総合研究大学院大学先端学術院

加速器科学コース・素粒子原子核コース

５年一貫制博士課程入学試験問題

専門科目

令和５年８月２３日（水）１３時００分～１６時００分

注意

☆ 答案用紙の所定の欄に，受験番号，氏名を記入すること．

☆ 各自に計算用紙１枚が配布されていることを確認すること．

☆ ６問の中から，４問を選んで解答せよ．

ただし、素粒子原子核コース理論部門を志望する（志望順位を問わず）受験者は第１問及び第２問を必ず選択しなければならない．

☆ 試験問題（４問）ごとに，異なった答案用紙を使用すること．

☆ 各問題に対して，答案用紙は複数使用してよいが，第○○問□□枚目というように，所定の欄に，選択した問題の番号及び答案用紙の順番を記入すること．解答できない場合も，受験番号，氏名，問題番号を記入し，提出すること．

☆ 答案用紙・計算用紙がさらに必要な場合は，挙手をして監督者に知らせること．

第１問

ハミルトニアンが

$$\hat{H} = \frac{\hat{p}^2}{2m} + \frac{1}{2}m\omega^2\hat{x}^2$$

で表される一次元調和振動子を考える．ここで $\hat{x}$ は座標演算子，$\hat{p}$ は運動量演算子，m は粒子の質量，ω は角振動数である．次のように定義される演算子 $\hat{a}$ と $\hat{a}^\dagger$ は交換関係 $[\hat{a}, \hat{a}^\dagger] = 1$ を満たす．

$$\hat{a} = \sqrt{\frac{m\omega}{2\hbar}}\left(\hat{x} + \frac{i}{m\omega}\hat{p}\right), \quad \hat{a}^\dagger = \sqrt{\frac{m\omega}{2\hbar}}\left(\hat{x} - \frac{i}{m\omega}\hat{p}\right)$$

ここで $\hbar$ は換算プランク定数である．このとき，以下の問いに答えよ．

【問 1】
ハミルトニアン $\hat{H}$ を $\hat{a}$ と $\hat{a}^\dagger$ を用いて表せ．

【問 2】
演算子 $\hat{a}$ と $\hat{a}^\dagger$ に対して次の関係式を満たす波動関数 $\phi_n(x)$ を考える．

$$\hat{a}\,\phi_{n+1}(x) = \sqrt{n+1}\,\phi_n(x), \quad \hat{a}^\dagger\phi_n(x) = \sqrt{n+1}\,\phi_{n+1}(x)$$

ここで n は 0 または正の整数である．また，$\phi_n(x)$ は規格化されているとする．このとき，$\phi_n(x)$ は系のエネルギー固有状態の波動関数であり，対応するエネルギー固有値が次のように表されることを示せ．

$$E_n = \hbar\omega\left(n + \frac{1}{2}\right)$$

ただし，$\phi_0(x)$ は演算子 $\hat{a}$ に対して $\hat{a}\,\phi_0(x) = 0$ を満たすとする．

【問 3】
時刻 $t = 0$ において系の波動関数が次のように与えられたとする．

$$\psi(x) = A\,\exp\left(-\frac{m\omega}{2\hbar}x^2 + ikx\right)$$

ここで A は規格化定数，k は x によらない実数である．この $\psi(x)$ に演算子 $\hat{a}$ を作用させると次の関係式を満たす．

$$\hat{a}\,\psi(x) = \alpha\,\psi(x)$$

係数 α を k, m, ω を用いて表せ．

【問 4】

$\psi(x)$ は系のエネルギー固有状態の波動関数 $\phi_n(x)$ を用いて次のように展開することができる．

$$\psi(x) = B \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{n!}} C^n \phi_n(x)$$

規格化定数 B と係数 C を，それぞれ α を用いて表せ．

【問 5】

$\psi(x)$ を系のハミルトニアン $\hat{H}$ によって時刻 $t = 0$ から時間発展させる．時刻 t における波動関数 $\psi(x, t)$ は $\phi_n(x)$ を用いて次のように表すことができる．

$$\psi(x, t) = B e^{-i\omega t/2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{n!}} \big\{C(t)\big\}^n \phi_n(x)$$

係数 $C(t)$ を α, ω, t を用いて表せ．

【問 6】

演算子 $\hat{a}$ を作用させると $\psi(x, t)$ は次の関係式を満たすことがわかる．

$$\hat{a}\, \psi(x, t) = \beta(t)\, \psi(x, t)$$

係数 $\beta(t)$ を α, ω, t を用いて表せ．

【問 7】

$\psi(x, t)$ について期待値 $\langle \hat{x} \rangle$，$\langle \hat{p} \rangle$，$\langle \hat{x}^2 \rangle$，$\langle \hat{p}^2 \rangle$ を k, m, ω, t を用いて表せ．さらに，$(\Delta x)^2 = \langle \hat{x}^2 \rangle - \langle \hat{x} \rangle^2$，$(\Delta p)^2 = \langle \hat{p}^2 \rangle - \langle \hat{p} \rangle^2$ とするとき，$\Delta x\, \Delta p$ がどのように時間発展するか説明せよ．

第２問

一辺の長さが L で体積が $V = L^3$ の十分大きな立方体の箱の中に，質量が m でスピンが 0 の同種粒子が N 個ある系について考える．重力の影響は無いものとし，以下の問いに答えよ．$\hbar = h/(2\pi)$ であり，h はプランク定数である．

【問１】

$N=1$ のとき，一粒子のハミルトニアン $\hat{H} = -\frac{\hbar^2}{2m}\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}\right)$ の固有状態 $\varphi(x,y,z)$ は，

$$\varphi(x,y,z) = \left(\frac{2}{L}\right)^{3/2} \sin\left(\frac{\pi\, n_x\, x}{L}\right) \sin\left(\frac{\pi\, n_y\, y}{L}\right) \sin\left(\frac{\pi\, n_z\, z}{L}\right) \tag{1}$$

と書くことができる．箱の中の座標 x, y, z は，それぞれ 0 から L の範囲に値をとる．このとき物理的に許される全てのハミルトニアンの固有値 $\varepsilon(n_x, n_y, n_z)$ を n_x, n_y, n_z がとれる値の条件とともに示せ．

【問２】

以下では $N \gg 1$ の場合を考える．粒子間に相互作用はなく，N 個の粒子は互いに区別できないとする．この系のハミルトニアンの固有値は，一粒子のハミルトニアンの固有値の和 $E = \sum_{j=1}^{N} \varepsilon^{(j)}(n_x^{(j)}, n_y^{(j)}, n_z^{(j)})$ と書ける．ここで，添字 ${}^{(j)}$ は j 番目の粒子に関する量であることを意味する．この系を温度 T の熱浴に接触させ，その平衡状態をカノニカル分布の分配関数

$$Z_{V,N}(T) = \sum \exp\left(-\frac{E}{k_B T}\right) \tag{2}$$

を用いて調べる．k_B はボルツマン定数であり，和はハミルトニアンの全ての固有状態についてとっている．この系の分配関数が，

$$Z_{V,N}(T) = \frac{1}{N!}\left[\sum_{n=1}^{\infty} \exp\left(-\frac{\varepsilon_0\, n^2}{k_B T}\right)\right]^{3N} \tag{3}$$

の形で書けることを示し，ε_0 の表式を求めよ．また，(3) に現れる因子 $1/N!$ の物理的な起源を述べよ．

【問３】

$\varepsilon_0 \ll k_B T$ を仮定して分配関数 (3) を近似的に評価し，ε_0 を用いて表せ．これに【問２】で求めた ε_0 の表式を代入し，この系のヘルムホルツの自由エネルギー $F(T,V,N) = -k_B T \ln Z_{V,N}(T)$ を求め，自由エネルギーの示量性 $F(T, \lambda V, \lambda N) = \lambda F(T,V,N)$ を示せ．導出にあたっては，

$$\text{ガウス積分の公式：} \int_{-\infty}^{\infty} dx\, e^{-x^2} = \sqrt{\pi} \tag{4}$$

$$\text{スターリングの公式：} \nu \gg 1 \text{ のとき } \nu! \sim (\nu/e)^{\nu} \tag{5}$$

を用いよ．

【問 4】

この箱を温度 T の熱浴から分離し，箱内の粒子と同種の粒子からなる温度 T，化学ポテンシャル μ の熱・粒子浴に接触させ平衡状態になったとする．このとき，箱内の系はグランドカノニカル分布の大分配関数

$$\Xi_V(T,\mu) = \sum_{N'=0}^{\infty} \exp\left(\frac{\mu N'}{k_B T}\right) Z_{V,N'}(T) \tag{6}$$

に従う．ここで，N' は箱内の粒子数である．新しい平衡状態における粒子数の期待値 $\langle N' \rangle$ が以前の平衡状態における粒子数 N と一致するような化学ポテンシャルを μ_0 とする．新しい平衡状態における粒子数の期待値 $\langle N' \rangle$ を $\Xi_V(T,\mu)$ の微分を用いて表せ．次に,【問 3】の結果を用いて，大分配関数 (6) が,

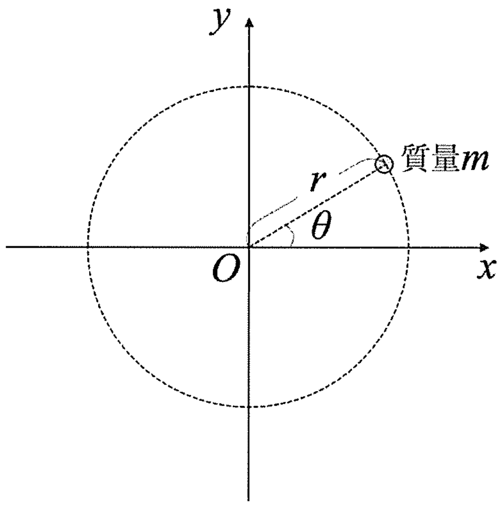
$$\Xi_V(T,\mu) = \exp\left[\left(\frac{mk_B T}{2\pi\hbar^2}\right)^{3/2} V e^{\frac{\mu}{k_B T}}\right] \tag{7}$$

と書けることを示し，μ_0 の表式を求めよ．

第３問

ある中心力ポテンシャル $U(r)$ 中で，2 次元における質点 (質量 m) の非相対論的運動を考える．以下，$\dot{x}$ のように，変数の上にドットを付与した場合は，その変数の時間微分を表すこととする．

【問１】



(1) 質点の運動エネルギー T が 2 次元極座標 (r, θ) を用いて

$$T = \frac{1}{2}m\left(\dot{r}^2 + r^2\dot{\theta}^2\right) \tag{1}$$

と書けることを示せ．ここで，直交座標 (x, y) は，

$$x = r\cos\theta \tag{2}$$
$$y = r\sin\theta \tag{3}$$

と表すことができる．

(2) ラグランジアン $\mathcal{L} = T - U$ と，ラグランジュ方程式，

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{\theta}}\right) - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \theta} = 0 \tag{4}$$
$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{r}}\right) - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial r} = 0 \tag{5}$$

から，

$$\ell = mr^2\dot{\theta} \tag{6}$$
$$E = \frac{1}{2}m\dot{r}^2 + \frac{\ell^2}{2mr^2} + U(r) \tag{7}$$

で表される角運動量 ℓ と全エネルギー E が保存することを示せ．

【問２】

ポテンシャル$U(r)$を,

$$U(r) = -\frac{k}{r} \tag{8}$$

とする. ただしkは正の実数とする.

(1) 式 (6), (7) を用いて,

$$d\theta = -\frac{du}{\sqrt{-u^2 + \frac{2mk}{\ell^2}u + \frac{2mE}{\ell^2}}} \tag{9}$$

を導出せよ. ここで$u = 1/r$である. また, 導出において$\dot{r} \geq 0$を仮定してよい.

(2) 式 (9) の積分が,

$$r = \frac{\ell^2}{mk}\frac{1}{1 + \sqrt{1 + \frac{2E\ell^2}{mk^2}}\cos(\theta - \theta_0)} \tag{10}$$

となることを示せ (θ_0は定数). ここで,

$$\int \frac{dx}{\sqrt{-x^2 + ax + b}} = -\arccos\left(\frac{2x - a}{\sqrt{a^2 + 4b}}\right) + C \tag{11}$$

という積分公式を使用してよい. ここでa, bは実数, Cは積分定数である.

(3) 質点の軌道を表す式 (10) は,

$$r = \frac{R}{1 + \varepsilon\cos\theta} \tag{12}$$

という, 離心率εを用いた二次曲線の形となっている. ここでRは正の実数である. (i) $\varepsilon = 0$, (ii) $0 < \varepsilon < 1$, (iii) $\varepsilon = 1$, (iv) $\varepsilon > 1$の各場合において, 全エネルギーEが満たす条件と, 各軌道の一般的な名称について答えよ (各軌道の方程式を改めて明示する必要はない).

第４問

【問１】

図１のように真空中の点Ｐを通って紙面に垂直に置かれた金属棒中に流れる電流が作り出す磁場を計算する．金属棒に紙面の表から裏へ向かって電流 I が流れている時, 真空の透磁率を μ_0 として以下の設問に答えよ. ただし金属棒は無限に長く, その太さは原点までの距離と比べて十分に小さく無視できるとする.

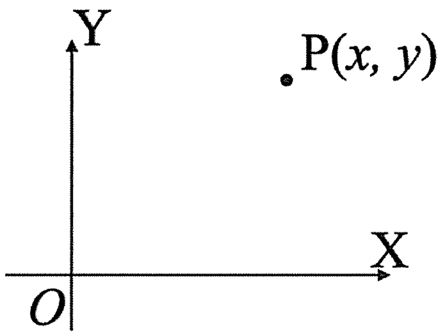


図 1:

(1) 金属棒に流れる電流が原点 O に作る磁束密度 $\vec{B^0} = (B^0_x, B^0_y)$ の絶対値 $|\vec{B^0}|$ を求めよ.
ヒント: 任意の閉曲線 ℓ に沿った磁束密度 $\vec{B}$ の接線成分の積分と閉曲線 ℓ に囲まれた領域を通る電流 I には $\oint \vec{B} \cdot d\vec{\ell} = \mu_0 I$ の関係がある.

(2) B^0_x, B^0_y が以下となることを示せ.

$$B^0_x = -\frac{\mu_0 y I}{2\pi(x^2 + y^2)}$$

$$B^0_y = \frac{\mu_0 x I}{2\pi(x^2 + y^2)}$$

(次ページの【問 2】に続く)

【問 2】

図 2 のように金属導体でできた円環が XZ 平面に平行で中心が Y 軸上となるように置かれている．円環の断面は円でその面積を a とし，その中心を点 $P(r\cos\theta, y, r\sin\theta)$ とおく．ここで θ は XZ 平面上の角度で図 2 に示した方向を正とする．図 2 の空間は真空で，時間 t に従って変化する一様な外部磁場 $\vec{B}(t) = (0, -kt, 0)$ が与えられている．ここで k は正の定数とする．

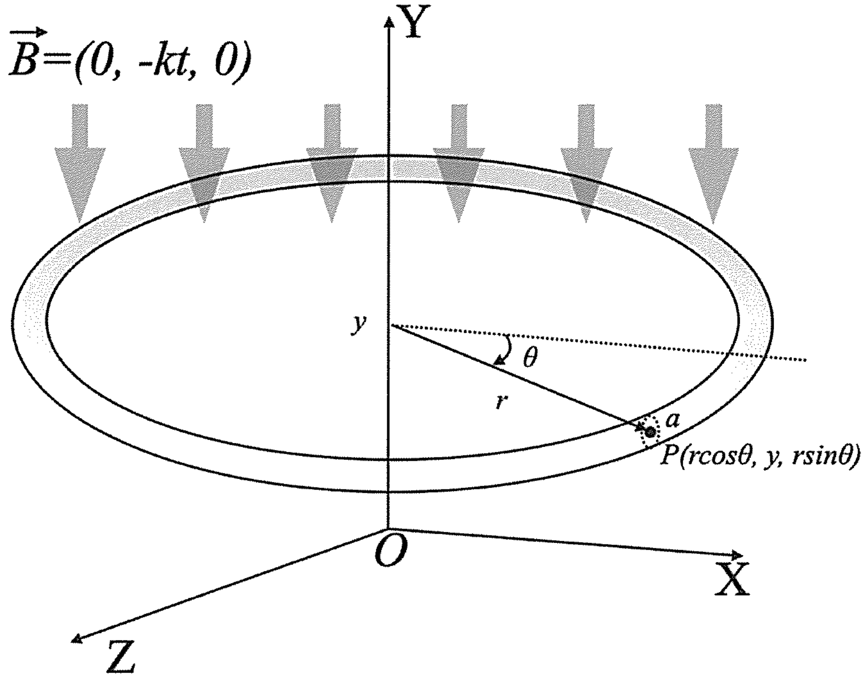


図 2:

(1) 外部磁場 $\vec{B}(t)$ の時間変化により導体内には電場が発生する．点 P に作られる電場の絶対値 $|\vec{E}|$ と x, y, z 成分 $\vec{E} = (E_x, E_y, E_z)$ を r, θ, k で表せ．
ヒント：外部磁場により発生する電場はファラデーの誘導法則 $\left(rot\vec{E} = -\frac{d\vec{B}(t)}{dt}\right)$ を，閉曲線 ℓ に囲まれた曲面 S 内の電場はストークスの定理 $(\int rot\vec{E}\cdot d\vec{S} = \oint \vec{E}\cdot d\vec{\ell})$ を満たす．

(2) 電場が発生すると電場に沿って電流が導体に流れる．点 P を含む導体断面に流れる電流 $\vec{I} = (I_x, I_y, I_z)$ を求めよ．ただし電気伝導率を σ とし，断面積 a は十分小さく断面内の電流密度と電場は一定とみなせるとして計算せよ．
ヒント：電流密度を $\vec{j}$ とおくと $\vec{j} = \sigma\vec{E}$ が成り立つ．

(3) 導体から微小角度 $d\theta$ で切り出した部分に流れる電流が原点 O に作る磁場 $d\vec{B^0} = (dB^0_x, dB^0_y, dB^0_z)$ を求めよ．
ヒント：切り出した部分の電流が作り出す磁場の絶対値 $|d\vec{B^0}|$ は以下で表すことができる．

$$|d\vec{B^0}| = \frac{1}{4\pi}\cdot\frac{\mu_0|\vec{I}|rd\theta}{r^2+y^2}$$

(4) 導体全体を流れる電流が原点 O に作る磁場 $\vec{B^0} = (B^0_x, B^0_y, B^0_z)$ を求めよ．

第5問

質量 m の粒子の全エネルギー（以下，単にエネルギーと呼ぶ）を E，運動量を $\overrightarrow{p}$，速さ（速度の大きさ）を v とすると，以下の関係式が成り立つ．

- $(mc^2)^2 = E^2 - (|\overrightarrow{p}|c)^2$
- $\beta = \frac{v}{c}, \gamma = (1-\beta^2)^{-\frac{1}{2}}$ とすると，$|\overrightarrow{p}| = mv\gamma$

ここで c は真空中の光速である．この問題では，簡単のため $c=1$ ととる自然単位系を用いる．自然単位系では，質量，運動量，エネルギーの単位として，同じ eV を用いることができる（1 eV は電子が 1 V の電圧で加速されるときに得るエネルギー）．また $c=1$ なので $\beta = v$ であり，上記の関係式は

- $m^2 = E^2 - |\overrightarrow{p}|^2$
- $|\overrightarrow{p}| = m\beta\gamma$

となる．この関係式を用いて，以下の問に答えよ．

【問１】

速さ β の荷電粒子が屈折率 n の物質を通過する際，β が物質中の光速 $\frac{1}{n}$ よりも大きければ，図 1 のように荷電粒子の進行方向から角度 θ_C （但し $\cos\theta_C = \frac{1}{\beta n}$）ずれた方向にチェレンコフ光とよばれる光が放出される．このチェレンコフ光を用いて荷電粒子の種類を識別することを考える．陽子，荷電 K 中間子 (K^+)，荷電 π 中間子 (π^+) の質量はそれぞれ 0.938 GeV, 0.494 GeV, 0.140 GeV であるが，簡単のため 1 GeV, 0.5 GeV, 0.1 GeV とせよ（1 GeV は 10^9 eV）．

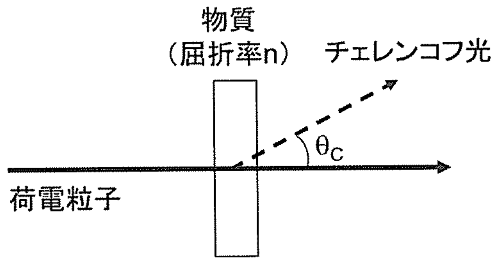


図 1:

(1) 荷電粒子の速さ β を，質量 m と運動量の大きさ $p\ (=|\overrightarrow{p}|)$ で表せ．また，運動量 1 GeV の陽子の β を有効数字 1 桁で計算せよ．運動量 1 GeV の陽子が次の物質を通過するときにチェレンコフ光は発生するか答えよ．

- サファイア（屈折率 1.8）
- 空気（屈折率 1.0003）

(2) エアロゲルは屈折率がおおむね 1.01 から 1.10 の間の透明な物質で，製法によって屈折率を自由に調節できる．このエアロゲルを使って粒子識別を行うことを考える．今，運動量が

2 GeV の K^+ と π^+ がエアロゲル内を通過するとする．π^+ が通過した場合にはチェレンコフ光が発生し，K^+ が通過した場合にはチェレンコフ光が発生しないようにして，K^+ と π^+ を識別したい．エアロゲルの屈折率はいくら以下にすればよいか．小数点以下 2 桁で答えよ．計算の際には必要に応じて以下の近似式を用いるとよい．

$$\sqrt{1+z} \sim 1 + \frac{1}{2}z \qquad (|z| \ll 1 \text{ のとき})$$

(3) K^+ と π^+ だけでなく，2 GeV の陽子と K^+ と π^+ の区別をしたい場合にはどうすればよいか，検討せよ．

【問 2】

質量 M の粒子が，質量 m_1 の粒子 1 と，質量 m_2 の粒子 2 に崩壊する場合を考える．必要に応じて，冒頭に記した関係式 $m^2 = E^2 - |\vec{p}|^2$ を用いよ．

(1) 図 2 のように，崩壊前の粒子が静止している場合を考える．崩壊後の粒子 1 のエネルギーと運動量を $E_1, \vec{p_1}$，粒子 2 のエネルギーと運動量を $E_2, \vec{p_2}$ とする．崩壊の前後でのエネルギーと運動量がそれぞれ保存することから，$M, E_1, \vec{p_1}, E_2, \vec{p_2}$ の満たすべき式を記せ．これらの式から $\vec{p_1}, \vec{p_2}$ を消去し，E_1 を M, m_1, m_2 で表わせ．

(2) 次に，図 3 のように，崩壊前の粒子が動いていて，エネルギー，運動量が $E, \vec{p}$ の場合を考える．粒子 1,2 のエネルギーと運動量を，それぞれ $E_1, \vec{p_1}, E_2, \vec{p_2}$ とするとき，崩壊前の粒子の質量 M を $E_1, \vec{p_1}, E_2, \vec{p_2}$ で表わせ．

(3) KEK で行われている Belle II 実験では，電子と陽電子を衝突させて生成した B 中間子の崩壊を調べる．B 中間子は様々な種類の崩壊をするが，重要な崩壊の例として B 中間子が J/ψ 粒子と中性の K_L 粒子に崩壊する場合がある．このとき、Belle II 検出器では，中性の K_L 粒子は検出できるものの運動量の方向だけしか測定できず，運動量の絶対値は測定できない．すなわち，図 3 で粒子 2 が K_L 粒子の場合には $\vec{p_1}$ と $\vec{p_2}$ のなす角 θ は測定できるが，粒子 2 の運動量の大きさ $|\vec{p_2}|$ は測定できない．この場合に $x = |\vec{p_2}|$ とおいて，前問の関係式から x の成り立つ二次方程式を導出せよ．これを解き，x を求めよ（複号はそのままでよい）．方程式，答えには以下の変数を含めてよい：$M, m_1, m_2, E_1, p_1 = |\vec{p_1}|$ （$\vec{p_1}$ の大きさ），θ （$\vec{p_1}$ と $\vec{p_2}$ のなす角），$A = M^2 - m_1^2 - m_2^2$.

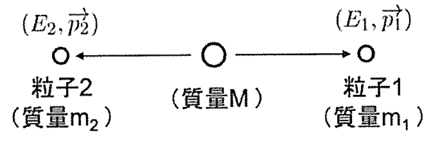


図 2:

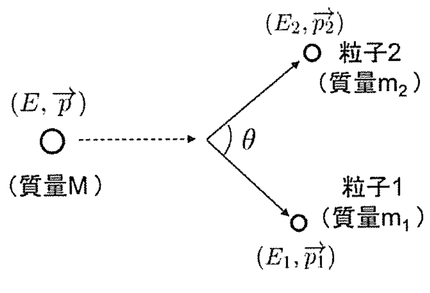


図 3:

第6問

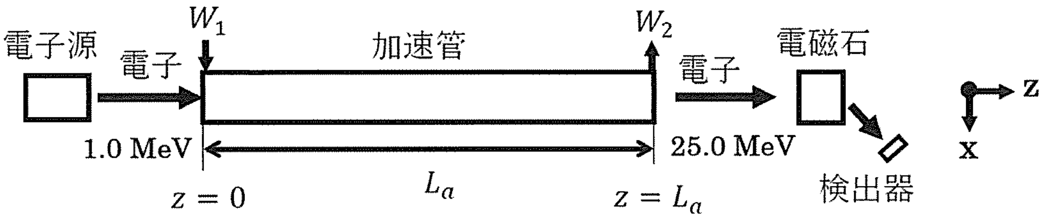


図１：小型の電子加速器の全体図

図１のような小型の電子加速器をつくりたい．電子源で生成された電子を加速管へ通し，加速管内の電場で電子を加速し，電子の運動エネルギーを 1.0 MeV(※)から 25.0 MeV まで上げる．その後，電磁石で作り出した一様磁場で電子を曲げて，その先にある検出器で電子を検出する．加速管内では，電磁波であるマイクロ波により電場を作り出す．マイクロ波は上流側から電力 W_1で入力され，加速管の中を通り，加速管の下流側から電力 W_2 ($W_1 > W_2$) で出てくる．

(※) 電子を 1 V の電圧で加速した時に得られる運動エネルギーが 1 eV(1 電子ボルト)であり，MeV＝10^6 eV である．

【問 1】

加速管にて電子の運動エネルギーを上げるために必要なマイクロ波の電力を求めたい．

図１の z 軸を電子の進む方向とし，加速管の長さをL_aとする．この時，以下の問いに答えよ．

(1) マイクロ波が加速管を通過する際，その電力は減衰し，加速管入口で電力 W_1だったものが出口では電力 W_2となる．加速管内の位置zでのマイクロ波の電力 $W(\mathrm{z})$ が，$W(\mathrm{z}) = az + b$という形で表せるとしたとき，この電力 $W(\mathrm{z})$ を W_1，W_2，L_a，z を用いて表せ．なお，加速管入口を $z = 0$ とする．

(2) この時，単位長さ当たりの電力の変化量 $\frac{dW(z)}{dZ}$ をW_1，W_2，L_aを用いて表せ．

(3) 次に，長さL_aの加速管で得られる加速電圧 $V_a \equiv -\int_0^{L_a} E\,dz$ について考える．マイクロ波の作り出す電場Eと加速管内の単位長さ当たりの電力の変化量 $\frac{dW(z)}{dZ}$ には以下の関係がある．

$$\frac{dW(z)}{dz} = \frac{-E^2}{R}$$

Rは定数であり，単位長さ当たりの抵抗を表している．この式を用いて，加速電圧 V_aを

R, W_1, W_2, L_aを用いて表せ.

(4) 運動エネルギー1.0 MeVの電子を加速管へ入射し，25.0 MeVまでエネルギーを上げることを考える. この時, 加速管へ入力するマイクロ波の電力W_1 [MW]を有効数字2桁で求めよ. ただし， $R = 56$ MΩ/m, 加速管の長さ$L_a = 2.0$ m であり，また，加速管へ入力したマイクロ波の電力は，加速管内で減衰し，加速管出口でちょうど半分になっているとする. また，電力の減衰は加速管内壁での損失が主であり，電子を加速することによる電力の減衰は，これに比べて非常に小さく無視できるものとする.

【問2】

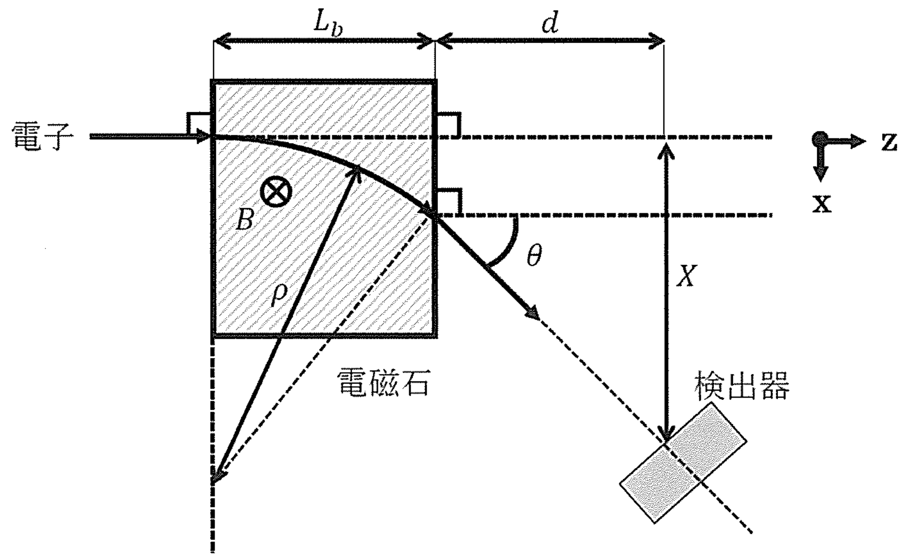


図２：加速管下流にある電磁石と検出器の付近の拡大図

加速管下流では，電磁石で作り出した一様磁場で，加速された電子を曲げて，その先にある検出器で電子を検出したい. 図２のように，z軸方向に長さL_bの領域に紙面垂直方向の一様な磁場があるとする(図２の斜線部分). そこに電子を入射したとき，電子はローレンツ力により曲率半径ρで円弧を描き，ある角度θで電磁石の磁場から射出される. この時，以下の問いに答えよ.

(1) 曲率半径ρをL_b, θを用いて表せ.

(2) 電子の運動エネルギーが25.0 MeVのとき, その運動量は25.5 MeV/cとなる(cは光速). 加速管で加速されたこの電子の進行方向を電磁石で，z軸に対し 45 度曲げて射出させる場合を考える. 一様磁場の領域の長さ$L_b = 370$ mm, 電磁石からの電子の射出角度$\theta =$

45 度としたとき，曲率半径ρ [m]，および電磁石の磁束密度B[T]を有効数字 2 桁で求めよ．ここで，運動量P [MeV/c]，磁束密度B [T]，曲率半径ρ [m]としたときに，P [MeV/c] = 300×B[T]×ρ [m]となることが知られている．これを用いてよい．

(3) 電磁石の下流，z 軸方向に距離d[m]のところに検出器を設置したい．電子は角度θだけ曲げられたため，図 2 のように x 軸方向に距離X[m] 離れた位置に置く必要がある．この距離Xをρ，θ，dを用いて表せ．

(4) 距離$d = 1.0$ m，射出角度$\theta =$ 45 度のとき，距離X[m]を有効数字 2 桁で求めよ．ここで曲率半径ρ[m]は(2)で求めた値とする．