中性子光学研究と装置開発

海老澤 徹

(元京都大学原子炉実験所)

Neutron Optics and the Instrumentations

Toru Ebisawa

ex-Research Reactor Institute of Kyoto University

ABSTRACT

My study on neutron optics started in 1970 when I got the information of the neutron mirrors and the neutron guide tube in the Technical University of Munich. I, however, had limited my neutron optics on the neutron mirrors and the neutron guide tubes until 1985. Since 1990, I have challenged to the neutron spin interferometry together with my collaborators, which include new young physicists too.

Keywords: *neutron optics, neutron mirror, neutron spin interferometry*

1. はじめに

この度は、中性子科学会より、功績賞を頂き感謝しております。私は人生の多くの時間を中性子を用いた多くの研究者（中性子光学の専門家に限定されない）と共に中性子光学研究に従事してきましたが、これらの共同作業は大変興味深く、また、楽しいものでした。あらためて感謝したいと思います。

私の関わった中性子光学研究は、大きく2期に分けることができます。

第一期は、1970年から1985年までの期間、京大原子炉実験所（京大炉）で行われた中性子光学研究です。

第二期は、それ以降の中性子スピン干渉現象を中心としたより範囲の広い中性子光学研究です。この第二期の研究は、原子力研究開発機構（原研）3号炉 C3-1-2 ポート、及び、京大原子炉 CNS ビームポートを用いて行いました。

2. 京大炉における中性子光学

2.1 中性子導管との出会い

私が京大炉に入所したのは、京大原子炉が臨界になった1964年であった。その当時、私に課せられた職務は、中性子のサブサーマル領域の単色ビームを得るための中性子メカニカルモノクロメーターの運転、改良、並びに、原子核構造研究者のデータ取得を支援することであった。この装置の目的は、共鳴領域中性子の吸収による核構造の研究であったが、中性子強度が弱いこと、興味ある原子核構造研究のテーマがなかなか見つからない等の困難を当初から抱えていた。そのような状況

に苦慮していた私にとって、1969年の秋に、ミュンヘン工科大学において既に始まっていた optics を基礎にした中性子導管に関連する文献に出会ったのは、偶然の幸運であった。当時は現在のように便利な文献検索システムもなく、科学雑誌も各国の言語で書かれるのが一般的であった（各国の科学雑誌が英語に統一されるのは1970年であった）。中性子導管に関する文献との出会いも偶然であったが、私は、この時、中性子導管製作の基礎となった中性子光学を専門にすることを決意した。

2.2 京大炉中性子導管の設置（1970～1972）

ミュンヘン工科大学における中性子導管の製作法に関する主要な文献は、1970年の初めまでにはほぼ入手出来た。また、72年に運転を開始する ILL の中性子導管群計画に関する資料も入手した。これらの文献に対しては、私の上司である岡本朴部門長も大いに興味を示した。

部門長の主導のもとに、中性子導管製作法のバイブルとも言える Alefeld. B による文献を中心にしてゼミが直ちに組織された。ゼミの対象は、部門員全員と所長（柴田俊一教）である。同時に、中性子導管を設置するプロジェクトの立ち上げと導管設置のために科学研究費の要求（1970年）が行われた。

科研費は翌71年には認められ、中性子導管設置のための準備作業が開始された。中性子導管の構造の決定と製作の方法、中性子ミラー製作の依頼先、原子炉に設置するための実験ポートの改造や中性子導管遮蔽、あるいは、原子炉格納容器に隣接する中性子測定室建設等の準備作業が開始され

た。中性子ミラーはフロートガラス面にスパッターされた Ni 薄膜が用いられた。この Ni 中性子ミラーは日本板硝子の研究所で作成した。この当時、ガラスメーカーは、1 メートル四方の大きなフロートガラス面にスパッター法で金属薄膜を作成する技術を既に有していた。

E-3 実験孔に中性子導管を設置する作業は、73 年 12 月に完了した[1]。この中性子導管は現在でも利用されている。

2.3 京大炉における中性子ミラー反射率測定の開 始

京大炉における中性子ミラー反射率の測定の開始は、中性子導管製作と平行して行われた。すなわち、導管用の Ni 全反射ミラー製作時に、以下のような中性子ミラーを日本板硝子(株)に依頼して試作した。Ni 全反射ミラー、Ni 薄膜、Ni-Ti の 2 層薄膜、Co-Fe 合金薄膜等である。これらの中性子ミラーに対してチョッパーTOF法による反射率測定が行われた。測定結果は、蒸着薄膜をその中性子散乱長から評価される 1 次元井戸型ポテンシャルで近似し、入射中性子を平面波で近似すると、中性子の反射特性が良く再現されることが実証された。これが京大炉における中性子光学の始まりであった。この研究結果を論文にして投稿する段階で、同様の主旨の論文がミュンヘン工科大学の A. Steyerl 教授によって直前に発表されているのを発見し、投稿を断念した。後に触れるが、私の研究の進路を変える切っ掛けは、後の彼との研究交流によるものである。

2.4 中性子ミラー製作の開始と中性子光学の進展 (1974~1978)

(1) 京大炉において、中性子多層膜ミラーを製作するための真空蒸着装置の準備をはじめたのは、中性子導管実験室の整備がほぼ終了した 75 年の初めであった。新しい研究をスタートするに当たって、実験所内で使用されていない真空蒸着装置を探し出し、それを改造して多層膜ミラーを試作する方法を選択した。表面積が 15cm×7cm のフロートガラスを 2 枚セットして多層膜ミラーを蒸着できる装置を何とか完成したのが、1976 年の初めであった。ちなみに、この装置の蒸着時の真空度は、diffusion pump の性能が良くなく、 1×10^{-5} Torr と通常のものより 1 桁悪かった。

(2) この間、1974 年には、B.P. Schoenborn 等による多層膜モノクロメーターの論文、及び、1976 年には F. Mezei によるスーパーミラーの論文等が出版された。これらの多層膜ミラーのアイデアは、中性子光学研究の将来性を高めるものであった。

(3) 直ちに、多層膜モノクロメーターやスーパーミラー、あるいは、中性子偏極用の磁気ミラー等の試作を開始した。若干の試行錯誤はあったが、1976 年の秋には、試作した多層膜ミラーの反射率は、当時の実用的なレベルに到達していた。また、多層膜ミラーの反射率も前述の方法を用いて評価

すると、複雑な構造のものでも測定された反射率は良い近似で再現されることが示された[2, 3]。これらの研究結果は、実用的な中性子ミラーの開発に世界で最初に成功したことを示していた。この当時、反射率の測定、データ解析や論文作成等を共同で行ったメンバーは、阿知波紀郎氏と山田修作氏を加えた 3 人で主として行われた。阿知波氏は、磁性体の研究者であり、後に所属も九大に変わったが、その後もずっと密接な共同研究者であった。

(4) この成功を受けて、1980 年春には市販されている標準型の diffusion pump をもつ蒸着装置を部門長の配慮により購入することができた。この装置では、ベルギーの容積も大きく、蒸着可能な試料の面積も格段に大きくなったこと、当時発売されていた 8 ビットパソコンを利用して電子銃による自動蒸着が可能になったこと等、多層膜成膜装置としての性能は飛躍的に向上した、しかし、この装置で作成した初期の多層膜ミラーの中性子反射率は、意外にも実用性を持たない低いものであった。新旧の装置の違いとして考えられたのは、真空度の違いであった。すなわち新しい装置の真空度は 1×10^{-6} Torr であり、最初の装置より一桁良いことであった。そこで、リークバルブを開けて真空度を一桁悪くすると、作成された中性子ミラーの反射率は格段に改善され、前述の真空度の悪い蒸着装置による反射率が再現された。すなわち、多層膜生成時における真空度は、偶然にも 1×10^{-5} Torr 程度が最適であったわけである。酸素の存在による蒸着膜の酸化の程度によるものと推定される。

2.5 KUR におけるその後の中性子光学研究

以下に新しい蒸着装置の導入以降における KUR 中性子光学の経過について簡潔に述べる。

(1) パーマロイ-ゲルマニウム磁気多層膜ミラーの開発

パーマロイは偏極中性子ビームを得るための磁性材料、核的材料として優れている、一方、ゲルマニウムは結晶化しにくい元素として非磁性材料として優れている。

(2) 中性子波による巨視的共鳴現象の研究 (1979)

中性子波動はある種のポテンシャルを通過する際に共鳴現象が生じると予測されるポテンシャルが存在する。そのようなポテンシャルを真空蒸着装置で作成し、京大炉 E-3 導管に設置されている反射率計によって上記現象が起こることを実際に実証した。この実験は A. Steyerl 教授が 1979 年に半年間、京大炉に滞在した際に彼の提案により行われた[4]。

(3) 大面積スーパーミラー製作法の開発とスーパーミラー中性子導管の世界最初の設置

上記新規導入された蒸着装置を用いると、30 cm × 10 cm の面積のフロートガラス 8 枚に 3Q_c のスーパーミラーを一度に蒸着することが可能である。1984 年には世界で最初の熱中性子導管が KUR の

B4-実験孔に設置された。この導管もまた、現在でも使用されている。

(4) 中性子ミラーの製作法は1980年代の後半から、マグネトロンスパッター法、ずっと遅れるがイオンビームスパッター法へと進化した。特に、21世紀に入ってから京大炉や原研に導入されたイオンビームスパッター法によって達成された精密中性子光学のレベルの高さには、隔世の感がある。

(5) 京大炉冷中性子源実験施設に中性子導管を設置(1988~1990)

CN2, CN3 ポート用に2本のスーパーミラー冷中性子導管を設置すると共に、CN1 ポートに干渉計開発用の簡易型冷中性子導管を設置した。

(6) ILL 滞在における貴重な経験(1986)

1986 年はチェルノブイリ事故のあった年であるが、1年間 ILL に滞在し、Prof. A. Steyerl 氏によって開発、製作された UCN neutron microscope の特性測定を ILL の炉室2階にある UCN, VCN beam port で行った[5]。その場所で行われていた他の実験は、neutron EDM の測定、magnetic VCN bottle を用いた中性子寿命の測定、あるいは、中性子電荷の上限測定等、日本では考えられない実験が多量の脳力と労力を使って行われていた。私自身もそこで1年間どんな物理に役立つのか良くわからない実験を続けながら、私も日本に帰ったら、これまで考えてこなかった分野に挑戦してみたいと切に思っていた。

3 長波長中性子干渉計の開発と研究(1990以降)

3.1 新しい研究グループの結成と科研費重点領域研究による財政的支援の決定(1990)

1980年代の後半には、日本においても KEK 等の研究会において中性子干渉計を用いた量子力学的観測問題が集中的に議論されるようになっていた。そのような議論の中で、今からスタートするのなら既に10年の歴史がある Si 完全単結晶を用いた干渉計の開発ではなく、従来のものと異なった新しい原理による長波長中性子干渉計を開発し、新しい干渉現象の観測を目標にすべきだと考えた。幸いにも、そのような考えの、20才代の若い人達と新しい研究グループを1990年に立ち上げた。その時のメンバーは、大竹淑恵氏、田崎誠司氏、舟橋春彦氏、海老澤徹の4名であった。

それと時を同じくして政池明氏(京大教授)を総括責任者とする文部省科学研究費重点領域研究(No. 4244103, 1991年~1995年)に研究課題”多層膜中性子干渉計の開発と干渉現象の研究”というテーマで参加することができて、研究計画を実行するための予算的な裏付けを得ることもできた。

3.2 原研3号炉、第一世代 C3-1-2 中性子光学ポートの設置(1991~1999)

長波長中性子干渉計を開発し、開発後の研究を推進するためには、中性子強度が出来るだけ大きな専用の長波長中性子ビームポートは不可欠に重要である。京大原子炉 CNS のビームポートと原研

3号炉のビームポートを比較すると、中性子強度で10倍の違いと CNS 運転の利用時間で5倍以上の違い、利用可能な中性子数では、50倍以上の違いになる。そのため、将来にわたる研究推進のためには、原研3号炉にビームポートを確保することは極めて重要な条件であった。そこで上記研究目的のために C3-1-2 ポートの利用承認を物性研に要請した。当時の物性研施設長の山田安定先生の御決断により私たちの要請は受け入れられたのですが、その際、吉沢先生、加倉井先生等の御賛同も含めて忘れられないことであった。

3.3 第一世代 C3-1-2 ポートの設置(1993年)と利用開始

C3-1-2 ポートを利用するためには、実験スペースを確保するために中性子ビームを約24度程度曲げる必要がある。当時の中性ミラーの性能を考慮して、面間隔(2d)が100Åで反射率90%の多層膜中性子モノクロメーターを4枚用い、4回の連続反射のシステムを設置することにより、12.5Åの波長の中性子を約24度曲げて取り出すことが出来た。C3-1-2 ポートの設置作業は、大竹淑恵氏、田崎誠司氏、舟橋春彦氏、海老澤徹の4名によって主に行われた。その際、既設の C3-1-1 ポートとの干渉があり、様々な困難に遭遇したが、物性研川村さんの適切なご指導により無事切り抜けることができた。

C3-1-2 ポートが利用できるようになった段階で、阿知波紀郎氏((九大教授)、河合武氏(京大炉教授)、日野正裕氏(九大博士課程)等も参加した。高分子薄膜を対象とした反射率計としての利用では、鳥飼直也さん(現三重大学准教授)や金谷利治さん(現中性子科学会会長)等、高分子の専門家にお世話をお願いした。

3.4 C3-1-2 ポートの大改造(2001年, 2002年)

C3-1-2 ポートを大改造する提案は、私の停年が1年後に迫った2001年の2月に原研の鈴木淳市さんからあった。直ちに、原研の鈴木淳市氏、曾山和彦氏、物性研の川村氏、京大原子炉の田崎誠司氏、海老澤徹の5人のワーキンググループが組織され、2002年の春に完成した[6]。その結果、従来24度曲げられた単色ビーム1本だった C3-1-2 ポートは、14.5度(白色)、24度(白色)、35度(単色)と曲げられた3本のビームポートによる3つの実験施設に大幅に改善された。Fig. 1 は、新たに誕生した3本の導管から得られた中性子のビーム強度である[6]。

この C3-1-2 の大改造は、中性子施設の利用効率を大幅に上げた画期的なプロジェクトであったが、改造に伴う作業には大きな困難も幾つかあった。

その第一は、ガイド増設作業のために小角散乱用の中性子速度選別機を一時的に撤去しなければならなかったこと、既設の C3-1 ポートとの干渉

Fig.1 Neutron spectra in the three new ports.

を避ける必要があったこと、放射化している遮蔽体に3本のビームを通すための加工等、多くの厳しい困難に直面した。また、新ポートの性能を左右する3Q_cのスーパーミラーの入手もピンポイントのタイミングで幸運にも入手出来た。これらの困難な作業は、鈴木淳市さん、曾山さん、川村さん3人の専門性によって解決された。停年を直前にしたこの時の経験も、私にとって忘れることのない貴重な体験であった。

3.5 独創的な様々な冷中性子干渉計の開発

1991年から着手したMach-Zehnder型冷中性子干渉計の開発には成功しなかった。しかし、3年間にわたる干渉計開発研究の経験は、干渉計の成立する物理的条件に関する様々な知見をもたらした[7]。その経験に基づいて95年以降、様々な冷中性子(多層膜)干渉計が開発された。それら干渉計の特性については下記の代表的な文献を参照されたい。

- (a) 多層膜冷中性子干渉計に関する舟橋、北口等による論文[8, 9].
- (b) 多層膜スピンスプリッターを用いた干渉計に関する田崎、海老澤等らの論文[10, 11, 12].
- (c) 共鳴フリップパーを用いた冷中性子干渉計に関する論文、山崎大、丸山龍治等の論文[13, 14].
- (d) 共鳴 flipper を用いたスピンエコー法の開発に関する日野、北口、川端等の論文[15].

4 磁場の強度に依存しないスピンエコー法に関する一つの提案

4.1 磁場中における中性子スピンの量子力学的取り扱い

スピン 1/2 の粒子である中性子は、量子力学的には、磁場中、 B 、では $\pm 1/2$ の値しか取り得ず、precession という概念は成立しない。比較的大きな値をもつ magnetic moment を取り扱う磁性体研究では、古典的取り扱いが良い近似になるが、中性子スピンの場合には下記に示されるように、量子力学的取り扱いが不可欠である。

(a) 偏極中性子ビームは、 $\pi/2$ フリップパーによって $\pm 1/2$ スピンをもつ2つの状態の重ね合わせ状態になる。それら中性子の potential energy は、 $-(\pm \mu_n \cdot B)$ によって与えられる。+スピン中性子は速度が速く、-スピン中性子は遅いので、両者は空間的に分離する。ここで、 μ_n は中性子の magnetic moment である。

(b) $\pm 1/2$ スピン中性子の磁場中における運動を考える。両者の空間的な分離による経路差を D とすると位相差、 ϕ 、は次式で与えられる[11].

$$\phi = 2\pi D n / \lambda \quad (1)$$

ここで、 λ は中性子波長であり、 n は経路媒質の屈折率であり、空気中では近似的に1である。

4.2 Multilayer Spin Splitter(MSS)の構造とスピンの量子回転

(a) MSS とは Fig. 2 に示される構造を持つ複合中性子ミラーである。それは、平面性の良いシリコン基板上に中性子を反射する非磁性の多層膜ミラーを最初に成膜し、ゲルマニウム (Ge) の厚い Gap 層を挟んで、表面側の+スピン中性子を反射する磁気ミラーから構成される。

(b) 偏極中性子は $\pi/2$ フリップパーによって+スピンの重ね合わせ状態になるが、そのような中性子が MSS に入射すると、+スピン成分は MSS の表面で反射し、-スピン成分は Ge のギャップ層を透過して、その奥の Non Magnetic Mirror により反射される。その結果、Fig. 2 に示されるように、2つの反射ビーム成分は中性子の進行方向及びその直角方向に空間的に分離する。

Fig.2 Structure and principle of a multilayer spin splitter(MSS).

Fig.3 Structure and function of a Double MSS.

4.3 上記、同一特性の2つのMSSがFig. 3に示されるように 2θ の交差角で配置されたdouble MMSの体系(DMMS)を考える。

土の重ね合わせ状態にある中性子がこの体系に入射するとき、+スピン成分は左側の磁気ミラーの表面で反射し、-スピン成分は裏側の非磁気ミラーで反射される。右側の磁気ミラーでも同様の反射が生じるので、土のスピン分波間には位相差、 ϕ が生じる。この位相差は、Ge層内の屈折率を無視すると、 ϕ は下式によって与えられる[11]。

$$\phi = \{(ab-ac) + (fg-eg)\} / \lambda \\ = (4\pi D \sin(\theta)) / \lambda \quad (2)$$

ここで、 θ はMSSへの入射角である。

このスピンエコー装置の配置例はFig. 4によって示される。また、そのスピンエコー装置としての予測性能はTable 1に示される。

Fig.4 An arrangement of a neutron phase spin echo spectrometer using a pair of DMSSs.

Table 1 Neutron spin rotation by DMSS using Eq. (2), energy resolution and τ_{nse} [11].

波長 (nm)	0.6	0.12	0.24
ギャップ厚: 1 μm			
回転数	133	133	133
エネルギー分解能 (μeV)	35	8.6	2.2
τ_{nse} (nsec)	0.12	0.49	1.9
ギャップ厚: 10 μm			
回転数	1330	1330	1330
エネルギー分解能 (μeV)	3.5	0.86	0.22
τ_{nse} (nsec)	1.2	4.9	19
ギャップ厚: 100 μm			
回転数	13300	13300	13300
エネルギー分解能 (μeV)	0.35	0.086	0.022
τ_{nse} (nsec)	12.0	49	190

4.4 Table.1 に示されるように、このタイプのスピンエコー法が実用化するためには、平行度の良いギャップ層の間隔は、10 ミクロン以上という条件が達成される必要がある。しかし、この要求の実現は容易ではなく、2002 年に行われた田崎等の実験が最後であった。

4.5 その後の中性子光学の発展は2つの方法で従来の技術的な壁を越える可能性を示唆している。その方法の一つは、京大炉及び原研で開発された精密イオンビームスパッタリング法を用いて Ge ギャップ層の平行性を精度良く達成する方法である[16]。もう一つの可能性は、北口等によって行われた平行エタロンを利用する方法である[8, 9]。後者では、約10 ミクロンのギャップ層に対して干渉パターンを観測している。

5. おわりに

1970 年からスタートした京大原子炉実験所における中性子導管の設置が私の中性子光学研究の出発点です。その研究を主導したのは故岡本朴氏（元京大炉教授）です。また、1979 年から始まった A. Steyerl 教授との交流は、私が neutron spin interferometry に進む契機にもなった。1987 年から2002 年の定年退職まで私のスピン光学の開発テストは京大炉の CNS ポートで行われた。その施設の設置と運転、管理を責任者として行ったのは、宇津呂雄彦氏（元京大炉教授）、河合武氏（元京大炉教授）である。1991 年以降の原研3号炉 C3-1-2 ポートにおける研究活動を可能にしたのは、政池明氏（元京大理学部教授）を総括責任者とする重点領域研究（1991 年～1995 年）に加わることが出来たことです。また、C3-1-2 ポートを中性子光学研究用ポートとして認めて頂いたのは、山田安定氏（元東大物性研教授、中性子散乱施設長）の決断です。諸先生方に深謝致します。ここに記載することは不可能ですので、氏名は省略しますが、直接的、間接的を問わず、多くの研究仲間と長期にわたる共同研究生活を楽しく過ごすことが出来ました。心からの感謝を表します。私に残された時間は、長くはありませんが、機会があれば、今後とも宜しくお願いします。

なお、図、表は原著でなく、“中性子スピン光学、阿知波紀郎編著”より、引用した。

参考文献

- [1] 岡本朴他, KUR 中性子導管, (1974).
- [2] T. Ebisawa, N. Achiwa, *et al.*, Journal of Sci & Tech. 16, 647(1979).
- [3] S. Yamada, T. Ebisawa, N. Achiwa, *et al.*, Annu. Rep. Res. Reactor Inst. Kyoto Univ., 11, 8(1979).
- [4] A. Steyerl, T. Ebisawa, M. Utsuro, Z. Phys. B-Condense Matter 41, 283-286(1981).
- [5] A. Steyerl, W. Drexel, T. Ebisawa, *et al.* Revue Phys. Appl. 23 (1988) 171-180.
- [6] J. Suzuki, S. Tasaki, K. Soyama, T. Ebisawa, Appl. Phys. A 74 [Suppl.], S308-S310(2002).
- [7] T. Ebisawa, S. Tasaki, Y. Otake, H. Funahashi, *et al.*, NIM A, 334(1994) 594-606.
- [8] H. Funahashi, T. Ebisawa, T. Haseyama, M. Hino, A. Masaike, Y. Otake, S. Tasaki, Phys. Rev. A, Vol 54. 649-651.

- [9] M. Kitaguchi, H. Funahashi, T. Nakura, M. Hino, H.M Shimizu, Phys. Rev. A Vol. 67, 033609.
- [10] T. Ebisawa, S. Tasaki, *et al.*, Phys. Rev. A, Vol 57, 4720-4729.
- [11] T.Ebisawa, D. Yamazaki, S. Tasaki, *et al.*, Phys. Lett. A 259 (1999) 20-24.
- [12] S. Tasaki, T. Ebisawa, R. Maruyama, N. Achiwa, T. Kawai, Y. Kawabata, M. Hino, D. Yamazaki, Physica B 335 (2003) 234-237.
- [13] D.Yamazaki, NIMA 488 (2002) 623-633
- [14] R. Maruyama, S. Tasaki, M. Hino, M. Takeda, T. Ebisawa, Y. Kawabata, NIM A503(2004) 505-512.
- [15] M.Hino, M. Kitaguchi, Y. Kawabata, *et al.*, NIM-A, 574 (2007) 292-296.
- [16] M. Hino, private communication.