

平成 21 年 5 月 20 日現在

研究種目：特定領域研究
 研究期間：2003～2008
 課題番号：15077205
 研究課題名（和文） 最高エネルギー宇宙線の高信頼度シミュレーション手法の開発
 研究課題名（英文） Developing a high-fidelity method for simulating cosmic rays in the highest energy region
 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：想像を絶する高エネルギー宇宙線(10^{20} eV領域)の正体，発生機構を突止めるには，宇宙線が大気中に突入した時起こる現象の精密シミュレーションが不可欠である．これには単体のコンピュータでは 10 年の桁の時間がかかる．これを克服する全く新しい並列分散処理の手法を開発，また、観測に対応するシミュレーションを行うデータベースも開発した．内部の物理過程を検証するためのLHC加速器実験の手はずを整えた．

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2003 年度	17,200,000	0	17,200,000
2004 年度	13,100,000	0	13,100,000
2005 年度	2,400,000	0	2,400,000
2006 年度	1,500,000	0	1,500,000
2007 年度	2,000,000	0	2,000,000
2008 年度	1,500,000	0	1,500,000
総計	37,700,000	0	37,700,000

研究分野：数物系科学

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：宇宙線，シミュレーション，GZK エネルギー，LHC，多重発生

1. 研究開始当初の背景

人知の限りを尽くし莫大な予算で建設した加速器で得られる粒子のエネルギーの 1 億倍ものエネルギー(10^{20} eV)の粒子が宇宙の中では作られ，地球に飛来している．このような最高エネルギー領域の宇宙線が陽子で 50Mpc(約 1.5 億光年，Mpc= 10^6 パーセク：1 pc=3.26 光年)以遠の宇宙で作られているとすると，宇宙を一様に満たす 2.7K 輻射との相互作用でエネルギーを失い，宇宙線のエネルギースペクトルは 10^{20} eV 近辺で鋭いカットオフを持つと予想されている(GZK カットオフ)．陽子以外の粒子の場合もその他の効果で遠方からは飛来できないと考えられている．

このような予想に対し，我が国の AGASA グループは 10 例ほどのスーパーGZK 宇宙線事象を報告している．これが事実ならスーパーGZK 宇宙線は遠宇宙ではなく，銀河系近傍ないし極端には我が銀河系内で作られているとしなければならない．しかしながら，そのような宇宙線の到来方向に特異な天体は見つからず，その正体は謎に包まれている．

この謎を解く仮説として，1) 特殊相対性理論がスーパーGZK エネルギー領域では成り立たず，陽子と 2.7K 輻射の相互作用は起こらない．そのため宇宙線は遠宇宙より飛来しうる．2) ビッグバン初期に生成された準安定の超重粒子あるいは宇宙紐(cosmic string)など

の位相欠陥 (topological defect) が、銀河系近傍で崩壊し超高エネルギー宇宙線を発生している。3) 超高エネルギーのニュートリノが、重力によって銀河系近傍に集積している宇宙背景ニュートリノと反応して Z_0 粒子を作り、その崩壊生成粒子が観測されている。4) 近傍の銀河団などで未知の加速機構によりスーパーGZK宇宙線が作られている。などがある。

これらはいずれも既成概念を覆す大胆な仮説であり、新しい物理への突破口となりうる。しかしながら、10例の統計は精度的に不十分である。

AGASA実験は地上に設置したシンチレータでの観測をするが、その後、米国ユタ大学がFly's eye実験として知られる、大気蛍光を観測する手法により結果を出し、GZKカットオフと矛盾しないとの主張をした。このような背景のもと、より確かな観測結果を求めるため、2つのプロジェクトが提案された。1つは先行するAuger計画であり、最高エネルギー宇宙線の特定領域研究(TA計画)がやや遅れて承認された。本研究はその計画研究である。

2. 研究の目的

スーパーGZK宇宙線の存在ないしGZKカットオフがどのように起こるかなどを観測から確かにするには、そうした宇宙線の起こす空気シャワー現象を精密にシミュレーションし、そのエネルギー、粒子種、到来方向の推定をする基礎資料を整える必要がある。GZKエネルギー領域のモンテカルロ・シミュレーションを行う上で大きな2つの問題がある。

(1) 計算時間とデータ容量

(2) 超高エネルギーにおける多重発生モデル

GZKエネルギー領域の完全なモンテカルロ・シミュレーション(以下Full MC)をクロック周波数2GHzの単体のコンピュータで行うと、 10^{19} eVで2年、 10^{20} eVでは20年を要する計算になる。また、出力される粒子情報は観測面を1層に限っても、数百ギガから数テラバイトの容量が必要である。

計算時間の問題を解決するために、通常行われている手法はThinningと呼ばれるものである。これはエネルギーが低い粒子は全てを追跡せずエネルギーの比率に応じて重みを付け、その重みの逆数で確率的に追跡するものを決めるという手法である。従って、GZK領域の空気シャワーを数時間~10時間の計算時間で生成するには、 $10^5 \sim 10^6$ の重みが必要である。つまり、1つの粒子が $10^5 \sim 10^6$ 個の粒子を表すことになり、観測で必要になる空気シャワー中心から遠方での粒子の到着時間、エネルギー、角度さらにそれらの量の相関などが正しく表せるかなど問題点が多い。

並列分散処理での試みは行われていないか、成功していない。これはcpu間の通信が複雑になり、10台規模以上では効果が得られない。何らかの工夫が必要である。

もう一方の多重発生のモデルは加速器での検証が 10^{14} eV領域までしかできていない。超高エネルギーではカラーガラス凝縮などが起こると予想されており、現状で使われているモデルの妥当性は不明である。これらの状況を改善するにはLHC加速器での検証が欠かせない。ただし、当時LHC加速器を用いて宇宙線観測に資するような実験計画はなかった。

3. 研究の方法

(1) 計算時間と容量の問題。

1 Skeleton法 通常の並列処理には通信負荷の問題がつきまとう。そこで通信負荷のない分散処理が実現できれば計算時間の問題は解決する。この問題は次に述べるD-Skeleton法で解決するが、それに至るSkeleton法をまず説明する。我々が使うMCコードはCosmosといわれるものである。CosmosにはSkeleton法といわれる手法が備わっている。これは $10^{15} \sim 10^{17}$ eVの起こす空気シャワーのうち高山で高エネルギーの粒子を含むものをシミュレートするために開発された。空気シャワーとしてのシミュレーションを多くのイベントに対して行ってから、高エネルギー粒子を含むイベントを選択するのは莫大な時間がかかる。そこで、最初たとえば、 $E_{min}=10^{12}$ eVまで粒子を追跡しskeletonを作る。

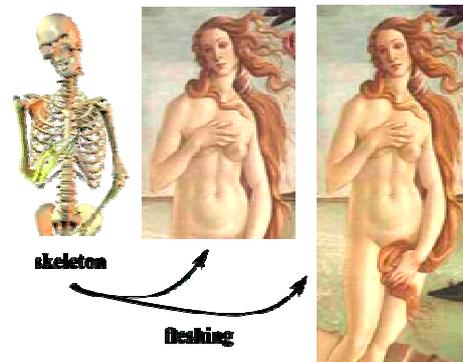


図1 Skeleton法の概念図

これには多くの時間を要しない。その結果高エネルギー粒子が観測されないものは捨てる。Skeletonが高エネルギー粒子を含むものだけについて再度シミュレーションを行うが、それにはskeletonを元に肉付け(flesh)をすればよい(図1, 2)、つまり、低エネルギー(MeV以下)まで粒子を追跡し空気シャワーを得る。

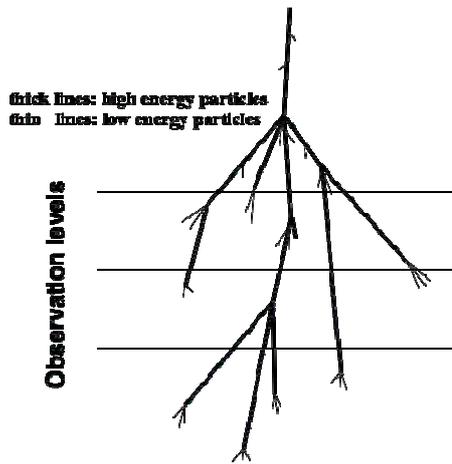


図 2 skeleton 法で構成要素となるのはすでに追跡の終わった高エネルギー粒子(太線)と flesh の際に必要な低エネルギー粒子(細線)の情報である。

2D-Skeleton 法. この Skeleton 法を応用すると, 通信が不要な最大効率の分散処理が可能となる(図 3). まず skeleton を n 個のサ

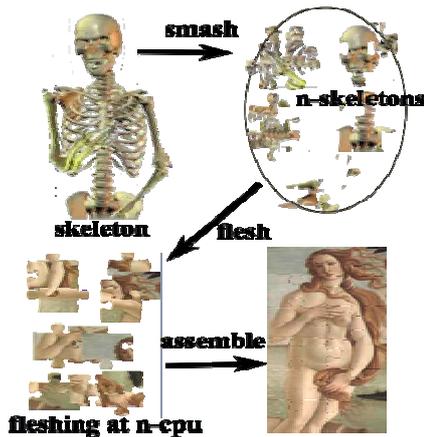


図 3 D-skeleton 法 の概念図.

ブスケルトンに分割する(smash). このn個をn台のcpuで処理をする(flesh). それぞれのcpuで計算が終わった段階で結果を統合する(assemble). n台のcpuでのfleshingを依頼するとき, 結果を統合するときを除けば, 各cpu間での通信は不要で, 最大効率の分散処理が可能である. これをD-Skeleton(Distributed Skeleton)法と名付ける. D-Skeleton法により, 本計画で導入した60台のcpuを用いて 10^{19} eVのFull MCを10日~2週間で行う事が可能になった.

しかしながら, 10^{20} eVのFull MCにはさらにこの10倍の時間がかかる. あるいは 10^{19} eVと同じ程度の時間内で終了させるには500~1000台規模のcpuが必要である. したがって, 単なる分散処理以外の方法の併用が必

要である. D-skeleton法とthin sampling法を併用する事は可能であるが, 1粒子に重みが付く効果がどのような影響を及ぼすかの評価が必要である.

ここではensemble thinningと呼ぶべき方法を用いる. サブスケルトンを作る際に元になるスケルトン中の粒子のエネルギーをソートして各サブスケルトン中のエネルギー和に偏りがないように配分する. 10^{20} eVの入射粒子に対して, $E_{min} = 2 \cdot 10^{15}$ eVでスケルトンを作り, $n=999$ のサブスケルトンに分割した場合の例を表1に示す. E_{min} 以下の層粒子数は1534303である. 表中のサブスケルト

表 1 サブスケルトンのエネルギーと粒子数

cpu#	cpuPW	Sum E	# of ptcls
1	1.0	0.9827795E+08	1535
2	1.0	0.9827795E+08	1536
3	1.0	0.9827795E+08	1536
4	1.0	0.9827795E+08	1536
5	1.0	0.9827795E+08	1535
...			
995	1.0	0.9827795E+08	1536
996	1.0	0.9827795E+08	1536
997	1.0	0.9827795E+08	1536
998	1.0	0.9827795E+08	1536
999	1.0	0.9827795E+08	1535

ンの粒子数は1535か1536, エネルギー和は7桁の精度で一致している. さらにサブスケルトン内部の粒子種別毎のエネルギー分布をみてもほとんど同じである. つまりサブスケルトンは双子の如くみな似ている. それに肉付けしたのも, ほぼ同様の空気シャワーを作る. したがって, n個のサブスケルトンからランダムにm個のサブスケルトンを選び出し, 肉付けし, その結果をassembleしてn/m倍にすれば全てに肉付けした場合とほとんど同じ結果が得られる.

実際それぞれのサブスケルトンに肉付けした結果得られる粒子数の違いは~3%程度であり, $m=50$ 程度あれば誤差は無視できる状態になる. このようなensemble thinningでは各粒子はすべてn/m個の重みを持っているのと等価である. 通常のthinningではエネルギーの低い粒子ほど(したがって, 中心から遠方の粒子ほど)大きな重みを持つ. 実験で観測するのは中心から500m~2km程度であり, 重みの問題は大きい.

D-skeleton法では1つの粒子をn/m個の粒子として扱う必要はない. なぜなら a)このような領域では粒子は十分多数ある. b) 検出器の近傍の粒子群は検出器に降ってくる粒子群と同等の性質を持っていると見なせる. したがって, m個のcpuから生成される粒子をすべて記録する必要はなく, むしろランダ

ムに選択して、記録する粒子は少なくしてよい。このようにすると、検出器に降ってくる粒子はN個のはずであるが、記録されているのはM個(M=0~N)しかないといった状態になる。しかし、検出器の近傍には検出器に降ってくる粒子と同等の性質を持つと見なせる粒子がN個以上あるので、それらを検出器に入射させれば良い。これで記録容量とFull MCの計算時間の問題を同時に解決できる。

揺らぎの問題の解決: ただし、これで計算時間の問題がすべて解決したわけではない。空気シャワーはイベント毎の揺らぎが大きいので、多数のイベントを発生させて結果を解析する必要がある。しかし、D-skeleton法のFull MCで多数のイベントを発生させるのは不可能である。

この問題は、thin sampling法は適切に使用えば、a)積分量(観測面での総粒子数、粒子の横広がり分布、到着時間分布など)に対しては信頼できる結果を与える事と、b)個々の粒子の物理量はage(発達の度合い)が同じ空気シャワーでは、Moliere長で計った中心からの距離が同じ所では同じ分布をするということを利用して解決できる。

多数のシャワーはthin sampling法を用いて発生し(LDDと呼ぶ: Longitudinal Development Data)、上記に述べた積分量を計算、データベースに記録する。これにより、検出器点での粒子数が分かるので、個々の粒子の情報は、やはりデータベースに登録したFull MCによるデータ(FDDと呼ぶ: Four Dimensional Data)を参照して取り出す。その際、ageとMoliere長によるスケールリングを用いる。このためには十分細かい刻みの大気深さでFDDを記録する必要があり、データベース容量は大きくなる。データ登録時とアクセス時に高速性が要求される。特に前者の要求にかなうDBソフトとは少なく、ここではqdbmを選択した。

注意すべきは粒子の到着時間分布はageとMoliere長でのスケールリングが成り立たないことである。中心からの距離を実長で計った場合にはスケールリングが成り立つ。このため、LDDには粒子到着時間の立ち上がり10%の時間を観測面上516点で記録し、FDDの時間を較正する。

(2)超高エネルギーにおける多重発生モデルの問題

現在宇宙線空気シャワー現象をシミュレートするのに使われているモデルは4ないし5である。いずれもQCDの理論的予測などに基づくものであるが、空気シャワー発達を左右する(前方に発生する)エネルギーの高い粒子についてはQCDによる理論計算が不可能なため、電磁相互作用のように信頼できるレ

ベルにはない。加速器データとの比較は $\sim 4 \cdot 10^{14}$ eVまでしかなされていない。すでにこの領域でもモデル間の差はあるが、さらに高エネルギーでどうなるかは全く不明である。

我々は、建設中のLHC (Large Hadron Collider; ヨーロッパ素粒子原子核研究所 CERN)のビームを使えば実験室換算で 10^{17} eV相当の衝突についての情報が得られる事に注目した。LHCは宇宙線の為のデータ取得を目指して設計されてないので、どのような観測ができるか不明であった。調査の結果ビーム衝突点から140mの地点でビームパイプがY字形に2つに分れる場所があることが判明し、そこに測定器を置けば通常の加速器でははかれない超前方での粒子発生スペクトルを観測できる事を突止めた(図4)。Y字部分

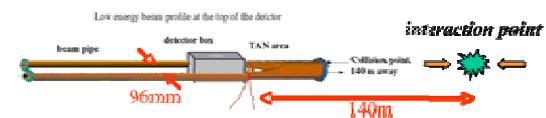


図4 測定器を設置するY字部分。衝突点からの超前方粒子が観測できる。

の幅はわずか10cmであり、またビームパイプの形状から計れる粒子の角度は非常に小さい。このような環境で有為なデータを取る為の検出器の設計を精力的に行った。計れる粒子はガンマ線と中性の2つである。その他の荷電粒子は磁場により曲げられ観測点に到達しない。その結果シンチレーティング・ファイバーを位置敏感なセンサーとした断面2cmx2cmと4cmx4cmのタンゲステンカロリメータ2つを用いれば各種のモデルを弁別できる測定が可能なが判明した。

これを元にCERN LHC委員会にプロポーザルを提出し、2年を越える厳格な審査の結果実験が認められた。

LHCの完成はこれまでも年々遅れているので、本領域研究の間に完成するかどうかは不明であった。また実験を遂行するのは本計画研究のみより、さらに大きなグループとして行うのが望ましく、日本側グループの拡大、イタリア、スイスなどを含む国際協同研究として発展させLHCf実験と呼称する事となった。

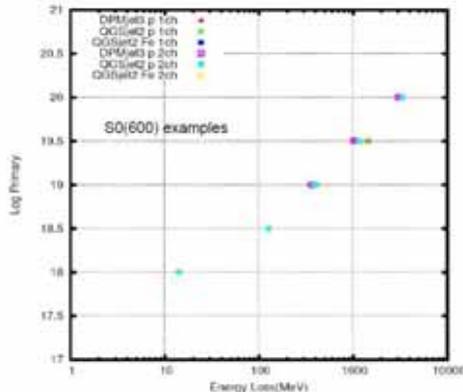
これまで、シンチレーティング・ファイバーを主体とするカロリメータを構築、各種のテスト実験を行い、LHCに設置することに成功している。

4. 研究成果

(1)シミュレーション。これまで3年余をかけてFull MCデータ(FDD)150イベント、LDD数十万イベントを生成し、データベース化した。各種分析をし、地表アレーによるエネ

ルギー決定法の開発を行い、中心から 600m ないし 800m での検出器レスポンスを用いる事が有効な事を示した。1 例として 600m でのレスポンスと 1 次粒子のエネルギーの関係を図 5 に示す。

図 5 600m 地点での検出器の観測エネルギー



ギーと入射粒子のエネルギーの相関。天頂角 0 度の場合。qgsjet2 と dpmjet3 の場合に付いて示してある。

レスポンスは、天頂角が 30 度以上のシャワーについて、検出器位置として換算距離を用いても方位角依存性が大きく、データ解析には特に注意が必要な事が判明した。これは従来看過されてきた点である。

到着時間分布から到来方向を決定したときの角度誤差の評価を得、鉛直入射に近いときは 1 度以内の誤差で推定可能なことが判明した。

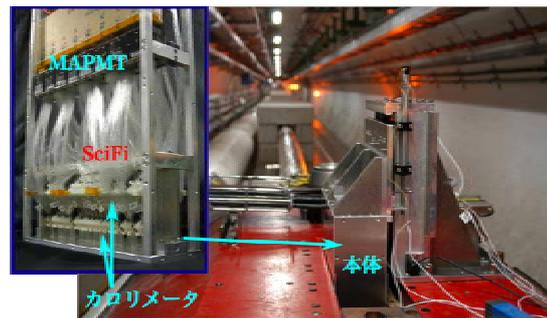
上記で得られた地表検出器のレスポンスを用いて、TA 観測の結果を解析し、予備的なエネルギースペクトルが得られた。これは大気蛍光観測とは異なる様相を見せており、非常に興味深い。今後さらに詳細な詰めが必要であるが、極高エネルギー領域での核相互作用に異変があるか、大気蛍光法の見直しに繋がるか、など今後の展開が待たれる。

シミュレーション計算には現在韓国の Yonsei, ChungNum, Pusan の各大学の協同研究者も加わり、分担してイベントの生成、解析に当たっている。また、高エネルギー加速器研究機構(KEK)の大型シミュレーション計算プロジェクトに採用されたので、スーパーコンピュータ Blue Genes での計算も行う予定である。この場合 2000cpu 相当の計算が行えるので、Full MC を大幅に増強できる。

(2)モデルの検証実験

CERN LHC での実験を通してモデルの検証を行い、MC の信頼度を高めることは LHC の完成が遅れ、実現していない。我々は測定器を十分調整し、設置する事を済ませた(図 6)。

図 6 左側は測定器の内部。下部に 2cmx2cm



と 4cmx4cm 断面のカロリメータ、SciFi 用のファイバー、読み出し用マルチアノード PMD が見える。それを設置した状態が右図。

LHC での実験は当初より拡大し、LHCf 実験として進行中である。イタリアグループとは協同で上記とは異なる場所に別の測定器を設置した。LHC は 2009 年度中には稼働を開始し、我々に必要なビームが 2009, 2010 年に得られると予想されている。LHCf 実験の結果を元に MC で使われるモデルの検証を行う予定である。

LHC の実験やシミュレーション計算の話が進行するにつれ、高エネルギー原子核理論の研究者と交流が深まり、GZK エネルギー領域ではカラーガラス凝縮をモデルに導入する必要性があるとの結論に達した。我が国発の新しいモデルを作る話が進行中である。

LHCf に対する期待は宇宙線関係の研究者間で大きい。例えば、H.J.Drecher は Phys. Rev. D 77, 056003 (2008) で以下のように述べている。

...the Feynman-x distribution in the beam fragmentation region at LHCf will be key to understanding muon production in air showers quantitatively.

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 8 件)

O.Adriani, K.Kasahara, K.Masuda et al, The LHCf detector at the CERN Large Hadron Collider. Online Journal. JINST 3 S08006. 39 pages.

(<http://www.iop.org/EJ/abstract/1748-0221/3/08/S08006>) 査読有

L.Bonechi, K.Kasahara, K.Masuda, et al. Production and test of the LHCf micro strip silicon system. Nuclear Instrument and Method A. Vol. 596, Issue 1, 21 October 2008, Pages 85-87 査読有

K.Kasahara and F.Cohen. A New Parallel Processing Scheme Enabling Full Monte

Carlo EAS Simulation in the GZK Energy Region. Proc.30th ICRC. Mexico Merida. Vol.4 (2008) pp. 581-584. 査読無

K.Kasahara and F.Cohen. A Fast and Accurate Monte Carlo EAS Simulation Scheme in the GZK Energy Region and Some Results for the TA experiment. Proc.30th ICRC. Mexico Merida. Vol.4 (2008) pp. 585-588. 査読無

D'Alessandro, O. Adriani, K.Kasahara and K.Masuda et al., LHCf: An LHC DETECTOR FOR ASTROPARTICLE PHYSICS. ACTA PHYSICA POLONICA B, Vol. 38, No.3 pp.829-838 (2007) 査読有

T.Sako, K.Kasahara K.Masuda, et al., Performance of the Prototype Detector for the LHCf Experiment, Nuclear Instrument and Method A. Vol. 578, Issue 1, 21 July 2007, Pages 146-159 査読有

A.Oscar K.Kasahara, K.Masuda et al., The LHCf experiment at LHC, Czechoslovak Journal of Physics. Vol.56, No.1 (2006) A107-116. 査読有

A.Oscar K.Kasahara, K.Masuda et al. Technical Design Report of the LHCf experiment. LHCf-TDR-001 CERN-LHCC-2006-004 (2006) 71 pages. (<http://cdsweb.cern.ch/record/926196/files/>) 査読無

[学会発表](計11件)

木戸英治, 笠原克昌, 井上直也他 TA Collaboration. TA 実験 154: Air shower full MC と地表粒子検出器による宇宙線のエネルギーの見積り. 日本物理学会年会 2009年3月28日 立教大学

武多昭道 笠原克昌 井上直也 他 TA Collaboration. TA 実験 155: 地表検出器による極高エネルギー宇宙線スペクトル. Ibid.

中井幹夫 笠原克昌 増田公明他 LHCf Collaboration. LHCf における粒子識別性能について. Ibid.

笠原克昌. “空気シャワーシミュレーション” 超高エネルギー宇宙線とハドロン構造 2008、KEK、2008年4月25日. 招待講演

K.Kasahara, An LHC Detector for Cosmic Ray Science, Measuring photons and neutrons in the very forward region at the LHC. Invited talk at COMMITTEE ON SPACE RESEARCH (COSPAR), Montreal, Canada, July 19, 2008

K.Kasahara. “LHCf: Measuring Zero Degree Photons and Neutrons at LHC for Cosmic Ray Physics”, Invited talk at International Workshop for Cosmic Ray and High Energy Universe, March 6, Aoyama, Tokyo (2007)

笠原克昌. “超高エネルギー宇宙線シミュレーションの限界と LHCf 実験による改善” シンポジウム「超高エネルギー宇宙線観測の新たな展開」日本物理学会 62 回年次大会, 札幌 (2007). 招待講演.

K.Kasahara. “Measurement of Photons and Neutrons in the Very Forward Region at the LHC”. Invited talk at “14-th International Symposium on Very High Energy Cosmic Ray Interactions”, Weihai, China, August 15-22 2006.

K.Kasahara. LHCf: Measurement of Photons and Neutrons in the Very Forward Region at the LHC. Invited talk at “QCD at Cosmic Energies 2”, September 27, 2005, Skopelos, Greece.

K.Kasahara. The Current Status and Prospect of the TA Experiment, XIth International Conference on Elastic and Diffractive Scattering. Chateau de Blois, France, May 15 - 20, 2005

笠原克昌. “LHC f - 最高エネルギー宇宙線の相互作用を決める”. 日本物理学会 2005 年秋季大会 (大阪市立大学杉本キャンパス) 招待講演

[その他]

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

<http://cosmos.n.kanagawa-u.ac.jp/>

<http://cosmos.n.kanagawa-u.ac.jp/NewCode>

CERN Courier, “LHCf: a tiny new experiment joins the LHC”, Nov.2006

CERN Bulletin, “A new LHC experiment is born”, No.42, October 2006

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

(3) 連携研究者

井戸川 知之 (IDOGAWA TOMOYUKI)

芝浦工業大学システム理工学部・准教授

研究者番号: 40257225

水谷 興平 (MIZUTANI KOUHEI)

埼玉大学・名誉教授

研究者番号: 60008844

井上 直也 (INOUE NAOYA)

埼玉大学理学部・教授

研究者番号: 40168456

増田 公明 (MASUDA KIMIYAKI)

名古屋大学・太陽地球環境研究所・准教授

研究者番号: 40173744