

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 9 日現在

機関番号：32702

研究種目：基盤研究(A) (海外学術調査)

研究期間：2013～2016

課題番号：25257203

研究課題名(和文)宇宙線観測装置CALETの地上検証モデルを用いたCERN加速器での校正実験

研究課題名(英文) Beam tests of the CALET cosmic-ray detector with a ground verification model at CERN-SPS

研究代表者

田村 忠久 (Tamura, Tadahisa)

神奈川大学・工学部・教授

研究者番号：90271361

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 36,800,000円

研究成果の概要(和文)：宇宙線観測装置CALETは平成27年8月に打上げられ、宇宙ステーションで電子、ガンマ線、原子核の観測を行っている。高エネルギーの宇宙線を検出する装置の性能は、検出器内で起こる粒子の相互作用をシミュレーションすることによって評価されている。したがって、シミュレーションで用いられる相互作用モデルを加速器ビームによって実際に検証し、シミュレーションの信頼性を確保することは非常に重要である。そこで、CALET実機の地上検証モデルを製作し、スイスのCERN(欧州合同原子核研究機構)のSPS加速器を利用して重イオン(重陽子～アルゴン)を照射して、シミュレーションで実験データを再現できることを確認した。

研究成果の概要(英文)：A cosmic-ray detector, CALET, was launched in August 2015. It is successfully observing cosmic-ray electrons, gamma-rays, and nuclei on the International Space Station. Performances of the detector for the high energy cosmic rays are estimated by simulations for interactions of particles in the detector. Thus, it is very important to verify the simulations by beam tests. Therefore, we carried out heavy ion beam tests at CERN-SPS with a ground verification model which we assembled with Structure Thermal Models, Bread Board Models of readout electronics, and self-made electronics circuits equivalent to Flight Models. We could confirm that the simulations were consistent with the beam data.

研究分野：宇宙線物理学

キーワード：宇宙線 宇宙物理 宇宙科学 国際宇宙ステーション 加速器

1. 研究開始当初の背景

(1) 宇宙線電子を 1 GeV から 20 TeV まで、ガンマ線を 10 GeV から 10 TeV まで、原子核を数 10 GeV から 1000 TeV まで観測する CALET プロジェクトは、宇宙航空研究開発機構 (JAXA) によって国際宇宙ステーション (ISS) への搭載が承認され、2010 年 3 月より開発に着手し、2014 年夏期の打上げを目指していた。本研究組織のメンバーは、CALET への礎となった気球による宇宙線電子観測の経験をもとに、研究者の立場から JAXA 有人宇宙環境利用ミッション本部における CALET 開発に取り組んだ。CALET は、最終的に 2015 年 8 月 19 日に打上げられた。

(2) CALET の主検出器は 10 年以上におよぶ気球観測で開発したイメージングカロリメータを発展させたものである。宇宙線が検出器に入射するとカスケード的に相互作用が起こり、粒子が増殖するシャワー現象が発生するので、これを画像として検出する。図 1 の検出器は 3 つの部分からなる。最上部はプラスチックシンチレータによる入射電荷測定器 (CHD)、その下は断面が 1 mm 角のシンチファイバー (SciFi) を 1 層当り 448 本並べたベルトとタングステン板を積層したイメージングカロリメータ (IMC)、下部は 19×20×326 mm³ の PbWO₄ (PWO) 結晶シンチレータ 192 本 (16 本×12 層) を組上げた全吸収型カロリメータ (TASC) という構成になっている。図 2 左は 1 TeV の電子が垂直入射した場合のシャワーの例、図 2 右はそのシャワー中の荷電粒子によってシンチレータ (SciFi, PWO) が発光するのを X、Y 方向に投影した画像として捉える例である (図 2 は X 方向のみ)。

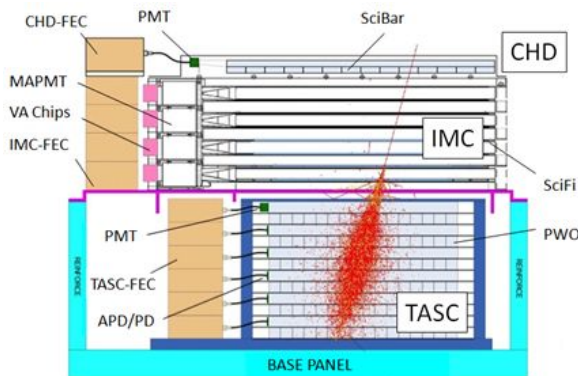


図 1: CALET の検出器概念図

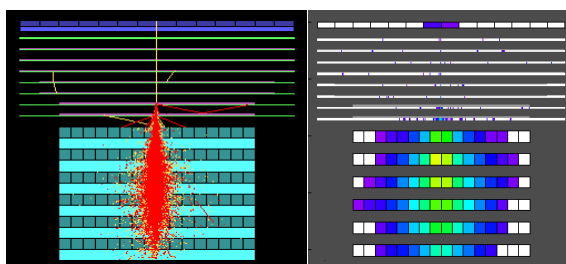


図 2: 電子シャワー (シミュレーション)

2. 研究の目的

(1) 電子の加速源は超新星残骸 (SNR) と考えられているが、3000 光年より遠い SNR や 10 万年より古い SNR からの電子は、銀河内を伝播する際のエネルギー損失で、地球に到達するまでに 1 TeV 以下になる。その結果、近傍に数個しか存在しない比較的若い SNR (Vela 等) の影響が、図 3 のように TeV 領域に特徴的なスペクトルとして現れると期待される。図 3 には、我々の気球実験 BETS と南極周回気球 PPB-BETS、米国の Fermi 衛星と南極周回気球 ATIC 等の観測結果を重ねて、CALET による 5 年間の観測の予測を示した。スペクトル決定ではエネルギー分解能が重要な鍵の一つとなるが、電子観測を主目的とする CALET は、全吸収型の厚い TASC によって 10 GeV 以上で 3% という他に類を見ない高分解能を発揮する。

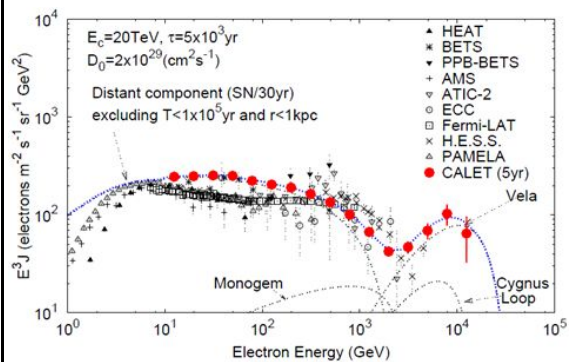


図 3: 電子スペクトル

(2) 宇宙線のエネルギースペクトルを高精度で決定するには、エネルギー分解能以外にも、入射粒子の選別能力、方向決定精度などに関する性能評価と較正の実施が大前提となる。そのため、加速器を用いたビーム実験が必須である。これまでの CERN-SPS 加速器による CALET プロトタイプ検出器の性能評価では、電子 10 ~ 290 GeV、陽子 30 ~ 350 GeV のビームを用いて、示す電子と陽子を選別する解析などを行ってきたが、このような高エネルギーのビームを利用できる加速器施設はスイスの CERN をおいて他にはない。本研究では、CALET と等価な形状および電気特性をもった地上検証モデルを製作し、それを用いて加速器実験による性能評価と較正を行うこと、さらにその結果をシミュレーションで再現することが目標である。TeV 領域に及ぶ観測データの解析では、エネルギー決定やバックグラウンド除去率についてシミュレーションに依存するため、ビーム実験でシミュレーションを把握しておくことが重要である。

3. 研究の方法

(1) 平成 25 年度は、CALET の地上検証モデルを製作するために、これまでの加速器実験で用いてきた気球実験等で開発した回路とフライト品を模擬した自作回路について、フ

ライト品と同じ設計の相当品に置き換えることを目指した。また、翌年度にスイス CERN の SPS 加速器を利用して、重粒子ビームによる照射実験を行うためのマシンタイムの申請も行った。CALET は平成 24 年 2 月に CERN の承認実験 (Recognized Experiment) として認められているため、十分なマシンタイムを確保できた。

(2) 平成 26 年度は、地上検証モデルの組み上げと、実験機材の準備を行い、フライト実験について想定される様々な条件で、平成 27 年 2 月から 3 月にかけて Ar ビームを用いたビーム照射実験を行った。

(3) 平成 27 年度には、CALET の前段検出器である電荷検出器の読み出し回路のフライト同等品を用いて、CERN-SPS 加速器による Pb ビーム照射実験を行って、読み出し回路の性能評価を行った。

(4) 平成 28 年度は、取得したビーム実験データの詳細解析と、シミュレーションによる実験データの再現を確認する作業を行った。

4. 研究成果

(1) CERN の SPS 加速器ビーム実験の供試体となる CALET の地上検証モデルとして、検出部のチャンネル数増設と、フライト品相当のフロントエンド回路への置き換えを実施した。検出器前段に位置する CHD と検出器中段の IMC のシンチファイバー検出部については STM (構造熱モデル) を使用し、CHD のプラスチックシンチレータをそれまでの 6 本にさらに 6 本を追加して、X 層 6 本、Y 層 6 本とした。検出器後段の TASC についても STM を使用し、検出部の PWO シンチレータをそれまでの 36 本に 12 本を追加してダミーとして用いていた真鍮と置き換えた。追加分の配置はシミュレーションによって決めた。図 4 は 30 GeV/n の C ビームを照射した場合のシミュレーションである。追加する PWO の配置候補を検討した結果、エネルギー測定や相互作用モデルの検証では配置の差が出ないので、後方散乱の影響を効果的に調べられるように TASC の X1 層目と Y1 層目の片側に 6 本ずつを追加することにした (図 5)。また、光センサー (PMT, APD) 用の高圧電源は EM (エンジニアリングモデル) を使用した。

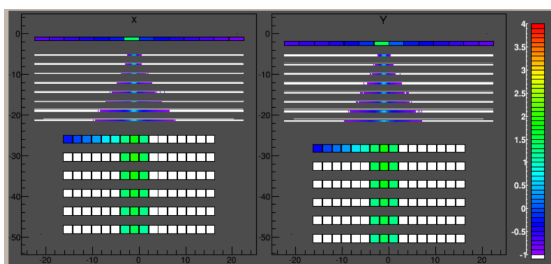


図 4 : C (30 GeV/n) のシミュレーション

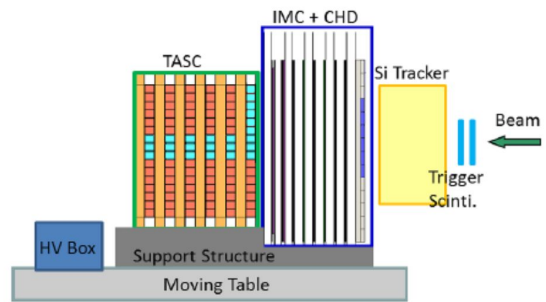


図 5 : 地上検証モデルの構成

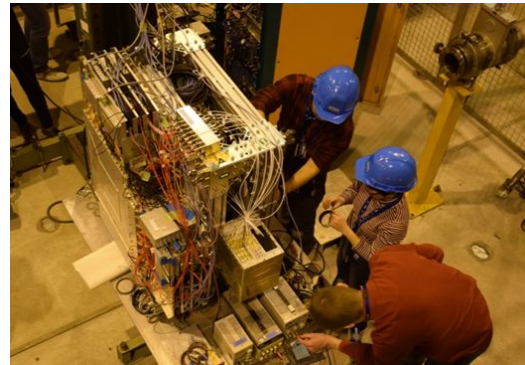


図 6 : 地上検証モデルの H8 ビームライン設置

(2) H27 年 2~3 月期の 1 ヶ月間でアルゴンビーム実験を H8 ビームライン (図 6) において実施した。現地での交渉の末、申請していた最高エネルギーの 150 GeV/n ビームの利用が可能となり、その他に最低エネルギーの 13 GeV/n、および 19 GeV/n も照射することができた。日米伊による共同シフトによって、アルゴンビームの直接照射の他に、アルゴンビームをターゲットに照射して得られる破砕核 (重陽子~アルゴン) の照射も行い、入射位置を変更などによって合計 750 万イベントを取得した。CHD の読み出しフロントエンド回路については、CALET のフライト実験同等品の納品が遅れ、ビーム実験の実施と並行して調整試験を行ったが、実験期間中に装置に組み込むことができず、H27 年 11 月の鉛ビーム実験で試験を行った。

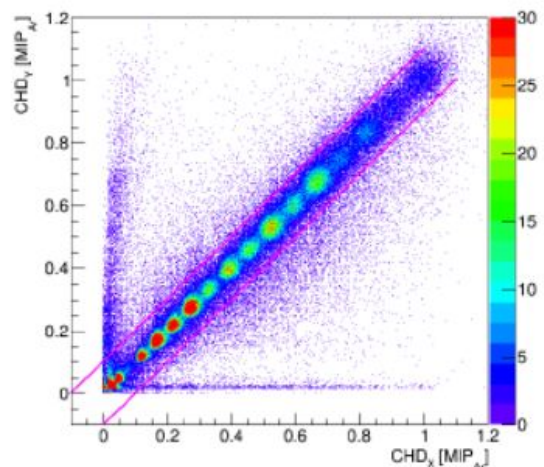


図 7 : CHD の X 層と Y 層の出力波高値

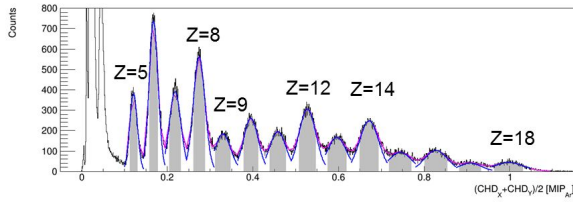


図 8 : CHD による電荷測定

(3) 破砕核に対する CHD による電荷検出を図 7 に示す。CHD の X と Y の 2 層で測定した電荷が横軸と縦軸に対応し、濃くなっている塊のそれぞれが各原子核に対応する。図 7 のマゼンタ色の 2 本の線で挟まれた領域を切り出し、X と Y の測定値の平均値を電荷とするとその分布は図 8 のようになる。各ピークをガウス分布 (Z=2,3 はガウス分布を畳み込んだランダム分布) でフィットしてピーク値と分散を求めたところ、期待通りの電荷分解能が得られた。アルゴン (^{40}Ar) の TASC 全体でのエネルギー損失は図 9 のようになる。赤線は実験結果、青線は実験データさらに UV レーザーによる校正データで補正した結果、黒線がシミュレーション結果である。図 9 はそれぞれの原子核に対する TASC によるエネルギー測定直線性を示している。入射エネルギー (運動量) に対して、TASC によるシャワーエネルギーの測定が直線にのり、実験とシミュレーションが一致する結果が得られた。シミュレーションのハドロン相互作用モデル (DPMJET-、QGSJET-2、EPOS) については、実験との比較において有意な差はみられなかった。また、図 10 は原子核に対するエネルギー分解能である。地上検証モデルでは PW0 の本数が限定されているが、ハドロン成分に対する 20~30% のエネルギー分解能が得られた。これも、実験結果とシミュレーション結果が統計精度の誤差内で良く一致していることを確認することができた。

ビーム実験による性能評価は、ビームエネルギーに上限があること、またフライト模擬品であることから、フライト品のキャリブレーションという性格ではなく、部分モデルについて実験データとシミュレーションを比較することを主目的とした。本研究によってその所期の目的は達成され、シミュレーション

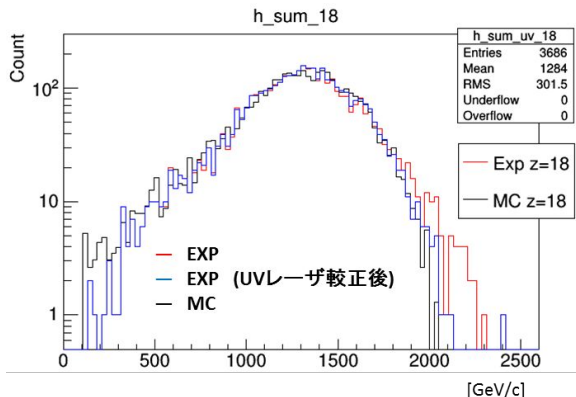


図 8 : ^{40}Ar の TASC でのエネルギー損失分布

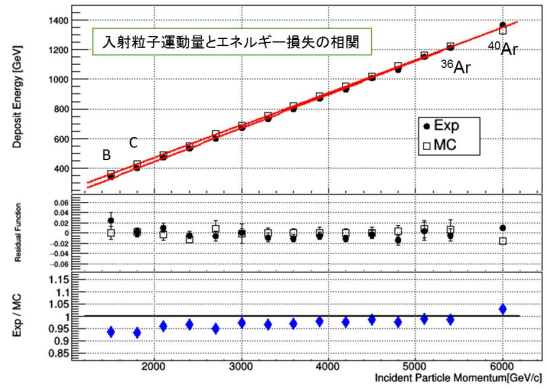


図 9 : シャワーエネルギー測定直線性

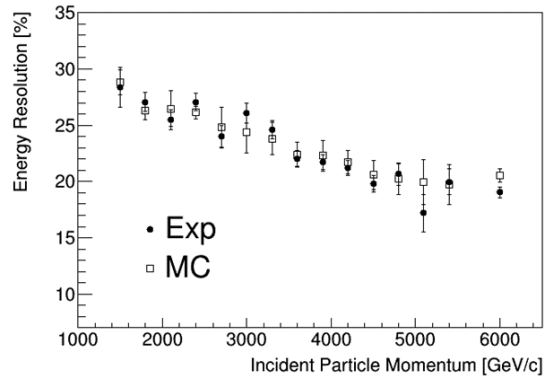


図 10 : 各原子核に対するエネルギー分解能

による CALET 実機の性能評価の信頼性を確かなものにする事ができた。

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 5 件)

土川 恵理子, “CERN-SPS 重原子核ビーム実験のデータ解析による CALET 観測性能検証”, 早稲田大学先進理工学研究科物理学及応用物理学専攻修士論文, 2016 年 2 月

T. Tamura for the CALET collaboration, “Heavy ion beam test at CERN-SPS with the CALET”, Proceedings of the 34th ICRC, The Hague, The Netherlands, 査読無し, 2015, pp.1-8

https://pos.sissa.it/archive/conferences/236/589/ICRC2015_589.pdf

Y. Akaike for the CALET collaboration, “Simulations for CALET Energy Calibration Confirmed Using CERN-SPS Beam Tests”, Proceedings of the 34th ICRC, The Hague, The Netherlands, 査読無し, 2015, pp.1-8

https://pos.sissa.it/archive/conferences/236/613/ICRC2015_613.pdf

T. Tamura for the CALET collaboration, “Particle Beam Tests of the Calorimetric Electron Telescope”, Proceedings of the 33rd ICRC, Rio de

Janeiro, 査読無し, 2013, 4pp.
<http://www.cbpf.br/~icrc2013/papers/icrc2013-0986.pdf>
Y. Ueyama, S. Torii, K. Kasahara, S. Ozawa, T. Tamura, Y. Katayose, Y. Shimizu, et al., "The CALET Structure and Thermal Model used for beam test at CERN", Proceedings of the 33rd ICRC, Rio de Janeiro, 査読無し, 2013, 4pp.
<http://www.cbpf.br/~icrc2013/papers/icrc2013-0647.pdf>

[学会発表](計 14 件)

田村忠久, 鳥居祥二, 笠原克昌, 小澤俊介, 植山良貴, 清水雄輝, 他 CALET チーム, "CERN-SPS 加速器実験による CALET の電子・陽子観測性能", 日本物理学会 2016 年秋季大会, 2016 年 9 月 21 日, 宮崎大学(木花キャンパス)
多田真希子, 小澤俊介, 笠原克昌, 清水雄輝, 田村忠久, 鳥居祥二, 他 CALET チーム "CERN-SPS による CALET の重原子核エネルギー測定性能", 日本物理学会 2016 年秋季大会, 2016 年 9 月 21 日, 宮崎大学(木花キャンパス)
土川恵理子, 鳥居祥二, 笠原克昌, 小澤俊介, 田村忠久, 清水雄輝, 他 CALET チーム, "CERN-SPS 重イオンビーム実験による CALET のエネルギー測定性能", 日本物理学会 2015 年秋季大会, 2015 年 9 月 26 日, 大阪市立大学(杉本キャンパス)
岡田侑子, 鳥居祥二, 笠原克昌, 小澤俊介, 田村忠久, 他 CALET チーム, "CERN-SPS 重イオンビーム試験による CALET-CHD の電荷分解能", 日本物理学会 2015 年秋季大会, 2015 年 9 月 26 日, 大阪市立大学(杉本キャンパス)
田中真文, 鳥居祥二, 笠原克昌, 小澤俊介, 田村忠久, 他 CALET チーム, "CERN-SPS における重イオンビーム実験に用いた CALET 熱構造モデルの較正試験", 日本物理学会 2015 年秋季大会, 2015 年 9 月 26 日, 大阪市立大学(杉本キャンパス)
赤池陽水, 寺澤敏夫, 鳥居祥二, 笠原克昌, 小澤俊介, 田村忠久, 清水雄輝, 他 CALET チーム, "CALET 熱構造モデルによる CERN-SPS 重粒子イオンビーム実験に向けたシミュレーション計算", 日本物理学会 第 70 回年次大会, 2015 年 3 月 21 日, 早稲田大学(早稲田キャンパス)
田村忠久, 鳥居祥二, 笠原克昌, 小澤俊介, 片寄祐作, 清水雄輝, 他 CALET チーム, "CALET 熱構造モデルによる CERN-SPS での重粒子イオンビーム実験", 日本物理学会 第 70 回年次大会, 2015 年 3 月 21 日, 早稲田大学(早稲田キャンパス)
Y. Akaike, et al., "Performance of

particle identification with the CALET calorimeter expected by CERN-SPS beam tests", The 40th COSPAR Scientific Assembly, Aug.2-10, 2014, Moscow, Russia

T. Tamura et al., "The Calorimetric Electron Telescope (CALET) for High Energy Astroparticle Physics on the International Space Station", The 40th COSPAR Scientific Assembly, Aug.5, 2014, Moscow, Russia

T. Tamura et al., "Beam tests of CALET with BBM electronics and STM at CERN-SPS", The 40th COSPAR Scientific Assembly, Aug.2-10, 2014, Moscow, Russia

赤池陽水, 鳥居祥二, 笠原克昌, 小澤俊介, 田村忠久, 片寄祐作, 清水雄輝, 他 CALET チーム, "CERN-SPS 加速器実験による CALET の性能検証", 日本物理学会 第 69 回年次大会, 2014 年 3 月 28 日, 東海大学(湘南キャンパス)

赤池陽水, 鳥居祥二, 笠原克昌, 小澤俊介, 田村忠久, 片寄祐作, 清水雄輝, 他 CALET チーム, "CERN-SPS における熱構造モデルを用いた CALET 性能検証実験", 第 14 回宇宙科学シンポジウム, 2014 年 1 月 9 日, JAXA 宇宙科学研究所(相模原)

田村忠久, 鳥居祥二, 笠原克昌, 小澤俊介, 片寄祐作, 清水雄輝, 他 CALET チーム, "CERN-SPS 加速器実験における CALET 観測性能実証", 日本物理学会 2013 年秋季大会, 2013 年 9 月 22 日, 高知大学(朝倉キャンパス)

田村忠久, "CALET による高エネルギー電子・ガンマ線観測", 第 43 回天文・天体物理若手夏の学校(招待講演), 2013 年 8 月 1 日, 宮城蔵王ロイヤルホテル(宮城宮城県・刈田郡蔵王町)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

田村 忠久 (TAMURA, Tadahisa)
神奈川大学・工学部・教授
研究者番号: 90271361

(2) 研究分担者

日比野 欣也 (HIBINO, Kinya)
神奈川大学・工学部・教授
研究者番号: 80260991

(3) 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

笠原 克昌 (KASAHARA, Katsuaki)
早稲田大学・理工学術院・招聘研究員
研究者番号: 00013425

吉田 賢二 (YOSHIDA, Kenji)
芝浦工業大学・システム工学部・教授
研究者番号：90260984

片寄 祐作 (KATAYOSE, Yusaku)
横浜国立大学・工学研究科・准教授
研究者番号：90323930

小澤 俊介 (OZAWA, Shunsuke)
早稲田大学・理工学術院・研究員
研究者番号：60506715

清水 雄輝 (SHIMIZU, Yuki)
神奈川大学・工学部・准教授
研究者番号：60434320

(4)研究協力者

John William Mitchell
NASA Goddard Space Flight Center

Pier Simone Marrocchesi
University of Siena and INFN Pisa