

物理実験学 2 (2025 年度) レポート問題 第 1 回 11 月 10 日出題

1. 熱放射 (radiation, 黒体輻射)

温度 T [K] にある黒体から放出される電磁波は熱放射と呼ばれる。放射される単位時間当りの熱量は、温度 T で光子が熱平衡状態にあるとし、考えている単位面積に単位時間あたりに当たる光子の持つエネルギーの総量を考えれば良い。光速を c [m/s], プランク定数を h [Js] ($\hbar = h/2\pi$), ボルツマン定数を k_B [J/K] とする。

(1) 黒体から熱放射として単位時間・単位面積あたりに放射されるエネルギー $e(T)$ (Stefan-Boltzman 則) を導出せよ。

今、低温実験装置 (cryostat) が直径 15 cm, 高さ 60 cm の円筒状の容器の中にあるとしよう。その中に下から 30 cm の高さまで液体ヘリウム 4 が入っているとす。上部の空間には、熱遮蔽板が数枚設置してあり、室温部から液体が見通せない (直接見えない)。熱遮蔽板は周りのヘリウムガスによって冷やされているとし、最下段の熱遮蔽板は液体ヘリウムのすぐ近くにあるとする。容器はヘリウムガスを回収する配管 (ほぼ 1 気圧) に繋いである。

(2) 熱遮蔽板の役割と、遮蔽板がない場合にはどのような状況になるか、を考察せよ。

(3) 室温 (300 K とする) から実験装置内の液体ヘリウム (4.2 K) へ熱放射として侵入する単位時間当りの熱量 P [W] を求めよ。

(4) 液体ヘリウム (^4He) の蒸発潜熱は 0.0829 kJ/mol, 分子量は 4.0026 g/mol, 沸点での密度は 124.67 kg/m³ である。実験装置自体 (サンプルセル等) の熱容量等を無視して、周りが室温 (300 K) の場合に実験装置内の液体ヘリウムの全てが蒸発するのにかかる時間を求め、実験時間としての妥当性を考察せよ。また、周りが液体窒素温度 (77 K) の場合についても計算し、周囲が室温の場合と比較、考察せよ。

2. 希釈冷凍機

希釈冷凍機について、特に、冷却の原理やそこにある物理、さらには実際の冷凍機の構成、冷凍能力などについて、図や式を交えて記述せよ。

3. Eddy current heating

(1) 半径 R , 長さ L の円柱状の金属棒が、時間変化する磁束密度 \vec{B} の中にある状況を考えよう。ここで磁束密度は金属棒の軸方向に平行とする。磁束密度の大きさを B とし、その時間変化を \dot{B} , 金属棒の電気抵抗率を ρ , 金属棒の体積を V として、金属棒での単位時間当たりの渦電流による発熱の大きさを L を使わない形 (代わりに V を使う) で求めよ。

(ヒント: 円柱に沿って z 軸となる円筒座標を考え、棒の断面中央から、半径 r の場所に仮想的に幅 Δr , 厚み Δz のコイルを考える。 \dot{B} によってコイルに生じる誘導起電力と、コイルが形成する抵抗の値から、そのコイルで発生する Joule 熱を求め、 z 方向, r 方向に積分する)

(2) (1) の結果をもとに、核断熱消磁冷却に使用するバンドル内 (Cu としよう) に含まれる核スピンの量を大きく減らすことなく Eddy current heating による発熱を減らすにはどのようにするのが良いかについて考察せよ。その工夫により、具体的に同じ磁場変化 (同じ \dot{B}) の際に、直径 40mm, 長さ 20cm の銅の塊の発熱を何倍に減らせるか、を概算せよ。

提出期限: 2025 年 12 月 1 日 (月)

提出先: Adobe Scan 等で pdf にして、PandA 経由で提出、あるいは、通常のレポートとして理学部 6 号館・教務前のレポート箱へ

担当: 松原 明

(遅れても多少減点する程度なので、必ず提出してください。)