

MeV/sub-MeV全天サーベイの将来計画

○中澤知洋¹, 高橋忠幸^{1,2}, 渡辺伸², 一戸悠人^{1,2}, 井上芳幸², 内山泰伸³, 榎戸輝揚⁴, 釜江常好^{1,5}, 国分紀秀², 武田伸一郎⁶, 田島宏康⁷, 田代信⁸, 玉川徹⁹, 寺田幸功⁸, 深沢泰司⁸, 牧島一夫¹ et al. and the ex-CAST WG members
 1:U Tokyo, 2:ISAS/JAXA, 3:Rikkyo U., 4: Kyoto U., 5: Stanford U., 6:OIST, 7:Nagoya U/ISEE, 8:Saitama U., 9:RIKEN, 10:Hiroshima U., 7:Osaka U.,

本計画は、未だ精密な観測の存在しない 0.2~2 MeV の帯域で高い精度の全天観測を行い、宇宙の高エネルギー現象の理解を飛躍的に高めることを目的とする。現代の天体物理学では、電波、赤外、可視光、そして、X線から、GeV、TeVのガンマ線に至るまで、**広い波長帯域で精度の高い観測結果を組み合わせることで天体現象に迫る**。しかし、2000年に観測を終了したCOMPTEL検出器以降、**MeVガンマ線の観測には大きな穴**があいたままである。

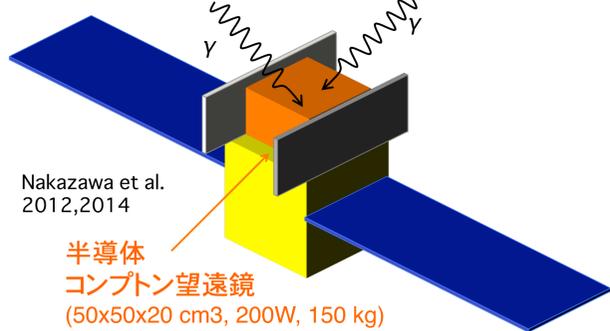
我々は、シリコン(Si)とテルル化カドミウム(CdTe)を組み合わせた広視野の半導体コンプトンカメラという、日本発の新技术を主検出器に用いることを提案している。半導体の優れたエネルギー分解能を活かし、COMPTEL(0.5-10 MeV)よりエネルギーの低い0.2 -2 MeVのsub-MeV帯域でのコンプトン撮像を実現する。エネルギー帯域を下げることで、光子数を増やし、小型の衛星でも高い感度を達成することができる。技術的には、ASTRO-H 軟ガンマ線検出器をベースにすることで、近い将来での実現を目指している。本計画が実現すれば、**世界初のsub-MeV帯域の全天観測**に加え、**全天のsub-MeV 偏光サーベイ**も可能となる。広視野を持つことでガンマ線バーストや宇宙ジェット天体の突然の増光に加え、GeV帯域で初めて確認されたかに星雲の突発的な増光など、未知の、科学的に興味深い高エネルギー現象への扉を開くことができる。

1: MeV/sub-MeV 全天サーベイの将来計画

将来計画として、日本ではCAST計画が、ヨーロッパではASTROGAM計画が検討されている。どちらも半導体を用いたコンプトン望遠鏡である(ASTROGAMはシンチレータとのハイブリッド)。

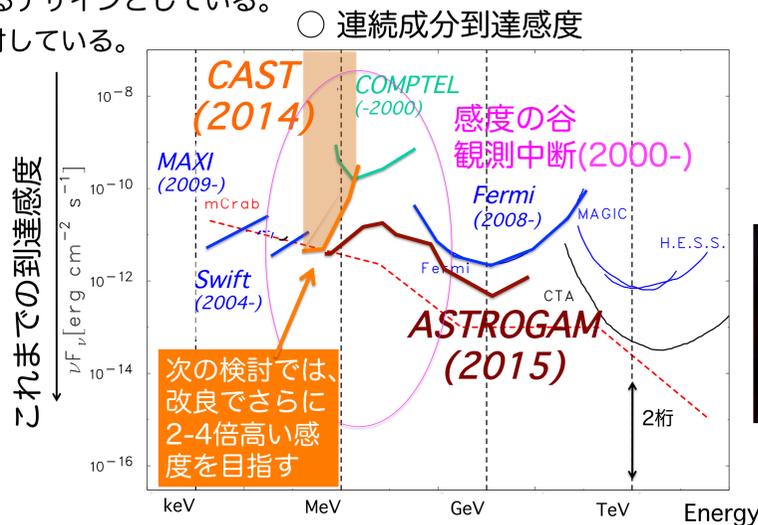
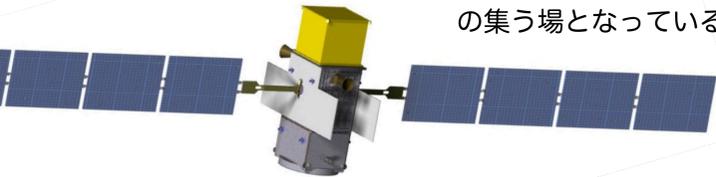
1-1: CAST 計画(小型衛星 or sub-payload)

Si/CdTe コンプトンカメラを用いて、0.2-2 MeVの全天サーベイを実施する。2020年代の観測を目標として、小型科学衛星や大型衛星のサブペイロードとして検討を進めている。当面、Sub-MeVに集中することで、小型のシステムで目標感度を得るデザインとしている。現在は、さらなる感度向上を目指したデザイン改良を検討している。



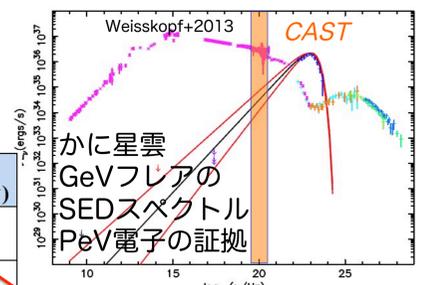
1-2: ESA M4/5 ASTROGAM 計画

MeV帯域を狙う国際計画として、ヨーロッパを中心として検討中のASTROGAM計画がある。GeV帯域までを一気に狙う野心な計画で、CASTよりかなり大型である。M4に提案されM5へも改良型を提案しようとしている。ヨーロッパのみならず、主要メンバーに日本人や米国人を含む。世界のMeV/GeV研究者が参加し、サイエンスとハードウェア検討において、世界のMeV コミュニティの集う場となっている。



○ 積分時間1MsでのASTROGAM計画のガンマ線輝線感度

E (keV)	FWHM (keV)	Origin	SPI sensitivity (ph cm ⁻² s ⁻¹)	ASTROGAM sens. (ph cm ⁻² s ⁻¹)
511	1.3	Narrow line component of the e ⁺ /e ⁻ annihilation radiation from the GC region	5.2 × 10 ⁻⁵	8.0 × 10 ⁻⁶
847	35	⁵⁶ Co line from thermonuclear SN	2.3 × 10 ⁻⁴	8.7 × 10 ⁻⁶
1157	15	⁴⁴ Ti line from core-collapse SN remnants	9.6 × 10 ⁻⁵	8.4 × 10 ⁻⁶
1275	20	²² Na line from classical novae of the ONe type	1.1 × 10 ⁻⁴	1.1 × 10 ⁻⁵
2223	20	Neutron capture line from accreting neutron stars	1.1 × 10 ⁻⁴	1.2 × 10 ⁻⁵

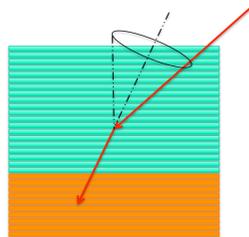


3年間で4±2 このSNIaを捉える感度

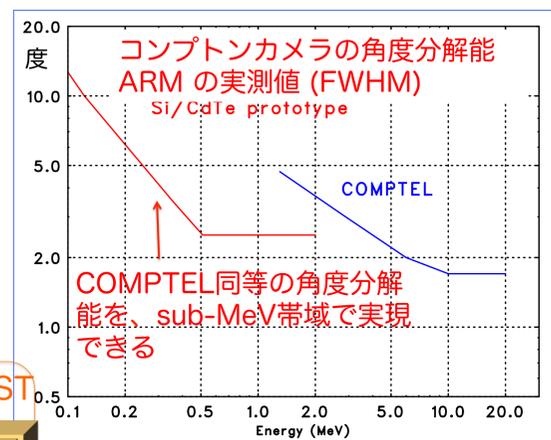
2: コンプトン望遠鏡の原理

$$\cos \theta = 1 - m_e c^2 \left(\frac{1}{E_2} - \frac{1}{E_1 + E_2} \right)$$

検出器の中で、ガンマ線をコンプトン散乱させてから光電吸収し、エネルギー損失と散乱角の関係を用いて、ガンマ線の入射方向を天空上の円弧として再構成する。コンプトン散乱は、光子の電場ベクトルに垂直方向に散乱しやすいため、偏光感度も持つ。



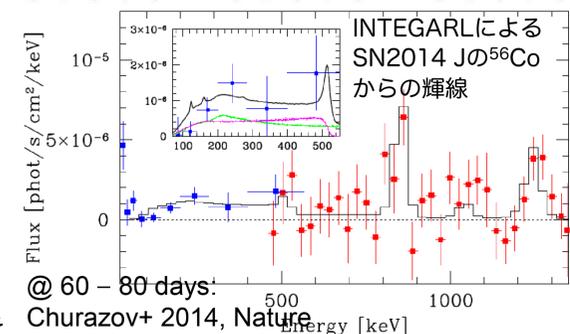
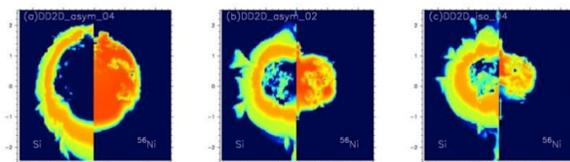
Si/CdTe半導体カメラを採用することで、~1% (FWHM)という高いエネルギー分解能を得て、これまでの1/6のエネルギーのガンマ線でもコンプトン再構成を可能とする。



2-2: 重元素生成と核ガンマ線

核ガンマ線はMeVのみに現れ、重元素生成の最も直接的なプローブとなる。I型超新星(SNIa)の起源が白色矮星と恒星の連星か、2重白色矮星連星か、未だに決着がつかない。最近、SN2014Jから、ついにINTEGRAL衛星が検出した 847 keV 輝線は、早速 SNIa モデルに大きな疑問を投げかけた。MeV帯域で 10⁻⁵ ph/cm²を切る高い輝線感度を実現すれば、3年程度の観測期間で、3-5個のSNIaを捉えることができ、大きな飛躍となる。同様に重力崩壊型の超新星爆発(SNII)の観測もでき、宇宙の重元素生成の研究が大きく進む。

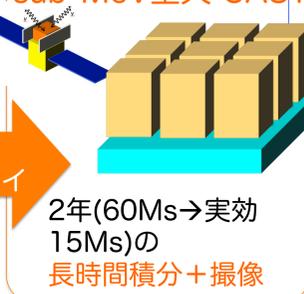
Ia型の超新星爆発のモデル計算



ASTRO-H SGD



sub-MeV全天 CAST



ASTRO-H 軟ガンマ線検出器 SGD のSi/CdTe コンプトンカメラを、全天観測に応用する

Takahashi+2004, Takeda+2009, Tanaka+ 2007, 2005, Watanabe+ 2007,2006, 2005, Mitani+ 2004, Takahashi+ 2000 etc...



[1] Deil R., Space Science Reviews, 49, 1988
 [2] 武田伸一郎, 博士論文, 東京大学, 2008
 [3] Nakazawa K. et al. SPIE 2012, 2014
 [4] Ichinohe et al. 2016 NIMA

[5] Watanabe S. et al. NIM-A, 579, 2007
 [6] Tanaka T. et al. NIM-A, 568, 2006
 [7] Takeda S. et al. NIM-A, 579, 2007
 [8] Schönfelder et al., AAS., 143, 2000

右: イメージングの実績