

論文内容の要旨

論文題目 Positive Ion Mobility in Liquid ^3He under High Magnetic Fields
和訳(強磁場下における液体ヘリウム3中の正イオン移動度)

氏名 小原 顕

序

理想的なフェルミ流体である液体 ^3He 中のイオンは、液体 ^3He 中に人為的に導入できる数少ないプローブ粒子の一つで、外部電場により運動を制御できるため、輸送現象を研究するのに適している。イオンには電荷の違う正負2種類が存在する。本実験で特に注目したのは正のイオンである。これは ^3He 原子百個程度からなるマイクロクラスターで、半径 R は融解圧 p_m 、液体の圧力 p_L を用いて $p_m - p_L = A/R^4 - Bs/R$ で決定されると考えられている。 A, B は固体液体の密度などに依存する定数で s は固液の界面張力である。また表面上に ^3He 原子の核スピンを持つため、磁氣的粒子であるといえる。さて、正イオンの移動度 μ は零磁場の低温で対数的な温度依存性($\mu = a + A \log(1/T)$)を示すことが実験的に知られている。この原因の一つとして、次のような可能性が考えられる。すなわち、フェルミ流体中を磁氣的粒子が運動するとき、局在スピンと準粒子のスピン間にスピンフリップを伴う磁氣的散乱が存在する、というものである。これを検証するため、磁場をパラメタとして移動度測定を行い、磁氣的散乱の機構を説明することが本研究の目的である。

実験

測定は、温度・圧力・磁場をパラメタとして体系的に行った。

温度 温度範囲は 1.2mK から 130mK までである。主たる測定・考察が行われたのは超流動転移以前の 3.2 mK である。温度計は零磁場中におかれた ^3He 融解圧温度計および Pt 核帯磁率温度計を用いた。温度精度は $\pm 5 \mu\text{K}$ 。

圧力 圧力は 3.0~32.3bar という広い圧力範囲で行われた。融解圧極小点を超える圧力での移動度測定は、零磁場中における実験を含めて、過去に例がない。

磁場 最大磁場は 14.8 Tesla である。液体・固体ヘリウムの実験全般を通してみて

も、希釈冷凍機温度以下でこのような高磁場を用いる実験はそれほど多くは行われていない。移動度測定に関しては、テスラ以上の磁場をかけた例は過去にない。

移動度測定方法 Gated Time of Flight と呼ばれる方法を用いて電場中での速度を直接測定し、 v - E 図のフィッティングから移動度を求めた。測定精度は1%未満である。

測定結果

速度測定

具体的な測定波形を図1に示した。Gated Time of Flight 法の採用によって、時間分解能が格段に向上した。また、図2に示したように低電場における速度はリニアリティーが良く、高精度の移動度測定が可能となった。

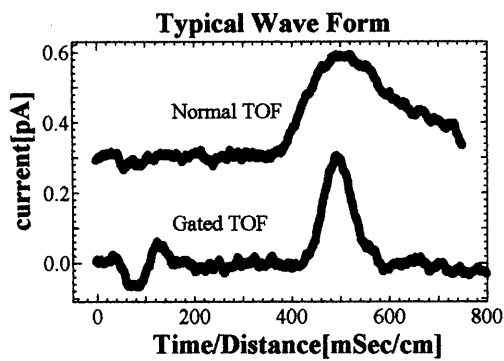


図1：測定波形

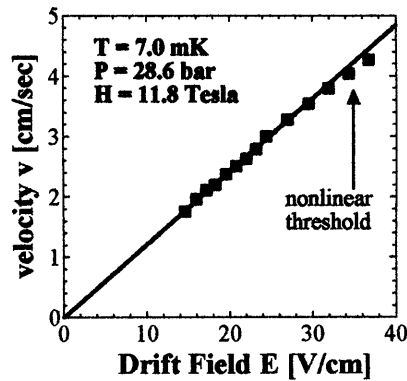


図2： v - E 図

温度依存性

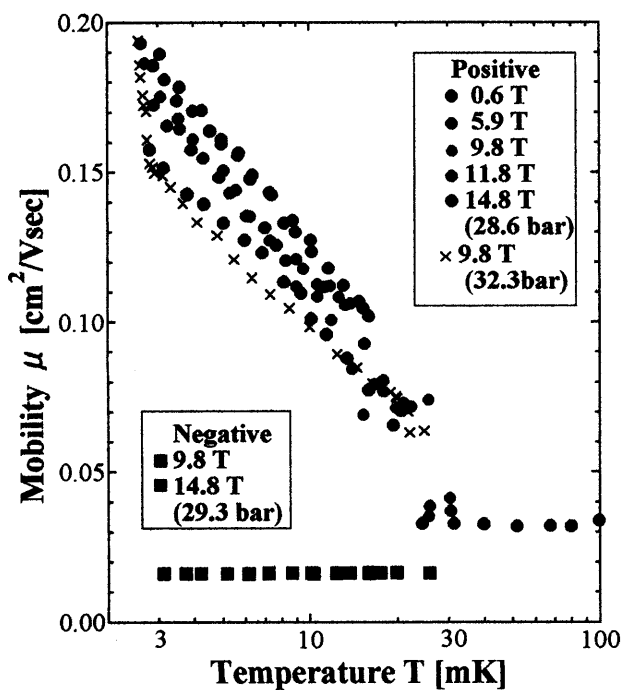


図3：温度依存性

高圧下における、温度依存性を一定磁場のもと測定した結果が図3である。各磁場において、 $\mu = a + A \log(1/T)$ の関係式が満たされていることが判る。 μ の絶対値は14.8 Tが最も低くなる。傾きは図4のように7 Tを頂点としたピークを持つ。

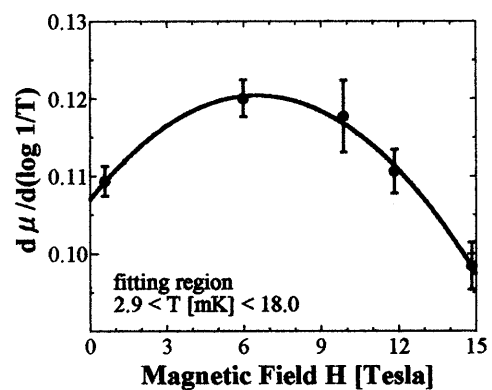


図4：28.6barにおける $\log(1/T)$ の傾き

磁場依存性 28.6 bar の各温度における移動度の磁場依存性を図 5 に示す。20 mK では弱い単調減少を示すが、3.2 mK では 7 T を頂点とする幅の広いピークを持つ。5.1, および 9.1 mK では弱磁場で磁場依存性はないが、8 T 以上で減少に転ずる。高磁場での磁場依存性は図 6 から明らかなように H/T で決められる様に見える。さらに、移動度の増大成分が生ずる温度を調べるため、3.2 mK 近傍で同様の測定を行った(図 7)。増大成分は~3.4 mK を境にして露わに現れることが判る。

次に、温度を 3.2 mK と 20 mK に固定し、31.5~3.0 bar までの圧力別に磁場依存性を測定した(図 8)。縦軸は 0.6T での移動度(図 9 上)で規格化してある。3.2 mK 31.5 bar では最大 35% に及ぶ山型の磁場依存性が存在する。ピークの位置は圧力の減少に伴い 1 次関数で高磁場側へシフトする(図 9 中)。また、25.6 bar 以下の圧力ではピークを示す前にプラトーが存在する。最低圧 3.0 bar では磁場依存性は消失する。18.6 bar における磁場依存性が約 10 T で弱い極小を示すことから、移動度は増大・減少の 2 成分の重ね合わせで記述できるものと考えられる。このモデルにたつとピークの位置及び低磁場プラトーが存在することも、現象論として整理することが可能となる。

考察

イオンの移動度は以下の右式で散乱断面積と関連づけられる。

$$\mu = \frac{a}{\sigma} + \frac{b}{\sigma^2} \log \frac{c\sigma}{T}$$

a, b, c は定数である。

負イオン(核スピンの無い非磁性粒子)に磁場依存性が存在しないこと(図 9 下)から、正イオンの移動度に局在スピンの大きな寄与を及ぼしていることは明らかである。従って、一定温度では磁場に依存する散乱断面積 σ のみを考慮すればよい。

移動度減少成分 磁場の増加に伴い、正イオンの有効半径が膨らむ。原因として、まず ${}^3\text{He}$ の融解圧 p_m を考慮した。 p_m は磁場中で減少することが知られている。界面張力 s を 0 とすると正イオンの半径 R は $(p_m - p_L)^{-4}$ に比例する。 $\sigma = \pi R^2$ より移動度を計算すると、31.2 bar でも高々 8% の減少しか導出できない。次に、界面張力に磁場依存性を持たせると、例えば 0 T でバルクの値 $s = 0.065$ dyn/cm, 15 T で $s = 0.045$ となっていれば最大 35% の減少分を記述することが出来る。今のところ界面張力の磁場依存性についての理論的な考察はない。磁場と共に正イオンの有効半径が増大することから、強く偏極した正イオンの周りに、表面スピンと同じ向きのスピンを持った準粒子が寄せ集められていることが考えられる。

移動度増大成分 正イオン表面に局在する ${}^3\text{He}$ の核スピンと準粒子の間にはスピン交換に由来する相互作用が存在することを示している。低温・磁場下では正イオン表面スピンの完全に偏極するため磁氣的相互作用は抑制され、移動度は増大し飽和する。しかし、正イオン=準粒子散乱は非弾性散乱であるため、定量的な考察は困難である。移動度の磁場依存性が液体の圧力に強く依存することから、準粒子を媒介とした交換相互作用が大きく寄与している可能性がある。

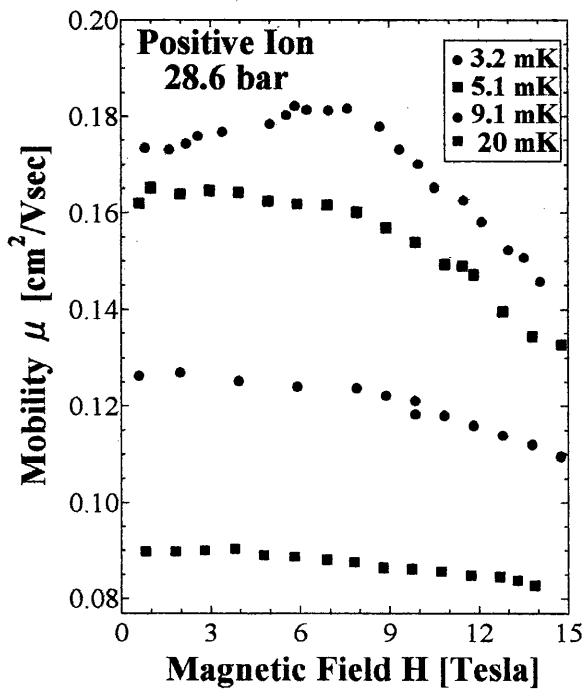


図 5 : 磁場依存性(温度別)

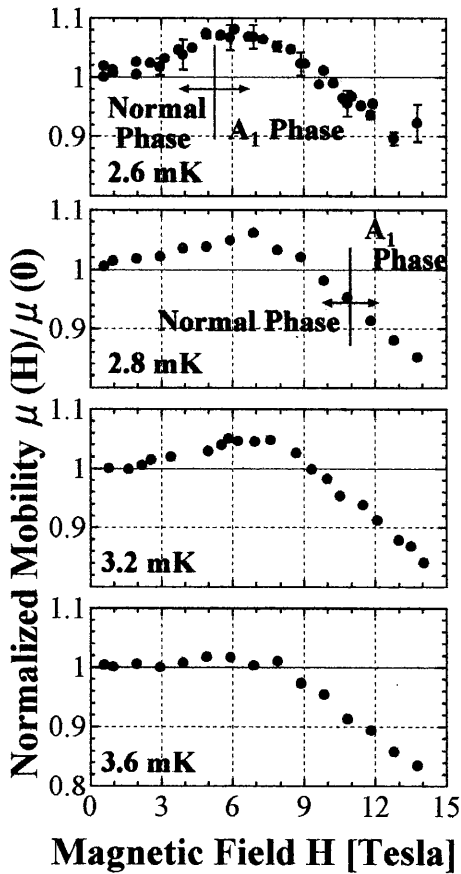


図 7 : より低温での磁場依存性

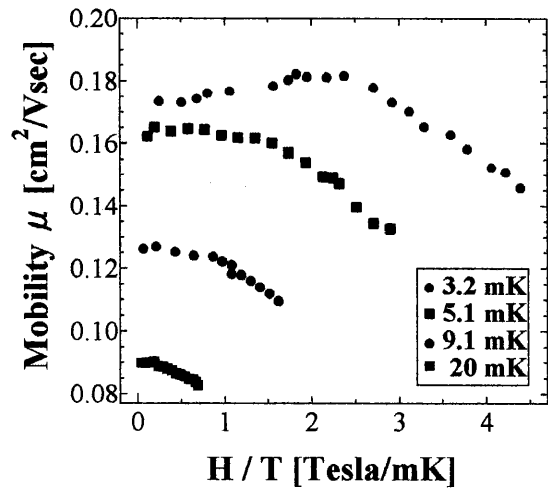


図 6 : 高磁場での傾き

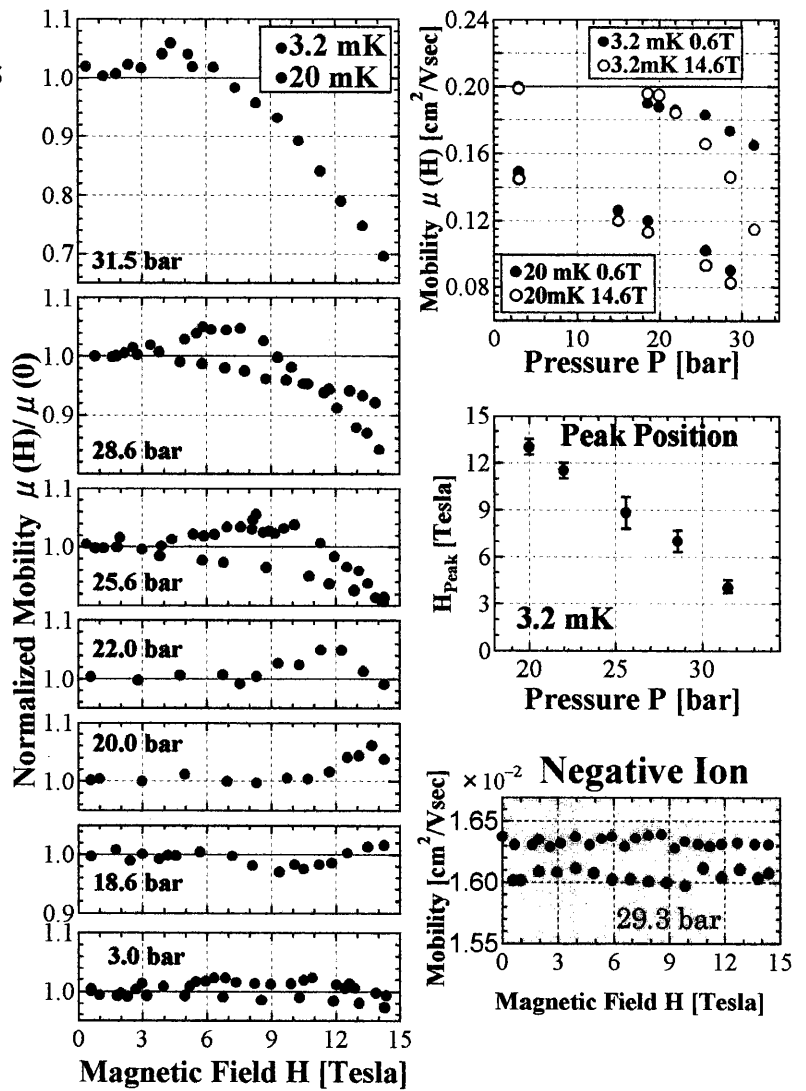


図 8 : 磁場依存性(圧力別)

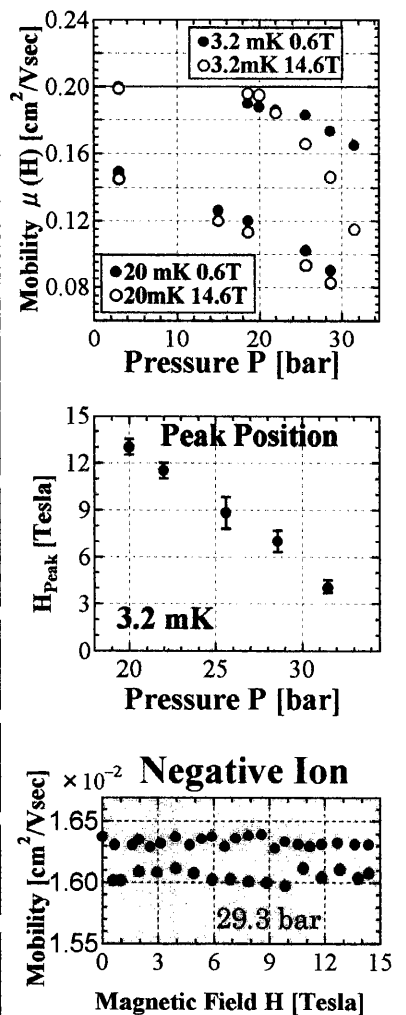


図 9

