

TA Hybrid解析とSD解析を用いた Invisible Energy の推定

2024年3月26日

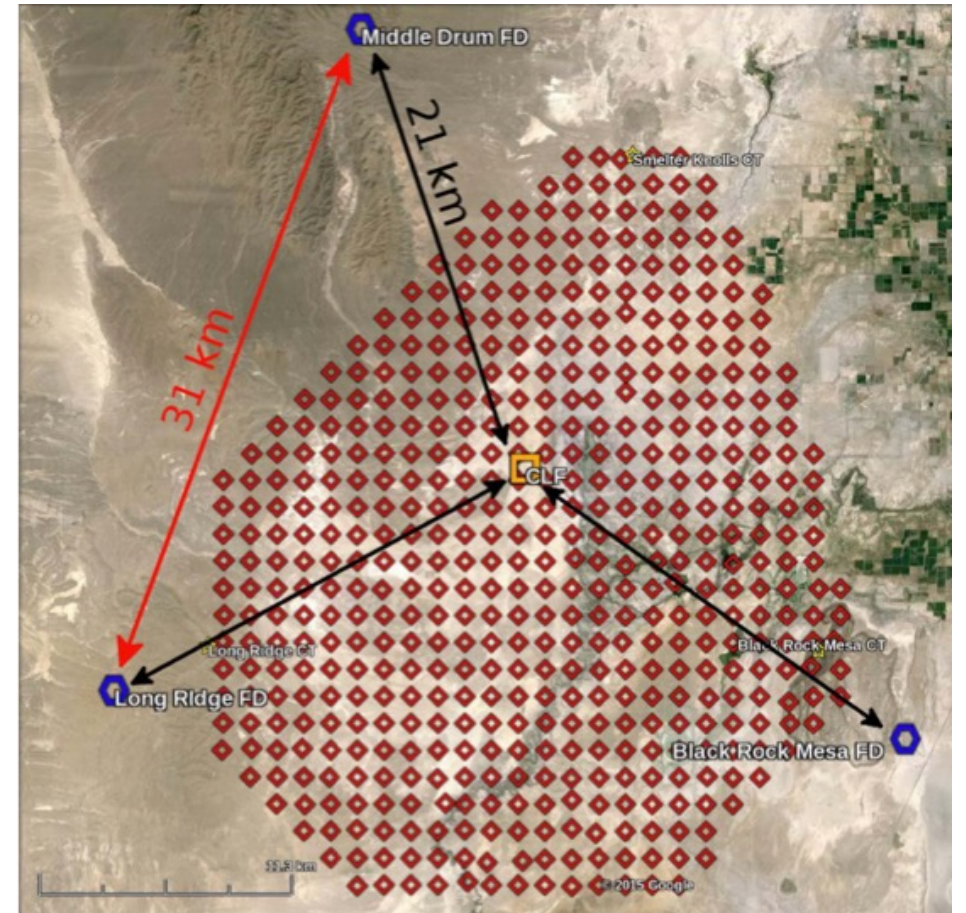
第七回 空気シャワー観測による宇宙線の起源探索研究会

大阪公立大学 中原美紅

Telescope Array 実験

- 2008年稼働
- 米国ユタ州に2種類の検出器を設置
 - **Surface Detector (地表検出器)**
 - 507台、1.2 km 間隔の格子状に設置
 - 700 km² の検出面積
 - **Fluorescence Detector (大気蛍光望遠鏡)**
 - 3ヶ所のステーションに設置

FDステーション	望遠鏡の台数
BRM(Black Rock Mesa)	12台
LR(Long Ridge)	12台
MD(Middle Drum)	14台



SD



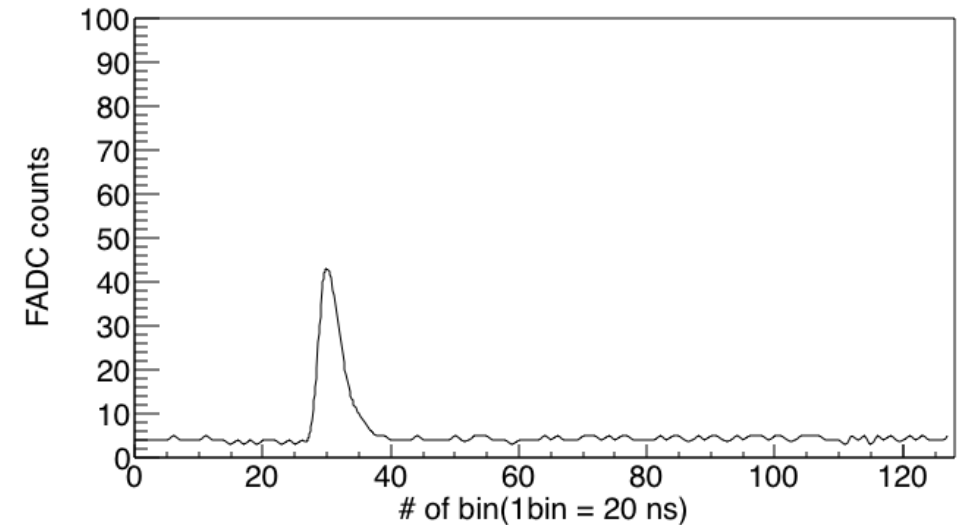
FDステーション

SD(地表検出器)

- 構造
 - 2層のプラスチックシンチレータ
 - 光電子増倍管
 - ソーラーパネル
 - 無線通信アンテナ
- 荷電粒子がシンチレーター内でエネルギー損失
 - シンチレーション光が発生
 - 光電子増倍管へ集光し記録



TA SD

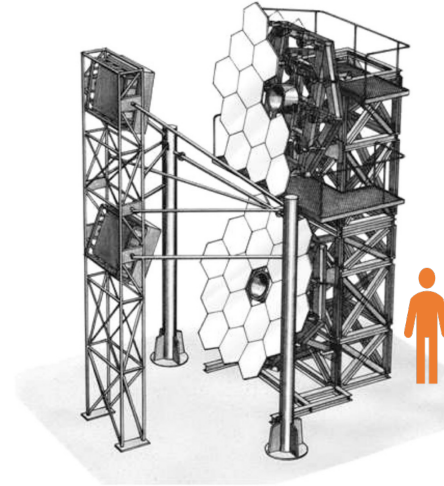


SDで記録された波形情報

FD(大気蛍光望遠鏡)

- 構造

- 鏡(18枚/1台、面積6.8 m²)
- カメラ(256個の光電子増倍管)



BRMステーション

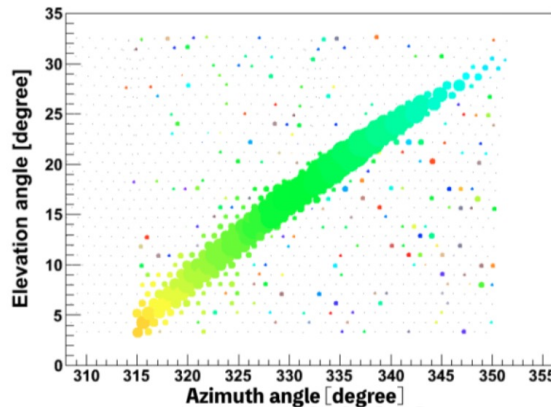
- 大気蛍光を観測

- 大気蛍光…空気シャワー中の荷電粒子が大気中の分子を励起させ、その分子が基底状態に戻るときに放出する光
- 荷電粒子のエネルギー損失に対応している
 - 荷電粒子が持っていたエネルギーを求めることができる(= E_{cal})

Hybrid解析

-ジオメトリ

- SDとFDを用いた解析



FDで観測された
イベントディスプレイ

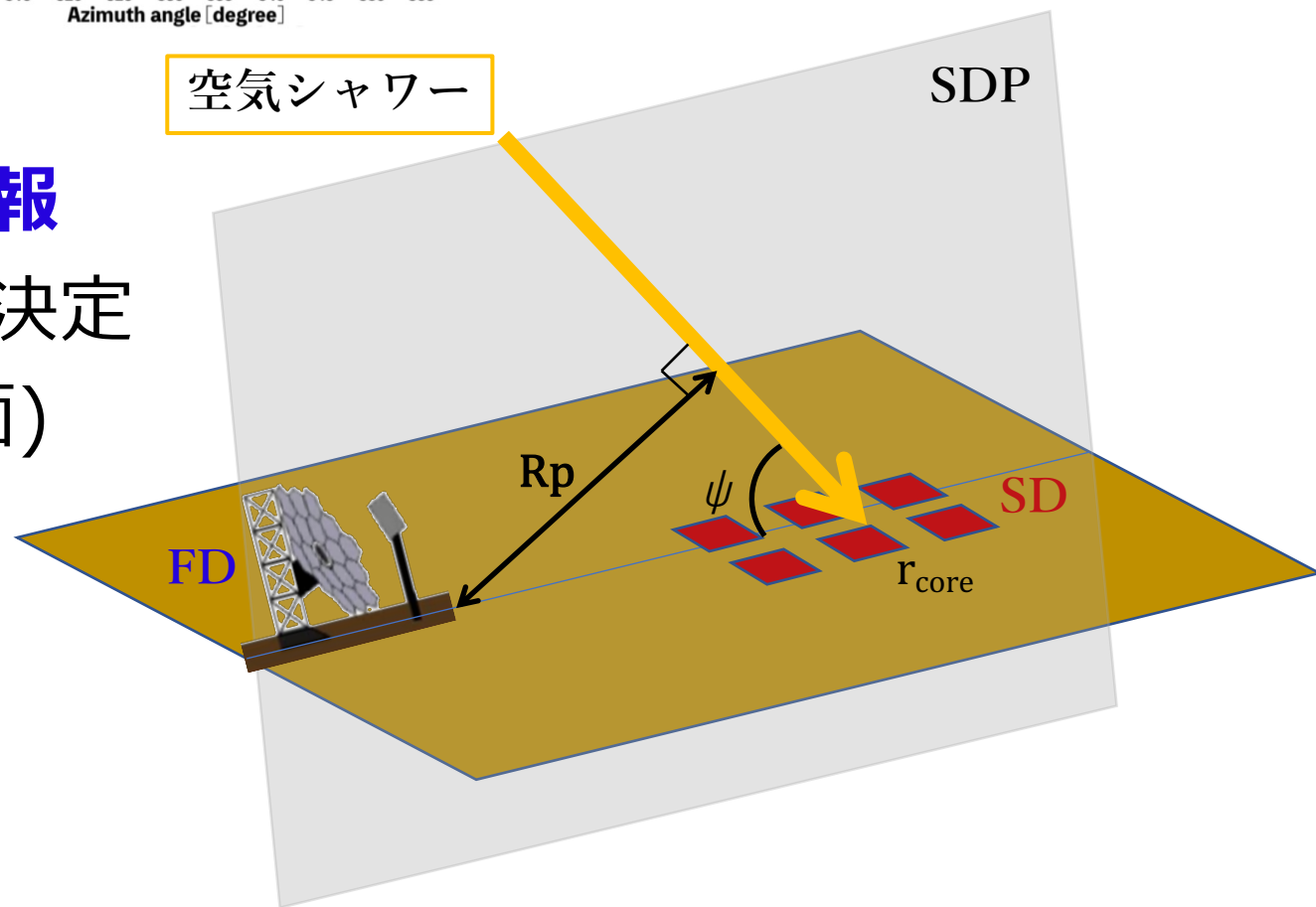
FDのみ…**二次元情報 + 時間情報**

Shower Detector Planeの決定
(シャワー軸とFDを含む平面)



FD + SD…**地上の情報を追加**

ジオメトリ再構成

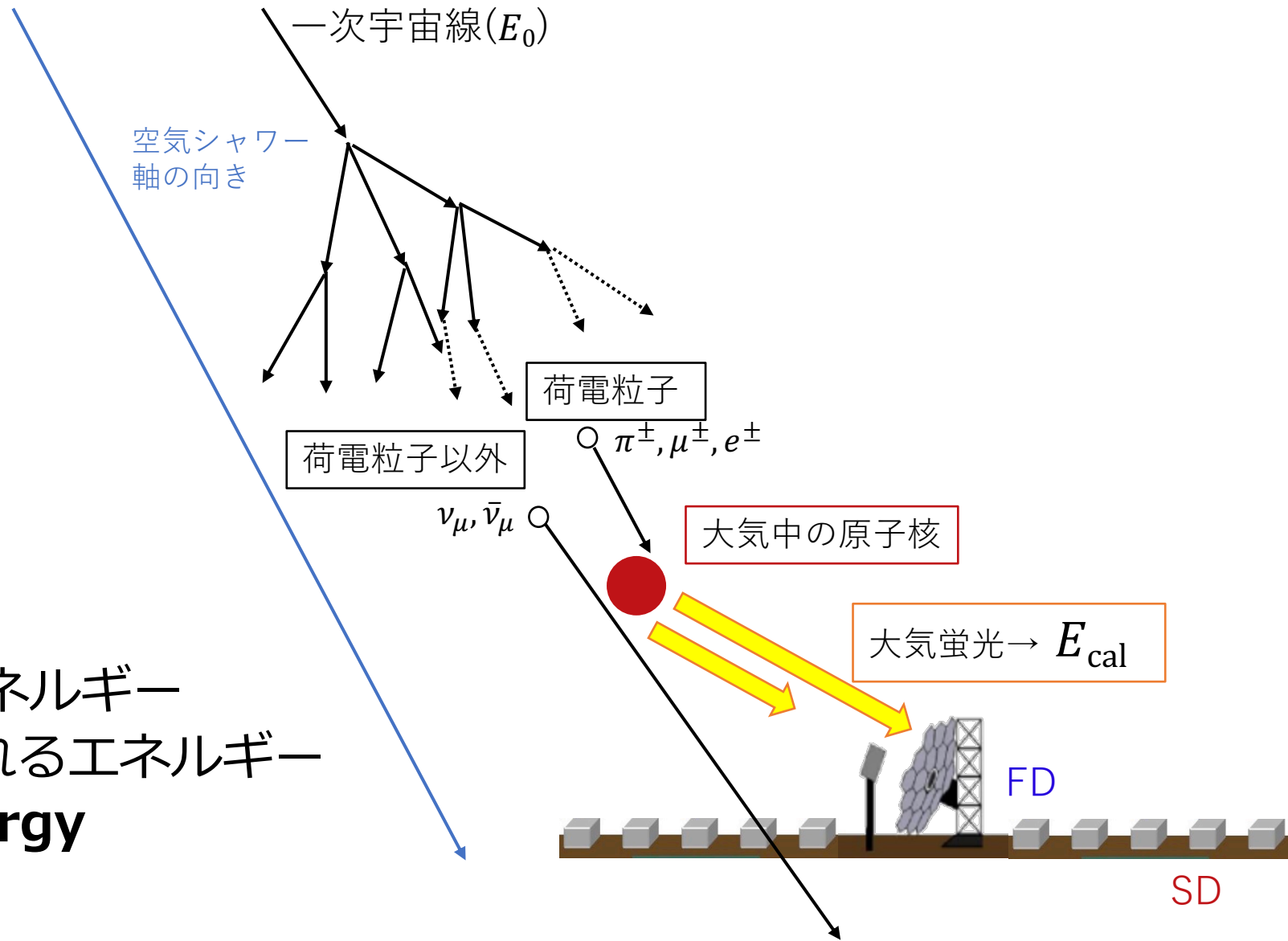


Hybrid解析

-エネルギー

$$E_0 = E_{\text{cal}} + E_{\text{inv}}$$

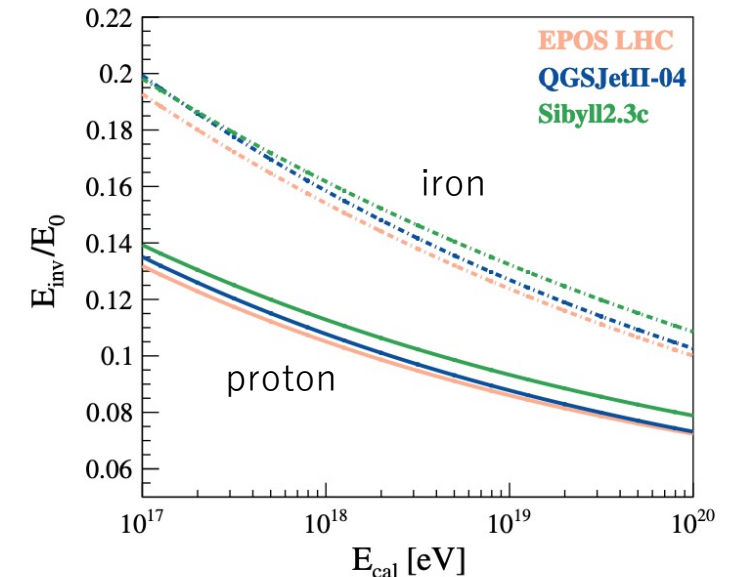
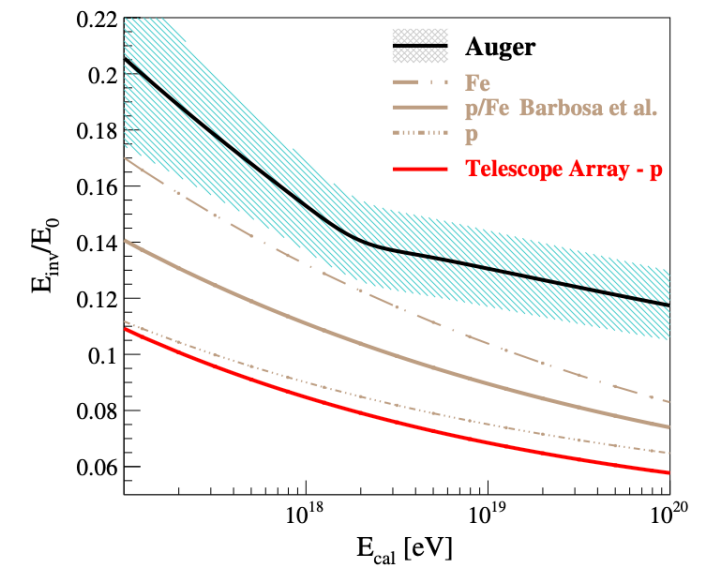
- E_0 : 一次宇宙線のエネルギー
- E_{cal} : FD観測で得られるエネルギー
- E_{inv} : **Invisible Energy**



エネルギーを持ち去るため、
FDでは観測できない
 \rightarrow **Invisible energy**

目的と背景

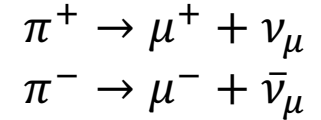
- 目的
 - 空気シャワーのミュオン成分を取り出して
ミュオン数から invisible energy を推定する
- 背景
 - ハドロン相互作用モデルによって異なる
 - proton と仮定してシミュレーションで推定
 - Auger とinvisible energy の推定値がズレている



Phys.Rev.D 100 (2019) 8, 082003
Data-driven estimation of the invisible energy of
cosmic ray showers with the Pierre Auger
Observatory

Invisible Energy の新しい推定方法

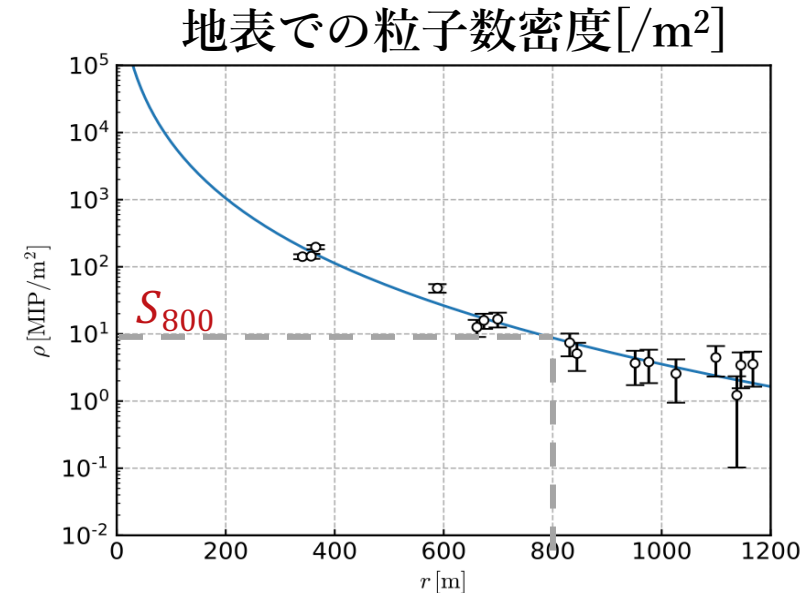
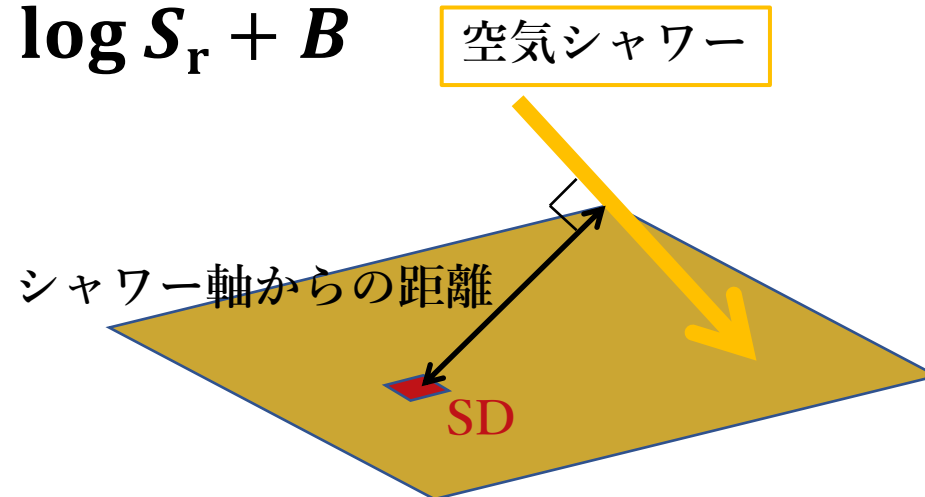
- E_{inv} はミューオン数にほぼ比例 $\rightarrow E_{\text{inv}} = \varepsilon N_{\mu}$



SD観測から得られる粒子数密度を用いて E_{inv} を求める

- S_r : シャワー軸から r m 離れた地表での粒子数密度

$$\log E_{\text{inv}} = A \log S_r + B$$



MCシミュレーション

シミュレーション条件

ハドロン相互作用モデル : QGSJet II -04

宇宙線核種 : proton, iron

エネルギー : $\log E = 19.0, 19.1, \dots, 20.0$

天頂角 : 0 ~ 70 deg

方位角 : 0 ~ 360 deg

コア位置 : 半径 25 km の円内

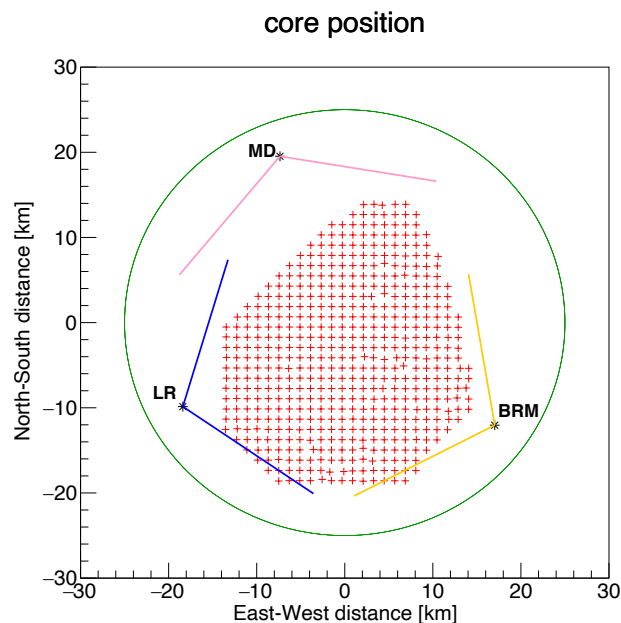
イベントセレクション条件

• Hybrid

- # of $PMT_{rec} > 20$
- $\theta < 45$ deg
- X_{max} がFDの視野内

• SD

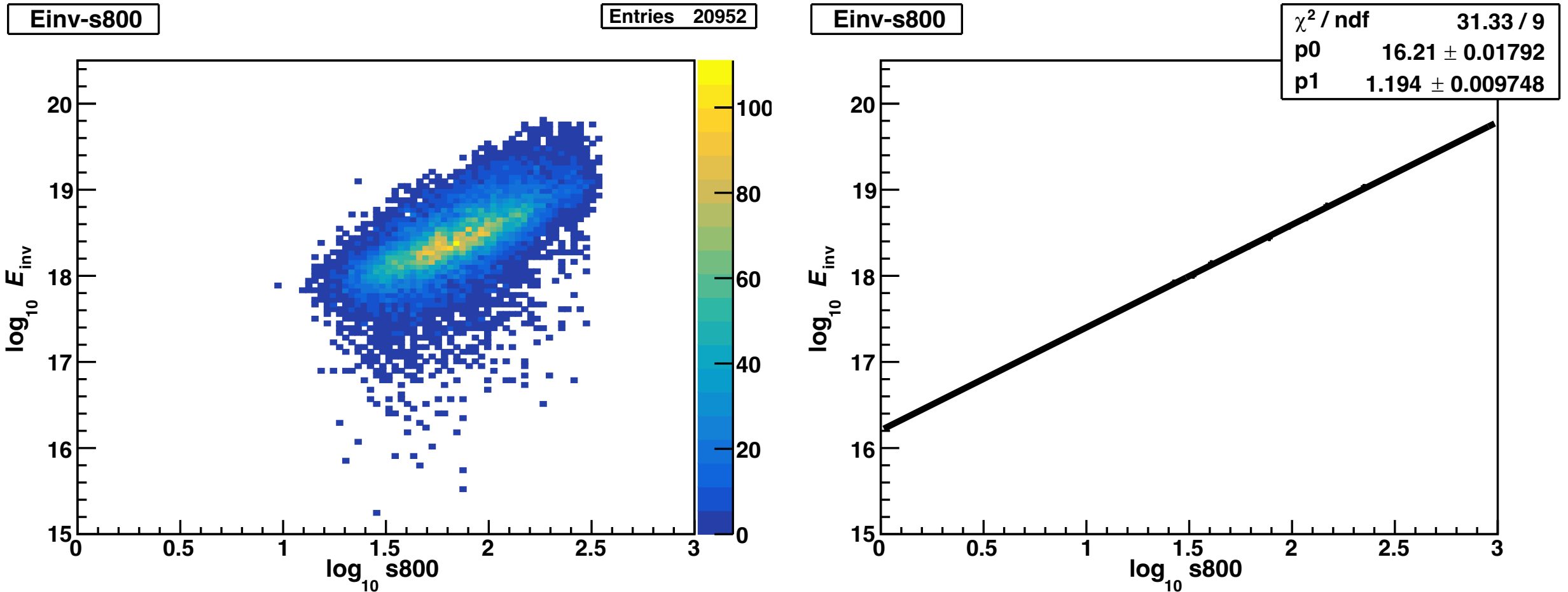
- $E > 1$ EeV
- $\theta < 45$ deg
- # of $SD_{rec} \geq 5$
- $D_{border} > 1200$ m
- ジオメトリフィット $\chi^2 < 4.0$
- ldfフィット $\chi^2 < 4.0$
- $\sigma(S_{800})/S_{800} < 0.25$
- pointing direction error < 5.0 deg



$\log S_{800}$ と $\log E_{inv}$ の関係

$$\log E_{inv} = A \log S_r + B$$

QGSJetII-04
proton

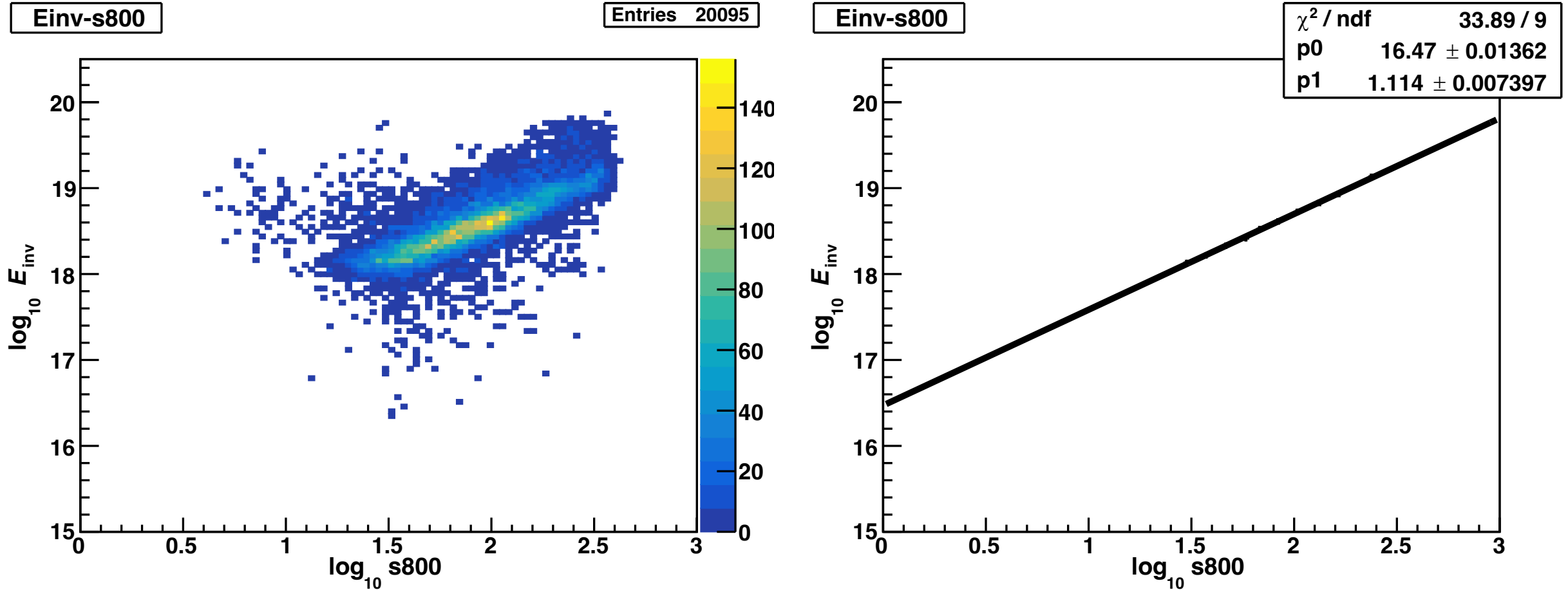


$\log S_{800}$ と $\log E_{\text{inv}}$ の関係

$$\log E_{\text{inv}} = A \log S_r + B$$

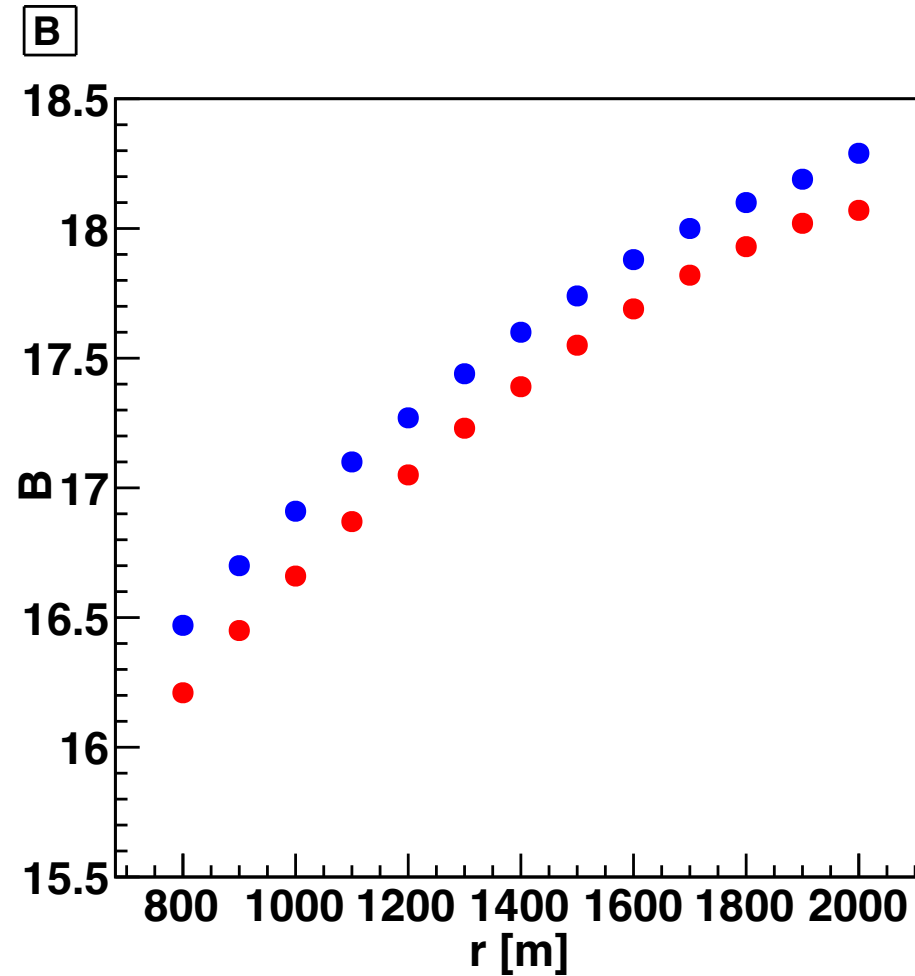
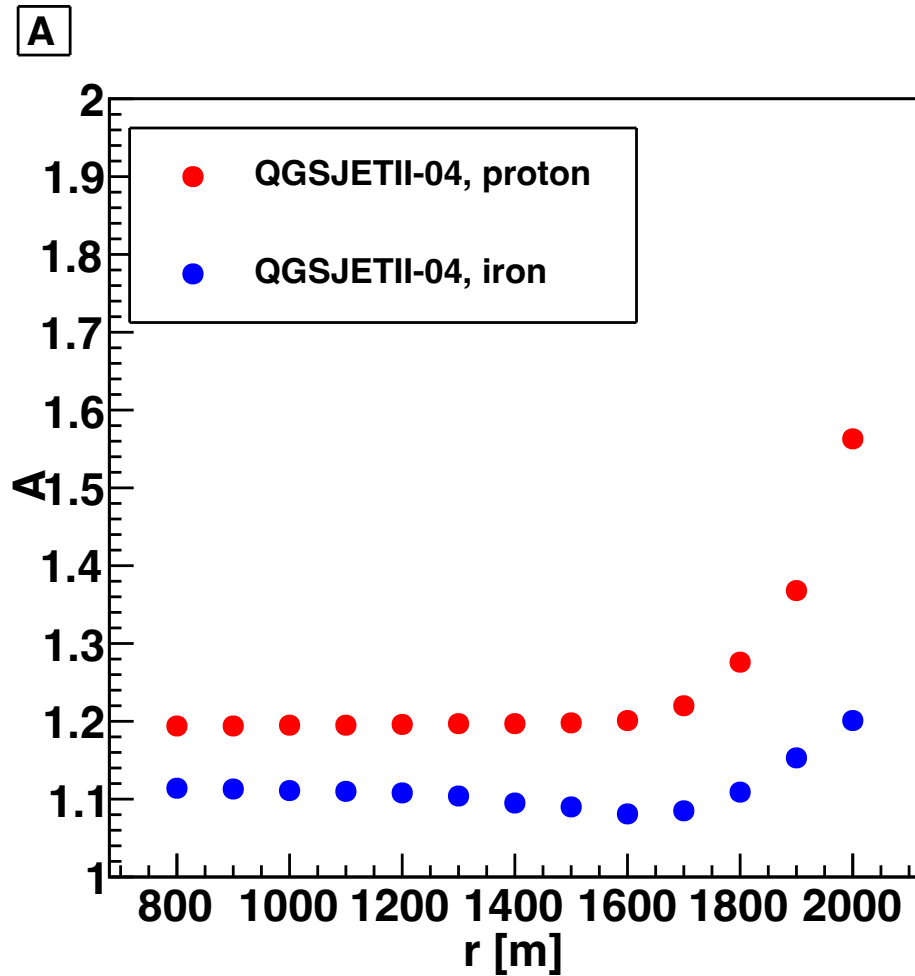
QGSJetII-04

iron



$$\log E_{\text{inv}} = A \log Sr + B$$

A, B

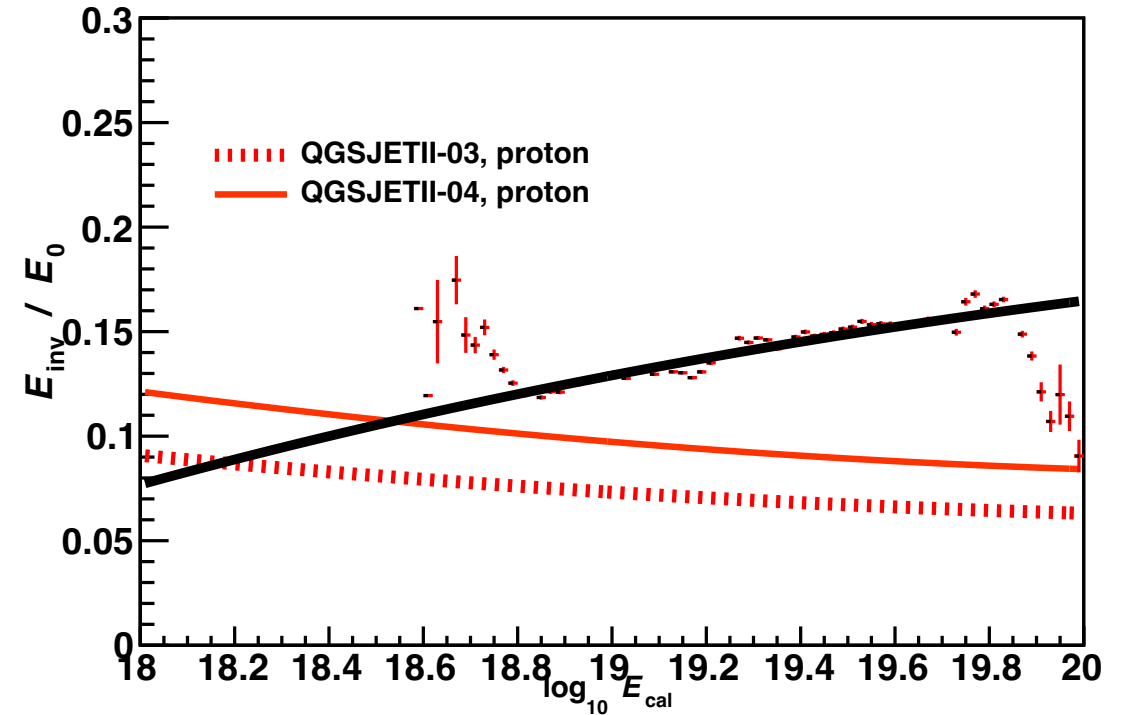
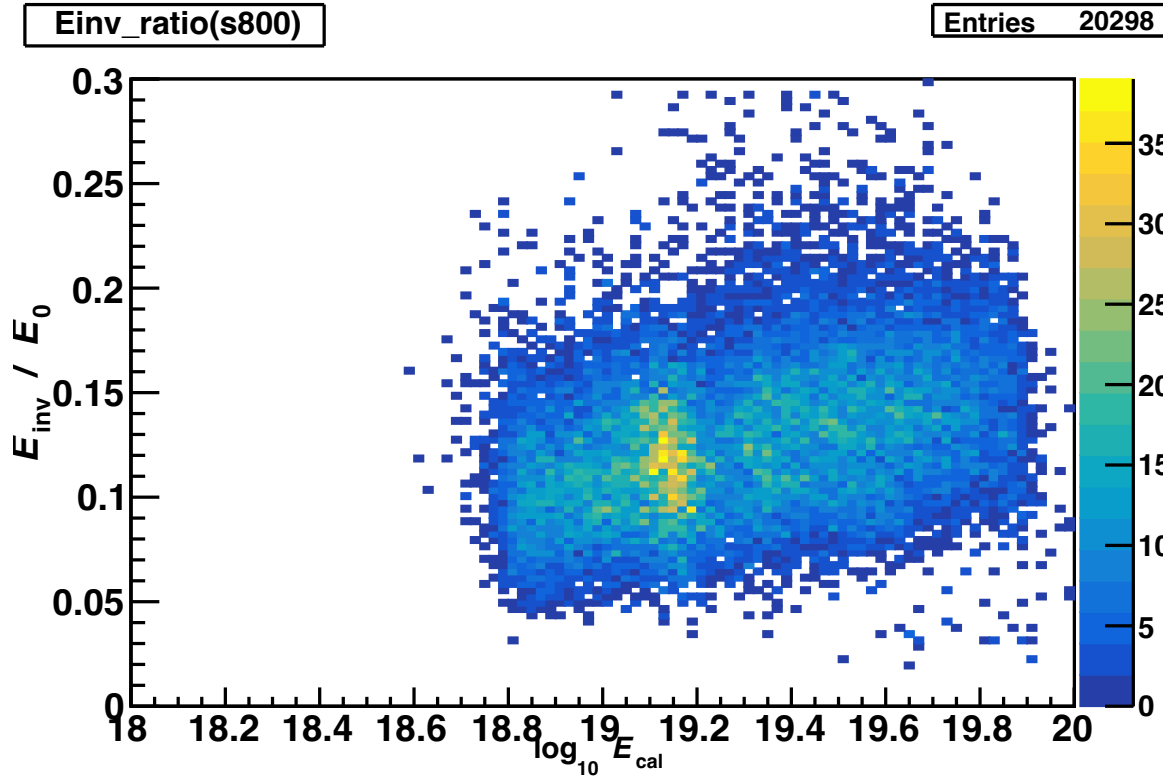


$$E_{\text{inv}}/E_0$$

$$\log E_{\text{inv}} = A \log S_r + B$$

QGSJetII-04

proton

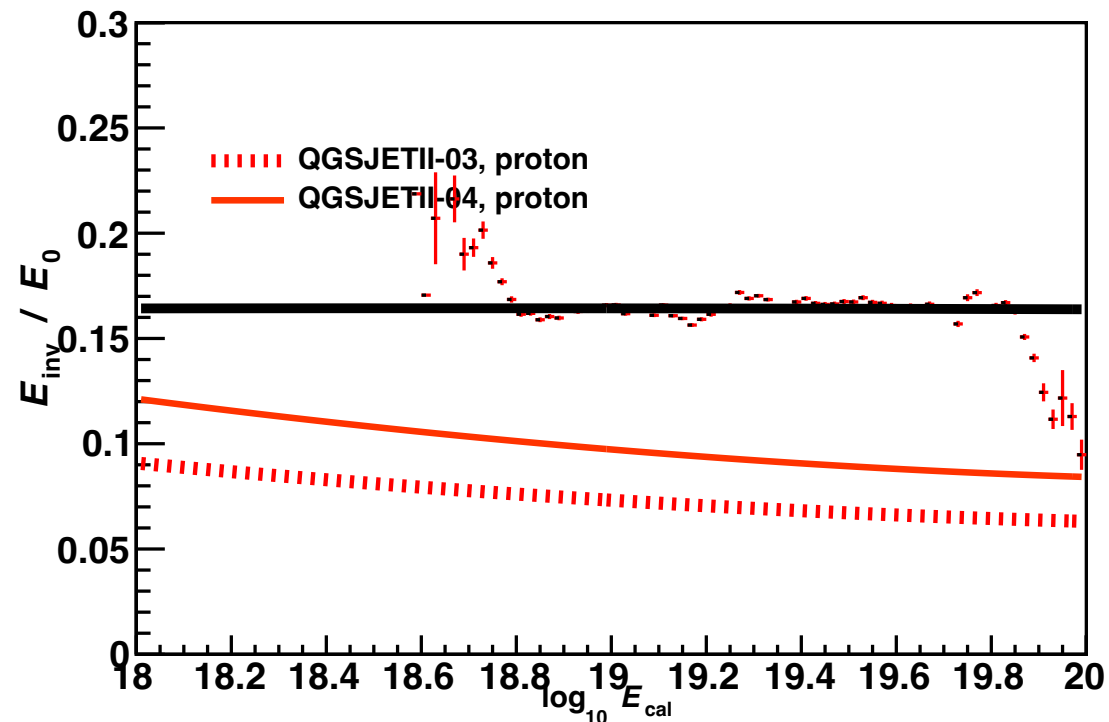
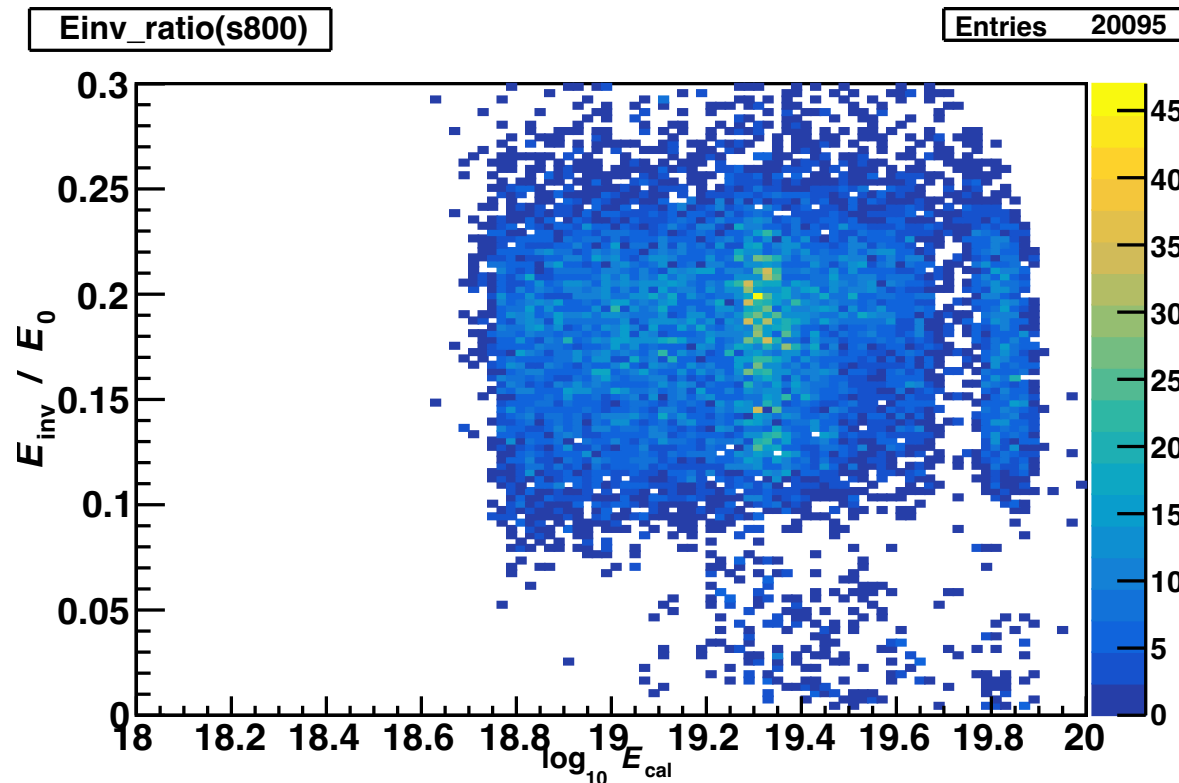


$$E_{\text{inv}}/E_0$$

$$\log E_{\text{inv}} = A \log S_r + B$$

QGSJetII-04

iron



$$E_{\text{inv}}/E_0$$

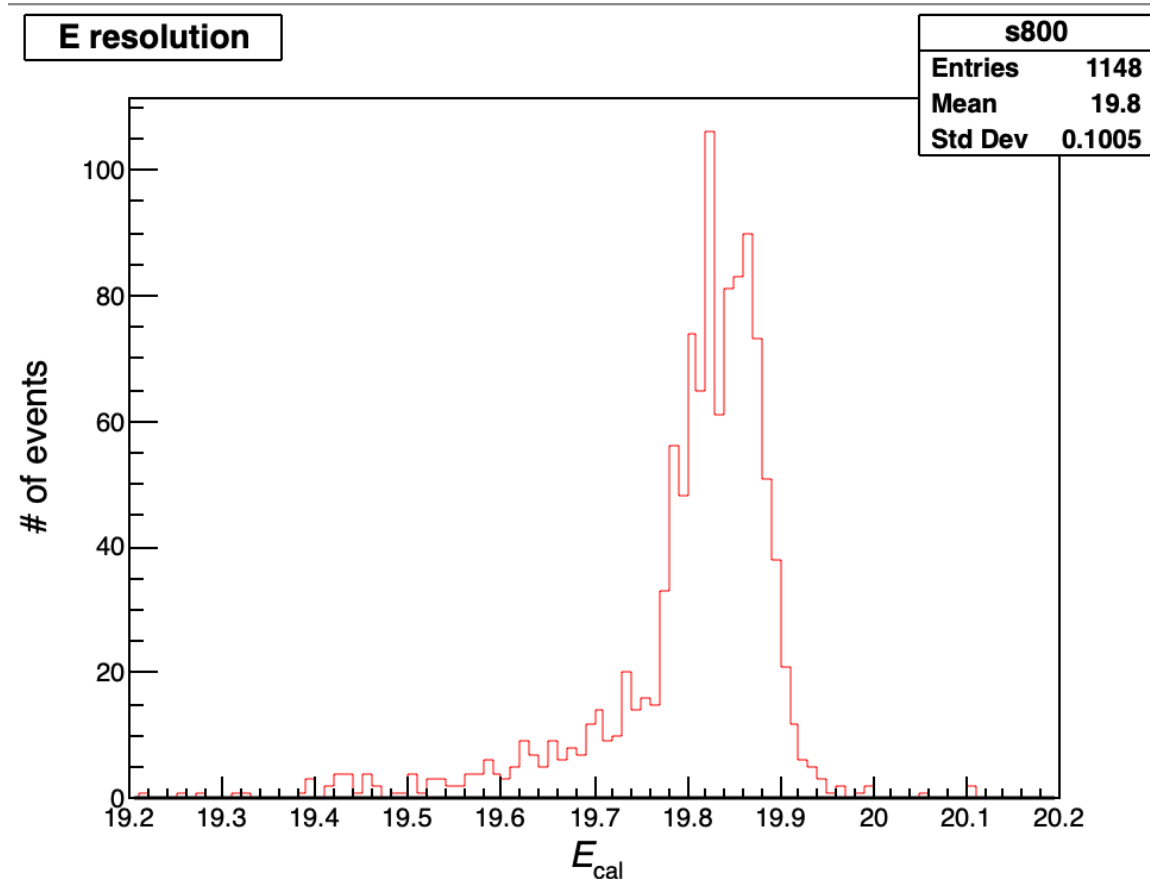
- $E_{\text{inv}}/E_{\text{cal}}$ を大きく見積もっている
→ E_{cal} を小さく見積もっている

$$\log E_{\text{inv}} = A \log S_r + B$$

QGSJetII-04

proton

Log E = 20.0



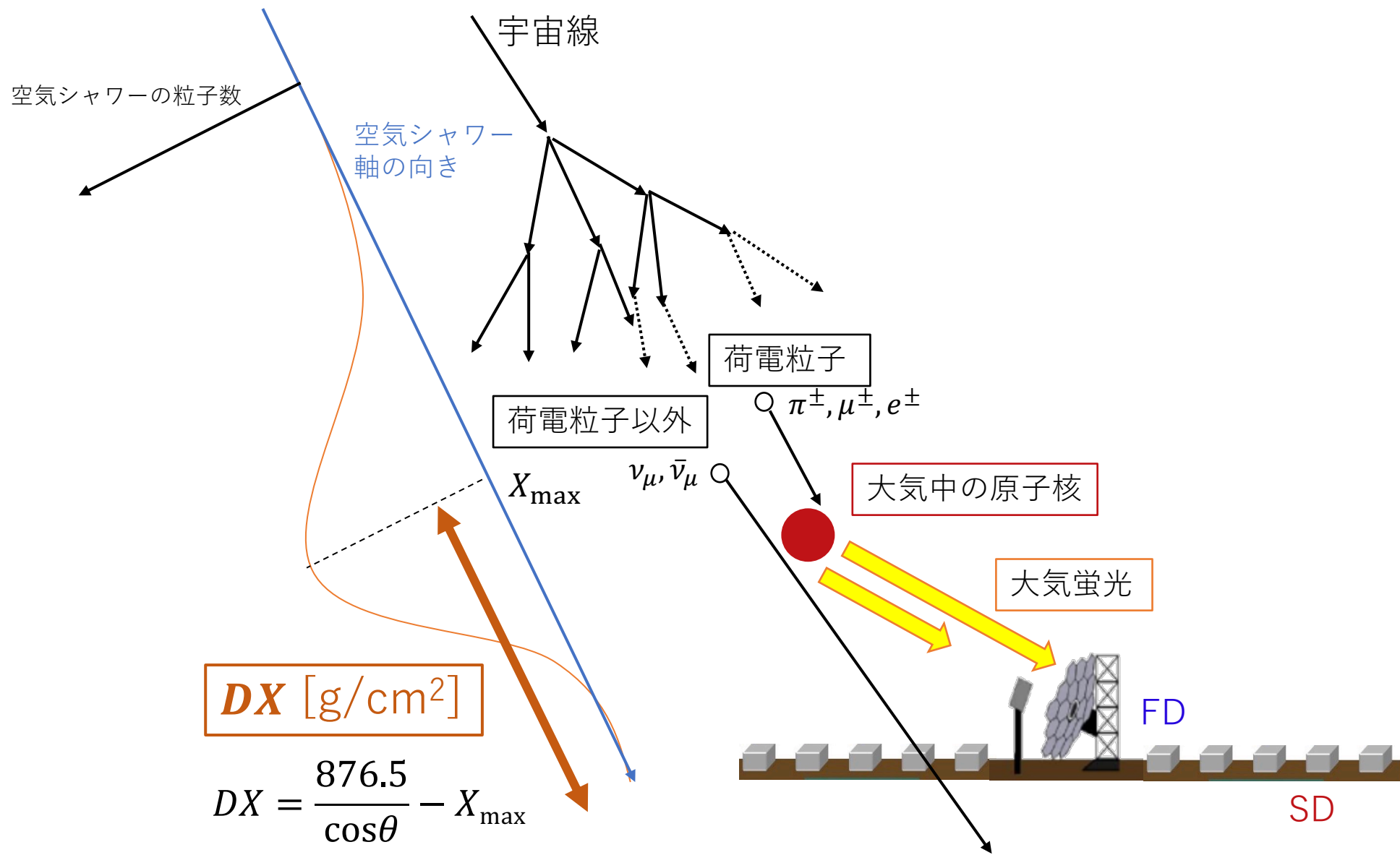
まとめと今後

- 地表での粒子数密度に注目したInvisible Energyの推定方法

$$\log E_{\text{inv}} = A \log S_r + B$$

- E_{true} の値が大きくなると $E_{\text{inv}}/E_{\text{cal}}$ の値が大きくなる
→ E_{cal} を小さく見積もる原因を見つける

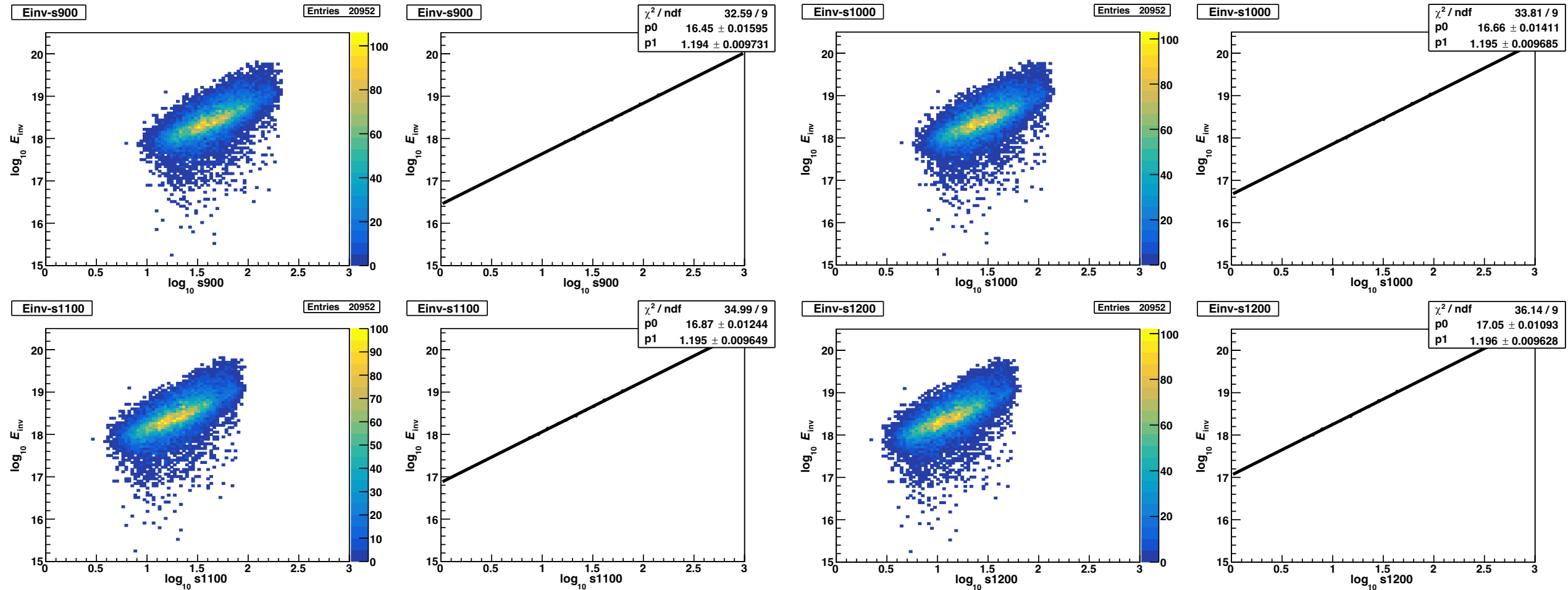
Back Up



エネルギーを持ち去るため、
FDでは観測できない
→ **Invisible energy**

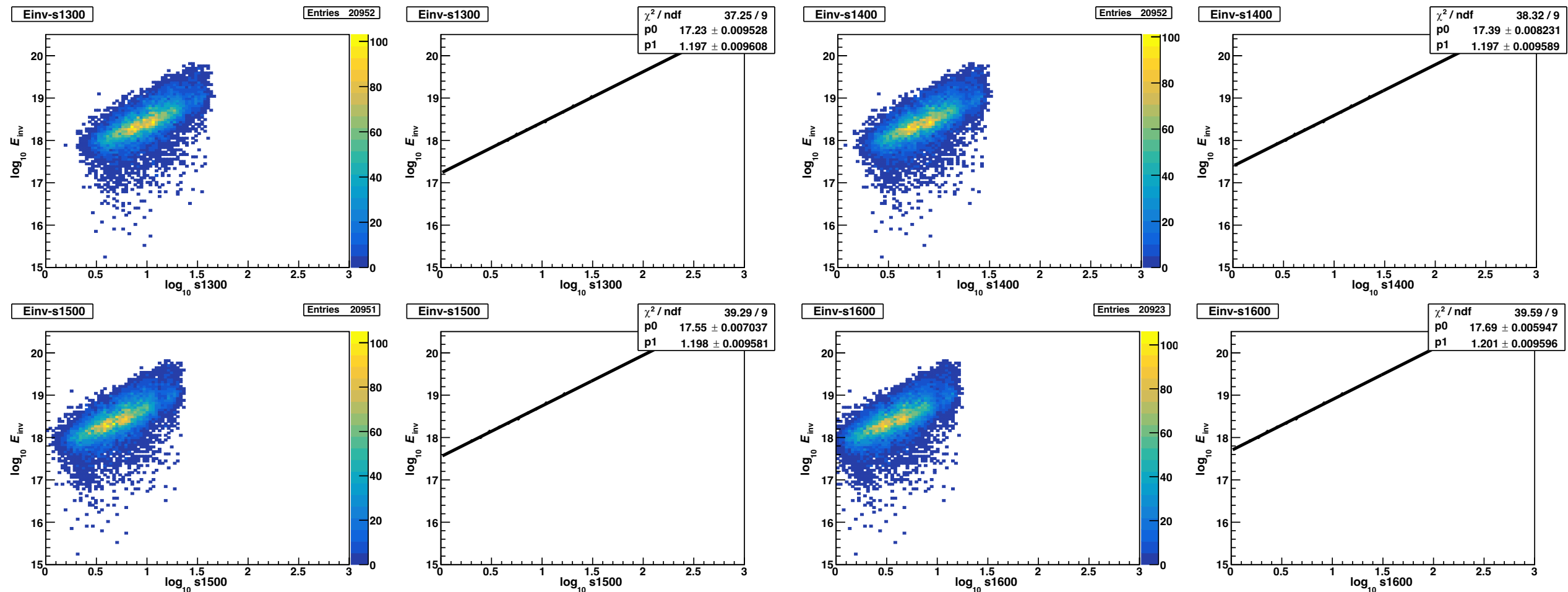
$\log S_r$ と $\log E_{inv}$ の関係 ($r = 900, 1000, 1100, 1200$)

QGSJetII-04
proton



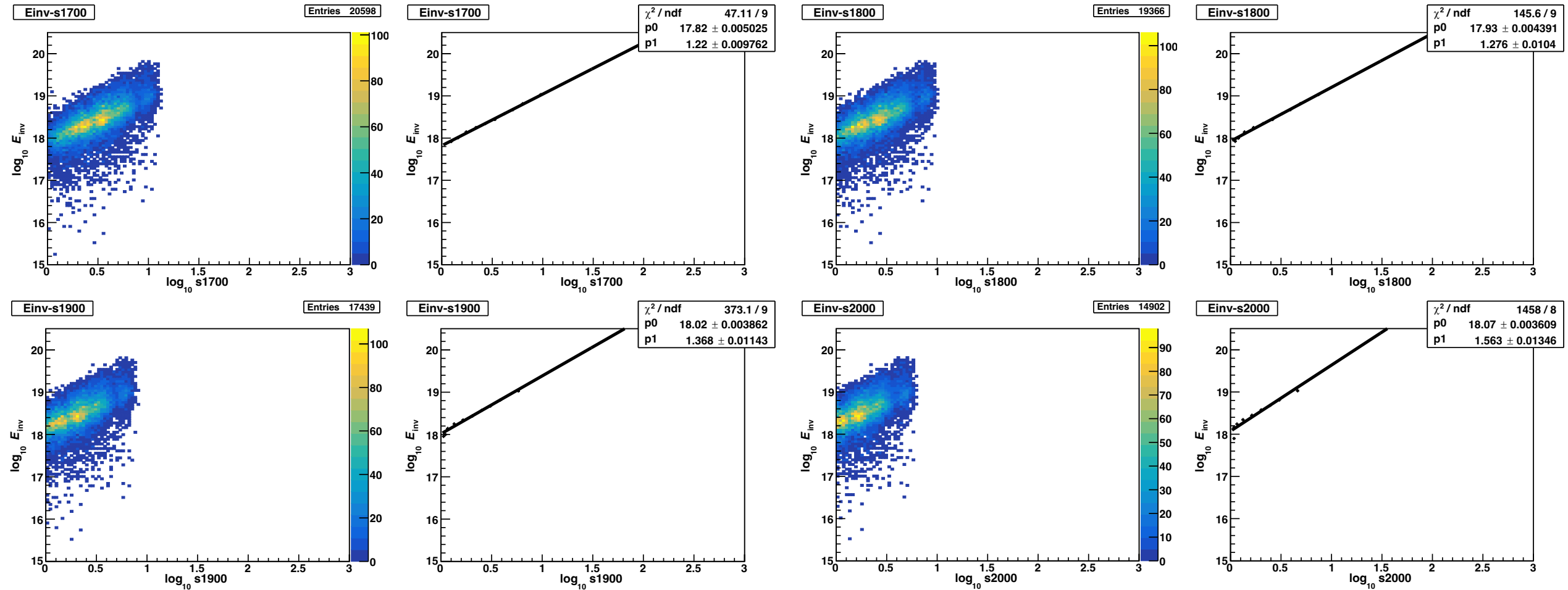
log S_r と log E_{inv} の関係 ($r = 1300, 1400, 1500, 1600$)

QGSJetII-04
proton



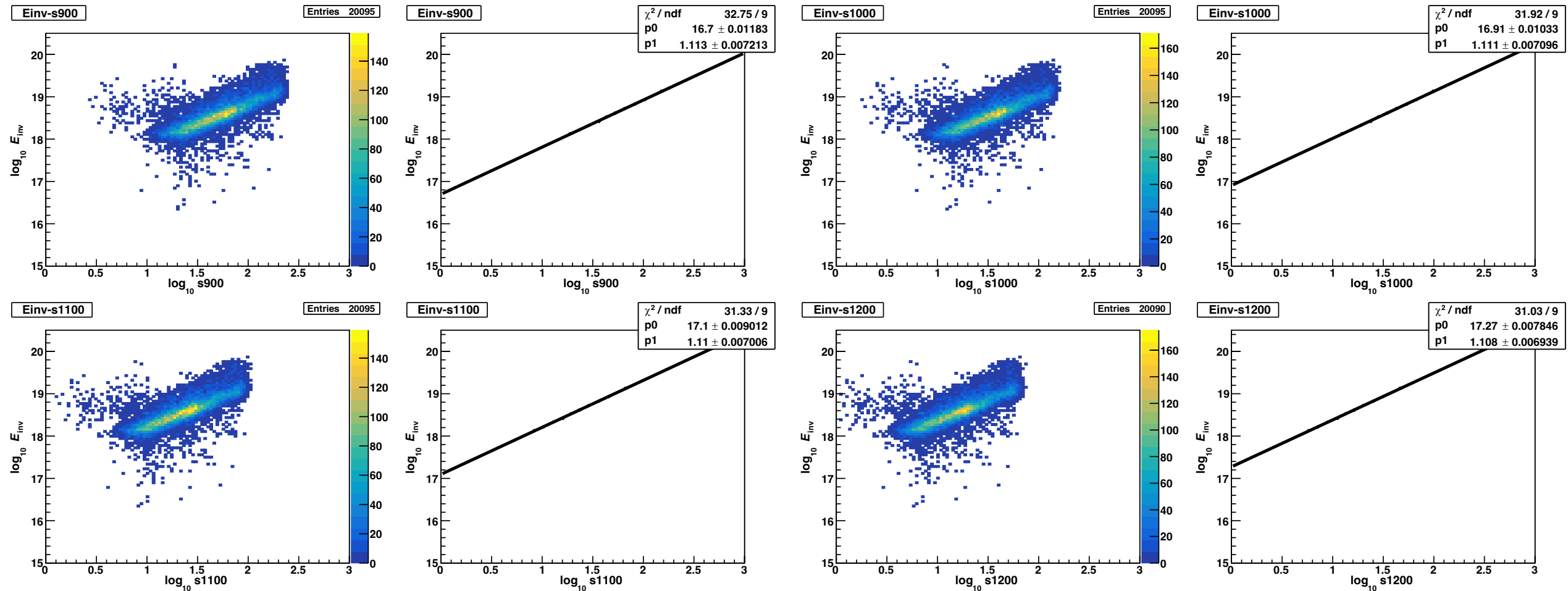
log S_r と log E_{inv} の関係 ($r = 1700, 1800, 1900, 2000$)

QGSJetII-04
proton



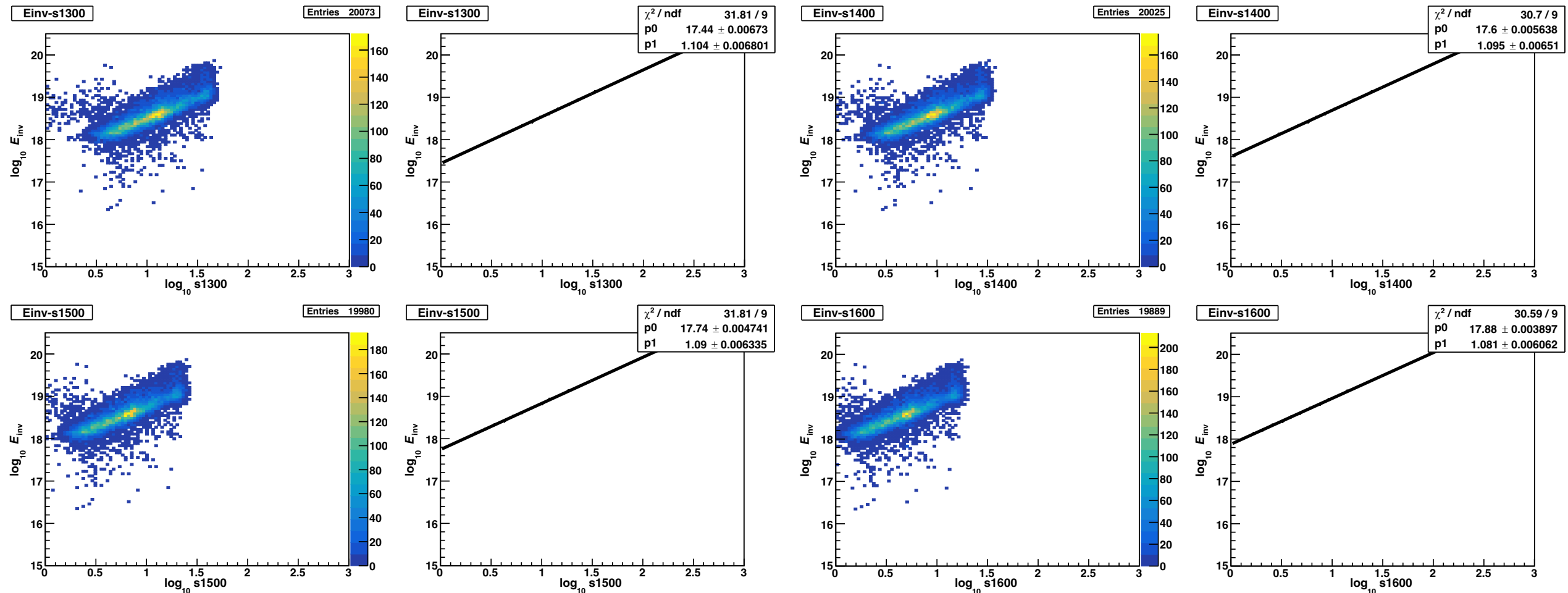
$\log S_r$ と $\log E_{inv}$ の関係 ($r = 900, 1000, 1100, 1200$)

QGSJetII-04
iron



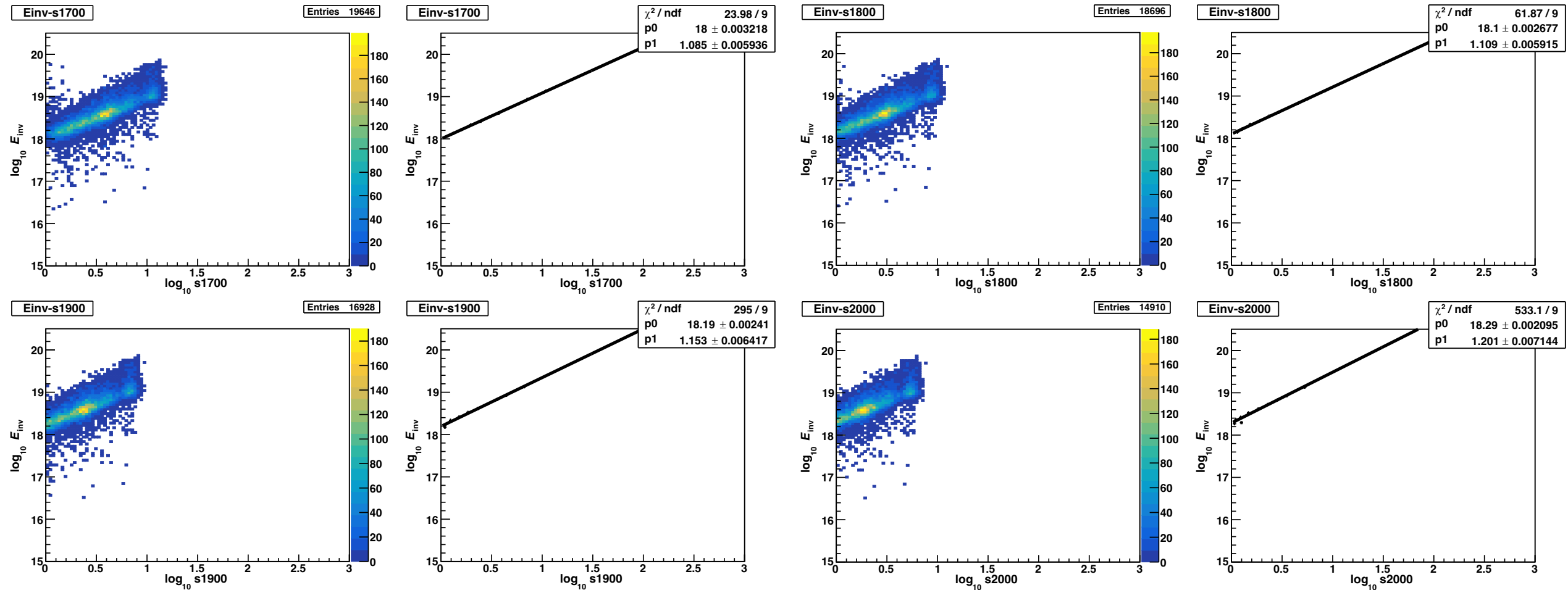
$\log S_r$ と $\log E_{inv}$ の関係 ($r = 1300, 1400, 1500, 1600$)

QGSJetII-04
iron

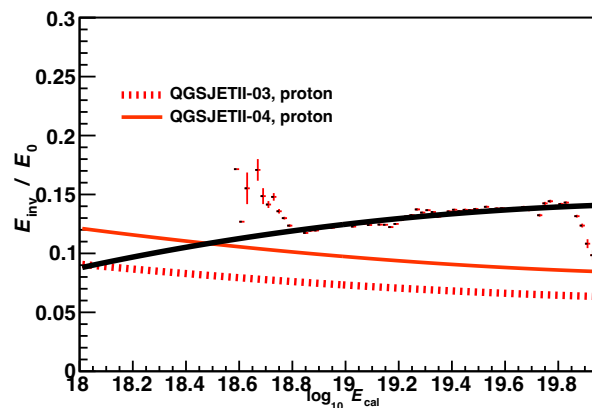
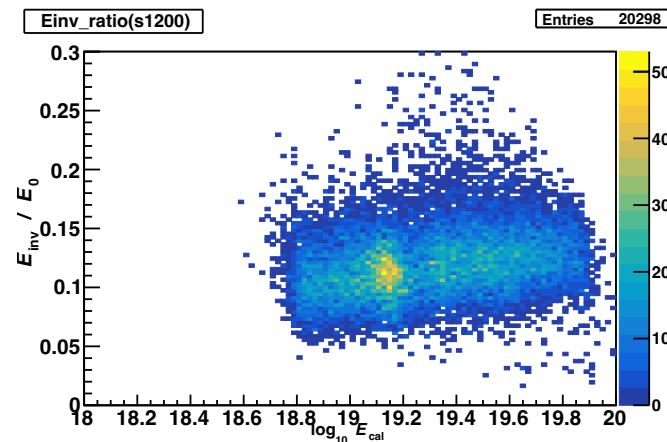
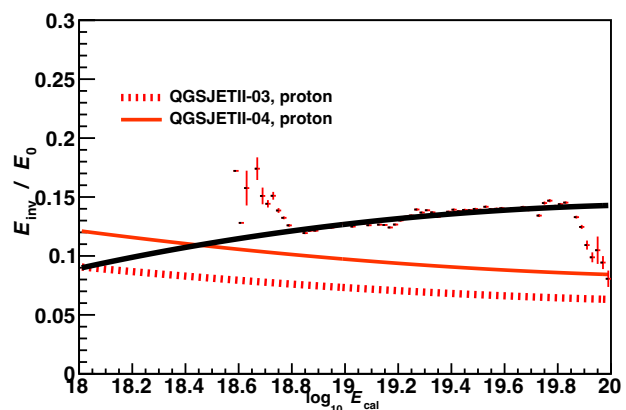
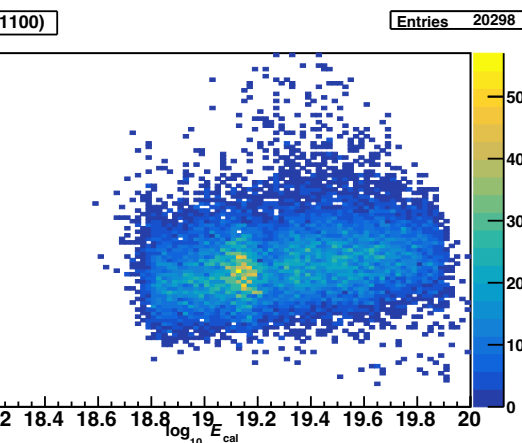
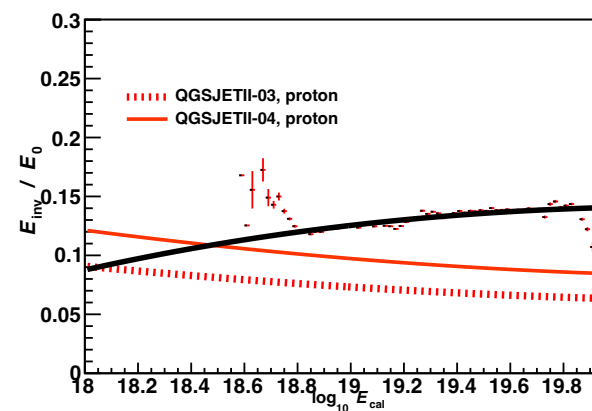
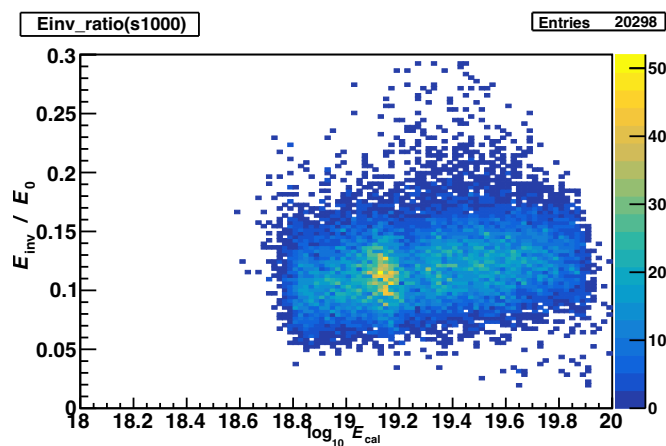
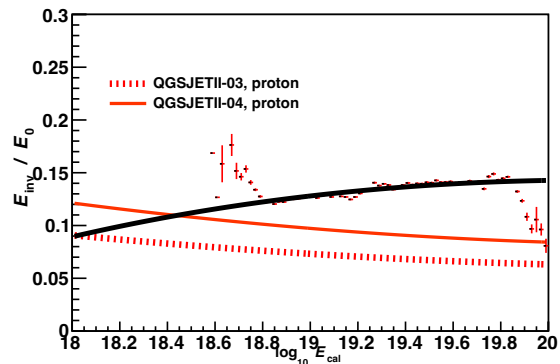
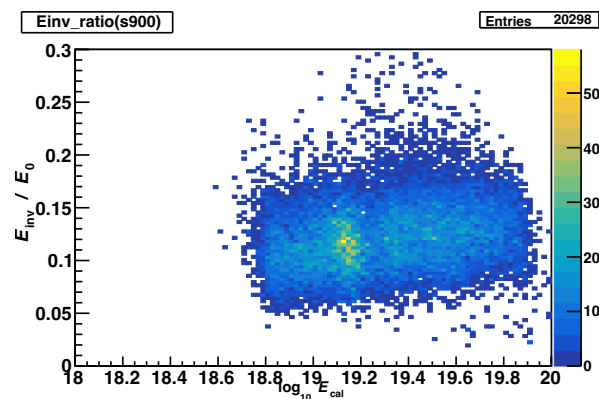


$\log S_r$ と $\log E_{inv}$ の関係 ($r = 1700, 1800, 1900, 2000$)

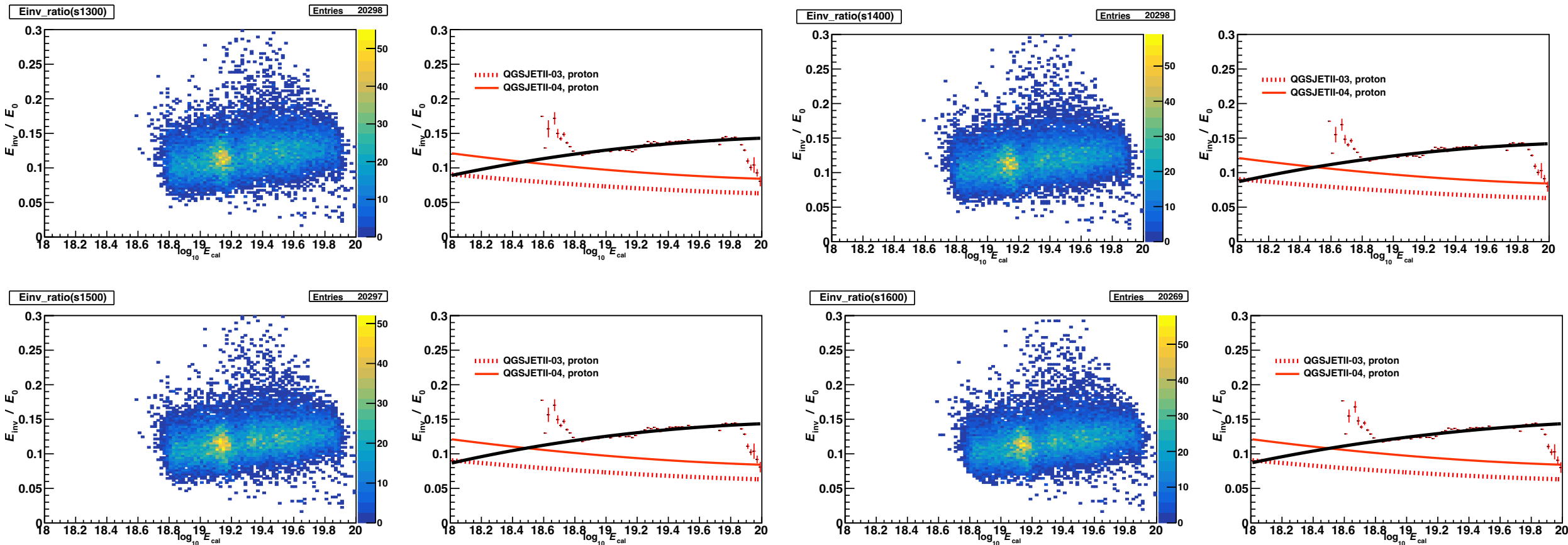
QGSJetII-04
iron



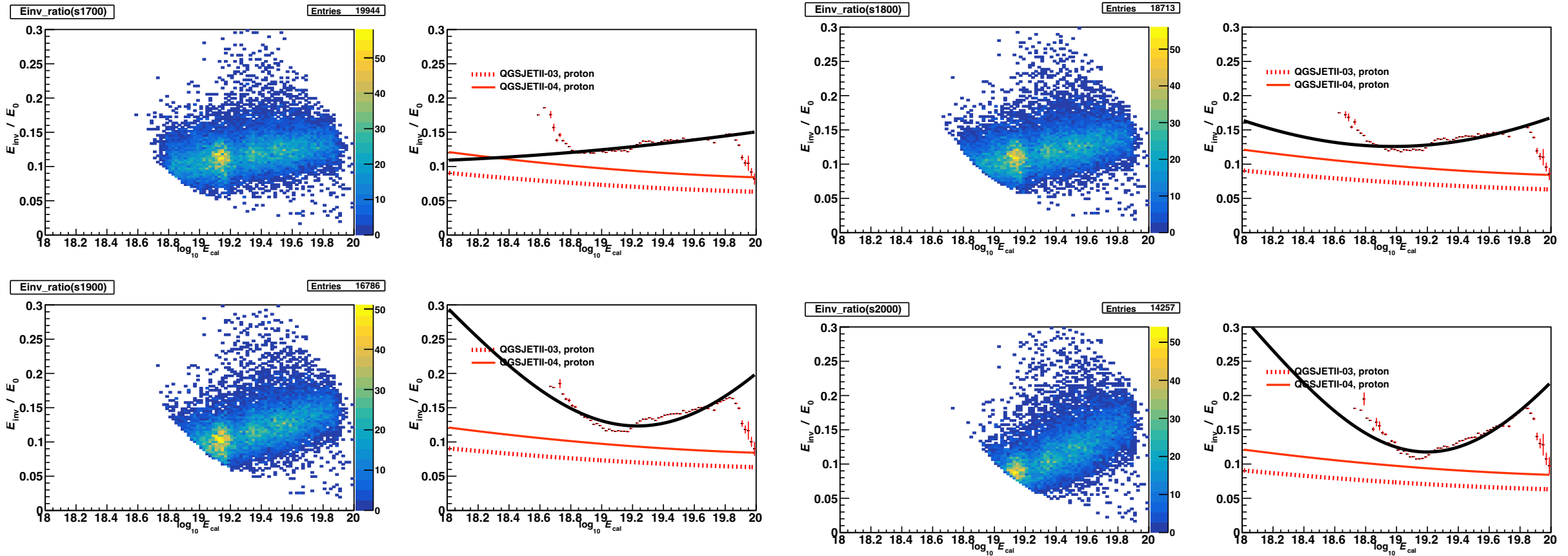
E_{inv}/E_0 ($S_{900}, S_{1000}, S_{1100}, S_{1200}$) QGSJetII-04 proton



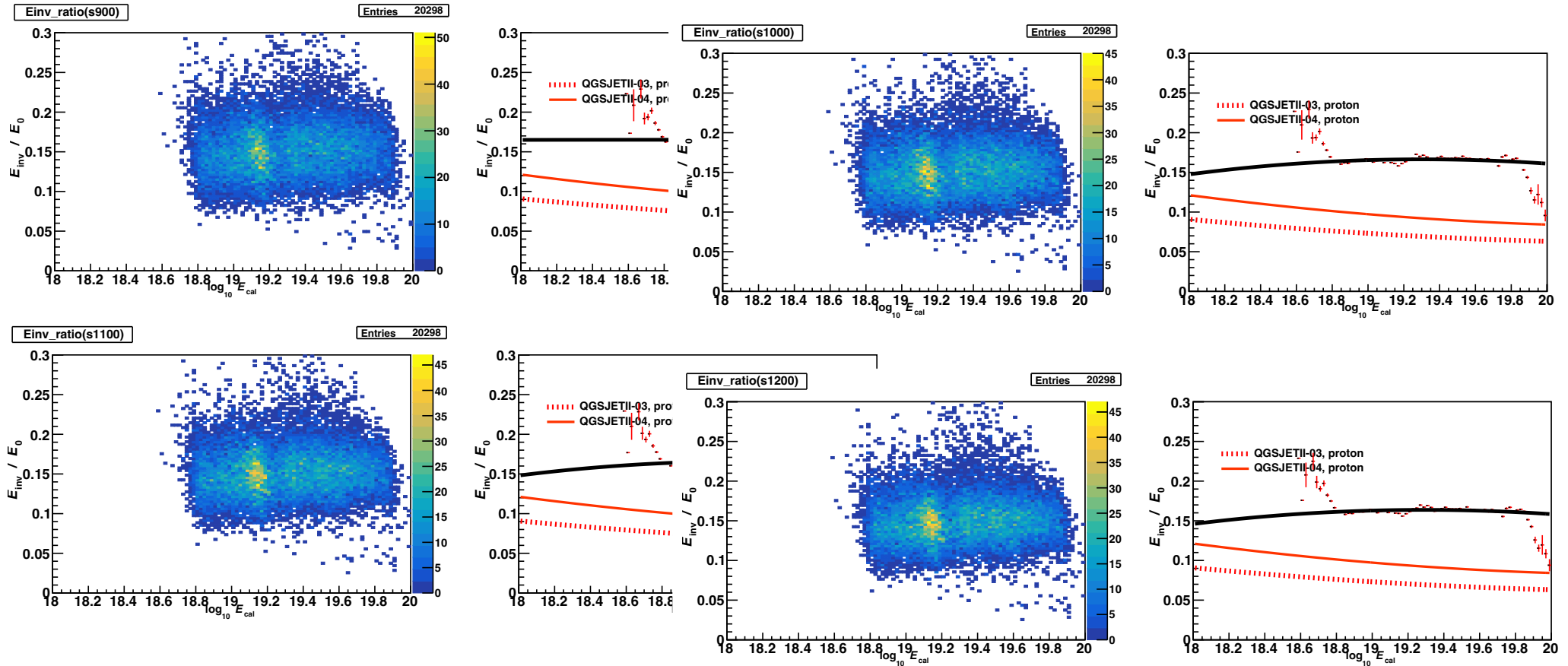
E_{inv}/E_0 ($S_{1300}, S_{1400}, S_{1500}, S_{1600}$) QGSJetII-04 proton



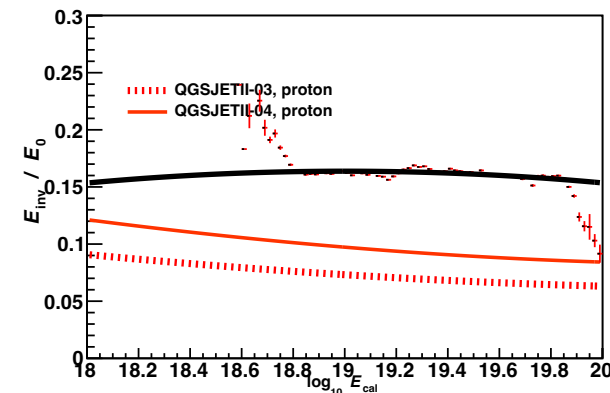
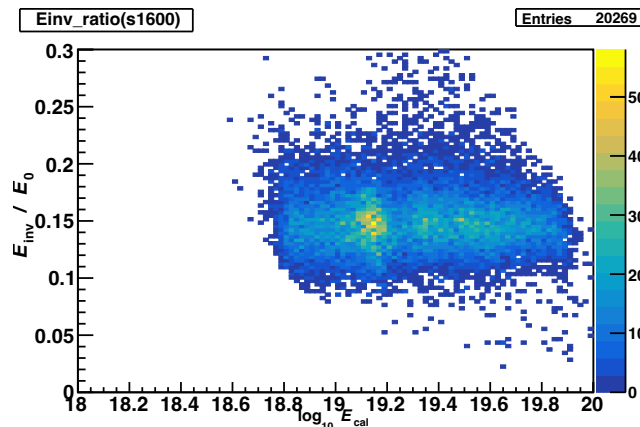
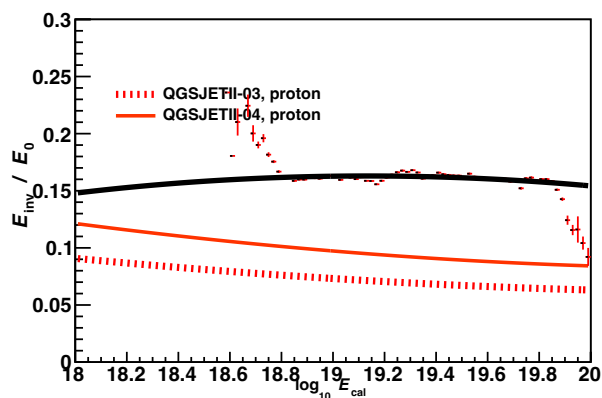
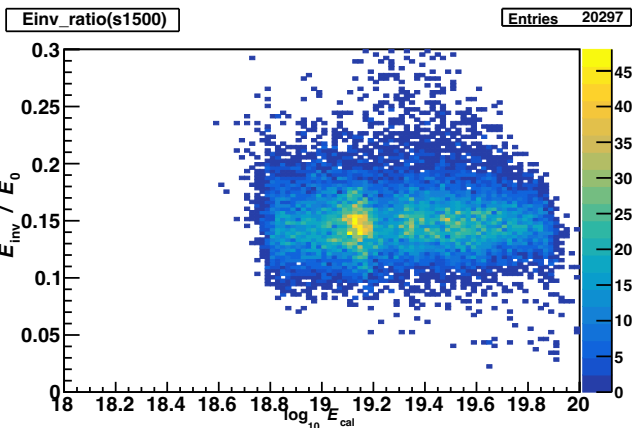
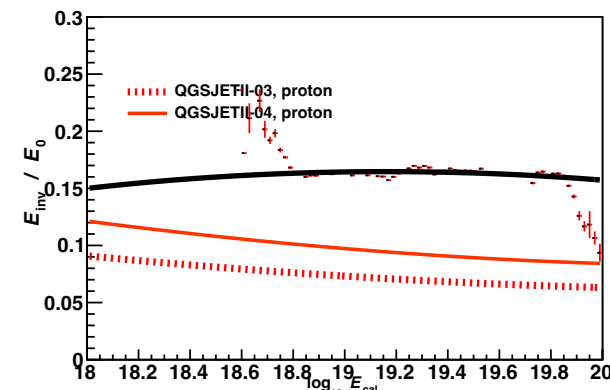
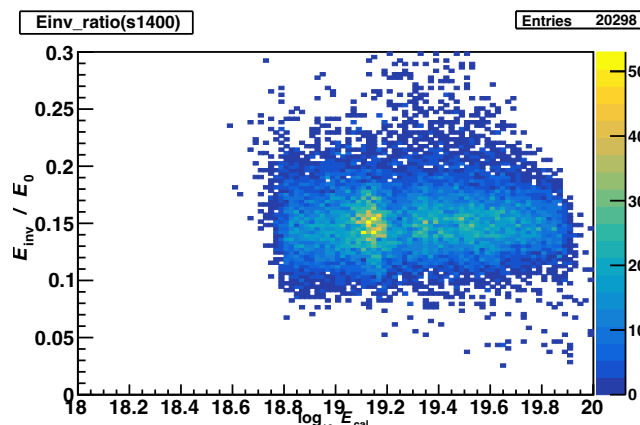
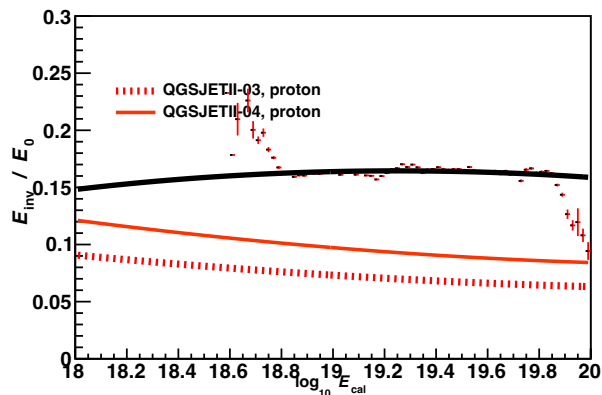
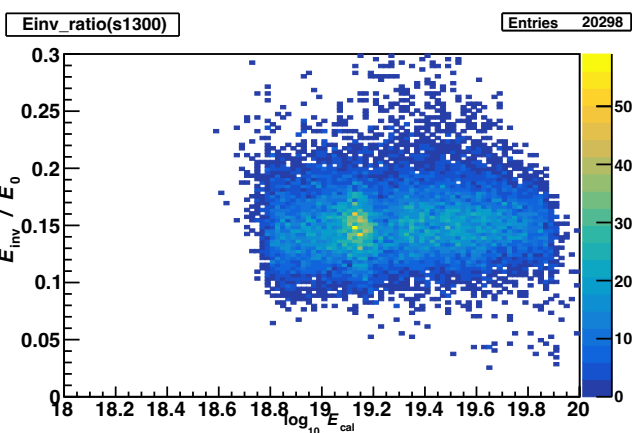
E_{inv}/E_0 ($S_{1700}, S_{1800}, S_{1900}, S_{2000}$) QGSJetII-04 proton



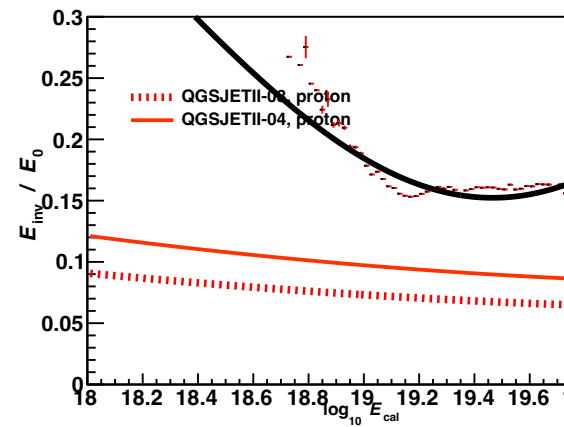
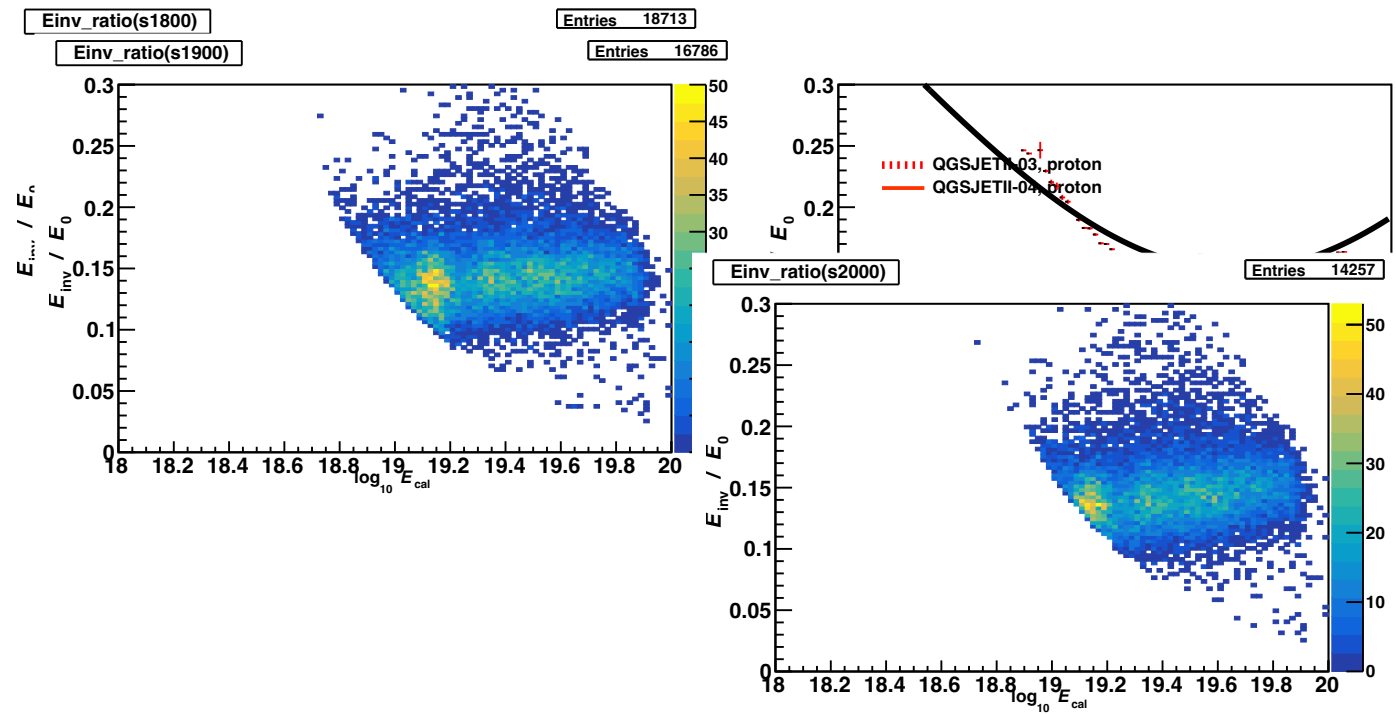
E_{inv}/E_0 ($S_{900}, S_{1000}, S_{1100}, S_{1200}$) QGSJetII-04 iron



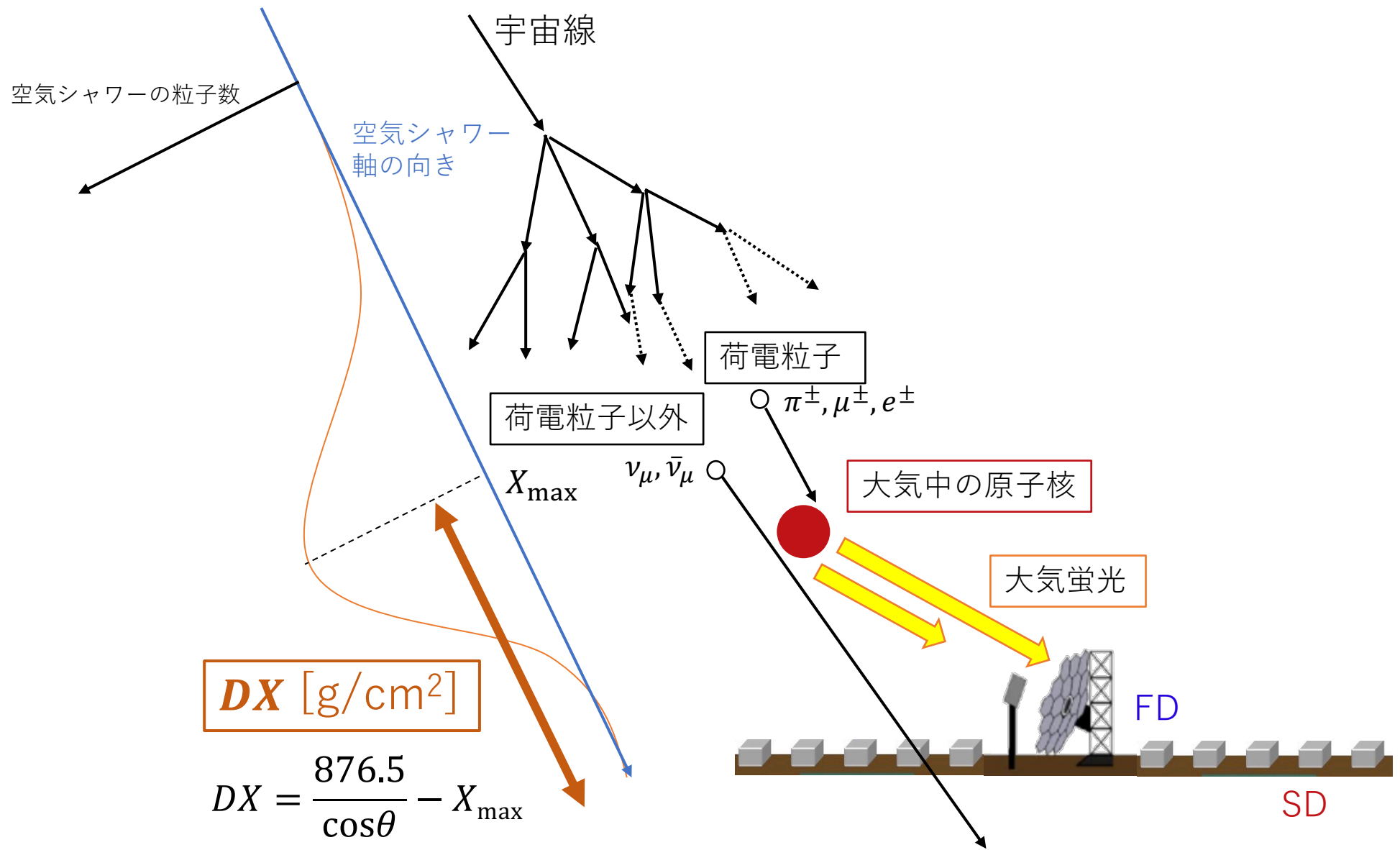
E_{inv}/E_0 ($S_{1300}, S_{1400}, S_{1500}, S_{1600}$)^{iron} QGSJetII-04



E_{inv}/E_0 ($S_{1700}, S_{1800}, S_{1900}, S_{2000}$)^{iron} QGSJetII-04



今後



エネルギーを持ち去るため、
FDでは観測できない
→ **Invisible energy**