

Unidade 3

# Energia Nuclear



**Fissão  
Fusão  
Aplicações**



Profa. Marcia Russman Gallas (FIS01184)

## ENERGIA NUCLEAR

Produção de energia



queima de combustível



**Carvão:** reação química envolvendo elétrons das últimas camadas dos átomos de carbono e oxigênio, que se reagrupam em configurações mais estáveis

Elétrons no átomo → força coulombiana  
Energia envolvida → **alguns eV**

**Urânio:** reação nuclear onde reagrupamos os núcleons de um núcleo em uma configuração mais estável

Núcleons no núcleo → interação forte  
Energia envolvida → **milhões de eV**

**CONCLUSÃO: se extrai muito mais energia de 1kg de urânio do que de 1 kg de carvão**

Profa. Marcia Russman Gallas (FIS01184)

**Mecanismo de transformação da queima do combustível (perda de massa) em energia:**



**E = Mc<sup>2</sup>**, massa se transforma em energia e vice-versa

$$Q = -\Delta mc^2 = (M_i - M_f)c^2$$

pequena perda de massa → muita energia é liberada pois  $Q \sim c^2$

**Energia Nuclear: 2 processos**

- **Fusão** – somente em testes de laboratório, por enquanto gasta-se mais (ou igual) energia para provocar fusão do que a energia gerada no processo
- **Fissão** – processo controlado – centrais nucleares

Profa. Marcia Russman Gallas (FIS01184)

**EXEMPLO:**

$$\Delta m = 0,1 \text{ mg}$$

$$Q = 1 \times 10^4 \text{ kg} \times 9 \times 10^{16} \text{ m/s} = 9 \times 10^{12} \text{ J}$$

QUANTO É ESSA ENERGIA???

Suposição: reator nuclear transforma essa massa em energia em 1 hora e toda a energia é aproveitada

$$\text{Potência} = \text{Trabalho}/\text{tempo} = \text{energia liberada}/\text{tempo}$$

$$9 \times 10^{12} / 3600 \text{ s} = 25 \text{ Megawatts}$$

Consumo padrão numa moradia: 3,3 kWh

$$0,1 \text{ mg} \rightarrow 25 \text{ MWh} \rightarrow \text{energia para } 7576 \text{ moradias}$$

Profa. Marcia Russman Gallas (FIS01184)

Tabela mostrando a quantidade de energia gerada a partir de 1 kg de matéria por vários processos, e o tempo durante o qual esta energia manteria acesa uma lâmpada de 100 W.

Forma de matéria	Processo	Tempo
Água	Queda-d'água de 50 m	5 s
Carvão	Combustão	8 h
UO <sub>2</sub> enriquecido	Fissão em um reator	690 anos
<sup>235</sup> U	Fissão total	3 x 10 <sup>4</sup> anos
Deutério	Fusão total	3 x 10 <sup>4</sup> anos
Matéria e Antimatéria	Aniquilação total	3 x 10 <sup>7</sup> anos

→ Limites reais

→ Limites teóricos

Profa. Marcia Russman Gallas (FIS01184)

## Fissão Nuclear: processo básico

**Definição:** núcleo com número de massa grande se divide em dois fragmentos de números de massa comparáveis.

- Núcleos com número de massa grande:
  - fissão espontânea (probabilidade muito pequena)
  - fissão induzida artificialmente (probabilidade bem maior)
- Indução de fissão em um núcleo:
  - excitando-o com uma energia de pelo menos 4 a 6 MeV;
  - bombardeando-o com nêutrons, desde que um desses nêutrons seja capturado e que a soma da sua energia cinética com a sua energia de ligação ao núcleo seja maior do que o limiar de energia para a fissão

Profa. Marcia Russman Gallas (FIS01184)

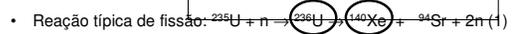
**Exemplo:**

- <sup>235</sup>U: pode sofrer fissão ao capturar um nêutron mesmo que ele tenha uma energia cinética muito baixa, da ordem de 0,025 eV (nêutron lento ou térmico)
- <sup>238</sup>U: pode sofrer fissão ao capturar um nêutron desde que ele tenha uma energia cinética grande, da ordem de 1 MeV (nêutron rápido).
- Essa diferença se deve à energia de pareamento:

<sup>235</sup>U: Z=92 e N=143 → emparelhamento do nêutron capturado com o nêutron ímpar do núcleo libera uma energia adicional de cerca de 0,57 MeV.

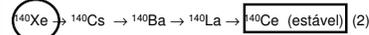
<sup>238</sup>U: Z=92 e N=146 → nêutron capturado não pode se emparelhar e, então, não existe energia de emparelhamento a ser liberada.

Profa. Marcia Russman Gallas (FIS01184)

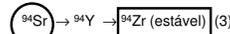


• Conservação de Z e N, portanto de A e carga total

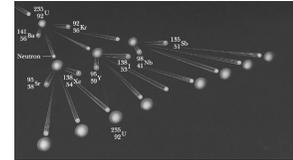
• <sup>140</sup>Xe e <sup>94</sup>Sr altamente instáveis e sofrem vários decaimentos beta (conversão de um nêutron em um próton e a emissão de um elétron e um antineutrino)



Z = 54 55 56 57 58



Z = 38 39 40



Profa. Marcia Russman Gallas (FIS01184)

• Energia de desintegração Q liberada neste processo de fissão:  
 $Q = -\Delta mc^2$   
 = energia resultante da transformação da energia de repouso em energia cinética dos produtos finais de decaimento

• Cálculo desta energia: devemos levar em conta o decaimento dos fragmentos da fissão combinando as equações (1), (2) e (3)

• Teremos portanto, no final:



$$Q = -\Delta mc^2 = -[(139,9054 \text{ u} + 93,9063 \text{ u} + 1,008 67 \text{ u}) - 235,0439 \text{ u}] c^2 =$$

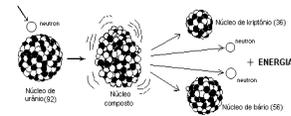
$$= -[234,82037 \text{ u} - 235,0439 \text{ u}] c^2 =$$

$$= -[-0,223 53 \text{ u}] 931,5 \text{ MeV/u} = 208 \text{ MeV}$$

• Fissão no interior de um sólido: Q assume a forma de energia cinética dos produtos de fissão aumentando a energia interna do corpo  
 → externamente resulta em aumento da temperatura

Profa. Marcia Russman Gallas (FIS01184)

### Modelo para a Fissão



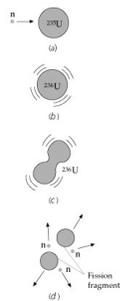
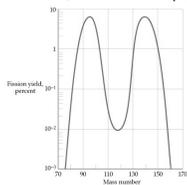
#### Modelo coletivo ou da gota líquida:

- núcleo original e o nêutron absorvido formam o núcleo composto, que já nasce num estado excitado e com a energia de excitação colocada em modos coletivos de vibração.

Profa. Marcia Russman Gallas (FIS01184)

#### Modelo coletivo ou da gota líquida:

- se a energia de excitação é suficientemente grande, numa dessas vibrações coletivas o núcleo composto pode assumir uma forma com dois blocos de núcleons separados por uma estreita ponte.
- se, entre esses blocos, a repulsão coulombiana de longo alcance entre os prótons for mais importante que a interação nuclear atrativa de curto alcance, o núcleo composto se fragmenta.



Profa. Marcia Russman G

Porque alguns núclídeos pesados como o <sup>235</sup>U e o <sup>239</sup>Pu são facilmente fissionados por nêutrons térmicos e o <sup>238</sup>U e o <sup>243</sup>Am não sofrem fissão?

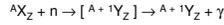
- se a energia de excitação ( $E_x$ ) é baixa, as vibrações coletivas do núcleo composto não o levam a uma forma muito diferente da sua forma quando no estado fundamental que é medido pelo parâmetro de distorção r (grau de afastamento do núcleo de sua forma esférica);

- existe uma barreira de potencial ( $E_b$ ) que só pode ser vencida se o nêutron fornecer energia suficiente para que os fragmentos possam vencer a barreira;

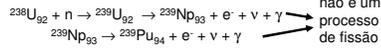
- se a energia não for suficiente, esta energia de excitação será liberada simplesmente com a emissão de radiação  $\gamma$ .

Profa. Marcia Russman Gallas (FIS01184)

- o núcleo composto passa ao seu estado fundamental e o processo como um todo não passa de uma captura radioativa de um nêutron e pode ser representado por:



- a captura de um nêutron lento pelo  ${}^{238}\text{U}$  desencadeia o seguinte processo:



- processo responsável, em certos reatores nucleares, pela produção de grandes quantidades de plutônio

-  ${}^{239}\text{Pu}$  e  ${}^{235}\text{U}$ : sofrem fissão com a captura de um nêutron lento  
 $E_n > E_b$

Profa. Marcia Russman Gallas (FIS01184)

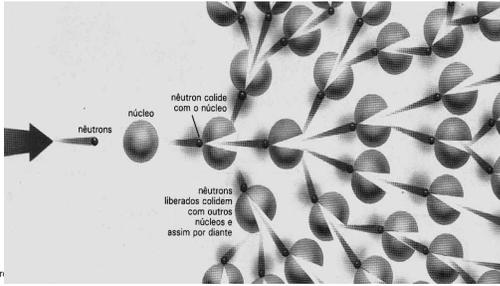
Comparação entre energia de excitação e barreira de potencial para 4 núclídeos pesados:

Núclídeo inicial	Núclídeo formado	$E_n$ (MeV)	$E_b$ (MeV)	Fissão por nêutrons térmicos ?
${}^{235}\text{U}$	${}^{236}\text{U}$	6,5	5,2	Sim
${}^{238}\text{U}$	${}^{239}\text{U}$	4,8	5,7	Não
${}^{239}\text{Pu}$	${}^{240}\text{Pu}$	6,4	4,8	Sim
${}^{243}\text{Am}$	${}^{244}\text{Am}$	5,5	5,8	Não

Profa. Marcia Russman Gallas (FIS01184)

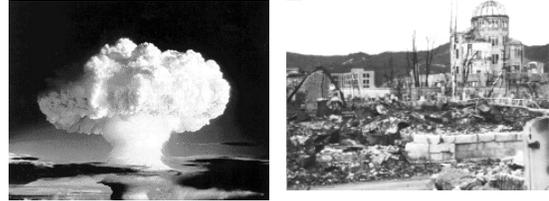
### Reação em cadeia

É um conjunto de reações de fissão nuclear que se inicia, geralmente, pelo bombardeamento com nêutrons e que continua espontaneamente pela captura de nêutrons originados de fissões anteriores.



Pn

Primeira aplicação prática da energia nuclear:  
**bomba nuclear**  
 energia liberada de forma descontrolada = 12 ktons  
 (equivalente a 12000 toneladas de dinamite)



- duas bombas nucleares usadas na Segunda Guerra Mundial continham  ${}^{235}\text{U}$  (Hiroshima) e  ${}^{239}\text{Pu}$  (Nagasaki)  
 - Energia liberada nas bombas produzidas hoje: Megatons.....

Profa. Marcia Russman Gallas (FIS01184)

- Se a massa fissionável de urânio (massa de urânio que sofre fissão) for muito pequena, os nêutrons não serão capturados por outros núcleos de urânio e a reação não terá continuidade.
- Portanto existe uma **massa crítica** que é a massa mínima da substância fissionável que possibilita a ocorrência de uma reação em cadeia.
- A velocidade de uma reação em cadeia pode ser de dois tipos:
  - **não-controlada**: ocorre muito rapidamente (em menos de 1 segundo), liberando enorme quantidade de energia → explosão da bomba nuclear
  - **controlada**: ocorre nos chamados reatores de fissão nuclear, permitindo aproveitar a energia liberada e evitar explosões.

Profa. Marcia Russman Gallas (FIS01184)

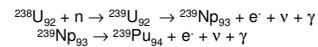
### Material fissionável: ${}^{235}\text{U}$ ou ${}^{239}\text{Pu}$

- amostra natural de urânio contém cerca de 99,3% de  ${}^{238}\text{U}$ , não fissionável, e cerca de 0,7% de  ${}^{235}\text{U}$ , fissionável.  
 ${}^{238}\text{U}$  é bom absorvedor de nêutrons produzidos na fissão do  ${}^{235}\text{U}$

→ obstáculo à reação em cadeia.

- uso efetivo do urânio como combustível nuclear requer que se retire parte do  ${}^{238}\text{U}$  das amostras de urânio natural → amostra de urânio com uma abundância maior do que cerca de 0,7% de  ${}^{235}\text{U}$  é dita enriquecida.

- usa-se urânio enriquecido com 3% de  ${}^{235}\text{U}$  → retira-se o  ${}^{238}\text{U}$  do urânio natural através da transformação deste em  ${}^{239}\text{Pu}$  e o plutônio é mais fácil de ser retirado, desta forma se aumenta a concentração de  ${}^{235}\text{U}$



Profa. Marcia Russman Gallas (FIS01184)

**Reator Nuclear:** um reator de potência operando a potência constante

**Balanco de nêutrons num reator:**

- acompanhamento de uma geração de 1000 nêutrons térmicos nas interações com o combustível  $^{235}\text{U}$ , com a matriz de  $^{238}\text{U}$  e com o moderador.

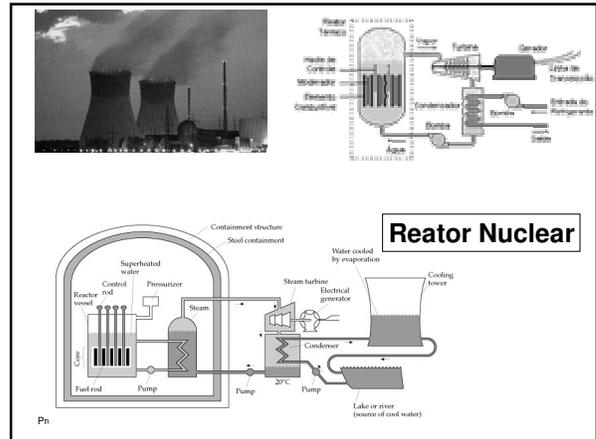
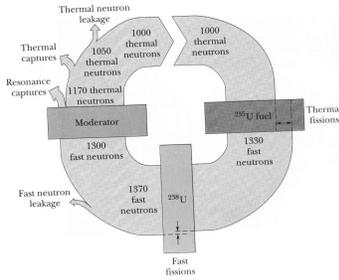
**Fator de multiplicação k:**

- razão entre o número de nêutrons presentes no início de uma certa geração e no início da geração seguinte.

$k = 1$  operação do reator é dita crítica – geração de potência em estado permanente

- reatores são projetados para  $k > 1$  – supercríticos!

Profa. Marcia Russman Gallas (FIS01184)



**Como funciona um reator de água pressurizada (PWR):**

- Água é usada como moderador e como fluido de transferência;
- Elemento combustível, na forma de pastilhas, por exemplo de  $\text{UO}_2$  introduzidas em tubos de metal (hastes) e mergulhadas no líquido moderador formando o núcleo do reator, contido num vaso de pressão
- Circuito primário: água que circula no vaso é mantida a 300 C e pressão de 150 atm;
- no gerador de vapor o calor da água no circuito primário é transferido para a água do circuito secundário que se transforma em vapor e chega na turbina que aciona o gerador elétrico;
- Para completar o circuito secundário, o vapor que sai da turbina é resfriado, condensado e bombeado de volta para o gerador de vapor
- O vaso de pressão de um reator típico que produz 1000 MW tem:
  - altura de 12 m
  - pesa 450 ton
  - circulação de água: 20 m<sup>3</sup>/s

Profa. Marcia Russman Gallas (FIS01184)

**Reator desenvolvido pelo departamento de Energia Nuclear da UFRGS**

**Reator nuclear a leito fixo: FBNR**

[http://www.rcgg.ufrgs.br/fbnr\\_por.htm](http://www.rcgg.ufrgs.br/fbnr_por.htm)

**Características do FBNR**

- está baseado na tecnologia do PWR já existente no país.
- é simples em projeto.
- é de pequeno porte.
- é modular.
- 30 MW de calor e 10MW de energia elétrica

Profa. Marcia Russman Gallas (FIS01184)

## Fusão Nuclear: processo básico

- ocorre no interior do sol, acontece quando os núcleos de dois átomos se juntam, produzindo energia nesse processo. A fusão nuclear pode produzir energia calorífica 1.750 vezes maior do que a necessária para provocá-la. E a fusão não apresenta os perigos de radiação da fissão.
- dificuldade em duplicar a fusão nuclear é construir um aparelho que possa manter um "plasma" de núcleos "fusíveis" numa área bastante pequena, em temperaturas suficientemente elevadas (cerca de 100 milhões °C) para que ocorra a fusão.

*Science* (1972): "As usinas de energia de fusão provavelmente usarão o lítio e duas formas de hidrogênio — o deutério e o trício — como combustível. A água do mar possui suficiente deutério para satisfazer as necessidades durante 3 bilhões de anos e o lítio no quilômetro superior da crosta poderia satisfazê-las por 15 milhões de anos."

Profa. Marcia Russman Gallas (FIS01184)

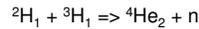
- 31.10.1952 os EUA testaram a primeira bomba de hidrogênio, conhecida como "Mike" com potência aproximada de 1.000 vezes superior à bomba de Hiroshima. O atol de Elugelab no Pacífico, sobre o qual foi detonada, desapareceu completamente numa cratera de mais de 500 m de profundidade e mais de 2 km de extensão. Nove meses depois, em agosto de 1953, a URSS testou um dispositivo similar de menor potência.



Profa. Marcia Russman Gallas (FIS01184)

## Bomba de Hidrogênio

- Na bomba de hidrogênio, um disparador de bomba atômica inicia uma reação de Fusão Nuclear (alta temperatura) num composto químico de deutério e trício, produzindo instantaneamente o Hélio-4 que por sua vez reage com o deutério.

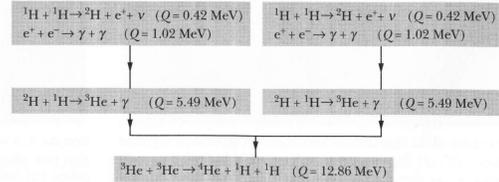
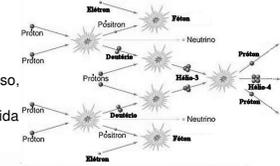


- Esta bomba é ainda envolvida por urânio natural e os nêutrons liberados na fusão causam ainda um processo de fissão nuclear no urânio, gerando muita radioatividade.
- Explosão: onda de choque → forte deslocamento de ar → vento radioativo → alta temperatura → radiação nuclear (nêutrons e radiação  $\gamma$ )

Profa. Marcia Russman Gallas (FIS01184)

## Fusão Nuclear: Sol e outras estrelas

Mecanismo próton-próton que explica a produção de energia no Sol. Neste processo, há fusão de prótons para a formação de partículas  $\alpha$  ( ${}^4\text{He}$ ), com uma liberação líquida de energia de 26,7 MeV por evento.

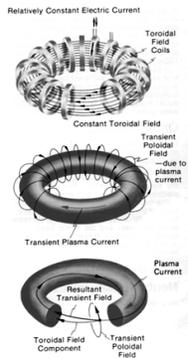


Profa. Marcia Russman Gallas (FIS01184)

## Reatores de Fusão: Tokamak

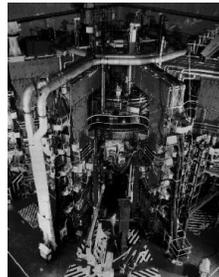
**Токамак:** do russo "тороидальная камера в магнитных катушках" (toroidal chamber in magnetic coils, tokamac).

- Os projetos de reator de fusão foram baseados em um Projeto Tokamak para o sistema de contenção magnética, o reator toroidal seria um aparelho maciço com cerca de 10 m de altura e 30 m de diâmetro. O Tokamak (Câmara Magnética Toroidal) é um potente eletroímã que através do seu campo magnético mantém a reação de fusão, sob a forma de plasma, contida em seu interior, sem tocar o material das paredes.



Profa. Marcia Russman Gallas (FIS01184)

Em 1978, a Comunidade Europeia (mais a Suécia e a Suíça) empreenderam a construção do projeto JET ("Joint European Torus") próximo de Abingdon (Reino Unido). O JET produziu o seu primeiro plasma em Junho de 1983 e realizou experiências bem sucedidas com uma mistura deutério-trítio em Novembro de 1991.



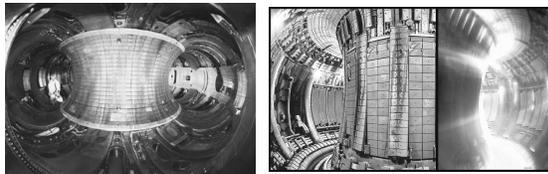
O tokamak Europeu JET é o maior e o mais importante do mundo.

- Estados Unidos, o tokamak PLT em Princeton produziu uma temperatura de plasma superior a 60 milhões de graus em 1978. Durante os anos 80, foram realizadas experiências no tokamak TFTR (reator teste para fusão em tokamak) igualmente em Princeton e em 1993 foram também efetuadas descargas com uma mistura deutério-trítio.

- Japão: experiências de ponta no tokamak JT-60 a partir de 1988, continuando atualmente na versão 'upgrade' (JT-60U).

Profa. Marcia Russman Gallas (FIS01184)

- O projeto de um reator de fusão enfrenta muitos problemas técnicos, a começar pelas enormes diferenças de temperatura e fluxo de nêutrons em distâncias muito pequenas. Temperaturas de 100 milhões  $^{\circ}\text{C}$  e fluxo de nêutrons de 1013 nêutrons/cm<sup>2</sup>/s. Mas a apenas 2 m de distância, onde estão os magnetos supercondutores, o fluxo e a temperatura devem ser quase nulos.



Profa. Marcia Russman Gallas (FIS01184)

- Nenhum reator de fusão atingiu ainda o ponto de equilíbrio em que a quantidade de energia gerada seja igual ou exceda a quantidade aplicada no reator.

- Na opinião dos técnicos o reator de fusão será a solução a longo prazo para os problemas de eliminação da poluição atômica e térmica, para obtenção de combustível mais barato e energia a baixo preço.

- Em agosto de 2001 foi noticiado que os cientistas do DIII-D (National Fusion Facility-San Diego) "estão prestes a conseguir dobrar a pressão do reator Tokamak para obter as condições necessárias para alcançar e manter uma reação de fusão nuclear".

- Outras opções de reatores de fusão: confinamento inercial (Laboratório Lawrence Livermore – máquina de fusão a laser NOVA)
  - pequena pelota de combustível é comprimida pela incidência multilateral de feixes de lasers
  - compressão da pelota e a sua temperatura se eleva e aumenta também a densidade das partículas → pode ocorrer fusão

Profa. Marcia Russman Gallas (FIS01184)

## Prêmio Nobel de Física 2008

Concedido à área de física teórica de partículas elementares e altas energias aos professores:

-Yoichiro Nambu, nascido em 1921, pela descoberta do mecanismo de quebra espontânea de simetria na física subatômica, e que desenvolveu sua carreira no Enrico Fermi Institute, University of Wisconsin, EUA.

-Toshide Maskawa, nascido em 7/2/1940, e que desenvolveu sua carreira no Yukawa Institute for Theoretical Physics, YITP, University of Kyoto, Kyoto, Japão,

e

-Makoto Kobayashi, nascido em 4/4/1944, que desenvolveu sua carreira no High Energy Accelerator Research Organization, KEK, Japão,

ambos pela descoberta da origem da quebra de simetria que prediz a existência de pelo menos tres familias de quarks na natureza.

Profa. Marcia Russman Gallas (FIS01184)

## Large Hadron Collider / Atlas Experiment

- Large Hadron Collider (LHC): túnel circular com 27 km de circunferência, construído numa profundidade em torno de 50 a 175 m, entre as fronteiras da Suíça e França, situado no Laboratório Europeu de Física de Partículas (CERN) - <http://www.cern.ch> em Genebra, Suíça.
- <http://lhc.web.cern.ch/lhc/>



Profa. Marcia Russman Gallas (FIS01184)

## Large Hadron Collider / Atlas Experiment

- ATLAS é uma experiência de física de partículas no LHC. Iniciando na primavera de 2009, ATLAS é um detector de partículas que tem como objetivo estudar os resultados de processos de colisão frontal entre feixes de prótons em altíssimas energias, e irá permitir conhecer mais sobre as forças básicas que formam nosso universo desde o começo dos tempos! Entender sobre a origem da massa, outras dimensões do espaço, buracos negros microscópicos, etc.
- <http://www.atlas.ch/index.html>
- <http://www.atlas.ch/etours.html>
- **Mecanismo e partícula de Higgs**  
([http://www.atlas.ch/etours\\_physics/physics-10.html](http://www.atlas.ch/etours_physics/physics-10.html))
- **Filme sobre a partícula de Higgs**  
(<http://angelsanddemons.cern.ch/video/higgs-boson>)

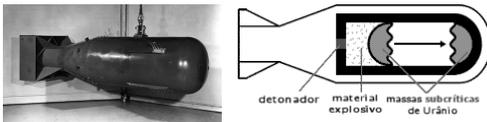
Profa. Marcia Russman Gallas (FIS01184)

### Um pouco de história:

- dia 16 de julho de 1945, no estado do Novo México nos EUA, a primeira bomba atômica da história, conhecida como "Gadget", foi detonada. J. R. Oppenheimer foi o responsável por convidar um grupo de cientistas americanos, junto com alguns refugiados europeus, para Los Alamos, e dirigir o projeto.
- Esta bomba era composta de duas pequenas bolas de plutônio, recobertas por níquel e em cujo centro estava um núcleo de berílio e urânio. A explosão experimental, chamada "Trinity", foi produzida pela união das duas bolas por explosivos convencionais ("implosão") e aconteceu no meio do deserto do Novo México, acerca de 100 km da cidade de Alamogordo, região habitada apenas por formigas, aranhas, cobras e escorpiões.

Extraído de *Quim. Nova*, Vol. XY, No. 00, 1-x, 200\_  
MARCOS DA HISTÓRIA DA RADIOATIVIDADE E TENDÊNCIAS ATUAIS  
Xavier et al; publicado na web em 30/8/06  
Profa. Marcia Russman Gallas (FIS01184)

- Na manhã de 6 de agosto de 1945, em Hiroshima, Japão, um avião americano B-29, chamado Enola Gay, soltou uma bomba atômica denominada "Little Boy", que detonou 580 m acima do centro da cidade.



- A bomba tinha 3,2 m de comprimento, 74 cm de diâmetro, pesava 4,3 t e tinha uma potência equivalente a 12,5 mil t de TNT, provido de uma bala de 2,26 kg de  $^{235}\text{U}$ , disparada em um alvo de 7,71 kg de  $^{235}\text{U}$ . Quando as duas peças se encontram, ocorre uma reação em cadeia.
- Como resultado do ataque, pela liberação intensa de calor e ocorrência de incêndios, a cidade de Hiroshima foi destruída e 90 mil pessoas morreram naquele mesmo dia.

Profa. Marcia Russman Gallas (FIS01184)



Três dias após destruir Hiroshima, outro avião B-29 atacou a cidade de Nagasaki. A bomba utilizada, chamada de "Fat Man", consistia de dois hemisférios de plutônio unidos por explosivos convencionais, tinha 3,25 m de comprimento e 1,52 m de diâmetro, pesava 4,5 t e tinha uma potência equivalente a 22 mil t de TNT. O ataque resultou em mortes imediatas de 40 mil pessoas. As conseqüências não foram maiores porque o terreno montanhoso protegeu o centro da cidade. Os estragos materiais foram menos arrebatadores que em Hiroshima, mas, 12 h depois, era visível o fogo em Nagasaki, a mais de 320 km de distância.

Profa. Marcia Russman Gallas (FIS01184)



## Nagasaki

Antes



Depois

Até o final de 1945, 145 mil pessoas tinham morrido em Hiroshima e 75 mil em Nagasaki. Milhares de pessoas sofreram ferimentos sérios. Devido aos efeitos da radiação, várias mortes ocorreram nos anos seguintes, e causaram também nascimentos de bebês com má formação genética. A maioria das vítimas afetadas pelas bombas atômicas de Hiroshima e Nagasaki era civil, sendo que aquelas que estavam mais próximas do epicentro das explosões foram incineradas, enquanto que as mais distantes receberam a radiação em altas doses, o que provocou mortes dolorosas. Mesmo hoje, mais de seis décadas após o ataque com bombas nucleares, os sobreviventes ainda sofrem com as lembranças dos ataques.