

TES型X線マイクロカロリメータの開発と評価

村松 はるか^{1a)}, 林 佑^{1a)}, 前久 景星^{1a)}, 山崎 典子^{1a)}, 満田 和久^{1a)}

Development and Evaluation of TES X-ray microcalorimeter

Haruka Muramatsu^{1a)}, Tasuku Hayashi^{1a)}, Keisei Maehisa^{1a)}, Noriko Yamasaki^{1a)}, Kazuhisa Mitsuda^{1a)}

^{1a)}宇宙科学研究所 満田研究室

ISAS/JAXA, 3-1-1 Chuo-ku, Yoshinodai, Sagami-hara, Kanagawa, 252-5210 Japan

[©]E-mail:muramatu@astro.isas.jaxa.jp

TES型X線マイクロカロリメータのエネルギー応答は高エネルギーになるにつれて非線形性を示すことが知られている。応答の非線形性はエネルギー較正時の誤差や分解能の劣化に繋がる。我々は、3-60 keVまでの帯域でTES型X線マイクロカロリメータの性能評価を行い、解析的に非線形性を改善する方法を提案する。

キーワード TES、X線、マイクロカロリメータ

1. はじめに

TES型X線マイクロカロリメータは超伝導-常伝導遷移端を高感度な温度計として使用し、入射する光子による温度上昇を測定している。高エネルギーの光子がTES型X線マイクロカロリメータに入射するとその遷移端を超え、パルス波形が飽和してしまう。遷移端を超えときのエネルギーを飽和エネルギーといい($E_{\text{sat}}=CT/\alpha$)で表される。本試験では、飽和エネルギー以上のX線を検出した際のTES型X線マイクロカロリメータ(TES)の波高値とエネルギーの関係や分解能について評価する。また、エネルギー応答関数を求めることで、パルスが飽和した場合のエネルギー較正方法について検討する。

2. 3-60 keVのTES型X線マイクロカロリメータの評価試験と解析方法

飽和エネルギーの設計値12 keVのTESを使用し、⁴¹Ca、⁵⁵Fe、²⁴¹Am線源を用いて3-60 keVまでの照射試験を行った。TESは、宇宙科学研究所のナノエレクトロニクスルームで製作しており、Au吸収体4 μm厚、熱容量は0.7 pJ/K、転移温度は150 mKである。

入射光子の温度上昇から入射光子のエネルギーやTESの分解能を求めるには様々な信号処理を行う。入射X線によるTESの温度上昇をTESの電流変化として測定し、全てのeventを記録している。この電流変化は時間の関数となっている。取得した全n個のパルスに対して、S/N比が最大になるようにデジタルフィルター処理を施す。得られたn個の値は波高値とほぼ

等しく、PHA(Pulse height analysis value)と呼ばれている。n個のPHAとカウントの関係をプロットすることで、PHAのスペクトルを得る。本試験ではPHAスペクトルのラインをK K α 、K K β 、Mn K α 、Mn K β 、Np L α 、Np L β 、Np L γ 、Am γ 26 keV、Am γ 60 keVの9本確認した。エネルギーセンターに対応するPHAの値を求めるために、各PHAラインをモデル関数でフィッティングを行う。微細構造/satelliteを含むラインについては、Lorentz+GaussianのVoigt関数を用いてフィッティングを行い、他のラインについては、Gaussianのみを用いてフィッティングを行った。9つのラインに対するPHAとエネルギーの関係をプロットすると図1となる。PHAとエネルギーの関係(ゲインカーブ)を見ると、6 keV(Mn K β)まではゲインカーブが線形であるが、6 keV以上で非線形になっていることが分かる。

ゲインカーブを良く表す解析的な関数を使用して、PHAからエネルギー相当の値に変換すること

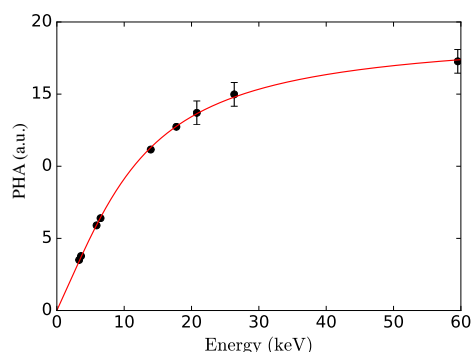


図1.PHAとエネルギーの関係、黒点がデータ点、赤線はChaucy分布関数

で、エネルギー分解能を求めることが出来る。我々は解析的な関数として多項式よりも、Cauchy分布関数が60 keVまでのゲインカーブを良く表していることを発見した。Cauchy分布関数とは

$$F(X; \alpha, \gamma, X_c, c) = \frac{a}{\pi} \tan^{-1} \left(\frac{X - X_c}{\gamma} \right) + c \quad (1)$$

である。F=PHA、X=Energyとして、F=0、X=0の条件を加え、ゲインカーブのフィッティングを行い、フィッティングで求めたパラメータを使用して、PHAの値をエネルギー相当(PI:Pulse Invariant)に変換した。PIのスペクトルに対して、PHA空間での解析と同じようにモデル関数を用いてフィッティングを行うことでPIスペクトルの中心値とエネルギー分解能を得た。各ラインのPIの値とエネルギーの差がCauchy関数を使用した際のエネルギーの決定精度となり、20 keVのエネルギーに対しては0.6 keVのエネルギー決定精度を得ることが出来た。6 keVのエネルギーに対しては5 eV、25 keVのエネルギーについては15 eV、60 keVのエネルギーに対しては100 eVの分解能を得た。

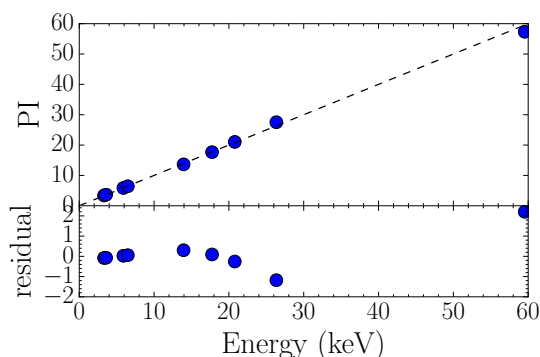


図2. 各ラインのエネルギー決定精度 (residual)

3. 考察

パルス信号処理として使用しているデジタルフィルター処理は、パルス波形が線形であることを仮定している。パルス波形が非線形となると、デジタルフィルター処理が最適に適用されずに分解能の劣化に繋がる。本試験では6 keVまでのエネルギー応答は線形であり、原理的な分解能4.2 eVと同等の分解能を得られている。6 keV以上ではエネルギー応答

の非線形性が見られ、分解能も25 keVでは、10 eV、60 keVでは95 eVもの劣化が見られた。非線形性が大きくなるに連れて、分解能の劣化も大きくなることを確認した。エネルギー決定精度を見ると、20 keVまでは1eV以内の決定精度でエネルギーを決定できることが分かった。

4. まとめ

飽和エネルギー以上のX線を照射しTES型Xマイクロカロリメータのエネルギー応答と分解能について調査した。高エネルギーのX線が入射するにつれて、エネルギー応答が非線形となるが60 keVまでは検出できることを確認した。60 keVまでのゲインカーブを良く表す関数として、Cauchy分布関数を導入し、20 keVでは1%のエネルギー決定精度を達成することができた。分解能は、高エネルギーになるに連れて劣化していることを確認した。3-25 keVのエネルギー帯域で15 eV以下の分解能であった。本試験に使用したTES型X線マイクロカロリメータは飽和エネルギーよりも10 keV高い20 keVまでのエネルギーでは10 eVの分解能と1%以下のエネルギー決定精度で使用できることが分かった。