

Ⅶ 量子固体研究の現状

東大・教養 生井 沢 寛

(8 月 1 日 受 理)

量子固体とは、量子液体に対応する量子効果の顕著な固体であり、主としてヘリウムを指す。固体という探求しつくされた物理的対象について我々が日常抱く“常識”とは相入れない特徴が、この固体の実験的また理論的追求の過程でいくつか現われて来ている。特に興味深いと思われる特徴を中心にこの分野の現状を簡単に眺めてみたい¹⁾。

この固体は煎じつめれば

- ① 零点振動が激しい
- ② ハードコア効果、即ち近距離相関が無視出来ない

という、互いに関連し合う2点によって特徴付けられている。①は、原子間引力が小さく質量が小さい事に依るが、この為、ヘリウムに対しては、通常の格子力学が適用出来ない。量子固体の物理は、静的ポテンシャルでは決まらず、それと同程度の大きさを持つ運動エネルギーを、正しく“量子力学”に依って考慮しなければならないのである。格子原子の運動を量子力学的に扱うという点で困難さが増す。この微視的に見た特徴に加えて、実験家にとっても理論家にとっても興味深いのは、量子固体が加圧によって非常に大きい範囲に亘って体積を変えうる固体である点である。種々の量の体積依存を大きい範囲で知る事が出来る訳だから、理論も厳しい試練を受ける事になる。

個々の問題に移ろう。最も基本的な物理量である凝集エネルギー（加圧下である事に注意!!）は非常に小さく約 -1°K 程度である事が知られている²⁾。これは①によって -20K 程度の位置エネルギーと同程度の運動エネルギーとが相殺した結果であり、理論的には注意深い扱いを要する。特に②の扱いが難かしい。核物質の理論の2つの流れに対応した2つのやり方がある。ひとつはNosanow³⁾に始まる、Jastrow流の相関関数を導入して変分クラスター展開を行う方法である。他はIwamoto-Namaizawa⁴⁾に始まるK行列自己無撞着摂動法で、ハードコアポテンシャルの2体問題をきちんと解いて有効相互作用（K行列）を導入し、摂動展開をやる。後者の方が前者より低い、実験値との一致も良く、体積依存性も良い結果を与える。2体問題をちゃんと解いて②の近距離相関を正しく扱う事が出来た為である。

もうひとつの基本的量に音波の分散関係がある。前述の如く、通常の格子力学は量子固体に全く使えない。①と②を正しく扱う量子力学的な音波の理論が要る⁵⁾。やはり2つの流れがあって、一は；出発から音波を最も近い集団励起として仮定した上で、固体波動函数を作ってやって変分を行い、仮定した音波の分散をエネルギー最小の条件よりセルフコンシステントに決める⁵⁾。短距離相関は原理的に入れにくいので、基底状態で得たものを用いて有効相互作用を便宜的に定めて取り入れる。通常の格子力学で原子を格子点に固定していた代りに、原子の広がりを考慮してその波動函数で平均した形になっている。計算は難しくないで沢山仕事があるが、平衡点からの位置のずれによる展開という通常の格子力学と変りない観点に立っている。これは①による原子の平均的広がりが、格子定数の3割にも及ぶ量子固体では良くない近似である。実際、中性子散乱による分散曲線と比べると、この方法の最低次（調和近似に相当）は良い結果を与えるのに、次の項（3次の非調和項に当たる）を入れると、分散はかえって悪くなり、巾も良くない。もうひとつの方法は、離散的レベルを持つ局所化された原子間に相互作用が働いて、丁度励起子の様にレベル遷移が相隣る原子間を coherent に伝わるという描像に立つ⁶⁾（図1）。この観点では、原子の波動状態と、原子間の相互作用が音波の分散を決めるので、基底エネルギーの第2の方法の自然な拡張として、量子固体の動的記述が行える。短距離相関も正しく扱える。平衡点よりのずれによる展開は不要。しかし計算は難しく巾を出すのも容易でない。今後の進展を期待したい。

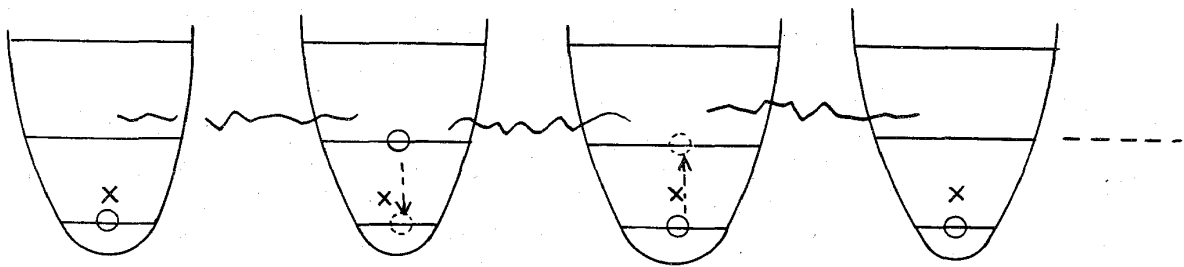


図 1

実験で見つかっているが、理論的に満足の行く説明の未だ無い事実を次に述べてみる。

a) 比熱の異常な振舞い

これは今の所 bcc He^3 にのみ見出され他の固相には無い異常である。bcc He^4 にも有るかも知れないが、この相の領域が非常に狭いので実験は難しい。

イ. 高温側 ($T/\theta_0 > 0.02$) の異常⁷⁾

比熱をデバイ理論 $C_V \sim (T/\theta_D)^3$ に合せ, T^3 よりずれる分をデバイ温度が T に依るものとして分析すると図2になる。(図の θ_0 は $\theta_D(T)$ の最大値)

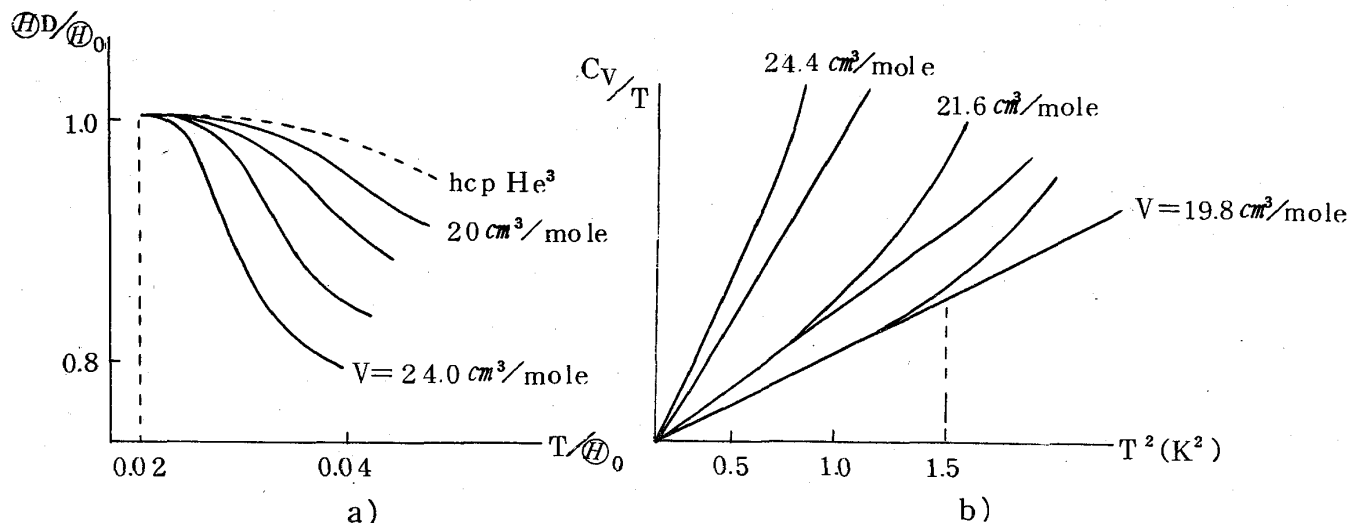


図 2

他の相及び Ar, Kr 等は $\theta/\theta_0 \xrightarrow{T \rightarrow 0} 1$ であり θ/θ_0 対 T/θ_0 曲線は, Volume を変えても殆んど同一の曲線を描くのに対し, bcc He³ は, 大きい体積依存を有する。このデバイ理論よりのずれは $C_V/T - T^2$ 曲線 (図2) によってもっと明らかとなる。直線はデバイ値を太線は実験値を示す。このずれが実験値として提出された activation 的な

$$C_{\text{excess}}/R = 2 (\phi(V)/T)^2 e^{-\phi(V)/T}$$

でよく再現される事は昔から知られているが理論的説明は充分でない。

ロ. 低温側 ($T/\theta_0 \lesssim 0.01$) の異常²⁾

図3の様に低温の比熱はデバイ型に合わすと, θ_D が $T \lesssim 1$ K に山を持ち $T \rightarrow 0$ で減少する。更に θ_D の体積依存も著しい。この事実は

- 比 熱²⁾
- 音波速度⁸⁾
- 熱伝導率⁹⁾
- 圧 力⁹⁾

の独立な4つの実験で確立されて居り, He⁴ の混入の影響も注意深く考慮され, 装置による影響も充分除去されて来た結果なのである。He³ 核スピンの ordering は,

量子固体研究の現状
交換エネルギーが $\sim 10^{-3}$ K なので影響し得ない。Horner¹⁰⁾が、音波分散の所で述べた第一の方法の3次非調和項までとった音波分散から出した比熱で、この異常が説明出来るとしている。可能性として興味深いが、音波分散で述べた非調和項を入れた分散が良くないという事実を照して検討の余地が多い。ちなみに Horner の分散は実験値より低く出ている（実験は He^4 なので直接比較は出来ないが）。

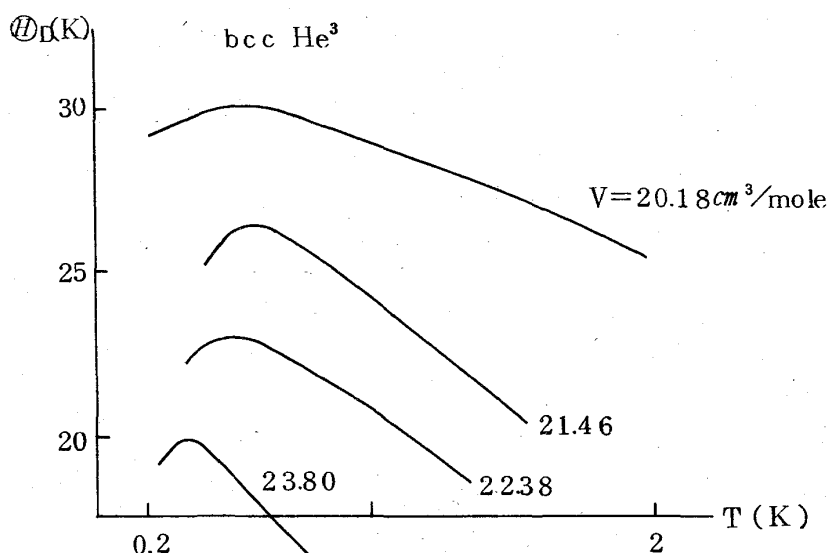


図 3

b) 熱伝導率の異常¹¹⁾

bcc He^3 の熱伝導率は、 hcp He^3 に比べ異常に低く温度依存も $T \rightarrow 0$ で境界との散乱から予想される $\kappa \sim T^3$ からずれて

$$\kappa \sim T^{2.55}$$

の様に振舞う。この機構は低温の比熱異常と密接に関係しているらしい。

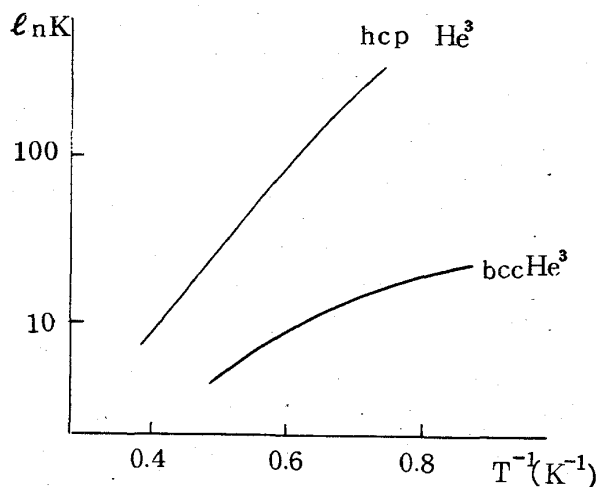


図 4

c) 中性子散乱の異常¹²⁾

bcc He^4 の非弾性中性子散乱によって音波分散が調べられたが、他の相 (hcp , fcc) には無かった異常な散乱が見出されている。1 フォノンの散乱 Intensity を $Q^2 e^{-2W}$ (Q^2 は運動量, e^{-2W} はデバイ=ワラー因子) で割った量を、ブリルアンゾーン境

界をはさむ対称な2箇所の運動量でみると図のようである。

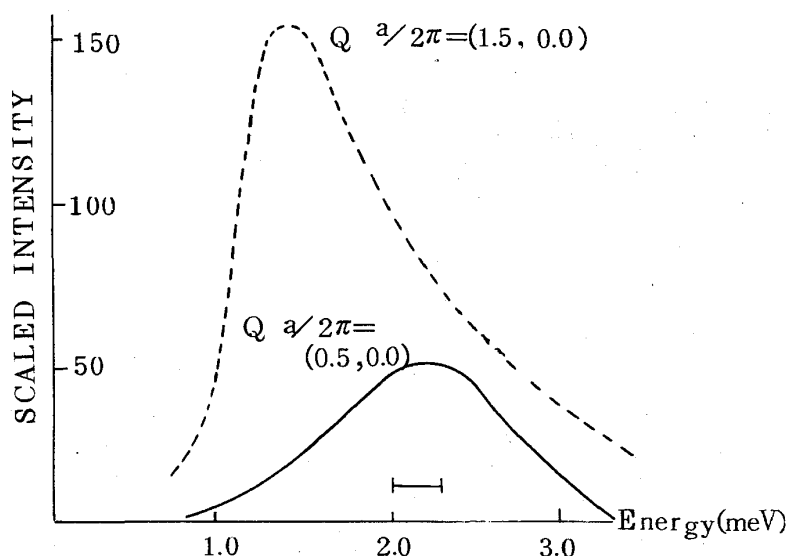


図 5

- 1°) 強度が, Q 大ほど大で 3~4 倍違う。
- 2°) Peak energy が有意なずれ (~ 0.8 meV) を示す。
- 3°) 大きい Q の profiles は非対称な peak。

このような異常を起すのは, $Qa/2\pi \sim 1.6 (\sim 2.44 \text{ \AA}^{-1})$ の周辺で様々な分散分枝について見られる。特に 2°) は, 分散曲線の周期性

$$\omega(\vec{Q} + \vec{g}) = \omega(\vec{Q}) \quad (; \vec{g} \sim \text{逆格子ベクトル})$$

を破る事を意味する。1°) は形状因子の詳しい再検討を要求する。いずれも通常の格子力学では全く理解出来ない現象である。He⁴ の bcc のせまい相領域での実験なので, 実験自体大変難しいものである。この現象の実験的確立が望まれる。

d) ラマン散乱¹³⁾

高いエネルギーシフトの側に, 仲々減衰しない幅広い山が見える(図6)。これは固体ヘリウム全般の性質であるが, 他の希ガス元素固体では, ラマンスペクトルは高エネルギー側で急速に落ちる。むしろこのスペクトルは, 液体ヘリウムのスペクトルに似る。今の所多フォノン過程として説明する試みがあるが, 実験は再現出来ない。

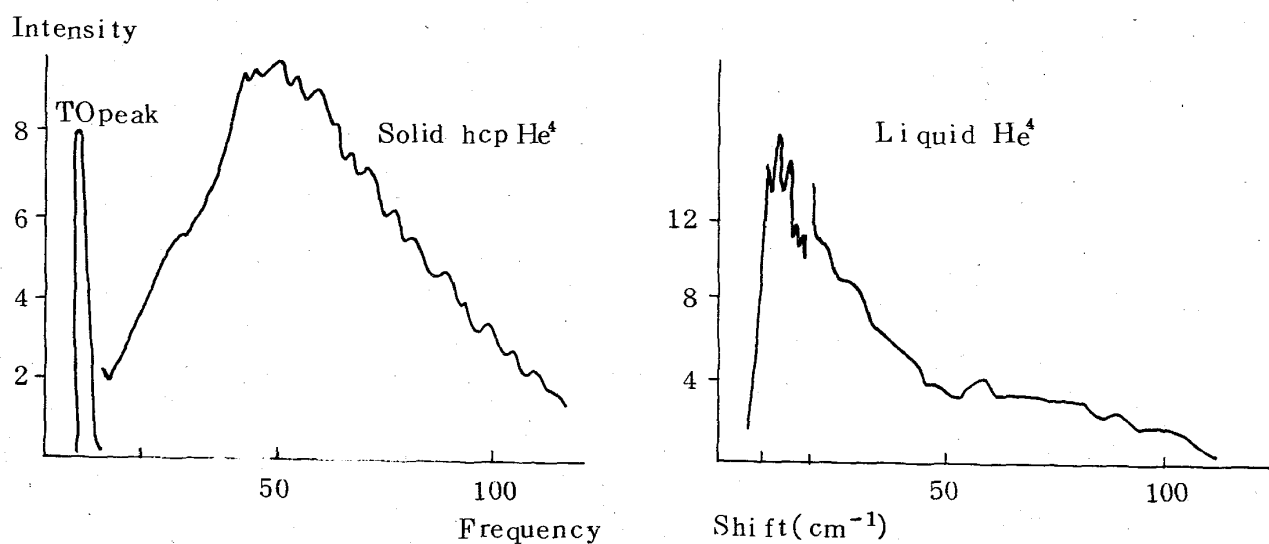


図 6

なお他にも、 He^3 のスピンの関連して、交換エネルギー、スピン緩和など NMR¹⁴⁾ に引っかかる現象と対応する理論とが沢山あるが、手に余るのでここでは述べない。ただ、“交換”の主体は、ここでは原子が①により大きく広がって相隣る原子の波動函数を感じる事が出来るからである事を指摘しておく。 $\text{He}^3 - \text{He}^4$ 混合固体中での異種原子の拡散、Vacancyの運動など、一粒子運動から出発し得る現象には、①の効果がじかに効く。この点も量子固体の量子的なる所以である。

参 考 文 献

1) 全般のレビュー ;

R.A.Guyer, Solid state Physics 23 ('69), 413.

2) BCC He の実験 ;

R.C.Pandorf and D.O.Edwards, Phys. Rev. 169 ('68), 222.

3) L.H.Nosanow, Phys. Rev. 146 ('66), 120.

4) F.Iwamoto and H.Namaizawa, Prog. Theor. Phys. Suppl. 37 and 38 ('66), 234, 及び Prog. Theor. Phys. 45 ('71), 682.

5) 音波の理論のレビュー ;

N.R.Werthamer, Am. J. Phys. 37 ('69), 763.

6) W.Brenig, Z. f. Physik 171 ('63), 63 ; D.R.Fredkin and N.R.Werthamer, Phys. Rev. 138 ('65), A 1527.

生井沢 寛

これらの論文では近距離相関は扱えない。近距離相関を正しく扱った完全に量子力学的理論は次で与えられた ;

H.Namizawa, Prog. Phys. **48** ('72) to be appeared.

7) E.C.Heltemes and C.A.Swenson, Phys. Rev. **128** ('62), 1512 ;

H.H.Sample and C.A.Swenson, Phys. Rev. **158** ('67), 188.

8) D.S.Greywall, Phys. Rev. A **3** ('71), 2106.

9) E.D.Adams, Proc. 12th Intl. Conf. on Low Temp. Phys. (Kyoto, 1970), 37.

10) H.Horner, Phys. Rev. Letters **25** ('70), 147.

11) E.J.Walker and H.A.Fairbank, Phys. Rev. Letters **5** ('60), 139 ;

W.C.Thomlinson, Phys. Rev. Letters **23** ('69), 1330.

12) E.B.Osgood, V.J.Minkiewicz, T.A.Kitchens, and G.Shirane, Phys. Rev. A **5** ('72), 1537.

13) R.E.Slusher and C.M.Surko, Phys. Rev. Letters **27** ('71), 1699.

14) NMR の実験レビュー ;

R.A.Guyer, R.C.Richardson, and L.I.Zane, Rev. Mod. Phys. **43** ('71), 532.

VIII 液体ヘリウム中のイオンのレビュー

— 特にイオンの易動度について —

東大・工 井 口 家 成

P_{O}^{210} などのアイソトープによって液体ヘリウム中に正・負両イオンを作り出すことが出来るようになって以来十何年かになるが、その間イオン自身の研究、或いはイオンを用いての液体ヘリウムの研究が実験、理論両面から広く精力的に行われてきた。主に研究された問題を挙げると、液体ヘリウム中に存在する正・負イオンの構造に関するもの、或いは Vortex ring と結びついた ion - ring complex の構造に関するもの、動的にはこれら二つのタイプのイオン(前者をふつう Bare ion という)の易動度の測定及びそれに関連してのイオンと quasi-particle との相互作用の研究がある。ここで易