

Universidade Estadual de Campinas IFGW – Instituto de Física Gleb Wataghin

Relatório Final de F 809, 2º semestre de 2.005 Aluno: Aldo G. Pereira Orientadora: Prof. Maria José P. M. de Almeida.* Coordenador: Prof. José J. Lunazzi.



Contador Geiger: Montagem a Utilização para o Ensino de Física Nuclear.

Resumo.

A proposta sugerida no Relatório Parcial foi frustrada, pois quando fomos fazer o vácuo no tubo de cobre, este quebrou a janela de mica (dois dias antes da apresentação). Colocaríamos um vácuo de aproximadamente 20 cmHg (ver W. J. Price, Nuclear Radiation Detectors, 2nd ed., Methuen and Co., London, 1964), e depois introduziríamos o gás Argônio. O primeiro problema seria como colocar o Quench gás dentro do tubo (Álcool Etílico numa porcentagem de 5% a 10%), mas o Prof. Landers sugeriu o seguinte: colocar o álcool etílico no estado sólido (ponto de fusão -114,1 °C !!!!), e introduzi-lo no tubo e depois fazer o vácuo. O problema é que o álcool etílico tem um baixíssimo ponto de fusão e isto iria acarretar alguns problemas, mas eu particularmente estava otimista com relação à empreitada. Como afirmado acima todo o otimismo foi quebrado quando o tubo quebrou a janela de mica.

Voltando a proposta inicial – descrita no Projeto -, da utilização do Contador para fins didáticos apressei-me em conseguir um contador no LNLS. Neste ínterim consegui um com o próprio Prof. Landers (que ainda estava na caixa e nunca tinha sido utilizado). Fomos ao laboratório para calibrá-lo e atingir a voltagem de Plateau.

Introdução.

Se vamos utilizar o enfoque Historia da Ciência então resta saber: quem foi Geiger, um dos inventores do Contador que leva seu nome? Hans Geiger, cujo nome era Johannes Wilhen Geiger, nasceu na Alemanha em Setembro de 1882. Tornou-se Ph.D em Física Nuclear pela Universidade de Erlangen em 1906. Foi um dos maiores colaboradores de Rutheford, trabalhando em Manchester com Rutheford de 1906 a 1912. Em 1911 ele confeccionou a primeira versão do contador para contar o numero de partículas alfa e outras radiações ionizantes. Com a ajuda de outros detectores de radiação, ele usou seu contador nos primeiros experimentos que levaram a identificação das partículas alfa como o núcleo do átomo Hélio. Ele e Rutheford demonstraram que as partículas alfa tinham carga positiva 2e, onde e é o que conhecemos hoje como carga

elementar, e que ocasionalmente defletiam com grandes ângulos quando acertavam uma fina placa de ouro ou prata. Este experimento levaria ao modelo atômico proposto por Rutheford em 1912, e que o núcleo atômico, na verdade, ocupava um volume pequeno no centro atômico.

Muitas teorias relacionando radioatividade também tiveram contribuições de Geiger. Em 1910, com Rutheford, eles mostraram que duas partículas alfa são emitidas no decaimento do Urânio e em 1912, com J. M. Nuttal, eles provaram que este decaimento é causado por dois isótopos do Urânio. A regra de Geiger-Nuttal de 1911, estabeleceu que a relação linear entre o logaritmo da variação das partículas alfa e a constante de tempo de decaimento, que esta envolvido na razão de decaimento dos núcleos emitidos.

Geiger retornou para a Alemanha em 1914 e durante a Primeira Guerra ele serviu como um oficial de artilharia no exercito alemão. Com Walther Bothe, Geiger inventou a técnica de coincidence counting e usou-a em 1924 para clarificar os detalhes do experimento de Compton. No ano seguinte, na Universidade de Kiel, ele e Walther Muller melhoraram a sensibilidade, performance e durabilidade do contador de partículas que Geiger havia feito antes. Hoje com o aperfeiçoamento destes detectores sua utilização não esta restrita a detecção de partículas alfa, mas também de radiações beta e gama (como será descrito neste relatório).

Geiger também participou da tentativa fracassada dos alemães de construir uma bomba atômica durante a segunda guerra.

A importância didática é de grande relevância pelos termos já descritos no Projeto. A apresentação levantará algumas questões e entrevistas aos alunos: conhecem ou sabem o que é o Contador Geiger, para que serve e qual a sua relação com a física nuclear, como funciona, como poderíamos utilizá-lo em sala de aula (tendo em vista seu baixo custo), aplicações em medicina, etc.

Princípios de funcionamento, cálculos pertinentes, medidas de dose de radiação.

No relatório parcial descrevemos algumas das vantagens em utilizar um Geiger na detecção de radiação. Sua importância histórica é indiscutível; quando, por exemplo, ouvimos relatos do acidente de Goiânia sempre associamos ao aparelho que fazia "barulhos" estranhos quando era aproximado de locais de possíveis ocorrências. Antes do acidente de Goiânia as pessoas provavelmente não sabiam o que significava o símbolo de radiação (figura 1).



Fig. 1 Símbolo de alerta de radiação.

Ficou claro que, ter uma consciência sobre os principais efeitos da radiação, é de fundamental relevância pra o cidadão moderno para entender se realmente há um perigo real de contaminação radiativa ou apenas um preconceito infundado. A utilização do Geiger em medicina é bem vasta, desde a medição de uma possível contaminação até o rastreamento de um resíduo radiativo dentro de uma veia humana.

O aparelho utilizado foi o modelo TP 2131 - mica end window -, cuja voltagem de Plateau é em torno de $900\ V$; a voltagem de Plateau é aquela na qual a contagem dos pulsos tem uma razão constante dentro do tubo. Para alcançar a voltagem de Plateau começamos com uma baixa diferença de potencial e a aumentamos de $20\ em\ 20\ V$ fazendo a contagem de eventos por $10\ s$. Para um determinado valor da voltagem conhecido como "starting voltage", o gás começa a ionizar-se perante a aproximação de

uma fonte radioativa. Aumentando gradativamente a voltagem atingimos o Plateau e as contagens tornam-se constantes, descartando efeitos de uma possível inclinação no Plateau que não pode ser reduzida completamente (referência 2). Para o modelo utilizado a voltagem de funcionamento ideal é aproximadamente 900 V. Aumentado ainda mais a voltagem o Plateau é destruído abruptamente e podem ocorrer possíveis descargas continuas dentro do tubo – mesmo sem amostra radioativa. É imprescindível que, quando atingido este valor máximo de operação a voltagem seja reduzida, pois alem de ser maléfico á saúde pode danificar o aparelho. Fazendo medidas de calibração no aparelho construímos o gráfico abaixo que descreve bem a voltagem de utilização. A amostra radioativa utilizada, para o gráfico da esquerda foi o Cobalto-60, que decai em γ segundo a equação abaixo:

 $^{60}_{27}\text{Co} \rightarrow ^{60}_{28}\text{Ni} + ^{0}_{-1}\beta + ^{0}_{0}\gamma$

700	177	700	79
720	189	720	128
740	198	740	124
760	198	760	113
780	200	780	112
800	201	800	109
820	203	820	120
840	205	840	145
860	204	860	102
880	207	880	132
900	205	900	123
920	206	920	130
940	204	940	112
960	208	960	119
980	201	980	140
1000	210	1000	123

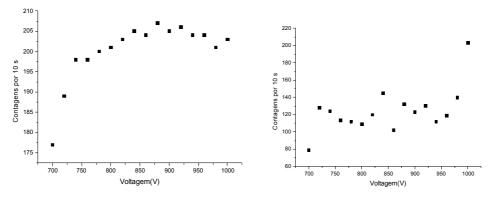


Figura 2. Gráficos de Voltagem por número de contagens.

Para o gráfico da direita a amostra utilizada foi o Césio-137 que decai em β e γ

A eficiência do contador para radiação γ depende da distancia a qual a radiação incide no tubo do contador. Se a interação acontece próximo às paredes logo os eventuais elétrons criados próximos á parede podem alcançar o interior do tubo e iniciar uma descarga através de avalanches. A eficiência depende, então, de dois fatores (de W. K. Sinclair, Cap. 5 em Radiation Dosimetry. Copyright 1956 Academic Press):

- 1) A probabilidade que o raio γ incidente interaja dentro das paredes e produza um elétron secundário e;
- 2) A probabilidade que um elétron secundário interaja com o gás antes de atingir o final do tubo.

Devido ao fato de que um único íon formado dentro do tubo pode ocasionar uma descarga, a eficiência para qualquer partícula carregada que entra no volume do tubo é, em torno, de 100%. Assim em situações práticas a probabilidade que uma radiação

incidente ionize o gás é dependente da penetração da mesma na janela de mica. Com partículas α o problema é seu baixo poder de penetração na janela de mica e um baixo livre caminho médio no ar (figura 3).

MICA Window	αEnergy	αRange in Air	
1.0 mg/cm ²	1.9 MeV	10 mm	
2.0 mg/cm ²	2.6 MeV	15 mm	
3.0 mg/cm ²	3.6 MeV	22 mm	
4.0 mg/cm ²	4.5 MeV	29 mm	

Figura 3. Alguns dados para partícula alfa. Canberra Dover.

Foi feito a tentativa de obter medidas com partículas alfa utilizando uma areia radioativa – a mesma utilizada pela aluna Nataly em sua câmara de nuvens -, mas obtive resultado negativo, muito provavelmente devido ao baixo range das alfas no ar como descrito na tabela acima. Um problema a pensar é como medir doses de alfa no ambiente, sabendo de seu baixo poder de penetração.

A construção do tudo Geiger, como dito anteriormente, foi frustrada, pois a janela de mica quebrou ao fazer o vácuo. Todos os cálculos para a construção de um futuro projeto de F-809 do tubo Geiger são descritos numa excelente bibliografía (referencia 1), como, por exemplo, raio do anodo, catodo, espessura da janela, pressao utilizada dentro do tubo, quench gás, campo elétrico para um bom funcionamento que no caso de um tubo cilíndrico é:

$$E = \frac{V}{r \ln \left(\frac{r_2}{r_1}\right)},$$

Onde r_2 e r_1 são os raios do catodo e do anodo respectivamente, podemos calcular também, alguns dados teóricos como velocidade dos íons positivos produzidos dentro do tubo e íons negativos e compará-los. No caso do modelo utilizado por nós as descrições são dadas na tabela abaixo:

Tube Type → Characteristic ↓	2131
Application	α, β, γ
Sensitivity*** 137Cs opm at 1 mR/h*	1650
Window Area Density (mg/cm²)	1.8 – 2.0
Window Effective Diameter (mm, in)	28.4, 1.12
Recommended Operating Voltage	900
Plateau Length Volts min.	850-1000
Plateau Slope (%/100 V max.)	10
Dead Time (µs max.)	200
Background (c/m)*** Shielding 2" Pb + 1/8" Al	40 max.
Test Circuit	Figure 1
Resistor, R _a (MΩ)	1.0
Resistor, R1 (MΩ)	1.0
Operating Temp (°C)	-20 to +55
Cathode Material	Cr/Fe
Cathode Wall	1.7, 0.065
Max. Length Including Pins (mm, in)	115, 4.54
Max. Overall Diameter (mm, in)	35, 1.38
Window Recess (mm, in)	1.3, 0.050

Dados para o modelo TP 2131. Canberra Dover.

O Geiger tem larga aplicação em medicina através de medidas de doses de radiação ou possíveis contaminações. A radiação é medida em várias unidades diferentes. O roentgen (R) mede a quantidade de radiação no ar. O gray (Gy) é a quantidade de energia que realmente é absorvida por qualquer tecido ou substância após uma exposição à radiação. Como alguns tipos de radiação podem afetar uns organismos biológicos mais que outros, o sievert (Sv) é utilizado para descrever a intensidade dos efeitos que a radiação produz sobre o corpo para quantidades equivalentes de energia absorvida. Os efeitos prejudiciais da radiação dependem da quantidade (dose), da duração da exposição e do grau de exposição. Uma única dose rápida de radiação pode ser fatal, mas a mesma dose total aplicada ao longo de semanas ou meses pode produzir efeitos mínimos. A dose total e o grau de exposição determinam os efeitos imediatos sobre o material genético das células. A dose é a quantidade de radiação que uma pessoa é exposta durante um determinado período de tempo. A dose da radiação ambiental que é inevitável é baixa, em torno de 1 a 2 miligrays (1 miligray é igual a 1/1.000 gray) por ano e não produz efeitos detectáveis sobre o organismo. Os efeitos da radiação são cumulativos, isto é, cada exposição é adicionada às anteriores para determinar a dose total e seus possíveis efeitos sobre o organismo. À medida que a dose ou a dose total aumenta, a probabilidade de efeitos detectáveis também aumenta. Os efeitos da radiação também dependem da porcentagem do corpo que é exposta. Por exemplo, uma radiação maior que 6 grays geralmente pode causar a morte da pessoa exposta quando a radiação é distribuída por toda a superfície corpórea. No entanto, quando ela é limitada a uma área pequena, como no tratamento contra o câncer (radioterapia), essa quantidade pode ser aplicada 3 a 4 vezes sem que sejam produzidas lesões graves no organismo. A distribuição da radiação no organismo também é importante. As partes do corpo em que as células se multiplicam rapidamente (p.ex., intestinos e medula óssea) são lesadas mais facilmente pela radiação que as partes em que as células se multiplicam mais lentamente (p.ex., músculos e tendões). Durante a radioterapia contra o câncer, é feito o máximo possível para se proteger as partes mais vulneráveis do corpo, de modo que doses altas possam ser utilizadas.

Suspeita-se de lesão causada pela radiação quando uma pessoa adoece após ser submetida à radioterapia ou após ser exposta à radiação em um acidente. Não existem exames específicos para diagnosticar a condição, embora possam ser utilizados muitos exames diferentes para detectar um edema ou uma disfunção orgânica. O prognóstico depende da dose, da quantidade de radiação e da distribuição no corpo. Os exames de sangue e da medula óssea podem fornecer informações adicionais sobre a gravidade da lesão. Quando uma pessoa apresenta a síndrome cerebral ou gastrointestinal, o diagnóstico é evidente e o prognóstico é muito ruim. A síndrome cerebral pode ser fatal em algumas horas ou poucos dias e a síndrome gastrointestinal geralmente é fatal em 3 a 10 dias, embora algumas pessoas sobrevivam algumas semanas. Freqüentemente, a síndrome hematopoiética causa a morte em 8 á 50 dias. A morte pode ser decorrente de uma infecção avassaladora em 2 á 4 semanas ou por uma hemorragia intensa em 3 á 6 semanas após a exposição à radiação. O diagnóstico de lesões crônicas causados pela radiação é difícil ou impossível quando a exposição é desconhecida ou passa despercebida. Quando o médico suspeita de uma lesão causada pela radiação, ele investiga possíveis exposições ocupacionais, podendo consultar os arquivos de instituições estatais ou federais que mantêm registros das exposições radioativas. O médico também pode examinar periodicamente os cromossomos, que contêm o material genético celular, em busca de determinadas anomalias que podem ocorrer após uma exposição significativa à radiação. No entanto, os resultados desses exames podem ser não conclusivos. Quando os olhos são expostos à radiação, eles devem ser examinados periodicamente em busca de cataratas. Todos estes procedimentos em grande maioria são utilizados medições feitas com Geiger.

A utilização do Geiger foi feita para duas amostras radioativas: Cobalto-60 e Césio-137. Foram medidas as curvas de Plateau. Na apresentação daríamos ênfase na explicação de como funciona um Geiger e como utilizá-lo para fazer medidas de dose de radiação. Mostraríamos aos alunos a sua importância em nosso dia a dia. Entender o por quê de que quando um repórter perguntou ao Prof. Jose Goldemberg se ele moraria em Angra ele respondeu: só se for com Geiger de bolso. Espero ter transmitido a "inspiração" para que os alunos que tenham a idéia de construir um Geiger caseiro, parta dos conhecimentos e dificuldades transmitidas neste relatório.

Referências.

- 1. W. J. Price, Nuclear Radiation Detection, 2^{nd} ed., Capítulo 5, McGraw-Hill, New York, 1964.
- 2. Wilkinson, D. H.:"Ionization Chambers and Counters", Capítulo 7, Cambridge University Press, London, 1950.
- 3. Melissinos, A. C.:" Experiments in Modern Physics", Capítulo 5, Academic Pess, 1966.
- 4. Souza Cruz,S.M e Zylbersztajn, A. O enfoque ciência, tecnologia e sociedade e aprendizagem centrada em eventos. Em: "Ensino de Física: conteúdo, metodologia e epistemologia numa concepção integradora", Ed. UFSC.
- 5. Urone, Paul Peter, "Physics with health science applications (John Wiley & Sons). Ver especialmente o Capitulo 18.
- 6. www.childrenofthemanhattanproject.org/FH/LA/Michael_Merriman.htm.

 Este site da uma descrição do acidente de P. Slotin que morreu em 1947 num acidente radioativo, que é descrito no filme "Day One".
 - 7. http://www.kronjaeger.com/hv-old/radio/geiger/caltech/exp2.htm

Mostra um experimento de medidas relacionadas ao Contador Geiger.

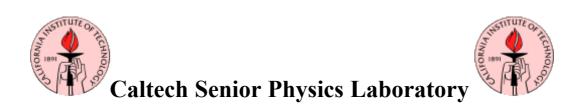
- 8. http://www.canberra.com/pdf/Products/Detectors_pdf/GMDetectors.pdf .
- Manual com descrições para utilização do Geiger utilizado no laboratório.
- 9. www.msd-brazil.com/msd43/m manual/mm sec24 279.htm.

Fala dos perigos de uma exposição do corpo humano á fontes de radiação e possíveis tratamentos.

Anexos.

1.

The Geiger Counter And Counting Statistics



Experiment 2

September 1997

This experiment has three parts: the first deals with some of the physics of a Geiger-Mueller (GM) Tube and will acquaint you with some characteristics of this gas-filled detector. The second part utilizes those parts of statistical theory that apply particularly to all counting experiments. The third part examines a fundamental property of all detectors, namely the detection efficiency. This is not the simple experiment it appears to be at first glance; it contains subtleties that are not always immediately apparent. The measurement and analysis techniques encountered here are universally applicable to all other types of radiation detectors.

Introduction

A Geiger-Mueller (GM) tube is a gas-filled radiation detector. It commonly takes the form of a cylindrical outer shell (cathode) and the sealed gas-filled space with a thin central wire (the anode) held at ~ 1 KV positive voltage with respect to the cathode. The fill gas is generally argon at a pressure of less than 0.1 atm plus a small quantity of a quenching vapor (whose function is described below).

If a gamma - ray interacts with the GM tube (primarily with the wall by either the Photoelectric Effect or Compton scattering) it will produce an energetic electron that may pass through the interior of the tube.

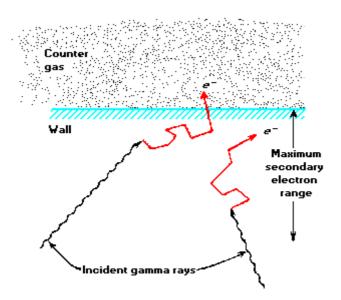


Figure 1. The principal mechanism by which gas-filled counters are sensitive to gammarays involves ejection of electrons from the counter wall. Only those interactions that occur within an electron range of the wall's inner surface can result in an output pulse.

Ionization along the path of the primary electron results in low energy electrons that will be accelerated towards the center wire by the strong electric field. Collisions with the fill gas produce excited states (~11.6eV) that decay with the emission of a UV

photon and electron-ion pairs (\sim 26.4 eV for argon). The new electrons, plus the original, are accelerated to produce a cascade of ionization called "gas multiplication" or a Townsend avalanche. The multiplication factor for one avalanche is typically 10^6 to 10^8 . Photons emitted can either directly ionize gas molecules or strike the cathode wall, liberating additional electrons that quickly produce additional avalanches at sites removed from the original. Thus a dense sheath of ionization propagates along the central wire in both directions, away from the region of initial excitation, producing what is termed a Geiger-Mueller discharge.

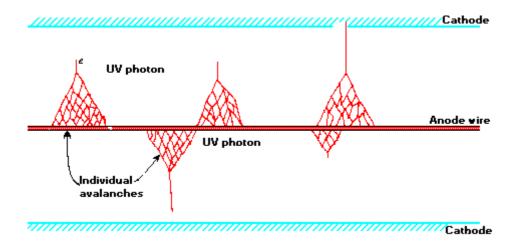


Figure 2. The mechanism by which additional avalanches are triggered in a Geiger-Mueller discharge.

The intense electric field near the anode collects the electrons to the anode and repels the positive ions. Electron mobility is $\sim 10^4$ m/s or 10^4 times higher than that for positive ions. Electrons are collected within a few μs , while the sheath of massive positive ions (space charge) surrounding the center wire are accelerated much more slowly (ms) outward towards the cathode.

The temporary presence of a positive space charge surrounding the central anode terminates production of additional avalanches by reducing the field gradient near the center wire below the avalanche threshold. If ions reach the cathode with sufficient energy they can liberate new electrons, starting the process all over again, producing an endless continuous discharge that would render the detector useless. An early method for preventing this used external circuitry to "quench" the tube, but the introduction of organic or halogen vapors is now preferred. The complex molecule of the quenching vapor is selected to have a lower ionization potential (< 10 eV) than that of the fill gas (26.4 eV). Upon collision with a vapor molecule the fill gas ion gives up ~ 10 eV to the quench vapor molecule which then quickly dissociates rather than losing its energy by radiative emission. The remainder of the partially neutralized vapor-atom energy (~ 4 eV) produces a UV photon that is strongly absorbed by the molecules and prevented from reaching the cathode. Any quench vapor that might be accelerated and impact the cathode dissociates on contact. Organic quench vapors, such as alcohols, are permanently altered by this process, limiting tube life to $\sim 10^9$ counts. Halogen quench vapors dissociate in a reversible manner later recombining for an essentially infinite life.

The sheath of positive ions (space charge) close to the anode reduces the intense electric field sufficiently that approaching electrons do not gain sufficient energy to start new avalanches. The detector is then inoperative (dead) for the time required for the ion sheath to migrate outward far enough for the field gradient to recover above the avalanche threshold. The time required for recovery to a value high enough for a new pulse to be generated and counted is called the "dead time" and is of the order of 100 µs.

Measurement Of Dead Time - Two Source Method:

Measuring the dead time of a system requires two sources, S_1 and S_2 . A counting rate is measured first with S_1 , then S_1 plus S_2 , and finally with only S_2 . If the dead time were zero the counting rate with both sources together would be simply the sum of the individual rates. The fact that it never is permits one to compute the actual dead time. At modest count rates this is straightforward. If the counting rates are very high it is necessary to decide which of two models applies, i.e., is the detector paralysable or non-paralysable.

Reference: (2) p. 96-102.

{Exercise: Work out the necessary relationship. (Assume no background.)}

Measurement Of Dead Time - Oscilloscope:

The dead time of the GM tube may be directly determined with an oscilloscope by observing the recovery envelope of the pulses. Note carefully where the CRO is connected. The test point gives information about the GM tube only. Recovery must be sufficient to produce a pulse large enough to exceed the "threshold" of the following counting circuits. The "dead time" of these circuits should also be considered.

Reference: (2) p. 225-226.

Correction Of Count Rate To Include Dead Time:

If n' counts are recorded in a time interval t with a detector of dead time d, it is necessary to compute the true number n that would have been observed with a counter of zero dead time. Since n'_d is the total dead time, and n/t is the true counting rate, (n/t) n'_d is the total number of counts that would have occurred during the total dead time interval. Therefore $(n/t)n'_d = n - n'$. In terms of the counting rate, R = n/t and R' = n'/t,

$$R = \frac{R'}{1 - R'd} \quad . \tag{1}$$

The GM tube output is a charge pulse whose amplitude is independent of the energy of the detected radiation. The only amplitude information that it can provide is that the energy of the detected radiation was sufficient to produce electrons energetic enough to penetrate to the sensitive region of the tube. The quantity of charge produced is directly proportional to the "over voltage", i.e., the difference between the GM threshold voltage at which a GM discharge will first occur, and the higher normal operating voltage. The output signal will be directly proportional to the charge (10⁸ - 10¹⁰ ion-pairs), and inversely proportional to the circuit capacitance (GM tube capacitance + the connecting cable capacitance + the input capacitance of the electronic system). The normal signal is of the order of volts.

Counting Statistics

It is assumed that you are familiar with statistics and the definitions for sample and population means, variances, and probability distribution.

Statistics Definitions:

(From P. R. Bevington, *Data Reduction and Error Analysis for the Physical Sciences*, pp. 10-24.)

	Sam ple	Population
mean	\overline{x}	μ
variance	s^2	σ^2
standard deviation	s	σ

The definitions of these symbols are:

$$\overline{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} x_i \qquad \qquad \mu = \lim_{N \to \infty} \overline{x}$$
 Sample Mean:

$$s^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N} (x_i - \overline{x})^2$$
Sample Variance:
$$\sigma^2 = \lim_{N \to \infty} s^2$$

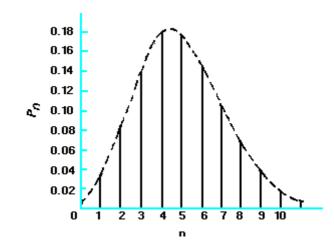
(Note the N - 1 in the definition of s^2 makes s^2 a correct estimator of sigma².)

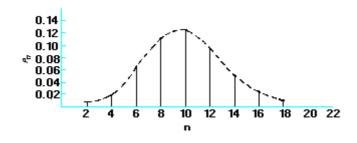
Poisson Distribution:

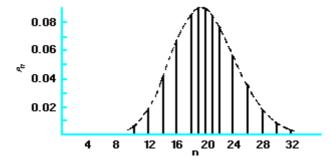
Under the conditions that are thought to apply to all radioactive decays (i.e., all the nuclei are identical, independent, and each has a definite and constant probability of decay in a unit time interval), one can derive a distribution function P(x) that is the probability of observing x counts in one observation period.

The distribution of the values x about the true average μ is called the Poisson distribution and has the form:

$$s^{2} = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N} \left(x_{i} - \overline{x} \right)^{2} \qquad \qquad \sigma^{2} = \lim_{N \to \infty} s^{2}$$
(2)







{Exercise: Show that for the Poisson distribution, s^2 equals the mean value μ .}

References: (1) p. 750-753 (3) p. 34-35 (4) p. 36-42

The Meaning Of Sigma:

If the mean of a Poisson distribution becomes $\sim\!20$, the distribution becomes symmetrical, assuming the characteristics of a Normal, or bell-shaped Gaussian distribution. This displays the characteristic that 68% of the total area of the distribution lies within \pm sigma of the mean. For a Poisson distribution sigma=sqrt(μ), so that a counting measurement is 68% likely to be within \pm sigma of the true population mean μ

Since x is probably close to μ , we may take sigma = sqrt(x), and say that a single measurement is 68% likely to be within \pm sqrt(x) of the true mean. Similarly the values for \pm 2 sigma and \pm 3 sigma are 95% and 99.7%, respectively. When plotting experimental results, it is customary to include error bars of length sigma_l on each point x_i .

Propagation Of Errors:

Often a desired value is a function of several measured values each of which has finite statistical uncertainties. If a value Z = f(X,Y) is a function of independent random variables X and Y, there will be a certain spread in Z associated with spreads in the values of X and Y. By using probability theory it is not difficult to derive the following general formula:

$$\sigma_x^2 = \left(\frac{\partial f}{\partial x}\sigma_x\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\sigma_y\right)^2 \tag{3}$$

which relates the expected uncertainty in a calculation of Z to the corresponding uncertainties, sigma_x and sigma_y, of X and Y. Both the random variables X and Y must have a normal distribution, with the uncertainties in both X and Y small enough so that the differentials accurately describe the variations in Z. Note also that Poisson random variables are nearly normal when M > 20, so that this formula usually will hold quite well.

{Exercise: Express the uncertainty in X+Y, X-Y, XY, X/Y, and In(X) in terms of s_x and of s_y . Write the uncertainties in XY and X/Y to show the fractional uncertainty in terms of the fractional uncertainties in X and Y. Do you see the mnemonic value of this?}

References: (1) p. 768-769, (4) Chap. 4, (3) p. 51-55.

Experimental Tasks

The apparatus consists of a halogen quenched Geiger-Mueller tube (TGM Model N106/3P) that may be used in or out of a lead shielded "house", a Counter/Timer/High-voltage Power Supply (Nucleus Model 550), and various radioactive sources. Be certain you understand the correct procedures for handling radioactive sources. See the Primer On The Effects Of Exposure To Ionizing Radiationthat also contains an inventory of the radioactive sources available in the laboratory.

1: Finding the best operating point for the GM tube.

Apply 500V to the tube with a moderate strength 137 Cs source (50 μ Ci) nearby. Increase the HV until counts begin to appear, then record the count rate as a function of voltage for a few points up to ll00 V. Do you see the end of the flat region of counts vs. voltage?

This flat region is called the plateau. DO NOT EXCEED Il00 V AT ANY TIME, as this will cause a continuous arc that destroys the tube by permanently dissociating the quenching gas. Estimate (just roughly) the %/V slope of the count rate curve near the middle of the plateau. Formerly this slope was important because HV power supplies were much less stable than they are today. Set an operating point that is near the middle of the plateau for your measurements.

2. Measuring the dead time. (Two source and CRO Method)

A high count rate is required to produce a significant dead time and to achieve sufficiently small statistical uncertainties in a reasonable time, as well as produce a usably visible CRO trace. Use one of the 250 μ Ci 137 Cs sources. Observe the dead time directly on the CRO by attaching a 10x probe to one of the 550 connectors labeled "COUNTS". Consult the 550 circuit diagram for details.

A vertical sensitivity of 2 V/div and a sweep speed of about 20 μ s/div are suggested. When measuring a dead time from the recovery envelope be aware that the counting circuits contain a threshold discriminator (See 550 Manual).

When you attach anything to the "COUNTS" connector, what is done to the capacitance that must be charged by the GM tube? Attach a cable (48-60 inch RG-58/U, 30 pF/ft) to the second "COUNTS" connector. Compare the signal amplitude with and without the cable attached. Why use a l0x probe to make the connection rather than a coax cable? How much charge is contained in a full amplitude pulse? Can you estimate the total capacitance that the GM tube must charge up to produce its output pulses?

Use two similar strong sources (each 250 μ Ci). It is best to secure the GM tube to a thick bed of plastic foam to minimize any scattering from nearby material. Place Source 1 at the midpoint of the bare detector very nearly touching it. Take a counting run and measure the dead time on the CRO. Place Source 2 similarly on the other side of the tube, count and measure this dead time on the CRO. Remove Source 1, count and measure this dead time with the CRO. Count for times long enough for statistical uncertainties in N_1 , N_1+N_2 , and N_2 that are small compared to the differences (N_1+N_2) - N_1 , etc.

Calculate the dead time. Compare your CRO data to the corresponding counting data. Are they consistent? Explain any differences. What is the approximate uncertainty in the calculated dead time? Is this detector paralysable, or non-paralysable? Explain. (Reference (2), p.96-102.)

3. Examining a Poisson Distribution.

Use only "natural room background" radiation as a source with the GM tube in its lead "house". Take 0.5 minute runs and plot them on a histogram until the shape of the distribution emerges, or you have 20 runs. Counting at low rates for short time intervals (x < 20) produces the characteristically skewed Poisson distribution. Now calculate x-bar and s. How well does s match with sqrt(x)? How many of the points fall within \pm s of x-bar? What is the source of the background?

4. GM Tube Detection Efficiency.

Estimate the efficiency of the GM tube using the attached plot of the total mass attenuation coefficient for aluminum and the energy of a ¹³⁷Cs gamma ray. Assume that the walls of the tube are thin enough so that any interaction that will scatter an electron in the proper direction will produce a count. Should you use the absorption or the attenuation coefficient? (see Evans, p. 686-689) Is the air between source and detector important? Is the mass attenuation coefficient for air comparable to that for aluminum? Consider the shape of the wall(s) of the tube. (See SUGGESTION below.)

Relevant parameters are: Wall = 30 mg/cm² Aluminum, Fill Gas = Argon 95%/ Halogen Quenching Vapor 5%, Total fill pressure ~5 cm Hg, Density of air ~1.3 mg/cm³

Now **measure** the efficiency. (SUGGESTION: Use the bare tube on a foam platform with as large a separation between the source and detector as permits a reasonable count rate.) Consider the effects of "background". To calculate the total emission from the source you will need an understanding of the ¹³⁷Cs decay scheme (See "'Internal Conversion", in any of References 1-3), the strength of the source, its half - life, and the calibration date. (Data on last page of the Primer On The Effects Of Exposure To Ionizing Radiation) How well do the calculated and measured values agree? The decay schemes of several frequently used sources are provided in Appendix . See also the Guide to the *TABLE OF ISOTOPES*. Would a correction for the shape of the wall be significant?

Questions

{Be sure to do exercises 1, 2, and 3 in the text.}

- 1. Is it possible for a gamma ray to interact with a free electron by means of the Photoelectric Effect?
- 2. How does the avalanche phenomenon differ from gas multiplication?
- 3. Which is more important in producing a signal the collection of electrons at the anode or the less rapid increase in the diameter of the positive ion sheath?
- 4. Which is more important in the operation of a Geiger tube a large total potential drop or a large electric field gradient? What does the radial variation in electric field look like?

- 5. Given a counter with a plateau threshold of 975 V, what changes in the design of the counter should be made to lower that threshold?
- 6. How does the efficiency of a Geiger counter vary with photon energy? How does the choice of wall material and thickness affect the efficiency? How could you increase the efficiency of the GM tube that you used, without the use of any tools?

References

- 1. * R. D, Evans, *The Atomic Nucleus*, McGraw Hill Book Company.
- 2. * G. Knoll, *Radiation Detection And Measurement*, McGraw Hill Book Company, 1989.
- 3. * N. Tsoulfanidis, *Measurement And Detection Of Radiation*, McGraw Hill Book Company, 1995.
- 4. * C. M. Lederer and V. S. Shirley, *Table Of Isotopes*, 6th Edition, 1967; 7th Edition, 1978; or R. B. Firestone and V. S. Shirley 8th Edition, 1996, Wiley Interscience.
- 5. * P. Bevington, D. K. Robinson, <u>Data Reduction And Error Analysis For The Physical Sciences</u>, McGraw-Hill Book Company, 1992.
- 6. S. A. Korff, *Electron And Nuclear Counters*, Van Nostrand Co.
- 7. W. Price, Nuclear Radiation Detection, McGraw Hill Book Company, 1964.
- 8. E. Bleuler and G. Goldsmith, *Experimental Nucleonics*, Holt, Rinehart and Winston.

All of these are available in the lab. References with * are considered primary references.

Appendix A

			Main Decay Scheme
Element	Energy of Radiation	Half-	
Element	(MeV)	Life	

Cesium 137	beta - 0.51397 gamma 0.66166	30.07 yr	30.07 y 137Cs 65Cs 0 _p -1175.80 244% 241, 712 & arr.edu 2.552 m 258
Cobalt 60	beta - 0.31786 gamma ₁ 1.173237 gamma ₂ 1.332501	5.2714 yr	\$2714 y 27 C0 Q _g - 2823.9 2922 N
Sodium 22	beta + 0.5454 gamma ₁ 1.274532 gamma ₂ , gamma ₃ 0.511 from positron annihilation	2.6019 yr	2.8019 y u 2.70 Na = 1.1 Na = 0.55 + 2.24 2.1 sasos

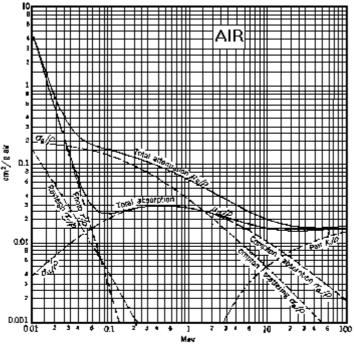


Figure A-1. Mass attenuation coefficients for photons in air, computed from the tables of atomic cross-sections prepared by G. R. White. In computing these curves, the composition of "air" was taken as 78.04 volume percent nitrogen, 21.02 volume percent oxygen, and 0.94 volume percent argon. At 0°C and 760 mm Hg pressure, the density of air is 0.001293 gm/cm³

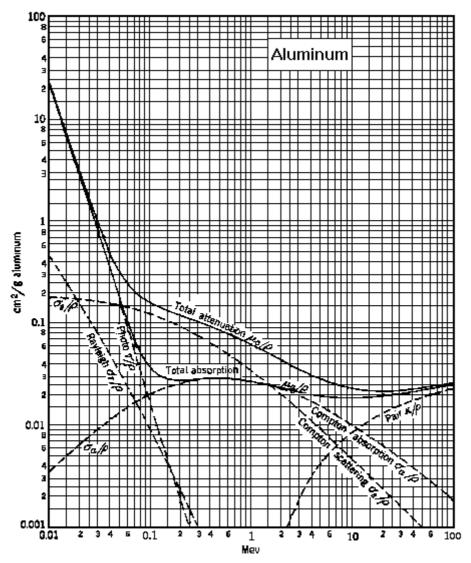


Figure A-3. Mass attenuation coefficients for photons in aluminum. The individual curves have the same significance as in Fig. A-1 and were computed from tables of atomic cross-sections prepared by G.R. White. The corresponding linear coefficients for A1 may be obtained by multiplying by 2.70 g/cm³.

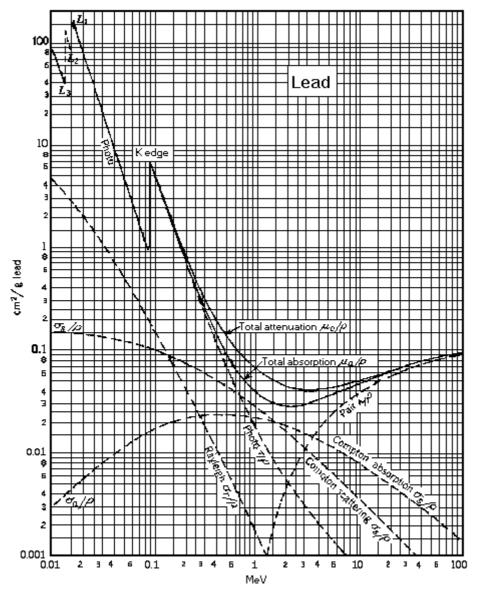


Figure A-4. Mass attenuation coefficients for photons in lead. The individual curves have the same significance as in Fig. A-1 and were computed from the tables of atomic cross sections by G. R, White, The corresponding linear coefficients for lead may be obtained by using 11.35 g/cm³Pb density.



2.

As lesões causadas pela radiação são lesões tissulares causadas pela exposição à radiação.

Em geral, a radiação refere-se a ondas ou partículas de alta energia emitidas por fontes naturais ou artificiais (produzidos pelo homem). A lesão tissular pode ser causada pela breve exposição a níveis elevados de radiação ou pela exposição prolongada a níveis

baixos. Alguns efeitos adversos da radiação duram apenas pouco tempo; outros causam doenças crônicas. Os efeitos iniciais de doses altas de radiação tornam-se evidentes minutos ou dias após a exposição. Os efeitos tardios podem tornar-se evidentes apenas semanas, meses ou mesmo anos mais tarde. As mutações do material genético celular dos órgãos sexuais podem tornar-se evidentes somente quando uma pessoa exposta à radiação tiver filhos com defeitos genéticos.

Causas

No passado, as fontes nocivas de radiação eram os raios X e os materiais radioativos naturais (p.ex., urânio e radônio). Atualmente, os raios X utilizados em exames diagnósticos produzem muito menos efeitos radioativos que os utilizados no passado. As fontes mais comuns de exposição a altos níveis de radiação são os materiais radioativos produzidos pelo homem utilizados em muitos tratamentos médicos, em laboratórios científicos, na indústria e em reatores de energia nuclear.

Ocorreram grandes vazamentos acidentais de reatores nucleares, como na usina de Three Mile Island, na Pensilvânia em 1979 e na usina de Chernobyl, na Ucrânia em 1986. O acidente de Three Mile Island não provocou uma grande exposição exposição radioativa. De fato, as pessoas que viviam em um raio de 1,5 km da usina receberam uma quantidade de radiação um pouco menor que a quantidade de raios X que uma pessoa recebe, em média, em 1 ano. No entanto, as pessoas que viviam perto de Chernobyl foram expostas a uma quantidade consideravelmente maior de radiação. Mais de 30 pessoas morreram e muitas outras sofreram lesões. A radiação desse acidente chegou até a Europa, a Ásia e os Estados Unidos. No total, a exposição à radiação gerada por reatores nos primeiros 40 anos de uso da energia nuclear, excluindo Chernobyl, provocou 35 exposições graves com 10 mortes, mas nenhum caso foi associado às usinas de energia. Nos Estados Unidos, os reatores de energia nuclear devem cumprir padrões federais rigorosos que limitam a quantidade de material radioativo liberado a níveis extremamente baixos. A radiação é medida em várias unidades diferentes. O roentgen (R) mede a quantidade de radiação no ar. O gray (Gy) é a quantidade de energia que realmente é absorvida por qualquer tecido ou substância após uma exposição à radiação. Como alguns tipos de radiação podem afetar uns organismos biológicos mais que outros, o sievert (Sv) é utilizado para descrever a intensidade dos efeitos que a radiação produz sobre o corpo para quantidades equivalentes de energia absorvida. Os efeitos prejudiciais da radiação dependem da quantidade (dose), da duração da exposição e do grau de exposição. Uma única dose rápida de radiação pode ser fatal, mas a mesma dose total aplicada ao longo de semanas ou meses pode produzir efeitos mínimos. A dose total e o grau de exposição determinam os efeitos imediatos sobre o material genético das células.

A dose é a quantidade de radiação que uma pessoa é exposta durante um determinado período de tempo. A dose da radiação ambiental que é inevitável é baixa, em torno de 1 a 2 miligrays (1 miligray é igual a 1/1.000 gray) por ano e não produz efeitos detectáveis sobre o organismo. Os efeitos da radiação são cumulativos, isto é, cada exposição é adicionada às anteriores para determinar a dose total e seus possíveis efeitos sobre o organismo. À medida que a dose ou a dose total aumenta, a probabilidade de efeitos detectáveis também aumenta. Os efeitos da radiação também dependem da porcentagem do corpo que é exposta. Por exemplo, uma radiação maior que 6 grays geralmente pode causar a morte da pessoa exposta quando a radiação é distribuída por toda a superfície corpórea. No entanto, quando ela é limitada a uma área pequena, como no tratamento contra o câncer (radioterapia), essa quantidade pode ser aplicada 3 a 4 vezes sem que sejam produzidos lesões graves no organismo. A distribuição da radiação no organismo também é importante. As partes do corpo em que as células se multiplicam rapidamente (p.ex., intestinos e medula óssea) são lesadas mais facilmente pela radiação que as

partes em que as células se multiplicam mais lentamente (p.ex., músculos e tendões). Durante a radioterapia contra o câncer, é feito o máximo possível para se proteger as partes mais vulneráveis do corpo, de modo que doses altas possam ser utilizadas.

Sintomas

A exposição à radiação produz dois tipos de lesão: a lesão aguda (imediata) e a lesão crônica (tardia). As síndromes de radiação aguda podem afetar diferentes órgãos. A síndrome cerebral ocorre quando a dose total de radiação é extremamente alta (mais de 30 grays). É sempre fatal. Os primeiros sintomas, náusea e vômito, são seguidos por agitação, sonolência e, algumas vezes, coma. É muito provável que esses sintomas sejam causados pela inflamação cerebral. Em poucas horas, ocorrem tremores, convulsões, incapacidade de andar e a morte. A síndrome gastrointestinal ocorre devido a doses totais menores, mas ainda elevadas, de radiação (4 grays ou mais). Os sintomas são a náusea, o vômito e a diarréia graves, acarretando uma desidratação intensa. Inicialmente, a síndrome é causada pela morte de células que revestem o trato gastrointestinal. Os sintomas são perpetuados pela destruição progressiva das células que revestem o trato e por infecções bacterianas. Finalmente, as células que absorvem os nutrientes são completamente destruídas e ocorre um extravasamento frequentemente intenso de sangue para o interior dos intestinos. Novas células podem crescer, em geral, quatro a seis dias depois da exposição à radiação. Mas mesmo se ocorrer esse desenvolvimento celular, é provável que as pessoas com essa síndrome venham a morrer de falência da medula óssea, que habitualmente ocorre duas ou três semanas mais tarde. A síndrome hematopoiética afeta a medula óssea, o baço e os linfonodos (os principais locais de hematopoiese [produção de células do sangue]). A síndrome ocorre após a exposição de 2 a 10 grays de radiação, começando com anorexia (perda de apetite), apatia, náusea e vômito. Esses sintomas são mais graves 6 a 12 horas após a exposição, podendo desaparecer por completo, aproximadamente de 24 a 36 horas após a exposição. Durante esse período assintomático, as células produtoras de sangue (células hematopoiéticas) dos linfonodos, do baço e da medula óssea começam a morrer, acarretando uma diminuição acentuada de eritrócitos e leucócitos. A falta de leucócitos, que combatem as infecções, frequentemente resulta em infecções graves. Quando a dose total da radiação é superior a 6 grays, as disfunções hematopoiéticas e gastrointestinais geralmente são fatais. A doença aguda da radiação ocorre em uma pequena porcentagem de pacientes após um tratamento radioterápico, especialmente do abdômen. Os sintomas incluem a náusea, vômito, diarréia, inapetência, cefaléia, malestar generalizado e aumento da frequência cardíaca. Os sintomas geralmente desaparecem em algumas horas ou dias. A sua causa permanece desconhecida. A exposição prolongada ou repetida a baixas doses de radiação de implantes radioativos ou fontes externas pode causar amenorréia (interrupção da menstruação), redução da fertilidade em homens e mulheres, diminuição da libido (impulso sexual) nas mulheres, catarata e anemia (redução da quantidade de eritrócitos), leucopenia (redução da quantidade de leucócitos) e trombocitopenia (redução da quantidade de plaquetas). Doses muito elevadas em áreas limitadas do corpo causam perda de cabelo, descamação da pele e formação de úlceras, calos, aranhas vasculares (pequenas áreas avermelhadas constituídas por vasos sangüíneos dilatados localizados imediatamente abaixo da superfície cutânea). Com o passar do tempo, essa exposição pode causar câncer de pele

Ocasionalmente, ocorrem lesões graves de órgãos expostos à radiação muito tempo após o término da radioterapia contra o câncer. A função renal pode diminuir após um período de latência de 6 meses a 1 ano depois da pessoa receber doses extremamente elevadas de radiação. A anemia e a hipertensão arterial também podem

(carcinoma epidermóide). Pode ocorrer a formação de tumores ósseos anos após a

ingestão de determinados compostos radioativos (p.ex., sais de rádio).

ocorrer. Grandes doses acumuladas nos músculos podem causar um quadro doloroso caracterizado pela atrofia muscular e depósitos de cálcio no músculo irradiado. Muito raramente, essas alterações acarretam um tumor muscular maligno. A radiação de tumores pulmonares pode causar pneumonite por radiação (uma inflamação pulmonar) e doses elevadas podem provocar uma fibrose (cicatrizes) grave do tecido pulmonar, a qual pode ser fatal. O coração e o pericárdio (saco que envolve o coração) podem inflamar após uma aplicação intensa de radiação sobre o esterno e o tórax. Grandes doses acumuladas de radiação na medula espinhal podem causar uma lesão catastrófica, acarretando a paralisia. A radiação intensa sobre o abdômen (para tratar cânceres dos linfonodos, dos testículos ou dos ovários) pode acarretar a formação de úlceras crônicas, cicatrizes e perfuração intestinal. A radiação altera o material genético das células que se multiplicam. Nas células que não pertencem ao sistema reprodutivo, essas alterações podem causar anomalias do crescimento celular (p.ex., câncer ou catarata).

Quando os ovários e os testículos são expostos à radiação, a chance dos filhos apresentarem anomalias genéticas (mutações) aumenta em animais de laboratório, mas este efeito não foi comprovado no ser humano. Alguns pesquisadores acreditam que a radiação não é nociva abaixo de uma certa dose (limiar), enquanto outros acham que qualquer radiação sobre os ovários e os testículos pode ser nociva. Como não existem dados definitivos a respeito, a maioria dos especialistas recomenda que qualquer exposição à radiação médica e ocupacional seja mantida abaixo de um determinado nível. Em qualquer caso, estima-se que a chance de apresentar uma doença relacionada à radiação ou à mutação genética seja de 1 em 100 para cada gray de exposição e cada pessoa recebe em média apenas aproximadamente 0,002 gray de radiação em um ano.

Diagnóstico e Prognóstico

Suspeita-se de lesão causada pela radiação quando uma pessoa adoece após ser submetida à radioterapia ou após ser exposta à radiação em um acidente. Não existem exames específicos para diagnosticar a condição, embora possam ser utilizados muitos exames diferentes para detectar um edema ou uma disfunção orgânica. O prognóstico depende da dose, da quantidade de radiação e da distribuição no corpo. Os exames de sangue e da medula óssea podem fornecer informações adicionais sobre a gravidade da lesão. Quando uma pessoa apresenta a síndrome cerebral ou gastrointestinal, o diagnóstico é evidente e o prognóstico é muito ruim. A síndrome cerebral pode ser fatal em algumas horas ou poucos dias e a síndrome gastrointestinal geralmente é fatal em 3 a 10 dias, embora algumas pessoas sobrevivam algumas semanas. Freqüentemente, a síndrome hematopoiética causa a morte em 8 a 50 dias. A morte pode ser decorrente de uma infecção avassaladora em 2 a 4 semanas ou por uma hemorragia intensa em 3 a 6 semanas após a exposição à radiação. O diagnóstico de lesões crônicas causados pela radiação é difícil ou impossível quando a exposição é desconhecida ou passa desapercebida. Quando o médico suspeita de uma lesão causada pela radiação, ele investiga possíveis exposições ocupacionais, podendo consultar os arquivos de instituições estatais ou federais que mantêm registros das exposições radioativas. O médico também pode examinar periodicamente os cromossomos, que contêm o material genético celular, em busca de determinadas anomalias que podem ocorrer após uma exposição significativa à radiação. No entanto, os resultados desses exames podem ser inconclusivos. Ouando os olhos são expostos à radiação, eles devem ser examinados periodicamente em busca de cataratas.

Exposição Anual à Radiação nos Estados Unidos			
Fonte	Dose (milisieverts)	Média	

Fontes naturais	0,82
Procedimentos médicos (p.ex., radiografias)	0,77
Radioatividade devida a testes de armamentos nucleares	0,04-0,05
Indústria nuclear	menos de 0,01
Pesquisa	0,01 ou menos
Produtos de consumo	0,03-0,04
Viagens aéreas	0,005
Transporte de materiais de radioterapia	0,0001
Outros	0,15
TOTAL	1,84

Tratamento

A pele contaminada por materiais radioativos deve ser lavada imediatamente com grandes quantidades de água e com uma solução destinada a essa finalidade, quando disponível. Os pequenos ferimentos puntiformes devem ser limpos vigorosamente para que sejam removidas todas as partículas radioativas, apesar do processo de escovação poder causar dor. Quando uma pessoa ingeriu material radioativo recentemente, deve ser feita a indução ao vômito. As pessoas que foram expostas a radiação excessiva podem ser controladas com exames do ar expirado e de urina em busca de sinais de radioatividade. Como a síndrome cerebral aguda é sempre fatal, o tratamento visa evitar o sofrimento, aliviando a dor, a ansiedade e a dificuldade respiratória. Também são administrados sedativos para controlar as convulsões. Os sintomas da doença da radiação, causados pela radioterapia sobre o abdômen, podem ser reduzidos através da administração de medicamentos antieméticos (que combatem a náusea e o vômito) antes da radioterapia. A síndrome gastrointestinal pode ser aliviada com antieméticos, sedativos e uma dieta leve. Os líquidos são repostos de acordo com a necessidade. São administradas várias transfusões de sangue e antibióticos para ajudar a manter a pessoa viva durante 4 a 6 dias posteriores à exposição à radiação, até que novas células comecem a crescer no trato gastrointestinal. Para a síndrome hematopoiética, as células sangüíneas são repostas por meio de transfusões. As medidas para prevenir a infecção incluem a antibioticoterapia e o isolamento para manter a pessoa afastada de pessoas que possam ter microorganismos patogênicos (que causam doenças). Algumas vezes, é realizado um transplante de medula óssea, mas a taxa de sucesso é baixa, exceto quando existe um gêmeo fraterno como doador. No tratamento dos efeitos tardios da exposição crônica, o primeiro passo consiste na remoção da fonte de radiação. Certas substâncias radioativas (p.ex., rádio, tório e o estrôncio) podem ser removidas do organismo com medicamentos que se aderem a essas substâncias, sendo, em seguida, excretados na urina. No entanto, essas drogas são mais úteis quando administradas logo após a exposição. As úlceras e os cânceres são removidos ou reparados cirurgicamente. O tratamento da leucemia provocada pela radiação é o mesmo que para qualquer caso de leucemia, a quimioterapia. As células sangüíneas podem ser repostas por meio de transfusões, mas esta medida é apenas temporária, porque é muito pouco provável que a medula óssea lesada pela radiação se regenere. Não existe tratamento que reverta a esterilidade, mas o funcionamento anormal dos ovários e dos testículos, que acarreta concentrações baixas dos hormônios sexuais, pode ser tratado com a reposição hormonal