V ESCOLA AVANÇADA DE ENERGIA NUCLEAR
Teoria e aplicações das ciências nucleares
Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN-CNEN/SP
São Paulo, 25 a 30 de junho de 2012

FN13 – Física de nêutrons

Prof. Dr. Odair Lelis Gonçalez
Prof. Dr. Claudio Antonio Federico
Divisão de Física Aplicada do Instituto de Estudos Avançados - IEAv
Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial – DCTA
São José dos Campos, SP
E-mail: odairl@ieav.cta.br
claudiofederico@ieav.cta.br

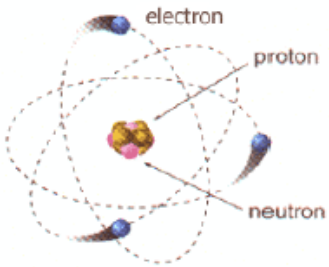
SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO
2 A DESCOBERTA DO NÊUTRON E A FISSÃO NUCLEAR
3 FONTES DE NÊUTRONS
4 INTERAÇÃO DE NÊUTRONS COM A MATÉRIA
5 PROCESSOS FÍSICOS ENVOLVIDOS NA DETEÇÃO DO NÊUTRON
6 NÊUTRONS PRODUZIDOS PELA RADIAÇÃO CÓSMICA

BIBLIOGRAFIA

1. ZAMBONI, C. B. (coord.). *Fundamentos da Física de Nêutrons*. São Paulo: Livraria Editora da Física, 2007
2. Seara da Ciência. *A Descoberta do Nêutron.* Apostilas eletrônicas da Dona Fifi. Disponível em http://www.seara.ufc.br/ . Acesso 29 jun 2008
3. BRAZ JÚNIOR, D. *Tópicos de Física Moderna*. Campinas: Editora Companhia da Escola, 2002.
4. KNOLL, G. F. *Radiation Detection and Measurement*. 2nd ed. N.York: John Wiley & Sons inc., 1989
5. FEDERICO, C. A.; O. L. GONÇALEZ, CALDAS, L. V. E.; BRUK, L. *Estudo da Dose Devida à Radiação Cósmica no Espaço Aéreo Brasileiro*. Trabalho apresentado no VIII SITRAER/II RIDITA. São Paulo, 3-6 novembro (2009).
6. FEDERICO, C. A.; GONÇALEZ, O. L.; CALDAS, L. V. E.; FONSECA, E. S.; MARTIN, I. M. *Medidas de Nêutrons Produzidos na Atmosfera pela Radiação Cósmica na Região da Anomalia Magnética do Atlântico Sul*. Caderno de Atividades de P&D do IEAv. São José dos Campos: Instituto de Estudos Avançados, 2009.

1 INTRODUÇÃO



O nêutron é uma partícula fundamental constituinte do núcleo atômico e, dentro do núcleo é estável, podendo existir por um tempo infinitamente longo.

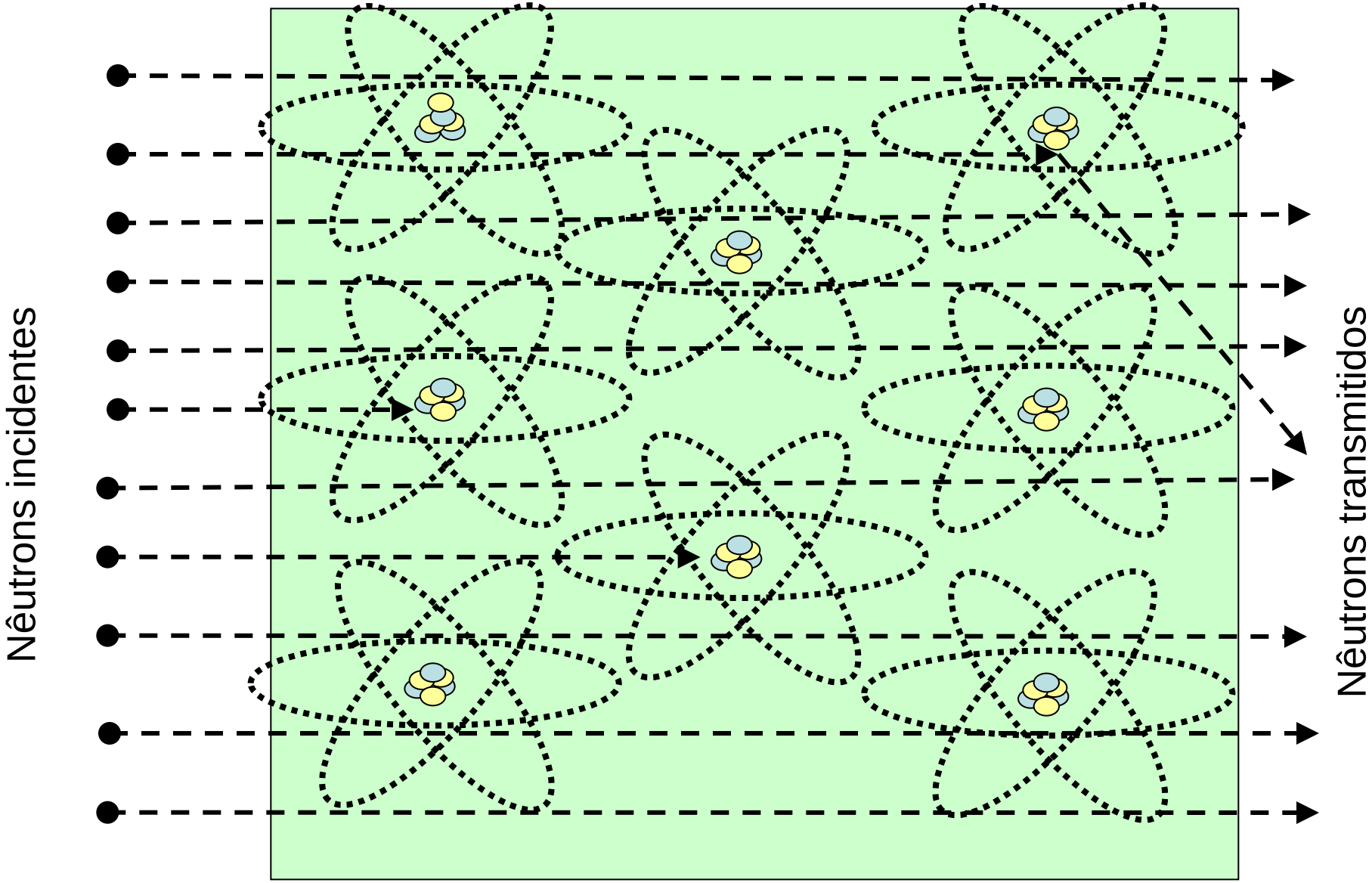
Fora do núcleo tem uma meia vida de 10,235(23) minutos decaindo segundo a seguinte equação de transmutação:

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

Sua massa é ligeiramente maior que a do próton e tem o valor de 1,008664904(14) u.m.a., ou, expresso em energia equivalente, a massa é de 939,56563(MeV). Uma u.m.a. equivale a 1/12 da massa do ^{12}C e o valor equivalente em energia provém da equação de Einstein: $E = mc^2$.

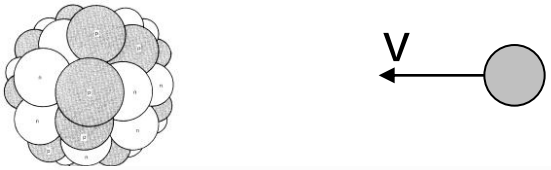
O nêutron não possui carga elétrica e, portanto, praticamente não sofre nenhuma força por campos elétricos. Entretanto possui spin igual a ½ e momento de dipolo magnético igual a $-1{,}913\mu_n$., onde μ_n é o magneton de nuclear:

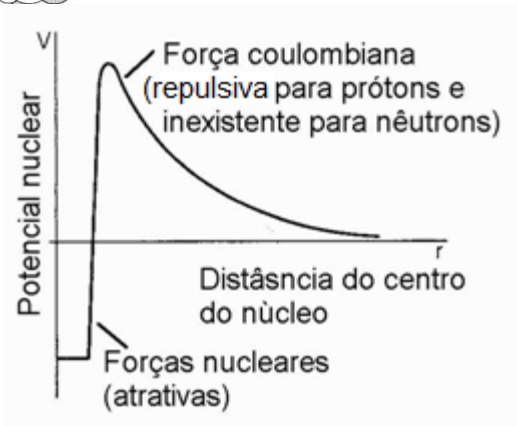
$$ \mu_n = \frac{e\hbar}{2m_p} = 0{,}505 \times 10^{-26} A.m^2 $$

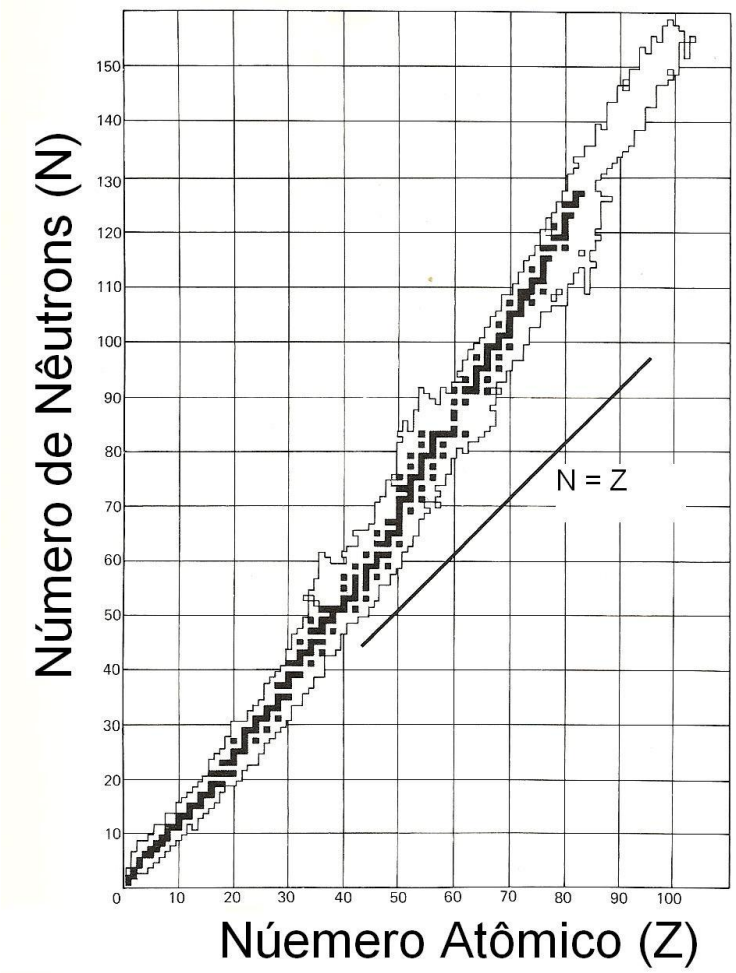


Nêutrons incidentes num material (Ex: ^{6}Li)

No núcleo, como a interação nuclear forte é de natureza atrativa, o nêutron atua como um “elemento de ligação” que contrabalança a repulsão mútua entre os prótons no núcleo atômico. Assim podemos dizer que o nêutron é o responsável pela estabilidade do núcleo atômico.







Lembrando as forças fundamentais:

a) **Interação gravitacional: atrativa, de longo alcance e diminui com o inverso do quadrado da distância;**
b) **Interação eletromagnética: atrativa ou repulsiva, de longo alcance e diminui com o inverso do quadrado da distância;**
c) **Interação forte (nuclear forte ou hadrônica): atrativa e de curto alcance (< 10^{-15}m) e está associada a troca de pions; e**
d) **Interação fraca (nuclear fraca ou miônica): atrativa e de curto alcance (<10^{-18}m) e atua sobre quarks e léptons.**

2 A DESCOBERTA DO NÊUTRON E AS CONSEQÜÊNCIAS PARA A FÍSICA

2.1 Antecedentes

O resgate da teoria atômica começou com o químico inglês **John Dalton** (1766-1844), que, no inicio do século XIX, estudando resultados de experiências não somente suas, mas também de outros colegas, teve a feliz idéia de resgatar os conceitos de Leucipo e Demócrito (Grécia antiga) e formulou três postulados:

I - A matéria é constituída por partículas extremamente pequenas, os átomos, que não se subdividem e preservam sua individualidade nas transformações químicas.

II - Átomos idênticos constituem um mesmo elemento químico, de tal forma que cada elemento se caracteriza pelo peso de seu átomo.

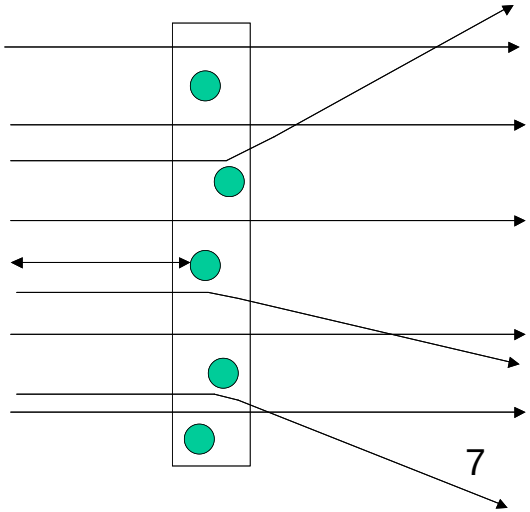
III - Os compostos químicos são formados pela união de átomos de diferentes elementos, em proporções numéricas simples e determinadas.

Perto do final do século XIX, o inglês **William Crookes** (1832-1919) inventou uma ampola que permitiu realizar descargas elétricas através do ar a baixa pressão em seu interior (ar rarefeito). Em 1897, o inglês **Joseph John Thomson** (l856-1940), usando uma ampola de Crookes modificada, realizou uma experiência que lhe permitiu concluir que as cargas elétricas atraídas pelo pólo positivo estão concentradas em pequenas partículas, que ficaram depois conhecidas por **elétrons**.

Além disso, **Thomson** foi o primeiro a propor um modelo atômico que levava em consideração as cargas (positivas e negativas). De acordo com sua concepção, o átomo seria constituído por uma quantidade de cargas positivas homogeneamente distribuídas numa esfera, com elétrons (negativos) recheando seu interior. Para maior clareza, comparou sua idéia a um pudim que estivesse recheado de passas. É por isso que o modelo atômico de **Thomson** é conhecido como o modelo do **pudim de passas.**

De 1907 a 1911, o físico neozelandês **Ernest Rutherford** (1871-1937), ex-assistente de **J. J. Thomson** na Universidade de Cambridge, realizou na Universidade de Manchester uma série de experiências que contribuíram, definitivamente, para entender o átomo tal como se conhece hoje.

Usando uma fonte que emite partículas alfa (partículas que possuem carga elétrica positiva), **Rutherford** fez com que elas incidissem sobre uma finíssima lâmina da ouro. Verificou que três coisas aconteciam: **muitas partículas passavam direto através da lâmina, outras poucas eram desviadas e algumas eram rebatidas para trás.**



A partir do observado, **Rutherford** concluiu que o átomo possui um núcleo muito pequeno e compacto, onde se concentram cargas elétricas positivas. Ao redor desse núcleo, circulam os elétrons que possuem cargas elétricas negativas. É importante destacar que o número de prótons e elétrons precisa ficar empatado para que o átomo esteja no estado neutro, também conhecido como estado fundamental. **Além disso, concluiu que o núcleo é muito pequeno e que as órbitas descritas pelos elétrons são tão grandes, em comparação com o núcleo e, conseqüentemente, que o átomo é praticamente vazio.**

O modelo de **Rutherford** fez com que a humanidade adentrasse o século XX com uma idéia bastante realista da estrutura atômica. A exemplo do que acontece com os planetas ao redor do Sol, **Rutherford** imaginou que os elétrons gravitassem em torno do núcleo em órbitas circulares.

Só que essa hipótese contrariava uma lei clássica da física. De acordo com as leis de Maxwell para o eletromagnetismo, se o elétron se movimentasse em torno do núcleo, ele estaria constantemente irradiando luz, o que o levaria a perder sua energia e colidir com o núcleo.

Em 1913, o físico dinamarquês **Niels Bohr** (1885-1962) resolveu o impasse, propondo uma reformulação no modelo de **Ruthertord**. A partir de experiências realizadas com hidrogênio, **Bohr** supôs que os elétrons giram em torno do núcleo em órbitas definidas e que as leis da física clássica não se aplicam aos átomos.

Depois de 1913, o modelo planetário resultante dos estudos de Rutherford e Bohr se consolidou, e, embora se conheça muito mais atualmente a respeito da estrutura atômica, ele não foi abandonado porque ajuda a compreender mais facilmente os fatos.

Rutherford achava que os núcleos deveriam conter, além dos prótons eletricamente positivos, partículas neutras que seriam uma combinação de prótons e elétrons. **Chadwick** se empenhou na busca por essas partículas até que, em 1932, com uma série de experiências muito bem elaboradas, achou o que procurava. Com sua modéstia e timidez características, publicou um artigo de meia página na revista Nature intitulado ***"Possível existência de um nêutron"***. Esse pequeno artigo rendeu-lhe o prêmio Nobel de Física de 1935, mesmo ano em que os Joliot-Curie ganharam o prêmio de Química.

Vamos ver a sucessão de fatos que levaram à descoberta do nêutron.

2.2 A Experiência de Chadwick

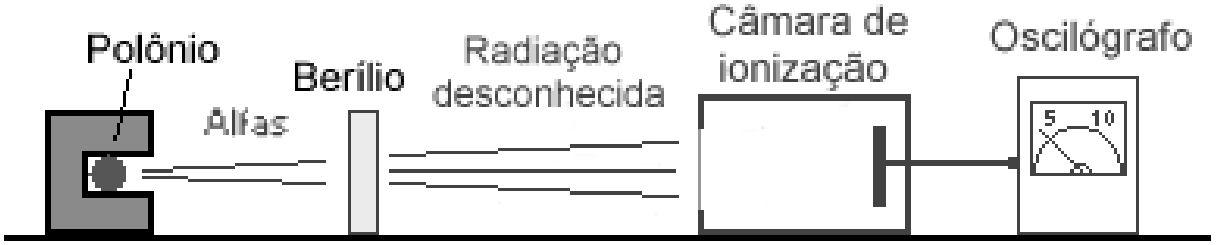
A sucessão de idas e vindas que culminou com a descoberta do nêutron começou em 1928 com algumas experiências dos alemães **Walter Bothe** e seu aluno **Herbert Becker**. Eles usavam uma amostra radioativa que produzia partículas alfa. **Bothe** e **Becker** usavam as alfas para "irradiar" uma amostra de berílio, metal branco, leve e muito tóxico. Notaram, então, que o "bombardeio" das partículas alfas produzia um novo tipo de radiação a partir do berílio. Logo, verificaram que essa radiação era eletricamente neutra, isto é, não se desviava na presença de cargas elétricas ou ímãs. Equivocadamente, concluíram que essa radiação deveria ser de raios gama.

Frederico e Irene Joliot-Curie leram o artigo dos alemães e resolveram reproduzir a experiência. Eles dispunham de fontes mais intensas de partículas alfa, as amostras de polônio purificadas pela mãe de Irene, **Maria Curie**. Nesse reprodução da experiência, observaram também o surgimento de uma radiação neutra partindo do berílio

Assim mesmo, foram mais adiante e, por alguma razão, resolveram usar essa radiação neutra para bombardear uma placa de parafina. O arranjo da experiência era mais ou menos o seguinte:

Com esse arranjo observaram que a radiação neutra desconhecida (que julgavam ser raios gama) arrancava prótons da parafina. Prótons, cargas positivas, são fáceis de serem identificados. A velocidade média com que os prótons deixavam a parafina era cerca de $3{,}3 \times 10^7$ m/s. Concluíram, erroneamente, que os prótons eram ejetados por espalhamento Compton, a exemplo do que já se havia observado para elétrons.

Chadwick, em 1932, reproduziu as experiências de **Bothe** e dos **Joliot-Curie**, usando uma câmara de ionização para medir esta radiação:



A fonte radioativa de polônio emite partículas alfa que incidem sobre um disco de berílio. O berílio bombardeado pelas alfas produz uma radiação neutra desconhecida. Para descobrir a natureza dessa radiação, Chadwick captou-a em uma câmara de ionização. Como o nome indica, a passagem da radiação pela câmara ioniza átomos de um gás que serão, então, capturados por uma placa metálica eletricamente carregada. Desse modo, pulsos corrente saem da placa e produzem deflexões no ponteiro de um oscilógrafo. Chadwick observou que, colocando a fonte de radiação bem junto do detetor, já surgiam 4 deflexões por minuto no oscilógrafo.

Essa contagem se mantinha mesmo quando uma chapa de chumbo com 2 centímetros de espessura era colocada entre o berílio e o detetor, demonstrando que a radiação desconhecida era bastante penetrante.

A seguir, observou que, colocando uma placa de parafina entre o berílio e o detector, as contagens no oscilógrafo aumentavam para cerca de 10 por minuto.

Isso indicava claramente que a radiação desconhecida induzia a produção de outro tipo de radiação a partir da parafina. Alguns testes simples logo mostraram que essa nova radiação era formada de prótons. **Chadwick** conseguiu medir a energia desses prótons e logo ficou claro que eles não poderiam ser produzidos por raios gama. Uma comparação elementar utilizando a conservação da energia em um choque frontal entre partículas mostrou que uma radiação gama não seria capaz de arrancar prótons da parafina com a energia observada.

Foi então que **Chadwick** supôs que a radiação fosse composta de partículas neutras com peso semelhante ao peso do próton. Levando em conta essa hipótese, **Chadwick** usou a radiação neutra do berílio para bombardear vários gases diferentes. Desse modo, medindo a energia de recuo dos átomos desses gases após serem atingidos pela radiação neutra, conseguiu calcular a massa das partículas neutras. Obteve um valor um pouco maior que a massa do próton, como era de se esperar. Com sua modéstia e timidez características, publicou um artigo de meia página na revista Nature intitulado "*Possível existência de um nêutron*". Esse pequeno artigo rendeu-lhe o prêmio Nobel de Física de 1935, mesmo ano em que os Joliot-Curie ganharam o prêmio de Química.

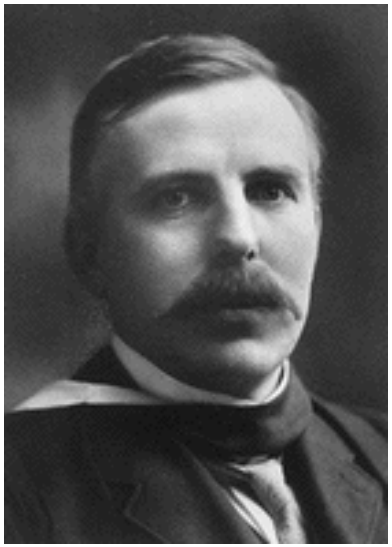
2.3 As personagens da história da descoberta do nêutron

Walter Bothe

Produziu uma radiação neutra bombardeando berílio com partículas alfa. concluiu que esta radiação neutra se tratava de gamas

Irene Joliot-Curie e Frederico Joliot-Curie

Bombardearam parafina com a partícula neutra. Obtiveram prótons. Mas concluíram que eram produzidos por espalhamento Compton



Ernest Rutherford.

Com a experiência de espalhamento de partículas alfa em folhas de ouro, concluiu pelo modelo planetário do átomo. Sugeriu a existência de uma partícula neutra no núcleo

James Chadwick

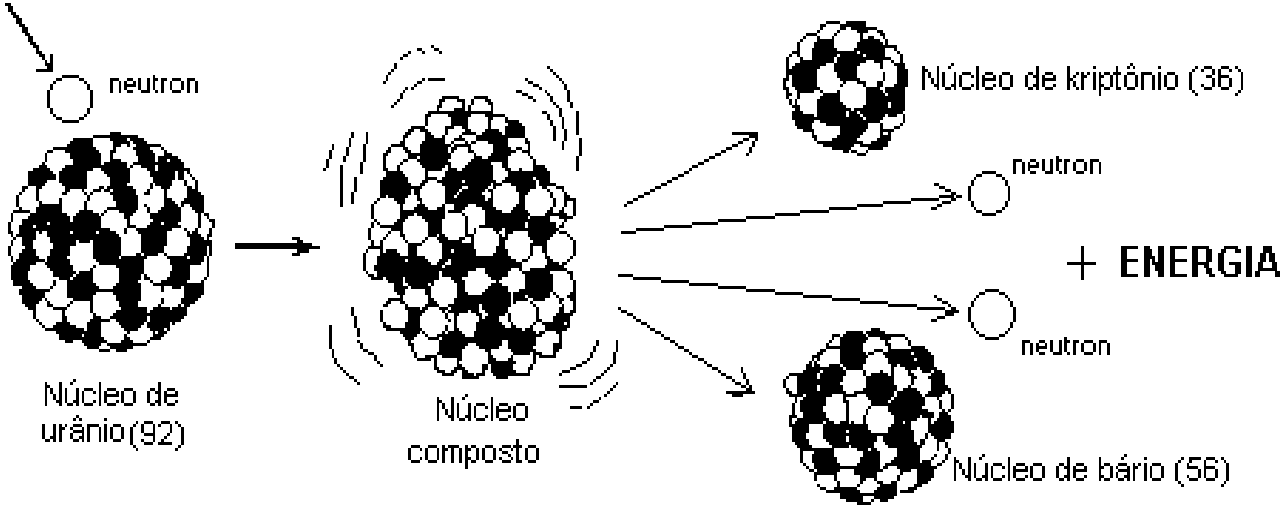
Repetiu os experimentos e Bothe e dos Juliot-Curie, usando uma câmara de ionização. Mediu a energia dos prótons. Concluiu a existência do nêutron considerando um choque elástico

2.4 O nêutron e a fissão nuclear

A seguir, desde 1934, **Enrico Fermi** e seus ajudantes, na Itália, começaram a bombardear com nêutrons tudo que era núcleo existente, começando pelo núcleo do hidrogênio e seguindo adiante na tabela periódica de Mendeleyev. Já a partir do flúor (Z=9), começaram a surgir novos isótopos radioativos. Ao chegarem aos elementos pesados, como o urânio (Z=238), os italianos pensaram que estavam criando novos elementos artificiais, os *transurânicos*, com peso ainda maior.

Acontece que **Fermi**, ao bombardear núcleos, descobriu que nêutrons de baixa velocidade (os chamados "nêutrons térmicos") penetram com mais eficiência no núcleo que nêutrons rápidos. A partir dessa observação, ele sempre fazia seu feixe de nêutrons passar por um "moderador", antes de usá-los para bombardear amostras.

Em 1935, **Otto Hahn, Lise Meitner e Fritz Strassmann**, em Berlim, resolveram repetir essas experiências que Fermi fazia na Itália.
Ao bombardearem o urânio com nêutrons lentos observaram o aparecimento de espécies de massa muito menor, como por exemplo, o bário. **Logo, desconfiaram que a única explicação era admitir que o núcleo de urânio estava se partindo em pedaços, por exemplo, um deles sendo um núcleo de bário.**



Cálculos realizados por **Lise Meitner,** com base no modelo da gota líquida de Bohr e usando a fórmula de massa de von Weizsacker (1935), indicaram que, neste processo, haveria uma enorme liberação de energia. Logo despertou-se o interesse militar na confecção de uma bomba de grande potência. Assim, a fissão nuclear passou a ser considerada estratégica e houveram grandes investimentos na produção de reatores e armas nucleares.

Em 1945, Otto Hahn, recebeu o prêmio Nobel, pela descoberta e explicação do fenômeno da fissão nuclear.

A contribuição de Lise Meitner na época foi omitida pois não seria aceito pelo nazismo na Alemanha o trabalho de Otto Hahn tendo a colaboração de uma cientista de origem judaica.

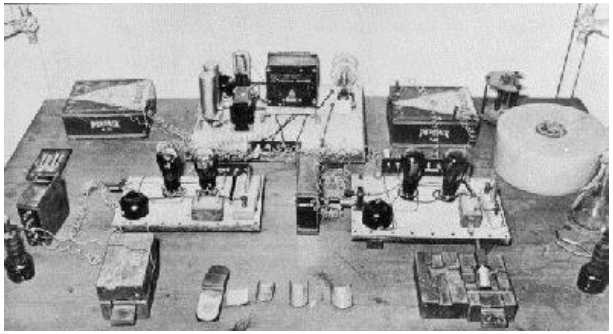
2.5 Alguns personagens da história da fissão nuclear

Enrico Fermi

Lise Meitner e Otto Hahn

E. Fermi no laboratório

L. Meitner e O. Hahn no laboratório



A bancada de trabalho de Lise Meitner

3 FONTES DE NÊUTRONS

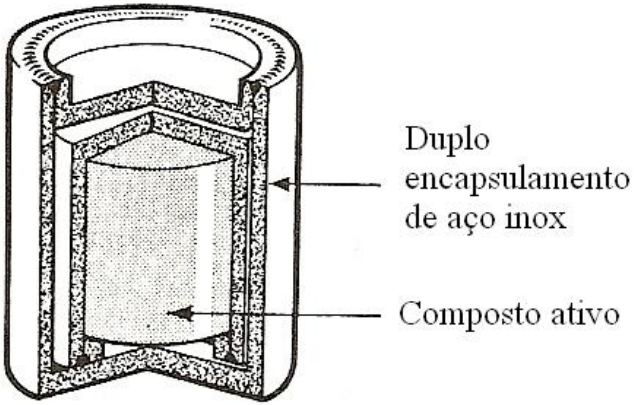
Nêutrons não são emitidos espontaneamente por nuclídeos radioativos, salvo pouquíssimas exceções de meia vida muito curta, que não são práticos de serem usados. Além disso, por não possuírem carga elétrica, não podem ser acelerados como elétrons, prótons, alfas e demais íons em aceleradores de partículas. Neste caso, recorre-se a reações nucleares nas quais nêutrons são emitidos como produto de reação. São os principais tipos:

a) Fontes compostas (α,n): Mistura-se um emissor alfa com um material específico,que, bombardeado por partículas alfa, emite um nêutron;
b) Fontes (γ,n): Gamas emitidos por um radioisótopo com energia conveniente incidem num material específico, que, bombardeado por gamas emite um nêutron;
c) Fontes de fissão espontânea: Seleciona-se um material pesado produzido num reator atômico que sofre fissão espontânea, sendo que no processo de fissão, há a emissão de 2 a 3 nêutrons por fissão;
d) Aceleradores de partículas: utiliza-se um alvo conversor, no qual a partícula acelerada provoca uma reação onde é emitido o nêutron; e
e) Reatores nucleares: Pode-se “extrair” feixes de nêutrons por meio de canais apontados para o núcleo de um reator, ou, ainda, irradiar uma amostra com nêutrons posicionando-a junto ao núcleo do reator.

Fontes compostas (α,n):

Alguns elementos leves como o ^{9}Be, ^{10}B, ^{11}B, ^{19}F, ^{7}Li, ^{13}C emitem um nêutron quando atingidos por partículas alfa de isótopos como: ^{210}Po, ^{226}Ra, ^{239}Pu, ^{241}Am, ^{242}Cm

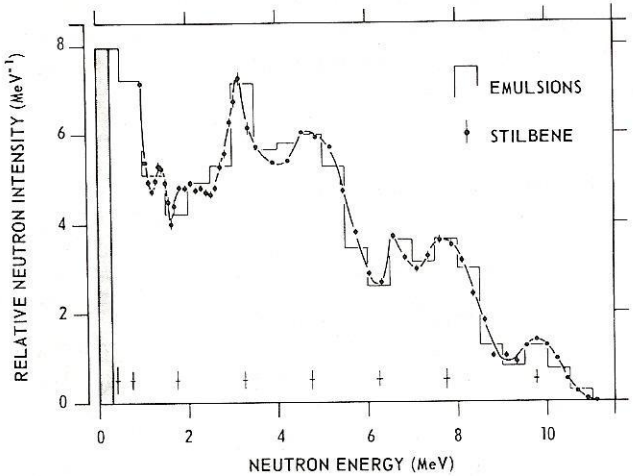
Fonte	E_α (MeV)	$T_{1/2}$	*Produção* (n/α)
$^{210}Po + Be$	5,30	138,4 dias	$0,7 \times 10^{-4}$
$^{226}Ra + Be$	4,78; 4,59	$1,622 \times 10^{3}$ anos	$1,8 \times 10^{-4}$
$^{239}Pu + Be$	5,15	$2,44 \times 10^{4}$ anos	$0,6 \times 10^{-4}$
$^{241}Am + Be$	5,48	$4,60 \times 10^{2}$ anos	$0,7 \times 10^{-4}$
$^{242}Cm + Be$	6,11	163 dias	$1,1 \times 10^{-4}$
$^{241}Am + B$	5,48	$2,44 \times 10^{4}$ anos	$1,0 \times 10^{-5}$
$^{241}Am + F$	5,48	$2,44 \times 10^{4}$ anos	$4,0 \times 10^{-6}$



Forma de uma fonte composta (α,n):

A emissão de nêutrons deste tipo de fonte é isotrópica. Assim, o fluxo de nêutrons em qualquer direção, numa data distância "d" da fonte é:

$$\phi = \frac{Q}{4\pi d^2} \quad \text{sendo} \quad Q = A.f_\alpha.\varepsilon_{\alpha,n}$$



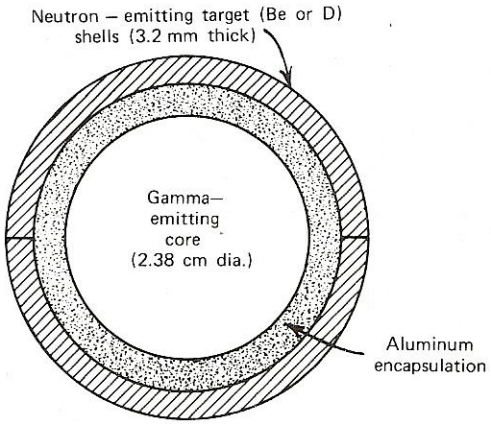
Espectro em energia de uma fonte de nêutrons de Pu-Be

Onde ϕ é o fluxo de nêutrons ($n.cm^{-2}.s^{-1}$), ***Q*** é a taxa de emissão de nêutrons (n/s) e ***d*** é a distância (cm), A(Ba) é a atividade da fonte, f_α é a fração de decaimento por emissão de alfas e $\varepsilon_{\alpha,n}$ é a eficiência da reação.

$$\phi = \int_0^\infty \phi_{dif}(E)dE$$

Fontes (γ,n):

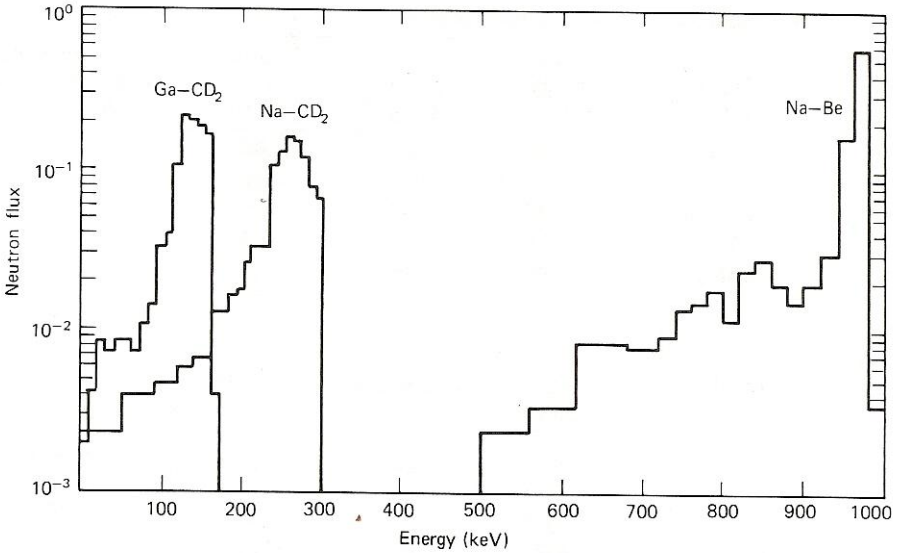
As reações fotonucleares **^{9}Be (γ,n)^{8}Be** e **^{2}H (γ,n)^{1}H** têm baixos limiares de reação de modo que radiação gama de alguns radioisótopos pode promover tais reações. Estas fontes produzem nêutrons com energia abaixo de 1MeV (vide espectros na figura).



Vista superior de uma fonte (γ,n): cilíndrica

Emissor gama	Meia vida	Energia do gama (MeV)	Alvo	Rendimento em (n/s) por Bq da fonte gama
^{24}Na	15,0h	2,7541	Be	3,4 x 10^{-5}
^{24}Na	15,0h	2,7541	D	3,3 x 10^{-5}
^{72}Ga	14,1h	1,8611	Be	0,649 x 10^{-5}
		2,2016		
		2,5077		
^{72}Ga	14,1h	2,5077	D	0,25 x 10^{-5}
^{124}Sb	60,2d	1,691	Be	0,25 x 10^{-5}

Obs.: A fonte Sb-Be emite nêutrons de 25KeV



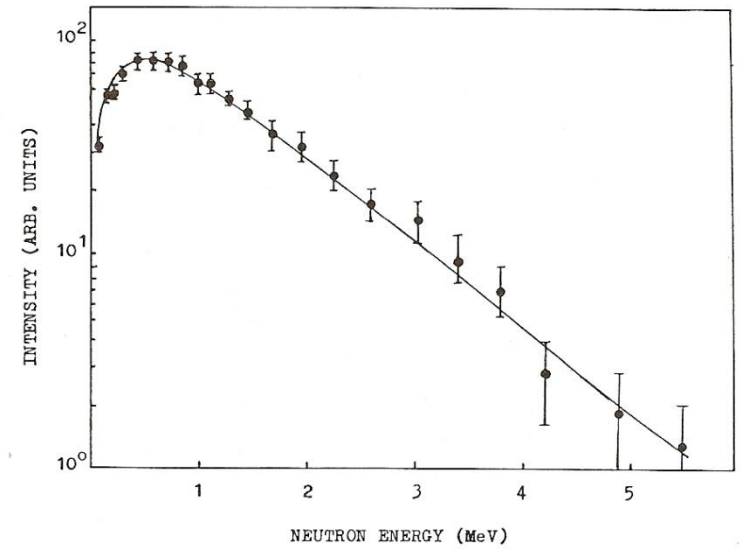
Espectro de energia de algumas fontes (γ,n):

A emissão de nêutrons deste tipo de fonte é aproximadamente isotrópica. Assim, o fluxo de nêutrons em qualquer direção, numa data distância “d” da fonte pode ser calculado pela mesma expressão dada para as fontes (α,n).

Fissão expontânea

Numa fissão de um elemento pesado são emitidos de 2 a 3 nêutrons por fissão. A fonte mais comumente usada é o ^{252}Cf, que decai por fissão espontânea (3,09%) e por emissão alfa (96,91%), com uma meia vida de 2,65anos.

A produção de nêutrons é 0,116 n/s por Bq de ^{252}Cf. Isto significa que pode-se, por exemplo, obter produção de $2{,}30\times10^{6}$n/s por apenas 1 micrograma de ^{252}Cf



Espectro em energia dos nêutrons emitidos por uma fonte de 252Cf.

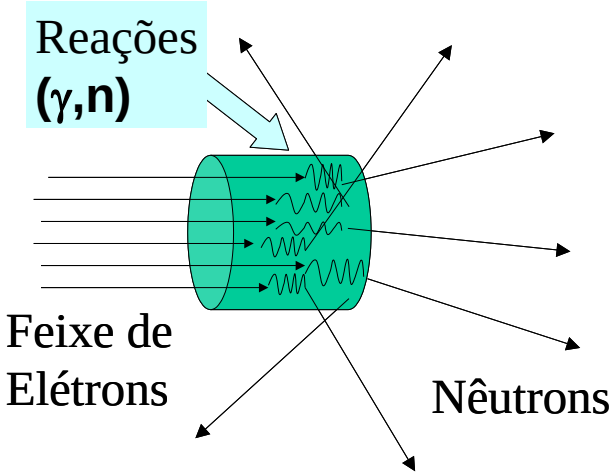
O espectro em energia (figura ao lado) apresenta o máximo na região entre 0,5 e 1 MeV e se estende até 8 a 10 MeV. Este espectro é descrito pela função:

$$\varphi(E) = E^{1/2} e^{-E/T}$$

Onde o parâmetro T é a temperatura nuclear, cujo valor, para esta fonte é 1,3MeV

Aceleradores de partículas

a) **Aceleradores de elétrons**: Quando um feixe de elétrons de alta energia atinge um alvo de alto número atômico, os elétrons ao serem freados pelos átomos do alvo emitem uma radiação de freamento ("bremsstrahlung") cuja energia se estende até a energia do elétron do feixe. Esta radiação provoca reações (γ,n) no próprio material do alvo. Os nêutrons produzidos são emitidos isotropicamente e têm um espectro parecido com o de fissão, com energia média entre 1 e 2 MeV



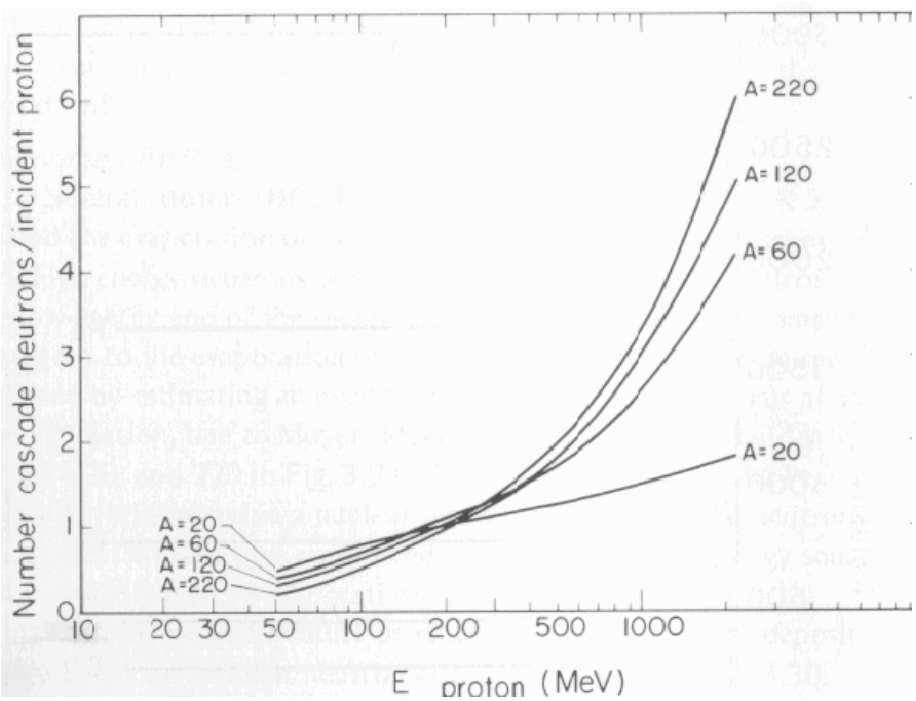
Produção de nêutrons de evaporação num alvo atingido por um feixe de elétrons de alta energia (E>10MeV). Desde que alguns destes aceleradores trabalham em regime pulsado, são gerados pulsos muito intensos de nêutrons

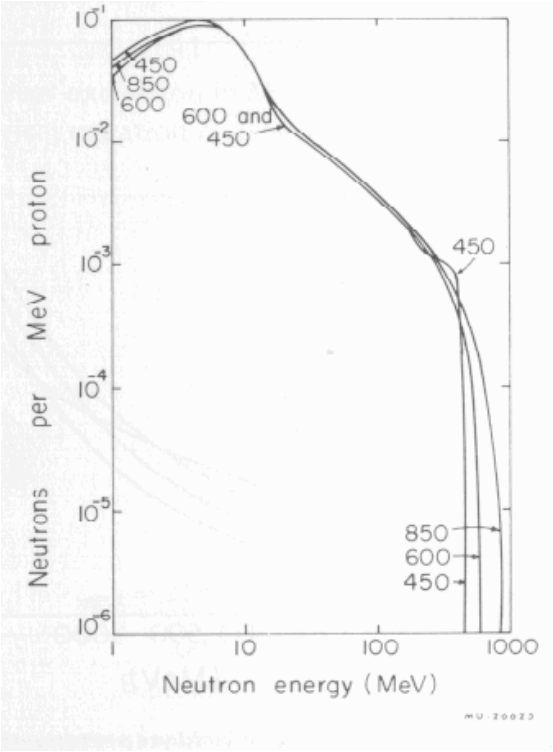
b) **Aceleradores eletrostáticos**: dêuterons acelerados promovem reações do tipo **^{2}H(d,n)^{3}He** ou **^{3}H(d,n)^{4}He** se forem usados alvos de deutério ou tritio. A energia destes nêutrons é de 2,5 e14,2 MeV para os alvos de deutério (d = ^{2}H) ou trítio (t = ^{3}H) respectivamente. Os alvos são finas camadas de deutério ou tritio depositado em uma base metálica. A partir de um feixe de dêuterons de 300keV estas reações já são possíveis. A emissão de nêutrons depende da corrente do acelerador e pode chegar até 10^{10-22} n/s

c) Outros aceleradores de partículas

Diversas reações produzidas por feixes de partículas carregadas produzidas em aceleradores podem ser utilizadas para a geração de nêutrons. Neste caso, conhecendo-se o mecanismo de reação e aplicando-se leis de conservação de momento, a energia do nêutrons emitido em cada direção é bem determinada. Esta é uma forma de produção de feixes mono energéticos de nêutrons.

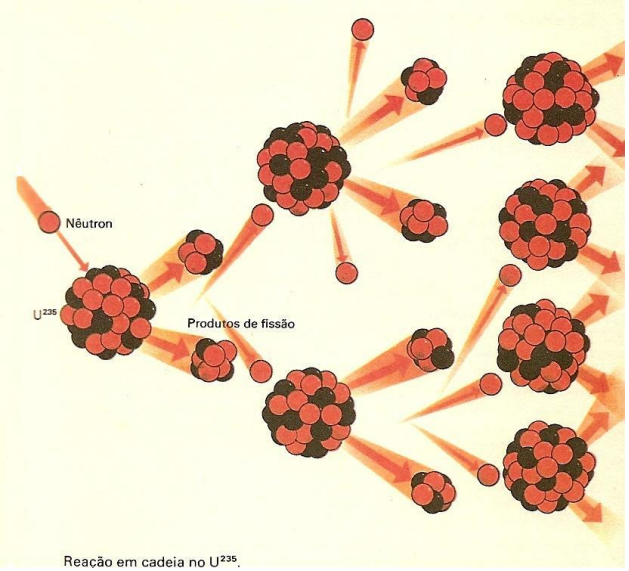
Nêutrons de alta energia podem ser produzidos a partir de aceleradores de alta energia.





Reatores nucleares

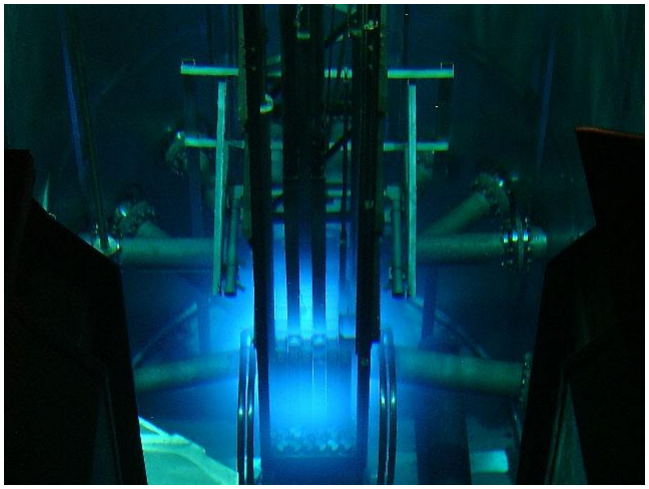
Num reator nuclear ocorre uma reação nuclear em cadeia controlada, de modo que a taxa de reação é mantida constante. A fissão do ^{235}U ocorre após a captura de um nêutron térmico. Na fissão , além dos fragmentos de fissão e da liberação de grande quantidade de energia (~200MeV), há a emissão de 2 ou 3 nêutrons rápidos. Estes nêutrons perdem sua energia no moderador e quando térmicos podem ser absorvidos pelo urânio e provocar nova fissão. E assim por diante... (vide figura)



Reação em cadeia

A população de nêutrons é mantida constante por meio das barras de controle, que são materiais absorvedores de nêutrons, de modo que a reação em cadeia se é mantida em uma taxa desejada.

No reator IEA-R1 são conseguidos fluxos da ordem de 10^{13} n/cm^2.s. Ainda, feixes de nêutrons podem ser obtidos através de canais radiais (ou tubos guia) apontados para o núcleo do reator.



Vista (por cima) do reator IEA-R1

Num reator temos nêutrons térmicos, epitérmicos (que estão sendo termalizados) e rápidos, que são produzidos nas fissões. Na figura da direita é apresentado o espectro de nêutrons no reator IPEN/MB-01

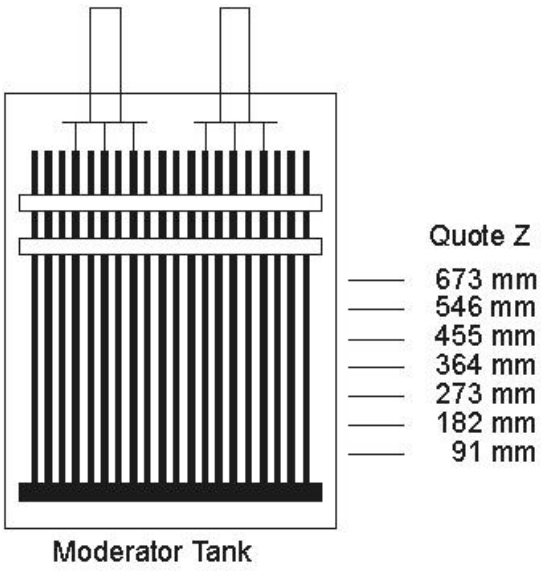
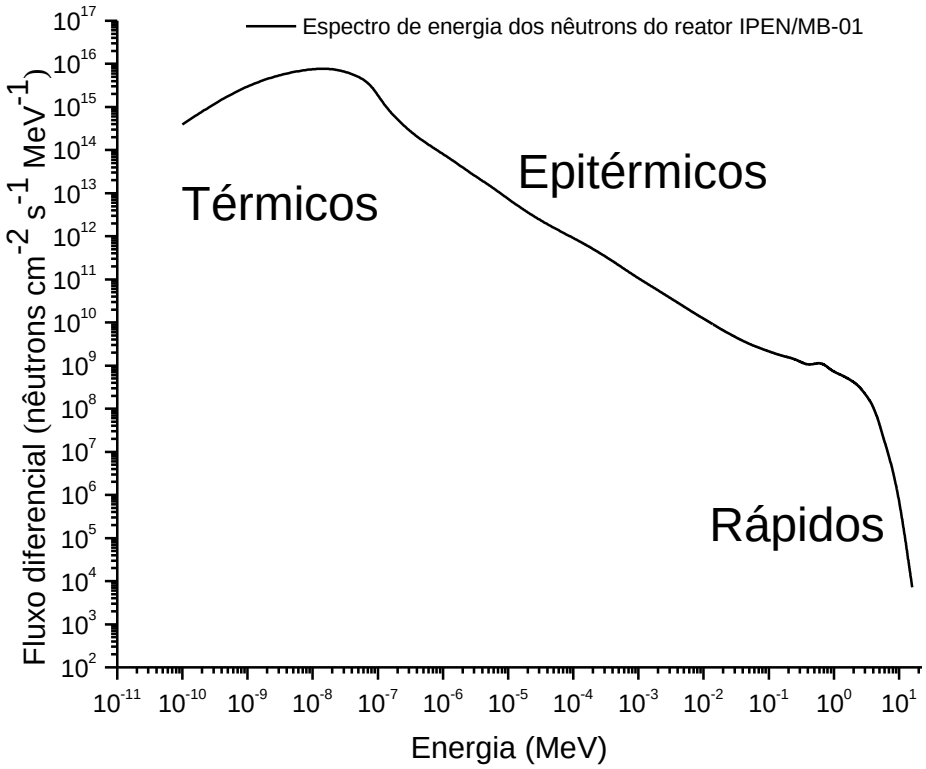


Ilustração da altura ativa do núcleo do reator IPEN/MB-01



Espectro de energia dos nêutrons do reator IPEN/MB-01

Dá um tempo !! Vai assistir um filme !!

4 INTERAÇÃO DE NÊUTRONS COM A MATÉRIA

Por não possuir carga elétrica a interação do nêutron livre com o campo elétrico dos átomos (tanto dos elétrons quanto dos prótons) é desprezível. Sendo assim, a interação do nêutron com o meio material se dá essencialmente pela interação direta com os núcleos dos átomos constituintes do meio. Pela inexistência de repulsão coulombiana, como ocorre com prótons e alfas, nêutrons de baixa energia se aproximam e penetram no núcleo, iniciando reações nucleares.

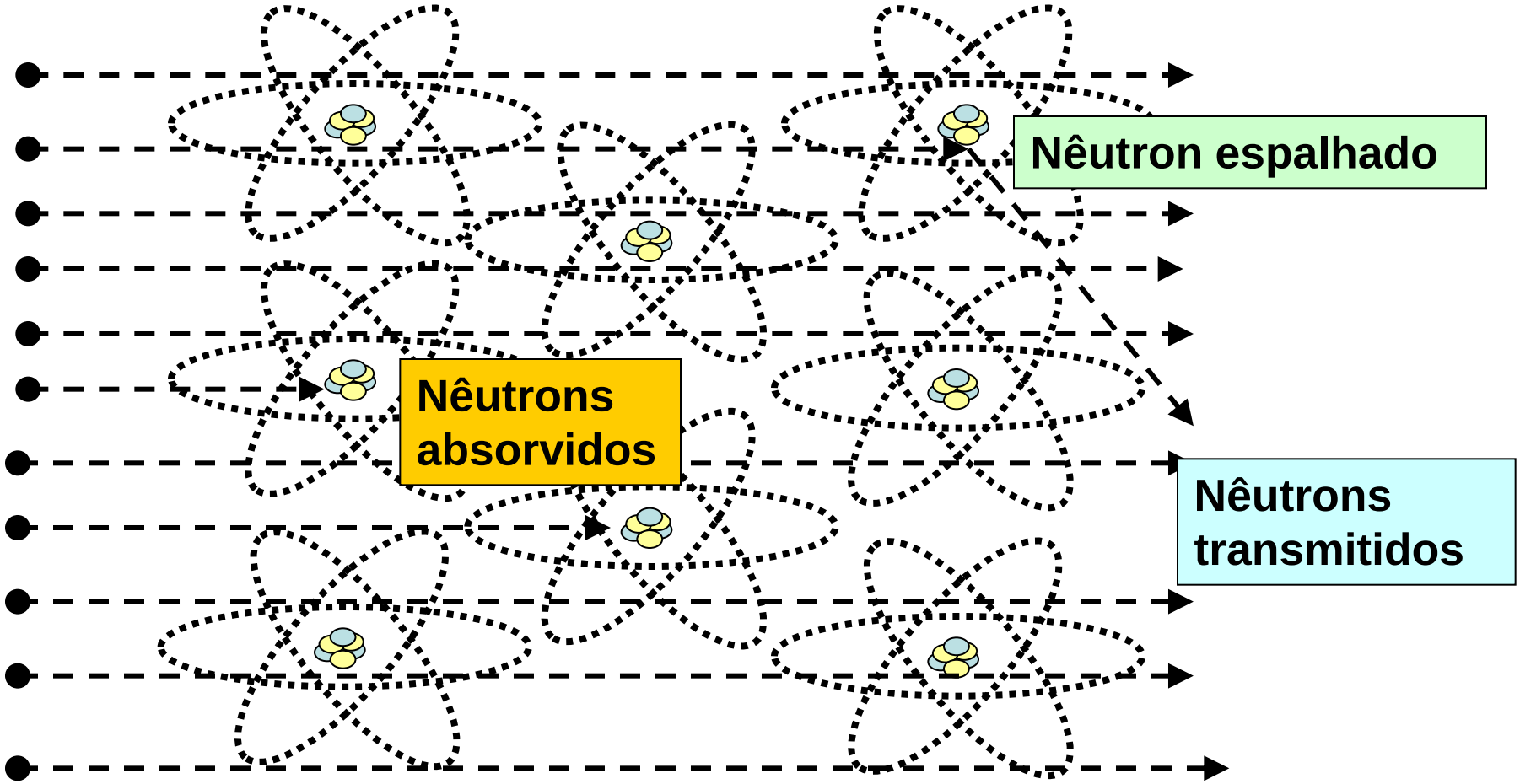
No meio material o nêutron livre segue uma trajetória retilínea em movimento uniforme até colidir com um núcleo e interagir com o mesmo.

Podemos dividir a interação do nêutron com o núcleo da seguinte forma:

a) **Espalhamento: elástico e inelástico;**
b) **Absorção: captura radioativa, reação e fissão.**

No espalhamento o nêutron interage com o núcleo, mas continua livre, modificando, entretanto a sua velocidade (energia) e direção da trajetória. Se o espalhamento for **elástico**, na colisão com o núcleo estacionário, o nêutron transfere parte de sua energia cinética para o núcleo, como no choque de duas bolas de bilhar, sendo que o núcleo adquire uma velocidade de recuo. No espalhamento **inelástico** parte da energia do nêutron é transferida para excitação do núcleo.

No meio material o nêutron livre segue uma trajetória retilínea em movimento uniforme até colidir com um núcleo e interagir com o mesmo



O nêutron é absorvido pelo núcleo porque ocorre uma interação nuclear

Na **absorção** o nêutron deixa de ser livre e forma com o núcleo um sistema composto, podendo ocorrer três tipos de **reação nuclear**:

a) **A captura radioativa**: que é uma reação do tipo $^{A}X(n,\gamma)^{A+1}X$, sendo que, em geral, o isótopo do elemento X é formado no estado excitado e desexcita-se pela emissão de radiação gama. Daí o nome de captura radioativa. Esta reação é muito provável para nêutrons de baixa energia (térmicos) e é o principal mecanismo de produção de radioisótopos em reatores, pois o radioisótopo formado é, em geral, um emissor beta menos. Na captura do nêutron há a emissão de gamas prontos ou gamas de captura.

b) **A reação** ocorre quando há a emissão de partículas do núcleo, havendo uma mudança da estrutura do núcleo atingido pelo nêutron. Exemplos: (n,p); (n,n'p); (n,α); (n,2n), etc. Estas reações apresentam um limiar.

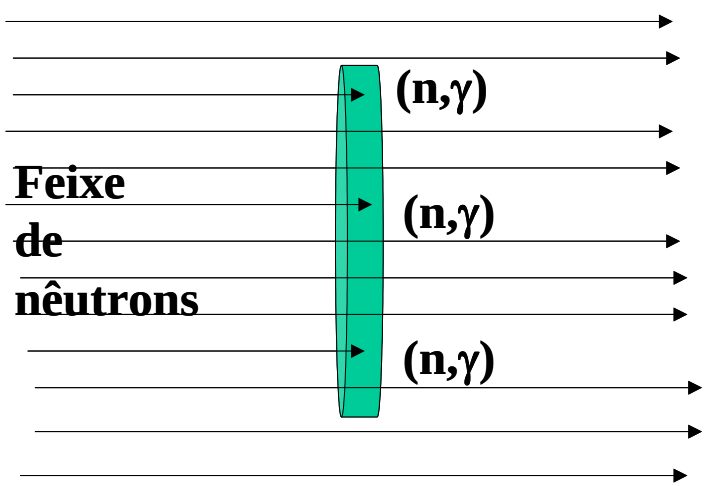
c) **Fissão**: este tipo especial de reação ocorre quando o nuclídeo formado pela absorção do nêutron apresenta grande instabilidade de massa e fissiona-se em dois fragmentos menores. No caso do 235U a maior probabilidade de fissão se dá para a absorção de nêutrons de baixíssima energia (nêutrons térmicos):

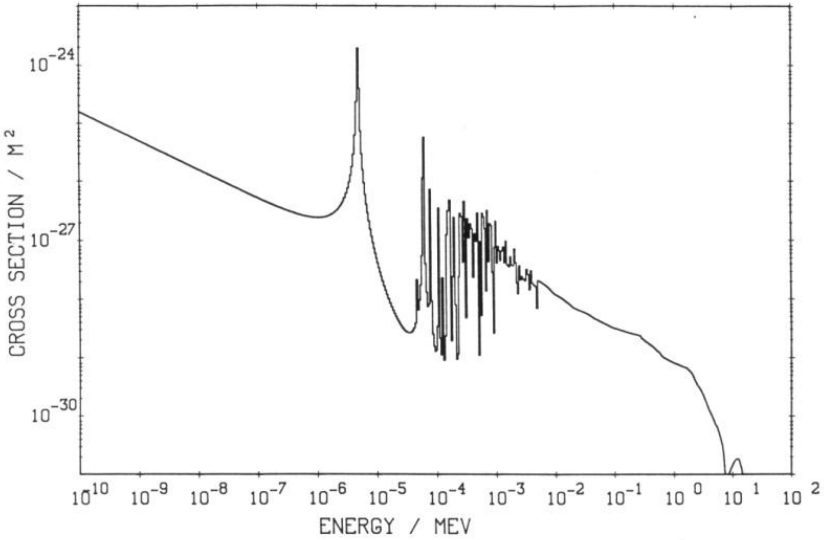
$$n + {}^{235}U \rightarrow {}^{236}U^{*} \rightarrow {}^{A_1}X^{*} + {}^{A_2}Y^{*} + 2n + 200MeV$$

Interação ou processo nuclear: Para expressar a probabilidade de ocorrência de uma reação nuclear utiliza-se o conceito de secção de choque. Para isso supõe-se um fluxo incidente de nêutrons ϕ (n/cm^2.s) sobre uma lâmina muito fina de um dado material de espessura Δx totalmente imersa neste fluxo. A taxa de reação será dada pela taxa com que nêutrons são removidos do feixe. Esta taxa é dada por:

$$R = \sigma N \phi \quad \Rightarrow \quad \sigma = \frac{R}{N\phi}$$

onde N é o número de núcleos alvo e σ é a seção de choque. Uma simples análise dimensional mostra que a unidade de medida da seção de choque é cm^2. Para maior conveniência usa-se a unidade barn, onde 1b=10^{-24}cm^2





Seção de choque de captura de 197Au

As probabilidades de interações de nêutrons com núcleos do meio são governadas pelas seções de choque, as quais, por sua vez, variam de acordo com a energia do nêutron. Por conveniência, agrupam-se os nêutrons em tres faixas de energia, a saber:

a) Nêutrons térmicos[1]: Energia menor que 0,25eV
b) Nêutrons epitérmicos e intermediários: entre 0,25eV e 100keV
c) Nêutrons rápidos:Energia maior que 100keV

Os nêutrons térmicos estão em equilíbrio térmico com o meio, isto é, a sua energia segue a distribuição de Maxwell-Boltzmann. A energia média dos nêutrons é dada por 3KT/2 = 0,025eV. A reação predominante é a captura radioativa. A secção de choque de captura radioativa é alta e cai linearmente com 1/v

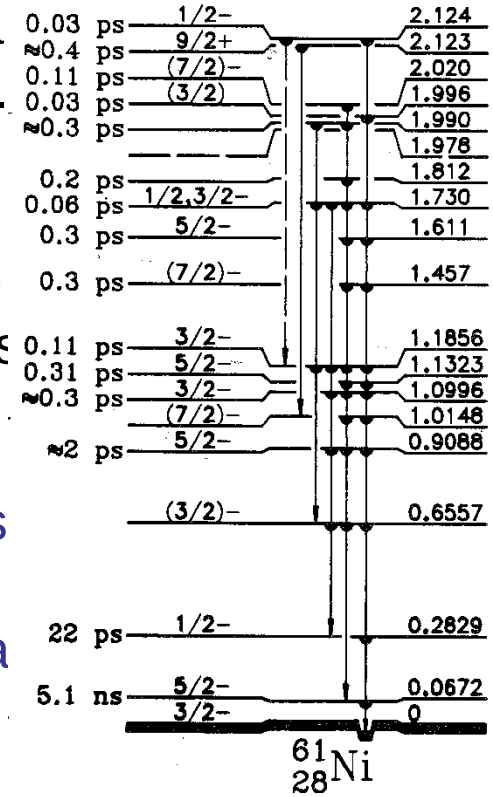
Os nêutrons epitérmicos e intermediários estão em processo de termalização, que se dá através de colisões com os núcleos do meio. Nesta região de energia são importantes as ressonâncias na seção de choque de captura (ver figura da secção de choque do ouro na transparência anterior. O espectro segue aproximadamente uma distribuição 1/E

[1] **Esta divisão é arbitrária e leva em conta a seção de choque do Cd usado como filtro de nêutrons**

Os nêutrons rápidos, ao colidirem com os núcleos do meio em que estão se propagando, podem sofrer **espalhamento elástico, inelástico ou uma reação nuclear**. A probabilidade de reação é baixa (baixa secção de choque), entretanto, há reações com baixas energias limiares.

No caso de **reação**, os produtos de reação irão ionizar o meio e o núcleo residual poderá ser instável (radioativo). O núcleo residual, se radioativo, decairá segundo a sua meia vida. Exemplo a reação:
$^{32}S(n,p)^{32}P$ com limiar de 1,0 MeV, sendo ^{32}P emissor β^- com $T_{1/2}$ = 14,3d

Nas colisões **elásticas e inelásticas** o nêutron perderá parte de sua energia e se desviará da trajetória original. A quantidade de energia perdida em cada colisão dependerá da massa do núcleo alvo e do ângulo de espalhamento. Neste processo, se não sofrer reação, o nêutron irá perdendo a sua energia através de inúmeras colisões até atingir a faixa térmica.



Na colisão **inelástica** o nêutron excitará graus internos de liberdade do núcleo alvo (ver figura ao lado) que, prontamente, emitirá raios gama de desexcitação. Esta radiação gama se propagará e ionizará o meio.

4 PROCESSOS FÍSICOS ENVOLVIDOS NA DETEÇÃO DO NÊUTRON

A **detecção** de nêutrons significa determinar a quantidade de nêutrons presentes num fluxo e a **espectrometria** significa medir a sua energia, ou melhor, determinar a distribuição em energia deste fluxo de nêutron ou o seu espectro (distribuição de partículas segundo a sua energia).

Via de regra, um detector de partículas ou radiação baseia-se na medida da ionização do meio causado pela partícula ou radiação. O nêutron, não possuindo carga elétrica, não é capaz de ionizar diretamente o meio. Neste caso são necessários materiais conversores, com os quais, o nêutron reagindo, produz uma partícula carregada que ionizará o meio detector.

O conversor deverá possuir alta seção de choque de reação com nêutrons.

Os principais conversores são: ^{3}He (gás), ^{6}Li(sólido); materiais físseis (^{235}U, ^{238}U, ^{239}Pu); ^{10}B (gasoso ou sólido), ^{1}H (em compostos sólidos, líquidos ou gasosos).

^{3}He: reação (n,p) com seção de choque de 5330b para nêutrons térmicos

$$^{3}He + ^{1}n \rightarrow ^{3}H + ^{1}H + 0{,}764 MeV$$

$$E_p = 0{,}573 MeV \quad \text{e} \quad E_t = 0{,}191 MeV$$

^{6}Li: reação (n,α) com seção de choque de 94b para nêutrons térmicos

$$^{6}Li + ^{1}n \rightarrow ^{3}H + ^{4}He + 4{,}78 MeV$$

$$E_t = 2{,}73 MeV \quad \text{e} \quad E_\alpha = 2{,}05 MeV$$

^{10}B: reação (n,α) com seção de choque de 3840b para nêutrons térmicos e integral de ressonância (nêutrons epitérmicos) de 1720b

$$^{10}B + ^{1}n \rightarrow ^{7}Li + ^{4}He + 2{,}792 MeV \ (6\%)$$

$$^{10}B + ^{1}n \rightarrow ^{7}Li^{*} + ^{4}He + 2{,}310 MeV \ (94\%)$$

$$E_{^{7}Li^{*}} = 0{,}840 MeV \ \text{e} \ E_\alpha = 1{,}47 MeV \ \ (94\%)$$

O lítio excitado decai rapidamente com a emissão de um gama de 482keV

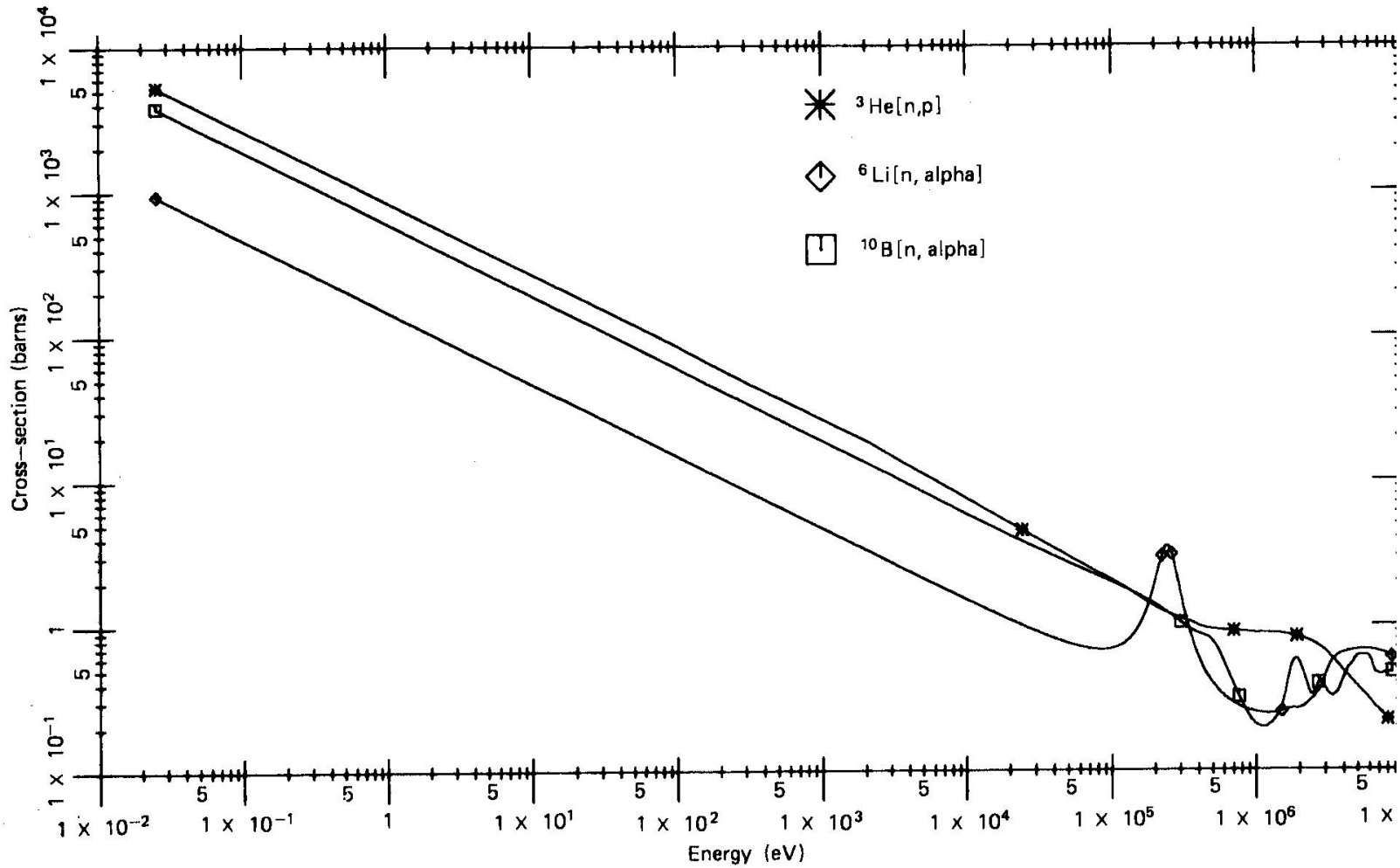
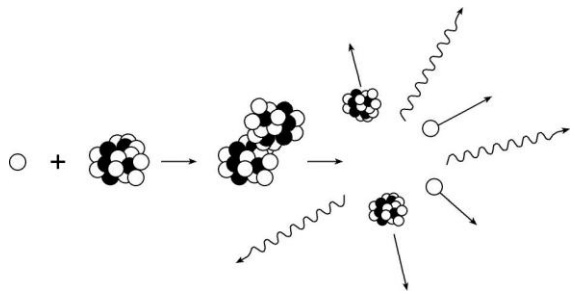
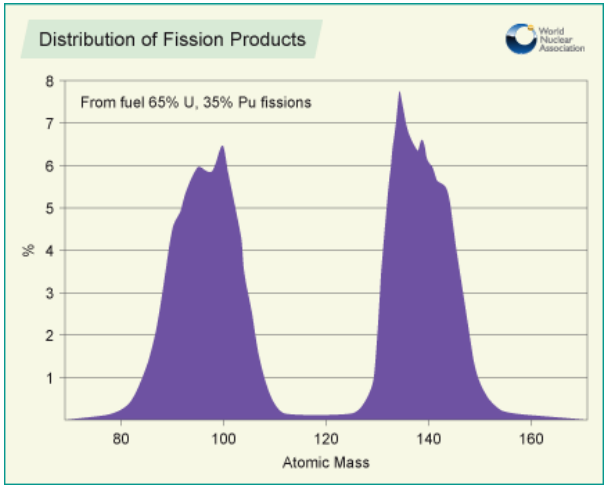


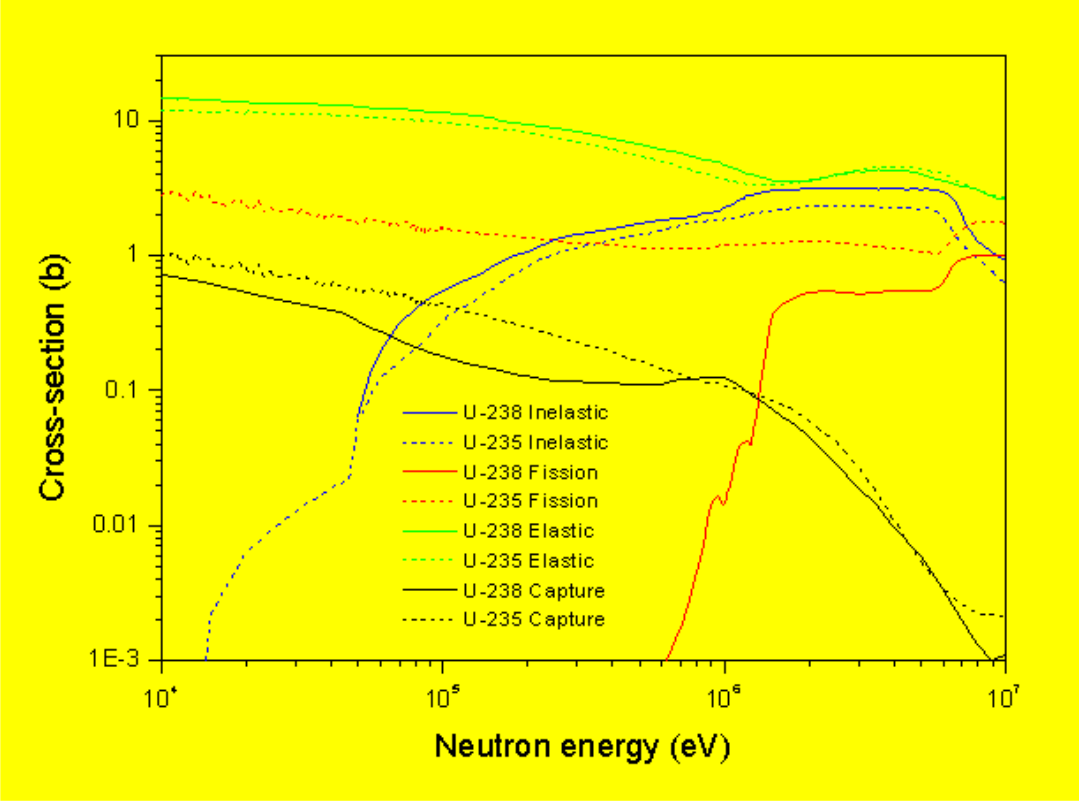
Figure 14-1 Cross section versus neutron energy for some reactions of interest in neutron detection.

Fissão: Há a liberação de dois fragmentos de fissão com alta energia (≈200MeV ao todo) que são fortemente ionizantes. Os fragmentos de fissão podem então ser detectados por meio de câmaras de ionização ou contadores proporcionais.

O ^{235}U tem alta seção de choque para nêutrons térmicos, o ^{238}U se fissiona com nêutrons rápidos e o ^{239}Pu é sensível a nêutrons térmicos e rápidos.







^{1}H: espalhamento elástico p(n,n)p com seção de choque entre 30 e 10b desde a faixa térmica até 500keV e caindo monotonicamente a 1b em 10MeV.

No espalhamento elástico de nêutrons por qualquer núcleo o nêutron perde energia transferindo-a ao núcleo que estava em repouso. O núcleo espalhador (que pode ser um próton), após a colisão, com a energia transferida na colisão com o nêutron, se moverá e ionizará o meio onde está.

Aplicando-se as leis da conservação da energia total e do momento em uma colisão elástica, a energia de recuo do núcleo espalhado de massa A é:

$$E_R = \frac{4A}{(1+A)^2}(\cos^2\theta)E_n$$

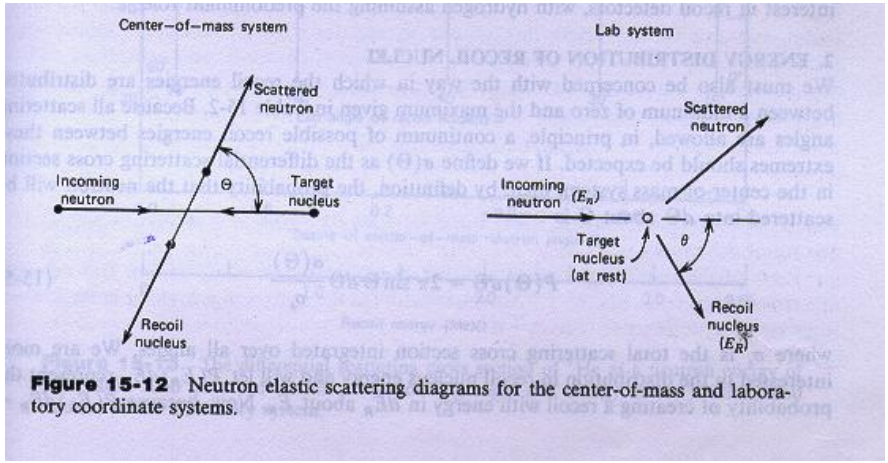


Figure 15-12 Neutron elastic scattering diagrams for the center-of-mass and laboratory coordinate systems.

onde θ é ângulo de espalhamento. A máxima transferência de energia ocorre numa colisão frontal (θ=180°):

$$E_R^{máx} = \frac{4A}{(1+A)^2}E_n$$

No caso do próton A=1 observa-se que o nêutron pode perder toda a sua energia numa única colisão frontal!

Alvo	Número de massa	Fração máxima de energia transferida (E_R/E_n)	Número médio de colisões para termalizar nêutrons de 2MeV
Hidrogênio	1	1	18,2
Deutério	2	0,989	25,1
Hélio	4	0,64	43
Lítio	7	0,4375	68
Berílio	9	0,36	87
Carbono	12	0,284	115
Oxigênio	16	0,221	152
Urânio	238	0,01667	2172

5 MEDIDA DO ESPECTRO DE NÊUTRONS

5.1 Tempo de vôo

Detecta-se o nêutron numa certa distância (L) da fonte e sabendo-se o tempo (t) que o nêutron levou para percorrer esta distância a sua energia (E) é:

$$E = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}m\left(\frac{L}{t}\right)^2$$

Na prática gera-se um pulso de nêutrons de modo que o tempo de vôo é contado a partir do pulso. Em reatores utiliza-se o “chopper” (que é um obturador giratório e em aceleradores lineares de elétrons o feixe de elétrons que atinge o alvo gerador de nêutrons é pulsado.

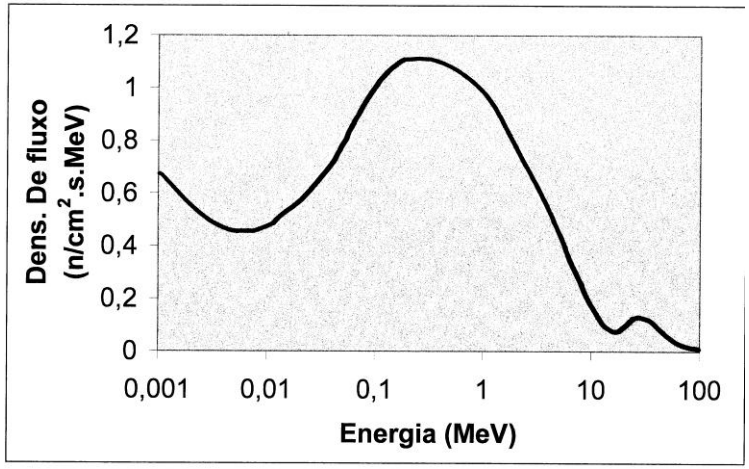
A resolução em energia depende da largura do pulso (Δt) e do comprimento (L) do percurso de vôo, segundo a equação:

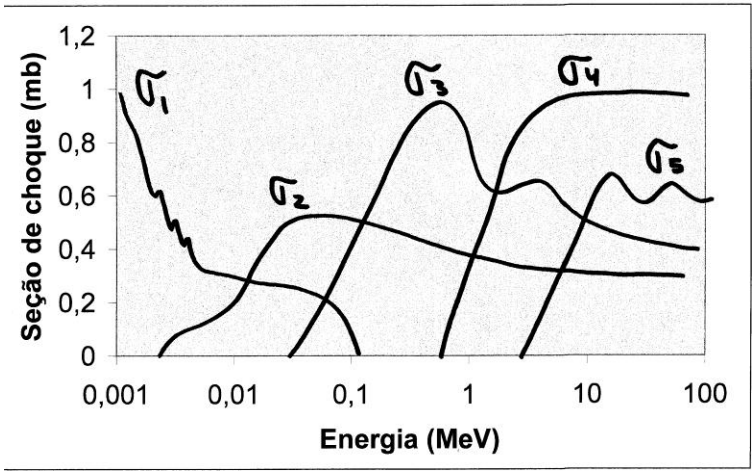
$$\Delta E = \left(\frac{8}{m}\right)^{\frac{1}{2}} E^{\frac{1}{2}}\left(\frac{\Delta t}{L}\right)$$

Em reatores consegue-se medir o espectro térmico e epitérmico com chopper mecânico ($\Delta t \approx$ms) e tubos de tempo de voo de até 10m. Em aceleradores mede-se toda a faixa epitérmica e rápida com pulso de largura de 10ns a 1μs e tubos de vôo de 25 a 250m.

5.2 Detectores limiares (folhas de ativação)

Expõe-se ao fluxo de nêutrons um conjunto de folhas que serão ativadas a partir de reações com nêutrons. As atividades saturadas são medidas por espectroscopia gama, as quais fornecerão a taxa de reação com o espectro de nêutrons





As atividades saturadas relacionam-se com o fluxo de nêutrons $\phi(E)$:

$$A_1 = \int_0^\infty \phi(E).\sigma_1(E)dE$$

$$A_2 = \int_0^\infty \phi(E).\sigma_2(E)dE$$

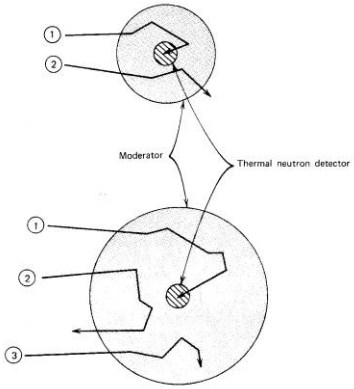
...

$$A_n = \int_0^\infty \phi(E).\sigma_n(E)dE$$

Trata-se de um sistema de “n” equações integrais, onde “n” é o número de detectores limiares utilizados. Há métodos de deconvolução para obter-se o espectro de nêutrons (distribuição em energia do fluxo). Um software muito utilizado é o Sand-II.

5.3 Esferas de Bonner

Um método de espectroscopia de nêutrons que usa o mesmo princípio da ativação é o espectrômetro de esferas de Bonner.



Os nêutrons incidentes nas esferas de parafina sofrerão vários espalhamentos no C e H e serão moderados. Parte dos nêutrons escapará, parte será absorvida em reações de captura e parte atingirá a faixa térmica. Os nêutrons térmicos são detectados por um detector de 3He. A fração que atingirá a faixa térmica dependerá da energia dos nêutrons e do diâmetro da esfera.

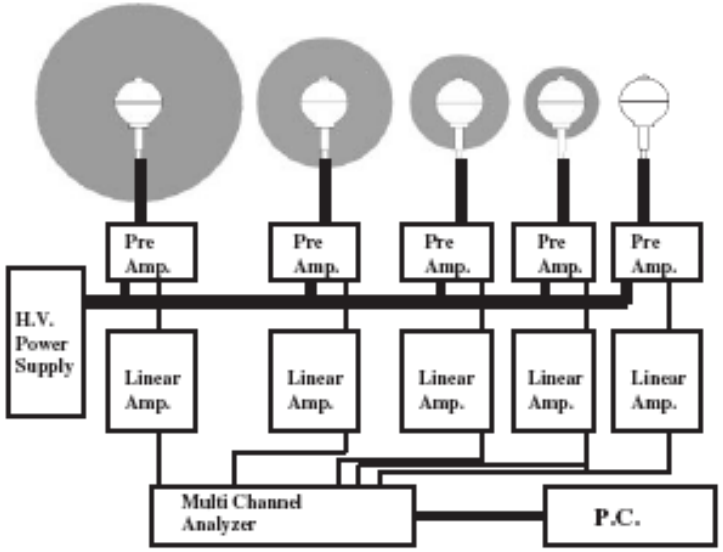
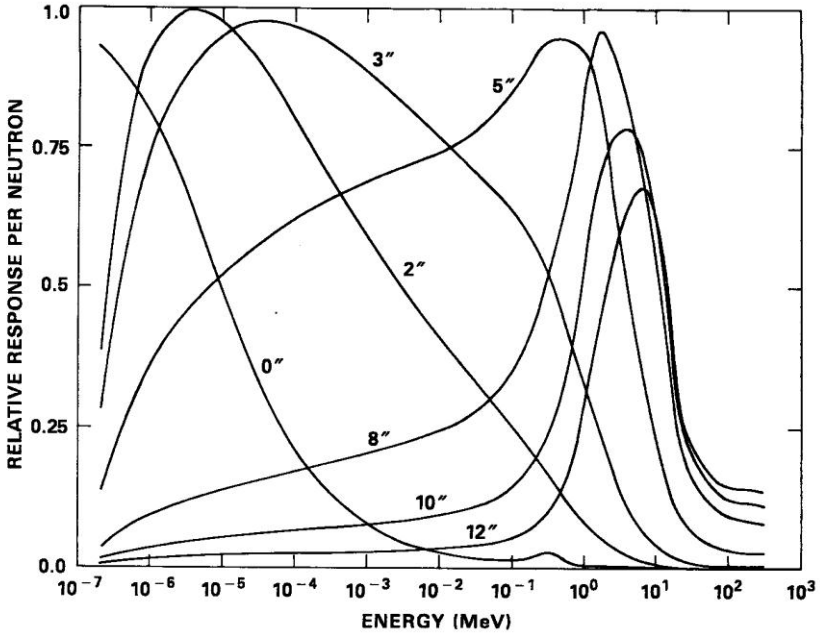
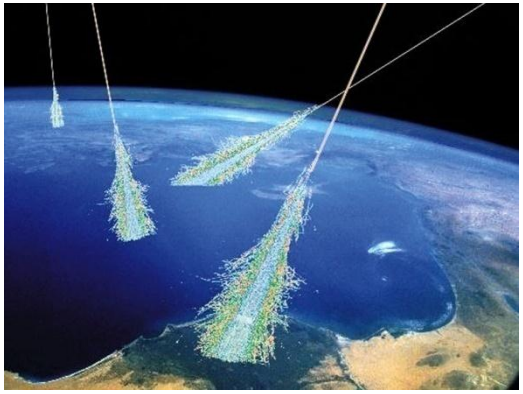


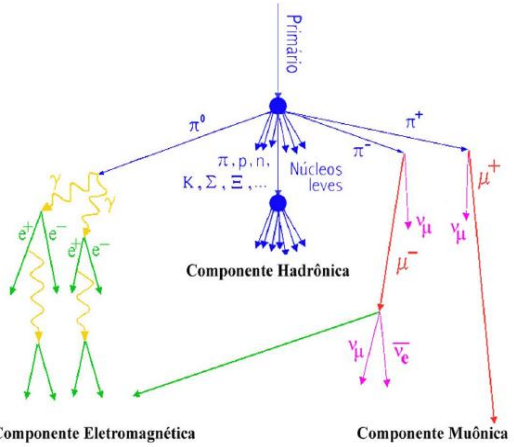
Fig. 1 Schematic diagram of the experimental arrangement of the Bonner multi-sphere neutron spectrometer (BS)

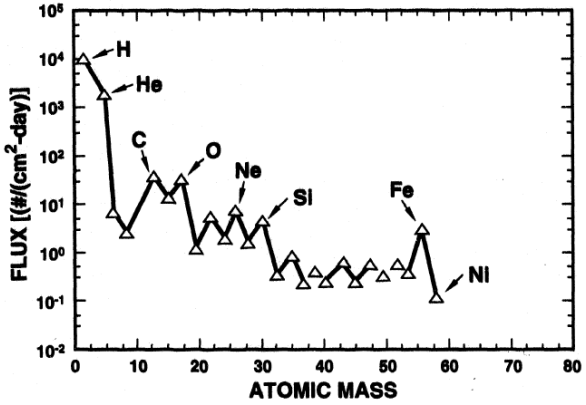


6 NÊUTRONS PRODUZIDOS PELA RADIAÇÃO CÓSMICA

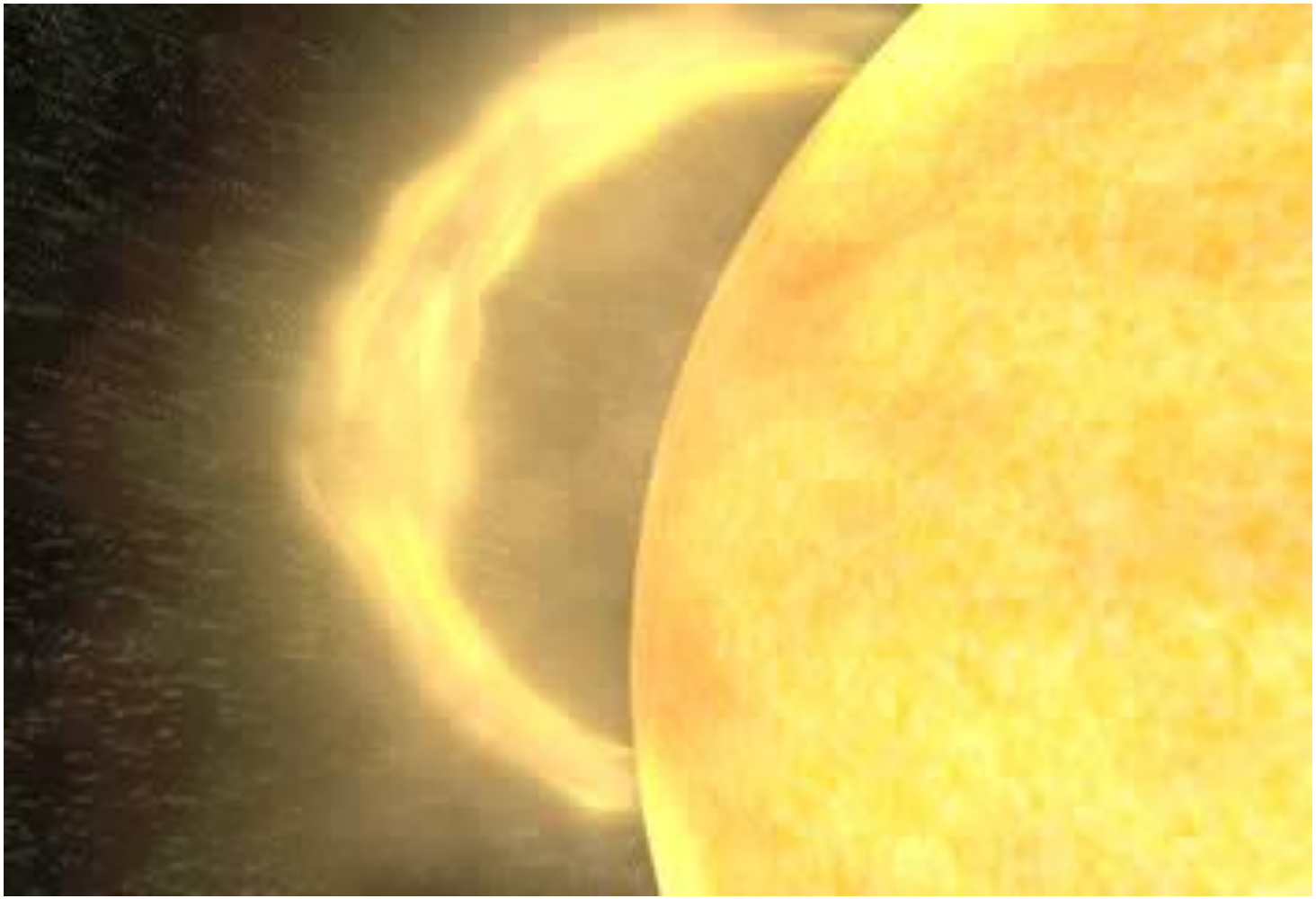
O homem ao longo de sua vida está continuamente exposto à radiação ionizante de origem artificial e natural. A radiação artificial é proveniente das aplicações médicas (raios-X, radioterapia e medicina nuclear), de reatores nucleares e outras aplicações industriais, como, por exemplo, a gamagrafia utilizada na inspeção de peças pesadas. São fontes naturais de radiação aquelas emanadas por radioisótopos presentes na terra, água e ar desde a origem do nosso planeta e as partículas de alta energia provenientes do espaço. Esta radiação proveniente do espaço é chamada de radiação cósmica (RC). Parte da RC é desviada pelo campo magnético terrestre. A RC é atenuada pela atmosfera terrestre, porém, parte dela, ainda atinge a superfície da terra, irradiando todos os seres vivos continuamente. A intensidade da radiação cósmica depende da altitude.







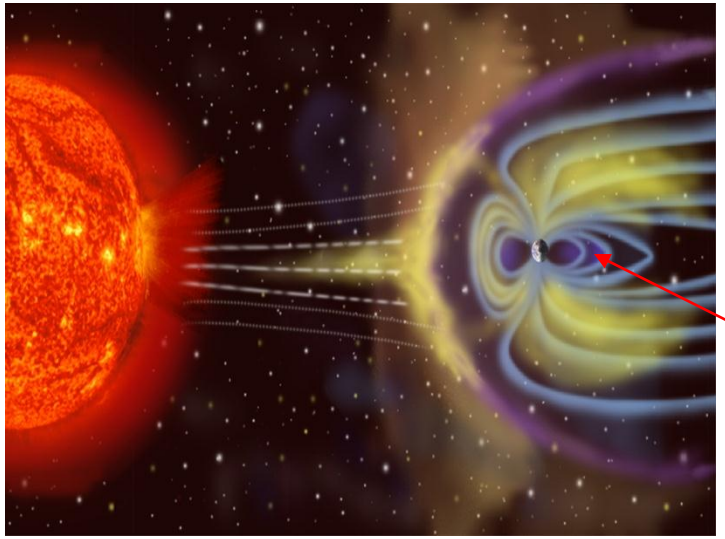
Introdução

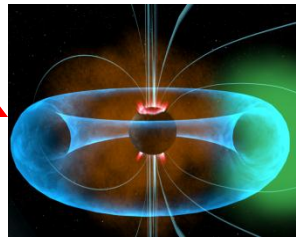


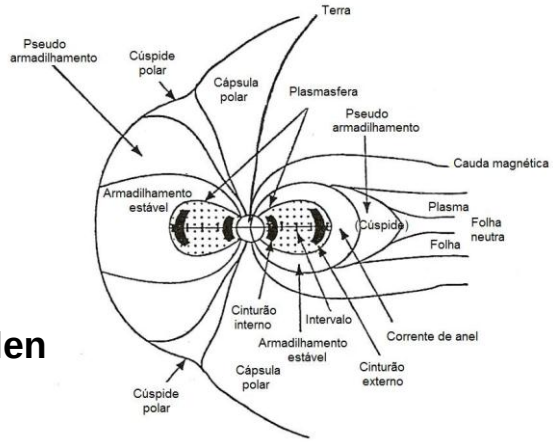
www.nasa.gov

Classificação:

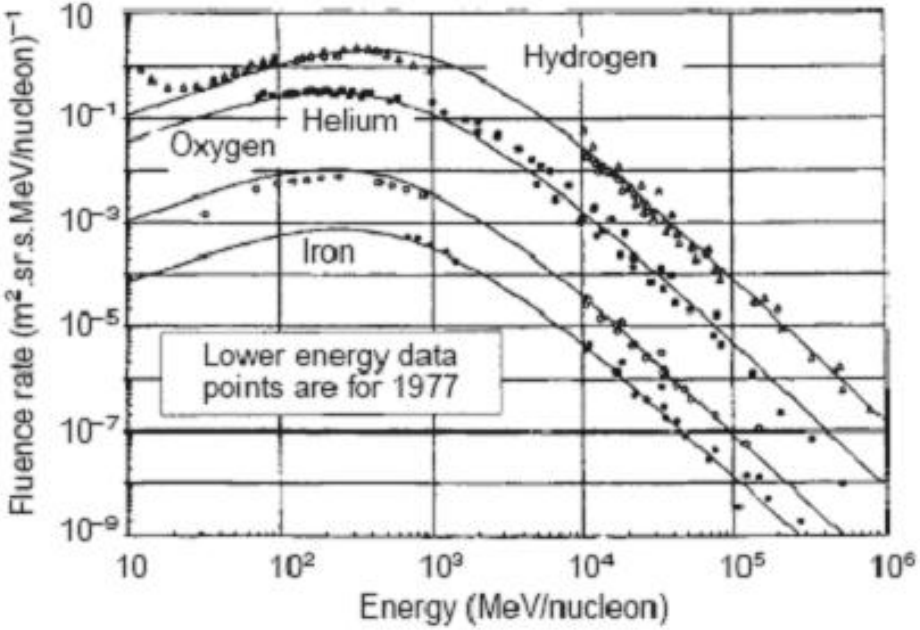
1) **Radiação cósmica galáctica (RCG)**
2) **Radiação cósmica solar (RCS)**
3) **Radiação aprisionada (RCA)**



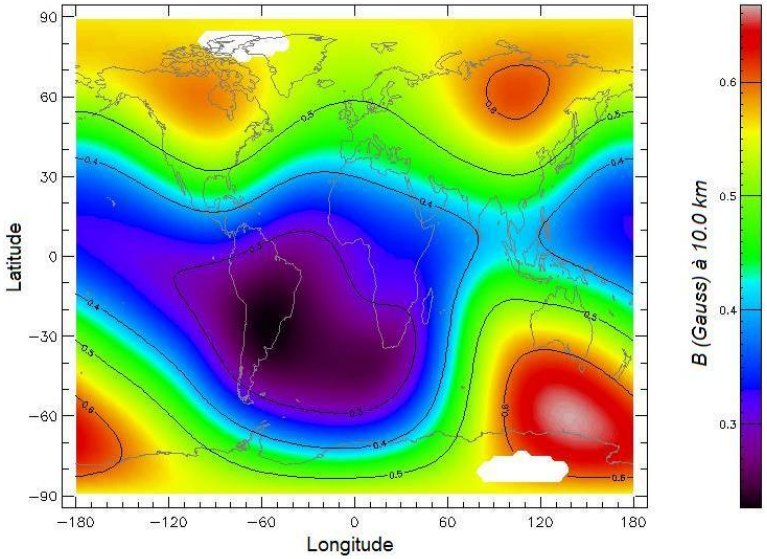




Cinturões de Van Allen

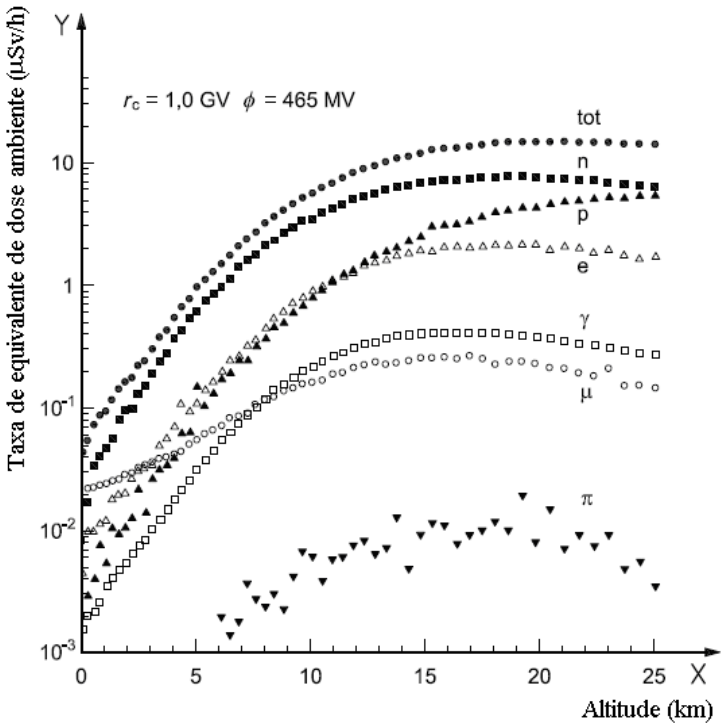


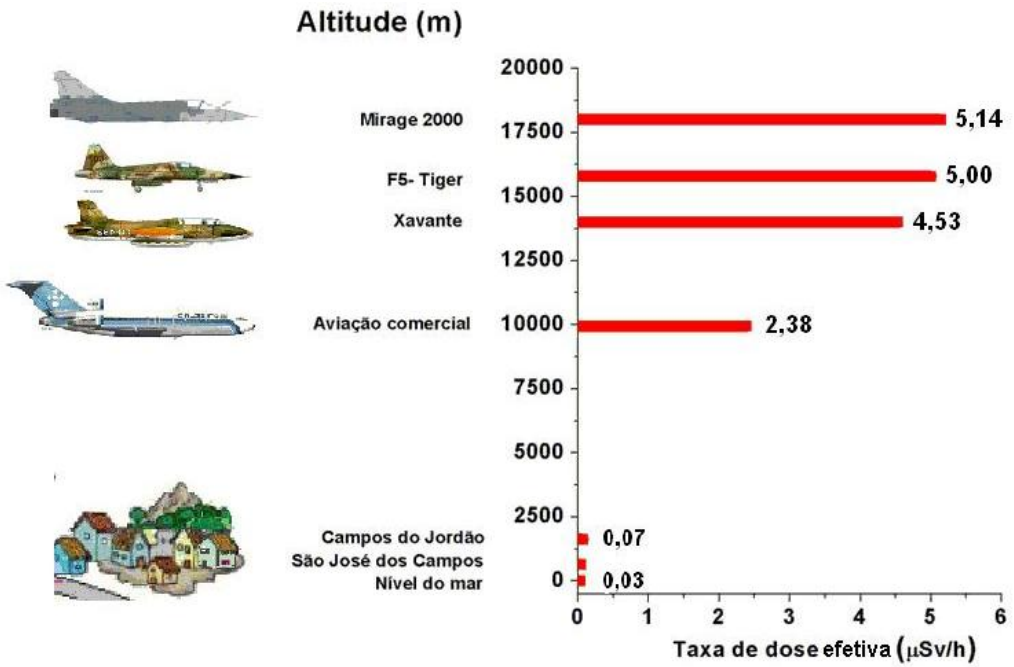
Distribuição em energia de algumas partículas (núcleos) do RCG



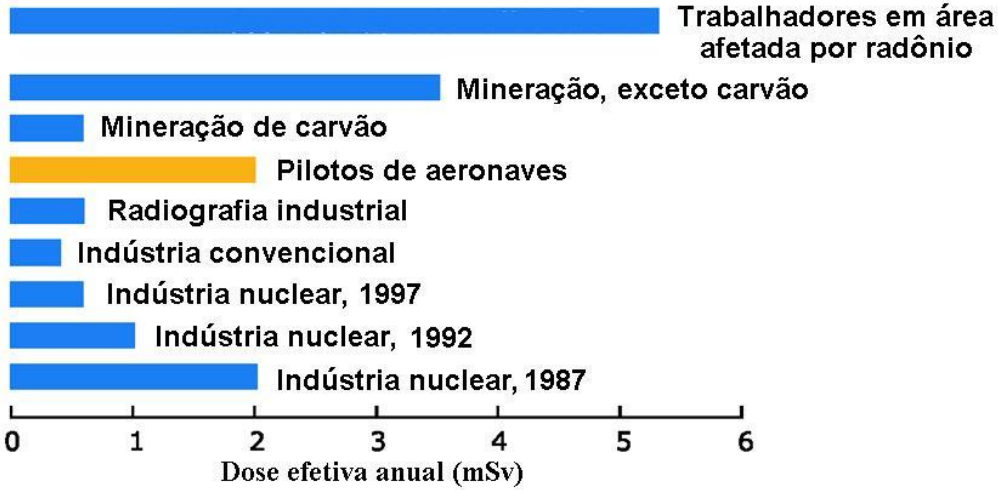
Anomalia Magnética do Atlântico Sul (AMAS)

Nível de dose em vôos de grande altitude

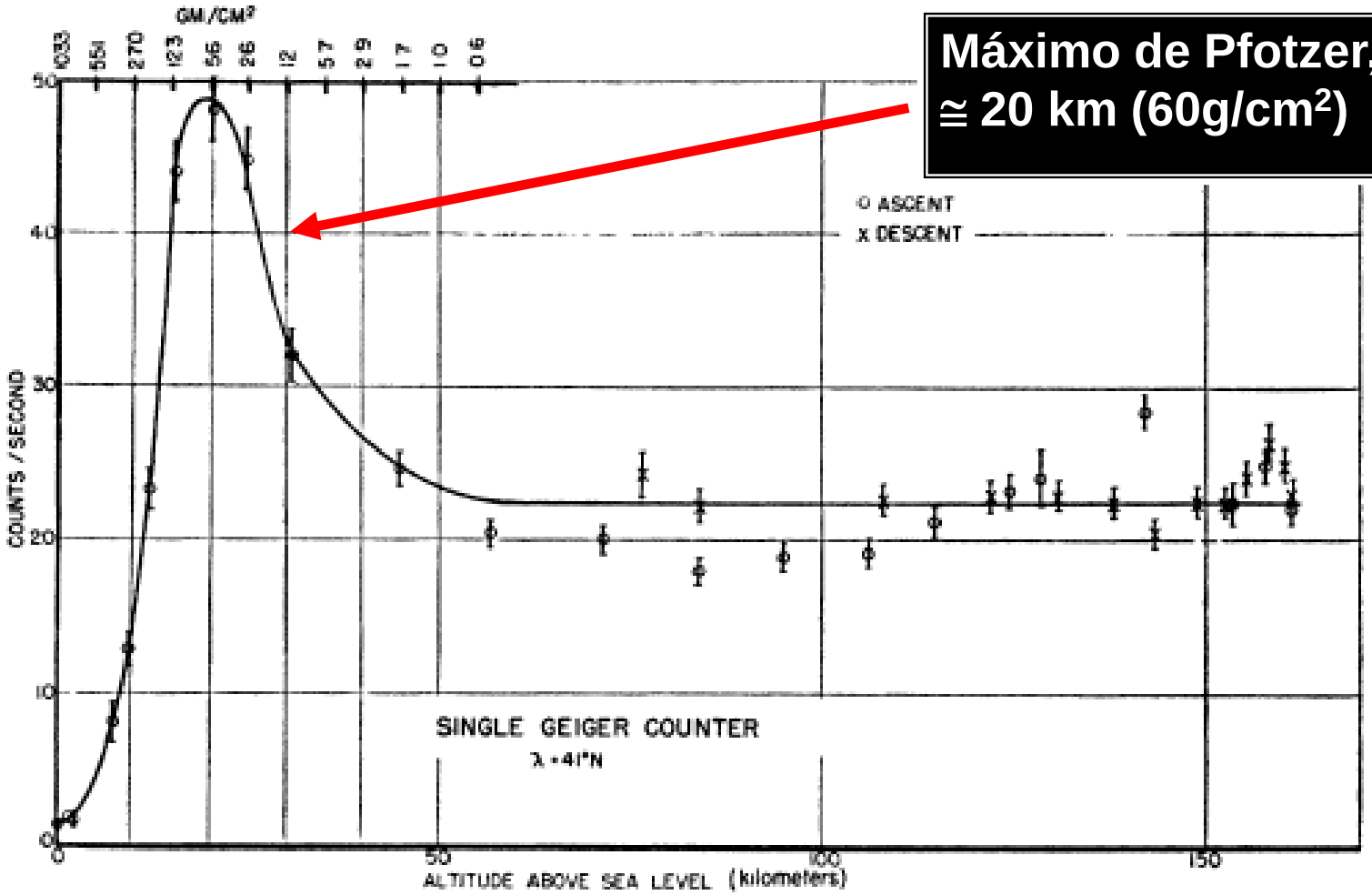




A taxa de dose equivalente aumenta com a altitude, em aproximadamente 300 vezes para os vôos de grande altitude (0,03mSv/h na superfície até 10mSv/h acima de 15 km). A principal componente é a neutrônica



Radiação Cósmica



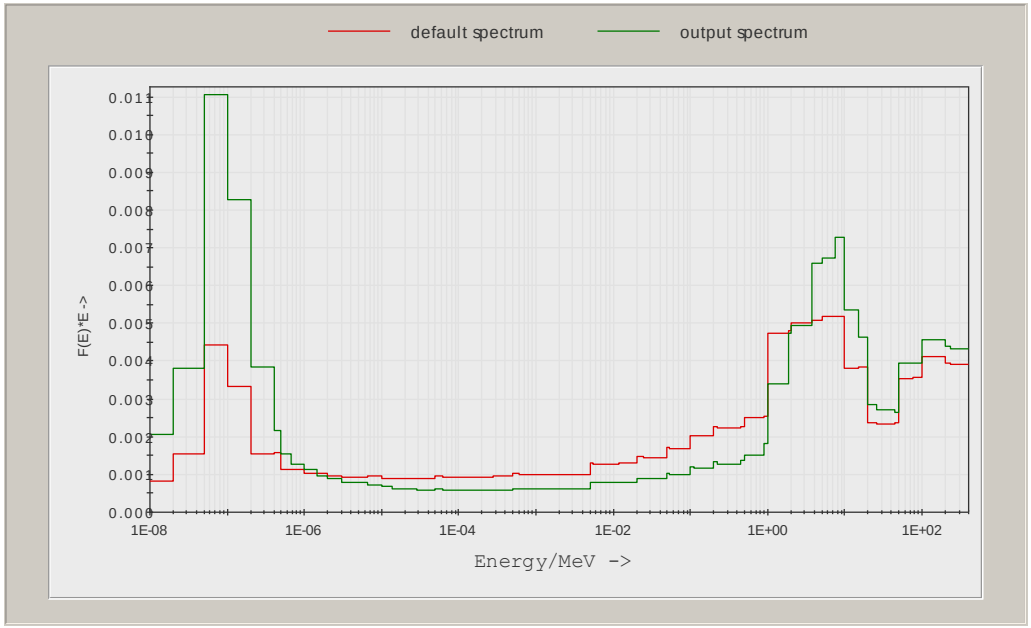
Máximo de Pfotzer,
≅ 20 km (60g/cm²)

Van Allen, 1947

Espectro de nêutrons medido em no Parque Nacional do Itatiaia em março de 2009 a uma altitude aproximada de 2360 m comparado com o espectro obtido por Goldhagen e col.*, que foi utilizado como parâmetro inicial para o processo de desconvolução. O fluxo total de nêutrons obtido por meio da integração do espectro deconvoluído é de 597 n/m^{2}s. O fluxo calculado para este local por meio do programa EXPACS-2** é de 504 n/m^{2}s

Dados experimentais: taxa de contagem nas esferas de Bonner

Diâmetro da esfera (pol)	Taxa de contagem (10^3con/s)	Incerteza (%)
0	4,652	6,19
2	4,612	6,31
3	5,528	4,63
5	5,874	5,88
8	5,332	5,18
10	4,598	5,59
12	4,121	6,35

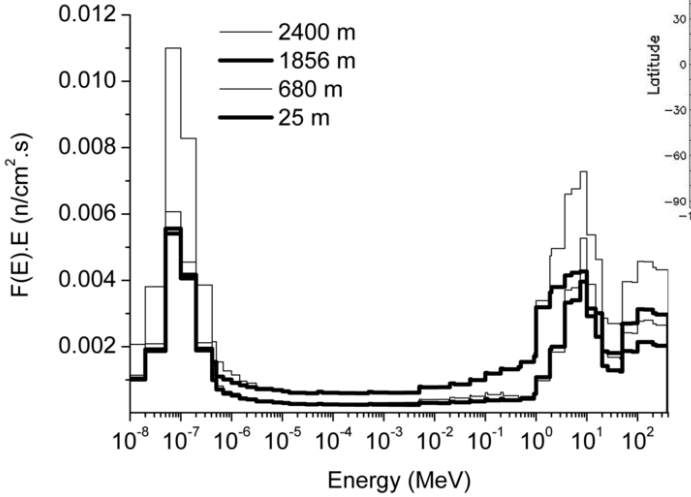


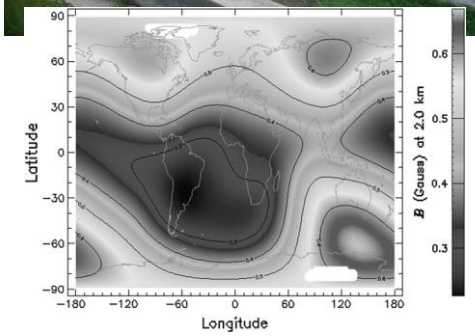
Espectro calculado de nêutrons pelo Programa MAXED com matriz resposta SAN4. (INPUT: vermelho e OUTPUT: verde)

*** P. Goldhagen, M. Reginatto, T. Kniss, J. W. Wilson, R. C. Singleterry, I. W. Jones, W. Van Steveninck, "Measurement of the energy spectrum of cosmic-ray induced neutrons aboard an ER-2 high-altitude airplane", Nuc. Instr. Meth. Phys. Res. A, v. 476, p. 42–51, 2002.**

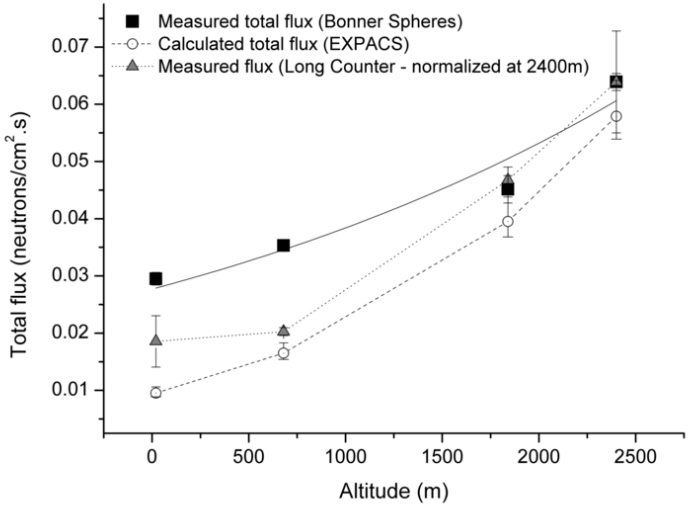
**** Disponível em http://phits.jaea.go.jp/expecs**

• **NEUTRON SPECTRA MEASUREMENTS IN THE SOUTH ATLANTIC ANOMALY REGION, Radiation Measurements, n. 45 (2010) p.1526-1528**



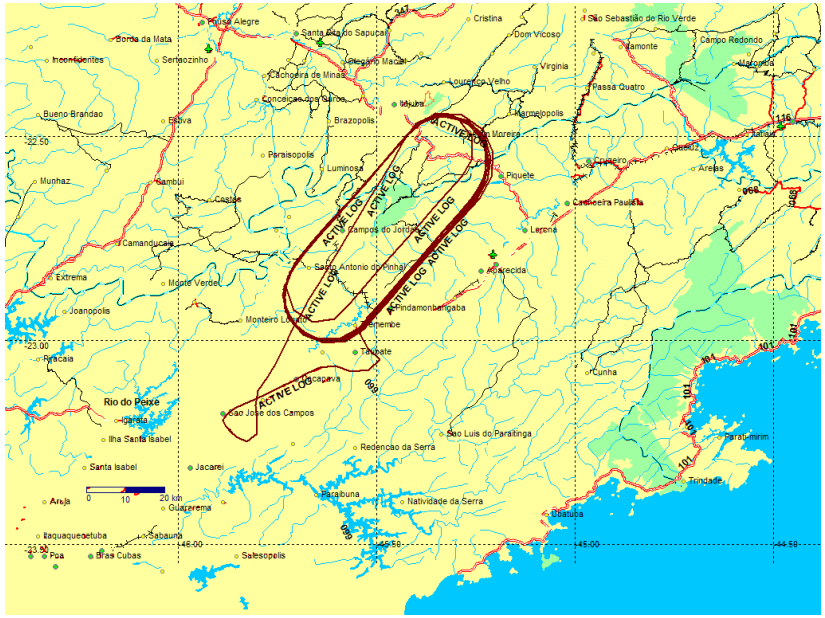


Neutrons flux and spectrum mesasurements at several ground level altitudes

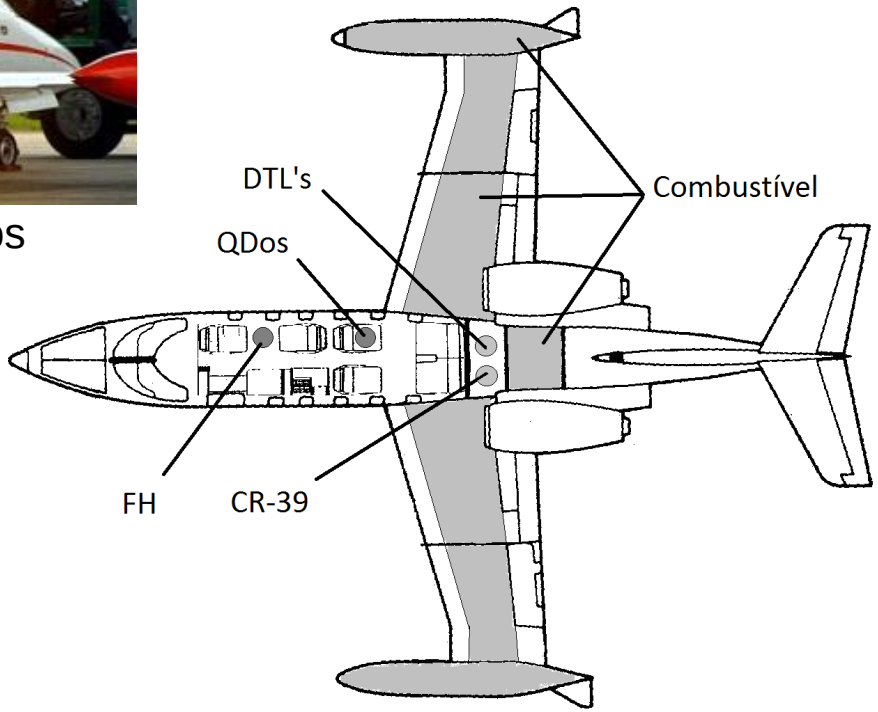


Em execução: Medidas a bordo de aeronaves em vôo (4876 a 13106m)

A aeronave VU-35 da FAB, utilizada nos ensaios experimentais.

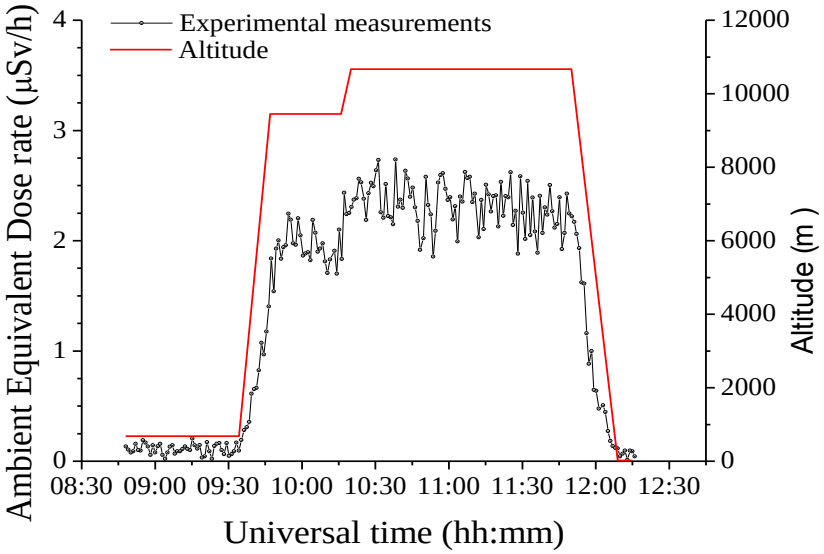


Rota do ensaio de ponto fixo, realizado na região próxima ao aeroporto de São José dos Campos, SP



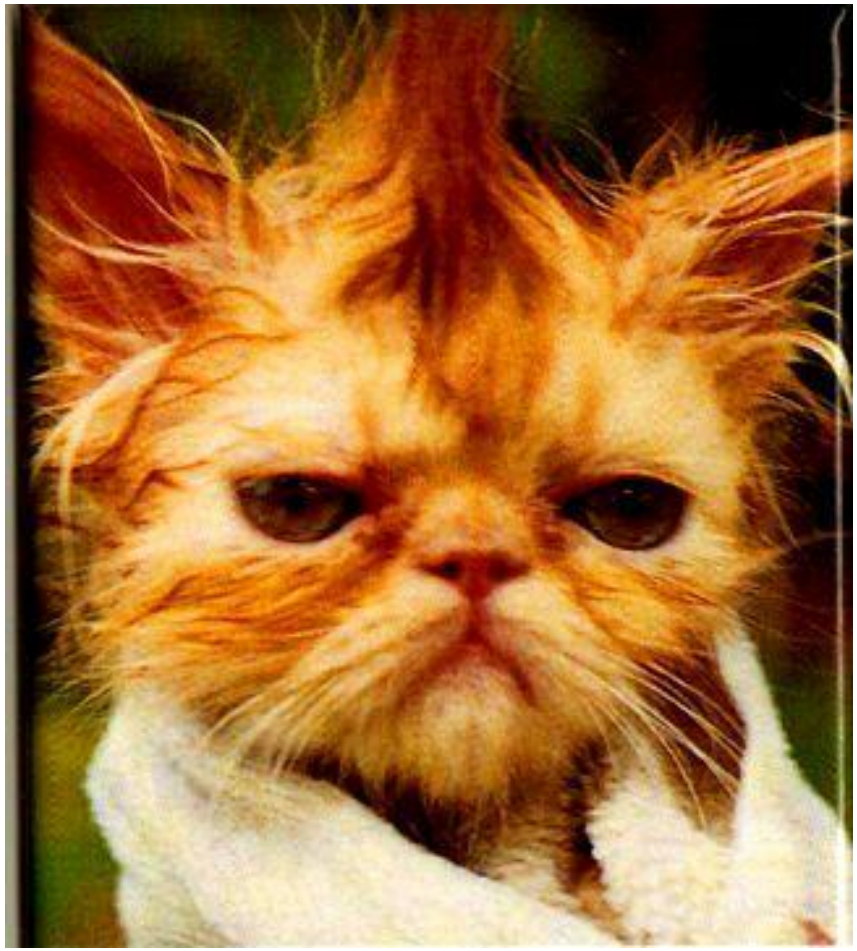
Representação esquemática das posições dos instrumentos de medida ativos e passivos e dos compartimentos de combustível da aeronave

Medições em voo



Rota do ensaio de trajeto para Foz do Iguaçu e Canoas, onde serão feitos ensaios de ponto fixo

UFA !



OBRIGADO