

低温基板表面上における 吸着分子のオルソ・パラ転換測定装置の開発

木村勇氣¹, 日高宏², 香内晃², 渡部直樹^{1,2}

1. 共同研究推進部
2. 雪氷新領域部門 宇宙雪氷学グループ

1. 背景

宇宙空間における星・惑星の誕生メカニズムは、古くから多くの研究者達によって議論されてきた。現在、分子雲内でガスや塵が自己重力で凝集することで星が形成され、星の重力場にトラップされたガスや塵で形成される円盤内で惑星が誕生したと考えられている。もちろん、我々の住む太陽系も同様のプロセスを経て形成されたと考えられているが、実際のところ太陽系がどのような環境下（素となる分子雲の化学組成や温度）で形成されたのか等、詳細は明らかではない。太陽系の形成を理解するためには、形成時の分子雲環境を知ることが必要となる。

太陽系の外側に存在するカイパーベルトやオールト雲からやってくる長周期の彗星は、比較的太陽による熱変成を受けておらず、太陽系形成時の情報をもつ貴重な天体と考えられている。長周期彗星の発光から彗星の化学組成がわかれば、太陽系形成時の化学組成が明らかになり、またその組成比から（化学反応プロセスを仮定することで）温度を推定することもできる。しかし、組成比は熱変成により大きく変わる（揮発性成分はすぐに蒸発してしまう）ため、熱変成の見積もりやその影響を除去することの困難さから、この方法による温度の推定は難しい。そこで、彗星に含まれる分子のオルソ・パラ比から太陽系形成時の温度を見積もれないか議論されている。

オルソ・パラ比による温度の見積もり

核スピンの零ではない二つ以上の原子核が分子内に存在するとき、核スピン異性体が存在する。たとえば、水素分子ではオルソ水素 ($o\text{-H}_2$) とパラ水素 ($p\text{-H}_2$) と呼ばれ、分子を表記する波動関数の対称性の制約から、 $o\text{-H}_2$ は分子の回転量子数 J が奇数、 $p\text{-H}_2$ は J が偶数しかとりえない。つまり、分子の回転量子数分布を測定すればオルソ・パラ比を決定することができる。オルソ・パラ比は、分子が生成された時の温度によって異なった値をとることが知られている。このオルソとパラ状態間の遷移は、光の吸収・放出や衝突では生じず、化学反応による原子核の交換または磁性体や化学吸着を生じる触媒との接触が必要であるため、熱変性を受けている彗星表面（主成分は非磁性体の H_2O 氷）であっても、分子が生成された当時のオルソ・パラ比が保持されており、そこから過去の環境温度を見積もれないかという議論である。

2. 目的

近年、非磁性体表面上（銀や銅）でもオルソ-パラ転換が生じることが報告されてきた。転換時間やそのメカニズムは未解明であるため、 H_2O 氷の表面でオルソ-パラ転換が生じないことは自明ではない。彗星から蒸発した分子のオルソ・パラ比が、過去の情報を保持しているかどうかを明らかにするためには、 H_2O 氷表面上でのオルソ-パラ転換について調べる必要がある。そこで、低温 H_2O 氷表面におけるさまざまな分子のオルソ-パラ転換の測定を行うことを目的とし、実験装置の開発を行った。

3. 実験装置および測定方法

実験装置の概略図を図 1 に示す。実験は、低温基板の上に作成された H_2O 氷上に室温状態のガス分子（たとえば H_2 ）を蒸着した後、蒸着分子をレーザーによって H_2O 氷表面から脱離させ、脱離した分子の回転状態分布を多光子共鳴イオン化法*1（REMPI）により測定することで行う。蒸着後のガス分子の表面滞在時間の関数として脱離分子の回転状態分布測定を行ったとき、 H_2O 表面上でオルソ-パラ転換が生じる場合、室温状態における蒸着分子のオルソ・パラ比からのズレが検出される。

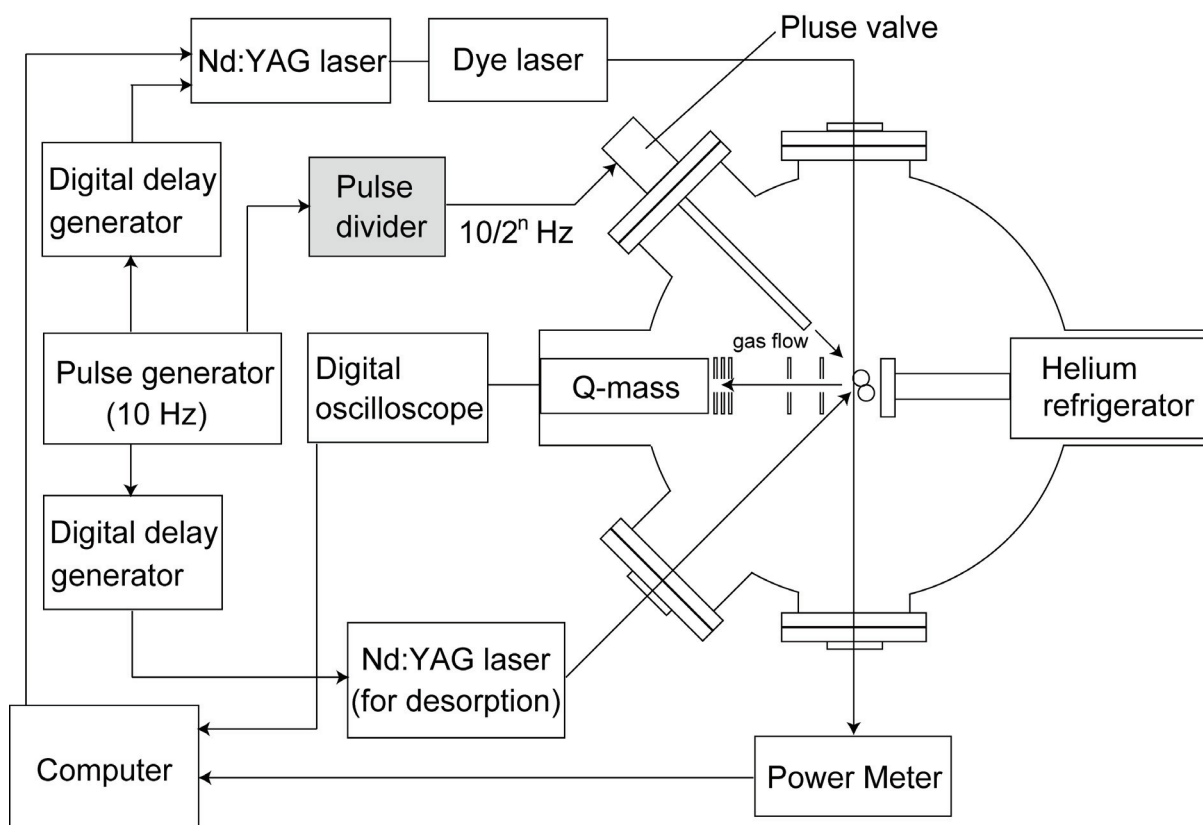


図 1：実験装置の概略図

*1 多光子を用いて、特定の電子・振動・回転状態の分子のみを選択的にイオン化する手法。この手法により、分子の内部状態分布測定が可能になる。

以下に、 H_2 分子の回転状態分布測定の手順を示す。

1. 基板を冷却し (10-150 K), H_2O 分子を蒸着させることにより氷を作成する。
2. パルスジェネレーターで 10 Hz のパルスを生成後 (図 2a), 分周器 (今回作成依頼をした機器) によって $10/2^n$ の周波数に変換し (図 2b), このパルスを H_2 蒸着用のパルスバルブに入力する。これにより, $2^n/10$ 秒の周期で H_2 分子が H_2O 氷表面に蒸着される (図 2c)。
3. 吸着した H_2 分子の回転状態は, H_2O 氷表面から蒸発させるための YAG レーザーと蒸発した H_2 分子をイオン化するための REMPI レーザーを 10 Hz の周期で動作させ測定する。 H_2 パルス分子線が氷表面に到達するまでと, 蒸発用レーザーが照射されてから, REMPI によるイオン化領域に H_2 分子が飛行するまでに時間がかかるため, 蒸発用レーザーと REMPI レーザー発振のための入力パルスにはデジタルディレイジェネレーターにより, 任意の時間差を与えられるようになっている (図 2d, 図 2e)。
4. 手順 3 を $2^n/10$ 秒間, $1/10$ 秒間隔で回転状態分布の時間変化を測定した後, 次の H_2 パルス分子線で新たに H_2 分子を蒸着し (このとき, 最初に吸着した H_2 はほとんどが蒸発して, REMPI で検出できない), 手順 3 を繰り返すことにより回転状態分布変化の統計をとる。

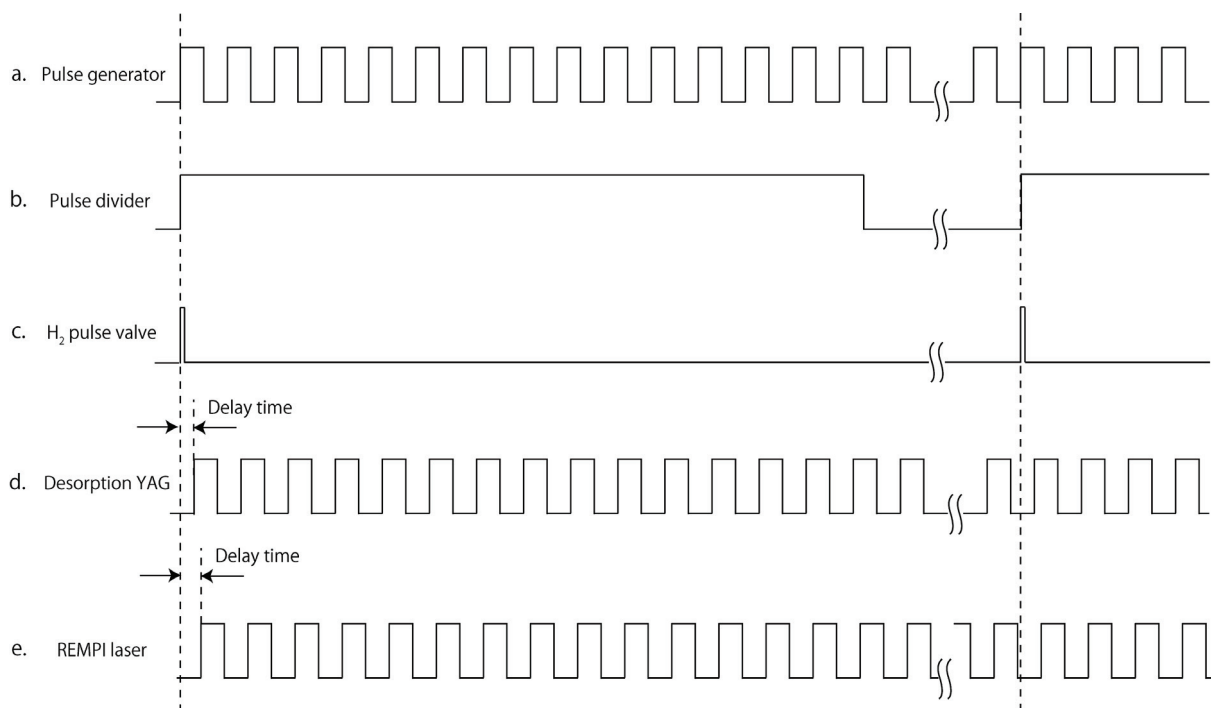


図 2 : 測定時のパルスタイミング

4. 測定例と今後の予定

現在、測定システムの構築中であるが、REMPI レーザーテスト時に測定した H_2 分子の回転状態スペクトルの測定結果を図 3 に示す。上述したように、 H_2 分子吸着後の時間の関数として、図 3 に示したような吸着 H_2 分子の回転状態分布測定を行い、低温 H_2O 氷表面におけるオルソ-パラ転換について研究を開始する予定である。

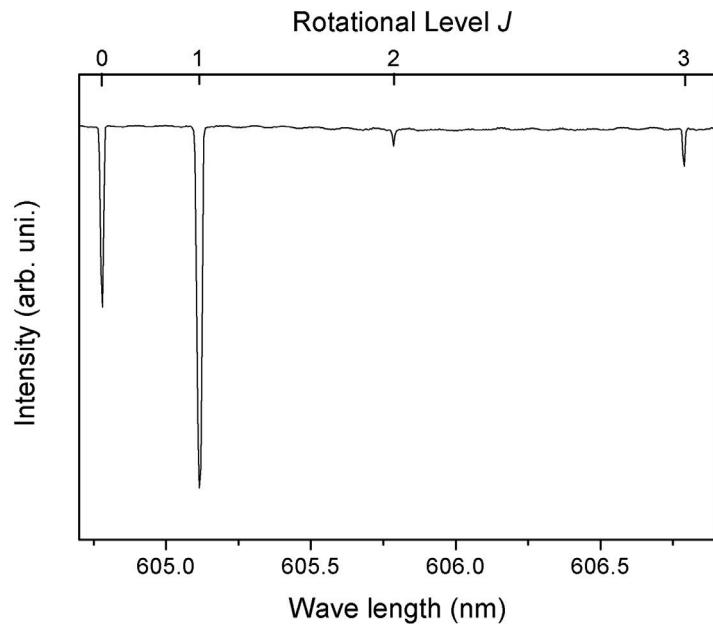


図 3：電子・振動基底状態にある H_2 分子の回転状態分布