

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 30 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2011～2014

課題番号：23244050

研究課題名(和文) LHC 超前方測定による宇宙線シャワーとハドロン散乱の包括的解明

研究課題名(英文) A comprehensive study of cosmic ray air showers and hadronic interactions by very forward measurement at LHC

研究代表者

伊藤 好孝 (Itow, Yoshitaka)

名古屋大学・太陽地球環境研究所・教授

研究者番号：50272521

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 29,200,000 円

研究成果の概要(和文)：超高エネルギー宇宙線の観測手段である空気シャワー現象の理解に不可欠となる、超高エネルギーハドロン相互作用での超前方粒子生成について、LHC超前方に設置した小型検出器を用いて測定するLHCf実験を遂行し、重心系0.9TeV、7TeVの陽子陽子衝突、および重心系5.02TeV陽子鉛衝突からのガンマ線、中性中間子、中性子の超前方エネルギー分布を初めて明らかにした。その結果、超高エネルギー宇宙線の空気シャワー研究に用いられるハドロン相互作用モデルは、いずれもデータを再現しない事が分かった。さらに、将来の重心系13TeV衝突測定に向けて、GS0シンチレーターを用いて検出器の高耐放射線化を行った。

研究成果の概要(英文)：We have performed the LHCf experiment for measurements for very forward particle productions, which are relevant for understanding of air shower development and its implication for high energy cosmic ray measurements, by using small dedicated detectors at LHC. The results for very forward energy spectra of gamma rays, neutral pions and neutrons from root-s = 0.9 TeV and 7 TeV pp collisions and root-s = 5.02 TeV/n p-Pb collisions were obtained and compared with various hadronic interaction models commonly used for cosmic ray air shower simulations. We found any interaction models could not reproduce the observed spectra perfectly. We have also developed a new high-radiation-hard detector utilizing GS0 scintillator for the purpose of coming LHC runs at root-s = 13 TeV collisions.

研究分野：宇宙線物理学

キーワード：宇宙線 加速器実験 国際協力 素粒子実験 実験核物理 LHCf実験 CERN LHC

1. 研究開始当初の背景

(1) **超高エネルギー宇宙線**: 宇宙線は、宇宙から飛来する高エネルギーの陽子と原子核である。宇宙線を持つ最高エネルギーは  $10^{20}$  乗電子ボルトという超高エネルギーにまで達するものがあるが、その起源は不明である。この超高エネルギー宇宙線の観測は、宇宙線が地球大気と衝突して起こす核相互作用により生成する二次粒子のシャワー(空気シャワー)を地上で観測する手法が取られる。空気シャワー粒子の粒子数から宇宙線エネルギーが、シャワー粒子の最大到達高度から宇宙線の化学組成が推定される。しかしながら、この推定は超高エネルギーで宇宙線が起こす核相互作用の過程に依存しており、従来の加速器実験をはるかに上回るエネルギーでの核相互作用モデルの不定性が、宇宙線観測の不定性となっていた。

(2) **LHCf 実験**: 2010 年より欧州原子核研究機構(CERN)で稼働を始めたラージハドロンコライダー(LHC)は、陽子陽子衝突型加速器であり、重心系 14TeV の衝突エネルギーは、 $10^{17}$  乗電子ボルトの宇宙線が大気と衝突するエネルギーに匹敵する。宇宙線が生成する二次粒子のなかで、最もエネルギーの高い粒子は元の粒子の進行方向(超前方)に集中する。空気シャワーの精密な理解には、衝突の「超前方」に生成されるこのようなエネルギーの高い二次粒子生成の測定データが不可欠であった。LHC での各実験には、超前方粒子のエネルギー測定が可能な測定器は無いため、我々は独自の小型電磁力ロリメーターを開発し、ATLAS 実験が行われる陽子陽子衝突点 IP1 の ±140m の場所に設置し、超前方生成粒子の測定を行う LHCf 実験を提案し、2010 年には重心系 7 TeV (と 0.9TeV) の陽子陽子衝突でのデータ取得を完了し、データ解析を進めている。

(3) **陽子-原子核衝突測定的重要性**: 宇宙線が衝突する標的は実際には陽子ではなく窒素原子核である。原子核標的での粒子生成は、陽子標的と異なり、原子核中での再散乱や原子核自身による遮蔽効果を伴い単純ではない。これらを実験的に検証するために陽子-原子核衝突での同様な超前方測定が必要であった。LHC では陽子-鉛原子核衝突も予定されており、このデータ取得は空気シャワーにおける原子核効果の理解の第一歩として非常に重要であった。

(4) **LHC でのハドロン物理との連携**: LHC の陽子陽子衝突では膨大な二次粒子が生成され、その正確な理解が物理解析に必要である。超高エネルギー宇宙線の空気シャワーシミュレーションに用いられる QGSJET-II, EPOS などのハドロン相互作用モデルが、LHC のデータをよく再現している事がわかってきた。これらが記述する“多重ボメロン衝突”が寄与するハドロン相互作用は、LHCf 実験が測定している超前方粒子生成と深く関連しており、LHCf のデータが LHC での

粒子生成に理解にも役立つと考えられる。宇宙線のみならず、ハドロン相互作用の包括的な理解を進めるためにユニークな連携が期待されている。衝突エネルギー依存性の理解は、ひとつの重要な鍵であり、2010 年に取得済みの重心系 7TeV 衝突に加え、LHC 本来の衝突エネルギーである重心系 14TeV 衝突でのデータ取得は必須である。

2. 研究の目的

(1) **LHCf 実験での超前方中性粒子エネルギー分布の研究と包括的なハドロン相互作用の理解**: LHCf 実験において、超前方方向に放出される中性粒子(ガンマ線、中性パイ中間子、中性子)のエネルギー分布、横運動量分布、ラピディティ分布等を測定し、超高エネルギー宇宙線の空気シャワー観測に用いられている様々な宇宙線ハドロン相互作用モデルとの比較、検証を行う。また、LHC での陽子-鉛衝突測定を行い、空気シャワーの理解に不可欠な原子核効果について研究を行う。同時に、他の LHC 実験、RHIC 実験等の測定結果や、空気シャワー観測実験との比較を行い、幅広いエネルギー範囲、ラピディティ領域において、超高エネルギーハドロン相互作用モデルの包括的な精密化を行う。

(2) **LHC14TeV 陽子陽子衝突へ向けた LHCf 検出器の準備**: LHC での重心系 14TeV 衝突(註: 実際には 13TeV が実現)でのデータ取得に向け、検出器の高耐放射線化やエネルギー測定精度の改善に向けたアップグレード作業を行う。

3. 研究の方法

(1) **LHCf データ解析とハドロン相互作用の包括的理解に向けて**:

LHCf 実験の概要と解析

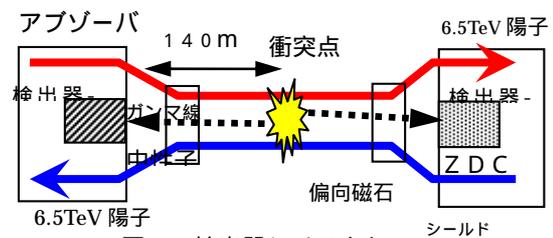


図1 検出器レイアウト

図1に LHCf 実験の概略図を示す。LHCf 実験では、2 台の検出器(Arm1, Arm2)を衝突点の両側にそれぞれ設置する。各検出器には、タングステン板とプラスチックシンチレーター板を交互に 16 層積み重ねたサンプリング型カロリメーター 2 本がある。各カロリメーターには 4 層の位置検出器(Arm1 用にはプラスチックシンチレーター、Arm2 用にはシリコンストリップ検出器)が挿入されており、粒子入射位置を測定する。各シンチレーター層はそれぞれ光電子増倍管で独立に読み出され、総光量からエネルギーが、縦方向光量分布から電磁シャワーかハドロンシャワー

かの弁別が可能である。また、入射位置から、ラピディティ、横運動量測定その他、2本のガンマ線の普遍質量分布の再構成から中性中間子の測定ができる。2010年に取得された0.9TeVおよび7TeV陽子陽子衝突からの解析を進め、電磁シャワーからガンマ線と中性中間子、ハドロンシャワーから中性子の測定を行う。

#### LHC 陽子-鉛衝突での原子核効果の検証

2012年にLHCにおいて核子あたり5.02TeVの陽子-鉛原子核衝突が行われる。この機会に、LHCf 検出器の2台のうち1台(Arm2)を陽子ビーム前方側に設置し、超前方粒子の測定を行う。このスペクトルを陽子陽子衝突と比較することで、原子核効果の測定を行う。

#### 加速器実験、空気シャワー実験を横断した研究会の開催

LHCf 実験で得られた成果を世界に発信し、LHC 他実験や空気シャワー実験グループ、ハドロン相互作用モデル研究者と共同で議論のために国際研究会を組織する。

### (2) LHC13TeV 陽子陽子衝突へ向けた準備

#### GSO シンチレーターを用いた LHCf 検出器の高耐放射線化

超前方における放射線強度は、衝突エネルギーのおよそ3乗で強くなるため、LHC14TeVデータ取得の際には2010年7TeVデータ取得時に比べほぼ一桁高い放射線環境が予測される。当初のLHCf 検出器は、放射線に弱いプラスチックシンチレーター、およびシンチレーションファイバー(Arm1の場合)を用いているため、これを放射線に強いGSOシンチレーターを用いたものに交換し、検出器の交代放射線化を図る。シンチレーター層は、物質量を同じとするために当初検出器より薄い1mm厚のGSOシンチレーター板を用い、読み出しライトガイドもアクリル製からクォーツ製に交換する。またシンチレーションファイバー層は、1mm角GSOシンチレーター棒を並べたホドスコープに交換する。これらに対して加速器ビームを用いた放射線損傷テストや光量の位置依存性、クロストークなどの諸性能を調べ、最終的に検出器アップグレード作業を行う。

#### エネルギー測定性能向上へ向けた検出器の改造

エネルギー測定性能向上のために、Arm2 検出器のシリコン検出器層挿入位置の最適化や温度センサーの増強による検出器安定性モニターの強化などを行う。

### 4. 研究成果

#### (1) 超前方ガンマ線スペクトルと、衝突エネルギー依存性:

図2にLHCf 実験で得られた7TeV陽子陽子衝突からの超前方ガンマ線のエネルギー分布と、様々なハドロン相互作用モデルによる予想分布を示す。どのモデルもデータを完全に再現するものは存在しないが、測定値は各モ

デルのばらつきの幅の中に含まれる。このことから、超高エネルギー宇宙線の空気シャワー観測結果は、ハドロン相互作用によってばらつきから推定される系統誤差の範囲内に収まっている、ということが結論される。超高エネルギー宇宙線の観測結果が、予想されるハドロン相互作用モデル不定性の範囲内で正しいことを初めて加速器実験により検証することができた重要な成果である。また、各モデルの中では、QGSIJET -03モデルとEPOS1.99モデルが比較的測定結果を再現していることがわかった(雑誌論文)。

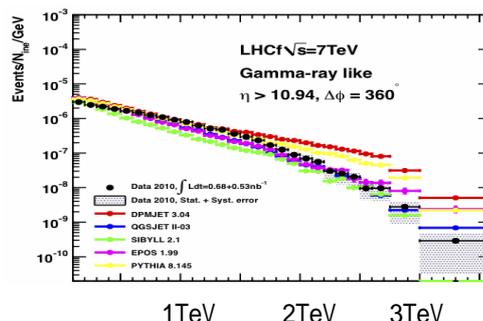


図2 LHCf 実験での7TeV陽子陽子衝突での0度ガンマ線エネルギースペクトル

異なる衝突エネルギーでのガンマ線スペクトルを比較するため、ファイブ XF(2時粒子のエネルギーを陽子ビームエネルギーで割ったもの)分布を同じ横運動量範囲で比較する。図3に重心系0.9TeVと7TeV陽子陽子衝突で得られた超前方ガンマ線のXF分布の比較を示す。絶対値も含め非常によい一致をしていることがわかる。このことから、XF分布は衝突エネルギーに寄らない、というファイブスケールリングがこの衝突エネルギーにおいてもよく成り立っていることがわかる。このことは、LHCでの結果をさらに高い10の20乗電子ボルトの領域に外挿する際に重要な知見である。

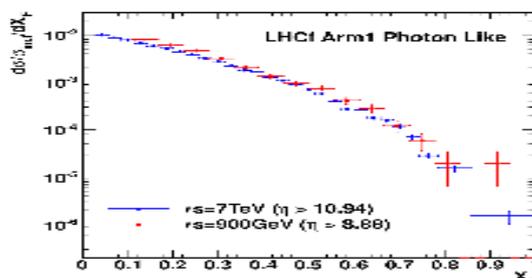


図3 0.9TeV(赤)と7TeV(青)衝突での超前方ガンマ線のXF分布。縦軸はXFで規格化した断面面積

#### (2) 7TeV 陽子陽子衝突からの中性中間子エネルギースペクトル:

7TeV陽子陽子衝突での超前方中性中間子の横運動量分布を様々なハドロン相互作用モデルの予想と比較をおこなった。その結果EPOSモデルがよく測定データを再現していることがわかった。一方、平均横運動量のラ

ピディティ依存性を、過去 SppS 加速器（重心系 0.63TeV）で行われた UA7 実験での中性中間子測定の結果と比較すると、両者は異なるラピディティ領域でスムーズにつながっていることがわかった。このことは（1）で得られたファイマインスケールリングの結果を支持しているものと考えられる（雑誌論文 11）。

### **（3）LHC 陽子-鉛衝突データ取得と原子核効果：**

LHC で 2013 年 1 月に行われた、重心系核子あたり 5.02TeV 陽子鉛衝突ランに、Arm2 検出器を再設置し、超前方中性粒子の測定に成功した。このデータ取得時には、衝突点を同じくする ATLAS 検出器との連動データ取得も行い、中央検出器の情報も活用した研究が可能となっている。陽子-鉛原子核衝突の陽子サイドの超前方中性パイ中間子の横運動量分布の解析を進め、7TeV 陽子陽子衝突との比較をおこなって超前方中間子生成に対する原子核効果の測定を行った。その結果、強い中間子生成の抑制が観測されたが、EPOS, QGSJET など宇宙線ハドロン相互作用モデルはこの振る舞いをよく再現していることがわかった。

### **（4）GSO シンチレーターを用いた耐放射線性の高い検出器への改造**

放射線耐性の弱いプラスチックシンチレーターを GSO シンチレーターに交換する作業をおこなった。まず GSO の放射線耐性をテストするために放射線医学研究所 HIMAC 加速器で重イオンビームを照射し、700kGy まで発光量の低下は認められず、逆に最大 25% の光量増加を認めた（雑誌論文）。さらに、厚み 1 ミリの GSO 薄板シンチレーターと 1 ミリ角 GSO バーを並べたホドスコープ型位置検出器の開発を行い、HIMAC および CERN でのビーム照射テストを行い、基本性能の測定を行った（雑誌論文）。これら成果を元に、LHCf 検出器の再組み立て作業を行い、2015 年の LHC13TeV 陽子陽子衝突に向けた検出器のアップグレード作業を完了した。

### **（5）国際研究会 “High Energy Scattering at Zero Degree ( HESZ2013 )” の開催**

2013 年 3 月 2 日-4 日まで名古屋大学素粒子宇宙線研究機構で行い、外国人 10 数名を含む 30 名強を集めて活発な議論が行われた。研究会では、LHC の 6 つの実験や RHIC での 2 つの実験、その他ハドロン相互作用の理論研究者、宇宙線研究者が一同に会し、分野横断的な研究会となった。

（研究会ホームページアドレス：  
[http://www.gcoe.phys.nagoya-u.ac.jp/hes\\_z2013/](http://www.gcoe.phys.nagoya-u.ac.jp/hes_z2013/)）

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 16 件)

O.Adriani, Y.Itow (9 番目), K.Masuda (15 番目), T.Sako (23 番目), 他 29 人, “Measurement of zero degree single photon energy spectra for root s = 7-TeV proton-proton collisions at LHC”, 査読有, Physics Letter B 703, 2011, 128-134. Doi:10.1016/j.physletb.2011.07.077

K.Kawade, Y.Itow (3 番目), K.Masuda (4 番目), T.Sako (6 番目) 他 5 人, “Study of radiation hardness of Gd(2)SiO(5) scintillator for heavy ion beam.”, 査読有, Journal of Instrumentation, 6, 2011, T09004. Doi:10.1088/1748-0221/6/09/T09004  
G.Mitsuka, Y.Itow (9 番目), K.Masuda (14 番目), T.Sako (23 番目), 他 9 人, “Data analysis techniques for LHCf”, AIP Conference Proceedings, 査読無, 1367, 2011, 212. Doi:10.1063/1.3628748

K.Kasahara, Y.Itow (9 番目), K.Masuda (12 番目), T.Sako (15 番目), 他 20 人, “First year results from LHCf”, AIP Conference Proceedings, 査読無, 1367, 2011, 58. Doi:10.1063/1.3628716

T.Mase, Y.Itow (9 番目), K.Masuda (13 番目), T.Sako (23 番目), 他 9 人, “The performance of the LHCf detector”, AIP Conference Proceedings, 査読無, 1367, 2011, 216. Doi:10.1063/1.3628749

K.Kawade, Y.Itow (10 番目), K.Masuda (14 番目), T.Sako (24 番目), 他 8 人, “Study of GSO scintillator for the LHCf upgrade”, AIP Conference Proceedings, 査読無, 1367, 2011, 220. Doi:10.1063/1.3628750

K.Taki, Y.Itow (8 番目), K.Masuda (13 番目), T.Sako (21 番目), 他 23 人, “Luminosity Determination in s=7TeV Proton Collision Using the LHCf Front Counter at LHC”, 査読有, Journal of Instrumentation, 7 2012, T01003. Doi:10.1086/1748-0221/7/01/T01003

T.Suzuki, K.Kasahara, K.Kawade, T.Murakami, K.Masuda, T.Sako, and S.Torii, “Performance of very thin Gd2SiO5 scintillator bar for the LHCf experiment”, 査読有 Journal of Instrumentation, 8, 2012, T01007. doi:10.1088/1748-0221/8/01/T01007

T.Mase, Y.Itow(9 番目), K.Masuda(12 番目), T.Sako(21 番目), 他 25 人, “ Calibration of LHCf calorimeters for photon measurement by CERN SPS test beam”, 査読有, Nuclear Instruments & Methods A 671, 2012, 129-136. Doi: 10.1016/j.nima.2011.12.096

O.Adriani, Y.Itow (9 番目), K.Masuda(13 番目), T.Sako(20 番目), 他 20 人, “ Measurement of zero degree inclusive photon energy spectra for  $\sqrt{s}=900\text{GeV}$  proton-proton collisions at LHC”, 査読有, Physics Letter B 715, 2012, 298-303. Doi:10.1016/j.physletb.2012.07.065

O.Adriani, Y.Itow(9 番目), K.Masuda(13 番目), T.Sako(21 番目) 他 23 人, “ Measurement of forward neutral pion transverse momentum spectra for  $s = 7\text{TeV}$  proton-proton collisions at LHC”, 査読有, Physical Review D 86, 2012, 092001. Doi:10.1103/PhysRevD.86.092001

H.Menjo, Y.Itow(8 番目), K.Masuda(13 番目), T.Sako(21 番目), 他、 “ Forward Photon Energy Spectrum at 7TeV p-p Collisions Measured by the LHCf Experiment”, 査読無, Nuclear Instruments & Methods, A 692, 2012, 224-227. Doi:10.1016/j.nima.2011.12.071

M. Bonghi, Y. Itow ( 7 番目 ), K. Masuda ( 1 0 番目 ), T. Sako ( 1 8 番目 ), 他 6 人, “ Results from the LHCf experiment”, 査読無, Nuovo Cimento, C 026, 2013, 01, 120-123. Doi:10.1393/ncc/i2013-11420-y

K.Kawade, Y.Itow( 9 番目 ), K.Masuda(1 1 番目), T.Sako ( 1 9 番目 ), 他 25 名, “ Current status of the LHCf experiment and future plan”, 査読無, EPJ Web of Conferences, 53, 2013, 07009. Doi:10.1051/epjconf/20135307009

T.Sako, Y.Itow( 8 番目 ), K.Masuda(11 番目), 他 1 3 人, “ LHCf plan for p-Pb forward particle measurement”, 査読無, EPJ Web of Conferences, 53, 2013, 07010. Doi:10.1051/epjconf/20135307010

O.Adriani, Y.Itow( 7 番目 ), K.Masuda ( 1 0 番目 ), T.Sako(1 8 番目), 他 2 4 名, “ LHCf detector performance during the 2009-2010 LHC run”, 査読有, International Journal of Modern Physics, A 28, 2013, 1330036.

Doi:10.1142/S0217751X13300366

[学会発表](計 26 件)

T.Sako, “ Current status of the LHC forward (LHCf) experiment”, 32nd International Cosmic Ray Conference, (ICRC2011), Beijing, Aug11-Aug18, 2011

さこ隆志, “ LHCf 実験アップグレード準備状況”, 日本物理学会秋季大会, 弘前大学, 2011年9月16日-19日

Y.Itow “ The LHCf experiment ~Connection between cosmic rays and forward physics” (招待) “ Future directions in High Energy QCD”, RIKEN, Oct 20-22, 2011

T.Sako, “ LHCf, connecting collider with astroparticle physics”, (招待) KMIIN, Nagoya, Oct 24-26, 2011

T.Sako “ LHCf experiment”, (招待) KEK Theory Center Cosmophysics Group Workshop on High Energy Astrophysics (HEAP11), KEK, Nov13-Nov15, 2011

Y.Itow “ Review of accelerator data relevance to air shower simulations”, (招待), International Symposium on Future Direction in Ultra High Energy Cosmic Ray Physics (UHECR2011), CERN, Feb 13-16, 2012.

T.Sako “ LHCf plan for p-Pb forward particle measurement”, (ポスター), UHECR2011, CERN, Feb 13-16, 2012

さこ隆志 “ R&D for radiation hard GSO (Gd<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>) scintillator and GSO hodoscope”, 新八ドロン研究会, 大阪大学, 2012年2月20日-21日

伊藤好孝, “ LHCにおける宇宙線相互作用検証実験 LHCf -全体報告(2012年春)および陽子-原子核衝突測定にむけて-”, 日本物理学会第67回年会, 関西学院大学, 2012年3月24日-27日

増田公明, “ LHCf 実験における  $s=900\text{GeV}$  陽子衝突によるガンマ線のエネルギースペクトル”, 日本物理学会第 67 回年会, 関西学院大学, 2012年3月24日-27日

Y.Itow, “ The LHCf experiment to verify UHECR interactions at LHC”, International Conference for High Energy Physics (ICHEP2012), Melbourne, Jul 4-11, 2012.

Y.Itow, “ The results from the LHCf experiment and future prospects”, (招待), International Symposium on Very High Energy Cosmic Ray Interactions (ISVHECR12012), Berlin, Aug10-15, 2012.

	<u>T.Sako</u> , "The LHCf experiment to verify UHECR interactions at LHC", (招待), VIII TOURS SYMPOSIUM ON NUCLEAR PHYSICS AND ASTROPHYSICS, Lenzkirch-Saig, Germany, Sep 2-7, 2012	[図書](計 0 件)
	<u>さこ隆志</u> , "LHCにおける宇宙線相互作用検証実験 LHCf -全体報告(2012年秋)-", 日本物理学会秋季大会, 京都産業大, 9月11-14日, 2012年	[産業財産権] 出願状況(計0件)
	<u>さこ隆志</u> , "加速器実験と超高エネルギー宇宙線", 最高エネルギー宇宙線実験研究会, 東京大学宇宙線研究所, 2012年10月28日	名称: 発明者: 権利者: 種類: 番号: 出願年月日: 国内外の別:
	<u>Y.Itow</u> , "LHCf + high-energy cosmic-ray", (招待), "Hadron Collider Physics Symposium 2012", Kyoto, Nov 12-16, 2012	取得状況(計0件)
	<u>Y.Itow</u> , "LHCf and p-A forward at RHIC", The Physics of p+A collisions at RHIC, Brookhaven National Laboratory, Jan 8-9, 2013	名称: 発明者: 権利者: 種類: 番号: 出願年月日: 取得年月日: 国内外の別:
	<u>T.Sako</u> , "Forward particle production measured by LHCf; testing hadronic interaction models for CR physics", IV Workshop on Air Shower Detection at High Altitude, Napoli, Italy, Jan31-Feb1, 2013	[その他] ホームページ等 <a href="http://home.web.cern.ch/about/experiments/lhcf">http://home.web.cern.ch/about/experiments/lhcf</a> <a href="http://www.stelab.nagoya-u.ac.jp/LHCf/LHCf/index.html">http://www.stelab.nagoya-u.ac.jp/LHCf/LHCf/index.html</a>
	<u>Y.Itow</u> , "LHCf forward physics results", (招待), "Results and prospects of forward physics at the LHC", CERN, Feb 11-12, 2013	
	<u>Y.Itow</u> , "Opening Remark", (基調), High Energy Scattering at Zero Degree (HESZ2013), Nagoya, March 2-4	6. 研究組織
21	<u>T.Sako</u> , "RHICf", (招待), High Energy Scattering at Zero Degree (HESZ2013), Nagoya, March 2-4	(1)研究代表者 伊藤好孝 (ITOW, Yoshitaka) 名古屋大学・太陽地球環境研究所・教授 研究者番号: 5 0 2 7 2 5 2 1
22	<u>伊藤好孝</u> , 「LHCf 実験における超前方での高エネルギー-QCD 物理」,(招待), 第68回日本物理学会年会, 広島大, 3月26-29日, 2013年	(2)研究分担者 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: 4 0 1 7 3 7 4 4
23	<u>T.Sako</u> , "Effect of forward meson spectra on Xmax determination", 33rd International Cosmic Ray Conference (ICRC2013), Rio de Janeiro, Brazil, Jul 2-9, 2013	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: 4 0 1 7 3 7 4 4
24	<u>さこ隆志</u> , "赤外線照射によるGSOシンチレータの放射線損傷からの回復", 日本物理学会秋季大会, 高知大学, 2013年9月20日-23日	(3)連携研究者 なし
25	<u>T.Sako</u> , "Recent status of LHCf to improve the cosmic-ray air shower modeling", KMI2013, Nagoya, Dec 13, 2013	(4)研究協力者 毛受弘彰 (MENJO, Hiroaki ) 名古屋大学・理学研究科・特任助教 三塚岳 (MITSUKA, Gaku ) 名古屋大学・太陽地球環境研究所・特任助教 他
26	<u>さこ隆志</u> , "LHCにおける宇宙線相互作用検証実験 LHCf -全体報告(2014年春)-", 第69回日本物理学会年会, 東海大学, 2014年3月27-30日,	