

LHCf実験; LHCを用いた最高エネルギー宇宙線相互作用の検証

名古屋大学太陽地球環境研究所

さこ 隆志 sako@stelab.nagoya-u.ac.jp

伊藤 好孝 itow@stelab.nagoya-u.ac.jp

2008年(平成20年)5月31日

1 はじめに

2008年、ついに待望のLHCが稼動する。ATLAS, ALICEといった巨大実験とともに、日本が大きく貢献しているLHCf実験を紹介する。LHCfは超高エネルギー宇宙線と地球大気の相互作用の不定性をおさえるための実験である。

宇宙線の中には 10^{20} eVものエネルギーを持った粒子が観測されている[1][2]。最高エネルギー宇宙線¹のエネルギー-スペクトルを決定し、その起源を探ることは、天体物理的な興味だけでなく、物理学の基礎の検証や未知の超重粒子の発見につながる可能性があることが示唆されている。 10^{20} eVの宇宙線は宇宙を満たす背景放射と衝突し、 π 中間子を生成してエネルギーを失ってしまう。その平均自由行程は数Mpc程度であり、もしも宇宙線源が数10Mpcを越えて宇宙に広がっているならば、エネルギースペクトルは 10^{20} eV付近で急激に折れ曲がるはずである(GZKカットオフ[3])。逆に、この折れ曲がりが見えなければ、宇宙線源は近傍にあることになり、宇宙線の到来方向からその起源天体を調べる‘宇宙線天文学’が可能になる。なお、10Mpcは約3千万光年であり、宇宙の大きさから考えれば‘極近傍’といっても過言ではない。カットオフがないのに対応天体も見つからない場合、宇宙線源を天体ではなく、未知の超重素粒子の崩解や、ローレンツ不変性の破れを考える、といった提案がなされている[4]。

観測の方法と歴史は2章で詳しく述べるが、複数のグループやテクニックが矛盾した結果を出しており、結着がつかないのが現状である。現在、新しい大規模な観測実験が進行しており、観測データは質・量ともに飛躍的に向上している。しかし、2,3章で述べる通り、観測結果の解釈にはハドロン相互作用の不定性が大きく影響している。LHCf実験は、宇宙線空気シャワーの発達に重要で、

ATLASなどの汎用検出器がカバーしていない、超前方放出粒子の測定を行ない、この不定性を減らすこと目的とした実験である。小型の解像型サンプリングカロリメータで0度方向に放出された中性粒子を測定することで、現在宇宙線研究で使用されている主要な相互作用モデルの良否を判定することができる。また、新たなモデルを構築する際の重要なキャリブレーションデータを与える。本研究紹介では、4章でLHCf実験の紹介を行なうが、その背景の超高エネルギー宇宙線観測実験の歴史と現状、ハドロン相互作用モデルについても少々詳しく述べることにする。

2 最高エネルギー宇宙線観測の現状と問題点

一次宇宙線の到来頻度はエネルギーのほぼ3乗に反比例して減少し、 10^{19} eVを超えるエネルギーの宇宙線頻度は1個/ km^2 /年程度である。そこで、最高エネルギー宇宙線の観測は大気自身を検出器の一部として使い、宇宙線が大気中で起こしたカスケードからのシャワー粒子を地表検出器でとらえる手法(Surface Detector; SD)、もしくはシャワー粒子が大気中の窒素を励起して発生する大気蛍光を望遠鏡でイメージングしてとらえる手法(Fluorescence Detector; FD)の2種類が用いられている。

日本のAGASA実験(Akeno Giant Air Shower Array)は、明野高原の 100 km^2 の範囲に100台以上のプラスチックシンチレータを展開した初めての大規模地上アレイ(SD)である。1990年より観測を開始した彼らは、11個の 10^{20} eVを超えるイベントを観測し、GZKカットオフを超えて宇宙線のエネルギーが伸びていることを主張した[1]。同じ頃、HiRes実験はユタの砂漠において大気蛍光望遠鏡(FD)による観測を行ない、こちらはGZKカットオ

¹目安として 10^{18} eV以上の宇宙線をさす。

フと矛盾しないエネルギースペクトルを得ている [2]。これがいわゆる「最高エネルギー宇宙線問題」である。第二世代の実験である Auger 実験や Telescope Array 実験 (TA) では、SD と FD の両手法を併用している。2004 年から観測を開始した Auger は、アルゼンチンのマラガに 3000 km² の水チェレンコフタンクアレイを展開し、大気蛍光望遠鏡も設置して空気シャワーの同時観測を行っている [5]。AGASA, HiRes, Auger の 3 実験によるエネルギースペクトルをまとめたものが図 1 である。Auger の結果は 4×10^{19} eV 付近からスペクトルがソフトになっていることを示しており、HiRes 実験と同様、GZK カットオフの存在を示しているように考えられる。AGASA との差は、AGASA のエネルギースケールを 40% 程度下げれば合いそうである。

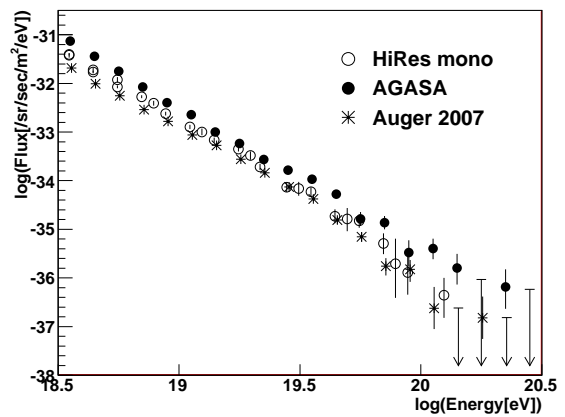


図 1: 最高エネルギー宇宙線エネルギースペクトル

ところで、SD では、ある高度でのシャワー発達中の粒子数を測定し、モンテカルロ計算と比較することによってエネルギーを決定する。したがって、宇宙線と大気のハドロン相互作用の不定性によるシャワー発達の違いが系統誤差の要因となる。FD では大気蛍光総量はシャワー総粒子数に比例するので、シャワー発達の様相には依存しないとされる。その一方で、大気蛍光の絶対量の不定性や、大気透過率の補正など、実験的な系統誤差が大きくなる。Auger のエネルギースケールは、大気蛍光の結果を信じて決めているが、地上検出器で決めたエネルギースケールとは 30% 違うと報告されている [6]。

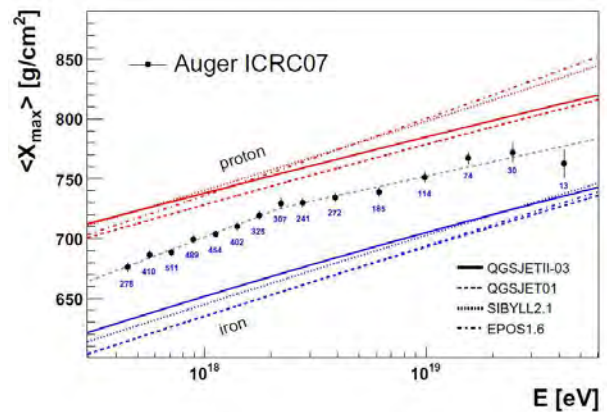


図 2: Auger が測定した、エネルギー別の X_{max} の変化。プロットが測定で、実線、点線はさまざまな相互作用モデルによる計算値。図には、一次宇宙線が陽子のみの場合と鉄のみの場合が示されている。各点に添えられた数字は、そのエネルギービンでのイベント数。

Auger は 2007 年に 6×10^{19} eV 以上のイベントの到来方向と活動銀河核の方向に有意な相関があると発表した [7]。最高エネルギー宇宙線が陽子であれば、このエネルギーならば銀河磁場に曲げられずに直進する。したがって、最高エネルギー宇宙線は鉄などの原子核ではなく、陽子であることを示唆している。一方、宇宙線化学組成はシャワー発達が最大となる高度 (X_{max}) から推定されるが、Auger の結果は 10^{20} eV に近づくにつれて陽子から重原子核に遷移しているように見える (図 2, [8])。また、地上検出器でのミュオン数も、一次組成が原子核という描像と一致している。このように最高エネルギー宇宙線の問題は、スペクトルに折れ曲がりありそうだと、ことまでは確認できたものの、それが GZK カットオフなのか何なのか確立するところまでは至っていないのが現状である。この問題の根底には、空気シャワー観測におけるハドロン相互作用の不定性の問題がある。

3 空気シャワーとハドロン相互作用

空気シャワー観測において、空気シャワー発達の様相の違いが一次宇宙線のエネルギー、化学組成などの測定の系統誤差になることは述べた。たとえば、AGASA では、SYBILL, QGSJET2 という異なるモデルを用いることによって、もとめられるエネルギーに 10% の違いがあることを報告している。また、図 2 にもみられる通り、 X_{max} の計算値は相互作用モデルによって大きく異っており、この不定性をおさえない限り、実際に飛来している宇宙線の化学組成を知ることはできない。

東京大学宇宙線研究所が中心となって進めている TA 実験も、ユタに 700 km² の地上シンチレータアレイと大気蛍光望遠鏡を設置して、今年度からデータ取得を開始した。数年後には、南半球で観測する Auger 実験との結果の比較が可能になり、その結果が期待されている。

シャワー発達はだまかに二つの量に左右される。ひとつは非弾性衝突断面積、もうひとつは超前方生成粒子のエネルギー分布である。ハドロン衝突において二次粒子のエネ

ルギーフローの大半は超前方に集中するので、前者はもちろん、後者も空気シャワー発達を大きく左右する。この超前方粒子生成はターゲット核子中の small-x のパートンの衝突が寄与するため、非摂動的な QCD が支配するソフトな領域であり、ポメロンなどの現象論的なアプローチに立脚したモデルが作られてきた。現在、宇宙線の空気シャワーシミュレーションに使われている超高エネルギーハドロン反応モデルとして、SYBILL, QGSJET, DPMJET, EPOS などがあるが、加速器で到達可能なエネルギー（実験室系で 10^{14} eV 以下）での実験データでチューンされたモデルを何桁も外挿しているため、最高エネルギー宇宙線のエネルギーでの不定性が大きい。また昨今、このような超高エネルギー超前方生成に寄与する超 small-x のグルーオンにおいて、カラーガラス凝縮などの新たな現象の出現が HERA, RHIC などのデータから議論されており、エネルギーによるモデルの単純な外挿がもはや成り立っていない可能性がある。したがって、 10^{20} eV にできるだけ近いエネルギーでの超前方生成実験データがぜひとも必要である。

まもなく稼動する LHC は、実験室系にして 10^{17} eV の衝突を実現し、最高エネルギー宇宙線の領域まであと少しのところまで迫ることができる。LHC 加速器のレイアウトは、0 度に検出器をおくスペースが用意されており、まさに宇宙線研究にとって不可欠なデータをとる千載一遇のチャンスである。

4 LHCf 実験

LHCf 実験は、主に宇宙線研究者を中心に結成されたグループで、日本、イタリア、スイス、フランス、スペイン、米国の 6 カ国から集った約 30 人からなっている。メンバーの約半分は日本人で主要な貢献をしているが、他国のメンバーもそれぞれ得意な分野をもち、国際コラボレーションが非常に有効に機能している。実験は 2004 年に CERN に提案され、2006 年に提出した Technical Design Report [9] を経て LHC 委員会に LHC の実験のひとつとして正式に承認された。グループでは、2004 年にプロトタイプ機を製作して CERN SPS 加速器において装置の基本性能を証明し [10]、2006 年から 2007 年にかけて本番用装置を製作、試験を実施した。本研究紹介に記載しきれない装置の詳細については、まもなく発行される JINST LHC 特集を参照されたい [11]。

LHCf は、その前身ともいえる CERN の Sp̄pS コライダーにおける最前方 π^0 測定実験 UA7[12] のメンバーから発案された。UA7 の時代は、 10^{15} eV での宇宙線のエネ

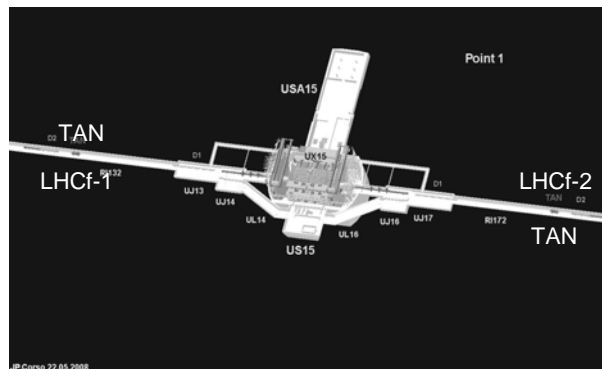


図 3: ATLAS 検出器と LHCf インストール場所の関係。図中央が ATLAS 検出器。LHCf 検出器は、左右 140 m 離れた TAN と書かれた場所に設置されている。

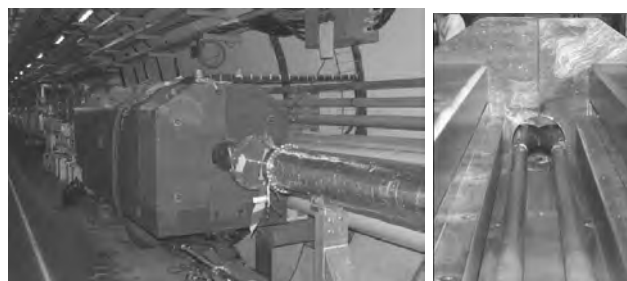


図 4: 中性粒子ダンパー TAN(左写真)。TAN の内部でビームパイプが 2 本に分かれており、LHCf 検出器はその間に設置されている (右写真)。

ルギースペクトルの折れ曲がり (いわゆる knee) の問題に対する相互作用の検証が目的であったが、LHC の時代になり再び GZK 問題が現われたのは、歴史はくり返すということだろうか？

4.1 測定環境

LHCf の実験装置は、LHC の中でも ATLAS 実験が実施される Interaction Point1 (IP1) に設置される。LHC はコライダーのため、0 度方向に放出された粒子はビームパイプの中を進む。荷電粒子は D1 マグネットによって取り除かれるが、中性粒子はそのまま直進し、最終的に衝突点から 140 m 先にある TAN と呼ばれる鉄塊でダンプされる。TAN の中では、衝突点付近で一本だったビームパイプが二本に分岐しており、その間に幅 96 mm、奥行き 1000 mm の装置設置用スロットが用意されている。ATLAS 検出器と TAN の位置関係および TAN の構造は図 3、図 4 に示す通りである。TAN のスロットには、ATLAS の通常の運転の時は Luminosity Monitor と ATLAS ZDC (Zero Degree Calorimeter) が設置されるが、加速器立ち上げ初

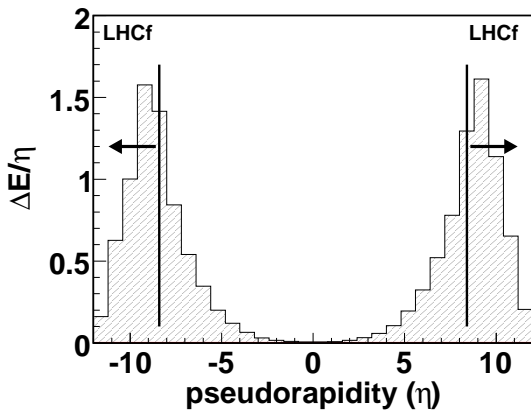


図 5: LHC 陽子衝突で生成される 2 次粒子のエネルギー流量を η の関数として示した。LHCf の測定可能範囲 $\eta > 8.4$ に約半分のエネルギーが運ばれることがわかる。

期の低ルミノシティのときだけ、スロットの IP 側 300 mm に LHCf 実験装置を設置する。

衝突点からスロット方向へのビームパイプの物質厚は 1 放射長になるように調整されている。ただし、TAN に達する前にビームパイプ側壁にぶつかるような角度をもった粒子は測定ができない。この限界は角度にして $310 \mu\text{rad}$ (擬ラピディティで $\eta=8.7$) である。IP1 では、高ルミノシティでの衝突時にビームを下向き $140 \mu\text{rad}$ の角度をつけて衝突させる。LHCf の測定時にこの角度をつけることができれば、測定可能範囲を $450 \mu\text{rad}$ ($\eta=8.4$) まで広げることが可能になる。図 5 に LHC での衝突の際に二次粒子が持ち去るエネルギーを η の関数として示した。LHCf の測定場所でほぼ半分のエネルギーの流れを測定できることがわかる。また、図 6 には発生する γ 線のエネルギーと横方向運動量 (P_T) の分布を示した。実線の右下が LHCf の測定可能範囲である。X_F > 0.1 で、LHCf が P_T 分布の最大位置をカバーできることがわかる。

4.2 実験装置

LHCf は、IP1 の両側の対称な位置に 2 台の検出器を設置し、LHC リング内側からみて左手に設置する装置を 1 号機 (Arm#1)、右手に設置するものを 2 号機 (Arm#2) と呼ぶ。2 台の装置はどちらも TAN のスロットに設置するために、 $90 \text{ mm}^w \times 620 \text{ mm}^h \times 290 \text{ mm}^l$ の小型容器に収められている (図 7)。この容器は、TAN に固定されたマニピュレータに吊り下げられており、上下に 120 mm の移動が可能である。2 台の検出器はそれぞれが 2 台の独立な解像型サンプリングカロリメータを持ち、入射す

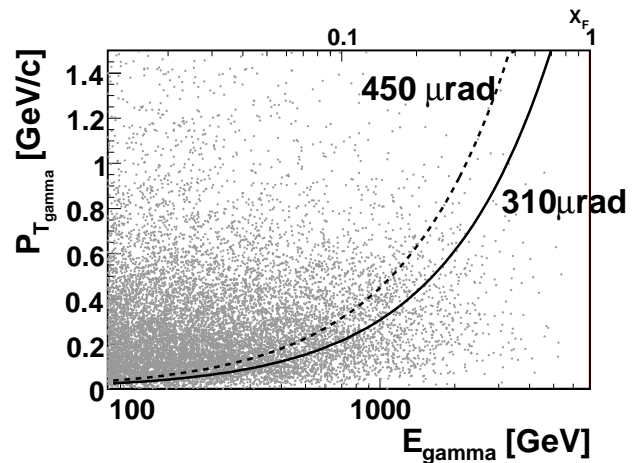


図 6: LHC 陽子衝突で生成される γ 線のエネルギー - と P_T 分布。実線および破線の右下が LHCf の測定可能範囲。

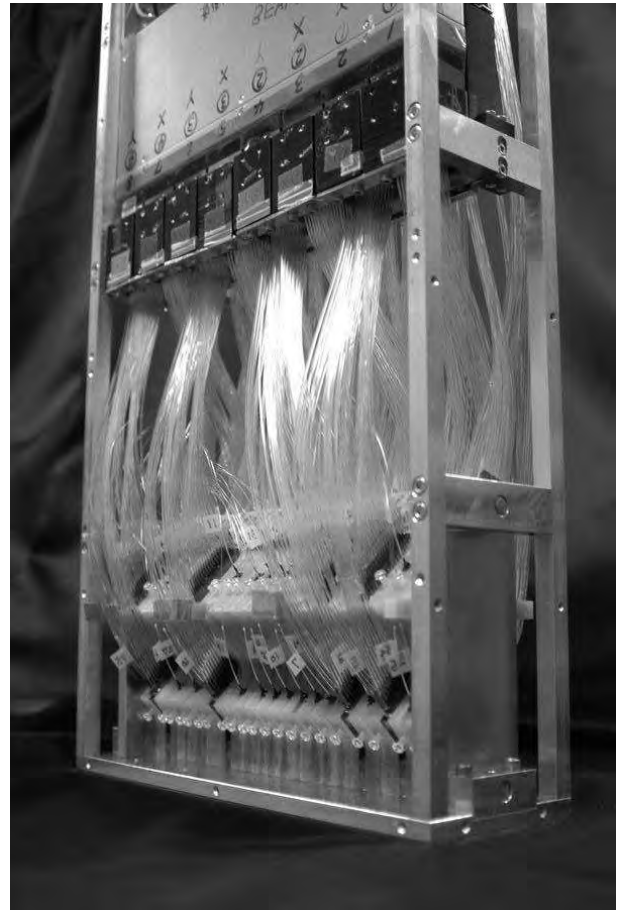


図 7: LHCf 1 号機の全体像写真。写真下部にカロリメータが設置されている。写真上部に見えるのが、MAPMT とフロントエンド回路。

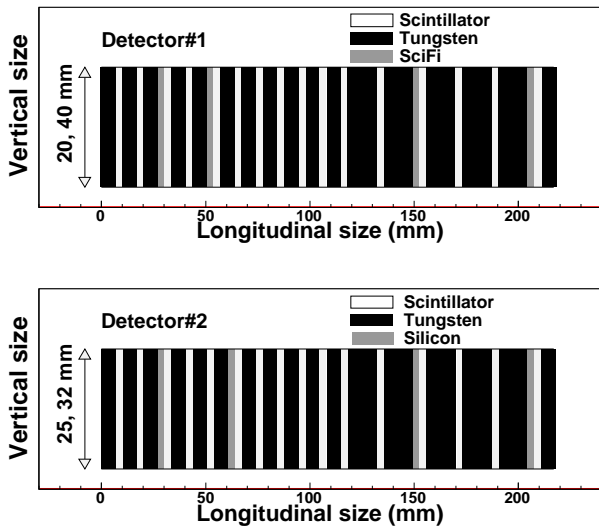


図 8: LHCf カロリ - メ - タの縦方向構造。上下パネルはそれぞれ 1 号機, 2 号機の構造を示す。

る中性粒子 (主に γ 線と中性子) のエネルギーと入射位置を測定する。各カロリメータはタングステン (1 枚 7.0 mm^t , 2 放射長) と 16 枚のプラスチックシンチレータ (Eljen technology EJ-260, 3 mm^t) からなり、縦方向の構造は図 8 に示す通りである。総物質量は 44 放射長 (1.7 ハドロン相互作用長) であり、 $>100 \text{ GeV}$ の γ 線に対して $<5\%$ の、中性子に対しては 30–40% のエネルギー分解能を持つ。後述の位置検出器の違いから、ビームに垂直な方向には、1 号機と 2 号機で異なる形状をしている。1 号機のカロリメータは $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ と $40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ のものを 45° 傾けて縦に並べた配置、2 号機では $25 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$ と $32 \text{ mm} \times 32 \text{ mm}$ を斜めに配置している (図 9)。シンチレータからの光はアクリルライトガイドと光ファイバーを通して装置上部に設置された光電子増倍管 (HAMAMATSU, R7400-U) で読み出す。

位置検出装置として、1 号機ではシンチレーションファイバ (SciFi; KURARAY SCSF-38) とマルチアノード光電子増倍管 (MAPMT; HAMAMATSU H7546) を、2 号機ではシリコンストリップ検出器を使用している。直行する 2 方向を 1 組として、各カロリメータに 4 組の検出器が挿入されている。正確な挿入位置は図 8 に示す通りだが、前 2 組は 100 GeV から 7 TeV の γ 線のシャワーピーク付近を、後ろ 2 組はほぼランダムな位置で発生するハドロンシャワーのピーク付近を抑えるために配置されている。

SciFi は 1 mm 角で、一本ずつに白ペイントをほどこして、カロリメータのサイズに合わせて敷きつめている。SciFi

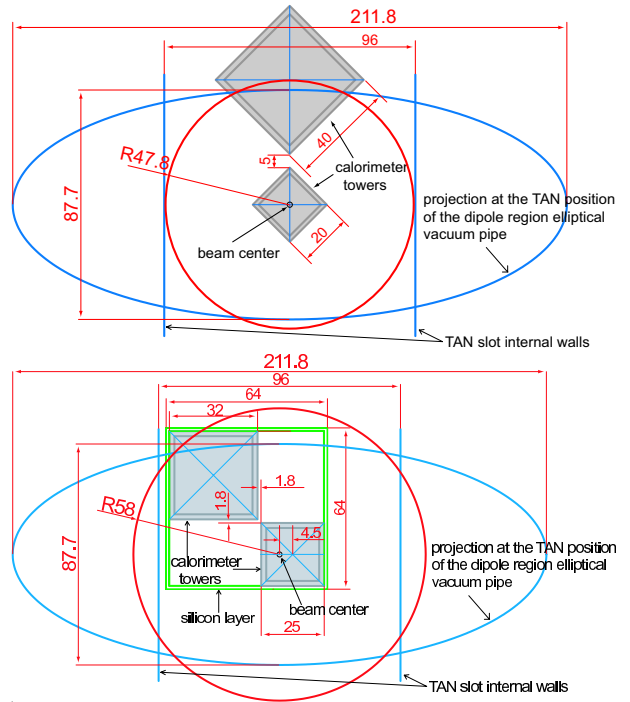


図 9: LHCf カロリ - メ - タの正面図。上下パネルはそれぞれ 1 号機, 2 号機の構造を示す。

は、カロリメータの縁で一本ずつ光ファイバに接続され、シンチレーション光は光ファイバーを通して MAPMT に運ばれる。MAPMT は 1 台が 64 アノードをもっており、8 台の MAPMT で、全 480 本のファイバー信号を読み出す。これらのシステムには、神奈川大学、早稲田大学が中心になって開発した BETS/CALET といった宇宙線観測実験の技術を応用している [13]。

シリコンストリップ検出器は、ATLAS に使用されるものを使用している。1 枚の検出器は、 $64 \text{ mm} \times 64 \text{ mm}$ の有効面積があり、二つのカロリメータを同時にカバーしている。ストリップの間隔は $80 \mu\text{m}$ であるが、LHCf では $160 \mu\text{m}$ ごとに読み出しを行なっている。信号は LHC の基準信号である 40 MHz のクロック信号に従ってアナログパイプラインに保存されており、トリガー信号を受けて、対応する信号をデジタル化し転送する。シリコンストリップ検出器は、イタリアのフィレンツェ大学が開発を担当した。

データ収集は 200 m のケーブルを通して、ATLAS の計測室 (USA15) で実施する。ATLAS とは独立したシステムであるが、LHCf の各事象には ATLAS との同時事象解析を可能にするためのタイムスタンプをつけている。ATLAS Central Trigger Processor から発せられるトリガー数を同じ規則で計数し、LHC の基準クロックである 40 MHz クロックの計数とともに記録している。これによ

て、ATLASトリガー事象とLHCf事象の時刻を25 nsの精度で知ることができ、同時刻に発生したATLAS事象をトリガー番号で指定することができる。

4.3 期待される結果

LHCfが検出の対象とする粒子は以下の通りである。

1. >100 GeVの γ 線 主に $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$ で発生したもので、一つの γ 線が検出される場合。もっとも高い統計の測定が期待できる。 <100 GeVでは、ビームパイプ等から発生するバックグラウンドの量が多くなる。
2. >600 GeVの π^0 中間子 上記過程で発生した2個の γ 線が、二つのカロリメータに同時に入射する場合。二つの γ 線のエネルギーと入射位置が測定できるため、不変質量が衝突点で発生した π^0 中間子に相当する事象を選ぶことで π^0 中間子の生成断面積の測定が可能になる。低エネルギーの限界はカロリメータの幾何学的配置によって決まる。単独 γ 線事象の10%程度の頻度で検出される。
3. ~ 2 TeV以上の中性子 相互作用におけるleading particleへのエネルギー付与の割合を知るのに重要。単独 γ 線事象と同程度の頻度で検出されるが、十分なエネルギー分解能を得るためにはカロリメータ前方で発達するシャワーを選択する必要がある。低エネルギーの限界は K^0 中間子の漏れ込みが大きくなる領域である。

上記の三通りの測定では、各粒子のエネルギースペクトルとともに入射位置を測定することが可能であり、角度分布、あるいは擬ラビディティ分布に焼き直すことができる。図10から図12に、様々なハドロン相互作用モデルから予想される単独 γ 線、 π^0 中間子、中性子のエネルギースペクトルを示す。各図には γ 線と中性子のエネルギー分解能としてそれぞれ5%、30%を考慮し、縦軸の誤差棒は統計誤差を示している。計算では 10^7 の非弾性散乱を仮定しており、 $\sigma_{inel} = 100$ mbとすると $\int L dt = 0.1$ nb $^{-1}$ という短時間のランで測定は終了する。これらの図からわかる通り、LHCfによる短時間の測定で、宇宙線研究で広く用いられているハドロン相互作用モデルの良否が明らかになる。

ハドロン相互作用ではないが、LHCf実験ではLPM効果(Landau-Pomeranchuk-Migdal効果)のシャワー発達に対する影響を初めて定量的に測定することが可能になる。LPM効果は、電磁シャワーの相互作用長が実効的に長くなる現象で、粒子のエネルギーと物質密度の積に応じて影響

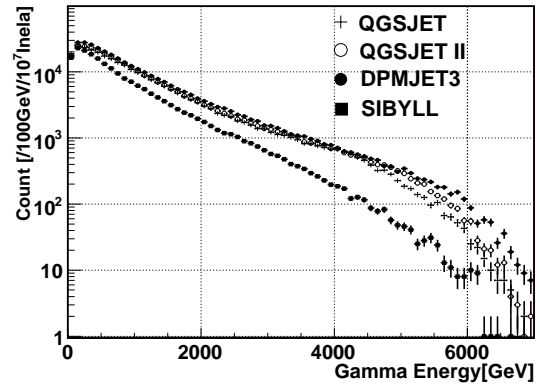


図10: LHCfで測定される0度方向での γ 線のエネルギースペクトル。異なる4つの相互作用モデルを用いた計算結果。

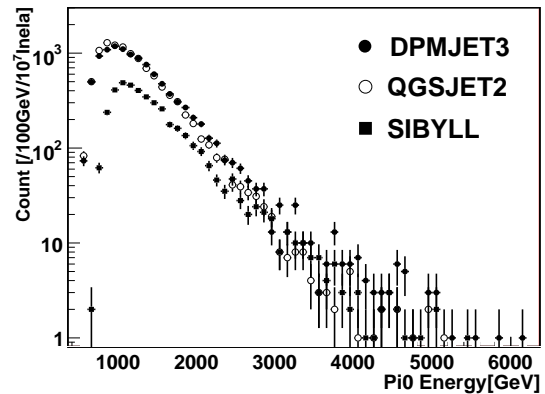


図11: LHCfで測定される π^0 中間子のエネルギースペクトル。異なる3つの相互作用モデルを用いた計算結果。

が現われる。宇宙線空気シャワーの場合は $10^{19} \sim 10^{20}$ eVくらいから影響が現われると考えられているが、タングステンカロリメータを用いたLHCf検出器でもその効果が現われると予想されている。図13に、LPM効果を考慮した場合としない場合の1 TeV γ 線シャワー発達の様子を示した(横軸はLHCfカロリメータのチャンネル番号)。シャワー発達曲線には約10%近い差が現われており、LHCfカロリメータの精度で十分に検証が可能である。

4.4 ランニングシナリオ

4.3節で述べた通り、LHCfのランは $\int L dt = 0.1$ nb $^{-1}$ 程度の測定で十分な統計を得ることができる。LHCは加速器の立ち上げ時に $L = 10^{28} \sim 10^{30}$ cm $^{-2}$ s $^{-1}$ で様々な試験を行なう。LHCfはこの試験運転の期間中の数日の間に

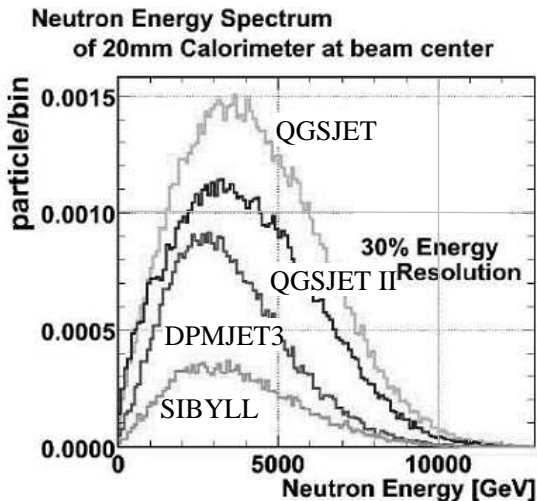


図 12: LHCfで測定される中性子のエネルギースペクトル。検出装置のエネルギー分解能 30%を仮定している。異なる 4 つの相互作用モデルを用いた計算結果。

データ収集を完了する。たとえば、 $L=10^{29} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ のとき、 10^3 s のランで上記積分ルミノシティを達成することができる。この時、LHCfで検出される事象頻度はおよそ 1 kHz であり、データ収集システムもこの値に最適化してある。また、LHCは $L \leq 10^{30} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ では 43 バンチ/ビームで運転し、LHCfの回路もこのバンチ間隔 ($2 \mu\text{s}$) に合わせているため、高いルミノシティでは複数事象のパイラップが生じる可能性がある。

実際の LHCf のラン時間は加速器立ち上げのスケジュールに合わせて決定する。理想的には、異なる装置ゲインでの複数回の測定、マニピュレータを動かしての広 P_T 領域のスキャン、衝突角をつけての低ラピディティまでの測定、を実施したい。ただし、ランが 10 日程度続くと、プラスチックシンチレータに放射線ダメージの影響が現われ始めることが予想されるため、3 日程度が理想的である。なお、プラスチックシンチレータには常時測定室から紫外レーザーを入射することで、発光率の変化をモニタできるようになっている。ランが終了した後、装置はマニピュレータによってビーム面から 10 cm 程上方に移動し、放射線ダメージを避ける。その後、最初の加速器メンテナンスの際に TAN から撤去し、LHCf の場所には銅製のブロックが挿入される。

2008 年 4 月に発表された LHC の最新の立ち上げスケジュールによれば、LHC は 2008 年には $\sqrt{s}=10 \text{ TeV}$ の衝突から開始し、2009 年に設計値の $\sqrt{s}=14 \text{ TeV}$ を達成する。LHCf では両エネルギーでデータ取得をするべく、最終準備を進めている。検出器はすでに 2 台とも TAN 内に設置されており (図 14)、計測室からのデータ収集にも成

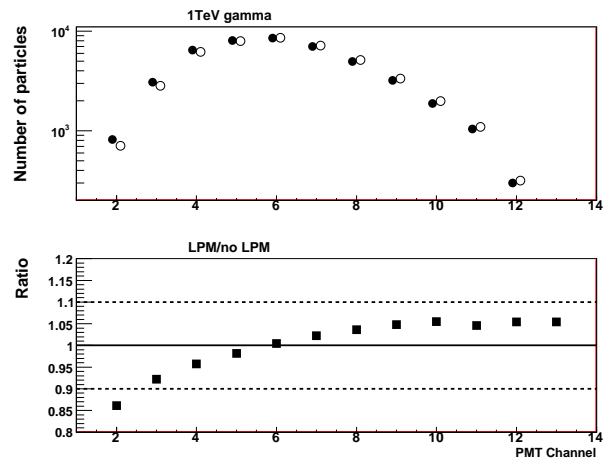


図 13: LHCfで測定される 1 TeV γ 線のシャワー発達曲線。上段は、カロリメータ各層の粒子数。LPM 効果を考慮した場合 (白丸) と考慮しない場合 (黒丸)。下段は LPM がある場合とない場合の粒子数の比。10%近い差が予想されている。



図 14: LHC トンネル内に設置された LHCf 検出器。

功している。装置の製作、SPS 加速器での試験、LHC トンネルへのインストール、調整の作業すべてにわたって、名古屋大学と早稲田大学の大学院生が活躍している (図 15)。

5 まとめ

Auger 実験が本格的な観測結果を出し始め、最高エネルギー宇宙線の観測データは飛躍的に向上している。観測結果は、宇宙線源の空間分布、エネルギースペクトル、伝搬プロセス、化学組成がからみ合っており、統一的な解釈が得られていないのが現状である。もしかしたら未知の物理現象が潜んでいるかもしれない。本年からフルスケー



図 15: LHCf 検出器のインストール作業風景。外国人共同研究者や CERN スタッフの中で日本の大学院生も活躍している。

ル運転を開始した日本の TA 実験による独立な観測結果に期待がかかっている。上記宇宙物理的な未知数と並んでデータの解釈に影響を与えるのが、宇宙線と地球大気のハドロン相互作用モデルである。この不定性を抑える唯一で最良の方法は LHC 加速器を用いることであり、LHCf 実験は LHC IP1 において、宇宙線空気シャワー発達に重要な最前方放出粒子の測定を行なう。

最高エネルギー宇宙線問題は、大規模観測実験と LHC が同時期に進展することで、今もっとも面白い時代を迎えていると言えるだろう。今年 4 月には KEK において、超高エネルギーでのハドロン相互作用をテーマとして、宇宙線研究者と原子核・ハドロン研究者の合同研究会も開かれ、新たな研究も芽生えつつある。小さな LHCf 実験が、この大きな流れの中で重要な役割を果たすことが筆者たちの楽しみである。

6 謝辞

本研究は LHCf メンバーの努力によって遂行されています。グループを代表して本紹介文を執筆することを認めていただいた LHCf グループのメンバーに感謝します。LHCf 実験は、日本担当分については、科学研究費補助金によって遂行されています。最後に、本研究紹介の執筆を薦めてくださった岡山大学の田中礼三郎氏に感謝いたします。

参考文献

[1] M.Takeda, *et al.*, Phys. Rev. Lett., **81** (1998) 1163

- [2] R. U. Abbasi, *et al.*, Phys. Rev. Lett., **92** (2004) 151101
- [3] G. T. Zatsepin and V. A. Kuzmin, JETP Lett, **4** (1966) 78; K. Greisen, Phys. Rev. Lett., **16** (1966) 748
- [4] H. Sato and T. Tati, Progr. Theor. Phys., **47** (1999) 1788
- [5] T. Yamamoto, *et al.*, Proc. of 30th Intl. Cosmic Ray Conference, Merida (2007)
- [6] R. Engel, *et al.*, Proc. of 30th Intl. Cosmic Ray Conference, Merida (2007)
- [7] The Pierre Auger Collaboration, Science, **318** (2007) 938
- [8] M. Unger *et al.*, Proc. of 30th Intl. Cosmic Ray Conference, Merida (2007)
- [9] LHCf Technical Design Report, CERN-LHCC-2006-004 (2006)
- [10] T. Sako, *et al.*, Nucl. Instr. and Meth., **A578** (2007) 146
- [11] O. Adriani *et al.*, JINST (2008) accepted
- [12] E. Paré *et al.*, Phys. Lett., **B242** (1990) 531
- [13] S. Torii *et al.*, Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.), **134** (2004) 23