

機関番号：32689

研究種目：基盤研究 (B)

研究期間：2008～2010

課題番号：20340058

研究課題名 (和文) CERN LHCf 実験遂行と超高エネルギー核相互作用モデルの選別

研究課題名 (英文) Running the CERN LHCf experiment and validating nuclear interaction models at ultra high energies

研究代表者

笠原 克昌 (KASAHARA KATSUAKI)

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号：00013425

研究成果の概要 (和文) : LHCf 実験は CERN LHC 加速器を用いて, 超高エネルギー宇宙線 (UHECR) に匹敵するエネルギー領域で超前方に発生する粒子 (ガンマ線 = 光子, 中性子) のスペクトルを観測する. これにより宇宙線実験で使われているモンテカルロ (MC) シミュレーションで用いられる核相互作用モデルの検証を行い, UHECR の謎の解明に役立てるのが目的である.

LHCf は 2009 年末に 450 GeV + 450 GeV 衝突, 2010 年に 3.5 TeV + 3.5 TeV 衝突の観測に成功した. これらは実験室系換算で $4.3 \cdot 10^{14}$ eV と $2.6 \cdot 10^{16}$ eV にそれぞれ相当する. MC のモデルとして DPMJET (v3.04), PYTHIA (v8.145), QGSJET II (v03), SIBYLL (v2.1) および EPOS (v1.99) を検証した. この全く未知の領域でのスペクトルは予想から全く外れている訳ではなかったものの, これらのどのモデルも実験結果を満足に再現するレベルには遠いことが判明した. 光子のスペクトルは多くの MC モデルよりソフトな様相を呈し, ハドロンはハードな様相を呈している. また, LHC の他の実験 (ATLAS, CMS など) の中心領域での擬ラピディティ (η) 分布の結果と合わせると, 全てのモデルは LHC 領域で破綻すると言ってよい. DPMJET は低エネルギー領域では非常によいモデルであるが, LHCf での光子スペクトルはデータよりかなりハードである. η 分布は LHC 領域で突然データからずれる. PYTHIA は LHC の η 分布を再現するように調整されたものを用いたが, 光子については DPMJET と同じ様相を呈する.

これらのことは, 数年後に期待される LHC の最高エネルギーでの実験を行い, 破綻の傾向を調べ, モデルの検証を行うことが重要なこと, 新たなモデルの構築が必要なことを示している.

研究成果の概要 (英文) : LHCf is a dedicated experiment to observe the spectrum of photons and neutrons produced in the very forward region of collisions at CERN LHC of which energy is comparable to the ultra-high energy cosmic rays (UHECR). The purpose is to validate nuclear interaction models used in the Monte-Carlo (MC) simulations for cosmic-ray experiments, and thus to help clarify the mystery of UHECR.

LHCf successfully observed the 450 GeV + 450 GeV collisions in the end of 2009 and also 3.5 TeV + 3.5 TeV collisions in 2010. The energy is equivalent to the laboratory energy of $4.3 \cdot 10^{14}$ eV and $2.6 \cdot 10^{16}$ eV, respectively. We examined MC models, DPMJET(v3.04), PYTHIA(v8.145), QGSJET II(v03), SIBYLL(v2.1) and EPOS(v1.99). The spectrum in this completely unexplored region was found not completely far way from our expectation, but these models cannot fit the experimental data in a satisfactory way. The photon spectrum is softer than many MC models while hadrons show a harder spectrum. If we consider the pseudo-rapidity (η) distribution in the central region, obtained by other LHC experiments (ATLAS and CMS), together with our data, we may say all interaction models breakdown in the LHC energy region. DPMJET is a very good model in the low energy region but its photon spectrum is much harder than the LHCf data and the η distribution suddenly breakdowns at LHC energies. PYTHIA, though tuned to fit the LHC η distribution, shows a similar photon spectrum as DPMJET.

These facts indicate that we need to explore the highest energy LHC collisions expected in a few years to clarify the breakdown tendency and to validate the models, and also that it is important to construct a new interaction model.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	5,800,000	1,740,000	7,540,000
2009年度	5,500,000	1,650,000	7,150,000
2010年度	3,300,000	990,000	4,290,000
年度			
年度			
総計	14,600,000	4,380,000	18,980,000

研究分野：宇宙線物理学

科研費の分科・細目：物理学・素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：超高エネルギー宇宙線, LHC 加速器, ハドロン相互作用, モンテカルロ, 空気シャワー

1. 研究開始当初の背景

10^{14} eV以上の宇宙線の観測結果(図1)は互いに矛盾するもの、想定する核相互作用モデルによって解釈が変わるものなどが多

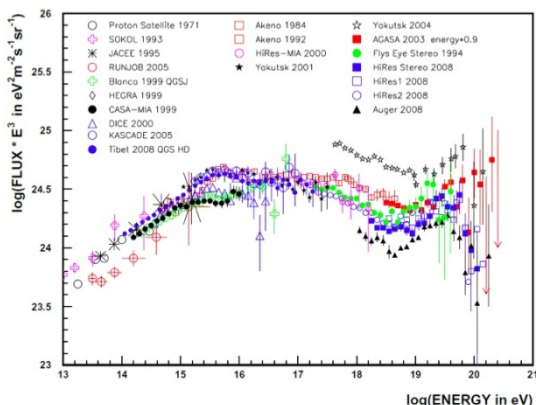


図 1 超高エネルギー宇宙線スペクトル(Form M.Nagano: New Journal of Physics 11)

くある。例えば、

●2.7K 宇宙背景放射との相互作用のため 50 \square 100 Mpc 以遠からは 10^{20} eV を越える宇宙線は到来し得ない(GZK カットオ)はずであるが、我が国のAGASA グループは無視できない数のそうしたイベント(super GZK event)を示している。ユタ大学のHiRes グループと最近の南天でのAuger グループのデータはAGASA データとは矛盾する。ただし、HiResとAuger のデータが一致しているわけではない。

● 10^{17} eV からGZK エネルギー領域での宇宙線組成の問題。重粒子主成分から陽子主

成分に変移するという解釈とそうでない解釈がある。

● 10^{15} eV 前後では宇宙線のエネルギースペクトルに折れ曲がりが見られる。これは超新星残骸での宇宙線加速の証拠の1つとみなせ、理論的な加速限界 $\square 10^{15}$ eV と符合する。宇宙線の磁場での閉じ込めから、 10^{15} eV では鉄のような重粒子が主成分であり、低エネルギーでの陽子主成分からの遷移がある、とするのが自然であるが、観測データの解釈は統一されていない。

2. 研究の目的

こうした矛盾は宇宙線の加速源、加速機構、伝播を宇宙物理や素粒子物理で統一的に解釈するのが困難にしている。観測データ間の矛盾、あるいは解釈の不定性の多くは、大気中での宇宙線の核相互作用モデルの不定性に起因している。特に衝突で超前方に発生する粒子スペクトルの情報が重要である。しかしながら、 10^{12} eVを越える領域での前方粒子スペクトルの測定は困難を極めるため実質上なされていない。

2008年から稼働が期待されるCERN(ヨーロッパ素粒子原子核研究所)のLHC(大型ハドロン衝突型加速器)のエネルギーは実験室換算で 10^{17} eV に達する。したがって、このエネルギーでの相互作用モデルの超前方での検証は、上記の諸問題の多くを解決しないし、解決の糸口を与えるはずである。

そのためCERNに於いてLHCf実験を遂行し、超前方に発生する中性粒子の観測をし、ス

ペクトルを求め、各種モデルの検証をする。

3. 研究の方法

3.1) 測定器 LHCはLHCfのような超前方の粒子測定をすることを想定して作られていない。唯一超前方の測定が可能な場所が recombination chamber と呼ばれる、ビームパイプが1本から2本に別れる地点である(図2上)。これは粒子衝突が起こる地点から140mの距離にある。LHCfはATLASサイトを採用し、衝突点に対称な2カ所に Arm1 と Arm2 と呼ぶ検出器を設置し観測を行った(図2下)。Arm1, 2とも2つのタングステン・カロリメータからなる。カロリメータは44輻射長(r.l)で最初の11層までは2r.l毎に、12~16層は4r.l毎にそれぞれ3mm厚のプラスチック・シンチレータを挿入し、エネルギー決定に使用する。さらに3, 5, 13, 16層には位置敏感型検出器を挿入し、カスケード・シャワーの中心を割り出す。Arm1の固有の緒元は以下

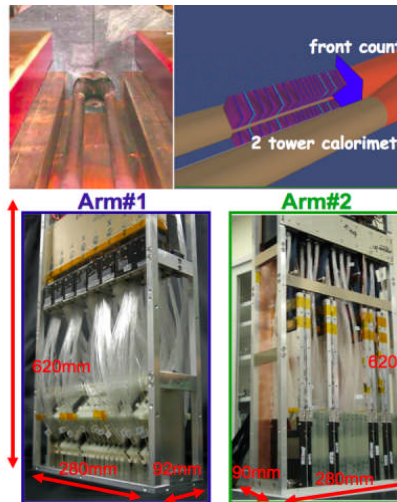


図2 Arm1 と Arm2 検出器

のようである。位置敏感型検出器として1mm角のシンチレーティング・ファイバーからなるバンドを使う。タワーのサイズは断面が2cm x 2cmと4cm x 4cm。一方Arm2は位置敏感型検出器としてSiストリップ検出器を使う。タワーのサイズは2.5cm x 2.5cmと3.2cm x 3.2cmである。2つのタワーは異なる η 領域でのスペクトルを求めるのと、パイゼロからの2つの光子により不変質量を求めてエネルギーの較正に使うためである。

タワーの前面には面積8cm x 8cmのフロント・カウンターを置く。(1mm厚のプラスチック・シンチレータ4枚で面積をカバーし2層からなる。)このトリガーレートからビーム強度の推定が可能である。エネルギー分解能は数100GeV以上の光子に対して数%

位置分解能はArm1では $\sim 200\mu\text{m}$, Arm2では $40\sim 100\mu\text{m}$ である。検出器の詳細は文献②。

3.2) 実施方法 装置はすでにこれまでの科学研究費で作成済みで、CERN SPS 加速器での較正も行っている。実験にはCERN LHC 加速器を使う。これには長期間のCERN滞在が必要である。実験シフト、CERN内での各種会議、委員会への出席などは共同研究者(主力は名古屋大学、イタリアのフィレンツェ大学)と分担した。

4. 研究成果

4.1) $\sqrt{s}=900\text{GeV}$ の run. LHCは2008年9月の稼働直後に事故のため1年間の休止をし、2009年12月に $\sqrt{s}=900\text{GeV}$ (450GeV

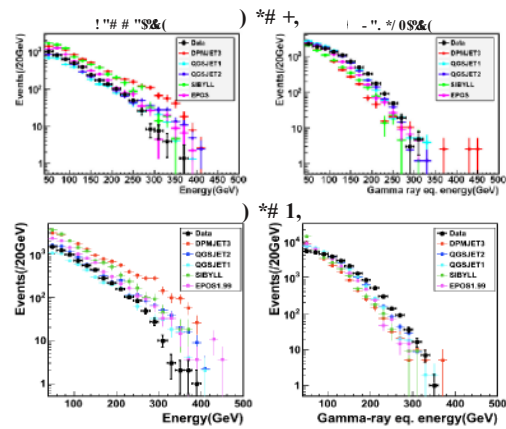


図3 900GeVでのスペクトル。上Arm1下Arm2。それぞれ左がガンマ線、右がハドロン。

+ 450 GeV)の衝突が実現した。ビームが出たのは数日間であったが、LHCfでのデータ取得に成功し、統計は十分ではないが光子スペクトルとハドロン・スペクトルを求めた。ハドロンと光子の識別には $L_{90\%}$ と言う量を用いる。これはシャワーの遷移曲線を積分形で描き、全体の90%になる深さ(r.l)である。(次節参照)

図3には900GeVでの光子とハドロンのスペクトルを示す。Arm1(上)とArm2(下)の結果はコンシステントである。光子(左)は多くのモデルより実験値がソフトである。逆にハドロン(右)は実験値がハードである。実験と比較的良好一致を示すのはQGSJET1とEPOSである。低エネルギーで良いモデルであったDPMJET3が一番一致が良くない。

4.2) $\sqrt{s}=7\text{TeV}$ での結果。2010年4月から本来のLHCのエネルギー領域での7TeVでのビームが本格的に利用可能になった。これは実験室系換算 $2.6 \cdot 10^{16}\text{eV}$ に及び、これまで全く未知の領域である。

トリガーは100GeV以上の光子に対して99%

以上の効率あるような設定である。

4.3) 粒子判別-光子の検出- 光子とハドロン(中性子)の混ざるデータより光子イベントを取り出すには前述のように $L_{90\%}$ 分布を用いる。図4には Arm1 の 2cm タワーでの $L_{90\%}$ 分布を 500~1000 GeV の再構成エネルギーに対して示した。QGSJETII による MC の結

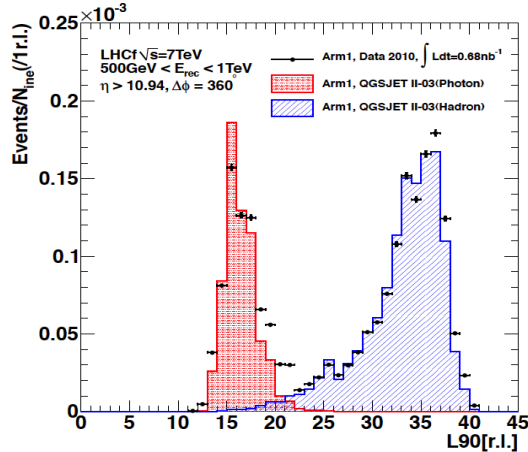


図4 $L_{90\%}$ 分布の一例. 再構成エネルギーで 500~1000GeV 領域. QGSJETII による結果.

果も示してある。MC の結果は Template と呼ぶ。モデルの相違により Template は変わるが、結果はそれらに寄らない。各エネルギーの $L_{90\%}$ の分布で光子の検出効率 ϵ が 90% になる深さを使い光子イベントを取り出す。Template を用いて光子イベントの純度 P を各エネルギー bin で $P=N_p/(N_p+N_h)$ で定義する。ここに N_p, N_h は Template 中の光子とハドロン数である。光子のエネルギースペクトルの各エネルギー bin で P/ϵ を掛けると、正しいフラックスが求まる。

モデル計算と実験との不一致はシステムマティックとして扱う。それらは、低エネルギーで 5%, 3TeV 領域で 20% である。

4.4) パイゼロ不変質量. Arm1, Arm2 とも 2 つのタワーがあるので、それぞれのタワーにパイゼロからの光子が入射したときはその不変質量を求め、エネルギー推定の誤差を議論できる。光子が 1 つのタワーに入射すると、カスケード・シャワーの粒子がタワーから漏れ出し、別のタワーに入る。この補正は MC で行う。MC データを実験データと同じように解析してパイゼロの質量を再構成すると Arm1 では 135.2 MeV, Arm2 では 135.0 MeV が得られた。統計的な不確定性は ± 0.2 MeV である。

一方実験データから不変質量を再構成すると Arm1 は 145.8 ± 0.1 MeV, Arm2 は 140.0 ± 0.1 MeV となった (図5)。これらは

それぞれ、7.8%, 3.7% の過剰である。単一光子のエネルギースケールの系統誤差は 3.5% と推定される。この 3.5% の系統誤差はシンチレータ中の発光の集光効率の不均一性などが大きな原因である。また、2 光子の位置測定による系統誤差は $\sim 1\%$ 、シャワーの漏れ込み補正に寄る系統誤差は $\sim 2\%$ あり、これらを 2 乗和で加えて、パイゼロ質量に対する系統誤差とすると 4.2% となる。従って、Arm2 の値は問題ない精度と言える。一方 Arm1 の誤

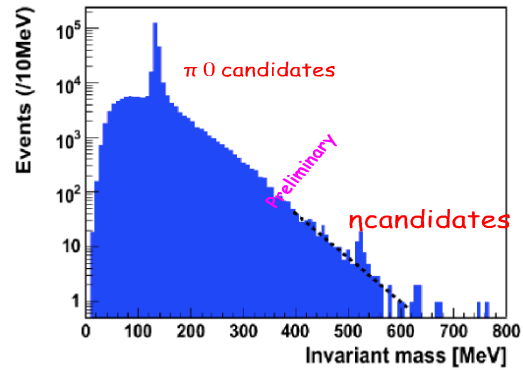


図4 2 光子の不変質量分布. パイゼロとイータメソンのピークが観測されている

差は系統誤差の 2 倍であり、その原因は不明である。

我々は現時点ではパイゼロ質量の差をエネルギー較正に組み入れず、系統誤差として扱い Arm1 は (-9.8%, +1.8%), Arm2 は (-6.6%, +2.2%) の非対称な系統誤差を与えてスペクトルを求めた。

4.5) 光子スペクトルの導出 Arm1 と Arm2 の異なる幾何学形状のデータを共通に使うため、幾何学条件が同じなる範囲のデータを重ね合わせる。今回の解析では小タワーの中心とビーム中心が一致する場合のみを扱うので、小タワーの条件は $\eta > 10.94$ 方位角は全角度。大タワーの条件は $8.99 > \eta > 8.81$, 方位角範囲は 20 度である。求めたスペクトルは大タワーについては Arm1 と Arm2 について非常に良い一致をした。小タワーについては多少のズレが見られる。これは系統誤差の範囲内である。

両者をまとめて、絶対値のスケールで MC と比較するには、衝突の輝度 L と非弾性衝突断面積 σ が必要である。衝突数 N_{col} は累積輝度を用いて、

$$N_{col} = \sigma L$$

となる。 L はフロント・カウンターのトリガーレートを ATLAS からの情報と比較して較正してあるので、LHCf として導出可能である。非弾性散乱断面積は LHCf では求めることは不可能であり、TOTEM などの実験結果が必要であるが、現在はまだ結果が出ていない。そ

ここで、ここでは $\sigma = 71.5 \text{ mb}$ を仮定して、スペクトルの縦軸の絶対値を正規化する。

$N_{\text{col}} = 4.9 \times 10^{17}$ (Arm1), 3.8×10^{17} (Arm2) である。図 5-a, b に小タワーと大タワーでの結果をそれぞれ MC モデルのスペクトルと比較して示した。

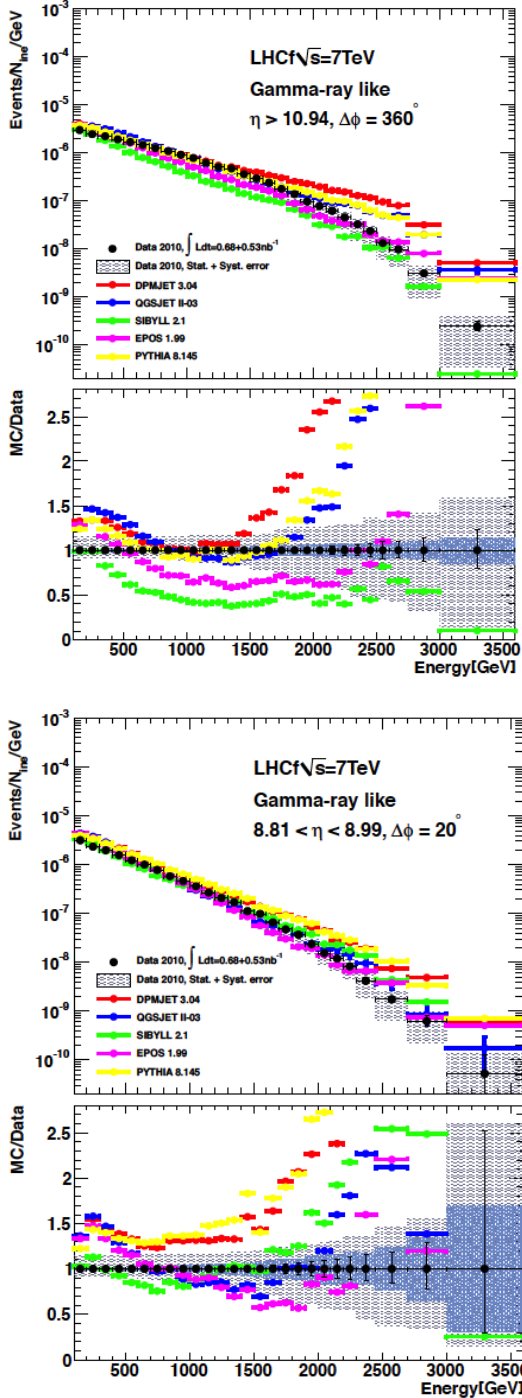


図 5. a) 上図. 小タワーでの光子スペクトル. b) 下図. 大タワーでの光子スペクトル. それぞれの下部の図は実験値との比を示した。

4.6) まとめ

●超前方 $\eta > 10.94$ で光子エネルギー $0.5 \sim 1.5 \text{ TeV}$ のスペクトルは QGSJETII, DPMJET3, PYTHIA が極めて良い一致を示す. しかし, 2 TeV 以上では実験値より有意にハードである。

●同じく $\eta > 10.94$ で SIBYLL と EPOS は全エネルギー領域でスペクトル形は実験値とかなり良い一致を示す. しかし, SIBYLL の強度は実験値の $1/2$ 程度である. EPOS は若干一致が良いが, 傾向は似ている。

● $8.81 < \eta < 8.99$ ではモデルと実験の差は上記より良い. ただし, DPMJET3 と PYTHIA は実験より有意にハードである. エネルギーの大きな領域では, 他のモデルもハードになるが頻度は少なく宇宙線への影響は小さい。

●宇宙線への影響を調べるにはモデルの再構築が必要である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 22 件)

- ① H. Menjo, K. Kasahara, K. Masuda, M. Mizuishi, M. Nakai, T. Sako, Y. Shimizu, S. Torii et al., Monte Carlo study of forward p_0 production spectra to be measured by the LHCf experiment for the purpose of benchmarking hadron interaction models. *Astroparticle Physics* vol.34 (2011) pp513-520. 査読有
- ② The LHCf Collaboration: O. Adriani, K. Kasahara, K. Masuda, M. Mizuishi, T. Sako, Y. Shimizu, S. Torii et al., The LHCf detector at the CERN Large Hadron Collider. 2008 JINST vol.3 S08006. pp. 1-36. <http://iopscience.iop.org/1748-0221/3/08/S08006> 査読有
- ③ H. Menjo, K. Kasahara, K. Masuda, M. Nakai, T. Sako, T. Suzuki, Y. Shimizu, S. Torii et al., Comparison of hadron interaction models with measurement of forward spectra by the LHCf apparatus. *IL NUOVO CIMENTO* Vol. 34 C, N. 2 Aprile (2011)pp. 135-140 査読無
- ④ A. Tricomi, K. Kasahara, K. Masuda, M. Mizuishi, M. Nakai, T. Sako, Y. Shimizu, S. Torii et al., Early Physics with the LHCf Experiment at LHC. European Physical Society Europhysics Conference on High Energy Physics, EPS-HEP 2009, July (2009)pp.16 - 22 Krakow, Poland. <http://pos.sissa.it/> 査読無

その他18件

[学会発表] (計 51 件)

- ① K. Kasahara, First year results from LHCf. Ultra High-Energy Cosmic Ray 2010, Nagoya. Dec.11(2010). Invited Talk.
- ② T. Sako, FIRST RESULTS OF LHCf; VERY FORWARD PARTICLE PRODUCTION IN 7TeV LHC COLLISIONS 13th ICATPP Conference on Astroparticle, Particle, Space Physics and Detectors for Physics Applications Oct.07(2010) Como, Italy. Invited Talk.
- ③ 鈴木拓也, LHC における 7TeVx7TeV 衝突用 LHCf 検出器の開発 -GSO bar の導入-. 日本物理学会. 2010年9月11日九州工業大学
- ④ 中井幹夫, LHCf 実験 3.5TeVx3.5TeV 衝突における中性子とガンマ線の選別. 日本物理学会, 2010年9月11日九州工業大学
- ⑤ K. Kasahara, The LHCf experiment: Observes forward energetic neutral particles at LHC to calibrate hadronic interaction models for cosmic-ray physics. JENAM 2010: Joint European and National Astronomy Meeting Sep. 10 2010. Lisbon, Portugal. Invited Talk.
- ⑥ T. Sako, LHCf Measurements of Very Forward Particles at LHC. XVI International Symposium on Very High Energy Cosmic Ray Interactions. Jun. 8 (2010) Chicago, USA. Invited Talk.
- ⑦ 笠原克昌, 空気シャワーシミュレーション. 日本物理学会 2008年9月21日, 山形大学招待講演

その他 44 件

[その他]

ホームページ等

<http://www.stelab.nagoya-u.ac.jp/LHCf/LHCf/index.html>

<http://133.9.129.98/lhcf/>

<http://hep.fi.infn.it/LHCf/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

笠原 克昌(KASAHARA KATSUAKI)

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号：00013425

(2) 連携研究者

鳥居 祥二(TORII SHOJI)

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号：90167536

小澤 俊介(OZAWA SHUNSUKE)

早稲田大学・理工学術院・講師
研究者番号：60506715

清水 雄輝(SHIMIZU YUUKI)

早稲田大学・理工学術院・講師

研究者番号：60434320

増田 公明(MASUDA KIMIAKI)

名古屋大学・太陽地球環境研究所・准教授

研究者番号：40173744

さこ 隆志(SAKO TAKASHI)

名古屋大学・太陽地球環境研究所・助教

研究者番号：90324368