

278 — a) Teoria do efeito Doppler. b) Defina absorção total do som num recinto. c) Propriedades das linhas de força do campo electrostático.

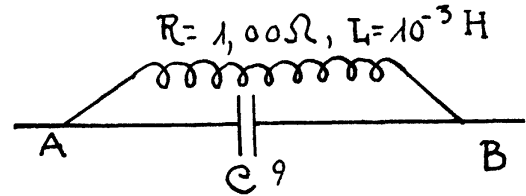
289 — a) Estabeleça as leis de Kirchhoff. b) Momento do binário director de um íman num campo uniforme. Selectividade do circuito oscilante. c) Campo magnético girante. Motor síncrono polifásico.

280 — A pulsação das correntes alternadas que percorrem o circuito figurado é $\omega = 10^4$ rad/s; Calcule a capacidade do condensador C, sabendo que a corrente e a tensão entre A e B estão em fase. (Método dos imaginários).

R: Como a corrente na linha e a tensão entre A e B estão em fase $\varphi=0$; logo de $\cos \varphi = R/Z_t$ tira-se que $Z_t=R=1,00$ Ohms. Representando por Z'_t , Z'_B , e Z'_C as impedâncias imaginárias entre A e B, na bobina e no condensador respectivamente tem-se:

$$\frac{1}{Z'_t} = \frac{1}{Z'_B} + \frac{1}{Z'_C} = \frac{1}{R + L\omega j} + \frac{1}{-\frac{1}{C\omega} j} = \frac{-RC\omega + (1 - LC\omega^2)j}{-L\omega + Rj}$$

$$\text{donde } Z'_t = \frac{-L\omega + Rj}{-RC\omega + (1 - LC\omega^2)j}$$



A impedância entre A e B é dada por

$$|Z'_t| = \sqrt{\frac{L^2\omega^2 + R^2}{R^2C^2\omega^2 + (1 - LC\omega^2)^2}}$$

$$\text{ou ainda } Z_t^2 [R^2C^2\omega^2 + (1 - LC\omega^2)^2] = L^2\omega^2 + R^2.$$

Substituindo valores tem-se:

$$101 \times 10^8 C^2 - 2 \times 10^5 C - 10^2 = 0.$$

Resolvendo a equação vem $C = 0,109 \times 10^{-3} F$.

GLAPHYRA VIEIRA

7. FÍSICA NUCLEAR

COMPARAÇÃO ENTRE INSTRUMENTOS PARA MEDIÇÕES RADIOACTIVAS DE CONTADORES DE GEIGER E CÂMARAS DE IONIZAÇÃO

1. Questões práticas. O que é que os tubos de Geiger e as câmaras de ionização realmente medem? Em que casos é um tipo de detector radioactivo mais indicado que o outro?

São estas as importantes perguntas a que vamos procurar responder.

Para dar uma ideia mais concreta deste assunto, não hesitaremos em relembrar alguns princípios elementares que são do conhecimento de todos. Depois mencionaremos alguns resultados de recentes desenvolvimentos, apresentando interessantes dados sobre a permutabilidade dos tubos de Geiger e câmaras de ionização numa série de importantes casos práticos. ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Comparison of Geiger-Counter and Ion-chamber Method of Measuring gamma Radiation V. Nuclearonics, vol. 7, n.º 6, págs. 21/26, Dez. 1950.

2. As duas unidades fundamentais nas medições radioactivas. Os átomos de um elemento radioactivo encontram-se num estado instável. Mais cedo ou mais tarde, cada átomo radioactivo sofrerá um novo arranjo da sua estrutura interna, de maneira a procurar um estado mais estável, de menor energia interna. O excesso de energia é libertado sob a forma de radiação, constituída por partículas α ou β , ou ainda por radiação γ ou uma combinação delas, conforme o elemento considerado. Se um grande número de átomos radioactivos está presente numa substância, os seus reajustamentos internos não se dão simultaneamente para todos eles. Alguns dos átomos permanecem estáveis por mais tempo que outros, e o fenómeno da emissão de radiação tem lugar ao acaso, caracterizando a «radioactividade» da substância.

Dois quantidades são do maior interesse nas medições radioactivas:

a) A *taxa* (ou ritmo) dos novos arranjos atômicos ou «desintegrações» numa dada amostra.

b) A *energia* transportada pela radiação emitida e os *efeitos* da sua interacção com a matéria.

A *taxa* segundo a qual os átomos se desintegram é uma verdadeira medida de «actividade» da substância radioactiva. É geralmente expressa em «Curies» (C) sendo um Curie a actividade de uma substância que sofre $3,7 \times 10^{10}$ desintegrações por segundo.

Como dissemos acima, cada desintegração dá origem á emissão de uma partícula ou de um raio, ou de uma combinação de ambas as coisas. Por exemplo cada desintegração do cobalto-60 radioactivo, dá origem a uma partícula beta e dois raios gama.

A energia transportada pela radiação é característica do tipo de elemento radioactivo considerado. Se a radiação encontra matéria no seu trajecto, perderá parte da sua energia. Se houver uma concentração de matéria suficiente numa certa direcção, a radiação será possivelmente completamente detida nessa direcção. A matéria, portanto, absorve a energia da radiação. A esta absorpção de energia corresponde a emissão de electrões pelos átomos constitutivos da matéria absorvente.

As partículas alfa e beta são facilmente detidas por delgadas lâminas de matéria. Em particular, não penetram muito além dos tecidos superficiais do corpo humano.

Um indivíduo exposto a intensa radiação α ou β sofrerá geralmente apenas um prejuizo muito superficial.

Os raios gama, ao contrário, são muito penetrantes. Eles atravessam o corpo humano e interactuam com os seus tecidos internos e com as células vivas. As medições da energia de interacção dos raios gama com a matéria serão portanto da maior utilidade nos efeitos da radiação sobre a saúde humana.

O roentgen (r) é definido em relação à

energia de interacção da radiação gama com o ar. Como os raios γ provocam a emissão de electrões pelos átomos constituintes do ar, o ar é assim dissociado em iões transportando cargas eléctricas opostas. Um roentgen (r) é definido como a quantidade (ou dose) de radiação gama num dado ponto, que cria nesse ponto uma densidade iónica que transporta uma unidade electrostática de carga (1. u. e. s.) de cada sinal, por centímetro cúbico de ar nas condições normais de pressão e temperatura (p. t. n). Como a radiação é emitida geralmente de uma maneira contínua pelas substâncias radioactivas, a intensidade de dose («dose rate») da radiação gama num ponto será medida em roentgens por segundo.

Curies e roentgens são as unidades fundamentais associadas com as medições radioactivas. A primeira é uma unidade *absoluta* e define a *concentração* do elemento radioactivo na substância.

O segundo mede a radiação pelos seus *efeitos* (mais precisamente: pelos efeitos da radiação gama presente na substância radioactiva) sobre a matéria circunjacente, especificadamente sobre o ar.

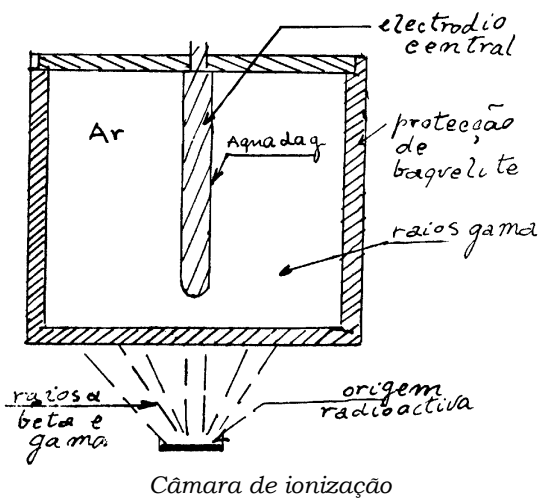
A segunda unidade não pode ser derivada da primeira, porque ela não depende sómente da concentração da actividade da substância (curies) mas também do tipo de substância radioactiva considerada (n.º de raios gama produzidos por desintegração, energia transportada pela radiação gama) e ainda da sua forma geométrica e distância ao ponto no qual a medição dos roentgens é feita.

Os tubos de Geiger são «detectores de partículas» e estão indicados nas medições da concentração de actividade das substâncias radioactivas.

As câmaras de ionização detectam os efeitos energéticos da radiação gama sobre o ar (e do mesmo modo sobre os tecidos vivos) na vizinhança de fontes radioativas. Estão particularmente indicadas para avaliação e advertência do grau de perigo para as pessoas que trabalham na presença de radiações ionizantes.

3. Medição da radiação pelos seus efeitos energéticos (roentgens) usando câmaras de ionização. Por definição de roentgen, a sua medida é equivalente à da ionização produzida num pequeno volume (1cm^3) de ar pela componente *gama* presente na radiação.

As radiações α e β também produzem forte ionização no ar, mas a sua contribuição deve ser eliminada das medições em roentgens. Esta limitação na definição do roentgen corresponde ao facto, de grande interesse prático, de que sómente a componente *gama* da radiação externa tem efeito apreciável sobre os tecidos do corpo humano. Os tecidos superficiais actuam como uma tela que protege os tecidos internos das radiações α e β mas não detém a radiação γ . Quando se fazem medições *gama*, uma protecção equivalente é colocada entre a fonte da radiação e o volume de ar onde se faz a medição. Esta protecção é geralmente uma tela de «bakelite» com alguns milímetros de espessura, envolvendo o volume V de ar da câ-



mara de ionização. Os iões produzidos neste volume de ar pelos raios γ que penetram na câmara, são orientados por meio de uma diferença de potencial entre as paredes internas da câmara e um electrodo central. Esta d. d. p. é da ordem de 100 a 200 volts.

Produz-se uma corrente pelo movimento dos iões positivos e negativos, cuja intensi-

dade é proporcional aos roentgens por segundo ($r/\text{seg.}$) absorvidos no volume da câmara.

Esta corrente é extremamente pequena, mesmo para poderosas fontes radioactivas. Tem de ser ampliada por válvulas electrométricas especiais, para que dê uma leitura apreciável, mesmo com os mais sensíveis aparelhos de medida.

Os instrumentos com câmara de ionização têm portanto uma pequena sensibilidade e *nunca dão uma leitura apreciável na presença de radiações produzidas por baixos níveis de actividade.*

Afortunadamente, os efeitos energéticos de tais radiações fracas não representam, para as pessoas expostas, nenhum perigo apreciável.

A sensibilidade das câmaras de ionização é suficiente para leituras de intensidade de radiação para os valores em que os perigos provenientes das radiações já necessitam de ser tomados em conta nas medidas de verificação de segurança. Constroem-se dois tipos de instrumentos com câmaras de ionização:

a) No primeiro tipo, fazem-se leituras dinâmicas, dando o número de cargas eléctricas colectadas por segundo, dos iões produzidos pelos raios *gama* que penetram num dado volume de ar. Estes instrumentos medem portanto, uma corrente, que é proporcional aos roentgens por segundo (ou miliroentgens por hora), por definição de roentgen.

b) No segundo tipo, fazem-se leituras cumulativas, dando o número total de iões produzidos dentro do volume da câmara, desde que ela seja colocada no campo da radiação. Estes instrumentos medem portanto, uma carga eléctrica que é, por definição, proporcional ao número total de roentgens absorvido pela câmara no campo da radiação.

O seu princípio é idêntico ao do electrosκόpio clássico de folha de ouro, onde a carga eléctrica inicial dos electrodos, é gradualmente neutralizada pelos iões produzidos no volume da câmara. A qualidade do fabrico é determinada pelo grande isolamento entre os electrodos, de maneira a manter a carga inicial quando nenhuma radiação está presente.

Nota — Ê o número total de roentgens absorvidos pelo corpo humano que dá a medida do efeito da radiação interna sôbre a saúde. Calculou-se que uma dose total de 400 a 600 roentgens é fatal em muitos casos.

A dose de tolerância abaixo da qual é considerado livre de perigo o trabalhador por tempo ilimitado é geralmente tida em 300 miliroentgens por semana.

Portanto, os instrumentos com câmara de ionização (medidor de doses de bolso do tipo de electroscópio) dão as mais úteis informações depois de terem sido expostos num campo de radiação.

Mas esta informação pode ser obtida também tarde demais, visto que as leituras cumulativas dos instrumentos integradores são geralmente tomadas uma vez por dia ou por semana. Os instrumentos dinâmicos devem ser usados quando ocasionalmente nos aproximamos de poderosas fontes radioactivas, de maneira a avaliar por quanto tempo se pode sem perigo trabalhar no campo de radiação produzido por aquelas fontes, sem incorrer no perigo de receber mais que a dose de tolerância total consentida por dia ou por semana.

4. Variação da intensidade da dose de radiação (r/s) coma actividade da fonte «Curies», natureza e distância. Os instrumentos com câmara de ionização são geralmente transportados por pessoas que trabalham no campo da radiação. Dão uma medida do nível da radiação na região onde estão localizados. Este nível da radiação varia com a distância das fontes radioactivas bem como com a concentração da actividade «Curies» das fontes e o tipo de raios que são emitidos.

Se sômente uma fonte estiver presente, de actividade C curies, e se puder ser considerada suficientemente pequena para ser assimilada a uma carga pontual, a sua intensidade de dose de radiação gama à distância d será dada por

$$(1) \quad r / \text{hora} = K \frac{C}{d^2}$$

A leitura de um instrumento dinâmico com câmara de ionização (roentgens por hora ou por segundo) será portanto inversamente proporcional ao quadrado da distância d à fonte e proporcional à actividade C , para uma dada fonte radioactiva.

Ê importante notar que o factor de proporcionalidade K não é o mesmo para todas as substâncias.

Com efeito, nós temos sempre visto que a quantidade de curies C define semente o número de desintegrações por segundo, da substância. Cada desintegração pode produzir um, dois, ou mais raios gama, ou nenhum, dependendo isso da natureza da substância considerada. Uma substância dando vários raios gama por desintegração produzirá geralmente intensidades de dose mais fortes, para a mesma actividade em curies, do que uma dando sômente um raio gama, por desintegração. Além disso, o poder ionizante dos raios gama, que é uma medida da dose da radiação, é aproximadamente proporcional à energia total transportada por aqueles raios. Se C for expresso em curies e d em centímetros, cada tipo de raios gama caracterizado pela sua energia $E_1(\text{MeV})$ contribuirá para a intensidade de dose com uma quantidade aproximadamente de

$$(2) \quad 5570 E_1 \times \frac{C}{d^2} = r / \text{hora}$$

As dosagens são aditivas, e se cada desintegração produzir vários raios gama de energias respectivamente E_1, E_2, E_3, \dots a intensidade da dose total será dada aproximadamente por

$$(3) \quad 5570 (E_1 + E_2 + \dots) \times \frac{C}{d^2}, \text{ em } r / \text{hora}$$

Exemplo: Cada, desintegração do cobalto-60 produz um raio β e dois raios gama. As energias dos raios gama são respectivamente 1,1 e 1,3 MeV. Os efeitos da ionização devida aos raios β são eliminados pelas paredes das câmaras de ionização e a lei-

tura devida aos raios gama será dada por

$$5570 \times (1,1 + 1,3) \frac{C}{d^2} = 13400 \frac{C}{d^2} \quad r/hora$$

Se $C = 10^{-3} = 1$ milicurie de cobalto-60 a intensidade de dose à distância $d = 100$ cm, será

$$13400 \times \frac{10^{-3}}{10^4} = 0,00134 \quad r/hora = \\ = 1,34 \text{ miliroentgens por hora}$$

Se, em vez de 1 milicurie de cobalto-60, tomássemos 1 milicurie de rádio (aproximadamente 1 mg) a intensidade de dose à mesma distância (100 cm) seria sómente 0.84 miliroentgens por hora. O cálculo efectivo para o rádio seria complicado pelo facto de que a desintegração do rádio produz substâncias filhas que são elas próprias rádio-activas e nem todos os raios γ são portanto emitidos simultâneamente.

5. Efeitos energéticos das radiações α e β .

Uma substância radioactiva que emite sômente raios alfa ou beta não pode, de acordo com a definição, produzir roentgens na sua vizinhança. Uma câmara de ionização, com paredes de bakelite, não dará nenhuma indicação na presença de radiações alfa ou beta. Estas radiações serão detidas pelas paredes da câmara antes de penetrar no volume de ar da câmara. Contudo, os raios α e β são muito mais ionizantes que os próprios raios gama, visto que perdem toda a sua energia no pequeno percurso que podem fazer na matéria até chegarem ao repouso. Se uma parede muito fina for usada em vez de bakelite como envólucro da câmara de ionização, indicações de intensidade de dose muito altas serão obtidas na presença de radiações α ou β provenientes de fontes de relativamente pouca actividade.

Estas leituras determinam os efeitos expressos em roentgens-equivalentes produzidos por qualquer tipo de radiação e dão uma medida da densidade de energia da radiação absorvida pelas superfícies do corpo humano

que estão directamente expostas aos raios alfa e beta.

Certas câmaras de ionização possuem uma janela constituída por uma fina película «pliofilm» que pode ser destapada rodando um disco de bakelite existente numa das paredes da câmara. Podem assim ser obtidas medidas de roentgens-equivalentes deixando penetrar no volume da câmara os raios α e β , o que se torna muito útil para avaliar o perigo superficial resultante da exposição directa à radiação α ou β . Contudo, a não ser na manipulação de grandes actividades, o perigo da exposição não é nunca demasiado grande.

O principal perigo de lidar com substâncias radioactivas α e β , reside na *contaminação* e *ingestão*, isto é, sempre que os tecidos estão em *contacto directo* com aquelas substâncias. Nestes casos, quantidades de actividade extremamente pequenas, indetectáveis pelo método das câmaras de ionização, podem causar a destruição dos tecidos que permaneceram em contacto com as substâncias emisoras. Isto deve-se ao alto poder ionizante dos raios α e β , cuja energia é absorvida pela matéria, ao longo dos pequenos percursos através dela.

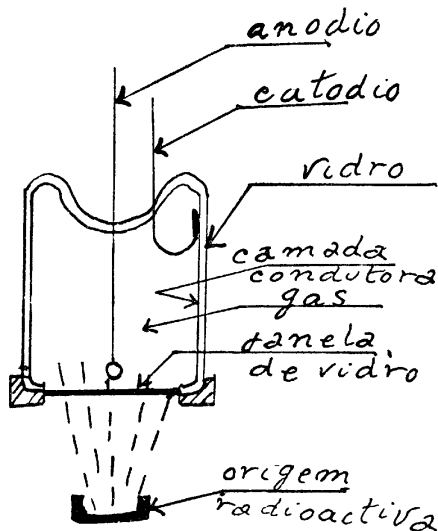
Pode pois dizer-se que, duma maneira geral, a exposição à radiação é o principal perigo no tratamento com fontes γ , enquanto que o perigo de contaminação é de principal importância nas fontes α e β .

Concluindo, acentuamos que a forte ionização produzida por fontes de raios β , relativamente fracas, tornou possível a construção dos micrometros de raios beta industriais (β -Ray Thicknen Ganger), nos quais a radiação beta é admitida no volume de uma câmara de ionização através de uma delgadíssima janela, situado em face da fonte de raios beta.

6. Medição da actividade de amostras radioactivas, usando tubos de Geiger. Se sômente as câmaras de ionização fossem utilizadas na detecção das radiações, não se teriam desenvolvido as técnicas dos marcadores radioactivos, envolvendo actividades

extremamente pequenas; além disso, a aviação das contaminações, teria sido um problema insolúvel, tornando o manuseamento das substâncias radioactivas muito arriscado.

Os tubos de Geiger são os mais sensíveis ⁽¹⁾ detectores de radiação neste campo. Como as câmaras de ionização, eles têm também dois eléctrodos. O cátodo é geralmente a parede interna do próprio tubo. O anodo tem a forma de um fio fino concentrico com o tubo.



Tubo para partículas alfa e beta (tipos IGC-1, IGC-2)

Aplica-se entre os eléctrodos uma diferença de potencial muito alta. Devido ao grande gradiente do potencial, os iões produzidos no volume do tubo são fortemente acelerados e dão origem, á maneira de uma reacção em cadeia, a uma «avalanche» de iões secundários resultantes dos choques com as moléculas gasosas que eles encontram no seu caminho.

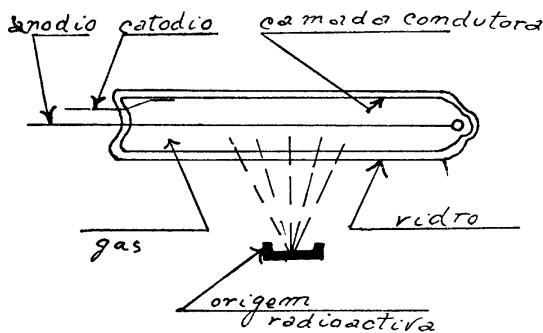
Ao passo que, uma câmara de ionização, operando a um baixo potencial, apenas reúne e mede a fraca corrente iónica produzida ao longo do trajecto da radiação ⁽²⁾ penetrante,

⁽¹⁾ Os contadores de cintilações são ainda mais sensíveis, mas o seu uso é ainda limitado pelo seu alto preço.

⁽²⁾ Esta denominação inclui, de acordo com a prática geral, as partículas alfa e beta, bem como os raios gama.

um tubo Geiger dá conta de cada fenómeno ionizante elementar por emissão de um impulso eléctrico de curta duração, suficiente para actuar uma escala ou um medidor de intensidade que regista ou conta os fenómenos «ionizantes» que ocorrem num dado intervalo de tempo. Um «fenómeno ionizante» pode ser consequência de um simples ião ou de um grupo de iões produzidos ao longo do caminho de um raio que penetra no tubo.

É imediatamente evidente que um tubo de Geiger está idealmente indicado para medir actividades extremamente baixas, quase prestes a desaparecer. Qualquer que seja o número (superior a um) de iões iniciais produzidos por um só raio, ainda será produzido um im-



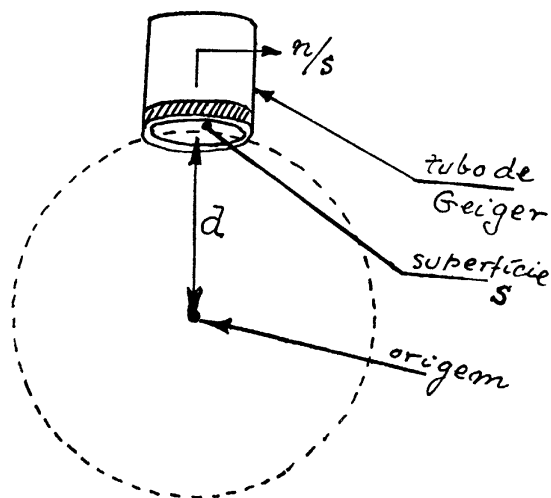
Tubo para radiação gama (tipos IGC-4, IGC-5, IGC-6)

pulso de apreciável grandeza. Tais impulsos sendo idênticos em grandeza, segue-se que um tubo de Geiger regista sómente o número de raios que produzem ionizações no volume do tubo, enquanto que a câmara de ionização na sua ordem de sensibilidade, mede o poder ionizante de raios de diferentes tipos e energias.

Contudo, como havemos de ver nos parágrafos seguintes, nem todos os raios que incidem num tubo de Geiger produzem um «fenómeno ionizante». Um certo número deles não são portanto registados nem contados. Alguns (especialmente raios α e β) podem não ter energia suficiente para atravessar o envólucro do tubo. Outros (especialmente raios γ) poderão atravessar todo o tubo sem produzir um único par de iões. Outros ainda poderão incidir no tubo durante um tão pequeno

intervalo de tempo, que vários raios consecutivos poderão não ser identificados por impulsos separados porque se excedeu o limite do «tempo de recuperação» do tubo. Este último efeito determina um limite superior (de saturação) do poder de contagem dos tubos de Geiger.

7. Contagem das partículas α e β . Em primeiro lugar consideraremos um caso ideal, no qual se supõe que a fonte está concentrada num ponto, e que todos os raios emitidos na direcção do tubo de Geiger são efectivamente contados. Será também presuposto que é emitido somente um raio por cada desintegração.



Designando por c (Curies) a actividade da fonte, d (cm) a sua distância ao tubo e s (cm²) a sua superfície normal à direcção de radiação, o número médio de raios que penetram no tubo por segundo será evidentemente, (supondo d grande em relação às dimensões do tubo)

$$(4) \quad n = \frac{s}{4\pi d^2} \times C \times 3,7 \times 10^{10} \text{ (c.p.s.)}$$

onde o factor geométrico $\frac{s}{4\pi d^2}$ representa a razão entre o número de raios que penetra através da superfície do tubo, e o número total de raios através da superfície $4\pi d^2$ de da esfera de raio d com centro na fonte.

A expressão ideal (4) permite calcular a actividade da fonte C medindo a contagem por unidade de tempo.

Na prática encontram-se algumas limitações para tais medições absolutas dos emissores de raios alfa e beta.

Estas limitações poderão ser aproximadamente resumidas pela introdução de um «factor de eficiência» η naquela equação (4) que dá então: ⁽¹⁾

$$(5) \quad n = \eta \frac{s}{4\pi d^2} \times C \times 3,7 \times 10^{10} \text{ (c.p.s.)}$$

A eficiência de contagem η depende de vários factores, ⁽²⁾ os mais importantes dos quais são os seguintes, para os emissores alfa e beta:

a) Sendo as partículas alfa e beta facilmente absorvidas por delgadas lâminas de matéria, uma fracção de tais partículas é detida pelas paredes do tubo e pela camada de ar entre a amostra radioactiva e o tubo.

Este efeito é desprezível para as partículas beta de alta energia, se o tubo fôr provido de uma janela de mica delgada tal como existe em certos tipos. Mas a fracção absorvida já se torna importante para radiação beta, de baixa energia tal como as emitidas pelo carbono 14 e o enxôfre 35 e é proibitivamente grande para as partículas alfa.

É conveniente em tais casos introduzir a amostra radioactiva dentro do próprio volume do tubo, evitando-se assim a absorpção pela janela e pelo ar. Aparelhos de Geiger especiais têm sido criados para este fim, nomeadamente o SC-16 Windowless Flow Counter na Tracerlab. ⁽³⁾

b) O factor «eficiência de medição» η nas medições alfa e beta é ainda reduzido pelo factor de absorpção próprio ⁽⁴⁾ o qual dá conta

⁽¹⁾ Presupõe-se que o emissor se transforma numa substância estável depois da emissão de um raio alfa ou beta.

⁽²⁾ Benjamin P. Burt: «Absolute Beta Counting» Nucleonics. Vol. 5 n.º 2, págs. 28/43, Agosto 1949

⁽³⁾ Tracerlog, n.º 29 de Setembro de 1950.

⁽⁴⁾ A. H. W. Aten, Jr. «Corrections for beta-particle Self-absorption» Nucleonics, Vol. 6, n.º 1 pg. 68-74 Janeiro de 1950.

da absorpção da emissão proveniente das camadas internas pelas camadas envolventes exteriores da substância radioativa.

c) A fonte não poderá em geral ser considerada pontual e a distância d raramente é muito grande comparada com as dimensões do tubo. Isto vai reflectir-se no cálculo de η , ou melhor, o factor geométrico $s/4\pi d^2$ tem que se alterar para se adaptar mais rigorosamente às condições experimentais. Um caso limite é o obtido no SC-16 Windowless Flow Counter, no qual a fonte é colocada dentro



do próprio detector, na superfície do fundo. Aqui o factor geométrico é aproximadamente igual a 0,5 visto que todos os raios emitidos para cima, não saem da câmara de contagem.

É importante notar que, devido ao seu alto poder ionizante, praticamente todas as partículas alfa e beta que penetram no volume sensível de um tubo de Geiger são efectivamente «contadas», contanto que os intervalos entre as partículas sejam maiores do que o «tempo de recuperação» do tubo.

As actividades podem ser calculadas para os emissores alfa e beta, contanto que as devidas correcções sejam feitas, de acordo com o que dizemos acima.

Medições absolutas, requerendo uma rigorosa interpretação da eq. (5) tornam possível a preparação de «fontes padrão» de referência, que poderão ser usadas para medições relativas de fontes desconhecidas, contanto que condições geométricas fixas sejam usadas em todas as experiências. Se n_r for a contagem por unidade de tempo obtida pela fonte conhecida de referência e n a contagem por unidade de tempo obtida com a fonte desconhecida, a equação (5) dá:

$$(6) \quad \frac{n}{n_r} = \frac{\eta}{\eta_r} \times \frac{C}{C_r}$$

onde o factor geométrico constante $s/4\pi d^2$ é eliminado da medição e não há necessidade, portanto, de o calcular. Na equação (6) a actividade C_r da fonte de referência é conhecida, bem como o valor aproximado da «eficiência de contagem» η_r para os raios emitidos pela fonte de referência.

Sòmente a «eficiência de contagem» η da amostra tem de ser avaliada, considerando principalmente os factores de absorpção referidos anteriormente em a) e b); o factor dimensões indicado em c) é eliminado desde que todas as amostras sejam observadas em condições geométricas idênticas às da fonte de referência.

8. Contagem de raios gama. A expressão (5) do parágrafo precedente também se aplica, em princípio, aos emissores gama. Se N raios gama são emitidos por desintegração podemos escrever:

$$(7) \quad n = N \times \eta \frac{s}{4\pi d^2} \times C \times 3,7 \times 10^{10} \text{ c. p. s.}$$

A absorpção pelo ar e pelas paredes do tubo de Geiger, são desprezíveis para os raios gama. O principal factor que afecta a eficiência de contagem η neste caso, é que sòmente uma pequena percentagem de raios gama que

passam através do tubo de Geiger produzem os «fenómenos ionizante» ⁽¹⁾ indispensáveis para obtenção dos correspondentes impulsos eléctricos, o que se deve ao facto de os raios gama serem muito penetrantes. Uma considerável porção de matéria é portanto indispensável para se obter a energia de interacção com a radiação gama que produzirá a formação dos iões.

Por esta razão, é conveniente usar tubos de Geiger com paredes espessas para a medição eficiente da radiação gama. Uma maior concentração de matéria nas paredes do tubo aumenta a probabilidade que tem um raio gama de encontrar uma molécula de substância das paredes e arrancar electrões, alguns dos quais penetrarão ⁽²⁾ no volume de gás produzindo uma corrente iónica que determinará um «impulso». As interacções dos raios gama com as paredes do tubo, mais que directamente com o gás, são responsáveis pela maior parte das «contagens» registadas pelo tubo.

Esta interacção é ainda acrescida pela utilização nas paredes do tubo de material de elevado número atómico.

Assim, somente uma pequena fracção η (veja eq. 7) dos raios gama que incidem no tubo é efectivamente contada; η é da ordem de 0,01 (1%) para um tubo vulgar, mas varia grandemente com a energia da radiação incidente (ver fim do parágrafo 9). É assim evidente que a contagem absoluta dos raios gama é impraticável só com a técnica dos tubos de Geiger.

O factor eficiência η não pode ser eliminado para componentes fisicamente mensuráveis, como sucedia no caso da contagem alfa e beta.

Somente *medicões relativas* podem ser feitas com um tubo de Geiger em amostras gama, usando uma fonte-gama referência calibrada por técnicas especiais.

⁽¹⁾ Ao contrário, com vimos, praticamente todos os raios alfa ou beta produzem «fenómenos ionizantes» contanto que entrem no volume do tubo.

⁽²⁾ O poder penetrante dos electrões fornece um limite para a espessura máxima útil das paredes.

A expressão (6) aplica-se a tais medidas, mas a razão de eficiência n/n_r é geralmente impossível de computar nos casos vulgares. Esta razão deve portanto ser feita igual à unidade, usando uma fonte de referência feita do *mesmo material radioactivo* que as amostras.

9. Possibilidade de usar tubos de Geiger em vez de câmaras de ionização para medidas em roentgens. Primeiramente excluiremos a possibilidade de interpretar as medições com tubo de Geiger de radiação alfa ou beta em termos de roentgens equivalentes. Cada partícula alfa ou beta que penetra no volume do tubo, dá origem a um e somente um impulso, independentemente do poder ionizante relativo das partículas de diferentes energias. A situação é bem diferente quando somente temos a considerar radiação gama.

Como dissemos nos parágrafos precedentes, os tubos de Geiger são sensíveis à energia dos raios gama. Mais precisamente, recentes experiências mostraram ⁽¹⁾ que a eficiência ou contagem η dos tubos de Geiger para raios gama é muito aproximadamente proporcional à energia E dos raios gama, dentro de energias compreendidas entre certos limites E_a e E_b , sendo estes limites dependentes do material das paredes do tubo. Nesta hipótese, podemos então escrever aproximadamente:

$$(8) \quad \eta = KE \text{ (para } E_a < E < E_b)$$

Para materiais de número atómico médio, como o cobre, a relação (8) é válida entre

$$E_a = 0,4 \text{ MeV e } E_b = 3,0 \text{ MeV}$$

Se uma fonte gama emitir N raios gama por desintegração, de energias $E_1 E_2 \dots E_N$ e se todas essas energias existem entre os limites E_a e E_b , podemos pôr na eq. (7):

$$\begin{aligned} N \times \eta &= \eta_1 + \eta_2 + \dots + \eta_N = \\ &= K(E_1 + E_2 + \dots + E_N) \end{aligned}$$

A eq. (7) escreve-se agora:

⁽¹⁾ W. K. Sinclair: «Comparison of Geiger-counter and Ion-chambre Methods of Measuring Gamma Radiation». *Nucleonics*, vol. 7, n.º 6, pg. 21/26, Dec. 1950.

$$n = K(E_1 + E_2 + \dots) \frac{S}{4\pi d^2} \times C \times 3,7 \times 10^{10} \text{ c. p. s.}$$

comparando esta expressão com eq. (3) obtém-se

$$(11) \quad \frac{n}{r/\text{hora}} = \frac{3,7 \times 10^{10}}{5570} \times \frac{Ks}{4\pi} = \text{const.}$$

Chegaremos assim ao interessante resultado de que, *na presença de radiação gama de energias compreendidas entre E_a e E_b , a contagem por unidade de tempo de um tubo de Geiger, pode ser referida a roentgens por hora*, e a indicação do tubo é portanto equivalente à de uma câmara de ionização.

A possibilidade da medição da intensidade de dose de radiação γ com tubo de Geiger torna possível estender o alcance de tais medições abaixo dos mais baixos valores detectáveis pelo método das câmaras de ionização, as quais dão leituras mínimas da ordem

de 1 miliroentgen por hora. As medições com tubos de Geiger podem detectar intensidades de dose tão baixas como alguns microroentgens por hora. Por outro lado temos sempre feito notar o facto de que há um limite superior para a ordem de medidas útil (linear) dos tubos de Geiger, devido aos efeitos de saturação no tubo. Na prática, se se pode admitir uma perda de contagens de cerca de 10 a 20%, aquele limite superior corresponde a uma contagem por unidade de tempo da ordem de 1.000 a 1.500 c. p. s., equivalente a uma intensidade de dose da ordem de 20 ou 40 miliroentgens por hora, dependendo da eficiência do tubo para raios gama.

Tracerlab, Inc. — European Office
Artigo amavelmente cedido pelos Serviços Científicos desta firma. (Outubro 1951).

TRADUÇÃO DE
LÍBANO MONTEIRO

10. SECÇÃO LIVRE

BASES FÍSICAS DA ELECTROCARDIOGRAFIA (1)

I — Panorama das teorias da electrocardiografia e algumas das suas dificuldades

A — Fenómenos bioeléctricos em geral.

A Bioelectricidade nasceu de uma observação fortuita. Em 1790, Galvani ao constatar que as patas de rãs suspensas por ganchos de cobre a uma balastrada de ferro se contraíam, teve a ideia que essas contrações seriam devidas a correntes de origem animal. É bem conhecida a sua controvérsia com Volta e como se demonstrou que era errada a interpretação de Galvani. Mas Volta também não tinha razão negando as correntes de origem animal; as observações de Galvani na pata galvanoscópica tornavam-nas muito plausíveis e, efectivamente, com a invenção do galvanómetro demonstra-se de modo incontestável a sua existência [1].

Sabe-se hoje que entre as células dos organismos vivos e o meio intersticial existe, quando as células estão em repouso, uma

diferença de potencial que se pôde medir directamente em células vegetais gigantes (de algas dos géneros *Valonia* e *Nitella*,) em ovos e mais recentemente em células animais relativamente pequenas utilizando microelectrodos. Esta polarização da superficie celular é, em geral, tal que o interior é negativo em relação ao exterior [2-3].

O potencial de repouso pode variar em relação com modificações passivas das células quer sem lesão, alterando-lhes a forma ou sujeitando-as a pressões moderadas, quer lesando-as por acções físicas ou químicas. Maior interesse biológico têm as modificações de carácter activo, espontâneas ou provocadas.

(1) Este é o primeiro de uma série de artigos cujo objectivo é chamar a atenção dos físicos para um importante campo de investigação teórica e experimental de física aplicada à medicina.