

箱根超低温シンポジウム見聞記

基 研 長 岡 洋 介
京大理 大見見 哲 巨
水 崎 隆 雄

9月5日から9日までの5日間、箱根で‘International Symposium on Physics at Ultralow Temperatures’があり、出席しました。この会合の名称はsymposiumですが、conferenceとsymposiumの違いについて、一日目の夜に開かれたパーティで Prof. Brewer が面白いコメントをしました。真面目にやるのが conference で、酒を飲みながらやるのが symposium だということです。あとで辞書を引いてみましたら、確かに conference には、“formal interchange of views; a meeting for this purpose” とあり、symposium の方には最初に“a drinking party esp. following a banquet” とありました。後者について別の英和辞典には、“饗宴（古代ギリシャで通例会食に続いて行われた酒をくみかわしながら音楽をたのしみ談論に興じたつどい）”と詳しい説明がありました。というわけで、この報告も symposium の報告らしく、水割りでも横において気軽に書こうと思います。

せっかく箱根まで出かけるのですから、いい天気であってほしいと思っていましたが、幸い第一日は素晴らしい快晴に恵まれました。雨つづきだったこの夏で、はじめて全国的に晴れ上がった日だったそうです。箱根の中で、芦ノ湖と富士山の両方が眺められる唯一のホテルというのが、会場の箱根観光ホテルの宣伝文句なのだそうですが、その言葉通り、富士山が乙女峠の上に頭を見せていました。ホテルからの眺めで残念なのは、ゴルフ場が仙台原の大きな面積を占めていることです。この晴天は二日目まで続きました。三日目の遠足は曇り。山登り（大湧谷まで）したのだから、高い所から富士山を見たいと思ったのですが、富士山は雲の中でした。四日目、朝のうちは“今日一日位もつかない？”と思わせたのですが、昼頃から降りだし、レディース・プログラムは雨にたたられたようです。最終日、解散は激しい雨の中でした。

symposium は招待講演を中心に組織されていました。その題目を見れば、ここで何が

問題になったか、おおよそわかると思いますので、まずそれを紹介します。

第一日

- D. M. Lee: General Review on Experimental Aspects of Superfluid ^3He .
A. Ahonew: NMR and Ion Experiments in Superfluid ^3He .
E. F. Adams: Progress towards Understanding Magnetic Ordering in Solid ^3He .
R. A. Guyer: Magnetic Properties of Solid ^3He .

第二日

- J. C. Wheatley: Orbital and Spin Relaxation in Super-fluid ^3He .
D. D. Osheroff: Non-local Spin Dynamics in Superfluid ^3He .
K. Maki: Textural Defects (Solitons and Other Singularities) in Superfluid ^3He .

第三日

- G. Frossati: Conventional Cycle Dilution Refrigerator down to 2.3 mK.
R. de Bruyn Ouboter: The ^3He - ^4He Dilution Refrigerator through which ^3He is Circulated and Cooling by Compression of the ^3He in the Mixing Chamber of this Refrigerator.
T. Satoh: A New Type Pomeranchuk Cooling Machine.

第四日

- O. V. Lounasma: Nuclear Refrigeration of Liquid ^3He .
J. Itoh and N. Sano: Nuclear Adiabatic Demagnetization of Proton Systems in Singlet Ground State Magnetic Salts.

第五日

- J. D. Reppy: Hydrodynamical Experiments in Superfluid ^3He .
P. Wölfle: Collective Modes and Transport Properties of Superfluid ^3He .
A. Leggett: General Review: Theoretical Aspects with Summary Remarks on the Symposium.

参加者は、名簿によると、日本 79，米 19，英・仏各 4，フィンランド・オランダ・西独各 2，スイス・イスラエル・イタリー各 1。外国からの主な参加者達は、上の招待講演をした人たちのほかに、B. F. Brewer, J. M. Goodkind, H. E. Hall, R. Combescot, G. Baym, W. J. Huiskamp, D. Thoulouze, D. O. Edwards といったところでした。

要するに、主なテーマは超流動 ^3He ，固体 ^3He のスピン秩序，超低温技術の三つです。なにぶん、言葉と物理の二重の障壁を越えての不確かな情報ですから、要領よく紹介することは私の能力を越えそうです。おそらく、もっと確かな会議報告が“物理学会誌”にものり、そのうちには Proceedings も出るはずですので、私としては、symposium をしめくくった Leggett の General Review についてやや詳しく紹介し、それから固体 ^3He の話題に少し触れたいと思います。超流動 ^3He については大見さん，超低温技術については水崎さんの印象記を読んで下さい。

Leggett の話の Abstract には、“This talk raises the question of what is the fundamentally new physics to be expected in the milidegree and submilidegree temperature regime, and attempts a partial answer”とありました。実のところ、“何故超低温をやるか”という疑問に答えることは、そう容易なことではありません。Kamerlingh-Onnes の時代ではないのですから、“低温がそこにあるから”と答えてすませるわけにはもういかないでしょう。その点でいえば、高エネルギー物理の方がずっと分がいいことを認めないわけにはいきません。エネルギーを高くしさえすれば、必ず何か新しいことが出てくるだろう、あとはお金の問題、楽観的になっていられそうですから。しかし、低温ではエントロピーが(実質上) 0 になってしまえば、それ以上新しいことが出て来ようがありません。その意味で Leggett の “fundamentally new physics” には興味がありました。

Leggett の言うところはこうでした。低温の物理は、要するに ordering の物理である。とくに超低温に興味深いのは、そこでいろいろな内部自由度を残した複雑な ordering が可能になるからである。複雑な ordering は一般にそれを引き起す力も弱く、またいろいろな摂動(不純物など)に対しても不安定であるから、どうしても低温が必要になる、ということのように思いました。その典型的な例が、超流動 ^3He であるということになります。具体的な問題としては、つぎのような問題に触れました。

1) 常磁性金属における p 波超伝導

帯磁率の大きな常磁性金属では、スピンのゆらぎの媒介によって、反平行スピンの電子間には斥力が、平行スピンの電子間には引力が働く。このため、s 波ではなくて p 波のクーパー対による超伝導が生じる可能性がある。有力な候補は $ZrZn_2$ で、低温で圧力をかけると強磁性が消失するが、そのすぐ上の領域ではスピンのゆらぎが大きいので、p 波超伝導が可能かもしれない（図 1）。ただし、p 波超伝導は通常の s 波超伝導とは違って非磁性的な不純物にも敏感なので、実現させるためには試料の純度が問題になるだろう。

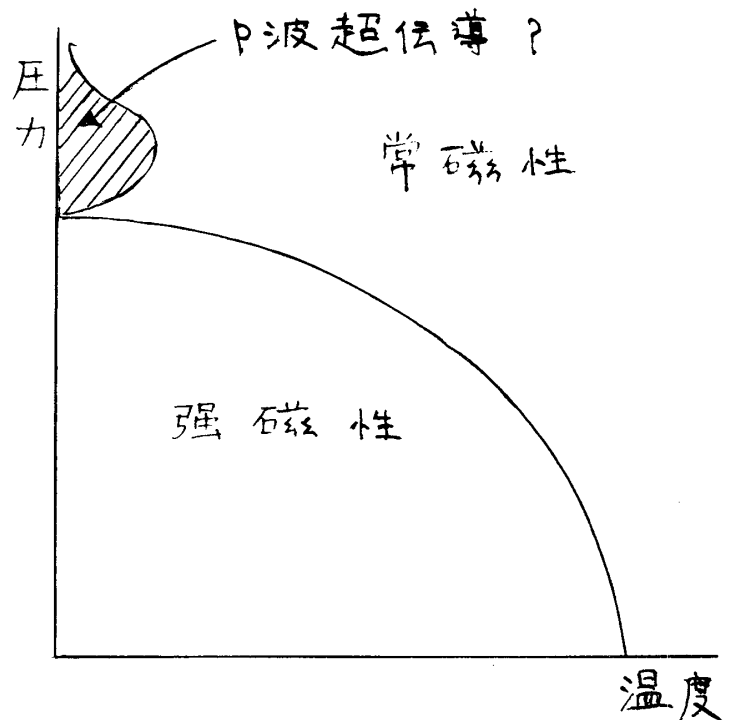


図 1 $ZrZn_2$ の相図

2) 固体 3He のスピンの秩序

交換相互作用によって生じた核スピン系の秩序の唯一の例である。どのような秩序が実現しているか、それを実験的にはどのようにして確かめるかが問題になる。

3) $^3He - ^4He$ 混合系での 3He の超流動

最近の理論によると、 T_c は高压では 0.1 mK の程度になる。 3He の濃度が低いときは 1S_0 、高いときは 3P の pairing が期待される。

4) 超流動 3He

超流動の安定性、熱平衡における角運動量の問題など論じられましたが、ここでは少し変った話題にだけ触れることにします。

(a) 3mK 以下での化学：仮想的に 2 ケの稀ガス原子の分子 (Ne_2 など) を考えてみる。この分子が回転しても、各原子の電子分布が球対称のままであれば、もちろん軌道角運動量に伴う磁気モーメントは生じない（図 2 実線）。しかし、相互作用によって電子が分極すれば（図 2 点線）、回転によってわずかながらも磁気モーメントが生じる。現実には、稀ガス原子は分子を作らず、稀ガス元素の化学は存在しない。しかし、超流

動 ^3He では ^3He 原子の Cooper 対が生じておりこれも一種の二原子分子と見なすことができる。これについても、上と同じような機構で軌道角運動量に伴う磁気モーメントが生じることが期待される。角運動量のそろった A 相は強磁性だということになる！自発磁化の大きさは、

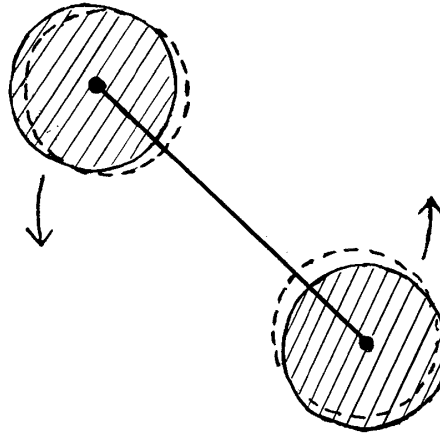


図2 希ガス二原子分子の回転

$$M_0(T) = \chi_n H_{\text{eff}}(T)$$

ただし、 χ_n はノーマル相での帯磁率、 H_{eff} は

$$H_{\text{eff}}(T) \sim 0.02 (1 - T/T_c) \text{ G}$$

(b) 3mK 以下での高エネルギー物理 (A. J. Leggett: Phys. Rev. Letters 5 (1977),): 素粒子の弱い相互作用の理論で、核子と電子の相互作用に中性カレントが媒介するものがあるかどうか問題になっている。もしこれがあれば、核子・電子相互作用にパリティを保存しない成分が存在することになる。このパリティ非保存をどうやって確かめるか？ ^3He B 相では、軌道角運動量 $\vec{L}$ とスピン角運動量 $\vec{S}$ がともに期待値が $\langle \vec{L} \rangle = \langle \vec{S} \rangle = 0$ となるが、 $\langle \vec{L} \times \vec{S} \rangle$ はマクロに存在する。パリティが保存しなければ、これに比例して電気双極子モーメント

$$\vec{d} = c \langle \vec{L} \times \vec{S} \rangle$$

がマクロに存在する。パリティが保存する系では、 $\vec{d}$ と $\vec{L} \times \vec{S}$ は対称性が異なるので $c = 0$ でなければならない。パリティ非保存力があれば、 $c \sim 10^{-12} e$ と見積られる。これが実験的に見出されれば、マクロなパリティ非保存の最初の例になるだろう。

Leggett 氏の英語は、本人も認める如く、早口でたいへんわかりにくいのですが、この話のときは心してゆっくり話してくれましたし、内容も独想的かつ明解で面白い話でした。ただ、“fundamentally new” という看板に対して、これで“なるほど”と思うかいくぶんなりと不満を感じるかは、人によってわかれるところかと思います。新しい、興味深い分野であることは確かなのですが。

最後に、symposium で論じられた具体的な問題の一つだけ触れておきます。固体 ^3He の核スピン秩序の問題です。Goodkind は磁場一定のもとでの核スピンの磁化 M の温度依存性の測定結果を報告しました（図 3）。

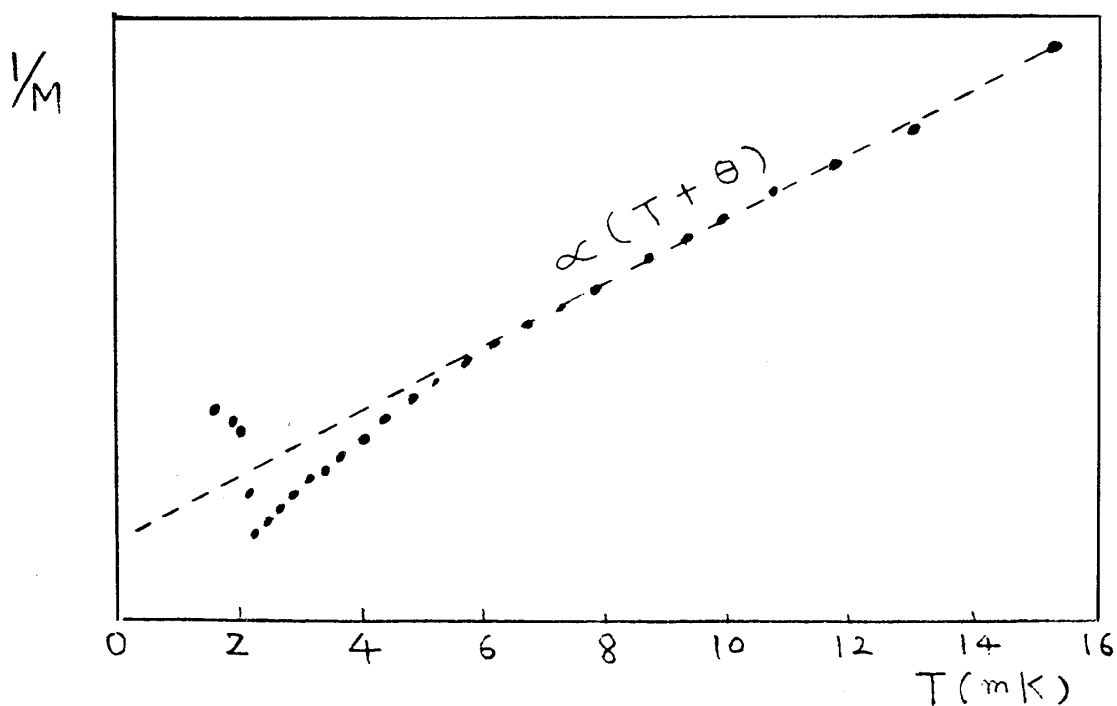


図 3 固体 ^3He の磁化の温度変化
($\theta = 2.6 \text{ mK}$)

特徴は、転移点 T_m の上では高温での Curie-Weiss 則の直線から M の増す方向にはずれること、 T_m 以下で M の急激な減少が見られることです。前者の傾向は森井さんたち（大阪市大）の実験結果にもはっきり見えていました。 T_m での M の変化が連続的か不連続かは、試料の熱平衡の問題があって確定的ではないようですが、おそらく不連続、

つまり相転移は一次だろうというのが Goodkind の考えのようでした。実験家にきいてみますと、この実験ではやはり試料が熱平衡になっているかどうかの問題で、その意味でこれで確定的なことが言えたとは思われない、ということです。しかし、量的なことはとにかく、これで固体 ^3He で 1.1 mK 付近で見出された相転移が磁気的なものであることが、直接確められたことになります。同時に、それが一次転移であることも、エントロピーの温度変化にもとびが見えていることともあわせて、ほぼ確かになったように思います。

それでは、このような一次転移がどのような機構で起りうるかが問題です。可能性としては、(1) 交換相互作用の体積依存性が強いので、転移点で体積変化が起る。(2) 4 スピン相互作用がきく。(3) 単純なハイゼンベルグ模型でもゆらぎを考慮すれば一次転移になる、などがあると思います。(1) は格子の弾性エネルギーが交換相互作用に比べてはるかに大きいので、転移点でのエントロピーや磁化の大きなとびを説明することは無理だと思います。(2) については、symposium でも伊豆山 — 内海、石川 — 岡田によって論じられたのですが、相互作用のパラメータを適当に選びさえすれば、この実験のような一次転移を導くことは可能なようです。パラメータとしては、大雑把に言って 2 スピンの相互作用が nearest neighbor より second neighbor の方が強いこと (second neighbor は反強磁性的)、4 スピン相互作用がある程度強いことが必要です。問題はこのような相互作用が現実の固体 ^3He で期待できるかという点で、それは ad hoc meeting での伊豆山さんと Guyer の論争の種でもありました。(3) の可能性については、理論的にまだ不明な点が多いようです。

symposium の一夜、ホテルの一室に集って酒を飲みながらだべっていたとき、日本人の昭和一桁の一理論家が「完敗だったネ」と述懐しました。私など、昭和一桁も二桁に近い世代のせいか、日本対外国の勝った、敗けたの意識は薄いのですが、大正世代、純正二桁世代はどのような受取り方をするものなのでしょうか？

(長岡洋介)

超流動 He^3

最初に言い訳から書き出します。私自身、超流動 He^3 は、現在初歩から勉強中でこの

シンポジウムにはそのために参加したというような具合ですので、講演は解らないことだらけでした。そんな訳ですが、液体 He^4 とは、何年か付き合ってきた立場から素朴な感想を書くことにします。

さて、 He^3 の超流動相の発見者の一人 D. M. Lee のきれいなカラーのスライドを使った実験の review に始まって招待講演は全部で 8 つありました。全体を聞いた大ざっぱな印象としては、超流動相が見付かって 5 年あまりというのにもうすでに bulk 状態では平衡とそれからはずれの小さい所は、 He^4 と同じ程度に片が付いてしまったのではないかという感じを持ちました。例えば、P. Wölfle の輸送現象についての仕事は、 He^4 における Khalatnikov 達の仕事にあたることをすごい馬力で、A. B. 両相でやってしまったというようにみえました。そして、現在の研究の主な方向は He^4 でたどったと同じように film, 表面, イオン, vortex, He^3 ではこれに加えて, soliton そうして, 流れとか境界条件のきいている状況下での spin とか ℓ -vector の運動などなどという方向に進みつつあるのではないかと思います。招待講演の中で、現在思い出せるもの、したがって印象に残ったものをいくつか上げますと、A. Ahonon の carbon 表面での susceptibility の異常の測定、J. C. Wheatley の heat flow と磁気のパルスによって引き起される ℓ -vector の運動の超音波による測定、この中で、きれいな周期的な運動の外に観測された、長周期で不安定な運動は我々の考えている芯のない, vortex ring の pain よるものではないかと考えたくまりました、真木さんの soliton の話しは、もう少し時間をかけて聞きたかったし、A. J. Leggett の He^3 pain が coherent であることを使った、弱い相互作用の結合定数の決定についての計算は興味がありました。

contributed paper については、学会と同じような、10 分～15 分という持ち時間でしたので、研究会等ですでに知っていたもの以上のものは得ることができませんでした。ただ、G. Baym の point をおさえた上手な話し方が印象に残りました。（これは内容がよく理解できたということではありません）。

最後に、4 日目の午後に行われた、Ad. Hoc. Meets についてふれます。J. D. Reppy の He^4 - film での ρ_s の測定の話しの後、 He^3 についての議論がありました。その中では, composite soliton が実験にかかるかどうかという実験家からの質問が真木さんに集中していたことと、Intrinsic angular momentum についての A. J. Leggett, R. Combescot, 石川正勝君の議論が印象的でした。

（大見哲巨）

超 低 温 技 術

液体 He^3 の超流動の発見が一つの刺激にもなって、最近の超低温技術の発達が目覚しく、又超低温の実験グループもここ数年多くなったように思われる。ULT-シンポジウムにおいても、これらのことを反映して技術的な問題を議論するセッションにかなりの時間が割かれた。技術関係のセッションとしては、主として核断熱消磁冷却器、希釈冷却器の改良と超低温における周辺技術である。Lounasmaa が核断熱消磁冷却の概要と現状を述べた。現在世界中で稼動中の核断熱消磁冷却器は 12 台、建設中のもの 12 台（内、日本にて 4 台）とのことである。冷却温度は 0.5 mK 以下であり、例えばヘルシンキ大のものは 0.5 mK 以下に 1 日程度保つことが出来る。その他、核断熱消磁法を用いている数人の実験家からの現状と問題点の報告があった。

一方、希釈冷却器に関する報告のうち、グルノーブル大グループの Frossati の話が注目を集めた。我々も噂には聞いていたのであるが、希釈冷却器だけで液体 He^3 を冷して、超流動状態にしたとのことであった。彼等は、熱交換器を改良して 2.03 mK の世界記録を樹立した。彼等の熱交換器の表面積を大きくするために使用した粉は、日本製の銀粉であった。さらに熱交換器を改良すれば、際限なく温度が下がるであろうというたのもしい結果であり、今後この方面での大きな進歩が期待できる。又新しいタイプの希釈冷却器の実例が Ouboter と佐藤によって報告されたが、興味深い。

超低温における実験技術の基礎的な問題としてカピッツァ熱抵抗、温度計等の報告があった。カピッツァ抵抗は超低温で温度を下げる時、熱の流出入のネックとなるもので大変重要なものであるが、あいかわらずはっきりしたデータは出ていなかった。温度計としては 95% La で薄めた CMN 温度計が有力なようである。

世界の低温物理では、mK，サブ mK 領域での仕事が行なわれ、今やそれ以下を目ざして急速な発展期にあるという感じである。それに比べ日本の低温物理は大きく遅れており、肌寒い思いをすると同時に、一方「やらなくっちゃあ」という思いも強い次第である。

（水崎隆雄）