

低速分子イオンビーム源の開発

—減速・集束レンズの製作—

日高宏, 香内晃, 渡部直樹

低温基礎科学部門 雪氷物性/惑星科学グループ

小島隆夫

理化学研究所 原子物理研究室

1. はじめに

星間空間には、氷星間塵と呼ばれる氷マントルをまとったサブミクロンサイズの鉱物微粒子と高密度のガスが集積した、分子雲という天体があることが知られている。宇宙に数多く存在している星・惑星などの天体は、分子雲内で塵やガスが集積することにより形成されたと考えられており、分子雲の進化を明らかにすることは、我々の太陽系やその他数多くの星々の誕生を明らかにすることにつながる。これまで、分子雲を対象とした多くの天文観測により、100種類を超える数多くの分子やイオンの存在が確認されている。それゆえ、分子雲内では様々な化学反応が生じていると考えられ、分子雲は星・惑星形成の場としてだけでなく、宇宙空間における化学進化（分子成長）を理解する上でも非常に重要な天体である。

分子雲形成初期の化学組成を仮定し、実際に分子雲内で起こりえる様々な化学反応を取り込んだ化学反応ネットワーク計算を行うことで、分子雲内の化学組成が時間（分子雲年齢）と共にどのように変化するかをシミュレーションすることができる。すなわち、分子雲内の化学組成は、分子雲内の化学進化、ひいては分子雲の進化の度合いを示す時計になりえる。分子雲内の化学進化の研究は、分子雲の進化を解明するために有効なアプローチである。

これまで、分子雲内の化学反応ネットワーク計算は、実験や理論計算により蓄積されてきた膨大な反応断面積データを用いて行われ、一定の成果を上げている。しかし、これらは気相での化学反応のみを考慮した計算である。近年、星間塵表面での化学反応の重要性が指摘され始め、化学反応ネットワーク計算に表面での化学反応の反応過程が取り込まれるようになってきた。しかしながら、気相反応に比べ固体表面での化学反応に関する反応速度定数や反応断面積といった定量データは数少なく、表面反応を取り込んだより現実に近い反応ネットワーク計算による分子雲進化のシミュレーションは、未だ確立されていない。

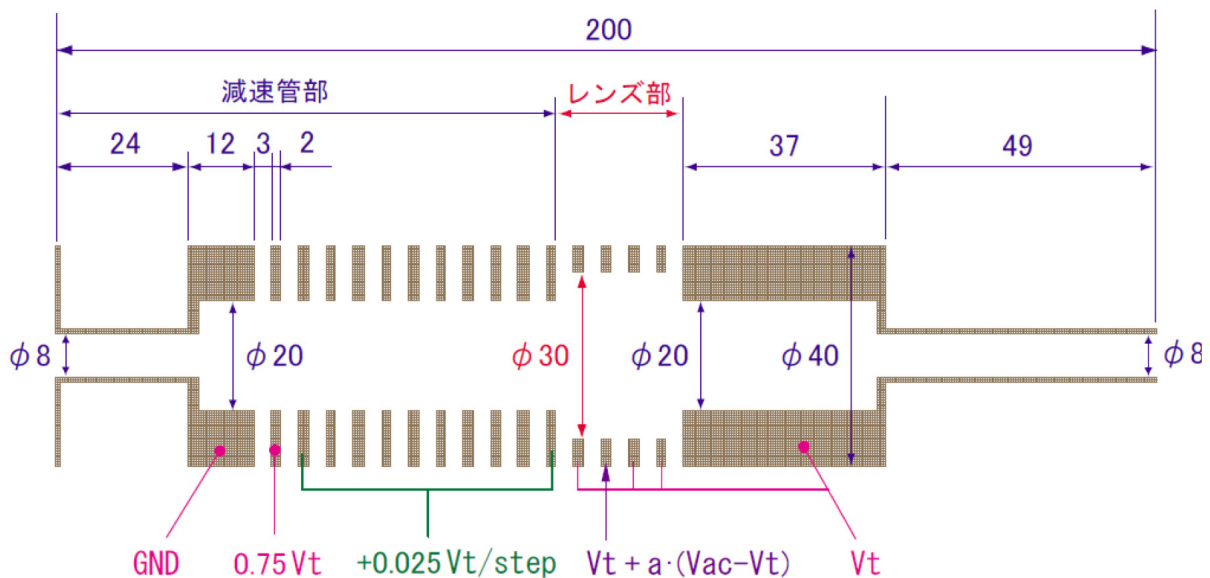
我々は、中性原子源を用いて星間塵表面で生じる中性原子-分子反応のシミュレーション実験を行い、表面反応による反応速度定数の導出を行ってきた。最近、新たに固体表面におけるイオン-分子反応実験を開始するため、分子イオンビームの開発をスタートした。

2. 減速・収束光学系の設計

低速分子イオンビーム生成のために重要な、減速・収束光学系の設計を行い、飛行エネルギーが数百 eV の分子イオンビームを、試料表面にバイアス電圧 V_t をかけることで数 eV 程度まで減速させて照射することを目標とした。しかし、試料のバイアス電圧のみによる減速では、ビームが拡散する可能性や、試料へ入射角をもって照射した場合、偏向して試料から逸れてしまう可能性も考えられる。そこで、試料直前にビームの減速・収束のための光学系を置くことにした。

当初、減速・収束系を三電極型のレンズを 2 段組み合わせたズームレンズ型とし、設計を開始した。しかし、イオン軌道計算ソフト SIMION で種々の軌道シミュレーションを試みたが、良い収束系が得られなかった。

そこで、加速器などで通常用いられている“定電場型減速管+集束レンズ1段”という構造に変更した(下図)。このレンズ系を組み込む既存の実験装置の空間的な制約から、あまり多くのレンズを配置できないため、減速管部分は初段で V_t の 75 % 程度まで一気に減速し、後半の多段電極部を定電場にしてビーム形状を整える方式を採用した。



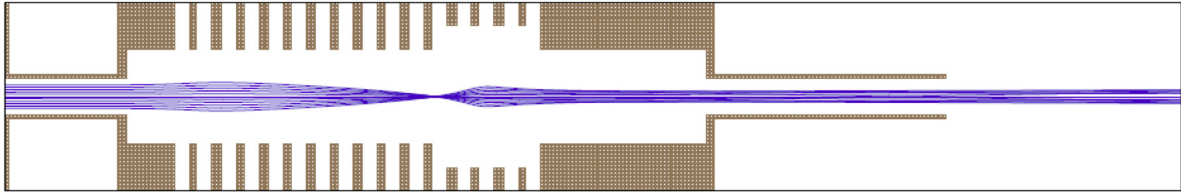
加速電圧 $V_{ac} = 100 \sim 300 \text{ V}$ のイオンビームを $3 \sim 5 \text{ eV}$ まで減速するため、試料電位 V_t は $V_{ac} - V_t = 3 \sim 5 \text{ V}$ である。シミュレーションの結果、この条件下で試料に効率よくビーム照射を行うことができるレンズ電位は $V_L = V_t + a (V_{ac} - V_t)$ である。係数 a は、他の条件により若干前後するが、おおよそ $a \doteq 4.8$ である。

3. SIMION によるシミュレーション例

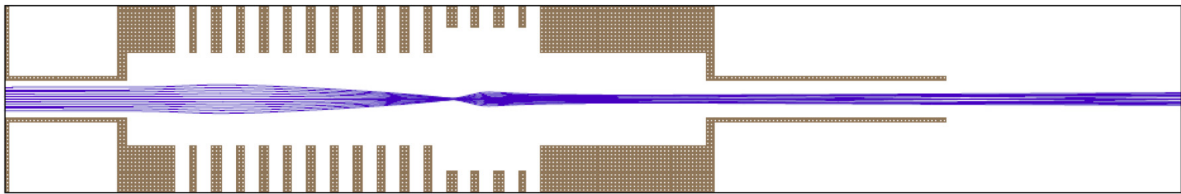
分子イオンビームとして、直径 5 mm の平行な CH_4^+ イオンビームを想定し、シミュ

レーゾンした結果を以下に示す. 尚, 簡便のため, 試料標的への照射エネルギー (衝突エネルギー) を E_c と書き, $E_c = e(V_{ac} - V_t)$ である.

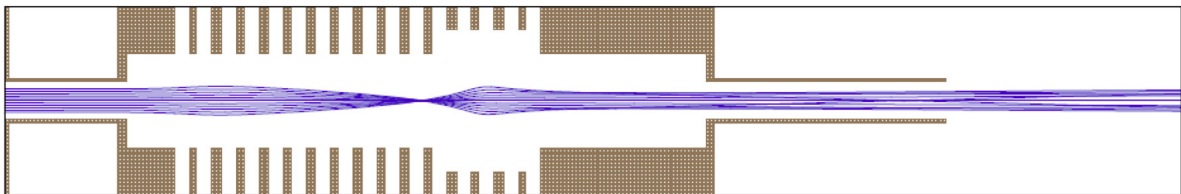
$$V_{ac} = 103 \text{ [V]}, \quad V_t = 100 \text{ [V]}, \quad E_c = 3 \text{ [eV]}, \quad V_L = 114.5 \text{ [V]}, \quad a = 4.83$$



$$V_{ac} = 105 \text{ [V]}, \quad V_t = 100 \text{ [V]}, \quad E_c = 5 \text{ [eV]}, \quad V_L = 125 \text{ [V]}, \quad a = 5.0$$



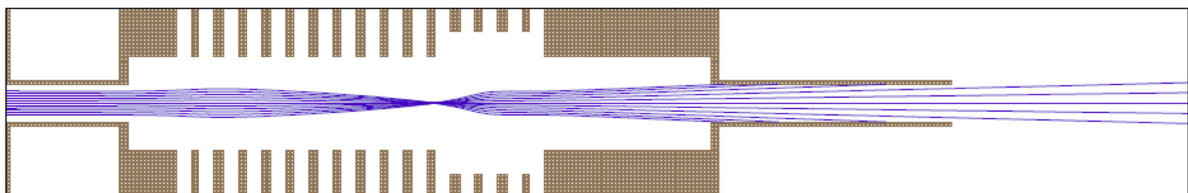
$$V_{ac} = 203 \text{ [V]}, \quad V_t = 200 \text{ [V]}, \quad E_c = 3 \text{ [eV]}, \quad V_L = 214.2 \text{ [V]}, \quad a = 4.73$$



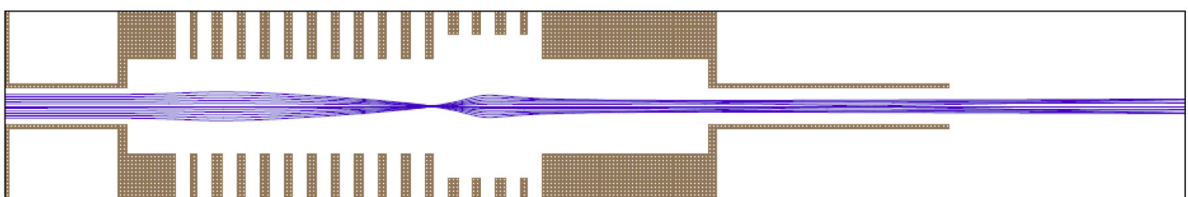
この結果を見てわかるように, 加速電圧が 100 V から 200 V へ変化しても, レンズ電位係数 a の若干の調整は必要であるが, 減速・収束特性は良く, 試料への照射実験に十分使用可能な状態である.

減速後のビームのエネルギーは極めて低いため, ビームの収束はレンズ電位の変化に対して非常に敏感であることが予想される. そこで, 次にレンズ電位 V_L のみを変化させ, ビーム形状のシミュレーションを行った.

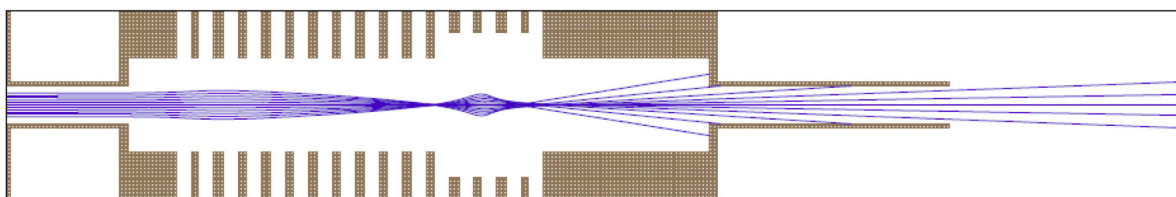
$$V_{ac} = 205 \text{ [V]}, \quad V_t = 200 \text{ [V]}, \quad E_c = 5 \text{ [eV]}, \quad V_L = 222 \text{ [V]}$$



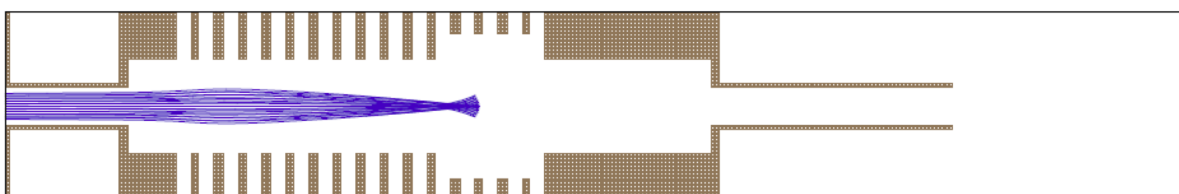
$$V_{ac} = 205 \text{ [V]}, \quad V_t = 200 \text{ [V]}, \quad E_c = 5 \text{ [eV]}, \quad V_L = 224 \text{ [V]}$$



$V_{ac}=205$ [V], $V_t=200$ [V], $E_c=5$ [eV], $V_L=226$ [V]

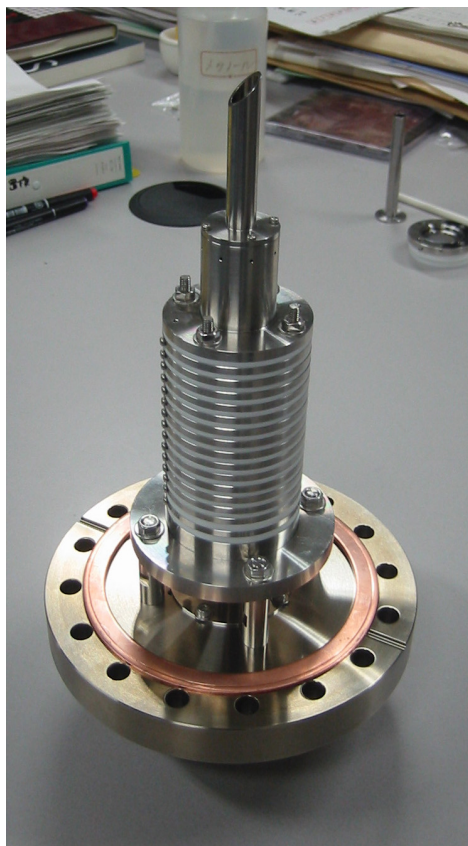


$V_{ac}=205$ [V], $V_t=200$ [V], $E_c=5$ [eV], $V_L=228$ [V]



この結果より、ビーム形状が明らかにレンズ電位 V_L に敏感であることがわかる。よって、実機においてレンズに電位を印加する際は、10 回転ポテンシオメーター等により、細かな電位コントロールを可能にする必要がある。

4. 製作組み立ておよび予備実験



今回設計した減速・集束レンズ系の部品の製作を、低温科学研究所の技術部に依頼した。左図は、組み上がった減速・収束レンズの全体写真である。このレンズ系は低温科学研究所に設置してある、LASSIE (Laboratory Setup for Surface reactions in Interstellar Environments) に組み込まれ、すでに低速分子イオンビーム生成の予備実験が開始している。現在、 CH_4^+ 、 CH_3^+ 、 HCO^+ の低速分子イオンビームを生成し、それぞれのビーム種で分子イオンビーム源の各種レンズに対する電位配置や諸条件の最適解を探している。これまでの試験で、ビーム種にもよるが、電流値にしておよそ 0.6 nA ($E_c \doteq 6$ eV) の低速分子イオンビームの生成に成功している。