

平成 30 年 6 月 25 日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2017

課題番号：15K13405

研究課題名(和文) TOF-MIEZE分光法による量子井戸滞在時間の測定

研究課題名(英文) Measurement of dwell time of neutron in quantum wells with TOF-MIEZE spectroscopy

研究代表者

日野 正裕 (Masahiro, Hino)

京都大学・原子炉実験所・准教授

研究者番号：70314292

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,900,000円

研究成果の概要(和文)：飛行時間法(TOF)と中性子時間ビート法(MIEZE)を組み合わせたTOF-MIEZE法を用いて、共鳴トンネルする量子井戸滞在時間等の障壁通過時間の測定を試みた。本課題を通じて、TOFに注目した定式化を行うことで強磁場の磁気イメージング等、TOF-MIEZE分光器の新たな可能性を実験的に検討できた。また障壁通過時間に言及するには、より精密な解析のためのデータ処理手法の開発が必要なが明らかになった。

研究成果の概要(英文)：We tried to measure dwell times of resonant tunneling neutrons in quantum wells by using the TOF-MIEZE (Time Of Flight - Modulated Intensity by Zero Effort) spectroscopy. We formulated the feature of TOF-MIEZE spectroscopy and investigated new possibilities of TOF - MIEZE spectrometer such as magnetic imaging under strong magnetic field. Although the TOF-MIEZE method is promising, more precise data analyzing process should be required for measurement of the dwell time.

研究分野：中性子光学

キーワード：中性子光学 スピン 磁気多層膜 MIEZE

1. 研究開始当初の背景

中性子の(多層)膜による反射、透過の問題は、膜面に対して垂直方向の平面波を考えて一次元シュレディンガー方程式を解くことで非常に正確に記述される。それはトンネル領域でも全く変わらず、いわゆるラーモア時計によるトンネル時間の問題、つまり磁気単層膜をトンネル透過するラーモア(スピン)歳差回転角も平面波で考えた量子力学的予測と全く違いは生まれぬ(Phys.Rev.A 59(1999) 2261)。さらに量子井戸を共鳴トンネルさせたラーモア歳差回転角も平面波の結果と良い一致を得た(Phys.Rev.A 61(2000) 013607)。ここで磁気膜トンネル中性子のラーモア歳差角が平面波の結果と一致することは、膜内に定在波ができていいると考えられるが、果たしてその定在波はどのくらいの時間でできているのだろうか? 平面波モデルの量子力学では予測できないこの疑問を実験で明らかにするため、磁気多重連結量子井戸を作成し、中性子が膜内にいる間に、ポテンシャルを変動させ、スピン歳差角を測定し、その変動周期による違いを観測することが考えられるが、それは中性子実験に利用可能な広い面積でかつ低磁場で高速スイッチ可能な磁気膜製作は容易ではない。そこで、よりシンプルで実時間観測可能であり、かつ新たに開発したばかりの MIEZE(Modulated Intensity by Zero Effort)分光法で磁気多重連結量子井戸の実時間測定を提案した。当時、J-PARC MLF BL06 のビームライン及び周辺遮蔽体の建設が終了し、ビーム特性の評価を行っていた。また日本原子力研究開発機構の研究用原子炉 JRR-3 の MINE ポートで基本要素開発した MIEZE 分光器を BL06 に移設し、MIEZE 分光器を構築しはじめた所であった。

2. 研究の目的

非相対論的量子力学において、時間はパラメーターであり、期待値で求められるような観測量の形式をとっていない。しかし量子、特に質量を持つ中性子が障壁を(共鳴トンネル)通過する時間は如何ほどか? また定在波はどのくらいの時間でできるのか(はたして瞬間か?)この素朴だが量子力学が答えられない疑問に、実時間観測可能な実験を行い、一石を投じる。さらに、本実験の理解を通して、新たな MIEZE 分光法の可能性を検討することを研究目的とした。

3. 研究の方法

MIEZE 型共鳴スピンエコー装置は中性子スピンエコー法の一つであり、中性子スピンの位相差が2つの共鳴スピンフリップパーでつけられ(図1)1つのスピン成分に2つエネルギー準位があることで、実時間で中性子強

度が振動する。中性子スピンエコー法は、中性子散乱の中で最も高エネルギー分解能でかつ中間相関関数が直接観測出来るなど、スロダイナミクス研究に力を発揮する分光法であるが、MIEZE 分光器は、通常のスピンエコー法とは異なり、試料はアナライザーミラーの後方にセットされ、試料には一つのスピン状態のみとなる。

ここで スピン(又は スピン)は共鳴スピンフリップパーでつけられた2つのエネルギー準位を持つ時計として機能することに着目すると、試料による スピン中性子の MIEZE シグナルの違いを比較すれば、実時間のずれ(到着時間ずれ)の観測が可能となる。

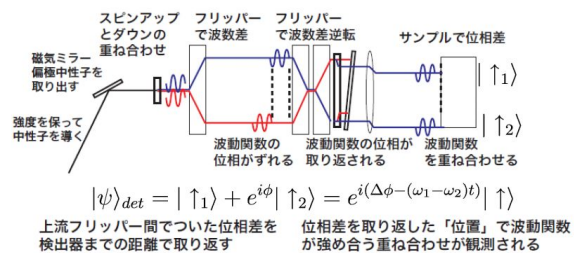


図1 MIEZE 分光法のエネルギーダイアグラム

多重連結量子井戸は、 スピンは多重の量子井戸、 スピンは一つのポテンシャルのみを感じる Fabry-Perot 磁気多層膜を用いて実現する。Fabry-Perot 磁気多層膜を透過するスピン歳差回転中性子の回転角は井戸の数が増加するに従って比例的に増えるが、その透過確率は適当な層数以上はほとんど変化しない。そこで井戸の数の多い Fabry-Perot 磁気多層膜を作成することで、中性子強度の減少無く スピン中性子の膜内での共鳴トンネルの数滞在時間を増やすことができる。一方 スピン中性子は層数の増加に関係なくほとんど一つの箱形ポテンシャルを感じることになる(図2)

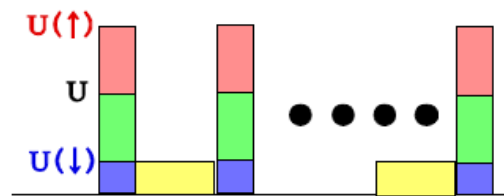


図2 Fabry-Perot 磁気多層膜が構築する中性子のポテンシャル場。 スピン中性子は U( )の周期ポテンシャルを スピン中性子は U( )を感じる。

4. 研究成果

TOF-MIEZE 分光器の新たな可能性を実験的に検討した。定常源からの単色中性子ビームを用いる 従来の MIEZE 法では、高いコントラストの MIEZE シグナルを観測する

ために、振動数と機器間の距離に非常に精密な条件が要求される(MIEZE 条件)。しかし飛行時間法(TOF)を用いることで、TOF-MIEZE シグナルでは、MIEZE 条件からずれた場合もコントラストはほとんど減少しないこと、それは実効振動数の変化をもたらすことを定式化し、実験でも確認した。特に、J-PARC MLF のような中性子源での中性子発生時間幅が小さいパルス中性子源ではその特長が活かされ、装置の高度化、特に精密測定にも非常に有利であることが示された。

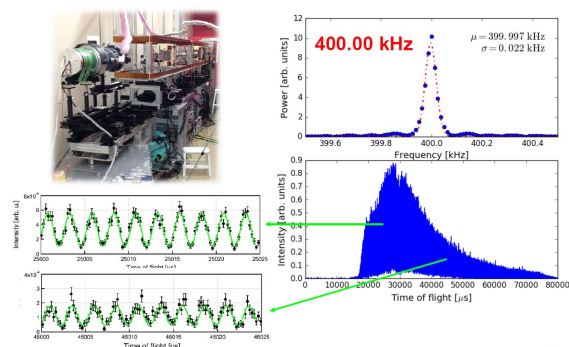


図3 実効400kHzのTOF-MIEZEシグナル。

次に京都大学原子炉実験所(現 京大複合原子力科学研究所)のイオンビームスパッタ装置を利用し量子井戸の数が200で全厚さ12  $\mu\text{m}$ 、全層801層の  $\text{Fe}(20\text{nm})\text{-}[\text{SiGe}_3(40\text{nm})\text{-Fe}(20\text{nm})]^{200}$  の Fabry-Perot 磁気多層膜の作成まで成功した。そして磁気膜透過で実効振動数200kHzのTOF-MIEZEシグナルの観測に成功したが、中性子強度を含めた解析の難しさ、MIEZEシグナルのいびつな形状等を含んだ装置の安定性等、実験上の問題が明らかとなった。MIEZEシグナル形状の問題は、電気ノイズの混入等の問題を解決し、現在までに、安定的に実効振動数400kHzでコントラストの高いTOF-MIEZEシグナル観測に成功している(図3)。

しかし Fabry-Perot 膜に興味のある(共鳴トンネル透過する)TOFの時間領域は狭く、中性子統計的にもデータ解析が難しい。そこで実験装置の安定性及びポテンシャル場による実時間遅れのTOF-MIEZE分光法による評価のため、シリコン単結晶を透過するTOF-MIEZE測定を検討した。ここで、MIEZEでは一つのスピン状態であるので、通常のスピン干渉計のようなベクトル量ではなくスカラー量として磁場経路積分値が求められ、TOF-MIEZE分光法による強磁場の磁気イメージングの可能性があることが分った。図4にシリコン単結晶500mmを透過した400kHz TOF-MIEZEシグナルとフィッティングの結果を示す。ここではTOFで20~20.1msの間の周期2.5  $\mu\text{s}$ の中性子の時間振動が得られており、これをサイン波でフィッティングして波長に

よる実効振動数の変化を見て、波長によって、実効振動数が大きくなる傾向は見られたが、誤差が大きく解析手法を含めて検討が必要となった。

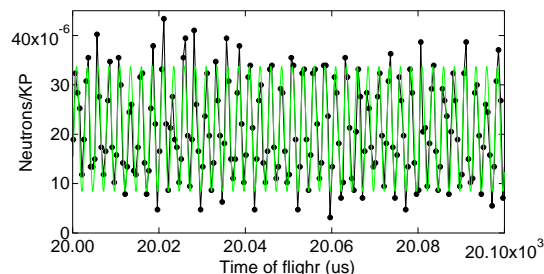


図4 典型的なTOF-MIEZEシグナルをsin関数で最小二乗フィッティングしたグラフ(ここではTOFの時間で20.0~20.1msの間)。

本研究課題で、TOF-MIEZE分光法の可能性が高まると共に、足し合わせの仕方を含むデータ処理についての課題がより明らかになった。現状の解析では実験データを活かし切れておらず、統計的にきびしくてもより確度の高いアプローチのデータ処理を検討している。今後も解析手法の開拓を進めると共に、TOF-MIEZE実験環境の整備を行い、磁気多層膜の高度化を含めて追試を行う予定である。

また J-PARC MLF の大強度パルス中性子源と最近の中性子集光光学技術の進展により、振動磁場の領域を研究開始当時よりも2桁以上小さく出来、当時は不可能だった Fabry-Perot 磁気多層膜の MHz オーダーの高速スイッチング実験も視野に入ってきている。TOF-MIEZE分光法の可能性を追求すると共に、共鳴トンネル通過する時間は如何ほどか?また定在波はどのくらいの時間でできるのか(はたして瞬間か)?という疑問に、分光法の高度化を通じて引き続き実験的に答えをだしていきたい。

TOF-MIEZE 分光器開発は、KEK-京大連携で開発しており、光・量子融合連携研究開発プログラム「中性子とミュオンの連携による「摩擦」と「潤滑」の本質的理解」の支援も受けた。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計2件)

T.Oda, M.Hino, M.Kitaguchi, H. Filter, P.Geltenbort, Y.Kawabata, Towards a high-resolution TOF-MIEZE spectrometer with very cold neutrons, 査読有, Nucl. Inst. Meth. A860 (2017), 35-41.

T.Oda, M.Hino, M.Kitaguchi, P.Geltenbort, Y.Kawabata, Pulsed neutron time-dependent intensity modulation for quasi-elastic neutron scattering spectroscopy, 査読有, Review of Scientific Instruments 87(2016) 105124(5pages).

[学会発表](計 10 件)

日野正裕、小田達郎、遠藤仁、川端祐司、TOF-MIEZE 分光法による量子井戸の中性子滞在時間観測の試み、日本中性子科学会第 17 回年会、2017/12/2、福岡大学  
日野正裕、小田達郎、遠藤仁、山田悟史、瀬戸秀紀、川端祐司、TOF-MIEZE 分光法で目指す表面・界面ダイナミクス、日本物理学会 2017 年秋季大会、2017/9/24、岩手大学

M.Hino, T.Oda, Y.Kawabata, H.Endo, N.L.Yamada, H.Seto, A test of TOF-MIEZE reflectometry for study of nanomagnetic dynamics, International Conference on Neutron Scattering 2017(ICNS2017), 2017/7/10, Daejeon, Korea

M.Hino, Current status and perspective of neutron resonance spin echo spectrometers at BL06 at J-PARC/MLF, International Conference on Neutron Optics (NOP2017), 2017/7/8, Nara(Japan)

日野正裕、小田達郎、遠藤仁、山田悟史、瀬戸秀紀、細島拓也、山形豊、武田晋、河合利秀、吉永尚生、川端祐司、J-PARC/MLF BL06 中性子スピンエコー分光器群(VIN ROSE)と集光ミラー開発 II、日本物理学会第 72 回年次大会、2017/3/19、大阪大学

日野正裕、小田達郎、川端祐司、中性子反射光学と成膜技術、日本物理学会 2016 年秋季大会、2016/9/22、宮崎大学

日野正裕、小田達郎、吉永尚生、金山雅哉、杉山正明、川端祐司、遠藤仁、山田悟史、細島拓也、郭江、加藤純一、山形豊、森田晋也、武田晋、古坂道弘、瀬戸秀紀、J-PARC/MLF BL06 VIN ROSE と中性子集光ミラー開発の現状、第 50 回京都大学原子炉実験所学術講演会、2016/1/27、京都大学原子炉実験所(大阪府)

小田達郎、日野正裕、北口雅暁、川端祐司、Peter Geltenbort、極冷中性子を用いた TOF-MIEZE スピンエコー実験、第 50 回京都大学原子炉実験所学術講演会、2016/1/27、京都大学原子炉実験所(大阪府)

M. Hino, Current status of development of ellipsoid neutron supermirrors with

metal substrates, NDS-2015: 4th Neutron Delivery Systems International Workshop (NDS2015), 2015/9/28, Grenoble (France).

M.Hino, Current status and perspective of neutron resonance spin echo spectrometers (VIN ROSE) at BL06 at J-PARC/MLF, 2nd Asia-Oceania Conference on Neutron Scattering (AOCNS 2015), 2015/7/22, Sydney (Australia).

[図書](計 0 件)

[産業財産権]

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

[その他]

ホームページ等

<http://www.rrri.kyoto-u.ac.jp/neutron/optics/index.html>

## 6. 研究組織

研究代表者

日野 正裕 (Masahiro Hino)

京都大学・原子炉実験所・准教授

研究者番号：70314292

連携研究者

小田 達郎 (Tatsuro Oda)

京都大学・原子炉実験所・助教

研究者番号：70782308

川端 祐司 (Yuji Kawabata)

京都大学・原子炉実験所・教授

研究者番号：00224840