# 東大物理工学科 2016

**21B00817 鈴木泰雅,[1]**

## 第一問

### *[1.1]*

運動方程式より

$$0 = kv_0t_0 - \mu mg, \quad t_0 = \frac{\mu mg}{kv_0} \tag{1}$$

である.

### *[1.2]*

物体 B が右方向に動くという仮説を立てる. ($\dot{x}_B >$) ここで運動方程式は

$$m\ddot{x}_B = k(v_0(t + t_0) - x_B) - \frac{2}{3}\mu mg - kx_B \tag{2}$$

となる.

### *[1.3]*

$$m\ddot{x}_B = -2k\left(x_B - \frac{v_0(t+t_0)}{2} + \frac{\mu mg}{3k}\right) \tag{3}$$

であり,

$$X_B = x_B - \frac{v_0(t+t_0)}{2} + \frac{\mu mg}{3k} = x_B - \frac{v_0 t}{2} - \frac{\mu mg}{6k} \tag{4}$$

とすると

$$m\ddot{X}_B = -2kX_B, \quad X_B = A\cos\left(\sqrt{\frac{2k}{m}}t\right) + B\sin\left(\sqrt{\frac{2k}{m}}t\right) \tag{5}$$

であり,

$$X_B(0) = 0 - \frac{v_0t_0}{2} + \frac{\mu mg}{3k} = -\frac{\mu mg}{6k} \tag{6}$$

$$\dot{X}_B(0) = 0 - \frac{v_0}{2} = -\frac{v_0}{2} \tag{7}$$

であるため,

$$X_B = -\frac{\mu mg}{6k}\cos\left(\sqrt{\frac{2k}{m}}t\right) - \frac{v_0}{2}\sqrt{\frac{m}{2k}}\sin\left(\sqrt{\frac{2k}{m}}t\right) \tag{8}$$

$$\therefore x_B = \frac{v_0}{2}\left(t - \sqrt{\frac{m}{2k}}\sin\left(\sqrt{\frac{2k}{m}}t\right)\right) + \frac{\mu mg}{6k}\left(1 - \cos\left(\sqrt{\frac{2k}{m}}t\right)\right) \tag{9}$$

である.

*[1.4]*

$$\sqrt{\frac{2k}{m}}t_0 \ll 1 \tag{10}$$

であるため，

$$\sin\left(\sqrt{\frac{2k}{m}}t_0\right) \approx \sqrt{\frac{2k}{m}}t_0 + \mathcal{O}\left(\sqrt{\frac{2k}{m}}t_0\right)^3, \quad \cos\left(\sqrt{\frac{2k}{m}}t_0\right) \approx 1 - \frac{1}{2}\left(\sqrt{\frac{2k}{m}}t_0\right)^2 + \mathcal{O}\left(\sqrt{\frac{2k}{m}}t_0\right)^4 \tag{11}$$

よって二次までの近似をすると

$$x_B(t=t_0) = \frac{v_0}{2}\left(t_0 - \sqrt{\frac{m}{2k}}\sqrt{\frac{2k}{m}}t_0\right) + \frac{\mu mg}{6k}\left(1 - 1 + \frac{1}{2}\left(\sqrt{\frac{2k}{m}}t_0\right)^2\right) = \frac{t_0^3 k v_0}{6m} \tag{12}$$

となり，これは物体 A が静止するために

$$k\frac{t_0^3 k v_0}{6m} < \mu mg = t_0 k v_0, \quad \therefore \frac{t_0^2}{6m}k < 1 \tag{13}$$

であることを示せばよい．解けない？？

*[2.1]*

ラグランジュ方程式を解く．ラグランジアンは

$$\begin{aligned}
L =& \frac{1}{2}m\left[\dot{q}_A^2 + \dot{q}_B^2 + \dot{q}_C^2\right] \\
&-k_1 l^2\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{l+q_C}{l}\right)^2 - \frac{1}{2}\left(\frac{q_B}{l}\right)^2 - \frac{1}{2}\left(\frac{-l+q_A}{l}\right)^2 + \frac{1}{4}\left(\frac{l+q_C}{l}\right)^4 + \frac{1}{4}\left(\frac{q_B}{l}\right)^4 + \frac{1}{4}\left(\frac{-l+q_A}{l}\right)^4\right] \\
&-\frac{1}{2}k_0\left[(q_C - q_B)^2 + (q_B - q_A)^2\right]
\end{aligned}$$

であるためそれぞれの方程式は一次の形まで書くと

$$\begin{aligned}
m\ddot{q}_A =& -k_1 l^2\left[-\left(\frac{-l+q_A}{l}\right)\frac{1}{l} + \left(\frac{-l+q_A}{l}\right)^3\frac{1}{l}\right] + k_0(q_B - q_A) \\
&\approx -k_1 l^2\left[\frac{1}{l} + \frac{2q_A}{l^2}\right] + k_0\left(q_B - q_A\right) \\
m\ddot{q}_B =& -k_1 l^2\left[-\left(\frac{q_B}{l}\right)\frac{1}{l} + \left(\frac{q_B}{l}\right)^3\frac{1}{l}\right] - k_0\left\{-(q_C - q_B) + (q_B - q_A)\right\} \\
&\approx k_1 q_B - 2k_0 q_B + k_0 q_C + k_0 q_A \\
m\ddot{q}_C \approx& -k_1 l^2\left[\frac{1}{l} + \frac{2q_C}{l}\right] - k_0(q_C - q_B)
\end{aligned}$$

である．よってこられを行列で表現すると

$$m\begin{bmatrix}\ddot{q}_A \\ \ddot{q}_B \\ \ddot{q}_C\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}-2k_1 - k_0 & k_0 & 0 \\ k_0 & k_1 - 2k_0 & k_0 \\ 0 & k_0 & -2k_1 - k_0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}q_A \\ q_B \\ q_C\end{bmatrix} + \begin{bmatrix}-k_1 l \\ 0 \\ k_1 l\end{bmatrix} \tag{14}$$

となる．ここで，一般的に

$$m\ddot{\boldsymbol{q}} = A\boldsymbol{q} + B \tag{15}$$

があり対角化して

$$\boldsymbol{q}' = U\boldsymbol{q} \tag{16}$$

とすると

$$m\ddot{\boldsymbol{q}}' = U^{-1}AU\boldsymbol{q}' + U^{-1}B \tag{17}$$

であり，例えば一つの成分を取り出して

$$m\ddot{q}_i' = aq_i' + b = a\left(q_i' + \frac{b}{a}\right) \tag{18}$$

であり，この基準振動 $\omega$ が満たす方程式は

$$-\omega^2 = \frac{a}{m} \tag{19}$$

となるためこれは $b$ に依存しない．よって，行列 $A$ のみの対角化をすればよい．よって，この行列の固有方程式は

$$\begin{aligned}\det\begin{bmatrix}-2k_1-k_0-\lambda & k_0 & 0\\ k_0 & k_1-2k_0-\lambda & k_0\\ 0 & k_0 & -2k_1-k_0-\lambda\end{bmatrix} &= (-2k_1-k_0-\lambda)\left(\lambda^2+(k_1+3k_0)\lambda+3k_0k_1-2k_1^2\right)\\ &= 0\end{aligned}$$

であるため固有値は

$$\lambda = -2k_1 - k_0, \frac{1}{2}\left[-(k_1+3k_0) \pm \sqrt{9k_1^2 - 6k_1k_0 + 9k_0^2}\right] \tag{20}$$

である．よって固有振動数はこれに $1/m$ 倍して $-1$ をかけて平方したものであるため

$$\omega = \sqrt{\frac{2k_1+k_0}{m}}, \sqrt{\frac{1}{2m}\left(k_1+3k_0 \mp \sqrt{9k_1^2-6k_1k_0+9k_0^2}\right)} \tag{21}$$

である．

*[2.2]*

不安定な解はこの固有振動が虚数数の時であり，時刻に対して指数関数的に増大する．

$$9k_1^2 - 6k_1k_0 + 9k_0^2 = 9k_0^2\left[\left(\frac{k_1}{k_0}\right)^2 - \frac{2}{3}\left(\frac{k_1}{k_0}\right) + 1\right] \tag{22}$$

は任意の $k_1/k_0$ で正の値であるが,

$$k_1 + 3k_0 - \sqrt{9k_1^2 - 6k_1k_0 + 9k_0^2} < 0 \tag{23}$$

の時この固有振動は不安定になる．よって,

$$9k_1^2 - 6k_1k_0 + 9k_0^2 > (k_1+3k_0)^2, \quad \therefore 2k_1^2 - 3k_0k_1 > 0 \tag{24}$$

である．これは

$$\frac{k_1}{k_0} > \frac{3}{2} \tag{25}$$

よって，$k_C$ の値は

$$k_C = \frac{3}{2}k_0 \tag{26}$$

である．

*[2.3]*

$$k_1 = \frac{2}{3}k_0 \tag{27}$$

であるためそれぞれ固有振動数に代入すると

$$\sqrt{\frac{7k_0}{3m}}, \sqrt{\frac{k_0}{3m}}, \sqrt{\frac{10k_0}{3m}} \tag{28}$$

である．それぞれの固有ベクトルは

$$-\frac{7k_0}{3}\text{の時：}\begin{bmatrix}1\\0\\-1\end{bmatrix}, \quad -\frac{k_0}{3}\text{の時：}\begin{bmatrix}1\\2\\1\end{bmatrix}, \quad -\frac{10k_0}{3}\text{の時：}\begin{bmatrix}-1\\1\\-1\end{bmatrix} \tag{29}$$

であり，行列 $U$ は

$$\begin{bmatrix}1 & 1 & -1\\0 & 2 & 1\\-1 & 1 & -1\end{bmatrix}, \quad U^{-1}AU = \begin{bmatrix}-\frac{7k_0}{3} & 0 & 0\\0 & -\frac{k_0}{3} & 0\\0 & 0 & -\frac{10k_0}{3}\end{bmatrix} \tag{30}$$

であり，

$$U^{-1}B = \begin{bmatrix}1/2 & 0 & -1/2\\1/6 & 1/3 & 1/6\\-1/3 & 1/3 & -1/3\end{bmatrix}\begin{bmatrix}-k_1 l\\0\\k_1 l\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}-k_1 l\\0\\0\end{bmatrix} \tag{31}$$

となるため，$\boldsymbol{q}'$ は $\boldsymbol{q}$ の成分の線形結合であり，初期値は $\boldsymbol{q}(0) = \dot{\boldsymbol{q}}(0) = 0$ であるため，$\boldsymbol{q}'(0) = \dot{\boldsymbol{q}}'(0) = 0$ である．よって解いて

$$\boldsymbol{q}' = \begin{bmatrix}k_1 l\left(1 - \cos\left(\sqrt{\frac{7k_0}{3m}}t\right)\right)\\0\\0\end{bmatrix} \tag{32}$$

となる．よって，元の座標に戻ると

$$\boldsymbol{q} = \begin{bmatrix}q_A\\q_B\\q_C\end{bmatrix} = U^{-1}\boldsymbol{q}' = \begin{bmatrix}1/2\\1/6\\-1/3\end{bmatrix}k_1 l\left(1 - \cos\left(\sqrt{\frac{7k_0}{3m}}t\right)\right) \tag{33}$$

であるため，

$$q_A : q_B : q_C = 1/2 : 1/6 : -1/3 \tag{34}$$

である．

## 第二問

*[1]*

$$\phi(P) = \frac{-q}{4\pi\epsilon_0}\frac{1}{r_-} + \frac{q}{4\pi\epsilon_0}\frac{1}{r_+} \tag{35}$$

*[2]*

$$\begin{aligned}\phi(P)&= \frac{-q}{4\pi\epsilon}\frac{1}{r + d/2\cos\theta} + \frac{-q}{4\pi\epsilon}\frac{1}{r - d/2\cos\theta} &(36)\\ &\approx \frac{q}{4\pi\epsilon_0}\frac{1}{r}\left\{-1 + \frac{d}{2r}\cos\theta + 1 + \frac{d}{2r}\cos\theta\right\} = \frac{p}{4\pi\epsilon_0}\frac{1}{r^2}\cos\theta &(37)\end{aligned}$$

となる．

*[3]*

$$\begin{aligned}\boldsymbol{E}&= -\nabla\phi(P) = \left(\boldsymbol{e}_r\frac{\partial}{\partial r} + \boldsymbol{e}_\theta\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial\theta}\right)\frac{p}{4\pi\epsilon_0}\frac{1}{r^2}\cos\theta &(38)\\ &= \frac{p}{4\pi\epsilon_0 r^3}\left(2\cos\theta\boldsymbol{e}_r + \sin\theta\boldsymbol{e}_\theta\right) &(39)\end{aligned}$$

である．

*[4]*

$\theta = \pi/2$ の時，

$$\boldsymbol{E} = \frac{p}{4\pi\epsilon_0 r^3}\boldsymbol{e}_\theta \tag{40}$$

であるため，$r$ 成分は持たない．$\theta_2 = 0$ の時，それぞれ $\mp p$ の電荷は

$$\begin{aligned}-q : \boldsymbol{F}_-&= \frac{p}{4\pi\epsilon_0(l - d/2)^3}\boldsymbol{e}_\theta &(41)\\ q : \boldsymbol{F}_+&= \frac{p}{4\pi\epsilon_0(l + d/2)^3}\boldsymbol{e}_\theta &(42)\end{aligned}$$

であるため，$F_- > F_+$ であるから，反時計回りに回転し始める．一方．$\theta = -\pi/2$ の時はそれぞれの $p_1$ からの距離は等しく，($l$ が十分に大きいため)，$\theta$ 方向にしか力がかからないため，回転しない．

*[5]*

$\boldsymbol{p}_2$ に作る電場 $\boldsymbol{E}$ は

$$\boldsymbol{E}_1 = \frac{p_1}{4\pi\epsilon_0 l^3}\left(2\cos\theta_1\boldsymbol{e}_r + \sin\theta_1\boldsymbol{e}_\theta\right) \tag{43}$$

であり，書き込んだ図より

$$\boldsymbol{p}_2\cdot\boldsymbol{e}_r = p_2\cos\theta_2, \quad \boldsymbol{p}_2\cdot\boldsymbol{e}_\theta = -p_2\sin\theta_2 \tag{44}$$

である．よって

$$U = -\boldsymbol{p}_2\cdot\boldsymbol{E}_1 = -\frac{p_1p_2}{4\pi\epsilon_0 l^3}\left(2\cos\theta_1\cos\theta_2 - \sin\theta_1\sin\theta_2\right) \tag{45}$$

となる．

## 第三問

*[1]*

シュレディンガー方程式は

$$-\frac{\hbar^2}{2m}\psi''(x) = E\psi(x) \tag{46}$$

であり，この解は

$$\psi(x) = A\sin(\lambda x) + B\cos(\lambda x), \quad \lambda = \frac{\sqrt{2mE}}{\hbar} \tag{47}$$

である．ここで，$x = \pm a$ で $\psi$ の時，

$$A = 0, \mathrm{or}, B = 0 \tag{48}$$

である．よって，

$$\psi(x) = A\cos(\lambda x), \quad B\sin(\lambda x) \tag{49}$$

となり，$\psi(\lambda a) = 0$ より，

$$\lambda a/2 = \frac{\pi n_{\mathrm{odd}}}{2}, \quad \lambda a/2 = \frac{\pi n_{\mathrm{even}}}{2} \tag{50}$$

である．よって，

$$\psi(x) = A\cos\left(\frac{\pi n_{\mathrm{odd}}}{a}x\right), \quad B\sin\left(\frac{\pi n_{\mathrm{even}}}{a}x\right) \tag{51}$$

である．ここで，

$$\int_{-a/2}^{a/2}\cos^2\left(\frac{\pi n_{\mathrm{odd}}}{a}x\right)dx = \int_{-a/2}^{a/2}\sin^2\left(\frac{\pi n_{\mathrm{odd}}}{a}x\right)dx = a \tag{52}$$

であるため，

$$\psi(x) = \sqrt{\frac{2}{a}}\cos\left(\frac{\pi n_{\mathrm{odd}}}{a}x\right), \quad \sqrt{\frac{2}{a}}\sin\left(\frac{\pi n_{\mathrm{even}}}{a}x\right) \tag{53}$$

であり，

$$\frac{\sqrt{2mE}}{\hbar} = \frac{\pi n}{a}, \quad E = \frac{\hbar^2\pi^2 n^2}{2ma^2} \tag{54}$$

である．

*[2]*

$$\Psi(x_1, x_2) = \frac{1}{\sqrt{2}}\left(g(x_1)e(x_2) - g(x_2)e(x_1)\right), \tag{55}$$

$$g(x_1)g(x_2), \quad e(x_1)e(x_2), \quad \frac{1}{\sqrt{2}}\left(g(x_1)e(x_2) + g(x_2)e(x_1)\right) \tag{56}$$

*[3]*

$s = 1/2$ より，$m = \pm 1/2$ である．よって，

$$S = 1, \quad M = \pm 1, 0, \qquad S = 0, M = 0 \tag{57}$$

であるため，同時固有状態と全スピンは

$$S = 1, \quad |\uparrow\uparrow\rangle, \frac{1}{\sqrt{2}}\left(|\uparrow\downarrow\rangle + |\downarrow\uparrow\rangle\right), |\downarrow\downarrow\rangle \tag{58}$$

$$S = 0, \quad \frac{1}{\sqrt{2}}\left(|\uparrow\downarrow\rangle - |\downarrow\uparrow\rangle\right) \tag{59}$$

である．

*[4]*

## 第四問

*[1]*

$$X = a\left(n^+ - n^-\right) \tag{60}$$

であり，$N = n^+ + n^-$ であるため，

$$X = a\left(N - 2n^-\right) \tag{61}$$

であり，$n^-$ と $X$ は一対一対応する．よって，$n^-$ の選び方が全通りであり，状態数は

$$W = \frac{N!}{(N - n^-)!n^-!} \tag{62}$$

であり，

$$N - 2n^- = n, \quad \therefore n^- = \frac{N-n}{2} \tag{63}$$

の時の状態数は

$$W = \frac{N!}{(\frac{N-n}{2})!(\frac{N+n}{2})!}, \quad \therefore P(n) = \frac{(\frac{N-n}{2})!(\frac{N+n}{2})!}{N!} \tag{64}$$

エントロピーは

$$S = k_B \log W \approx k_B \left(N \log N - \frac{N-n}{2}\log\left(\frac{N-n}{2}\right) - \frac{N+n}{2}\log\left(\frac{N+n}{2}\right)\right) \tag{65}$$

となる．

*[2]*

$X$ を固定することは $n$ を固定することである．また全体のエネルギーは $0$ であるため自由エネルギーは

$$F = -TS = -k_B T\left(N \log N - \frac{N-X/a}{2}\log\left(\frac{N-X/a}{2}\right) - \frac{N+X/a}{2}\log\left(\frac{N+X/a}{2}\right)\right) \tag{66}$$

であるため，

$$\tau = -k_B T \frac{1}{a}\left(\frac{NX/a}{2(N^2 - (X/a)^2)} + \frac{1}{2}\log\left(\frac{N-X/a}{N+X/a}\right)\right) \tag{67}$$

である．ここで，$X \ll Na$ の時，二次以上の項を無視するとすると

$$\log\left(\frac{N-X/a}{N+X/a}\right) = \log\left(\frac{1-X/(Na)}{1+X/(Na)}\right) \approx -\frac{X}{Na} - \frac{X}{Na} = -2\frac{X}{Na} \tag{68}$$

$$\frac{NX/a}{2(N^2 - (X/a)^2)} = \frac{X/(Na)}{2(1-(X/(Na))^2)} \approx \frac{X}{2Na} \tag{69}$$

であるため，

$$\tau \approx -k_B T \frac{1}{a}\left(\frac{X}{2Na} - \frac{X}{Na}\right) = k_B T \frac{X}{2Na^2} \tag{70}$$

となる．

*[3]*

分配関数はそれぞれ独立な粒子からできているので

$$Z = z^N = (\exp(-\beta\kappa) + \exp(\beta\kappa))^N = (2\cosh(\beta\kappa))^N \tag{71}$$

であり，エネルギーの期待値は

$$E = -\frac{1}{Z}\frac{dZ}{d\beta} = -N\tanh(\beta\kappa)\kappa \tag{72}$$

また，

$$E = \kappa(-n^+ + n^-), \quad X = a(n^+ - n^-), \quad \therefore X = -\frac{a}{\kappa}E \tag{73}$$

よって，

$$X = Na\tanh(\beta\kappa) \tag{74}$$

である．また，$\kappa\beta \ll 1$ の時，

$$E \approx -N\beta\kappa^2, \quad X \approx Na\beta\kappa \tag{75}$$

である．

*[4]*

$$\frac{dE}{d\beta} = -\langle E^2\rangle + (\langle E\rangle)^2 = -\left(\langle E^2\rangle - (\langle E\rangle)^2\right) \tag{76}$$

ゆえ，$E$ の分散は

$$-\frac{dE}{d\beta} = N\kappa^2\frac{1}{\cosh^2(\beta\kappa)} \tag{77}$$

であり，$X$ の分散は

$$(\frac{a}{\kappa})^2 N\kappa^2\frac{1}{\cosh^2(\beta\kappa)} \tag{78}$$

である．

## 第五問

### *[1]*

運動方程式は

$$m\ddot{\boldsymbol{u}} = -e\boldsymbol{E}_{\mathrm{ex}} - e\dot{\boldsymbol{u}} \times \boldsymbol{B}_{\mathrm{ex}} - m\omega_0^2\boldsymbol{u} \tag{79}$$

であり，各成分ごとに書き下すと

$$\boldsymbol{u} = \frac{1}{-m^2(\omega_0^2-\omega^2)^2+(e\omega B)^2}\begin{bmatrix} m(\omega_0^2-\omega^2) & ie\omega B \\ -ie\omega B & m(\omega_0^2-\omega^2)\end{bmatrix}\boldsymbol{E}_{\mathrm{ex}} \tag{80}$$

である．

### *[2]*

式に代入すると

$$\tilde{\epsilon}\boldsymbol{E}_{\mathrm{ex}} - \boldsymbol{E}_{\mathrm{ex}} = \begin{bmatrix} (\epsilon_{xx}-1)E_x + i\gamma E_y \\ -i\gamma E_x + (\epsilon_{xx}-1)E_y \\ 0 \end{bmatrix} = -\frac{ne}{\epsilon_0}\begin{bmatrix} u_x \\ u_y \\ 0\end{bmatrix} \tag{81}$$

であり，それぞれの係数を比較して

$$\gamma = -\frac{e^2 n\omega B}{A\epsilon_0}, \quad \epsilon_{xx} = -\frac{ne}{\epsilon_0}\frac{1}{A}m(\omega_0^2-\omega^2)+1, \quad A = -m^2(\omega_0^2-\omega^2)^2+(e\omega B)^2 \tag{82}$$

ここで，条件より，$A<0$ であるため，

$$\gamma = -\frac{e^2 n\omega B}{A\epsilon_0} > 0, \quad \epsilon_{xx} > 1 \tag{83}$$

### *[3]*

$E$ のみの式にすると

$$\boldsymbol{k}\times(\boldsymbol{k}\times\boldsymbol{E}_0) = -\mu_0\epsilon_0\omega^2\tilde{\omega}\boldsymbol{E}_0 = -\left(\frac{\omega}{c}\right)^2\tilde{\omega}\boldsymbol{E}_0 \tag{84}$$

であり，

$$(\boldsymbol{k}\cdot\boldsymbol{E}_0)\boldsymbol{k} - k^2\boldsymbol{E}_0 + \left(\frac{\omega}{c}\right)^2\tilde{\omega}\boldsymbol{E}_0 = 0 \tag{85}$$

### *[4]*

$x, y$ 成分のみ書き下すと

$$k_z^2 E_x = \left(\frac{\omega}{c}\right)^2 (E_x\epsilon_{xx} + i\gamma E_y) \tag{86}$$

$$k_z^2 E_y = \left(\frac{\omega}{c}\right)^2 (-i\gamma E_x + E_y\epsilon_{xx}) \tag{87}$$

よって，

$$\begin{bmatrix} k_z^2-(\omega/c)^2\epsilon_{xx} & -i\gamma(\omega/c)^2 \\ i\gamma(\omega/c)^2 & k_z^2-(\omega/c)^2\epsilon_{xx}\end{bmatrix}\boldsymbol{E} = 0 \tag{88}$$

でなければいかない．よって，

$$(k_z^2-(\omega/c)^2\epsilon_{xx})^2 = \gamma^2(\omega/c)^4 \tag{89}$$

であり，$\epsilon_{xx} > \gamma$ より，

$$k_\pm = \frac{\omega}{c}\sqrt{\epsilon_{xx} \pm \gamma} \tag{90}$$

であり，

$$\boldsymbol{E}_{0+} = \frac{1}{\sqrt{2}} E \begin{bmatrix} 1 \\ i \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{E}_{0-} = \frac{1}{\sqrt{2}} E \begin{bmatrix} 1 \\ -i \\ 0 \end{bmatrix} \tag{91}$$

*[5]*

$$\boldsymbol{E} = \frac{1}{\sqrt{2}} \left( \boldsymbol{E}_+ + \boldsymbol{E}_- \right) \tag{92}$$