

氏 名 今 井 敏 博

学位（専攻分野） 博士(理学)

学 位 記 番 号 総研大甲第391号

学位授与の日付 平成11年3月24日

学位授与の要件 数物科学研究科 核融合科学専攻

学位規則第4条第1項該当

学 位 論 文 題 目 Electron detachment from negative hydrogen ions in
collisions with neutral atoms and positive ions at high
energies

論 文 審 査 委 員 主 査 教 授 金子 修
教 授 俵 博之
助 教 授 佐藤 國憲
教 授 金子 敏明（岡山理科大学）
助 教 授 田中 雅慶（核融合科学研究所）
助 教 授 季村 峯生（山口大学）

論文内容の要旨

High energy neutral hydrogen atom beam is used in the Neutral atom Beam Injection (NBI) for effective plasma heating in nuclear fusion research. There are two methods for production of neutral hydrogen atoms; one is electron capture process of positive hydrogen ions (protons) and the other is electron detachment process of negative hydrogen (H^-) ions. However, at high energies (more than 100 keV), the single electron detachment from H^- ions is much more efficient because the electron detachment cross sections from H^- ions are far larger than the electron capture cross sections of protons.

In the present thesis, I perform some theoretical analysis on the single electron detachment processes of H^- ions in collisions with neutral atoms and also with positive ions.

There are two electrons with different ionization potentials in a H^- ion in the ground state. I treat independently two electrons with different binding energies: one is the tightly bound 1s electron (ionization energy $\simeq 13.6$ eV) and the other is the loosely bound 1s' electron (ionization energy $\simeq 0.75$ eV) in the Hylleraas-Eckart function. Therefore, I take into account two different detachment processes, namely i) detachment of the tightly bound (1s) electron and ii) detachment of the loosely bound (1s') electron. To describe more detail of the electron detachment processes, the binding energies of each electron are taken into account in the detached electron wave functions. By these methods, I calculate the cross sections for production of hydrogen atoms not only in the ground state, $H^0(1s)$, but also in the excited states, $H^0(2s)$ and $H^0(2p)$, in the exit channel.

In collisions with neutral atoms including rare gases and atomic hydrogens, I use the first Born approximation to calculate the electron detachment cross sections from H^- ions. I also consider the target excitation in the exit channel. However, as it is too much time-consuming to calculate all the possible states of target in the exit channel, I use the closure approximation for the target excitation.

First, I present the calculated results of the total and partial single-electron detachment cross sections from H^- ions in collisions with He and H neutral atoms. Then, I compare the calculated total cross sections of electron detachment with experimental data available and find reasonable agreement between them.

The calculated partial cross sections for the production the ground state hydrogen atoms, $H^0(1s)$, are found to be dominant in all the collision energy range (10 keV \sim 10 MeV) investigated in the present study. The cross sections for $H^0(2s)$ formation are found to account for about 20 % and those for $H^0(2p)$ formation about 10 % of total electron

detachment cross sections.

The present calculated results show that the dominant contribution to the production of the ground state $H^0(1s)$ comes from the electron detachment of the loosely bound $1s'$ electron in H^- ions. On the other hand, in the production of the excited state hydrogen atoms $H^0(2s)$ and $H^0(2p)$, the detachment of the tightly bound $1s$ electron in H^- ions is found to be dominant over the detachment of the loosely bound $1s'$ electron.

In collisions with positive ions, I use the Four-Body Continuum Distorted Wave-Eikonal Initial State (4-B CDW-EIS) method to calculate the electron detachment cross section from a H^- ion because there are strong distortion effects to its electrons in H^- ion due to the Coulomb field of the incident positive ions. Thus I consider the distorted wave and distorted potentials. Though the transition amplitudes are given in two different forms, namely the 'prior' and the 'post' because there are two distortion potentials, I treat the prior transition amplitudes only here.

Then, I compare the calculated total electron detachment cross sections from H^- ions in collisions with protons with experimental data.

I also notice that in general, in collisions with positive ions, the calculated partial cross sections of production of $H^0(1s)$ is far larger (more than two orders of magnitude) than those of $H^0(2s)$ in all the energies investigated.

The present calculated results also show that the total electron detachment cross sections of H^- ions in collisions with protons are roughly one order of magnitude greater than those with neutral hydrogen atoms and a simple scaling which indicates that the electron detachment cross sections at high energies are roughly proportional to the square of the positive ion charge colliding with H^- ions.

These results suggest that H^- ions can be converted into neutral hydrogen atoms with more fraction of the ground state in collisions with positive ions more efficiently than in collisions with neutral atoms, indicating that the plasma neutralizer is indeed more promising than the neutral gas neutralizer in producing neutral hydrogen atoms for NBI from H^- ions.

論文の審査結果の要旨

今井君の出願論文は、高エネルギー（100keV以上）水素負イオンの、原子またはイオンとの衝突による電子離脱（中性化）断面積を、離脱後の水素原子の状態分布に着目して理論的に計算したものである。近年、核融合研究では水素負イオンを利用した高エネルギー中性粒子入射加熱装置が現実のものとなっているが、装置内で作られる中性粒子ビームが励起状態にあると加熱対象のプラズマに吸収される断面積が基底状態にあるものとは異なり、加熱効率に大きな影響を及ぼす。従って中性粒子の励起状態分布は非常に大切な情報であるにもかかわらず、今までこの点を理論的にも実験的にも研究した例はなく、本論文が初めての試みであり得られた結果も注目すべきものである。

本論文ではまず現在の中性粒子入射装置でも用いられている中性原子との衝突による電子離脱を扱っている。水素負イオンには電離エネルギーが異なる2つの電子があることから、これらの2個の電子が異なる束縛状態にあるとするモデル波動関数を始状態として用い、終状態として原子の励起状態を区別することにより各状態への遷移断面積をボルン近似を用いて計算した。終状態を単純な平面波とせず励起状態を考慮した点が本論文の独創性の1つである。ヘリウム原子に対して行った計算結果では中性化された水素原子のうち2s、2pの励起状態にある割合が20%程度あることが示され、近似の有効範囲内ではエネルギー依存性も含めて最近得られた実験結果と良い一致を示している。又、水素原子との衝突でも同様の結果を得ている。水素原子での実験データは無いので実験結果との比較はされていないが、この程度の割合で励起原子が存在すると応用上は無視できず非常に重要な結果である。この励起状態を作り出す上で、負イオンの弱い束縛状態にある電子の存在が大きいことも計算上で明らかにされた。続いて論文では、イオンとの衝突による電子離脱も調べられた。ここではクーロン力が重要な役割を果たすので近似法としてひずみ波の方法を用いて、中性原子と同様、衝突後の励起状態を区別して計算を行っている。現状では近似が荒く実験結果との一致が中性原子の場合に比較して良くないが、注目すべき点として、イオンとの衝突の場合は励起状態への遷移が非常に小さいことが示された。これは、入射イオンの強いクーロン場によると理解される。電子離脱断面積が大きくなることに付け加えて、負イオンの中性化にイオン（プラズマ）を用いることの有利性がもう1つ新たに明らかにされた訳であり、今後の実験研究の動機付けになると思われる。

以上、本論文は原子物理の観点からは新しい適用領域を開拓し、実験的な応用の面で重要な結果を提示しており、理学博士論文としての価値を有するものと認めた。尚、本研究では数値計算を主に行っているが、詳細な計算コードを作り上げた力量についても評価されるべきものと認めた。