

Title	12.ヘリウム吸着膜(基研長期研究計画「量子固体」,研究会報告)
Author(s)	生井沢, 寛
Citation	物性研究 (1977), 28(6): F54-F58
Issue Date	1977-09-20
URL	<a href="http://hdl.handle.net/2433/89396">http://hdl.handle.net/2433/89396</a>
Right	
Type	Departmental Bulletin Paper
Textversion	publisher

寺中久男

運動に随伴する。一方 vacancy を含む Fermi crystal では vacancy の Fermi velocity は小さく、音速は比較的大きいので単純に金属中の電子に対応させることはできない。この場合、波数  $\kappa$  に対して2つの領域を考える事ができる。 $n_0 k_0 / N < \kappa$ 、この時は、波数  $\kappa$  でバンド内の運動とフォノンが couple して、フォノン振動数を shift させる。集団運動は、このフォノン・モードだけである。 $n_0 k_0 / N > \kappa$  の場合には、exchange が相対的に大きく寄与して、長波長フォノンに影響を与える。

### 参 考 文 献

- 1) A. F. Andreev and I. M. Lifshitz, Sov. Phys. JETP 29, 1107 (1969)
- 2) W. F. Brinkman and T. M. Rice, Phys. Rev. B2, 1324 (1970)
- 3) Y. Nagaoka, Phys. Rev. 147, 392 (1966)
- 4) I. E. Dzyaloshinskiĭ, et al., Sov. Phys. JETP 35, 823 and 1213 (1972)
- 5) W. Brenig, Z. Physik 171, 60 (1963) D. R. Fredkin and N. R. Werthamer, Phys. Rev. 138, A1527 (1965) H. Namaizawa, J. Low Temp. Phys. 22, 335 (1976)

## ヘリウム吸着膜

東大教養 生 井 沢 寛

通称グラフォイル、と呼ばれる非常に滑らかで、吸着面積の大きい吸着体が登場してから、種々の物質の吸着膜の物理的性質が精力的に研究され、これらの準2次元的な世界も予想外に変化に富んでいる事が判って来ている<sup>1)</sup>。筆者の当面の興味の的は、2次元量子固体であるが、ここでは、吸着されたヘリウム膜(主に単膜)について実験的に知られた主要な物理的事実をまとめて報告し、その後で筆者のやっている事を簡単に紹介したい。

ヘリウム吸着膜の相図<sup>2)</sup>は、比熱測定<sup>2,3)</sup>、共存する気体の蒸気圧測定<sup>3)</sup>によって詳しく調べられている。その模式図を図1に描いた。

密度の低い場合には、自由気体と違い、吸着台の影響が大きく、吸着面の最も吸着力の強い部分から順次束縛されて、面の不均一性や不純物に強く左右された相が出来る

予想される（不均一固体）。この部分に関しては、何分低密度で実験にかかりにくいので確定的な実験的知識は余りない。

密度が少し高くなると、気相が実現する。殊に温度が $2^{\circ}\text{K}$ 以上になると、 $\text{He}^3$ ,  $\text{He}^4$ いずれの単膜も比熱が古典理想気体のそれとなる（古典的気体）。 $T < 2^{\circ}\text{K}$ では $C/Nk_B$ は1からずれる。 $\text{He}^3$ ではCは単調にTと共に減少し $T \rightarrow 0$ で $\propto T^1$ となって量子気体の様相を示す。 $\text{He}^4$ では、 $T \rightarrow 0$ でやはり量子気体となるが、 $1^{\circ}\text{K} < T < 2^{\circ}\text{K}$ で比熱に山が生じて、 $\text{He}^3$ と際立った差を見る。低温でのこの気体の比熱の振舞いは、原子間相互作用をヴィリヤル展開で取り入れ（第二補正まで）

で、ほぼ定性的に理解される。<sup>4)</sup>特に $\text{He}^4$ の比熱の山を、液相への転移と対応させる観点<sup>4)</sup>が興味深い。この立場では $\text{He}^3$ は $T \rightarrow 0$ でも恐らく液化しないだろうと推測される。いずれにせよ、未だ直接的検証は無く、また吸着台の影響の効果も不明なので確定的な事は言えないが、相図のこの部分に、統計ないしは同位体間の差がはっきりと出現している事は大変興味深い。

密度が更に高くなると、吸着台の炭素原子の作る蜂の巣格子上で、6個のCあたり各1個のHe原子を配った事に対応する密度（ $x_g = 1/3$ として矢で示した）のまわりに、

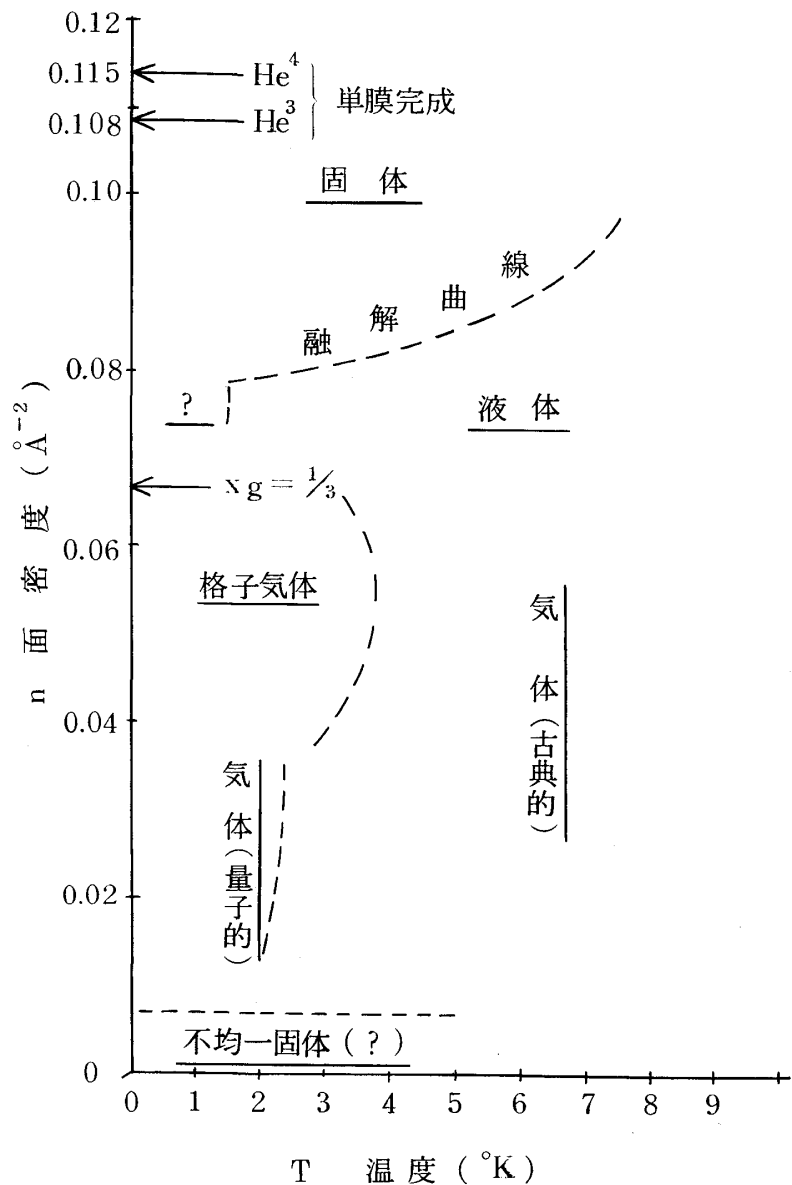


図 1

$T \sim 3^\circ\text{K}$  に付近で鋭い比熱の山を示す相が現われる<sup>2)</sup> (格子気体)。比熱のこの振舞いは  $\text{He}^3$  と  $\text{He}^4$  で殆ど相似的で、 $T \rightarrow 0$  では比熱は、ほぼ指数的に減少し、他方高温側では  $T \simeq 4^\circ\text{K}$  で早くも古典気体の値に近づく。この相転移は、炭素の蜂の巣格子の格子定数より  $\sqrt{3}$  倍大きい格子定数を持ち  $x_g = 1/3$  に対応する密度をもった三角格子に配列された  $\text{He}$  原子の格子気体への転移と考えられ、初期には、単純に 2 次元イジング模型と比べて分析された<sup>2)</sup>。しかし、グラフォイルよりずっと平らで滑らかな吸着台を用いた最近の比熱測定<sup>5)</sup>によれば、比熱の指数は、 $\alpha \simeq 0.36$  とかなり大きく、上述の格子気体を記述する三状態ポッツ模型による理論値とも合わない。転移点の上下での前述の非対称性、殊に高温で気体となる事を正しく反映した相転移の理論が展開される事が望まれる。

最近の比熱測定では、この格子気体相の直上の低温部(?)に、格子気体への転移に非常に良く似た転移を示す相がある事が報告されている<sup>6)</sup>。この相は、 $\text{He}^3$  と  $\text{He}^4$  とではほぼ同じ密度、 $0.072 \text{ \AA}^{-2} < n < 0.077 \text{ \AA}^{-2}$ 、と同じ温度  $T \sim 1^\circ\text{K}$  に出現するが、その正体は未だ判明していない。前述のとは違う配置を持つ格子気体なのだろうか。

相図の上部、高密度・低温度の部分は、比熱が  $T \rightarrow 0$  で  $T^2$  に比例しており、<sup>2)</sup>一方温度が高くなると融解とみなされる比例の山を示す<sup>2,3)</sup>。この部分は 2 次元固体であると考えられ、3 次元固体ヘリウムとの類似がかなり良い。更に直接的には、中性子散乱実験<sup>7)</sup>から、この部分の相は、2 次元三角格子の回析像を作り、回析像の頂点から求めた格子定数は、吸着台の炭素原子の格子定数や、前述の  $x_g = 1/3$  に対応する格子間かく等とはっきり異ったものである事が知られている。この様な高密度の凝集状態では、吸着台の面に沿う吸着ポテンシャルの起伏や不均一性等は、ヘリウム原子間の相互作用に比べて弱くなり、吸着面に沿う秩序は、主に後者によって決定されるものと考えられる。比熱の  $T^2$  法則が極めて低温まで成立している事は、前者による摂動が無視しうる程度である事を保証している。こうして、相図のこの部分では理想的に近い 2 次元的格子が主としてヘリウム原子間の相互作用によって形成されている。中性子回析像の幅から、回析体の大きさは  $100 \text{ \AA}$  程度、いい換えると、グラファイトの結晶体程度の大きさをもつと推測される<sup>7)</sup>。この様に有限ではあるがかなりの大きさの 2 次元結晶が観測された事は、よく知られた 2 次元秩序の不安定性の説からみて、非常に興味深い。位置の秩序は壊れても、相対的配置あるいは角度相関は、2 次元でもゆらぎに対して安定である<sup>8)</sup>。こ

の様な秩序を許し、しかも量子効果を考慮した時に、実験の中性子回折像が再現されるであろうか？ 融解についても格子欠かんの対の成長によるとする模型が提出されていて、<sup>3)</sup> 融解温度を定性的に説明できる様である。

この固相領域でも  $\text{He}^3$  と  $\text{He}^4$  の振舞いには本質的な差がない。バルクの場合にも  $\text{He}^3$  の核スピンの振舞いだけが両同位体の固体を区別する最も顕著な性質であったが、この2次元系での核スピンの関わる性質は、調べ始められたばかりである。<sup>9)</sup> NMR の線幅 ( $1/T_2$ ) の結果から、図1の相図の液体と固体の部分は、はっきりと見られるが、格子気体や他の部分は、比熱に出現した様な顕著な姿では現らわれない。交換エネルギーの大きさも見積られていて、格子定数の広い幅 ( $3.3 \text{ \AA} \leq a \leq 3.7 \text{ \AA}$ ) で、バルクの場合より弱いとはいえ、大きな変化を示す ( $10^5 \text{ sec}^{-1} \lesssim |J| \lesssim 10^6 \text{ sec}^{-1}$ ,  $a$  にほぼ比例)。スピンの秩序化や磁氣的振舞いなど、また NMR の緩和の機構など、今後の研究が待たれる。

最後に筆者のやっている事に簡単に触れる。相図の固体部分 ( $0.08 \text{ \AA}^{-2} \lesssim n$ ) では、前述の様に吸着面上の秩序には、吸着台の局所的な詳細は余り効かず、原子間相互作用が主役を演ずる。しかも単膜が完成する時の原子間距離は ( $\text{He}^4$  で  $3.17 \text{ \AA}$ )、典型的な原子間相互作用ポテンシャルの最小値を与える距離 ( $\sim 2.9 \text{ \AA}$ ) より大きく、量子効果が重要である事を示している。同時に、原子間ポテンシャルの強い斥力部分の役割も無視できない。即ち、事情は、3次元の固体ヘリウムに全く同様で、その取扱いの際に展開された理論が、<sup>10)</sup> 2次元の場合にも適用されるものと考えられる。

詳細は近々発表する積りだが、<sup>11)</sup> この予想は裏付けられて、基底状態エネルギー、化学ポテンシャル、展延圧力、圧縮係数、それに音速、音波分散などを、実験のあるものについては、実験値をよく再現する事が出来た。

- 1) J. G. Dash, "Films on Solid Surfaces", Academic Press, New York, 1975.
- 2) M. Bretz, J. G. Dash, D. C. Hickernell, E. O. McLean, and O. E. Vilches, Phys. Rev. A8, 1589 (1973).
- 3) R. L. Elgin and D. L. Goodstein, Phys. Rev. A9, 2657 (1974).
- 4) R. L. Siddon and M. Schik, Phys. Rev. A9, 907 (1974); Phys. Rev. A9, 1753 (1974).
- 5) M. Bretz, Phys. Rev. Letters 38, 501 (1977).

- 6) S. V. Hering, S. W. Van Sciver, and O. E. Vilches, J. Low Temp. Phys. **25**, 793 (1976).
- 7) K. Carneiro, W. D. Ellenson, L. Passell, J. P. McTague, and H. Taub, Phys. Rev. Letters **37**, 1695 (1976).
- 8) N. D. Mermin, Phys. Rev. **176**, 250 (1968).
- 9) B. P. Cowan, M. G. Richards, and A. K. Thomson, Phys. Rev. Letters **38**, 165 (1977)  
及び物性研蒼原研の佐藤氏による実験の中間報告。
- 10) F. Iwamoto and H. Namaizawa, Prog. Theor. Phys. Suppl. **37/38**, 234 (1966); *ibid*, **45**, 682 (1971); H. Namaizawa, Prog. Theor. Phys. **48**, 709 (1972); J. Low, Temp. Phys. **22**, 335 (1976)
- 11) H. Namaizawa, to be published.

## 核物質における“固化”

京大理 玉 垣 良 三

核力が、少くとも相対 S 状態で斥力 core をもつということから、斥力 core + その周辺の引力という共通の性質を有する He 系が量子固体の相を持つ事との類推に立って、高密度の核物質の固化の可能性が指摘された。<sup>1)</sup> この理論的類推とベラ・パルサー(中性子星)の“glitch”現象の解釈のために中性子星の中心部での核力による固化という現象論的モデルの提唱<sup>2)</sup>が、核物質での固化の研究の動機となった。既に、20 数篇の論文が 1970 年頃より出されている。これらの研究で明らかになってきた点と核力のテンソル力の第一次的効果が発現した相としての特定のスピン秩序をもった一次元的局在の相 — 広い意味での固体の意味で“固体”とかく — について報告する。

### 1. 斥力 core の“caging”機構による固化

若し、核物質(現実的には中性子星の高密度領域にかかわる問題なので、高密度成分をなす中性子みの物質を考えている)が、He 系と同様な機構で固化すると、その原因は斥力 core による geometrical “caging” の機構であると言えよう。このような類推に