

2024 年度 修士論文

Telescope Array 実験の宇宙線エネルギー決定における
Invisible Energy の推定：大気蛍光望遠鏡・地表粒子検出器データ
を用いた Data-Driven アプローチ

(Evaluation of Invisible Energy in Cosmic Ray Energy Determination for the Telescope Array
Experiment: A Data-Driven Approach Using Fluorescence and Surface Detectors' Data)

大阪公立大学大学院 理学研究科 物理学専攻
宇宙線物理学研究室

前期博士課程 2 年
学籍番号 BHB23102

中原 美紅

2025 年 2 月 25 日

概要

宇宙線は、宇宙を飛び交う高エネルギーの荷電粒子のことで、その生成機構および加速機構を解明することは宇宙物理学の大きな課題のひとつであり、宇宙の天体現象を究明する手がかりになると考えられている。また、超高エネルギー宇宙線によって生じる荷電粒子と中性粒子で構成された多数の粒子群を空気シャワーと呼び、この空気シャワーを観測することで間接的に宇宙線のエネルギーを測定することができる。

Telescope Array (TA) 実験 [1] では大気蛍光望遠鏡 (Fluorescence Detector: FD) [2] と地表粒子検出器 (Surface Detector: SD) [3] の 2 種類の検出器を用いて超高エネルギー宇宙線によって生じる空気シャワーを観測している。FD では空気シャワー粒子によって励起された大気中の分子が発する大気蛍光を、SD では空気シャワー粒子がプラスチックシンチレーター内で相互作用を起こしたときに発生するシンチレーション光をそれぞれ観測している。FD と SD の両方の検出器を用いた Hybrid 解析によって空気シャワーを作り出した宇宙線のエネルギーや到来方向を決定することができるが、大気中の分子は空気シャワー中の荷電粒子によってのみ励起されるので、FD で観測した大気蛍光強度から得られるのは空気シャワー中の荷電粒子成分の担うエネルギーのみであり、中性粒子の担うエネルギーは観測にかからない。このエネルギーのことを Invisible Energy と呼び、宇宙線の全エネルギーの約 10% ほどである。

現状の TA 実験における Hybrid 解析では、QGSJET II-04 という種類のハドロン相互作用モデルを使用し、到来した宇宙線核種が陽子であると仮定したシミュレーションで Invisible Energy の補正式を決定している。この手法は、宇宙線核種やハドロン相互作用モデルへの依存性が大きく、宇宙線核種を陽子と仮定した場合と鉄と仮定した場合において、宇宙線の全エネルギーに対する Invisible Energy の割合が約 5% ずれたシミュレーション結果となることが知られている [4]。

本研究では、この差異をエネルギー決定で考慮するために、核種やハドロン相互作用モデルへの依存性を最小にしつつ、Invisible Energy の大きさと相関するパラメーターを使ってエネルギー決定を行う手法の開発を目指し、FD 観測から得られる空気シャワー粒子が最大発達に至るまでの大気深さと SD 観測から得られる地表での粒子数密度に着目した。宇宙線によって生じた空気シャワーの粒子数は空気シャワーの発生から急激に増加し最大発達に達した後に減少していく。また、空気シャワーの最大発達までに宇宙線が通過した大気深さはその核種に相関するため、イベントごとの最大発達から宇宙線核種をある程度推定することが可能である。ここで、宇宙線核種が陽子と仮定した補正式と鉄原子核と仮定した補正式を計算し、推定した核種の質量数により近い補正式の影響を大きくすることができれば、宇宙線核種の決定は補正式の改良に不可欠ではなくなる。

この方法によって核種の特定を必要とせず、イベントごとに最適化された補正式で Invisible Energy を決定することができた。ハドロン相互作用モデルとして QGSJET II-04 と EPOS LHC をそれぞれ使用した陽子および鉄の 4 種類のモンテカルロシミュレーションから求めた Invisible Energy の決定バイアスは、いずれの組み合わせでも $\pm 10\%$ の範囲内である。

目次

第 1 章	イントロダクション	1
1.1	宇宙線	1
	エネルギースペクトル	2
	質量組成	3
	ミューオンパズル	4
1.2	空気シャワー	5
1.3	Invisible energy	6
	Auger で行われた先行研究	7
	TA 実験で行われた先行研究	9
	KASCADE 実験と IceTop の公開データを用いて行われた先行研究	11
第 2 章	Telescope Array (TA) 実験	13
2.1	大気蛍光望遠鏡 (FD)	14
2.1.1	構造	15
	鏡	16
	カメラ	16
2.1.2	データ収集システム	18
2.1.3	キャリブレーション	23
2.1.4	観測	23
2.2	地表検出器 (SD)	24
2.2.1	構造	25
	シンチレーターボックス	25
	エレキボックス	26
2.2.2	データ収集システム	26
	Level-0 trigger	27
	Level-1 trigger	27
	Level-2 trigger	27
2.2.3	キャリブレーション	28
2.2.4	観測	30
第 3 章	モンテカルロシミュレーション	31
3.1	CORSIKA	31
3.1.1	シニング	31

3.1.2	デシニング	32
3.2	SD シミュレーション	33
3.3	FD シミュレーション	36
3.4	シミュレーションデータセット	38
第 4 章	空気シャワーイベントの再構成手法	41
4.1	SD 再構成	41
4.1.1	準備	41
	波形中の信号部分を探索する	41
	ジオメトリの定義	42
4.1.2	フィッティング	44
	Rough fit	44
	Geometry fit	45
	LDF fit	45
4.1.3	エネルギーの仮決定	46
4.1.4	エネルギーの最終決定	46
4.1.5	クオリティーカット	46
	再構成に使用した SD の台数	46
	天頂角	47
	ボーダーカット	47
	Geometry fit と LDF fit	47
	Geometry fit で決まった到来方向の不定性	47
	粒子数密度	48
4.2	Hybrid 再構成	48
4.2.1	プレ再構成	48
	1st Selection	49
	2nd Selection	50
	3rd Selection	51
	4th Selection	51
4.2.2	ジオメトリ再構成	52
4.2.3	縦方向発達の再構成	54
4.2.4	クオリティーカット	54
	再構成に使用した PMT の本数	54
	天頂角	54
	X_{\max}	55
第 5 章	Invisible Energy の推定	57
5.1	Invisible Energy の性質	57
5.2	CORSIKA で計算された Invisible Energy	58
5.3	手法 1 (S_r を用いる)	60
5.3.1	A, B を決定する	61
5.3.2	E_{inv} を求める	62

5.4	手法2 (AとBの決定に再構成バイアスをなくす)	62
5.4.1	AとBを決定する	62
5.4.2	E_{inv} を求める	64
5.4.3	核種の違いによる影響	64
	陽子で決めたAとBを使う	65
	鉄で決めたAとBを使う	65
	陽子と鉄で決めたAとBの平均値を使う	66
5.5	手法3 (DXを用いる)	66
5.5.1	DX	67
5.5.2	AとBを決める	68
5.5.3	AとBをDXでスケールさせる	69
5.5.4	E_{inv} を求める	70
5.5.5	E_{inv} のエネルギー決定バイアス	70
第6章	実データ解析と議論	73
第7章	結論	75
	謝辞	77
	付録	79
A	CORSIKA シャワー数	79
B	CORSIKA で計算された Invisible Energy	80
C	手法1	81
C.1	r の値を変化させたときの $\log_{10} S_r$ と $\log_{10} E_{\text{inv}}$ の関係 ($E_{\text{inv}} = E_0^{\text{sim}} - E_{\text{cal}}^{\text{rec}}$)	81
	AとBを決めるためのグラフ	81
	AとBの値	85
C.2	r の値を変化させたときの $\log_{10} E_{\text{cal}}^{\text{rec}}$ と $\frac{E_{\text{inv}}^{A,B}}{E_0^{A,B}}$ の関係 ($E_0^{A,B} = E_{\text{cal}}^{\text{rec}} + E_{\text{inv}}^{A,B}$)	86
D	手法2	91
D.1	r の値を変化させたときの $\log_{10} S_r$ と $\log_{10} E_{\text{inv}}$ の関係 ($E_{\text{inv}} = E_0^{\text{sim}} - E_{\text{cal}}^{\text{CORSIKA scaled}}$)	91
	AとBを決めるためのグラフ	91
	AとBの値	95
D.2	r の値を変化させたときの $\log_{10} E_{\text{cal}}^{\text{rec}}$ と $\frac{E_{\text{inv}}^{A,B}}{E_0^{A,B}}$ の関係 ($E_0^{A,B} = E_{\text{cal}}^{\text{rec}} + E_{\text{inv}}^{A,B}$)	96
	陽子で決めたAとBを使う	101
	鉄で決めたAとBを使う	106
	陽子と鉄で決めたAとBの平均値を使う	111
E	方法3	115
E.1	r の値を変化させたときの $\log_{10} S_r$ と $\log_{10} E_{\text{inv}}$ の関係 ($E_{\text{inv}} = E_0^{\text{sim}} - E_{\text{cal}}^{\text{CORSIKA scaled}}$)	115
	AとBを決めるためのグラフ	115
	AとBの値	119
E.2	r の値を変化させたときの $\log_{10} E_{\text{cal}}^{\text{rec}}$ と $\frac{E_{\text{inv}}^{A,B}}{E_0^{A,B}}$ の関係 ($E_0^{A,B} = E_{\text{cal}}^{\text{rec}} + E_{\text{inv}}^{A,B}$)	120

引用文献

125

目次

1.1	宇宙線のエネルギースペクトルの観測結果 [5]	1
1.2	宇宙線のエネルギースペクトルの観測結果 [6]。横軸は宇宙線のエネルギー E 、縦軸はと裏頻度を表している。縦軸に $E^{2.6}$ をかけることでスペクトルの詳細な構造を見やすくしている	2
1.3	複数の実験によって測定された超高エネルギー宇宙線の質量組成 [7]。	3
1.4	9つの実験で報告された観測結果 N_μ から式 1.2 でスケールされた z の分布。灰色の帯は X_{\max} の測定から予想される質量組成を示す [8]。	4
1.5	空気シャワーの発達の様子を表す模式図 [9]	5
1.6	E_0 のエネルギーを持った宇宙線が空気シャワーを起こし、空気シャワー中の荷電粒子が大気蛍光を発生させる様子を表す図	6
1.7	Pierre Auger Observatory の検出器配置と各検出器の写真 [10]。赤色の丸が SD の位置を表しており、緑色の線で、各 FD の視野が描かれている。	7
1.8	ハドロン相互作用モデル EPOS LHC と QGSJET II-04 でシミュレーションした陽子と鉄のシャワーの E_{inv} と R_μ^{MC} の相関関係を表したグラフ [4]。赤線と青線は、それぞれ陽子と鉄のデータ点を式 1.10 でフィッティングしたもの。	8
1.9	EPOS LHC を用いて質量組成を陽子 50%、鉄 50% とした inclined シャワーから得られたパラメーター C と δ を使用して式 1.10 から求めた E_{inv} を真の値として他のモデルで求めた核種ごとの E_{inv} との比較を表す図 [4]。	9
1.10	DX を表す模式図	10
1.11	シミュレーションによって求められた $DX100 \text{ g/cm}^2$ ごとの A と B の値 [11]	10
1.12	TA 実験で FD と SD の同時観測された空気シャワーイベント 7 年間分の missing energy の推定結果 [11]	10
1.13	KASCADE 実験のシンチレーション検出器の配置と構造 [12]	11
1.14	IceCube の全容と IceTop に設置されている氷タンクの概略断面図 [13]	12
1.15	様々な実験の E_{inv} の割合の比較 [14]	12
2.1	TA 実験の 2 種類の検出器の配置図である。赤色の + は SD の位置、青色の*は FD が複数設置されている FD ステーションの位置を表している。	13
2.2	HiRes 実験と AGASA 実験で得られたエネルギースペクトルの比較（黒色の丸：HiRes-I Monocular、赤色の四角：HiRes-II Monocular、青色の三角：AGASA） [15]	14
2.3	FD ステーションの写真 (a) LR ステーション (b) BRM ステーション	15
2.4	(a) FD の概略図 [2]。上下の鏡の中心と上下のカメラの中心は地面から 5.5 m、1.5 m、6.0 m、2.8 m の高さに固定されている。なお、上部の FD では見やすくするために 7 枚のミラーセグメントが取り外されている。(b) FD の概略投影図 [2]	15

2.5	BRM ステーションに設置されている鏡の写真 (撮影 Y. Kawachi)	16
2.6	(a) BRM ステーションと LR ステーションで使用されている PMT の写真。六角形の光電面に BG3 フィルターが取り付けられている。(b) BG3 フィルターの波長ごとの透過率	17
2.7	(a) BRM ステーションと LR ステーションに設置されている保護ボックス。256 本の PMT が内蔵されており、扉にはパラガラスシートが取り付けられている。(b) パラガラスシートの波長ごとの透過率	17
2.8	(a) カメラの概略側面図。カメラ内の 256 本の PMT には、PMT の出力を伝送するケーブルや HV ケーブル、温度センサーが接続されている。(b) PMT の光電面の反対側から見たカメラの内部の写真。写真では扉が開いていて、見えているものは PMT の光電面の反対側である。また、PMT からパッチパネルにつながる無数の LAN ケーブルが見えており、写真下部の LAN ケーブルよりも太いものはデータ収集システムにつながるツイストペアケーブルである。(c) BRM ステーションの電子機器室の写真。上からつながっているのはパッチパネルへ繋がっているツイストペアケーブルである。	18
2.9	1ヶ所の FD ステーションのデータ収集システムのブロック図 [16]	19
2.10	トリガー周期の模式図 [17]。12.8 μs ごとに 25.6 μs の幅でスキャンされていることが分かる。	19
2.11	TF のブロック図 [16]	20
2.12	"Complete track" 条件のトラックパターン [16]	21
2.13	2 台のカメラをまたぐ "partial tracks" のパターン [16]	21
2.14	CTD のブロック図 [16]	22
2.15	FD で観測された空気シャワーのイベントディスプレイ (左図:LR、右図:BRM) [2]	23
2.16	FD ステレオ解析の模式図。それぞれの FD ステーションで決めた SDP の重なる部分が空気シャワー軸と決定できる。	24
2.17	(a) 実際に設置されている SD の写真。ソーラーパネルの下に電子機器やバッテリーが入ったエレキボックスが置かれており、シンチレーターと光電子増倍管が入ったシンチレーターボックスは鉄製の屋根の下に設置されている。(b) SD アレイ配置図。縦横のグリッド線は SD の間隔である 1200 m ごとにひかれている。それぞれの SD には ID (識別番号) が $ID = X \times 100 + Y$ で割り当てられている。全体を T 字で分けて 3 つのサブアレイを形成している。	24
2.18	(a) SD を構成している各部分の名前 (b) シンチレーターボックス内部構造 (C) エレキボックス内部構造	25
2.19	(a) TA 実験全体の施設配置図 (b) データ収集タワーのひとつである SKCT の写真。4 枚のソーラーパネルを備えた 3 つのスタンドがあり、スタンドにはバッテリー、データ収集用 PC、長距離リンク用のネットワーク機器が入っている。	26
2.20	Level-2 trigger の隣接 3 台のパターン [3]	27
2.21	モンテカルロシミュレーションを用いて得られた陽子のエネルギーごとのトリガー効率を表す図 [3]	28
2.22	(左) 1-MIP ヒストグラムの例 (右) ペDESTALヒストグラムの例 [18]	28
2.23	CORSIKA と GEANT4 を用いた SD シミュレーションによる大気粒子によるエネルギー損失を表すヒストグラム [18]。上下層におけるエネルギー損失を正規化している。	29
2.24	FADC カウント/MeV (および FADC カウント/VEM) で検出器のゲインを決定するための 1-MIP ヒストグラムのフィッティングを示す [18]。左図は上層、右図は下層。	29
2.25	BRM サブアレイでトリガーされた空気シャワーイベントの一例。(a) 赤い円は BRM アレイ内の SD を表しており、トリガーした SD には信号の大きさや時間発展が分かるように円が描かれている。円の半径は 1MIP に比例し、色の変化は時間発展を表している。(b) (a) の各 SD の波形	30

3.1	(a) シニング (b) デシニング	32
3.2	天頂角 45° 、エネルギー 10^{19} eV を持つ陽子を作る空気シャワーを SD でとらえた粒子数密度分布である [18]。粒子数の平均値と平均二乗誤差を比較している。(左) シニングをしていないシャワーと $\epsilon = 10^{-6}$ でシニングしたシャワーの比較 (右) シニングをしていないシャワーと $\epsilon = 10^{-6}$ でシニングし、デシニングをしたシャワーの比較	33
3.3	GEANT4 シミュレーションのために作られた SD の構造モデル。左図ではシンチレーションボックス内が見やすいように上方にずらしている [19]。	34
3.4	GEANT4 シミュレーションのために作られた SD のセットアップ図 [19]。矢印はシミュレーションされた粒子の到来方向を表す。	34
3.5	TA の SD のシミュレーションに使用するエネルギー損失のヒストグラムの一例 [18]。x 軸は上層でのエネルギー損失、y 軸では下層でのエネルギー損失を表す。(左) 1 GeV 、 $\theta = 0^\circ$ の μ^+ (右) 1 GeV 、 $\theta = 60^\circ$ の μ^+	35
3.6	TA の SD のシミュレーションに使用するエネルギー損失のヒストグラムの一例 [18]。x 軸は上層でのエネルギー損失、y 軸では下層でのエネルギー損失を表す。(左) 1 GeV 、 $\theta = 0^\circ$ の γ (右) 1 GeV 、 $\theta = 60^\circ$ の γ	36
3.7	ライブラリを用いたもの (黒点) と厳密にシミュレーションしたもの (点線) によって生成されたシンチレータにおけるエネルギー損失 dE/dX 分布の比較 [18]。(左) 5 GeV 、 $\theta = 40^\circ$ の γ (右) 5 GeV 、 $\theta = 40^\circ$ の μ^+	37
3.8	FD シミュレーションのために作られた FD の構造モデル [20]	38
3.9	FD シミュレーションの焦点面におけるスポットサイズ [20]。鏡全面に平行に光子を入射させ、作成されたものである。(左) 横軸と縦軸は焦点面に沿っており、色は検出された光子の数を示している。鏡は六角形のミラーセグメントで構成されているため、スポットは円にならない。(右) 半径の分布である。	38
3.10	PMT ポインティング方向の開き角について、恒星光のキャリブレーションとレイトレーシングによって得られたものの比較 [20]。縦軸はエントリー数、横軸は開き角を示す。BRM ステーションと LR ステーションの全 PMT (6144 PMT) がプロットされている。	39
4.1	SD で記録された波形信号の一例。どちらの波形でも破線の間が信号として選ばれている。(左) 典型的な空気シャワー由来の信号の例。(右) $25 \mu\text{s}$ 前に発生したランダムミュオンによる信号のあとに続く空気シャワー由来の信号の例。ランダムミュオンによる信号はアルゴリズムによって排除された。	42
4.2	典型的な TA の SD イベントのフットプリントを表している [18]。各円の中心には空気シャワー粒子を検出した SD が置いてあり、各円の大きさは SD で検出された信号の大きさに比例し、色の変化は時間発展を表している。星印はコア位置、矢印はシャワー軸を地面に投影したものである。	42
4.3	本研究で用いているジオメトリの定義を表す図。(左) 到来方向を表す天頂角と方位角の定義。コア位置を中心とし、x 軸は東向きに、y 軸は北向きに、z 軸は上方を指すようにとっている。z 軸正向きからの角度を天頂角 θ 、シャワー軸を x-y 平面に投影したときの x 軸正の向きから反時計回りに測った角度を方位角 ϕ としている。(右) コア位置の定義。コア位置は CLF 中心で、x 軸は東向きに、y 軸は北向きにとったときの x 座標 (Core_x) と y 座標 (Core_y) で表される。	43
4.4	シャワーのコアが地面に衝突する時刻 T_0 におけるシャワーフロントの図である [18]	43
4.5	TA 実験の SD 再構成で使われているエネルギー推定テーブル	46

4.6	ボーダーカットの境界線の図。ボーダーカットをかけた後の再構成で決まったコア位置が黒い点でかかっている。	48
4.7	三角形の形をしたフィルターの模式図。フィルターは、ピーク p と幅 w の組のうち、有意度が最大となるものを探す。青線がピーク p 、緑線が幅 w を示す。探索範囲は p が 0 から 512 ビン、 w が 0 から 30 ビンである。 i 番目のピン ($p - w \leq i \leq p + w$) の重み $W(i)$ は $w - p - i $ で計算される。	49
4.8	Hough 変換の模式図 [20]。x-y 平面のある点を通る直線群は、 $\rho - \omega$ 空間では 1 本の曲線で表される。そのため、 $\rho - \omega$ 空間での曲線の交点は、x-y 平面上で複数の点を通る直線を表している。	50
4.9	Hough 変換の前後の比較 [20]。(a) 色のついた円は信号の入った PMT を表している。色の変化は時間発展を、円の大きさは光電子の数を表している。(b) 左図を Hough 変換したもの。ピーク付近の重心に対応する直線をトラックと決めて赤線を引いている。	51
4.10	PMT のセレクション例。これは 2008 年 06 月 02 日に BRM ステーションで観測された実際のイベントである。横軸と縦軸は各 PMT のポインティング方向を示す。塗りつぶされた円は、S/N 比が 3σ より大きい PMT を示す。円の大きさは、得られた光電子数の平方根に比例する。色はタイミングを示す。緑は速く、赤は遅い \times 印は除去された PMT を表している。	53
4.11	ジオメトリ再構成に使うパラメーターの模式図	53
5.1	(a) 空気シャワー軸からの距離 r [m] を表す模式図。(b) r [m] ごとの空気シャワーの地表での粒子数密度 S_r [$/m^2$] を表すグラフ。横軸はシャワー軸からの距離、縦軸は粒子数密度を表している。データ点は SD に入った粒子数密度で、それらの点をフィッティングしたものが青い線で描かれている。例として空気シャワー軸から 800 m 離れた地表での粒子数密度を表す箇所を示している。	58
5.2	CORSIKA の出力である long ファイルから荷電粒子の縦方向発達をグラフで表したものである。これは、ハドロン相互作用モデル QGSJET II-04、 $10^{19.0}$ eV の陽子の一例である。	59
5.3	GH function のフィッティングから得られた E_0 に対する E_{inv} の割合を表している。ハドロン相互作用モデル 2 種類 (QGSJET II-04、EPOS LHC) \times 宇宙線核種 2 種類 (陽子、鉄) の計 4 パターンの線がかかっている。	60
5.4	手法 1 (5.3 節) の A と B を決めるための図。この図は $r = 800$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。	61
5.5	r を変化させたときの A と B の値。(a) QGSJET II-04、(b) EPOS LHC	61
5.6	手法 1 (5.3 節) を用いた E_0 に対する E_{inv} の推定割合である。この図は $r = 800$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。	62
5.7	手法 2 (5.4 節) の A と B を決めるための図。この図は $r = 800$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。	63
5.8	r を変化させたときの A と B の値。(a) QGSJET II-04、(b) EPOS LHC	63
5.9	手法 2 (5.4 節) を用いた E_0 に対する E_{inv} の推定割合である。この図は $r = 800$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。	64
5.10	手法 2 (5.4 節) を用いた E_0 に対する E_{inv} の推定割合である。核種の違いによる影響を知るために陽子で決めた A と B を使っている。この図は $r = 800$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。	65

5.11	手法 2 (5.4 節) を用いた E_0 に対する E_{inv} の推定割合である。核種の違いによる影響を知るために鉄で決めた A と B を使っている。この図は $r = 800$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。	65
5.12	手法 2 (5.4 節) を用いた E_0 に対する E_{inv} の推定割合である。核種の違いによる影響を知るために陽子と鉄で決めた A と B の平均値を使っている。この図は $r = 800$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。	66
5.13	(左図) 空気シャワーの粒子数が最大になるまでに通過した大気深さ X_{max} と X_{max} に達してから地表に到達するまでに通過した大気深さ DX を示している。(右図) DX の陽子と鉄による違いを示している。	67
5.14	手法 3 (5.5 節) の A と B を決めるための図。この図は $r = 800$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。	68
5.15	r を変化させたときの A と B の値。(a) QGSJET II-04、(b) EPOS LHC	68
5.16	横軸 $\log_{10} E_{cal}$ 、縦軸 DX を表す図。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。	69
5.17	DX を用いた A と B のスケール方法のイメージ	69
5.18	手法 3 (5.5 節) を用いた E_0 に対する E_{inv} の推定割合である。この図は $r = 800$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。	70
5.19	$r = 800$ m のときの決定精度を表す図。(a) QGSJET II-04、(b) EPOS LHC	71
6.1	手法 3 (5.5 節) を用いた実データの E_0 に対する E_{inv} の推定割合である。この図は $r = 800$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。	73
B.1	GH function を使って求めた $E_0^{CORSIKA}$ に対する $E_{inv}^{CORSIKA}$ の割合を表す図。横軸は CORSIKA シャワーの long ファイルから得られる大気深さごとの荷電粒子のエネルギー損失量を GH function でフィッティングし無限遠まで積分して用いて求めた $E_{cal}^{CORSIKA}$ に常用対数をとったものである。縦軸には $E_{cal}^{CORSIKA}$ ごとの $\frac{E_{inv}^{CORSIKA}}{E_0^{CORSIKA}}$ になっている。(a) QGSJET II-04 (b) EPOS LHC のハドロン相互作用モデルを用いた結果であり、それぞれのモデルの左上の図が陽子、右上の図が鉄の結果である。2次元ヒストグラムは CORSIKA シャワーのエネルギーごとに集まっており、集まりごとに平均値をプロットし式 B.1 を用いてフィッティングしたものを左下に描いている。	80
C.2	手法 1 (5.3 節) の A と B を決めるための図。この図は $r = 900$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。	81
C.3	手法 1 (5.3 節) の A と B を決めるための図。この図は $r = 1000$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。	81
C.4	手法 1 (5.3 節) の A と B を決めるための図。この図は $r = 1100$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。	82
C.5	手法 1 (5.3 節) の A と B を決めるための図。この図は $r = 1200$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。	82
C.6	手法 1 (5.3 節) の A と B を決めるための図。この図は $r = 1300$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。	82

C.7	手法 1 (5.3 節) の A と B を決めるための図。この図は $r = 1400$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。	83
C.8	手法 1 (5.3 節) の A と B を決めるための図。この図は $r = 1500$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。	83
C.9	手法 1 (5.3 節) の A と B を決めるための図。この図は $r = 1600$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。	83
C.10	手法 1 (5.3 節) の A と B を決めるための図。この図は $r = 1700$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。	84
C.11	手法 1 (5.3 節) の A と B を決めるための図。この図は $r = 1800$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。	84
C.12	手法 1 (5.3 節) の A と B を決めるための図。この図は $r = 1900$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。	84
C.13	手法 1 (5.3 節) の A と B を決めるための図。この図は $r = 2000$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。	85
C.14	手法 1 (5.3 節) を用いた E_0 に対する E_{inv} の推定割合である。この図は $r = 900$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。	86
C.15	手法 1 (5.3 節) を用いた E_0 に対する E_{inv} の推定割合である。この図は $r = 1000$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。	86
C.16	手法 1 (5.3 節) を用いた E_0 に対する E_{inv} の推定割合である。この図は $r = 1100$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。	87
C.17	手法 1 (5.3 節) を用いた E_0 に対する E_{inv} の推定割合である。この図は $r = 1200$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。	87
C.18	手法 1 (5.3 節) を用いた E_0 に対する E_{inv} の推定割合である。この図は $r = 1300$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。	87
C.19	手法 1 (5.3 節) を用いた E_0 に対する E_{inv} の推定割合である。この図は $r = 1400$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。	88
C.20	手法 1 (5.3 節) を用いた E_0 に対する E_{inv} の推定割合である。この図は $r = 1500$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。	88
C.21	手法 1 (5.3 節) を用いた E_0 に対する E_{inv} の推定割合である。この図は $r = 1600$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。	88
C.22	手法 1 (5.3 節) を用いた E_0 に対する E_{inv} の推定割合である。この図は $r = 1700$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。	89

D.41	手法 2 (5.4 節) を用いた E_0 に対する E_{inv} の推定割合である。この図は $r = 1200$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。	97
D.42	手法 2 (5.4 節) を用いた E_0 に対する E_{inv} の推定割合である。この図は $r = 1300$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。	97
D.43	手法 2 (5.4 節) を用いた E_0 に対する E_{inv} の推定割合である。この図は $r = 1400$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。	98
D.44	手法 2 (5.4 節) を用いた E_0 に対する E_{inv} の推定割合である。この図は $r = 1500$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。	98
D.45	手法 2 (5.4 節) を用いた E_0 に対する E_{inv} の推定割合である。この図は $r = 1600$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。	98
D.46	手法 2 (5.4 節) を用いた E_0 に対する E_{inv} の推定割合である。この図は $r = 1700$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。	99
D.47	手法 2 (5.4 節) を用いた E_0 に対する E_{inv} の推定割合である。この図は $r = 1800$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。	99
D.48	手法 2 (5.4 節) を用いた E_0 に対する E_{inv} の推定割合である。この図は $r = 1900$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。	99
D.49	手法 2 (5.4 節) を用いた E_0 に対する E_{inv} の推定割合である。この図は $r = 2000$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。	100
D.50	手法 2 (5.4 節) を用いた E_0 に対する E_{inv} の推定割合である。核種の違いによる影響を知るために陽子で決めた A と B を使っている。この図は $r = 900$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。	101
D.51	手法 2 (5.4 節) を用いた E_0 に対する E_{inv} の推定割合である。核種の違いによる影響を知るために陽子で決めた A と B を使っている。この図は $r = 1000$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。	101
D.52	手法 2 (5.4 節) を用いた E_0 に対する E_{inv} の推定割合である。核種の違いによる影響を知るために陽子で決めた A と B を使っている。この図は $r = 1100$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。	102
D.53	手法 2 (5.4 節) を用いた E_0 に対する E_{inv} の推定割合である。核種の違いによる影響を知るために陽子で決めた A と B を使っている。この図は $r = 1200$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。	102
D.54	手法 2 (5.4 節) を用いた E_0 に対する E_{inv} の推定割合である。核種の違いによる影響を知るために陽子で決めた A と B を使っている。この図は $r = 1300$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。	102

D.83	手法2 (5.4節) を用いた E_0 に対する E_{inv} の推定割合である。核種の違いによる影響を知るために陽子と鉄で決めた A と B の平均値を使っている。この図は $r = 1900$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。 . . .	114
D.84	手法2 (5.4節) を用いた E_0 に対する E_{inv} の推定割合である。核種の違いによる影響を知るために陽子と鉄で決めた A と B の平均値を使っている。この図は $r = 2000$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。 . . .	114
E.85	手法3 (5.5節) の A と B を決めるための図。この図は $r = 900$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。	115
E.86	手法3 (5.5節) の A と B を決めるための図。この図は $r = 1000$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。	115
E.87	手法3 (5.5節) の A と B を決めるための図。この図は $r = 1100$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。	116
E.88	手法3 (5.5節) の A と B を決めるための図。この図は $r = 1200$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。	116
E.89	手法3 (5.5節) の A と B を決めるための図。この図は $r = 1300$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。	116
E.90	手法3 (5.5節) の A と B を決めるための図。この図は $r = 1400$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。	117
E.91	手法3 (5.5節) の A と B を決めるための図。この図は $r = 1500$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。	117
E.92	手法3 (5.5節) の A と B を決めるための図。この図は $r = 1600$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。	117
E.93	手法3 (5.5節) の A と B を決めるための図。この図は $r = 1700$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。	118
E.94	手法3 (5.5節) の A と B を決めるための図。この図は $r = 1800$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。	118
E.95	手法3 (5.5節) の A と B を決めるための図。この図は $r = 1900$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。	118
E.96	手法3 (5.5節) の A と B を決めるための図。この図は $r = 2000$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。	119
E.97	手法3 (5.5節) を用いた E_0 に対する E_{inv} の推定割合である。この図は $r = 900$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。	120
E.98	手法3 (5.5節) を用いた E_0 に対する E_{inv} の推定割合である。この図は $r = 1000$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。	120
E.99	手法3 (5.5節) を用いた E_0 に対する E_{inv} の推定割合である。この図は $r = 1100$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。	121
E.100	手法3 (5.5節) を用いた E_0 に対する E_{inv} の推定割合である。この図は $r = 1200$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。	121

E.101	手法 3 (5.5 節) を用いた E_0 に対する E_{inv} の推定割合である。この図は $r = 1300$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。	121
E.102	手法 3 (5.5 節) を用いた E_0 に対する E_{inv} の推定割合である。この図は $r = 1400$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。	122
E.103	手法 3 (5.5 節) を用いた E_0 に対する E_{inv} の推定割合である。この図は $r = 1500$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。	122
E.104	手法 3 (5.5 節) を用いた E_0 に対する E_{inv} の推定割合である。この図は $r = 1600$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。	122
E.105	手法 3 (5.5 節) を用いた E_0 に対する E_{inv} の推定割合である。この図は $r = 1700$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。	123
E.106	手法 3 (5.5 節) を用いた E_0 に対する E_{inv} の推定割合である。この図は $r = 1800$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。	123
E.107	手法 3 (5.5 節) を用いた E_0 に対する E_{inv} の推定割合である。この図は $r = 1900$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。	123
E.108	手法 3 (5.5 節) を用いた E_0 に対する E_{inv} の推定割合である。この図は $r = 2000$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。	124

表目次

3.1	CORSIKA シャワー条件	39
4.1	SD 再構成のクオリティーカット条件	47
4.2	4th Selection での PMT の分類基準	52
4.3	4th Selection の PMT 選択基準	52
4.4	FD 再構成のクオリティーカット条件	54
5.1	GH function を用いて CORSIKA の出力から計算した E_{inv} の決定に使ったシャワー数	60
5.2	モンテカルロシミュレーション条件	60
5.3	モンテカルロシミュレーション条件	67
A.1	本研究に用いた CORSIKA シャワー数	79
C.2	手法 1 (5.3 節) で決めた A と B の値	85
D.3	手法 2 (5.4 節) で決めた A と B の値	95
E.4	手法 3 (5.5 節) で決めた A と B の値	119

第 1 章

イントロダクション

1.1 宇宙線

宇宙線は、宇宙を飛び交う高エネルギーの荷電粒子のことであり、狭義にはそれらのうち陽子や原子核成分を指す。宇宙線がどこでどのように加速されたのか（エネルギーが付与されたのか）は解明されておらず、これを解明することは宇宙物理学の課題のひとつである。

宇宙線は 1912 年に物理学者 V. F. Hess によって発見された [21]。この当時は既に空気を電離したり物質を貫通したりする能力をもつ放射線の存在は知られており、地表からも観測されていた。Hess は地表からの高度による放射線量の変化を気球に乗って測定した。地表からの放射線量は上空に行くにつれて下がり続けることが期待されており、初めは期待通りに減少した。しかし、上げ続けていくと一転して放射線量は増加することが観測された。この事実は宇宙からも放射線は到来していることを示唆しており、現在は宇宙線と呼ばれている。図 1.1 は宇宙線のエネルギースペクトルの観測結果であり、横軸は宇宙線のエネルギー、縦軸はエネルギーごとの到来頻度を表している [5]。この図から、宇宙線のエネルギーが 11 桁以上にわたることや高エネルギーになると到来頻度が下がることが分かる。

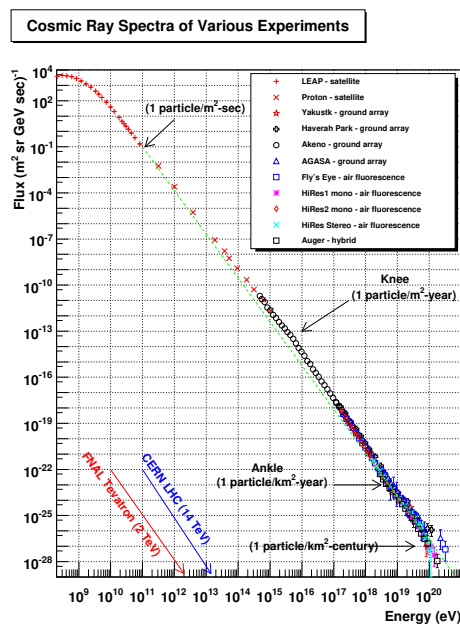


図 1.1: 宇宙線のエネルギースペクトルの観測結果 [5]

宇宙線の研究が進むにつれて、宇宙線が地球の大気と相互作用をし、多数の粒子群となる空気シャワー現象を起こすことがわかった。空気シャワーについては、1.2節で詳しく述べる。宇宙線について研究を行うために、様々な実験で観測が行われており、宇宙線の観測方法は直接観測と間接観測の2種類がある。 10^{13} eV以下の低エネルギーの宇宙線は到来頻度が高いので、気球や人工衛星に検出器を設置し、宇宙線そのものを観測している。一方で、 10^{13} eV以上の高エネルギーの宇宙線は到来頻度が低いので、検出器で直接観測するためには広大な検出面積が必要になる。観測に十分な面積をもつ検出器を気球や人工衛星に設置することは困難であるため、地表に検出器を設置し、宇宙線によって生成される空気シャワーを観測しており、これを間接観測と呼んでいる。このような方法で、宇宙線を観測することにより様々な性質を解析している。ここでは、性質としてエネルギースペクトル、質量組成、ミューオンパズルについて詳しく述べる。

エネルギースペクトル

エネルギースペクトルは、図1.1のように宇宙線のエネルギーごとの到来頻度を表したグラフである。高エネルギーになるほど到来頻度は下がるが、一定ではない。図1.2は、いくつかの実験から得られた宇宙線のエネルギースペクトルの観測結果を示しており、縦軸には横軸のエネルギー E の2.6乗をかけることにより、詳細な構造を見やすくしている [6]。この図より、到来頻度の減り方は一定ではなく、複数の折れ曲がり構造があることがわかる。ここでは、4つの折れ曲がり構造について述べる。

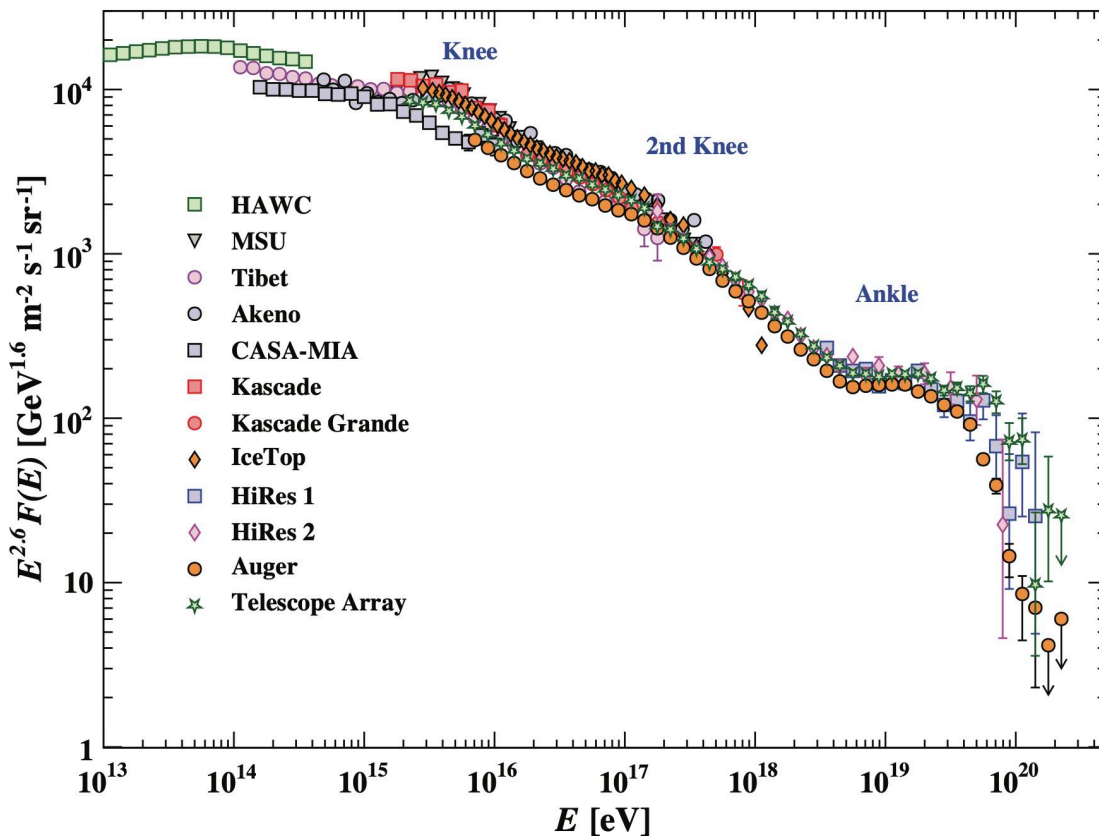


図 1.2: 宇宙線のエネルギースペクトルの観測結果 [6]。横軸は宇宙線のエネルギー E 、縦軸はと裏頻度を表している。縦軸に $E^{2.6}$ をかけることでスペクトルの詳細な構造を見やすくしている

■"Knee" 10^{15} eV から 10^{16} eV の間に "Knee" とよばれている傾きが急になっている構造がある [22]。この構造の原因としては、銀河系内の陽子の加速限界だと考えられている。

■"2nd Knee" 10^{17} eV 付近に "2nd Knee" とよばれている傾きが急になっている構造がある。このエネルギー帯は、銀河系内の鉄のような重い原子核の加速限界だと考えられている。KASCADE-Grande 実験 [23] は超高エネルギー宇宙線のエネルギースペクトルの中の "2nd Knee" の構造を報告し、重い原子核による空気シャワーの存在について示した [24]。鉄原子核の加速限界は "Knee" に対応するエネルギーの 26 倍で起こることが示唆されており、この 26 という数字は陽子と鉄の原子番号の比率に対応している [25]。

■"Ankle" $10^{18.7}$ eV 付近の "Ankle" とよばれている傾きが緩やかになっている構造がある。この構造の原因としては、様々なモデルが考えられているが、まだ分かっていない。

■cut off 10^{20} eV 付近に到来頻度の急激な減少がある。この構造の原因としては、様々な理論が考えられているが、まだ分かっていない。

質量組成

質量組成は、宇宙線核種の混ざり具合である。宇宙線核種を知るためのパラメーターとして、空気シャワー中の粒子数が最大になるときの大気深さ X_{\max} というものがある。質量数が大きい原子核による空気シャワーでは、陽子などの軽い原子核と比べると相互作用断面積が大きいことにより上空で早くに空気シャワーの発達が始まり、また宇宙線のエネルギーが同じ場合は核子あたりのエネルギーが小さいため、 X_{\max} は質量数が大きくなると小さくなり、質量数が小さくなると大きくなる。次の式 1.1 を用いて、質量数を推定している。

$$\langle \ln A \rangle = \frac{X_{\max}^{\text{obs}} - X_{\max}^{\text{proton}}}{X_{\max}^{\text{iron}} - X_{\max}^{\text{proton}}} \cdot \ln A_{\text{iron}} \quad (1.1)$$

A は質量数であり、陽子と鉄それぞれの平均 X_{\max} である X_{\max}^{proton} と X_{\max}^{iron} と観測された X_{\max}^{obs} を使って核種を推定している。複数の実験によって測定された超高エネルギー宇宙線のエネルギーごとの質量組成を図 1.3 に示す [7]。この図からエネルギーによって質量数が遷移していることがわかる。

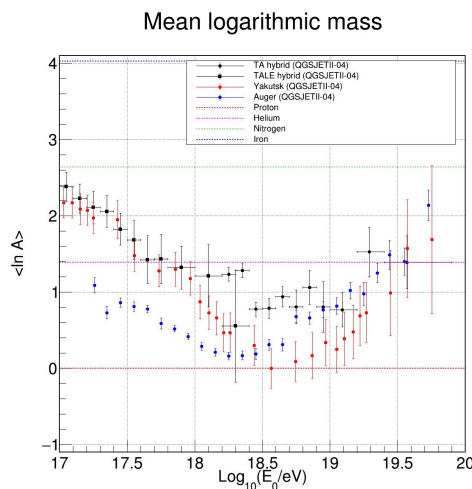


図 1.3: 複数の実験によって測定された超高エネルギー宇宙線の質量組成 [7]。

ミューオンパズル

空気シャワー実験では、実験室での再現が不可能である空気シャワー現象をコンピュータ上で疑似的に生成するため、モンテカルロシミュレーションを多用する。そこでは加速器で実現可能なエネルギー領域における原子核相互作用の知見に基づいた「相互作用モデル」を利用し、加速器のエネルギーを大きく超える宇宙線の相互作用に外挿している。近年の空気シャワー観測から、現実に観測される空気シャワー中のミューオン数と、空気シャワーシミュレーションから予測されるミューオン数が一致しないという問題が指摘され、「ミューオンパズル」として認識されるようになった。空気シャワー中のミューオンの数は、空気シャワーの X_{\max} と同様に、質量組成に敏感なパラメーターであり、ミューオン数の平均は宇宙線の質量数 A に比例する。Pierre Auger Observatory は傾斜の大きい空気シャワーについて、観測された空気シャワーのミューオン数が 10^{19} eV の宇宙線をシミュレーションした空気シャワーのミューオン数よりも 30% から 80% 多いことを報告した [26]。また、Telescope Array (TA) 実験も地表検出器アレイによって観測された空気シャワーは、ハドロン相互作用モデル QGSJET II-03 を用いた空気シャワーシミュレーションにおけるミューオンの数よりも多いことを報告した [27]。

図 1.4 は、9 つの実験によるミューオン数 N_{μ} の値の比較を示している [8]。異なる実験の結果を比較するために、式 1.2 を使って N_{μ} をスケールさせた z というパラメーターを使用している。

$$z = \frac{\ln N_{\mu} - \ln N_{\mu P}^{\text{sim}}}{\ln N_{\mu \text{Fe}}^{\text{sim}} - \ln N_{\mu P}^{\text{sim}}} \quad (1.2)$$

$N_{\mu P}^{\text{sim}}$ と $N_{\mu \text{Fe}}^{\text{sim}}$ はシミュレーションによって得られるミューオン数であり、シミュレーションの種類に依存する。そのため、6 種類のモデルを使ったシミュレーションで比較を行った。式 1.2 のスケールを行うことにより、 N_{μ} のエネルギー依存性が吸収され、実験に依存するミューオン数の推定値を比較できるようになる。結果は N_{μ} と X_{\max} で一致しておらず、特にエネルギー 10^{17} eV 以上では N_{μ} で予想される質量組成の方が重くなる。これは、現在のシミュレーションでは空気シャワー中のミューオン数をうまく再現できていないことを示唆している。

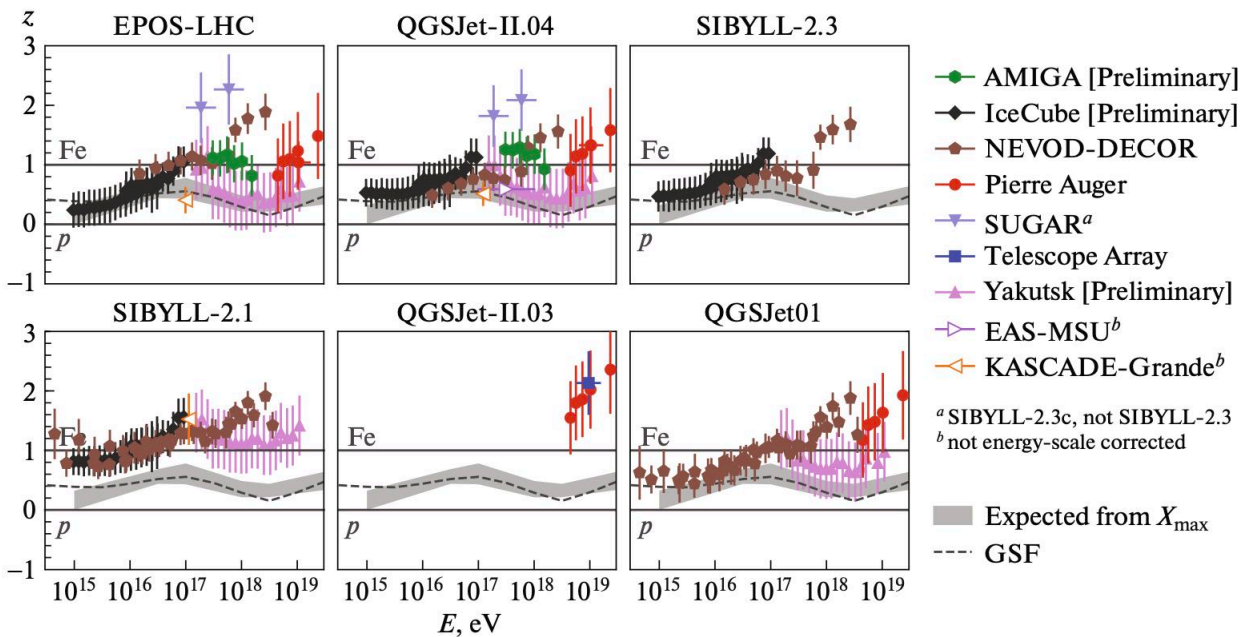


図 1.4: 9 つの実験で報告された観測結果 N_{μ} から式 1.2 でスケールされた z の分布。灰色の帯は X_{\max} の測定から予想される質量組成を示す [8]。

1.2 空気シャワー

超高エネルギー宇宙線の観測において、図 1.1 よりエネルギー約 10^{15} eV の宇宙線は 1 年で 1 m^2 あたり 1 粒子という低頻度であり、直接観測することは困難である。そこで、宇宙線と地球の大気との相互作用によって引き起こされる空気シャワー現象を観測する間接観測を行う。本節では、空気シャワーについて詳しく述べる。

図 1.5 は、空気シャワーの発達の様子を表す模式図である。まず、空気シャワーの初期段階では、陽子、中性子、 π^0 、 π^\pm 、 K^\pm などのハドロンが作られる [9]。 π^0 は、

$$\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma \quad (1.3)$$

のように 2 つの γ に崩壊する。まだ、空気シャワーの初期段階であり、ここでできた γ はさらに大気と相互作用をして電子対生成を起こすことができるエネルギーを持っている。そして、電子対生成でできた e^\pm は制動放射によって、 γ を生成する。このサイクルは電磁カスケードと呼ばれ、宇宙線の空気シャワーの大部分 (約 90%) を占めている。 π^\pm は、

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu \quad (1.4)$$

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu \quad (1.5)$$

のように崩壊する。 μ^\pm のこの先の反応を追うと、

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu \quad (1.6)$$

$$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu \quad (1.7)$$

のように崩壊する。 μ の平均寿命は 2.2×10^{-6} 秒と比較的長く、大気との相互作用が起こりにくいことから、空気シャワー中のほとんどの μ は電磁カスケードの一部になることなく地上に到達する。

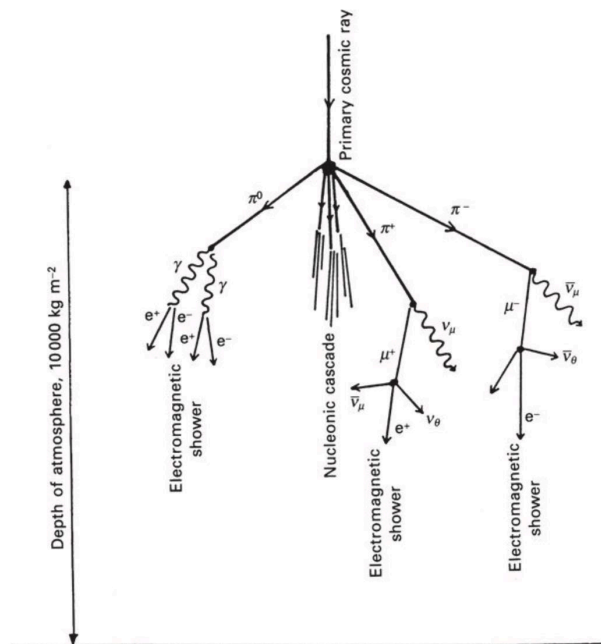


図 1.5: 空気シャワーの発達の様子を表す模式図 [9]

1.3 Invisible energy

宇宙線が地球の大気と相互作用し、多数の粒子群となる空気シャワー現象を起こす。空気シャワーは多数の粒子群となり地表に降り注ぐ。その粒子群は、 π^\pm , μ^\pm , e^\pm などの荷電粒子と ν_μ , $\bar{\nu}_\mu$ などの中性粒子からなりそれぞれの粒子にエネルギーが分配されながら空気シャワーは発達していく。分配された粒子が持つエネルギーや粒子が起こしたエネルギー損失の和が空気シャワーを作り出した宇宙線のエネルギーとなる。荷電粒子は大気中の分子を励起させるときにエネルギー損失を起こす。励起された分子は、基底状態に戻るときに波長域 300 nm から 400 nm の大気蛍光を発生させる。空気シャワーを観測している実験では、この大気蛍光を大気蛍光望遠鏡 (Fluorescence Detector: FD) で観測している。大気蛍光は荷電粒子のエネルギー損失由来であり、荷電粒子のエネルギーを推定することができる。しかし、電氣的に中性な粒子であるニュートリノは弱い相互作用しかしないので、大気蛍光が発生せず FD では検出が難しいため、持っていたエネルギーを推定することが困難である。この FD では観測できないエネルギーのことを **Invisible Energy** とよんでいる。

図 1.6 は、 E_0 のエネルギーを持った宇宙線が空気シャワーを起こし、空気シャワー中の荷電粒子が大気蛍光を発生させる様子を表している。FD で大気蛍光を観測し、荷電粒子由来のエネルギー損失の和として E_{cal} が計算される。宇宙線のエネルギー E_0 を決定するためには、中性粒子が持ち去ったエネルギーとして E_{inv} を推定する必要がある。この結果、 E_0 は、

$$E_0 = E_{\text{cal}} + E_{\text{inv}} \quad (1.8)$$

という式で決定することができる。

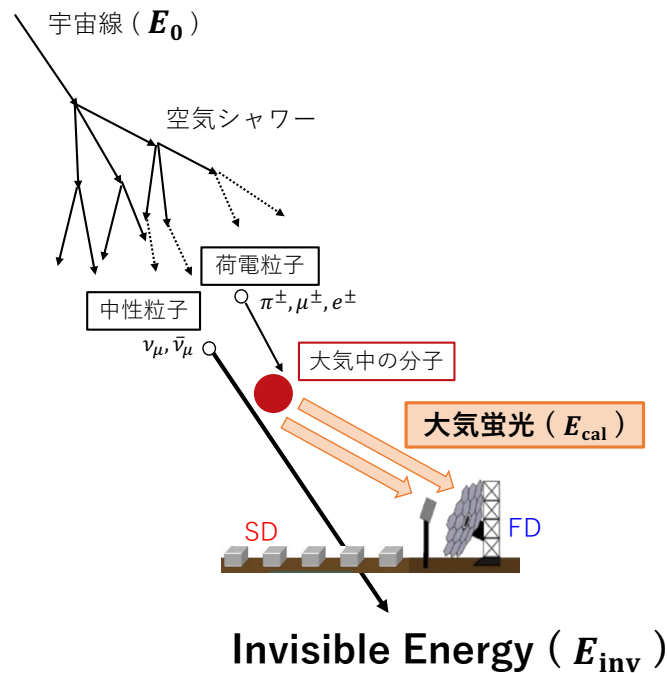


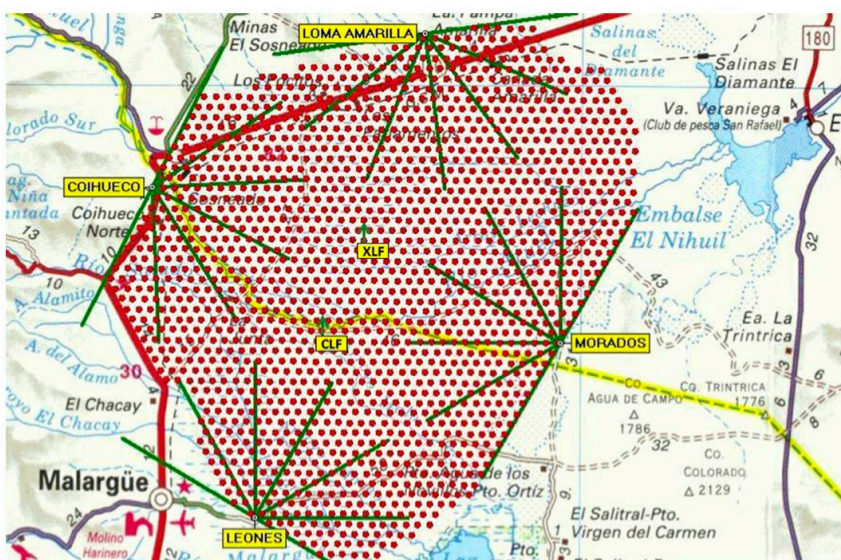
図 1.6: E_0 のエネルギーを持った宇宙線が空気シャワーを起こし、空気シャワー中の荷電粒子が大気蛍光を発生させる様子を表す図

本研究は、この Invisible Energy の新たな決定手法を開発するというものである。ここでは Invisible Energy について行われた先行研究を紹介する。

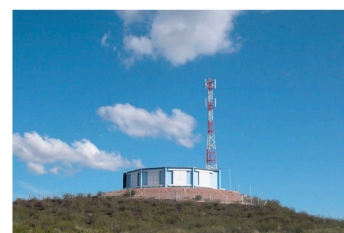
Invisible Energy は、J. Linsley によって初めて計算された [28]。その後、シミュレーションした空気シャワーを使うというより精巧な推定手法が発表された [29, 30]。この手法は、荷電粒子の数から E_{cal} を計算し、シミュレーションしたエネルギー E_0 から引き算し、 E_{inv} の割合を求めるというものである。その後、空気シャワーのシミュレーションの詳細が改善されたことから、 E_{inv} を計算するための異なる優れたアプローチが発表された [31]。その方法は、空気シャワーの成分から直接求めるといったものであった。

Auger で行われた先行研究

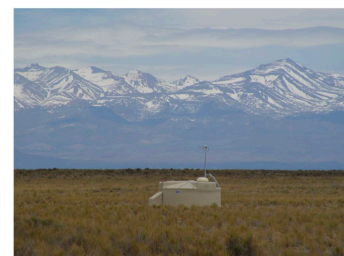
Pierre Auger Observatory [10] は大気蛍光望遠鏡 (Fluorescence Detector: FD) [32] と地表検出器 (Surface Detector: SD) [33] の二種類の検出器を用いて超高エネルギー宇宙線によって生じる空気シャワーを観測している南半球最大の実験である。南緯 35.0° と 35.3° の間、西経 69.0° と 69.4° の間に位置しており、標高 1400 m、平均大気深さ 875 g/cm^2 である。二種類の検出器は、図 1.7a [10] のように、SD アレイを取り囲むように FD ステーションが設置されている。



(a) Auger の検出器配置



(b) FD ステーションの写真



(c) SD の写真

図 1.7: Pierre Auger Observatory の検出器配置と各検出器の写真 [10]。赤色の丸が SD の位置を表しており、緑色の線で、各 FD の視野が描かれている。

FD (図 1.7b [10]) は、SD アレイを取り囲むように 4 ヶ所の FD ステーションにそれぞれ 6 台の FD が設置されている [32]。月の出ていない夜のみを観測を行い、約 14% のデューティ・サイクルで動作する。各 FD の視野は $30^\circ \times 30^\circ$ で、曲率半径 3.4 m の球面鏡と、光電子増倍管 (PMT) 22×20 本を並べたカメラで構成されている。FD によって観測された空気シャワーは、大気深さごとのエネルギー損失量を足し合わせたものに Invisible Energy の補正を加えることで得られる [34]。

SD (図 1.7c [10]) は、三角格子状に 1.5 km 間隔で 1660 台の水チェレンコフタンクを配置しており、有効検出面積は約 3000 km^2 である [33]。約 100% のデューティ・サイクルで動作する。各 SD は円筒形で、面積 10 m^2 、深さ 1.2 m まで純水が満たされている水中で起こったチェレンコフ光は、直径 9 インチの 3 つの PMT によって検出される。PMT の信号は、フラッシュアナログデジタルコンバータ (FADC) によって 40 MHz のサンプリング

周波数でデジタル化され、大気中のバックグラウンドミュオンによって生成された信号を用いて連続的に校正されている。水チェレンコフタンクは空気シャワーの電磁成分とハドロン成分に敏感である。電子と光子は水に吸収され、そのエネルギーにほぼ比例した量のチェレンコフ光を発生し、ミュオンは飛跡の長さに比例した信号を発生する。水チェレンコフタンクの高さが 1.2m あるので、アレイは天頂角の大きなシャワーにも感度がある。この傾いたシャワーでは、地上に到達するまでに通過する大気深さの間にシャワーの電磁成分がほとんど吸収されるため、水チェレンコフタンクによって検出される信号はミュオンが支配的である。SD によって観測された空気シャワーは天頂角によって 2 種類のエネルギー推定手法がある。天頂角が 60° 未満の vertical シャワーの場合、エネルギー推定はシャワーコアから 1000 m の地点の信号である $S(1000)$ を用いてエネルギー推定が行われる [10]。天頂角が 60° 以上の inclined シャワーの場合は、地上レベルでのミュオンの密度分布を用いてエネルギー推定が行われる [35]。ここでは、inclined シャワーの Invisible Energy の推定手法を紹介する [4, 36]。

天頂角が 60° 以上の空気シャワーは多くの大気を通過後、地表に到達するので電磁成分の多くは減衰しミュオンが支配的である。そのため、地表に到達したミュオンの総数 (N_μ) を測定することが可能である。 N_μ は、

$$E_{\text{inv}} = \epsilon_c^\pi N_\mu \quad (1.9)$$

のように、 E_{inv} に比例すると予想される観測値で、比例係数 ϵ_c^π はハドロン相互作用モデルと核種にわずかに依存する。

シミュレーションを用いて、ミュオン数 R_μ^{MC} と E_{inv} の関係を式 1.10 で表し、フィッティングし C と δ をハドロン相互作用モデル 3 種類をそれぞれ使って陽子と鉄で求めた。

$$E_{\text{inv}} = C (R_\mu^{\text{MC}})^\delta \quad (1.10)$$

図 1.8 は、ハドロン相互作用モデルを EPOS LHC と QGSJET II-04 を使用したときの E_{inv} と R_μ^{MC} の関係を表している [4]。式 1.10 でフィッティングすることによって、 C と δ を求めることができる。3 種類のハドロン相互作用

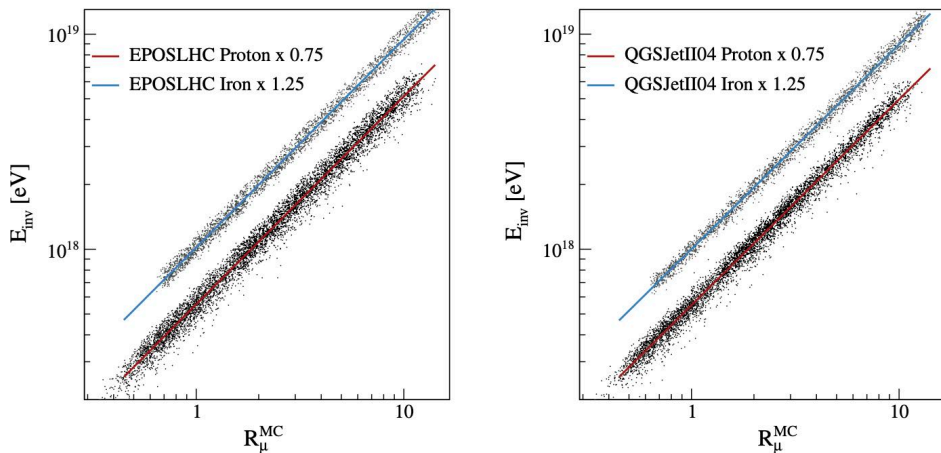


図 1.8: ハドロン相互作用モデル EPOS LHC と QGSJET II-04 でシミュレーションした陽子と鉄のシャワーの E_{inv} と R_μ^{MC} の相関関係を表したグラフ [4]。赤線と青線は、それぞれ陽子と鉄のデータ点を式 1.10 でフィッティングしたもの。

用モデルを用いて陽子と鉄の場合の C と δ を求めた。図 1.9 は、EPOS LHC で得られた C と δ を質量組成を陽子 50%、鉄 50% と仮定して、陽子と鉄でパラメーターの平均をとった C と δ を使用して求めた E_{inv} を真の値として他のモデルとの比較を示している [4]。

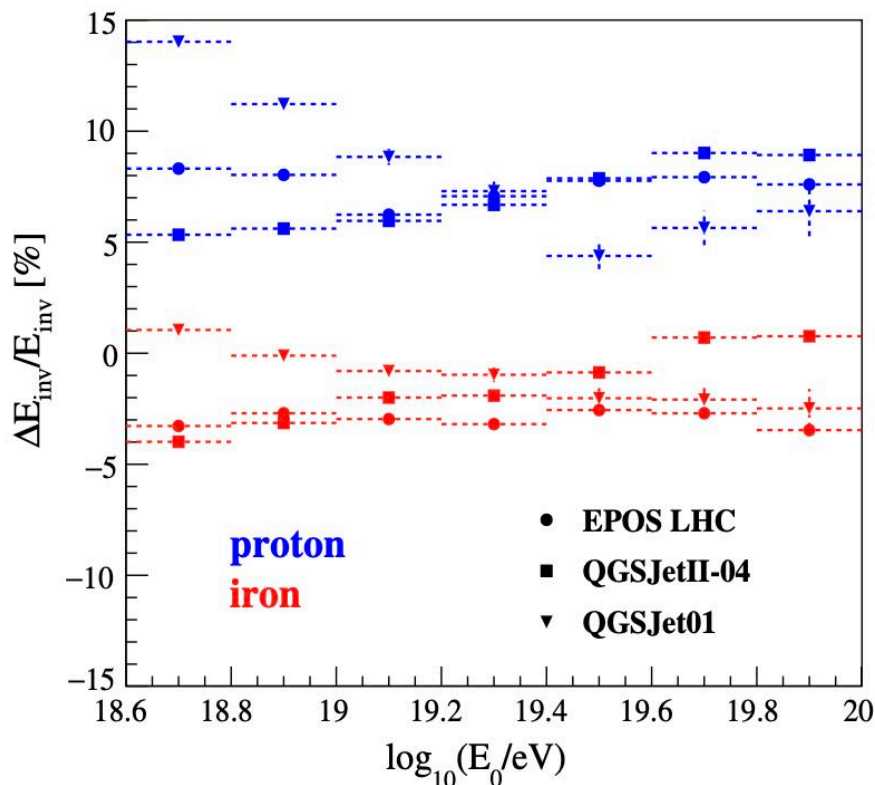


図 1.9: EPOS LHC を用いて質量組成を陽子 50%、鉄 50% とした inclined シャワーから得られたパラメーター C と δ を使用して式 1.10 から求めた E_{inv} を真の値として他のモデルで求めた核種ごとの E_{inv} との比較を表す図 [4]。

TA 実験で行われた先行研究

Telescope Array (TA) [1] は、Auger と同様に FD [2] と SD [2] の二種類の検出器を用いて空気シャワーを観測している北半球最大の実験である。TA 実験については、2 章で詳しく述べる。ここでは、ICRC2017 で発表された TA 実験で行われた Invisible Energy の推定手法について紹介する [11] (missing energy と Invisible Energy は同等のものであることに注意されたい)。

Missing energy (E_{miss}) は、TA 実験の SD 観測で得られる空気シャワー軸から 800 m 地点での粒子数密度 S_{800} を用いて次式のようにパラメーター化される。

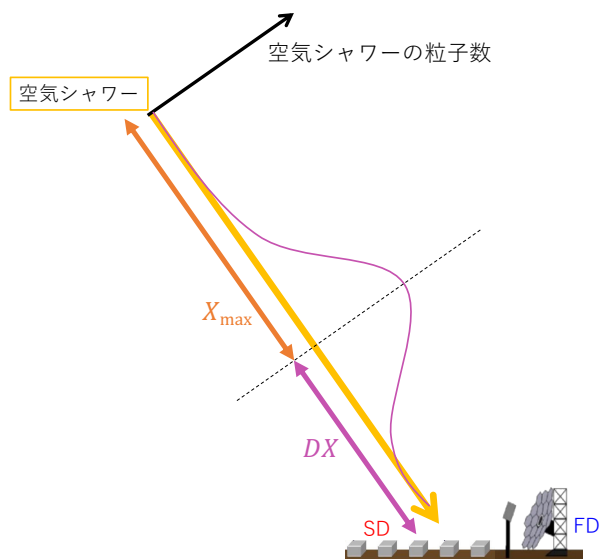
$$\log E_{\text{miss}} = A \log S_{800} + B \quad (1.11)$$

A と B の値は、CORSIKA シミュレーションを用いて DX を 100 g/cm^2 ごとに分けて求められている。 DX は空気シャワー中の粒子が最大になる大気深さ X_{max} から地表に到達するまでの大気深さであり、次式で表される。

$$DX = \frac{876.5}{\cos \theta} - X_{\text{max}} \quad (1.12)$$

876.5 g/cm^2 は TA サイトの平均的な大気深さを表しており、天頂角 θ を使って傾斜させた大気深さを求められる。図 1.10 で模式的に示している。

シミュレーションによって求められた $DX 100 \text{ g/cm}^2$ ごとの A と B の値を図 1.11 に示す [11]。図 1.11 の値を

図 1.10: DX を表す模式図

DX (g/cm^2)	100-200	200-300	300-400	400-500	500-600	600-700	700-800
A	1.059	1.053	1.086	1.085	1.045	1.117	1.142
B	16.25	16.28	16.32	16.42	16.59	16.62	16.73

図 1.11: シミュレーションによって求められた $DX100 \text{ g}/\text{cm}^2$ ごとの A と B の値 [11]

用いて TA 実験の 7 年間で FD と SD で同時観測された空気シャワーイベントに対して missing energy を推定した結果を図 1.12 に示す。この結果は、Auger 実験の結果と比べて、5% の差があった。

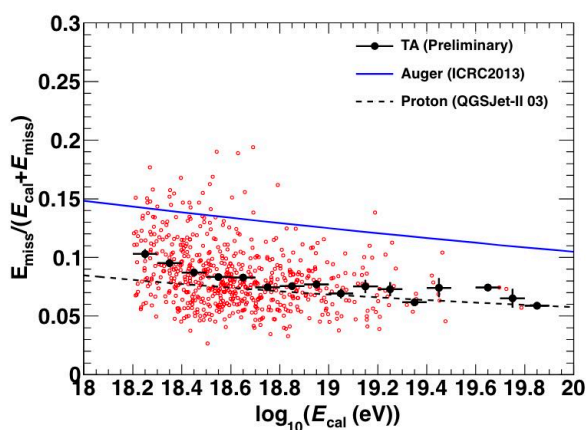


図 1.12: TA 実験で FD と SD の同時観測された空気シャワーイベント 7 年間分の missing energy の推定結果 [11]

KASCADE 実験と IceTop の公開データを用いて行われた先行研究

Auger 実験と同様の手法で KASCADE 実験 [37] と IceTop [38] の公開データを用いて Invisible Energy の推定が行われている。

KASCADE 実験は、 10^{14} eV から 10^{17} eV の高エネルギー宇宙線によって生じる空気シャワーを観測している実験である。北緯 49.1° 、東経 8.4° に位置しており、標高 110 m、平均大気深さ 1022 g/cm^2 である。検出器は図 1.13a のように 13 m 間隔で 252 台設置されており、16 台ずつで計 16 個のアレイクラスターを形成している [12]。全ての検出器に直径 1 m、高さ 5 cm の円筒形の液体シンチレーターが内蔵されており、空気シャワー中の電子成分と光子成分を測定している。さらに、外側 12 個のアレイクラスター中の検出器には、液体シンチレーターの下部に厚さ 10 cm の鉛と厚さ 4 cm の鉄の板が挿入されており、 3.2 m^2 のプラスチックシンチレーターを用いてミューオン成分を測定している。鉛と鉄の板も挿入している検出器を Type I (図 1.13b)、液体シンチレーターのみを検出器を Type II (図 1.13c) とよんでいる。

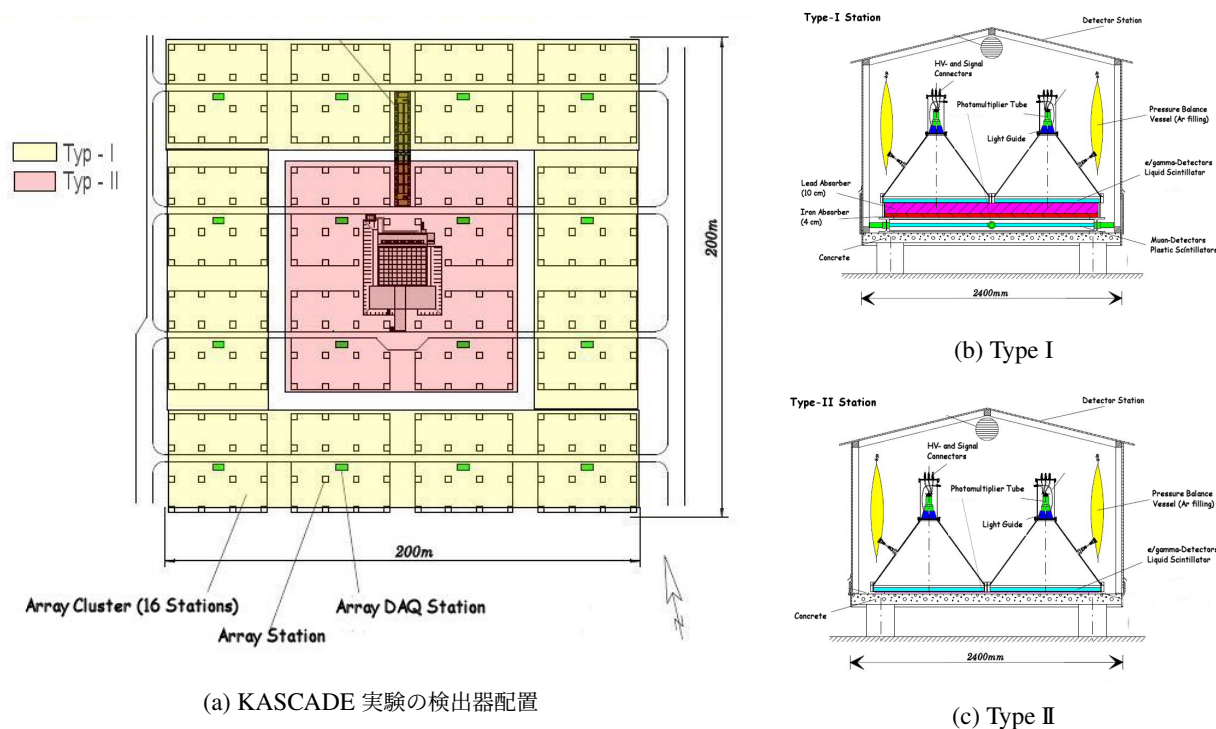


図 1.13: KASCADE 実験のシンチレーション検出器の配置と構造 [12]

IceTop は、IceCube の上部に設置された空気シャワー観測を行うための検出器アレイである。IceCube は、図 1.14a のように、南極大陸の深さ 1450 m から 2450 m の水の中に検出器が埋め込まれており、天然の水を利用した水チェレンコフ検出器を使用してニュートリノ観測を行っている [13]。その上部には、2 台 \times 81 ステーションの計 162 台の水タンク (図 1.14b) が設置されており、これが IceTop である。

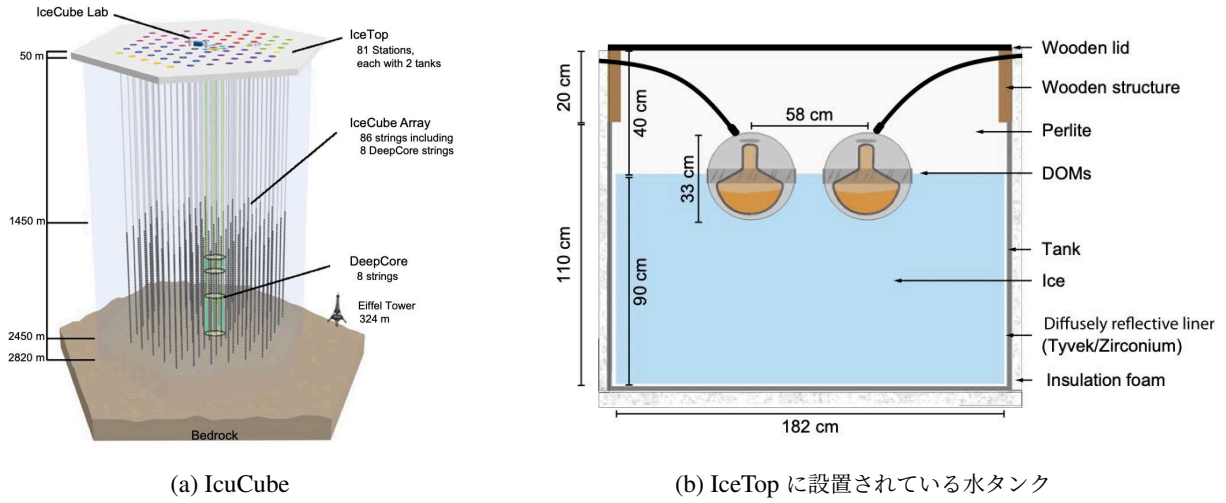


図 1.14: IceCube の全容と IceTop に設置されている水タンクの概略断面図 [13]

図 1.15 は、KASCADE 実験と IceTop の公開データを用いて推定された宇宙線のエネルギーに対する E_{inv} の割合の比較を示している。KASCADE 実験で $10^{15.2}$ eV から $10^{17.4}$ eV、IceTop では、 $10^{15.2}$ eV から $10^{17.0}$ eV の範囲の推定が行われている。

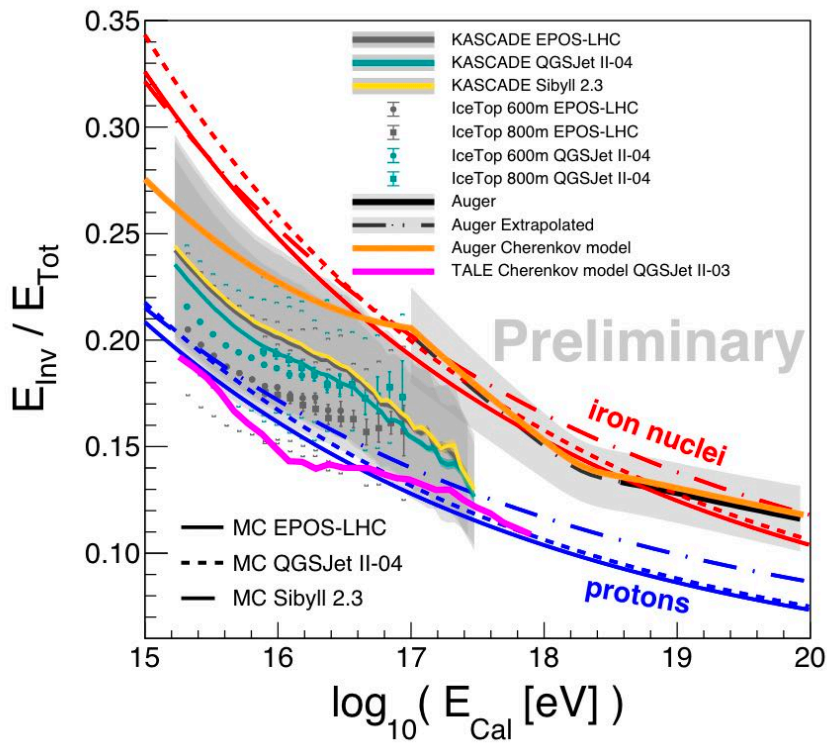


図 1.15: 様々な実験の E_{inv} の割合の比較 [14]

第2章

Telescope Array (TA) 実験

Telescope Array (TA) 実験は、日本、米国、ロシア、韓国などの国が参加している北半球最大の超高エネルギー宇宙線の観測所である [1]。アメリカ・ユタ州ミラード群の砂漠地帯に検出器を設置し、2008 年から定常的な観測が行われているので 15 年以上のデータを蓄積している。検出器は、地表検出器 (Surface Detector: SD) と大気蛍光望遠鏡 (Fluorescence Detector: FD) の 2 種類を設置しており、有効検出面積は 700 km^2 である。図 2.1 に検出器の配置図を示す。507 台の SD を取り囲むように 3 ヶ所の FD ステーションが設置されている。2 種類の検

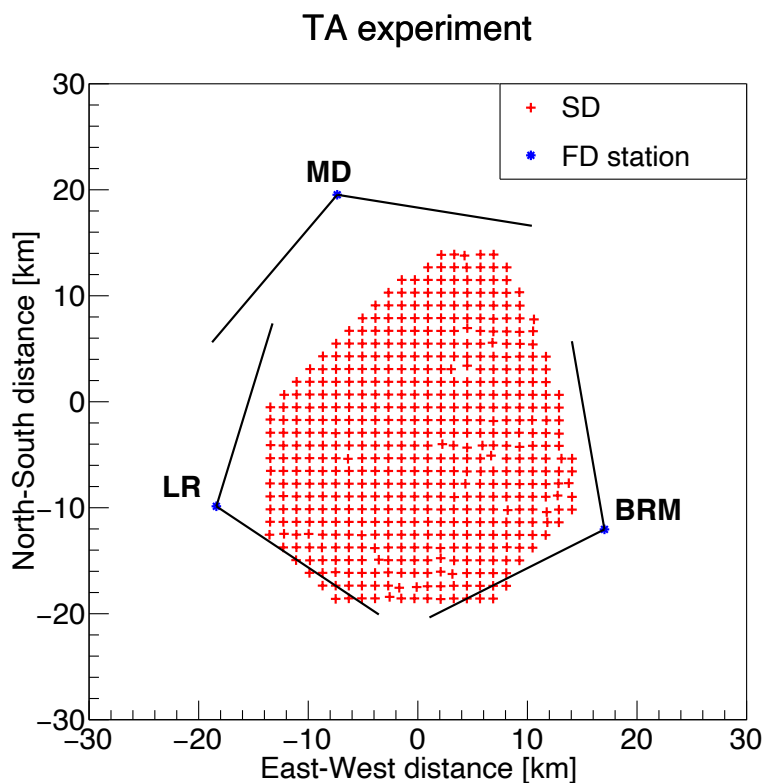


図 2.1: TA 実験の 2 種類の検出器の配置図である。赤色の + は SD の位置、青色の*は FD が複数設置されている FD ステーションの位置を表している。

出器を組み合わせてデータを解析し、 10^{18} eV 以上の超高エネルギー宇宙線のエネルギースペクトルや質量組成の解明に努めている。また、TA 実験を高エネルギー側へ拡張した TA×4 実験 [39–41] や低エネルギー側へ拡張した TALE 実験 [19, 42–44]・TALE infill 実験 [45] も行われている。

TA 実験を始める動機となったのが、High Resolution Fly's Eye (HiRes) 実験 [15] と Akeno Giant Air Shower Array (AGASA) 実験 [46] の結果の違いである。HiRes 実験では GZK カットオフ [47] に相当する $10^{19.7}$ eV 付近でのエネルギースペクトルの折れ曲がりが見られたが、AGASA 実験で得られたエネルギースペクトルでは GZK カットオフのような折れ曲がり（急激な宇宙線強度の減衰）は見られず $10^{19.7}$ eV を超える 11 個のイベントの存在が報告された。図 2.2 は HiRes 実験と AGASA 実験のエネルギースペクトルの比較である [15]。HiRes 実験は 2

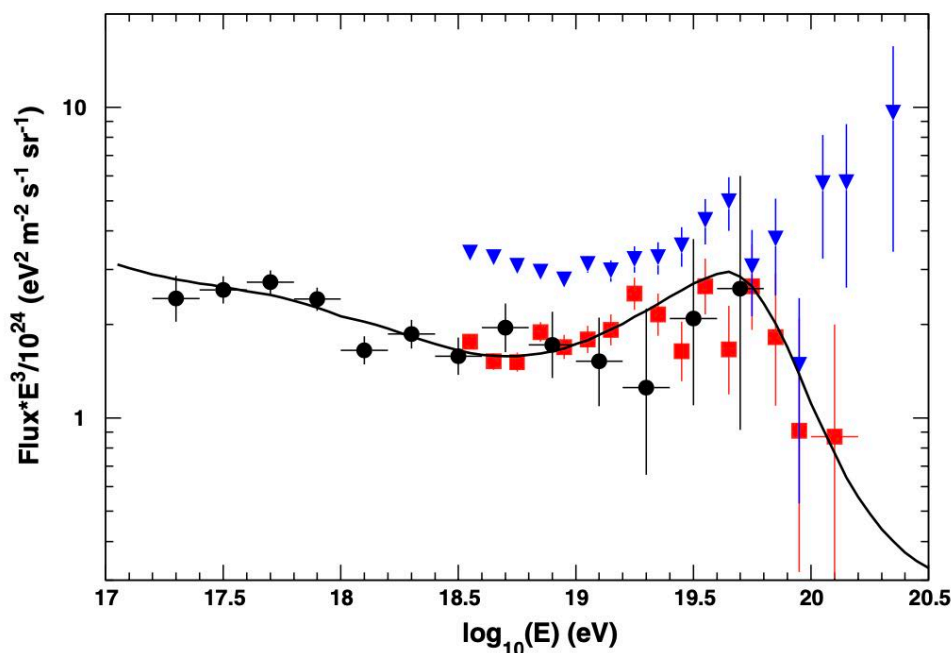
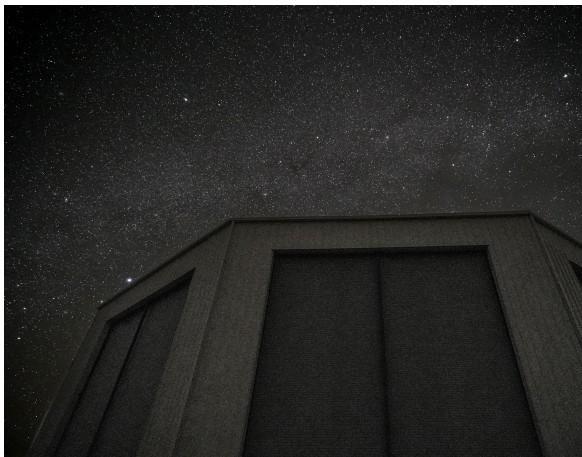


図 2.2: HiRes 実験と AGASA 実験で得られたエネルギースペクトルの比較（黒色の丸：HiRes-I Monocular、赤色の四角：HiRes-II Monocular、青色の三角：AGASA） [15]

つの FD ステーションのみ [48]、AGASA 実験は 111 台の SD のみ [46] を設置していた。FD を用いた場合と SD を用いた場合の結果の違いを比較し、高エネルギー側での結果の不一致を解決するために 2 種類の検出器を使用した大規模な観測所が必要であった。そのような動機で TA 実験は始まった。

2.1 大気蛍光望遠鏡 (FD)

TA 実験には、図 2.1 に示すように 3 ヶ所の FD ステーションがある。その中で北西部に位置している Middle Dru (MD) ステーションは、HiRes 実験 [48] から移設された 14 基の FD で構成されている。これらの FD で得られたデータは、HiRes 実験と同様の解析手法を使用することができる [15]。一方で、南西部と南東部に位置している Long Ridge (LR) ステーション (図 2.3a) と Black Rock Mesa (BRM) ステーション (図 2.3b) には TA 実験のために新たに作られた FD を 12 基ずつ設置されている。このセクションでは、LR と BRM に設置されている FD [2] について、詳しく述べる。



(a) LR ステーション (撮影 Y. Kawachi)

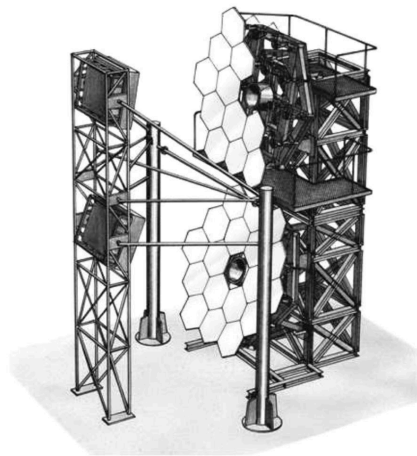


(b) BRM ステーション (撮影 S. Udo)

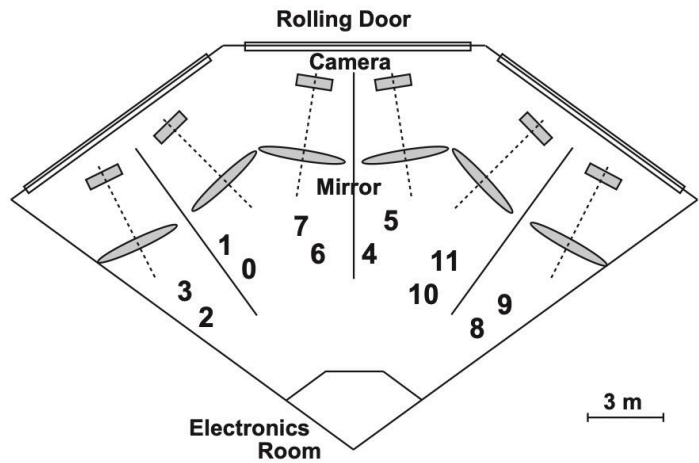
図 2.3: FD ステーションの写真 (a) LR ステーション (b) BRM ステーション

2.1.1 構造

FD は、図 2.4a のような見た目をしており、鏡とカメラそれぞれ 1 つずつを 1 基として上下に 2 基設置されている [2]。LR ステーションや BRM ステーションには上下 6 セットの計 12 基が設置されており、投影図は図 2.4b のようになっている [2]。鏡とカメラは 3000 mm 離れており、鏡で反射した大気蛍光をカメラに集光することで観測を行っている。



(a) FD の概略図



(b) FD の概略投影図

図 2.4: (a) FD の概略図 [2]。上下の鏡の中心と上下のカメラの中心は地面から 5.5 m、1.5 m、6.0 m、2.8 m の高さに固定されている。なお、上部の FD では見やすくするために 7 枚のミラーセグメントが取り外されている。(b) FD の概略投影図 [2]

鏡

大気蛍光の集光力を高めるために、球面状の鏡を使用している。鏡の直径は 3300 mm、曲率半径は 6067 mm、面積は 6.8 m^2 である。鏡の素材は、ホウケイ酸ガラス (SCHOTT AG, TEMPAX) が使われており、鏡の球面はミラーセグメントとよばれる 18 枚のミラーで作られている (図 2.5)。ミラーセグメントは六角形の形をしており、厚さは 10.5 mm で平行な辺の間の長さは 660 mm である。表面は厚さ 200 nm のアルミニウム層を真空蒸着す



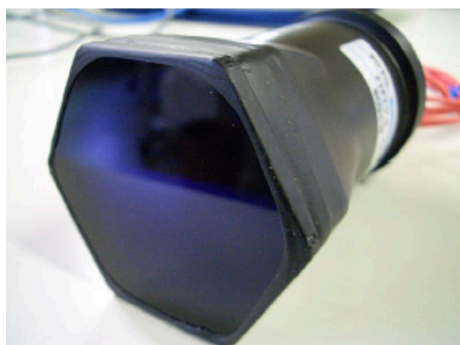
図 2.5: BRM ステーションに設置されている鏡の写真 (撮影 Y. Kawachi)

ることでコーティングしており、さらにそのアルミニウム層の表面 50 nm 分を陽極酸化させ Al_2O_3 の保護膜を形成した。陽極酸化の厚さ 50 nm は波長 350 nm で最大反射率を得るように決定された。鏡の反射率は 350 nm から 400 nm の波長領域で 80 % 以上である。

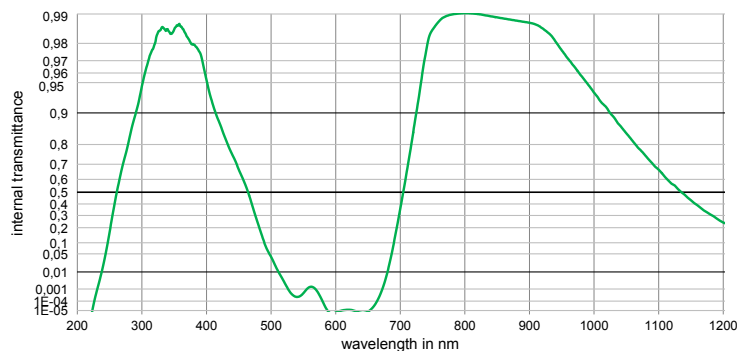
カメラ

上記の鏡の焦点面にはカメラが設置されている。各カメラは 16×16 本の光電子増倍管 (PMT) (浜松フォトニクス社製、R9508) から構成されており、 $860\text{ mm} \times 992\text{ mm}$ の有効面積を持つ。1 本の PMT は図 2.6a のように六角形の光電面を持っているため、他の PMT と並べるときに蜂の巣のような細密構造を作ることが容易である [7]。六角形の平行な辺の間の長さは 60 mm、そのうち有効な検出面は直径 57 mm の円であり、有効面積は 25.3 cm^2 である。鏡を反射して入る光に対しての各 PMT の視野は約 1° であり、256 本の PMT を集めたひとつのカメラは縦方向は 15° の範囲、横方向は 18° の範囲を視野に持つ。また、上下のカメラの視野の中心はそれぞれ 10.5° 、 25.5° の高さにある。観測を行う際の夜空からの光をカットするために、厚さ 4 mm の BG3 フィルター (SCHOTT AG, BG3 [49]) も取り付けられている。BG3 フィルターの透過率は、図 2.6b より 300 mm から 400 mm の波長域で 95 % 以上であることがわかる。

また、これらの PMT は環境による汚染を防ぐために図 2.7a [7] のように保護ボックスに入れている。保護ボックスの前面には紫外線を透過させるパラグラスシート (株式会社 Kuraray 製、PARAGLAS UV00) が取り付けられている。パラグラスシートの透過率は図 2.7b より 300 mm から 400 mm の波長域で 85 % 以上であることがわかる。



(a) PMT の写真 [7]

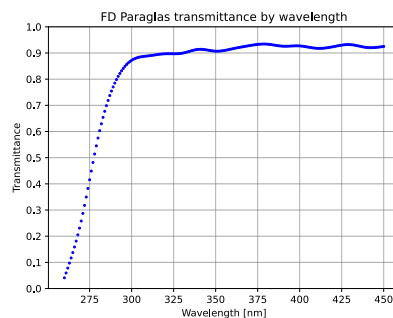


(b) BG3 フィルター透過率 [49]

図 2.6: (a) BRM ステーションと LR ステーションで使用されている PMT の写真。六角形の光電面に BG3 フィルターが取り付けられている。(b) BG3 フィルターの波長ごとの透過率



(a) PMT の保護ボックス [7]

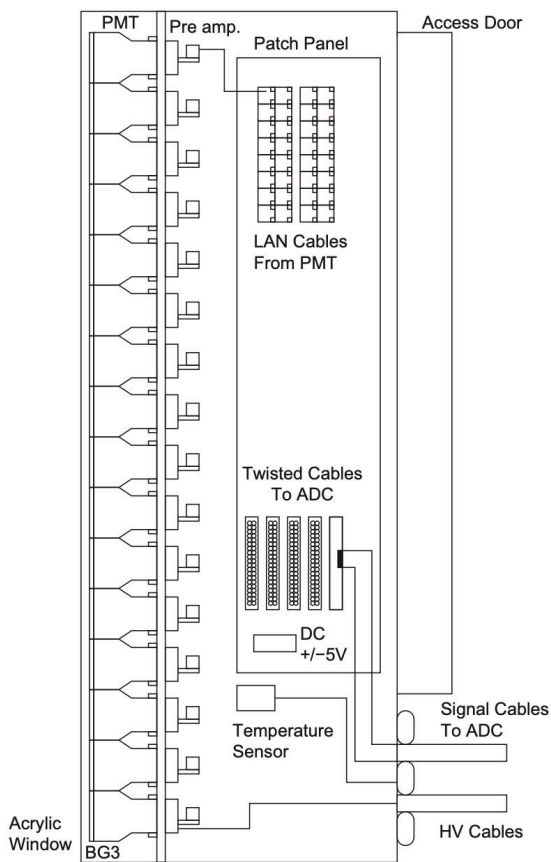


(b) パラグラスシートの透過率

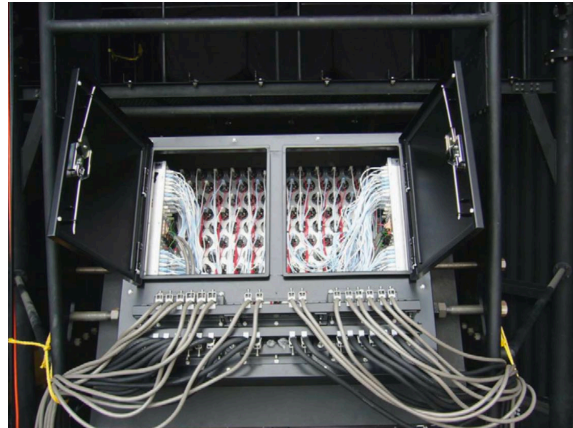
図 2.7: (a) BRM ステーションと LR ステーションに設置されている保護ボックス。256 本の PMT が内蔵されており、扉にはパラグラスシートが取り付けられている。(b) パラグラスシートの波長ごとの透過率

図 2.8a にカメラ内部の概略側面図を示す [2]。PMT への直流電源と PMT からの出力は、カメラ内のパッチパネルとの間を標準的な LAN ケーブル (長さ: 50~100 cm) で伝送される。LAN ケーブルが接続されたパッチパネルを図 2.8b に示す [2]。次に、PMT の出力はカメラ内のパッチパネルから 20 m 離れている温度管理された電子機器室 (図 2.8c (by Y. Kawachi)) にあるデータ収集システムへ伝送される。ここで使用しているケーブルは、40 個のコアを持つツイストペアケーブル (坂東電線株式会社製、BIOS-A-2820P) である。1 個のコアにつき 1 本の PMT がつながっており、16 本の PMT で 1 本のツイストペアケーブルを使用している。つまり、各カメラには 16×16 本の PMT があるので、16 本のツイストペアケーブルを使って計 256 本の PMT に入った情報をデータ収集システムに伝えている。また、上下のカメラのケーブルの長さはそれぞれ 25.5 m と 22.3 m である。

高電圧 (High Voltage: HV) 電源は、特注の電源 (高砂製作所製) を使用し、同軸ケーブル (坂東電線株式会社製、1.5D-2V) を介して各 PMT に印加される。HV 電源は 256 個の出力を持ち、各出力の値は $\pm 0.2\%$ の精度で個別に監視・制御できる。この不確かさは、PMT ゲインの約 $\pm 2\%$ に相当する。典型的な印加電圧は -880 V で、最大電圧は -1200 V である。安全対策として、異常な高電圧や電流が検出された場合、HV 電源は自動的にシャットダウンされる。直流電源 (KENWOOD 社製、PW18-3AD) は 2 つのパッチパネルに接続され、1 台のカメラの 256 個のプリアンプに ± 5 V の直流電圧を分配している。



(a) カメラの概略側面図 [2]



(b) PMT の光電面の反対側から見たカメラの内部の写真 [2]



(c) 電子機器室

図 2.8: (a) カメラの概略側面図。カメラ内の 256 本の PMT には、PMT の出力を伝送するケーブルや HV ケーブル、温度センサーが接続されている。(b) PMT の光電面の反対側から見たカメラの内部の写真。写真では扉が開いていて、見えているものは PMT の光電面の反対側である。また、PMT からパッチパネルにつながる無数の LAN ケーブルが見えており、写真下部の LAN ケーブルよりも太いものはデータ収集システムにつながるツイストペアケーブルである。(c) BRM ステーションの電子機器室の写真。上からつながっているのはパッチパネルへ繋がっているツイストペアケーブルである。

2.1.2 データ収集システム

空気シャワー由来の大気蛍光が鏡で反射し、各 PMT に入射する。PMT では、入射した光子は光電効果により多数の光電子を作り出し、調整されたゲイン 4×10^4 で増幅され電気信号として記録されている。図 2.9 に 1 つの FD ステーションのデータ収集システムのブロック図を示す [16]。PMT の出力信号は、次の 3 種類の VME モジュール (SDF、TF、CTD) でトリガー判定を行う。

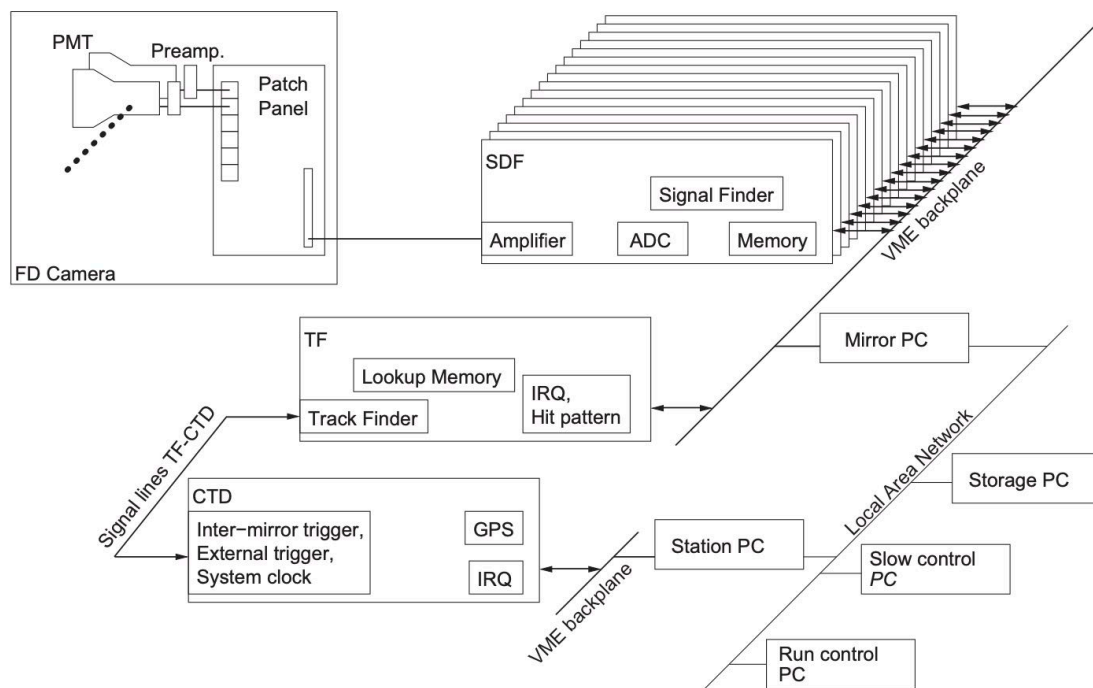


図 2.9: 1 ヶ所の FD ステーションのデータ収集システムのブロック図 [16]

1. Signal Digitizer and Finder (SDF)

First-level トリガーをかけるかを判断するモジュールである。カメラ 1 台につき、16 個の SDF モジュールがあり、それぞれ 16 個の入力を持っているため、計 256 個の入力が各 PMT つながっている。12 bit のアナログ-デジタル変換回路 (Flash Analog to Digital Converter: FADC) を備えており、サンプリング周波数 40 MHz でデジタル化されるので 25 ns ごとのサンプリングデータになる。SDF では連続する 4 つのサンプリングデータを積分して $25 \text{ ns} \times 4$ の 100 ns ごとにまとめるので、サンプリング周波数 10 MHz、量子化ビット数 14 bit 相当になる。図 2.10 はトリガー周期の模式図である [17]。空気シャワー由来の信号を見つけるための、トリガー判定は $12.8 \mu\text{s}$ ごとに行われる。そのときに使われるデータは前後 $12.8 \mu\text{s}$ の計 $25.6 \mu\text{s}$ 分のフレームである。オーバーラップをしながらトリガー判定を行うのは、図 2.10 の点線のような波形が来たときにオーバーラップがないと信号をのがしてしまうからである。この設定によって、どのタイミングに空気シャワーが来ても信号を捉えることができる。信号を発見すると、first-level トリガーがかかり、次の TF モジュールに渡される。トリガーレートは、 $\sim 3 \text{ Hz}$ である。

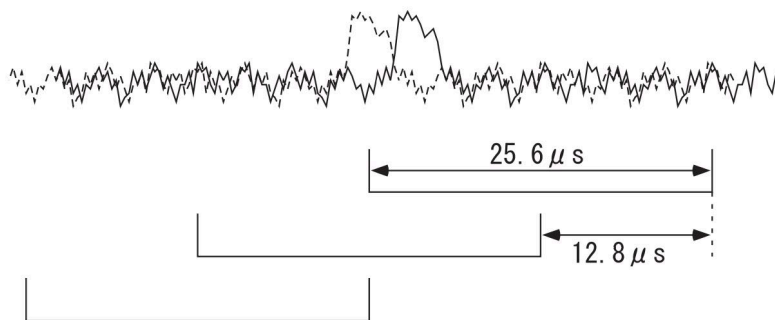


図 2.10: トリガー周期の模式図 [17]。 $12.8 \mu\text{s}$ ごとに $25.6 \mu\text{s}$ の幅でスキャンされていることが分かる。

2. Track Finder (TF)

各カメラにあり (計 12 個)、16 個の SDF モジュールから first-level トリガーを収集し、そのデータの中に空間的なトラックがあるのかを判断するモジュールである。空間的なトラックがあれば、second-level トリガーがかかり、次の CTD に渡される。図 2.11 に TF のブロック図を示す [16]。

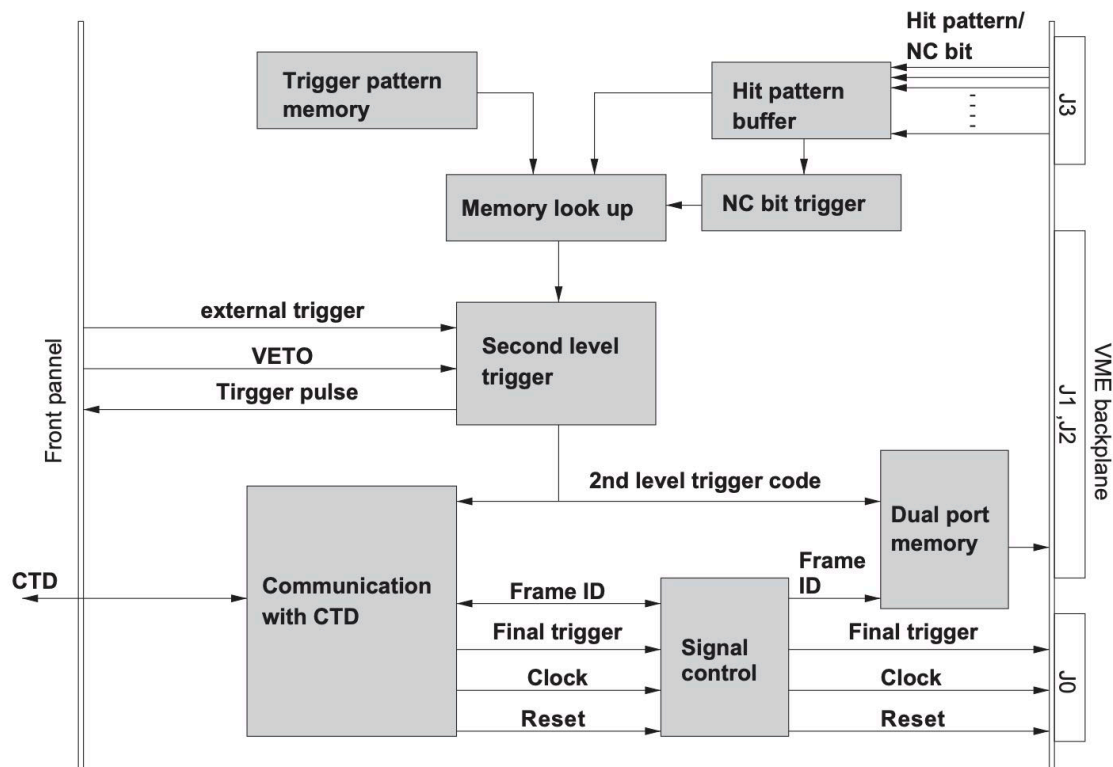


図 2.11: TF のブロック図 [16]

図 2.12 は空間的なトラックがあるかどうかを判断する際の模式図である [16]。TF では図 2.12 の左上の濃いグレーの部分のように 5×5 本の PMT をひとつのサブマトリックスとしてスキャンしている。スキャンは $12.8 \mu\text{s}$ ごとに $25.6 \mu\text{s}$ 分のデータに対して行われる。このスキャンでは、サブマトリックス内で隣接する 5 本の PMT がしきい値を超えているという "complete track" 条件を満たすものを探している。サブマトリックス内の 5×5 本の PMT のヒットパターンは、1 つの PMT につきしきい値を超えているか超えていないかの 2 通りあるので全部で 2^{25} パターンある。全パターンの中で、"complete track" 条件を満たすヒットパターンはルックアップテーブルとして、8 個のスタティック RAM (CY7C1041、 $256\text{K} \times 16$) にプログラムされており、このルックアップテーブルと一致しているのかをスキャンしている。処理時間はサブマトリックスごとに 25 ns かかり、ひとつのカメラ内で 144 パターンのサブマトリックスごとのとり方があるので、合計で $25 \text{ ns} \times 144 = 3.6 \mu\text{s}$ ほどである。ルックアップテーブルと一致すれば、second-level トリガーがかかる。また、2 台のカメラをまたぐシャワーは "partial tracks" として捉えることができる (図 2.13 [16])。2 台のカメラの境界にある 4×4 のサブマトリックスにおいて、隣接する 3 本の PMT がしきい値を超えている場合に "partial tracks" として認識される。同様に、ルックアップテーブルが作成されており、一致すれば second-level トリガーがかかる。加えて、SDF が著しく大きな信号を検出すると、"nonconditional (NC)" とよばれるトリガーがかかり、second-level トリガーがのかかったものと共に CTD に送られる。

3. Central Trigger Distributor (CTD)

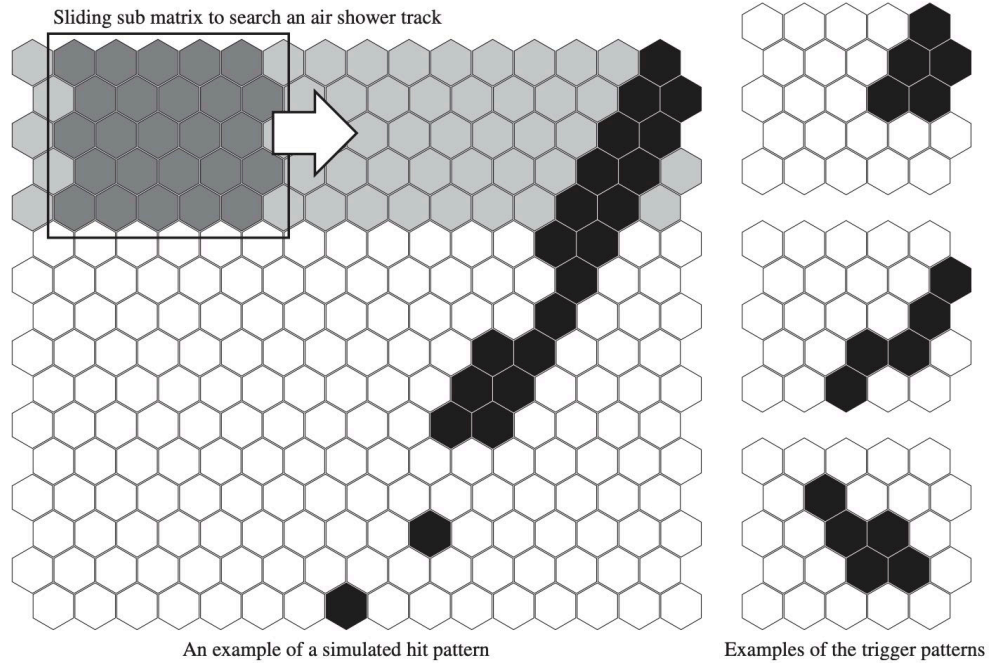


図 2.12: "Complete track" 条件のトラックパターン [16]

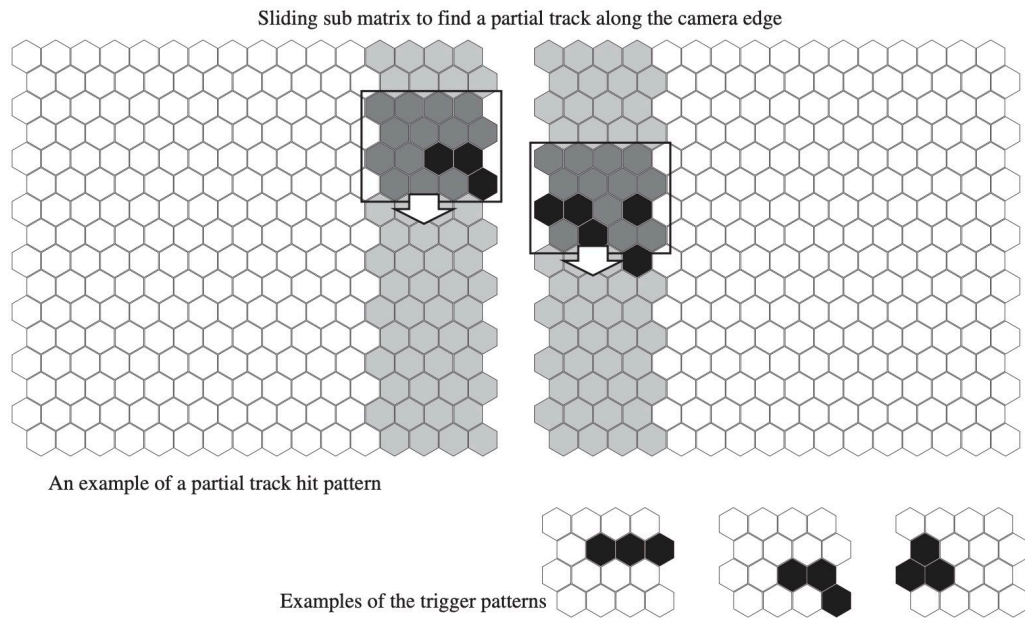


図 2.13: 2 台のカメラをまたぐ "partial tracks" のパターン [16]

各 FD ステーションに 1 つずつあり、主に 2 つの役割を持っている。1 つは final-level トリガーをかけるか判断するという役割、もう 1 つは SDF や TF との時間同期のためにシステムクロックを供給するという役割である。この役割を果たすために、CTD はクロックジェネレータと GPS モジュールを搭載している。図 2.14 に CTD のブロック図を示す [16]。

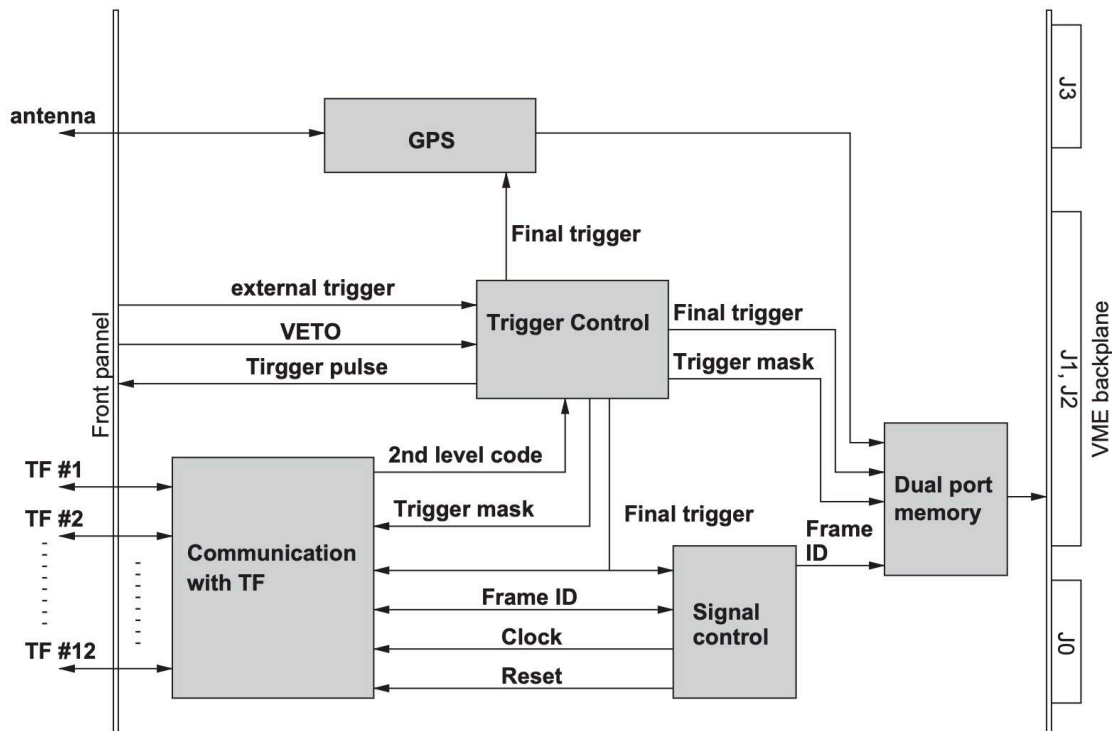


図 2.14: CTD のブロック図 [16]

GPS モジュール (Motorola M12 + Timing Oncore (P283T12T1X)) は PPS (Pulse Per Second) 信号を受信している。イベントの時刻は PPS 信号の立ち上がり時刻と各フレームの立ち上がり時刻との差から計算される。時間差は 40 MHz のシステムクロックでカウントされ、時刻の分解能は 25 ns、精度は 20 ns である。TF モジュールから "complete track" 条件による second-level トリガーを受信すると、FD ステーション内の全 PMT の波形データを記録するために final-level トリガーを全 TF に送信する。隣接する 2 つの TF から "partial track" 条件による second-level トリガーが受信されたり、"nonconditional (NC)" による second-level トリガーが受信された場合も final-level トリガーを生成する。

Final-level トリガーが生成されるとすぐに、CTD と TF は VME 制御 PC にデータ収集を開始するフラグを送信する。データ収集が開始されてから読み出しバッファヘデータが転送されるまでの時間は 12.8 μ s 未満である。トラックを見つける過程とモジュール間のトリガー情報の転送にかかる時間が支配的である。SDF と TF の読み出しバッファが満杯になると、CTD はトリガー生成を中断し、デッドタイムとして記録する。一度トリガーしてから、次にトリガーできるように準備するためには時間がかかり、その中央値は 30 ms である。これは、FD 観測時間全体の約 10% を占め、CTD モジュールに記録されている。

TF と CTD には検出器が設置されている場所の上空を通る飛行機に対するシステムも備わっている。飛行機が検出器の上空を通るときに出す可視光は空気シャワー観測においてノイズになるので除外しなければならない。飛行機が出す光の時間幅は大気蛍光よりも明らかに長いので、簡単に判別できる。TF が 8 フレーム連続でトリガーされた場合、TF は飛行機による信号だと判断し、情報を CTD に送る。CTD は、TF からの連続トリガーが停止するまで DAQ サイクルを停止し、この時間をデッドタイムとして記録する。

2.1.3 キャリブレーション

キャリブレーションとは、観測に使っている検出器が実際はどのような働きをしているのか、検出器のある環境はどのようなものなのかを確かめる作業である。観測で得られたデータを適切に扱うためには必須である。また、シミュレーションを行うときには実データのキャリブレーション情報を使って、より環境を再現している。

例えば、PMT のポインティング方向は、恒星光によってキャリブレーションされている。これは、HiRes の検出器恒星光紫外線フラックスの TD1 カタログ [50] を用いた研究に基づく。恒星の位置は正確に知られており、光はペダスタルの高さとして観測される。飛行機、雷、月の光も拾うのでノイズとなるが、恒星光のパルス幅ははるかに長いので分かりやすい。この方法によって、鏡の位置、ポインティング方向、曲率、カメラの回転、各光電管のポインティング方向が、カメラ面上で得られた星像に合わせて調整される。

他にも、PMT のゲイン測定や鏡の反射率などに対してもキャリブレーションを行っている。

2.1.4 観測

大気蛍光望遠鏡では、空気シャワー中の荷電粒子が大気中の分子と相互作用を起こして発生する大気蛍光を観測している。大気蛍光とは、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発生する光のことである。発生した大気蛍光は FD の鏡で反射し、各 PMT に入射する。どの PMT にどのような時間差で入射したのかがわかれば空気シャワーがどの方向でどのように発達したのかが分かる。LR ステーションと BRM ステーションは、仰角 3° から 33° 、方位角 108° をカバーするように設計されており、300 nm から 420 nm の波長領域に感度を持つ。大気蛍光は日中などの背景光が多いときには観測することができないため、月の出ていない夜のみ FD 観測は行われている。観測時間としては 10% ほどである。

図 2.15 は実際に LR ステーションと BRM ステーションで観測された空気シャワーのイベントディスプレイである [2]。色のついた円は実際に信号の入った PMT を表しており、円の大きさは信号の強度、円の色の変化は時間発展を表している。FD では空気シャワーの形をそのまま見ることができ、FD とシャワー軸を含む平面 (SDP) を

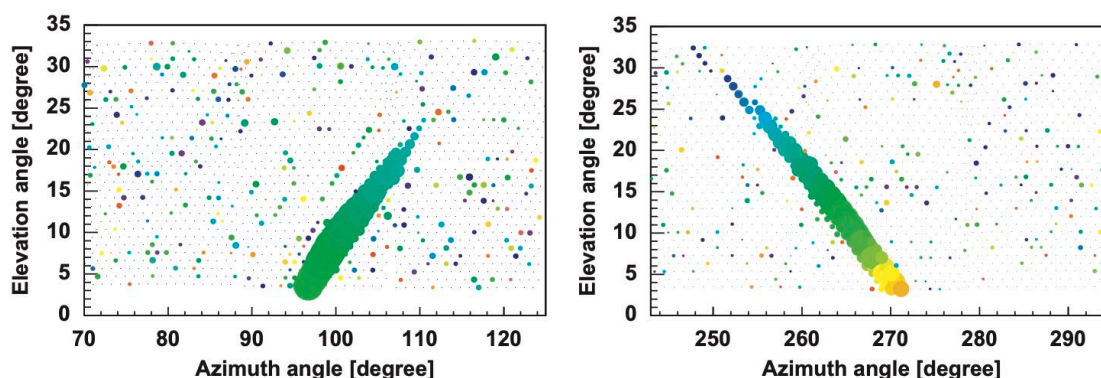


図 2.15: FD で観測された空気シャワーのイベントディスプレイ (左図:LR、右図:BRM) [2]

決定することができる。しかし、1つの FD ステーションのみでは SDP を決めることはできても、奥行き情報を決めることは難しくジオメトリの決定精度が悪くなってしまふ。解決方法の1つとして FD ステーションを2つ使う FD ステレオ解析がある。図 2.16 [2] に、FD ステレオ解析の様子を示している。2つの FD ステーションを使えば、それぞれの FD ステーションで決定した SDP の重なる部分を空気シャワー軸と決める事ができ、ジオメトリを正確に決定することができる。

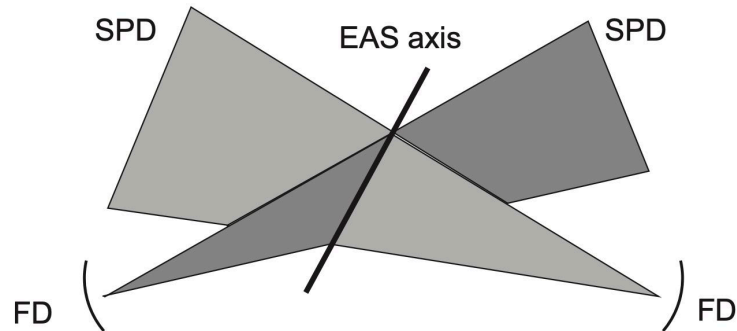


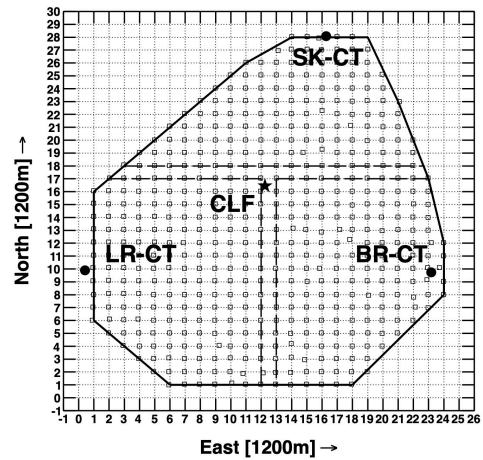
図 2.16: FD ステレオ解析の模式図。それぞれの FD ステーションで決めた SPD の重なる部分が空気シャワー軸と決定できる。

2.2 地表検出器 (SD)

TA 実験では、図 2.1 に示すように 507 台の地表検出器からなる SD アレイが設置されている。それぞれの SD は 1.2km 間隔で格子状に設置されており、約 700 km² の有効検出面積を持つ。TA サイトに設置されている SD は図 2.17a (by Y.Kawachi) のような見た目をしている。図 2.17b のように、SD アレイは 3 つのサブアレイに分割



(a) TA サイトに設置されている SD の写真



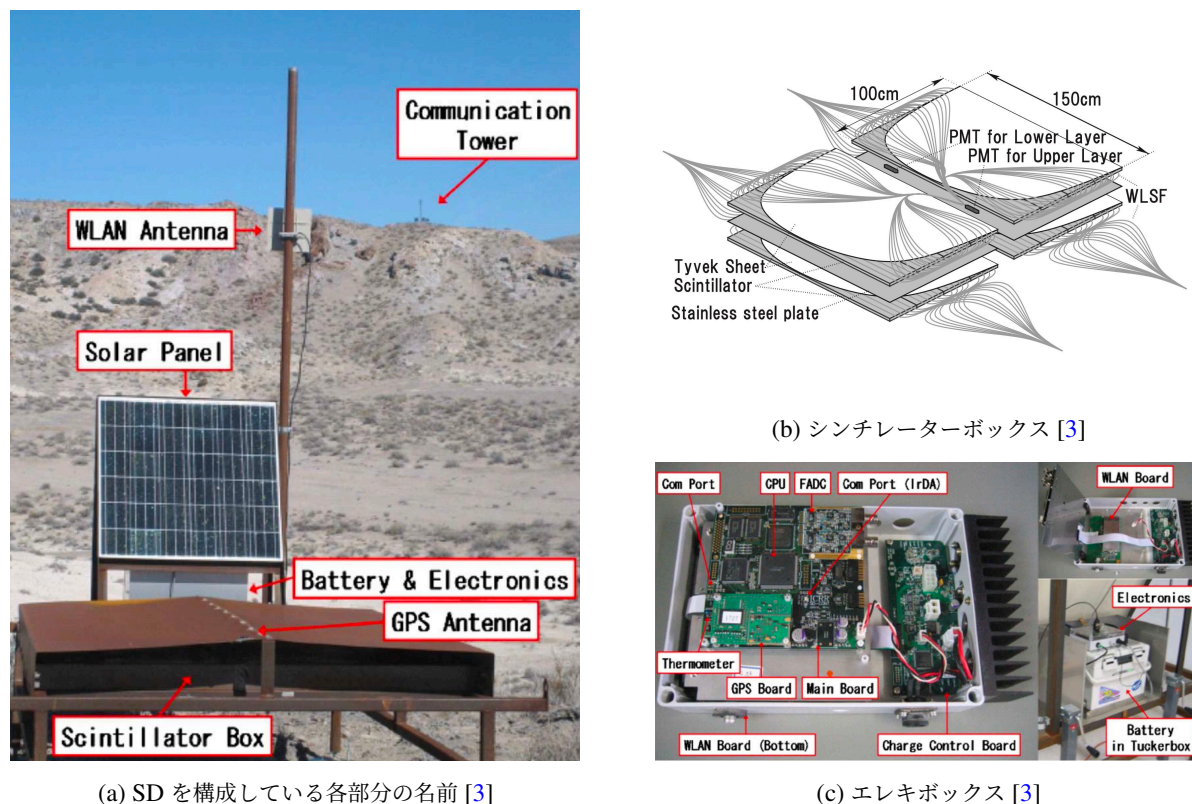
(b) SD アレイ [18]

図 2.17: (a) 実際に設置されている SD の写真。ソーラーパネルの下に電子機器やバッテリーが入ったエレキボックスが置かれており、シンチレーターと光電子増倍管が入ったシンチレーターボックスは鉄製の屋根の下に設置されている。(b) SD アレイ配置図。縦横のグリッド線は SD の間隔である 1200 m ごとにひかれている。それぞれの SD には ID (識別番号) が $ID = X \times 100 + Y$ で割り当てられている。全体を T 字で分けて 3 つのサブアレイを形成している。

されている [18]。それぞれのサブアレイごとに無線 LAN 通信を使って通信タワーに接続されている。それぞれのタワーは LRCT (Long Ridge Communication Tower)、BRCT (Black Rock mesa Communication Tower)、SKCT (Smelter Knoll Communication Tower) とよばれており、SD の台数は 189 台、170 台、148 台に分けられている。この節では、SD の構造と SD アレイを使ったデータ収集方法について述べる。

2.2.1 構造

SD は、図 2.18a に示すようにシンチレーターや光電子増倍管、ソーラーパネル、バッテリーなどで構成されている [3]。電子機器やバッテリーは厚さ 1.2 mm のステンレスの板で作られたエレキボックスの中に収納されており、



(a) SD を構成している各部分の名前 [3]

(b) シンチレーターボックス [3]

(c) エレキボックス [3]

図 2.18: (a) SD を構成している各部分の名前 (b) シンチレーターボックス内部構造 (C) エレキボックス内部構造

この箱はソーラーパネルの下に設置されている。シンチレーターと光電子増倍管は、2.3 m × 1.7 m × 10 cm のシンチレーターボックスの中に収納されており、その上部には大きな温度変化から検出器を守るために厚さ 1.2 mm の鉄製の屋根が取り付けられている。電力源として、日中は 1 m × 1 m のソーラーパネルで充電されたバッテリーから供給されており、消費電力は 10 W 以下である。

シンチレーターボックス

図 2.18b に示すように 2 層のプラスチックシンチレーターで構成されている [3]。各層は厚さ 1.2 cm (1.24 g/cm²)、面積 3 m² のプラスチックシンチレーターを使用しており、層の間には厚さ 1 mm のステンレス製の板が挿入されている。また、各層 2 つのあわせて 4 つのセグメントからなり、それぞれのセグメントの大きさは 1.5 m × 1.0 m である。各セグメントは 2 層のタイベックシート (Dupont 株式会社製、1073B) で包まれている。そして、1 つ 1 つのセグメントは 4 つのシンチレータースラブからできており、各スラブの大きさは 1.5 m × 0.25 m である。スラブの表面には長辺と平行に 2 cm 間隔で深さ 1.5 mm の溝があり、溝に沿って 104 本の全長 5 m の波長変換ファイバー (株式会社 Kuraray 製、Y-11) がポリエステル製のテープ (#850 silver 3M) で固定されている。ファイバーは上下層ごとに束ねられ上下層それぞれに 1 本ずつ設置されている PMT (Electron Tubes 社製、1073B) に接続している。

エレキボックス

図 2.18c は、ソーラーパネル (KYOCERA 社製、KC125TJ) の下に置かれているステンレス製のエレキボックスの内部の写真である [3]。

■FADC (Analog Devices 社製、AD9235RU-65) PMT からの信号をデジタル化するためのもの。量子化ビット数 12 bit、サンプリング周波数 50 MHz のものを使用している。

■CPU (Renesas Electronics 社製、SH4)

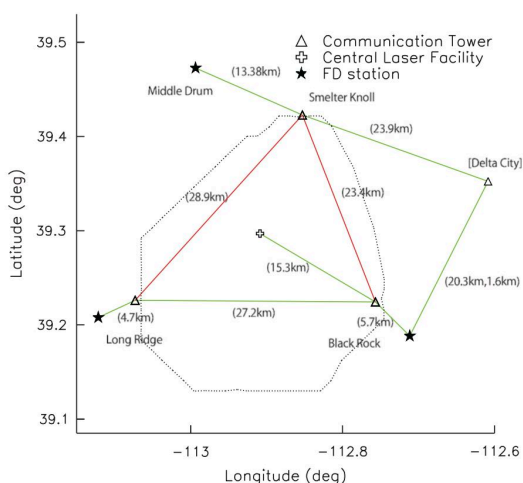
■無線 LAN モデム (ADTEC 社製、ADLINK540F) 各 SD からタワーにデータを送信するためのもの

■GPS モジュール (Motorola M12+ oncore module) PPS 信号を受信して時刻情報を得るためのもの。

■バッテリー (C&D technologies 社製、DCS)

2.2.2 データ収集システム

SD アレイは 3 つのサブアレイに分割され、それぞれのサブアレイごとに無線 LAN 通信を使って通信タワーに接続している。図 2.19a は TA 実験全体の施設とその位置関係を表している [3]。三角印は通信タワーであり、図 2.19b はデータ収集タワーのひとつである SKCT の写真を示している [3]。各通信タワーは SD からのトリガー



(a) TA 実験全体の施設配置図 [3]



(b) SKCT の写真 [3]

図 2.19: (a) TA 実験全体の施設配置図 (b) データ収集タワーのひとつである SKCT の写真。4 枚のソーラーパネルを備えた 3 つのスタンドがあり、スタンドにはバッテリー、データ収集用 PC、長距離リンク用のネットワーク機器が入っている。

情報を収集し、FD ステーションや CLF (Central Laser Facility) と通信を行う役割を持つ。収集されたデータは通信タワーに一時的に保存され、12 時間ごとにデルタに転送される。

まず、各 SD 内のシンチレーターに入った荷電粒子によってシンチレーション光が発生し、波長変換ファイバーを通して PMT に集光される。PMT の出力は、ボード上の 12bit の FADC でサンプリング周波数 50MHz でデジタル化される。FPGA では、FADC のペDESTAL 値を毎秒モニターし、トリガーのしきい値を保持する。ペDESTAL 値は 160 ns 内の FADC 値の平均値として定義される。信号の大きさの単位として MIP (Minimum Ionizing

Particles) というものを用いる。MIP は、FADC の値を粒子数相当のものに焼き直したものであり、1 MIP の定義は、300 MeV のミュオンがシンチレータ内に垂直に侵入したときの電離損失 $2.05 \text{ MeV}/(\text{g}/\text{cm}^2)$ で信号の値を割ったものである。

PMT 用の基盤 (Electrontube 社製、PS1806/12F-02) は、DAC を通して電力が供給され制御されている。電力は 125 W のソーラパネルで発電され、容量 100 Ah のバッテリーに充電される。バッテリーは CPU ボードと連動する charge control ボードによって制御され、各電子機器に必要な電力 ($\sim 5 \text{ W}$) を供給している。

時間の同期は、約 10 ns の分解能を持つ GPS モジュール (Motorola M12+ oncore module) が受信する PPS 信号によって行われる。PPS 信号をもとに、メインボード上の 50 MHz サブクロックによって 20 ns の精度でタイムスタンプが作られる。

トリガーシステムは 3 段階に分かれている。

Level-0 trigger

15 FADC counts (0.3 MIP 相当) 以上の信号が入ったとき、GPS モジュールによるタイムスタンプとともに波形が SD 内のメモリに一時記録される。保存される波形は $2.56 \mu\text{s}$ (FADC の 128 bin 分) 分で、トリガーレートは約 750 Hz である。

Level-1 trigger

150 FADC counts (3.0 MIP 相当) 以上の信号があれば、タグ付を付けて時刻を記録する。Level-1 トリガーは約 30 Hz で発生し、各 SD は 1 秒間に発生した Level-1 トリガーの時刻リストを毎秒 2.4 GHz の無線 LAN モデム (ADTEC 株式会社製、ADLINK540F) を通って通信タワーへ送信される。データ収集のボーレートは 1 Mbps で、これは 1 秒間に 1 000 000 bit のデータが転送できることを示す。

Level-2 trigger

Level-1 trigger のかかった SD の ID (識別ナンバー) と時刻が 1 s ごとに表形式でそれぞれの通信タワーに記録される。これらの表を連続的にスキャンし、 $8 \mu\text{s}$ 以内に、Level-1 trigger が作動した SD が隣接する 3 台に存在する場合、Level-2 trigger が作動する。トリガーレートは約 0.003 Hz である。隣接 3 台の位置関係には、図 2.20 のようなパターンがある [3]。Level-2 trigger がかかると、通信タワーにあるファームウェアは最初に隣接 3 台を満

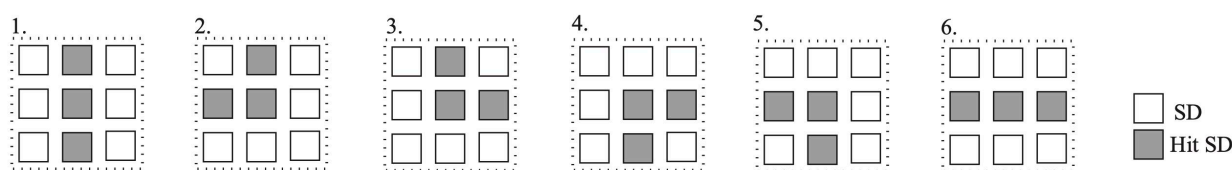


図 2.20: Level-2 trigger の隣接 3 台のパターン [3]

たしたものから Level-1 trigger のときのタイムスタンプを見て、イベントトリガー時刻を作成する。次に、通信タワーは各 SD に対しイベントトリガー時刻を中心として $\pm 32 \mu\text{s}$ 以内に Level-0 trigger のかかった波形を要求し、その波形の入った SD の位置 (ID) や波形のタイムスタンプを保存する。Level-2 trigger がかかったイベントの情報はタワー間でも共有されるので、サブアレイを 2 つもしくは 3 つまたぐイベントもカウントされる。

このようなトリガー条件でのトリガー効率は 10^{19} eV のエネルギーの宇宙線に対して 97% に達する (図 2.21 [3])。

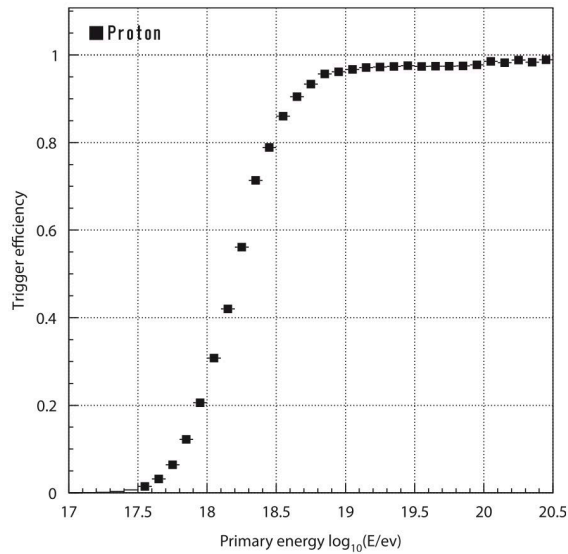


図 2.21: モンテカルロシミュレーションを用いて得られた陽子のエネルギーごとのトリガー効率を表す図 [3]

2.2.3 キャリブレーション

それぞれの SD は、10 分間データを取り続け、次の 10 分間で新しくデータを取っている間、各通信タワーに転送される。つまり、1 日あたり 144 回繰り返していることになる。キャリブレーションに使われる情報は、1-MIP ヒストグラムとペDESTALヒストグラムである。Level-0 trigger がなかったすべての波形データは FADC 12 bin (240 ns) にわたって積分され、1-MIP ヒストグラムとして保存される。ペDESTALヒストグラムの場合は、FADC 8 bin (SI160ns) ごとに積分され、約 6.25 MHz のレートでサンプリングされる。図 2.22 は 10 分間のモニタリングで得られた典型的な 1-MIP ヒストグラムとペDESTALヒストグラムの例を示している [18]。ペDESTALヒスト

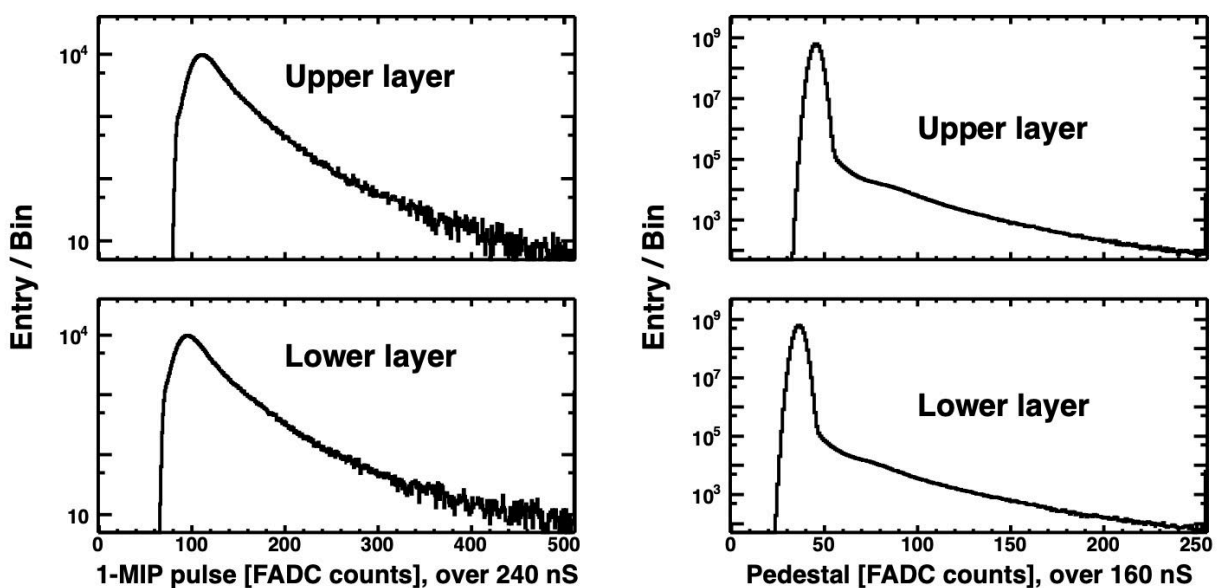


図 2.22: (左) 1-MIP ヒストグラムの例 (右) ペDESTALヒストグラムの例 [18]

グラムに見られる右側に小さく伸びている部分、ほとんどが大気粒子に起因するものあり、6.25 MHz よりもはるかに小さい割合 $750 \text{ Hz}/6.25 \text{ MHz} \sim 0.01\%$ で発生するため、影響は少ない。この2つのヒストグラムは、各SDのエネルギー損失 1 MeV あたりの FADC count のゲインを決定するために使われる。ゲインを決定する方法は、地表で粒子数密度分布をシミュレーションし、SDでの応答によって測定されたのと同じ 1-MIP ヒストグラムを生成するゲイン値を決定することである。図 2.23 はシミュレーションで得られた SD の上下層におけるエネルギー損失のヒストグラムである [18]。このヒストグラムは十分な統計量で作成されている。図 2.23 のヒストグラムから、上

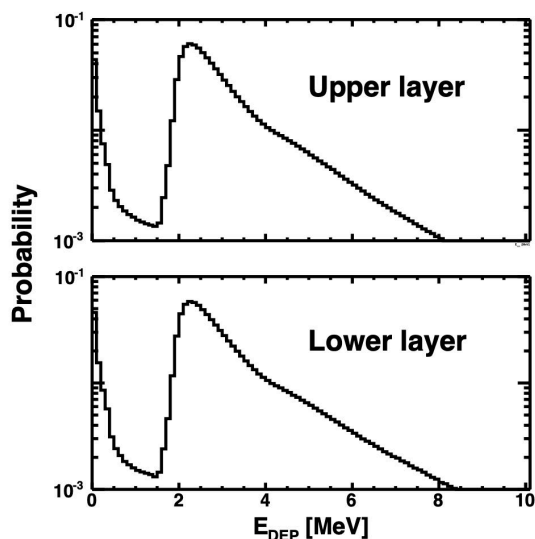


図 2.23: CORSIKA と GEANT4 を用いた SD シミュレーションによる大気粒子によるエネルギー損失を表すヒストグラム [18]。上下層におけるエネルギー損失を正規化している。

下層でエネルギー損失をサンプリングする。これをシンチレーター内のどこでエネルギー損失が起こるかによるゆらぎを考慮するために、ガウス分布で 7% スメアリングする。これより、エネルギー損失によって生じる光電子の数分かる。典型的な SD の場合、ポアソン分布の平均値として 1 MeV あたり 10 個の光電子である。図 2.24 に典型的な SD の 1-MIP ヒストグラムのフィットを示す [18]。

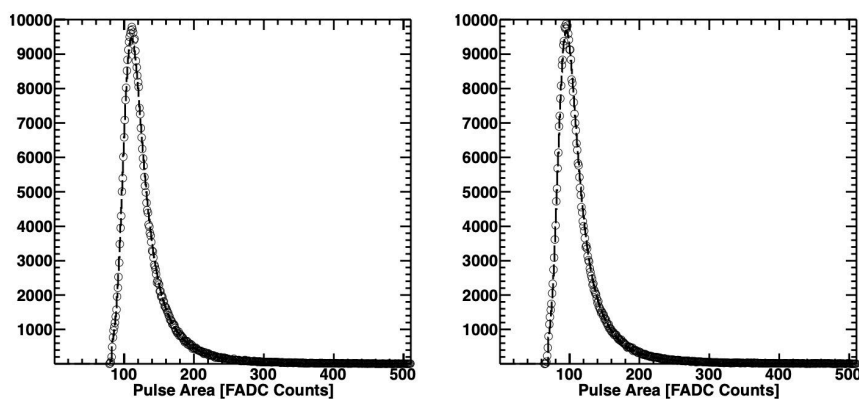


図 2.24: FADC カウント/MeV (および FADC カウント/VEM) で検出器のゲインを決定するための 1-MIP ヒストグラムのフィッティングを示す [18]。左図は上層、右図は下層。

2.2.4 観測

地表粒子検出器では、空気シャワー粒子が検出器内のシンチレーターと相互作用した際に生じるシンチレーション光を観測している。地表に広がる複数の検出器を使って、時間差や信号の大きさから空気シャワー粒子の分布を見て、空気シャワーを作り出した宇宙線の特徴を決めている。図 2.25a は、BRM アレイで実際に観測された空気シャワーイベントの一例である [3]。赤い円は BRM サブアレイ内の SD を表しており、円の大きさは信号の大きさを、色の変化は時間発展を表している。図 2.25b は、図 2.25a の各 SD で記録された波形信号を示している [3]。

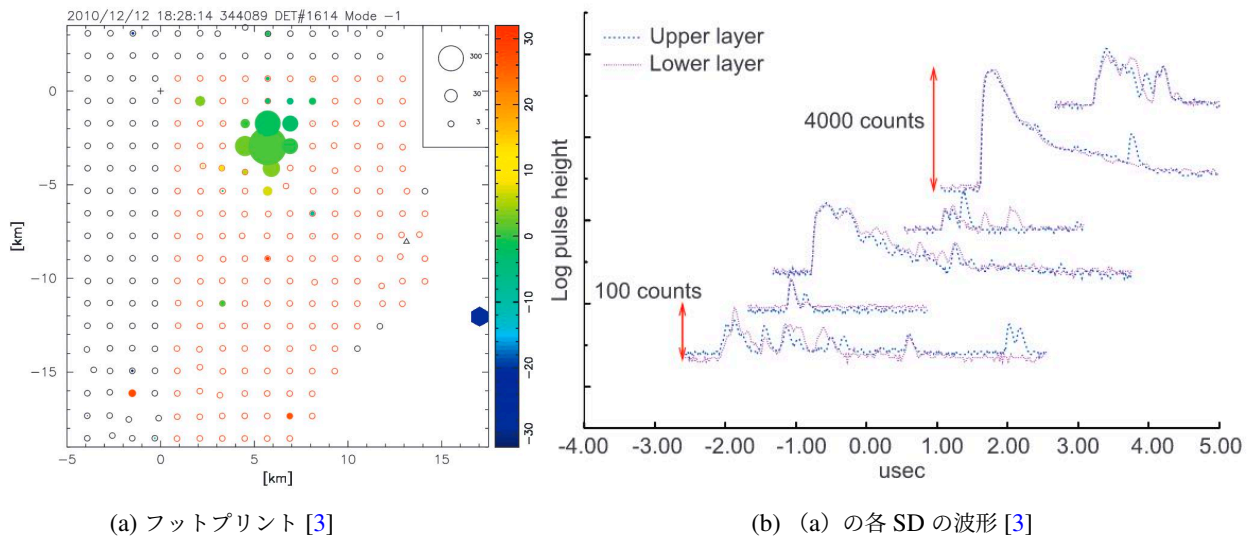


図 2.25: BRM サブアレイでトリガーされた空気シャワーイベントの一例。(a) 赤い円は BRM アレイ内の SD を表しており、トリガーした SD には信号の大きさや時間発展が分かるように円が描かれている。円の半径は 1MIP に比例し、色の変化は時間発展を表している。(b) (a) の各 SD の波形

第3章

モンテカルロシミュレーション

TA 実験で捉えた空気シャワーを解析するためには、空気シャワーの発達や検出器内で起こる反応を正確に考慮する必要がある。これらを考慮した解析を行うため、本研究では COsmic Ray Simulations for KAscade (CORSIKA) [51] を用いて空気シャワーの発達のシミュレーションを行った。その後、SD と FD それぞれに対して検出器の応答シミュレーションを行った。本章では、CORSIKA、SD シミュレーション、FD シミュレーションについて述べる。

3.1 CORSIKA

宇宙線が作り出す空気シャワーについて解析するために、CORSIKA を使用した。CORSIKA では、宇宙線核種やエネルギー、到来方向を指定して空気シャワーのシミュレーションを行うことができる。シミュレーションでは、空気シャワー粒子と大気中の原子核との相互作用を計算することができるが、2 次粒子の数が多く、 10^{17} eV 以上の超高エネルギー宇宙線が作り出す空気シャワーをシミュレーションするには膨大な量のデータを扱う必要があり、計算時間も膨大になる。本章では、CORSIKA シミュレーションでデータ量を減らすために行われている工夫について詳しく述べる。

3.1.1 シニング

超高エネルギー宇宙線が起こす空気シャワーは多数の粒子群となる。粒子の個数はエネルギーの 9 桁下個ほどである。例えば、 10^{17} eV の宇宙線が作り出す空気シャワー中の粒子数は最大 10^8 個にもなる。すべての粒子についてシミュレーションをすると、 10^{17} eV では数日、 10^{18} eV では数ヶ月かかる。これらのことから 10^{20} eV のエネルギーを持つ何千ものシャワーをシミュレーションすることは、現実的に不可能であることが分かる。

データ量および計算時間を削減するために、シニング [52–54] という手法を用いる。これは空気シャワー粒子を間引き、代表粒子に間引いた粒子数に相当する重みを与えて追跡するという手法である。シャワー軸付近は粒子の密度が高く、よりシニングによる効果が期待できる。

まず、 E_0 のエネルギーをもつ宇宙線が起こした空気シャワーを考える。シニングでは以下の条件に照らし合わせて、各粒子を間引くかどうか決定する。生き残った粒子には間引かれた粒子の粒子数に相当する重みを与えられる。

■ $\sum_j E_j < \epsilon E_0$ のとき 確率 $p_i = E_i / \sum_j E_j$ でシミュレーションが続行される。

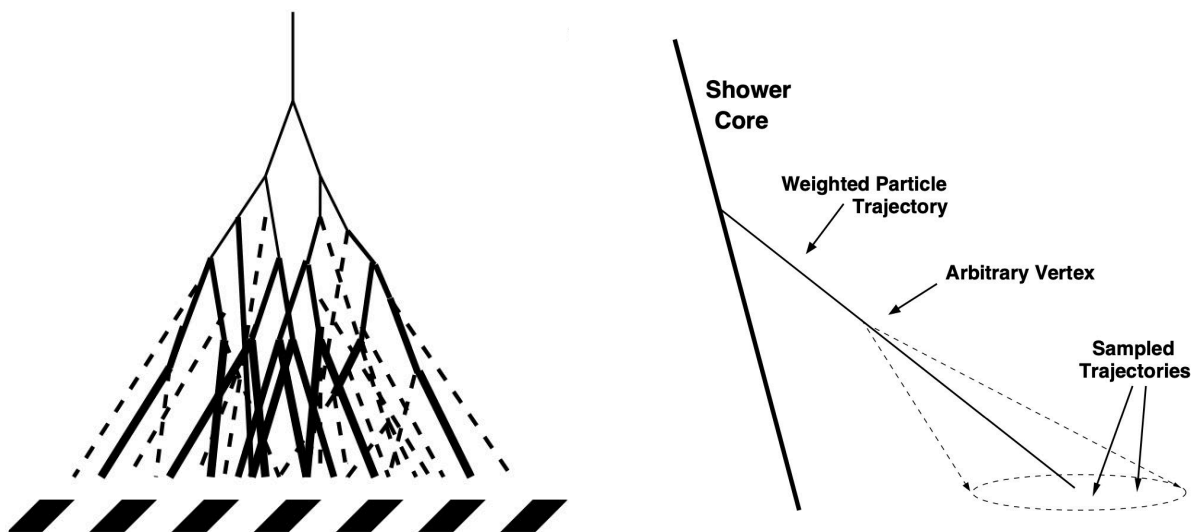
■ $\sum_j E_j \geq \epsilon E_0$ のとき エネルギー $E_i < E_0$ の二次粒子は確率 $p_i = E_i / \min(\epsilon E_0, \sum_{j, E_j < \epsilon E_0} E_j)$ で続行される。
($E_i \geq E_0$ の粒子は全てシミュレーションが続行される。)

E_j は空気シャワー中の二次粒子のエネルギー、 ϵ はシニングレベルパラメータである。 ϵ はシミュレーションを行う際に設定することができ、元の宇宙線のエネルギーに対する空気シャワー粒子のエネルギーの割合を表している。どちらの場合も、選ばれた二次粒子には $w_i = w/p_i$ の重みが割り当てられる。ここで、 w は相互作用を起こす前の粒子の重みであり、最終的には 1 になるように正規化される。この設定により、エネルギーが ϵE_0 に比べて小さく、シミュレーションでは捨てられてしまう粒子には同様の粒子が多く捨てられていることを考慮して、重みが大きく与えられることが分かる。粒子のエネルギーと、その粒子が周囲の物質に損失するエネルギーを重みを考慮して足し合わせると、宇宙線のエネルギーに等しくなる。シニングにより追跡する粒子数は 10^3 から 10^6 分の 1 ほどになる。

シニングによって計算量は大幅に減少するが、間引いたことによる影響を考えなければならない。FD が観測しているのは、シャワー軸付近の高密度部分である。高密度であれば、代表粒子に重みを持たせても多数の粒子があるので分布や広がりへの影響はない。FD によるエネルギー決定の統計的な不確かさへの主な寄与は、FD が検出する光子のフラックスに関連するポアソン揺らぎであり、シャワーコアでの粒子数の揺らぎによるものではないので、FD への影響はあまりない。

しかし、SD への影響は大きい。SD は地表での粒子数分布を観測している。シャワー軸から離れたところでは低密度のため、代表粒子を決めてしまうと分布そのものが大きく変わってしまうため影響がある。

図 3.1a [18] はシニングの過程を表している。点線は、シニングによって間引かれた粒子の軌跡である。下の黒い平行四辺形は SD を表しており、シニングによって地表での粒子数密度が実際のシャワーとは大きく違っていることが分かる。シニングによって粒子の地表でのばらつきをまとめてしまったことによる影響をなくすために粒子数



(a) シニングの過程の模式図 [18]

(b) デシニングのガウシアンで広がる円錐のイメージ [55]

図 3.1: (a) シニング (b) デシニング

が 1 ずつになるようにバラつかせるデシニングという操作が行われる。次節では、デシニングについて述べる。

3.1.2 デシニング

シニング後に、地表での粒子の情報を戻す方法としてデシニングがある [55, 56]。シニング後の CORSIKA シャワーは、地表レベルでの粒子の情報（重み、種類、エネルギー、位置、角度、到着時刻）が記録されている。デシニングではこのリストに粒子の情報を追加し、その後すべての粒子の重みは 1 に設定される。まず、重み w の二次

粒子の軌道上を中心としたガウシアンで広がる円錐を使って 2 次元ガウス分布で粒子の重みを決め、軌道を決める (図 3.1b [55])。次に、軌道を決めた粒子にエネルギーと時刻情報を与えて、記録する。この 2 つの作業を $w - 1$ 回繰り返す。 w が整数ではないとき、 w の小数部分に基づいてランダムに粒子をひとつ加える。時刻情報について、粒子の速度は光速で考えられ、宇宙線がはじめに相互作用を起こしたときにできた粒子よりも早く到達してはいけないという制限がある。

図 3.2 [18] は、デシニングによる結果への影響を比較している。図 3.2 (左) より、平均値はデシニングをしなく

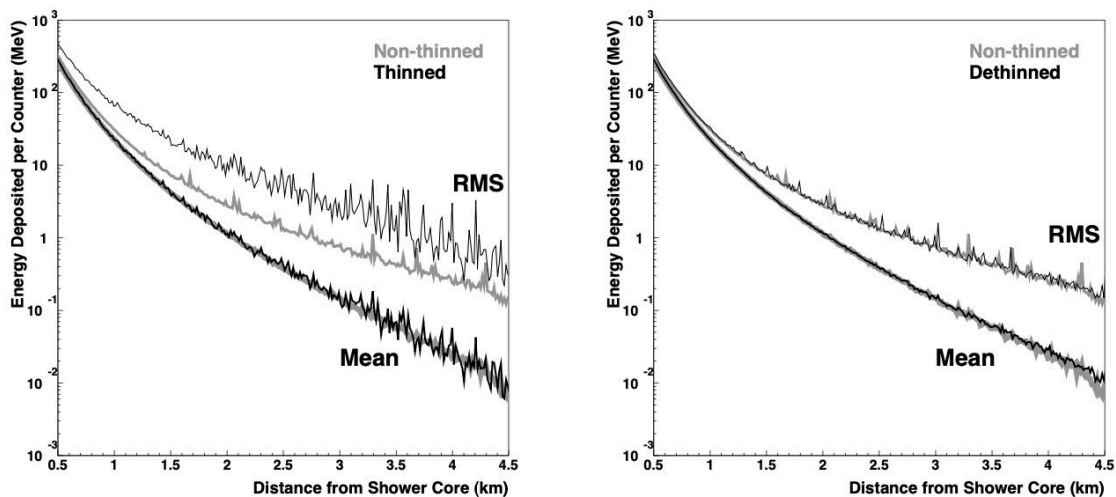


図 3.2: 天頂角 45° 、エネルギー 10^{19} eV を持つ陽子が作る空気シャワーを SD でとらえた粒子数密度分布である [18]。粒子数の平均値と平均二乗誤差を比較している。(左) シニングをしていないシャワーと $\epsilon = 10^{-6}$ でシニングしたシャワーの比較 (右) シニングをしていないシャワーと $\epsilon = 10^{-6}$ でシニングし、デシニングをしたシャワーの比較

ても再現できているが、RMS (Root Mean Square) は再現できていない。しかし、図 3.2 (右) より、デシニングを行うと RMS が再現できる。

本研究では、シニングレベルパラメータは $\epsilon = 10^{-6}$ に設定している。これは計算量を減らしつつ、地表での粒子の情報を戻せる最適な値である。

3.2 SD シミュレーション

CORSIKA で空気シャワーのシミュレーションを行った後は、実際に観測している検出器での応答をシミュレーションしなければならない。SD の応答は、GEometry ANd Tracking (GEANT4) [57, 58] を用いてシミュレーションされており、SD シミュレーションと呼んでいる。SD シミュレーションは、SD 内の空気シャワー粒子のエネルギー損失を決定している。本研究では、GEANT4 の標準パッケージを元に TA の SD のために個別に開発されたプログラムを使用している。

SD は $2\text{ m} \times 1.5\text{ m} \times 1.2\text{ cm}$ のプラスチックシンチレーターが 2 層あり、その中で粒子がシンチレーション光を発生させ、エネルギー損失を起こしている。このエネルギー損失を正確に早くシミュレーションしなければならない。この目的のために、"eloss_sdgeant" というパッケージが開発された。このライブラリでは、1 GHz の CPU コア 1 つで、約 150 MB のランダムアクセスメモリを使用しながら、1 秒間に約 10^5 個の粒子のエネルギー損失を、上下層のシンチレーターでシミュレートすることができる。この中には、CORSIKA の粒子 ID と運動量を引数に

取り、SDの上下層それぞれでのエネルギー損失を返す関数が入っている。

図3.3 [19]はGEANT4シミュレーションのために作られたSDの構造モデルを示している。空気シャワー中の γ , e^\pm , μ^\pm , p , n , π^\pm のSD内での応答をシミュレーションする。シンチレータやステンレス製の箱、屋根、バッテリー、ソーラーパネル、フレームなどが全て考慮されている。

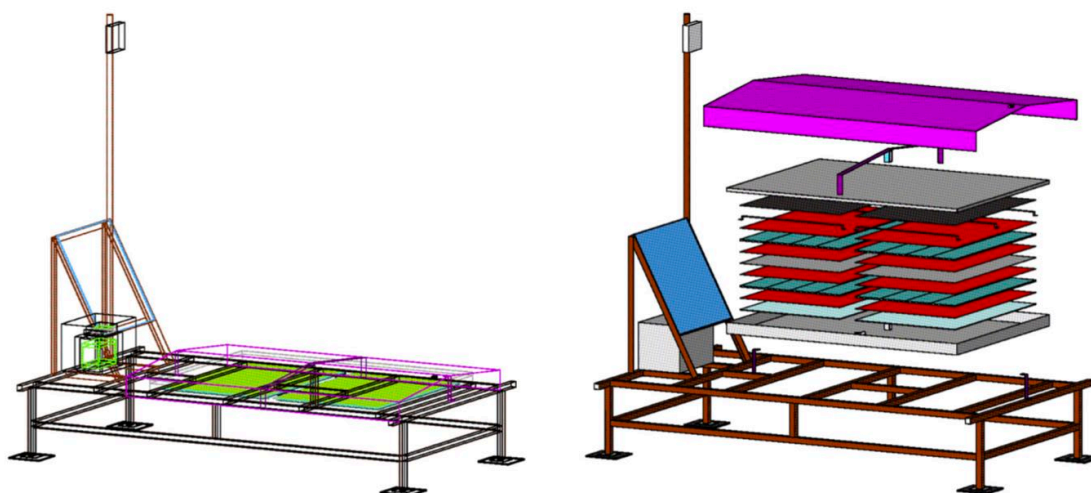


図3.3: GEANT4シミュレーションのために作られたSDの構造モデル。左図ではシンチレーションボックス内が見やすいように上方にずらしている [19]。

この構造モデルを、図3.4 [19]のように6m×6mの正方形の中にセットする。"eloss_sdgeant"には、粒子の種

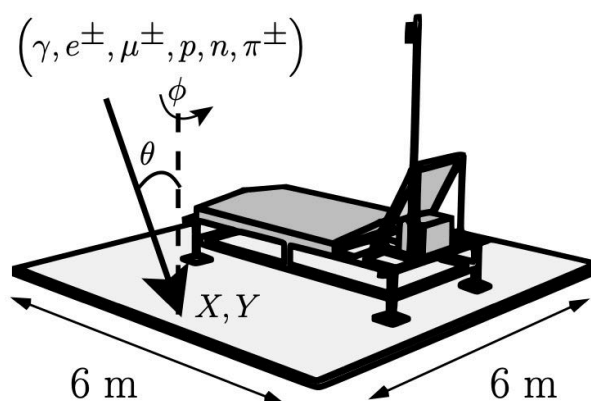


図3.4: GEANT4シミュレーションのために作られたSDのセットアップ図 [19]。矢印はシミュレーションされた粒子の到来方向を表す。

類、エネルギー、天頂角ごとの上下層それぞれでのエネルギー損失を表す2次元ヒストグラムから構成されており、これらは次の方法で収集された。

まず、6m×6mの正方形内の中からランダムに点 (X, Y) 、方位角 ϕ を選び粒子を降らせる方法を選ぶ。粒子が、検出器ユニットとそれを取り囲む物質の内部で起こりうるすべての相互作用を計算し、その結果生じる上部および下部シンチレータ内部のエネルギー損失を計算する。このステップを 1.2×10^6 回繰り返す。粒子がエッジ効

果（シンチレーター以外の検出器のフレームなどで起こす相互作用）や後方散乱（粒子が地面と衝突し起こる）を含めるためにシンチレーターの面積（ $1.5\text{ m} \times 2\text{ m}$ ）の12倍である $6\text{ m} \times 6\text{ m}$ の正方形で設定されている。

図 3.5 [18] は、2種類の天頂角 0° と 60° でシミュレーションした 1 GeV の μ の例である。 1 GeV の μ に対し

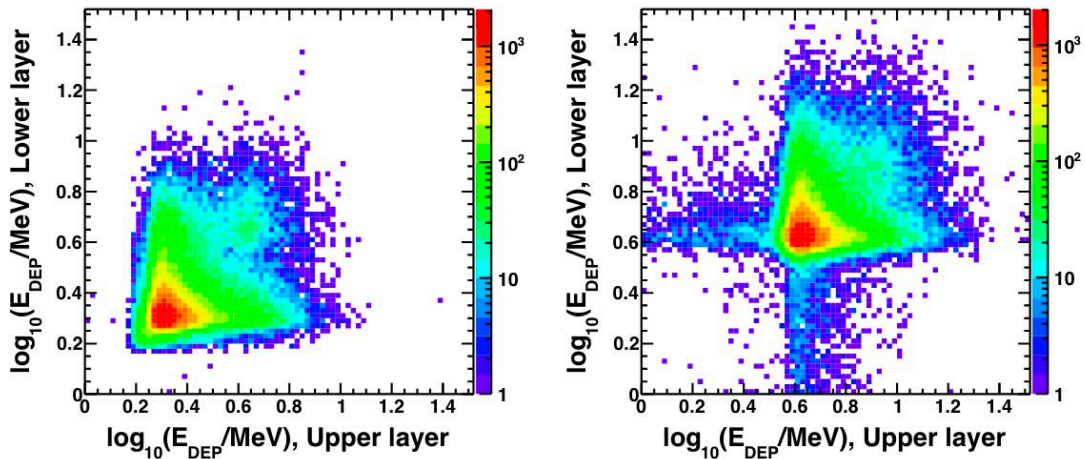


図 3.5: TA の SD のシミュレーションに使用するエネルギー損失のヒストグラムの一例 [18]。x 軸は上層でのエネルギー損失、y 軸では下層でのエネルギー損失を表す。(左) 1 GeV 、 $\theta = 0^\circ$ の μ^+ (右) 1 GeV 、 $\theta = 60^\circ$ の μ^+

てエッジ効果や後方散乱による影響は少ない。 μ の最小電離エネルギーは 300 MeV から約 400 MeV の範囲にあり、エネルギー損失は粒子のエネルギーに対して対数的に増加する。左右どちらの図でも、大きなピーク（最も可能性の高いエネルギー損失量）が存在する。垂直に入射した場合 ($\theta = 0^\circ$) では (図 3.5 左)、最も可能性の高いエネルギー損失量は両層とも約 2 MeV ($\log_{10} 2 \sim 0.3$) である。これは、2 の 1 MIP を定義するのに使用された。傾いて入射した場合 ($\theta = 60^\circ$) では (図 3.5 右)、最も可能性の高いエネルギー損失量は両層とも約 4 MeV ($\log_{10} 4 \sim 0.6$) である。図 3.5 右では、片方の層では 4 MeV に近いが、もう片方の層では様々な値の可能性がある。その理由としては幾何学的なものが考えられる。傾いて入射した粒子は片方の層を通過するが、もう片方は通過しないもしくは部分的に通過するというような場合である。

図 3.6 [18] は、2種類の天頂角 0° と 60° でシミュレーションした 1 GeV の γ の例である。垂直に入射した場合 ($\theta = 0^\circ$) では (図 3.6 左)、最も可能性の高いエネルギー損失量は両層とも $\sim 4\text{ MeV}$ ($\log_{10} 4 \sim 0.6$) で、同じ状況の μ と比べて 2 倍である。この理由は γ が $\gamma \rightarrow e^+ + e^-$ のように電子対生成を起こし、2 倍の粒子数になるからである。また、TA の SD のシンチレーターでは、垂直方向に進んだ $\sim 500\text{ MeV}$ の e^+ と e^- が $\sim 2\text{ MeV}$ になる可能性が最も高い。図 3.6 左では、下層では $\sim 4\text{ MeV}$ がほとんどであるのに対し、上層では幅広い分布になっている。これは上層のシンチレーターで電子対生成が起こり、その後 e^+ と e^- が下層のシンチレータに入る場合に対応している。どちらの図も 1 MeV 以下に分布の広がりを持つ。最小電離エネルギーの μ よりも相互作用長がかなり短いので、エッジ効果や後方散乱を考えることが重要であることを示している。これは、傾いて入射した場合 ($\theta = 60^\circ$) で (図 3.6 右)、最も顕著に表れている。

この 4 つのヒストグラムは数ある中の一例である。 γ 、 e^\pm 、 μ^\pm 、 p 、 n 、 π^\pm の粒子それぞれに対して、各エネルギーと各天頂角のものが作られた。 γ については、 $\log_{10}(E_{\text{MIN}}/\text{eV}) = 4.7 \sim \log_{10}(E_{\text{MAX}}/\text{eV}) = 11.0$ の $\log_{10} E = 0.1$ 刻みの 63 種類が作られた。 e^\pm 、 μ^\pm 、 p 、 n については、 $\log_{10}(E_{\text{MIN}}/\text{eV}) = 6.0 \sim \log_{10}(E_{\text{MAX}}/\text{eV}) = 11.0$ の $\log_{10} E = 0.1$ 刻みの 50 種類が作られた。 π^\pm については、 $\log_{10}(E_{\text{MIN}}/\text{eV}) = 6.0 \sim \log_{10}(E_{\text{MAX}}/\text{eV}) = 10.9$ の $\log_{10} E = 0.1$ 刻みの 49 種類が作られた。また、全ての粒子、天頂角は $\sec \theta = 1, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0$ で作られた。このようなエネルギーと天頂角は空気シャワーの性質を考えられて決定された。例えば、 γ だけ

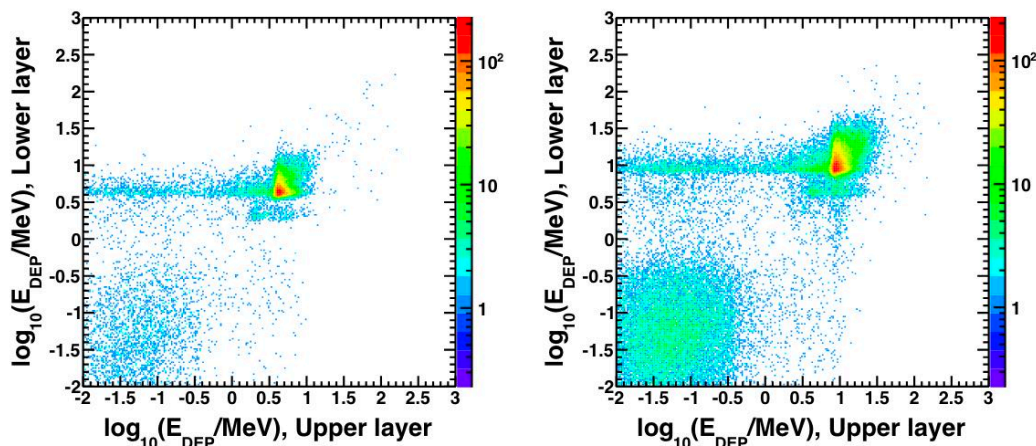


図 3.6: TA の SD のシミュレーションに使用するエネルギー損失のヒストグラムの一例 [18]。x 軸は上層でのエネルギー損失、y 軸では下層でのエネルギー損失を表す。(左) 1 GeV、 $\theta = 0^\circ$ の γ (右) 1 GeV、 $\theta = 60^\circ$ の γ

$\log_{10}(E_{\text{MIN}}/\text{eV})$ が他の粒子と比べて小さい。これは低エネルギーの γ が他の粒子よりも約 10 倍と多く無視できないからである ($E < 1 \text{ MeV}$ の γ で $\sim 5\%$)。また $\log_{10} E/\text{eV} > 11$ や $\sec \theta > 4.0$ の粒子は大気中で相互作用を起こさずに地表に到達することはめったにない。

このライブラリが SD シミュレーションで使用されるとき、粒子の種類とエネルギー、天頂角を引数として取得し、ライブラリ内で 2 次元ヒストグラムが利用可能な最も近いエネルギーと天頂角の値を見つける。次に、上下のシンチレータのエネルギー損失を、エネルギー損失が全くない場合と一方の層のみにエネルギー損失がある場合を含めて、これらの 2 次元ヒストグラムからサンプリングする。

ライブラリには粒子のエネルギーと天頂角の制限がある。まれに、 $\log_{10}(E/[\text{eV}]) > 11$ または $\sec(\theta) > 4$ の粒子が地上に到達する場合、 $\log_{10}(E/[\text{eV}]) = 11$ または $\sec(\theta) = 4$ の境界の結果をライブラリから外挿することにより、正しいエネルギー損失が得られる。図 3.7 [18] は、SD シミュレーションによって生成されたエネルギー損失分布の比較を示している。粒子は γ (図 3.7 (左)) と μ^+ (図 3.7 (右)) である。それぞれ 5 GeV ($\log_{10}(E/[\text{eV}]) \sim 9.7$) と $\theta = 40^\circ$ ($\sec(\theta) \sim 1.3$) について行われた。エネルギーと角度は、ライブラリの中のいずれとも一致しないように選択されたため、補完する必要がある。この場合、ライブラリの中で利用可能な最も近い値は、エネルギーが $10^{19.65} \text{ eV}$ と $10^{19.75} \text{ eV}$ 、 $\sec(\theta)$ が 1.0 と 1.5 である。ライブラリを用いても、再現できることが分かる。

シンチレータ内のエネルギー損失を決定した後は、検出器によって読み出された信号を決定することである。この段階では、時間の関数としてのエネルギー損失が、シンチレータの上下層で利用することができる。

このような手順で作成したヒストグラムをルックアップテーブルとして、CORSIKA シャワーの SD 内での応答をシミュレーションする。SD アレイの広がる地表を $6 \text{ m} \times 6 \text{ m}$ のタイルに分割し、各タイルについてエネルギー損失を計算する。次に、コア位置をランダムに選び、それに対応するタイルを選択する。TA の SD は 50 MHz の FADC を使用しているため、信号は 20 ns でスライスされている。

3.3 FD シミュレーション

FD の検出器応答による空気シャワーシミュレーションのために、JAVA で書かれたシミュレーションプログラムを使用した。CORSIKA の出力である long ファイルには、空気シャワー中の粒子種ごとに垂直の大気

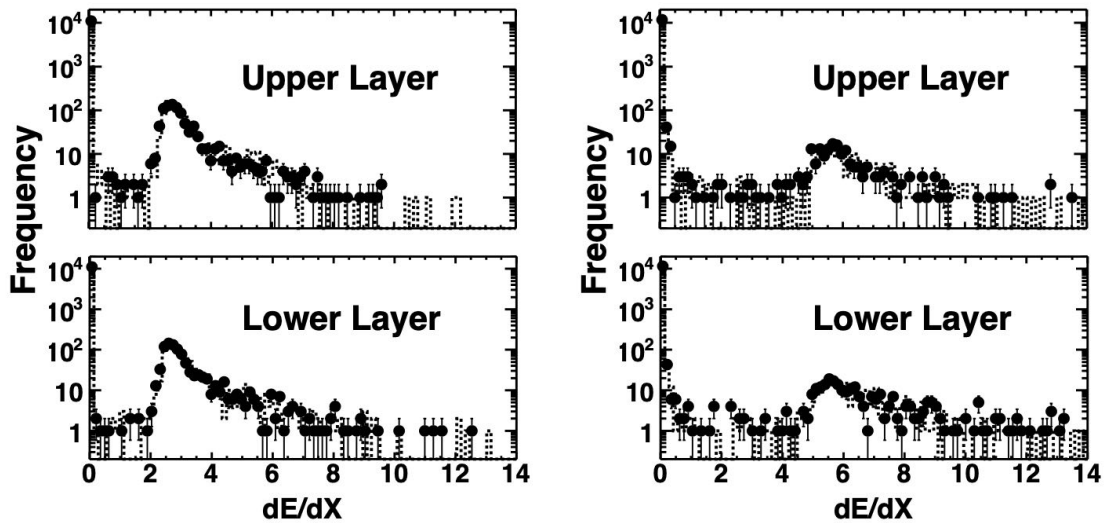


図 3.7: ライブラリを用いたもの（黒点）と厳密にシミュレーションしたもの（点線）によって生成されたシンチレータにおけるエネルギー損失 dE/dX 分布の比較 [18]。(左) $5\text{ GeV}, \theta = 40^\circ$ の γ (右) $5\text{ GeV}, \theta = 40^\circ$ の μ^+

深さ 1 g/cm^2 間隔の粒子数とエネルギー損失がかかっている。これを用いて、空気シャワーの縦方向発達についてシミュレーションし、大気蛍光とチェレンコフ放射の強度を推定している。大気蛍光の強度を推定するために、垣本らによる実験で測定された結果 [59] と Fluorescence in Air from SHowers (FLASH) 実験 [60] で報告された空気中の蛍光光子のスペクトルを採用した。また、気温や気圧などの大気に関するパラメータについては、the Global Data Assimilation System (GDAS) を使用した。GDAS のデータベースは、米国の National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) によって運営されており、気圧 $20 \sim 1.000\text{ hPa}$ の大気の情報をも 3 時間ごとに提供している。その情報には、特定の気圧における高度、気温、露点が含まれる。このデータベースは、地球の各経度と緯度を 1 度の格子で表現している合計 $360 \times 180 = 65,160$ の点を持っている。空気シャワーシミュレーションで使用する大気パラメータは、TA 実験地点に最も近い ($39\text{N}, 113\text{W}$) 地点の GDAS データセットを採用している。エアロゾルの測定は、LIDAR (Light Detection And Ranging) システムによって行われた。平均的な垂直エアロゾル光学深度 (Vertical Aerosol Optical Depth: VAOD) 値は 0.04 と推定され、減衰長は 25 km である。空気シャワーシミュレーションと再構成も考慮されている。

FD シミュレーションは基本的にレイトレーシングであり、ミラー上で反射する場所や PMT のどこにどの角度で入射するかなどの光子の軌跡が計算される。図 3.8 [20] は FD シミュレーションのために作られた FD の構造モデルである。鏡、透過フィルター、カメラフレーム、カメラボックス、シャッターフレームなどの FD の細かな構造が考慮されている。光子が FD 内に侵入すると内部の構造物とどのように反応するのかをシミュレーションしている。鏡での反射角は $\sigma = 0.19^\circ$ のレイリー分布でランダムに変動させる。焦点面におけるスポットサイズの半径は 3.0 cm 以下である (図 3.9 [20])。スポットは円ではないため、この 3.0 cm というのは大まかに計算されている。

図 3.10 [20] に、PMT のポインティング方向について、恒星光キャリブレーションで得られたポインティング方向とレイトレーシング法で得られたポインティング方向の比較を示す。恒星光キャリブレーションにより、 0.1 度以下の精度でジオメトリが調整されていることがわかる。

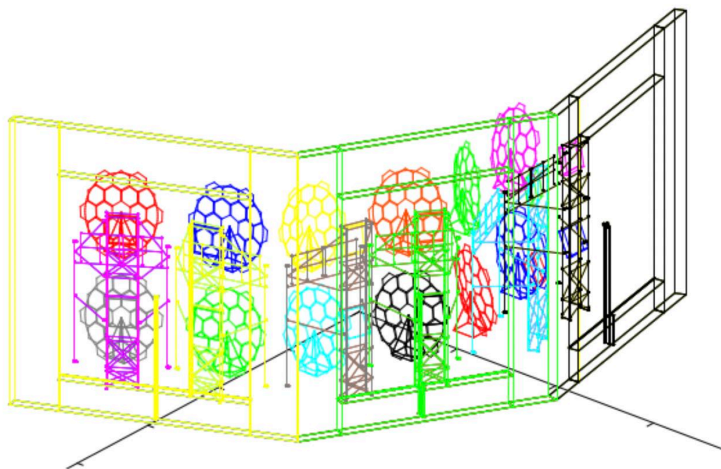


図 3.8: FD シミュレーションのために作られた FD の構造モデル [20]

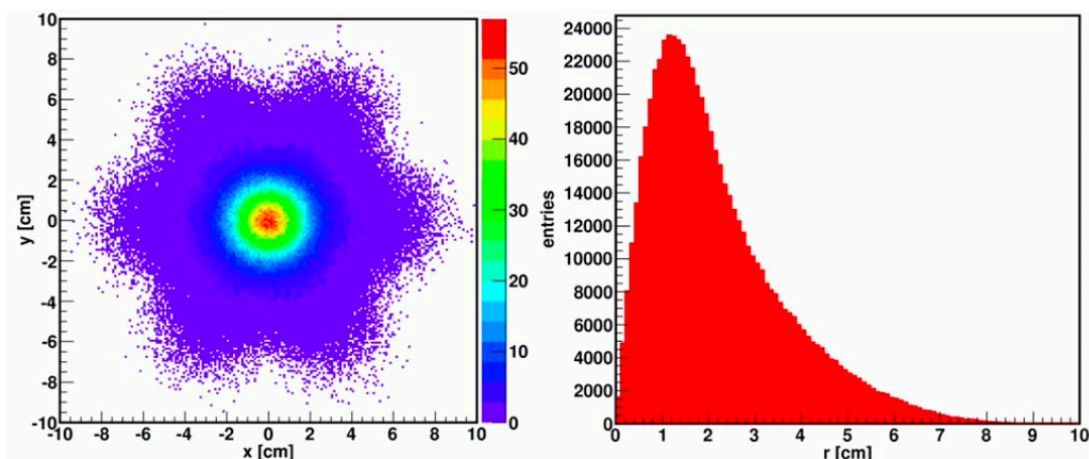


図 3.9: FD シミュレーションの焦点面におけるスポットサイズ [20]。鏡全面に平行に光子を入射させ、作成されたものである。(左) 横軸と縦軸は焦点面に沿っており、色は検出された光子の数を示している。鏡は六角形のミラーセグメントで構成されているため、スポットは円にならない。(右) 半径の分布である。

3.4 シミュレーションデータセット

この節では本研究に用いたシミュレーションデータセット (表 3.1) を示す。CORSIKA シャワーのハドロン相互作用モデルは高エネルギー側で QGSJET II-04 [61] と EPOS LHC [62] を、低エネルギー側では FLUKA [63] を使用し、電磁成分のシミュレーションには EGS4 [64] を使用している。宇宙線核種は陽子と鉄を使用し、シャワー数は QGSJET II-04 の鉄はエネルギーごとに約 300 シャワー、その他 3 パターンは約 400 シャワーある (表 A.1)。それぞれのシャワーは天頂角が異なり、コア位置と方位角をランダムに選択しながらシャワーを使いまわし、シミュレーションしている。使いまわし回数は、QGSJET II-04 の鉄はエネルギーごとに約 333 回、その他 3 パターンは約 250 回である。これはどのパターンでも約 100000 イベント分シミュレーションできるように調整した。

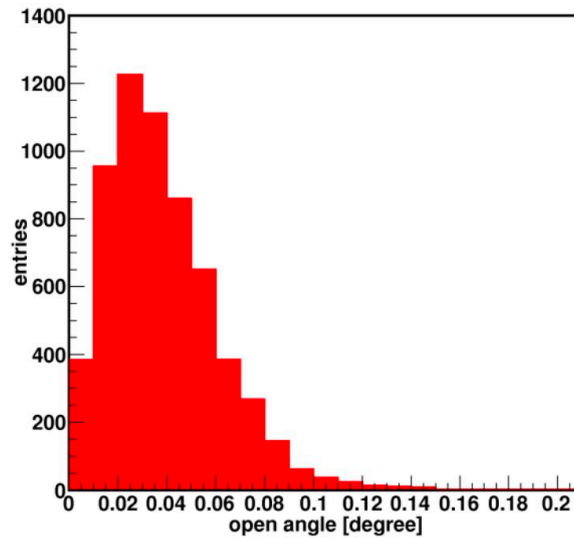


図 3.10: PMT ポインティング方向の開き角について、恒星光のキャリブレーションとレイトレーシングによって得られたものの比較 [20]。縦軸はエントリー数、横軸は開き角を示す。BRM ステーションと LR ステーションの全 PMT (6144 PMT) がプロットされている。

表 3.1: CORSIKA シャワー条件

ハドロン相互作用モデル	FLUKA ($E < 80 \text{ GeV}$) QGSJET II-04、EPOS LHC ($E \geq 80 \text{ GeV}$)
宇宙線核種	陽子、鉄
エネルギー E	$10^{18.0} \text{ eV}$ から $10^{20.0} \text{ eV}$ まで
天頂角 θ	$0^\circ \sim 70^\circ (\propto \sin \theta \cos \theta)$
方位角 ϕ	$0^\circ \sim 360^\circ$ で一様ランダム
シニングパラメーター	$\epsilon = 10^{-6}$

第 4 章

空気シャワーイベントの再構成手法

空気シャワーの情報から、その空気シャワーを作り出した元の宇宙線のジオメトリ（到来方向とコア位置）やエネルギーを決定することを再構成という。到来方向は天頂角と方位角で表し、コア位置は宇宙線が到来する向きのベクトルと地表との交点である。TA 実験では SD と FD で空気シャワーを観測し（またはシミュレーションをして）、その結果を再構成している。本章では、SD のみを使う SD 再構成、SD と FD の両方を使う Hybrid 再構成の 2 種類について述べる。

4.1 SD 再構成

TA の SD イベント再構成は、大きく分けて 4 段階で行われている。

Step1、記録された信号の時刻情報からジオメトリを求める。

Step2、SD の信号の強度を元に空気シャワー粒子数の横方向分布を決める。

Step3、天頂角 θ と空気シャワー軸から 800 m 離れた地点での粒子数密度を使って、エネルギーを決める。

Step4、SD と FD の両方で観測された同一事象を用いて SD で求められたエネルギーを FD で求められたエネルギーへスケールする。本節では、SD 再構成の流れを述べる。

4.1.1 準備

波形中の信号部分を探索する

空気シャワーを再構成するには、まず波形中の信号部分を探索する必要がある。図 4.1 に信号を見つける過程を示す [18]。時間幅 80 ns (FADC のタイムスライス 4 ビン分) で波形をスキャンし、上下層それぞれで 4 ビン全てにおいて波形がベースラインの変動幅に対し 5σ を超えると、超えた 4 ビンの中で一番はじめの 20 ns のタイムスライスの始まりが立ち上がり時刻となり、信号の開始時刻になる。1 σ は 50 Hz で記録した FADC カウントの RMS である。反対に、4 つのタイムスライス全てにおいて波形がベースラインの変動幅に対し 5σ を下回ると、信号は終わりとなりみなされる。このように 4 つのタイムスライスに区切ってスキャンすることによって、一瞬だけ波形の高さが高くなるようなランダムミュオンによるノイズを除去することができる。図 4.1 (右) のように信号の前にランダムミュオンがあると、信号だと勘違いしてイベントの立ち上がり時刻を間違える可能性がある。これは専用開発されたアルゴリズムにより排除される。最後にイベントの立ち上がり時刻から 10 μ s 以内の信号領域と判断された部分を積分する。各 SD の波形の高さは、FADC 信号を積分し、ペDESTAL を差し引き、キャリブレーションして VEM で表す。

空気シャワー粒子はある程度広がった領域にほぼ同時に到来するため、記録される信号は空間的かつ時間的に連続する。具体的には、SD 同士の距離が $1.2 \text{ km} \times \sqrt{2}$ を超えなければ空間的に連続しているとみなす (1.2 km は格

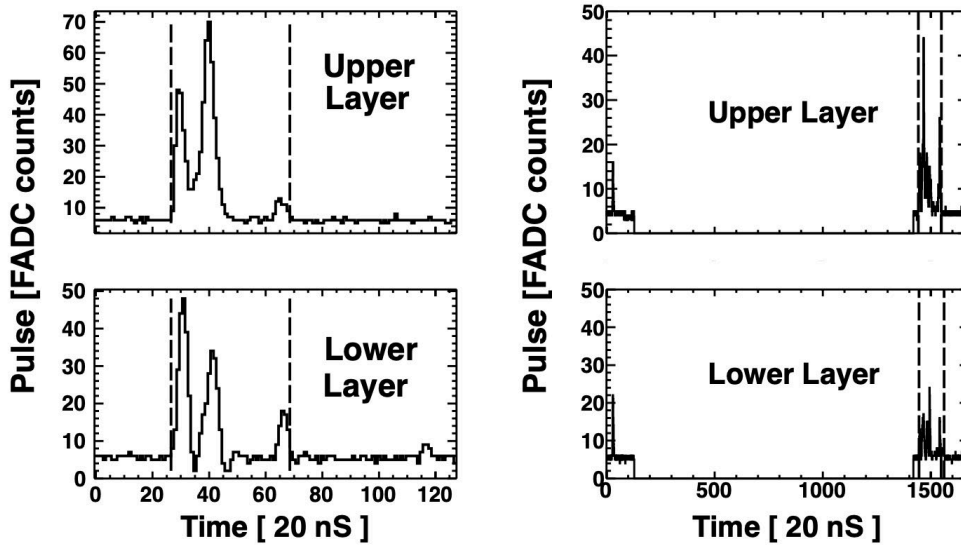


図 4.1: SD で記録された波形信号の一例。どちらの波形でも破線の間が信号として選ばれている。(左) 典型的な空気シャワー由来の信号の例。(右) 25 μs 前に発生したランダムミュオンによる信号のあとに続く空気シャワー由来の信号の例。ランダムミュオンによる信号はアルゴリズムによって排除された。

子状に設置している TA の SD の隣同士の距離)。また、空間的な距離を光速で割った値を波形の立ち上がり時刻の差を超えなければ時間的に連続しているとみなされる。二種類の連続性を確認しているのはランダムな大気ミュオンの信号だけを捉えた SD を排除するためである。図 4.2 は、空間的かつ時間的に連続であることを確認した後の空気シャワーイベントのフットプリントである [18]。

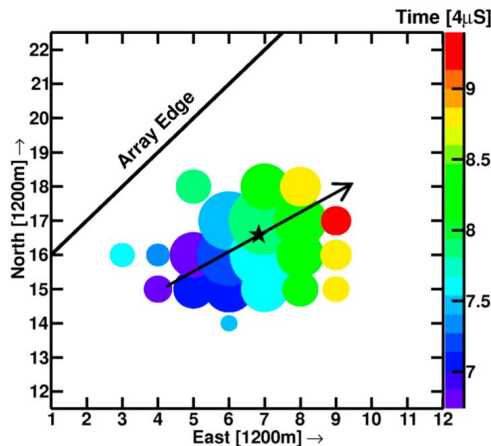


図 4.2: 典型的な TA の SD イベントのフットプリントを表している [18]。各円の中心には空気シャワー粒子を検出した SD が置いてあり、各円の大きさは SD で検出された信号の大きさに比例し、色の変化は時間発展を表している。星印はコア位置、矢印はシャワー軸を地面に投影したものである。

ジオメトリの定義

本節では再構成をする際に使用するパラメーターの定義を示す。

ジオメトリの定義を図 4.3 に示す。座標系は CLF を原点に取り、x 軸は東向きに、y 軸は北向きに、z 軸は上方を指すようにしている。イベントの到来方向として、天頂角 θ は z 軸からの角度、方位角 ϕ はシャワー軸を x-y 平面に投影したときの x 軸正の向きから反時計回りに測った角度である

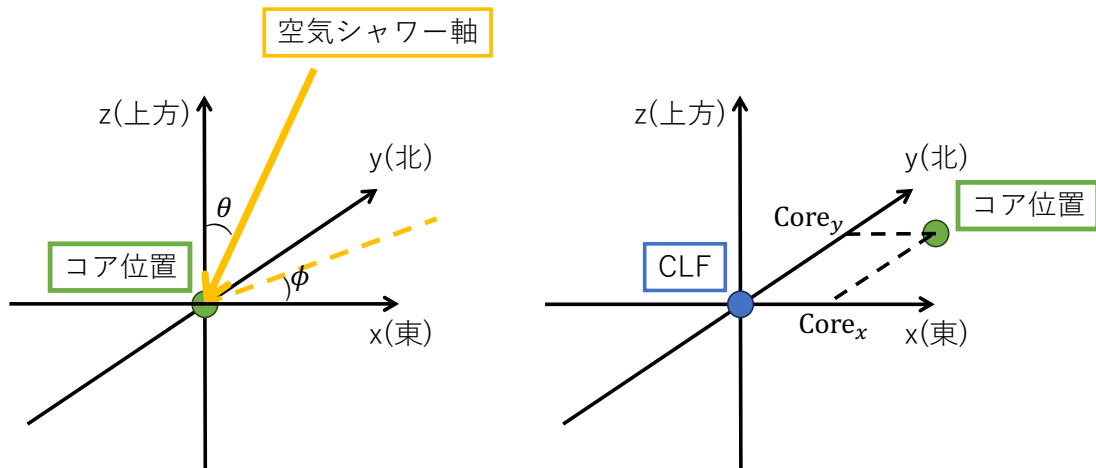


図 4.3: 本研究で用いているジオメトリの定義を表す図。(左) 到来方向を表す天頂角と方位角の定義。コア位置を中心とし、x 軸は東向きに、y 軸は北向きに、z 軸は上方を指すようにしている。z 軸正向きからの角度を天頂角 θ 、シャワー軸を x-y 平面に投影したときの x 軸正の向きから反時計回りに測った角度を方位角 ϕ としている。(右) コア位置の定義。コア位置は CLF 中心で、x 軸は東向きに、y 軸は北向きにとったときの x 座標 ($Core_x$) と y 座標 ($Core_y$) で表される。

図 4.4 は、シャワーのコアが地面に衝突する時刻 T_0 におけるシャワーフロントの図である [18]。 $\hat{n}(\theta, \phi)$ をシャ

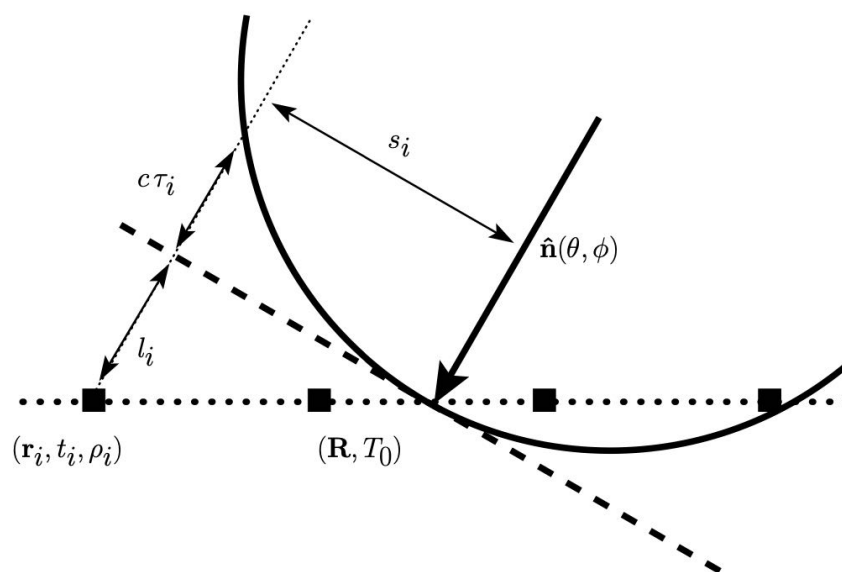


図 4.4: シャワーのコアが地面に衝突する時刻 T_0 におけるシャワーフロントの図である [18]

ワの伝播方向の単位ベクトルとし、 $\hat{\mathbf{n}}(\theta, \phi)$ を x-y 平面に投影してできるベクトルを $\hat{\mathbf{u}}(\phi)$ とすると次の式が成り立つ。

$$\hat{\mathbf{n}}(\theta, \phi) = \begin{bmatrix} -\sin(\theta) \cos(\phi) \\ -\sin(\theta) \sin(\phi) \\ -\cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

$$\hat{\mathbf{u}}(\phi) = \begin{bmatrix} -\cos(\phi) \\ -\sin(\phi) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

\mathbf{R} はコア位置を表している。トリガーのかかった SD の中で i 番目の SD に注目すると、 s_i はシャワー軸からの距離、 l_i はコアを通りシャワーの伝播方向に垂直な平面との距離、 τ_i はシャワーフロントの曲率による信号到達までの時間の遅れ、 $(\mathbf{r}_i, t_i, \rho_i)$ はそれぞれ位置 (3次元)、時刻、単位面積当たりの粒子数 [VEM/m²] である。

4.1.2 フィットティング

空気シャワーのジオメトリと粒子数密度分布を決定するために、Rough fit, Geometry fit, LDF fit の3種類のフィッティングを行う。Rough fit では、Geometry fit を行うための初期値を決める。Geometry fit ではコア位置や到来方向を決め、LDF fit では粒子数密度の横方向分布を決める。

Rough fit

たくさんのパラメーターからなる関数をフィッティングして χ^2 が最小になるようにいきなり再構成する前に、フィッティングの初期値を決めるために仮のジオメトリを決める。図 4.4 のコア位置 \mathbf{R} は式 4.3 の \mathbf{R}_{COG} で近似される。

$$(\mathbf{R}_{\text{COG}})_k = \frac{\sum_{i=1}^N r_{i,k} \rho_i}{\sum_{i=1}^N \rho_i} \quad (4.3)$$

\mathbf{R}_{COG} はトリガーされた N 台の SD の座標に、観測された地表での粒子数密度 ρ で重み付けをした検出器の座標平均であり、仮のコア位置となる。 $k = 1, 2$ は \mathbf{R} と \mathbf{r} の x, y 成分を表し、z 成分は 0 ではないがこの近似では無視される。本来は曲率を持っているはずのシャワーフロントを平面と近似して仮のコア位置を決定している。仮のコア位置 \mathbf{R}_{COG} と各 SD での信号を受け取る時間差を使ってフィッティングの初期値を決める。時間差 Δt は次の式で表される。

$$\Delta t = \sin \theta \frac{(\mathbf{r} - \mathbf{R}) \cdot \hat{\mathbf{u}}}{c} \quad (4.4)$$

ここまでで決めた仮のジオメトリを初期値として、次の χ_G^2 が最小になるようにフィッティングパラメーター $T_0, R_x, R_y, \theta, \phi$ についてフィッティングを行う。

$$\chi_G^2 = \sum_{i=1}^N \left(\frac{t_i - t_i^{\text{FIT}}}{\sigma_{t_i}} \right)^2 + \left(\frac{\mathbf{R} - \mathbf{R}_{\text{COG}}}{\sigma_{\mathbf{R}_{\text{COG}}}} \right)^2 \quad (4.5)$$

$$t^{\text{FIT}} = T_0 + \frac{l}{c} + \tau \quad (4.6)$$

$$\sigma_t = \sqrt{\sigma_e^2 + \sigma_\tau^2} \quad (4.7)$$

$t_i - t_i^{\text{FIT}}$ はフィッティング関数から予測される i 番目 SD に信号が入った時刻と実際に信号が入った時刻との差である。時刻の不確かさ σ_t は、時間遅れの不確かさ σ_τ と電子機器による不確かさ σ_e (20 ns) の2つの要素からなり式 4.7 で計算されている。 $\sigma_{\mathbf{R}_{\text{COG}}} = 170 \text{ m}$ は、観測された地表での粒子数密度 ρ で重み付けをした検出器の座標

平均の不確かさである。まず、トリガーのかかった全 N 台の SD で式 4.5 を計算し、 χ_{all}^2 とする。次に、 N 台ある SD から 1 台除いた $(N-1)$ 台で N パターン同じ計算をし、 χ_i^2 とし、 $\Delta_{\chi_i^2} = \chi_{\text{all}}^2 - \chi_i^2$ を計算する。そして、 $\Delta_{\chi_i^2}$ が一番大きいものを Δ_{χ^2} とし、10 よりも大きかったら該当する SD を除外する。このように 1 台ずつ SD を減らしながら、同様の作業を繰り返す。作業が終わるのは、 $\Delta_{\chi^2} < 10$ になったときであり、この段階で残っている SD を使って今後の解析を進めていく。

Geometry fit

Rough fit で得られた次に天頂角の関数として Linsley の時間遅延関数でシャワーフロントの曲率をフィッティングする [65]。

$$\tau = (8 \times 10^{-4} \mu\text{s}) a(\theta) \left(1.0 + \frac{s}{30\text{m}}\right)^{1.5} \rho^{-0.5} \quad (4.8)$$

$$\sigma_\tau = (7 \times 10^{-4} \mu\text{s}) a(\theta) \left(1.0 + \frac{s}{30\text{m}}\right)^{1.5} \rho^{-0.3} \quad (4.9)$$

$$a(\theta) = \begin{cases} 3.3836 - 0.01848\theta & (\theta < 25^\circ) \\ c_0 + c_1\theta + c_2\theta^2 + c_3\theta^3 & (25^\circ \leq \theta \leq 35^\circ), \\ \exp(-3.2 \times 10^{-2}\theta + 2.0) & (35^\circ < \theta) \end{cases} \quad (4.10)$$

$$c_0 = -7.76168 \times 10^{-2}, \quad c_1 = 2.99113 \times 10^{-1},$$

$$c_2 = -8.79358 \times 10^{-3}, \quad c_3 = 6.51127 \times 10^{-5}.$$

$a(\theta)$ はシャワーフロントの曲率を表している。ここで、 θ は天頂角 [deg]、 ρ は粒子数密度、 s はシャワー軸から SD までの距離である。この値は、TA の SD のデータを用いて調整されている。この結果を初期値にして、 $a = 0$ (シャワーフロントが平面だと仮定) の式でフィッティングする。最後に、 $a = 0$ のときの結果を初期値にして、

$$\tau = a \left(1 - \frac{l}{12 \times 10^3\text{m}}\right)^{1.05} \left(1.0 + \frac{s}{30\text{m}}\right)^{1.5} \rho^{-0.5} \quad (4.11)$$

$$\sigma_\tau = (1.56 \times 10^{-3}) \left(1 - \frac{l}{12 \times 10^3\text{m}}\right)^{1.05} \left(1.0 + \frac{s}{30\text{m}}\right)^{1.5} \rho^{-0.3} \quad (4.12)$$

の式でフィッティングして、ジオメトリが決定する。

LDF fit

AGASA 実験と同じ横方向分布関数 (Lateral Distribution Function: LDF) を用いた [66, 67]。SD の信号から地表での粒子数密度を再現するようにフィッティングをする。

$$\rho = A \left(\frac{s}{91.6\text{m}}\right)^{-1.2} \left(1 + \frac{s}{91.6\text{m}}\right)^{-(\eta(\theta)-1.2)} \left(1 + \left[\frac{s}{1000\text{m}}\right]^2\right)^{-0.6} \quad (4.13)$$

$$\eta(\theta) = 3.97 - 1.79 [\sec(\theta) - 1] \quad (4.14)$$

$$\sigma_\rho = \sqrt{0.56\rho + 6.3 \times 10^{-3}\rho^2} \quad (4.15)$$

次の式を最小にするようにフィッティングする。フィッティングパラメーターはコア位置 \mathbf{R} とスケールパラメーター A である。

$$\chi_{\text{LDF}}^2 = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\rho_i - \rho_i^{\text{FIT}}}{\sigma_{\rho_i}}\right)^2 + \left(\frac{\mathbf{R} - \mathbf{R}_{\text{COG}}}{\sigma_{\mathbf{R}_{\text{COG}}}}\right)^2 \quad (4.16)$$

4.1.3 エネルギーの仮決定

一定の天頂角における宇宙線のエネルギーは空気シャワー軸から 800 m の距離の信号の大きさの変化と対応していることがわかっている。エネルギーを決めるために使う SD ごとの空気シャワーの到達する時間差と横方向分布関数は、AGASA 実験 [66] で使用された式を元に、TA の SD データに合わせて調整されたものを使用する。前節のフィッティングに成功すると、次はその結果を用いてエネルギーを決定する。このときに使うのが、シャワー軸から 800 m の距離での粒子数密度 $S_{800} = \rho(800 \text{ m})$ [68] と再構成後の $\sec(\theta)$ の 2 つである。図 4.5 [18] は現在、TA の SD のエネルギー決定に使われているエネルギー推定テーブルである。これはモンテカルロシミュレーショ

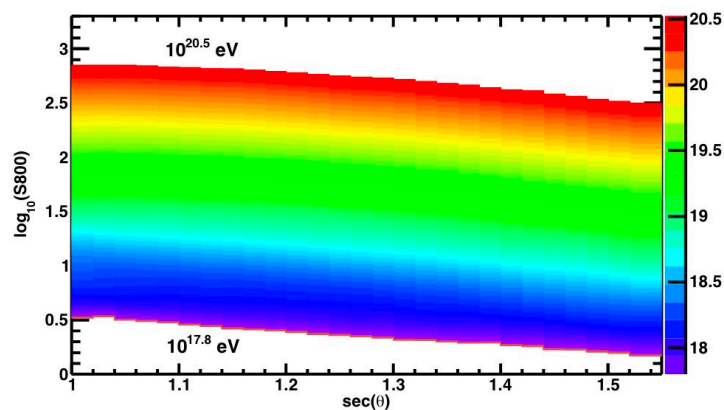


図 4.5: TA 実験の SD 再構成で使われているエネルギー推定テーブル

ンを使って作られたもので、色の違いはエネルギーの違いを表している。 S_{800} と $\sec(\theta)$ が分かれば、エネルギーが分かるようになっている。注意点としては、これが最終的なエネルギーではないということである。次節で最終的なエネルギー決定を行う。

4.1.4 エネルギーの最終決定

同じイベントについて、SD 再構成と FD 再構成でエネルギーを求めると、SD 再構成で求めたほうが FD 再構成で求めたときより 27% 高くなるという違いが出る。

$$E_{SD} = 1.27 \times E_{FD} \quad (4.17)$$

SD 単独で FD データが存在していないイベントにおいても式 4.17 の関係があると仮定し、図 4.5 で求めた仮のエネルギーは 1.27 で割って FD で求めたエネルギーの方にスケールする。

4.1.5 クオリティーカット

全てのパラメーターについて再構成が終わると、クオリティーカットをかける。これは再構成の結果が不十分なものを除外するというものである。カット条件はエネルギーの分解能を最適化するために設定されている。

再構成に使用した SD の台数

再構成に使われた SD の台数が 5 台以上のイベントが選択される。これによって再構成後にエネルギーが極端に高く見積もられているイベントが多く除外される。SD のトリガー条件より、最低 3 台の SD に信号が入れば再構

表 4.1: SD 再構成のクオリティーカット条件

再構成に使用した SD の台数	$N_{SD} \geq 5$
天頂角	$\theta < 45 \text{ deg}$
ボーダーカット	$D_{\text{border}} > 1200 \text{ m}$
エネルギー	$E > 1 \text{ EeV}$
Geometry fit	$\chi^2/\text{d.o.f.} < 4$
LDF fit	$\chi^2/\text{d.o.f.} < 4$
Geometry fit で決まった到来方向の不定性	$\sigma_G < 5 \text{ deg}$
粒子数密度	$\sigma_{S_{800}}/S_{800} < 0.25$

成されるが、Geometry fit のときにフィッティングパラメーターが 5 つあるので SD は 5 台以上いる。

天頂角

再構成後の天頂角が $\theta < 45 \text{ deg}$ のイベントが選択される。天頂角が大きいイベントは地表に到達するまでに大量の物質を通過するので、地表での揺らぎが大きく小さな信号も多いため再構成の分解能が大きくなってしまふ。分解能を悪くしないような値を設定している。

ボーダーカット

SD アレイの端から 1200 m 離れた SD アレイ内にコアがあるイベントが選択される。エネルギーを決めるために必要な S_{800} を求めるときに、アレイの端ではシャワー軸から 800 m の距離に SD がなく、粒子数密度知りたくても観測できていないということが起こりかねない。貴重な粒子数の情報が失われているので除外される。TA の SD は 1200 m 離れた格子状に設置されているのでこの条件によりコアとアレイの間には必ず SD が 1 台はあるという状況になる。図 4.6 に境界線の取り方を示す。

Geometry fit と LDF fit

Geometry fit と LDF fit を行ったときのそれぞれの自由度ごとの χ^2 が次の条件のときに選択され (式 ??、式 4.16) 。

$$\chi_G^2/\text{d.o.f.} < 4 \quad (4.18)$$

$$\chi_{\text{LDF}}^2/\text{d.o.f.} < 4 \quad (4.19)$$

Geometry fit で決まった到来方向の不定性

Geometry fit を行った際に天頂角 θ と方位角 ϕ が決まり、それぞれの不確かさは σ_θ と σ_ϕ である。この 2 つから全体的なポインティング方向の不確かさ σ_G は次の式で決まる。

$$\sigma_G = \sqrt{\sigma_\theta^2 + \sin^2 \theta \sigma_\phi^2} \quad (4.20)$$

$\sigma_G < 5 \text{ deg}$ のときに選択される。

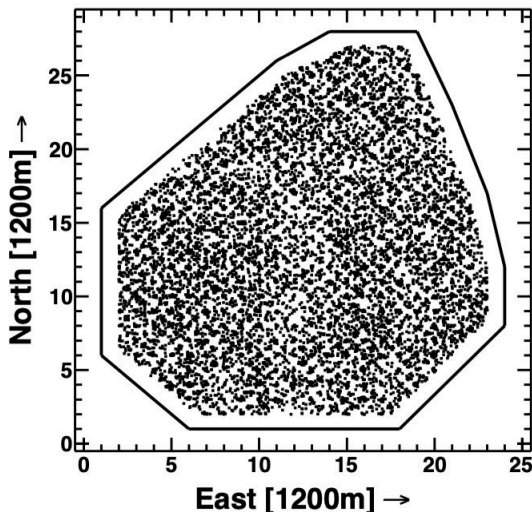


図 4.6: ボーダーカットの境界線の図。ボーダーカットをかけた後の再構成で決まったコア位置が黒い点でかかっている。

粒子数密度

LDF fit (式 4.15) のスケールパラメーター A は S_{800} に比例する。このとき S_{800} の不確かさは次の式で求められる。

$$\sigma_{S_{800}}/S_{800} = \sigma_A/A \quad (4.21)$$

σ_A は式 4.16 の χ_{LDF}^2 を最小にしたときに MINUIT [69] によって得られる不確かさである。 $\sigma_{S_{800}}/S_{800} < 0.25$ のときに選択される。これは最後のクオリティカットであり、低エネルギーのイベントが真のエネルギーより高く再構成されることによるバックグラウンドが除去される。

4.2 Hybrid 再構成

Hybrid 解析の基本的な考え方は FD モノ解析に SD1 台の時間情報を含めることによって精度を上げようというものである。

4.2.1 プレ再構成

FD カメラの PMT から解析に必要な情報を取り出し、ノイズによるヒットを除去する。これは4つのステップで行われる。解析に必要な有用な情報(タイミング、S/N比、光電子数)は、1st Selection で得られる。2nd Selection と 3rd Selection では、カメラ平面上のトラックサーチと各 PMT のタイミングにより、4th Selection のための初期値を得るためのより厳密なセレクションが行われる。4th Selection では、反復による幾何学的再構成により最終的な PMT を得る。4th Selection では、1st, 2nd, 3rd Selection で除去された PMT を含む全ての PMT について判定を行う。

まず、FD の解析の前に、トリガーされた全ての SD を解析し、エネルギー損失とタイミングを求める。この解析では、シャワーコアが地表にたどり着いたタイミングを使用されるため、シャワーフロントが重要である。そのため、最初の立ち上がり時刻を SD のタイミングとして使用する。

立ち上がり時刻は S/N 比を用いて求める。ペデスタルライン σ_{ped} の変動は 10 分毎にモニタリングされている。まず、得られた波形を $3 \times \sigma_{ped}$ 以上のビンから $3 \times \sigma_{ped}$ 未満のビン単位に分割する。最初のユニットの開始時刻を SD のタイミングとして使用する。エネルギー損失量は、波形カウントからエネルギー損失量への変換係数を用いた全波形単位の積分によって計算される。この変換係数はモニタされた電荷分布と SD シミュレーションを用いて算出される。各 SD の位置情報も GPS 情報から得られる。

1st Selection

まず、図 4.7 [20] のような三角形の形をもつフィルターで各波形をスキャンする。これは、次式の有意度 $\sigma(w, i)$

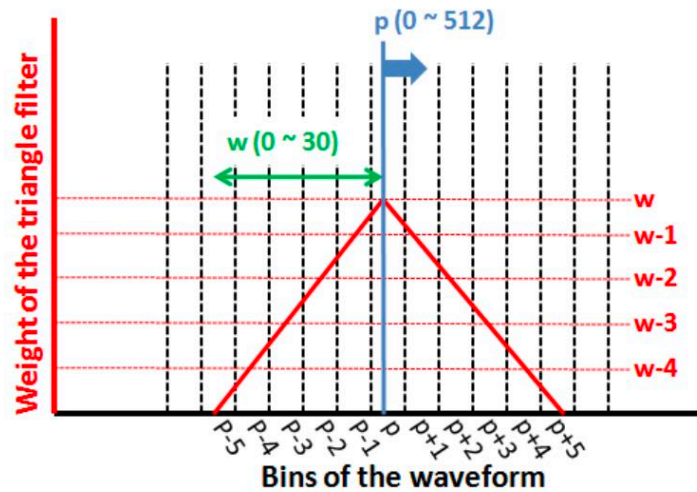


図 4.7: 三角形の形をしたフィルターの模式図。フィルターは、ピーク p と幅 w の組のうち、有意度が最大となるものを探す。青線がピーク p 、緑線が幅 w を示す。探索範囲は p が 0 から 512 ビン、 w が 0 から 30 ビンである。 i 番目のビン ($p - w \leq i \leq p + w$) の重み $W(i)$ は $w - |p - i|$ で計算される。

が最大になるように、波形のピーク p と幅 w を決定するために用いられる。

$$\sigma_{p,w} = \frac{\sum_{i=p-w}^{p+w} F_{sub}(i) W(i)}{\sum_{i=p-w}^{p+w} P_{rms}(i) W(i)} \quad (4.22)$$

$$W(i) = w - |p - i| \quad (4.23)$$

ここで、 F_{sub} はペデスタルの平均値を引いた波形の i 番目のビンの値、 $W(i)$ は i 番目のビンの重み、 P_{rms} はペデスタルゆらぎである。各ペデスタルの平均値とゆらぎは、SDF によって求めた。このフィルターは 0 から 30 までの幅 w とピークビン p を、有意度が最大になるように探す。有意度が最大の p と w の組を見つけると、タイミング T とその誤差 σ_T は次の式で計算される。

$$T = 100 \text{ ns} \times \frac{\sum_{i=p-w}^{p+w} i \times F_{sub}(i)}{\sum_{i=p-w}^{p+w} F_{sub}(i)} \quad (4.24)$$

$$\sigma_T^2 = 100 \text{ ns} \times \frac{\sum_{i=p-w}^{p+w} F_{sub}(i) \times (T - i)^2}{\sum_{i=p-w}^{p+w} F_{sub}(i)} \quad (4.25)$$

ここで、100 ns は 10 MHz のサンプリングに対応するビン幅である。タイミング T は、割り当てられた幅の重心に対応する。選択された幅が 30 ビンの場合、この PMT はノイズヒット PMT、フィッティングに失敗したものとして扱われ、解析には使用されない。

次に、PMT の信号量を表す光電子数 $N_{p,e}$ を次の式で計算する。

$$N_{p,e} = \text{Gain} \times \sum_{i=p-3w}^{p+3w} F_{\text{sub}}(i) \quad (4.26)$$

Gain はキャリブレーションによって得られる。 $p \pm 3w$ の領域は、検出した波形の幅よりはるかに大きい。 $N_{p,e}$ は、幾何学および縦方向のフィッティングの重みに使用される。

最後に有意度の高い ($6\sigma_{p,w}$ 以上) の信号をもつ PMT を次のセレクションに渡す。このとき、有意度の小さい ($6\sigma_{p,w}$ より小さい) PMT は 2nd、3rd Selection には使用しない。

2nd Selection

ノイズの多い PMT は 1st Selection で除去されるはずだが、バックグラウンドの大きいものは除去されない。このセレクションでは、カメラ上のトラックを決め、遠いものを除去するという方法で PMT を除去する。空気シャワーの縦方向発達はシャワー軸に沿って起こるため、FD で観測したときに直線上軌跡が作られる。ここでは、直線を検出するために用いられる Hough 変換という座標変換を用いる。Hough 変換で、カメラのトラックスキャンを行い、ノイズがヒットしていると思われる PMT を除去する。

一般的に、x-y 平面の直線は (ρ, ω) は次の式で変換される。

$$\rho = x \cos \omega + y \sin \omega \quad (4.27)$$

$\rho - \omega$ 空間を Hough 空間と呼び、この変換を Hough 変換と呼ぶ。x-y 平面上のある 1 点を通る直線は無数にある (これは信号の入った 1 本の PMT を考えたときにトラックが無数に考えられることに対応している)。それぞれの直線は Hough 空間では 1 つの点で表され、x-y 平面上のある 1 点を通る無数の直線は Hough 空間では曲線になる。この性質を図で表したものが図 4.8 [20] で、x-y 平面上の緑色の線と青色の線の直線の集合は、 $\rho - \omega$ 空間では曲線で表されている。 $\rho - \omega$ 空間の曲線の交点は、x-y 平面で同じ直線をもつことを表しており、図 4.8 の x-y 平面

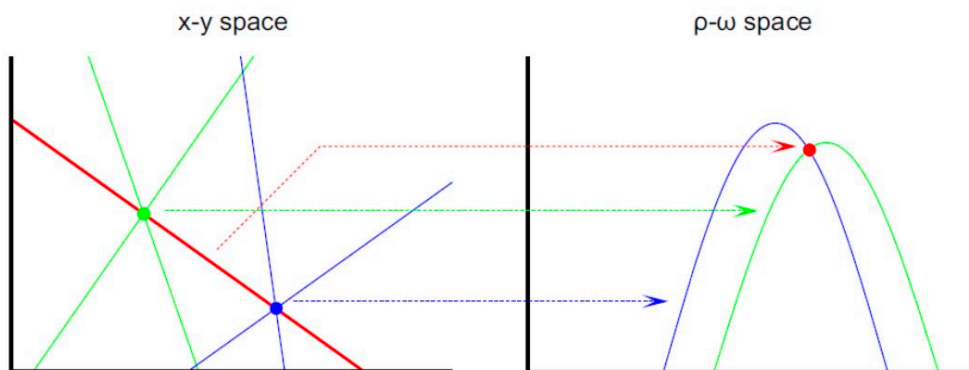


図 4.8: Hough 変換の模式図 [20]。x-y 平面のある点を通る直線群は、 $\rho - \omega$ 空間では 1 本の曲線で表される。そのため、 $\rho - \omega$ 空間での曲線の交点は、x-y 平面上で複数の点を通る直線を表している。

の赤い線に対応している。従って、PMT の全ての位置 (x-y 平面) に対応する全ての曲線 ($\rho - \omega$ 空間) の交点は PMT (x-y 平面) のトラックとして検出することができる。トラックの上ののっていないものはノイズである。

解析では、各 PMT の位置に対応する点 (θ, ϕ) を天頂角-方位角平面 (図 4.8 の x-y 平面に対応) に作成し、Hough 変換によりトラックを探す。Hough 変換後の分布のピーク付近の重心 (ρ, ω) を求める。この結果の例を図 4.9 に示す。

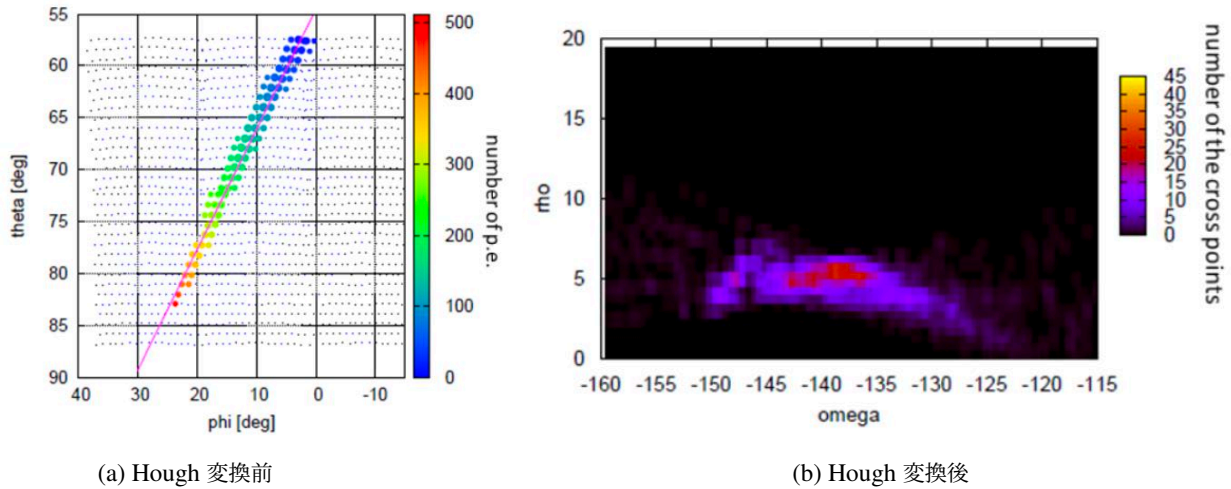


図 4.9: Hough 変換の前後の比較 [20]。(a) 色のついた円は信号の入った PMT を表している。色の変化は時間発展を、円の大きさは光電子の数を表している。(b) 左図を Hough 変換したもの。ピーク付近の重心に対応する直線をトラックと決めて赤線を引いている。

トラックが決まった後は、トラックから離れている PMT を除去する。PMT_{*i*} がトラックからどれくらい離れているかを表す距離的角度 β_i を全 PMT について計算する。PMT の除去を決定するために、PMT の全ての β_i のヒストグラムをビン幅 1 deg で作成する。閾値は、0 deg のビンからスキャンしていき、最初にエントリー数が 0 になったビンになる。しきい値以上の β_i を持つ PMT_{*i*} は次のセレクションに進む前に除去される。

3rd Selection

ノイズがヒットした PMT はトラックの近くにまだ残っている。3rd, 4th Selection ではタイミング情報を使って、ノイズがヒットしている PMT を除去する。

$$t_i = t^* + \frac{1 \sin \psi - \sin \alpha_i}{c \sin(\psi + \alpha_i)} r_0 \quad (4.28)$$

t^* はシャワーコアが地表に到達するタイミング、 r_0 はシャワーコアから FD ステーションまでの距離、 α_i は SDP 上の i 番目の PMT の方向の仰角、 ψ はシャワーコアからの仰角である。正確なフィッティングのために、このセレクションでは、粗めのフィッティングをして大まかな PMT セレクションを行う。2nd Selection で Hough 変換により決定された直線を SDP とする。どの PMT を除去するかを決定するために、PMT の時刻とフィッティングによる予想時刻との時間差 Δ_T を全ての PMT について計算し、1 μ s のビン幅のヒストグラムを作成する。各ビンは 0 μ s からスキャンし、エントリーのない最初のビンがしきい値となる。しきい値以上の Δ_T を持つ PMT は、次のセレクションに進む前に除去される。

4th Selection

1st, 2nd, 3rd Selection を経て、有意度の高い PMT のみが残っている。残っている PMT を使って初期値を決める。4th Selection では、今までに除去された PMT も復活するチャンスがある。

まず、SDP 上の PMT の仰角とタイミング情報を hybrid mono timing fitting でフィッティングする。次に、フィッティングされた関数からのタイミング差 R_i 、擬似的な χ_i^2 および SDP の β_i との開き角が、前のステップで

除去された PMT を含むすべての PMT について計算される。

$$R_i = |f(\alpha_i) - T_i| \quad (4.29)$$

$$\chi_i^2 = \left(\frac{R_i}{\sigma_{T_i}} \right)^2 \quad (4.30)$$

$$\beta_i = \vec{P}_i \cdot \vec{V}_{\text{NSDP}} \quad (4.31)$$

ここで、 α_i は i 番目の PMT の SDP に射影した仰角、 $f(\alpha_i)$ は α_i におけるフィッティング関数から得られたタイミング、 σ_{T_i} は 1st Selection で得られたピークタイミングの誤差である。また \vec{P}_i はポインティングベクトル、 \vec{V}_{NSDP} は SDP に対する垂直方向である。これらのパラメータは PMT の追加/除去の判定に使用される。これらの PMT は表 4.2 に示す 2 種類の基準で分類される。まず、SOFT で分類される。SOFT で分類された PMT だけが、

表 4.2: 4th Selection での PMT の分類基準

パラメーター	SOFT	HARD
R_i	$< 1.2 \mu\text{s}$	$< 0.8 \mu\text{s}$
χ_i^2	< 20	< 15
β_i	$< 4 \text{ deg}$	$< 2 \text{ deg}$

HARD の基準で分類される。分類された PMT は、 α_i と T_i の線形フィッティングにより、隣接する PMT と分類された PMT との開き角が 5 deg 未満で、かつタイミング差が 5 μs 未満の PMT が選択される。この判定には、フィッティング関数からの時間差 R_{Lin} 、擬似的な χ_{m}^2 、使用された PMT の数 N_{Lin} を用いる。判定基準を表 4.3 に示す。この判定は、位置とタイミングが孤立している PMT の除去に有効である。この判定基準に該

表 4.3: 4th Selection の PMT 選択基準

パラメーター	しきい値
N_{Lin}	< 3
R_{Lin}	$1.2 \mu\text{s}$
χ_{m}^2	20

当する PMT があれば、その PMT をもう一度 4th Selection を行う。もし、この表 4.2 と表 4.3 の 2 つの基準を満たさない PMT があれば、PMT は除去される。この繰り返しは、該当する PMT がなくなるまで続けられる。

セレクションを通った PMT の例を図 4.10 に示す。

4.2.2 ジオメトリ再構成

まず、FD ステーション単体で PMT の方向とタイミングを用いてジオメトリ再構成を行う。タイミングは次の式で計算される。

$$T_{\text{exp},i} = T_{\text{core}} + \frac{1}{c} \frac{\sin \psi - \sin \alpha_i}{\sin(\psi + \alpha_i)} \quad (4.32)$$

$T_{\text{exp},i}$ と α_i は PMT _{i} の SDP 上での予想タイミングと仰角、 T_{core} 空気シャワー軸が地上に到達したタイミング、 R_{core} は FD ステーションからコア位置までの距離、 ψ は SDP 上での空気シャワーの仰角である (図 4.11 [20])。

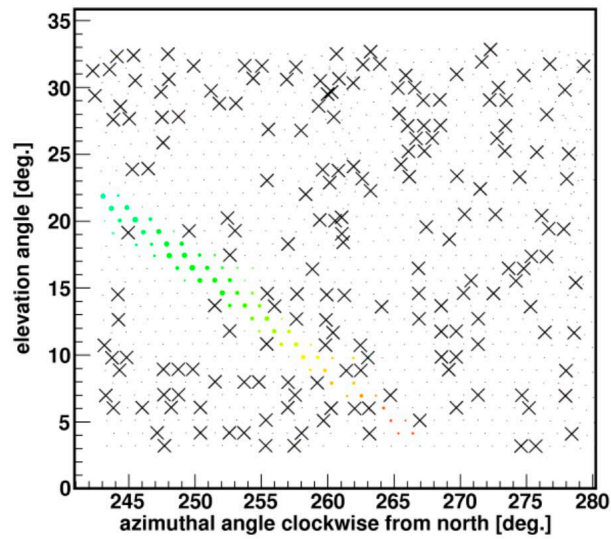


図 4.10: PMT のセレクション例。これは 2008 年 06 月 02 日に BRM ステーションで観測された実際のイベントである。横軸と縦軸は各 PMT のポインティング方向を示す。塗りつぶされた円は、S/N 比が 3σ より大きい PMT を示す。円の大きさは、得られた光電子数の平方根に比例する。色はタイミングを示す。緑は速く、赤は遅い \times 印は除去された PMT を表している。

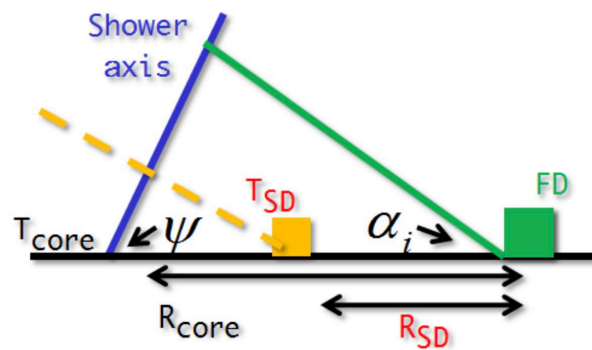


図 4.11: ジオメトリ再構成に使うパラメーターの模式図

この方法により SDP を正確に決定することができる。しかし、FD のみでは空気シャワー軸の奥行き方向の決定は難しく、奥行き決定精度はエネルギー決定精度にも影響する。そのため、コア位置付近の SD を 1 台使って次のように奥行情報を決定する。

$$T_{\text{core}} = T'_{\text{SD}} + \frac{1}{c} (R_{\text{core}} - R_{\text{SD}}) \cos \psi \quad (4.33)$$

$$T'_{\text{SD}} = T_{\text{SD}} - \frac{1}{c} \left\{ (\vec{P}'_{\text{SD}} - \vec{P}_{\text{SD}}) \cdot \vec{P} \right\} \quad (4.34)$$

空気シャワー軸は ψ 、 R_{core} 、 T_{core} の 3 つのパラメータによって決定される。ここで、 \vec{P}_{SD} は SD の位置、 \vec{P}'_{SD} は SDP 上に投影された SD の位置、 \vec{P} は地上からのシャワー軸の方向、 T_{SD} は 7.2.1 節で説明した SD の読み取りエッジのタイミング、 T'_{SD} は投影長に対する補正タイミング、 R_{SD} は FD と \vec{P}'_{SD} の間の距離である。従って、 χ^2

は次のように書ける：

$$\chi^2 = \sum_i \frac{(T_{\text{exp},i} - T_i)^2}{\sigma_{T,i}^2} \quad (4.35)$$

ここで、 σ_T は、1st Selection で計算される推定タイミングの揺らぎである。この関数はシャワーの前面構造が平坦であるという仮定を持っている。この仮定は、SD がシャワー軸に近い場合や、宇宙線のエネルギーが小さい場合には十分である。典型的なシャワーフロントの構造は、シャワーコアから 600 m 離れた位置で、 10^{19} eV のエネルギーで 100 ns の遅れがある。一方、エネルギーが低くなると、シャワーフロントの粒子はミューオンが支配的になる。その場合、揺らぎは大きくなるが、平面であるという仮定からの典型的な遅延は小さくなる。

この解析では、SD1 台を自由に選ぶことができる。まず、ヒットした SD の中でノイズヒットの SD は除去する。次に、SDP と地上が交差するラインから 1.2 km よりも離れた SD を除去する。最後に、残った SD の中から式 4.35 の χ^2 が最小となるように選択する。

4.2.3 縦方向発達の再構成

空気シャワーによって生成される光子は、大気蛍光だけではなくチェレンコフ光によるものもある。本研究では、縦方向発達の再構成に逆モンテカルロシミュレーションを用いる。この手法は、データと MC の比較から最適な空気シャワーを探すというものである。

4.2.4 クオリティーカット

全てのパラメーターについて再構成が終わると、クオリティーカットをかける。これは再構成の結果が不十分なものを除外するというものである。カット条件はエネルギーの分解能を最適化するために設定されている。

表 4.4: FD 再構成のクオリティーカット条件

再構成に使用した PMT の本数	$N_{\text{PMTrec}} > 20$
天頂角	$\theta < 45 \text{ deg}$
X_{max}	視野内

再構成に使用した PMT の本数

再構成に使用した PMT の本数が 20 本を超えるとときに選択される。PMT の本数が少ないと、イベントの空間トラックを見つけることが困難なため、クオリティーカットの条件に入っている。トラックが短いと SDP を決めるのも困難になる。

天頂角

再構成後の天頂角が $\theta < 45 \text{ deg}$ のイベントが選択される。天頂角が大きいイベントは地表に到達するまでに大量の物質を通過するので、地表での揺らぎが大きく小さな信号も多いため再構成の分解能が大きくなってしまう。分解能を悪くしないような値を設定している。

X_{\max}

X_{\max} が FD の視野内にあるものが選択される。FD で X_{\max} を捉えていないと、GH function のフィッティングがうまくできない。

第5章

Invisible Energy の推定

1.3 節で述べたの宇宙線の核種に依らない Invisible Energy の推定方法について述べる。

5.1 Invisible Energy の性質

Invisible Energy は ν_μ や $\bar{\nu}_\mu$ などの中性粒子が大気蛍光を発生させず持ち去るエネルギーである。 ν_μ や $\bar{\nu}_\mu$ を観測して持っているエネルギーを直接求めることができればいいのだが、ニュートリノは弱い相互作用しかしないので検出が難しい。観測のできないニュートリノを見るためにニュートリノと同時に生成される μ^\pm に着目した。空気シャワーの発達過程での反応 (1.2 節) の中に次の2つがある。

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu \quad (5.1)$$

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu \quad (5.2)$$

この2つの反応により、観測したい ν_μ と $\bar{\nu}_\mu$ は μ^\pm と同時に生成されることが分かる。つまり、 μ^\pm の個数 (N_μ) が分かれば、 ν_μ と $\bar{\nu}_\mu$ の個数もわかるということである。 N_μ と Invisible Energy との間に次のような関係があると仮定して解析を行った。

$$\log E_{\text{inv}} = \alpha \log N_\mu + \beta \quad (5.3)$$

つまり、 N_μ を測定することができれば E_{inv} を求めることができる。 N_μ を測定するために TA 実験の SD 観測で得られる地表での粒子数密度に着目した。SD 観測では、空気シャワーが地表に到達したときの粒子数を観測しており、空気シャワー軸からの距離を r [m] (図 5.1a) として粒子数密度 S_r [$1/\text{m}^2$] (図 5.1b) を求めることができる。SD 観測によって得られる S_r は、荷電粒子がシンチレーターで相互作用を起こし発生したシンチレーション光によるものである。ほとんどが電磁成分で、 μ^\pm の寄与は少ししか含まれていない。しかし、 μ^\pm の個数にも対応しているものとして、

$$\log E_{\text{inv}} = A \log S_r + B \quad (5.4)$$

のような関係式を用いた。本研究では、式 5.4 を用いて、 S_r から E_{inv} をイベントごとに求められるように A と B を決定することを目標とした。

A と B を求めるために、モンテカルロシミュレーションとその再構成結果を用いて、 S_r と E_{inv} の関係を見た。そして、求めた A と B を使って E_{inv} を正しく求められているかを確認した。その際に、シャワー軸からの距離を遠くする (r を大きくする) と空気シャワー粒子の電磁成分が減り、 μ の寄与が大きくなり、宇宙線核種に依らない A と B を求められると考えた。

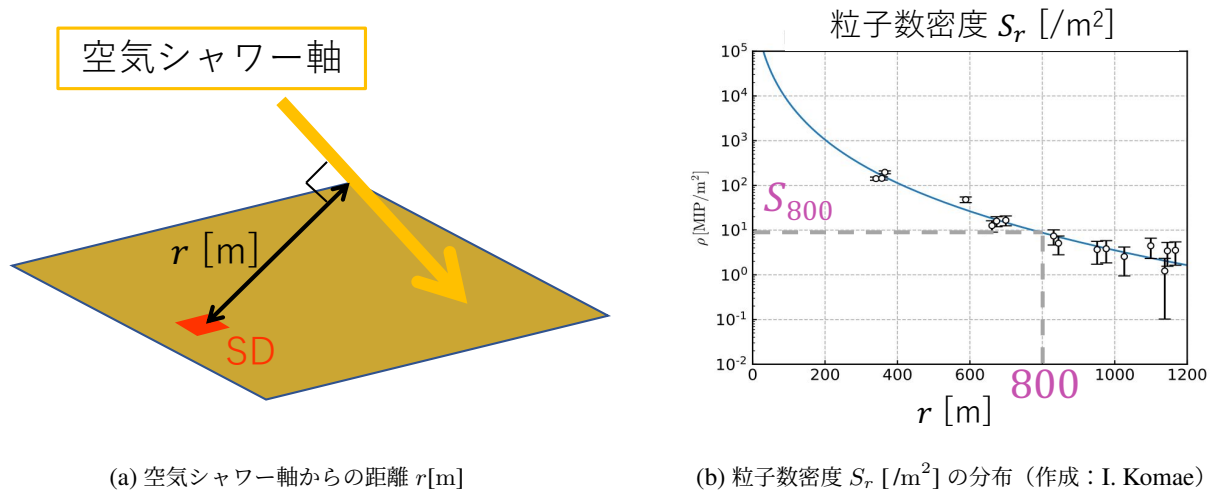


図 5.1: (a) 空気シャワー軸からの距離 r [m] を表す模式図。(b) r [m] ごとの空気シャワーの地表での粒子数密度 S_r [1/m²] を表すグラフ。横軸はシャワー軸からの距離、縦軸は粒子数密度を表している。データ点は SD に入った粒子数密度で、それらの点をフィッティングしたものが青い線で描かれている。例として空気シャワー軸から 800 m 離れた地表での粒子数密度を表す箇所を示している。

5.2 CORSIKA で計算された Invisible Energy

実データの Invisible Energy をイベントごとに観測値から求めることが最終目標である。中性粒子が要因となっている Invisible Energy は観測できないので、観測値から推定し補正するしかない。本研究では、実データの Invisible Energy を求める補正式を作るために、モンテカルロシミュレーションを用いた。シミュレーションが空気シャワー現象を再現できているならば、CORSIKA の出力から Invisible Energy を求めることができ、今回用いたのは出力のひとつである long ファイルである。long ファイルには空気シャワー粒子の縦方向発達 (LONGITUDINAL DISTRIBUTION) について書かれており、垂直大気深さごとの空気シャワー粒子のエネルギー損失が分かる。Long ファイル中の荷電粒子が起こすエネルギー損失を積分することによって、FD で観測可能なエネルギー E_{cal} を求めることができ、シミュレーションした宇宙線のエネルギーから E_{cal} を引けば、 E_{inv} を求めることができる ($E_{\text{inv}}^{\text{CORSIKA}} = E_0^{\text{CORSIKA}} - E_{\text{cal}}^{\text{CORSIKA}}$)。本節では、 $E_{\text{cal}}^{\text{CORSIKA}}$ を求める方法について、詳しく述べる。

Long ファイルには、実際に通過した大気深さを垂直方向成分に直して 1g/cm² ごとにエネルギー損失が記録されているので、入射した角度 (天頂角 θ) を使って大気深さを $\cos \theta$ で割って補正しなければならない。図 5.2 にハドロン相互作用モデルに QGSJET II-04 を用いた 10^{19.0} eV の陽子による空気シャワーのシミュレーションから得られる荷電粒子のエネルギー損失の結果を示す。グラフの縦軸は空気シャワー中の荷電粒子のエネルギー損失、横軸は垂直大気深さを $\cos \theta$ で割って補正した値である。CORSIKA の出力を黒い点でプロットしており (875 点)、空気シャワーの粒子数の発達と同様に荷電粒子のエネルギー損失もはじめは増え、その後減衰していくことを表している。黒い点が途中でなくなっているのは、CORSIKA は地表に到達するまでの縦方向発達のみ追っているからである。地表に到達した後もシンチレーターや地中でエネルギー損失を起こすので、荷電粒子のもつエネルギーを全て計算するためには地表に到達した後のエネルギー損失もすべて足すことが必要となる。そのために、次の式 5.5

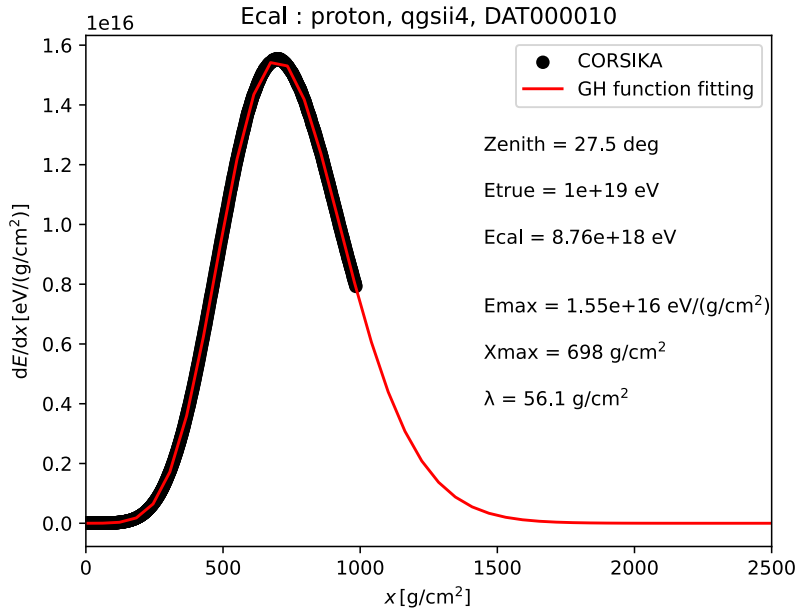


図 5.2: CORSIKA の出力である long ファイルから荷電粒子の縦方向発達をグラフで表したものである。これは、ハドロン相互作用モデル QGSJET II-04、 $10^{19.0}$ eV の陽子の一例である。

を用いてフィッティングを行い、図 5.2 の赤線で示している。

$$E(X) = E_{\max} \left(\frac{X - X_0}{X_{\max} - X_0} \right)^{\frac{X_{\max} - X_0}{\lambda}} \exp \left(\frac{X_{\max} - X}{\lambda} \right) \quad (5.5)$$

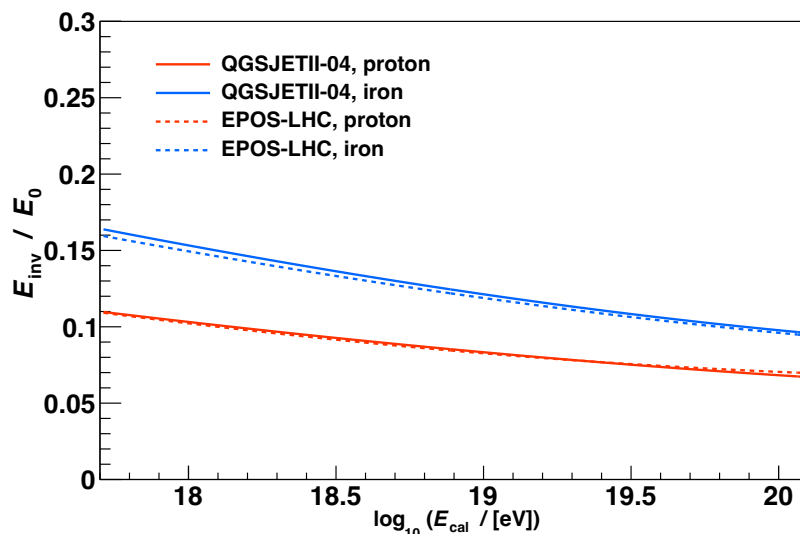
これは、Gaisser-Hillas (GH) function [70] というもので、空気シャワー中の荷電粒子について粒子数の縦方向発達をよく表すことができる関数である。 X_0 は宇宙線が最初に大気と相互作用を起こした大気深さ、 X_{\max} は空気シャワーの粒子数が最大になったときの大気深さ、 E_{\max} は X_{\max} 地点でのエネルギー損失量、 λ は平均自由行程を表している。フィッティングパラメーターは X_0 , X_{\max} , E_{\max} , λ である。 $\left(\frac{X - X_0}{X_{\max} - X_0} \right)^{\frac{X_{\max} - X_0}{\lambda}}$ の項は X_{\max} に達するまでの発達を、 $\exp \left(\frac{X_{\max} - X}{\lambda} \right)$ は X_{\max} 後の減衰を表している。式 5.5 を使ってフィッティングすることによって、CORSIKA が追っていない部分を外挿することができる。そして、フィッティング結果を無限遠まで積分したものが荷電粒子が要因となった $E_{\text{cal}}^{\text{CORSIKA}}$ となる。 $E_{\text{cal}}^{\text{CORSIKA}}$ が分かれば、CORSIKA シャワーの E_0^{CORSIKA} との差分を取り、 $E_{\text{inv}}^{\text{CORSIKA}}$ を求めることができる。

CORSIKA の long ファイルから GH function を用いて $E_{\text{inv}}^{\text{CORSIKA}}$ を求める操作を全 CORSIKA シャワーに対して行った。CORSIKA シャワーは、ハドロン相互作用モデル 2 種類 (QGSJET II-04, EPOS LHC) \times 宇宙線核種 2 種類 (陽子、鉄) の計 4 パターンある。それぞれのパターンについてエネルギー $10^{18.0}$ eV, $10^{18.1}$ eV, ... , $10^{20.0}$ eV の 21 ビン分の計算を行った。また、大気深さごとのエネルギー損失を表すグラフは天頂角 θ によって大きく変化する。QGSJET II-04 の鉄は約 300 種類の一様ランダムに選ばれた天頂角、その他の 3 パターンは約 400 種類ランダム天頂角を使用した。表 5.1 に 4 パターンそれぞれのシャワー数を示す。CORSIKA シャワーは TA 実験全体で使っている共用のものを使用したため、エネルギーによってシャワー数のばらつきがある (表 A.1)。

全シャワーに対して CORSIKA の出力から $E_{\text{inv}}^{\text{CORSIKA}}$ を計算し、宇宙線のエネルギー E_0^{CORSIKA} に対する $E_{\text{inv}}^{\text{CORSIKA}}$ の割合を求めたものが、図 5.3 である。4 本の線はエネルギーごとの平均値をプロットし、フィッティングをして得られたものである (詳細は付録 B を参照)。

表 5.1: GH function を用いて CORSIKA の出力から計算した E_{inv} の決定に使ったシャワー数

シャワー数	QGSJET II-04	EPOS LHC
陽子	約 8400	約 8400
鉄	約 8400	約 6300

図 5.3: GH function のフィッティングから得られた E_0 に対する E_{inv} の割合を表している。ハドロン相互作用モデル 2 種類 (QGSJET II-04、EPOS LHC) × 宇宙線核種 2 種類 (陽子、鉄) の計 4 パターンの線がかかっている。

5.3 手法 1 (S_r を用いる)

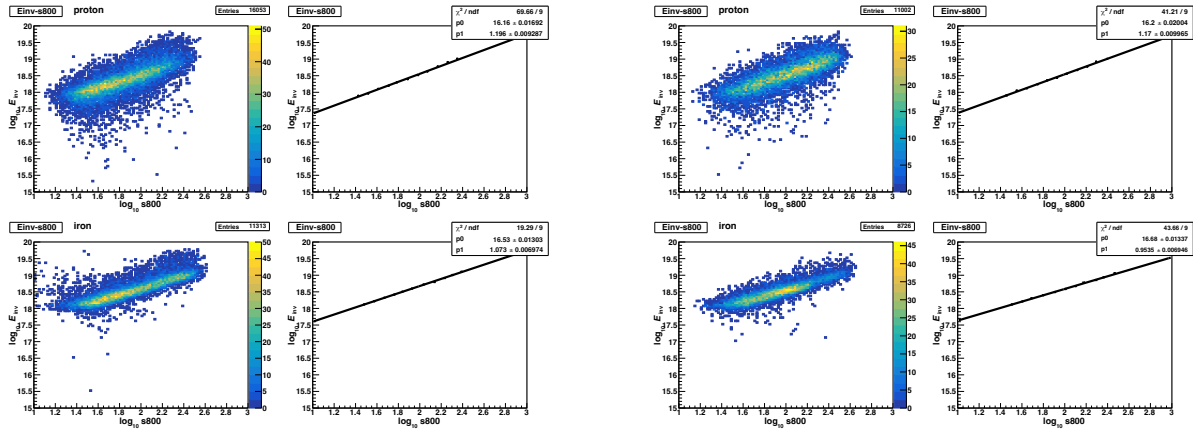
5.3 節で用いたモンテカルロシミュレーションの条件を表 5.2 に示す。

表 5.2: モンテカルロシミュレーション条件

ハドロン相互作用モデル	QGSJET II-04、EPOS LHC
宇宙線核種	陽子、鉄
エネルギー E	$10^{19.0}$ eV から $10^{20.0}$ eV まで
天頂角 θ	$0^\circ \sim 70^\circ (\propto \sin \theta)$
方位角 ϕ	$0^\circ \sim 360^\circ$ で一様ランダム
コア位置	半径 25 km の円内で一様ランダム

5.3.1 A, B を決定する

モンテカルロシミュレーションを用いて、 $\log_{10} S_r$ と $\log_{10} E_{\text{inv}}$ の関係を求める。 S_r の値は再構成で求めたシャワー軸から r 離れた地点での粒子数密度、 E_{inv} は $E_0^{\text{sim}} - E_{\text{cal}}^{\text{rec}}$ で求めた値を用いている。 $E_{\text{cal}}^{\text{rec}}$ は再構成で求められた FD で観測できるエネルギーである。図 5.4 はそれぞれ QGSJET II-04 と EPOS LHC の結果を表している。両図とも上 2 つの図が陽子、下 2 つの図が鉄の結果である。横軸はシャワー軸から距離 $r = 800$ m 地点の粒子数密



(a) QGSJET II-04 を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

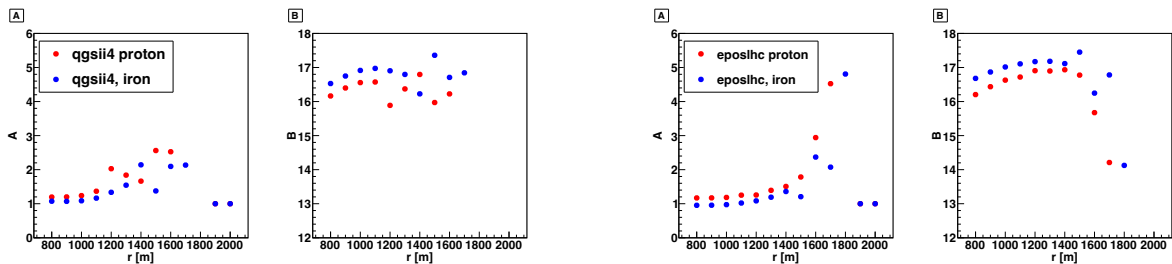
(b) EPOS LHC を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

図 5.4: 手法 1 (5.3 節) の A と B を決めるための図。この図は $r = 800$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。

度 S_{800} を常用対数をとったもの、縦軸は $\log_{10} S_{800}$ に対する E_{inv} に常用対数をとったもので 2 次元ヒストグラムを作成した。イベント数の多少で色が変わっている。2 次元ヒストグラムを生成した後にエネルギーごとに平均値をとって右の図にプロットしている。これを一次関数 (式 5.6) でフィッティングする。

$$y = p0 + p1 \times x \quad (5.6)$$

x は横軸 $\log_{10} S_{800}$ 、 y は縦軸 $\log_{10} E_{\text{inv}}$ のことである。フィッティングパラメーターの $p1$ は式 5.4 の A に、 $p0$ は B に対応している。この方法で r を 100 m 刻みで 800 m ~ 2000 m の間で変化させながら行った。 $r = 800$ m 以外の $r = 900$ m, 1000 m, ..., 2000 m に関する図は C.1 節を参照されたい。得られた A と B の結果を図 5.5 に示す。細かい数値は表 C.2 を参照されたい。陽子と鉄で A, B の値は r によって似た変化をしているが、一致はしない。



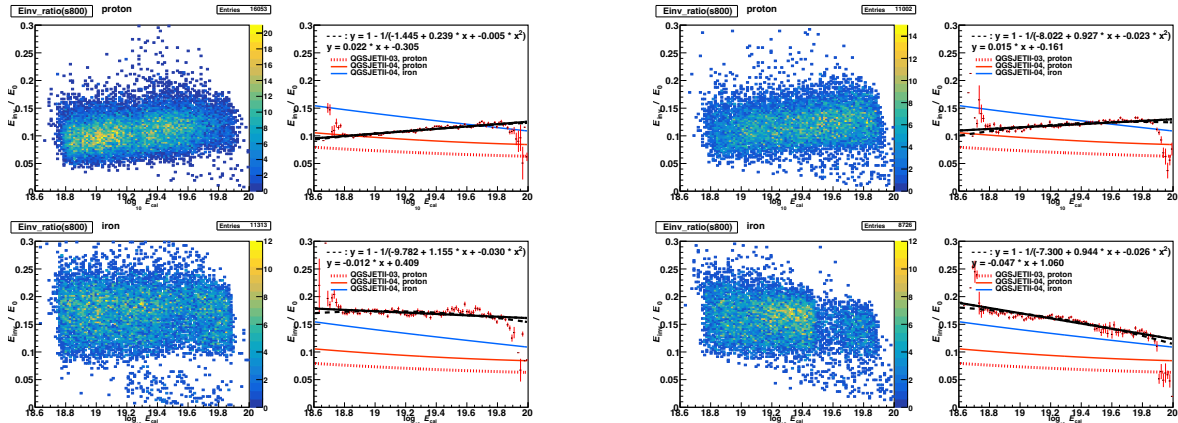
(a) QGSJET II-04 を使用。赤丸は陽子、青丸は鉄の結果。

(b) EPOS LHC を使用。赤丸は陽子、青丸は鉄の結果。

図 5.5: r を変化させたときの A と B の値。(a) QGSJET II-04、(b) EPOS LHC

5.3.2 E_{inv} を求める

前節で求めた A と B を使って、 E_{inv} を求める。図 5.6 は、横軸 $\log_{10} E_{\text{cal}}^{\text{rec}}$ 、縦軸 $\frac{E_{\text{inv}}^{A,B}}{E_0} = \frac{E_{\text{inv}}^{A,B}}{E_{\text{cal}}^{\text{rec}} + E_{\text{inv}}^{A,B}}$ でプロットしたものである。 $E_{\text{inv}}^{A,B}$ はイベントごとの S_{800} と前節で求めた A と B を式 5.4 に代入して求めた E_{inv} である。2次元ヒストグラムを作成し、そのエネルギーごとの平均値を右の図にプロットしてフィッティングを行う



(a) QGSJET II-04 を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

(b) EPOS LHC を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

図 5.6: 手法 1 (5.3 節) を用いた E_0 に対する E_{inv} の推定割合である。この図は $r = 800$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。

た。フィッティング関数はグラフの中に記してあり、2種類のフィッティング関数をしている。結果を比較するために、CORSIKA の出力から求めた割合を陽子は赤で、鉄は青でプロットしている。この方法で r を 100 m 刻みで 800 m ~ 2000 m の間で変化させながら行った。 $r = 800$ m 以外の $r = 900$ m, 1000 m, ..., 2000 m に関する図は C.2 節を参照されたい。図 5.6 より、この方法では E_{inv} の分布が大きく広がっており、正確に求められていない。原因は、 A と B を決定する際に $E_{\text{cal}}^{\text{rec}}$ を用いたことによって、再構成の精度や検出器の応答も考慮したからであると考えられる。次節では再構成結果 $E_{\text{cal}}^{\text{rec}}$ ではなく、CORSIKA シャワーそのものの出力から $E_{\text{cal}}^{\text{CORSIKA}}$ を直接求め、 A と B を決定する。

5.4 手法 2 (A と B の決定に再構成バイアスをなくす)

本節でも、5.3 節と同様に、式 5.4 を満たす A と B を求める。5.4 節では、5.3 節で用いたモンテカルロシミュレーションの条件 (表 5.2) と同様のものを用いた。5.3 節では、 A と B の決定に再構成の結果 $E_{\text{cal}}^{\text{rec}}$ を使用したので、再構成バイアスがかかり分布が大きく広がり、 E_{inv} をはっきりと求めることはできなかった。そこで、再構成結果ではなく CORSIKA シャワーの出力から直接 $E_{\text{cal}}^{\text{CORSIKA}}$ を求め、CORSIKA シャワーの宇宙線のエネルギーとの差分を取り E_{inv} を求めた。

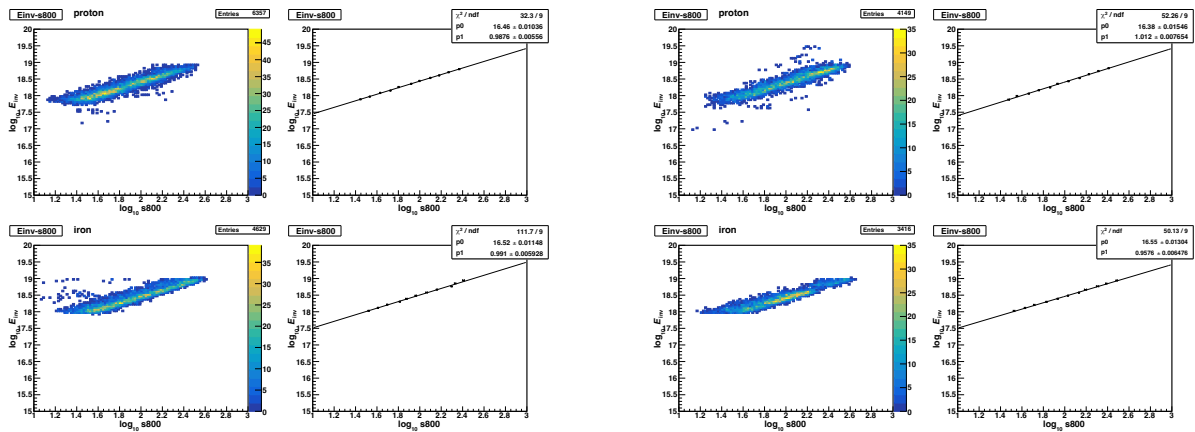
5.4.1 A と B を決定する

モンテカルロシミュレーションを用いて、 $\log_{10} S_r$ と $\log_{10} E_{\text{inv}}$ の関係を求める。 S_r の値は再構成で求めた値、 E_{inv} は COROSIKA で求めた E_{cal} の割合から決定している。シミュレーションしたエネルギー E_0^{sim} は表 5.2 のエネルギーの値通りではなくポアソン分布でスケールさせているので、図 5.2 のようにして求めているものよりも

少しずつズレている。これを考慮するためにスケールの前後で E_{cal} の割合は変わらないものとして E_{cal} も次の式でスケールさせた。

$$E_{\text{cal}}^{\text{CORSIKAscaled}} = E_0^{\text{sim}} \times \frac{E_{\text{cal}}^{\text{CORSIKA}}}{E_0^{\text{CORSIKA}}} \quad (5.7)$$

図 5.7 は、横軸が $\log_{10} S_r$ 、縦軸は $E_{\text{inv}} = E_0^{\text{sim}} - E_{\text{cal}}^{\text{CORSIKAscaled}}$ で求めた $\log_{10} E_{\text{inv}}$ をプロットしたものである。図 5.7a は QGSJET II-04 の結果を、図 5.7b は EPOS LHC の結果を表している。両図とも上 2 つの図が陽子、下 2 つの図が鉄の結果であり、2 次元ヒストグラムを生成した後にエネルギーごとに平均値をとって右の図にプロットしている。これを一次関数 (式 5.6) でフィッティングする。図 5.4 と比べて、縦軸方向のばらつきが抑えられて

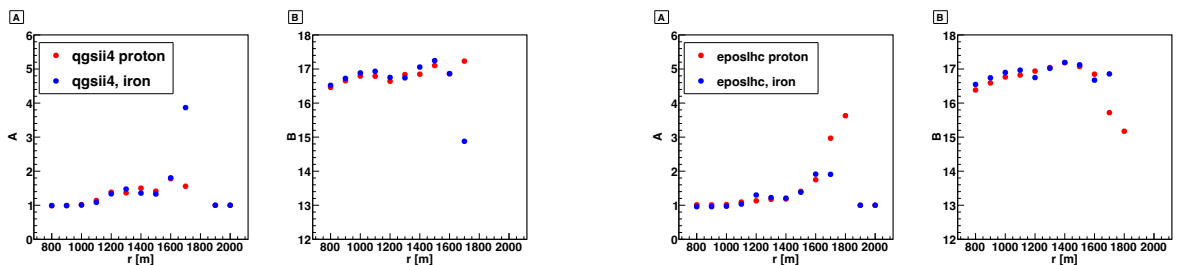


(a) QGSJET II-04 を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

(b) EPOS LHC を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

図 5.7: 手法 2 (5.4 節) の A と B を決めるための図。この図は $r = 800 \text{ m}$ のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。

いることが分かる。 $E_{\text{cal}}^{\text{rec}}$ ではなく $E_{\text{cal}}^{\text{CORSIKA}}$ を用いることにより、再構成によるバイアスがなくなり、より正確な E_{inv} についてのグラフになっているからである。フィッティングパラメーターの $p1$ は式 5.4 の A に、 $p0$ は B に対応している。この方法で r を 100 m 刻みで $800 \text{ m} \sim 2000 \text{ m}$ の間で変化させながら行った。 $r = 800 \text{ m}$ 以外の $r = 900 \text{ m}, 1000 \text{ m}, \dots, 2000 \text{ m}$ に関する図は D.1 節を参照されたい。得られた A と B の結果を図 5.8 に示す。細かい数値は表 D.3 を参照されたい。A, B の値は r の変化とともに変化しているが、陽子と鉄の値が前章の結果よりも近づいていることがわかる。



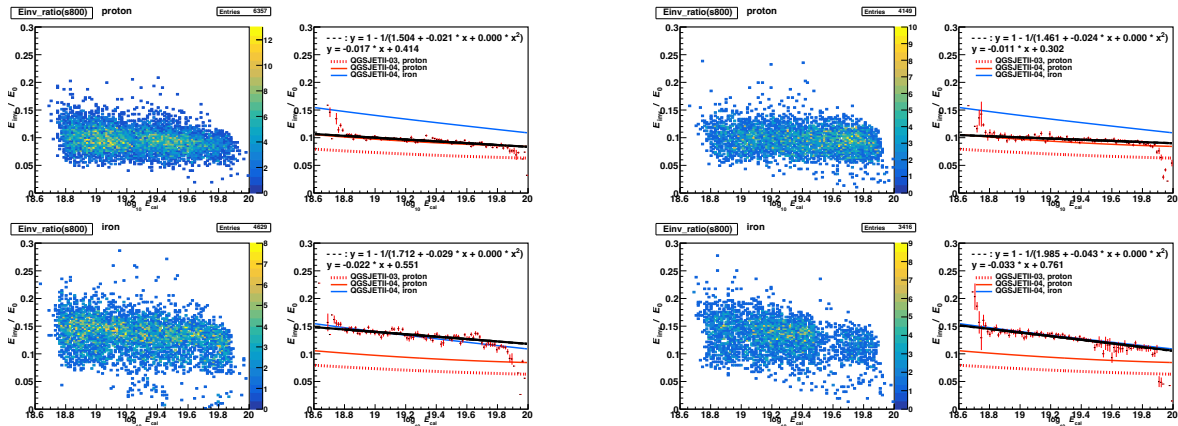
(a) QGSJET II-04 を使用。赤丸は陽子、青丸は鉄の結果。

(b) EPOS LHC を使用。赤丸は陽子、青丸は鉄の結果。

図 5.8: r を変化させたときの A と B の値。(a) QGSJET II-04、(b) EPOS LHC

5.4.2 E_{inv} を求める

前節で求めた A と B を使って、 E_{inv} を求める。図 5.9 は、横軸 $\log_{10} E_{cal}^{rec}$ 、縦軸 $\frac{E_{inv}^{A,B}}{E_0} = \frac{E_{inv}^{A,B}}{E_{cal}^{rec} + E_{inv}^{A,B}}$ でプロットしたものである。 $E_{inv}^{A,B}$ はイベントごとの S_{800} と前節で求めた A と B を式 5.4 に代入して求めた E_{inv} である。2次元ヒストグラムを作成し、その平均値を右の図にプロットしてフィッティングを行った。フィッティン



(a) QGSJET II-04 を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

(b) EPOS LHC を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

図 5.9: 手法 2 (5.4 節) を用いた E_0 に対する E_{inv} の推定割合である。この図は $r = 800$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。

グ関数はグラフの中に記してあり、2 種類のフィッティング関数をしている。結果を比較するために、CORSIKA の出力から求めた割合を陽子は赤で、鉄は青でプロットしている。この方法で r を 100 m 刻みで 800 m ~ 2000 m の間で変化させながら行った。 $r = 800$ m 以外の $r = 900$ m, 1000 m, ..., 2000 m に関する図は D.2 節を参照されたい。図 5.6 と比べて、GH function で求めた線に一致していることが分かる。

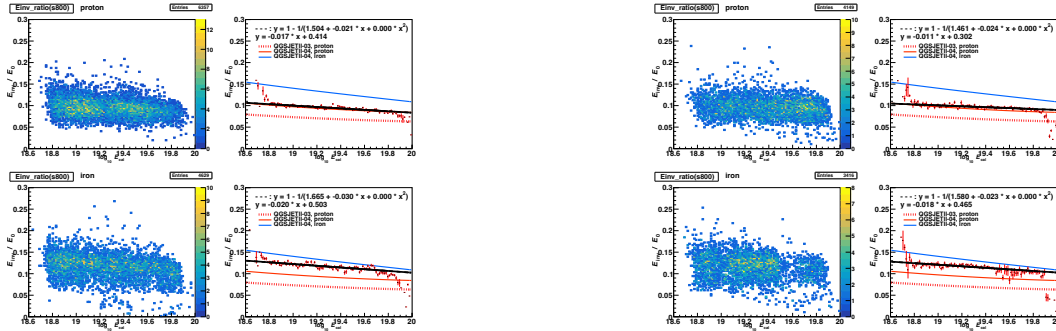
この結果は、陽子をシミュレーションして求めた A と B を用いて陽子による空気シャワーの Invisible Energy を推定できることと鉄をシミュレーションして求めた A と B を用いて鉄による空気シャワーの Invisible Energy を推定できることを示している。つまり、宇宙線核種が分かれば適切な A と B を用いて Invisible Energy を補正することができる。しかし、空気シャワー観測では宇宙線核種を特定することは難しく、核種がわからない状況では適切な A と B がわからず補正できない。次の節では異なる核種の A と B を使った際の推定値への影響を調べた結果を示す。

5.4.3 核種の違いによる影響

前節では、陽子と鉄それぞれのシミュレーションで決めた A と B を用いて、同じ核種の Invisible Energy を推定できることを確かめた。実データでは、宇宙線核種がわからないのでどちらの A と B を使えばいいのかわからない。本節では、異なる核種で補正した場合の影響を見る。結果は、陽子で決めた A と B を使用したとき、鉄で決めた A と B を使用したとき、陽子と鉄で決めた A と B の平均値を使用したときの計 3 パターンを示している。

陽子で決めたAとBを使う

AとBは図5.8の値を使用した。図5.9との違いは、鉄の E_{inv} を求めるときに陽子で決めたAとBを使っているという点である。図5.10の陽子のプロット(上段)は、図5.9と同じものである



(a) QGSJET II-04 を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

(b) EPOS LHC を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

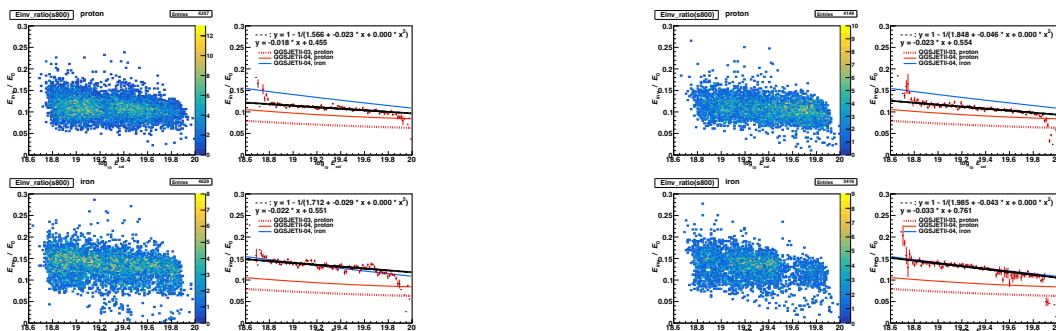
図5.10: 手法2(5.4節)を用いた E_0 に対する E_{inv} の推定割合である。核種の違いによる影響を知るために陽子で決めたAとBを使っている。この図は $r = 800\text{m}$ のときを示している。ハドロン相互作用モデルは(a)ではQGSJET II-04、(b)ではEPOS LHCを使用している。

r を100m刻みで800m~2000mの間で変化させながら行った。 $r = 800\text{m}$ 以外の $r = 900\text{m}, 1000\text{m}, \dots, 2000\text{m}$ に関する図はD.2節を参照されたい。

鉄の結果を見ると、鉄で決めたAとBを使っているときと比べて約1%~2%値が小さくなっている事がわかる。陽子で決めたAとBを使用したため結果も陽子の結果の線に寄っており、もし宇宙線核種が鉄だったときに陽子で決めたAとBを使うと、値を小さく見積もってしまうことが分かる。

鉄で決めたAとBを使う

AとBは図5.8の値を使用した。図5.9との違いは、陽子の E_{inv} を求めるときに鉄で決めたAとBを使っているという点である。図5.11の鉄のプロット(下段)は、図5.9と同じものである



(a) QGSJET II-04 を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

(b) EPOS LHC を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

図5.11: 手法2(5.4節)を用いた E_0 に対する E_{inv} の推定割合である。核種の違いによる影響を知るために鉄で決めたAとBを使っている。この図は $r = 800\text{m}$ のときを示している。ハドロン相互作用モデルは(a)ではQGSJET II-04、(b)ではEPOS LHCを使用している。

r を 100 m 刻みで 800 m ~ 2000 m の間で変化させながら行った。 $r = 800$ m 以外の $r = 900$ m, 1000 m, ..., 2000 m に関する図は D.2 節を参照されたい。

陽子の結果を見ると、鉄で決めた A と B を使っているときと比べて約 1% ~ 2% 値が大きくなっている事がわかる。鉄で決めた A と B を使用したため結果も鉄の結果の線に寄っており、もし宇宙線核種が陽子だったときに鉄で決めた A と B を使うと、値を大きく見積もってしまうことが分かる。

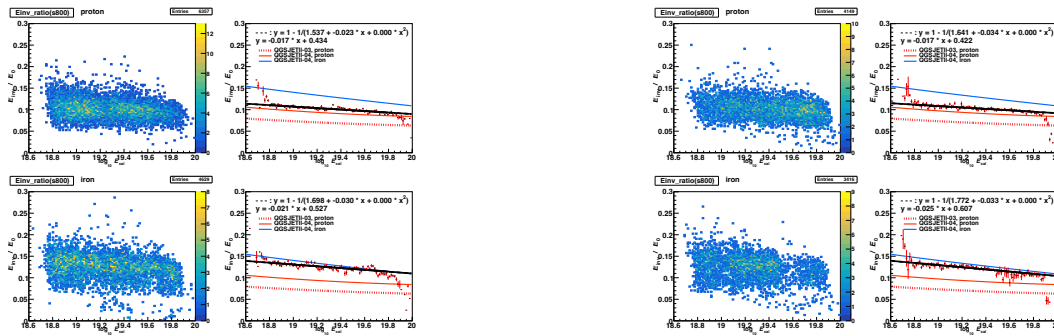
陽子と鉄で決めた A と B の平均値を使う

A と B は図 5.8 の値を使用した。図 5.9 との違いは、陽子と鉄で決めた A と B の平均値を使っているという点である。つまり、

$$A = \frac{A_P + A_{Fe}}{2} \quad (5.8)$$

$$B = \frac{B_P + B_{Fe}}{2} \quad (5.9)$$

で決めた A と B を使用して計算している。



(a) QGSJET II-04 を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

(b) EPOS LHC を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

図 5.12: 手法 2 (5.4 節) を用いた E_0 に対する E_{inv} の推定割合である。核種の違いによる影響を知るために陽子と鉄で決めた A と B の平均値を使っている。この図は $r = 800$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。

r を 100 m 刻みで 800 m ~ 2000 m の間で変化させながら行った。 $r = 800$ m 以外の $r = 900$ m, 1000 m, ..., 2000 m に関する図は D.2 節を参照されたい。

陽子と鉄の両方とも本来の割合の線からズレている。 A と B に平均値を用いたためお互いが他方の結果に近づいている。

5.5 手法 3 (DX を用いる)

5.4 節の結果より、宇宙線核種ごとに決定した A と B を使うと同じ核種の Invisible Energy を推定できるが、異なる核種はうまく推定できないことがわかった。これを解決するためには、核種によって A と B を使い分けが必要だが、実データでは核種を特定することが難しい。そこで、宇宙線核種に敏感な X_{max} を含むパラメーター DX を用いて、核種を特定せずとも陽子と鉄で決めた A と B からスケールさせてイベントごとに A と B を決める手法を開発した。

5.5.1 DX

宇宙線核種を特定することは難しいが、核種に敏感なパラメーターとして空気シャワーの粒子数が最大になるまでに通過した大気深さ X_{\max} がある。 X_{\max} を陽子と鉄で比べると、陽子の方が深くなるのが分かっている。今回の手法で用いたのは、この X_{\max} と天頂角の情報を含む DX というパラメーターであり、 X_{\max} に達してから地表に到達するまでに通過した大気深さを表している (図 5.13)。

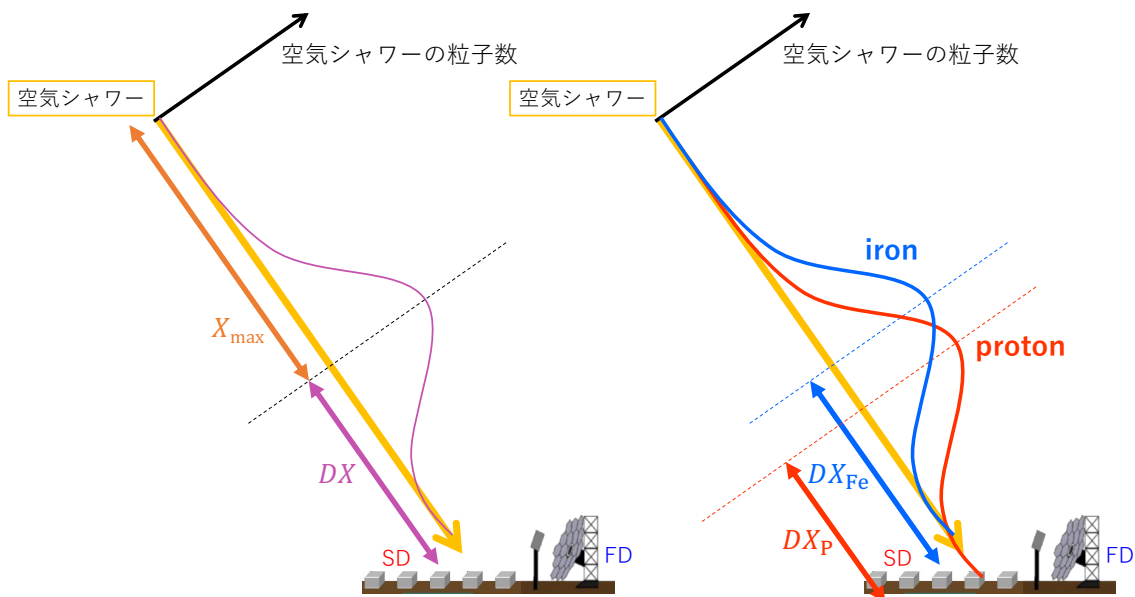


図 5.13: (左図) 空気シャワーの粒子数が最大になるまでに通過した大気深さ X_{\max} と X_{\max} に達してから地表に到達するまでに通過した大気深さ DX を示している。(右図) DX の陽子と鉄による違いを示している。

DX は TA 実験サイトの平均大気深さ 876.5 g/cm^2 と天頂角 θ を用いて式 5.10 のように表すことができる。

$$DX = \frac{876.5 \text{ g/cm}^2}{\cos \theta} - X_{\max} \quad (5.10)$$

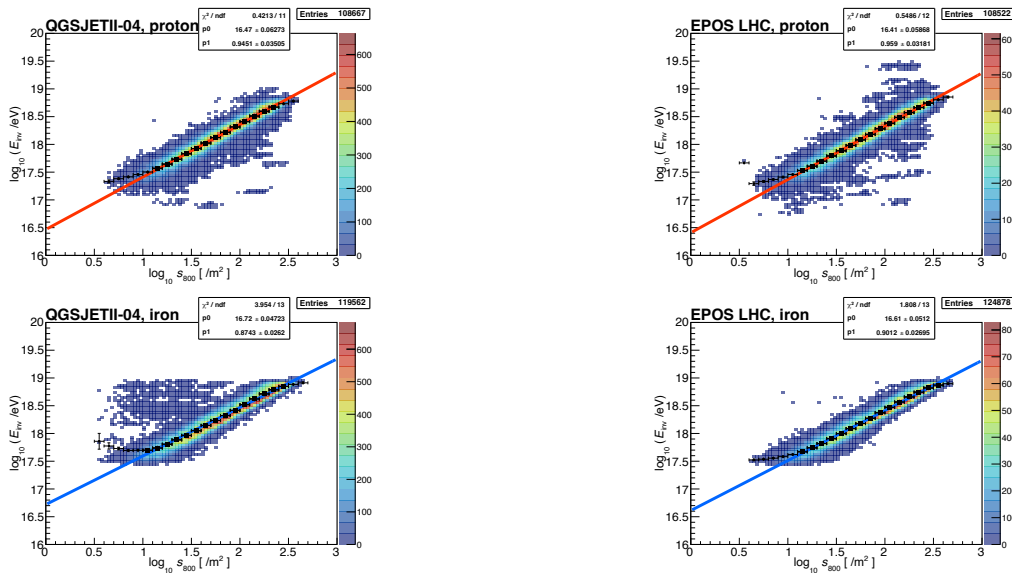
5.5 節で用いたモンテカルロシミュレーションの条件を表 5.3 に示す。表 5.2 からの変更点はエネルギー範囲の下限を広げたこととシミュレーションに用いるキャリブレーションファイルの期間を FD 観測が行われている期間に限定したことである。これにより実データ解析と同様のキャリブレーションファイルを使用することができる。

表 5.3: モンテカルロシミュレーション条件

ハドロン相互作用モデル	QGSJET II-04, EPOS LHC
宇宙線核種	陽子、鉄
エネルギー E	$10^{18.5} \text{ eV}$ から $10^{20.0} \text{ eV}$ まで
天頂角 θ	$0^\circ \sim 70^\circ (\propto \sin \theta)$
方位角 ϕ	$0^\circ \sim 360^\circ$ で一様ランダム
コア位置	半径 25 km の円内で一様ランダム

5.5.2 A と B を決める

モンテカルロシミュレーションを用いて、 $\log_{10} S_r$ と $\log_{10} E_{\text{inv}}$ の関係を求める。図 5.14 は横軸が $\log_{10} S_r$ 、縦軸が $E_0^{\text{sim}} - E_{\text{cal}}^{\text{CORSIKAscaled}}$ で求めた $\log_{10} E_{\text{inv}}$ をプロットしたものである。図 5.14a は QGSJET II-04 の結果を、図 5.14b は EPOS LHC の結果を表している。両図とも上図が陽子、下図が鉄の結果であり、2次元ヒストグラムを生成した後に横軸を 30 ビンに分け、ビンごとの縦軸の平均値と標準誤差を黒色のデータ点でプロットしている。データ点の中でエントリー数が 3000 以上のものを用いて一次関数 (式 5.6) でフィッティングする。フィッティン

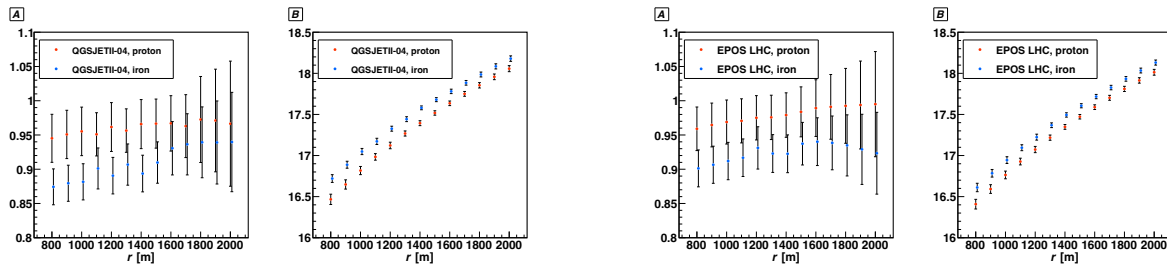


(a) QGSJET II-04 を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

(b) EPOS LHC を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

図 5.14: 手法 3 (5.5 節) の A と B を決めるための図。この図は $r = 800$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。

パラメーターの p_1 は式 5.4 の A に、 p_0 は B に対応している。この方法で r を 100 m 刻みで 800 m ~ 2000 m の間で変化させながら行った。 $r = 800$ m 以外の $r = 900$ m, 1000 m, ..., 2000 m に関する図は E.1 節を参照されたい。得られた A と B の結果を図 5.15 に示す。細かい数値は表 E.4 を参照されたい。A と B をそれぞれのモデル、核種ごとに A_P, B_P, A_{Fe}, B_{Fe} とする。



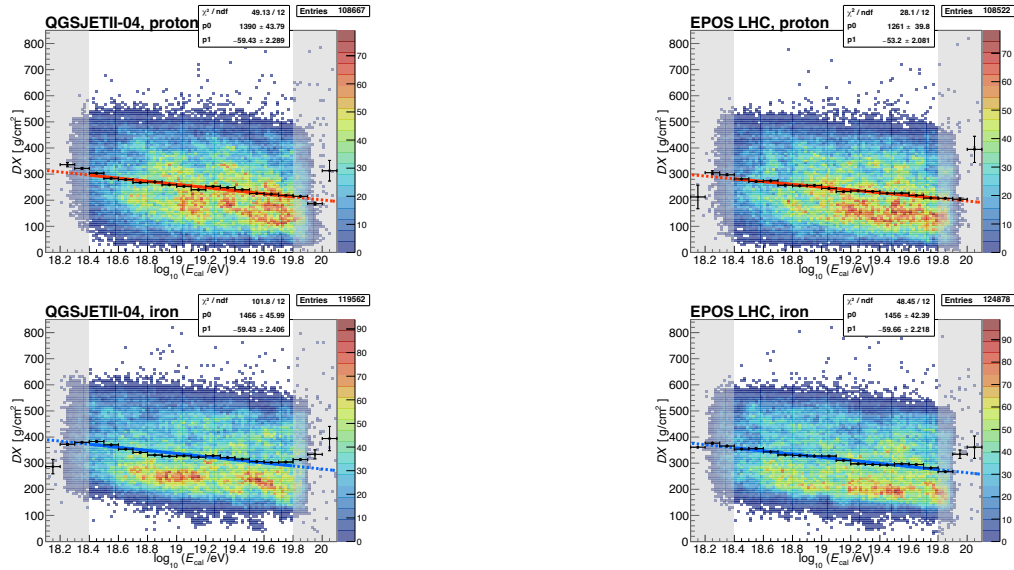
(a) QGSJET II-04 を使用。赤丸は陽子、青丸は鉄の結果。

(b) EPOS LHC を使用。赤丸は陽子、青丸は鉄の結果。

図 5.15: r を変化させたときの A と B の値。(a) QGSJET II-04、(b) EPOS LHC

5.5.3 A と B を DX でスケールさせる

まず、図 5.16 のように E_{cal} と DX の関係の 2 次元ヒストグラムを作成する。2 次元ヒストグラムの中で E_{cal} ごとの平均値と標準偏差を右にプロットし、直線でフィッティングすることによって、 E_{cal} が決まったときの DX の典型値が一意に決まる。この決まった値を核種ごとに DX_{P} , DX_{Fe} とする。



(a) QGSJET II-04 を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

(b) EPOS LHC を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

図 5.16: 横軸 $\log_{10} E_{\text{cal}}$ 、縦軸 DX を表す図。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。

式 5.10 を使って、イベントごとに DX を求める事ができる。 DX を次の式に代入して A と B をイベントごとに計算する。

$$A = A_{\text{P}} + \frac{DX - DX_{\text{P}}}{DX_{\text{Fe}} - DX_{\text{P}}} (A_{\text{Fe}} - A_{\text{P}}) \quad (5.11)$$

$$B = B_{\text{P}} + \frac{DX - DX_{\text{P}}}{DX_{\text{Fe}} - DX_{\text{P}}} (B_{\text{Fe}} - B_{\text{P}}) \quad (5.12)$$

これは、 DX の値が陽子寄りか鉄寄りかで A と B の値をスケールさせるようになっている。図 5.17 に式 5.10 のイメージを示す。

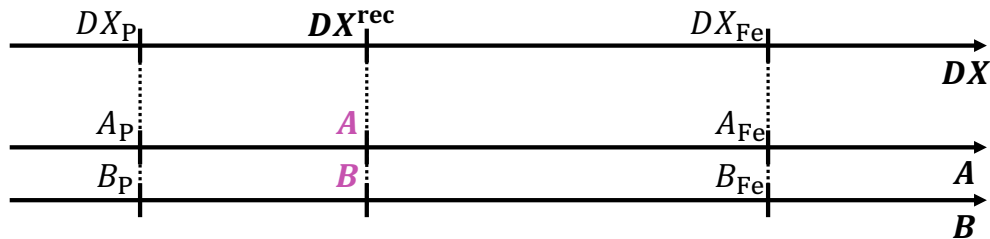
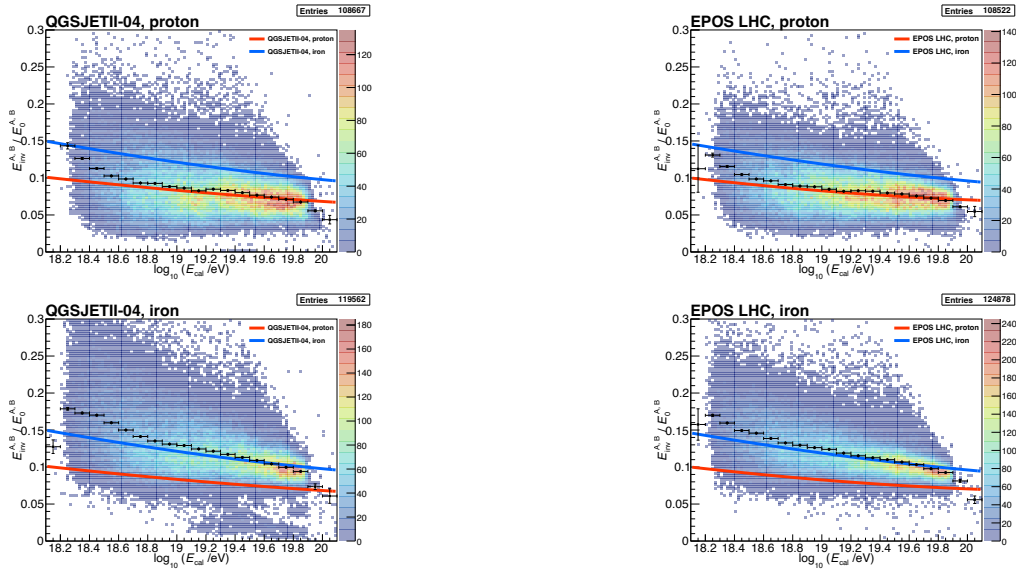


図 5.17: DX を用いた A と B のスケール方法のイメージ

5.5.4 E_{inv} を求める

前節で求めた A と B を使って、 E_{inv} を求める。図 5.18 は、横軸 $\log_{10} E_{\text{cal}}^{\text{rec}}$ 、縦軸 $\frac{E_{\text{inv}}^{A,B}}{E_0} = \frac{E_{\text{inv}}^{A,B}}{E_{\text{cal}}^{\text{rec}} + E_{\text{inv}}^{A,B}}$ でプロットしたものである。 $E_{\text{inv}}^{A,B}$ はイベントごとの S_{800} と前節で求めた A と B を式 5.4 に代入して求めた E_{inv} である。2次元ヒストグラムを作成し、 E_{cal} ごとに縦軸の平均値と標準誤差をプロットした。結果を比較するため



(a) QGSJET II-04 を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

(b) EPOS LHC を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

図 5.18: 手法 3 (5.5 節) を用いた E_0 に対する E_{inv} の推定割合である。この図は $r = 800$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。

に、CORSIKA の出力から求めた割合を陽子は赤で、鉄は青でプロットしている。この方法で r を 100 m 刻みで 800 m ~ 2000 m の間で変化させながら行った。 $r = 800$ m 以外の $r = 900$ m, 1000 m, ..., 2000 m に関する図は E.2 節を参照されたい。図 5.18 から、陽子は CORSIKA の陽子シャワーで求めた曲線に、鉄は CORSIKA の鉄シャワーで求めた曲線と一致していることがわかる。 E_{cal} の小さい領域で一致していないのは、シミュレーションを行ったエネルギー範囲外の値を外挿によって推定しているためである。

5.5.5 E_{inv} のエネルギー決定バイアス

図 5.19 は、横軸 $\log_{10} E_0^{\text{sim}}$ 、エネルギーごとに $\left(E_{\text{inv}}^{A,B} - E_{\text{inv}}^{\text{CORSIKA scaled}} \right) / E_{\text{inv}}^{\text{CORSIKA scaled}}$ の値をプロットしたものである。

2次元ヒストグラムを作成し、その平均値を右の図にプロットした。また、図 5.19 からこの手法でのエネルギー決定バイアスはどのパターンでも $\pm 10\%$ の範囲内である。

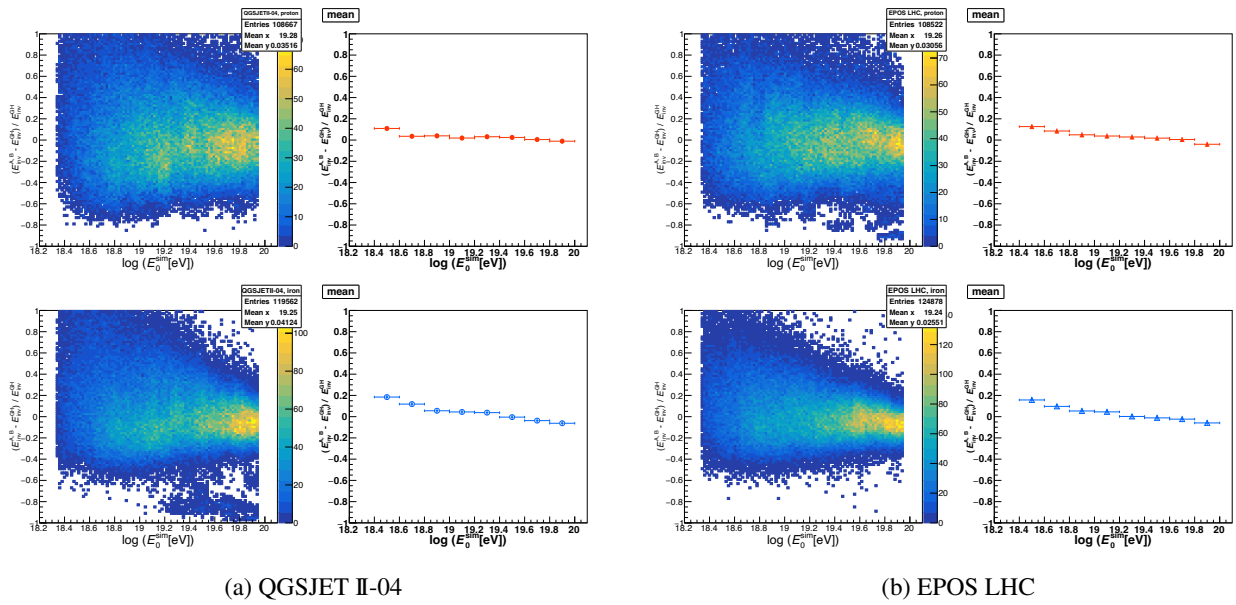


図 5.19: $r = 800 \text{ m}$ のときの決定精度を表す図。(a) QGSJET II-04、(b) EPOS LHC

第6章

実データ解析と議論

実データの Invisible Energy を推定するために、5.5 節の方法で解析を行った。実データは BRM ステーションと LR ステーションで観測された Hybrid イベントであり、両ステーションで観測されたイベントは再構成に使われた PMT の本数が多かったステーションを使って再構成をしている。観測期間は 2008 年 5 月から 2020 年 2 月の間である。

図 6.1 に結果を示す。図 6.1a はハドロン相互作用モデル QGSJET II-04 で決めた A と B を使用した結果、

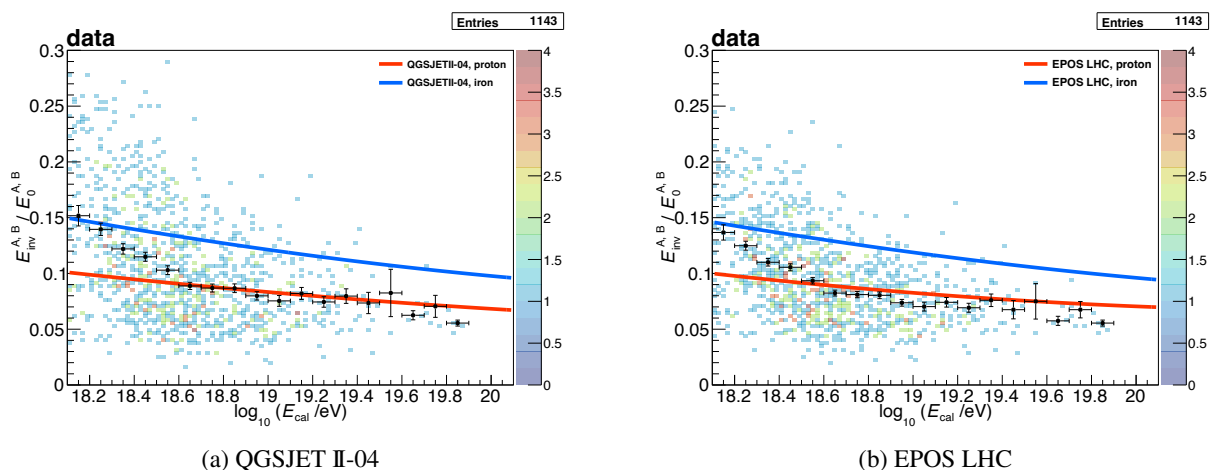


図 6.1: 手法 3 (5.5 節) を用いた実データの E_0 に対する E_{inv} の推定割合である。この図は $r = 800$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。

図 6.1b はハドロン相互作用モデル EPOS LHC で決めた A と B を使用した結果を示している。ハドロン相互作用モデルを変えても実データ解析の結果は大きくは変わらないことが分かった。また、エネルギーが $10^{18.5}$ eV 未満では陽子と鉄の間にデータ点があり、 $10^{18.5}$ eV 以上では陽子と重なるという結果になった。 A と B を決めるときに使ったモンテカルロシミュレーションのエネルギー範囲が $10^{18.5}$ eV 以上であり (表 5.3)、 $10^{18.5}$ eV 未満は外挿で求まっているため、信用できない。

この結果は、TA 実験のデータを用いて行われた先行研究 (図 1.12) と一致する結果となったが、依然として Auger の結果に比べて約 5% 低いことを表している。ミュオンパズルの存在をふまえると、 S_r がミュオン成分に相関していれば実データでの E_{inv} の割合はシミュレーションで得られる割合よりも高く出ることが予想されるが今回そのような結果は得られなかった。

また、TA 実験を低エネルギー側に拡張した TALE 実験でも今回の手法を適用すれば、図 1.15 の KASCADE 実

験や IceTop による低エネルギー側の結果とも比較することができるようになり、他のどの実験も測定していないエネルギー領域に踏み込むことができる。

第7章

結論

宇宙線核種に依らない Invisible Energy の決定手法を開発した。Invisible Energy の大きさと相関するパラメーターとして、FD 観測から得られる空気シャワーの粒子数の最大発達から通過した大気深さ DX と SD 解析から得られる地表での粒子数密度 S_r を使用した。結果は、ハドロン相互作用モデル QGSJET II-04 と EPOS LHC、陽子および鉄の全 4 パターンに Invisible Energy の決定バイアスは、いずれの組み合わせでも $\pm 10\%$ の範囲内であった。

また、開発した方法で実データの解析を行った。結果は、陽子に一致するというものであった。

今後は、開発した手法で E_{inv} を補正しエネルギー決定を行い、実データとモンテカルロシミュレーションの比較をすることや SD と FD のエネルギースケールを決め直し、エネルギースペクトルを書くことを計画している。

謝辞

本研究を進めるにあたり、数多くのご指導・ご助言をいただいた全ての方に感謝致します。

指導教員である大阪公立大学の藤井俊博准教授に感謝申し上げます。魅力的な先行研究を紹介していただき、無事にアップデートすることができました。何度も進級や卒業を諦めようかと思うほどの熱心なご指導を賜り、思い出さない日はありません。社会で強く生きていく力を身につけることができました。

大阪公立大学の常定芳基教授に感謝申し上げます。宇宙線に関する知識や発表中の言葉遣いについて多くのことを学びました。修論の添削では可愛い絵文字がたくさんのできる言葉を頂きました。ぜひこれからも後輩たちの添削をするときに使ってくださいね。

東京大学の藤田慧太郎さんに深く感謝申し上げます。毎週開催していただいたミーティングでは、解析に関する助言をいただき研究の進む方向を示し続けてくださいました。TA グループでは、藤田さんが何人いるのか分からなくなるくらい多くの人々の解析をサポートされていて、私も藤田さんのような頼りにされる存在になりたいです。報告してくれなかったこと忘れてないですけど、ご結婚おめでとうございました。

東京大学宇宙線研究所の荻尾彰一所長、埴隆志准教授、大島仁特任研究員、信州大学の富田孝幸助教、大阪電気通信大学の多米田裕一郎准教授に感謝申し上げます。グループミーティングの発表では、鋭い質問や議論で盛り上げてくださいました。

大阪公立大学の横田晴香さん、申興秀特任助教、櫻井駿介特任研究員、Fraser Bradfield 氏に深く感謝申し上げます。横田さんには出張などの事務手続きでお世話になりました。いつも私達のことを気にかけてくださっていたこと覚えています。Hybrid 解析の師匠の申さん、解析や検出器、観測について多くのことについてご指導いただきました。また、弟子の会しましょうね。櫻井さん、研究生活からプライベートまでお世話になりました。これからも宇宙線陽キャ代表として盛り上げてください。フレーザー、私がいつもふらっと研究室に行っても話を聞いてくれてありがとう。研究の話や遊びの話楽しかったです。いつかオーストラリア遊びに行きます。

大阪公立大学の古前壱朗氏、改めこまえもん、3年間ありがとうございました。初めはパソコンのセットアップから最後は修論の添削まで丸3年本当にお世話になりました。なぜか私のほうが感慨深くなっています。一番手にかかる後輩だったかもしれませんが、こまえもんの後輩として研究室で過ごせたことを心から幸せに思います。何か困ったことがあるといつも助けてくれ、本当に頼りになる存在でした。心から尊敬しています。

大阪公立大学同期の河内祐輔さん、小林拓郎さん、古坊龍一さんに感謝致します。かわちにビビりながら B4 のときに研究室に入りましたが、一番おもしろい同期たちでした。3人と一緒に卒業するために研究したと言っても過言ではないです。かわちくん、同じ TA グループに入って出張などでもお世話になりました。同期の誰よりも研究熱心でとても尊敬していました。修論ラストスパート一緒に走ってくれてありがとう。こぼやしくん、最後の最後までデカイことに慣れずに終わりましたが、デカイだけじゃなくて話のセンスも光っていることが分かりました。私も話をまわせるように見習いたいと思います。こぼん、とりあえずお互い乗り越えた、えらい。いつも私のこぼーんの呼びかけに答えてくれてありがとう。これからも優しいこぼんでいてください。

TA グループ同期である東京大学の小山千里さん、大阪電気通信大学の楠森優貴さん、信州大学の水野航太さん、佐藤大輝さんに感謝致します。研究会の度に、同期の活躍に刺激を受けて頑張ることができました。

研究室で出会った方々に感謝申し上げます。岩崎葵先輩、1年間しか研究室で一緒にできませんでしたが、親しみやすくすぐに大好きになりました。研究のことを聞くといつでも教えてくれて、お忙しい時期にもシミュレーションの基本から教えて下さいました。また、いつでも笑いをとりにいく関西人の基本も教えていただきました。有村龍平先輩、研究室や就活でお世話になりました。rootを使ってフィッティングをすること一番初めに教えていただいたこと今でも覚えています。普段は見せないけど、研究でも就活でも真面目に要領よくこなしていく姿がとてもかっこよかったです。高橋薫先輩、他大の2歳下の後輩にもいつも優しく接して下さってありがとうございました。野沢温泉で出会ってから、研究会の度に唯一の女性の先輩がいてくれて心強かったです。敷田淳さん、石井達希さん、遠藤康平さん、太田新一郎さん、能勢幸弘さん、加藤晴香さん、橘春花さん、中川心媛氏、松下治斗氏、お世話になりました。また、課外活動では水泳部と森政会の皆さんのおかげで楽しく過ごすことができました。

最後になりましたが、ずっと味方でいてくれて応援し続けてくれた家族と友人に感謝致します。3年間ありがとうございました。

付録

A CORSIKA シャワー数

ハドロン相互作用モデル 2 種類 (QGSJET II-04、EPOS LHC) \times 宇宙線核種 2 種類 (陽子、鉄) の計 4 パターンそれぞれの CORSIKA シャワー数を示す。エネルギーごとにシャワー数のばらつきがある (表 5.1)。

表 A.1: 本研究に用いた CORSIKA シャワー数

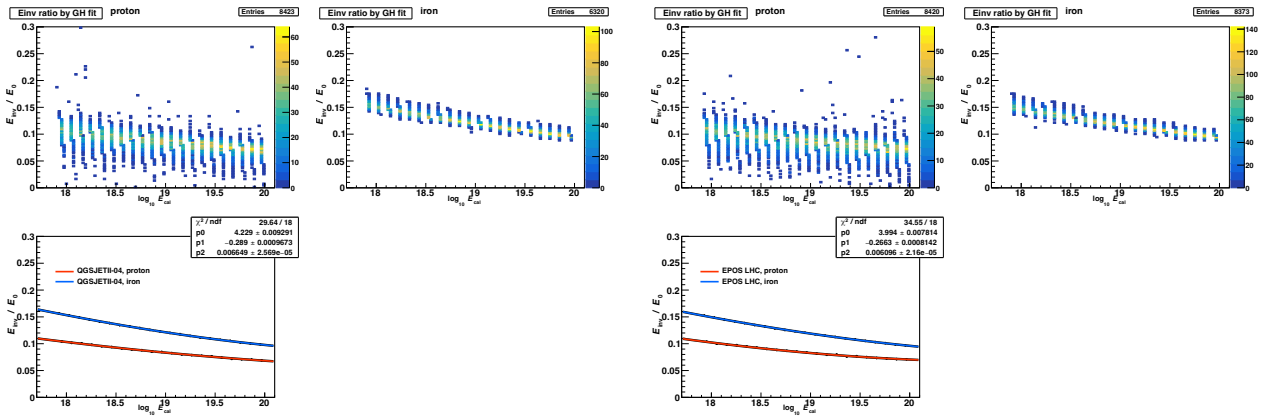
$\log_{10}(E/\text{eV})$	QGSJET II-04、陽子	QGSJET II-04、鉄	EPOS LHC、陽子	EPOS LHC、鉄
18.0	400	301	401	399
18.1	400	301	401	400
18.2	400	301	401	398
18.3	400	301	401	400
18.4	400	301	401	399
18.5	400	301	401	398
18.6	400	301	401	398
18.7	400	301	401	398
18.8	400	301	401	400
18.9	400	301	401	399
19.0	400	301	401	400
19.1	400	301	401	398
19.2	400	301	401	400
19.3	400	301	401	400
19.4	400	301	401	400
19.5	401	301	401	399
19.6	400	301	401	399
19.7	400	301	401	400
19.8	400	301	401	400
19.9	400	301	401	400
20.0	400	301	401	397

B CORSIKA で計算された Invisible Energy

図 5.3 で示した GH function を使って求めた E_0^{CORSIKA} に対する $E_{\text{inv}}^{\text{CORSIKA}}$ の割合の求め方の詳細を示す。図 B.1a、図 B.1b は、それぞれ QGSJET II-04、EPOS LHC を使ったシャワーの CORSIKA 出力の long ファイルから求めた $E_{\text{inv}}^{\text{CORSIKA}}$ の分布である。それぞれの上 2 つの図の分布が分かれているのは、エネルギーごとに集まっているからである（左上：陽子、右上：鉄）。それぞれの下図は上の図のエネルギーごとの平均値をプロットし、式 B.1 でフィッティングしたものである。

$$y = 1 - \frac{1}{p0 + p1 \times x + p2 \times x^2} \quad (\text{B.1})$$

それぞれのモデルの下図のグラフに描かれている線をまとめたものが図 5.3 である。



(a) QGSJET II-04 を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

(b) EPOS LHC を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

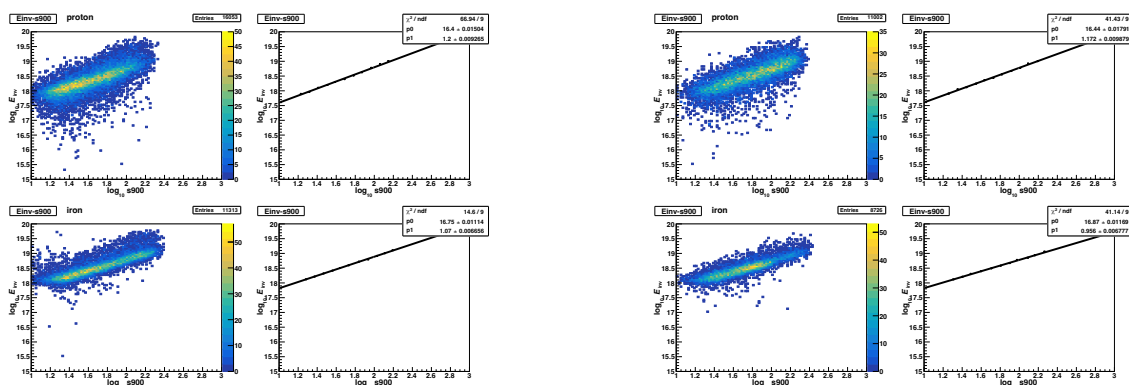
図 B.1: GH function を使って求めた E_0^{CORSIKA} に対する $E_{\text{inv}}^{\text{CORSIKA}}$ の割合を表す図。横軸は CORSIKA シャワーの long ファイルから得られる大気深さごとの荷電粒子のエネルギー損失量を GH function でフィッティングし無限遠まで積分して用いて求めた $E_{\text{cal}}^{\text{CORSIKA}}$ に常用対数をとったものである。縦軸には $E_{\text{cal}}^{\text{CORSIKA}}$ ごとの $\frac{E_{\text{inv}}^{\text{CORSIKA}}}{E_0^{\text{CORSIKA}}}$ になっている。(a) QGSJET II-04 (b) EPOS LHC のハドロン相互作用モデルを用いた結果であり、それぞれのモデルの左上の図が陽子、右上の図が鉄の結果である。2次元ヒストグラムは CORSIKA シャワーのエネルギーごとに集まっており、集まりごとに平均値をプロットし式 B.1 を用いてフィッティングしたものを左下に描いている。

C 手法 1

C.1 r の値を変化させたときの $\log_{10} S_r$ と $\log_{10} E_{\text{inv}}$ の関係 ($E_{\text{inv}} = E_0^{\text{sim}} - E_{\text{cal}}^{\text{rec}}$)

A と B を決めるためのグラフ

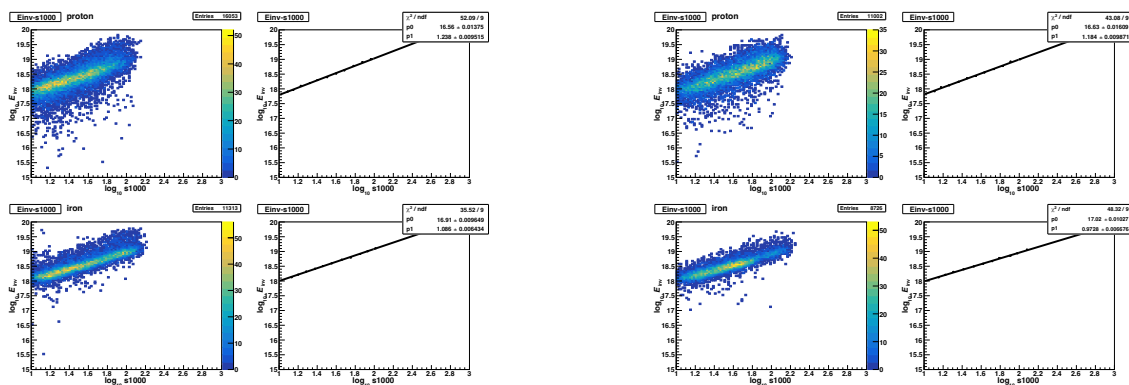
図 5.4 と同様に描いており、一次関数でフィッティングしてフィッティングパラメーターから A と B を決めている。具体的な A と B の値は表 C.2 を参照されたい。



(a) QGSJET II-04 を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

(b) EPOS LHC を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

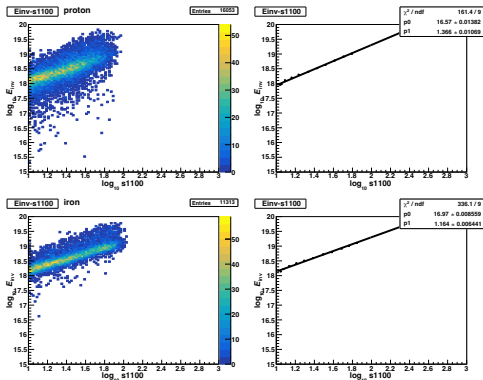
図 C.2: 手法 1 (5.3 節) の A と B を決めるための図。この図は $r = 900$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。



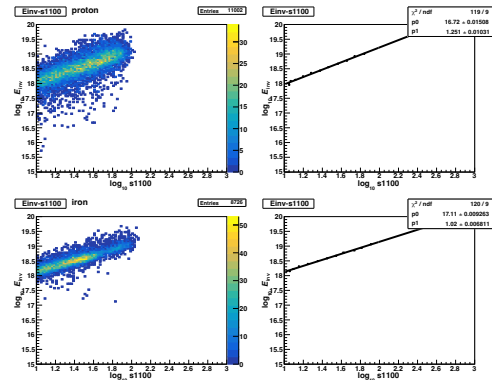
(a) QGSJET II-04 を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

(b) EPOS LHC を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

図 C.3: 手法 1 (5.3 節) の A と B を決めるための図。この図は $r = 1000$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。

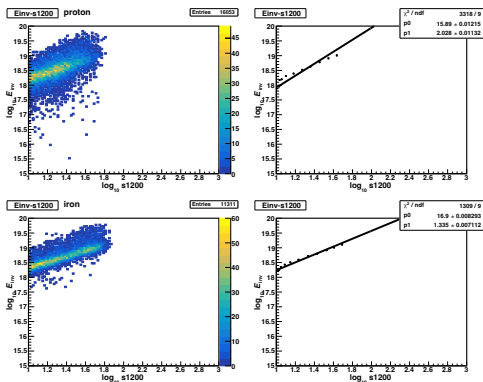


(a) QGSJET II-04 を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

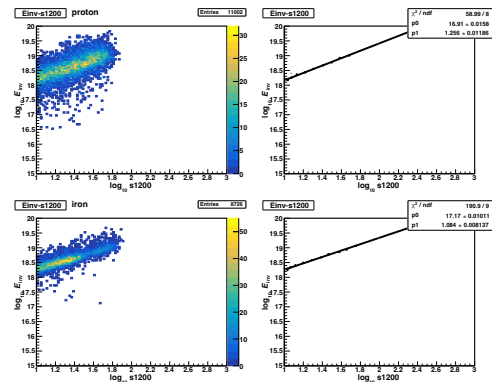


(b) EPOS LHC を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

図 C.4: 手法 1 (5.3 節) の A と B を決めるための図。この図は $r = 1100$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。

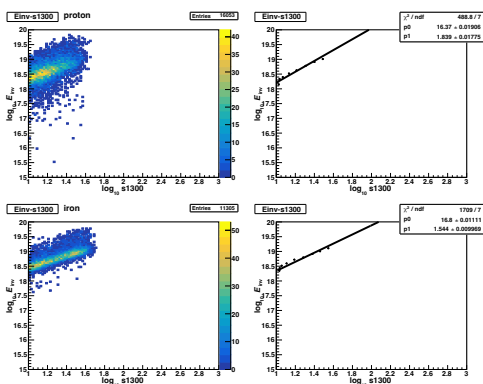


(a) QGSJET II-04 を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

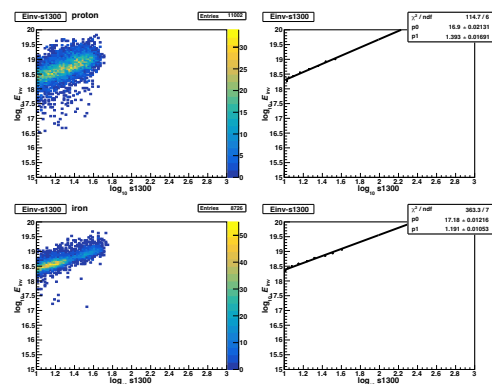


(b) EPOS LHC を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

図 C.5: 手法 1 (5.3 節) の A と B を決めるための図。この図は $r = 1200$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。

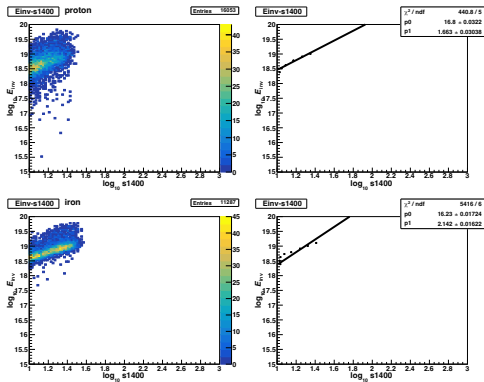


(a) QGSJET II-04 を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

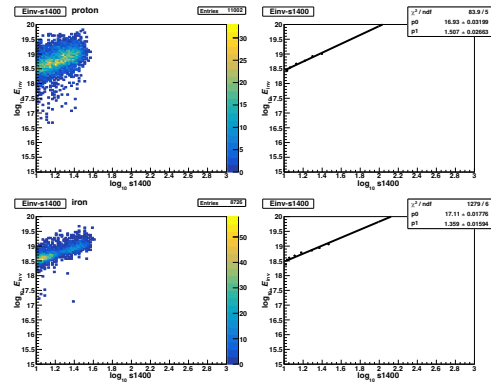


(b) EPOS LHC を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

図 C.6: 手法 1 (5.3 節) の A と B を決めるための図。この図は $r = 1300$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。

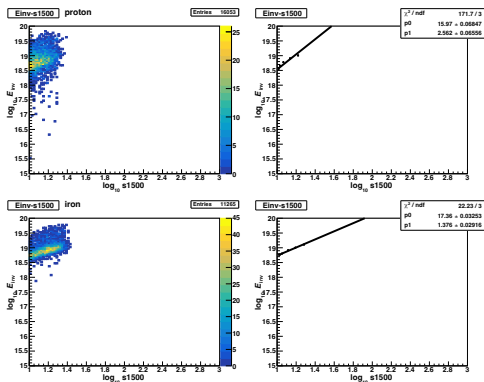


(a) QGSJET II-04 を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

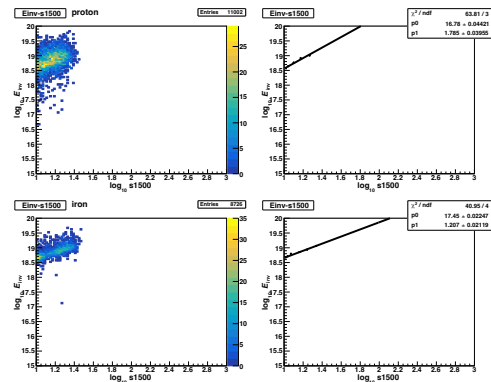


(b) EPOS LHC を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

図 C.7: 手法 1 (5.3 節) の A と B を決めるための図。この図は $r = 1400$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。

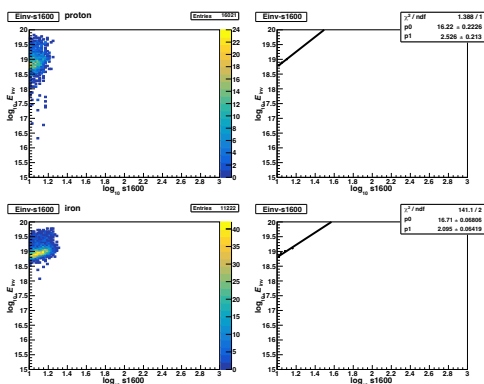


(a) QGSJET II-04 を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

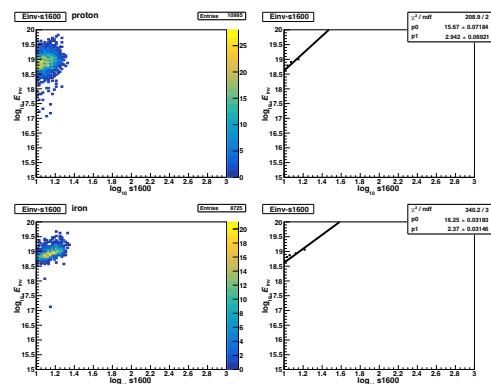


(b) EPOS LHC を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

図 C.8: 手法 1 (5.3 節) の A と B を決めるための図。この図は $r = 1500$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。

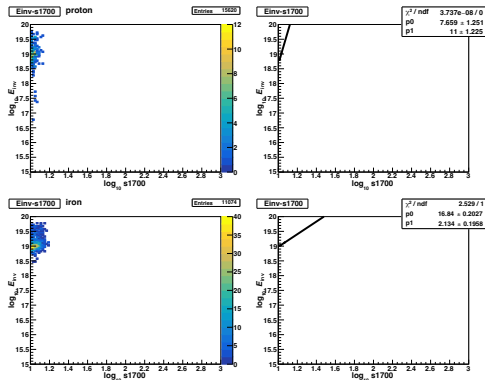


(a) QGSJET II-04 を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

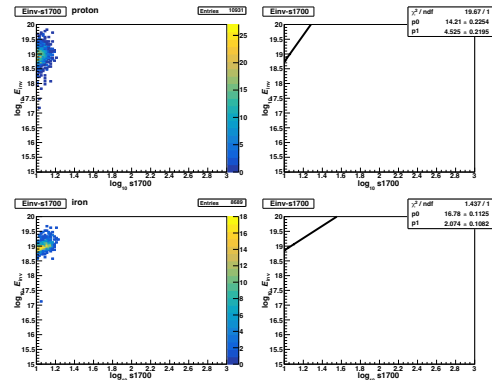


(b) EPOS LHC を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

図 C.9: 手法 1 (5.3 節) の A と B を決めるための図。この図は $r = 1600$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。

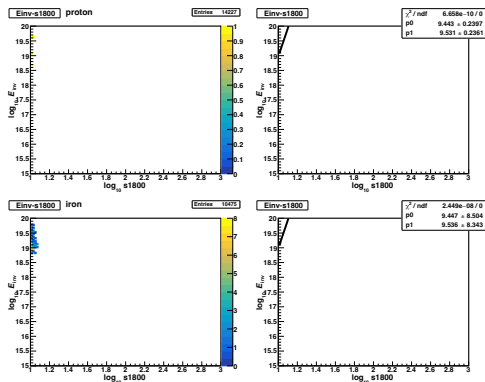


(a) QGSJET II-04 を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

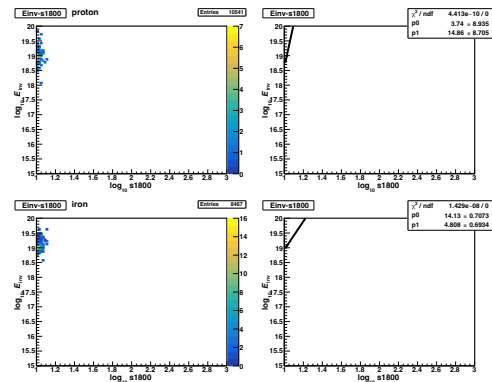


(b) EPOS LHC を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

図 C.10: 手法 1 (5.3 節) の A と B を決めるための図。この図は $r = 1700$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。

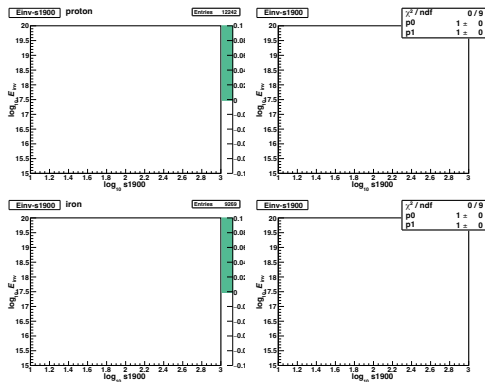


(a) QGSJET II-04 を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

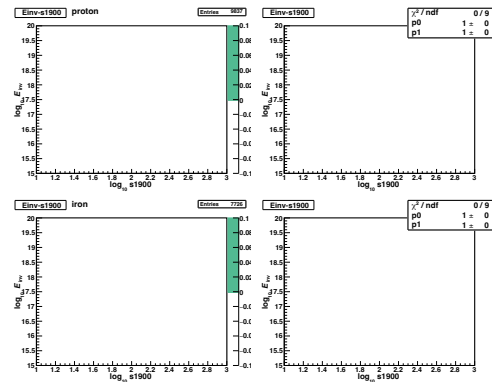


(b) EPOS LHC を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

図 C.11: 手法 1 (5.3 節) の A と B を決めるための図。この図は $r = 1800$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。



(a) QGSJET II-04 を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

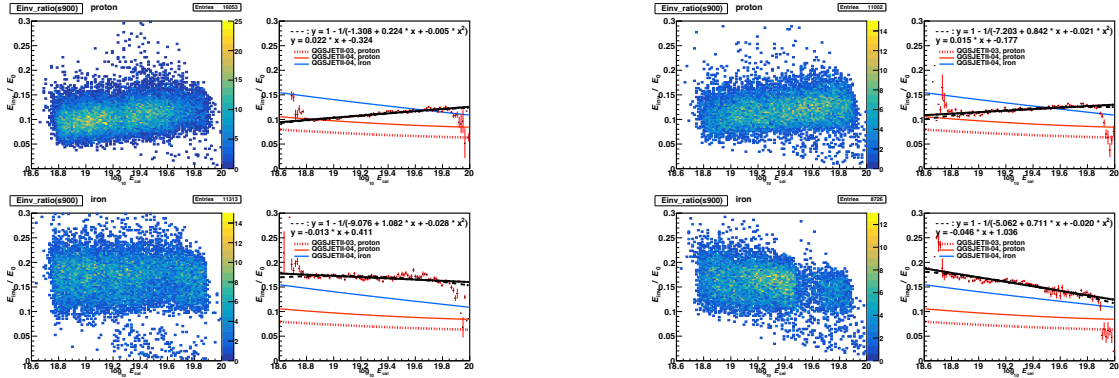


(b) EPOS LHC を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

図 C.12: 手法 1 (5.3 節) の A と B を決めるための図。この図は $r = 1900$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。

C.2 r の値を変化させたときの $\log_{10} E_{\text{cal}}^{\text{rec}}$ と $\frac{E_{\text{inv}}^{A,B}}{E_0^{A,B}}$ の関係 ($E_0^{A,B} = E_{\text{cal}}^{\text{rec}} + E_{\text{inv}}^{A,B}$)

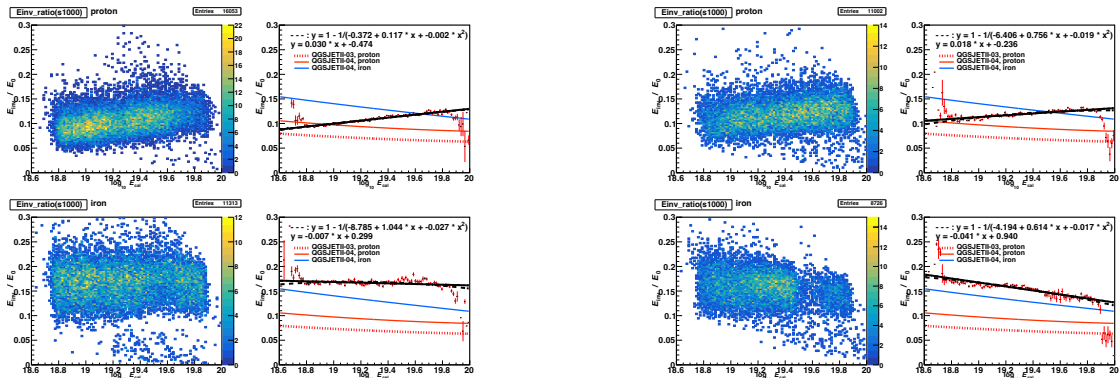
図 5.6 と同様に描いている。



(a) QGSJET II-04 を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

(b) EPOS LHC を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

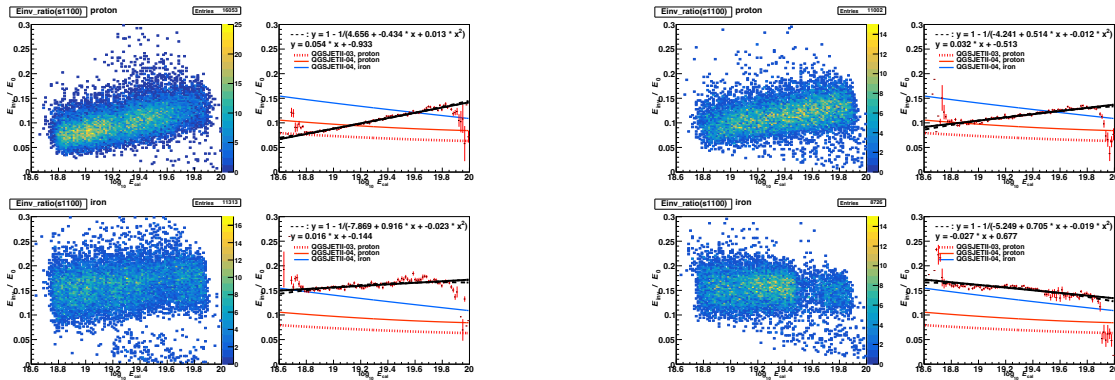
図 C.14: 手法 1 (5.3 節) を用いた E_0 に対する E_{inv} の推定割合である。この図は $r = 900$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。



(a) QGSJET II-04 を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

(b) EPOS LHC を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

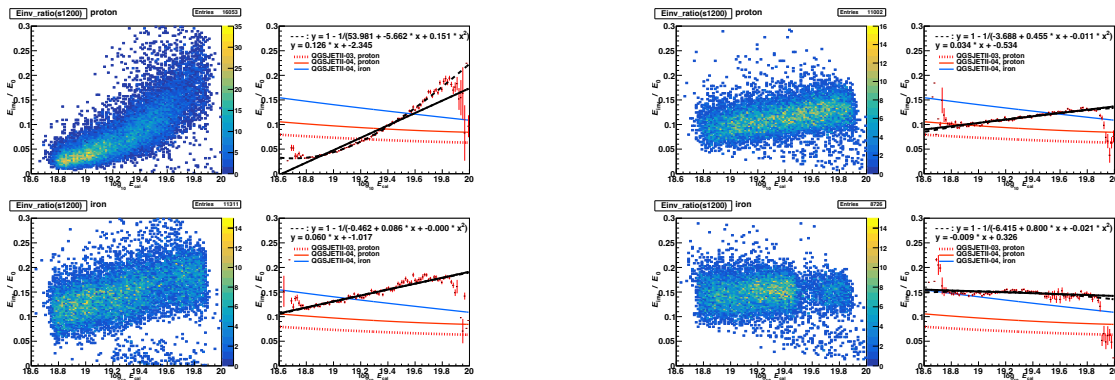
図 C.15: 手法 1 (5.3 節) を用いた E_0 に対する E_{inv} の推定割合である。この図は $r = 1000$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。



(a) QGSJET II-04 を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

(b) EPOS LHC を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

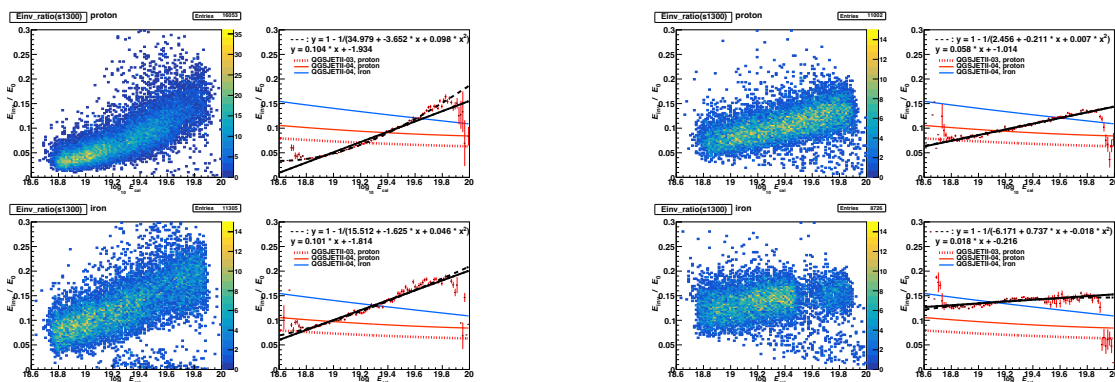
図 C.16: 手法 1 (5.3 節) を用いた E_0 に対する E_{inv} の推定割合である。この図は $r = 1100$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。



(a) QGSJET II-04 を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

(b) EPOS LHC を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

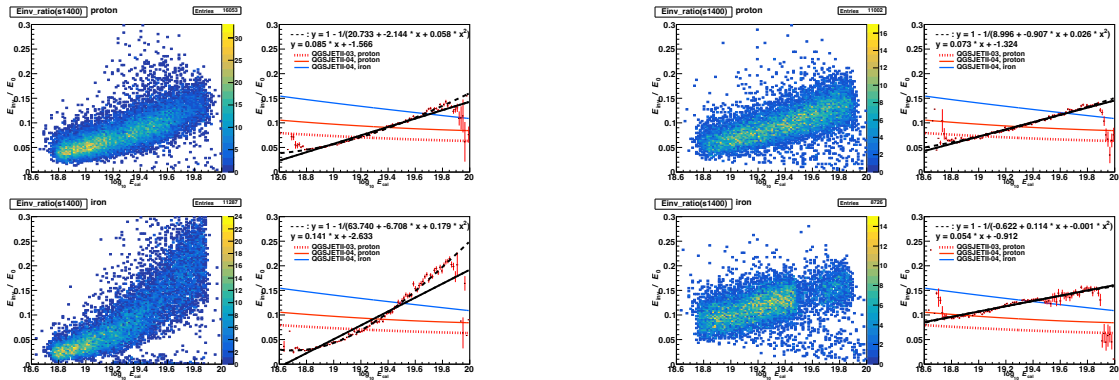
図 C.17: 手法 1 (5.3 節) を用いた E_0 に対する E_{inv} の推定割合である。この図は $r = 1200$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。



(a) QGSJET II-04 を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

(b) EPOS LHC を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

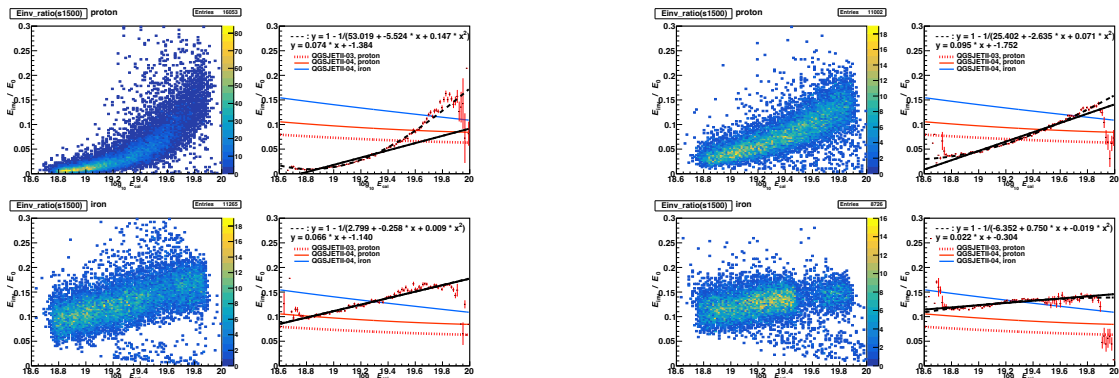
図 C.18: 手法 1 (5.3 節) を用いた E_0 に対する E_{inv} の推定割合である。この図は $r = 1300$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。



(a) QGSJET II-04 を使用。 (上) 陽子、(下) 鉄の結果。

(b) EPOS LHC を使用。 (上) 陽子、(下) 鉄の結果。

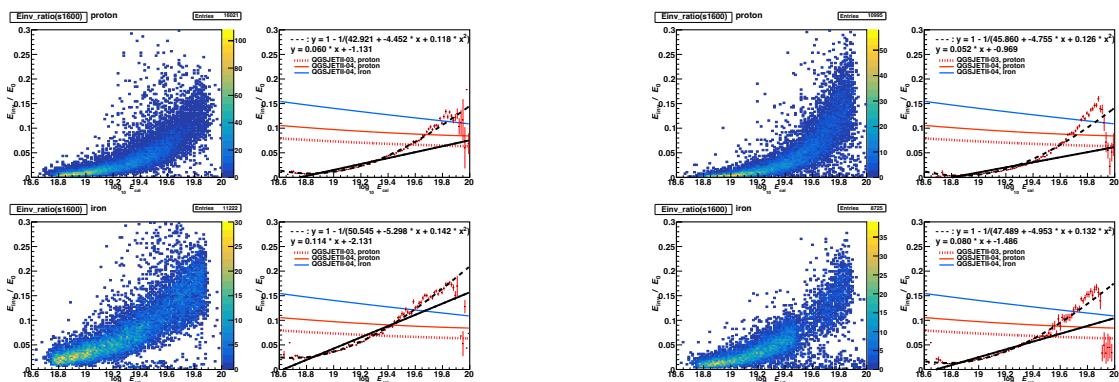
図 C.19: 手法 1 (5.3 節) を用いた E_0 に対する E_{inv} の推定割合である。この図は $r = 1400$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。



(a) QGSJET II-04 を使用。 (上) 陽子、(下) 鉄の結果。

(b) EPOS LHC を使用。 (上) 陽子、(下) 鉄の結果。

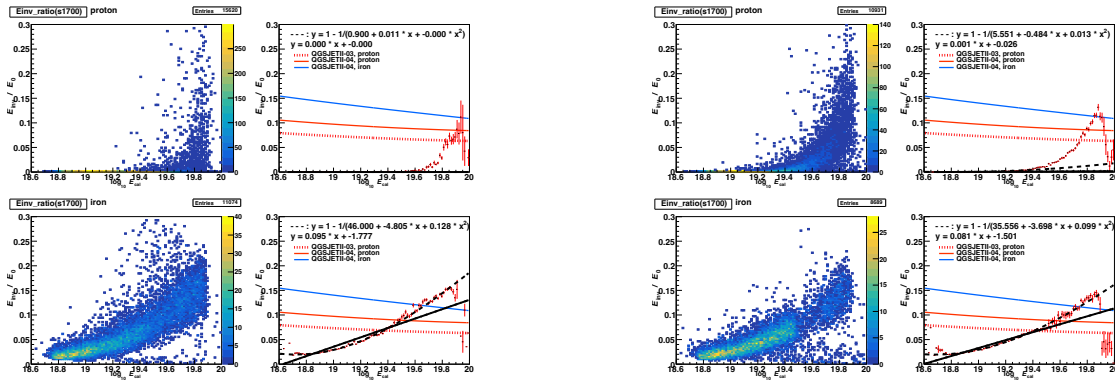
図 C.20: 手法 1 (5.3 節) を用いた E_0 に対する E_{inv} の推定割合である。この図は $r = 1500$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。



(a) QGSJET II-04 を使用。 (上) 陽子、(下) 鉄の結果。

(b) EPOS LHC を使用。 (上) 陽子、(下) 鉄の結果。

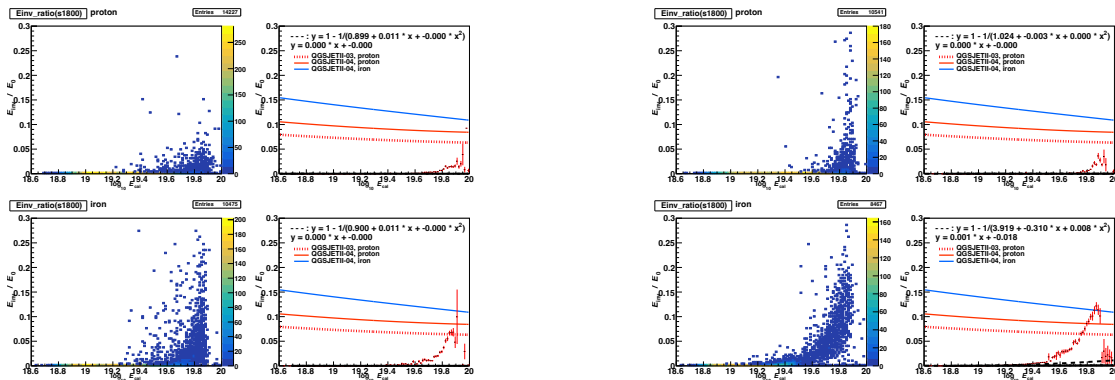
図 C.21: 手法 1 (5.3 節) を用いた E_0 に対する E_{inv} の推定割合である。この図は $r = 1600$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。



(a) QGSJET II-04 を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

(b) EPOS LHC を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

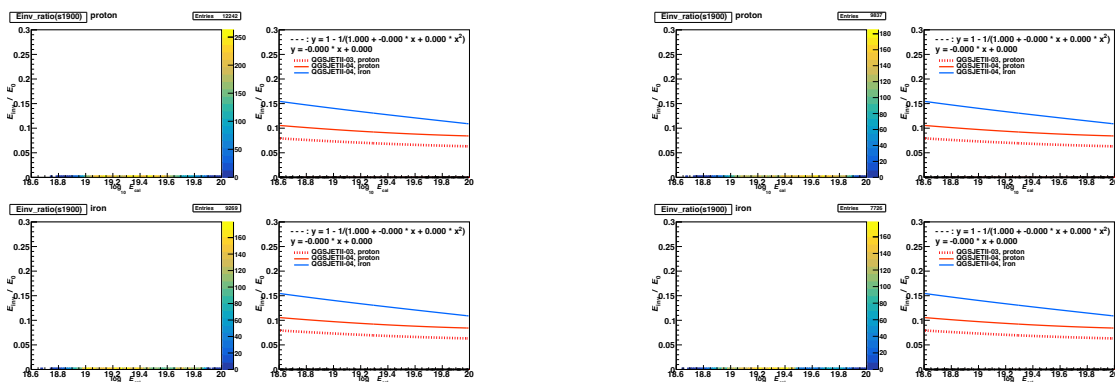
図 C.22: 手法 1 (5.3 節) を用いた E_0 に対する E_{inv} の推定割合である。この図は $r = 1700$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。



(a) QGSJET II-04 を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

(b) EPOS LHC を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

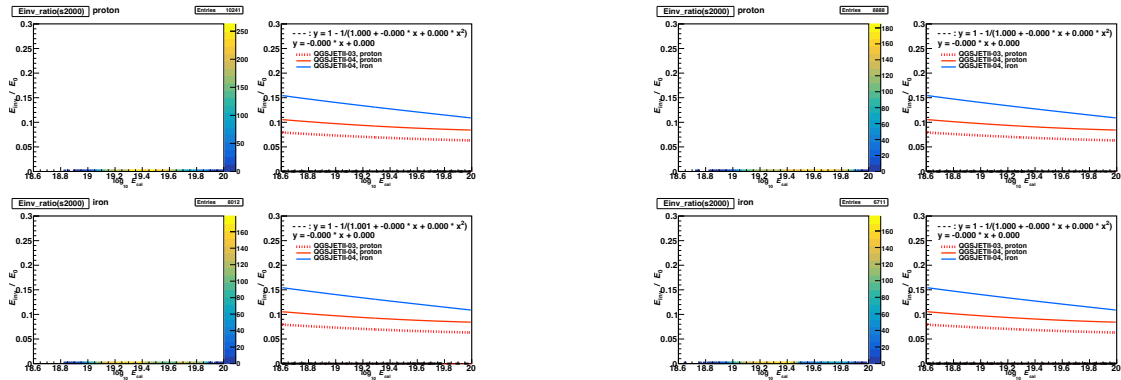
図 C.23: 手法 1 (5.3 節) を用いた E_0 に対する E_{inv} の推定割合である。この図は $r = 1800$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。



(a) QGSJET II-04 を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

(b) EPOS LHC を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

図 C.24: 手法 1 (5.3 節) を用いた E_0 に対する E_{inv} の推定割合である。この図は $r = 1900$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。



(a) QGSJET II-04 を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

(b) EPOS LHC を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

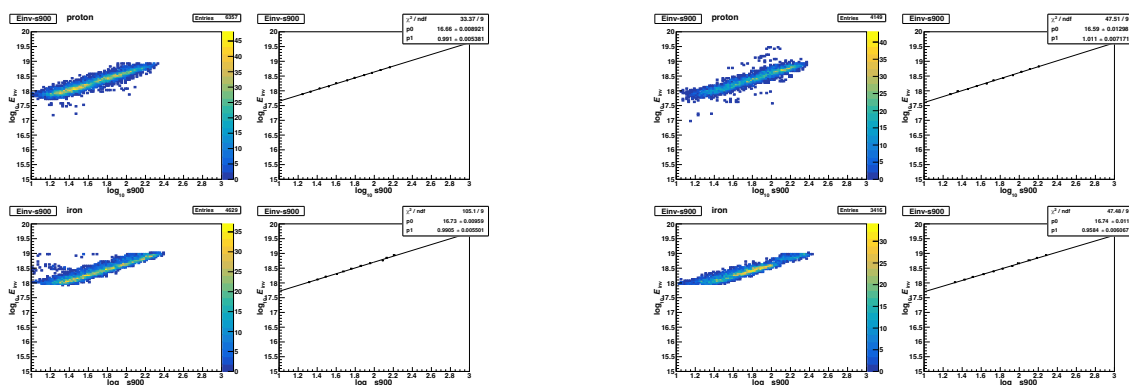
図 C.25: 手法 1 (5.3 節) を用いた E_0 に対する E_{inv} の推定割合である。この図は $r = 2000$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。

D 手法2

D.1 r の値を変化させたときの $\log_{10} S_r$ と $\log_{10} E_{\text{inv}}$ の関係 ($E_{\text{inv}} = E_0^{\text{sim}} - E_{\text{cal}}^{\text{CORSIKAscaled}}$)

A と B を決めるためのグラフ

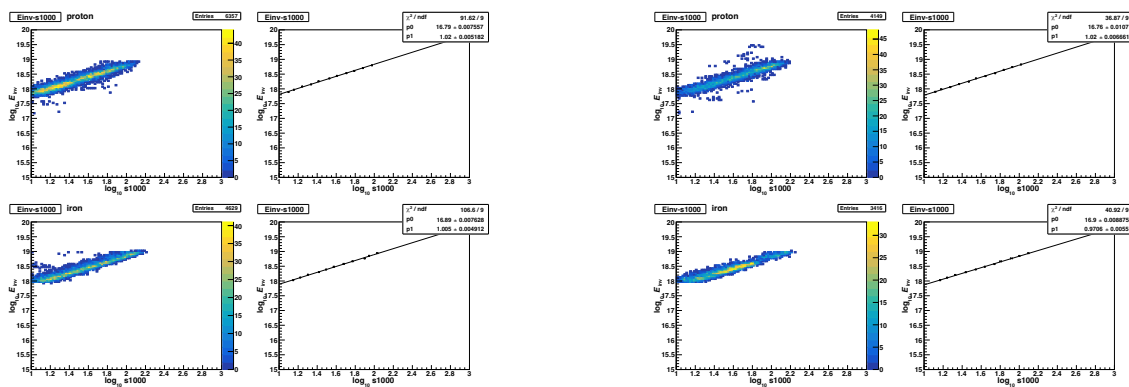
図 5.7 と同様に描いており、一次関数でフィッティングしてフィッティングパラメーターから A と B を決めている。具体的な A と B の値は表 D.3 を参照されたい。



(a) QGSJET II-04 を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

(b) EPOS LHC を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

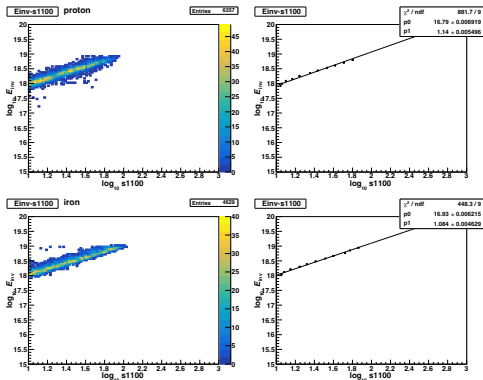
図 D.26: 手法 2 (5.4 節) の A と B を決めるための図。この図は $r = 900$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。



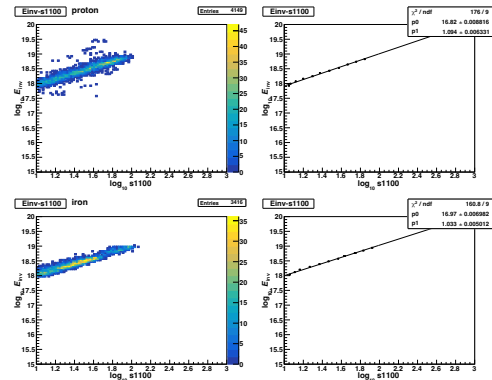
(a) QGSJET II-04 を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

(b) EPOS LHC を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

図 D.27: 手法 2 (5.4 節) の A と B を決めるための図。この図は $r = 1000$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。

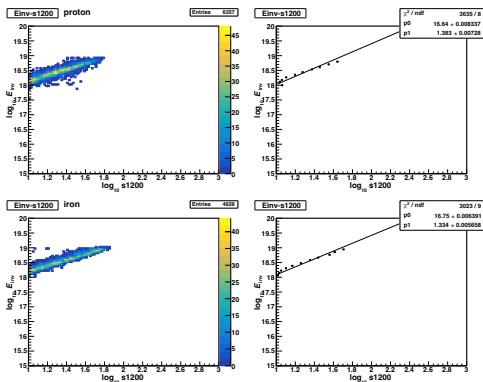


(a) QGSJET II-04 を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

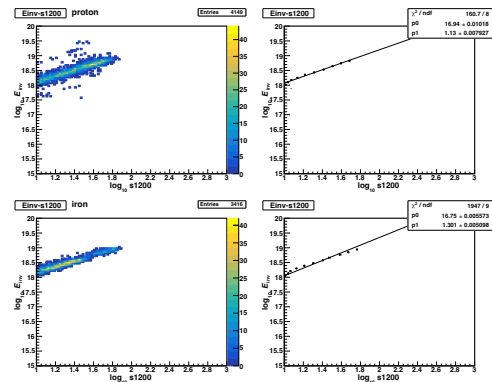


(b) EPOS LHC を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

図 D.28: 手法 2 (5.4 節) の A と B を決めるための図。この図は $r = 1100$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。

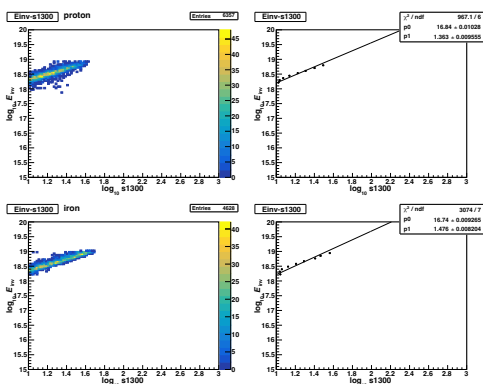


(a) QGSJET II-04 を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

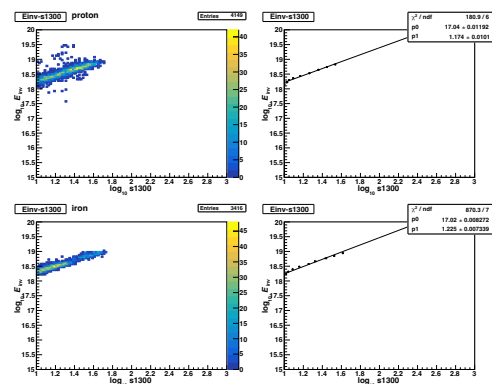


(b) EPOS LHC を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

図 D.29: 手法 2 (5.4 節) の A と B を決めるための図。この図は $r = 1200$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。

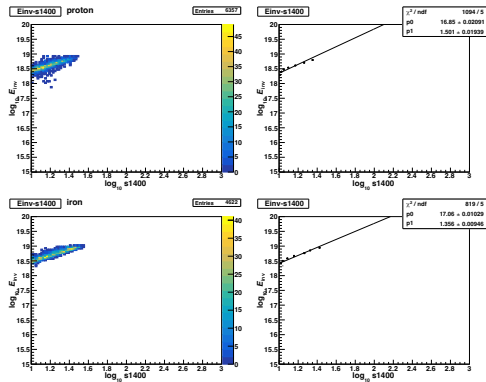


(a) QGSJET II-04 を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

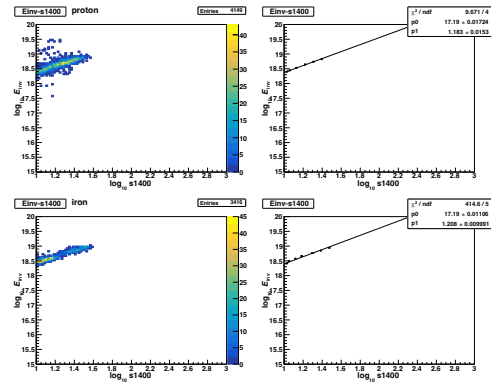


(b) EPOS LHC を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

図 D.30: 手法 2 (5.4 節) の A と B を決めるための図。この図は $r = 1300$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。

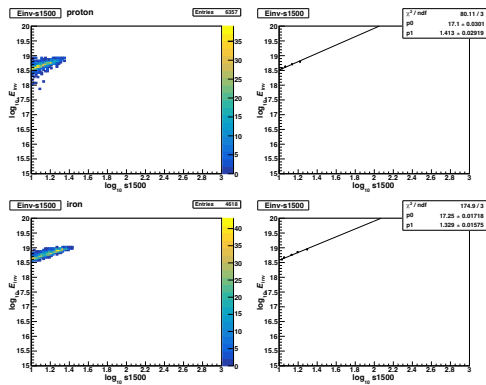


(a) QGSJET II-04 を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

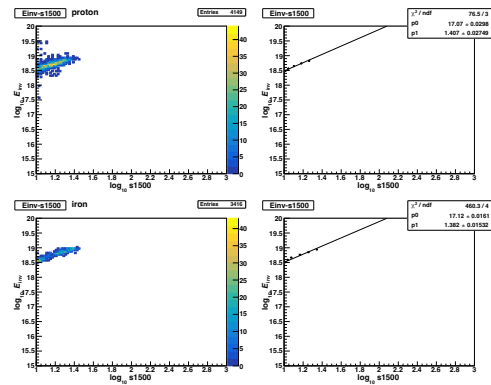


(b) EPOS LHC を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

図 D.31: 手法 2 (5.4 節) の A と B を決めるための図。この図は $r = 1400$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。

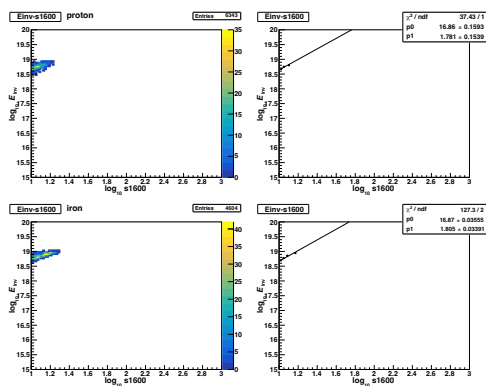


(a) QGSJET II-04 を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

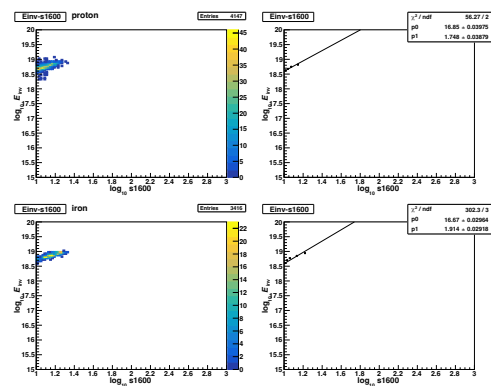


(b) EPOS LHC を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

図 D.32: 手法 2 (5.4 節) の A と B を決めるための図。この図は $r = 1500$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。

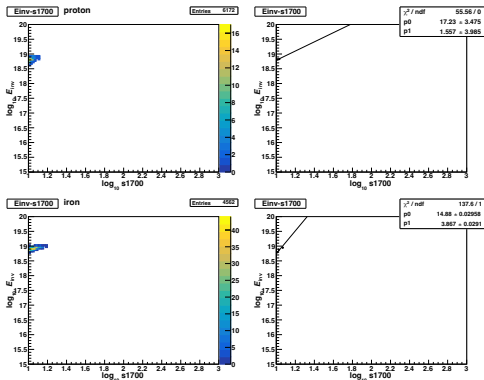


(a) QGSJET II-04 を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

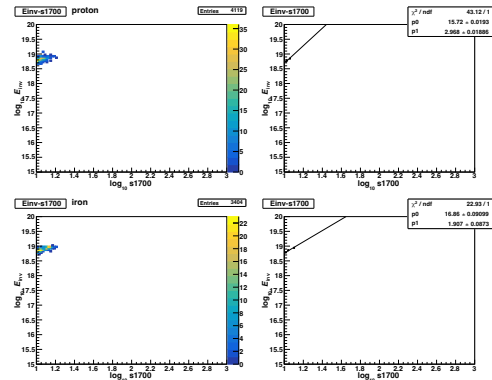


(b) EPOS LHC を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

図 D.33: 手法 2 (5.4 節) の A と B を決めるための図。この図は $r = 1600$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。

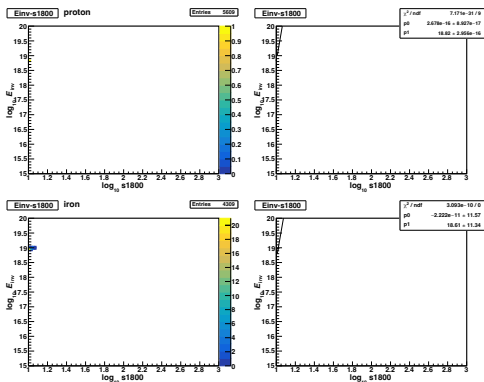


(a) QGSJET II-04 を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

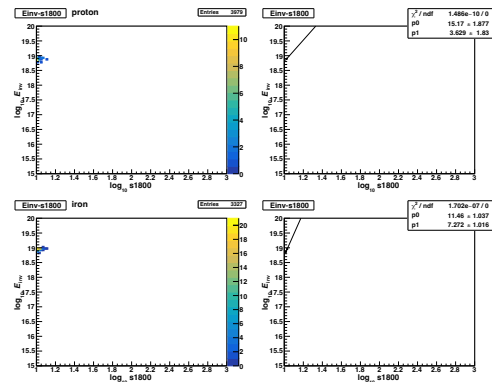


(b) EPOS LHC を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

図 D.34: 手法 2 (5.4 節) の A と B を決めるための図。この図は $r = 1700$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。

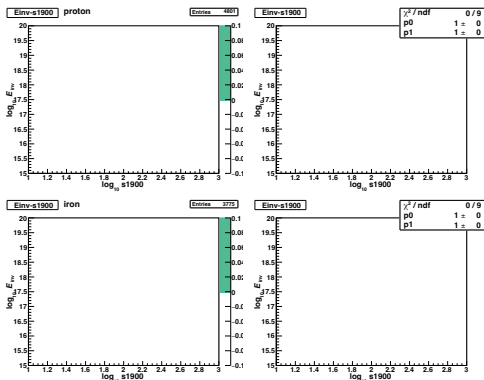


(a) QGSJET II-04 を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

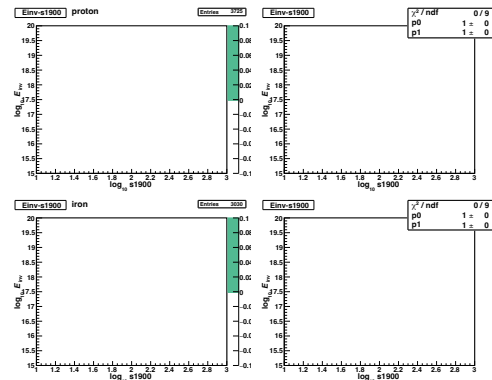


(b) EPOS LHC を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

図 D.35: 手法 2 (5.4 節) の A と B を決めるための図。この図は $r = 1800$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。



(a) QGSJET II-04 を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

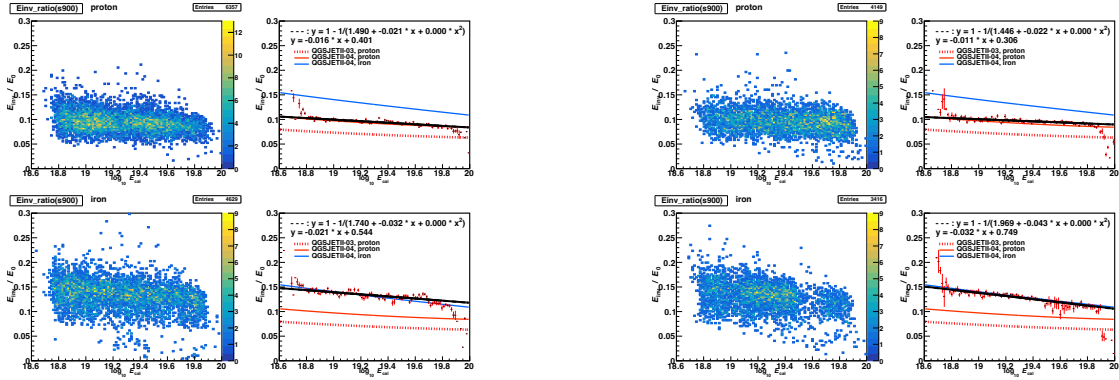


(b) EPOS LHC を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

図 D.36: 手法 2 (5.4 節) の A と B を決めるための図。この図は $r = 1900$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。

D.2 r の値を変化させたときの $\log_{10} E_{\text{cal}}^{\text{rec}}$ と $\frac{E_{\text{inv}}^{A,B}}{E_0^{A,B}}$ の関係 ($E_0^{A,B} = E_{\text{cal}}^{\text{rec}} + E_{\text{inv}}^{A,B}$)

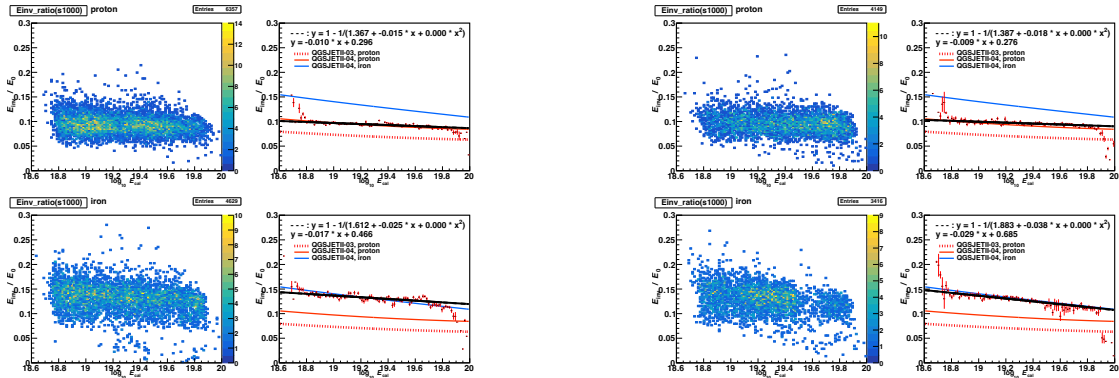
図 5.9 と同様に描いている。



(a) QGSJET II-04 を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

(b) EPOS LHC を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

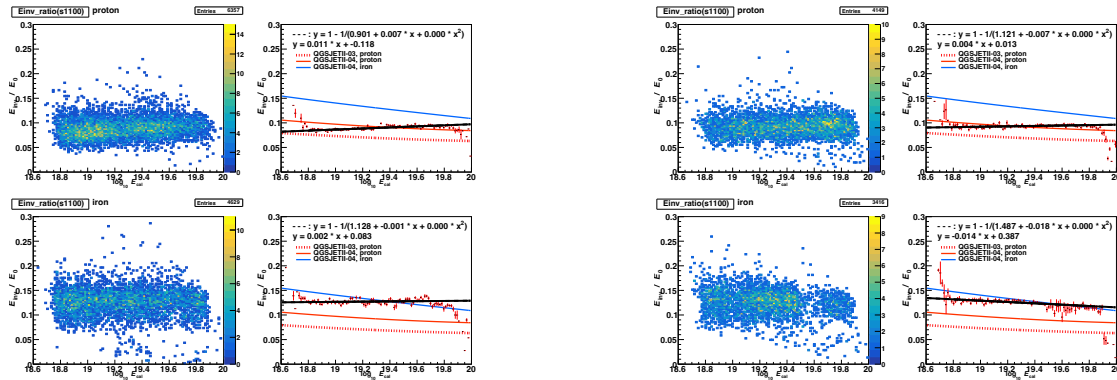
図 D.38: 手法 2 (5.4 節) を用いた E_0 に対する E_{inv} の推定割合である。この図は $r = 900$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。



(a) QGSJET II-04 を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

(b) EPOS LHC を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

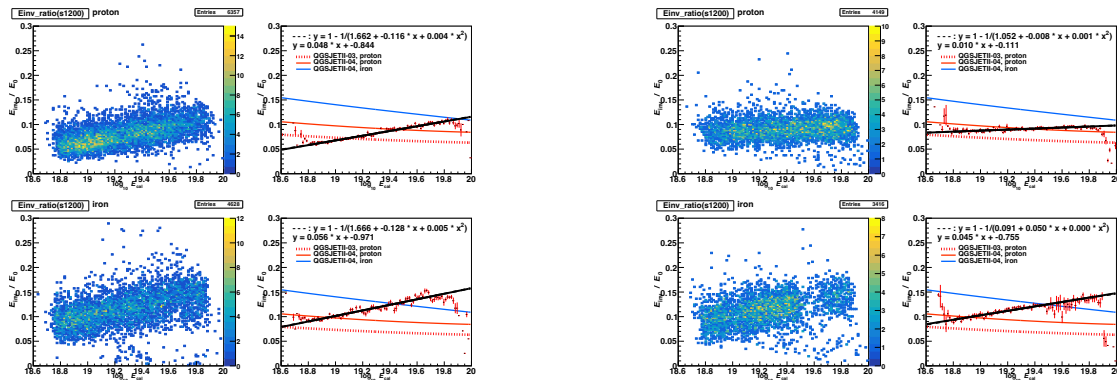
図 D.39: 手法 2 (5.4 節) を用いた E_0 に対する E_{inv} の推定割合である。この図は $r = 1000$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。



(a) QGSJET II-04 を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

(b) EPOS LHC を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

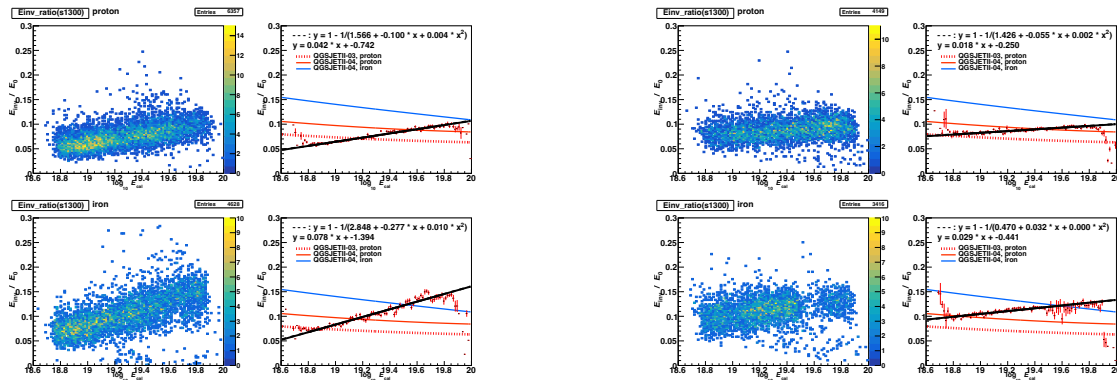
図 D.40: 手法 2 (5.4 節) を用いた E_0 に対する E_{inv} の推定割合である。この図は $r = 1100$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。



(a) QGSJET II-04 を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

(b) EPOS LHC を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

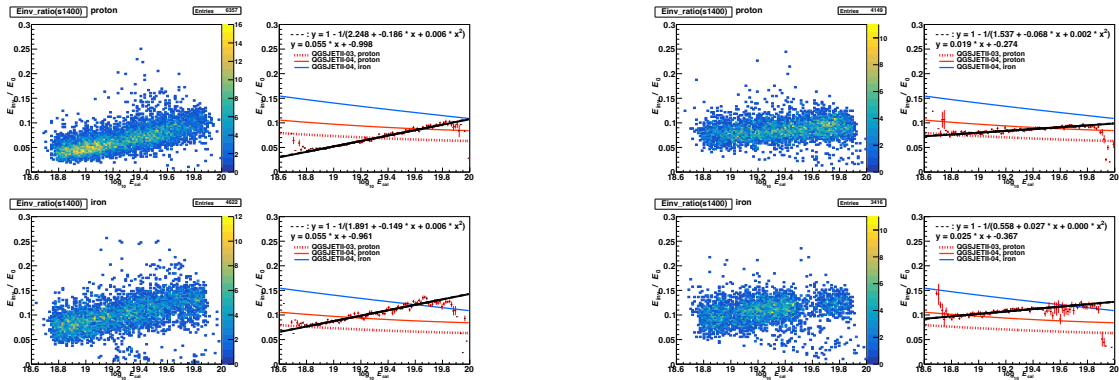
図 D.41: 手法 2 (5.4 節) を用いた E_0 に対する E_{inv} の推定割合である。この図は $r = 1200$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。



(a) QGSJET II-04 を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

(b) EPOS LHC を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

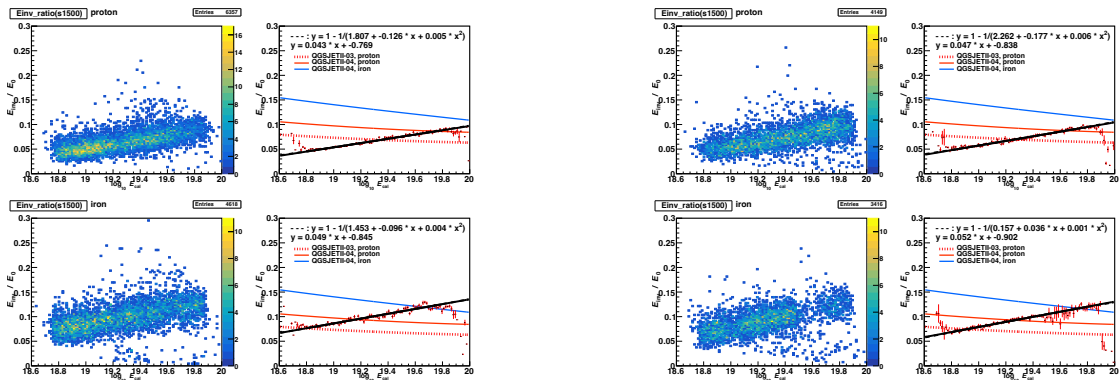
図 D.42: 手法 2 (5.4 節) を用いた E_0 に対する E_{inv} の推定割合である。この図は $r = 1300$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。



(a) QGSJET II-04 を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

(b) EPOS LHC を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

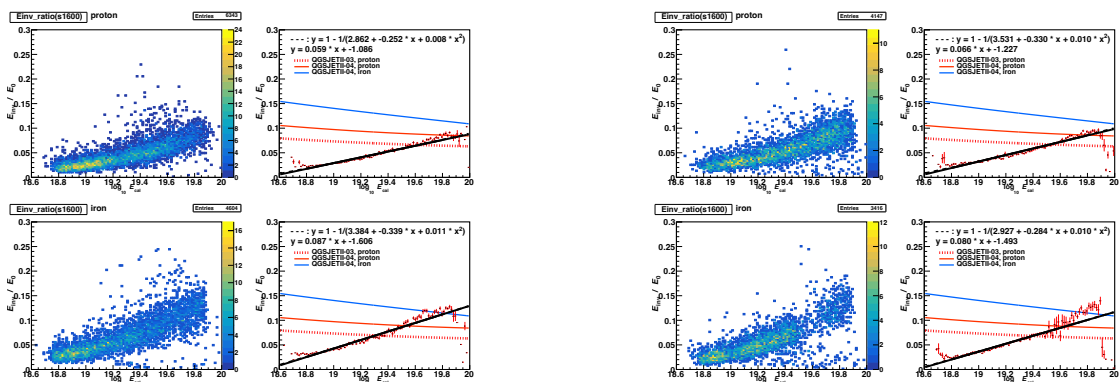
図 D.43: 手法 2 (5.4 節) を用いた E_0 に対する E_{inv} の推定割合である。この図は $r = 1400$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。



(a) QGSJET II-04 を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

(b) EPOS LHC を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

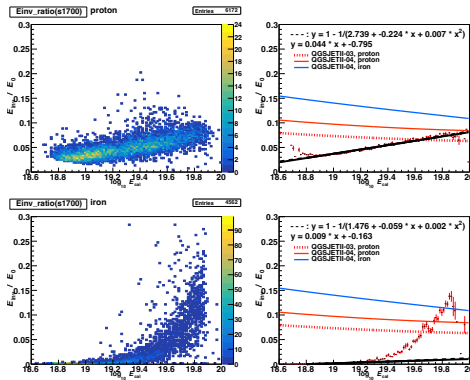
図 D.44: 手法 2 (5.4 節) を用いた E_0 に対する E_{inv} の推定割合である。この図は $r = 1500$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。



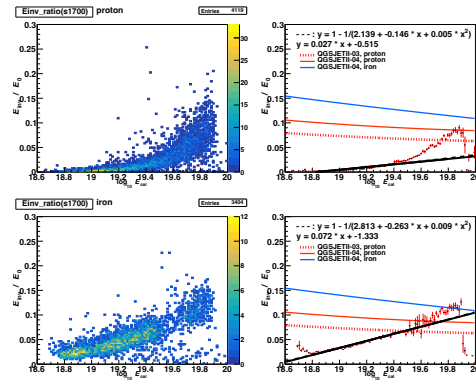
(a) QGSJET II-04 を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

(b) EPOS LHC を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

図 D.45: 手法 2 (5.4 節) を用いた E_0 に対する E_{inv} の推定割合である。この図は $r = 1600$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。

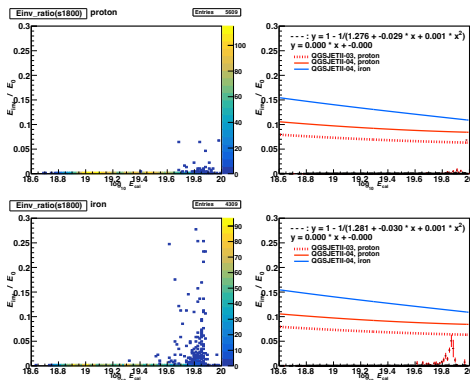


(a) QGSJET II-04 を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

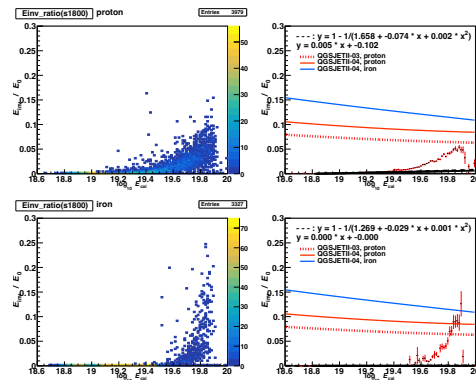


(b) EPOS LHC を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

図 D.46: 手法 2 (5.4 節) を用いた E_0 に対する E_{inv} の推定割合である。この図は $r = 1700$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。

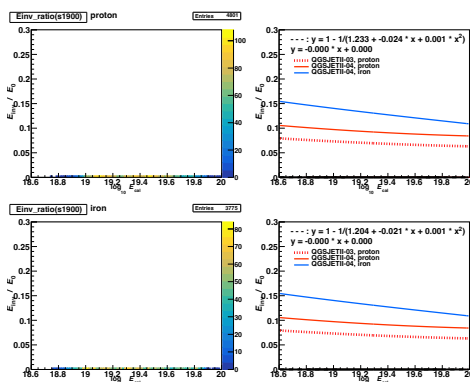


(a) QGSJET II-04 を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

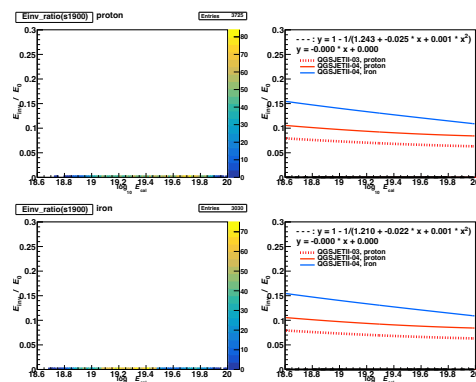


(b) EPOS LHC を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

図 D.47: 手法 2 (5.4 節) を用いた E_0 に対する E_{inv} の推定割合である。この図は $r = 1800$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。

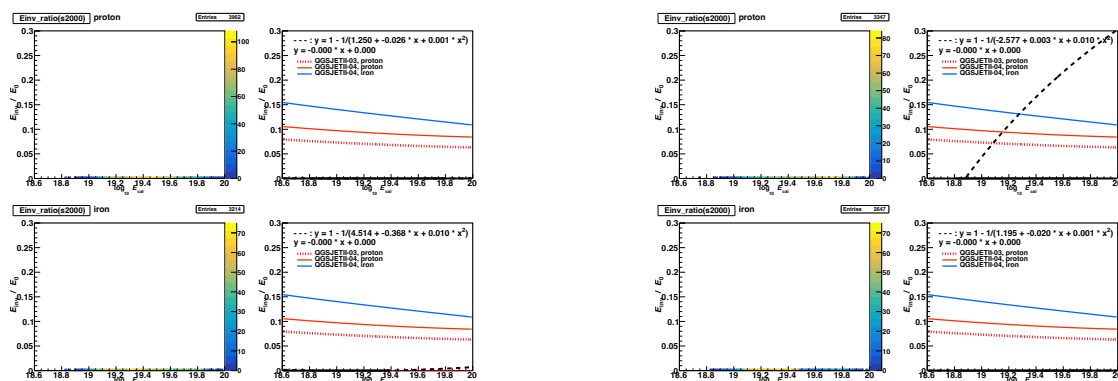


(a) QGSJET II-04 を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。



(b) EPOS LHC を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

図 D.48: 手法 2 (5.4 節) を用いた E_0 に対する E_{inv} の推定割合である。この図は $r = 1900$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。



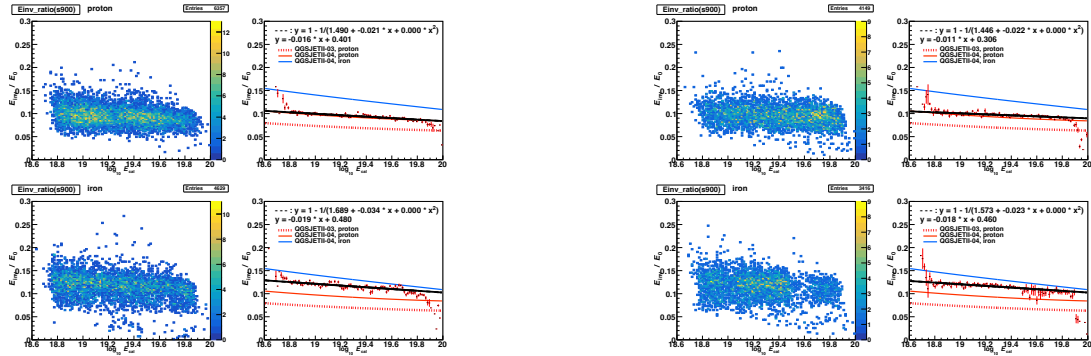
(a) QGSJET II-04 を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

(b) EPOS LHC を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

図 D.49: 手法 2 (5.4 節) を用いた E_0 に対する E_{inv} の推定割合である。この図は $r = 2000$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。

陽子で決めた A と B を使う

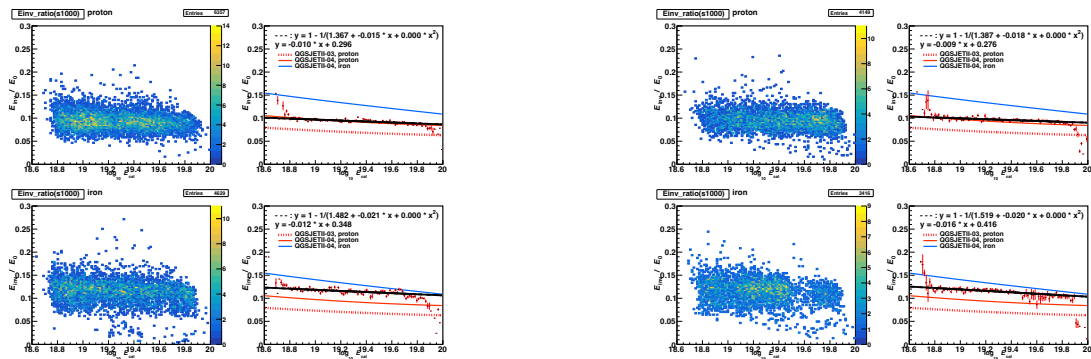
図 5.10 と同様に描いている。



(a) QGSJET II-04 を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

(b) EPOS LHC を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

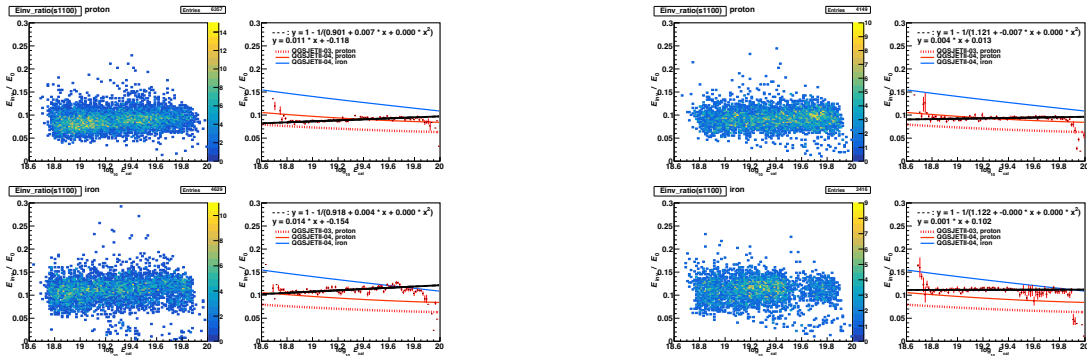
図 D.50: 手法 2 (5.4 節) を用いた E_0 に対する E_{inv} の推定割合である。核種の違いによる影響を知るために陽子で決めた A と B を使っている。この図は $r = 900$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。



(a) QGSJET II-04 を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

(b) EPOS LHC を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

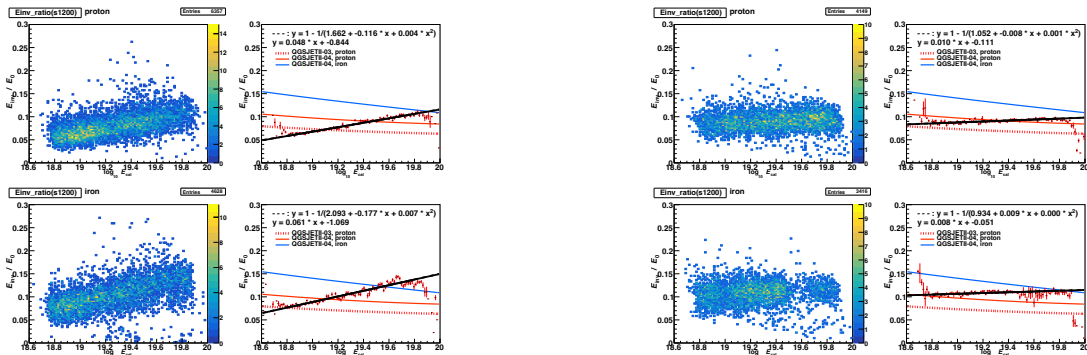
図 D.51: 手法 2 (5.4 節) を用いた E_0 に対する E_{inv} の推定割合である。核種の違いによる影響を知るために陽子で決めた A と B を使っている。この図は $r = 1000$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。



(a) QGSJET II-04 を使用。 (上) 陽子、(下) 鉄の結果。

(b) EPOS LHC を使用。 (上) 陽子、(下) 鉄の結果。

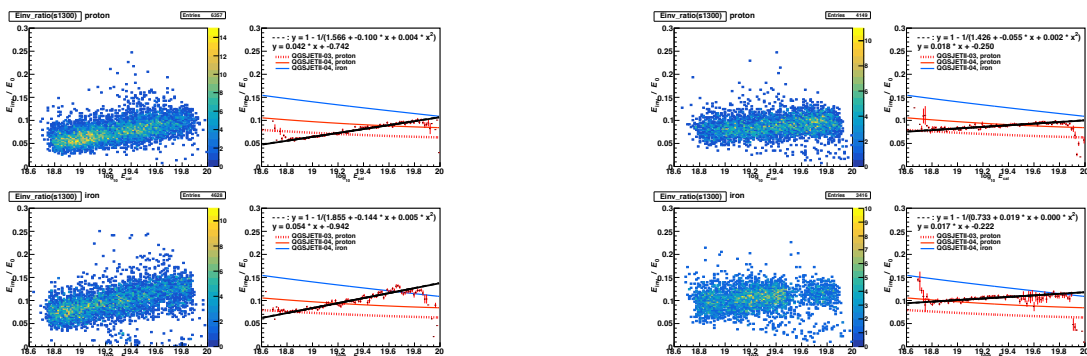
図 D.52: 手法 2 (5.4 節) を用いた E_0 に対する E_{inv} の推定割合である。核種の違いによる影響を知るために陽子で決めた A と B を使っている。この図は $r = 1100\text{m}$ のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。



(a) QGSJET II-04 を使用。 (上) 陽子、(下) 鉄の結果。

(b) EPOS LHC を使用。 (上) 陽子、(下) 鉄の結果。

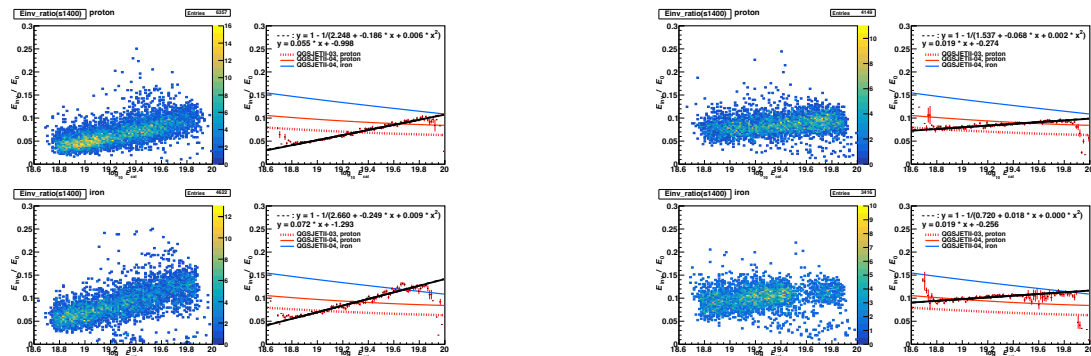
図 D.53: 手法 2 (5.4 節) を用いた E_0 に対する E_{inv} の推定割合である。核種の違いによる影響を知るために陽子で決めた A と B を使っている。この図は $r = 1200\text{m}$ のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。



(a) QGSJET II-04 を使用。 (上) 陽子、(下) 鉄の結果。

(b) EPOS LHC を使用。 (上) 陽子、(下) 鉄の結果。

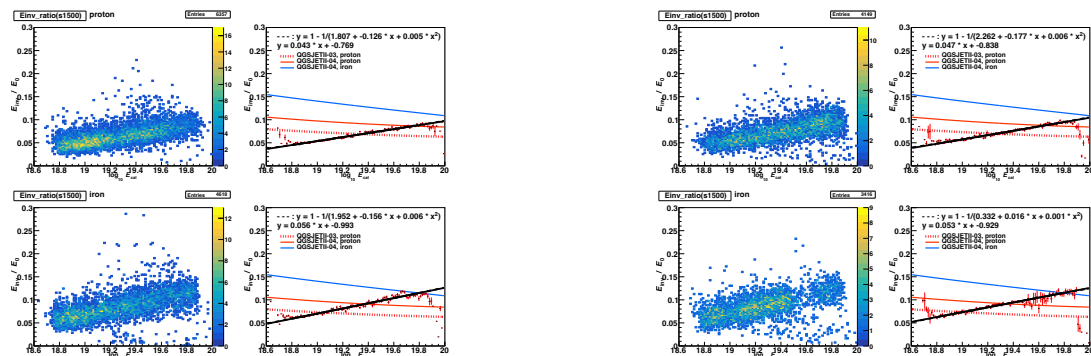
図 D.54: 手法 2 (5.4 節) を用いた E_0 に対する E_{inv} の推定割合である。核種の違いによる影響を知るために陽子で決めた A と B を使っている。この図は $r = 1300\text{m}$ のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。



(a) QGSJET II-04 を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

(b) EPOS LHC を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

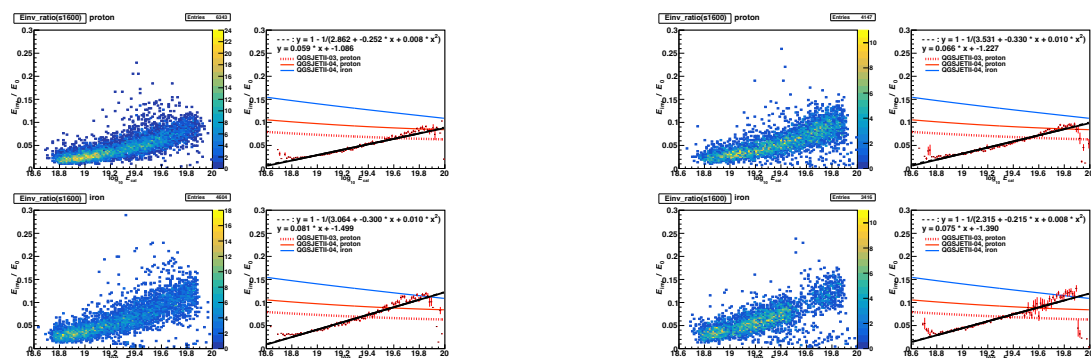
図 D.55: 手法 2 (5.4 節) を用いた E_0 に対する E_{inv} の推定割合である。核種の違いによる影響を知るために陽子で決めた A と B を使っている。この図は $r = 1400$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。



(a) QGSJET II-04 を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

(b) EPOS LHC を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

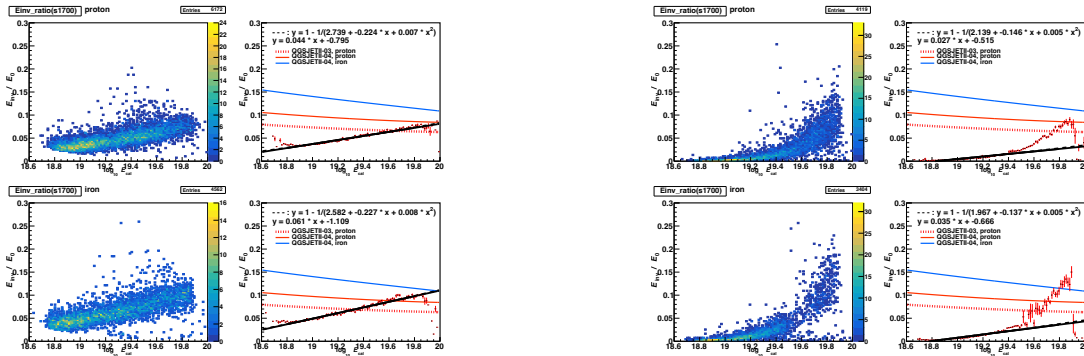
図 D.56: 手法 2 (5.4 節) を用いた E_0 に対する E_{inv} の推定割合である。核種の違いによる影響を知るために陽子で決めた A と B を使っている。この図は $r = 1500$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。



(a) QGSJET II-04 を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

(b) EPOS LHC を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

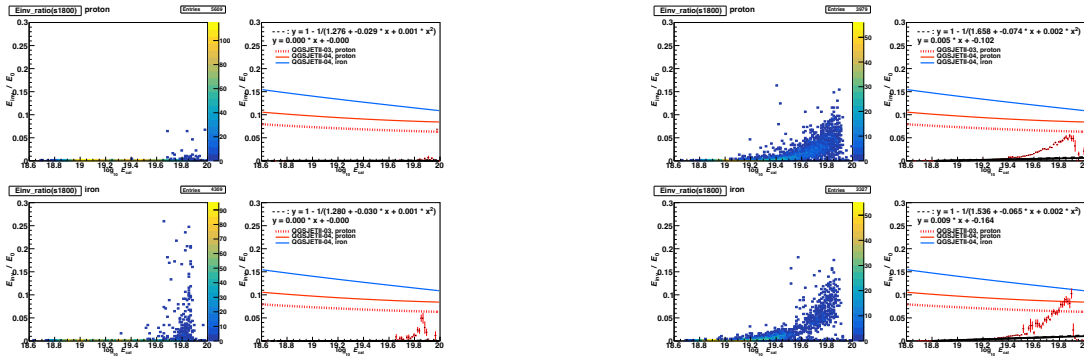
図 D.57: 手法 2 (5.4 節) を用いた E_0 に対する E_{inv} の推定割合である。核種の違いによる影響を知るために陽子で決めた A と B を使っている。この図は $r = 1600$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。



(a) QGSJET II-04 を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

(b) EPOS LHC を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

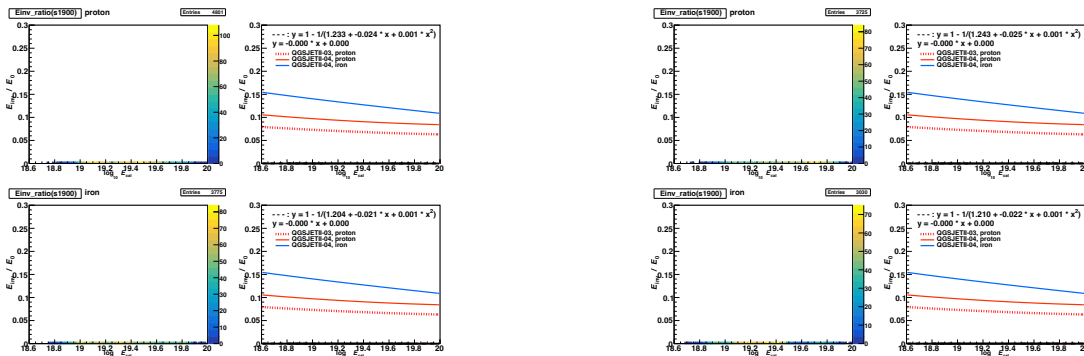
図 D.58: 手法 2 (5.4 節) を用いた E_0 に対する E_{inv} の推定割合である。核種の違いによる影響を知るために陽子で決めた A と B を使っている。この図は $r = 1700$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。



(a) QGSJET II-04 を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

(b) EPOS LHC を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

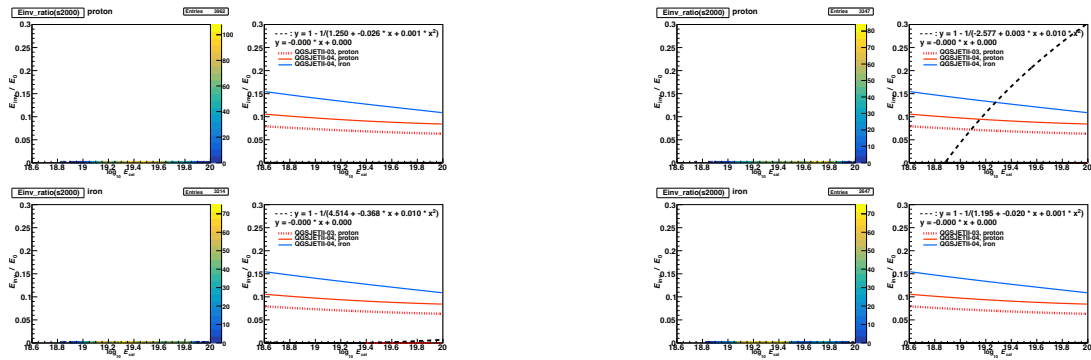
図 D.59: 手法 2 (5.4 節) を用いた E_0 に対する E_{inv} の推定割合である。核種の違いによる影響を知るために陽子で決めた A と B を使っている。この図は $r = 1800$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。



(a) QGSJET II-04 を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

(b) EPOS LHC を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

図 D.60: 手法 2 (5.4 節) を用いた E_0 に対する E_{inv} の推定割合である。核種の違いによる影響を知るために陽子で決めた A と B を使っている。この図は $r = 1900$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。



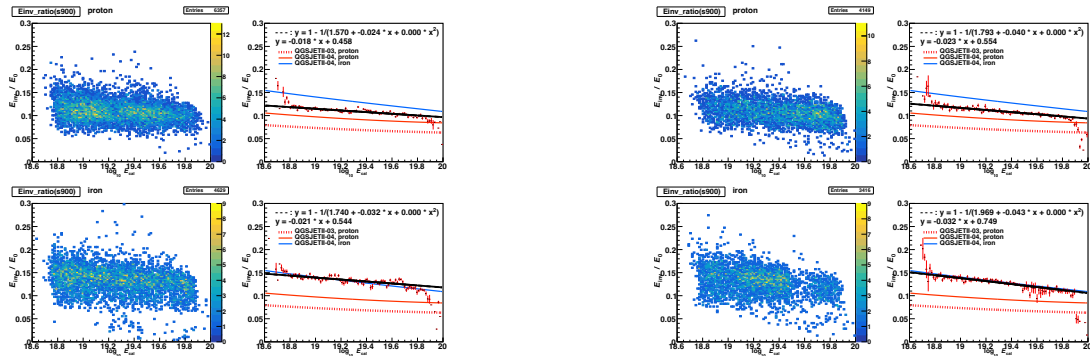
(a) QGSJET II-04 を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

(b) EPOS LHC を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

図 D.61: 手法 2 (5.4 節) を用いた E_0 に対する E_{inv} の推定割合である。核種の違いによる影響を知るために陽子で決めた A と B を使っている。この図は $r = 2000$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。

鉄で決めた A と B を使う

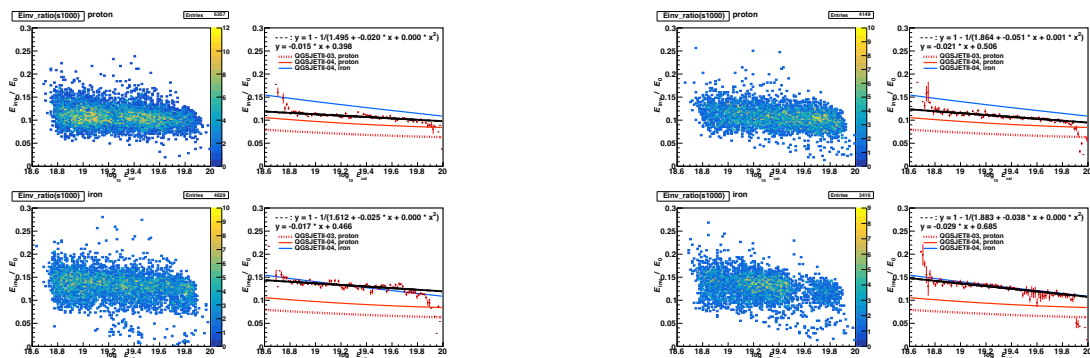
図 5.11 と同様に描いている。



(a) QGSJET II-04 を使用。 (上) 陽子、 (下) 鉄の結果。

(b) EPOS LHC を使用。 (上) 陽子、 (下) 鉄の結果。

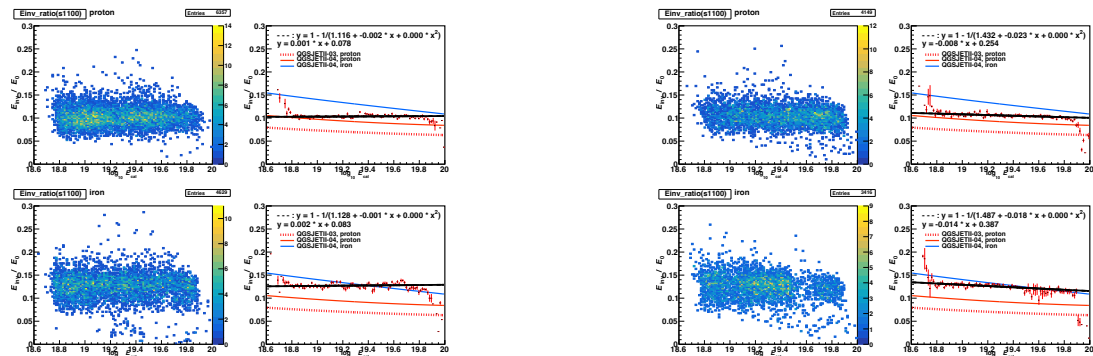
図 D.62: 手法 2 (5.4 節) を用いた E_0 に対する E_{inv} の推定割合である。核種の違いによる影響を知るために鉄で決めた A と B を使っている。この図は $r = 900$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。



(a) QGSJET II-04 を使用。 (上) 陽子、 (下) 鉄の結果。

(b) EPOS LHC を使用。 (上) 陽子、 (下) 鉄の結果。

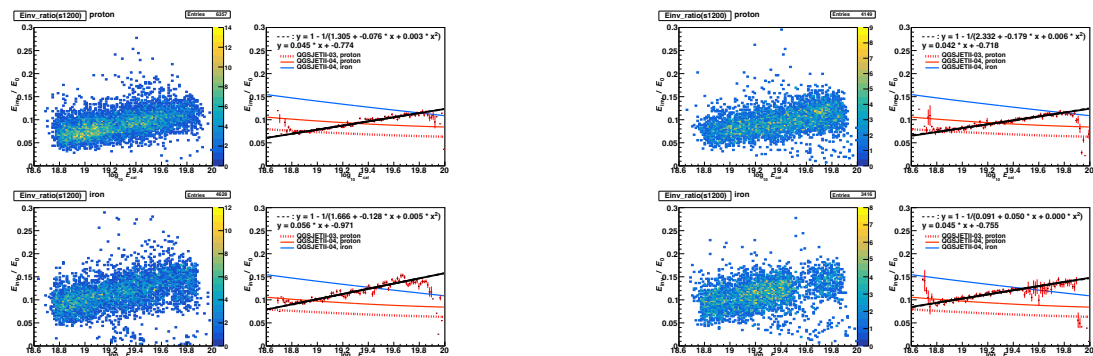
図 D.63: 手法 2 (5.4 節) を用いた E_0 に対する E_{inv} の推定割合である。核種の違いによる影響を知るために鉄で決めた A と B を使っている。この図は $r = 1000$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。



(a) QGSJET II-04 を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

(b) EPOS LHC を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

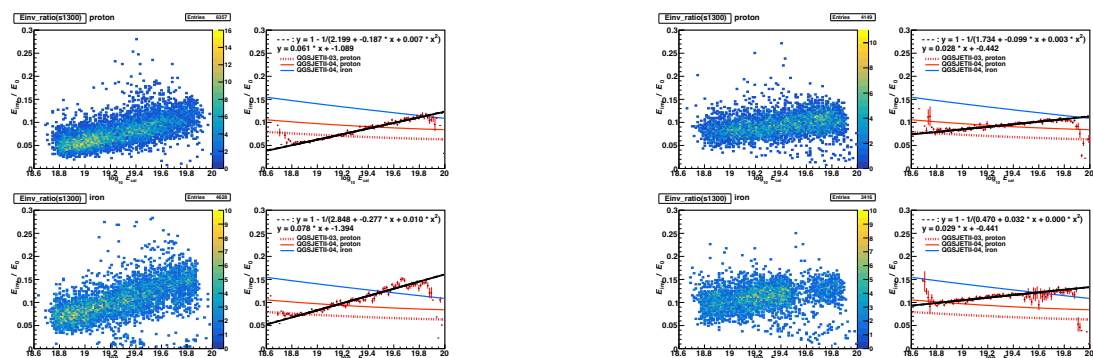
図 D.64: 手法 2 (5.4 節) を用いた E_0 に対する E_{inv} の推定割合である。核種の違いによる影響を知るために鉄で決めた A と B を使っている。この図は $r = 1100$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。



(a) QGSJET II-04 を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

(b) EPOS LHC を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

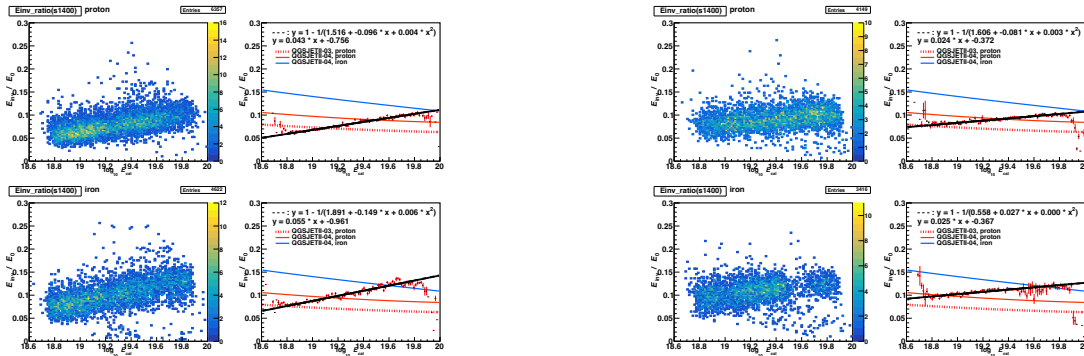
図 D.65: 手法 2 (5.4 節) を用いた E_0 に対する E_{inv} の推定割合である。核種の違いによる影響を知るために鉄で決めた A と B を使っている。この図は $r = 1200$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。



(a) QGSJET II-04 を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

(b) EPOS LHC を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

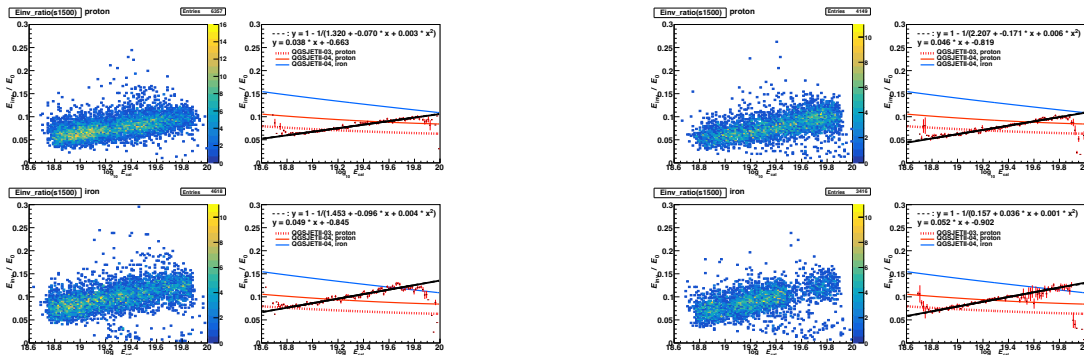
図 D.66: 手法 2 (5.4 節) を用いた E_0 に対する E_{inv} の推定割合である。核種の違いによる影響を知るために鉄で決めた A と B を使っている。この図は $r = 1300$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。



(a) QGSJET II-04 を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

(b) EPOS LHC を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

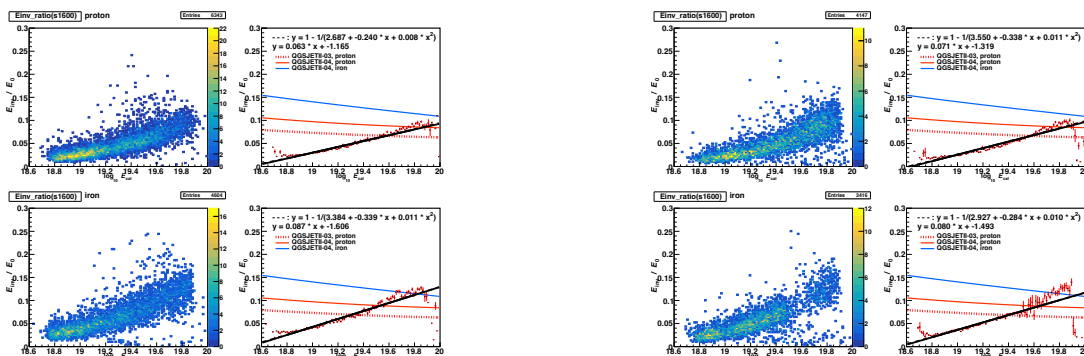
図 D.67: 手法 2 (5.4 節) を用いた E_0 に対する E_{inv} の推定割合である。核種の違いによる影響を知るために鉄で決めた A と B を使っている。この図は $r = 1400$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。



(a) QGSJET II-04 を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

(b) EPOS LHC を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

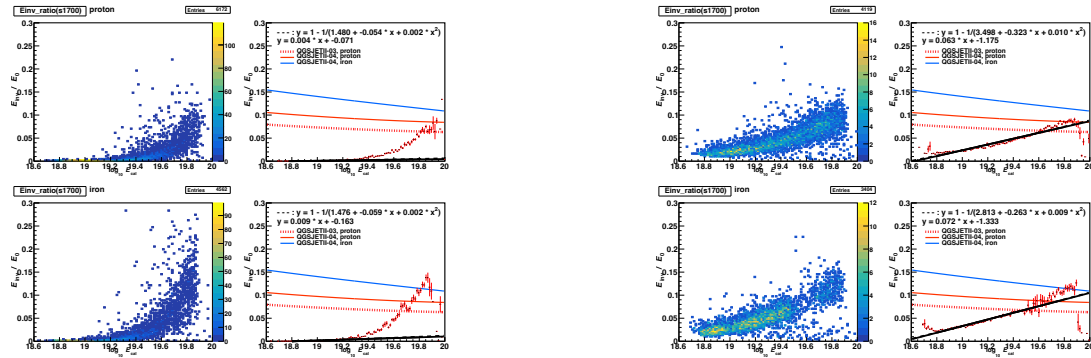
図 D.68: 手法 2 (5.4 節) を用いた E_0 に対する E_{inv} の推定割合である。核種の違いによる影響を知るために鉄で決めた A と B を使っている。この図は $r = 1500$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。



(a) QGSJET II-04 を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

(b) EPOS LHC を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

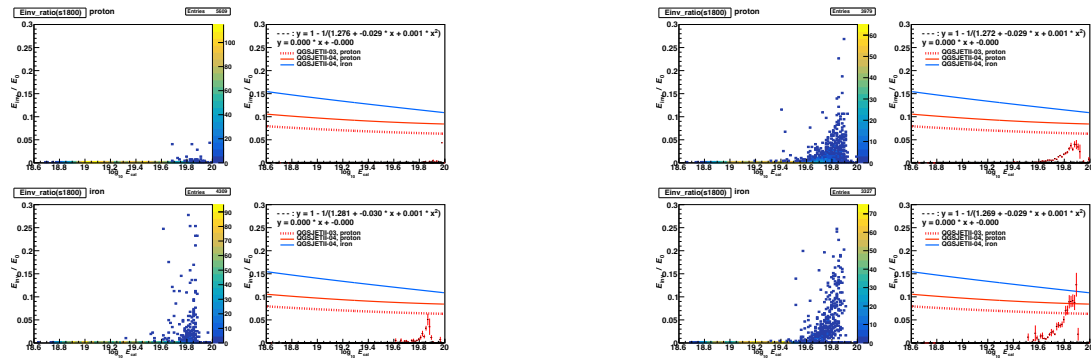
図 D.69: 手法 2 (5.4 節) を用いた E_0 に対する E_{inv} の推定割合である。核種の違いによる影響を知るために鉄で決めた A と B を使っている。この図は $r = 1600$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。



(a) QGSJET II-04 を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

(b) EPOS LHC を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

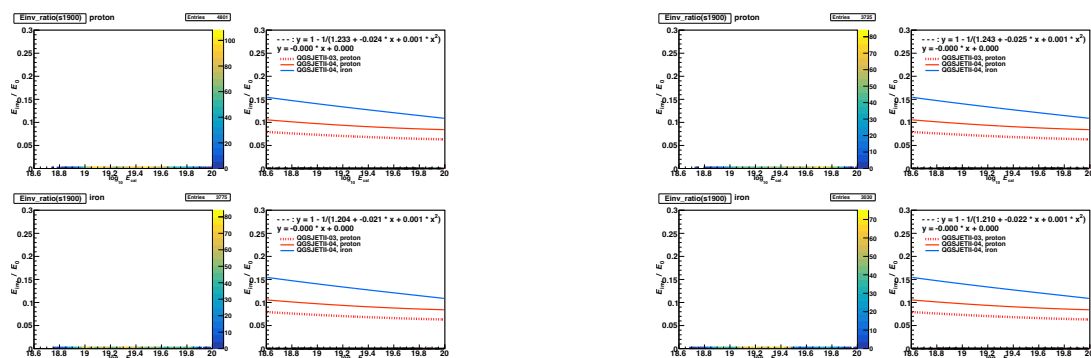
図 D.70: 手法 2 (5.4 節) を用いた E_0 に対する E_{invv} の推定割合である。核種の違いによる影響を知るために鉄で決めた A と B を使っている。この図は $r = 1700$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。



(a) QGSJET II-04 を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

(b) EPOS LHC を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

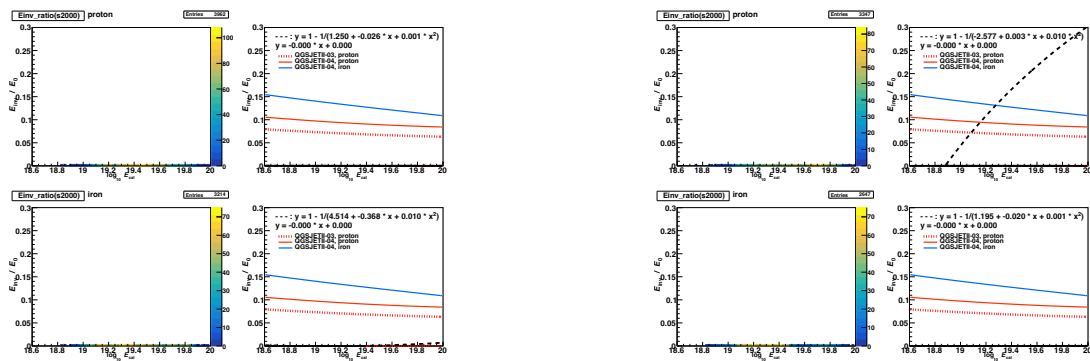
図 D.71: 手法 2 (5.4 節) を用いた E_0 に対する E_{invv} の推定割合である。核種の違いによる影響を知るために鉄で決めた A と B を使っている。この図は $r = 1800$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。



(a) QGSJET II-04 を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

(b) EPOS LHC を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

図 D.72: 手法 2 (5.4 節) を用いた E_0 に対する E_{invv} の推定割合である。核種の違いによる影響を知るために鉄で決めた A と B を使っている。この図は $r = 1900$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。



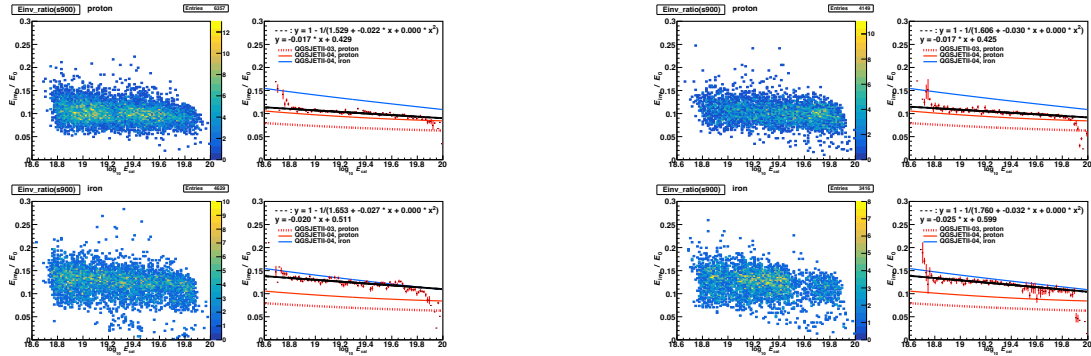
(a) QGSJET II-04 を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

(b) EPOS LHC を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

図 D.73: 手法 2 (5.4 節) を用いた E_0 に対する E_{inv} の推定割合である。核種の違いによる影響を知るために鉄で決めた A と B を使っている。この図は $r = 2000 \text{ m}$ のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。

陽子と鉄で決めた A と B の平均値を使う

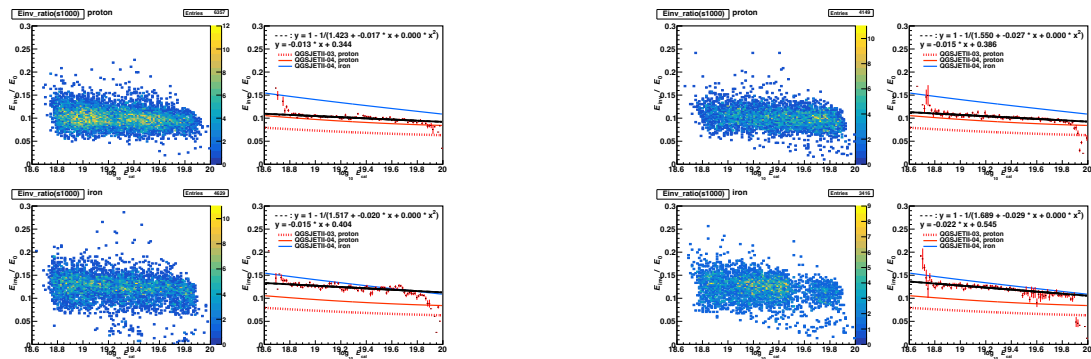
図 5.12 と同様に描いている。



(a) QGSJET II-04 を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

(b) EPOS LHC を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

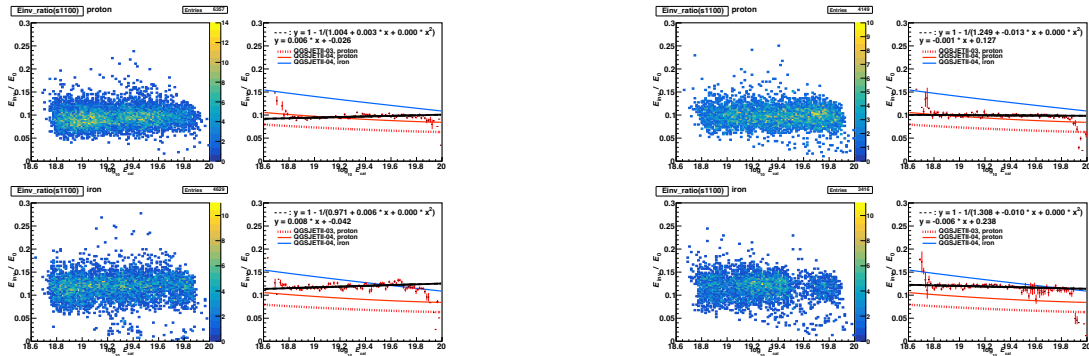
図 D.74: 手法 2 (5.4 節) を用いた E_0 に対する E_{inv} の推定割合である。核種の違いによる影響を知るために陽子と鉄で決めた A と B の平均値を使っている。この図は $r = 900$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。



(a) QGSJET II-04 を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

(b) EPOS LHC を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

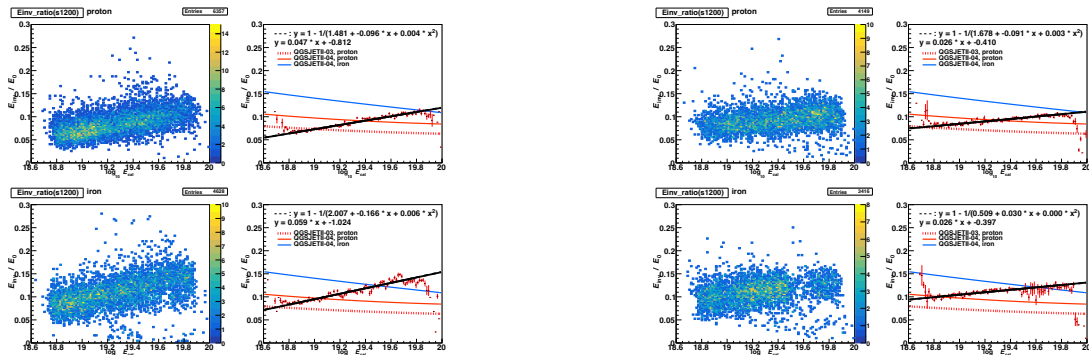
図 D.75: 手法 2 (5.4 節) を用いた E_0 に対する E_{inv} の推定割合である。核種の違いによる影響を知るために陽子と鉄で決めた A と B の平均値を使っている。この図は $r = 1000$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。



(a) QGSJET II-04 を使用。 (上) 陽子、(下) 鉄の結果。

(b) EPOS LHC を使用。 (上) 陽子、(下) 鉄の結果。

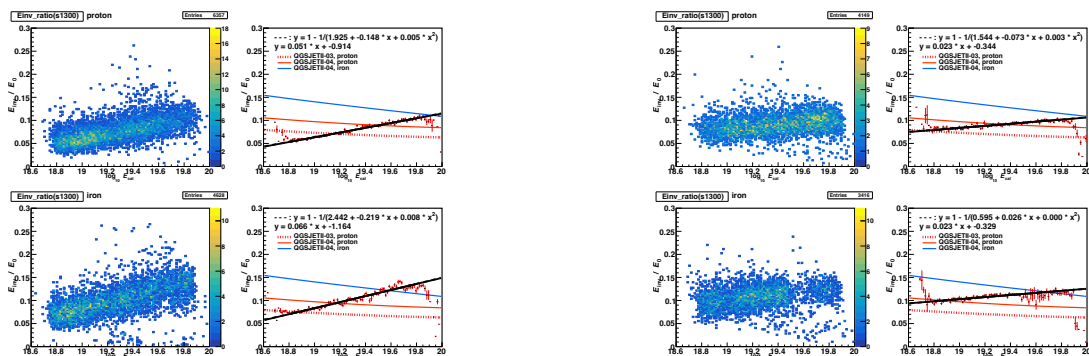
図 D.76: 手法 2 (5.4 節) を用いた E_0 に対する E_{inv} の推定割合である。核種の違いによる影響を知るために陽子と鉄で決めた A と B の平均値を使っている。この図は $r = 1100$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。



(a) QGSJET II-04 を使用。 (上) 陽子、(下) 鉄の結果。

(b) EPOS LHC を使用。 (上) 陽子、(下) 鉄の結果。

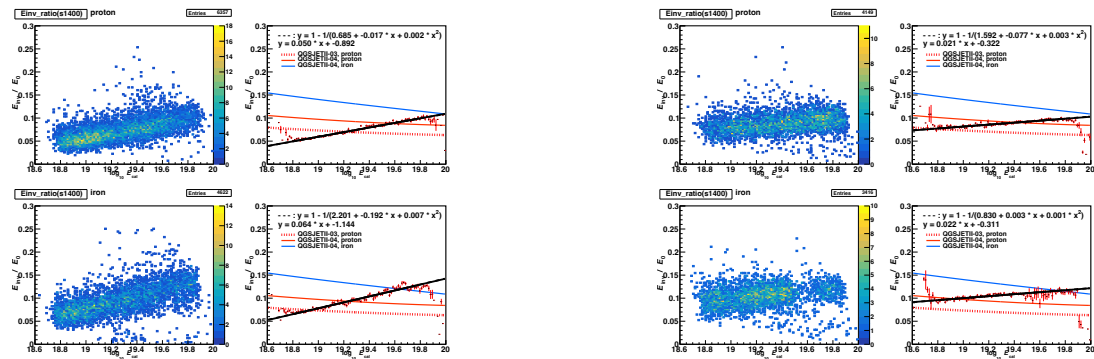
図 D.77: 手法 2 (5.4 節) を用いた E_0 に対する E_{inv} の推定割合である。核種の違いによる影響を知るために陽子と鉄で決めた A と B の平均値を使っている。この図は $r = 1200$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。



(a) QGSJET II-04 を使用。 (上) 陽子、(下) 鉄の結果。

(b) EPOS LHC を使用。 (上) 陽子、(下) 鉄の結果。

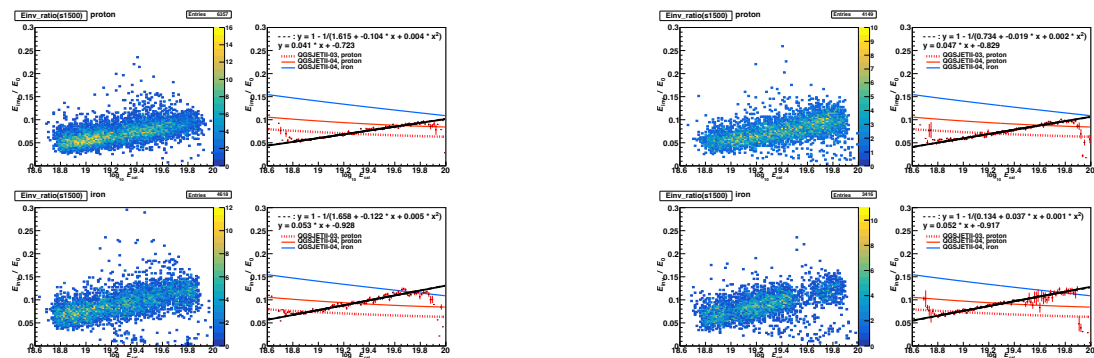
図 D.78: 手法 2 (5.4 節) を用いた E_0 に対する E_{inv} の推定割合である。核種の違いによる影響を知るために陽子と鉄で決めた A と B の平均値を使っている。この図は $r = 1300$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。



(a) QGSJET II-04 を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

(b) EPOS LHC を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

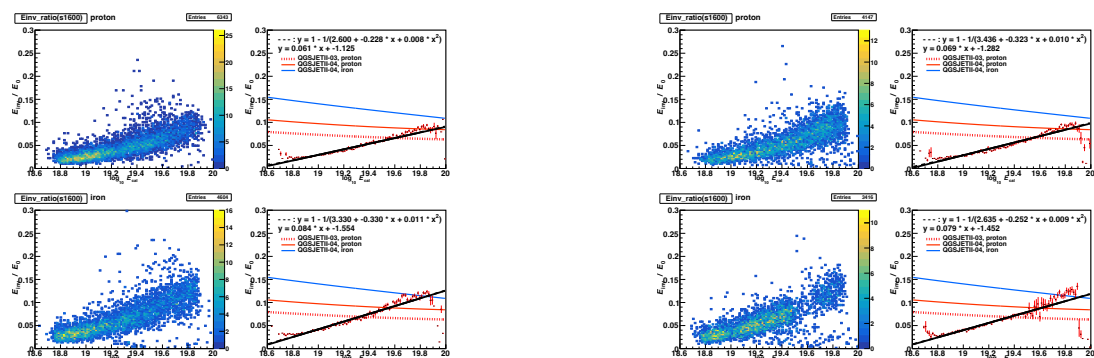
図 D.79: 手法 2 (5.4 節) を用いた E_0 に対する E_{inv} の推定割合である。核種の違いによる影響を知るために陽子と鉄で決めた A と B の平均値を使っている。この図は $r = 1400$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。



(a) QGSJET II-04 を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

(b) EPOS LHC を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

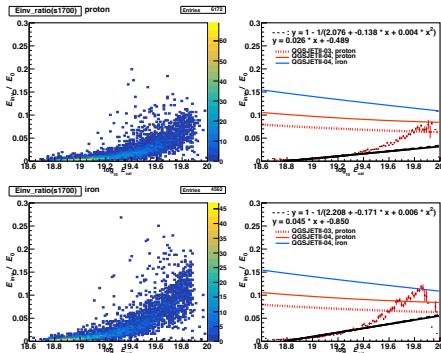
図 D.80: 手法 2 (5.4 節) を用いた E_0 に対する E_{inv} の推定割合である。核種の違いによる影響を知るために陽子と鉄で決めた A と B の平均値を使っている。この図は $r = 1500$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。



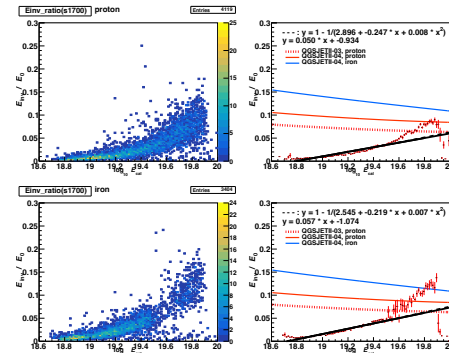
(a) QGSJET II-04 を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

(b) EPOS LHC を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

図 D.81: 手法 2 (5.4 節) を用いた E_0 に対する E_{inv} の推定割合である。核種の違いによる影響を知るために陽子と鉄で決めた A と B の平均値を使っている。この図は $r = 1600$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。

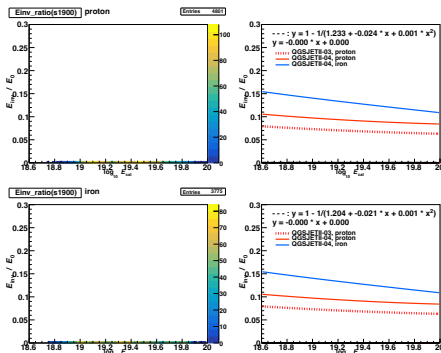


(a) QGSJET II-04 を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

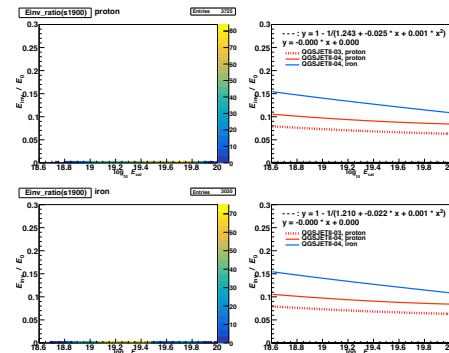


(b) EPOS LHC を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

図 D.82: 手法 2 (5.4 節) を用いた E_0 に対する E_{inv} の推定割合である。核種の違いによる影響を知るために陽子と鉄で決めた A と B の平均値を使っている。この図は $r = 1700$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。

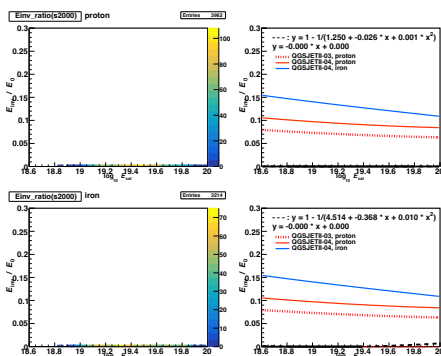


(a) QGSJET II-04 を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

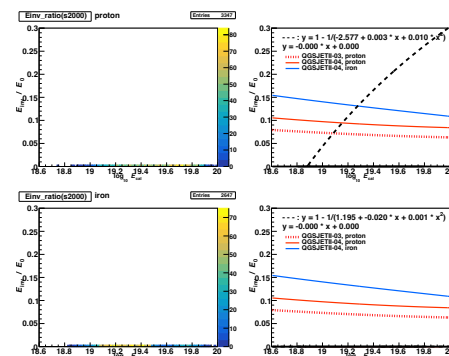


(b) EPOS LHC を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

図 D.83: 手法 2 (5.4 節) を用いた E_0 に対する E_{inv} の推定割合である。核種の違いによる影響を知るために陽子と鉄で決めた A と B の平均値を使っている。この図は $r = 1900$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。



(a) QGSJET II-04 を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。



(b) EPOS LHC を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

図 D.84: 手法 2 (5.4 節) を用いた E_0 に対する E_{inv} の推定割合である。核種の違いによる影響を知るために陽子と鉄で決めた A と B の平均値を使っている。この図は $r = 2000$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。

E 方法3

E.1 r の値を変化させたときの $\log_{10} S_r$ と $\log_{10} E_{\text{inv}}$ の関係 ($E_{\text{inv}} = E_0^{\text{sim}} - E_{\text{cal}}^{\text{CORSIKAscaled}}$)

A と B を決めるためのグラフ

図 5.14 と同様に描いており、一次関数でフィッティングしてフィッティングパラメーターから A と B を決めている。具体的な A と B の値は表 E.4 を参照されたい。



(a) QGSJET II-04 を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

(b) EPOS LHC を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

図 E.85: 手法3 (5.5 節) の A と B を決めるための図。この図は $r = 900$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。



(a) QGSJET II-04 を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

(b) EPOS LHC を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

図 E.86: 手法3 (5.5 節) の A と B を決めるための図。この図は $r = 1000$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。



(a) QGSJET II-04 を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

(b) EPOS LHC を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

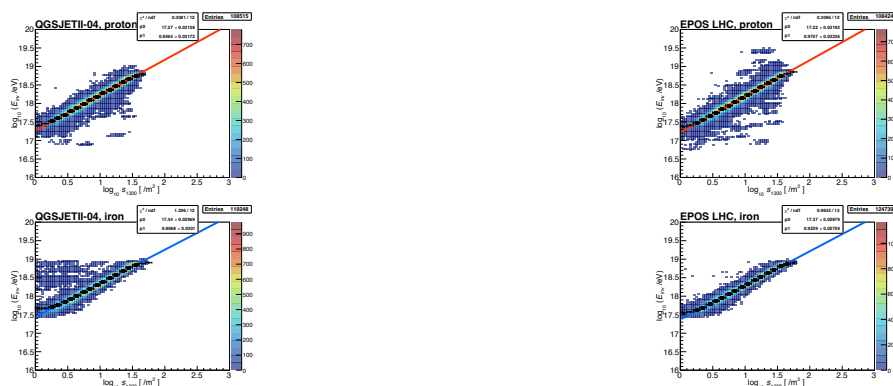
図 E.87: 手法 3 (5.5 節) の A と B を決めるための図。この図は $r = 1100$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。



(a) QGSJET II-04 を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

(b) EPOS LHC を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

図 E.88: 手法 3 (5.5 節) の A と B を決めるための図。この図は $r = 1200$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。



(a) QGSJET II-04 を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

(b) EPOS LHC を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

図 E.89: 手法 3 (5.5 節) の A と B を決めるための図。この図は $r = 1300$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。



(a) QGSJET II-04 を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

(b) EPOS LHC を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

図 E.90: 手法 3 (5.5 節) の A と B を決めるための図。この図は $r = 1400$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。



(a) QGSJET II-04 を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

(b) EPOS LHC を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

図 E.91: 手法 3 (5.5 節) の A と B を決めるための図。この図は $r = 1500$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。



(a) QGSJET II-04 を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

(b) EPOS LHC を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

図 E.92: 手法 3 (5.5 節) の A と B を決めるための図。この図は $r = 1600$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。



(a) QGSJET II-04 を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

(b) EPOS LHC を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

図 E.93: 手法 3 (5.5 節) の A と B を決めるための図。この図は $r = 1700$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。



(a) QGSJET II-04 を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

(b) EPOS LHC を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

図 E.94: 手法 3 (5.5 節) の A と B を決めるための図。この図は $r = 1800$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。



(a) QGSJET II-04 を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

(b) EPOS LHC を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

図 E.95: 手法 3 (5.5 節) の A と B を決めるための図。この図は $r = 1900$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。



(a) QGSJET II-04 を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

(b) EPOS LHC を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

図 E.96: 手法 3 (5.5 節) の A と B を決めるための図。この図は $r = 2000$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。

A と B の値

表 E.4 は手法 3 (5.5 節) で決めた A と B の値をまとめている。図 5.14 や E.1 節のグラフのフィッティング結果から求めている。

表 E.4: 手法 3 (5.5 節) で決めた A と B の値

r	QGSJET II-04				EPOS LHC			
	A_P	B_P	A_{Fe}	B_{Fe}	A_P	B_P	A_{Fe}	B_{Fe}
800 m	0.945143	16.4668	0.874286	16.72	0.959032	16.4082	0.901231	16.6112
900 m	0.950812	16.648	0.879523	16.888	0.964593	16.5923	0.906529	16.7841
1000 m	0.955262	16.8173	0.88161	17.0488	0.96893	16.7637	0.911949	16.9444
1100 m	0.950948	16.9835	0.901137	17.1721	0.970628	16.9268	0.916804	17.0952
1200 m	0.961629	17.1224	0.890611	17.3265	0.975108	17.073	0.931134	17.2237
1300 m	0.95643	17.2681	0.906813	17.4424	0.975695	17.2175	0.922918	17.3686
1400 m	0.965897	17.3937	0.893696	17.5802	0.979091	17.3483	0.922547	17.4938
1500 m	0.966615	17.5179	0.909764	17.6799	0.983777	17.4719	0.937303	17.6057
1600 m	0.96695	17.6355	0.930613	17.7805	0.989243	17.5886	0.940235	17.7173
1700 m	0.962944	17.7504	0.936361	17.8848	0.991058	17.7023	0.938443	17.827
1800 m	0.972616	17.8545	0.939277	17.986	0.992542	17.8106	0.934807	17.9326
1900 m	0.971153	17.9575	0.93906	18.085	0.993778	17.9139	0.92902	18.0343
2000 m	0.966515	18.0572	0.939713	18.1793	0.995014	18.0128	0.923348	18.1312

E.2 r の値を変化させたときの $\log_{10} E_{\text{cal}}^{\text{rec}}$ と $\frac{E_{\text{inv}}^{A,B}}{E_0^{A,B}}$ の関係 ($E_0^{A,B} = E_{\text{cal}}^{\text{rec}} + E_{\text{inv}}^{A,B}$)

図 5.18 と同様に描いている。



(a) QGSJET II-04 を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

(b) EPOS LHC を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

図 E.97: 手法 3 (5.5 節) を用いた E_0 に対する E_{inv} の推定割合である。この図は $r = 900$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。



(a) QGSJET II-04 を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

(b) EPOS LHC を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

図 E.98: 手法 3 (5.5 節) を用いた E_0 に対する E_{inv} の推定割合である。この図は $r = 1000$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。



(a) QGSJET II-04 を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

(b) EPOS LHC を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

図 E.99: 手法 3 (5.5 節) を用いた E_0 に対する E_{inv} の推定割合である。この図は $r = 1100$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。



(a) QGSJET II-04 を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

(b) EPOS LHC を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

図 E.100: 手法 3 (5.5 節) を用いた E_0 に対する E_{inv} の推定割合である。この図は $r = 1200$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。



(a) QGSJET II-04 を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

(b) EPOS LHC を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

図 E.101: 手法 3 (5.5 節) を用いた E_0 に対する E_{inv} の推定割合である。この図は $r = 1300$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。



(a) QGSJET II-04 を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

(b) EPOS LHC を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

図 E.102: 手法 3 (5.5 節) を用いた E_0 に対する E_{inv} の推定割合である。この図は $r = 1400$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。



(a) QGSJET II-04 を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

(b) EPOS LHC を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

図 E.103: 手法 3 (5.5 節) を用いた E_0 に対する E_{inv} の推定割合である。この図は $r = 1500$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。



(a) QGSJET II-04 を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

(b) EPOS LHC を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

図 E.104: 手法 3 (5.5 節) を用いた E_0 に対する E_{inv} の推定割合である。この図は $r = 1600$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。



(a) QGSJET II-04 を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

(b) EPOS LHC を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

図 E.105: 手法 3 (5.5 節) を用いた E_0 に対する E_{inv} の推定割合である。この図は $r = 1700$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。



(a) QGSJET II-04 を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

(b) EPOS LHC を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

図 E.106: 手法 3 (5.5 節) を用いた E_0 に対する E_{inv} の推定割合である。この図は $r = 1800$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。



(a) QGSJET II-04 を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

(b) EPOS LHC を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

図 E.107: 手法 3 (5.5 節) を用いた E_0 に対する E_{inv} の推定割合である。この図は $r = 1900$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。



(a) QGSJET II-04 を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

(b) EPOS LHC を使用。(上) 陽子、(下) 鉄の結果。

図 E.108: 手法 3 (5.5 節) を用いた E_0 に対する E_{inv} の推定割合である。この図は $r = 2000$ m のときを示している。ハドロン相互作用モデルは (a) では QGSJET II-04、(b) では EPOS LHC を使用している。

引用文献

- [1] TELESCOPE ARRAY collaboration, *Telescope array experiment*, *Nucl. Phys. B Proc. Suppl.* **175-176** (2008) 221.
- [2] TELESCOPE ARRAY collaboration, *New air fluorescence detectors employed in the Telescope Array experiment*, *Nucl. Instrum. Meth. A* **676** (2012) 54 [arXiv:1201.0002].
- [3] TELESCOPE ARRAY collaboration, *The surface detector array of the Telescope Array experiment*, *Nucl. Instrum. Meth. A* **689** (2013) 87 [arXiv:1201.4964].
- [4] PIERRE AUGER collaboration, *Data-driven estimation of the invisible energy of cosmic ray showers with the Pierre Auger Observatory*, *Phys. Rev. D* **100** (2019) 082003 [arXiv:1901.08040].
- [5] W.F. Hanlon, *Updated cosmic ray spectrum*, Accessed Jan. 28, 2024,
URL: <https://web.physics.utah.edu/~whanlon/spectrum.html>.
- [6] PARTICLE DATA GROUP, *Review of Particle Physics*, *PTEP* **2022** (2022) 083C01.
- [7] H. Shin, *The measurement of the energy spectrum and depth of maximum shower development of ultra-high-energy cosmic rays collected by the telescope array with the hybrid*, Ph.D. thesis, The University of Tokyo (2022).
- [8] H.P. Dembinski, *The Muon Puzzle in High-Energy Air Showers*, *Phys. Atom. Nucl.* **82** (2020) 644.
- [9] M.S. Longair, *HIGH-ENERGY ASTROPHYSICS. AN INFORMAL INTRODUCTION FOR STUDENTS OF PHYSICS AND ASTRONOMY* (1981).
- [10] PIERRE AUGER collaboration, *The Pierre Auger Cosmic Ray Observatory*, *Nucl. Instrum. Meth. A* **798** (2015) 172 [arXiv:1502.01323].
- [11] T. Fujii, M. Fukushima, D. Ikeda, D. Ivanov, B. Shin, J.P. Lundquist et al., *A systematic uncertainty on the energy scale of the Telescope Array fluorescence detectors*, *PoS ICRC2017* (2017) 524.
- [12] KCDC, *The cascade experiment*, Accessed Feb. 24, 2025,
URL: <https://kcdc.iap.kit.edu/information/aboutKASCADE/>.
- [13] ICECUBE collaboration, *IceTop: The surface component of IceCube*, *Nucl. Instrum. Meth. A* **700** (2013) 188 [arXiv:1207.6326].
- [14] J. Vicha, V. Novotný and J. Ebr, *Data-driven Estimation of Invisible Energy below EeV*, *PoS ICRC2023* (2023) 497.
- [15] HiRES collaboration, *Monocular measurement of the spectrum of UHE cosmic rays by the FADC detector of the HiRes experiment*, *Astropart. Phys.* **23** (2005) 157 [arXiv:astro-ph/0208301].
- [16] Y. Tameda et al., *Trigger electronics of the new fluorescence detectors of the Telescope Array experiment*, *Nucl. Instrum. Meth. A* **609** (2009) 227.
- [17] A. Taketa, *Telescope array experiment fluorescence detector electronic system development*, Master's thesis, The University of Tokyo (2005).

- [18] D. Ivanov, *Energy spectrum measured by the telescope array surface detector*, Ph.D. thesis, Rutgers University (2012). DOI: [10.7282/T3K35SG3](https://doi.org/10.7282/T3K35SG3).
- [19] K. Fujita, *Cosmic ray energy spectrum and mass composition measurement with the telescope array low energy extension detector in hybrid mode*, Ph.D. thesis, Osaka City University (2021). DOI: [10.24544/ocu.20220603-006](https://doi.org/10.24544/ocu.20220603-006).
- [20] D. Ikeda, *Hybrid analysis of ultra-high energy cosmic rays observed with the telescope array*, Ph.D. thesis, The University of Tokyo (2009).
- [21] V.F. Hess, *Über Beobachtungen der durchdringenden Strahlung bei sieben Freiballonfahrten*, *Phys. Z.* **13** (1912) 1084.
- [22] G. Kulikov and G. Khristiansen, *On the Size Spectrum of Extensive Air Showers*, *Soviet Physics JETP* **35** (1959) 441.
- [23] W.D. Apel et al., *KASCADE-Grande measurements of energy spectra for elemental groups of cosmic rays*, *Astropart. Phys.* **47** (2013) 54 [[arXiv:1306.6283](https://arxiv.org/abs/1306.6283)].
- [24] KASCADE GRANDE collaboration, *Kneelike structure in the spectrum of the heavy component of cosmic rays observed with KASCADE-Grande*, *Phys. Rev. Lett.* **107** (2011) 171104 [[arXiv:1107.5885](https://arxiv.org/abs/1107.5885)].
- [25] B. Peters, *Primary cosmic radiation and extensive air showers*, *Nuovo Cim.* **22** (1961) 800.
- [26] J. Albrecht et al., *The Muon Puzzle in cosmic-ray induced air showers and its connection to the Large Hadron Collider*, *Astrophys. Space Sci.* **367** (2022) 27 [[arXiv:2105.06148](https://arxiv.org/abs/2105.06148)].
- [27] TELESCOPE ARRAY collaboration, *Study of muons from ultrahigh energy cosmic ray air showers measured with the Telescope Array experiment*, *Phys. Rev. D* **98** (2018) 022002 [[arXiv:1804.03877](https://arxiv.org/abs/1804.03877)].
- [28] J. Linsley, *SPECTRA, ANISOTROPIES AND COMPOSITION OF COSMIC RAYS ABOVE 1000 GeV*, *ICRC1983 Vol.12* (1983) p.135.
- [29] PHYSICS DEPARTMENT, UNIVERSITY OF UTAH, SALT LAKE CITY, UT 84112, *THE STRUCTURE OF EAS AT $E > 0.1$ EeV*, *ICRC1985 Vol.7* (1985) p.159.
- [30] C. Song, Z. Cao, B.R. Dawson, B.E. Fick, W.-Y. Lee, P. Sokolsky et al., *Energy estimation of UHE cosmic rays using the atmospheric fluorescence technique*, *Astropart. Phys.* **14** (2000) 7 [[arXiv:astro-ph/9910195](https://arxiv.org/abs/astro-ph/9910195)].
- [31] H.M.J. Barbosa, F. Catalani, J.A. Chinellato and C. Dobrigkeit, *Determination of the calorimetric energy in extensive air showers*, *Astropart. Phys.* **22** (2004) 159 [[arXiv:astro-ph/0310234](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0310234)].
- [32] PIERRE AUGER collaboration, *The Fluorescence Detector of the Pierre Auger Observatory*, *Nucl. Instrum. Meth. A* **620** (2010) 227 [[arXiv:0907.4282](https://arxiv.org/abs/0907.4282)].
- [33] PIERRE AUGER collaboration, *The Surface Detector System of the Pierre Auger Observatory*, *Nucl. Instrum. Meth. A* **586** (2008) 409 [[arXiv:0712.2832](https://arxiv.org/abs/0712.2832)].
- [34] PIERRE AUGER collaboration, *Measurement of the average shape of longitudinal profiles of cosmic-ray air showers at the Pierre Auger Observatory*, *JCAP* **03** (2019) 018 [[arXiv:1811.04660](https://arxiv.org/abs/1811.04660)].
- [35] PIERRE AUGER collaboration, *Reconstruction of Inclined Air Showers Detected with the Pierre Auger Observatory*, *JCAP* **08** (2014) 019 [[arXiv:1407.3214](https://arxiv.org/abs/1407.3214)].
- [36] THE PIERRE AUGER COLLABORATION collaboration, *Estimate of the non-calorimetric energy of showers observed with the fluorescence and surface detectors of the Pierre Auger Observatory*, *ICRC2013* (2013) p.11 [[arXiv:1307.5059](https://arxiv.org/abs/1307.5059)].
- [37] KASCADE collaboration, *The Cosmic ray experiment KASCADE*, *Nucl. Instrum. Meth. A* **513** (2003) 490.
- [38] (ICECUBE COLLABORATION)*, ICECUBE collaboration, *Density of GeV muons in air showers measured with*

- IceTop*, *Phys. Rev. D* **106** (2022) 032010 [arXiv:2201.12635].
- [39] TELESCOPE ARRAY collaboration, *Surface detectors of the TA \times 4 experiment*, *Nucl. Instrum. Meth. A* **1019** (2021) 165726 [arXiv:2103.01086].
- [40] TELESCOPE ARRAY collaboration, *The TA \times 4 Experiment*, *JPS Conf. Proc.* **19** (2018) 011025.
- [41] K. Fujisue, *The measurement of the highest-energy cosmic ray energy spectrum with the extended surface detector array of the telescope array experiment*, Ph.D. thesis, The University of Tokyo (2023).
- [42] TELESCOPE ARRAY collaboration, *Telescope Array Low energy Extension(TALE) Hybrid*, *PoS ICRC2019* (2020) 375.
- [43] R. Arimura, *Measurement of cosmic ray mass-composition at the 2nd knee region with the tale surface detectors*, Master's thesis, Osaka City University (2022).
- [44] I. Komae, *Measurement of the energy spectrum of cosmic rays with 3 years of data recorded by the tale-sd array*, Master's thesis, Osaka City University (2023).
- [45] A. Iwasaki, *Tale infill experiment : Detector performance evaluation and optimization for pev-eev cosmic ray observations*, Master's thesis, Osaka City University (2023).
- [46] N. Chiba et al., *Akeno Giant Air Shower Array (AGASA) covering 100 km² area*, *Nucl. Phys. A Acce. Spectro. Detec. Assoc.Equip.* **311** (1992) 338.
- [47] M. Takeda et al., *Extension of the cosmic ray energy spectrum beyond the predicted Greisen-Zatsepin-Kuz'min cutoff*, *Phys. Rev. Lett.* **81** (1998) 1163 [arXiv:astro-ph/9807193].
- [48] T. Abu-Zayyad et al., *The prototype high-resolution Fly's Eye cosmic ray detector*, *Nucl. Instrum. Meth. A* **450** (2000) 253.
- [49] SCHOTT, *Data sheet bg3*, Accessed Dec. 19, 2024,
URL: <https://media.schott.com/api/public/content/46d981c7c46b46efa2c73d359b507032>.
- [50] SCHOTT, *Td1 stellar ultraviolet fluxes catalog*, Accessed Jan. 27, 202,
URL: <https://heasarc.gsfc.nasa.gov/W3Browse/all/td1.html>.
- [51] D. Heck, J. Knapp, J.N. Capdevielle, G. Schatz and T. Thouw, *CORSIKA: A Monte Carlo code to simulate extensive air showers*, Tech. Rep. FZKA-6019 (1998).
- [52] A.M. Hillas, *Shower simulation: Lessons from MOCCA*, *Nucl. Phys. B Proc. Suppl.* **52** (1997) 29.
- [53] PIERRE AUGER collaboration, *A thinning method using weight limitation for air-shower simulations*, *Astropart. Phys.* **15** (2001) 259.
- [54] D.S. Gorbunov, G.I. Rubtsov and S.V. Troitsky, *Air-shower simulations with and without thinning: Artificial fluctuations and their suppression*, *Phys. Rev. D* **76** (2007) 043004 [arXiv:astro-ph/0703546].
- [55] B.T. Stokes, R. Cady, D. Ivanov, J.N. Matthews and G.B. Thomson, *Dethinning Extensive Air Shower Simulations*, *Astropart. Phys.* **35** (2012) 759 [arXiv:1104.3182].
- [56] TELESCOPE ARRAY collaboration, *CORSIKA Simulation of the Telescope Array Surface Detector*, [arXiv:1403.0644] (2014).
- [57] GEANT4 collaboration, *GEANT4—a simulation toolkit*, *Nucl. Instrum. Meth. A* **506** (2003) 250.
- [58] J. Allison et al., *Geant4 developments and applications*, *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **53** (2006) 270.
- [59] F. Kakimoto, E.C. Loh, M. Nagano, H. Okuno, M. Teshima and S. Ueno, *A Measurement of the air fluorescence yield*, *Nucl. Instrum. Meth. A* **372** (1996) 527.
- [60] R. Abbasi et al., *Air fluorescence measurements in the spectral range 300-420 nm using a 28.5-GeV electron beam*, *Astropart. Phys.* **29** (2008) 77 [arXiv:0708.3116].
- [61] S. Ostapchenko, *Monte Carlo treatment of hadronic interactions in enhanced Pomeron scheme: I.*

- QGSJET-II model*, *Phys. Rev. D* **83** (2011) 014018 [[arXiv:1010.1869](#)].
- [62] T. Pierog, I. Karpenko, J.M. Katzy, E. Yatsenko and K. Werner, *EPOS LHC: Test of collective hadronization with data measured at the CERN Large Hadron Collider*, *Phys. Rev. C* **92** (2015) 034906 [[arXiv:1306.0121](#)].
- [63] A. Ferrari, P.R. Sala, A. Fasso and J. Ranft, *FLUKA: A multi-particle transport code (Program version 2005)*, Tech. Rep. (2005), DOI: [10.2172/877507](#).
- [64] W.R. Nelson, H. Hirayama and D.W. Rogers, *EGS4 code system*, (1985).
- [65] J. Linsley and L. Scarsi, *Arrival times of air shower particles at large distances from the axis*, *Phys. Rev.* **128** (1962) 2384.
- [66] M. Teshima et al., *Properties of 10^9 GeV - 10^{10} GeV Extensive Air Showers at Core Distances Between 100 m and 3000 m*, *J. Phys. G* **12** (1986) 1097.
- [67] S. Yoshida et al., *Lateral distribution of charged particles in giant air showers above EeV observed by AGASA*, *J. Phys. G* **20** (1994) 651.
- [68] D. Newton, J. Knapp and A.A. Watson, *The Optimum Distance at which to Determine the Size of a Giant Air Shower*, *Astropart. Phys.* **26** (2007) 414 [[arXiv:astro-ph/0608118](#)].
- [69] F. James and M. Roos, *Minuit: A System for Function Minimization and Analysis of the Parameter Errors and Correlations*, *Comput. Phys. Commun.* **10** (1975) 343.
- [70] T. Gaisser and A. Hillas, *Reliability of the method of constant intensity cuts for reconstructing the average development of vertical showers*, *15th International Cosmic Ray Conference* **8** (1977) 353.