

氏名 木村洋昭

学位(専攻分野) 博士(理学)

学位記番号 総研大甲第42号

学位授与の日付 平成5年3月23日

学位授与の要件 数物科学研究科 放射光科学専攻

学位規則第4条第1項該当

学位論文題目 Polarization measurement of synchrotron  
radiation with use of multilayers in the soft  
x-ray region

論文審査委員 主査 教授 安藤正海

教授 宮原恒豊

教授 松下正

教授 北村英男

助教授 雨宮慶幸

助教授 設楽哲夫

(高エネルギー物理学研究所)

助教授 山本正樹(東北大学)

## 論文内容の要旨

近年、放射光が持つ偏光の性質を利用した研究が盛んに行われている。それらの実験において結果を定量的に解析するには、放射光の偏光状態を知る事が大変重要である。光の偏光状態をすべて決定するには移相子と検光子を組み合わせた偏光測定が不可欠であるが、軟X線領域ではこのような偏光素子がこれまで無かったので、他の波長域に比べて偏光解析の分野では立ち遅れてきた。ところが、多層膜反射鏡がこの波長域での偏光素子として有望であることがわかってきたので、これを使って偏光測定を行うために以下の事を目標に研究を行った。

- 1) 反射型の偏光素子を使った超高真空仕様のビームラインエリプソメータの開発
  - 2) 完全検光子や4分の1波長板が無い場合での偏光測定法の開発
  - 3) 偏向電磁石や、直線・楕円アンジュレーターからの放射光の軟X線領域での偏光状態の測定と研究
- ### 1. ビームラインエリプソメータの開発

2枚の反射型偏光素子を使ってそれらの方位角を別々に変化させながらトータルの反射強度を測定する事ができる装置を開発した。2枚の偏光素子は、1枚は移相子として、もう1枚は検光子として使う。以下にその特徴を述べる。

- (1) 軟X線ビームラインに直接接続できるように超高真空仕様
- (2) 2つの素子の方位角を独立に変える事が可能( $0^{\circ} \sim 360^{\circ}$ 、最小ステップ $0.036^{\circ}$ )
- (3) 2つの素子の入射角を独立に変える事が可能( $90^{\circ} \sim 20^{\circ}$ 、最小ステップ $0.05^{\circ}$ )
- (4) 架台にジンバルサポートを採用し、交換式ピンホールを使用する事によりオンラインで測定光を使って容易に光軸調整ができる。また、この機構を利用してビームプロファイル中の偏光状態の場所依存性を調べる事ができる。
- (5) 偏光素子を光路から外して光を後流にスルーする事ができ、他の実験装置と併用して測定を行う事ができる。
- (6) 光の偏光測定の他に、軟X線エリプソメータとして反射面の光学的実験を行う事ができる。

この装置を立ち上げて実際に使用し、精度などで測定可能なものに関して調べた。

- (a) 到達真空度は、モーター回転時に $5 \times 10^{-8}$  torrである。
- (b) 移相子方位角の精度は $0.06^{\circ}$ 、検光子のそれは $0.08^{\circ}$ 以下、原点精度は共に $0.02^{\circ}$ である。
- (c) 移相子入射角の原点精度は $0.05^{\circ}$ 、他は測定できなかった。
- (d) 上記(4)、(5)の機構は設計どおりに機能している。

### 2. 偏光測定法

ポラリメトリ：光の位相情報を得られない測定を意味する。具体的には、測定光を検光子で反射させ、その反射光強度を検光子の方位角を変えながら測定して得られる余弦自乗型のシグナルを得る。検光子の偏光能が既知ならば、この

データから、偏光楕円の見かけの楕円率角（直線偏光度）と主軸の方位角を知る事ができる。

エリプソメトリ：光の位相情報も得られる測定を意味する。測定には移相子と検光子の2つの素子を使う。移相子の方位角を変化させながら移相子からの反射光に対してポラリメトリを行う。得られた結果をポアンカレ球上にプロットし、理論式に当てはめて、移相子と入射光の偏光特性をフィッティングによって求める。これによって入射光の偏光状態をすべて決める事ができる。

尚、この論文では、以下の用語について併記してあるとおりに定義する。

リターデーション： $\Delta = \Delta p - \Delta s$

偏光度：全強度に対する偏光成分の割合

楕円率角：右廻りが正、偏光成分のみに関する偏光楕円の楕円率

見かけの楕円率角：極性がなく常に正で、非偏光成分も含む楕円率角

方位角：光源に正対し水平を $0^{\circ}$ とし、水平からccw方向に正方向をとる。

円偏光の回転方向：光源に正対し、光軸に垂直な面に射影された電場ベクトルの回転方向

### 3. 偏光測定

PFのBL-28A、BL-18A、SOR-RINGのBL-1'において、移相子と検光子にはMo/Si101層の多層膜を使い、主に波長12.7nmの光を使って測定を行った。得られた成果を以下に述べる。

#### 3-1. PF BL-28A（直線・楕円アンジュレーター）での測定

##### ◎測定法の検定

・エリプソメトリの測定法の確認のため、移相子の条件や光源の条件を組み合わせフィッティングを行ったが、同じ条件のものは良い一致を見た。

### ◎直線偏光モード

- ・エリプソメトリにより、偏光度 $0.99 \pm 0.002$ 、楕円率角 $4^\circ \pm 0.2^\circ$ 、主軸の方位角 $0.7^\circ \pm 0.3^\circ$ であった。移相子の条件を変えたり、日付を変えて測定したが変化はなかった。
- ・ポラリメトリによりアンジュレータのギャップを変えて相対スペクトル位置を変化させて、見かけの直線偏光度の変化を測定した。その結果、垂直方向偏光成分はギャップ値に関わり無く一定の強度を持っていることが解った。

### ◎円偏光度モード

- ・一次のピークで、偏光測定を行った結果、偏光度は $0.9 \pm 0.2$ 、楕円率角は $40^\circ \pm 2^\circ$ 、主軸の方位角は $-40^\circ \pm 5^\circ$ であった。分光器の $\Delta$ を考えると電子リングからの放射光の円偏光度は1に近い事が予測される。
- ・水平方向に角度 $0.5/\gamma$ 軸外しの光の楕円率角は変化しなかったが偏光度が $0.8 \pm 0.1$ 程度に低下した。

### ◎円偏光回転方向について

- ・ポラリメトリにより、IUPモードの時、 $-45^\circ$ 方向(IUNモード時、 $+45^\circ$ 方向)に主軸を持ち、見かけの楕円率角 $35^\circ$ 程度の楕円偏光が観測された。分光器の $\Delta$ を $0^\circ$ から $90^\circ$ の間とすれば、これは右円偏光であるという結論に達する。
  - ・多層膜の偏光特性の理論的予測により、全反射領域では多層膜のリターデーションも正の値をとる。移相子をこの領域で使ってエリプソメトリを行った結果、楕円率角は正の値(右円偏光)をとった。
- これらは蓄積リングアンジュレータ内のポジトロンの回転方向と矛盾しない。

### 3-2. PF BL-18A (偏向電磁石)での測定

#### ◎ポラリメトリ

- ・分光器の入射スリット前にあるダイアフラムによって、取り込む放射光の垂直方向観測軸角を変化させたところ、楕円率角は理論計算値どおりに変化したが、楕円の主軸も系統的に傾き、垂直方向観測軸角 $1\text{mrad}$ あたり $20^\circ$ にもなった。
- ・同じダイアフラムによって垂直方向取り込み角幅を変化させたところ、見かけの直線偏光度は $1/\gamma$ 幅までは $0.95$ 程度であったが $2/\gamma$ 幅で $0.93$ 、 $6/\gamma$ 幅(ダイアフラム全開)では $0.90$ 程度であった。
- ・ビームプロファイル中の偏光の場所依存性を測定したが、変化がなかった。

#### ◎エリプソメトリ

- ・軸上と軸外しの放射光に対して測定を行った結果、偏光度は $0.97$ で変化せずに偏光楕円の主軸と楕円率角が変化した。

### 3-3. SOR-RING BL-1'での直接偏光測定

- ・前述の楕円の主軸の垂直観測軸角依存性がSR本来の性質かどうか調べるため、光学素子を途中にいれない状態で直接偏光測定を行った。多層膜とA1のフィルターにより $85\text{eV}$ の準単色光を測定した。観測軸角を $2\gamma$ まで変化させたが主軸の傾きは観測されなかった。従って、主軸の傾きは分光器などの光学素子の $\Delta$ が原因であることが確かめられた。

## 論文の審査結果の要旨

木村洋昭の博士論文は、多層膜を用いた楕円偏光解析装置の製作とそれを用いた種々の放射光の偏光状態の測定に関するものである。直線偏光、円偏光など放射光の偏光を利用した研究は、近年盛んに行われるようになってきたが、その中で偏光状態を定量的に知ることは極めて重要である。しかし、偏光解析のためには高い偏光能力を持つ偏光子や移相子が不可欠であるが、軟X線領域では、そのような素子そのものが簡単には作れないという問題があった。この問題は、この研究では多層膜を作ることによって解決している。多層膜は一種のブラッグ反射を利用するので $45^\circ$ 程度の入射角でも大きな反射率を持ち得るからである。

一方、多層膜を偏光子・検光子として用いる偏光解析を行うためには、それぞれに対する入射角、方位角を可変にできる偏光解析装置(ELLI)が必要である。この研究では世界で初めてELLIを設計・製作し測定に用いている。ELLIは超高真空仕様であり、また光ビームを下流にそのまま通過させることも可能になるような、ビームラインにオンラインで設置できる構造となっている。最近、いくつかの海外の放射光施設からELLIの詳細についての問い合わせがあり、すでに大きな波及効果を及ぼしている。

ELLIを用いた偏光度の測定は、放射光実験施設のBL18及びBL28で行われた。この研究で用いられた測定方法は、強度を最大にするような光軸調整では偏光楕円の主軸の傾きが観測角によることを見出されて、その原因が大きな謎になっていたが、この研究では東京大学物性研究所のSOR-RINGを用いて、ビームライン光学系を通さない偏光測定を行って主軸が変化しないことを見出した。この結果、主軸の傾きの観測角依存性は、ビームライン光学系によるものであることが明らかになった。

以上のような偏光状態についての知見は世界で初めてのものもあり、その波及効果は極めて大きく、解析装置ELLIの建設をも含めて世界を一步リードしていることは明らかである。よって、この研究は博士論文として十分な内容をもったものであると結論される。

また、木村洋昭に対して学位論文に係わる専門分野及び周辺分野について口述による試験を行った結果、ストークス・パラメーターなどの偏光状態の記述、多層膜偏光子の原理、ELLIのメカニズムの詳細、放射光の性質、ビームライン光学系の作用などに関する質問に対して、的確に答え、十分な知識と理解度を持っていることが明かとなった。また、透過型の多層膜の利用など、今後の研究の展望についても説得力ある提案も行い、この分野において世界をリードしていく見通しを明らかにした。

以上のように、学位論文を中心に広く確実な知識を有しているばかりでなく、実績に裏付けられた将来の展望が明確であると判断された。また、公開発表会による最終審査にも合格した。