



Вплив пилчастих коливань у JET та ITER на швидкі йони

Yu.V. Yakovenko,^{1,2} V.V. Lutsenko,¹ V. Kiptily,³ L. Giacometti,⁴ T. Craciunescu,⁵
V.Ya. Goloborod'ko,¹ B.S. Lepiavko,¹ A.I. Tishchenko,² H. Weisen,⁶
S. Sharapov,³ Ya.I. Kolesnichenko,¹ and JET Collaborators⁷

¹ Kyiv Institute for Nuclear Research, Kyiv, Ukraine

² Nat. Univ. of Kyiv Mohyla Academy, Kyiv, Ukraine

³ Culham Centre for Fusion Energy, Abingdon, UK

⁴ Istituto di Fisica del Plasma "P. Caldirola", CNR, Milano, Italy

⁵ EURATOM-MedC Association, National Institute for Laser, Plasma and Radiation Physics, Bucharest, Romania

⁶ Swiss Plasma Center, ÉPFL, Lausanne, Switzerland

⁷ See the author list of "X. Litaudon et al 2017 Nucl. Fusion 57 102001"

The logo for the Joint European Torus (JET) tokamak, consisting of the letters "JET" in a bold, blue, italicized sans-serif font.



This work has been carried out within the framework of the EUROfusion Consortium and has received funding from the Euratom research and training programme 2014-2018 under grant agreement No 633053. The views and opinions expressed herein do not necessarily reflect those of the European Commission.



- Мотивація
- Результати моделювань кодом OFSEF
- Новий швидкий код для вливу пилчастих коливань на швидкі йони
- Вплив непараболічних профілів у ITER
- Вплив колапсів на нейтронну емісію в JET
- Висновки



- Відомо, що колапси пилчастих коливань впливають на швидкі йони, включно з альфа-частинками (TFTR) та популяціями, створеними нагріванням (JET, DIII-D, AUG)
- Теоря та експеримент показують, що цей ефект залежить від енергії та пітч-кута частинок, а також від параметрів пристрою та колапсу.
- Щоб пояснювати експерименти та передбачати вплив пилчастих коливань у майбутніх реакторах, треба мати засоби моделювання та перевірити теорію.
- Важливо зрозуміти, які можливості дають результати експериментів на JET.

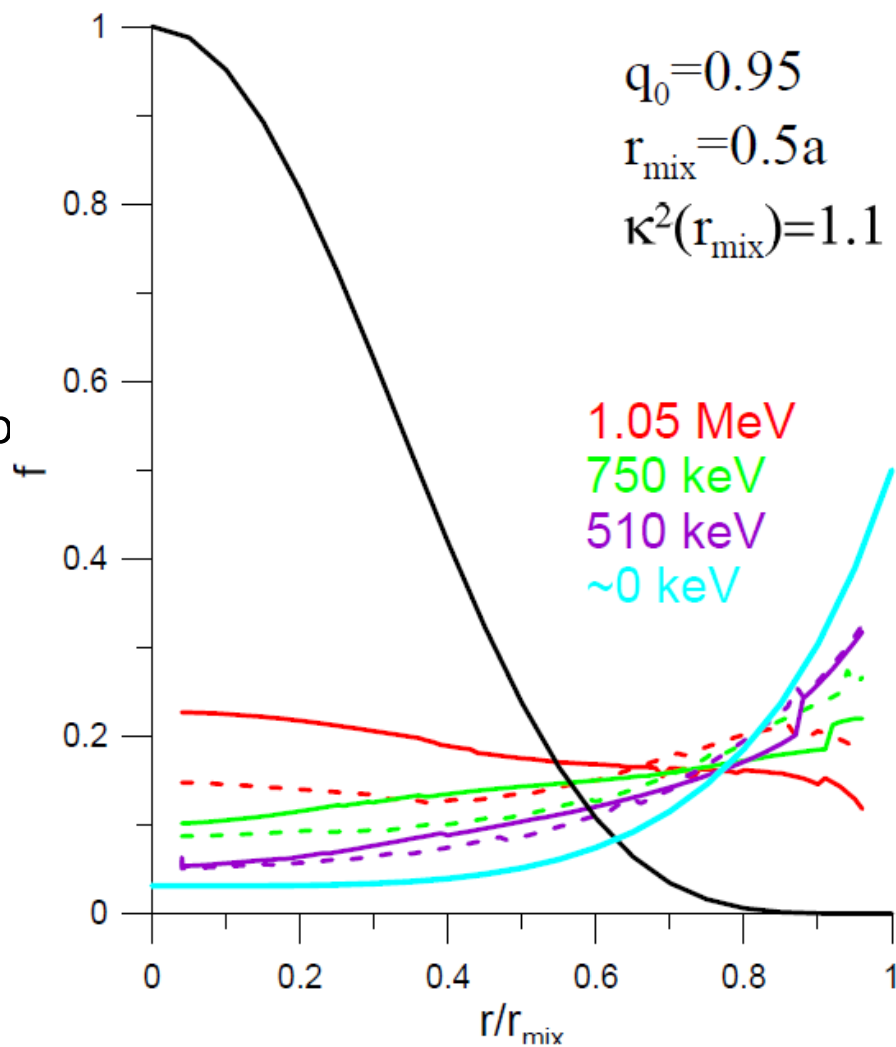


- Код OFSEF: перерозподіл швидких йонів пилчастими коливаннями
[Kolesnichenko et al., Phys. Plasmas 4 \(1997\) 2544](#)
- Беззіткненнєвий рух частинок у **напів-аналітичному електромагнітному полі**, що моделює кадомцевський колапс
- Баунс-усереднена (ba) версія: нехтує шириною орбіт, але враховує прецесію.
- Дрейфова (gc) версія: враховує ширину орбіт.
- **Головні безрозмірні параметри**: відношення періоду прецесії (τ_{pr}) до тривалості колапсу (τ_{crash}) $\Rightarrow \mathcal{E}$ (енергія), $\lambda = \mu B_0 / \mathcal{E}$, $\epsilon_{mix} = r_{mix} / R_0$, та $q_0 - 1$
- Профіль q також впливає на перерозподіл.

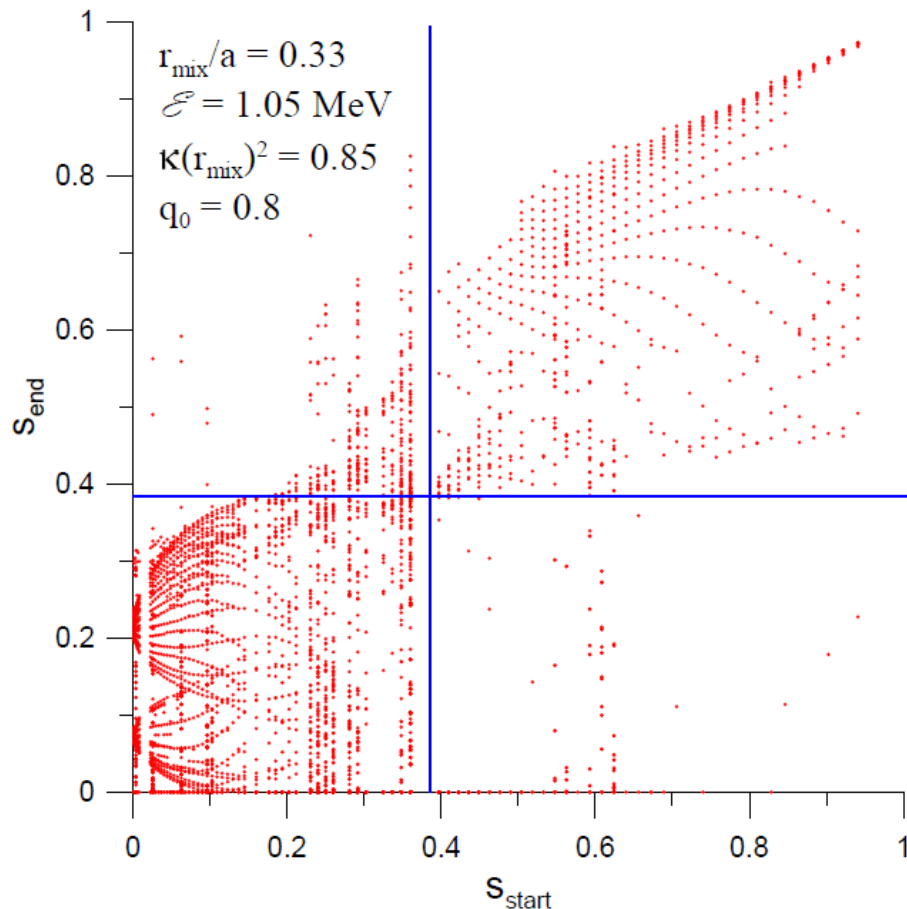
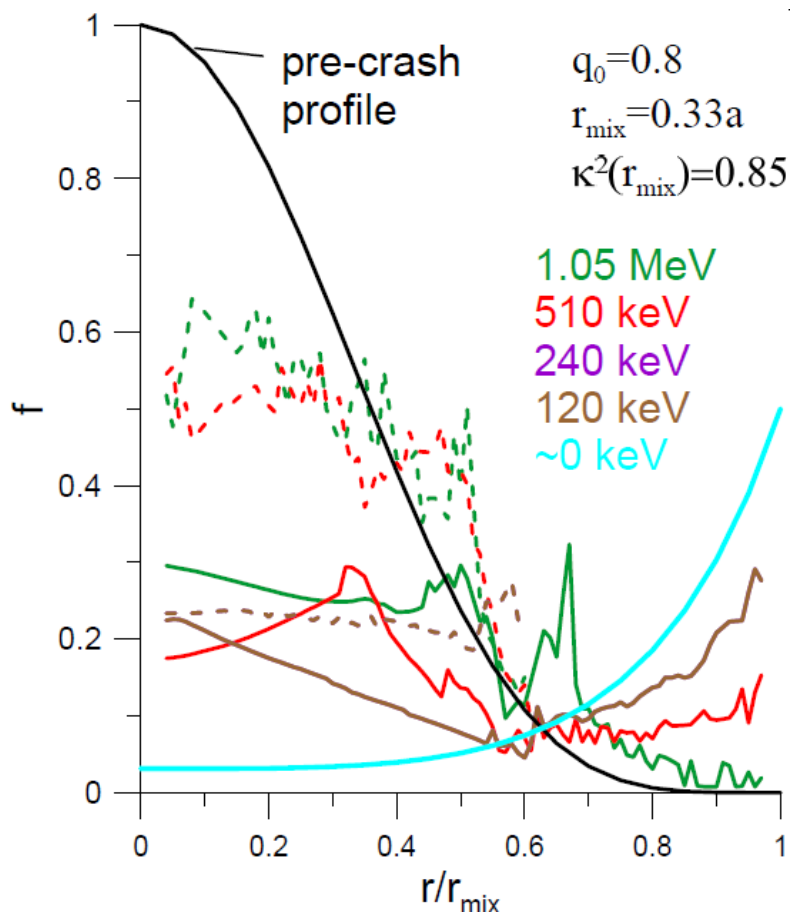
Моделювання OFSEF I



- Проведено моделювання OFSEF (ba): скан за головними параметрами для параболічного профілю q^1
- Енергії показано для конфігурації типу JET та $\tau_{\text{crash}} = 3.3 \times 10^{-4}$ s.
- Профілі f at при фіксованому адіаб. інваріанті J_{\parallel} (\mathcal{E} не зберігається).
- $\kappa^2 = [1 - \lambda(1 - \epsilon)] / (2\lambda\epsilon)$ – параметр захопленості ($\kappa = 1$ відповідає сепаратрисі пролітні-захоплені).
- Пролітні частинки сильно перерозподіляються навіть при мевних енергіях через велику v_{\parallel} .
- Перерозподіл послаблюється при $q_0 \Rightarrow 1$, ϵ сильним навіть при $q_0 = 0.95$.
- Роль ширини орбіт треба вивчити з dc-версією.



Моделювання OFSEF II



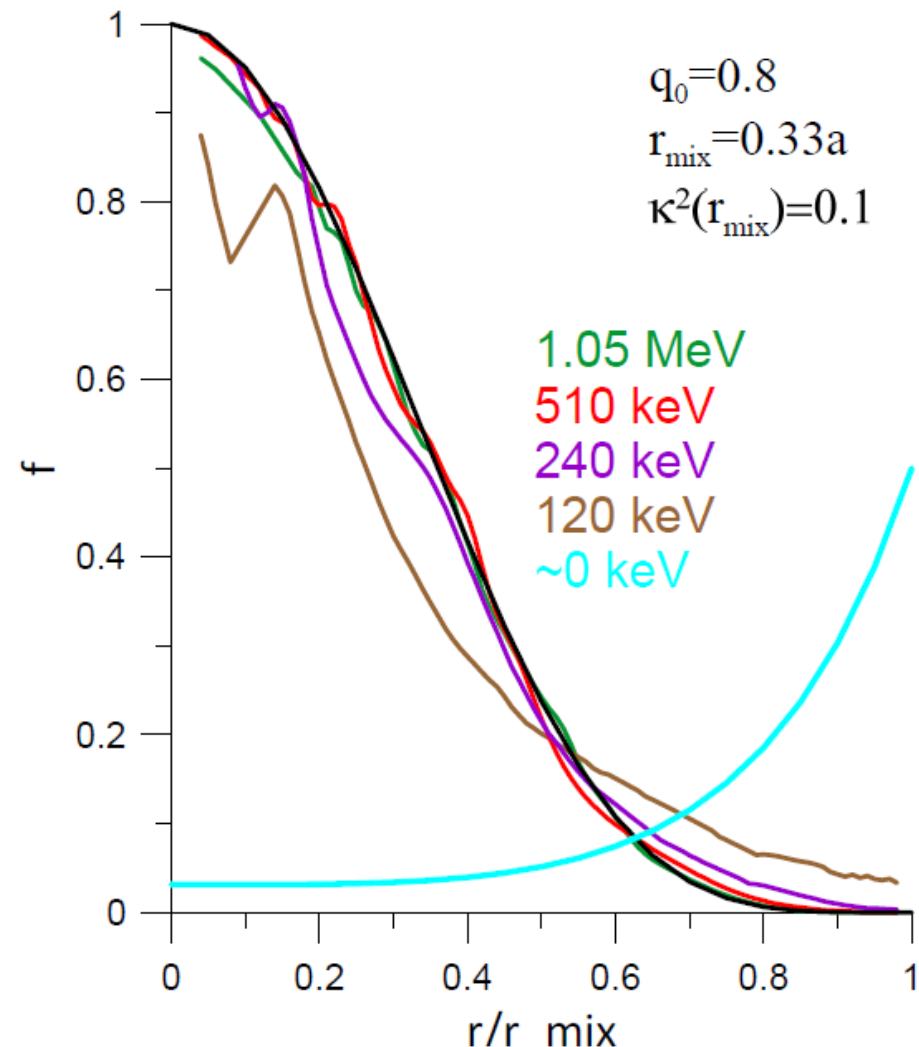
- Захоплені частинки виявляють бар'єрну поведінку поблизу сепаратриси.
- При високих енергіях прецесія долає дрейф в електричному полі збурення => перерозподіл слабшає.

- Див. наведену гістограму
- Той же механізм, що відповідає за критичну енергію захоплених частинок

[Kolesnichenko, Yakovenko, Nucl. Fusion 36 \(1996\) 159](#)

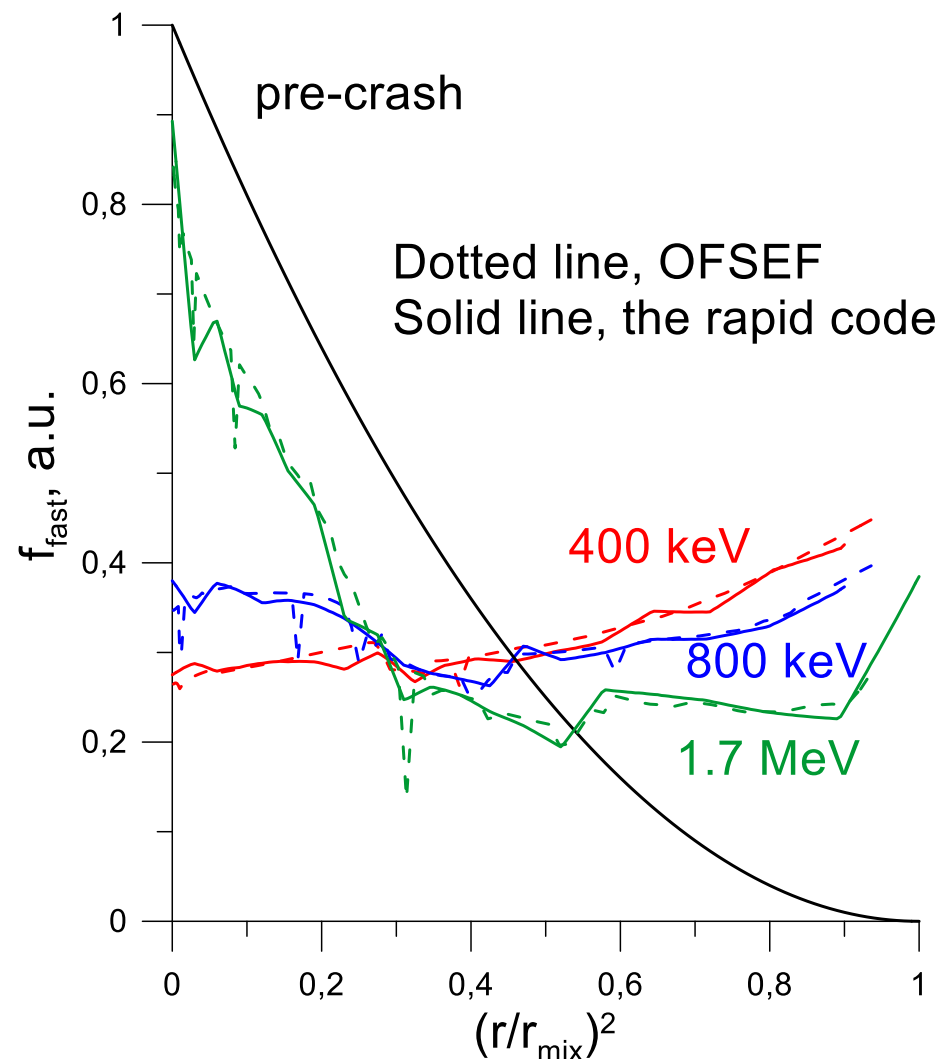


- Сепаратриса є неважливою для глибоко захоплених частинок.
- Такі частинки нечутливі до колапсу при енергіях, вищих критичної, $\mathcal{E}_{\text{crit}}$.
- Для цих конкретних параметрів $\mathcal{E}_{\text{crit}}$ є досить низькою, $\sim 100\text{-}200$ кеВ.
- Як бачимо, картина перерозподілу сильно залежить від енергії частинки та пітч-кута.

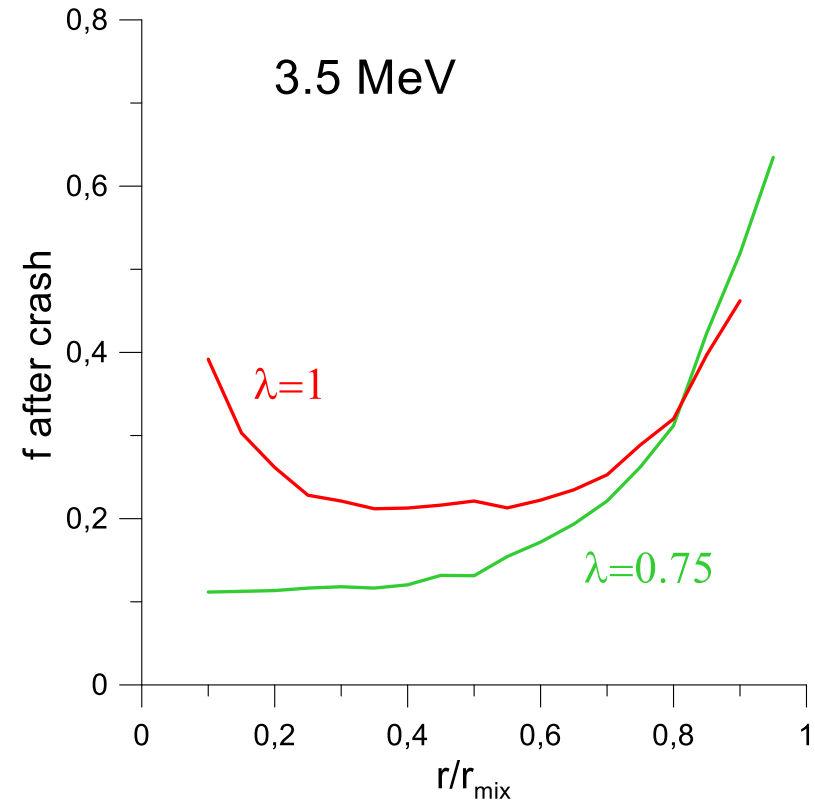
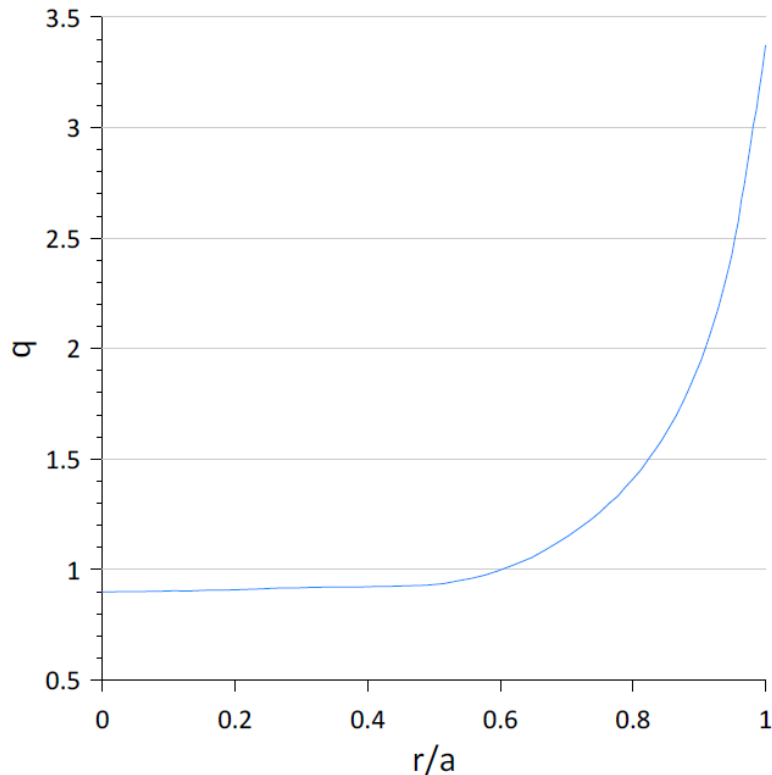




- Код для швидкого моделювання перерозподілу швидких йонів
- Вважаємо, що $J_{||}$ зберігається (це не зовсім так для пролітних частинок, але похибка є припустимою).
- Тоді перерозподіл є інтегральним перетворенням у 1D-просторі (над $f_{fast}(r)$).
- Будується та зберігається ядро перетворення як скінченно-елементне наближення результатів OFSEF.
- Полілінійна інтерполяція в просторі параметрів
- Треба зберігати $\sim 10^7$ чисел для задовільної точності.
- Потрібно $\sim 10^3$ арифметичних операцій, щоб розрахувати f_{fast} в одній точці фазового простору.
- Числову частину протестовано; будується інтерфейс.



Вплив на альфа-частинки в ITER



- Прогнозні розрахунки для ITER дають різні форми профілів q , напр., плоскі з великим радіусом поверхні $q = 1$ та профілі типу "head-and-shoulder".
[S.D. Pinches, Phys. Plasmas 22 \(2015\) 021807](#)
- Було виконано моделювання кодом OFSEF.

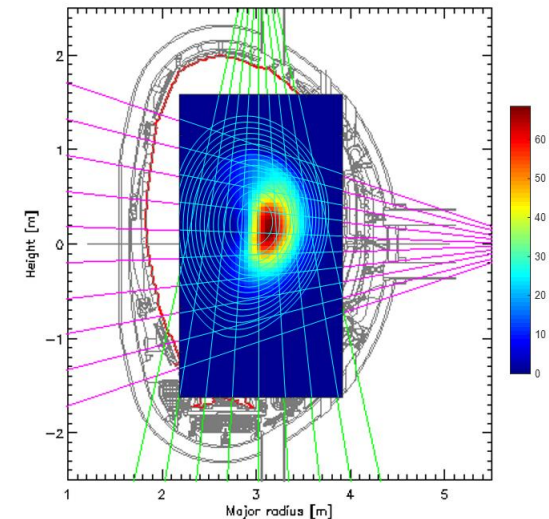
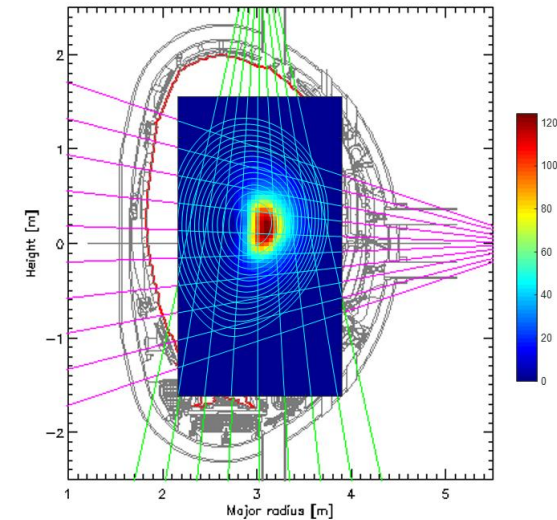
- Показано профілі 3,5-мевних альфа-частинок після колапсу для плоского профілю q .
- Перерозподіл дуже сильний.
- Для цього профілю q після колапсу плазма біля $r = r_{\text{mix}}$ складається переважно з приосьових частинок.



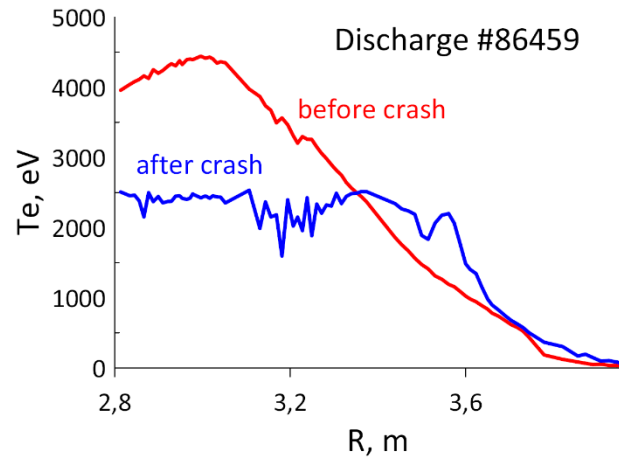
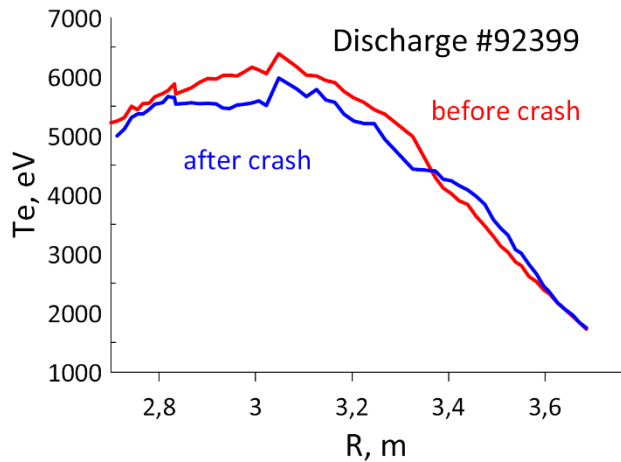
- Монітор нейтронних профілів у JET дає можливість спостерігати зміни просторового розподілу швидких йонів дейтерію.
- Можна скористатись цим для перевірки існуючих теорій перерозподілу швидких йонів пилчастими коливаннями (зокрема, щодо чутливості до енергії та пітч-кута йонів).
- У більшості розрядів за нейтронну емісію відповідальні переважно **інжектовані йони** (у більшості пролітні).
- У розрядах із ЙЦРН на **3^{ій} гармоніці дейтерію**, велика частка нейтронів створюється прискореними ЙЦРН йонами (з великою часткою захоплених).
- Цікаво порівняти вплив колапсів на нейтронну емісію в розрядах з різними схемами ICRH.
- Ми вибрали розряди **#92398–92400** та **#86459**: сильні колапси при високій нейтронній емісії.



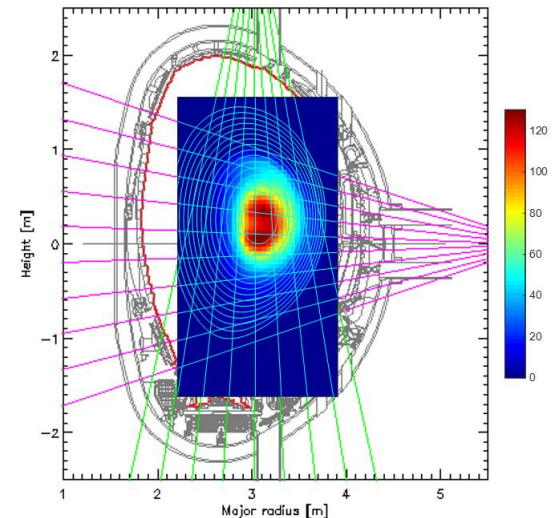
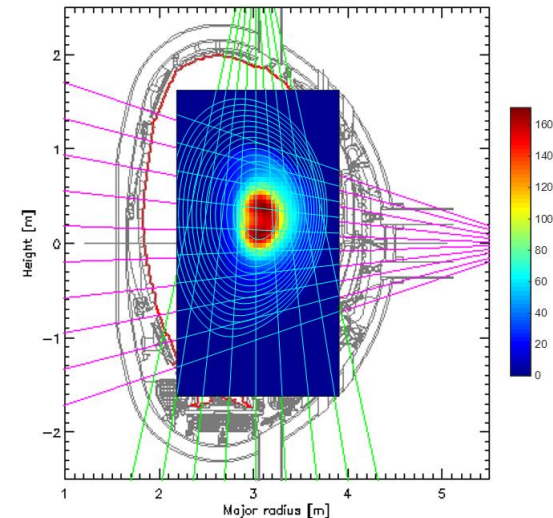
- Нагрівання інжекцією нейтралів (4 МВт) та ЙЦРН на 3^{ій} гармоніці D (3 МВт).
- Кілька колапсів при сильному ЙЦРН.
- Значний **хвіст** прискорених йонів D
- Горизонтальна асиметрія емісії => **захоплені йони**?
- Колапс при $t = 51.02$ с: радіус інверсії 38 см (JETSTA), тривалість $\sim 3 \times 10^{-4}$ с (JETSTA та DESC), спад нейтронної емісії **$\sim 15\%$** , $q_0 = 0.805$ (EFIT)
- f_{fast} перед колапсом моделювалась фоккер-планківським кодом FIDIT
[Yavorskij, V., Goloborod'ko, V., Eriksson, L.G. et al., J. Fusion Energy 34 \(2015\) 774](#)
- Перерозподіл моделювався кодом OFSEF (gs-версією, бо ширина орбіт для йонів хвоста не є нехтовною).
- Кодується перетворення координат фазового простору між OFSEF та FIDIT.
- Метою є вивчити наскільки різні гіпотези про характер перерозподілу узгоджуються зі спостереженнями.



Розряди #92398–92400



Shot #92399



- Гібридні розряди з нагріванням інжекцією
- Спади нейтронної емісії (5% для #92400, ~10% для #92399, слабкий для #92398) корелюють із радіусами інверсії (~30 см для #92399).
- Розрахунки FIDIT готові для #92398.
- Проблема: EFIT дає $q_0 \sim 1.05-1.2$.
- Ідентифікація параметрів колапсів та профілів q : див. стенди Р.12 (Б.С. Лепявко, А.І. Тіщенко, Ю.В. Яковенко та ін.) та Р.16 (А.І. Тіщенко, Ю.В. Яковенко та ін.)
- Готуються розрахунки OSFEF (нещодавно в код було додано можливість працювати з непараболічними профілями q).



- Проведено моделювання перерозподілу швидких йонів пилчастими коливаннями за допомогою коду OFSEF у широкому діапазоні параметрів частинок та пристрою.
- Для перехідних частинок спостерігається бар'єрна поведінка біля сепаратриси між пролітними та захопленими частинками.
- Розробляється новий швидкий код для моделювання перерозподілу швидких йонів пилчастими коливаннями .
- Непараболічність профілів q може сильно впливати на перерозподіл альфа-частинок у ITER.
- Ведеться моделювання впливу колапсів на нейтронну емісію, метою якого є порівняти вплив колапсів на швидкі йони, створені різними методами нагрівання плазми.

Частково доповідалося на конференції МАГАТЕ з термоядерної енергії, Ахмадабад, Індія, жовтень 2018 р.



Дякую за увагу!