

# КЕПШІНГ ТА КЛЕМШІНГ У СТЕЛАРАТОРІ ВЕНДЕЛЬШТАЙН 7-Х ПІД ЧАС НАГРІВАННЯ НА ЕЛЕКТРОННОМУ ЦИКЛОТРОННОМУ РЕЗОНАНСІ

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

*Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна*

Особливістю стеларатора Wendelstein 7-X є те, що неокласичний транспорт в ньому є доволі малим і практично не впливає на утримання плазми, де основну роль грає турбулентність, як і в токамаках [1]. Нагрівання на електронному циклотронному резонансі (ЕЦРН) дозволило отримати плазми з електронною температурою від 1 до 7 кеВ [2]. Проте йонна температура в таких експериментах була значно нижчою за 7 кеВ; більше того, спостерігався клемпінг йонної температури при  $T_i \approx 1.5$  кеВ [3].

У цій роботі за допомогою 0-вимірної парадигми рівнянь балансу енергії показано, що у плазмах із переважним нагріванням електронів, зокрема при ЕЦРН, температура йонів  $T_i$  завжди обмежена згори (кепшінг) температурою, яка є нижчою за температуру електронів  $T_e$ . Коли теплопровідність йонів є аномальною, тобто коли час утримання енергії йонів набагато менший за час утримання енергії електронів – наприклад, через викликану йонною температурно-градієнтною (ЙТГ) нестійкістю турбулентність – такий кепшінг узгоджується з основними рисами клемпінгу йонної температури, що спостерігався у експериментах на стелараторах та токамаках, зокрема на стелараторі Wendelstein 7-X, див. напр. [3]. По-перше, температура кепшінгу  $T_{i*}$  (максимальне значення  $T_i$  як функції  $T_e$ , яке досягається при  $T_e^*$ , причому максимум дуже пологий) є нижчою за значення, яке дає неокласична теорія переносу тепла; по-друге, цей максимум не залежить від потужності нагрівання: по-третє, він може лише слабо залежати від густини плазми, по-четверте, існує плато йонної температури в околі  $T_e^*$ .

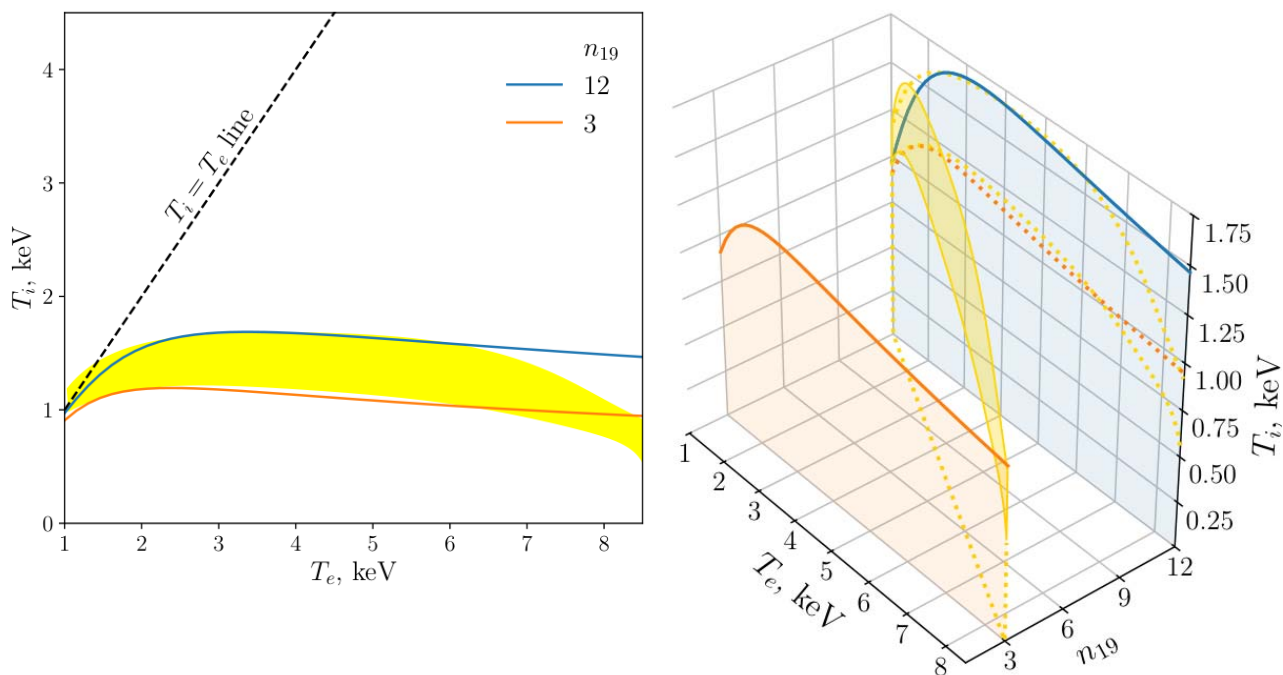


Рис. 1. Залежність  $T_i$  від  $T_e$  в W7-X. Зліва: жовтим зафарбована область, в яку потрапляє абсолютна більшість експериментальних точок з Рис. 1а роботи [3] для ЕЦРН-розрядів із різною потужністю ЕЦРН та різною густиною плазми. Ця область відповідає відомій температурі клемпінгу  $T_i \approx 1.5$  кеВ. Суцільні лінії: розраховані функції  $T_i(T_e)$  для густої (синя) і розрідженої (червона) плазми у W7-X. Справа: те ж, що і зліва, з додаванням осі густини плазми  $n_{19}$  [ $n / 10^{19} \text{ m}^{-3}$ ]. Наскісне розташування жовтої області схематично показує, що в експериментх високі значення  $T_e$  досягаються лише при низькій густині плазми. Пунктирні криві спроектовано на площину  $n_{19}=12$  для порівняння з лівим графіком.

Завдяки існуванню плато йонної температури, температура кепшінгу  $T_{i*}$  близька до температури йонів, яка досягається за тієї питомої потужності нагрівання  $p_{\text{нс}}$ , за якої  $T_i \approx T_e$ . Збільшення питомої потужності нагрівання понад  $p_{\text{нс}}$ , чи за рахунок зменшення густини плазми, чи через збільшення

потужності ЕЦРН, приводить до зростання  $T_e$ , в той час як  $T_i$  змінюється слабо. Ці особливості аномального кеппінгу показано на Рис. 1, 2. Таким чином, можна стверджувати, що клемпінг йонної температури є аномальним кеппінгом, що виникає через ЙТГ-турбулентність чи інші нестійкості, які спричиняються до аномальної йонної теплопровідності, а викладена в цій роботі парадигма може застосовуватися для опису клемпінгу.

Отримано співвідношення, які можуть бути використані для діагностики часу утримання енергії в плазмі під час клемпінгу: знаючи температуру клемпінгу та питому потужність нагрівання в експерименті з  $T_e \approx T_i$ , можна обчислити час утримання енергії в експериментах з іншою густиною та питомою потужністю нагрівання.

Результати роботи опубліковано в статті [4].

Робота виконана в рамках консорціуму EUROfusion.

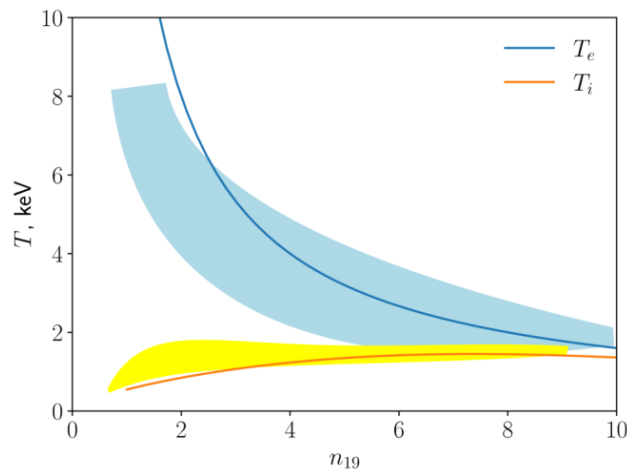


Рис. 2. Залежність  $T_i$  та  $T_e$  від густини плазми  $n_{19}$  за фіксованого значення потужності ЕЦРН 7 МВт. Інші параметри як на Рис. 1. Жовтим та синім зафарбовані області, в які потрапляють абсолютна більшість експериментальних значень відповідно  $T_i$  та  $T_e$ , зображених на Рис. 1b роботи [3].

1. C.D. Beidler et al. Nature 596(12) (2021) 221. doi:10.1038/s41586-021-03687-w
2. T. Klinger et al. Nucl. Fusion 59(11) (2019) 112004. doi:10.1088/1741-4326/ab03a7
3. M.N.A. Beurskens et al. Nucl. Fusion 61(11) (2021) 116072. doi:10.1088/1741-4326/ac1653
4. Ya.I. Kolesnichenko, V.V. Lutsenko, A.V. Tykhyu. Phys. Plasmas 33 (2026) 032506. doi:10.1063/5.0315228