

(論文内容の要旨)

微細加工を用いたピクセル型ガス増幅検出器 μ -PIC (Micro Pixel Gas Chamber) を用いて二次元計数型検出器を開発、X 線小角散乱および熱中性子イメージングへ応用し、大強度量子ビームでの広ダイナミックレンジ高精度強度分布測定の可能性を評価した。この論文は 6 章からなる。

1. Introduction

X 線小角散乱 (SAXS) は、1-100 nm スケールの物質の構造を明らかにする強力な手法であり、物性・生命から産業利用まで応用範囲は広い。特に近年、第三世代放射光 (SPring-8 等) で得られる強力な X 線を照射し高精度測定が要求される。従来、散乱 X 線は積分型検出器 (イメージングプレート・CCD) が用いられるが、これらの検出器の性能によって、構造解析の精度が制限されている。時間に比例したノイズや読み出しノイズにより、弱い散乱が埋もれ、X 線強度の精度が悪くなる。これらの問題を解決するものとして、X 線光子を数える計数型検出器 μ -PIC を開発した。計数型検出器は原理的にこのような雑音が無く、構造解析の精度向上が期待される。この章では、他の計数型検出器の紹介・比較も述べている。

2. X-ray area detector based on μ -PIC

μ -PIC は、微細な電極が二次元的に 400 μ m 間隔で製作された 2 次元ガス検出器である。検出部面積は 10 cm $\times$ 10 cm、256 $\times$ 256 ピクセルあるが、ストリップ読み出しをすることで、読み出しチャンネル数を 512 チャンネルに抑えている。 μ -PIC の利得、一様性、応答の線形性など基本的な性能、信号処理システムについて述べている。また計数測定の特徴である結晶の化学変化の時分割測定の実例を示した。

3. Performance characteristics of the μ -PIC detector for high-count rate environments

μ -PIC の座標演算を行うエンコーダの改良を行った。エンコーダは、入射 X 線の位置と到来時間を 100MHz で高速処理出来るが、大強度 X 線照射下での正しい動作が、X 線小角散乱のような高精度測定に不可欠である。エンコーダが偶発事象を防ぎ、大強度 X 線下で正しく位置情報が得られるよう改良し、SPring-8 BL45XU (理研構造生物学ビームライン) にて性能評価を行い、溶液散乱において 6 桁以上のダイナミックレンジを得た。これは、二次元 X 線検出器では最高性能の値であり、他の検出器より 1 桁以上高い。以上から μ -PIC は強い散乱と弱い散乱の同時計測を可能にし、今後の構造解析の精度向上が期待される。また、 μ -PIC の各チャンネルからの信号の電荷情報を同じエンコーダから取得する手法を開発、信号分布を使い位置分解能を 100 μ m 以下まで改善、他の装置と遜色無くなった。

4. Application to Compton camera

μ -PIC およびエンコーダは電子飛跡検出型コンプトン・ガンマ線カメラにも使用されている。改良されたエンコーダをこのカメラにも応用し性能評価を行った。

5. Application to small-angle neutron scattering

μ -PIC は、二次元熱中性子時分割検出器にも応用できる。X 線小角散乱に用いた装置を JRR-3 NOP ビームラインで動作し、熱中性子に対するイメージング能力を実証した。位置分解能は 1 mm であった。既存の検出器の位置分解能が 2-3 mm である。J-PARC に不可欠な 1 マイクロ秒以下の時間分解能を有するため今後の発展が期待される。

6. Summary

X 線小角散乱については、6 桁以上のダイナミックレンジを確認し、また電荷情報から位置分解能が向上することを示した。また熱中性子イメージングに成功し、1 mm という高い位置分解能を得た。

(論文審査の結果の要旨)

放射光利用による大強度 X 線ビームを用いた物性・生命分野の構造解析は多くの成果をもたらしてきた。近年、従来の結晶構造解析ばかりでなく結晶構造を取らないアモルファス物質、ソフトマター、溶液などの構造研究に X 線による小角散乱 (SAXS) が注目され、放射光利用の重要な測定手段となってきた。この論文は、SAXS に不可欠な 10^6 以上の広ダイナミックレンジ強度分布測定を可能にする計数形画像装置の開発について述べている。SAXS では広いスケールでの構造解析または希薄な溶液での構造解析を行うため 10^6 以上のダイナミックレンジでの散乱強度分布測定が要望されている。このような広いダイナミックレンジでの測定には Spring8 のような大強度ビームが必要であり、そのような過酷な環境下で正確に動作可能な高精度画像検出器が必要であった。特にこのような要請を満たす画像検出器として X 線の強度のみを積分して画像化する CCD カメラやイメージングプレートなどの検出器が使用されているが、上記のような広いダイナミックレンジを得ることは、暗電流などの雑音と微弱な散乱成分との分離が困難な状況であった。一方、雑音が非常に少ない従来の計数型装置はこのような大強度ビーム化での使用は不可能であった。

しかし近年、微細加工によるガス増幅検出装置が開発され、高計数率で $100\ \mu\text{m}$ 程度の位置分解能を持つ 10cm 角以上の大面積 X 線画像検出器の開発が可能となってきた。京大物理第 2 宇宙線グループが独自にそのような検出器の一つとして Micro Pixel Gas Chamber (μPIC) を開発、さらにそれを利用し放射光施設の大強度 X 線ビーム下で動作可能な計数形高精度イメージング検出器の開発を Spring8 と共同で行ってきた。

この論文では、まず今までに開発された座標演算装置 (エンコーダ) が 1MHz 以上の高計数率で偶発事象を発生する誤作動を発見、その原因、改良を行い、上記のような広いダイナミックレンジによる強度分布を可能にした。さらにエンコーダに改良を加え、各チャンネルの信号電荷までの測定を可能として、電荷分布測定から位置分解能を数割改善し $100\ \mu\text{m}$ 以下と他の高精度画像検出器と遜色なくした。また真空容器窓の改良により窓による X 線吸収の減少など多くの改良を行い、この μPIC 検出器を大強度ビーム環境下で利用できる計数形イメージング装置として完成させた。この技術は J-PARC のようなパルス中性子ビームには不可欠な画像装置であり、申請者はその可能性をも示した。このように計数形イメージング装置という新しい実験手段を放射光および中性子科学の分野に提供した。

このように本論文は博士 (理学) の学位論文として価値のあるものと認める。また論文内容および関連した事項についての試問を行った結果、合格と認めた。