

Operação de um Contador Proporcional com Nano-Partículas

Aplicação à deteção de neutrões térmicos

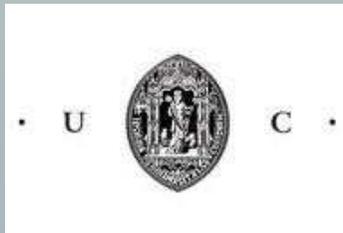
Fernando Amaro¹, C.M.B. Monteiro¹, J.M.F. dos Santos¹, A. Antognini²

¹LibPhys - Coimbra University, Portugal

²ETH, Zurich, Switzerland



LIBPhys-UC



Deteção de neutrões

A deteção de neutrões em contadores gasosos é feita indiretamente através de **reações de captura nuclear** com alguns isótopos:

o neutrão interage com o núcleo numa reação que leva à emissão de produtos com elevado poder ionizante (partículas alfa, protões, iões). Estes produtos são detetados e assinalam a presença dum neutrão. Elevado Q (~MeV)

Em termos práticos a escolha de materiais com potencial para a deteção de neutrões em detetores gasosos é muito limitada: ^3He , ^{10}B e ^6Li .

Isotope	Potential gamma radiation discrimination ^a	Potential neutron detection efficiency ^b	Typical detector type
Helium-3 (for comparison)	Good (0.76 MeV)	Excellent (5,333 barns)	Proportional
Boron-10	Very good (2.3 MeV)	Very Good (3,835 barns)	Proportional, scintillator, or semiconductor
Lithium-6	Excellent (4.78 MeV)	Good (940 barns)	Scintillator or semiconductor

Deteção de neutrões

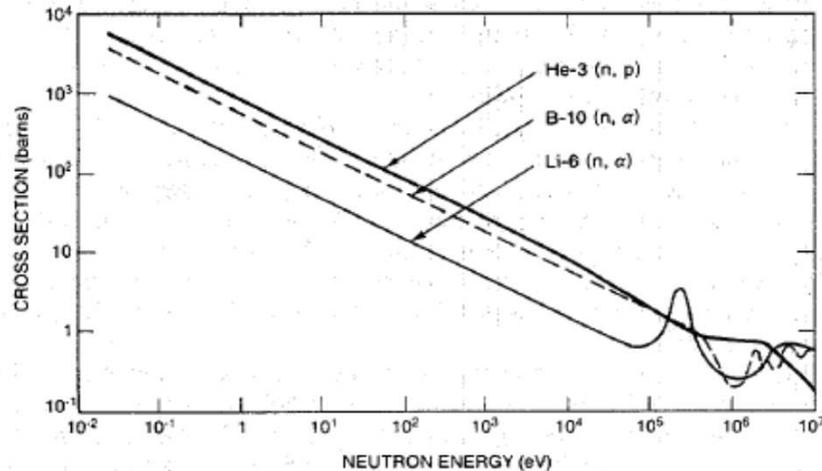
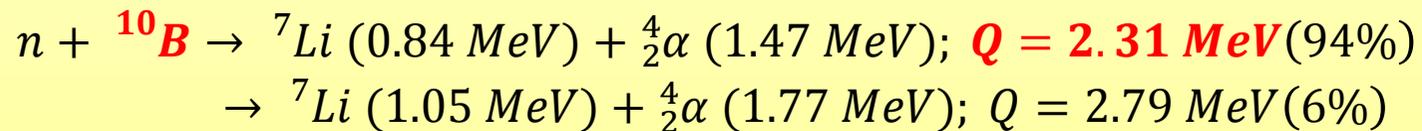
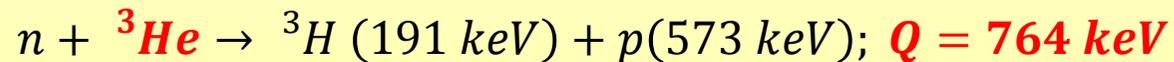


Figura 1: Secção eficaz para captura nuclear em ^3He , ^{10}B e ^6Li , em função da energia do neutrão incidente.

A probabilidade de ocorrência da reação de captura nuclear aumenta com a diminuição da energia do neutrão.

Os sistemas de deteção que utilizam este mecanismo são rodeados com materiais moderadores que reduzem a energia dum neutrão para valores térmicos (0.025 eV)

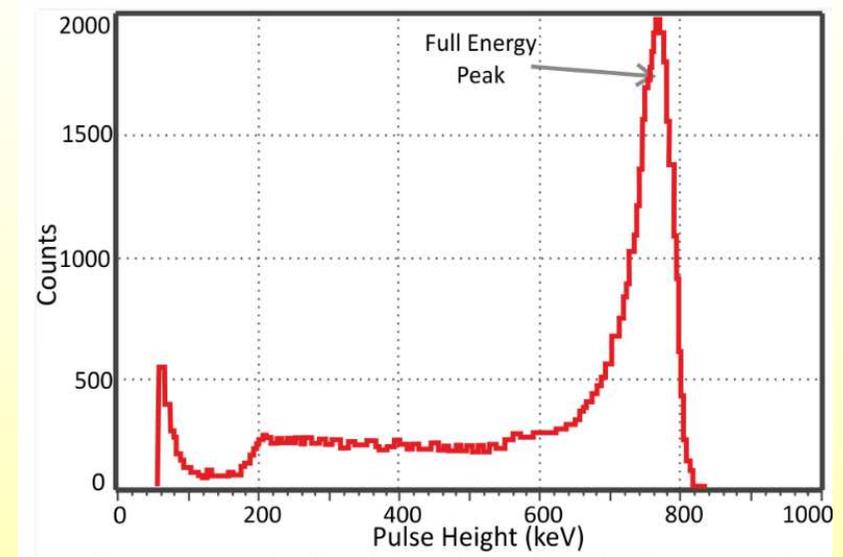


Devido à conservação do momento os produtos são sempre emitidos em **direções opostas**, com energias bem definidas.

^3He

É um gás que serve como meio de conversão e, adicionalmente de paragem dos produtos secundários e amplificação (geralmente são utilizados outros gases, com maior poder de paragem, misturados com o ^3He).

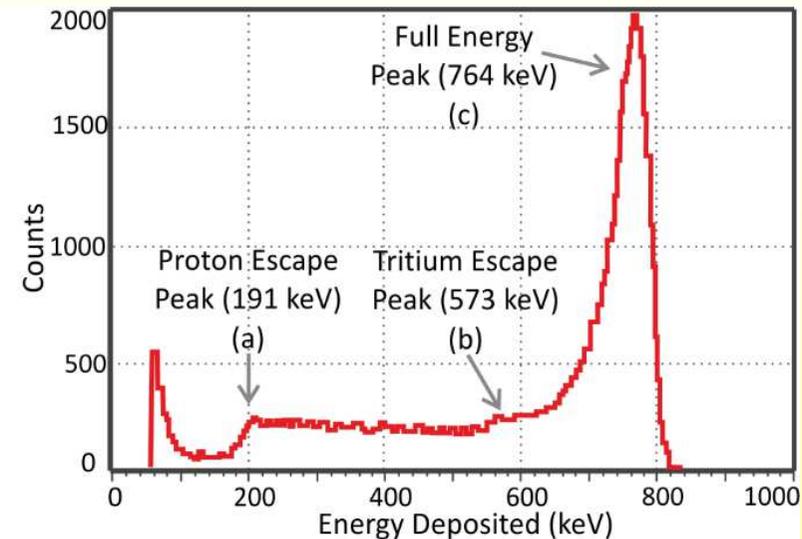
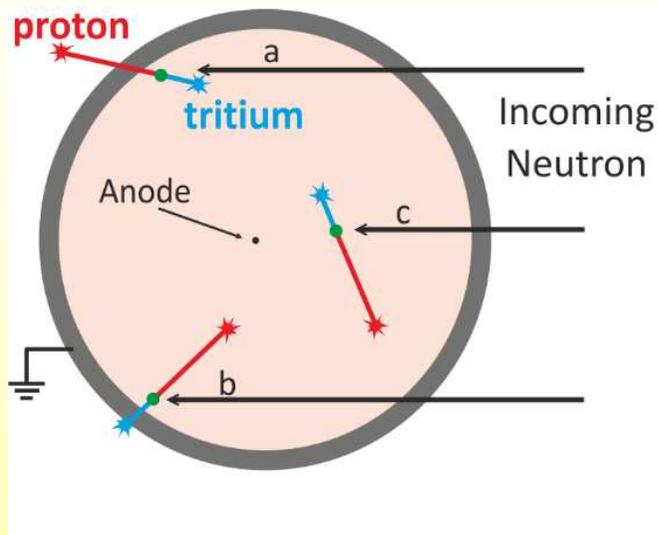
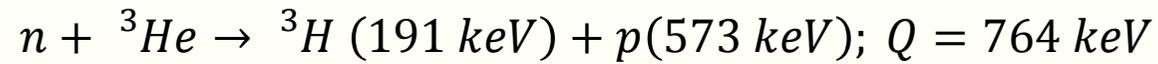
- Elevada secção eficaz para neutrões térmicos
- Fácil de produzir um detetor com grande área de deteção
- Boa discriminação de raios gama (Z baixo, com pouco poder de paragem para raios gama)
- Barato e disponível (era!!)



[Mazed D. et al., *Design parameters and technology optimization of ^3He -filled proportional counters for thermal neutron detection and spectrometry applications*, Radiation Measurements 47 (2012)]

A única fonte de ^3He nos EUA (maior produtor/consumidor) provém da agência que faz a administração da segurança nuclear (NNSA). O ^3He é um produto do decaimento do trítio, resultante do processo de fabrico de armas nucleares. Com a adoção dos tratados de não proliferação nuclear deu-se um decréscimo na produção de ^3He .

^3He



- Interação perto das paredes do detetor: um dos produtos escapa-se do detetor - > deposição parcial (“Efeito de parede”)
- Interação no volume gasoso: ambos os produtos depositam toda a energia no gás (mais provável em detetores maiores)

A crise do ^3He

Após o 11 de Setembro os Estados Unidos a reforçaram as suas fronteiras com “*Radiation Portal Monitors*”. Estes portais permitem controlar a carga em busca de material radioativo contrabandeado. Encontram-se equipados com vários sensores, entre os quais um detetor capaz de identificar a presença de neutrões (^3He). Estes são emitidos espontaneamente por materiais radioativos (fissão) bem como por alguns tipos de explosivos plásticos.



A elevada procura e a disponibilidade limitada do ^3He levam a um açambarcamento de todas as reservas e conseqüente aumento do custo.

Outras aplicações do ^3He (não relacionadas com segurança) :

- Centros de pesquisa (Europa, US, Japão)
- Análise a solos na indústria do petróleo
- Ressonância magnética (pulmão)
- Criogenia

80 \$/l => 1000 \$/l

Procura estimada em 2010: 65 000 l/y . Oferta: 15 000 l/y.

[Kouzes, The ^3He Supply Problem, PNNL-18388]

Alternativas ao ^3He

1. Trifluoreto de boro (BF_3):

- Já utilizado em contadores proporcionais.
- Tóxico e instável -> não utilizável em aplicações comerciais.

2. Contadores proporcionais com camada interna de ^{10}B :

- A mais promissora das alternativas
- Tecnologia já madura e pronta a substituir contadores proporcionais de ^3He .
- Baixa eficiência de detecção (10% vs 60-70% nos contadores proporcionais ^3He)
- Necessários vários tubos para obter a mesma eficiência que ^3He

3. Cintiladores dopados com Lítio:

- Má discriminação gama
- Necessitam de um fotosensor para ler a cintilação
- Ainda em desenvolvimento

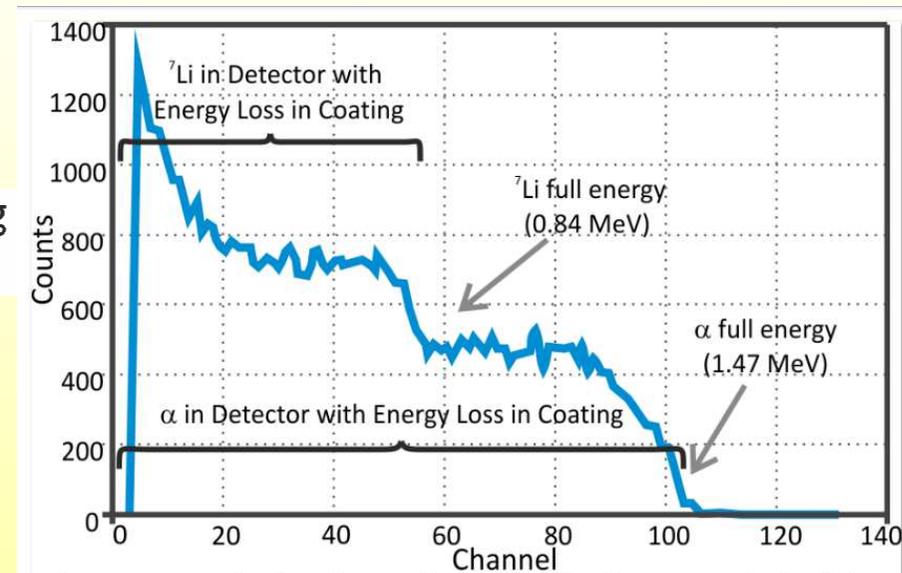
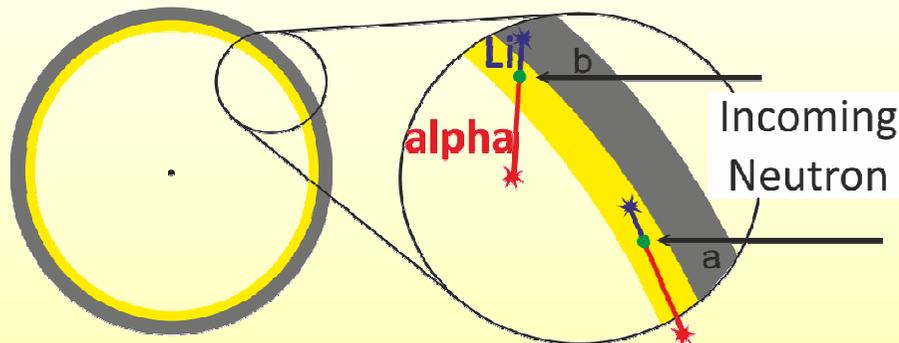
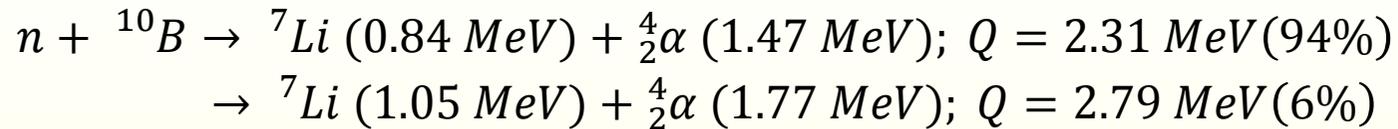
4. Outras opções

- Finas folhas de lítio suspensas
- Fotodíodos revestidos com ^{10}B

[Kyle A. Nelson, et al., *A suspended boron foil multi-wire proportional counter neutron detector*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 767 (2014)]

[Kouzes R. T., et al., *Neutron detection alternatives to ^3He for national security applications*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 623 (2010)]

Contadores Proporcionais ^{10}B



- Q da reação mais elevado
- 20% do boro natural é ^{10}B
- Resposta em degrau duplo
- Eficiência de deteção limitada a 10%
- Aumento da camada de ^{10}B não altera eficiência de deteção (~10% max.)

Deteção de neutrões: a nossa alternativa

Substituir os átomos de ^3He numa mistura gasosa por nano-partículas contendo ^{10}B

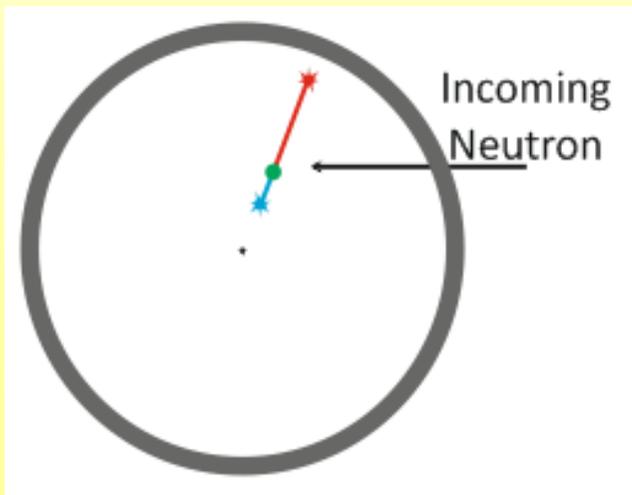
A conversão deve ter lugar num átomo de boro afastado das paredes



As partículas com boro devem estar suspensas ou transportadas no gás



As partículas devem ter um tamanho inferior ao alcance máximo dos produtos da reacção no material (3 microns no caso de MgB_2)



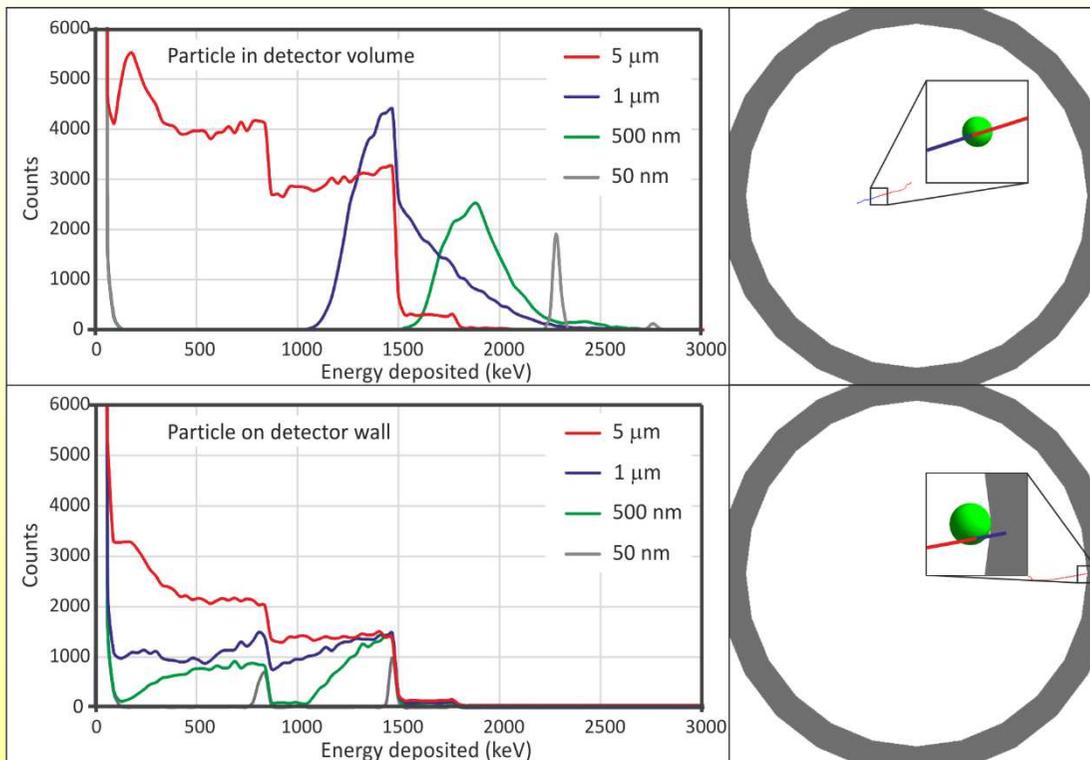
- **Deposição total da energia libertada na reacção**
- **Eficiência depende do volume total/concentração**
- **Percas dentro da partícula dependem do tamanho**

Nano partículas contendo ^{10}B :

- MgB_2 , B_4C , BN
- Outros materiais (^6Li , Gd)

Deteção de neutrões: a nossa alternativa

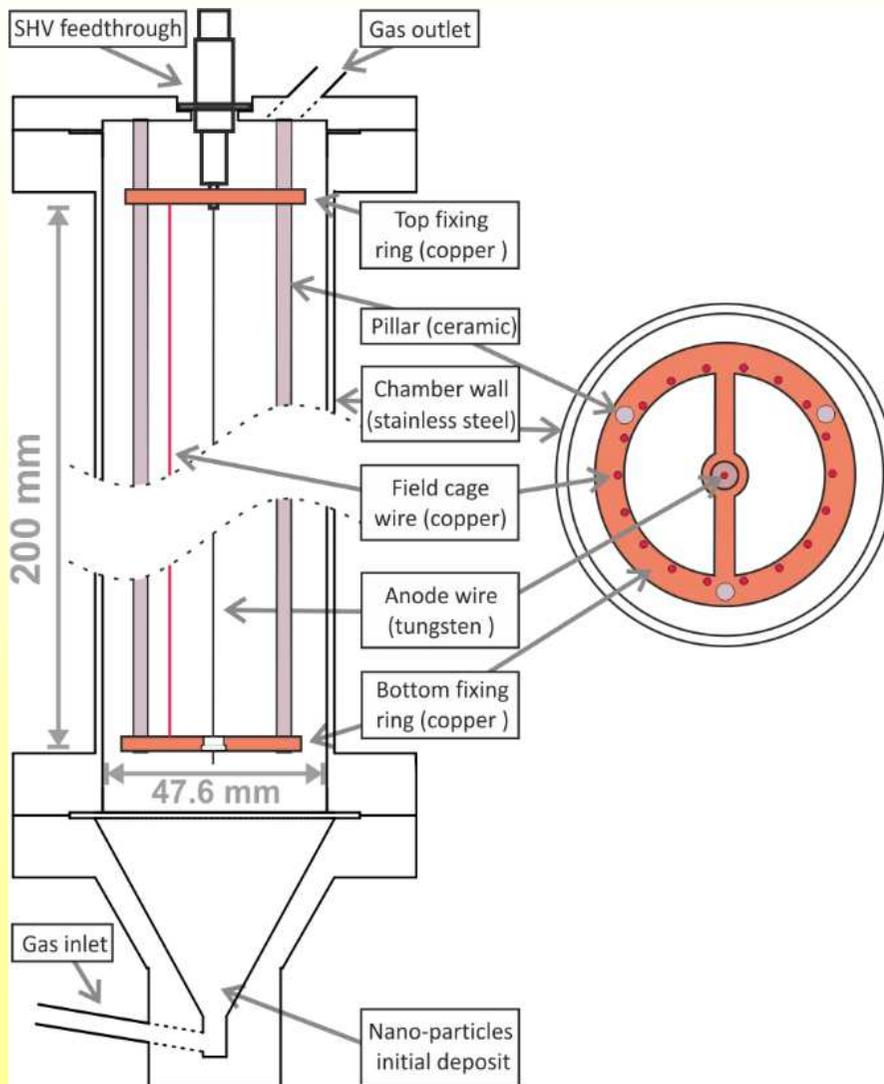
A resposta fornecida pela nossa geometria foi estudada para duas posições da partícula. Simulações de MonteCarlo (Geant4)



Pico energia total é possível apenas se a partícula de boro:

- tiver diâmetro inferior a 2 μm
- não estiver em contacto com as paredes do detetor

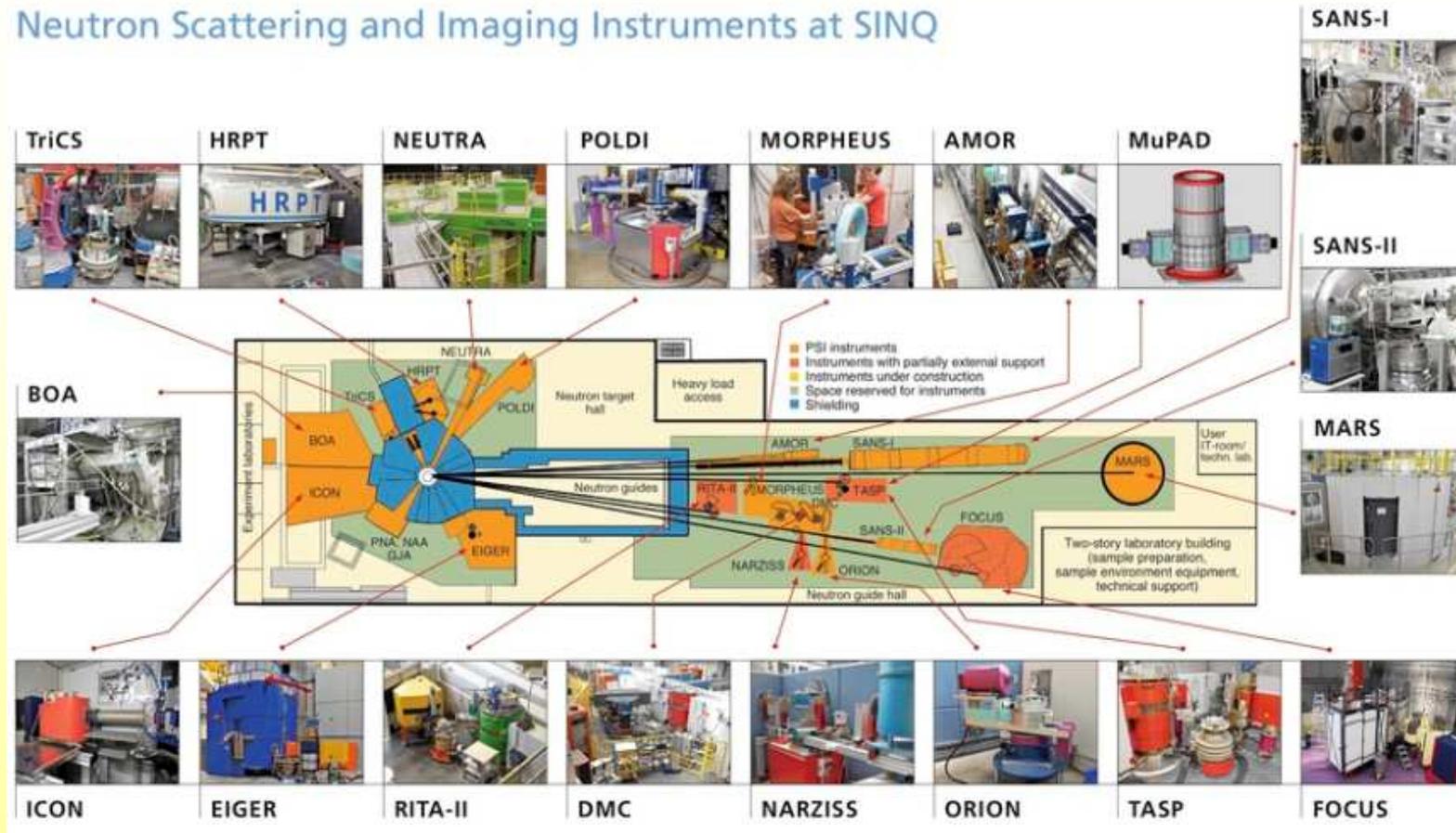
Deteção de neutrões: a nossa alternativa



- Protótipo: aço inox com feedtroughs para altas tensões
- Sistema de dispersão muito rudimentar
- Pequena quantidade de material colocada no detetor
- O fluxo de gás é aberto violentamente para promover dispersão do material. Após o que é reduzido para a operação do detetor.
- Gás (mistura de Ar/CH₄) circula continuamente no detetor.
- Filtro para partículas de 2 microns na saída (reservatório de óleo)
- Gate (conjunto de 18 elétrodos junto das paredes do detetor): permite criar uma zona morta, evitando contribuições de material junto das paredes.

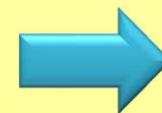
Paul Scherrer Institute (PSI)

Neutron Scattering and Imaging Instruments at SINQ



Vários instrumentos disponíveis.

Narziss: desenvolvida em parceria com a indústria para teste de elementos óticos para neutrões



~750 neutrões
térmicos/s

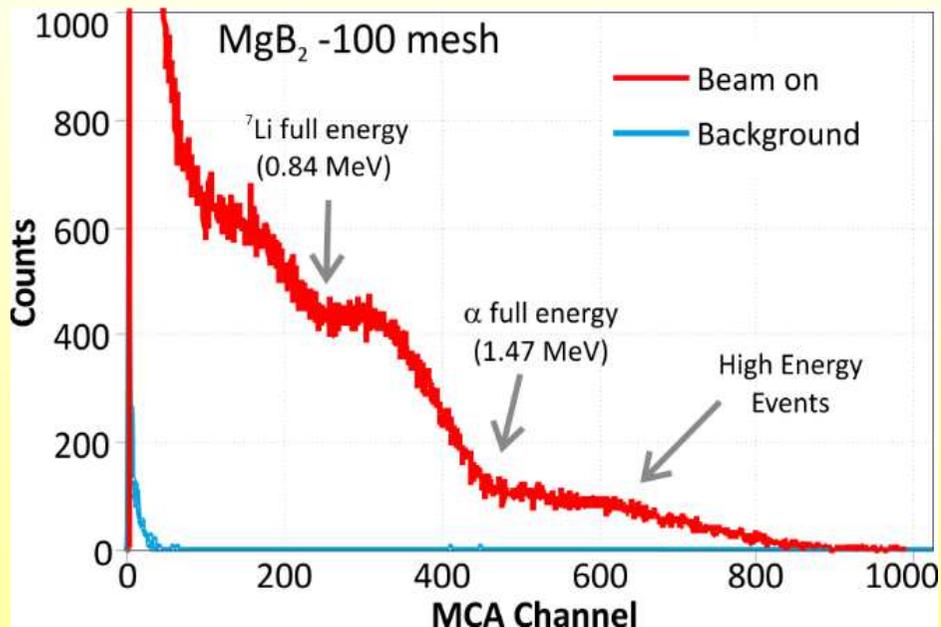
Resultados experimentais PSI



Resultados experimentais PSI

Medidas preliminares: partículas de MgB_2 <150 microns (-100 mesh)

- Solução não ideal: diâmetro elevado das partículas causa “efeito de parede” no seu interior.
- Boa primeira abordagem (segundo a literatura partículas mais pequenas tendem a aglomerar)



“Efeito de parede” domina a distribuição obtida:

- Absorção interna ?
- Material depositado nas paredes do detetor ?

mas....

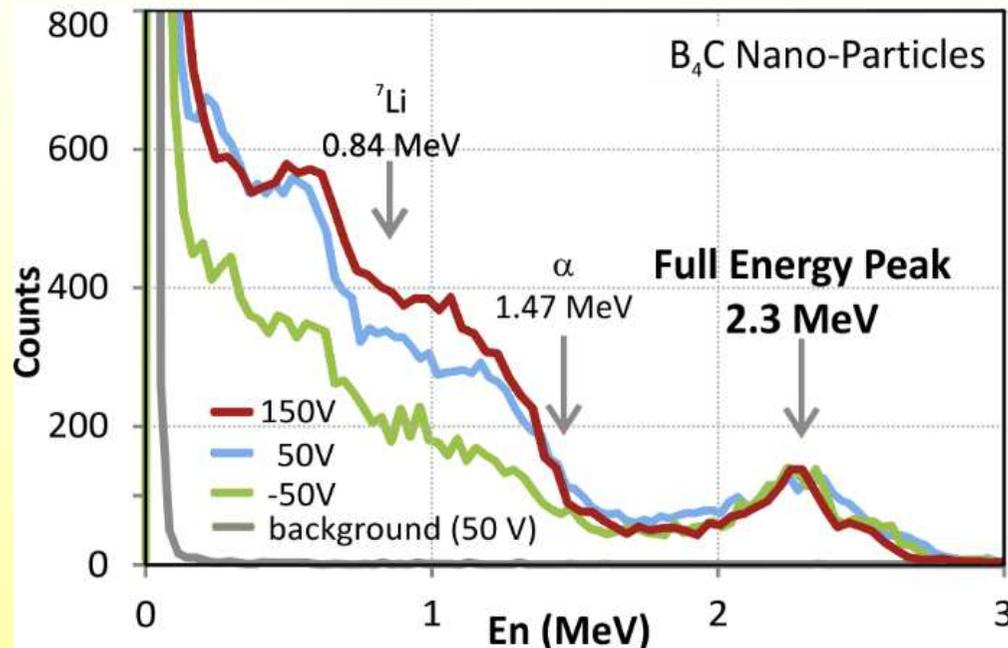
A presença de **eventos com energias acima do limiar da partícula alfa** só era possível se algumas partículas de dimensões reduzidas estivessem efetivamente dispersas no gás no interior do detetor .

10% eficiência detecção (semelhante à dos contadores proporcionais com ^{10}B)

Resultados experimentais PSI

B_4C (nano-particles)

- Fabricante não especificou dimensões. Análise posterior revelou tamanho médio de 1 micron.



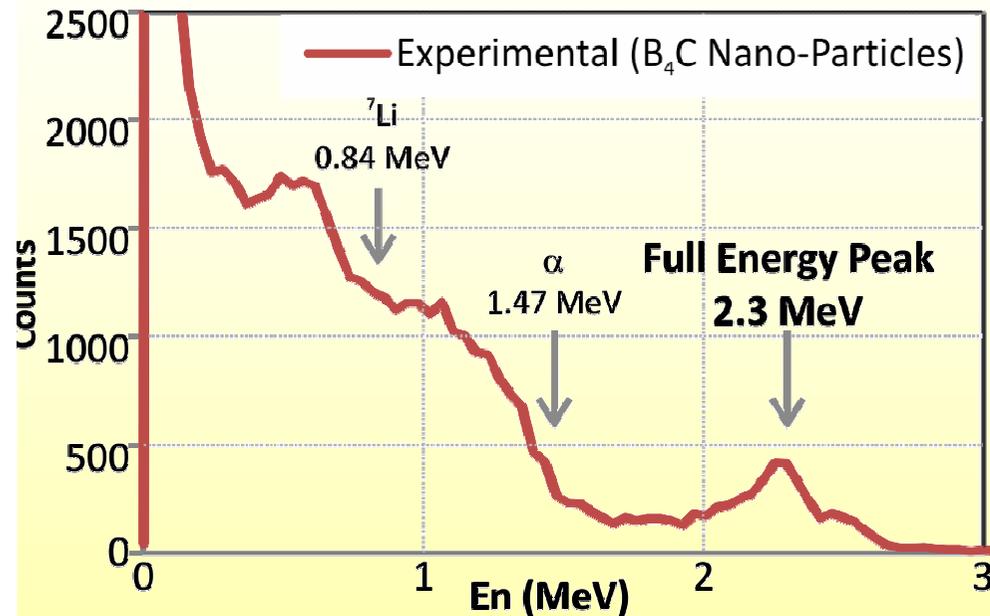
Efeito de parede ainda presente na resposta mas desta vez acompanhado por um pico de **deposição da energia total**, à semelhança do que ocorre nos contadores proporcionais de ³He.

Efeito de parede depende da polarização da gate instalada junto das paredes do detetor.

A presença dum pico de energia total mostra que há partículas com diâmetro inferior a 2 micron completamente rodeadas por gás (suspensas) e que é possível um recolher informação da reação entre um neutrão e essas partículas.

Resultados experimentais PSI

B₄C (nano-particles)



Deposição da energia total, à semelhança do que ocorre nos contadores proporcionais de ³He.

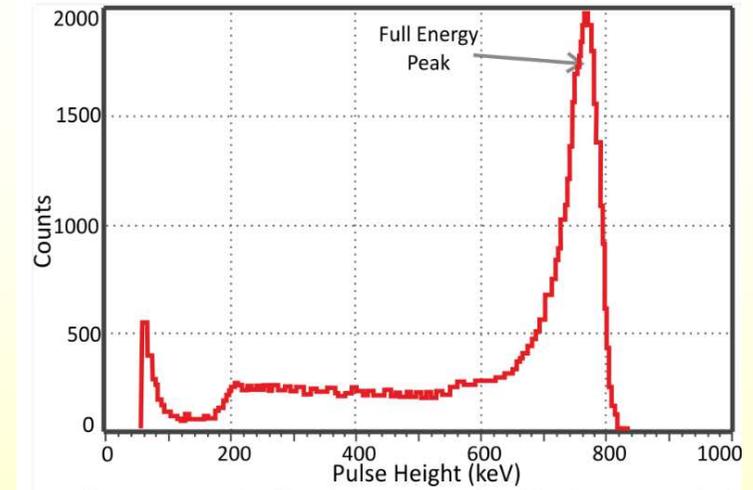
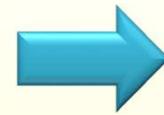
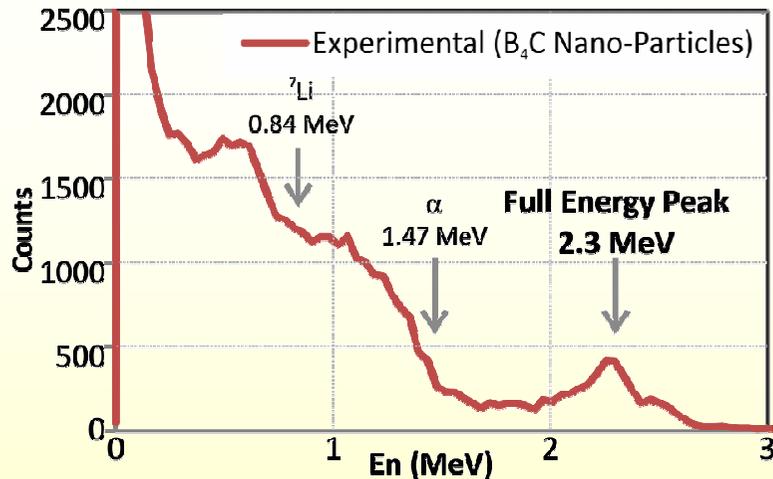
Mas para energias mais elevadas (**2.3 MeV em vez de 0.76 MeV**)

- Maior poder de discriminação gama (?) .
- Tensões de funcionamento inferiores (menos ganho necessário para obter mesmo S/N)

Estes resultados motivaram a publicação:

[F. D. Amaro, C. M. B. Monteiro, J. M. F. dos Santos, A. Antognini, *Novel concept for neutron detection: proportional counter filled with ¹⁰B nanoparticle aerosol*, Scientific Reports **7**,: 41699 (2017)]

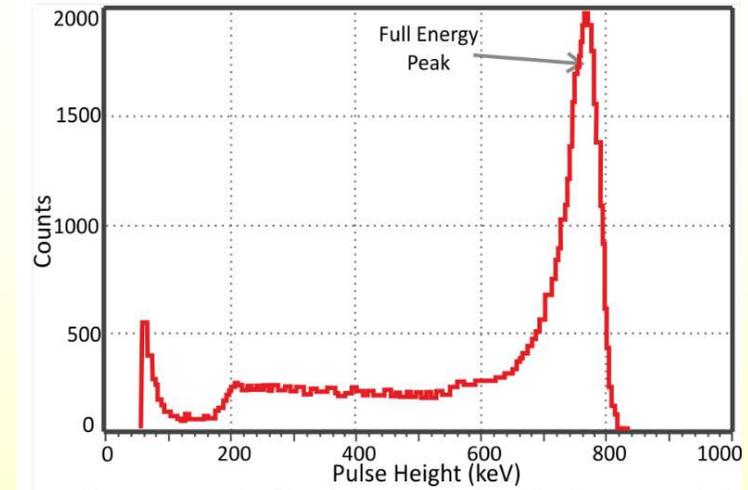
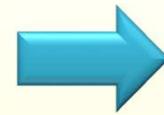
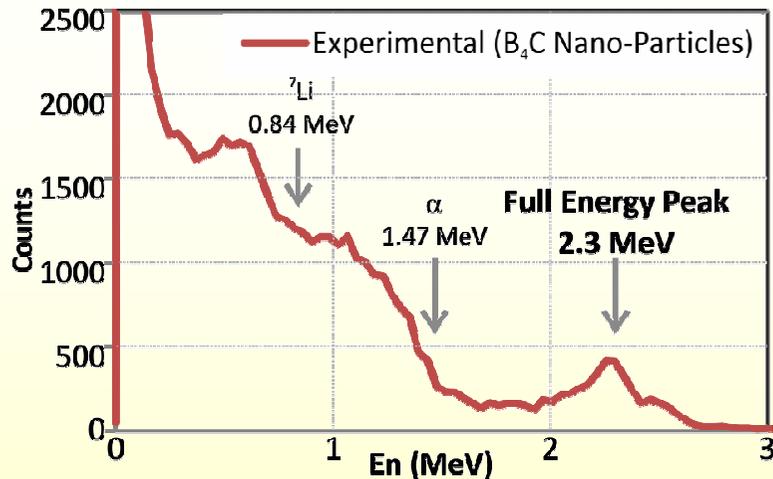
“still a long way to go”



Melhorar a resposta:

- Seleção cuidadosa das partículas: tamanho e forma(?)
- Impedir aglomeração das partículas: revestimentos, mecanismos mecânicos (impacto) para desaglomerar
- Prevenir a adesão das partículas às paredes do detetor: elétrodos (criação de zonas mortas junto da parede), revestimentos (partículas e paredes), electropolishing (?), desenho do detetor
- Uso de gases a pressões acima da atmosférica

“still a long way to go”



Aumento da estabilidade e operação a longo prazo:

- Sistema de recirculação
- Agitadores mecânicos (membranas vibratórias, inversão do detetor)

Melhorar eficiência de detecção

- Aumentar quantidade de ¹⁰B dentro do detetor: concentração de partículas, materiais enriquecidos ¹⁰B
- Aumentar volume do detetor (mais fluxo, mais elétrodos para recolha de carga)

Operação de um Contador Proporcional com Nano-Partículas

Aplicação à deteção de neutrões térmicos

Fernando Amaro¹, C.M.B. Monteiro¹, J.M.F. dos Santos¹, A. Antognini²

¹LibPhys - Coimbra University, Portugal

²ETH, Zurich, Switzerland



LIBPhys-UC

