

Ц 840a

Б-245

Барашенков В.С.

2242

Никитин В.А.

1-78



Б2-2-11441.

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Б2-2-11441

ДЕПОНИРОВАННАЯ ПУБЛИКАЦИЯ

Дубна 1978

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ  
Лаборатория вычислительной техники и автоматизации

В.С. Баранцов, В.Ф. Ивочкин

Б2-2-11441

Расчет  
упругого рассеяния двух ядер

Рукопись поступила  
в издательский отдел  
.. 4 .. апреля 1978 г.

Объединенный институт  
ядерных исследований  
БИБЛИОТЕКА

Дубна, 1978 г.

## АННОТАЦИЯ

Приведены программы расчетов в оптичском приближении с учетом кулоновских эффиктов дифференциального сечения упругого рассеяния двух ядер. Программы написаны на языке ФОРТРАН и использовались для расчетов на ЭВМ БЭСМ-6 и СДС-6500.

Дифференциальное сечение упругого рассеяния двух ядер в  
Лабораторной системе в координат на угол

$$\frac{\delta(\theta)}{\delta_k(\theta)} = \left\{ \cos \left[ 2G \ln \left( \sin \frac{\theta}{2} \right) \right] + \frac{1}{G} \sin^2 \frac{\theta}{2} \sum_1 \right\}^2 +$$

$$+ \left\{ \sin \left[ 2G \ln \left( \sin \frac{\theta}{2} \right) \right] + \frac{1}{G} \sin^2 \frac{\theta}{2} \sum_2 \right\}^2$$

Здесь  $\delta_k(\theta)$  — сечение кулоновского рассеяния (формула  
Розерфорда)

$$\sum_1 = \sum_{L=1}^{L_{MAX}} (2L+1) P_L(\cos \theta) \left\{ (1-R_L) \cdot \sin(2\delta_L) - AI_L \cos(2\delta_L) \right\},$$

$$\sum_2 = \sum_{L=1}^{L_{MAX}} (2L+1) P_L(\cos \theta) \left\{ (1-R_L) \cos(2\delta_L) + AI_L \sin(2\delta_L) \right\},$$

$P_L(\cos \theta)$  — полином Лежандра,

$$\delta_L = \sum_{k=1}^L \arctg(G/k),$$

$$G = 0,1574 \cdot Z_H \cdot Z_M \sqrt{\frac{A_M}{T(\text{МэВ})}},$$

$$R_L = \cos(R\eta_L) e^{-A\eta_L}, \quad AI = \sin(R\eta_L) e^{-A\eta_L},$$

$$R\eta_L = x \cdot E T A_L, \quad A\eta_L = y \cdot E T A_L,$$

$x, y$  — подгоночные параметры,

$$E T A_L = \int_0^{\infty} \frac{1}{s} (\sqrt{s^2 + \rho_L^2}) ds, \quad \rho_L = \lambda (G + \sqrt{G^2 + L^2}),$$

$$\lambda = 4,566 \frac{A_H + A_M}{A_H A_M} \sqrt{\frac{A_H}{T(\text{МэВ})}} -$$

длина дебройловской волны (в единицах  $10^{-13}$  см).

$$D(R) = \int_0^{\infty} x^{2\lambda} D_N(x) dx \int_{-1}^{+1} D_M(\sqrt{R^2 + 2Rxz + Z^2}) dz,$$

$D_N(x)$  и  $D_M(x)$  - внутриядерная плотность падающего ядра и ядра-мишени, которая выбирается в виде функции Сэмсона-Будда для ядер с массовым числом  $A > 16$  и в виде функции осциллирующей модели для  $A \leq 16$ ;

$A$  - массовое число,  $Z$  - зарядовое число ядра.

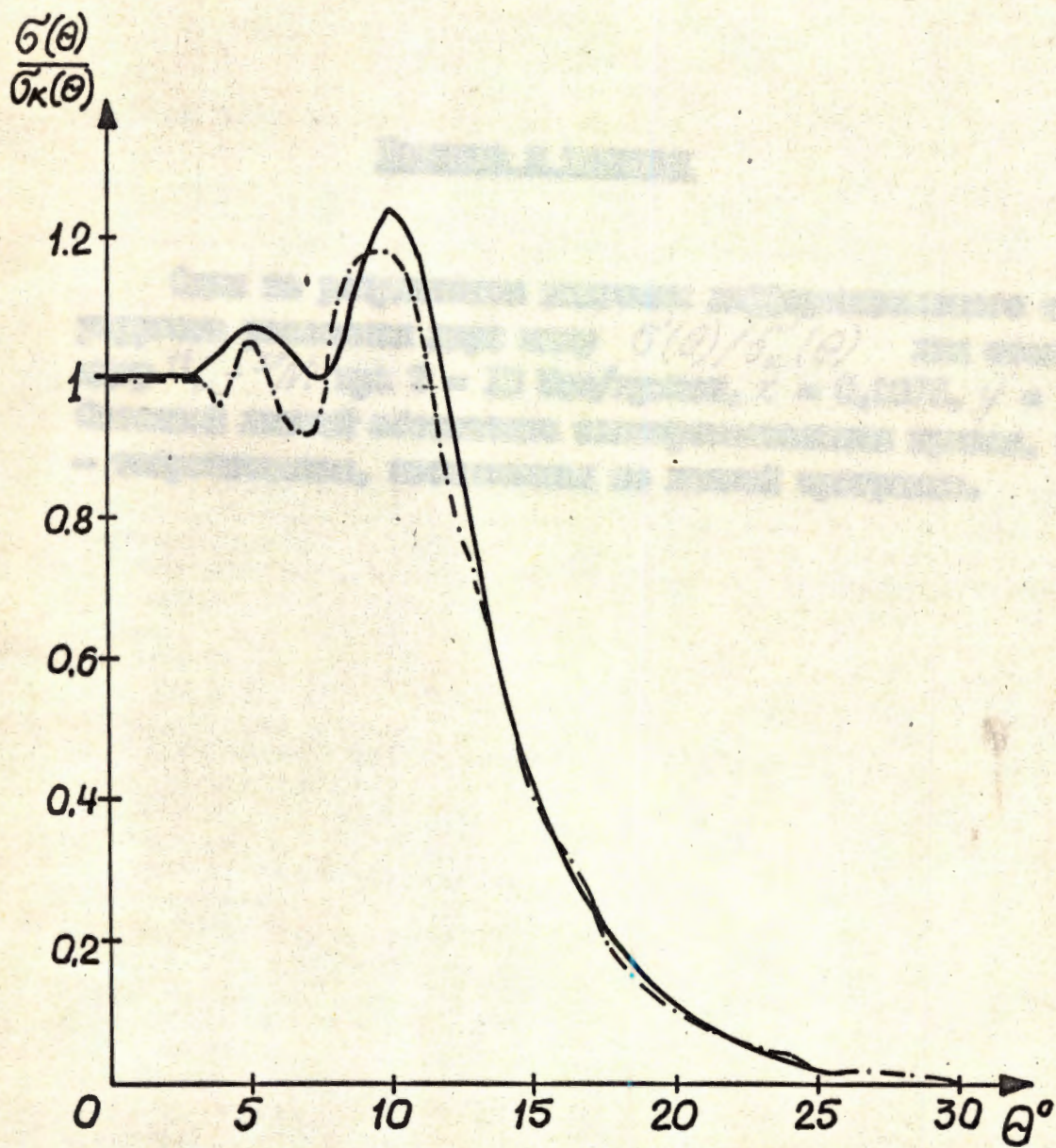
$T$  - кинематическая энергия падающего ядра в лабораторной системе координат.

Индексы  $N$  и  $M$  относятся соответственно к падающему ядру и ядру-мишени.

Параметр  $L_{\text{MAX}}$  выбирается для каждой конкретной задачи в зависимости от энергии  $T$  и массовых чисел  $A_1$  и  $A_2$  путем пробного расчета из условия, что при  $L > L_{\text{MAX}}$  доля  $\Sigma A_L$  становится исчезающе малой и не дает вклада в рассчитываемое сечение.

При высоких энергиях и для очень тяжелых ядер, когда  $L_{\text{MAX}} \gg 100$  удобно суммы  $\sum_1$  и  $\sum_2$  заменить интегралами, а полиномы Лежандра  $P_L$  - функцией Бесселя  $J_0$  (см. гл. II в монографии В.С. Бараненкова и В.Д. Тенеева "Взаимодействие высокоэнергетических частиц с ядрами", Атомиздат, М., 1972 г.).

Справочное обозначение формул дано в нашей работе: В.С. Бараненков, В.С. Никитин "Квантоклассическое приближение для упругого рассеяния тяжелых ядер", препринт СВЯИ, Дубна, 1978.





```

PROGRAM CHEK 1(INPUT,OUTPUT,PUNCH)
C  CALCULATION AND OUTPUT OF DNORMA
COMMON/WH/W(8),H(8)/RDD/R(60),DD(60)/TGL/T,G,AL/AZ/AM,AN,BM,CM
DIMENSION ETA(1000)
AM=58. $ AN=12. $ ZM=28. $ ZN=6. $ T=124.5
BM=4.22 $ BN=1.55 $ CM=0.545 $ CN=1.64
N=100
PRINT 1,AM,AN,ZM,ZN,BM,BN,CM,CN,T
1 FORMAT(111,2X#AM=#F4.0,4X#AN=#F4.0,4X#ZM=#F4.0,4X#ZN=#F4.0/
*2X#BM=#F4.2,4X#BN=#F4.2,4X#CM=#F5.3,3X#CN=#F4.2/
*2X#T=#F10.2#MEV#//
*9X#R(I)#6X#DD(I)#)
DATA (W=0.1012285363,0.2223810345,0.3137056459,0.3626837834,
*0.3626837834,0.3137066459,0.2223810345,0.1012285363),
*(H=0.9602898565,0.7966664774,0.5255324099,0.1834346425,
*-0.1834346425,-0.5255324099,-0.7966664774,-0.9602898565)
C  DETERMINATION OF THE ARRAY R
R(1)=0.
S=4.*BM/50.
DO 2 I=1,59
C  2 R(I+1)=R(I)+S
C  CALCULATION AND OUTPUT OF THE EQUIVALENT DENSITY
A1=0. $ B1=R(30)
3 PD=0.
DO 4 J=1,8
Y2=((B1-A1)*H(J)+B1+A1)/2.
Y3=W(J)*Y2*Y2
4 PD=PD+Y3*J(Y2,ZN,AN,BN,CN,ZM,AM,BM,CM)
IF(A1.NE.0) GO TO 5
OD=PD*B1/2.
A1=R(30) $ B1=R(50)
GO TO 3
5 PD=PD*(B1-A1)/2.+OD
B2=1./12.5654
PD=B2/PD
C  CALCULATION AND OUTPUT OF THE DENSITY
DO 7 I=1,60
DD(I)=D(R(I),ZN,AN,BN,CN,ZM,AM,BM,CM)
PRINT 6,I,R(I),DD(I)
6 FORMAT(2X,I3,2E10.3)
DD(I)=ALOG(DD(I)*PD)
7 CONTINUE
SQ=SQRT (AN/T)
G=0.1574*SQ*ZN*ZM
AL=4.566*SQ*(AN+AM)/(AN*AM)
CALL PHASE(ETA,N)
PRINT 8
8 FORMAT(//5X#L#7X#ETA#)
PRINT 9,(L,ETA(L),L=1,N)
9 FORMAT(3X,I4,E12.3)
STOP
END

```



```
FUNCTION D (R,ZN,AN,BN,CN,ZM,AM,BM,CM)
C   CALCULATION OF THE EQUIVALENT DENSITY
COMMON /WH/ W(8),H(8)/AB/A(3),B(3)
RR=R**2
C   THREE INTERVALS FOR THE EXTERNAL INTEGRAL
IF(AM-16.1)1,1,2
1  CC=BM & GO TO 3
2  CC=CM
3  A(1)=0.
   B(1)=1.5*BM
   A(2)=B(1)
   B(2)=A(2)+CC
   A(3)=B(2)
   B(3)=59.*BM/15.
C   CALCULATION OF THE INTEGRALS IN THE INTERVALS A(I)-B(I)
D=0. & DO 6 I=1,3
T=0. & DO 5 K =1,8
Y=((B(I)-A(I))*H(K)+A(I)+B(I))/2. & RY=2.*R*Y
C   CALCULATION OF THE INTERNAL INTEGRAL
T1=0. & DO 4 L=1,8
Y1=SQRT(RR+RY*H(L)+Y*Y)
4  T1=T1+W(L)*DENS(Y1,ZM,AM,BM,CM)
C   VALUE OF THE INTERNAL INTEGRAL IS EQUAL T1
5  T=T+W(K)*Y**2*DENS(Y,ZN,AN,BN,CN)*T1
6  D=D+T*(B(I)-A(I))/2.
RETURN & END
```

```
FUNCTION DENS(R,Z,A,B,C)
C   CALCULATION OF THE INTERNUCLEAR DENSITY
    PI=3.14159
    IF(A-16.1)1,1,2
C   LIGHT NUCLEUS
    1 C2=C**2
      BB=C2*(1.-1./A)
      Z1=C2/BB $ Z2=(Z-2.)/3.
      X=1.+1.5*Z2*(1.-Z1)
      Y=Z1*Z2
      DO=2./((BB*PI)**1.5*Z)
      RR=R**2/BB
      IF(RR-43.)3,3,5
    3 DENS=DO*(X+Y*RR)*EXP(-RR) $ RETURN
C   HEAVY NUCLEUS
    2 DO=0.75/(B**3*PI*(1.+(PI*C/B)**2)).
      RB=(R-B)/C
      IF (RB-43.)4,4,5
    4 DENS=DO/(1.+EXP(RB)) $ RETURN
    5 DENS=0. $ RETURN
END
```

```
C      SUBROUTINE PHASE(ETA,N)
      CALCULATION OF THE SCATTERING PHASES
      COMMON /TGL/T,G,AL/WH/W(8),H(8)/AZ/AM,AN,3M,CM/AB/A(3),B(3)
      DIMENSION ETA(N)
      DO 3 L=1,N
      P2=AL*(G+SQRT(G*G+L*L))
      ET=0.
      DO 2 I=1,3
      BA1=(B(I)-A(I))/2. & BA2=(B(I)+A(I))/2.
      T1=0.
      DO 1 K=1,8
      Y=BA1*H(K)+BA2
      X1=Y*Y
      X2=SQRT(1.+2.*AL*G*(P2-SQRT(X1+P2*P2)))/X1
      X3=W(K)*P(X1,P2)
1      T1=T1+X3/X2
2      ET=ET+T1*BA1
3      ETA(L)=ET
      PUNCH 4,ETA
4      FORMAT(8E10.3)
      RETURN & END
```

```

FUNCTION P(X,PD)
COMMON/RDD/R(60),DD(60)
Y=SQRT(X+PD*PD)
IF(Y.GT.R(60)) GO TO 1
CALL FINTER(Y,R,DD,60,Z)
P=EXP(Z) $ RETURN
1 P=0.
RETURN $ END

```

1	1.00000000	1.00000000
2	1.00000000	1.00000000
3	1.00000000	1.00000000
4	1.00000000	1.00000000
5	1.00000000	1.00000000
6	1.00000000	1.00000000
7	1.00000000	1.00000000
8	1.00000000	1.00000000
9	1.00000000	1.00000000
10	1.00000000	1.00000000
11	1.00000000	1.00000000
12	1.00000000	1.00000000
13	1.00000000	1.00000000
14	1.00000000	1.00000000
15	1.00000000	1.00000000
16	1.00000000	1.00000000
17	1.00000000	1.00000000
18	1.00000000	1.00000000
19	1.00000000	1.00000000
20	1.00000000	1.00000000
21	1.00000000	1.00000000
22	1.00000000	1.00000000
23	1.00000000	1.00000000
24	1.00000000	1.00000000
25	1.00000000	1.00000000
26	1.00000000	1.00000000
27	1.00000000	1.00000000
28	1.00000000	1.00000000
29	1.00000000	1.00000000
30	1.00000000	1.00000000
31	1.00000000	1.00000000
32	1.00000000	1.00000000
33	1.00000000	1.00000000
34	1.00000000	1.00000000
35	1.00000000	1.00000000
36	1.00000000	1.00000000
37	1.00000000	1.00000000
38	1.00000000	1.00000000
39	1.00000000	1.00000000
40	1.00000000	1.00000000
41	1.00000000	1.00000000
42	1.00000000	1.00000000
43	1.00000000	1.00000000
44	1.00000000	1.00000000
45	1.00000000	1.00000000
46	1.00000000	1.00000000
47	1.00000000	1.00000000
48	1.00000000	1.00000000
49	1.00000000	1.00000000
50	1.00000000	1.00000000
51	1.00000000	1.00000000
52	1.00000000	1.00000000
53	1.00000000	1.00000000
54	1.00000000	1.00000000
55	1.00000000	1.00000000
56	1.00000000	1.00000000
57	1.00000000	1.00000000
58	1.00000000	1.00000000
59	1.00000000	1.00000000
60	1.00000000	1.00000000

AM= 58.      AN= 12.      ZM= 28.      ZN= 6.  
 BM=4.22      BN=1.65      CM= .545      CN=1.64  
 T=      124.50MEV

	R(I)	DD(I)
1	0.	.439E-03
2	.281E+00	.408E-03
3	.563E+00	.435E-03
4	.844E+00	.431E-03
5	.113E+01	.394E-03
6	.141E+01	.384E-03
7	.159E+01	.372E-03
8	.197E+01	.358E-03
9	.225E+01	.340E-03
10	.253E+01	.320E-03
11	.281E+01	.298E-03
12	.309E+01	.274E-03
13	.338E+01	.249E-03
14	.366E+01	.223E-03
15	.394E+01	.196E-03
16	.422E+01	.170E-03
17	.450E+01	.145E-03
18	.478E+01	.122E-03
19	.505E+01	.100E-03
20	.535E+01	.839E-04
21	.563E+01	.638E-04
22	.591E+01	.493E-04
23	.619E+01	.372E-04
24	.647E+01	.274E-04
25	.675E+01	.197E-04
26	.703E+01	.138E-04
27	.731E+01	.946E-05
28	.760E+01	.637E-05
29	.788E+01	.421E-05
30	.816E+01	.273E-05
31	.844E+01	.175E-05
32	.872E+01	.110E-05
33	.900E+01	.688E-06
34	.928E+01	.425E-06
35	.957E+01	.251E-06
36	.985E+01	.159E-06
37	.101E+02	.959E-07
38	.104E+02	.587E-07
39	.107E+02	.355E-07
40	.110E+02	.214E-07
41	.113E+02	.129E-07
42	.115E+02	.777E-08
43	.118E+02	.457E-08
44	.121E+02	.281E-08
45	.124E+02	.159E-08
46	.127E+02	.111E-08
47	.129E+02	.639E-09
48	.132E+02	.356E-09
49	.135E+02	.220E-09
50	.138E+02	.132E-09
51	.141E+02	.790E-10
52	.143E+02	.474E-10
53	.146E+02	.294E-10
54	.149E+02	.170E-10
55	.152E+02	.102E-10
56	.155E+02	.612E-11

L	ETA
1	.100E-01
2	.995E-02
3	.979E-02
4	.958E-02
5	.933E-02
6	.904E-02
7	.872E-02
8	.839E-02
9	.804E-02
10	.767E-02
11	.730E-02
12	.693E-02
13	.655E-02
14	.617E-02
15	.579E-02
16	.542E-02
17	.506E-02
18	.470E-02
19	.435E-02
20	.401E-02
21	.368E-02
22	.337E-02
23	.307E-02
24	.278E-02
25	.251E-02
26	.225E-02
27	.201E-02
28	.179E-02
29	.158E-02
30	.139E-02
31	.122E-02
32	.106E-02
33	.922E-03
34	.794E-03
35	.680E-03
36	.580E-03
37	.491E-03
38	.414E-03
39	.347E-03
40	.289E-03
41	.240E-03
42	.198E-03
43	.163E-03
44	.133E-03
45	.108E-03
46	.879E-04
47	.711E-04
48	.572E-04
49	.459E-04
50	.367E-04
51	.293E-04
52	.233E-04
53	.185E-04
54	.146E-04
55	.115E-04
56	.908E-05
57	.715E-05
58	.561E-05
59	.441E-05
60	.345E-05
61	.270E-05
62	.211E-05
63	.165E-05

66 .786E-06  
67 .513E-06  
68 .478E-06  
69 .372E-06  
70 .290E-06  
71 .226E-06  
72 .176E-06  
73 .137E-06  
74 .106E-06  
75 .827E-07  
76 .643E-07  
77 .500E-07  
78 .389E-07  
79 .302E-07  
80 .235E-07  
81 .182E-07  
82 .142E-07  
83 .110E-07  
84 .855E-08  
85 .654E-08  
86 .515E-08  
87 .400E-08  
88 .311E-08  
89 .240E-08  
90 .186E-08  
91 .145E-08  
92 .112E-08  
93 .871E-09  
94 .670E-09  
95 .519E-09  
96 .402E-09  
97 .310E-09  
98 .239E-09  
99 .184E-09  
100 .141E-09

```

PROGRAM SCATS(INPUT,OUTPUT)
C   CALCULATION OF THE TWO NUCLEUS ELASTIC CROSS-SECTION
    DIMENSION ETA(100),DT(100),S11(62)
    AM=58. $ AN=12. $ ZM=28. $ ZN=6. $ T=124.5
    BM=4.22 $ BN=1.66 $ CM=0.545 $ CN=1.64
    X=0.0375 $ Y=0.0625
C   CALCULATION OF THE CONSTANTS AND PRINT OF THE DATA
    SQ=SQRT (AN/T)
    G=0.1574*SQ*ZN*ZM
    AL=4.566*SQ*(AN+AM)/(AN*AM)
    PRINT 1,AM,AN,ZM,ZN,BM,BN,CM,CN,T,AL,G,X,Y
1   FORMAT(1H1,2X#AM=#F4.0,4X#AN=#F4.0,4X#ZM=#F4.0,4X#ZN=#F4.0/
    *2X#BM=#F4.2,4X#BN=#F4.2;4X#CM=#F5.3,3X#CN=#F4.2/
    *2X#T=#F10.2#MEV#,4X#LAMBDA=#E10.4# FERMIS#,
    *4X#G=#E10.4/2X#X=#F6.4,2X#Y=#F6.4//2X#TETA    SS#)
    PI=3.14159 $ ST=1.5 $ AT=1.5
    READ 2,ETA
2   FORMAT(8E10.3)
    A0=PI*AN*AM*ST*100.*2.
C   CALCULATION OF THE ARRAY D AND DT
    DT(1)=ATAN(G)
    DO 3 L=2,100
3   DT(L)=DT(L-1)+ATAN(G/L)
    A1=A0*AT*X $ N=1
    DO 5 I=1,31
    TETA=(PI*(I-1.)/72.+0.0001)/5.
    S11(N)=TETA*360./PI $ N=N+1
    A2=A0*Y
C   CALCULATION OF THE SUM
    SM1=0. $ SM2=0. $ M=0.
    DO 4 L=1,100
    RE1=A1*ETA(L) $ AE1=A2*ETA(L)
    RR1=COS(RE1)*EXP(-AE1) $ AR1=SIN(RE1)*EXP(-AE1)
    Z=COS(2.*TETA)
    YX=ALEGF(L,M,Z,0)
    F1=SIN(2.*DT(L)) $ F2=COS(2.*DT(L)) $ F3=(2.*L+1.)*YX
    FS1=((1-RR1)*F1-AR1*F2)*F3
    FS2=((1-RR1)*F2+AR1*F1)*F3
    SM1=SM1+FS1
4   SM2=SM2+FS2
C   CALCULATION OF THE CROSS-SECTION
    S1=2.*G*ALOG(SIN(TETA))
    S2=1./G*SIN(TETA)**2
    SS=(COS(S1)+S2*SM1)**2+(SIN(S1)+S2*SM2)**2
    S11(N)=SS
5   N=N+1
    PRINT 6,S11
6   FORMAT(2XF4.1,E9.3)
    STOP $ END

```



AM= 58. AN= 12. ZM= 28. ZN= 6.  
BM=4.22 BN=1.66 CM= .545 CN=1.64  
T= 124.50MEV LAMBOA= .1426E+00 FERMIS G= .8210E+01  
X= .0375 Y= .0625

TETA	SS
.0	.100E+01
1.0	.995E+00
2.0	.100E+01
3.0	.101E+01
4.0	.964E+00
5.0	.105E+01
6.0	.960E+00
7.0	.919E+00
8.0	.110E+01
9.0	.117E+01
10.0	.118E+01
11.0	.109E+01
12.0	.866E+00
13.0	.731E+00
14.0	.578E+00
15.0	.410E+00
16.0	.335E+00
17.0	.260E+00
18.0	.170E+00
19.0	.135E+00
20.0	.117E+00
21.0	.772E-01
22.0	.549E-01
23.0	.507E-01
24.0	.345E-01
25.0	.192E-01
26.0	.198E-01
27.0	.192E-01
28.0	.108E-01
29.0	.708E-02
30.0	.738E-02

*Blumstein - 135m*