

中性子干渉計を用いた量子力学の基礎的研究

本論文は学術論文だが、量子力学の基礎的諸問題に関する実験事実を理解したいと思っている方々が最初に読む教材としても推奨できる。本論文に刺激されて、未完である量子力学に実験あるいは理論の一節を書きこもうという志を立てる方が、読者の中から出てくることを期待したい。

量子力学は実験事実を少しでも整合的に記述しようとして20世紀初頭から先人たちの作り上げた未完のマニュアルで、解析力学のように原理から出発して現象の記述に至るトップダウンの学問体系とは真逆のボトムアップになっている。たとえば桜井氏の教科書 *Modern Quantum Mechanics* では、この点を誠実に説明している。しかし、大学で量子力学を学んだ人にとっても、光学実験、超伝導、不均一磁場を通るスピンを持った原子ビーム、電子の干渉実験などなど、量子力学の個々の実験をセットアップから結果のグラフまで全部読み砕くのは大変な作業となる。それに思考実験が加わると、多くの人がかじけてしまう心配がある。そこで実験の種類を一つにして、それを使った量子力学のもろもろの基礎的問題についての理解を深めるという取り上げ方が有効になる。特に中性子の干渉とスピンの実験は、量子力学で多くの人にとって不思議と受け取られる項目をほぼ網羅しているので、その目的にはもっともよい。類推によって他の実験も理解して行くことができるので、初心者にとって中性子実験が最適の素材である。もちろん、歴史的に重要な実験を知ることが重要だが、それは他の機会に譲ればよい。

中性子実験の特徴を挙げよう。量子力学では、光子あるいは電子が粒子性と波動性の両方を持つことを理解することが最初のポイントである。光子と違って中性子は静止できるので、粒子としてイメージしやすく、さらにスピンという内部自由度もあるので使いやすい。また、電氣的に中性であるために相互作用が小さく量子力学的なコヒーレンスもよい。Colella, Overhauser と Werner は中性子干渉計を用いて、重力とコリオリ力のある場合の干渉実験を行った(上記の桜井氏の教科書にも述べられている)。これに代表される中性子の波動性に関する実験を便宜的に第一期の中性子による量子実験と呼ぶ。図はシリコン単結晶の中性子干渉計で、左から中性子が入射し、途中は経路 I と II の重ね合わせになり、透過方向 (O 波) と反射方向 (H 波) の二つ波が後に干渉する仕組みになっている。第一期の中性子による量子実験については、Rauch らによる総合報告があるが、この論文の第3章にはその成果が教科書的にまとめられている。

一方、量子力学に重要な要素としてエンタングルメントがある。1935年の Einstein, Podolsky と Rosen の論文に始まり、最近の量子情報科学の進展の

中で重要性が増している。多数の中性子同士のエンタングルメントした状態を作るのは収量やエネルギーに問題があり、実験に使うには困難が伴う。そこで、中性子の経路の自由度とスピンの自由度のエンタングルメント、さらにはエネルギー状態とのエンタングルメントに着目してベルの不等式の破れなどの実験を著者たちは行ってきた。これを第二期の中性子による量子実験と呼ぶ（現実には第二期にも第一期的な実験も行っている）。本論文の第4章以下の内容は著者たちが行った第二期の中性子による量子実験に関するものである。

本論文では、ここ15年間の中性子実験による量子力学の研究を総合報告している。第2章で、この論文を読むために必要な中性子実験の装置と技術を説明している。実験技術としてシリコン完全結晶干渉計を用いたことで大きな進歩が得られた。上にも述べたように第3章において、第一期の中性子による量子実験が多数要約されている。一例をあげると、中性子による Aharonov-Bohm 効果とそれと類似の Aharonov-Casher 効果の実験が紹介されている。第4章で幾何学位相、第5章でエンタングルメントのある実験で量子力学の非局所性、より一般的には contextuality の実験が説明されている。第6章では、誤差と擾乱に関する不確定性関係に関する実験が簡潔に説明されている。量子力学における重要な概念の説明、歴史的なエピソードなども随所にあり、量子力学についての幅ひろい理解を助けている。

本論文の背景には、量子力学の創設者のひとりであるシュレーディンガーがウィーン市を流れるドナウ川からの運河のほとりに創設した **Atominstitut** の伝統がある。この研究所は、小型原子炉から引き出される中性子を用いて実験を行い、**Zeilinger, Weinfurter, Schmiedmayr** 等、この分野の世界的な研究者を輩出してきた。スピン $1/2$ を持つ中性子は空間的に2回転すると位相が元に戻るという実験が量子力学の基礎に関する最初の実験であり、それはここで行われた。最後に著者たちを紹介する。長谷川祐司氏は、現在このグループのリーダーであり、**Klepp** 氏と **Sponar** 氏は二人とも長谷川氏の学生で今はそれぞれの研究機関でポスドクをしている。

原論文

Fundamental Phenomena of Quantum Mechanics Explored with Neutron Interferometer, Jürgen Klepp, Stefan Sponar, Yuji Hasegawa, Prog. Theor. Exp. Phys. 2014, 082A01 (2014)
DOI:10.1093/ptep/ptu085, [arXiv: 1407.2526 [quant-ph]]

問い合わせ先 :

長谷川祐司 (Atominstitut ウィーン工科大学准教授)

電話 : Tel: (+43)-1- 588 01 141 490 電子メール: Hasegawa@ati.ac.at

図：シリコン単結晶の中性子干渉計。左から中性子が入射し，途中は経路ⅠとⅡの重ね合わせになり，透過方向（O波）と反射方向（H波）の二つの干渉波ができる。

