

太陽風と惑星大気との相互作用のモデル実験

久保治也・河島信樹・伊藤富造

Simulation Experiment on the Interaction of Solar Wind and Planetary Atmosphere

By

Haruya KUBO, Nobuki KAWASHIMA and Tomizo ITOH

Abstract: Ionization mechanism in Comet was simulated in laboratory using gun-produced plasma stream and gas cloud from F. A. V. Diagnostic tools were an optical spectrometer, a Kerr cell camera and an image converter camera. Helium gas cloud is ionized by hydrogen or helium plasma stream, but not ionized by argon or nitrogen plasma stream. It is revealed that a neutral gas cloud is ionized by electrons heated in a shock wave created in the mutual gas cloud-plasma stream interaction. Observing H_{β} in the interaction of hydrogen plasma stream with various gas clouds, the intensity of H_{β} is the strongest when hydrogen plasma stream interacts with helium gas cloud. This is explained by the excitation transfer

1. 緒 言

われわれはこれまでにプラズマ流と中性ガス塊との相互作用に関する実験を、宇宙空間の現象に関連させて行なってきた。たとえば、type-I comet は固体の核の周囲を、CO, N₂, CO₂ などの中性ガスが取り囲んでいて、太陽風がこの中性ガス塊と相互作用して、それを電離し加速したものであると考えられているが、その際の shock formation と comet tail [1] の構造に関してはすでに報告した。更に、comet に関して今一つ興味ある問題があり、それは太陽風に依ってガスがいかに電離されるかということである。また、金星の周囲に shock front が存在することを Mariner 5 [2] が観測したが、これは太陽風と CO₂, NH₃ などの金星大気との相互作用で形成されたものであり、金星大気の温度分布は shock heating によって説明される。このようにプラズマ流と中性ガスとの相互作用は宇宙空間では非常にありふれた現象である。今回は comet に関連して、中性ガスがプラズマ流によってどのように電離されるかということ、およびそれに続いて起こる excitation transfer について報告する。プラズマ流は同軸型プラズマ銃で、ガス塊は fast-acting gas valve (F. A. V.) でおおの生成する。

ガスの電離に関する実験は、通常原子分子物理学の領域で、収束した電子あるいはイオンビームを用いて行なわれていて、入射電子あるいはイオンビームが、ガス原子の最外殻電子

の速度 ($\sim 10^8$ cm/sec) とほぼ同じ速度を持つときに、電離断面積が最大値を持つということが実証されている。ここに入射粒子束が single particle の電子あるいはイオンビームではなくて、プラズマ流であれば、中性ガス塊はいかにして電離されるのであろうかという疑問が生じる。

中性ガスと磁化プラズマとの衝突電離は Alfvén [3] によって研究され、かれは中性ガスが急速に電離されるための条件として下記の criterion を与えた。すなわち

$$\frac{1}{2} Mv^2 \geq eV_i$$

ここに eV_i は中性ガスの電離エネルギー、 M はプラズマ粒子と中性ガス原子との換算質量、 v はプラズマ流と中性ガスとの相対速度である。

Danielsson [4] がこの process に関して実験を行ない、Alfvén の criterion は正しいという結論を出した。一方、われわれの実験結果は、単に Alfvén の criterion に従うというよりはむしろ、shock formation による電離が一番有効にきいているというものである。すなわち、shock front におけるプラズマの加熱が中性ガスの電離を引き起こす、しかし、プラズマ流中のイオンの初期運動エネルギーは電離にほとんど関係しないということである。

一方、プラズマ流と中性ガスの相互作用において、プラズマの中性線を観測していると、非常に遅れた時刻にピークを持つというおもしろい現象が見つかった。また、この強度がターゲットガスによって種々異なることから、excitation transfer が関係しているということが確認された。

このような excitation transfer が宇宙空間でも種々のところで生起しているのであろう。

2. 実験操作

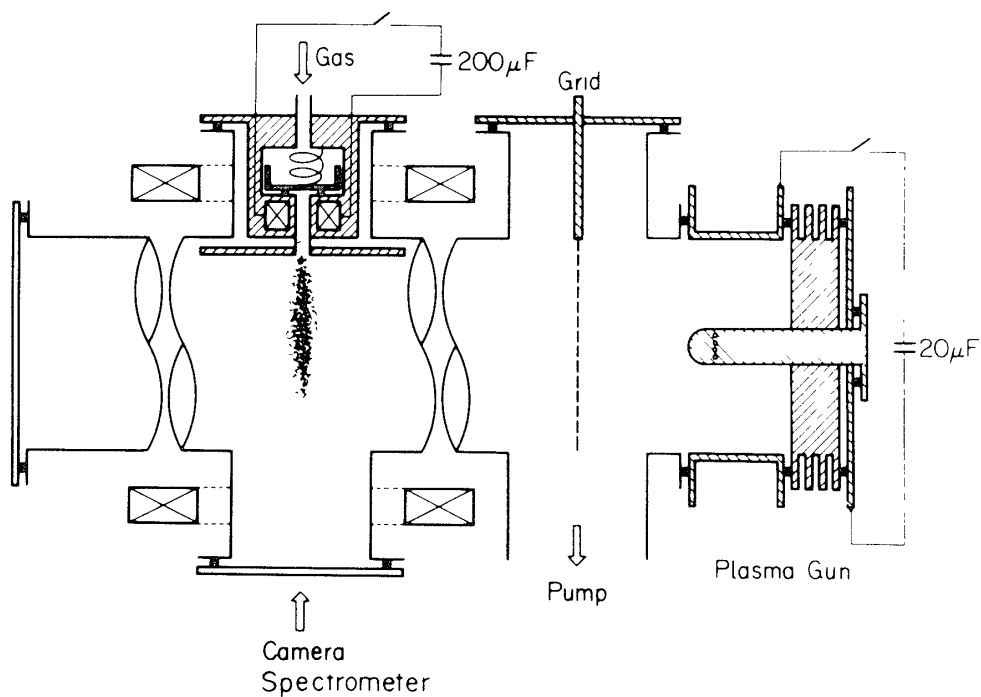
実験装置の模式図を第1図に示す。真空容器は直径6インチのパイレックスのガラス管で構成され、 4×10^{-6} Torr の真空度まで引かれる。プラズマ銃は同軸型で、銃口から相互作用領域の中心までの距離は 1.7 m である。

TRW イメージコンバーターカメラ、カーセルカメラ、島津 GE-100 分光器、静電複探針を測定装置として使用した。プラズマの壁への損失を減少させるために軸方向磁場を加えてある。中性ガスを導入するために F. A. V. を使用し、円柱状のガス塊がプラズマ流とカメラの軸に垂直に、あるいはプラズマ流に平行に形成される。ガス柱の半径は約 5 cm で、除々に広がる。中性ガス塊とプラズマ流に使用したガスは、水素、ヘリウム、アルゴン、窒素および空気である。

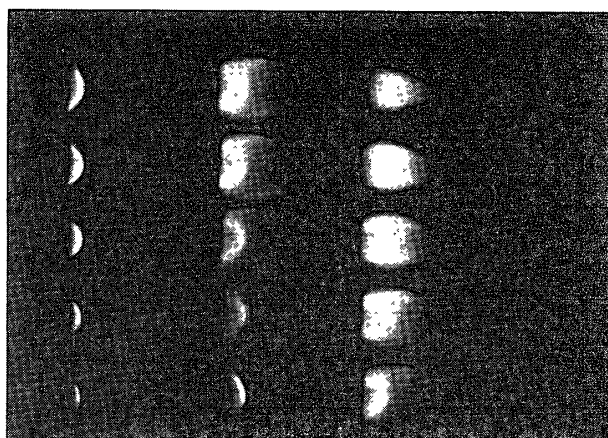
3. 実験結果

ターゲットガスの F. A. V. の開放とプラズマ銃の放電の間の時間間隔 τ が $350 \mu\text{sec}$ のときの水素プラズマ流とアルゴンガス塊の相互作用の時間分解した一連のイメージコンバーター写真を第2図に示す。明るい部分が、プラズマ銃放電後の経過時間を T とすると、 $T = 10 \mu\text{sec}$ に観測され始め、shock front は $T = 20 \mu\text{sec}$ に形成される。

shock front の構造は τ に依存する。 τ が $250 \mu\text{sec}$ よりも小さいときには、shock front



第 1 図 実験装置の模式図. 中性カスは左端から導入することもある.

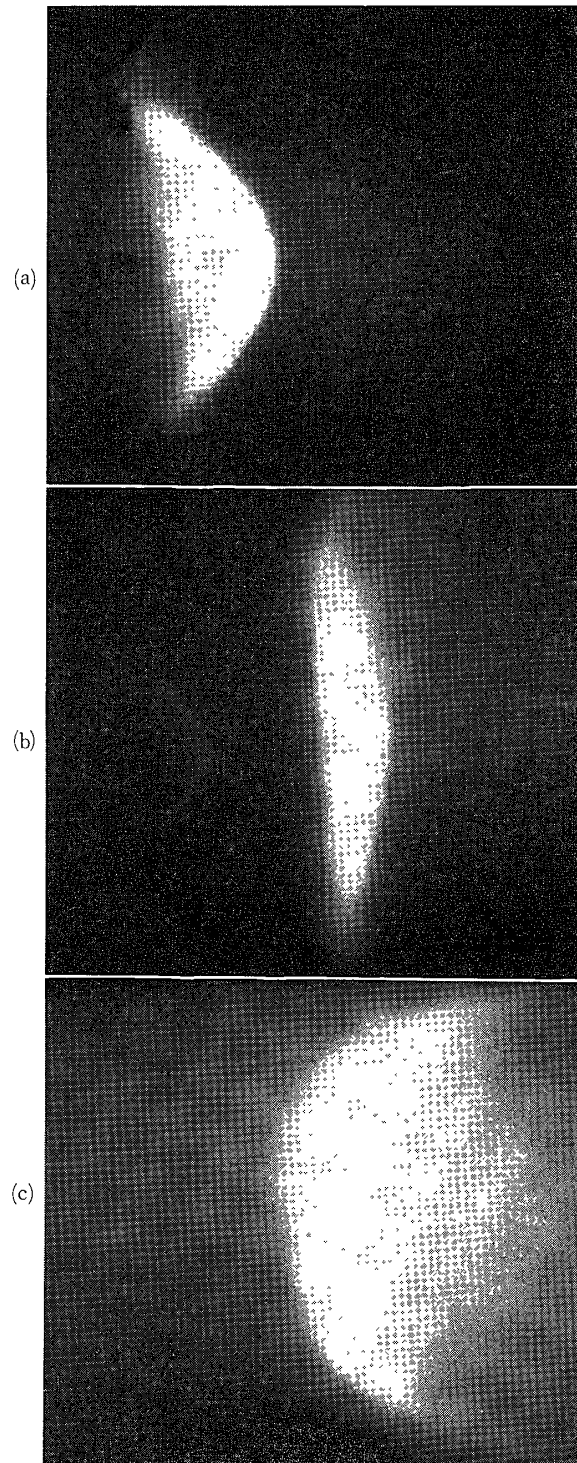


第 2 図 アルゴンガスと水素プラズマ流との相互作用のイメージコンバータ写真. カスは第 1 図の入れ方をし, プラズマ流は右側よりくる
 右端 上よりプラズマ銃放電後 10, 12, 14, 16, 18 μ sec
 中央 上より 20, 22, 24, 26, 28 μ sec
 左端 上より 30, 32, 34, 36, 38 μ sec
 露出時間 100 n sec

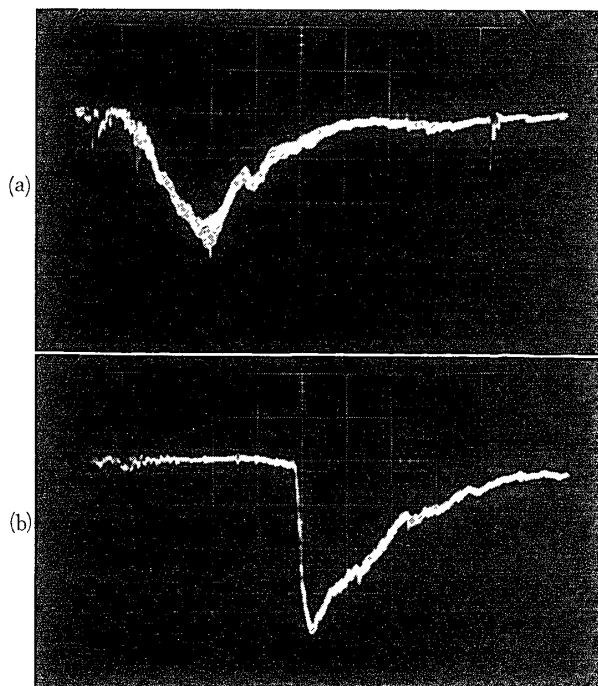
は観測されず, $\tau=350\mu\text{sec}$ では shock front は $T=20\mu\text{sec}$ に見られ, それはプラズマ銃の方向に凸である. $\tau=450\mu\text{sec}$ では shock front は $T=25\mu\text{sec}$ に現われ, それは真直ぐである. $\tau=650\mu\text{sec}$ ではプラズマ銃の方向に凹なる shock front が $T=30\mu\text{sec}$ に観測される. これら三つの相異なる shock structure のカーセル写真を第3図に示す. この shock structure の違いはプラズマ流と中性ガスとの相対的な拡がり方の違いによるものである. $\tau=350\mu\text{sec}$ では, 中性ガスの径方向の大きさはプラズマ流のそれに比べて小さいので, 比較的大きな径のプラズマの流れがより小さな径の障害物で妨害される, その結果 shock front は上流方向に凸になる. $\tau=650\mu\text{sec}$ では中性ガスとプラズマ流の相対的な大きさが逆になるので shock front は逆に上流方向に凹になる.

ターゲットガスをアルゴンからヘリウムに変えると, ヘリウムはアルゴンよりも早く拡散するので, アルゴンに対するよりも小さな τ で上流方向に凹なる shock front が現われる.

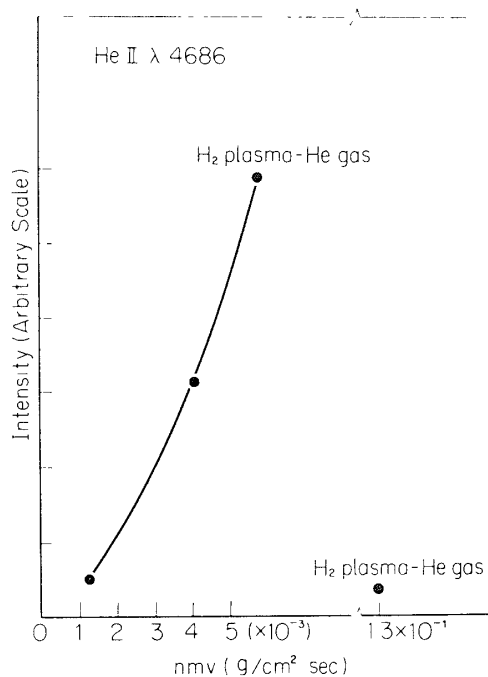
第4図は水素のプラズマ流がヘリウムガスと相互作用したときのヘリウムの中性線 $\text{He I } \lambda 4471$ とヘリウムのイオン線 $\text{He II } \lambda 4686$ のオシロスコープ写真である. プラズマ銃は $\tau=350\mu\text{sec}$ に 16 kV で放電される. ヘリウムの中性線は常に $\text{He II } \lambda 4686$ よりも時間的にさきに現われる. 窒素あるいはアルゴンのプラズマ流を用いたときには, $\text{He II } \lambda 4686$ は観測されない. 水素プラズマ流および窒素プラズマ流とヘリウムガスとの相互作用で観測される $\text{He II } \lambda 4686$ の強度を, 運動量密度を横軸にして第5図に示す. 同じ傾向の曲線がエネルギー密度に対しても得られる. 窒素の



第3図 アルゴンガスと水素プラズマ流との相互作用のカーセル写真. ガスは左側から入れ, プラズマ流は右側からくる. τ をガスの F. A. V. 開放後プラズマ銃放電までに経過した時間とすると
 (a) $\tau=350\mu\text{sec}$ プラズマ銃放電後 $20\mu\text{sec}$
 (b) $\tau=550\mu\text{sec}$ " $25\mu\text{sec}$
 (c) $\tau=650\mu\text{sec}$ " $30\mu\text{sec}$
 露出時間 $1\mu\text{sec}$



第 4 図 ヘリウムガスと水素プラズマ流が相互作用したときのヘリウムの中性線およびイオン線。ガスは第 1 図に従って入れる。掃引 $5\mu\text{sec/div}$
トリガー プラズマ銃放電
(a) He I λ 4471 (b) He II λ 4686

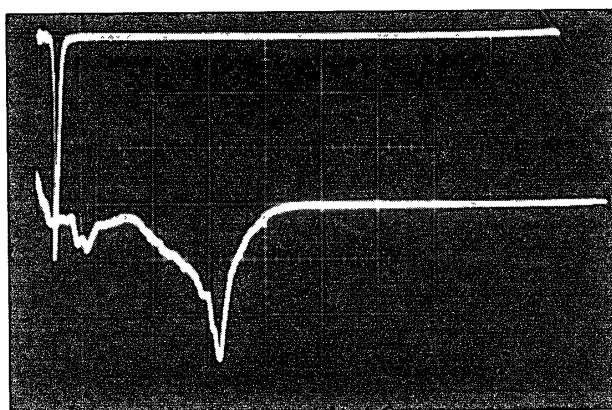


第 5 図 He II λ 4686 の強度とプラズマ流の運動量密度との関係

プラズマ流は水素のプラズマ流に比べてオーダー 1 つ以上大きな運動量密度を持っているが、He II λ 4686 の強度は水素プラズマ流がヘリウムガスと相互作用したときの方がはるかに強い。このことからヘリウムガスの電離はプラズマ流の運動量密度やエネルギー密度に直接的に支配されているのではないということがわかる。

τ を変えて He II λ 4686 の強度変化を調べると、最大強度を与える τ の最適値が存在するが、イオン線の現われる時刻は τ が大きくなればなるほど遅れる。このことはターゲットガスの量が増大すればするほど、電離をひきおこす shock front が観測領域に到達する時刻が遅れるからである。

イメージコンバーター写真とスペクトル線のオシロスコープ写真を見比べて、shock front の現われる時刻と、He II λ 4686 の現われる時刻が一致す



第 6 図 ヘリウムガスと水素プラズマ流の相互作用で観測される He II λ 4686 と H_{β} . 上軸 He II λ 4686 下軸 H_{β} 掃引 $50\mu\text{sec/div}$
トリガー プラズマ銃 ガスは第 1 図に従って入れる

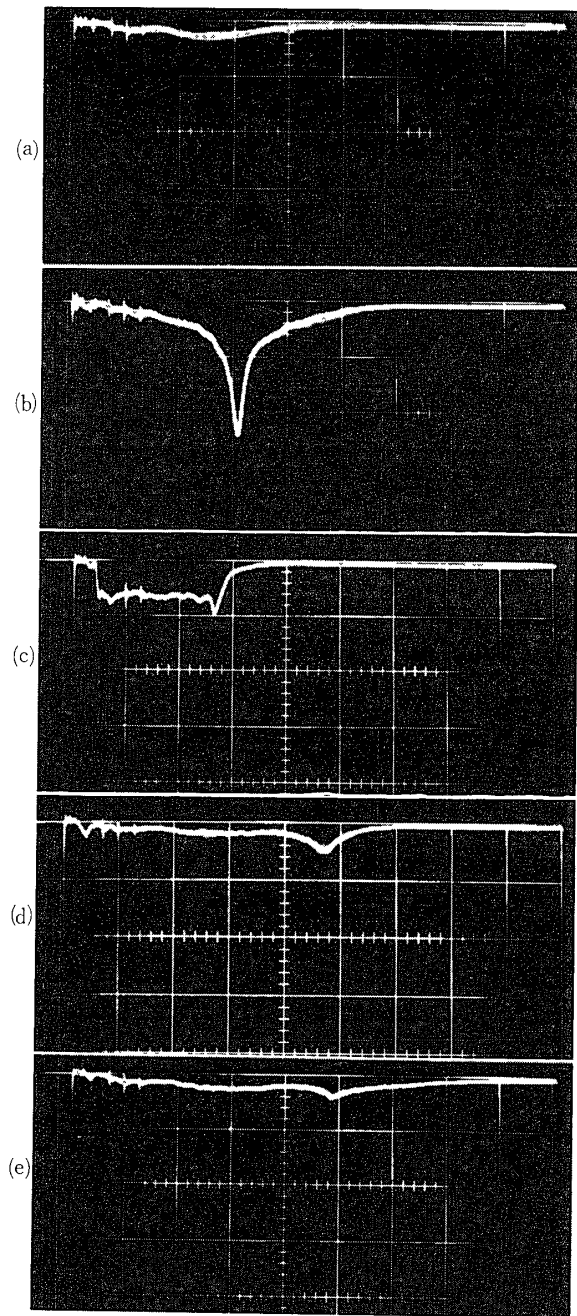
ることが明らかになった。また、第4図の He I/He II の強度比から shock front の現われる時刻にプラズマ流の電子温度が急に上昇していることがわかる。これらの事実が電離は衝撃波加熱に関係した現象であるということを示唆する。この電離機構をはっきりさせるために、ターゲットガスをヘリウムからアルゴンに変えて、Ar II λ 4348 を観測した。予期通り、イメージコンバーター写真に shock front の現われる時刻と Ar II λ 4348 が現われる時刻とが一致した。

衝撃波の形成はプラズマ流およびガスの種類による。窒素およびアルゴンのプラズマ流がヘリウムガスと相互作用しても、衝撃波は観測されず、He II λ 4686 もほとんど観測されない。これらのプラズマ流がアルゴンガスと相互作用すると衝撃波が観測され、Ar II λ 4348 も観測される。しかしこの shock front の明るさは水素プラズマ流がヘリウムガスと相互作用した場合の shock front の明るさよりもはるかに弱い。これらの実験結果はターゲットガスの電離は Alfvén の過程によるよりはむしろ主として、衝撃波で加熱された電子によるものであるということを示している。

プラズマ流と中性ガスの相互作用に関する素過程についてなんらかの情報を得るために、プラズマ流の中性線を調べた。すなわち、水素プラズマ流を用いるときは H_{β} および H_{γ} に注目し、ヘリウムプラズマ流を用いるときは He I λ 4471 を調べた。

第6図は水素プラズマ流がヘリウムガスと相互作用した場合の He II λ 4686 と H_{β} のオシロスコープ写真である。

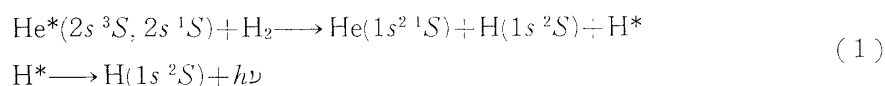
第6図で興味あることは H_{β} がプラズマ銃放電後約 $150\mu\text{sec}$ のところに非常に大きなピークを持つということである。プラズマ流の持続時間は約 $60\mu\text{sec}$ で、これまでに述べてきた衝撃波形成などの相互作用は $20\mu\text{sec}$ ~



第7図 水素プラズマ流が種々のターゲットガスと相互作用したとき、および相互作用しないときの H_{β} . ガスは第1図の左側から入れる。掃引 $50\mu\text{sec/div}$. トリガー プラズマ銃
(a)相互作用なし, (b)ヘリウム, (c)水素, (d)窒素, (e)アルゴン.

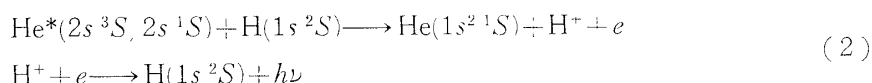
50 μ sec の間に起っている。したがってこの 150 μ sec のところに現われる H_{β} のピークは今までの相互作用よりもはるかに遅れて起こる現象である。

水素プラズマ流が、水素、ヘリウム、窒素、アルゴンガスと相互作用した場合、およひ全然ガスと相互作用しない場合の H_{β} の強度の時間的变化を第 7 図に示す。プラズマ流がヘリウムガスと相互作用するとき H_{β} の強度は最大である。また、 H_{β} のピークが現われる時刻がターゲットガスの質量が大きくなるにしたがって遅れてくる。これは水素ガスの拡散速度が重いガスの中においては軽いガスの中におけるよりも小さいからである。この H_{β} のピークは再結合によるものではない。なぜならば中性ガスの密度は $\sim 10^{16}/\text{cm}^3$ なので再結合が起こるとすれば三体の再結合であり、三体の再結合は第 3 体は何であろうと、再結合率はほとんど変わらないということがわかっており、これはヘリウムと相互作用したときに最も強い H_{β} を出すということと矛盾する。また、複探針の測定により H_{β} がピークを示す時刻にプラズマは存在していないので、もともと再結合は起こり得ないのである。ヘリウムガスと水素プラズマ流が相互作用した場合に H_{β} が最大強度を持つのは多分、プラズマ流によって励起された準安定単位にあるヘリウム原子と、プラズマ流の到達よりもはるかに遅れて実験領域に流入してくるプラズマ銃中の電離していない残留水素分子との間の dissociative excitation transfer によるのである。これは下記の過程で表現される。すなわち、



ヘリウムが非常に高い準安定単位 (19.8 eV) を持っていることは周知の事実で、(1) 式の反応が可能になる。窒素やアルゴンのような他のターゲットガスはヘリウムに比べてオーダー 1 つくらい小さい H_{β} しか出さないが、これは dissociative excitation transfer を生起させるほどの寿命の長い、エネルギー準位の高い準安定単位をこれらの原子が持っていないからである。

今一つ考えられる可能な過程は



である。これら二つの反応の断面積はたいして違わないので、どちらの反応が起こるかは H_2 と H の量がどの程度であるかによる。水素原子の水素分子への再結合率は $\sim 10^{-31} \text{ cm}^6/\text{sec}$ なので、水素原子密度が $10^{16}/\text{cm}^3$ 程度のときは 100 μ sec 位の間ではほとんどの水素原子は分子にはならずそのまま存在する。したがって、水素原子と水素分子の密度が同じオーダーならば (1) の反応も (2) の反応も同じ程度に起こり、 H_{β} の現われる時刻に H^+ も観測されるはずであるが、実験事実 H^+ を見つけていない。結論として、プラズマ銃から流入してくる中性ガスはほとんど水素分子で、水素原子はあまり存在せず、(1) の反応で H_{β} が放出されるといえる。また、たとえ (2) の反応が同様に起こったとしても radiative recombination が生起する断面積は非常に小さく H_{β} にはあまり寄与しない。したがって H_{β} 放射を支配している機構は dissociative excitation transfer であると結論される。

4. 結 論

プラズマ流と相互作用している中性ガスの電離機構を研究した。第2図および第4図からわかるように shock front とイオン線は同時刻に現われ、イオン線は衝撃波に対応して非常に急峻な立上りを示す。さらに、He I/He II の強度比から shock front が形成されたときにプラズマ流の電子温度が上昇することがわかる。したがって電離は主として衝撃波で加熱されたプラズマ電子によるということが結論される。さらに、もし Alfvén の電離過程が支配的であるとすると、ヘリウムガスは窒素あるいはアルゴンのプラズマ流によっても電離されるはずである。なぜならばこれらのプラズマ流も $\frac{1}{2}Mv^2 \geq eV$ なる条件を十分に満たしているから。

プラズマ流の中性線を水素およびヘリウムのプラズマ流を用いて研究した。プラズマ流が中性ガス塊と相互作用しないときは第7図に示されているように中性線はほとんど現われぬ。これらのプラズマ流がガス塊と相互作用すると、プラズマ銃からの中性ガスはプラズマで励起された中性ガス塊によって止められ、中性線はプラズマ銃放電後約 $150\mu\text{sec}$ 経過してピークを持つ。中性線の強度はターゲットガスがヘリウムの方が最大で、これは準安定準位にあるヘリウム原子とプラズマ銃からの分子との間の dissociative excitation transfer によって説明できる。

この実験にはなお多くの解決すべき問題が残っているが、上記の興味ある結果は、荷電粒子と中性原子の collective な相互作用の分野において重要な物理的事実を引き出す可能性を含んでいる。

謝 辞

この実験を行なうに当って技術的な方面で宇宙航空研究所プラズマ実験室の和宇慶朝繁氏に御世話になったことを感謝する。原子分子の素過程に関しては、高柳和夫教授に種々示唆をいただいたことに感謝する。

1972年1月14日 新設部(科学)

参 考 文 献

- [1] H. Kubo, N. Kawashima and T. Itoh, Plasma Physics **13**, 131, 1971.
- [2] H. S. Bridge, et al., Science, **158**, 1669, 1967.
- [3] H. Alfvén, Rev. Mod. Phys. **32**, 710, 1960.
- [4] L. Danielsson, Phys. Fluids **13**, 2288, 1970.