

令和 6 年 9 月 21 日現在

機関番号：22604

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2019～2023

課題番号：19H00701

研究課題名(和文) 太陽風多価イオンのX線放射観測に対する地上実験からのメッセージ

研究課題名(英文) Messages from laboratory experiments on the observation of X-ray emission from multiply charged ions in the solar wind

研究代表者

田沼 肇 (Tanuma, Hajime)

東京都立大学・理学研究科・教授

研究者番号：30244411

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 34,600,000円

研究成果の概要(和文)：水素イオンビームを水素とほぼ同じイオン化ポテンシャルを持つメタンと衝突させて疑似共鳴的な電荷移行反応によって太陽風と同等な速度の高速中性水素原子ビームを生成する装置を開発した。電気通信大学で開発された電子ビームイオントラップにおいて裸からヘリウム様までの高電離鉄イオンを生成し、微量の中性気体を導入しながらX線発光をシリコンドリフト検出器によって測定した。電子ビームを流した状態では、電子衝撃励起による水素様とヘリウム様のイオンからの発光が観測されたが、電子ビームを切った状態では、電荷移行反応によって生成した励起状態からの発光だけが観測された。両者のスペクトルには顕著な違いが見られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

準安定励起状態を含まない高速中性水素ビームの生成には、負イオンビームの光脱離が適当であるとされてきたが、イオン化ポテンシャルがほとんど同じメタンを標的気体として用いることで、正イオンビームであっても基底状態だけの中性水素ビームが生成できることを実証した。また、電子ビームイオントラップを用いた実験では、裸および水素様の鉄イオンの電荷移行反応によるX線発光を世界で初めて観測した。宇宙で観測されたスペクトルとの比較によって、宇宙空間における励起メカニズムの理解の助けになることを期待している。

研究成果の概要(英文)：We have developed a device to generate a fast neutral hydrogen atom beam with a velocity equivalent to that of the solar wind by a quasi-resonant charge-transfer reaction in which a hydrogen ion beam is collided with methane, which has almost the same ionization potential as hydrogen.

Highly ionized iron ions ranging from bare to helium-like were produced in the electron beam ion trap developed at the University of Electro-Communications, and X-ray emission was measured with a silicon drift detector while introducing a small amount of neutral gas. With the electron beam flowing, emission from hydrogen-like and helium-like ions due to electron impact excitation was observed, while with the electron beam off, only emission from excited states produced by charge transfer reactions was observed. There was a marked difference between the two spectra.

研究分野：原子分子物理学

キーワード：X線天文学 太陽風電荷交換

1. 研究開始当初の背景

欧州が打ち上げた X 線観測衛星 ROSAT は、エネルギー分解能は非常に低いものの、低エネルギー X 線の全天観測を行い、特定の X 線源天体の存在しない方向からも常に X 線が観測されることを見いだした。この背景 X 線放射の候補として局所高温パルスが考えられていたが、X 線強度が数日単位で大きく変動することから、発光機構は不明であった。その後、百武彗星の周辺の広い領域から強い X 線が放出されていることが ROSAT 衛星によって観測され、他の彗星からも同様に X 線が放出することから、太陽風にわずかに含まれている多価イオンが彗星周辺に広がった気体と衝突することによって発光する「太陽風電荷交換 (Solar Wind Charge Exchange)」という現象が原因であることが判明した。また、背景 X 線放射は別の観測衛星が測定した太陽風強度の時間変動と全く同じ挙動を示すことが判って、太陽系に広く薄く分布する中性粒子と太陽風多価イオンの衝突によることが明らかになった。

以上のような X 線放出現象を地上で再現しようという試みが幾つかの研究グループで行われてきたが、標的粒子の選定 (太陽系内の主要な希薄粒子は原子状水素)、衝突速度 (典型的な太陽風の速度は 400 - 800 km/s)、発光寿命 (宇宙で観測される発光寿命には制限がないが、ビーム実験では ns より速くないと観測できない) の全ての条件を満たした再現実験の試みは存在していなかった。裸や閉殻イオンの場合は、一電子捕獲反応によって生成するのは二重項に限られるため、最低励起状態からの発光が連続的な二光子遷移になるものの、他には長寿命な状態は存在しない。しかし、水素様イオンやリチウム様イオンでは一電子捕獲によって一重項と三重項が生成し、最低励起三重項状態が準安定となることが知られている。すざく衛星による背景 X 線放射スペクトルでは、6 価の酸素原子イオンからの発光の中心波長は三重項からの禁制線とされている。エネルギー分解能が充分ではないので、この同定は決定的ではないが、Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL) の電子ビームイオントラップ (EBIT) と ASTRO-E 衛星に搭載されたマイクロカロリメータと同じ検出器を用いて、狭い領域に閉じ込めた 7 価の酸素原子イオンに CO₂ ガスを噴霧して発光させた実験では、一重項からの共鳴線より禁制線の方が強いことが観測されている。

2. 研究の目的

標的粒子の種類と衝突速度を太陽系で起こっている電荷交換現象と同じ条件にして、大きく異なる全ての寿命の発光を観測することが、本研究の最終的な目的である。一言で言えば、実験室における太陽風電荷交換の完全な再現である。その上で太陽風に含まれている多価イオンと太陽系内に希薄に分布する中性水素原子との衝突における電荷交換反応断面積と発光断面積の測定を行う。

3. 研究の方法

多価イオンビームと中性標的粒子の衝突実験で観測可能な光学的遷移は、衝突領域で直ちに発光する短寿命励起状態からの速い遷移のみである。長寿命の発光を観測するためには、多価イオンを狭い領域に発光寿命より十分に長い時間蓄積しておく必要がある。多価イオンを生成して蓄積する装置としては、高密度の電子ビームによって逐次電離を起こして電子ビームの作る深い静電ポテンシャルと強い磁場によって多価イオンを閉じ込める電子ビームイオントラップ (EBIT) が最適である。但し、電子ビームが存在すると電子衝突による発光と電子捕獲反応による発光の区別ができないため、発光観測時には電子ビームを OFF にする必要がある。電子ビームを OFF にすると電子ビームによるイオントラップ能力が失われるため、磁場による閉じ込め能力に頼ることになる。研究分担者である中村が所属する電気通信大学では液体ヘリウムによって冷却した超伝導コイルによって約 3 T の磁束密度を実現できる大型の EBIT が約 25 年前に開発され、現在でも稼働している。この装置であれば電子ビームを OFF にしても強磁場による多価イオンのトラップが可能である。

イオントラップ内部の多価イオンは 10 eV 程度の熱運動をしている。そのため、太陽風速度での衝突を実現するには標的として高速中性ビームを用意する必要がある。太陽風電荷交換での中性標的は水素原子であるから、高速中性水素原子ビームの生成が必要となる。一般的には加速した負イオンビームを強力なレーザーを用いて光電子脱離を起こすことで中性化する方法が取られている。その理由は、正イオンビームを気体との衝突によって中性化すると励起状態が生成するために、基底状態の中性粒子だけにはならないと考えられているからである。しかし、水素原子とメタンのイオン化ポテンシャルはどちらも 13.6 eV であることから、陽子ビームとメタンの電荷移行反応は共鳴的に起こり、励起状態の生成は無視することができる。このアイデアに基づいて基底状態の高速中性水素原子ビーム源を開発し、電通大の EBIT に接続することで、太陽風電荷交換現象を再現する。

発光の観測には太陽風に多く含まれる炭素や酸素からの発光が観測可能な分光器が望ましい。通常の半導体検出器には Be 窓が用いられているため、低エネルギー発光の観測は不可能である。そこで特注で製作した「窓無し」のシリコンドリフト検出器 (SDD) を導入した。

4. 研究成果

2.45 GHz マイクロ波放電型イオン源によって生成した水素原子イオンを太陽風速度の範囲にある 2-3 keV まで加速した後に、アインツェルレンズによって平行ビームに整形した。このビームを希薄なメタン気体で満たした約 40 cm 長さのパイプを通して高速中性水素原子ビームを生成した。メタン気体を導入する前にパイプを抜けてきたイオンビーム強度を測定し、メタンの圧力を変えながらイオンビーム強度の減少を測定すると、既知の電荷移行反応断面積を用いた解析によって理解できる結果となった。この装置では、直径 4 mm で約 1 μpA に相当する高速中性水素原子ビームが生成できることが判った。

新型コロナウイルス感染症による行動規制によって、装置開発が大きく遅れた。更に 2021 年 12 月 4 日に起こった火災のために実験室が停電し、最終的には約 6 ヶ月間も実験ができない状況が続いた。他の実験室を整理して装置を移設し開発を再開したが、約 2 ヶ月の遅れが加わった。これらの事情から、合わせて約 1 年間は実験が不可能となってしまった。それでも 3 年目終了時には中性ビーム生成には成功したが、強度が計画の半分以下であったため、装置の改造を試みてほぼ予定通りのビーム強度が得られるようになったのが 4 年目であった。平行して、導入した SDD 検出器の試運転を行ったが、検出器の内部からの気体放出が大きく、超高真空を必要とする EBIT に接続することができないことが判った。そのため、検出器がダメージを受けない 100 程度のベーキングを行って、内壁からの放出ガス量の低減を図った。以上のような準備を都立大において行った後、中性水素原子ビーム源と SDD 検出器を電通大に移設し、EBIT に接続した。

SDD は約 200 eV 以上であれば軟 X 線が観測可能であることを都立大では確認していたが、EBIT に接続すると電子ビーム起因と思われるノイズ（主に制動輻射）が非常に強く、1 keV 以上でないと測定できないことが判明した。そこで炭素や酸素の多価イオンに関する測定は断念し、He 様イオンが 6 keV 以上の X 線を放出する Fe（鉄）を用いることにした。Fe は宇宙において非常に重要な元素であり、事故によって短命に終わったひとみ衛星でも He 様と H 様の Fe イオンからの発光は観測されている。Fe を EBIT に導入するためには、常温でも高い蒸気圧をもつフェロセン $\text{Fe}(\text{C}_5\text{H}_5)_2$ を用いた。 10^{-9} Pa に保たれた EBIT の中に、圧力上昇が検出できないレベルの微量のフェロセンを導入し、13 keV、100 mA の電子ビームを通じた状態では、裸、H 様、および He 様の多価 Fe イオンが共存すると考えられる。実際、このとき He 様および H 様の Fe イオンからの発光が観測された。これを図 1 に黒線で BG (on) として示した。BG はバックグラウンド、on は電子ビームが入っているという意味である。この状態で電子ビームをパルス化し、電子ビームが on のときと off のときの X 線をそれぞれ積算して観測した。電子ビームが off のときの X 線スペクトルを図 2 の BG (off) に示す。電子ビームが off のときは殆ど X 線は検出されないが、わずかに 6.7 keV にシグナルが見られる。これは多価 Fe イオンと非常に希薄なフェロセンとの電荷交換衝突によるものと考えられる。次に EBIT のイオン雲の中心部をめがけて高速中性水素原子ビーム照射を試みた。ところが、ビームを導入すると EBIT 内部の圧力が急激に上昇してしまった。考察の結果、EBIT 中心部の電極表面にビームが照射されると、表面に付着している気体がスパッタされて大量に出てきてしまうことが判った。照射ビームは内部で必ずどこかの金属表面に衝突するため、このガス発生は避けることのできない現象である。十分に照射を継続すればアウトガスが減少すると期待して継続したが、ガス放出は一向に収まらなかった。この予想していなかった状況のため、残念ながら高速中性水素原子ビーム導入は諦めざるを得なかった。

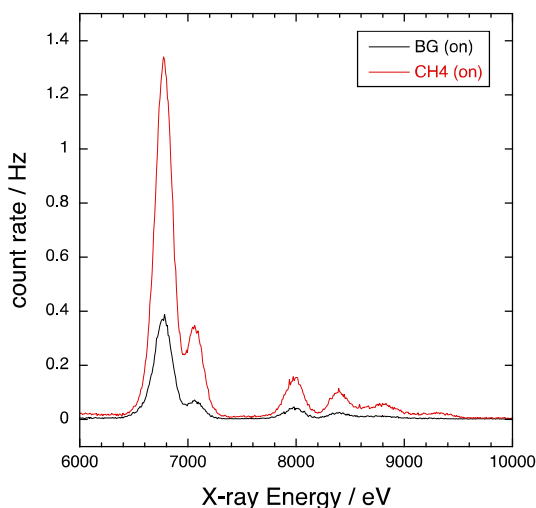


図 1. 電子ビーム on での X 線スペクトル.

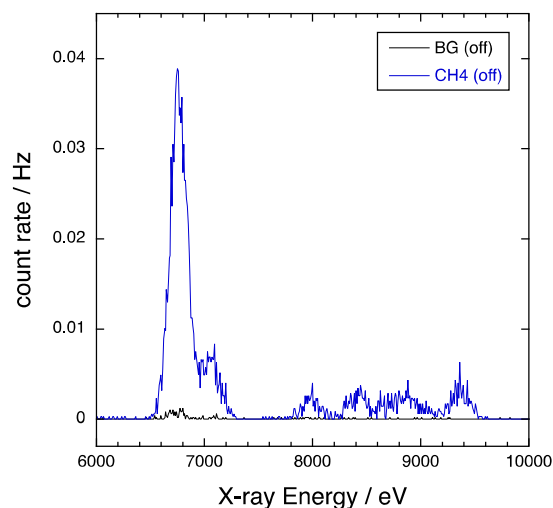


図 2. 電子ビーム off での X 線スペクトル.

そこで、中性水素原子と同じイオン化ポテンシャルを持つメタン気体を EBIT に導入することで電荷移行反応を起こさせて X 線スペクトルを観測することにした。一電子捕獲反応は標的気体のイオン化ポテンシャルだけで決まるというのが一般的な常識であるため、一電子捕獲過程に限れば、メタン分子は中性水素原子の代用品と考えることができる。但し、イオンビームを用いた衝突実験では 10^{-3} Pa 以上の標的気体を衝突領域に導入するのが一般的であるが、EBIT では高電離イオンを生成して蓄積するためには 10^{-6} Pa でも圧力が高すぎるので、本実験では 10^{-6} Pa を越えない程度の圧力の標的気体を EBIT の真空容器全体に満たして測定を行った。

図 1 および図 2 には、メタンガスを導入した際の、電子ビームが on と off の状態でのスペクトルがそれぞれ示されている。電子ビーム on のときのスペクトルは強度が異なるものの、スペクトルの概形はメタン標的の有無に関係ないように見える。一方、off のときには一桁以上強度は弱いながらも X 線スペクトルが観測されている。電子ビーム on と off で比較すると、明らかにスペクトルの形は変化しており、電子衝撃励起による励起と電荷移行反応による励起状態の生成には大きな違いがあることが明確に示された。ひとみ衛星によって観測された Fe イオンのスペクトルは本研究のものより遙かに分解能が高いので全く同じとは言えないが、電子ビーム on の状態で観測されたスペクトルに近い。それぞれのピークは He 様および H 様の Fe イオンが電子との衝突によって励起された後に脱励起して発光したものであり、典型的な高温プラズマからの発光スペクトルと言える。一方、電子ビーム off で観測されたスペクトルは、H 様および裸の Fe イオンがメタン分子と衝突して一電子移行反応を起こし、生成された He 様および H 様の Fe イオンの励起状態から発光したものである。スペクトル形状の違いは、このような励起状態の生成機構の違いによるものである。エネルギー分解能が充分ではなく、詳細な遷移の同定はまだ完了していないが、このような高電離 Fe イオンの電荷交換反応による X 線スペクトルの観測例はこれまでに報告されたことがなく、宇宙における X 線スペクトル観測および高温プラズマ研究において、ベンチマークとなるようなデータが初めて観測できた。当初の研究目的とは違うものになってしまったが、X 線天文学に対して、高強度で観測される H 様の $1s-2p$ 遷移や He 様の $1s^2-1s2p$ 遷移だけでなく、より高い励起状態からの遷移を詳細に解析することで、多価イオンと衝突している中性粒子の同定に繋がるような地上実験の端緒が開けた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Y. Nishimura, S. Imaizumi, H. Tanuma, et al.	4. 巻 11
2. 論文標題 Charge exchange spectroscopy of multiply charged erbium ions	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 atoms	6. 最初と最後の頁 40
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/atoms11020040	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計12件（うち招待講演 2件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 浅野裕哉, 中村信行, 坂上裕之, 飯田進平, 田沼肇
2. 発表標題 高速中性水素原子ビーム源の開発
3. 学会等名 原子衝突学会第47回年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大那拓海, 島田健人, 西村勇輝, 沼館直樹, 田沼肇
2. 発表標題 極端紫外分光用斜入射分光器の波長に依存する検出効率の決定 II
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 田沼肇
2. 発表標題 地上実験でみる太陽風多価イオンと惑星間物質との衝突
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 西村勇輝, 今泉咲希, 田沼肇
2. 発表標題 中性子星合体による重元素合成の基礎研究としての多価イオン電荷交換分光III
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 西村勇輝, 今泉咲希, 田沼肇
2. 発表標題 低価数のErイオンの電荷交換分光
3. 学会等名 核融合科学研究所2021年合同素過程研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田沼肇, 大橋隼人, 沼館直樹
2. 発表標題 重元素多価イオンの電荷交換分光におけるUTA
3. 学会等名 核融合科学研究所2021年合同素過程研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 横井 彪希, 西村 勇輝, 田沼 肇
2. 発表標題 多価イオンの電荷交換衝突におけるEUV発光断面積
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田沼肇
2. 発表標題 電荷移行断面積の理論値を用いた斜入射分光器の感度較正
3. 学会等名 核融合科学研究所2022年合同素過程研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 板橋美和, 田沼肇
2. 発表標題 keV領域における多価イオンの電子捕獲断面積測定
3. 学会等名 核融合科学研究所2023年合同素過程研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 板橋美和, 田沼肇
2. 発表標題 多価Krイオンと二電子標的における電子捕獲断面積
3. 学会等名 日本物理学会2024年春季年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 田沼肇
2. 発表標題 多価イオンの電荷移行反応とその断面積
3. 学会等名 原子衝突学会第44回年会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H. Tanuma, N. Numadate, Y. Yamada, T. Ohna
2. 発表標題 Charge exchange UV-Visible and EUV spectroscopy of multiply charged heavy ions
3. 学会等名 31st International Conference on Photonic, Electronic, and Atomic Collisions
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

新型コロナウイルス感染症による研究の遅延に加えて、東京都立大学・南大沢キャンパス8号館5階で発生した火災が同じ建物の1階にある実験室の電源ケーブルにまで被害を与え、半年以上の長期間に亘って実験が中断されたことが大いに悔やまれる。言い訳にはなってしまうが、予想できなかった事態によって大きな妨害と受けたことは紛れもない事実であることを付記しておく。

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	坂上 裕之 (Sakaue Hiroyuki) (40250112)	核融合科学研究所・ヘリカル研究部・助教 (63902)	
研究分担者	中村 信行 (Nakamura Nobuyuki) (50361837)	電気通信大学・レーザー新世代研究センター・教授 (12612)	
研究分担者	飯田 進平 (Iida Shimpei) (20806963)	東京都立大学・理学研究科・助教 (22604)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------