

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 1 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24540423

研究課題名(和文)電子Cold Collisionによる分子極限量子効果の探索

研究課題名(英文)Investigations of molecular quantum effect in the cold electron collision

研究代表者

北島 昌史(Kitajima, Masashi)

東京工業大学・理工学研究科・准教授

研究者番号：20291065

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：電子のde Broglie波長が原子・分子の大きさよりも遥かに長くなる様な、超低エネルギー領域における電子衝突(電子Cold Collision)実験を通して、量子論的な特異物理現象の発現を探索した。本研究では、放射光を用いることで衝突エネルギー10meV以下までの超低エネルギーの電子ビームを生成し、N₂、O₂などの二原子分子、CO₂など三原子分子の電子衝突断面積を測定した。また、単原子分子であるHeについても、精密な断面積測定に成功し、これまで多くの研究の基準となっていた理論予想値が正しいことを明らかにすることが出来た。

研究成果の概要(英文)：Investigations of the striking quantum scattering events which take place as long de Broglie wavelength, low-energy electrons encounter molecules, in the cold collision regime, are carried out. In this study, total cross sections for molecular targets, such as N₂, O₂, CO₂ and so on have been investigated. The total cross sections for these molecules have shown several structure due to resonances. The absolute total cross sections for electron scattering from He are also obtained. The present results proved the reliability of the theoretically obtained standard cross sections.

研究分野：原子・分子科学

キーワード：超低エネルギー電子衝突 量子ビーム 衝突断面積 放射光

1. 研究開始当初の背景

原子や分子をはじめとする、量子力学により記述されるミクロな標的の内部状態や相互作用についての情報は、電子、陽子、中性子、あるいはイオンなどの性質のよく分かっている粒子を用いた散乱実験により、その詳細な情報が明らかにされてきた。なかでも、電子と原子・分子の衝突は量子力学創成期から散乱問題の代表的なモデルとして、理論・実験の両面から広く研究されてきた。特に電子・原子・分子衝突においては支配的な相互作用（クーロン力）が既知であることから、有限系の少数多体問題における複雑なダイナミクスを精密に検証する場をも提供している。一方、電子・原子・分子衝突の理解は種々の反応素過程の解明やプラズマ科学、大気科学、核融合科学、放射線作用、などの広範な分野の基礎としても重要である。

さて、電子の衝突・散乱過程では、電子の衝突エネルギーの低くなると、電子の de Broglie 波長が長くなることに起因し、量子力学的効果による特有の現象が現れる。衝突エネルギーが 100meV 以下ともなると、電子の de Broglie 波長は数十 Å 以上となり原子・分子のサイズよりもはるかに大きくなっていく。このような状況での電子衝突は電子 Cold Collision (Cold Electron Collision) と呼ばれており特異的な物理現象の発現が期待され大変興味深い。

また、超低エネルギーにおける電子衝突断面積は応用上も重要である。例えば、放射線の物質への作用は、放射線と物質の相互作用により生成した大量の二次電子がその主役であり、この二次電子が物質中の原子・分子と衝突繰り返すことで、エネルギーを次第に失い熱平衡状態となる。また、放電・プラズマ現象等においても電子は原子・分子と衝突を繰り返すことでエネルギーを次第に失い、放電場に印加されている加速電圧と標的粒子の温度で決まる熱平衡状態へと収束して行く。これらの熱化した大量の電子がどのような断面積を有しているかで、後続過程を大きく変わって行くのである。

数 eV 以下の低エネルギー領域の電子と原子・分子との衝突過程の研究手法としては、古くからスオーム法が用いられてきた。この手法では、電子源より気体中に放出された多数の電子が、電子の入射方向に印加された電界の下で、標的となる原子・分子と繰り返し衝突しながら運動する。その結果、標的分子と熱平衡になるまでエネルギーを失いながら、あるエネルギー分布を持った電子群（スオーム）が形成される。この電子スオームについて輸送係数といったマクロな量を測定する。スオーム法では、実験によって得られるマクロな量を、熱平衡を仮定してボルツマン方程式を介することで、衝突断面積というミクロな物理量に関係づける。ただし、この方法では電子と熱分布している標的粒子と

の多重衝突の末に得られたマクロな物理量を測定するため、電子と標的粒子の衝突断面積そのものを直接測定していることにはならないのである。すなわち、電子と標的粒子の衝突断面積を直接測定するには Single Collision 条件下での電子衝突実験が必要となる。

電子・原子・分子衝突実験では、熱フィラメントからの熱電子を電子源とする手法が一般的に用いられてきたが、熱フィラメントからのエネルギー拡がりのある熱電子を用いるために、実験可能な衝突エネルギーの下限は約 500meV 程度であった。

本研究グループでは、独自の手法である、しきい光電子源を開発し、約 10 meV という極めて低いエネルギーの電子ビームの生成に成功し、重い希ガス原子である Ar, Kr, Xe を標的とした Single Collision 条件下での超低エネルギー電子衝突実験を達成する手法を開発した。この実験手法により、量子力学的な効果によって希ガス原子の電子衝突断面積値がほとんど 0 になる Ramsauer - Townsend 極小を明確に観測することに成功し、実験手法は確立されたものとなった。

我々は、開発した実験手法を用いて Ar, Kr, Xe の希ガス原子の超低エネルギー電子衝突断面積をはじめ Single Collision 条件下で精密に測定することに成功した。その結果、それまで間接的な手法から推定されていた値よりも、低エネルギー極限での断面積値が大幅に小さいものであることを見出した。また、これまで信頼されていた、理論計算による衝突断面積についても疑問を投げかけるものとなった。

なお、我々の開発した実験手法が、極めて高いエネルギー分解能を達成できることを利用して、10eV 近傍に現れる、希ガス原子の Feshbach 共鳴の衝突全断面積を、はじめて測定することに成功した。このように、主に重い希ガス原子を標的とした電子 Cold Collision 実験により、その特異的な現象の一旦が垣間見えてきた。

2. 研究の目的

本研究は、標的を原子から分子に拡張することで、極めて de Broglie 波長の長い電子波と、多くの自由度のある物質（分子）との相互作用により発現する量子効果の探索を目的としたものである。分子は電子的な自由度のほかに振動および回転の自由度をもち、有限少数多体問題の典型例である。実際に、 N_2 をはじめとする多くの分子について、1~4 eV 程度の電子衝突で起こる共鳴では、分子の振動の自由度が共鳴状態の生成と崩壊に大きく寄与することが知られている。

電子 Cold Collision においては、衝突電子の de Broglie 波長が極めて長くなるだけでなく、衝突時間も非常に長くなる。例えば 10 meV の電子衝突では衝突時間はおよそ

10^{-14} sec となり、これは分子の振動周期に匹敵する。これらのことから、分子による電子 Cold Collision は振動・回転との強い相互作用を誘起し、より特異的な物理現象の発現が期待される。

電子 Cold Collision における特異な効果は電子衝突断面積に現れることが期待される。本研究では、分子の振動・回転励起のしきいエネルギー近傍の超低エネルギーの電子衝突断面積を Single Collision 条件下で測定することを目指した。

また、本研究では、標的を分子に拡張する前段階として、最も基本的な系である He および Ne による超低エネルギー電子衝突断面積を測定し、これまで最も信頼されてきた理論が超低エネルギー電子衝突においても成り立つかを検証することも目的の一つとした。

3. 研究の方法

本研究は、電子 Cold Collision における量子効果を探索するために、100 meV 以下の超低エネルギーの電子衝突断面積を種々の分子を標的として測定した。

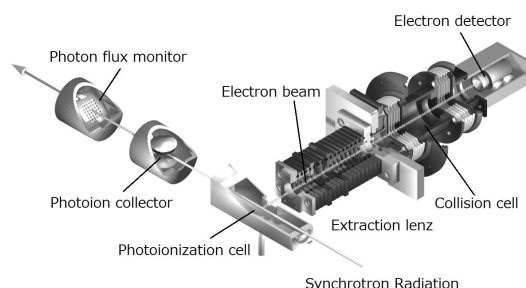


図 1. しきい光電子源を用いた電子 Cold Collision 実験装置の概略

本研究では、熱フィラメントの代わりに、希ガス原子の電離しきいエネルギーでの光電離で生成するエネルギーがほとんど“0”のしきい光電子を電子源として用いる、本研究のグループで開発した、「しきい光電子源」を採用した。しきい光電子源からの超低エネルギー電子ビームを利用することで超低エネルギー電子衝突実験を行った。実験装置の概略を図 1 に示す。電子衝突実験装置は光イオン化セル (Photoionization cell), 静電レンズ系 (Extraction lens), 衝突セル (Collision cell), 電子検出器 (Electron detector) から成り、これらを二重の磁気シールド内に設置して、地磁気の影響を遮断する。光イオン化セル内の希ガス原子に放射光 (Synchrotron Radiation) を照射し、生成したしきい光電子を静電レンズにより形成する特殊な電場を用いて非常に高い効率で捕集し、これをビームにして用いる。エネルギーがほぼ“0”のしきい光電子のみを捕集するため、エミッタンスの小さな電子ビームを実現できる。このため、電子ビームを減速した際に生じる電子ビームの広がり角を抑え

ることができ、結果的に減速の際の電子ビームの発散に伴う電子ビーム強度のロスを抑減できる。実験は、高エネルギー加速器研究機構・物質構造科学研究所・放射光実験施設 (KEK-PF) の真空紫外ビームライン BL-20A で行った。

本研究では、10 meV 程度までの極めて低い衝突エネルギー領域で実験を行うため、電子衝突エネルギーを数 meV 程度の高い精度で校正する必要があるが、これには測定対象となる分子の共鳴構造を用いる。ところが、ほとんどの分子の共鳴エネルギーは、これまで、数 10meV の精度でしか知られていなかった。このため、本研究では、高い精度でその共鳴エネルギーが知られている希ガス原子と標的となる分子の混合気体について、透過電子強度を測定することで、標的分子の衝突断面積にあらわれる共鳴構造のエネルギーを高い精度で決定する手法を確立し、これに基づいて高精度の電子エネルギーの校正法を確立した。

4. 研究成果

図 2 に本研究で得られた He および Ne の電子衝突断面積と、本研究グループがこれまでに得た Ar, Kr, Xe の測定結果を、既存の実験結果および理論計算結果と比較したものを示した。これまで、実験的に直接測定出来なかった、100 meV 以下の超低エネルギー領域で、電子衝突断面積を得ることに成功し、He および Ne については、既存の理論予想値が正しいことを明らかにした。

一方、我々の実験結果を理論計算と比較すると、Kr, Xe と標的原子が大きくなるにつれて、100 meV 以下の低エネルギー領域で理論による断面積値が実験値よりも大きくなる傾向が見られる。これらの理論計算は、スオーム法で得られた実験結果との一致は引が比較的良い。スオーム・パラメータを再現する断面積セットをつくる際には、その出発点として、有効長理論 (MERT) を用いることが多いが、MERT が適用できるエネルギー範囲が、従来考えられていたものより狭いことをが、この不一致から明らかになった。

なお、本研究により He についての既存の理論予想値が超低エネルギー領域においても正しいことが明らかになったが、He の理論計算値は、これまでほとんどの断面積データの基準に用いられており、電子衝突過程を内含する多くの物理現象や反応素過程の研究に大きな意義がある。

図 3 には、本研究で得られた N_2 , O_2 , および CO_2 の電子衝突断面積と、これまでのデータから得られていた推奨値の比較を示した。本研究により、これまで直接的な測定による結果が得られていなかった、超低エネルギー領域での衝突全断面積を明らかにすること

が出来た。特に、 O_2 では分子の振動励起エネルギー近傍に共鳴状態があることが知られていたが、 O_2 の振動励起しきいエネルギーよりも低いエネルギー準位を有する共鳴状態まで、その断面積を測定することに成功した。本研究による測定から、一連の共鳴状態の寿命は、互いにほぼ等しいことも明らかになった。

なお、今回得られた N_2 , O_2 , および CO_2 は、永久双極子モーメントを持たない分子であるにも関わらず、 CO_2 のみ超低エネルギー領域で極めて大きな衝突断面積を有することが本研究においても確認された。また、低エネルギーでのその値は、推奨値よりも大きいことが示唆された。この断面積の増大は、電子 Cold Collision での特徴と考えられる、virtual state として知られているもので、本

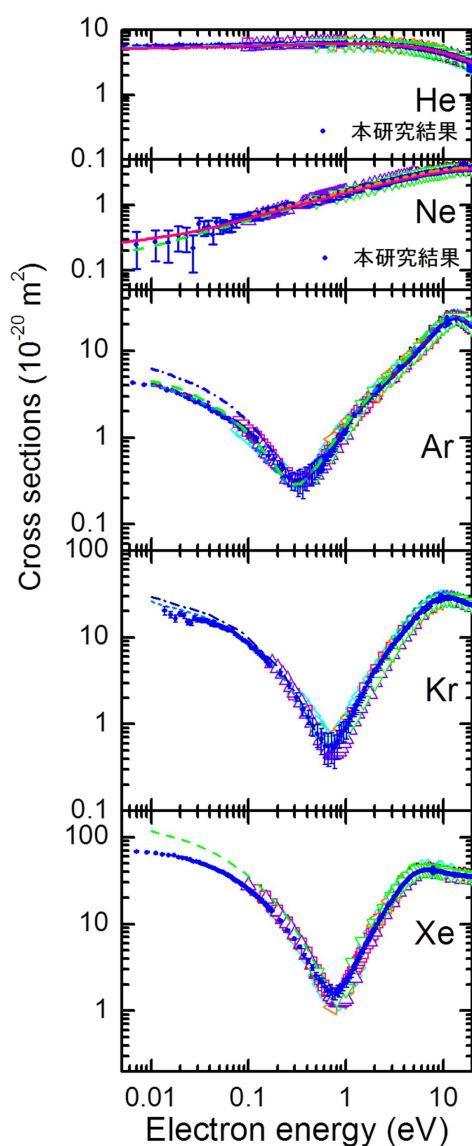


図2. 希ガス原子の電子衝突断面積の比較。本研究で得られたHeおよびNeの電子衝突断面積と、本研究グループがこれまでに得たAr, Kr, Xeの測定結果を、既存の実験結果(プロット)および理論計算結果(曲線)と比較した。

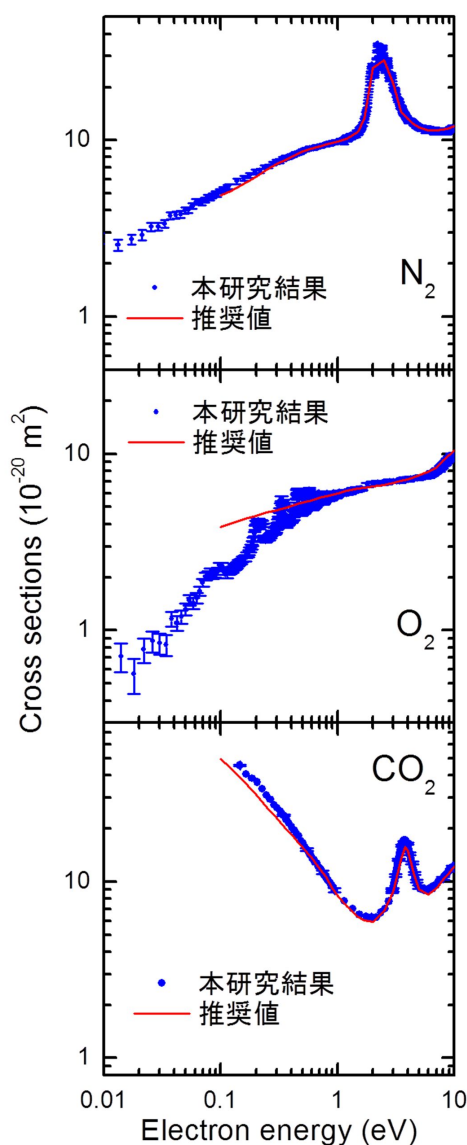


図3 本研究で得られた N_2 , O_2 , および CO_2 の電子衝突断面積とこれまでのデータから得られていた推奨値の比較。

研究によってもその存在が確かめられたことになる。

以上、本研究では、これまで測定が困難であった超低エネルギーでの原子・分子の電子衝突断面積を、高い精度で測定することに成功した。また、超低エネルギーの電子衝突における、特異性についてもその発現の一旦を垣間見ることが出来た。今後、より多くの分子について測定することで、多くの知見が得られるものと考えられる。さらに、より多くの情報を得ることが出来る、角度微分断面積やエネルギー微分断面積を測定することが可能になれば、飛躍的に多くの知見が得られることが期待される。

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 3件)

重村圭亮、北島昌史、小田切丈、菅悖史、加藤英俊、星野正光、田中大、伊藤健二、Total cross sections for electron scattering from He and Ne in cold electron collisions、Journal of Physics: Conference Series 488巻 042015-1-1頁 2014年、査読あり

北島昌史、重村圭亮、黒川学、小田切丈、加藤英俊、星野正光、田中大、伊藤健二、Measurements of ultra-low-energy electron scattering cross sections of atoms and molecules、AIP Conference Proceedings 1588巻, 78-86頁 2014年、査読あり

重村圭亮、北島昌史、黒川学、豊島海士、小田切丈、菅悖史、加藤英俊、星野正光、田中大、伊藤健二、Total cross sections for electron scattering from He and Ne at very low energies、Physical Review A 89巻 022709-1-9頁 2014年、査読あり

〔学会発表〕(計 13件)

北島昌史、重村圭亮、穂坂綱一、小田切丈、星野正光、田中大、Ultra-low-energy electron collision cross sections of atoms and molecules、15th International Congress on Radiation Research、2015.5.27、京都国際会館(京都府・京都市)

近藤篤史、重村圭亮、北島昌史、小田切丈、星野正光、田中大、しきい光電子源を用いた CO₂ の電子衝突全断面積の高分解能測定、日本物理学会第70回年次大会、2015.3.21、早稲田大学早稲田キャンパス(東京都・新宿区)

重村圭亮、近藤篤史、北島昌史、小田切丈、星野正光、田中大、しきい光電子源を用いた CO₂ の電子衝突全断面積測定、物構研サイエンスフェスタ 2014、2015.3.17、つくば国際会議場(茨城県・つくば市)

北島昌史、重村圭亮、近藤篤史、黒川学、小田切丈、加藤英俊、星野正光、田中大、伊藤健二、Cross section measurements of ultra-low energy electron collisions with atoms and molecules utilizing the threshold photoelectron source、11th Asian International Seminar on Atomic and Molecular Physics、2014.10.8、東北大学片平キャンパス(宮城県・仙台市)

近藤篤史、重村圭亮、北島昌史、小田切丈、星野正光、田中大、Modified electron lens

system for investigating cold electron collision of linear molecules、原子衝突学会第39回年会、2014.10.6、東北大学片平キャンパス(宮城県・仙台市)

重村圭亮、北島昌史、小田切丈、加藤英俊、星野正光、田中大、伊藤健二、しきい光電子源を用いた電子-H₂衝突実験の現状、物構研サイエンスフェスタ 2013、2014.3.18、つくば国際会議場(茨城県・つくば市)

重村圭亮、北島昌史、小田切丈、加藤英俊、星野正光、田中大、伊藤健二、e⁻-H₂分子の Feshbach 共鳴エネルギーの決定、原子衝突学会第38回年会、2013.11.16、理化学研究所(埼玉県・和光市)

北島昌史、重村圭亮、小田切丈、加藤英俊、星野正光、田中大、伊藤健二、Measurements of ultra-low-energy electron scattering cross sections of atoms and molecules、4th International Meeting on Frontiers of Physics、2013.8.28、Pahang(マレーシア)

重村圭亮、北島昌史、小田切丈、菅悖史、加藤英俊、星野正光、田中大、伊藤健二、Total cross sections for electron scattering from He and Ne in cold electron collisions、28th International Conference on Photonic, Electronic, and Atomic Collisions、2013.7.24-30、蘭州(中国)

重村圭亮、北島昌史、小田切丈、菅悖史、加藤英俊、星野正光、田中大、伊藤健二、Total cross section for electron scattering from He, Ne, Ar, Kr, and Xe at ultra-low energy、18th International Symposium on Electron - Molecule Collisions and Swarms、2013.7.21、金沢文化ホール(石川県・金沢市)

重村圭亮、北島昌史、小田切丈、加藤英俊、菅悖史、星野正光、田中大、伊藤健二、しきい光電子源を用いた超低エネルギー電子衝突実験 - HeおよびNeの電子衝突全断面積 -、物構研サイエンスフェスタ 2013、2014.3.14、つくば国際会議場(茨城県・つくば市)

重村圭亮、北島昌史、小田切丈、加藤英俊、菅悖史、星野正光、田中大、伊藤健二、HeおよびNeの超低エネルギー電子衝突全断面積、日本物理学会2012年秋季大会、2012.9.20、横浜国立大学(神奈川県・横浜市)

重村圭亮、北島昌史、小田切丈、加藤英俊、

菅 惇史、星野正光、田中 大、伊藤健二、
しきい光電子を電子源とする超低エネルギー電子ビームを用いた H₂ 分子の Cold Electron Collision 実験、原子衝突学会
第 37 回年会、2012.7.29、電気通信大学(東京都・調布市)

〔その他〕

ホームページ等

www.chemistry.titech.ac.jp/~kouchi/index.html

6 . 研究組織

(1)研究代表者

北島 昌史 (KITAJIMA Masashi)

東京工業大学・大学院理工学研究科・准教授

研究者番号：20291065