

# Оптимальне підсилення термоядерного горіння йонно-циклотронним резонансним нагріванням палива

Ю. В. Яковенко<sup>1,2</sup> та А. І. Тіщенко<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ

<sup>2</sup>Національний університет «Києво-Могилянська академія», Київ

Українська конференція з фізики плазми та  
керованого термоядерного синтезу — 2019  
Київ, 11–12 грудня 2019 р.

- 1 Вступ: мотивація
- 2 Оптимальне ЙЦРН за відсутности ІНС
- 3 Оптимальне ЙЦРН за наявности ІНС
- 4 Висновки

# Постановка задачі I

- У термоядерному реакторі буде якийсь додаткове нагрівання плазми — інжекцією нейтральних струменів (ІНС) або радіочастотними хвилями — зокрема, для керування процесом горіння.
- Надтеплові частинки впливають на інтенсивність горіння не лише через нагрівання плазми, а й безпосередньо.
- Вивчалася можливість підвищити ефективність реактора при застосуванні ІНС  
*J. M. Dawson, H. P. Furth, and F. H. Tenney, Phys. Rev. Lett. 26 (1971) 1156*  
*D. L. Jassby, Nucl. Fusion 17 (1977) 309*
- Реакції струмів-плазма робитимуть помітний внесок у потужність реактора ITER.
- У JET спостерігалась синергія ІНС та йонно-циклотронного резонансного нагрівання (ЙЦРН).  
*A. V. Krasilnikov et al., Plasma Phys. Control. Fusion 51 (2009) 044005*

- Якими є граничні можливості підвищення енергетичної ефективності реактора при застосуванні ЙЦРН?
- Наразі розроблено багато методів ЙЦРН з різними властивостями  
⇒ Ідемо не від можливого, а від бажаного і шукаємо оптимальну стратегію, не думаючи про її технічну здійсненність
- Задача: знайти розподіл квазілінійної дифузії (КД) йонів палива у фазовому просторі, який максимально підвищує потужність реакції при заданій потужності, що вводиться в плазму.
- Початковий крок: одновимірна задача — функція розподілу швидкої компоненти палива та коефіцієнт КД залежать лише від енергії частинки.

- Рівняння Фоккера-Планка для сорту, що нагрівається:

$$\frac{\partial f}{\partial t} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial}{\partial v} \left[ v^2 D_c \left( \frac{2v}{v_T^2} f + \frac{\partial f}{\partial v} \right) + v^2 D_{QL} \frac{\partial f}{\partial v} \right]$$

де  $D_c$  та  $D_{QL}$  — коефіцієнти зіткненнявої та КЛ дифузії.

- У стаціонарі інтегруємо і отримуємо:

$$\frac{df}{dw} = -(1 - u)f$$

де  $w = v^2/v_T^2$ ,

$u(w) = \frac{D_{QL}}{D_{QL} + D_c}$  — наш керуючий параметр,  $0 \leq u \leq 1$ .

# Задача оптимального керування

- Питомі витрати на нагрівання палива:

$$P_{ICRH} = - \int_{v_{\min}}^{v_{\max}} dv 4\pi M v^3 D_{QL} \frac{\partial}{\partial v} = \int_{v_{\min}}^{v_{\max}} dv \frac{8\pi M v^4}{v_T^2} D_c u f.$$

- Витрати залишаються скінченними, коли  $D_{QL} \rightarrow \infty$  ( $u \rightarrow 1$ )!
- Питома потужність реакції:

$$P_{fus} = n_t \mathcal{E}_f \int_0^\infty dv 4\pi v^2 \mathcal{B}(v, T) f(v),$$

де

$$\mathcal{B}(v, T) = n_t^{-1} \int d^3 \vec{v}_t f_M(v_t, T) \sigma(|\vec{v} - \vec{v}_t|) |\vec{v} - \vec{v}_t|,$$

індекс “t” стосується сорту палива, який не піддається нагріванню.

- Задача:  $P_{fus} \rightarrow \max$  при  $P_{ICRH} = P_0$   
або

$$P = -P_{fus} + \lambda P_{ICRH} = \int dw [-L_{fus}(w) + \lambda L_{ICRH}(w)u] f(w) \rightarrow \min.$$

- Спряжене рівняння:

$$-\frac{dq}{dw} = -(1-u)q + L_{fus}(w) - \lambda L_{ICRH}(w)u.$$

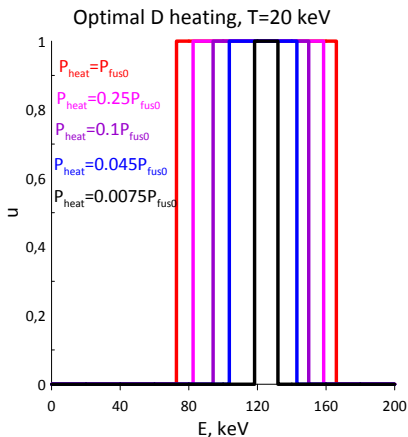
- Принцип мінімуму Понтрягіна:

$$H = [-L_{fus}(w) + \lambda L_{ICRH}(w)u + q(1-u)]f \rightarrow \min_u.$$

- $u$  не залежить від  $f$ , тому спряжене рівняння відчіпляється від основного, що є рідкісним щастям для задач оптимального керування.
- Лінійність гамільтоніану за  $u$  означає, що система тяжіє до перемикачів:  $u = 0$  або  $u_{\max}$  (утім, можливі також т.з. ковзні режими).

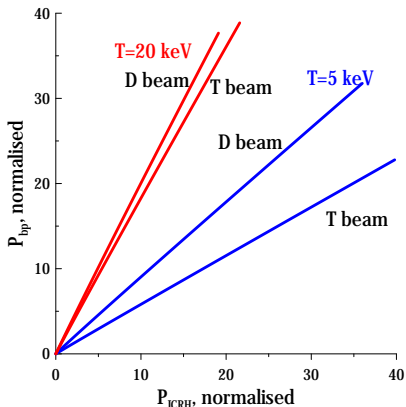
# Оптимальне нагрівання I

- Змінюємо  $\lambda$ , знаходимо оптимальне нагрівання при різних потужностях.
- Оптимальним є створювати КД поблизу максимуму реактивності.



Енергетичний виграш від появи «хвостів» при нагріванні

ICRH beam-plasma power vs heating power  
50/50 D/T

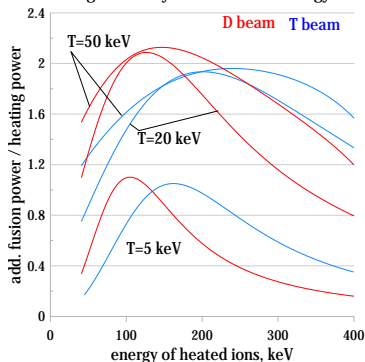




# Оптимальне нагрівання II

Відгук на нагрівання у вузькому енергетичному інтервалі.

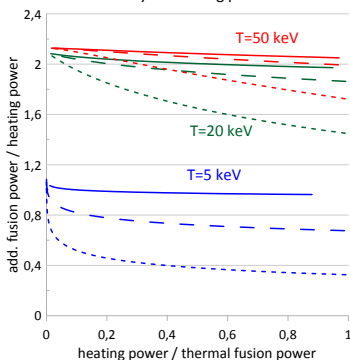
Heating efficiency vs. resonance energy



- Інтерпретація: КД поблизу максимуму постачає туди йони та затримує їх там.
- Узявши  $D/T=1/2$ , можна підняти енергетичний вигравш до  $\sim 3$  ( $T = 20 - 50$  кеВ).

Різна інтенсивність дифузії. Суцільна лінія —  $u \leq 1$ , пунктири —  $u \leq 0.8$  та  $u \leq 0.5$

Efficiency vs. heating power



При високій температурі ефективність майже не падає завдяки широкій функції відгуку.

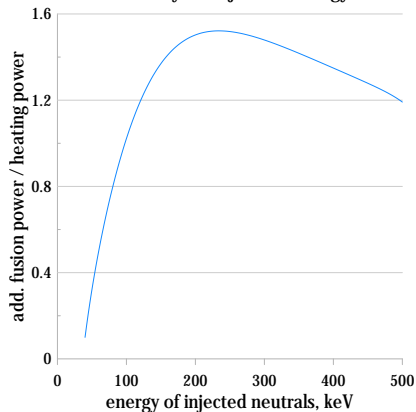
- Додаємо  $\delta$ -джерело в рівняння Фоккера-Планка, розбиваємо  $f$  на повільно зростаючий максвеліан та «хвіст», отримуємо для хвоста:

$$\frac{df}{dw} + (1 - u)f = \frac{1 - u}{\eta + w^{3/2}} \begin{cases} \psi(w) & \text{при } w < w_{inj}, \\ \psi(w) - 1 & \text{при } w > w_{inj}, \end{cases}$$

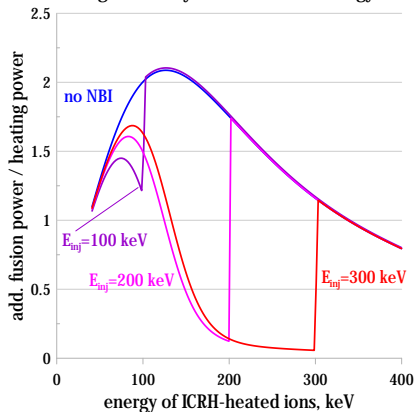
де  $S_{inj}$  та  $w_{inj}$  — інтенсивність та нормована енергія інжекції,  $\eta$  — певна константа,  $\psi(x) = (2/\sqrt{\pi}) \int_0^x dt \sqrt{t} \exp(-t)$ .

# Енергетичний виграш за наявності ІНС

Енергетичний виграш від ІНС.  
Tail reactivity vs. injection energy



Виграш від ЙЦРН за наявності ІНС  
Heating efficiency vs. resonance energy



- Реакції синтезу, спричинені надтепловим хвостом одного з йонів палива, дають додаткову потужність, у 2–3 рази більшу за потужність нагрівання.
- **Caveat:** Цей лише додатковий ефект до підсилення реакції через нагрівання (величину останнього ми тут не розглядаємо).
- Оптимальна стратегія полягає в концентрації КД в інтервалі поблизу максимуму реактивності; інтервал розширюється при збільшенні наявної потужності.
- Наявність ІНС не змінює енергетичний вигравш у кращий бік.
- Синергія ЙЦРН та ІНС може полягати в тому, що наявність інжекції сприяє передачі енергії хвиль йонам, а не електронам (у цьому розгляді враховувалася лише передача йонам).
- DD-реакція потребує окремого розгляду.