ$ を解析対象とした(97bins)

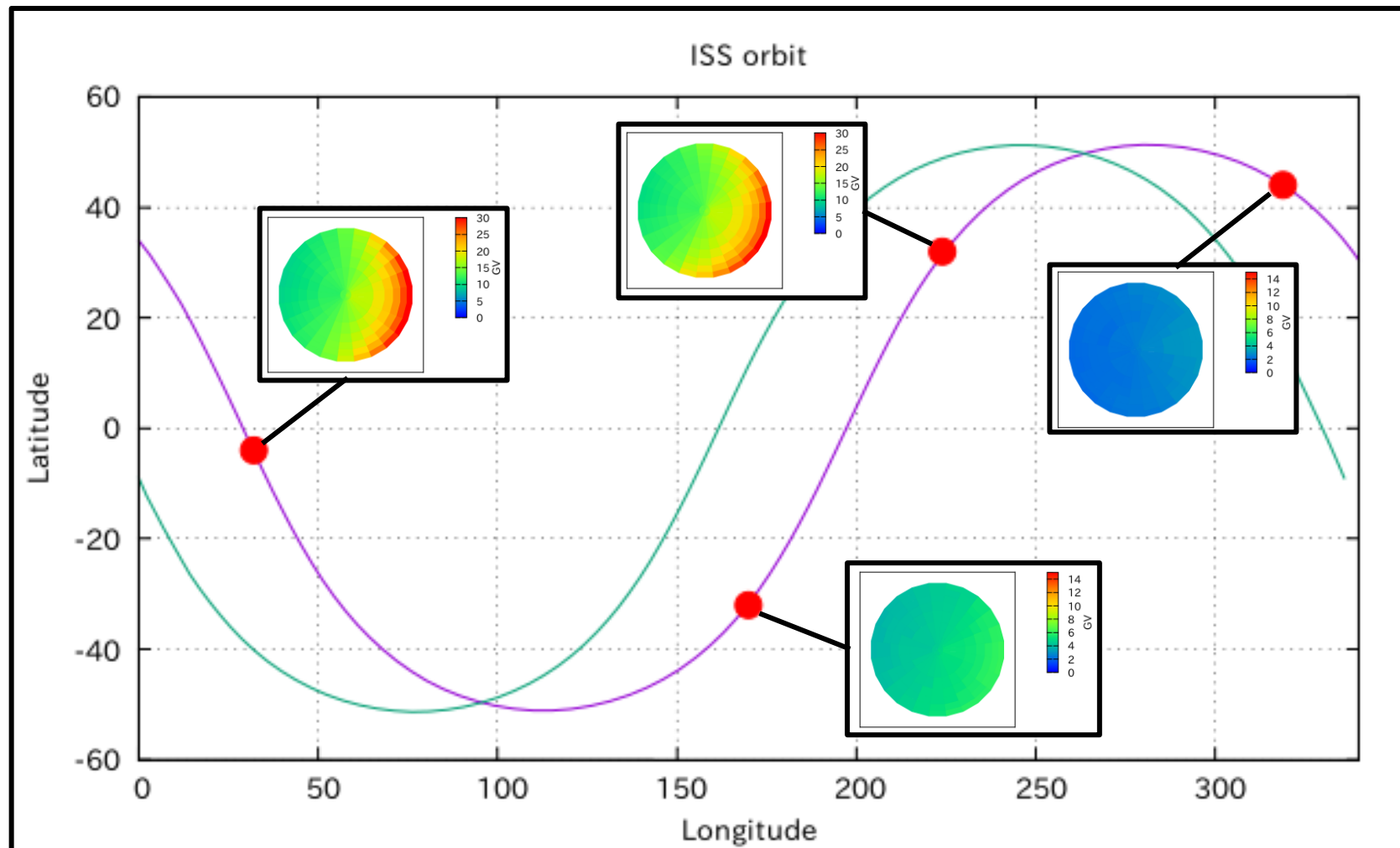


Cutoff Rigidity

Rc Dome を計算した 観測点

対象期間：

- 2015年10月~2023年10月で、UH trigger mode の期間
- 緯度、経度それぞれを1度刻みで区切る：
~250,000地点/month
- おおよそ10点ごとにまとめる：
~25,000地点/month
- 太陽風観測データが無いところはカット





Flight Data Analysis

Oct. 2015 – Oct. 2023 (97months)

- UH trigger(CHD, IMC1+2, iMC3+4)
- UH tracking (UH用の飛跡再構成アルゴリズム)

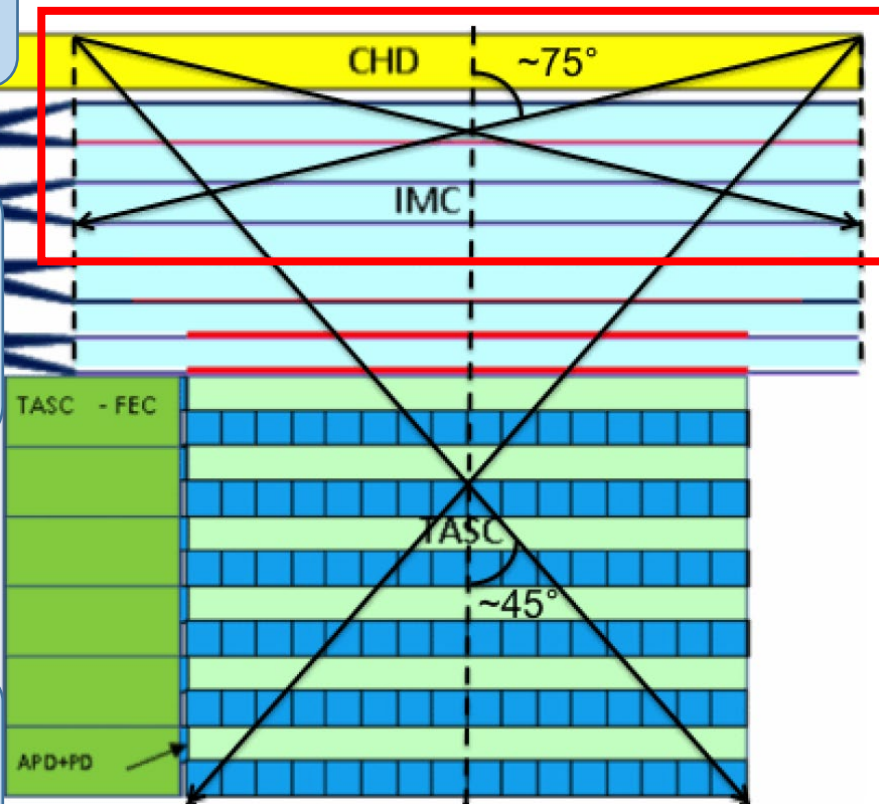
CHD(Charge Detector)

プラスチックシンチレータ 14本×2 (x方向、y方向)

IMC - FEC

IMC(IMaging Calorimeter)

1mmx1mmx448mm のシンチファイバー448本/1層
448本×2 (x方向、y方向) ×8層
タングステン板 7層



UH Trigger

CHD2層
(CHD_x+CHD_y)
IMC上部4層
(IMC_{x1-x4}, IMC_{y1-y4})

これらのenergy depositが一定値以上

$S\Omega = 4,400 \text{ cm}^2\text{sr}$

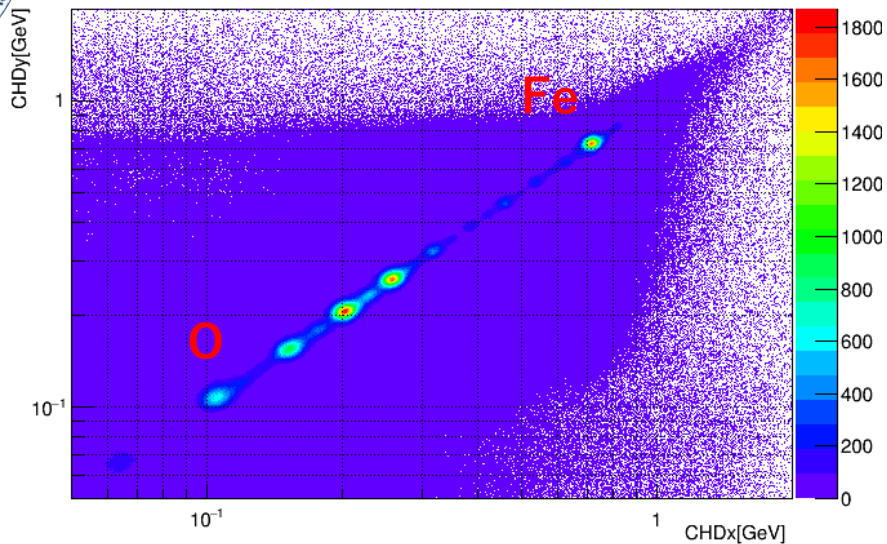
TASC(Total AbSorption Calorimeter)

PWOシンチレータ 16本×2 (x方向、y方向) ×6層

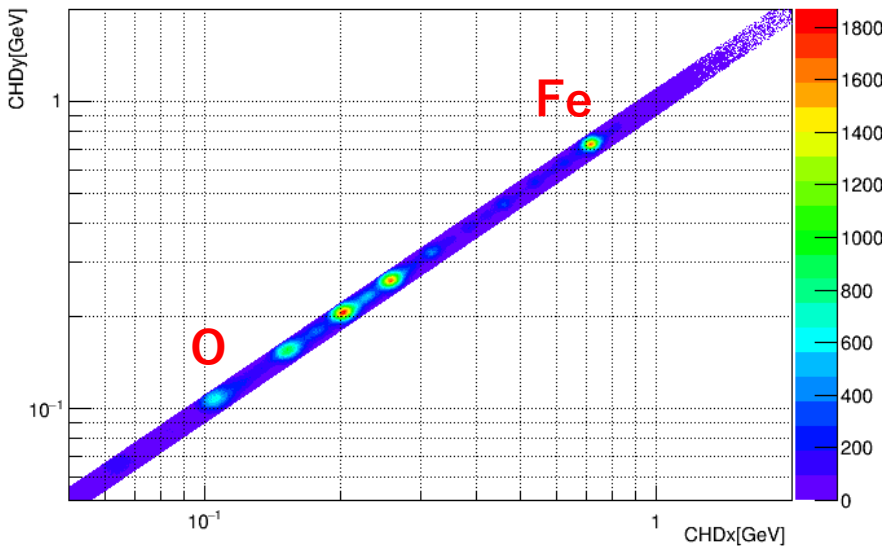


Charge Identification

CHDy vs CHDx (201510-202105)

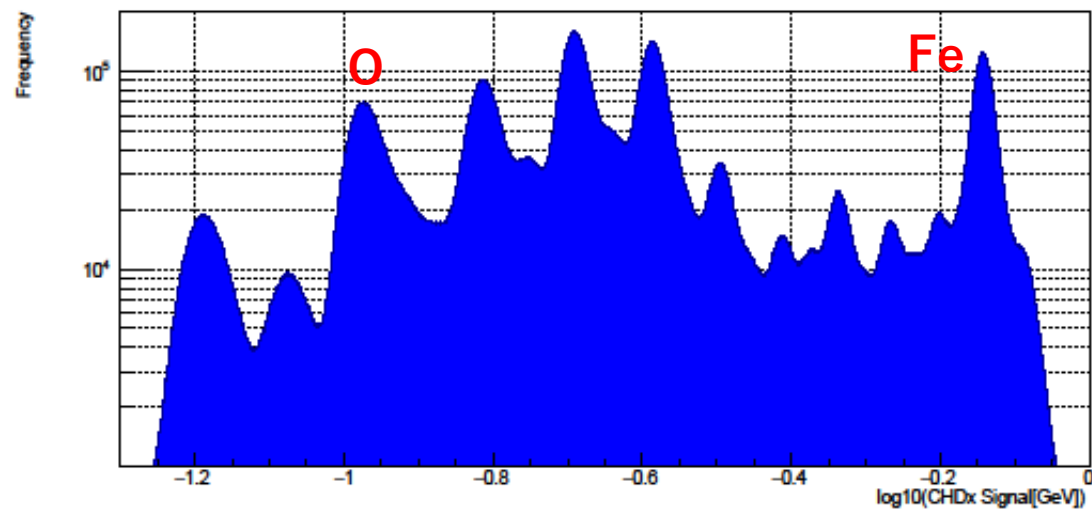


CHDy vs CHDx with 10% cut(201510-202105)



- UH trigger mode 中に検出された飛跡
- CHDx, CHDyが±10%以内のものを採用
- 再構成された飛跡それぞれについてRc を計算
- CHDx,CHDyそれぞれのヒストグラムをRc bin 毎に作成
- 各電荷に対応するピークを読み取る

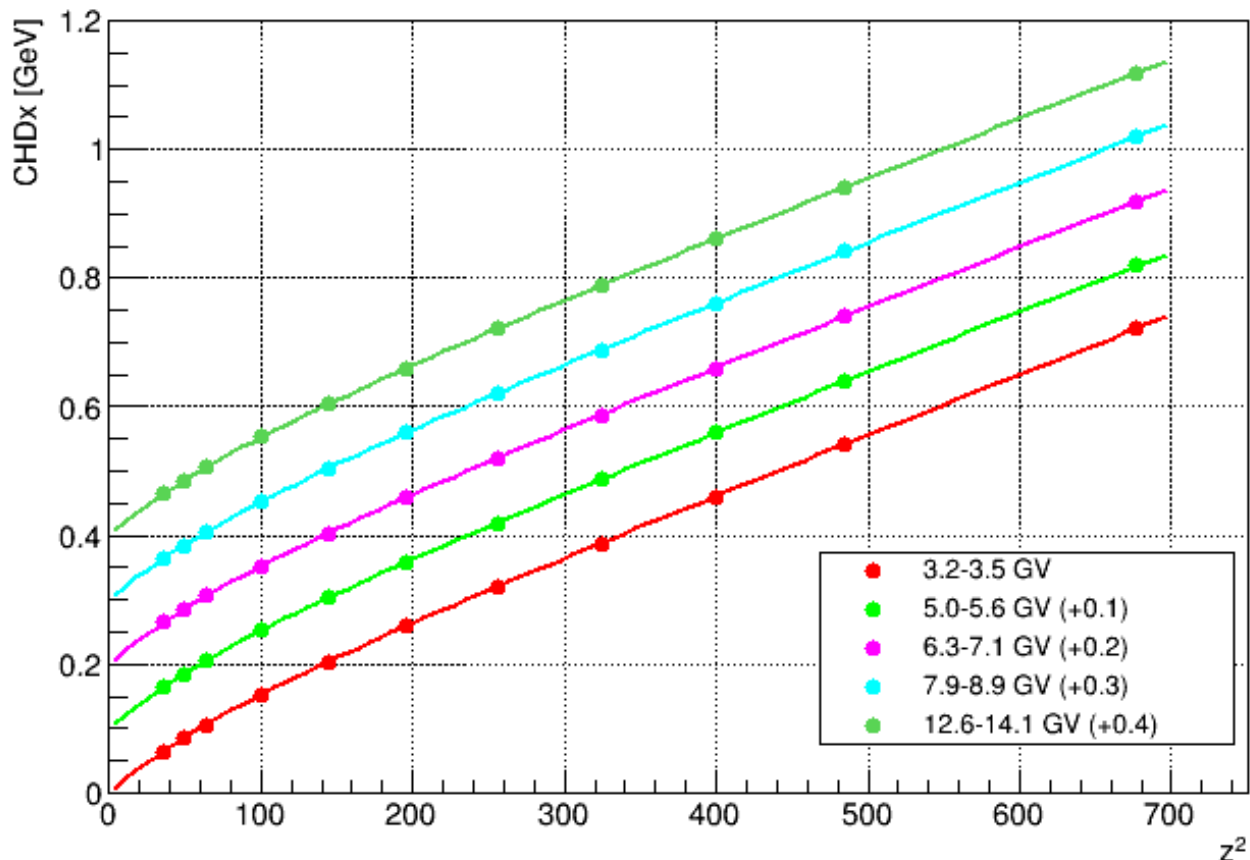
CHDx Signal Distribution(log10)





Charge Identification

CHDx vs z^2



Scintillation の saturation を考慮した halo model による fitting
 (Marrocchesi et al. NIM A659(2011)477)

$$\frac{dL}{dx} = \frac{A(1 - f_h)\alpha Z^2}{1 + B_s(1 - f_h)\alpha Z^2} + Af_h\alpha Z^2$$

$$\alpha \simeq 2\text{MeV/g/cm}^2$$

f_h : fraction in the halo

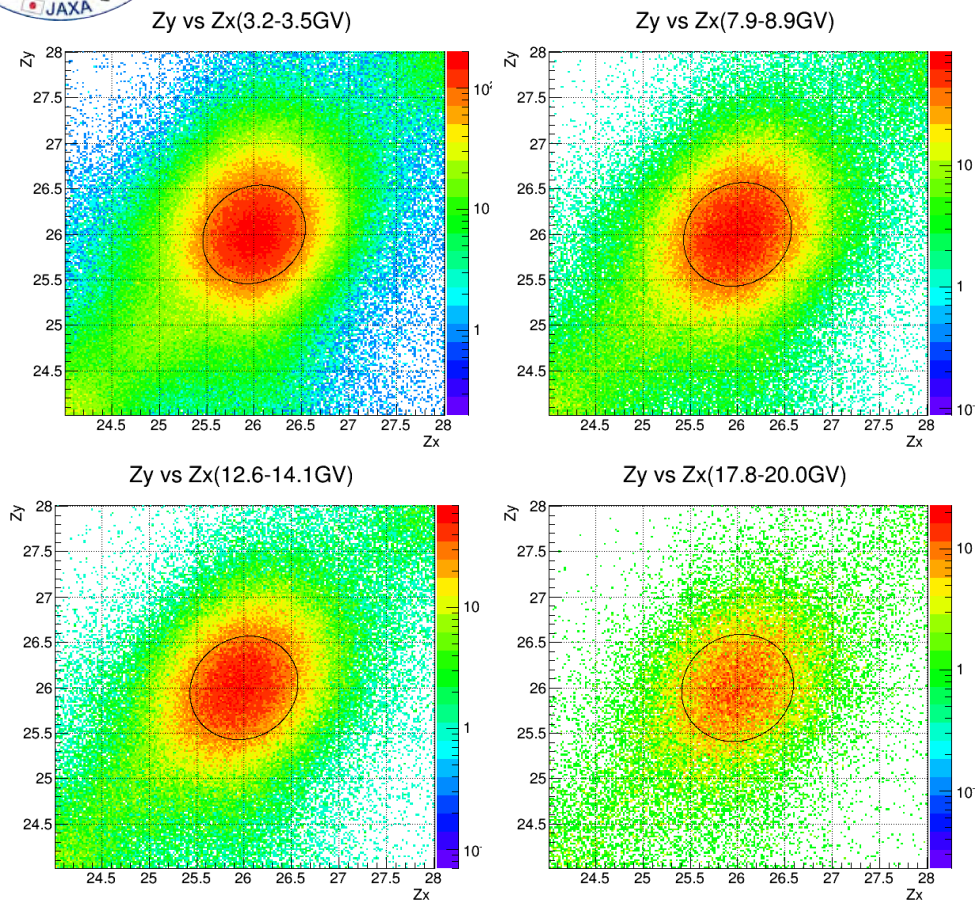
B_s : saturation parameter

A : normalization constant

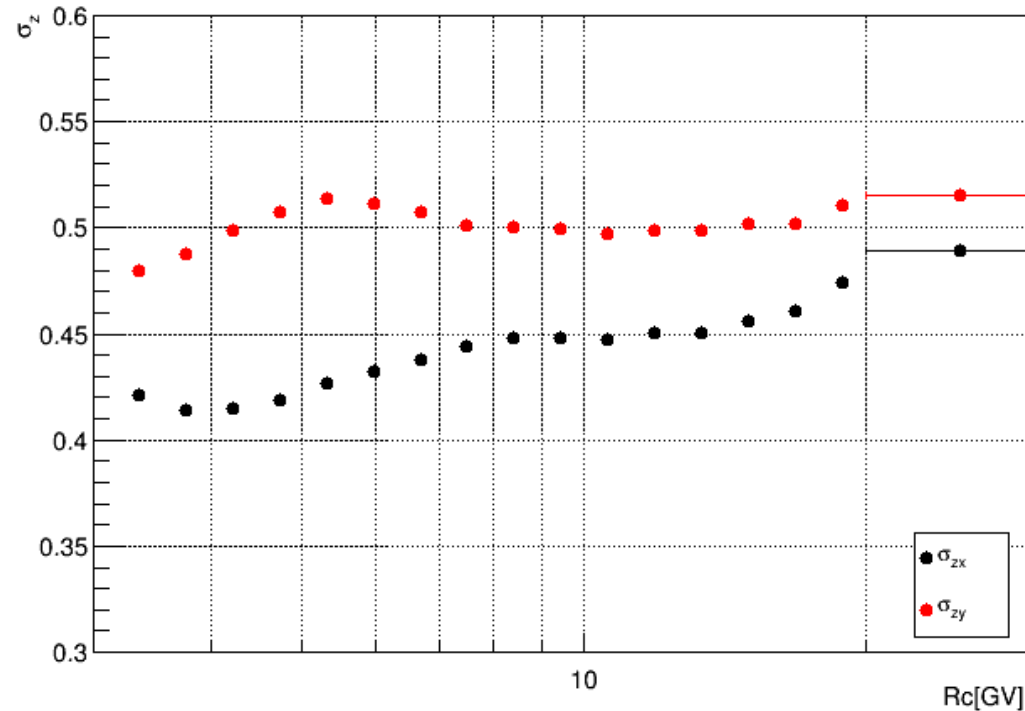
CHDx, CHDyそれぞれについてfitting → それぞれ電荷へ変換(ZCHDx, ZCHDy)



Charge Identification



Charge resolution



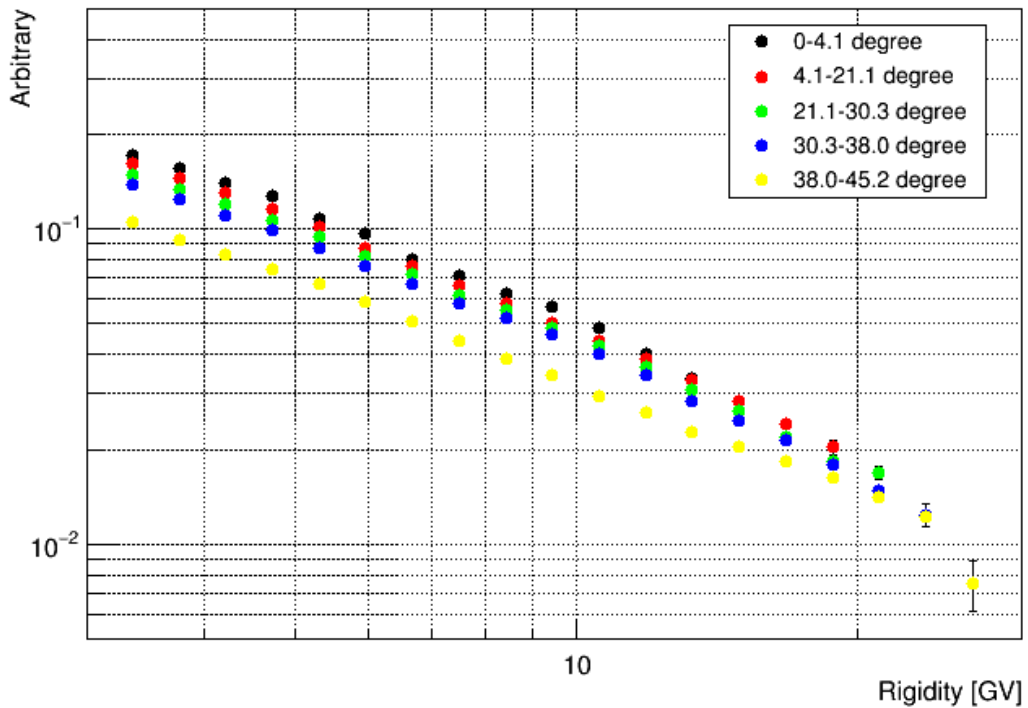
- 楕円は 1.2σ
- 1.2σ の楕円の内側にあるtrackをFe核候補とした

- Zx, Zy の標準偏差 σ_{zx}, σ_{zy}
- 最後の bin は $Rc > 20.0GV$.

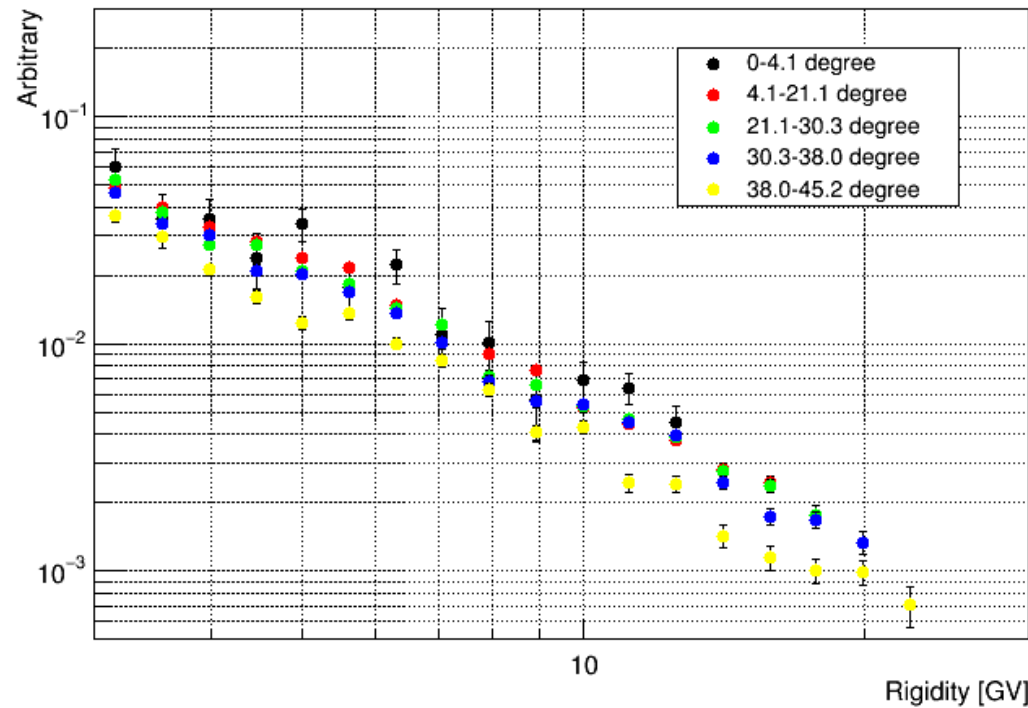


Rigidity Spectrum

Integral Rigidity Spectrum (Fe)



Differential Rigidity Spectrum (Fe)



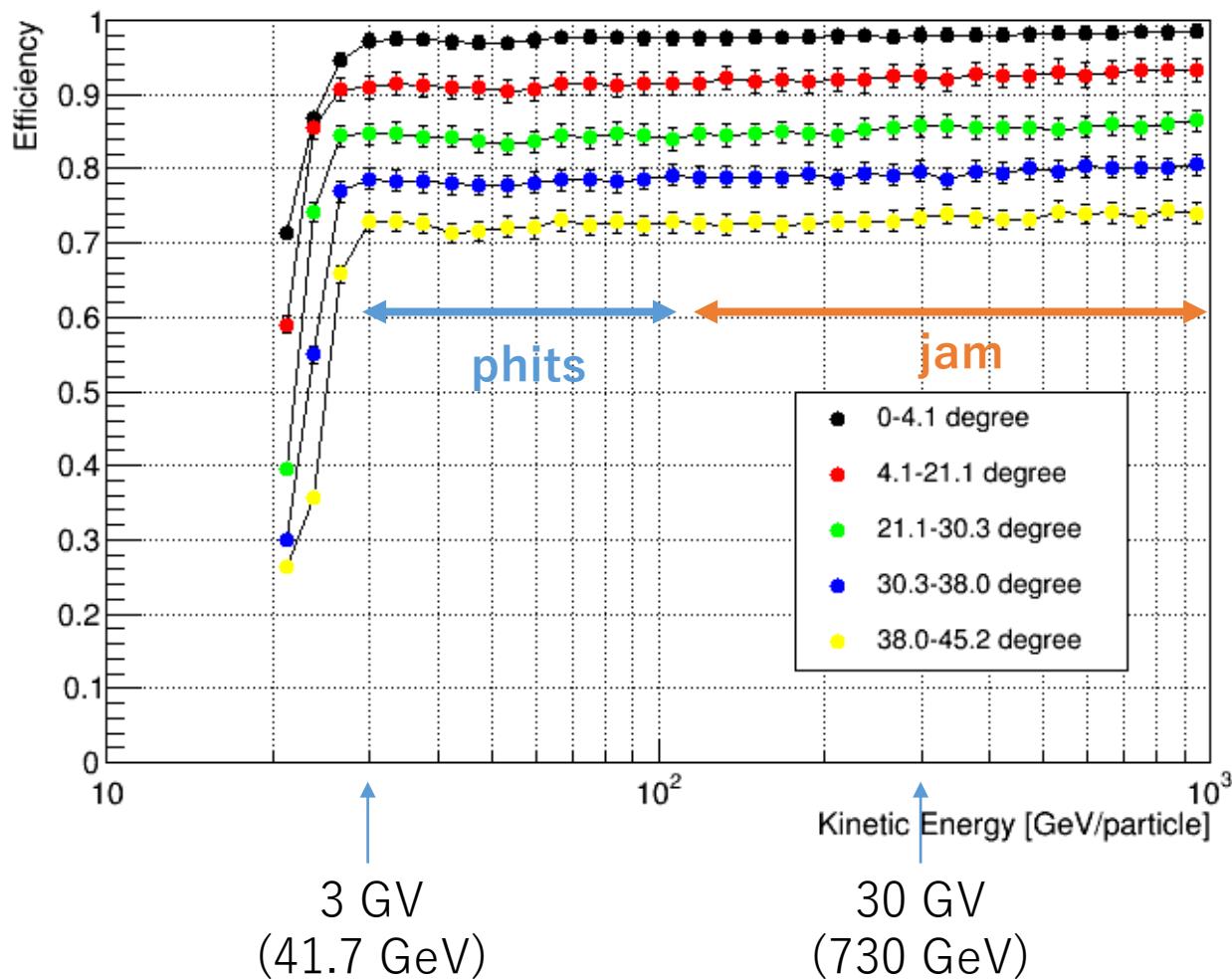
各 Rc bin内の個数をカウント ($\theta < 45^\circ$)
SQTで割って積分強度を算出

積分強度の差分をとって微分強度に変換



Efficiency

Tracking and Geometrical Efficiency (CHD_top-IMCY4_bot)(JamFrag=2,dr=2.0)



検出効率：

Simulation Code:

COSMOS8.042 + EPICS9.311

- CALET検出器上部に等方分布で入射
- CHDtop + IMC4bot を通過 && Tracking に成功したものを採用

Interaction models:

< 2 GeV/n (<112 GeV) : **phits** model
K.Niita et al., Radiation Measurements,41, 1080(2006)

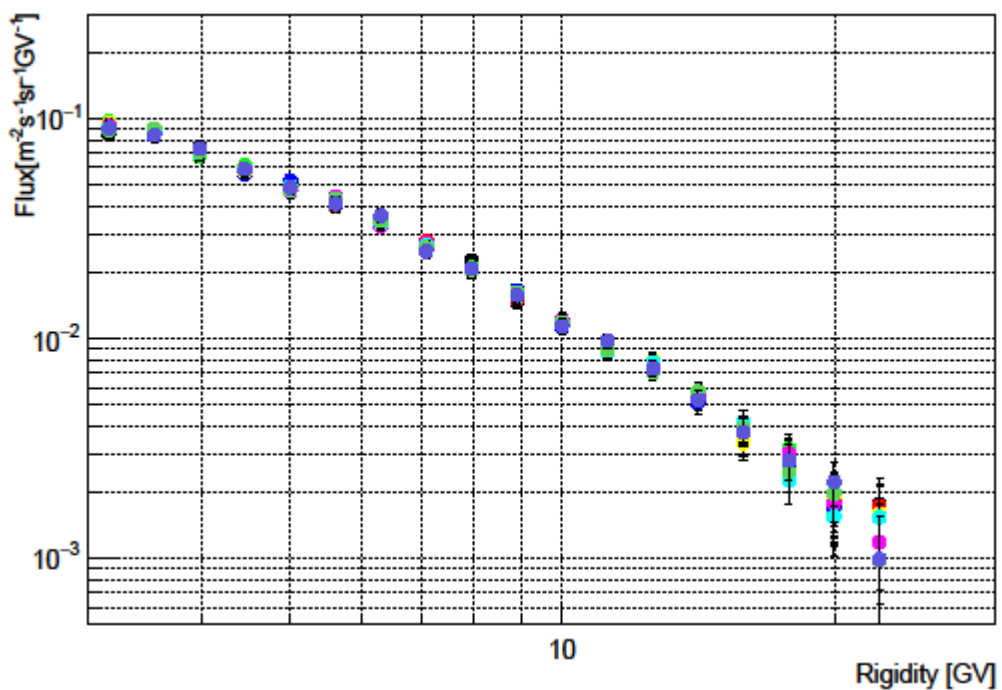
2 GeV/n~100 GeV/n(112GeV~5.6TeV) : **jam** model
Y.Nara et al., Phys.Rev.C, 61, 024901(1999)



Systematic Uncertainties

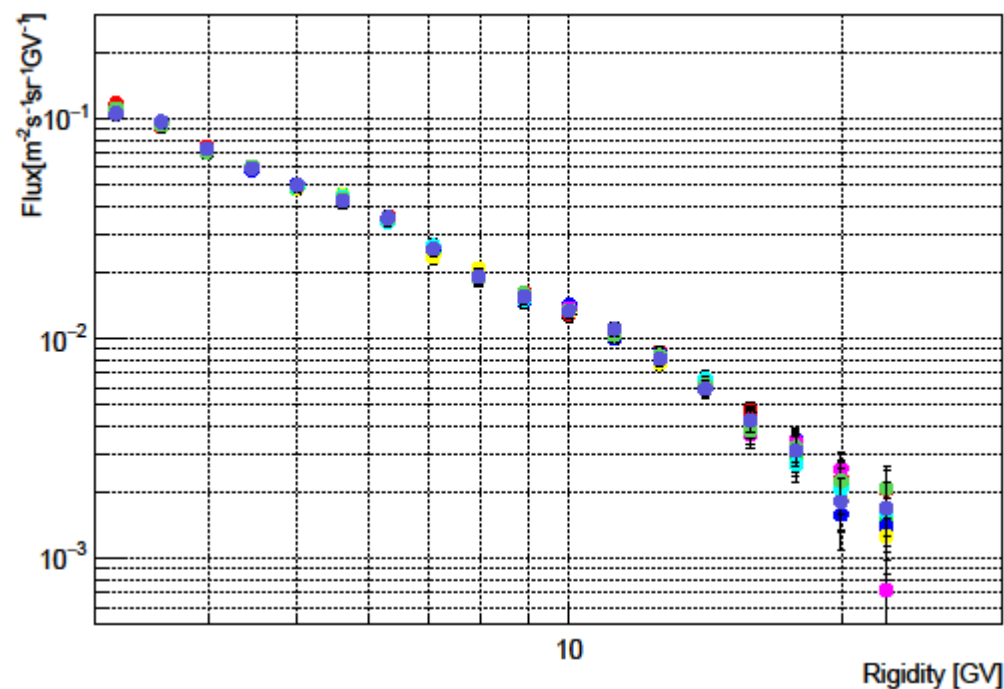
Rc計算方法の影響

Effect of Rc calculation(longitude and latitude variation)



観測点の緯度・経度のstepによるRcの fluctuationの影響: ~8%

Effect of Rc calculation(due to the arrival direction)

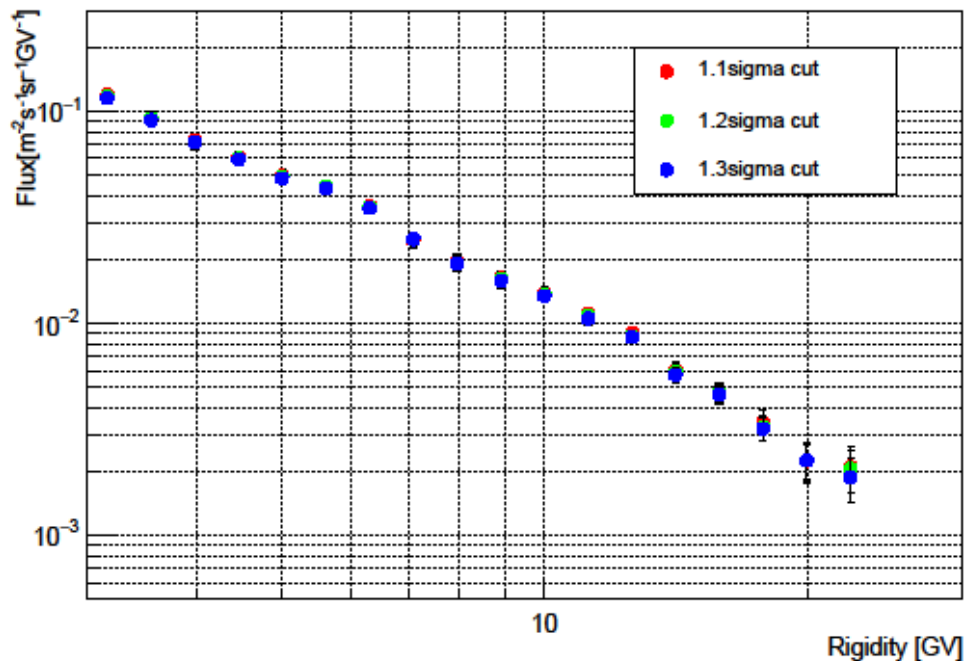


立体角bin中での Rc fluctuation の影響: ~5%



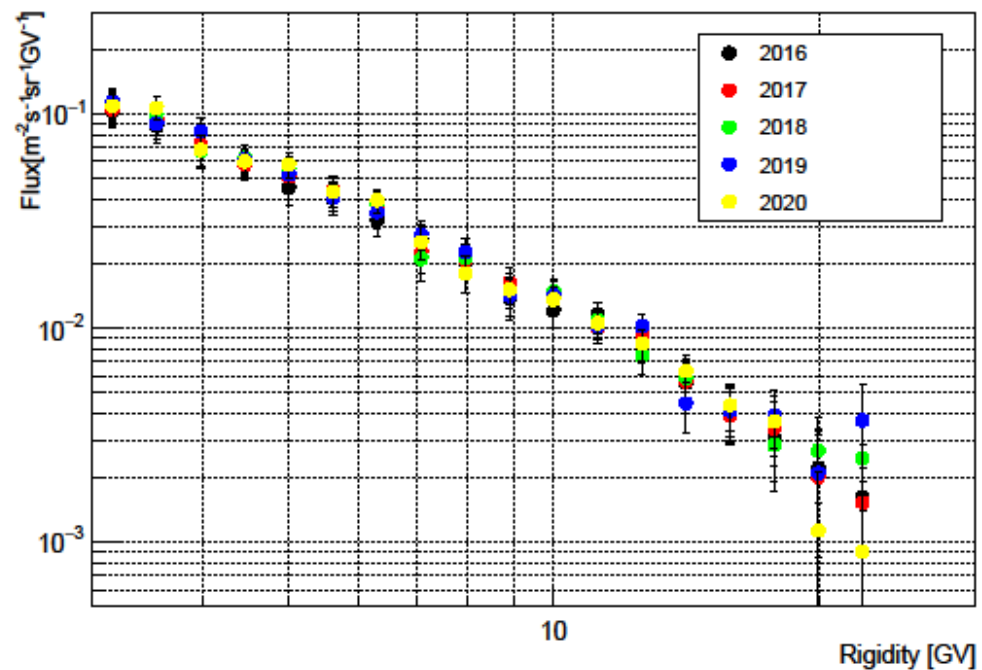
Systematic Uncertainties

Effect of charge selection cut



Charge cut の影響
1.1 σ , 1.2 σ , 1.3 σ でカットした場合のfluxの
fluctuation : < 2%

Longterm Stability

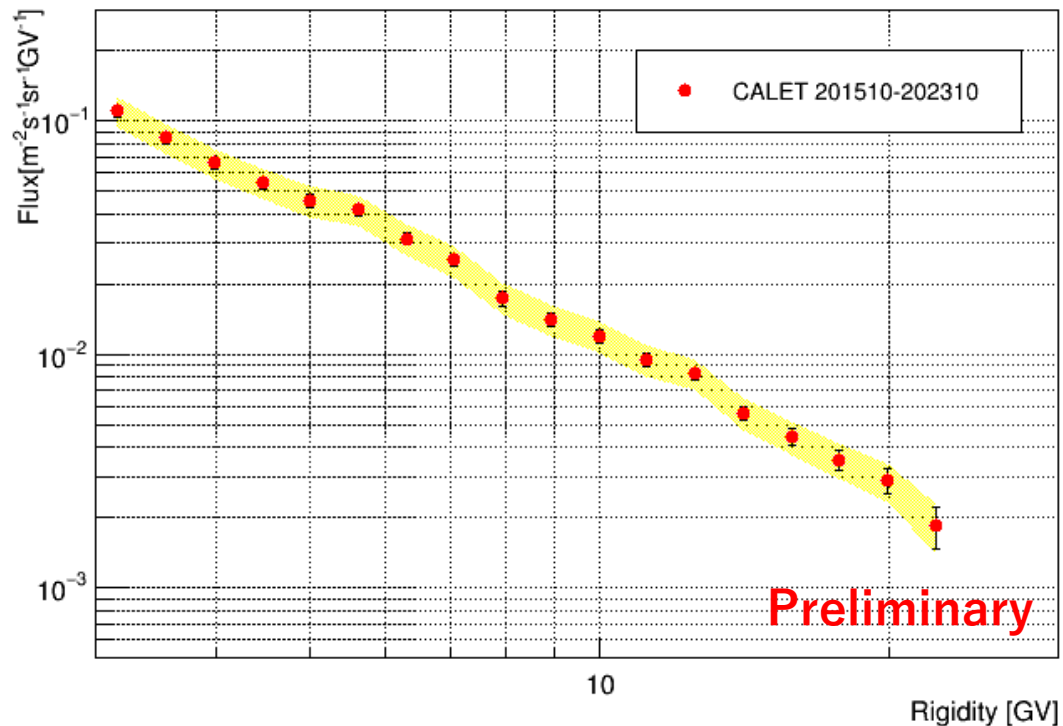


年ごとの違い: ~10%



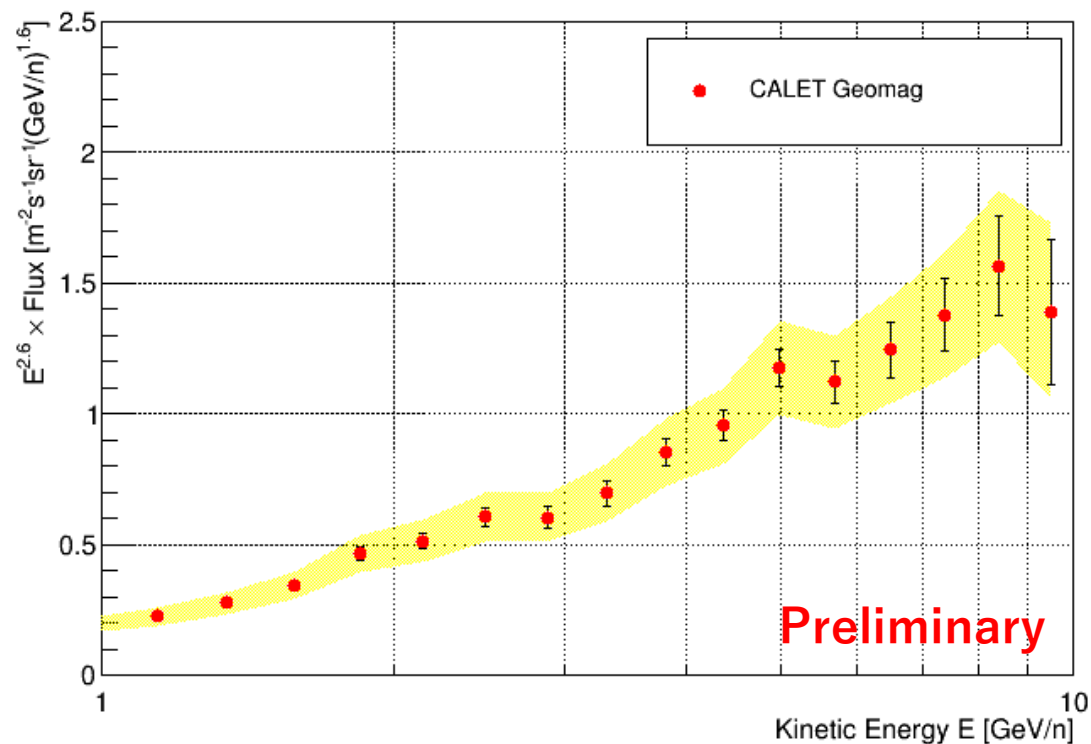
Absolute Flux

Differential Rigidity Spectrum (Fe)



- 天頂角毎の検出効率で補正後 1 つにまとめた

Energy Spectrum (Fe)

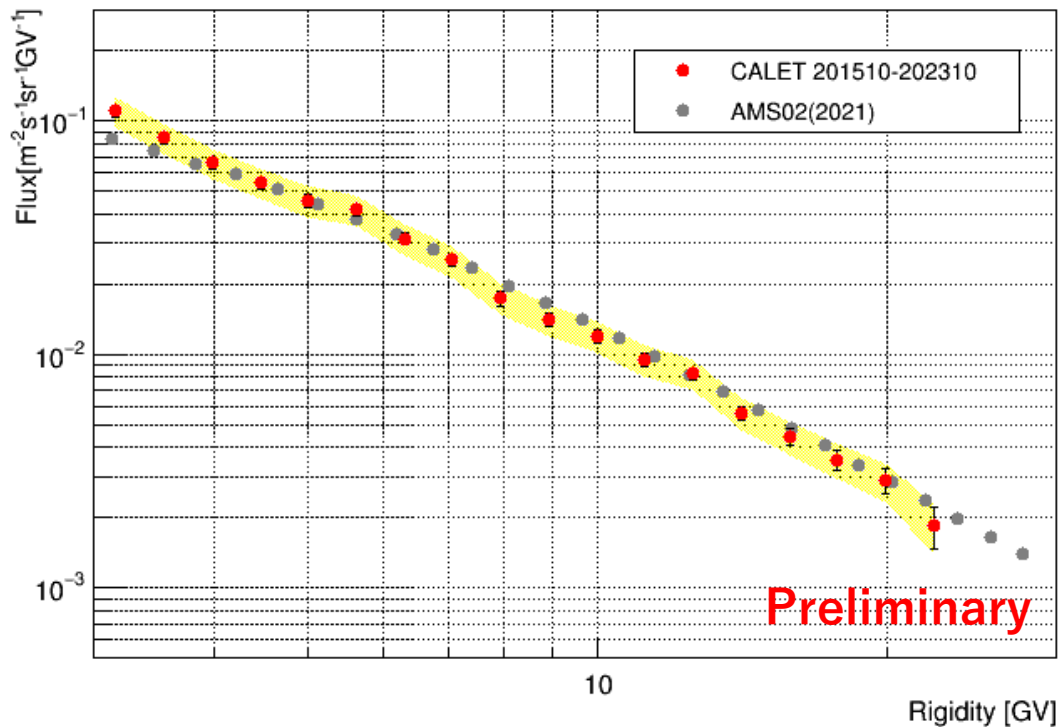


- 横軸は核子あたりの運動エネルギー $E(\text{GeV}/n)$
- 縦軸は $\text{flux} \times E^{2.6}$
- 誤差棒は統計誤差, 黄色の範囲は total error



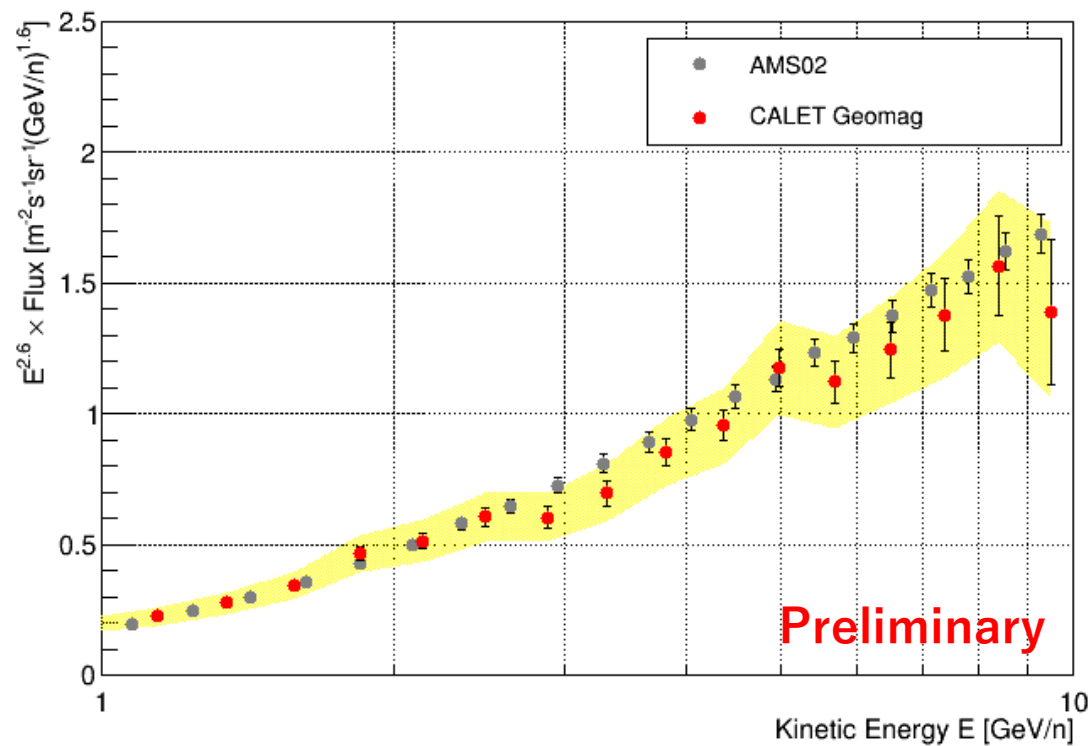
Absolute Flux

Differential Rigidity Spectrum (Fe)



- 天頂角毎の検出効率で補正後 1 つにまとめた

Energy Spectrum (Fe)

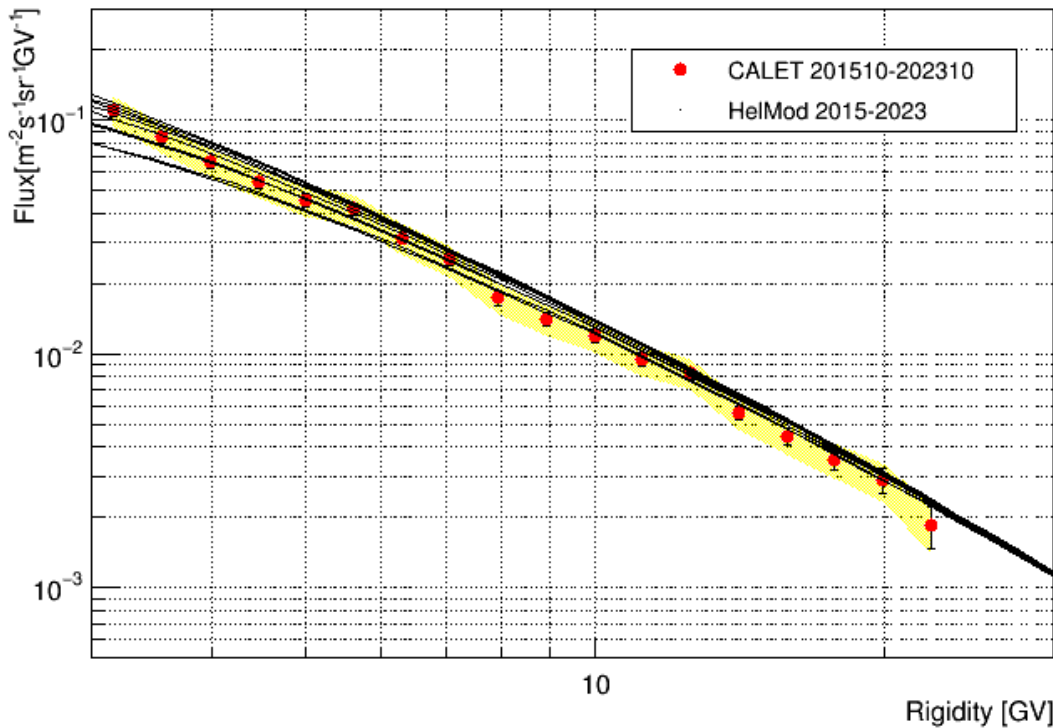


- 横軸は核子あたりの運動エネルギー $E(\text{GeV}/n)$
- 縦軸は $\text{flux} \cdot E^{2.6}$
- 誤差棒は統計誤差, 黄色の範囲は total error

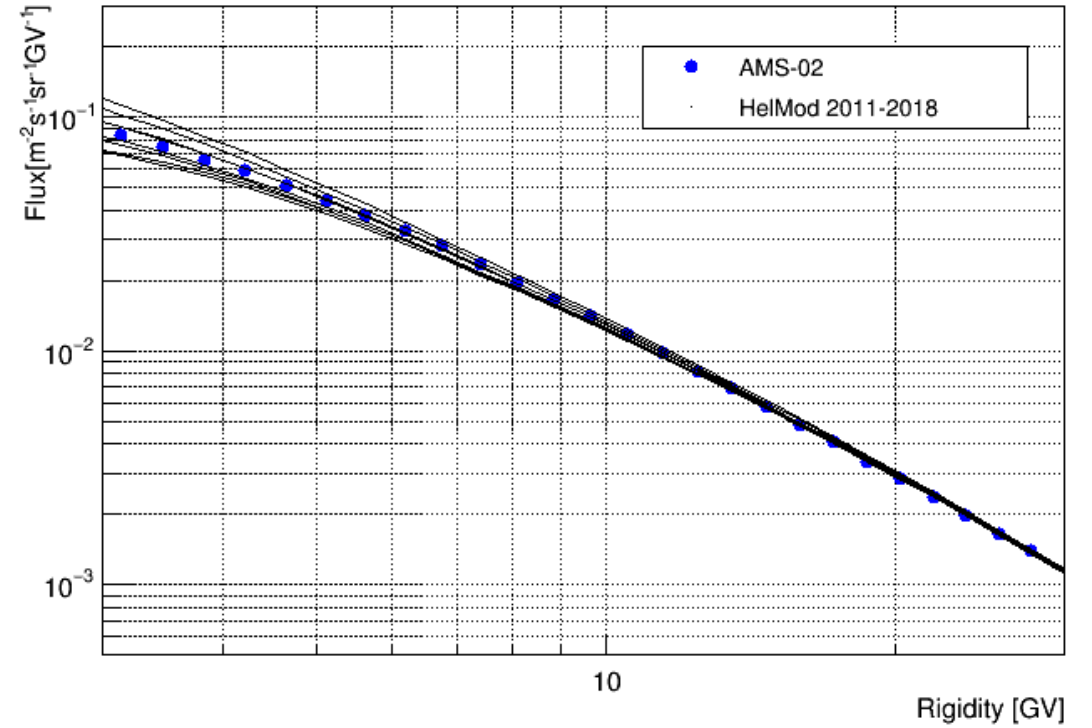


Comparison with HelMod

Differential Rigidity Spectrum (Fe)



Differential Rigidity Spectrum (Fe)



- 3-4GVのずれは modulation で説明できる。

[HelMod: the Modulation Model through the Heliosphere](https://www.helmod.org/) (<https://www.helmod.org/>)



Summary

- CALETの97月(201510-202310)の観測データを用いて 3GV-20GVの範囲で鉄核強度を算出
- 核子当たりの運動エネルギーで 1GeV/n-10GeV/n
- AMSの結果とほぼ一致。3-4GVのずれは solar modulation から期待される差と consistent
- この方法を他の核種へ応用して solar modulation を調べる