

Ле Ван Нгок:  
Б1-4-83-203,

С342В

Л-342



3302/83

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Б 1 - 4 - 83 - 203

ДЕПОНИРОВАННАЯ ПУБЛИКАЦИЯ

Дубна 1983

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ  
Лаборатория вычислительной техники и автоматизации

Б1-4-83-203

с 342в  
л-342

Ле ван Нгок, С.Ю.Шамаков

МОНТЕ-КАРЛОВСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ  $\gamma$ -КВАНТОВ,  
ОБРАЗОВАННЫХ В ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЯХ В ВЕЩЕСТВЕ

Руководитель отдела  
в издательском отделе  
.. 01: 04 1983 г.

Объединенный институт  
ядерных исследований  
БНБ-ИСТИТЕНА

Дубна, 1983

### Summary

The program for Monte-Carlo simulation of the processes accompanying the propagation of  $\gamma$  -quanta within the energy range of 0.01 - 11 MeV in matter is developed. The program is included into the program for calculation of the propagation of high-energy particles in media and may be used for calculation of the transmissions of  $\gamma$  -quanta produced from (n, c), (n, n'), (n, f) reactions, and emitted by the residual excited nuclei of the matter. The obtained results are in a good agreement with the experimental data and with the calculated results of the other authors.

## А Н Н О Т А Ц И Я

Разработана программа Монте-карловского моделирования процессов рождения и переноса  $\gamma$ -квантов с энергией 0,01-11 МэВ в веществе. Программа включена в программу расчета распространения высокоэнергетических частиц в веществе и может быть использована для расчета прохождения через вещество  $\gamma$ -квантов, образованных в реакциях  $(n, \gamma)$ ,  $(n, n'\gamma)$ ,  $(n, f\gamma)$  и испущенных остаточными возбужденными ядрами.

Результаты тестовых расчетов находятся в хорошем согласии с экспериментальными данными и расчетами других авторов.

## Введение

Изучение взаимодействия  $\gamma$ -излучения, образованного в ядерных реакциях в веществе представляет большой интерес с точки зрения практических приложений. Рассмотрение таких вопросов как расчет защиты ускорителей и космических аппаратов от  $\gamma$ -излучения требует знания характеристик  $\gamma$ -излучения, рожденного в ядерных реакциях в веществе. Для того, чтобы получить необходимую информацию из эксперимента требуются большие затраты, в некоторых случаях эксперимент невозможен, поэтому возникает необходимость рассчитывать взаимодействие  $\gamma$ -излучения с веществом теоретически.

Удобным, а иногда и единственным методом расчета распространения излучения в веществе, является Монте-карловское моделирование на ЭВМ. Целью данной работы является детальное описание программы моделирования прохождения  $\gamma$ -квантов, образованных в реакциях взаимодействия протонов средних энергий (в качестве примера рассмотрен случай  $E_p = 0,8$  ГэВ) в веществе.

Программа написана на языке ФОРТРАН и реализована на ЭВМ CDC-6500. Настоящая программа позволяет рассматривать прохождение  $\gamma$ -квантов, образованных в ядерных реакциях в однокомпонентной среде заданной геометрической конфигурации. Программа включена в программу расчета распространения высокоэнергетических частиц в веществе<sup>177</sup> в качестве модуля и может легко быть обобщена на случай многокомпонентных сред.

### Физические процессы, реализованные в программе

В процессе взаимодействия протонов высоких и средних энергий с веществом происходит образование большого числа вторичных частиц, которые, в свою очередь, могут взаимодействовать с ядрами вещества, рождая новые частицы и т.д. Таким образом, в

среде образуется лавина вторичных частиц, постепенно обогащаясь медленными нейтронами (медленные заряженные частицы остаются вследствие ионизационных потерь). Именно эти нейтроны и образуют  $\gamma$ -кванты в реакциях  $(n, \gamma)$ ,  $(n, n'\gamma)$ ,  $(n, f\gamma)$

$\gamma$ -кванты также испускаются остаточными возбужденными ядрами среды и фрагментами деления в конце испарительной стадии процесса девозбуждения. Кроме того,  $\gamma$ -кванты могут образовываться в процессе распада  $\pi^0$ -мезонов, однако, этот канал становится существенным лишь при высоких энергиях и в данной работе не рассматривается.

Энергетический интервал рассматриваемых  $\gamma$ -квантов простирается от 0.01 МэВ до 11 МэВ. В этом интервале доминируют три механизма взаимодействия  $\gamma$ -излучения с веществом: фотопоглощение, комптоновское рассеяние и образование пар.

а) Фотопоглощение - в рассматриваемом энергетическом интервале поглощение  $\gamma$ -квантов с возбуждением атомов, преимущественно на K, L и M оболочках является единственным каналом "гибели"  $\gamma$ -квантов. Мягким флуоресцентным излучением можно пренебречь, так как оно немедленно поглощается веществом.

б) Комптоновское рассеяние - это процесс упругого рассеяния  $\gamma$ -квантов на "свободных" электронах атомов. Угловое распределение рассеянных фотонов дается формулой Клейна-Нишины:

$$\sigma(\Omega) d\Omega = \frac{r_0^2 (1 + \cos^2 \theta)}{2 [1 + E(1 - \cos \theta)]^2} \left\{ 1 + \frac{E^2 (1 - \cos \theta)^2}{(1 + \cos^2 \theta) [1 + E(1 - \cos \theta)]} \right\} d\Omega \quad (1)$$

( $r_0^2 = e^2 / m_0 c^2 = 0,28183 \cdot 10^{-13}$  см,  $E$  - энергия до рассеяния в единицах  $m_0 c^2 = 0,511$  МэВ)

$$E' = \frac{E}{1 + E(1 - \cos \theta)} \quad (2)$$

где  $E'$  - энергия  $\gamma$ -кванта после рассеяния в единицах  $m_0 c^2$

Интегрируя формулу Клейна-Нишины по углам, получаем зависимость комптоновского сечения рассеяния  $\gamma$ -квантов от энергии:

(3)

При энергиях  $\gamma$ -кванта ниже 0,1 МэВ необходимо использовать аппроксимационную формулу <sup>/II/</sup>

$$\sigma_c(E) = \frac{1}{(1+2E)^2} \left\{ 1 + 2E + \frac{6}{5}E^2 - \frac{1}{2}E^3 + \frac{2}{7}E^4 - \frac{8}{105}E^6 + \frac{4}{105}E^7 \right\} \quad (4)$$

Выборка  $E'$  и  $\theta$  из этих распределений упрощается применением метода, предложенного Карсоном <sup>/II/</sup>. В соответствии с этим методом  $E'$  определяется из уравнения

$$E' = \frac{E}{1 + SA + (2E - S)A^2} \quad (5)$$

где  $S = E / (1 + 0,5625E)$  и  $A$  - случайное число, равномерно распределенное в интервале  $(0,1)$ . Для  $E > 4$  МэВ к правой части (5) надо добавить член  $0,5(E-4)A^2(1-A)^2/6$ . Такой метод выборки дает значение  $E'$  с точностью 5%. Связь между углами  $\theta$  и  $\varphi$  и полярным углом  $\omega$  и азимутальным углом  $\chi$  комптоновского рассеяния дается следующими формулами:

$$\begin{aligned} \cos \theta_{n+1} &= \cos \theta_n \cos \omega + \sin \theta_n \sin \omega \cos \chi \\ \sin \varphi_{n+1} &= (S \sin \varphi_n + t \cos \varphi_n) / \sin \theta_{n+1} \\ \cos \varphi_{n+1} &= (S \cos \varphi_n - t \sin \varphi_n) / \sin \theta_{n+1} \end{aligned}$$

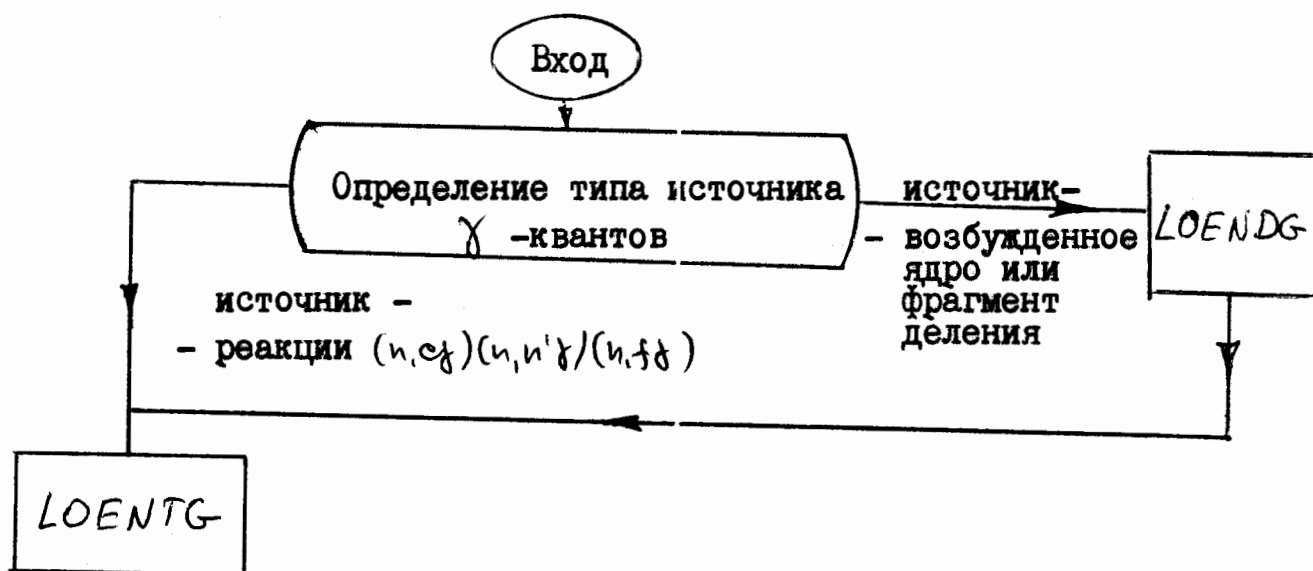
$$\begin{aligned} \text{где } S &= \cos \omega \sin \theta_n - \sin \omega \cos \theta_n \cos \chi \\ t &= \sin \chi \sin \omega \end{aligned}$$

с) Образование пар ( $\gamma, e^+e^-$ ) процесс с порогом  $2m_0c^2$  ( $= 1,02$  МэВ) становится важным при более высоких энергиях  $\gamma$ -кванта. Электроны и позитроны замедляются в среде, испуская тормозное излучение, которым можно пренебречь (то же касается и электронов, выбитых в процессе комптоновского рассеяния). Окончательно электрон поглощается с испусканием относительно

мягкого флуоресцентного излучения, а позитрон аннигилирует с электроном рассеивающей среды. В процессе аннигиляции образуются два  $\gamma$ -кванта, двигающихся в противоположных направлениях с энергией  $m_0c^2$  каждый. Свободный пробег позитронов очень мал по сравнению с пробегом фотонов в рассматриваемом энергетическом интервале, поэтому мы полагаем, что аннигиляционные  $\gamma$ -кванты образуются в точке рождения пары.

## II. БЛОК-СХЕМА И СТРУКТУРА ПРОГРАММЫ

Разработанные программы называются *LOENTG* и *LOENDG*. *LOENTG* используется для моделирования процессов рождения в реакциях  $(n, \gamma)$ ,  $(n, n'\gamma)$ ,  $(n, f\gamma)$  и переноса  $\gamma$ -квантов. *LOENDG* позволяет моделировать испускание  $\gamma$ -квантов возбужденными ядрами вещества (или фрагментами деления) в конце стадии испарения. Работа этих программ в составе программы расчета распространения высокоэнергетических частиц в веществе определяется следующей блок-схемой:



### а) Функционирование *LOENTG*

Блок-схема этой подпрограммы приведена на рис. I.

- 1) Определение типа источника  $\gamma$ -квантов.
- 2) Определение максимального числа точек рождения  $\gamma$ -квантов в среде.
- 3) Определение числа  $\gamma$ -квантов, рожденных в данной точке.



- 4) Определение направления движения и кинетической энергии  $\gamma$ -кванта.
- 5) Проверка, удовлетворяет ли данный  $\gamma$ -квант условиям регистрации. Например, мы можем ограничиться рассмотрением только  $\gamma$ -квантов с энергией больше  $E_{min}$ ; если энергия данного  $\gamma$ -кванта меньше  $E_{min}$ ; перейти к рассмотрению следующего  $\gamma$ -кванта.
- 6) Определение пробега  $\gamma$ -кванта до взаимодействия и проверка, находится ли точка взаимодействия внутри блока вещества.
- 7) Если точка взаимодействия находится внутри блока, то определяется тип взаимодействия в соответствии с сечениями каналов

$\sigma_a, \sigma_c, \sigma_p$

Обозначения, используемые в программе:

- $EGRG(i), i = 1-26$  - границы энергетических интервалов, на которые разбивается рассматриваемая область энергий  $\gamma$ -квантов <sup>/8/</sup>;
- $SPG(i, j), SPG1(i, j), SPG2(i, j), i = 1-26, j = 1-15$  - спектры  $\gamma$ -квантов, рожденных в реакциях  $(n, \gamma)$   $(n, n' \gamma)$   $(n, f \gamma)$  соответственно <sup>/8/</sup>;
- $NGR(i), i = 1-1800$  - номера энергетических групп, к которым принадлежали нейтроны, вызвавшие реакции  $(n, \gamma), (n, n' \gamma), (n, f \gamma)$
- $IPR1(i), IPR2(i), i = 1-1800$  - если  $IPR1(i) = 1$ , то  $i$ -ая реакция -  $(n, \gamma)$ . Если  $IPR2(i) = 1$ , то  $i$ -ая реакция -  $(n, n' \gamma)$ . Если  $IPR1(i) = 0$  и  $IPR2(i) = 0$   $i$ -ая реакция -  $(n, f \gamma)$ .
- $WG(i, j), i = 1, 3, j = 1-1800$  - координаты точек, в которых произошли реакции с образованием фотонов.
- $EG(i), i = 1, \dots, 26$  - значения энергии для интерполяции (линейной или экспоненциальной) сечений.
- $SPM(i, j), i = 1-26, j = 1, 15$  - вспомогательный массив для временного хранения массива  $SPG$ .
- $WPG(i, j), i = 1-9, j = 1-10$  - характеристики  $\gamma$ -квантов, образованных в данной точке среды за исключением рассматриваемого  $\gamma$ -кванта, или характеристики вновь рожденных  $\gamma$ -квантов во взаимодействии рассматриваемого  $\gamma$ -кванта с ядром.

- ANGL(i), i = 1 - 4 - начальное направление движения  $\gamma$ -кванта, выбираемое из изотропного распределения.
  - SUG(i), SUG1(i), SUG2(i), i = 1 - 26 - множественности  $\gamma$ -квантов, рожденных в реакциях:  $(n, \gamma)$ ,  $(n, n'\gamma)$ ,  $(n, f\gamma)$  соответственно.
  - NGRUP - номер энергетической группы, к которой принадлежал нейтрон, вызвавший рождение рассматриваемого фотона.
  - GOT1 = +1 - точка взаимодействия вне блока вещества, GOT1 = -1 - точка взаимодействия внутри блока.
  - IDG, LDG - если IDG = 0 и LDG = 0 -  $\gamma$ -квант родился в реакциях  $(n, \gamma)$ ,  $(n, n'\gamma)$ ,  $(n, f\gamma)$ . IDG = 1 и LDG = 1  $\gamma$ -квант испущен возбужденным ядром или фрагментом деления.
  - IBP - суммарное число реакций  $(n, \gamma)$ ,  $(n, n'\gamma)$ ,  $(n, f\gamma)$
  - WQ(i), i = 1 - 9 - характеристики рассматриваемого  $\gamma$ -кванта:  
 WQ(1), WQ(2), WQ(3) - координаты фотона (в см)  
 WQ(4), WQ(5), WQ(6) - направление полета  $\gamma$ -кванта -  $\cos\theta$   
 $\sin\theta$ ,  $\cos\varphi$  соответственно.  
 WQ(7) - кинетическая энергия (в МэВ)  
 WQ(8), WQ(9) - свободны и используются при использовании весового метода моделирования.  
 WQS и WQS1 - кинетические энергии в единицах  $m_0 c^2$   $\gamma$ -кванта до и после рассеяния соответственно.
  - SGLNS, SGLNA, SGLP, SGT1 - сечение комптоновского рассеяния, фотопоглощения, образования пар и полное сечение соответственно (в  $\text{см}^{-1}$ ).
- LOENTG использует следующие подпрограммы и функции:
- SUBROUTINE ISANG1 - для розыгрыша первоначального направления движения фотона.
  - SUBROUTINE GAEN - для определения начальной энергии  $\gamma$ -кванта, рожденного в реакциях  $(n, \gamma)$ ,  $(n, n'\gamma)$ ,  $(n, f\gamma)$  в соответствии с экспериментальными данными <sup>1/8</sup>.
  - SUBROUTINE INTESE - находит путем интерполяции сечение фотопоглощения или образования пар при данной энергии.
  - FUNCTION FG - вычисляет сечение комптоновского рассеяния в соответствии с формулой (3).

### III. РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕСТОВЫХ РАСЧЕТОВ

Программа использовалась для решения задач переноса  $\gamma$ -излучения в следующих случаях.

а) Коллимированный пучок  $\gamma$ -квантов с энергией 7 МэВ падает нормально на бетонную стену толщиной 70 см. Регистрировался поток прошедшего  $\gamma$ -излучения с энергией 1,5 МэВ на разных расстояниях от оси пучка. Производилось Монте-карловское усреднение результатов в энергетическом интервале (0,75-2,25) МэВ.

б) Источник  $\gamma$ -квантов - бесконечно длинный цилиндр из  $^{60}\text{Co}$  толщиной 1,27 см. вычислялись энергетические спектры вылетевших  $\gamma$ -квантов и энергетические спектры  $\gamma$ -квантов, вылетевших под разными углами  $\psi$  к оси, перпендикулярной оси цилиндра.

Полученные результаты, приведенные на рисунках 2-7, находятся в хорошем согласии с экспериментом и расчетными данными<sup>16/</sup>. На рис. 4-7 приведены спектры  $\gamma$ -квантов в четырех интервалах по  $\cos \psi$ : (0,75-1.), (0,5-0,75), (0,25-0,5), (0., 0,25).

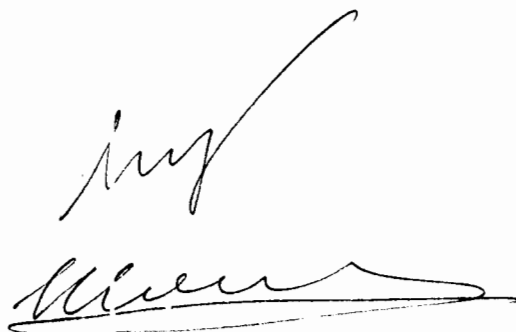
в) Коллимированный пучок протонов падает в торец цилиндра из  $^{238}\text{U}$  диаметром 10 см и длиной 30 см. Вычисленные спектры вылетевших  $\gamma$ -квантов приведены на рисунках 8-9 и находятся в хорошем согласии с результатами.

В заключение авторы выражают благодарность профессору В.С.Барашенкову за постановку задачи, внимание и полезные обсуждения.

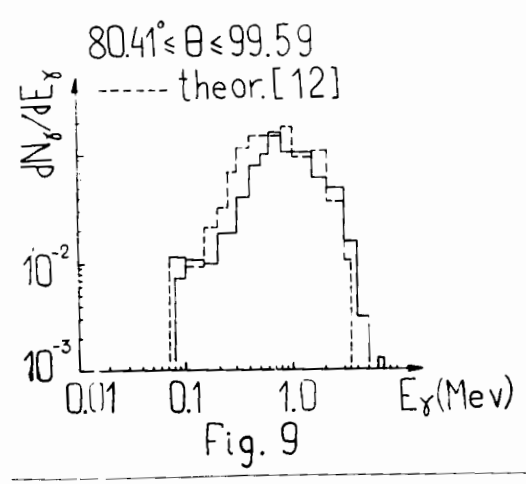
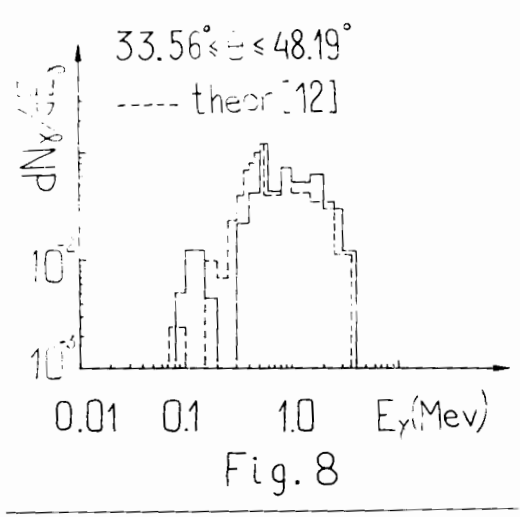
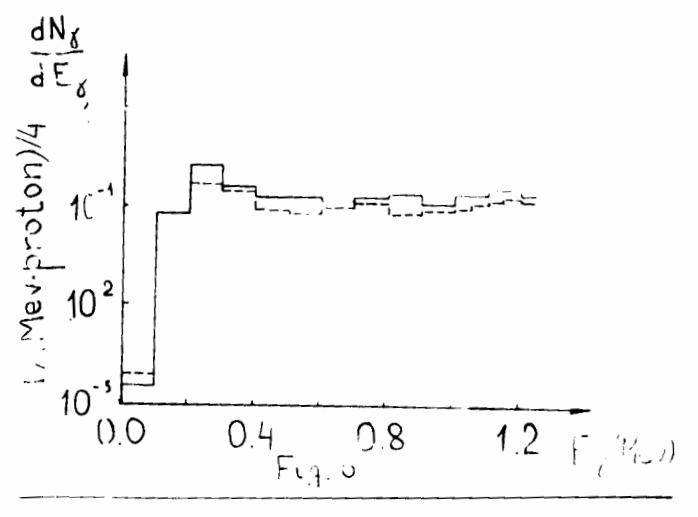
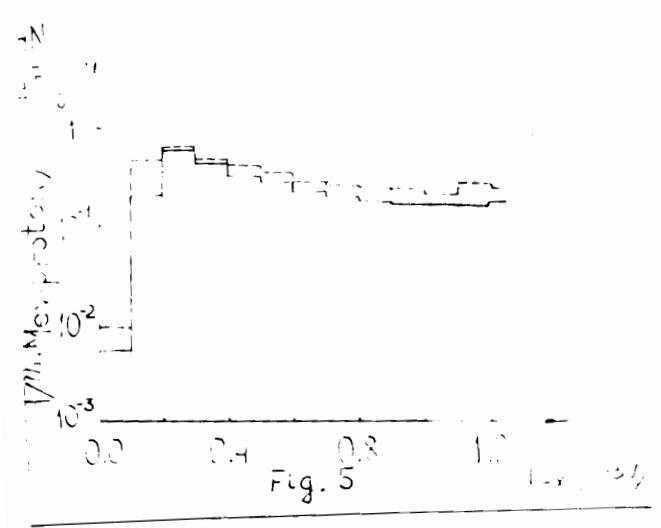
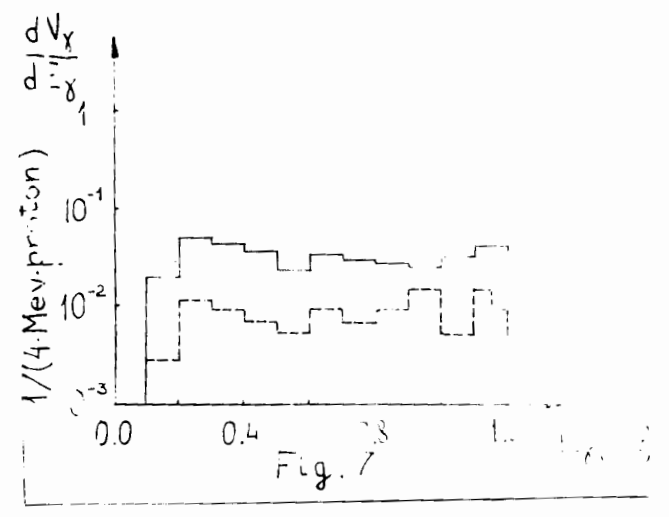
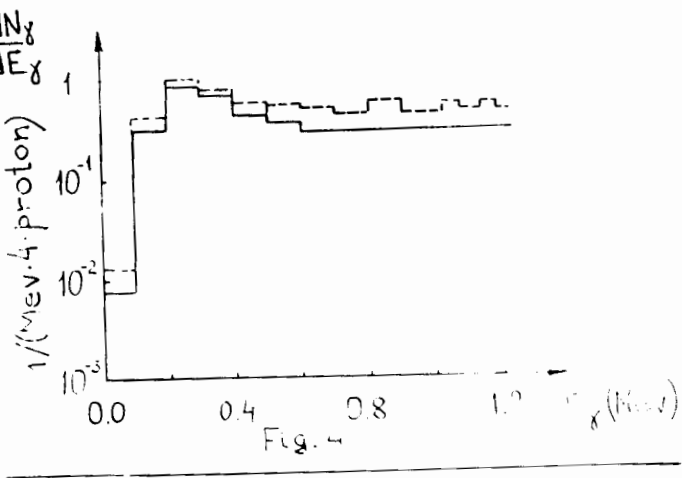
#### Литература

1. Барашенков В.С., Тонеев В.Д. Взаимодействия высокоэнергетических частиц и ядер с ядрами. М., "Атомиздат", 1972.
2. Гайтлер Г. Квантовая теория излучения. М., <sup>ИЛ</sup> 1956.
3. Барашенков В.С. ЭЧАЯ, 9, с.871.
4. Золотухин В.Г. и др. Поле излучения точечных источников  $\gamma$ -квантов. "Атомиздат", М., 1974.
5. Ермаков С.М., Михайлов Г.А. Курс статистического моделирования. "Наука", М., 1978.

6. Martin L.D. Nucleonic, 1964, 6, с.14
7. Соболевский Н.М. ОИЯИ, Б1-2-5458, Дубна, 1970.
8. Абагян Л.П. и др. Групповые константы для расчета реакторов и защиты. "Энергоиздат", М., 1981.
9. Сторм Э., Израэль Г. Фотонные сечения от 0,01 до 100 МэВ для элементов 1-100. "Атомиздат", М., 1965.
10. Ильинов А.С., Оганесян Ю.Ц., Черепанов Е.А. ОИЯИ, Р4-80-356, Дубна, 1980.
11. Carson F. Journ. of phys. and chem. ref. data, 1975, 4, p.471.
12. Foolwood R.R., et al. LA-4789-UC, Los-Alamos, 1972.

A handwritten signature in black ink, consisting of a series of fluid, connected strokes. The signature is written in a cursive style and is positioned below the list of references.





## SUBROUTINE LOFNDG

SIMULATION OF THE CHARACTERISTICS OF THE PHOTONS EMITTED  
 FROM THE EXCITED RESIDUAL NUCLEI.  
 AN INVERSE FUNCTION METHOD IS USED.  
 WEDDLE(G,A,B,6) RETURNS THE INTEGRAL BETWEEN THE LIMITS  
 A AND B OF THE FUNCTION G

COMMON/WRPR/WP(9)/BLOR7/WQ(9)/BLOR3/EX,A,Z

COMMON/IDENG/IDG

COMMON/CDG/LDG

COMMON/SOR/F(10)

DIMENSION X(10)

EXTERNAL G

IDG=1 LDG=1

1 WQ(1)=WP(1) SWQ(2)=WP(2) SWQ(3)=WP(3)

ST=EX/10.

DO200 J=1,10

X(J)=J\*ST

50 CONTINUE

F(1)=WEDDLE(G,0.,X(1),6)

DO100 I=2,10

F(I)=F(I-1)+WEDDLE(G,X(I-1),X(I),6)

100 CONTINUE

DO200 K=1,10

200 F(K)=F(K)/F(10)

RN=RNDM(-1)

EN=PINC(RN,X,10)

WQ(7)=EN

CALL LOFNTG

EX=EX-EN

IF(EX.GT.0.1)GOTO1

RETURN (EN)

C  
C  
C

FUNCTION WEDDLE(G,A,B,N)

NUMERICAL INTEGRATION

INTEGER P

P=N/6 \$X=A \$H=(B-A)/FLOAT(N)

S1=1. \$S2=1. \$S3=0.

S4=0. \$S5=1. \$S6=0.

DO10 I=1,P

S1=S1+G(X+H) \$S2=S2+G(X+2.\*H)

S3=S3+G(X+3.\*H) \$S4=S4+G(X+4.\*H)

S5=S5+G(X+5.\*H) \$S6=S6+G(X+6.\*H)

X=X+6.\*H

WEDDLE=0.3\*H\*(G(A)+5.\*S1+S2+6.\*S3+S4+5.\*S5+2.\*S6-G(B))

RETURN SEND

10



## FUNCTION G(E)

ENERGY DISTRIBUTION OF GAMMA QUANTA EMITTED FROM  
THE NUCLEUS (A,Z) WITH EXCITATION ENERGY E.

```
C  
C  
C  
COMMON/BL1003/EX,A,Z  
B=0.1 S2=40.3/(A**0.2) SGAR=0.3*ER  
UR=SQRT(B*A*(EX-E))  
AG=(E**4)*EXP(2.*UR)  
AK=E**2-ER**2 SBK=GAR*E  
BQ=AK**2+BK**2  
G=AG/3Q  
RETURN SEND
```

```
FUNCTION PING(RN,P,H)
COMMON/SOR/F(10)
DIMENSION P(M)
DO25 J=1,10
IF(RN-F(J)) 30,20,20
20 CONTINUE
J=10
30 N=J
IF(N.EQ.1)GOTO25
P1=P(N-1) SF1=F(N-1)
P2=P(N) SF2=F(N)
GOTO27
25 P1=0. SF1=0.
P2=P(1) SF2=F(1)
27 PING=P1+(RN-F1)*(P2-P1)/(F2-F1)
RETURN SEND
```

## SUBROUTINE LOENTG

LOW ENERGY TRANSPORT OF GAMMA QUANTA  
CALCULATION IS PERFORMED FOR U238

COMMON/BLORG1/EGRG(16)/BLORG3/OLNG  
\*/GOOUTG/GOT1/BLOR6/IPRG/BLOR7/WQ(9)  
\*/BLOR8/SUG(26),SUG1(26)/BLOR9/SPG(26,15),SPG1(26,15)  
COMMON/LX/SPG2(26,15),SUG2(26)  
COMMON/BLOR10/NGR(1800),WG(3,1800),IPR1(1800)  
COMMON/BLANGL/ANGL(4)  
COMMON/BLOR12/NGRUP  
COMMON/CDG/LDG  
COMMON/ES/IPR2(1800)  
COMMON/IDENG/IDG  
COMMON/HN/WQS,WQS1  
COMMON/VC/IBP  
COMMON/CROSE/SGT1  
COMMON/TIL/ISF/NPO/EG(26)  
DIMENSION SPM(26,15)  
DIMENSION WPG(9,10)

DO220 M=1,9  
DO220 N=1,10  
223 WPG(M,N)=0.  
KI=0, KG=0  
IF(LDG-1)17,18,18  
17 IG=1  
MI=IBP  
IF(MI)100,100,18  
18 CALL JNFORG  
19 IPRG=1  
MN=1  
IF(IDG)55,55,56  
55 NGRUP=NGR(IG)  
KE=KA(IG)  
IF(IPR1(IG))35,35,33  
35 IF(IPR2(IG))37,37,38  
37 DO34J=1,15  
SPM(NGRUP,J)=SPG(NGRUP,J)  
SPG(NGRUP,J)=SPG1(NGRUP,J)  
34 CONTINUE  
SUM=SUG(NGRUP)  
SUG(NGRUP)=SUG1(NGRUP)  
GOTO37  
38 DO39 J=1,15  
SPM(NGRUP,J)=SPG(NGRUP,J)  
SPG(NGRUP,J)=SPG2(NGRUP,J)  
39 CONTINUE  
SUM=SUG(NGRUP)  
SUG(NGRUP)=SUG2(NGRUP)  
37 NG=SUG(NGRUP)  
RG=SUG(NGRUP)-NG  
IF(RNDM(-1)-RG)20,23,23  
20 KG=NG+1  
GOTO25  
23 KG=NG  
IF(KG-1)22,24,28  
22 GOTO87  
24 WQ(1)=WG(1,IG)  
WQ(2)=WG(2,IG)  
WQ(3)=WG(3,IG)

DEFINITION OF THE GAMMA QUANTA ENERGY

CALL GAEN(AP)  
WQ(7)=AP

SIMULATION OF AN ISOTROPIC ANGULAR DISTRIBUTION

56 CALL TSANGL  
WQ(4)=ANGL(1)  
WQ(5)=ANGL(2)  
WQ(6)=ANGL(3)

SPLITTING OF GAMMA QUANTA WITH THE ENERGY  
IN THE INTERVAL (0.08-0.2)MEV IS USED

```

IF(WQ(7).LT.0.08.OR.WQ(7).GT.0.2)GOTO200
KI=1 $WQ(8)=0.1 $X1=WQ(1) $X2=WQ(2) $X3=WQ(3) $ENK=WQ(7)
GOTO212
200 NP=1 $WQ(8)=1. $GOTO201
23 CONTINUE

```

```

C
C BLOCK OF GAMMA QUANTA STORE INTO MEMORY
DO4 L=1,10
IF(WPG(7,L))43,43,44
43 MK=L $GOTO44
44 CONTINUE
PRINT42
42 FORMAT(4X,33HLOW ENERGY GAMMAS MASSIV EXCEEDED)
GOTO24
43 MN=MK+(KG-2)
DO16 J=MK,MN
CALL TSANGL $CALL GAEN(AP)
WPG(1,J)=WG(1,IG)
WPG(2,J)=WG(2,IG)
WPG(3,J)=WG(3,IG)
WPG(4,J)=ANGL(1)
WPG(5,J)=ANGL(2)
WPG(6,J)=ANGL(3)
WPG(7,J)=AP
16 CONTINUE
END BLOC OF GAMMA QUANTA STORE

```

```

C
C GOT024
202 NP=10
201 CONTINUE
DO10 J=1,NP
77 IF(WQ(7)-OLNG)103,103,1
103 IF(NP-1)88,88,1000
1 DO2 J=2,26
3 IT(WQ(7)-EG(J))3,2,2
2 NGRUP1=J-1 $GOTO4
CONTINUE
NGRUP1=25

```

```

C
C LINEAR OR EXPONENTIAL INTERPOLATION OF
C ABSORPTION AND PAIR FORMATION CROSS SECTIONS
4 CALL INTESE(NGRUP1,SGLNA1,SGLP1)
WQS=WQ(7)/0.511
45 IF(NGRUP1-8)45,45,46
45 SGLNS=FG1(WQS)
46 GOTO49
46 SGLNS=FG(WQS)
48 SGT=SGLNS+SGLNA1
SGT1=SGT+SGLP1

```

```

C
C SIMULATION OF FREE PATH

```

```

BL=-ALOG(RNDM(-1))
PROBEG=BL/SGT1

```

```

C
C CALCULATION OF PHOTON COORDINATES AT THE END OF FREE PATH

```

```

CALL SUB416(PROBEG,1)
CALL GISOUT1

```

```

C
C CHECK OF WHETHER PHOTON IS INSIDE MATTER(OUT1<0)
C OR OUTSIDE (OUT1 > 0)

```

```

C
C CALL SUB6G(WQ(1),WQ(2),WQ(3))
IF(GOT1)5,5,6
6 CALL GISOUT
IF(KI.EQ.1)GOTO304
IF(KS.EQ.1)GOTO305
GOTO88
304 WQ(1)=X1 $WQ(2)=X2 $WQ(3)=X3 $WQ(8)=0.1
WQ(7)=ENK
505 CALL TSANGL
WQ(4)=ANGL(1) $WQ(5)=ANGL(2) $WQ(6)=ANGL(3)
GOTO170F
305 WQ(1)=X11 $WQ(2)=X21 $WQ(3)=X31 $WQ(8)=0.1
WQ(7)=ENK1

```

```

GOTO575
5  B=RNDM(-1)*SGT1
   IF(B-SGLNS)9,10,10
9  IPRG=1 $CALL GISOUT
C
C
C
C
C
C
CALCULATION PHOTON ENERGY AFTER SCATTERING
CALL ENAFS
CALCULATION PHOTON DIRECTION OF FLY AFTER SCATTERING
CALL NEANGL
WQ(4)=ANGL(1)
WQ(5)=ANGL(2)
WQ(6)=ANGL(3)
IPRG=3
IF(KI.EQ.1)GOTO77
IF(KS.EQ.1)GOTO77
X11=WQ(1) $X21=WQ(2) $X31=WQ(3) $ENK1=WQ(7) $KS=1 $WQ(8)=0.1
GOTO222
17 IF(B-SGT)11,12,12
11 CALL GISOUT
   IF(KI.EQ.1)GOTO204
   IF(KS.EQ.1)GOTO205
GOTO88
204 WQ(1)=X1 $WQ(2)=X2 $WQ(3)=X3 $WQ(7)=ENK $CALL ISANGL
    WQ(4)=ANGL(1) $WQ(5)=ANGL(2) $WQ(6)=ANGL(3)
GOTO1000
205 WQ(1)=X11 $WQ(2)=X21 $WQ(3)=X31 $WQ(7)=ENK1 $CALL ISANGL
    WQ(4)=ANGL(1) $WQ(5)=ANGL(2) $WQ(6)=ANGL(3)
GOTO1000
12 MN=MN+1 $CALL ISANGL
   IF(WQ(7).LT.0.08.OR.WQ(7).GT.0.2)GOTO77
   WPG(1,MN)=WQ(1) $WPG(2,MN)=WQ(2)
   WPG(3,MN)=WQ(3) $WPG(4,MN)=ANGL(1)
   WPG(5,MN)=ANGL(2) $WPG(6,MN)=ANGL(3) $WPG(7,MN)=0.511
   WQ(4)=-WPG(4,MN) $WQ(5)=-WPG(5,MN) $WQ(6)=-WPG(5,MN)
   WQ(7)=0.511 $GOTO77
C
C
C
C
C
C
BLOCK OF CHOOSING NEW PHOTON FROM MEMMOORY
CONTINUE
89 IF(WPG(7,1))89,89,90
90 DO91 J=1,10
91 IF(WPG(7,J))92,92,91
92 JN=J-1
   GOTO93
91 CONTINUE
93 CONTINUE
DO94 J=1,9
WQ(J)=WPG(J,JN)
94 WPG(J,JN)=0.
END BLOCK OF CHOOSING NEW PHOTON
C
C
C
C
C
C
IF(WQ(7).LT.0.08.OR.WQ(7).GT.0.2)GOTO207
WQ(8)=0.1 $X1=WQ(1) $X2=WQ(2) $X3=WQ(3) $ENK=WQ(7) $KI=1
GOTO222
207 WQ(8)=1. $NP=1
    KI=0 $KS=0
    GOTO201
83 IF((IG-1)87,100,100
87 IF(IPR1(IG).LE.0.AND.IPR2(IG).LE.0)GOTO101
DO15 M=1,15
SPG(NGRUP,M)=SPM(NGRUP,M)
15 CONTINUE
SUG(NGRUP)=SUM
101 IG=IG+1
   IF(IG.GT.MI)GOTO100
   KI=0 $KS=0 $GOTO19
100 RETURN $END

```

```
SUBROUTINE ISANGL  
COMMON/BLANGL/ANGL(4)  
ANGL(1)=1.-2.*RNDM(-1)  
ANGL(4)=SQRT(1.-ANGL(1)**2)  
F=2.*3.1415926536*RNDM(-1)  
ANGL(2)=SIN(F) $ANGL(3)=COS(F)  
RETURN $END
```

```
SUBROUTINE GAEN(AP)
COMMON/BLOR8/SUG(26),SUG1(26)/BLOR9/SPG(26,15),SPG1(26,15)
COMMON/BLOR11/AEG(15)
COMMON/BLOR12/NGRUP
COMMON/BLOR61/EGRG(16)
DIMENSION AG(15)
DO2 J=1,15
2 AG(J)=SPG(NGRUP,J)/SUG(NGRUP)
DO4 J=2,15
4 AG(J)=AG(J-1)+AG(J)
B=RNDM(-1)
DO6 J=1,15
IF(B-AG(J))8,6,6
8 IG=J GOTO10
6 CONTINUE
IG=15
10 AP=EGRG(IG+1)+RNDM(-1)*(EGRG(IG)-EGRG(IG+1))
RETURN END
```

```
SUBROUTINE INTESE(NGRUP1,SGLNA1,SGLP1)
COMMON/BLORG1/EGRG(16)/BLORG2/SGLNA(26)/BLORG41/SGLP(26)
COMMON/BLOR7/WQ(9)
COMMON/NPO/EG(26)
IF=0 $IR1=0
IF(WQ(7).GT.0.1.AND.WQ(7).LE.0.1156)GOTO50
IF(WQ(7).GT.0.1156.AND.WQ(7).LT.0.15)GOTO51
50 B=SGLNA(NGRUP1+1)/SGLNA(NGRUP1) $GOTO99
B=0.6603 $EQ=EG(NGRUP1+1) $EG(NGRUP1+1)=0.1156
IR=1 $GOTO39
51 B=0.5152 $SG=SGLNA(NGRUP1) $SGLNA(NGRUP1)=86.02
EQ=EG(NGRUP1) $EG(NGRUP1)=0.1156
IR1=1
90 B1=EG(NGRUP1+1)/EG(NGRUP1)
B2=WQ(7)/EG(NGRUP1)
C=(ALOG(B)/ALOG(B1))*ALOG(B2)+ALOG(SGLNA(NGRUP1))
SGLNA1=EXP(C)
IF(NGRUP1-1)101,101,101
100 D=SGLP(NGRUP1+1)/SGLP(NGRUP1)
D1=(ALOG(D)/ALOG(B1))*ALOG(B2)+ALOG(SGLP(NGRUP1))
SGLP1=EXP(D1)
RETURN
101 SGLP1=0.
IF(IR.EQ.1)GOTO103
IF(IR1.EQ.1)GOTO102
RETURN
102 SGLNA(NGRUP1)=SG $EG(NGRUP1)=EQ $GOTO106
103 EG(NGRUP1+1)=EQ
106 RETURN $END
```



C  
C  
C

FUNCTION FG(GT)

CLEIN-NISHINA FORMULA

```
COMMON/BLOK2/ATG(3),ZTG(3)/BLOK3/RO(3),DI(3),R2(3)
COMM(N/HN/WQS,WQS1
GT=WQS
RE2=7.84281489E-26
AT=2.*3.1415926536*RE2
AM=(1.+GT)/((1.+2.*GT)**2)
AN=2./(GT**2)
AL=((GT**2-2.*GT-2.)/(2.*GT**3))*ALOG(1.+2.*GT)
AQ=AT*(AM+AN+AL)
FG=AQ*3.6025E+24*RO(1)*ZTG(1)/ATG(1)
RETURN
END
```

C  
C  
C

EXPERIMENTAL FIT OF COMPTON CROSS SECTION AT LOW ENERGY

FUNCTION FG1(RQ)

COMMON/BLOK2/ATG(3),ZTG(3)/BLOK3/RO(3),DI(3),P2(3)

COMMON/HN/WQS,WQS1

RQ=WQS \*PT=8./3.\*7.8428148E-26

BM=1./((1.+2.\*RQ)\*\*2)

SL=1.+2.\*RQ+6./5.\*(RQ\*\*2)-1./2.\*(RQ\*\*3)+2./7.\*(RQ\*\*4)-  
\*8./105.\*(RQ\*\*6)+4./105.\*(RQ\*\*7)

FG1=PT\*BM\*SL\*3.6025E+24\*RO(1)\*ZTG(1)/ATG(1)

RETURN SEND

```
SUBROUTINE SUB41G(PR,I)
COMMON/BLOK7/WQ(9)/BLOK14/XG,YG,ZG
SN=SQRT(1.-WQ(4)**2)
IF(I)1,1,2
1 XG=WQ(1)+PR*SN*WQ(6)
  YG=WQ(2)+PR*SN*WQ(5)
  ZG=WQ(3)+PR*WQ(4)
  RETURN
2 WQ(1)=WQ(1)+PR*SN*WQ(6)
  WQ(2)=WQ(2)+PR*SN*WQ(5)
  WQ(3)=WQ(3)+PR*WQ(4)
  RETURN END
```

```

1  SUBROUTINE SUB6G(X,Y,Z)
2  IF(Z)1,1,2
3  GOT1=1. $RETURN
4  IF(GH(2)-Z)3,3,4
5  GOT1=1. $RETURN
6  IF(GH(1)-SQRT(X**2+Y**2))5,5,6
   GOT1=1. $RETURN
   GOT1=-1.
   RETURN $END

```

```

SUBROUTINE GISOUT1
COMMON/HISTOG/DIG01(25),DIG02(25),DIG03(25),DIG04(25),
*DIG05(25),DIG06(25),DIG07(25),DIG08(25),DIG0(25),DIGS(25)
COMMON/BLOR7/WQ(9)/CROSE/SGT1
COMMON/BLOK1/GH(5)
COMMON/TIL/ISF/IDENG/IDG
REAL L1,L2,L
C=WQ(1)*WQ(6)+WQ(2)*WQ(5)
D=SQR(1.-WQ(4)**2)
IF(D.EQ.0.)GOTO20
DELTA=C**2-(WQ(1)**2+WQ(2)**2-GH(1)**2)
B=SQR(DELTA)
L1=(-C+B)/D
L2=-(C+B)/D
IF(L1.GT.L2)GOTO10
L=L2 $GOTO11
10 L=L1
11 Z=WQ(3)+L*WQ(4)
IF(Z.GE.0..AND.Z.LE.30.)GOTO15
IF(Z.LT.0.)GOTO16
IF(Z.GT.30.)GOTO17
16 L=-WQ(3)/WQ(4) $GOTO15
17 L=(30.-WQ(3))/WQ(4)
15 WE=WQ(8)*EXP(-SGT1*L)
IF(WQ(4).GT.0.6666.AND.WQ(4).LE.0.8333)GOTO12
IF(ABS(WQ(4)).LE.0.16665)GOTO14
RETURN
12 CALL GIST(WQ(7),DIG01,25,WE)
RETURN
14 CALL GIST(WQ(7),DIG02,25,WE)
20 RETURN $END

```

```
SUBROUTINE GIST(X,RX,N,W)
COMMON/NPO/EG(26)
DIMENSION RX(N)
DO3 M=2,26
IF(X-EG(M))2,3,3
2 L=M-1 $GOTO4
3 CONTINUE
L=25
4 RX(L)=RX(L)+W
RETURN $END
```

```
SUBROUTINE ENAFS  
COMMON/DL OR7/WQ(9)  
COMMON/HN/WQS,WQS1  
AR=RNDM(-1)  
WQ(7)=WQS  
SG=WQ(7)/(1.+0.5625*WQ(7))  
BT=1.+SG*AR+(2.*WQ(7)-SG)*AR**3  
IF(WQ(7).GT.4.)GOTO10  
WQ(7)=WQ(7)/BT $GOTO12  
10 WQ(7)=(WQ(7)/BT)+0.5*(WQ(7)-4.)*(1.-AR)**2*AR**2  
12 WQS1=WQ(7)  
WQ(7)=WQ(7)*0.511  
RETURN $END
```

```
SUBROUTINE NEANGL
COMMON/BLOR7/WQ(9)/BLANGL/ANGL(4)/HN/WQS,WQS1
REAL MUY,MUY1
RA=2.*3.1415926536*RNDM(-1)
SI=SIN(RA)
COT=COS(RA)
MUY=1.+1./WQS-1./WQS1
AS=SQRT(1.-WQ(4)**2)
MUY1=SQRT(1.-MUY**2)
BG=WQ(4)*MUY+AS*MUY1*COT
SE=SQRT(1.-BG**2)
T=MUY1*SI
S=MUY*AS-WQ(4)*MUY1*COT
ANGL(1)=BG
ANGL(2)=(S*WQ(5)+T*WQ(6))/SE
ANGL(3)=(S*WQ(6)-T*WQ(5))/SE
ANGL(4)=SE
RETURN
END
```



## SUBROUTINE INFORG

C  
C  
C  
C

DATA FOR U-238

```

COMMON/BLORG1/EGRG(16)/BLORG2/SGLNA(26)/BLORG41/SGLP(26)
*/BLORG3/OLNG
*/BLORG8/SUG(26),SUG1(26)/BLORG9/SPG(26,15),SPG1(26,15)
COMMON/LX/SPG2(26,15),SUG2(26)
*/BLOR11/AEG(15)
COMMON/NPO/EG(26)
DATA(EGRG=11.,9.,7.,5.5,4.5,3.5,2.5,1.75,1.22,
*0.75,0.35,0.15,0.08,0.04,0.02,0.01)
DATA(AEG=10.,8.,6.25,5.,4.,3.,2.125,1.5,1.,0.55,
*0.25,0.115,0.06,0.03,0.015)
DATA(EG=9.,1.,0.015,0.02,0.03,0.04,0.05,0.06,0.08,0.1,0.15,0.2,
*0.3,0.4,0.5,0.6,0.8,1.,1.5,2.,3.,4.,5.,6.,8.,10.,15.)
DATA(SGLNA=3366.,1122.,1286.56,729.3,342.21,188.87,116.314,
*53.482,29.172,44.319,21.131,7.3865,3.7026,2.1879,1.4343,
*0.7667,0.4381,0.2319,0.1414,0.0761,0.0511,0.0378,0.0297,
*0.0204,0.0155,0.0097)
DATA(SGLP=17(0.),0.0359,0.1122,0.2431,0.346,0.4301,0.4974,
*0.6096,0.712,0.9275)
DATA(SPG=26(0.),26(0.),0.002,25(0.),0.012,0.001,24(0.),
*0.061,0.010,24(0.),0.149,0.120,0.181,23(0.),0.219,0.272,
*0.082,0.087,22(0.),0.214,0.317,0.186,0.047,0.002,21(0.),
*0.277,0.447,0.413,0.251,0.102,21(0.),0.311,0.416,0.607,
*0.548,0.164,21(0.),0.222,0.176,0.369,0.444,0.093,21(0.),
*0.143,0.166,0.128,0.179,0.154,0.196,0.066,0.004,18(0.),
*0.144,0.077,0.124,0.161,0.213,0.610,0.501,0.272,0.122,
*17(0.),0.082,0.062,0.100,0.117,0.007,21(0.),0.030,0.022,
*0.040,0.050,0.003,21(0.))
DATA(SUG=1.866,1.986,2.230,1.804,0.744,0.806,0.567,
*0.276,0.122,17(0.))
DATA(SPG1=73(0.),26(0.003),26(0.131),26(0.288),26(0.668),
*26(0.517),26(0.578),26(0.840),26(0.294),26(0.688),26(0.208),
*26(0.032),26(0.048))
DATA(SUG1=26(4.288))
DATA(SPG2=26(0.),25(0.001),26(0.013),26(0.039),26(0.076),
*26(0.291),26(0.518),26(0.775),26(0.174),26(0.255),26(0.126),
*26(0.414),26(0.236),26(0.118),26(0.059))
DATA(SUG2=26(3.096))
DATA(OLNG=0.01)
RETURN
END

```

### Summary

The program for Monte-Carlo simulation of the processes accompanying the propagation of  $\gamma$ -quanta within the energy range of 0.01 - 11 MeV in matter is developed. The program is included into the program for calculation of the propagation of high-energy particles in media and may be used for calculation of the transmissions of  $\gamma$ -quanta produced from  $(n,\gamma)$ ,  $(n,n')$ ,  $(n,f)$  reactions, and emitted by the residual excited nuclei of the matter. The obtained results are in a good agreement with the experimental data and with the calculated results of the other authors.