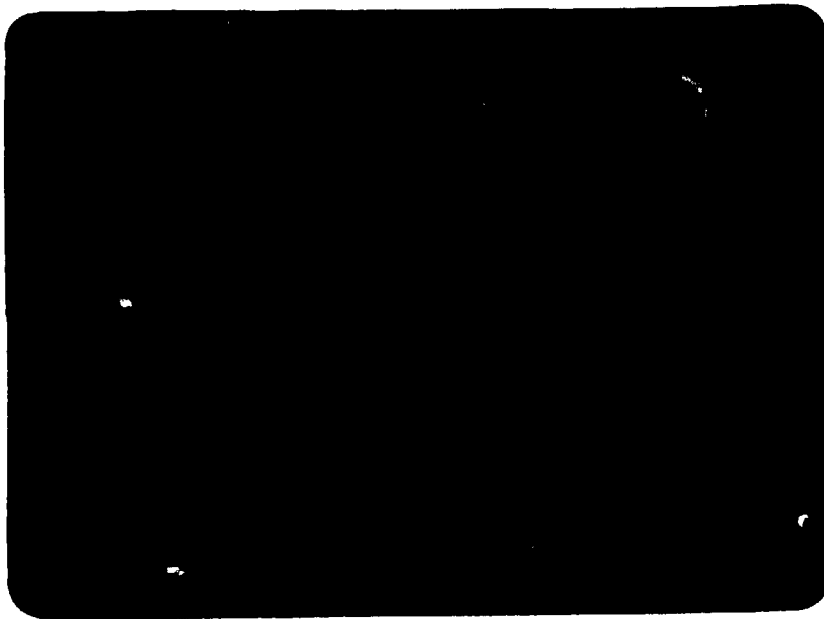
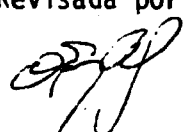
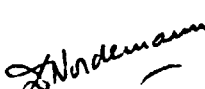





SECRETARIA DE PLANEJAMENTO DA PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA
CONSELHO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO CIENTÍFICO E TECNOLÓGICO



INSTITUTO DE PESQUISAS ESPACIAIS

1. Publicação nº <i>INPE-3002-PRE/452</i>	2. Versão	3. Data <i>rev., 1984</i>	5. Distribuição <input type="checkbox"/> Interna <input checked="" type="checkbox"/> Externa <input type="checkbox"/> Restrita
4. Origem <i>DGA/DIG</i>	Programa <i>GEONUC</i>		
6. Palavras chaves - selecionadas pelo(s) autor(es) <i>GEOFÍSICA NUCLEAR ESPECTROMETRIA GAMA</i> <i>ESPECTROMETRIA ALFA</i>			
7. C.D.U.: <i>550.3:539.16</i>			
8. Título <i>ELEMENTOS BÁSICOS DE GEOFÍSICA NUCLEAR</i>		<i>INPE-3002-PRE/452</i>	10. Páginas: <i>30</i>
			11. Última página: <i>29</i>
9. Autoria <i>Daniel J.R. Nordemann</i> <i>Enio B. Pereira</i>			12. Revisada por  <i>Odyllo D. de Aguiar</i>
Assinatura responsável 			13. Autorizada por  <i>Nelson de Jesus Parada</i> <i>Diretor Geral</i>
14. Resumo/Notas <i>A Geofísica Nuclear aplica os métodos da detecção das radiações nucleares às Geociências e, em particular, ao estudo dos processos dinâmicos da litosfera, da hidrosfera e da atmosfera, englobando também alguns aspectos da Planetologia e da Astrofísica. Neste trabalho são descritos os métodos mais usados: espectrometria alfa e espectrometria gama, assim como a interação das radiações alfa e gama com a matéria e os vários tipos de detectores (câmara de grade, detetor de silício à barreira de superfície para a radiação alfa; cintilador de iodeto de sódio ativado com tálio, e detetores de germânio hiperpuro ou de lítio difundido para a radiação gama). As principais aplicações da Geofísica Nuclear são dadas a título de exemplo para ilustrar o uso dos métodos descritos.</i>			
15. Observações			

ELEMENTOS BÁSICOS DE GEOFÍSICA NUCLEAR

D.J.R. NORDEMANN; E.B. PEREIRA

Instituto de Pesquisas Espaciais, INPE; Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, CNPq.

Resumo

Nuclear Geophysics applies the nuclear radiation detection methodology to the geosciences, specially to study the dynamical processes of the lithosphere, the hydrosphere and the atmosphere as well as some aspects of planetology and astrophysics. In this work the main methods are described: alpha-ray and gamma-ray spectrometry, the interaction of alpha and gamma radiation with matter and the detectors used (grid chambers, surface barrier silicon detector for alpha radiation; and sodium iodide thallium activated phosphors, hyperpure and lithium drifted germanium semiconductor detectors for gamma radiation). The principal applications of Nuclear Geophysics are given as examples to illustrate the use of the methods described.

Resumo

A Geofísica Nuclear aplica os métodos da detecção das radiações nucleares às Geociências e, em particular, ao estudo dos processos dinâmicos da litosfera, da hidrosfera e da atmosfera, englobando também alguns aspectos da Planetologia e da Astrofísica. Neste trabalho são descritos os métodos mais usados: espectrometria alfa e espectrometria gama, assim como a interação das radiações alfa e gama com a matéria e os vários tipos de detetores (câmara de grade, detetor de silício à barreira de superfície para a radiação alfa; cintilador de iodeto de sódio ativado com tâlio, e detetores de germânio hiperpuro ou de lítio difundido para a radiação gama). As principais aplicações da Geofísica Nuclear são dadas a título de exemplo para ilustrar o uso dos métodos descritos.

1. INTRODUÇÃO

1.1 - A GEOFÍSICA NUCLEAR

O desenvolvimento geral da Física Nuclear foi acompanhado pelo progresso das técnicas finas de medidas das radiações nucleares. Esse processo permitiu desenvolver pesquisas sobre radiações alfa, beta e gama associadas à radioatividade natural e artificial (antropogênica) na atmosfera, na hidrosfera e na litosfera. Assim nasceu a Geofísica Nuclear, ciência situada entre a Física Nuclear e as Geociências, cujos domínios mais conhecidos englobam principalmente parte da Geocronologia, da Hidrologia, da Aeronomia, da Cosmoquímica, da Astrofísica de Alta Energia e, sob um ponto de vista aplicado, da Geologia de Prospeção. Uma fração importante desses estudos, de grande interesse atual na pesquisa espacial, trata das radiações de origem nuclear na baixa, média e alta atmosfera da Terra; da radioatividade natural e induzida nos meteoritos, planetas e satélites; e dos acontecimentos cósmicos no passado que deixaram traços de sua presença no presente, tais como as quedas dos asteróides e meteoritos na Terra.

De todos os métodos da Geofísica Nuclear, empregados na pesquisa espacial, dois se destacam pela frequência de seu emprego e pela riqueza das informações que eles fornecem sobre os núclídeos radioativos das amostras medidas. Trata-se da espectrometria alfa e da espectrometria gama, cujos princípios serão descritos na segunda parte, enquanto a aparelhagem será descrita na terceira parte. A quarta parte será dedicada a algumas aplicações importantes.

2. PRINCÍPIO DA ESPECTROMETRIA ALFA E DA ESPECTROMETRIA GAMA

Um detetor de radiação nuclear é um objeto que transforma uma radiação incidente em um fenômeno perceptível, luminoso ou elétrico. Os detetores comumente usados na detecção das radiações alfa e gama fornecem, após a absorção da radiação incidente, um sinal elétrico possível de ser analisado por meios eletrônicos; o conjunto constitui uma cadeia de detecção. São as *interações da radiação incidente com a matéria* que tornam a sua detecção possível.

Outro parâmetro importante na detecção nuclear e na Geofísica Nuclear é o fator tempo. Os detetores permitem medir *números de acontecimentos*, ou seja, de emissões, detetados *por intervalo de tempo*. Por outro lado, é a transmutação dos nuclídeos radioativos em função do tempo que providencia a *escala de tempo* no estudo dos fenômenos dinâmicos das Geociências e da Planetologia, através das datações geocronológicas, por exemplo.

Um terceiro fator importante é o *aspecto discreto* das emissões radioativas alfa e gama e o *carater estatístico* das taxas de contagem medidas. Este fator é especialmente importante na *dominios das fracas radioatividades* muitas vezes encontradas na Geofísica Nuclear. Embora as técnicas de detecção tenham sido aperfeiçoadas, as taxas de contagem continuam sendo baixas, o que faz com que as incertezas não sejam desprezíveis nos resultados das medidas.

A Tabela 1 indica as propriedades mais importantes das partículas e das radiações de interesse na Geofísica Nuclear, assim como os

principais tipos de detetores. Uma partícula alfa, sendo um núcleo de hélio de velocidade equivalente a alguns MeV⁽¹⁾; e um raio gama, sendo uma radiação eletromagnética na mesma faixa de energia, são completamente diferentes. Mas o aspecto *monoenergético* das suas respectivas emissões leva à realização de *cadeias de espectrometria* comparáveis, embora essas emissões não sejam provenientes de processos nucleares semelhantes e não sejam normalmente detetadas pelos mesmos detetores.

Graças à existência de detetores capazes de fornecer informações sobre a energia absorvida na detecção, um espectrômetro nuclear alfa ou gama permite obter o espectro, isto é, a distribuição dos acontecimentos detetados em função da energia, permitindo assim identificar e medir separadamente as contribuições de diversas origens. Este aspecto será esclarecido nas Seções 2 e 3 deste texto.

Por causa do menor uso das radiações beta e X na Geofísica Nuclear aplicada à ciência espacial, o problema da sua detecção não será tratado aqui.

(1) Um eV é igual a $1,602 \cdot 10^{-12}$ erg.

TABELA 2

RADIAÇÕES ALFA, BETA, X E GAMA E PRINCIPAIS TIPOS DE DETETORES

RADIAÇÃO	NATUREZA	DETETOR	TIPO	OPERAÇÃO
α	${}^4_2\text{He}$	ZnS(Ag) Câmara de grade Diodo Si	cintilação gás/ionização semicondutor	contagem espectrometria espectrometria
β	e^{-}, e^{+}	Contador Geiger Cintilador plástico	gás/ionização cintilação	contagem contagem
X	radiação eletromagnética ≤ 120 KeV	Contador proporcional NaI(Tl) Ge(Li); GeHP	gás/ionização cintilação semicondutor	espectrometria espectrometria espectrometria
γ	radiação eletromagnética até alguns MeV	NaI(Tl) Ge(Li); GeHP	cintilação semicondutor	espectrometria espectrometria

2.1 - INTERAÇÃO DA PARTÍCULA ALFA COM A MATÉRIA

Durante a interação das partículas carregadas com a matéria, devido à sua carga elétrica, a energia é transferida aos elétrons da matéria por pequenas quantidades de energia sucessivas. A energia transferida durante uma interação é de $E_{\max} = 4E_0 m/M$ no máximo (E_0 energia inicial; m e M massas do elétron e da partícula incidente, respectivamente). No caso de uma partícula alfa de 4 MeV, tem-se $E_{\max} \approx 2$ keV. Esta energia transferida é nitidamente superior à energia necessária para mudar um elétron, dentro de um sólido, do seu estado de equilíbrio a um estado excitado da banda de condução ou, no caso de um gás, para libertar completamente um elétron ligado de uma molécula. No caso do sólido, um elétron de alta excitação (duração de vida 10^{-12} seg) cria um grande número de pares elétron-buraco quando volta até um estado de excitação menor. A energia necessária para produzir um par elétron-buraco é $W = 3,61$ eV no silício e $2,94$ eV no germânio. No caso de um gás, considera-se somente a ionização da molécula ou do átomo que perdeu um elétron. A energia média para criar um par de íons é $W = 26,4$ eV para o argônio. Em todos os casos, pode existir uma emissão de fótons no visível no momento do rearranjo final dos átomos ou das moléculas excitadas (luminescência, cintilação).

As partículas alfa se caracterizam por possuir um baixo poder de penetração na matéria, da ordem de frações de milímetros apenas para energias normalmente encontradas na superfície da Terra (Figura 1). De fato, a ordem de grandeza das energias envolvidas pelos elétrons (energia máxima transmitida em uma interação, energia necessária para criar um par elétron-buraco ou um par de íons) parece fraca quando comparada à energia incidente da partícula alfa (de um até alguns MeV),

mas devido à natureza eletromagnética das interações entre partículas carregadas, essas interações são muito prováveis e, conseqüentemente, muito frequentes. Assim a partícula alfa perde a sua energia de maneira rápida, embora progressiva. Os percursos das partículas alfa são por esta razão muito curtos, de alguns centímetros no ar até alguns microns nos sólidos. As partículas alfa são então absorvidas em pouca distância. É suficiente usar um detetor de pouca espessura para detetá-las e um absorvedor delgado para proteger-se delas.

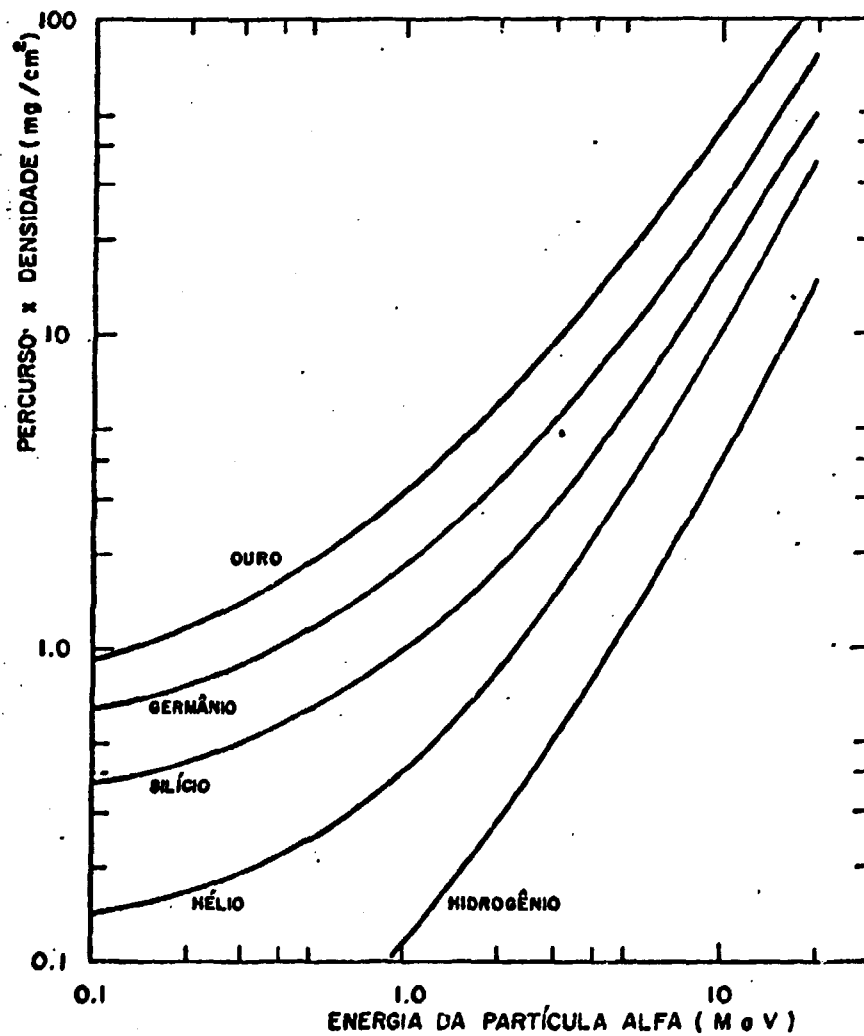


Fig. 1 - Curvas de percurso-energia calculadas para partículas alfa em vários materiais. Os percursos são expressos em densidades superficiais.

2.2 - INTERAÇÃO DA RADIAÇÃO GAMA COM A MATÉRIA

Em contraste com o comportamento das partículas alfa, a radiação gama interage pouquíssimo com a matéria, mas a fração de energia transferida a cada interação é grande, uma vez que pode atingir em uma só interação a totalidade da energia incidente, o que implica o desaparecimento do fóton incidente. Os principais processos de interação dos fótons gama com a matéria levam à transferência total ou de parte da energia do fóton incidente a um ou alguns elétrons, que são assim acelerados.

A probabilidade de interação de um fóton incidente sobre um elétron ou um núcleo alvo é definida pela sua seção de choque σ , para uma dada interação, tal que

$$\frac{d\phi}{dx} = -N \phi \sigma ,$$

onde:

N é o número de núcleos ou elétrons por unidade de volume no alvo;

ϕ é o fluxo de fótons incidentes;

σ é a seção de choque (unidade: 1 barn = 10^{-24} cm²);

x é a distância ao longo da direção de propagação do fluxo incidente.

A integração da fórmula acima em função da distância x percorrida dá as variações do fluxo em função da espessura de matéria atravessada:

$$\phi = \phi_0 \exp(-N\sigma x) = \phi_0 \exp(-fx) = \phi_0 \exp(-x/\lambda),$$

onde evidentemente $f = N\sigma$ é o coeficiente de absorção e $\lambda = 1/\mu$ é o comprimento da absorção (não confundir com o percurso).

Nos fenômenos de absorção nos quais o alvo é caracterizado pela sua densidade em elétrons independentemente da sua densidade em núcleos, usa-se o coeficiente de absorção mássica $\rho = \mu/d$ que é expresso em $\text{cm}^2 \text{g}^{-1}$ (sendo d a densidade = massa específica do alvo). Esse coeficiente, do modo que foi definido, independe da densidade ou estado físico do absorvedor (sólido, líquido ou gasoso). Tem-se $\phi = \phi_0 \exp(-\rho y)$, com as espessuras y do alvo sendo então expressas em g cm^{-2} . Essas noções de absorção das radiações nucleares na matéria segundo uma lei exponencial se aplicam a muitos casos, embora haja exceções.

Efeito Fotoelétrico Interno

É a interação entre um raio X ou gama incidente de energia $h\nu$ e um elétron ligado de uma camada profunda (K em 80% dos casos e L em 20% dos casos, aproximadamente). O fotoelétron liberado leva uma energia cinética E_c .

$$E_c = h\nu - E_{lig}$$

A energia E_{lig} representa a energia fornecida ao átomo para libertar o fotoelétron. Posteriormente o rearranjo eletrônico deste átomo faz-se com a emissão do raio X característico (ou de um elétron Auger).

A seção de choque de efeito fotoelétrico aumenta com a energia de ligação do elétron alvo e com a proximidade da energia incidente com

esta energia de ligação. A curva das variações da seção de choque de efeito fotoelétrico em função da energia do raio X ou gama incidente apresenta então descontinuidades importantes que correspondem às camadas eletrônicas cada vez mais profundas. A mesma seção de choque varia em função do número atômico dos núcleos do alvo segundo uma lei de potência de z com expoente entre 4 e 5:

$$\sigma_{fe} \propto Z^4 \text{ até } 5 .$$

O efeito fotoelétrico é o efeito mais importante para a espectrometria gama: a detecção dos raios X ou gama se faz usando processos que envolvem elétrons acelerados, subsequentemente detectados por excitação, ionização ou criação de pares elétron-buraco. Entre esses processos de transferência de energia do raio gama a um elétron, o efeito fotoelétrico é o único através do qual a totalidade da energia (menos a energia de ligação do elétron) do raio gama incidente é transferida a um elétron. A Figura 2 mostra como varia a absorção da radiação gama pelo efeito fotoelétrico ($\mu_p h$), em função da energia da radiação incidente, para o cristal cintilador de NaI(Tl) comumente empregado na detecção da radiação gama. O coeficiente de absorção μ , como já mencionado, corresponde ao inverso do comprimento de absorção ou caminho livre médio, e tem a dimensão de $[L^{-1}]$.

Efeito Compton

Trata-se da interação de um fóton gama com um elétron livre (ou pouco ligado, isto é, de uma camada periférica). O raio gama $h\nu$ incide num elétron que ganha velocidade (direção de ângulo θ com a direção do raio incidente) enquanto é emitido outro fóton de energia $h\nu' < h\nu$

(direção de ângulo φ com a direção do raio incidente). O raio gama inicial desaparece. Evidentemente, as leis de conservação da energia e do momento cinético se aplicam e levam a

$$hv' = hv / (1 + [1 - \cos\theta] hv/mc^2)$$

onde mc^2 é a energia do elétron em repouso (0,51 MeV).

Devido à simplicidade do fenômeno, esforços foram feitos para calcular teoricamente as seções de choque relativas ao efeito Compton. Assim é possível obter valores de seções diferenciais $d\sigma/d\Omega$ (por unidade de ângulo sólido) e integrais σ de choque para o efeito Compton. As frações de energia perdidas em média por efeito Compton são 14%, 34%, 44% e 66% a 100 keV, 1 MeV e 10 MeV, respectivamente.

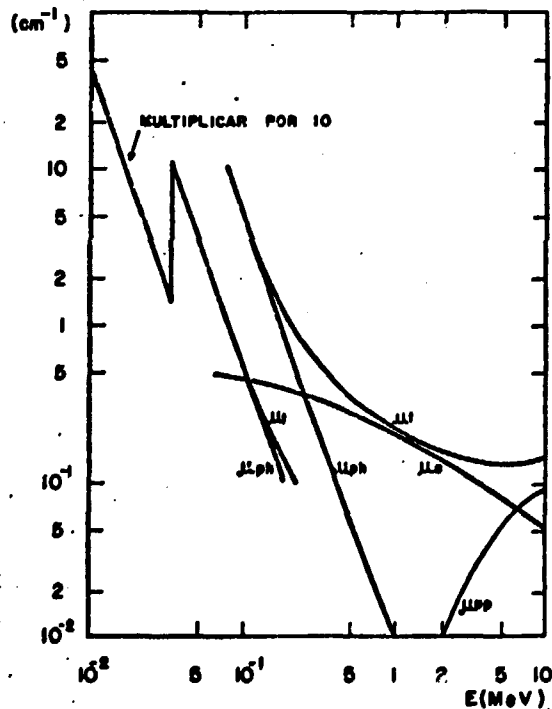


Fig. 2 - Coeficiente de absorção do cintilador NaI(Tl) para os raios gama (ph: efeito fotoelétrico; c: efeito Compton; pp: efeito de produção de pares; t: absorção total).

Em geral, no volume de um detetor acontece mais de uma interação Compton. Elas acontecem em cascata, degradando necessariamente a energia do raio gama incidente. Se a energia total do raio incidente é absorvida e transferida a alguns elétrons, tudo acontece como se o raio gama tivesse sido "detetado" inteiramente, como seria o caso através de um efeito fotoelétrico. Trata-se de absorção total, equivalente à detecção fotoelétrica. Por esta razão, nos espectros gama, o pico fotoelétrico é às vezes chamado de pico de absorção total.

Quando a energia do raio gama incidente não é totalmente absorvida no detetor, a distribuição obtida estatisticamente no espectro é complexa: a forma da "colina" Compton no espectro não é calculável e o aspecto geral de um espectro gama depende da natureza, da forma e do tamanho do detetor.

A Figura 2 apresenta a variação da absorção da radiação gama pelo efeito Compton (μ_c), em função da energia da radiação incidente, para o cristal cintilador de NaI(Tl).

Efeito de Criação de Pares

No campo eletrostático de um núcleo, um fóton gama de energia superior a $2 mc^2 = 1,02$ MeV pode dar lugar ao fenômeno de criação de par:

$$h\nu = e^+ + e^- + h\nu'$$

O elétron e o pósitron comportam-se em seguida como elétrons acelerados ou raios beta na matéria. O pósitron amortecido acaba se encontrando com

um elétron e, uma vez que são de cargas opostas e que não existe neste caso barreira nuclear, se aniquilam com a emissão característica de dois raios gama de 0,51 MeV em oposição (na maior parte dos casos).

A probabilidade de criação de pares aumenta muito com a energia do raio gama incidente; este processo começa a ser significativo para $E > 2$ MeV. O efeito de criação de pares e a aniquilação dos pósitrons implica, para a detecção de raios gama de energia superior a 1,02 MeV, na presença nos espectros de picos suplementares a $E - 0,51$ MeV, $E - 1,02$ MeV e 0,51 MeV.

A Figura 2 mostra a variação do coeficiente de absorção pela produção de pares (μ_{pp}) em função da energia da radiação incidente. O coeficiente de absorção total, que corresponde à simples soma dos coeficientes de absorção de cada um dos processos descritos, esta também representado nessa figura (μ_t).

3. PRINCIPAIS TIPOS DE DETETORES USADOS EM GEOFÍSICA NUCLEAR

3.1 - ESPECTROMETRIA ALFA

Por razões históricas convém mencionar a cintilação do sulfeto de zinco ativado com prata ZnS(Ag). Após a passagem de uma partícula alfa, a deexcitação dos átomos deste cintilador faz-se com emissão de luz, visível a olho nu ou transformada em impulso elétrico por uma fotomultiplicadora. Embora a partícula alfa seja totalmente absorvida, este cintilador não pode ser usado para a espectrometria porque a luz sofre perdas importantes, uma vez que ele não é transparente.

Câmara de Grade

Trata-se de uma câmara de ionização preenchida com uma mistura de argônio (90%) e de metano (10%), especialmente concebida para a espectrometria alfa. A fonte emissora é colocada no catodo, dentro da câmara. A grade, colocada entre o catodo e o anodo, impede a influência no anodo dos íons criados por ionização entre o catodo e a grade. Ela permite ao anodo recolher pacotes de elétrons, em número proporcional à energia dos raios alfa emitidos pela fonte. Para fontes alfa delgadas, para as quais a auto-absorção dos raios alfa é desprezível, o rendimento é quase o rendimento geométrico correspondente a uma emissão dentro de um ângulo sólido de 2π , ou seja, 50%.

A resolução (largura relativa a meia altura do pico) é cerca de 1% para as partículas alfa de energia entre 4 e 8 MeV. O ruído de fundo não é desprezível (1 pulso por hora) entre 4 e 8 MeV, o que destina a câmara de grade a medidas de amostras cuja atividade é bastante alta.

Detetores Semicondutores

Estes detetores usam a criação de pares elétron-buraco numa junção de um diodo (polarizada ao inverso) especialmente feito para este uso, de silício de tipo n e com zona enriquecida de impurezas p. As vantagens em relação à câmara de grade são muitas e a resolução é aproximadamente três vezes melhor, porque um par elétron-buraco precisa de 3,61 eV para se criar no silício, enquanto um par de íons precisa de 26,4 eV para se criar no argônio. A pureza dos materiais usados

permitem chegar a ruídos de fundo baixíssimos (1 pulso em 10 horas entre 4 e 6 MeV). O tempo de recolhimento das cargas é muito curto (alguns nanosegundos) porque o percurso das partículas alfa é muito curto (16 μm para uma partícula alfa de 5 MeV no silício), o que permite medir atividades elevadas.

Os detetores semicondutores apresentam dois inconvenientes: o pulso elétrico recolhido na resistência de carga é bem menor do que o do anodo da câmara de grade, porque a impedância do diodo é nitidamente menor do que a da câmara de grade (embora, no caso do diodo, o número de portadores de cargas seja bem maior). O diodo detetor alfa precisa então de um pré-amplificador de cargas de sensibilidade elevada, de grande estabilidade e de baixíssimo ruído de fundo (um ruído do fundo elevado prejudica a resolução). O rendimento dos diodos detetores alfa é menor do que o da câmara de grade, sendo o fator geométrico inferior devido ao tamanho limitado do diodo (por exemplo, área útil: 300 mm^2), uma vez que não se aproxima muito a fonte emissora alfa do diodo para evitar contaminação.

Vale salientar que a espectrometria de fontes espessas de raios alfa não é possível por causa da absorção total ou parcial da energia dos raios alfa na própria fonte. Por isto, usam-se habitualmente fontes alfa delgadas preparadas para a espectrometria alfa, geralmente através de separações químicas, visando selecionar o elemento cujo isótopo é emissor alfa.

3.2 - ESPECTROMETRIA GAMA

É possível usar um contador proporcional a gás (enchimento argônio-metano) para efetuar uma espectrometria de radiação eletromagnética X ou gama. Após a transferência da energia da radiação incidente a um elétron, através dos processos descritos acima, este cria um número de pares de íons proporcional à sua energia. Mas o rendimento destes contadores é fraco, uma vez que a densidade do gás é fraca. Está é a razão porque eles são comumente usados para a espectrometria X, e não para a espectrometria gama.

Cintilador de Iodeto de Sódio Ativado com Tâlio

Trata-se de um monocristal transparente de iodeto de sódio ativado com tâlio NaI(Tl) fechado dentro de um invólucro, protegido do ar (é higroscópico) e exposto aos fótons gama. Após a absorção de um raio gama incidente, parte ou a totalidade da sua energia é transferida a um ou alguns elétrons. Esses elétrons, ao atravessar a rede cristalina, excitam átomos que emitem pacotes de fótons, visíveis na maior parte. O número de fótons emitidos é proporcional à energia da radiação gama transferida para o cristal por um ou mais dos processos ilustrados na Figura 3. A Figura 4 mostra as espessuras necessárias que deve possuir um detector de cintilação de NaI(Tl) a fim de absorver uma dada fração da radiação incidente. Por exemplo, 90% da radiação incidente de 1 MeV é absorvida em um detector com uma espessura de 12,5 centímetros. Uma análise comparativa das Figuras 3 e 4 permite concluir que quanto maiores as dimensões do detector de NaI(Tl) , maior será a eficiência de detecção

e melhor será a relação pico/espectro total final nos espectros de ra
diação obtidos (menos o escape dos fótons γ secundários). Devido à li
nearidade dos vários processos (rendimento quântico do fotocatodo, mul
tiplicação do número de elétrons), a altura do pulso elétrico recolhido
é proporcional à energia da radiação gama que foi gasta no cristal. Um
tal detetor permite assim realizar medidas de espectrometria da radia
ção gama.

Como o número atômico médio do iodeto de sódio é bastante ele
vado, o rendimento de detecção no pico fotoelétrico (absorção total) é
grande. Nos espectros, para as energias inferiores à do pico fotoelé
trico, uma "colina" devida ao efeito Compton corresponde à presença dos
raios gama para os quais somente uma parte da energia foi medida. Para
um espectro obtido com um cintilador de NaI(Tl), a relação área do pi
co/área total é de 30%, aproximadamente, e cresce com o tamanho do cris
tal. O rendimento de detecção é de alguns % para as energias entre 0,5
e 2 MeV, para um cristal de 4" x 3" e para uma fonte puntual colocada
junta ao cristal.

O estudo da resolução dos cristais cintiladores é difícil por
causa do número de fenômenos envolvidos: recolhimento da luz das cinti
lações pelo fotocatodo, adaptação entre o espectro luminoso emitido e
a sensibilidade espectral da fotomultiplicadora, rendimento quântico do
fotocatodo (aproximadamente 0,1), flutuações de percurso dos elétrons
na fotomultiplicadora. A resolução varia em $1/\sqrt{E}$ como função da ener
gia E do raio gama detetado. Para um cristal de 4" x 3" de boa qualida
de, a resolução é 8% aproximadamente para a radiação a 0,660 MeV do cé
sio 137-bário 137.

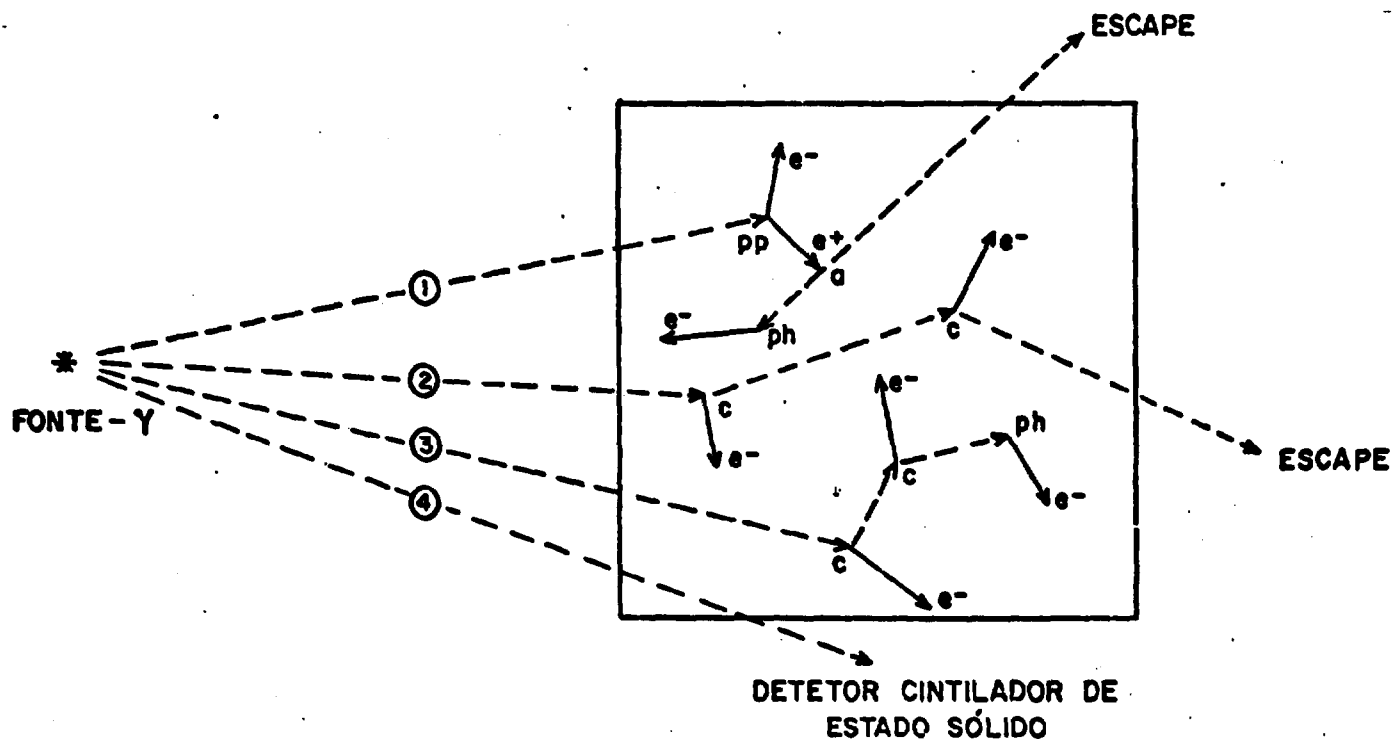


Fig. 3 - Ilustrações dos diversos processos de transferência da energia dos fótons de radiação gama em cintilador de estado sólido. Os feixes de radiação 4 e 2 têm somente parte de sua energia transferida ao cintilador, enquanto o feixe 3 sofre absorção total após múltiplas interações no detetor. As interações são indicadas por: pp = produção de pares; c = Compton; ph = fotoelétrico.

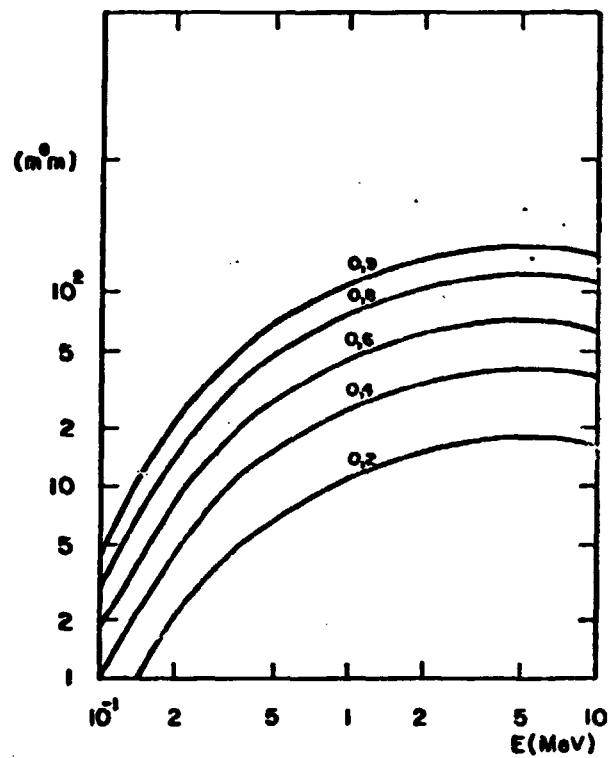


Fig. 4 - Espessura de NaI(Tl) necessária para absorver uma fração dada de um feixe de raios gama em função de sua energia.

Detetor Semicondutor

Num semicondutor, o elétron que adquiriu, através dos processos descritos acima, a totalidade ou uma parte da energia do raio gama incidente cria pares elétron-buraco em número proporcional à sua energia. As técnicas de fabricação dos detetores semicondutores para a espectrometria gama são difíceis (alta pureza dos constituintes, controle das condições físicas) e variadas (semicondutor de difusão de lítio Ge(Li), ou de alta pureza como GeHP). Um dos problemas maiores consiste na realização de grandes volumes úteis de detecção, com a boa resolução que permita um número elevado de portadores elementares de informação.

Para a detecção dos raios gama, usa-se o germânio por causa do seu número atômico elevado ($Z(\text{Ge}) = 32$ contra $Z(\text{Si}) = 14$) que permite uma absorção maior e, por isto, rendimentos superiores.

Os detetores Ge(Li) e GeHP são usados com êxito nos laboratórios, embora eles apresentem algumas dificuldades: rendimento fraco para os menores, uso do nitrogênio líquido para obtenção das melhores características (caso do Ge(Li) e do GeHP) e manutenção permanente das baixas temperaturas (caso do Ge(Li) somente).

De forma diversa da espectrometria alfa, a espectrometria gama pode ser praticada em amostras de grande volume, devido à absorção fraca dos raios gama. Isto permite medidas em laboratório sem tratamento químico, amostras aerossóis, rochas, solos, meteoritos) de alguns gramas até quilogramas.

3.3 - ELETRÔNICA ASSOCIADA, CADEIA DE ESPECTROMETRIA NUCLEAR, ANALISADOR DE PULSOS

Os detetores aptos à espectrometria nuclear fornecem pulsos elétricos cujas alturas V são proporcionais à energia E do raio alfa ou gama neles gasta. Para realizar um espectrômetro completo, tem-se que dispor de um aparelho para analisar a amplitude dos pulso e separá-los em canais correspondentes a faixas consecutivas de intervalos iguais de energia. Cada canal funciona assim com um escalímetro, totalizando os pulsos de amplitude compreendida entre V e $V + \Delta V$, sendo ΔV a largura do canal. Graças à correspondência linear entre V e E , a distribuição

da frequência dos pulsos nos canais corresponde ao espectro dos acontecimentos versus energia da radiação detetada.

Em resumo, os principais elementos de uma cadeia da espectrometria alfa ou gama são indicados na Figura 5, quais sejam:

- detetor;
- a alimentação elétrica do detetor (polarização do semicondutor ou alimentação da fotomultiplicadora);
- o amplificador de pulsos (pré-amplificador e amplificador);
- o analisador de pulsos (conversor analógico-digital apropriado para pulsos, circuitos de endereço, memória; um microprocessador com "software" adequado pode cumprir essas últimas funções);
- os periféricos de saída (osciloscópio/televisão, impressora, registrador de papel, gravador de cassete).

As principais qualidades de uma cadeia de espectrometria nuclear no domínio das fracas radioatividades são:

- a linearidade (deteção, amplificação, conversão analógico-digital);
- a estabilidade;
- o baixo ruído de fundo (nuclear ou eletrônico);
- a confiabilidade.

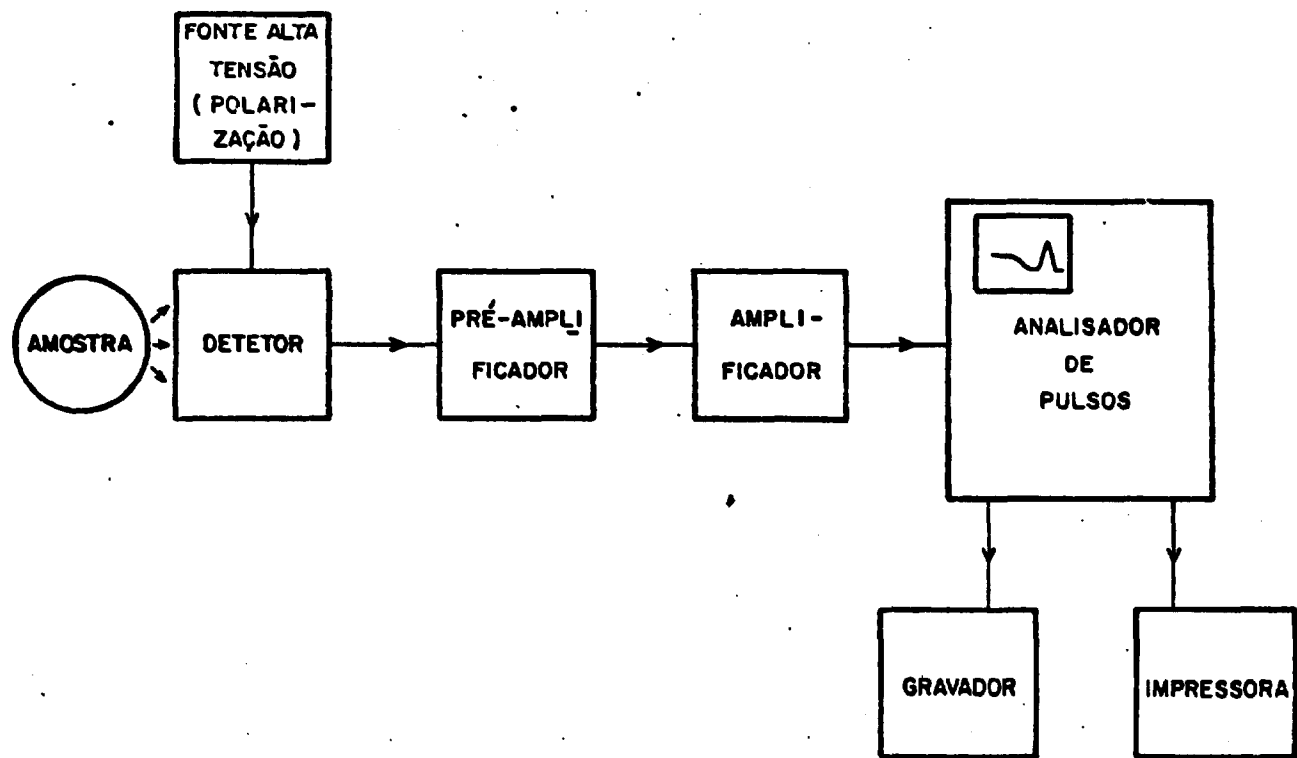


Fig. 5 - Esquema simplificado de uma cadeia de espectrometria nuclear.

3.4 - DESCRIÇÃO DAS MEDIDAS

Uma análise típica compreende a medida da amostra (sem tratamento químico, no caso da espectrometria gama) e a obtenção nas mesmas condições, mas sem a amostra, de um ruído de fundo da instalação. Este último será subtraído do espectro "bruto" da medida. Obtém-se assim o espectro "líquido", que permite avaliar as atividades das várias contribuições dos emissores radioativos, graças ao conhecimento dos rendimentos de detecção. Vários métodos de tratamento dos espectros são usados, especialmente no caso da espectrometria gama que é mais complexa.

As incertezas dos resultados das medidas de espectrometria alfa e gama vêm do caráter estatístico das emissões nucleares, do erro cometido durante a calibração (simulação mais ou menos exata da amostra e das condições geométricas, erro sobre a atividade dos padrões radioativos), das variações possíveis do ruído de fundo, etc.

4. APLICAÇÕES

A espectrometria alfa e a espectrometria gama permitem medir tanto fontes radioativas naturais quanto artificiais. Porém, no domínio da Geofísica Nuclear, o uso da espectrometria alfa tem sido principalmente restrito às medidas dos núclídeos decedentes naturais do urânio e do tório, tanto pelas suas abundâncias, como pela importância das informações que deles se pode obter. Medem-se habitualmente os teores de urânio-238 e de tório-232, bem como os de outros produtos de decaimento de longa vida em suas respectivas séries radioativas, nos estudos da

litosfera. O desequilíbrio entre o urânio-234 e o urânio-238 é estudado principalmente no campo da Hidrologia. O radônio e seus produtos de decaimento de vida curta e média são de grande interesse em estudos da troposfera e baixa estratosfera (dinâmica e composição). O campo da espectrometria gama é mais vasto e são estudados os teores de urânio e potássio medidos perto da superfície da terra, ou por uma plataforma remota (avião, balão). Estudam-se as radiações naturais induzidas e os produtos de espalhamento devidos à ação da radiação cósmica em meteoritos, em amostras retornadas das missões lunares, nos solos da Lua e de Marte com estações automáticas. A espectrometria gama é empregada nos estudos dos produtos de fissão introduzidos pelo homem na atmosfera devido às explosões nucleares atmosféricas, bem como na análise da dispersão desses processos na atmosfera, hidrosfera e no solo. Os processos de ativação neutrônica em reatores nucleares associados à espectrometria gama fornecem ferramenta de enorme relevância nos estudos de planetologia e cosmoquímica, ambos dentro dos interesses da Geofísica Nuclear. De grande importância, devem-se mencionar os estudos das radiações atmosféricas e produtos de reações nucleares na atmosfera, causados pela incidência do fluxo de radiações cósmicas.

Apresentam-se nas Tabelas 2 e 3 as principais emissões alfa e gama dos elementos radioativos primitivos e dos seus descendentes.

A bibliografia indica algumas pesquisas de Geofísica Nuclear usando os métodos descritos. Outras aplicações podem ser facilmente encontrados nas revistas especializadas: Geoquímica et Cosmoquímica Acta, Journal of Geophysical Research, Earth and Planetary Science Letters, Health Physics, Revista Brasileira de Geofísica, Revista Brasileira de Geociência, etc.

TABELA 2

URÂNIO, TÓRIO E POTÁSSIO: EMISSÕES GAMA

EMISSOR	E (%) MeV	PERÍODO
U 238: Bi214(RaC)	0,609 (65,8) 1,120 (20,6) 1,761 (25,8) ...	$4,49 \cdot 10^9$ a 19,7 min
Th 232: Tl208(ThC'')	0,240 (40,2) 0,511 (8,4) 0,583 (31,0) 2,615 (36,1) ...	$1,39 \cdot 10^{10}$ a 3,10 min
K: K40	1,460 (10,95)	$K40/K = 0,0118\%$ $1,27 \cdot 10^9$ a

TABELA 3

URÂNIO, TÓRIO: EMISSÕES ALFA
(POR ORDEM CRESCENTE DE ENERGIA)

E (%) MeV	U	Th	PERÍODO
4,007		Th 232	$1,39 \times 10^{10}$ a
4,195	U 238		$4,51 \times 10^9$ a
4,354 (35)	(U 235)		$7,1 \times 10^8$ a
4,370 (25)	(U 235)		+ família
4,615 (24)	Th 230 (Io)		$7,52 \times 10^4$ a
4,682 (76)	Th 230 (Io)		
4,717 (28)	U 234		$2,48 \times 10^5$ a
4,768 (72)	U 234		
4,777	Ra 226		1622 a
5,305	Po 210 (RaF)		138,4 d
5,338 (38)		Th 228 (RdTh)	1,91 a
5,421 (71)		Th 228 (RdTh)	
5,486	Rn 222		3,82 d
5,681		Ra 224 (ThX)	3,64 a
5,998	Po 218 (RaA)		3,05 min
6,047 (36,2)		Bi 212 (ThC)	60,5 min
6,282		Rn 220 (Tn)	51,5 s
6,775		Po 216 (ThA)	0,158 s
7,680	Po 214 (RaC')		$1,64 \times 10^{-4}$ s
8,780 (63,8)		Po 212 (ThC')	$3,04 \times 10^{-7}$ s (ver ThC)

5. CONCLUSÃO

A descrição da metodologia da espectrometria alfa e da espectrometria gama para as aplicações de Geofísica Nuclear visam principalmente esclarecer as particularidades específicas: uso da radioatividade de natural na maior parte dos casos, detecção nuclear, determinação e uso de rendimentos de detecção, análise de amplitude de pulsos com as suas exigências particulares.

Embora se trate de uma metodologia altamente especializada, parece possível construir uma parte importante dos equipamentos nos laboratórios de pesquisas brasileiros que não têm, na maioria dos casos, uma infraestrutura científica e tecnológica neste domínio. Leve-se em conta o desinteresse na industrialização de tais equipamentos pela indústria do País, dada a pequena demanda atual. Alguns tipos de detectores podem ser construídos com meios reduzidos (Ge(Li), contador proporcional, alguns cintiladores). Na parte da eletrônica, não há impossibilidade fundamental. As várias fontes de tensão podem ser construídas, assim como pré-amplificadores, amplificadores, discriminadores, embora sempre se enfrente o problema dos níveis de ruído eletrônico, em algumas aplicações. Na parte da eletrônica digital, os progressos e o desenvolvimento da microeletrônica e das indústrias associadas permitem resolver a maior parte dos problemas (microprocessador, impressoras, gravadores, etc.).

AGRADECIMENTOS

Este trabalho faz parte do *Projeto Vernáculo* que representa o esforço de alguns pesquisadores do INPE de criar uma literatura básica de Ciência Espacial em Língua Portuguesa dirigida principalmente aos estudantes.

O projeto Vernáculo, coordenado por V.W.J.H. Kirchhoff, deve rã tratar dos seguintes assuntos:

- Elementos básicos da Ionossonda, M.A. Abdu.
- Elementos básicos do Riômetro, M.A. Abdu.
- Elementos básicos do Polarímetro, I.J. Kantor.
- Elementos básicos do Radar de Laser, V.W.J.H. Kirchhoff.
- Elementos básicos sobre Fotômetros, V.W.J.H. Kirchhoff.
- Elementos básicos de Geofísica Nuclear, D.J.R. Nordemann e E.B. Pereira.
- Elementos básicos sobre o Espectrofotômetro Dobson, V. Sahai.
- Elementos básicos sobre Magnetômetros, N.B. Trivedi.

BIBLIOGRAFIA

1. J.B. Birks. *The theory and practice of scintillation counting*. Oxford, Pergamon, 1964.
2. C.E. Crouthamel. *Applied gamma-ray spectrometry*. New York, Pergamon, 1960.
3. G.F. Knoll. *Radiation detection and measurement*. New York, J. Wiley, 1979.
4. R.M. Kogan; I.M. Nazarov; S.J. Friedman. *Gamma spectrometry of natural environment and formations*. Jeruzalem, IPST, 1971.
5. C.M. Lederer; V.S. Shirley. *Table of isotopes*. New York, J. Wiley, 1978.
6. D.J.R. Nordemann; L.M. Moreira. *Elementos de geocronologia nuclear*. Bahia, Universidade Federal da Bahia, 1972.
7. E.B. Pereira; V.M. Hanza. Os mecanismos de difusão e transporte convectivo na formação de anomalias superficiais de Radônio-222 gerado em profundidade. *Revista Brasileira de Geofísica*, 1(1):37-44, set., 1982.
8. E.B. Pereira; D.J.R. Nordemann. The effects of a tropical rain forest on airborne gamma-ray spectrometry. *Revista Brasileira de Geofísica*. 1(2):99-108, mar. 1983.
9. K. Siegbahn. *Alpha, beta and gamma-ray spectroscopy*. Amsterdam, North-holland, 1965.