

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2008～2010

課題番号：20540387

研究課題名(和文) Cold Collision 分光法による極限量子効果の探索

研究課題名(英文) Investigations of strong quantum dominated effect in the cold collision

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

研究成果の概要(和文)：本研究は、電子 Cold Collision と呼ばれる超低エネルギー電子衝突における電子分光法を開発・確立し、極めて波長の長い電子波と物質(原子・分子)との相互作用により発現する量子効果の探索を目指した。超低エネルギー電子ビームの生成に放射光を用いる全く新しい手法を考案し、原子・分子の衝突断面積を精密に測定する実験装置を開発した。種々の原子・分子について測定を行い、極限エネルギー領域での断面積データを得ることに成功した。

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. A new experimental technique using the synchrotron radiation as an electron source was developed.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2009年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2010年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・原子・分子・量子エレクトロニクス

キーワード：超低エネルギー電子衝突、放射光、しきい光電子、電子散乱、Cold Collision

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ことが知られている。さらに、衝突エネルギーが 100meV 以下となると、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 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。

原子・分子を標的とする電子衝突実験では、エネルギーの揃った電子ビームが必要であるが、これまでは熱フィラメントからの熱電子が電子源として一般的に用いられてきた。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、電子レンズとエネルギー選別器を用いてエネルギーの揃った電子ビームとし、気体標的である原子・分子によって散乱された電子をエネルギー分析・検出するものである。しかしながら、実験可能な衝突エネルギーの下限は約 500meV 程度である。これは、電子源として使われる熱フィラメントを用いる熱電子放出法に起因する。すなわち、空間電荷制限、エネルギー分解能と電子ビーム強度の相反関係によるものである。また、気体を標的とする実験では固体表面に比べて標的の粒子密度が非常に小さいため、入射電子ビーム強度が大きいことが必要なこと、さらに、試料の空間的広がりを上まわる長焦点のビームが必要なことから、より困難な実験となる。

熱フィラメントに代わる、新しい電子源として、希ガス原子等の光電離で生成する光電子が注目されている。デンマークとドイツの2つのグループは、光電子を電子源とする研究手法を開発・実用化し、大きな成果を収めている。これらの新しい手法では、これまで不可能であった超低エネルギー領域において、Single Collision (一回衝突) 条件下での電子衝突実験が可能とした。光電子を用いた超低エネルギー電子衝突実験技術の開発は 1990 年代より行われてきたが、実用的な技術となったのは 2000 年頃であるが、現在でもデンマークとドイツの2つのグループのみの技術である。いずれの手法も、専用の放射光ビームラインや大がかりなレーザーが必要であり、汎用を用いることのできる技術となっていなかった。

2. 研究の目的

本研究は、光電子を電子源とする電子ビーム生成手法を拡張し、より汎用な高分解能、大強度の超低エネルギー電子ビーム生成手法を開発することで、超低エネルギー電子衝突すなわち Cold Collision 実験を達成し、その量子効果を探査することを目的とした。

3. 研究の方法

電子ビームのエネルギー幅は、光のエネルギー分解能による光電子のエネルギー分布

だけでなく、光イオン化に用いる光のスポットサイズと電子捕集のために光イオン化領域に印加した電位勾配の積にも依存する。光電子を効率よく捕集するためにはある程度の電位勾配が必要であるため、高分解能の電子ビームを生成するためには、高い光エネルギー分解能と、非常に小さな光のスポットサイズを両立しなければならない。しかし、光のスポットサイズを小さくすると、ビーム強度が小さくなるだけでなく実験装置に対する光軸の調整が非常に難しくなるなど、ビームタイムの中での実験が極めて困難になる。また、電子ビーム強度を大きくするために光の強度を大きくするとスポットサイズが小さいために、光イオン化領域での空間電荷効果が大きくなり、そのことにより電子ビームのエネルギー幅が広がってしまう。

そこで本研究では、電子ビームのエネルギー幅と電子ビーム強度の相反関係を解決するための新しい電子ビーム生成手法を開発した。本手法の特徴は、電子ビームの電子源として、エネルギーがほぼゼロである“しきい光電子”に着目し、“浸み出し電場”を用いて非常に弱い捕集電場でしきい光電子を捕集することである。この浸み出し電場とは電子レンズのつくる電場が、グラウンドと等しい電位にある光イオン化セルの電子捕集用のアパーチャーを超えて、光イオン化領域にしみ出す電場である。この浸み出し電場により光イオン化領域から電子レンズに向かって非常に緩いポテンシャル勾配が形成され、エネルギーがほぼゼロのしきい光電子は立体角 $4\pi \text{ sr}$ という高い効率でポテンシャル勾配に沿って静電レンズ系へ取り込まれる。一方、エネルギーを持って生成した光電子は、その運動方向をあまり変えられず、静電レンズ方向に放出されたもの以外は捕集されない。すなわち、浸み出し電場法ではエネルギー選択的に光電子を捕集することになる。このエネルギー選択性は高く、数 meV 以上のエネルギーの光電子はほとんど捕集されない。

さて、しきい光電子のみを捕集するための捕集電場は非常に弱いため、電子ビームのエネルギー幅に寄与する光のスポットサイズと捕集電場の勾配の積を、スポットサイズをそのままにして、小さくすることが出来る。このため、放射光強度を犠牲にすることなく、高分解能の電子ビーム生成が可能である。また、空間電荷効果を小さく抑えられるため、従来法よりも強度の限界ははるかに大きくなることも特徴である。さらに、エネルギーがほぼゼロ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低減

できる。

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、静電レンズ系、衝突セル、電子検出器から成り、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している。また光イオン化セル後方には光子エネルギーをモニターするためのAr⁺イオン検出器であるマイクロチャンネルプレートと放射光強度をモニターするためのAuメッシュを設置している。これら全体を真空チャンバー内に収納している、実験は、PFリングの高分解能真空紫外分光ビームラインBL-20Aで行った。

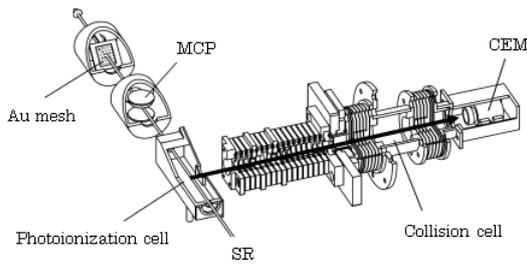


図1 開発したしきい光電子源と電子衝突断面積測定実験装置。

4. 研究成果

本研究により得られた Cold Electron Collision 領域から 20 eV おける Kr の電子衝突全断面積を図2に示す。Kr の電子衝突全断面積は、Ramsauer - Townsend 極小として知られる、量子力学的効果により出現する衝突断面積の極小が約 700 meV に現れ、それより小さな衝突エネルギー領域では、衝突エネルギーの減少とともに、断面積値が急激に大きくなるのが分かる。200 meV 以上では多くの実験結果が報告されており、我々の結果もよく一致している。一方、200 meV 以下では、わずかに Gus' kov らの報告があるが、彼らの報告値は 200meV 以上のエネルギー領域において他の実験結果と異なっており、信頼性が低い。本研究の結果から、Cold Electron Collision 領域での断面積の増大は 30 meV で $17 \times 10^{-20} \text{ m}^2$ に達することが分かった。図3、図4に示した Ar, Xe についても、Cold Electron Collision 領域における電子衝突全断面積は Gus' kov らの報告があるのみであり、このことは Cold Electron Collision 領域では、希ガスの様な基本的な系であっても、正確な電子衝突全断面積が知られていないことを示している。

さらに、これまで低エネルギー領域で信用されていた理論モデルである有効距離理論と、実験結果を比較したところ、超低エネルギー領域ではこの理論が破綻することを見出した。

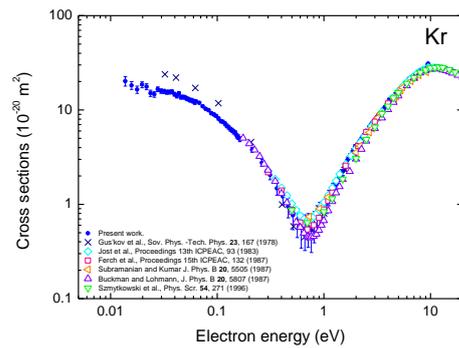


図2 本研究により得られた、超低エネルギー領域から 20 eV までの Kr の電子衝突断面積。これまでの報告例のあるエネルギー領域では、従来の値を良く再現している。一方、これまでの信頼できる報告のない超低エネルギー領域 (200 meV 以下) においては、衝突断面積が非常に大きくなること、有効距離理論で推定されていた値よりは小さくなること、などが明らかになった。

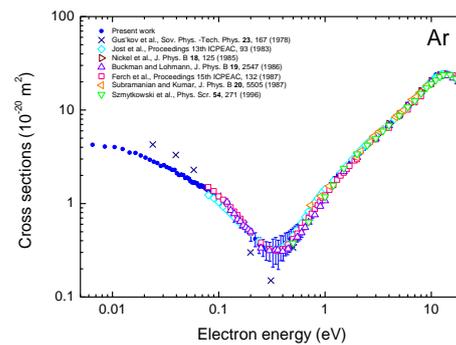


図3 本研究により得られた、超低エネルギー領域から 20 eV までの Ar の電子衝突断面積。

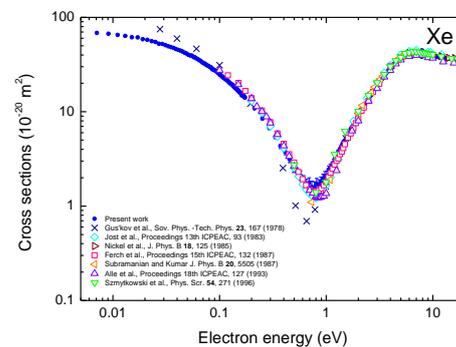


図4 本研究により得られた、超低エネルギー領域から 20 eV までの Xe の電子衝突断面積。

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 4 件)

①黒川学、北島昌史、豊島海士、小田切丈、加藤英俊、河原弘朋、星野正光、田中大、伊藤健二、A threshold photoelectron source for the study of low energy electron scattering: total cross section for electron scattering from krypton in the energy range from 14meV to 20 eV、Physical Review A、82 巻、062707-1-10 頁、2010 年、査読有

②黒川学、北島昌史、小田切丈、加藤英俊、星野正光、田中大、伊藤健二、しきい光電子を用いた Cold Electron Collision 実験手法の開発、PF-News、28 巻、20-24 頁、2010 年、査読無

③黒川学、北島昌史、平野佑一朗、小田切丈、加藤英俊、河原弘朋、星野正光、田中大、伊藤健二、Development of a new set-up for Cold Electron Collision experiment utilizing the threshold photoelectrons、Journal of Physics: Conference Series、194 巻、042010-1-1 頁、2009 年、査読無

④北島昌史、田中大、超低および低エネルギー ($10\mu\text{eV}\sim 10\text{eV}$) 電子衝撃による原子・分子励起ダイナミクス研究の新展開、日本物理学会誌、64 巻、742-751 頁、2009 年、査読有

[学会発表] (計 15 件)

①北島昌史、黒川学、木住野貴也、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高分解能ビーム実験による Ar、Kr、Xe 原子の超低エネルギー電子衝突全断面積測定、日本化学会第 91 春季年会、2011. 3. 27、神奈川大学、横浜

②木住野貴也、黒川学、小田切丈、北島昌史、加藤英俊、星野正光、田中大、伊藤健二、しきい光電子を用いた高分解能実験による窒素分子の電子衝突全断面積測定、日本物理学会第 66 回年次大会、2011. 3. 27、新潟大学、新潟

③黒川学、北島昌史、小田切丈、加藤英俊、星野正光、田中大、伊藤健二、Development of a new set-up for total cross section measurement in the cold electron collision、63rd Gaseous Electronics Conference and 7th International Conference on Reactive

Plasmas、2010. 10. 6、Maison de la Chimie、仏国

④豊島海士、黒川学、北島昌史、小田切丈、加藤英俊、星野正光、田中大、伊藤健二、しきい光電子を用いた、e - Ne、Ar、Kr、Xe 衝突の高分解能全断面積測定による Feshbach 共鳴の寿命決定、日本物理学会第 65 回年次大会、2010. 3. 23、岡山大学、岡山

⑤黒川学、豊島海士、北島昌史、小田切丈、加藤英俊、星野正光、田中大、伊藤健二、しきい光電子を用いた Cold Electron Collision 実験 ; Kr の電子衝突全断面積、第 27 回 PF シンポジウム、2010. 3. 9、つくば国際会議場、つくば

⑥北島昌史、黒川学、小田切丈、河内宣之、加藤英俊、河原弘朋、星野正光、田中大、伊藤健二、放射光を用いた Cold Electron Collision 実験、第 52 回放射線化学討論会、2009. 9. 24、福井工業大学、福井

⑦黒川学、北島昌史、小田切丈、河原弘朋、加藤英俊、星野正光、田中大、伊藤健二、しきい光電子を用いた超低エネルギー電子衝突実験、第 3 回分子科学討論会、2009. 9. 23、名古屋大学、名古屋

⑧黒川学、北島昌史、小田切丈、加藤英俊、河原弘朋、星野正光、田中大、伊藤健二、しきい光電子を用いた Cold Electron Collision 実験 ; Kr、Xe の全断面積測定及び共鳴構造の解析、原子衝突研究協会第 34 回年会、2009. 8. 28、首都大学東京、八王子

⑨黒川学、北島昌史、小田切丈、加藤英俊、河原弘朋、星野正光、田中大、伊藤健二、Cold Electron Collision experiment utilizing the threshold photoelectrons; Total cross section measurements of Kr and Xe、16th International Symposium on Electron - Molecule Collisions and Swarms、2009. 7. 30、Toronto、カナダ

⑩黒川学、北島昌史、平野佑一朗、小田切丈、加藤英俊、河原弘朋、星野正光、田中大、伊藤健二、Development of a new set-up for Cold Electron Collision experiment utilizing the threshold photoelectrons、26th International Conference on Photonic, Electronic, and Atomic Collisions、2009. 7. 24、Kalamazoo、米国

⑪北島昌史、黒川学、平野佑一朗、小田切丈、加藤英俊、河原弘朋、星野正光、田中大、伊藤健二、High resolution low energy

electron collision experiment utilizing threshold photoelectrons -from thermal energy to 10 eV-, 第 25 回化学反応討論会、2009. 6. 3、大宮ソニックシティ、さいたま

⑫黒川学、北島昌史、小田切丈、加藤 英俊、河原弘朋、星野正光、田中大、伊藤健二、しきい光電子を用いた Cold Collision 実験手法の確立、日本化学会第 89 春季年会、2009. 3. 30、日本大学、船橋

⑬黒川学、北島昌史、小田切丈、加藤 英俊、河原弘朋、星野正光、田中大、伊藤健二、しきい光電子を用いた超低エネルギー電子衝突実験；Kr, Xe の全断面積測定、日本物理学会第 64 回年次大会、2009. 3. 27、立教大学、東京

⑭北島昌史、黒川学、小田切丈、河内宣之、河原弘朋、加藤英俊、星野正光、田中大、伊藤健二、放射光を用いた超低エネルギー電子衝突実験、第 51 回放射線化学討論会、2008. 10. 15、産業技術総合研究所、つくば

⑮黒川学、北島昌史、小田切丈、河原弘朋、加藤英俊、星野正光、田中大、伊藤健二、しきい光電子を用いた Cold Electron Collision 実験の現状、原子衝突研究協会第 33 回研究会、2008. 8. 5、北海道大学、札幌

[その他]

ホームページ等

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

Top.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

(3) 連携研究者

星野 正光 (HOSHINO MASAMITSU)

上智大学・理工学部・准教授

研究者番号：40392112

伊藤 健二 (ITO KENJI)

高エネルギー加速器研究機構・

物質構造科学研究所・教授

研究者番号：60151502