

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年3月31日現在

機関番号：32612

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2010～2011

課題番号：22654041

研究課題名（和文） ナノポアを用いた新しい超低温生成法の開発とヘリウム準粒子スピントロニクスの開拓

研究課題名（英文） Development of Novel Refrigeration Method and Helium - Quasiparticle Spintronics using Nanopores

研究代表者

白濱 圭也 (SHIRAHAMA KEIYA)

慶應義塾大学・理工学部・教授

研究者番号：70251486

研究成果の概要（和文）：

本研究は、ナノポア中ヘリウム同位体混合液のエネルギー離散化を利用して超低温を生成する新手法を開発することと、ヘリウム3を用いた準粒子スピントロニクスを開拓することを目的とする。ポーラスアルミナの表面に金を堆積させ、細孔が直径10nm程度まで狭窄化することに成功した。この手法を追求することで、エネルギー離散化が顕著に表れる直径5nm程度のナノポアアレイの作成手法を確立できる見通しが立った。

研究成果の概要（英文）：

We develop a novel method for refrigeration using helium isotope mixture liquid ($^3\text{He} - ^4\text{He}$) in nanoporous media, and study the spintronic properties of helium - 3 quasiparticles. Porous alumina substrates in which the pore size is narrowed by plating gold are successfully prepared. Measurements of superfluid properties of confined liquid ^4He showed the reduction of pore size down to 10 nm. We pursue these methods to decrease the pore size down to 5 nm, at which the energy quantization of ^3He quasiparticles and refrigeration are expected.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,700,000	0	1,700,000
2011年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,700,000	300,000	3,000,000

研究分野：低温物理学

科研費の分科・細目：数物系科学、物理学、物性 II

キーワード：低温物性、物性実験、スピントロニクス、ヘリウム 34 混合液、ナノポア

1. 研究開始当初の背景

レーザー冷却の発明が超低温原子気体という研究分野を切り開いたように、新しい低温生成手段は常に新しい物理を生み出してきた。物性研究では、希釈冷凍技術により 10mK までの極低温がお金で買えるようにな

り、超伝導、メゾスコピック系、重い電子系等の分野の爆発的な発展をもたらした。さらに近年、量子計算、量子臨界現象、量子ホール効果、ナノ振動子等の先端研究で、10mK 以下の超低温を簡便かつ連続的に保持する方法の開発が望まれている。

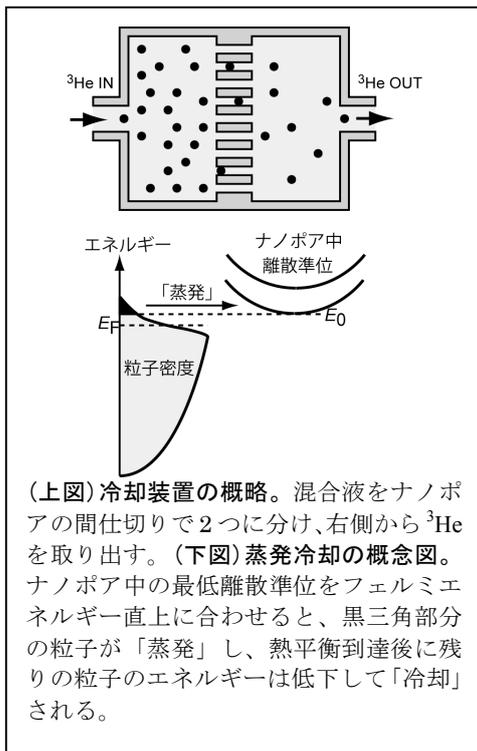
希釈冷凍機の最低温度は 5mK であり、それ以下の超低温は唯一核断熱消磁法で生成される。しかし核断熱消磁は一度限りの冷凍法で、寒冷は数日で失われ長期実験には適さない。また製作には高度な技術を要し、10T 近い磁場が必要であるなど、希釈冷凍機と全く違い超低温を手軽に生成するにはほど遠い。

2. 研究の目的

本研究では、(1)簡便な超低温生成法を実現して科学技術の発展に資すること、(2)低温生成法を応用して新しいスピントロニクス研究を創始すること、を目標として、 ^3He - ^4He 混合液とナノポアを用いた「蒸発冷却」の方法を提案し、その試作と動作確認を行う。

(1) 直径 40nm の細孔を持つポーラスアルミナの表面にカーボンや高分子をコートして、表面に 5nm 以下のナノポアアレイを作成する技術を確認する。

(2) ナノポアアレイを用いて混合液の蒸発冷却効果を確認する。

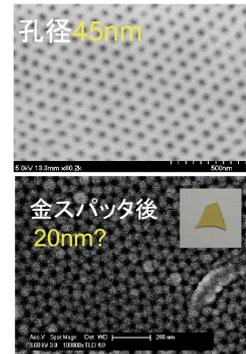


(3) 磁場印加による細孔内準位のゼーマン分裂が冷却に与える影響を調べる。期間後は、これらの得られた成果に基づいて冷凍装置の実現を図ると共に、準粒子スピントロニクスや低次元量子流体等の研究に発展させる。

3. 研究の方法

ポーラスアルミナを利用した新しいナノポアアレイの開発と、冷却装置のプロトタイプ製作を進め、冷却効果の基礎実験を行う。

細孔径 40nm のナノポアアレイを有するポ



ポーラスアルミナ試料(上図)と金スパッタ後(下図)の SEM 写真。

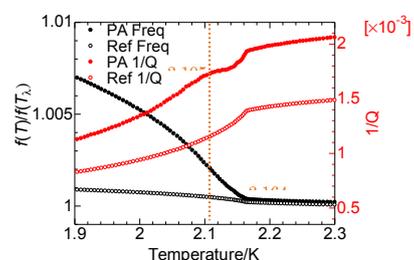
ーラスアルミナの作成技術は、研究分担者の本多がすでに確立している。この表面にダイヤモンドライクカーボン(DLC)やポリマーを堆積させて、細孔径を 5nm 程度まで小さくするプロセスを開発する。これにより、ポア中 ^3He 準粒子のエネルギーの完全制御が可能になる。

さらに冷却装置の製作と、磁場を印加することによる離散準位のゼーマン分裂の確認を試みる。

4. 研究成果

準粒子のエネルギー離散化を実現するためのポーラスアルミナの細孔径の狭窄化を試み、さらに作成したポーラスアルミナ試料中 ^4He の超流動特性を実験的に調べた。直径40nmのまっすぐで規則正しく配列した細孔を持つポーラスアルミナの表面に、スパッタリングにより金を堆積させ細孔を部分的に塞いだ試料を、作成条件を変えて多数準備した。これらの細孔中 ^4He の超流動特性を、振動ワイヤー法で測定した。超流動転移温度が最大5mK程度低下することを確認し、細孔直径を10nmまで小さくすることに成功した。

しかし、多数の試料の特性が一定しないこ

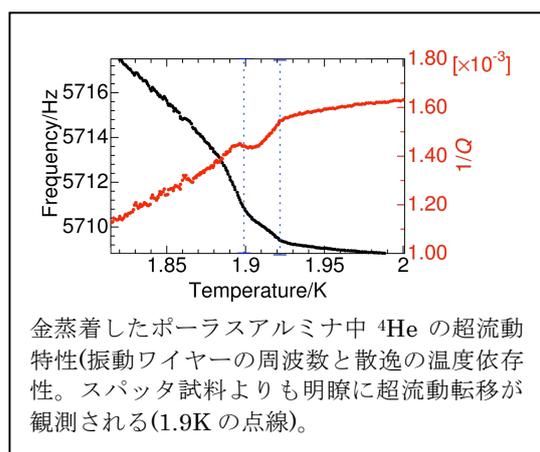


金スパッタしたポーラスアルミナでの超流動特性(振動ワイヤーの周波数と散逸の温度依存性(アルミナ無しの場合との比較)。2.1K 付近で散逸にピークがあり、孔中 ^4He の転移温度とみなせる。

とから、スパッタリングでは細孔直径の精密制御は困難であると結論し、加熱蒸着による細孔狭窄化に切り替えた。本研究の終了直前に超流動特性の測定を行い、以前のスパッタ試料よりも明確に細孔狭窄化を示す非常に良好な結果を得ることができた。今後この手法を追求することで、直径5nm程度のナノポアアレイの作成への目途が付いた。

また、細孔中にダイヤモンドライクカーボンをコートして細孔径制御を行う試みも同様に進め、やはり10nm程度まで細孔が狭窄化したことを示す結果(超流動転移温度の低下)を得た。この方法では、細孔内壁のカーボンをグラファイト化することで、圧力による細孔径の制御が出来るかと期待しており、より高温での熱処理によるグラファイト化を進めていく。

結果として混合液を用いた実験には進めなかったが、直径5nm程度のナノポアアレイの作成手法を確立できる見通しが立ったので、今後研究が大きく進展すると考えている。



5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 5 件)

① “Torsional oscillator experiment on superfluid ^4He confined in a porous alumina nanopore array”, S Murakawa, R Higashino, K Yoshimura, Y Chikazawa, T Tanaka, K Kuriyama, K Honda, Y Shibayama and K. Shirahama, Journal of Physics, Conf. Ser. (2012), in press.

② “Layer by Layer Growth of Solid ^4He on Graphite down to 0.1 K”, A. M. Koga, Y. Shibayama, K. Shirahama, Journal of Low Temperature Physics **166**, 257-267 (2012).

③ “Electrically-Switchable, Permselective Membranes Prepared from Nano-structured N-doped DLC”, K. Honda, M. Yoshimatsu, K. Kuriyama, R. Kuwabara, H. Naragino, K. Yoshinaga, T. Kondo, A. Fujishima, Diamond and Related Materials **20**, 1110-1120 (2011).

④ “Four-dimensional XY quantum critical behavior of ^4He in nanoporous media”, Th. Eggel, M. Oshikawa, K. Shirahama, Physical Review **B 84**, 020515 (2011).

⑤ “Suppression of Superfluidity of ^4He in a Nanoporous Glass by Preplating a Kr Layer”, Y. Shibayama and K. Shirahama, Journal of the Physical Society of Japan **80** (2011) 084604 (10 pages).

[学会発表] (計 10 件)

① 振動ワイヤー法によるポーラスアルミナナノポアアレイ中超流動 ^4He の研究
田中智也, 村川智, 近澤佑介, 柴山義行, 栗山孝一, 本多謙介, 白浜圭也
日本物理学会年次大会、関西学院大学、2012年3月26日

② 振動ワイヤー法によるポーラスアルミナナノポアアレイ中超流動 ^4He の研究
田中智也, 村川智, 近澤佑介, 柴山義行, 栗山孝一, 本多謙介, 白浜圭也
東京大学物性研究所短期研究会「量子凝縮系におけるDefectsとTopology」東京大学物性研究所、2012年1月5, 6日

③ 振動ワイヤー法によるポーラスアルミナナノポアアレイ中超流動 ^4He の研究
田中智也, 村川智, 近澤佑介, 柴山義行, 栗山孝一, 本多謙介, 白浜圭也
日本物理学会秋季大会、於 富山大学、2011年9月23日

④ Torsional oscillator measurements for superfluidity of ^4He confined in a porous Alumina nanopore array
S. Murakawa, Y. Chikazawa, T. Tanaka, R. Higashino, K. Yoshimura, K. Kuriyama, K. Honda, Y. Shibayama and K. Shirahama
26th International Conference on Low Temperature Physics (LT26)、北京(中国)、2011年8月15日

⑤ Superfluidity of ^4He confined in a nanopore array probed by a vibrating wire
T. Tanaka, S. Murakawa, Y. Chikazawa, Y. Shibayama, K. Shirahama
26th International Conference on Low

Temperature Physics (LT26)、北京(中国)、2011年8月15日

⑥ ナノポアアレイを用いた超流動⁴Heのねじれ振子測定

村川智, 東野羅磨, 吉村光司, 近澤佑介, 柴山義行, 栗山孝一, 本多謙介, 白濱圭也
日本物理学会秋季大会、大阪府立大学、2010年9月25日

⑦ Superfluidity of ⁴He in a nanopore array of porous alumina

S. Murakawa, Y. Chikazawa, R. Higashino, K. Yoshimura, Y. Shibayama, K. Kuriyama, K. Honda, and K. Shirahama
QFS2010 : International Symposium on Quantum Fluids and Solids, Grenoble, France, 2010年8月2日

⑧ Layering transitions in solid ⁴He growth on graphite

A. Koga, Y. Shibayama, and K. Shirahama
QFS2010: International Symposium on Quantum Fluids and Solids, Grenoble, France, 2010年8月2日

⑨ Controlling of the electrochemical catalytic activity at DLC nanodot array electrode

K. Kuriyama; R. Kuwabara; H. Naragino; K. Yoshinaga; K. Honda
Pacifichem 2010, Honolulu, U.S.A, 2010年12月18日

⑩ Fabrication of high density magnetic recording media based on FePt nanorod arrays by AC electrocrystallization method

R. Kuwabara; K. Kuriyama; H. Naragino; K. Yoshinaga; K. Honda
Pacifichem 2010, Honolulu, U.S.A, 2010年12月18日

6. 研究組織

(1)研究代表者

白濱 圭也 (SHIRAHAMA KEIYA)
慶應義塾大学・理工学部・教授
研究者番号 : 70251486

(2)研究分担者

本多 謙介 (HONDA KENSUKE)
山口大学・理工学研究科・准教授
研究者番号 : 60334314

(3)連携研究者

該当なし