QUÍMICA | ENSINO MÉDIO – 2º ANO | VANDERLEI I PAULA

RADIOATIVIDADE

O átomo que não fica quieto.

DE 1896 A HOJE • 130 ANOS DE NÚCLEOS INSTÁVEIS

α alfa

para numa folha de papel

β beta

para numa placa de alumínio

γ gama

atravessa até o chumbo

ROTEIRO DA AULA

O que vamos ver hoje

1. **A descoberta**
   Röntgen, Becquerel e os Curie
2. **As três radiações**
   alfa, beta e gama — o que cada uma é
3. **Penetração e blindagem**
   do papel ao chumbo
4. **As leis de Soddy**
   escrevendo equações nucleares
5. **Séries radioativas**
   decaimentos em conjunto
6. **Meia-vida**
   a cinética do decaimento
7. **Acidentes**
   Chernobyl, Goiânia, Fukushima
8. **Hoje**
   aplicações, medos e desafios

Existe alguma matéria que muda de identidade **sozinha** — sem fogo, sem reagente, sem que ninguém faça nada?

Existe. E a Química que você aprendeu até aqui não consegue explicar.

PARTE 1

A descoberta

Como uma gaveta fechada, um minério teimoso e uma cientista polonesa mudaram a ideia do que a matéria é.



Röntgen **Becquerel** **Thomson** **Curie** **Rutherford**

O CENÁRIO

1895: o mundo dos tubos de vidro

A O tubo de Crookes

a bancada padrão da época

- Vidro fechado, com ar rarefeito dentro
- Dois eletrodos em alta voltagem
- A parede oposta brilhava de verde

B Os raios catódicos

o mistério de 1895

- Algo saía do cátodo em linha reta
- Onda ou partícula? Ninguém sabia
- Era a pergunta da moda na Europa

✦ Em três anos esses tubos entregaram **o elétron**, **os raios X** e a **radioatividade** — e derrubaram o átomo indivisível de Dalton.

A radioatividade foi descoberta por quem tentava explicar os raios X — e errou o alvo.

1897 · CAMBRIDGE

Thomson e a primeira peça do átomo

1 O experimento

- Os raios catódicos desviam com campo elétrico e magnético
- Logo, são partículas com carga negativa
- Thomson mediu a relação carga/massa delas

2 A conclusão

- A massa dava cerca de 1/1800 da massa do hidrogênio
- Existe algo menor que o átomo: o elétron
- Modelo do “pudim de passas” (1904)

! **Por que isso importa nesta aula?** se o átomo fosse indivisível, nenhum poderia virar outro. Thomson abriu a porta que os Curie atravessaram.

8 DE NOVEMBRO DE 1895 · WÜRZBURG

Röntgen e os raios X

- Cobriu o tubo com **papelão preto** e apagou a luz do laboratório.
- Uma tela a dois metros **brilhou mesmo assim**.
- Atravessava papelão e carne, mas parava no osso.
- Chamou de **raios X**, o X da incógnita da matemática.
- Radiografou a mão da esposa, Anna Bertha, com a aliança.
- 1901: o **primeiro Nobel de Física**. Recusou-se a patentear.

A frase

"Eu vi a minha morte."

Anna Bertha, ao ver os próprios ossos na chapa.

! **Atenção: raio X não é radioatividade.** Vem da eletrosfera e acaba quando você tira o plugue. A radioatividade vem do núcleo e não tem como desligar.

O QUE MUDOU

O mundo inteiro passou a radiografar

3 meses
da descoberta ao primeiro uso médico documentado

1901
primeiro Nobel de Física da história

0
patentes: ele quis a descoberta livre para todos

O lado ingênuo

- Feiras exibiam raios X como diversão
- Sapatarias “provavam” sapatos com eles
- Pioneiros perderam dedos e mãos

A lição

- Não dói, não cheira, não aparece
- O dano é cumulativo e demora anos
- A proteção de hoje nasceu desses erros

MARÇO DE 1896 · PARIS

Becquerel e a gaveta que revelou tudo

1 A hipótese (errada)	Substâncias fosforescentes, depois de tomar sol, emitiriam raios X.
2 O material	Sulfato duplo de uranilo e potássio, um sal de urânio que brilha após a luz.
3 O acaso	Paris passou dias nublados. Ele guardou o sal sobre chapas envoltas em papel preto, na gaveta.
4 A revelação	Revelou as chapas por hábito, sem esperar nada. A imagem estava lá — intensa.

! O sal emitia sozinho, no escuro, sem receber energia de fora.

O TESTE DECISIVO

Como ele soube que não era fosforescência

1 Não era o sol

- Amostras guardadas semanas no escuro marcavam a chapa igual
- A intensidade não caía com o tempo sem luz

2 Não era fosforescência

- Sais de urânio que não brilham marcavam a chapa do mesmo jeito
- Até o urânio metálico funcionava

3 Era o urânio

- O que todas as amostras ativas tinham em comum era um só elemento
- Ele chamou de “raios urânicos”

Por dois anos quase ninguém ligou — até alguém precisar de um tema de doutorado.

? **E a energia, vem de onde?** em 1905, $E = mc^2$ mostrou que massa vira energia.

1897–98 · A TESE

Marie Curie escolhe o tema que ninguém queria

- Nascida em Varsóvia, foi estudar em Paris porque a **Polônia proibia mulheres na universidade**. Pierre Curie largou os próprios trabalhos para acompanhá-la.
- Precisava de tema de doutorado e escolheu justamente os **raios de Becquerel** — abandonados por todos depois da febre dos raios X.

O instrumento

eletrômetro piezoelétrico

- Inventado por Pierre e Jacques Curie
- A radiação ioniza o ar, que conduz
- Medindo a corrente, mede-se a radiação

A virada de método

de mancha para número

- Becquerel olhava manchas em chapas
- Marie passou a medir com número
- Foi a medida que entregou o resto

A DESCOBERTA-CHAVE

A radiação é uma propriedade do átomo

1. **A forma química não importa**
   Óxido, sulfato, urânio metálico: a atividade só depende de quanto urânio existe na amostra.

2. **O ambiente não importa**
   Aquecer, resfriar, comprimir, iluminar, dissolver: nada altera a emissão.

3. **Não é só o urânio**
   O tório também emite. Logo, é um fenômeno geral, não uma esquisitice de um elemento.

✦ **A emissão vem de dentro do átomo.** Marie criou a palavra: **radioatividade**.

A conta que não fechava

O que ela esperava

A pechblenda é um minério: contém urânio misturado a muita coisa inerte. Então deveria ser MENOS ativa que uma amostra de urânio puro.

O que ela mediu

A pechblenda era várias vezes MAIS ativa que o urânio puro. A calcolita, outro minério, também. A medida repetiu-se sempre.

Se sobra atividade… → **…é porque existe outro elemento, muito mais ativo, escondido ali.**

Os Curie deduziram a existência de dois elementos novos a partir de uma diferença numérica — antes de ver um único grão deles.

JULHO DE 1898

Polônio: o nome de um país que não existia

- Separado da pechblenda acompanhando a química do **bismuto**, por precipitação sucessiva.
- Centenas de vezes mais ativo que o urânio, em quantidade pequena demais para pesar.
- Em 1898 a Polônia **não existia no mapa**: estava dividida entre Rússia, Prússia e Áustria desde 1795.
- Marie deu o nome como **ato político**. Foi a primeira vez que um elemento químico virou denúncia.

Po polônio

Número atômico: 84
Emissor alfa
Po-210: meia-vida de 138 dias
Achado pela radioatividade, e não pela química

Detalhe químico que vale a prova: acharam o polônio junto do bismuto e o rádio junto do bário porque elementos do mesmo grupo se comportam igual.

DEZEMBRO DE 1898

Rádio: o elemento que brilha no escuro

8 t
de resíduo de pechblenda processado à mão

4 anos
de trabalho num galpão sem piso e com goteiras

0,1 g
de cloreto de rádio puro obtidos em 1902

Por que “rádio”

- Do latim radius, raio
- Emite luz azul-esverdeada no escuro
- Aquece a si mesmo o tempo todo

Como acharam

- Acompanha o bário: mesmo grupo 2
- Separado por cristalização fracionada
- Massa 226; meia-vida de 1600 anos

1900–1930

Quando o rádio virou produto de farmácia

Tinta luminosa

ponteiros de relógio e mostradores de avião

Água “energizante”

o tônico Radithor, vendido em farmácia

Cosméticos

creme facial, pó de arroz e pasta de dente



As Radium Girls

- Operárias de fábricas de relógio nos EUA afinavam o pincel com os lábios
- Muitas desenvolveram necrose da mandíbula e cânceres ósseos
- O processo que moveram criou a base do direito à indenização por doença ocupacional

Ninguém sabia. Foi esse preço que fez nascer a proteção radiológica de hoje.

RECONHECIMENTO

Marie Curie em números

2
Nobel: Física 1903 e Química 1911

1ª
mulher a receber um Nobel

1ª
professora mulher da Sorbonne

~150
mulheres formadas como radiologistas

O Nobel de 1903

- O comitê ia premiar só os homens
- Pierre exigiu o nome dela na lista
- O prêmio foi dividido entre os três

As “petites Curies”

- Unidades móveis de raios X na guerra
- Ela mesma dirigia e operava os carros
- Cerca de 1 milhão de soldados atendidos

O PREÇO

Os cadernos que até hoje não podem ser tocados

- Pierre morreu em **1906**, atropelado por uma carroça em Paris.
- Marie morreu em **1934, de anemia aplástica** — a medula óssea destruída pela exposição de décadas.
- Irène, a filha, ganhou o Nobel de Química em 1935 e morreu de **leucemia em 1956**.
- Eles carregavam amostras no bolso do jaleco e guardavam tubos de rádio na gaveta da mesa.

Hoje, em Paris

Os cadernos de laboratório de Marie estão na Biblioteca Nacional da França, guardados em caixas forradas de chumbo. Quem quiser consultar assina um termo de responsabilidade.

! **Por que ainda hoje?** o rádio-226 tem meia-vida de 1600 anos. Daqui a pouco você vai saber calcular quanto ainda resta.

1899–1900

Três radiações, três comportamentos

Rutherford empilhou folhas de alumínio sobre a fonte e mediu o que passava.

α Primeiro degrau

- A intensidade despencou logo na primeira folha
- Batizou de radiação alfa

β Segundo degrau

- Uma parte continuou passando por várias folhas
- Batizou de radiação beta

γ O que sobrou

- Villard (1900) achou algo que atravessava tudo
- Rutherford chamou de gama em 1903

Em 1908 Rutherford provou que a partícula alfa é um núcleo de hélio.

Os nomes são as três primeiras letras gregas, na ordem em que foram achadas.

1902 · RUTHERFORD E SODDY

O átomo que vira outro átomo

- Estudando o tório, viram a atividade sumir de uma amostra e **aparecer em outra substância**.
- Concluíram: o átomo se desintegra e **se transforma em um elemento diferente**.
- Isso contraria Dalton, Lavoisier e tudo o que a Química dizia sobre elementos.
- Em 1908 Rutherford recebeu o Nobel de **Química** — ele, que se considerava físico, achou a maior

O medo deles

"Pelo amor de Deus, Soddy, não chame isso de transmutação. Vão cortar nossas cabeças como alquimistas."

— atribuída a Rutherford

A alquimia acertou o quê e errou o como: um elemento vira outro mesmo — mas no núcleo, sozinho, sem que nenhuma reação química interfira.

1911–1938

Onde a radioatividade mora

1911	**Rutherford**	O experimento da folha de ouro revela o núcleo: pequeno, denso e positivo. É ali que tudo acontece.
1913	**Soddy e Fajans**	Leis do deslocamento radioativo e o conceito de isótopo: mesmo Z, A diferente.
1932	**Chadwick**	Descobre o nêutron. Agora dá para entender por que certos isótopos são instáveis.
1938	**Hahn, Strassmann, Meitner e Frisch**	Fissão nuclear: um núcleo pesado se parte em dois, liberando energia enorme.

Lise Meitner explicou a fissão e ficou fora do Nobel de 1944.

SÍNTESE · PARTE 1

Quem fez o quê — 1895 a 1903

Ano	Quem	O que descobriu
1895	Wilhelm Röntgen	Raios X — e o primeiro Nobel de Física
1896	Henri Becquerel	O urânio emite radiação por conta própria
1897	J. J. Thomson	O elétron: o átomo é divisível
1898	Marie e Pierre Curie	Polônio e rádio; a palavra radioatividade
1899	Ernest Rutherford	Separa as radiações alfa e beta
1900	Paul Villard	Descobre a radiação gama
1902	Rutherford e Soddy	Transmutação: um elemento vira outro
1903	Curie, Curie e Becquerel	Nobel de Física pela radioatividade

SÍNTESE · PARTE 1

Quem fez o quê — 1908 a 1938

Ano	Quem	O que descobriu
1908	Ernest Rutherford	A partícula alfa é um núcleo de hélio
1911	Rutherford, Geiger e Marsden	O núcleo atômico
1911	Marie Curie	Nobel de Química: rádio e polônio isolados
1913	Soddy e Fajans	Leis do deslocamento; conceito de isótopo
1932	James Chadwick	O nêutron
1934	Irène e Frédéric Joliot-Curie	Radioatividade artificial
1938	Hahn, Strassmann e Meitner	Fissão nuclear

Em 43 anos o átomo passou de indivisível a divisível — e quebrável de propósito.

PARTE 2

As três radiações

O que exatamente sai de um núcleo instável — e por que uma folha de papel segura uma delas e nem o chumbo segura a outra.



alfa | beta | gama | penetração | blindagem

A ORIGEM DE TUDO

Por que um núcleo fica instável

Força nuclear forte

a favor da estabilidade

- Atrai prótons e nêutrons uns aos outros
- É muito intensa, mas de alcance curtíssimo
- Só age entre partículas praticamente encostadas

Repulsão elétrica

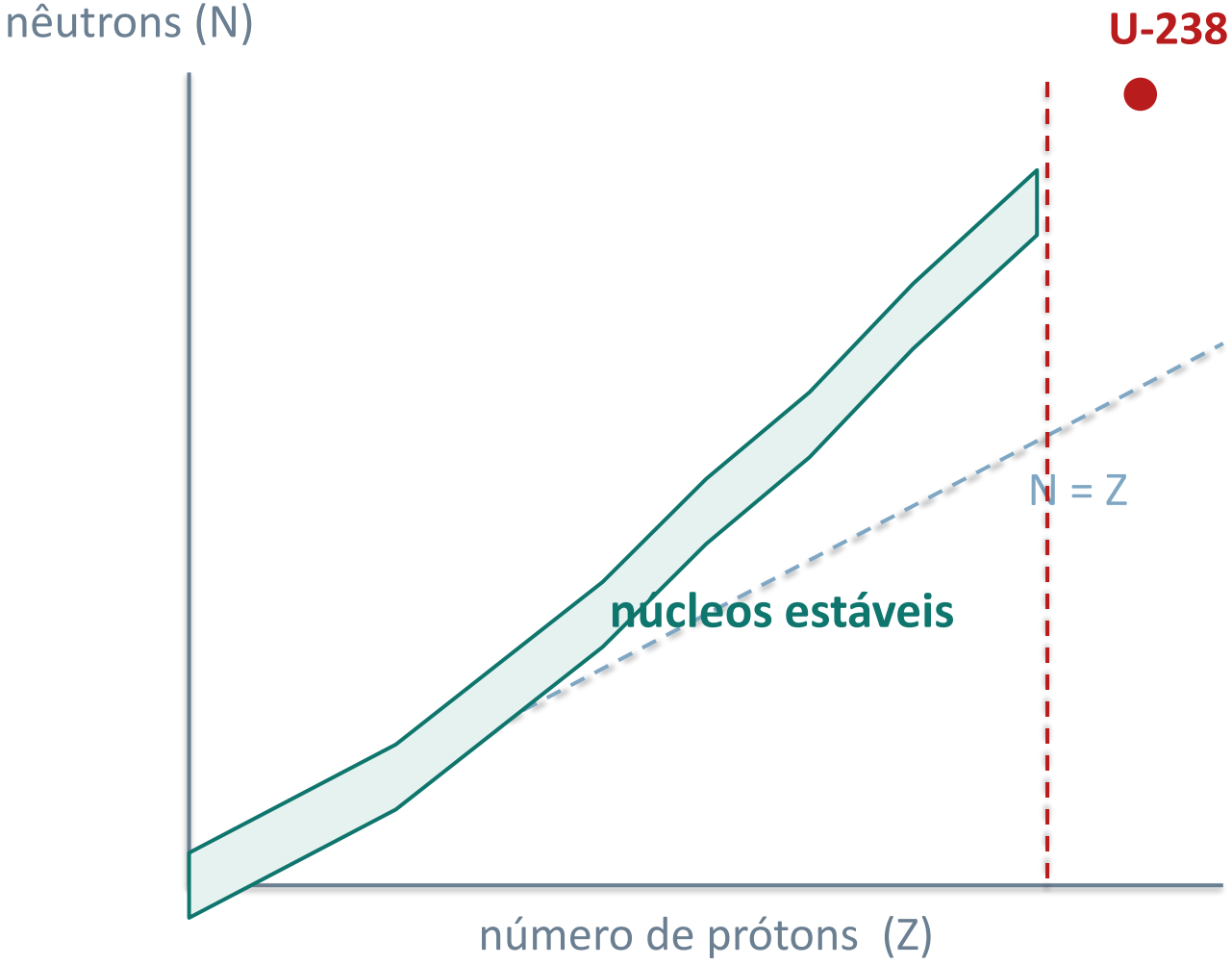
contra a estabilidade

- Todo próton empurra todo próton
- É mais fraca, mas alcança o núcleo inteiro
- Quanto mais prótons, mais ela pesa na conta

Os nêutrons entram como espaçadores: aumentam a atração sem acrescentar repulsão.

! **Núcleo grande, problema grande:** a atração só vale para os vizinhos.

A faixa de estabilidade



A regra do N/Z

- Até Z = 20, N ≈ Z nos estáveis
- Depois N sobe até ~1,5 vez Z

Acima de Z = 83

- Nenhum é estável: todos decaem
- Urânio, rádio, polônio, tório

Fora da faixa, o núcleo se ajusta decaindo.

Partícula alfa (α)

α

$^{4}_{2}He$

núcleo de hélio

Característica	Valor
Composição	2 prótons + 2 nêutrons
Massa	4 u — a mais pesada das três
Carga elétrica	+2
Velocidade	5% a 10% da velocidade da luz
Alcance no ar	poucos centímetros

Emissores alfa típicos: urânio-238, rádio-226, polônio-210, radônio-222, amerício-241.

! **Uma folha de papel ou a pele já barram a alfa.** Mas se a fonte for engolida ou inalada, ela passa a ser a mais perigosa das três — e já vamos ver por quê.

RADIAÇÃO 2 DE 3

Partícula beta (β^-)

β^-

$^{0}_{-1}e$

elétron de alta energia

Característica	Valor
O que é	um elétron, mas vindo do núcleo
Massa	~1/1836 u — desprezível
Carga elétrica	–1
Velocidade	até 99% da velocidade da luz
Alcance no ar	até alguns metros

O núcleo não tem elétron. De onde sai?

Um nêutron vira próton e cospe o elétron.

$$^{1}_{0}n \rightarrow {}^{1}_{1}p + {}^{0}_{-1}e + \nu$$

Emissores beta típicos: carbono-14, iodo-131, césio-137, estrôncio-90, cobalto-60.

DUAS PRIMAS DA BETA

Quando sobra próton em vez de nêutron

Emissão de pósitron (β^+)

$$^{1}_{1}p \rightarrow {}^{1}_{0}n + {}^{0}_{1}e$$

O pósitron é a antipartícula do elétron: mesma massa, carga +1. Z diminui 1 e A não muda.

Captura eletrônica

$$^{1}_{1}p + {}^{0}_{-1}e \rightarrow {}^{1}_{0}n$$

O núcleo puxa um elétron da camada mais interna. O efeito é o mesmo: Z cai 1 e A fica igual.

$$^{18}_{9}F \rightarrow {}^{18}_{8}O + {}^{0}_{1}\beta$$

Onde isso aparece na vida real: o exame PET usa flúor-18. O pósitron encontra um elétron, os dois se aniquilam e viram dois raios gama.

Radiação gama (γ)

γ

onda eletromagnética

sem massa, sem carga

Característica	Valor
O que é	energia pura, um fóton
Massa	zero
Carga elétrica	zero
Velocidade	300 000 km/s — a da luz
Alcance no ar	centenas de metros

De onde ela vem

Fica “excitado” depois de emitir α ou β.

$$^{137}_{56}Ba^{*} \rightarrow {}^{137}_{56}Ba + \gamma$$

O gama não muda nem A nem Z: só tira o excesso de energia.

O GAMA É ONDA

Onde a radiação gama fica no espectro

← maior comprimento de onda

maior frequência e maior energia →



Tudo isso é a mesma coisa

- Todas viajam a 300 000 km/s
- Muda só o comprimento de onda — e a energia

Por que o gama machuca

- Acima do ultravioleta, a onda arranca elétrons
- Isso é radiação ionizante — quebra o DNA

A CONTA DA ONDA

A energia de uma onda eletromagnética

$$c = \lambda \cdot f$$

$c = 3{,}0 \times 10^{8}$ m/s (constante) • λ = comprimento de onda (m) • f = frequência (Hz)

$$E = h \cdot f$$

$h = 6{,}63 \times 10^{-34}$ J·s (constante de Planck) • E = energia do fóton (J)

Exemplo: um raio gama do cobalto-60 tem $\lambda \approx 1{,}0 \times 10^{-12}$ m.

$f = c / \lambda$

$f = 3{,}0 \times 10^{8} / 1{,}0 \times 10^{-12}$

$f = 3{,}0 \times 10^{20}$ Hz

$E = h \cdot f$

$E = 6{,}63 \times 10^{-34} \times 3{,}0 \times 10^{20}$

$E \approx 2{,}0 \times 10^{-13}$ J

Um fóton de luz visível tem ~4×10^{-19} J: o gama carrega meio milhão de vezes mais.

NÃO CONFUNDA

Raio X e gama: mesma onda, origens diferentes

	Raio X	Raio gama
Natureza	onda eletromagnética	onda eletromagnética
Origem	eletrosfera do átomo	núcleo do átomo
Como se produz	máquina: elétrons freados	sozinho, num núcleo excitado
Dá para desligar?	sim: tirou da tomada, acabou	não: só o tempo resolve
Energia típica	menor	maior

? **Fica radioativo depois do exame?** Não: o aparelho só emite enquanto está ligado.

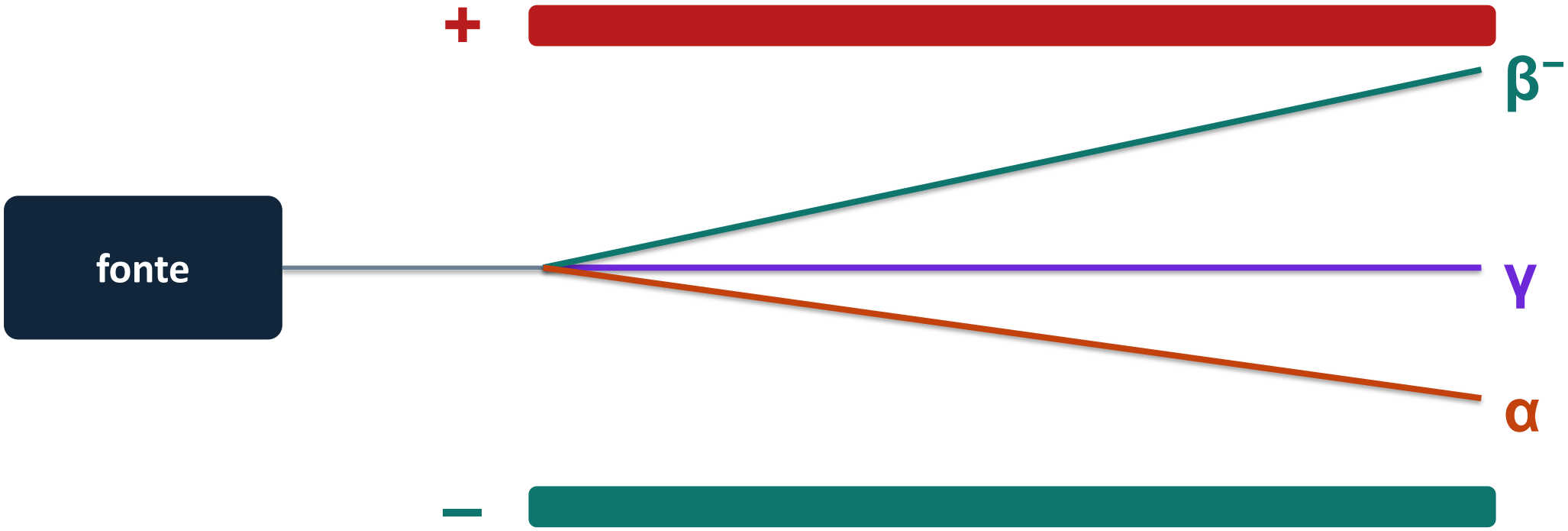
QUADRO-RESUMO

Alfa, beta e gama lado a lado

	alfa α	beta β	gama γ
Natureza	núcleo de hélio	elétron	onda
Símbolo	$^{4}_{2}He$	$^{0}_{-1}e$	$^{0}_{0}\gamma$
Massa (u)	4	≈ 0	0
Carga	+2	–1	0
Velocidade	≈ 0,1 c	até 0,99 c	c
Poder de ionização	**altíssimo**	médio	baixo
Poder de penetração	baixo	médio	**altíssimo**
Barrada por	papel	alumínio	chumbo e concreto

COMO SE SEPARAM

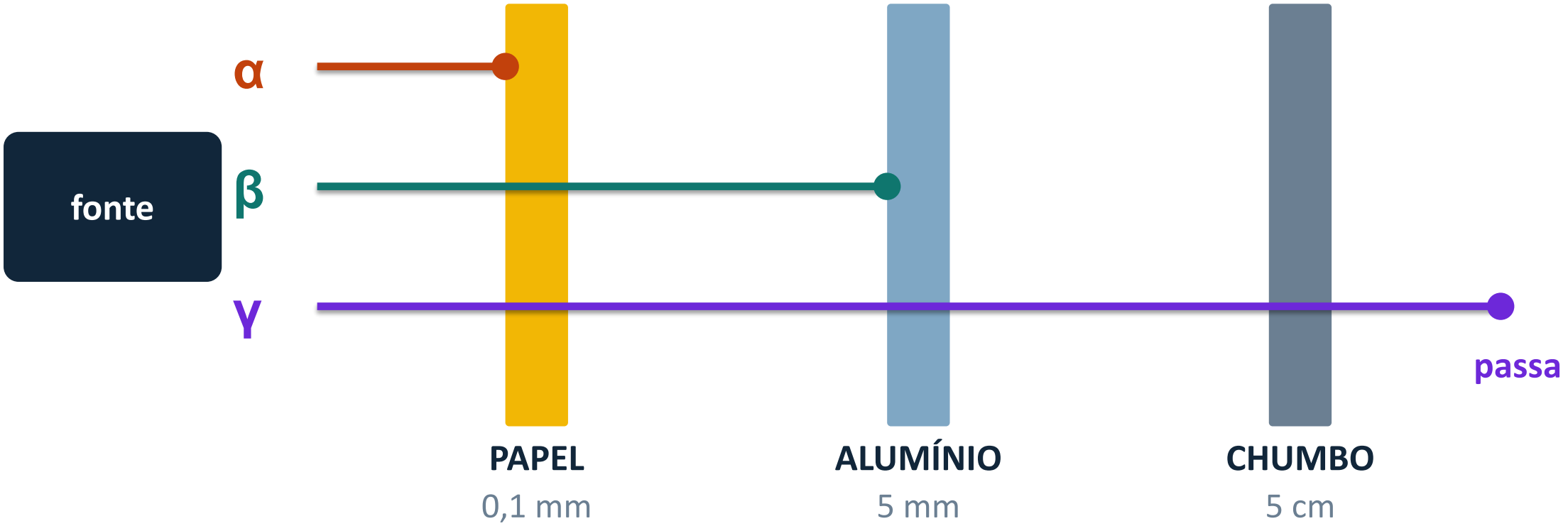
As três no campo elétrico



- **β⁻ é negativa:** vai para a placa positiva e desvia muito, pois quase não tem massa.
- **α é positiva:** vai para a placa negativa, mas desvia pouco: é bem mais pesada.
- **γ não tem carga:** segue reto.

PODER DE PENETRAÇÃO

Papel, alumínio e chumbo



! **O gama nunca é barrado de vez:** cada camada de chumbo corta a metade.

A RELAÇÃO INVERSA

Quem penetra pouco, ioniza muito

A alfa entrega toda a energia dela num espaço curtíssimo.

α Alfa: a bala de canhão

- Grande, lenta e com carga +2
- Colide com quase tudo
- Para logo, mas deixa rastro intenso

γ Gama: o tiro de laser

- Sem massa e sem carga
- Quase não interage com os átomos
- Vai longe, mas faz menos dano

A consequência prática (isso cai em prova)

Fonte FORA do corpo: o perigo é o gama. A alfa nem passa da pele.

Fonte DENTRO do corpo: o perigo é a alfa. Toda a energia fica ali.

O radônio-222, gás emissor alfa, é a segunda maior causa de câncer de pulmão.

PARTE 3

Escrevendo o decaimento

Duas leis, uma regra de conservação e você resolve qualquer equação nuclear que aparecer.



1ª lei de Soddy **2ª lei** **emissão gama** **séries**

ANTES DE COMEÇAR

Como se escreve um núclideo

$$^{238}_{92}U$$

A = número de massa

prótons + nêutrons — fica em cima

Z = número atômico

só os prótons — fica embaixo

As três na mesma notação: $^{4}_{2}\alpha$ $^{0}_{-1}\beta$ $^{0}_{0}\gamma$

Quem manda na identidade do elemento é o Z. Mudou o Z, mudou o elemento. Mudou só o A, continua o mesmo elemento — são isótopos.

1ª LEI DE SODDY

Emissão alfa: perde 4 de massa e 2 de prótons

$$ {}^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2}Y + {}^{4}_{2}\alpha $$

O número de massa

- Cai 4 unidades: saíram 2 prótons e 2 nêutrons

O número atômico

- Cai 2: o elemento anda 2 casas para trás

Quem emite alfa

- Núcleos pesados, com Z acima de 83

Leia a equação em voz alta: “o urânio-238 emite uma alfa e vira tório-234”. Nenhuma reação química faz isso — nem fogo, nem ácido, nem eletrólise.

Quatro exemplos para treinar

$$^{238}_{92}U \rightarrow {}^{234}_{90}Th + {}^{4}_{2}\alpha$$ urânio-238 → tório-234

$$^{226}_{88}Ra \rightarrow {}^{222}_{86}Rn + {}^{4}_{2}\alpha$$ rádio-226 → radônio-222

$$^{210}_{84}Po \rightarrow {}^{206}_{82}Pb + {}^{4}_{2}\alpha$$ polônio-210 → chumbo-206

$$^{241}_{95}Am \rightarrow {}^{237}_{93}Np + {}^{4}_{2}\alpha$$ amerício-241 → neptúnio-237

Confira sempre: a soma dos números de cima e a soma dos de baixo têm de bater dos dois lados.

Emissão beta: a massa fica, o Z sobe 1

$$ {}^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A}_{Z+1}Y + {}^{0}_{-1}\beta $$

O número de massa

- Não muda: o elétron tem massa desprezível

O número atômico

- Sobe 1: um nêutron virou próton lá dentro

Quem emite beta

- Núcleos com nêutrons demais

Repare no efeito na tabela periódica: a alfa joga o elemento duas casas para trás; a beta empurra uma casa para a frente.

Quatro exemplos para treinar



tório-234 → protactínio-234



carbono-14 → nitrogênio-14



iodo-131 → xenônio-131



cobalto-60 → níquel-60

Note que o número de massa é o mesmo dos dois lados em todas elas.

EMISSÃO GAMA

A radiação que não transforma nada

$$ {}^{A}_{Z}X^{*} \rightarrow {}^{A}_{Z}X + {}^{0}_{0}\gamma $$

O asterisco indica núcleo excitado — com energia sobrando depois de uma emissão α ou β.

O caso mais famoso do Brasil: o césio-137

$$ {}^{137}_{55}Cs \rightarrow {}^{137}_{56}Ba^{*} + {}^{0}_{-1}\beta \qquad {}^{137}_{56}Ba^{*} \rightarrow {}^{137}_{56}Ba + {}^{0}_{0}\gamma $$

Primeiro sai a beta; depois o bário excitado solta o gama.

! **Na equação o gama não altera nenhum número** — mas deve ser escrito.

A REGRA DE OURO

Duas somas que sempre fecham

ΣA antes = ΣA depois

A soma dos números de massa (os de cima) é igual dos dois lados da seta.

ΣZ antes = ΣZ depois

A soma dos números atômicos (os de baixo) também é igual dos dois lados.

Com essas duas igualdades você descobre qualquer peça que faltar:

Falta o produto?

Subtraia os números da partícula emitida.

Falta a partícula?

Faça a diferença entre os dois núclideos.

Falta o inicial?

Some tudo o que está do lado direito.

EXERCÍCIO RESOLVIDO 1

Descobrir o produto

O rádio-226 emite uma partícula alfa. Qual elemento se forma?

$$^{226}_{88}\mathrm{Ra} \rightarrow {}^{?}_{?}\mathrm{X} + {}^{4}_{2}\alpha$$

Número de massa

$226 = A + 4 \rightarrow A = 222$

Número atômico

$88 = Z + 2 \rightarrow Z = 86$

✓ Z = 86 é o radônio. Resposta: **radônio-222**, um gás nobre radioativo.

EXERCÍCIO RESOLVIDO 2

Descobrir a partícula emitida

O tório-234 se transforma em protactínio-234. O que foi emitido?

$$^{234}_{90}\text{Th} \rightarrow {}^{234}_{91}\text{Pa} + {}^{?}_{?}\text{x}$$

Número de massa

$234 = 234 + A \rightarrow A = 0$

Número atômico

$90 = 91 + Z \rightarrow Z = -1$

✓ Massa 0 e carga –1: é uma **partícula beta**. O sinal negativo é a assinatura dela.

Quando um decaimento só não resolve

O tório-234 que sobrou do urânio também é instável. E o produto dele também. O núcleo decai várias vezes seguidas até chegar a algo estável: isso é uma série (ou família) radioativa.



O urânio-238 leva 14 decaimentos até virar chumbo-206. Ainda existe urânio na Terra porque ele decai devagar demais para ter acabado.

A série só para num núcleo estável. Nas três séries naturais o ponto final é sempre um isótopo de chumbo.

SÉRIE DO URÂNIO

Os 14 passos de U-238 até Pb-206

De → para	tipo	meia-vida
U-238 → Th-234	α	$4{,}5 \times 10^9$ anos
Th-234 → Pa-234	β	24 dias
Pa-234 → U-234	β	1,2 minuto
U-234 → Th-230	α	245 mil anos
Th-230 → Ra-226	α	75 mil anos
Ra-226 → Rn-222	α	1 600 anos
Rn-222 → Po-218	α	3,8 dias

De → para	tipo	meia-vida
Po-218 → Pb-214	α	3,1 minutos
Pb-214 → Bi-214	β	27 minutos
Bi-214 → Po-214	β	20 minutos
Po-214 → Pb-210	α	0,16 milissegundo
Pb-210 → Bi-210	β	22 anos
Bi-210 → Po-210	β	5 dias
Po-210 → Pb-206	α	138 dias

Total: 8 partículas alfa e **6 partículas beta** — vamos conferir por cálculo no próximo slide.

O ATALHO

Quantas alfas e betas, sem escrever a série

Passo 1 — conte as alfas

$$n\alpha = (A_i - A_f) \div 4$$

Só a alfa mexe no número de massa.

Passo 2 — conte as betas

$$n\beta = 2 \cdot n\alpha - (Z_i - Z_f)$$

Cada alfa tira 2 do Z; cada beta devolve 1.

Conferindo a série do urânio: U-238 (Z = 92) → Pb-206 (Z = 82)

$n\alpha = (238 - 206) \div 4$

$n\alpha = 32 \div 4$

$n\alpha = 8$ alfas

$n\beta = 2 \cdot 8 - (92 - 82)$

$n\beta = 16 - 10$

$n\beta = 6$ betas

Bate exatamente com a tabela dos 14 passos. E resolveu em dez segundos.

EXERCÍCIO RESOLVIDO 3

A série do tório

O tório-232 (Z = 90) decai até o chumbo-208 (Z = 82). Quantas alfas e quantas betas são emitidas no caminho?

Alfas

$$n\alpha = (232 - 208) \div 4$$

$$n\alpha = 24 \div 4 = 6$$

Betas

$$n\beta = 2 \cdot 6 - (90 - 82)$$

$$n\beta = 12 - 8 = 4$$

$$^{232}_{90}\text{Th} \longrightarrow {}^{208}_{82}\text{Pb} + 6\,\alpha + 4\,\beta$$

✓ Confira a regra de ouro: $232 = 208 + 6\cdot4 + 4\cdot0$ ✓ e $90 = 82 + 6\cdot2 + 4\cdot(-1)$ ✓

AS FAMÍLIAS RADIOATIVAS

Três séries naturais e uma extinta

Série	Começa em	Termina em	α / β	Meia-vida do início
Urânio	U-238	Pb-206	8 / 6	4,5 bilhões de anos
Actínio	U-235	Pb-207	7 / 4	700 milhões de anos
Tório	Th-232	Pb-208	6 / 4	14 bilhões de anos
Neptúnio	Np-237	Bi-209	7 / 4	2,1 milhões de anos

Hoje o neptúnio-237 só existe porque é produzido em reatores nucleares.

? **Por que a série do neptúnio sumiu?** Porque 2,1 milhões de anos é pouco perto dos 4,5 bilhões da Terra: tudo o que existia já decaiu.

A SÉRIE QUE ENTRA NA SUA CASA

Radônio-222

- O radônio é um **gás nobre** formado no meio da série do urânio, a partir do rádio-226.
- Por ser gás, ele escapa do solo e das rochas e **se acumula em porões e ambientes fechados**.
- É emissor alfa. Inalado, deposita toda a energia direto no tecido do pulmão.
- É a **segunda maior causa de câncer de pulmão** no mundo, atrás só do cigarro.

A sequência

Ra-226 ↓ α

Rn-222 ↓ α

Po-218

Meia-vida de 3,8 dias: tempo de sobra para chegar até você.

✓ **Solução em qualquer casa:** ventilação. Abrir janelas dispersa o radônio e derruba a concentração. É barato, e é a principal recomendação sanitária para o problema.

AGORA É COM VOCÊ

Exercícios — equações nucleares

1. O bismuto-210 (Z = 83) emite uma partícula beta. Escreva a equação e identifique o produto.

2. O amerício-241 (Z = 95) se transforma em neptúnio-237 (Z = 93). Qual partícula foi emitida?

3. Na série do actínio, o U-235 (Z = 92) chega ao Pb-207 (Z = 82). Quantas alfas e quantas betas são emitidas?

4. Um núclideo emite 1 alfa e, em seguida, 2 betas. O que acontece com A e com Z no final?

Dica para a 4: some os efeitos. Uma alfa faz A–4 e Z–2; cada beta faz Z+1.

GABARITO

Confira as respostas

1 $^{210}_{83}Bi \rightarrow {}^{210}_{84}Po + {}^{0}_{-1}\beta$ — forma-se polônio-210

2 $^{241}_{95}Am \rightarrow {}^{237}_{93}Np + {}^{4}_{2}\alpha$ — foi emitida uma partícula alfa

3 **7 alfas e 4 betas**

nα = (235 – 207) ÷ 4 = 7 **nβ = 2·7 – (92 – 82) = 4**

4 **A cai 4 e Z volta ao valor original**

Z: –2 (alfa) +1 +1 (betas) = 0. É o mesmo elemento, só que um isótopo mais leve.

PARTE 4

A cinética do decaimento

Um núcleo isolado decai quando quiser. Um punhado deles obedece a um relógio impecável — e é esse relógio que a gente usa.



meia-vida **$m = m_0 / 2^n$** **atividade** **carbono-14**

A DEFINIÇÃO

Meia-vida: o relógio do núcleo

Meia-vida (P ou t½) é o tempo necessário para que metade dos núcleos de uma amostra se desintegre.

Não é “metade do tempo de vida”

- Passada uma meia-vida, sobra metade. Passada outra, sobra a metade da metade

Não depende da quantidade

- 1 grama ou 1 tonelada de césio-137: os dois caem pela metade em 30 anos

Compare com a cinética química: lá, aquecer acelera tudo. Aqui, não muda absolutamente nada.

! **Nada de fora muda a meia-vida:** nem temperatura, nem pressão, nem ligação.

O PADRÃO

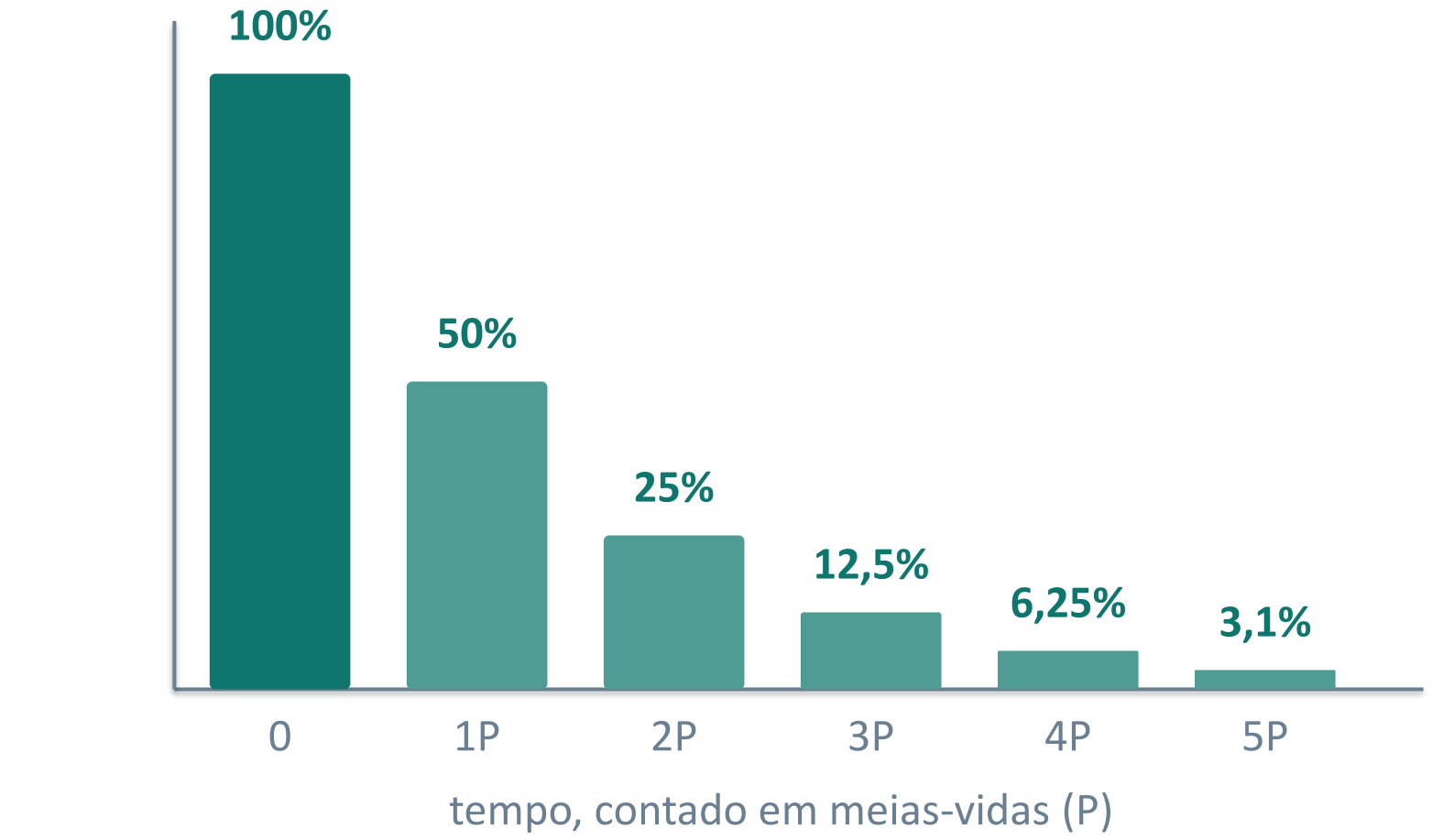
Sempre pela metade

Meias-vidas	n	Fração restante	Começando com 80 g
nenhuma	0	1	**80 g**
uma	1	1/2	**40 g**
duas	2	1/4	**20 g**
três	3	1/8	**10 g**
quatro	4	1/16	**5 g**
cinco	5	1/32	**2,5 g**

A fração restante é sempre 1 dividido por 2 elevado a n.

A CURVA

O decaimento é exponencial



A curva nunca toca o zero

- Cada intervalo corta a metade do que sobrou
- Nunca chega a zero

A regra prática

- Em 10 meias-vidas resta menos de 0,1%
- É o critério do rejeito

A FÓRMULA

Tudo em uma linha

$$m = m_0 / 2^n$$

m
massa (ou número de átomos) que resta

m_0
massa inicial

n
quantas meias-vidas se passaram

$$n = t / P$$

t = tempo decorrido • P = meia-vida

As duas juntas resolvem qualquer questão: descubra n primeiro, depois divida m_0 por 2^n.

ORDENS DE GRANDEZA

Meias-vidas que você vai encontrar

Núclideo	Meia-vida	Onde aparece
Flúor-18	110 minutos	exame PET
Tecnécio-99m	6 horas	cintilografia — o mais usado no mundo
Iodo-131	8 dias	diagnóstico e tratamento da tireoide
Cobalto-60	5,3 anos	radioterapia e esterilização
Césio-137	30 anos	o acidente de Goiânia
Carbono-14	5 730 anos	datação de material orgânico
Plutônio-239	24 100 anos	rejeito de reator e armas
Urânio-238	4,5 bilhões de anos	combustível e idade das rochas

Meia-vida curta: perigoso agora, some logo. Longa: pouco ativo, mas fica.

EXERCÍCIO RESOLVIDO 4

Quanto sobra?

Um hospital recebe 80 mg de iodo-131, cuja meia-vida é de 8 dias. Quanto resta depois de 32 dias?

Passo 1 — quantas meias-vidas?

$$n = t / P = 32 / 8 \rightarrow n = 4$$

Passo 2 — aplique a fórmula

$$m = 80 / 2^4 = 80 / 16$$

$$m = 5 \text{ mg}$$

Conferindo passo a passo — cada seta vale 8 dias:

80 mg → 40 mg → 20 mg → 10 mg → 5 mg

✓ Resposta: restam 5 mg de iodo-131 — e 75 mg já viraram xenônio-131.

EXERCÍCIO RESOLVIDO 5

Descobrir a meia-vida

Uma amostra tinha 1,0 g de certo núclideo. Depois de 90 anos restam 0,125 g. Qual é a meia-vida?

1. A fração

$0{,}125 / 1{,}0 = 1/8$

$1/8 = 1/2^3$

2. O expoente

$2^n = 8$

$n = 3$ meias-vidas

3. A meia-vida

$P = t / n = 90 / 3$

$P = 30$ anos

✓ Meia-vida de 30 anos, emissor beta e gama: **é o césio-137**. Guarde esse número — daqui a pouco ele reaparece, em Goiânia.

Atividade: desintegrações por segundo

Becquerel (Bq)

- 1 Bq = 1 desintegração por segundo
- É a unidade oficial do SI — e é minúscula

Curie (Ci)

- 1 Ci = $3{,}7 \times 10^{10}$ Bq
- Equivale à atividade de 1 g de rádio-226

A atividade cai exatamente como a massa — mesma fórmula, mesma curva:

$$A = A_0 / 2^n$$

Por isso o Tc-99m é o mais usado: some do corpo quase no mesmo dia.

Exemplo rápido

Uma dose de tecnécio-99m tem $4{,}8 \times 10^4$ Bq. Em 24 h (quatro meias-vidas de 6 h): $4{,}8 \times 10^4 \div 16 = 3{,}0 \times 10^3$ Bq.

DATAÇÃO

Carbono-14: o relógio dos seres vivos

1	**Na alta atmosfera**	Raios cósmicos batem em nitrogênio e formam carbono-14 o tempo todo.
2	**Enquanto o ser vive**	Ele respira e se alimenta, repondo C-14. A proporção no corpo fica constante.
3	**Quando morre**	Para de repor. O C-14 que sobrou começa a decair sem reposição.
4	**No laboratório**	Compara-se a atividade da amostra com a de um ser vivo atual.

$$^{14}_{7}N + {}^{1}_{0}n \rightarrow {}^{14}_{6}C + {}^{1}_{1}H$$

Meia-vida do C-14: 5 730 anos

EXERCÍCIO RESOLVIDO 6

Datando um osso

Um osso encontrado numa escavação apresenta 1/4 da atividade de carbono-14 de um osso atual. Qual é a idade do material?

Quantas meias-vidas?

$$1/4 = 1/2^2$$

$$n = 2 \text{ meias-vidas}$$

Quanto tempo é isso?

$$t = n \cdot P = 2 \times 5\,730$$

$$t = 11\,460 \text{ anos}$$

O método só vale para material que um dia esteve vivo: osso, madeira, tecido, semente, papel.

! **Limite do método: cerca de 50 000 anos.** Depois disso resta tão pouco C-14 que a medida deixa de ser confiável.

ALÉM DO CARBONO

Relógios para milhões e bilhões de anos

Método	Meia-vida	Serve para
Carbono-14	5 730 anos	múmias, fósseis recentes, pergaminhos
Potássio-40 → Argônio-40	1,25 bilhão de anos	rochas vulcânicas e sítios arqueológicos
Urânio-238 → Chumbo-206	4,5 bilhões de anos	as rochas mais antigas do planeta

A idade da Terra

- 4,54 bilhões de anos (urânio-chumbo)
- Medida por Clair Patterson, 1953

O princípio é o mesmo

- Compara o que restou com o formado
- Mais chumbo, mais velha a rocha

A CONTA QUE GOIÂNIA DEIXOU

O césio-137 daqui para a frente

1987	2017	2047	2287
100%	50%	25%	0,1%
o acidente	uma meia-vida depois	duas meias-vidas	dez meias-vidas

Matematicamente a atividade nunca zera. Na prática, após dez meias-vidas ela já se confunde com a radiação natural do ambiente — e é esse o critério adotado pelas normas.

! **O rejeito de Goiânia está em Abadia de Goiás** e vai ficar lá por séculos. É essa a conta que um país precisa saber fazer.

AGORA É COM VOCÊ

Exercícios — meia-vida

1. O cobalto-60 tem meia-vida de 5,3 anos. Partindo de 64 g, quanto resta depois de 21,2 anos?

2. Uma fonte de tecnécio-99m (P = 6 h) tem atividade de $1{,}6 \times 10^5$ Bq. Qual será a atividade 18 h depois?

3. Uma amostra caiu de 200 g para 12,5 g em 60 dias. Qual é a meia-vida?

4. Um pergaminho tem 1/8 da atividade de C-14 de uma amostra atual. Qual é a idade dele?

Em todos: ache n primeiro. Depois é só dividir por 2^n.

GABARITO

Exercícios de meia-vida

1	n = 21,2 / 5,3 = 4	**m = 64 / 2^4 = 4 g**
2	n = 18 / 6 = 3	**A = 1,6 × 10^5 / 8 = 2,0 × 10^4 Bq**
3	200 → 12,5 é 1/16, então n = 4	**P = 60 / 4 = 15 dias**
4	1/8 = 1/2^3, então n = 3	**t = 3 × 5 730 = 17 190 anos**

PARTE 5

Quebrar e juntar núcleos

Até aqui o núcleo decidia sozinho. Agora é a humanidade que provoca a transformação — e libera energia em outra escala.



fissão **reação em cadeia** **fusão** **$E = mc^2$**

FISSÃO NUCLEAR

Partindo o núcleo ao meio

$$^{235}_{92}U + {}^{1}_{0}n \rightarrow {}^{141}_{56}Ba + {}^{92}_{36}Kr + 3\,{}^{1}_{0}n$$

1 O gatilho

- Um nêutron lento entra no U-235
- O núcleo incha e se parte em dois

2 A energia

- Os produtos pesam menos
- A diferença vira energia: $E = mc^2$

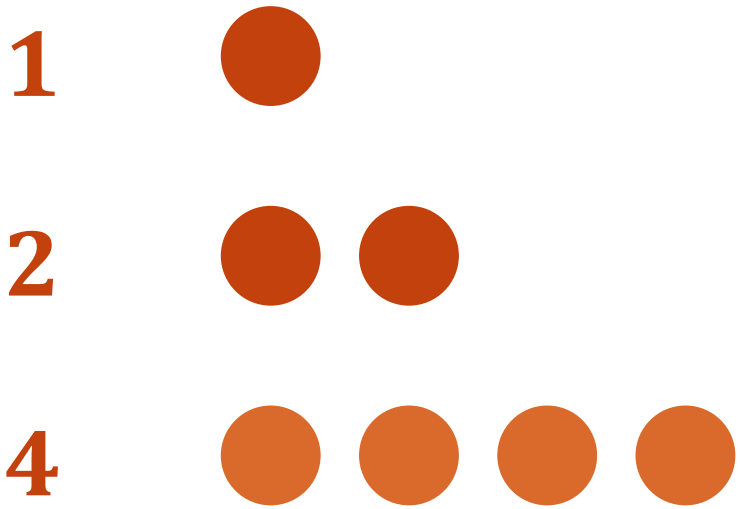
3 O troco

- Sobram 2 ou 3 nêutrons livres
- São eles que provocam as fissões seguintes

! **A escala:** 1 g de urânio-235 rende o mesmo que 2,7 toneladas de carvão.

REAÇÃO EM CADEIA

Um nêutron vira dois, dois viram quatro



Massa crítica

- O mínimo de material para a cadeia se sustentar

Bomba ou usina?

- A diferença é o controle: barras absorvem nêutrons

POR DENTRO DE UMA USINA

Uma caldeira muito sofisticada

1 O núcleo do reator	Pastilhas de urânio enriquecido dentro de varetas; a fissão controlada aquece a água.
2 As barras de controle	Descem entre as varetas absorvendo nêutrons. Descendo mais, a reação desacelera.
3 O vapor e a turbina	A água quente gera vapor, que gira a turbina ligada ao gerador elétrico.
4 A contenção	Prédio de concreto e aço que isola tudo do ambiente — justamente o que faltava em Chernobyl.

✦ Uma usina nuclear é uma usina a vapor: muda só a fonte de calor.

FUSÃO NUCLEAR

O caminho contrário: juntar núcleos leves

$$^{2}_{1}H + ^{3}_{1}H \rightarrow ^{4}_{2}He + ^{1}_{0}n + \text{energia}$$

É o que o Sol faz

- Hidrogênio vira hélio a 15 milhões de graus
- 600 milhões de toneladas por segundo

Por que é difícil na Terra

- Dois núcleos positivos se repelem muito
- Só temperatura e pressão enormes vencem

Em 2022 um laboratório nos EUA **tirou de uma fusão mais energia do que injetou**.

QUADRO-RESUMO

Fissão e fusão lado a lado

	Fissão	Fusão
O que acontece	núcleo pesado se parte	núcleos leves se juntam
Combustível	urânio-235, plutônio-239	isótopos de hidrogênio
Condição	nêutron lento	milhões de graus
Energia liberada	muito alta	ainda maior
Rejeito radioativo	sim, e de longa duração	muito menor
Onde já funciona	usinas no mundo todo	só em laboratório

A fusão é a promessa do século: combustível abundante e pouquíssimo rejeito.

PARTE 6

Quando algo dá errado

Cinco episódios que moldaram tudo o que hoje se chama de segurança e proteção radiológica.



1945 1979 1986 1987 2011

AGOSTO DE 1945

Hiroshima e Nagasaki

Hiroshima · 6 de agosto

- Bomba de urânio-235: a Little Boy
- Cerca de 15 mil toneladas de TNT
- ~140 mil mortes até o fim do ano

Nagasaki · 9 de agosto

- Bomba de plutônio-239: a Fat Man
- Cerca de 21 mil toneladas de TNT
- ~74 mil mortes até o fim do ano

Muitos dos cientistas da fissão passaram a vida fazendo campanha contra o uso militar dela.

! **A radiação matou depois da explosão:** os sobreviventes deram os dados.

28 DE MARÇO DE 1979 · EUA

Three Mile Island

- Uma válvula travou aberta e o reator perdeu água de refrigeração.
- Os instrumentos indicavam a válvula fechada. Os operadores **agiram com base numa leitura errada** e pioraram a situação.
- Metade do núcleo derreteu. **O prédio de contenção segurou quase tudo**.
- Nenhuma morte ou doença foi atribuída ao acidente.

O legado

O acidente praticamente congelou a construção de novas usinas nos Estados Unidos por trinta anos. O dano maior foi à confiança pública.

A lição técnica: a engenharia funcionou, a interface com o operador é que falhou. Depois disso, painéis de controle e treinamento foram refeitos em todo o setor.

26 DE ABRIL DE 1986 · UCRÂNIA

Chernobyl

- Um teste de segurança com o reator em potência muito baixa — a condição mais instável daquele projeto.
- Sistemas de segurança foram **desligados de propósito** para o teste continuar.
- A potência disparou e houve explosão. O grafite queimou por dez dias.
- O reator **não tinha contenção**: a fumaça subiu direto para a atmosfera.

As vítimas diretas

2 trabalhadores morreram na explosão e 28 nos meses seguintes, por síndrome aguda de radiação — bombeiros e operadores que entraram sem saber o que enfrentavam.

! **O dano de longo prazo:** cerca de 5 mil casos de câncer de tireoide em quem era criança, por iodo-131 no leite das vacas.

CHERNOBYL

O que ficou

30 km

de raio na zona de exclusão, em vigor até hoje

~49 mil

moradores de Pripyat evacuados em 3 horas

2016

conclusão do novo confinamento de aço

A zona hoje

- Sem gente, a fauna se multiplicou: alces, lobos, cavalos selvagens
- A radiação é um problema menor para os animais do que a presença humana era

O que mudou no mundo

- Contenção passou a ser exigência inegociável
- Criou-se a cultura de segurança: qualquer operador pode parar o reator

13 DE SETEMBRO DE 1987 · GOIÂNIA

O maior acidente radiológico do mundo

1 O abandono	Uma clínica de radioterapia mudou de endereço e deixou para trás um aparelho com uma cápsula de césio-137.
2 O ferro-velho	Dois catadores levaram a peça e a venderam como sucata. No ferro-velho, a cápsula foi rompida.
3 O pó azul	O cloreto de césio brilhava no escuro. Foi distribuído entre famílias e amigos como curiosidade.
4 O alerta	Só 15 dias depois alguém levou o material até a vigilância sanitária — de ônibus, dentro de uma sacola.

! O pó não cheirava, não queimava e era bonito: crianças passaram no corpo.

GOIÂNIA

Os números e a química

19,26 g
de cloreto de césio dentro da cápsula

4
mortes nas semanas seguintes

249
pessoas contaminadas

112 mil
pessoas monitoradas nos meses seguintes

Por que foi tão grave

- O CsCl é solúvel: espalhou-se pela pele, pela roupa, pela casa
- O césio age como o potássio e vai para o músculo

Leide das Neves, 6 anos

Brincou com o pó e comeu um ovo com as mãos contaminadas. Morreu um mês depois, enterrada em caixão de chumbo.

Milhares de toneladas de solo e entulho viraram rejeito, hoje em Abadia de Goiás.

11 DE MARÇO DE 2011 · JAPÃO

Fukushima Daiichi

- Terremoto de magnitude 9,0. Os reatores **desligaram automaticamente e corretamente**.
- Cinquenta minutos depois veio um tsunami de cerca de 15 metros — o muro de proteção tinha 10.
- A água inundou os geradores de emergência. **Sem energia, sem bomba; sem bomba, sem refrigeração**.
- Três núcleos derreteram e houve explosões de hidrogênio nos prédios.

O número que surpreende

Nenhuma morte por radiação aguda. Mas mais de 2 000 mortes foram ligadas ao estresse e às condições da evacuação de 150 mil pessoas.

! **A lição mais desconfortável:** uma evacuação mal planejada pode causar mais vítimas do que a radiação de que se fugia.

O SALDO

O que os acidentes ensinaram

1 **Contenção**	Barreira física não é luxo. Foi ela que salvou Three Mile Island e faltou em Chernobyl.
2 **Cultura de segurança**	Qualquer operador pode parar o processo. Nenhum teste vale mais que a margem de segurança.
3 **Controle de fontes**	Goiânia não foi uma usina: foi uma fonte órfã. Rastrear cada fonte virou obrigação legal.
4 **Comunicação**	Informação clara e rápida salva mais gente do que qualquer barreira de concreto.

O Brasil criou a CNEN em 1956; depois de 1987 a fiscalização de fontes mudou de patamar.

PARTE 7

Para que serve

Radiação ionizante não é só risco: é diagnóstico, tratamento, conservação de alimento, energia e exploração espacial.



medicina **indústria** **alimentos** **energia**

MEDICINA · 1

Ver por dentro sem abrir

Núclideo	Meia-vida	Para que serve
Tecnécio-99m	6 horas	cintilografia de osso, coração, rim, tireoide
Flúor-18	110 minutos	PET: mostra onde o corpo consome mais glicose
Iodo-131	8 dias	imagem e função da tireoide
Gálio-67	3,3 dias	localização de infecções e tumores

Por que meia-vida curta

- O material precisa sumir logo após o exame
- O Tc-99m responde por ~80% dos exames

Por que gama

- Só o gama atravessa o corpo e é detectado
- Um emissor alfa seria inútil e perigoso

MEDICINA · 2

Tratar com radiação

1 Radioterapia externa

- Gama de cobalto-60 ou acelerador linear
- Vários feixes se cruzam no tumor

2 Braquiterapia

- Sementes de iodo-125 ou fios de irídio-192
- Ficam colados ao tumor: dose alta, alcance curto

3 Terapia metabólica

- Iodo-131 bebido em solução
- A tireoide captura o iodo e a radiação age ali

Seringas e luvas são esterilizadas com gama na embalagem lacrada.

✦ **Células que se dividem rápido** são mais vulneráveis à radiação.

INDÚSTRIA E ALIMENTOS

Onde mais a radiação trabalha

Gamagrafia

irídio-192 radiografa soldas de tubulação e estrutura metálica

Medidores

controlam espessura de papel e chapa, e nível de tanque fechado

Traçadores

localizam vazamento em tubulação enterrada sem escavar

Detector de fumaça

amerício-241 ioniza o ar; a fumaça corta a corrente e dispara

Irradiação de alimentos

mata micro-organismos e retarda brotação e amadurecimento

Inseto estéril

machos esterilizados por radiação derrubam pragas agrícolas

✓ **Alimento irradiado não fica radioativo.** Ele só atravessa um feixe de gama, como uma mala passa pelo raio X do aeroporto. Nenhum átomo dele se transforma.

ENERGIA

O Brasil nuclear

Angra 1

em operação comercial desde 1985

Angra 2

em operação desde 2001

Angra 3

obra iniciada e ainda não concluída

O peso na matriz

- Cerca de 2% da eletricidade brasileira
- Aqui é complemento: nossa base é hidrelétrica
- Funciona 24 h por dia, chova ou faça sol

O urânio brasileiro

- Uma das maiores reservas do mundo
- Caetité (BA) é a mina em operação
- O Brasil domina o enriquecimento

E AINDA

Aplicações que você não imaginava

No espaço	As sondas Voyager e os jipes Curiosity e Perseverance usam plutônio-238: o calor do decaimento vira eletricidade onde o sol não basta.
Na arte	Raios X e gama revelam pinturas escondidas sob outras camadas e autenticam obras e múmias sem tocar no objeto.
Na agricultura	Fósforo-32 marca o fertilizante e mostra quanto a planta realmente absorve.
Na sua casa	O detector de fumaça do teto do shopping tem uma fonte de amerício-241 do tamanho de uma lentilha.

A Voyager 1 saiu da Terra em 1977 e ainda transmite.

PARTE 8

Hoje: medos e desafios

O que realmente expõe você à radiação, o que é lenda e quais são os problemas que ainda não têm solução.



dose | mitos | rejeito | futuro

COMO SE MEDE O RISCO

Gray e sievert

Gray (Gy)

- Mede a energia absorvida por quilo de tecido
- É física pura: 1 Gy = 1 joule por quilograma

Sievert (Sv)

- Mede o efeito biológico dessa energia
- A mesma energia em alfa causa cerca de 20 vezes mais dano que em gama

Uma alfa entrega toda a energia num espaço mínimo: dentro do corpo, concentra o dano.

O sievert é a unidade que interessa à saúde: no dia a dia usamos mSv e µSv.

ORDEM DE GRANDEZA

A escala das doses

1 banana	0,1 µSv
Voo São Paulo–Lisboa	0,05 mSv
Radiografia de tórax	0,1 mSv
Dose natural, por ano	2,4 mSv
Tomografia de abdome	~10 mSv
Limite para trabalhador, por ano	20 mSv
Síndrome aguda de radiação	a partir de 1 000 mSv
Dose letal sem tratamento	4 000 a 5 000 mSv

Entre a banana e a dose letal há um fator de 50 milhões. “Tem radiação”, sozinho, não quer dizer nada.

A PARTE QUE NINGUÉM CONTA

Você é radioativo

~4 000 Bq

de potássio-40 no seu corpo, agora

~50%

da dose natural vem do gás radônio do solo

2,4 mSv

de dose natural média por ano, no mundo

De onde vem a dose natural

- Radônio do solo, raios cósmicos e rochas
- E o potássio-40 da comida: banana, feijão

Lugares naturalmente “quentes”

- Guarapari (ES): areia monazítica, rica em tório
- Há regiões no Irã com dose dezenas de vezes maior

O MAL-ENTENDIDO NÚMERO 1

Irradiação não é contaminação

Irradiação

Você foi atingido pela radiação, como quem toma sol. Saiu do feixe, acabou. Você não fica radioativo nem "passa" para ninguém.

Contaminação

O material radioativo está em você: na pele, na roupa, dentro do corpo. Ele continua emitindo e pode ser transferido a outras pessoas.

É essa diferença que explica por que um paciente sai da radioterapia e abraça a família sem problema nenhum.

Em Goiânia houve contaminação: o pó grudou em gente, roupa e chão. Numa radiografia há apenas irradiação.

MITOS E FATOS

O que assusta e o que realmente importa

“Forno de micro-ondas deixa a comida radioativa.”	Micro-onda é radiação não ionizante: só agita moléculas de água e aquece.
“Celular e wi-fi causam câncer por radiação.”	Também são não ionizantes. Não têm energia para arrancar elétron nenhum.
“Usina nuclear pode explodir como bomba atômica.”	Impossível: o combustível do reator não tem enriquecimento suficiente.
“Qualquer dose de radiação é perigosa.”	Você recebe dose natural todo dia. O que importa é a quantidade, o tempo e o tipo.

Regra prática: se a radiação não é ionizante, ela não quebra ligação química — e não mexe no seu DNA.

O DESAFIO QUE NINGUÉM RESOLVEU

O rejeito de alta atividade

- O combustível usado sai do reator com plutônio-239 dentro — **meia-vida de 24 mil anos**.
- Ele precisa ficar isolado por um tempo maior que o de qualquer civilização que já existiu.
- Hoje quase todo esse material está **estocado nas próprias usinas**, em piscinas e cofres de concreto.
- A Finlândia construiu o primeiro depósito geológico definitivo do mundo, a meio quilômetro de profundidade.

A pergunta aberta

Como avisar alguém daqui a 10 mil anos que aquele lugar é perigoso, sem saber que língua essa pessoa vai falar?

Do outro lado da balança: a nuclear não emite gases de efeito estufa na geração.

O QUE VEM POR AÍ

Três frentes em aberto

1

Reatores pequenos

Reatores modulares, fabricados em série e instalados perto de onde a energia é consumida.

2

Fusão

Combustível vindo da água, sem risco de descontrole e com rejeito muito menor. Ainda em laboratório.

3

Medicina de precisão

Moléculas que levam o núclideo direto à célula do tumor: o mesmo composto diagnostica e trata.

O fio que liga tudo: a mesma propriedade que matou Marie Curie hoje salva milhões de pessoas por ano. A diferença é conhecimento e controle.

SÍNTESE

O essencial desta aula em oito linhas

Radioatividade é propriedade do núcleo	Não depende de ligação, temperatura nem pressão.
São três emissões	α (núcleo de hélio), β (elétron) e γ (onda).
Penetração e ionização são inversas	α ioniza muito e penetra pouco; γ, o contrário.
1ª lei de Soddy	Emitiu α: A cai 4 e Z cai 2.
2ª lei de Soddy	Emitiu β: A não muda e Z sobe 1.
Toda equação conserva A e Z	As somas batem dos dois lados da seta.
Meia-vida é constante para cada núclideo	$m = m_o / 2^n$, com $n = t / P$.
O risco depende de dose, tipo e via	Fora do corpo, cuidado com γ. Dentro, com α.

“Nada na vida deve ser temido, apenas compreendido. Agora é hora de compreender mais, para temer menos.”

— atribuída a Marie Curie



Próxima aula: exercícios de fixação — equações nucleares e meia-vida.