

「マイクロケルビンの世界」

東京大学理学系研究科物理学専攻

福山 寛

E-mail: hiroshi@phys.s.u-tokyo.ac.jp

物質の温度を極限的に下げてゆくと何が起こるであろうか? 低温開拓は 20 世紀初頭の量子力学の誕生以来、物理学者が新しい現象を探索しようとするときに採用する最も生産的な方法論の一つである。私たちはここ数年来、さまざまな試料を 100 μK (1 万分の 1 ケルビン) 以下の超低温度に冷却し、その温度を長時間保って物性測定できる小型で高性能な核断熱消磁冷凍機を建設してきた(図 1)。その冷却原理は、名前の示す通り、金属銅の原子核スピン系の断熱消磁冷却法である。

図 2 は、完成した冷凍機が今年 3 月 1 日に最低温度 51 μK を達成したときの冷却曲線である。これには約 0.7 Kg の銀と 30 g のグラファイトからなる 2 つの試料セルが搭載されていて、これらを数週間にわたって 200 μK 以下の温度に保持し、比熱と核磁気共鳴測定を行うことができる。現在、世界では恐らく 60 台を越す核断熱消磁冷凍機が稼働しているが、こうした超低温度で物性測定できるものはわずか 3、4 台である(ほとんどのものは 300 μK 以上)。我々の装置は其中でも特にコンパクトに作られている。それでも実験空間は直径 150 mm 高さ 190 mm と十分確保されており、複数の実験を同時進行できる。最終的な最低到達温度は 20~30 μK と予測しており、文字通り世界最高性能の数字である(この原稿が印刷される頃には、実験室のすぐ隣で行われている建物新営工事が発する床振動の合間を縫って、その温度を達成しているかも知れない)。

こうした超低温度で、主に液体および固体ヘリウム (He) の量子多体現象を研究している。なぜ μK が必要かという、原子は電子より 3 桁重いので、量子効果が顕著になる温度が 3 桁低いのである。例えば金属の伝導電子系のフェルミ温度は 10^4 K オーダーであるのに対し、液体 ^3He のそれはわずか数 K である。BCS 型の超伝導はフェルミ温度より十分低い強く縮退した温度域で起こる。実際、飽和蒸気圧下の液体 ^3He は 930 μK で、p 波スピン三重項 ($^3\text{P}_0$) の BCS 状態、すなわち超流動状態に相転移する。

現在進めている実験の一つは、 ^3He をグラファイト表面に 1 原子層づつ物理吸着させて実現する 2 次元フェルミ粒子系の超流動探索である。低次元では揺らぎのために転移温度は 3 次元系より低下するし、三重項状態を安定化すると考えられるスピン揺らぎを媒介とした引力相互作用が、2 次元では効きづらくなることも予想される。温度は下がれば下がるほど超流動転移発見のチャンスは拡がると言える。ところで、

純粋な低次元系で相互作用が短距離かつ等方的な場合には、有限温度の長距離秩序転移が存在しないという証明（Mermin-Wagner の定理）がある。では理想的な 2 次元系と考えられる単原子層 ^3He はどうであろうか？我々は、クーパ対の内部自由度（p 波）のために Ising 型の有限温度相転移が観測されるのではないかと考えている。ボース粒子系であるバルクの超流動 ^4He は、BEC が実現している最初の例であった。その 2 次元系の超流動転移は、Kosterlitz-Thouless 理論（トポロジカル転移）の正しさを見事に証明した。一方、フェルミ粒子系であるバルクの超流動 ^3He は、銅酸化物高温超伝導体につながる非 s 波 Cooper 対という新しいパラダイムを開いた。では ^3He の 2 次元超流動はどんな新奇な物理を見せてくれるであろう？吸着第 2 層目に対して行った予備的な比熱測定の結果は、モット転移直前の高密度域で準粒子有効質量が裸の ^3He 質量の 20 倍以上にも達し（3 次元系の 3 倍以上）相互作用が想像以上に強いことを示している（図 3）。

同時進行しているもう一つの研究は、2 次元 ^3He の密度を増したときに現れる、1 層目の周期ポテンシャルに対して整合な局在相（図 3 の 4/7 相）が示す核磁性（ $S = 1/2$ ）である。我々は数年前、4/7 相が約 300 μK 以下で“量子スピン液体”と呼ばれる新しい磁気基底状態をもつ可能性を初めて指摘した。長距離秩序をもつ強磁性や反強磁性状態を“スピン固体”とすると、量子スピン液体とはスピン自由度に関する“液体”状態である。これに外部磁場を印可して一軸性の異方性を導入したときのスピンの“固化”、つまり長距離秩序の出現を検出しようというねらいである。“スピン固体”の素励起はよく知られているようにスピン波である。ではスピン液体の素励起は何であろうか？この一般的な問いに関する重要なヒントも、この実験から得られると期待している。

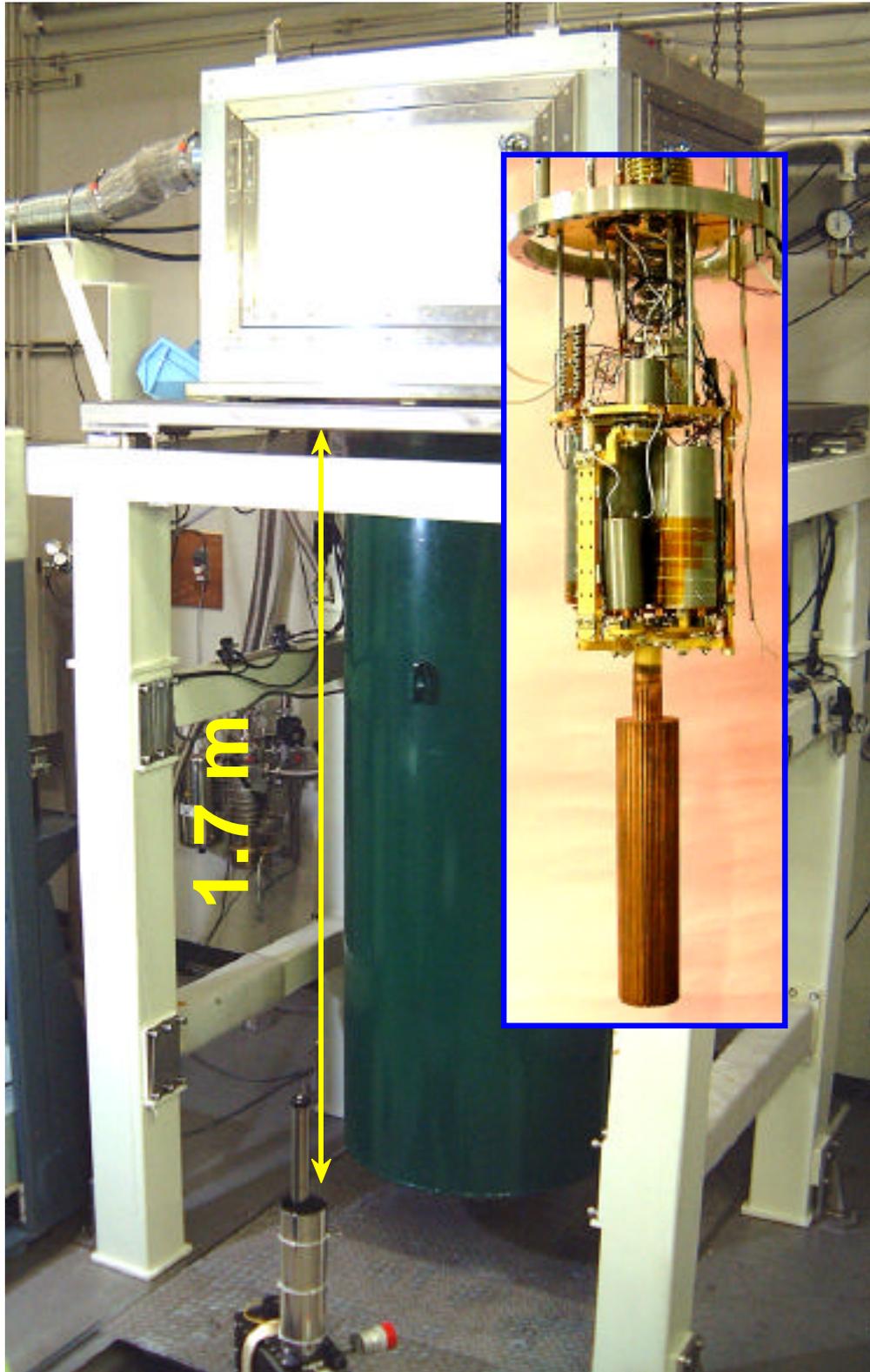


図 1 . 核断熱消磁冷凍機（理学部 1 号館 B208 実験室）。挿入図はその心臓部。

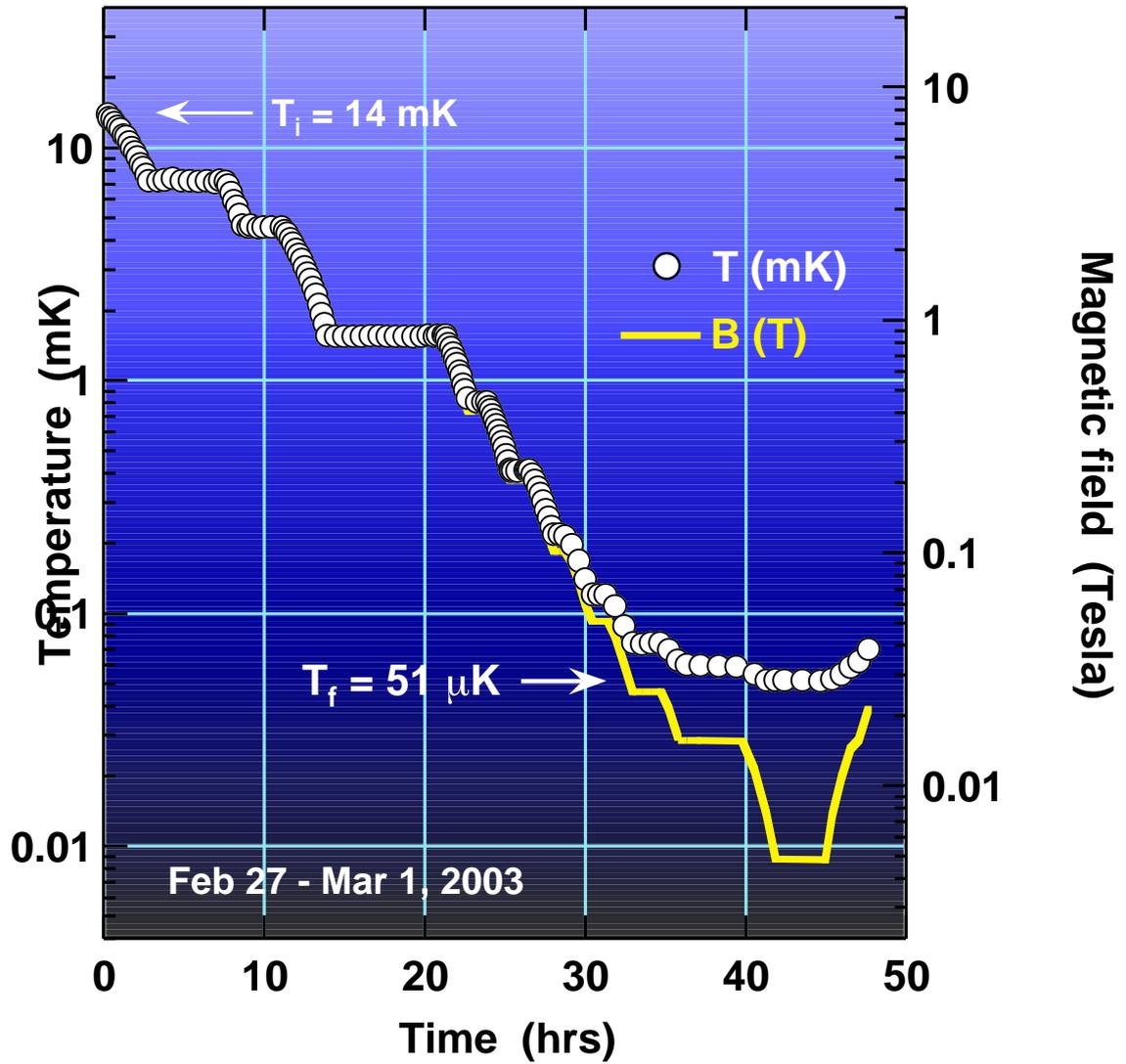


図 2 . 51 μK の超低温を発生したときの冷却曲線。温度は白金の核帯磁率が Curie 則に従うことを利用した磁気温度計で測定する。

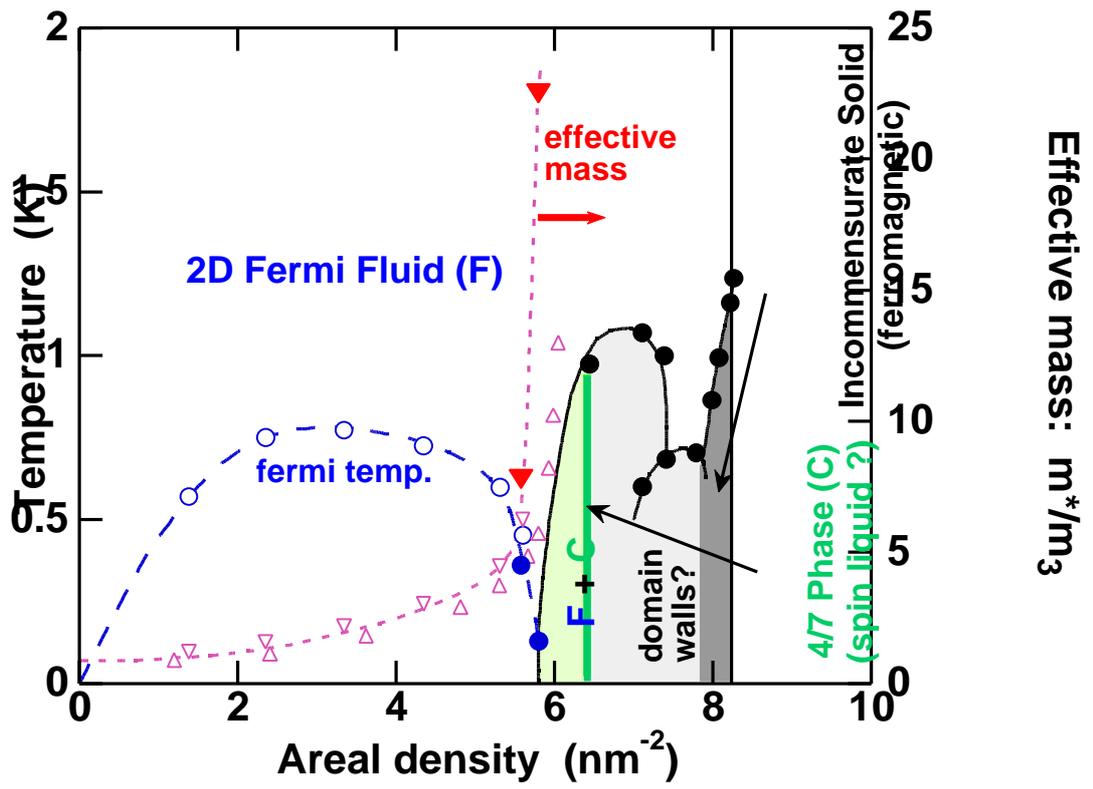


図 3. グラファイト表面に吸着した第 2 層目の 2 次元 ³He の状態相図。面密度の関数として多様な量子物性を示す。