

Introduzione al V meeting Campagna di Analisi di FTU

Francesco Paolo Orsitto

ENEA C R Frascati Aula B Brunelli

03 feb 2025 ore 10.00

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.

Ci sono gli articoli di rivista pubblicati come overviews IAEA 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

Campagna di analisi di FTU

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.**

Topics .

Per ogni topica un gruppo di lavoro .

- Le topiche seguenti estratte dalla analisi delle Nuclear Fusion Overviews(NFO) di FTU dal 2005 al 2022 sono prese come riferimento per il lavoro della campagna di analisi:
- Physics and technology of RF heating systems
- Operation at high density
- MHD and its Stabilization by ECRH
- Diagnostics
- Liquid Litium Limiter experiments
- Runaways (REIS)
- Impurity seeding
- **Operazione e controlli (nuova)**
- **Theory**

Metodo di lavoro

- 2. Nella stesura del volume 45 di FUS SCI TECH 2004 dedicata a FTU, il lavoro dei vari capitoli e' stato fatto usando solo le pubblicazioni fatte nel periodo 1990-2004.
- Il lavoro era stato strutturato con un responsabile per capitolo.
- **Il lavoro relativo alla Campagna di analisi di FTU si puo' organizzare seguendo tale esempio : ogni capitolo ha un titolo tratto dalle topiche elencate al punto 1 , con un responsabile.**

Metodo di lavoro

- Prima parte del lavoro :
- analisi delle OV di FTU pubblicate su Nuclear Fusion e presentazione della analisi in meetings dedicati
- dividere il lavoro per topiche
- seconda parte del lavoro :
- scrivere dei lavori riassuntivi delle conoscenze acquisite nelle topiche

Pubblicazione

- **2.1. la sintesi delle conoscenze prodotte su FTU relative alle topiche considerate saranno inserite in articoli dedicati da pubblicare su un volume speciale di Fus Sci Tech .**
- **2.2. Tali articoli (vedi punto 2.1) saranno raccolti in prima istanza in un volume da pubblicare a cura dell'ENEA.**

Teams

- 3. E' stato creato un Working Group (GdL_FTU) su Teams.
- E' stata creata una cartella con le Overviews di FTU pubblicate su Nuclear Fusion e gli articoli del volume 45 di Fusion Science Technology dedicati a FTU .
- Tale spazio su Teams potra essere utilizzato per comunicazioni nell'ambito del WG: utilizzando la mail GdL_FTU@enea.it. Per utilizzare tale mail e' necessario essere inclusi nella mailing list del WG.

Analisi della OV 2013

- 3. La analisi del test della OVFTU del 2013 (P Buratti et al , Nuc Fus 53 (2013)104012) ha condotto alle seguenti osservazioni:
- Le topiche rilevanti incluse nella OV2013 sono :
 1. **RF**: Physics and technology of RF heating systems(LHCD coupling at high density and new ECRH launcher)
 2. **operation at high density (density limit)**
 3. **MHD** and its Stabilization by ECRH(ST stabilization)
- 4. **Theory** and measurements of electron fishbones and simulations by MHD-gyrokinetic XHMGC code
- 5. **Diagnostics** (refractometer)

DENSITY LIMIT scenario

Plasma parameters range

$I_p = 0.5, 0.7, 0.9 \text{ MA}$

$B_T = 4, 5.2, 6.0, 7.2, 8.0 \text{ T}$

NeMAX line average =
 $4 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$

Measured by a fast scanning
 CO_2/CO along more than 30
 Vertical chords : from
 plasma

Axis to $r/a = 0.8$

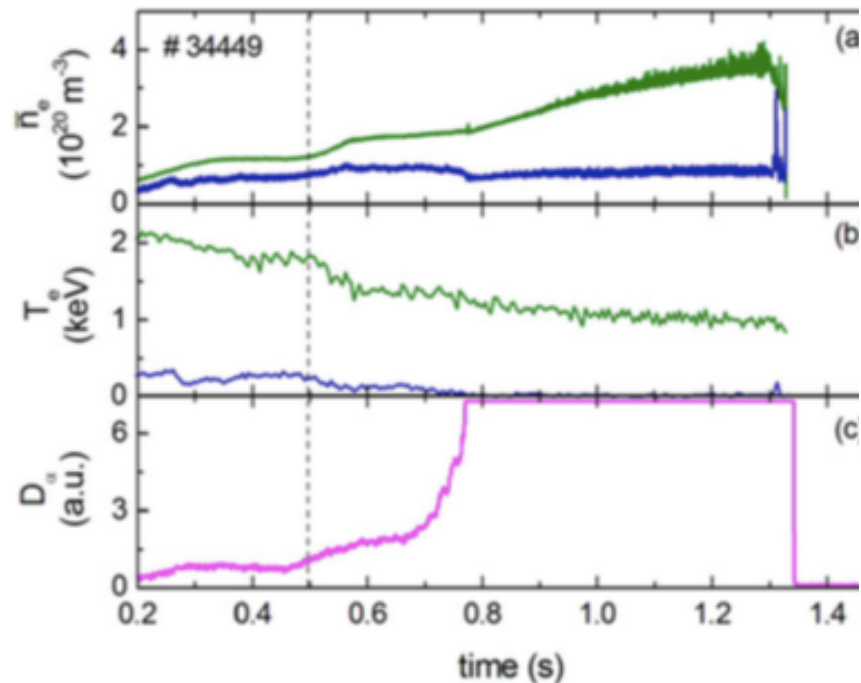


Figure 1. Time traces of some relevant quantities for a specific discharge with $I_p = 0.7 \text{ MA}$ and $B_T = 7.2 \text{ T}$. (a) Line-averaged density at $r/a = 0$ (green) and 0.8 (blue). (b) Electron temperature in electron cyclotron emission at $r/a = 0$ (green) and 0.8 (blue). (c) D_α emission. The dashed vertical line marks the MARFE onset.

Comparison with Greenwald density limit

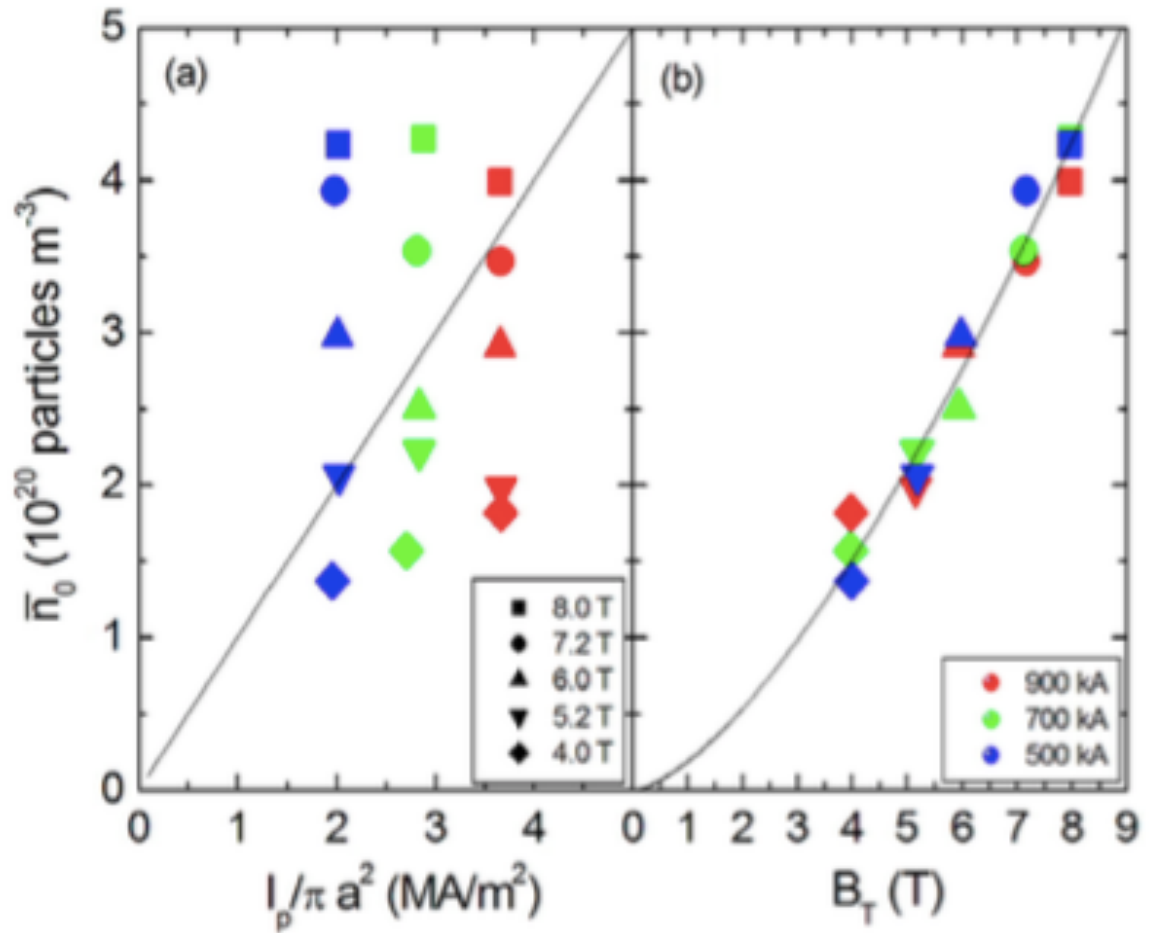
Greenwald
Density limit

$$n_G = I_p / (\pi a^2)$$

FOR

$I_p = 0.5 \text{ MA}$

$N_{MAX} = 2 * n_G$



Color code : blue $I_p = 0.5 \text{ MA}$; green $I_p = 0.7 \text{ MA}$; red $I_p = 0.9 \text{ MA}$

DEPENDENCE ON THE DENSITY PEAKING

THE DENSITY LIMIT IS REACHED THROUGH A DENSITY PEAKING

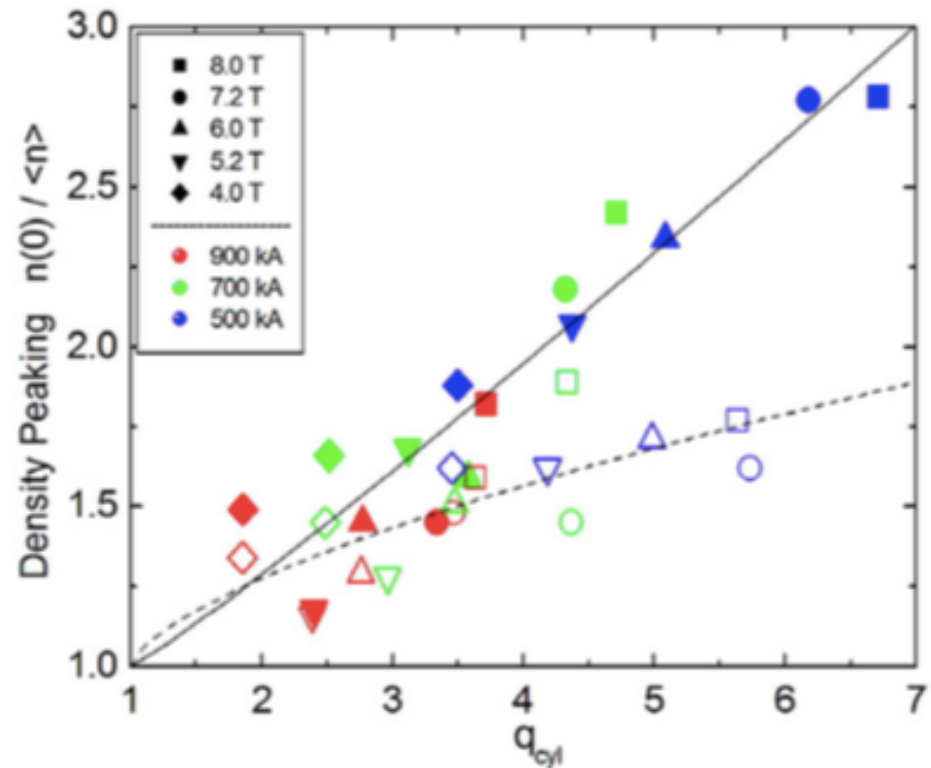


Figure 3. Density peaking at MARFE onset (open symbols) and at disruption (solid symbols) versus q_{cyl} . B_T and I_p are coded as in figure 2 (see insets). The two lines are only a guide for the eye.

Results of density limit experiments

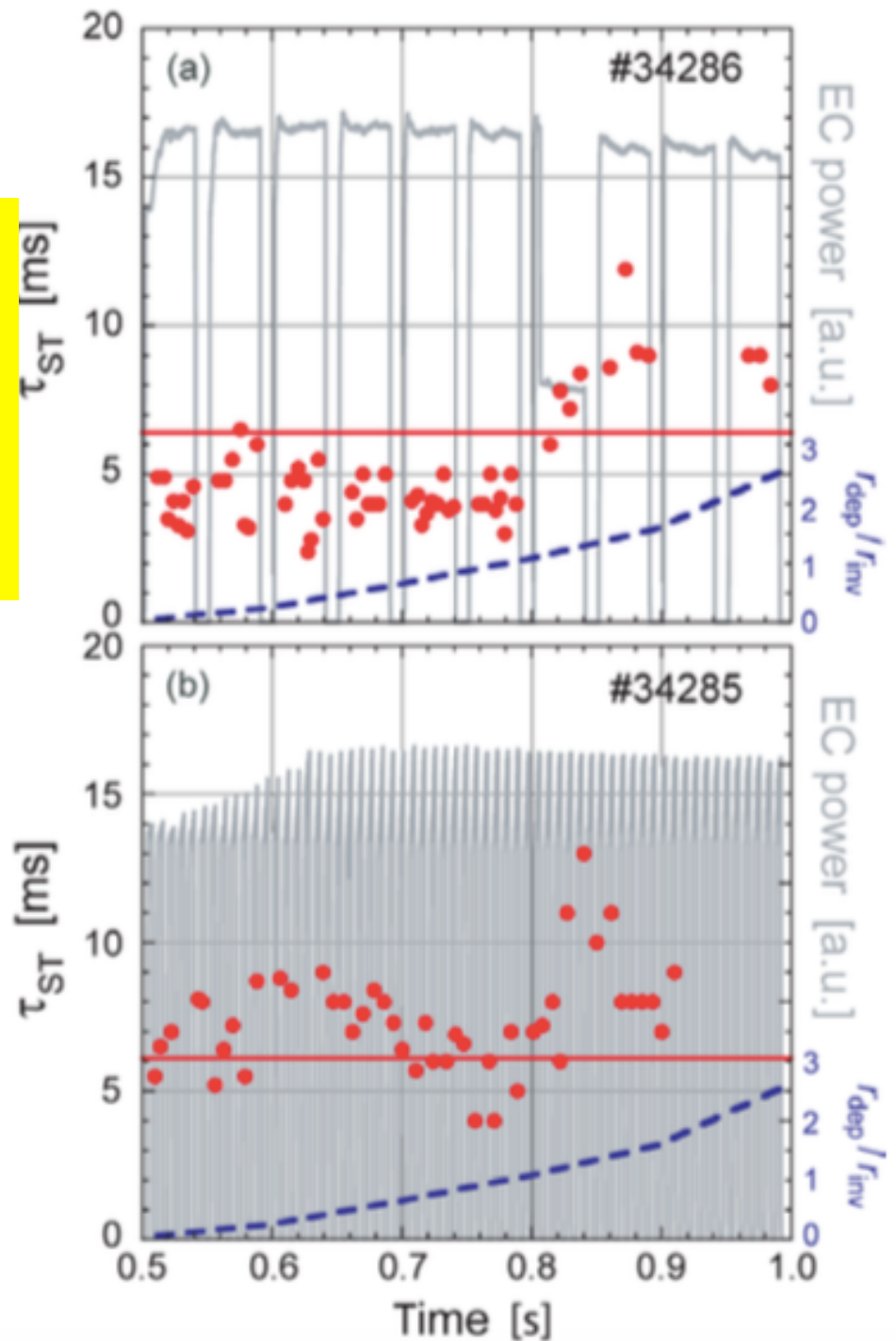
- NO DEPENDENCE OF THE DENSITY LIMIT ON THE PLASMA CURRENT
- DENSITY LIMIT IS DEPENDING ON THE MAGNETIC FIELD
- SEQUENCE IS : MARFE FORMATION AND START OF DENSITY PEAKING LEADING TO DISRUPTION
- THE MAX DENSITY REACHED IS DOUBLE OF THE GREENWALD :
- **FOR $I_P=0.5\text{MA}$ $N_{\text{MAX}}=2*n_G$**

Sawtooth(ST) control by ECRH /ECCD

- ST are magnetic periodic relaxations of the current profile generated by a $m=1$, $n=1$ mode : an island is formed with dimension of the $q=1$ surface
- The control of the ST is performed heating by ECRH at the edge of the island changing in this way the current profile locally delaying the formation of the $q=1$ island in the plasma.

Two types of modulations of ECRH
20 Hz and 125Hz

$I_p=0.5\text{MA}$ and $n=0.6 \cdot 10^{20}\text{m}^{-3}$
Ramp of $B=5.2\text{T} \rightarrow 5.5\text{T}$ to change
The power deposition location



Development of tools for MHD control

Main aims of the MHD Real Time control is to stabilize the tearing modes $m/n=3/2, 2/1$ and ST

The MHD control system detects the modes and determines the mode numbers

the island location

Determines the poloidal and toroidal angles of injection of the RF heating beam.

Input Measurements are : ECE polychromator . Mirnov coils , equilibrium , and ECH power monitors

LHCD(lower hybrid current drive) studies

- Aims : study the effects of Parametric Instabilities on the LHCD propagation and absorption /reflection
- Regimes of LH propagation:
 - i) low density: here the LHCD is efficient
 - ii) 'standard high density' ($n_e > 10^{20} \text{m}^{-3}$) : the wave seems dissipated at plasma edge. NO SXR signals (no fast electrons generated by LH) , and low edge electron temperature
 - iii) 'new high density regime ' : SXR detected signals : fast electrons generated by LH and high T_e at the edge.

RF spectrum (spectral broadening) in the high density regimes

In the 'standard high density '
The PI act a strong spectral
broadening in presence of
a low $T_e < 30\text{eV}$ at edge
the wave don't propagate

In the 'new high density '
regimes high $T_e = 0.2\text{keV}$ at edge
Effect of Liquid Lithium Limiter
This allows the propagation of
LH wave to $r/a = 0.4$ where SXR
Are detected.

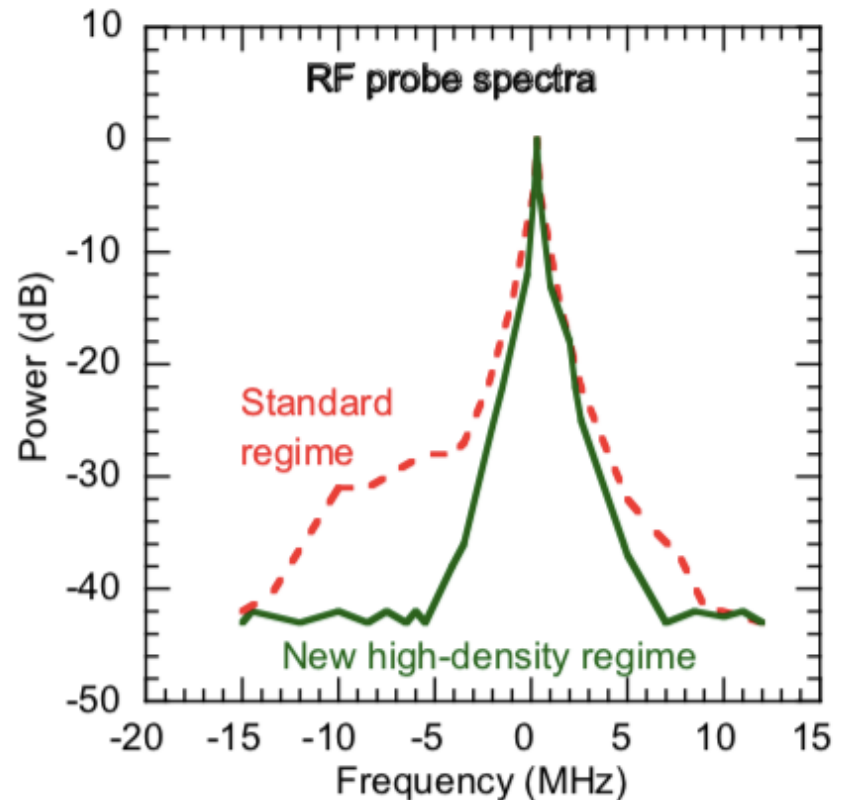


Figure 8. Frequency spectra of the RF signal collected by a loop antenna in the standard high-density regime (dashed) and in the 'new' one with higher temperature at the plasma periphery (solid). Zero frequency corresponds to the (8 GHz) injected frequency.

Modelling of LHCD coupling

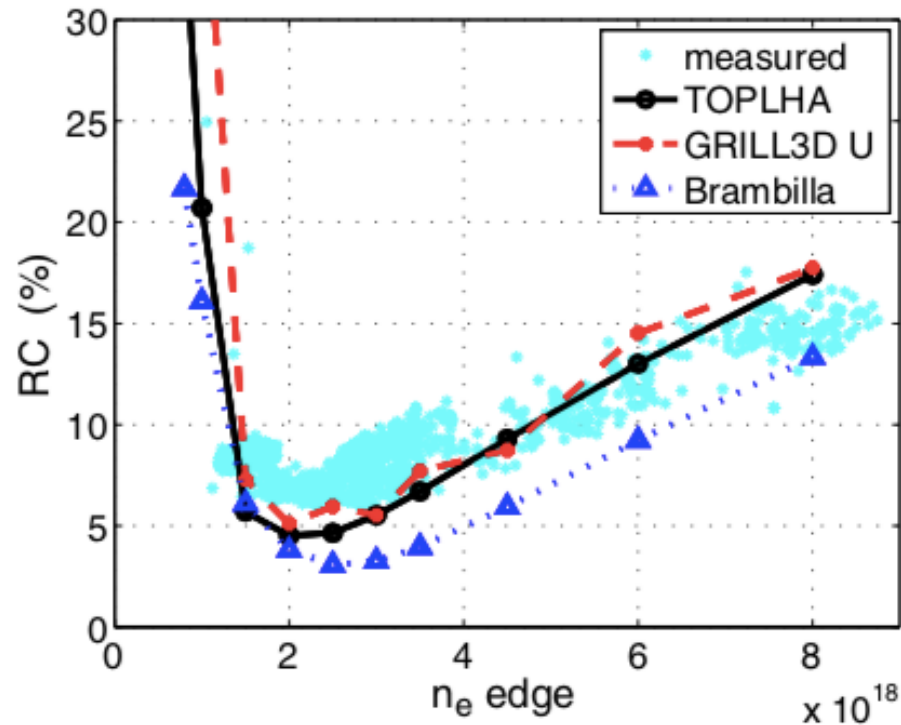


Figure 9. Measured and calculated reflection coefficients for a row of a conventional FTU grill launcher with 75° phasing.

Refractometer (Petrov 2012)

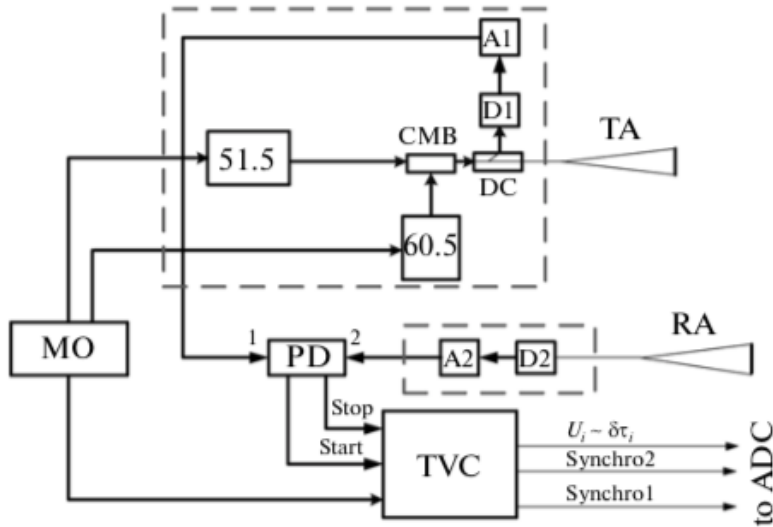


Fig. 6. Scheme of the two-frequency pulsed time-of-flight refractometer: (MO) master oscillator; (51.5, 60.5) 51.5 and 60.5 microwave oscillators, respectively; (CMB) radiation combiner; (DC) directional coupler; (TA) transmitting antenna; (RA) receiving antenna; (D1) reference channel detector; (D2) signal detector; (A1, A2) pulsed amplifiers; (PD) pulse discriminator; and (TVC) time-to-voltage converter.

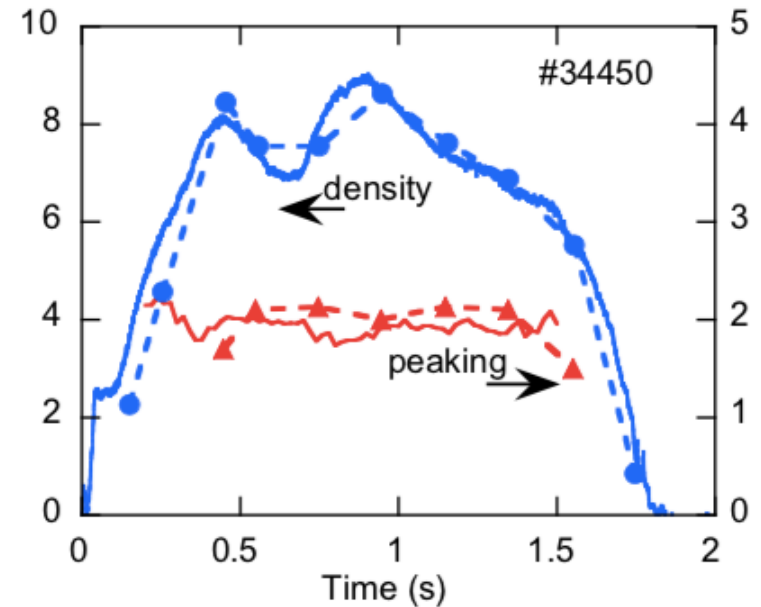


Figure 10. Comparison between line-averaged density in 10^{19} m^{-3} units (in blue) and density peaking factor (in red) from the laser interferometer (solid lines) and from the new time-of-flight refractometer (dashed lines with markers).