



www.ati.ac.at

Technische Universität Wien
Atominstitut
Vienna University of Technology
Institute of Atomic and Subatomic Physics
Stadionallee 2, 1020 Wien, Austria



2014年7月30日

中性子とそのスピンの分離を量子効果を使って観測

-- 児童小説『不思議の国のアリス』に出てくる「チェシャ猫」を捕獲 --

この度、ウィーン工科大学の長谷川祐司准教授を中心としたチャップマン大学(米)のトラクセン教授、フランス国立科学研究センター(仏)のマツキン研究員、ラウエ・ランジュバン研究所(仏)との共同研究グループは、児童小説『不思議の国のアリス』に出てくる「チェシャ猫」(オカルト、心霊主義的には『霊体分離』)に類する現象を、量子効果を活用した測定で実験的に観測することに世界で初めて成功しました。具体的には後選択(post-selection)という新しい測定方法を用いて、本来分離不可能な、中性子本体とその一自由度であるスピンの分離を、最先端の中性子干渉法という手法を用いて観測しました。この成果は基礎科学の発展にとどまらず、ナノサイエンスの新たな測定技術、超精密測定の開発への応用が期待できます。なお、本研究成果は、2014年7月29日付(英国時間)英国科学雑誌 Nature Communications 電子版に掲載されます。なお、本研究のプレス発表は日本では長谷川祐司が責任者となるほか、共同研究者を通して、ウィーン工科大学(奥)、ラウエ・ランジュバン研究所(仏)、チャップマン大学(米)でも行われます。

長谷川准教授は、本成果に関し、「中性子干渉法の確立は、JST 戦略的創造研究推進事業(さきがけ)での私の研究目標であり、そこでの成果によるところが大きい」と語っています。「さきがけ」は、JST が推進する個人型研究です。長谷川准教授は、「量子と情報」研究領域 <http://www.jst.go.jp/kisoken/presto/ja/kenkyu/21quantum.html> に採択され、2004年から2007年の間、「光学実験を手段とした量子情報処理のための量子力学的物理現象の研究」という研究課題を実施しました。

問い合わせ先:

ウィーン工科大学(Vienna University of Technology) Institute of atomic and Subatomic Physics

准教授 長谷川 祐司 (はせがわ ゆうじ)

Email: Hasegawa@ati.ac.at

Tel: (+43) 1-58801-141-490, Fax: (+43) 1-58801-141-99

中性子とそのスピンの分離を量子効果を使って観測

-- 児童小説『不思議の国のアリス』に出てくる「チェシャ猫」を捕獲 --

●ポイント

量子力学における「測定」に関する研究分野には、量子理論の正当性にもかかわらず、いまだ不明確な事例が多々あり、研究しつくされていない領域である。例えば、測定の精度の限界に関するハイゼンベルクの不確定原理に「穴」があることは、中性子を使った光学実験で2012年に初めて示された。今回の研究では、後選択(post-selection)という新しい測定方法に関しての理論的を基にして、最先端の中性子干渉法という手法を用いた実験を行った。その結果、本来分離不可能な、中性子本体とその一自由度であるスピンの分離を観測することに成功した。この研究成果は、実験による新たな量子測定法の検証であると同時に、波及効果として、量子測定の基礎的な研究の発展はもとより、ナノサイエンスの新たな測定技術、測定の擾乱除去による精密測定の精度向上などの量子測定、量子情報技術への応用が期待できる。

●背景

現在のコンピュータや通信の様々な困難を克服すべく、量子力学の重ね合わせやエンタングルメントを活用した量子情報技術の開発が近年盛んにおこなわれている。その一方、この技術の基盤である量子理論、特に量子測定に関する基礎研究も、最近いくつか新発見が報告されている。本研究はアメリカ、フランスの研究者との共同研究でウィーン工科大学の長谷川らの中性子光学実験グループが、2012年の不確定性関係の破れの観測実験に続行した、量子測定の基礎に関する新現象の観測実験である。この新しい量子測定の基礎分野では東京工業大学・細谷暁夫名誉教授、大阪大学・井元信之教授、など日本の研究者も活躍している。

●研究の内容・意義

ナノの世界で起こる現象は量子力学によって記述され、2012年に実験による検証により改定を決定づけた不確定性原理をはじめ、波動と粒子の二重性、状態の重ね合わせのなど、日常の経験からすると奇異な現象が多く存在する。昨年テルアビブ大学のアハラノフ教授らが理論的に導出した新現象は、児童小説『不思議の国のアリス』に出てくる「チェシャ猫」にちなんで、「量子チェシャ猫」と名付けられた。通常の推察では「中性子とスピンは粒子とその粒子の性質」なので、分離不可分であるが、今回の研究では、この粒子とスピンの空間的な分離を中性子を使った光学実験で実証した。(図1参照)

実験には中性子干渉計という機器を用いた。この機器は1970年代にウィーンで開発され、世界最大の研究用原子炉を有するフランス・グルノーブルのラウエ・ランジュバン研究所でこの機器を用いた研究が続けられている。さらに、量子物理学の基礎現象に関する実験手段として最適な、この中性子干渉計を用いた研究は、ウィーン工科大学の長谷川のもとで行われて

いる。今回の研究は、さらに、チャップマン大学(米)のトラクセン教授、フランス国立科学研究センター(仏)のマツキン研究者らからの理論的な補助を得て遂行した。

中性子干渉計に入射した中性子は2つの光路に分れた後、それぞれの光路で適正なスピン操作にあう。この2つの光路は干渉計を出射する際に再び合わせられ、前方方向に進む光路では「後選択 (post-selection)」と呼ばれるスピンの選択が行われ検出器に入る。(図2参照) この段階で「量子チェシャ猫」が出現した。それから、まず中性子が干渉計なのどちらの光路を通過したのかを見るために、ビーム強度を弱める吸収版をそれぞれの光路に挿入した。その結果、吸収版を上の方の光路に挿入した時だけ検出される中性子の強度に変化があった --- 中性子は上の光路を通っている。次に、スピンはどちらの光路を通っているかを見るために、磁場をそれぞれの光路にかけた。今度は、下の光路の磁場をかけた時だけ強度に変化があった --- スピンは下の光路を通っている。これらの結果から、干渉計を通過する際に中性子とスピンはそれぞれ別の光路を飛行していたことになる。

不確定性原理をはじめ、量子力学の示唆する現象には日常生活からの推察では理解しがたい現象がたくさんある。今回の「量子チェシャ猫」も、新たな量子パラドクスであるといえる。アインシュタイン・ポドルスキー・ローゼン (EPR) のパラドクスが量子暗号や量子テレポーテーションの「基盤原理」となったように、今回の研究の成果は基礎科学の発展にとどまらず、新技術の基盤原理となりえる可能性を秘めている。また、独創的な基礎科学の研究において、理論・実験にわたる国際共同研究を日本人が先導したことは特筆に値する。

●今後の発展・波及効果

本研究によって、新たな量子測定法の開発の基盤として、後選択 (post-selection) という測定方法を用いる量子測定法の有効性が確認された。こうした量子物理学の基礎研究領域の創生は、この研究が国際的な共同研究で行われたことから明らかなように、世界に重要な学術的な貢献の発信をもたらす。さらには、新機軸の画期的な産業基盤技術の創出をももたらすことが期待される。具体的には、今回の成果がナノサイエンスにおける新たな測定技術につながれば、それに伴って量子制御・操作の拡張をもたらすと期待される。また、測定の擾乱除去による精密測定の精度向上などの量子測定、量子情報技術の発展をもたらす技術基盤をもたらすと期待される。

【発表雑誌】

雑誌名: Nature Communications (電子版: 7月29日)

タイトル: Observation of a quantum Cheshire Cat in a matter-wave interferometer experiment

著者: Tobias Denkmayr, Hermann Geppert, Stephan Sponar, Hartmut Lemmel, Alexandre Matzkin, Jeff Tollaksen and Yuji Hasegawa

DOI: 10.1038/ncomms5492

【用語説明】

チェシヤ猫: ルイス・キャロル(英)が書いた児童小説『不思議の国のアリス』に出てくる、架空の猫で、特有のひと癖ある「笑い」で有名である。作中では、この猫は徐々に消え、そしてその笑いだけが残ることがある。それに関してアリスは「笑いのない猫はよく見るけれど、猫のいない笑いは見たことがない」と驚く。このエピソードにちなんで、粒子(例えば、中性子)とスピンの分離をイスラエル人の理論物理学者アハラノフは「量子チェシヤ猫」と名付けた。オカルト、心霊主義的に言えば「霊体離脱」に相当するかもしれない。

中性子: 陽子と電子とならび原子核の構成要素のひとつ。電荷がゼロ(中性)で核子である陽子よりもわずかに重い。一定の半減期で陽子と電子と反電子ニュートリノに崩壊する。振る舞いは量子力学に従い、様々な基礎物理の観測・測定実験に使われる。

スピン: 量子物理学における素粒子の基本特性のひとつで、角運動量的一种である。磁場との相互作用があり、まさに「小さな磁石」のように振舞う。測定値は量子化され、連続量ではなく不連続量として観測される。

中性子干渉計: シリコン完全結晶から切り出したモノリシック構造の機器で、いわゆる可視光領域マッハ・ツェンダーの干渉計の構造をしている。干渉計内で数cmはなれたビームが最後の刃で再び合され、二つの干渉ビームが現れる。中性子は質量やスピンなどの粒子的な性質を持つ一方で、干渉計内では二つの光路に分かれ、それぞれの重ね合わせの状態になり、干渉波を形成する。

ラウエ・ランジュバン研究所: フランスのグルノーブルにある研究所で世界最大の研究用原子炉があり、中性子を用いた分光実験に関して世界最大規模のである。ESRF という放射光施設も隣接する。

後選択 (post-selection): 例えば写真を撮る際に、直接のイメージの撮影ではなく、偏光フィルターを用いて撮影するとコントラスト高い映像が得られるように、検出直前にスピンなどの自由度の選択を行うと、通常とは異なる現象が起こり得る。今回の研究は、的確な量子状態の生成に並んで、スピンの後選択の効果によって「量子チェシヤ猫」が出現した。

精密測定: たとえば中性子の電気双極モーメントの測定のように極微量の物理量、あるいは超高精度での測定が望まれる測定。このような物理量の測定では、多種の物理的自由度との相互作用による擾乱のための測定精度の低下がたびたび問題になる。今回観測した「量子チェシヤ猫」効果を有効に活用することにやり、避けがたい擾乱の効果の寄与を減らすことが可能になり、測定精度が向上することが期待されている。

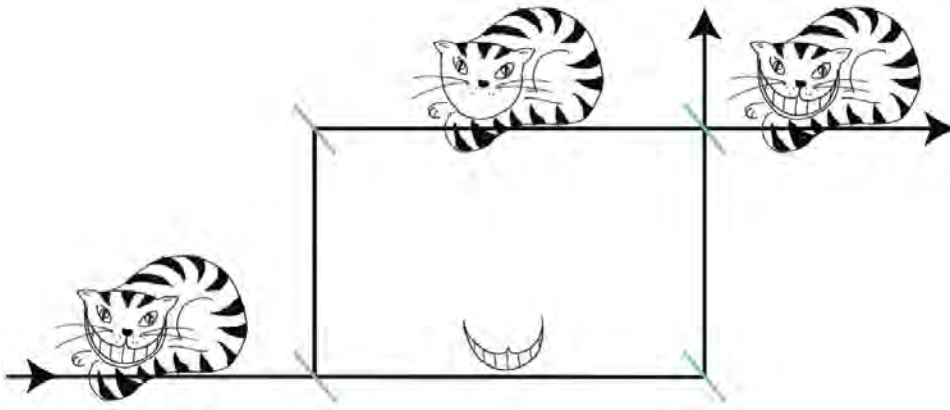


図1 量子論的「チェシャ猫」の模式図。(元々、猫とその笑いは分離不可能だという前提があるが)チェシャ猫は干渉計の2光路を通る際に、「猫自身」は上の光路を「その笑い」は下の光路を通過する。

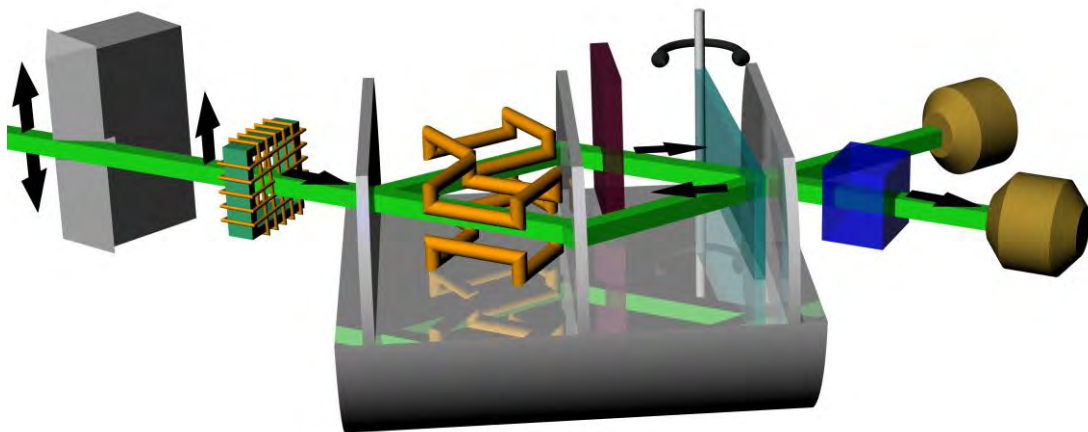


図2 実際の実験の配置図。スピンのそろった中性子ビームが干渉計の入射すると2つの光路に分かれる。適切なスピン操作を行い、干渉計を離れる干渉波に後選択 (post-selection) をすると「チェシャ猫」が出現する。すなわち、中性子本体が奥の光路、そのスピンの手前の光路を通過することになる。

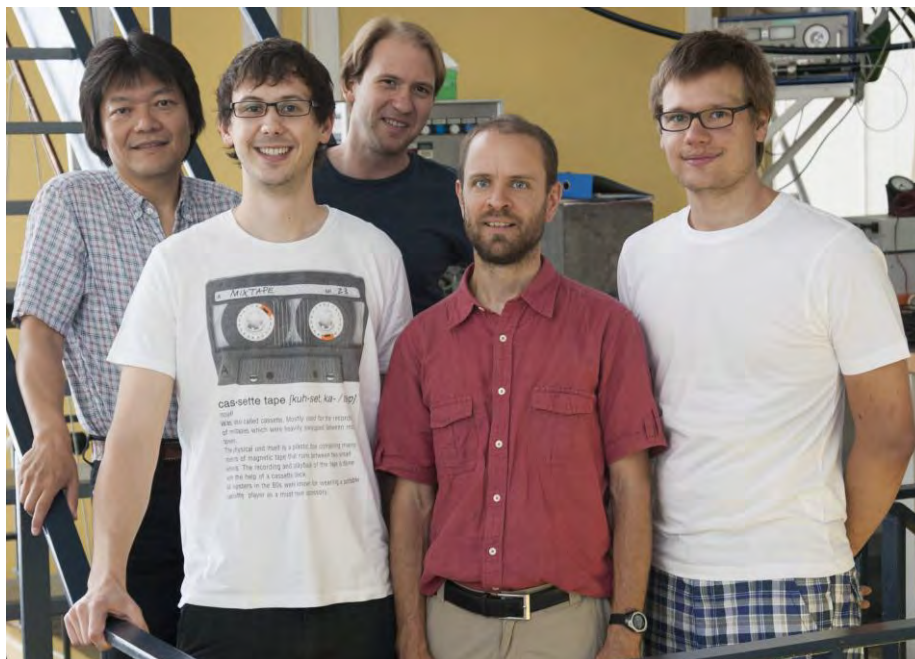


図3 今回の実験を行った、ウィーン工科大学、Atominstiut における長谷川祐司准教授の中性子光学実験グループ。

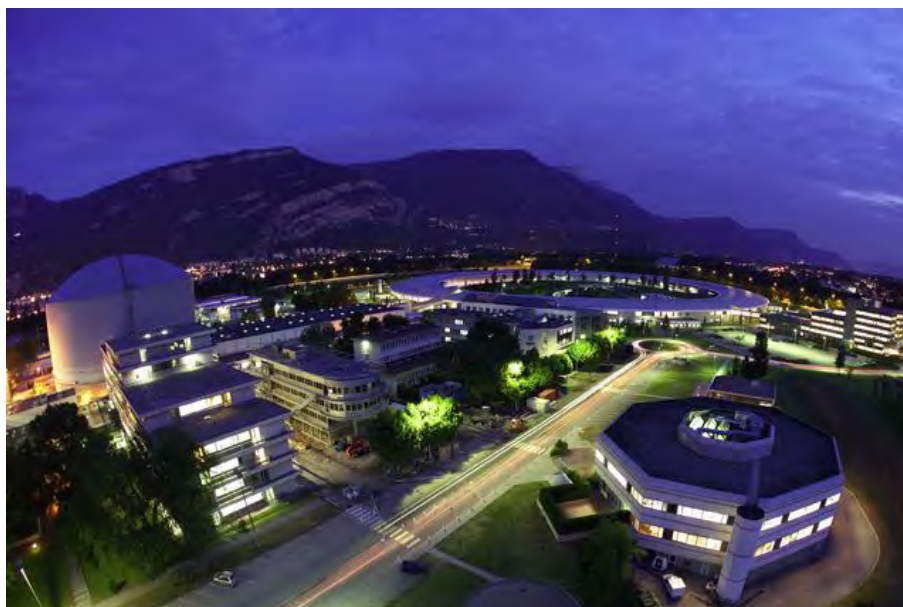


図 4 実際の実験は、フランス・グルノーブルにあるラウエ・ランジュバン研究所 (ILL) の研究用原子炉を用いて行った。(<http://www.ill.eu> より)