



東北大学

平成 26 年 11 月 28 日

報道機関 各位

東北大学多元物質科学研究所

アインシュタインとボーアの思考実験を分子レベルで実現！

<概要>

東北大学多元物質科学研究所の上田潔教授、フランスのソレイユシンクロトロン放射光施設の Catalin Miron 研究員のグループ、スウェーデン王立工科大学の Faris Gel' mukhanov 教授らの合同チームは、アインシュタインとボーアの論争で思考実験として提案された 2 重スリット実験^{*1)} を、酸素分子の 2 個の酸素原子を 2 重スリットに置き換えることによって、初めて、実現しました。

アインシュタインとボーアは、20 世紀前半、光や電子があわせ持つ波としての性質と粒子としての性質の 2 重性の解釈について、論争を繰り広げました。彼らが論争の際に用いた手法は思考実験です。実際には実験を行うことなく、理論的思考によって実験結果を演繹するものでした。彼らの思考実験は、当時、実現できないものばかりでしたが、のちの研究者の想像力を大いに掻き立てました。現在も様々な実験的検証が行われています。合同チームは、アインシュタインとボーアの論争でも主要な位置を占める 2 重スリット実験を分子レベルで実現しました。そして、ボーアの反論を裏付けるように、一方のスリット（原子）だけが受ける電子の反跳運動量を観測した場合には干渉縞が消え、これが観測できない場合には干渉縞が現れることを、初めて、実証することに成功しました。

この結果は、英国の科学雑誌『Nature Photonics』オンライン版（12 月 1 日付け：日本時間 12 月 2 日）に掲載されます。

(お問い合わせ先)

東北大学多元物質科学研究所

教授 上田 潔

秘書 生井 淳子

電話番号：022-217-5381/5380 FAX: 022-217-5380

E-mail: ueda@tagen.tohoku.ac.jp

namai@tagen.tohoku.ac.jp

(別紙)

1. 背景

われわれを取り巻く世界は様々な分子が集まって構成されています。分子は様々な原子で構成され、原子は電子や陽子・中性子といった素粒子で構成されています。量子力学によれば、光子や電子、あるいは素粒子が集まってできた原子や分子も、波としての性質と粒子としての性質をあわせ持ちます。この波と粒子の2重性にまつわる量子力学の解釈を巡って、20世紀前半にアインシュタインとボーアは論争を繰り広げました。この論争でアインシュタインが提案した思考実験の代表的なものに2重スリットによる干渉実験があります(図1)。量子力学では粒子は広がりをもった波動関数で記述されます。アインシュタインは、広がりをもった波動関数が粒子の運動を記述するものではないことを示そうとして、2重スリット思考実験を提案し、粒子(光子や電子)がスリットを通過するときに粒子が通過した方のスリットが受ける反跳運動量を測定すれば粒子がどちらのスリットを通過して衝立に到達したかがわかると主張しました。ボーアは、スリットを通過するときにスリットが受ける反跳運動量を測定すると、スリットの位置に不確定性が生じて衝立上の干渉縞は消滅すると反論しました。このことを実験的に検証することは、当時は不可能に思っていました。

2. 研究の手法と成果

本研究では、アインシュタインとボーアの論争にある2重スリットを2個の酸素原子に置き換えました。軟X線を用いて酸素分子を励起すると分子は高速の電子を放出して脱励起します。この励起された酸素分子は、脱励起と競争するようにして、速やかに2個の酸素原子へと解離します。合同チームは、フランスの中型高輝度放射光施設^{*2)}ソレイユの最先端の軟X線ビームラインにおいて、酸素分子を励起し、放出された電子と電子放出の結果生成されたイオンの運動量を同時に計測しました。この実験の結果、酸素分子または解離生成した酸素原子と高速電子との間の運動量の交換を測定することに成功しました。ここで、2つのシナリオが考えられます。第1のシナリオは、高速電子の放出が酸素分子の解離の前に起きる場合です。このとき、2個の酸素原子、つまり2つのスリットはつながっています。この場合、2個の酸素原子が受ける反跳運動量は同じです(図1のaとb)。従って、どちらの原子が電子を放出したかは決定できません。第2のシナリオは、分子が解離してから高速電子が放出される場合です。この場合、一方の酸素原子が高速電子の反跳運動量を受け取るため、どちらの原子が電子を放出したかを決定できます(図1のcとd)。合同チームはこの2つのシナリオに相当する現象をそれぞれ観測し、第1のシナリオの場合には有名なヤングの2重スリット実験のように干渉縞が現れ、第2のシナリオの場合には干渉縞が消えることを実証しました(図2)。

3. 本研究の意義

波動性と粒子性の2重性にまつわるアインシュタインとボーアの論争と思考実験は、多くの研究者の想像力を掻き立てて、2012年のSerge HarocheとDavid Winelandのノーベル物理学賞受賞に見るように、「個別の量子系の計測と制御を可能にする実験的な手法の発展」に大いに役立ってきました。本研究もまた、80年前にアインシュタインが提案した可動な2重スリットの干渉実験を、個別の量子系の計測、つまり軟X線励起した酸素分子から放出される高速電子とスリットに見立てた2個の酸素原子との間の運動量交換を観測することによって、実現したものです。結果はボーアの反論を支持するものでした。

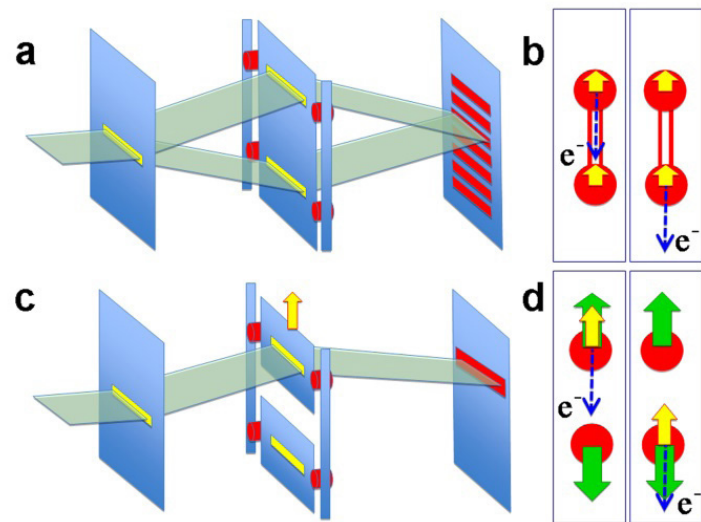


図 1. (a) と (c)、アインシュタインとボーアの 2 重スリット思考実験の模式図；2 個のスリットが固定された場合 (a) とそれぞれ独立して動くことができる場合 (c)。 (b) と (d)、2 重スリットを 2 個の酸素原子に置き換えた本実験の模式図；2 個の原子が結合している場合 (b) と独立している場合 (d)。

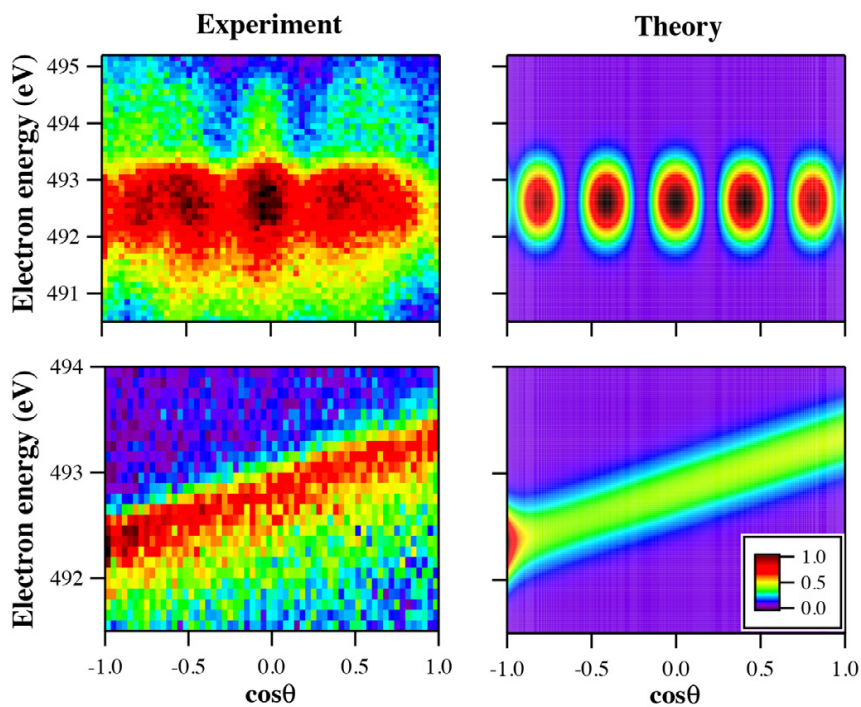


図 2. 2 重スリット思考実験を分子レベルで実現した実験結果 (左) と計算結果 (右)。高速電子の反跳運動量からどちらの原子が電子を放出したかを決定できない場合は、有名なヤングの 2 重スリット実験で観測される干渉縞と同様な干渉パターンが観測され (上)、決定できる場合は干渉縞が消える (下)。

《用語解説》

*1) 2 重スリット実験

ヤングは 19 世紀初めに光源からの光を平行な 2 つのスリットを通すと衝突上に干渉縞が現れることを示した。これが有名なヤングの 2 重スリット実験であり、光の波動性を示すものである。その後、量子力学の誕生とともに、粒子のもつ波動性を示す実験と位置づけられるようになった。20 世紀前半までは典型的な思考実験であったが、20 世紀後半には電子を用いた 2 重スリット実験が行われるようになった。しかし、アイン

シュタインとボーアの論争にあるように、スリットと電子との運動量交換を観測し、電子の経路が指定できた場合には干渉縞が消え、電子の経路が指定できない場合には干渉縞が現れることを実験的に検証したのは、本研究が初めてである。

*2) 中型高輝度放射光施設

高エネルギーの電子が磁場中で力を受けて曲がるときに放出される電磁波をシンクロトロン放射光と呼ぶ。放射光施設とは、赤外線からX線にいたるシンクロトロン放射光を光源として利用する施設である。加速器技術の進歩とともに放射光源としての明るさ（輝度）も増し、現在、世界の主な放射光施設は第3世代高輝度放射光施設と呼ばれるものがほとんどである。放射光施設は電子のエネルギーにより大型・中型・小型に区別される。日本唯一の第3世代高輝度放射光施設であるスプリング8は、電子エネルギーが世界で最も高い（8 GeV）典型的な大型放射光施設である。一方、ヨーロッパ諸国やアメリカなどでは、電子エネルギーがより低い（3 GeV 前後）の高輝度放射光が数多く存在し、中型放射光施設と呼ばれている。スプリング8のような大型放射光施設では、主に物質の構造決定に必要な波長の短いX線（硬X線）が得られるが、物質の電子励起を行うのに用いられる、より波長の長いX線（軟X線）の生成は、中型放射光施設の方が得意としている。日本には中型高輝度放射光施設がないために、多くの軟X線利用研究が海外の中型高輝度放射光施設で行われている。現在、我が国でも中型高輝度放射光施設の建設が検討されている。