

SMILE: 核ガンマ線イメージングで 切り拓くサイエンス

水村好貴^{1,2}, 高田淳史², 谷森達^{2,1}, 水本哲矢², 古村翔太郎², 岸本哲朗², 竹村泰斗²,
吉川慶², 中増勇真², 中村優太², 谷口幹幸², 窪秀利², 黒澤俊介³, 澤野達哉⁴

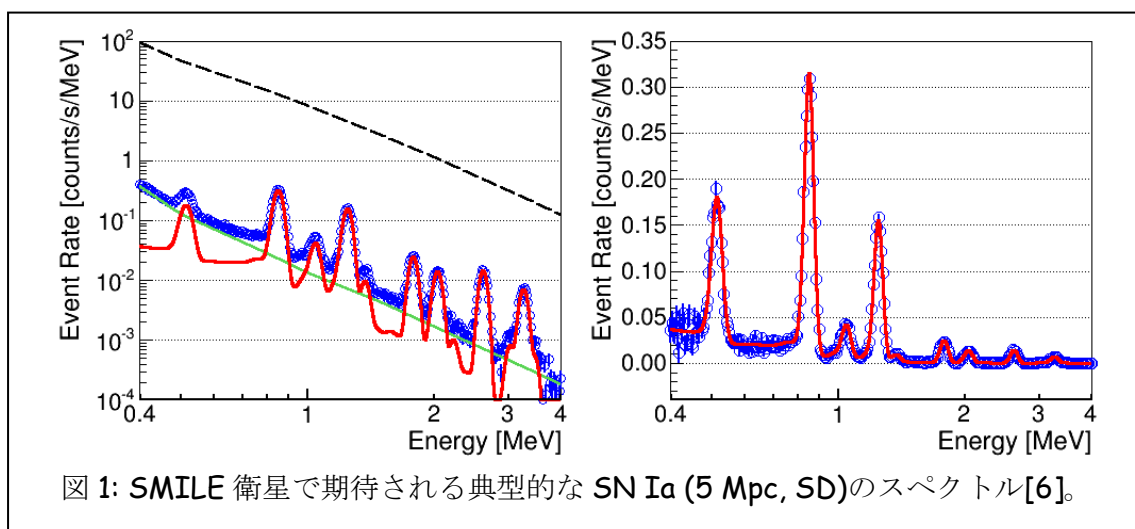
(1:京大宇宙ユニット, 2:京大理, 3:東北大 NICHe, 4:金沢大数物)

1. 核ガンマ線イメージング

核ガンマ線は、原子核固有の情報を遠隔探査できる有力なツールで、他の観測手段に代え難い自然科学が数多く存在する。しかしながら、雑音除去とイメージングの技術的困難さから、最も進捗が遅れている観測波長帯でもある。我々は、MeV ガンマ線イメージング装置 ETCC を開発し SMILE 実験を進めてきた[1, 2]。近年、根本的な困難原因の特定と実機での説明に成功し[3]、将来装置[4]の信頼性が高まり、ETCC での天文学・地球惑星科学に関するサイエンス開拓がより期待できる状況となっている。

2. 天文学の期待

Ia 型超新星爆発(SN Ia)は、宇宙への元素供給源としても、観測上の距離指標としても天文学上重要な天体現象である。その爆発過程は、白色矮星が伴星からの質量降着を経て着火する Single Degenerate (SD)モデルと、白色矮星同士の連星融合にて爆発する Double Degenerate (DD)モデルが有力候補であるが、議論が続いている。近年、核ガンマ線観測での時間発展分析の有効性が説かれたが[5]、約 40 年に 1 個という超近傍(3.5 Mpc)で発生した SN2014J の観測でさえ、INTEGRAL 衛星で⁵⁶Ni と⁵⁶Co ラインガンマ線を 4 σ で検出、Suzaku 衛星では 3 σ 上限値を与えたに留まり、結論に至っていない。天文用の SMILE 衛星[2, 4]が実現すれば、年に数個の SN Ia 発生が期待できる距離 40 Mpc からでも核ガンマ線ラインが十分議論でき、光度曲線から SD vs. DD の



診断が可能となる。また、SD と DD が共存していたとしても、5 年の衛星観測で共存比を 20%程度の精度で特定でき、宇宙の化学進化に制限を加えられる。

銀河面には ^{26}Al が大量に分布している事が判明しており、その崩壊半減期($\sim 7.5 \times 10^5$ 年)が銀河内の物質循環タイムスケールと近い為、生成源が解れば銀河内の物質流動のプローブになると期待されている。しかし、COMPTEL と INTEGRAL で得られた ^{26}Al の分布は、十分に一致しているとは言えず、より低雑音で point spread function (PSF) が明確に定義可能な高角度分解能の核ガンマ線イメージング装置での観測が望まれている。 ^{26}Al の生成源候補としては、Asymptotic Giant Branch 星(AGB 星)、Wolf-Rayet 星、重力崩壊型超新星などが考えられているが、判別されていない。AGB 星のトレーサーと考えられている赤外線全天マップをテンプレートに、SMILE 気球/衛星での観測を模擬すると(図 2)[7]、衛星規模で ^{26}Al の生成源に迫ることが可能である事がわかる。

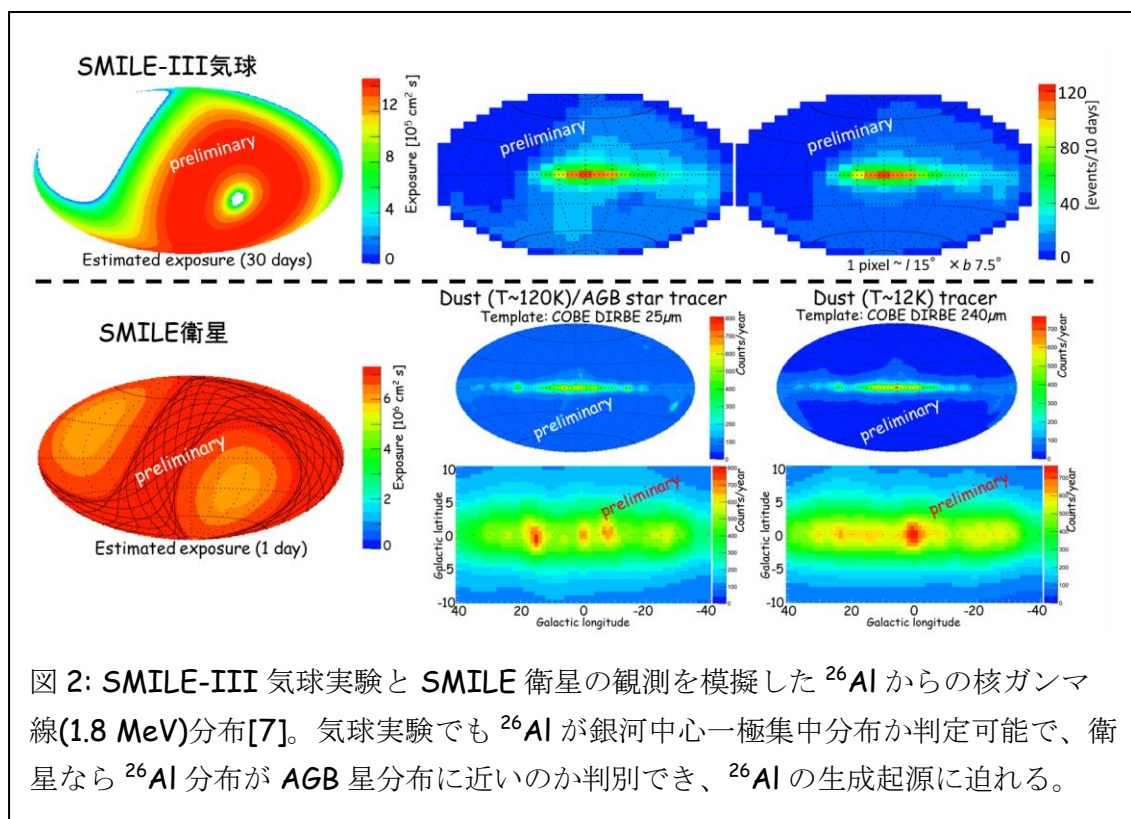


図 2: SMILE-III 気球実験と SMILE 衛星の観測を模擬した ^{26}Al からの核ガンマ線(1.8 MeV)分布[7]。気球実験でも ^{26}Al が銀河中心一極集中分布か判定可能で、衛星なら ^{26}Al 分布が AGB 星分布に近いのか判別でき、 ^{26}Al の生成起源に迫れる。

銀河中心領域からの電子・陽電子対消滅線(511 keV)は、銀河系内で最も高い強度で観測されているラインガンマ線である。しかしながら、銀河中心領域のガス組成比、磁場の構造と強度、陽電子の拡散と熱化機構など不明なパラメータが多い上に、観測データも角度分解能と感度の制限が厳しく、その陽電子の起源は未解決である[8]。銀河面および銀河ハローからの電子・陽電子対消滅線は、INTEGRAL/SPI でも観測されているが、低強度で広がっている複雑な構造であり、十分理解されていない。図 3 に、INTEGRAL による約 6 年の観測結果、SMILE-II+気球実験による 1 日の観測予想、

SMILE-III 気球実験による 10 日の観測予想を示す。SMILE-II+ で 511 keV ラインの銀河中心が確認でき、SMILE-III 気球による 10 日の観測でその分布の拡がりを議論可能で、気球実験レベルで大型衛星の数年に渡る観測と同等以上の成果が期待できる。

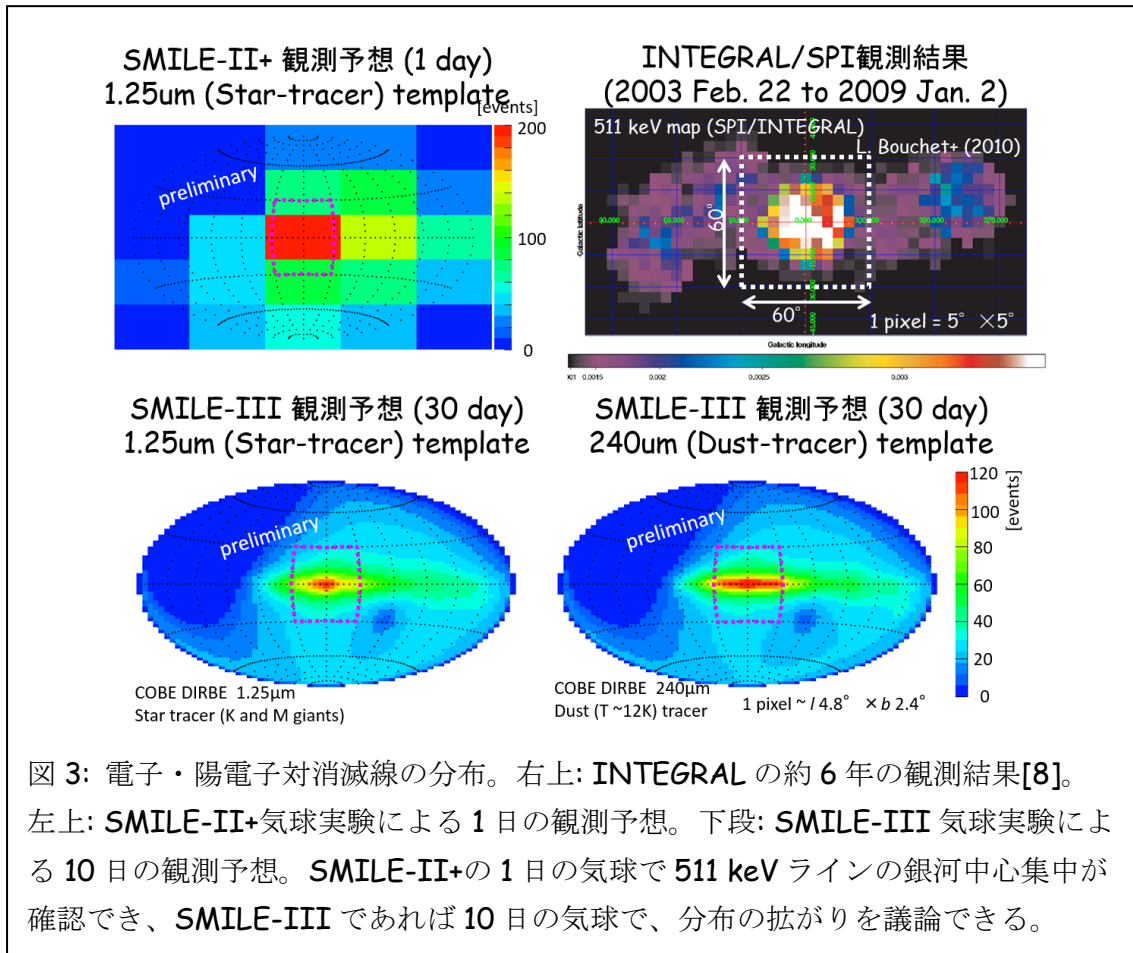


図 3: 電子・陽電子対消滅線の分布。右上: INTEGRAL の約 6 年の観測結果[8]。左上: SMILE-II+気球実験による 1 日の観測予想。下段: SMILE-III 気球実験による 10 日の観測予想。SMILE-II+の 1 日の気球で 511 keV ラインの銀河中心集中が確認でき、SMILE-III であれば 10 日の気球で、分布の拡がりを議論できる。

これら以外にも、最遠方ガンマ線バースト(GRB)、GRB の偏光観測[9,10]、MeV ガンマ線背景放射、活動銀河核、太陽フレア、超新星残骸、恒星質量ブラックホール、パルサー、連星系、宇宙線加速、原始ブラックホール、など数多くの天体・物理現象が研究対象になり、核ガンマ線の観測窓を拓く事は天文学を大きく牽引する原動力となる。

3. 地球惑星科学の期待

相対論的電子降下現象(Relativistic electron precipitation; REP)は、高エネルギー電子が地球上空に降り注ぐ現象で、その供給源の物理過程や、大気中間層の化学組成への影響[11]で注目されており、MAXIS 気球実験では REP バーストからのガンマ線が観測されている。SMILE のような広視野ガンマ線イメージング装置で、その空間構造が観測できれば、REP バーストごとの時間的・空間的發展情報と、その電子降り込み量を評価できる。特に、2016 年内の打上予定の ERG 衛星と相性が良く、もし極域での SMILE 気球実験と ERG 衛星の同時観測が実現すれば、赤道上の放射線帯での粒子加速現場か

ら地球大気に降り注ぐ根本まで、一本の磁力線に沿った粒子運動の始点と終点を観測できる。また、地上の電波アンテナ群で得るの電子密度高度分布とも相補的である(図 4)。

月表層には約 $1 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ で銀河宇宙線が降り注いでおり、核破砕反応から中性子が生じ、月表層物質との相互作用で原子核固有のエネルギーを持つガンマ線が放射される(図 5)。また、天然放射性核種もガンマ線を放射する。これらをイメージング装置で観測すれば、月表層の元素組成分布を得られ、月地殻の形成過程や地殻形成後の熱的活動、月全体の化学組成に制約を与え、月の起源と進化を解明する重要な情報となる。Kaguya 衛星搭載のガンマ線分光器(K-GRS)は、 ^{232}Th , ^{238}U , ^{40}Ca , ^{40}K などの月面分布を明らかにしたが、その空間分解能は 130 km 程度であった[14]。SMILE-III 同等機を月周回衛星に搭載し高度 100 km から遠隔探査を行えば、核ガンマ線に対して数 km 以下の空間分解能を達成でき、K-GRS より 2 桁高感度な観測を実施でき、クレーター内外の元素組成の違いや、将来の月面基地の建設候補地を絞る有力な資源分布情報を提供できる。

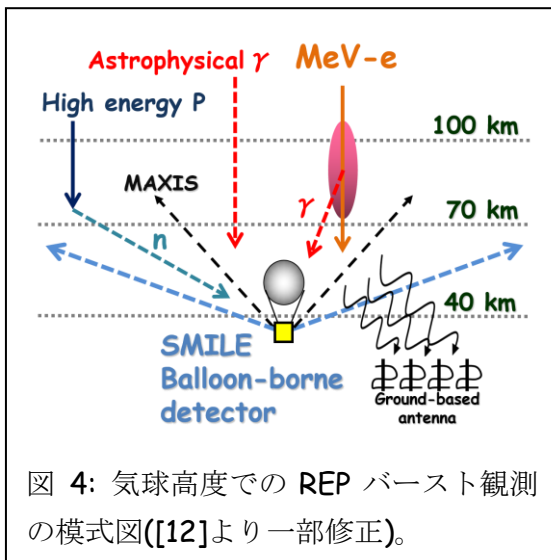


図 4: 気球高度での REP バースト観測の模式図([12]より一部修正)。

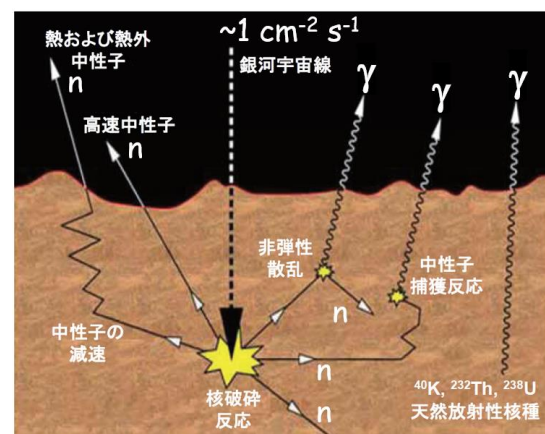


図 5: 月・岩石惑星表層からの核ガンマ線放射の模式図([13]より一部追記)。

参考文献

- [1] A. Takada, et al., *Astrophys. J.* 733 (2011) 13.
- [2] T. Tanimori, et al., *Astrophys. J.* 810 (2015) 28.
- [3] 谷森達, 他, 平成 28 年度大気球シンポジウム, isas16-sbs-003.
- [4] 高田淳史, 他, 平成 28 年度大気球シンポジウム, isas16-sbs-025.
- [5] A. Summa, et al., *Astron. Astrophys.* 554 (2013) A67.
- [6] Y. Mizumura, et al., *JPS Conf. Proc.*, in press [arXiv:1610.06843]
- [7] A. Takada, et al., *Proc. SPIE* 9905 (2016) 99052M.
- [8] L. Bouchet, et al., *Astrophys. J.* 720 (2010) 1772–1780.
- [9] S. Komura, et al., *Proc. of Science (ICRC2015)* 1019.
- [10] 古村翔太郎, 他, 平成 28 年度大気球シンポジウム, isas16-sbs-004.
- [11] L. B. Callis, et al., *J. Geophys. Res.* 96 (1991) 2939–2976.
- [12] Y. Mizumura, et al., *The 4th Symposium on Polar Science*, OS-P23.
- [13] 唐牛讓, 他, *日本惑星科学会誌* 17 (2008) 161–166.
- [14] N. Hasebe, et al., *J. Phys. Soc. Jpn.* 78 (2009) Suppl. A 18–25.