

広視野電子飛跡検出型コンプトンカメラによる
天体および超高層電子由来ガンマ線観測気球実験 (SMILE-II)

谷森達, 窪秀利, 水本哲矢, 水村好貴, Parker J., 岩城智, 澤野達哉,
中村輝石, 松岡佳大, 古村翔太郎, 佐藤快, 中村祥吾, ¹高田淳史, ²身内賢太郎, ³岸本祐二
京大大学院理学研究科, ¹京大生存圏研究所, ²神戸大理学部, ³KEK

1. SMILE-計画

現在、京大宇宙線グループでは、宇宙 MeV および sub-MeV ガンマ線広視野ガンマ線カメラを開発している。CGRO 衛星 COMPTEL 検出器(1991～2000)など従来のコンプトン検出器は、入射ガンマ線がコンプトン散乱を起こした場所と反跳電子のエネルギー、散乱ガンマ線の方向とエネルギーのみ測定するため、入射ガンマ線の方向が円錐で求まる(図 1 左)。そのため、バックグラウンドの除去が難しく、予想された感度よりも 1 桁悪い感度しか達成できなかった。

COMPTEL による 1 MeV 以上の全天探査[1]に引き続き、2003 年以降 INTEGRAL 衛星により、サブ MeV 領域の銀河面探査が行われた[2]。COMPTEL が行った探査では、全天で定常的放射天体が約 30 天体、INTEGRAL では 600 keV 以上では 4 天体が観測された。

GeV 領域での Fermi 衛星の観測[3]とは大きな隔たりがある。このように、MeV ガンマ線天文学の発展を阻害しているのは MeV ガンマ線イメージング観測の技術的困難によるところが大きい。さらに昨年、Ge 検出器を用いたコンプトンカメラとアクティブ VETO カウンタを搭載した NCT 気球実験の結果が発表された。6 cm²の有効面積、8 時間の観測で、Crab から 4 σ の信号を検出、MeV ガンマ線天文学に重要な貢献を行った。しかし、天体から検出されたサブ MeV ガンマ線は予想の 6 分の 1 であり、天体領域に限っても信号の 35 倍以上、全視野から 4 0 0 倍の雑音が最終的に残り、画像処理手法の MLEM 法を適応することで上記信号を認識出来た。この報告はサブ MeV 領域においても大変強い雑音があることを示し、0.1 - 1.0 MeV の全領域で高い雑音除去能力が不可欠なことがわかった。

我々はコンプトン散乱による反跳電子の飛跡を 3 次元測定し(図 1 右上)、入射ガンマ線の方向を 1 事象毎に決定する電子飛跡検出型コンプトンカメラ (Electron Tracking Compton Camera : ETCC) を開発した (図 1 左) [4]。この検出器は、コンプトン反跳電子の方向を捉えることでガンマ線到来方向を円でなく円弧として強く制限できる。さらに、反跳電子と散乱ガンマ線の角度 (α) を用いた運動学的チェック、また反跳電子のエネルギー損失率から宇宙線、中性子、さらには TPC を突き抜ける高エネルギー電子と、ETCC 内で静止するコンプトン散乱電子の識別が可能となる。このように新しい複数の手法で雑音を除去するため、従来のコンプトン法より 1 桁以上高感度を達成できる。MeV ガンマ線領域では、装置の有効面積に比べ雑音除去能力が重要であり、特にエネルギー連続成分に対して、我々が開発した ETCC では、上記複数の雑音除去により大きな感度改善が期待できる。我々は ETCC が MeV 領域ガンマ線全天観測に有効であると考え、以下に述べる開発・観測を行いながら、衛星での全天探査をみざす計画を進めている。17 年度までに反跳電子の方向とエネルギーを測定する 10 cm 角 Time

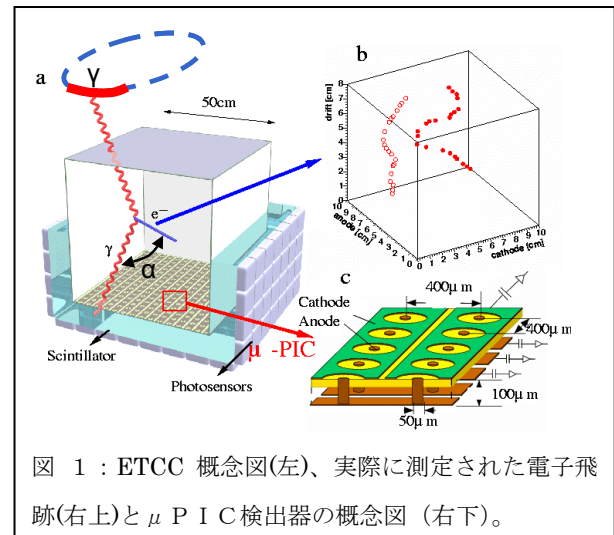
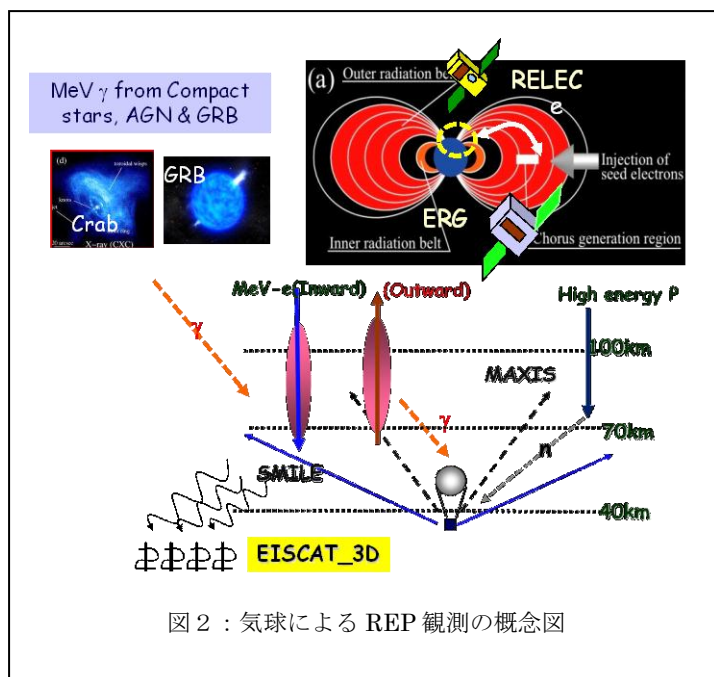


図 1 : ETCC 概念図(左)、実際に測定された電子飛跡(右上)と μ P I C 検出器の概念図 (右下)。

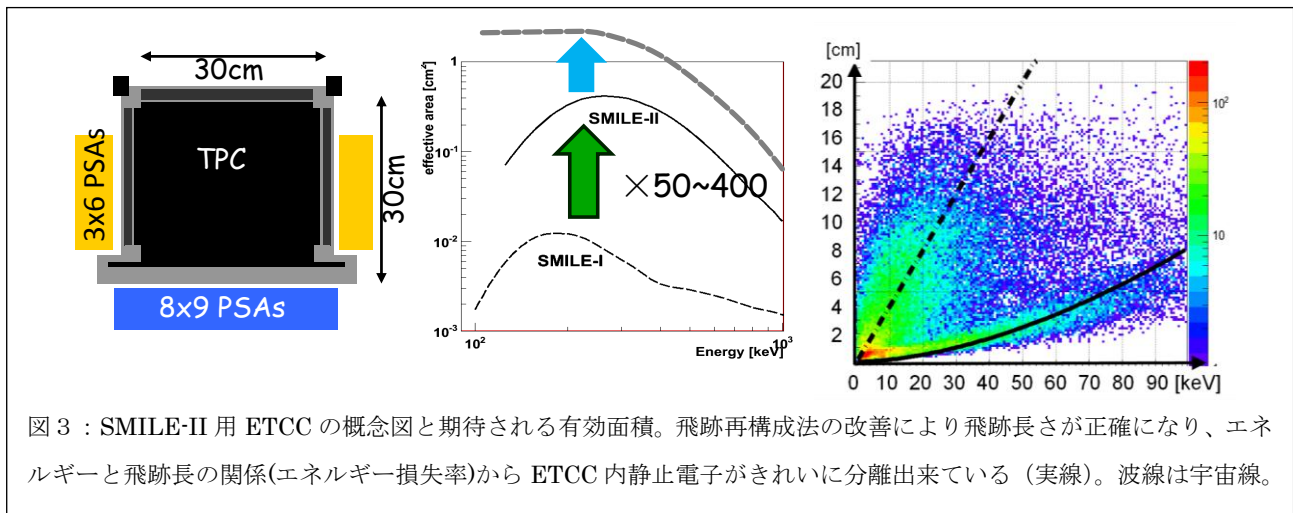
Projection Chamber (TPC)および散乱ガンマ線の位置とエネルギーを測定する GSO シンチレータ・ピクセルアレイ (1ピクセルは $6 \times 6 \times 13 \text{ mm}^3$) を組み合わせた ETCC を開発し、地上実験で基本性能を調べ、高いイメージング能力を得た。18 年度には第 1 段階実験 (SMILE-I : Sub-MeV gamma-ray Imaging Loaded-on-balloon Experiment) として、10 cm 角 ETCC を用い、大気および宇宙拡散ガンマ線の測定気球実験を 18 年 9 月に三陸大気球観測所で行った。3 時間半の観測で約 20 万事象を測定し、エネルギー損失率、 α 判定などで約 400 事象が最終的に残った。シミュレーションでは宇宙拡散・大気ガンマ線は約 400 フォトンの検出が予想され、測定値とよく一致した。特にデータを解析するために、上にも述べたように宇宙線による装置自身の放射化による雑音ガンマ線を、シミュレーションにより見積もることが不可欠となる。観測されたデータとシミュレーションを比較しながら改良することで信頼性のあるシミュレーションを開発することができた。宇宙拡散ガンマ線および大気ガンマ線のスペクトルを得、Astrophysical Journal 誌に出版した[5]。観測されたガンマ線フラックスおよび有効面積を考えると、この ETCC は COMPTEL の約 10 倍の高感度で観測を実現できた。

2. 北極周回気球による北極域ガンマ線バーストおよび 銀河内ガンマ線天体観測実験 (SMILE-II)

現在、SMILE-I の結果を踏まえて、銀河内の強い軟ガンマ線天体からのスペクトル観測を目的とし、SMILE-I の 50 倍程度の感度を持つ 30 cm 角 ETCC (約 6 時間のカニ星雲の観測で 5σ 程度の感度を予定) 程度の観測装置の開発を 2008 年度から行っている (SMILE-II 実験) [6]。その開発の途中、2010 年、北極域高層大気を非干渉散乱レーダーで観測する国際共同研究組織の欧州非干渉散乱 (EISCAT) レーダー科学協会 [6] Director の E.Turunen 氏から SMILE-II を用いて極地域で相対論的電子降下 (Relativistic electron precipitation; REP) による大気中での γ 線バースト (図 2) [7] のイメージング測定のコラボレーション提案を受けた。さらに EISCAT の国内代表機関である国立極地研、名古屋大 STE 研と協議し、2014 年頃打ち上げ予定の地球内部磁気圏探査衛星 ERG [8]



との共同観測も視野にいれ、より拡張された境界領域共同実験を目標として京大宇宙線グループと EISCAT、名古屋 STE 研、極地研、さらには ERG 衛星グループである JAXA、京大生存圏研の研究者と北極でのガンマ線気球実験の推進を目指すグループを立ち上げた。現在、スウェーデン、キルナのスウェーデン宇宙公社 (SSC) の基地から 2013 年に、北極周回軌道での 2 週間におよぶ長時間観測を目指している。太陽活動極大期は 2013 年から開始されることを考慮した。また ERG 衛星が打ち上がる前に、北極でのガンマ線バースト観測技術を実験的なものにするためにも是非必要であり、2013 年に試験飛行 (1 日)、14 年から北極周回飛行を行う方向で行くことを検討している。現在、スウェーデン宇宙科学研究所・山内正敏氏を代表としてスウェーデンに 2 年分の予算を申請中である (他にルーレオ工科大・Arvelius 幸子氏、EISCAT・E.Turunen 氏が参加)。この SMILE-II に搭載される 30 cm 角 ETCC は、北極周回飛行では 2 週間の飛行と観測時間が長く、宇宙線雑音の増加を考慮してもかに星雲に対して 10σ 程度の観測が期待でき、宇宙観測にも有用である。



このように早急に北極周回飛行実験を立ち上げたいと考え、今年度のスウェーデンへの申請が認められない場合、JAXA で、2013 年度キルナからの 1 日の試験飛行を支援していただきたい。

3. SMILE-II 実験装置と 25 年度観測 (大樹町観測の可能性)

SMILE-II は、かに星雲など強い軟ガンマ線放射天体を 6 時間の観測で 5σ 以上の精度で観測するため、図 3 左に示すような 30 cm 角 ETCC を採用した。数年前から地上用の 30 cm 角 ETCC を動作させ、性能改善を続けている。性能改善は省電力化と感度改善、画像解析法の 3 点に集約されるが、ここでは感度改善について述べる。上記性能を得るためには SMILE-I の約 50 倍の有効面積を実現する必要がある。これを実現するために多くの改善を行ってきた。例えば、(1) SMILE-I の 2.5 倍の有効体積、(2) ETCC 底面、側面をシンチレーターで覆い、さらに PET 材料による薄型 TPC ガス容器を採用し、反跳ガンマ線検出効率の増加、(3) 目標天体の方位角のみの追尾、(4) TPC 読み出し回路、およびピッチの改善による大幅な電子飛跡情報の増加、(5) シンチレーターアレイ毎の読み出し回路の設置、を行った。さらに幾つかの改良を行い、有効体積を SMILE-I の 50 倍の感度向上で有効面積 $0.5\text{cm}^2@300\text{keV}$ を目指した。特に (4) の電子飛跡検出改善に力を注ぎ、SMILE-I 装置の Ar 仕様で $2\times 10^{-5}@662\text{keV}$ と以前の 10 倍程度の感度改善を達成した。さらに飛跡のエネルギー損失率(dE/dx)の精度も図 3 右のように大きな改善があり、 dE/dx のみで大半の雑音除去が可能となった。この結果に基に SMILE-II の予想検出効率当初予定の 2 倍以上の $1\text{cm}^2@300\text{keV}$ の感度が可能となった、現在さらに比較的容易な Ar ガスを 1.5 気圧に加圧を行い、 $2\text{cm}^2@300\text{keV}$ を目指している (図 3 中)。この有効面積をもと大樹町でのかに星雲観測の可能性を図 4 に示す。この計算では ARM 値 (10 度@662keV: 半値) 雑音領域 20 度を用いた。キルナでは大樹町の約 5 倍の宇宙線雑音を考慮した。このように大樹町では上記改善が実現すれば、大樹町、2 時間の観測で、かに星雲 5σ の観測も可能となる。今、ガス圧を 1.5 気圧加圧でさらに 2 倍の有効面積改善が期待でき、現在 30cmFM で試験中である。また従来データがほとんど無かった大気速中性子フラックス計測を行う。SMILE-I では実際数百事象が雑音の中に検出された。SMILE-II では高統計のデータが取得出来る。

このように、2013 年度スウェーデンまたは JAXA の支援によるキルナからの試験飛行が不可能なときは、2013 年 9 月、大樹町での実験も大変意義が大きく、是非行いたいと考えている。

4. 追記【北極観測の科学的意義】

REP 現象は、超高層大気でのイオン化現象の鍵であり、地球規模での大気循環を通じて、オゾン層ダイナミクスの鍵を握る NO_x の生成に深く関わっていると考えられ[9]、大変注目されながら、観測手法が手薄な分野である。我々が開発した ETCC は、視野が広く、100keV-数 MeV の間でイメージング検出が

可能なため、宇宙からのガンマ線観測と同時に REP による制動放射ガンマ線や、雷からのガンマ線も同時に観測ができる。特に気球は、衛星では不可能な定点観測が可能となり、REP のような不規則な現象の頻度および位置決定には不可欠な実験となる。また極地では周回観測も可能なため、測定時間が2週間と長期に拡張でき、宇宙、地球科学どちらにも有意義なデータが供給可能となる。特に2013年頃からは太陽活動極大期に対応し、多くのREP現象が期待される。さらに太陽活動極大期に合わせ2015年にはERG衛星(宇宙科学研究所 小型科学衛星シリーズ2号機候補)によるバンアレン帯でのプラズマや相対論的電子の赤道面での観測

が行われる。またロシアのプラズマ観測のための極周回衛星 RELEC (2013年打上予定)との共同観測提案も受けている。この気球実験はその加速電子(REP)の落下点である北極でREPが作る制動ガンマ線を観測し、ERG単独の観測ではわからない加速電子が降りこんでくる場所の広がりや、降り込み電子のエネルギーなどが得られ、加速機構の全体像の把握が可能になる。これは粒子加速の定量的理解という点で宇宙線物理、高エネルギー宇宙物理にも重要なデータとなり、是非この期間での気球との同時観測が必要となる。このように上記2つの衛星観測の可能性を大きく広げることになる。この計画は衛星では不可能な極地の利点を生かし定点観測を継続的に行い、気球実験独自の科学的成果を出すことが出来る。これを2014年から極小期までの5年程度観測を継続したい。

参考文献

1. J.V. Schönfelder et al., "The first COMPTEL source catalogue", A&AS, 143 (2000) 145
2. L. Bouchet et al., "INTEGRAL SPI All-Sky View in Soft Gamma Rays: A Study of Point-Source and Galactic Diffuse Emission", ApJ, 679 (2008) 1315
A. A. Abdo et al., "Fermi/Large Area Telescope Bright Gamma-Ray Source List", ApJS, 183 (2009) 46
3. T. Tanimori et al., "MeV γ -ray imaging detector with micro-TPC", New Astron. Rev., 48 (2004) 263;
R. Orito, et al., "Compton gamma-ray imaging detector with electron tracking", Nucl. Instr. Meth. A, 525 (2004) 107; A. Takada et al., "Development of an advanced Compton camera with gaseous TPC and scintillator", Nucl. Instr. Meth. A, 546 (2005) 258; H. Kubo et al., "High-speed Position Encoding System for the TPC with Micro Pixel Chamber Readout", 2005 IEEE NSS Conf. Rec., 371
4. A. Takada et al., "Observation of Diffuse Cosmic and Atmospheric Gamma Rays at Balloon Altitudes with an Electron-Tracking Compton Camera", ApJ, 733 (2011) 13
5. 谷森達 et al., 「電子飛跡測定型広視野コンプトンカメラによる sub-MeV および MeV ガンマ線観測計画 (SMILE 実験)」大気球研究報告 2010-03-31 (2010) 19
6. <http://www.eiscat.se/>
7. J. Foat et al., "First Detection of a Terrestrial MeV X-ray Burst", Geophys. Res. Lett., 25, (1998) 4109
8. <http://gemsissc.stelab.nagoya-u.ac.jp/erg/project/research-system/>
9. E. Turunen et al., "Impact of different energies of precipitating particles on NOx generation in the middle and upper atmosphere during geomagnetic storms" J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Phys. 71 (2009) 1176

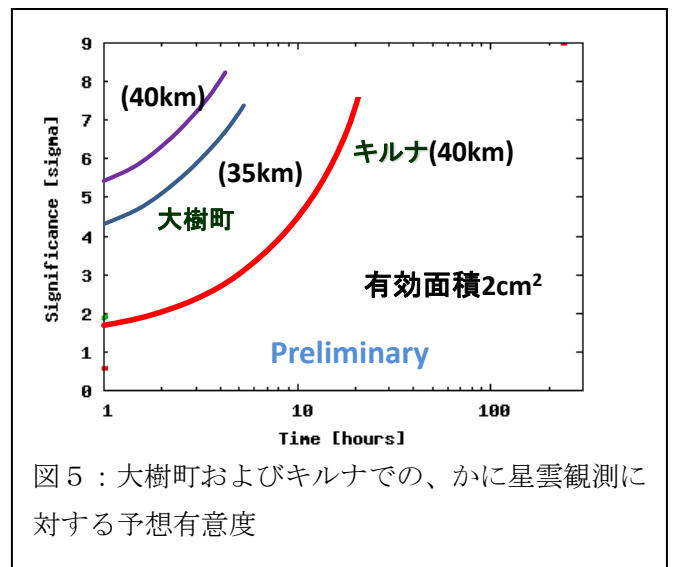


図5：大樹町およびキルナでの、かに星雲観測に対する予想有意度