

一般的注意事項: 理論試験

理論試験は5時間で、合計30点満点である。

試験の開始と終了は試験監督が合図する。試験開始の合図の前に問題の入った封筒やフォルダーを開けないこと。経過時間のアナウンスが、1時間ごと、および終了15分前にある。

試験中

- ・ペンまたはボールペンを使用すること。鉛筆で図やグラフなどの下書きをしてもよいが、コントラストよく明瞭にスキャンされるように、最終的な答えはペンで輪郭をなぞる、鉛筆で特に濃くはっきりと書くなどの注意をすること。

- ・Aと書かれた解答用紙には、最終的な解答を書くこと。Wと書かれた白紙のワーキングシートは、詳細な解答のためのものである。解答には必ず問題番号を記入し、その問題のワーキングシートを使用すること(ヘッダーの問題番号を確認せよ)。シートに採点されたくないことが消し残っているときはその部分にバツをつけること。すべてのページの表側だけを使うこと、また、枠外には何も書かないこと。

- ・白紙の用紙が足りない場合は、試験監督に申し出ること。受け取った用紙のヘッダーに、国番号、学生番号(ワーキングシートからコピーせよ)、問題番号、ページ番号を記入すること。

- ・解答はできるだけ簡潔に。可能な限り、方程式、論理演算子、考え方を表すスケッチなどを使って、どう考えたかを説明すること。長い文章は避けること。

- ・それより前にある問題を解いていなくても、後の問題は解けることがある。

- ・試験中はすべて監視され記録される。許可なく机を離れることはできない。トイレやその他の必要(シートやペン、水やお菓子の追加)がある場合は、試験監督に知らせること。

試験終了時に

- ・試験の終了が告げられたら、直ちに筆記を中止すること。

- ・すべての問題について、対応するシートを次の順序で揃えておくこと: 上から、カバーシート、解答用紙(A)、ワーキングシート(W)、空白または余分なシート。

- ・一つの問題に属するすべてのシートを同じ封筒またはフォルダーに入れる。一般的注意事項(G)は封筒またはフォルダーに入れずに机の上に置いておくこと。試験室からはいかなるシートも持ち出してはいけない。

- ・試験監督が許可したら、試験会場を離れることができる。筆記用具、定規、分度器、電卓を忘れないように。

物理定数

次の表は、問題文で与えられたもののほかに、解答で用いる物理定数である。

物理定数	記号	数値
光速	c	299 792 458 m/s
真空の透磁率 (磁気定数)	μ_0	$4\pi \cdot 10^{-7} \text{ N/A}^2$; [1 N/A ² = 1 Vs/Am]
真空の誘電率 (電気定数)	ϵ_0	$8.8541878128(13) \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$; [1 F/m = 1 As/Vm]
電荷素量	e	$1.602176634 \cdot 10^{-19} \text{ C}$; [1 C = 1 A · s]
電子質量	m_e	$9.1093837015(28) \cdot 10^{-31} \text{ kg}$
陽子質量	m_p	$1.67262192369(51) \cdot 10^{-27} \text{ kg}$
中性子質量	m_n	$1.67492749804(95) \cdot 10^{-27} \text{ kg}$
原子質量単位	m_{amu}	$1.66053906660(50) \cdot 10^{-27} \text{ kg}$
重力定数	G	$6.67430(15) \cdot 10^{-11} \text{ m}^3/(\text{kg} \cdot \text{s}^2)$
アボガドロ定数	N_A	$6.02214076 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$
気体定数	R	$8.31446261815324 \dots \text{ J}/(\text{K} \cdot \text{mol})$
ボルツマン定数	k_B	$1.380649 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$
シュテファン・ボルツマン定数	σ	$5.670374419 \dots \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$
プランク定数	h	$6.62607015 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$
ディラック定数	$\hbar = h/(2\pi)$	$1.0545718176 \dots \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$

永久磁石 (10 点)

NdFeB 合金から作られる強力な永久磁石は、非常に幅広のヒステリシスループをもつため、広い応用範囲にわたって磁化 J が一定であるとみなすことができる。以下では $J \equiv 1.5 \text{ T}/\mu_0$, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ N/A}^2$. 全ての永久磁石の磁化は一樣と仮定する。磁化は、物質の単位体積あたりの磁気双極子モーメントと定義される。

ヒント 1. あとで次の等式が有用になるであろう:

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^4} = \frac{\pi^4}{90}.$$

ヒント 2. 球形の磁石が作る磁場は、点状双極子の磁場と同じである。他の形状の磁石が作る磁場は、その直径よりはるかに大きな距離で初めて点双極子の磁場と等価になる。

ヒント 3. 電気双極子と磁気双極子の電場と磁場は座標の関数として相似であり、定数因子を乗じることで一方から他方を得ることができる。

ヒント 4. 境界条件によって生ずる磁場は、常に与えられた境界の外側の磁場源で置き換えることができる。

Part A. 磁石の間の相互作用 (4.5 点)

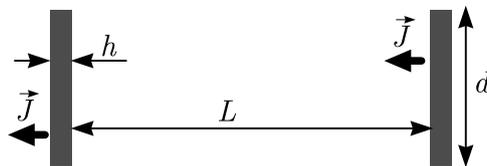
磁石からの距離が磁石の大きさより十分大きい場合、磁石による磁場は磁石の双極子モーメントの磁場で近似することができる。

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi r^3} (2\vec{m}_{\parallel} - \vec{m}_{\perp}).$$

ここで $r = |\vec{r}|$ であり、磁気モーメントを双極子から観測点にひいた動径ベクトル \vec{r} に対し垂直な部分と平行な部分に分解してある。

$$\vec{m} = \vec{m}_{\perp} + \vec{m}_{\parallel}$$

- A.1** 直径 $d = 20 \text{ mm}$ 、厚さ $h = 2 \text{ mm}$ の円筒形 (円板) 磁石が軸に平行に磁化している。0.6pt
このような磁石 2 つを軸を一致させ、距離 $L = 20 \text{ cm}$ だけ離れた時、両者の間にはたらく力を求めよ。ただし、 $L \gg d, h$ を仮定してよい。



- A.2** $\frac{h}{2}$ よりずっと離れたところでは、課題 A.1 の磁石がつくる磁場は円周を流れる電流 I がつくる磁場と同じになる。この電流 I を求めよ。0.4pt

- A.3** 課題 A.1 で $L = 5 \text{ mm}$ の場合、磁石の間にはたらく力はいくらになるか。この場合、不等式 $d \gg L \gg h$ が成立すると仮定してよい。1.0pt

- A.4** 同一の直径 $\delta = 5 \text{ mm}$ の球形磁石が磁氣的引力で多数結合して鎖状になっている。このとき、最上部の磁石の下に吊るしたときに自重で壊れない最大長 l を求めよ。ただし、NdFeB 磁石の密度は $\rho = 7500 \text{ kg/m}^3$ である。 1.0pt

- A.5** A.4 の鎖を考え、図の点 P における磁場 B の大きさを求めよ。鎖の端点 O から距離が r で OP と鎖のなす角が θ である。ただし、不等式 $l \gg r$ および $r \sin \theta \gg \delta$ が成立するものとする。 1.5pt



Part B. 強磁性体との相互作用 (3.5 点)

ここで、永久磁石のほかに、トランスのコアに使われているような強磁性体の板があると仮定する。この場合、強磁性体の比透磁率 $\mu_r \sim 10^5$ は一定で非常に大きい値と考えることができる。

ヒント 5. 透磁率が大きいということは、その材料でできた物体の外表面付近の磁力線が、表面に対してほぼ垂直になることを意味する。これは、導体の外表面付近の電界線の挙動と似ている。

- B.1** A.4 の球形磁石が一つ、厚く無限に広い強磁性体板から距離 $s = \delta$ 離れたところにあるとする (解答用紙を見よ)。球体の磁化は板に垂直な方向に向いている。解答用紙の断面の磁力線を描け。この図には、3 つの点 (1、2、3) が記されているが、これらの点を通る磁力線を、解答用紙の図の範囲で、全長にわたって描くこと。 1.0pt

- B.2** ここで、球形の磁石を板に直接接触させる。安定な平衡状態における球形磁石の磁化ベクトルはどの方向を向き、板と磁石の間に働く法線方向の力はいくらになるか。また、解答用紙の該当する欄で、正しい方向を示す図にレ点をつけよ。 1.0pt

- B.3** ここで、A.1の磁石の一つを、直径が $D = 2d$ で分厚い強磁性体の円板2枚の間に挟み、3枚の円板がすべて同軸のかたちにする。この時それぞれの板に作用する磁気的な力 F を求めよ。ヒント：強磁性板の外側と、板と板の間の隙間の外側の磁場は共に無視してよい。 1.5pt

Part C. (反) 強磁性秩序 (2点)

物質の磁氣的性質は、電子や原子核の磁気双極子モーメントに起因する。双極子モーメントが互いに平行な方向を向いていれば、それによって生じる磁場は大きくなり、これが強磁性体である。一方、双極子モーメント1つに対して、近くにもう1つ反平行な双極子モーメントがあると、磁場が打ち消される。反強磁性体ではこういう配列が実現されている。

以下では、A.4の球形磁石を非常に多数2次元格子に配置した場合を考える。下に示す実物の写真を参照せよ。すべての磁化ベクトルが図の平面上にあると仮定する。計算では、最近接の相互作用だけを考えることにする。(C.1の図では、各磁石は4つの最近接磁石を持ち、C.2の図では6つの最近接磁石を持つ)。

- C.1** 下の図に磁石の磁化の向きを示せ。あなたが示す配置が唯一の可能性であることを示す必要はないが、その配置が実際に安定である事を示せ。また、他の磁石を静止させたまま、この格子の中央付近から1個の磁石を引き抜くのに必要なエネルギーを求めよ。この磁化の配置は、強磁性体、反強磁性体のどちらに対応しているか？ 0.8pt

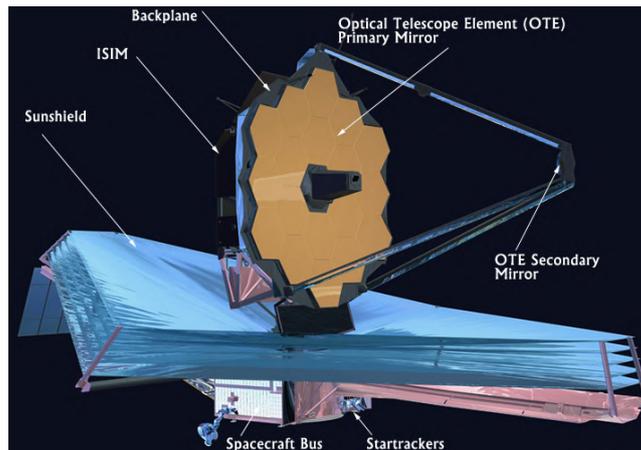


- C.2** 下図について課題C.1と同じ質問に答えよ。 1.2pt



ジェームス・ウェッブ宇宙望遠鏡 (12 点)

ジェームス・ウェッブ宇宙望遠鏡の物理を問う問題である。星からの光は、面積 $A_{\text{mirror}} = 25 \text{ m}^2$ の主鏡に当たり、副鏡で反射する。システムの焦点距離は $f = 130 \text{ m}$ である。光は、CCD (charged-coupled device) カメラの入った ISIM (Integrated Science Instrument Module) に集光される。



画像引用元: NASA

Part A. 星のイメージング (1.8 点)

最も近い赤色巨星は、距離 89 光年で、温度 $T_{\text{star}} = 3600 \text{ K}$ 、直径 $d_o = 1.7 \times 10^{11} \text{ m}$ である。

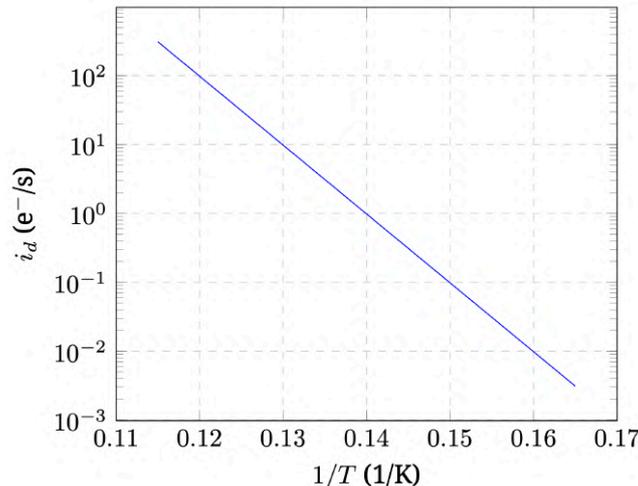
- | | | |
|------------|---|-------|
| A.1 | CCD カメラ撮像面上の星の像の直径を計算せよ。 | 0.4pt |
| A.2 | CCD カメラ撮像面上の回折による像のボケ（分解能を与える）の直径を見積もれ。赤色巨星からの強度が最も強い波長 $\lambda = 800 \text{ nm}$ を想定せよ。 | 0.4pt |
| A.3 | CCD が冷却されず、撮像面の上からの放射によってのみ熱を失う場合、赤色巨星の像の位置での CCD の平衡温度はどうか？ CCD の表面は黒体であると仮定する。計算式と数値評価を求めよ。 | 1.0pt |

Part B. 光子のカウント (1.8 点)

CCD カメラで光子が吸収されると、装置内で電子が放出される。この現象は、光子がエネルギーギャップ ΔE_g を越えて電子を励起するのに十分なエネルギーを持っている場合にのみ発生する。十分なエネルギーを持つ光子はすべて変換が成功すると仮定する。また、CCD カメラの温度によってギャップを越えて電子が漏れることがある。これは暗電流 i_d と呼ばれ、1 秒あたりの電子の数で測定される。これは温度の関数で、次の式で表される。

$$i_d = i_0 e^{-|\Delta E_g|/6k_B T}. \quad (1)$$

ここで i_0 は定数である。



グラフは、暗電流が温度によってどのように変化するかを示している。暗電流の単位 e^-/s は、1秒間に何個の電子がカウントされるかである。

- B.1** 暗電流のグラフから、画素上の電子をちょうど励起できるような遠方の光子発生源の温度を、1桁のオーダーで推定せよ。 0.4pt

電子はコンデンサーに集められ、露光時間 τ の後、電子はカウントされる。このプロセスには、3つの主要な不確かさがある。読み出しノイズと呼ばれる計数プロセスの固定的な不確かさ、暗電流に関連するポアソン分布誤差、検出された入射光子に関連するポアソン分布誤差の3つである。ポアソン分布誤差は、あるプロセスに関連するカウント数の平方根に等しい。測定された光子数は、コンデンサー内の電子数から暗電流に関連する電子数を差し引いたものに等しい。

- B.2** 読み出しノイズ σ_r 、暗電流 i_d 、入射光子レート p 、露光時間 τ であるとき、総カウント数の不確かさ σ_t の式を書き下せ。 0.4pt

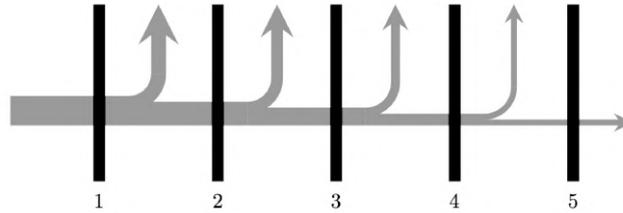
このパートの残りの問題では、露光時間を $\tau = 10^4$ s、読み出しノイズを固定の $\sigma_r = 14$ と仮定する。

- B.3** 動作温度は $T_p = 7.5$ K と仮定する。光子の数がカウントの不確かさの10倍となるような、最小の光子レート p を計算せよ。 0.5pt

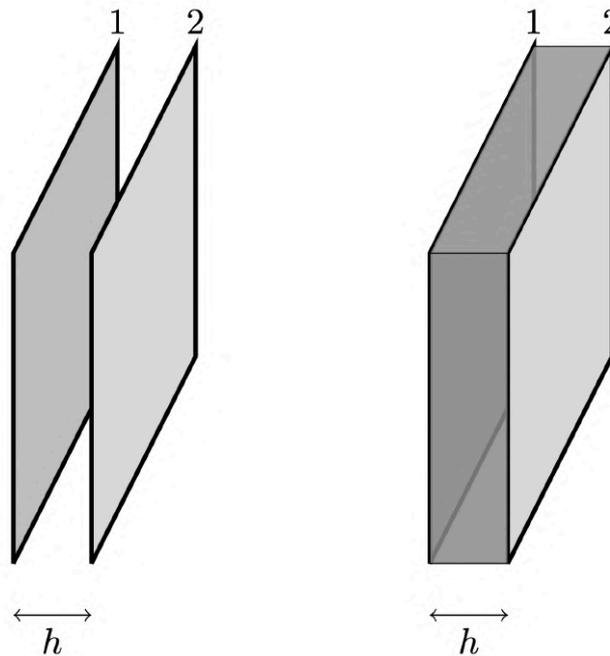
- B.4** すべての光子がちょうどバンドギャップを越えて電子を励起することができると仮定すると、主鏡上における B.3 で議論した光子の源の強度はどれくらいか？ 答を W/m^2 の単位で表せ。 0.5pt

Part C. 受動的冷却 (4.4 点)

赤外線 CCD カメラは低温に保たなければならない。最初の装置は、太陽の放射を防ぐためのシールドである。太陽のシールドは、5つの薄いシート(黒)からなる反射層からなる。太陽からの放射エネルギー(灰)は左の第1シートに入射し、あるエネルギーはシートの間から逃げていく。



エネルギーの流れの模式図：縦線（黒）はシート、エネルギーの流れ（灰）は左から右へ。ただし、シートとシートの間では、一部のエネルギーは上へ流れ、空間へ出ていく。



左図は、隣接する2枚のシート1, 2が距離 h で離れたシンプルなモデル。シートは接続されておらず、周囲は空間に開かれている。シートは平行であると仮定する。熱放射はシート間で交換され、熱放射は周囲の隙間を通して逃げる事ができる。右図では、視覚化しやすいように外周部の隙間に影を付けている。

以下のように単純化を仮定する。

- シートは正方形で、それぞれの面積は $A_{\text{sheet}} = 200 \text{ m}^2$ とする。
- シートは平行で、周囲に $h = 25 \text{ cm}$ の間隔がある。
- シートは一定の放射・吸収率 $\epsilon \ll 1$ を持つ。シート表面からの反射はすべて拡散的であると仮定する。
- シートは薄く、表面と裏面の温度は等しく、均一である。
- あるシートから放射された放射フラックスのうち、隣のシートに吸収される割合は $\alpha \leq 1$ である。つまり、図のシート1がシート2に向かって熱量 Q_1 を放出すると、シート2はシート1から量 αQ_1 を吸収することになる。
- 2枚のシートの中の周囲ギャップから放出される放射フラックスの量は、 βQ_{12} で近似される。ここで、 αQ_{12} は、2枚のシート間の正味のフラックスである。 $\beta < 1$ である。これは、2枚のシートの間の空間

への熱損失は、シート間の正味の熱交換に比例すると言っているのと同じである。これは、この問題に対するおおまかな近似である。

- 空間の背景温度は無視できるほど低い。

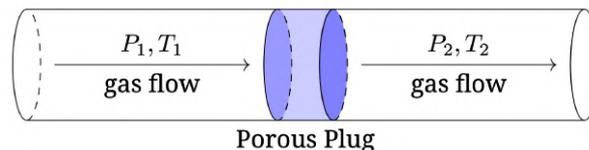
C.1 入射太陽放射強度 I_0 , 定数 α と β , および必要な物理定数を用いて、1 枚目と 5 枚目の平衡温度の式を導出せよ。式を簡単にするため、他の定数を α, β などで定義してよい。 2.4pt

C.2 放射・吸収率を $\epsilon = 0.05$ と仮定して、シートの形状に関する情報から、 α と β の数値評価を導け。上のシートの長方形の箱のモデルは、外周部が放射エネルギーの完全な吸収体として効果的に働くので、検討することを勧める。 1.6pt

C.3 シート 1 とシート 5 の温度を数値的に求めよ。太陽エネルギー強度は $I_0 = 1360 \text{ W/m}^2$ とする。 0.4pt

Part D. 極低温冷却 (4 点)

冷却システムの最終段階では、CCD カメラを直接冷却する。閉サイクル冷凍システムは、一定圧力 P_1 のヘリウムガスをスポンジ状の多孔質プラグを通して一定圧力 P_2 のパイプに移動する供給パイプラインを持つ。パイプは CCD を冷却するため、ガスを運び込む。ヘリウムガスはその後、ポンプを通過して供給ラインに戻る。



圧力 P_1 と温度 T_1 のヘリウムガスが左から供給され、プラグを通して、圧力 P_2 と温度 T_2 の右側へ押し出されていく。

ガスが多孔質プラグ内を移動する際、スポンジの狭い流路壁との粘性摩擦が重要な影響を与えるようになるが、このプロセスではガスとの間で熱の移動はない。領域 2 でのガスのバルク速度は、領域 1 でのバルク速度よりわずかに大きいだけである。

ヘリウムは理想気体ではないが、この過程では気体の状態を保つ。

D.1 左から右へプラグを通過する気体 1 モルを考えよう。大小がある量を示す場合には「>」または「<」を、等しくなければならない量を示すために「=」を、他の多くの情報がなければどちらが大きいかわからない場合は「?」を記入して、解答用紙の表を完成させよ。 1.0pt

D.2 1 モルの気体がプラグの中を移動するときの、 U (内部エネルギー), P (圧力), V (体積) から構成される保存量を特定せよ。この保存量をどのように導き出したか、過程を示せ。 0.6pt

あなたの解答用紙には、ヘリウムの質量あたりの体積に対する質量あたりの内部エネルギーのグラフがあり、等温線とエントロピー一定の線が描かれている。

D.3 $V_2 = 0.100 \text{ m}^3/\text{kg}$ と $T_2 = 7.5 \text{ K}$ を仮定して、グラフを用いて、Part D.2 で議論した保存量の数値評価値を求めよ。グラフ上に作図を示せ。 1.4pt

D.4 T_1 の最大可能温度を求めよ。グラフ上に作図を表示せよ。 0.8pt

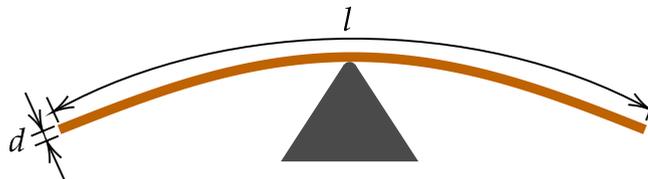
D.5 D.4 で議論した最大値 T_1 のあなたの評価値を仮定し、 P_1 の数値評価を求めよ。 0.2pt

スケーリング則 (8 点)

スケーリング則は、2つの物理量が有意な区間で互いにスケールアップする関数関係を記述するものである。この関数関係はべき乗則になることもあるが、他の可能性もある。厳密な表現を得ることが困難であっても、スケーリング則を導き出せることがよくある。

Part A. スパゲッティ (2.0 点)

- A.1** 直径 d の一本のスパゲッティの棒が中点を支えられて水平に置かれている。 $d = 1$ mm のとき、棒は長さが $l = 50$ cm を超えると、自身の重さのために折れてしまう。棒の直径が $d' = 1$ cm の場合、自身の重さで折れる直前の最長の長さ l' はいくらか? 2.0pt



Part B. 砂の城 (2.0 点)

- B.1** 粗粒砂の平均的な粒の体積は細粒砂の 10 倍である。最適な含水量の湿った細粒砂と最適な含水量の湿った粗粒砂（つまり、それらを用いて作る建造物が最大強度を得られる含水量の砂）を使って、全く同じ形と大きさの円柱を 2 つ作る。それぞれの円柱を平行な 2 枚の板で挟み、強度を測定する。粗粒砂の円柱は、板を押す力が $F_c = 10$ N に達すると破壊される。細粒砂でできた円柱を破壊するのに必要な力 F_f はいくらか？重力の影響は無視してよい。 2.0pt

Part C. 恒星間旅行 (2.0 点)

- C.1 恒星間探検旅行の宇宙船は、一定の大きさの固有加速度 $g = 10 \text{ m/s}^2$ で航行する。 2.0pt
すなわち、この加速度は宇宙船が瞬間的に静止している慣性座標系における加速度である。乗客はあと 50 年と見積もられる寿命以内に地球に帰還しなければならない。宇宙船の地球からの最大到達距離は d であるが、加速度を $g' = 15 \text{ m/s}^2$ にするとより遠い距離 d' に到達することができる。比 d'/d はいくらか？

ヒント 1. 相対論的速度加算の公式を用いてもよいが、他のアプローチもある。

ヒント 2. 次のように定義された双曲線関数を扱う必要があるかもしれない：
 $\cosh x = \frac{1}{2}(e^x + e^{-x})$, $\sinh x = \frac{1}{2}(e^x - e^{-x})$, $\tanh x = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}}$.

ヒント 3. やり方にもよるが、次の積分公式を用いても良い： $\int \frac{dx}{1-x^2} = \text{atanh } x + C$,
 $\int \frac{dx}{\sqrt{1+x^2}} = \text{asinh } x + C$, $\int \sinh x dx = \cosh x + C$, ここで、 $\text{asinh } x$ と $\text{atanh } x$ は対応する双曲線関数の逆関数である。

Part D. ザット・シンキング・フィーリング (あの沈むような感覚) (2.0 点)

- D.1 半径 r_0 の均質な木の球が水に浮いている。摩擦の影響を無視すれば、微小振動の 2.0pt
角振動数は ω_0 であるが、粘性摩擦があるため、鉛直方向に変位させたあとの減衰振動の角振動数は実際には $0.99\omega_0$ となる。水に浮かぶ木の球が変位したときに微小振動をする最小の半径 r_{\min} はいくらか？

ヒント. 流体から物体に働く粘性抵抗は、その物体の流体に対する速度と、流体の粘性率 η に比例する。粘性率の単位は $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$ である。

永久磁石 (10 点)

Part A. 磁石間の相互作用 (4.5 点)

A.1 (0.6 pt)

(数式)

(数値) $F =$

A.2 (0.4 pt)

(数式)

(数値) $I =$

A.3 (1.0 pt)

(数式)

(数値) $F =$

A.4 (1.0 pt)

(数式)

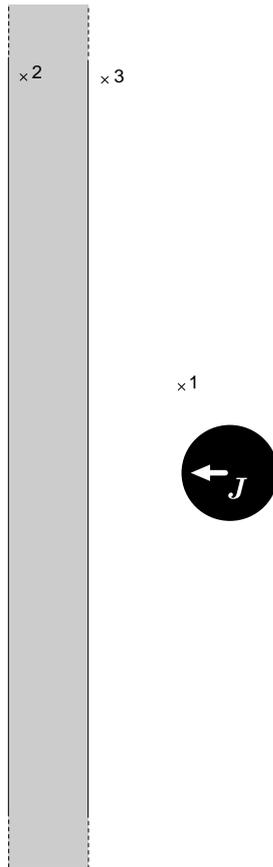
(数値) $l =$

A.5 (1.5 pt)

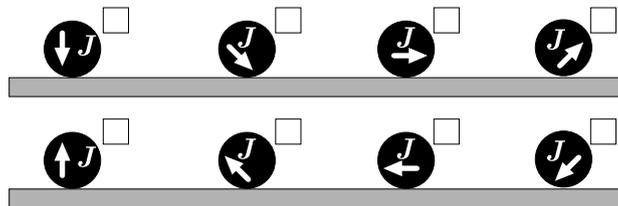
(数式) $B =$

Part B. 強磁性体との相互作用 (3.5 点)

B.1 (1.0 pt)



B.2 (1.0 pt)



(数式)
(数値) $F =$

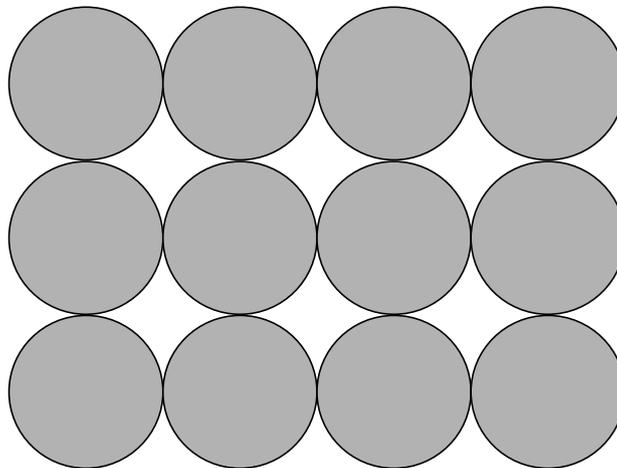
B.3 (1.5 pt)

(数式)

(数値) $F =$

Part C. (反) 強磁性的秩序 (2 点)

C.1 (0.8 pt)

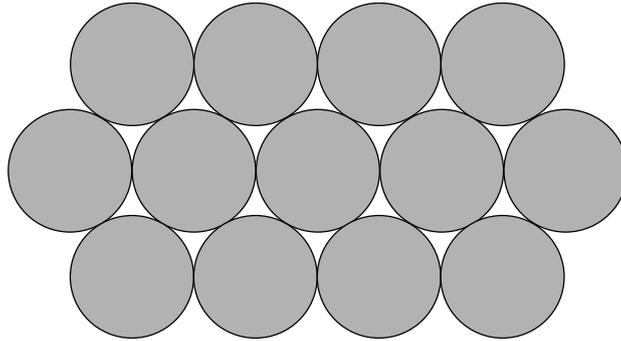


正しい秩序に下線を引け: 強磁性秩序 反強磁性秩序

(数式) 必要なエネルギー =

(数値) 必要なエネルギー =

C.2 (1.2 pt)



正しい秩序に下線を引け: 強磁性秩序 反強磁性秩序

(数式) 必要なエネルギー =

(数値) 必要なエネルギー =

ジェームス・ウェッブ宇宙望遠鏡 (12 点)

Part A. 星のイメージング (1.8 点)

A.1 (0.4 pt)

数値 d_{image} =

A.2 (0.4 pt)

数値 d_{diff} =

A.3 (1.0 pt)

表式 T_{image}

数値 T_{image} =

Part B. 光子のカウント (1.8 点)

B.1 (0.4 pt)

数値 T_{source} =

B.2 (0.4 pt)

表式 σ_t

B.3 (0.5 pt)

数値 p =

B.4 (0.5 pt)

強度の数値

Part C. 受動的冷却 (4.4 点)

C.1 (2.4 pt)

表式 T_1

表式 T_5

C.2 (1.6 pt)

数値評価 $\alpha =$

数値評価 $\beta =$

C.3 (0.4 pt)

数値 $T_1 =$

数値 $T_5 =$

Part D. 極低温冷却 (4 点)

D.1 (1.0 pt)

量の名称	状態 1	">", "<", "=", or "?" を用いて比較せよ。	状態 2
内部エネルギー	U_1		U_2
温度	T_1		T_2
エントロピー	S_1		S_2
圧力	P_1		P_2
体積	V_1		V_2

D.2 (0.6 pt)

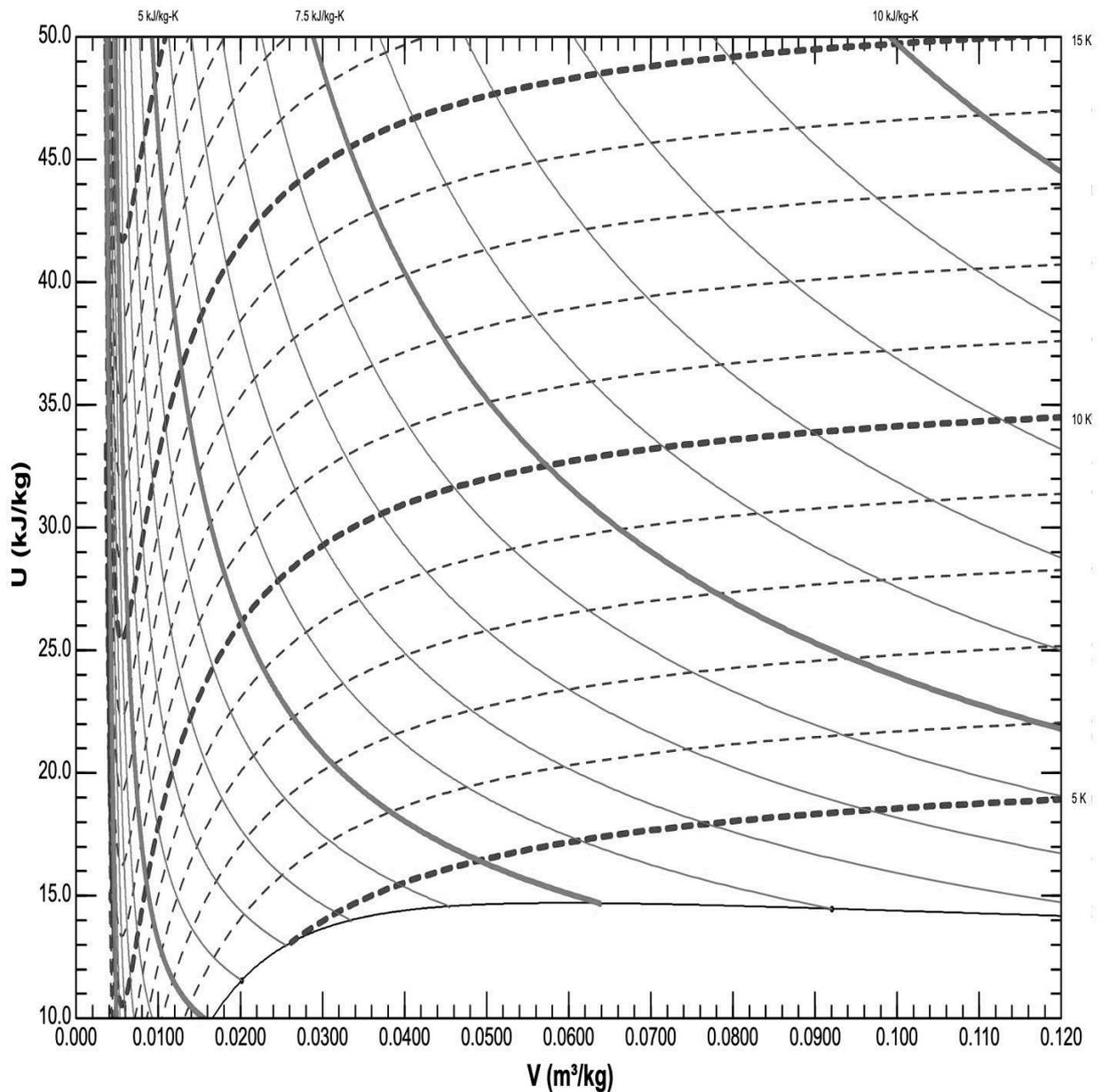
保存量の表式

D.3 (1.4 pt)

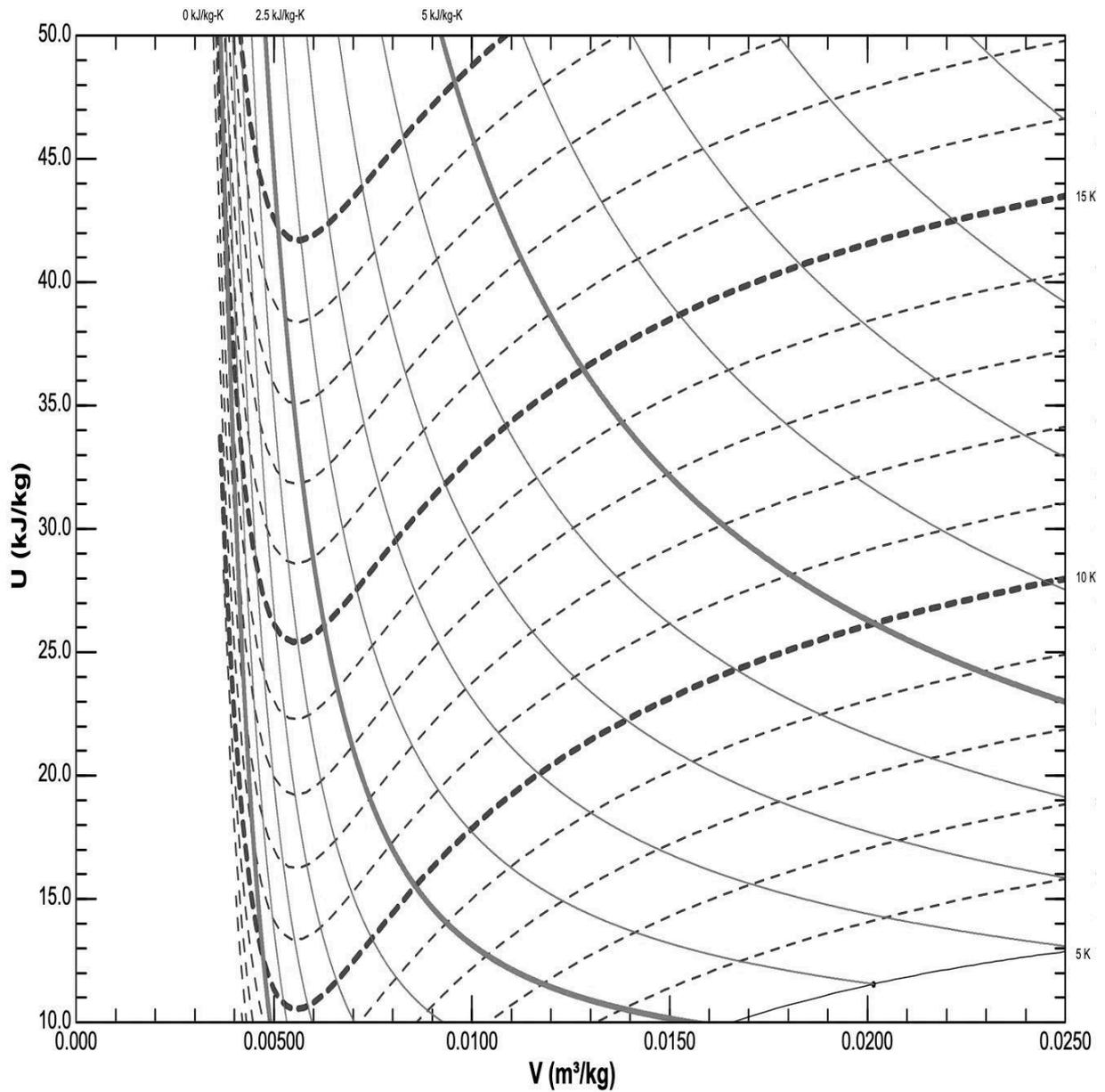
実線（体積が大きくなると下降する傾向）は、エントロピー S の等エントロピー線；太曲線の値は上にある。

破線（体積が大きくなると増加する傾向）は、温度 T の等温線；太曲線の値は右にある。

縦軸は、内部エネルギー (kg あたり) U ；横軸は、体積 (kg あたり) V 。



D.4 (0.8 pt)



D.5 (0.2 pt)

数值 $P_1 =$

スケーリング則 (8 点)

Part A. スパゲッティ (2.0 点)

A.1 (2.0 pt)

$$l' =$$

Part B. 砂の城 (2.0 点)

B.1 (2.0 pt)

$$F_f =$$

Part C. 恒星間旅行 (2.0 点)

C.1 (2.0 pt)

$$d'/d =$$

Part D. ザット・シンキング・フィーリング (あの沈むような感覚) (2.0 点)

D.1 (2.0 pt)

$$r_{\min}/r_0 =$$