



**Universidade Estadual de Campinas**  
**Instituto de Física Gleb Wataghin**  
**Instrumentação para o Ensino F 809**  
**Relatório Final**

**Thiago Carluccio Ra: 017450**

Prof. Responsável: Dr. José L. Lunazzi  
Orientador: Prof. Dr. José Rubens Maiorino

**Simulação da Detecção de Radiação Gama através do  
Método de Monte Carlo**

## 1. Introdução

O método Monte Carlo é um método numérico de resolver problemas físicos e matemáticos através da amostragem aleatória. A invenção deste método é geralmente atribuída a Fermi, Von Neumann, Ulam, Metropolis e Richtmyer. O método só se tornou viável, como uma técnica numérica universal, com o advento dos computadores. A principal vantagem do método Monte Carlo é sua simplicidade. Aplicado a simulação do transporte de partículas num meio, o método não soluciona a equação de transporte, não é necessário nem mesmo conhecer tal equação, pois o método simula diretamente o transporte da partícula, utilizando uma grande quantidade de dados nucleares, como secções de choque dependendo da energia da partícula. A simulação consiste em seguir a “vida” de uma partícula (fóton), do momento de sua criação na fonte ou em alguma reação, até o momento de sua “morte”, por absorção ou fuga do sistema. Cada evento individual é simulado seqüencialmente e as distribuições de probabilidade que governam estes eventos são amostradas estatisticamente. O comportamento médio das partículas no sistema é inferido da média do comportamento das partículas simuladas [1]. Pretende-se simular o espectro de deposição de energia de raios gama em detectores de NaI utilizando este método.

O método de detectar radiação através de cintilações é um dos mais antigos. Inicialmente, a técnica que se utilizava era a visual, com o auxílio de uma ocular. Com o aparecimento da radioatividade artificial este método se tornou impraticável (devido às altas atividades envolvidas) e foi substituído pelos detectores à gás. Entretanto, com o desenvolvimento das válvulas fotomultiplicadoras, a detecção pela cintilação se destacou, sendo muito utilizada atualmente [2,3].

Os detectores cintiladores são bastante versáteis e de grande aplicação na Física moderna. Em sua forma original, auxiliou Rutherford na descoberta do núcleo atômico. Com o advento das fotomultiplicadoras, estes passaram a integrar os aparatos de importantes experimentos físicos. Tais experimentos incluem a descoberta do pósitron e dos mésons  $\mu$ , a espectroscopia gama, a tomografia por emissão de pósitron (PET) e o descobrimento de *bursts* de raios gama astronômicos [2].

Em particular, estamos interessados na espectroscopia gama. A emissão de raios gama é um mecanismo pelo qual a energia de excitação de um núcleo pode ser removida. Tais estados excitados podem acompanhar o decaimento de radioisótopos ou podem resultar de transmutações nucleares induzidas. Os raios gamas apresentam energias típicas que vão de alguns KeV até vários MeV [2]. Embora sejam conhecidos um grande número de mecanismos de interação dos raios gamas com a matéria, somente três são relevantes na medida da

radiação: absorção fotoelétrica, espalhamento Compton e produção de pares. Todos estes processos levam a uma parcial ou completa transferência de energia do fóton gama para o elétron. Isso resulta em uma mudança repentina na história do raio gama: ou ele desaparece ou ele é espalhado por ângulos significativos [3].

A absorção fotoelétrica é o efeito predominante para raios gama de baixa energia (algumas centenas de KeV) enquanto que a produção de pares predomina para gamas de alta energia (acima de 5-10 MeV). O efeito Compton é o processo mais provável na faixa de energia entre esses dois extremos. O número atômico do meio interagente influencia fortemente as probabilidades relativas dessas três interações. A mais impressionante dessas variações envolve a seção de choque para a absorção fotoelétrica, que varia aproximadamente com  $Z^{4,5}$  [3]. Sendo assim, é desejável que os detectores utilizados em espectroscopia gama incorporem elementos de alto número atômico.

## **1.1. Mecanismos de Interação da Radiação Gama com a Matéria**

### **1.1.1 Absorção Fotoelétrica**

Absorção fotoelétrica é uma interação na qual o fóton incidente desaparece. Tal fóton, de energia  $h\nu$ , interage com o átomo como um todo. Sua energia é transferida a um elétron, normalmente pertencente à camada mais interna do átomo. Para energias típicas de raios gamas, um elétron da camada K é arremessado com uma energia cinética  $E_e$ , dada por:

$$E_e = h\nu - E_b$$

onde  $E_b$  é a energia de ligação do elétron orbital (da ordem de 1-10 KeV). Conservação de momento requer que o átomo recue neste processo, mas essa energia de recuo é muito pequena e normalmente é desprezada.

O buraco que é criado na camada eletrônica, como resultado da emissão do fotoelétron, é rapidamente preenchido através de um rearranjo eletrônico. Neste processo, a energia de ligação é liberada na forma de raios X característicos ou de elétrons de Auger. Entretanto, os elétrons de Auger são de baixa energia e seu alcance é extremamente pequeno [Cullity, Knoll]. Já os raios X característicos viajam uma certa distância (tipicamente 1 mm) antes de serem absorvidos através de interações fotoelétricas com camadas eletrônicas mais externas dos átomos absorvedores.

Como a energia de ligação é muito menor que a energia do fóton gama, se nada escapa do detector, a soma das energias cinéticas dos fotoelétrons deve ser igual a energia do fóton gama incidente. Dessa forma, a absorção fotoelétrica é um processo ideal para a determinação da energia do raio gama original.

### 1.1.2. Espalhamento Compton

No efeito Compton, o fóton incidente pode interagir com qualquer um dos elétrons orbitais. Os elétrons são considerados livres pelo fato de ser a energia do fóton incidente extremamente elevada comparada com a energia do elétron ligado. O resultado do espalhamento Compton é um elétron recuado e um fóton gama espalhado (com uma frequência menor que a do fóton incidente). A energia  $E_\gamma$  do fóton incidente é dividida entre o elétron recuado e o fóton espalhado. Essa divisão da energia depende do ângulo de espalhamento  $\theta$ .

Impondo a conservação do momento e da energia-massa relativística, obtém-se a seguinte relação entre a energia  $E_\gamma$  do fóton antes da colisão e a energia  $E_{\gamma'}$  do fóton depois da colisão [5,3]:

$$\frac{1}{E_{\gamma'}} - \frac{1}{E_\gamma} = \frac{(1 - \cos \theta)}{m_e c^2}$$

onde  $m_e c^2$  é a chamada energia de repouso do elétron (511 KeV).

Um gama entra no cristal do detector e é espalhado por um elétron de maneira a deixar o detector. Então, a quantidade de energia detectada corresponde à energia cinética transferida ao elétron. A máxima energia do elétron,  $E_{\text{máx}}$ , resulta de uma colisão frontal com o gama, onde este é espalhado de um ângulo  $\theta = \pi$  (backscattering):

$$E_{\text{máx}} = E_\gamma - E_{\gamma'} = \frac{2E_\gamma^2}{2E_\gamma + m_e c^2} \quad (1)$$

O degrau Compton representa esta energia máxima transferida ao elétron. O elétron também pode sofrer colisões não frontais e ter uma energia menor que a máxima depois da colisão. Esta é a origem da larga distribuição de eventos com energia menores que a do degrau Compton.

A situação contrária também pode acontecer: um gama é espalhado por um elétron externo ao detector (do material da blindagem, por exemplo) e ao entrar no detector, com uma energia menor que a do gama primário, ele é detectado através de efeito fotoelétrico. Somente entrarão no detector gamas cujo o ângulo de espalhamento for próximo de  $\pi$ . O fotopico obtido é chamado de pico retro-espalhamento (backscattering peak).

A conservação de energia requer que a energia do degrau Compton somada à energia do pico de retro-espalhamento seja igual à energia do gama original (fotopico).

### 1.1.3. Produção e Aniquilação de Pares

Este processo ocorre intensamente próximo aos prótons dos materiais absorvedores. Ele consiste no desaparecimento de um raio gama e na formação de um par elétron-pósitron em seu lugar. A energia mínima para tornar o processo possível é  $2m_e c^2$ . Se o gama incidente receber esta energia, o excesso será compartilhado como energia cinética pelo par.

Alguns isótopos radioativos, que possuem um excesso de prótons, reduzem seu número atômico através de decaimento  $\beta^+$ . Após perder sua energia cinética o pósitron se recombina com um elétron do meio gerando dois fótons de energia  $m_e c^2$ . O tempo necessário para o pósitron ser freado e se aniquilar é muito pequeno sendo praticamente instantânea a aniquilação do gama original e subsequente emissão de dois gamas de  $m_e c^2$ . Como estes dois gamas saem em direções opostas (conservação do momento linear), praticamente apenas um deles interage com o detector. O resultado desta interação é um fotopico de 511 KeV e um contínuo Compton [2].

Todos esses três processos atenuam um feixe de gamas incidentes, ora absorvendo ora espalhando alguns fótons. Isso é mostrado esquematicamente na figura 1a. O número de gamas removidos ( $-\Delta N$ ) do feixe incidente ( $N_0$ ) é proporcional ao número de elétrons e núcleos ao longo do caminho percorrido através d material reagente. O número de elétrons e núcleos é proporcional à densidade atômica ( $\rho$ ) do material . O caminho atravessado é ( $\Delta x$ ). Essa atenuação é representada por [2,4]

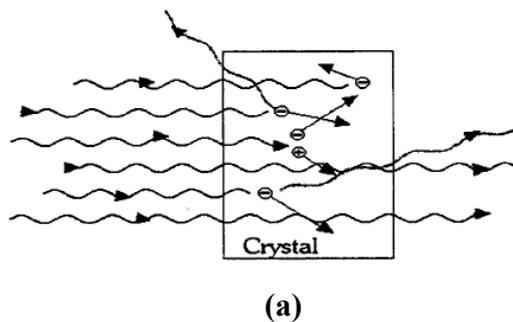
$$\Delta N = -N_0 (\rho \Delta x) \frac{\mu}{\rho}.$$

Assim,

$$N(x) = N_0 \exp\left(-(\rho x) \frac{\mu}{\rho}\right), \quad (2)$$

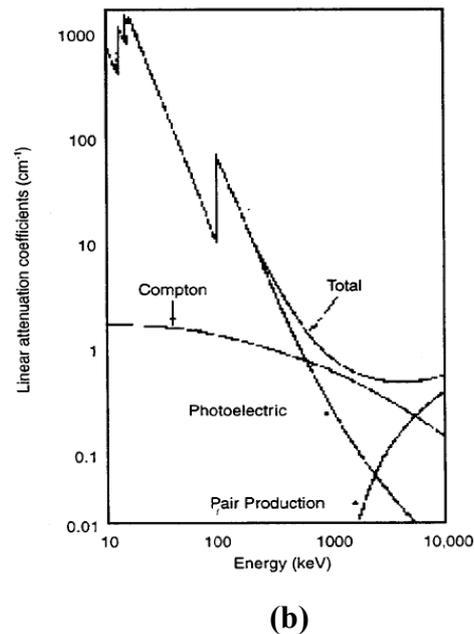
onde  $\mu/\rho$  é o chamado coeficiente de absorção de massa. As seções de choque de cada processo dependem da energia [3] logo, este coeficiente também (figura 1b).

Finalmente, através da medida de intensidades relativas dos fotopicos é possível medir o coeficiente de atenuação do material absorvedor.



**Fig. 1a: Esquema ilustrando a atenuação dos raios gama.**

**Fig. 1b: Coeficiente de atenuação linear ( $\mu$ ) do chumbo.**



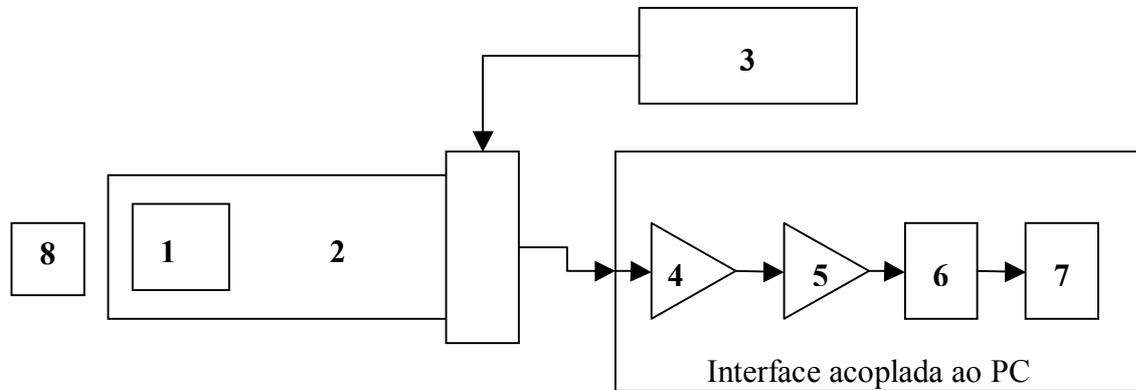
## 1.2 Aparato Experimental

O NaI é um cristal não condutor, o que implica em uma grande separação entre a banda de valência e de condução. Elétrons energéticos, produzidos por um gama, dissipam suas energias cinéticas na produção de par elétron-buraco. Estes pares são resultados da colisão de elétrons energéticos com elétrons do cristal. A recombinação destes pares pode resultar na emissão de luz por transições radioativas ou vibração na rede cristalina.[2]

A fração de energia depositada no cristal que é convertida em luz é denominada eficiência luminosa. A presença de Tálcio eleva de maneira significativa a emissão de luz pelo cristal [1]. Como resultado o cristal dopado converte cerca de 11% da energia do gama incidente em energia cinética em fótons de energia média de 3 eV [2].

Esta luminescência pode ser convertida em um pulso de corrente mensurável através da utilização de materiais fotossensíveis e amplificadores eletrônicos, que fornecerão uma resposta proporcional à energia depositada no cristal pela radiação gama.[1,3]

Segue um esquema de montagem do espectrômetro gama:



1: Cristal de NaI

2: Fotomultiplicadora

3: Fonte de alta tensão regulável

4: Pré-amplificador

5: Amplificador linear

6: Analisador de altura de pulso

7: Contador

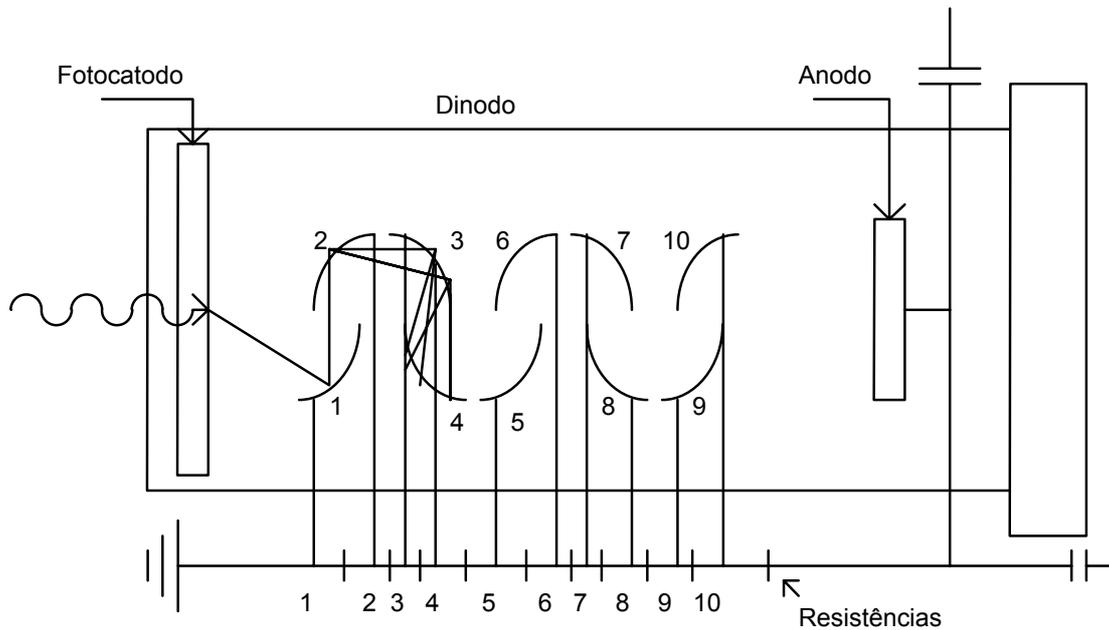
8: Fonte radioativa

**Fig. 2: Esquema simplificado de um contador de cintilação.**

O Iodeto de Sódio é utilizado em detectores devido à sua alta densidade ( $3,67 \text{ g/cm}^3$ ) e ao alto número atômico do Iodo, o que torna alta a seção de choque para a interação dos gamas com o cristal. Além disso, este material possui uma alta eficiência luminosa.

Esta luz é transmitida eficientemente para o fotocátodo da válvula fotomultiplicadora diretamente ou por reflexão. Essa luz causa a emissão de fotoelétrons do fotocátodo. Estes elétrons são, por sua vez, acelerados e focalizados nos dinodos da válvula, através do campo elétrico produzido por uma diferença de tensão aplicada à válvula fotomultiplicadora (Figura 3) [2,3]. Cada elétron arranca de 3 a 5 novos elétrons. Portanto, o ganho da corrente para uma fotomultiplicadora típica de 10 estágios é da ordem de  $10^6$ . Quando os elétrons chegam ao anodo, a corrente flui através de uma resistência e causa uma queda na tensão pelo equipamento, através de um capacitor é gerado um pulso que será posteriormente contado e discriminado. Este pulso negativo tem, em geral, uma amplitude de poucos milivolts até alguns volts.[apos]

O tempo de subida do pulso, isto é, o tempo para o pulso subir de 10 % a 90 % de sua máxima amplitude é determinado pela meia vida do estado excitado do cintilador que emite a luz e pelo tempo introduzido pela multiplicação dos elétrons.

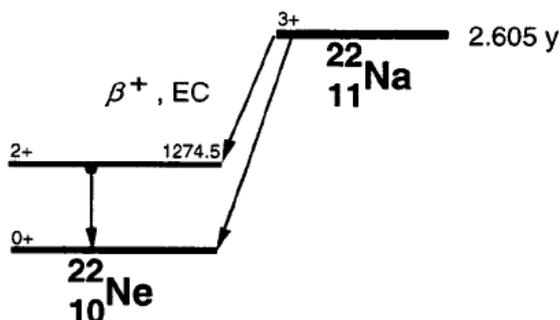


**Fig. 3: Válvula Fotomultiplicadora**

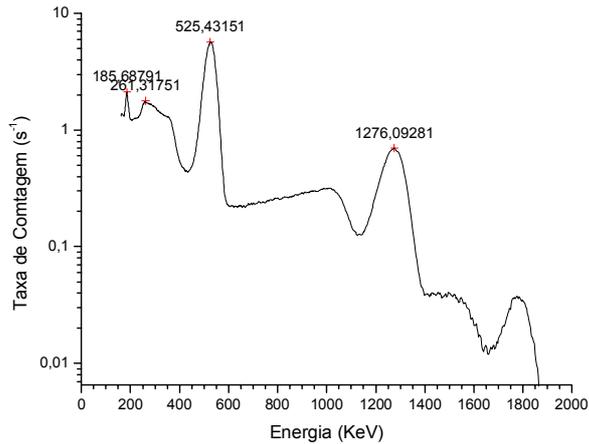
O laboratório de Física Moderna, utilizado na disciplina F 740 conta com um detector de NaI (TI) de 1,5 x 1,5 in, acoplado a um analisador multi-canal controlado digitalmente por um microcomputador.

Utilizando-se este equipamento, obteve-se o seguinte espectro para uma fonte cilíndrica de  $\text{Na}^{22}$ :

(a)



(b)



**Fig. 6a: Canais de decaimento do  $^{22}\text{Na}$ . Fig. 6b: Espectro do  $^{22}\text{Na}$**

O  $^{22}\text{Na}$  possui dois canais de decaimento e uma meia vida de 2,605 anos. Em um destes canais, o núcleo decai para um estado excitado do  $^{22}\text{Ne}$  por um decaimento  $\beta^+$ . Através da emissão de um gama de 1274,5 KeV, o estado fundamental do  $^{22}\text{Ne}$  é alcançado. Já no outro canal, o núcleo absorve um elétron da camada K decaindo diretamente para o estado fundamental do  $^{22}\text{Ne}$  (figura 6a). Esta fenomenologia pode ser observada no espectro do  $^{22}\text{Na}$  (figura 6b).

## 2. O Método de Monte Carlo

### 2.1 Introdução

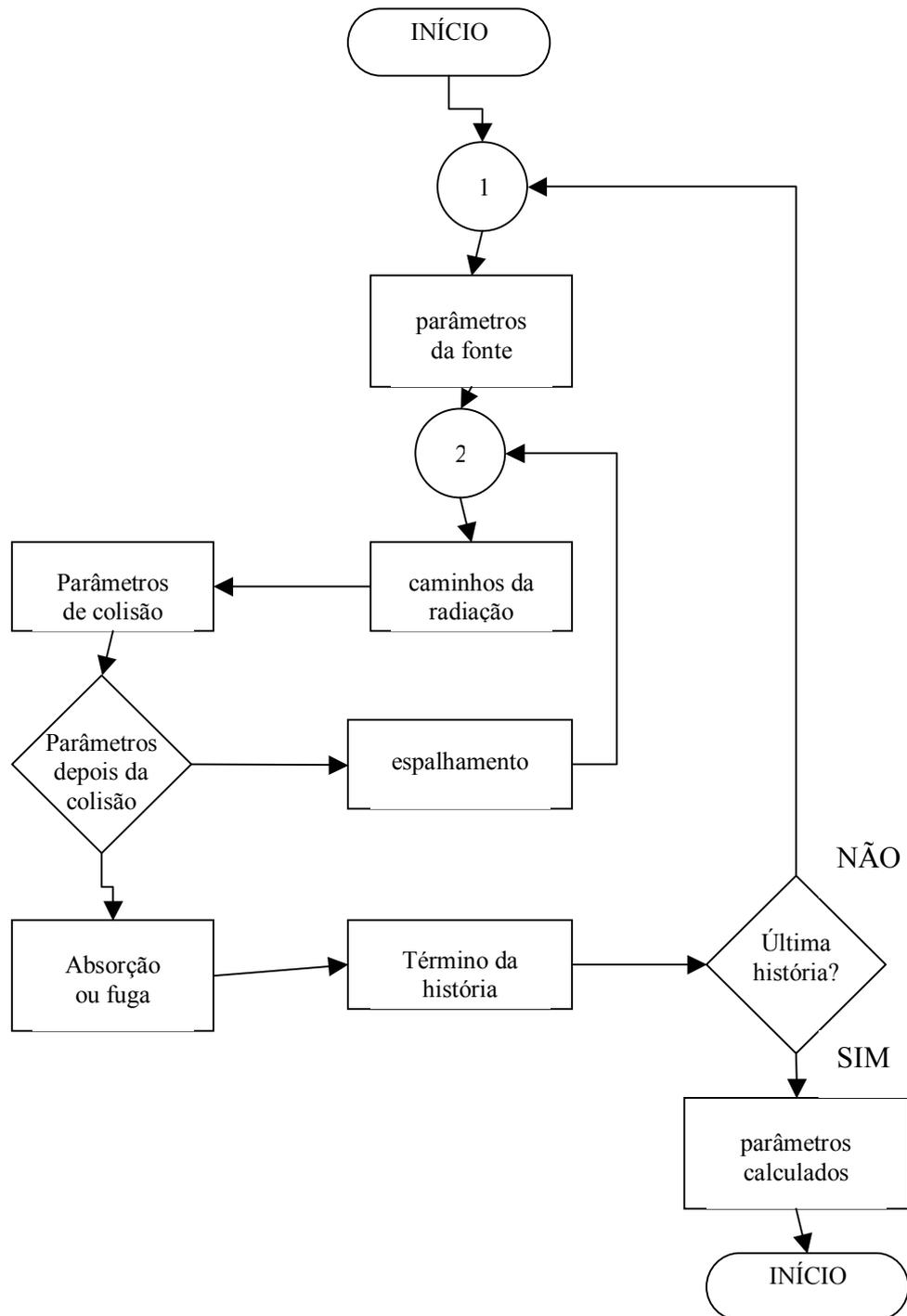
Os modernos computadores tornaram possível a simulação de complicados problemas matemáticos utilizando método Monte Carlo.

O método Monte Carlo é uma técnica de análise numérica que utiliza a amostragem estatística para solução de problemas físicos ou matemáticos. Um modelo estocástico é amostrado de distribuições de probabilidade apropriadas que representam o sistema sendo simulado e estimando-se as respostas requeridas por intermédio de médias estatísticas.[1]

A emissão e o transporte de radiação através de meios materiais pode ser considerados eventos probabilísticos. Na emissão de radiação deve-se conhecer a probabilidade da radiação ser emitida com um determinado ângulo e energia, e o processo de transporte envolve o conceito de secção de choque, que nada mais é que a probabilidade que a radiação interaja de uma determinada maneira.

Conhecendo-se estas probabilidades pode se simular desde o processo de “nascimento” da radiação, a trajetória percorrida pela mesma, até sua “morte” ou fuga do sistema.

O seguinte diagrama de blocos ilustra o processo de simulação Monte Carlo em processos de transporte [1]:



## 2.2 Métodos de amostragem

Para a solução de problemas pelo método Monte Carlo é necessário fazer amostragens de distribuições de probabilidade adequadas. Quantidades aleatórias distribuídas uniformemente podem ser utilizadas para simular eventos que obedecem a qualquer distribuição[32].

A relação entre números aleatórios com uma dada distribuição e números aleatórios uniformemente distribuídos entre (0,1), está baseada no seguinte teorema:

Teorema: Seja  $\eta$  uma quantidade aleatória de distribuição  $f(x)$ , então a distribuição da quantidade aleatória  $\xi$  dada por:  $\xi = \int_{-\infty}^{\eta} f(x)dx$ , é uniforme no intervalo (0,1). Assim, pode-se exprimir  $\eta$  como função apenas de  $\xi$  e de sua distribuição de probabilidade  $f(x)$ .

Por exemplo, a probabilidade da partícula sofrer colisão entre  $x$  e  $x+dx$  é dada por:

$f(x)dx = e^{-\Sigma_t x} \Sigma_t dx$ , onde  $\Sigma_t$  é a secção de choque macroscópica total do meio. Seja,

$$\xi = F(L) = \int_0^L e^{-\Sigma_t x} \Sigma_t dx = 1 - e^{-\Sigma_t L} \quad (3)$$

temos então:

$$L = -\frac{1}{\Sigma_t} \ln(1 - \xi) = F^{-1}(\xi), \quad (4)$$

como  $(1 - \xi)$  tem a mesma distribuição de  $\xi$ , obtém-se:

$$L = -\frac{1}{\Sigma_t} \ln(\xi) \quad (5)$$

Assim, o ponto em que a partícula interagiu será dado pela equação acima, a partir do “sorteio” da quantidade aleatória e uniforme entre (0,1)  $\xi$ .

Existem algumas outras técnicas de amostragem dentro do método Monte Carlo, como a Técnica de Rejeição e Amostragem por Importância, que não serão abordados nesse trabalho, mas que são muito utilizadas. O procedimento ilustrado nas equações acima é a essência do método.

Além de se calcular valores médios, espera-se que a variância destes valores seja pequena, existem várias técnicas de redução de variância que não serão discutidos neste trabalho, como Roleta Russa e fracionamento [1].

### 3. Idealizações e Aproximações para construção do Modelo de Simulação

Para construir o modelo de simulação, foi negligenciado o efeito da radiação de fundo, assim como da interação da radiação com materiais ao redor do detector, como blindagens e encapsulamento do cristal. Tal hipótese é equivalente à dizer que o detector e a fonte estão num vácuo infinito. As diferenças observadas devido a essa hipótese são mais relevante para baixas energias e pequeno número de contagem, com essas aproximações não será observado nos espectros simulados o efeito de retroespalhamento.

Assume-se também que a radiação gama é não polarizada e interage com o detector somente por efeito fotoelétrico, espalhamento Compton e produção de pares. Estas aproximações são suficientemente válidas na região do espectro trabalhada.

Considera-se também que os eletrons só perde energia por ionização e excitação, o que se mostrou razoavelmente válido em[41].

Para uma maior eficiência computacional se utiliza as seguintes reduções de variância:

1. O raio gama atinge o detector;
2. O raio gama interage dentro do detector;
3. O raio gama é obrigado a “sobreviver” através do efeito Compton.

Para cada condição acima é calculado os pesos apropriados utilizando princípios físicos e geométricos.

As secções de choque utilizadas foram retiradas da literatura, citadas em [1] e ajustadas por polinômios de grau 3.

O alargamento do espectro é assumido como sendo gaussiano e o desvio padrão utilizado é obtido empiricamente, sabendo-se a largura à meia altura è  $2,35\sigma$ [1].

#### **4. Atividades Realizadas durante o projeto**

Como parte da disciplina F 740 realizou-se a espectroscopia gama utilizando o detector que se deseja simular, estudando o funcionamento do mesmo. Muitos dos espectros que se pretende simular foram obtidos e estudados.

Estudou-se as seguintes secções de [1]:

- O Método Monte Carlo
  - Números Aleatórios
  - Métodos de Amostragem
  - Análise dos Resultados
- Cálculo de Eficiências e Levantamento do Espectro
  - Idealizações e Aproximações para a Construção do Modelo de Simulação
  - Considerações Gerais Sobre o Modelo de Cálculo
  - Determinação do Ângulo Sólido
  - Cálculo dos Cossenos Diretores Iniciais
  - Determinação dos Coeficientes de Atenuação
  - Determinação da Probabilidade de Interação
  - Determinação da Nova Energia após o Espalhamento
  - Levantamento do Espectro
- Descrição do Programa
- Problemas Amostra

Este estudo possibilitou um entendimento da rotina que será implementada. Estudou-se a linguagem FORTRAN para se entender o código fonte da simulação realizada em [1]. Este estudo baseou-se nos livros [8] e [9]. A implementação da rotina está em andamento. A rotina foi desenvolvida por Vieira [1] em 1982, em FORTRAN IV, num IBM /370/155. A rotina estava impressa com baixa qualidade, bastante comprometida pelo tempo, o que causou alguns erros quanto a nomes de variáveis. Foi necessário corrigir a sintaxe de algumas linhas do código para que a rotina fosse compatível com os compiladores modernos, como o g77 do

Linux. Foi implementada uma entrada de dados mais amigável, onde são perguntados ao usuário (na tela) os parâmetros da simulação, a entrada de dados de [1] era feita por cartão perfurado.

A compatibilização do código fonte com os compiladores atuais consumiu grande parte do tempo.

Os erros obtidos durante a etapa de depuração do código foram maiores que o previsto. Desde final do semestre passado até começo de dezembro corrigiram-se muitos destes erros. Na presente data o programa funciona razoavelmente bem. O programa roda bem rápido e alcança-se uma solução convergente com aproximadamente 2000 histórias por linha de emissão.

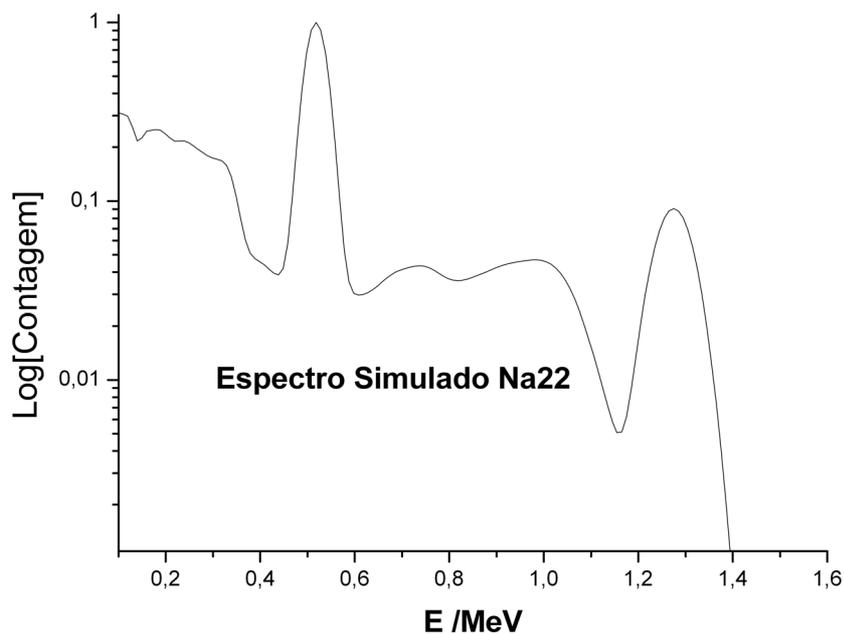
Foi utilizado o compilador PGF95 6.0 no Linux e o Lahey® Fortran 95 para Windows®. Em ambos é possível obter executáveis satisfatórios. Não garanto que seja possível utilizar outro compilador com o código fonte atual.

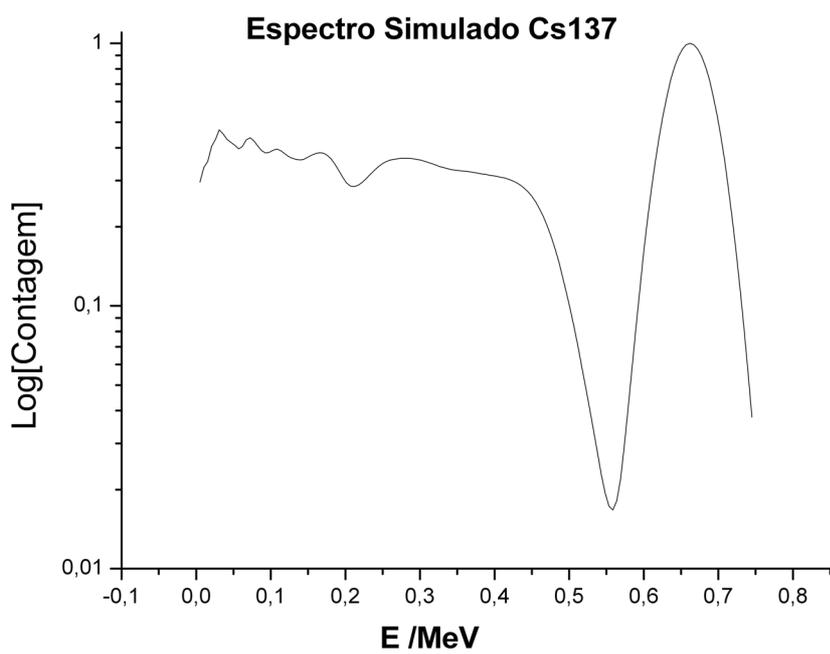
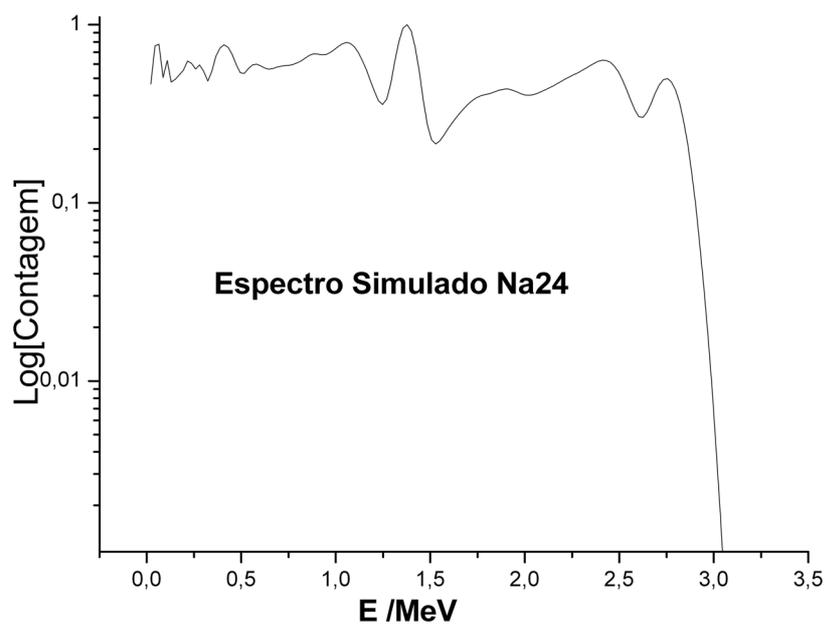
Foram necessárias **60 horas de programação**, cerca de 3 por semana, desde a prévia da apresentação deste trabalho no semestre passado até que o mesmo chegasse ao estado atual.

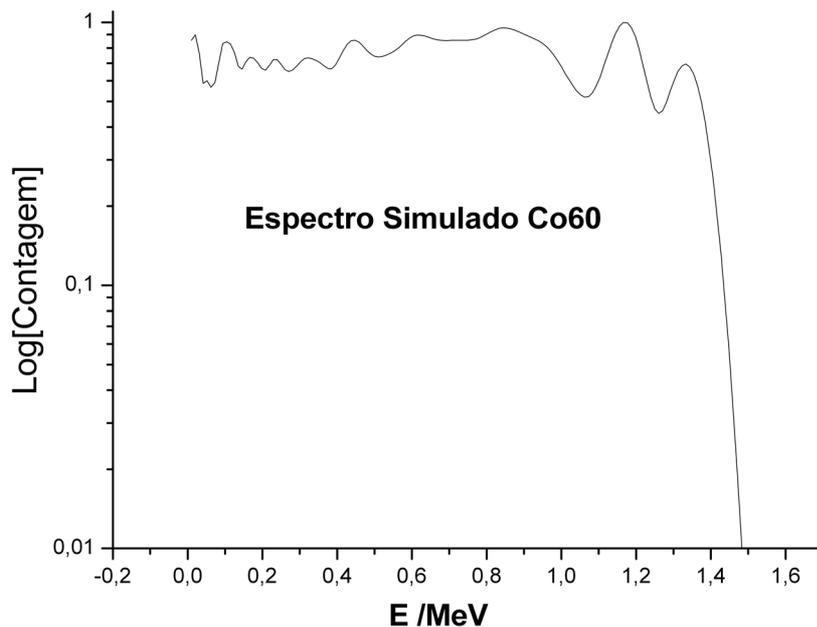
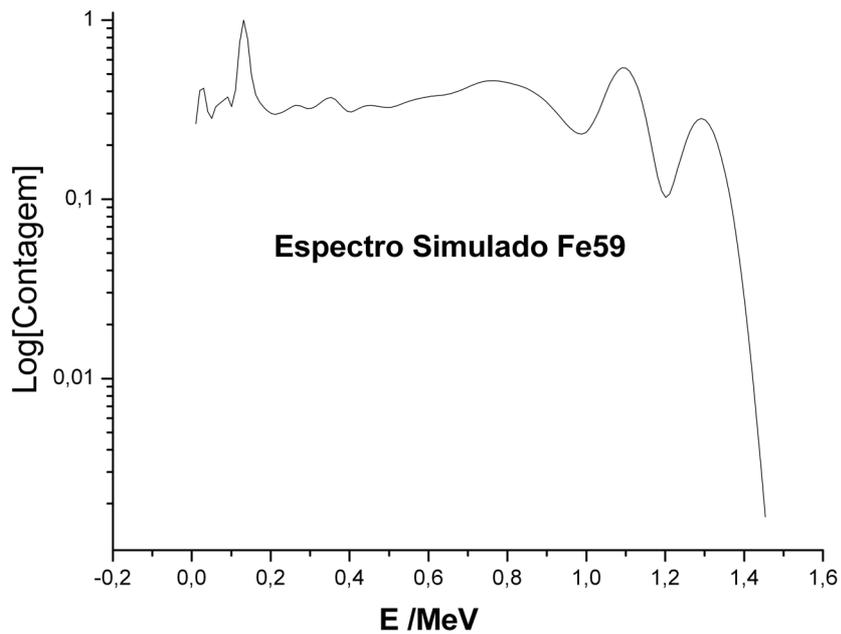
Durante este semestre foi estudado softwares Monte Carlo comerciais como o MCNP-X

## 5. Resultados e Discussões

Embora este trabalho não tenha grande compromisso com a precisão, mas sim com a ilustração do método Monte Carlo e com a possibilidade do código ser utilizado para fins didáticos, os resultados encontrados após duro trabalho de programação são bastantes satisfatórios, conforme pode ser visto nos espectros simulados abaixo:







Note que o espectro calculado do  $^{22}\text{Na}$  é muito próximo do experimental da figura 6a, exceto pelo pico soma, que acontece quando o detector não consegue resolver temporalmente a entrada de dois fótons no detector. Pode-se observar claramente as reações mais prováveis de acontecerem na interação dos raios gama com o cristal, a absorção fotoelétrica (foto-pico) e o efeito Compton (contínuo e borda Compton).

Existem na literatura [6,7] trabalhos muito mais precisos que estes, assim como existem pacotes que permitem uma grande facilidade de modelagem da fonte radioativa e dos materiais presentes num dado laboratório (foto-multiplicadora, blindagem, etc...), com

secções de choque muito mais completas, atuais e precisas das que foram utilizadas neste trabalho. Possuem também reações que foram ignoradas neste trabalho, tal como a formação de raios-x secundários, provenientes da absorção fotoelétrica de um elétron de caroço e seguinte transição de elétrons de níveis superiores para o buraco deixado. Tais refinamentos fogem do escopo do trabalho e foram deixados de lado.

A interface criada, embora seja em modo texto, é bastante intuitiva. Como resultado da simulação é gerado um arquivo de texto que pode ser facilmente exportado para um software que faça gráficos.

## 6. Conclusões

Acredito que poderá ser uma ferramenta para os alunos que realizarem espectroscopia gama no laboratório de Física Moderna.

O trabalho é muito importante para mim, pois além de disponibilizar uma ferramenta para o ensino de Física, me permitiu aprender um pouco sobre o método Monte Carlo. Este conhecimento será muito útil nas atividades de pesquisa, onde estou utilizando o programa Monte Carlo MCNP-X para implementar uma metodologia de cálculos neutrônicos em reatores avançados (ADS), tal trabalho terá continuidade na pós-graduação.

## 6. Referências

- [1] Vieira, W. J., Simulação do Espectro de Deposição de Energia de Raios Gama em Detectores de NaI Utilizando o Método de Monte Carlo, Dissertação de mestrado, IPEN, São Paulo, 1982.
- [2] Peterson, R. S., Experimental  $\gamma$  Ray Spectroscopy and Investigations on Environmental Radioactivity, University of the south Sewanee, Tennessee, 1994.
- [3] Knoll, G. F., Radiation Detection and Measurement, John Willey, New York, 2000.
- [4] Cullity, B. D., Elements of X-Ray Diffraction, Addison-Wesley, 1968.
- [5] Eisberg, R.; Resnik, R., Física Quântica, Editora Campos, 1921.
- [6] Silva J. C., Simulação Monte Carlo dos sistemas de detecção de perfilagem nuclear, Rev. Bras.Geof. vol.19 no.3 São Paulo Sept./Dec. 2001.
- [7] Shi HX, Chen BX., Li TZ, Yun D, Precise Monte Carlo simulation of gamma-ray response functions for an NaI(Tl) detector, Appl Radiat Isot. 2002 Oct;57(4):517-24.
- [8] Grillo, M. C. A., Programação Estruturada com FORTRAN e WATFIV, LTC, Rio de Janeiro, 1985.
- [9] Grossberg, A. B., FORTRAN for Engineering Physics - Mechanics, Data Analysis, and Heat, McGraw-Hill, 1971.
- [10] Dos Reis, M. A., Vitiello, S. A. S., Simulação Monte Carlo aplicado ao oscilador harmônico quântico 1D, Relatório Final de F809, IFGW, UNICAMP, Campinas, 2004.
- [11] <http://fortran.com>
- [12] H. Tawara, S. Sasaki, K. Saito, E. Shibamura and M. Miyajima, KEK Proceedings 200-20, (2000).
- [13] <http://mcnpx.lanl.gov>

## **ANEXO 1: Código Fonte**

```

!          PROGRAMA MCGAMA
!
!          THIAGO CARLUCCIO
!
!          SIMULAÇÃO DO ESPECTRO GAMA EM DETECTORES DE NaI
!          UTILIZANDO O MÉTODO MONTE CARLO
!
!          PROJETO DE INSTRUMENTACAO PARA ENSINO F 808 2o SEMESTRE 2005
!
!          SUBROTINAS UTILIZADAS
!                  BOIING, TATA, SUSY, ERRSET (IBM), LILI,
!                  MICA, FOFA, BIA E FLO.
!
!
!          IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
!          COMMON IU
!          DIMENSION CONT(144), E(144), FINAL(144)
!          DIMENSION ENERG(30), PROB(30)
!          DATA PI/3.1415926/
!          WRITE (*,*) '-----'
!          WRITE (*,*) 'ESTE PROGRAMA TENTA SIMULAR POR MONTE CARLO',/
!          WRITE (*,*) 'A INTERACAO DA RADIAÇÃO GAMA COM UM CRISTAL DE NaI.',/
!          WRITE (*,*) 'SEU PRINCIPAL OBJTIVO EH ILUSTRAR ESTE IMPORTANTE,/
!          WRITE (*,*) 'METODO DE CALCULO'
!          WRITE (*,*) '-----'
!          WRITE(*,*) 'Raio da Fonte (cm)(1):'
!          RF=1.0
!          READ(*,*) RF
!          WRITE(*,*) 'Raio do Detector (cm): (2)'
!          RD=3.32
!          READ(*,*) RD
!          WRITE(*,*) 'Altura do Detector (cm)(10):'
!          AD=7.62
!          READ(*,*) AD
!          WRITE(*,*) 'Distancia da fonte Pontual ao Eixo do Detector:(0)'
!          P=0.0
!          READ(*,*) P
!          WRITE(*,*) 'Distancia da Fonte ao topo do Detector (cm)(10):'
!          HO=10.0
!          READ(*,*) HO
!          WRITE(*,*) 'Fonte tipo feixe paralelo Sim=0 Nao=1:'
!          FP=0
!          READ(*,*) FP
!          WRITE(*,*) 'Parametro de Espalhamento do Histograma:(0.07)'
!          READ(*,*) U
!          WRITE(*,*) 'Numero de Historias:'
!          READ(*,*) N
!          WRITE(*,*) 'Numero de Linhas:'
!          READ(*,*) IZ
!          WRITE(*,*) 'Fator de Normalizacao:'
!          FNORM=1.0
!          READ(*,*) FNORM
!          DO 2 I=1, IZ
!          WRITE(*,*) 'ENERGIA DA LINHA:'
!          READ(*,*) ENERG(I)
!          WRITE(*,*) 'PROBABILIDADE RELATIVA DA LINHA:'
!          READ(*,*) PROB(I)
2 CONTINUE
IU=123456789

```

```

DO 556 I=1, 144
CONT(I)=0.D0
FINAL(I)=0.D0
556 CONTINUE
SUM1=0.D0
SUM2=0.D0
SUM3=0.D0
SUM4=0.D0
SUM5=0.D0
SUM6=0.D0
HELP=0

!
! WRITE(*,*) N
DO 1 I=1, N
! WRITE(*,*) 'HISTORIA'
! WRITE(*,*) I
!
! SELECAO DA ENERGIA INICIAL
!
CALL FLO (IZ, ENER, PROB, HELP, EFMAX, EFC, EF)
HELP=1
! SELECAO DO PONTO DA PRIMEIRA INTERACAO
!
CALL TATA (RF, RD, AD, P, HO, FP, WP, XE, YE, ZE, DE, ACOS,
*BCOS, CCOS, IFONTE)
X=RANDO(0)
EO=EF
WZ=0.D0
WY=0.D0
WP1=0.D0
PROD=1.D0
CALL SUSY (EO, SIGMAC, SIGMAF, SIGMAP, SIGMAT)
ELI=-1.D0/SIGMAT*(DLOG(1.D0-X*(1.D0-DEXP(-1.0*SIGMAT*DE))))
XN=ELI*ACOS+XE
YN=ELI*BCOS+YE
ZN=ELI*CCOS+ZE
WT=1.D0-EXP(-SIGMAT*DE)
WV=WT*(SIGMAF/SIGMAT)
DELTAE=EFMAX/128.0
EA=EF
DO 55 K=1,128
E(K)=DELTAE*K
IF((EA-E(K)).LT.1.E-5) GO TO 54
IF(EA-E(K)) 54,54,55
54 CONT(K)=CONT(K)+WV
GO TO 56
55 CONTINUE
56 WU=WT
IF(EF.LT.1.1) GO TO 223
WPP=WT*SIGMAP/SIGMAT
CALL LILI (XN, YN, ZN, AD, EF, RC, EA)
IF(EA-EF) 197,198,197
198 WP1=WPP
197 DO 6777 K=1,128
E(K)=DELTAE*K
IF((EA-E(K)).LT.1.E-5) GO TO 5777
IF (EA-E(K)) 5777,5777,6777
5777 CONT(K)=CONT(K)+WPP
GO TO 223
6777 CONTINUE

```

```

!
! TESTE PARA TERMINO DA HISTORIA
!
223 WX=WT*(SIGMAC/SIGMAT)
    IF (PROD.LE.1.0E-8) GO TO 401
    PROD=PROD*WX
!
!
! SELECAO DO ANGULO DE ESPALHAMENTO E ENERGIA DO FOTON ESPALHADO
!
    CALL BOIING (EO,ES)
    TETA=ACOS(1.0+0.511/EO-0.511/ES)
    EO=ES
!
!
! TESTE PARA TERMINO DA HISTORIA
!
    IF(EO.LT.1.E-2) GO TO 401
    X=RANDO (0)
    FI=2.0*PI*X
    CT=DCOS(TETA)
    ST=DSIN(TETA)
    CF=DCOS(FI)
    SF=DSIN(FI)
!
! COSSENO DIRETORES EMERGENTES
!
    DENOM=SQRT(0.1D1-CCOSS)
    IF(DENOM.LE.0.D-4) GO TO 26
    ACOSSI=ACOSS*CT+(CCOSS*ACOSS*ST*CF-BCOSS*ST*SF)/DENOM
    BCOSSI=BCOSS*CT+(CCOSS*BCOSS*ST*CF+ACOSS*ST*SF)/DENOM
    GCOSSI=CCOSS*CT-DENOM*ST*CF
    ACOSS=ACOSI
    BCOSS=BCOSI
    GCOSS=GCOSSI
    GO TO 27
26 ACOSS=ST*CF
    BCOSS=ST*SF
    GCOSS=GCOSS*CF
!
! SELECAO DA NOVA DISTANCIA A PERCORRER NO CRISTAL
!
27 A=ACOSS*ACOSS+BCOSS*BCOSS
    B=2.D0*(XN*ACOSS+YN*BCOSS)
    C=XN*XN+YN*YN-RD*RD
    D=B*B-4*A*C
    DE=(-B+SQRT(D))/(2.D0*A)
    ZR=DE*GCOSS+ZN
    IF(ZR) 111,111,211
211 IF(ZR-AD) 40, 411, 411
111 DE=-ZN/GCOSS
    GO TO 40
411 DE=(AD-ZN)/GCOSS
!
!
! SELECAO DE NOVO PONTO DE INTERACAO
!
40 X=RANDO (0)
    CALL SUSY (EO, SIGMAC, SIGMAF, SIGMAP, SIGMAT)
    ELI=-1.D0/SIGMAT*(DLOG(1.D0-X*(1.D0-DEXP(-SIGMAT*DE))))
    XN=ELI*ACOSS+XN

```

```

      YN=ELI*BCOSS+YN
      ZN=ELI*GCOSS+ZN
      WT=1.D0-EXP(-SIGMAT*DE)
      IF(EF.LT.1.1) GO TO 312
      WK=WT*(SIGMAP/SIGMAT)
!
!
!   PERCA DE ENERGIA DEVIDO AO EFEITO DE PRODUCAO DE PARES
!
      CALL LILI (XN, YN, ZN, AD, EF, RD, EA)
      IF(EA-EF) 9,8,9
      8 WY=WY+WK*PROD
      9 DO 677 K=1,128
        E(K)=DELTAE*K
        IF((EA-E(K)).LT.1.D-5) GO TO 98
        IF(EA-E(K)) 98,98,677
      98 CONT(K)=CONT(K)+WK*PROD
        GO TO 312
      677 CONTINUE
!
!   PERCA DE ENERGIA DEVIDO AO EFEITO FOTOELETRICO
!
      312 WF=WT*(SIGMAF/SIGMAT)
        EA=EF
        DO 75 K=1,128
          E(K)=DELTAE*K
          IF((EA-E(K)).LT.1.E-5) GO TO 74
          IF(EA-E(K)) 74,74,75
        74 CONT(K)=CONT(K)+WF*PROD
          WZ=WZ+WF*PROD
          GO TO 77
        75 CONTINUE
!
!   PERCA DE ENERGIA DEVIDA A FUGA DO FOTON
!
      77 EA=EF-EO
        DO 67 K=1,128
          E(K)=DELTAE*K
          IF(EA-E(K)) 101,101,67
      101 CONT(K)=CONT(K)+PROD*(1.0-WT)
        GO TO 223
!
      67 CONTINUE
!
!
!   FIM DA HISTORIA
!
!
      401 SUM1=SUM1+WU*WP
        SUM2=SUM2+WP
        SUM3=SUM3+WU*WU*WP*WP
        SUM4=SUM4+WP*WP
        SS=WP*(WV+WZ+WP1+WY)
        SUM5=SUM5+SS
        SUM6=SUM6+SS**2.D0
!
      1 CONTINUE
      WRITE(*,*) 'FIM DAS HISTORIAS'
!
!   CALCULO DO FATOR GEOMETRICO
!

```

```

WRITE(*,*) 'SUM2 '
WRITE(*,*) SUM2
WRITE(*,*) 'N'
WRITE(*,*) N
OMEGA=SUM2/N
WRITE(*,*) 'OMEGA '
WRITE(*,*) OMEGA
S2=(1./(N-1.))* (SUM4-(SUM2)**2/N)/N
WRITE(*,*) 'S2 '
WRITE(*,*) S2
SIGOME=SQRT(S2)
!
!
!
CALCULO DA EFICIENCIA INTRINSICA TOTAL (EIT)
!
!
EIT=(1.0/N)*SUM1/OMEGA
WRITE(*,*) 'OMEGA '
WRITE(*,*) OMEGA
WRITE(*,*) 'EIT '
WRITE(*,*) EIT
WRITE(*,*) 'THIAGO '
O2=OMEGA*OMEGA
S=(1./(N-1.))* (SUM3/O2-SUM1*SUM1/N/O2)/N
SIGE=SQRT(ABS(S))
!
!
!
CALCULO DA EFICIENCIA DO FOTOPICO (EFP)
!
!
EFP=(1.0/N)*SUM5/OMEGA
WRITE(*,*) 'SUM5 '
WRITE(*,*) SUM5
S1=(1./(N-1.))* (SUM6/O2-(SUM5)**2/N/O2)/N
SIGEFP=SQRT(ABS(S1))
!
!
!
CALCULO DA RAZAO PICO/TOTAL (R)
!
!
R=EFP/EIT
SIGR=(EFP/EIT)*SQRT((S1/EFP*EFP+S/(EIT*EIT)))
!
!
!
CALCULO DA EFICIENCIA INTRINSICA DA FONTE (ETG)
!
!
ETG=OMEGA*EIT
S3=OMEGA*OMEGA*S2+EIT*EIT*S
SIGETG=SQRT(S3)
!
!
!
CALCULO DA EFICIENCIA DE FOTOPICO DA FONTE (EFG)
!
!
EFG=OMEGA*EFP
!
S4=OMEGA*OMEGA*S2+EFP*EFP*S1
SIGEFG=SQRT(S4)
!
!
!
ESPALHAMENTO DO HISTOGRAMA
!
!
CALL MICA (EFMAX,U,CONT,FINAL,FNORM)
!
!
!
IMPRESSAO DE RESULTADOS
!
!
!
CALL BIA (RF,RD,AD,P,HO,EFC,CONT,FINAL,FNORM,U,N,
*EIT,EFP,OMEGA,R,IFONTE,SIGOME,SIGE,SIGEFP,SIGR,DELTAE)
WRITE(*,*) 'IMPRESSAO DOS RESULTADOS '
READ(*,*) THIAGO

```

```

!
!
!   GRAFICO DO ESPECTRO
!
!   CALL FOFA (FINAL)
!   GO TO 1001
!   WRITE(*,*) 'FIM DO PROGRAMA'
!   READ(*,*) THIAGO
2000 STOP
    22 END
!
!
!
!   SUBROUTINE FLO (IZ,ENERG,PROB,HELP,EFMAX,EFC,EF)
!
!   ESTA SUBROTINA FORNECE A ENERGIA MAXIMA DO NUCLIDEO
!   A ENERGIA CARACTERISTICA E AMOSTRA UMA ENERGIA QUALQUER
!   PARA UTILIZACAO NO DESENVOLVIMENTO DOS CALCULOS
!
!   IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
!   COMMON IU
!   DIMENSION ENERG(30), PROB(30)
!   IF(HELP==1) GO TO 30
!   DEN=0.0
!   DO 1 I=1, IZ
!   DEN=DEN+PROB(I)
1 CONTINUE
!   DO 2 I=1, IZ
!   PROB(I)=PROB(I)/DEN
2 CONTINUE
!   IF(IZ.LE.1) GO TO 4
!   IZ1=IZ-1
!   DO 3 I=1, IZ1
!   PROB(I+1)=PROB(I)+PROB(I+1)
3 CONTINUE
!   EFC=ENERG(1)
!   EF=EFC
!   DO 20 I=2, IZ
!   IF(EF-ENERG(I)) 10,10,20
10 EF=ENERG(I)
20 CONTINUE
!   EFMAX=EF
!   GO TO 30
4 EFMAX=ENERG(1)
!   EFC=EFMAX
!   EF=EFC
30 X=RANDO(0)
!   DO 5 I=1, IZ
!   IF(X.GT.PROB(I)) GO TO 5
!   EF=ENERG(I)
!   GO TO 40
5 CONTINUE
40 RETURN
!   END
!
!
!
!   SUBROUTINE BIA (RF,RD,AD,P,HO,EFC,CONT,FINAL,FNORM,U,N,
!   *EIT,EFP,OMEGA,R,IFONTE,SIGOME,SIGE,SIGEFP,SIGR,DELTAE)
!
!   SUBROTINA PARA IMPRESSÃO DE RESULTADOS

```

```

      IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
      DIMENSION VETOR(144),CONT(144),FINAL(144)
      INTEGER IERROR, K
      WRITE(*,*) 'ANTES DE ABRIR O ARQUIVO'
      OPEN(20,FILE='MCGAMA.OUT',STATUS='REPLACE',ACTION='WRITE',
      *IOSTAT=IERROR)
      WRITE(*,*) 'IERROR'
      WRITE(*,*) IERROR
      WRITE(*,*) 'HISTOGRAMA'
      WRITE(20,*) 'IMPRESSAO DOS RESULTADOS MCGAMA.OUT'
!     WRITE(20,230) RF
! 230 FORMAT('RF = ',ES14.4,/)
!     WRITE(20,231) RD
! 231 FORMAT('RD = ',ES14.4,/)
!     WRITE(20,232) AD
! 232 FORMAT('AD = ',ES14.4,/)
!     WRITE(20,233) P
! 233 FORMAT('P = ',ES14.4,/)
!     WRITE(20,234) HO
! 234 FORMAT('HO = ',ES14.4,/)
!     WRITE(20,235) EFC
! 235 FORMAT('EFC = ',ES14.4,/)
!     WRITE(20,236) FNORM
! 236 FORMAT('FNORM = ',ES14.4,/)
!     WRITE(20,237) U
! 237 FORMAT('U = ',ES14.4,/)
!     WRITE(20,238) N
! 238 FORMAT('N = ',I4,/)
!     WRITE(20,239) EIT
! 239 FORMAT('EIT = ',ES14.4,/)
!     WRITE(20,240) EFP
! 240 FORMAT('EFP = ',ES14.4,/)
!     WRITE(20,241) OMEGA
! 241 FORMAT('OMEGA = ',ES14.4,/)
!     WRITE(20,242) R
! 242 FORMAT('R = ',ES14.4,/)
!     WRITE(20,243) IFONTE
! 243 FORMAT('IFONTE = ',I4,/)
!     WRITE(20,244) SIGOME
! 244 FORMAT('SIGOME = ',ES14.4,/)
!     WRITE(20,245) SIGE
! 245 FORMAT('SIGE = ',ES14.4,/)
!     WRITE(20,246) SIGEFP
! 246 FORMAT('SIGEFP = ',ES14.4,/)
!     WRITE(20,247) SIGR
! 247 FORMAT('SIGR = ',ES14.4,/)
!     WRITE(20,248) DELTAE
! 248 FORMAT('DELTAE = ',ES14.4,/)
!     WRITE(20,249) EFMAX
! 249 FORMAT('EFMAX = ',ES14.4,/)
      WRITE(20,*) ' K      VETOR(K)      CONT(K) FINAL(K) '
      DO K = 1, 144
      VETOR(K)=DELTAE*K*1.D0
      WRITE(20,200) K,VETOR(K),CONT(K),FINAL(K)
200 FORMAT(I3.3,1X,ES14.3,1X,ES14.3,1X,ES14.3)
      END DO
      WRITE(*,*) THIAGO
      READ(*,*) THIAGO
      END
!
      SUBROUTINE MICA (EFMAX,U,CONT,FINAL, FNORM)

```

```

!
!   ESTA SUBROUTINA ESPALHA O HISTOGRAMA POR GAUSSIANAS COM
!   DESVIOS PADROES CALCULADOS EMPIRICAMENTE
!
      IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
      DIMENSION CONT(144), FINAL(144)
      PI=3.1415926
      DELTAE=EFMAX/128.
      DO 3367 J=1, 144
      E1=DELTAE*J
      DO 3366 K=1, 128
      E2=DELTAE*K
      SIGMA=U*E2**(2./3.)/2.35
      SIGMA2=SIGMA*SIGMA
      DIV=1.D0/SQRT(2.D0*PI*SIGMA2)
      F=(E2-E1)/SIGMA
      F=F*F*0.5D0
      IF (K-1) 3,3,4
3   W=0.5
      GO TO 6
4   W=1.D0
      6 IF (F-10.0) 3365,3366,3366
3365 FINAL(J)=CONT(K)*DIV*DEXP(-1.0*F)*DELTAE*W+FINAL(J)
3366 CONTINUE
3367 CONTINUE
      CONST=FINAL(1)
      DO 1 I=1, 144
      IF(CONST-FINAL(I)) 2,2,1
2   CONST=FINAL(I)
1   CONTINUE
      DO 3368 M=1,144
      FINAL(M)=(FINAL(M)/CONST)*FNORM
3368 CONTINUE
      RETURN
      END
!
!
      SUBROUTINE LILI (XN, YN, ZN, AD, EF, RD, EA)
!
!   ESTA SUBROTINA FORNECE A ENERGIA ABSORVIDA
!   NO EFEITO DE FORMACAO DE PARES
!
      IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
      COMMON IU
      PI=3.1415926
      X=RANDO(0)
      TETA=ACOS(.2D1*X-0.1D1)
      CT=COS(TETA)
      ST=SIN(TETA)
      X=RANDO(0)
      FI=2.*PI*X
      CF=COS(FI)
      SF=SIN(FI)
!
!   COSSENOS DIRETORES
!
      CDA=ST*CF
      CDB=ST*SF
      CDG=CT
!
!   PRIMEIRA FOTON DE ANIQUILAMENTO

```

```

!
680 EO=0.511
    EA=EF
    CDA1=-CDA
    CDB1=-CDB
    CDG1=-CDG
    XP=XN
    YP=YN
    ZP=ZN
    XA=XN
    YA=YN
    ZA=ZN
    IAJUDA=1
    GO TO 332

!
!   SEGUNDO FOTON DE ANIQUILAMENTO
!
329 CDA=CDA1
    EO=0.511
    CDB=CDB1
    CDG=CDG1
    XP=XA
    YP=YA
    ZP=ZA
    IAJUDA=2

!
!   CALCULO DA DISTANCIA A PERCORRER
!
332 A=CDA*CDA+CDB*CDB
    B=2.*(XP*CDA+YP*CDB)
    C=XP*XP+YP*YP-RD*RD
    D=B*B-4*A*C
    D=SQRT(D)
    DE=(-B+D)/(2.*A)
    ZR=DE*CDG+ZP
    IF(ZR) 81,81,82
82  IF(ZR-AD) 80,83,83
81  DE=-ZP/CDG
    GO TO 80
83  DE=(AD-ZP)/CDG

!
!   SIMULACAO DO TIPO E LOCAL DE INTERACAO
!
80  X=RANDO(0)
    CALL SUSY (EO, SIGMAC, SIGMAF, SIGMAP, SIGMAT)
    ELI=-1./SIGMAT*LOG(X)
    IF(ELI.GT.DE) GO TO 504
    AUX=SIGMAC/SIGMAT
    X=RANDO(0)
    IF (X.LT.AUX) GO TO 503
    EA=EA
    IF (IAJUDA.EQ.1) GO TO 329
    GO TO 1
504 EA=EA-EO
    IF (IAJUDA.EQ.1) GO TO 329
    GO TO 1
503 XP=ELI*CDA+XP
    YP=ELI*CDB+YP
    ZP=ELI*CDG+ZP
    CALL BOIING (EO,ES)
    TETA=ACOS(1.0+0.511/EO-0.511/ES)

```

```

EO=ES
CT=COS (TETA)
ST=SIN (TETA)
X=RANDO (0)
FI=2.*PI*X
CF=COS (FI)
SF=SIN (FI)
!
! COSSENOS DIRETORES EMERGENTES

DENOM=SQRT (1.D0-CDG*CDG)
IF (DENOM.LE.1.D-04) GO TO 331
CDA2=CDA*CT+ (CDG*CDA*ST*CF-CDB*ST*SF) /DENOM
CDB2=CDB*CT+ (CDG*CDB*ST*CF+CDA*ST*SF) /DENOM
CDG2=CDG*CT-DENOM*ST*CF
CDA=CDA2
CDB=CDB2
CDG=CDG2
GO TO 332
1 RETURN
331 END
!
SUBROUTINE BOIING (EO,ES)
!
! ESTA ROTINA AMOSTRA UMA ENERGIA PARA O FOTON
! ESPALHADO DADA PELA FORMULA DE KLEIN-NISHIDA
! UTILIZANDO A TECNICA DE REJEICAO.
!
IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
COMMON IU
A=EO/0.511
2 R=RANDO (0)
X= (1.+R*2.*A) / (1.+2.*A)
CT=1.+1./A-1./ (A*X)

P= (2.*A* (1.+A) ) / ( (1.+2.*A) **2)
Q= (1.-2./A-2/ (A*A) ) *LOG (1.+2.*A)
T=4./A
G=P+Q+T
FX= (X+1./X+CT-1.) /G
R=RANDO (0)
TEST=R* ( (1./ (1.+2.*A) +1.+2.*A) ) /G
IF (TEST-FX) 1,1,2
1 ES=EO*X
RETURN
END
!
SUBROUTINE TATA (RF, RD, AD, P, HO, FP, WP, XE, YE, ZE,
*DE, ACOSS, BCOSS, GCOSS, IFONTE)
IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
COMMON IU
!
! ESTA SUBROTINA CALCULA O PESO GEOMETRICO, AS
! COORDENADAS DE ENTRADA DO FOTON, AS POSSIVEIS COOR-
! DENAS DE SAIDA, A DISTANCIA DE PERCURSO PROVAVEL DEN-
! TRO DO DETECTOR E OS COSSENOS DIRETORES UTI-
! LIZANDO O METODO DE MONTE CARLO.
!
! SELECAO DO TIPO DE FONTE
!
PI=3.1415936

```

```

!
      IF (FP) 8,8,41
!
      8 IF (HO) 90,90,9
!
      9 IF (RF) 13,13,60
      13 IFONTE=2
!
      10 IF (P-RD) 20,30,30
!
      SELECAO DA DIRECAO INICIAL
!
      FONTE NA REGIAO CILINDRICA ACIMA DA FACE CIRCULAR DO
      DETECTOR
!
      20 TETA7=ATAN((RD+P)/HO)
      TETA0=ATAN((RD-P)/HO)
      TETA4=0.0
      X=RANDO(0)
      TETA=ACOS(1-X*(1-COS(TETA7)))
      W1=0.5*(COS(TETA4)-COS(TETA7))
      IF (TETA-TETA0) 11,11,12
      11 X=RANDO(0)
      ALFA=2*PI*X
      W2=1.0
      WP=W1*W2
      SEGOA=P*COS(ALFA)+SQRT(RD*RD-P*P*SIN(ALFA)*SIN(ALFA))
      GO TO 14
      12 TTETA=DTAN(TETA)
      ALFA7=ACOS((P*P+HO*HO*TTETA*TTETA-RD*RD)/(2.*HO*P*TTETA))
!
      X=RANDO(0)
      ALFA=ALFA7*(2*X-1)
      SEGOA=P*COS(ALFA)+SQRT(RD*RD-P*P*SIN(ALFA)*SIN(ALFA))
      W2=ALFA7/PI
      WP=W1*W2
      GO TO 14
!
      FONTE FORA DA REGIAO CILINDRICA E COM HO.GT.0.0
!
      30 ALFA7=ASIN(RD/P)
      X=RANDO(0)
      ALFA=ALFA7*(2*X-1)
      W2=ALFA7/PI
      SEGOA=P*COS(ALFA)+SQRT(RD*RD-P*P*SIN(ALFA)*SIN(ALFA))
      TETA7=ATAN(SEGOA/HO)
      SEGOB=P*COS(ALFA)-SQRT(RD*RD-P*P*SIN(ALFA)*SIN(ALFA))
      TETA0=ATAN(SEGOA/HO)
      TETA4=ATAN(SEGOB/(HO+AD))
!
      X=RANDO(0)
!
      TETA=ACOS(COS(TETA4)-X*(COS(TETA4)-COS(TETA7)))
      W1=0.5*(COS(TETA4)-COS(TETA7))
      WP=W1*W2
      17 G=SEGOB/TAN(TETA)
      ZE=HO+AD-G
      IF (AD-ZE) 14,14,19
!
      O FOTON ENTROU PELO LADO DO DETECTOR
!

```

```

19 XE=SEGOB*SIN(ALFA)
   YE=SEGOB*COS(ALFA)-P
   GG=SEGOA/TAN(TETA)
   ZS=HO+AD-SEGOA/TAN(TETA)
   IF (ZS) 22,22,23
!
!   O FOTON SE DIRIGE AO FUNDO DO DETECTOR
!
22 ZS=0.0
   SEGOG=(HO+AD)*TAN(TETA)
   XS=SEGOG*SIN(ALFA)
   YS=SEGOG*COS(ALFA)-P
   DE=ZE/COS(TETA)
!
   GO TO 220
!
!   O FOTON SE DIRIGE AO LADO DO DETECTOR
23 XS=SEGOA*SIN(ALFA)
   YS=SEGOA*COS(ALFA)-P
   SAB=SEGOA-SEGOB
   DE=SAB/SIN(TETA)
!
   GO TO 220
!
!   O FOTON ENTROU POR CIMA DO DETECTOR
!
14 EA=SEGOA-HO*TAN(TETA)
   ZS=AD-EA/TAN(TETA)
   IF (ZS) 15,16,16
!
!   O FOTON SE DIRIGE AO FUNDO DO DETECTOR
!
15 SOE=HO*TAN(TETA)
   XE=SOE*COS(ALFA)
   YE=SOE*COS(ALFA)-P
   ZE=AD
   SEGOG=(HO+AD)*TAN(TETA)
   XS=SEGOG*SIN(ALFA)
   YS=SEGOG*COS(ALFA)-P
   ZS=0.0
   DE=AD/COS(TETA)
!
   GO TO 220
!
!   O FOTON SE DIRIGE AO LADO DO DETECTOR
!
16 SOE=HO*TAN(TETA)
   XE=SOE*SIN(ALFA)
   YE=SOE*COS(ALFA)-P
   ZE=AD
   YS=SEGOA*COS(ALFA)-P
   XS=SEGOA*SIN(ALFA)
   DE=EA/SIN(TETA)
!
   GO TO 220
!
!   FONTE FORA DA REGIAO CILINDRICA E COM HO.LE.0.0
!
90 RSP=RD/P
   ALFA7=ASIN(RSP)
   X=RANDO(0)

```

```

ALFA=ALFA7*(2.D0*X-1)
W2=ALFA7/PI
SEGOA=P*COS(ALFA)+SQRT(RD*RD-P*P*SIN(ALFA)*SIN(ALFA))
SEGOB=P*COS(ALFA)-SQRT(RD*RD-P*P*SIN(ALFA)*SIN(ALFA))
TETA7=PI/2.D0+ATAN(ABS(HO)/SEGOB)
TETA4=ATAN(SEGOB/(AD-ABS(HO)))
X=RANDO(0)
TETA=ACOS(COS(TETA4-X*(COS(TETA4)-COS(TETA7))))
W1=0.5*(COS(TETA4)-COS(TETA7))
WP=W1*W2
IFONTE=2
!
!   O FOTON TEM DIRECAO INICIAL DESCENDENTE
!
18 IF(TETA-PI/2.0) 118,119,119
118 G=SEGOB/TAN(TETA)
ZE=HO-AD-G
YE=SEGOB*COS(ALFA)-P
XE=SEGOB*SIN(ALFA)
GG=SEGOA/TAN(TETA)
ZS=HO+AD-GG
IF(ZS) 22,22,23
!
!   O FOTON TEM DIRECO INICIAL ASCENDENTE
!
119 G=SEGOB*TAN(TETA-PI/2.0)
ZE=HO+AD+G
YE=SEGOB*COS(ALFA)-P
XE=SEGOB*SIN(ALFA)
GG=SEGOA*TAN(TETA-PI/2)
ZS=HO+AD+GG
IF(ZS-AD) 23,24,24
!
!   O FOTON SE DIRIGE A SUPERFICIE CIRCULAR SUPERIOR DO DETECTOR
!
24 ZS=AD
SEGOG=ABS(HO)/TAN(TETA-PI/2.D0)
XS=SEGOG*SIN(ALFA)
YS=SEGOG*COS(ALFA)-P
DE=ZE/COS(TETA)
!
GO TO 220
!
!   FONTE TIPO FEIXE PARALELO
!
41 X=RANDO(0)
P=RF*SQRT(X)
XE=0.D0
YE=P
ZE=AD
XS=0.D0
YS=P
ZS=0.D0
DE=AD
ACOSS=0.0
BCOSS=0.D0
GCOSS=-1.D0
WP=1.D0
IFONTE=1
!
GO TO 21

```

```

!
!   FONTE EM DISCO
!
60 X=RANDO(0)
   P=RF*SQRT(X)
   IFONTE=3
!
   GO TO 10
!
!   COSSENOS DIRETORES
!
!
220 ACROSS=(XS-XE)/DE
    BCOSS=(YS-YE)/DE
    GCOSS=(ZS-ZE)/DE
!
21 RETURN
   END
!
   SUBROUTINE SUSY (EO, SIGMAC, SIGMAF, SIGMAP, SIGMAT)
   IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
!
!   ESTA SUBROUTINA FORNECE AS SECCOES DE CHOQUE PARA
!   IODETO DE SODIO PARA ENERGIAS ATE 10 MEV
!
!   SIGMAC=SECCAO  CHOQUE PARA EFEITO COMPTON
!   SIGMAF=SECCAO  CHOQUE PARA EFEITO FOTOELETRICO
!   SIGMAP=SECCAO  CHOQUE PARA FORMACAO DE PARES
!   SIGMAT=SECCAO  CHOQUE TOTAL
!
!   OBS.
!   OS COEFICIENTES DOS POLINOMIOS PARA EFEITO COMPTON
!   E DE FORMACAO DE PARES FORAM RETIRADOS DA PUBLICA-
!   CAO DE F. T. AVIGNONE E J. A. JEFFREYS EM NUCL. INSTR. AND
!   METH. 179(1981)159, E OS COEFICIENTES PARA O EFEITO FOTO
!   ELETRICO FORAM CALCULADOS POR UM AJUSTE POR MINIMOS
!   QUADRADOS DOS DADOS OBTIDOS POR E. STORM E H. I. ISRAEL, LA-3753
!
!   SECCAO DE CHOQUE COMPTON
!
   IF(EO.GT.0.04) GO TO 1
   SIGMAC=0.63-2.46*EO+9.94*EO*EO
   GO TO 2222
1  IF (EO.GT.0.15) GO TO 2
   SIGMAC=0.608-1.74*EO+3.2*EO*EO
   GO TO 2222
2  IF (EO.GT.0.7) GO TO 3
   SIGMAC=0.51-0.731*EO+0.507*EO*EO
   GO TO 2222
3  IF (EO.GT.3.5) GO TO 4
   SIGMAC=0.355-0.222*EO+0.0772*EO*EO
   GO TO 2222
4  SIGMAC=0.167-0.028*EO+0.193E-2*EO*EO-0.52E-4*EO*EO*EO
!
!   SECCAO DE CHOQUE PARA EFEITO FOTO ELETRICO
!
2222 IF (EO.GT.0.01) GO TO 21
    SIGMAF=600.
    GO TO 3333
21 IF (EO.GT.0.02) GO TO 22
    SIGMAF=1.9678E+3-1.96196E+5*EO+5.0792E+6*EO*EO

```

```

GO TO 3333
22 IF (EO.GT.0.03316) GO TO 23
   SIGMAF=3.287E+2-1.764686E+4*EO+2.49437E+5*EO*EO
   GO TO 3333
23 IF (EO.GT.0.05) GO TO 24
   SIGMAF=5.9192E+2-2.11774E+4*EO+2.0146E+5*EO*EO
   GO TO 3333
24 IF (EO.GT.0.15) GO TO 25
   SIGMAF=4.8158E+1-6.6484E+2*EO+2.3685E+3*EO*EO
   GO TO 3333
25 IF (EO.GT.0.3) GO TO 26
   SIGMAF=1.8023-5.1597*EO-0.10345*EO*EO
   GO TO 3333
26 IF (EO.GT.0.5) GO TO 27
   SIGMAF=1.1126-4.0767*EO+3.963*EO*EO
   GO TO 3333
27 IF (EO.GT.0.8) GO TO 28
   SIGMAF=0.3155-0.7227*EO+0.44337*EO*EO
   GO TO 3333
28 IF (EO.GT.1.5) GO TO 29
   SIGMAF=0.080928-0.10334*EO+0.0357007*EO*EO
   GO TO 3333
29 IF (EO.GT.3.0) GO TO 30
   SIGMAF=0.0196932-0.01206*EO+0.00206*EO*EO
   GO TO 3333
30 IF (EO.GT.5.0) GO TO 31
   SIGMAF=0.006437-0.0020123*EO+0.000185*EO*EO
   GO TO 3333
31 SIGMAF=0.00295-0.000538*EO+2.997E-5*EO*EO
!
!   SECCAO DE CHOQUE PARA FORMACAO DE PARES
!
3333 IF (EO.GT.1.022) GO TO 301
   SIGMAP=0.0
   GO TO 4444
301 IF (EO.GT.1.28) GO TO 302
   SIGMAP=-0.215E-3+0.209E-3*EO
   GO TO 4444
302 IF (EO.GT.3.0) GO TO 303
   SIGMAP=-0.0133*0.907E-2*EO+0.107E-2*EO*EO
   GO TO 4444
303 IF (EO.GT.4.0) GO TO 304
   SIGMAP=-0.0245+0.0184*EO-0.8E-3*EO*EO
   GO TO 4444
304 IF (EO.GT.8.0) GO TO 305
   SIGMAP=-0.0197+0.0166*EO-0.633E-3*EO*EO
   GO TO 4444
305 SIGMAP=0.0312+0.526E-2*EO
!
!   SECCAO DE CHOQUE TOTAL
!
4444 SIGMAT=SIGMAF+SIGMAC+SIGMAP
   RETURN
   END
!
FUNCTION RANDO (X)
IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
COMMON IU
IU=IU*65539.e0
IF (IU) 5,6,6
5 IU=IU+2147483647+1

```

```
6 YFZ=IU
  RANDO=YFZ*0.4656613e-9
  RETURN
  END
```

```
!  
!  
!  
!  
!
```