

微小重力下における超流動表面波

東工大 奥田雄一、高橋 拓也、鈴木 元也、野村 竜司

物材機構 沼澤 健則

NASA Peter Shirron

The Surface Waves on Superfluid ^4He on the jet plane

Yuichi Okuda, Takuya Takahashi, Motoya Suzuki and Ryuji Nomura
Tokyo Institute of Technology, O-okayama, Meguro-ku, Tokyo 152-8551
E-Mail: okuda@ap.titech.ac.jp

Takenori Numazawa,
National Institute of Material Science, Sakura, Tsukuba 152-8551

Peter Shirron,
NASA Goddard Space Flight Center,

Abstract: Surface waves on superfluid ^4He were optically investigated under 0.5 G, 0.1 G and 0.05 G, using the jet-plane parabolic flight. Assuming that the fundamental mode is excited which is determined by the sample cell width, the resonance peak was well reproduced by the gravity wave with the corresponding gravity constant.

Key words: Microgravity, Parabolic flight, Superfluid

固体 ^4He は超流動相から 25 気圧以上の圧力を印加して生成される。1 K 以下の極低温においては、両相のエントロピーがほとんど消失しているため、固液相転移に伴う潜熱がほとんどゼロである。超流動相による質量の輸送が非散逸的に進行することと併せて、結晶成長がおどろくほどの速さで進行する。圧力をかけても瞬時に平衡状態に達し、他の固体ではとても実現できない真の平衡形を観測できるのである。一方、外部圧力がない場合に固体が存在できないのは、大きな量子力学的揺らぎにより融解しているからで、この量子揺らぎのために各原子の振動振幅は大変大きい。その結果、ラフニング転移の秩序変数であるファセットのサイズも揺らぎによってかき消され、とても小さいものになっている。実験的にファセットを観測するためには、巨視的な結晶が必要となるが、巨視的な結晶を作成すると、重力の影響が大きくなり、重力ポテンシャルを極小にするように結晶は形を変えてしまう。したがって、真の平衡形、平衡状態でのラフニング転移などを調べるためには、微小重力環境が不可欠になってくる[1-2]。

微小重力環境は容易には実現できない。我々は 2 年ほど前から、JAXA(JSF)の協力を得て、航空機による短時間微小重力実験をスタートさせた。以下では、その過程で得られた液体ヘリウムについての実験の結果である。

航空機実験

航空機実験では、約 20 秒間の微小重力が得られる。固体 ^4He の結晶成長の速さや系が熱平衡に達する緩和時間が短いことを考えると、この時間は十分である。

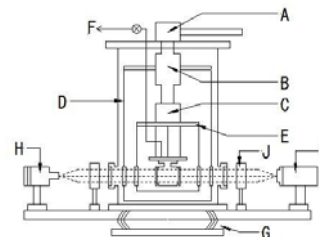


図1. クライオスタット。A-C:GM 冷凍機、F:サンプルライン、G:振動吸収バネ、H:CCD カメラ、I:光源、J:レンズ

航空機で低温実験を実施するにはいくつか克服しなければならない技術課題がある。気相と共存する液相は液の逆流を防がねばならない。実験装置の総重量、使用総電力に厳しい制約がある。航空機への搭載の際に電源を 30 分間ほどシャットダウンしなければならない。エプロンでの待機時間はせいぜい 3 時間ほどしかない。空域まで 30 分ほど、パラボリック・フライトに 1 時間程度の時間しかない。等々である。これらは低温実験とは相反するものである。

図 1 は ADR を用いた宇宙冷凍機[3]をもとに改造されたクライオスタットの模式図である。GM 冷凍

機によって4K温度ステージを確保し、サンプルである液体ヘリウムを航空機がエプロンで待機している間にコンデンスする。コンデンスした液体を直ちにスクロールポンプによって減圧沸騰させ、2K以下に温度を下げて超流動状態にする。実際はコンデンスを開始してから1時間ほどでスタンバイ状態にすることができた。

図には液体ヘリウムの界面の様子をモニターする光学系も示されている。スーパー・ルミネッセンス・ダイオードによる点光源を平行光にしてシャドウグラフ法でカメラにとりこむ。

超流動 4He の界面の運動

実験はパラボリック・フライトに入る前の2G、パラボリック・フライトの微妙なコントロールにより、0.5G、0.1G、0.05G、0.01Gで行い、それぞれの映像を撮影することができた。図2. は0.01Gのときの界面の映像の一部である。液体は容器全体の壁面に移動している。ムービーは1秒間に30フレームのスピードで取り込まれているので、重力加速度が一定の時間領域(約20秒間)について2枚の静止画として取り出し、ある決められた位置の界面の変位の時間変動をFFTにかけ、周波数ドメインに変換する。その結果のひとつとして、0.1Gについて図3に示す。図から明らかのように、特徴的な周波数に鋭いピークが得られた。

この結果を、界面波の重力による成分のみで解析してみた。有限の深さの液体の界面の振動数は一般的に、

$$\omega^2 = gk \tanh kh + \frac{\alpha}{\rho} k^3$$

で与えられる[4]。ここで k は波数、 h は液体の深さ、 α は表面張力、 ρ は密度である。液体ヘリウムの場合、第二項の表面張力の項はとても小さいので現状では無視できる。サンプルセルのサイズは幅30mm、液体の深さは10mmである。

表面波の壁での境界条件を自由端反射とし、励起される波長は容器幅 d で決められるとして上記の式から振動数を計算した。図3の $n=1$ は共鳴振動の基本振動数、 $n=2$ 以上はその高調波を表す。図から明らかのように、実測されたシャープなピークは驚くほどの精度で基本波と一致している。また、高調波はほとんど励起されていないことが分かる。この計算結果との一致は、0.05G、0.1G、0.5G、1G、2G、のそれぞれに対して同様で、基本波によって良く再現できている。また、0.01Gでは自由表面を定義することができないのでこの解析はできなかった。また0.05Gにおいても表面張力の効果はほとんどないことが分かる。境界条件の詳細を考慮せずに大きさのみでこれほど実験結果を再現

できるのは驚きである



図2. 0.01 G のときの超流動ヘリウムの界面の様子。左上の数字はx,y,z方向のGの値である。

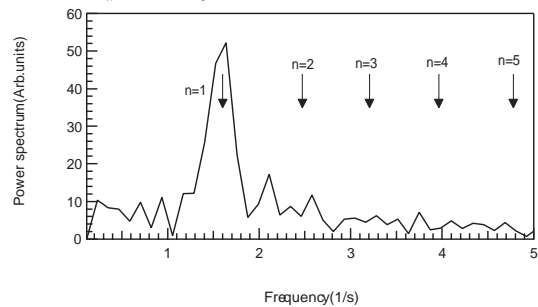


図3. 0.1G のときの超流動ヘリウムの液面振動の周波数特性。図の n は基本波($n=1$)と高調波の位置を示す。

まとめと今後の課題

航空機のパラボリック・フライトにより始めて超流動 ^4He の自由界面の運動の重力依存性を測定した。その結果は、流体力学の重力波によって見事に再現することができた。実験結果の詳細は別途報告の予定である[5]。今後は、より低温を必要とする固体 ^4He の実験のための冷凍機の改良を目指す。

最後に、本研究は日本宇宙フォーラムWGおよびグローバルCOE「ナノサイエンスを拓く量子物理学拠点」(東工大物理)から援助をいただいたことに謝辞を表します。

参考文献

1. Y. Okuda and R. Nomura, J. Phys. Soc. Jpn. 77, 111009-1-10 (2008)、Y. Okuda and R. Nomura, J. the Japan Society of Microgravity Application, 21, 159-164 (2004).
2. S. Balibar, H. Alles, and A. Ya. Parshin, Rev. Mod. Phys. 77 (2005) 317.
3. T. Numazawa, K. Kamiya, P. Shirron and K. Mitsuda, J. Physics. Conf. ser. 150, 012032 (2009)
4. Fluid Mechanics, Landau and Lifshitz, Course of Theoretical Physics, vol.6.
5. T. Takahashi et al., to be published in Microgravity Science and Technology (2010).