

Cálculos de Inyección de Haces
Neutros para las Descargas
del TJ-II

J. Guasp
C. Fuentes
M. Liniers

Cálculos de Inyección de Haces Neutros para las Descargas del TJ-II

Guasp, J.; Fuentes, C.; Liniers, M.

34 pp. 17 figs. 8 refs.

Resumen

A partir de las descargas del TJ-II con inyección de NBI de las campañas 2003-2004 se han ajustado las pérdidas, absorción y perfiles radiales de deposición a funcionales sencillas que, para una densidad dada, permiten calcularlos muy rápidamente de manera aproximada.

Las desviaciones medias entre los cálculos para las descargas individuales utilizando sus perfiles de densidad y temperatura experimentales y los valores predichos por los ajustes, son del orden del 10 al 15% y su comportamiento con la densidad el esperado: decrecimiento monótono de las pérdidas de *shine through*, crecimiento de la absorción con inicio de saturación a alta densidad.

Los perfiles radiales de deposición de iones rápidos se estrecha inicialmente al crecer la densidad para, luego, comenzar a ensancharse aunque, en el rango de densidades medias de línea analizado ($0,51$ a $4,1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$), nunca resultan suficientemente anchos para hacer crecer las pérdidas directas ni producir perfiles huecos. Por su parte los perfiles de absorción de potencia se ensanchan monótonamente.

Existen subrutinas Fortran, disponibles en los tres ordenadores del CIEMAT (jen50, fusc y fénix), para el cálculo rápido aproximado de todas esas magnitudes.

NBI Calculations for the TJ-II Experimental Discharges

Guasp, J.; Fuentes, C.; Liniers, M.

34 pp. 17 figs. 8 refs.

Abstract:

Calculations for NBI losses, absorption and power deposition radial profiles, corresponding to the experimental TJ-II campaigns 2003-2004, have been fitted to simple functionals in order to allow a fast approximative evaluation for any given density.

The average difference between the calculations for the individual discharges using the experimental density and temperature radial profiles and the fit predictions are between 10 and 15%, and the behaviour with density is the expected one: nonotonic decrease of *shine through* losses and increase of absorption with incipient saturation for high densities.

The fast ion birth radial profile narrows initially at low densities but later starts to widen, although, for the average line density range analysed ($0,51$ a $4,1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$), never are wide enough to induce an increase of direct orbit losses neither to produce hollow radial profiles. The power absorption radial profile widens nonotonically.

There exist Fortran subroutines, available at the three CIEMAT computers, allowing the fast approximative evaluation of all these values.

CLASIFICACIÓN DOE Y DESCRIPTORES

S70

PLASMA; HELIAC STELLARATORS; HELICAL CONFIGURATION; NEUTRAL ATOM
BEAM INJECTION; PLASMA HEATING; PARTICLE LOSSES; COMPUTER CODES

Cálculos de Inyección de Haces Neutros
para las descargas del TJ-II

J. Guasp
C. Fuentes
M. Liniers

INDICE

1. Introducción.
2. Ajustes para el *Shine Through*, absorción y pérdidas de NBI.
3. Ajustes para los perfiles radiales de NBI.
4. Conclusiones.

Referencias

Lista de Figuras

Figuras

Apéndice I. Subrutina `perfpot_nbi`.

1. Introducción.

En numerosas ocasiones sería conveniente disponer de una estimación aproximada rápida, de las pérdidas y absorción de haces neutros (NBI) en el plasma sin necesidad de ejecutar, cada vez, el código de Montecarlo correspondiente, que exige considerable tiempo de cálculo. Esto podría conseguirse ajustando a formas funcionales sencillas la dependencia de esas magnitudes con la variable fundamental que, en el caso de NBI, es la densidad media de línea.

Con el fin de establecer esa posibilidad se ha utilizado el código de Montecarlo Fafner II [1] para calcular las pérdidas, absorción, y perfiles radiales de las densidades de potencia correspondientes a las descargas del TJ-II en que hubo inyección de haces neutros (NBI) pertenecientes a las campañas experimentales de los años 2003 y 2004 [2], [3], [4], [5].

No todas las descargas en que hubo inyección de neutros pudieron ser analizadas, sino solamente aquellas en que se encuentran disponibles perfiles de densidad y temperatura de *Scattering Thomson*, en las que además existe la señal de densidad del interferómetro de microondas y también medida de la temperatura iónica central. Además fueron descartadas aquellas descargas en que hubo algún fallo de los inyectores (*breakdown*), de los temporizadores, etc. Con todo ello se retuvieron finalmente un total de 96 descargas.

Con el fin de poder utilizar los perfiles de *Scattering Thomson* en el código de Montecarlo, éstos se simetrizaron y suavizaron ajustándolos a funcionales adecuadas (los detalles de esos ajustes serán descritos en [6]). Un ejemplo de esos perfiles ajustados y su comparación con los datos experimentales aparece en las Figs.1.1 y 1.2. Se trata de una descarga de densidad de línea intermedia (la 11364, del 5 de Mayo del 2004, con $1.83 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$) con perfil de densidad relativamente ancho y plano y un perfil de temperatura con bajo valor central (286 eV). La diferencia media entre los valores experimentales y los del ajuste (definida como la raíz cuadrada del cociente entre la norma de la diferencia y la norma del perfil ajustado) es de un 3% para la densidad y de un 9% para la temperatura. Por su parte las Figs. 1.3 y 1.4 muestran los perfiles de densidad y temperatura para tres descargas de densidad media creciente (0.90, 1.83 y 2.88, en adelante las densidades se expresarán en unidades de 10^{13} cm^{-3}). Se observará que el aumento del valor central de la densidad se ve acompañado de un estrechamiento del perfil, efectivamente su anchura a valor mitad del central \underline{ahn} (cf. §3) pasa de 0.78 en la primera a 0.72 y por último a 0.61. Por su parte el perfil de temperatura cuyo valor central, como es lógico, decrece, comienza inicialmente a aplanarse y ensancharse ($\underline{aht} = 0.48, 0.80$) para luego detener e incluso invertir esa tendencia (0.51). Todos estos comportamientos serán descritos en detalle en [6].

La evolución temporal de las principales magnitudes del plasma (densidad de línea, señal de Rayos X blandos, energía y corriente del haz, potencia estimada entrante en el toro) para la segunda descarga (la 11364) aparecen en las Fig. 1.5 y 1.6. En el momento de la toma de los perfiles de *Scattering Thomson* (1211 ms., línea vertical) la energía de inyección era de 27 keV con una corriente de iones de 48 Amp. La medida de la

potencia en el calorímetro del inyector fue, ese día, de 220 kW, por lo que la potencia entrante en el toro en ese momento (calculada con los códigos Optimus y Densb [7],[8]) se estimó en unos 156 kW.

Los cálculos del código Fafner para este caso (descarga 11364, enl = 1.83) arrojaron los siguientes resultados:

Pérdidas de <i>shine through</i>	=	42 kW	(27% de la potencia entrante en el toro)
Pérdidas de órbitas	=	18 kW	(11%, de las cuales 71% directas)
Pérdidas por CX	=	40 kW	(26%)
Absorción total	=	56 kW	(36%)
Absorción electrones	=	41 kW	(73% de la total absorbida)
Absorción iones	=	15 kW	(27% de la total absorbida)

Los perfiles radiales de densidad de potencia depositada en forma de iones rápidos $H(r)$ y absorbida aparecen en la Fig.1.7. El perfil de potencia absorbida está bien centrado con un máximo de 0.34 W/cm^3 y su anchura radial a valor mitad del central es de 0.37, mientras para $H(r)$ esos valores son 0.39 y 0.50 y también se encuentra bien centrado. Debe notarse que éstos perfiles son considerablemente estrechos (un perfil perfectamente parabólico poseería una anchura de 0.71) y que tal cosa ocurre en todo el rango de densidades exploradas (0.51 a 4.1) lo que tiene consecuencias importantes tanto sobre el comportamiento de las pérdidas directas (§2) como sobre la forma de los perfiles de deposición (§3).

En las simulaciones de Montecarlo, para el cálculo de las pérdidas de *shine through* se siguieron unos 60000 átomos neutros, mientras que para el resto de pérdidas y la absorción se siguieron inicialmente las trayectorias de 8000 iones rápidos, aunque posteriormente (en el caso de la descarga 11364) se produjeran más de 32000 reionizaciones. La divergencia gaussiana del haz fue tomada como 1.3° , la mezcla de especies a esta energía (27 keV) fue (0.77, 0.11, 0.12) y, como es usual en el TJ-II, la población de neutros fríos se tomó con densidad 10^{11} cm^{-3} en el borde del plasma y 200 veces menor en el centro. La incertidumbre estadística del cálculo de Montecarlo se sitúa alrededor de un 5% para el *shine through*, y en un 8% para el resto de magnitudes.

Cálculos análogos se han realizado para cada una de las 96 descargas mencionadas anteriormente. Con esos *datos brutos*, basados en los perfiles de densidad y temperatura experimentales, es posible obtener ajustes para la dependencia de las principales magnitudes con la densidad media de línea.

2. Ajustes para el Shine Through, absorción y pérdidas de NBI.

Al contrario de lo que ocurre con los perfiles de densidad y temperatura del plasma [6] la dependencia con la potencia, salvo por un factor multiplicativo uniforme directamente proporcional a la potencia inyectada, es muy pequeña. Por esta razón las fracciones de potencia referidas a la potencia entrante en el toro (Ptor) son prácticamente insensibles al nivel de potencia y, por el contrario, extremadamente dependientes de la densidad del plasma. Por ello se ha tomado, en este caso, la densidad media de línea como la única variable independiente para el ajuste de magnitudes.

Además tampoco se observa aquí ninguna dependencia clara con el modo de inyección de ECRH (On u Off axis) por lo que, de nuevo al contrario de lo que ocurre con los perfiles de densidad y temperatura [6], para los ajustes de NBI se han tomado ambas situaciones conjuntamente.

La funcional para ajuste de magnitudes tiene la forma

$$f(\text{enl}) = A \cdot \text{enl}^\alpha / (1 + A \cdot \text{enl}^\alpha)$$

en donde enl es la densidad media de línea (en 10^{13} cm^{-3}) y A y α son los parámetros de ajuste para la magnitud f. Esta forma funcional sencilla permite comportamientos monótonos, crecientes o decrecientes, según el signo de α , en los que f se sitúa siempre entre 0 y 1 tal como conviene a fracciones de potencia.

Para el caso de la fracción de *shine through* el ajuste óptimo se consigue con $A = 0.82$ y $\alpha = -1.2$ y se observa una excelente correlación con la densidad (Fig.2.1), en esa figura (y todas la siguientes) los círculos huecos corresponden a los cálculos correspondientes a las 96 descargas utilizando los perfiles de densidad y temperatura experimentales, mientras que los triángulos sólidos corresponden a los valores del ajuste óptimo para esas mismas densidades. Como era de esperar la fracción decrece monótonamente con la densidad, alcanzando un 65% para la densidad más baja (0.51) y reduciéndose a 0.13 para la más elevada (4.1). La desviación media entre los datos brutos y el ajuste (definida, al igual que en §1, como la raíz cuadrada del cociente entre la norma de la diferencia y la norma del ajuste expresada en %) es de un 6%, mientras que la máxima desviación individual es un 19% (descarga 11622 con $\text{enl} = 3.6$). Por debajo de $\text{enl} = 1$, esta fracción supera el 44%.

La siguiente fracción ajustada es la fracción de potencia total absorbida en términos de potencia disponible en el plasma (es decir la que entra en el toro menos las pérdidas de *shine through* o, en otras palabras, la que aparece en forma de iones rápidos). El ajuste óptimo corresponde en este caso a $A = 0.28$ y $\alpha = +2.2$. Se observará en la Fig.2.2 la tendencia creciente y posterior saturación de esta fracción. El acuerdo es menos bueno que para el *shine through*: desviación media 8%, máxima 23% (descarga 11609 con $\text{enl} = 0.64$) con visible mayor dispersión a alta densidad. La máxima eficiencia de absorción (90%) se consiguió para la descarga 10527 ($\text{enl} = 4.1$, la más alta) para la cual Ptor = 225 kW lo que corresponde a 175 kW absorbidos, también es la máxima predicha por el ajuste. La eficiencia mínima, obviamente, tiene lugar a la más a baja densidad (0.51) con un 6.6%.

Si en lugar de representar la fracción absorbida con respecto a la potencia disponible se representa la fracción con respecto a la potencia entrante en el toro (Fig. 2.3) sigue presentándose una tendencia monótona creciente similar, con una dispersión media del 8% y máxima del 23%. La máxima eficiencia es 78% que corresponde a la descarga 10527 anterior, mientras que el mayor valor absoluto de P_{abs} para la serie (203 kW) se alcanza en la 11705 con $n_l = 3.0$ para la que $P_{tor} = 320$ kW. Para densidades superiores a 2.8 el ajuste prevé eficiencias superiores al 60%, mientras que por debajo de 1.3 la eficiencia es inferior al 20%.

La fracción de potencia que absorben los electrones con respecto a la absorbida en total presenta el ajuste óptimo para $A = 2.06$ y $\alpha = +0.52$. Como cabía esperar a estas energías la mayor parte de la potencia se la llevan los electrones (entre un 60 y 85%, Fig.2.4), fracción que crece con la densidad. La desviación media es de un 6% con una discrepancia máxima del 14%.

Para las pérdidas de órbitas totales la fracción correspondiente se ha elegido con relación a la potencia “restante”, definida como la disponible menos la total absorbida. En este caso el ajuste óptimo corresponde a $A = 0.29$, $\alpha = +0.75$ y da lugar a una desviación media del 11% y máxima del 43%.

Sin embargo, a efectos de representación, es más intuitivo mostrar la fracción de pérdidas totales con respecto a P_{tor} . Eso es lo que aparece en la Fig.2.5 en donde esas pérdidas crecen primero a baja densidad, ya que en esa zona las pérdidas de *shine through* predominan sobre todas las demás. Más tarde comienzan a decrecer debido al estrechamiento inicial del perfil de deposición de iones rápidos (cf. §3) y, cuando todavía más adelante, esos perfiles empiezan a ensancharse el decrecimiento de las pérdidas se atenúa, aunque la anchura es aún insuficiente para hacer nacer los iones en zonas suficientemente periféricas para que haya pérdidas directas altas. Sólo para densidades más elevadas que las alcanzadas hasta ahora cabe esperar que esas pérdidas comiencen a aumentar. Estas pérdidas se sitúan entre un 5 y un 10%, aunque esta vez la dispersión es muy considerable.

Por su parte, para la fracción de perdidas directas frente a la de órbitas total, el ajuste óptimo produce $A = 3.24$, $\alpha = -0.32$, con una desviación media del 5% y máxima del 37%. Esta fracción aparece en la Fig.2.6, como es usual a estas energías es siempre superior a un 70% y decrece con la densidad debido al aumento de la colisionalidad.

Finalmente las pérdidas cambio de carga (CX) aparecen en la Fig.2.7, con la lógica tendencia decreciente con la densidad, salvo a densidad muy baja en que el *shine through* predomina. Sus valores se sitúan entre un 6 y un 35%.

3. Ajustes para los perfiles radiales de NBI.

Un ejemplo para los perfiles radiales de absorción y nacimiento de iones rápidos se mostró en la Fig.1.7.

Para la forma radial de estos perfiles se ha adoptado una funcional con 5 parámetros:

$$P(s) = p_0 \cdot (1 + p_3 \cdot s^2) / [1 + (s/p_1)^{p_2}]^{p_4} \quad (3.1)$$

En donde \underline{s} es el radio medio del plasma normalizado a 1 en el borde, p_0 es el valor central, p_1 está ligado a la anchura del perfil, p_3 da cuenta de la posible oquedad, mientras que p_2 y p_4 dan cuenta de la “curvatura” del perfil para $s \rightarrow 0$ y $s \gg p_1$. Esta funcional permite gran variedad de formas (perfiles huecos o muy picudos p. ej.) y es la misma que se ha adoptado para el ajuste de los perfiles de densidad y temperatura [6].

Para cada una de las 96 descargas con cálculos de NBI se determina ese conjunto de parámetros. Hecho éso se calculan los *factores de forma* para cada descarga. Esos factores de forma se definen de la siguiente manera (p. ej. para el perfil de potencia total absorbida $P_b(s)$):

fvolp: (factor de forma en volumen) $fvolp = \langle P_b \rangle / P_b(0)$, en donde $\langle P_b \rangle$ es el promedio en volumen del perfil y $P_b(0)$ es su valor central. Es el momento de orden 1 de $P_b(s)$ y la inversa de lo que, con frecuencia, se denomina como factor de pico (*peaking factor*).

flinp: (factor de forma de línea) $flinp = \overline{P_b} / P_b(0)$, en donde $\overline{P_b}$ es el promedio en línea del perfil. Es el momento de orden 0 de $P_b(s)$.

ahp: (anchura a valor mitad) $P_b(ahp) = P_b(0)/2$

Oqp: (oquedad) $oqp = \text{Max} [P_b(s)] / P_b(0)$

Esos 4 factores de forma son independientes del valor central p_0 , tienen más sentido físico y tienden a variar más suavemente que los coeficientes p_1, p_2, p_3, p_4 de (3.1).

En general fvolp, flinp y ahp son tanto mayores cuando más ancho y plano es el perfil, para un perfil exactamente parabólico sus valores serían 0.5, 0.67 y 0.71 y, en este caso, $Oqp = 1$. Para el caso de la descarga 11364 los valores de esos parámetros para el perfil de densidad (Figs.1.1 y 1.3) son: 0.54, 0.72, 0.72, 1., mientras que para el perfil de deposición de iones rápidos (H, Fig.1.7) valen: 0.27, 0.47, 0.50, 1.

A continuación cada uno de esos 4 factores de forma, y para cada uno de los tres perfiles radiales (P_b , el de absorción de los iones P_i y el de nacimiento de iones rápidos H), se ajusta a una función cuadrática dependiente de la densidad media de línea como única variable independiente, 12 parámetros en total, esos parámetros se almacenan en un fichero permanente.

Posteriormente, para una densidad dada, se interpola en las 3 formas cuadráticas para obtener los factores de forma aproximados predichos para esa densidad con los que, a continuación, se obtienen los coeficientes p_1, p_2, p_3, p_4 de (3.1) que producen los factores de forma más similares a los predichos. Esos 4 coeficientes de ajuste se han

calculado para una serie de densidades y, tras un suavizado mediante *splines* para evitar saltos bruscos artificiales, se han almacenado también en un fichero permanente, de forma que para el cálculo posterior de los perfiles basta interpolarse en este último fichero y aplicar la fórmula (3.1) sin necesidad de repetir los ajustes.

Se observará que el coeficiente p_0 (el valor central del perfil) NO necesita ser ajustado ya que, una vez obtenido el factor de forma en volumen f_{volp} , su valor se obtiene sin más que exigir que la integral en volumen del perfil ajustado sea igual a la potencia total absorbida, calculada previamente en §2. Es decir $P_{abs} = \int P_b(s) \cdot dV$ (o bien la potencia disponible en el caso de $H(s)$), en otras palabras: $p_0 = P_{abs} / Vol / f_{volp}$, en donde Vol es el volumen de la configuración.

Los resultados de todos estos ajustes aparecen en las Fig.3.1 y 3.2. La Fig. 3.1 muestra la dependencia con la densidad media de f_{volh} y ahh correspondientes al perfil de deposición de iones rápidos H. Se observará que los dos factores decrecen inicialmente con la densidad (estrechamiento del perfil), este decrecimiento es consecuencia directa del estrechamiento de los perfiles de densidad (cf. [6]). Sin embargo a densidades altas la deposición de iones rápidos se hace más periférica por lo que se ensancha su perfil (ahh crece). Pese a eso, como se indicó en §2, en las campañas analizadas no se han alcanzado aún densidades en las que las pérdidas directas comiencen a crecer ni tampoco en las que el perfil de deposición comience a presentar oquedad.

Para f_{volh} la desviación media entre los valores basados en perfiles experimentales y el ajuste es de un 7% y la máxima 22%, mientras que para ahh es 6 y 17%, respectivamente. El otro factor de forma f_{linh} sigue pautas similares al ahh .

El caso del perfil de potencia absorbida aparece en la Fig.3.2, ahora ambos factores de forma crecen monótonamente, una tendencia lógica que se debe a que, a medida que aumenta la densidad, la zona radial en la que su valor local es suficientemente alto para producir absorción apreciable se hace más extensa. En cualquier caso, en el rango de densidades analizado, la anchura de estos perfiles de potencia es claramente menor que la de $H(s)$. Las dispersiones son más elevadas que en el caso anterior.

Finalmente una comparación entre los perfiles de deposición obtenidos con el cálculo directo partiendo de los perfiles experimentales y los predichos por el ajuste, correspondientes a la descarga 11364, aparece en la Fig. 3.3, el acuerdo, en este caso, es bastante satisfactorio, con diferencias medias (definida, una vez más, como la raíz cuadrada del cociente entre la norma de la diferencia y la norma del perfil ajustado) de 3% para H, 7% para la absorción total y 4% para la de los iones. Para el conjunto de las 96 descargas la desviación media es de 10% para $H(s)$, 14% para el perfil de absorción total y 15% para el iónico. Valores similares se obtienen para las desviaciones del valor central p_0 .

Todas estas magnitudes (fracciones de pérdidas y de absorción, perfiles radiales ajustados, etc.) pueden ser obtenidas rápidamente mediante la utilización de una subrutina Fortran, cuyo modo de llamada y localización se describen en el Apéndice I, subrutina que se encuentra disponible en los tres ordenadores del Ciemat (jen50, fusc y fénix).

4. Conclusiones.

A partir de las descargas del TJ-II con inyección de NBI de las campañas 2003-2004 se han ajustado las pérdidas, absorción y perfiles radiales de deposición a funcionales sencillas que, para una densidad dada, permiten calcularlos muy rápidamente de manera aproximada.

Las desviaciones medias entre los cálculos para las descargas individuales utilizando sus perfiles de densidad y temperatura experimentales y los valores predichos por los ajustes, son del orden del 10 al 15% y su comportamiento con la densidad el esperado: decrecimiento monótono de las pérdidas de *shine through*, crecimiento de la absorción con inicio de saturación a alta densidad.

Los perfiles radiales de deposición de iones rápidos se estrechan inicialmente al crecer la densidad para, luego comenzar a ensancharse aunque en el rango de densidades medias de línea analizado (0.51 a $4.1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$), nunca se ensanchan lo suficiente para hacer crecer las pérdidas directas ni producir perfiles huecos. Por su parte los perfiles de absorción de potencia se ensanchan monótonamente.

Existen subrutinas Fortran, disponibles en los tres ordenadores del Ciemat (jen50, fusc y fénix), para el cálculo rápido aproximado de todas esas magnitudes.

Referencias.

- [1] A.Teubel, J.Guasp, M.Liniers. “Montecarlo simulations of neutral beam injection into the TJ-II helical axis stellarator. *Report IPP 4/268*. IPP Garching. March 1994.
- [2] M.Liniers and TJ-II Team. *Stellarator News* **92**, May 2004.
- [3] M.Liniers et al. *31st EPS Conference on Plasma Physics*. London 2004. P4-169.
- [4] M.Liniers, J.Alonso, G.Marcon et al. “First beams with the TJ-II injector 1”. CCNB/1/03. Consorcio RFX, Padova (Italia). June 2003.
- [5] C.Fuentes, M.Liniers, C.Fuentes et al. “Neutral beam injection optimisation at TJ-II”. Enviado para publicación a *Fusion Engineering and design*.
- [6] J.Guasp, C.Fuentes, M.Liniers. “Ajustes de los perfiles radiales de densidad y temperatura para las descargas con NBI del TJ-II”. Informe Ciemat. Próxima publicación.
- [7] C.Fuentes, M.Liniers, J.Guasp. “Aplicación del código Optimus al sistema de inyección de neutros del TJ-II”. Informe Ciemat 874, diciembre 1998.
- [8] J.Guasp, , M.Liniers, C.Fuentes et al. “Thermal load calculations at TJ-II Vacuum Vessel under Neutral Beam injection”. *Fusion Technology* **35**, 32 (Jan. 1999).

Lista de Figuras.

§1.

Fig.1.1 Comparación entre los datos experimentales del perfil de densidad procedentes del *Scattering Thomson* (círculos) y el perfil ajustado (línea gruesa) para la descarga 11364.

Fig.1.2 Idem. para el perfil de temperatura electrónica.

Fig.1.3 Comparación entre los perfiles de densidad (ya ajustados) de tres descargas de densidad creciente.

Fig.1.4 Idem. para el perfil de temperatura electrónica.

Fig.1.5 Evolución temporal de la densidad media de línea, la señal de Rayos X blandos, la energía y la corriente de iones del haz para la descarga 11364. Los perfiles de *Scattering Thomson* se tomaron a los 1211 ms. (línea vertical).

Fig.1.6 Idem. para densidad media de línea y la estimación de la potencia entrante en el toro.

Fig.1.7 Perfiles radiales de deposición de iones rápidos $H(r)$, de absorción total (P_{abs}) y de absorción electrónica (P_{el}) e iónica (P_{ion}) para la descarga 11364.

§2.

Fig.2.1 Comparación entre los valores calculados a partir los perfiles de densidad y temperatura experimentales (círculos) y los resultados del ajuste (triángulos) para la fracción de potencia de pérdidas de *Shine Through* con relación a la potencia entrante en el toro (P_{tor}).

Fig.2.2 Idem para la fracción de potencia absorbida con relación a la potencia disponible.

Fig.2.3 Idem para la fracción de potencia absorbida con relación a la potencia entrante en el toro (P_{tor}).

Fig.2.4 Idem para la fracción de potencia absorbida por los electrones con relación a la potencia absorbida total.

Fig.2.5 Idem para la fracción de pérdidas de órbitas con relación a la potencia entrante en el toro.

Fig.2.6 Idem para la fracción de pérdidas de órbitas directas con relación a las totales

Fig.2.7 Idem para la fracción de pérdidas de cambio de carga (CX) con relación a la potencia entrante en el toro.

§3.

Fig.3.1 Comparación entre los factores de forma f_{volh} y ahh calculados a partir los perfiles de densidad y temperatura experimentales (símbolos) y los resultados del ajuste (líneas) para el perfil de deposición de iones rápidos H.

Fig.3.2 Idem para el perfil de absorción total de potencia.

Fig.3.3 Comparación entre los perfiles radiales de deposición obtenidos con los perfiles de densidad y temperatura experimentales (símbolos) y los del ajuste (líneas) para la descarga 11364.

11364, 5 May
100_44_64, Off axis
electron density

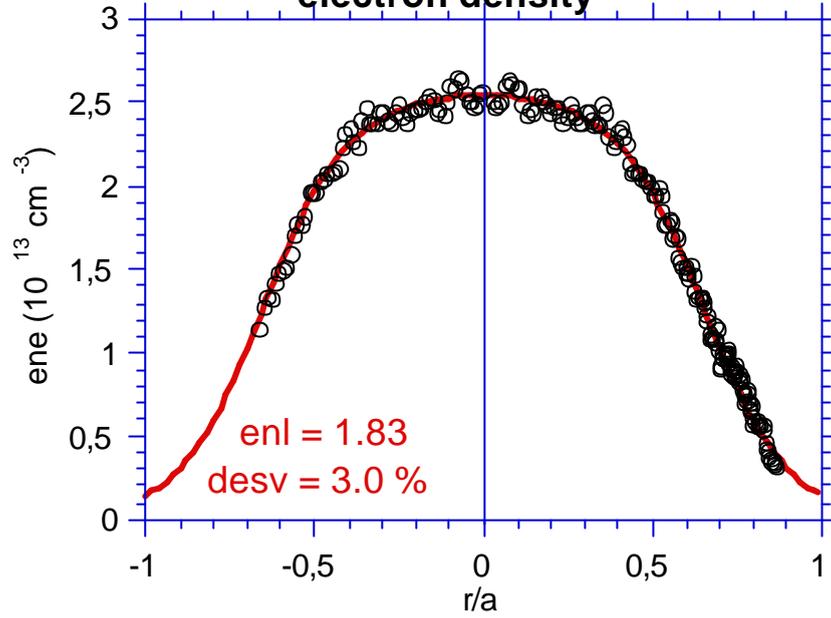


Fig.1.1

11364, 5 May
100_44_64, Off axis
Electron Temperature

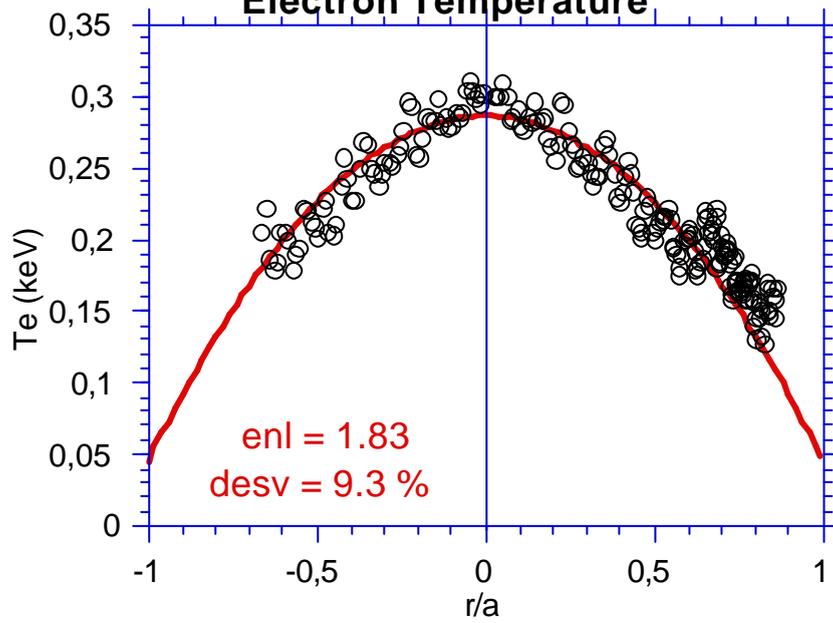


Fig.1.2

density profiles

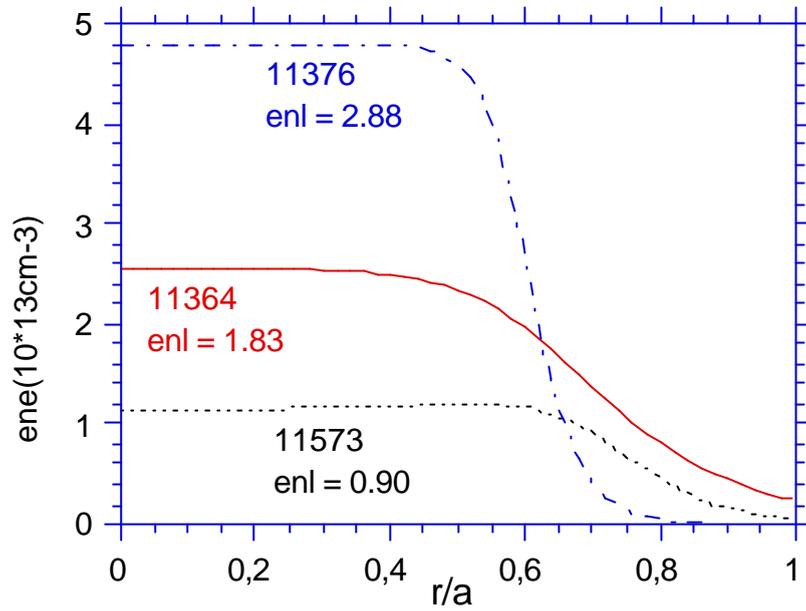


Fig.1.3

Temperature profiles

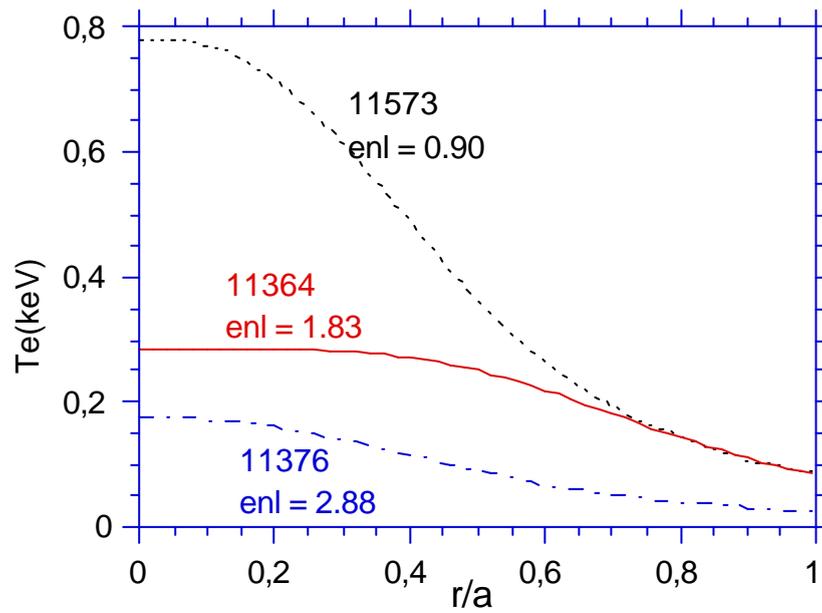


Fig.1.4

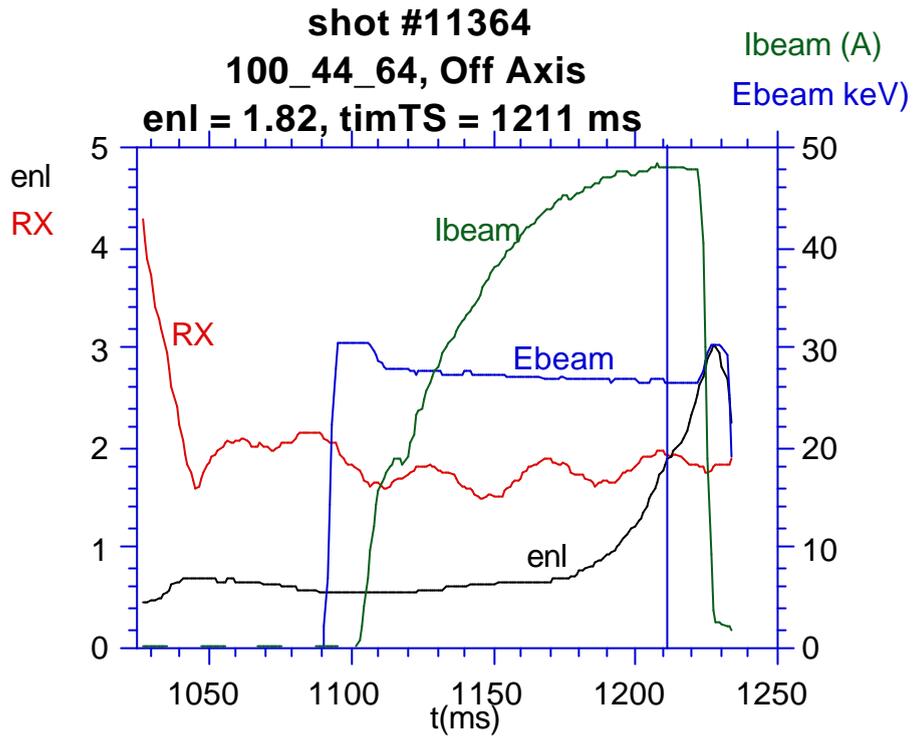


Fig.1.5

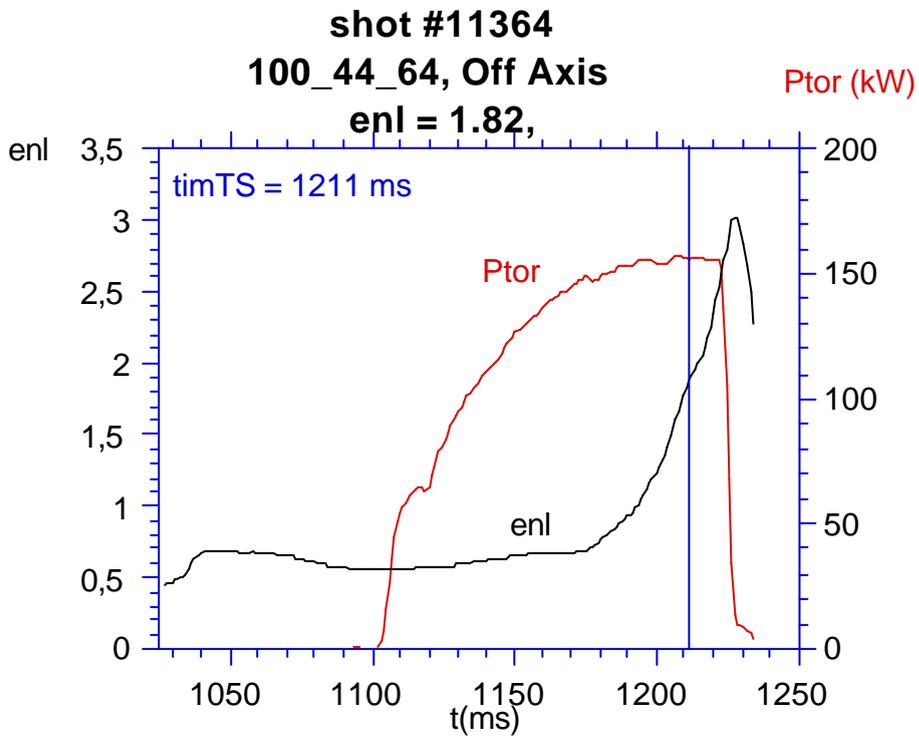


Fig.1.6

shot #11364, Off Axis

$P_{tor} = 156 \text{ kW}$,

$enl = 1,82$

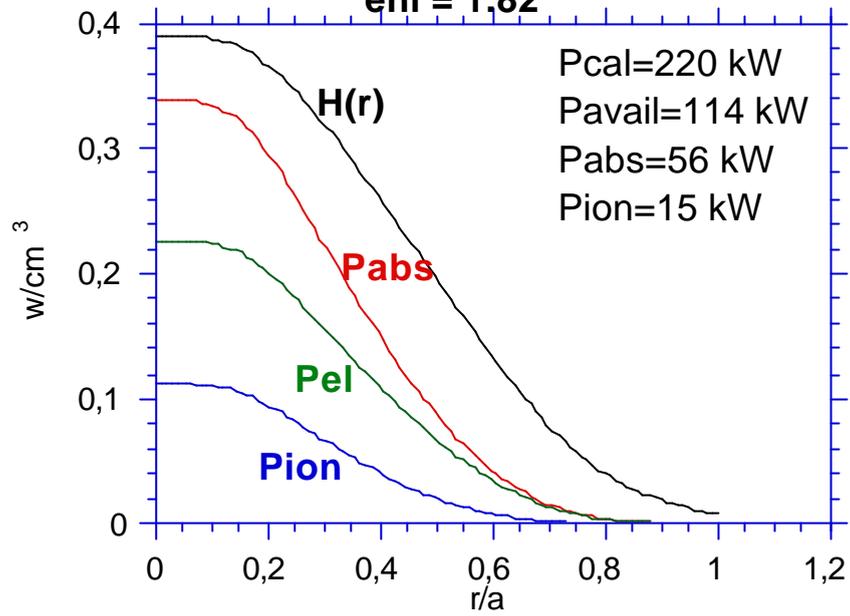


Fig.1.7

**NBI Calculations (96 cases)
Shine through fraction**

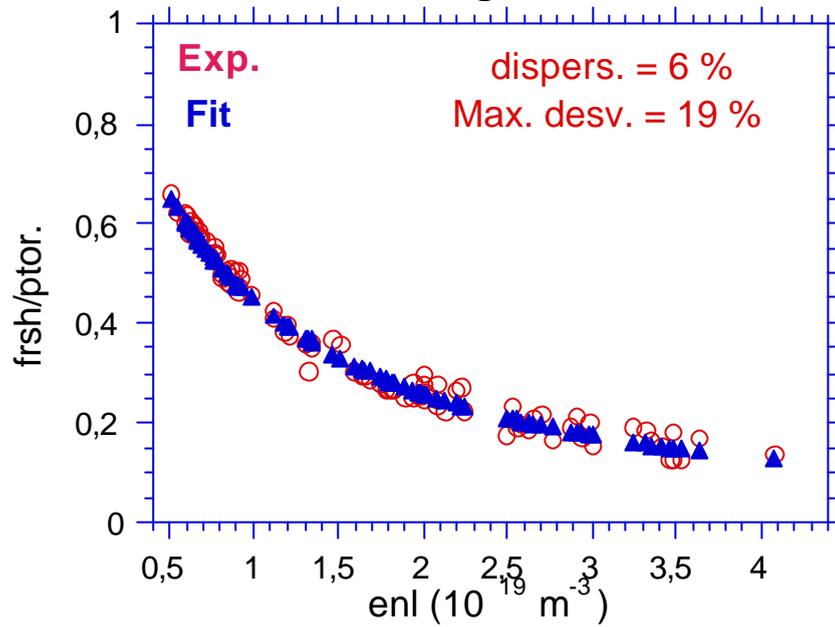


Fig.2.1

**NBI Calculations (96 cases)
Absorbed fraction
(over available power at plasma)**

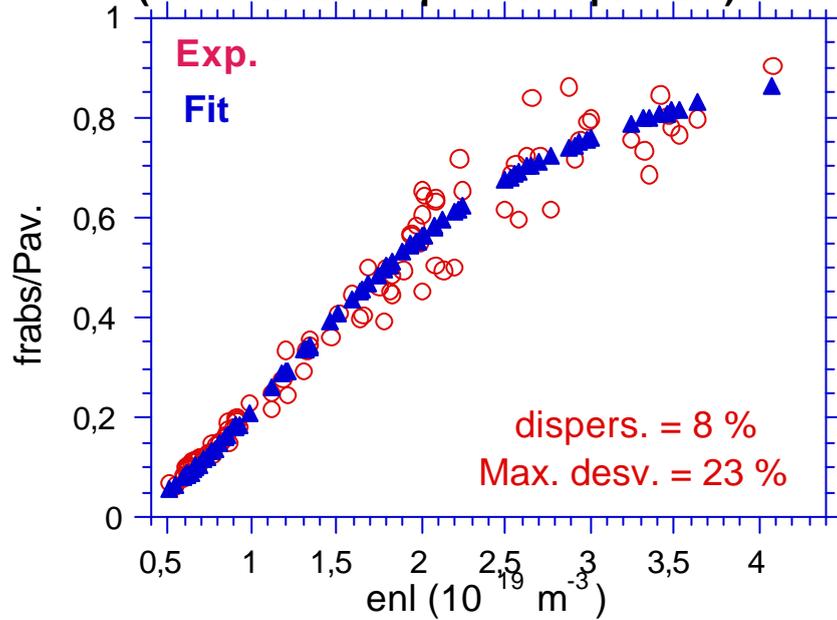


Fig.2.2

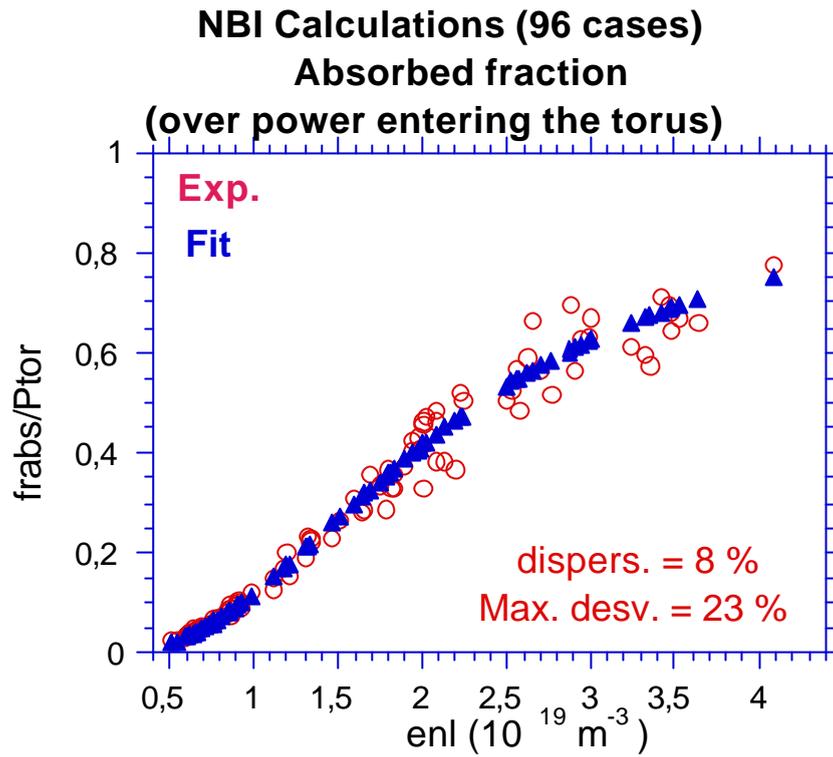


Fig.2.3

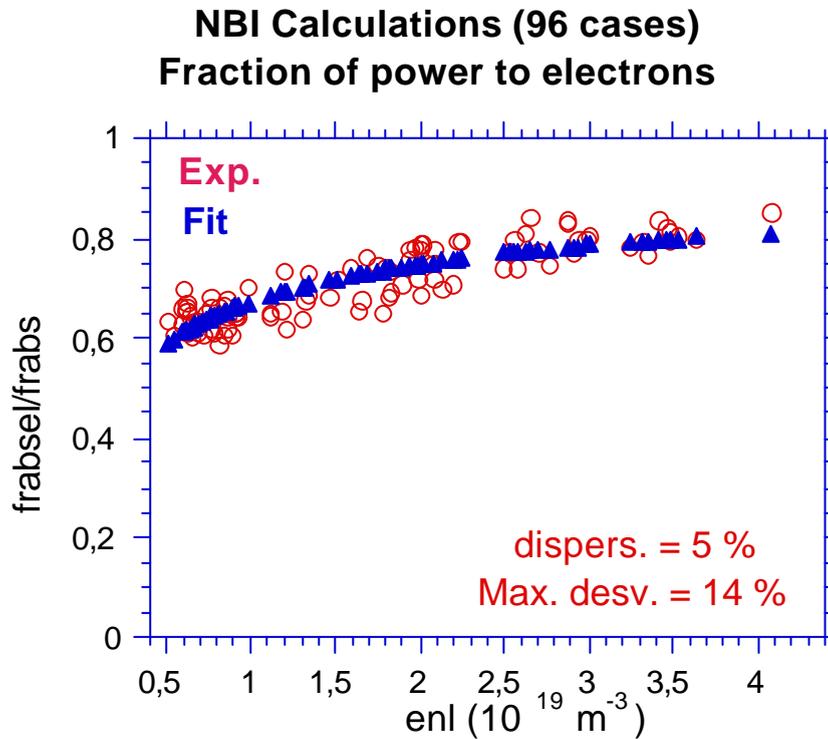


Fig.2.4

NBI Calculations (96 cases) Fraction of orbit losses

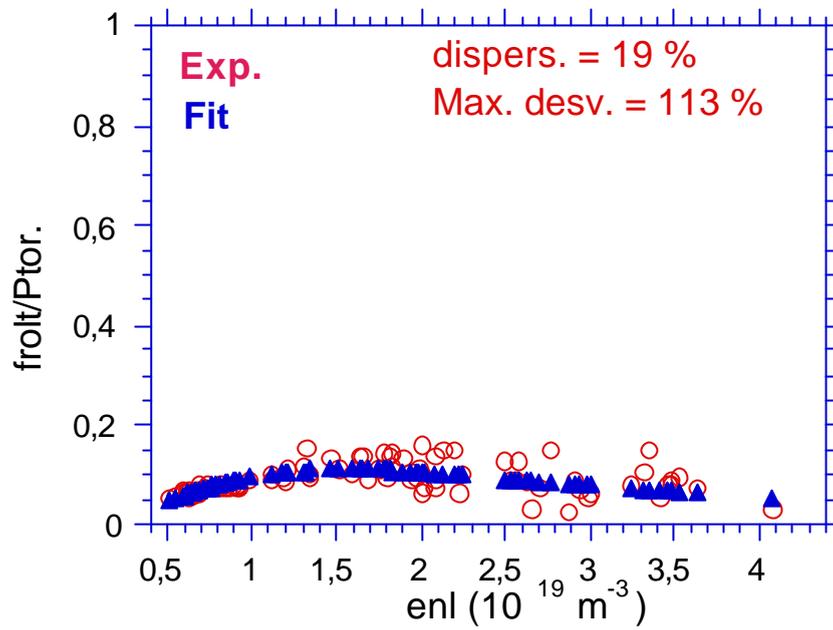


Fig.2.5

NBI Calculations (96 cases) Fraction of direct losses

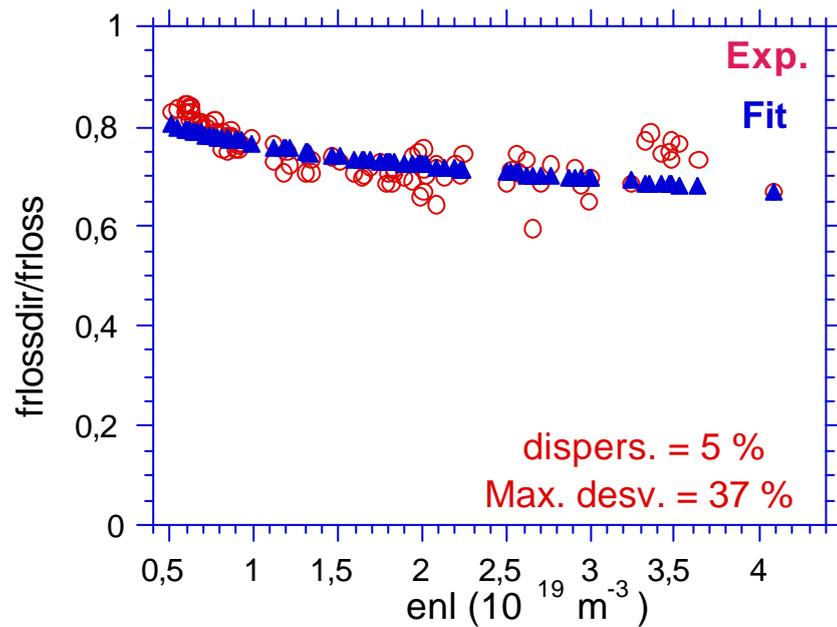


Fig.2.6

**NBI Calculations (96 cases)
Fraction of CX losses**

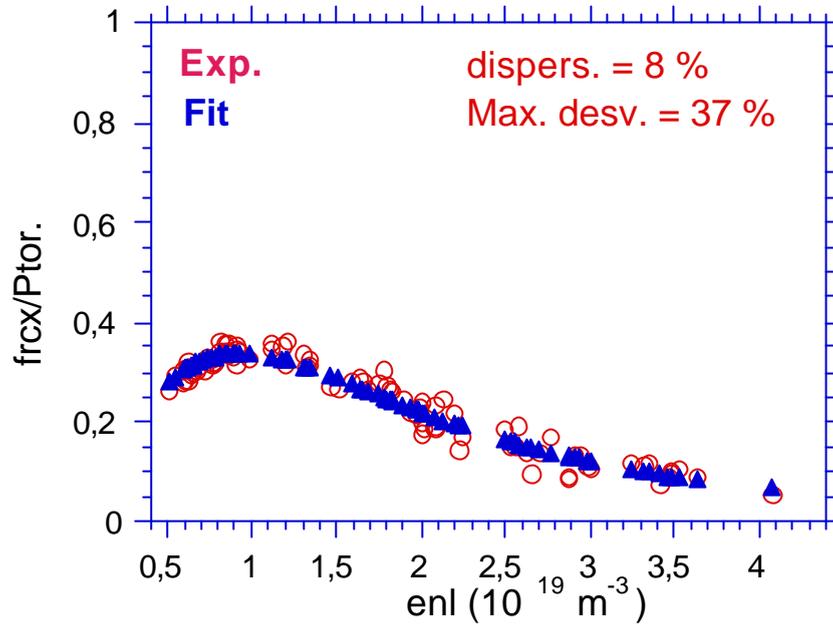


Fig.2.7

Fast ion birth profile form factors

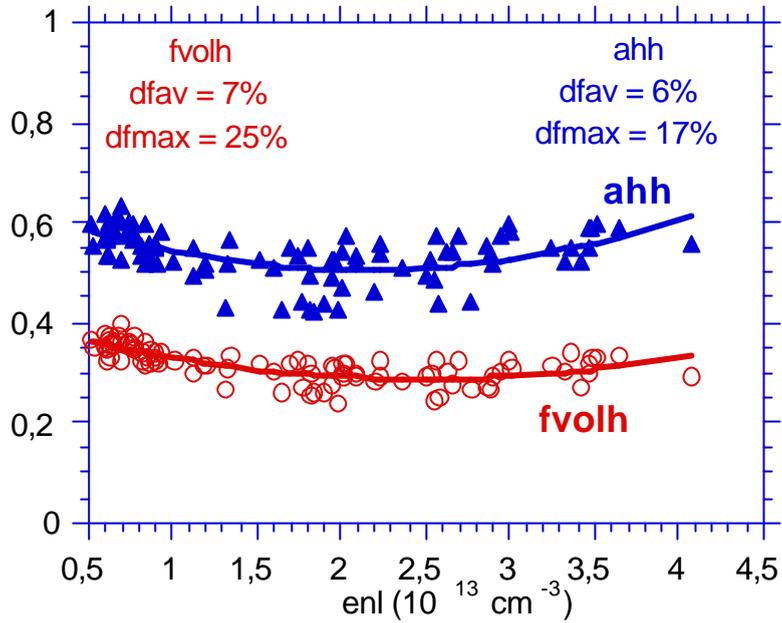


Fig.3.1

Absorption profile form factors

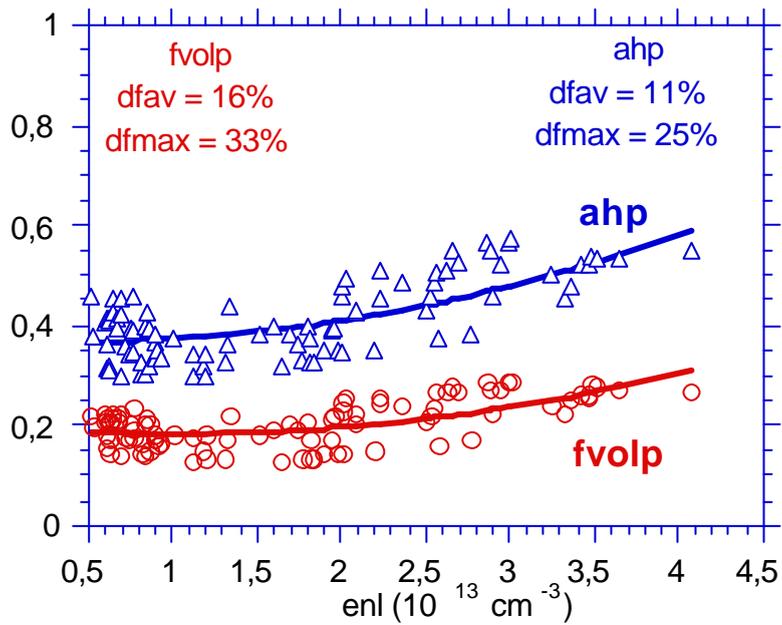


Fig.3.2

shot #11364, Off Axis

Ptor = 156 kW

enl = 1.82

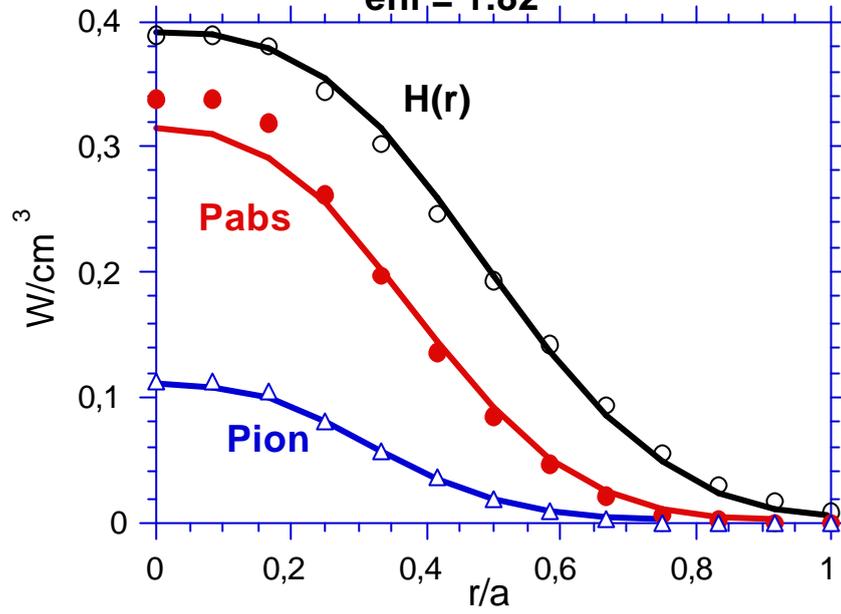


Fig.3.3

Apéndice I. Subrutina perfpot_nbi.

Se describe aquí el modo de utilización de la subrutina perfpot_nbi para el cálculo rápido aproximado de pérdidas, absorción y perfiles de deposición de NBI.

perfpot_nbi : Subrutina para el calculo aproximado de los perfiles radiales de absorción de haces neutros en el TJ-II, calcula también otras magnitudes importantes (potencia total absorbida, diversas perdidas, etc.).

Hace uso de los ajustes realizados sobre las descargas con inyección de NBI durante las campañas 2003-2004 del TJ-II. Para ello se simetrizaron y suavizaron los perfiles de *Scattering Thomson* de 96 descargas y con ellos se efectuaron los cálculos de absorción de NBI con el código de Montecarlo Fafner-2. Una vez hecho eso se ajustaron, a su vez, las magnitudes principales a formas funcionales adecuadas.

La subrutina esta escrita en Fortran-90 e instalada en el Origin-3800 (jen50), el ALTIX-3700 (fenix) y el Alpha-Server8400 (fusc).

Todas las variables siguen la convención usual del Fortran, además aquellas que comienzan por la letra "c" son de tipo *character* y, a menos que se indique explícitamente lo contrario, todas las variables son *real*4* e *integer*4* es decir simple precisión en cada ordenador. No obstante existe un módulo alternativo en donde las variables están en doble precisión.

1. Modo de llamada

```
call perfpot_nbi (conf, powco, powcn, enlcm, ns, psh, polpr, polt, pcx,  
$ pabst, pion, ajbt, perfabst,perfion,perfh, ierr, iextrap)
```

En donde los 17 argumentos (los 5 primeros de entrada, los 12 restantes de salida) poseen el siguiente significado:

1.1 Input (7 argumentos):

conf (character): Nombre de la configuración magnética elegida
(p. ej. '100_44' o '60_40_46')

powco (real): Potencia entrante en el toro para el haz CO (el que inyecta en la misma dirección del campo magnético toroidal, el N° 1).(En MW, el valor usual es 0.930)

powcn (real): Potencia entrante en el toro para el haz COUNTER (el que inyecta en dirección opuesta a la del campo magnético toroidal, el N°2).(En MW, el valor usual es 0.930)

enlcm (real): Densidad media de línea del plasma (en cm⁻³)

ns (integer): Número de puntos radiales en que se desea obtener los perfiles. Esos puntos radiales se distribuyen uniformemente en radio medio normalizado a 1 en el borde, con el primer valor = 0. y el ultimo (el ns) = 1. Lo mas conveniente es que esté comprendido entre 11 y 25. Si este valor fuera ≤ 0 no se calculan los perfiles radiales (se ponen todos a 0.). Ha de ser ≤ 51 .

1.2 Ouput (12 argumentos):

psh (real): Potencia perdida en *Shine Through* (en MW).

polpr (real): Potencia de pérdidas directas (*prompt*) de iones rápidos (en MW).

polt (real): Potencia total de pérdidas de iones rápidos, tanto directas como colisionales (en MW).

pcx (real): Potencia de pérdidas de cambio de carga (CX) con el fondo de neutros fríos (en MW).

pabst (real): Potencia total absorbida por el plasma, tanto iones como electrones (en MW).

pion (real): Potencia absorbida por los iones del plasma (en MW).

ajbeam (real): Corriente total de iones rápidos entrante en el toro (en Amperios)

perfabst (real, dimension \geq ns): Perfil radial de absorción total del plasma (tanto iones como electrones) en cada uno de los ns puntos deseados) (en $W.cm^{-3}$).

perfion (real, dimension \geq ns): Perfil radial de absorción de los iones del plasma en cada uno de los ns puntos deseados) (en $W.cm^{-3}$).

perfhr (real, dimension \geq ns): Perfil radial de nacimiento de los iones rápidos (perfil de deposición H(s)) en cada uno de los ns puntos deseados) (en $W.cm^{-3}$).

ierr (integer): Indicador de error. Es distinto de 0 en el caso de configuración inválida (p. ej. '100_6f') o si hubiera habido algún problema en la lectura de la base de datos.

iextrap (integer): Si la configuración elegida existe en la base de datos (es decir si se han efectuado los cálculos de NBI) éste parámetro vale 0. En caso contrario el programa toma la configuración disponible mas cercana y lo pone a 1.

La subrutina usa internamente la unidad lógica 399 para efectuar la lectura de la base de datos, por lo que esa unidad no deberá ser utilizada por el usuario.

2. Subrutinas auxiliares.

La absorción de los haces neutros depende no solo de la densidad del plasma sino también de la cantidad de impurezas, el perfil radial y valor del fondo de neutros fríos procedentes de la pared así como la energía del haz y la composición de especies, divergencia, etc.

Estas magnitudes pueden fijarse explícitamente mediante varias subrutinas independientes, que, lógicamente, tienen que ser llamadas ANTES que `perfpot_nbi`, los valores así establecidos permanecen en vigor hasta otra nueva llamada. Si nunca se las llama rigen valores *por defecto* que se especifican más adelante.

2.1 Establecimiento de la Z efectiva del plasma.

Se efectúa mediante la llamada:

```
call set_zeff_nbi( zeff, zimp)
```

Los 2 parámetros son de entrada y corresponden a:

zeff (real): Z efectiva del plasma

zimp (real): Numero atómico de la impureza (evidentemente deberá ser $zeff < zimp$)

Si no se efectúa ninguna llamada a esta subrutina los valores por defecto son: $Z_{eff}=1$. (no hay impurezas) y $zimp = 26$. (hierro).

2.2 Establecimiento del perfil radial de neutros fríos.

Se efectúa mediante la llamada:

```
call set_neutr_nbi( enna, enn0)
```

Los 2 parámetros son de entrada y corresponden a:

enna (real): Densidad del fondo de neutros fríos en el borde del plasma (en cm^{-3}).

enn0 (real): Densidad del fondo de neutros fríos en el centro del plasma (el eje magnético, en cm^{-3}).

El perfil radial de los neutros fríos se supone que depende del radio medio, normalizado a 1 en el borde, de manera exponencial, con esos valores en los extremos ($enn0$ en $s=0$., $enna$ en $s=1$.)

Si no se efectúa ninguna llamada a esta subrutina los valores por defecto son:
 $enna = 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ y $enn0 = enna/200. = 5 \times 10^8 \text{ cm}^{-3}$.

2.3 Establecimiento de la energía del haz y de la mezcla de especies.

Se efectúa mediante la llamada:

```
call set_energ_nbi( ekev, fr11, fr12, fr13)
```

Los 4 parámetros son de entrada y corresponden a:

ekev (real): Energía de la componente de más alta energía del haz (en keV).

fr11, fr12, fr13 (reales): Fracción de las componentes de energía ekev, ekev/2 y ekev/3.
No necesitan sumar 1, el programa normaliza automáticamente

Si no se efectúa ninguna llamada a esta subrutina los valores por defecto son:
ekev = 40. keV, fr11 = 0.8, fr12 = 0.1 y fr13 = 0.1 . Para 27 keV valores típicos de estas fracciones son: 0.77, 0.11 y 0.12, respectivamente.

2.4 Establecimiento de la divergencia del haz.

Se efectúa mediante la llamada:

```
call set_diverg_nbi( diverg )
```

El único parámetro es de entrada y corresponde a la divergencia gaussiana del haz (en grados, real)

Si no se efectúa ninguna llamada a esta subrutina el valor por defecto es:
diverg = 1.3°.

5. Características de la configuración.

En ocasiones puede ser útil acceder a las características de la configuración, sobre todo si ha sido elegida automáticamente (cf. §1.2, argumento iextrap). Para ello basta hacer la llamada (evidentemente DESPUES de la de perfpot_nbi):

```
call get_conf_nbi( confv, aicc, aihc, aivf, reffcm, aiot)
```

En donde los 6 argumentos son de salida, todos reales salvo el primero.

confv (character*16): Nombre de la configuración realmente elegida (la más cercana a la solicitada de las disponibles)

aicc (real): Corriente del conductor circular (en décimas de kAmp).

aihc (real): Corriente del conductor helicoidal (en décimas de kAmp).

aivf (real): Corriente de las bobinas de campo vertical (en décimas de kAmp).

reffcm (real): Radio medio de la configuración (en cm).

aiot (real): Transformada rotacional en el eje de la configuración.

6. Utilización de las subrutinas.

El conjunto de subrutinas se encuentra compilado en Fortran-90 y debe utilizarse con ese lenguaje, aunque es compatible con la inclusión de subrutinas o librerías escritas en Fortran-77 (p. ej. las de los datos de descarga del TJ-II o, incluso, teniendo en cuenta la diferencia en la precisión de los argumentos, las de la librería del TJ-II).

Para su inclusión deberá hacerse uso de las siguientes sentencias en cada ordenador ("prog_user.f" simboliza el programa del usuario y los puntos suspensivos posibles opciones, llamadas a otros módulos, librerías, etc.)

6.1 Origin-3800 (jen50):

```
f90 .... prog_user.f .... \  
      .... /r4/temporal/guasp/bases/calc_nbi.o ....
```

6.2 ALTIX-3700 (fenix):

```
ifort .... prog_user.f .... \  
      .... /disco02/fusion/guasp/datos_tj2/calc_nbi.o ....
```

6.3 AlphaServer8400 (fusc):

```
f90 ..... prog_user.f ... \  
      ..... /usr/users2/guasp/proctr/bases/calc_nbi.o .....
```

6.4 Utilización en doble precisión.

A menudo algunos programas se compilan con la opción de compilación " -r8 -i8 " lo que fuerza automáticamente a que el tipo por defecto de todas las variables sea real*8 e integer*8 (doble precisión en esos ordenadores), eso sucede p.ej. con la librería del TJ-II "libtj2.a" o con la de rejilla del espacio real "lib_g3d.a".

Con el fin de facilitar la utilización en esos casos y no tener necesidad de efectuar la engorrosa transferencia de variables de cada precisión, se ha incluido un módulo alternativo que permite esa posibilidad.

Con él las llamadas son idénticas a las de los §§ 1 a 3, aunque ahora las variables son real*8 e integer*8. Lo único que ahora cambia es que el módulo binario incluido en §§6.1 a 6.3 ya no es el "calc_nbi.o", sino el "calc_nbi8.o".

este texto se encuentra en:

jen50:/r2/fusion/guasp/datos_tj2/perfpot_nbi.help
fenix:/disco02/fusion/guasp/datos_tj2/perfpot_nbi.help
y en fusc:/usr/users2/guasp/datos_tj2/perfpot_nbi.help

Cálculos de inyección de haces neutros para las descargas del TJ-II

Guasp J.; Fuentes C.; Liniers M.
28 pp., 17 figs., 8 ref.

Resumen:

A partir de las descargas del TJ-II con inyección de NBI de las campañas 2003-2004 se han ajustado las pérdidas, absorción y perfiles radiales de deposición a funcionales sencillas que, para una densidad dada, permiten calcularlos muy rápidamente de manera aproximada.

Las desviaciones medias entre los cálculos para las descargas individuales utilizando sus perfiles de densidad y temperatura experimentales y los valores predichos por los ajustes, son del orden del 10 al 15% y su comportamiento con la densidad el esperado: decrecimiento monótono de las pérdidas de *shine through*, crecimiento de la absorción con inicio de saturación a alta densidad.

Los perfiles radiales de deposición de iones rápidos se estrechan inicialmente al crecer la densidad para, luego, comenzar a ensancharse aunque, en el rango de densidades medias de línea analizado (0.51 a $4.1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$), nunca resultan suficientemente anchos para hacer crecer las pérdidas directas ni producir perfiles huecos. Por su parte los perfiles de absorción de potencia se ensanchan monótonamente.

Existen subrutinas Fortran, disponibles en los tres ordenadores del Ciemat (jen50, fusc y fénix), para el cálculo rápido aproximado de todas esas magnitudes.

NBI calculations for the TJ-II experimental discharges

Guasp J.; Fuentes C.; Liniers M.
28 pp., 17 figs., 8 ref.

Abstract:

Calculations for NBI losses, absorption and power deposition radial profiles, corresponding to the experimental TJ-II campaigns 2003-2004, have been fitted to simple functionals in order to allow a fast approximative evaluation for any given density.

The average difference between the calculations for the individual discharges using the experimental density and temperature radial profiles and the fit predictions are between 10 and 15%, and the behaviour with density is the expected one: monotonic decrease of *shine through* losses and increase of absorption with incipient saturation for high densities.

The fast ion birth radial profile narrows initially at low densities but later starts to widen, although, for the average line density range analysed (0.51 a $4.1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$), never are wide enough to induce an increase of direct orbit losses neither to produce hollow radial profiles. The power absorption radial profile widens monotonically.

There exist Fortran subroutines, available at the three Ciemat computers, allowing the fast approximative evaluation of all these values.

DESCRIPTORES

S70

PLASMA; HELIAC STELLARATORS; HELICAL CONFIGURATION;
NEUTRAL ATOM BEAM INJECTION; PLASMA HEATING; PARTICLE LOSSES;
COMPUTER CODES