

Proposta campagna di analisi di FTU

Breve riassunto della proposta

Francesco Paolo Orsitto

ENEA C R Frascati Aula A Marino

30 settembre 2024 ore 14.00

Contributi alla proposta da
G Apruzzese , L Boncagni, P Buratti, A Cardinali ,
C Castaldo, A. Fassina , M Iafrati , C Mazzotta , V Pericoli ,
G Pucella, M Zerbini

Introduzione e contesto

Le conoscenze prodotte dal lavoro svolto su FTU sono uniche e per molti aspetti ancora da sintetizzare.

Infatti , Non esiste un luogo (articolo di rivista, oppure un volume di una rivista) in cui siano sintetizzate le conoscenze prodotte da FTU dal 2005 al 2022(18anni).

Ci sono gli articoli di rivista pubblicati come overviews IAEA su Nuclear Fusion in tale periodo 2005-2022 .

Inoltre un volume di Fusion Science and Technology (vol 45 , Nr.3 may 2004) e' stato dedicato alle conoscenze acquisite e pubblicate tra il 1990 ed il 2004 su FTU

PROPOSTA

La proposta consiste nella realizzazione di un volume analogo al vol 45 di FUSION SCIENCE and TECHNOLOGY in cui si riassumano I risultati di FTU dal 2005 al 2022 (18 anni) nelle varie topiche .

Per tale obiettivo potrebbe essere utile la organizzazione di una campagna di analisi dei dati di FTU della durata di tre mesi , definendo delle topiche con dei responsabili .

Obiettivo di tale campagna e' quello di consolidare gli elementi di novità prodotte da FTU nel periodo 2005-2022 ed **arrivare ad una sintesi delle conoscenze prodotte su FTU.**

Outline

Analisi della struttura del volume di FUS SCI TECH pubblicato nel 2004

Elementi sulla organizzazione della compagna di analisi

Structure of FUSSCITECH Volume published in 2004

- Cap I FTU program
- Chap II Highlights of Physics studies
- Chap III Internal Transport Barriers
- Chap IV High density Regimes
- Chap V MHD studies
- Chap VI Transport studies
- Chap VII RF wave physics
- Chap VIII Diagnostics systems
- Chap IX FTU Machine Design and Contruction
- Chap X FTU Operation
-
- Chap XI Heating and Current Drive Systems

Highlights FTU program

New physics regimes :

- Internal Transport Barriers
- PEP modes : pellet enhanced confinement mode
- Radiation-improved (RI) modes

Physics studies :

- Wave physics studies : LHCD ; ECRH and ECCD ;
 - synergy between LHCD and ECRH; IBW
- MHD studies : $m=1$ mode analysis and tearing modes ,
 - MHD stabilization
 - Transport studies

Global confinement

The fig 16 shows
 the confinement improvement factor with
 Respect to the ITER 97 L-mode scaling
 The Internal transport formation lead
 to strong enhancement for short conf time
 In fig 7 it is shown that the Alcator scaling
 tauE = density is recovered using pellets

$$\tau_{E_ITER97} = 0.023 I_p^{0.96} B_t^{0.03} R^{1.83} \times \left(\frac{R}{a}\right)^{0.06} \kappa^{0.64} \bar{n}^{0.40} M_{eff}^{0.20} P^{-0.73} .$$

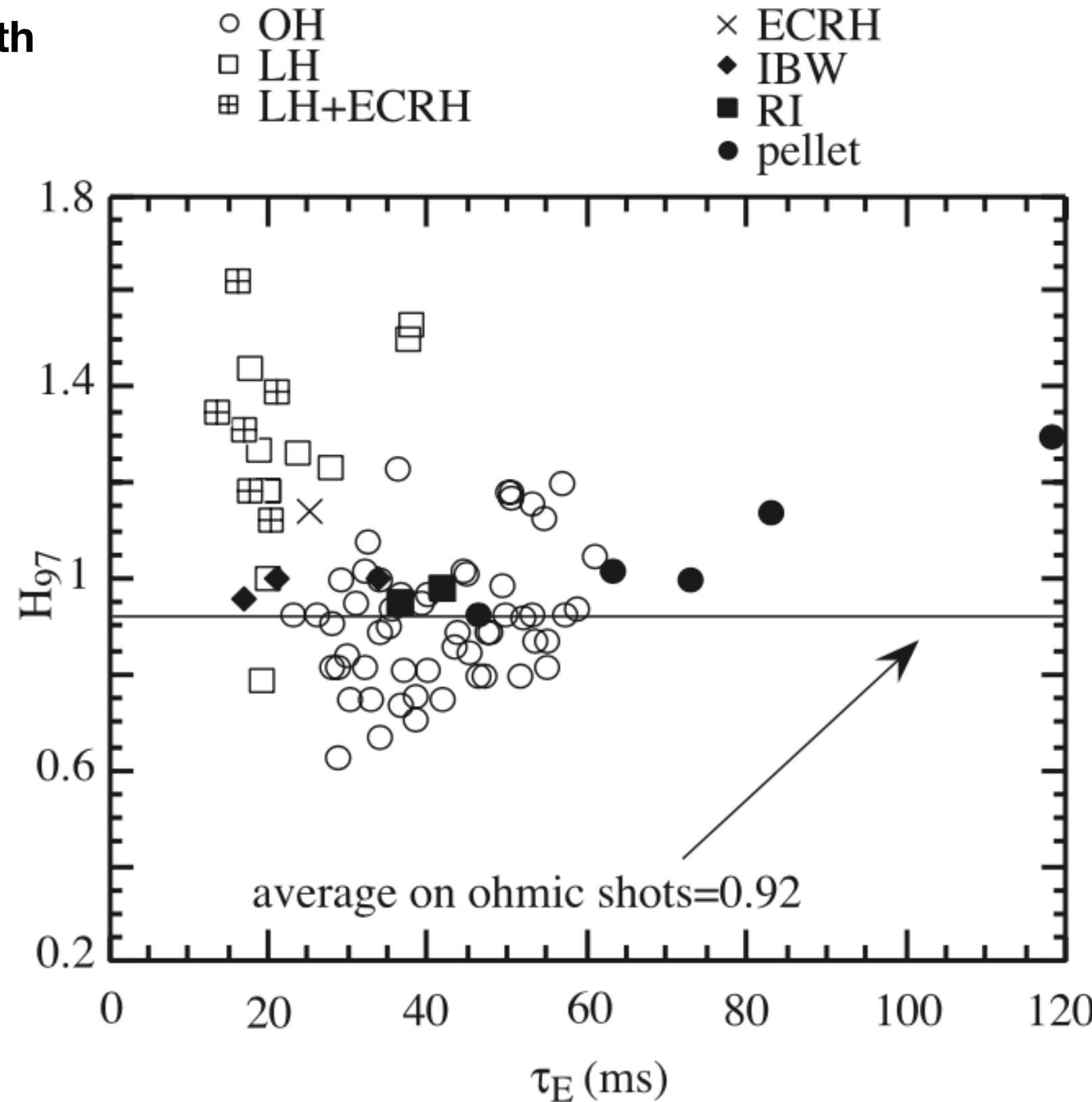


Fig. 16. H factor (ITER97 L-mode) against energy confinement time for various regimes in FTU.

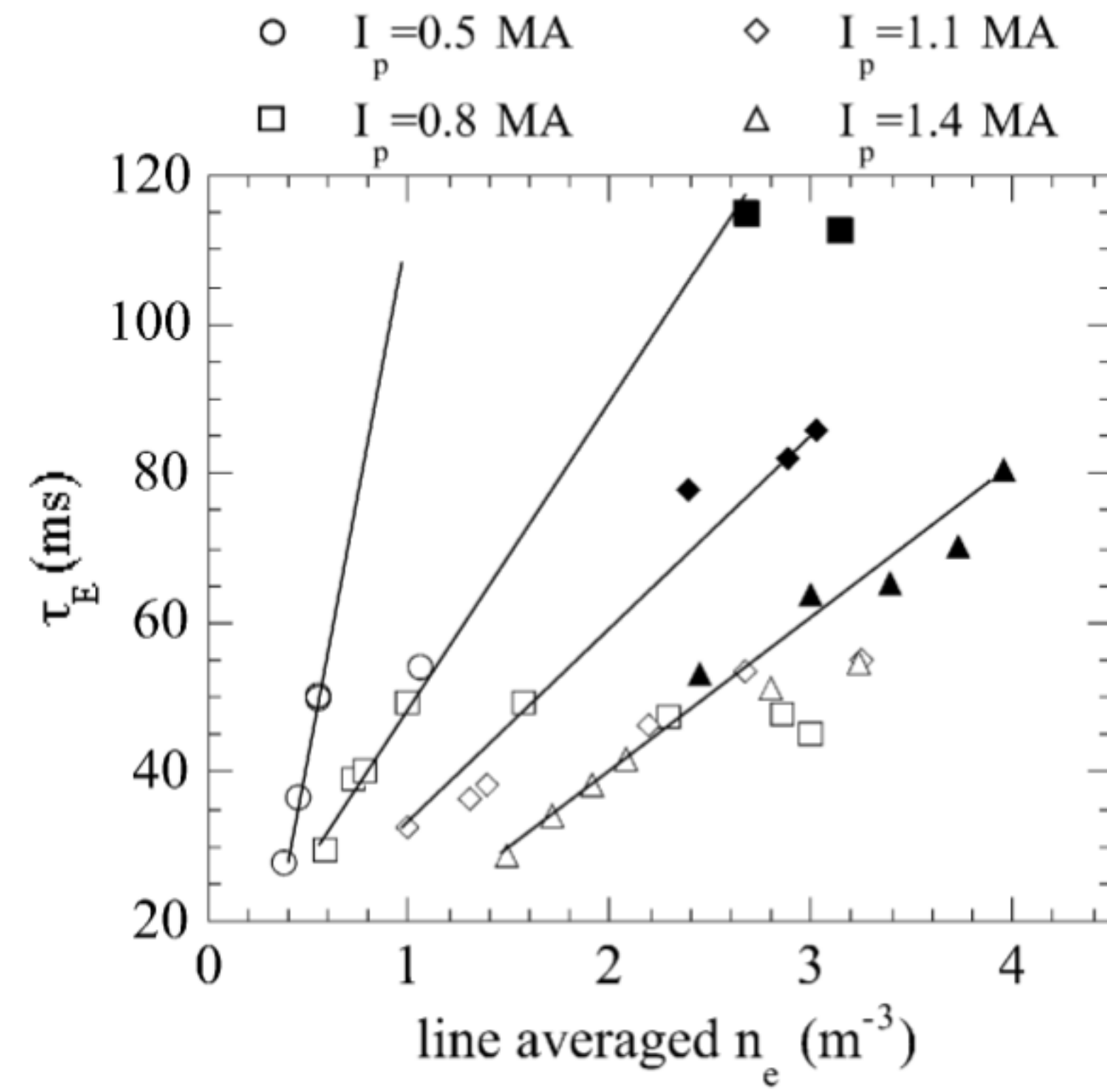


Fig. 7. Confinement time in FTU ohmic discharges (density scan experiment); both ohmic (open symbols) and pellet points are shown (solid lines have been drawn as a guide for the eye to show the recovery of the neo-Alcator scaling with density obtained within multiple-pellet discharges; pellet τ_E data are averaged over 50 ms).

PEP pellet enhanced performance modes

Pellet injection lead
to enhanced confinement as shown in fig 10
The current profile is slightly modified
as shown in fig.9

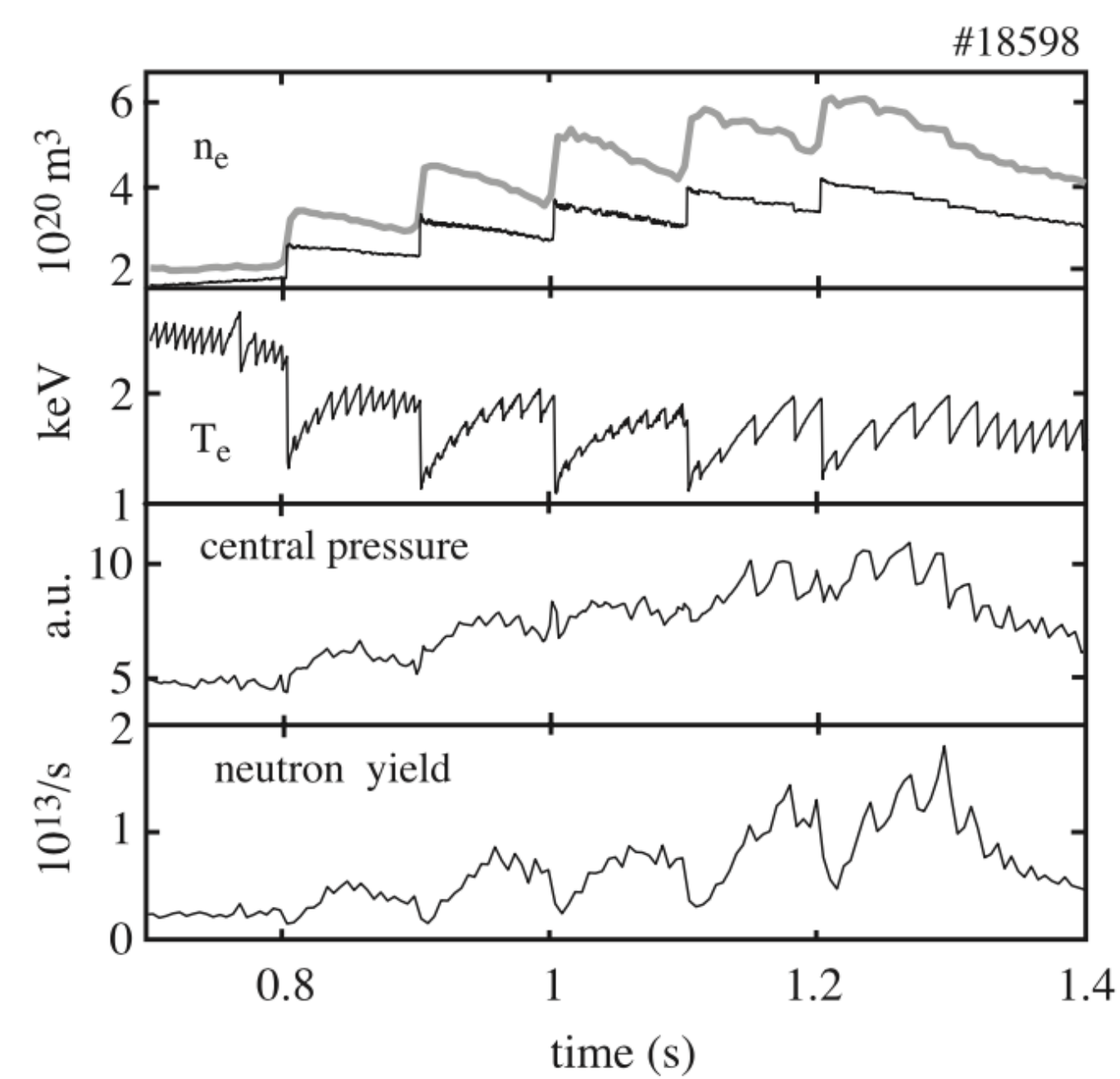


Fig. 9. Time traces of #18598. In the top box, the grey curve corresponds to the central density and the black line to the volume-averaged density. Sawteeth are delayed but not suppressed, and quasi-steady state is achieved. The total radiated power remains constant.

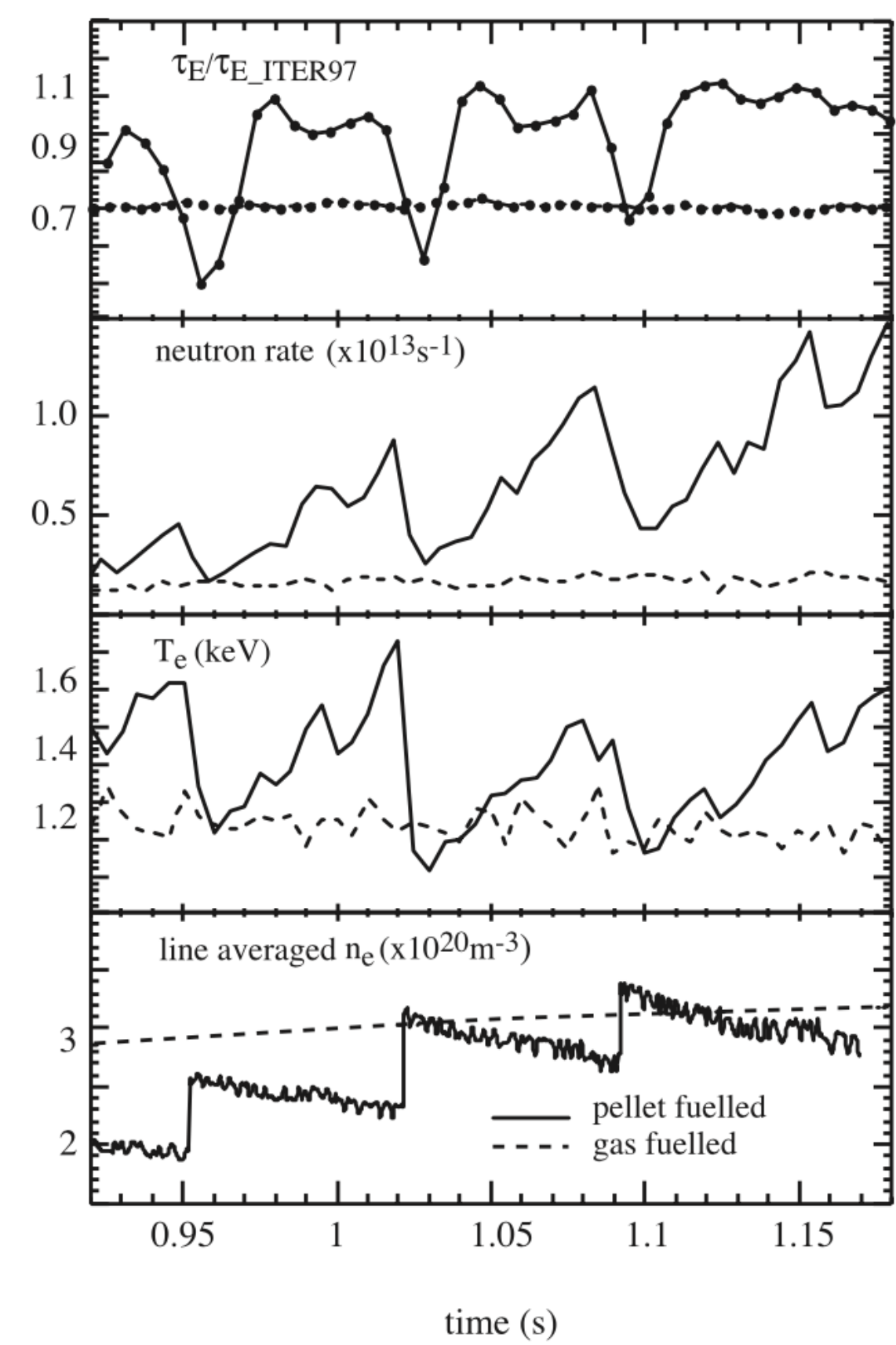


Fig. 10. Time evolution of temperature, density, neutron rate, and energy confinement time normalized to the ITER97 scaling for a gas-fueled (dotted line) and a pellet-fueled (solid line) discharge.

Wave Physics

Internal Transport barrier

Formation of transport barrier by LHCD
Heating after ECRH central heating

Electron temperature >> ION Temperature

Gormezano et al. FTU PHYSICS STUDIES

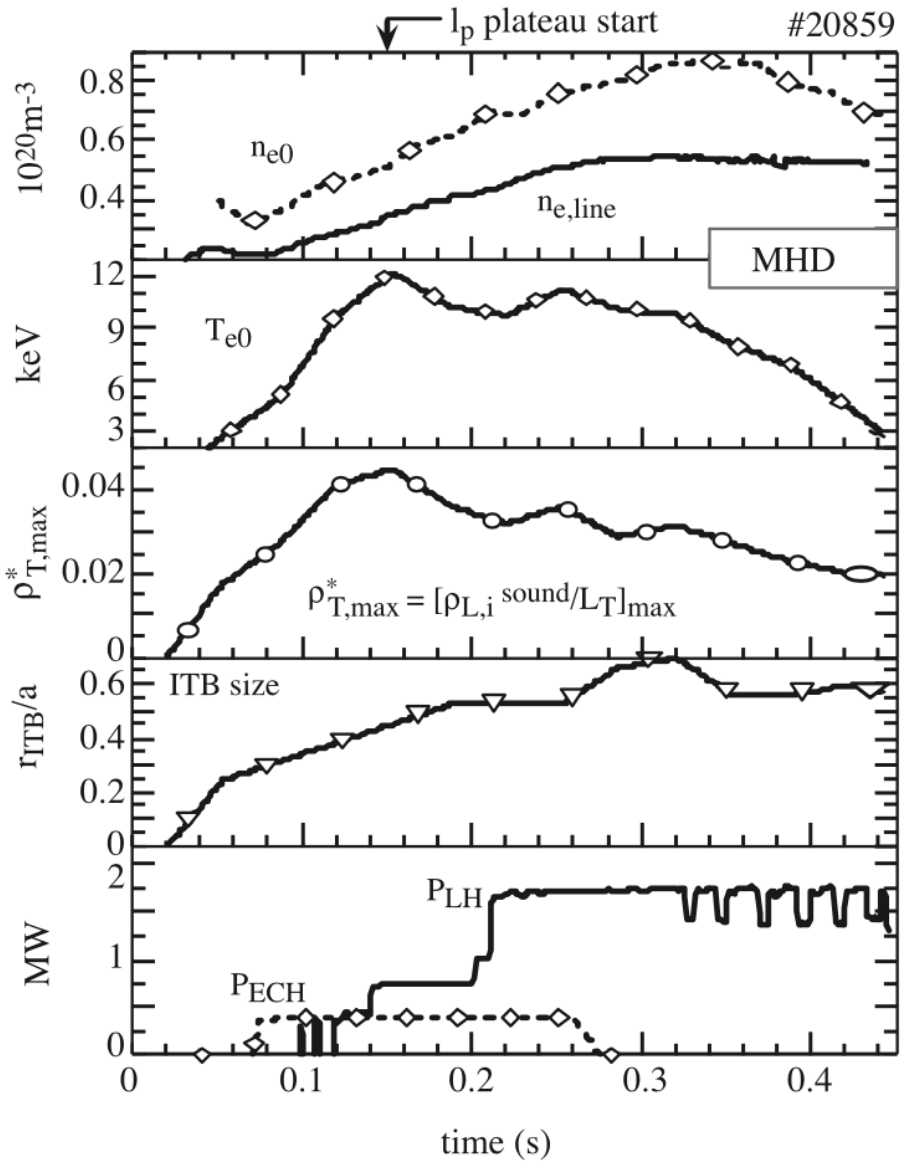


Fig. 3. Time traces of main signals of pulse #20859. An ITB is formed quite early in time as indicated from the normalized Larmor radius. A significant MHD activity starts at $t = 0.35$ s when the ITB is collapsing.

combined LHCD and ECRF power, as planned for future experiments.

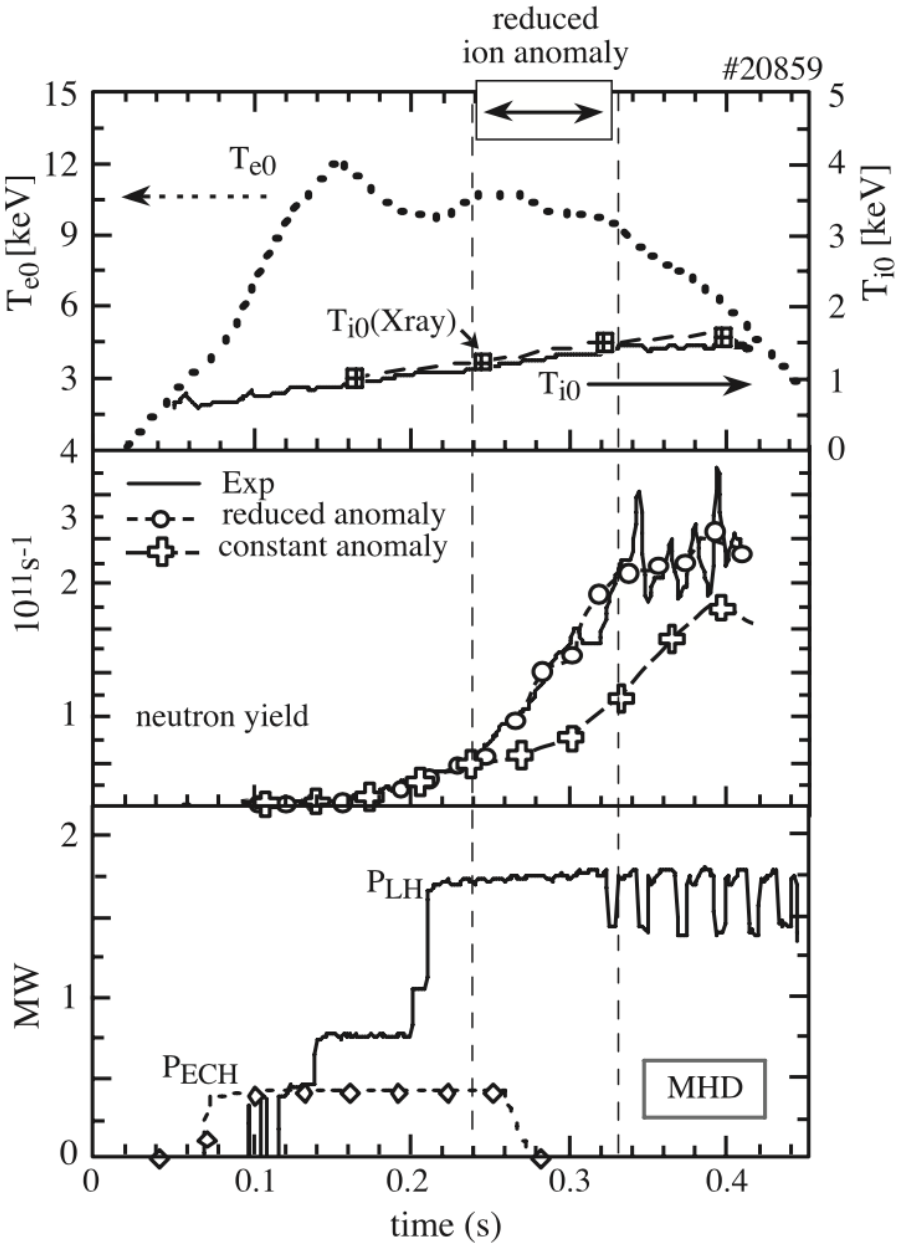


Fig. 4. Increase of the thermal neutron yield during LHCD and ECRH application in pulse #20859. Electron and ion temperature (from neutron yield and from X-ray measurements) are also indicated. The initial value of the ion anomaly factor of 1.7 (open crosses) has to be reduced to 1.1 during the ITB (open circles) to have a better simulation of the neutron yield.

Wave physics

LHCD Current drive efficiency

A typical shot where the achievement of the full current drive by LHCD injection (fig.18) at High central density

The plot of the current drive efficiency η_{CD} vs the electron temperature is shown

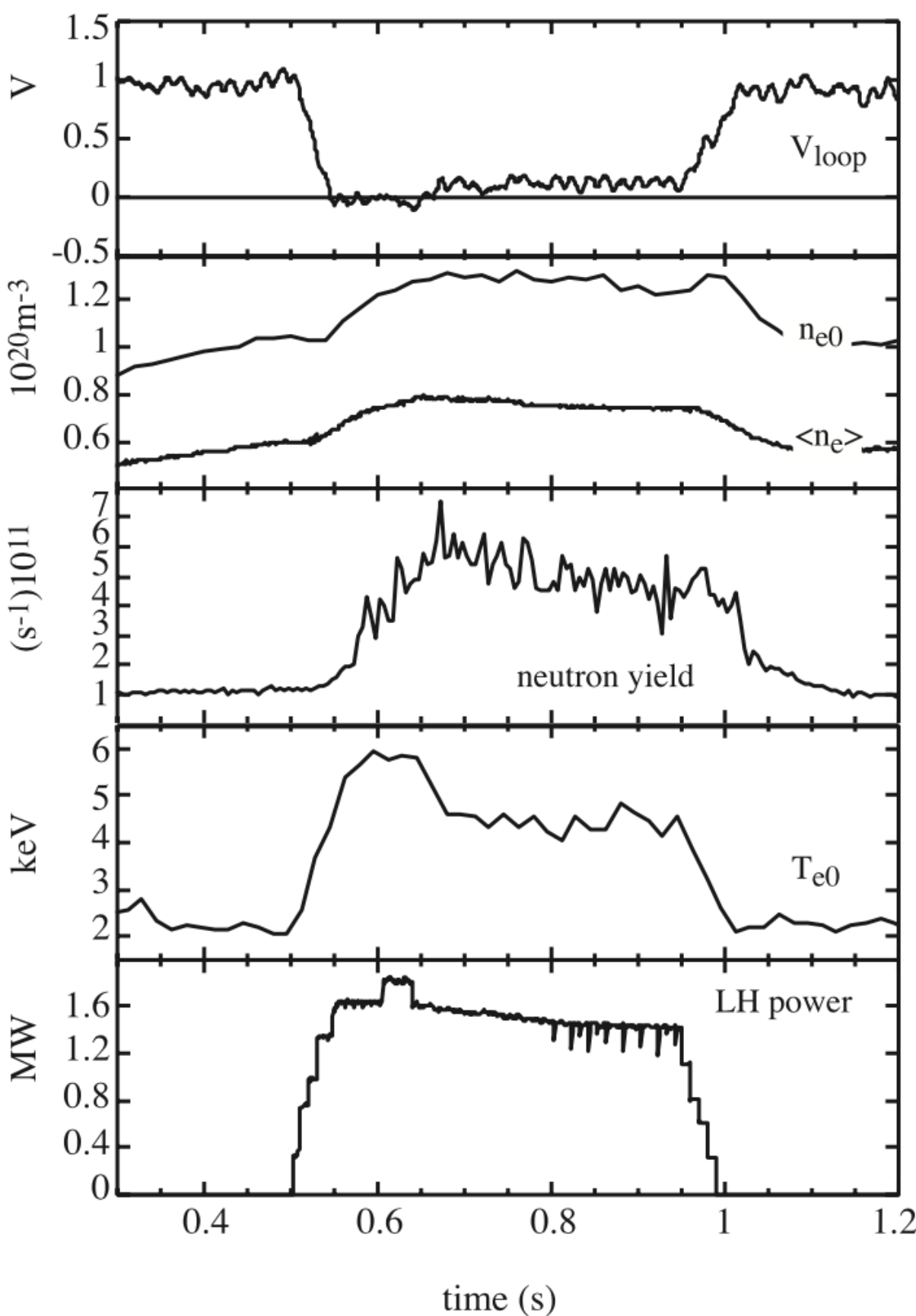
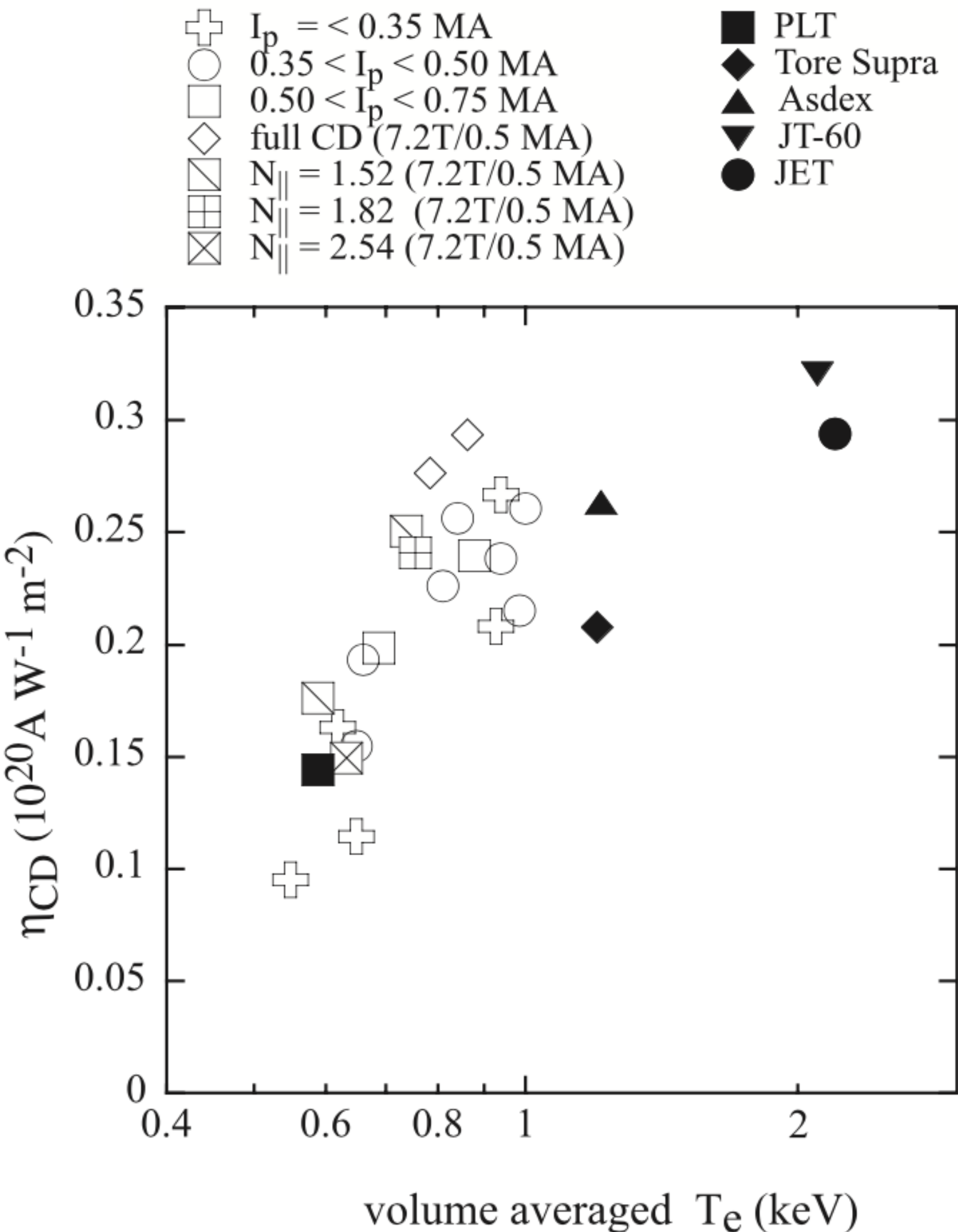


Fig. 18. Main signals of an LHCD discharge with nearly full CD (#22424, $B_t = 7.2$ T, $I_P = 0.5$ MA) at ITER relevant densities.



TRANSPORT AND CONFINEMENT IN EC HEATED DISCHARGES ON CURRENT RAMP

TRANSPORT IN SHEAR REVERSED PLASMAS

Strong ECRH heating at plasma centre
During the current ramp slows the penetration
Of the current to the plasma centre
Leading to shear reversed q -profiles (fig 16)

In fig.14 typical traces of ECRH Heating
on current ramps leading to high Temperatures
In core plasma

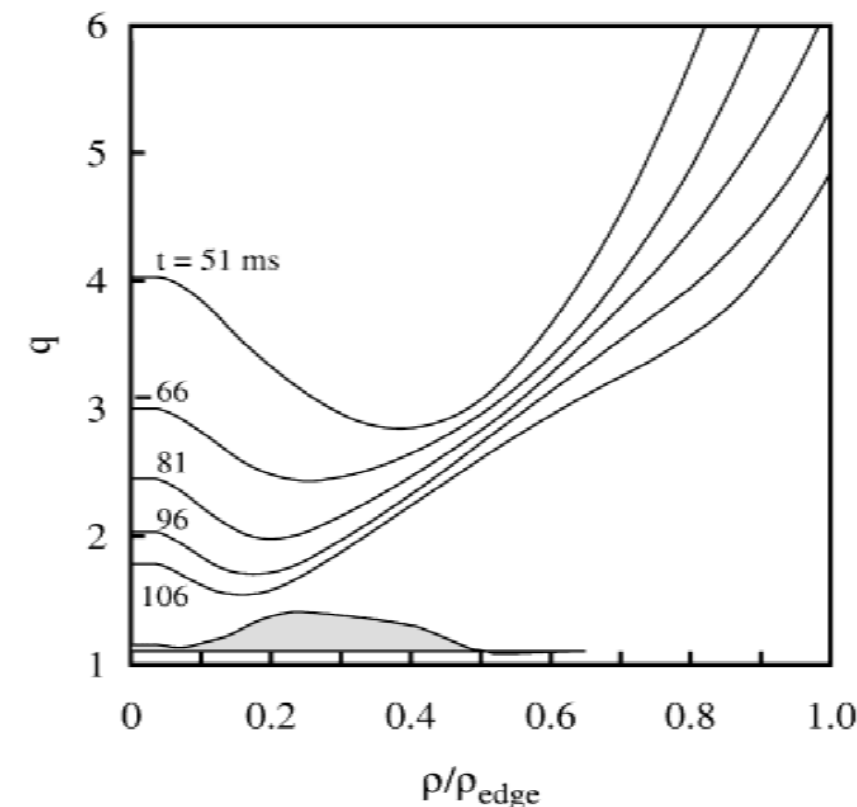


Fig. 16. Time evolution of the q profile calculated for pulse #12658 assuming $Z_{eff} = 6.7$ and Spitzer resistivity. The value ρ_{edge} is the radial coordinate of the last closed magnetic surface. The shaded area shows the temperature modulation (in kilo-electron-volt units, with baseline offset at 1.1) during the growth of an $m = 2$ double-tearing instability.

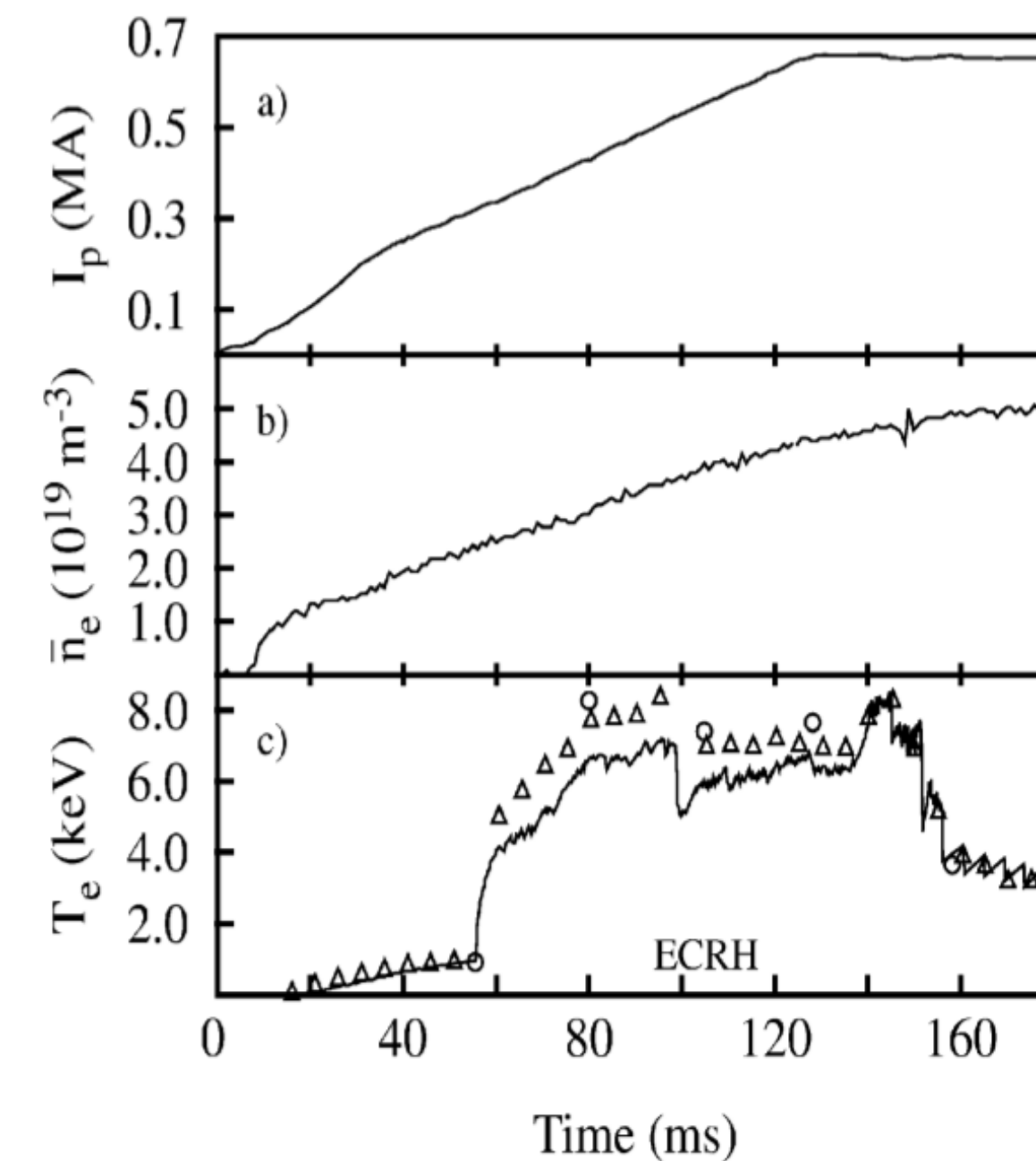


Fig. 14. Time evolution of (a) plasma current, (b) line-averaged electron density, and (c) electron temperature for FTU pulse #12799. The solid line in (c) represents the fast ECE measurement at $R = 0.976$ m, the circles give TS results at $R = 0.965$ m, and the triangles represent the peak temperature as measured by the Michelson interferometer.

ION HEATING DURING ECRH

DIFFICULTY IN HEATING IONS

The difficulty of heating ions
in ECRH heated discharges
Is shown in these figures.
The scheme of O-mode heating
Lead to work at low to medium density
A this make difficult the collisional relaxation
Of the energy from election to ions.

Granucci et al. RADIO-FREQUENCY WAVE PHYSICS IN FTU

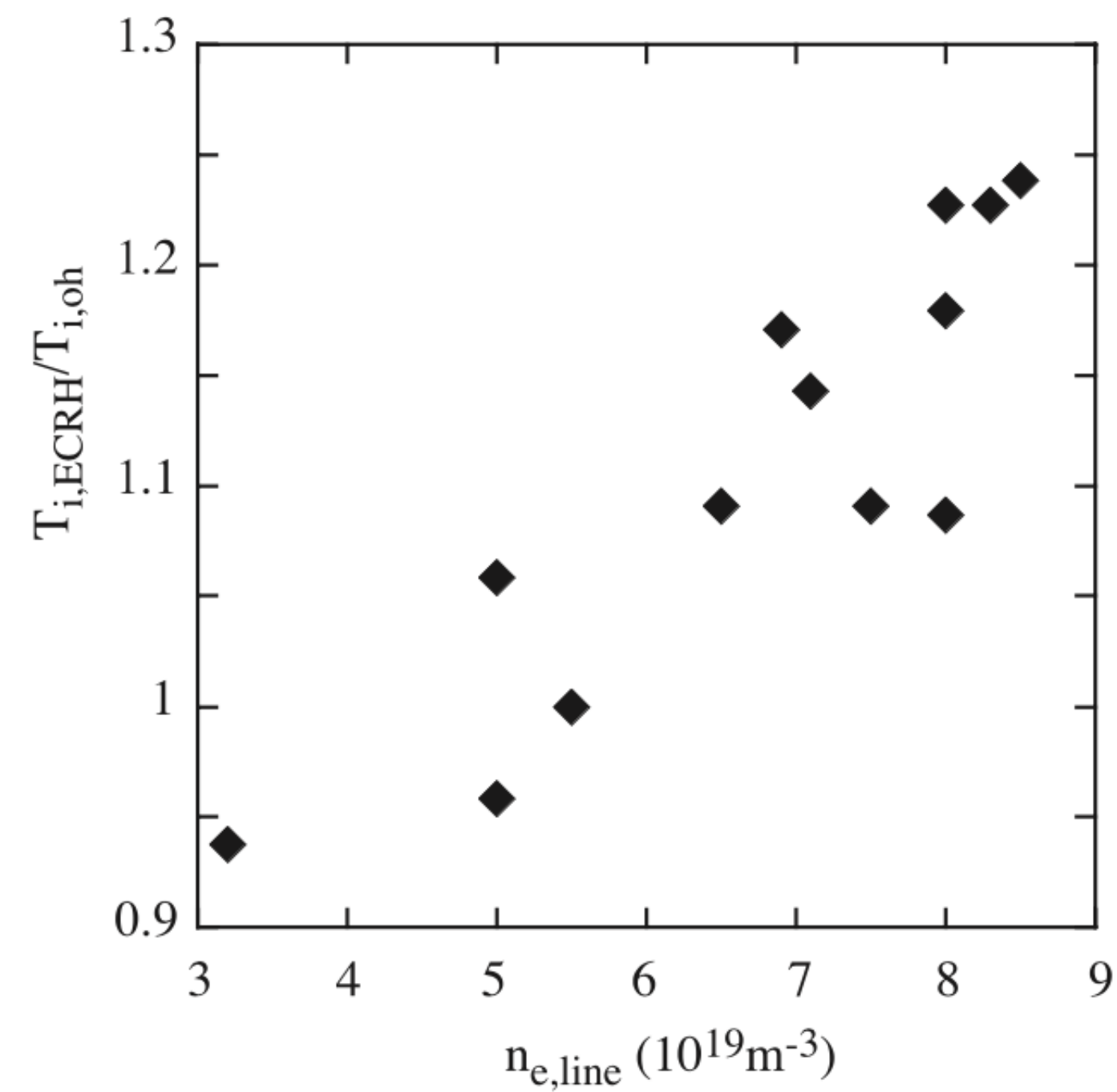
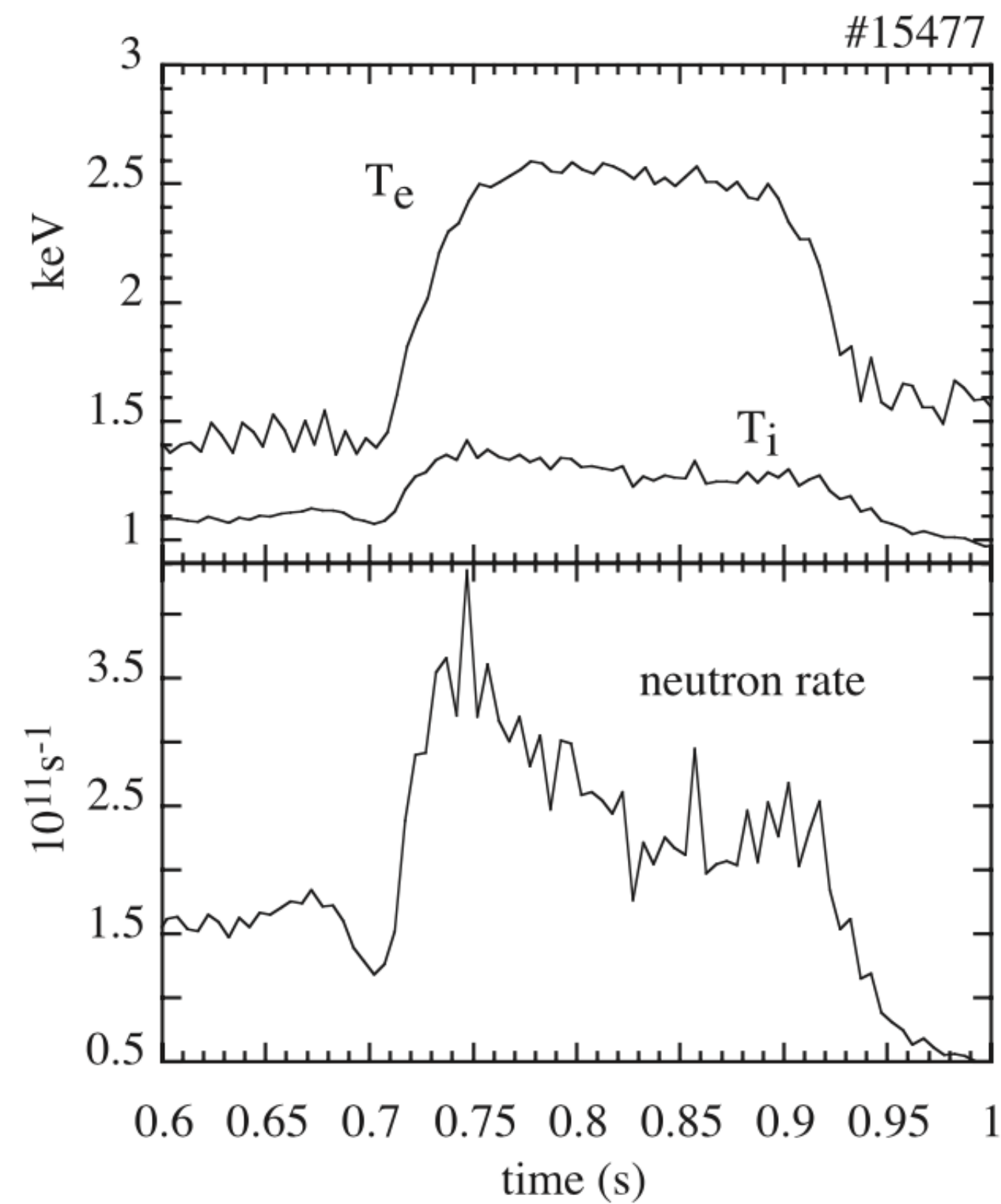


Fig. 3. Ion heating efficiency, during ECRH at 800 kW, increases linearly with electron density.

DIAGNOSTICS

Lay out of the Thomson scattering systems
Which measures the electron density and temperature

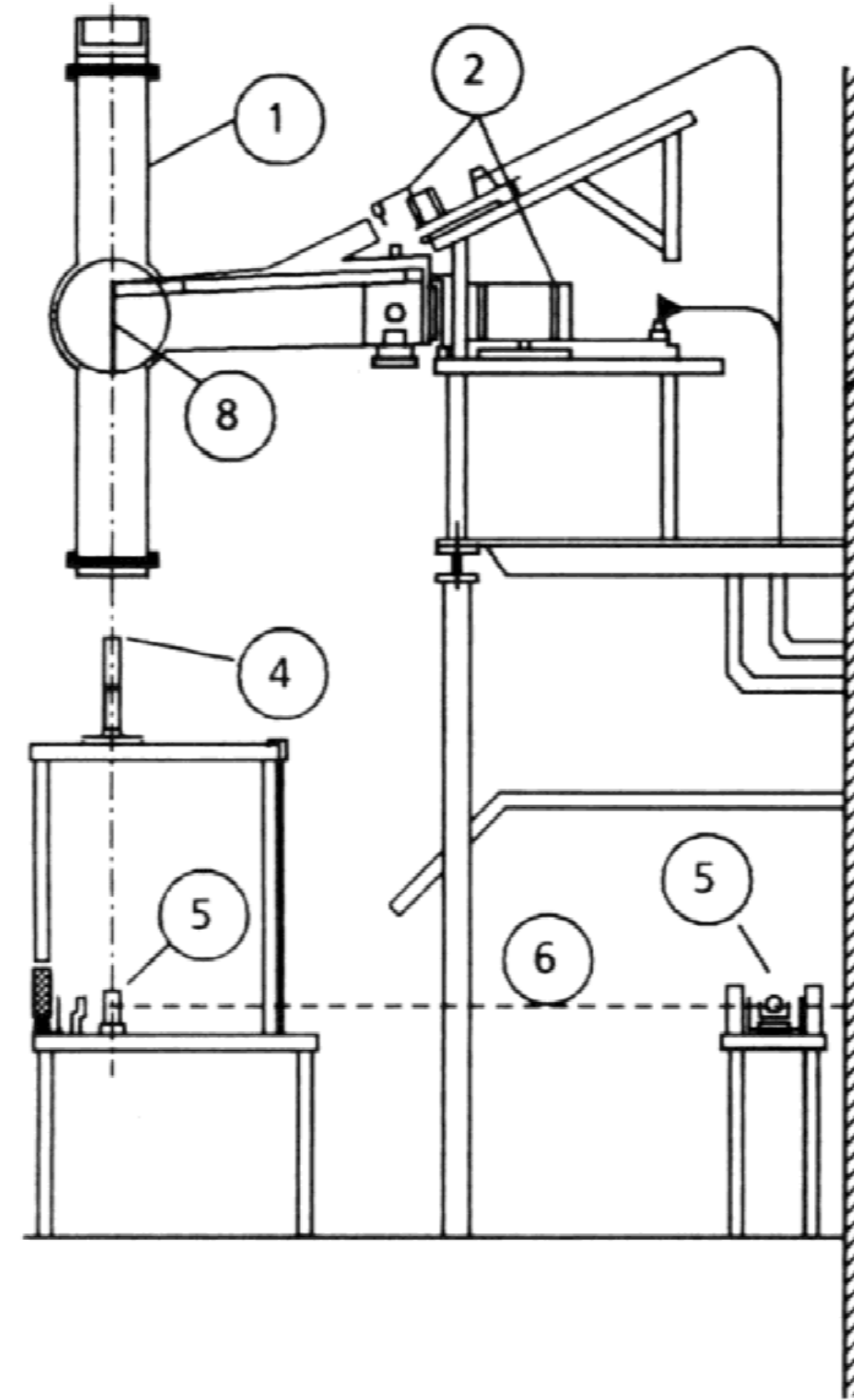


Fig. 3. Schematic diagram of the Thomson scattering system:
(1) main FTU chamber, (2) objectives, (4) focusing
lenses, (5) steering mirrors, (6) laser beams, (8) scat-
tering volume.

Elementi della organizzazione della compagna di analisi

Programma preliminare

Il programma di lavoro potrebbe articolarsi nelle seguenti attività’.

A. Mese di ottobre 2024

3.1. raccolta dei lavori pubblicati su rivista nel periodo 2005-2022

3.2. raccolta dei lavori pubblicati per conferenze nel periodo 2005-2022

3.3. rapporti tecnici nel periodo 2005-2022

B. Mese novembre 2024

3.4. inizio scrittura dei lavori - summary degli articoli pubblicati

C. Mese di dicembre 2024

3.5. identificazione delle aree che richiedono ulteriori approfondimenti in termini di ricerca sui dati disponibili nel database di FTU e risultati preliminari delle ricerche .

3.6. Tale attività (3.5) potrebbe richiedere estensione (di altri tre mesi) della campagna di analisi .

D . Organizzazione di un review meeting in primavera 2025

Osservazioni sulla proposta

- Importante affrontare il problema dell'accesso al database di FTU : collegamento VPN al cluster e come leggere i dati di FTU
- Definire un database manager :per es. una persona che si occupa del filing dei documenti
- cosa utile per DTT : si potrebbe cogliere l'occasione per trasferire in formato IMAS tutti gli esperimenti di FTU DI INTERESSE GENERALE.
- molto utile portare a pubblicazioni alcuni lavori originali di FTU che non hanno trovato modo di essere ultimati e a valle di ciò provare a scrivere dei lavori di sintesi dei "secondi 15 anni di FTU (2005-2019)"

OSSERVAZIONI METODOLOGICHE

SI POTREBBE PARTIRE DA un elenco delle sperimentazioni effettuate su FTU negli ultimi 15 anni.

Utilizzare la piattaforma wiki di FTU (<https://ftuwiki.frascati.enea.it>) per estendere a ritroso il lavoro di raccolta e organizzazione delle informazioni fatto negli ultimi anni.

Topiche (in blu nuove proposte)

1. Trasporto del plasma
2. MHD
3. Fisica del riscaldamento del plasma con RF (ECRH, LH, IBW)
4. Operazioni e controlli
5. Plasma parete
6. Diagnostiche
7. Tecnologie dei riscaldamenti RF
8. Runaways
9. Metalli liquidi
10. Eredità' di FT, comparazione dei risultati di FTU con quelli di FT ed ALCATOR
11. Rilevanza di FTU per DTT e per le macchine JT-60SA, SPARC, ITER
12. Progressi della teoria

Grazie per la attenzione

Timeline

La campagna di analisi a partire da ottobre 2024 fino a dicembre 2024 (con appendici probabilmente fino a primavera (maggio) 2025, per il general review meeting), e' organizzata in maniera da avere una settimana di lavoro (tipicamente la seconda settimana di ogni mese) on site a Frascati , per ogni mese della campagna.

Ci saranno tre settimane complessive di lavoro on-site in cui i WGs, dedicati allo studio della varie topiche, si riuniscono.

In ognuna di tali settimane saranno organizzate riunioni plenarie.

ORGANIZZAZIONE **REVIEW MEETING(S)** FTU

- ALLA FINE DI OGNI FASE DELLA CAMPAGNA POTREBBE ESSERE IMPORTANTE ORGANIZZARE UN **GENERAL REVIEW MEETING** in cui si riportino i RISULTATI .

FTU Topical WGs

Saranno formati dei Topical Working Groups (WGs) su tali topiche , con un responsabile ed almeno due altri componenti .

Totale del numero delle persone coinvolte potrebbe essere 20-25 persone.

A termine di tale periodo provare a scrivere dei papers organici corrispondenti alle topiche scelte.

OSSERVAZIONI II

Il piano contenuto nella proposta potrebbe richiedere più tempo rispetto a quello indicato , (a causa del manpower probabilmente disponibile e della complessità della analisi dei dati e delle pubblicazioni).

Inoltre il tempo che e' necessario per pubblicare i lavori potrebbe essere dell'ordine di un anno .

Sarebbe utile avere un supporto da parte di nuove leve (**incentivato dalla Divisione**) per facilitare quel trasferimento di conoscenze che è sempre molto difficile da realizzare.