

СЦЕНАРІЇ З ПЕРЕВАЖНИМ НАГРІВАННЯМ ЙОНІВ У СТЕЛАРАТОРІ ВЕНДЕЛЬШТАЙН 7-Х

Я.І. Колесниченко, В.В. Луценко, А.В. Тихий

Інститут ядерних досліджень, проспект Науки 47, 03028 Київ, Україна

Використовуючи нульвимірну парадигму для рівнянь енергетичного балансу, розглянута плазма, нагріта інжекцією пучків нейтральних атомів (NBI) з енергією \mathcal{E}_0 , з метою дослідження можливості досягнення стаціонарної температури йонів T_i , що перевищує температуру електронів ($T_i > T_e$). Конкретні розрахунки проведені для стеларатора W7-X.

Зроблено висновок, що сценарії з $T_i > T_e$ можливі лише тоді, коли нагрівання електронів зовнішніми джерелами слабше, ніж охолодження електронів, спричинене втратою енергії. «Режим з гарячими йонами», тобто сценарій з $T_i \gg T_e$, можливий, коли електрон-йонний зв'язок дуже слабкий.

У стелараторі W7-X стаціонарні стани з $T_i > T_e$ можливі в плазмі з відносно низькою густиною та достатньо високим часом утримання енергії йонів (тобто, коли турбулентність, викликана градієнтом йонної температури (ITG) відсутня або пом'якшена), див. Таблицю 1.

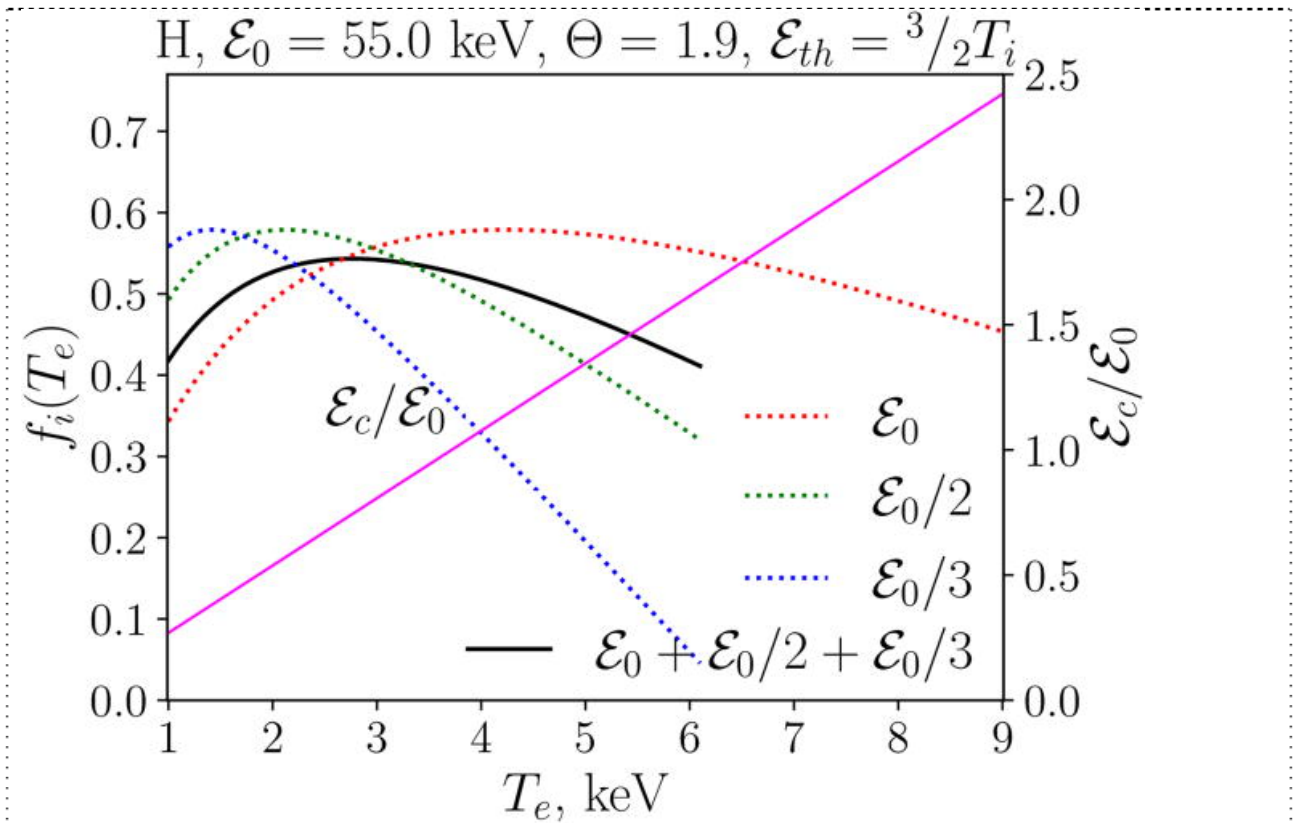
Передбачено важливу особливість нагрівання NBI у стаціонарному стані: виявлено, що частка потужності NBI, що передається йонам (f_i), має максимум при певній електронній температурі, див. Мал. 1. Це контрастує з відомим результатом Спітцера, показаним на Мал. 2, де ця частка, позначена f_i^+ , є монотонною функцією T_e . Різниця пояснюється тим, що $f_i^+ = f_i + 1.5T_i / \mathcal{E}_0$, де перший член пов'язаний з охолодженням швидких йонів внаслідок кулонівських зіткнень та супутнього нагрівання теплових йонів, тоді як другий член зумовлений переходом термалізованих інжекттованих частинок з популяції швидких до популяції йонів основної плазми.

Таблиця 1. Температури плазми (T_e та T_i), часи утримання йонів та електронів (τ_{Ei} та τ_{Ee}) та співвідношення $\Theta = T_i/T_e$, $\zeta = \tau_{Ee}/\tau_{Ei}$ у плазмі з нормованою густиною $n_{I0}=1$ для $P_{NBI} = 3.5$ МВт та $P_{NBI} = 6.8$ МВт. Наведені дані є вірними, коли параметри плазми забезпечують стаціонарний стан, такий що ζ дорівнює або 1/3 (стійка ITG мода) або 3 (ITG турбулентність).

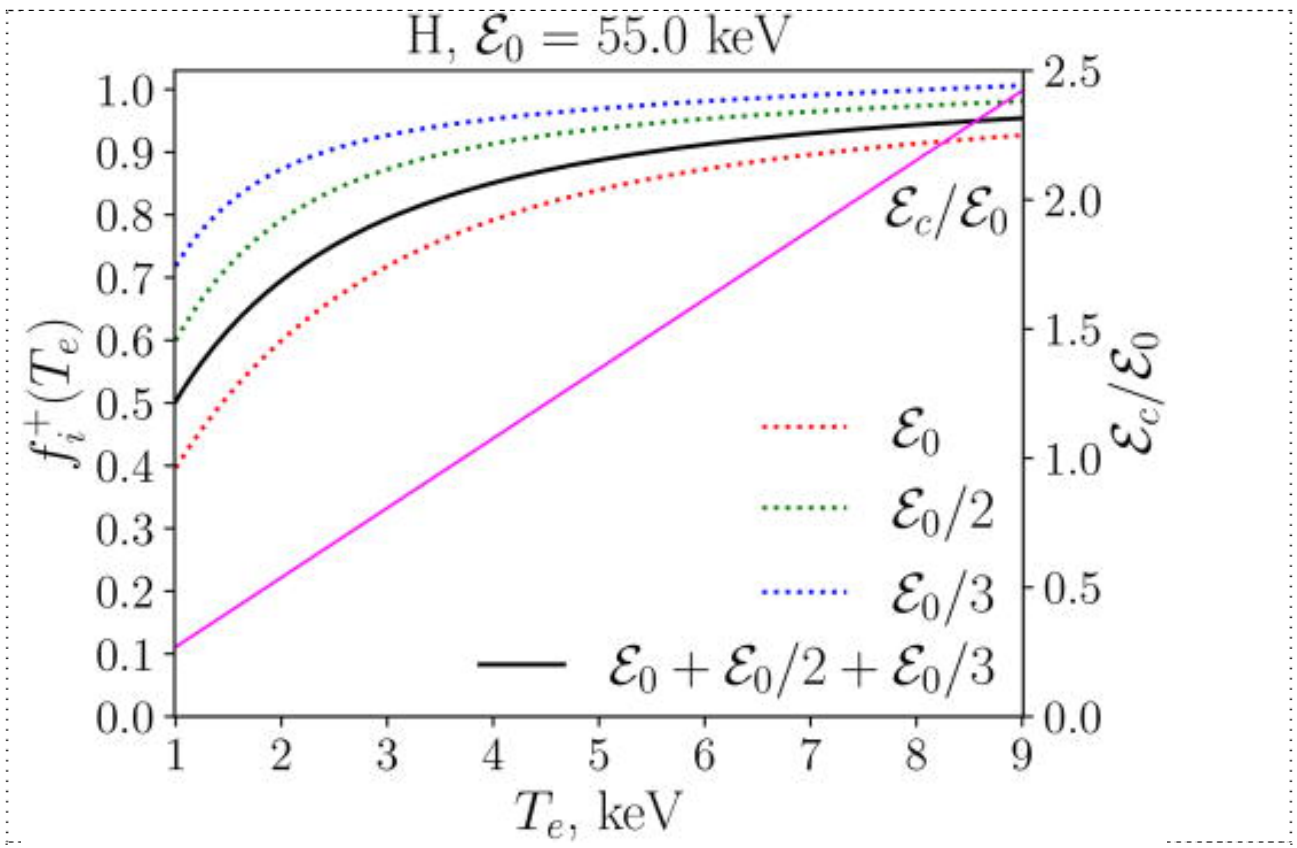
$P_{MВт}$	$\tau_{Ei}, \text{сек}$	$\tau_{Ee}, \text{сек}$	$T_i, \text{кеВ}$	$T_e, \text{кеВ}$	Θ	ζ
3.5	0.23	0.072	5.02	2.64	1.9	1/3
	0.39	0.12	8.40	4.42		
6.8	0.046	0.14	1.90	2.37	0.8	3
	0.16	0.45	6.34	7.93		
6.8	0.068	0.022	2.91	1.52	1.9	1/3
	0.26	0.081	11.1	5.82		
	0.027	0.081	2.16	2.70		
0.075	0.22	5.98	7.47			

Результати роботи опубліковано в статті [1], яка виконана в рамках Консорціуму EUROfusion, що фінансується Європейським Союзом через Програму досліджень та навчання Євратому (Грантова угода № 101052200—EUROfusion).

[1] Ya.I. Kolesnichenko, V.V. Lutsenko, A.V. Tykhyu, and the W7-X Team Scenarios with predominant heating of electrons and ions in Wendelstein 7-X, Phys. Plasmas **33**, 032506 (2026); <https://doi.org/10.1063/5.0315228>



Мал. 1. Частка потужності NBI f_i (чорна суцільна лінія), $f_i(\mathcal{E}_\sigma)$ для $\sigma=1,2,3$, де $\mathcal{E}_1=\mathcal{E}_0$, $\mathcal{E}_2=\mathcal{E}_0/2$, $\mathcal{E}_3=\mathcal{E}_0/3$ (штрихові лінії) та \mathcal{E}_c (критична енергія) для \mathcal{E}_0 (пурпурова лінія) як функції T_e у стелараторі W7-X.



Мал. 2. Те ж саме, що і на Мал.1., але для f_i^+ .

