

RADIAÇÃO: SUA UTILIDADE E PERIGO

SHIGUEO WATANABE

A. ATOMO – NÚCLEO E RADIOATIVIDADE

Estrutura atômica da matéria antes do século XIX

Raios-X

Átomo nuclear de Rutherford

Radioatividade: raios

Lei da desintegração: constante de desintegração e meia vida

Radioatividade artificial e radioisótopos

B. OS PERIGOS DA RADIAÇÃO

Efeito destrutivo da radiação

Efeito genético

Envelhecimento precoce

C. APLICAÇÕES ÚTEIS DA RADIAÇÃO

Na agricultura, biologia e bioquímica

Na indústria

Na arqueologia, geologia e gemologia

Na medicina

A. Átomo, Núcleo e Radioatividade

O interesse pelo conhecimento da constituição da matéria data da época dos gregos. Anaxágoras, Leucippo e Demócrito postularam que a matéria é constituída de aglomeração de partículas, que foram chamadas de *átomos*, para indicar a sua suposta indivisibilidade. Através dos séculos que seguiram, vários filósofos especularam sobre a estrutura da matéria. No começo do século XIX, as pesquisas sobre os pesos e os volumes de substâncias em reação química, realizadas por John Dalton e seus contemporâneos, conduziram estes ao enunciado, em *base experimental*, da teoria atômica da matéria.

A física atômica moderna teve o seu início na descoberta de raios-X por Roentgen, em 1895, da radioatividade por Beequerel em 1896, e do elétron por J.J. Thomson, em 1897.

A medida da razão *carga/massa* por J.J. Thomson e a determinação do valor da carga e do elétron por Millikan deram para esta partícula uma massa, que é cerca de 1840 vezes menor que a de um átomo de hidrogênio.

Na mesma época, os raios alfa de substâncias radioativas estavam recebendo muita atenção. Numa brilhante experiência de espalhamento de raios alfa por átomos de ouro (em folha fina desse material), Rutherford e seus colaboradores mostraram que um átomo deve ser constituído de uma parte central carregada positivamente e, com a quase totalidade da massa do átomo ali concentrada, chamada núcleo e os elétrons girando em torno dela, constituindo um sistema muito semelhante ao sistema solar. Este modelo contrasta ao de Thomson, que supunha que um átomo é uma esfera de raio da ordem de 10^{-8} cm, com carga positiva uniformemente distribuída e, os elétrons espalhados nessa esfera positiva. O número de elétrons num átomo, que é igual à carga positiva total dividida por e , chama-se *número atômico* e o número inteiro mais próximo da massa atômica foi chamado de *número de massa A*.

Investigando as propriedades de raios catódicos, que não são nada mais do que feixe de elétrons acelerados por uma diferença de potencial de dezenas a centenas de milhares de Volts, Roentgen descobriu que, uma placa metálica ou de vidro ou de outros materiais, quando bombardeados com

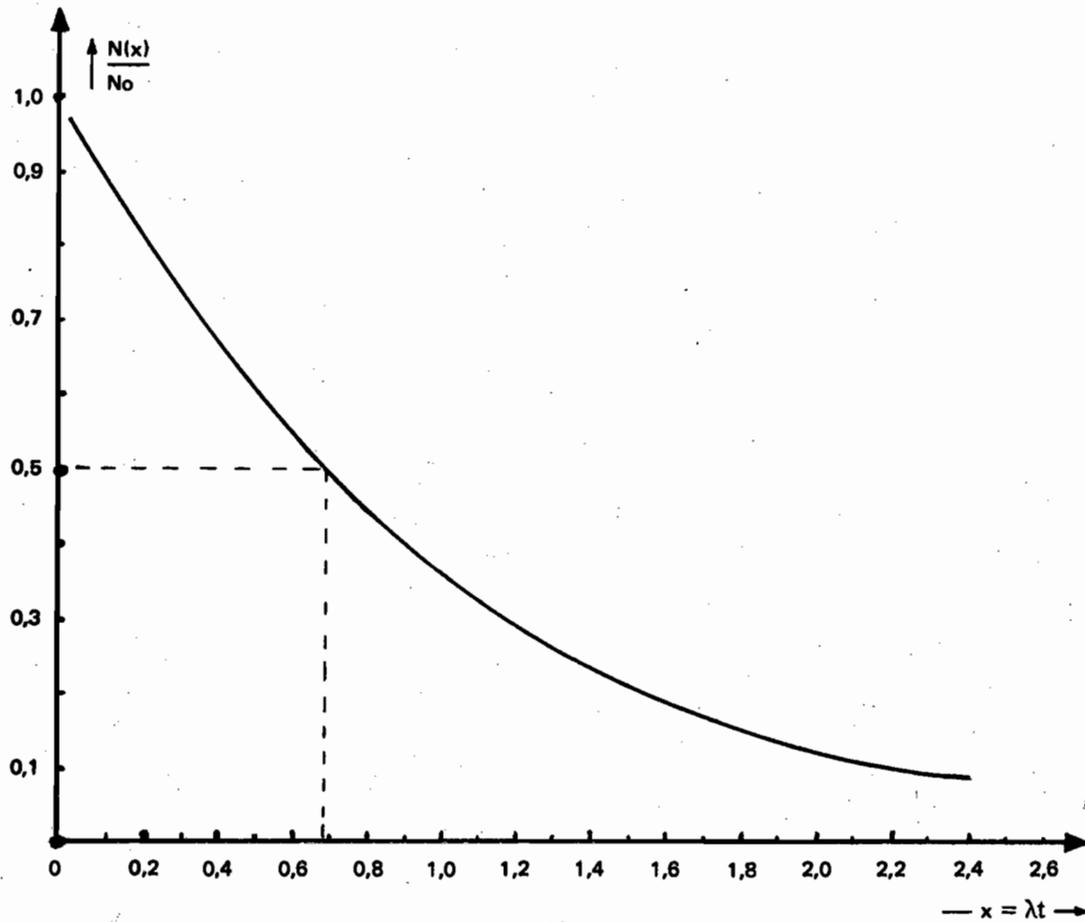


Figura 1. Curva de $\frac{N(x)}{N_0} = e^{-x}$; $x = \lambda t$.
No

raios catódicos, emitem um raio muito penetrante que recebeu o nome de raio-X. Este difere, por exemplo, de raios catódicos no sentido de ser uma radiação eletromagnética.

O núcleo do átomo mais leve, o hidrogênio, recebeu o nome de *próton*. É uma partícula carregada positivamente e o valor de sua carga é igual a e , o mesmo da do elétron. A sua massa é, porém, 1840 vezes a do elétron. Com a descoberta por Chadwick, de nêutron, partícula sem carga e com massa praticamente igual à do próton, foi formulada por Heisenberg a hipótese de que o núcleo é formado de Z prótons e $(A - Z)$ nêutrons, modelo este já consagrado por todos. Na natureza são encontrados átomos cujo número atômico Z varia de 1 a 92: $Z = 1$ é o hidrogênio e $Z = 92$, o urânio. Em núcleos de Z pequeno, chamados núcleos leves, há uma tendência de A ser igual a 2 vezes Z . Em núcleos pesados $A - Z$ é bem maior que Z . No urânio mais comumente encontrado, $Z = 92$ e $A - Z = 146$: $^{238}_{92}\text{U}$. Dois átomos com o mesmo valor de Z , porém, A diferente chamam-se *isótopos*.

Quando Z é maior do que 84, a repulsão coulombiana entre os Z prótons, torna-se grande suficiente para haver, de tempo em tempo, uma desintegração do núcleo, emitindo raio alfa, raio beta, ou raio gama, dando origem à radioatividade natural. O raio beta não passa de um elétron, enquanto que raio-gama é como o raio-X, uma radiação eletromagnética. A desintegração ou decaimento radioativo é um processo estatístico, isto é, dado um grupo de átomos radioativos de uma espécie, nunca podemos prever quando um determinado átomo se desintegra; só podemos saber a probabilidade de um átomo se desintegrar em um determinado instante. Tudo isto pode ser caracterizado pela lei de desintegração radioativa, expressa por

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$$

onde N_0 é o número de átomos radioativos no início da experiência, $N(t)$ é o número de átomos que restam no fim do tempo t e λ , chamado de constante de desintegração, dá a probabilidade com que um *átomo* particular se desintegre na unidade de tempo. O produto de λ por $N(t)$ dá o número de desintegrações na unidade de tempo, no instante t , e é chamado de *atividade*. A periodicidade de uma fonte radioativa é caracterizada por esta quantidade.

Chama-se *meia vida* ou *meio período*, o intervalo de tempo T

durante o qual a metade dos átomos existentes sofreu desintegração. Pode-se mostrar que:

$$T = 0,693/\lambda$$

A meia vida é a impressão digital de uma espécie radioativa. O seu valor varia de um tipo de átomo para outro. Abaixo temos uma tabela de meia vida de alguns dos *radioisótopos*.

Radioisótopos	Símbolo	Z	A	T	Emite raios
Urânio	U	92	238	5x10 ⁵ anos	alfa
Urânio	U	92	235	7x10 ⁸ anos	alfa
Tório	Th	90	232	1,4x10 ¹⁰ anos	alfa
Rádio	Ra	88	226	1620 anos	alfa
Rádio	Ra	88	225	14 dias	beta

Com o advento de aceleradores de partículas de alta energia e reatores nucleares, os cientistas descobriram que é possível produzir artificialmente, radioisótopos de quase toda espécie: iodo-131 (¹³¹I), cobalto-60, céscio-137, fósforo-32, etc., etc..

A *penetrabilidade* num dado material de um dado raio depende da energia deste. Quanto mais energético, maior a sua penetração dentro da mesma substância. Os raios alfa são pouco penetrantes (da ordem de micron de espessura da matéria sólida), os raios beta penetram mais (elétrons acelerados em um campo de 20.000 volts atravessa uma camada de ar decerca de 0,7 cm); os raios-X e gama são os mais penetrantes e porisso, num sentido, os mais perigosos.

Os raios-X e gama são caracterizados pela sua capacidade de ionizar uma dada quantidade de ar. A unidade usada é o Roentgen (R). 1R atravessando uma massa de ar igual a 0,001293g a 0°C e 760mm de Hg de pressão produz uma ionização cuja carga (-) (ou +) soma 0,33 x 10⁻⁹

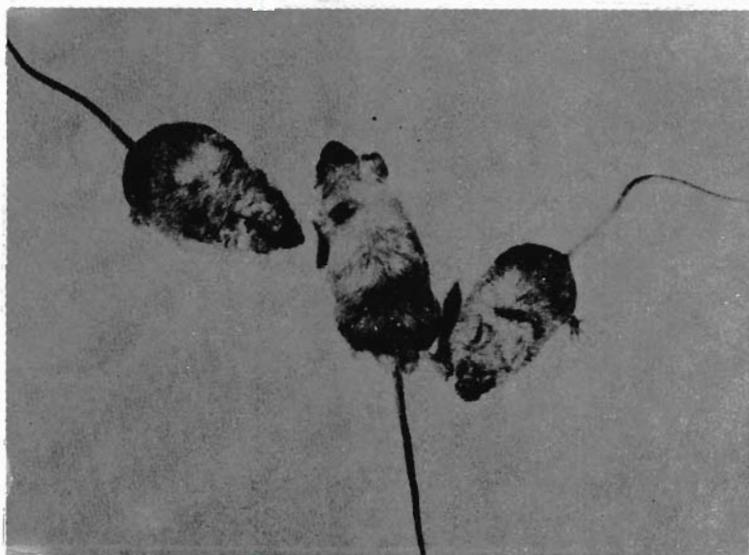


Figura 2

coulombs ou 2.08×10^9 pares de ion.

A atividade mede-se em curie (ci). 1 curie é a atividade de um elemento radioativo que sofre $3,7 \times 10^{10}$ desintegrações por segundo.

B. Os Perigos da Radiação

Embora os raios alfa e beta constituam, também, um perigo para um ser vivo, vamos falar só de raios-X e raios-gama, devido ao seu alcance maior, isto é, a maior penetrabilidade. Na realidade, a maior ênfase será dada ao perigo à humanidade.

A radiação quando interage com o tecido vivo, sempre o destrói. É claro que o tecido atingido pode se recuperar com o tempo.

1. Uma radiação muito intensa da ordem de 500 a 700 R pode ser fatal, principalmente se atingir órgãos críticos.
2. A radiação provoca câncer, principalmente a leucemia. A incidência de câncer aumenta com a dose (exposição é o termo correto) da radiação. Muitos estudiosos no início desconhecendo o efeito nocivo e por isso desprotegendo-se da radiação, tombaram vítimas de câncer devido à radiação.
3. A radiação acelera o envelhecimento, além de encurtar a vida. A Fig. 2 mostra 2 grupos de camundongos de 14 meses de idade, que inicialmente eram iguais. O grupo da esquerda não recebeu radiação e cresceram normalmente. O da direita recebeu uma dose alta, porém, não fatal; nota-se nitidamente os sinais de senilidade, além disso, só houve 3 sobreviventes.
4. Na Suíça, país dos bons relógios, há muitos operários cuja função é pintar os mostradores com tintas fosforescentes. Esta tinta contém um material que produz fosforescência quando irradiado com raios alfa por exemplo. Assim, costuma-se adicionar uma pequena quantidade de Ra (radio), que é emissor alfa. Como se sabe, o número de horas e os pequenos ris-

cos, que recebem esta tinta fosforescente são realmente pequenos. Para que não borre, a ponta do pincel usado deve ser bem fina, o que os operários conseguem lambendo-a sistematicamente. Em consequência, embora em quantidade realmente pequena cada vez, os operários ingerem o rádio que acaba se alojando em parte, nos ossos. Como se vê na tabela de meia vida, o rádio é um elemento de meia vida muito longa, e no decorrer do tempo vai destruindo o tecido ósseo, bem como provocar em alguns casos, o tumor ósseo. O rádio pode impressionar uma chapa fotográfica, de modo que, se seccionarmos uma parte qualquer do osso contendo rádio, e deixar em contacto com esse corte, uma chapa fotográfica por tempo apropriado, podemos obter a fotografia do rádio distribuído nesta secção do osso. Na Fig. 3, à esquerda uma fotografia direta da secção de um dos ossos; as áreas mais escuras são as partes danificadas pelos raios alfa do rádio. À direita a fotografia do próprio rádio no osso — a autoradiografia.

5. As chamadas cinzas radioativas, provenientes de testes nucleares, contém o estrôncio-90 (^{90}Sr) que é um radioisótopo emissor beta, entre outros produtos de fissão, também, radioativos. O Sr, também, é incorporado nos ossos, quando ingerido e tem uma meia vida de 28 anos e produz um efeito semelhante ao do Ra. O perigo da cinza radioativa está no seguinte: se espalha, após a sua produção, e pode cair, nas pastagens, contaminando o capim; a vaca come o capim e o Sr passa para o leite e deste às crianças e homens. Embora a ingestão de Sr se faça em quantidades mínimas, cada vez, no decorrer do tempo pode acumular uma quantidade prejudicial, principalmente devido à meia vida longa do Sr. A radiação direta da cinza, se for recebida, evidentemente provoca efeitos danosos. Na Fig. 4 vemos a consequência do teste nuclear realizado no atol de Bikini, em 1954, pelos Estados Unidos. Houve um erro na previsão da direção do vento que carregaria a cinza atômica e, um barco pesqueiro japonês de carga a 100 milhas do local de explosão, foi diretamente atingido pela cinza. Uma pessoa morreu e 23 sofreram fortes irradiações. Os peixes ficaram contaminados e foram considerados lixos radioativos.

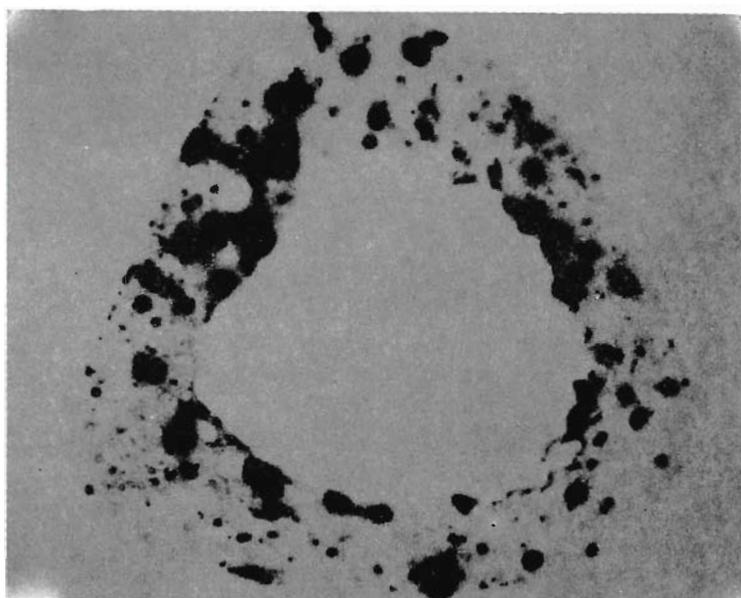
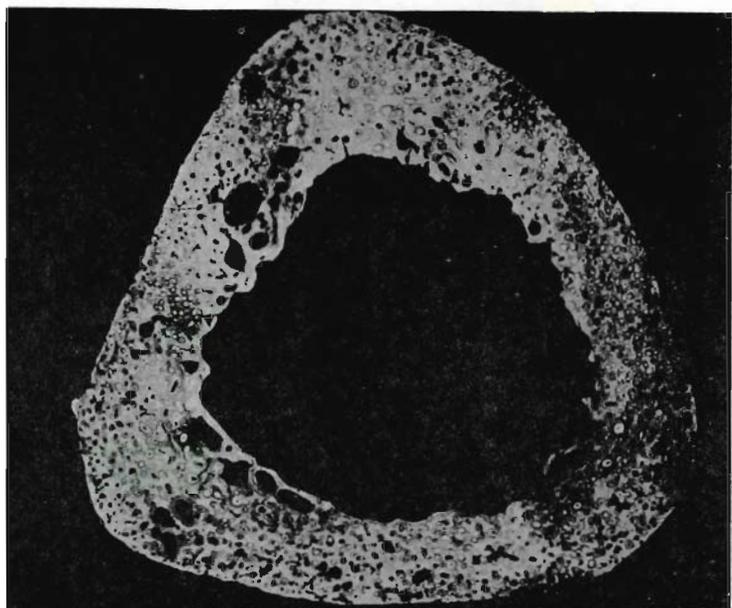


Figura 3



Figura 4

6. *Efeitos genéticos* — A radiação pode danificar ou induzir uma mudança profunda nos *cromossomas*, que são macromoléculas transportadoras de vida e *características* de seres vivos. Isto é nada mais do que a *mutação* e seus efeitos podem-se manifestar no primeiro, segundo, terceiro, etc. descendentes. Um cromossoma humano normal tem 23 pares.

A Fig. 5 — na parte superior — núcleo de uma célula, aumentado de 175 vezes — mostra cromossomas duplicados, triplicados, etc., por efeito da radiação; é um efeito anormal que, facilmente se degenera em câncer. Na parte inferior — temos um núcleo gigante (fotografia com um aumento de 50 vezes). Tornou-se gigante por efeito da radiação e tem agora mais de 700 cromossomas.

A Fig. 6 mostra resultados de estudos feitos no California Institute of Technology, sobre efeitos genéticos da radiação em *Drosófila*. A radiação causou uma mutação e rearranjos de cromossomas. A é uma drosófila normal, B é uma drosófila que nasceu com 4 asas e 2 tórax; C e D possuem 3 asas e tórax duplo parcial.

C. Aplicações Úteis da Radiação

Se de um lado, a radiação usada sem controle e sem adequada proteção, constitui um risco *sério*, mesmo em pequenas doses, o próprio poder destrutivo dela pode ser usado para o benefício da humanidade. É claro que outras propriedades da radiação são, também, amplamente utilizadas, como veremos a seguir.

1. Traçadores

Em agricultura, em biologia, em medicina, em química, em física e vários outros campos, é muito comum o uso do chamado *traçador radioativo*. Por exemplo, o fósforo, o enxofre e vários outros elementos são, é claro, essenciais para a vida, ou para formação de um cristal, etc.. Para o estudo do caminho seguido por esses elementos, no metabolismo, na fixação ou não em determinados órgãos, etc., é possível acompanhar esses elementos, se

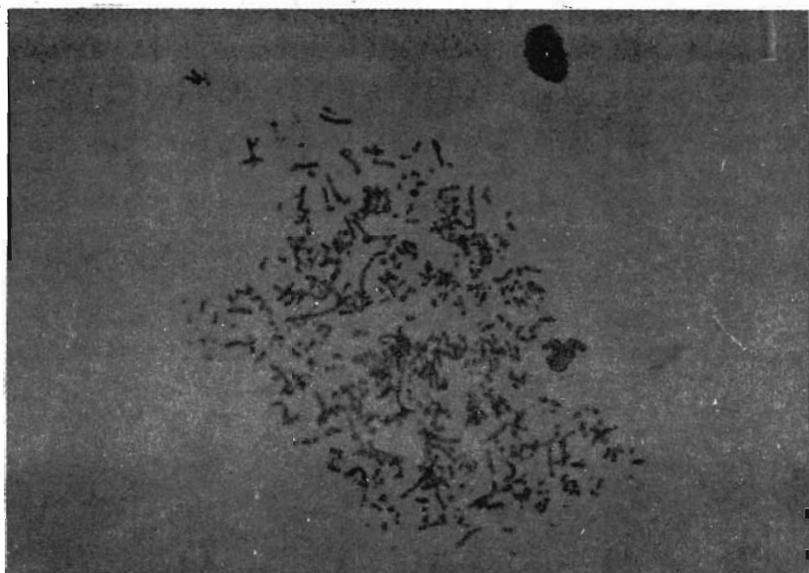
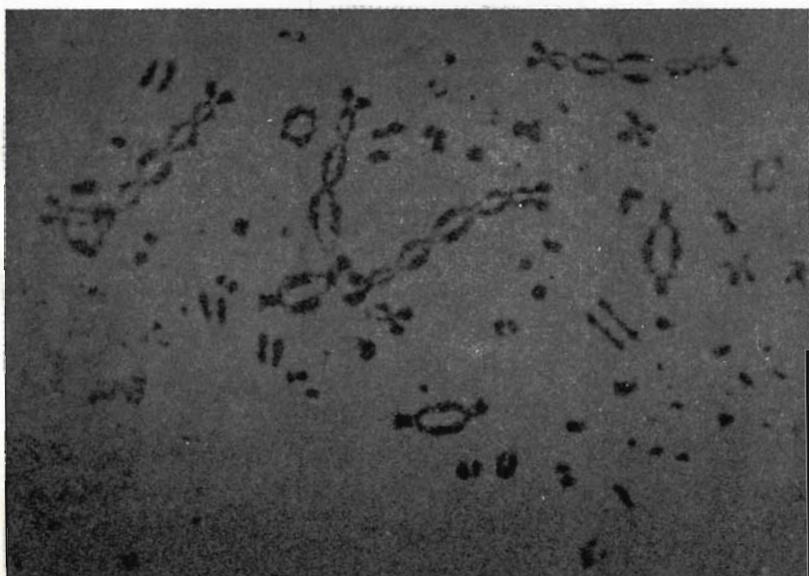


Figura 5

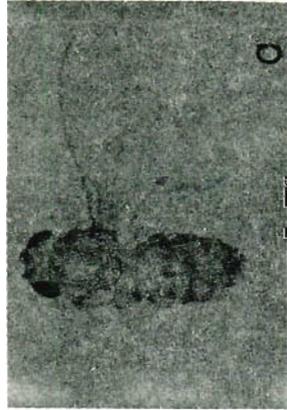
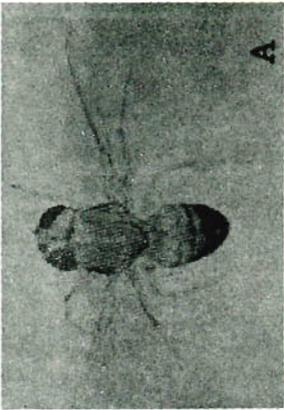
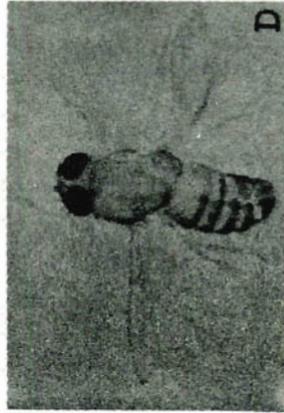
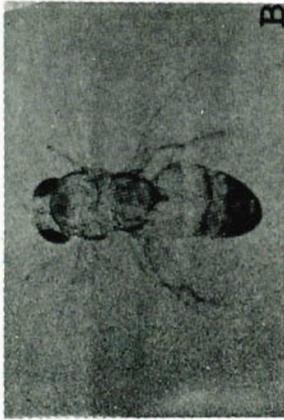


Figura 6

estes forem tornados radioativos. Há detetores de radiação que podem localizar esses elementos emissores de radiação. Num cristal muitas vezes desejamos conhecer a existência e a quantidade de átomos estranhos (impurezas) ao cristal. Por exemplo formado um cristal de cloreto de sódio, podemos observar a inclusão intencional ou não de certas impurezas, tornando estas radioativas num reator e examinando as radiações emitidas.

Muitas descobertas importantes foram feitas por este método.

2. Autoradiografia

No exemplo de rádio incorporado nos ossos de operários da fábrica de relógios na Suíça, vimos um caso de autoradiografia. Em outras instâncias, podemos obter a autoradiografia de um objeto orgânico ou não, se uma substância radioativa se instalar naquele objeto, pois, as radiações emitidas podem impressionar uma chapa fotográfica posta em contacto com o objeto em estudo. Obtém-se uma imagem dos pontos ou regiões onde os radioelementos se localizaram. A técnica de autoradiografia é amplamente utilizada.

A Fig. 7 mostra as células sendo preparadas para autoradiografia: (a) células sendo cobertas com uma emulsão fotográfica; (b) células cobertas sendo expostas para produzirem imagens latentes.

Fig. 8 — Autoradiografia de células tumorosas. Em cima — células tumorosas e células normais de sangue. Em baixo — células de tumor aumentadas.

3. Conservação de Alimentos por Irradiação

Mais da metade da população mundial vive subnutrida por falta de suficiente alimentação. Por outro lado, uma quantidade razoavelmente grande de frutas, legumes, cereais, etc. se deterioram por força da lei da natureza e falta de meio de conservação. A possibilidade de artificialmente preservar esses alimentos poderia aliviar uma parte daquele problema. A radiação ionizante pode conservar os alimentos inibindo ou destruindo as bactérias e outros microorganismos responsáveis pelo apodrecimento. A radia-

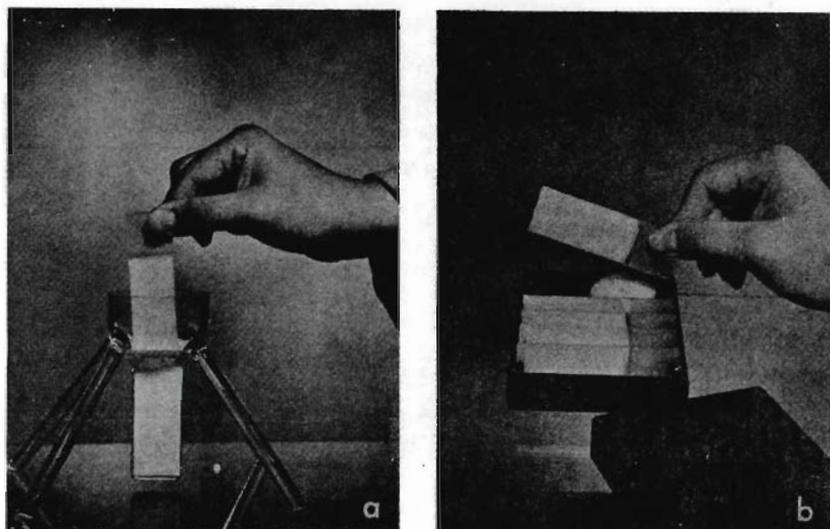


Figura 7

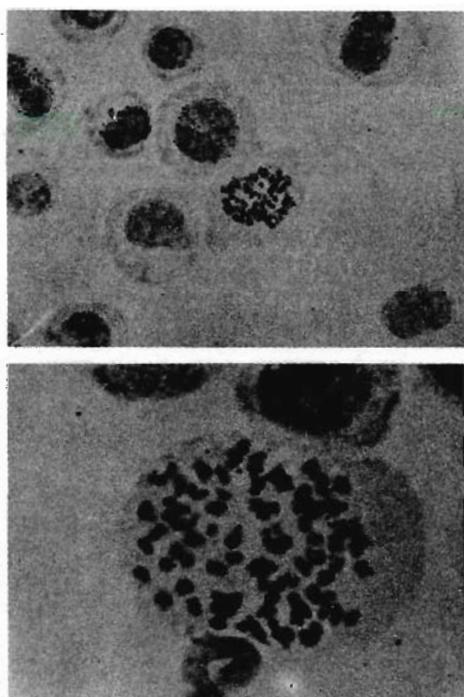


Figura 8

ção pode fazer mais do que isso: perdas, devidas aos insetos de trigo nos Estados Unidos, atingem milhões de dólares por ano. Inseticidas químicos podem controlar insetos adultos, mas os seus ovos permanecem intactos no trigo e se chocam quando a temperatura aumenta. A radiação é o melhor meio de destruir os ovos sem atingir o trigo.

Atualmente mais de 55 países desenvolvem programas de irradiação de alimentos.

Na Fig. 9, as duas batatas vieram de um mesmo pé. A batata de baixo foi irradiada com raios gama de 20.000 R e a de cima nada; as duas foram mantidas na mesma sala por 16 meses e fotografadas.

Na Fig. 10 temos o *Hawaii Development Irradiator* completado em 1967 e pode irradiar quase toda produção de frutas de Hawaii, como mamão, manga etc.. A fonte inicial de cobalto-60 de 250.000 curies de atividade pode irradiar 2.000 quilos de alimentos por hora com 75.000 R.

Na Fig. 11 temos um Laboratório de Radiação do Exército Estadunidense. (1) os bifes são parcialmente cozinhados para destruir enzimas antes da irradiação; (2) os bifes pré-cozinhados são enlatados; (3) as latas são colocadas em caixas de alumínio e transportadas para as celas de irradiação; (4) durante a passagem dessas caixas contendo as latas de bifes, barras de cobalto-60 sobem e irradiam-nas.

Na Fig. 12 os camarões nas duas fotografias foram pescados na mesma hora. Os de baixo receberam irradiação gama e os de cima não.

4. Aplicação na Indústria

Como em outras áreas, o uso da radiação, tanto de aparelhos de raios-X como de radioisótopos, é de prática amplamente difundida na indústria do mundo inteiro. Podemos citar algumas das inúmeras aplicações:

- a. padronização da espessura de chapas de metal, de papel etc., enquanto são produzidos e sem destruir o material. Assim como a quantidade de luz que atinge a nossa vista através de um

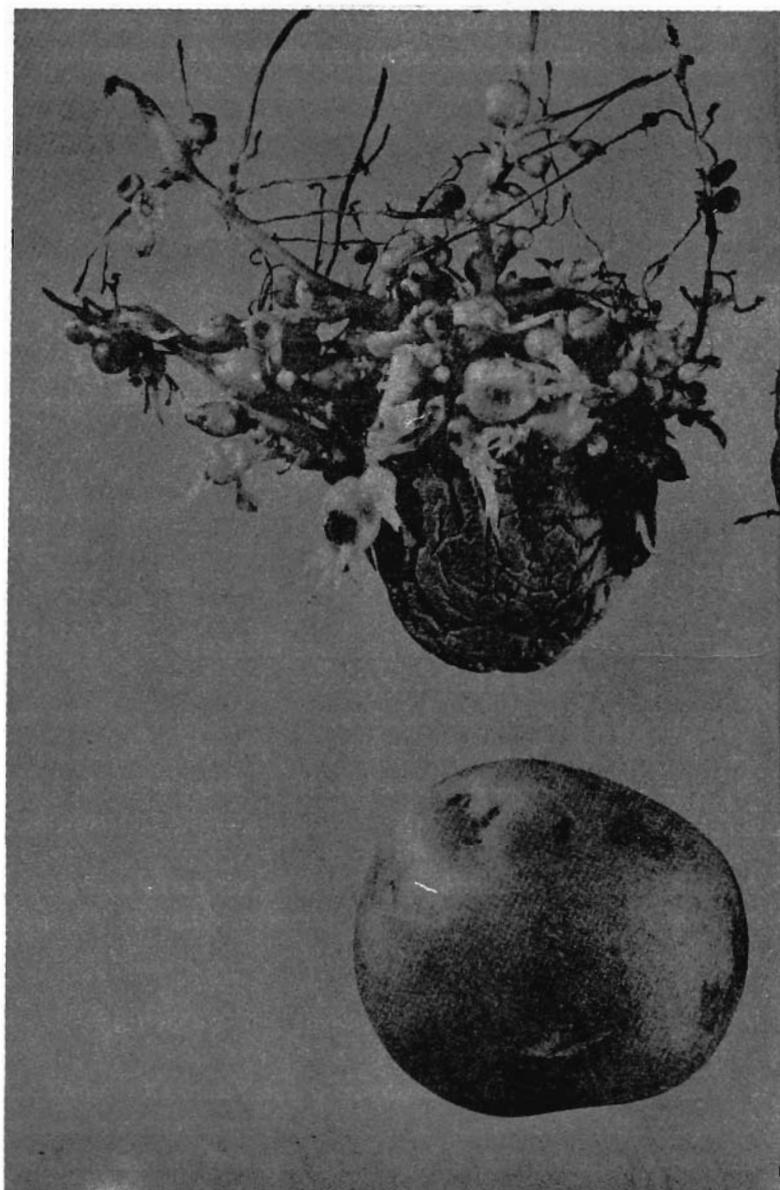


Figura 9

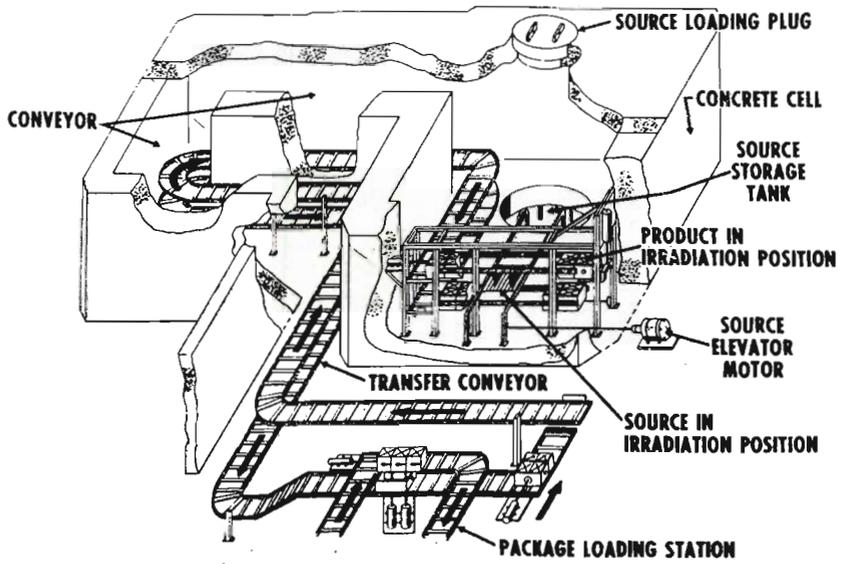


Figura 10

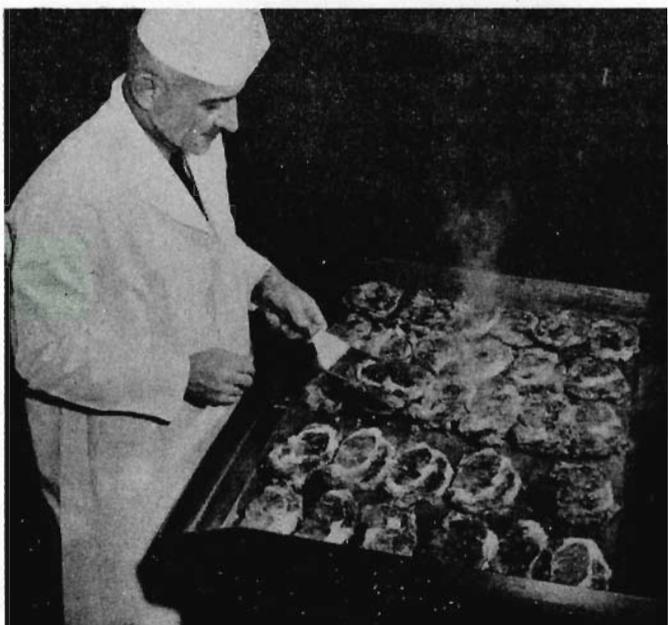


Figura 11

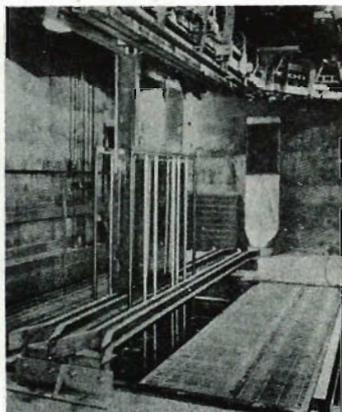
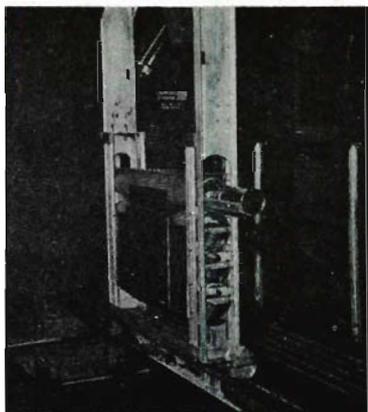
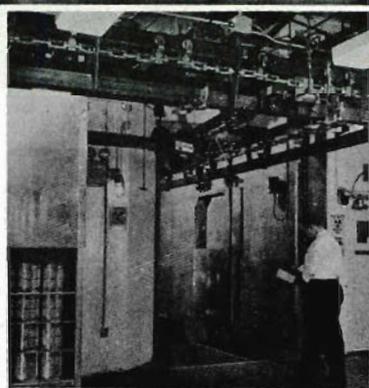
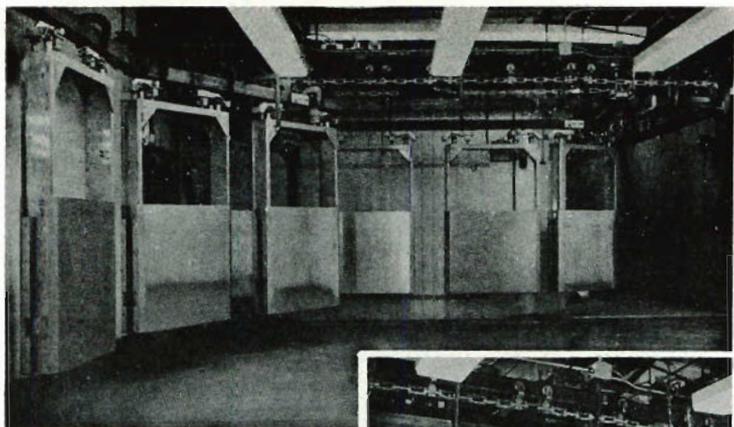


Figura 11



Figura 12

meio, não perfeitamente transparente, depende da espessura deste, a intensidade da radiação que atravessa uma chapa, digamos metálica, depende da espessura desta. Assim registrando a intensidade da radiação transmitida podemos verificar a uniformidade da espessura.

Na Fig. 13 temos o princípio de padronização da espessura.

A Fig. 14 mostra um medidor de espessura em uso numa fábrica de borracha.

b. Na fabricação de papel de lixa, o processo compõe-se de vários passos: (1) aplicação do primeiro adesivo, (2) colocação da camada de abrasivo, (3) primeiro tratamento térmico parcial, (4) aplicação final do adesivo, e (5) tratamento térmico final. Entre cada passo pode ser verificada a natureza da lixa que se forma usando *medidores múltiplos de radioisótopos*.

A Fig. 15 ilustra um sistema de medidores múltiplos de radioisótopo.

c. Baseado em um princípio diferente, pode-se medir a espessura da camada de cobertura de um metal noutro, por exemplo, o estanho no aço. O fabricante pode medir a espessura do estanho com isótopos por retro-espalhamento ou fluorescência de raios-X.

A Fig. 16 mostra o princípio de medidor de retro-espalhamento.

d. O controle do nível de um líquido num tanque ou em qualquer outro vasilhame pode ser feito usando um emissor de raios gama e um detector.

Na Fig. 17 – (a) a fonte de raios gama flutua na superfície do líquido. Quando o nível do líquido atinge a altura em que se encontra o detector D, a radiação gama atinge o detector e aciona o alarme; (b) a fonte F e o detector D são móveis na direção da vertical, para procura do nível do líquido, acima deste a radiação gama atinge o detector, abaixo dele a radiação é absor-

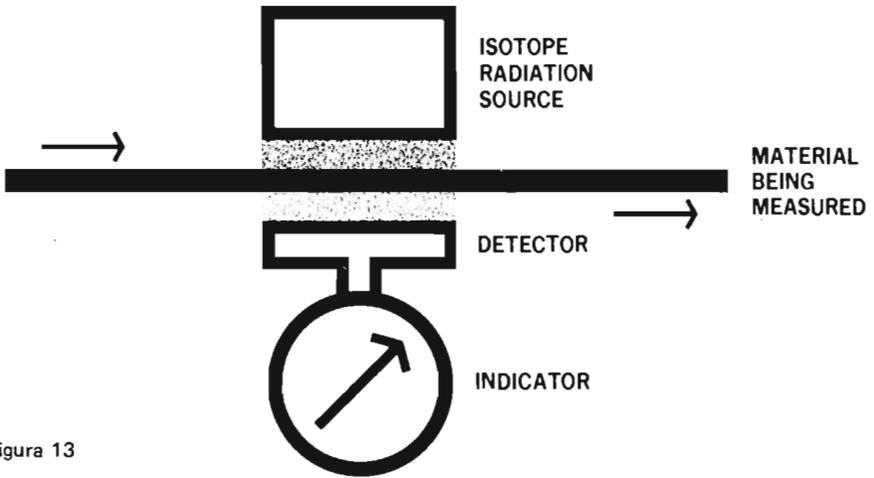


Figura 13

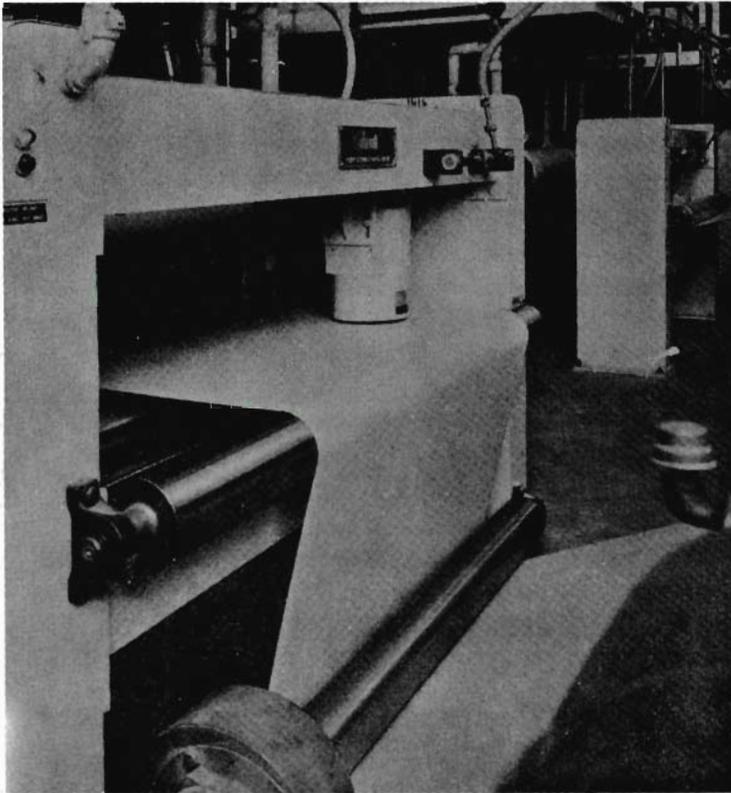


Figura 14

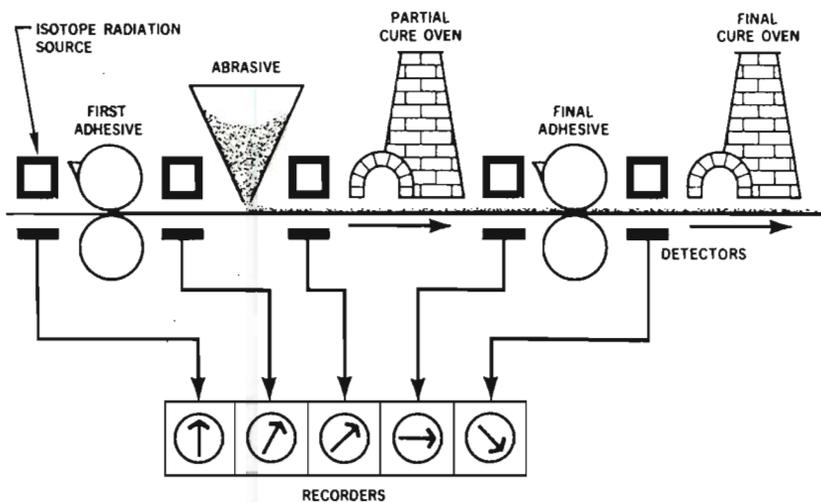


Figura 15

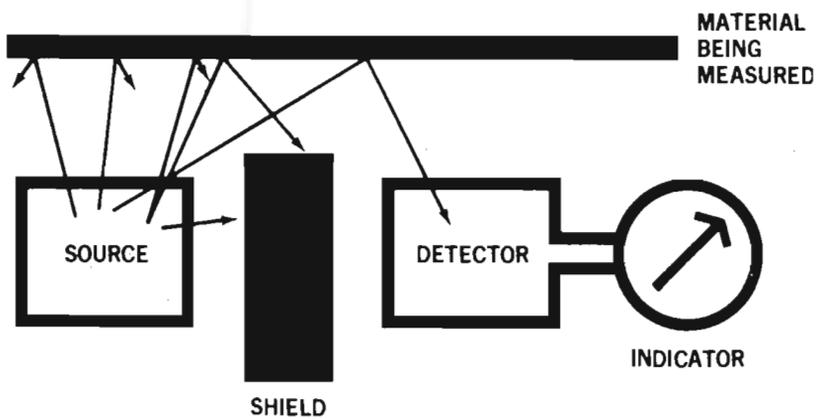


Figura 16

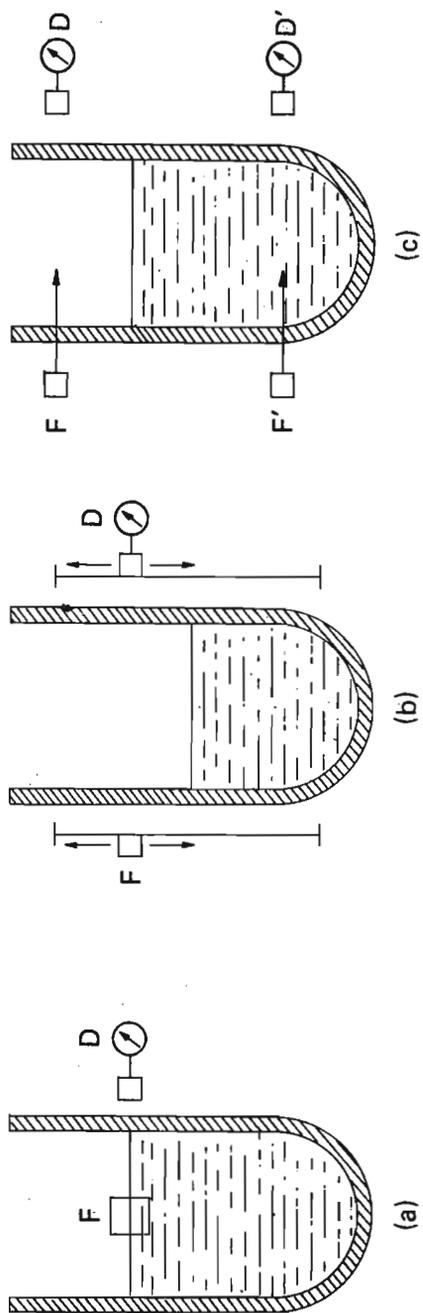


Figura 17

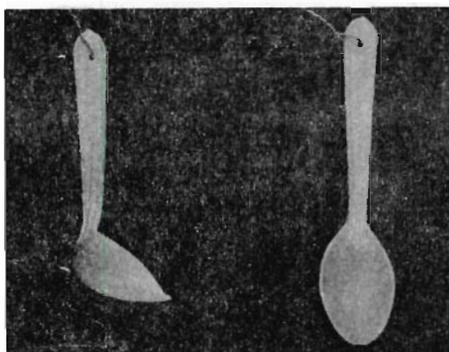


Figura 18

vida pelo líquido e não chega no detetor; (c) o par F—D indica o nível superior limite e F'—D' o nível inferior limite do líquido.

- e. A Radiografia X ou gama de um material é usada na indústria no controle de qualidade, e o princípio é o mesmo da radiografia médica ou dentária.
- f. Sobre traçadores já falamos na secção 1. do capítulo C.. — São usados no teste do gasto de pistão, em hidrologia, nos oleodutos, etc..
- g. Uma aplicação semelhante à da preservação de alimentos encontra-se na indústria, também.

Na Fig. 18 a colher da esquerda não foi irradiada e a da direita foi e depois as duas foram colocadas em água fervendo. O polietileno (plástico) inicial com que as colheres desta figura foram feitas é fraco diante do aquecimento. Uma irradiação apropriada quebra algumas das moléculas e se combinam com outras para dar origem a um material mais resistente ao calor.

5. Aplicação na Medicina

Para não estender demais este artigo, omitiremos a aplicação da radiação em arqueologia, geocronologia, gemologia, etc., e vamos ver *algumas* das aplicações médicas.

O grande malfeitor é, também, o grande benfeitor da humanidade.

A radiação é extensivamente usada na diagnose de moléstias de várias espécies — a Radiologia Diagnóstica e a Medicina Nuclear — bem como na cura de algumas das doenças, principalmente de tumores — a Radioterapia.

A diagnose pode ser conduzida com raios-X (radiologia diagnóstica) ou administrando radioisótopos ao paciente e detetando a radiação deles proveniente (cintilografia). A primeira é um processo muito difundido, e sua descrição será omitida.

Na Fig. 19 vemos o primeiro sistema de cintilografia (photoscanner) desenvolvido em 1954, na Universidade de Pennsylvania e *aposentado* em 1963. O dispositivo em forma de uma chapa quadrada espessa, contém detetor de radiação, se move de modo a *varrer* com o detetor, a região cujo cintilograma se deseja obter.

A Fig. 20 mostra um contador de corpo inteiro, que fornece a imagem de cabeça ao pé da pessoa (Donner Laboratory).

Fig. 21 — Um *multi-detetor diferencial* desenvolvido pelo Brookhaven National Laboratory para localização de tumores cerebrais com isótopos emissores de pósitrons.

Fig. 22 — Imagens cintilográficas da tiróide. (A) tiróide normal, (B) a anterior aumentada, (C) tiróide com tumor — região assinalada.

Não nos deteremos mais nesta parte e consideremos a Terapia. Um radioterapeuta conta a seguinte estória verídica:

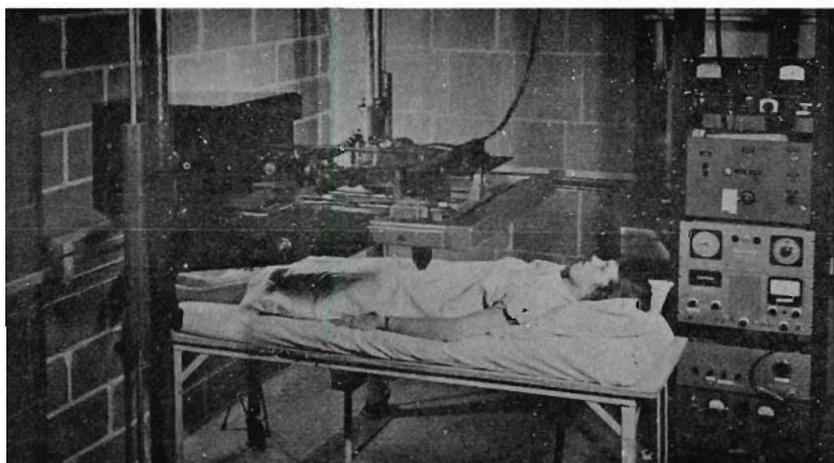


Figura 19

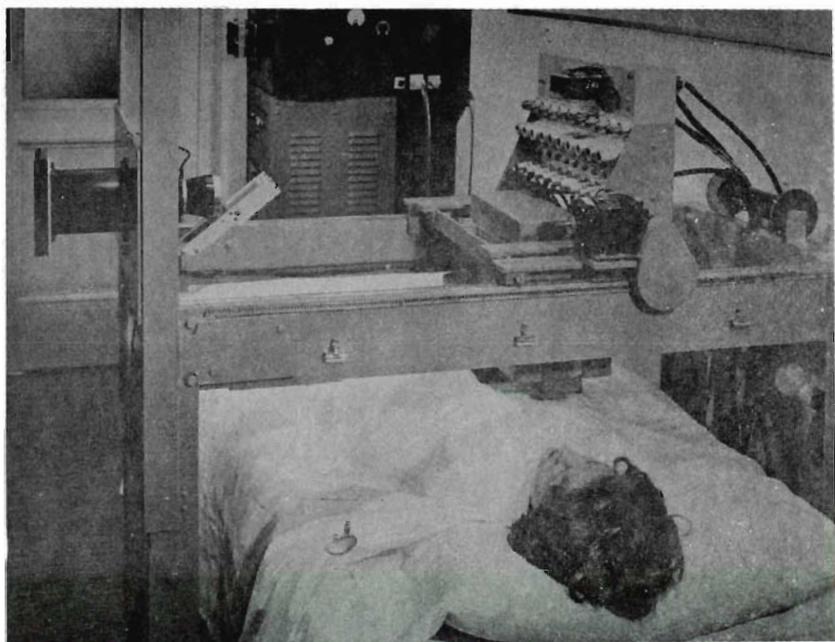


Figura 20

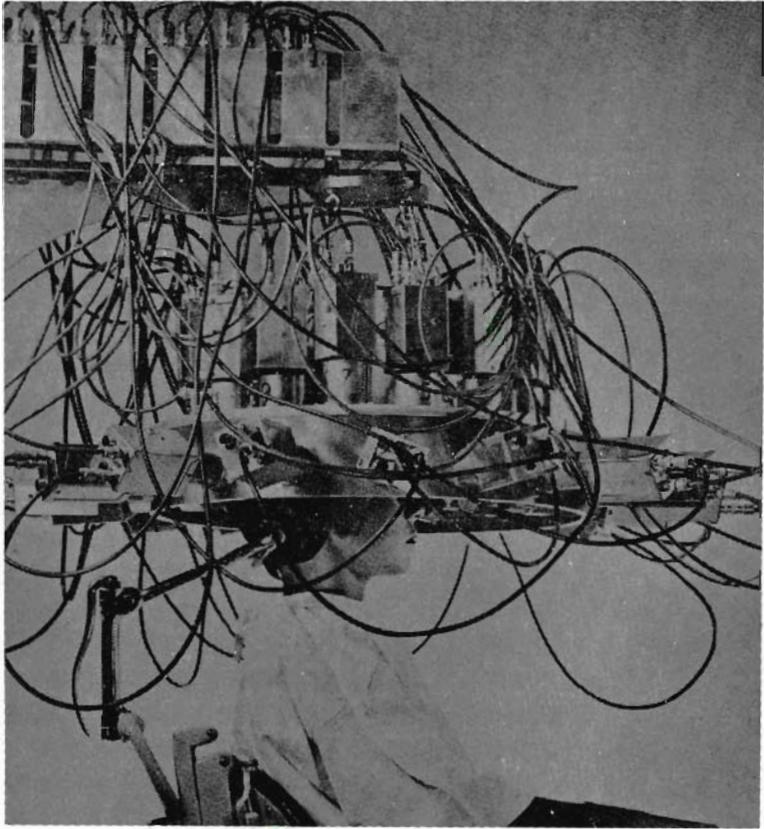


Figura 21

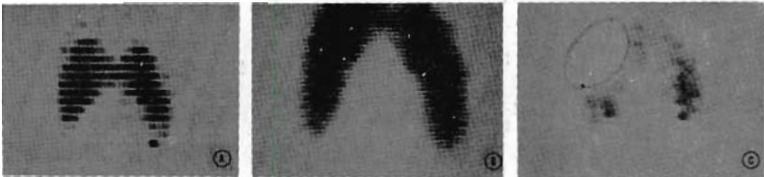


Figura 22

Um paciente, masculino, de 75 anos de idade, que ficou rouco há mais de um mês, foi tratado sem sucesso com medicamentos costumeiros de gripe. Finalmente, o exame da sua laringe revelou um inchaço com úlcera na corda vocal direita. Uma biópsia foi feita e constatou-se que se tratava de um câncer do tipo célula-escamosa. Iniciou-se uma radioterapia diária com o cobalto-60, por 31 dias. Isto se deu em setembro de 1959. Durante o tratamento, a voz do paciente piorou, mas, a volta à voz normal se deu depois de dois meses de terminado o tratamento. A radiação destruiu o crescimento canceroso e o exame regular do paciente num período de 6 anos subsequentes não mostrou o reaparecimento do câncer.

Hoje em dia, estórias semelhantes são frequentes e a radioterapia passou a ser uma técnica bastante segura e eficiente.

A Fig. 23 mostra esquematicamente uma bomba de cobalto. O cabeçote onde se aloja o cobalto-60 pode girar em torno do paciente.

A Fig. 24 mostra uma unidade de cobalto -60 de M.D. Anderson Hospital and Tumor Institute em Houston, U.S.A., que emprega uma fonte de 3000 curies.

Mais recentemente foram adaptados os aceleradores lineares e, também, os betatrons, para produzirem raios-X de alta energia e serem usados em radioterapia. Centenas de aparelhos que vão desde 4 milhões de volts a 30 milhões de volts estão sendo usados no mundo inteiro.

Para não prolongar mais, vamos citar aqui, o uso de *nêutrons* em terapia de câncer = *neutronterapia*.

Fig. 25 -- Tratamento de um tumor cerebral com a captura de nêutrons, usando o reator de pesquisa de Brookhaven National Laboratory. (1) Um obturador de chumbo blinda o paciente contra os nêutrons do reator. (2) Um composto contendo Boro é injetado na veia; o tumor absorve a maior parte do boro. (3) Após 8 minutos quando o tumor está saturado, o obturador é retirado e nêutrons bombardeiam o cérebro; o boro que captura um nêutron sofre uma fissão e os fragmentos disso resultantes, destroem

o tumor. (4) Vinte minutos depois o obturador é recolocado e o tratamento termina.

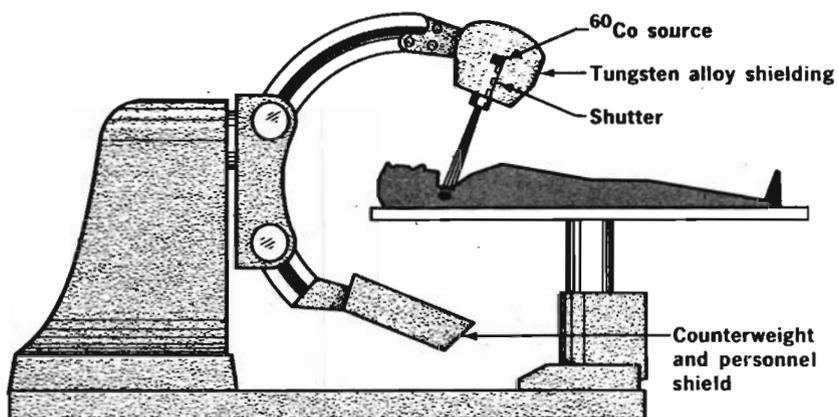


Figura 23

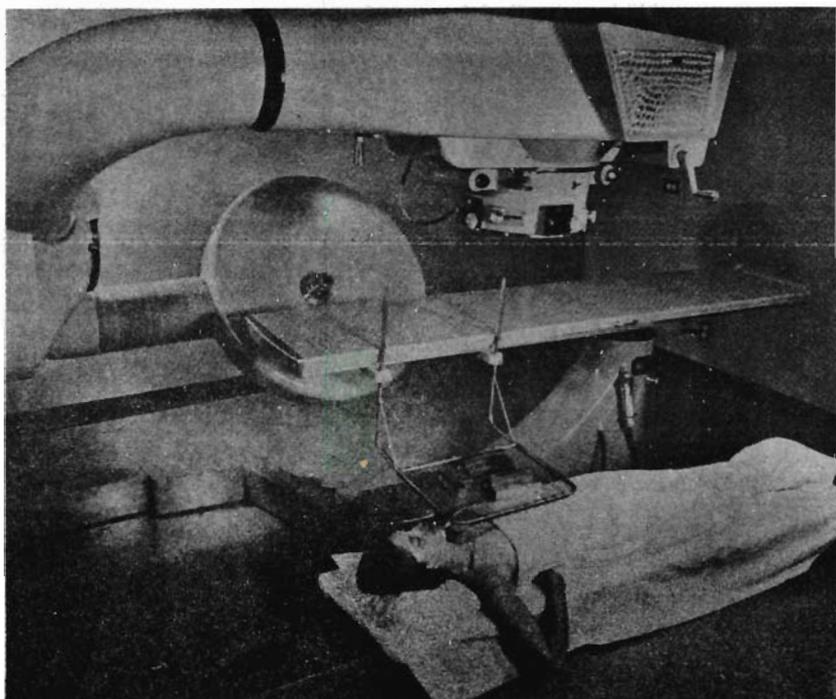


Figura 24

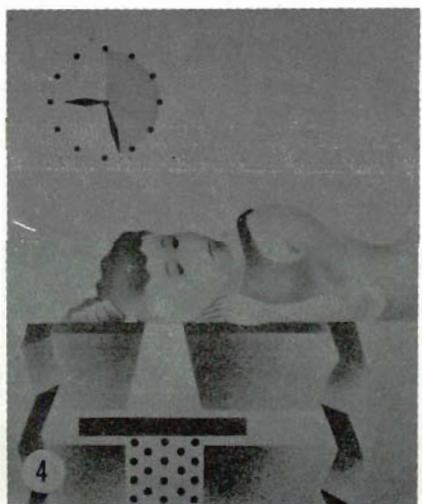
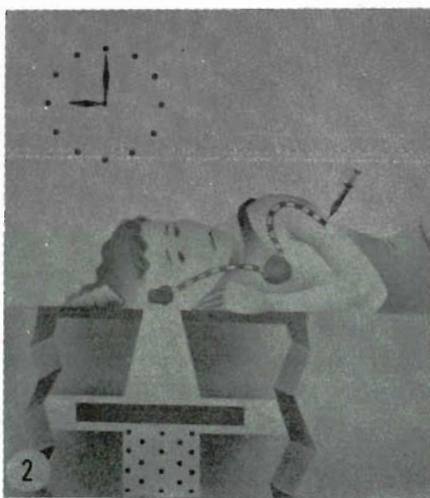
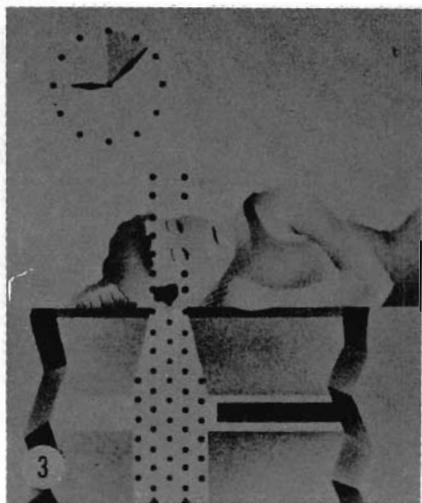


Figura 25

Nesta pequena palestra temos um pequeno exemplo de como a Física pode ser aplicada em benefício da humanidade.