

3P037 水素分子液滴の分光研究：超流動水素の探索

(UBC Canada¹、京大院理²) 久間晋¹、後藤悠²、A. Khramov¹、○百瀬孝昌¹

【序】1937年にKapitsaが見出した液体ヘリウムの超流動現象は、翌年Londonによってヘリウム原子がボーズ・アインシュタイン凝縮(BEC)を起こした結果発現していると説明された。水素分子は水素原子核(フェルミ粒子) 2個からなるボーズ粒子として取り扱える事が知られている。BEC転移温度の式

$$T_C = \frac{3.31\hbar^2}{Mk_B} \left(\frac{n}{g} \right)^{2/3}$$

(M は質量、 k_B はボルツマン定数、 n は密度、 g は縮重度) を当てはめると、BEC転移温度は $J=0, I=0$ のパラ水素の場合6K、 $J=1, I=1$ のオルト水素の場合1.5Kと予想される[1]。そのため、パラ水素分子はすべての物質の中でもっとも超流動・BEC転移しやすい系であるといえる。しかしながら、水素分子は13.8Kで凝固するため、超流動転移温度まで液体状態で過冷却することができず、未だ水素分子の超流動・BEC転移は達成されていない[2]。

我々は、系の粒子数を減らすと凝固点が降下すること[3]に着目し、巨大水素クラスターを低温にすることで、水素分子の超流動・BEC状態を観測できるのではないかと考え、その分光研究を進めている。本研究では、 10^6 個程度の個数の水素分子集団が、4Kの温度で液滴のように振る舞う結果を得たので、報告する。

【実験手法】超流動ヘリウム液滴発生装置[4]を用い、ノズルからヘリウムガスの代わりに水素ガスを噴出させることで、極低温の水素分子集団を真空中に生成した。ノズル温度は20 - 50K、圧力は5 - 20気圧でパルス状に水素ガスを吹き出した。連続ノズルを用いた同様の実験はすでにKnuthらによって報告されている[5]。彼らによると、このようにして生成した水素分子集団は $10^4 - 10^6$ の個数でその温度は

4Kである。パルスノズルによる水素分子集団生成は今回が初めてであるので、まず生成する分子集団を四重極質量分析器を用いて分析した。さらに水素クラスターの物性を調べるため、ピックアップセルの手法でMg-Phthalocyanine(Mg-Pc)を水素クラスターにピックアップし、そのレーザー誘起蛍光(LIF)を観測した。励起レーザーにはナノ秒の色素/OPOパルスレーザーを用いた。

【結果と考察】図2は、四重極質量分析器に水素分子集団が到達するまでの飛行時間(TOF)のノズル温度依存性を示す。背圧は5気圧である。22Kより上では速度の速い成分が2種類存在しており、それらの速度はノズル温度が高いほど速い。22Kより下では、速度の遅いブロードな信号が検出された。水素はおよそ22Kで液化するため、22Kより上では水素ガスからの分

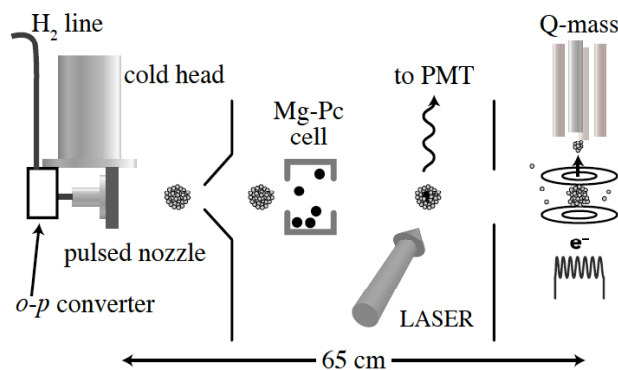


図1 実験装置の概略

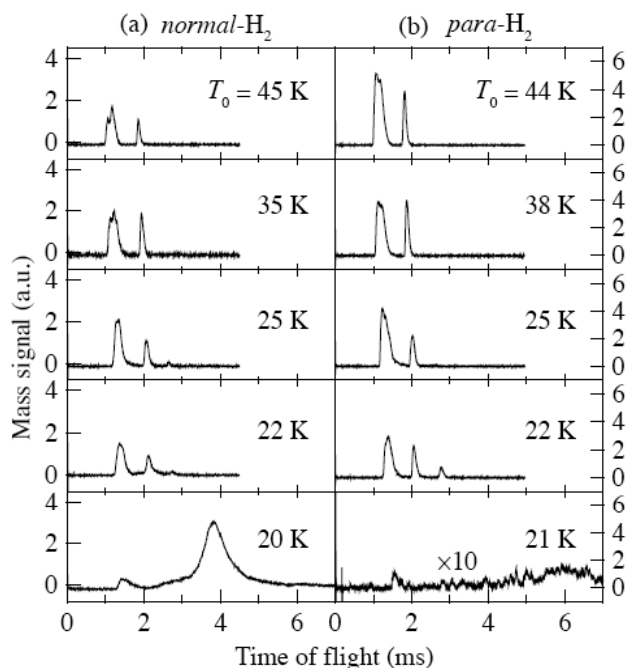


図2 水素液滴がノズルから質量分析器に到達するまでの飛行時間(TOF)のノズル温度依存性。(a)ノーマル水素、(b)パラ水素。

1000個程度)中のMg-PcのLIFスペクトル[6]と全く同一の周波数、線幅、スペクトル構造をもつ事が明らかになった。このことは、Mg-Pcが水素分子集団の中心に存在し、かつMg-Pcの周りの水素分子が流体的性質を持っていることを示唆している。すなわち、今回生成した水素分子集団が水素液滴と呼べるものであるといえる。一方、パラ水素濃度を高くすると、スペクトルはわずかに高周波数側にシフトするとともに、線幅が鋭くなり、スペクトル構造が観測された。このような違いは、ヘリウム液滴中に捕捉した水素クラスターでは見られなかった。ヘリウム液滴中に捕捉した水素クラスターは温度0.4K、サイズ 10^3 個であったのに対して、今回の水素液滴は温度4K、サイズ約 10^6 個である。すなわち、Mg-PcのLIFスペクトルに温度またはクラスターサイズの影響が明瞭に現れていることになる。当日、スペクトルの詳細とその解析を示す。

【参照】

- [1] V. L. Ginzburg and A. A. Sobayanin, JETP Lett. **15**, 242 (1972).
- [2] H.J. Maris, G.M. Seidel, T.E. Huber, J. Low Temp. Phys. **51**, 471 (1983).
- [3] R. S. Berry, Adv. Chem. Phys. **70**, 74 (1988).
- [4] M.N. Slipchenko, S. Kuma, T. Momose, A.F. Vilesov, Rev. Sci. Instr. **73**, 3600 (2002).
- [5] E.L. Knuth, F. Schunemann, J.P. Toennies, J. Chem. Phys. **102**, 6258 (1995).
- [6] 本討論会 3B18で報告。

子集団の生成、22Kより下では液体水素からの分子集団の生成と考えられる。同様の速い集団と遅い集団はKnuthらによっても観測されており[5]、水素ガスから発生した場合分子集団サイズはおよそ 10^4 個、液体水素から発生した場合およそ 10^6 個と報告されている。我々のパルスノズルは、ヘリウム液滴の場合、連続ノズルと比べて一桁から二桁大きなサイズの液滴ができることから[4]、今回我々が生成した水素分子集団も 10^6 個かそれ以上と予想される。

図3は速い速度成分を持つ水素分子集団にピックアップした、Mg-PcのLIFスペクトルのオルト-パラ依存性を示す。まず、パラ水素濃度が25%のノーマル水素のLIFスペクトルは、ヘリウム液滴中に捕捉した水素クラスター(サイズ

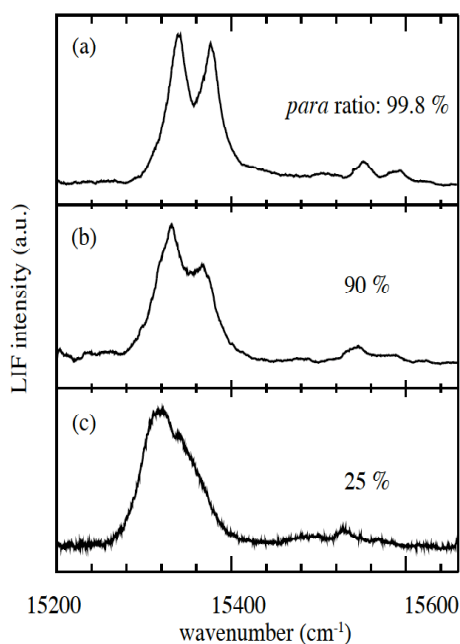


図3 水素液滴中のMg-PcのLIFスペクトルのパラ濃度依存性。