

02.84.01

CNEA-NT 5/84

C.N.E.A. Biblioteca	
SERIE DE PUBLICACIONES	
Nº 2	AÑO 1984

REPUBLICA ARGENTINA
COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA
Dependiente de la Presidencia de la Nación
GERENCIA DE INVESTIGACIONES

ALGUNAS MAGNITUDES FISICAS DE INTERES EN REACCIONES
NUCLEARES Y SU DEPENDENCIA RESPECTO DEL SISTEMA
PROYECTIL-BLANCO: CURVAS CARACTERISTICAS
PARA UN ACELERADOR ELECTROSTATICO

J.O. FERNANDEZ NIELLO y A.J. PACHECO

Buenos Aires

1984

ALGUNAS MAGNITUDES FÍSICAS DE INTERÉS EN REACCIONES NUCLEARES Y SU
DEPENDENCIA RESPECTO DEL SISTEMA PROYECTIL-BLANCO: CURVAS
CARACTERÍSTICAS PARA UN ACELERADOR ELECTROSTATICO

J.O.Fernández Niello y A.J.Pacheco

I. RESUMEN

Se presentan gráficos de diversas magnitudes físicas de interés en el análisis de reacciones nucleares como función de la combinación proyectil-blanco, correspondientes a tensiones de terminal similares a las que se espera alcanzar con el acelerador TANDAR. La información se presenta en forma de curvas de nivel expresadas en dos planos equivalentes: a) (Z proyectil - Z blanco) y b) (masa total - asimetría de masa).

II. INTRODUCCION

En el diseño y análisis de experiencias que involucren reacciones con iones pesados, se requiere con frecuencia el conocimiento de una serie de parámetros característicos de la colisión (energía cinética por encima de la barrera coulombiana, momento angular de "grazing", ángulo de "grazing", etc.) y de su dependencia respecto del sistema reactante.

Bajo ciertas suposiciones razonables, estas magnitudes físicas pueden ser expresadas como funciones sumamente simples de los números atómicos y másicos de los núcleos proyectil y blanco (Z_p, Z_t, A_p, A_t), así como de la energía de bombardeo (E_p). En realidad, sólo cuatro de estas cinco variables son independientes, ya que en general, la energía de bombardeo es función del proyectil a través de una relación $E_p(Z_p, A_p)$, característica del acelerador utilizado. En el caso de un acelerador electrostático como el TANDAR, bajo condiciones constantes de operación, dicha relación

es consecuencia directa de la evolución de la distribución de estados de cargas del proyectil a la salida del último "stripper" como función del número atómico Z_p . La complejidad que resulta de esta dependencia dificulta seriamente la evaluación (aún en forma cualitativa) de los parámetros antes mencionados como función de la distintas combinaciones proyectil-blanco.

Con el objeto de superar en alguna medida la dificultad mencionada, se ha confeccionado una serie de gráficos referidos a algunas magnitudes físicas características de las reacciones inducidas por iones pesados, para el caso en que se utilice un acelerador electrostático. La información se presenta en forma de curvas de nivel graficadas en dos sistemas de coordenadas, cada uno de los cuales representa a todos los posibles sistemas de reacción.

III. DESCRIPCION DE LOS GRAFICOS

Los gráficos presentados corresponden a las siguientes condiciones de operación del acelerador:

- 1) Tensión de terminal: $V = 14$ MV, un stripper sólido (Figuras 1-4).
- 2) " " " : $V = 17$ MV, " " " (Figuras 5-8).
- 3) " " " : $V = 20$ MV, " " " (Figuras 9-12).
- 4) " " " : $V = 20$ MV, dos strippers sólidos (Figuras 13-16).

Para cada uno de estos casos, se muestran curvas referidas a las siguientes magnitudes físicas:

E_{cm}/B_c = Cociente entre la energía cinética en el sistema centro de masa y la barrera coulombiana del sistema proyectil-blanco,

L_{gr} = Momento angular correspondiente a colisiones rasantes (momento angular de "grazing") en unidades de $\hbar$,

obtenidas a partir de las siguientes expresiones:

$$E_{cm} = \frac{E_p}{1 + A_p/A_t}, \quad [1]$$

$$B_c = \frac{e^2 Z_p Z_t}{R}, \quad [2]$$

$$L_{gr} = R \sqrt{2\mu (E_{cm} - B_c)}, \quad [3]$$

donde e es la unidad de carga, μ es la masa reducida, y para la distancia internuclear R se ha usado¹⁾:

$$R[\text{fm}] = 1.225 (A_p^{1/3} + A_t^{1/3}) + 2. \quad [4]$$

Esta última expresión es apropiada sólo para núcleos pesados. Por lo tanto, para sistemas en los que participa por lo menos un núcleo liviano ($Z \lesssim 4$), los valores obtenidos a partir de los gráficos pueden no ser demasiado realistas.

Finalmente, se incluyen gráficos de la energía promedio por nucleón del proyectil E_p/A_p como función de su número de masa, para tensiones de terminal $V = 8$ MV, 11 MV, 14 MV, 17 MV y 20 MV, con uno y dos strippers sólidos (Figuras 17 y 18).

Las curvas de nivel han sido representadas en dos sistemas equivalentes de coordenadas:

$$1) \quad \{Z_p, Z_t\}$$

$$ii) \quad \{A, a\}$$

donde $A = A_p + A_t$ es la masa total y $a = (A_t - A_p)/A$ es la asimetría de masa. Según esta definición de la asimetría de masa, $a = 0$ corresponde a sistemas simétricos ($A_p = A_t = A/2$) mientras que $a = 1$ ó $a = -1$ describen sistemas extremadamente asimétricos ($A_p = 0$ ó $A_t = 0$, respectivamente). Para reducir el problema general que es función del conjunto de cuatro variables $\{Z_p, Z_t, A_p, A_t\}$ a uno de sólo dos, ya sea $\{Z_p, Z_t\}$ ó $\{A, a\}$, se ha supuesto una correspondencia entre el número másico $\mathcal{A}$ y el número atómico $\mathcal{Z}$, dada por la siguiente parametrización de la línea de estabilidad ²⁾:

$$\mathcal{Z} = \frac{1}{2} \mathcal{A} \left(1 - \frac{0.4 \mathcal{A}}{\mathcal{A} + 200} \right) \quad [5]$$

La pérdida de generalidad derivada de considerar un sólo valor de $\mathcal{Z}$ para cada valor de $\mathcal{A}$ es, en la mayoría de los casos, poco importante frente a la simplicidad que resulta en la presentación de la información.

Con el objeto de facilitar la visualización de la relación [5], los gráficos presentados en función de Z_p y Z_t también muestran los correspondientes valores de A_p y A_t en la abscisa superior y en la ordenada derecha. De ese modo, para un sistema determinado es posible estimar el error cometido como consecuencia de las desviaciones del proyectil y/o del blanco respecto de lo que establece la expresión [5]. Por su parte, en los gráficos realizados en la representación $\{A, a\}$ se incluye la variable $A_p/A = (1 - a)/2$ en la abscisa superior, a los efectos de facilitar la estimación de la masa de proyectil. En todos los casos, el rango de los cálculos efectuados se extiende hasta $Z = 92$ (o el correspondiente valor del número másico).

En cada uno de los gráficos se ha considerado cinemática directa ($A_p \leq A_t$) e inversa ($A_p > A_t$). En las coordenadas $\{Z_p, Z_t\}$ ambos casos

definen dos regiones separadas entre sí por (aproximadamente) la diagonal $Z_p = Z_t$. En la representación $\{A, a\}$ las regiones de cinemática directa e inversa quedan definidas por la condición $a \geq 0$ y $a < 0$, respectivamente.

La energía cinética del proyectil ha sido calculada mediante las relaciones

$$E_p = (1 + q_1) V e \quad [6]$$

para el caso en que se emplee un stripper, y

$$E_p = [1 + q_1 f + (1 - f) q_2] V e \quad [7]$$

para dos strippers. Las constantes q_1 y q_2 son los valores medios de las distribuciones de estados de carga del ion cuando atraviesa la primera y segunda lámina, respectivamente, y han sido calculadas mediante la expresión³⁾:

$$q = Z_p [1 + (3.83 Z_p^{-0.45} E[\text{MeV}]/A_p)^{-1/6}]^{-0.6} \quad [8]$$

Sí bien q_1 y q_2 no son necesariamente números enteros, su empleo en las fórmulas [6] ó [7] brinda una buena estimación de la energía más probable de cada proyectil para una dada tensión de terminal. La constante f que aparece en la expresión [7] es característica del acelerador y está relacionada con la ubicación del segundo stripper. En el caso del TANDAR se tiene $f = 0.33$.

IV. USO DE LOS GRAFICOS

El empleo de los gráficos en algunas aplicaciones prácticas se ilustra a través de los siguientes ejemplos:

Ejemplo 1) Considérese la reacción $^{40}\text{Ca} + ^{96}\text{Zr}$, operando el acelerador con un stripper a una tensión del terminal de 20 MV. En la tabla 1 se muestran los valores de E_{cm}/B_c y L_{gr} obtenidos a partir de las figuras 9 y 11 (tomando $Z_p = 20$, $Z_t = 40$) y de las figuras 10 y 12 (para $A = 136$, $a = 0.41$). En la tercera y cuarta columna se incluyen también los resultados de los cálculos sin las aproximaciones mencionadas en la sección anterior, es decir, tomando los dos valores enteros más próximos a q_1 y considerando los valores exactos de Z_p , Z_t , A_p y A_t . Las diferencias que se observan entre las columnas 1 y 2, y entre éstas y la 3 ó la 4 dan una idea acerca de la importancia de dichas aproximaciones. Debe advertirse que estas diferencias pueden acentuarse notablemente en las regiones de elevada densidad de curvas de nivel.

Ejemplo 2) Estudio de las combinaciones proyectil-blanco que formen un núcleo compuesto rotacional de masa $A = 165$ en un estado de alto momento angular. Considerando dos strippers y una tensión del terminal de 20 MV, de la figura 16 se obtiene un valor máximo $L_{\text{gr}} \simeq 150 \hbar$ para $a \simeq 0.4$, correspondiente a la partición de masas $A_p \simeq 50$, $A_t \simeq 115$. Por supuesto este resultado no hace referencia alguna a la distribución de ondas parciales que contribuyen a la fusión, sino que sólo brinda la combinación proyectil-blanco asociada al mayor valor del impulso angular de grazing.

Ejemplo 3) Análisis del momento angular límite L por encima del cual desaparece la barrera de fisión para un dado núcleo²⁾. Supóngase que se desee hallar las combinaciones proyectil-blanco cuyo momento angular de grazing supere al momento angular límite de un núcleo compuesto con $A = 60$. Para esta masa se predice un valor de $L \simeq 60 \hbar$. Considerando una tensión de 17 MV y un stripper [fig.8], el rango de asimetrías posibles se extiende desde $a \simeq 0.025$ ($A_p \simeq 29$, $A_t \simeq 31$) hasta $a \simeq 0.38$ ($A_p \simeq 19$, $A_t \simeq 41$).

Ejemplo 4) Formación de un núcleo compuesto en la región de los transuránicos de masa $A \simeq 260$. De las curvas correspondientes al cociente E_{cm}/B_c en la representación $\{A, a\}$ se observa que para tensiones de terminal de 14 MV (Fig.2) y 17 MV (Fig.6) todas las combinaciones proyectil-blanco para esa masa conducen a colisiones subcoulombianas. Para $V=20$ MV y un stripper (Fig.10) el rango de colisiones por encima de la barrera coulombiana está limitado entre los sistemas ($A_p = 25, A_t = 235$) y ($A_p = 46, A_t = 214$). Para igual valor de tensión y dos strippers este rango se amplía hacia sistemas más simétricos, hasta alcanzar valores de $A_p = 72$ y $A_t = 188$ (Figura 16). Las consideraciones acerca de la sección eficaz de formación del núcleo compuesto realizadas en el Ejemplo 2, también son válidas en este caso.

V. CONCLUSIONES

Las curvas de nivel resultantes de las distintas condiciones de operación de un acelerador electrostático proveen un método rápido y confiable tanto para determinar la factibilidad de un dado experimento, como para optimizar algunas de sus características durante la etapa de planificación.

El conjunto de gráficos aquí presentado se limita a dos magnitudes físicas -energía cinética por encima de la barrera coulombiana y momento angular de grazing- que suelen ser de interés en la mayoría de las investigaciones de física nuclear realizadas con iones pesados, así como a valores de la tensión del terminal adecuados para el caso del acelerador TANDAR.

En la medida en que resulte necesario, el método puede ser fácilmente extendido para considerar otras magnitudes físicas o bien, para dis-

tintas condiciones de operación tales como las dadas por el uso de strippers gaseosos o de distintos valores de la tensión.

Agradecemos a los Dres. M.C.Berisso y A.Etchegoyen la asistencia brindada en el uso de programas de graficación por computadora.

Referencias:

- 1) W.D.Myers y W.J.Swiatecki, Ark.Fys. 36(1967)343.
- 2) S.Cohen, F.Plasil y W.J.Swiatecki, Ann. of Phys. 82(1974)577
- 3) H.D.Betz, Rev.Mod.Phys. 44(1972)465.

TABLA 1

Proyectil: ^{40}Ca Blanco : ^{96}Zr

V= 20 MV, 1 stripper

	Fig.9 y 11	Fig.10 y 12	q=10	q=11
E_{cm}/B_c	1,65	1.67	1.59	1.73
$L_{\text{gr}}(h)$	107	110	104	116

Comparación entre los valores de E_{cm}/B_c y L_{gr} obtenidos de las curvas en la representación $\{Z_p, Z_t\}$ (columna 1), y $\{A, a\}$ (columna 2). En las columnas 3 y 4 se muestran los correspondientes valores calculados mediante las expresiones [1], [2], [3], [4] y [6], utilizando los 2 estados de carga más próximos al valor medio de la distribución dado por [8].

Leyendas de figuras:

- Fig.1: Curvas de nivel de la energía cinética en el centro de masa dividida por la barrera coulombiana como función de los números atómicos del proyectil (Z_p) y del blanco (Z_t), para $V=14$ MV y un stripper sólido.
- Fig.2: Curvas de nivel de la energía cinética en el centro de masa dividida por la barrera coulombiana como función de la masa total (A) y de la asimetría de masa (a), para $V=14$ MV y un stripper sólido.
- Fig.3: Curvas de nivel del momento angular de "grazing" (en unidades de $\hbar$) como función de los números atómicos del proyectil (Z_p) y del blanco (Z_t), para $V=14$ MV y un stripper sólido.
- Fig.4: Curvas de nivel del momento angular de "grazing" (en unidades de $\hbar$) como función de la masa total (A) y de la asimetría de masa (a), para $V=14$ MV y un stripper sólido.
- Fig.5: Idem Fig.1, para $V=17$ MV y un stripper sólido.
- Fig.6: Idem Fig.2, para $V=17$ MV y un stripper sólido.
- Fig.7: Idem Fig.3, para $V=17$ MV y un stripper sólido.
- Fig.8: Idem Fig.4, para $V=17$ MV y un stripper sólido.
- Fig.9: Idem Fig.1, para $V=20$ MV y un stripper sólido.
- Fig.10: Idem Fig.2, para $V=20$ MV y un stripper sólido.
- Fig.11: Idem Fig.3, para $V=20$ MV y un stripper sólido.
- Fig.12: Idem Fig.4, para $V=20$ MV y un stripper sólido.
- Fig.13: Idem Fig.1, para $V=20$ MV y dos strippers sólidos.
- Fig.14: Idem Fig.2, para $V=20$ MV y dos strippers sólidos.
- Fig.15: Idem Fig.3, para $V=20$ MV y dos strippers sólidos.
- Fig.16: Idem Fig.4, para $V=20$ MV y dos strippers sólidos.

Fig.17: Energía del proyectil por nucleón en el sistema de laboratorio como función del número másico A_p , para distintas tensiones de terminal y un stripper sólido.

Fig.18: Idem 17, para dos strippers sólidos.

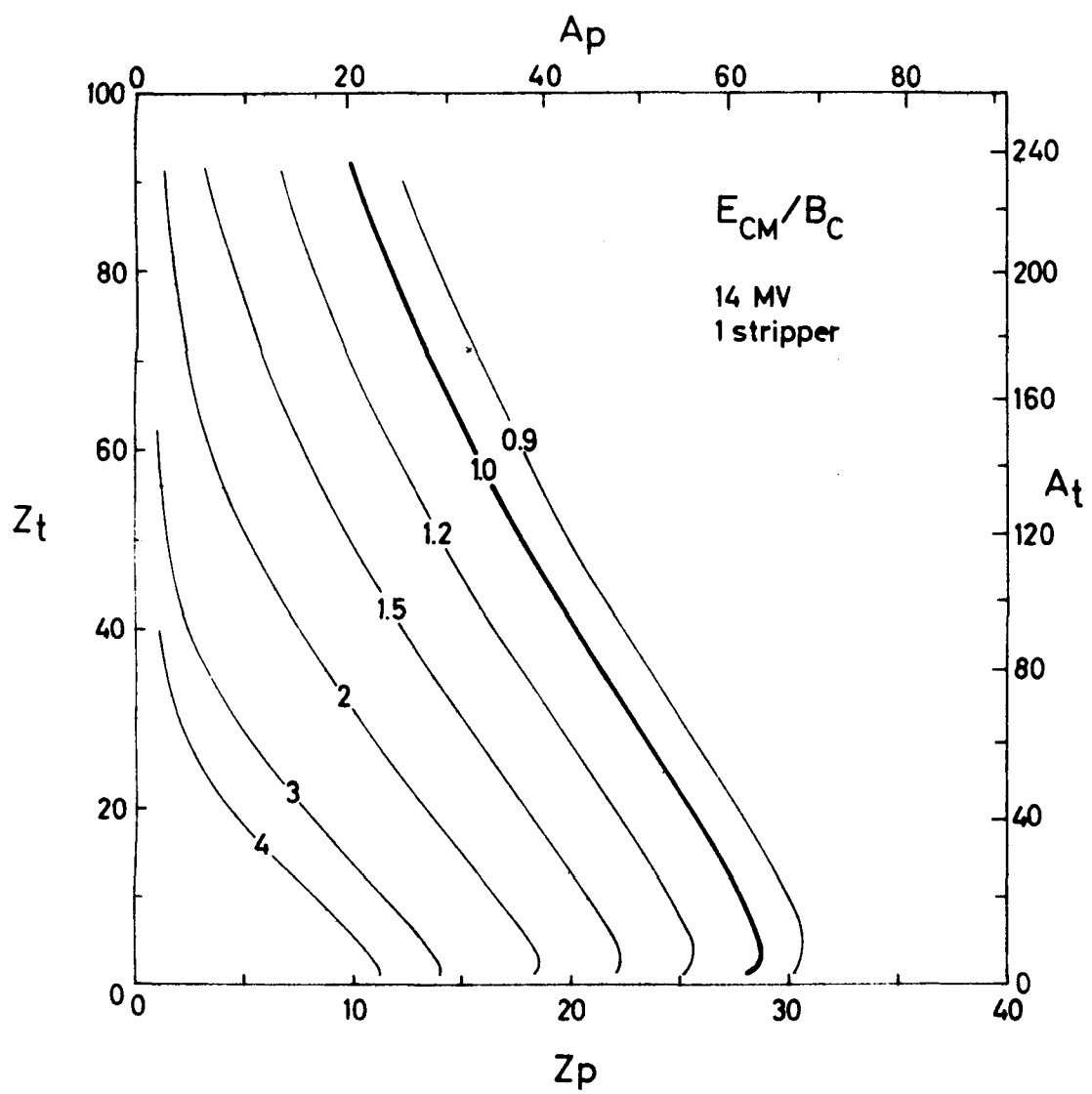


Fig. 1

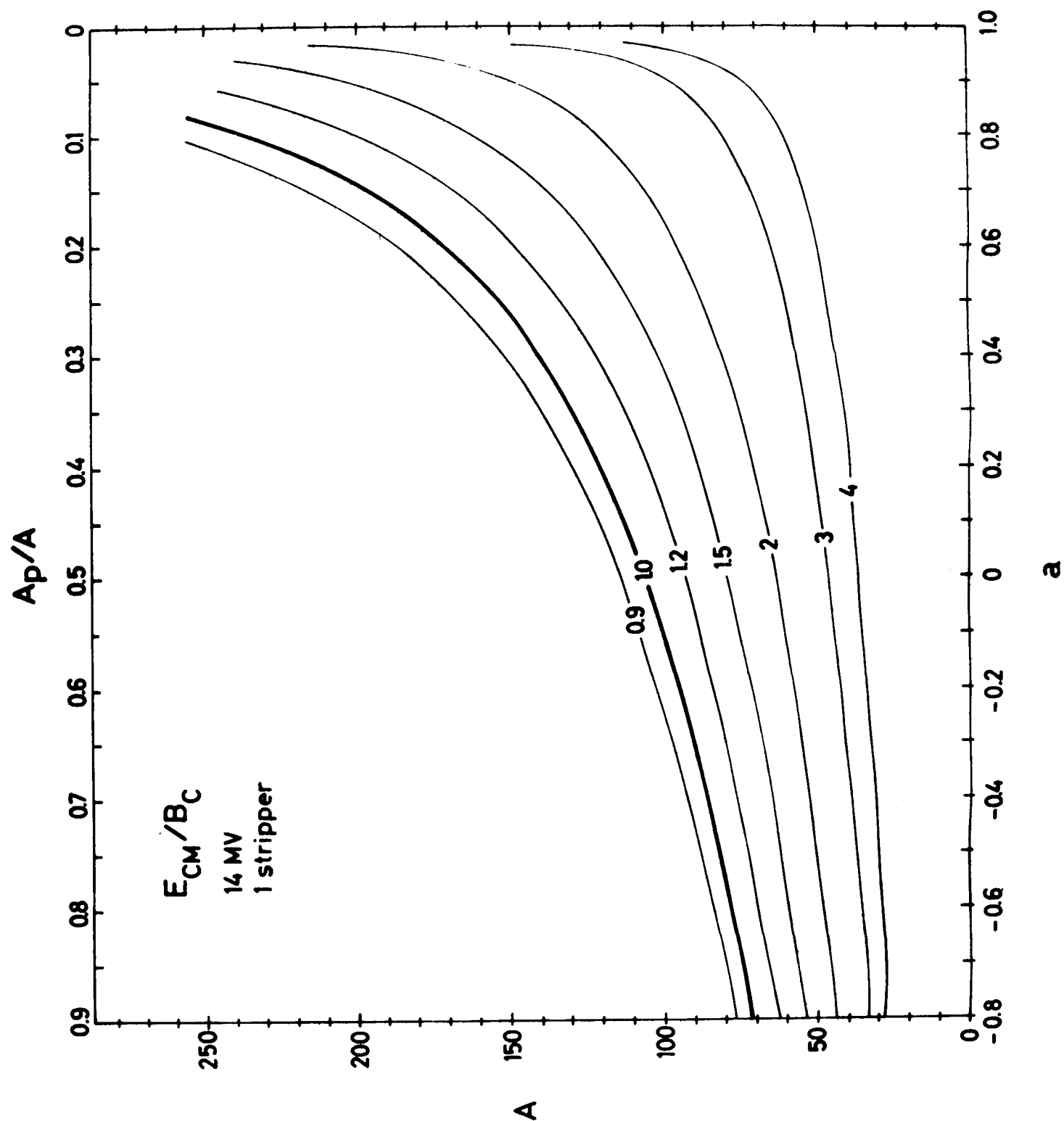


Fig. 2

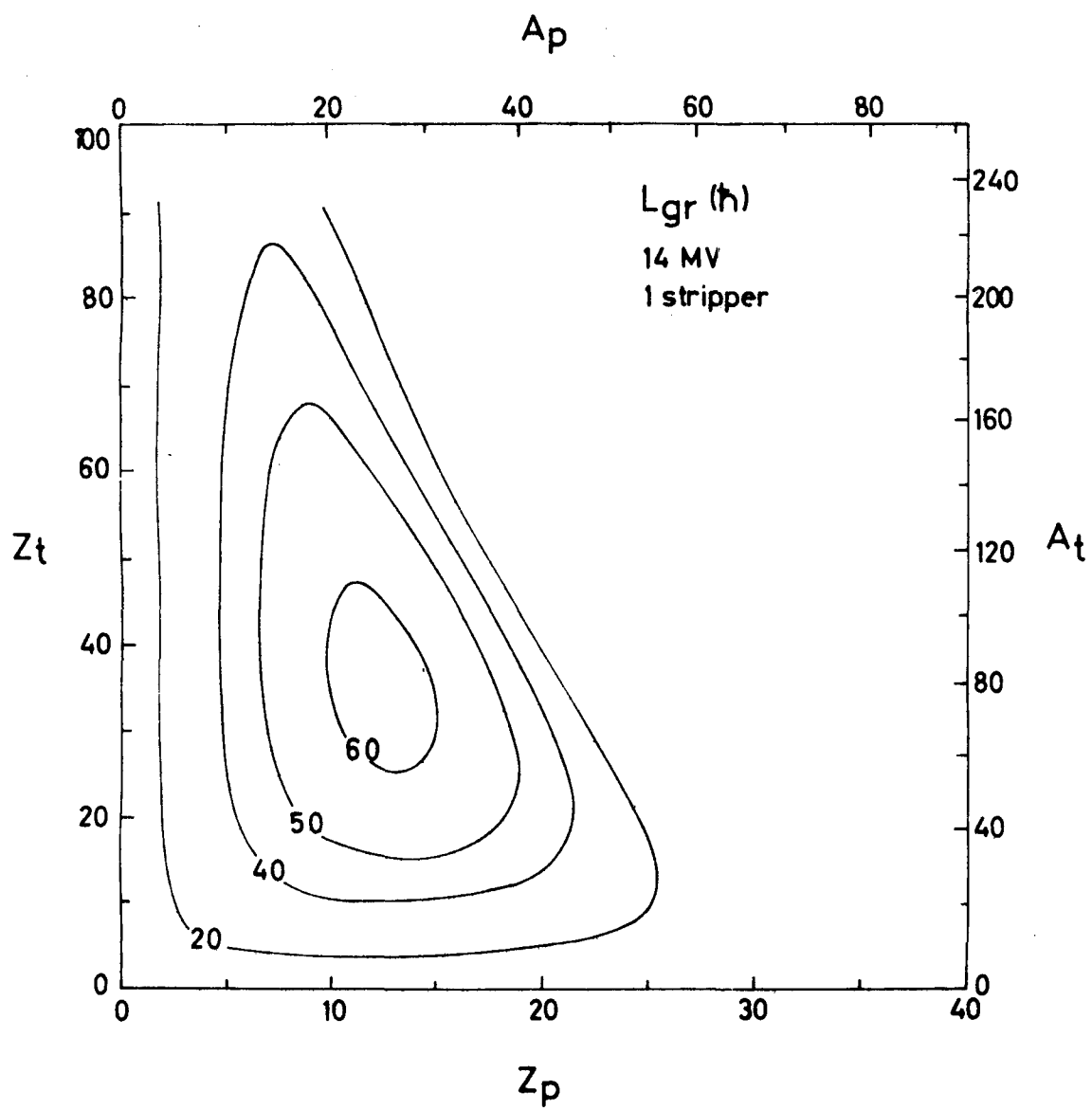


Fig. 3

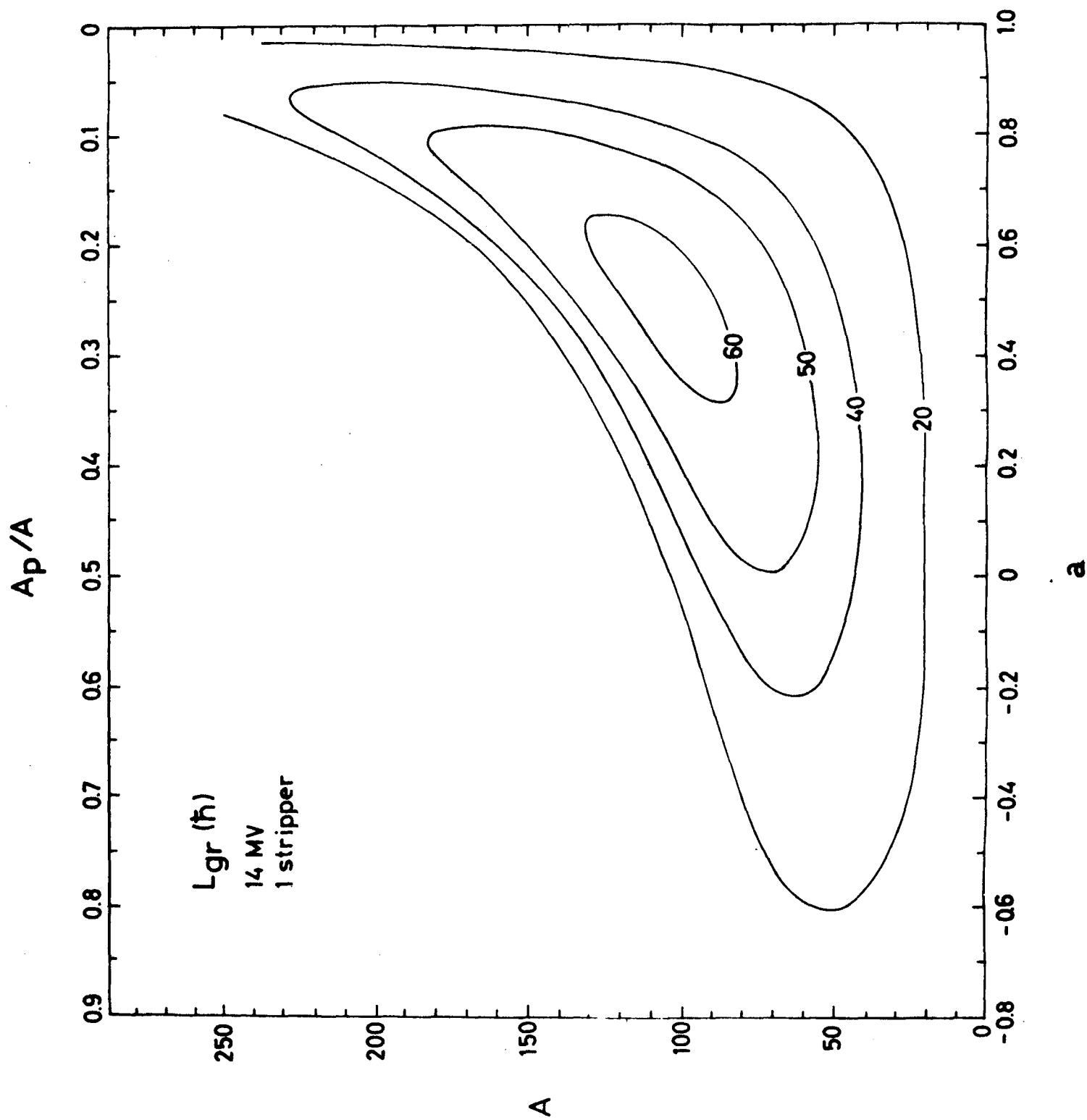


Fig. 4

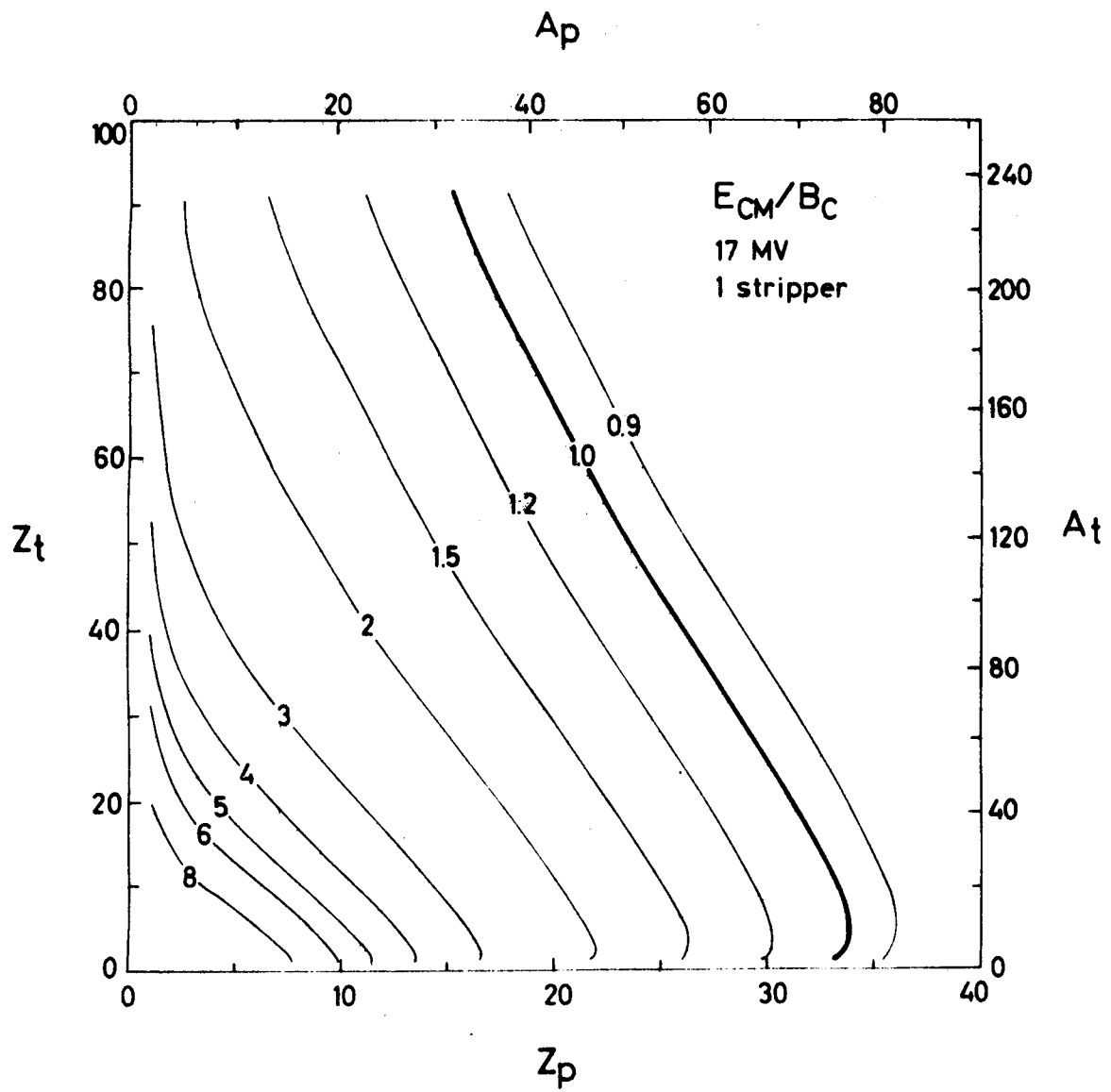


Fig. 5

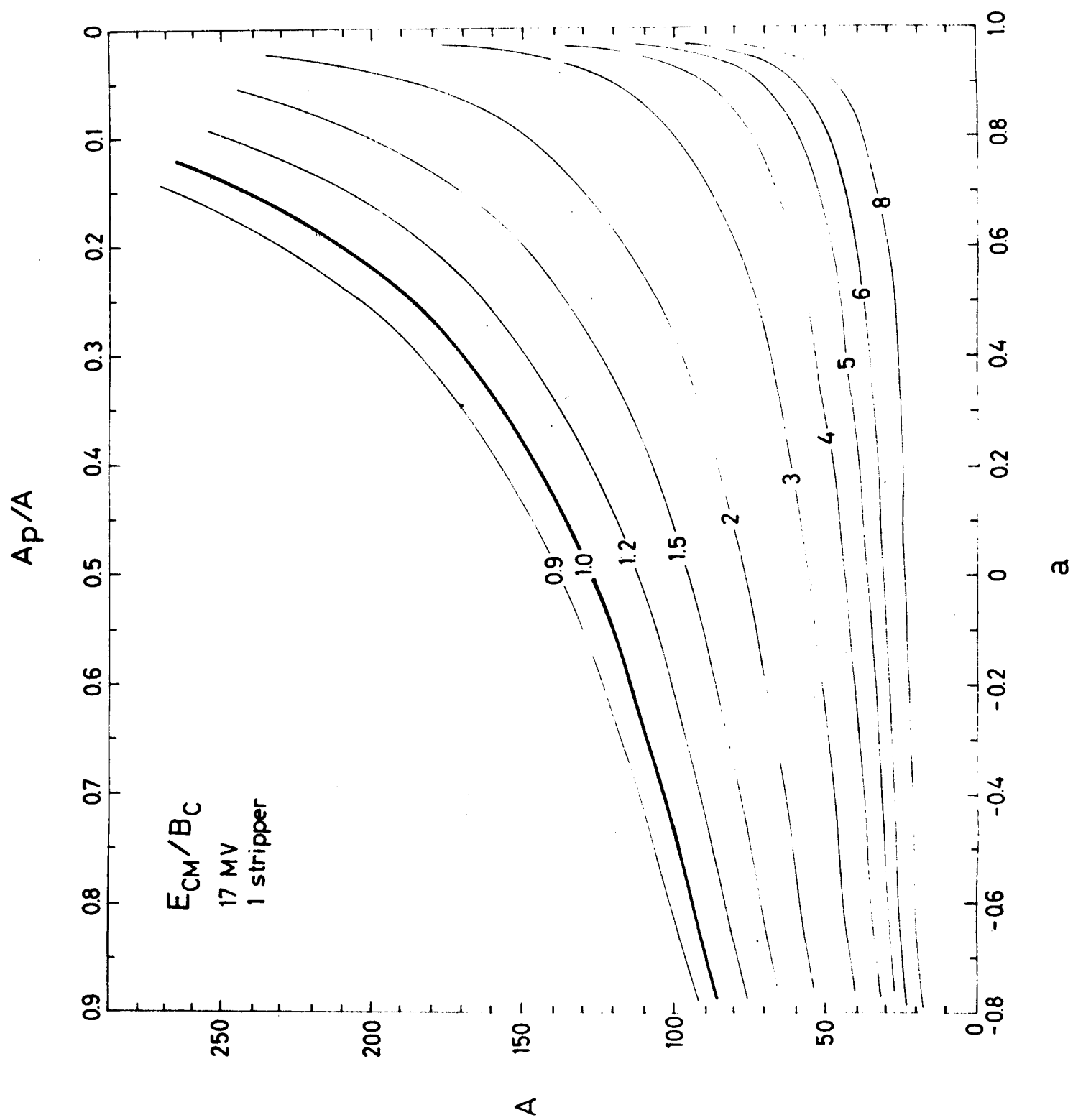


Fig. 6

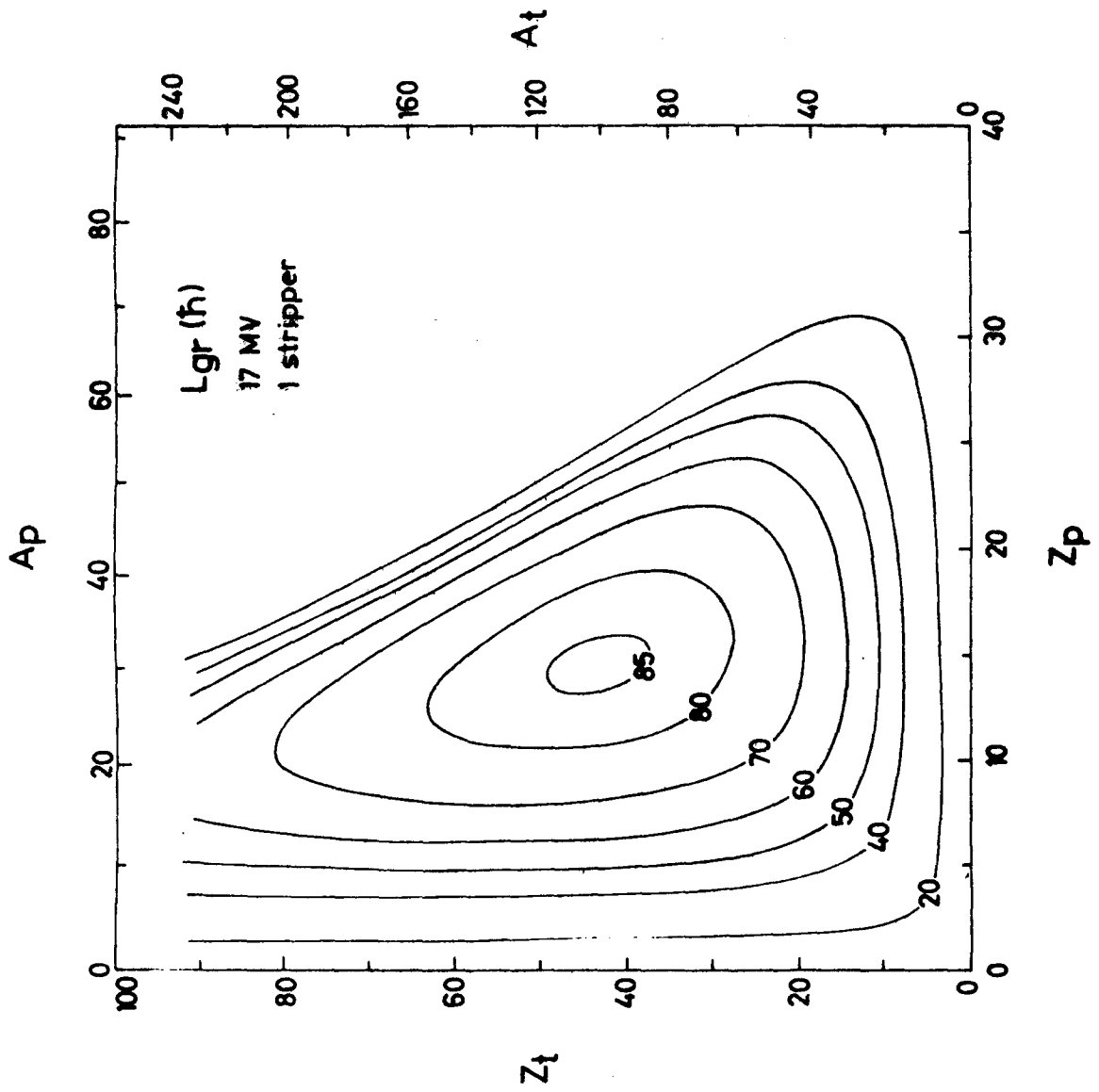


Fig. 7

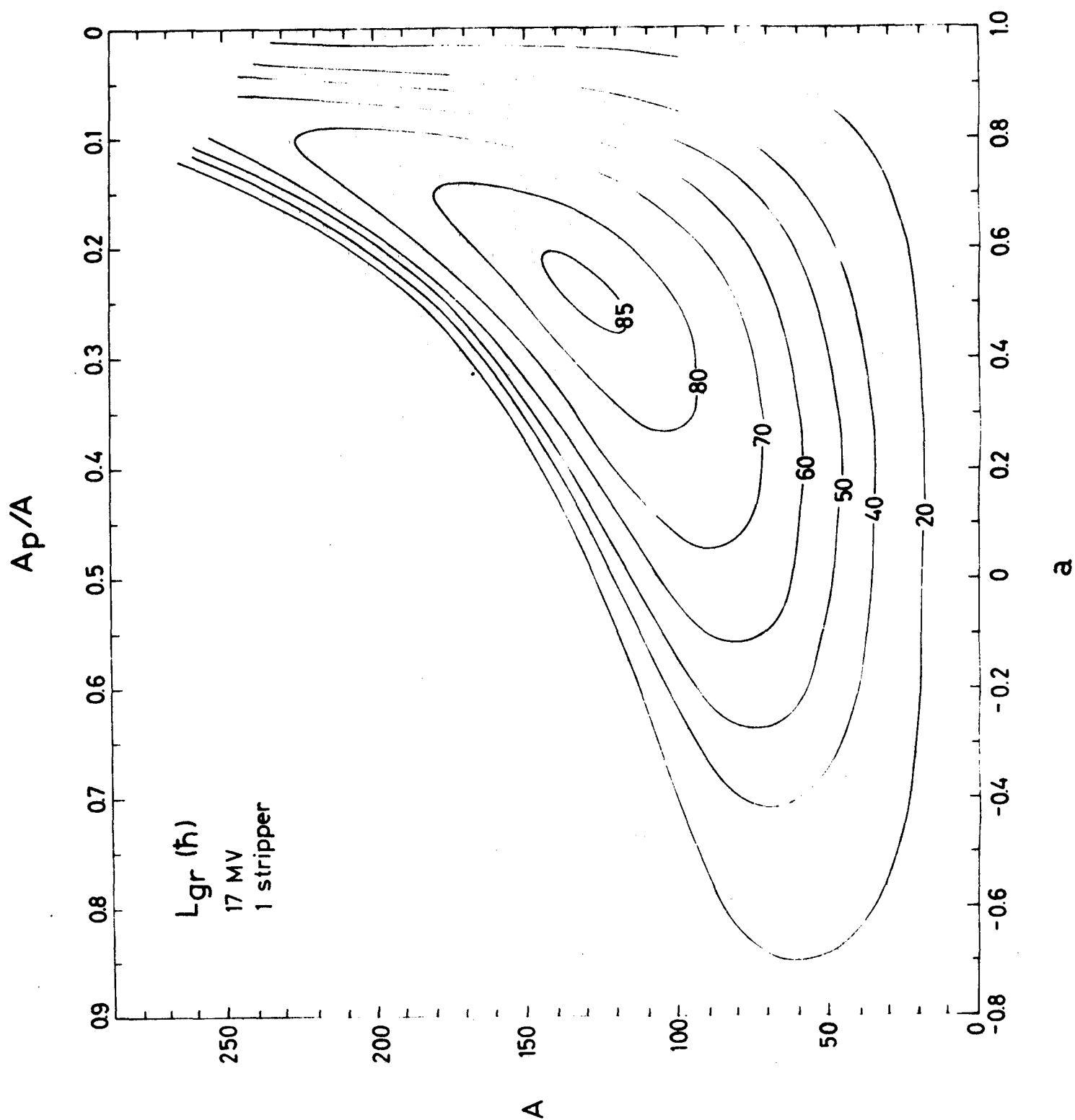


Fig. 8

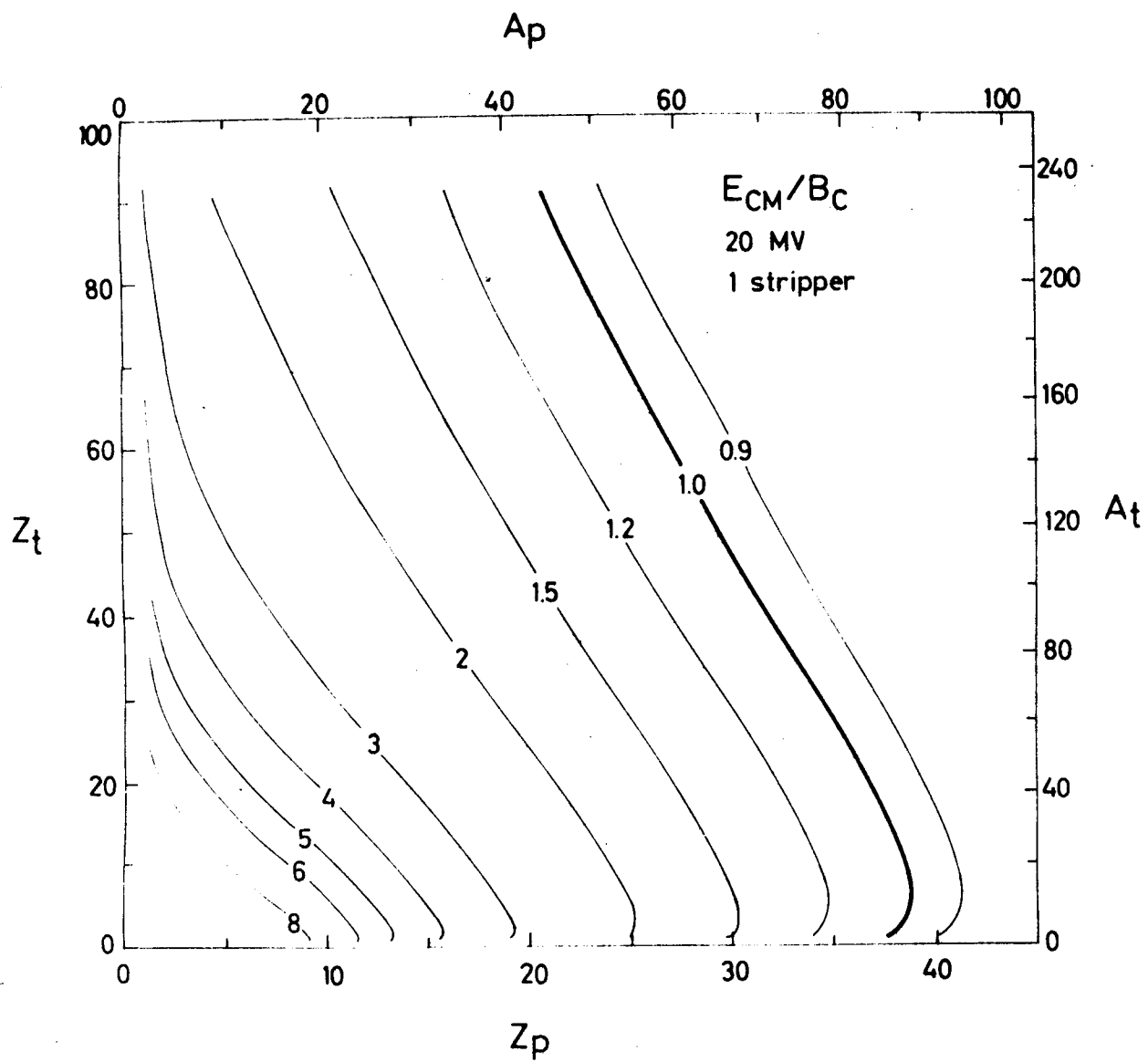


Fig. 9

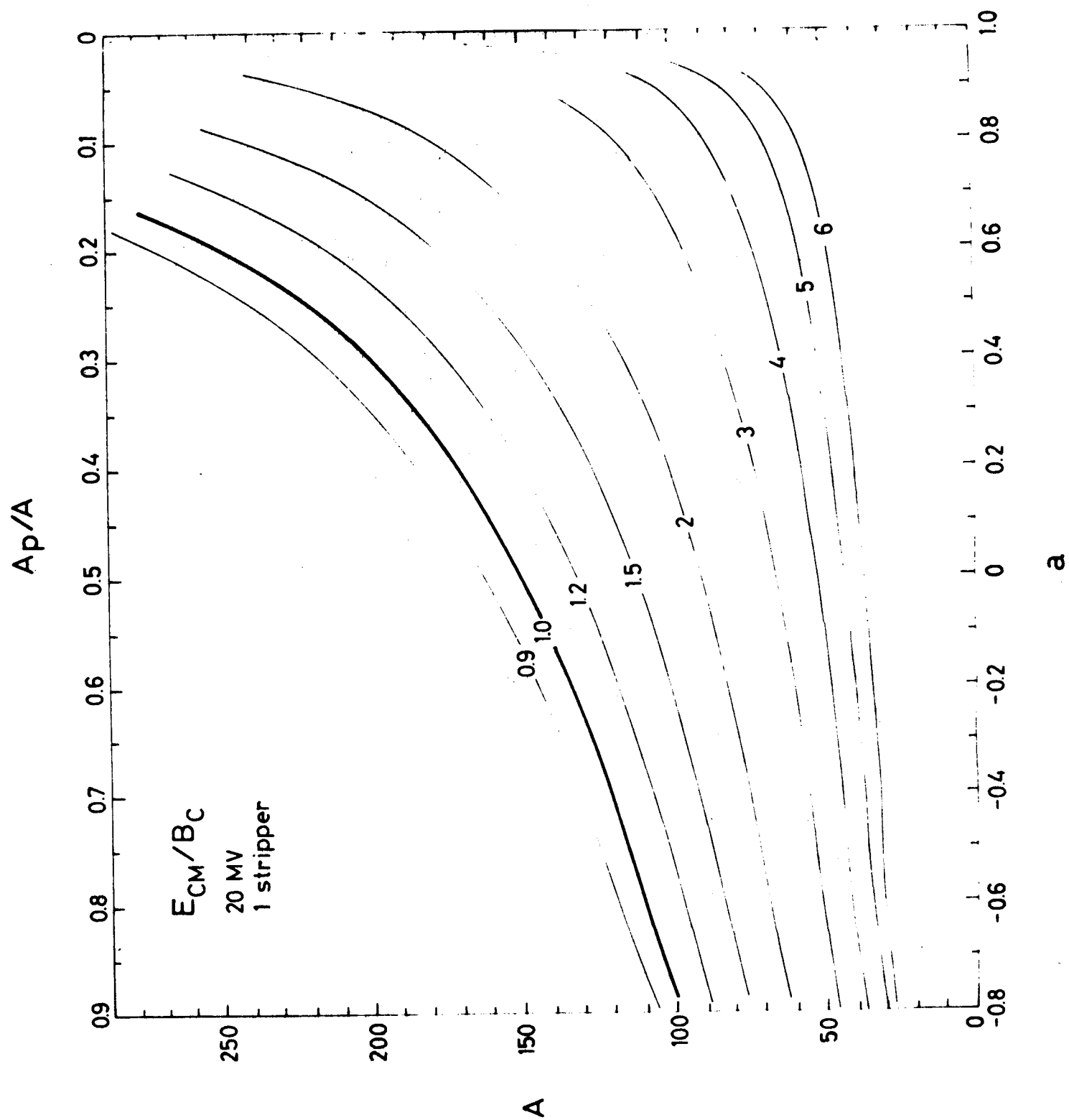


Fig. 10

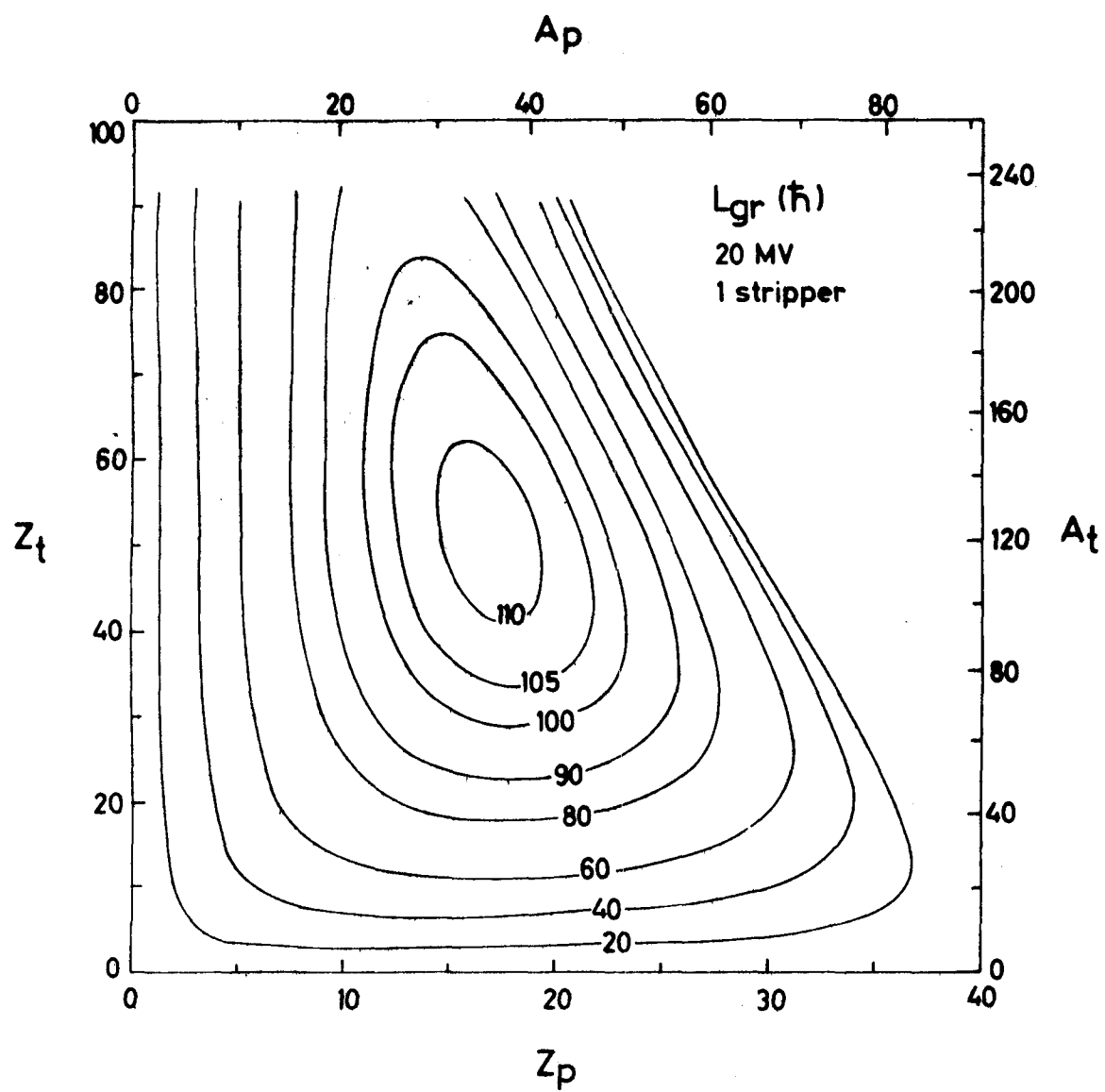


Fig. 11

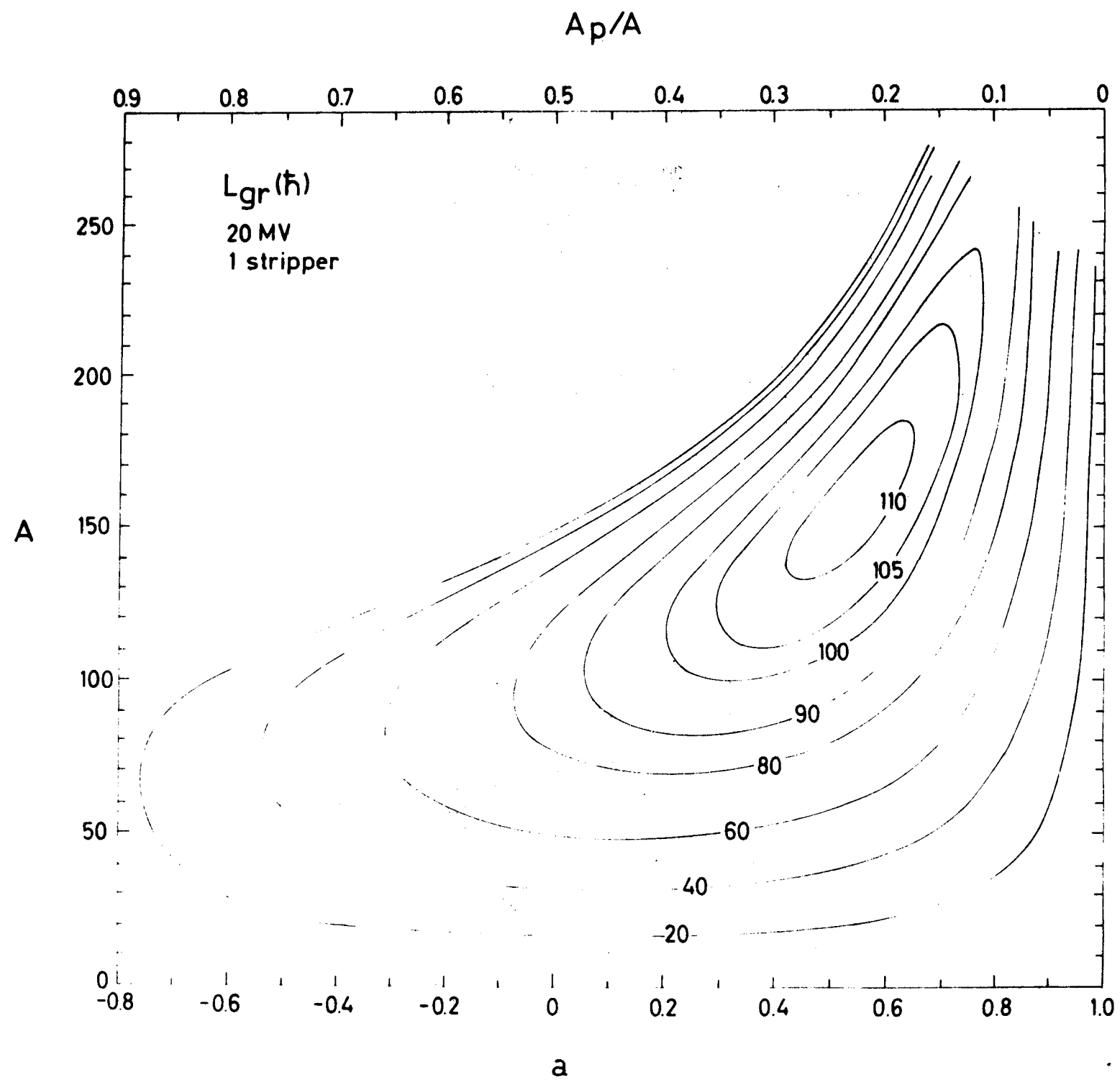


Fig. 12

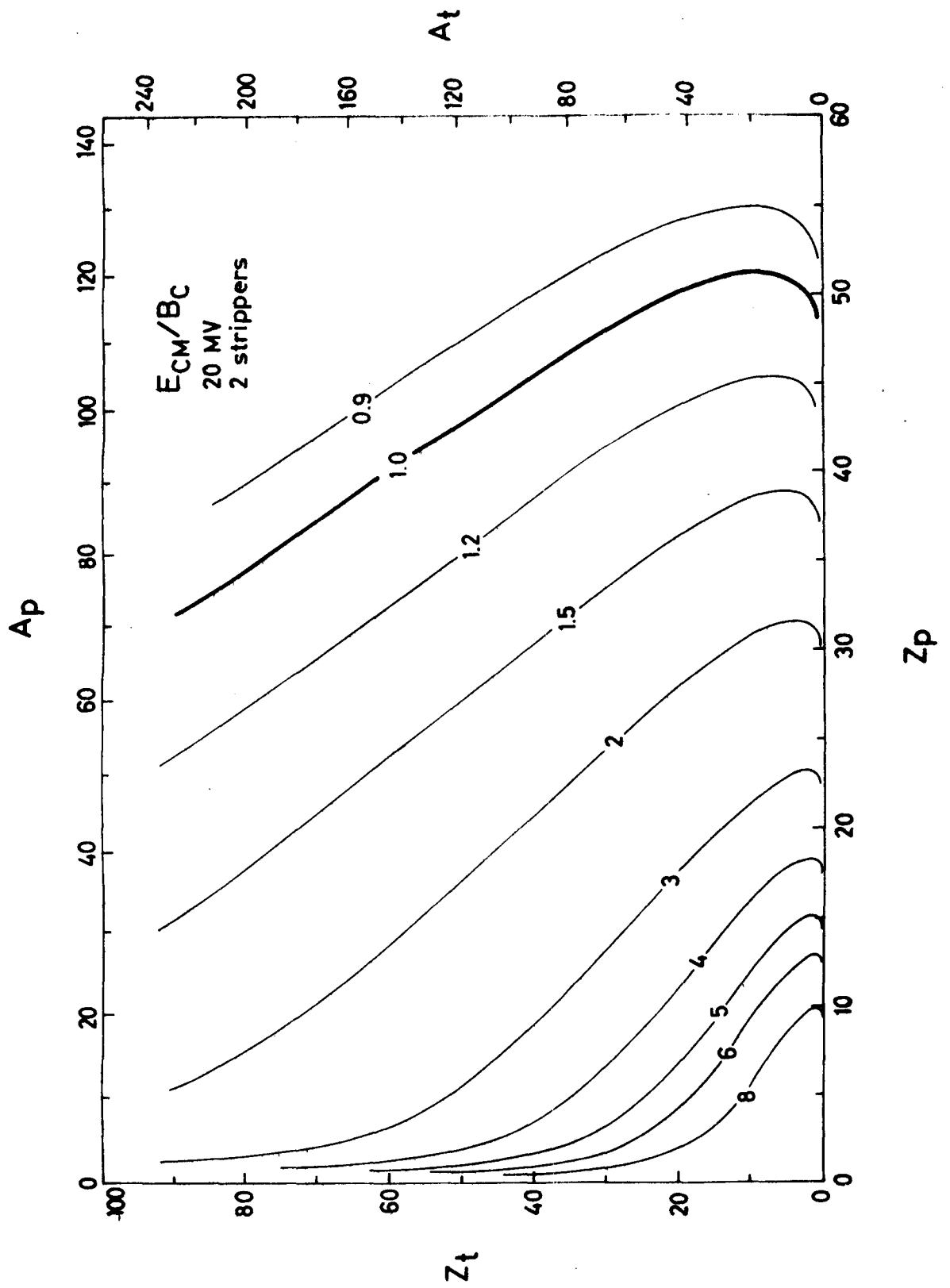


Fig. 13

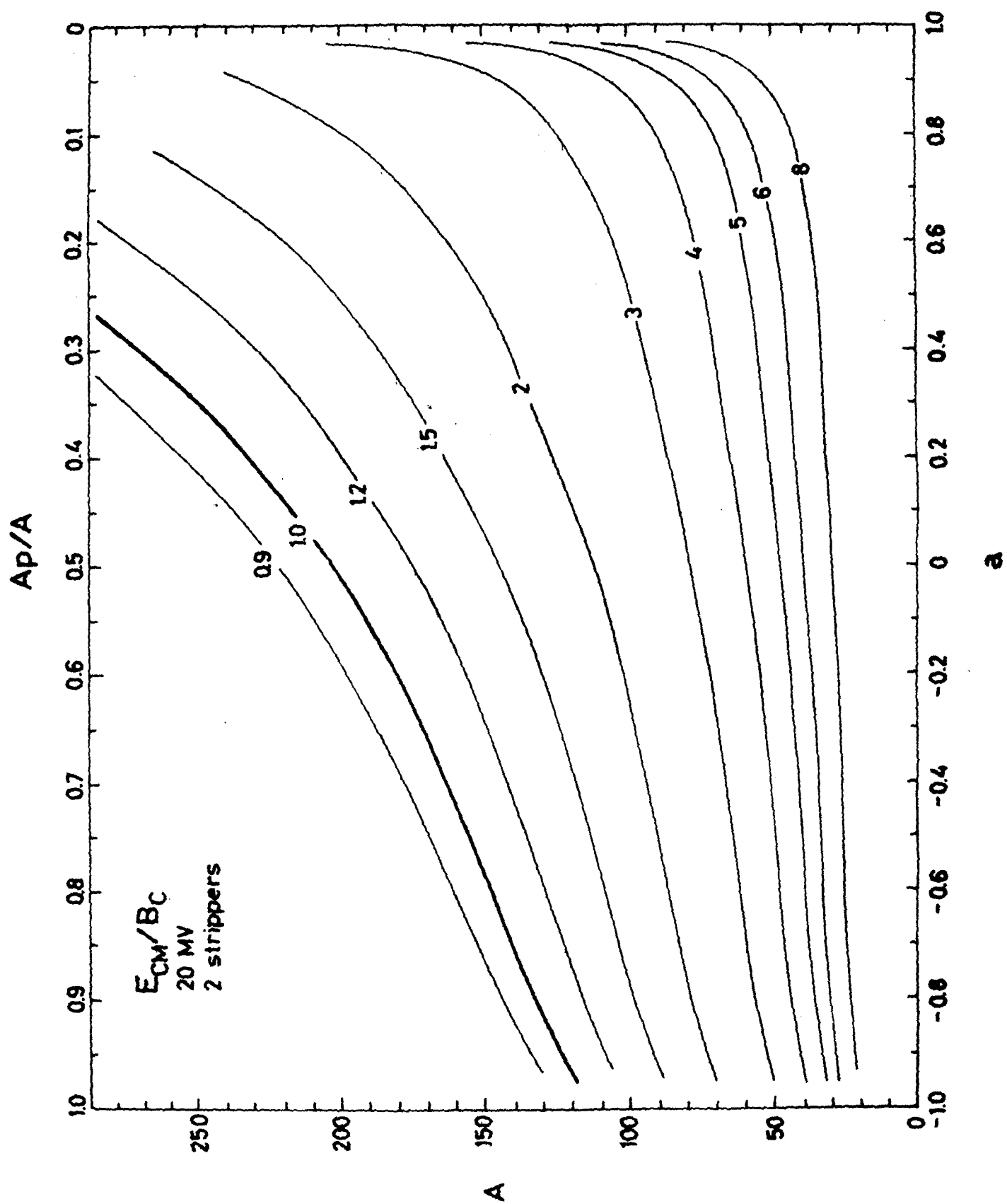


Fig. 14

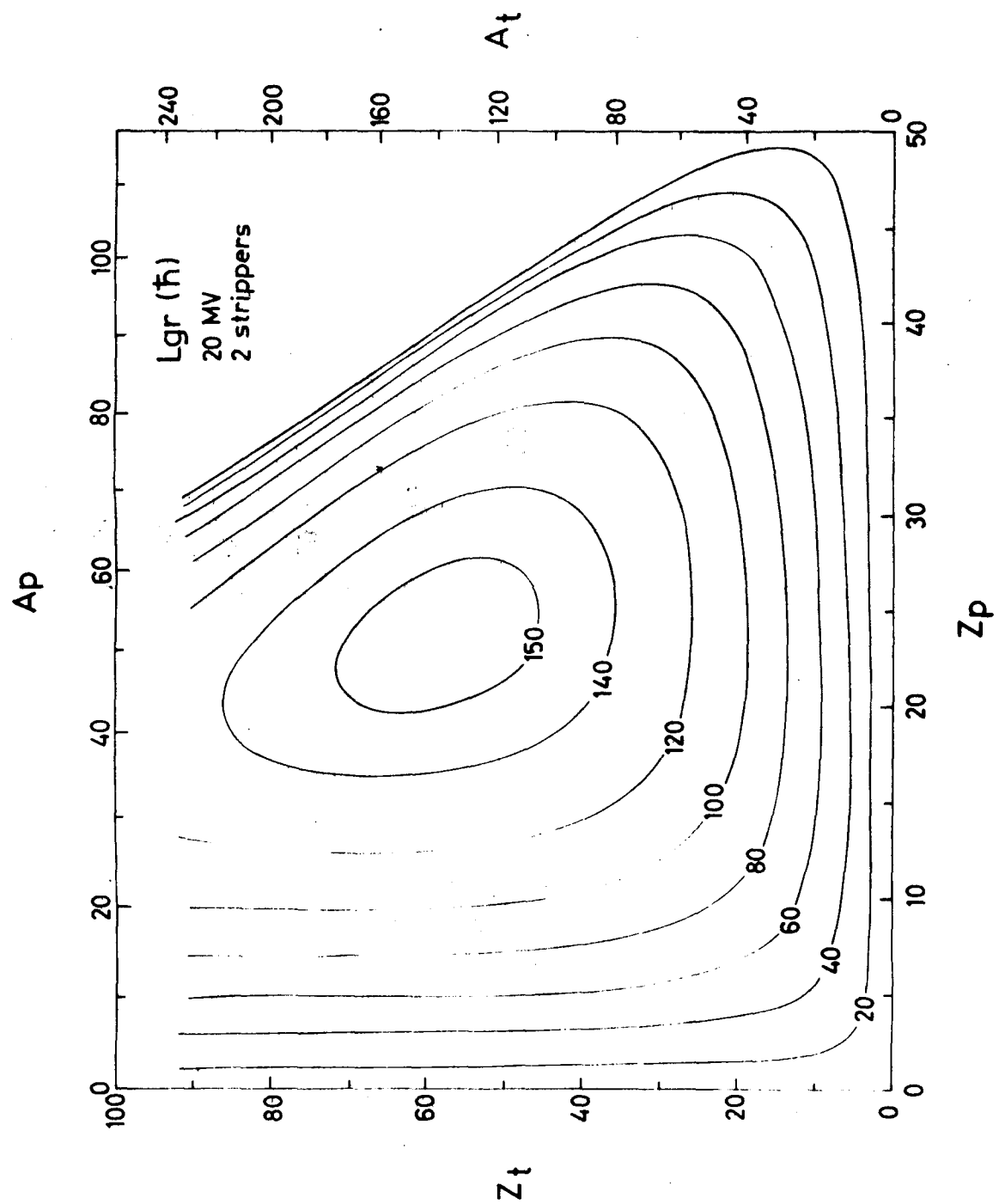


Fig. 15

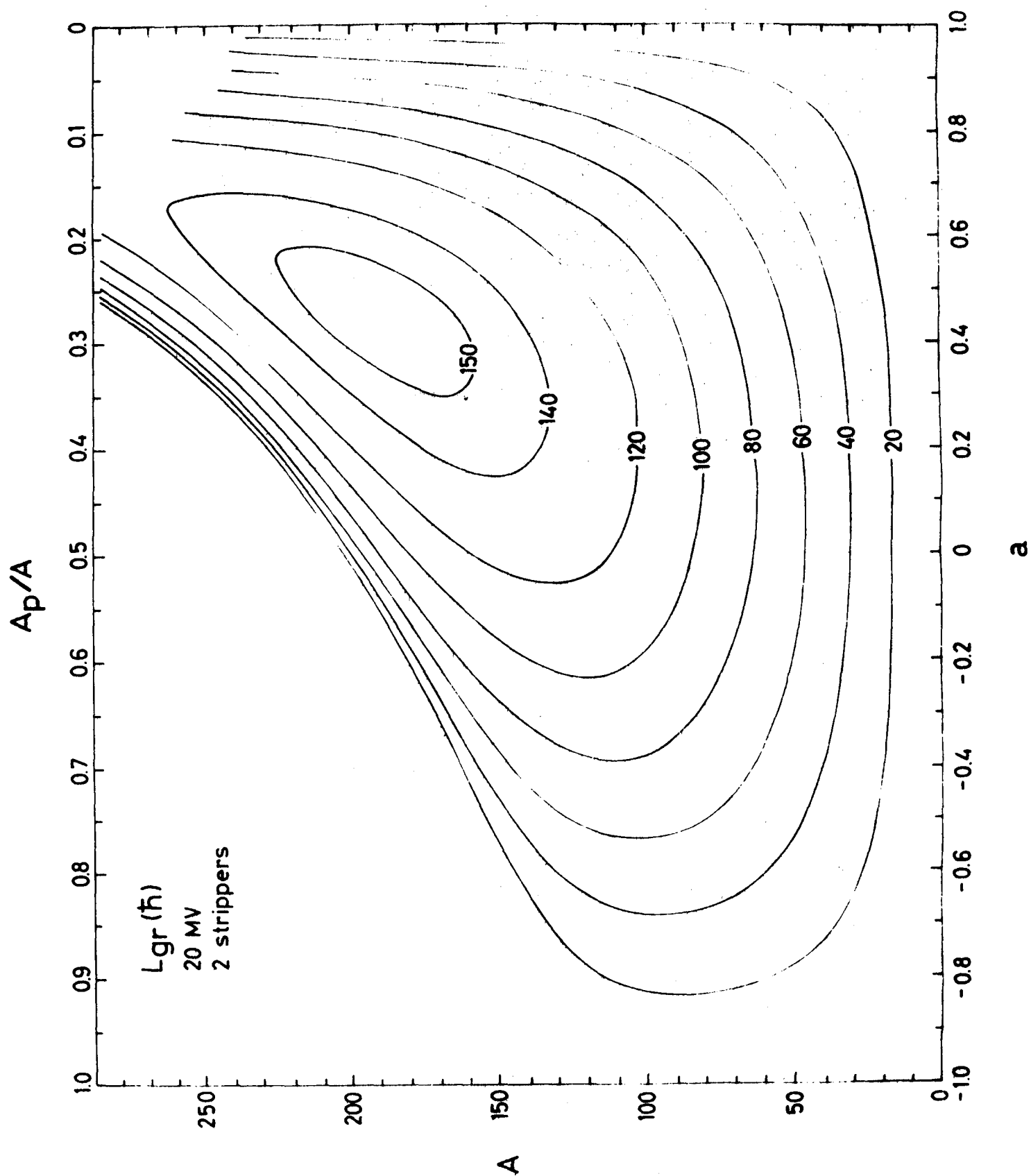


Fig. 16

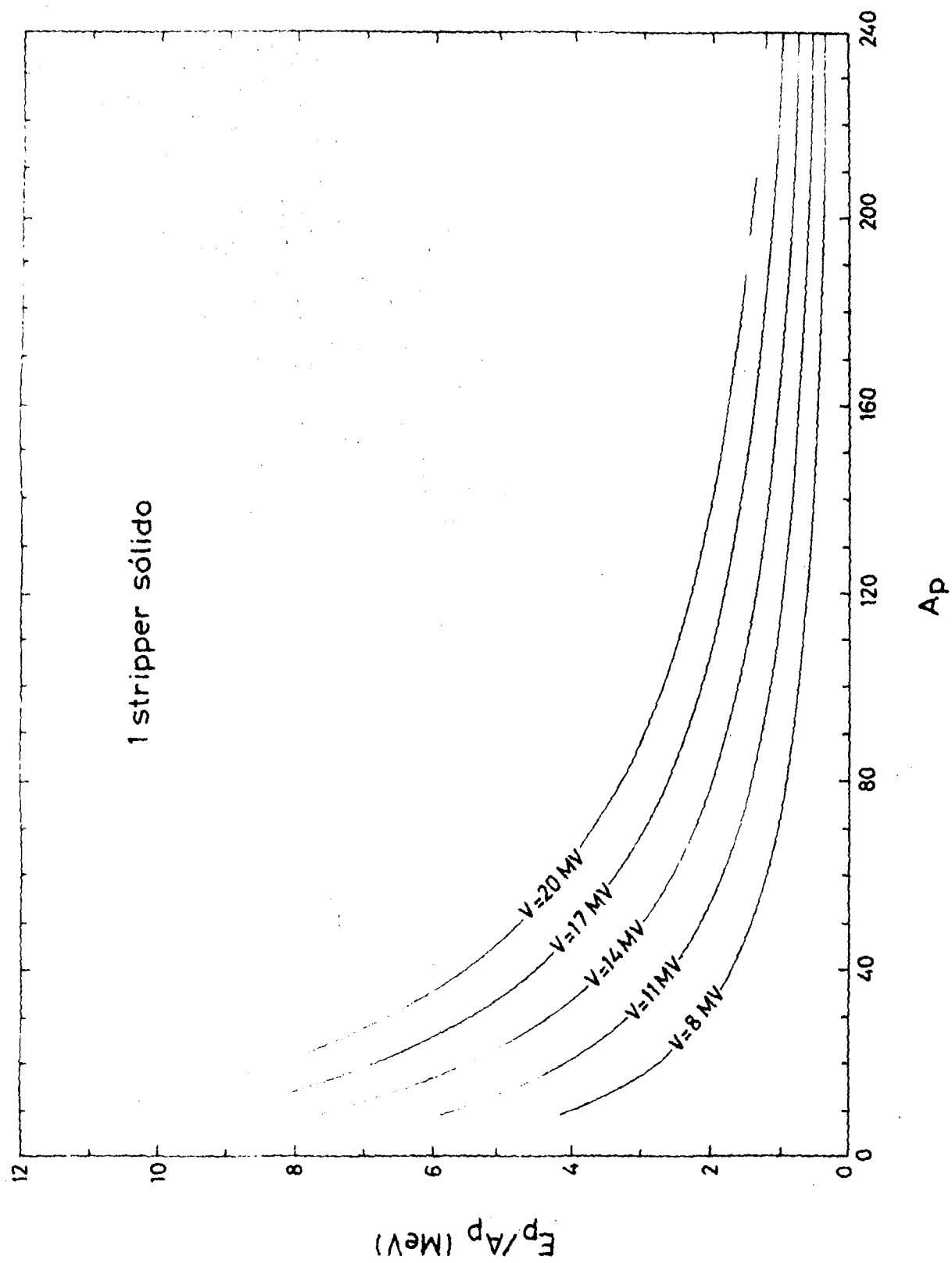


Fig. 17

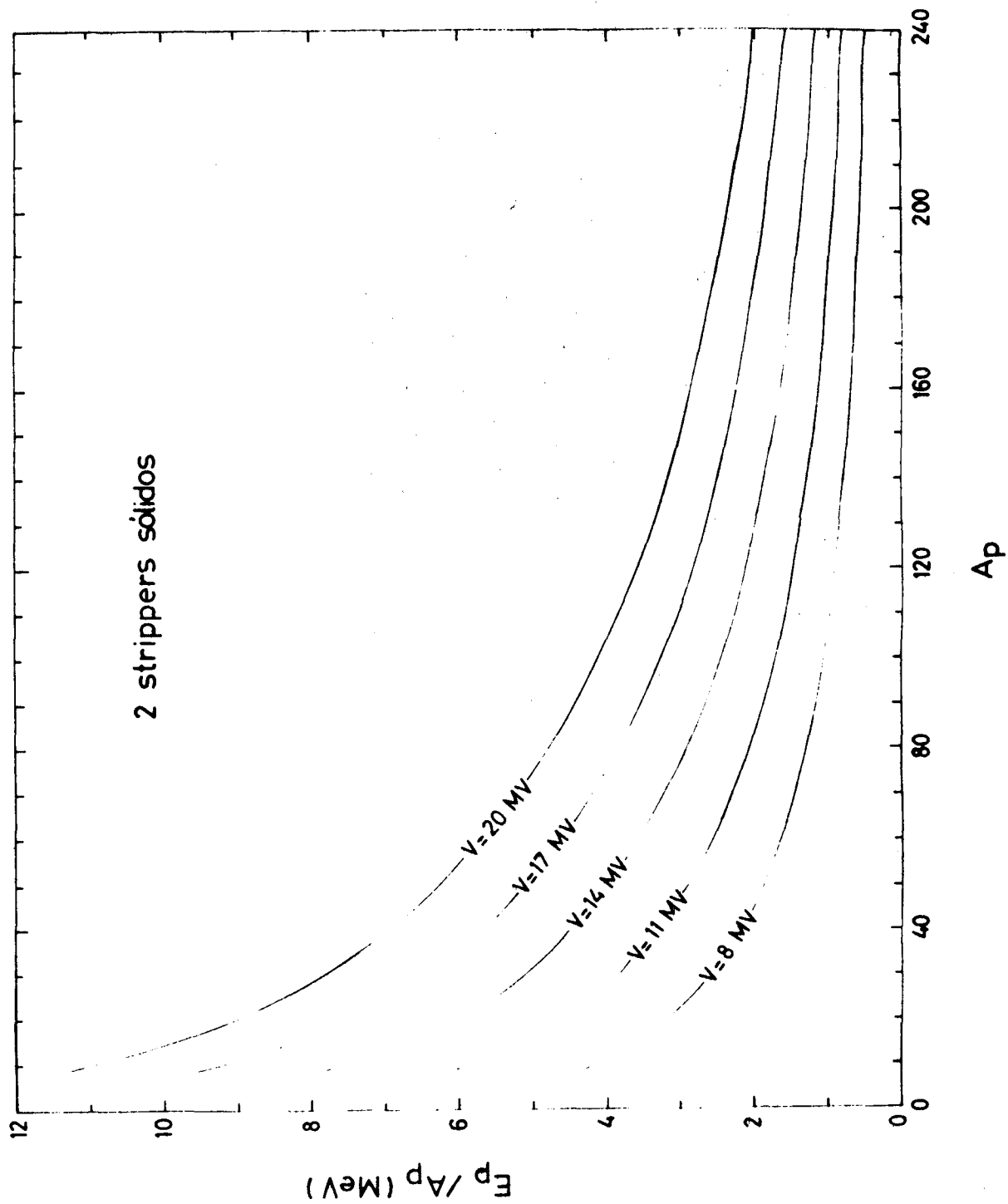


Fig. 18