ЗЕРТХАНАЛЫҚ ЖҰМЫС №1
ПЛАЗМАНЫҢ НЕГІЗГІ ПАРАМЕТРЛЕРІН ЕСЕПТЕУ ЖӘНЕ ПЛАЗМАЛЫҚ КҮЙ КРИТЕРИЙЛЕРІН ТЕКСЕРУ

Жұмыстың мақсаты

Электрон концентрациясы мен температурасы арқылы плазманың Дебай ұзындығын, Дебай сферасындағы бөлшектер санын, электрондық плазмалық жиілігін және электрондық қысымын анықтау; плазмалық күй критерийлерін тексеру.

Күтілетін оқу нәтижелері

- Дебай экрандалуының физикалық мағынасын түсіндіреді;
- λ_D, N_D және f_{pe} шамаларын есептейді;
- $L \gg \lambda_D$ және $N_D \gg 1$ шарттарын сандық тексереді;
- Excel-де параметрлік тәуелділіктерді тұрғызады және талдайды.

Қажетті құралдар

Компьютер немесе ноутбук, Microsoft Excel немесе Google Sheets, калькулятор.

Қысқаша теория

Плазма және иондалған газ. Плазма – еркін электрондардан, оң және теріс иондардан, сондай-ақ бейтарап бөлшектерден тұратын иондалған орта. Алайда кез келген иондалған газды бірден плазма деп атауға болмайды. Плазмаға тән негізгі ерекшелік – зарядталған бөлшектердің қозғалысы тек жеке соқтығыстармен емес, көптеген бөлшектер тудыратын ортақ электр және магнит өрістерімен де анықталатын ұжымдық сипат. Сондықтан плазма жай иондалған газдан квазибейтараптығы, Дебай экрандалуы және ұжымдық тербелістердің болуымен ерекшеленеді.

Квазибейтараптық. Плазманың макроскопиялық көлемінде оң және теріс зарядтардың концентрациялары бір-біріне өте жақын болады. Бір рет иондалған плазма үшін қарапайым түрде $n_e \approx n_i$ деп жазуға болады. Бұл абсолютті бейтараптық емес: плазманың шағын аймақтарында немесе шекара маңында зарядтардың жергілікті бөлінуі пайда болуы мүмкін. Осындай аз ғана зарядтық ауытқулар электр өрісін туғызады, ал ол бөлшектерді қайта таратып, плазманы қайтадан квазибейтарап күйге әкелуге ұмтылады. Сондықтан квазибейтараптық – плазманың үлкен масштабтағы орташа қасиеті.

Дебай экрандалуы. Егер плазмаға сыртқы заряд енгізілсе немесе қандай да бір аймақта зарядтардың теңгерімі бұзылса, еркін электрондар мен иондар сол электр өрісіне жауап ретінде қайта бөлінеді. Нәтижесінде бастапқы электр өрісі белгілі бір арақашықтықтан кейін әлсірейді. Осы экрандалудың сипаттамалық кеңістіктік масштабы Дебай ұзындығы λ_D деп аталады. Электрондық компонент үшін ол төмендегі өрнекпен анықталады:

$$\lambda_D = \sqrt{\frac{\varepsilon_0 k_B T_e}{n_e e^2}}$$

Температура мен концентрацияның әсері. Дебай ұзындығы $\lambda_D \propto \sqrt{T_e}$ және $\lambda_D \propto 1/\sqrt{n_e}$ заңдылықтарына бағынады. Электрон температурасы T_e артқанда электрондардың жылулық қозғалысы күшейіп, оларды бір аймақта ұстау қиындайды, сондықтан экрандалу арақашықтығы

ұлғаяды. Ал электрон концентрациясы n_e артқанда зарядты экрандауға қатысатын бөлшектер саны көбейеді және электр өрісі қысқа арақашықтықта әлсірейді, сондықтан λ_D кемиді. Осы тәуелділік зертханалық жұмыста $\lambda_D=f(n_e)$ графигі арқылы тексеріледі.

Дебай сферасындағы бөлшектер саны. Радиусы λ_D болатын шартты сфера Дебай сферасы деп аталады. Оның ішіндегі зарядталған бөлшектер саны N_D плазмадағы ұжымдық әсерлердің қаншалықты айқын екенін көрсетеді:

$$N_D = \frac{4\pi}{3} n_e \lambda_D^3$$

$N_D \gg 1$ шартының физикалық мағынасы. Егер Дебай сферасында көптеген бөлшек болса, электр өрісін экрандау бір ғана бөлшектің әсерімен емес, көп бөлшектің бірлескен қозғалысымен жүзеге асады. Бұл плазманың ұжымдық табиғатын көрсетеді. Керісінше, N_D шамасы бірге жуық немесе одан кіші болса, жеке бөлшектер арасындағы әсер басым болып, плазмалық орта ұғымын қолдану шектеледі.

Жүйе өлшемі және плазмалық күй критерийі. Плазманың сипаттамалық өлшемі L Дебай ұзындығынан әлдеқайда үлкен болуы тиіс: $L \gg \lambda_D$. Бұл жағдайда жүйенің негізгі көлемі шекаралық электр өрістерінен қорғалып, квазибейтарап күй сақталады. Егер $L \approx \lambda_D$ болса, экрандалу масштабы бүкіл жүйе өлшемімен шамалас болады; сондықтан шекаралық өрістер плазманың едәуір бөлігіне әсер етеді және макроскопиялық квазибейтараптық туралы тұжырым әлсірейді. Осы жұмыста плазмалық күйді бағалау үшін екі негізгі шарт бірге тексеріледі: $L \gg \lambda_D$ және $N_D \gg 1$.

Электрондық плазмалық жиілік. Плазмада электрондар тепе-теңдік күйінен аз ғана ығысса, оң иондық фон мен электрондар арасында қалпына келтіруші электр өрісі пайда болады. Соның әсерінен электрон бұлты иондық фонға қатысты ұжымдық тербеліс жасайды. Осы табиғи тербелістің бұрыштық жиілігі ω_{pe}, ал кәдімгі жиілігі f_{pe} деп аталады:

$$\omega_{pe} = \sqrt{\frac{n_e e^2}{\varepsilon_0 m_e}}, \qquad f_{pe} = \frac{\omega_{pe}}{2\pi}$$

Плазмалық жиіліктің уақыттық мағынасы. Плазмалық жиілік плазманың зарядтық ауытқуға қаншалықты тез жауап беретінін сипаттайды. Тербеліс периоды $T_{pe}=1/f_{pe}=2\pi/\omega_{pe}$, ал сипаттамалық жауап уақытының реті $1/\omega_{pe}$ шамасында. Формуладан $\omega_{pe} \propto \sqrt{n_e}$ және $f_{pe} \propto \sqrt{n_e}$ екені көрінеді: электрон концентрациясы артқан сайын қалпына келтіруші электр өрісі күшейіп, ұжымдық тербеліс жиілігі жоғарылайды. Сондықтан $\lambda_D=f(n_e)$ графигі төмендейтін, ал $f_{pe}=f(n_e)$ графигі өсетін тәуелділік көрсетуі тиіс.

Электрондық қысым. Плазмадағы электрондар жылулық қозғалысқа ие болғандықтан, олардың газдық-кинетикалық қысымын электрон концентрациясы мен температурасы арқылы бағалауға болады:

$$p_e = n_e k_B T_e = n_e e\, T_e[\mathrm{eV}]$$

Ескерту: T_e электрон-вольтпен берілсе, $k_B T_e$ энергиясын $e \cdot T_e[\mathrm{eV}]$ түрінде қолдануға болады. Сонда $\lambda_D = \sqrt{(\varepsilon_0 T_e[\mathrm{eV}]/(n_e e))}$, ал электрондық қысым $p_e = n_e e T_e[\mathrm{eV}]$. Егер T_e Кельвинмен берілсе, $p_e = n_e k_{BT_e}$ формуласын қолданыңыз.

Температураны электрон-вольтпен өрнектеу. Электрондық қысым p_e концентрацияға да, температураға да тура пропорционал. Егер T_e Кельвинмен берілсе, $p_e = n_e k_B T_e$ қолданылады. Плазма физикасында электрон температурасы жиі электрон-вольтпен беріледі. 1 eV$=1.602176634\times10^{-19}$ Дж және 1 eV/$k_B \approx 1.16045\times10^{4}$ K болғандықтан, T_e eV-пен берілген кезде $k_B T_e = e\cdot T_e$[eV] деп алып, $p_e = n_e e T_e$[eV] түрін қолдануға болады.

Негізгі физикалық қорытынды. Бұл жұмыста есептелетін λ_D, N_D, f_{pe} және p_e шамалары плазманың әртүрлі қасиеттерін сипаттайды: λ_D – электр өрісінің экрандалу масштабын, N_D – ұжымдық әсерге қатысатын бөлшектер санын, f_{pe} – электрондық компоненттің ұжымдық жауап жылдамдығын, ал p_e – электрондардың жылулық қысымын. L/λ_D және N_D критерийлерін бірге талдау берілген иондалған ортаны плазма ретінде қарастырудың негізділігін бағалауға мүмкіндік береді.

Орындалу реті

1. Өз варианты бойынша n_e, T_e және L мәндерін кестеден алыңыз.
2. T_e мәнін eV-тан Кельвинге түрлендіріңіз.
3. Дебай ұзындығын λ_D есептеңіз.
4. Дебай сферасындағы бөлшектер санын N_D есептеңіз.
5. ω_{pe} және f_{pe} есептеңіз.
6. Электрондық қысымды p_e есептеңіз.
7. L/λ_D қатынасын анықтап, $L \gg \lambda_D$ шартын бағалаңыз.
8. Excel-де негізгі вариант үшін есеп жүргізіп, қосымша түрде n_e-ді $0.1n_e$; $0.2n_e$; $0.5n_e$; n_e; $2n_e$; $5n_e$; $10n_e$ етіп өзгертіп, $\lambda_D(n_e)$ және $f_{pe}(n_e)$ графиктерін тұрғызыңыз.
9. Графиктерден концентрация артқанда экрандалу масштабы мен плазмалық жиілік қалай өзгеретінін түсіндіріңіз.

Бастапқы деректер: 8 вариант

Вариант	n_e, м$^{-3}$	T_e, eV	**L, м**
1	1.0×10^{16}	2.0	0.10
2	5.0×10^{16}	2.5	0.08
3	1.0×10^{17}	3.0	0.12
4	5.0×10^{17}	1.5	0.05
5	1.0×10^{18}	4.0	0.15
6	2.0×10^{18}	2.2	0.20
7	5.0×10^{18}	5.0	0.25
8	8.0×10^{17}	3.5	0.07

Есептеу үлгісі

Мысал: $n_e = 1.0\times10^{16}$ *м*$^{-3}$, $T_e = 2$ *eV*. Дебай ұзындығы $\lambda_D \approx 1.05\times10^{-4}$ *м*. Егер $L = 0.10$ *м* болса, $L/\lambda_D \approx 9.5\times10^{2}$, яғни жүйе өлшемі Дебай ұзындығынан әлдеқайда үлкен.

Excel-де рәсімдеуге арналған кесте үлгісі

№	n_e, $м^{-3}$	T_e, eV	T_e, K	λ_D, м	N_D	f_{pe}, Гц	p_e, Па	L/λ_D
1								
2								
…								

Графиктер: 1) $\lambda_D=f(n_e)$; 2) $f_{pe}=f(n_e)$. Екі графикте де ось атаулары мен өлшем бірліктері міндетті түрде көрсетілсін.

Есеп беру құрылымы

1. Зертханалық жұмыстың атауы, мақсаты және студенттің варианты.
2. Бастапқы деректер кестесі.
3. Қолданылған формулалар және белгілеулер.
4. Есептеу нәтижелерінің Excel кестесі.
5. Талап етілген графиктер.
6. Нәтижелерді физикалық тұрғыдан талдау.
7. Қысқаша қорытынды (кемінде 5–7 сөйлем).

Бақылау сұрақтары

1. Плазма мен жай иондалған газдың негізгі айырмашылығы қандай?
2. Квазибейтараптық абсолютті бейтараптықтан несімен ерекшеленеді?
3. Дебай ұзындығы нені сипаттайды?
4. T_e артқанда λ_D қалай өзгереді?
5. n_e артқанда λ_D және f_{pe} қалай өзгереді?
6. $N_D \gg 1$ шартының физикалық мағынасы қандай?
7. $L \approx \lambda_D$ болса, макроскопиялық квазибейтараптық туралы қандай қорытынды жасауға болады?
8. Плазмалық жиілік қандай уақыт масштабын сипаттайды?

Негізгі физикалық тұрақтылар

Шама	Белгіленуі	Мәні
Элементар заряд	e	$1.602176634\times10^{-19}$ Кл
Электрон массасы	m_e	9.109×10^{-31} кг
Протон массасы	m_p	1.673×10^{-27} кг
Дейтрон массасы (жуық)	m_D	3.344×10^{-27} кг
Электр тұрақтысы	ε_0	8.854×10^{-12} Ф/м
Магнит тұрақтысы	μ_0	$4\pi\times10^{-7}$ Гн/м
Больцман тұрақтысы	k_B	1.380649×10^{-23} Дж/К
1 eV	–	$1.602176634\times10^{-19}$ Дж
1 eV/k_B	–	$\approx1.16045\times10^{4}$ К