

天文観測技術の最前線 (22)

X線カロリメータ (X-ray Calorimeter)

X線は、可視光の百分の一から数千分の一の短い波長をもつために、可視光などで用いられる、光の波動の性質を利用した分光のテクニックを使うのが大変困難です。回折格子や、結晶格子による分散型分光器は、波長の千分の一程度の高いスペクトル分解能 ( $\lambda/\Delta\lambda=1000$ ) が可能ですが、分光の過程でX線の大部分が失われてしまいます。従って、太陽や、ごく小数の明るいX線源の観測にしか使えませんでした。それに対して、ガス計数管や半導体検出器など、光の粒子としての性質を利用して、X線光子一つ一つのエネルギーを測る非分散型分光器は、観測の効率はいよりのですが、高いスペクトル分解能 (エネルギー分解能) を実現することはできませんでした (半導体検出器で、 $\lambda/\Delta\lambda \leq 100$ )。

X線カロリメータは、X線ボロメータとも呼ばれ、X線のエネルギーを、光子一個ずつ熱に変換して測定します。非分散型であるために高い観測効率を持ちながら、原理的には、分散型分光器に劣らない、高いエネルギー分解能をもつ究極のX線分光器です。1997年頃に打ち上げ予定の米国の巨大X線天文台衛星 AXAF には、X線カロリメータが初めて搭載されますが、その搭載モデルを担当する NASA ゴダード宇宙飛行センターとウィスコンシン大学のグループを始め、現在、世界各国で開発が進められています。ウィスコンシン大学では、5.9 keV のX線に対して分解能 7.3 eV ( $\lambda/\Delta\lambda \approx 800$ ) をもつX線カロリメータを、既に実験室で実現しています。

X線カロリメータの原理は図1に示すように、赤外線天文観測用ボロメータとよく似ています。ある熱容量  $C$  をもつX線吸収体が、温度一定の熱浴に、熱伝導性が適度に悪い物質でつながっています。エネルギー  $h\nu$  のX線光子が1個吸収されて、そのエネルギーがすべて熱に変わると、吸収体の温度は  $\Delta T = \frac{h\nu}{C}$  だけ上昇します (図2)。この上昇温度を精度よく測るためには、吸収体の熱容量を極端に小さくする必要があります。固体の比熱は格子振動に起因し、絶対零度に近いところではデバイの比熱式に従い、絶対温度の3乗に比例して0に近づきます。従って、熱容量を小さくするために素子を0.1K ぐらいの極低温に冷却します。

半導体検出器では、X線の電離作用によって検出器に

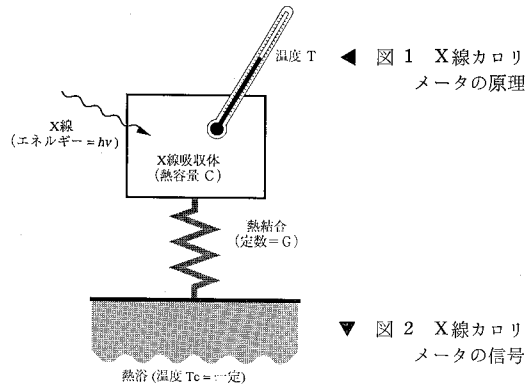
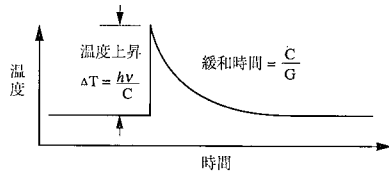


図2 X線カロリメータの信号



生じた電子-正孔対の数からX線のエネルギーを測るので、この数の統計的なゆらぎによってエネルギー分解能の理論的限界が決まります。それに対して、カロリメータではX線のエネルギーは格子振動を量子化したものであるフォノンに分配されます。分解能の理論的限界は、むしろ、熱浴と吸収体の間を行き来するフォノンのゆらぎから定まり、 $\Delta E = \xi \sqrt{k_B T^2 C}$  で表されます。ξは温度計や吸収体の性能で決まる1~9 ぐらいの定数、 $k_B$  はボルツマン定数、 $T$  と  $C$  は熱浴の温度と熱容量です。例えば、0.5 mm 角、25 μm 厚のシリコンを0.1K で使用すれば、熱容量は  $4 \times 10^{-15} \text{ JK}^{-1}$  です。このときの分解能の限界は  $\Delta E = 0.2 \text{ eV}$  と、半導体検出器 ( $\Delta E \approx 50 \text{ eV}$ ) にくらべて桁違いに小さくなります。実際には、能率のよいX線吸収物質、高感度の温度計、および、低雑音の信号読みだし回路という技術を組み合わせると、ようやくX線カロリメータができあがります。

さらに、天文観測に使うためには、0.1K の極低温冷却器を人工衛星に搭載しなくてはなりません。また、X線は通しても光や赤外線を全く通さない入射窓という困難な技術的課題があります。しかし、これらの課題を克服できれば、X線領域での輝線や吸収線の分光に威力を発揮し、超新星残骸や銀河団の高温プラズマの診断や、活動銀河核の巨大ブラックホール周辺の電離状態や運動の観測の精度が飛躍的に向上するでしょう。

河合誠之 (理研)

平成3年9月20日	発行人	〒181 東京都三鷹市国立天文台内	社団法人 日本天文学会
印刷発行	印刷所	〒162 東京都新宿区早稲田鶴巻町 565-12	啓文堂 松本印刷
定価 550 円	発行所	〒181 東京都三鷹市国立天文台内	社団法人 日本天文学会
(本体 534 円)	電話	(0422) 31-1359	振替口座 東京 6-13595