Informes Técnicos Ciemat

763

Septiembre 1995

Impactos de los iones rápidos en la Cámara de Vacio del TJ-II durante NBI

J. Guasp

Asociación EURATOM / CIEMAT para Fusión - 28

Instituto de Investigación Básica

Toda correspondencia en relación con este trabajo debe dirigirse al Servicio de Información y Documentación, Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas, Ciudad Universitaria, 28040-MADRID, ESPAÑA.

Las solicitudes de ejemplares deben dirigirse a este mismo Servicio.

Los descriptores se han seleccionado del Thesauro del DOE para describir las materias que contiene este informe con vistas a su recuperación. La catalogación se ha hecho utilizando el documento DOE/TIC-4602 (Rev. 1) Descriptive Cataloguing On-Line, y la clasificación de acuerdo con el documento DOE/TIC.4584-R7 Subject Categories and Scope publicados por el Office of Scientific and Technical Information del Departamento de Energía de los Estados Unidos.

Se autoriza la reproducción de los resúmenes analíticos que aparecen en esta publicación.

Depósito Legal: M-14226-1995
NIPO: 238-95-010-2
ISSN: 0214-087X

Editorial CIEMAT

CLASIFICACIÓN DOE Y DESCRIPTORES

700380, 700412
TOKAMAK DEVICES, HELIAC STELLARATORS, PLASMA, ION SCATTERING ANALYSIS, FAST NEUTRONS, ENERGY LOSSES, BEAM INJECTION, PARTICLE LOSSES

"Impactos de los iones rápidos en la Cámara de Vacío del TJ-II durante NBI"

Guasp, J.
78 pp. 46 figs. 6 refs.

Resumen

Se analizan teóricamente los posibles puntos de acumulación, sobre la cámara de vacío, de los iones rápidos perdidos durante la inyección tangencial balanceada de haces neutros en el Stellarator de eje helicoidal TJ-II. Se establece la relación con los puntos de salida del plasma, los de nacimiento y las características de la configuración magnética.

Se observa que las pérdidas directas son, con mucho, las más importantes, especialmente las del haz dirigido en el mismo sentido que el campo magnético, crecen con la energía del haz y con la densidad del plasma y se acumulan en zonas fijas, bien definidas, distribuidas aperiódicamente, sobre las placas de la cubierta del Hard Core produciendo fuertes cargas a altas densidades.

El resto de las pérdidas, salvo las de Shine Through que predominan a baja densidad, se distribuyen periódicamente y con máximos suaves produciendo cargas muy leves. No se observan superposiciones entre las diversas pérdidas o haces.

"Impacts of lost fast ions on the TJ-II Vacuum Vessel during NBI"

Guasp, J.
78.pp. 46 figs. 6 refs.

Abstract

The possible deposition patterns, on the Vacuum Vessel, of lost fast ions during the balanced tangential NBI in TJ-II helical axis Stellarator are analysed theoretically, establishing the relation between those impact points, the plasma exit and birth positions and the magnetic configuration characteristics.

It is shown that direct losses are the most important, mainly those produced by the beam injected with the same direction that the magnetic field, increasing with beam energy and plasma density but with impacts remaining fixed on well defined zones, aperiodically distributed along the Hard Core cover plates, producing high loads at high densities.

The remaining losses, except for the shine through ones that predominate at low density, are periodically distributed, with smooth maxima and produce very low loads. No overlapping between the different kind of losses or beams is observed.

Impactos de los iones rápidos en la Cámara de Vacio del TJ-II durante NBI

J. Guasp

Asociación EURATOM / CIEMAT para Fusión

Julio 1994

Indice

1. Introducción.
   1.1 Método de cálculo

2. Pérdidas instantáneas, caso CO.
   2.1 Trayectorias de escape.
   2.2 Distribución de potencia.
   2.3 Dependencias con la energía y la densidad.
   2.4 Distribución de impactos.
   2.5 Densidad de potencia.

3. Pérdidas instantáneas, caso CNT.
   3.1 Trayectorias de escape.
   3.2 Distribución de potencia.
   3.3 Distribución de impactos.
   3.4 Densidad de potencia.

4. Pérdidas retardadas, caso sin CX.

5. Pérdidas retardadas, caso con CX.

6. Posibles superposiciones.
   6.1 Superposición de PI y PR.
   6.2 Superposición de CO y CNT.
   6.3 Superposición con neutros de CX.
   6.4 Superposición con las pérdidas de shine through.

7. Conclusiones.

Referencias

Lista de Tablas.

Lista de Figuras.

1. INTRODUCCION.

Se estudia aqui la estructura de los impactos de los iones rápidos sobre la cámara de vacio del TJ-II (VV) durante NBI. Como se verá tales estructuras son consecuencia directa de las posiciones de salida de esas partículas en el plasma, que fueron analizadas detalladamente en [1]. Algo similar ocurre con sus variaciones con la energía del haz o la densidad del plasma con relación a los niveles globales de pérdidas que fueron analizados en [2].

Al igual que en [1] y [2] se han estudiado separadamente los casos CO y CNT, tanto las pérdidas instantáneas (PI, que son, con mucho, las más importantes) como las rerardadas (PR), tanto los casos con CX como sin él. Como allí, tambien se han efectuado los cálculos para tres energías del haz (27, 40 y 50 keV) a alta densidad (d3) y tres densidades ionicas centrales ("baja", d1= 1.94, "media", d2 = 5.83 y "alta", d3 = $11.1 \times 10^{13} cm^{-3}$) a una sola energía fija de 40 keV.

1.1 Método de cálculo.

Tomando como posiciones de salida las obtenidas para los iones rápidos a su salida del plasma [1], se han seguido las trayectorias hasta su choque con la cámara de vacío (o superar 500 μseg.). Como ahora las partículas ya están fuera del plasma se ha tenido que utilizar el código Fafner-I con la nueva rejilla, más fina, de campo y superficies magnéticas, sin colisiones, permitiendo "reentering" y con un paso espacial para el cálculo de orbitas muy reducido, equivalente a 0.24 cm.

La cámara de vacío (VV) ha sido modelada en la forma usual, mediante la combinación de planos y cilindros que simulan las bobinas de campo toroidal (TF) y el hard core (HC), uniendo unos con otros mediante superficies regladas.

En la Fig. 1 aparece la sección transversal de la VV para algunos cortes toroidales. Los saltos bruscos que se observan en algunos casos fuera del HC (p. ej. para Φ=22.5°) son reales y corresponden al hecho de que mientras los cortes se muestran en planos toroidales Φ=Cte, que convergen hacia el centro del toro (R=0), las bobinas TF son en realidad cilindros, cuyo grosor es el mismo tanto dentro como fuera del toro. Por lo tanto los planos Φ=Cte pueden intersectarlos. Esto, unido al hecho de que las bobinas TF-1 poseen mayor tamaño y estan más desplazadas hacia fuera, hace que las secciones transversales de la VV puedan presentar forma muy distinta para distintos Φ. Por el contrario la forma de la parte central del HC permanece igual, aunque girando hacia abajo 4 veces más aprisa que el ángulo toroidal.

Cuando se compara el modelo de VV utilizado aqui con el real (obtenido por digitalización de la parte interna de la VV) se observa una excelente coincidencia, salvo en lo que afecta a las ventanas, que no se han modelado aqui. En particular, la parte del HC, que es siempre la más crítica es prácticamente idéntica.

Con el fin de dilucidar la distribución de potencia sobre la VV se ha dividido ésta en 4 partes que se muestran en la Fig. 2a. Por un lado el HC se descompone en tres partes: la primera es la cubierta del conductor circular (CC), que abarca 30° a un lado y otro de la linea central (que se encuentra en posición poloidal θ=-4Φ) y posee sección transversal circular de radio 12.7 cm. Esta es la parte más crítica del HC pues es la más dificil de proteger y aquella que produciría mayor disminución de radio medio en el plasma si se ampliara. A un lado y otro del HC se encuentran las "placas" PL1 y PL2, tramos de sección transversal recta, que llegan hasta la parte interna de las bobinas

TF o los sectores (SC). Su longitud transversal es variable, puesto que depende de las posiciones y radios de las diversas TF y sus huecos (los SC) y oscila entre unos 20 y 30 cm. Por convenio la PL1 es la que queda en la parte de arriba del toro para ángulo toroidal $\Phi=0°$, ahi PL2 queda abajo, aunque hay que tener en cuenta que el giro del HC hace que a mitad de periodo, $\Phi=45°$, la posicion se invierta, lo que puede causar bastantes confusiones.

El resto de la VV, que como se verá es mucho menos crítico, está formado por la parte interna de las bobinas TF y los sectores (SC). Además, para los cálculos de densidad de potencia, esta parte se ha descompuesto en un mosaico formado por 72 partes en la dirección toroidal (18 por periodo, 5° de intervalo angular) y 36 en dirección poloidal (10° de intervalo). Sin embargo, como el HC es mucho más crítico, se ha preferido tratarlo separadamente, descomponiendolo en los mismos 72 tramos toroidales, mientras que en sentido transversal se han tomado 34 elementos (12 para el CC y 16 para cada una de las dos placas) de, aproximadamente, 2 cm cada uno. La superficie de cada uno de esos elementos es distinta y depende de su posición toroidal y transversal. Asi p. ej. en la parte central del CC para $\Phi=0°$ esos elementos tienen unos 14 cm en direccion longitudinal (toroidal) y 2.2 cm en dirección transversal (poloidal).

Para el cálculo de los puntos de impacto la intersección con la VV se determina con una precisión de, al menos, 0.2 cm.

Por último debe tenerse en cuenta que los cálculos para las densidades de potencia de pico son solo aproximados, dado el caracter discreto de los impactos, en los que cabe esperar fuertes fluctuaciones estadísticas y, por lo tanto, deben ser tomados solo como indicaciones de orden de magnitud. Mucha más fiabilidad tienen las estimaciones de distribución de potencia entre las diversas partes de la VV. No obstante, con el fin de aumentar lo más posible la estadística, en los casos de 40 keV y alta densidad, se ha triplicado casi el número de puntos, haciendo correr los códigos completos (es decir, tanto dentro como fuera del plasma) tres veces sucesivamente con números aleatorios iniciales muy diferentes.

Se observa sistemáticamente que cuanto mejor es la estadística más bajas resultan las densidades de potencia de pico, mientras que las proporciones de potencia se mantienen. Además esos resultados no han sido suvizados, ni se han tenido en cuenta efectos debidos al ángulo entre la velocidad de la partícula y la normal a la VV en el punto de impacto. Por todo ello los valores para esas densidades de pico dadas aqui podrían estar fuertemente sobreestimados.

2. PERDIDAS INSTANTANEAS. Caso CO.

Como ya se ha indicado repetidamernte son, con mucho, las más importantes, tanto en nivel de potencia (168.6 kW para 40 keV y alta densidad) como en grado de concentración y, por lo tanto, es a las que se dedicará mayor atención.

2.1 Trayectorias de escape.

Las Figs. 3 y 4 muestran la comparación entre puntos de salida del plasma (b) y los de impacto en la VV (a) vistos verticalmente desde arriba del toro (diagrama R-Φ, Fig.3) y en alzado (diagrama Φ-Z, Fig.4) para las pérdidas instantáneas (PI) del caso CO a 40 keV y alta densidad. Son patentes tanto la falta de periodicidad como la fuerte concentración y que los impactos reproducen las zonas de salida después de girar un pequeño ángulo en la dirección de inyección (en el sentido de las agujas del reloj en este caso CO) "apelmazandose" hacia la mitad de los periodos.

Para ver este efecto más claramente sería necesario disponer de un diagrama angular similar al de coordenadas de Boozer (Φb-Θb) utilizado en [1]. Como en este caso las partículas salen fuera del plasma, no existen coordenadas de flujo, lo más similar consiste en utilizar un diagrama Φ-Θvv en donde Φ es el ángulo toroidal (en el espacio real) y Θvv el ángulo poloidal que resulta de tomar el origen en el centro de la sección transversal de la VV (Fig. 2b) (que, cuando avanza Φ, gira alrededor del HC, en sentido negativo, 4 veces más aprisa y con radio 28.25 cm) con Θvv=0° dirigido horizontalmente hacia el exterior del toro. En este diagrama los impactos del caso anterior aparecen representados en la Fig. 5.

También aqui se observa el apelmazamiento de los puntos de impacto en la zona del HC (Fig.5a) tras desplazarse los de nacimiento (Fig. 5b) ligeramente hacia la izquierda y hacia arriba. Esto coincide con lo sugerido en [1] de que los iones siguen, más o menos, las lineas de campo y se fugan cuando se encuentran en las cercanías del HC por la parte exterior del toro (que es hacia donde derivan estas partículas CO).

De hecho, en este caso particular, todas las partículas obedecen a este esquema. Como se ve de la Fig. 6 ninguna partícula llega a recorrer más de 0.15 vueltas toroidales (54°, 0.6 periodos), con una media de 0.02 vueltas (8°). Cuando se analizan los casos de estadística incrementada los resultados son similares: muy pocas partículas sobreviven al primer paso cerca del HC en la zona externa del toro.

Esto tiene importantísimas consecuencias desde el punto de vista de los impactos ya que refuerza muchísimo la ya marcada tendencia a la concentracion en los puntos de salida y los hace chocar, precísamente, sobre el HC, en la zona cercana a las TF-4,5 y 6, lo que nos obliga a ver con mayor detalle cómo se concentran esos impactos y cuales son las zonas más afectadas.

2.2 Distribución de la potencia.

La Tabla I muestra los porcentajes de la potencia total de PI que van a parar a cada periodo en los casos CO y CNT para el caso "tipico" (40 keV y alta densidad) y las compara con las mismas magnitudes para los puntos de salida del plasma [1]. Se observará que en el caso CO ambos son muy similares (el caso CNT será tratado en el §3) con una fortísima concentración en el periodo -1 (la designación de los periodos es idéntica a la de [1]: se numeran correlativamente desde -2 a +2, saltándose el 0, con el +1 situado en el intervalo $0° \leq \Phi < +90°$). Es decir esa concentración principal, de más de un 70%, tiene lugar a una media vuelta de las posiciones de nacimiento. La zona que le sigue en importancia, con un 20%, se encuentra en el periodo +2, a una vuelta de la zona de nacimiento.

Tabla I. Distribución por periodos de la potencia (en %)
(PI, 40 keV, alta densidad)

Caso	kW		Periodo -2	-1	+1	+2	HC
CO	168.6	Plasma	7.1	69.9	5.8	17.2	-
		VV	5.3	71.3	3.1	20.2	99.5
CNT	56.6	Plasma	4.5	2.8	19.5	73.2	-
		VV	3.4	63.4	25.2	8.0	96.6

No solo hay una fuerte concentración toroidal sino que, además, casi toda la potencia se deposita en el HC (99.5%), o más precisamente en una de las placas, la PL2 que recibe un 84.9% de la potencia total, mientras que el CC recibe solo el 14% (24 kW) y la otra placa PL1 y las TF una cantidad insignificante (0.25% y 0.5% respectivamente).

2.3 Dependencia con la energía y densidad.

La dependencia con estas magnitudes es una consecuencia directa de las encontradas en [1] para los puntos de salida del plasma y aparecen, para el caso CO, en la Tabla II en forma de porcentaje de potencia que se llevan las dos zonas de concentración mas importantes, así como el periodo en el que ocurren y el porcentaje que reciben la placa PL2 y el CC.

Se observará que a medida que aumenta la energía el segundo máximo recibe algo más, en detrimento del principal, aun cuando éste permanece siempre muy por encima, en concordancia con [1]. Lo contrario sucede con la densidad. Por su parte, la proporción que recibe el CC permanece, dentro de fluctuaciones estadísticas casi constante, entre el 11% y el 14%, algo que también sucede con la placa PL2 (alrededor de un 85%).

Pero lo más importante es que la localización de los máximos y su ordenación se mantienen en todos los casos, mostrando, como ya fue indicado en [1], que esas posiciones son un efecto de la configuración magnética y de la presencia del HC.

Tabla II. Distribución por periodos de la potencia (en %)
(PI, caso CO)

Energia (keV)	Densidad	Potencia (kW)	1er Máx. (%)	2o Máx. (%)	PL2 (%)	CC (%)
27	alta	154.2	78.2 (-1)	11.0 (+2)	88.2	11.4
40	alta	168.6	71.3 (-1)	20.2 (+2)	83.9	14.4
50	alta	184.3	64.2 (-1)	23.9 (+2)	86.0	12.6
40	baja	69.3	61.2 (-1)	25.9 (+2)	84.2	13.4
40	media	118.7	76.7 (-1)	15.9 (+2)	87.3	10.8
40	alta	168.6	71.3 (-1)	20.2 (+2)	83.9	14.4

2.4 Distribucion de impactos.

La concentración de los puntos de impacto para el caso CO a 40 keV y alta densidad con estadística incrementada (1100 puntos en total) puede percibirse con mayor claridad con los diagramas de las Fig. 7,8 y 9.

La Fig. 7 es un diagrama angular en el que, junto con el ángulo totoidal Φ del espacio real, en abscisas, se ha representado en ordenadas el ángulo $\Theta^*=180° - \Theta_{c0}$ (cf. Fig. 2b), es decir, el ángulo poloidal subtendido desde el centro de la cámara, centrado en el HC y que gira con él. En este diagrama el HC aparece "rectificado", la parte del CC a un lado y otro de la linea central está sombreada, mientras que la zona inmediata superior es la placa PL1 y la inferior la PL2. Las lineas quebradas son las fronteras entre el HC y el resto de la VV y muestran la indentacion hacia dentro debida a la posición de las TF. Este diagrama da una buena visión global de la distribución de impactos aunque distorsiona la zona de las placas ya que éstas se ven en escorzo y aparentan tener un tamaño transversal muy inferior al real.

Por esta causa los impactos en el HC se perciben mejor en el diagrama de la Fig. 8 que representa también el HC "rectificado", con el angulo toroidal Φ en abscisas mientras que en ordenadas aparece la distancia lineal transversal d_{HC}, es decir, la separación de la linea central del CC, tomada sobre el HC a lo largo de una linea Φ=Cte. Esto evita la distorsión del diagrama anterior, aunque solo permita representar fielmente el HC, y ayuda a percibir mejor la estructura de los impactos en esa zona. De todas formas debe tenerse en cuenta que, en la realidad, las dimensiones horizontales son mucho mayores de lo que parecen en la Fig. 8 (casi 12 veces superiores a la vertical: 942 cm frente a 80 cm).

En esta Fig. 8 se percibe perfectamente la fuerte concentración en el periodo -1 ($-90° \leq \Phi < 0°$) sobre la placa PL2 entre las TFA4 y TFA6. También se ve claramente que los impactos en el CC corresponden a los márgenes perifericos de los máximos en PL2 y que es el segundo máximo el que afecta más al CC.

Finalmente la Fig. 9 es otro diagrama Φ-R, visto desde arriba, en el que se ha representado la posición de las TF y, esquemáticamente, la de las placas del HC, separando los impactos sobre la parte superior ($\sin\theta \geq 0$) e inferior para mejor visibilidad.

2.5 Densidad de potencia.

Ahora bien, lo que importa más, desde el punto de vista práctico, no son tanto los inpactos en la VV sino las densidades de potencia, que dependerán tanto de la potencia total y del porcentaje que se deposita en cada zona, como de su superficie. Conviene repetir que, debido al caracter discreto de los impactos, las fluctuaciones en los valores calculados para las densidades de potencia de pico pueden ser muy altas y deben ser considerados como meras estimaciones en orden de magnitud. Algo más de fiabilidad tienen las densidades de potencia medias.

En la Tabla III y la Fig. 10 aparecen, para varios casos, esas densidades de potencia de pico en las zonas de máxima acumulación, así como la densidad de potencia media en la primera. También se ha incluido, por ser el punto potencialmente más problemático, la densidad de potencia de pico en el CC.

Tabla III. Densidades de potencia (en W/cm^2)
(PI, caso CO)

Energia (keV)	Densidad	1er Max. pico	1er Max. media	2° Max. pico	CC pico
27	alta	654	81.3	171	75
40	alta	655	80.1	161	50
50	alta	661	91.9	181	50
40	baja	235	28.8	81	38
40	media	497	61.4	90	45
40	alta	655	80.1	161	50

Se observará que en función de la energía las densidades de potrencia no varían mucho, consecuencia de la compensación entre el aumento de la potencia total, la disminución de la fracción que recibe el primer máximo y el mayor esparcimiento en el segundo. Por el contrario los aumentos con la densidad sí que son importantes, en este caso hay reforzamiento.

El area de impacto del máximo principal en la placa PL2 tiene unos 80 cm en dirección toroidal y 18 cm en la transversal, es irregular y se mantiene muy estable en posición cuando varían la energía y la densidad. Los valores de pico del primer máximo son muy elevados, sobre todo a alta densidad, más de 600 W/cm^2. Por lo tanto es la zona del primer máximo, sobre la placa PL2, situado alrededor de Φ=-37.5° y unos 15 cm por debajo del centro del CC, entre las TFA4 y TFA6, en donde habrá que tener cuidado especial.

El segundo máximo se situa hacia $\Phi\approx$+148° y a 10 cm por debajo de la linea central, es ligeramente más pequeño (unos 68 cm por 25 cm,entre las TFC5 y TFC6) y aperecen en él densidades de potencia de pico mucho menores, del orden de 160 W/cm^2 e invade parte del CC, lo que da lugar en él a densidades de potencia de pico de unos 50 W/cm^2 (hacia Φ=142° en el borde con la PL2, es decir a 6 cm por debajo de la linea central)

Finalmente en la Fig. 11a aparece la localización de los impactos del 1er máximo en una proyección poloidal, con la VV en un ángulo toroidal cercano al del máximo. Mientras que en la Fig. 12a se presenta la posicion de todos los impactos en un sistema que girara con el HC, de forma que su posicion parece fija. Queda clarísima la concentración en la parte "inferior" del HC en ese diagrama, es decir en la placa PL2.

3. PERDIDAS INSTANTANEAS. Caso CNT.

Como ya se indicó en [1] este caso difiere del CO en que los iones nacen más en la periferia y salen del plasma más dispersos por la parte interna del toro. Esto unido a una menor potencia de pérdidas da lugar a que constituya un caso menos grave que el CO.

3.1 Trayectorias de escape.

Para este caso CNT los puntos de impacto en la VV y los de salida del plasma aparecen en las Fig. 13 (diagrama R-Φ), 14 (diagrama Φ-Z) y 15 (diagrama $\Phi-\Theta_{VV}$) para el caso de 40 keV y alta densidad.

Se observa inmediatamernte un menor número de impactos que en el caso CO (ahora las pérdidas son solo de 56.6 kW, casi 3 veces menores) y menor concentración.

Como se discutió en [1] ahora las partículas no emergen del plasma cerca del HC y pueden recorrer más trayecto antes de golpear la VV, de modo que el máximo principal ocurre esta vez con los iones que emergen del plasma en la zona $90° < \Phi < 135°$ por la parte interna del toro y describen media vuelta, en el sentido de Φ positivo, antes de encontrar al HC en la parte interna del toro, hacia la zona $-45° < \Phi < 0°$ del periodo -1.

Una trayectoria típica puede verse en el diagrama angular $\Phi-\Theta_{VV}$ de la Fig.16. (ahora las trayectorias son menos suaves que en coordenadas de Boozer). En estos casos algunas partículas pueden llegar a recorrer mas de 2 vueltas antes de chocar con la VV, aunque la media se situa en 0.58 (204°, 2 1/4 periodos), como en el caso de la anterior Fig. 16. Pese a todo los impactos siguen apareciendo en su mayoría en la zona del HC (Fig. 15) de tal forma que, también aqui, la distribución de impactos está mucho mas concentrada que la de salida del plasma.

3.2 Distribución de potencia.

La distribución de la potencia por periodos aparece en la Tabla I (§2.2) en donde se percibe cómo el máximo, que a la salida del plasma se encontraba en el periodo +2 se ha desplazado, al chocar contra la VV, al -1 (media vuelta más allá) y recibe un 63% de la potencia total, mientras el máximo secundario del periodo +1 permanece dentro del mismo periodo y recibe un 25%. Este segundo máximo corresponde a partículas que salen del plasma en la parte inferior del periodo +1 del diagrama de la Fig. 15b y llegan enseguida al HC.

Se observará también que hay una aperiodicidad algo menor que en el caso CO, con menor desproporción entre el primer y segundo máximos, mientras que la concentración sobre el HC sigue siendo altísima (casi un 97%). aunque, como se verá más tarde (Tabla IV), casi toda concentrada en la placa PL1 y muy poca en el CC (menos de un 3%).

Esta concentración en la placa PL1 y casi ausencia en el CC se mantiene a otras densidades y energías (Tabla IV) mientras que, por el conrtrario, la aperiodicidad parece presentar un comportamiento más irregular con un pronunciado máximo a 40 keV y alta densidad, resultado de un reforzamiento ocasional de los diversos comportamientos de salida de los iones que fueron discutidos en [1].

Tabla IV. Distribución por periodos de la potencia (en %)
(PI, caso CNT)

Energía (keV)	Densidad	Potencia (kW)	1er Máx. (%)	2º Máx. (%)	PL1 (%)	CC (%)
27	alta	54.5	58.7 (-1)	37.8 (+1)	93.0	5.4
40	alta	56.6	63.4 (-1)	25.2 (+1)	92.3	2.8
50	alta	69.4	52.7 (-1)	30.5 (+1)	93.2	0.9
40	baja	35.1	43.9 (-1)	21.7 (+1)	90.9	3.8
40	media	60.3	44.7 (-1)	31.8 (+1)	93.3	0.1
40	alta	56.6	63.4 (-1)	25.2 (+1)	92.3	2.8

3.3 Distribución de impactos.

Las Figs. 17, 18 y 19 (análogas a las 7, 8 y 9 del caso CO) muestran con más detalle los impactos. Es clarísima la mayor dispersión y la preferencia por la placa superior PL1. Esto hace que aunque los máximos principales caigan en el mísmo periodo -1 tanto en el caso CO como en el CNT, sus zonas de concentración se encuentren, de hecho, muy bien separadas, como se comprueba comparando las Fig. 4 y 14 o las 8 y 18, un hecho afortunado que evita que ambos casos se refuercen en el caso de inyección balanceada (cf. §6.2).

3.4 Densidades de potencia.

Las densidades de potencia de pico en los dos máximos y la densidad media en el principal aparecen en la Tabla V, en este caso las densidades de potencia en el CC son muy pequeños, inferiores a 20 W/cm^2, y aún más en las bobinas TF y los sectores SC, inferiores a 5 W/cm^2.

El comportamiento irregular persiste, aunque la tendencia a constancia con la energía y ligero crecimiento con la densidad se perciben en la Fig. 10.

En este caso CNT, la zona del máximo principal se encuentra entre las TFA7 y TFB1, alrededor de Φ=-17.5°, sobre la placa PL1 a unos 11 cm por encima de la linea media del CC y tiene un area aproximada de 68 cm por 8 cm, algo menos que en el caso CO, pero aún así la mucha menor potencia total depositada sigue dando lugar a que la densidad de potencia de pico se situe un factor 3 por debajo de la del caso CO, en niveles de 200 W/cm^2, mientras que la densidad de potencia media en esa zona resulta aproximadamente la mitad.

Tabla V. Densidades de potencia (en W/cm^2)
(PI, caso CNT)

Energia (keV)	Densidad	1er Máx. pico	1er Máx. media	2° Máx. pico
27	alta	222	47.6	169
40	alta	214	52.5	80
50	alta	233	55.1	111
40	baja	149	22.6	45
40	media	204	40.7	98
40	alta	214	52.5	80

En este caso la mayor dispersión hace que la relación de potencia de pico entre el máximo secundario y el principal sea algo mayor que en el caso CO (sobre todo a 27 keV) aunque manteniendose en todos los casos en niveles de unos 100 W/cm^2, 80 W/cm^2 para 40 keV y alta densidad, situado hacia Φ=73° y a 10 cm por encima de la linea central, con un area de impacto de unos 42 cm por 6 cm, entre las TFB7 y TFB8.

Como en este caso hay mayor variabilidad con energías y densidades, se han incluido las Fig. 20 a 23 (que deben ser comparadas con la Fig. 18) que permiten percibir, pese a todo, la estabilidad espacial de las principales zonas de concentración de los impactos.

Finalmente la acumulacion alrededor de la placa PL1, aunque con mayor dispersión que en el caso CO, queda patente en la Fig. 12b.

4. PERDIDAS RETARDADAS. Caso sin CX.

No solo por su menor potencia total (del orden de 40 kW sin CX) [2], sino también por su periodicidad, dispersión a la salida del plasma y menor concentración en las cercanías del HC [1], era de esperar que estas pérdidas retardadas (PR) no presenten grandes problemas en cuanto a impactos sobre la VV.

Esa periodicidad se transmite a la distribución de impactos y es el hecho más notable de este tipo de pérdidas. Así, para el caso "standard", la máxima desviación resulta ser del 6% de la potencia total de pérdidas en el caso CO y de 4% para el CNT. Sin embargo esa periodicidad no implica, en absoluto, uniformidad toroidal. Esto se percibe en la Fig. 24 que muestra un histograma del angulo totoidal, módulo 90°, es decir: reducido a un solo periodo.

El mínimo en la zona Φ=45° corresponde a la existencia de un mínimo de partículas atrapadas en ese lugar [3],. Mientras que los máximos de partículas atrapadas, que según [3], se encuentran simetricamente situados alrededor de 20°-35° y de 55°-70°, se transforman en un claro ancho máximo principal situado hacia Φ=60°, el previsible alrededor de 30° se encuentra muy atenuado. Esto se debe a que las partículas atrapadas (que constituyen la mayoría para este tipo de pérdidas) derivan preferentemente hacia abajo y resulta que en la zona alrededor de Φ=67.5° el plasma se encuentra arriba, en la vertical del HC. Por lo tanto los iones que emergen del plasma hacia abajo se encuentran ahi inmediatamente con el HC, por el contrario los que salen hacia abajo en la zona Φ=22.5° (en donde el plasma esta debajo del HC) emergen al lado opuesto del HC y recorren caminos mas largos, y dipersos, que los anteriores. Esta tendencia a salir hacia abajo queda de mainfiesto en el histograma de angulos poloidales Θvv (ángulo poloidal visto desde el centro de la VV) de la Fig.25, tanto para el caso CO como para el COUNTER.

La periodicidad, asimetría toroidal, así como la no despreciable cantidad de impactos fuera del HC queda patente en los diagramas Φ-Θ^* de las Fig. 26 y 27 para los casos CO y CNT a 40 keV y alta densidad sin CX. Se observará la poca diferencia entre los casos CO y CNT como corresponde a la insensibilidad de las partículas atrapadas a la direccion inicial de la velocidad paralela, asi como la tendencia a ligeras, pero visibles, concentraciones sobre las TF, en particular las TF-6 y TF-5. Aunque la estadística de estos casos es bastante pobre, esa concentración puede intuirse en las vistas superior y lateral de la VV, diagramas (R-Φ) y (Φ–Z), de las Figs.28 y 29, concentración que será más patente en las pérdidas retardadas con CX que poseen mejor estadística.

Otra peculiaridad es la concentración preferente sobre la placa PL2 del HC, tanto en el caso CO como en el CNT. Esto, que a primera vista parece sorprendente, es consecuencia de que en el máximo de concentración toroidal, alrededor de Φ=60°, el HC se encuentra en un ángulo poloidal θ=+120°, situado arriba y hacia dentro del toro, con la placa PL2 casi horizontal, mientras que la PL1 se encuentra casi vertical y al derivar los iones hacia abajo tienen mucha más probabilidad de chocar con la primera, la PL2.

Todos estos efectos, que se mantienen a todas las densidades y energías, tanto en el caso CO como el CNT, quedan reflejados en las Tablas VI y VII, que muestran la distribución de potencia y la densidad de potencia de pico en los diversos componentes de la VV así como en los diagramas Φ-d_{HC} para los casos CO y COUNTER de las Fig. 30 y 31 (reducidos a un único periodo)

Pese a la acumulación preferente de los impactos cerca de las TF y en zonas vecinas al HC, las densidades de potencia máximas permanencen muy bajas. Estas zonas de acumulación se perciben en el diagrama poloidal con HC fijo de la Fig. 32.

Así, para 40 keV y alta densidad el máximo se encuentra sobre la PL2 hacia Φ=77.5° y 9 cm por debajo de la linea central, con 13 W/cm^2 en el caso CO, mientras para el CNT se alcanzan 17 W/cm^2, también en la PL2 a Φ=52.5° y -15 cm, con distribuciones bastante anchas (Figs.30 y 31).

El máximo valor alcanzado potr la densidad de potencia de pico se encuentra para el caso CO a 27 keV y alta densidad, unos 22 W/cm^2 en PL2, el correspondiente al CC no supera los 6 W/cm^2 mientras que para las TF nunca supera los 5 W/cm^2 (también en el caso CO a 40 keV y alta densidad) con variaciones que no parecen significativas dentro de las esperadas incertidumbres estadísticas, pero que nos permiten concluir que las PR no presentan problemas de cargas térmicas en la VV.

No obstante es necesario comprobar si estos bajos valores se mantienen cuando el CX se tiene en cuenta (§5).

Tabla VI. Distribución de la potencia en la cámara (en %)
Pérdidas Retardadas sin CX

Caso CO

Energia (keV)	Densidad	Potencia (kW)	PL1 (%)	CC (%)	PL2 (%)	TF+SC (%)
27	alta	55.6	0.0	1.2	56.1	42.7
40	alta	37.5	0.7	2.9	72.5	23.6
50	alta	36.1	0.0	6.2	60.3	33.4
40	baja	38.8	0.0	2.4	72.8	24.7
40	media	48.8	0.0	5.1	80.5	14.4
40	alta	37.5	0.7	2.9	72.5	23.6

caso COUNTER

Energia (keV)	Densidad	Potencia (kW)	PL1 (%)	CC (%)	PL2 (%)	TF+SC (%)
27	alta	53.6	0.6	1.8	68.7	28.9
40	alta	44.2	0.7	4.2	66.0	29.0
50	alta	32.9	0.0	0.0	75.3	24.7
40	baja	40.2	0.6	6.5	59.2	33.7
40	media	46.5	3.1	6.1	62.1	28.6
40	alta	44.2	0.7	4.2	66.0	29.0

Tabla VII. Distribución de las densidades de potencia de pico
Pérdidas Retardadas, 40 keV, alta densidad, sin CX
(en W/cm^2)

Caso	Potencia (kW)	PL1	CC (W(cm2)	PL2	TF+SC
CO	37.5	2.7	2.8	12.6	2.5
COUNTER	44.2	3.1	3.0	17.0	2.5

5. PERDIDAS RETARDADAS. Caso con CX.

En todos los cálculos con CX el valor para la densidad del fondo de neutros frios en el borde del plasma se ha tomado igual a 10^{11} cm^{-3}, decreciendo exponencialmente hacia el centro del plasma en donde alcanza un valor 200 veces menor.

Como ya se indicó en [1], el caso con CX, desde al punto de vista de la distribución de puntos de salida del plasma, resultaba ser una combinación del PR y de una pequeña población adicional que se comportaba como las PI, aunque con una repartición periódica, población que era debida a particulas reionizadas procedentes de pasantes confinadas que habían sufrido CX.

Eso queda confirmado para los impactos en la VV sin más que observar los diagramas Φ-Θ^* de las Figs.33 y 34 para los casos CO y CNT a 40 keV y alta densidad con CX. En este caso la máxima desviación respecto a la periodicidad es de un 6% de la potencia en el caso CO y de un 3% en el CNT. En particular se observará en la Fig. 34, que corresponde al caso CNT, la presencia de cierto número de impactos en la placa PL1, que están ausentes en las PR sin CX, pero que son característicos de las PI en ese tipo de inyección.

En este caso, debido a la mejor estadística, la acumulación de impactos cerca de las bobinas TF es evidente, como muestran las Fig.35 y 36 que representan los impactos sobre la cámara en una vista desde arriba, diagrama (R-Φ), o la vista lateral, diagrama (Φ-Z), con ángulos toroidales reducidos a un solo periodo. Esto también es visible en los histogramas de angulo toroidal (Figs.37 y 38) .

También en este caso las partículas salen predominantemente hacia abajo, como muestran los histogramas de ángulos poloidales Θvv de la Fig.39, que muestran una leve deformacion hacia $\Theta vv \approx 0°$ (hacia fuera) en el caso CO y hacia $\Theta vv \approx \pm 180°$ (hacia dentro) en el caso CNT, efecto de la poblacion reionizada pasante (comparense con los de la Fig.25 del caso sin CX).

Sin embargo no hay que dejarse engañar con el número de impactos y su densidad aparente. Los casos con CX, sobre todo a alta densidad, sufren numerosísimas reionizaciones que suministran un gran número de impactos, aunque con peso estadístico muy reducido. Como consecuencia la potencia, y sobre todo las densidades de potencia, que lleva esa componente "pseudo-instantánea" es bastante pequeña, por lo que, cuando se tiene en cuenta el CX, el aumento en las densidades de potencia no es importante.

La distribución de potencia viene dada en la Tabla VIII. Se observará ahora que la PL2 sigue recibiendo la mayor parte en el caso CO, mientras que en el CNT la PL1 y el CC se llevan ahora algo más que en ausencia de CX.

Por su parte la distribución de densidad de potencia de pico, para 40 keV, aparece en la Tabla IX. Así, en el caso CO a 40 keV y alta densidad, la densidad de potencia de pico en la PL2 crece ahora ligeramente (hasta 22 W/cm^2), como también lo hace en el CC (hasta 4 W/cm^2), mientras que en las TF se mantiene alrededor de los 6 W/cm^2, variaciones que no son muy significativas. Algo similar ocurre a otras energías y densidades.

Los máximos, considerablemente anchos, se situan ahora en la PL2, hacia $\Phi \approx 52.5°$ a 12 cm por debajo de la linea central con 22 W/cm^2 (Fig.40) en el caso CO, mientras que en el CNT permanece situado también sobre la PL2, hacia $\Phi \approx 7.5°$ a 21 cm por debajo de la linea central con 14 W/cm^2, aunque la PL1 recibe esta vez con 9.4 W/cm^2 y el CC unos 3.3 W/cm^2 (Fig.41).

Ese es un ejemplo de lo que sucede en el caso con CX con el aporte de la componente "pseudo-instantánea": el pequeño incremento da la potencia depositada en la placa PL1 del caso CNT. Sin CX esta placa recibe menos de un 1% de la potencia total de PR (0.3 kW), cuando se incluye el CX pasa a recibir un 15% (6 kW), bien lejos del 92% del caso CNT de PI. Por su parte la densidad de potencia de pico en esa placa pasa de menos de 3 W/cm^2, sin CX, a solamente 9.4 W/cm^2 con él.

Se observa un ligero decrecimiento de estos valores con la energía y un crecimiento suave con la densidad, que responden, simplemente, al comportamiento del nivel global de pérdidas [2] (Fig.42), manteniendose siempre por debajo de los 30 W/cm^2.

Por consiguiente tampoco las PR, en el caso de incluir CX, van a presentar problemas para la VV.

Tabla VIII. Distribución de la potencia en la cámara (en %)
Pérdidas Retardadas con CX

Caso CO

Energia (keV)	Densidad	Potencia (kW)	PL1 (%)	CC (%)	PL2 (%)	TF+SC (%)
27	alta	53.8	2.1	5.8	76.5	15.6
40	alta	37.1	0.4	5.9	73.4	20.3
50	alta	38.6	0.3	4.1	74.1	21.6
40	baja	18.4	0.0	10.7	84.4	4.9
40	media	31.1	0.5	2.2	81.9	15.4
40	alta	37.1	0.4	5.9	73.4	20.3

caso COUNTER

Energia (keV)	Densidad	Potencia (kW)	PL1 (%)	CC (%)	PL2 (%)	TF+SC (%)
27	alta	81.2	13.5	8.8	56.4	21.3
40	alta	48.0	15.3	6.5	61.1	17.1
50	alta	41.0	18.3	7.0	58.7	16.1
40	baja	7.0	59.1	7.4	15.3	18.1
40	media	33.4	35.8	2.8	44.0	17.4
40	alta	48.0	15.3	6.5	61.1	17.1

Tabla IX. Distribución de la densidad de potencia de pico
Pérdidas Retardadas con CX, 40 keV
(en W/cm^2)

Caso CO

Densidad	Potencia (kW)	PL1	CC (W/cm^2)	PL2	TF+SC
baja	18.4	0.0	2.6	8.5	0.4
media	31.1	1.8	0.9	14.0	2.1
alta	37.1	1.4	4.2	22.2	2.6

caso COUNTER

Densidad	Potencia (kW)	PL1	CC (W/cm^2)	PL2	TF+SC
baja	7.0	8.8	2.1	1.9	0.3
media	33.4	10.6	1.2	11.3	0.9
alta	48.0	9.4	3.3	14.1	1.5

6. POSIBLES SUPERPOSICIONES.

Hasta ahora hemos tratado separadamente las PI y las PR así como los casos CO y CNT ya que sus comportamientos pueden ser muy diferentes. Sin embargo, en la realidad, la VV no distingue el tipo de partícula que le llega ni tampoco, en el caso de inyección balanceada, si provienen del haz CO o CNT.

Además las pérdidas de iones rápidos no son las únicas que llegan a la VV, también hay que tener en cuenta los neutros procedentes de CX y los de "shine through". Hay que analizar si esos diversos componentes pueden dar lugar a superposición de las zonas de impacto preferentes ocasionando reforzamiento y, por lo tanto, un aumento de la densidad de potencia final en esas zonas.

6.1 Superposición de PI y PR.

Evidentemente el caso más peligroso sería que el máximo principal del caso CO coincidiera con los impactos de las PR con CX en la placa PL2 del HC periodo -1. Basta comparar las Figs.8, 40 y 41 para ver que ambas zonas de máximo estan algo desplazadas, sus efectos superpuestos son inferiores a la suma de las densidades de potencia máximas. De hecho, cuantitativamente, se pasa de 655 W/cm^2 a 670 W/cm^2 cuando se superponen los tres (PI CO con 655 W/cm^2, PR con CX CO con 11 W/cm^2 y PR con CX CNT con 3.7 W/cm^2) y el máximo permanece en el mismo sitio. Esto no es más que la consecuencia de la enorme disparidad entre las densidades de potencia de las PI y las PR (tanto con como sin CX), casi 30 veces superiores las primeras. Algo similar ocurre tanto en el segundo máximo como en el caso CNT y estos comportamientos se mantienen a todas las energías y densidades.

Por lo tanto apenas hay refuerzo en los puntos críticos entre PI y PR.

6.2 Superposición entre CO y CNT.

En el caso de inyección balanceada se utilizarán los haces 4 (CO) y 1 (CNT). Como ya se ha visto, para las PI, los impactos van a parar a placas distintas del HC y en posición toroidal no coincidente, aunque los dos máximos principales caen en el mísmo periodo. Basta comparar cualquiera de las Fig. de cada caso (p. ej. Fig. 4a con 14a, o la Fig. 8 con la 18) para comprobar la ausencia de superposición. Lo que es un hecho afortunado.

Por el contrario, las PR CO y CNT poseen máximos anchos y suaves, periódicos y se superponen levemente, por lo que las densidades de potencia son bajas (con CX el máximo resultante de la superposición da 26 W/cm^2 en las cercanías del máximo del caso CO). Por ello puede considerarse que cuando hay inyección balanceada el "fondo" de PR se incrementaría algo, pero no así las PI.

6.3 Superposición con neutros de CX.

Este tema ha sido objeto de un estudio aparte [5]. Los neutros de CX se reparten periodicamente, con zonas de acumulación relativamente anchas y, sobre todo, con bajos niveles de carga. Las densidades de potencia de pico son siempre inferiores a 35 W/cm^2 en el HC y a 10 W/cm^2 en las bobinas TF.

Así, en el caso de 40 keV y baja densidad (donde las pérdidas por CX son mayores) la densidad de potencia de pico máxima se encuentra sobre el CC (35 W/cm^2, hacia $\Phi \approx 47.5°$ y -1.1 cm) para el caso CO, mientras que en el CNT se situa sobre la PL1 (23 W/cm^2, hacia $\Phi \approx 67.5°$ y +7.3 cm) y apenas se superpone con el caso CO (máximo de la superposición 38 W/cm^2 en el CC). Además este tipo de pérdidas decrecen, en general, con la densidad, por lo tanto presentan un comportamiento opuesto al de las PI.

Por lo tanto, incluso a baja densidad, en donde las pérdidas por CX son muy elevadas, no parece que puedan ocasionar problemas en la VV y el posible refuerzo con las otras pérdidas va a ser muy poco importante.

Las Figs.43 y 44 muestran cortes longitudinales (d_{HC}=Cte) y transversales (Φ=Cte) a través de los dos máximos principales en el caso en que tanto PI como PR (incluyendo CX), asi como los neutros de CX se superponen utilizando los haces n° 1 (CNT) y 2 (CO).

6.4 Superposición con las pérdidas de Shine Through (ST).

Esto también ha sido objeto, de un estudio separado [6].

Los principales puntos de deposición en la VV de las pérdidas por "shine through" son dos [6]. El primero cerca del cruce del haz con el HC, en la zona de máximo acercamiento, cerca del foco vertical que afecta al CC. El segundo a la salida del haz y afecta a una de las placas laterales y la zona vecina de las TF.

Si, como parece probable, se utiliza como haz CO el N° 4 esos dos puntos se encuentran hacia Φ=157.5° y 124°, respectivamente. Es decir hacia 3/4 y la mitad del periodo +2 (Fig. 9). Mientras que para el haz CNT (el N° 1) se encuentran en Φ=22.5° y 56°, en el periodo +1 (Fig. 19). La traza de estos haces aparece también en los diagramas Φ-Θ^* (Figs. 7 y 17) en donde el cuadrado representa el punto de entrada del haz y el triangulo el de salida.

De estos grupos de figuras se percibe que la única zona de posible superposición que podría ser de importancia podría ser la que se da entre la salida del haz CO y el borde externo del segundo máximo de las PI de ese mismo caso CO (hacia Φ=135° , periodo +2), aunque los máximos parecen estar razonablemente separados.

Las cargas de Shine Through crecen con la energía y decrecen fuertemente con la densidad. Se situan en las dos zonas separadas, mencionadas anteriormente. En la 1ª, cerca del cruce con el HC (Φ entre 17.5° y 12.5°), el CC es el más afectado, con densidades de pico de unos 260 W/cm^2 a baja densidad y 40 keV, bajando a 110 W/cm^2 a alta. La 2ª zona se encuentra cerca de la salida del haz y cae, principalmente, sobre las TFB5 y TFB6 en el haz CNT (TFC4 y TFC3 para el haz CO) que reciben cargas máximas de 600 y 440 W/cm^2, respectivamente, a baja densidad, descendiendo hasta 128 y 44 W/cm^2 a alta.

La comparación con los resultados de [6] permite deducir que apenas hay solapamiento entre los impactos de PI y los de las pérdidas por Shine Through de los diversos haces. No obstante el ST es quien que produce más cargas en el CC, cargas que pueden ser bastante considerables a baja densidad (260 W/cm^2).

Por otro lado la variación con la densidad de las cargas producidas por las PI y las de ST es opuesta, predominando estas últimas a baja densidad.

6.5 Resultado de las superposiciones.

Como conclusión de todas estas superposiciones se presenta en la Tabla X la distribución de potencia de pico, en cada periodo y en cada parte de la VV, cuando se añaden todo tipo de pérdidas, con los haces n°1 (CNT) y 4 (CO) (es decir PI, PR con CX, neutros de CX y neutros de ST) en el caso de alta densidad a 40 keV.

Tabla X

Densidades de potencia de pico máximas (en W/cm^2)
Haces n°1 (CNT) y n°4 (CO), incluidas todas las pérdidas

Parte	Periodo			
	-2	-1	+1	+2
PL1	17	223	83	27
CC	33	26	108	116
PL2	50	674	30	178
TF	6	9	129	128

Se observará que la posición de los máximos en el HC corresponden a los de las PI (sobre la PL2 en el haz 4, sobre la PL1 en el haz 1), afectando principalmente al periodo -1. Que el mayor valor sobre el CC es de 116 W/cm^2, debido fundamentalmente al ST del haz n°4 y que las bobinas TF y los sectores no afectados por el ST (periodos -2 y -1) las cargas permanecen siempre por debajo de 10 W/cm^2, debidos a PR y CX, mientras que en los otros dos el ST contribuye fuertemente unos 130 W/cm^2), afectando a las bobinas de salida.

Los contornos de densidad de potencia sobre el HC para el caso de superposición de los haces n°1 (CNT) y 4 (CO), alta densidad y 40 keV, aparecen en la Fig.45 (en intervalos de 100 W/cm^2 comenzando en 50).

Si en lugar de utilizar solo dos haces se usaran los cuatro tangenciales aparece entonces, en la PL2, un ligero refuerzo entre el primer máximo de uno de los haces CO y el segundo máximo del otro, aumentando hasta 707 W/cm^2. La distribución de cargas de este caso aparece en la Tabla XI. En este caso el periodo -1 es siempre el más afectado.

Como ya se ha indicado (§6.4) a baja densidad el ST produce las cargas más importantes, mientras disminuyen las debidas a las PI (§§ 2.5 y 3.4), esa dependencia con la densidad de la distribución de las densidades de potencia de pico máximas aparece, tanto para 2 como para 4 haces, en la Tabla XII y en la Fig.46. Evidentemente las cargas en el CC y las TF presentan la tendencia decreciente con la densidad, propia del ST, mientras los de las placas presentan la tendencia opuesta, propia de las PI.

Tabla XI

Densidades de potencia de pico máximas (en W/cm^2)
4 Haces, incluidas todas las pérdidas

Parte	Periodo			
	-2	-1	+1	+2
PL1	86	250	86	27
CC	108	121	108	116
PL2	77	707	77	178
TF	130	140	130	140

Tabla XII

Densidades de potencia de pico máximas (en W/cm^2)
incluidas todas las pérdidas

2 haces (1+4)

densidad	PL1	CC	PL2	TF
baja	156	275	242	615
media	213	241	515	264
alta	223	116	674	129

4 haces

densidad	PL1	CC	PL2	TF
baja	175	282	254	625
media	238	248	536	274
alta	250	121	707	140

7. CONCLUSIONES.

Las conclusiones sobre el estudio de los impactos de iones rápidos sobre la VV son las siguientes.

i) Pérdidas instantáneas:

Son, con mucho las más importantes en cuanto a potencia y dan lugar a una distribución de impactos aperiódica y con varias fuertes concentraciones toroidales en alguna de las placas del HC (la PL2 para el caso CO y la PL1 en el caso CNT).

a) Caso CO.

Es, con mucho, el más peligroso. Presenta dos máximos sobre la placa PL2 del HC. El máximo principal se encuentra a una 1/2 vuelta más allá de la zona de nacimiento de los iones rápidos (es decir hacia Φ=-37°) sobre la placa PL2 y a unos 15 cm de la linea media del CC, entre las TFA4 y TFA6, dando lugar a densidades de potencia de pico de unos 660 W/cm^2 y densidades de potencia media de 80 W/cm^2 , sobre un area, toroidalmente alargada, de unos 80 cm x 18 cm y recibe el 70% de la potencia total,

El segundo máximo, mucho menos importante, se encuentra entre las TFC5 y TFC6, aproximadamente 1/2 vuelta más allá del primero, da lugar a densidades de potencia de unos 160 W/cm^2 y recibe alrededor de un 20% de la potencia total. La parte crítica del HC, el CC, recibe densidades de potencia moderadas, del orden de 50 W/cm^2.

Estos valores no varían mucho con la energía pero decrecen fuertemente a bajas densidades, en el inicio de la inyección (Fig. 10)

b) Caso CNT.

Aqui el máximo principal aparece hacia Φ=-17.5°, sobre la placa PL1 a unos 11 cm de la linea media del CC, entre las TFA7 y TFB1, en un area toroidalmente alargada de unos 68 cm x 8 cm, dando lugar a densidades de potencia de pico de unos 214 W/cm^2 y densidades de potencia media de 50 W/cm^2 , recibiendo más de un 60% de la potencia total. Este máximo se encuentra bien separado del correspondiente al caso CO. Por su parte, en este caso, el CC recibe densidades de potencia insignificantes.

El segundo máximo se encuentra a un periodo del primero, hacia Φ=72°, entre las TFB7 y TFB8 y recibe solo unos 80 W/cm^2.

Estos valores se mantienen al variar la energía del haz y decrecen ligeramente al decrecer la densidad (Fig. 10)

ii) Pérdidas retardadas:

Poseen nivel de potencia extremadamente bajo. Sus impactos se distribuyen de manera periódica, con menor grado de concentración en el HC que en el caso de PI y, preferentemente, sobre la placa PL2 con un ancho máximo, dentro de cada periodo, situado hacia Φ=60° (TF6). No muestran puntos de concentración importantes, son muy similares las del caso CO y CNT y dan lugar a densidades de potencia de pico muy moderadas, inferiores a 20 W/cm^2 sobre la placa PL2 y de 6 W/cm^2 sobre el CC o las bobinas TF.

iii) Pérdidas retardadas con CX:

Son similares a las del caso sin CX salvo por la presencia de una pequeña población de partículas reionizadas que proviene de partículas pasantes confinadas que han sufrido cambio de carga y se concentra sobre las placas del CX de forma similar a la de las PI correspondientes, aunque a niveles moderados, inferiores a 35 W/cm^2 , decreciendo suavemente al decrecer la densidad.

No se presentan problemas importantes de reforzamiento entre los diversos casos (PI, PR, CO, CNT), los posibles reforzamientos con los impactos de neutros procedentes de CX también resultan ser muy poco importantes, mientras que los debidos a los impactos de neutros de Shine Through se concentran en el CC y en las bobinas TF, predominando a baja densidad, sin que haya tampoco reforzamientos notables con el resto.

REFERENCIAS.

[1]. J. Guasp. "Puntos de salida en el plasma de los iones rápidos durante NBI en el TJ-II". Report CIEMAT. Junio 1994.

[2]. J.Guasp, M.Liniers. "Comportamiento de las pérdidas instantáneas y retardadas en la inyección de neutros del TJ-II". Report CIEMAT. Mayo 1994.

[3]. J. Guasp. "Loss cone structure for fast ions in TJ-II helical axis stellarator". Submitted to Plasma Physics and Controlled Fusion. Abril 1994.

[4]. J. Guasp, M. Liniers. "Theoretical evaluations of neutral beam injection efficiency for the TJ-II helical-axis stellarator". Fusion Technol., **24**, 251 (1993).

[5]. J. Guasp. "Impactos de los neutros de CX en la cámara de vacio del TJ-II durante NBI". Report CIEMAT. Septiembre 1994.

[6]. J.Guasp, M.Liniers. "Impactos de los neutros de Shine Through en la cámara de vacio del TJ-II durante NBI". Report CIEMAT. Octubre 1994.

LISTA DE TABLAS.

Tabla I. Distribución por periodos de la potencia. PI, 40 keV, alta densidad.

Tabla II. Distribución de potencia para varias densidades y energías. PI caso CO

Tabla III. Densidades de potencia para varias densidades y energías. PI caso CO

Tabla IV. Distribución de potencia para varias densidades y energías. PI caso CNT

Tabla V. Densidades de potencia para varias densidades y energías. PI caso CNT

Tabla VI. Distribución de potencia en las diversas partes de la cámara, PR, casos CO y CNT sin CX (en %).

Tabla VII. Distribución de densidad de potencia de pico en las diversas partes de la cámara, PR, casos CO y CNT, 40 keV y alta densidad, sin CX (en W/cm^2).

Tabla VIII. Distribución de potencia en las diversas partes de la cámara, PR, casos CO y CNT con CX (en %).

Tabla IX. Distribución de densidad de potencia de pico en las diversas partes de la cámara, PR, casos CO y CNT, 40 keV, con CX (en W/cm^2).

Tabla X. Distribución de densidades de potencia de pico, por periodos, en las diversas partes de la cámara. Superposición de los haces n°1 (CNT) y 4 (CO), incluyendo todo tipo de pérdidas (PI, PR con CX , CX y ST) para 40 keV y alta densidad. (en W/cm^2).

Tabla XI. Como la Tabla X pero para los 4 haces tangenciales.

Tabla XII. Dependencia con la densidad de las densidades de potencia de pico máximas, en las diversas partes de la cámara. Para 2 y 4 haces, incluyendo todo tipo de pérdidas (PI, PR con CX , CX y ST) para 40 keV. (en W/cm^2).

LISTA DE FIGURAS.

Fig.1 Algunos cortes toroidales de la Cámara de Vacío del TJ-II.

Fig.2 Partición de la VV (a) y principales ángulos utilizados (b)

Fig.3 Puntos de impacto en la VV (a) y de salida del plasma (b). Vista desde la parte superior del toro (diagrama R-Φ). PI, Caso CO, 40 keV, alta densidad.

Fig.4 Ibid. en alzado (diagrama Φ-Z). PI, Caso CO, 40 keV, alta densidad.

Fig.5 Diagrama angular Φ-Θvv en espacio real. PI. (Caso CO, 40 keV, alta densidad).

Fig.6 Rélación enttre el número de vueltas poloidales y toroidales desde la salida del plasma hasta el choque con la VV. PI, Caso CO, 40 keV, alta densidad.

Fig.7 Diagrama Φ-Θ^* ($\Theta^* = 180 - \Theta_{c0}$) (estadística incrementada). (PI, Caso CO, 40 keV, alta densidad).

Fig.8 Diagrama Φ-d_{HC} (estadística incrementada). (PI, Caso CO, 40 keV, alta densidad).

Fig.9 Diagrama R-Φ (estadística incrementada), mostrando esquemáticamente el HC y las TF, separando impactos en la parte superior e inferior. (PI, Caso CO, 40 keV, alta densidad).

Fig.10 Dependencia de la densidad de potencia de pico sobre el máximo principal con la energía (a) y la densidad (b) en los casos CO y CNT, PI (en W/cm^2).

Fig.11 Proyección poloidal (R-Z) de los impactos en la zona del primer máximo con posiciónes de la VV cercanas a él. Caso CO (a) y CNT (b). (PI, 40 keV, alta densidad).

Fig.12 Proyección poloidal de todos los impactos en un sistema que gira con el HC Caso CO (a) y CNT (b). (PI, 40 keV, alta densidad).

Fig.13 Puntos de impacto en la VV (a) y de salida del plasma (b). Vista desde la parte superior del toro (diagrama R-Φ). PI, Caso CNT, 40 keV, alta densidad.

Fig.14 Ibid. en alzado (diagrama Φ-Z). PI, Caso CNT, 40 keV, alta densidad.

Fig.15 Diagrama angular Φ-Θvv en espacio real. PI. (Caso CNT, 40 keV, alta densidad).

Fig.16 Trayectoria de una partícula CNT típica en el diagrama angular Φ-Θvv.

Fig.17 Diagrama Φ-Θ* ($\Theta^* = 180 - \Theta_{c0}$) (estadística incrementada). (PI, Caso CNT, 40 keV, alta densidad).

Fig.18 Diagrama Φ-d_{HC} (estadística incrementada). (PI, Caso CNT, 40 keV, alta densidad).

Fig.19 Diagrama R-Φ (estadística incrementada), mostrando esquemáticamente el HC y las TF, separando impactos en la parte superior e inferior. (PI, Caso CNT, 40 keV, alta densidad).

Fig.20 Diagrama Φ-d_{HC} , PI. Caso CNT para 27 keV, alta densidad.

Fig.21 Diagrama Φ-d_{HC} , PI. Caso CNT para 50 keV, alta densidad.

Fig.22 Diagrama Φ-d_{HC} , PI. Caso CNT para 40 keV, baja densidad.

Fig.23 Diagrama Φ-d_{HC} , PI. Caso CNT para 40 keV, densidad media.

Fig.24 Histograma de ángulos toroidales, módulo un periodo. PR <u>sin CX</u>, casos CO (a) y CNT (b) para 40 keV, alta densidad.

Fig.25 Histograma de ángulos poloidales Θvv. PR <u>sin CX</u>, casos CO (a) y CNT (b) para 40 keV, alta densidad.

Fig.26 Diagrama Φ-Θ* ($\Theta^* = 180 - \Theta_{c0}$) (estadística incrementada). (PR, Caso CO, 40 keV, alta densidad <u>sin CX</u>).

Fig.27 Diagrama Φ-Θ* ($\Theta^* = 180 - \Theta_{c0}$) (estadística incrementada). (PR, Caso CNT, 40 keV, alta densidad <u>sin CX</u>).

Fig.28 Diagrama R-Φ (estadística incrementada), mostrando esquemáticamente la silueta de la VV. Impactos reducidos a un solo periodo. (PR, Caso CO, 40 keV, alta densidad <u>sin CX</u>).

Fig.29 Diagrama Φ-Z (estadística incrementada), mostrando esquemáticamente la silueta de la VV. Impactos reducidos a un solo periodo. (PR, Caso CO, 40 keV, alta densidad <u>sin CX</u>).

Fig.30 Diagrama Φ-d_{HC} (estadística incrementada) reducido a un solo periodo. (PR, Caso CO, 40 keV, alta densidad <u>sin CX</u>).

Fig.31 Diagrama Φ-d_{HC} (estadística incrementada) reducido a un solo periodo. (PR, Caso CNT, 40 keV, alta densidad <u>sin CX</u>).

Fig.32 Proyección poloidal de todos los impactos en un sistema que gira con el HC Caso CO (a) y CNT (b). (PR, 40 keV, alta densidad sin CX).

Fig.33 Diagrama Φ-Θ^* ($\Theta^* = 180 - \Theta_{c0}$) (estadística incrementada). (PR, Caso CO, 40 keV, alta densidad con CX).

Fig.34 Diagrama Φ-Θ^* ($\Theta^* = 180 - \Theta_{c0}$) (estadística incrementada). (PR, Caso CNT, 40 keV, alta densidad con CX).

Fig.35 Diagrama R-Φ (estadística incrementada), mostrando esquemáticamente la silueta de la VV. Impactos reducidos a un solo periodo. (PR, Caso CO, 40 keV, alta densidad con CX).

Fig.36 Diagrama Φ-Z (estadística incrementada), mostrando esquemáticamente la silueta de la VV. Impactos reducidos a un solo periodo. (PR, Caso CO, 40 keV, alta densidad con CX).

Fig.37 Histograma de ángulos toroidales, módulo un periodo. PR con CX, caso CO para 40 keV, alta densidad.

Fig.38 Histograma de ángulos toroidales, módulo un periodo. PR con CX, caso CNT para 40 keV, alta densidad.

Fig.39 Histograma de ángulos poloidales Θvv. PR con CX, casos CO (a) y CNT (b) para 40 keV, alta densidad.

Fig.40 Diagrama Φ-d_{HC} (estadística incrementada) reducido a un solo periodo. (PR, Caso CO, 40 keV, alta densidad con CX).

Fig.41 Diagrama Φ-d_{HC} (estadística incrementada) reducido a un solo periodo. (PR, Caso CNT, 40 keV, alta densidad con CX).

Fig.42 Dependencia de la densidad de potencia de pico en las diversas partes de la VVcon la energía (a) y la densidad (b) en los casos CO y CNT, PR con CX. (en W/cm^2).

Fig.43 Corte longitudinal (d_{HC}=Cte.) a lo largo de los dos principales máximos cuando se utilizan los haces 1 (CNT) y 4 (CO) y se incluyen todo tipo de pérdidas salvo el Shine Through. (40 keV, alta densidad).

Fig.44 Como la Fig.43 pero en corte transversal (Φ=Cte.).

Fig.45 Contornos de la densidad de potencia de pico en diversas partes de la cámara. (Haces n°1 y 4) para alta densidad y 40 keV. Incluidas todas las pérdidas. En intervalos de 100 W/cm^2 comenzando en 50).

Fig.46 Dependencia con la densidad de las cargas máximas. Caso con dos haces (a) y con 4 (b). 40 keV. Incluidas todas las pérdidas.

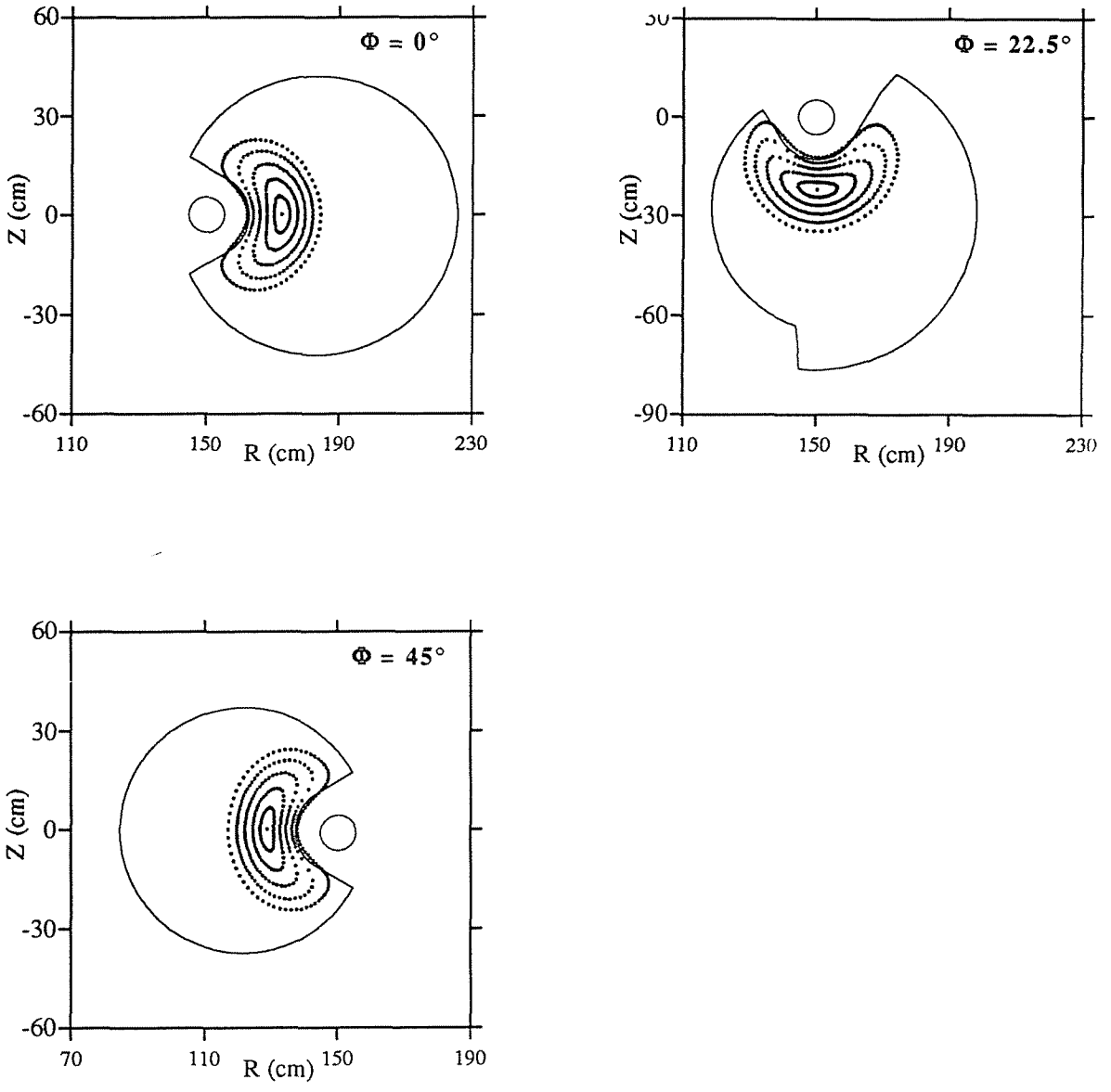


Fig. 1

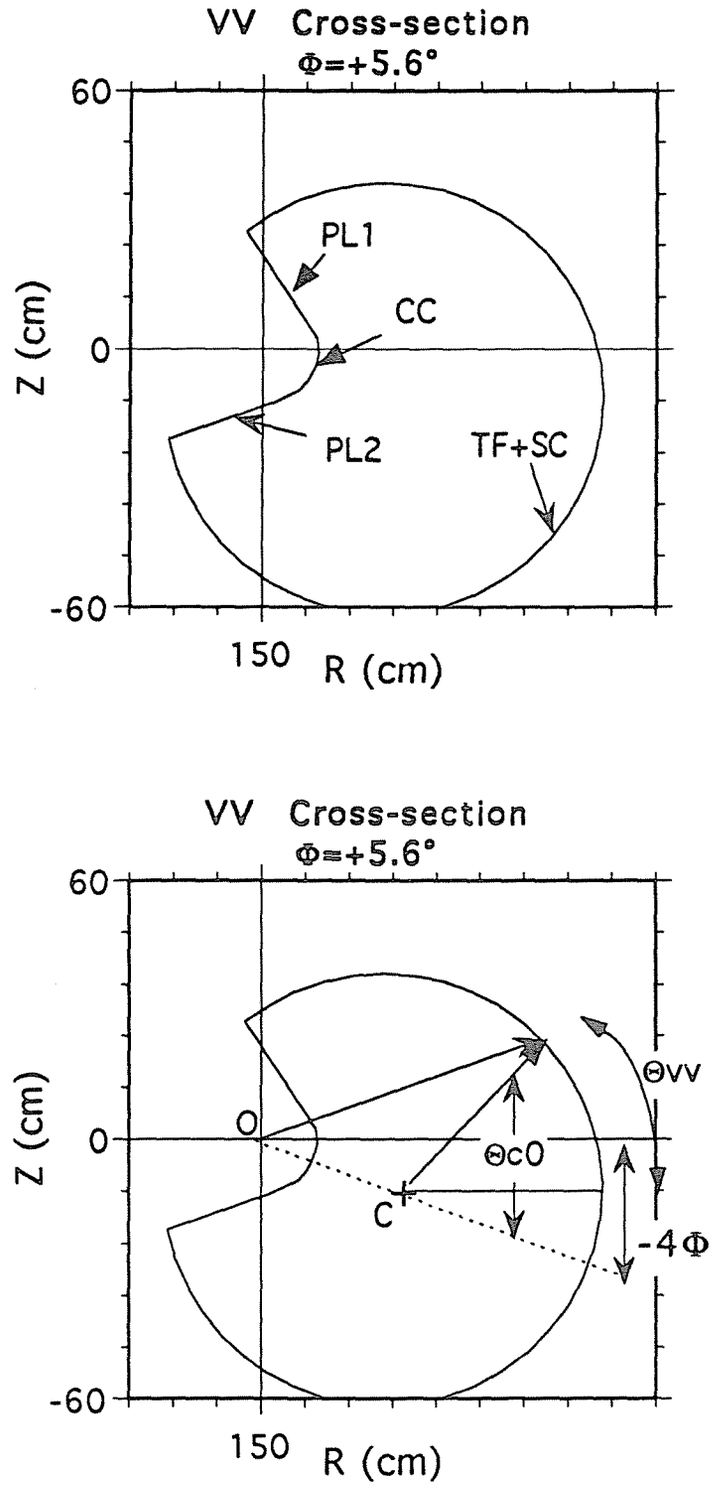
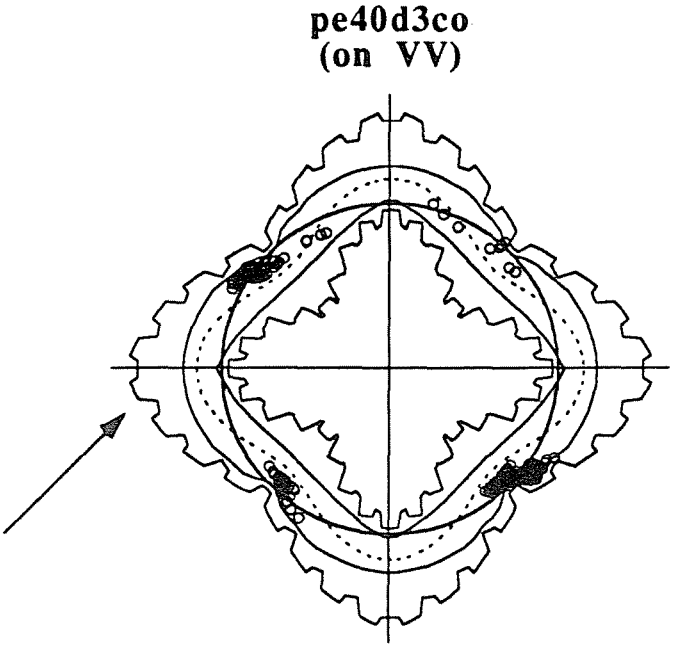

VV Cross-section
Φ=+5.6°
60
0
-60
Z (cm)
150
R (cm)
PL1
CC
PL2
TF+SC
VV Cross-section
Φ=+5.6°
60
0
-60
Z (cm)
150
R (cm)
O
C
ΘcO
Θvv
-4Φ

Fig. 2



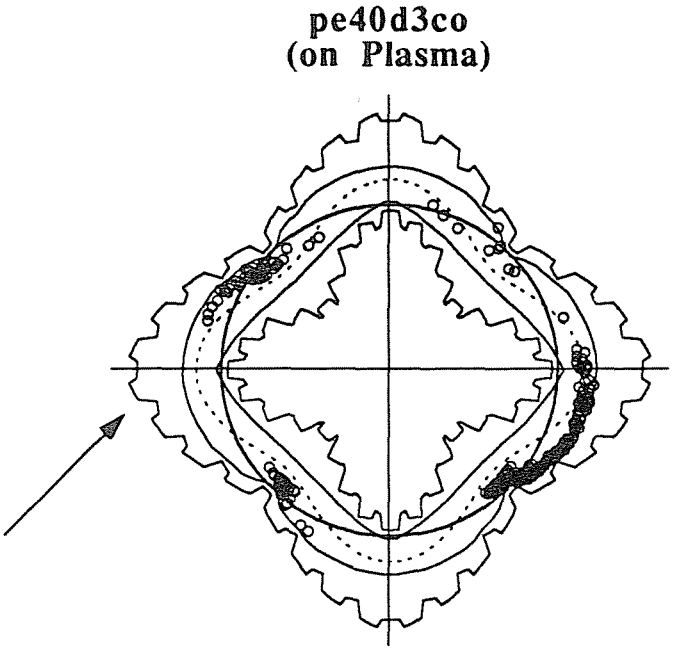
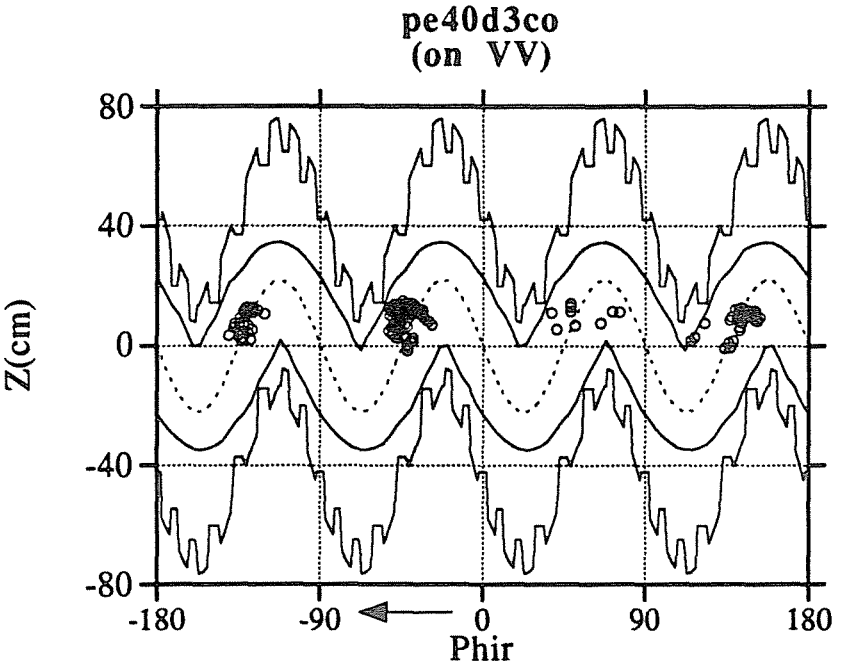


Fig. 3


pe40d3co
(on VV)
80
40
0
-40
-80
Z(cm)
-180
-90
0
90
180
Phir

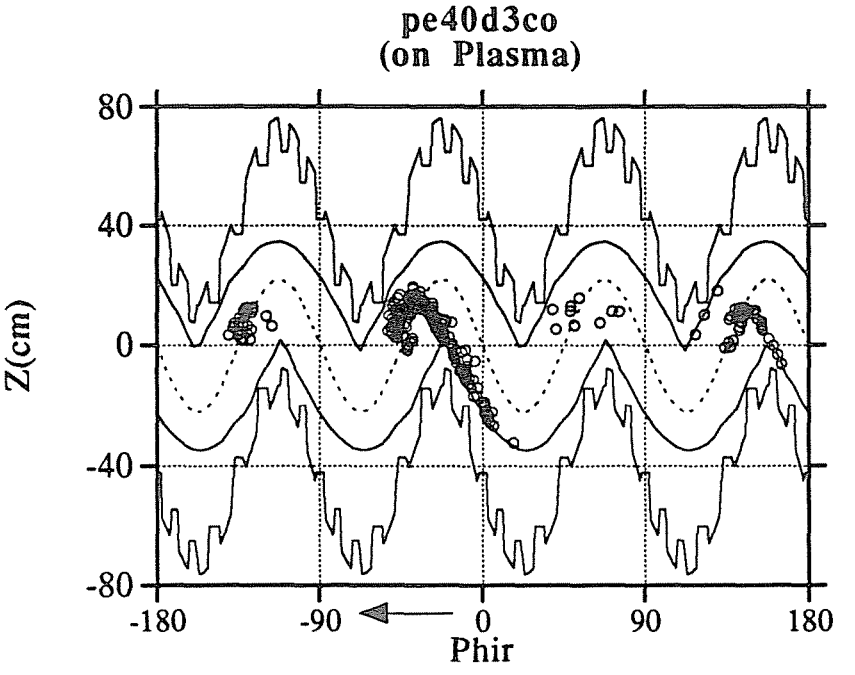
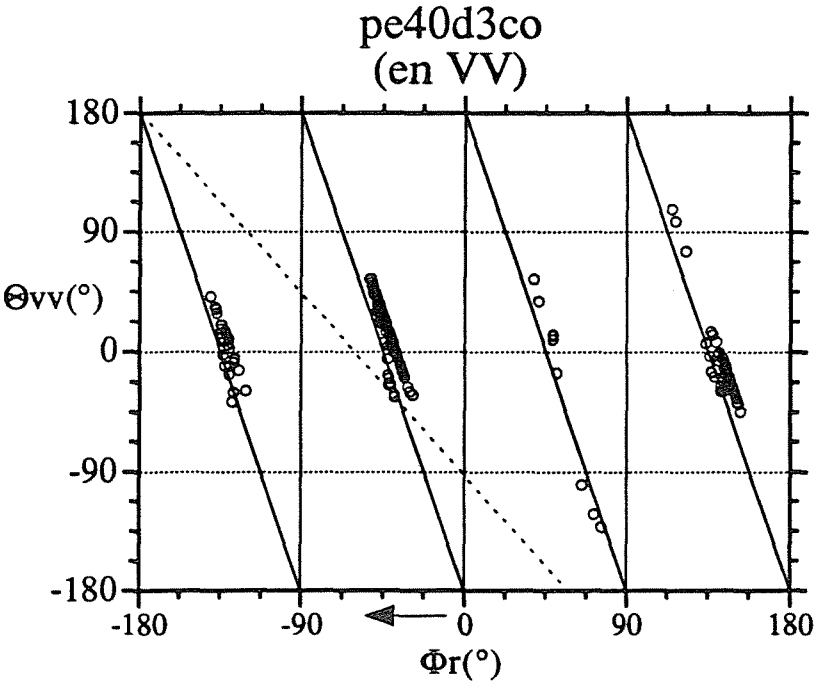

pe40d3co
(on Plasma)
80
40
0
-40
-80
Z(cm)
-180
-90
0
90
180
Phir

Fig. 4


pe40d3co
(en VV)
180
90
Θvv(°)
0
-90
-180
-180
-90
0
90
180
Φr(°)

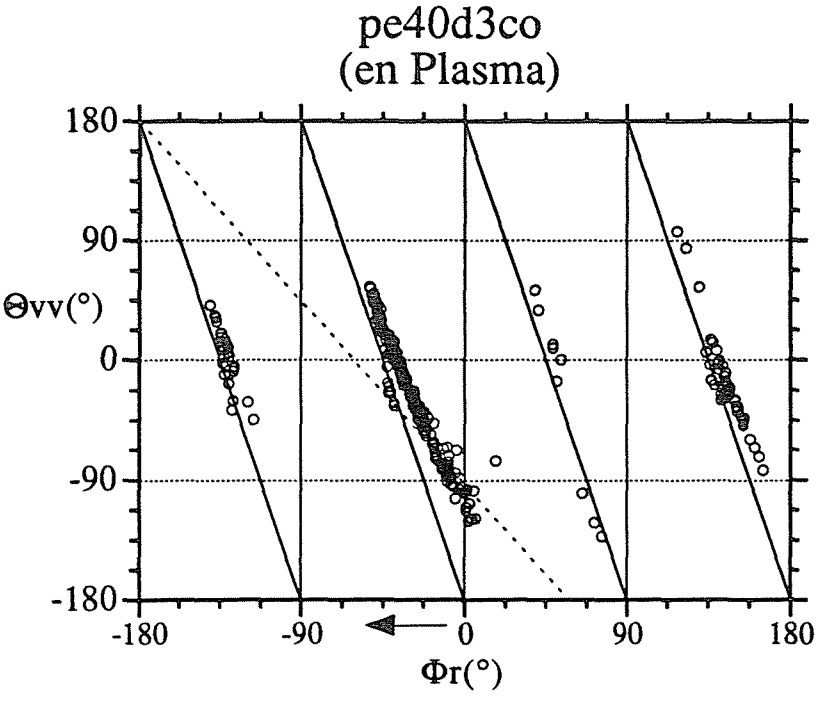

pe40d3co
(en Plasma)
180
90
Θvv(°)
0
-90
-180
-180
-90
0
90
180
Φr(°)

Fig. 5

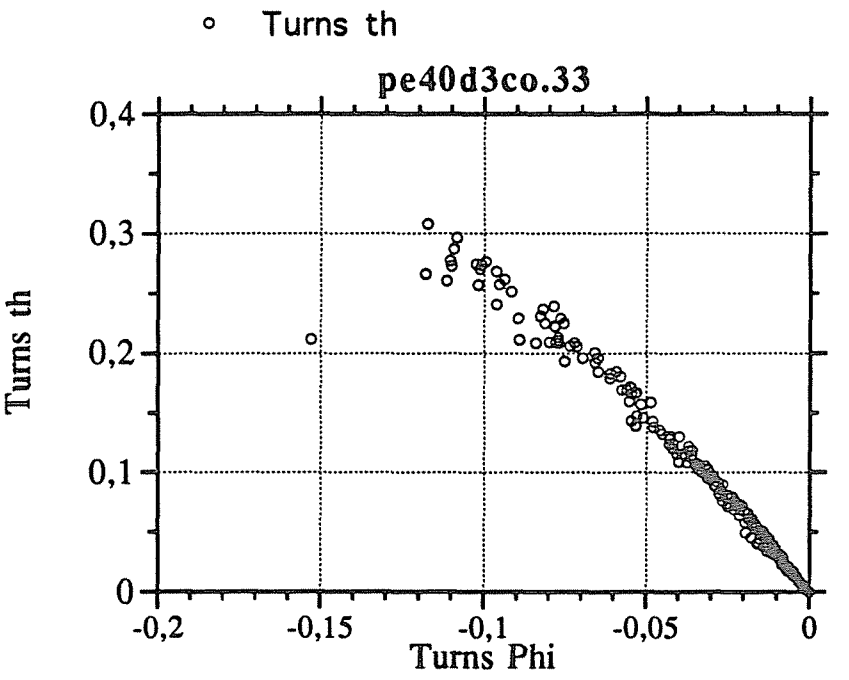

Turns th
pe40d3co.33
0,4
0,3
0,2
0,1
0
Turns th
-0,2
-0,15
-0,1
-0,05
0
Turns Phi

Fig. 6

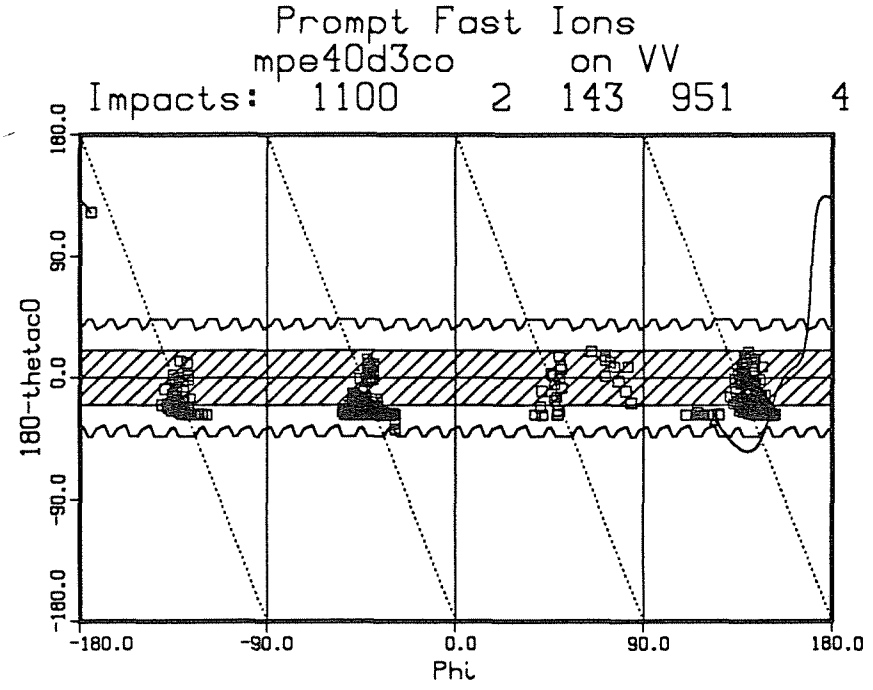

Prompt Fast Ions
mpe40d3co on VV
Impacts: 1100 2 143 951 4
180.0
90.0
0.0
-90.0
-180.0
180-thetac0
-180.0
-90.0
0.0
90.0
180.0
Phi

Fig. 7

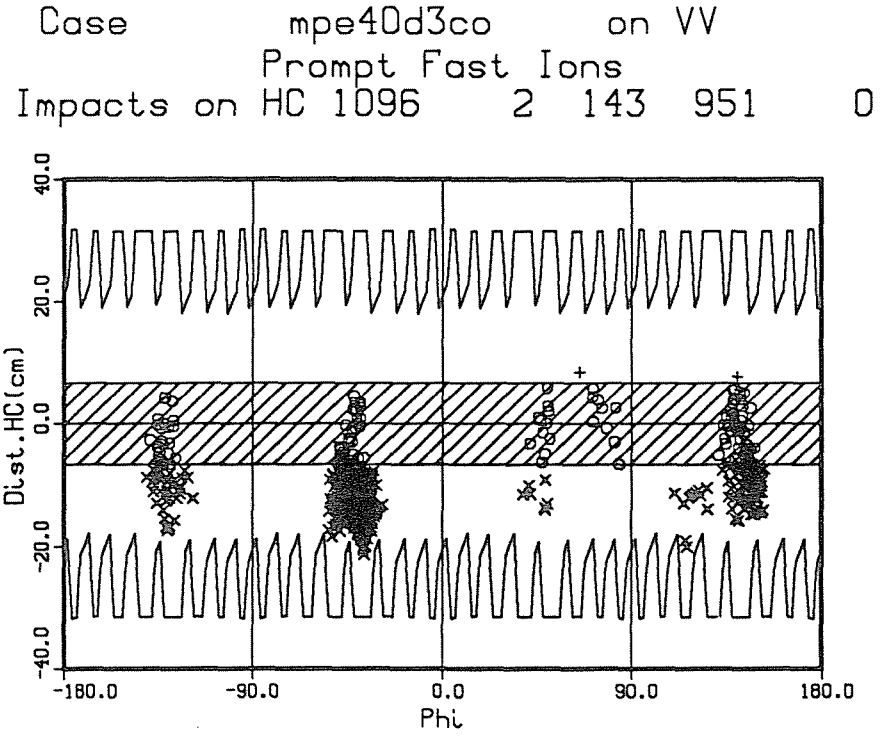

Case mpe40d3co on VV
Prompt Fast Ions
Impacts on HC 1096 2 143 951 0
40.0
20.0
0.0
-20.0
-40.0
Dist.HC(cm)
-180.0
-90.0
0.0
90.0
180.0
Phi

Fig. 8

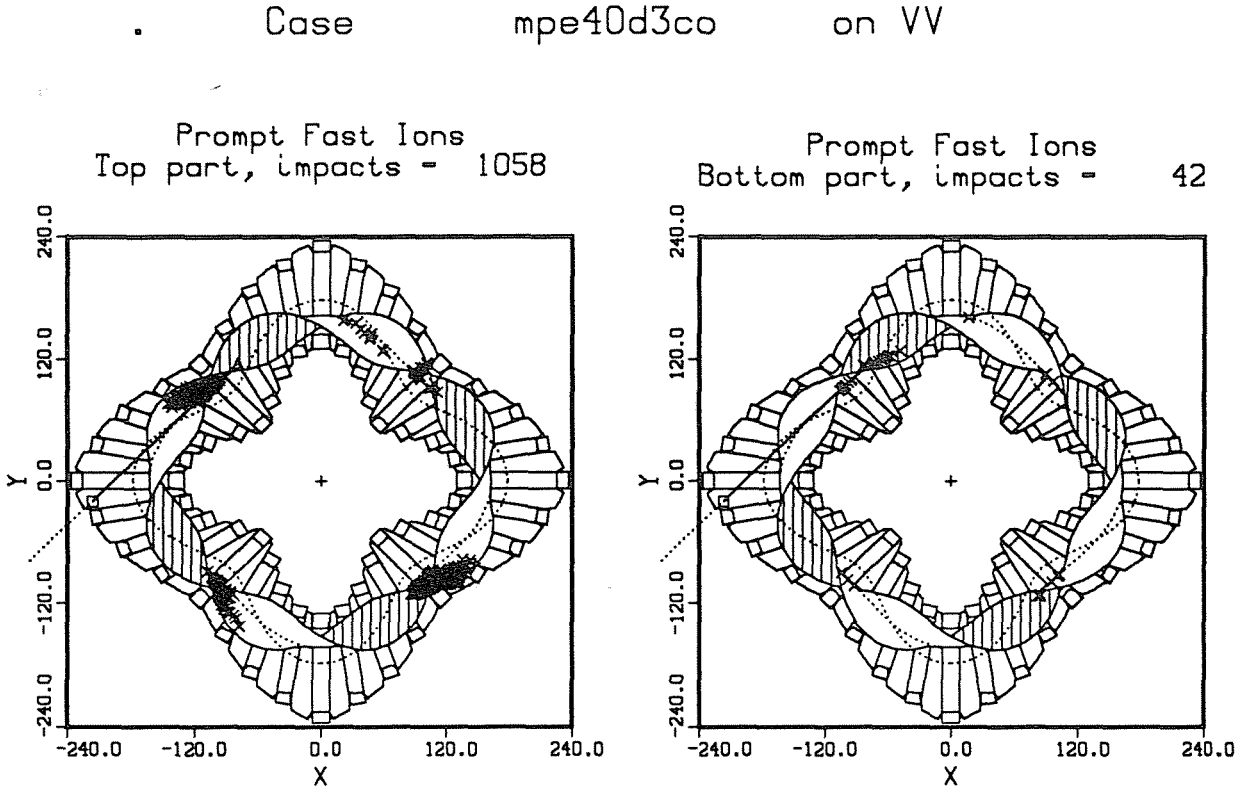
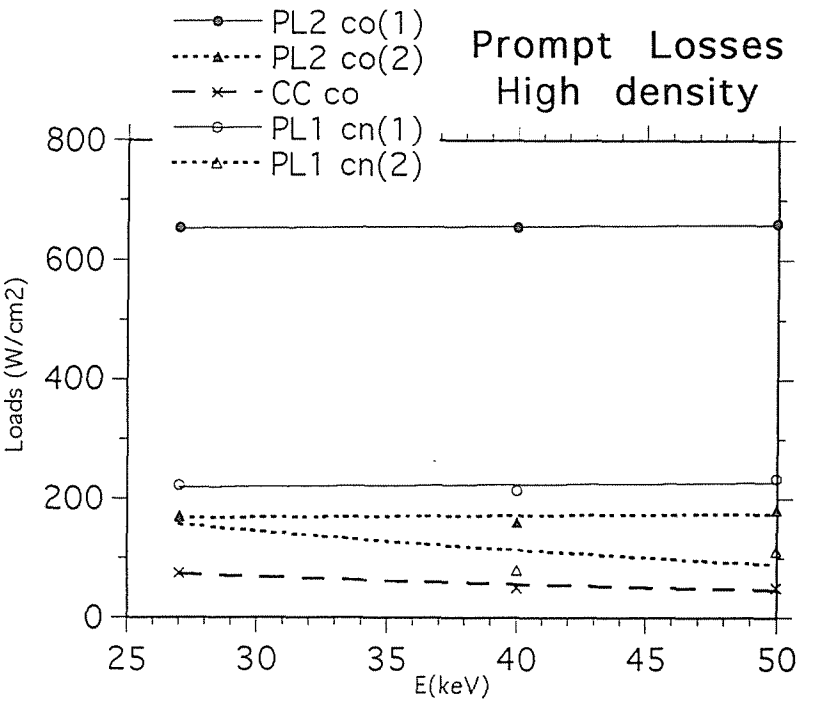

Case mpe40d3co on VV
Prompt Fast Ions
Top part, impacts = 1058
Prompt Fast Ions
Bottom part, impacts = 42
240.0
120.0
0.0
-120.0
-240.0
Y
X

Fig. 9


PL2 co(1)
PL2 co(2)
CC co
PL1 cn(1)
PL1 cn(2)
Prompt Losses
High density
Loads (W/cm2)
E(keV)
0
200
400
600
800
25
30
35
40
45
50

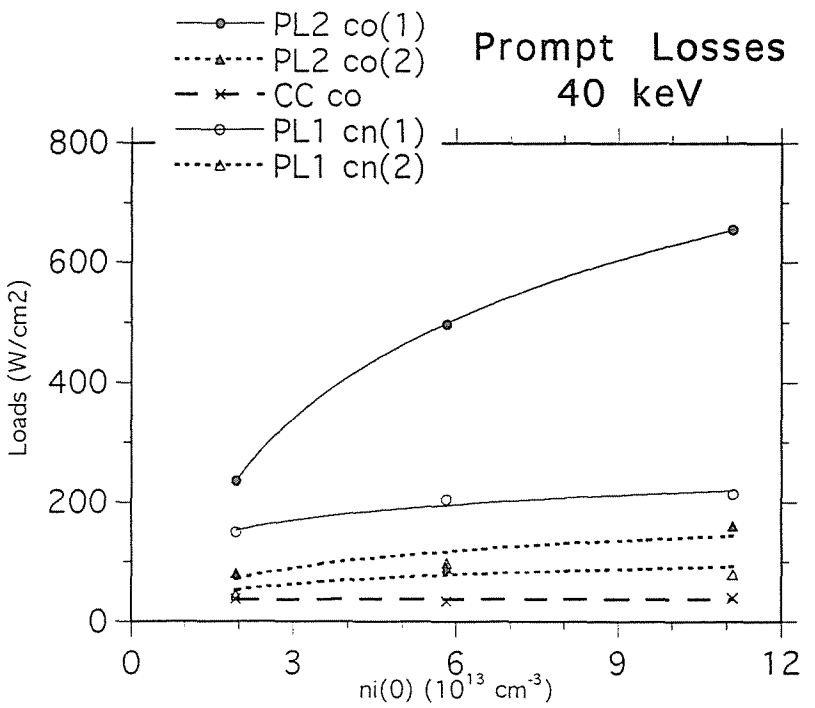
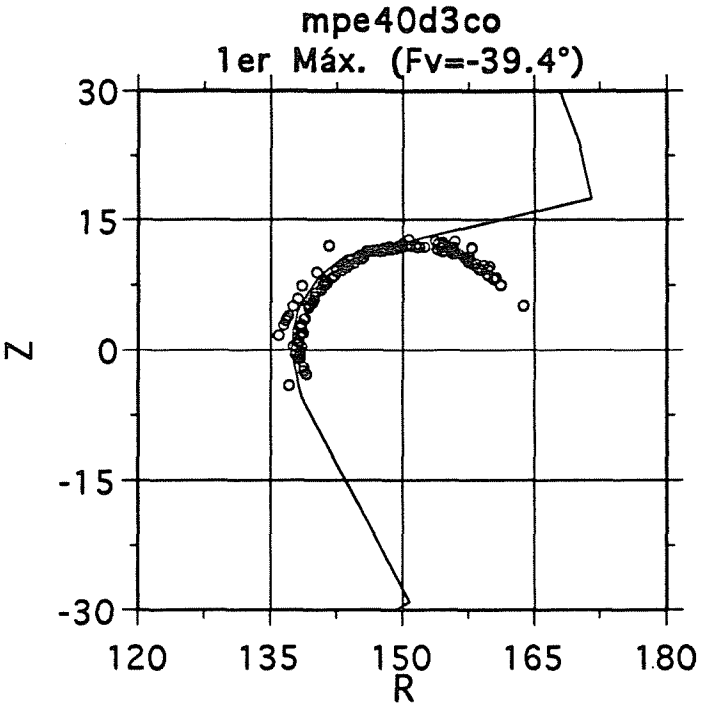

PL2 co(1)
PL2 co(2)
CC co
PL1 cn(1)
PL1 cn(2)
Prompt Losses
40 keV
Loads (W/cm2)
ni(0) (10^13 cm^-3)
0
200
400
600
800
0
3
6
9
12

Fig. 10


mpe40d3co
1er Máx. (Fv=-39.4°)
30
15
0
-15
-30
Z
120
135
150
165
180
R

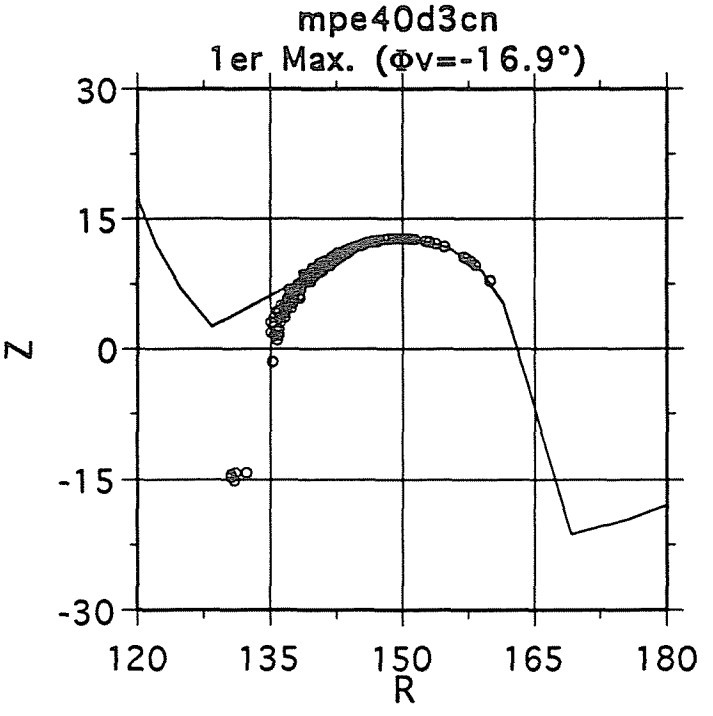
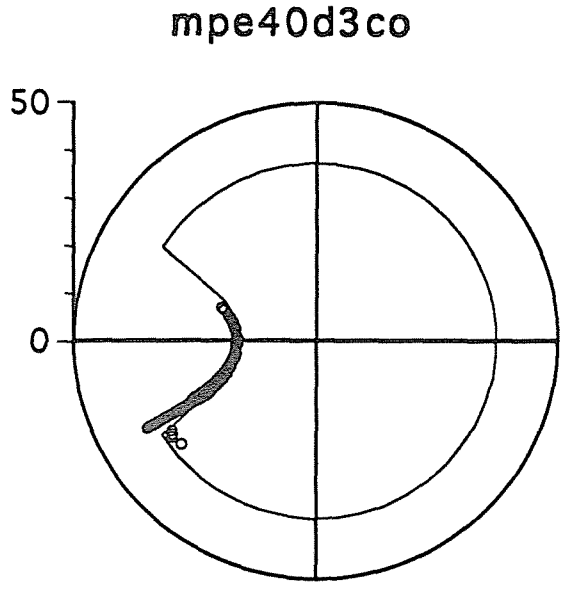

mpe40d3cn
1er Max. (Φv=-16.9°)
30
15
0
-15
-30
Z
120
135
150
165
180
R

Fig. 11



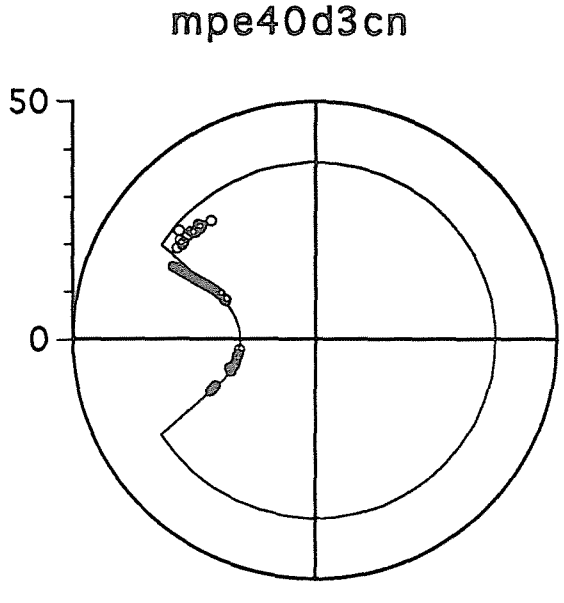
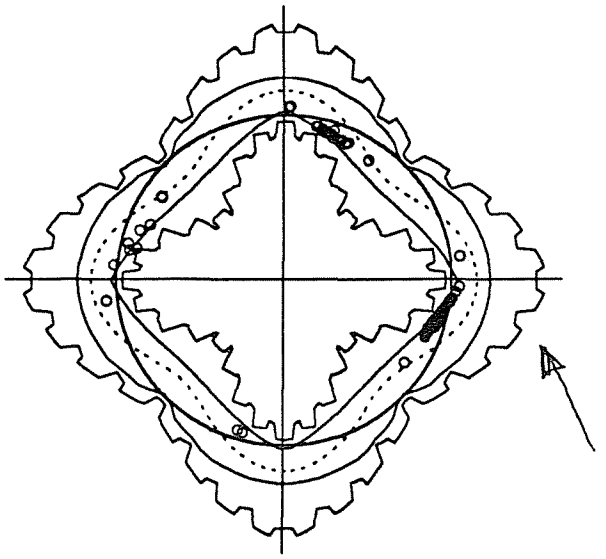


Fig. 12

pe40d3cn
(on VV)



pe40d3cn
(on Plasma)

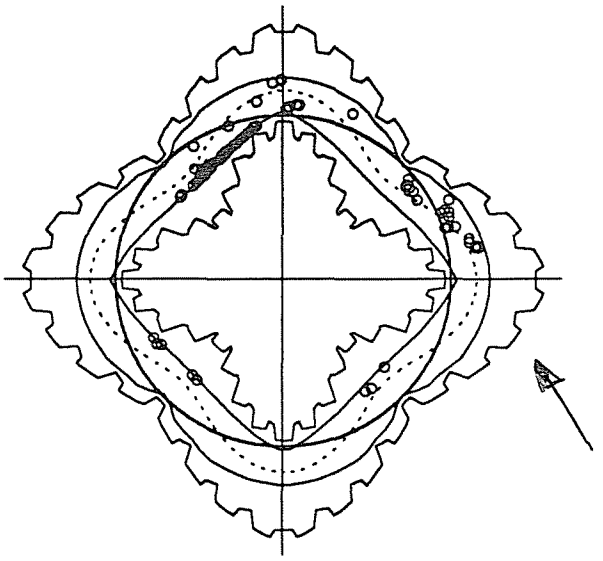
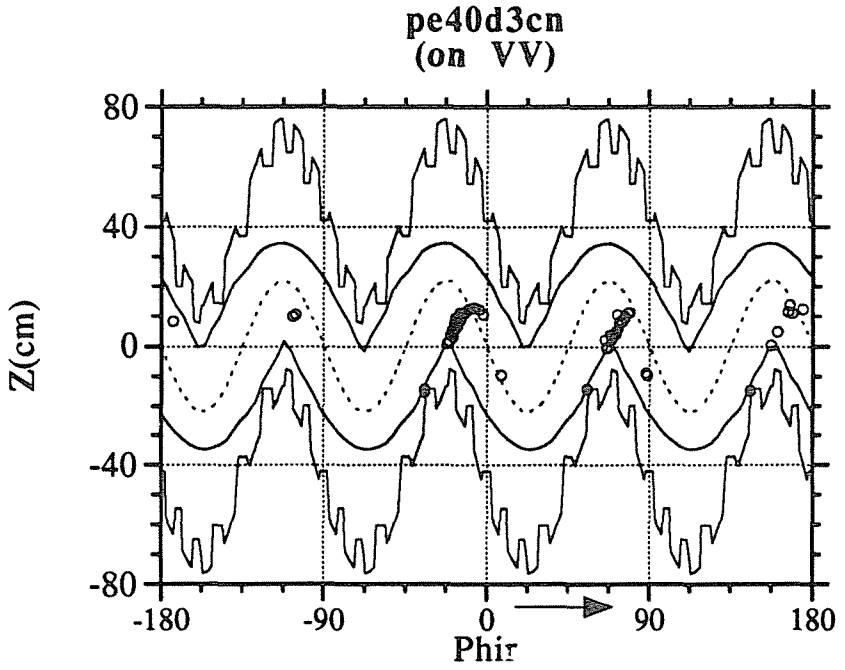


Fig. 13


pe40d3cn
(on VV)
80
40
0
-40
-80
Z(cm)
-180
-90
0
90
180
Phir

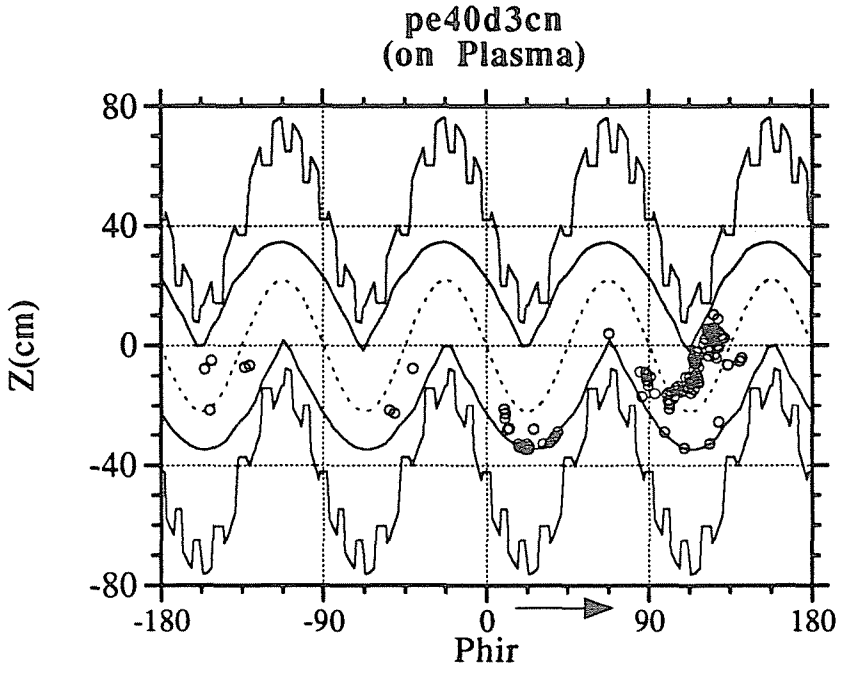
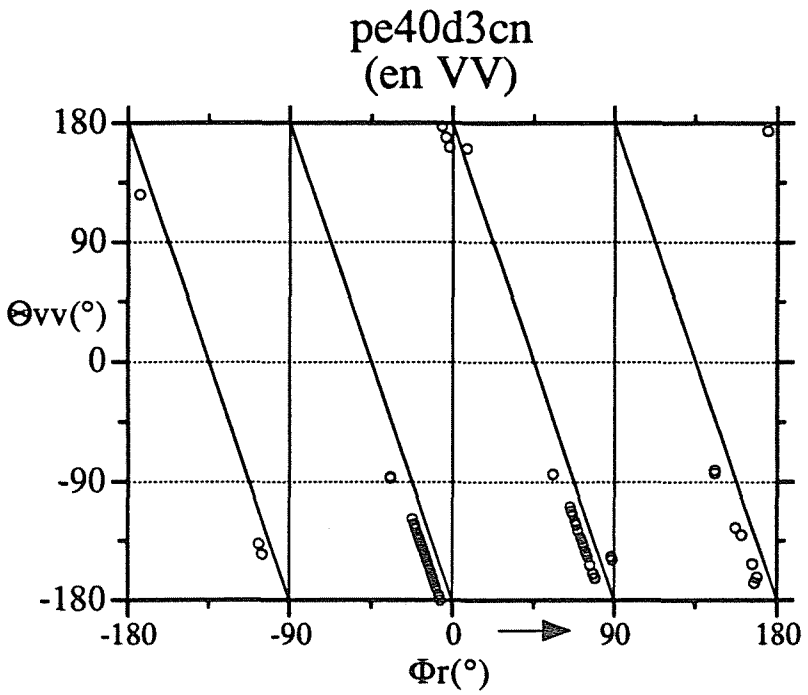

pe40d3cn
(on Plasma)
80
40
0
-40
-80
Z(cm)
-180
-90
0
90
180
Phir

Fig. 14


pe40d3cn
(en VV)
180
90
Θvv(°)
0
-90
-180
-180
-90
0
90
180
Φr(°)

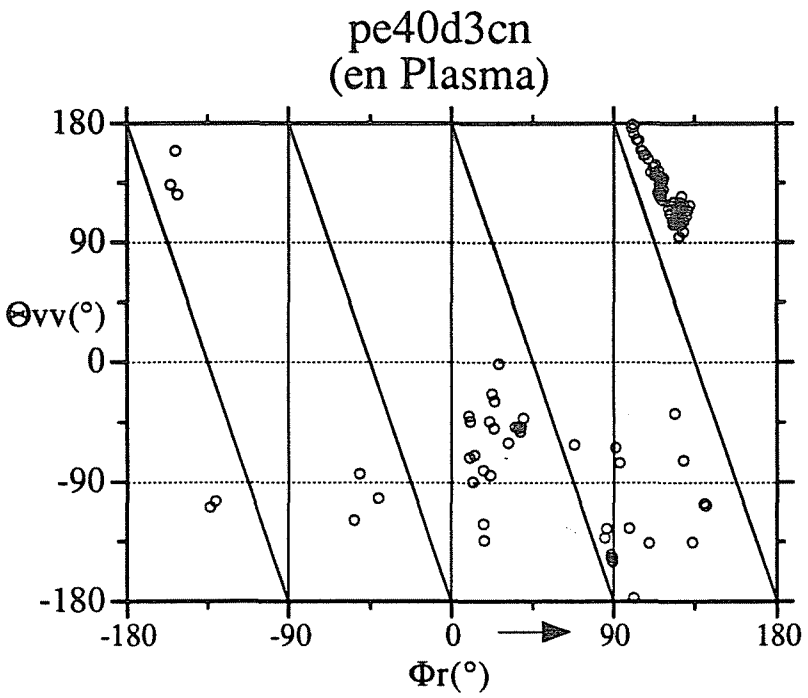

pe40d3cn
(en Plasma)
180
90
Θvv(°)
0
-90
-180
-180
-90
0
90
180
Φr(°)

Fig. 15

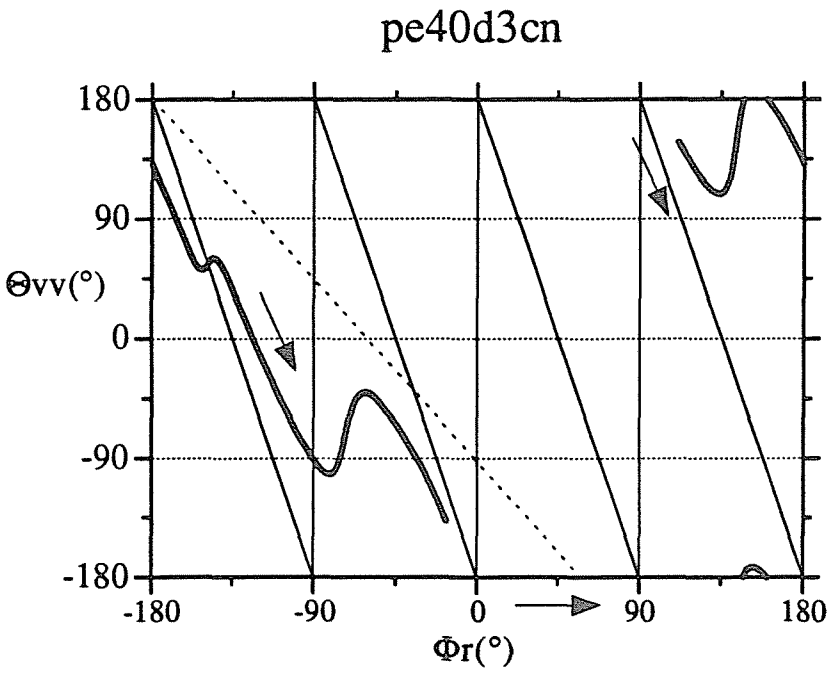


Fig. 16

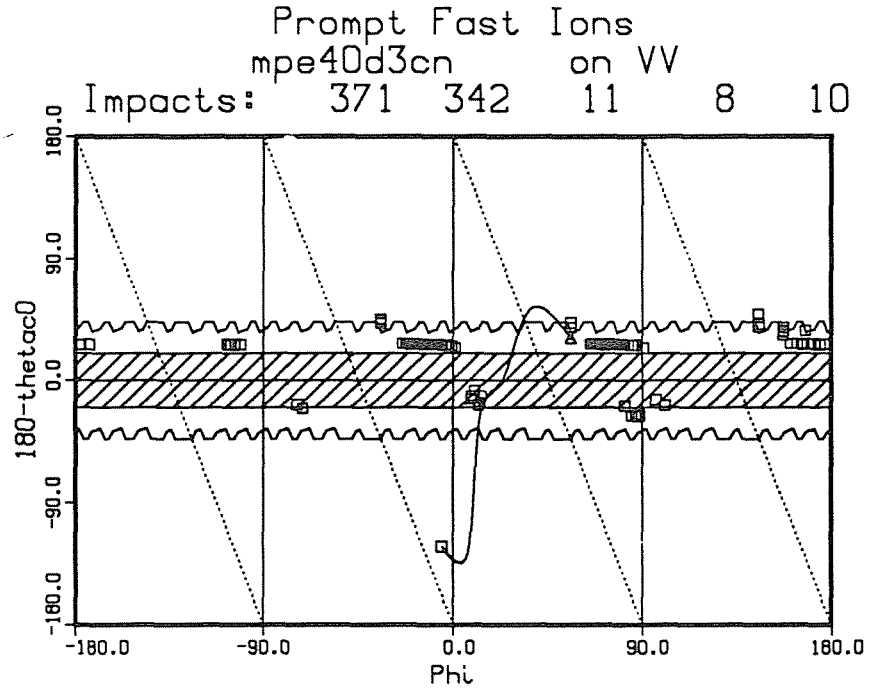

Prompt Fast Ions
mpe40d3cn on VV
Impacts: 371 342 11 8 10
180.0
90.0
0.0
-90.0
-180.0
180-thetac0
-180.0
-90.0
0.0
90.0
180.0
Phi

Fig. 17

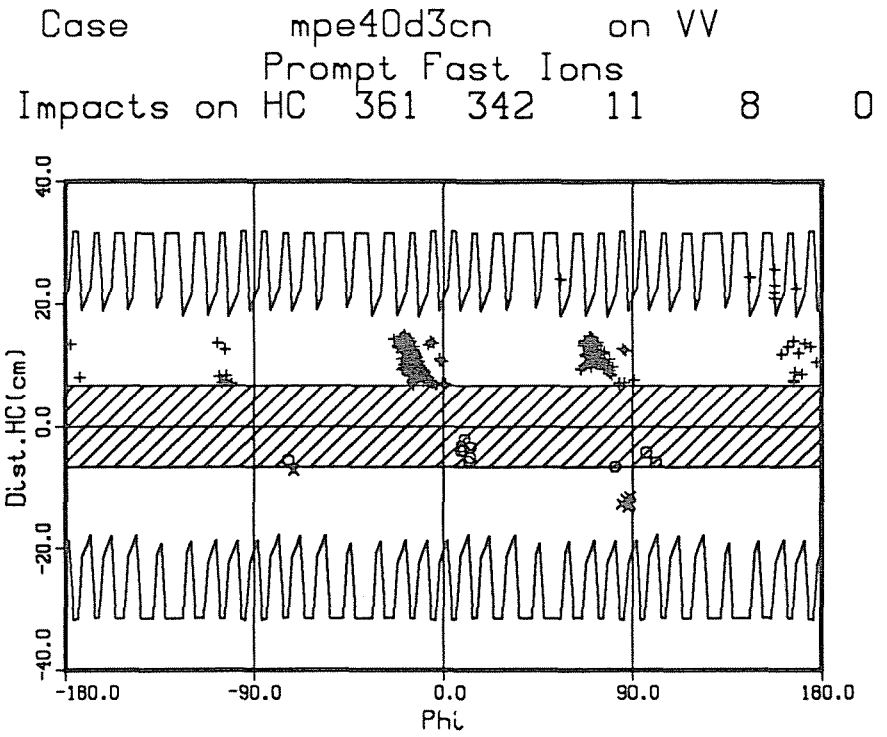

Case mpe40d3cn on VV
Prompt Fast Ions
Impacts on HC 361 342 11 8 0
40.0
20.0
0.0
-20.0
-40.0
Dist.HC(cm)
-180.0
-90.0
0.0
90.0
180.0
Phi

Fig. 18

Case mpe40d3cn on VV

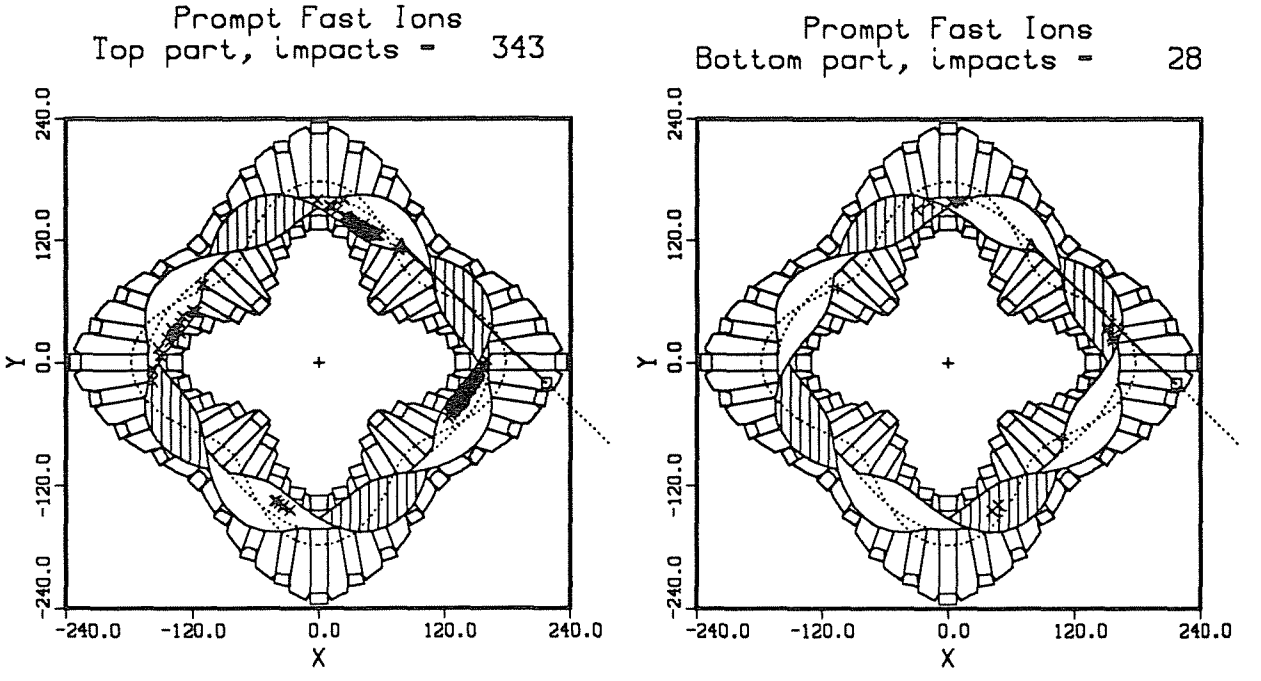


Fig. 19

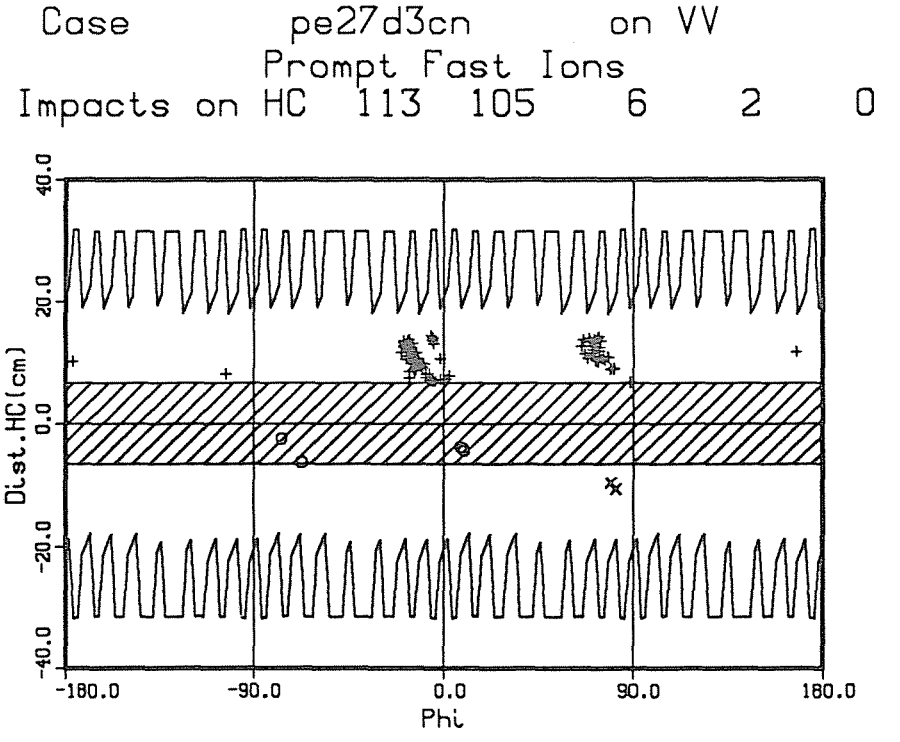

Case pe27d3cn on VV
Prompt Fast Ions
Impacts on HC 113 105 6 2 0
40.0
20.0
0.0
-20.0
-40.0
Dist.HC(cm)
-180.0
-90.0
0.0
90.0
180.0
Phi

Fig. 20

Case pe50d3cn on VV
Prompt Fast Ions
Impacts on HC 141 137 2 2 0

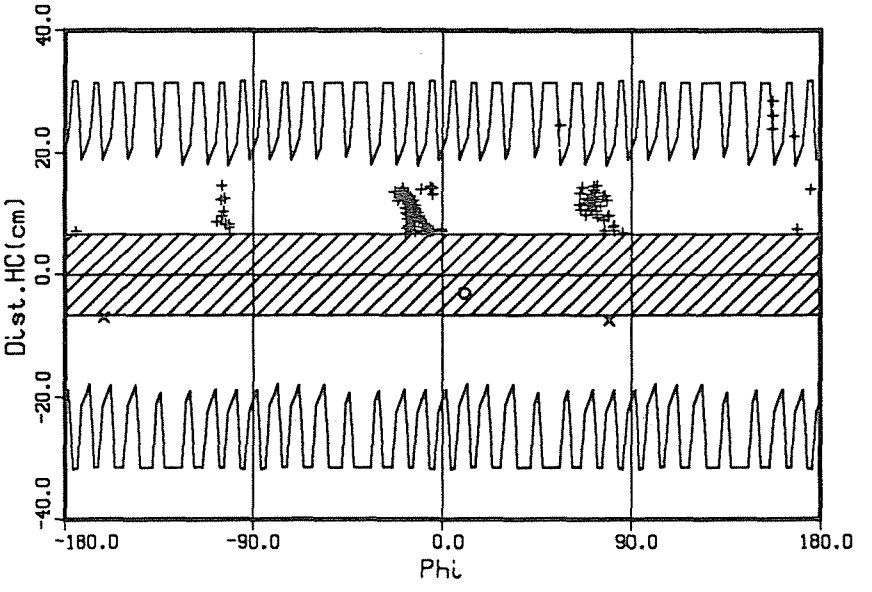


Fig. 21

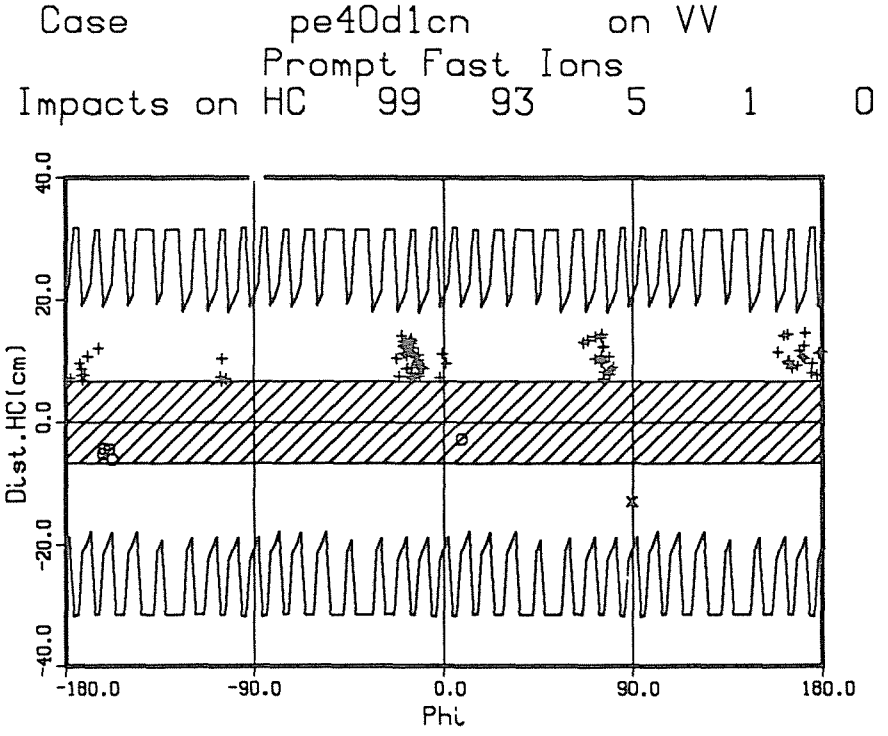

Case pe40d1cn on VV
Prompt Fast Ions
Impacts on HC 99 93 5 1 0
40.0
20.0
0.0
-20.0
-40.0
Dist.HC(cm)
-180.0
-90.0
0.0
90.0
180.0
Phi

Fig. 22

Case pe40d2cn on VV
Prompt Fast Ions
Impacts on HC 126 123 0 3 0

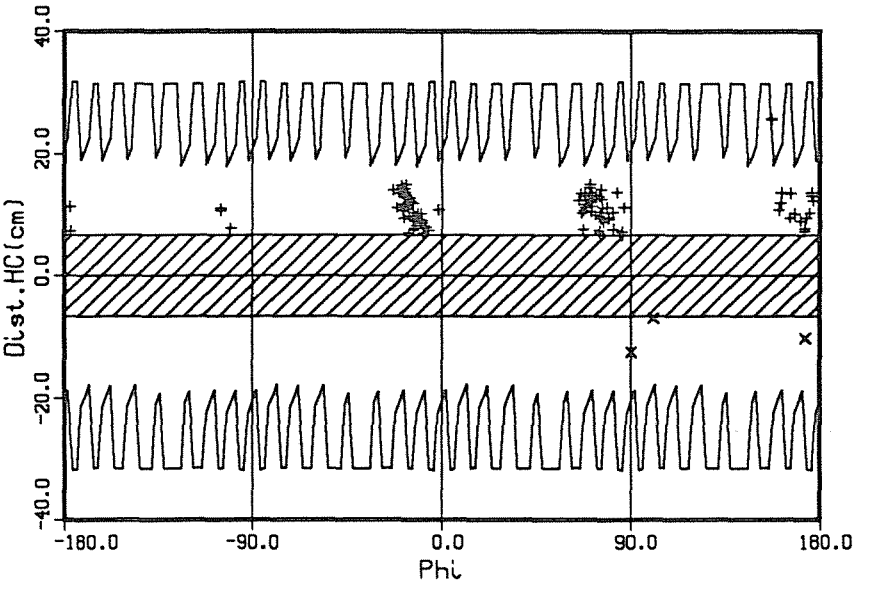
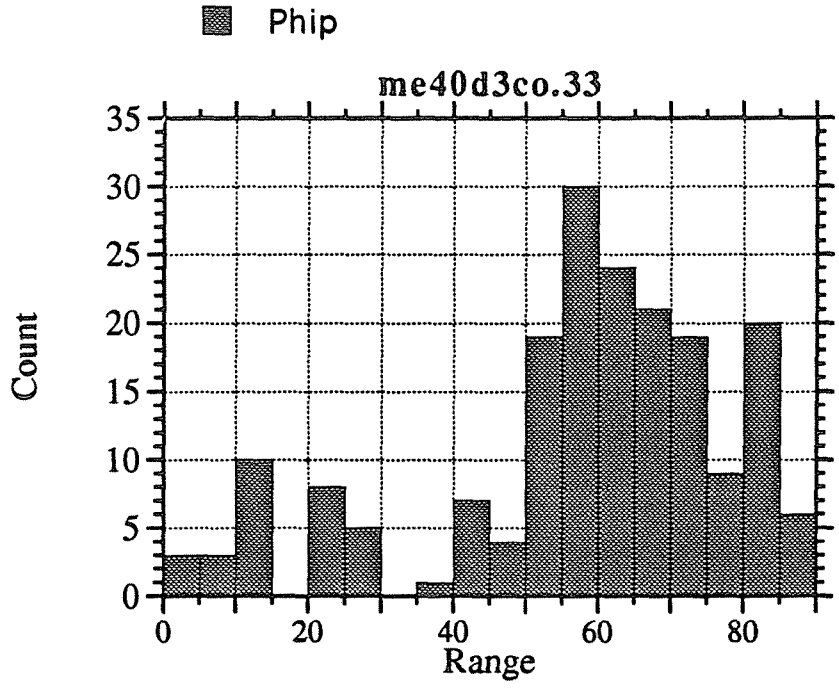


Fig. 23


Phip
me40d3co.33
Count
Range
0
5
10
15
20
25
30
35
0
20
40
60
80

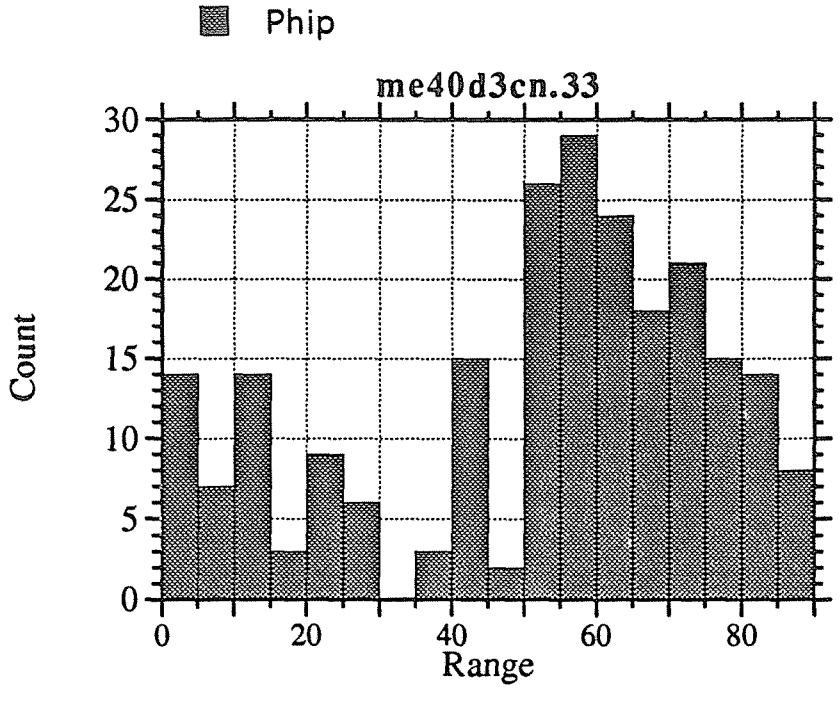
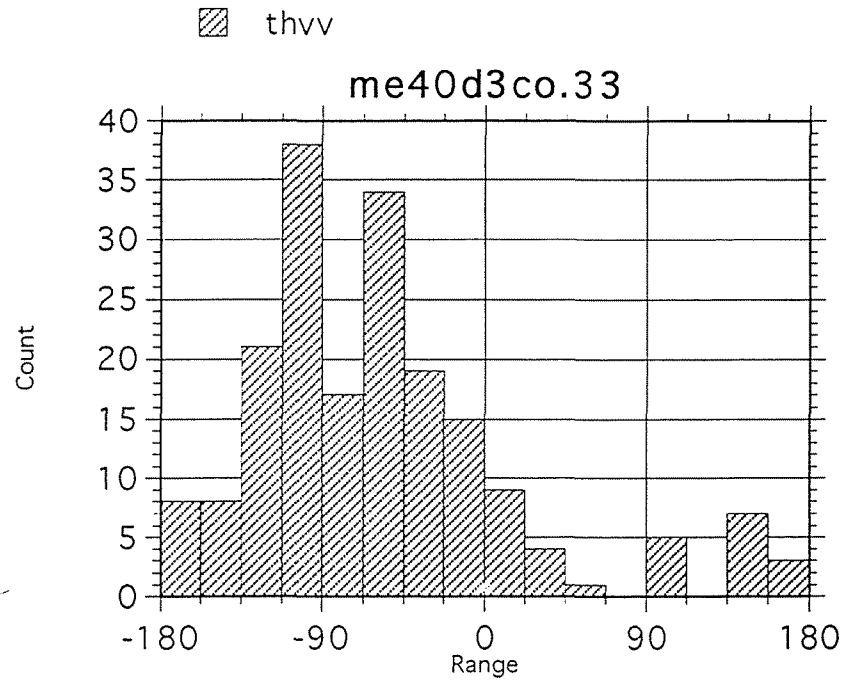

Phip
me40d3cn.33
Count
Range
0
5
10
15
20
25
30
0
20
40
60
80

Fig. 24


thvv
me40d3co.33
Count
40
35
30
25
20
15
10
5
0
-180
-90
0
90
180
Range

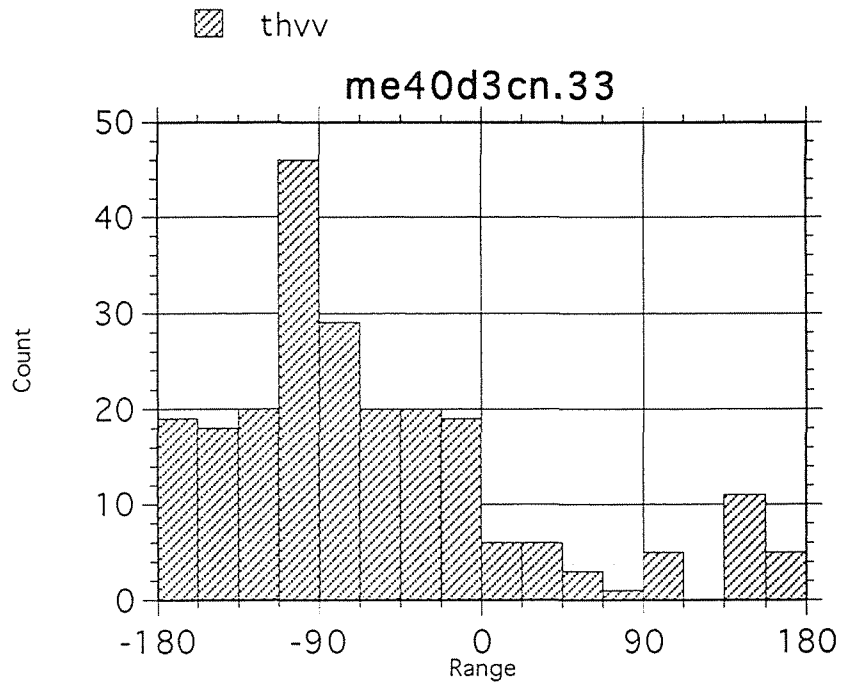

thvv
me40d3cn.33
Count
50
40
30
20
10
0
-180
-90
0
90
180
Range

Fig. 25

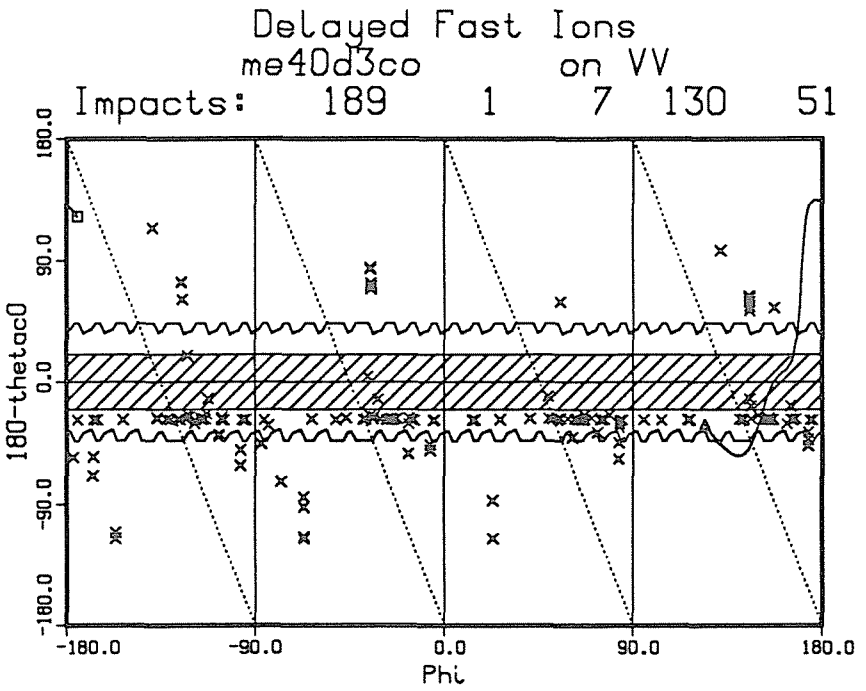

Delayed Fast Ions
me40d3co on VV
Impacts: 189 1 7 130 51
180-thetac0
180.0
90.0
0.0
-90.0
-180.0
-180.0
-90.0
0.0
90.0
180.0
Phi

Fig. 26

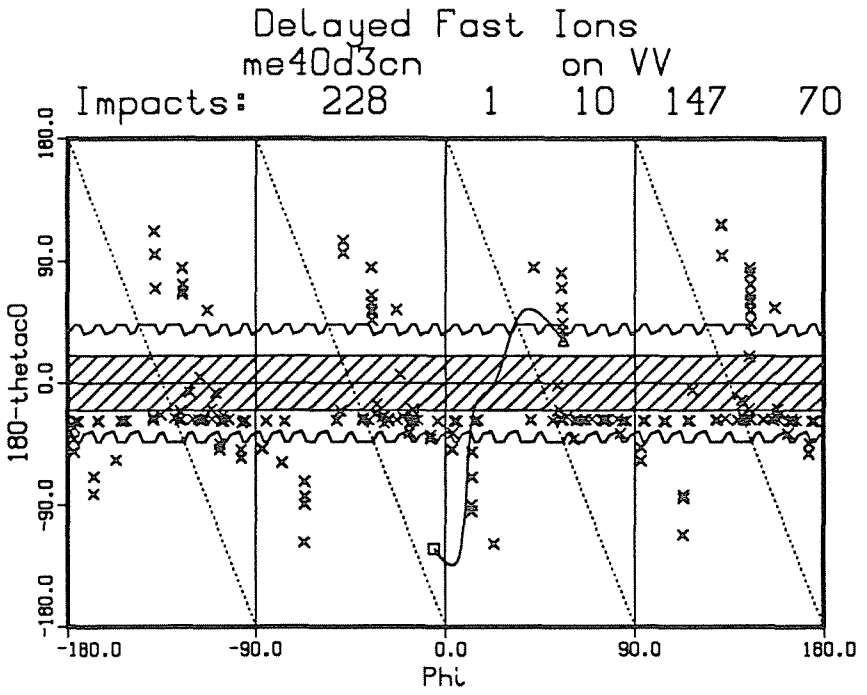
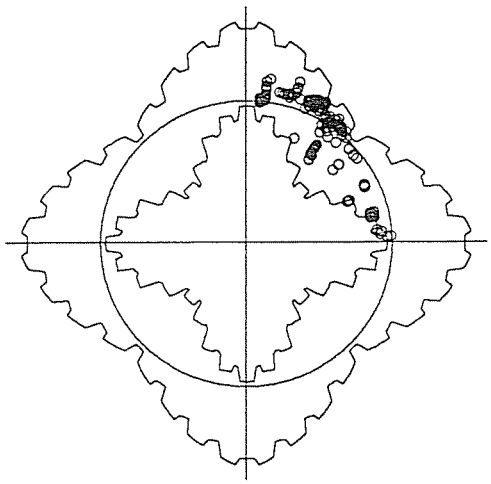

Delayed Fast Ions
me40d3cn on VV
Impacts: 228 1 10 147 70
180-thetac0
180.0
90.0
0.0
-90.0
-180.0
-180.0
-90.0
0.0
90.0
180.0
Phi

Fig. 27

me40d3co



me40d3cn

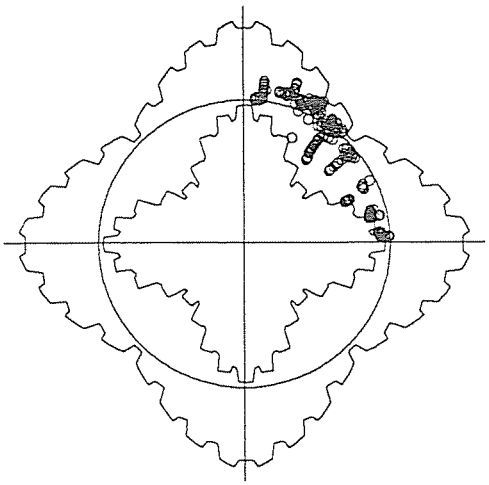
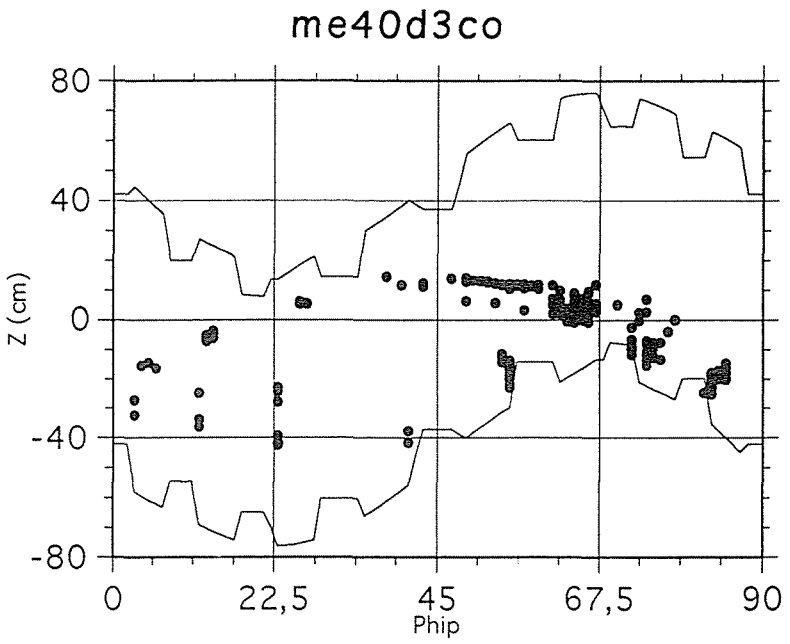


Fig. 28


me40d3co
80
40
0
-40
-80
Z (cm)
0
22,5
45
67,5
90
Phip

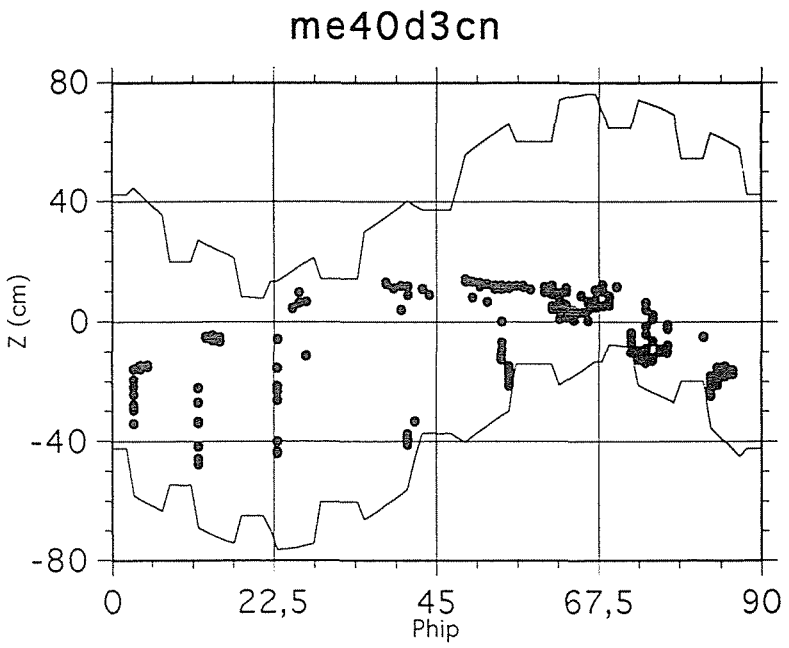

me40d3cn
80
40
0
-40
-80
Z (cm)
0
22,5
45
67,5
90
Phip

Fig. 29

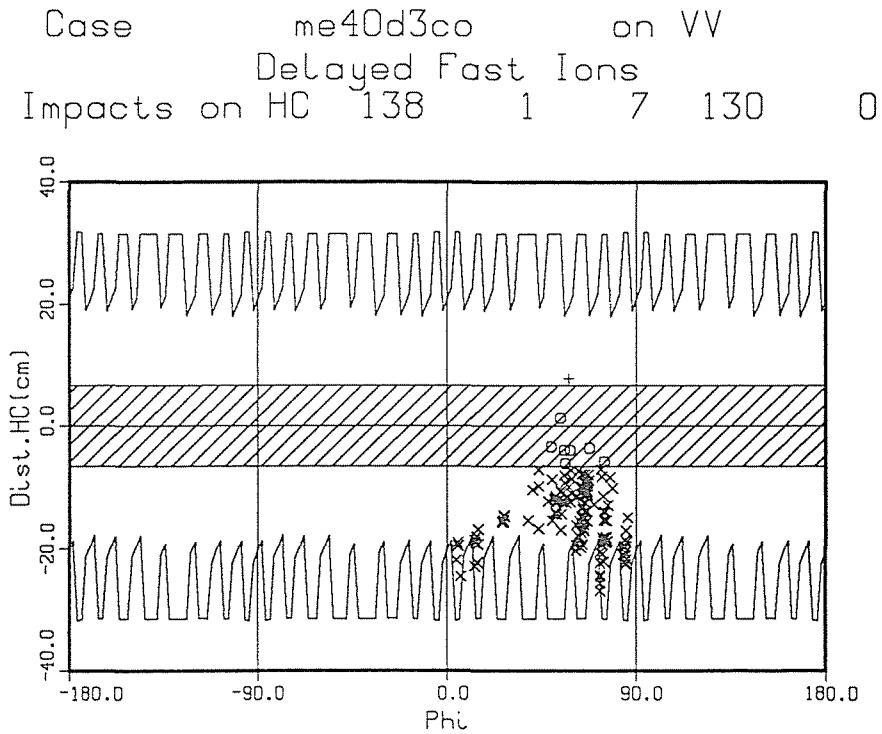

Case me40d3co on VV
Delayed Fast Ions
Impacts on HC 138 1 7 130 0
40.0
20.0
0.0
-20.0
-40.0
Dist.HC(cm)
-180.0
-90.0
0.0
90.0
180.0
Phi

Fig. 30

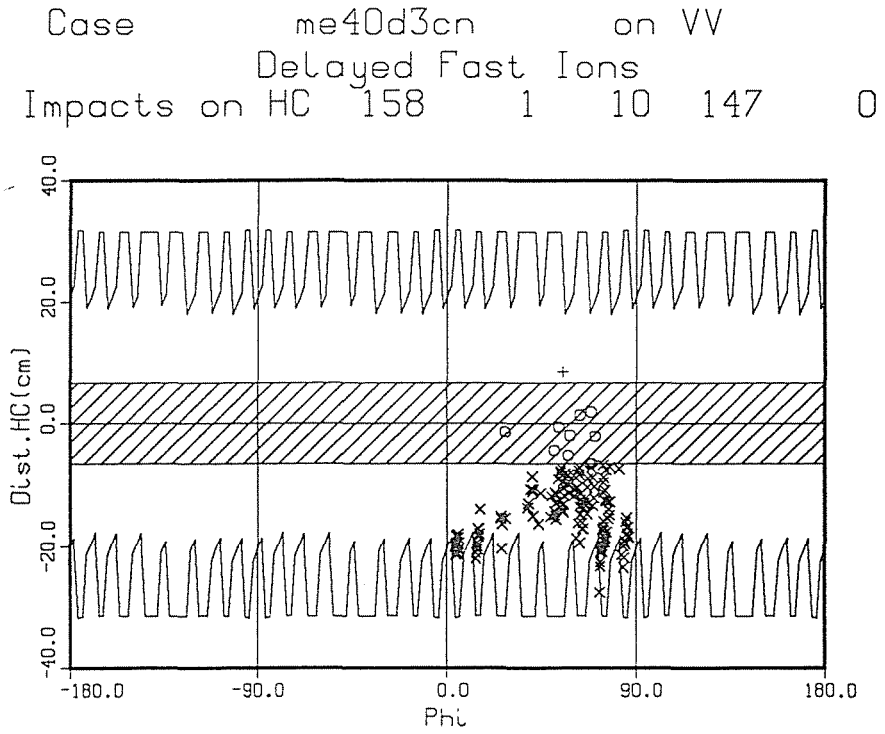
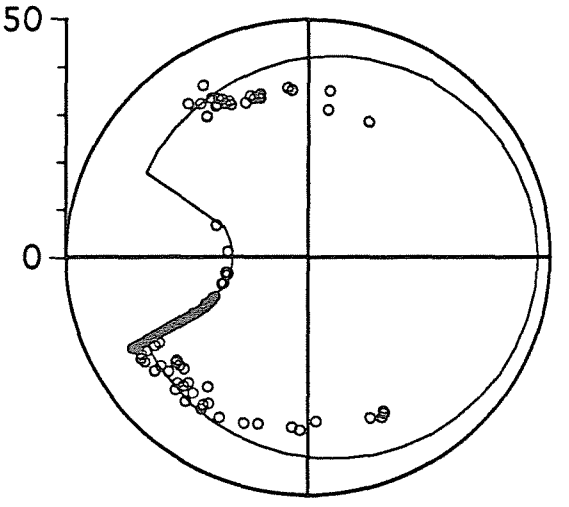

Case me40d3cn on VV
Delayed Fast Ions
Impacts on HC 158 1 10 147 0
40.0
20.0
0.0
-20.0
-40.0
Dist.HC(cm)
-180.0
-90.0
0.0
90.0
180.0
Phi

Fig. 31

me40d3co



me40d3cn

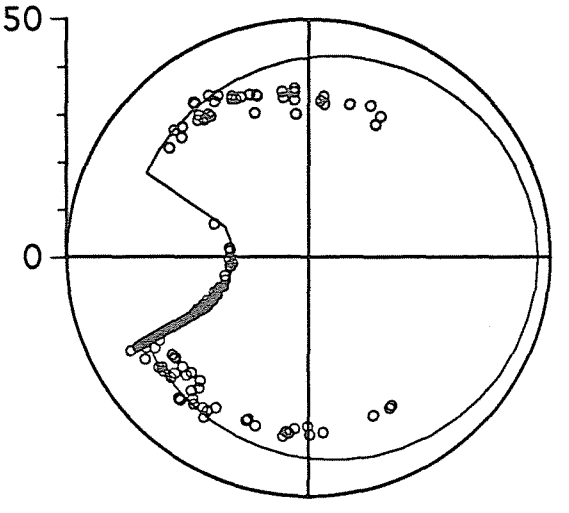


Fig. 32

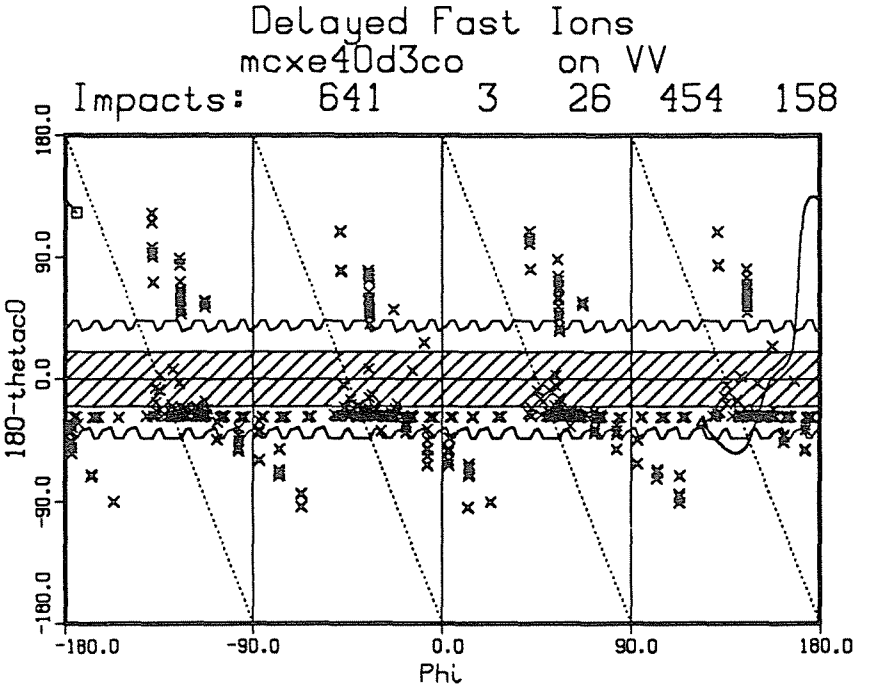

Delayed Fast Ions
mcxe40d3co on VV
Impacts: 641 3 26 454 158
180-thetac0
180.0
90.0
0.0
-90.0
-180.0
-180.0
-90.0
0.0
90.0
180.0
Phi

Fig. 33

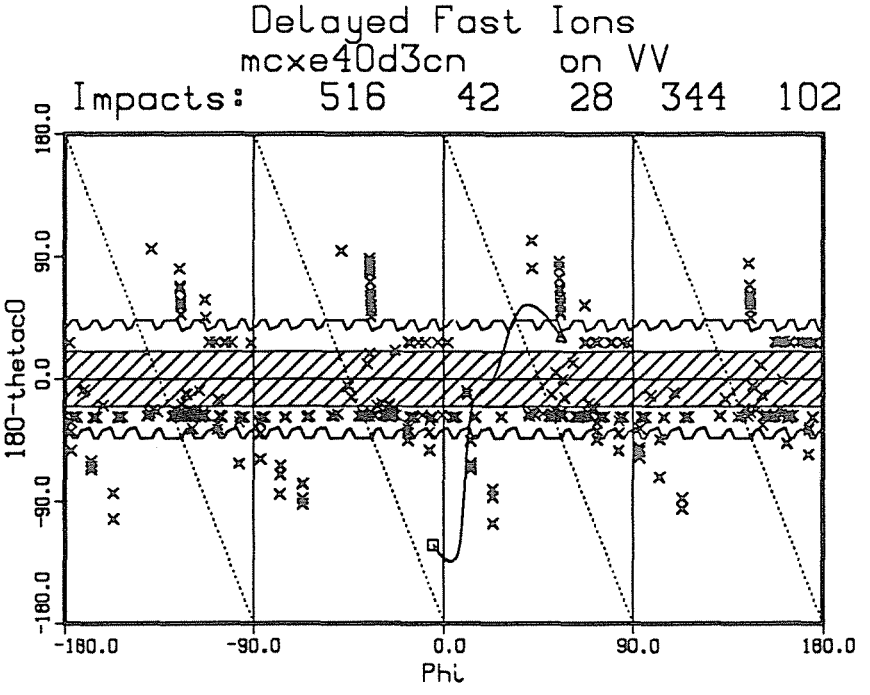
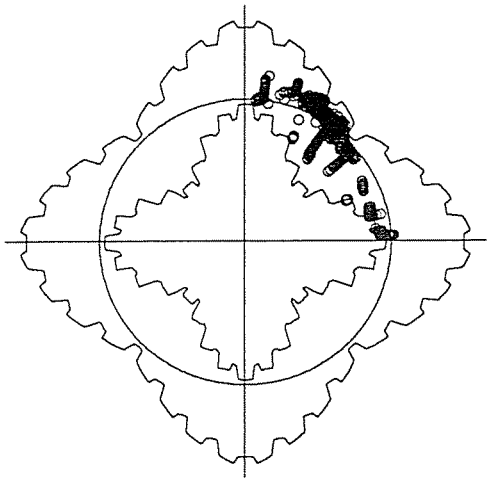

Delayed Fast Ions
mcxe40d3cn on VV
Impacts: 516 42 28 344 102
180-thetac0
180.0
90.0
0.0
-90.0
-180.0
-180.0
-90.0
0.0
90.0
180.0
Phi

Fig. 34

mcxe40d3co



mcxe40d3cn

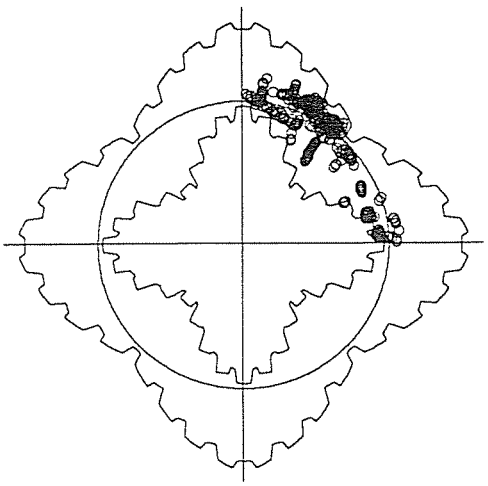
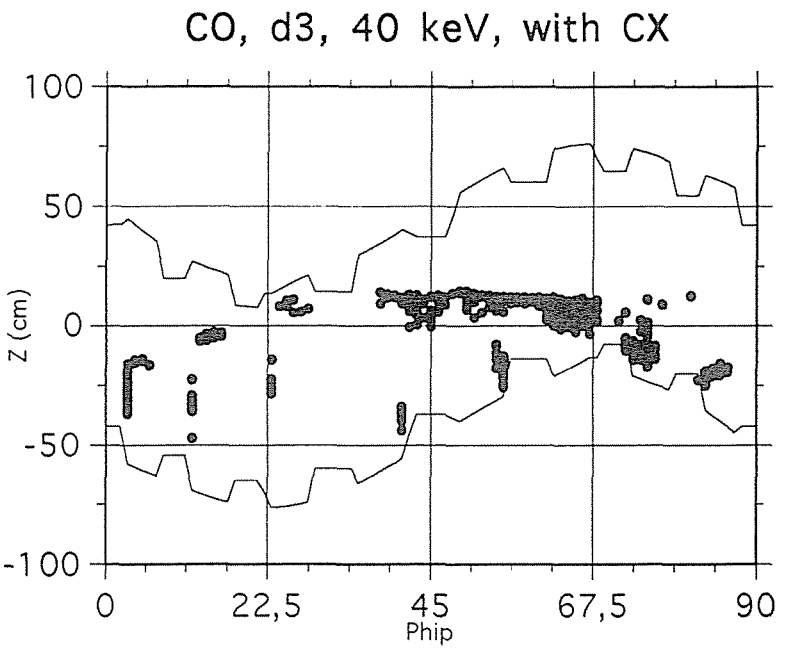


Fig. 35


CO, d3, 40 keV, with CX
100
50
0
-50
-100
Z (cm)
0
22,5
45
67,5
90
Phip

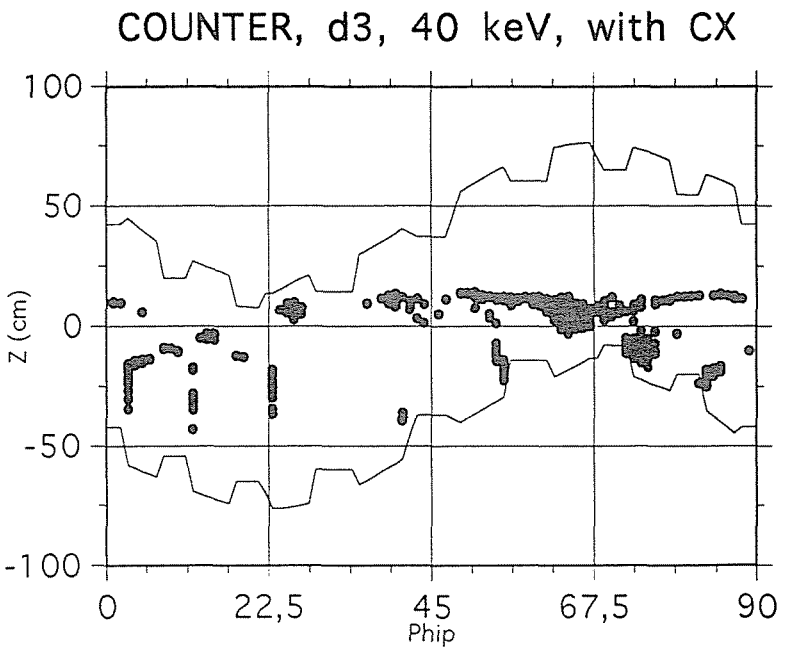
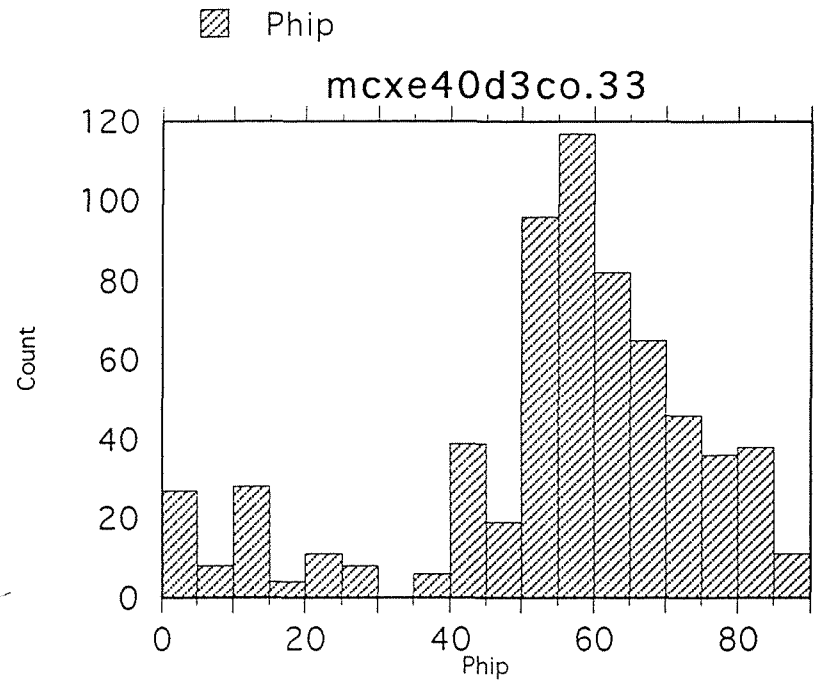

COUNTER, d3, 40 keV, with CX
100
50
0
-50
-100
Z (cm)
0
22,5
45
67,5
90
Phip

Fig. 36


Phip
mcxe40d3co.33
120
100
80
60
40
20
0
Count
0
20
40
60
80
Phip

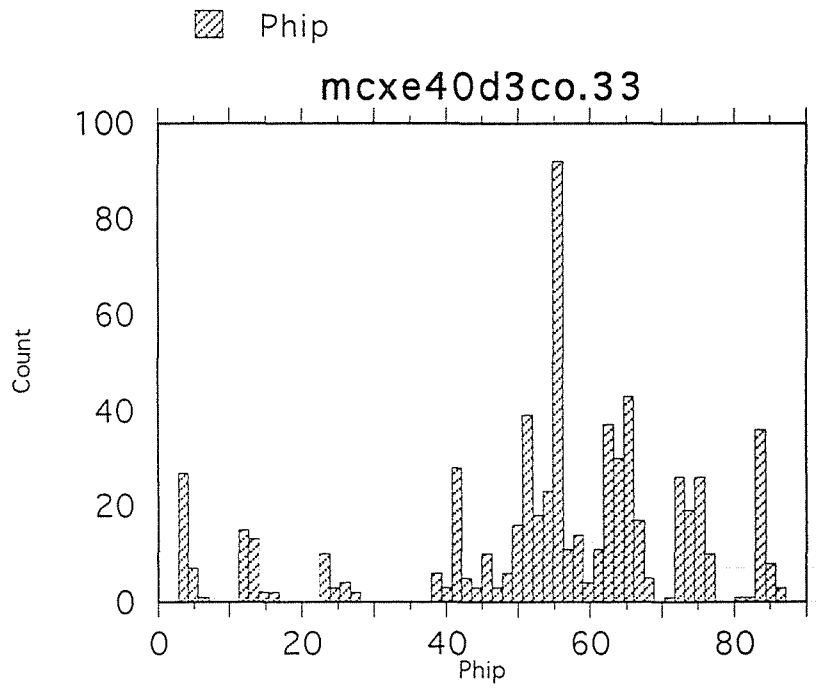
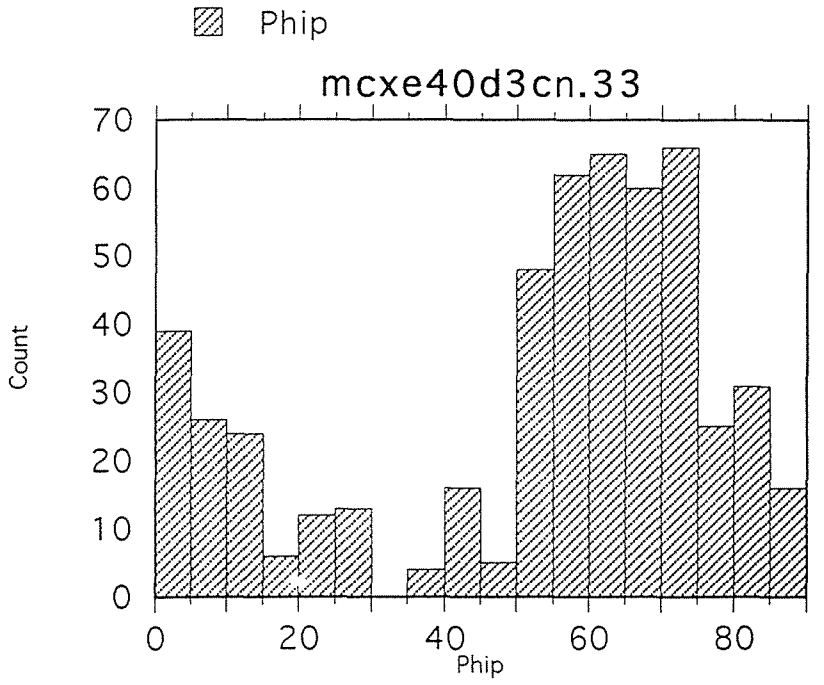

Phip
mcxe40d3co.33
100
80
60
40
20
0
Count
0
20
40
60
80
Phip

Fig. 37


Phip
mcxe40d3cn.33
Count
70
60
50
40
30
20
10
0
0
20
40
60
80
Phip

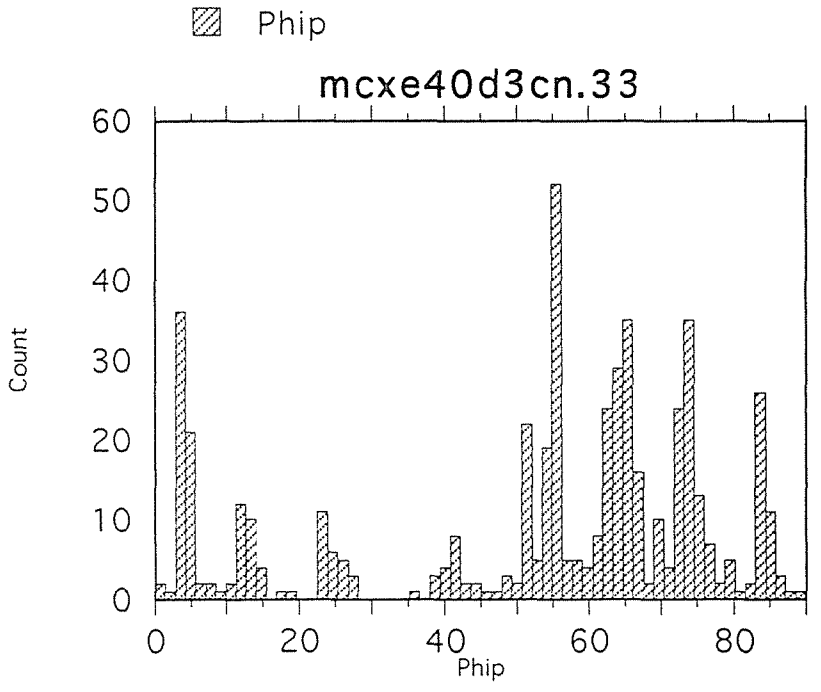
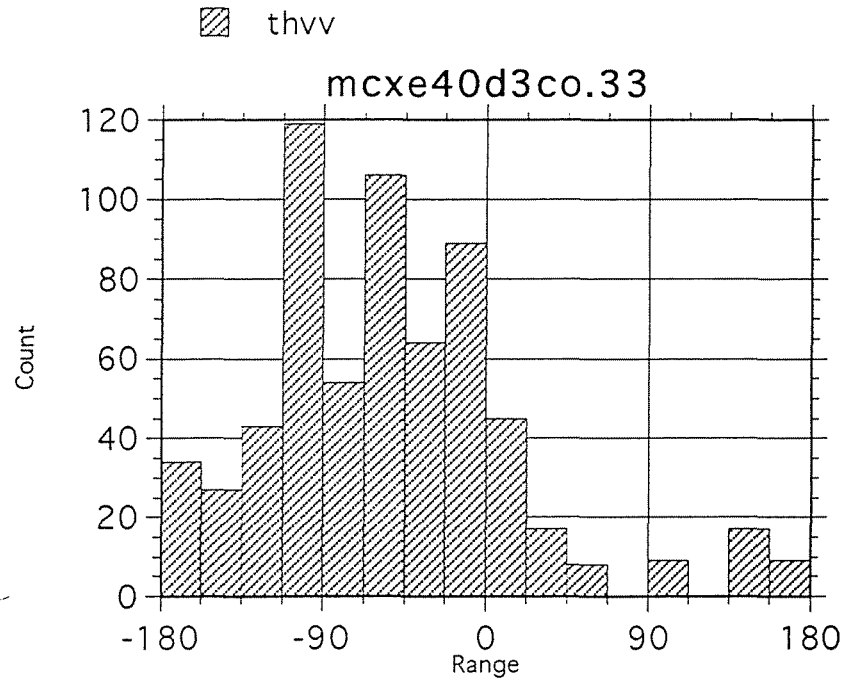

Phip
mcxe40d3cn.33
Count
60
50
40
30
20
10
0
0
20
40
60
80
Phip

Fig. 38


thvv
mcxe40d3co.33
120
100
80
60
40
20
0
Count
-180
-90
0
90
180
Range

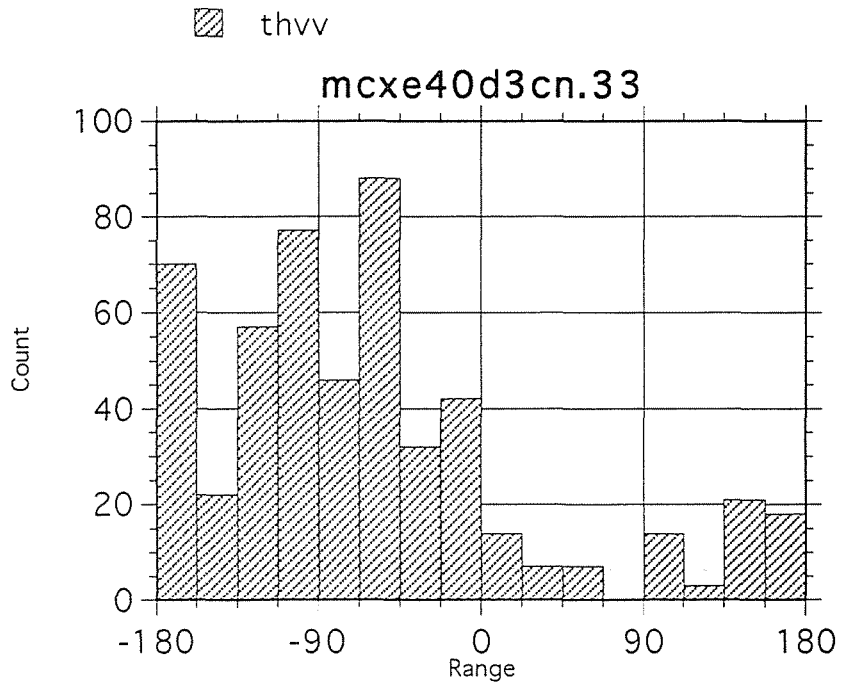

thvv
mcxe40d3cn.33
100
80
60
40
20
0
Count
-180
-90
0
90
180
Range

Fig. 39

Case mcxe40d3co on VV
Delayed Fast Ions
Impacts on HC 483 3 26 454 0

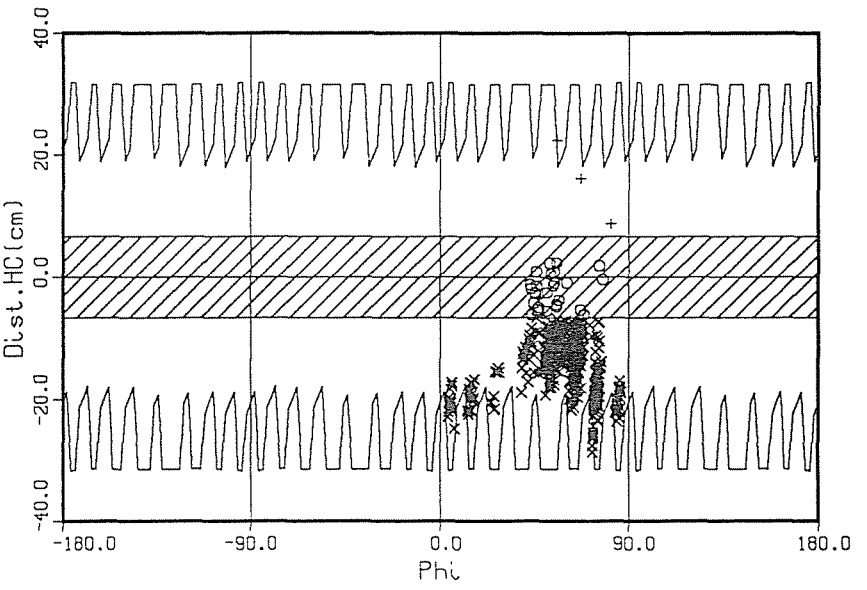


Fig. 40

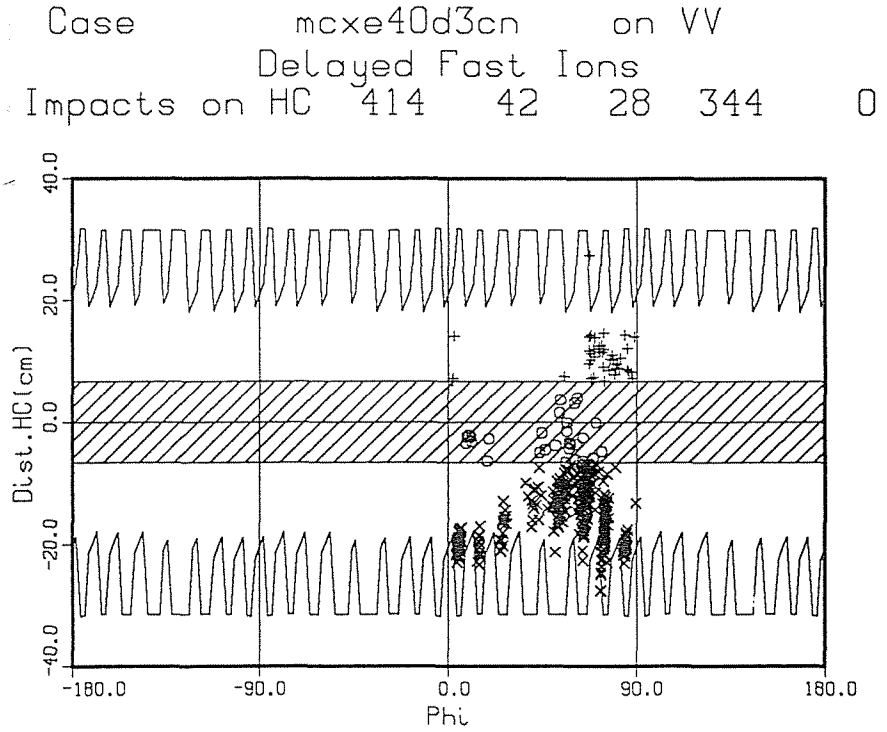
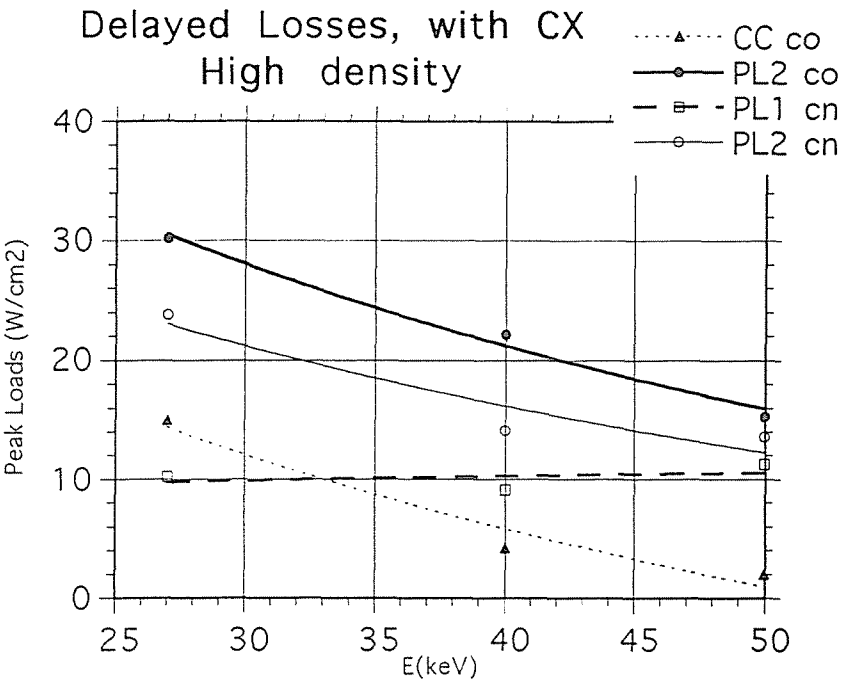

Case mcxe40d3cn on VV
Delayed Fast Ions
Impacts on HC 414 42 28 344 0
40.0
20.0
0.0
-20.0
-40.0
Dist.HC(cm)
-180.0
-90.0
0.0
90.0
180.0
Phi

Fig. 41


Delayed Losses, with CX
High density
CC co
PL2 co
PL1 cn
PL2 cn
Peak Loads (W/cm2)
E(keV)
0
10
20
30
40
25
30
35
40
45
50

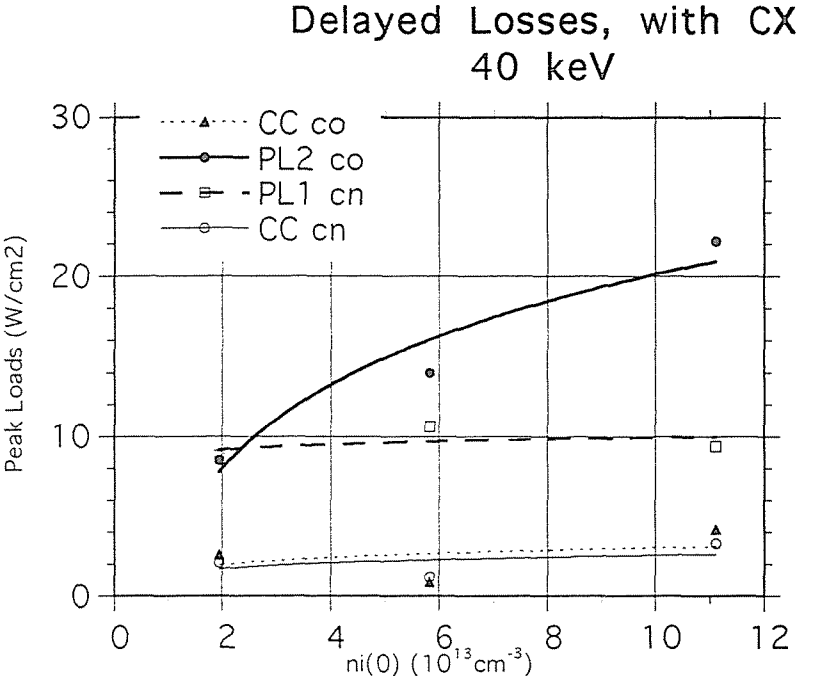
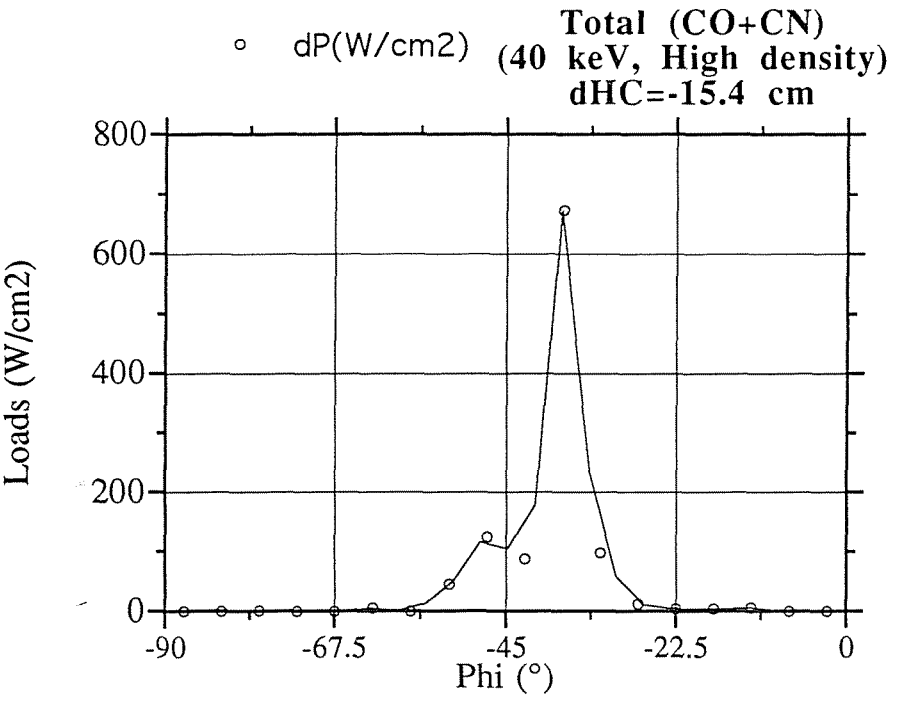

Delayed Losses, with CX
40 keV
CC co
PL2 co
PL1 cn
CC cn
Peak Loads (W/cm2)
ni(0) ($10^{13}cm^{-3}$)
0
10
20
30
0
2
4
6
8
10
12

Fig. 42


dP(W/cm2)
Total (CO+CN)
(40 keV, High density)
dHC=-15.4 cm
Loads (W/cm2)
800
600
400
200
0
-90
-67.5
-45
-22.5
0
Phi (°)

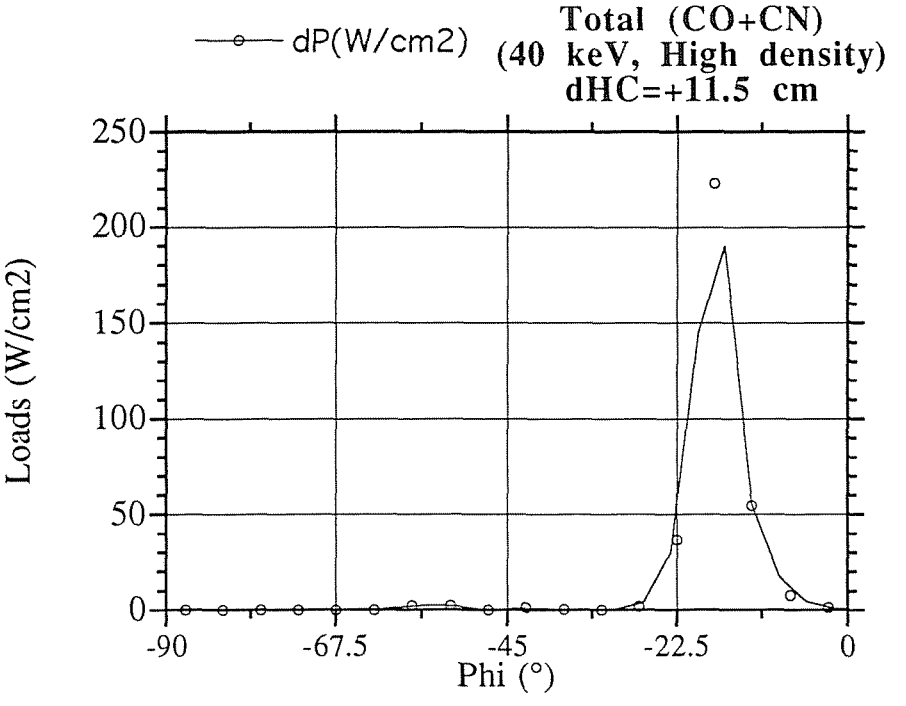
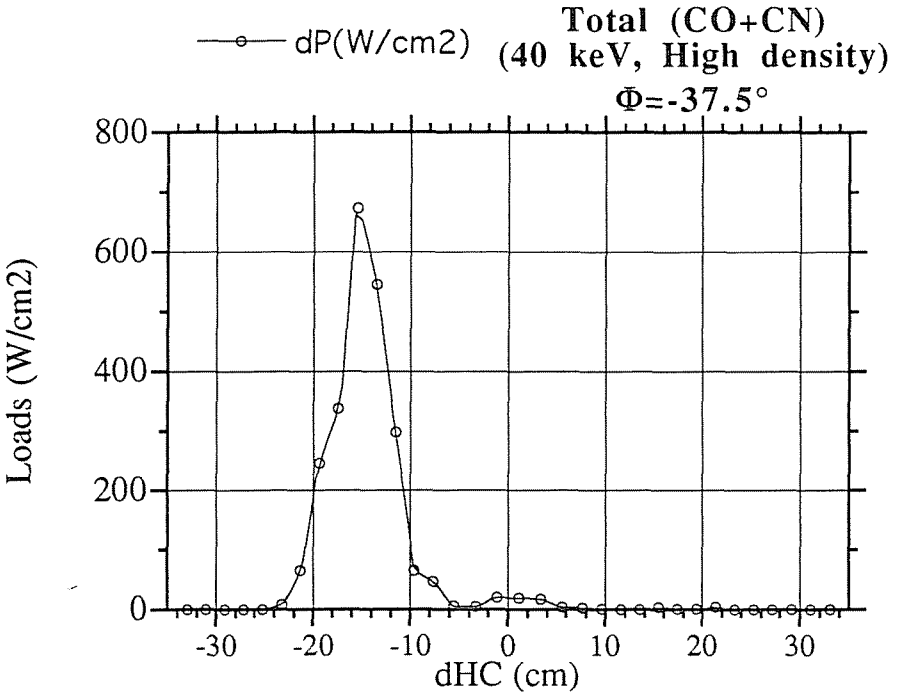

dP(W/cm2)
Total (CO+CN)
(40 keV, High density)
dHC=+11.5 cm
Loads (W/cm2)
250
200
150
100
50
0
-90
-67.5
-45
-22.5
0
Phi (°)

Fig. 43


dP(W/cm2)
Total (CO+CN)
(40 keV, High density)
Φ=-37.5°
Loads (W/cm2)
800
600
400
200
0
-30
-20
-10
0
10
20
30
dHC (cm)

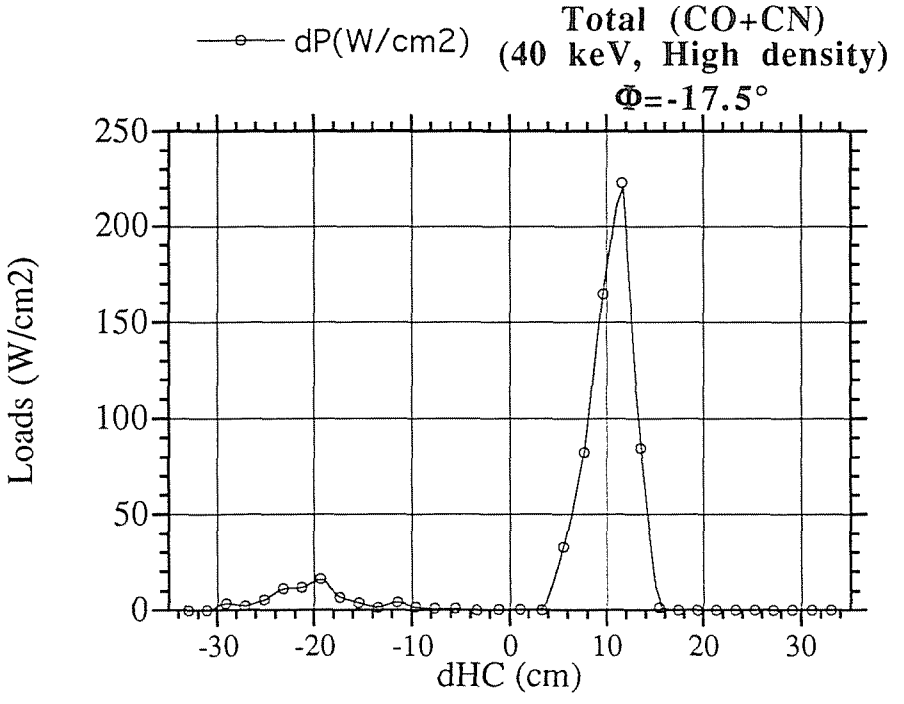

dP(W/cm2)
Total (CO+CN)
(40 keV, High density)
Φ=-17.5°
Loads (W/cm2)
250
200
150
100
50
0
-30
-20
-10
0
10
20
30
dHC (cm)

Fig. 44

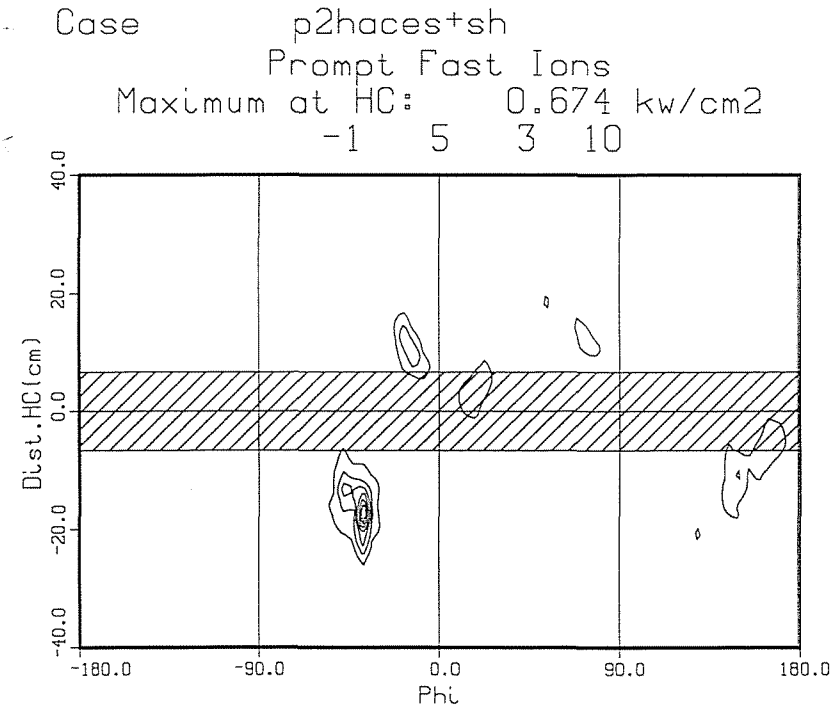
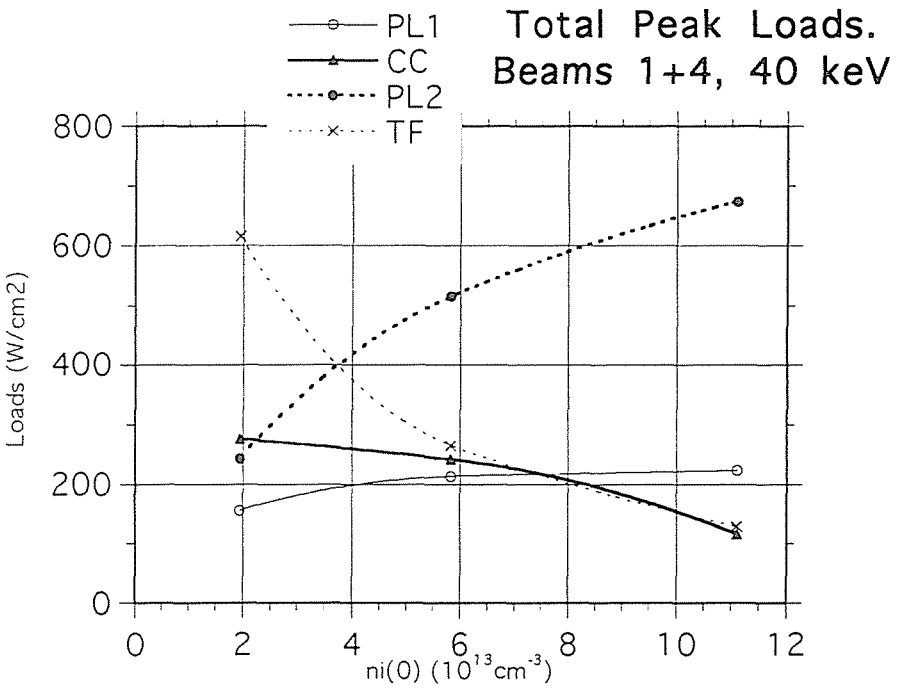

Case p2haces+sh
Prompt Fast Ions
Maximum at HC: 0.674 kw/cm2
-1 5 3 10
40.0
20.0
0.0
-20.0
-40.0
Dist.HC(cm)
-180.0
-90.0
0.0
90.0
180.0
Phi

Fig. 45


PL1
CC
PL2
TF
Total Peak Loads.
Beams 1+4, 40 keV
Loads (W/cm2)
800
600
400
200
0
0
2
4
6
8
10
12
ni(0) ($10^{13}cm^{-3}$)

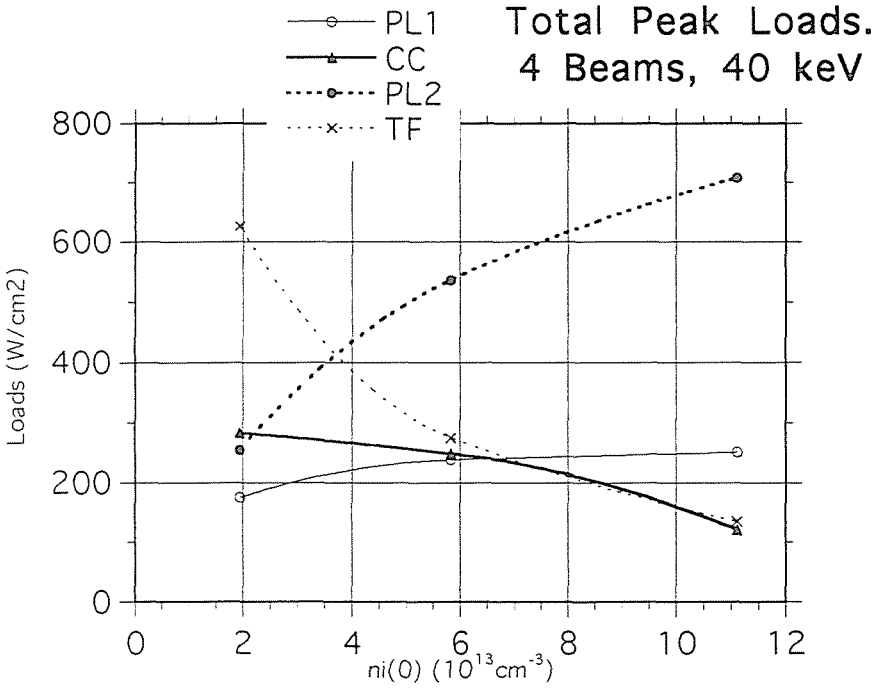

PL1
CC
PL2
TF
Total Peak Loads.
4 Beams, 40 keV
Loads (W/cm2)
800
600
400
200
0
0
2
4
6
8
10
12
ni(0) ($10^{13}cm^{-3}$)

Fig. 46