

# MeV ガンマ線検出を目的とした電子飛跡検出型コンプトンカメラ ETCC の性能評価

竹村泰斗（京都大学大学院理学研究科）

## Abstract

MeV ガンマ線領域では検出器の感度が他の領域と比べ非常に悪く未発展となっている。この理由は宇宙線と検出器の相互作用により発生するガンマ線や大気からの散乱ガンマ線などの膨大なバックグラウンドが存在することにある。そのため MeV 領域での観測例は非常に少なく、全天観測では 1991 年に打ち上げられた CGRO(Compton Gamma Ray Observation) 衛星に搭載された検出器 COMPTEL の 1 例のみである。そこで我々はコンプトン散乱における反跳電子の方向を測定することにより、強力なバックグラウンド除去能力を備える検出器 ETCC( Electron Tracking Compton Camera) を開発している。現在、ETCC を搭載した気球実験 SMILE-II (Sub-Mev gamma-ray Imaging Loaded-on-ballon Experiment - II) が計画中である。この実験の目的は比較的明るい天体であるかに星雲や Cygnus X-1 を観測することにより ETCC のイメージング能力を実証することである。SMILE-II 用 ETCC の性能評価を行ったので、その報告を行う。

## 1 MeV ガンマ線天文学とその観測

MeV ガンマ線で観測できる天体現象はブラックホールの降着円盤の内側での  $\pi^0$  崩壊によるガンマ線の放射や AGN(Active Galactic Nuclei), GRB(Gamma Ray Burst), 太陽フレアなど多く存在する。

特に放射線同位体からの核ガンマ線は MeV のみに存在し、そのガンマ線を測定することにより元素合成の仕組みを知ることができる。Fe よりも重い元素は合成過程に不明な点が多い。超新星爆発時に起こると考えられているが元素合成で生成された放射線同位体からの核ガンマ線による直接観測は一例もない。Ia 型超新星では、爆発時に太陽質量の 0.6 倍の  $^{56}\text{Ni}$  が生成されると考えられており  $^{56}\text{Ni} \rightarrow ^{56}\text{Co} \rightarrow ^{56}\text{Fe}$  ( $^{56}\text{Ni}$ ,  $^{56}\text{Co}$  半減期はそれぞれ 6.1day, 77.2day) の崩壊を起こすため、この過程で発生した熱によって超新星の光度曲線をよく説明することができる。この現象が測定されたのは SN1987A(S.M. Matz et al. (1988)) と SN2014J(E.Churazov et al. (2014)) の 2 例のみである。観測例が極端に少ないため感度のよい検出器による観測が求められている。

しかしながら MeV の観測は進んでいない。1991 年に打ち上げられた衛星 CGRO に搭載された検出器

COMPTEL(V.Schönfelder, et al. (1993)) では 10 年間の観測で発見された天体は約 30 天体と非常に少ない。さらに COMPTEL 以降 MeV ガンマ線をメインターゲットとする衛星は打ち上げられていないのが現状である。MeV 領域観測の困難の最大の原因は膨大なバックグラウンドである。宇宙線が衛星自体と相互作用して発生する大量のガンマ線や中性子、検出器外部で散乱したガンマ線、大気からのガンマ線や中性子、これら全てがバックグラウンドとなる。そのため MeV ガンマ線検出器には強力なバックグラウンド除去能力が必要とされる。さらにガンマ線は透過力が高いため X 線のように全反射による集光で検出することができない。加えて MeV 領域でコンプトン散乱が優位に働いていることも観測を困難にする。コンプトン散乱が発生すると散乱ガンマ線と反跳電子が生じ、散乱ガンマ線がエネルギーと方向性の一部を持ち去るため、入射ガンマ線に対する情報が不足しガンマ線のエネルギー、到来方向を求めるのが困難となっている。このように多くの困難が存在するために MeV ガンマ線における検出器の感度は他の領域と比べて 2,3 桁悪い (図 1)。

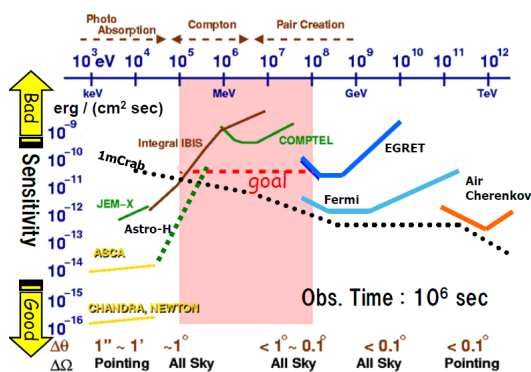


図 1: X 線、ガンマ線の検出器の感度

## 2 MeV ガンマ線検出器

MeV ガンマ線において最も優位な相互作用はコンプトン散乱である。そのため MeV ガンマ線の検出器はコンプトン散乱を利用する。このようなコンプトン散乱を利用するガンマ検出器のことをコンプトンカメラと呼ぶ。

COMPTEL はコンプトンカメラとして初めて宇宙で観測し数多くの成果を残した検出器である。COMPTEL は上部に液体シンチレータ、下部に NaI(Tl) シンチレータを距離を約 2m 離して設置している。ガンマ線が上方向から到来すると液体シンチレータでコンプトン散乱を起こし、反跳電子と散乱ガンマ線を生じ、散乱ガンマ線は NaI(Tl) シンチレータで光電吸収される。液体シンチレータではコンプトン点と反跳電子のエネルギーを測定し、NaI(Tl) シンチレータでは散乱ガンマ線の吸収点とエネルギーが測定される。コンプトン点と吸収点により散乱ガンマ線の方向は決定できる。しかし反跳電子の方向は測定できない。それにより到来ガンマ線の方向が円環上のみの制限となる。COMPTEL は、2つの検出器間の時間差によって、前述のバックグラウンドを極力落とすようにしていたが十分ではなかったため、感度の悪化を招いた。

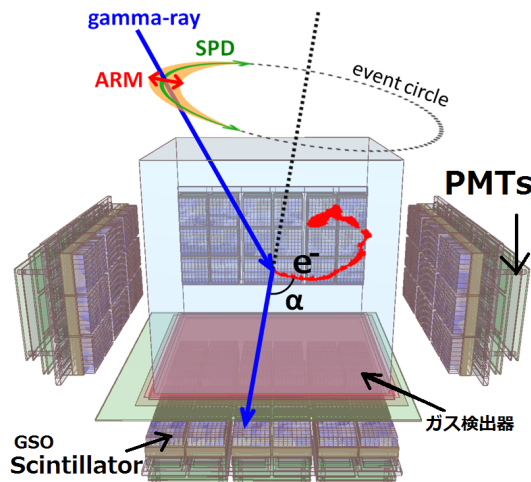


図 2: ETCC の構造

## 3 電子飛跡検出型 コンプトンカメラ ETCC

我々は COMPTEL の欠点を補うように反跳電子方向を取得するコンプトンカメラ ETCC(図 2) の開発を行っている。ETCC では反跳電子の電子飛跡の測定が可能であり、それにより従来の方法とは異なりガンマ線の到来方向を点で限定できる。また、電子飛跡はバックグラウンド除去としても非常に有用である。電子飛跡より求められるエネルギー損失率によって反跳電子と宇宙線や陽子などのバックグラウンドが分離できる。さらに散乱と反跳方向の角度を  $\alpha$  としたときこの角はコンプトン散乱を仮定したときに運動学的に導かれる値と、観測された散乱と反跳方向から幾何学的に求められる値が存在する。この独立な 2つの値が一致している成分を取り出すことによりコンプトン散乱以外のイベントを除去できる。さらに ETCC はガンマ線のイメージングが可能ることにより、方向に制限をかけることで地球や衛星筐体からのバックグラウンド除去が可能である。このように ETCC は様々なバックグラウンド除去能力を有しておりバックグラウンドに強い検出器となっている。

我々の ETCC では電子飛跡をとるためにガス検出器を使用している。ETCC 内のガスとガンマ線がコンプトン散乱を起こし発生した散乱ガンマ線はガス検出器の底面と側面に設置してあるシンチレータと

PMT で測定する。ガスを使用するメリットは電子飛跡を検出できることであり、シンチレータを使用するメリットは安価かつ容易に大きくできることである。

我々の研究室では 2006 年 9 月 1 日に三陸で 10cm 角 ETCC の気球実験 SMILE-I を行った。高度 32-35 km で観測時間 3 時間で 420 イベントが観測された。大気ガンマ線と宇宙拡散ガンマ線が観測され、イベント数は Geant4 によるシミュレーションの 400 イベントと一致した。このことにより ETCC には宇宙環境においてバックグラウンド除去能力を有することが実証された。(Takada,A. et al. (2011))

## 4 SMILE-II 用 ETCC の性能評価

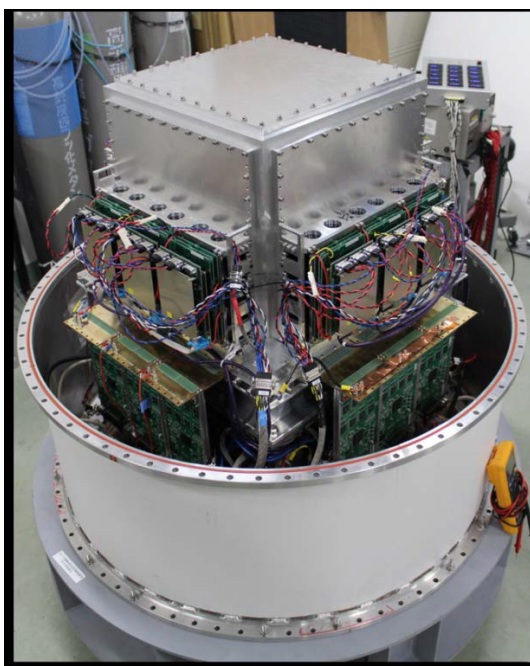


図 3: SMILE-II 用 ETCC

我々は現在、かに星雲や Cygnus X-1 などの明るい天体観測することによって ETCC のイメージング能力の実証する気球実験 SMILE-II を計画中である。アメリカのフォートサムナーにて高度 40 km の数時間の気球観測を考えており、 $5\sigma$  での観測には有効面

積  $< 0.5\text{cm}^2$  (@300keV), ARM(Angular Resolution Measure) $< 10^\circ$  (@662keV), SMILE-I の 100 倍の感度が要求される。これらを満たすべく ETCC のサイズを 10cm 角から 30cm 角へと大型化して有効面積を 10 倍増やした(図 3)。次に SMILE-I 時のデータ収集システムは荷電粒子の飛跡取得効率が 10% と悪かったため、これを改善し検出効率を 100% とした。このシステムの改善により電子飛跡の情報がより鮮明に取れるようになり、これにより角度分解能は 10 倍改善し、これらの改善により SMILE-I の 100 倍の感度が期待できる。

実験室にて RI ソース線源を用いて SMILE-II ETCC の性能評価を行った。図 4 は ETCC から天頂角  $60^\circ$  で距離 2 m 離れた場所に設置した線源  $^{137}\text{Cs}$  をイメージングした図である。この図はバックグラウンド除去を行った後の図である。天頂角  $0^\circ$  と  $60^\circ$  における検出効率を解析した結果、 $60^\circ$  における検出効率は  $0^\circ$  における値の 64.6% となった。このことにより ETCC の視野が  $3\text{sr}$  以上であることが示された。

得られたエネルギースペクトルを再構成することで有効面積を求めたのが図 5 である。黒実線が Geant4 のシミュレーションによる値であり、紫の点が実測値である。実測値とシミュレーション値の一致から 100% に近いイベントが取れていることが実証された。有効面積は  $\sim 1\text{cm}^2$  ( $< 300\text{keV}$ ), ARM は  $5.3^\circ$  (@662keV) であることが測定されている。これらの測定値は要求値を満たしている。SMILE-II の有効面積、ARM を性能評価による測定値として、バックグラウンドを SMILE-I 時に観測された値とすると予測される SMILE-II の感度は図 6 となる。以上より SMILE-II ETCC は要求される感度、SMILE-I の 100 倍に達したと考えられる。これは数時間の気球実験でかに星雲を  $5\sigma$  で観測できる感度である。

## 5 まとめ

SMILE-II 用 ETCC の性能評価により、有効面積は  $\sim 1\text{cm}^2$  ( $< 300\text{keV}$ ), ARM は  $5.3^\circ$  (@662keV) であることが示された。それにより、高度 40 km の数時間の気球実験 SMILE-II により、かに星雲や Cygnus X-1 を  $5\sigma$  観測できる性能をもつと推測できる。

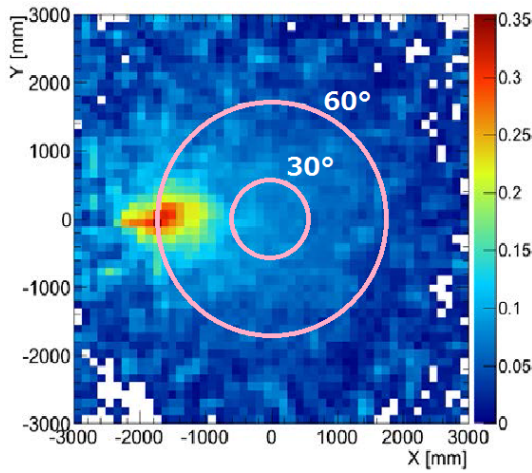


図 4:  $^{137}\text{Cs}$ 60° のイメージング

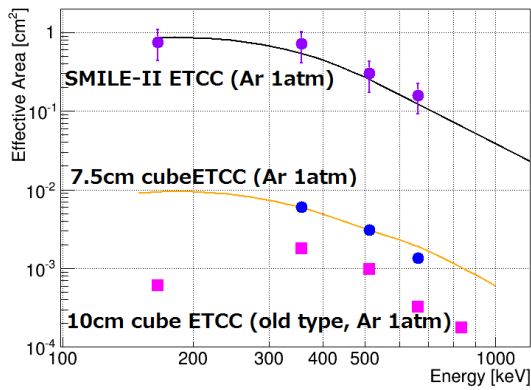


図 5: SMILE-II 用 ETCC の有効面積

さらに ETCC はガスの圧力・種類の変更し、シンチレータの厚みを 2,3 倍にすることで簡単に感度が 10 倍となることがシミュレーション ( 図 7 ) により示されている。SMILE-III の予測される感度は 図 6 と なる。この感度を有すると気球観測で銀河面探査やかに星雲の偏光観測が可能である。これにより気球でも新しい物理観測ができると期待される。

## Reference

- S.M.Matz et al. 1998. Nature Vol331  
 E.Churazov et al.(2014) arxiv:1405.3332v1  
 V.Schönfelder, et al.(1993) ApJS Vol86,657  
 Takada,A. et al.(2011), The Astrophysical Journal Vol733,13

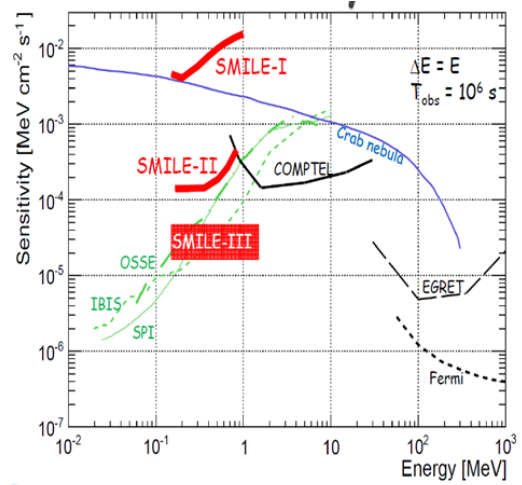


図 6: SMILE-II,III の予測感度

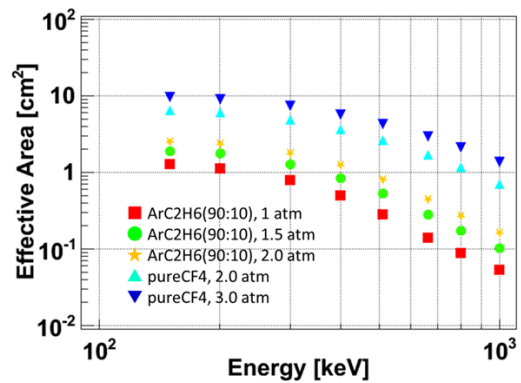


図 7: ガスの選択による有効面積のシミュレーション

Takada,A et al.(2011), Proceedings of 20th ESA Symposium