

ナノ空間中ヘリウムの局在ボース アインシュタイン凝縮

液体ヘリウム(^4He)は、十分低温になると、摩擦なしの流れ(超流動)が起こる。通常の流れ(常流動)と異なる、この超流動は、巨視的な数の ^4He 原子がエネルギーの最も低い状態を占有するという、いわゆる「ボース アインシュタイン凝縮(BEC)」に伴われる現象である。BEC状態は一つの巨視的な量子力学的な状態で、古典力学的に見て十分遠方に離れている2つの ^4He 原子も、量子力学的に見ると互いに強く影響を及ぼし合っている状態と言える。それでは、 ^4He をナノメートル(nm)サイズの微小な細孔に閉じ込めると、超流動特性はどのようなであろうか。慶應義塾大学理工学部の山本恵一氏、白浜圭也氏の研究グループでは、以前より直径 2.5 nm の細孔がランダムかつ 3 次元的につながった「ナノ空間ネットワーク」を有する多孔質ガラスの中に閉じ込めた ^4He の超流動の性質を調べてきたが、最近、その固体相・常流動相・超流動相間の境界を決定し、相図の全体像を明らかにした。特に、超流動相の高温側に隣接する領域に、「局在したボース アインシュタイン凝縮」の発生による新規な秩序状態が、超流動の前駆現象として現れていることを見出した。この研究は、日本物理学会発行の英文学術誌 Journal of the Physical Society of Japan (JPSJ)の 2008 年 1 月号に掲載される。

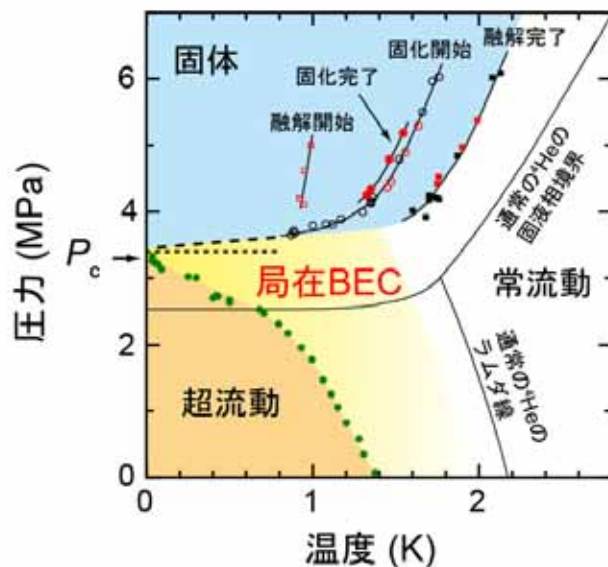


図 1. 2.5 nm のナノ細孔空間に閉じ込められた ^4He の圧力 - 温度相図。測定ができた凝固・融解過程は有限の温度幅にわたって生じているが、それらを外挿した固体相の境界線(ダッシュ線)は、臨界圧力値 P_c (ドット線)より高圧側にあると考えられる。

本研究で明らかになったナノ細孔空間中の ^4He の圧力温度相図が図 1 である。その結果の説明の前に、まず、通常(バルク)の相図を見ておく。その超流動転移温度(ラムダ点) T_c は 2.17 K(絶対温度)である。加圧すると T_c は緩やかに減少し、臨界圧力($P_c(T)$)で常流動相、または固体相への転移が起こる。固体相への転移が生じている 1 K 以下の低温では、 $P_c(T)$ は温度に依存しない。熱力学におけるクラペイロン - クラウジウスの式から、固液境界線の傾きは両相のエントロピーの差に比例する。つまり温度によらない $P_c(T)$ の存在は、超流動相は原子が整然と並んだ固体と同程度のエントロピー(乱雑さ)を有すること、すなわち、BEC 状態が一つの

巨視的な量子力学的状態であることを示している。

ナノ細孔空間中の ^4He は、まず、 $P=0$ での T_c はバルクの T_c よりもずっと低くなるが、特に加圧することでさらに大きく減少し、臨界圧力 P_c ($P_c(0) = 3.4 \text{ MPa}$ (34 気圧)) で絶対零度に到達する。この 0 K 近傍の転移の特性を明らかにするため、本研究では定積圧力と熱異常の測定から固体液体転移(凝固・融解)温度を精密に決定し、図 1 に示す相図を確定した。その結果、ナノ細孔空間中の ^4He においては、超流動相と固体相の間に超流動を示さない非超流動相が 0 K まで存在することがわかった。さらに、低温では、この非超流動相と固体相の境界線の温度に対する傾きが、高温でのそれに比べて著しく小さいことから、両相のエントロピーの差も、低温できわめて小さいことがわかる。この非超流動相は高温側の常流動相とは異質なものであり、本研究では、この相を「局在したボース - アインシュタイン凝縮状態」とであると解釈している。すなわち、ナノ多孔体中の ^4He では、細孔への閉じ込めポテンシャルが強いため、細孔径程度のサイズの局所的な BEC 状態が多数生じているものの、それらの間の位相(量子力学的な相関)が揃っていないため、全体としては一つの巨視的な量子力学的状態になり切れていないという状態である。このような局在 BEC 状態の存在は、大阪市立大学の小林未知数氏と坪田誠氏による 3 次元ランダムポテンシャル中の ^4He に対する理論計算においても見出されている。

ナノスケール空間に閉じ込められた粒子の超流動に関して、最近では、レーザーでトラップされた原子気体系も精力的に研究されている。本研究の意義は、ナノ多孔体中でのみ実現可能な高い密度のボース粒子系において、局在 BEC 状態という、新しい状態を見出したことにある。また、この状態は、強い「位相揺らぎ」によって超流動が部分的に壊された状態であり、銅酸化物高温超伝導体の「擬ギャップ状態」を説明するために提唱された位相揺らぎモデルとよく似た側面を持つことは大変興味深い。周期的なポテンシャルを課したヘリウム系の超流動特性との比較研究等、今後の多彩な研究の展開が期待される。

論文掲載誌: J. Phys. Soc. Jpn. **77** (2008) No. 1, p. 013601

電子版: <http://jpsj.ipap.jp/link?JPSJ/77/013601>

<情報提供: 白浜圭也 (慶應義塾大学)>