Informes Técnicos Ciemat

761

Septiembre 1995

Comportamiento de las pérdidas instantáneas y retardadas en la inyección de neutros del TJ-II

J. Guasp,
M. Liniers

Asociación EURATOM / CIEMAT para Fusión - 26

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
PLASMA, TOKAMAK DEVICES, INCLINATION, SCATTERING, BEAM INJECTION, PARTICLE LOSSES, ENERGY LOSSES, HELIAC STELLARATORS.

"Comportamiento de las pérdidas instantáneas y retardadas en la inyección de neutros del TJ-II"

Guasp, J.; Liniers, M.
52 pp. 33 figs. 4 refs.

Resumen

Se ha estudiado el comportamiento de las pérdidas de iones rápidos directas y retardadas en función de la energía y de la densidad comprobándose el incremento de las primeras con la energía, la fuerte diferencia entre CO y COUNTER y que están producidas exclusivamente por órbitas pasantes que pierden confinamiento en unas pocas decenas de μseg. También se ha observado la influencia de los perfiles de nacimiento que hace que tiendan a incrementarse con la densidad.

Por su parte las pérdidas retardadas están ampliamente separadas en el tiempo de las anteriores, son producidas por partículas que han sufrido pitch angle scattering y, en su inmensa mayoría, corresponden a órbitas atrapadas. Son mucho menos importantes que las instantáneas (alrededor de 1/3) y para ellas se observa un ligero decrecimiento con la energía. En ausencia de CX decrecen con la densidad (un efecto de perfil inicial) tendencia que se invierte cuando se incluye el CX.

La absorción posee poca sensibilidad a la energía, con bajos valores para baja densidad como consecuencia de las fuertes pérdidas por CX y shine through, aunque con rápida recuperación al aumentar la densidad.

"Behaviour of direct and delayed fast ion losses during NBI on TJ-II"

Guasp, J.; Liniers, M.
52 pp. 33 figs. 4 refs.

Abstract

The dependence with density and beam energy of the different kind of fast ion losses, direct and delayed, during tangential balanced NBI injection in TJ-II helical axis stellerator has been analysed. Direct losses increase with energy and a strong difference between the two injection directions appears, are produced by passing particles that loss confinement in a few μsec and the influence of birth profiles produces an increase with density.

Delayed losses are very well separated in time from direct ones, are produced by particles experimenting pitch angle scattering and, most o them, correspond to trapped particles. Are much less important than the direct ones (about 1/3), decrease slowly with energy and, with CX, increase with density (an effect of initial profile).

The absorption is rather independent of energy with low values at low density in reason of high shine through and CX losses, but recovers quickly with the density increase.

Comportamiento de las pérdidas instantáneas y retardadas en la inyección de neutros del TJ-II.

J. Guasp, M. Liniers

Asociación EURATOM / CIEMAT para Fusión

Mayo 1994

Indice:

1. Introducción
2. Perfiles y posiciones iniciales
3. Dependencia de las pérdidas con la energía y la densidad.
4. Tiempos característicos.
5. Tipo de atrapamiento.
6. Comportamiento de la absorción
7. Resultados en términos de Potencia.
8. Conclusiones.

Referencias

Lista de tablas y ficheros.

Lista de figuras.

1. INTRODUCCION.

Como ya fué demostrado previamente [1],[2] las pérdidas de iones rápidos en la inyección tangencial de neutros en el TJ-II consisten en dos componentes bien distintas. La primera componente corresponde a las pérdidas instantáneas o directas (*prompt*) que en cuestión de unas decenas de μseg. van a parar a la cámara de vacio. La segunda componente corresponde a las pérdidas retardadas (*delayed*) es decir aquellas partículas pasantes confinadas que tras sufrir *pitch angle scattering* pueden convertirse en partículas atrapadas y escapar del plasma. Ambas componentes poseen comportamientos bien distintos con la densidad y la energía, comportamientos que son el objeto del presente estudio.

Para ello se ha utilizado el código Fafner-II [3],[4] que utiliza coordenadas de flujo (Boozer), por tanto sin *reentering*, es más rápido y utiliza mejor estadística que Fafner-I (el código utilizado hasta ahora). Esta carencia de buena estadística impidió sacar conclusiones fiables sobre el comportamiento de estas pérdidas en estudios anteriores [1].

En este estudio se calculan separadamente los casos CO y COUNTER siguiendo, para cada uno de ellos, 200 partículas, que de hecho se convierten en unas 217 (con distinto peso) cuando el código intenta acercar lo más posible la distribución radial inicial de potencia de estas 200 partículas a la de ionización de los neutros del haz (que utiliza unas 7500). Además, para tener aún mejor estadística para las pérdidas instantáneas, que son siempre las predominantes, se efectua en cada uno de los casos un segundo cálculo con el código, esta vez utilizando 1950 partículas, pero limitando el tiempo máximo de las órbitas a 75 μseg., lo que es ampiamente suficiente. Este segundo cálculo es el que determina la porción definitiva de pérdidas debidas a las fugas instantáneas, la de las retardadas se mantiene igual a la del primer cálculo.

Estos valores deben compararse con las 100 partículas, con superposición de casos CO y COUNTER (caso *Balanced*), que se utilizaban con Fafner-I en estudios anteriores.

Con el fin de tener una idea de las dependencias con energías y densidades se han efectuado separadamente dos tipos de recorridos:

a) Un recorrido en energía para densidad "alta" (d3, $n_i(0) = 11.1 \times 10^{13}$ cm^{-3}) con 7 puntos (27, 35, 40, 42.5, 45., 47.5 y 50 keV).

b) Un recorrido en densidad para una energía fija de 40 keV con 4 puntos, correspondientes a las siguientes densidades ionicas centrales (en unidades de 10^{13} cm^{-3})

d1 = 1.94, d2 = 5.83, d3 = 11.1, d4 = 15.0

Como ya se ha indicado los casos CO y COUNTER se calculan separadamente, tanto con cambio de carga (CX) como sin él. En todos los casos los parámetros de inyección corresponden a los del "Textor-3" acortado, es decir fuente a 4.60 m, divergencia del haz 0.9° y focos adaptados al TJ-II (foco horizontal en la ventana, foco vertical en el cruce con el HC),

En todos los cálculos en que se tiene en cuanta el CX, el valor para la densidad del fondo de los 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.

2. PERFILES Y POSICIONES INICIALES.

Como estos perfiles iniciales influyen en el comportamiento de todas las magnitudes, conviene discutirlos aqui brevemente.

La Fig.1 muestra los perfiles de nacimiento en tres de los casos (estos perfiles son prácticamente idénticos para CO y COUNTER), se observa que para baja densidad a 40 keV (40d1) aparece menos potencia en forma de iones rápidos (hay más pérdidas por *shine through*) y que el perfil es más picudo en el centro y menos ancho en los bordes que para mayores densidades. Mientras para energía más alta (50d3) el perfil de nacimiento en la parte exterior es algo más estrecho que para 40 keV.

Estas tendencias quedan patentes en la Fig.2 que muestra un histograma de los redios del plasma (s: radio normalizado a 1 en el borde) en donde nacen los iones separando ya las partículas según su destino posterior (pérdidas instantáneas, retardadas o partículas termalizadas) así como en la Tabla I. Es obvio que las pérdidas instantáneas se encuentran en la periferia del plasma (en conformidad con [2] §4), que lo contrario ocurre con las particulas termalizadas y que la variación del radio medio de nacimiento confirma la tendencia de la Fig. 1.

TABLA I. VALORES MEDIOS DE NACIMIENTO

Caso	s medio	ϕ medio	Pitch medio
e40d1co	0.44	-19.9°	+0.94
e40d3co	0.51	-11.8°	+0.92
e50d3co	0.49	-12.6°	+0.92

Tan importantes como los radios medios son las posiciones de nacimiento. Estas pueden percibirse en la Fig.3 que muestra el valor del parámetro de pitch γ (coseno del ángulo entre la velocidad de la partícula y el campo magnético) y el ángulo toroidal ϕ (en el espacio real) con que nace cada partícula (tanto CO como COUNTER), se observa que el rango de ángulos de nacimiento es máximo para e40d1, menor para e40d3. Esto también queda de manifiesto en la Fig. 4 que muestra el histograma de esos ángulos de nacimiento asi como en la Tabla I (solo el caso CO aparece en ella, el COUNTER es prácticamente idéntico cambiando el signo de ϕ y del Pitch). Todos los iones nacen con pitch bastante superior al crítico, por consiguiente inicialmente sus orbitas son siempre pasantes.

De esa tabla se deduce que para baja densidad los neutros recorren más camino en el plasma antes de ionizarse y los iones nacen más centrados y con direcciones más tangenciales (Pitch más alto). Al aumentar la densidad los iones nacen antes, algo más hacia la periferia y algo peor alineados. Por el contrario al crecer la energía penetran un poco más aunque el efecto mayor es el de la densidad.

En cuanto a la distribución inicial de partículas que sufren pérdidas rápidas la concentración en la periferia pone de manifiesto las "coronas de pérdidas" mencionadas en [2] §4. Esto es patente en la proyección poloidal (en coordenadas de flujo) de la Fig. 5, para el caso CO y COUNTER, de 1950 partículas cuyos puntos de nacimiento aparecen superpuestos a la corona de pérdidas correspondiente al angulo, energía y pitch medios (la tenue nube de puntos de la periferia), y también para otras densidades y energías en la Fig.6.

3. COMPORTAMIENTO DE LAS PÉRDIDAS.

3.1 Pérdidas instantáneas.

Las pérdidas instantáneas, como tienen lugar en tiempos brevísimos (decenas de μseg., cf. §4, muy inferiores a los de colisión) son prácticamente las mismas con y sin cambio de carga, crecen claramente con la energía y siempre son notablemente mayores las CO que las COUNTER (en conformidad con [2] §4) como puede verse en las Fig. 7a (sin CX) y 8a (con CX).

Aunque estas pérdidas sean, en si, insensibles al plasma, si que dependen indirectamente de él a través de las diferencias en los perfiles iniciales. Esto hace que, en suma, exista una dependencia con la densidad (Figs. 7b y 8b) que resulta ser ligeramente creciente. Este crecimiento es un efecto del perfil inicial, se debe al aumento de partículas nacidas en la periferia del plasma cuando aumenta la densidad (cf. §2), el aumento es más visible en las CO que son más sensibles al acercamiento al borde que las COUNTER (ya que sus coronas de pérdidas son más anchas).

3.2 Pérdidas retardadas.

Las pérdidas retardadas decrecen levemente con la energía, tanto sin CX (Fig. 7a) como con él (Fig. 8a o, en escala ampliada, Fig. 9b) y son muy parecidas las CO y las COUNTER como corresponde a estar constituidas predominantemente por partículas atrapadas (cf. § 5) que son insensibles al signo inicial del pitch. Este decrecimiento es consecuencia de la disminucion de las secciones eficaces de colisión con la energía y no es un efecto de perfil como ha sido comprobado directamente repitiendo los cálculos a diversas energías manteniendo un perfil inicial fijo ficticio (distribución uniforme en superficie).

Con respecto a la dependencia con la densidad, en ausencia de CX, estas pérdidas decrecen. Esto se debe a que a mayor densidad hay menos iones que nacen en las partes centrales del plasma (la contrapartida del efecto que hace crecer las pérdidas instantáneas con la densidad). También aqui se mantienen muy parecidas las pérdidas del caso CO y del COUNTER, las diferencias deben ser atribuidas a flucuaciones estadísticas, que se notan más con estos valores bajos.

Cuando se incluyen los efectos del CX esa dependencia se altera, produciendose ahora un crecimiento con la densidad. Esto se debe a varios factores, por un lado a que a bajas densidades la competicion del cambio de carga es muy importante (las secciones eficaces de colision son bajas mientras las de CX no dependen de la densidad del plasma, solo de la del fondo de neutros frio) por otro lado a alta densidad la probabilidad de reionizacion es muy elevada y eso aumenta las posibilidades de pitch angle scattering. Se observará que la dispersión estadística es bastante mayor con CX que sin él, una consecuencia de la dificultad de separar correctamente las pérdidas retardadas cuando hay numerosísimas reionizaciones.

3.3 Pérdidas totales.

Esos crecimientos de las pérdidas instantáneas con la energía y decrecimiento de las retardadas hacen que las pérdidas de iones rápidos totales crezcan más lentamente, e incluso en algún caso (COUNTER con CX) lleguen a decrecer levemente compensandose unas con otras.

Algo similar sucede con la densidad, solo en el caso COUNTER sin CX el crecimiento de las pérdidas instantáneas es insuficiente para compensar el decrecimiento de las retardadas.

Otra consecuencia es que la relación entre pérdidas instantáneas y totales crece con la energía y con la densidad (Figs. 10 y 11), salvo para el caso COUNTER con CX en que decrecen con la densidad si bien con fuertes fluctuaciones (Fig. 11b). En ausencia de efectos de CX esa proporción se mantiene alrededor del 80% para CO-inyección y del 60% para COUNTER, mientras que con CX las variaciones son mayores y algo mas irregulares. Todo ello demuestra la importancia de esas pérdidas instantáneas.

3.4 Caso Balanceado.

Finalmente, para facilitar comparaciones con estudios anteriores, se representan en Figs. 12, 13 y 14 las dependencias de las perdidas y de la proporcion de la componente instantánea para el caso balanceado (promedio de los casos CO y COUNTER pesados con la potencia disponible en el plasma en cada caso).

Se confirma el crecimiento de las pérdidas instantáneas con la energía y la densidad, el decrecimiento de las retardadas, salvo el caso con CX respecto a la densidad (Fig. 13b), la relativa constancia de las pérdidas de iones rápidos totales (que se mantienen en niveles de alrededor de un 20 % de la potencia disponible), el crecimiento de la proporcion de perdidas instantáneas con la energia y con la densidad salvo, en este último caso, cuando de incluye el CX (Fig. 14b) en que decrecen levemente manteniendose alrededor de un 75%.

Una prueba de la mejoría en la estadística conseguida con este estudio resulta de la comparación de las Fig. 12 a y b con las 15 a,b, estas últimas corresponden a estudios anteriores en los que se utilizaba Fafner-I. Se percibe claramente cómo, en este último caso, las fluctuaciones estadísticas enmascaraban completamente las dependencias con la energía de las pérdidas instantáneas.

4. TIEMPOS CARACTERISTICOS.

Los histogramas de tiempos confirman la clarísima separación entre pérdidas instantáneas y retardadas en todos los casos. P. ej. en las Fig. 16 y 17 aparecen las distribuciones en tiempo de los diversos tipos de partículas para varios casos, en todos ellos se obtienen resultados similares si bien la escala de tiempos en el caso de baja densidad (e40d1) es mucho más dilatada. Es obvio que en unas pocas decenas de μseg. tienen lugar las pérdidas instantáneas, seguidas de un larguisimo intervalo de tiempo antes de que aparezcan las retardadas o tenga lugar la termalización y esto tanto en los casos CO como COUNTER, con y sin CX, aunque en el caso del CX, debido a las numerosas reionizaciones, haya algunos problemas para seguir correctamente los tiempos de las partículas.

En la Tabla II aparecen, para algunos casos seleccionados, los tiempos medios de confinamiento de las partículas que sufren pérdidas instantáneas y retardadas, asi como los intervalos de separacion entre unas y otras que, si bien estos últimos valores individuales son fuertemente dependientes de estadística, son enormemente superiores a los tiempos medios de las primeras.

TABLA II. TIEMPOS CARACTERISTICOS (en μseg.)

Caso	Pérdidas Instantáneas		Retardadas		
	t medio	t maximo	t medio	t mínimo	Separación
e40d1co	3.2	10.9	13610	3420	3409
e40d3co	3.5	12.1	1978	588	576
e40d3cn	3.1	29.8	1982	795	765
e40d3cocx (con CX)	3.6	27.5	1611	155	127
e50d3co	3.7	19.7	2240	1010	990

Estos histogramas son enteramente similares a los que se obtuvieron anteriormente con Fafner-I (Fig. 19) y que sirvieron para demostrar que todas las pérdidas retardadas proceden de procesos de pitch angle scattering ya que desaparecen completamente al eliminar éste (Fig. 19b).

5. TIPO DE ATRAPAMIENTO.

La afirmación, ya intuida en estudios anteriores, de que las pérdidas retardadas se deben fundamentalmente a partículas pasantes confinadas (es decir que sobreviven a las pérdidas instantáneas) que tras sufrir pitch angle scattering se convierten en atrapadas y escapan entonces del plasma, queda claramente demostrada an los diagramas de las Figs. 20 y 21. En cualquiera de los casos se observa que:

a) Todas las partículas correspondientes a pérdidas instantáneas son pasantes, como corresponde a partículas nacidas con pitch muy elevado (cf. §2) que no han tenido tiempo de sufrir ninguna colisión.

b) La inmensa mayoría de las pérdidas retardadas corresponden a partículas atrapadas.

c) Para las partículas termalizadas la mayor parte son pasantes aunque aparece una fracción apreciable de partículas atrapadas que consiguen termalizarse antes de perderse.

d) En todos los casos aparecen muy pocas partículas localmente atrapadas.

6. RESULTADOS PARA LA ABSORCION.

Con el fin de completar este estudio y facilitar la comparación con los anteriores daremos aqui los resultados obtenidos para las absorciones y el resto de pérdidas.

En la Fig. 22 aparecen la absorción, las perdidas de iones rápidos totales (suma de instantáneas y retardadas) y las de shine through para los casos CO y COUNTER sin CX. La fracción de pérdidas de shine through se mide con relación a la potencia que entra en el toro (0.89 MW, es decir la del haz, 1 MW, menos las pérdidas en los *scrapers* 11.1%), mientras el resto de las pérdidas y la absorcion se calculan con relación a la potencia disponible en el plasma (la anterior menos las pérdidas de shine through de cada caso), esto permite comparaciones entre casos muy dispares.

De esa figura es evidente la poca sensibilidad de la absorción y las pérdidas de iones rápidos a la energía, mientras que las de shine through aumentan lentamente con la energia como consecuencia del decrecimiento de las secciones eficaces.

Con respecto a la dependencia con la densidad el esperado fuerte decrecimiento, casi exponencial, del shine through compensa el crecimiento de las pérdidas de iones en el caso COUNTER pero no en el CO en el que las pérdidas son más grandes y crecen más rápidamente.

La absorción del caso COUNTER es siempre mayor que la del CO (aproximadamente un 19% , menores pérdidas ionicas) manteniendose alrededor de un 88 y 74% respectivamente (valores para d3 y 40 keV)

Cuando se tiene en cuenta el CX(Fig. 23) sus pérdidas decrecen levemente con la energía (consecuencia del comportamiento de sus secciones eficaces) y decrecen fuertemente con la densidad ya que, como se indicó en §3.2, a baja densidad el resto de las secciones eficaces son pequeñas mientras las de CX se mantienen produciendo más oportunidades para cambio de carga que para el resto de los procesos, por el contrario al subir la densidad esos otros procesos compiten más eficazmente y, además, hay muchas más posibilidades de reionización.

Se obsrvará tambien una diferencia visible, aparentemente inesperada, entre las pérdidas por CX del caso CO y las del COUNTER, estas últimas son algo mas altas. Esto se debe a que al ser las coronas de pérdidas más estrechas en el caso COUNTER, las partículas que en ese caso sobreviven a las pérdidas instantáneas se encuentran en zonas más perifericas que en el caso CO, zonas en que la densidad del fondo de neutros frios es mayor y, por lo tanto, existirán más procesos de CX.

El resultado final del fuerte decrecimiento de las pérdidas CX con la densidad es que la absorcion, que es alarmantemente escasa a bajas densidades (cf. Tabla III), se incrementa rápidamente con la densidad, manteniendose mayor la absorción del caso COUNTER (Fig. 23b).

Por último en las Fig. 24 y 25 se presentan los resultados para el caso "balanceado" (CO y COUNTER superpuestos) manteniendose la insensibilidad a la energía y densidad en ausencia de CX y el crecimiento de la absorcion cuando el CX está presente. La Tabla III muestra la dependencia con la densidad para el caso de 40 keV con CX.

TABLA III. DEPENDENCIA CON LA DENSIDAD CENTRAL (10^{13} cm^{-3})

Caso 40 keV, balanceado, con CX

(Fracción respecto a la potencia disponible en el plasma, excepto el Shine Through*)

ni(0)	1.9	5.8	11.	15.
Shine Through*	0.43	0.15	0.07	0.04
CX Losses	0.66	0.31	0.16	0.13
Prompt Losses	0.10	0.12	0.14	0.16
Delayed Losses	0.02	0.04	0.05	0.05
Fast Ion Losses (Total)	0.13	0.16	0.19	0.21
Absorption	0.21	0.52	0.65	0.66
Absorbed Power (MW)	0.22	0.79	1.07	1.12

(* Fracción respecto a la potencia entrante en el toro)

Los perfiles radiales de deposicion de potencia total (electrones mas iones) aparecen en las Fig. 26 y 27 superpuestos a los de nacimiento. Cerca del borde se observará el estrechamiento mayor del perfil CO respecto al COUNTER, consecuencia de la mayor anchura de la corona de pérdidas instantáneas, diferencia que es menos patente con CX, que en esa zona es muy intenso.

Se observará también, a radios intermedios, la similitud de los perfiles de deposición con los de nacimiento en ausencia de CX, así como el decrecimiento de la potencia depositada en la periferia cuando el CX está presente, consecuencia de la mayor densidad de neutros frios en esa zona.

A estas energías los electrones del plasma se llevan alrededor de un 70% de la potencia absorbida, esta proporción crece lentamente con la energía y la densidad y es ligeramente superior con CX que sin él.

Por último la Fig.28 presenta los resultados antiguos (con Fafner-I) que demuestran la escasa influencia del reentering en la absorción y las pérdidas por CX, mientras que en las de iones rápidos esa influencia puede cifrarse en un 10% de su valor. Se observará tambien que los valores numéricos de las pérdidas de iones rápidos obtenidos con Fafner-I teniendo en cuenta *reentering* son algo mayores que los obtenidos, sin *reentering* pero con mejor estadística, en este estudio (p. ej. para d3 y 40 keV con CX Fafner-I daba 0.27 frente a 0.19 ahora). Por el contrario las diferencias relativas en la potencia absorbida son menores, obteniendose valores absolutos ligeramente mejores en este estudio.

7. RESULTADOS EN TÉRMINOS DE POTENCIA.

En todo lo anterior las pérdidas por shine through estaban calculadas como fracción respecto a la potencia que entra en el toro (es decir: la inyectada menos las pérdidas en los "ports" y "scrapers" del TJ-II, 11.1%, constantes) mientras que el resto de pérdidas y la absorción venían dadas como fracción respecto a la potencia disponible en el plasma (es decir: la que entra en el toro menos las pérdidas por shine through, que crecen ligeramente con la energía,, y decrecen fuertemente con la densidad). Esto permitía comparar el comportamiento del plasma en condiciones de energías y densidades muy diferentes.

No obstante para otro tipo de comparaciones es preferible disponer de esos mismos resultados en términos de potencia absoluta, suponiendo que se inyectara 1 MW en cada haz. Los resultados completos aparecen en las Tablas IX y X en función de energías y densidades y, separadamente, para los casos CO y COUNTER, tanto con CX como sin él. Su comportamiento es la consecuencia directa de los discutidos en §3 y del de las pérdidas por shine through expuesto más arriba.

Asi, la distinción entre pérdidas de iones rápidos instantáneas y retardadas aparece en las Fig. 29 (sin CX) y 30 (con CX). Como era de esperar las pérdidas instantáneas crecen con la energía, siendo notablemente mayores las CO que las COUNTER, tanto sin CX como con él, mientras las retardadas decrecen manteniendose muy similares las CO y COUNTER en ausencia de CX.

Con relación a la densidad, las instantáneas crecen mientras las retardadas decrecen ligeramente sin CX y crecen cuande éste se encuentra presente. Todo ello en conformidad con los resultados de las Fig. 7 y 8 y el fuerte decrecimiento del shine through.

La suma total da, para las pérdidas ionicas, un claro crecimiento con la energía y la densidad, salvo para el caso COUNTER en función de la energía, que resulta ser ligerísimamente decreciente sin CX y algo más claramente con CX, aqui el crecimiento de las instantáneas no llega a compensar el decrecimiento de las retardadas.

En cuanto a la absorción total su comportamiento aparece en la Fig. 31 para el caso sin CX (junto con las pérdidas de iones rápidos totales y las de shine through) y en la Fig. 32 para el caso con CX (junto con las pérdidas por CX).

En ausencia de CX la absorción total decrece levísimamente con la energía. Consecuencia, sobre todo, del crecimiento del shine through. Mientras que crece claramente con la densidad ya que el fuerte decrecimiento del shine through compensa, con creces, el crecimiento de las pérdidas iónicas totales. Como era de esperar la absorción para el caso CO es claramente inferior a la del COUNTER (alrededor de un 20%).

En el caso con CX la absorción apenas depende de la energía, solo hay un levísimo decrecimiento, ya que el decrecimiento de las pérdidas por CX compensa el crecimiento de las iónicas en el caso CO. A la vez la diferencia entre pérdidas por CX entre CO y COUNTER (explicada en el §6) contribuye a acercar en valor y comportamiento ambos casos. Ahora la diferencia entre absorción CO y COUNTER se ha reducido a sólo un 10%, obtenido sobre todo a costa de la absorción del caso COUNTER.

El crecimiento de la absorción con la densidad se hace ahora, en el caso con CX, extremadamente marcado, la diferencia entre CO y COUNTER casi se anula a baja

densidad en donde la absorción se hace preocupantemente baja (del orden de 100 kW) aunque se recupera rápidamente a densidad media y alta (400 y 500 kW) para luego saturarse.

Finalmente en la Tabla XI repetimos los resultados para el caso blanceado con CX (cf. Tabla III) en función de la densidad, expresados ahora en MW, suponiendo que cada haz inyectara 1 MW a una energía de 40 keV (Fig.33).

TABLA XI. DEPENDENCIA CON LA DENSIDAD CENTRAL (10^{13} cm^{-3})

Caso 40 keV, balanceado, con CX

(en MW)

ni(0)	1.9	5.8	11.	15.
Scraper Losses	0.22	0.22	0.22	0.22
Shine Through	0.76	0.27	0.12	0.08
CX Losses	0.67	0.47	0.26	0.21
Prompt Losses	0.10	0.18	0.23	0.27
Delayed Losses	0.025	0.065	0.085	0.092
Fast Ion Losses (Total)	0.13	0.25	0.32	0.36
Absorption	0.22	0.79	1.07	1.12

Como se ve, a bajas densidades, las fuertes pérdidas por shine through y por CX reducen extraordinariamente la absorción.

Por último la Tabla XII reproduce esos mismos resultados expresados como fracción de potencia entrante en ele toro.

TABLA XII. DEPENDENCIA CON LA DENSIDAD CENTRAL (10^{13} cm^{-3})

Caso 40 keV, balanceado, con CX

(Fracción respecto a la potencia entrante en el toro)

ni(0)	1.9	5.8	11.	15.
Shine Through	0.43	0.15	0.07	0.04
CX Losses	0.38	0.26	0.15	0.12
Prompt Losses	0.06	0.10	0.15	0.15
Delayed Losses	0.01	0.03	0.05	0.05
Fast Ion Losses (Total)	0.07	0.14	0.18	0.20
Absorption	0.12	0.44	0.60	0.63
Absorbed Power (MW)	0.22	0.79	1.07	1.12

8. CONCLUSIONES

Se ha estudiado el comportamiento de las pérdidas de iones rápidos instantáneas y retardadas en función de la energía y de la densidad comprobandose el incremento de las primeras con la energía, la fuerte diferencia entre CO y COUNTER y que están producidas exclusivamente por orbitas pasantes que pierden confinamiento en unas pocas decenas de μseg. También se ha observado la influencia de los perfiles de nacimiento que hace que tiendan a incrementarse con la densidad.

Por su parte las pérdidas retardadas estan ampliamente separadas en el tiempo de las anteriores, son producidas por partículas que han sufrido pitch angle scattering y, en su inmensa mayoria, corresponden a órbitas atrapadas. Son mucho menos importantes que las instantáneas (alrededor de un 1/3) y para ellas se observa un ligero decrecimiento con la energia. En ausencia de CX decrecen con la densidad (un efecto de perfil inicial) tendencia que se invierte cuando se incluye el CX.

Las absorciones confirman la poca sensibilidad a la energía, los preocupantemente pobres valores para baja densidad como consecuencia de las fuertes pérdidas por CX y shine through así como la rápida recuperación al aumentar la densidad.

REFERENCIAS

[1]. LINIERS M., GUASP J., ALEJALDRE C. and PEREZ-NAVARRO A. (1993) *Proc. 20th Europ. Conf. on Controlled Fusion and Plasma Physics.* (Lisbon), ECA, **17C**, Part III, 993, EPS Geneva.

[2]. GUASP J. Enviado a *Plasma Physics and Controlled Fusion* . (1994)

[3]. TEUBEL A. (1994A) *IPP/Report 4/266* ,Garching.

[4]. TEUBEL A., GUASP J. and LINIERS M. (1994B) *IPP/Report 4/268* , Garching.

LISTA DE TABLAS Y FICHEROS

Tabla I. Valores medios de nacimiento de los iones.

Tabla II. Tiempos característicos de partículas perdidas.

Tabla III. Dependencia con la densidad central (40 keV, caso balanceado, con CX). Resultados expresados como fracción de la potencia disponible en el plasma, excepto el Shine Through que lo está como fracción de la potencia entrante en el toro.

Tabla IV. Scan de Energia, densidad alta.
(fichero Kaleida Usuarios 1 / Guasp / Losses / Scan-E)

Tabla V. Scan de densidad, 40 keV.
(fichero Kaleida Usuarios 1 / Guasp / Losses / Scan-d)

Tabla VI. Scan de energia, densidad alta,caso balanceado.
(fichero Kaleida Usuarios 1 / Guasp / Losses / Bal-E)

Tabla VII. Scan de densidad, 40 keV, caso balanceado.
(fichero Kaleida Usuarios 1 / Guasp / Losses / Bal-d)

Tabla VIII. Perfiles radiales de potencia depositada y de nacimiento
(fichero Kaleida Usuarios 1 / Guasp / Losses / Perfil.dat)

Tabla IX. Scan de Energia, densidad alta (en MW).
(fichero Kaleida Usuarios 1 / Guasp / Losses / Pot-E)

Tabla X. Scan de densidad, 40 keV (en MW).
(fichero Kaleida Usuarios 1 / Guasp / Losses / Pot-d)

Tabla XI. Dependencia con la densidad central (40 keV, caso balanceado, con CX), resultados expresados en MW.

Tabla XII. Dependencia con la densidad central (40 keV, caso balanceado, con CX). Resultados expresados como fracción de la potencia entrante en el toro.

Los resultados de los cálculos se encuentran en la CRAY-YMP en el directorio /fusion/guasp/orbits/dirloss en ficheros con nombres del tipo:

e40d3c0.34 (casos sin CX, 200 partículas)
cxe40d3co.34 (casos con CX, 200 partículas)
pe40d3co.34 (pérdidas instantáneas con 1950 partículas y 75 μseg.)
etc....

Otros ficheros, del tipo .38 o .37 contienen datos sobre posiciones iniciales, características de las orbitas y puntos de salida

LISTA DE FIGURAS

Fig.1. Perfiles radiales de nacimiento.

Fig.2. Histograma de radios de nacimiento de los iones.

Fig.3. Pitch y ángulo toroidal de nacimiento de los iones.

Fig.4. Histograma de ángulos toroidales de nacimiento de los iones.

Fig.5. Puntos de nacimiento de los iones para 1950 partículas.
Proyección poloidal en coordenadas de flujo.

Fig.6. Idem. para varias densidades y energias (200 partículas).

Fig.7. Dependencia de las pérdidas instantáneas y retardadas con la energía (a) y la densidad central (b). Caso sin CX.

Fig.8. Idem. caso con CX.

Fig.9. Pérdidas retardadas, en escala ampliada, con y sin CX.
a) Dependencia con la densidad.
b) Dependencia con la energía.

Fig.10. Proporción de pérdidas instantáneas, caso sin CX.

Fig.11. Idem., caso con CX.

Fig.12. Pérdidas instantáneas y retardadas. Caso balanceado sin CX.

Fig.13. Idem., caso con CX.

Fig.14. Proporción de pérdidas instantáneas, caso balanceado, con y sin CX.

Fig.15. Como en Fig. 12 pero con Fafner-I y baja estadística.

Fig.16. Histograma de tiempos de particulas perdidas. Casos CO.

Fig.17. Idem. en escala temporal ampliada durante los instantes iniciales.

Fig.18. Idem. casos CO, COUNTER y con CX.

Fig.19. Idem. pero con Fafner-I y baja estadística. Efecto de la supresión del Pitch angle scattering.

Fig.20. Tipo de atrapamiento en varios casos CO, sin CX.

Fig.21. Idem. para casos CO, COUNTER y con CX.

Fig.22. Dependencia de la absorcion y las pérdidas con la Energía (a) y con la densidad (b). Casos CO y COUNTER sin CX.

Fig.23. Idem., con CX.

Fig.24. Idem., caso balanceado sin CX.

Fig.25. Idem., con CX.

Fig.26. Perfiles de deposición de potencia CO y COUNTER sin CX.

Fig.27. Idem., con CX.

Fig.28. Efecto del reentering y del pitch angle scattering (con Fafner-I).

Fig.29. Dependencia de las pérdidas instantáneas y retardadas con la energía (a) y la densidad central (b). Caso sin CX. Expresada en MW

Fig.30. Idem. caso con CX.

Fig.31. Dependencia de la absorcion y las pérdidas con la Energía (a) y con la densidad (b). Casos CO y COUNTER sin CX. Expresados en MW.

Fig.32. Idem., con CX.

Fig.33. Idem. para el caso balanceado, con CX.Expresados en MW.

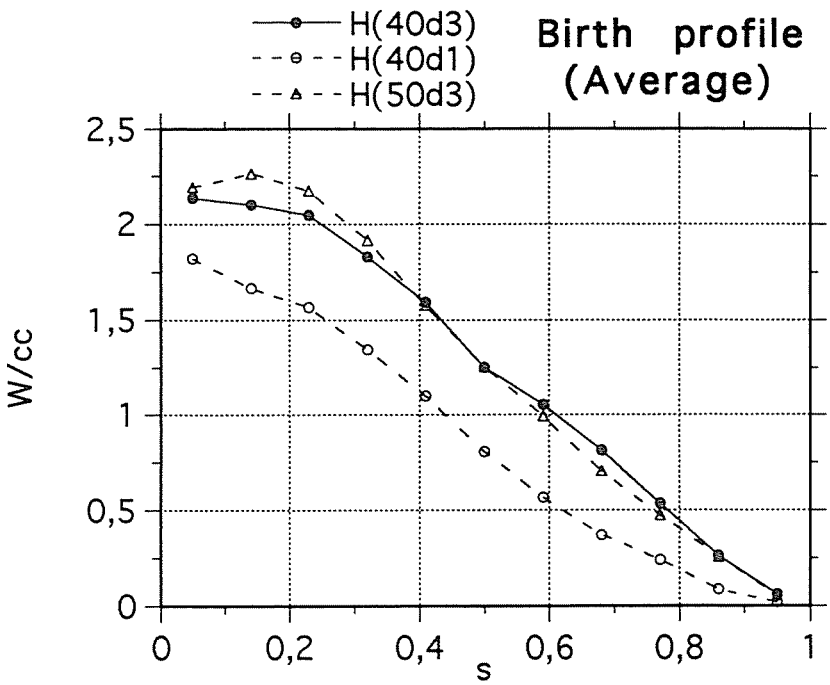
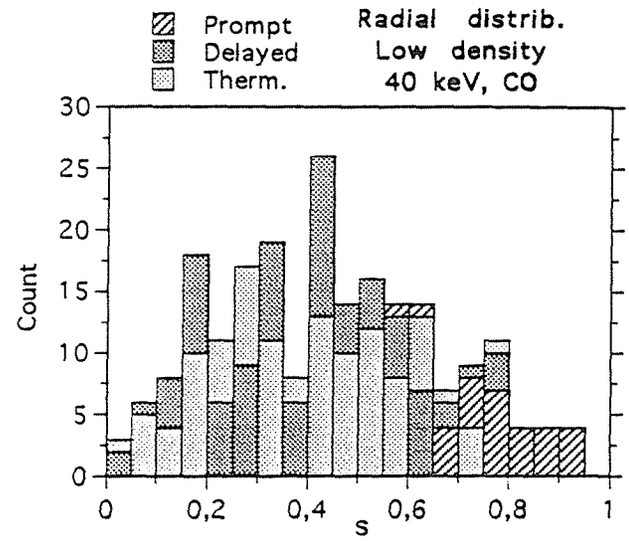
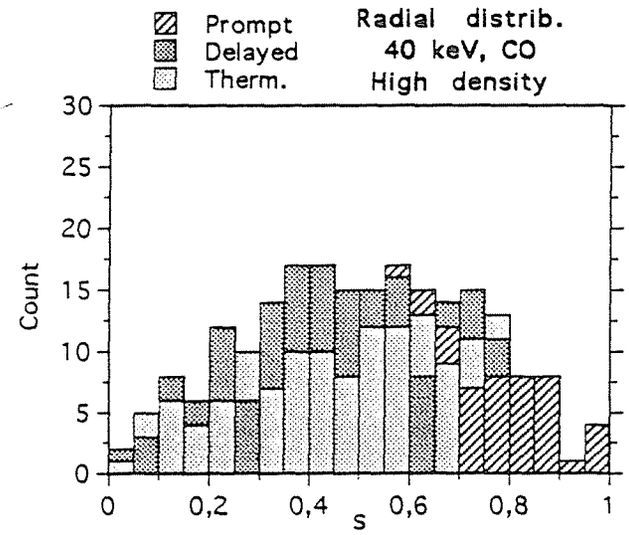

H(40d3)
H(40d1)
H(50d3)
Birth profile
(Average)
W/cc
2,5
2
1,5
1
0,5
0
0
0,2
0,4
0,6
0,8
1
s

Fig. 1


Prompt
Delayed
Therm.
Radial distrib.
Low density
40 keV, CO
Count
s


Prompt
Delayed
Therm.
Radial distrib.
40 keV, CO
High density
Count
s

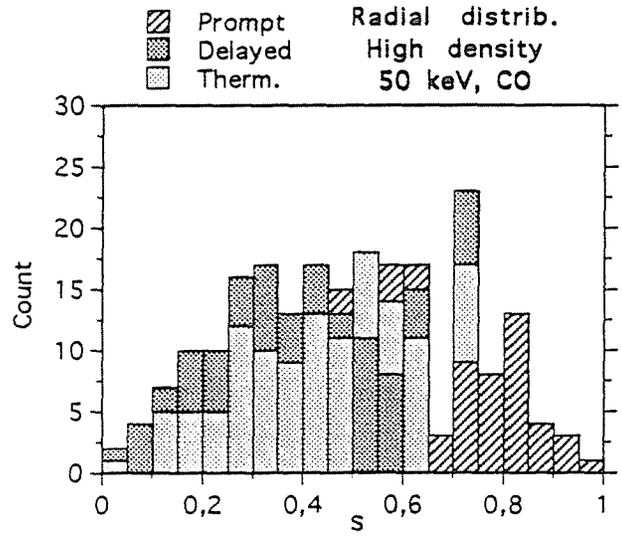

Prompt
Delayed
Therm.
Radial distrib.
High density
50 keV, CO
Count
s

Fig. 2

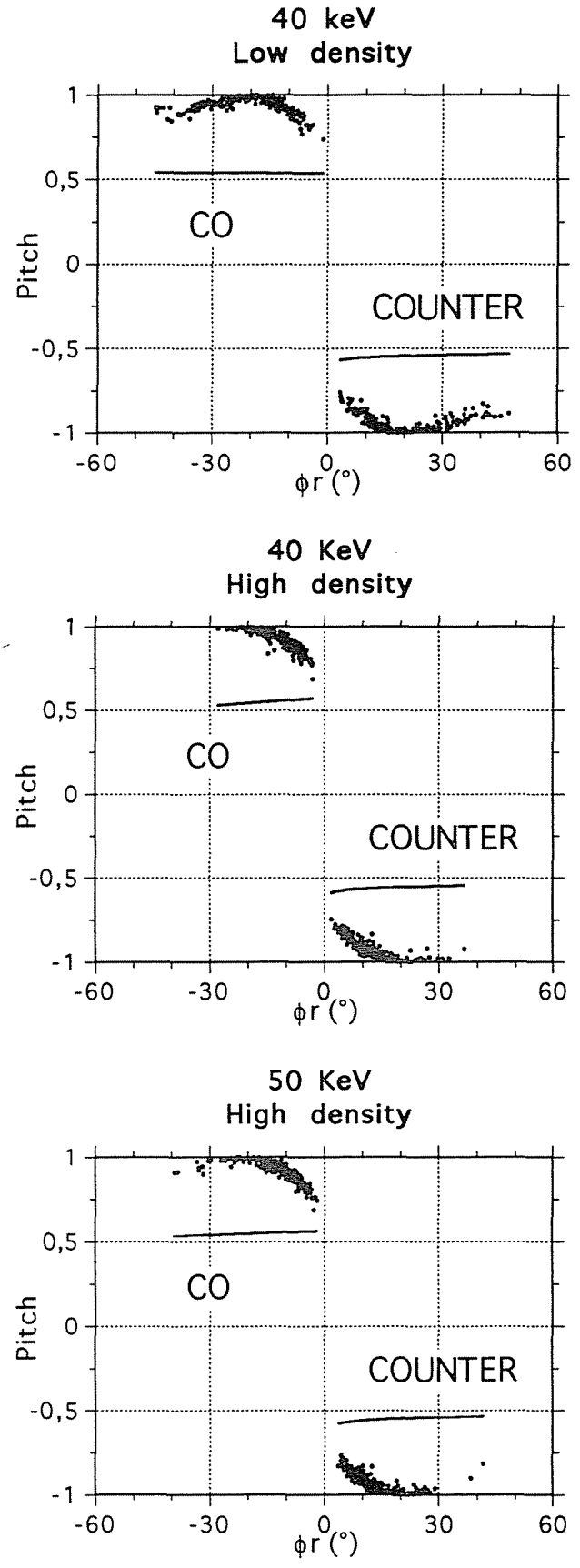

40 keV
Low density
CO
COUNTER
Pitch
1
0,5
0
-0,5
-1
-60
-30
0
30
60
ϕr (°)
40 KeV
High density
CO
COUNTER
Pitch
1
0,5
0
-0,5
-1
-60
-30
0
30
60
ϕr (°)
50 KeV
High density
CO
COUNTER
Pitch
1
0,5
0
-0,5
-1
-60
-30
0
30
60
ϕr (°)

Fig. 3

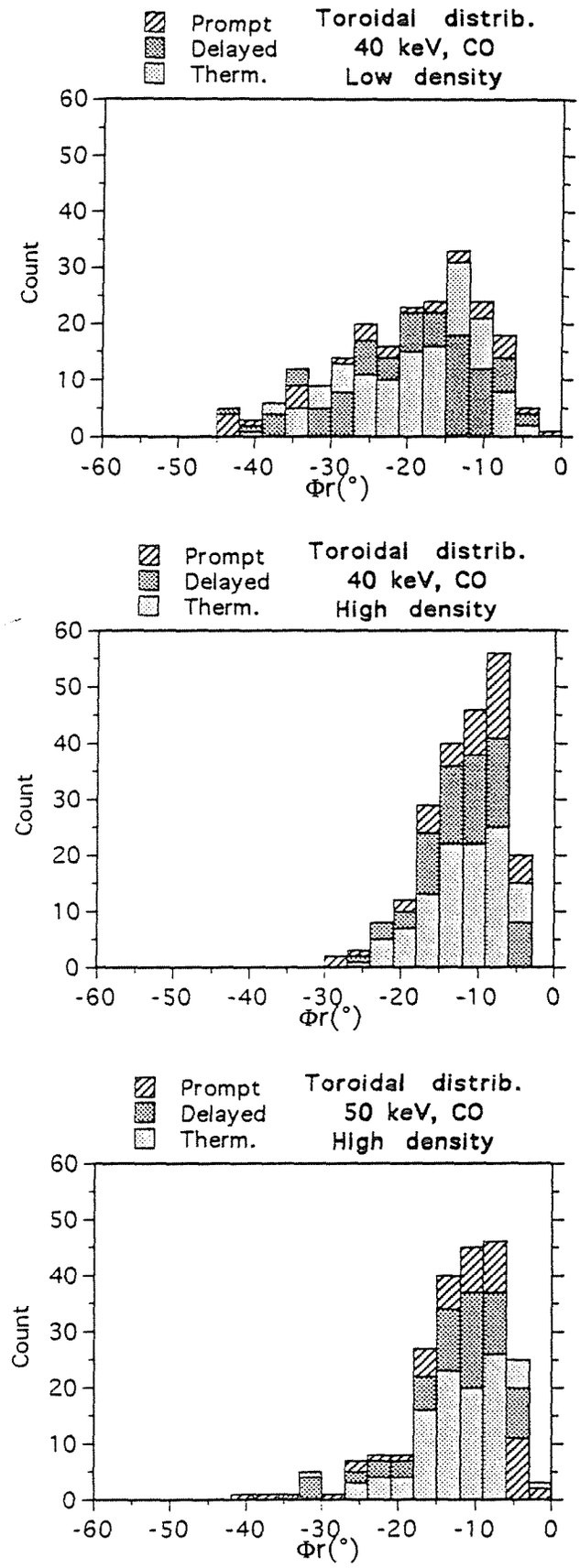
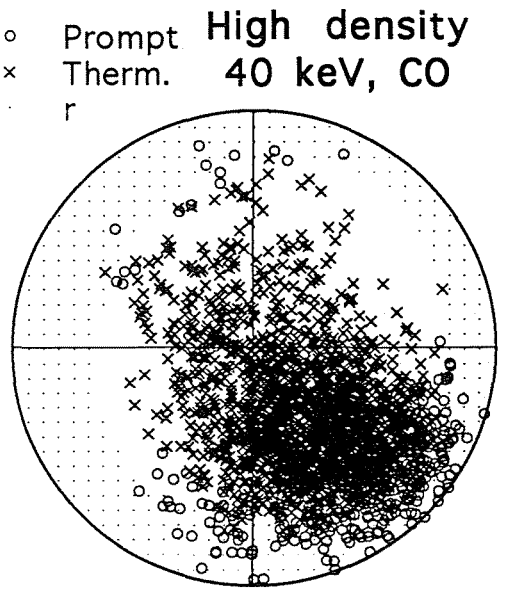

Prompt
Delayed
Therm.
Toroidal distrib.
40 keV, CO
Low density
Count
Φr(°)
Prompt
Delayed
Therm.
Toroidal distrib.
40 keV, CO
High density
Count
Φr(°)
Prompt
Delayed
Therm.
Toroidal distrib.
50 keV, CO
High density
Count
Φr(°)

Fig. 4


Prompt
Therm.
r
High density
40 keV, CO

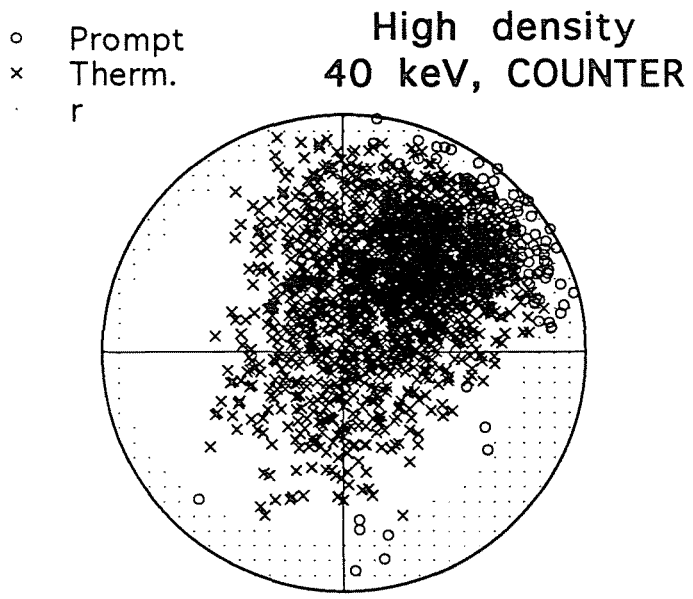

Prompt
Therm.
r
High density
40 keV, COUNTER

Fig. 5

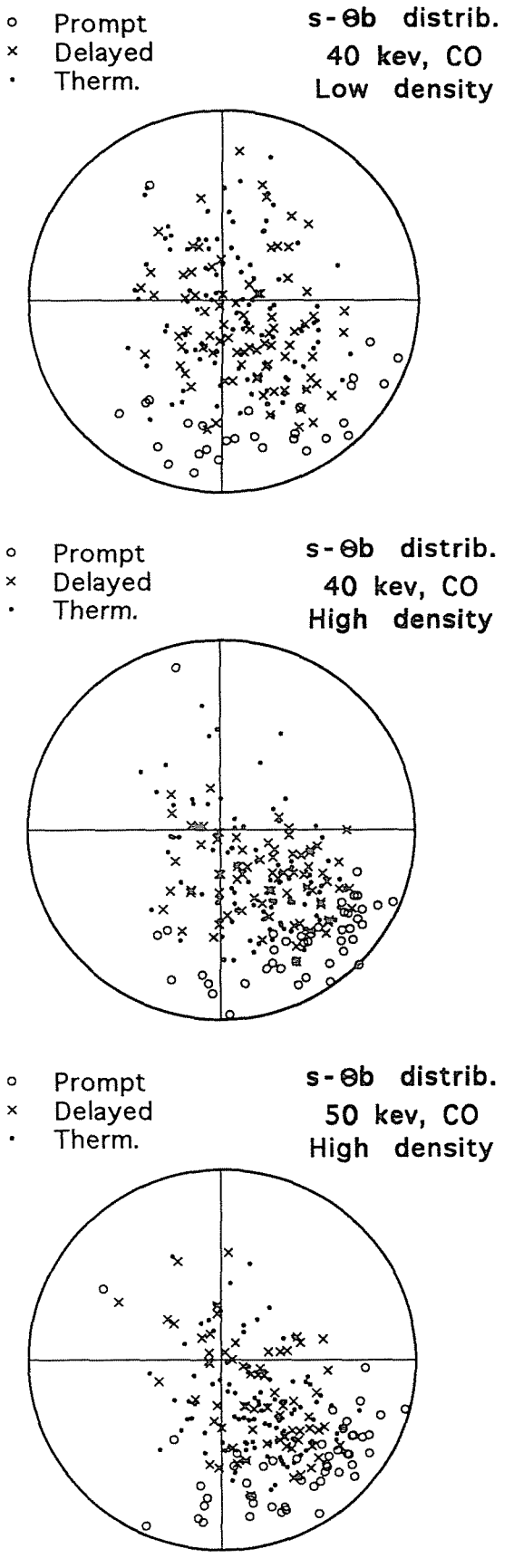
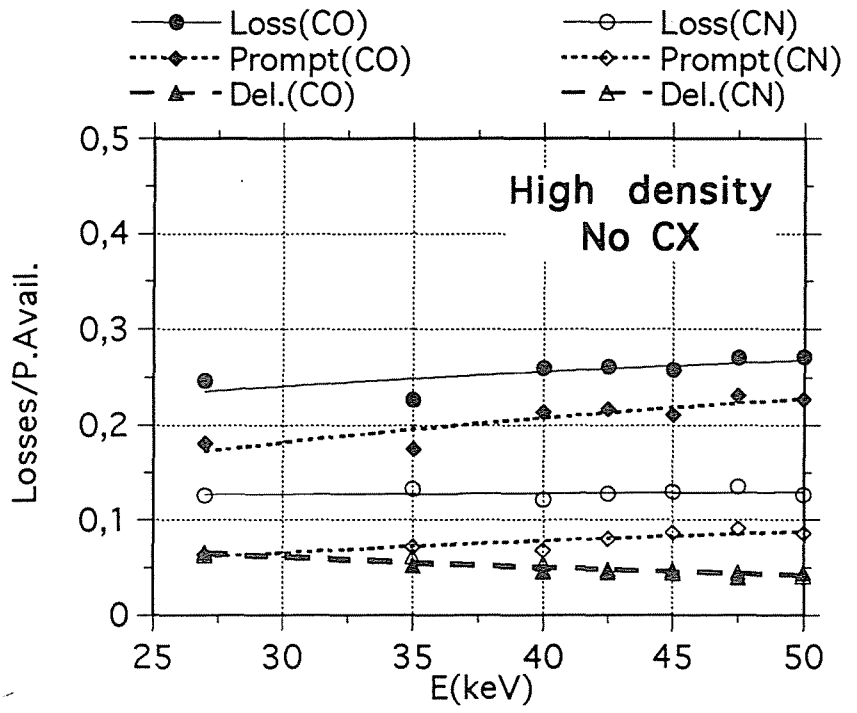

Prompt
Delayed
Therm.
s-θb distrib.
40 kev, CO
Low density
Prompt
Delayed
Therm.
s-θb distrib.
40 kev, CO
High density
Prompt
Delayed
Therm.
s-θb distrib.
50 kev, CO
High density

Fig. 6


Loss(CO)
Loss(CN)
Prompt(CO)
Prompt(CN)
Del.(CO)
Del.(CN)
High density
No CX
Losses/P.Avail.
0,5
0,4
0,3
0,2
0,1
0
25
30
35
40
45
50
E(keV)

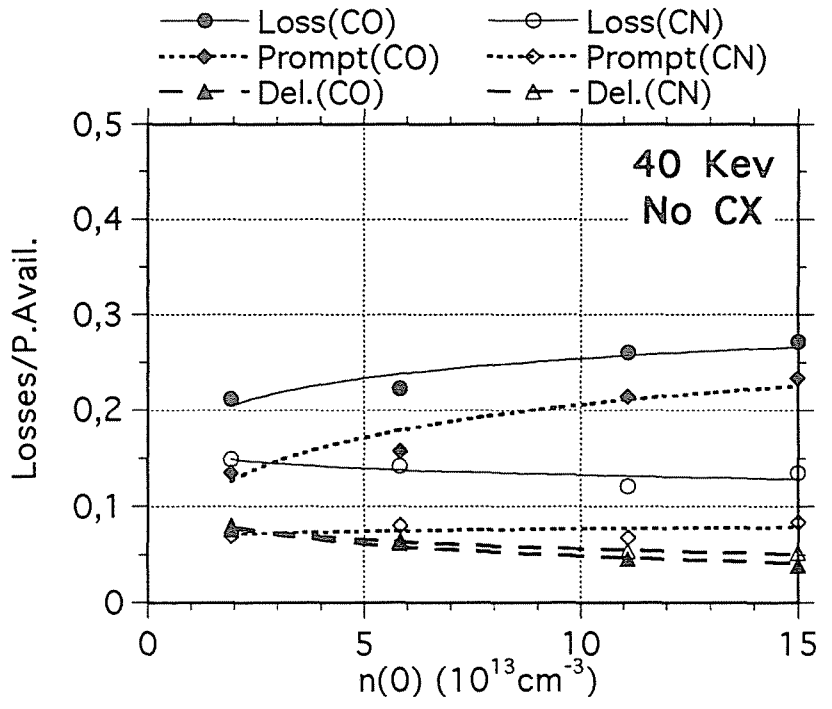
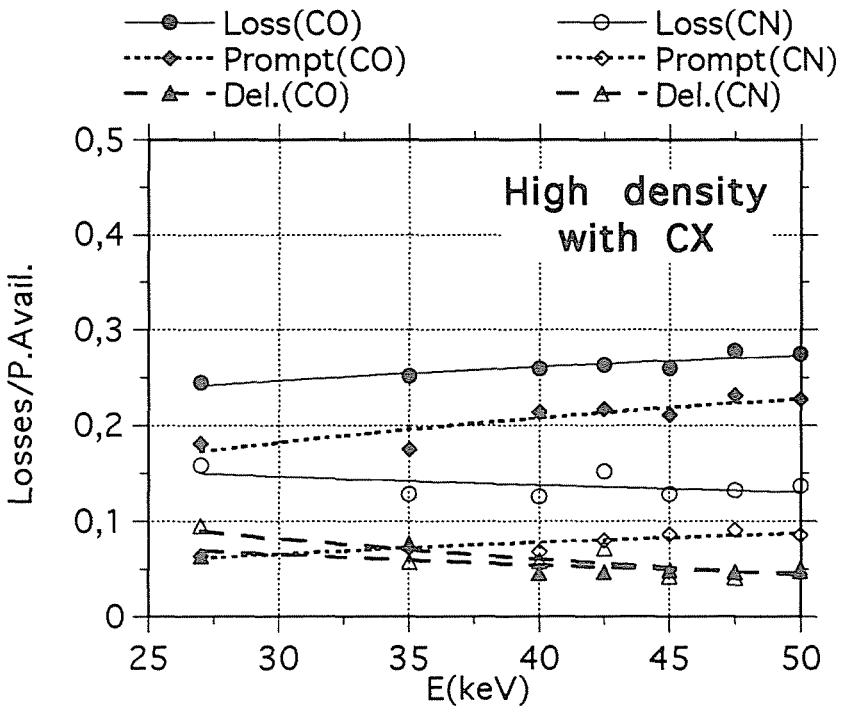

Loss(CO)
Loss(CN)
Prompt(CO)
Prompt(CN)
Del.(CO)
Del.(CN)
40 Kev
No CX
Losses/P.Avail.
0,5
0,4
0,3
0,2
0,1
0
0
5
10
15
n(0) ($10^{13}cm^{-3}$)

Fig. 7


Loss(CO)
Prompt(CO)
Del.(CO)
Loss(CN)
Prompt(CN)
Del.(CN)
High density
with CX
Losses/P.Avail.
0,5
0,4
0,3
0,2
0,1
0
25
30
35
40
45
50
E(keV)

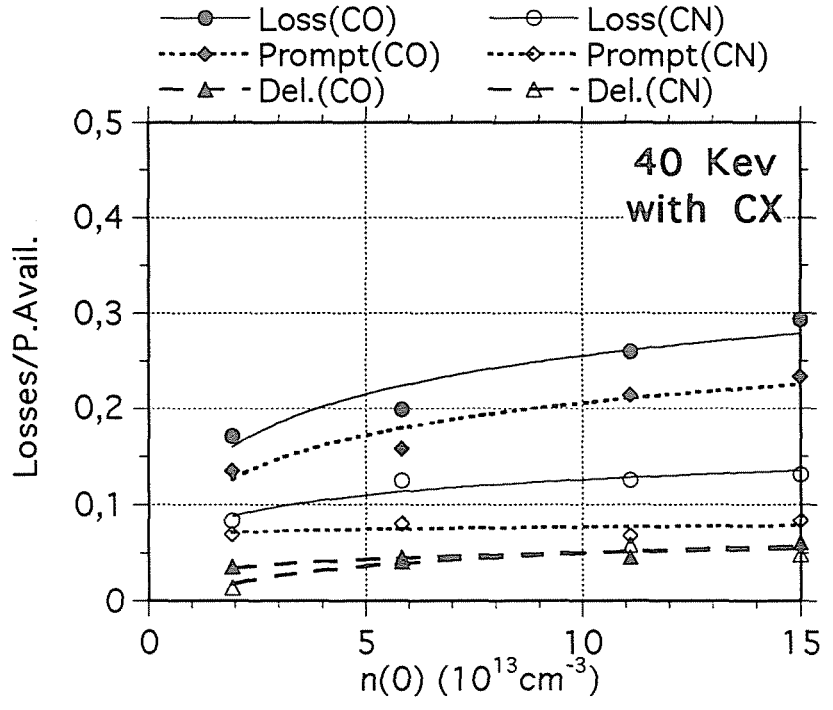
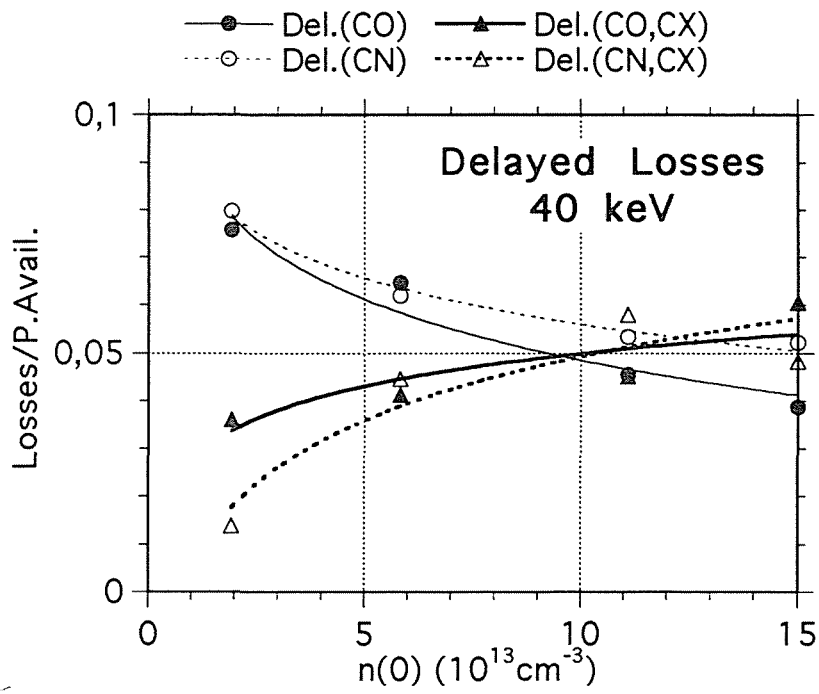

Loss(CO)
Prompt(CO)
Del.(CO)
Loss(CN)
Prompt(CN)
Del.(CN)
40 Kev
with CX
Losses/P.Avail.
0,5
0,4
0,3
0,2
0,1
0
0
5
10
15
n(0) ($10^{13}cm^{-3}$)

Fig. 8


Del.(CO)
Del.(CO,CX)
Del.(CN)
Del.(CN,CX)
Delayed Losses
40 keV
Losses/P.Avail.
0,1
0,05
0
0
5
10
15
n(0) ($10^{13}cm^{-3}$)

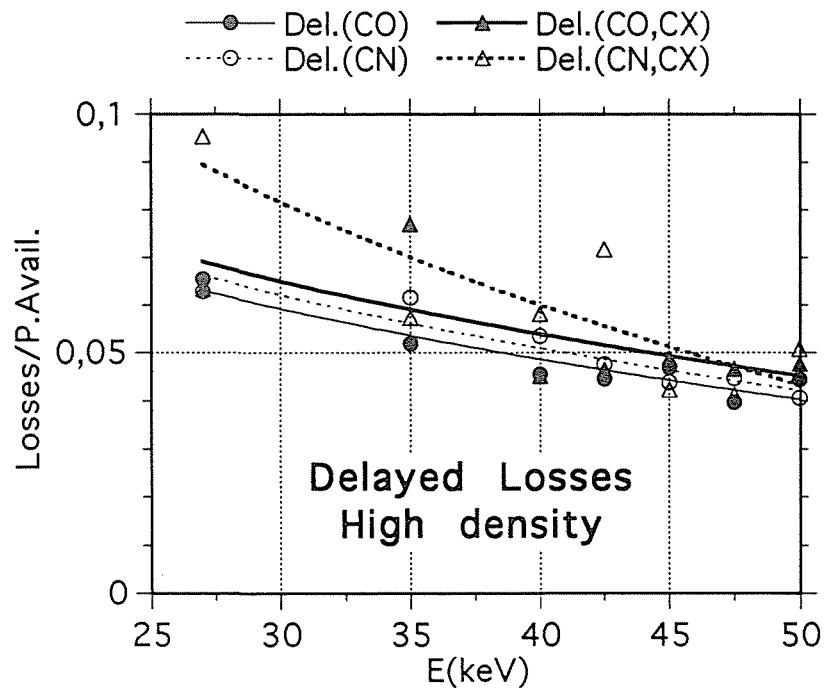
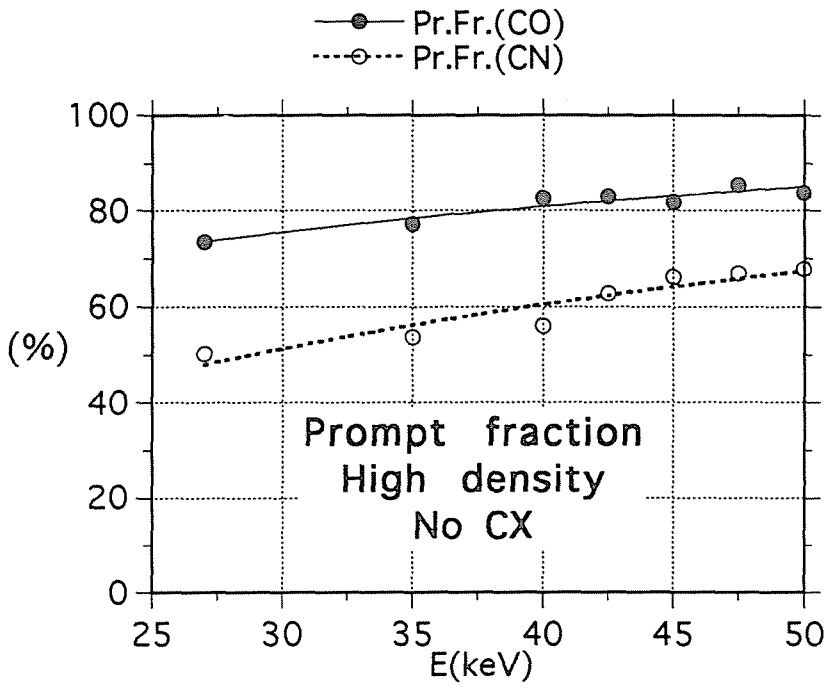

Del.(CO)
Del.(CO,CX)
Del.(CN)
Del.(CN,CX)
Delayed Losses
High density
Losses/P.Avail.
0,1
0,05
0
25
30
35
40
45
50
E(keV)

Fig. 9


Pr.Fr.(CO)
Pr.Fr.(CN)
100
80
60
40
20
0
(%)
Prompt fraction
High density
No CX
25
30
35
40
45
50
E(keV)

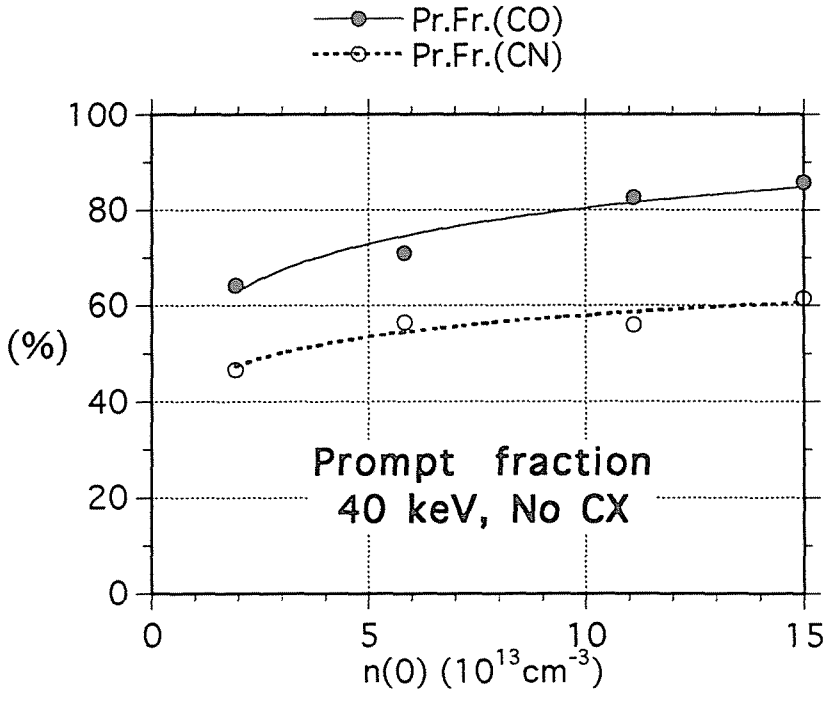
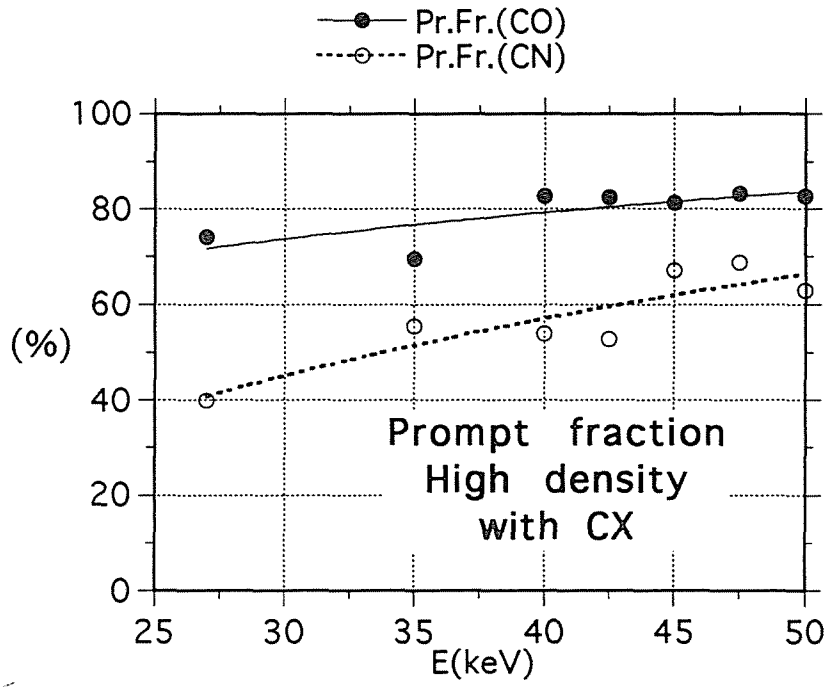

Pr.Fr.(CO)
Pr.Fr.(CN)
100
80
60
40
20
0
(%)
Prompt fraction
40 keV, No CX
0
5
10
15
n(0) ($10^{13}cm^{-3}$)

Fig. 10


Pr.Fr.(CO)
Pr.Fr.(CN)
100
80
60
40
20
0
(%)
Prompt fraction
High density
with CX
25
30
35
40
45
50
E(keV)

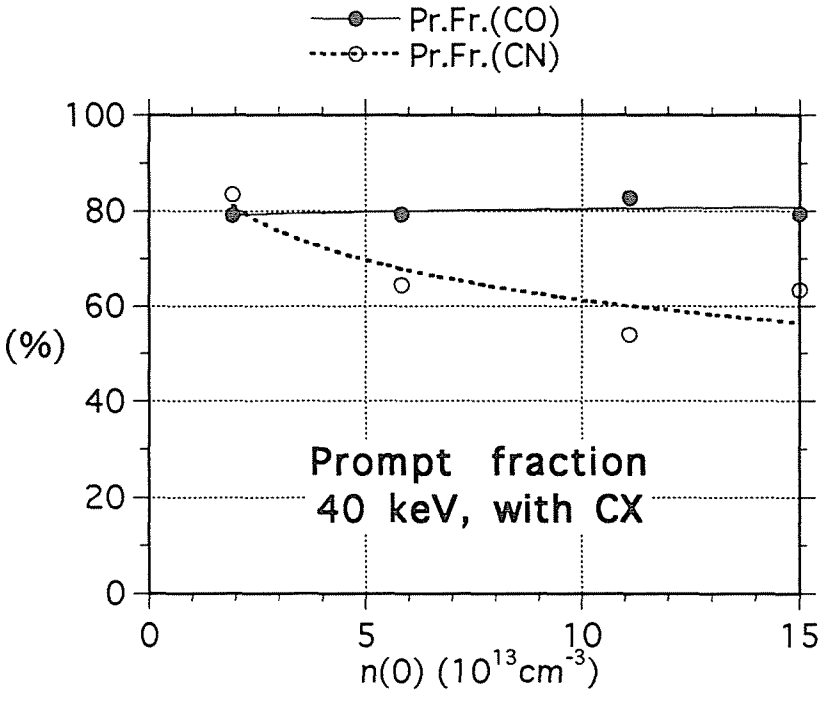
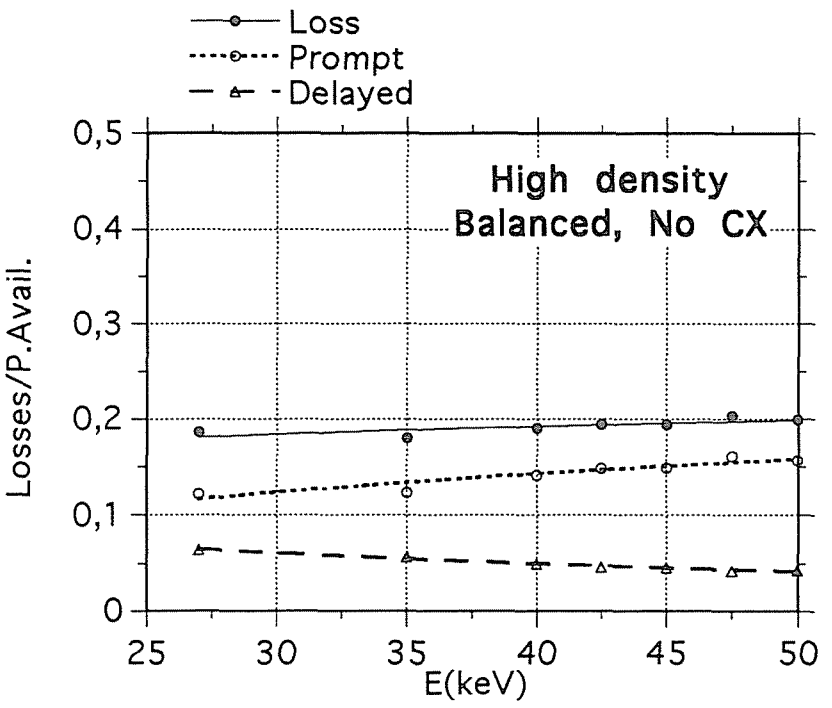

Pr.Fr.(CO)
Pr.Fr.(CN)
100
80
60
40
20
0
(%)
Prompt fraction
40 keV, with CX
0
5
10
15
n(0) ($10^{13}cm^{-3}$)

Fig. 11


Loss
Prompt
Delayed
High density
Balanced, No CX
Losses/P.Avail.
0,5
0,4
0,3
0,2
0,1
0
25
30
35
40
45
50
E(keV)

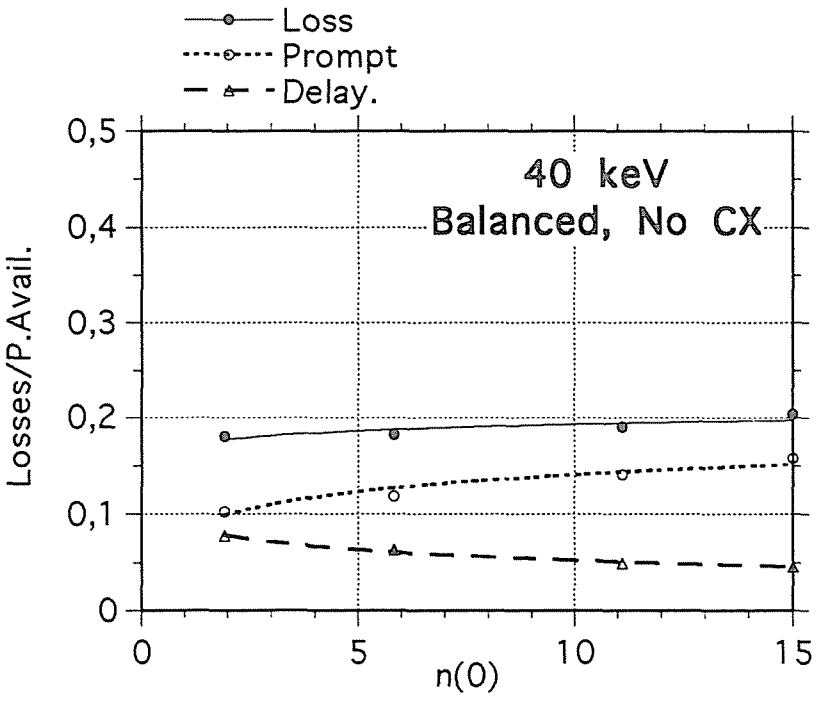
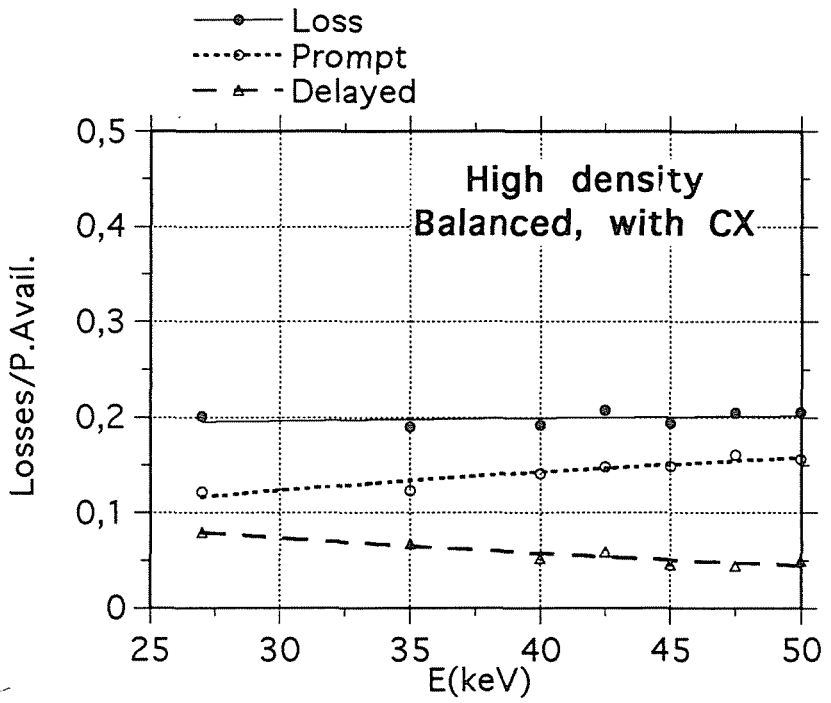

Loss
Prompt
Delay.
40 keV
Balanced, No CX
Losses/P.Avail.
0,5
0,4
0,3
0,2
0,1
0
0
5
10
15
n(0)

Fig. 12


Loss
Prompt
Delayed
High density
Balanced, with CX
Losses/P.Avail.
0,5
0,4
0,3
0,2
0,1
0
25
30
35
40
45
50
E(keV)

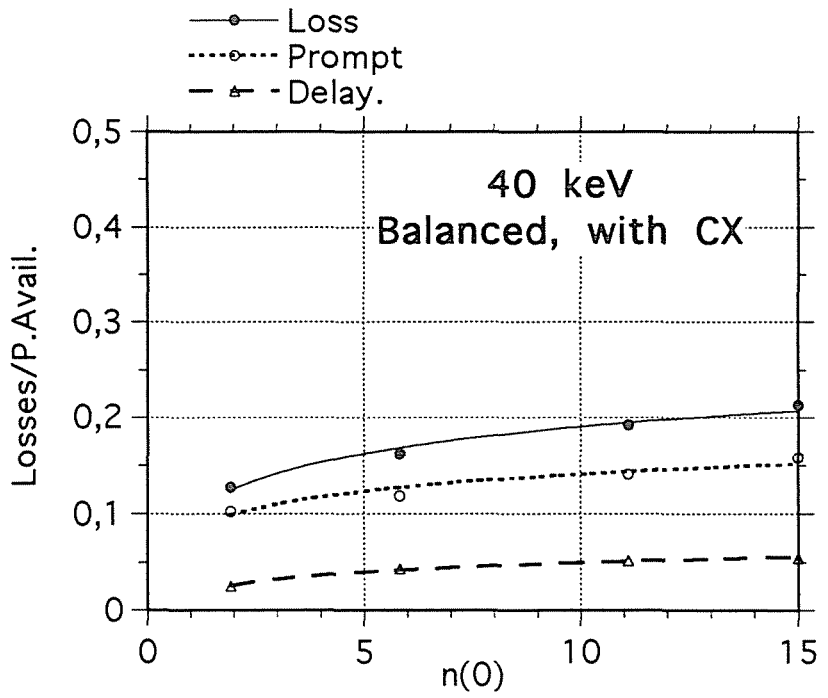
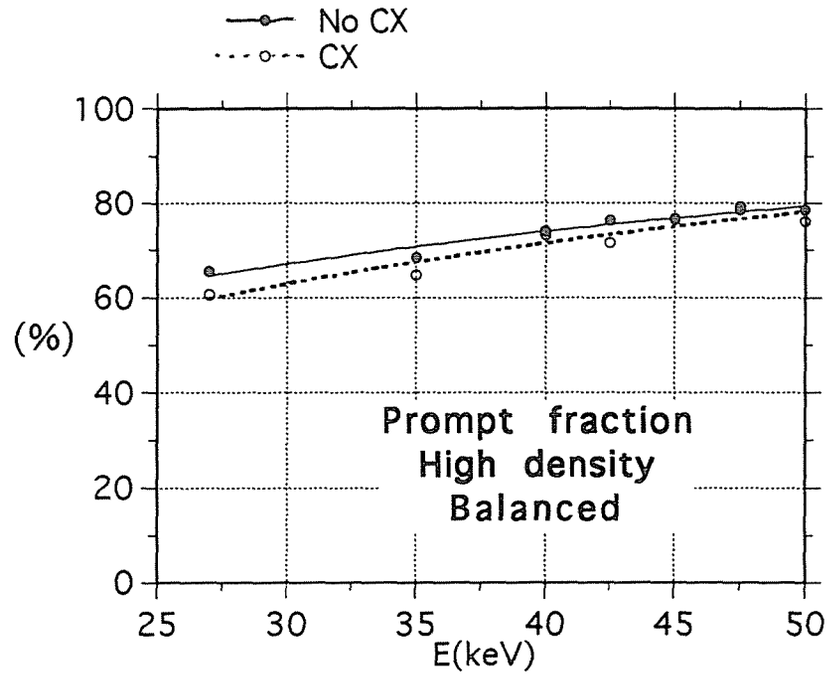

Loss
Prompt
Delay.
40 keV
Balanced, with CX
Losses/P.Avail.
0,5
0,4
0,3
0,2
0,1
0
0
5
10
15
n(0)

Fig. 13


No CX
CX
100
80
60
40
20
0
(%)
Prompt fraction
High density
Balanced
25
30
35
40
45
50
E(keV)

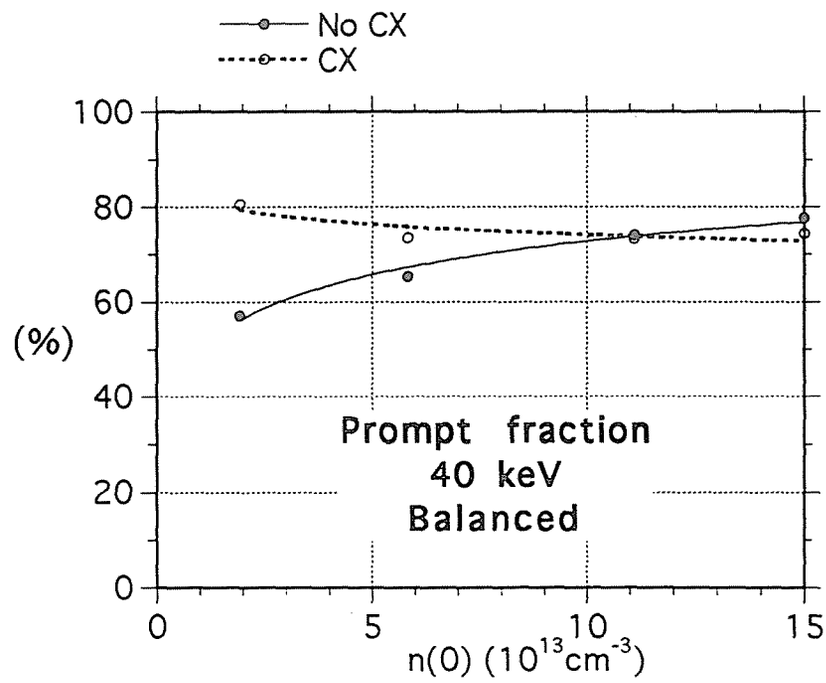

No CX
CX
100
80
60
40
20
0
(%)
Prompt fraction
40 keV
Balanced
0
5
10
15
n(0) ($10^{13}cm^{-3}$)

Fig. 14

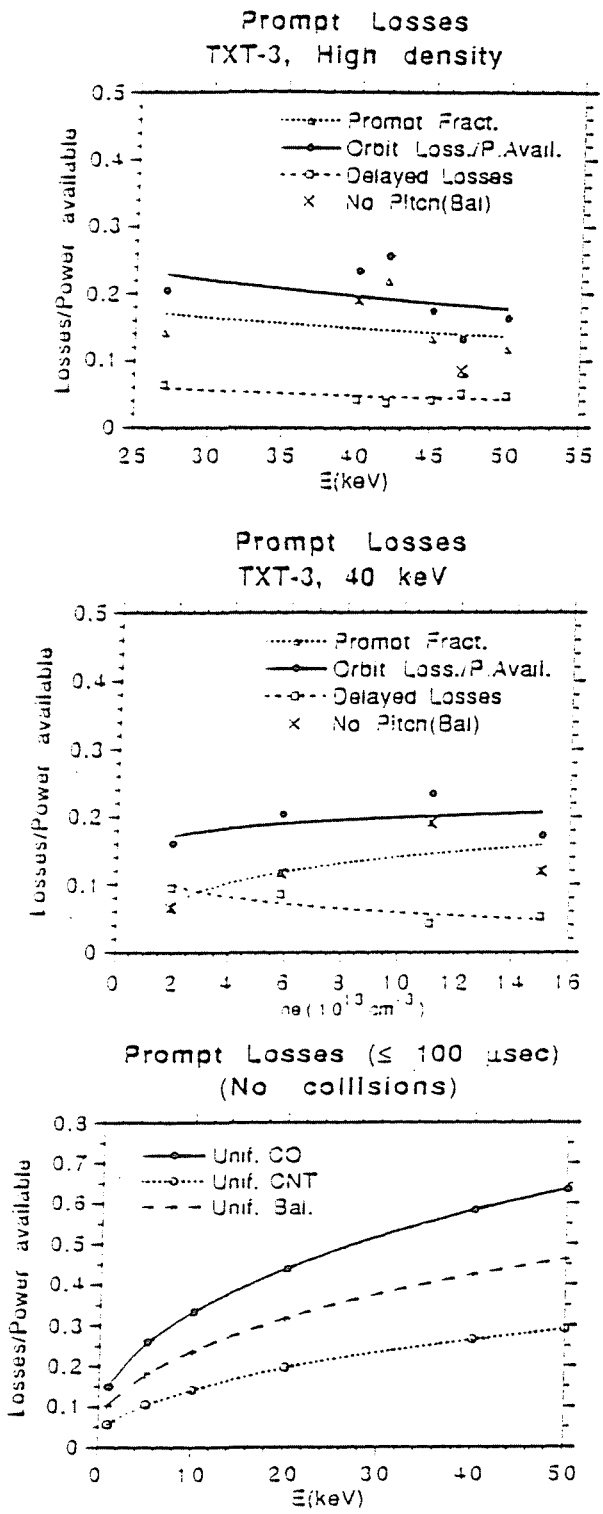
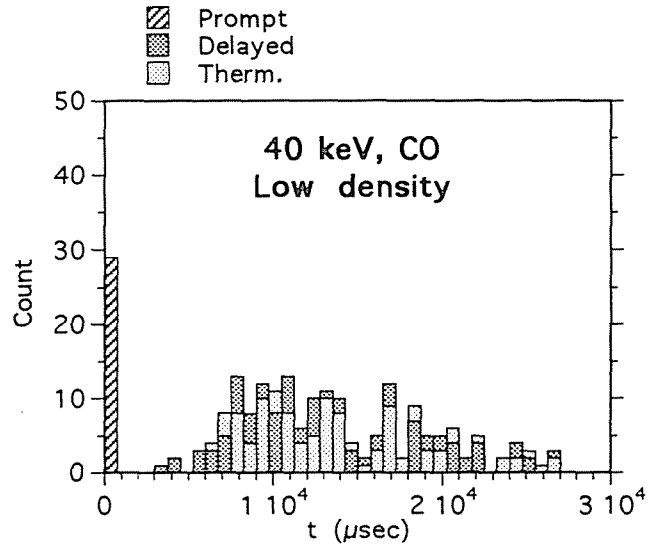
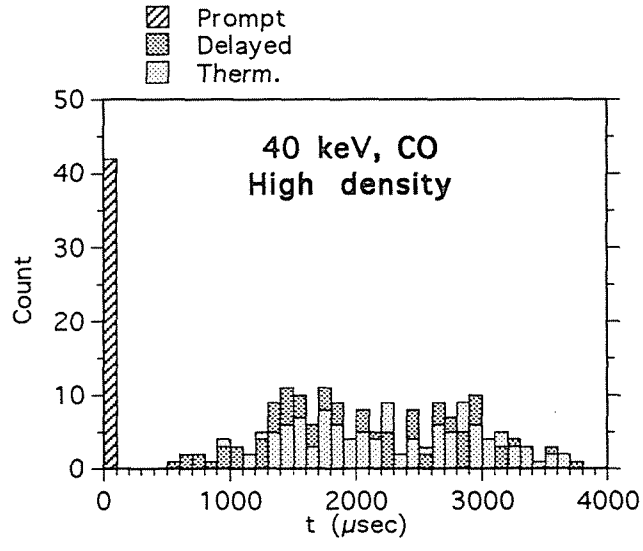

Prompt Losses
TXT-3, High density
Promot Fract.
Orbit Loss./P.Avail.
Delayed Losses
No Pitch(Bal)
Losses/Power available
E(keV)
a)
Prompt Losses
TXT-3, 40 keV
Promot Fract.
Orbit Loss./P.Avail.
Delayed Losses
No Pitch(Bal)
Losses/Power available
b)
Prompt Losses (≤ 100 μsec)
(No collisions)
Unif. CO
Unif. CNT
Unif. Bal.
Losses/Power available
E(keV)
c)

Fig. 15


Prompt
Delayed
Therm.
40 keV, CO
Low density
Count
t (μsec)


Prompt
Delayed
Therm.
40 keV, CO
High density
Count
t (μsec)

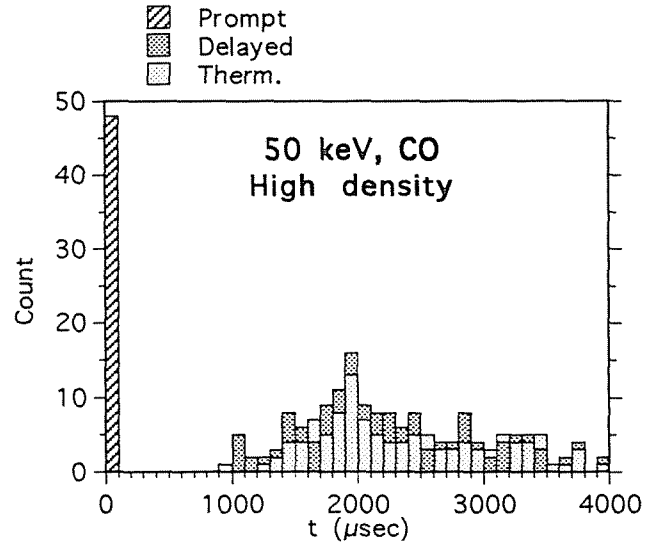

Prompt
Delayed
Therm.
50 keV, CO
High density
Count
t (μsec)

Fig. 16

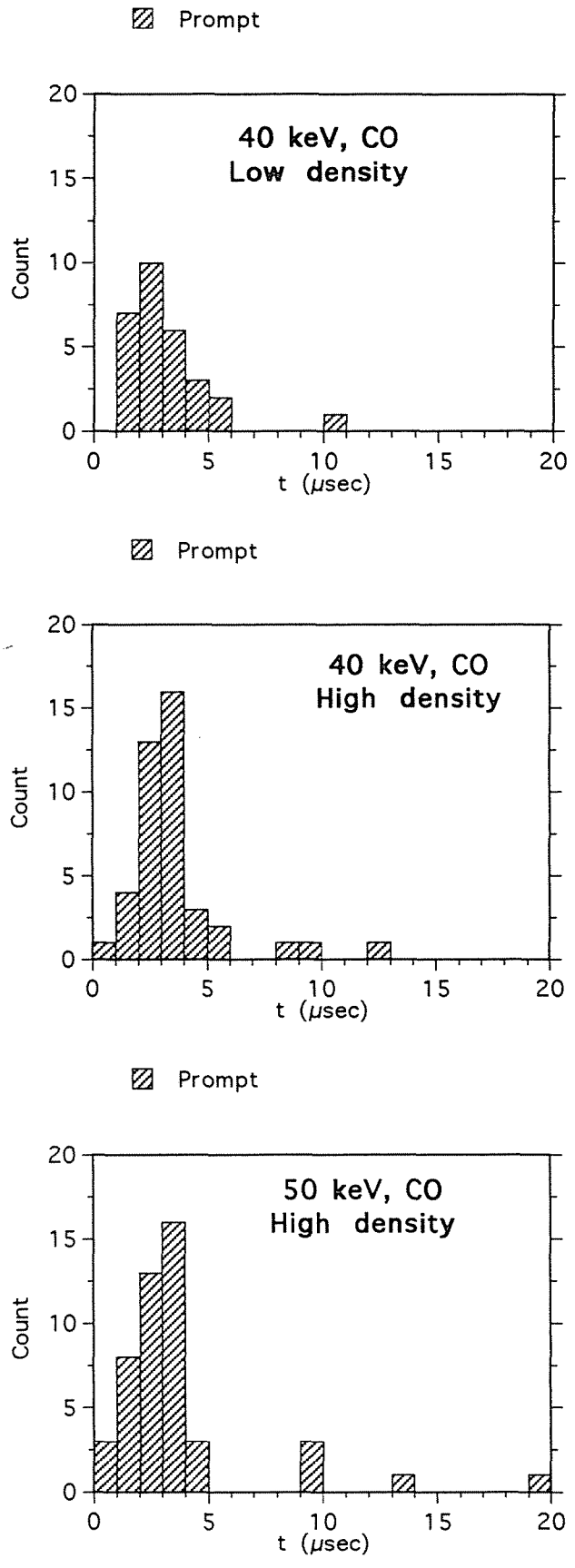

Prompt
40 keV, CO
Low density
Count
t (μsec)
Prompt
40 keV, CO
High density
Count
t (μsec)
Prompt
50 keV, CO
High density
Count
t (μsec)

Fig. 17

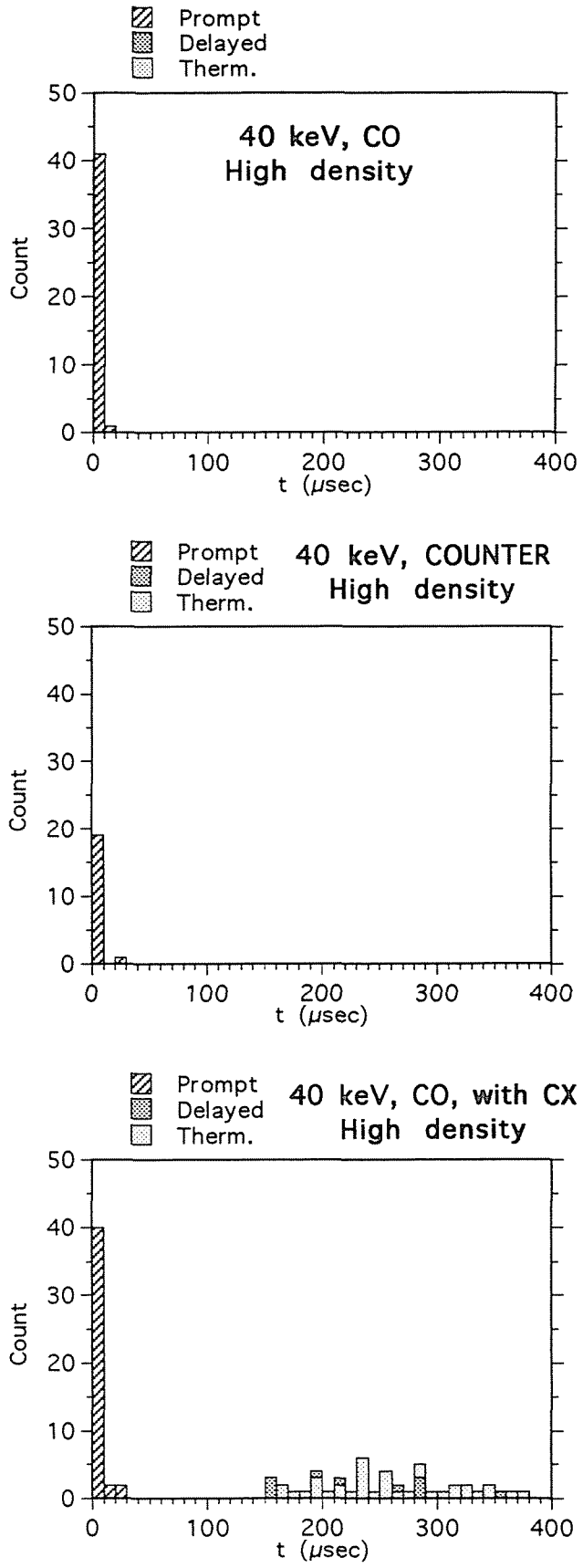
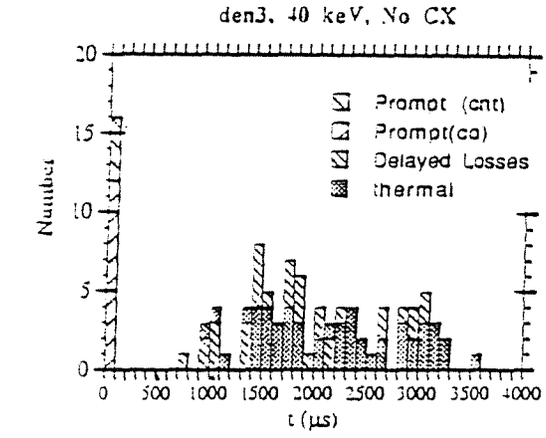
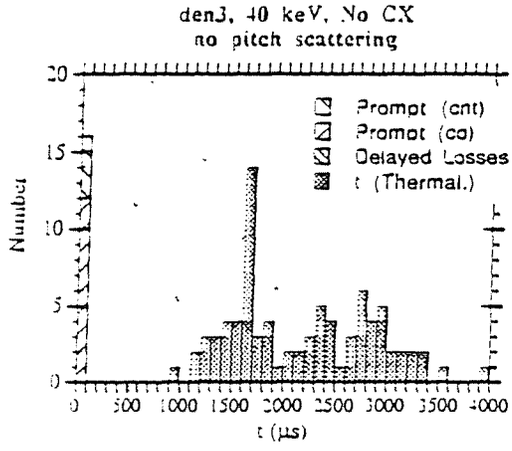

Prompt
Delayed
Therm.
40 keV, CO
High density
Count
t (μsec)
Prompt
Delayed
Therm.
40 keV, COUNTER
High density
Count
t (μsec)
Prompt
Delayed
Therm.
40 keV, CO, with CX
High density
Count
t (μsec)

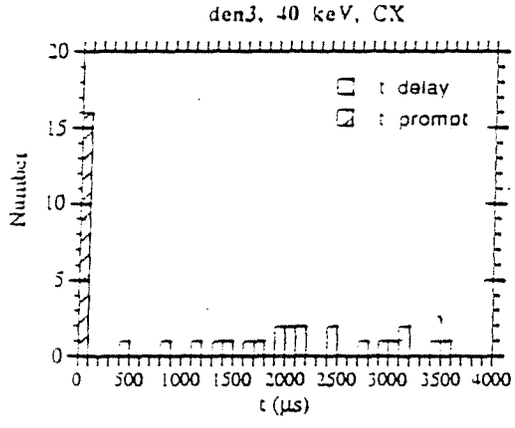
Fig. 18


den3, 40 keV, No CX
Promot (cnt)
Prompt(co)
Delayed Losses
thermal
Number
t (μs)

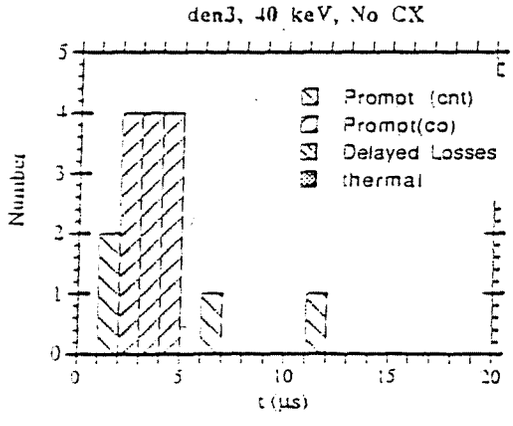
a)


den3, 40 keV, No CX
no pitch scattering
Prompt (cnt)
Promot (co)
Delayed Losses
t (Thermal.)
Number
t (μs)

b)

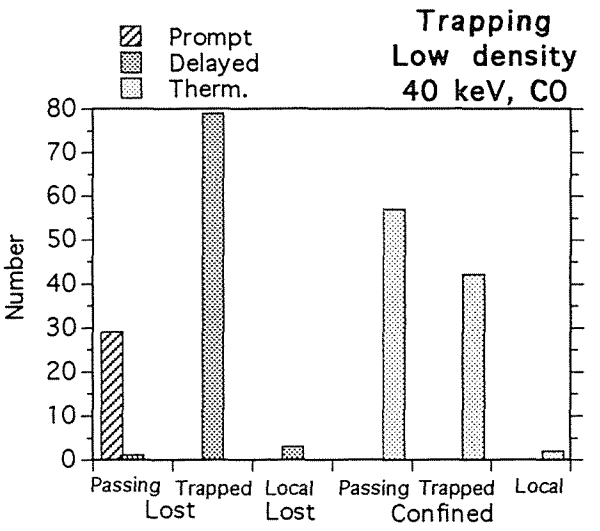

den3, 40 keV, CX
t delay
t promot
Number
t (μs)

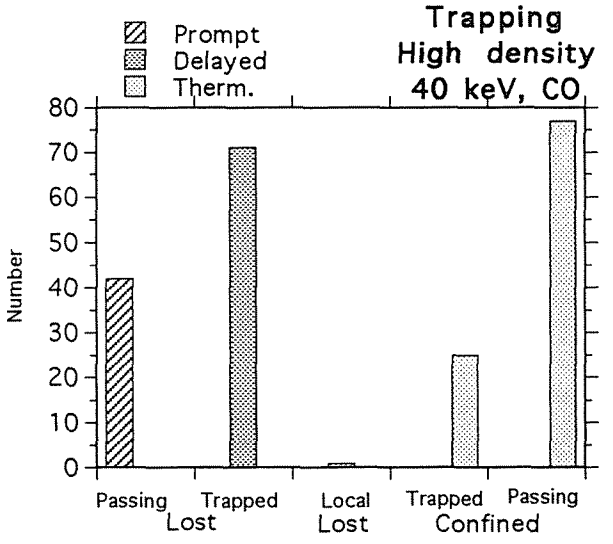
c).


den3, 40 keV, No CX
Promot (cnt)
Promot(co)
Delayed Losses
thermal
Number
t (μs)

d)

Fig. 19


Prompt
Delayed
Therm.
Trapping
Low density
40 keV, CO
Number
80
70
60
50
40
30
20
10
0
Passing
Trapped
Local
Passing
Trapped
Local
Lost
Lost
Confined


Prompt
Delayed
Therm.
Trapping
High density
40 keV, CO
Number
80
70
60
50
40
30
20
10
0
Passing
Trapped
Local
Trapped
Passing
Lost
Lost
Confined

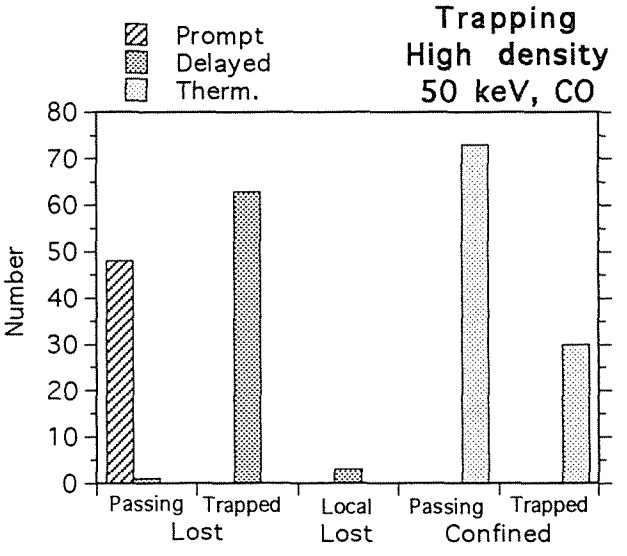

Prompt
Delayed
Therm.
Trapping
High density
50 keV, CO
Number
80
70
60
50
40
30
20
10
0
Passing
Trapped
Local
Passing
Trapped
Lost
Lost
Confined

Fig. 20

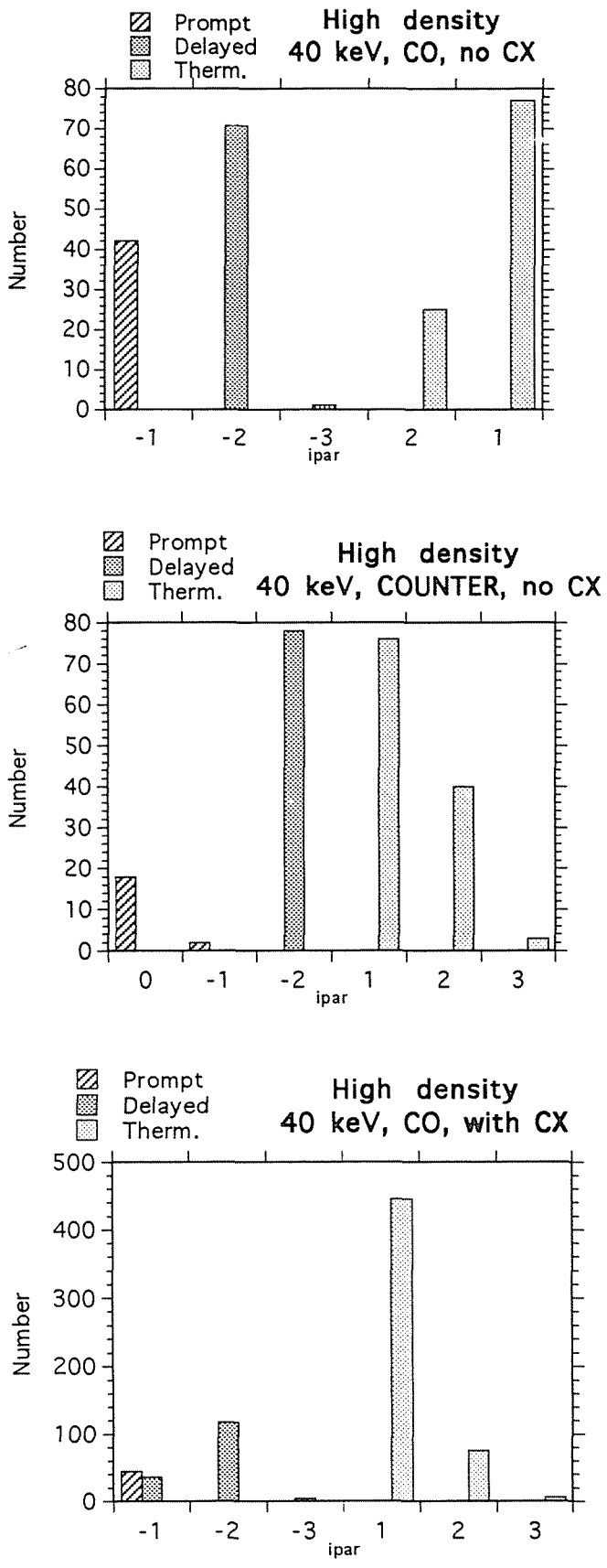
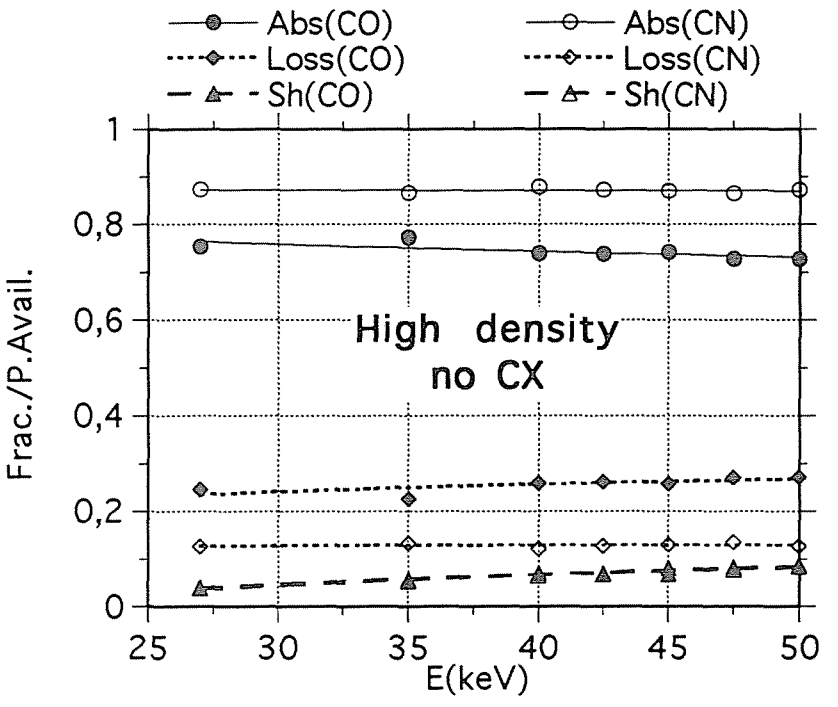

Prompt
Delayed
Therm.
High density
40 keV, CO, no CX
Number
ipar
Prompt
Delayed
Therm.
High density
40 keV, COUNTER, no CX
Number
ipar
Prompt
Delayed
Therm.
High density
40 keV, CO, with CX
Number
ipar

Fig. 21


Abs(CO)
Abs(CN)
Loss(CO)
Loss(CN)
Sh(CO)
Sh(CN)
High density
no CX
Frac./P.Avail.
E(keV)
0
0,2
0,4
0,6
0,8
1
25
30
35
40
45
50

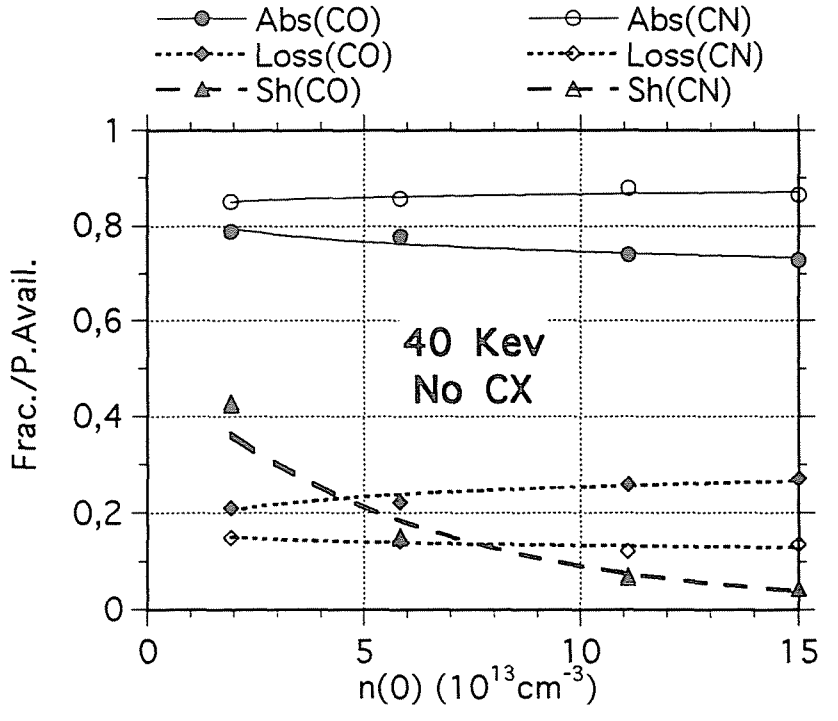
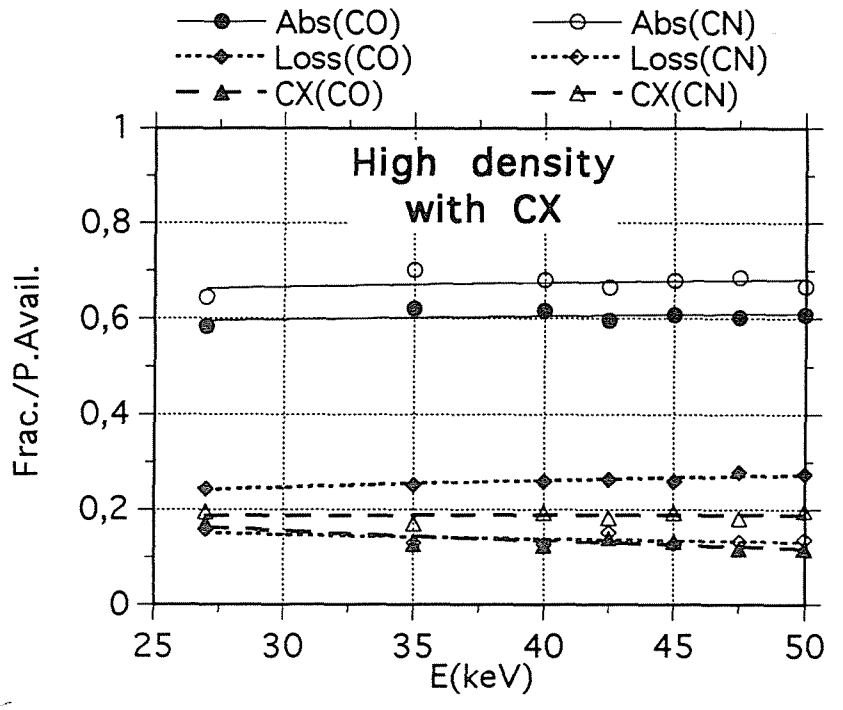

Abs(CO)
Abs(CN)
Loss(CO)
Loss(CN)
Sh(CO)
Sh(CN)
40 Kev
No CX
Frac./P.Avail.
n(0) ($10^{13}cm^{-3}$)
0
0,2
0,4
0,6
0,8
1
0
5
10
15

Fig. 22


Abs(CO)
Abs(CN)
Loss(CO)
Loss(CN)
CX(CO)
CX(CN)
High density
with CX
Frac./P.Avail.
E(keV)
0
0,2
0,4
0,6
0,8
1
25
30
35
40
45
50

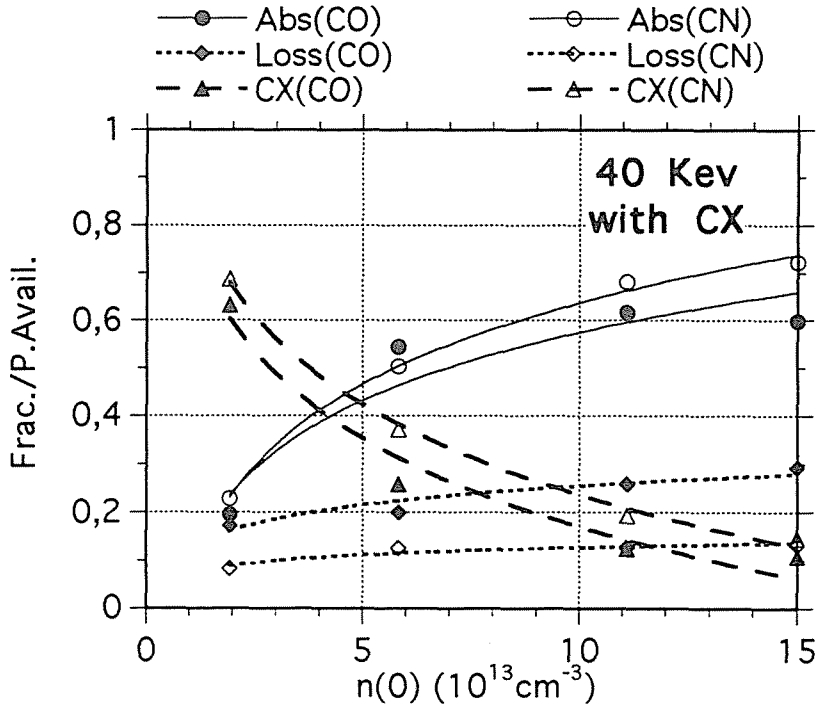
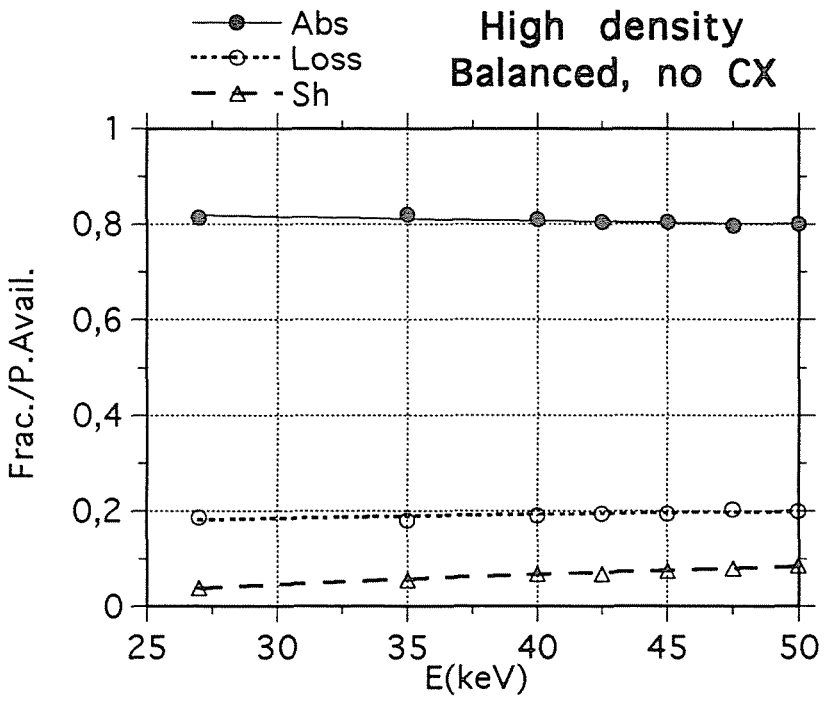

Abs(CO)
Abs(CN)
Loss(CO)
Loss(CN)
CX(CO)
CX(CN)
40 Kev
with CX
Frac./P.Avail.
n(0) (10^13 cm^-3)
0
0,2
0,4
0,6
0,8
1
0
5
10
15

Fig. 23


Abs
Loss
Sh
High density
Balanced, no CX
Frac./P.Avail.
1
0,8
0,6
0,4
0,2
0
25
30
35
40
45
50
E(keV)

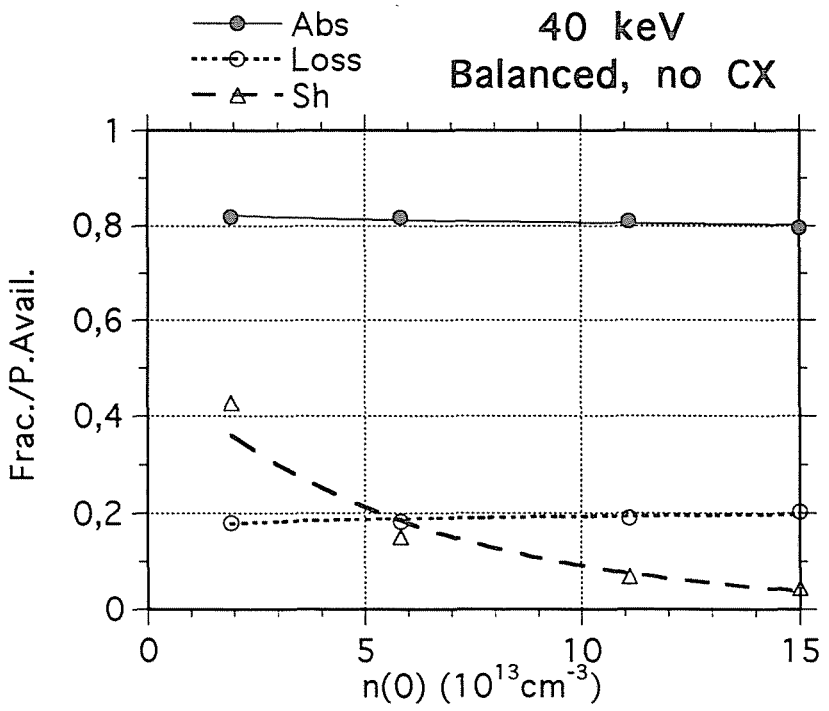
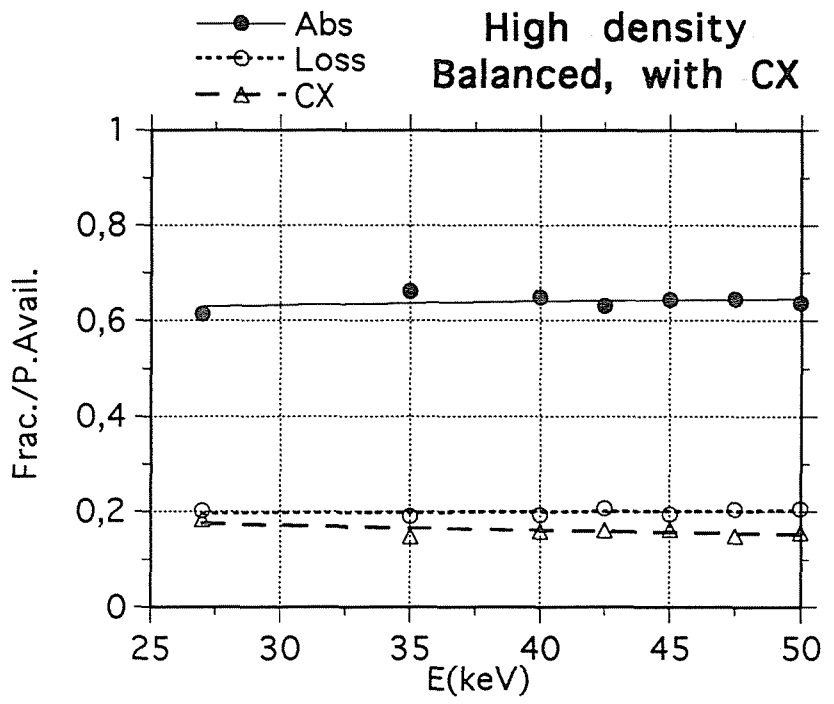

Abs
Loss
Sh
40 keV
Balanced, no CX
Frac./P.Avail.
1
0,8
0,6
0,4
0,2
0
0
5
10
15
n(0) ($10^{13}cm^{-3}$)

Fig. 24


Abs
Loss
CX
High density
Balanced, with CX
Frac./P.Avail.
1
0,8
0,6
0,4
0,2
0
25
30
35
40
45
50
E(keV)

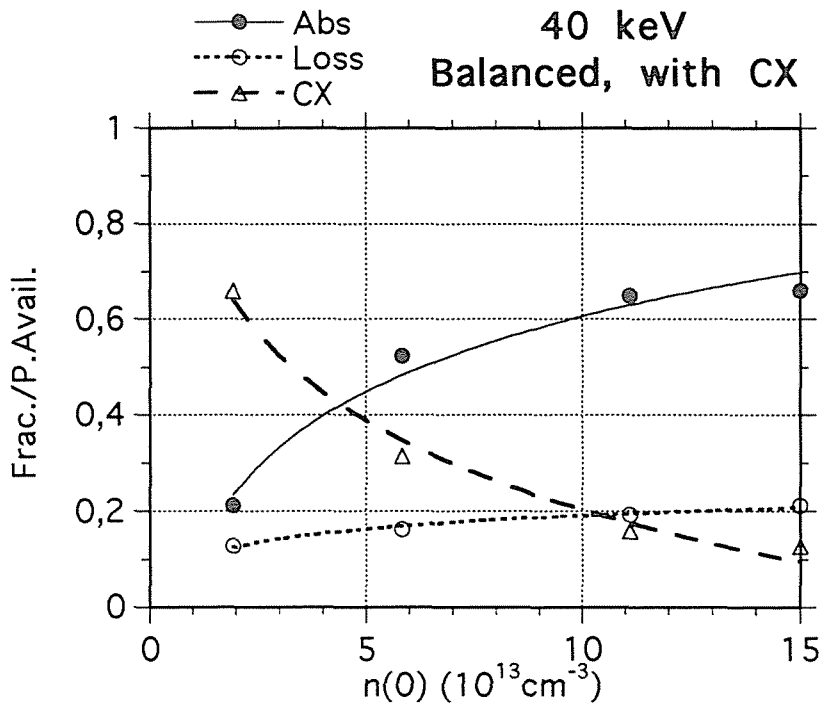
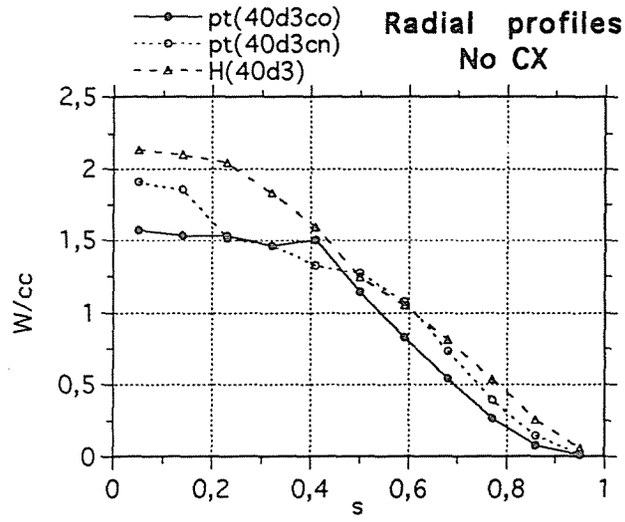
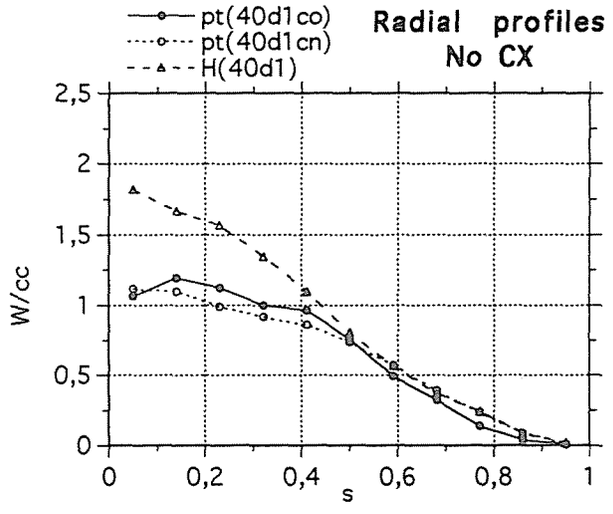

Abs
Loss
CX
40 keV
Balanced, with CX
Frac./P.Avail.
1
0,8
0,6
0,4
0,2
0
0
5
10
15
n(0) ($10^{13}cm^{-3}$)

Fig. 25


pt(40d3co)
pt(40d3cn)
H(40d3)
Radial profiles
No CX
W/cc
s
0
0,5
1
1,5
2
2,5
0,2
0,4
0,6
0,8


pt(40d1co)
pt(40d1cn)
H(40d1)
Radial profiles
No CX
W/cc
s
0
0,5
1
1,5
2
2,5
0,2
0,4
0,6
0,8

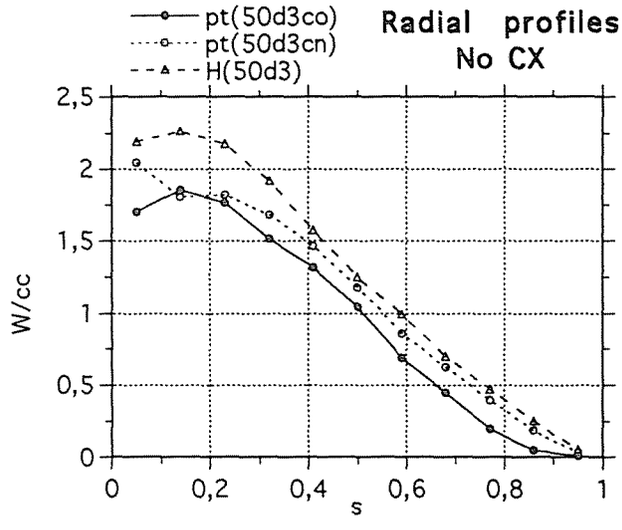
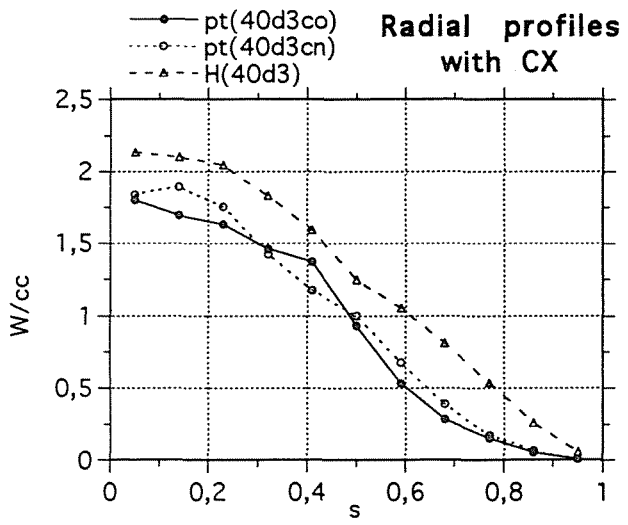
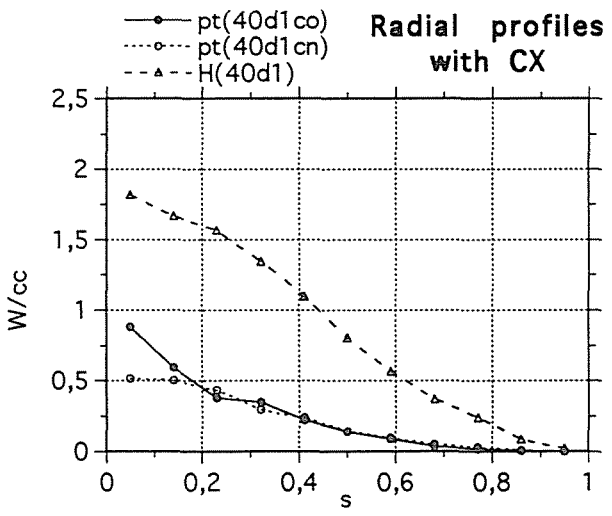

pt(50d3co)
pt(50d3cn)
H(50d3)
Radial profiles
No CX
W/cc
s
0
0,5
1
1,5
2
2,5
0,2
0,4
0,6
0,8

Fig. 26


pt(40d3co)
pt(40d3cn)
H(40d3)
Radial profiles
with CX
W/cc
s
2,5
2
1,5
1
0,5
0
0
0,2
0,4
0,6
0,8
1


pt(40d1co)
pt(40d1cn)
H(40d1)
Radial profiles
with CX
W/cc
s
2,5
2
1,5
1
0,5
0
0
0,2
0,4
0,6
0,8
1

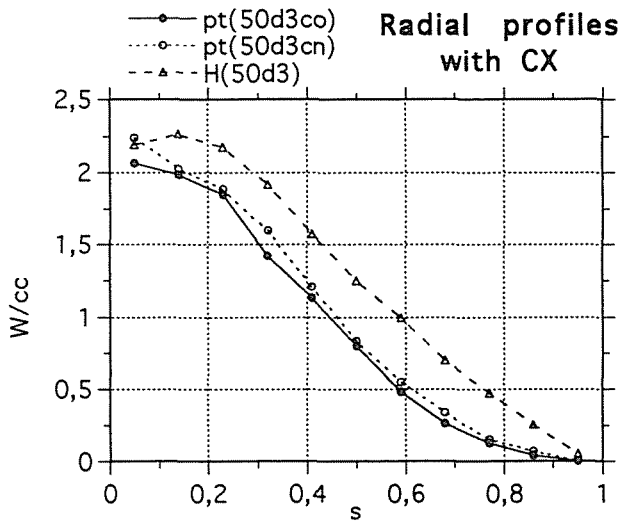
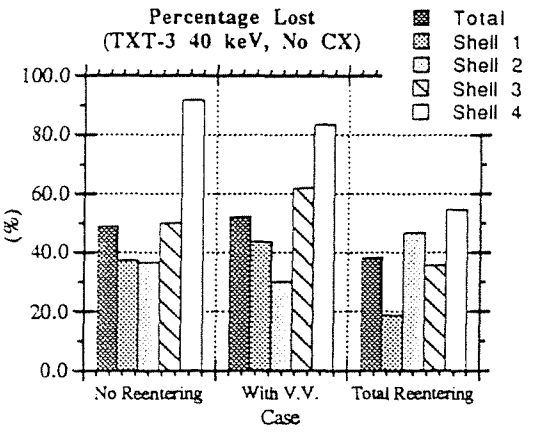
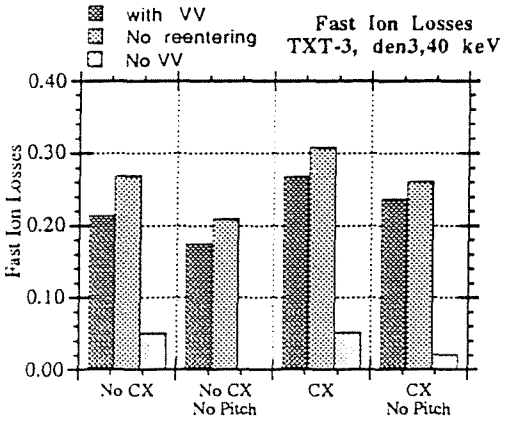
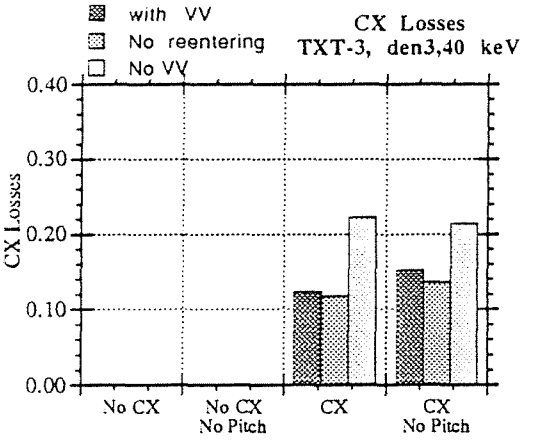

pt(50d3co)
pt(50d3cn)
H(50d3)
Radial profiles
with CX
W/cc
s
2,5
2
1,5
1
0,5
0
0
0,2
0,4
0,6
0,8
1

Fig. 27


Percentage Lost
(TXT-3 40 keV, No CX)
Total
Shell 1
Shell 2
Shell 3
Shell 4
100.0
80.0
60.0
40.0
20.0
0.0
(%)
No Reentering
With V.V.
Total Reentering
Case


with VV
No reentering
No VV
Fast Ion Losses
TXT-3, den3,40 keV
0.40
0.30
0.20
0.10
0.00
Fast Ion Losses
No CX
No CX
No Pitch
CX
CX
No Pitch


with VV
No reentering
No VV
CX Losses
TXT-3, den3,40 keV
0.40
0.30
0.20
0.10
0.00
CX Losses
No CX
No CX
No Pitch
CX
CX
No Pitch

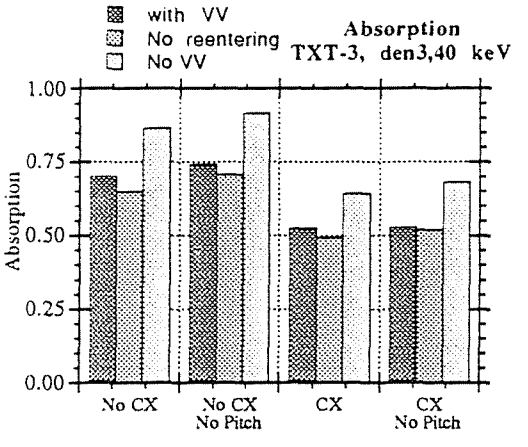
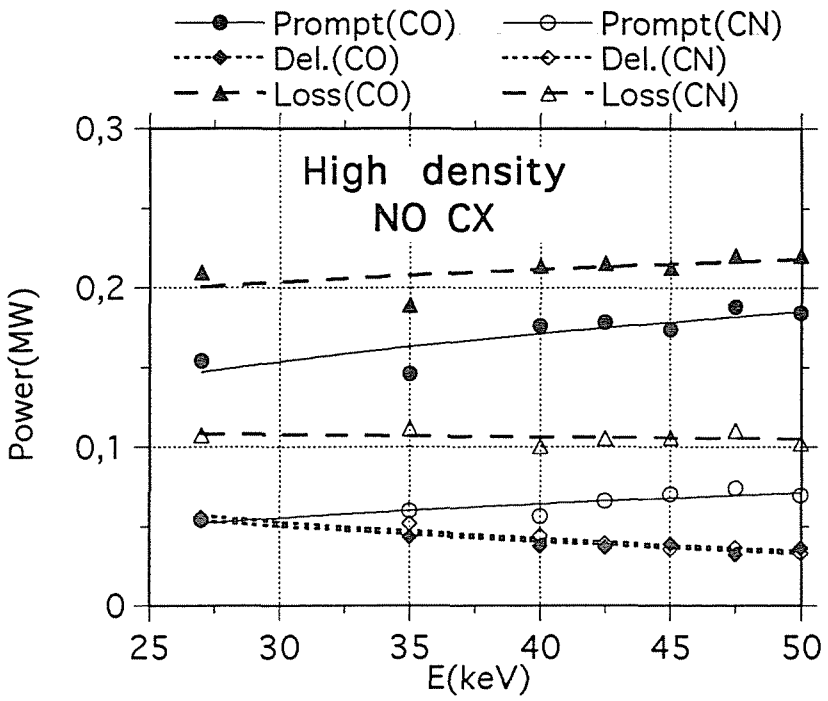

with VV
No reentering
No VV
Absorption
TXT-3, den3,40 keV
1.00
0.75
0.50
0.25
0.00
Absorption
No CX
No CX
No Pitch
CX
CX
No Pitch

Fig. 28


Prompt(CO)
Prompt(CN)
Del.(CO)
Del.(CN)
Loss(CO)
Loss(CN)
High density
NO CX
Power(MW)
0,3
0,2
0,1
0
25
30
35
40
45
50
E(keV)

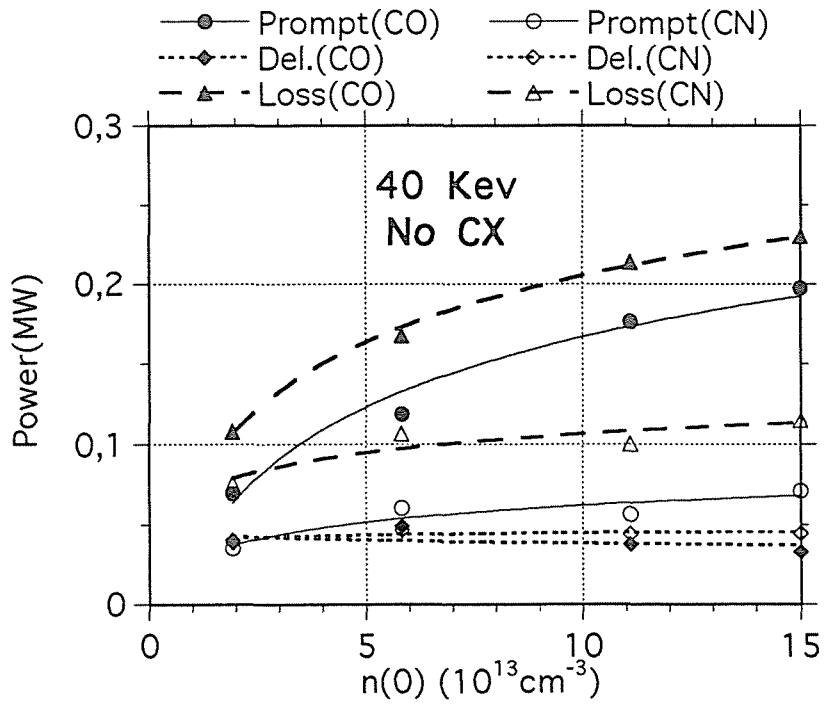
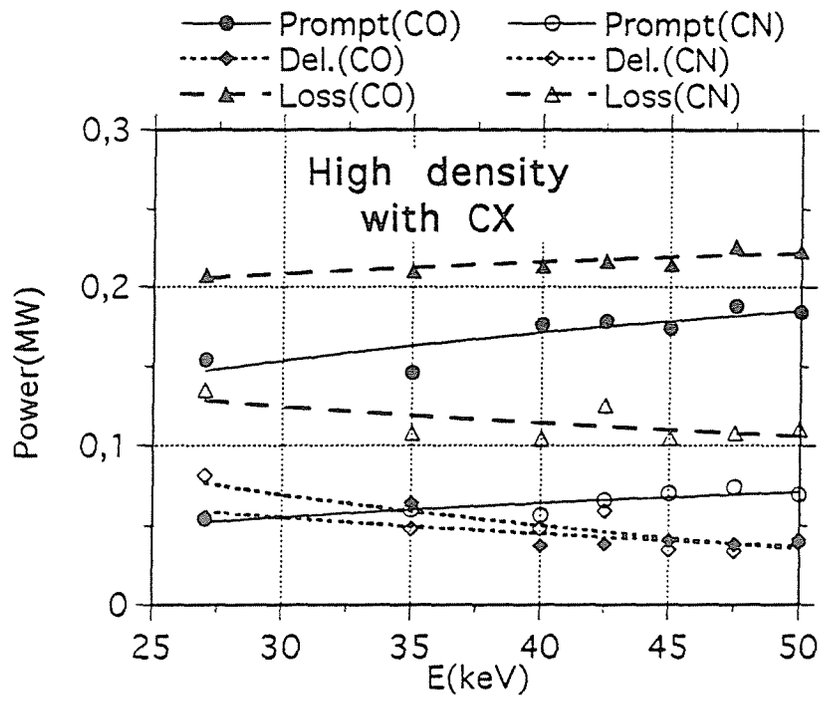

Prompt(CO)
Prompt(CN)
Del.(CO)
Del.(CN)
Loss(CO)
Loss(CN)
40 Kev
No CX
Power(MW)
0,3
0,2
0,1
0
0
5
10
15
n(0) ($10^{13}cm^{-3}$)

Fig. 29


Prompt(CO)
Prompt(CN)
Del.(CO)
Del.(CN)
Loss(CO)
Loss(CN)
High density
with CX
Power(MW)
0,3
0,2
0,1
0
25
30
35
40
45
50
E(keV)

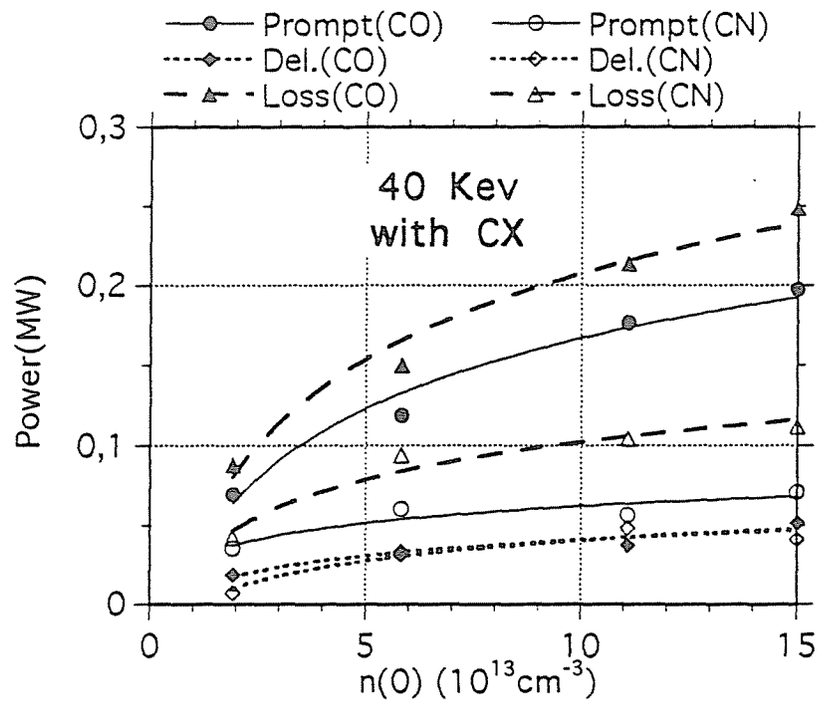
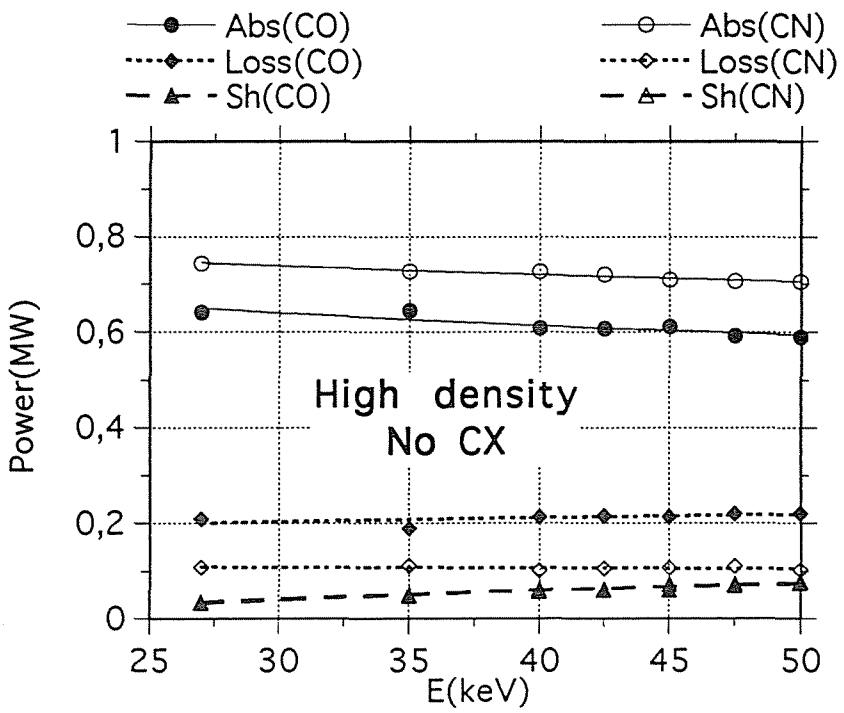

Prompt(CO)
Prompt(CN)
Del.(CO)
Del.(CN)
Loss(CO)
Loss(CN)
40 Kev
with CX
Power(MW)
0,3
0,2
0,1
0
0
5
10
15
n(0) ($10^{13}cm^{-3}$)

Fig. 30


Abs(CO)
Loss(CO)
Sh(CO)
Abs(CN)
Loss(CN)
Sh(CN)
High density
No CX
Power(MW)
E(keV)
0
0,2
0,4
0,6
0,8
1
25
30
35
40
45
50

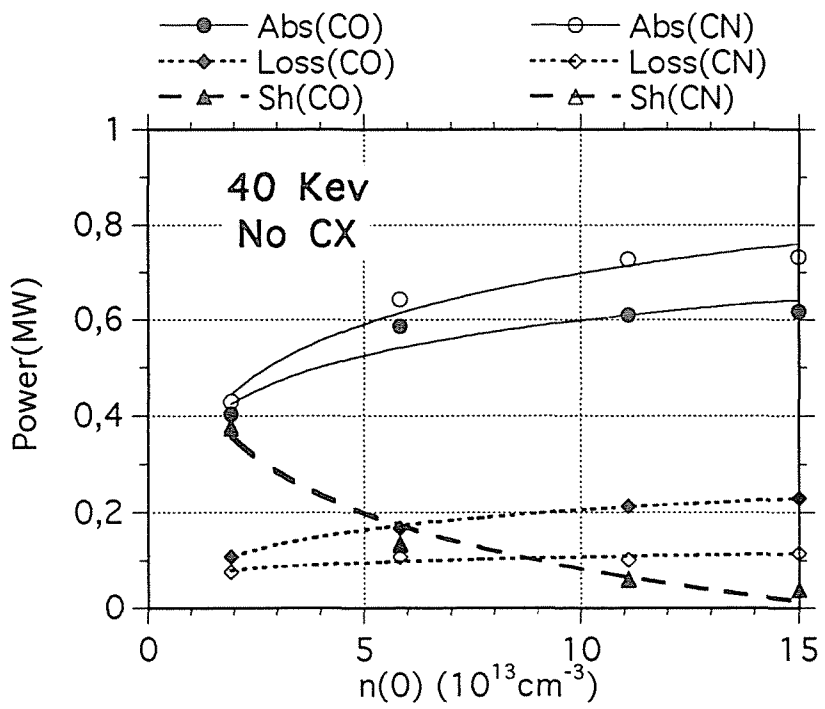
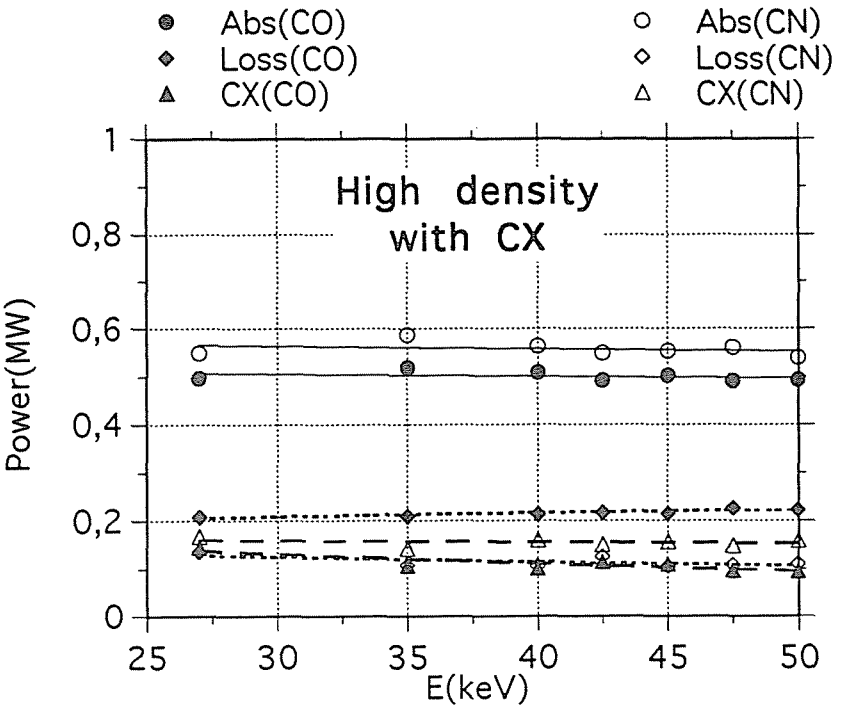

Abs(CO)
Loss(CO)
Sh(CO)
Abs(CN)
Loss(CN)
Sh(CN)
40 Kev
No CX
Power(MW)
n(0) ($10^{13}cm^{-3}$)
0
0,2
0,4
0,6
0,8
1
0
5
10
15

Fig. 31


Abs(CO)
Loss(CO)
CX(CO)
Abs(CN)
Loss(CN)
CX(CN)
High density
with CX
Power(MW)
E(keV)
0
0,2
0,4
0,6
0,8
1
25
30
35
40
45
50

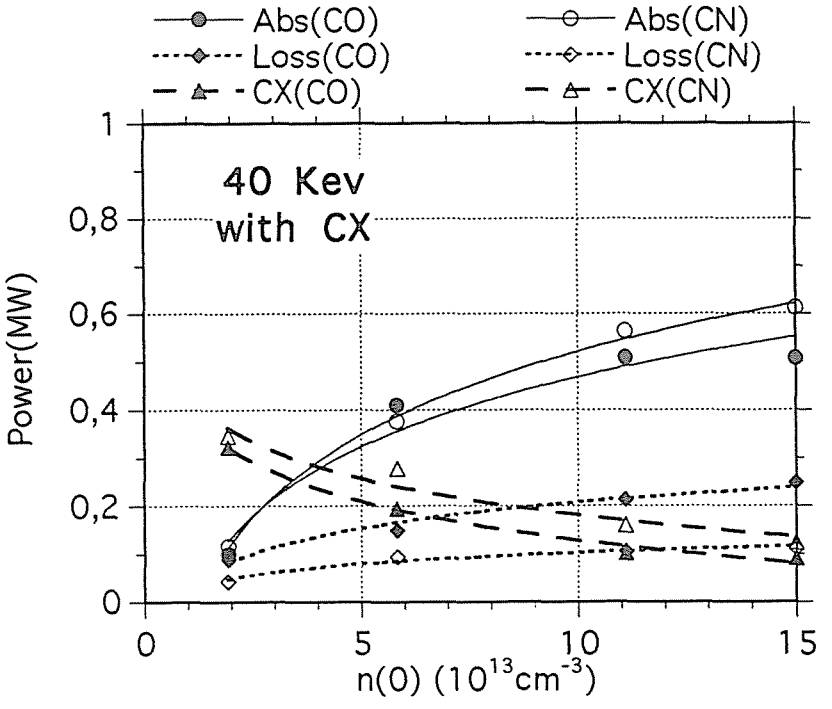
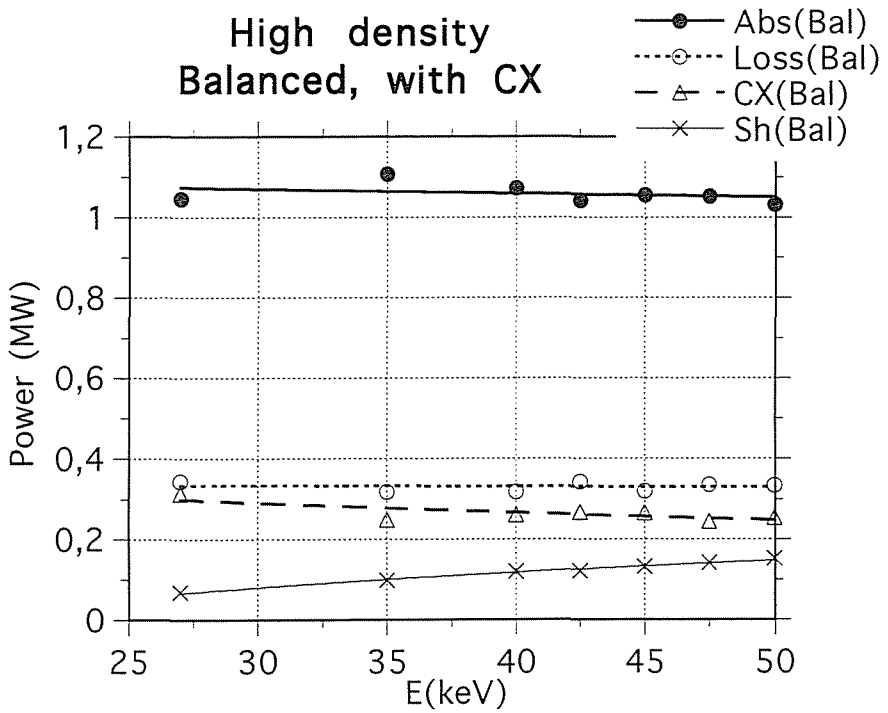

Abs(CO)
Loss(CO)
CX(CO)
Abs(CN)
Loss(CN)
CX(CN)
40 Kev
with CX
Power(MW)
n(0) ($10^{13}cm^{-3}$)
0
0,2
0,4
0,6
0,8
1
0
5
10
15

Fig. 32


High density
Balanced, with CX
Abs(Bal)
Loss(Bal)
CX(Bal)
Sh(Bal)
Power (MW)
E(keV)
1,2
1
0,8
0,6
0,4
0,2
0
25
30
35
40
45
50

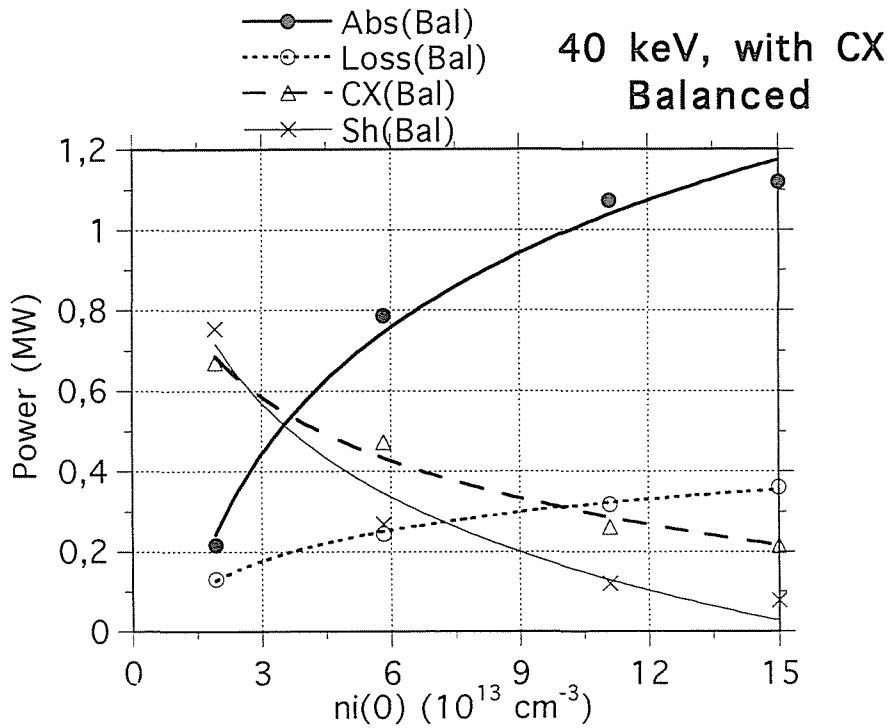

Abs(Bal)
Loss(Bal)
CX(Bal)
Sh(Bal)
40 keV, with CX
Balanced
Power (MW)
ni(0) (10^13 cm^-3)
1,2
1
0,8
0,6
0,4
0,2
0
0
3
6
9
12
15

Fig. 33