Есеп 1. Қоспа (9 ұпай)

Бөлім A: Сымдардың магнит өрісі

a) Магнит өрісінің айналымы туралы теореманы ($\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I$) қолдана отырып, біз $r > R$ жағдайға жазамыз.

$$B \cdot 2\pi r = \mu_0 I,$$
$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}.$$

Магнит өрісінің бағытын ескере отырып, оны векторлық көбейтінді арқылы жазуға болады:

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{2\pi r^2}(\vec{r} \times \hat{z}).$$

$r < R$ жағдайында токтың тек бір бөлігі R радиус шеңберімен шектелген аудан арқылы өтеді:

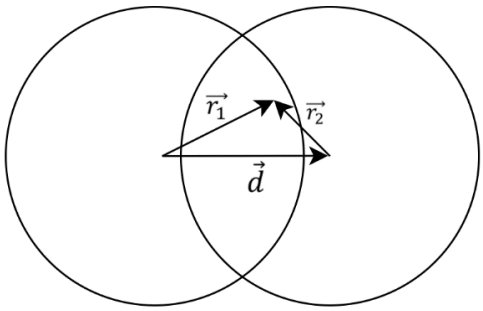
$$B \cdot 2\pi r = \mu_0 I \frac{r^2}{R^2},$$
$$B = \frac{\mu_0 I r}{2\pi R^2},$$

немесе векторлық түрінде:

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{2\pi R^2}(\vec{r} \times \hat{z}).$$

B магнит өрісінің сызықтары – оң бұрандалы бағыттағы концентрлік шеңберлер.

b) Қуысты қарама-қарсы бағытталған екі токтың қиылысы ретінде елестетуге болады. Содан кейін қуыстағы магниттік индукция – бұл екі сымнан алынған магнит өрістерінің суперпозициясы. Біз радиус векторларын $\vec{r_1}$ және $\vec{r_2}$ сымдардың орталықтарынан қуыстың белгілі бір нүктесіне тартамыз. Содан кейін (суретті қараңыз), $\vec{r_1} - \vec{r_2} = \vec{d}$. Магниттік индукция үшін:



$$\vec{B} = \vec{B_1} + \vec{B_2} = \frac{\mu_0 I}{2\pi R^2}\left((\vec{r_1} \times \hat{z}) - (\vec{r_2} \times \hat{z})\right) = \frac{\mu_0 I}{2\pi R^2}((\vec{r_1} - \vec{r_2}) \times \hat{z}).$$
$$\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{2\pi R^2}(\vec{d} \times \hat{z}).$$

Егер сол сымның тогы оқырманнан бағытталған болса, онда магнит өрісі төмен, әйтпесе жоғары бағытталған.

Бөлім В: Белгісіз зат (5 ұпай)

Изохора теңдеуіне сүйене отырып, қысым $P = const \cdot (T - T_0)$. Оның температурасы бойынша туындысы:

$$\left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_V = const = \frac{P}{T - T_0}.$$

T тұрақты температурада V көлеміндегі бойынша U ішкі энергиясының туындысын аламыз:

$$\left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_T = \frac{am^2}{V^2} = a\rho^2.$$

Оларды біріктіре отырып, $\left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_T = T\left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_V - P$ формулаға ауыстырып қоямыз:

$$a\rho^2 = T \cdot \frac{P}{T - T_0} - P = \frac{PT_0}{T - T_0}.$$

Осылайша,

$$P = \frac{am^2(T - T_0)}{V^2 T_0}.$$

$T = const$ кезінде қысым -2 $(P \propto 1/V^2)$ дәрежесіне пропорционалды, сондықтан изотерма теңдеуі:

$$PV^2 = const.$$

Адиабатикалық процесте температура бойынша тығыздықтың туындысын аламыз:

$$\frac{d\rho}{dT} = \frac{K}{T}.$$

Екінші жағынан, термодинамиканың бірінші заңын қолдана отырып,

$$pdV + dU = 0,$$

ішкі энергияны дифференциалдап, $dV = -\frac{md\rho}{\rho^2}$ қолдана отырып, келесі теңдеуін шемеміз:

$$\left(\frac{a\rho^2(T - T_0)}{T_0} + a\rho^2\right)\left(-\frac{md\rho}{\rho^2}\right) + bdT = 0$$

$$\frac{d\rho}{dT} = \frac{bT_0}{am}\frac{1}{T} \rightarrow K = \frac{bT_0}{am}$$

Қоспа (9 баллов)

Бөлім А: Сымдардың магнит өрісі (4 ұпай)		
a)	1.5 ұпай	Магнит өрісінің айналымы туралы теорема (жалпы формула немесе есептегі теңдеулердің дұрыс жазылуы) – 0.5 ұпай $\vec{B}\ (\mathrm{r} > \mathrm{R})$ – 0.4 ұпай $\vec{B}\ (\mathrm{r} < \mathrm{R})$ – 0.6 ұпай *Егер бағыт сипатталмаса, бірақ векторлық жазба дұрыс болса, онда толық балл қойылады*
b)	2.5 ұпай	$\vec{B} = \overrightarrow{B_1} + \overrightarrow{B_2}$ – 1.5 ұпай. $\overrightarrow{r_1} - \overrightarrow{r_2} = \vec{d}$ – 0.5 ұпай. $\vec{B}$ – 0.5 ұпай.

Бөлім В: Белгісіз зат (5 ұпай)

$\left(\frac{\partial \mathrm{P}}{\partial \mathrm{T}}\right)_{\mathrm{V}}$ туынды дұрыс алынды – 0.5 ұпай.

$\left(\frac{\partial \mathrm{U}}{\partial \mathrm{V}}\right)_{\mathrm{T}}$ туынды дұрыс алынды – 0.5 ұпай.

P – 1 ұпай.

$\mathrm{P}^2\mathrm{V} = \mathrm{const}$ – 0.5 ұпай.

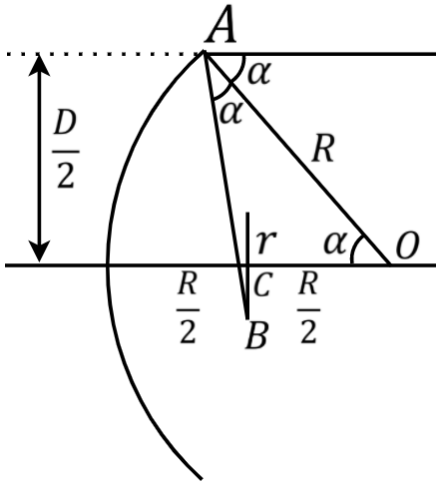
$\frac{d\rho}{dT} = \frac{K}{T}$ – 0.5 ұпай.

$pdV + dU = 0$ – 0.5 ұпай.

$dV = -\frac{md\rho}{\rho^2}$ – 0.5 ұпай.

$K = \frac{bT_0}{am}$ – 1 ұпай.

Есеп 2. Параболалық айна (8 баллов)



a) A нүктесіндегі айнаның шетіне тиетін және B нүктесіндегі дискінің шетіне түсетін сәулені қарастыра отырып (диск C, OC=R/2 нүктесінде орналасқан):

$$\sin\alpha = \frac{D}{2R}.$$

Мысалы, негізгі оптикалық оське AB және OA проекцияларын қарастыра отырып:

$$\left(r + \frac{D}{2}\right)\cos 2\alpha = R\cos\alpha - \frac{R}{2}.$$

Осы теңдеуде α білдіру арқылы біз жауап аламыз:

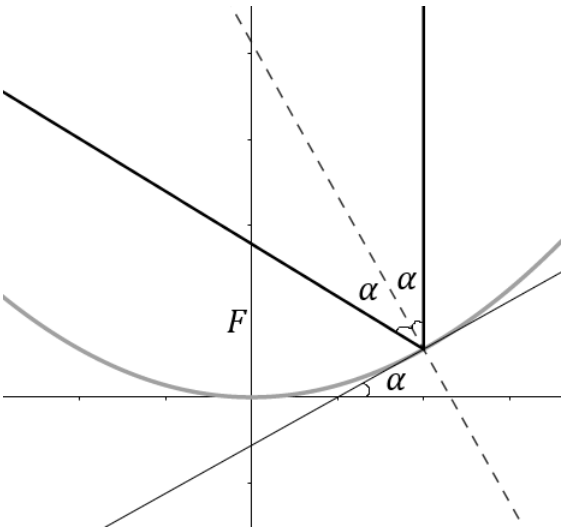
$$r = \frac{R}{2}\cdot\frac{2R\sqrt{4R^2 - D^2}}{2R^2 - D^2} - \frac{D}{2}.$$

b) Сынаптың өздігінен алынған бөлігін бетіне алыңыз. Оның көкжиекке көлбеуі α, ал $tan\,\alpha = \frac{dy}{dx}$. Екінші жағынан, тепе-теңдік жағдайынан $tan\,\alpha = \frac{\omega^2 x}{g}$ аламыз.:

$$\int_0^y dy = \int_0^x \frac{\omega^2 x}{g}dx$$

$$y = \frac{\omega^2}{2g}x^2,$$

яғни, сынаптың беті шынымен айналу параболоиды болып табылады.



c) Айнаға параллель орналасқан Сәуле осы айнаның фокусында шағылысады және біріктіріледі. Содан кейін $\tan\alpha = \frac{\omega^2 x}{g}$ көмегімен,

$$F = y + x\cot 2\alpha = \frac{\omega^2}{2g}x^2 + x\,\frac{1 - tan^2\,\alpha}{2\,tan\,\alpha} =$$

$$= \frac{\omega^2}{2g}x^2 + \frac{x}{2}(\cot\alpha - \tan\alpha) = \frac{\omega^2}{2g}x^2 + \frac{x}{2}\left(\frac{g}{\omega^2 x} - \frac{\omega^2 x}{g}\right) = \frac{g}{2\omega^2}.$$

F өрнегінде x айнымалысы төмендеді, яғни бұл оптикалық жүйеде аберрация жоқ.

Шелекті босату екі шартпен шектеледі: сынап шелектен төгілмеуі керек; параболоидтың жоғарғы жағы шелектің түбінен жоғары болуы керек. Бұл жағдайда

$$y = \frac{\omega^2}{2g}x^2$$

теңдеуді қолдана отырып, $x = R$ мен $y = H$ болған жағдайда:

$$H = \frac{\omega_{max}^2}{2g}R^2, \qquad \omega_{max} = \sqrt{\frac{2gH}{R^2}} = 16.3\,\frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

Бұл жағдайда сынаптың көлемін есептейміз:

$$V = \int_0^R 2\pi x dx \cdot y = \frac{\pi\omega_{max}^2}{g}\int_0^R x^3 dx = \frac{\pi\omega_{max}^2 R^4}{4g} = \frac{\pi R^2 H}{2} = 10.6\ \text{л}.$$

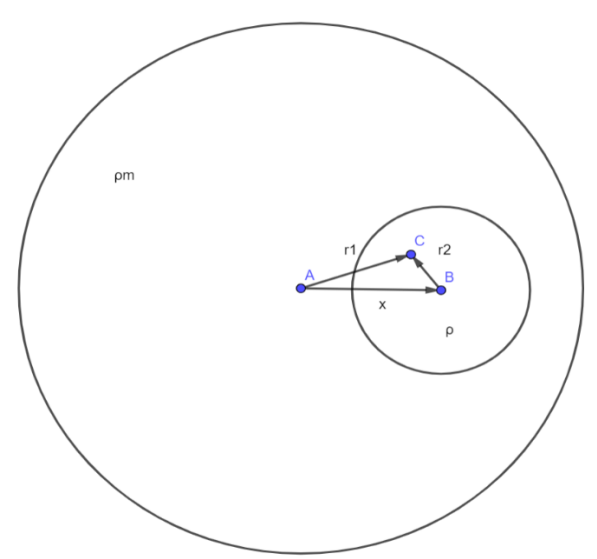
Параболалық айна (8 ұпай)		
a)	2.5 ұпай	Диск қисықтық орталығынан $R/2$-де орналасқан - 0.5 ұпай. Айна шетінен шағылысқан жарық дискінің қарама-қарсы жиегіне түседі – 0.5 ұпай. $\sin\alpha = \frac{D}{2R}$ – 0.5 ұпай r-ды дұрыс шығаруға болатын кез келген теңдеу – 0.5 ұпай. r – 0.5 ұпай.
b)	2 ұпай	$\tan\alpha = \frac{dy}{dx}$ – 0.75 ұпай $\tan\alpha = \frac{\omega^2 x}{g}$ – 0.75 ұпай $y = \frac{\omega^2}{2g}x^2$ – 0.5 ұпай
c)	2 ұпай	F-ды дұрыс шығаруға болатын кез келген теңдеу – 0.5 ұпай. $F = \frac{g}{2\omega^2}$ – 1.5 ұпай
d)	1.5 ұпай	$H = \frac{\omega_{max}^2}{2g}R^2, \quad \omega_{max} = \sqrt{\frac{2gH}{R^2}} = 16.3\,\frac{\text{рад}}{\text{с}}$ – 0.5 ұпай. $V = \int_0^R 2\pi x dx \cdot y, \quad V = \frac{\pi R^2 H}{2} = 10.6\ \text{л}$ – 1 ұпай.

Есеп 3. Планеталардың ядросының қозғалысын зерттеу (13 баллов).

Бөлім А. Ауырлық күшінің әсері (2 ұпай)

А.1. Осы ығысу кезінде планета ядросының ішіндегі гравитациялық өрісті табыңыз. **(1.5 ұпай)**

Шешім:



Сур. 1. Қосындымен планета.

Бұл мәселені шешу үшін орталықтан r қашықтықта ρ_m тығыздығының біртекті шарының ішіндегі өрісті табамыз.

Гравитациядағы Гаусс теоремасы бойынша: $4\pi r^2 g = 4\pi G \cdot \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_m \rightarrow g = \frac{4}{3}\pi G \rho_m r$ (0.5)

Енді сфералық қуысы бар планетаны қарастырайық, оның орталығы x қашықтықта, содан кейін қуысты қуыста ρ_m және $-\rho_m$ тығыздығы бар 2 сфералық қосындылар ретінде қарастыруға болады. Содан кейін қуыс ішіндегі біздің өріс қалған планетаның суперпозициясымен және толық біртекті шар бар ρ_m қосындысымен, сондай-ақ қуыс ішіндегі біртекті шардың өрісін беретін $-\rho_m$ қосындысымен ұсынылады. (2)

Қуыс ішіндегі өріс: $\overrightarrow{g_1} = -\frac{4}{3}\pi G \rho_m (\vec{r}_1 - \vec{r}_2) = -\frac{4}{3}\pi G \rho_m \vec{x}$ (0.5)

Алайда, біздің ядро қуыс емес, оның массасы да бар, сондықтан оның өрісін де ескеру керек: $\overrightarrow{g_2} = -\frac{4}{3}\pi G \rho \vec{r}_2$. (0.2)

Толық өріс:

$$\vec{g} = \overrightarrow{g_1} + \overrightarrow{g_2} = -\frac{4}{3}\pi G \rho \vec{r}_2 - \frac{4}{3}\pi G \rho_m \vec{x} \ (0.3)$$

А.2. Ядроға әсер ететін ауырлық күшін табыңыз **(0,5 ұпай)**

Шешім:
Күш $\vec{F} = m\vec{g}$ ретінде анықталатыны белгілі (1)
Біртекті емес өріс жағдайында жалпы күшті былай жазуға болады:

$$\vec{F} = \sum \vec{g}\Delta m = -\frac{4}{3}\pi G\rho_m\vec{x}\sum \Delta m - \frac{4}{3}\pi G\rho \sum \vec{r}_2\Delta m = -\frac{4}{3}\pi G\rho_m m\vec{x}\ (0.5)$$

Себебі теңдеу $\sum \vec{r}_2\Delta m$ ортасында орналасқан ядро массаларының центрінің орнын білдіреді, сондықтан $\sum \vec{r}_2\Delta m = 0$ (3)

Бөлім В. Мантияның ядромен бірге қозғалысын есептеу (5 ұпай)

В.1. Сұйықтық жылдамдығының шекаралық шарттарын табыңыз. **(0,5 ұпай)**

Шешім: Бұл шекаралық шарттары айқын және

$$v_n = 0 \quad (0.25)$$
$$v_\infty = v_0 \quad (0.25)$$

себебі шардың қозғалысы мантияның шексіздікке қозғалысына әсер ете алмайтындықтан, мантия ядроға ене алмайды және жылдамдықтың қалыпты компоненті нөлге тең.

В.2. Шардың айналасында ағып жатқан сұйықтық жылдамдығы мен асқын өткізгіш шарды біртекті магнит өрісіне салғандағы магниттік өрістің индукциясы арасында ұқсасатық жасауға болатынын көрсетіңіз. **(1 ұпай)**

Шешім: бастау үшін жылдамдықты табу міндеті қандай екенін табамыз. Біздің жағдайда сұйықтықтың ыстық емес қозғалысы жылдамдық айналымы нөлге тең. ($\oint \vec{v}\cdot\overrightarrow{dl} = 0$) (1)
Нәтижесінде біздің жылдамдық өрісі кейбір скалярлық функцияның градиенті ретінде ұсынылуы мүмкін, яғни $\vec{v} = -grad\ (\alpha)$ (2)
Сондай-ақ, сұйықтық үшін үздіксіздік теңдеуі орындалуы керек екенін ескереміз:

$$div(\rho\vec{v}) = 0 \rightarrow \rho\cdot div(\vec{v}) = 0 \rightarrow\ div(\vec{v}) = 0 \quad (3)$$

(3) - ті (2) - ке ауыстыру арқылы біз сұйықтықтың жылдамдығын табу үшін дифференциалдық теңдеуді аламыз: $\Delta\alpha = 0$ (4)
Енді өткізгіш шарды біртекті магнит өрісіне орналастыру мәселесін қарастырыңыз. Бұл мәселенің шекаралық шарттары жылдамдық жағдайларына сәйкес келетінін ескереміз:
Өткізгіштің ішіндегі магниттік индукция ағыны 0 болғандықтан, $B_n = 0$; $B_\infty = B_0$. (5)
Сондай-ақ, біз магнитостатикалық жағдайда жұмыс істейтіндіктен, $div(\vec{B}) = 0$ (6)
Біз суперөткізгіштермен жұмыс жасайтындықтан, олар бірдей болмайды, яғни $\oint \vec{B}\cdot\overrightarrow{dl} = 0$ (7) және біздің өрісімізді магниттік потенциалдың градиенті ретінде ұсынуға болады: $\vec{B} = -grad(\varphi)$. (8)
(8) - ді (6) - ға ауыстыру арқылы біз $\vec{v}$-мен бірдей теңдеуді аламыз, яғни $\Delta\varphi = 0$ (9)

Яғни, индукция мен жылдамдықты табу үшін бірдей шекаралық шарттары бар бірдей дифференциалдық теңдеулерді алдық. Яғни, $\vec{v}$ және $\vec{B}$ еркін тұрақтыға көбейту дәлдігіне сәйкес келеді.
Қатысушының шешіміндегі идея үшін ішінара ұпайлар беріледі.

B.3. Шардың айналасындағы бүкіл кеңістіктегі сұйықтықтың тұрақталған жылдамдығын табыңыз. **(2 ұпай)**

Шешім: біз B.2 тармағында дәлелдегендей, сұйықтықтың жылдамдығын табу туралы тапсырманы өткізгіш шардың айналасында өрісті табу проблемасына дейін азайтуға болады.
$\overrightarrow{B_0}$ біртекті магнит өрісіндегі өткізгіш шарды қарастырыңыз. Бұл жағдайда доптың бетінде өрістің қалыпты компоненті нөлге тең болатын шешім алу керек екенін ескеріңіз. Доптың магнит өрісін диполь өрісі ретінде ұсынуға болады делік. (1)
Содан кейін суперөткізгіш шардың өрісі біртекті шармен бірге

$$\vec{B} = \frac{3k(\vec{m}\cdot\vec{r})\vec{r}}{r^5} - \frac{k\vec{m}}{r^3} + \overrightarrow{B_0} \quad (0.2)$$

теңдеу түрінде болады.
Диполь бағытымен θ бұрышын құрайтын бағыт үшін шекаралық шартты жазамыз:

$$\frac{3km}{R^3}\cdot\cos(\theta) - \frac{km}{R^3}\cdot\cos(\theta) + B_0\cos(\theta) = 0 \rightarrow m = -\frac{B_0R^3}{2k} \quad (1.0)$$

Сонда өткізгіш доптың айналасындағы өріс:

$$\vec{B} = -\frac{3R^3\left(\overrightarrow{B_0}\cdot\vec{r}\right)\vec{r}}{2r^5} + \frac{\overrightarrow{B_0}R^3}{2r^3} + \overrightarrow{B_0} \quad (0.2)$$

Енді біз допты тірек шеңберіндегі кеңістіктегі жылдамдықты жаза аламыз:

$$\vec{v} = -\frac{3R^3(\overrightarrow{v_0}\cdot\vec{r})\vec{r}}{2r^5} + \frac{\overrightarrow{v_0}R^3}{2r^3} + \overrightarrow{v_0} \quad (0.2)$$

Ал қозғалыссыз санақ жүйесінде:

$$\vec{v} = -\frac{3R^3(\overrightarrow{v_0}\cdot\vec{r})\vec{r}}{2r^5} + \frac{\overrightarrow{v_0}R^3}{2r^3} \quad (0.4)$$

B.4. Сол қосылған массаны μ табыңыз. **(1,5 ұпай)**

Шешім: Сұйықтықтың қосылған массасын табу үшін сұйықтықтың кинетикалық энергиясын анықтау керек..

$$E_k = \int \frac{dmv^2}{2}$$

$$dm = 2\pi r\sin\theta\cdot dr\cdot rd\theta$$

$$E_k = \int_R^\infty\int_0^\pi \pi r^2\sin\theta\, v^2 drd\theta \quad (0.5)$$

Алдыңғы тармақтан v-ны ауыстыру кезінде $v^2 = \frac{v_0^2\left(1+3\cos^2\theta\right)R^6}{r^6}$ (0.5)

$$E_k = \frac{\pi\rho v_0^2R^6}{4}\int_R^\infty\frac{dr}{r^4}\int_\pi^0(1+3\cos^2\theta)d(\cos\theta) = \frac{\pi\rho R^3v_0^2}{3} \quad (0.5)$$

Бөлім С. Мантия қысымының әсерін қарастыру. (4,5 ұпай)

С.1. Планета ішінде белгілі бір нүктесіндегі сұйықтық φ гравитациялық потенциалға тәуелділік функциясы ретінде көрсетіңіз. **(1 ұпай)**

Шешім: Біздің сұйықтық тепе-теңдікте, яғни оған қолданылатын барлық күштер теңдестірілген. x бойындағы күштерді қарастырыңыз:
Қысым күші: $F_{pressure} = -\frac{\Delta p}{\Delta x} \cdot V$ (0.4)
Гравитация күші: $F_{grav} = \rho V g = -\frac{\Delta \varphi}{\Delta x} \cdot \rho V$ (0.4)
$F_{pressure} + F_{grav} = 0$, тепе-теңдік жағдайын ескере отырып,

$$p = -\rho\varphi(x, y, z) + C \quad (0.2)$$

алуға болады.

С.2. Планета $\vec{r_1}$, ядро $\vec{r_2}$ орталығынан және ығысуы $\vec{x}$ функциясы ретінде ядроның ішіндегі гравитациялық потенциалды табыңыз **(2 ұпай)**

Решение: Бастау үшін тығыздығы ρ болатын біртекті доптан потенциал табамыз. Бастау үшін шар бетінің потенциалын табайық:

$$\varphi(R) = \int_{\infty}^{R} \frac{GM}{r^2} dr = -\frac{GM}{R} \ (0.3)$$

Енді планетаның орталығынан r_1 қашықтықта мантия жасаған әлеуетті табамыз. Ол үшін А.1 нәтижесін қолданамыз. Біртекті шардағы өріс үшін:

$$\varphi(R) - \varphi(r_1) = \int_{r_1}^{R} g dr = \int_{r_1}^{R} \frac{4}{3}\pi G\rho r dr = \frac{4}{3}\pi G\rho \frac{R^2 - r_1^2}{2} = \frac{GM}{2R} - \frac{GMr_1^2}{2R^3}$$

$$\varphi(r_1) = -\frac{3}{2}\frac{GM}{R} + \frac{GM{r_1}^2}{2R^3} \ (0.6)$$

Оған суперпозицияға байланысты ядро потенциалы $\varphi(r_2)$ қосылуы керек:

$$\varphi(r_2) = -\frac{3}{2}\frac{Gm}{r} + \frac{Gmr_2^2}{2r^3}$$

Мұнда r – ядро радиусы, ал $m = \frac{4}{3}\pi r^3(\rho - \rho_m)$ (0.4)
Сондай-ақ, шар ішіндегі потенциалы:

$$\varphi = -\frac{3}{2}\frac{GM}{R} + \frac{GM{r_1}^2}{2R^3} - \frac{3}{2}\frac{Gm}{r} + \frac{Gmr_2^2}{2r^3} \ (0.2)$$

r_1, r_2 косинус теоремасымен байланысты және $r_1^2 = x^2 + r_2^2 + 2xr_2\cos(\theta)$ (0.5)
$\theta - \vec{x}$ мен $\vec{r_2}$ арасындағы бұрыш.

С.3. Планетаның ядросына әсер ететін сұйықтық қысымының күшін табыңыз**. (1.5 ұпай)**

Решение: Ядродағы қысым күші ядро бетіне қалыпты болатындығын ескеріңіз. (1)

$$dF = 2\pi r^2 p(\theta)\sin(\theta)\, d\theta \quad (0.5)$$

Симметрия әсерінен толық күш x бойымен бағытталады, содан кейін

$$dF_x = 2\pi r^2 p(\theta)\sin(\theta)\cos(\theta)\,d\theta = -2\pi r^2 p(\theta)\cos(\theta)\,d(\cos(\theta)) \quad (0.3)$$

Сонда толық күшті келесідей табуға болады:

$$F_p = \int_{\pi}^{0} 2\pi r^2\,\rho \cdot \frac{GM}{2R} \cdot \frac{2xr}{R^2}\cos^2(\theta)\,d(\cos(\theta))$$

Косинусқа пропорционалды емес бөліктер интегралдау кезде нөлге айналады.

$$F_p = \frac{16\pi^2}{9} G\rho_m^2 r^3 x \quad (0.7)$$

Бөлім D. Планета ядросының қозғалысын анықтау. (1,5 ұпай)

D.1. Планета ядросының кіші тербелістерінің жиілігін табыңыз. Мантия тығыздығы $\rho_m = 4{,}8\ \text{г/см}^3$, ал ядро тығыздығын $\rho = 12{,}7\ \text{г/см}^3$ деп қарастырыңыздар. **(1,5 ұпай)**

Шешім: А және С бөліктерінен $F = F_g - F_p \propto x,$ және $F < 0$, бұл планетаның қозғалыс теңдеуін гармоникалық тербелістердің теңдеуі болып табылатын $M\ddot{x} = -Cx$ ретінде ұсынуға болатындығын көрсетеді.

Күшін табайық:

$$F = F_g - F_p = -\frac{16}{9}\pi^2 G\rho_m(\rho - \rho_m)r^3 x \ (0.2)$$

Сондай-ақ, В бөлігінен тиімді ядро массасын табуға болатындығын ескереміз:

$$M = \frac{4}{3}\pi r^3\rho + \frac{2}{3}\pi r^3\rho_m = \frac{2}{3}\pi r^3(2\rho + \rho_m) \ (0.5)$$

Содан кейін $M\ddot{x} = -Cx$ қозғалыс теңдеуінен

$$\omega^2 = \frac{C}{M} = -\frac{F}{Mx} = \frac{8}{3}\pi G \cdot \frac{\rho_m(\rho - \rho_m)}{2\rho + \rho_m} \ (0.6)$$

$$\omega = 8.367 \cdot 10^{-4}\text{Гц} \quad (0.2)$$