

「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」

1. 研究実施の概要

CCD により X 線検出を精度良くかつ効率良く行なうために、可視光に比べて空乏層を $25\mu\text{m}$ 程度に厚くし、読み出し雑音レベルを電子に換算して数個に抑えるような読み出しを行なった。X 線検出器の校正に使用される $^{55}\text{Fe}(5.9\text{ keV})$ の X 線に対して、エネルギー半値幅 140eV 程度を達成した。X 線検出を CCD で行なう利点は、良いエネルギー分解能とともに、優れた位置分解能を発揮することにある。X 線は CCD に入ると多数(5.9 keV の X 線なら 1600 個余り)の電子が作られる。つまり、可視光の場合には、可視光の光子一個で電子はせいぜい 1~2 個しか作られないが、X 線の場合には、多数の電子が作られ、かつある大きさに広がってしまう。我々は、その具体的な形状をメッシュ実験により実測した。これにより、一個の X 線が作る電子が隣り合う画素にどのように広がるかを精密に調べることが出来た。この結果を使うと、X 線の入射位置を画素の大きさよりも遥かに精度良く決定できる。つまり、電子雲形状が判っている場合、信号がいくつかの画素にどのように分かれるかを調べれば、X 線の入射位置の画素内部での位置が判る。こうして、少なくとも $1\mu\text{m}$ 程度の精度で入射場所を決定することが出来るようになった。今後、検出効率を更に向上させること、信号処理を効率良く進めること、読みだし速度を速めることなどを進める。

2. 研究実施内容

(1) 大阪大学グループ

(a) X 線によって作られる電子雲形状の測定

メッシュ実験により CCD の画素内部のどこに X 線が入ったら、どのような信号が作られるかを精密に測定することが可能になった。これは、微小穴の多数開いた金属メッシュを CCD 素子直前に配置し、微小穴により、X 線入射位置を制限する手法である。この手法は、我々の発案であるが、既に、アメリカやイギリスで応用されている。外国では、比較的低エネルギー X 線を使用し、画素の入射場所によるレスポンスを詳細に調べている。我々は、従来まで、銅製のメッシュで、穴の大

大きさが $3.4\mu\text{m}$ であったものを、金製のメッシュに替え、穴の大きさを $1.5\mu\text{m}$ 程度に微細化したものを使用した。これにより、有効測定エネルギーが 3keV から 6keV へと広がると同時に、測定精度が向上した。この測定の結果を使うと、いろいろなエネルギーの X 線がどのような形状の電子雲を CCD 内部で作るかを実測できるようになった。その結果、電子雲は、ガウス分布で良く合うこと、その大きさは、CCD 内部で X 線が吸収されてから、空乏層中を伝播する時の拡散によっておおむね説明できることが判った。つまり、電子雲形状の中心は、確かに、初めての X 線が入射した場所に対応することになる。また、X 線が CCD に入射した時、信号が周辺の画素にどのように分配されるかも、実験的にはっきりさせることが出来た。今後、この技術を発展させ、更に高エネルギー領域へと応用させたい。それにより、X 線で最初に生じる光電子が走る方向に電子雲が少し伸びた形になることを実験的に確認したい。

(b) CCD の X 線に対する入射場所決定精度の向上

X 線によって作られる電子雲形状を知っていると、CCD 内の入射場所により、信号がどのように分配されるかを定めることが出来る。通常の X 線検出においては、どのように信号がいくつかの画素に分配されるかを測れるので、これから、X 線が入射した場所を精密に決定できる。従来までは、X 線の入射位置として、信号電荷の一番たくさん集まった画素に入ったと考えるのがせいぜいであった。こうなると、位置決定精度は画素の大きさで決まる。これに対して、広がった電荷の重心を入射位置と見なす手法がある。これは、ある程度は、入射位置決定精度を向上させることは可能であるが、どの程度向上したかを測定する手法がなかったため、実用的とは言えなかった。我々は、電子雲形状を測定し、これを使って、入射位置を精密に決定する手法を確立した。メッシュ実験は、実際の X 線入射位置を精度良く定めることが出来るので、精密な校正も行なえた。これによれば、重心を使用する方法は、入射 X 線エネルギーにより精度が変わること、決定精度には系統的な誤差の付くことが判った。それに対して、電子雲形状を知った上での位置決定には、系統的な誤差が付かないこと、エネルギー依存性のないことを実験的に確かめた。現在までの位置決定精度は、 $1\mu\text{m}$ 程度である。この精度を上げるには、メッシュの微小穴を小さくして、校正精度を上げる必要がある。

(c) ヨーロッパの X 線天文衛星 XMM 搭載の CCD の校正実験

従来まで、CCD の画素内での検出効率変化を測定するには、極めて細い X 線ビームを一本使い、照射場所を順次変えて行く方法が取られた。これでは測定効率が悪いのみならず、照射場所の決定精度などにも問題が生じる。我々のメッシュ実験はこれらの問題点を一掃し、かつ測定精度をミクロン単位にまで精密化した。この応用として、ヨーロッパの X 線天文衛星 XMM に搭載される CCD 素子の校正を

行なった。素子は、EEV 社製の $40\mu\text{m}$ 四角の画素であり、我々が通常使用している画素の大きさ ($8\mu\text{m}$ 、 $12\mu\text{m}$ 、 $24\mu\text{m}$) とは異なるので、我々の使用しているメッシュは使えない。そこで、新たにメッシュを作ることなく、データ解析法を改良して対応した。この結果、ほとんど、任意のメッシュ形状と CCD 画素の大きさの組合せで実験可能になった。こうして、EEV 社製のゲート構造を薄くした素子のレスポンスを精密に調べた。この素子は、他社で製作されている CCD とは異なった構造をしているために、画素の境界が直線になっていないこと、薄くしたゲートがどのくらい他のゲートに比べて薄くなっているかなどを調べた。

(2) 京都大学グループ

高エネルギー X 線に対する検出感度改善

10keV を超えるような高いエネルギーの X 線になると、X 線の吸収は空乏層で起こる確率が下がり、その下の中性領域で起こることが多い。空乏層で吸収された場合には、発生する全ての電子が電極に集められるので、その信号の大きさ(どのくらいの数の画素に広がっているか)を調べれば、入射 X 線エネルギーを知ることが出来る。一方、中性領域で吸収された場合には、そこでの拡散により電子雲が大きく広がるとともに、一部の電子は失われてしまう。実験の結果、全ての電子が集められている信号に付いての広がり、空乏層中での拡散によるものとほぼ一致することを確認した。更に、信号の一部が失われている場合に付いては、信号の広がりが大きくなるにつれ、より多くの電荷量が失われていることを確認した。両者の関係を使うと、中性領域で吸収された X 線で、一部の電荷の失われた信号に付いても、入射 X 線のエネルギーを調べることが可能になった。この手法により、等価的に 30% 近く検出効率を改善することが可能になった。ちなみに、X 線以外の荷電粒子が入った場合にも、広がった電子雲を作るが、両者には形状に大きな違いがあり、容易に区別することが可能あることも確かめた。

(3) 浜松ホトニクス社グループ

(a) X 線検出用の素子の開発

CCD の特徴の一つである、良いエネルギー分解能を達成するための読みだし部分を改善し、低温動作において、5.9 keV の X 線に対して、140eV 程度の半値幅を常時実現することが出来るようになった。また、検出効率を改善するために空乏層の厚さとして、 $25\mu\text{m}$ 程度を実現した。又、動作条件を種々検討し、雑音レベルが大きくなる範囲で、空乏層を厚くする手法を確立している。このような基礎的な研究開発とともに、実用を目指した、有効面積の大きな素子や、多数の素子をほとんど隙間なく並べられるバッタブル素子の開発を行なった。X 線検出には、多くの場合、フレーム転送型素子が必要である。現在製作できているのは、受光部分が 1 インチ四角(画素の大きさは $24\mu\text{m}$ 四角)のフレーム転送型素子である。こ

れまでに製作して来た素子の応用として、国際宇宙ステーション搭載用素子を製作している。これは、全天 X 線監視カメラ MAXI に使用されるもので、その使用目的のために、フルフレーム転送型素子として使うことになっている。そこで、CCD のエネルギー分解能を有効に利用するために、蓄積部分のない素子を作った。これは、素子とそれを冷却するペルチェ素子とを一体にして製作したもので、環境温度 -20°C のときに、動作温度 -60°C が実現するようになっている。MAXI ではこの素子を 16 個並べたカメラを 2 台使予定である。

3. 主な研究成果の発表 (論文発表)

- K. Torii, K. Kinugasa, T. Toneri, T. Asanuma, H. Tsunemi, T. Dotani, K. Mitsuda E. V. Gotthelf and R. Petre
Discovery of a 69 Millisecond X-ray pulsar: a compact source in the vicinity of the Supernova Remnant RCW103
1998 *Astrophysical Journal* 494L207-L210
- K. Kinugasa, K. Torii, Y. Hashimoto, H. Tsunemi, K. Hayashida, S. Kitamoto, Y. Kamata, T. Dotani, F. Nagase, M. Sugizaki, Y. Ueda, N. Kawai, K. Makishima and S. Yamauchi
Discovery of the faint X-ray pulsar AXJ1820.5-1434 with ASCA
1998 *Astrophysical Journal* 495 435-439
- K. Kinugasa, K. Torii, H. Tsunemi, S. Yamauchi, K. Koyama and T. Dotani
Discovery of X-ray emission from a radio Supernova Remnant G352.7-0.1
1998 *Pub. Astr. Soc. Japan* 50 249-256
- E. Miyata, H. Tsunemi, T. Kohmura, S. Suzuki and S. Kumagai
Metal-rich plasma at the center portion of the Cygnus Loop
1998 *Pub. Astr. Soc. Japan* 50 257-270
- M. Pivovarov, S. Jones, M. Bautz, S. Kissel, G. Prigozhin, H. Tsunemi and E. Miyata
Measurement of the Subpixel Structure of AXAF CCD's
1998 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 45 164-175
- H. Tsunemi, J. Hiraga, K. Yoshita and S. Kitamoto
Where are the X-ray event grades formed inside the pixel of the charge coupled device ?
1998 *Jpn. J. Appl. Phys.* 37 2734-2739
- K. Yoshita, H. Tsunemi, K. C. Gendreau, G. Pennington and M. W. Bautz
Direct Measurement of the Subpixel Level X-ray Detection Efficiency of

- the CCD on Board the ASCA Satellite
1998 IEEE Trans. Nucl. Sci. 45 915-920
- J. Hiraga, H. Tsunemi, K. Yoshita, E. Miyata and M. Ohtani
How big are charge clouds inside the charge-coupled device produced by
X-ray photons ?
1998 Jpn. J. Appl. Phys. 37 4627-4632
- K. Torii, K. Kinugasa, K. Katayama, H. Tsunemi and S. Yamauchi
Discovery of a 7 second X-ray pulsar AXJ1845.0-0300
1998 Astrophysical Journal 503 843-847
- E. Miyata, H. Tsunemi, K. Torii, K. Hashimoto, T. Tsuru,
K. Koyama, K. Ayani, K. Ohta and M. Yoshida
Discovery of a compact X-ray source inside the Cygnus Loop
1998 Pub. Astr. Soc. Japan 50 475-482
- K. Hayashida, S. Kitamoto, E. Miyata, H. Tsunemi, K. Hashimoto,
K. Katayama, T. Kohmura, R. Asakura, K. Yoshita, H. Katayama, M. Shouho,
○K. Kinugasa, K. Torii, Y. Hashimoto, H. Tsunemi, K. Hayashida,
S. Kitamoto, S. Kamata, T. Dotani, F. Nagase, M. Sugizaki, Y. Ueda,
N. Kawai, K. Makishima, S. Yamauchi
Discovery of the Faint X-Ray Pulsar AX J1820.5-1434 with ASCA
Astrophysical Journal, 495, (1998) 435-
- K. Torii, K. Kinugasa, K. Katayama, T. Kohmura, H. Tsunemi, M. Sakano,
M. Nishiuchi, K. Koyama, S. Yamauchi
Discovery of a 220 Second X-Ray Pulsar, AX J1749.2-2725
Astrophysical Journal, 508, (1998) 854-858.
- M. Nishiuchi, K. Koyama, T.G. Tsuru, H. Awaki, H. Tomida, K. Yamaguchi,
H. Tsunemi
Response function of an x-ray CCD camera on board the Astro-E satellite
Proc. SPIE, 3445 (1998) 268-277.
- K. Torii, K. Kinugasa, K. Katayama, H. Tsunemi, and S. Yamauchi
Discovery of a 7 Second X-Ray Pulsar, AX J1845.0-0300
Astrophysical Journal, 503, (1998) 843-847
- K. Kinugasa, K. Torii, H. Tsunemi, S. Yamauchi, K. Koyama, and T. Dotani
Discovery of X-Ray Emission from a Radio Supernova Remnant G352.7-0.1
Publ. of the Astronomical Society of Japan, 50, (1998) 249-255.
- Emi Miyata, Hiroshi Tsunemi, Ken'ichi Torii, Kiyoshi

Hashimotodani, Takeshi Tsuru, Katsuji Koyama, Kazuya Ayani, Kouji Ohta,
Michitoshi Yoshida

Discovery of a compact X-ray source inside the Cygnus Loop

Publ. of the Astronomical Society of Japan, 50, (1998) 257-269.

○H. Tsunemi, J. Hiraga, K. Yoshita and K. Hayashida

Measurement of the charge cloud shape produced by an X-ray photon
inside the CCD using a mesh experiment

1999 Nucl. Instrum. and Meth. A421 90-98

○K. Hayashida, N. Miura, H. Tsunemi, K. Torii, H. Murakami, Y. Ohno and
K. Tamura

X-ray polarimetry with a conventional gas proportional counter through
rise-time analysis

1999 Nucl. Instrum. and Meth. A421 241-248

○K. Yoshita, H. Tsunemi, E. Miyata, K. C. Gendreau, and M. W. Bautz

Improvement of the Position Resolution of the CCD for X-Ray Use

1999 IEEE Trans. Nucl. Sci. 46 100-107

○H. Tsunemi, J. Hiraga, K. Yoshita and E. Miyata

Does an X-ray photon really generate a charge cloud in an asymmetric
shape ?

1999 Jpn. J. Appl. Phys. 38, 2953-2957

○K. Kinugasa and H. Tsunemi

ASCA Observation of Kepler's Supernova Remnant

1999 Pub. Astr. Soc. Japan 51, 239-252

○H. Tsunemi, J. Hiraga, K. Yoshita, K. Hayashida

Measurement of the charge cloud shape produced by an X-ray
photon inside the CCD using a mesh experiment

NIM A, 421, (1999), 90-98.

○K. Hayashida, N. Miura, H. Tsunemi, K. Torii, H. Murakami,
Y. Ohno, K. Tamura

X-ray polarimetry with a conventional gas proportional counter
through rise-time analysis

NIM A, 421, (1999), 241-248.

他 5 件