

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月24日現在

機関番号：24302

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22540508

 研究課題名（和文）中性粒子に対するマイクロチャンネルプレート検出器の
絶対検出効率測定法の確立

 研究課題名（英文）A new method for determining the absolute detection efficiencies
of a microchannel plate detector for neutral particles

研究代表者

齊藤 学 (SAITO MANABU)

京都市立大学・大学院生命環境科学研究科・准教授

研究者番号：60235075

研究成果の概要（和文）：中性粒子に対するマイクロチャンネルプレート（MCP）検出器の絶対検出効率を測定する新たな方法を確立した。この測定法は、イオン-原子衝突における電子捕獲反応のコインシデンス測定を利用した方法である。この方法を用いて、H、C、Ne、Ar、Kr、Xe、W 中性原子に対する検出効率を 0.5～4.8 keV の入射エネルギーの範囲で決定することができた。さらに、これらの検出効率に対して一定のスケーリング則を見いだすことができた。

研究成果の概要（英文）：A new method for determining the absolute detection efficiencies of a microchannel plate detector for neutral particles has been developed. This method is based on the coincidence measurement of neutralized incident ions and ionized target atoms in electron capture collisions. Using this method, we determined the detection efficiencies for H, C, Ne, Ar, Kr, Xe, and W atoms with energies of 0.5–4.8 keV. Additionally, a scaling law for these detection efficiencies was derived.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2011年度	500,000	150,000	650,000
2012年度	300,000	90,000	390,000
年度			
年度			
総計	1,800,000	540,000	2,340,000

研究分野：原子・分子物理学

科研費の分科・細目：プラズマ科学・プラズマ科学

キーワード：中性粒子検出、マイクロチャンネルプレート、検出効率、電子捕獲衝突、飛行時間分析、反跳イオン

1. 研究開始当初の背景

(1) マイクロチャンネルプレート検出器（MCP）は、keV オーダーの加速エネルギーを持つイオンの検出に最もよく用いられている検出器のひとつである。これまでの研究によって MCP のイオンに対する絶対検出効率は、イオンの原子種や電荷数および加速エネルギー

に依存することが明らかになっている。そのため、いくつかのグループが、様々な種類のイオンに対して MCP の絶対検出効率の加速エネルギーおよび電荷数依存性を調べてきた。それらの研究では、MCP とファラデーカップ（FC）で交互にイオンを測定し、MCP で検出されたイオン数を FC で得られた電流量

と比較することで、MCP の絶対検出効率を求めた。一方、中性粒子に対する検出効率に関しては、電荷を持たない中性粒子の電流量を FC で測定することはできないため、この方法を用いることはできない。そこで電流量の代わりに、中性粒子の衝撃によって FC の壁から放出される二次電子量を用いて MCP に入射する中性粒子数を求める試みが行われてきた。だがこの方法では、FC の壁材の二次電子放出率を別途調べなければならない。このような理由で、中性粒子に対する MCP の絶対検出効率の測定例は非常に少なく、イオンに対する絶対検出効率が中性粒子に対して一般的に用いられている。

(2) 本研究代表者の斉藤らは、 H_2^+ 分子イオンが電子捕獲によって2個の中性 H に分かれる電子捕獲解離反応の研究において、中性 H 粒子を MCP を用いて測定し、その解離異方性を明らかにしようとしている。また、核融合炉ダイバータ領域での不純物除去過程に関連する必要性から、MCP を用いて加速金属イオン (Be^+ , B^+ , Fe^+ , Ni^+ , W^+) の中性化断面積を測定し、断面積の半経験式の導出とデータベース化を目指している。そのため、これらの研究で特に関心が持たれる eV から keV エネルギー領域の様々な中性粒子種に対する MCP の絶対検出効率測定法の確立が非常に重要な課題となっている。

(3) また斉藤らは、イオンビーム衝突による標的多重電離の実験研究の中で、標的電離イオンを検出する MCP の相対検出効率を飛行時間分析器によって決定できることを確かめていた。この方法をさらに発展させることで、本申請課題の、中性粒子種に対する MCP の絶対検出効率測定法の着想に至った。

2. 研究の目的

(1) イオン-原子衝突で生じる電子捕獲反応を利用した、keV エネルギー中性原子に対する MCP の絶対検出効率測定法を確立する。

(2) 開発した測定法を用いて、中性原子に対する MCP 検出器の絶対検出効率を、原子種と入射エネルギーの広い範囲にわたって決定する。

(3) 測定されたデータより、検出効率の原子種依存性および入射エネルギー依存性を明らかにする。

(4) 原子種依存性および入射エネルギー依存性に一定のスケーリング則が成り立たないかを検討する。スケーリング則が成り立つのであれば、MCP を使用する際にそのスケーリング則を用いて検出効率を見積もることができる。

これは MCP を用いた研究を行う上で、非常に価値の高い知見である。

3. 研究の方法

(1) 本研究で考案する方法は、1 価イオン-原子衝突で生じる 1 電子捕獲反応を利用する方法である。測定したい原子種の 1 価イオンビームを原子標的に衝突させ、1 電子捕獲衝突で中性化したイオンと電離した標的を 2 台の MCP でコインシデンス測定する。1 電子捕獲反応であれば一致するはずのコインシデンス数と電離標的イオン数の相違から、中性化したイオンの検出に用いた MCP の絶対検出効率を導出する。ただし、keV エネルギーの衝突では 1 電子捕獲断面積に比べて標的電離を引き起こす他の衝突プロセスの断面積が非常に小さいことを前提としている。

① 電離標的検出のための飛行時間分析器を設計製作し、これを既存の標的チェンバー内に設置した。設計においては、衝突で生成された標的イオンが引き出し電場によって全て捕集され MCP に到達すること、および Xe^+ イオン程度の高質量まで分析できることを指標にした。

② イオンビームと原子標的を用いて実際に衝突実験を行った。製作した飛行時間分析器で電離標的を測定し、分析器が上記(1)-①で示した性能を有するかを確認した。

③ 別方法によって得られた既存の検出効率データと本測定法を用いて得られたデータを比較し、本測定法全体の適切性を評価した。

(2) 本測定法を用いて、中性粒子に対する MCP の絶対検出効率を決定した。中性粒子種は希ガスである。これは、a) 既存のイオン源によって安定してイオンビームを供給できる、b) keV エネルギー領域のイオン-原子衝突では、同種同士の衝突によるイオンの中性化率はかなり高くなる。標的原子ガスとして希ガスは容易に準備できる、等の理由による。

① 0.5-4.8 keV のエネルギー範囲において 0.5 keV ステップで、Ne、Ar、Kr、Xe に対する MCP の検出効率を決定した。

② 測定されたデータより、検出効率のエネルギー依存性および原子種依存性を明らかにした。

(3) さらに、(2) で測定された原子よりも軽い元素および重い原子種の中性粒子に対する MCP の絶対検出効率を決定した。

① 0.5-4.8 keV のエネルギー範囲において

0.5 keV ステップで、H、C、W に対する MCP の検出効率を決定した。H、C、W の標的原子ガスを準備することは難しいので、H、C、W のそれぞれとイオン化エネルギーの近い、Ar、Xe、NO ガスを標的ガスとして用いた。

②NO 分子を標的ガスとして用いる場合、1 電子捕獲との競合反応である 1 電子捕獲分子解離反応が無視できるかどうかを確認した。

③測定されたデータより、検出効率のエネルギー依存性および原子種依存性を調べ、(2)-②の結果と比較、検討した。

(4) 検出効率の原子種依存性および入射エネルギー依存性に成り立つスケーリング則の導出を試みた。

4. 研究成果

(1) イオン-原子衝突で生じる 1 電子捕獲反応を利用した、keV エネルギー中性原子に対する MCP の絶対検出効率測定法の確立に成功した。最終的な実験装置(例として中性 Ar の検出効率測定)を図 1 に示す。1 電子捕獲反応によって生成された標的 Ar⁺イオンの MCP2 による検出数 n 、そのバックグラウンド数 n_B 、および中性化された入射イオン Ar⁰ と標的 Ar⁺イオンのコインシデンス数 c を図 1 に示した装置で測定する。このとき c は、時間波高変換器(TAC)で記録された飛行時間スペクトルの Ar⁺ピークの面積に対応する。これらの測定値より、図中の MCP1 の中性 Ar⁰ に対する絶対検出効率を、 $c/(I - n_B)$ の関係から決定することができる。この測定方法の適切性を以下のように確認することができた。

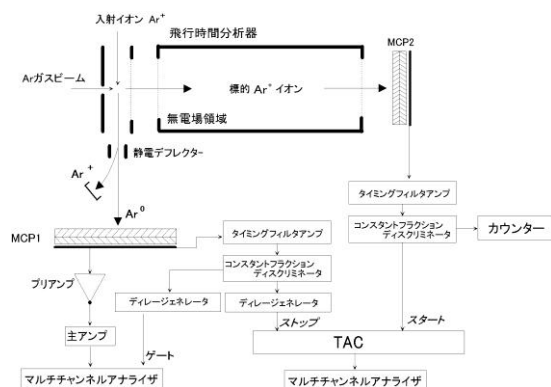


図 1 実験装置の概略

①Ne⁺イオンビームと Ne 標的ガス、Ar⁺イオンビームと Ar 標的ガス、Xe⁺イオンビームと Xe 標的ガスのそれぞれの衝突系を用いて、生成する標的イオンの飛行時間分析を行った。標的イオンの飛行時間スペクトルには 1 価イオンのピークだけが観測された。多価イオンの

ピークや残留ガスより生じるイオンは観測されなかった。これにより、a) 製作した装置が Xe⁺イオンの質量まで同定可能なこと、および b) 1 電子捕獲以外の標的電離プロセスや残留ガスの影響を無視できるという本測定法的前提が成り立つ、の 2 点を確認できた。

②図 2 は 2 keV W⁺イオンビームと NO 標的ガスを衝突させた場合の、標的イオンの飛行時間スペクトルである。横軸は飛行時間を表している。また図には、典型的な残留ガスイオンと NO 分子の解離より生ずるイオンの飛行時間の位置が示されている。図を見ると明らかのように、NO 分子ガスを用いても、標的解離は見られずに、電子捕獲による NO の 1 価イオンだけが主に検出されていることがわかる。他の衝突エネルギーにおいても同様の結果が得られた。よって、W の場合に NO ガスを用いても、1 電子捕獲との競合反応である電子捕獲解離反応の寄与は無視できるほど小さいことが確認できた。

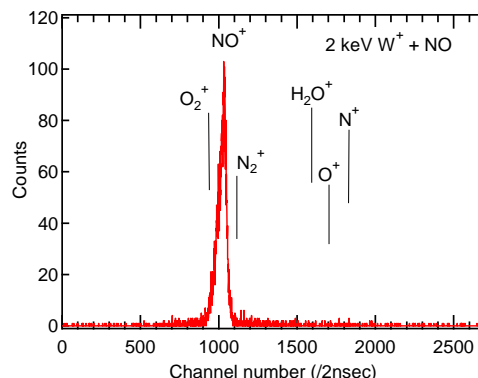


図 2 標的 NO⁺イオンの飛行時間スペクトル

③中性粒子に対する絶対検出効率の既存データがほとんど存在しないため、0.6-6 keV の Ar⁺イオンに対する絶対検出効率を本測定法を用いて測定し、それを過去の Ar⁺イオンに対するデータと比較した。その結果を図 3 に示す。両者はよく一致しており、本測定法の適

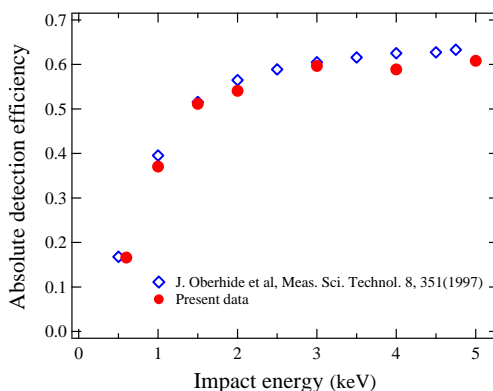


図 3 Ar⁺イオンに対する MCP の絶対検出効率

切性が確認されたといえる。

(2)本測定法を用いて、希ガス原子 (Ne、Ar、Kr、Xe) に対するMCPの絶対検出効率を0.5-4.8 keVのエネルギー範囲で決定した。その結果を図4に示す。横軸がエネルギー、縦軸が検出効率である。測定誤差は、0.5 keVを除くと±5%以下である。0.5 keVで±10%程度である。図中の破線は用いたMCPの開口率(約50%)を表している。この結果より、検出効率のエネルギー依存性および原子種依存性が以下のように明らかになった。

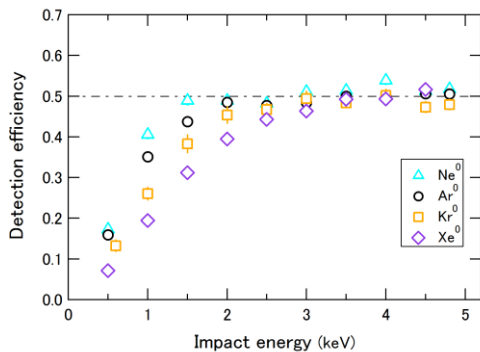


図4 希ガス原子に対するMCPの絶対検出効率

①検出効率は、低エネルギー側ではエネルギーとともにMCPの開口率付近の値まで増加する。開口率に達した後は、エネルギーに依存せず一定である。この傾向は原子種によらない。

②同じエネルギーで原子同士の検出効率を比較すると、低エネルギー側では、原子質量が増加するほど、検出効率は低くなる傾向が見られる。高エネルギー側では原子種に関わらず、開口率付近の値で一定になる。

③決定された検出効率は、リントハルトらによって導出された電子的阻止能に関する公式(LSS公式)を用いてスケーリングされるといふ結果を得た。それを図5に示す。 Z_1 、 Z_2 はそれぞれ入射イオンとMCP材料(鉛ガラス)の原子番号、 v_0 はボーア速度である。

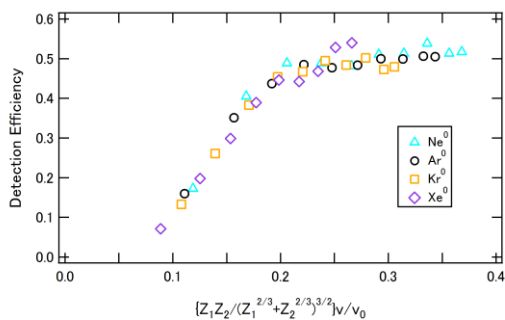


図5 LSS公式を用いたスケーリング結果

(3)本測定法を用いて、Neより軽く、Xeより重い希ガス以外のH、C、W原子に対するMCPの絶対検出効率を、0.5-4.5 keVのエネルギー範囲で決定した。その結果を図6に示す。この結果より、これらの原子に対する検出効率のエネルギー依存性および原子種依存性は、希ガス原子に対する依存性と同じであることが確認された。一方、HおよびCのような、より軽い中性粒子に対する絶対検出効率に関しては、(2)-(3)のLSS公式を用いたスケーリング則からはずれることがわかった。

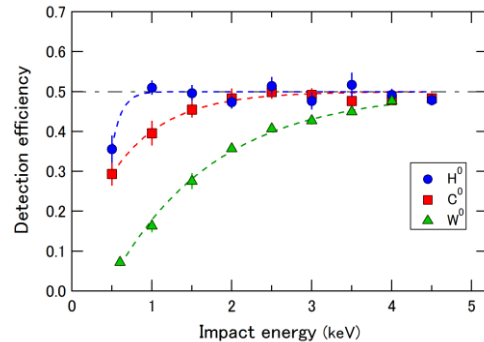


図6 H、C、W原子に対するMCPの絶対検出効率

(4)本研究で測定されたすべての絶対検出効率に対して適用できる新たなスケーリング則の導出を試みた。絶対検出効率は、中性粒子の衝撃によってMCPから放出される平均2次電子収量に依存するという予測の下に、電子的阻止能に対するLSS公式とリントハルトらの核的阻止能公式を用いて、それぞれの中性粒子衝撃に対するMCP材料の平均2次電子収量を見積もった。その値(相対値)を横軸にして検出効率をプロットした結果が図7である。図から明らかなように、H、C、Ne、Ar、Kr、Xe、Wに対する絶対検出効率は、放出される平均2次電子収量でスケーリングできることがわかる。これは、まだ検出効率が測定されていない原子に関しても、すでに測

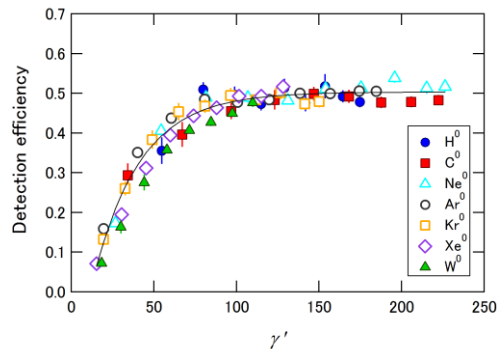


図7 平均二次電子収量を用いたスケーリング結果

定されたデータから検出効率を見積もることが可能であるという、重要な知見である。

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 2 件)

①N. Takahashi, Y. Adachi, M. Saito, and Y. Haruyama, Absolute detection efficiencies for keV energy atoms incident on a microchannel plate detector. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, 2013, 査読有.

DOI:10.1016/j.nimb.2013.03.026

②N. Takahashi, S. Hosokawa, M. Saito, and Y. Haruyama, Measurement of absolute detection efficiencies of a microchannel plate detector using charge transfer reaction. Physica Scripta T144, 2011, 014057, 査読有.

DOI:10.1088/0031-8949/2011/T144/014057

[学会発表] (計 4 件)

①N. Takahashi, Y. Adachi, M. Saito, and Y. Haruyama, Absolute detection efficiencies of keV energy atoms incident on a microchannel plate detector. The 25th International Conference on Atomic Collisions in Solids, 2012.10.21, Kyoto.

②高橋直也, 安達泰之, 細川俊介, 糸井駿, 齊藤学, 春山洋一, 電荷移行反応を用いた中性粒子に対する MCP の絶対検出効率測定. 日本物理学会 2011 年秋季大, 2011. 9. 21, 富山大学.

③高橋直也, 安達泰之, 細川俊介, 齊藤学, 春山洋一, 中性粒子に対するマイクロチャンネルプレートでの絶対検出効率測定. 日本物理学会第 66 回年次大会, 2011. 3. 25, 新潟大学.

④N. Takahashi, S. Hosokawa, M. Saito, and Y. Haruyama, Measurement of absolute detection efficiencies of a microchannel plate detector using charge transfer reaction. The 15th in a series of International Conference on the Physics of Highly Charged Ions, 2010.08.30, Shanghai, China.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

齊藤 学 (SAITO MANABU)

京都府立大学・大学院生命環境科学研究科・准教授

研究者番号 : 60235075

(2) 研究分担者

春山 洋一 (HARUYAMA YOICHI)

京都府立大学・大学院生命環境科学研究科・教授

研究者番号 : 00173097

