

Quantum phase transition of liquid helium in aerogel

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2018-12-20 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: Matsumoto, Koichi メールアドレス: 所属:
URL	https://doi.org/10.24517/00052951

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 3.0 International License.



エアロジェル中の液体ヘリウムの量子相転移

課題番号 16540312

平成 16 年度～平成 18 年度科学研究費補助金
(基盤研究(C)) 研究成果報告書

平成 19 年 5 月

研究代表者 松本宏一
金沢大学 自然科学研究科 准教授

金沢大学附属図書館



0800-04459-2

はしがき

本報告書は「エアロジェル中の液体ヘリウムの量子相転移」を研究課題とする平成 16 年度～平成 18 年度科学研究費補助金（基盤研究(C)）における研究成果の報告である。

1997 年研究代表者の松本はエアロジェル中の液体ヘリウム 3 の系において、超流動・常流動転移に量子相転移が起こることを見いだした。また、孔径の小さな多孔質ガラス中の液体ヘリウム 4 も超流動・常流動転移に量子相転移を起こすという報告があり、多孔質体中のヘリウムは 3,4 どちらの同位元素も興味深い性質を示す。

エアロジェルはシリカの鎖状高分子が結合し、ネットワークを構成している物質である。エアロジェルのシリカが空間を占める割合は、1%程度の物まで作成することができ、非常にオープンな構造をもつ。さらに、そのネットワークはフラクタルな不規則構造を持っている。一方の液体ヘリウムは不純物の存在しない極めて純粋な物質であり、エアロジェルという不規則構造がもたらす、一種の不純物効果は新しい系として興味を集めている。

我々はこの系の状態を調べる方法として、超音波を用い、液体ヘリウム 3 と 4 の両者について、量子相転移や量子臨界状態の解明を目指して研究を行った。さらに、エアロジェルの構造が相転移に及ぼす効果を調べるために、いくつかのエアロジェルを用いた研究を行った。液体ヘリウム 4 の系については残念ながらエアロジェル中では量子相転移は観測されなかった。しかし、エアロジェルが液体ヘリウム 4 の準粒子と相互作用する新奇な現象を観測することができた。また、シリカが固体・液体相転移に及ぼす効果や、エアロジェル中での固体液体界面における結晶成長現象を明らかにすることができた。エアロジェル中のヘリウム固体の性質の解明は、最近大きな話題になっているヘリウム固体の超流動現象の解明に繋がる重要な成果である。

一方、液体ヘリウム 3 とエアロジェルの研究は、核断熱消磁によるマイクロケルビン領域の超低温が必要になる。残念なことに、我々が構築した核断熱消磁冷凍機に、試料セルの真空漏れやヘリウム循環ポンプのトラブルなどが続き、本研究期間において十分な実験を行うことができなかった。それでも、研究期間最終年度に、エアロジェル中の液体ヘリウム 3 を透過する超音波信号をとらえることができた。これは、本報告書を作成している現在も実験が継続してお

り、新しいデータが得られつつある。すでに、純粋な液体ヘリウム 3 とは全く異なる超音波吸収の温度変化を示すことなどが明らかになりつつある。

得られた研究成果はまだ論文化されていない物も多いため、研究成果の概要について、日本語で簡潔にまとめた。特に、液体ヘリウム 3 を用いた実験については実験データの蓄積が始まったばかりであり、むしろ今後の展望について述べる。また、研究の関連も考えこの研究の着想に至った我々の論文も載せることにした。

研究組織

研究代表者 : 松本宏一 (金沢大学自然科学研究科 准教授)
研究分担者 : 阿部聡 (金沢大学自然科学研究科 講師)
(研究協力者 : D. A. Tayurskii (ロシア、カザン大学、教授))

交付決定額(配分額)

(金額:円)

	直接経費	間接経費	合計
平成 16 年度	1,400,000	0	14,000,000
平成 17 年度	1,100,000	0	1,100,000
平成 18 年度	1,100,000	0	1,100,000
総計	3,600,000	0	3,600,000

研究発表

学会誌等

- (1) A. Golov, D. Einzel, G. Lawes, K. Matsumoto, and J. M. Parpia
Dissipation Mechanisms near the Superfluid ^3He Transition in Aerogel
Physical Review Letters, vol.92, 195301 (2004)
- (2) K. Matsumoto, Y. Matsuyama, D. A. Tayurskii, and K. Tajiri
Porosity dependence of sound propagation in liquid ^4He filled aerogel
JETP Lett vol 80. No.2, p.109-113 (2004)
- (3) D. A. Tayurskii, K. Matsumoto
On the sound propagation in silica aerogels filled in by normal and superfluid helium
Magnetic Resonance in Solid, vol. 6, No. 1, 213-220 (2004)
- (4) Koichi Matsumoto, Masaaki Nishikawa, Keiichi Yoshino, Satoshi Abe, Haruhiko Suzuki, Dimitrii A. Tayurskii, Koji Tajiri
Superfluid transition and solidification of ^4He in aerogel
Journal of Physics and Chemistry of Solids 66 (2005) 1486-89
- (5) Masaaki Nishikawa, Keiichi Yoshino, Satoshi Abe, Haruhiko Suzuki, Koichi Matsumoto, Dimitrii A. Tayurskii, Koji Tajiri
Pressure dependence of the sound velocity of ^4He in aerogel
Journal of Physics and Chemistry of Solids 66 (2005) 1506-08
- (6) K. Matsumoto, K. Yoshino, S. Abe, H. Suzuki, and K. Tajiri
Solidification and Melting of ^4He in Aerogel Observed by Ultrasound Propagation
AIP Conference Proceedings 850 (2006) 347-348
- (7) Koichi Matsumoto, Hiroyuki Tsuboya, Keiichi Yoshino, Satoshi Abe, Haruhiko Suzuki, and Dmitrii Tayurskii
Possible Sound Mode Conversion in "Superfluid ^4He -97% Open Aerogel" System
Journal of Low Temperature Physics (2007) in press.

学位論文

- (1) "Aerogel 中の 4He の超音波測定"
西川 公章、金沢大学 (理学修士) 2005 年 3 月
- (2) "Aerogel 中の 4He の超流動転移と固化"
吉野 敬一、金沢大学 (理学修士) 2006 年 3 月
- (3) "超低温における超音波実験"
坂井 晶、金沢大学 (理学修士) 2006 年 3 月

国際会議発表

- (1) Koichi Matsumoto, Masaaki Nishikawa, Keiichi Yoshino, Satoshi Abe, Haruhiko Suzukia, Dmitrii A. Tayurskii, Koji Tajiri
"Superfluid transition and solidification of 4He in aerogel"
Todai International Symposium 2004 and The Ninth ISSP International Symposium (ISSP-9) on Quantum Condensed System, November 16 – 19, 2004, Kashiwa, Chiba, Japan
- (2) Masaaki Nishikawa, Keiichi Yoshino,*, Satoshi Abe, Haruhiko Suzuki, Koichi Matsumoto, Dmitrii A. Tayurskii, Koji Tajiri
"Pressure dependence of the sound velocity of 4He in aerogel"
Todai International Symposium 2004 and The Ninth ISSP International Symposium (ISSP-9) on Quantum Condensed System, November 16 – 19, 2004,
- (3) K. Matsumoto, K. Yoshino, S. Abe, H. Suzuki, and K. Tajiri
"Solidification and Melting of 4He in Aerogel Observed by Ultrasound Propagation"
24th International Conference on Low Temperature Physics (LT24), August 10-17, 2005, Florida, USA
- (4) Koichi Matsumoto, Hiroyuki Tsuboya, Keiichi Yoshino, Satoshi Abe, Haruhiko Suzuki, and Dmitrii Tayurskii
"Possible Sound Mode Conversion in "Superfluid 4He-97% Open Aerogel" System
International Symposium on Quantum Fluids and Solids (QFS2006), August 1-5, 2006 Kyoto, Japan

国内学会等発表

- (1) 西川公章, 吉野敬一, 阿部聡, 鈴木治彦, 松本宏一, 田尻耕治
"エアロジェル中の液体 ^4He の音波 - 圧力依存性 - "
日本物理学会 2004 年秋季大会、2004 年 9 月、青森大学
- (2) 吉野敬一, 西川公章, 阿部聡, 鈴木治彦, 松本宏一, 田尻耕治
"Aerogel 中での ^4He の超流動転移と固化"
日本物理学会北陸支部定例学術講演会、2004 年 12 月、富山大学
- (3) 吉野敬一, 西川公章, 阿部聡, 鈴木治彦, 松本宏一, 田尻耕治
"Aerogel 中での ^4He の超流動転移と固化"
日本物理学会 第 60 回年次大会、2005 年 3 月、東京理科大学
- (4) 吉野敬一, 坪谷博行, 阿部聡, 鈴木治彦, 松本宏一, 田尻耕治
"Aerogel 中での ^4He の超流動転移と固化 II"
日本物理学会 第 2005 回秋季大会、2005 年 9 月、同志社大学
- (5) 坂井昌, 阿部聡, 鈴木治彦, 松本宏一
"超音波による Aerogel 中での液体 ^3He の研究"
日本物理学会北陸支部定例学術講演会、2005 年 12 月、福井大学
- (6) 坪谷博行, 吉野敬一, 阿部聡, 鈴木治彦, 松本宏一, 田尻耕治
"Aerogel 中での ^4He の固化"
日本物理学会北陸支部定例学術講演会、2005 年 12 月、福井大学
- (7) Koichi Matsumoto, Satoshi Abe, Haruhiko Suzuki, Dmitrii A. Tayurskii
"Quantum Phase Transition of He in Aerogel"
金沢大学-カザン大学合同セミナー、2006 年 1 月、金沢大学
- (8) 松本宏一, 吉野敬一, 坪谷博行, 阿部聡, 鈴木治彦, 田尻耕治
"Aerogel 中での ^4He の超流動転移と固化 III"
日本物理学会 第 61 回年次大会、2006 年 3 月、愛媛大学・松山大学
- (9) 松本宏一
"超低温領域での音波物性の研究"
第 1 回(金沢、富山、新潟 3 大学) 連携物性研究会、2006 年 9 月
- (10) 坪谷博行, 松本宏一
"エアロジェル中の液体 ^4He の超音波測定"

第1回(金沢、富山、新潟3大学)連携物性研究会、2006年9月

(11) 大森光一、坪谷博行、阿部聡、鈴木治彦、松本宏一

"Aerogel 中での ^4He の超流動転移とモード転換"

日本物理学会北陸支部定例学術講演会、2006年12月、金沢大学

(12) 三原信吾、辻井宏之、阿部聡、鈴木治彦、松本宏一

"Aerogel 中での液体 ^3He の超音波測定"

日本物理学会北陸支部定例学術講演会、2006年12月、金沢大学

(13) Koichi Matsumoto, Hiroyuki Tsuboya, Keiichi Yoshino, Satoshi Abe,

Haruhiko Suzuki, Dmitrii A. Tayurskii

"Anomalous Sound Attenuation in "Superfluid ^4He -97% Open Aerogel" System"

文部科学省科学研究費補助金特定領域研究「スーパークリーン物質で実現する新しい量子相の物理」平成18年度研究成果報告会、淡路夢舞台国際会議場、2006年12月

(14) 坪谷博行、大森光一、阿部聡、鈴木治彦、松本宏一、D. A. Tayurskii

"Aerogel 中における ^4He の超流動転移とモード転換"

日本物理学会 2007年春季大会、2007年3月、鹿児島大学

研究成果の概要

液体ヘリウム3とエアロジェルの系

液体ヘリウム3の超流動は非S波（P波-3重項）である。この非等方ペアリングを理解するために発展した概念は重いフェルミ粒子系、酸化物超伝導体などの理解に重要な役割を果たしてきた。ヘリウム3は通常の物質に比べて極めて純粋である。しかし、逆に純粋であることが不純物状態の研究を不可能にしていた。最近の研究で、エアロジェルを用いることで、クエンチされた乱れの中での液体ヘリウム3の超流動の研究が可能になった。

エアロジェルはシリコンと酸素の鎖状の高分子が編み目のようにネットワークを作っている物質で、さらにそのネットワークがフラクタルな不規則構造を持っている。そして、そのネットワークの特徴的な長さが液体ヘリウム3のクーパー対の相関距離と近いこと、エアロジェルでは液体ヘリウム3の中にシリコンの鎖状の高分子があたかも不純物のように入っている系と考えられる。このようにエアロジェルが従来研究されてきた多孔質媒体とは本質的に異なる性質があり、特に液体ヘリウム3のクーパー対の相関長との関係において、乱れのある状態下でのP波超流動の研究が可能であると考えた。そして、米国コーネル大学のJ. Parpiaとねじり振動子を用いた共同実験を行い、3次元液体ヘリウム3の超流動転移に量子相転移の存在すること、エアロジェルの構造相関と超流動の相関に関する関係があることなどを発見してきた（参考論文参照）。さらに、エアロジェル中の液体ヘリウム3に与えた振動のエネルギー散逸についても解析を行った（発表論文1）。

音波のモードの一つである第ゼロ音波は、超流動体の集団励起と結合して、超流動のエネルギーギャップなど秩序状態についての重要な情報を与える。そこで、超音波の実験により、エアロジェルの中でのヘリウム3の量子相転移、量子臨界状態の研究を行うこととした。

核断熱消磁装置の建設と性能試験

超低温領域での実験を行うために核断熱冷凍機の整備を進めた。その過程で冷凍機の漏れ、ヘリウム循環ポンプのトラブルなどの問題が発生し、それらの解決に時間を要した。最終的には研究期間内に、有効モル数90モルの大型の核断熱冷凍機が完成した。引き続き冷凍試験を行いほぼ設計通りの比熱を持つこと、数週間にわたり実験に必要な超低温状態に保つことができること、予冷時間などほぼ設計通りの運転ができることなどを確認した。

試料セルの作製と超音波測定系の試験

液体ヘリウムの実験では超流動転移の性質や音響特性が圧力により大きな影響を受ける。現在、ヘリウム4で行っている実験では室温部に圧力センサーを設置し、液体の圧力制御もこのセンサーにより行っている。低温部と室温部に固体が生成されるような高圧条件では、現在の方式では試料の圧力が正確に

求められない。この問題を解決するためには、低温部で圧力のその場観測が必要である。このための試料セルの設計および製作を行った。この実験セルでは特に、バルクヘリウムとの違いを明確にするために、ジェル中液体とバルク液体の両方の試料を同じでセルで観測出来るように工夫した。

超音波測定系としては、大きな減衰が予想される液体ヘリウム3を大きなエネルギーを入射できない超低温で測定するために十分な感度を持つ測定系が完成した。また、従来のパルスエコー法より広帯域化が容易な定在波共鳴法の試験も行った。

超低温での実験

以上の要素を統合し、核断熱消磁による超低温領域での実験を行うための実験システムを構築した。現在、このシステムを用いた実験が進行中である。

残念ながら、上で述べたようなトラブルもあり、本研究期間において十分な実験を行うことができなかった。それでも、研究期間最終年度に、エアロジェル中の液体ヘリウム3を透過する超音波信号をとらえることができた。これは、本報告書を作成している現在も実験が継続しており、新しいデータが得られつつある。すでに、純粋な液体ヘリウム3とは全く異なる超音波吸収の温度変化を示すことなどが明らかになりつつある。

液体ヘリウム4とエアロジェルの系

エアロジェル中のヘリウム4の相図

孔径の小さな多孔質ガラス中の液体ヘリウム4も超流動・常流動転移に量子相転移を起こすという報告があり、空孔率97%から92%までのエアロジェルを用いて、超音波により相図を明らかにする研究を行った。その結果、ヘリウム4の相図を様々な空孔率のエアロジェルについて確立した。しかし、液体ヘリウム4の系については、エアロジェル中では超流動転移は抑制されることが示されたが、残念ながら量子相転移は観測されなかった。それでも、エアロジェルがヘリウム4相図に及ぼす効果については明らかにすることができた。この結果については、国際会議等で発表してきたが、現在論文としてまとめる準備をしている。

空孔率95%までのエアロジェル中の液体ヘリウム4の音波

エアロジェルの性質で述べたようにエアロジェルは非常に密度の低いシリカであるため、機械的強度は非常に弱く、柔らかい。このことが液体ヘリウムの音波の伝播にも影響し、バルクとは異なった興味ある性質を与える。エアロジェルを構成するシリカが圧力や熱勾配により運動する常流動成分と粘性結合により共に運動してしまうので、エアロジェル中に超流動ヘリウムがおかれた場合はこの状況が複雑になり、通常多孔質中での第4、第5音波とは異なる

ドを発生する。

この系ではエアロジェルと液体ヘリウム4の両者が結合した音波のモードの存在が予想され、我々の実験では音波モードのうち速い音速を持つモードの観測に超流動と常流動の両相で成功した。そして、縦波超音波は超流動相では第1音波と第4音波の中間のモード、常流動相ではエアロジェルにより変調を受けた密度波となっていることがわかった。音速の全体的な温度変化はバルクの場合とよく似ており、超流動転移温度において臨界揺らぎに伴う音速の減少が観測されている。吸収においても臨界揺らぎに伴うピークが観測されているが、このピークはバルクと同程度に鋭く、試料全体での相転移を示している。これらのピークで特定される超流動転移温度は比熱測定による結果とほぼ一致して、バルクの場合より数mK低下した(発表論文2, 3, 5)。

音速において興味深いのはエアロジェルの密度変化によりヘリウム4中を伝播する音速の絶対値がバルクより大きくなったり小さくなったりすることであり、これはエアロジェルにより音速の変調が可能であることを示している。音速変調により音響インピーダンスが変化できるので音波の反射防止膜への応用が可能になるかもしれない(発表論文5)。

我々の実験では粘性侵入長はエアロジェルの平均シリカ距離より長いので、液体ヘリウム4の粘性のある成分のすべてがエアロジェルと結合する。この結合したエアロジェルの質量と復元力が音速に影響を与えると考えた。このモデルを用いると、最低温度領域以外では実験データを比較的よく説明出来た。しかし、最低温度付近ではこの解析モデルと音速の実験値との違いは大きくなっている。これは音響屈折率による解釈では、通常の多孔質とは逆の空孔率依存性を与えてしまうので、説明出来ない。我々は液体ヘリウム4とエアロジェルの間に別の結合機構が存在している可能性があると考えている(発表論文5)。

エアロジェル中の液体ヘリウム4を伝播する超音波は、エアロジェルによる散乱によりかなり大きな減衰を示すことが明らかになった。また、ヘリウム4のみの場合に見られるフォノンとロトンの散乱による吸収ピークはエアロジェル中では発見されなかった。

空孔率が95%より小さいエアロジェルでの音波の吸収は、常流動相では試料による違いが大きくない。超流動転移温度で臨界揺らぎに伴う鋭い吸収ピークが観測され、超流動相では吸収にエアロジェルの構造による違いが現れる。エアロジェル中の場合はシリカとの衝突で決まる幾何学的平均自由行程がフォノン同士あるいはロトンとの散乱の平均自由行程と同等になる低温に達すると吸収にエアロジェルの構造による違いが現れていると考えられる(発表論文2, 3, 5)。

空孔率97%のエアロジェル中の液体ヘリウム4の異常音波吸収

さらに我々は97%の空孔率のエアロジェルを用いた10MHz超音波の実験において、以下のような極めて興味深い現象を見いだした。超流動相である1.7K付近に大きな吸収ピークを持つ空孔率97%のエアロジェルを発見した。これは上で述べた空孔率95%までのエアロジェルでは見られない現象で、全く新しい発見である。第一報の結果について2006年夏に行われた国際会議(QFS2006)において発表

したが、理論家を含めて広く注目を集めた(発表論文7)。この現象は、P. Burosov等が理論的に予言している新しい集団励起間の相互作用を実験的に観測したものである可能性がある。つまり、ナノ多孔体の媒体とヘリウム中の集団励起が相互作用することで新たな集団励起が引き起こされている。これは、純粋なヘリウムでは起こらない現象である上に、特定の多孔体でしかまだ見つかっていない現象で、フラクタル構造などと深く関わっている新しい物理がある。

エアロジェル中のヘリウム4の結晶成長、固液界面の研究

ヘリウム4の結晶がエアロジェル中で生成される過程や、固体および固体・液体界面の音響的性質を観測し、結晶成長や固体中の空孔や転位がエアロジェルによりどのように影響を受けるかを明らかにした。この実験により新たに発見された現象については、発表論文4, 9を発表し、国際会議(LT24)での発表を行った。詳細については、総合的報告として論文を準備中である。ここでは、概要を報告する。

ヘリウム4の固化圧力に対するエアロジェルの効果

実験はブロックキャピラリー法を用いて行うので、室温部の圧力計ではセル内の圧力は分からない。そこで固化圧の決定には、音速の圧力変化と固化が起こった音速を用い、圧力を求めた。この値はキャピラリーブロック時の圧力とヘリウム熱膨張から見積もった値と合理的に一致した。このように決めた我々の固化開始圧は空孔率依存性があまりない。

固化と融解に関するヒステリシスについては、Vycor, Boglassの結果と比較すると、ヒステリシスの起こる温度領域が狭いことが特徴である。さらに、完全固化する前に固化開始後途中で引き返す時のヒステリシスと完全に固化させたときのヒステリシスに違いがあることが分かった。さらに、固化が常流動相から起きるときのヒステリシスについて詳細に測定した。このとき音波の吸収は急激に立ち上がる。しかし、固体は液体より音速が速いが、観測された音速はあまり大きくならない。このことは、エアロジェル中でマイクロな固体核が生成されていることを示していると考えられる。バルクにおいても常流動相ではデンドライトな固体核ができていくという報告もあるので、ジェル中でも同様な核生成が起こっている可能性がある。

固体ヘリウムについて

固体の物性は結晶品位に大きく影響を受けることが知られている。我々の測定した固体は1.5Kに少なくとも数日、長いときは数週間アニーリングされていた。

エアロジェル中の固体ヘリウム4の音速の絶対値は飛行時間法で求めた。その値は約550m/s程度であった。音波の吸収については過去のバルク固体の研究結果と比較すると、その温度依存性は鈴木秀次のデータよりGoodkindの結果に近い。しかし、途中の温度で減衰ピークが見えたりするわけではない。

さらにヘリウム3を不純物として添加した実験を行った。0.16%のヘリウム3を添加した場合は超音波の吸収は減少した。Aerogel中に生成された固体は多

くの結晶転位を含んでいると考えて良いだろう。固体ヘリウム4中のヘリウム3は結晶転位のピン止め中心として働くと考えられている。そして、結晶転位と音波振動との相互作用を抑制すると考えられている。我々の測定では、エアロジェル中での固体ヘリウム4の超音波吸収はヘリウム3の添加により吸収が減少した。エアロジェル中の固体ヘリウムは結晶転位がバルクより非常に多いと考えられるが、このような系でもヘリウム3による転位のピン止め機構が働いているように思われる。

固体-液体界面の音波透過と結晶成長

マクロな固液界面が生成していることは、過去に光学的観測が示している。我々の測定はマクロな界面を通しての音波透過を観測している。また、これは固化のヒステリシスで示したように、音速と吸収の関係からも、低温ではマクロな界面ができていると考える方が、両者をうまく説明できる。

界面の同定は音速変化によって行われた。音速はすべて液体の時の値から、すべて固体の値まで、セルの仕込み圧力に応じて変化した。この音速の値によって、固体と液体の比率が決定された。

界面での音波減衰は、試料セル内がすべて固体の時とすべて液体の時より28-37dB大きい。また、減衰の値もばらついていて、この大きさのバラツキは界面の状態の違いであると思われる。各測定により固体・液体の体積比も違うので、界面の生成状況が違うことは起こりえる。このとき、吸収の温度変化を見ると、固体の吸収に対して、ほぼ一定値(28-37dB)で増加しているように観測された。このように観測された界面での音波減衰の原因について、二つ機構が考えられる。一つは界面での結晶成長であり、バルクでは音波減衰の主な原因である。また、Aerogel内では結晶成長はシリカによる物質輸送の阻害によって、抑制されていると考えることもできる。もう一つは界面での音波散乱であり、エアロジェル中では固体液体界面がシリカによって乱されていると考えられるので、そこでの音波の散乱は音波の減衰機構として可能性がある。固体ヘリウムはガラスを濡らさないことが知られている。界面はシリカのためにミクロに乱れた構造になっていて、それが音波の界面散乱の原因になっている可能性もある。

そこで、結晶成長が行われなく、音響インピーダンスの違いのみで音波が減衰すると仮定すると、界面での音波透過は約2dB(@0.5K)減少することが予測される。その一方、バルクと同様の結晶成長が起こっているとすると、減衰は40-45dB(@0.5K)となる。この両者の見積もりを比較するとバルク同様の結晶成長で音波伝播が妨げられているとするとやや減衰が小さい。しかし、音響インピーダンスの違いとするには減衰が大きい。

結晶成長の効果を検討するために、我々はヘリウム3を添加した実験を行った。そのねらいは、バルクのヘリウムでは、固-液界面に選択的に存在するヘリウム3は結晶成長を抑制することが知られているからで、ヘリウム3添加により、結晶成長の効果を押さえることができるはずである。実験結果は界面形成時にはヘリウム3添加によっても減衰は殆ど変わらなかった。このことから、エアロジェルで固-液界面が乱されていて、そこで音波の透過の性質が決まっ

ている。あるいは結晶成長を抑制する機構は、Aerogelによる物質輸送の制限が支配的で、ヘリウム3による抑制効果が見えないということが考えられた。

展開

液体ヘリウム3-エアロジェルの系

量子相転移、量子臨界状態の解明

エアロジェル中の超流動ヘリウム3の秩序状態はバルクと同様にA相・B相などの状態をとる証拠が見つけられつつある。しかし、量子相転移近傍の相図や状態は未だ確立していない。また、超流動でない状態が通常のフェルミ流体と同様であるか明らかになっていない。量子相転移を起こす物理パラメタには密度だけでなく磁場も考えられる。

音波のモードの一つである第ゼロ音波は、超流動体の集団励起と結合して、超流動のエネルギーギャップなど秩序状態についての重要な情報を与える。そこで、超音波の実験をさらに進めることにより、エアロジェルの中での液体ヘリウム3の量子相転移、量子臨界状態を解明する。

エアロジェルの持つフラクタル構造と超流動の関係の解明

エアロジェルのシリカクラスターの大きさや、シリカのフラクタル相関の超流動転移との関係はこの研究において大きな注目を集めている。我々はエアロジェルを入手出来るので、条件を変えたエアロジェルを用い、その中での液体ヘリウム3の超流動転移の詳細を調べる。

また、常流動相においては、第ゼロ音波と第1音波間のモードの遷移を観測することで、超流動転移に関わる基本的かつ重要な準粒子の散乱長についての情報を得る。

液体ヘリウム4-エアロジェルの系

フラクタル構造と集団励起相互作用の関係解明

エアロジェルのフラクタル次元は合成条件によっておよそ2.5から1.6程度まで変化させることができ、2次元的なものから1次元に近い構造まで調べることができる。上で述べたように様々な合成条件のエアロジェルの測定を行うことができる。本研究で発見された新奇な集団励起のモード間相互作用についての詳細なデータを集め、ジェル密度や構造との関係を明らかにする。

多数のモードの同時測定による、流体力学的領域からパリストイックな領域までの理解

液体ヘリウムは非常にユニークな物質で、一つの物質で温度と励起周波数により、以下の3つの領域を実現することができる。

1. 常流動状態では通常の流体として振る舞う。
2. 超流動状態では超流体と常流体という多孔体との相互作用において流体力学的に扱える全く性質の異なる二成分の複合流体として振る舞う。
3. より低温では常流体がなくなり超流動体中にバリスティックな音響量子が存在する領域へと変化する。

これと、多孔体自身の持つ振動モードとの相互作用により、新奇な現象が起こっていると考えられるので、広い周波数範囲でのスペクトロスコピックな観測が現象の解明に不可欠である。広い流体領域での観測を実現する。

平成19年3月
松本 宏一