AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS NUCLEARES DO NÚCLEO
DE ^{127}Te : UMA PROPOSTA PARA O ENSINO DE FÍSICA NUCLEAR**

WAGNER FONSECA BATISTA

Dissertação apresentada como parte
dos requisitos para obtenção do Grau
de Mestre em Ciências na Área de
Tecnologia Nuclear – Aplicações

Orientadora:
Profa. Dra. Cibeles Bugno Zamboni

São Paulo
2011

*Figuras, descrições, medidas, números e
desenhos ainda não expõem um fenômeno.*

- Goethe -

Agradecimentos

À Deus.

À Dra. Cibele Bugno Zamboni pela orientação, incentivo, ensinamentos e dedicação.

Ao Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares por possibilitar a realização deste trabalho.

À Secretaria da Educação do Estado de São Paulo pelo suporte financeiro.

Ao amigo Rodrigo Oliveira Aguiar pela ajuda e incentivo nos primeiros passos.

Aos colegas do grupo do Laboratório de Espectroscopia e Espectrometria das Radiações, Agostinho, Frederico, Laura, Ilca, Sabrina, Tatyana, Guilherme e Luciana pela amizade e auxílio.

Aos meus familiares pelo incentivo e compreensão.

DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS NUCLEARES DO NÚCLEO DE ^{127}Te : UMA PROPOSTA PARA O ENSINO DE FÍSICA NUCLEAR

Wagner Fonseca Batista

RESUMO

Um estudo do decaimento β^- do ^{127}Te , via espectroscopia gama, foi realizado utilizando um detector de HPGe de alta resolução. As medidas foram realizadas na região de energia de 30 keV a 1,0 MeV, com o objetivo de obter uma melhor compreensão de sua estrutura nuclear. As fontes radioativas de ^{127}Te foram obtidas a partir da reação nuclear $^{126}\text{Te}(n,\gamma)^{127}\text{Te}$, produzidas no reator IEA-R1 do IPEN/CNEN-SP. Cinco transições anteriormente atribuídas a este decaimento foram confirmadas com melhor precisão. Foi realizada também a medida da meia-vida do ^{127}Te com incerteza significativamente menor.

Utilizando um conjunto dos dados experimentais, selecionados da medida de espectroscopia gama, foi elaborada e aplicada uma proposta didática para alunos do Ensino Médio utilizando o programa Excel.

NUCLEAR PARAMETERS DETERMINATION OF THE ^{127}Te β^- DECAY: A PROPOSAL FOR TEACHING NUCLEAR PHYSICS

Wagner Fonseca Batista

ABSTRACT

A study of the ^{127}Te β^- decay was carried out by means of gamma spectroscopy measurements using high resolution HPGe detector, in the region from 30 keV to 1.0 MeV, aiming to get a better understanding of the ^{127}Te nuclear structure. The radioactive sources of ^{127}Te were obtained from the $^{126}\text{Te}(n,\gamma)^{127}\text{Te}$ nuclear reaction produced in the IEA- R1 nuclear reactor at IPEN/CNEN-SP. Five gamma transitions previously attributed to this decay were confirmed with a better precision than previously. The half-life of ^{127}Te was also studied resulting in data with lower uncertainty.

Using a set of data selected from gamma spectroscopy measurements was developed and applied a didactic proposal for high school students using the Excel software.

SUMÁRIO

	Página
INTRODUÇÃO.....	11
CAPÍTULO I – ESPECTROSCOPIA GAMA	12
I.1 OBJETIVO	12
I.2 MOTIVAÇÃO	12
I.3 INSTRUMENTAÇÃO	13
I.4 TÉCNICA EXPERIMENTAL.....	15
I.4.1 Calibração em energia	15
I.4.2 Calibração em eficiência	17
I.4.3 Produção das fontes radioativas de ^{127}Te	19
I.5 MEDIDAS DE ESPECTROSCOPIA GAMA	20
I.6 ANÁLISE DE DADOS.....	21
I.6.1 Cálculo da energia das transições gama	21
I.6.2 Cálculo da intensidade relativa das transições gama.....	22
I.6.3 Medida da meia-vida	24
I.7 RESULTADOS.....	25
I.8 DISCUSSÃO	30
CAPÍTULO II – PROPOSTA DIDÁTICA	33
II.1 OBJETIVO.....	33
II.2 PROPOSTA CURRICULAR DE FÍSICA	33
II.3 MATERIAL DIDÁTICO	34
II.3.1 Dados experimentais	35

II.3.2 Pastas de trabalho do Excel: utilização dos recursos computacionais	39
II.4 DESEMPENHO DO PROGRAMA EXCEL	47
II.5 APLICAÇÃO DA PROPOSTA DIDÁTICA	48
II.6 RESULTADOS	53
II.7 DISCUSSÃO	53
 CAPÍTULO III – CONCLUSÕES	 55
III.1 CONCLUSÕES	55
III.2 PERSPECTIVAS	55
 APÊNDICE A - Textos Complementares	 57
APÊNDICE B – Pastas de Trabalho do Excel	61
 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	 65

Lista de Tabelas

TABELA 1 – Isótopos Te que podem ser produzidos por ativação neutrônica.....	20
TABELA 2 – Energia (E_γ) e intensidade relativa (I_γ) dos raios gama emitidos no decaimento β^- do ^{127}Te	27
TABELA 3 – Meia-vida do ^{127}Te obtido no presente estudo e da literatura.	30
TABELA 4 – Condições experimentais dos estudos realizados no decaimento β^- do ^{127}Te	31
TABELA 5 – Energias dos raios gama do decaimento beta do ^{127}Te	47
TABELA 6 – Meia-vida do decaimento beta do ^{127}Te	48

Lista de Figuras

FIGURA 1	– Esquema de decaimento β^- do ^{127}Te proposto pela referência [1].....	13
FIGURA 2	– Geometria de detecção	14
FIGURA 3	– Diagrama de blocos do espectrômetro γ	15
FIGURA 4	– Curva de calibração em energia do espectrômetro γ	16
FIGURA 5	– Curva de calibração em eficiência relativa do espectrômetro γ	18
FIGURA 6	– Ajuste realizado pelo IDF para energia de 417 keV (canal $482,674 \pm 0,006$)	22
FIGURA 7.a	– Espectros dos raios γ do decaimento β^- do ^{127}Te , na região de energia de 35 keV a 125 keV	25
FIGURA 7.b	– Espectros dos raios γ do decaimento β^- do ^{127}Te , na região de energia de 140 keV a 250 keV	26
FIGURA 7.c	– Espectros dos raios γ do decaimento β^- do ^{127}Te , na região de energia de 345 keV a 460 keV	26
FIGURA 8	– Curvas de decaimento do ^{127}Te	28
FIGURA 9	– Valores de meia-vida das amostras de ^{127}Te	29
FIGURA 10.a	– Visualização da pasta de trabalho do Excel PT-1 com os dados experimentais da radiação de fundo do laboratório	36
FIGURA 10.b	– Visualização da pasta de trabalho do Excel PT-2 com os dados experimentais da 1ª hora de contagem do ^{127}Te	37
FIGURA 10.c	– Visualização da pasta de trabalho do Excel PT-3 com os dados experimentais de 30 horas de contagem do ^{127}Te	38
FIGURA 11	– Visualização da pasta de trabalho do Excel PT-4 usada para gerar os espectros sobrepostos do ^{127}Te e da radiação de fundo do laboratório	40
FIGURA 12.a	– Visualização do espectro gama do ^{127}Te e de fundo do laboratório (canal 0 ao 1000) gerados pelo programa Excel.....	41

FIGURA 12.b	– Visualização do espectro gama parcial do ^{127}Te e de fundo do laboratório (canal 200 ao 550) gerados pelo programa Excel	42
FIGURA 13	– Visualização da pasta do Excel PT-5 utilizada para a localização do fotopico de 418 keV	44
FIGURA 14	– Visualização da pasta de trabalho do Excel PT-6, parcialmente preenchida, utilizada para os cálculos das áreas do fotopico de 418 keV do ^{127}Te	45
FIGURA 15	– Visualização da pasta de trabalho do Excel PT-7 utilizada para o cálculo da meia-vida do decaimento beta do ^{127}Te	46
FIGURA 16.a	– Pasta de trabalho PT-1 com a coluna das energias preenchida	49
FIGURA 16.b	– Pasta de trabalho PT-2 com a coluna das energias preenchida	50
FIGURA 17	– Pasta de trabalho PT-6 totalmente preenchida	51
FIGURA 18	– Pasta de trabalho PT-7 com o resultado do ajuste da exponencial sobre o gráfico	52

INTRODUÇÃO

Em estudos relacionados à pesquisa básica em física nuclear, o conhecimento de propriedades do núcleo é de fundamental importância para a compreensão da estrutura nuclear. As propriedades de um núcleo radioativo, tais como: energia e intensidade da radiação gama, energia dos níveis excitados, alimentação beta, razão de mistura multipolar da radiação gama, etc., podem ser investigadas pelo espectro de radiação gama emitida.

Em termos práticos, ao utilizar a radiação gama para o estudo de propriedades do núcleo, o que se faz é uma análise qualitativa e quantitativa do espectro de radiação gama emitida. Para tanto, necessita-se, por exemplo, de feixe de nêutrons para ativação do núcleo em questão, instrumentação nuclear adequada e programas de computador para análise dos espectros de raios gama gerados.

No presente estudo, foi realizada uma análise espectroscópica de um dos isótopos do telúrio, especificamente o isótopo de ^{127}Te que decai por emissão β^- populando os estados excitados do ^{127}I .

Posteriormente, selecionou-se um conjunto de dados experimentais, desse estudo, visando a sua utilização em uma proposta didática para o desenvolvimento do tema: “Núcleo Atômico e Radioatividade” com alunos do 3º ano do Ensino Médio de escolas estaduais. Esse tema faz parte da proposta curricular de Física, da Secretaria da Educação do Estado de São Paulo, e vai ao encontro das orientações de desenvolvimento de um estudo mais empírico da Física ao utilizar dados experimentais para se chegar a conceitos abstratos da Física Nuclear. Além disso, a utilização de dados experimentais possibilita uma ampla e rica variedade de situações de aprendizagem, tanto do tema em estudo como das ferramentas computacionais e dos recursos matemáticos empregados no campo de investigação espectroscópica via radiação gama.

A escolha do radioisótopo ^{127}Te foi determinada pela relativa simplicidade de sua estrutura nuclear, pela disponibilidade comercial do ^{126}Te , utilizado para a produção do ^{127}Te , além da necessidade de um investimento em aprimorar/confirmar os resultados existentes referentes a este decaimento beta.

CAPÍTULO I – ESPECTROSCOPIA GAMA

I.1 OBJETIVO

Medida da meia-vida associada ao decaimento β^- do ^{127}Te e determinação da energia e intensidade das transições gama deste decaimento.

I.2 MOTIVAÇÃO

De acordo com os dados que constam da última compilação de dados realizada por Firestone ^[1] (FIG. 1), o esquema de decaimento β^- do ^{127}Te é essencialmente baseado nas medidas realizadas por Apt *et al* ^[2], em 1970, utilizando detectores de Ge(Li). Uma análise dos dados obtidos neste estudo mostra que existem várias transições gama, as quais devido à baixa intensidade, ainda estão por ser confirmadas e outras, que embora observadas em diferentes estudos, não foram posicionadas no esquema de níveis. Além disso, observam-se incertezas no cálculo da intensidade, associadas às transições gama, que para muitas, chega a 30%. Outro parâmetro que necessita de confirmação é a proposição de meia-vida do isótopo de ^{127}Te .

FIGURA 1 - Esquema de decaimento β^- do ^{127}Te proposto pela referência [1]

I.3 INSTRUMENTAÇÃO

A instrumentação nuclear utilizada na aquisição dos espectros da radiação γ constituiu-se de um detector semicondutor, eletrônica associada e sistema de aquisição de dados descritos a seguir.

Um detector de HPGe (ORTEC GEM - 60195) foi montado no interior de uma blindagem de chumbo (FIG. 2). Este tipo de blindagem minimiza a radiação de fundo do laboratório. Um suporte circular de lucite, centralizado sobre a face do detector, sustentava a amostra a uma distância de 12,5 cm, de forma a minimizar os efeitos secundários (soma e empilhamento).

FIGURA 2 – Geometria de detecção

O sistema de aquisição de dados consistiu de um amplificador linear (ORTEC - 671) acoplado ao multicanal ADCAM (ORTEC - 918 A), operando com 4096 canais, controlado por um microcomputador PC, FIG. 3.

FIGURA 3 - Diagrama de blocos do espectrômetro γ

I.4 TÉCNICA EXPERIMENTAL

Neste item é descrito o procedimento para as calibrações em energia e eficiência do espectrômetro γ e a descrição do preparo das fontes radioativas de ^{127}Te .

I.4.1 Calibração em energia

A calibração em energia consiste em obter uma equação que relacione cada canal de contagem ao seu correspondente valor de energia. Um procedimento usual para a calibração em energia do espectrômetro γ é obter um ou mais espectros utilizando fontes padrão, isto é, fontes com energias bem estabelecidas. Uma relação das fontes recomendadas para esta finalidade é dada pela IAEA (Agencia Internacional de Energia Atômica) ^[3].

Neste trabalho a calibração em energia foi obtida utilizando uma fonte de ^{152}Eu para a aquisição de um espectro de 10 minutos de contagem. Com os valores de energia das transições γ da fonte de calibração e as suas respectivas posições (canal), fornecidas pelo o programa IDF ^[4], foi possível ajustar a equação linear:

$$E(C) = a.C + b \quad (1)$$

onde

E : energia da transição γ ;

C : posição do fotopico de contagem (canal);

a e b : parâmetros ajustados pelo método dos mínimos quadrados (FIG. 4).

De modo geral, séries polinomiais são utilizadas para este ajuste, no entanto, na faixa de energia empregada neste experimento (dezenas de keV até 1,5 MeV), as componentes de ordem maior que 1 são desprezíveis e, por esse motivo, optou-se por realizar um ajuste linear.

FIGURA 4 – Curva de calibração em energia do espectrômetro γ

A reta de calibração, obtida com a utilização do o programa Origin ^[5], é apresentada abaixo:

$$E = 0,88501(3).C - 9,429(18) \quad (2)$$

As incertezas nas energias foram determinadas através da seguinte expressão de propagação de erro ^[6]:

$$\sigma_E^2 = (C^2 \cdot \sigma_a^2 + a^2 \cdot \sigma_C^2) + \sigma_b^2 \quad (3)$$

I.4.2 Calibração em eficiência

A calibração em eficiência permite relacionar a área de um fotopico de contagem com a respectiva intensidade da radiação emitida (item I.6.2). Esta calibração é mais complexa quando comparada à calibração em energia, uma vez que, sua dependência energética não tem um comportamento linear. A soma de duas exponenciais mostrou-se indicada para este tipo de calibração.

A curva de eficiência relativa do detector de HPGe, expressa por $\varepsilon(E)$, para a geometria de detecção, foi obtida utilizando a fonte padrão de ¹⁵²Eu ^[3], que possui os valores das intensidades de suas transições gama bem estabelecidas, e expressa pela função:

$$\varepsilon(E) = a_1 \cdot e^{-b_1 \cdot E} + a_2 \cdot e^{-b_2 \cdot E} \quad (4)$$

onde: a_1 , a_2 , b_1 e b_2 são os parâmetros ajustados (FIG. 5).

FIGURA 5 – Curva de calibração em eficiência relativa do espectrômetro γ

A curva de eficiência relativa ajusta pelo programa Origin ^[5] é expressa pela equação 5. As equações utilizadas nesta calibração estão apresentadas no item I.6.2.

$$\varepsilon(E) = 2,53(13) \cdot e^{-0,00372(39)E} + 1,55(17) \cdot e^{-0,00047(8)E} \quad (5)$$

As incertezas nas eficiências relativas foram determinadas através da seguinte expressão de propagação de erro ^[6]:

$$\begin{aligned} \sigma_{\varepsilon}^2 = & a_1^2 \cdot e^{-b_1 \cdot E} \cdot (b_1^2 \cdot \sigma_E^2 + E^2 \cdot \sigma_{b_1}^2) + (e^{-b_1 \cdot E})^2 \cdot \sigma_{a_1}^2 + \\ & a_2^2 \cdot e^{-b_2 \cdot E} \cdot (b_2^2 \cdot \sigma_E^2 + E^2 \cdot \sigma_{b_2}^2) + (e^{-b_2 \cdot E})^2 \cdot \sigma_{a_2}^2 \end{aligned} \quad (6)$$

I.4.3 Produção das fontes radioativas de ^{127}Te

Para a produção de fontes radioativas de ^{127}Te ($T_{1/2} = 9,35 \text{ h}^{[7]}$), foi utilizado ^{126}Te (enriquecido em 98,6%) na forma de pó. Aproximadamente 5 mg ^{126}Te foram acondicionados em cápsulas de polietileno* (constituídas por elementos de baixa sensibilidade a nêutrons) e expostas a um fluxo de nêutron térmico de $10^{12} \text{ n}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ por 5 minutos no reator nuclear IEA R1 - IPEN-SP. A reação que descreve a produção dessas fontes é dada por:

O ^{127}Te assim produzido decai por emissão β^- , populando os estados excitados do ^{127}I , possibilitando o estudo das radiações gama emitidas.

Foram preparadas 3 amostras (m_1 , m_2 e m_3) utilizadas em rodízio, isto é, após a irradiação de m_1 por 5 minutos e posterior contagem de 40 horas, a amostra era submetida a um tempo de decaimento de 3 semanas (aproximadamente 54 meias-vidas) de modo a não apresentar atividade residual antes de ser submetida novamente à irradiação. O mesmo procedimento foi repetido para m_2 e m_3 .

Mesmo a amostra sendo enriquecida, aguardava-se por um período de 30 minutos (tempo de espera) para dar início às medidas, pois, embora em pequena quantidades, os isótopos de meia-vida curta do Te (TAB. 1) podiam ser ativados pela reação (n,γ) , contribuindo para o aumento de atividade da fonte produzindo interferentes no espectro.

A atividade final de cada fonte variou de 5 a 10 μCi permitindo a aquisição de dados por até 5 meias-vidas.

* Phosthumus Plastics

TABELA 1 - Isótopos de Te que podem ser produzidos por ativação neutrônica ^[8]

Isótopo	% Isotópica	Reação (n, γ)	T _{1/2}
¹²⁰ Te	0,096	¹²¹ Te	16,78d
		^{121m} Te	154d
¹²² Te	2,603	¹²³ Te	estável
¹²³ Te	0,908	¹²⁴ Te	estável
¹²⁴ Te	4,816	¹²⁵ Te	estável
¹²⁵ Te	7,139	¹²⁶ Te	estável
¹²⁶ Te	18,952	¹²⁷ Te	9,35h
		^{127m} Te	109d
¹²⁸ Te	31,687	¹²⁹ Te	69,6m
		^{129m} Te	33,6d
¹³⁰ Te	33,799	¹³¹ Te	25,0m
		^{131m} Te	30h

I.5 MEDIDAS DE ESPECTROSCOPIA GAMA

Após a irradiação com nêutrons do ¹²⁶Te e respectivo tempo de espera, cada fonte de ¹²⁷Te era transferida para o espectrômetro γ, descrito em I.3, onde eram adquiridos 40 espectros consecutivos de uma hora cada, correspondendo a aproximadamente 4 meias-vidas, com o objetivo de determinar a meia-vida associada a este decaimento. Após a medida de cada amostra de telúrio, era feita a aquisição do espectro da radiação de fundo do laboratório nas mesmas condições experimentais e pelo mesmo intervalo de tempo, para a devida correção.

No total foram feitas 26 irradiações, totalizando 1040 horas de contagem da amostra e da radiação de fundo.

I.6 ANÁLISE DE DADOS

A análise de um espectro γ unidimensional consiste na identificação das energias e determinação de suas intensidades. Para tanto, realiza-se primeiramente uma verificação quanto à posição dos fotopicos ao longo dos 4096 canais, em cada um dos espectros adquiridos, pois em medidas tão longas pode haver instabilidade no arranjo eletrônico alterando (deslocando) a posição dos fotopicos. Havendo alteração na posição dos fotopicos, efetua-se seu deslocamento utilizando o programa RELOCA ^[9].

Na sequência, efetua-se a soma dos espectros (já relocados) com auxílio do programa SOMA ^[9], resultando num único espectro denominado espectro - SOMA do ^{127}Te . Este procedimento é empregado também para análise da radiação de fundo.

Desta forma, para o cálculo das energias e intensidades, utilizou-se o espectro - SOMA, corrigido da radiação de fundo, pois a estatística acumulada facilita a identificação da transições γ de baixa intensidade.

I.6.1 Cálculo da energia das transições gama

Utilizando a curva de calibração, descrita em I.4.1, e as posições dos fotopicos do espectro-SOMA, obtidas com o programa IDF ^[4], foram calculadas as energias das transições γ . Na FIG. 6 temos um exemplo do ajuste feito pelo programa IDF para a determinação da posição de uma das transições gama identificada no presente estudo.

FIGURA 6 – Ajuste realizado pelo IDF para energia de 417 keV (canal $482,674 \pm 0,006$)

I.6.2 Cálculo da intensidade relativa das transições gama

A intensidade absoluta (I) de uma transição γ é definida como a taxa de emissão da transição pela taxa de decaimento do núcleo pai. O valor dessa intensidade está relacionado com a área (A) do seu respectivo fotopico através da seguinte expressão ^[10]:

$$A = N.I.\epsilon \quad (7)$$

onde: N é o número de decaimento do núcleo durante um determinado intervalo de tempo e ϵ é a eficiência do detector para uma dada geometria de medida.

A intensidade absoluta de uma transição γ está relacionada com a probabilidade de essa transição ocorrer. Entretanto, no presente estudo será calculada a intensidade relativa por não depender da atividade da fonte, uma vez que, não existe diferença entre o uso da intensidade relativa ou absoluta para a determinação dos parâmetros nucleares desejados neste trabalho.

A intensidade relativa depende somente da área dos fotopicos e da eficiência relativa do detector associada à transição γ na geometria de medida utilizada.

Para o cálculo da eficiência relativa foi utilizada a seguinte expressão ^[11]:

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_p} \quad (8)$$

onde

ε : eficiência absoluta;

ε_r : eficiência relativa;

ε_p : eficiência relativa assumida como padrão.

Utilizando o procedimento relativo, toma-se a eficiência em função de uma transição γ assumida como padrão, resultando em:

$$\varepsilon_p = \frac{A_p}{I_p \cdot N} \quad (9)$$

onde: A_p é a área da transição γ assumida como padrão e I_p é a intensidade da transição γ assumida como padrão.

A partir das relações (7), (8) e (9) tem-se:

$$\varepsilon_r = \frac{A \cdot I_p}{I \cdot A_p} \quad (10)$$

Com o programa IDF ^[4] foram determinadas as áreas dos fotopicos provenientes da fonte padrão, e da literatura foram extraídos os valores das intensidades dessas transições ^[3]. Assim pode-se obter as eficiências relativas para os valores de energia dos fotopicos da fonte padrão e ajustar uma curva de eficiência do detector em função da energia, como descrito no item I.4.2.

As intensidades relativas (I_r) podem ser obtidas através da seguinte definição ^[11]:

$$I_r = \frac{I}{I_p} \quad (11)$$

onde: I_p é a intensidade da transição γ mais intensa do decaimento (normalmente, utiliza-se o valor arbitrário de 100 para esta intensidade).

Utilizando a equação da eficiência, equação 5, e os valores das áreas dos fotopicos, calculadas pelo programa IDF ^[4], foram determinadas as intensidades das transições γ do radionuclídeo em estudo através da seguinte expressão:

$$I_r = \frac{A}{\varepsilon_r} \cdot \frac{\varepsilon_p}{A_p} \quad (12)$$

As incertezas nas intensidades foram calculadas através da seguinte expressão de propagação de erro ^[6]:

$$\sigma_{I_r}^2 = \left(\frac{k}{\varepsilon_r}\right)^2 \cdot \sigma_A^2 + \left(\frac{kA}{\varepsilon_r^2}\right)^2 \cdot \sigma_{\varepsilon_r}^2 \quad (13)$$

onde: k é a constante ε_p/A_p .

I.6.3 Medida da meia-vida

Para esta medida, a aquisição dos dados de cada fonte de ¹²⁷Te foi feita conforme descrito em I.5: aquisição de 40 espectros consecutivos de uma hora cada, correspondendo a aproximadamente 4 meias-vidas, visando acompanhar a meia-vida associada a este decaimento beta.

I.7 RESULTADOS

O espectro direto parcial dos raios γ do decaimento β^- do ^{127}Te , correspondente a aquisição de 517 horas (denominado espectro - SOMA), é apresentado na FIG. 7, juntamente com o espectro da radiação de fundo, para o mesmo tempo de contagem. Neste espectro, podemos observar as transições de 149,7 keV e 452,3 keV do decaimento β^- do ^{131}Te e a transição de 364,5 keV do decaimento β^- do ^{131}I cujas meias-vidas são, respectivamente, de 25 minutos e 8 dias. Estas transições gama indicam a presença de ^{130}Te produzido por ativação neutrônica (TAB. 1).

FIGURA 7.a - Espectros dos raios γ do decaimento β^- do ^{127}Te , na região de energia de 35 keV a 125 keV

FIGURA 7.b - Espectros dos raios γ do decaimento β^- do ¹²⁷Te, na região de energia de 140 keV a 250 keV

FIGURA 7.c - Espectros dos raios γ do decaimento β^- do ¹²⁷Te, na região de energia de 345 keV a 460 keV

As energias e intensidades das transições γ , obtidas conforme descrito em I.6, são apresentadas na TAB. 2, juntamente com os dados da literatura ^[2, 7, 12-13].

TABELA 2 – Energia (E_γ) e intensidade relativa (I_γ) dos raios gama emitidos no decaimento β^- do ^{127}Te

E_γ (keV)				
I_γ (%)				
Presente Estudo 2011	Apt, <i>et al</i> ^[2] 1970	Neeson, <i>et al</i> ^[12] 1966	Auble, <i>et al</i> ^[13] 1965	Knight, <i>et al</i> ^[7] 1956
57,419 $\pm$ 0,032	57,63 $\pm$ 0,08	<i>nd</i>	57,6 $\pm$ 0,05	58,5 $\pm$ 1,0
<i>nd</i>	3,0 $\pm$ 0,3		<i>nd</i>	5,6 $\pm$ 1,4
202,838 $\pm$ 0,020	202,9 $\pm$ 0,1	203	203 $\pm$ 1	203 $\pm$ 3
6,26 $\pm$ 0,13	5,86 $\pm$ 0,21	5,9 $\pm$ 2,9	5,4 $\pm$ 0,2	<i>nd</i>
215,123 $\pm$ 0,020	215,1 $\pm$ 0,1	215	214 $\pm$ 1	215 $\pm$ 4
3,97 $\pm$ 0,08	3,91 $\pm$ 0,17	3,2 $\pm$ 1,6	3,9 $\pm$ 0,2	<i>nd</i>
360,294 $\pm$ 0,022	360,3 $\pm$ 0,1	360	360,0 $\pm$ 0,5	360 $\pm$ 4
13,34 $\pm$ 0,34	13,6 $\pm$ 0,1	16,0 $\pm$ 6,4	14,8 $\pm$ 0,1	15 $\pm$ 3
417,910 $\pm$ 0,023	417,9 $\pm$ 0,1	418	417,0 $\pm$ 0,5	418 $\pm$ 2
100	100	100	100	100

nd: não determinado.

Considerando-se que o decaimento β^- do ^{127}Te tem meia-vida da ordem de ~ 9 horas ^[2], para sua determinação foram ajustadas curvas de decaimento utilizando os valores das taxas de contagem (áreas dos fotopicos) da transição γ mais intensa desse radionuclídeo (418 keV) com a utilização do programa Origin ^[5]. As áreas foram determinadas com a utilização do programa IDF ^[4], para cada fotopico de 1 hora de contagem. Na FIG. 8, temos as curvas para cada uma das 26 amostras produzidas.

FIGURA 8 – Curvas de decaimento do ^{127}Te

A curva decaimento empregada no ajuste foi ^[14]:

$$C(t) = C_0 \cdot e^{-bt} \quad (14)$$

onde: $T_{1/2} = \frac{\ln(2)}{b}$. (15)

A incerteza no valor de cada medida da meia-vida foi obtida pela seguinte expressão de propagação de erros ^[6]:

$$(\sigma_{T_{1/2}})^2 = \left(\frac{\ln 2}{b^2}\right)^2 \cdot \sigma_b^2 \quad (16)$$

Na FIG. 9 são apresentados os valores das medidas da meia-vida para as 26 amostras de ^{127}Te . Ao todo, foram 873 horas de contagem para a determinação desse parâmetro nuclear.

FIGURA 9 – Valores de meia-vida das amostras de ^{127}Te

O resultado da meia-vida do ^{127}Te foi obtido através da média ponderada dos 26 valores (FIG. 9) e apresentado na TAB. 3 juntamente com o valor da literatura ^[7] para comparação.

TABELA 3 – Meia-vida do ^{127}Te obtido no presente estudo e da literatura

	Presente Estudo, 2011	Knight <i>et al</i>, 1956 ^[7]
Meia-Vida (h)	$9,363 \pm 0,005$	$9,35 \pm 0,10$
Número de Fontes	26	1
Tempo de Contagem (total)	873 h	<i>n.i.</i>
Detector	HPGe 198cm ³	Contador Beta (proporcional)
Número de canais	4096	256

n.i.: não informado.

I.8 DISCUSSÃO

Um sumário das condições experimentais do presente trabalho, juntamente com as condições dos estudos anteriores, é apresentado na TAB. 4.

TABELA 4 – Condições experimentais dos estudos realizados no decaimento β^- do ^{127}Te

	Presente Estudo	Apt, et al, 1970	Neeson, et al, 1966	Auble, et al, 1965
Fonte	^{126}Te (98,6%) Pó: 5mg	^{126}Te (98%) *Líquida: Te em meio ácido gotejado** com cobertura de Mylar	^{126}Te (97,0%)	^{126}Te (94%) 10mg *Líquida: TeCl selada ampola de teflon ($\phi = 3\text{mm}$)
Detetor, FWHM, Intervalo de energia	HPGe 198 cm^3 , 1,87keV (1172keV ^{60}Co), 40 a 1000keV	Ge(Li) de 0,4 cm^3 , 0,6keV (59keV ^{241}Am), <90keV ^{57}Co Ge(Li) de 18 cm^3 , 2,1keV (662keV ^{137}Cs), 100 – 800 keV ^{57}Co Ge(Li) de 26 cm^3 , 2,4keV (662keV ^{137}Cs) 100 – 800 keV	NaI(Tl) 5,1cm x 5,1cm 8%(662keV ^{137}Cs), 100 - 800 keV	NaI(Tl) 7,6cm x 7,6cm 8%(662keV ^{137}Cs) 100 - 800 keV Ge(Li) de 0,6 cm^3 , 6keV (662keV ^{137}Cs), 100 - 800 keV
Número de Canais	4096	4096	256	ni
Tempo de irradiação	5 minutos	curta (ni)	8h	2 semanas
Fluxo de nêutrons, $\text{n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	$2 \text{ a } 5 \times 10^{11}$	ni	ni	2×10^{14}
Tempo de contagem	40 h por fonte	ni	9 - 12 h por fonte	ni

SC: medidas realizadas utilizando sistema anti-Compton

*: separação radioquímica (Sb e Ag)

**: suporte da fonte não informado

ni: não informado

De acordo com a TAB. 4, tem-se que as medidas de espectroscopia γ no presente estudo foram realizadas utilizando um detector de melhor resolução (HPGe), comparativamente aos estudos anteriores, (realizados com detectores de Ge(Li) e NaI(Tl)), resultando na determinação de energias e intensidades compatíveis com estudo mais recente, realizado por Apt, et al^[2], porém, com melhor precisão. A ausência do cálculo da intensidade da transição de 57 keV deve-se à falta de dados na curva de eficiência do detector para baixas energias ($E\gamma < 120$ keV).

As energias de menor intensidade ($I\gamma < 0,1\%$), alimentadas pelo fraco decaimento beta ($0,026 - 0,00013\%$), que constam da literatura não foram observadas neste estudo por estarem em uma região do espectro com alta taxa de contagem devido à contribuição de espalhamento Compton.

Para a medida da meia-vida, obteve-se um resultado com incerteza significativamente menor, uma vez que, além do detector de melhor resolução, investiu-se em estatística.

CAPÍTULO II – PROPOSTA DIDÁTICA

II.1 OBJETIVO

Com o objetivo de desenvolver junto a alunos do 3º ano do Ensino Médio, de Escolas Estaduais do Estado de São Paulo, os temas “Núcleo Atômico e Radioatividade” foi elaborada e aplicada uma proposta didática de manipulação e análise de dados experimentais do ^{127}Te , de modo semelhante ao que se faz nos laboratórios de espectroscopia nuclear, visando uma análise qualitativa das energias das radiações gama emitidas no decaimento beta deste radioisótopo bem como o cálculo de sua meia-vida.

Para esta finalidade, dados experimentais do ^{127}Te , obtidos no presente estudo espectroscópico, foram manipulados pelos alunos utilizando o programa Excel ^[15] (versão 2007) disponível na rede pública de educação do Estado de São Paulo.

II.2 PROPOSTA CURRICULAR DE FÍSICA

Na proposta curricular de Física ^[16] do Estado de São Paulo é destacada a importância da experimentação para um aprendizado significativo da Física. Por meio da experimentação, o aluno tem contato direto com o fenômeno estudado e assim pode interpretá-lo de maneira mais clara e concreta antes de aplicar as ferramentas da Matemática para descrevê-lo.

A experimentação, por sua vez, tem sido identificada apenas com as práticas laboratoriais, o que a torna aplicável à apenas a um número limitado de fenômenos e, muitas vezes, inviável financeiramente.

O uso de objetos do cotidiano (pilhas, lâmpadas, etc.) ou de recursos audiovisuais podem servir para demonstrar determinados fenômenos, permitindo introduzir conceitos abstratos, comuns no ensino da Física. A própria vivência do aluno pode servir de conteúdo empírico, uma vez que, ele vive em um mundo rico de fenômenos percebidos e objetos manipuláveis. No Estado São Paulo, onde as escolas estaduais possuem salas de informática com computadores para o uso dos alunos, têm-se mais um recurso muito útil para as aulas de experimentação. Os computadores podem ser usados para simular fenômenos físicos ou utilizados como ferramenta de manipulação de dados experimentais e fornecimento de resultados.

Entende-se, dessa maneira, que a experimentação envolve muito mais do que as práticas laboratoriais e que a utilização de recursos disponíveis para a sua execução a torna viável do ponto de vista financeiro e operacional.

II.3 MATERIAL DIDÁTICO

Textos conceituais ^[17], que compõem o material didático fornecido pela Secretaria da Educação do Estado de São Paulo aos alunos da 3ª série do Ensino Médio, e textos complementares ^[18], acompanhados de alguns exercícios (APÊNDICE A), que abordam os assuntos: constituição e estabilidade dos núcleos atômicos, radiação nuclear, meia-vida e detector de radiação, foram utilizados como introdução antes da manipulação dos dados experimentais.

Uma planilha do Excel, com os dados experimentais do ^{127}Te e pastas de trabalho destinadas a utilização destes dados, completa o material didático disponibilizado aos alunos. O APÊNDICE B apresenta, por meio de figuras, todas as pastas de trabalho do Excel na seqüência em que foram utilizadas (7 pastas no total, incluindo os dados experimentais).

A planilha do Excel com os dados experimentais foi copiada para 11 computadores do laboratório de informática da Escola Estadual Professora Maria Aparecida Nigro Gava.

II.3.1 Dados experimentais

Para a identificação das energias dos raios gama emitidos e o cálculo da meia-vida do decaimento beta do ^{127}Te , foram selecionados 30 arquivos consecutivos, com 1 hora de contagem cada, de uma das amostras do ^{127}Te , e um arquivo com 1 hora de contagem (sem a amostra de ^{127}Te) para a caracterização da radiação de fundo do laboratório.

Estes arquivos foram transferidos para uma planilha do Excel e separados em três pastas de trabalho (PT):

- PT-1: dados da radiação de fundo do laboratório (1 hora de contagem),
- PT-2: dados da primeira hora de contagem da radiação emitida pela amostra de ^{127}Te ,
- PT-3: dados das 30 horas de contagem da amostra, incluindo a primeira hora.

Na FIG. 10, são apresentadas as imagens das janelas geradas pelo programa Excel (PT-1, PT-2 e PT-3) com os dados experimentais selecionados.

FIGURA 10.a – Visualização da pasta de trabalho do Excel PT-1 com os dados experimentais da radiação de fundo do laboratório

FIGURA 10.b – Visualização da pasta de trabalho do Excel PT-2 com os dados experimentais da 1ª hora de contagem do ^{127}Te

Te127 - Microsoft Excel

PT-3 (Radiação do Te 127)

PT-2 (Radiação do Te 127)

PT-4 (Leitura das Energias)

100%

Pronto

Te127 - Microsoft Excel

Início Inserir Layout da Página Fórmulas Dados Revisão Exibição Desenvolvedor

T2

f_{γ}

A B C D E F G H I J K L M N

DADOS EXPERIMENTAIS

Radiação do Telúrio em 30 h de Contagem

Contagem

Canal	1ª hora	2ª hora	3ª hora	4ª hora	5ª hora	6ª hora	7ª hora	8ª hora	9ª hora	10ª hora	11ª hora	12ª hora	13ª hora	14ª hora
43	36	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
44	37	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
45	38	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
46	39	5	10	5	14	8	8	4	7	7	7	7	10	15
47	40	18	21	24	25	26	19	26	27	33	30	23	19	33
48	41	54	53	50	52	46	42	47	38	49	50	52	48	67
49	42	198	210	215	219	206	224	208	217	223	288	290	293	299
50	43	856	847	795	843	779	827	863	820	892	924	904	924	1009
51	44	1630	1495	1565	1574	1541	1547	1525	1495	1621	1658	1611	1710	1713
52	45	2229	2112	2251	2118	2190	2124	2221	2176	2213	2196	2237	2194	2224
53	46	2612	2672	2692	2719	2579	2581	2650	2584	2644	2705	2711	2621	2756
54	47	3062	3045	3026	2889	2913	3002	2955	3015	2899	3027	2915	2913	2923
55	48	3265	3266	3235	3206	3238	3271	3191	3105	3251	3265	3208	3293	3240
56	49	3564	3414	3404	3348	3438	3266	3268	3327	3439	3388	3381	3336	3412
57	50	3549	3628	3546	3577	3582	3424	3528	3447	3535	3443	3549	3419	3515
58	51	3778	3771	3548	3599	3675	3599	3574	3534	3505	3547	3632	3574	3571
59	52	3683	3715	3760	3750	3606	3656	3591	3644	3612	3685	3653	3623	3636
60	53	3688	3880	3771	3853	3696	3586	3775	3788	3664	3591	3735	3594	3786
61	54	3894	3869	3926	3844	3816	3772	3760	3733	3583	3791	3758	3576	3716
62	55	3888	3861	3843	3823	3705	3783	3837	3741	3686	3757	3765	3719	3711
63	56	3965	3820	3846	3802	3836	3879	3924	3858	3818	3689	3718	3801	3715

FIGURA 10.c – Visualização da pasta de trabalho do Excel PT-3 com os dados experimentais de 30 horas de contagem do ^{127}Te

II.3.2 Pastas de trabalho do Excel: utilização dos recursos computacionais

Neste item serão descritas as características da pasta de trabalho PT-4, utilizada para a identificação das energias das transições gama associadas ao decaimento beta do ^{127}Te , e das pastas de trabalho PT-5, PT-6 e PT-7, utilizadas para a determinação da meia-vida do ^{127}Te .

Na FIG. 11 é apresentada a composição da pasta de trabalho PT-4. Esta pasta utiliza os dados experimentais da primeira hora de contagem da amostra de ^{127}Te e os dados experimentais da contagem de 1 hora da radiação de fundo. A utilização do comando **Espectro Total** gera o espectro da amostra de ^{127}Te , sobreposto ao espectro da radiação de fundo (ver FIG. 12.a). Neste espectro, é possível identificar, por comparação, os fotopicos provenientes da amostra radioativa e da radiação de fundo. O valor da energia da transição gama correspondente a um determinado fotopico de contagem é lido diretamente no espectro passando o *mouse* sobre fotopico, FIG. 12.b.

Da mesma forma, o comando **Espectro Parcial** permite a geração de parte do espectro da amostra de ^{127}Te , sobreposta ao espectro da radiação de fundo (ver FIG. 12.b).

Os espectros gerados nesta pasta de trabalho são de fácil leitura, pois possuem poucas transições gama.

FIGURA 11 – Visualização da pasta de trabalho do Excel PT- 4 usada para gerar os espectros sobrepostos do ¹²⁷Te e da radiação de fundo do laboratório

FIGURA 12.a – Visualização do espectro gama do ^{127}Te e de fundo do laboratório (canal 0 ao 1000) gerados pelo programa Excel

FIGURA 12.b – Visualização do espectro gama parcial do ^{127}Te e de fundo do laboratório (canal 200 ao 550) gerados pelo programa Excel

Nas FIG. 13, 14 e 15 são apresentadas as composições das pastas de trabalho PT-5, PT-6 e PT-7. Estas pastas utilizam os dados experimentais das 30 horas de contagem da amostra para a determinação da meia-vida do ^{127}Te .

Para a determinação da meia-vida do ^{127}Te , foi utilizada a emissão gama mais intensa, ver FIG. 12.b (418 keV). As áreas desse fotopico foram calculadas somando as contagens dos canais correspondentes à sua posição (canal 480 ao 485) e descontando a contribuição da radiação de fundo do laboratório, calculada a partir das áreas adjacentes ao fotopico (canal 477 ao 479 e 486 ao 488), ver FIG. 13. Este procedimento foi realizado nos 30 espectros consecutivos desse radionuclídeo. À medida que as áreas do fotopico eram calculadas, o gráfico do número de contagem (área) em função tempo era traçado automaticamente, mostrando a curva de decaimento do ^{127}Te , FIG. 14 e 15.

FIGURA 13 – Visualização da pasta do Excel PT-5 utilizada para a localização do fotopico de 418 keV

FIGURA 14 – Visualização da pasta de trabalho do Excel PT-6, parcialmente preenchida, utilizada para os cálculos das áreas do fotopico de 418 keV do ^{127}Te

FIGURA 15 – Visualização da pasta de trabalho do Excel PT-7 utilizada para o cálculo da meia-vida do decaimento beta do ^{127}Te

II.4 DESEMPENHO DO PROGRAMA EXCEL

As energias identificadas no espectro, gerado pelo programa Excel, são apresentadas na TAB. 5 juntamente com os resultados obtidos com a utilização da curva de calibração do detector, equação 2. Os valores das energias, obtidos com o programa Excel, podem variar até 1 keV, dependendo da posição de leitura do *mouse* sobre o fotopico, o que não compromete o objetivo didático de identificação das transições gama do ^{127}Te .

TABELA 5 – Energias dos raios gama do decaimento beta do ^{127}Te

Energias dos Raios Gama (keV)	
<i>Material Didático (Espectro do Excel)</i>	<i>Estudo Espectroscópico (Tabela 2)</i>
202	202,838
215	215,123
360	360,294
418	417,910

O valor da meia-vida do radioisótopo ^{127}Te , obtido a partir do ajuste da curva de decaimento pelo programa Excel, é apresentado na TAB. 6. O valor obtido no estudo espectroscópico, item I.7, é apresentado para comparação.

TABELA 6 – Meia-vida do decaimento beta do ^{127}Te

Meia-Vida (h)	
<i>Material Didático (Espectro do Excel)</i>	<i>Estudo Espectroscópico (Tabela 3)</i>
9,5	9,363

II.5 APLICAÇÃO DA PROPOSTA DIDÁTICA

Esta proposta didática foi aplicada no final do 4º bimestre a duas turmas da 3ª série do Ensino Médio, uma com 10 alunos e outra com 6 alunos, na Escola Estadual Professora Maria Aparecida Nigro Gava, localizada em Taboão da Serra, município da Grande São Paulo.

A execução da proposta teve duas etapas bem distintas: na primeira, foram introduzidos os aspectos teóricos e na segunda os alunos manipularam os dados experimentais do ^{127}Te utilizando o programa Excel.

Como ponto de partida, foi realizada uma discussão em sala de aula com o intuito de avaliar o grau de conhecimento dos alunos com relação aos temas: Núcleo Atômico e Radioatividade, em seguida, foram distribuídos os textos conceituais (APÊNDICE A e [17]) para leitura, discussão e resolução de exercícios. Basicamente, os tópicos trabalhados visaram introduzir os conceitos de: constituição e estabilidade dos núcleos atômicos, radiação nuclear, meia-vida e detector de radiação.

Após familiarização com os temas, partiu-se para a utilização da planilha do Excel com a apresentação das pastas de trabalho com os dados experimentais da espectroscopia gama (PT-1 a PT-3).

A manipulação dos dados experimentais, pelos alunos, começou com a utilização da reta de calibração do detector para calcular e preencher a coluna das energias correspondentes aos canais de contagem, nas pastas de trabalho PT-1 e PT-2, ver FIG. 16.

FIGURA 16.a – Pasta de trabalho PT-1 com a coluna das energias preenchida

FIGURA 16.b – Pasta de trabalho PT-2 com a coluna das energias preenchida

Depois de preenchida a coluna das energias, os alunos partiram para a identificação das transições gama do ^{127}Te nos espectros da amostra, gerados automaticamente com a utilização dos comandos: **Espectro Total** e **Espectro Parcial** da pasta PT-4 (FIG. 11). A tabela situada nesta mesma pasta de trabalho também foi preenchida com os valores das energias identificadas. Para saber se uma determinada transição pertencia ou não ao ^{127}Te era feita a comparação do valor da energia lida nos espectros com os valores das energias conhecidas para esse radioisótopo, indicadas na tabela. Das cinco transições identificadas, quatro são do ^{127}Te (202, 215, 360 e 418 keV) e uma do ^{131}I (464 keV). Nesta etapa de identificação das emissões gama nos espectros, o objetivo foi um estudo visual e qualitativo das emissões do radioisótopo investigado.

Para determinar o valor da meia-vida do ^{127}Te , os alunos identificaram a posição do fotopico de 418 keV (canal de 477 a 488) na pasta de trabalho PT-5 (FIG. 13), copiaram as contagens pertencentes a esta faixa de canal de cada uma das 30 horas de contagem da pasta de trabalho PT-3 e calcularam as áreas dos 30 fotopicos consecutivos (418 keV), descontando a contribuição da radiação de fundo do laboratório, ver FIG. 17.

FIGURA 17 – Pasta de trabalho PT-6 totalmente preenchida

Depois de calculadas todas as áreas e, conseqüentemente, terminada a montagem automática do gráfico da taxa de contagem em função do tempo (FIG. 17) partiu-se para a última etapa do trabalho: o cálculo do valor da meia-vida do decaimento beta do ^{127}Te .

Na FIG. 18, temos a pasta de trabalho PT-7 utilizada para o cálculo da meia-vida do ^{127}Te , no qual, o gráfico da taxa de contagem em função do tempo (curva de decaimento) aparece novamente. Sobre este gráfico, os alunos utilizaram a função *adicionar linhas de tendência* do programa Excel, que ajustou uma exponencial do tipo:

$$y(x) = C_0 \cdot e^{-\lambda x} \quad (17)$$

Com o parâmetro λ ajustado foi possível, através da equação 18, calcular o valor da meia-vida do decaimento beta do ^{127}Te :

$$T_{1/2} = \frac{\ln(2)}{\lambda} \quad (18)$$

FIGURA 18 – Pasta de trabalho PT-7 com o resultado do ajuste da exponencial sobre o gráfico

II.6 RESULTADOS

A leitura e discussão dos textos didáticos, bem como a realização dos exercícios (APÊNDICE A), foram executadas satisfatoriamente por todos os alunos. O tempo de execução, incluindo o tempo de correção das atividades, foi de 90 minutos, divididos em duas aulas de 45 minutos. No decorrer desta etapa, foram levantadas várias questões sobre radiação nuclear, o que evidenciou o envolvimento dos alunos com o tema.

Dos 16 alunos que participaram desta atividade, 50% tinham bom domínio de uso do programa Excel, a outra metade afirmou nunca ter usado este programa. Esta diferença de conhecimento foi contornada com a utilização dos computadores em duplas.

As atividades de utilização da planilha foram divididas em quatro aulas de 45 minutos cada, totalizando 180 minutos. Cada aula teve o seu objetivo bem definido. Na primeira aula, os alunos utilizaram a reta de calibração do detector para o cálculo das energias correspondentes aos canais de contagem, na segunda aula, identificaram as energias das transições gama da amostra e, na terceira e quarta aula, calcularam a meia-vida do decaimento beta do ^{127}Te .

As atividades propostas foram concluídas com total aproveitamento por 87,5% dos alunos.

II.7 DISCUSSÃO

A realização de atividades práticas, que envolvem o uso do computador, após as aulas teóricas, foi recebida com entusiasmo pelos alunos e mostrou bons resultados no aprendizado da Física. Este tipo de atividade exigiu a colaboração dos alunos bem como o preparo antecipado do material didático (pelo professor).

O desenvolvimento das atividades propostas, discutidas no ítem II.5, necessitou do acompanhamento constante do professor, durante toda sua execução, para esclarecimentos de dúvidas, além de evitar dispersões como conversas paralelas e utilização indevida de equipamentos e programas de computador.

Um aspecto importante a considerar é que as turmas devem ser reduzidas, com aproximadamente 10 alunos, ou conte com a participação de mais profissionais em turmas maiores.

Apesar de os alunos não terem participado das medidas que geraram os dados utilizados neste trabalho, por tratar-se de fontes emissoras de radiação ionizante, as atividades propostas foram muito estimulantes. A utilização de dados experimentais possibilitou ainda uma ampla e rica variedade de situações de aprendizagem ao trazer uma série de informações da área nuclear para o nosso mundo sensorial, acabando por dar significado às grandezas microscópicas da Física Nuclear.

CAPÍTULO III - CONCLUSÕES

III.1 CONCLUSÕES

Com relação ao estudo espectroscópico realizado no núcleo de ^{127}Te , o emprego de um instrumental aprimorado e maior estatística resultou em dados de energia e intensidade das transições gama e de meia-vida do núcleo com incertezas menores.

A proposta didática acerca do uso do programa Excel, para o ensino de Física, teve um bom desempenho e gerou grande motivação entre os alunos, de modo que a manipulação dos dados transcorreu de forma eficiente. Outro ponto positivo, na utilização desse programa, é o fato de ele possibilitar aos alunos uma maior interação com este recurso computacional multidisciplinar e ampliar seu conhecimento em Física Nuclear.

III.2 PERSPECTIVAS

Com relação ao estudo espectroscópico de ^{127}Te pretende-se realizar medidas de espectroscopia simples e de coincidência gama-gama com um sistema anti-Compton visando identificar energias de mais baixa intensidade bem como obter as relações de coincidência que permitam posicionar as energias no esquema de níveis. Estas medidas serão realizadas no espectrômetro gama do laboratório Pelletron (4 detectores de HPGe de alta resolução e supressores Compton).

Em relação à proposta didática, sua utilização nos próximos anos na Escola Estadual Nigro Gava e, posteriormente, sua divulgação e aplicação em outras escolas, tende a introduzir atualizações e complementações no programa que compõe o material didático empregado no ensino de Física Nuclear, para alunos do Ensino Médio.

Pretende-se divulgar o material didático elaborado neste estudo em encontros de professores de Física, promovidos pelas Diretorias de Ensino ligadas à Secretaria de Educação do Estado de São Paulo, e em eventos voltados ao Ensino de Física.

APÊNDICE A - Textos Complementares ^[18]

Detector de Radiação

Detector de radiação é um instrumento capaz de medir a radiação emitida por uma fonte radioativa.

Considere que um detector de raios gama (por exemplo, HPGe) ficou próximo a uma fonte radioativa, por um determinado intervalo de tempo, e que foi obtida uma relação entre a intensidade da radiação coletada (contagem) e a posição de armazenamento dessas intensidade (canal). Nesta circunstância, é possível, utilizando a reta de calibração em energia, construir o espectro da intensidade da radiação gama coletada em função da energia dessa radiação.

Exemplo

Um detector de HPGe ficou ligado por 1 minuto próximo de uma fonte radioativa e gerou os seguintes dados experimentais:

Canal	Contagem	Energia (keV)
0	0	
1	1	
2	2	
3	4	
4	2	
5	1	
6	1	
7	2	
8	5	
9	3	
10	1	

Mãos a Obra

1ª etapa – Complete a tabela calculando os valores das energias correspondentes a cada canal, utilize a reta de calibração do detector: $E(c) = 2 \cdot c + 1$, onde c é o canal de contagem e E o valor da energia da radiação.

2ª etapa – Faça um gráfico da contagem em função do canal utilizando os dados da tabela.

Agora responda: quantos raios gama com energia de 17 keV foram contados pelo detector e quantos, com energia de 3 keV?

APÊNDICE B – Pastas de Trabalho do Excel

Te 127 - Microsoft Excel

2 DADOS EXPERIMENTAIS
Radiação do Telúrio em 30 h de Contagem

Contagem

Canal	1ª hora	2ª hora	3ª hora	4ª hora	5ª hora	6ª hora	7ª hora	8ª hora	9ª hora	10ª hora	11ª hora	12ª hora	13ª hora	14ª hora
36	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
37	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
38	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
39	5	10	5	14	8	8	4	7	7	7	7	10	15	
40	18	21	24	25	26	19	26	27	33	30	23	19	33	
41	54	53	50	52	46	42	47	38	49	50	52	48	67	
42	198	210	215	219	206	224	208	217	223	288	290	293	299	
43	856	847	795	843	779	827	863	820	892	924	904	924	1009	
44	1630	1495	1565	1574	1541	1547	1525	1495	1621	1658	1611	1710	1713	
45	2229	2112	2251	2118	2190	2124	2221	2176	2213	2196	2237	2194	2224	
46	2612	2672	2692	2719	2579	2581	2650	2584	2644	2705	2711	2621	2756	
47	3062	3045	3026	2889	2913	3002	2955	3015	2899	3027	2915	2913	2923	
48	3265	3266	3235	3206	3238	3271	3191	3105	3251	3265	3208	3293	3240	
49	3564	3414	3404	3348	3438	3266	3268	3327	3439	3388	3381	3336	3412	
50	3549	3628	3546	3577	3582	3424	3528	3447	3535	3443	3549	3419	3515	
51	3778	3771	3548	3599	3675	3599	3574	3534	3505	3547	3632	3574	3571	
52	3683	3715	3760	3750	3606	3656	3591	3644	3612	3685	3653	3623	3636	
53	3688	3880	3771	3853	3696	3586	3775	3788	3664	3591	3735	3594	3786	
54	3894	3869	3926	3844	3816	3772	3760	3733	3583	3791	3758	3576	3716	
55	3888	3861	3843	3823	3705	3783	3837	3741	3686	3757	3765	3719	3711	
56	3965	3820	3846	3802	3836	3879	3924	3858	3818	3689	3718	3801	3715	

PT-2 (Radiação do Te 127) PT-3 (Radiação do Te 127-30h) PT-4 (Leitura das Energias)

Pastas de trabalho PT-1, PT-2 e PT-3 – dados experimentais

Pasta de trabalho PT-4 e espectros – análise espectroscópica

Pastas de trabalho PT-5, PT-6 e PT-7 – determinação da meia-vida

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. FIRESTONE, R. B.; SHIRLEY, V. S. *Table of Isotopes*, 8th. ed. New York: John Wiley and Sons, 1996.
2. APT, K. E.; WALTERS, W. B.; GORDON, G. E. Decay schemes of 109 d $^{127\text{m}}\text{Te}$ and 9.4 h $^{127\text{g}}\text{Te}$. *Nucl. Phys A*, n. 152, p. 344-353, 1970.
3. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. X-RAY AND GAMMA-RAY STANDARDS FOR DETECTOR CALIBRATION. Viena, September 1991. (IAEA-TECDOC-619).
4. GOUFFON, P. *Manual do programa Idefix*. São Paulo, Universidade de São Paulo, Instituto de Física, Laboratório do Acelerador Linear, 1982.
5. OriginPro 8, version 8.0: OriginLab Corporation, 2007.
6. VUOLO, J. H. Introdução à teoria dos erros: laboratório de Física 1 e 2. Apostila Instituto de Física - USP, São Paulo, 1992.
7. KNIGHT, J. D.; MIZE, J. P.; STARNER, J. W.; BARNES, J. W. Radiations of Te^{127} and $\text{Te}^{127\text{m}}$. *Phys. Rev.* v. 102, p. 1592-1597, 1956.
8. Environmental, Chemistry & Hazardous Materials News, Careers & Resources. Disponível em: <<http://environmentalchemistry.com/yogi/periodic/Te-pg2.html#Nuclides>>. Acesso em: 11 nov. 2008.
9. MEDEIROS, J. A. G. Correlação angular direcional gama-gama no núcleo ^{72}Ge . 2000. Tese (Doutorado) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo.

10. KNOLL, G. F. ***Radiation Detection and Measurement***. New York, John Wiley & Sons, 1989. cap 12, Germanium Gamma-Ray Detectors. p. 427-436.
11. MEDEIROS, J. A. G. Níveis do ^{72}Ge populados pelo decaimento β^- do ^{72}Ga . 1995. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo.
12. NEESON, J. F.; ROALSVIG, J. P.; ARNS, R. G. Directional correlations in ^{127}I . *Can. J. Phys.*, v. 44, p. 1313-1320, 1966.
13. AUBLE, R. L.; KELLY, W. H. A Study of the excited states of ^{127}I populated in the decay of ^{127}Te and $^{127\text{m}}\text{Te}$. *Nucl. Phys.* n. 73, p. 25-32, 1965.
14. KAPLAN, I. ***Nuclear Physics***. Massachusetts, Addison-Wesley Publishing Company, 1964. cap 10, Natural Radioactivity and Laws of Radioactive Transformation. p. 229-234.
15. Microsoft Office Excel 2007, versão 2007: Microsoft Corporation, 2007.
16. SECRETARIA DA EDUCAÇÃO DO ESTADO DE SÃO PAULO. *Proposta Curricular do Estado de São Paulo: Física*, 2008.
17. MENEZES, L. C. e outros. *Ciências da Natureza e suas Tecnologias Física. Caderno do Aluno*. v. 3, p. 36 – 48, 2009.
18. BATISTA, W. F. Laboratório de Espectroscopia e Espectrometria das Radiações – IPEN, São Paulo, 2010.