九州大学理学部物理学科（物理学コース）

令和８年度 第３年次編入試験

物理学

令和７年９月６日（土）　９：００-１２：００

注意事項

(1) 試験開始の合図があるまでこの冊子を開かないこと.

(2) 問題冊子は表紙を含めて１１ページ（空白のページを除く）で, 問題は [I] から [IV] まである.

(3) 全ての解答用紙に, 受験番号を記入すること.

(4) 解答は指定された解答用紙に記入すること. 特に指定のない場合には, 裏面を使って解答してもよい. 下書きには, 問題冊子の余白や裏面などを利用し, 解答用紙の余白には下書きをしないこと.

(5) 解答用紙に書ききれない場合や, 用紙を取り替えたい場合は, 試験監督に申し出ること.

(6) 問題冊子は持ち帰ってよい.

[I] (80点)

[I-1]

太陽（質量 M）を周回する惑星（質量 m）の運動を考える。太陽と惑星は質点とみなし，太陽は静止しているものとする。惑星は，太陽を焦点の一つとする楕円上を運動する。図 I-1 に，太陽を原点 O として惑星の楕円軌道を示す。楕円の長軸方向に x 軸，短軸方向に y 軸をとり，楕円の長軸の長さを $2a$，短軸の長さを $2b$ とする。太陽から近日点までの距離を R_1，遠日点までの距離を R_2 とする。万有引力定数を G とする。

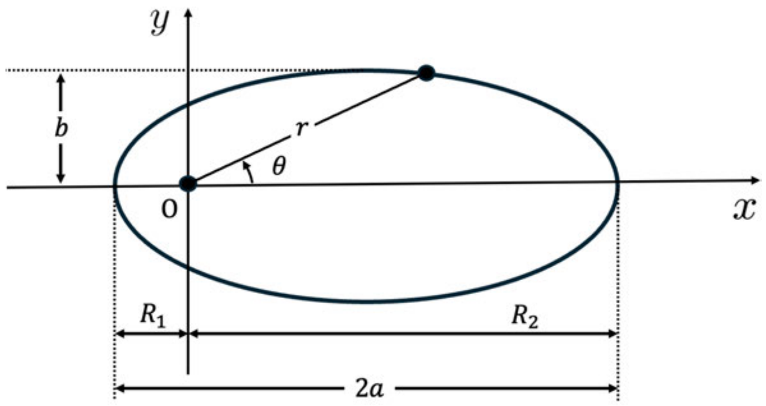


図 I-1

惑星の位置を二次元極座標系 (r, θ) で表す。惑星に加わる r 及び θ 方向の力を，それぞれ F_r と F_θ とすると，惑星の運動方程式は以下のようになる。

$$m(\ddot{r} - r\dot{\theta}^2) = F_r$$
$$m\frac{1}{r}\frac{d}{dt}(r^2\dot{\theta}) = F_\theta$$

以下の問いに答えよ。

(1) 太陽と惑星を結ぶ線分が単位時間に通過する面積（面積速度）が，時間によらず一定であることを示せ。

(2) 惑星の軌道が真円 $(a = b)$ の場合，公転周期を T とすると，T の 2 乗が a の 3 乗に比例することを示せ。

以下では，惑星の軌道が楕円 $(a > b)$ となる場合を考える。

(3) 惑星が近日点を通過するときの速さを v_1，遠日点を通過するときの速さを v_2 とする。近日点における面積速度 $\dot{S}_1$ を R_1 と v_1 を用いて表せ。また，遠日点における面積速度 $\dot{S}_2$ を R_2 と v_2 を用いて表せ。

(4) 近日点と遠日点における惑星の力学的エネルギーを考え，エネルギー保存則を面積速度 $\dot{S}$，G，M，m，R_1，R_2 を用いて表せ。

(5) 面積速度 $\dot{S}$ を G，M，R_1，R_2 を用いて表せ。

(6) 惑星の公転周期を T とすると，T の 2 乗が a の 3 乗に比例することを示せ。楕円の幾何学的性質として $R_1 R_2 = b^2$ を用いて良い。

[I-2]

x 軸上を運動する質点が，原点のまわりで減衰振動をする場合を考える。時刻 t における質点の変位 $x(t)$ は微分方程式

$$\ddot{x}(t) + 2\gamma\dot{x}(t) + \omega^2 x(t) = 0 \tag{A}$$

に従うものとする。ここに，$\dot{x}(t)$ と $\ddot{x}(t)$ は速度および加速度であり，γ と ω は正の定数である。さらに，$\omega > \gamma$ とする。

(1) 複素定数 λ で指定される関数 $e^{\lambda t}$ が式 (A) を満たすとき，$\lambda^2 + 2\gamma\lambda + \omega^2 = 0$ であることを示せ。

(2) (1) の 2 次方程式の 2 つの解を λ_+ と λ_- とする。2 つの複素定数 c_+ と c_- で指定される関数 $c_+ e^{\lambda_+ t} + c_- e^{\lambda_- t}$ は式 (A) を満たすが，この関数が変位 $x(t)$ を表すためには，さらに c_+ と c_- がある関係を満たす必要がある。この関係を答えよ。

(3) $t = 0$ において $x(0) = x_0$ および $\dot{x}(0) = 0$ のとき，変位は $x(t) = e^{-\gamma t}\xi(t)$ と書ける。この $\xi(t)$ を求めよ。ただし，x_0 は正の定数である。

次に，質点が周期的に変動する外力を受けて，十分に時間が経過したのちに，強制振動する場合を考える。$x(t)$ は

$$\ddot{x}(t) + 2\gamma\dot{x}(t) + \omega^2 x(t) = f_0 \cos(\Omega t)$$

に従うものとする。ここに，f_0 と Ω は正の定数である。

(4) 強制振動の解として，外力の振動から位相 ϕ だけ遅れた振動 $x(t) = A\cos(\Omega t - \phi)$ を考える。ここに，ϕ と A は定数である。$\tan\phi$ と A をそれぞれ，γ，ω，Ω，f_0 のうち必要なものを用いて表せ。以下の三角関数の公式を用いてよい。

$$\begin{aligned} \sin(\alpha \pm \beta) &= \sin\alpha\cos\beta \pm \cos\alpha\sin\beta \quad (\text{複号同順}) \\ \cos(\alpha \pm \beta) &= \cos\alpha\cos\beta \mp \sin\alpha\sin\beta \quad (\text{複号同順}) \end{aligned}$$

(5) 外力を調節して，Ω の値を連続的に変化させる場合を考える。以下では，$\omega \gg \gamma$ とする。A^2 を Ω の関数として見ると，$\Omega \approx \omega$ で最大値（A^2_{max}）のピークを持つ，共鳴を表す関数となる。この最大値は近似的に $A^2_{max} \approx A^2(\Omega = \omega)$ と表せる。A^2 の値が A^2_{max} の半分となるときの Ω の値を Ω_1 と Ω_2 とする（$\Omega_1 < \Omega_2$）。半値幅 $\Omega_2 - \Omega_1$ が，$\Omega_2 - \Omega_1 \approx 2\gamma$ となることを示せ。

[II] (80点)

[II-1]

図 II-1 のように直交した x, y 軸をとり，それらに直交し紙面手前向きの z 軸を考える。z 軸上に太さの無視できる陰極を置き，これを中心軸とした半径 R_0 の円筒状の陽極を置く。両極間には一定の電圧 V を与える。z 軸方向正の向きに磁束密度の大きさが B の一様な静磁場をかける。このとき，陰極から初速度 0 で放出された電子の運動は紙面内の運動となる。円筒座標 (r, θ, z) を用いて電子の運動を調べる。円筒（陽極）および陰極線は十分長く，円筒内の静電ポテンシャルは r のみの関数 $\phi(r)$ とする。また，電子の質量を m，電荷を $-e$ とする。以下の問いに答えよ。

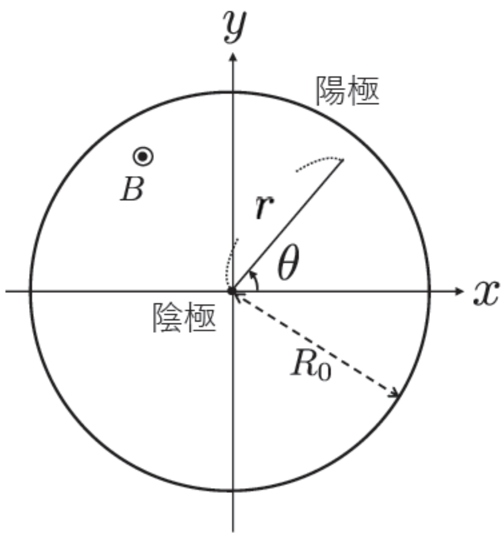


図 II-1

(1) 陽極の内側の電場ベクトルが $\phi(r)$ を用いてどのように書けるか，円筒座標でのベクトル成分を示せ。ただし，$\phi(r)$ の具体的な表式を求める必要はない。

(2) 円筒座標の r と θ 方向の力 F_r と F_θ を求めて，力学の大問 [1-1] で与えられた 2 次元極座標の運動方程式を用いて次のように書けることを示せ。

$$m(\ddot{r} - r\dot{\theta}^2) = -e\left(-\frac{d\phi}{dr} + Br\dot{\theta}\right)$$

$$\frac{m}{r}\frac{d}{dt}(r^2\dot{\theta}) = eB\dot{r}$$

(3) $\left(m\dot{\theta} - \frac{eB}{2}\right)r^2$ が一定に保たれることを示せ。また，初期条件を用いて $\dot{\theta}$ の値を求めよ。

以下では，$\dot{\theta}$ は前問 (3) で求めた値をとるものとし，$\dot{\theta} = \omega$ と書く。

(4) 次の関係式が成り立つことを示せ。

$$m\ddot{r} = e\frac{d\phi}{dr} - m\omega^2 r$$

(5) 前問 (4) の式に $\dot{r}$ をかけた式は，$\dfrac{dH}{dt} = 0$ のように書ける。この H を求めよ。ただし $\dfrac{d\phi}{dr}\dot{r}(t) = \dfrac{d\phi(r(t))}{dt}$ と考えてよい。

(6) 前問 (5) で求めた H は時間によらない定数であり，その値は，$\phi(0) = 0$ とすれば初期条件から 0 となる。この H を用いて電子が陽極に衝突しない限界の磁束密度の大きさを求めよ。ただし $\phi(R_0) = V$ である。答えは m, e, V, R_0 を用いて表せ。

[II-2]

図 II-2 のように z 軸と平行な一様電場（電場の大きさ E_0）の中に，半径 a の導体球が置かれている。導体球の中心を原点 O にとり，点 P の原点からの距離を r，z 軸からの角度を θ とする。導体球の電位を 0 とする。ただし，導体球の外部は真空であって，真空の誘電率を ε_0 とする。以下の問いに答えよ。

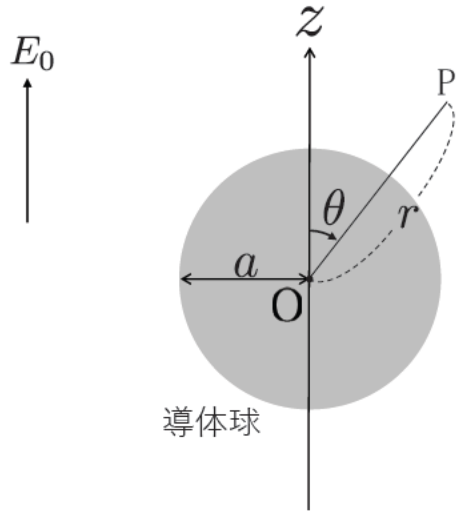


図 II-2

(1) 導体球内では電位と電場がどのようになっているか説明せよ。

(2) 導体球がなく一様電場のみ存在する場合，位置 (r, θ) における電位 $\phi_\infty(r, \theta)$ を E_0, r, θ を用いて表せ。ただし，原点 O での電位を 0 とする。

(3) 再び導体球がある場合を考える。$r \gg a$ における電位は前問の $\phi_\infty(r, \theta)$ に漸近する。また，導体球の周りの点 P における電位 $\phi(r, \theta)$ は，多重極展開により次のように書ける。係数 B_0, A_1, B_1 を求めよ。

$$\phi(r, \theta) = \frac{B_0}{r} + A_1 r \cos\theta + \frac{B_1}{r^2} \cos\theta$$

(4) 導体球の外部の電場 $\boldsymbol{E}$ について極座標での r 方向と θ 方向の成分を求め，そのおおよその様子を電気力線によって図示せよ。ただし，電気力線と導体球表面の関係に注意して図示すること。

(5) 導体球表面に誘起される面電荷密度 σ を求めよ。

(6) この導体球表面に誘起される電荷が作る電気双極子モーメントの大きさを求めよ。

[II-3]

図 II-3 のように，真空中に置いた無限に長い直線状の導線に大きさ I の定常電流を矢印の向きに流す。一辺の長さが a の正方形の導線を電流と同じ平面内に辺 AB が電流と平行になるように置く。電流と辺 AB との距離を r とする。真空中の透磁率を μ_0 とする。以下の問いに答えよ。

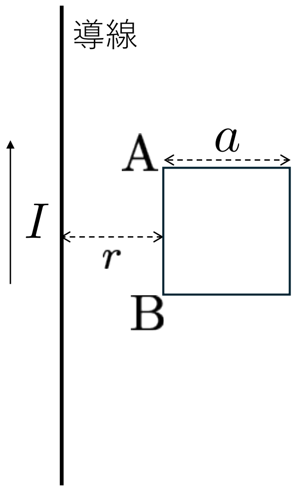


図 II-3

(1) 電流が距離 r の位置に作る磁束密度の大きさを求めよ。

(2) 正方形の導線で囲まれた領域を貫く磁束 Φ を求めよ。

(3) 正方形の導線を紙面内で右方向に平行移動させ，時刻 t における電流と辺 AB の距離を $r(t)$ とする。正方形の導線の回路に発生する起電力の大きさを求めよ。

(4) 正方形の導線は，電気抵抗率が σ，断面積が S であるとする。前問の起電力に対して，正方形導線に流れる電流の大きさを求めよ。また，この電流の向きが，時計まわりか反時計回りかを答えよ。ただし，導線の太さは，r と a に対して無視できるものとする。また，正方形の導線に流れる電流が作る磁場も無視できるとする。

[III] (40 点)

圧力 p，体積 V，温度 T の 1 モルの理想気体を考える。気体定数を R とし，扱う状態変化は準静的とする。以下の問いに答えよ。

(1) この気体の温度 T を一定に保ったまま，体積を V_1 から V_2 まで等温膨張させるとき，この気体が外になす仕事を求めよ。

(2) 一般に熱力学の関係式として

$$\left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_T = T\left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_V - p$$

が成り立つ。ここで U は内部エネルギーである。これを使って，この気体を等温膨張させるときに内部エネルギーの変化が 0 であることを示せ。

(3) この気体の温度 T を一定に保ったまま，体積を V_1 から V_2 まで等温膨張させるとき，この気体が外から受け取る熱量を求めよ。

(4) 前問の設定で，気体のエントロピー S の変化を求めよ。

(5) 温度一定での体積弾性率（等温体積弾性率）は

$$k_T = -V\left(\frac{\partial p}{\partial V}\right)_T$$

と定義される。この気体の等温体積弾性率 k_T を求めよ。

理想気体を断熱変化させると，p, V はポアソンの法則 ($pV^\gamma =$ 一定) を満たす。ここで γ は比熱比である。

(6) 断熱変化での体積弾性率（断熱体積弾性率) は

$$k_S = -V\left(\frac{\partial p}{\partial V}\right)_S$$

と定義される。この気体の断熱体積弾性率 k_S を求め， p, γ を使って表せ。

(7) 一般に気体の密度 ρ，体積弾性率 k と音速 v の間には

$$v^2 = \frac{k}{\rho}$$

の関係がある。標準状態（0 ℃，１気圧）での空気の圧力は $p_0 = 1.0 \times 10^5\,\mathrm{Pa}$, 密度は $\rho_0 = 1.3\,\mathrm{kg/m^3}$ である。なお，標準状態の空気は理想気体と見なしてよい。

(a) SI 単位系での圧力の単位 [Pa] を， 質量 [kg]，長さ [m]，時間 [s] の単位を用いて書き換えよ。

(b) 等温体積弾性率 k_T を使って，標準状態の空気に対する k_T/ρ の数値を求めよ。

(c) 空気は近似的に 2 原子分子とみなせるので $\gamma = 1.4$ となる。断熱体積弾性率 k_S を使って，標準状態の空気に対する k_S/ρ の数値を求めよ。

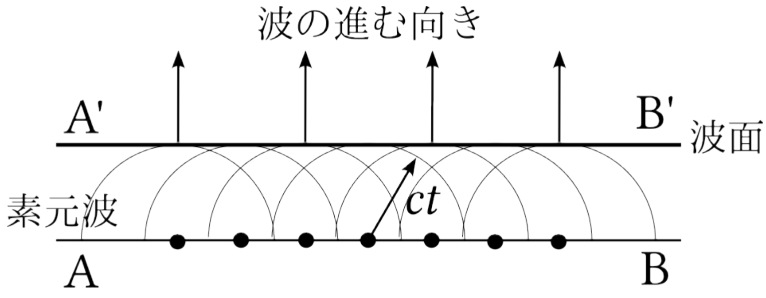
(d) 標準状態の空気中の音速の実測値は $v_0 = 3.3 \times 10^2\,\mathrm{m/s}$ である。(b)，(c) の結果と比較して，波の伝搬が熱力学的にどのような過程であるかを考察せよ。

[IV] (40 点)

次のホイヘンスの原理に基づき，以下の問いに答えよ。

ホイヘンスの原理

波面上の各点は，それらの点を波源とした球面波 (素元波) を出している。これらの素元波が共通に接する面が，それ以後の波面となる。



(図は速さ c で進む平面波の波面を表す。波面 AB の時間 t 後の波面は， AB 上の波源から出る半径 ct の無数の素元波に共通に接する波面 A′B′ となる。)

(1) 図 IV-1 のように，異なる媒質の境界面における光の屈折を考える。入射光が進む媒質 I の中での光の速さを v_{I}，屈折光が進む媒質 II の中での光の速さを v_{II} とする。また，図 IV-1 のように入射角 θ_{I} と屈折角 θ_{II} をとる。

このとき，ホイヘンスの原理を用いて以下のスネルの法則を導け。

$$\frac{\sin\theta_{\mathrm{I}}}{\sin\theta_{\mathrm{II}}} = \frac{v_{\mathrm{I}}}{v_{\mathrm{II}}}$$

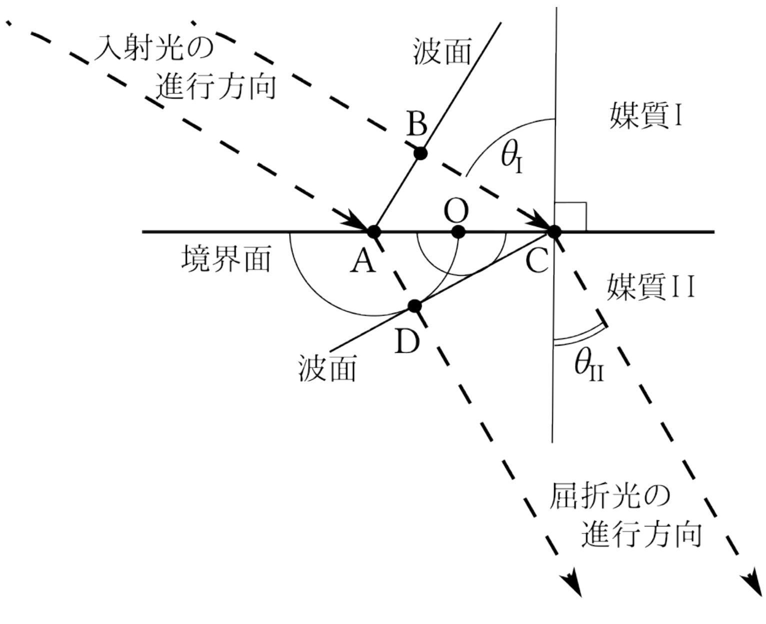


図 IV-1

次のフェルマーの原理に基づき，以下の問いに答えよ。

フェルマーの原理

> 光は到達するまでにかかる時間が極小となる経路を伝搬する。

(2) 図 IV-2 のように，$y > 0$ の領域は媒質 I（光の速さ v_{I}），$y < 0$ の領域は媒質 II（光の速さ v_{II}）に満たされており，光が $(0, a) \to (x, 0) \to (L, b)$ という経路をたどって伝搬するとする。ここで $(0, a)$ と (L, b) を固定したとき，光が境界面を通過する位置 x を求めることを考える。

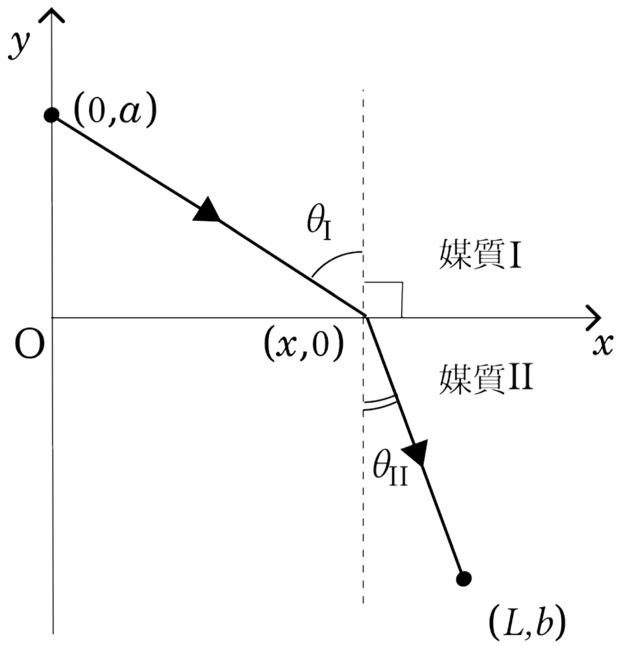


図 IV-2

(a) $(0, a)$ から出た光が (L, b) に到達するまでに要する時間 T を求めよ。

(b) フェルマーの原理に基づき，$v_{\mathrm{I}}, v_{\mathrm{II}}, a, b, L, x$ の間に成り立つ関係式を導け。

(c) 前問 (b) の結果に基づき，スネルの法則 (前問 IV(1) 参照) を導け。

九州大学理学部物理学科（物理学コース）

令和８年度 第３年次編入試験

英語

令和７年９月６日（土）　１２：１５−１３：００

注意事項

(1) 辞書は使用できない.

(2) 試験開始の合図があるまでこの冊子を開かないこと.

(3) 問題冊子は表紙を含めて３ページである.

(4) 解答用紙には, 受験番号を記入すること.

(5) 解答は指定された解答用紙に記入すること. 特に指定のない場合には,裏面を使って解答してもよい. 下書きには, 問題冊子の余白や裏面などを利用し, 解答用紙の余白には下書きをしないこと.

(6) 解答用紙に書ききれない場合や, 用紙を取り替えたい場合は, 試験監督に申し出ること.

(7) 問題冊子は持ち帰ってよい.

[**問題**] (60 点)

次の英文を読み，以下の問いに答えよ。

[redacted]

[redacted]

[redacted]

[redacted] [redacted]. （中略）

[redacted]

[redacted]

[redacted]

[redacted]

（出典: The Nobel Prize in Physics 2023, Popular science background）

Anne L'Huillier: アンヌ・リュイリエ (物理学者)，attosecond: アト秒 (10^{-18} 秒)，billion: 10 億，coincide: 時を同じくして起こる，emit: 放射する，excursion: 小旅行，femtosecond: フェムト秒 (10^{-15} 秒)，infrared: 赤外の，nanometre: ナノメートル (10^{-9} メートル)，note: 音符，overtone: 倍音，reattach: 再結合する，trough: 谷，ultraviolet: 紫外の

(1) 1980 年代，"ordinary laser systems" の "red light" によって実現可能な最も短い光パルスの長さは何秒とみなされていたか，有効数字２桁で単位をつけて答えよ。

(2) 下線部 "the key to ..." を和訳せよ。

(3) レーザーの電場を縦軸，時刻を横軸としたグラフの概形を実線で描き（正弦波として良い），同じ図の上に "overtone" のグラフを点線で描け。

(4) "When the laser light" から，"pulse of light" までの現象は，①気体原子のイオン化，②電子の往復運動，③電子の原子核への再結合，の３段階からなる。各段階について，現象が起こるメカニズムと，その結果何が起きるか，それぞれ日本語で説明せよ。

(5) 下線部 "The energy ..." を和訳せよ。

"overtones" から光パルスが生まれるメカニズムに関して，本文をまとめたのが以下の文である。この文について以下の問題に答えよ。

When there are many overtones of different [A] whose [B] are synchronized, they can be [C] to produce <u>a series of light pulses, each with a width of a few hundred attoseconds</u>.

(6) [A], [B] に当てはまる最も適切な語句をそれぞれ以下から選びそれぞれ答えよ。
(a) wavelengths, (b) amplitudes, (c) sizes, (d) peaks, (e) lasers

(7) [C] に当てはまる最も適切な語句を以下から選び答えよ。
(a) emitted, (b) transmitted, (c) added up, (d) occurred, (e) vibrated

(8) (6) の上の文の下線部 "a series of ..." を想像して時刻を横軸としたグラフを図示せよ。下線部最後の "a few hundred attoseconds" が図のどの部分を指すかも書き込むこと。