理工学研究科　博士課程前期課程・博士課程後期課程

研究科	専攻	課程	科目名	入試方式	年度	ページ
理工学	物理学	博士前期	口述試験	学内推薦入学試験	2026	1
理工学	物理学	博士前期	外国語（英語）	一般入学試験（夏季）	2026	2
理工学	物理学	博士前期	専門科目（物理学）	一般入学試験（夏季）	2026	3
理工学	物理学	博士前期	口述試験	一般入学試験（夏季）	2026	7
理工学	物理学	博士前期	外国語（英語）	一般入学試験（春季）	2026	8
理工学	物理学	博士前期	専門科目（物理学）	一般入学試験（春季）	2026	10
理工学	物理学	博士前期	口述試験	一般入学試験（春季）	2026	14
理工学	物理学	博士後期	外国語（英語）	一般入学試験（夏季）	2026	15
理工学	物理学	博士後期	専門科目（物理学）	一般入学試験（夏季）	2026	17
理工学	物理学	博士後期	口述試験	一般入学試験（夏季）	2026	20

「評価の視点」

入学年度	2026 年度入試
研究科	理工学研究科
課程	博士課程前期課程
専攻	物理学専攻
入試方式	学内推薦入学試験
試験科目	口述試験
評価の視点	理工学研究科のアドミッションポリシーに基づき、大学理工系学部卒業程度の基礎学力を持ち、専門分野における知識と応用力を備えているかを評価します。 また、学部卒業水準以上のコミュニケーション力、問題解決力、知識獲得力、組織的行動能力、創造力、自己実現力、多様性創発力、ならびに 専門性を発揮しており、入学後も自らそれらを向上させる意志を有しているかを評価します。

※①試験問題、②解答又は解答例、③出題の意図の要素を含むものとして「評価の視点」を公表します。

「解答または解答例」・「出題の意図」

入学年度	2026 年度入試
研究科	理工学研究科
課程	博士課程前期課程
専攻	物理学専攻
入試方式	一般入学試験（夏季）
試験科目	外国語
	英語（大問Ⅰ，Ⅱ，Ⅲ）
出題の意図	**① 長文読解能力** **② 英作文能力** **③ 専門の内容を英語で書く能力**
解答または解答例	解答例 I-1 低周波数の成分を考慮することが解像度をあげるのに有効だった I-2 生きた細胞の長期イメージングは、生物物理学において極めて重要ですが、従来の光学顕微鏡では光による細胞損傷のリスクがあり、その観察には限界がありました。 I-3. high-resolution fluorescence imaging II-1 Entropy always increases in non-quasistatic processes of an adiabatic system. II-2 Due to the uncertainty principle in quantum mechanics, it is impossible to know both position and momentum precisely at the same time. III For my graduation research, I am planning to study many-body problems in quantum systems. Among these, I am particularly interested in the ordered states of low-dimensional spin systems. I plan to start with numerical calculations, and am currently studying programming languages in preparation for this. Ultimately, I will need to use a supercomputer, so in addition to programming languages, I also need to study Linux, which is the operating system used by supercomputers. As part of my personal studies, I am also reading textbooks on many-body problems in quantum systems.

「解答または解答例」・「出題の意図」

<table>
<tr><td>入学年度</td><td>2026 年度入試</td></tr>
<tr><td>研究科</td><td>理工学研究科</td></tr>
<tr><td>課程</td><td>博士課程前期課程</td></tr>
<tr><td>専攻</td><td>物理学専攻</td></tr>
<tr><td>入試方式</td><td>一般入学試験（夏季）</td></tr>
<tr><td rowspan="2">試験科目</td><td>専門科目</td></tr>
<tr><td>物理学（大問Ⅰ）</td></tr>
<tr><td>出題の意図</td><td>学部で履修する解析力学の手法について、ラグランジアンの定義やらｇランジュの運動方程式と言った基礎的な事柄の科解を求めました。合わせて、題材として用いた２重振り子の問題は多自由度の振動の問題となるため、基準振動や基準モードの考え方の科解を確認しました。</td></tr>
<tr><td>解答または解答例</td><td>

１. 速度の x,y 成分を v_x, v_y とすると、

$$v_x = \ell\dot{\theta}_1(\cos\theta_1, \sin\theta_1), \qquad v_y = \ell(\dot{\theta}_1\cos\theta_1 + \dot{\theta}_2\cos\theta_2, \dot{\theta}_1\sin\theta_1 + \dot{\theta}_2\sin\theta_2)$$

２. 前問より運動エネル—K とポテンシャルエネルギー U は、

$$K = \frac{1}{2}m\ell^2\left[2\dot{\theta}_1^2 + \dot{\theta}_2^2 + 2\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2\cos(\theta_1-\theta_2)\right], \qquad U = -mg\ell(2\cos\theta_1 + \cos\theta_2)$$

３. $L = K - U$ を、それぞれが独立な変数と考えて $\dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2, \theta_1, \theta_2$ で微分すれば、

$$\frac{\partial L}{\partial\dot{\theta}_1} = m\ell^2\left[2\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2\cos(\theta_1-\theta_2)\right], \qquad \frac{\partial L}{\partial\dot{\theta}_2} = m\ell^2\left[\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_1\cos(\theta_1-\theta_2)\right]$$
$$\frac{\partial L}{\partial\theta_1} = -m\ell^2\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2\sin(\theta_1-\theta_2) - 2mg\ell\sin\theta_1, \qquad \frac{\partial L}{\partial\theta_2} = +m\ell^2\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2\sin(\theta_1-\theta_2) - mg\ell\sin\theta_2$$

４. ラグランジュの運動方程式により、

$$\frac{d}{dt}\frac{\partial L}{\partial\dot{\theta}_1} - \frac{\partial L}{\partial\theta_1} = m\ell^2\left[2\ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2\cos(\theta_1-\theta_2) + \dot{\theta}_2^2\sin(\theta_1-\theta_2)\right] + 2mg\ell\sin\theta_1 = 0$$
$$\frac{d}{dt}\frac{\partial L}{\partial\dot{\theta}_2} - \frac{\partial L}{\partial\theta_2} = m\ell^2\left[\ddot{\theta}_1\cos(\theta_1-\theta_2) + \ddot{\theta}_2 - \dot{\theta}_1^2\sin(\theta_1-\theta_2)\right] + mg\ell\sin\theta_2 = 0$$

５. $\sin\theta \approx \theta, \cos\theta \approx 1 - \frac{1}{2}\theta^2$ として、θ の高次の項を無視することにより

$$m\ell^2(2\ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2) + 2mg\ell\theta_1 = 0, \qquad m\ell^2(\ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2) + mg\ell\theta_2 = 0$$

したがって、

$$\ddot{\theta}_1 = -\frac{g}{\ell}(2\theta_1 - \theta_2), \qquad \ddot{\theta}_2 = -\frac{2g}{\ell}(\theta_2 - \theta_1)$$

$\theta_i \propto e^{-i\omega t}$ とすれば、

$$\omega^2\begin{pmatrix}\theta_1\\ \theta_2\end{pmatrix} = \begin{pmatrix}2g/\ell & -g/\ell\\ -2g/\ell & 2g/\ell\end{pmatrix}\begin{pmatrix}\theta_1\\ \theta_2\end{pmatrix}$$

より、固有値・固有ベクトルを求めれば

$$\omega^2 = (2 \pm \sqrt{2})\,\frac{g}{\ell}$$

$\Theta = A\theta_1 + B\theta_2$ として、

$$B/A = \pm\sqrt{2} \quad \text{for} \quad \omega^2 = (2 \mp \sqrt{2})\frac{g}{\ell}$$

６. ２つの質点が、$\omega^2 = (2-\sqrt{2})\frac{g}{\ell}$ の場合は同位相で振動し、$\omega^2 = (2+\sqrt{2})\frac{g}{\ell}$ の場合は逆位相で振動する。

</td></tr>
</table>

「解答または解答例」・「出題の意図」

入学年度	2026 年度入試
研究科	理工学研究科
課程	博士課程前期課程
専攻	物理学専攻
入試方式	一般入学試験（夏季）
試験科目	専門科目
	物理学（大問 II）
出題の意図	**非相対論的な範囲で運動する電荷を題材に、電磁気学の基礎事項について問いました。電磁気学の基本的な法則の理解、それを用いた計算能力、及び、得られた結果に対して物理的な解釈が適切に与えられるかを求めています。**
解答または解答例	1. $\boldsymbol{E_1} = \frac{q_1 \boldsymbol{R}}{4\pi\varepsilon_0 R^3}$ 2. $i_z(\boldsymbol{r}, t) = \frac{q_1 v_1}{4\pi[l^2+(z-v_1 t)^2]^{\frac{3}{2}}}\left[\frac{3(z-v_1 t)^2}{l^2+(z-v_1 t)^2} - 1\right]$ 3. $B_1 = \frac{\mu_0 q_1 v_1}{4\pi}\frac{l}{[l^2+(z-v_1 t)^2]^{\frac{3}{2}}}$、$\boldsymbol{B_1} = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{q_1 \boldsymbol{v_1}\times\boldsymbol{R}}{R^3}$ 4. $\boldsymbol{F_2} = \frac{q_1 q_2}{4\pi\varepsilon_0 R^3}\boldsymbol{R} + \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{q_1 q_2}{R^3}[\boldsymbol{v_2}\times(\boldsymbol{v_1}\times\boldsymbol{R})]$ 5. $\boldsymbol{v_1}(\boldsymbol{v_2}\cdot\boldsymbol{R}) = \boldsymbol{v_2}(\boldsymbol{v_1}\cdot\boldsymbol{R})$ 物理的意味：2 つの点電荷間の電磁気力のみを考えると作用・反作用の法則が成立しない。 6. $F_2 = \frac{q_1 q_2}{4\pi\varepsilon_0 R^2}\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)$ 説明：速さvが光速cに近づくと力の大きさF_2は 0 に近づく。

「解答または解答例」・「出題の意図」

入学年度	2026 年度入試
研究科	理工学研究科
課程	博士課程前期課程
専攻	物理学専攻
入試方式	一般入学試験（夏季）
試験科目	専門科目
	物理学（大問 III）
出題の意図	**量子ビットとよばれる単純な２準位系を題材に、量子力学の基礎の理解と応用力について問いました。量子力学的な期待値、パウリ行列の計算、量子状態の時間発展などの基礎的な事項の理解、および計算力が求められています。**
解答または解答例	1. $$\boldsymbol{b} = (\sin\theta\cos\phi, \sin\theta\sin\phi, \cos\phi)$$ 2. $\boldsymbol{b}$ は, ベクトルの始点を原点に取ると極座標 (θ, ϕ) の単位球面上の点を終点とするベクトルとなる. 3. 同じパウリ行列を自乗すると I になること, 異なるパウリ行列が反可換であることを示す. 4. 3 を用いるとすぐに示せる. 5. テイラー展開してパウリ行列が自乗すると I になることを利用すると偶数次の項は全て I がかかり, 奇数次の項は全て $\boldsymbol{\sigma}\cdot\boldsymbol{n}$ がかかることがわかる. 6. $b'_x = \cos\frac{\alpha}{2}b_x - \sin\frac{\alpha}{2}b_y$, $b'_y = \sin\frac{\alpha}{2}b_x + \cos\frac{\alpha}{2}b_y$, $b'_z = b_z$ 7. $U = \exp(-i\frac{\Omega t}{2}(\cos\gamma\ \sigma_x + \sin\gamma\ \sigma_y)) = \cos\frac{\Omega t}{2}I - i\sin\frac{\Omega t}{2}(\cos\gamma\ \sigma_x + \sin\gamma\ \sigma_y)$ 8. $-ie^{i\gamma}\|\downarrow\rangle$ (位相を無視して $\|\downarrow\rangle$ も正答) 9. $\cos(\Omega t)$

「解答または解答例」・「出題の意図」

入学年度	2026 年度入試
研究科	理工学研究科
課程	博士課程前期課程
専攻	物理学専攻
入試方式	一般入学試験（夏季）
試験科目	専門科目
	物理学（大問 IV）
出題の意図	**熱・化学平衡状態にある理想ボース気体に対して，量子統計力学による計算方法を習得しているかどうかを問う問題です。特に，ボース・アインシュタイン凝縮について正しく理解していることを求めています。**
解答または解答例	1. 化学ポテンシャル μ は基底エネルギーの値以下，すなわち，零か負の値しか取ることが出来ない。「理由」エネルギー準位が離散的な場合，(1) 式で与えられるボース分布関数は，エネルギー準位を占有する粒子数の期待値を与えが，これは非負であるため。 2. 定義 (4) より，$I(a)$ は a の減少関数である。よって，(5) 式の右辺を $a=-\mu/(k_{\mathrm{B}}T)$ の関数としてプロットすると，$a=0$ で最大値 $(2\pi mk_{\mathrm{B}}T/h^2)^{3/2}I(0)$ をとり，$a>0$ では単調に減少する形となる。この曲線と $\rho=$一定を表す横一直線との交点から $a=-\mu/(k_{\mathrm{B}}T)$ の値が定まる。この値 a は T を小さくすると単調に減少するので，μ は T を小さくするにつれて，非正の領域において単調に増加する（負側から零に近付づく）。 3. 問 2 の解答のように定まる a が，温度を下げて行ったときに零となる（したがって，μ も零となる）温度が T_{c} である。(4)–(6) 式より，このとき $\rho=\left(\frac{2\pi mk_{\mathrm{B}}T_{\mathrm{c}}}{h^2}\right)^{3/2}\zeta(3/2)$ が成り立つ。この式を T_{c} について解くと $T_{\mathrm{c}}=\frac{h^2}{2\pi mk_{\mathrm{B}}}\left(\frac{\rho}{\zeta(3/2)}\right)^{2/3}$ 4. $T\leq T_{\mathrm{c}}$ では，化学ポテンシャルは恒等的に $\mu=0$ であるので， $$\rho=\rho_0(T)+\left(\frac{2\pi mk_{\mathrm{B}}T}{h^2}\right)^{3/2}\zeta(3/2)$$ 問 3 の解答より $\rho=\left(\frac{2\pi mk_{\mathrm{B}}T_{\mathrm{c}}}{h^2}\right)^{3/2}\zeta(3/2)$ であるので，$T\leq T_{\mathrm{c}}$ の場合には， $$\rho=\rho_0(T)+\left(\frac{T}{T_{\mathrm{c}}}\right)^{3/2}\rho \quad\Longleftrightarrow\quad \frac{\rho_0(T)}{\rho}=1-\left(\frac{T}{T_{\mathrm{c}}}\right)^{3/2}$$ 5. 問 3 で求めた温度 T_{c} の表式においてプランク定数 $h\to0$ とすると，$T_{\mathrm{c}}\to0$ となることから，この現象（ボース・アインシュタイン凝縮）は量子効果によるものといえる。T_{c} が高くなるのは，粒子質量 m が小さい場合（例：液体ヘリウム），あるいは，粒子数密度 ρ が大きい場合（例：中性子星内部）である。

「評価の視点」

入学年度	2026 年度入試
研究科	理工学研究科
課程	博士課程前期課程
専攻	物理学専攻
入試方式	一般入学試験（夏季）
試験科目	口述試験
評価の視点	理工学研究科のアドミッションポリシーに基づき、大学理工系学部卒業程度の基礎学力を持ち、専門分野における知識と応用力を備えているかを評価します。 また、学部卒業水準以上のコミュニケーション力、問題解決力、知識獲得力、組織的行動能力、創造力、自己実現力、多様性創発力、ならびに 専門性を発揮しており、入学後も自らそれらを向上させる意志を有しているかを評価します。

※①試験問題、②解答又は解答例、③出題の意図の要素を含むものとして「評価の視点」を公表します。

「解答または解答例」・「出題の意図」

入学年度	2026 年度入試
研究科	理工学研究科
課程	博士課程前期課程
専攻	物理学専攻
入試方式	一般入学試験（春季）
試験科目	外国語 英語（大問Ⅰ，Ⅱ，Ⅲ）
出題の意図	**① 長文読解能力** **② 英作文能力** **③ 専門の内容を英語で書く能力**
解答または解答例	I 1. アーキテクチャを１次元から2次元にすることで、イオンのサブレジスタを格子状に配置できるようになり、サブレジスタ間の相互作用に必要な通信オーバーヘッド（≒やり取りの複雑さ）を減らせると書かれています。 2. 現在一般的な一次元のトラップ構造では、多数のイオンからなる大きなレジスタを複数の小さなサブレジスタに分割すると、それらサブレジスタ間で相互作用させる際に大きな複雑さが生じてしまいます。この問題を解決するために、本研究では「量子スプリングアレイ」と呼ばれる 2 次元イオントラップアーキテクチャを導入します。これはイオンのサブレジスタを格子状に配置することで、通信に伴うオーバーヘッドを低減するものです。 3. high control low error II 1. The change in momentum is equal to the impulse applied during that time. 2. Gravitational force and Coulomb force are both proportional to the inverse of the square of the distance. **III** For my graduation research, I am planning to study many-body problems in quantum systems. Among these, I am particularly interested in the ordered states of low-dimensional spin systems. I plan to start with numerical calculations, and am currently studying programming languages in preparation for this. Ultimately, I will

	need to use a supercomputer, so in addition to programming languages, I also need to study Linux, which is the operating system used by supercomputers. As part of my personal studies, I am also reading textbooks on many-body problems in quantum systems.

「解答または解答例」・「出題の意図」

入学年度	2026 年度入試
研究科	理工学研究科
課程	博士課程前期課程
専攻	物理学専攻
入試方式	一般入学試験（春季）
試験科目	専門科目
	物理学（大問Ⅰ）
出題の意図	問題設定に即して運動方程式を導くこと、そして適当な初期条件のもとで運動方程式の解を得るという力学の基本的な問題解析の手法の習得と求めました。また、強制振動のような非斉次の微分方程式の解法の理解を求めました。
解答または解答例	1．水平方向（加速度 a と反対向き）に慣性力 ma，鉛直下向きに重力 mg，棒に沿った方向に張力 T がはたらいている。これらのつり合いから $$\tan\theta_c = \frac{a}{g}$$ 2．水平方向に慣性力 $-m\ddot{X} = m\omega^2\Delta\sin\omega t$ がはたらくので， $$mL\ddot{\theta} = -mg\sin\theta + m\omega^2\Delta\sin\omega t\,\cos\theta$$ 3．$\lvert\theta\rvert \ll 1$ より，$\sin\theta\approx\theta,\ \cos\theta\approx 1$ として，$\omega_0 = \sqrt{g/L}$ とおけば， $$\ddot{\theta} + \omega_0^2\theta = \frac{\Delta}{L}\omega^2\sin\omega t$$ 初期条件を満たす解は $$\theta(t) = A\cos\omega_0 t - \frac{\Delta}{L}\frac{\omega^2}{\omega_0^2-\omega^2}\left(\frac{\omega}{\omega_0}\sin\omega_0 t - \sin\omega t\right)$$ 4．鉛直方向に慣性力 $-m\ddot{Y} = m\omega^2\Delta\sin\omega t$ がはたらくので， $$mL\ddot{\theta} = -(mg - m\omega^2\Delta\sin\omega t)\ \ \sin\theta$$ 5．問題の指示にしたがって方程式を変形すれば、 $$\ddot{\theta}_0 + \omega_0^2\theta_0 = 0$$ $$\ddot{\theta}_1 + \omega_0^2\theta_1 = \omega^2\sin\omega t\ \ \theta_0$$ 6．θ_0 に対する初期条件を考慮すれば $$\theta_0(t) = A\cos\omega_0 t$$ θ_1 に対する初期条件を考慮すれば $$\theta_1(t) = \frac{A}{2}\frac{\omega}{\omega+2\omega_0}\left[\frac{\omega+\omega_0}{\omega_0}\sin\omega_0 t - \sin(\omega+\omega_0)t\right] + \frac{A}{2}\frac{\omega}{\omega-2\omega_0}\left[\frac{\omega-\omega_0}{\omega_0}\sin\omega_0 t - \sin(\omega-\omega_0)t\right]$$

「解答または解答例」・「出題の意図」

入学年度	2026 年度入試
研究科	理工学研究科
課程	博士課程前期課程
専攻	物理学専攻
入試方式	一般入学試験（春季）
試験科目	専門科目 物理学（大問 II）
出題の意図	・アドミッションポリシーに基づき、大学理工系学部卒業程度の基礎学力を持ち、専門分野における知識と応用力を備えているかについて、電磁気学の基礎方程式であるマクスウェル方程式を取り扱い、高周波電流に対する応用問題に適用して解答できるかを見ている。
解答または解答例	1. 式(5)と$\boldsymbol{B}=\mu\boldsymbol{H}$を式(3)に代入すると、$(1/\sigma)\nabla\times\boldsymbol{j_e}=-\mu(\partial\boldsymbol{H}/\partial t)$ (10)。式(4)の両辺を時間微分したものを、式(10)に代入すると、$\mu(\partial\boldsymbol{j}_e/\partial t)=\mu\nabla\times(\partial\boldsymbol{H}/\partial t)=-(1/\sigma)\nabla\times(\nabla\times\boldsymbol{j_e})$（11)。ベクトル積の公式と$\nabla\cdot\boldsymbol{j}_e=0$を用いると、式(11)から式(6)が示される。 2. 電流はz軸方向に流れているので、$j_x=j_y=0$。$\nabla\cdot\boldsymbol{j}_e=0$から$\partial j_z/\partial z=0$なので、$j_z$は$z$に依存しない。 3. $d^2j_z(r)/dr^2+(1/r)[dj_z(r)/dr]-i\sigma\mu\omega j_z(r)=0$ 4. $k^2=-i\sigma\mu\omega$ 5. 問 4 の結果より、オイラーの公式から$k=(1-i)/\delta$（$\delta=\sqrt{2/\sigma\mu\omega}$ ）。したがって、導体表面からの深さℓに対して、$j_z\propto\exp(-\ell/\delta)$となる。すなわち、$j_z$は$\ell$に対して指数関数的に減衰する。また、$\omega$が大きいほどその減衰の程度は大きい。

「解答または解答例」・「出題の意図」

入学年度	2026年度入試
研究科	理工学研究科
課程	博士課程前期課程
専攻	物理学専攻
入試方式	一般入学試験（春季）
試験科目	専門科目
	物理学（大問III）
出題の意図	**1 次元調和振動子ポテンシャルに空間座標の 1 次の項が加わった場合の基底状態を求める問題です。前半は 1 次元調和振動子中の粒子に関する基礎的理解を問うもので、後半は空間座標の 1 次項が加わったポテンシャル中の基底状態が、昇降演算子の固有状態として表されることを示します。調和振動子ポテンシャルという量子力学の基本問題を正しく理解し、それを応用できる能力を評価することが目的です。**

解答または解答例

(a)

$$\hat{H}_0 = \hbar\omega\left(\hat{n} + \frac{1}{2}\right)$$

(b) 交換関係の公式 $[\hat{A}, \hat{B}\hat{C}] = [\hat{A}, \hat{B}]C + \hat{B}[\hat{A}, \hat{C}]$ を用いる。

$$[\hat{a}, \hat{n}] = \hat{a}, \quad [\hat{a}^\dagger, \hat{n}] = -\hat{a}^\dagger$$

(c) (b) で導出した交換関係から得られる式, $\hat{n}\hat{a} = \hat{a}\hat{n} - \hat{a}$, $\hat{n}\hat{a}^\dagger = \hat{a}^\dagger\hat{n} + \hat{a}^\dagger$ を用いる。

$$\hat{n}(\hat{a}|n\rangle) = (n-1)(\hat{a}|n\rangle), \quad \hat{n}(\hat{a}^\dagger|n\rangle) = (n+1)(\hat{a}^\dagger|n\rangle)$$

(d) (c) で $\hat{a}|n\rangle \propto |n-1\rangle$, $\hat{a}^\dagger|n\rangle \propto |n+1\rangle$ を示したので, $\hat{a}|n\rangle = c|n\rangle$, $\hat{a}^\dagger|n\rangle = c'|n+1\rangle$ とおいて定数 c, c' を求める。

$$(\langle n|\hat{a}^\dagger)(\hat{a}|n\rangle) = \langle n|\hat{n}|n\rangle = n = c^2, \quad (\langle n|\hat{a})(\hat{a}^\dagger|n\rangle) = \langle n|(\hat{n}+1)|n\rangle = n + 1 = c'^2$$

よって, $c = \sqrt{n}$, $c' = \sqrt{n+1}$ と求まる。

(e) 基底状態 $|\phi\rangle$ は $\hat{b}|\phi\rangle = 0$ を満たす。$\hat{b} = \hat{a} + \delta$ を用いると $(\hat{a} + \delta)|\phi\rangle = 0$。したがって, $\hat{a}|\phi\rangle = -\delta|\phi\rangle$。固有値は $-\delta$ となる。

(f)

$$\hat{a}|\phi\rangle = \sum_{n=1}^{\infty} C_n\sqrt{n}|n-1\rangle = \sum_{n=0}^{\infty}\sqrt{n+1}C_{n+1}|n\rangle = \sum_{n=0}^{\infty}(-\delta)C_n|n\rangle$$

式 (17) の最後の 2 式を比べ, $|n\rangle$ の係数が等しいことから (9) 式が得られる。

(g) (f) で得られた漸化式を繰り返し用いる。

$$C_n = \frac{-\delta}{\sqrt{n}}C_{n-1} = \frac{(-\delta)^2}{\sqrt{n(n-1)}}C_{n-2} = \cdots = \frac{(-\delta)^n}{\sqrt{n!}}C_0$$

(h) (g) で得られた C_n を用いると $|\phi\rangle$ は以下のように求まる。

$$|\phi\rangle = e^{-\delta^2/2}\sum_{n=0}^{\infty}\frac{(-\delta)^n}{\sqrt{n!}}|n\rangle$$

(i) 状態 $|\phi\rangle$ は, $\alpha = 0$ のときの基底状態 $|0\rangle$ を x 軸上で $-x_0$ だけ平行移動させたものである。

「解答または解答例」・「出題の意図」

入学年度	2026 年度入試
研究科	理工学研究科
課程	博士課程前期課程
専攻	物理学専攻
入試方式	一般入学試験（春季）
試験科目	専門科目
	物理学（大問IV）
出題の意図	1次元調和振動子からなる量子系の熱平衡状態に関する問題です。まず熱力学関係式を導出させ，それを用いてミクロカノニカル分布に対して絶対温度を導入します。ポテンシャル零のボース・アインシュタイン分布を導出させ，さらに、ヘルムホルツの自由エネルギーを算出することにより，カノニカル分布やグランド・カノニカル分布の形式との関連も意識させます。熱力学と統計力学の基礎を正しく理解していることを求めています。
解答または解答例	1. 熱力学第1法則より，内部エネルギーの変化は，$dE = \delta Q - pdV$. 熱力学第2法則より $dS = \delta Q/T$. この2式より $dS = (1/T)dE + (p/T)dV$ を得る。これを S の全微分の式と見なすと，右辺第1項より (1) 式が導かれる。 2. S の E による偏微分は (3) 式より $\dfrac{\partial S}{\partial E} = \dfrac{k_B}{h\nu}\log\dfrac{\frac{E}{h\nu}+\frac{N}{2}}{\frac{E}{h\nu}-\frac{N}{2}}$. これを (1) 式に従って $1/T$ と等値すると，(A) $= \dfrac{\frac{E}{h\nu}+\frac{N}{2}}{\frac{E}{h\nu}-\frac{N}{2}}$ が得られる。 3. (4) 式を E について解くと，(B) $= \dfrac{Nh\nu}{e^{h\nu/k_BT}-1}$ と定まる。 4. (5) 式より，$\dfrac{E}{h\nu} - \dfrac{N}{2} = \dfrac{N}{e^{h\nu/k_BT}-1}$, $\dfrac{E}{h\nu} + \dfrac{N}{2} = \dfrac{Ne^{h\nu/k_BT}}{e^{h\nu/k_BT}-1}$ これらを (3) 式に代入すると，$S = \dfrac{1}{T}\times\dfrac{Nh\nu}{e^{h\nu/k_BT}-1} - Nk_B\log(1-e^{-h\nu/k_BT})$. よって，(C) $= \log(1-e^{-h\nu/k_BT})$ 5. (7) 式に (5) 式と (6) 式を代入すると $F = -Nk_BT\log\left(\dfrac{e^{-h\nu/2k_BT}}{1-e^{-h\nu/k_BT}}\right)$. よって，$Z = \dfrac{e^{-h\nu/2k_BT}}{1-e^{-h\nu/k_BT}}$. 等比級数の公式より，これは $Z = \sum_{m=0}^{\infty} e^{-(m+1/2)h\nu/k_BT}$ に等しい。したがって，$f(m) = m + 1/2$.

「評価の視点」

入学年度	2026 年度入試
研究科	理工学研究科
課程	博士課程前期課程
専攻	物理学専攻
入試方式	一般入学試験（春季）
試験科目	口述試験
評価の視点	理工学研究科のアドミッションポリシーに基づき、大学理工系学部卒業程度の基礎学力を持ち、専門分野における知識と応用力を備えているかを評価します。 また、学部卒業水準以上のコミュニケーション力、問題解決力、知識獲得力、組織的行動能力、創造力、自己実現力、多様性創発力、ならびに 専門性を発揮しており、入学後も自らそれらを向上させる意志を有しているかを評価します。

※①試験問題、②解答又は解答例、③出題の意図の要素を含むものとして「評価の視点」を公表します。

中央大学大学院理工学研究科　2026 年度入学試験　【出題の意図】

試験方式	一般入学試験（夏季）
課程	博士課程後期課程
専攻	物理学専攻

※本件についての質問・照会には、個別に回答することはいたしません。

一般入学試験では、アドミッションポリシーにおける評価項目に基づき、博士後期課程を修めるにあたり必要とされる基礎知識と専門知識を問う試験を実施しています。

各問題については、以下のような観点から出題しています。

外国語　英語（大問Ⅰ、Ⅱ）

大問　Ⅰ
大学院博士後期課程で扱う専門的内容の標準的なテキストや論文をスムーズに読み解くための英文読解力を問いました。

大問　Ⅱ
論文作成や学会発表で必要とされる英文構成力を問いました。

中央大学大学院理工学研究科　2026 年度入学試験　【解答・解答例】

試験方式	一般入学試験（夏季）
課程	博士課程後期課程
専攻	物理学専攻
科目	外国語　英語（大問Ⅰ、Ⅱ）

※本件についての質問・照会には、個別に回答することはいたしません。

※公開する解答・解答例には、別解がある場合があります。

大問Ⅰ

解答・解答例：省略

【 出題の意図 】

博士後期課程で扱う専門的内容の標準的なテキストや論文をスムーズに読み解くための英文読解力を問う。

大問Ⅱ

解答・解答例：省略

【 出題の意図 】

博士後期課程で行う論文作成や学会発表で必要とされる英文構成力を問う。

中央大学大学院理工学研究科　2026 年度入学試験　【出題の意図】

試験方式	一般入学試験（夏季）
課程	博士課程後期課程
専攻	物理学専攻

※本件についての質問・照会には、個別に回答することはいたしません。

一般入学試験では、アドミッションポリシーにおける評価項目に基づき、博士後期課程を修めるにあたり必要とされる基礎知識と専門知識を問う試験を実施しています。

各問題については、以下のような観点から出題しています。

専門科目　物理学（大問Ⅰ、Ⅱ）

大問 Ⅰ
大学院博士後期課程で扱う専門的内容の標準的な知識として Dirac 場に関する基礎知識とカイラル対称性、ネーターの定理に関する基礎知識を問いました。

大問Ⅱ
大学院博士後期課程で必要とされる専門用語、および大学院博士後期課程での専門科目に関連する一般的な物理学の専門用語に関する知識を問いました。

中央大学大学院理工学研究科　2026 年度入学試験　【解答・解答例】

試験方式	一般入学試験（夏季）
課程	博士課程後期課程
専攻	物理学専攻
科目	専門科目　物理学（大問 I 、II）

※本件についての質問・照会には、個別に回答することはいたしません。

※公開する解答・解答例には、別解がある場合があります。

大問 I

1. $\mathcal{L} = \bar{\psi}(i\gamma^\mu\partial_\mu - m)\psi$

$$\delta\mathcal{L} = (\delta\bar{\psi})(i\gamma^\mu\partial_\mu - m)\psi + \bar{\psi}(i\gamma^\mu\partial_\mu - m)\delta\psi$$

$$= (\delta\bar{\psi})(i\gamma^\mu\partial_\mu - m)\psi + \left[(-i\partial_\mu\bar{\psi}\gamma^\mu - m\bar{\psi}\right]\delta\psi$$

$$+(全微分項)$$

∴ Euler-Lagrange 方程式は

$$(i\gamma^\mu\partial_\mu - m)\psi = 0 \quad ① \quad \cdots \boxed{答}$$

$$i\partial_\mu\bar{\psi}\gamma^\mu + m\bar{\psi} = 0 \quad ②$$

2. $(\gamma^5)^\dagger = -i(\gamma^3)^\dagger(\gamma^2)^\dagger(\gamma^1)^\dagger(\gamma^0)^\dagger = +i\gamma^3\gamma^2\gamma^1\gamma^0$

$$= +i\gamma^1\gamma^0\gamma^3\gamma^2 = +i\gamma^0\gamma^1\gamma^2\gamma^3$$

ただしここで $\{\gamma^\mu, \gamma^\nu\} = 2\eta^{\mu\nu}$ を用いた。

3. $m=0$ のとき $\mathcal{L} = \bar{\psi}i\gamma^\mu\partial_\mu\psi$.

カイラル変換は $\psi \to e^{i\gamma^5\theta}\psi$, $\psi^\dagger \to e^{-i\gamma^5\theta}\psi^\dagger$.

よって $\bar{\psi} \to \psi^\dagger e^{-i\gamma^5\theta}\gamma^0 = \psi^\dagger\gamma^0 e^{+i\gamma^5\theta} = \bar{\psi}e^{+i\gamma^5\theta}$.

$\because \{\gamma^0, \gamma^5\} = 0$

このとき カイラル変換後の Lagrangian 密度 $\mathcal{L}'$ は

$$\mathcal{L}' = \bar{\psi}e^{+i\gamma^5\theta}i\gamma^\mu\partial_\mu(e^{i\gamma^5\theta}\psi)$$

$$= \bar{\psi}i\gamma^\mu e^{-i\gamma^5\theta}e^{i\gamma^5\theta}\partial_\mu\psi = \bar{\psi}i\gamma^\mu\partial_\mu\psi = \mathcal{L}$$

よって $m=0$ の場合の $\mathcal{L}$ は カイラル変換のもとで不変である。

4. $\partial_\mu J^{\mu 5} = \partial_\mu (\bar{\psi}\gamma^\mu\gamma^5\psi)$

$$= (\partial_\mu\bar{\psi})\gamma^\mu\gamma^5\psi + \bar{\psi}\gamma^\mu\gamma^5\partial_\mu\psi$$

$$= \partial_\mu\bar{\psi}\gamma^\mu\gamma^5\psi - \bar{\psi}\gamma^5\gamma^\mu\partial_\mu\psi \quad ③$$

$m=0$のときDirac方程式は

$$i\gamma^\mu\partial_\mu\psi = 0$$

$$i\partial_\mu\bar{\psi}\cdot\gamma^\mu = 0$$

これらを③に代入すると $\partial_\mu J^{\mu 5} = 0$.

5. カイラル変換のもとで

$$m\bar{\psi}\psi \to m\bar{\psi}e^{+i\gamma^5\theta}e^{i\gamma^5\theta}\psi$$

$$= m\bar{\psi}e^{2i\gamma^5\theta}\psi \neq 0$$

よって $m\bar{\psi}\psi$ はカイラル変換のもとで不変ではない。

6. $m\neq 0$ の場合のDirac方程式は

$(i\gamma^\mu\partial_\mu - m)\psi = 0$ ① よって $\gamma^\mu\partial_\mu\psi = -im\psi$

$i\partial_\mu\bar{\psi}\gamma^\mu + m\bar{\psi} = 0$ ② よって $\partial_\mu\bar{\psi}\gamma^\mu = im\bar{\psi}$

$$\therefore \partial_\mu J^{\mu 5} = \partial_\mu\bar{\psi}\gamma^\mu\gamma^5\psi - \bar{\psi}\gamma^5\gamma^\mu\partial_\mu\psi$$

$$= im\bar{\psi}\gamma^5\psi + im\bar{\psi}\gamma^5\psi$$

$$= 2im\bar{\psi}\gamma^5\psi \quad \cdots \boxed{\text{答}}$$

大問 II

解答・解答例：省略

【 出題の意図 】

博士後期課程で必要とされる専門用語、および博士後期課程での専門に関連する一般的な物理学の専門用語についての基礎的な理解を問う。

「評価の視点」

入学年度	2026 年度入試
研究科	理工学研究科
課程	博士課程後期課程
専攻	物理学専攻
入試方式	一般入学試験（夏季）
試験科目	口述試験
評価の視点	理工学研究科のアドミッションポリシーに基づき、博士課程前期課程修了程度の基礎学力を持ち、それを発展させる能力を有しているかを評価します。 また、学部卒業水準以上のコミュニケーション力、問題解決力、知識獲得力、組織的行動能力、創造力、自己実現力、多様性創発力、ならびに 専門性を発揮しており、入学後も自らそれらを向上させる意志を有しているかを評価します。

※①試験問題、②解答又は解答例、③出題の意図の要素を含むものとして「評価の視点」を公表します。