

# **ФУНДАМЕНТАЛЬНА ФІЗИКА ПЛАЗМИ У ТЕРМОЯДЕРНИХ ДОСЛІДЖЕННЯХ**

**Я. І. Колесниченко**

**Інститут ядерних досліджень НАН України,  
Київ, Україна**

Метою моєї доповіді є привернути увагу до того факту, що термоядерні дослідження **є могутнім стимулом розвитку фундаментальної фізики плазми.**

# План

- **Розвиток та сучасний стан термоядерних досліджень з магнітним утриманням плазми**
- **Дещо про наші досягнення у 21-ому столітті у контексті світової науки (не звіт, а вибіркові результати!)**

# ЯДЕРНА ЕНЕРГЕТИКА

## Атомна

Ділення ядер

Радіоактивні продукти реакцій

Можливість ядерного вибуху

Великі запаси палива,  
але лише за умови  
використання бридерів

XX століття

## Термоядерна

Синтез ядер

Екологічно чистий паливний  
ЦИКЛ (лише наведена радіоактивність)

Ядерний вибух не можливий

Практично невичерпні запаси  
палива

XXI століття

## Гібридний реактор

## Вимоги до плазми у DT-реакторі

$$T \sim 10 - 20 \text{ кеВ}, \quad nT\tau_E \sim 3 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3} \text{ кеВ} \cdot \text{с}$$

$$\beta \equiv 8\pi p / B^2 \geq 5\%$$

$$1 \text{ кеВ} = 10\,000 \text{ }^\circ\text{С}$$

*Граф Ферерз:* “Шановні лорди, який термометр вимірює температуру 140 мільйонів  $^{\circ}\text{C}$  , не розтоплюючись?”

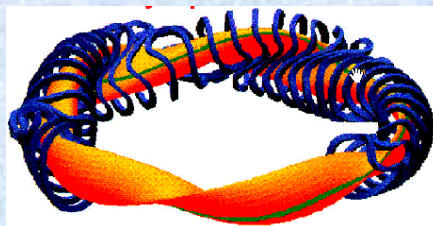
*Віконт Девідсон:* “Шановні лорди, я гадаю, дуже великий”

**3 дебати у палаті лордів  
відносно проекту токамака JET**  
[за статтею R.J. Bickerton, Plasma Phys.  
Contr. Fusion 35 (1993) B3 ]

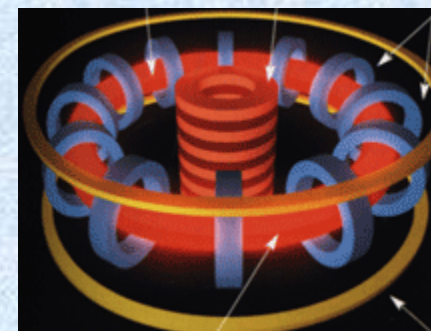
# 50-ті роки XX століття: Золота ера термояду

**Ідея магнітного утримання плазми (Тамм, Сахаров)**

**Стеларатор (Spitzer)**



**Токамак (Явлинський, Головін, Шафранов, Арцимович)**



**Дзеркальна пастка (Будкер, Пост)**

**Початок міжнародної співпраці:**

**II Женевська конференція з мирного використання атомної енергії (1958 р.)**



**Фото з книжки  
Project  
Matterhorn**



**Візит делегації СРСР до США (Принстон) у 1960 р.**

**Крайній справа – В.Т. Толлок (ХФТІ),  
біля нього Н.А. Явлінський – винахідник токамаків ,  
У центрі – Л. Спітцер – винахідник стелараторів**



# Подальший розвиток термоядерних досліджень: від песимізму до оптимізму

“Привид” дифузії Бома:  $D \propto T$   
Стимул для теоретиків та підстава для  
песимізму. Перемога у 1968 р.

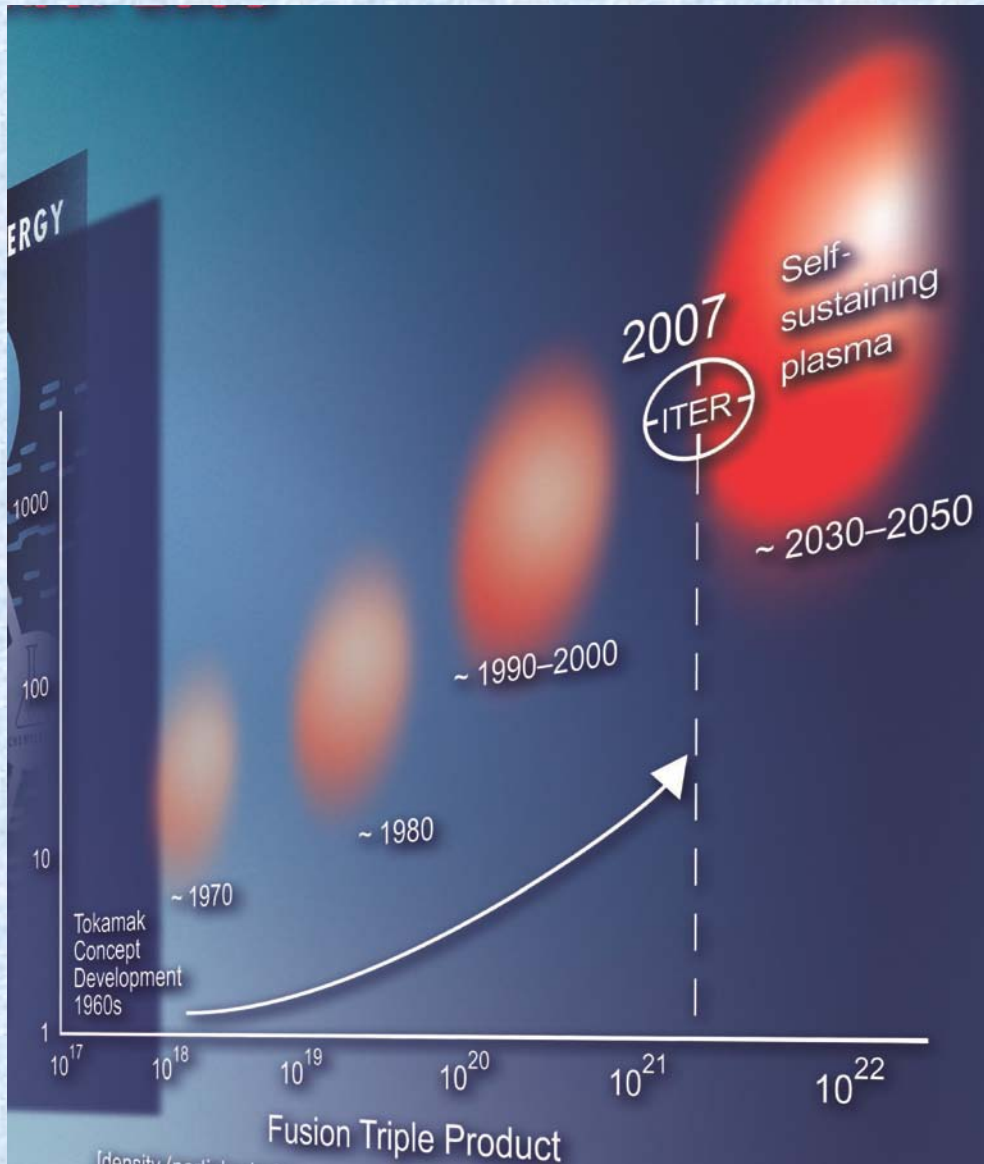
“H”-режим (1989 р. ASDEX)  
Більше оптимізму

Експерименти дали потужний стимул для  
розвитку теорії плазми:

- “Неокласична” дифузія
- Власні коливання
- Мікро та макро нестійкості
- Квазілінійна теорія
- Нелінійні явища

# Прогрес у термоядерному експерименті

22<sup>nd</sup> IAEA Fusion Energy Conference (Geneva, 2008):  
50 years of Fusion Research



Добуток  $nT\tau_E$   
подвоювався кожні 1.8 роки

# ТОКАМАКИ

JET (Великобританія)

JT-60U (Японія)

TFTR (США)

**Здійснення DT-реакції:**

TFTR - 10.7 МВт, 0.4 с,  $Q = 0.27$  (1996)

JET - 16.1 МВт, 0.85 с,  $Q \sim 1$  (1997)

$$Q = P_{fusion} / P_{heating}$$

**Демонстрація реакторних параметрів:**

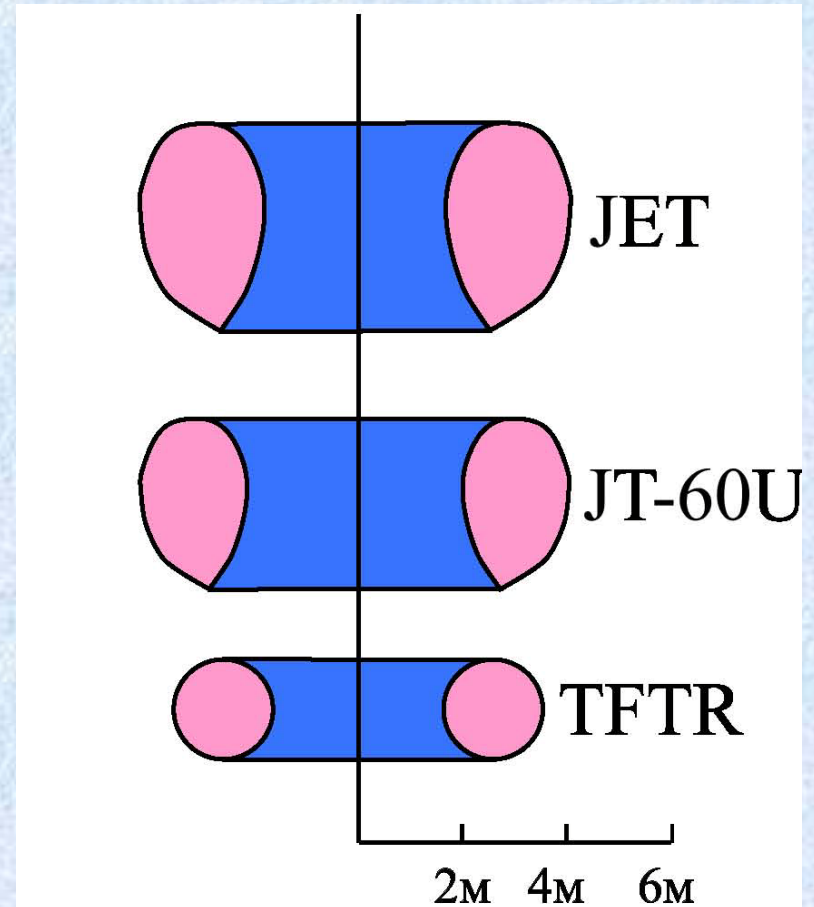
TFTR:  $T_i(0) = 45$  кеВ,

$n(0)\tau_E T_i(0) = 1.5 \times 10^{21} \text{ м}^{-3} \text{ с кеВ}$ ,

$Q_{eqv} = 1.25$ .

**TRIAM-1M** (Японія): Підтримання струму в плазмі ВЧ-методом

більше 5 годин. **TRIAM-1M – дуже малий токамак! Радіус плазми ~12 см.**



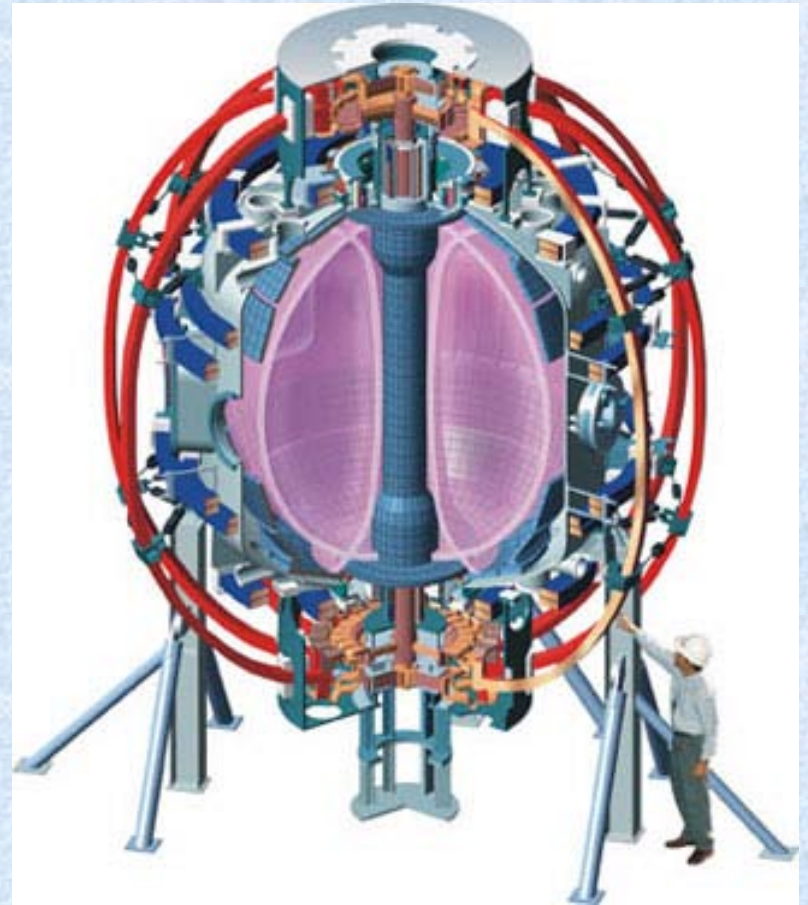
Мал. з статті: Колесниченко, Яковенко, Енергетика та ринок, 1, 32 (1997).

# Сферичний токамак NSTX (National Spherical Torus Experiment)

**NSTX є основним діючим термоядерним пристроєм в Принстоні (PPPL), США.**

**Сферичні тори (токамаки) – дуже круті тори ( $A = R/r \sim 1.5$ ) з слабким магнітним полем ( $B \sim 0.5$  Тл).**

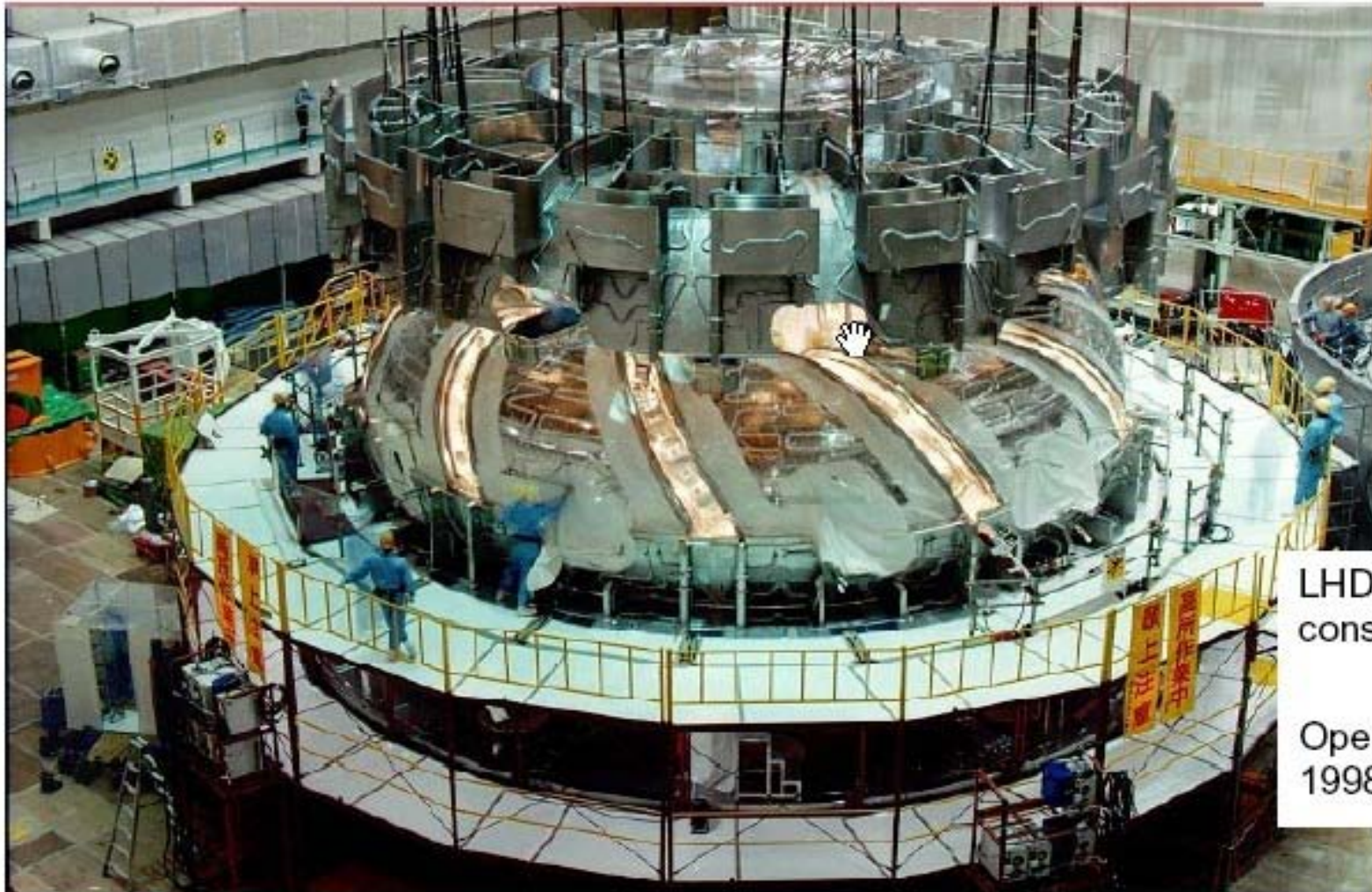
**Рекордсмени з досягнутого  $\beta$  ( $\beta > 30\%$ ).**





# Stellarator LHD (Large Helical Device)

Найбільший у світі стеларатор (Японія):  $R=3.9\text{м}$ ,  $a=0.65\text{м}$ ,  
 $V=3.4\text{Тл}$ ,  $P=40\text{МВт}$ ,  $T=1\text{-}3\text{ keV}$ ,  $n=10^{20}\text{ м}^{-3}$ .



LHD shown under construction.

Operating since 1998.



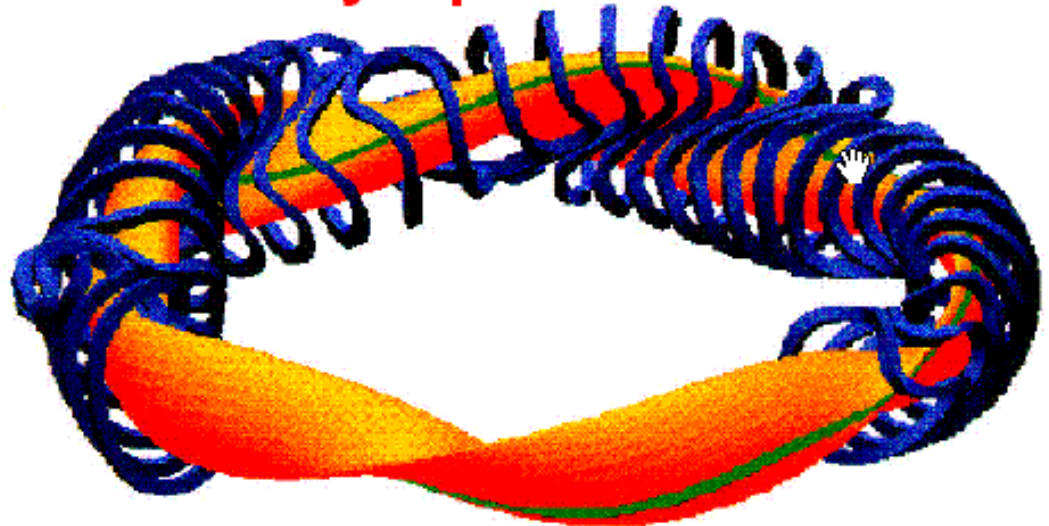
# Стеларатор Wendelstein 7-X

Оптимізований  
стеларатор, що  
споруджується в  
Німеччині.

$R=5.5\text{м}$ ,  $a=0.5\text{м}$

$B=2.5 - 3\text{Тл}$

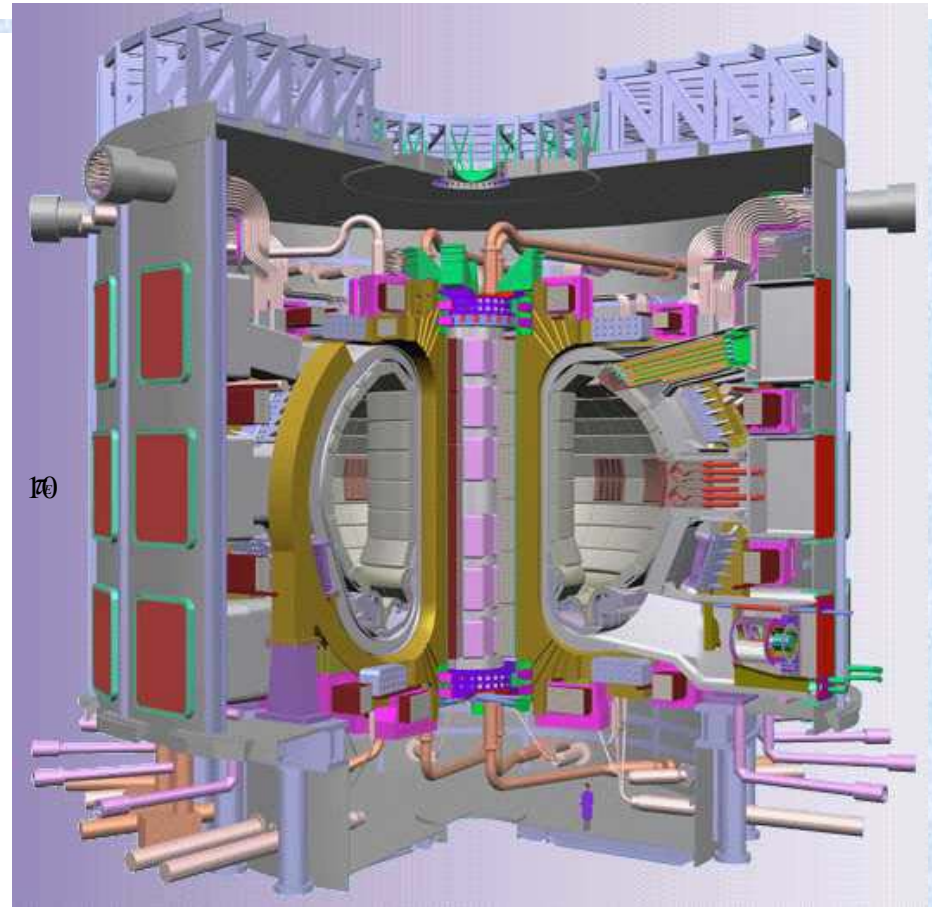
Numerically Optimized Stellarators



G.H. Neilson, ICTS Workshop, Kyiv 2001

# ITER

Major radius,  $R = 6.2$  m  
Minor radius,  $a = 2$  m  
Elongation,  $b/a = 1.86$   
Magnetic field,  $B = 5.3$  T  
Plasma current,  $I = 15$  MA  
Plasma density,  $n = 10^{20}$  cm $^{-3}$   
Ion temperature,  $T_i = 8$  keV  
Electron temperature,  $T_e = 9$  keV  
 $\beta = 8\pi p/B^2 = 2.5\%$   
Energy conf. time,  $\tau_E = 3.7$  s  
Ave. neutron wall load,  $0.6$  MW/m $^2$   
Energy gain,  $Q = P_{\text{fus}}/P_{\text{heating}} = 10 - 5$



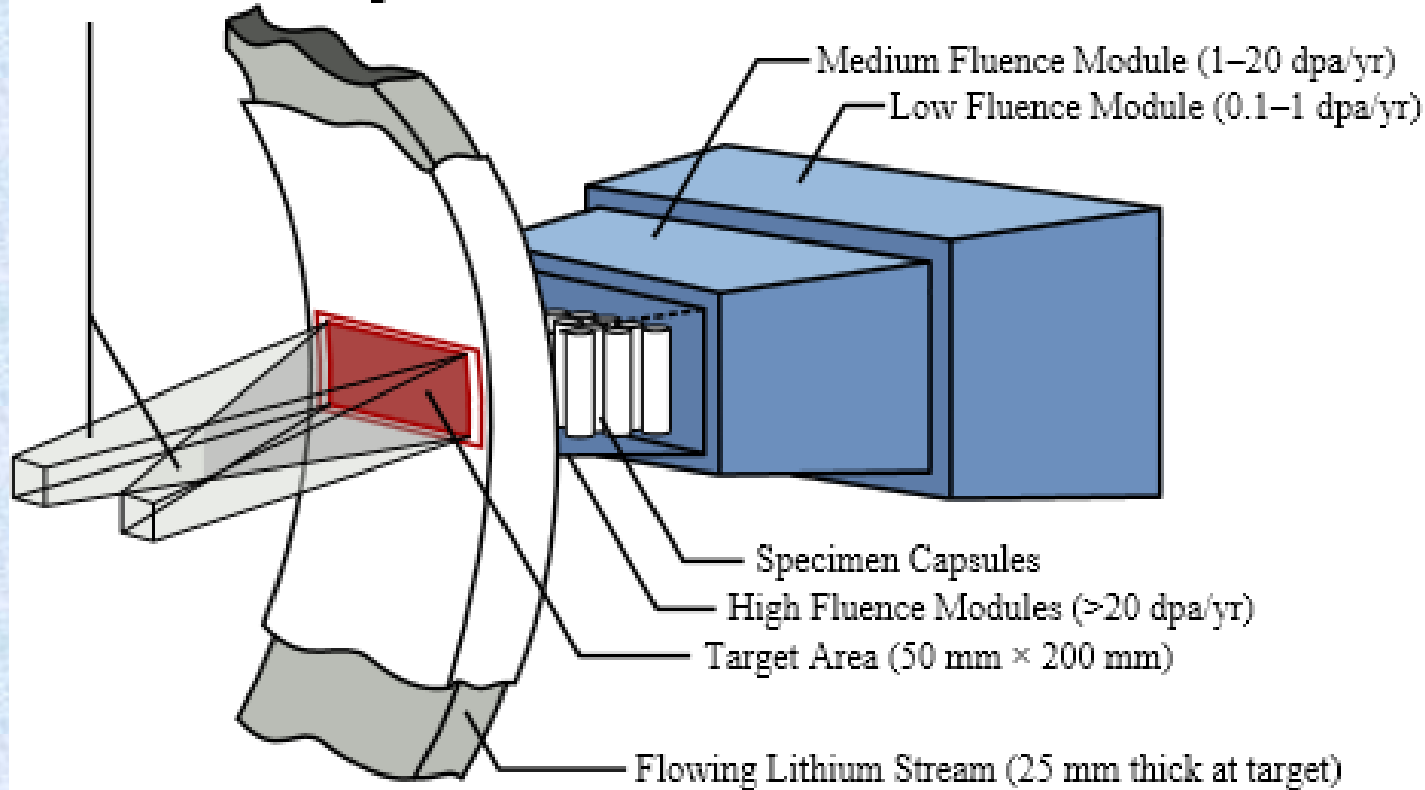
**In 2005 China, EU, Japan, Korea, Russia, and USA agreed to build ITER in Cadarache (France) + India**

# IFMIF

Intersecting Deuteron Beams

(Total Power: 250 mA @ 30–40 MeV)

(DPA = Displacements per Atom)



**The International Fusion Material Irradiation Facility planned by Japan, EU, USA, and RF, and managed by the IAEA will use a particle-based neutron source to produce a large neutron flux, in a suitable quantity and time period to test the long-term behavior of materials under conditions similar to those expected at the inner wall of a fusion reactor.**

# Фундаментальні дослідження



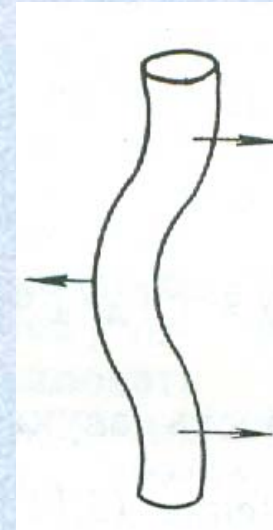
# Альфвенові хвилі

$$\omega = k_{\parallel} V_A$$

$k_{\parallel}$  - хвильове число вздовж магнітного поля

$$V_A = \frac{B}{\sqrt{4\pi\rho}}, \quad B - \text{магнітне поле}$$

$\rho$  - масова густина плазми



## Нобелівська премія -1970

Термоядерні дослідження виявили принципово нові властивості альфвенових хвиль!  
Крім того, з'ясувалось, що збудження цих хвиль може впливати на плазму.



# Альфвенів континуум

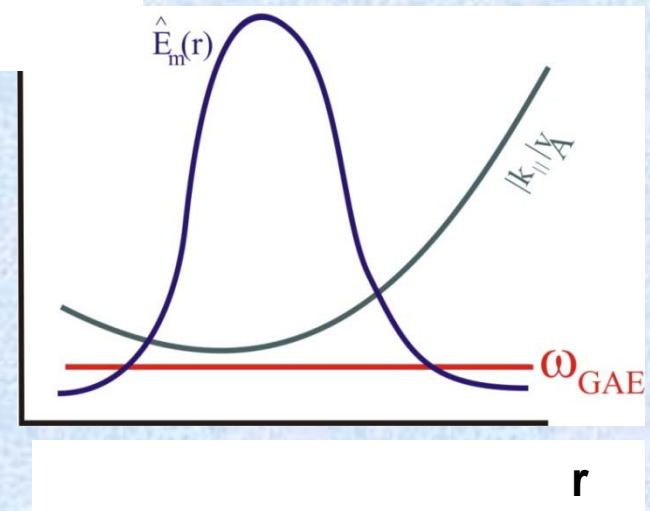
Реальна плазма є неоднорідною, тому  $V_A = V_A(r)$ ,  $k_{\parallel} = k_{\parallel}(r)$ .  
А отже, частота альфвенових хвиль залежить від радіальної координати ( $r$ ).

Тому існує **альфвенів континуум**.

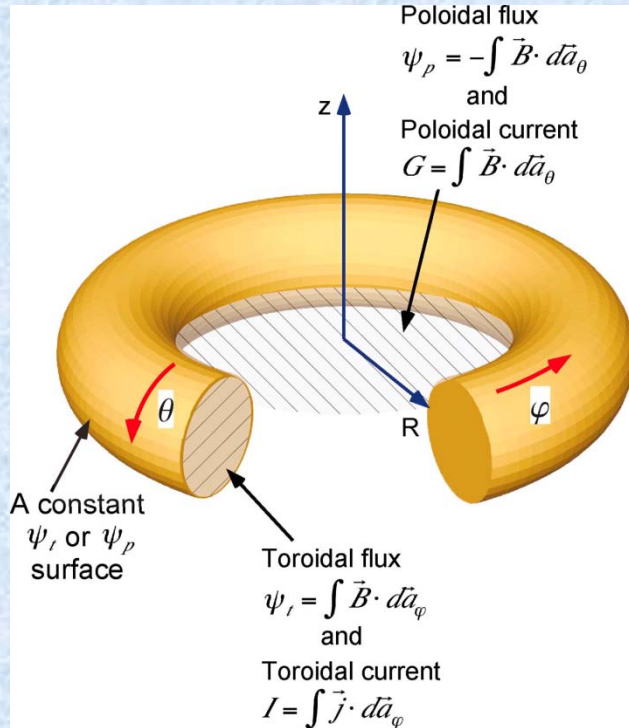
У прямому циліндрі рівнянням континууму є  $\omega_{AC}(r) = k_{\parallel}(r)V_A(r)$

Оскільки частота власних коливань системи ( $\omega$ ) не може залежати від координати, **власні коливання у плазмі з частотою  $\omega = \omega_{AC}(r)$  є неможливими.**

Існують лише дискретні власні коливання у щілинах **альфвенового континуума.**



# Координати та хвильові збурення



Координати  $r, \theta, \varphi$ . Тут  $r$   
 визначено рівнянням  $\psi_t = \bar{B} r^2 / 2$

$R$  – великий радіус тору

$$B = B_0 \left( 1 - \frac{r}{R} \cos \vartheta \right), \quad r/R \ll 1$$

$$\tilde{X} = \sum_{m,n=-\infty}^{\infty} X_{m,n}(r) \exp(im\vartheta - in\varphi - i\omega t),$$

$$k_{\parallel} = \frac{m\iota - n}{R},$$

$\iota -$

Обертальне перетворення  
 силових ліній магнітного поля

# Toroidicity-induced Alfvén eigenmodes (TAE)

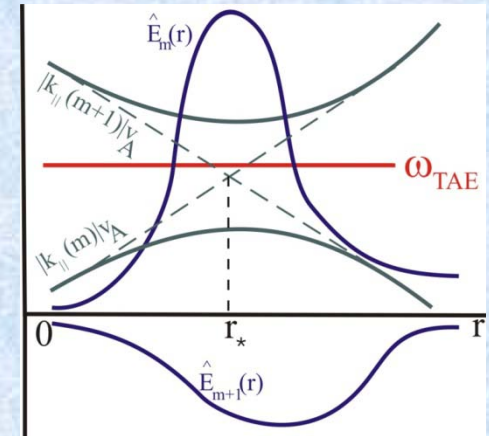
ТАЕ-моди – це альфвенові власні коливання з частотою у континуумній щілині, що утворюється через тороїдальність системи.

$$\tilde{E} = E_m \exp(im\vartheta - in\varphi) + E_{m+1} \exp[i(m+1)\vartheta - in\varphi]$$

ТАЕ-нестійкості, що збуджуються енергійними йонами, спостерігалися в усіх типах тороїдальних систем.

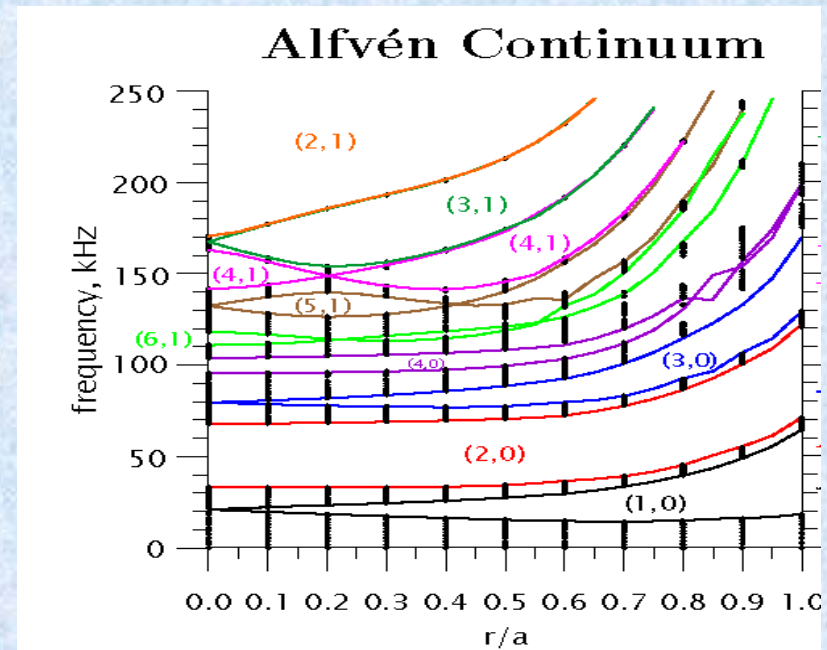
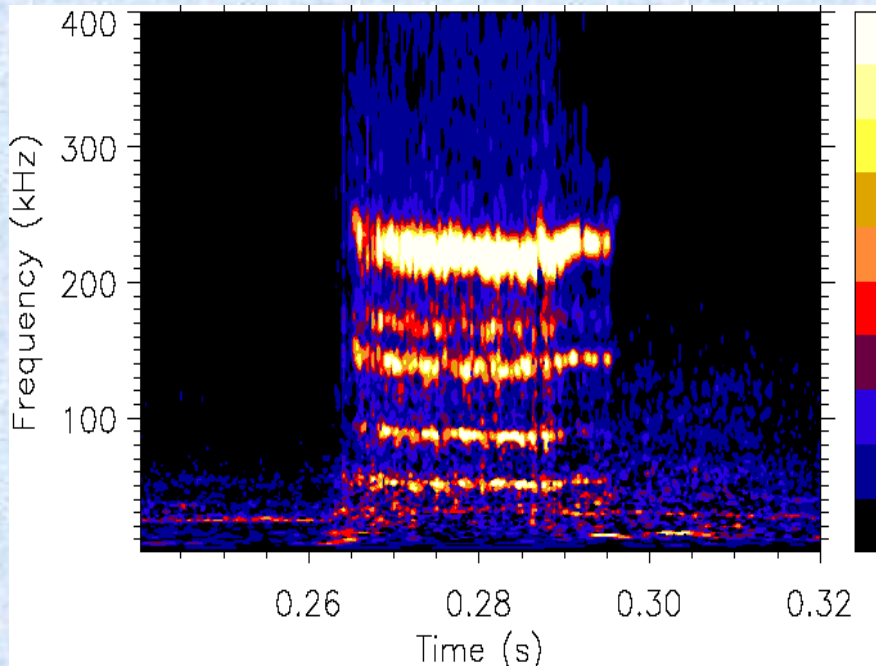
**C.Z. Cheng, M.S. Chance, Phys. Fluids 1986:**  
Піонерська робота з ТАЕ-нестійкостей

**В.С. Беликов, Я.И. Колесниченко, В.Н. Ораевский, ЖЭТФ 1968:**  
Піонерська робота з альфвенових нестійкостей плазми



*AC for 2 harmonics (m,m+1) coupled by the toroidicity and a TAE mode.*

# Альфвенові нестійкості у стелараторі Wendelstein 7-AS



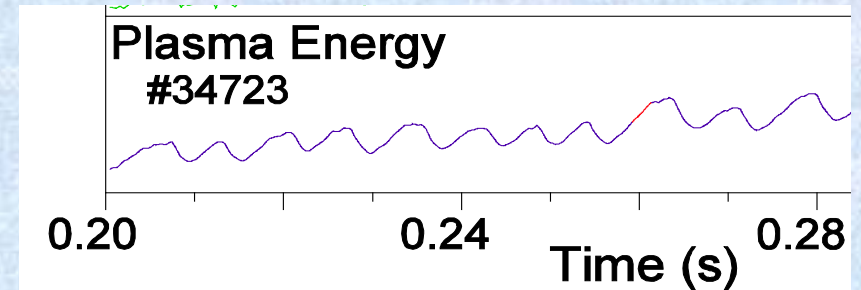
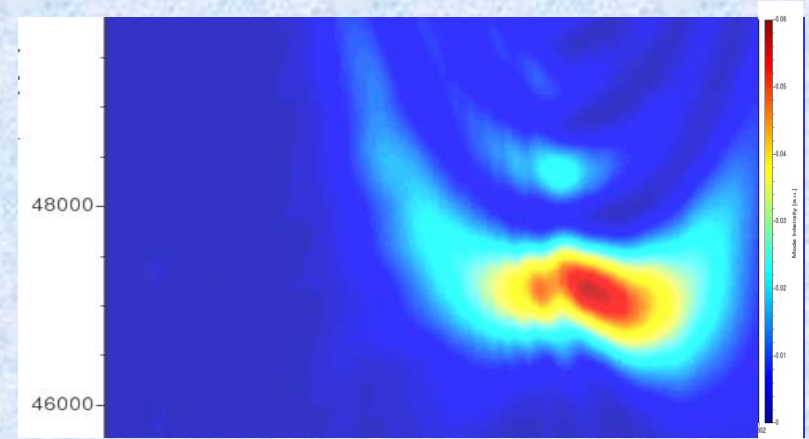
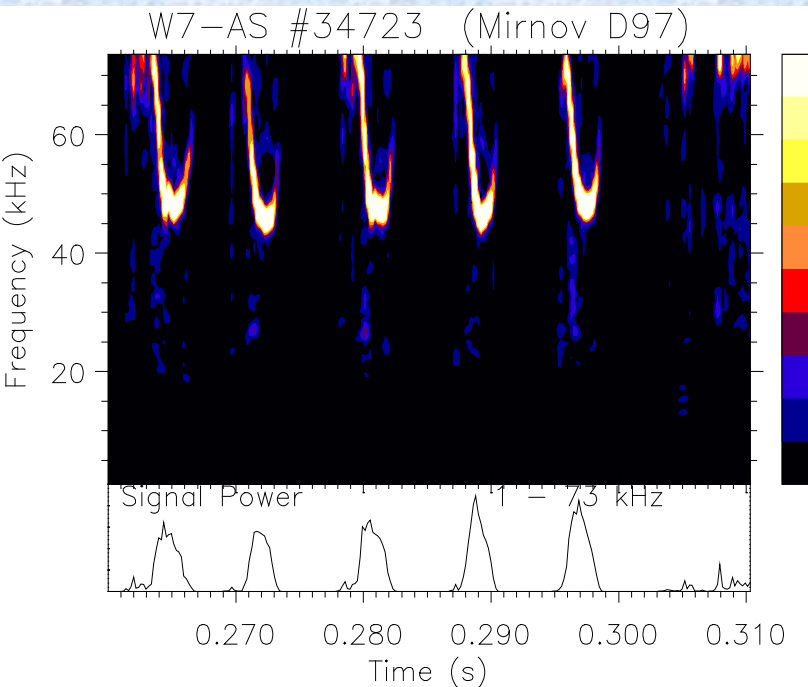
**Відкрито нові типи альфвенових коливань та нові резонанси частинка-хвиля.**

**Це дозволило пояснити спостережений спектр коливань.**

Ya. Kolesnichenko, V. Lutsenko, H. Wobig, Yu. Yakovenko, O. Fesenyuk, *Phys. Plasmas* **8** (2001) 491 and *Phys. Plasmas* **9** (2002) 517



# Альфвенові нестійкості у стелараторі Wendelstein 7-AS



- Strong frequency chirping down
- The wave amplitude is maximum at the final stage of instability bursts
- Strong thermal crashes occur on the final stage of the bursts



***Ya.Kolesnichenko<sup>1</sup>, Yu.Yakovenko<sup>1</sup>, A. Weller<sup>2</sup>,  
A. Werner<sup>2</sup>, J. Geiger<sup>2</sup>, V. Lutsenko<sup>1</sup>, S. Zegenhagen<sup>2</sup>***

***<sup>1</sup>Institute for Nuclear Research, Kyiv, Ukraine***

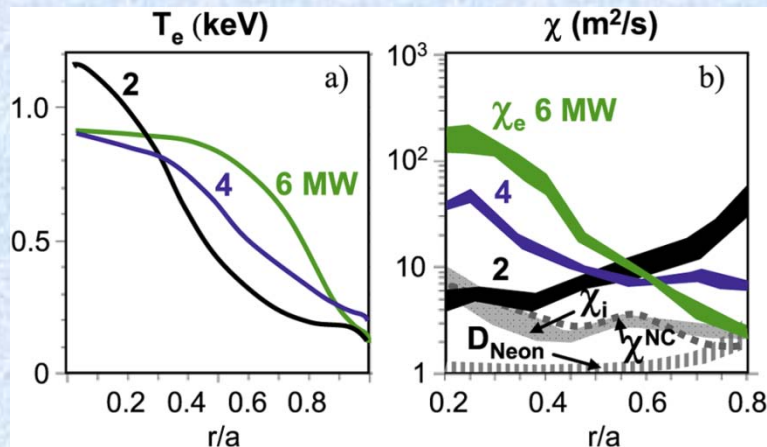
***<sup>2</sup>Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, Greifswald, Germany***

***Phys. Rev. Lett. 94 (2005) 165004***

Знайдено новий тип коливань плазми, названий “незвичайною глобальною альфвенівською власною модою”. Показано, що ці коливання можуть трансформуватися у кінетичну альфвенову хвилю, через що виникає аномальна теплопровідність плазми.

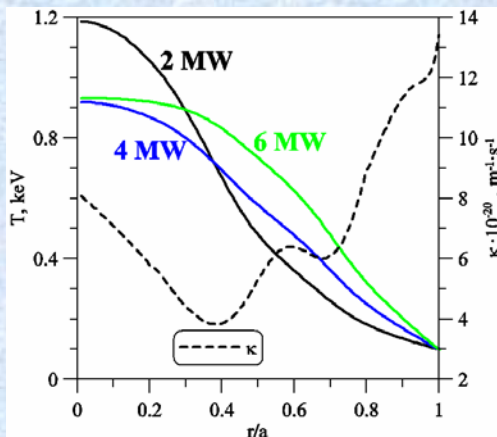
**Розвинена теорія аномальної теплопровідності плазми при наявності альфвенової хвилі є доволі загальною. Зокрема, вона пояснює природу періодичних спадів температури плазми у Вендельштайн 7-AS.**

# Деградація ефективності нагрівання плазми при збудженні альфвенових нестійкостей в NSTX



D. Stutman *et al.*, Phys. Rev. Lett. (2009):  
Measured temperature and thermal conductivity coefficients used to explain the experiment.

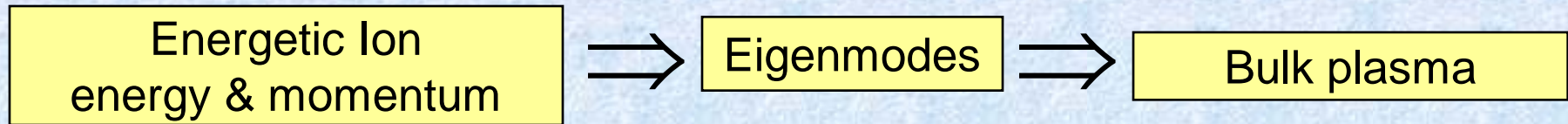
Наш аналіз цих експериментів привів до відкриття нового явища – просторового каналювання енергії та імпульсу енергійних йонів при розвитку альфвенових нестійкостей. *Ya. Kolesnichenko, Yu. Yakovenko, V. Lutsenko, Phys. Rev. Lett. 104 (2010) 075001*



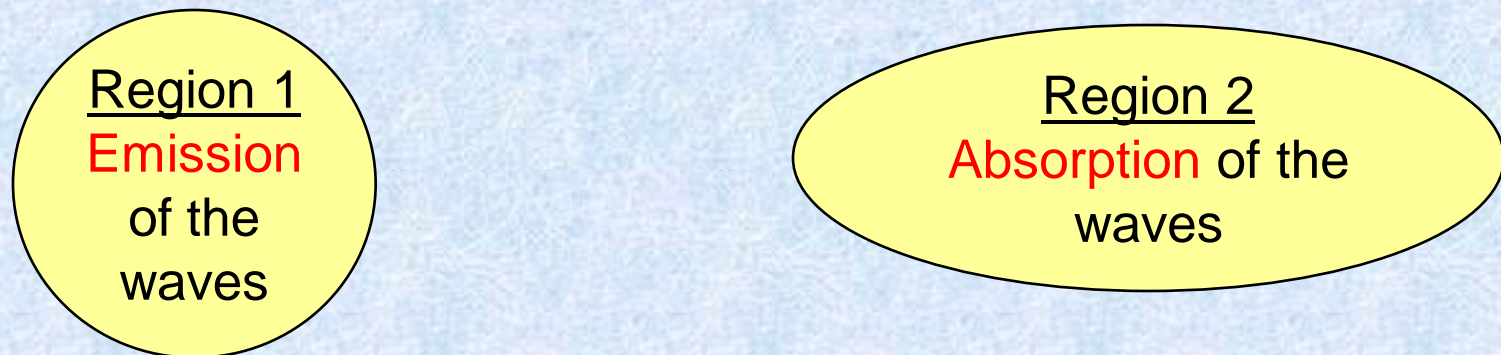
Temperature calculated in a model based on the effect of the energy channelling.

# Eigenmode channeling of energy and momentum: basic idea

During energetic-ion-driven Instabilities the energetic ions emit the waves which are absorbed by the plasma.

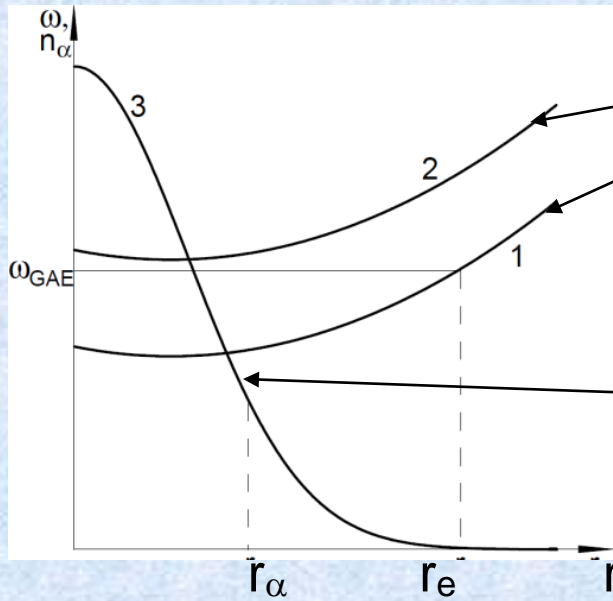


Typically, the region of emission (Region 1) does not coincide with the region of absorption (Region 2).



This implies that the energy and momentum of energetic ions is channeled from Region 1 to Region 2.

# Channeling by GAE modes

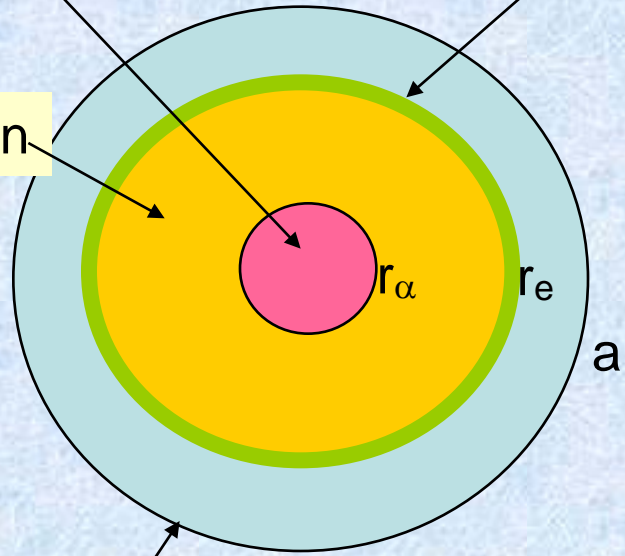


Alfven continuum branches

Energetic ions

Region of the wave damping

Mode location

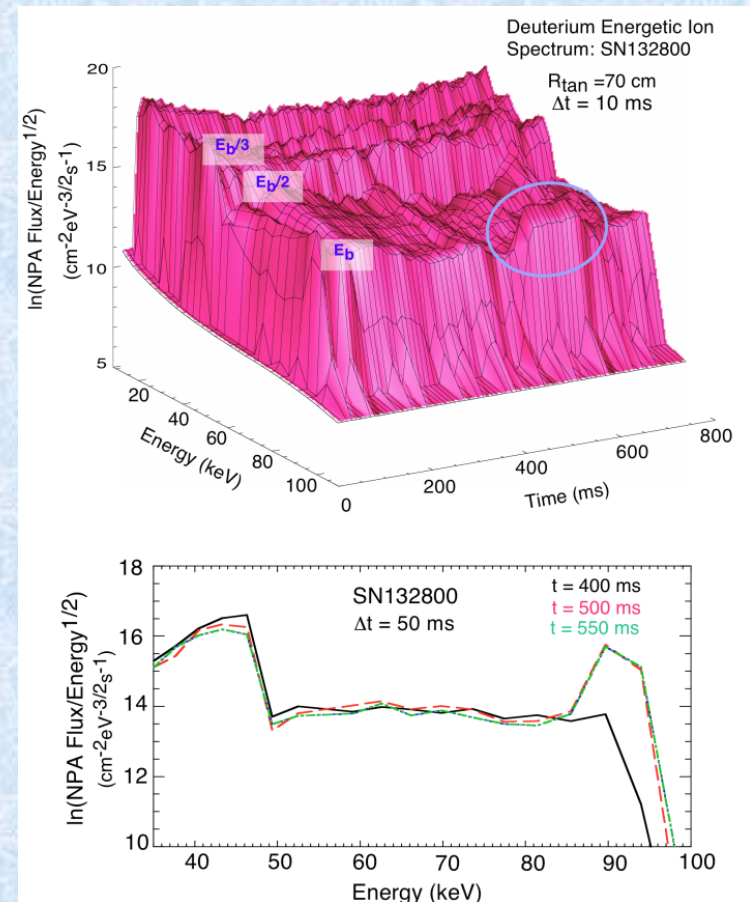
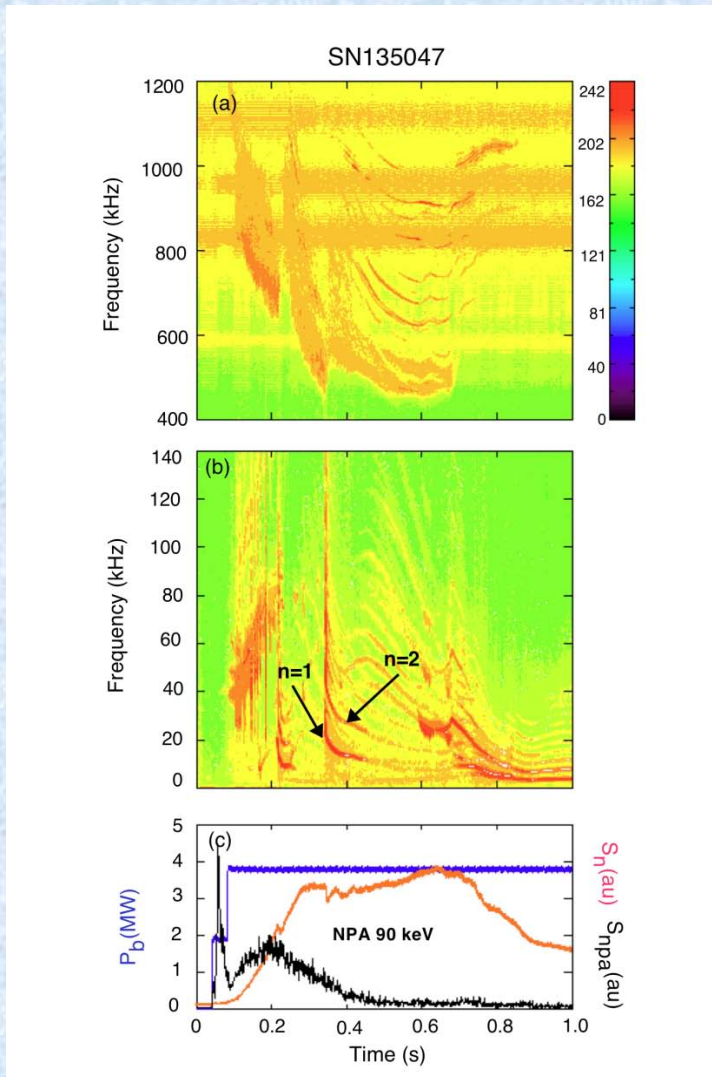


Plasma edge

GAE mode receives the energy and momentum of the beam ions inside the region  $r < r_\alpha$ , but gives the energy and momentum to electrons at  $r \sim r_e$ .

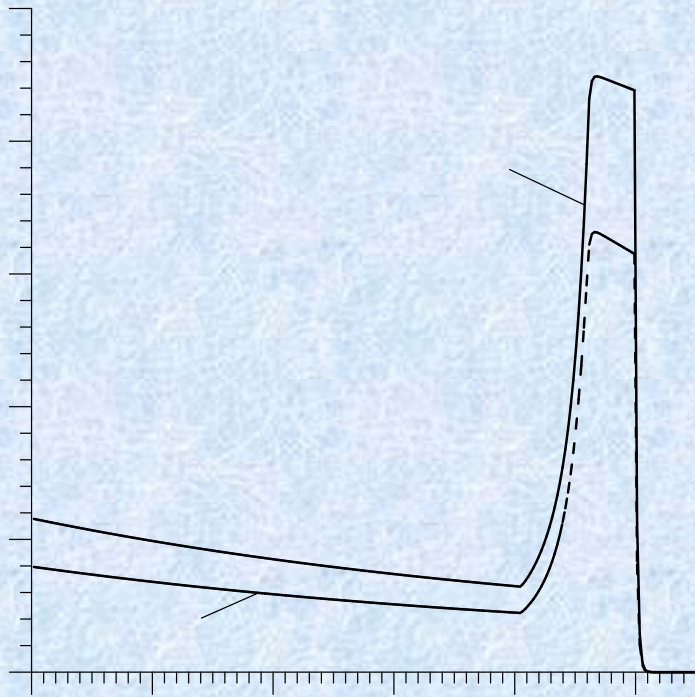


# Аномальні явища в NSTX: Пагорб на функції розподілу (High Energy Feature)





# Моделювання тривімірної квазілінійної релаксації функції розподілу енергійних йонів у NSTX



Пагорб з  $N=7$  отримано шляхом числового розв'язку модельного рівняння. Результат узгоджується з Експериментальними спостереженнями в розряді 132800

# Investigation of a transient energetic charge exchange flux enhancement ('spike-on-tail') observed in neutral-beam-heated H-mode discharges in the National Spherical Torus Experiment

S.S. Medley<sup>1</sup>, Ya.I. Kolesnichenko<sup>2</sup>, Yu.V. Yakovenko<sup>2</sup>, A. Bortolon<sup>3</sup>, R.E. Bell<sup>1</sup>, N.A. Crocker<sup>4</sup>, D.S. Darrow<sup>1</sup>, A. Diallo<sup>1</sup>, C.W. Domier<sup>5</sup>, R.J. Fonck<sup>6</sup>, E.D. Fredrickson<sup>1</sup>, S. P. Gerhardt<sup>1</sup>, N.N. Gorelenkov<sup>1</sup>, G.J. Kramer<sup>1</sup>, S. Kubota<sup>4</sup>, B.P. LeBlanc<sup>1</sup>, K.C. Lee<sup>5</sup>, E. Mazzucato<sup>1</sup>, G.R. McKee<sup>6</sup>, M. Podestà<sup>1</sup>, Y. Ren<sup>1</sup>, A.L. Roquemore<sup>1</sup>, D.R. Smith<sup>6</sup>, D. Stutman<sup>7</sup>, K. Tritz<sup>7</sup> and R.B. White<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Princeton Plasma Physics Laboratory, Princeton, New Jersey, 08543, USA<sup>a</sup>

<sup>2</sup> Institute for Nuclear Research, 03680, Kyiv, Ukraine

<sup>3</sup> University of California, Irvine, CA 90095, USA

<sup>4</sup> University of California, Los Angeles, CA 90095, USA

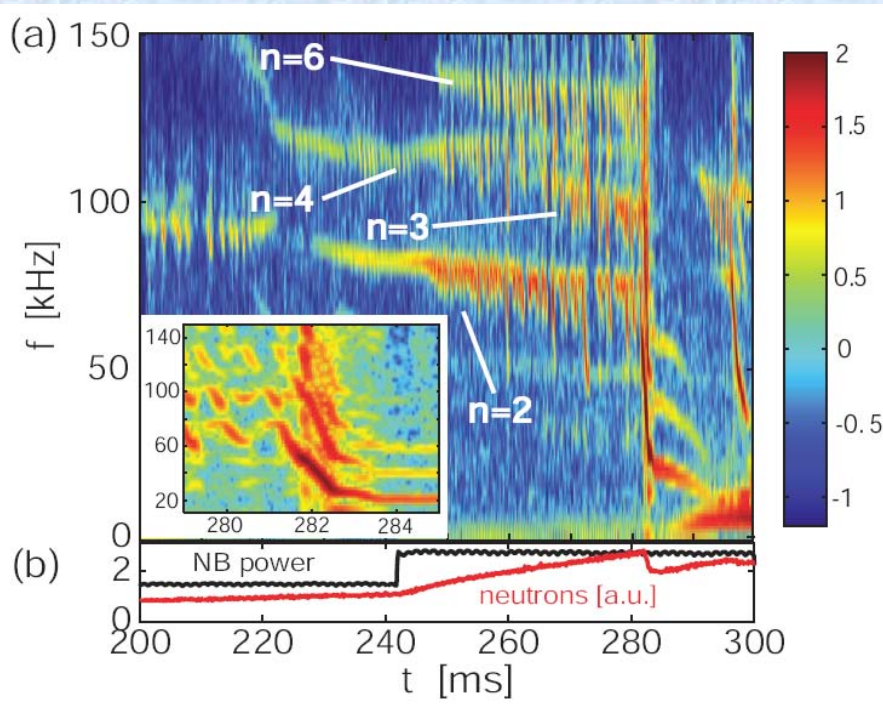
<sup>5</sup> Department of Applied Science, University of California, Davis, CA 95616, USA

<sup>6</sup> Department of Engineering Physics, University of Wisconsin-Madison, Madison, Wisconsin, 53706, USA

<sup>7</sup> Johns Hopkins University, Baltimore, Maryland 21218, USA

**Nuclear Fusion-2012; Also Report PPPL-4528 (2011)**

# Лавини (avalanches) альфвенових нестійкостей



**Лавина нестійкостей** :  
одночасне підсилення  
багатьох альфвенових  
нестійкостей, що супровод-  
жується швидкою зміною  
частот нестійкостей  
(frequency chirping).

**Лавина нестійкостей веде до  
викидів енергійних йонів та  
падінню нейтронної емісії.**

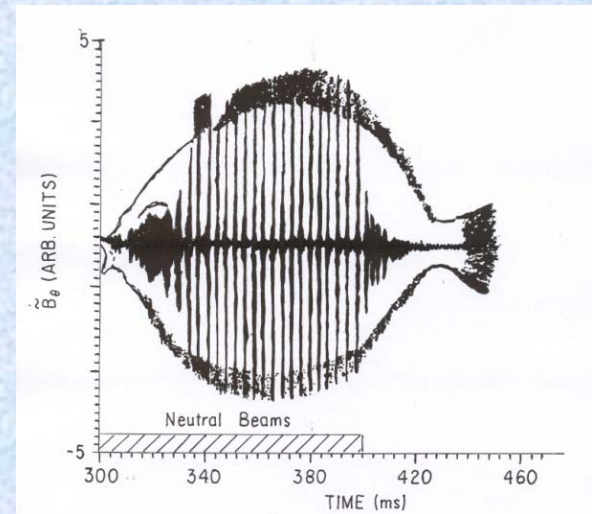
Podesta et al., Phys. Plasmas - 2009

Для числового моделювання цих експериментів штучно задають дуже великі транспортні коефіцієнти, обґрунтування яких є відсутнім. Також не зрозуміло, чому виникає одночасне підсилення і чірпінг частоти багатьох нестійкостей. **Через нелінійне комптонове розсіювання хвиль на енергійних йонах? – Доповідь Ю. Яковенка на цій конференції у середу.**

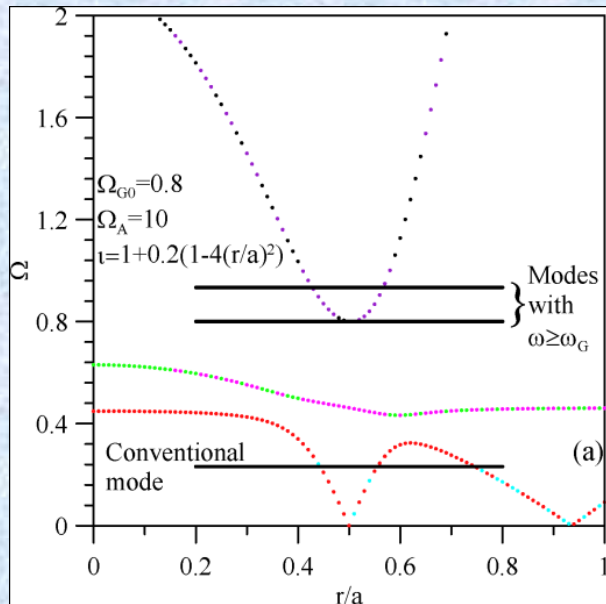
# Фішбон (fishbone) нестійкість

Це перша спостережена на експерименті нестійкість, що збуджується енергійними йонами. Нестійкість вела до великих втрат інжектваної у плазму енергії на токамаці PDX.

*K. McGuire, et al., Phys. Rev. Lett. 1983*



**Ця нестійкість є низькочастотною, див. малюнок.**

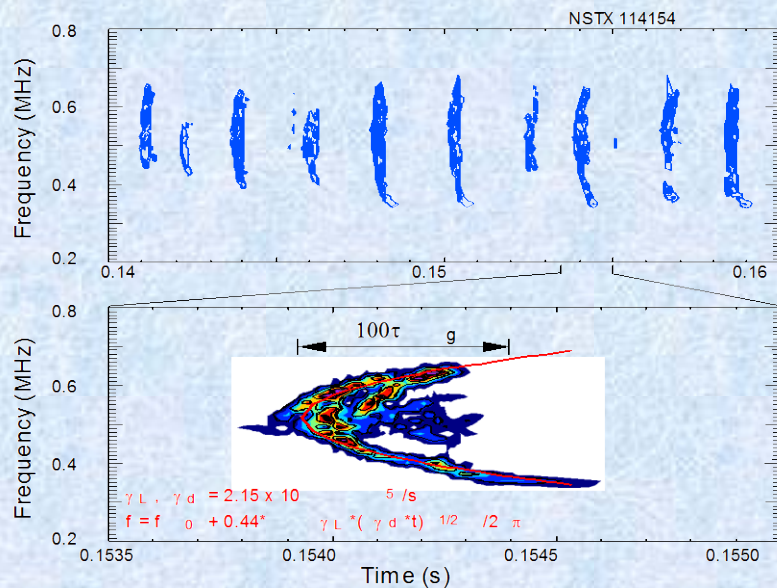


**Проте нещодавно було знайдено фішбон-нестійкості із значно більшими частотами. Ймовірно, нестійкість такого роду спостерігалася на токамаці JET.**

***Ya. Kolesnichenko, V. Lutsenko, R. White  
Nuclear Fusion Vol. 50 (2010) 084017***

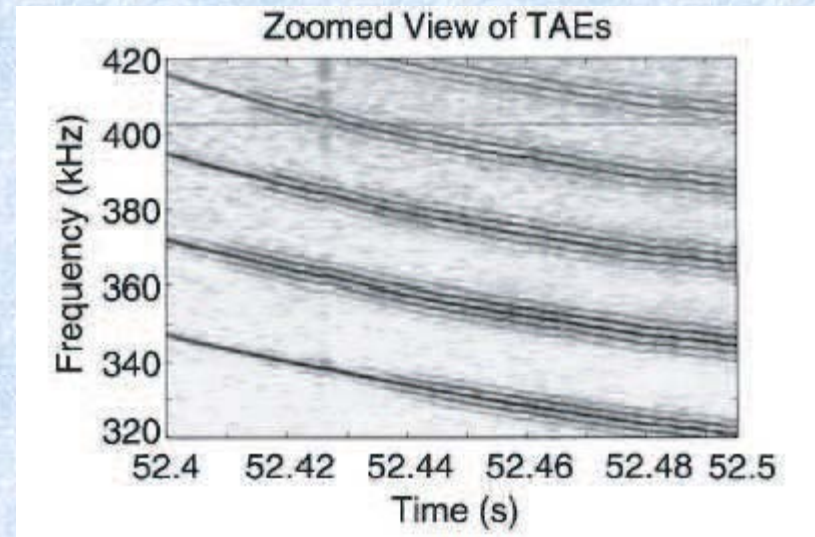


Термоядерна плазма часто є лише слабо нестійкою. Це стимулювало **розвиток нелінійної теорії систем поблизу границі стійкості**. З неї випливає, що нестійкості, які збуджуються енергійними йонами, можуть виходити на режими з **осциляціями амплітуд коливань, розщепленням частот та ін.** Ці явища спостерігалися у багатьох експериментах.



## Розщеплення частоти в NSTX

Courtesy of E. Fredrickson and R. White



## Розщеплення частоти в JET

A. Fasoli, Phys. Rev. Lett. 81, 5564, (1998)



## **A recent invited overview:**

Ya.I. Kolesnichenko, A. Konies, V.V. Lutsenko, Yu.V. Yakovenko  
“Affinity and difference between energetic-ion-driven instabilities in  
2D and 3D toroidal systems”

*Plasma Physics and Controlled Fusion, Vol. 53 No.2 (2011)*

*024007 (46 pages)*

(Special section on physics of the stellarator-tokamak interface)

IOP Publishing, UK

**Дякую за увагу**