

「極限環境状態における現象」
平成7年度採択研究代表者

常深 博

(大阪大学大学院理学研究科 教授)

「画素の小さいX線検出用CCDの開発研究」

1. 研究実施の概要

X線はその波長が短いために、光電吸収が起こると一つのX線光子が一度に多数の光電子を発生する。発生した光電子数はX線のエネルギー（波長）に比例する。こうして、CCDによりX線検出を行うと、X線の強度とそのカラー（波長）とが同時に測定できる。ビデオやデジカメなどに使われている可視光を検出するためのCCD素子は小さな画素が実現しているが、これは、可視光検出に必要な空乏層厚さが薄くても良いためである。X線を精度良くかつ効率良く検出するためには、可視光に比べて空乏層を可視光用に比べて桁で厚くし、読み出し雑音レベルを電子に換算して数個に抑える必要がある。これにより、効率の良いカラー X線検出器を目指す。

従来、X線を直接CCDで検出すると、その透過力のために、また生じる一次電子が多いために、位置検出能力が上がらないと言われていた。しかし、我々の実証実験により、X線光子の入射位置に付いては、その生じる電子雲の中心位置を正確に決定できることがわかった。これは、X線検出器の位置検出能力がサブ μm になる見通しがついた。今後、実時間でサブ μm レベルの画像取得をするには、より高速のデータ処理能力が必要になるが、現状のCPU処理能力の高速化を見ると、近い将来十分に実現可能と思える。

2. 研究実施内容

グループA

CCDを使った新しい結晶分光器の開発

従来まで、結晶分光器は波長分解能が高いものの、有効波長範囲が狭いと言う問題点があった。結晶を無限長とみなした場合、ブラッグ反射の起こる条件が極めて狭く、その結果、有効波長範囲が狭くなってしまふ。そこで、極めて薄い結晶を使い、有効波長範囲を広げる工夫を考案した。薄い結晶表面とブラッグ反射面とは異なっているように結晶を製作する。これを使い、実際にどの程度の有効性があるかを調べた。使用したX線は4.5keVのチタンの特性X線である。CCDの位置分解能を生かして、結晶の角度を一定にしたまま、像を調べた結果、チタンの K_{1} と K_{2} とを分離することが出来た。有効波長範囲は約20eVになっており、

従来までの結晶分光器に比べて一桁近く広がっていることを確認した。現状では、結晶表面の平面性、その厚さなどが最適になっていない。結晶分光器の有効波長範囲は向上しているが、エネルギー毎の検出効率が低い。これらを更に改善するための研究を進める。

ヨーロッパのX線天文衛星XMM搭載のCCDの校正実験（続）

昨年、ヨーロッパのX線天文衛星ニュートン（XMM）搭載のMOSCCDを使ってメッシュ実験を実行した。この時は、既存のメッシュを使ったために、メッシュ実験の実力を発揮したものの、素子内部での位置分解能は $5\mu\text{m}$ 程度にとどまった。素子の大きさは $40\mu\text{m}$ あるので、各ゲート間の差を十分に測定できた。今年度は素子に適合したメッシュを用意し、ビームにも工夫を凝らして再度測定した。メッシュピッチは $120\mu\text{m}$ 、微小穴の大きさは $1.5\mu\text{m}$ である。これにより、画素面上での位置分解能が $1\sim 2\mu\text{m}$ を実現した。これにより、X線で発生した電子雲の振る舞いを測定できた。特に、縦方向にスプリットするイベントの発生場所分布を通して、薄くしたゲート下の電場構造がはっきりした。印加電圧によっても変動することが判った。また、位置分解能が向上したことにより、ゲートの重なり構造もはっきりした。

グループB

X線CCDの高エネルギー側のレスポンス

天体からのX線を検出器で受け取った時、我々は元のスペクトルに検出器特有の変換を受けた情報を得る。得られたデータから元の情報に還元するためには、この変換を正確に知る必要がある。この変換を表す関数が応答関数であり、その精度は観測結果の精度を決める重要な要素である。そこで、CCDの高エネルギー側のレスポンスを詳しく調べる目的でマサチューセッツ工科大学で開発されたCCID17の地上較正試験を行ない、エネルギースペクトルの応答関数を作成した。その結果、単色X線に対するXISのパルス波高値分布は、エネルギーに対応するチャンネル付近に現れる単純なガウス関数だけではなく、低エネルギーに伸びるtailやいくつかのライン構造を持っていることがわかった。そこで、CCD内部で起こっている物理過程の違いを元にして、メインピーク、サブピーク、三角成分、コンスタント成分、Siエスケープ、Siラインという6つの成分に分離することに成功した。このような詳細なモデル化はこれまでに例のない試みである。次に、各成分のエネルギー依存性を調べるため、内部の過程をモデル化した簡単なシミュレーションを行ない、試験データを良く再現する結果を得た。このシミュレーションを用いれば、CCDの基本的なパラメータ（空乏層厚など）を与えるだけで応答関数が計算でき、個性が違う同種のCCDにも対応が可能である。以上の解析により、これまでにない精度の応答関数が構築された。

CCD-CRESTの性能評価と性能向上に関する研究

CCD-CRESTの性能評価とその向上について行った。まず、このCCD 検出器の性能を表す各種の指標（エネルギー分解能、空乏層厚、量子効率、暗電流、CTI）を実験的に決定した。次に性能を向上するための、以下に列挙する様々な実験を行った。1) 実効的に空乏層を厚くして検出効率を高める目的で、X線をCCD面の斜めから入射する実験を行った。入射角を深くすることで、実効空乏層厚を約3倍にすることに成功した。2) CCDの電極電圧として、露光中は空乏層を厚くするために高い電圧が、転送にはノイズを抑えるために低い電圧が望ましい。そこでクロックに同期するスイッチング回路を導入して露光中の縦転送電圧と転送中の縦転送電圧を独立に変化させた。これにより、エネルギー分解能を保ったまま、空乏層を約15%厚くすることに成功した。3) CCDからシグナルを読み出す回数を増やして、高い周波数のノイズ成分をおとすことができる（多重相関サンプリング方式）。これは、エネルギー分解能の改善につながる。我々はサンプリング回数Nを増やすことにより、エネルギー分解能を約10%向上することに成功した。

グループC

CCDをX線検出器として使うときには、低エネルギー側の検出率向上、高エネルギー側の検出率向上が課題である。低エネルギー側の検出率向上はゲートを薄くする方式ではなく、裏面照射方式を目指している。これは、素子全面を空乏化することにつながり、従って高エネルギー側の検出効率を向上することにもつながる。全面空乏化するには、現状のウェハの厚さ（400 μm 弱）から考えて、かなり薄くする必要がある。機械的に研磨する方式と、化学的にエッチングする方式とがあり、両方を追求している。この基礎研究以外に、1インチ四角の検出面積を持ったフレーム転送型素子のイールド向上を目指す研究を行っている。国際宇宙ステーションを目指すCCD素子の研究開発も継続している。

3. 主な研究成果の発表（論文発表）

H. Tsunemi, J. Hiraga, K. Yoshita, H. Katayama, S. Kitamoto, K. Hayashida, E. Miyata and M. Ohtani Comparison of methods to measure the primary charge cloud shape produced by an X-ray photon inside the CCD Nucl. Instrum. and Meth. (1999)

H. Tsunemi, J. Hiraga, K. Mori, K. Yoshita and E. Miyata Diagnostics of the CCD using the mesh experiment Nucl. Instrum. and Meth.(1999)

H. Tsunemi, E. Miyata K. Kinugasa and J. Hiraga Thermal emission from SNRs and plasma diagnostics Space Sci. Rev.(1999)

B. Paul, S. Kitamoto, F. Makino Change in the long-Term Intensity Variations Astrophysical Journal(2000.1.1)

S. Kitamoto, S. Tanaka, T. Suzuki, K. Torii, M. F. Corcam, W. Wildm Six Farly Type star Observal by ASCA Adrames in Space Research(2000)

S. Kitamoto, W. Eguchi, S. Miyamoto, H.Tsunemi, J.C. Licy, W. A. Whector, B. Paul Ginga All Sky Monitor Observation of Cys X-1 Astrophysical Journal(2000.3.15)