Informes Técnicos Ciemat

878
febrero, 1999

Efectos Resonantes durante la Moderación de Haces Neutros del TJ-II

J. Guasp
M. Liniers
C. Fuentes

Asociación EURATOM/CIEMAT para Fusión - 54

Departamento de Fusión y Partículas Elementales

Toda correspondenica 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 Estdos Unidos.

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

Depósito Legal: M -14226-1995
ISSN: 1135 - 9430
NIPO: 238-99-003-5

Editorial CIEMAT

CLASIFICACIÓN DOE Y DESCRIPTORES

700380;700412
PLASMA; HELIAC STELLARATORS; HELICAL CONFIGURATION; PLASMA; PARTICLE LOSSES; NEUTRAL ATOM BEAM INJECTIONS; ELECTRIC FIELDS; NUMERICAL ANALYSIS

"Efectos Resonantes durante la Moderación de Haces Neutros en el TJ-II"

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

80 pp. 47 figs.11 refs.

Resumen:

Se analiza teóricamente la estructura de las pérdidas de iones rápidos durante la moderación de haces neutros en el TJ-II, y muy en especial la influencia de los efectos resonantes y su dependencia con el campo eléctrico radial.

Las pérdidas directas presentan claros efectos resonantes cuando la relación de velocidades de rotación pasa cerca de los valores -4/3, -2 y 0, visibles tanto por la presencia de máximos pronunciados en las tasas de pérdidas como en las características de las trayectorias.

Las pérdidas retardadas también presentan efectos resonantes, generalmente a energías intermedias, 5 a 20 keV para inyección a 40 keV. Cerca de las resonancias la población de partículas pasantes que corresponden a estas fugas es muy numerosa y sus tasas de pérdidas pueden igualar e incluso superar a las de las pérdidas directas.

En esas pérdidas retardadas las partículas se concentran en los diagramas de los conos de pérdidas en franjas verticales, vecinas a las resonancias, con velocidad paralela más o menos constante. Esa velocidad paralela crece en módulo al aumentar el campo eléctrico, los máximos de pérdidas acostumbran a alcanzarse cuando el *pitch* y energía de estas franjas se acercan a los valores del inicio de la inyección

La componente atrapada de las pérdidas retardadas es máxima a potencial nulo, decreciendo al aumentar éste independientemente de su signo. Sus energías finales acostumbran a ser bajas (1 a 5 keV). Salvo a potenciales extremos, en que los que la resonancia -4 se deja sentir, no se observan efectos resonantes en esta población.

La ordenación de las resonancias es similar para todas las configuraciones y obedece razonablemente a la predicha por un modelo simple.

Las configuraciones extremas se encuentran dominadas por los efectos de las resonancias 0 y -2, dando lugar a tasas de pérdidas muy elevadas incluso a potencial eléctrico nulo. Por el contrario las configuraciones intermedias, cercanas a la de Referencia, no presentan efectos resonantes y sus tasas de pérdidas son moderadas a potenciales bajos. Sólo por encima de 2000 V los efectos resonantes comienzan a sentirse.

"Resonant Effects in Neutral beam Moderation at TJ-II"

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

80 pp. 47 figs.11 refs.

Abstract:

The structure of fast ion losses in neutral beam moderation at TJ-II is analysed theoretically, in particular the influence of resonant effects and the radial electric field dependence.

The direct losses show strong resonant effects when the ratio of the poloidal and toroidal rotation velocities pass near the values -4/3, -2 or 0. These effects are visible as strong maxima on the loss fractions and also as characteristic trajectory behaviours.

The delayed losses present resonant effects also, generally at intermediate energies (5 to 20 keV for 40 keV injection). Near the resonances the population of passing particles in these losses is very high and the loss fraction can equal or even surpass the direct losses.

In these delayed losses the particles concentrate along vertical strips on the loss cone diagrams of roughly constant parallel velocity. This parallel velocity increases with the electric field, the loss maxima are reached usually when the pitch and energy of these strips are near the initial injection values.

The trapped particle population in these delayed losses is maximal at null electric field and decreases with the field intensity for both potential signs. The corresponding final energies are usually low (1 to 5 keV). Except at extreme potentials, where the -4 resonance can appear, no resonant effects are observed for this population.

The resonance ordering is similar for all configurations and follows reasonably the predictions of a simple model.

The extreme configurations are dominated by the effects of the 0 and -2 resonances, giving very high loss fractions even for null electric field. In contrast the intermediate configurations, near the Reference one, do not present resonant effects and the losses are moderate at low potentials. Only above 2000 V the resonant effects start to appear.

Indice

1. Introducción.

2. Influencia del campo eléctrico radial en la absorción para la configuración de Referencia.

3. Comportamiento de las pérdidas de iones rápidos para la configuración de Referencia:
   3.1. Comportamiento a 40 keV.
   3.2. Dependencia con la energía de inyección.
   3.3. Situación de las resonancias en el caso no colisional.
   3.4. Comportamiento lejos de las resonancias.

4. Efectos de la resonancia -4/3.
   4.1. Caso de alto campo eléctrico.
   4.2. Caso de bajo campo eléctrico.

5. Efectos de la Resonancia 0.

6. Efectos de la Resonancia -2.

7. Situación de las resonancias para las diversas configuraciones.

8. Conclusiones.

Referencias

Lista de Figuras

1. Introducción

En este estudio se analiza la estructura de las pérdidas de iones rápidos durante la moderación de haces neutros en el TJ-II, y muy en especial la influencia de los efectos resonantes y su dependencia con el campo eléctrico radial.

Las configuraciones magnéticas seleccionadas son las mísmas que se utilizaron en la Ref.[1] para el estudio de la dependencia de la absorción con la configuración, con la única diferencia de que, con el fin de dar más variación, la configuración c44 de la serie [2], que da resultados similares a la c40 y ref2, se ha sustituido por la g de [3] que presenta fuertes efectos resonantes a bajo campo eléctrico. Las principales propiedades de esas configuraciones aparecen resumidas en la Tabla 1.I.

El método de cálculo también ha sido idéntico al utilizado en [1]: el código de Montecarlo Fafner-2 en coordenadas de Boozer ([4],[5],[6]), pero, esta vez, con la inclusión de un campo eléctrico radial.

Como en todos los estudios anteriores ([7], [8], [3]) el perfil radial del potencial del que deriva ese campo eléctrico se ha elegido lo más sencillo posible: parabólico, nulo en el borde, similar a los perfiles de temperatura, de esta forma un potencial central positivo da lugar a un campo eléctrico radial también positivo, dirigido hacia fuera del plasma. Al igual que en el resto de los estudios los resultados no dependen críticamente de la forma concreta de ese perfil radial.

Tabla 1.I

Principales características de las 9 configuraciones seleccionadas

Config.	Corrientes	Ihc (kA)	t(0)	reff (cm)	W (%)	δB(0) (%)	δB(a) (%)	dRax (cm)	Disim. (cm)	Shear (%)
e	103_0_52	**0**	**0.94**	**11.2**	**0.49**	2.45	**17.3**	19.8	+1.75	+5.5
d	88_15_50	1.5	1.20	13.0	1.32	2.26	20.5	20.4	+1.78	+3.2
c28	100_28_59	2.8	1.38	16.5	1.90	1.47	28.8	22.7	+1.93	+6.0
g	98_27_35	2.7	1.40	14.3	2.63	3.42	24.7	21.5	+4.96	+2.2
Ref2	104_33_61	3.3	1.47	18.2	2.35	**0.71**	32.7	22.8	+1.77	+3.0
c40	100_40_63	4.0	1.51	18.9	2.20	1.69	36.3	23.6	+1.69	+6.6
c48	100_48_65	4.8	1.59	20.1	2.46	2.09	41.9	24.1	+1.44	+6.8
c68	100_68_72	6.8	1.77	20.2	2.36	**3.17**	44.2	25.6	+1.29	+4.8
b	78_74_65	**7.4**	**1.91**	18.4	**5.45**	2.05	35.0	24.8	+1.79	-0.5

Nomenclatura:

Ihc: Corriente total en el conductor helicoidal
t(0): Transformada rotacional en el eje magnético
reff: Radio medio de la última superficie magnética no interceptada
W: Profundidad máxima del pozo magnético
δB(0): Rizado medio (*ripple*) del campo magnético en el eje: $(B_{max} - B_{min})/(2B_{aver})$
δB(a): Idem. en el borde
dRax: Elongación del eje magnético (distancia al centro del conductor circular CC para ángulo toroidal $\Phi=0°$)
Disim: Disimetría del eje magnético (diferencia entre la elongación del eje para $\Phi = 0°$ y para $\Phi = 45°$)
Shear: Diferencia relativa entre el valor de la transformada rotacional en el borde y en el eje.

2. Influencia del campo eléctrico radial en la absorción para la configuración de Referencia.

El comportamiento de la absorción para el caso de la configuración de Referencia (ref2) a 40 keV y densidad intermedia (valor central 5.4×10^{13} cm^{-3}, cf. Tabla 3.I de [1]) aparece en la Fig.2.1a para potenciales eléctricos moderados ($|V_0| < 1000$ Volt.). Se observará que la tasa de absorción (Pabs), en términos de la potencia disponible en el plasma, es decir tras descontar las pérdidas por *shine through*, es prácticamente insensible al valor del campo, con un ligerísimo aumento para campo más positivo, debido a un decrecimiento también muy leve en las pérdidas de iones rápidos totales (olt), consecuencia, a su vez, de una ligera variación de las pérdidas instantáneas (directas, *prompt*, olpr), mientras que las pérdidas retardadas (*delayed*) apenas presentan variación.

Es necesario ampliar el rango de potenciales recorridos (hasta 10000 Volt. en la Fig.2.1b) para que importantes cambios comiencen a ser visibles, con claros aumentos de las pérdidas de iones rápidos, tanto directas como retardadas, que presentan picos bien visibles. En este caso correspondiente a la configuración de Referencia, ésto sólo sucede a partir de unos 2000 Volt., es decir, para valores probablemente poco realistas en el TJ-II. Sin embargo, como se verá a todo lo largo de este estudio, para algunas configuraciones magnéticas, esos picos pueden aparecer para campos eléctricos muy reducidos, afectando considerablemente a la absorción incluso a campo nulo.

Se observa también (Fig.2.2) que la absorción y las pérdidas de iones rápidos presentan un comportamiento complementario, tanto en el caso de inyección en la dirección CO (es decir paralela a la del campo nagnético toroidal, figura superior) como en la dirección opuesta (figura inferior). Por lo tanto son esas pérdidas y no las de intercambio de carga (CX), que presentan comportamiento similar al de la absorción [1], las responsables de esas alteraciones.

Por último la Fig.2.3 pone de manifiesto la diferente localización de los picos para las pérdidas directas y retardadas y para cada dirección de inyección. Además se observará que para ciertos valores del potencial (+5000 V para el caso CO, >+3500 V para el COUNTER) la tasa de pérdidas retardadas puede ser igual o incluso superior a la de las directas, un hecho que contrasta con la tendencia completamente opuesta que se da para campo eléctrico nulo en todas las configuraciones (cf. Tabla 3.IV de Ref.[1]).

Comportamientos similares se observan para otras densidades del plasma, por ello en lo sucesivo nos limitaremos a presentar los cálculos correspondientes a densidad intermedia: valor central 5.4×10^{13} cm^{-3}, es decir al caso d4 de [1].

3. Comportamiento de las pérdidas de iones rápidos para la configuración de Referencia.

En los cálculos correspondientes a las gráficas anteriores se encuentran incluidos tanto los efectos de CX como de reionización posterior de esos neutros rápidos. Además, como es usual, se ha considerado una mezcla de especies energéticas en la proporción 80:10:10 (cf. Tabla 3.III de Ref.[1]), por consiguente en este caso los iones rápidos no poseen a una energía única inicial.

Estos tres efectos contribuyen a complicar la interrpretación del comportamiento de las pérdidas sin aportar nada cualitativamente significativo, por ello, con el fin de clarificar lo más posible la situación, en lo sucesivo se prescindirá de ellos, los cálculos corresponderán, por tanto, a ausencia de CX (y de reionización) y a una única energía de nacimiento de los iones rápidos. Se analizarán primero los resultados para 40 keV (§3.1) y más tarde (§3.2) su dependencia con la energía inicial.

3.1. Comportamiento a 40 keV.

Así la Fig. 3.1 muestra la descomposición de las pérdidas de iones rápidos en el caso de inyección CO, como ya se ha dicho sin CX y para energía inicial única de 40 keV. Además, a partir de ahora, la tasa de fugas se va a representar como fracción del número de partículas perdidas, sea cual sea su energía final, en lugar de la tasa de potencia, que es dependiente de esa energía final y da peor idea del destino individual de los iones.

La Fig. superior presenta las pérdidas totales (fl), con su separación entre directas (fl-pr) y retardadas (fl-del), mientras la inferior descompone las pérdidas retardadas (fl-del) en pasantes (fl-dps) y atrapadas (fl-tr). Como se ha indicado repetidamente en otros estudios ([9], [7], [10]) la inyección de neutros en el TJ-II es extremadamente tangencial por lo que absolutamente todos los iones rápidos nacen con prámetro de *pitch* muy superior al valor crítico y, por consiguiente, inician su vida como partículas pasantes. Por lo tanto las pérdidas directas, que apenas tienen tiempo de sufrir efectos colisionales, corresponden siempre, en el TJ-II, a partículas pasantes de alta energía. Por el contrario las pérdidas retardadas, que sí que pueden sufrir efectos colisionales, en particular de *pitch angle scattering*, pueden convertirse en atrapadas en el curso de su moderación.

Por su parte la Fig.3.2 muestra las mísmas magnitudes para el caso de inyección en la dirección COUNTER.

Se observará que, en ambos casos, los picos aparecen ahora mucho mejor definidos que en la Fig.2.3 anterior (ya no hay mezcla de diversas energías) situados a potenciales diferentes en cada caso. Además la proporción de partículas atrapadas perdidas presenta un máximo para potencial nulo, en donde la de pasantes retardadas en ínfima; este máximo local no se manifiesta apenas en la fracción de potencia (Fig.2.3) ya que, como se verá posteriormente, corresponde a iones de energía relativamente baja (1 a 5 keV). Esa distribución decrece monótonamente con la intensidad del campo eléctrico sea cual sea su signo, de manera que para potenciales elevados las pérdidas retardadas pasantes predominan fuertemente sobre las atrapadas.

Se observará también la aparición de un pequeño pico local en la distribución de pérdidas retardadas pasantes del caso COUNTER hacia -1000 Volt. (fl-dps en Fig.3.2b), pico que antes quedaba bastante enmascarado y que será analizado en §4.2.

La naturaleza de esos picos se clarifica ciuando se comparan las tasas de pérdidas, para cada valor del potencial eléctrico, con la relación entre las velocidades medias de rotación poloidal y toroidal correspondientes. La Fig. 3.3 presenta en la parte superior las pérdidas directas de los casos CO y COUNTER y en la inferior esa relación de velocidades angulares. Es patente, como indican las flechas, que los picos corresponden a potenciales para los que esa relación pasa cerca de los valores -4/3 (+6000 V del caso CO) y -2 (-7000 V para el caso CO, +10000 V para el COUNTER) poniendo claramente de manifiesto su caracter resonante [8],[3].

Se observará en esa figura que la relación de velocidades angulares crece monótonamente con el potencial para el caso CO y decrece en el COUNTER, con marcados detenimientos al pasar por las resonancias más intensas (la -2 en ambos casos). Esto se encuentra de acuerdo con las tendencias predichas por el "modelo simple" para las Resonancias discutido en [8] que daba para esa relación N un comportamiento del tipo (cf. fórmula (1.4), pág.6, de [8]):

$$N \equiv \Omega_\Theta/\omega_\phi = -t + V_0/(\gamma v).2R_0/(\delta^2 a^2 B) \qquad (3.1)$$

en donde t era la transformada rotacional, a el radio medio efectivo de la configuración, γ el parámetro de *pitch* del ion, v su velocidad lineal, V_0 el valor del potencial eléctrico central, etc.

De esta forma las resonancias se producirán cuando los valores de esa relación de velocidades angulares N pase por valores racionales de bajo orden, con lo cual el potencial de resonancia y, por lo tanto, la localización aproximada de los máximos de pérdidas, se producirían para (cf. fórmula (4.1), pág.17, de [3]):

$$V_{0,N}\ (\text{kVolt.}) = 3.73\ (N+t)\ [a(\text{cm})/18.2]^2\ \gamma\ [E(\text{keV})]^{1/2} \qquad (3.2)$$

Por otro lado las partículas procedentes de estas pérdidas directas, inicialmente monoenergéticas de 40 keV, emergen del plasma con energías cinéticas que poseen una distribución muy estrecha alrededor de un valor máximo que aparece representado en la Fig.3.4a. Se observará que, como era de esperar, la dependencia con el potencial eléctrico es casi lineal, de manera que para potencial positivo (campo eléctrico dirigido hacia fuera del plasma) los iones que alcanzan la periferia poeeen más energía cinética al haber sido acelerados por el campo independientemente de la dirección de inyección [7]. También aqui se observan claras perturbaciones alrededor de las zonas resonantes.

Las fórmulas (3.1) y (3.2) dependen de la combinación (γv), que no es otra que la velocidad paralela al campo magnético de la partícula $v_{\parallel}$. Como ya se indicó en [8] y [3] esa velocidad paralela es el parámetro dinámico esencial en el comportamiento de las resonancias, por lo que en lo sucesivo será útil estudiar su comportamiento, en particular el de la *velocidad paralela reducida* ξ definida como:

$$\xi = \gamma.\ (E/E_0)^{1/2} \qquad (3.3)$$

en donde E es la energía cinética final y E_0 la inicial.

Para las pérdidas directas la distribución de ese parámetro ξ también resulta ser muy estrecha con un máximo muy pronunciado, que aparece representado en la Fig.3.4b, y presenta un comportamiento monótono con el potencial, similar al de la energía cinética final pero, como es lógico debido a la presencia del *pitch* γ en (3.2), con signos opuestos para ambas direcciones de inyección.

Algo similar sucede con las pérdidas retardadas de partículas pasantes (Fig.3.5). La coincidencia aproximada de picos en la distribución de pérdidas y de resonancias es también patente, como indican las flechas, tanto para la resonancia -4/3 ((+5000 V en el caso CO, -1000 V en el COUNTER) como para la -2 (-5000 V en inyección CO, +7000 V en la COUNTER).

Además se observa que en el caso CO, hacia +10000 V, aparece otro pico que, como se verá más adelante, debe atribuirse a la influencia de la resonancia 0, pico que en el caso COUNTER parece intuirse también, aunque se encuentre situado más alla del límite izquierdo de la figura.

En este caso de pérdidas retardadas pasantes los espectros de energía final y de velocidad parelela reducida ξ son bastante más complicados que para las pérdidas directas y, como se comprobará en muchos ejemplos posteriormente, pueden presentar varios picos separados, no forzosamente estrechos. La Fig.3.6 muestra la localización del mayor de esos picos en función del potencial central, tanto para la energía final (figura superior) como para la velocidad paralela reducida ξ (inferior).

Se observará también que a medida que el potencial aumenta ambos máximos se van desplazando rápidamente hacia valores más altos. Análogo comportamiento aparece para las distribuciones en *pitch* final γ. Los saltos bruscos que se producen en esas gráficas ocurren cuando el valor absoluto del *pitch* alcanza su valor máximo posible (1), a partir de ahi ese pico desaparece y queda reemplazado por otro de energía (o valor de $|\xi|$) menor que repite la secuencia. Los máximos de pérdidas más acusados se dan cuando el valor del *pitch* y de la energía resonantes se encuentran más cercanos a sus valores iniciales.

La naturaleza resonante de esos picos queda también de manifiesto cuando se analizan las trayectorias individuales de los iones, que exhiben los comportamientos característicos de las órbitas resonantes -2 y 0 discutidos en [8].

Finalmente, para las pérdidas retardadas correspondientes a partículas atrapadas no se observan efectos resonantes claros a esta energía de 40 keV. Sin embargo pueden aparecer para otras configuraciones o energías (§3.2). Los espectros de energía poseen distribuciones no muy estrechas, centradas entre 1 y 5 keV, mientras que las distribuciones para la velocidad paralela se encuentran centradas alrededor del valor nulo y tienden a ser simétricas (§3.4).

3.2 Dependencia con la energía inicial.

Cuando se modifica la energía de inyección, manteniendo una única energía inicial para los iones, se observan comportamientos análogos para las pérdidas. Así las Figs.3.7 y 3.8 muestran las pérdidas directas y retardadas, para inyección CO y COUNTER, en el caso de tres energías iniciales (13, 20 y 40 keV, que corresponden a las presentes en la mezcla de especies energéticas usual $E_0/3$, $E_0/2$ y E_0). Los picos aparecen en todos los casos desplazados hacia valores del potencial menores y con creciente atenuación a medida que la energía decrece, lo que está de acuerdo con la tendencia predicha por el modelo simple (3.2) y la de disminución de la magnitud de las velocidades de deriva al decrecer la energía [7].

Así para las pérdidas directas del caso CO (Fig.3.7a) el pico correspondiente a la resonancia -2 (-7000 V a 40 keV) aparece hacia -5000 V a 20 keV y hacia -4000 a 13 keV. El pico menos acusado correspondiente a la resonancia -4/3 (+6000 V a 40 keV) aparece muy amortiguado hacia +3000 o +4000 V para las otras energías. Algo similar sucede con la resonancia -2 en el caso COUNTER (Fig.3.7b) que de encontrarse más allá del límite de la escala a 40 keV, aparece ya en su interior, con la consabida atenuación, a energías inferiores.

Para las pérdidas retardadas pasantes también se repite la situación e incluso de observa la aparición clara de la resonancia 0 en el interior de la escala en el caso COUNTER (extremo izquierdo de la Fig.3.8b) mientras la resonancia -4/3 (hacia -1000 V) no prece desplazarse mucho debido a la baja resolución para el potencial utilizada en el cálculo en esa zona (±1000 V).

Es claro que los resultados reseñados anteriormente en §2, con mezcla energética 80:10:10, corresponden a una superposición de los mencionados aquí.

Por su parte las pérdidas retardadas atrapadas se representan en la Fig.3.9 donde se observa el pico característico, situado a potencial nulo, pico que, como ya se ha indicado, no se manifiesta apenas en la tasa de pérdidas de potencia debido a la baja energía cinética final de esos iones. Tampoco aparecen grandes diferencias entre las dos direcciones de inyección [9]. No obstante algunos efectos resonantes sí que se hacen sentir para las energías inferiores a potenciales extremos (-10000 V para el caso CO, +10000 V para el COUNTER) que, como se verá en §3.3, corresponden a efectos de la resonancia -4.

Finalmente la Fig.3.10 muestra los potenciales correspondientes a cada máximo de pérdidas en función de la energía inicial. Dentro de la limitada resolución del recorrido en potenciales, esos valores para los máximos de pérdidas siguen las tendencias indicadas por la fórmula (3.2), aunque no quepa esperar predicciones cuantitativas de ese modelo tan simple para la compleja situación del TJ-II.

3.3. Situación de las resonancias en el caso no colisional.

Esta localización de las resonancias queda más clarificada cuando se observa su situación en los diagramas *pitch* -potencial (γ-V_0) utilizados en [8] y [3]. Tres ejemplos relevantes para la inyección de haces neutros aparecen en las Figs.3.11 a 3.13 y, aunque correspondan todos a una situación no clisional (no hay ni *pitch angle scattering* ni transferencia ni difusión de energía), sus resultados son cualitativamente extrapolables a nuestro caso, sobre todo a las pérdidas directas.

El primer ejemplo (Fig.3.11) corresponde a iones de 40 keV nacidos en la parte exterior del toro (ángulos de Boozer $\Phi b = \Theta b = 0°$) para un radio normalizado s=0.60 en la configuración de Referencia. Esto corresponde *grosso modo* a la posición típica media de nacimiento de los iones rápidos en la inyección de neutros del TJ-II [9].

Como se recordará ([8],[3]) en estos diagramas se representan las bandas resonantes principales (en estos casos las -4, -8/3, -2, -4/3 y 0) para cada valor del *pitch* inicial (eje horizontal) y potencial central (vertical), las líneas continuas gruesas representan los contornos de las zonas correspondientes a partículas atrapadas, mientras las líneas de puntos y las contínuas delgadas representan los límites de las zonas de pérdidas (que además tienen la letra **L** superpuesta).

Tal como sucedía en los casos estudiados en [8] y [3] las bandas resonantes aparecen dipuestas en dirección diagonal, mientras las bandas de pérdidas de partículas pasantes se sitúan mas o menos paralelamente a las resonantes, siempre del lado más positivo del potencial. La principal diferencia entre este diagrama y los considerados en aquellas Refs. es que ahora la energía cinética inicial es mucho más alta (40 keV en lugar de 0.5 o 1) y, por consiguiente, la anchura de las bandas de pérdidas es ahora mucho mayor (mayores velocidades de deriva).

La influencia de la posición de nacimiento queda de manifiesto comparando la figura anterior con la Fig.3.12 que corresponde al mísmo caso (40 keV) para iones nacidos algo más cerca de la periferia (s=0.75). La posición de las bandas resonantes permanece más o menos igual, mientras que las bandas de pérdidas asociadas se ensanchan considerablemente. Así la zona correspondiente a campo eléctrico nulo y *pitch* inicial γ cercano a +1 (parte central izquierda) no se encuentra afectada por las pérdidas para iones nacidos en s=0.6 (Fig.3.11) pero sí que lo está para los más periféricos (s=0.75), la mayor parte de las pérdidas directas durante la inyección de neutros a 40 keV provienen de esta última zona.

También resulta claro de la comparación de las dos figuras que las pérdidas a potencial nulo son el resultado del lejano efecto de la resonancia -2, aunque su alejamiento no permita hacer patentes comportamientos resonantes en sus trayectorias.

Estas dos figuras también permiten comprobar la coincidencia aproximada de los máximos de pérdidas directas (Fig.3.3a) con la posición de las bandas de pérdidas vecinas a las resonancias. Así el maximo situuado a -7000 V en el caso CO se encuentra en el interor de la banda de pérdidas vecina a la resonancia -2 (zona inferior derecha de la Fig.3.11, cruces), mientras que el pico incipiente que aparece más allá de +10000 V en el caso COUNTER también se encontraría, fuera del diagrama arriba a la izquierda, asociado a esa mísma resonancia.

Por su parte el máximo de pérdidas del caso CO situado hacia +5000 V debe ser identificado con la banda de pérdidas situada arriba a la derecha en las Figs.3.11 y 3.12 asociadas a la banda resonante -4/3 (aspas).

Aparte del hecho, ya mencionado anteriormente, de que en estos diagramas se ignoran efectos colisionales, además, se supone en ellos que los iones nacen en una única posición espacial. En realidad, las posiciones de nacimiento durante NBI se encuentran distribuidas contínuamente en una zona espacial finita, como también lo están en *pitch*, por lo que la coincidencia entre estos diagramas y los picos de pérdidas sólo puede ser aproximada (cf. §7).

La dependencia con la energía inicial puede ser percibida comparando el diagrama anterior (Fig.3.12, 40 keV) con el de la Fig.3.13 que corresponde a 20 keV y s=0.75. Se observa que, a esta energía menor, la pendiente de las bandas resonantes ha disminuido, acercándose al eje horizontal $V_0 = 0$, en conformidad con las tendencias del modelo simple (3.2) y los resultados del §3.2, mientras las bandas de pérdidas asociadas se han estrechado.

Esto ayuda a comprender la situación de los máximos de las pérdidas retardadas pasantes (Fig.3.5), en estos casos los iones ya han sufrido algo de moderación, por lo que su energía es inferior a los 40 keV iniciales. Así el pico situado hacia +7000 V en el caso COUNTER, para el cual la energía final es de unos 20 keV (Fig.3.6a), también puede ser identificado con la banda de pérdidas asociada a la resonancia -2 (cruces, parte superior izquierda de la Fig.3.5).

En estos casos de pérdidas retardadas, los diagramas no colisionales con los que comparar deben corresponder a la energía final de cada grupo de partículas. Ejemplos suplementarios de estas comparaciones irán siendo presentados en capítulos sucesivos.

Por último un diagrama correspondiente a una energía mucho menor: 5 keV, s=0.75 aparece en la Fig.3.14 que, por un lado, ayuda a identificar la banda de pérdidas asociada a la resonancia 0 (rombos, parte superior derecha) con el máximo de pérdidas situado hacia +10000 V en el caso CO, que según la Fig.3.6a corresponde a iones de energía situada entre 5 y 10 keV. Por otro lado ayuda también a explicar los efectos resonantes observados para potenciales extremos en las pérdidas de partículas atrapadas (Fig.3.9) que, en el diagrama, se encuentran clarísimamente asociados a los notables ensanchamientos de la zona de partículas atrapadas que se observan en los márgenes de la resonancia -4 (círculos, parte inderior derecha y superior izquierda del diagrama), ensanchamientos que fueron analizados en [8].

3.4. Comportamiento lejos de las resonancias.

Un caso típico, alejado de las resonancias, lo constituye el de la configuración de Referencia (ref2) a 40 keV para campo eléctrico nulo.

Ya se ha indicado que las pérdidas directas del caso CO correspondían a efectos lejanos, que ya no presentan comportamiento resonante, debidos a la resonancia -2. Algo similar ocurre con las del caso COUNTER que se deben a efectos lejanos de las resonancias -4/3 y, más remotamente, la 0 (cf. Figs.3.11 y 3.12, zona inferior izquierda). En este caso la predominancia de la tasa de pérdidas correspondiente al caso CO (24.1% frente a 10.5% el COUNTER a densidad intermedia), se debe a efectos no resonantes asociados al comportamiento de las velocidades de deriva ([7],[8]).

En cuanto a las pérdidas retardadas están constituidas, en su inmensa mayoría, por partículas atrapadas. Así p.ej., para la inyección CO, a densidad intermedia y 40 keV sin CX ni mezcla energética, la fracción de partículas perdidas retardadas es de un 12.6% (frente a un 24.1% para las directas) y de ellas apenas un 0.4% son pasantes.

Las distribuciones para la relacion de velocidades angulares poloidal y toroidal, asi como para la energía final y velocidad paralela para esos casos de potencial nulo aparecen en la Fig.3.15 para ambas direcciones de inyección.

La distribución de la relación de velocidades angulares N (fórmula (3.1), Fig.3.15a), presenta un máximo estrecho para un valor cercano al de la transformada rotacional de la configuración, algo mayor, en valor absoluto, para el caso CO, algo menor para el COUNTER. Esta diferencia con la previsión del modelo simple ha sido explicada en [11] y es debida al comportamiento de la dirección de las velocidades de deriva. Como ambos valores se encuentran alejados de resonancias de bajo orden [8], es lógico que tampoco en estas partículas quepa esperar, *a priori*, efectos resonantes.

El espectro de energía final (Fig. central) muestra, en ambos casos, una distribución relativamente ancha con un máximo situado en valores muy bajos: 1.5 keV para el caso CO, 1 keV para el COUNTER con valores medios respectivos de 2.5 y 2.4 keV.

Por su parte la distribución para la velocidad paralela reducida (figura inferior) es muy similar en ambos casos, bien centrada en el valor 0, con una semianchura de unas 0.16 unidades y muy simétrica, lo que refleja el hecho de que en esas partículas atrapadas el signo de la velocidad paralela se está invirtiendo repetidamente a lo largo de la trayectoria.

La distribución de esas partículas en un diagrama $V_{\parallel}$-$V_{\perp}$, similar a los utilizados en [8] y [3], es decir el *cono de pérdidas*, aparece en la Fig.3.16 en donde son bien visibles tanto la distribución simétrica para ambos sentidos de la velocidad paralela, como la concentración en la zona de baja energía (centro del diagrama).

Una distribución complementaria, que muestra la correlación entre relación de velocidades angulares (N) y velocidad paralela reducida (ξ) se representa en la Fig.3.17 donde se observa simultáneamente la concentración en valores de N y de ξ.

Se notará que, en estos casos, todos estos diagramas resultan relativamente anodinos, sin estructuras dignas de ser resaltadas. Esto es lo normal en los casos alejados de las resonancias, son éstas las que proporcionan estructura y variedad a los diversos diagramas utilizados, como se verá repetidamente en capítulos sucesivos. No obstante su inclusión en éste capítulo permitirá apreciar el contraste.

Muchas de las configuraciones situadas en el diagrama de flexibilidad en las cercanías de la ref2, también se encuentran alejadas de las resonancias principales en ausencia de campo eléctrico, por lo que dan lugar a resultados similares. Como único ejemplo ilustrativo se incluyen los resultados para las pérdidas directas y retardadas correspondientes a la configuración c40 (Fig.3.18, análoga a la 3.3a y 3.5a para ref2), se observarán comportamientos idénticos, aunque con valores cuantitativos ligeramente distintos. Configuraciones tales como la c44 de [1], 100_32_60, 100_36_62 de la serie [2], e incluso, aunque en menor medida, las c28 y c48, participan de este mísmo tipo de comportamiento (cf. §7).

4. Efectos de la resonancia -4/3.

Pasemos ahora a exponer la situación de las pérdidas en las cercanías de las diversas resonancias. En lo que sigue se prestará atención especial, bien a aquellos casos en donde esos efectos suceden a campo eléctrico nuy bajo, y por tanto pueden afectar fuertemente la absorcion de NBI a potencial nulo, bien en aquellos otros que, aunque sucedan a campos más elevados, sean particularmente ilustrativos. Comenzaremos con uno de estos últimos.

4.1 Caso de alto campo eléctrico.

Se trata del caso que ocurre para la configuración de Referencia en inyección CO para un valor del potencial eléctrico situado hacia +4000 V. Corresponde al pico señalado con -4/3 en la Fig.3.5 para pérdidas retardadas, en su mator parte (95%) pasantes, que emergen con una energía unos 30 keV (Fig.3.11a), intermedia a la de los diagramas γ-V_0 de las Fig.3.11 (40 keV) y 3.13 (20 keV), y que en ellos correspondería a la banda de pérdidas situada por encima de la resonancia -4/3 (aspas, parte central-superior derecha).

Los espectros correspondientes a este caso aparecen en la Fig.4.1 (similar a la 3.15). Esta vez la distribución correspondiente a la relación de velocidades angulares N (figura superior) aparece dividida en tres componentes bien separadas: una, la más numerosa, esta constituida exclusivamente por partículas pasantes y presenta un pico extremadamente estrecho, centrado en -1.37 con una semianchura (distancia desde el máximo al valor mitad) de 0.027 y valor medio -1.325 (la resolución de la distribución es de 0.025), el resto está formado por dos poblaciones, una de partículas pasantes y otra menos numerosa (un 5%) de atrapadas, ambas presentan una distribución algo más dispersa, centrada en -1.15 con semianchura algo mayor. Es, sobre todo, la primera componente la que nos interesa aqui.

El espectro de energía final (figura central) muestra también la mísma separación en tres poblaciones, la primera, la más numerosa, con su máximo en 29 keV, valor medio 29.9 (resolución 0.5 keV) que se prolonga, atenuandose, hasta energías más altas. Las otras dos componentes poseen enegías mucho menores (3 y 5 keV). Algo similar ocurre para el espectro de ξ, aunque en este caso el pico de la primera población es también muy estrecho, como en el caso de la distribución de N.

Estos espectros se clarifican cuando se representa el diagrama $V_{\parallel}$-$V_{\perp}$, el del cono de pérdidas (Fig.4.2). Se observan claramente las tres poblaciones (partículas pasantes representadas por círculos, atrapadas por cruces) y su acumulación a lo largo de bandas estrechas, *grosso modo* verticales, es decir de velocidad paralela *constante*. Algo que predice el modelo simple (3.2) [8]. La distribución de partículas en el diagrama ξ-N aparece en la Fig.4.3, que muestra también la concentración por encima de la resonancia -1.33 (línea de puntos horizontal)

Esa situación de bandas de pérdidas verticales en el diagrama del cono de pérdidas puede ser comparada con la que aparecería en el caso no colisional para iones de energías situadas entre 1 y 40 keV que nacieran, con distribución de velocidad isotrópica, a radio normalizado s=0.75, en el exterior del toro ($\Phi b = \Theta b = 0°$, Fig.4.4). Esa figura muestra las principales resonancias, junto con los contornos de las regiones de atrapamiento y pérdidas, de manera similar a la de los diagramas γ-V_0 del §3.3.

Se observa la coincidencia aproximada de las bandas de pérdidas de éste caso no colisional con el real (Fig.4.2). La banda principal se sitúa a la izquierda de la zona resonante -4/3 (aspas), lo que coincide con la situación en los diagramas de las Fig.3.11 y 3.13 en donde la franja de pérdidas para esa resonancia aparece para *pitch* menor, es decir velocidad paralela menor, que la de resonancia. Por consiguiente existe buena concordancia cualitativa entre ambos tipos de resultados.

Otra de las bandas de pérdidas que se observan en el diagrama de la Fig.4.2 corresponde a la incipiente zona de fugas situada a la izquierda de la banda resonante 0 (rombos) para velocidad paralela y energía bajas, también en este caso hay correspondencia con la situación de los diagramas γ-V_0, aunque en esta ocasión haya que acudir a uno de energía más baja (como el de la Fig.3.14 para 5 keV) en donde refleja la situación en la parte superior del diagrama. Los efectos de esa resonancia se describirán en §5.

Si el potencial eléctrico aumentara por encima del valor -4000 V a que corresponden estos casos se observaría que en los diagramas de los conos de pérdidas las bandas resonantes verticales se desplazarían hacia la derecha del diagrama, conforme a lo predicho por el modelo simple (3.2) y a lo que se observa (a energía fija) en los diagramas γ-V_0. Volvemos a encontrar así el comportamiento de los máximos de las distribuciones del parámetro ξ descritos en §3.1 y Fig.3.6. Al llegar esa banda al borde derecho del diagrama, desaparece, puesto que correspondería a valores no fisicos, superiores a +1 de γ, aunque permanece la otra banda de pérdidas, la asociada a la resonancia 0, que a su vez se iría desplazando hacia la derecha a medida que el potencial aumentara.

Otra franja de pérdidas que puede ser observada en la parte izquierda de la Fig.4.4 del caso no colisional, asociada a la resonancia -2 (cruces), correspondería a la zona cercana a los máximos del caso COUNTER de la Fig.3.8b. Los efectos de esa resonancia se describirán en §6.

4.2 Caso de bajo campo eléctrico.

Otro caso que muestra los efectos de la resonancia -4/3 pero, ésta vez, para potencial eléctrico mucho más bajo, es el que ocurre para la configuración de Referencia en inyección COUNTER a 40 keV para -1000 V. Se trata del pequeño pico que aparece en las Fig.3.2b, para partículas pasantes, o bien en la 3.5a.

Los espectros correspondientes a este caso aparecen en la Fig.4.5. Esta vez aparecen solo dos poblaciones en proporción parecida (46% de partículas pasantes, 54% de atrapadas) aunque de características bien distitntas.

La distribución de N para la población pasante (figura superior) presenta un máximo bastante estrecho centrado en -1.35, mientras el de la población atrapada es algo más ancho con centro en -1.32. Ambos valores significativamente cercanos a la resonancia -4/3.

La distribución de energía (fig. central) es bien distinta en ambos casos: la población pasante posee el máximo de energía a 5 keV y su distribución se extiende hasta energías mucho más altas (valor medio 8.7 keV), mientras la de partículas atrapadas posee el máximo a sólo 2 keV, con un valor medio de 2.8.

La disparidad en la distribución del parámetro ξ es aún más acusada, la población atrapada posee una distribución muy similar a la que se encuentra para los casos no resonantes (§3.4), mientras que la pasante presenta un máximo estrecho.

Ésto se confirma cuando se observa el diagrama del cono de pérdidas (Fig.4.6), la población atrapada se acumula en la parte central del diagrama de manera similar a la del caso no resonante de la Fig.3.16. Por el contrario la población pasante lo hace en una banda más bien curvada, que sólo tiene orientación vertical para baja velocidad paralela, si bien esa zona agrupa la mayor parte de las partículas. El diagrama ξ-N de la Fig.4.7 complementa lo expuesto más arriba.

Esa forma curvada para la banda de pérdidas no es predicha por el modelo simple, sin embargo sí que aparece cuando se efectúan cálculos no colisionales para el cono de pérdidas en las circunstancias anteriores. Por ej. la Fig.4.8 corresponde al caso de iones de energías situadas entre 1 y 40 keV, nacidos, como en §4.1, es decir con coordenadas s=0.75, $\Phi b = \Theta b = 0°$, distribución de velocidad isotrópica y potencial central igual a -1000 V. Cuando se analizan los casos de pérdidas retardadas se observa una forma curvada de la banda resonante -4/3 que se acomoda muy bien a lo que se observa en el caso de NBI (Fig.4.6).

Por último, la situación de los diagramas de resonancia γ-V_0 para 5 keV aparece en la Fig.4.9, en la que, para obtener mejor resolución, el rango de variación del potencial eléctrico se ha limitado a $\pm$2000 V (en lugar de la 10000 habituales). Se observa en la parte izquierda del diagrama, algo por debajo de la línea horizontal V_0= 0, una zona de pérdidas, algo discontínua, asociada a la resonancia -4/3 (aspas). Una banda similar aparece para pitch y potencial opuestos, aunque allí el módulo de éste sea algo mayor, que se encontraría asociada a los máximos marcados con -4/3 en la Fig.3.8a.

Otro caso similar a éste es el de la configuración g, para el cual se representan las pérdidas directas y retardadas en la Fig.4.10. Se observa que la peresencia de la resonancia -4/3 es perfectamente visible, no sólo en las pérdidas directas del caso CO a +3000 V (que es algo que ya ocurrria en la ref2) sio también para el caso COUNTER a solamente +200 V. Algo parecido ocurre con las pérdidas retardadas en donde para el caso COUNTER (figura inferior, línea de puntos) también aparece a solamente +100 V por lo que afecta fuertemente a las pérdidas a potencial nulo. Se observará también en el extremo izquierdo de esa Fig., para el caso CO, el acercamiento a una resonancia que no había aparecido hasta ahora: la -8/3.

5. Efectos de la Resonancia 0.

Un caso claro de situación dominada por la resonancia 0 es el de la configuración d, que posee un radio efectivo y una transformada rotacional bastante bajos (13 cm y 1.20, Tabla 1.I). La distribución de pérdidas aparece en la Fig.5.1.

En ella se observa que, junto a picos ligados a la resonancia -4/3, similares a los de §4.2, que aparecen tanto en las pérdidas directas como retardadas a potenciales muy bajos (-300 V), dominan los máximos debidos a la resonancia 0, que aparecen, para las pérdidas directas, a potenciales muy elevados, pero con tasas de pérdidas enormes (100%), resonancia que también aparece en las pérdidas retardadas para potenciales no muy altos (3000 V) en ambas direcciones de inyección. Además también se observan fuertes efectos de la resonancia -2.

Por todo ello, esta configuración d, presenta pérdidas muy elevadas a campo nulo en donde los efectos de ambas resonancias (0 y -4/3) se combinan. Como se indicó en [1] ésta no es una configuración adecuada para la inyección de neutros.

El diagrama de resonancias γ-V_0 para 40 keV aparece en la Fig.5.2, que, como siempre, permite asociar los máximos de pérdidas de la Fig.5.1 con los márgenes superiores de las bandas resonantes. Nótese en particular la anchísima franja de pérdidas asociada a la resonancia 0 (rombos, esquinas superior derecha e inferior izquierda del diagrama). También es visible, alrededor de la zona $V_0 = 0$ en inyección CO (en el centro hacia la extrema derecha), la banda asociada a la resonancia -4/3 (aspas), responsable del pico mencionado en primer lugar. Asimismo las zonas de pérdidas asociadas a la resonancia -2 (cruces) corresponden a los potenciales de los máximos respectivos.

Como ejemplo del efecto de la resonancia 0 en este caso consideraremos la situación de las pérdidas retardadas en inyección CO, con potencial central +2000 V (Fig.5.1b), algo por debajo del máximo que se produce hacia +3000 V. En este caso la tasa de pérdidas retardadas es muy elevada (33%), como también lo es la de pérdidas directas (58%), de forma que las pérdidas totales alcanzan nada menos que el 91%. En esas pérdidas retardadas la inmensa mayoría de los iones corresponden a trayectorias pasantes, apenas un 0.6% de ellas se encuentran atrapadas.

La distribución de energía final es similar a la de la Fig.4.5, con un máximo situado en 2.5 keV, extendiendose a energías más elevadas, hasta 12 keV, con un valor medio de 4 keV. Por su parte la distribución de velocidad paralela reducida se encuentra extremadamente concentrada alrededor de $\xi = 0.2$.

Esta concentración es patente en el diagrama del cono de pérdidas (Fig.5.3) en donde se percibe clarísimamente la banda vertical característica de un efecto resonante con poquísimas partículas fuera de ella, esparcidas aqui y allá sin ninguna estructura, alguna de ellas atrapada (cruces).

La correspondencia con el diagrama no colisional es también patente, como se comprueba en la Fig.5.4. La zona de pérdidas en cuestión es la que se encuentra situada a la derecha del diagrama, cerca del centro, limitada por un lado por la zona de partículas atrapadas (que es especialmente estrecha en este caso), por el otro, a su derecha, por la banda resonante 0 (rombos). La situación de esta zona de pérdidas en el diagrama γ-V_0 puede ser percibida en cualquiera de los presentados hasta ahora, p.ej. en el de la Fig.5.2 arriba a la derecha, aunque para la energía típica de este caso (2 a 5 keV) la pendiente de las bandas resonantes sea bastante menor ya que esta figura correspondía a 40 keV.

Otro caso dominado por la resonancia 0 lo constituye el de la configuración e, que posee radio y transformada rotacional extremadamente bajos (11 cm y 0.94, Tabla 1.I). Su distribución de pérdidas aparece en la Fig.5.5. Se observa en ella el fortísimo predominio de la resonancia 0, aún más acentuado que en el caso anterior, no solo en las pérdidas directas sino también en las retardadas para las que los potenciales resonantes aparecen a solamente +1000 V en el caso CO y a unos -1500 en el COUNTER. Este dominio es la consecuencia directa del valor anómalamente bajo, para el TJ-II, de la transformada rotacional en esta configuración. Además esas resonancias se encuentran casi igualmente espaciadas a ambos lados del potencial cero para cada una de las direcciones de inyección, por lo que las pérdidas a campo nulo son similares en ambas direcciones, una circunstancia que sólo se produce en esta configuración [1].

Como ya se indicó en [1] ambos casos resultan poco adecuados para la inyección de neutros en el TJ-II, no sólo a causa de estos efectos resonantes sino también a causa de su pequeño tamaño.

6. Efectos de la Resonancia -2.

La resonancia -2 predomina claramente en la configuración b, cuya distribución de pérdidas se muestra en la Fig.6.1. Se observa que en las pérdidas directas del caso CO esta resonancia se encuentra presente incluso a potencial nulo, mientras que en el COUNTER, para las pérdidas retardadas, se presenta, con gran intensidad a solamente +1000 V. Todo ello es consecuencia directa de que el valor de la transformada rotacional para esta configuración es 1.91, muy cercano a 2.

Su diagrama de resonancias γ-V_0 (Fig.6.2) confirma clarísimamente esta situación: la banda de pérdidas situada por encima de la resonancia -2 (cruces, en la parte central derecha del diagrama) invade la línea V_0=0 para γ positivo. Mientras que para la otra dirección de inyección la reonancia -2 se encuentra a potenciales positivos algo más elevados.

Un ejemplo del efecto de esta última resonancia lo constituye el caso de inyección COUNTER a +500 V, es decir algo por debajo del máximo de la Fig.6.1b para pérdidas retardadas. En este caso aparece un pequeño aporte de partículas atrapadas, alrededor de un 15%, el máximo de la distribución de energía se sitúa en unos 3 keV con un valor medio de 4.3 keV, muy similares para ambas poblaciones.

La distribución de partículas en el cono de pérdidas aparece en la Fig.6.3 y mientras la población atrapada se distribuye, como es usual, de manera más o menos simétrica en las dos direcciones, por el contrario la población pasante se agrupa en la banda vertical característica de los efectos resonantes.

La comparación con el diagrama de resonancias en el cono de pérdidas retardadas para el caso no colisional (Fig.6.4) muestra la situación de la banda resonante -2 (cruces, a la izquierda del centro del diagrama), que coincide con la de la Fig.6.3. Las islas de fugas que se observan cerca del borde, asociadas también a la resonancia -2, corresponden a pérdidas de mucha mayor energía, ligadas a pérdidas directas.

Otra configuración en la que se producen efectos similares de predominancia de la reonancia -2 es la c68, con transformada rotacional igual a 1.77, algo más alejada de 2 que en el caso anterior, aunque suficientemente cerca para que domine esa resonancia. La distribución de pérdidas aparece en la Fig.6.5, que en lo que concierne a la resonancia -2 es muy similar a la 6.1.

En ambos casos el predominio de la resonancia -2 se deja sentir muy fuertemente a campo nulo, por lo que las pérdidas en ese caso son muy importantes. Tampoco estas configuraciones serían adecuadas para la inyección de neutros pese a su considerable tamaño (18.4 y 20.2 cm, respectivamente) [1].

7. Situación de las resonancias para diversas configuraciones.

Pese a la variedad de situaciones expuesta en capítulos anteriores, muchos hechos resultan comunes para todas las configuraciones:

En primer lugar la ordenación de resonancias es similar en todos los casos, aunque en alguno de ellos no sean visibles, bien a causa de que queden fuera del rango de potenciales explorado, bien por que su contribución sea pequeña y quede enmascarada por otras influencias.

Esa ordenación de resonancias puede percibirse en un corte vertical, a *pitch* suficientemente elevado, en cualquiera de los diagramas γ-V_0 presentados, p.ej el de la Fig.3.14. Para el caso de inyección CO esa ordenación, en sentido creciente del potencial, es: -4 (casi siempre fuera de rango), -8/3 (pocas veces visible) , -2, -4/3 y 0. Por otro lado la intensidad con que contribuyen esas resonancias es máxima para el caso -2 y también para el 0 y -4 cuando están incluidos, tal como fué explicado en [8].

Por otro lado el modelo simple, fórmula (3.2), predice que el parámetro fundamental de ordenación de las resonancias es la combinación:

$$(N+t)*\xi*a^2 \qquad (6.1)$$

en donde ξ es la velocidad paralela reducida (3.3), N el orden de la resonancia, a el radio efectivo y t la transformada rotacional de la configuración.

Esto se confirma cuando se representan los valores del potencial eléctrico central correspondientes a los máximos de pérdidas para cada configuración en función de ese parámetro, representación que aparece en las Figs.7.1 a 7.3. Esas figuras se presentan separadamente para cada resonancia y se distingue tanto entre ambas direcciones de inyección como entre pérdidas directas y retardadas.

Como se observará de esa serie de figuras el acuerdo en la ordenación es bastante aceptable en general, no obstante deben tenerse en cuenta varios factores para explicar las discrepancias y la dispersión que allí se observa en ocasiones.

En primer lugar la exploración de valores del potencial se ha hecho en intervalos de 1000 V por encima de $|V_0|$= 1000 V, mientras que para potenciales menores es, usualmente, de unos 200 V. Ésto produce una incertidumbre en la localización precisa de los máximos de pérdidas.

En segundo lugar, como se aprecia en todos los diagramas de resonancia y fué explicado en [8], la zona de pérdidas se encuentra algo separada del centro de la resonancia, siempre, en todos estos casos de partículas nacidas en el exterior del toro, por encima de ella (V_0 más positivo) en los diagramas γ-V_0. Ésto también crea una discrepancia entre resonancia y máximo.

En tercer lugar, todos los diagramas de resonancia presentados y el propio modelo simple, suponen, forzosamente, que no hay colisiones, por lo tanto los efectos de *pitch angle scattering* y, sobre todo, de moderación, no están incluidos y pueden dar lugar a discrepancias con el caso real de inyección de neutros. Además los valores calculados en este último caso para la relación de velocidades angulares N, corresponden a una media a lo largo de toda la trayectoria de la partícula y puede suceder, y sucede, que la parte resonante de ésta se presente sólo en una porción de su recorrido.

Finalmente, tanto en los diagramas de resonancia como en el modelo simple se supone que los iones nacen en puntos bien determinados del plasma con *pitch* inicial igualmente fijo, o alternativamente, en el caso de diagramas para conos de pérdidas, que la distribución de velocidades de nacimiento es isotrópica. En la inyección de neutros los puntos de nacimiento y el *pitch* inicial se encuentran distribuidos contínuamente, si bien con fuerte concentración [9], por lo que cabe esperar una dispersión suplementaria de los resultados debida a este efecto.

Todo ello nos indica que las comparaciones entre los cálculos correspondientes a inyección y los de los diagramas y, muy en especial, los del modelo simple deben ser efectuadas con prudencia y que sólo cabe esperar concordancias cualitativas y coincidencia de tendencias. Estas tendencias sí que se confirman en todos los casos, en particular en la serie de Figs.7.1 a 7.3.

Sin embargo esta última representación se presta mal a extrapolaciones para otras configuraciones no incluidas aquí, ya que hace entrar en juego efectos ligados a la dinámica de las trayectorias, contenidos dentro del parámetro ξ que depende de *pitch* y energia finales de la partícula, impredecibles *a priori* y que dependen de los avatares individuales de cada caso. Por esa razón sería preferible contrastar la ordenación de máximos de pérdidas con algún otro parámetro que no dependiera de la dinámica de las partículas, ésto es lo que se hizo en la Ref. [3], en donde se eligió la combinación $(N+t)*a^2$, sugerida por el modelo simple (3.2), que sólo depende de propiedades de la configuración.

Cuando se efectúa la representación de los potenciales correspondientes a los máximos de pérdidas en función de este último parámetro se obtiene la serie de Figs.7.4 a 7.6. El acuerdo persiste aunque, como era de esperar, aparece ahora algo más de dispersión, pese a lo cual cabe resaltar lo siguiente:

a) En las configuraciones e, d, c28 y g el máximo asociado con la resonancia -4/3 (Fig.7.4) cae relativamente cerca del valor nulo del potencial eléctrico, por lo que ésta resonancia será influyente en las pérdidas de NBI a campo eléctrico moderado.

b) La resonancia -2 (Fig.7.5) sólo afecta a la situación de potencial bajo en las configuraciones b y c68. Por el contrario para la de Referencia (ref2), así como también para las c40 y c48, esos efectos resonantes se encuentran sólo a potenciales muy elevados.

c) Finalmente, la resonancia 0 (Fig.7.6) domina a potencial nulo en las configuraciones e y d, mientras en las ref2 y c40 esa resonancia se encuentra muy alejada.

En realidad, como cabía esperar, estas ordenaciones no hacen sino confirmar y resumir lo expuesto detalladamente en los capítulos anteriores.

8. Conclusiones

El análisis teórico de las pérdidas de iones rápidos durante la moderación de haces neutros en el TJ-II conduce a las siguientes conclusiones.

- Las pérdidas directas presentan claros efectos resonantes cuando la relación de velocidades de rotación pasa cerca de los valores -4/3, -2 y 0, visibles tanto por la presencia de máximos pronunciados en las tasas de pérdidas como en las características de las trayectorias.

- Las pérdidas retardadas también presentan efectos resonantes, generalmente a energías intermedias (5 a 20 keV para inyección a 40 keV), aunque resulten menos visibles en las trayectorias. Cerca de las resonancias la población de partículas pasantes que corresponden a estas fugas es muy numerosa y sus tasas de pérdidas pueden igualar e incluso superar a las de las pérdidas directas.

- En esas pérdidas retardadas las partículas se concentran en los diagramas de los conos de pérdidas en franjas verticales, vecinas a las resonancias, con velocidad paralela más o menos constante. Esa velocidad paralela crece en módulo al aumentar el campo eléctrico, los máximos de pérdidas acostumbran a alcanzarse cuando el *pitch* y energía de estas franjas se acercan a los valores del inicio de la inyección

- La componente atrapada de las pérdidas retardadas es máxima a potencial nulo, decreciendo al aumentar éste independientemente de su signo. Sus energías finales acostumbran a ser bajas (1 a 5 keV). Salvo a potenciales extremos, en que los que la resonancia -4 se deja sentir, no se observan efectos resonantes en esta población.

- La ordenación de las resonancias es similar para todas las configuraciones y obedece razonablemente a la predicha por el modelo simple (3.2).

- Las configuraciones extremas de baja transformada rotacional y pequeño radio (e y d) se encuentran dominadas por los efectos de la resonancia 0, dando lugar a tasas de pérdidas muy elevadas incluso a potenciales eléctricos moderados.

- Algo similar ocurre con las configuraciones extremas de transformada rotacional cercana a 2 (c68 y b), esta vez es la resonancia -2 la que predomina, produciendo también pérdidas muy elevadas, incluso a campo eléctrico nulo, pese a los tamaños considerables de éstas configuraciones.

- Por el contrario las configuraciones intermedias, cercanas a la de Referencia, no presentan efectos resonantes y sus tasas de pérdidas son moderadas a potenciales bajos. Sólo por encima de 2000 V los efectos resonantes comienzan a sentirse.

Todo ello confirma lo expuesto en la Ref.[1], es decir, que mientras las configuraciones extremas parecen poco adecuadas para la inyección de haces neutros en el TJ-II, por el contrario, las situadas en una amplia zona del diagrama de flexibilidad, alrededor de la de Referencia, parecen igualmente adecuadas para esa inyección.

Referencias

[1]. J.Guasp, M.Liniers. "Efectos de configuración magnética en la inyección de haces neutros del TJ-II". Informe CIEMAT, en prensa.

[2]. TJ-II Group. "First plasmas in the TJ-II Flexible heliac". 17th IAEA Fusion Energy Conference . Yokohama , Japan, October 1998
To be published in the Proceedings of the Conference: Fusion Energy 1998

[3]. J.Guasp, M.Liniers. "Dependencia de las pérdidas directas y de las propiedades de atrapamiento con la Configuración magnética del TJ-II".
Informe CIEMAT-845. Mayo 1998.

[4]. G.C.Lister. Report IPP 4/222. IPP Garching 1985.

[5]. G.C. Lister. Status/Report at IPP, IPP Garching 1986.

[6]. A.Teubel . IPP/Report 4/26, IPP Garching 1994.

[7]. J. Guasp, M.Liniers . "Influencia del campo eléctrico en las derivas, atrapamiento y trayectorias de partículas en el TJ-II". Informe CIEMAT-827, Mayo 1997

[8]. J. Guasp, M.Liniers . "Influencia de las Resonancias del campo eléctrico radial sobre las órbitas de partículas y los conos de pérdidas en el TJ-II".
Informe CIEMAT-832, Julio 1997.

[9]. J.Guasp, M.Liniers. "Comportamiento de las pérdidas instantáneas y retardadas en la inyección de neutros del TJ-II". Informe CIEMAT-761. Septiembre 1995.

[10]. A.Teubel, J.Guasp, M.Liniers. "Montecarlo simulations of neutral beam injection into the TJ-II helical axis Stellarator". Report IPP 4/268.
IPP Garching. March 1994.

[11]. J. Guasp, M.Liniers . "Puntos de salida en el plasma de los iones rápidos durante NBI en el TJ-II". Informe CIEMAT-762, Septiembre 1995.

Lista de Figuras

§2

Fig.2.1. Dependencia de la absorción (Pabs), de las pérdidas de iones rápidos totales (olt), directas (olpr) y retardadas (old) con el potencial eléctrico central como fracción de la potencia disponible en el plasma.
Configuración de Referencia, caso balanceado a 40 keV, densidad intermedia (valor central 5.4×10^{13} cm^{-3}, d4), incluye CX y mezcla de especies energéticas.
a) A potenciales moderados ($|V_0| < 1000$ V)
b) A potenciales elevados ($|V_0| < 10000$ V)

Fig.2.2. Dependencia de la absorción (Pabs), de las pérdidas de iones rápidos totales (olt) para los casos de inyección CO (a) y COUNTER (b).

Fig.2.3. Dependencia de las pérdidas de iones rápidos totales (olt), directas (olpr) y retardadas (old) para los casos de inyección CO (a) y COUNTER (b).

§3.1

Fig.3.1. a) Pérdidas de iones rápidos totales (fl), directas(fl-pr) y retardadas (fl-del)
b) Pérdidas retardadas totales (fl-del), pasantes (fl-dps) y atrapadas (fl-dtr).
Caso de inyección CO. Configuración de Referencia, densidad intermedia (d4), 40 keV, sin CX ni mezcla energética. En términos de la fracción de partículas perdidas.

Fig.3.2. Similar a la Fig.3.1 para inyección COUNTER.

Fig.3.3. a) Pérdidas directas pra inyección CO y COUNTER, caso de la Fig.3.1
b) Relación entre las velocidades angulares de rotación poloidal y toroidal

Fig.3.4. a) Energía cinética final de las pérdidas directas (posición del máximo de la distribución)
b) Velocidad paralela reducida de las pérdidas directas.

Fig.3.5. Similar a la Fig.3.3 para las pérdidas retardadas pasantes.

Fig.3.6. Similar a la Fig.3.4 para las pérdidas retardadas pasantes.

§3.2

Fig.3.7. Pérdidas directas para 13, 20 y 40 keV (sin CX ni mezcla energética)
a) Caso de inyección CO, b) Inyección COUNTER.

Fig.3.8. Similar a la Fig.3.7 para las pérdidas retardadas pasantes.

Fig.3.9. Similar a la Fig.3.7 para las pérdidas retardadas atrapadas

Fig.3.10. Dependencia con la energía de inyección de los potenciales correspondientes a los máximos de pérdidas tanto directas (Pr) como retardadas (Del) en ambas direcciones de inyección.
a) Resonancia -4/3 b) Resonancia -2

§3.3

Fig.3.11. Diagrama de resonancia *pitch*-potencial eléctrico central (γ-V_0) para la configuración de referencia e iones nacidos en coordenadas de Boozer: s=0.60, $\Phi b = \Theta b = 0°$ con energía cinética inicial de 40 keV. Caso no colisional.

Fig.3.12. Similar a la Fig.3.11 para s=0.75.

Fig.3.13. Similar a la Fig.3.11 para s=0.75 y 20 keV.

Fig.3.14. Similar a la Fig.3.11 para s=0.75 y 5 keV.

§3.4

Fig.3.15. Distribuciones para las pérdidas retardadas a potencial eléctrico nulo. Configuración de Referencia, densidad intermedia (d4) a 40 keV, sin CX ni mezcla energética.
a) Distribución para la relación de velocidades angulares (N).
b) Distribución para la energía cinética final.
c) Distribución para la velocidad paralela reducida (ξ).

Fig.3.16. Diagrama velocidad paralela-velocidad perpendicular ($V_{\parallel}$-$V_{\perp}$) para el caso anterior (V_0=0, inyección CO).

Fig.3.17. Diagrama velocidad paralela reducida-relación de velodidades de rotación (ξ-N) para el caso anterior

Fig.3.18. Pérdidas directas (a) y retardadas pasantes (b) para la configuración c40.

§4.1

Fig.4.1. Distribuciones para las pérdidas retardadas de la configuración de Referencia en inyección CO a 40 keV y potencial eléctrico central V_0 = +4000 V.
a) Distribución para la relación de velocidades angulares (N).
b) Distribución para la energía final.
c) Distribución para la velocidad paralela reducida (ξ).

Fig.4.2. Diagrama $V_{\parallel}$-$V_{\perp}$ para el caso anterior (V_0= +4000 V, CO)

Fig.4.3. Diagrama ξ-N, (V_0= +4000 V, CO)

Fig.4.4. Diagrama de resonancia $V_{\parallel}$-$V_{\perp}$ para el caso no colisional, iones nacidos en coordenadas de Boozer: s=0.75, $\Phi b = \Theta b = 0°$, con distribución de velocidades uniforme, energía mínima 1 keV, máxima 40 keV (V_0= +4000 V).

§4.2

Fig.4.5. Distribuciones para las pérdidas retardadas de la configuración de Referencia en inyección COUNTER a 40 keV y potencial eléctrico central V_0 = -1000 V.
a) Distribución para la relación de velocidades angulares (N).
b) Distribución para la energía final.
c) Distribución para la velocidad paralela reducida (ξ).

Fig.4.6. Diagrama $V_{\parallel}$-$V_{\perp}$ para el caso anterior (V_0= -1000 V, COUNTER)

Fig.4.7. Diagrama ξ-N, (V_0= -1000 V, COUNTER)

Fig.4.8. Diagrama de resonancia $V_{\parallel}$-$V_{\perp}$ para el caso no colisional, (V_0= -1000 V).

Fig.4.9. Diagrama de resonancia γ-V_0 para s=0.90 y 5 keV, entre -2000 y +2000 V.

Fig.4.10. Pérdidas directas (a) y retardadas pasantes (b) para la configuración g.

§5

Fig.5.1. Pérdidas directas (a) y retardadas pasantes (b) para la configuración d.

Fig.5.2. Diagrama de resonancia γ-V_0 para la configuración d, s=0.50 y 40 keV.

Fig.5.3. Diagrama $V_{\parallel}$-$V_{\perp}$ para las pérdidas retardadas de la configuración d a V_0= +2000 V en inyección CO.

Fig.5.4. Diagrama de resonancia $V_{\parallel}$-$V_{\perp}$ no colisional para el caso anterior (Config. d,V_0= +2000 V).

Fig.5.5. Pérdidas directas (a) y retardadas pasantes (b) para la configuración e.

§6

Fig.6.1. Pérdidas directas (a) y retardadas pasantes (b) para la configuración b.

Fig.6.2. Diagrama de resonancia γ-V_0 para la configuración b, s=0.50 y 40 keV.

Fig.6.3. Diagrama $V_{\parallel}$-$V_{\perp}$ para las pérdidas retardadas de la configuración b a V_0= +500 V en inyección COUNTER.

Fig.6.4. Diagrama de resonancia $V_{\parallel}$-$V_{\perp}$ no colisional para el caso anterior (Config. b,V_0= +500 V).

Fig.6.5. Pérdidas directas (a) y retardadas pasantes (b) para la configuración c68.

§7

Fig.7.1. Potenciales correspondientes a los máximos de pérdidas para cada una de las configuraciones, en función del parámetro $(N+t)*\xi*a^2$. Resonancia -4/3.
a) Para pérdidas directas
b) Para pérdidas retardadas pasantes.

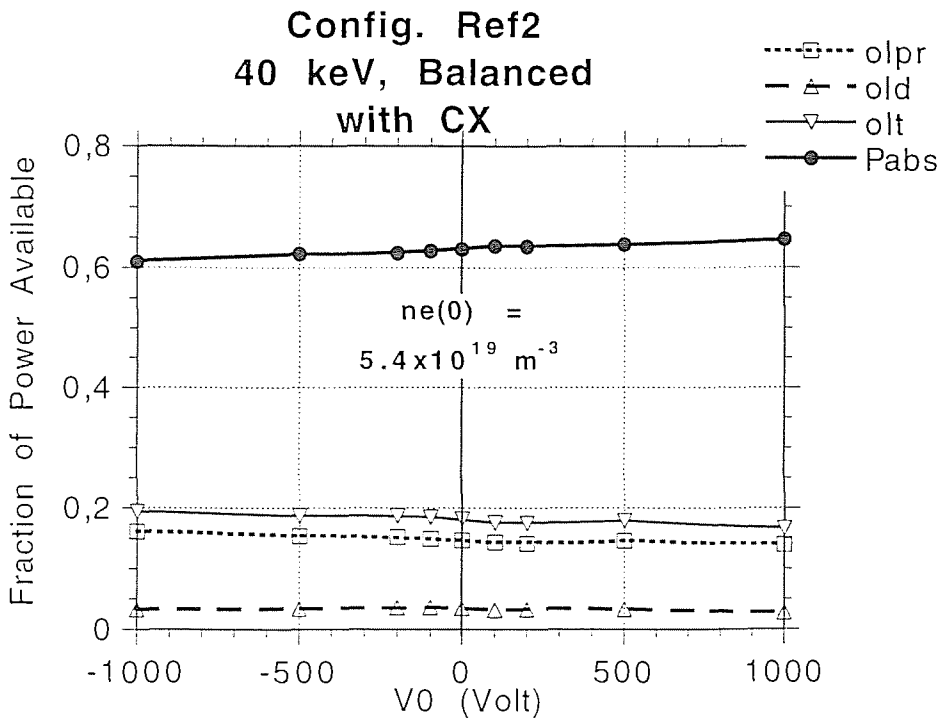
Fig.7.2. Similar a la Fig.7.1 para la Resonancia -2.

Fig.7.3. Similar a la Fig.7.1 para la Resonancia 0. Sólo pérdidas retardadas pasantes.

Fig.7.4. Potenciales correspondientes a los máximos de pérdidas para cada una de las configuraciones, en función del parámetro $(N+t)*a^2$. Resonancia -4/3.
a) Para pérdidas directas
b) Para pérdidas retardadas pasantes.

Fig.7.5. Similar a la Fig.7.4 para la Resonancia -2.

Fig.7.6. Similar a la Fig.7.4 para la Resonancia 0.


Config. Ref2
40 keV, Balanced
with CX
olpr
old
olt
Pabs
Fraction of Power Available
0,8
0,6
0,4
0,2
0
ne(0) =
5.4x10^19 m^-3
-1000
-500
0
500
1000
V0 (Volt)

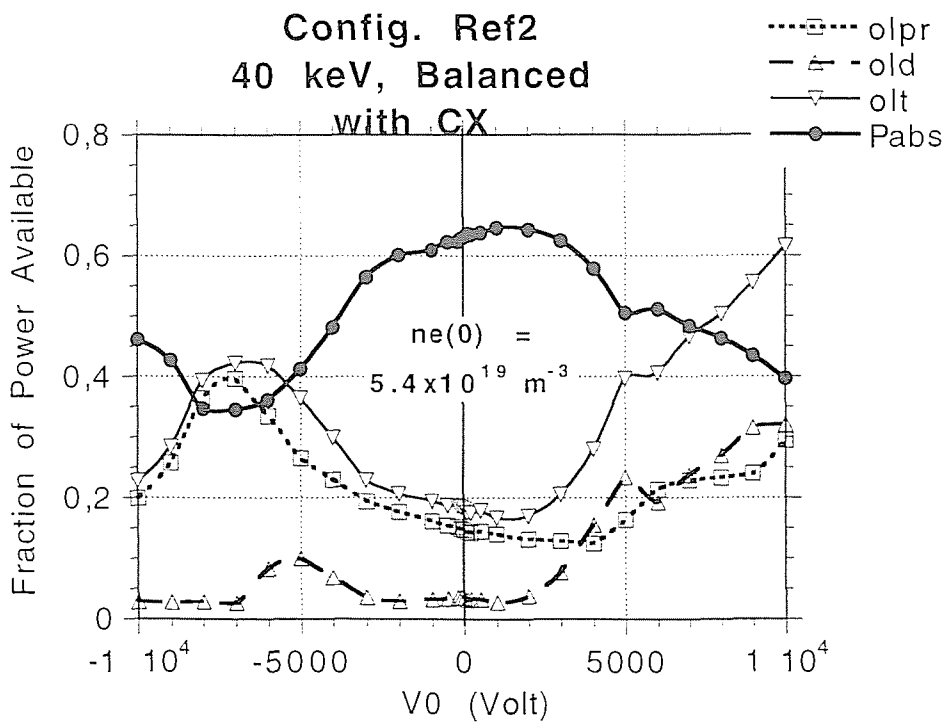
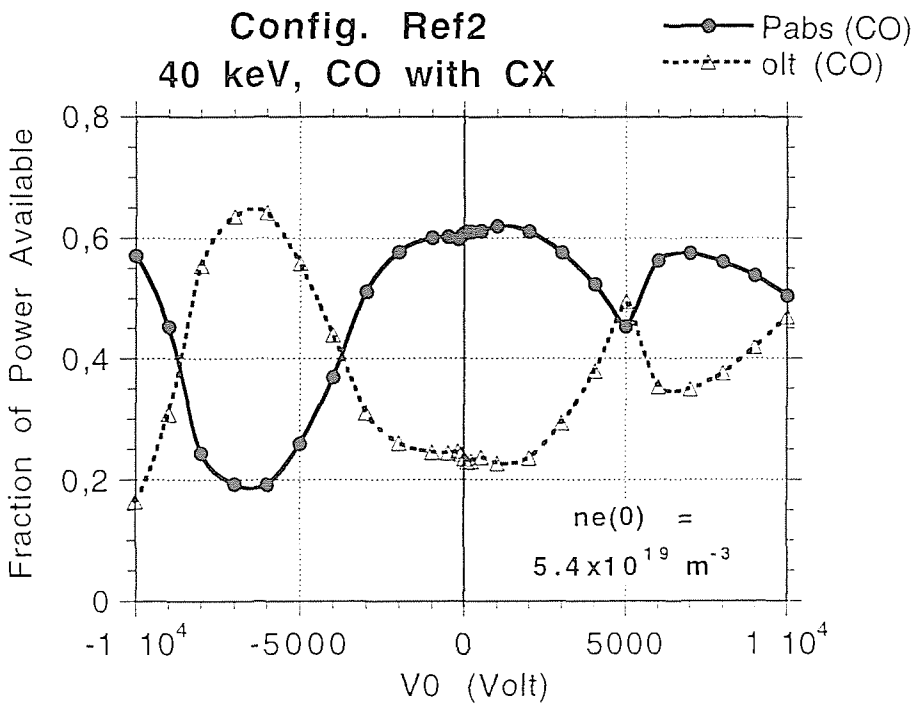

Config. Ref2
40 keV, Balanced
with CX
olpr
old
olt
Pabs
Fraction of Power Available
0,8
0,6
0,4
0,2
0
ne(0) =
5.4x10^19 m^-3
-1 10^4
-5000
0
5000
1 10^4
V0 (Volt)

Fig.2.1


Config. Ref2
40 keV, CO with CX
Pabs (CO)
olt (CO)
Fraction of Power Available
0,8
0,6
0,4
0,2
0
ne(0) =
5.4x10^19 m^-3
-1 10^4
-5000
0
5000
1 10^4
V0 (Volt)

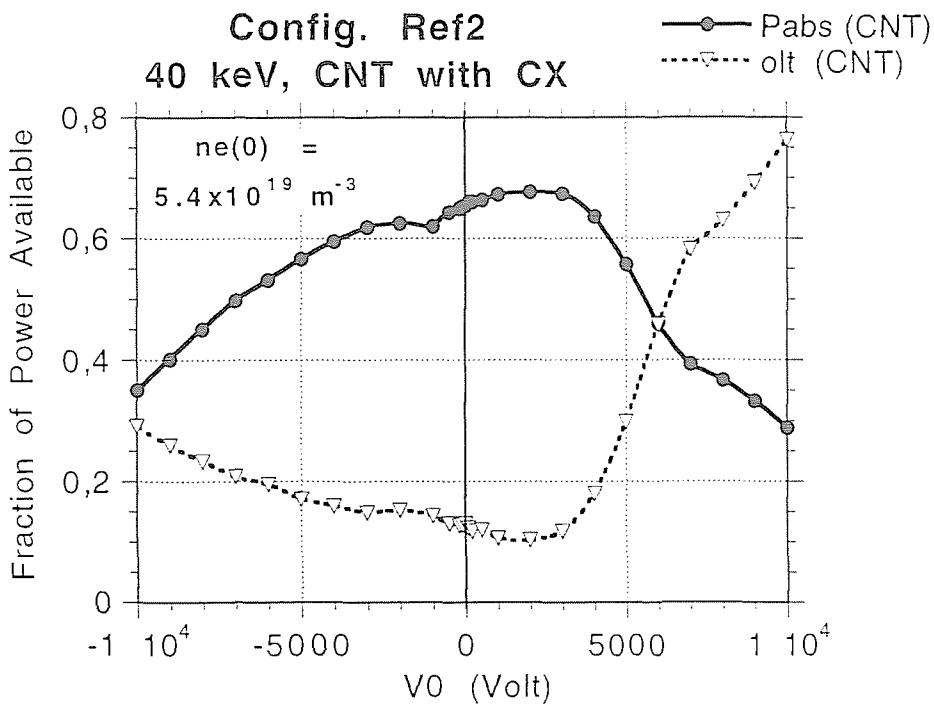
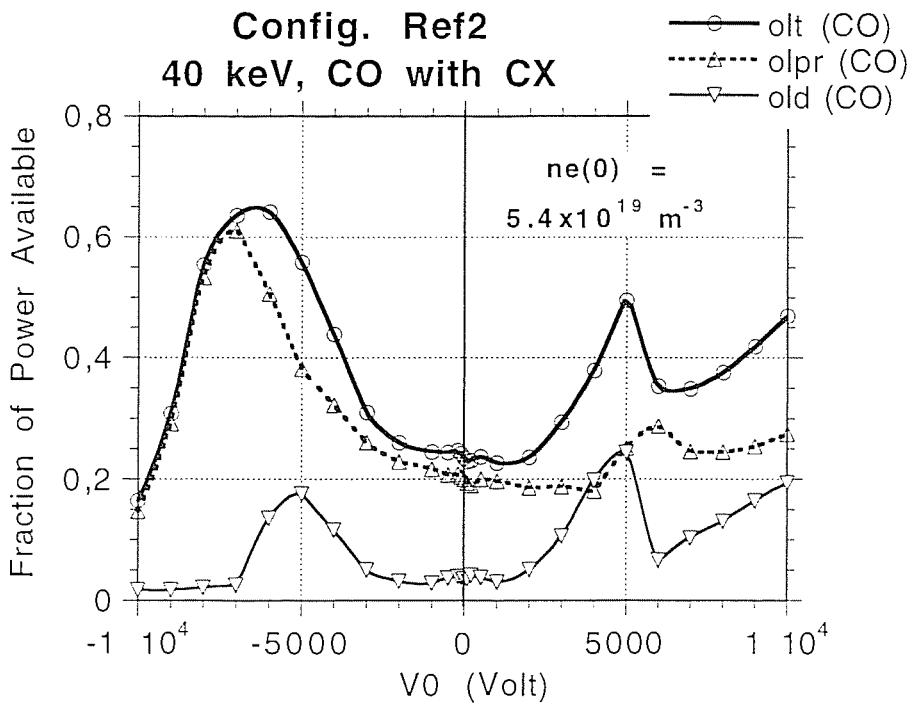

Config. Ref2
40 keV, CNT with CX
Pabs (CNT)
olt (CNT)
Fraction of Power Available
0,8
0,6
0,4
0,2
0
ne(0) =
5.4x10^19 m^-3
-1 10^4
-5000
0
5000
1 10^4
V0 (Volt)

Fig.2.2


Config. Ref2
40 keV, CO with CX
olt (CO)
olpr (CO)
old (CO)
ne(0) =
5.4x10^19 m^-3
Fraction of Power Available
0,8
0,6
0,4
0,2
0
-1 10^4
-5000
0
5000
1 10^4
V0 (Volt)

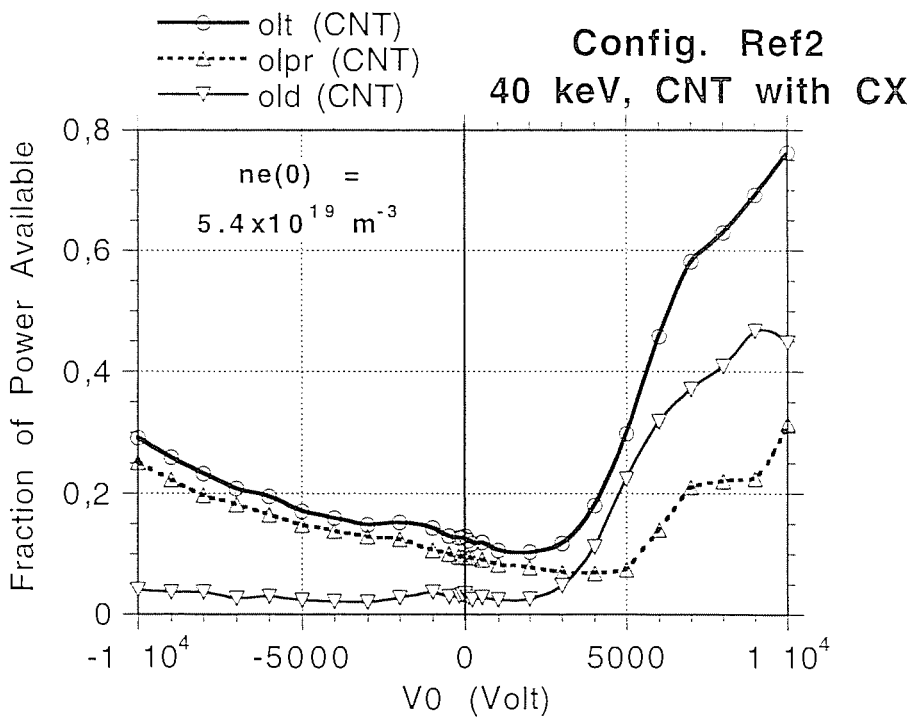
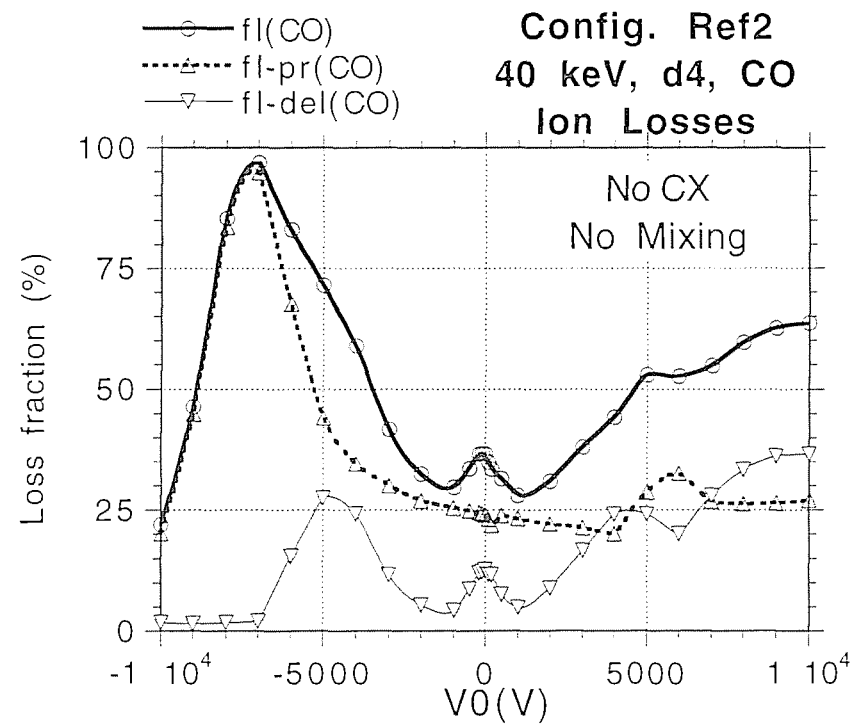

olt (CNT)
olpr (CNT)
old (CNT)
Config. Ref2
40 keV, CNT with CX
ne(0) =
5.4x10^19 m^-3
Fraction of Power Available
0,8
0,6
0,4
0,2
0
-1 10^4
-5000
0
5000
1 10^4
V0 (Volt)

Fig.2.3


fl(CO)
fl-pr(CO)
fl-del(CO)
Config. Ref2
40 keV, d4, CO
Ion Losses
No CX
No Mixing
Loss fraction (%)
100
75
50
25
0
-1 10^4
-5000
0
5000
1 10^4
V0(V)

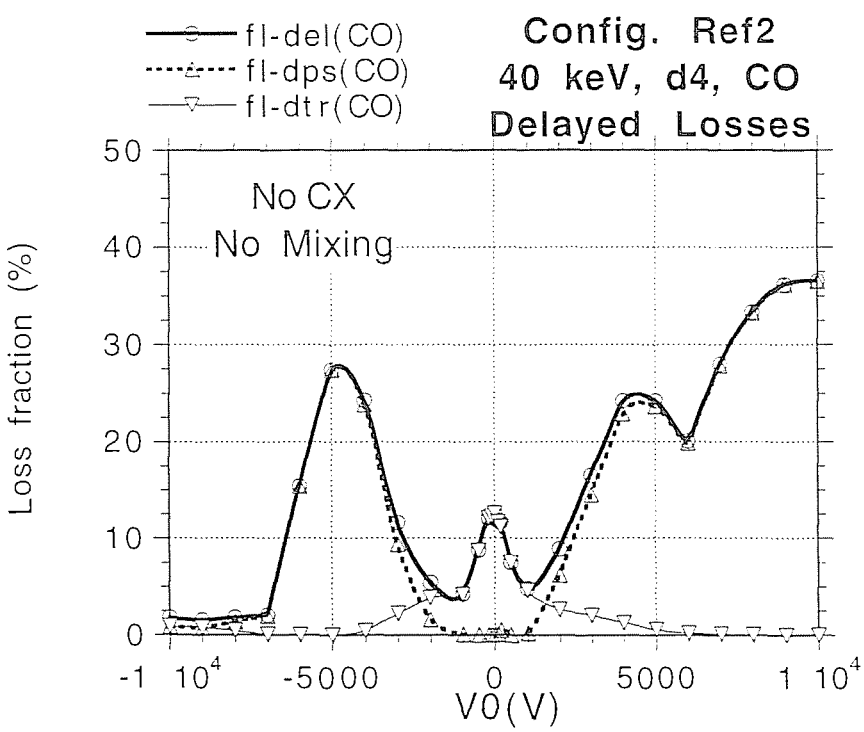
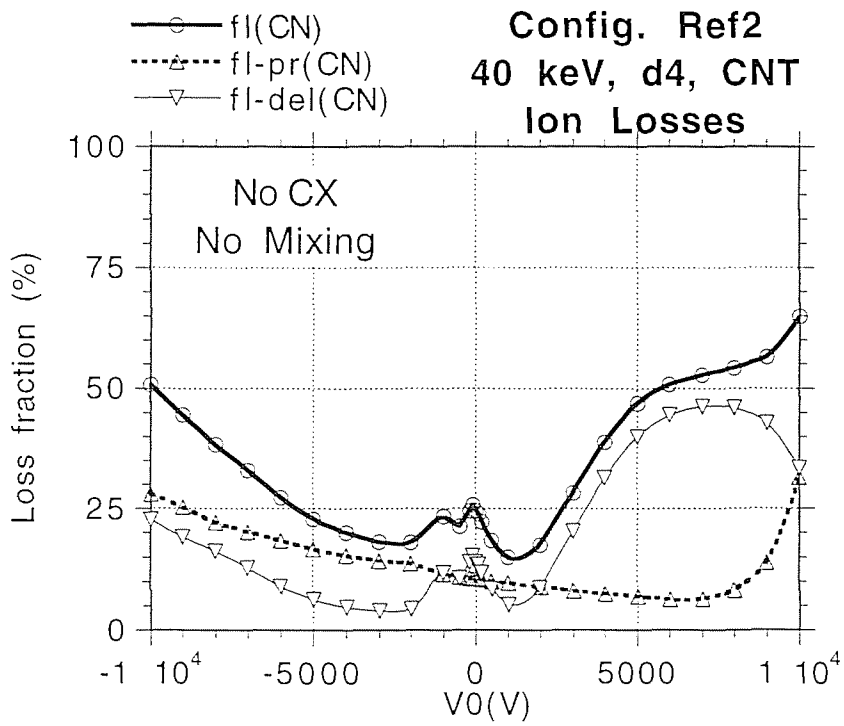

fl-del(CO)
fl-dps(CO)
fl-dtr(CO)
Config. Ref2
40 keV, d4, CO
Delayed Losses
No CX
No Mixing
Loss fraction (%)
50
40
30
20
10
0
-1 10^4
-5000
0
5000
1 10^4
V0(V)

Fig.3.1


fl(CN)
fl-pr(CN)
fl-del(CN)
Config. Ref2
40 keV, d4, CNT
Ion Losses
No CX
No Mixing
Loss fraction (%)
100
75
50
25
0
-1 10^4
-5000
0
5000
1 10^4
V0(V)

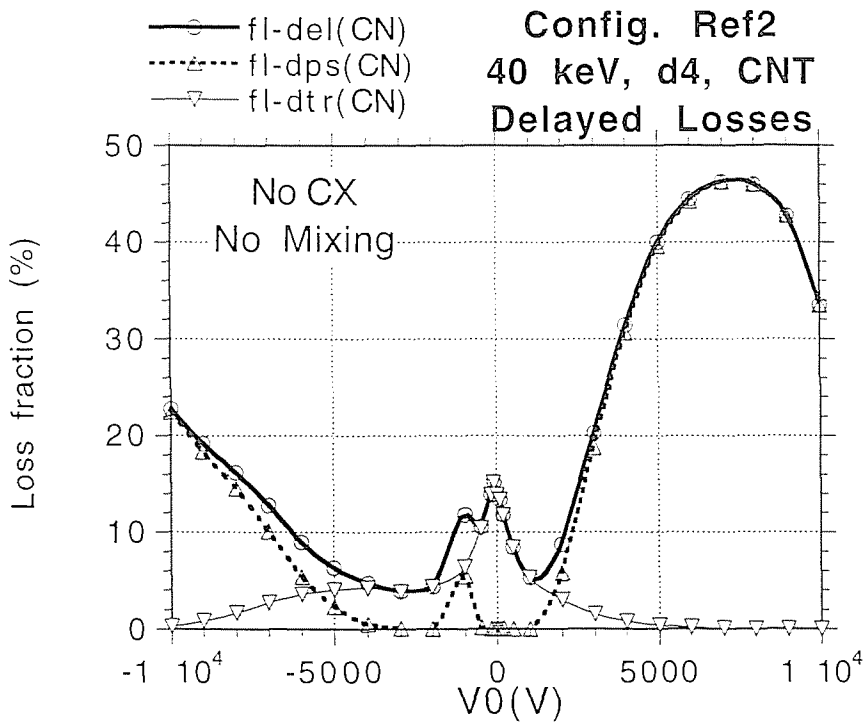
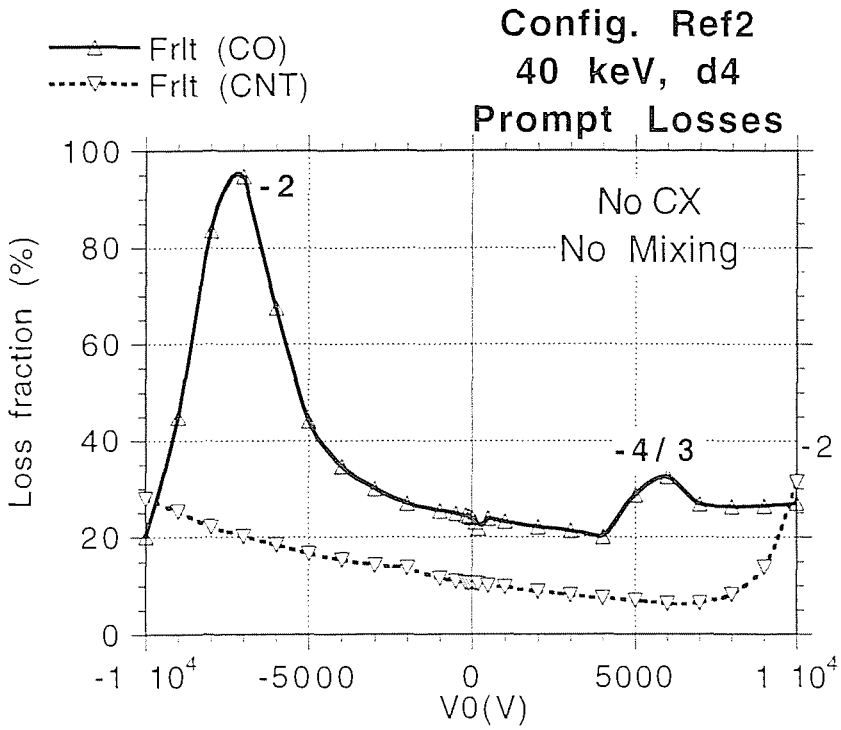

fl-del(CN)
fl-dps(CN)
fl-dtr(CN)
Config. Ref2
40 keV, d4, CNT
Delayed Losses
No CX
No Mixing
Loss fraction (%)
50
40
30
20
10
0
-1 10^4
-5000
0
5000
1 10^4
V0(V)

Fig.3.2


Frlt (CO)
Frlt (CNT)
Config. Ref2
40 keV, d4
Prompt Losses
No CX
No Mixing
-2
-4/3
-2
Loss fraction (%)
100
80
60
40
20
0
-1 10^4
-5000
0
5000
1 10^4
V0(V)

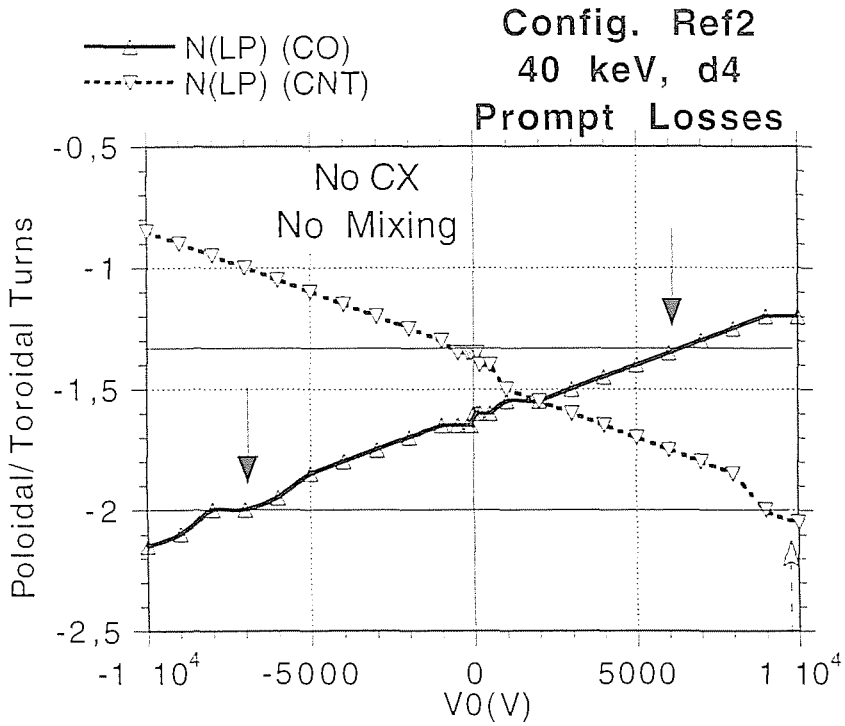
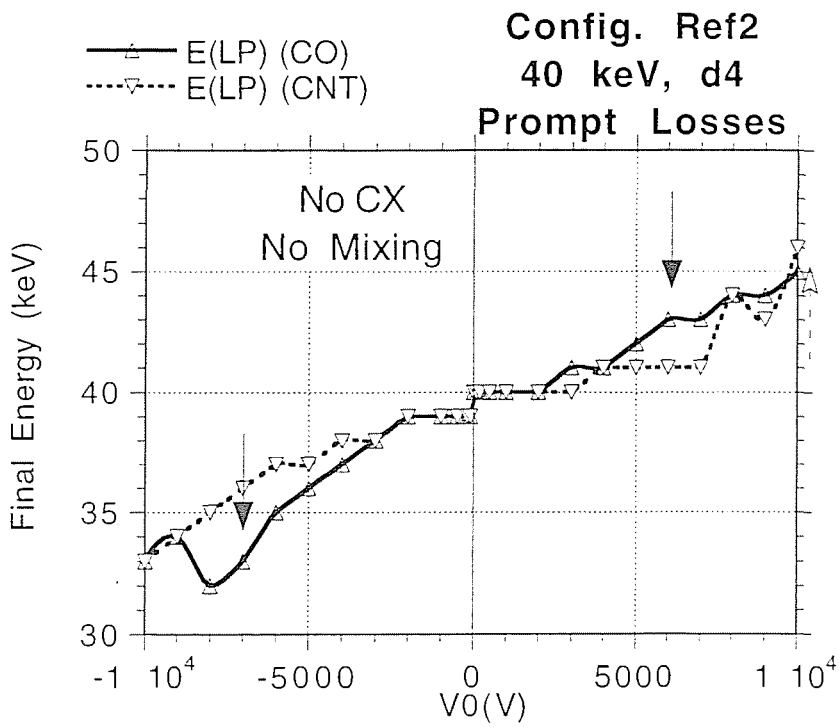

N(LP) (CO)
N(LP) (CNT)
Config. Ref2
40 keV, d4
Prompt Losses
No CX
No Mixing
Poloidal/ Toroidal Turns
-0,5
-1
-1,5
-2
-2,5
-1 10^4
-5000
0
5000
1 10^4
V0(V)

Fig.3.3


E(LP) (CO)
E(LP) (CNT)
Config. Ref2
40 keV, d4
Prompt Losses
No CX
No Mixing
Final Energy (keV)
50
45
40
35
30
-1 10^4
-5000
0
5000
1 10^4
V0(V)

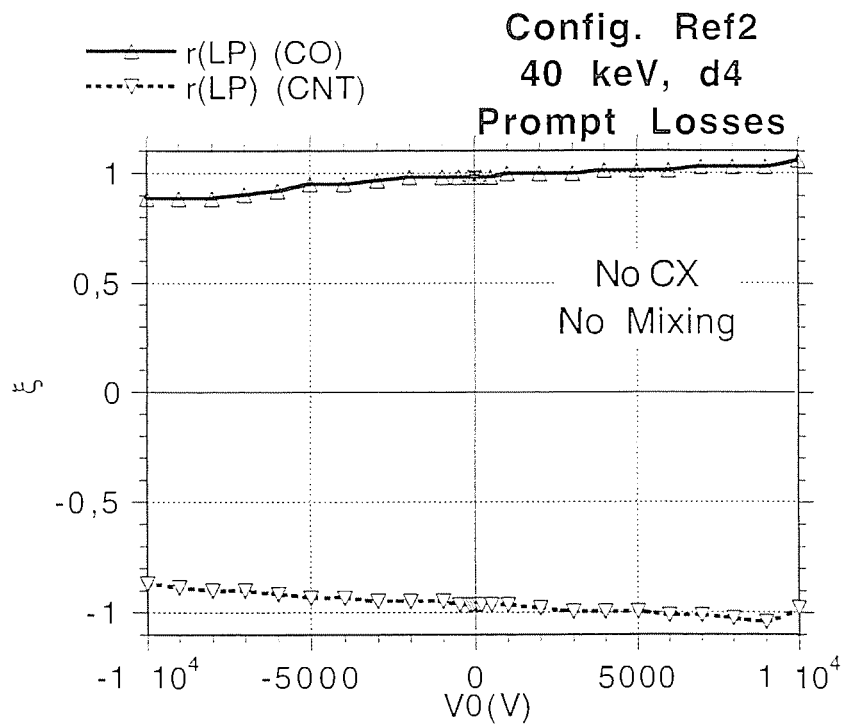
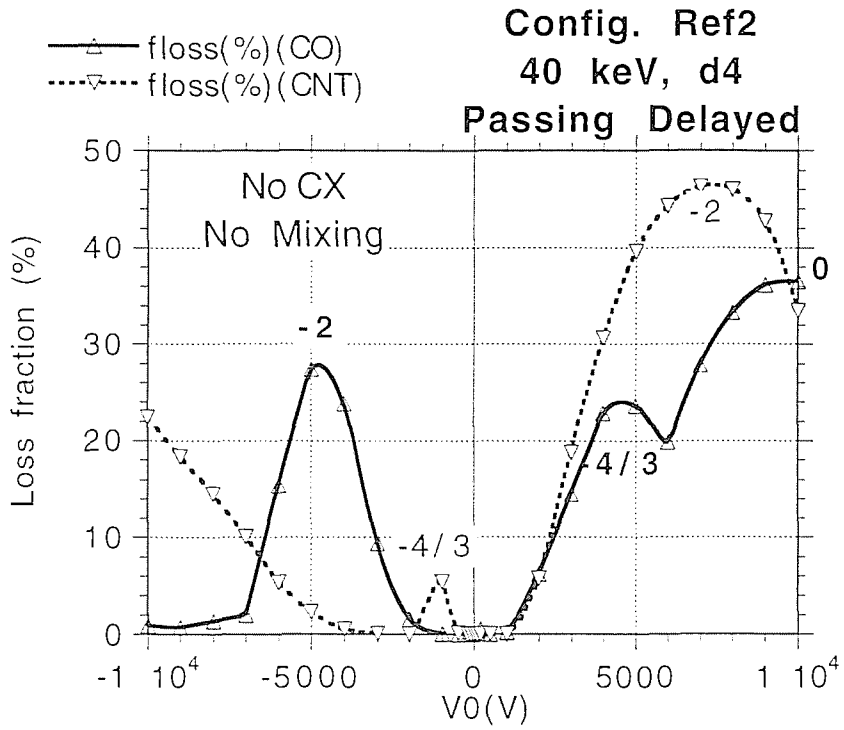

r(LP) (CO)
r(LP) (CNT)
Config. Ref2
40 keV, d4
Prompt Losses
No CX
No Mixing
ξ
1
0,5
0
-0,5
-1
-1 10^4
-5000
0
5000
1 10^4
V0(V)

Fig.3.4


floss(%)(CO)
floss(%)(CNT)
Config. Ref2
40 keV, d4
Passing Delayed
No CX
No Mixing
-2
-2
0
-4/3
-4/3
Loss fraction (%)
50
40
30
20
10
0
-1 10^4
-5000
0
5000
1 10^4
V0(V)

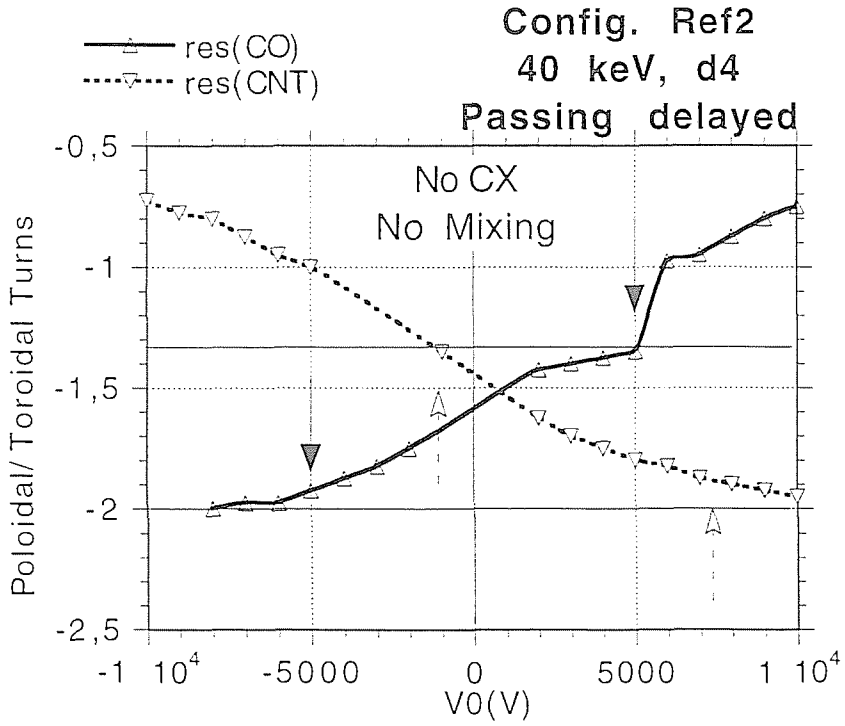
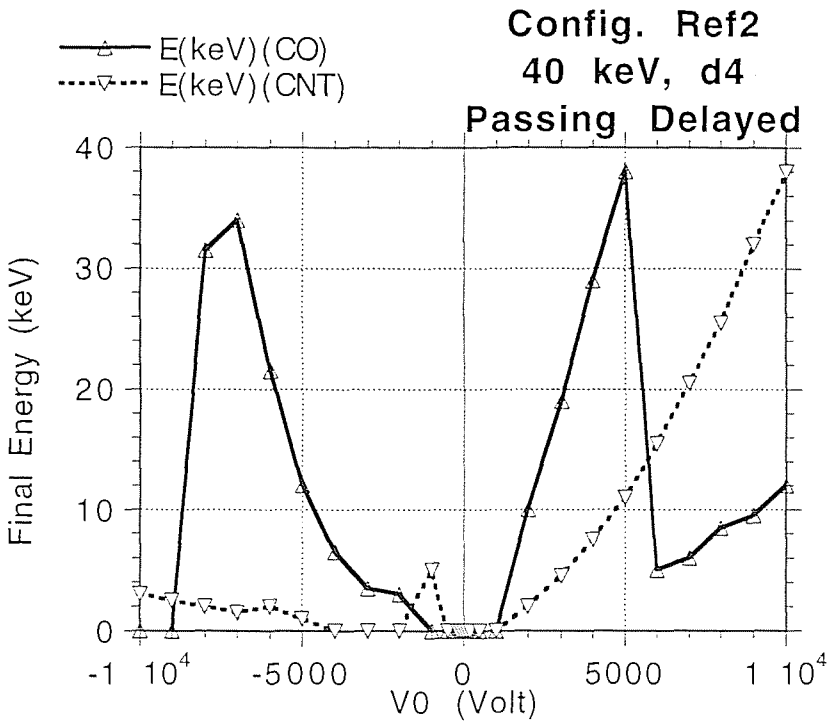

res(CO)
res(CNT)
Config. Ref2
40 keV, d4
Passing delayed
No CX
No Mixing
Poloidal/ Toroidal Turns
-0,5
-1
-1,5
-2
-2,5
-1 10^4
-5000
0
5000
1 10^4
V0(V)

Fig.3.5


E(keV)(CO)
E(keV)(CNT)
Config. Ref2
40 keV, d4
Passing Delayed
Final Energy (keV)
40
30
20
10
0
-1 10^4
-5000
0
5000
1 10^4
V0 (Volt)

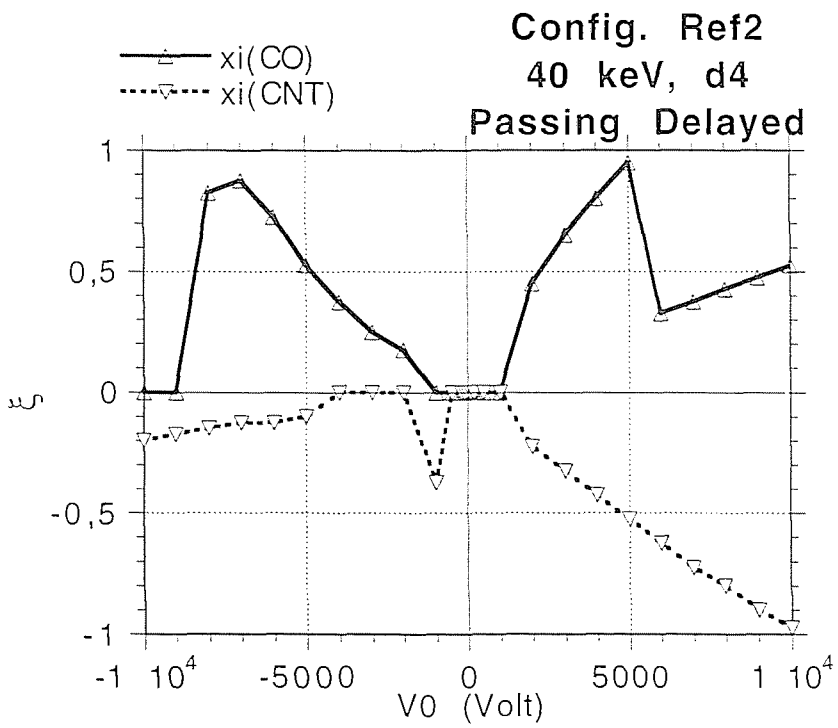
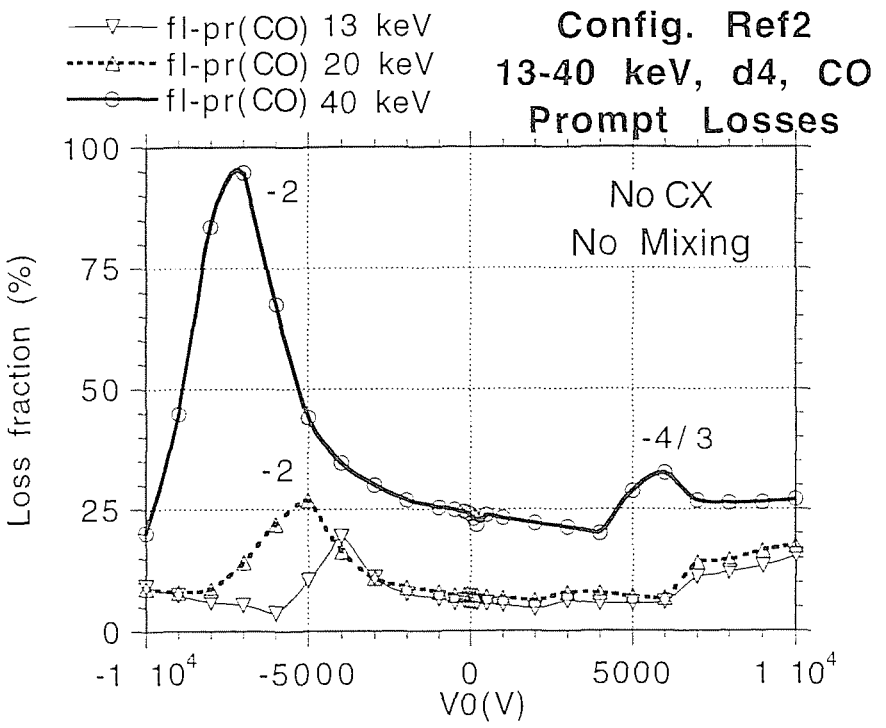

xi(CO)
xi(CNT)
Config. Ref2
40 keV, d4
Passing Delayed
ξ
1
0,5
0
-0,5
-1
-1 10^4
-5000
0
5000
1 10^4
V0 (Volt)

Fig.3.6


fl-pr(CO) 13 keV
fl-pr(CO) 20 keV
fl-pr(CO) 40 keV
Config. Ref2
13-40 keV, d4, CO
Prompt Losses
No CX
No Mixing
-2
-2
-4/3
Loss fraction (%)
100
75
50
25
0
-1 10^4
-5000
0
5000
1 10^4
V0(V)

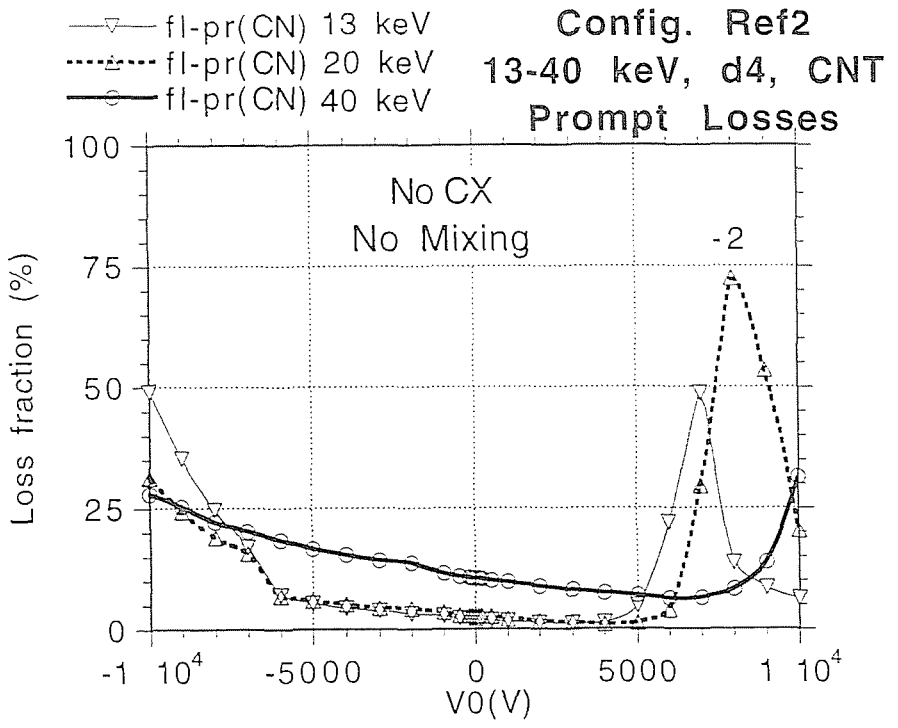
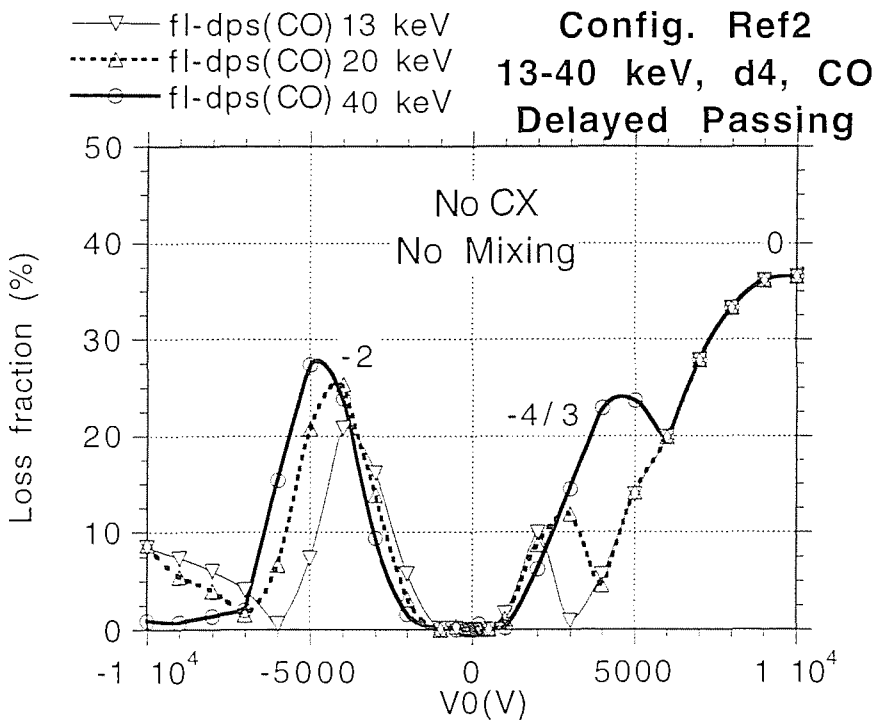

fl-pr(CN) 13 keV
fl-pr(CN) 20 keV
fl-pr(CN) 40 keV
Config. Ref2
13-40 keV, d4, CNT
Prompt Losses
No CX
No Mixing
-2
Loss fraction (%)
100
75
50
25
0
-1 10^4
-5000
0
5000
1 10^4
V0(V)

Fig.3.7


fl-dps(CO) 13 keV
fl-dps(CO) 20 keV
fl-dps(CO) 40 keV
Config. Ref2
13-40 keV, d4, CO
Delayed Passing
No CX
No Mixing
0
-2
-4/3
Loss fraction (%)
V0(V)

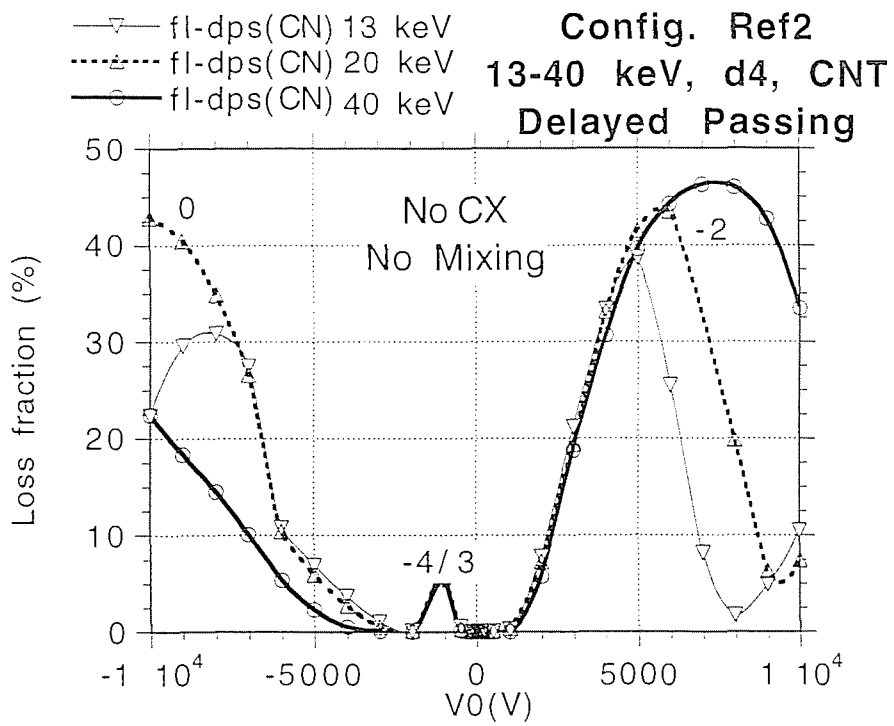
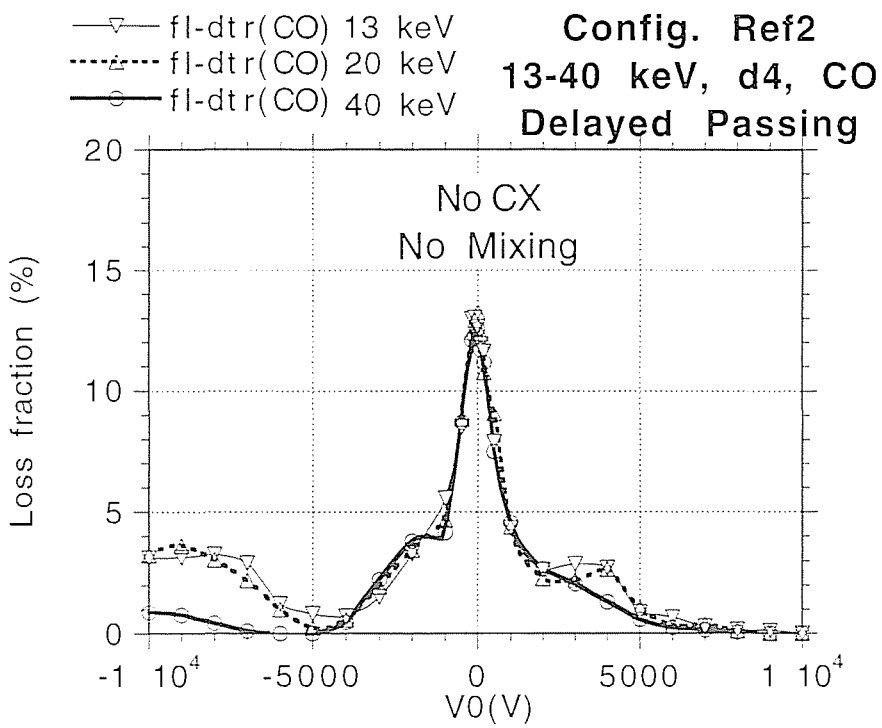

fl-dps(CN) 13 keV
fl-dps(CN) 20 keV
fl-dps(CN) 40 keV
Config. Ref2
13-40 keV, d4, CNT
Delayed Passing
No CX
No Mixing
0
-2
-4/3
Loss fraction (%)
V0(V)

Fig.3.8


fl-dtr(CO) 13 keV
fl-dtr(CO) 20 keV
fl-dtr(CO) 40 keV
Config. Ref2
13-40 keV, d4, CO
Delayed Passing
No CX
No Mixing
Loss fraction (%)
20
15
10
5
0
-1 10^4
-5000
0
5000
1 10^4
V0(V)

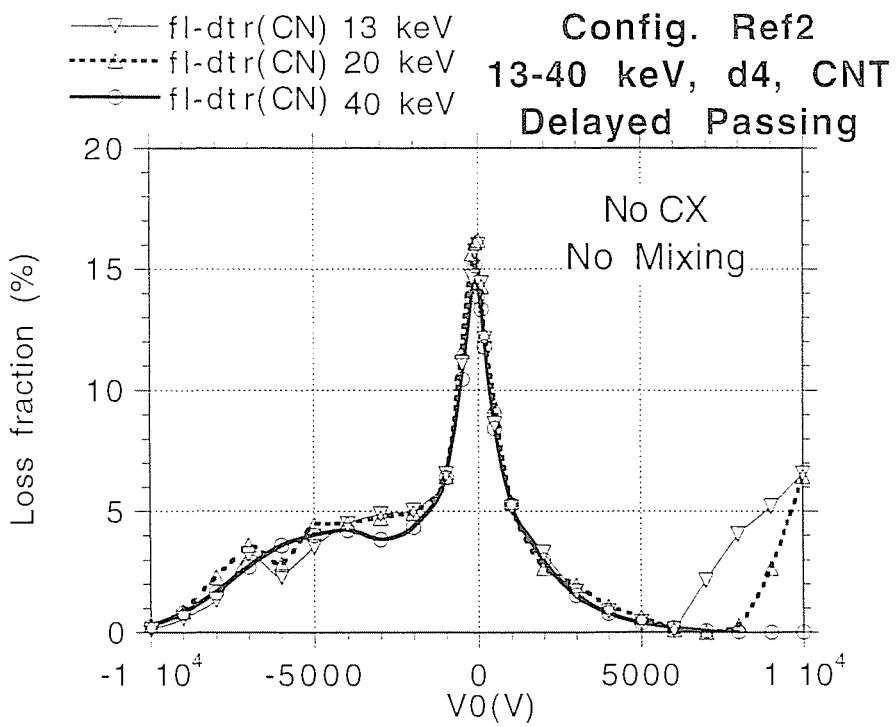
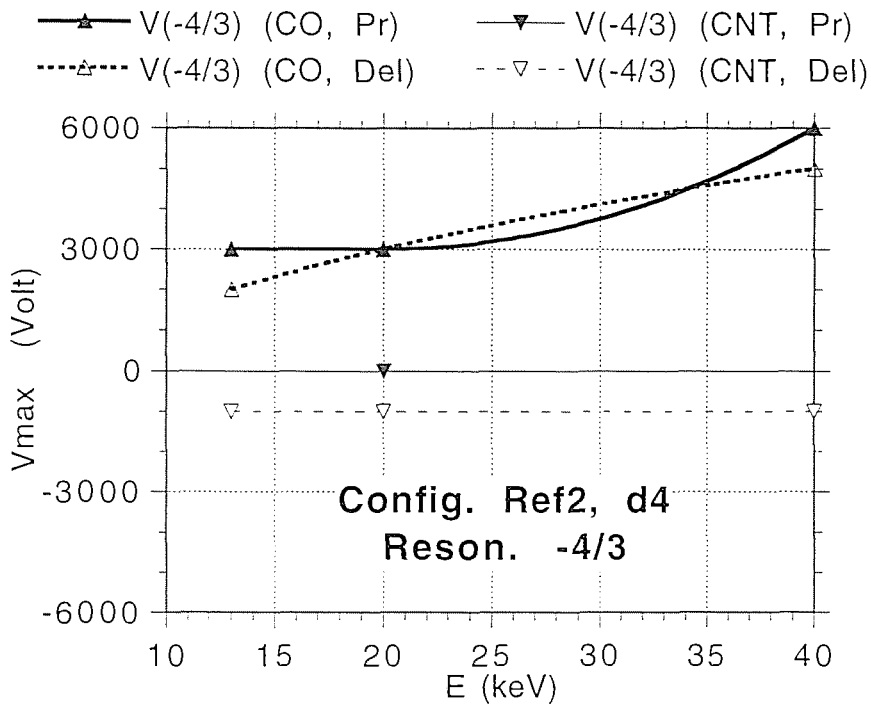

fl-dtr(CN) 13 keV
fl-dtr(CN) 20 keV
fl-dtr(CN) 40 keV
Config. Ref2
13-40 keV, d4, CNT
Delayed Passing
No CX
No Mixing
Loss fraction (%)
20
15
10
5
0
-1 10^4
-5000
0
5000
1 10^4
V0(V)

Fig.3.9


V(-4/3) (CO, Pr)
V(-4/3) (CNT, Pr)
V(-4/3) (CO, Del)
V(-4/3) (CNT, Del)
6000
3000
0
-3000
-6000
Vmax (Volt)
Config. Ref2, d4
Reson. -4/3
10
15
20
25
30
35
40
E (keV)

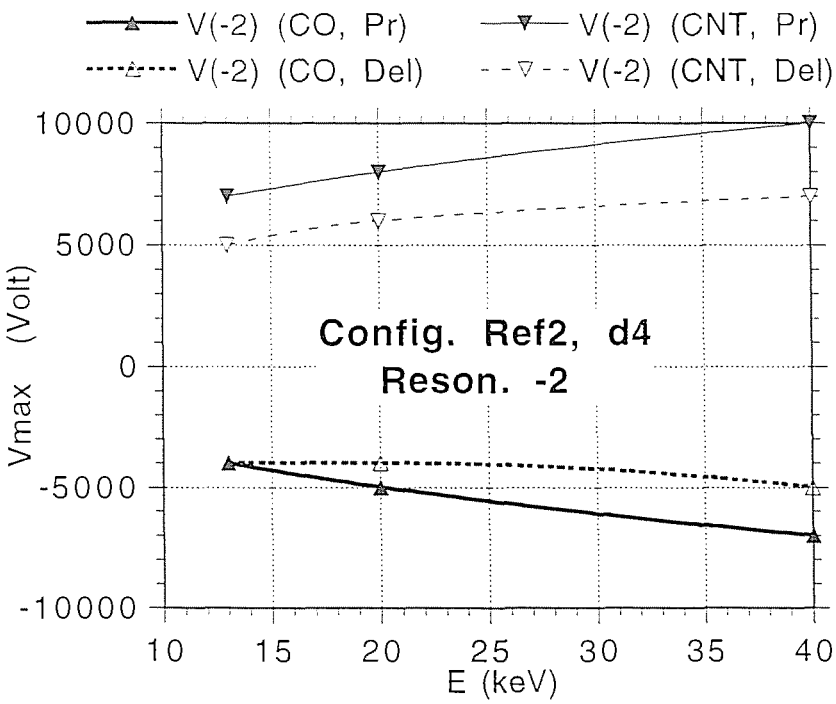

V(-2) (CO, Pr)
V(-2) (CNT, Pr)
V(-2) (CO, Del)
V(-2) (CNT, Del)
10000
5000
0
-5000
-10000
Vmax (Volt)
Config. Ref2, d4
Reson. -2
10
15
20
25
30
35
40
E (keV)

Fig.3.10

Fig.3.11

Config. ref2 , E(keV) = 40.00
s, Phi, Tht = 0.6000 0.0000E+00 0.0000E+00
Vmax(V) = 1.0000E+04
Dett, t(us) = +- 5.0000E-02 1.119 205.6

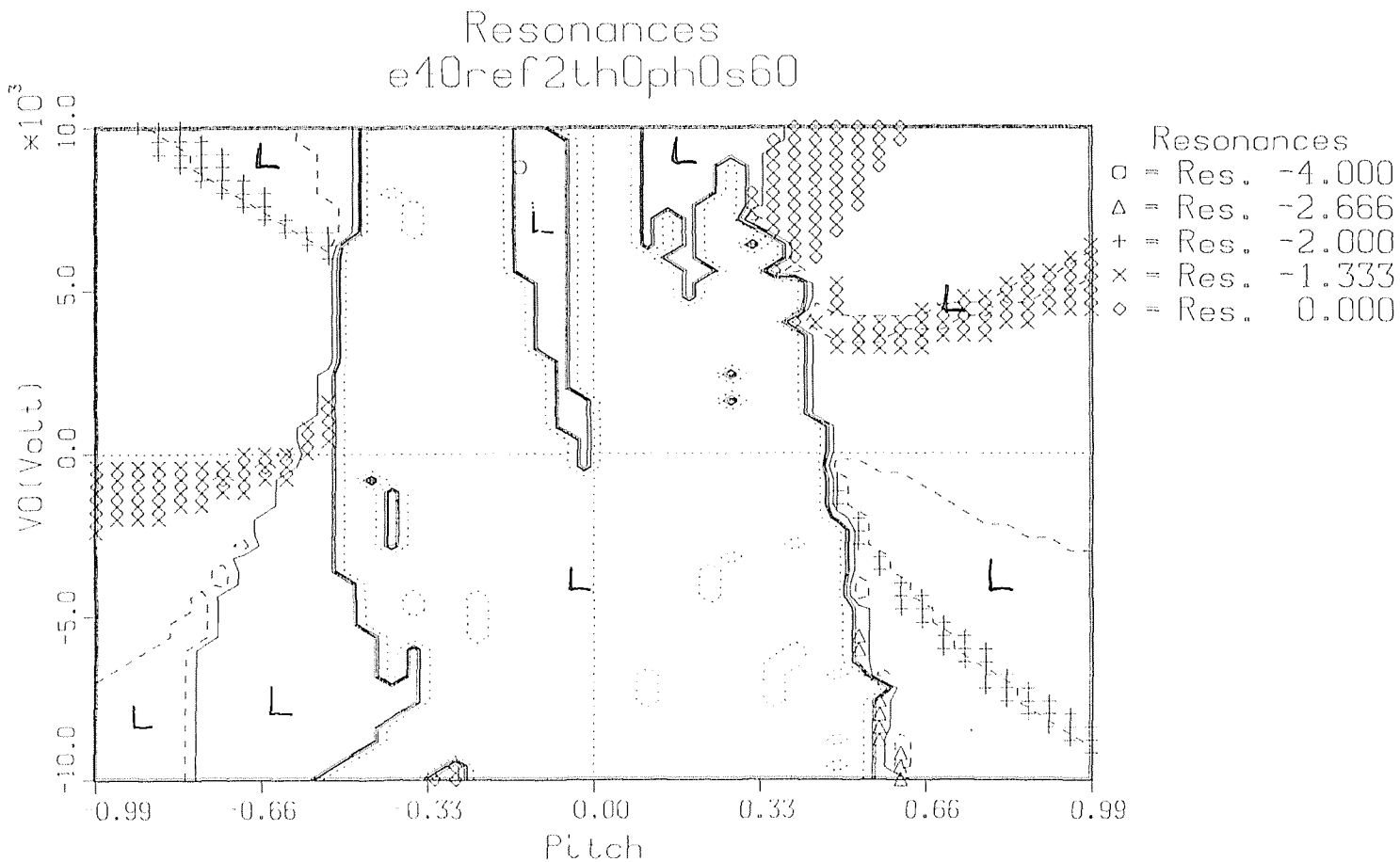


Fig.3.12

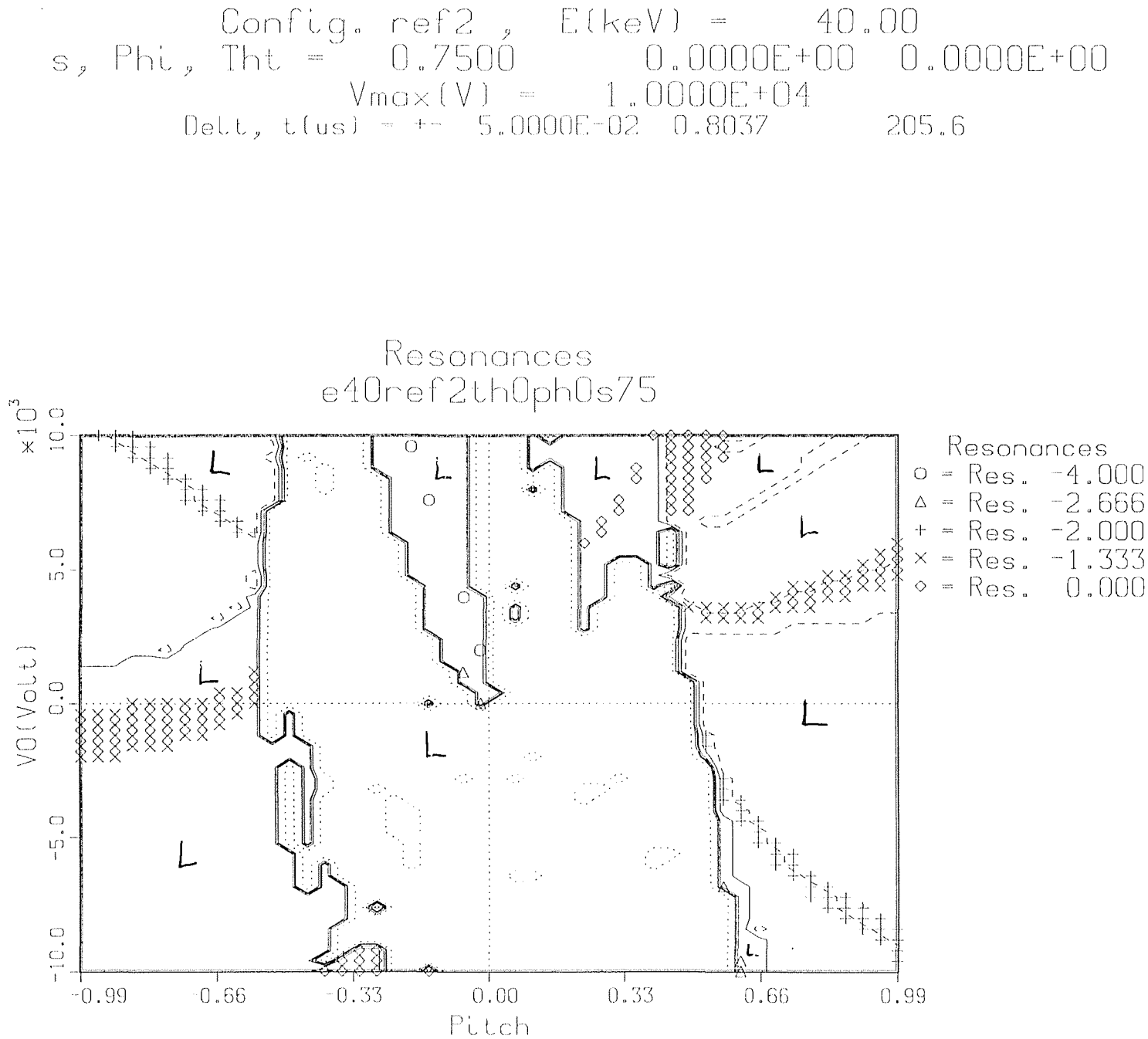
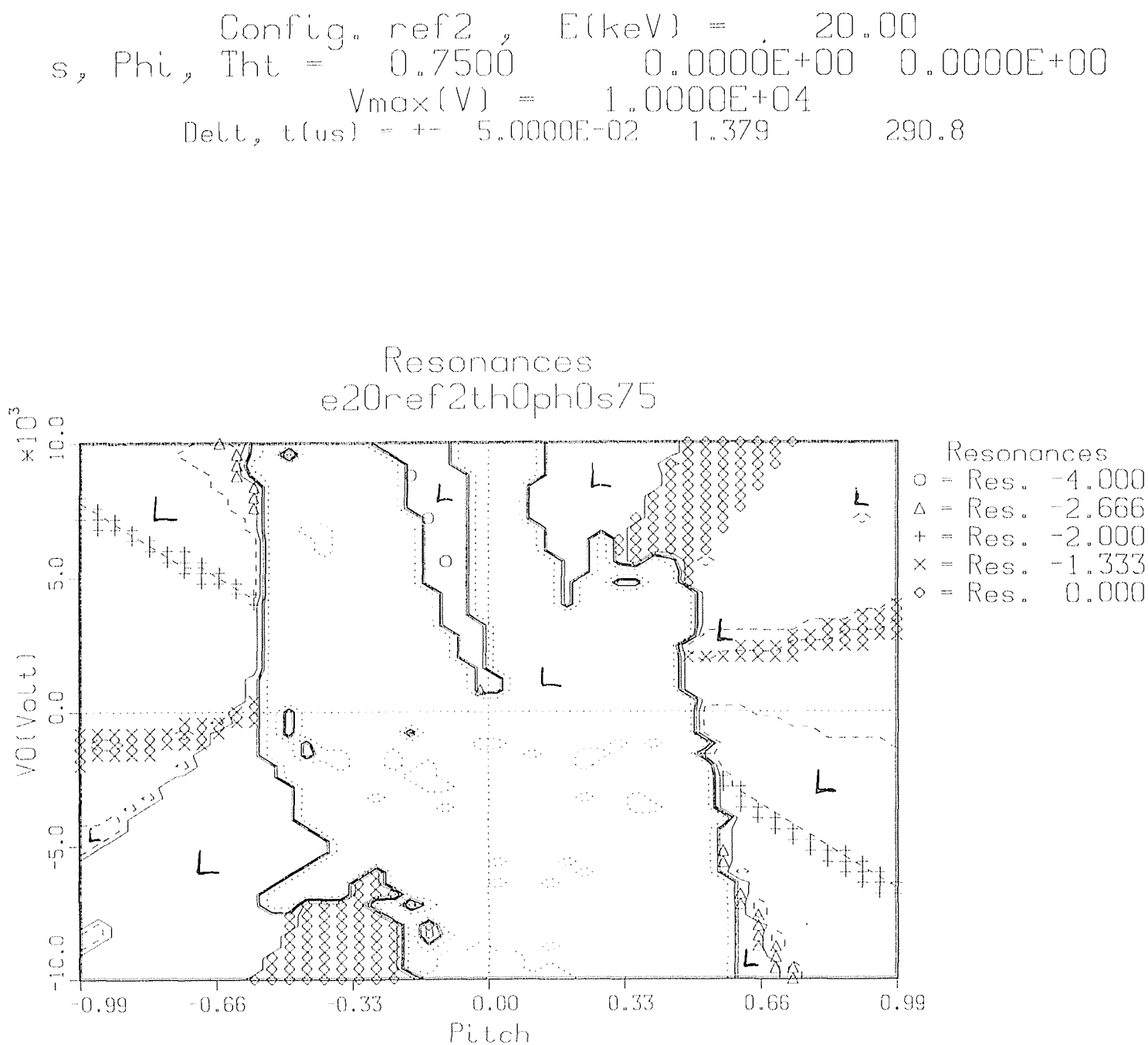

Config. ref2 , E(keV) = 40.00
s, Phi, Tht = 0.7500 0.0000E+00 0.0000E+00
Vmax(V) = 1.0000E+04
Delt, t(us) = +- 5.0000E-02 0.8037 205.6
Resonances
e40ref2th0ph0s75
Resonances
o = Res. -4.000
Δ = Res. -2.666
+ = Res. -2.000
× = Res. -1.333
◇ = Res. 0.000
V0(Volt)
×10^3
10.0
5.0
0.0
-5.0
-10.0
-0.99
0.66
-0.33
0.00
0.33
0.66
0.99
Pitch

Fig.3.13


Config. ref2 , E(keV) = 20.00
s, Phi, Tht = 0.7500 0.0000E+00 0.0000E+00
Vmax(V) = 1.0000E+04
Delt, t(us) = +- 5.0000E-02 1.379 290.8
Resonances
e20ref2th0ph0s75
V0(Volt) *10^3
10.0
5.0
0.0
-5.0
-10.0
-0.99
-0.66
-0.33
0.00
0.33
0.66
0.99
Pitch
Resonances
o = Res. -4.000
Δ = Res. -2.666
+ = Res. -2.000
× = Res. -1.333
◇ = Res. 0.000

Config. ref2 , E(keV) = 5.000
s, Phi, Tht = 0.7500 0.0000E+00 0.0000E+00
Vmax(V) = 1.0000E+04
Delt, t(us) = +- 5.0000E-02 5.044 581.5

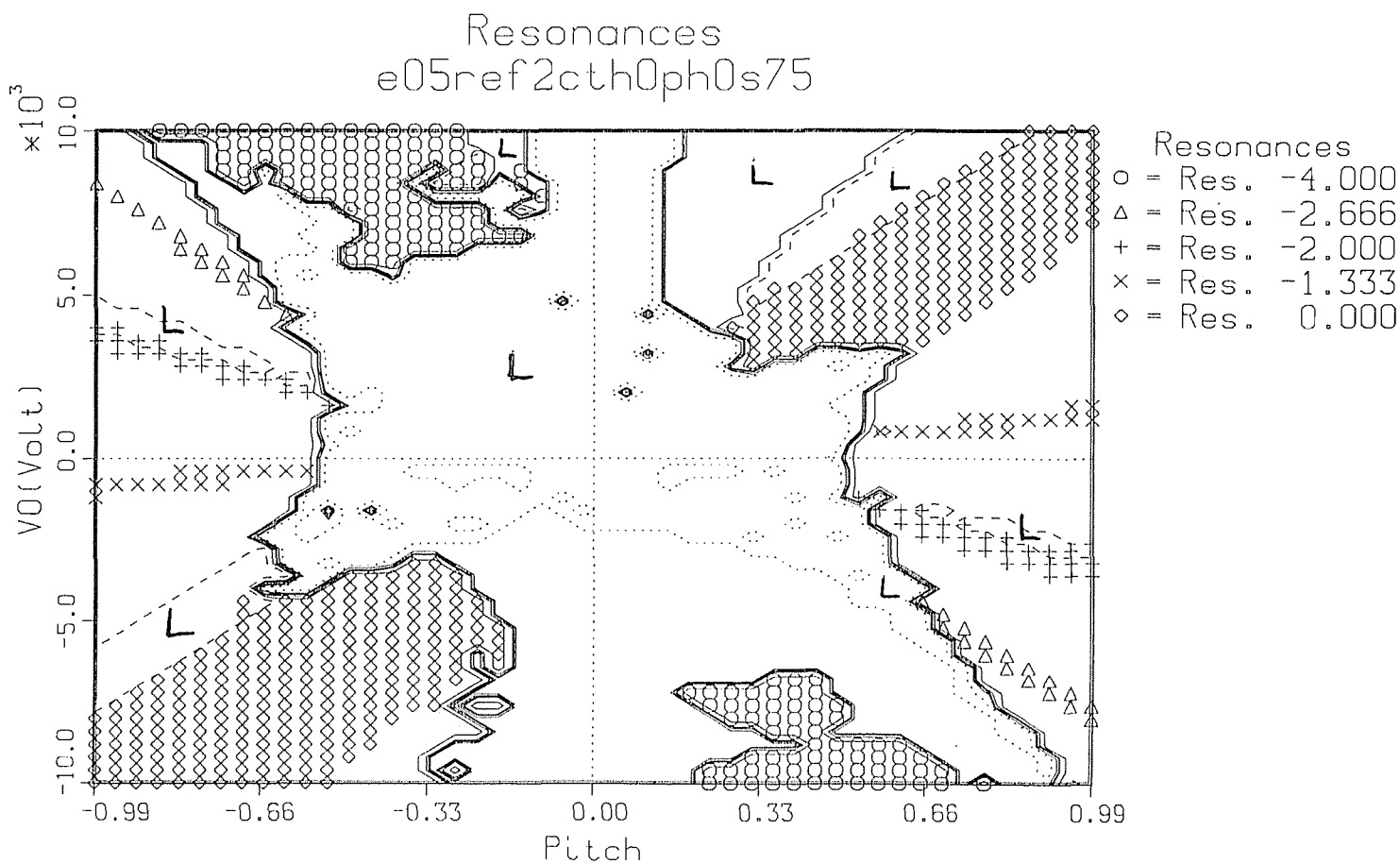
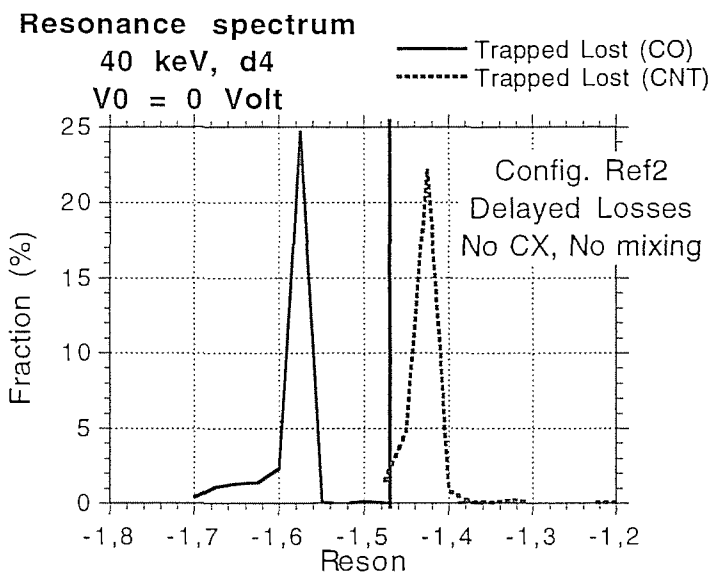
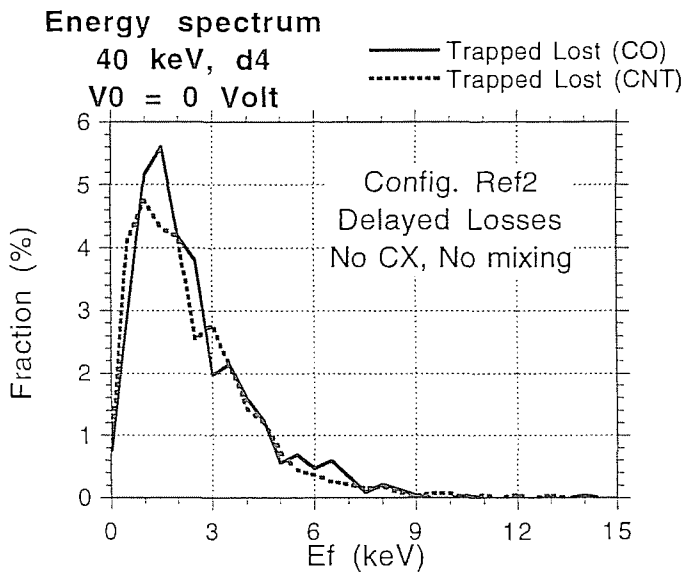


Fig.3.14


Resonance spectrum
40 keV, d4
V0 = 0 Volt
Trapped Lost (CO)
Trapped Lost (CNT)
Config. Ref2
Delayed Losses
No CX, No mixing
Fraction (%)
Reson
25
20
15
10
5
0
-1,8
-1,7
-1,6
-1,5
-1,4
-1,3
-1,2


Energy spectrum
40 keV, d4
V0 = 0 Volt
Trapped Lost (CO)
Trapped Lost (CNT)
Config. Ref2
Delayed Losses
No CX, No mixing
Fraction (%)
Ef (keV)
6
5
4
3
2
1
0
0
3
6
9
12
15

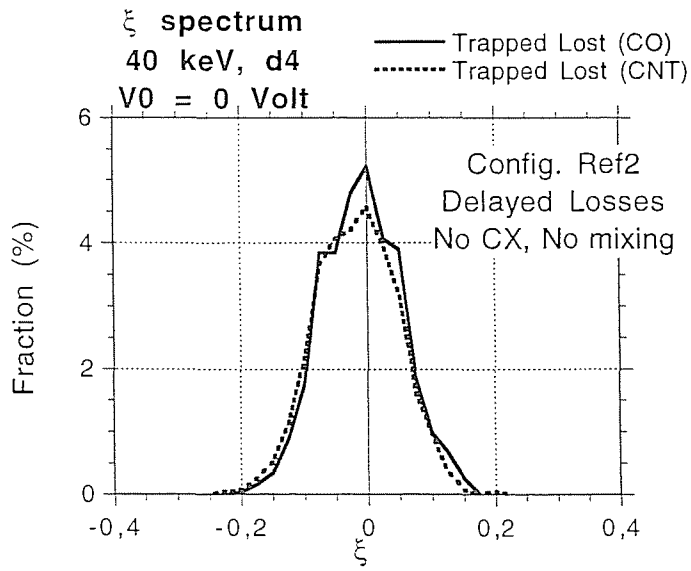
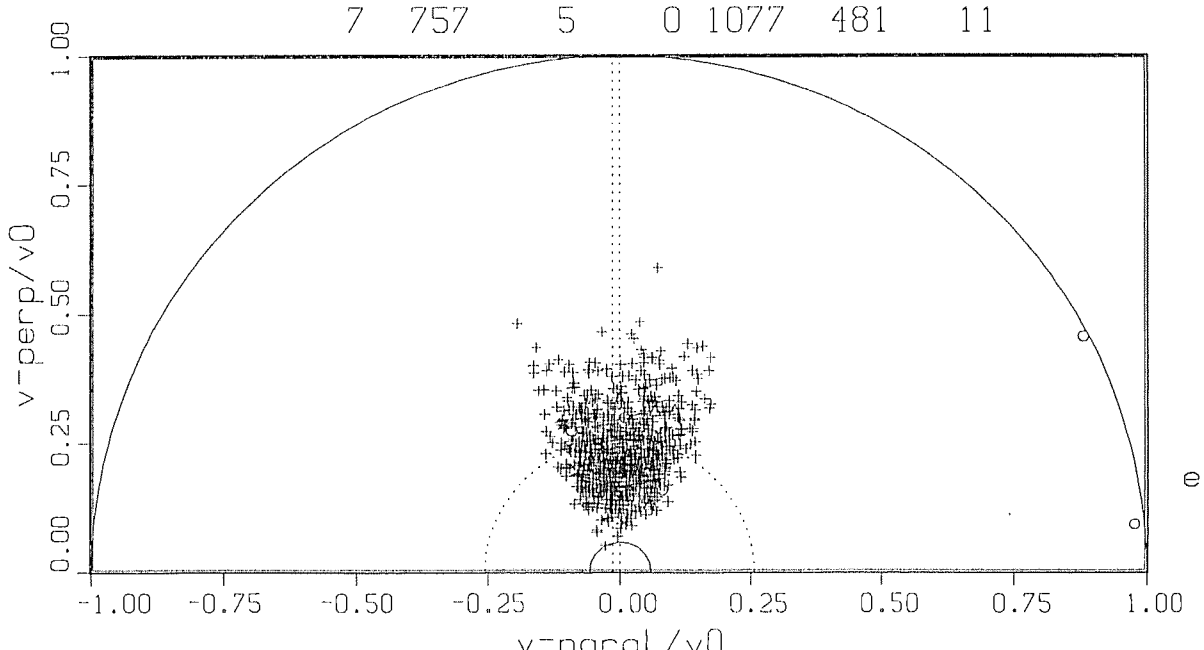

ξ spectrum
40 keV, d4
V0 = 0 Volt
Trapped Lost (CO)
Trapped Lost (CNT)
Config. Ref2
Delayed Losses
No CX, No mixing
Fraction (%)
ξ
6
4
2
0
-0,4
-0,2
0
0,2
0,4

Fig.3.15

Loss Cone diagram v-paral./v-perp.
Config. ref2, Delayed Losses (us) 40.00
Particles Lost = 32.89%, t av.= 2832.84 us
Passing = 46.28%, Trapped = 53.72%
Electric Potential = 0.0Volt

Symbols
△ = Lost-Locally Trapped
+ = Lost-Trapped
○ = Lost-Passing
× = Lost-Undefined

Loss cone diagram v-paral/v0 : v-perp/v0
Emin, Emax(keV) = 0.1362 40.00
Particle distrib. Total = 2338
7 757 5 0 1077 481 11



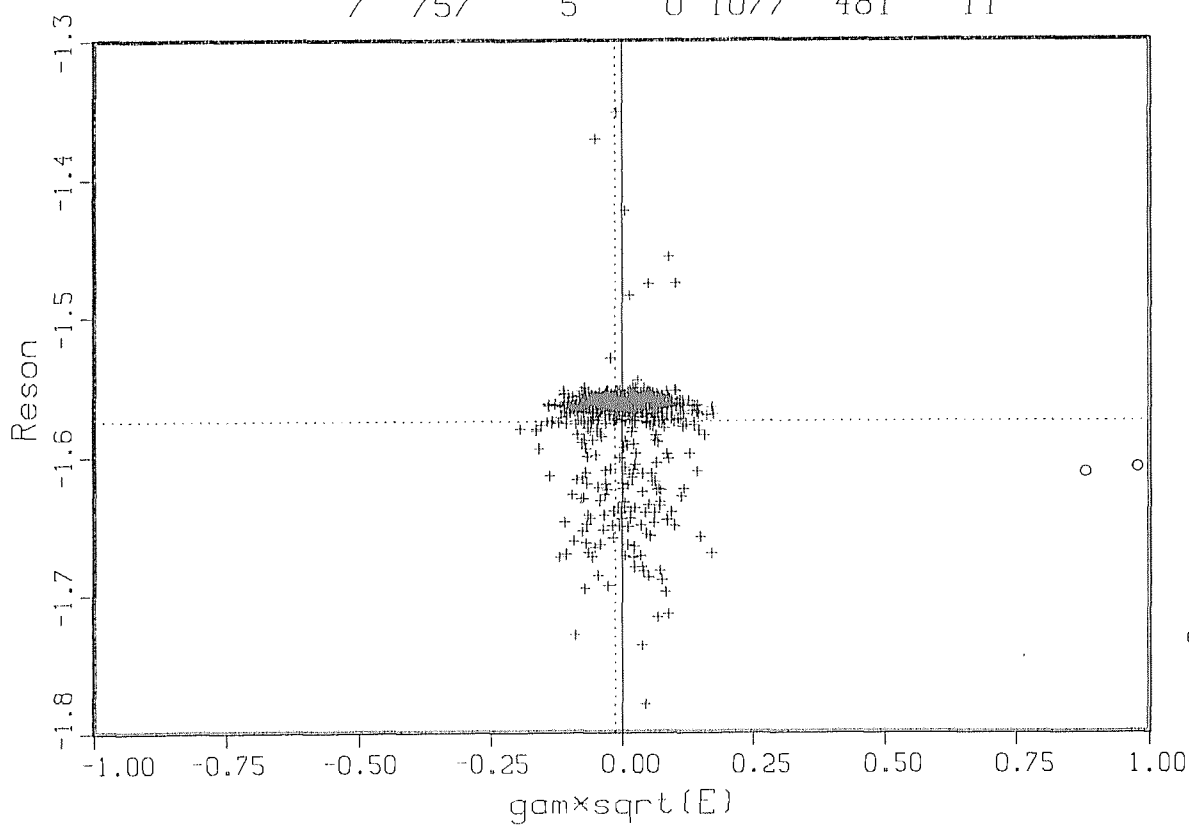
e40d4coefp00

Fig.3.16

Loss Cone diagram Pitch-Reson
Config. ref2, Delayed Losses (us) 40.00
Particles Lost = 32.89%, t av.= 2832.84 us
Passing = 46.28%, Trapped = 53.72%
Electric Potential = 0.0Volt

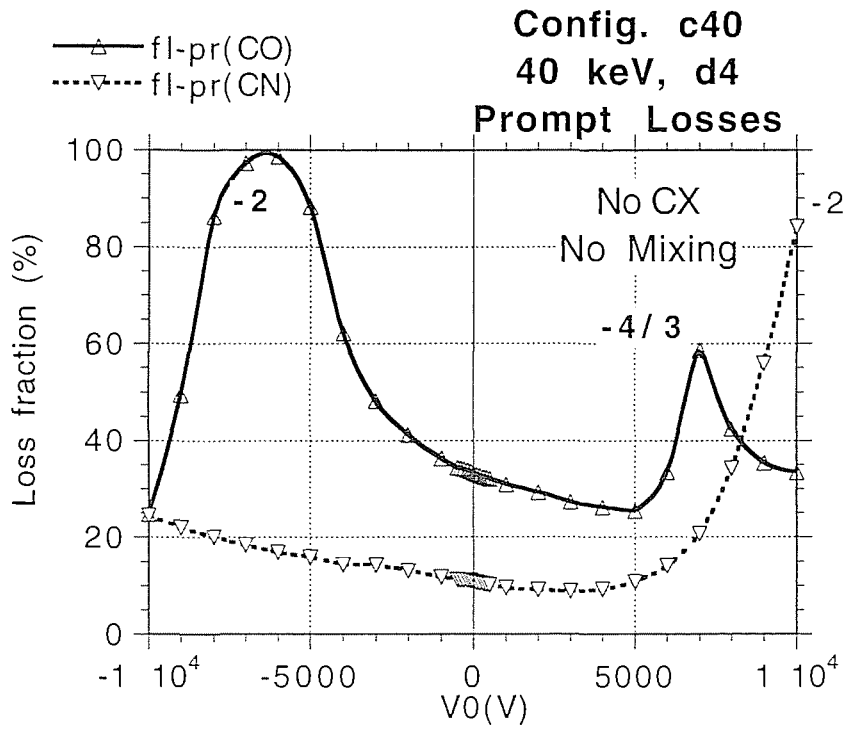
Diagram V Paral. - Reson
Emax = 40.000 keV
Particle distrib. Total = 2338
7 757 5 0 1077 481 11

Symbols
△ = Lost-Locally Trapped
+ = Lost-Trapped
○ = Lost-Passing
× = Lost-Undefined



e40d4coefp00

Fig.3.17


fl-pr(CO)
fl-pr(CN)
Config. c40
40 keV, d4
Prompt Losses
No CX
No Mixing
-2
-4/3
-2
Loss fraction (%)
V0(V)

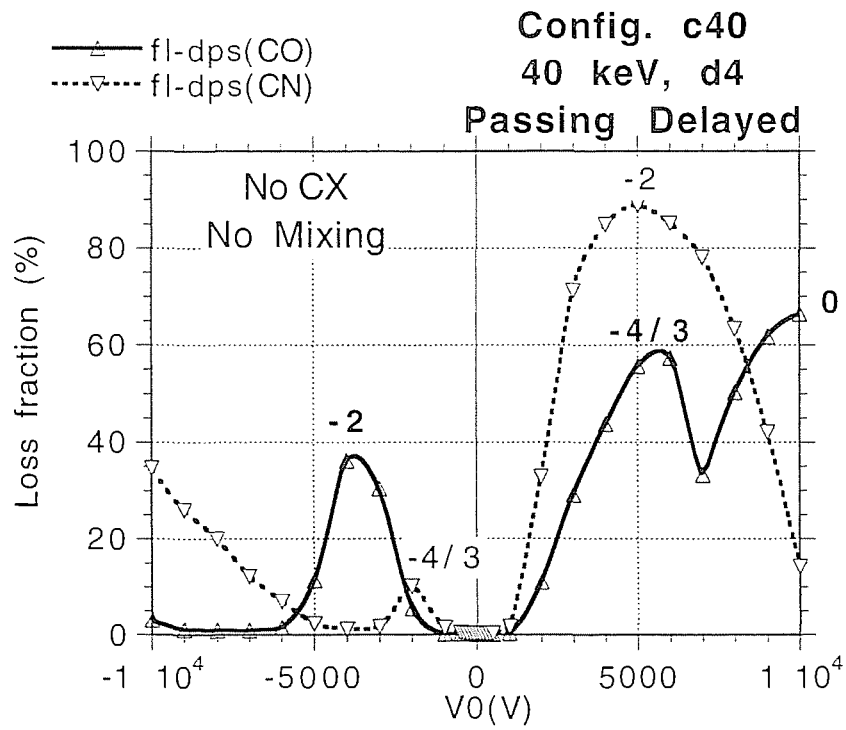

fl-dps(CO)
fl-dps(CN)
Config. c40
40 keV, d4
Passing Delayed
No CX
No Mixing
-2
-4/3
-2
-4/3
0
Loss fraction (%)
V0(V)

Fig.3.18

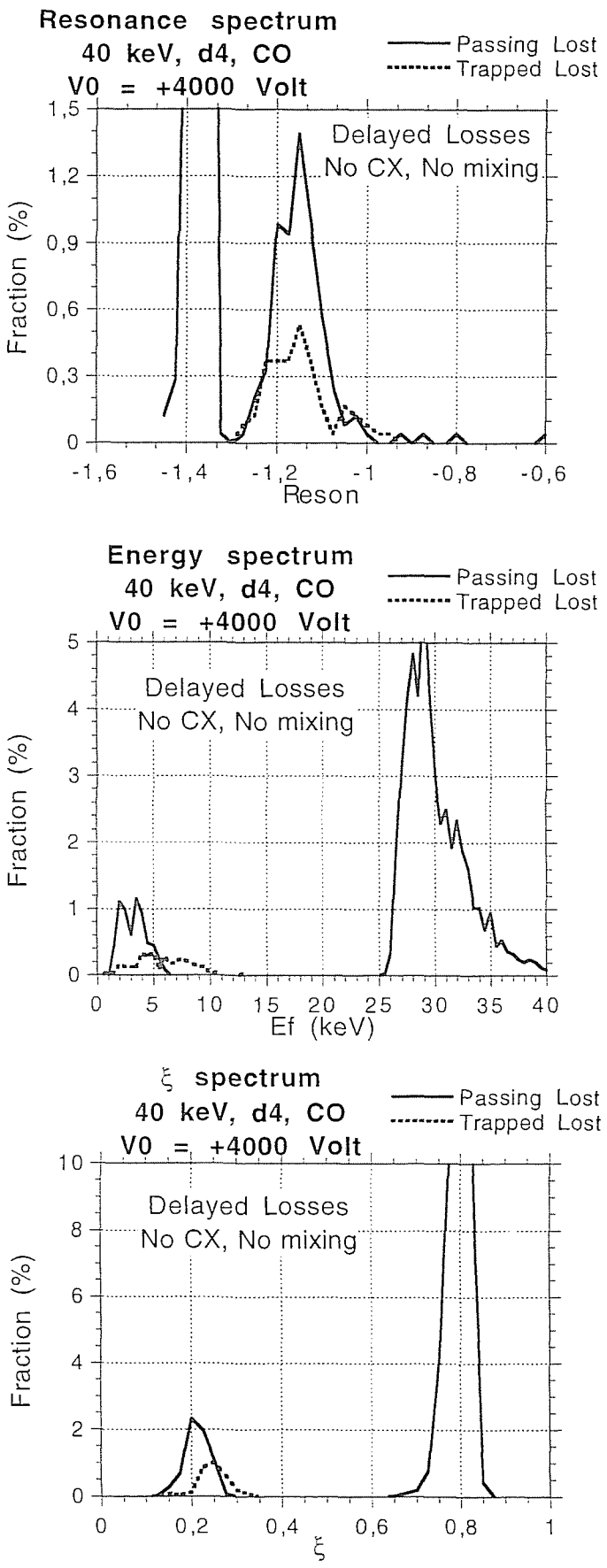
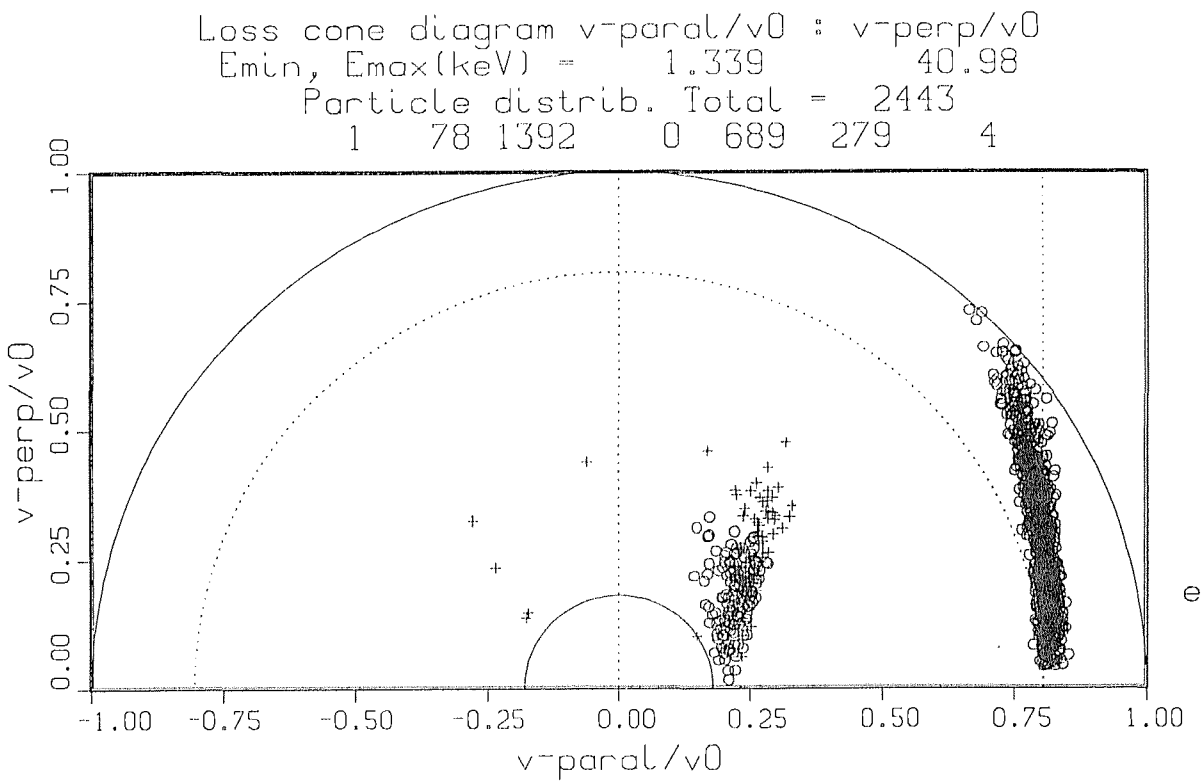

Resonance spectrum
40 keV, d4, CO
V0 = +4000 Volt
Passing Lost
Trapped Lost
Delayed Losses
No CX, No mixing
Fraction (%)
Reson
Energy spectrum
40 keV, d4, CO
V0 = +4000 Volt
Passing Lost
Trapped Lost
Delayed Losses
No CX, No mixing
Fraction (%)
Ef (keV)
ξ spectrum
40 keV, d4, CO
V0 = +4000 Volt
Passing Lost
Trapped Lost
Delayed Losses
No CX, No mixing
Fraction (%)
ξ

Fig.4.1

Loss Cone diagram v-paral./v-perp.
Config. ref2, Delayed Losses (us) 40.00
Particles Lost = 60.21%, t av.= 904.49 us
Passing = 85.18%, Trapped = 14.82%
Electric Potential = 4000.0Volt

Symbols
△ = Lost-Locally Trapped
+ = Lost-Trapped
○ = Lost-Passing
× = Lost-Undefined



e40d4coefp40

Fig.4.2

Loss Cone diagram Pitch-Reson
Config. ref2, Delayed Losses (us) 40.00
Particles Lost = 60.21%, t av.= 904.49 us
Passing = 85.18%, Trapped = 14.82%
Electric Potential = 4000.0Volt

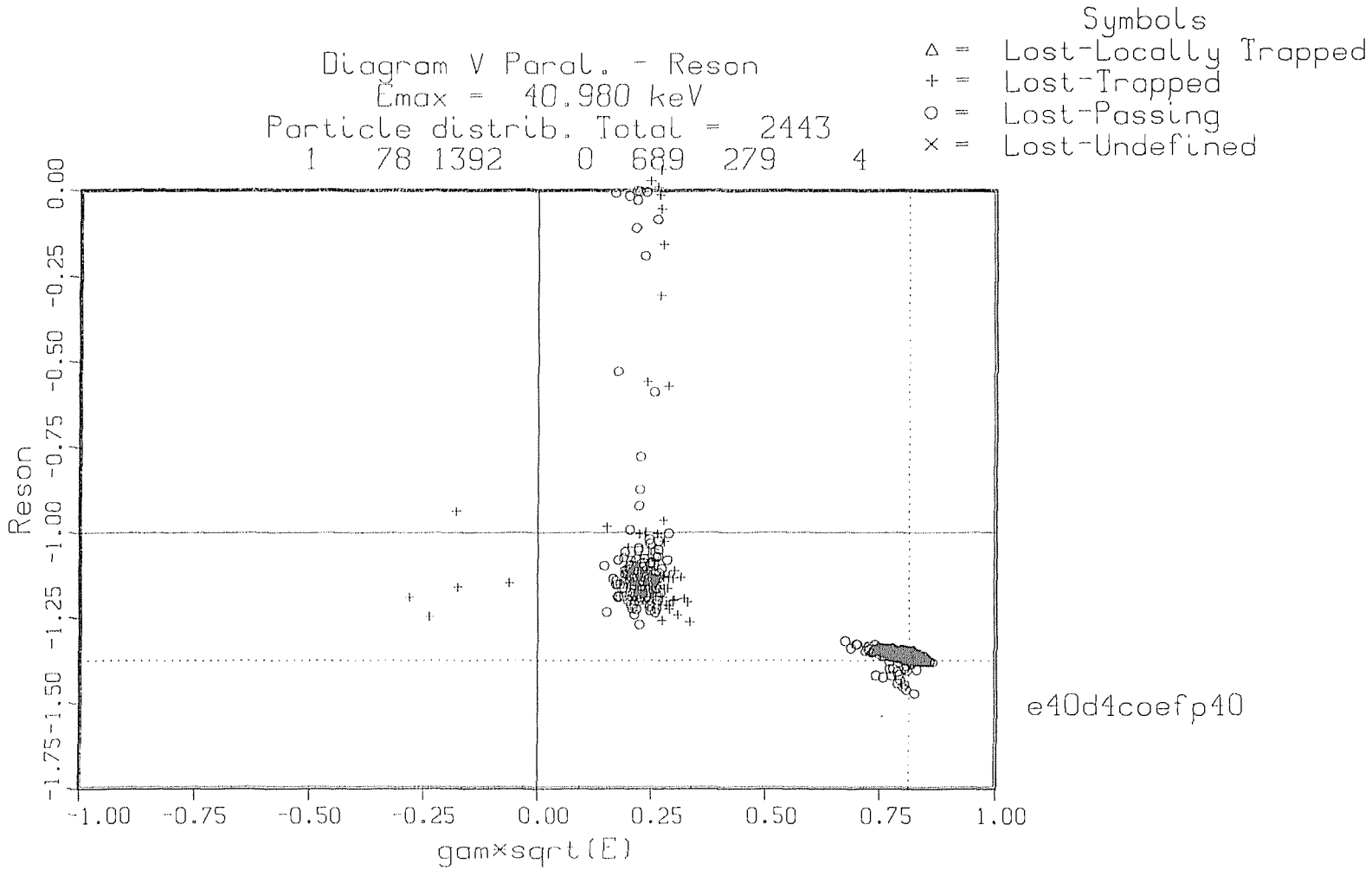
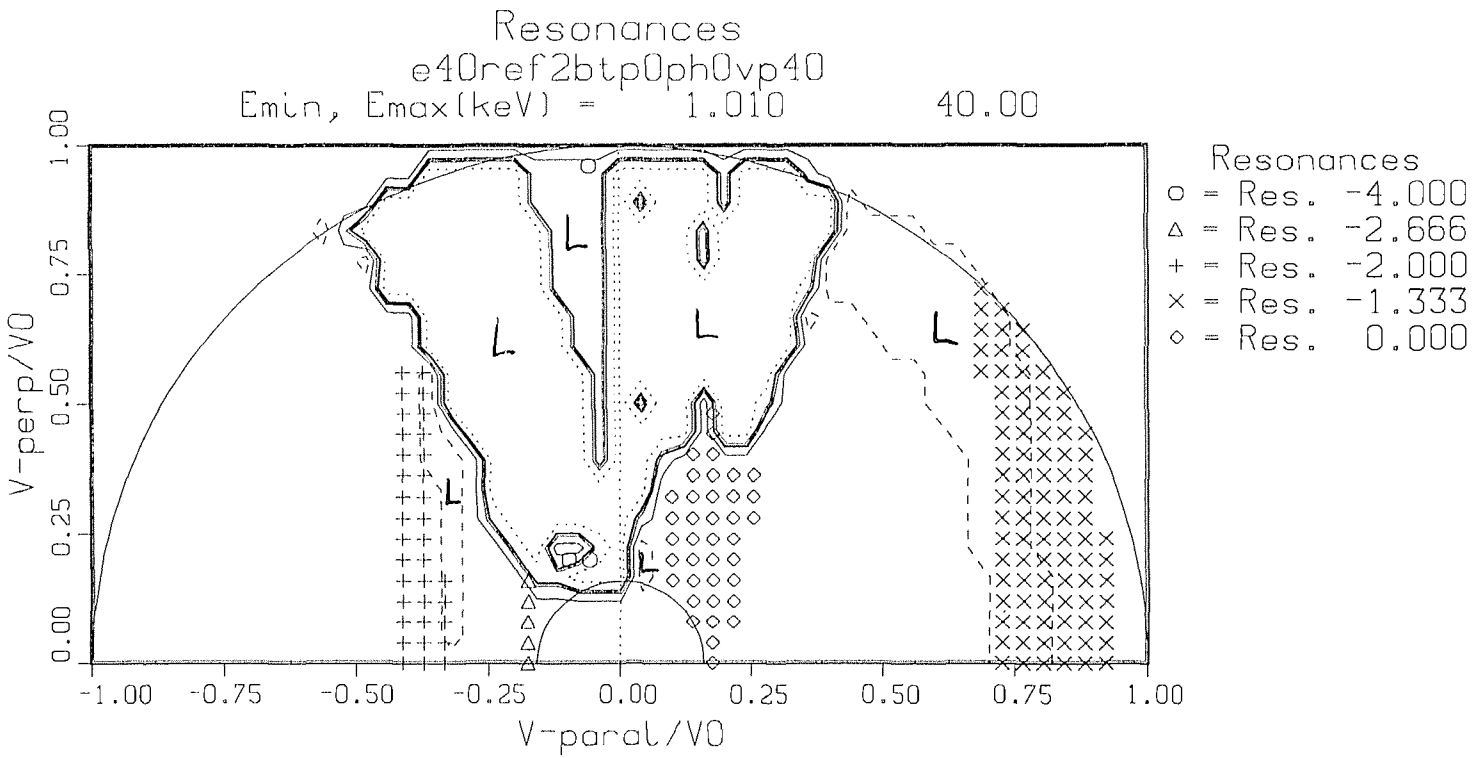


Fig.4.3

Fig.4.4


Config. ref2 , E(keV) = 40.00
s, Phi, Tht = 0.7500 0.0000E+00 0.0000E+00
V(V) = 4000.
Delt, t(us) = +- 5.0000E-02 1.146 1294.
Resonances
e40ref2btp0ph0vp40
Emin, Emax(keV) = 1.010 40.00
V-perp/V0
V-paral/V0
0.00
0.25
0.50
0.75
1.00
-1.00
-0.75
-0.50
-0.25
0.00
0.25
0.50
0.75
1.00
L
Resonances
o = Res. -4.000
Δ = Res. -2.666
+ = Res. -2.000
× = Res. -1.333
◇ = Res. 0.000

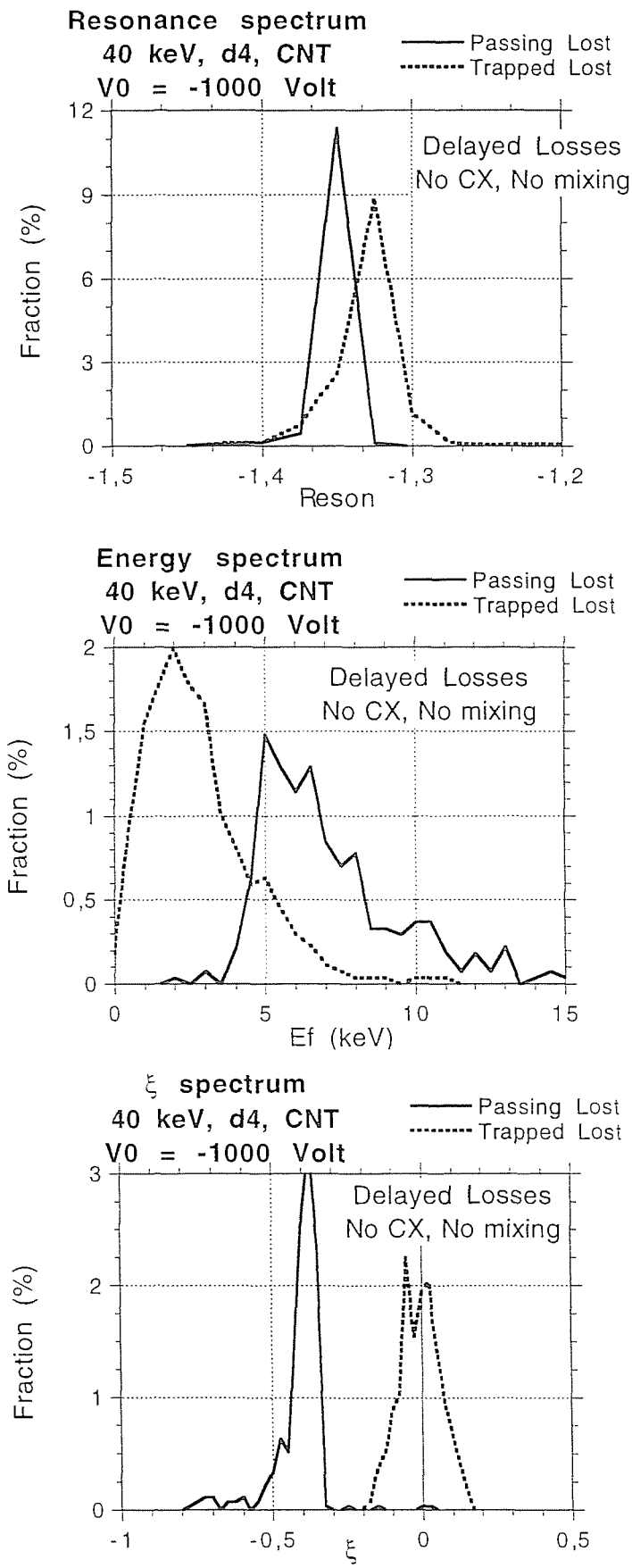
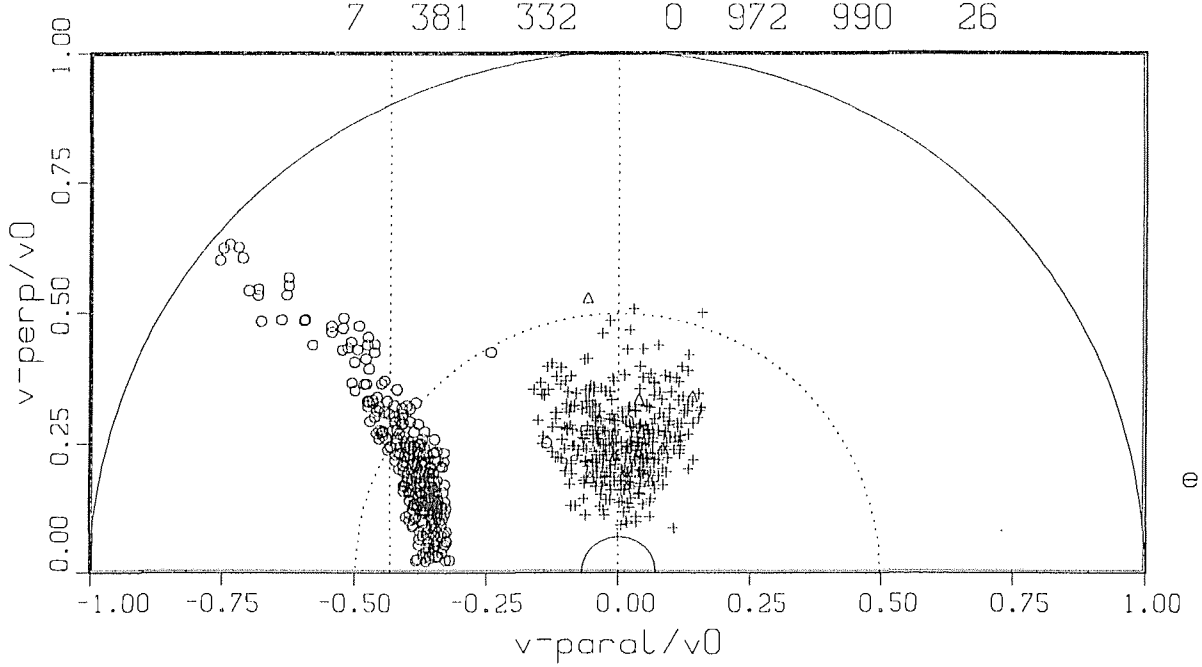

Resonance spectrum
40 keV, d4, CNT
V0 = -1000 Volt
Passing Lost
Trapped Lost
Delayed Losses
No CX, No mixing
Fraction (%)
12
9
6
3
0
-1,5
-1,4
-1,3
-1,2
Reson
Energy spectrum
40 keV, d4, CNT
V0 = -1000 Volt
Passing Lost
Trapped Lost
Delayed Losses
No CX, No mixing
Fraction (%)
2
1,5
1
0,5
0
0
5
10
15
Ef (keV)
ξ spectrum
40 keV, d4, CNT
V0 = -1000 Volt
Passing Lost
Trapped Lost
Delayed Losses
No CX, No mixing
Fraction (%)
3
2
1
0
-1
-0,5
0
0,5
ξ

Fig.4.5

Loss Cone diagram v-paral./v-perp.
Config. ref2, Delayed Losses (us) 40.00
Particles Lost = 26.59%, t av.= 2137.42 us
Passing = 48.15%, Trapped = 51.85%
Electric Potential = -1000.0Volt

Symbols
△ = Lost-Locally Trapped
+ = Lost-Trapped
○ = Lost-Passing
× = Lost-Undefined

Loss cone diagram v-paral/v0 : v-perp/v0
Emin, Emax(keV) = 0.1958 40.00
Particle distrib. Total = 2708
7 381 332 0 972 990 26



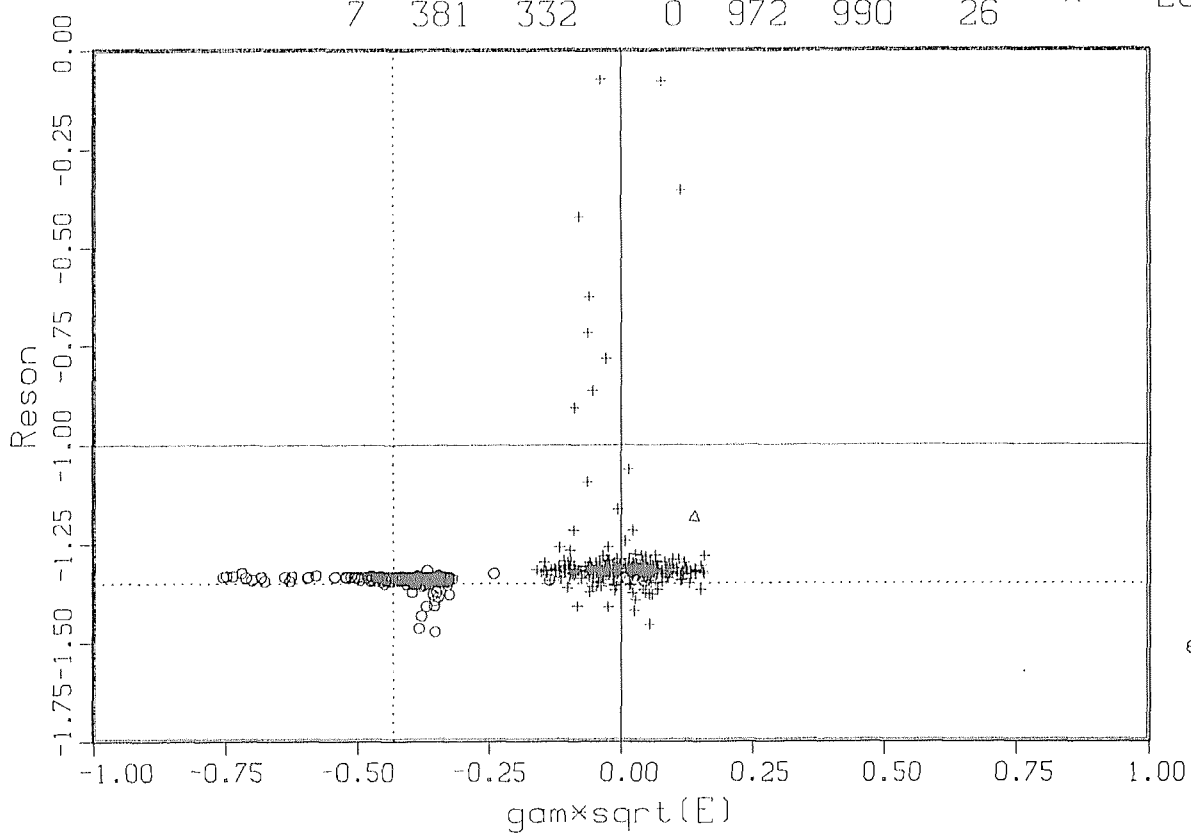
e40d4cnefm10

Fig.4.6

Loss Cone diagram Pitch-Reson
Config. ref2, Delayed Losses (us) 40.00
Particles Lost = 26.59%, t av.= 2137.42 us
Passing = 48.15%, Trapped = 51.85%
Electric Potential = -1000.0Volt

Diagram V Paral. - Reson
Emax = 40.000 keV
Particle distrib. Total = 2708
7 381 332 0 972 990 26

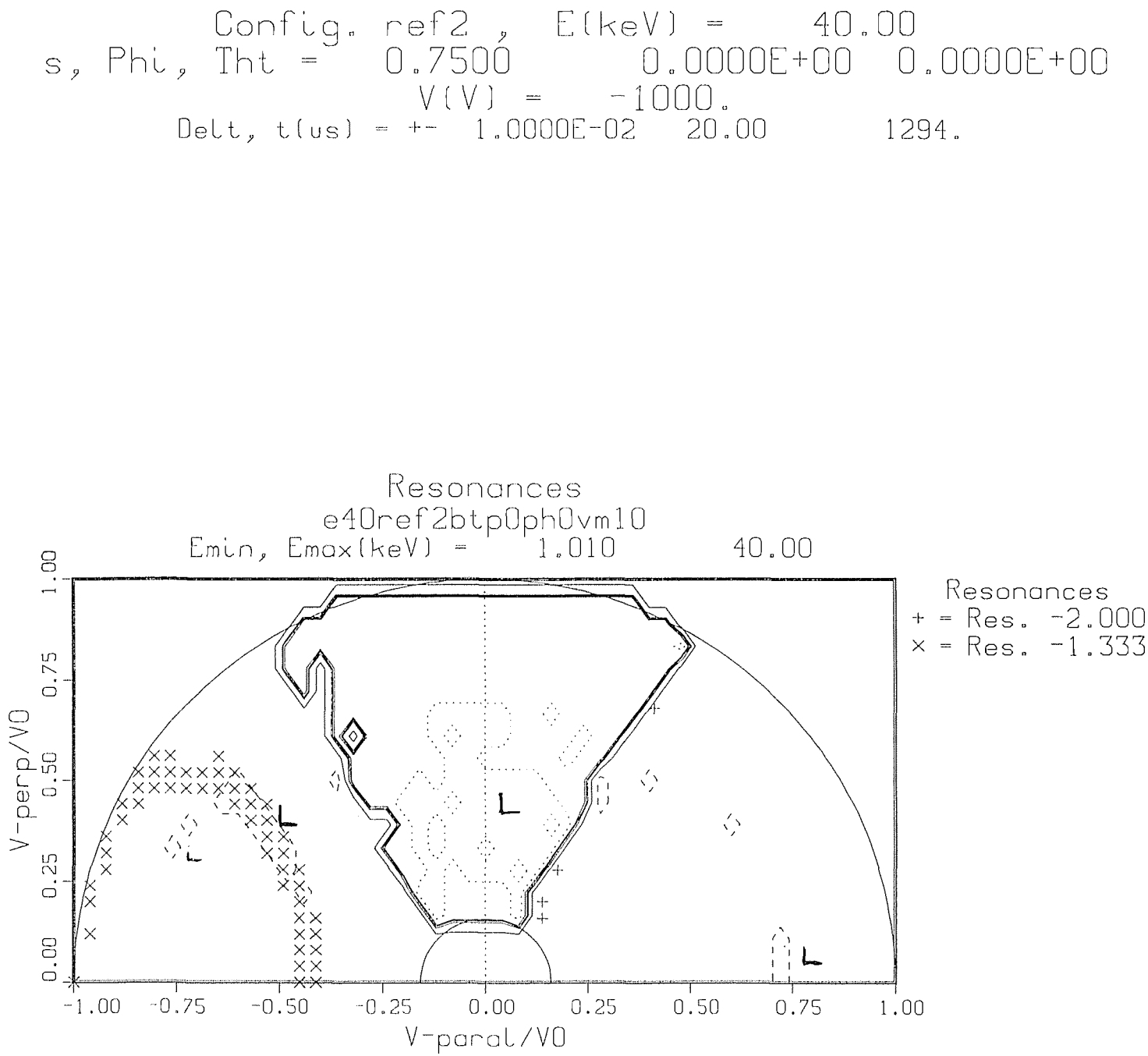
Symbols
△ = Lost-Locally Trapped
+ = Lost-Trapped
○ = Lost-Passing
× = Lost-Undefined



e40d4cnefm10

Fig.4.7

Fig.4.8


Config. ref2 , E(keV) = 40.00
s, Phi, Tht = 0.7500 0.0000E+00 0.0000E+00
V(V) = -1000.
Delt, t(us) = +- 1.0000E-02 20.00 1294.
Resonances
e40ref2btp0ph0vm10
Emin, Emax(keV) = 1.010 40.00
Resonances
+ = Res. -2.000
× = Res. -1.333
V-perp/V0
V-paral/V0
0.00
0.25
0.50
0.75
1.00
-1.00
-0.75
-0.50
-0.25
0.00
0.25
0.50
0.75
1.00
L
L
L
L

Config. ref2 , E(keV) = 5.000
s, Phi, Tht = 0.9000 0.0000E+00 0.0000E+00
Vmax(V) = 2000.
Delt, t(us) = +- 5.0000E-02 10.00 581.5

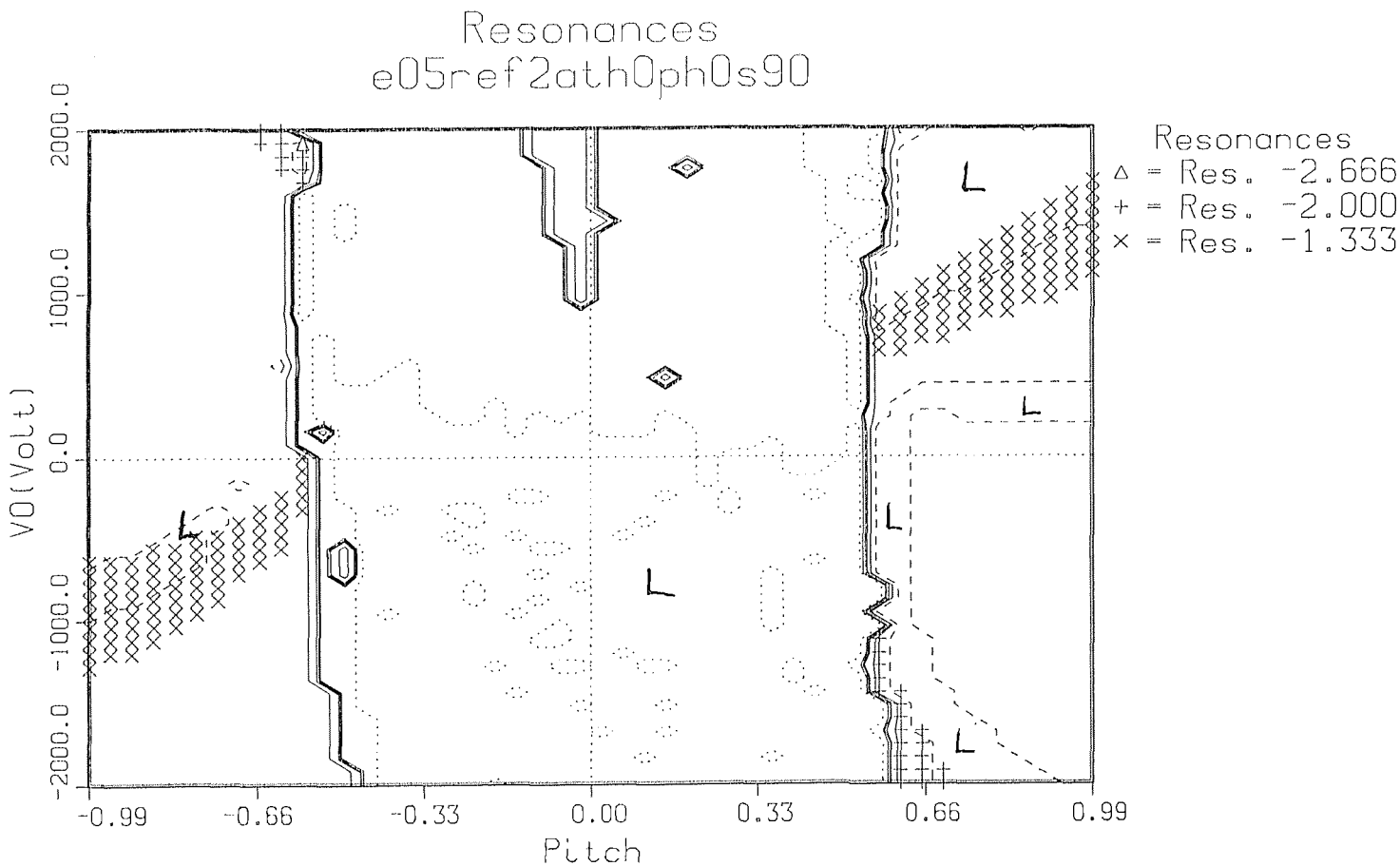
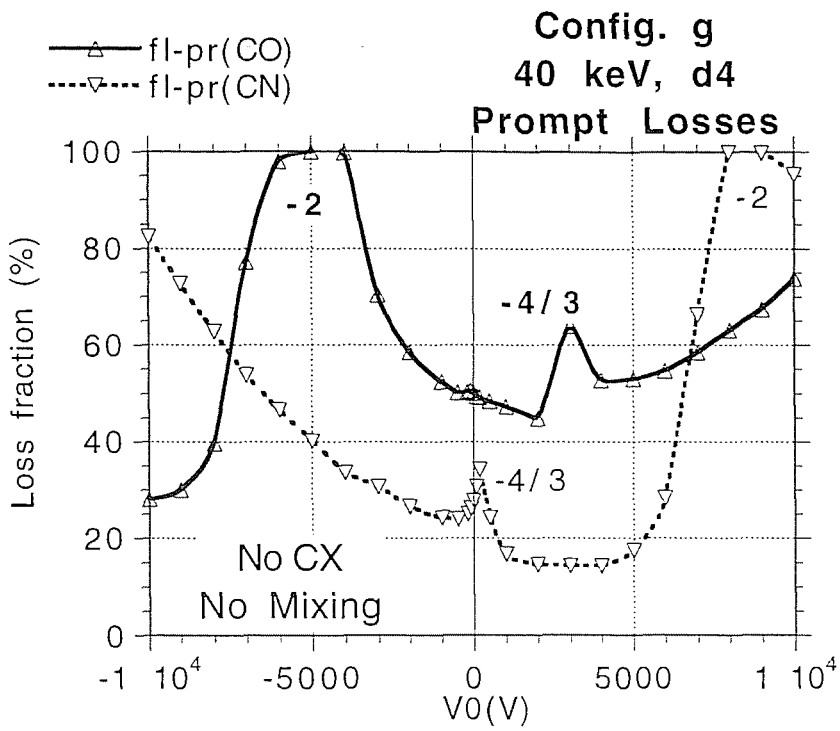


Fig.4.9


fl-pr(CO)
fl-pr(CN)
Config. g
40 keV, d4
Prompt Losses
Loss fraction (%)
100
80
60
40
20
0
-2
-2
-4/3
-4/3
No CX
No Mixing
-1 10^4
-5000
0
5000
1 10^4
V0(V)

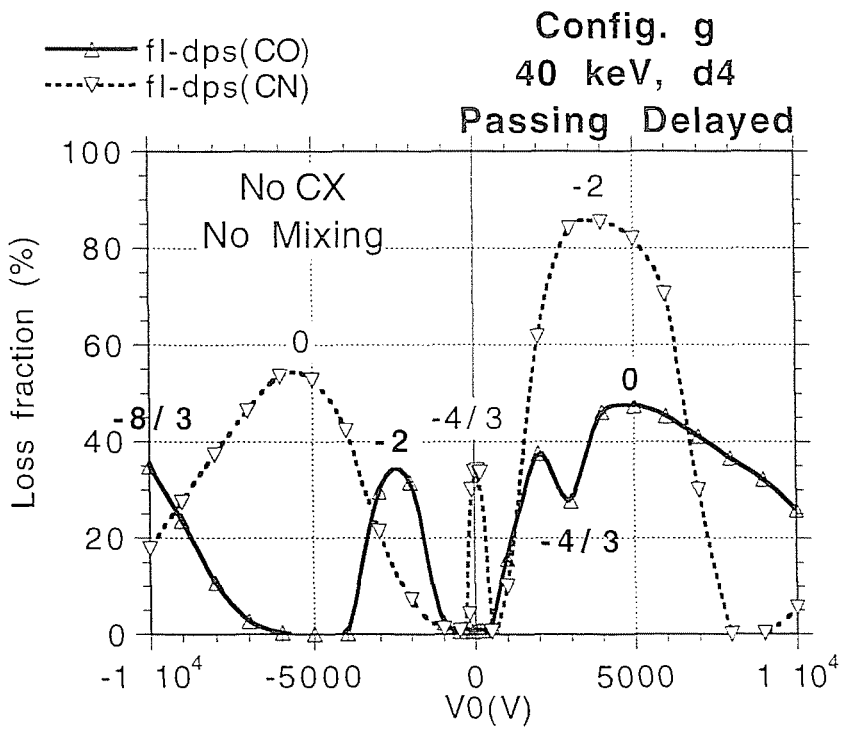
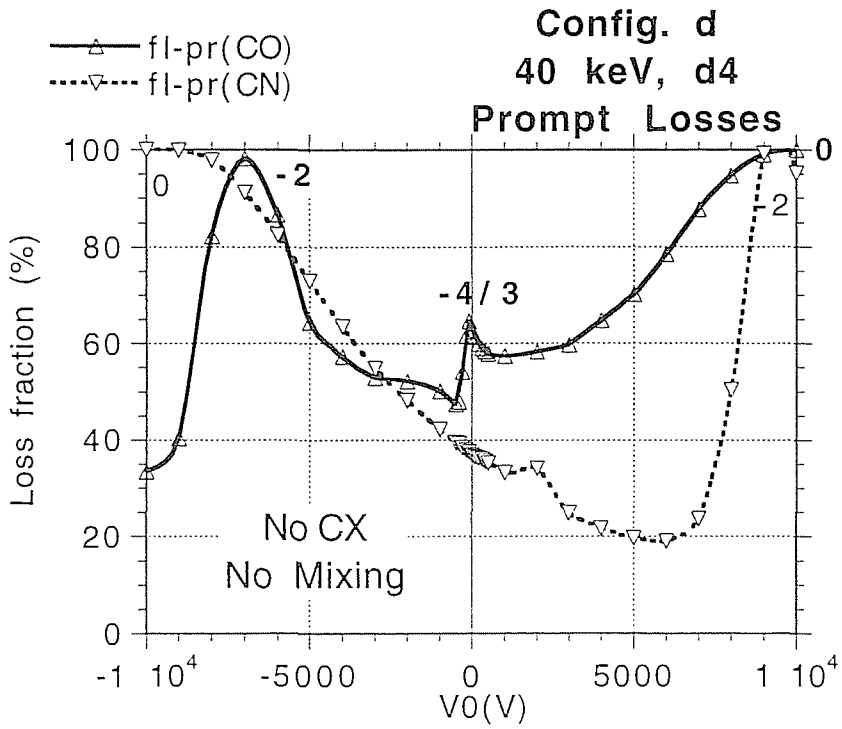

fl-dps(CO)
fl-dps(CN)
Config. g
40 keV, d4
Passing Delayed
Loss fraction (%)
100
80
60
40
20
0
No CX
No Mixing
-2
0
0
-8/3
-2
-4/3
-4/3
-1 10^4
-5000
0
5000
1 10^4
V0(V)

Fig.4.10


fl-pr(CO)
fl-pr(CN)
Config. d
40 keV, d4
Prompt Losses
Loss fraction (%)
100
80
60
40
20
0
0
-2
-4 / 3
-2
0
No CX
No Mixing
-1 10^4
-5000
0
5000
1 10^4
V0(V)

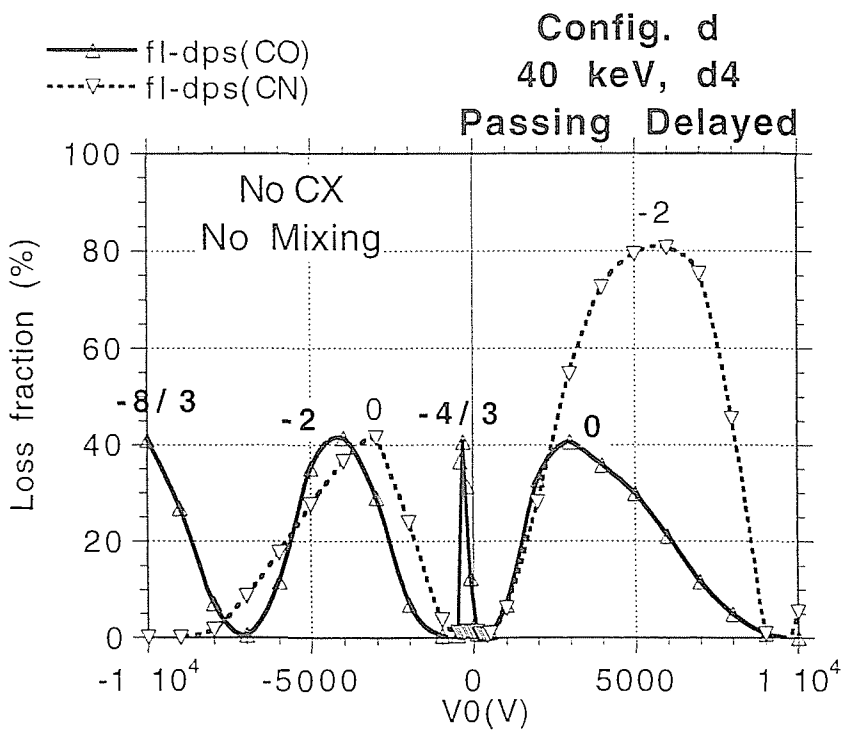
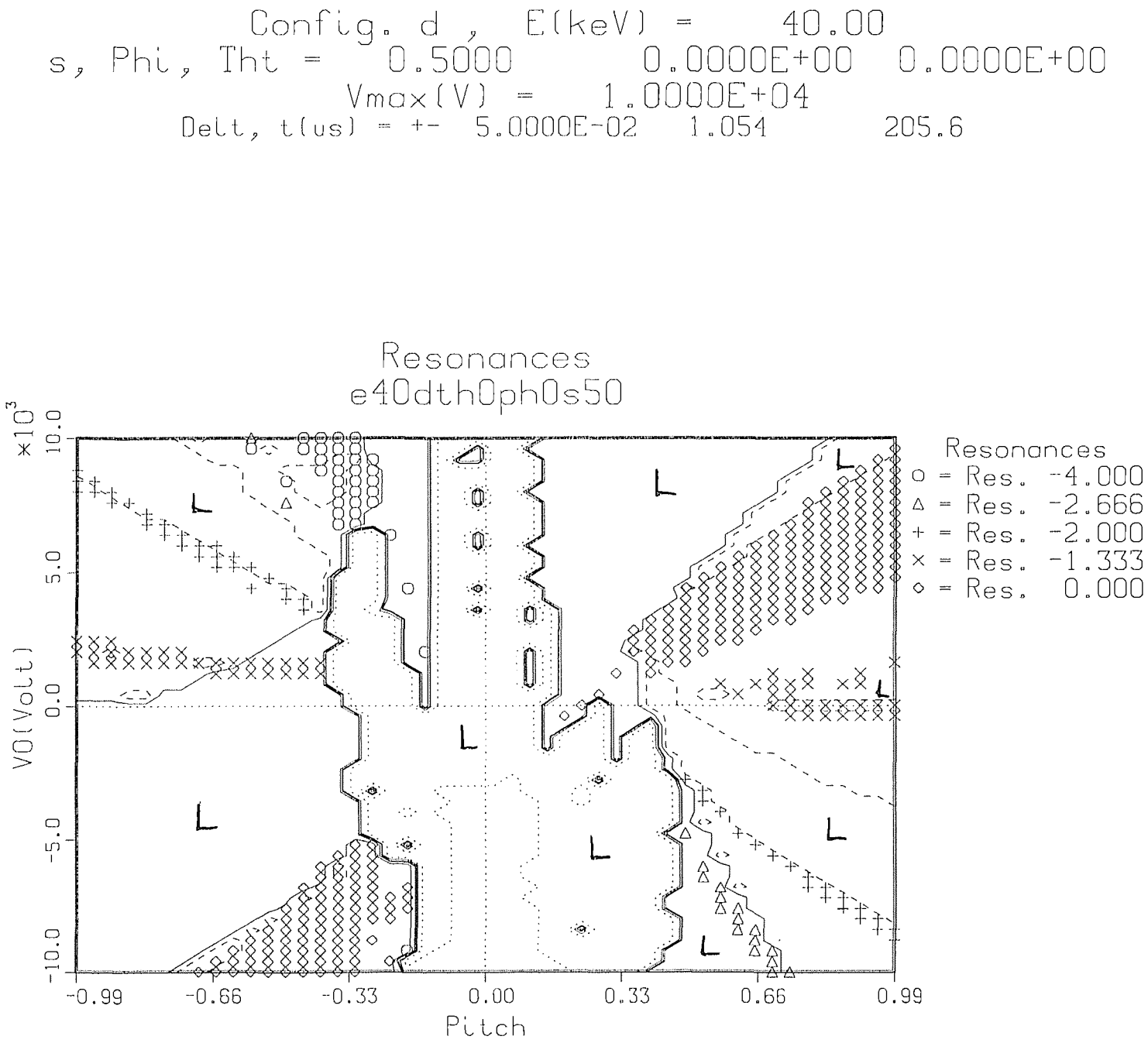

fl-dps(CO)
fl-dps(CN)
Config. d
40 keV, d4
Passing Delayed
Loss fraction (%)
100
80
60
40
20
0
No CX
No Mixing
-2
-8 / 3
-2
0
-4 / 3
0
-1 10^4
-5000
0
5000
1 10^4
V0(V)

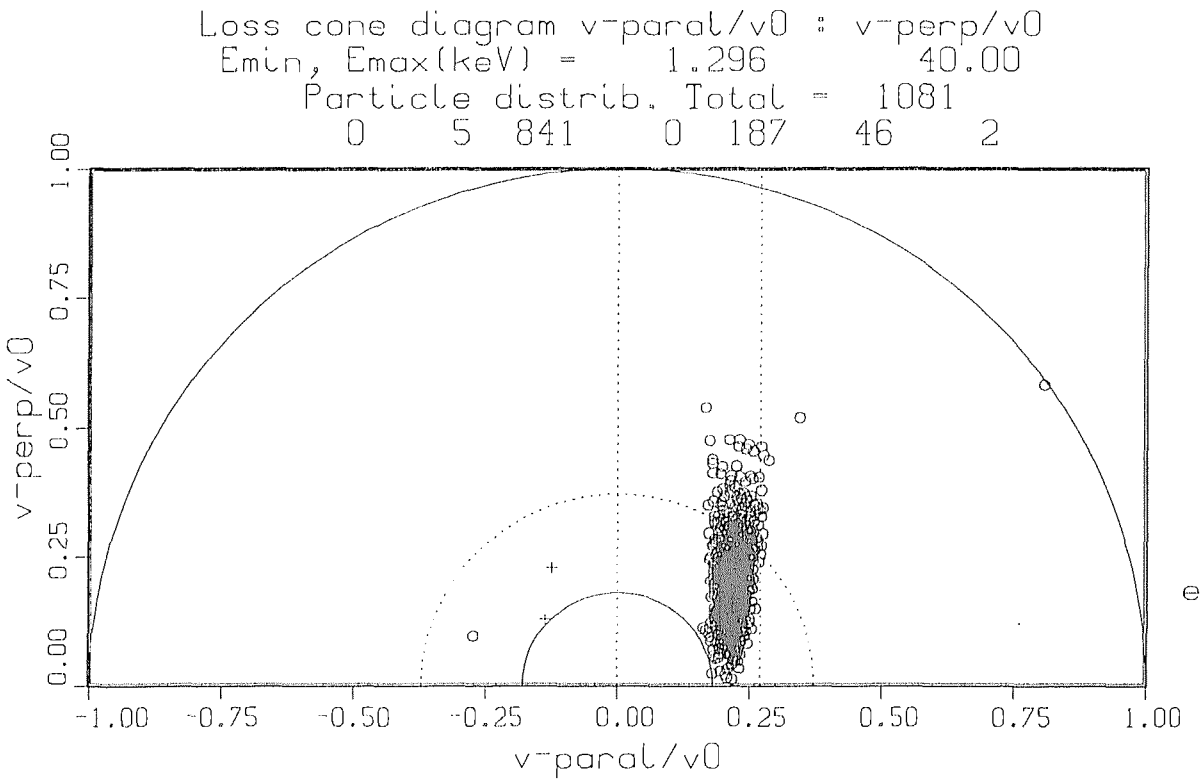
Fig.5.1

Fig.5.2


Config. d , E(keV) = 40.00
s, Phi, Tht = 0.5000 0.0000E+00 0.0000E+00
Vmax(V) = 1.0000E+04
Delt, t(us) = +- 5.0000E-02 1.054 205.6
Resonances
e40dth0ph0s50
Resonances
o = Res. -4.000
Δ = Res. -2.666
+ = Res. -2.000
× = Res. -1.333
◇ = Res. 0.000
VO(Volt)
×10^3
10.0
5.0
0.0
-5.0
-10.0
-0.99
-0.66
-0.33
0.00
0.33
0.66
0.99
Pitch
L

Loss Cone diagram v-paral./v-perp.
Config. d, Delayed Losses (us) 40.00
Particles Lost = 78.26%, t av.= 2868.81 us
Passing = 95.10%, Trapped = 4.90%
Electric Potential = 2000.0Volt

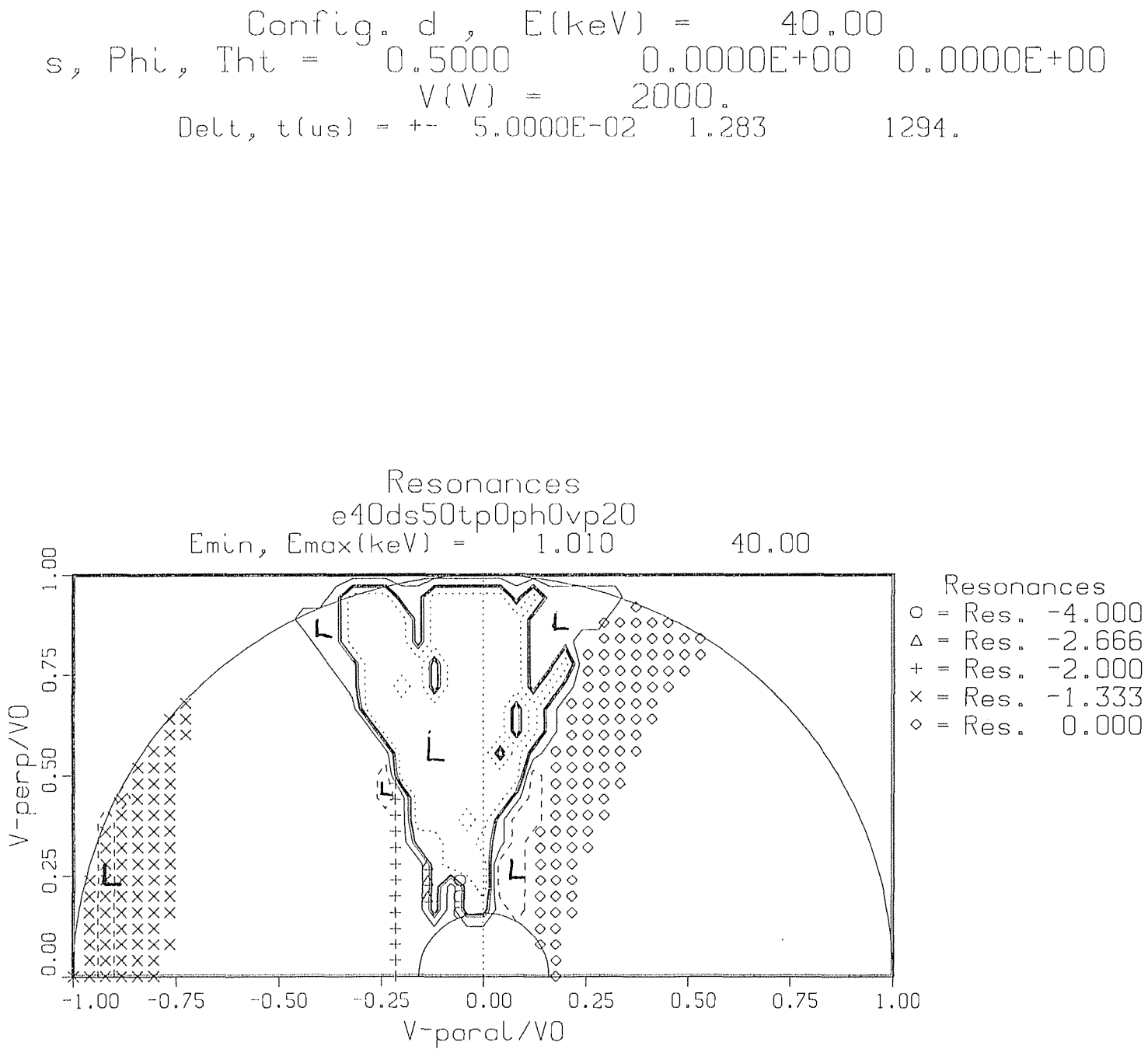
Symbols
△ = Lost-Locally Trapped
+ = Lost-Trapped
o = Lost-Passing
× = Lost-Undefined

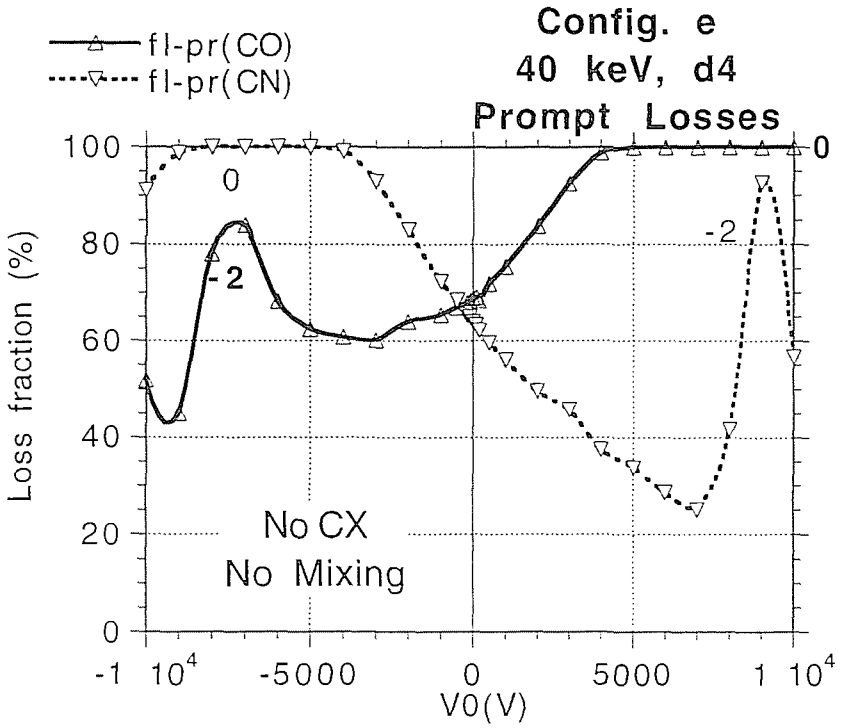


e40d4coefdp20

Fig.5.3

Fig.5.4


Config. d , E(keV) = 40.00
s, Phi, Tht = 0.5000 0.0000E+00 0.0000E+00
V(V) = 2000.
Delt, t(us) = +- 5.0000E-02 1.283 1294.
Resonances
e40ds50tp0ph0vp20
Emin, Emax(keV) = 1.010 40.00
V-perp/V0
V-paral/V0
0.00
0.25
0.50
0.75
1.00
-1.00
-0.75
-0.50
-0.25
0.00
0.25
0.50
0.75
1.00
Resonances
○ = Res. -4.000
△ = Res. -2.666
+ = Res. -2.000
× = Res. -1.333
◇ = Res. 0.000


fl-pr(CO)
fl-pr(CN)
Config. e
40 keV, d4
Prompt Losses
Loss fraction (%)
100
80
60
40
20
0
0
-2
-2
0
No CX
No Mixing
-1 10^4
-5000
0
5000
1 10^4
V0(V)

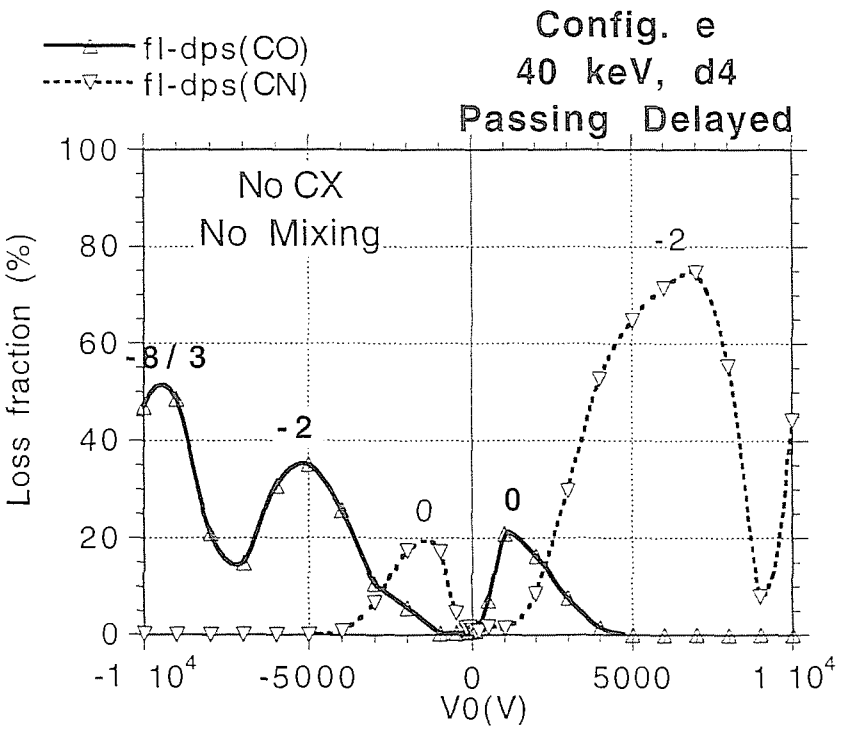
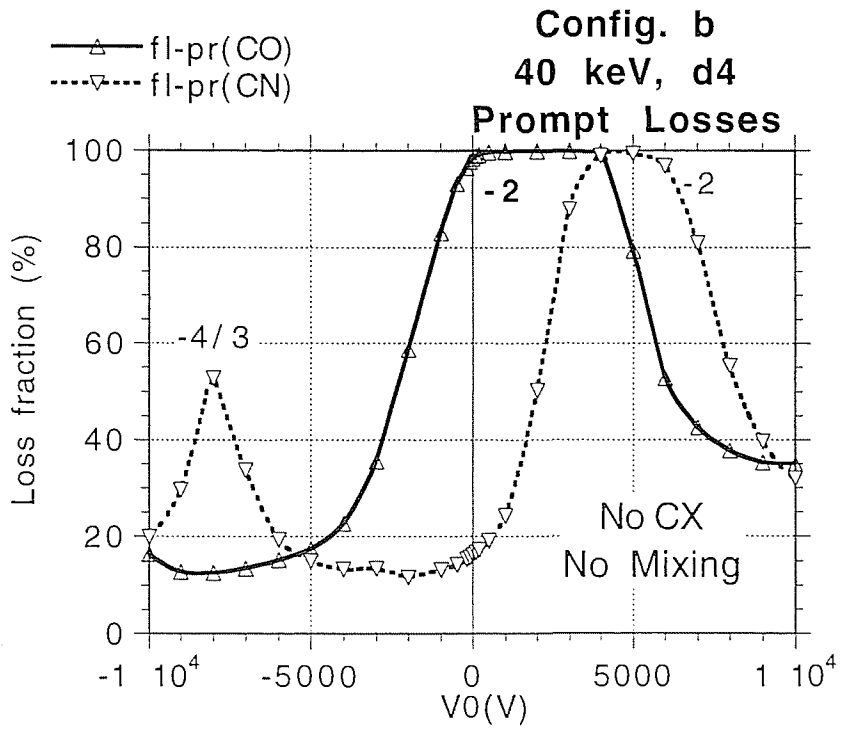

fl-dps(CO)
fl-dps(CN)
Config. e
40 keV, d4
Passing Delayed
Loss fraction (%)
100
80
60
40
20
0
No CX
No Mixing
-8 / 3
-2
0
0
-2
-1 10^4
-5000
0
5000
1 10^4
V0(V)

Fig.5.5


fl-pr(CO)
fl-pr(CN)
Config. b
40 keV, d4
Prompt Losses
Loss fraction (%)
100
80
60
40
20
0
-2
-2
-4/3
No CX
No Mixing
-1 10^4
-5000
0
5000
1 10^4
V0(V)

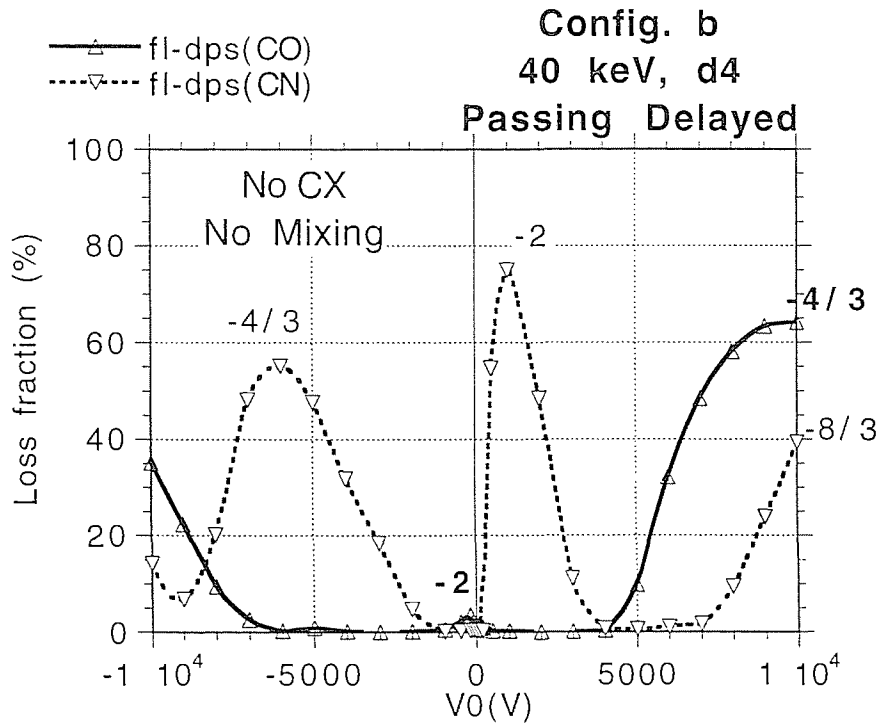
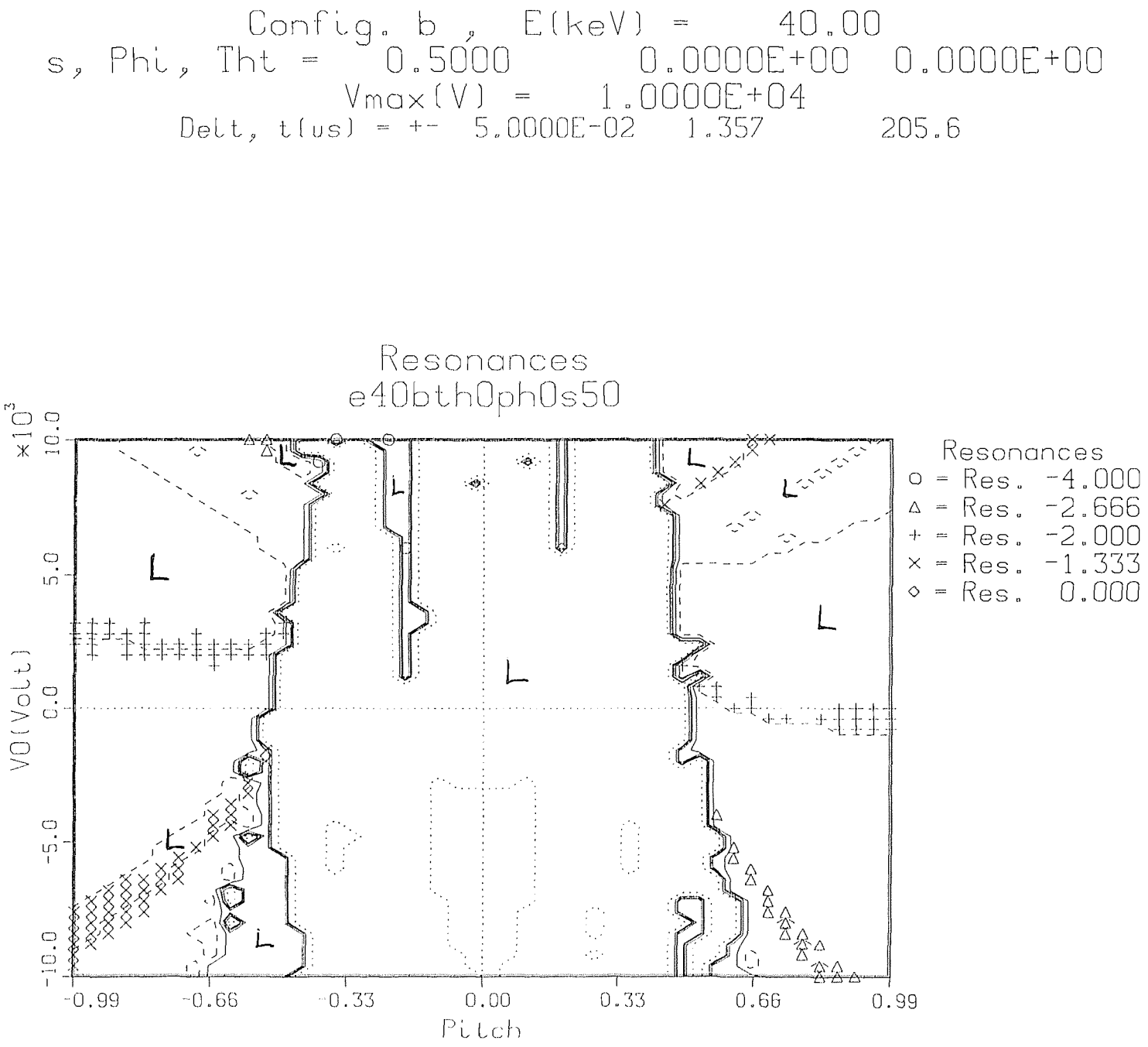

fl-dps(CO)
fl-dps(CN)
Config. b
40 keV, d4
Passing Delayed
Loss fraction (%)
100
80
60
40
20
0
No CX
No Mixing
-2
-4/3
-4/3
-8/3
-2
-1 10^4
-5000
0
5000
1 10^4
V0(V)

Fig.6.1

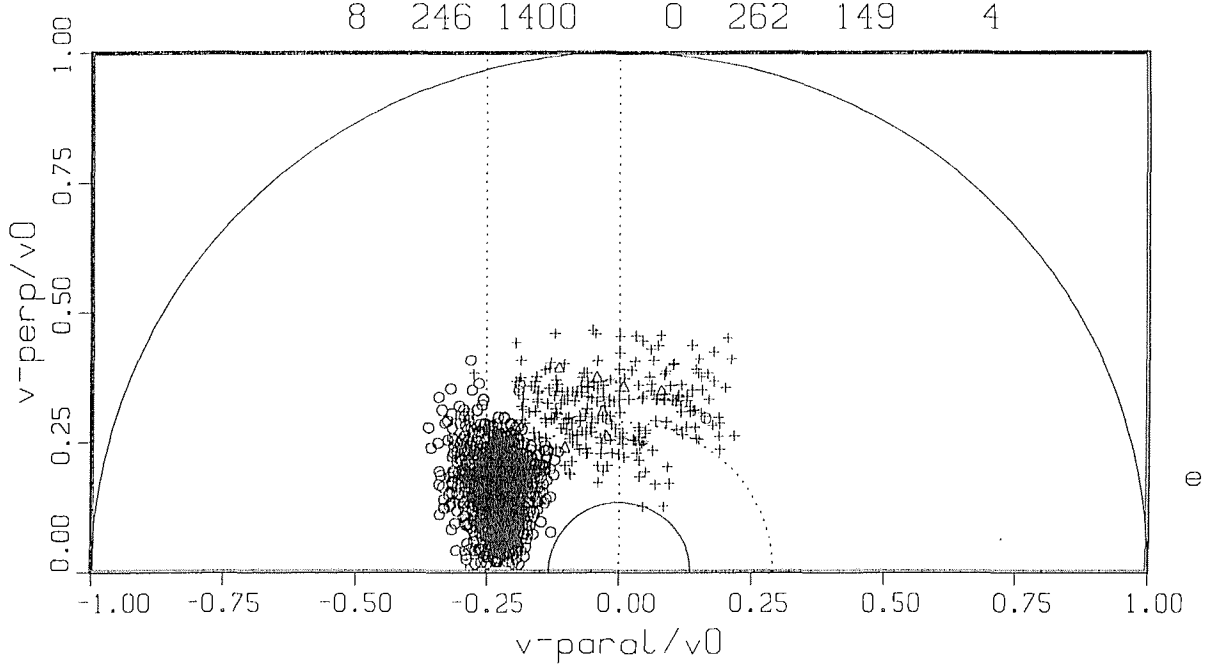
Fig.6.2


Config. b , E(keV) = 40.00
s, Phi, Tht = 0.5000 0.0000E+00 0.0000E+00
Vmax(V) = 1.0000E+04
Delt, t(us) = +- 5.0000E-02 1.357 205.6
Resonances
e40bth0ph0s50
VO(Volt)
*10^3
10.0
5.0
0.0
-5.0
-10.0
-0.99
-0.66
-0.33
0.00
0.33
0.66
0.99
Pitch
L
Resonances
o = Res. -4.000
Δ = Res. -2.666
+ = Res. -2.000
× = Res. -1.333
◇ = Res. 0.000

Loss Cone diagram v-paral./v-perp.
Config. b, Delayed Losses (us) 40.00
Particles Lost = 79.94%, t av.= 2627.71 us
Passing = 80.33%, Trapped = 19.67%
Electric Potential = 500.0Volt

Symbols
△ = Lost-Locally Trapped
+ = Lost-Trapped
○ = Lost-Passing
× = Lost-Undefined

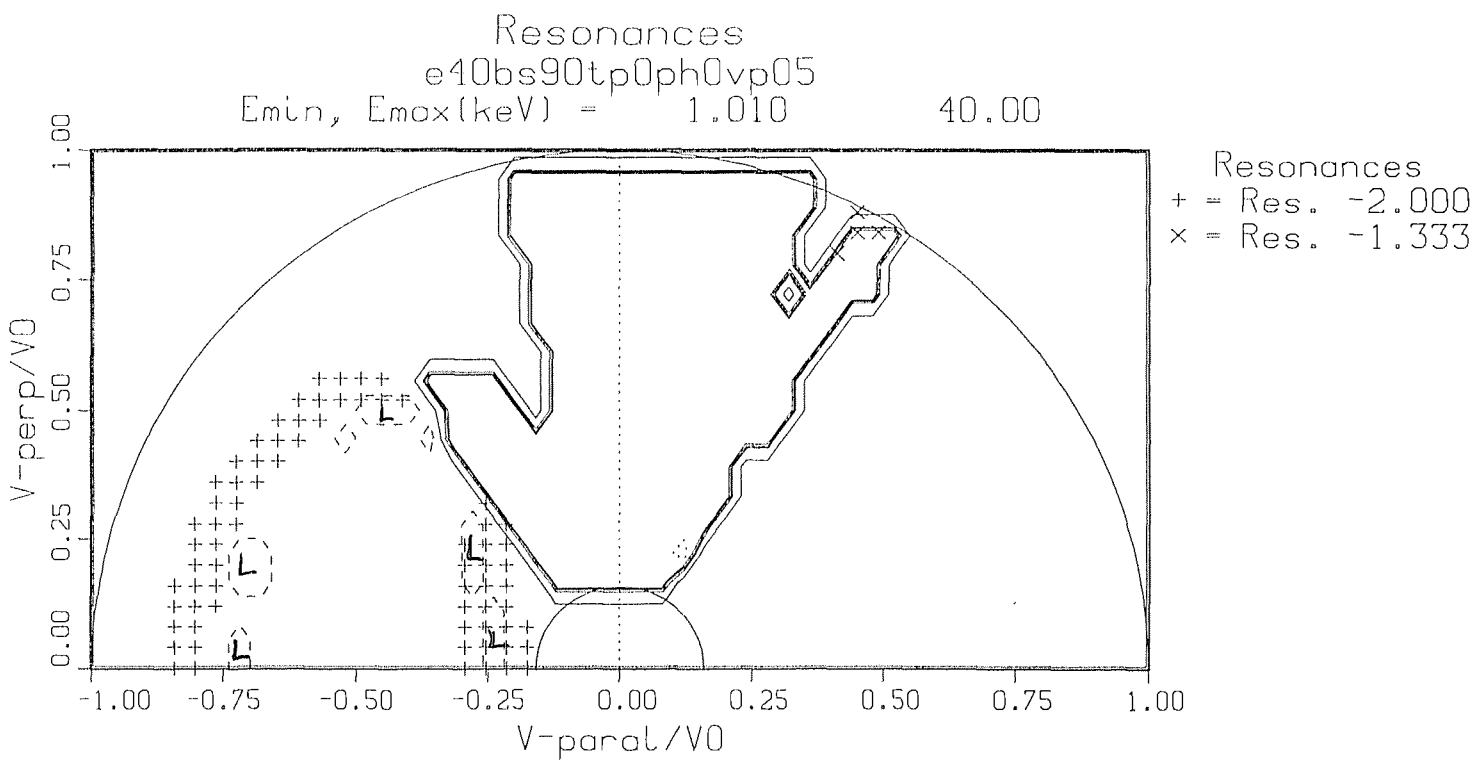
Loss cone diagram v-paral/v0 : v-perp/v0
Emin, Emax(keV) = 0.7153 40.00
Particle distrib. Total = 2069
8 246 1400 0 262 149 4

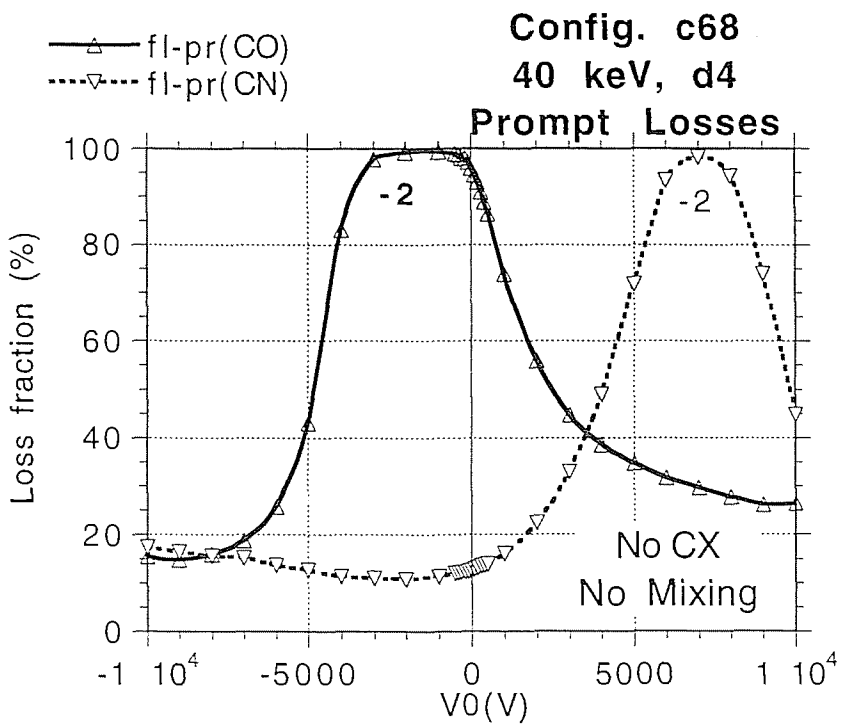


e40d4cnefbp05

Fig.6.3

Fig.6.4


Config. b , E(keV) = 40.00
s, Phi, Tht = 0.9000 0.0000E+00 0.0000E+00
V(V) = 500.0
Delt, t(us) = +- 5.0000E-02 30.00 1294.
Resonances
e40bs90tp0ph0vp05
Emin, Emax(keV) = 1.010 40.00
Resonances
+ = Res. -2.000
× = Res. -1.333
V-perp/V0
V-paral/V0
0.00
0.25
0.50
0.75
1.00
-1.00
-0.75
-0.50
-0.25
0.00
0.25
0.50
0.75
1.00


fl-pr(CO)
fl-pr(CN)
Config. c68
40 keV, d4
Prompt Losses
Loss fraction (%)
100
80
60
40
20
0
-2
-2
No CX
No Mixing
-1 10^4
-5000
0
5000
1 10^4
V0(V)

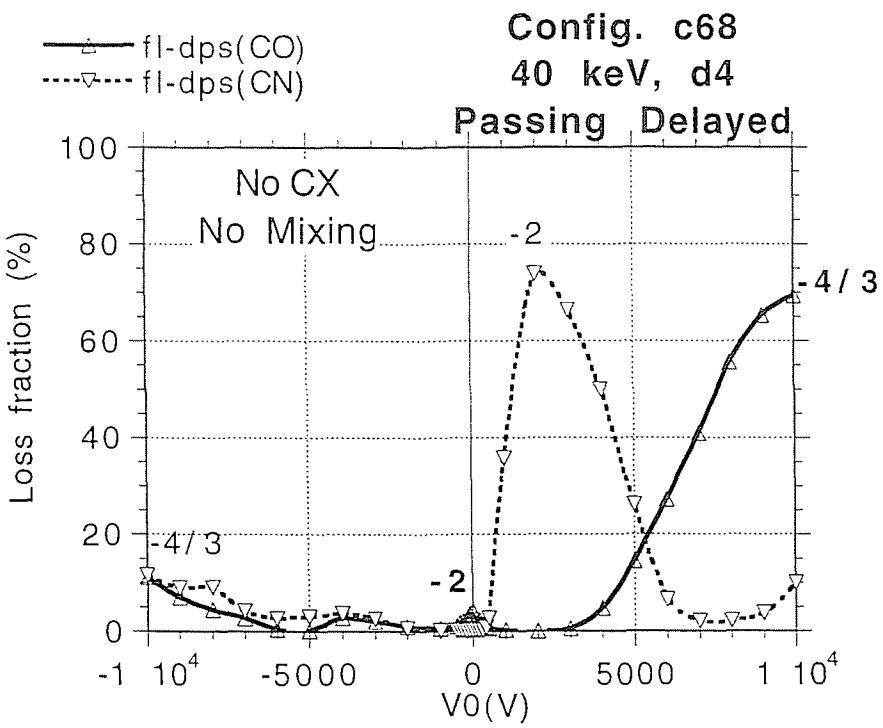
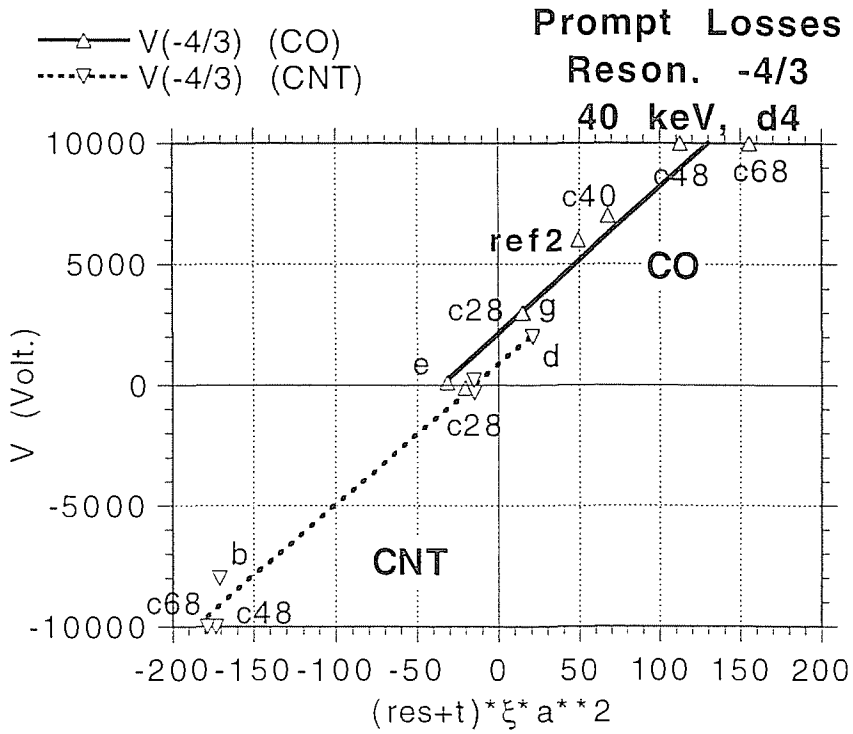

fl-dps(CO)
fl-dps(CN)
Config. c68
40 keV, d4
Passing Delayed
Loss fraction (%)
100
80
60
40
20
0
No CX
No Mixing
-2
-4/3
-4/3
-2
-1 10^4
-5000
0
5000
1 10^4
V0(V)

Fig.6.5


V(-4/3) (CO)
V(-4/3) (CNT)
Prompt Losses
Reson. -4/3
40 keV, d4
10000
5000
0
-5000
-10000
V (Volt.)
c40
c48
c68
ref2
CO
c28
g
d
e
c28
b
CNT
c68
c48
-200 -150 -100 -50 0 50 100 150 200
(res+t)*ξ*a**2

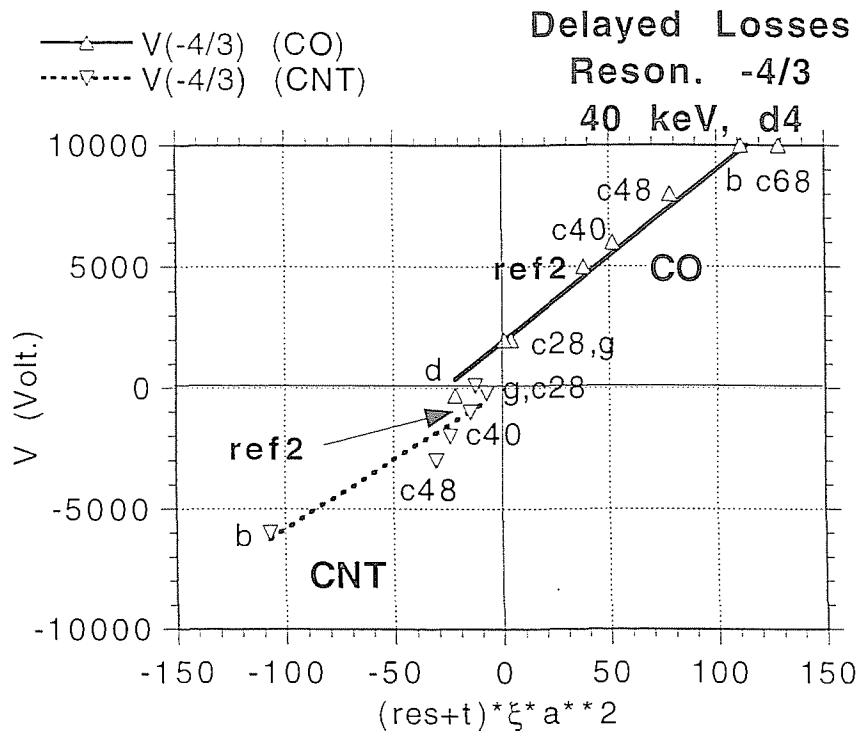
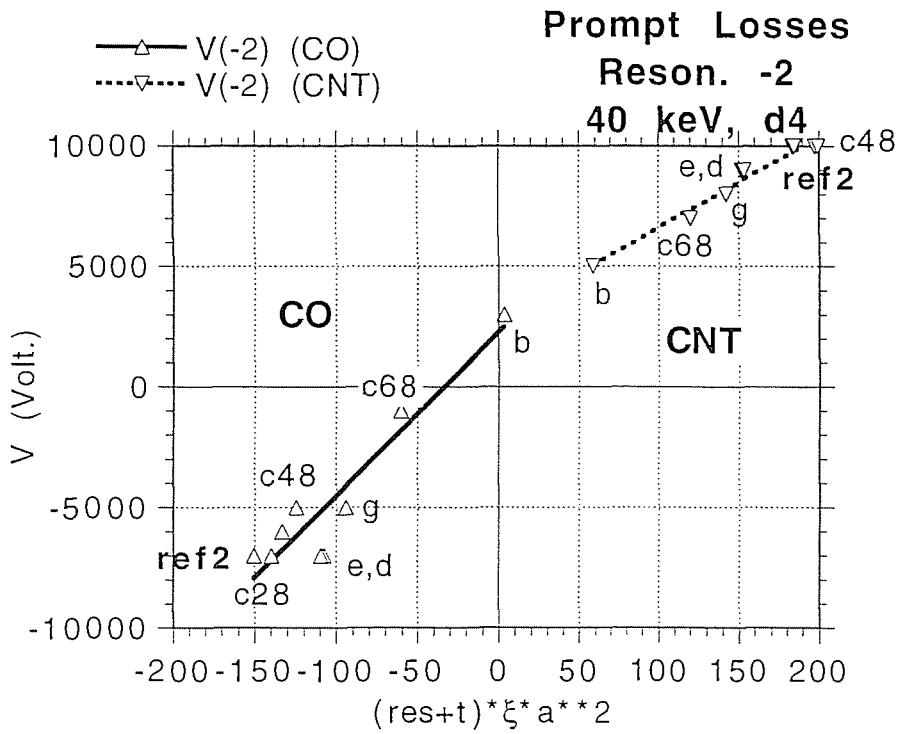

V(-4/3) (CO)
V(-4/3) (CNT)
Delayed Losses
Reson. -4/3
40 keV, d4
10000
5000
0
-5000
-10000
V (Volt.)
c48
b c68
c40
ref2
CO
c28,g
d
g,c28
ref2
c40
c48
b
CNT
-150 -100 -50 0 50 100 150
(res+t)*ξ*a**2

Fig.7.1


Prompt Losses
Reson. -2
40 keV, d4
V(-2) (CO)
V(-2) (CNT)
CO
CNT
V (Volt.)
(res+t)*ξ*a**2
10000
5000
0
-5000
-10000
-200 -150 -100 -50 0 50 100 150 200
c48
e,d
ref2
g
c68
b
c28

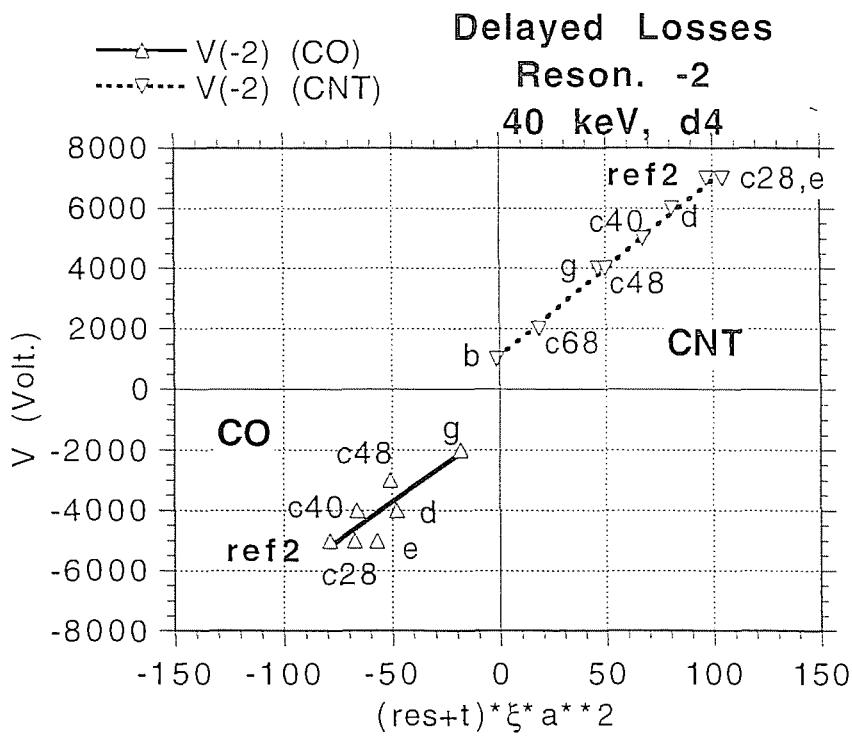

Delayed Losses
Reson. -2
40 keV, d4
V(-2) (CO)
V(-2) (CNT)
CO
CNT
V (Volt.)
(res+t)*ξ*a**2
8000
6000
4000
2000
0
-2000
-4000
-6000
-8000
-150 -100 -50 0 50 100 150
ref2
c28,e
c40
d
g
c48
b
c68
c28
e

Fig.7.2

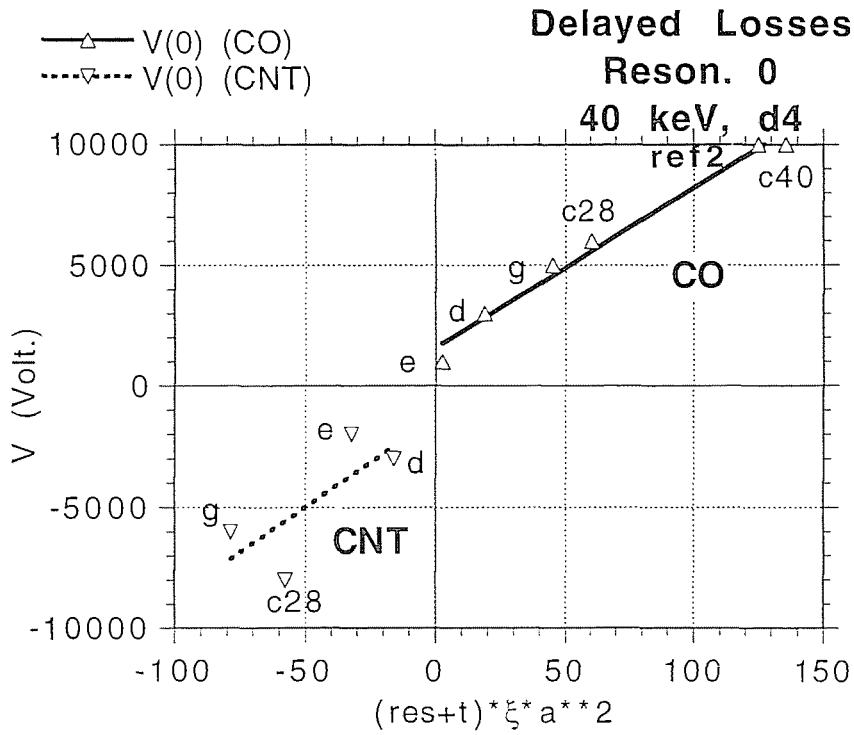
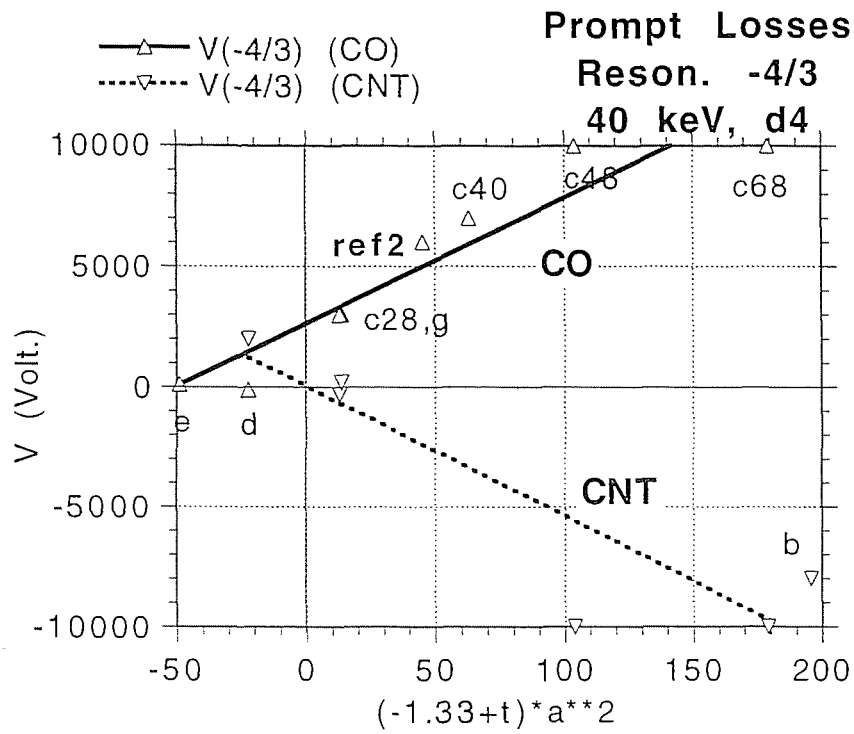

Delayed Losses
Reson. 0
40 keV, d4
V(0) (CO)
V(0) (CNT)
10000
5000
0
-5000
-10000
V (Volt.)
-100
-50
0
50
100
150
(res+t)*ξ*a**2
ref2
c40
c28
g
d
e
CO
e
d
g
c28
CNT

Fig.7.3


Prompt Losses
Reson. -4/3
40 keV, d4
V(-4/3) (CO)
V(-4/3) (CNT)
10000
5000
0
-5000
-10000
V (Volt.)
-50
0
50
100
150
200
(-1.33+t)*a**2
c40
c48
c68
ref2
CO
c28,g
e
d
CNT
b

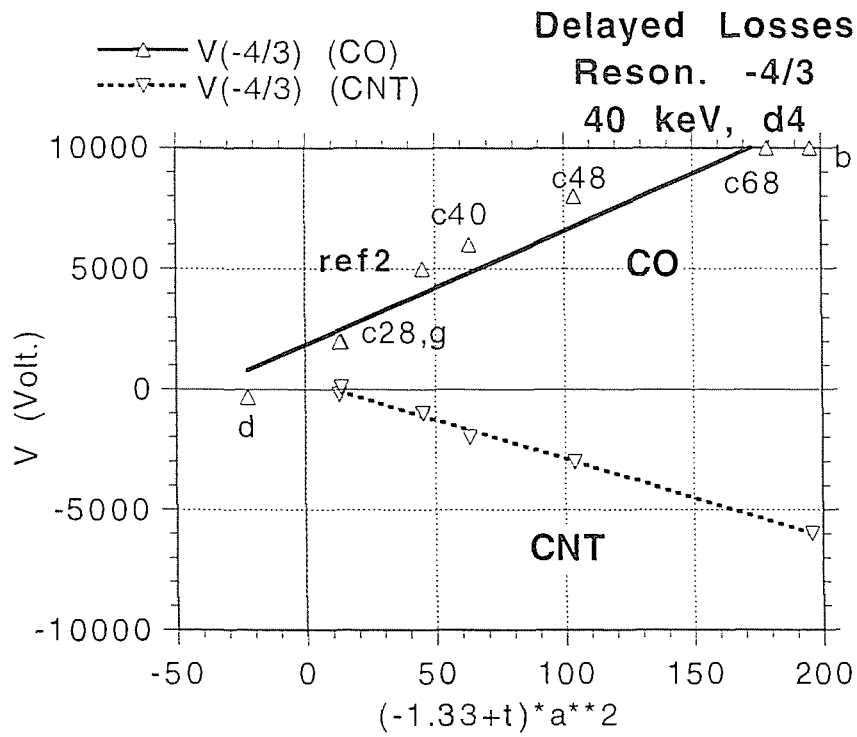
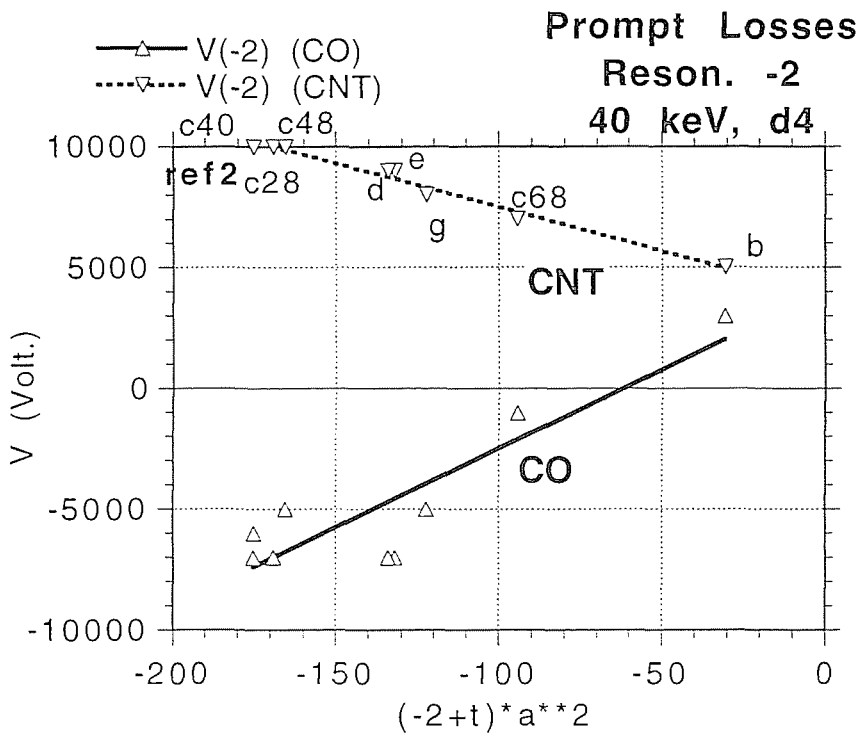

Delayed Losses
Reson. -4/3
40 keV, d4
V(-4/3) (CO)
V(-4/3) (CNT)
10000
5000
0
-5000
-10000
V (Volt.)
-50
0
50
100
150
200
(-1.33+t)*a**2
b
c48
c68
c40
ref2
CO
c28,g
d
CNT

Fig.7.4


Prompt Losses
Reson. -2
40 keV, d4
V(-2) (CO)
V(-2) (CNT)
c40
c48
ref2
c28
e
d
g
c68
b
CNT
CO
V (Volt.)
10000
5000
0
-5000
-10000
-200
-150
-100
-50
0
(-2+t)*a**2

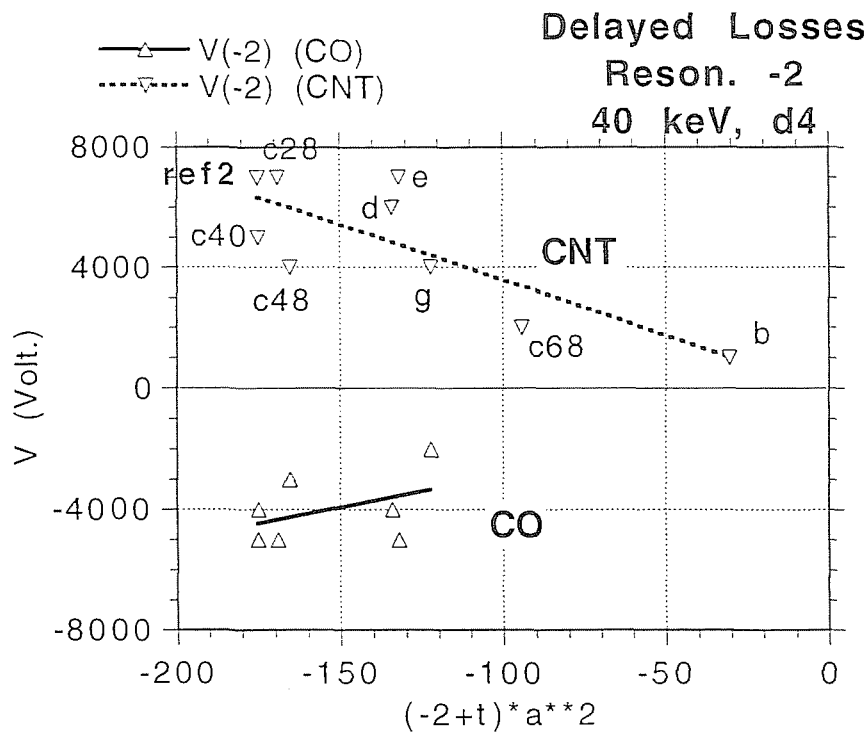
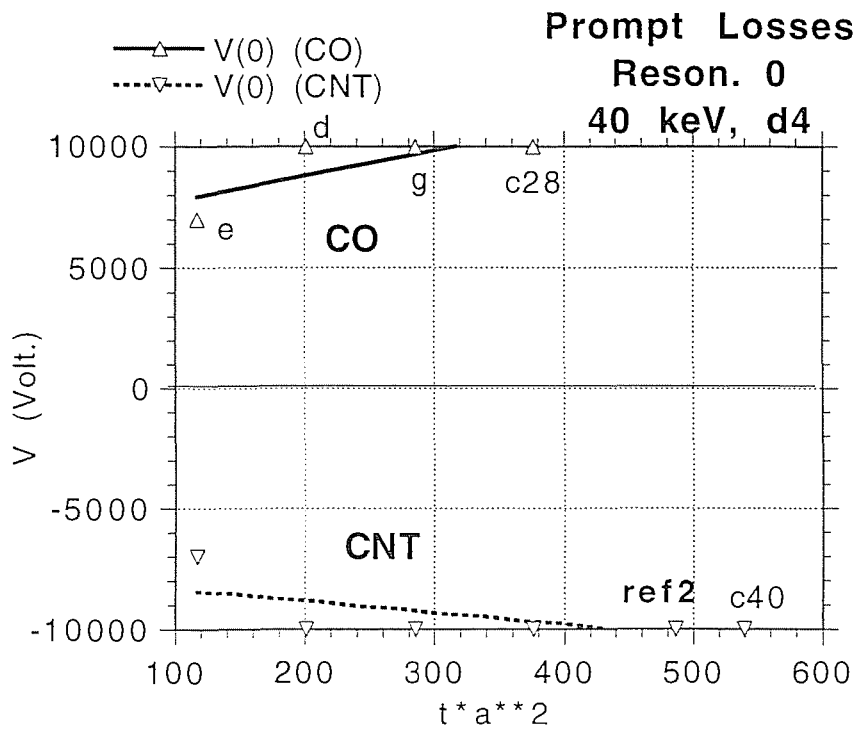

Delayed Losses
Reson. -2
40 keV, d4
V(-2) (CO)
V(-2) (CNT)
c28
ref2
e
d
c40
c48
g
c68
b
CNT
CO
V (Volt.)
8000
4000
0
-4000
-8000
-200
-150
-100
-50
0
(-2+t)*a**2

Fig.7.5


Prompt Losses
Reson. 0
40 keV, d4
V(0) (CO)
V(0) (CNT)
10000
5000
0
-5000
-10000
V (Volt.)
100
200
300
400
500
600
t*a**2
d
g
c28
e
CO
CNT
ref2
c40

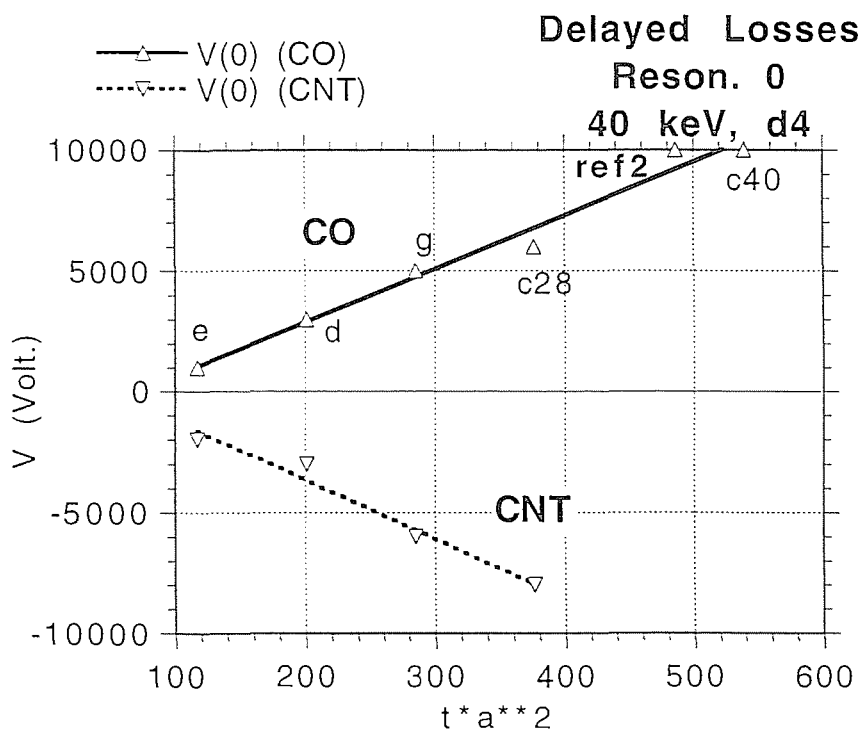

Delayed Losses
Reson. 0
40 keV, d4
V(0) (CO)
V(0) (CNT)
10000
5000
0
-5000
-10000
V (Volt.)
100
200
300
400
500
600
t*a**2
ref2
c40
CO
g
c28
e
d
CNT

Fig.7.6