

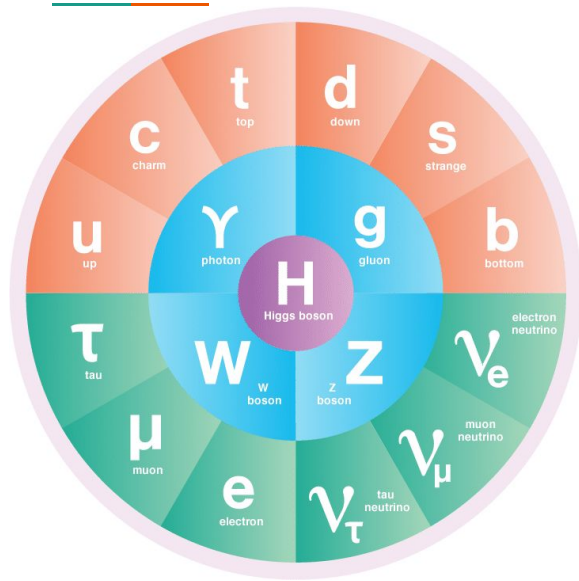
O Mistério da Natureza do Neutrino: Explorando o $\nu\beta\beta$ através do experimento LEGEND

Gabriel Botogoske



Neutrinos e sua natureza

O MODELO PADRÃO



→ Existem:

- 6 quarks
- 6 léptons (elétron, múon e tau e respectivos neutrinos de seu sabor)
- 5 gauge bosons (photon, Z, W^+ , W^- e o gluon)
- Bóson de Higgs

HELICIDADE E QUIRALIDADE

HELICIDADE: Projeção do Spin na direção do movimento

→ O operador helicidade comuta com a hamiltoniana: constante de movimento

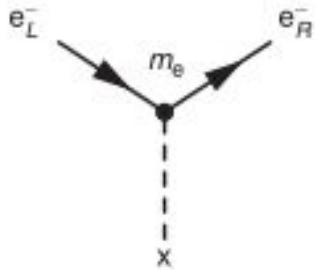


QUIRALIDADE: É um conceito mais difícil, mas podemos dizer: Somente partículas com quiralidade esquerda e antipartículas com quiralidade direita interagem via corrente carregada da força fraca. Além de ser um invariante de Lorentz.

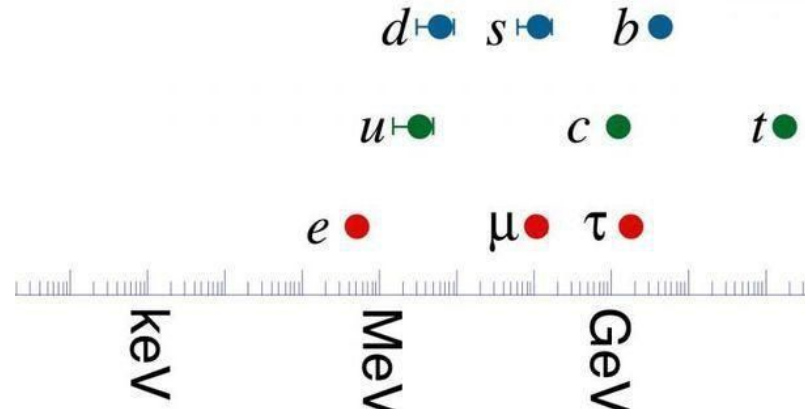
No regime sem massa o autoestado de helicidade é o mesmo de quiralidade.

HIGGS, MASSA E QUIRALIDADE

As partículas adquirem massa ao interagirem com o campo de higgs, acoplando partículas com quiralidade oposta



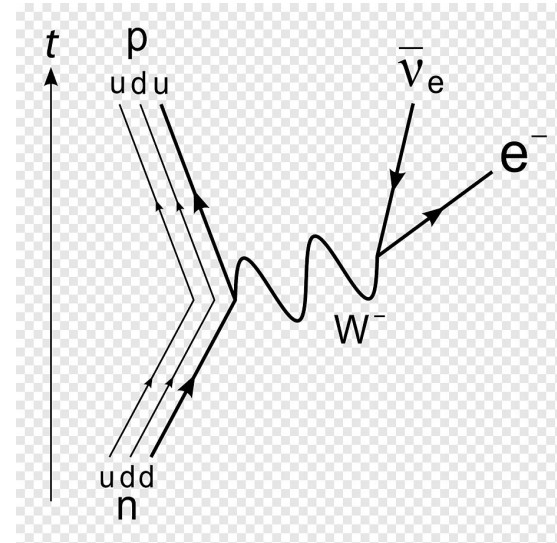
Aqui fica mais claro, porque a quiralidade não é conservada se a partícula tem massa.



INTERAÇÃO VIA CORRENTE CARREGADA DA FORÇA FRACA

- Acopla um lepton (quiralidade esquerda) com seu anti-neutrino (quiralidade direita)
- Acopla um lepton (quiralidade direita) com seu anti-neutrino (quiralidade esquerda)
- Conserva número leptônico: Partículas = +1 , Antipartículas = -1

(Conservação Acidental)



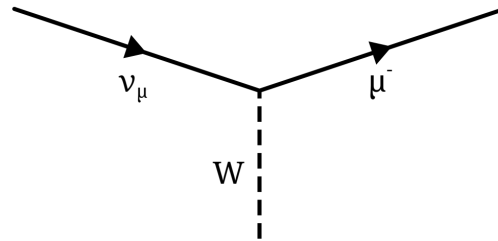
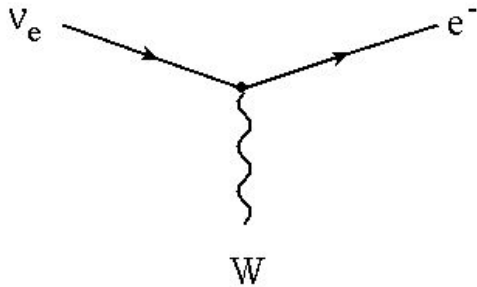
OS NEUTRINOS NO MODELO PADRÃO

→ Somente existem estados quirais de neutrinos de mão esquerda e estados quirais de anti-neutrinos de mão direita

→ **Não tem massa***

→ São partículas de Dirac (neutrinos e anti-neutrinos são partículas distintas)

→ Existem três diferentes sabores de neutrinos: neutrino eletrônico (ν_e), neutrino muônico (ν_μ) e neutrino tauônico (ν_τ).



OSCILAÇÃO DE NEUTRINOS E O PROBLEMA

→ Super Kamiokande e Sudbury Neutrino Observatory(SNO) descobriram a oscilação de neutrinos e o efeito MSW.

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta_{23} & \sin\theta_{23} \\ 0 & -\sin\theta_{23} & \cos\theta_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\theta_{13} & 0 & \sin\theta_{13}e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta_{13}e^{-i\delta} & 0 & \cos\theta_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\theta_{12} & \sin\theta_{12} & 0 \\ -\sin\theta_{12} & \cos\theta_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

Atmospheric Reactor & LBL Solar

Probabilidade de transição:

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) \sim \sin^2(2\theta_{13})\sin^2(\theta_{23})\sin^2(\Delta m_{12}^2 L/4E)$$



O neutrino é massivo!!!!

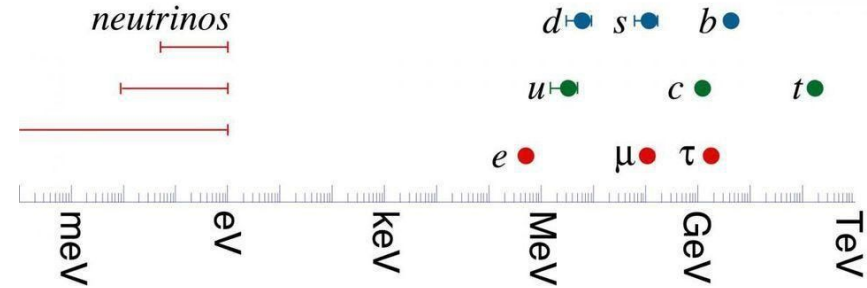
→ Porém em uma escala de massa muito distante dos seus irmãos léptons.

ALGUMAS OPÇÕES:

→ Continuar assumindo que o neutrino é uma partícula de Dirac e adicionar neutrinos de quiralidade oposta (e como consequência estéreis) para gerar o termo de massa

→ Assumir que o neutrino é uma partícula de majorana (partícula = antipartícula). Isso permite adicionar um termo de massa que acopla a partícula com seu conjugado. Isso significa que agora o antineutrino, nada mais é que o neutrino com quiralidade oposta

→ Mistura de ambos, dando origem ao mecanismo SeeSaw, gerando 3 neutrinos leves e no mínimo um neutrino estéril mais pesado. Os autoestados de massa ainda são de Majorana



Note que isso só é possível porque o neutrino é eletricamente neutro.

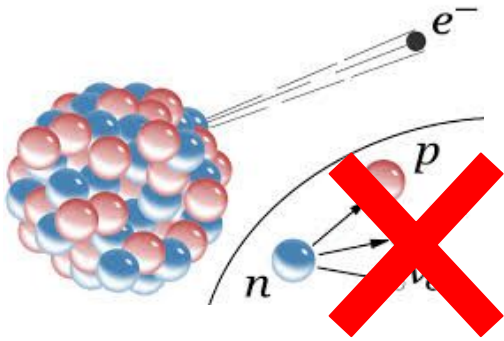


Majorana ou Dirac???
A busca pelo $\nu\beta\beta$

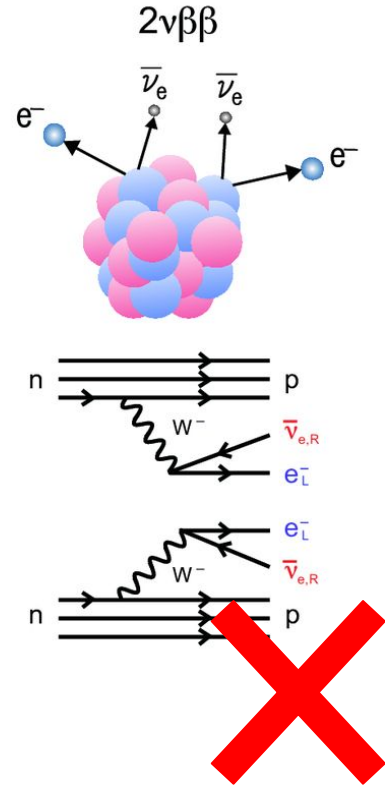
Como verificar?

Qual o método mais simples?

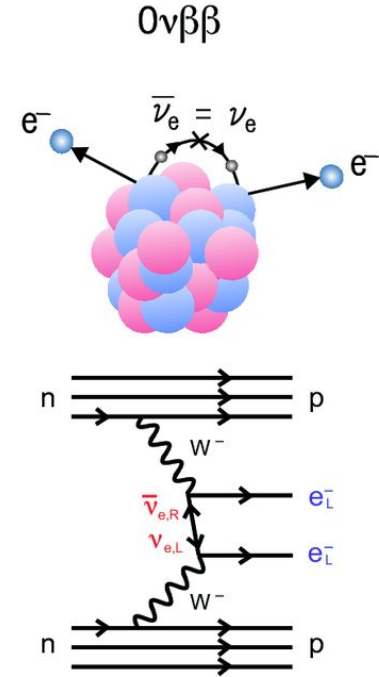
Com um decaimento beta normal?



Com um decaimento duplo beta?



Com um decaimento duplo beta sem emissão de neutrino?



$0\nu\beta\beta$

Energia Cinética somada de ambos os elétrons:

$2\nu\beta\beta \rightarrow$ Espectro contínuo

Permitido no modelo padrão

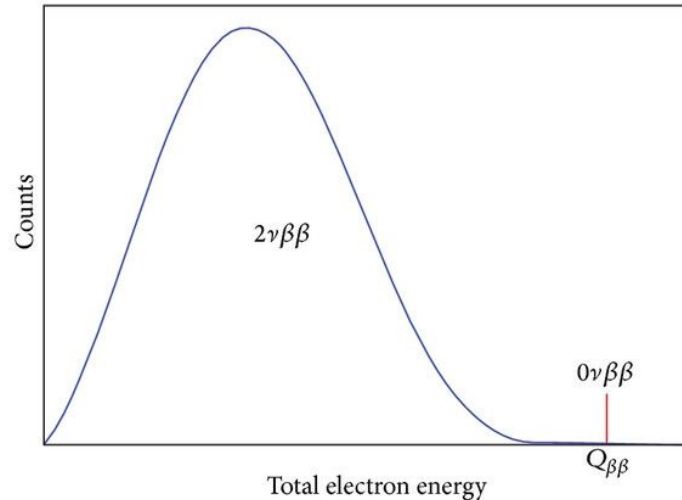
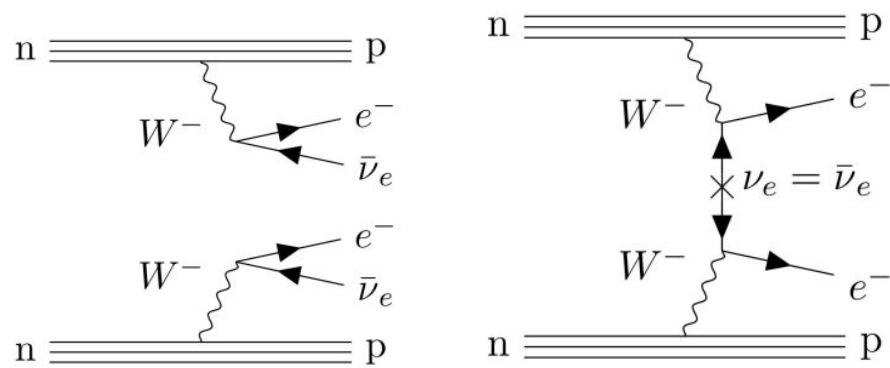
$T_{1/2} \sim 10^{18}$ a 10^{24} anos

$0\nu\beta\beta \rightarrow$ Espectro discreto

\rightarrow Violação de número leptônico

Explicação de assimetria matéria e antimatéria

$T_{1/2} > 10^{21}$ anos



0νββ

$$[T_{1/2}^{0\nu}]^{-1} = G^{0\nu}(Q_{\beta\beta}, Z) |M^{0\nu}|^2 \frac{|m_{\beta\beta}|^2}{m_e^2}$$

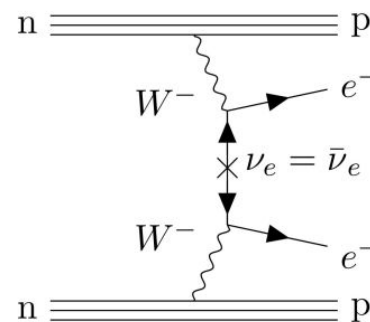
Fator de fase, número de maneiras do decaimento acontecer, conhecido com precisão

$$Q_{\beta\beta} = M(Z) - M(Z+2) - 2m_{ee}$$

Elemento de matriz nuclear: probabilidade do núcleo com o decaimento proposto. Grande incerteza.

Massa efetiva no neutrino de majorana

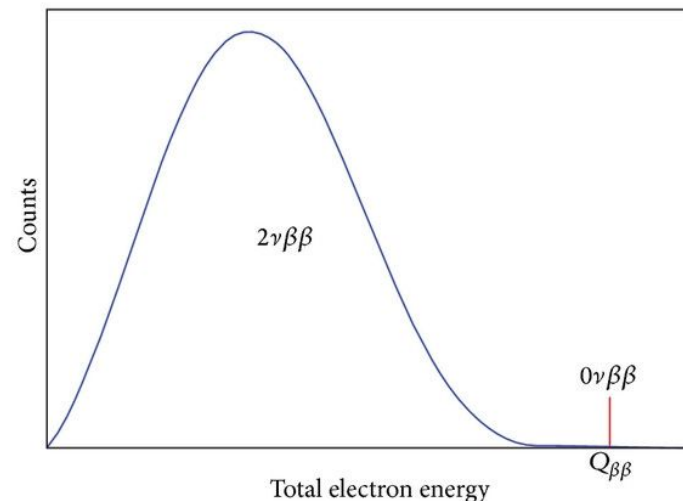
$$\langle m_{\beta\beta} \rangle = \left| \sum_i U_{ei}^2 m_i \right|$$



No experimento:

$$T_{1/2}^{0\nu} \propto \sqrt{\frac{M t}{\Delta E B I}}$$

M: massa ativa
t: tempo de run
 ΔE : resolução energética
BI: background index

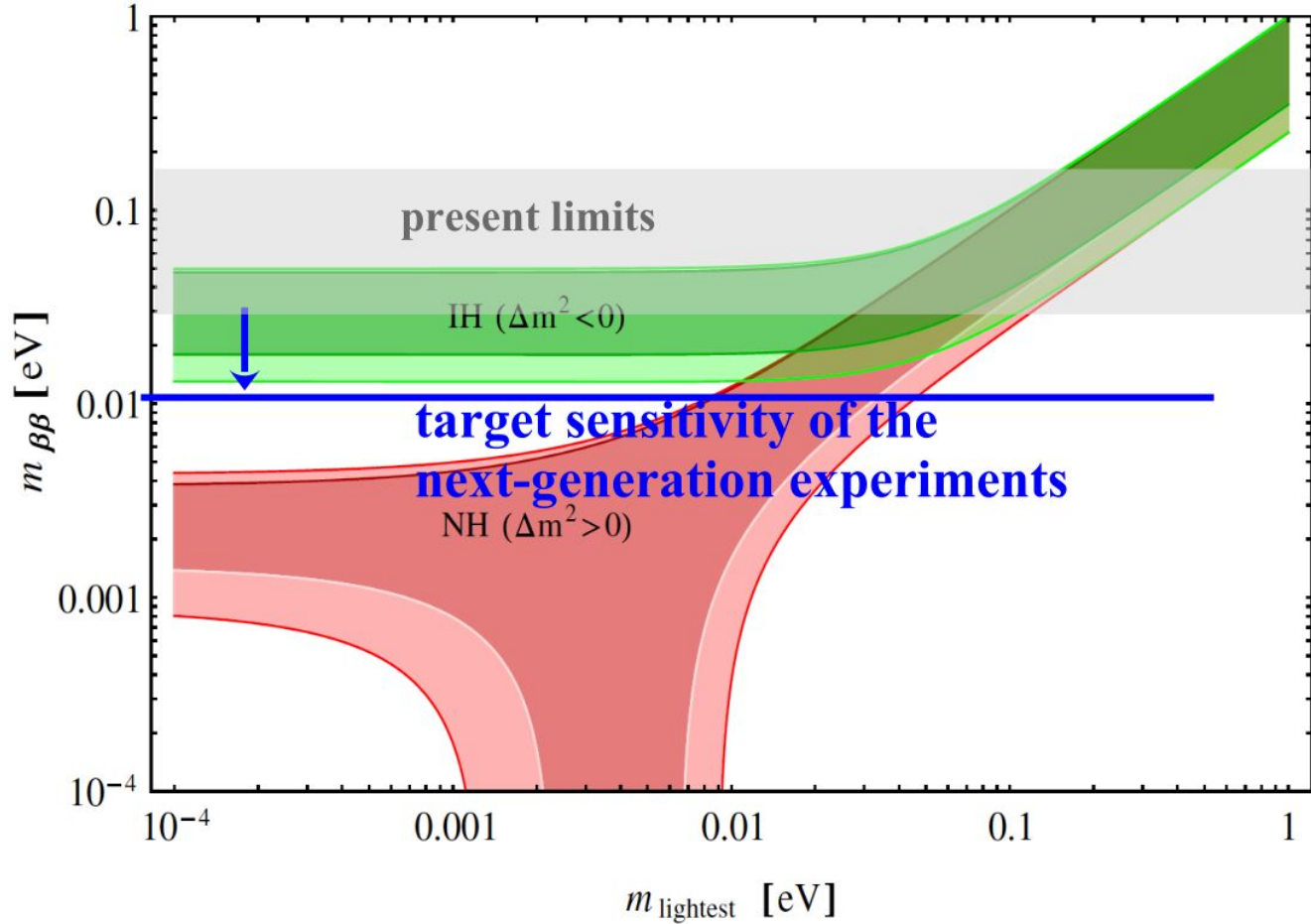


Escolha do material

– O decaimento $0\nu\beta\beta$ é um processo de segunda ordem fraca. Para que um núcleo seja candidato a este processo, o decaimento beta simples deve ser energeticamente proibido. Isso ocorre quando:

$$M(Z + 1, A) > M(Z, A) \quad (\beta^- \text{ proibido}) \qquad M(Z + 2, A) < M(Z, A) \quad (\beta\beta \text{ permitido})$$

- Alto $Q_{\beta\beta}$ – maior fator de fase
- Escalabilidade
- Abundante, ou facilmente enriquecido
- Pouco Background/Impureza





LEGEND

Usando ^{76}Ge para estudar o $0\nu\beta\beta$

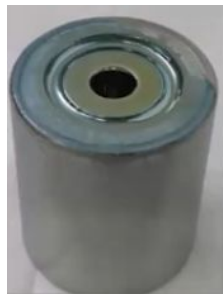
A colaboração LEGEND

Large Enriched Germanium Experiment for Neutrinoless $\beta\beta$ Decay

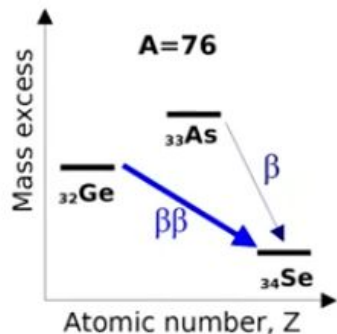
União da colaboração GERDA e do demonstrador MAJORANA

Uso de ^{76}Ge

- Alta eficiência: Fonte = Detector
- Alta pureza
- Excelente resolução energética
- Tecnologia bem estabelecida
- Alta densidade



LEGEND



$$Q_{\beta\beta} = 2039 \text{ keV}$$

O detector de Germânio

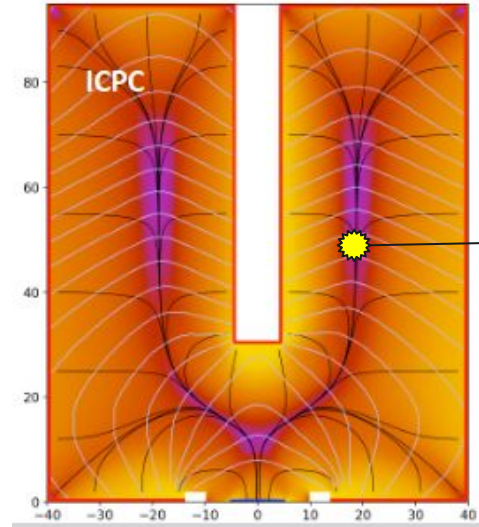
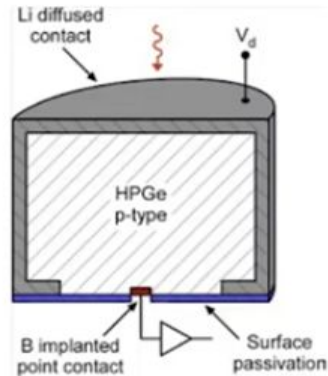
O HPGe (high purity germanium) germânio é um **semicondutor** tipo **p**, e é operado em regime reversamente polarizado para criar uma grande zona de depleção.

Operado a uma temperatura de 87K

Necessario enriquecimento (de ~ 8% para ~ 85%)

Contato p+ : altamente dopado com B e fino @ 0V

Contato n+: dopado com Li @ 3 to 5 kV



Quando energia é depositada são gerados pares elétrons-lacunas que são guiados para anodo(p+) ou catodo (n-)

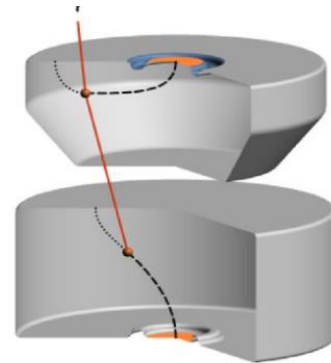
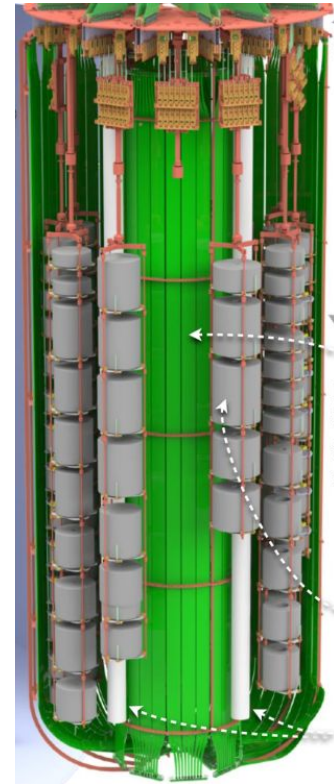
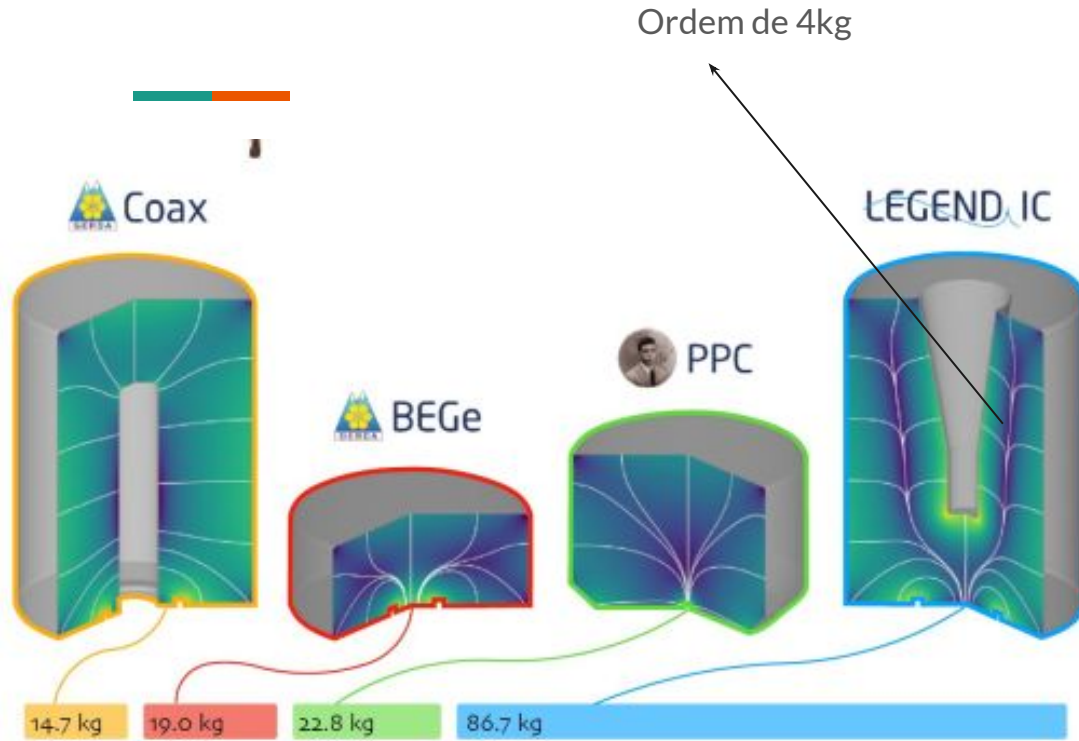


LEGEND-200

- 200 kg de HPGe
- VETO passivo de água ultra pura e Argônio Líquido
- Gran Sasso (Itália)
- Sensível a $T_{1/2}$ a ordem de 10^{27} anos
- BI (background index) na ordem de 2×10^{-4} cts/(keV.kg.ano)
- Coleta de dados iniciou em março de 2023

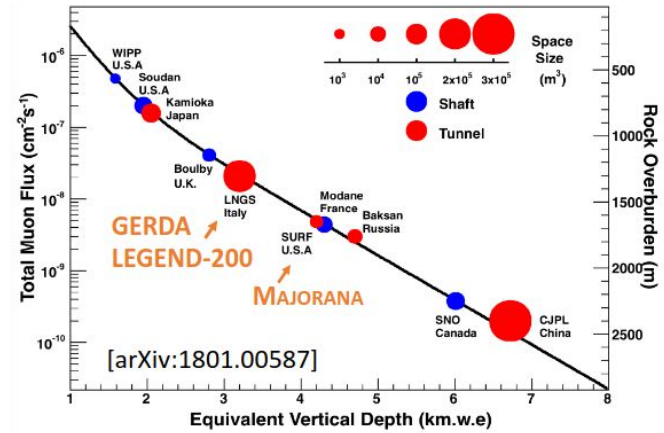
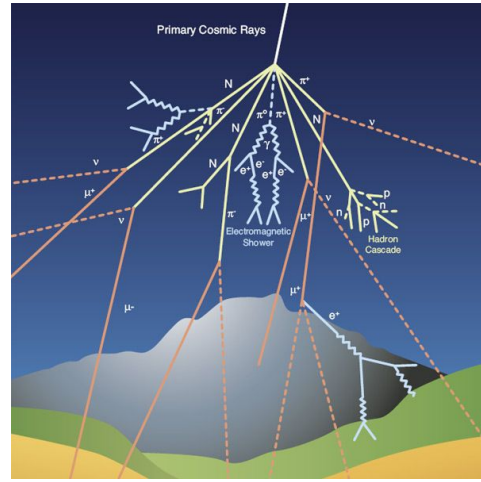
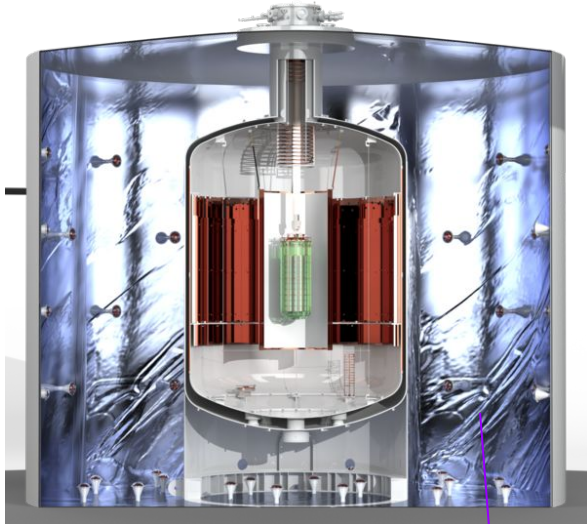


4 tipos de geometria



MULTIPLICITY CUT

MUON VETO

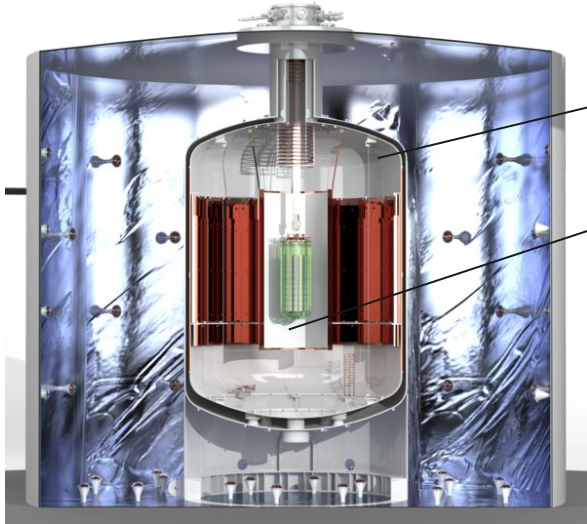


Tanque de água ultra pura (590 m³) para detectar photons cherenkov produzidos por múons com o uso de 66 PMTs (Photomultipliers tube)

Também funciona como neutron moderator

Nota: Radiação Cherenkov é a radiação emitida por uma partícula carregada viajando mais rápido que a velocidade da luz do meio.
Na água: $v > 0.75 c$

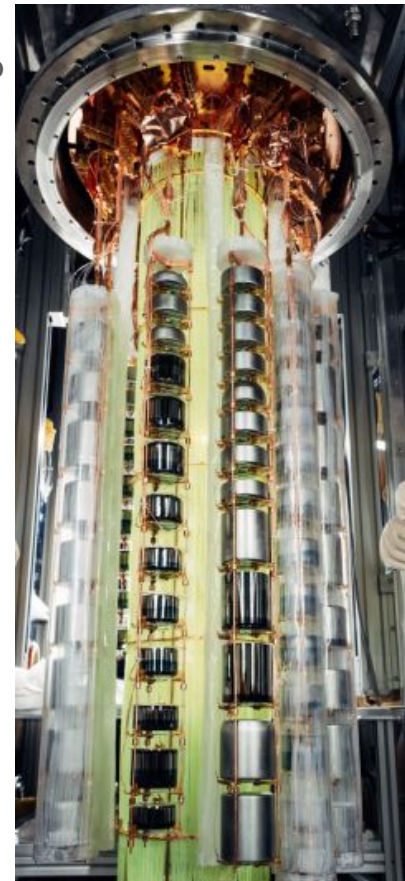
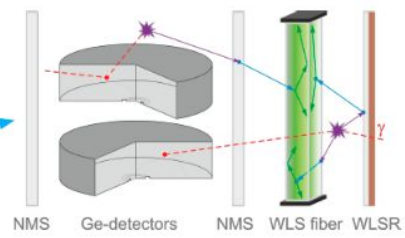
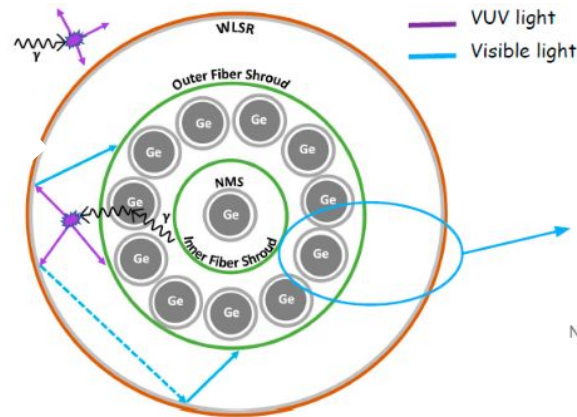
VETO de Argônio Líquido (LAr) e INSTRUMENTAÇÃO



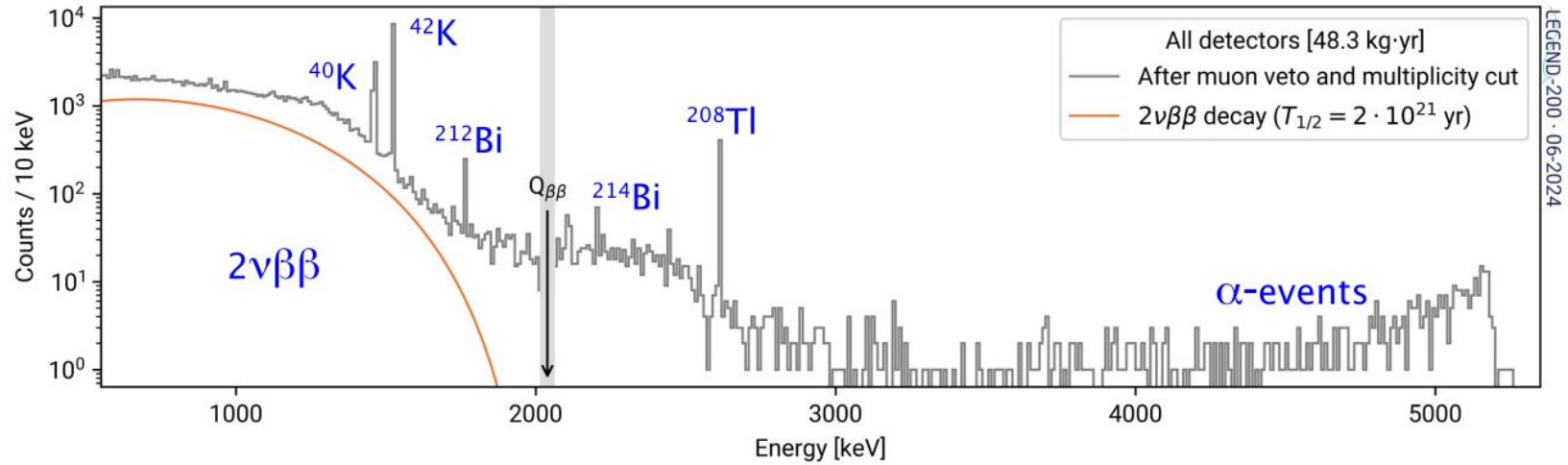
Volume externo de LAr para refrigeração e veto passivo

Volume interno de LAr com veto instrumentado

- Uso de 64 m³ de LAr
- Duas camadas concêntricas de fibras óticas com TPB evaporadas
- Nylon transparente com TPB evaporado em volta dos detectores de germânio
- WLS-Reflator em volta do germânio e das fibras
- 58 SiPMs (Silicon Photomultipliers)
- Fibras convertem do azul para o verde



BACKGROUND



α : Po-210 na superfície do germânio

γ : Linha em ^{40}K , ^{42}K , ^{214}Bi , ^{208}Tl além de gerarem também β

n: Ativação cosmogênica de materiais

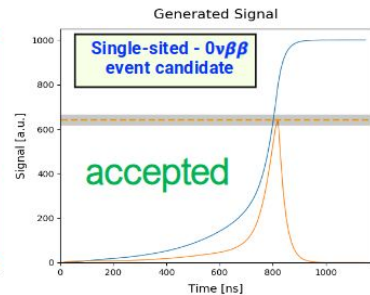
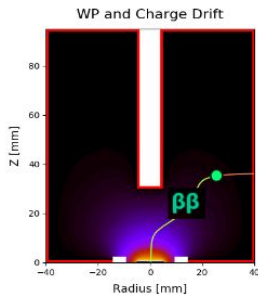
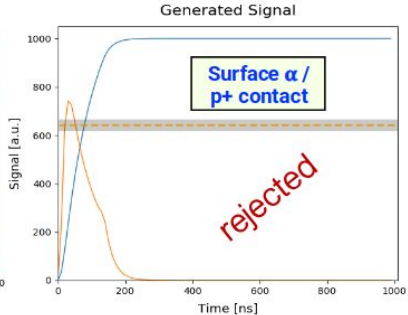
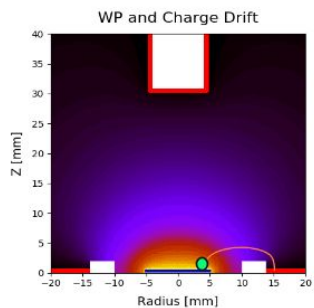
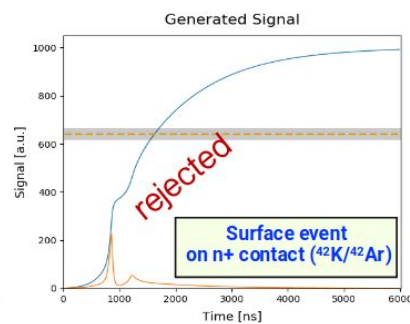
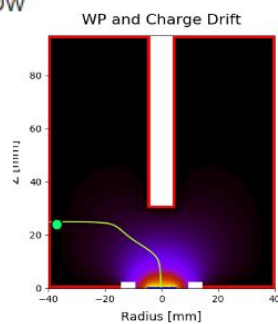
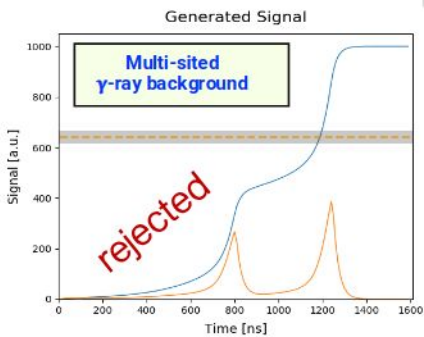
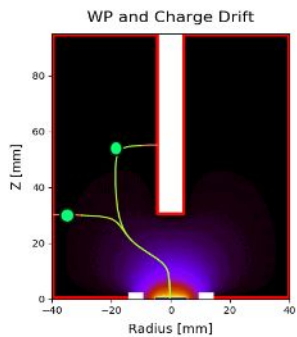
Contaminação de U238,
Th232 e do Ar42

Discriminação pela forma do pulso

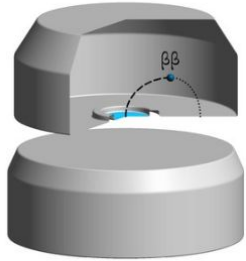
→ Campo elétrico mais forte perto do p+ e mais fraco perto do n+

→ Campo elétrico uniforme ao longo do seu volume: isso gera formas de ondas que não dependem da posição que a energia foi depositada, a menos que tenha ocorrido perto dos terminais.

→ Discriminação de A/E (amplitude/energia)

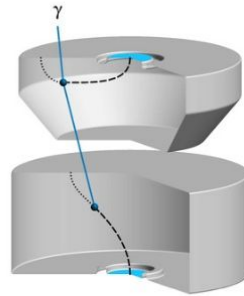


EM SUMA



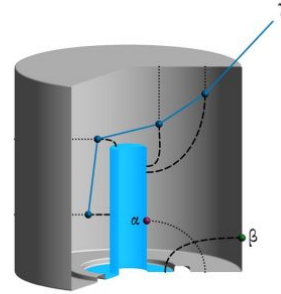
Single-site event topology (SSE)

- $2\nu\beta\beta$
- $0\nu\beta\beta$



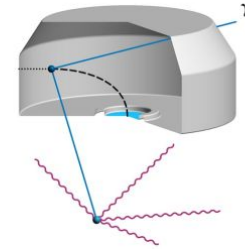
Detector multiplicity

- scattered events



Pulse Shape Discrimination (PSD)

- scattered multi-site events (MSE)
- surface events



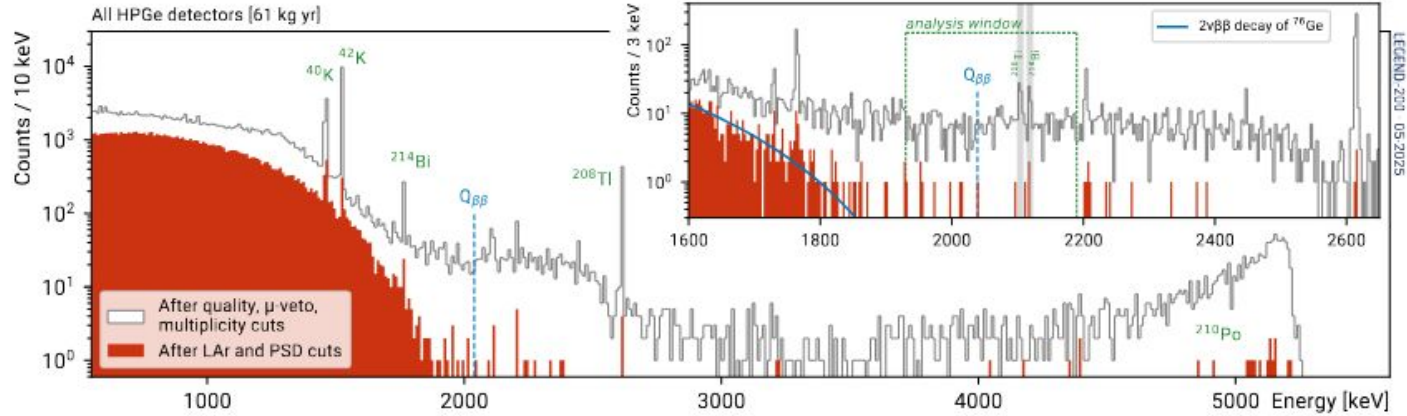
LAr-anti coincidence

- intrinsic backgrounds
- Ge cosmogenics

Water Cherenkov anti-coincidence

- muons

RESULTADOS

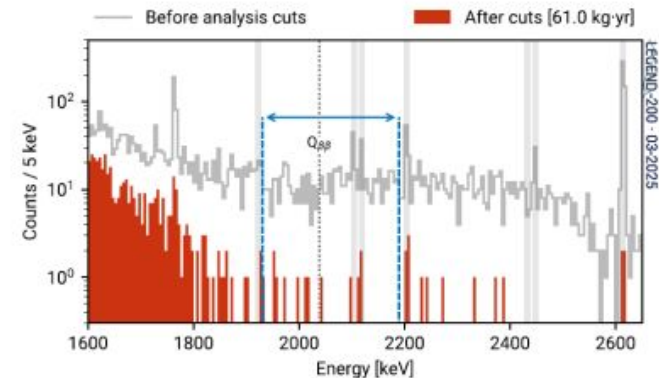


[10.48550/arXiv.2505.10440](https://arxiv.org/abs/10.48550/arXiv.2505.10440)

- 11 eventos na região de interesse
- 61 kg.anos de exposição

Frequentista: $T_{1/2} > 1.9 \times 10^{26}$ anos @ 90% C.L.

Bayesiana: $T_{1/2} > 2.8 \times 10^{26}$ anos @ 90% C.I.



LEGEND 1000

→ 1 tonelada de germânio

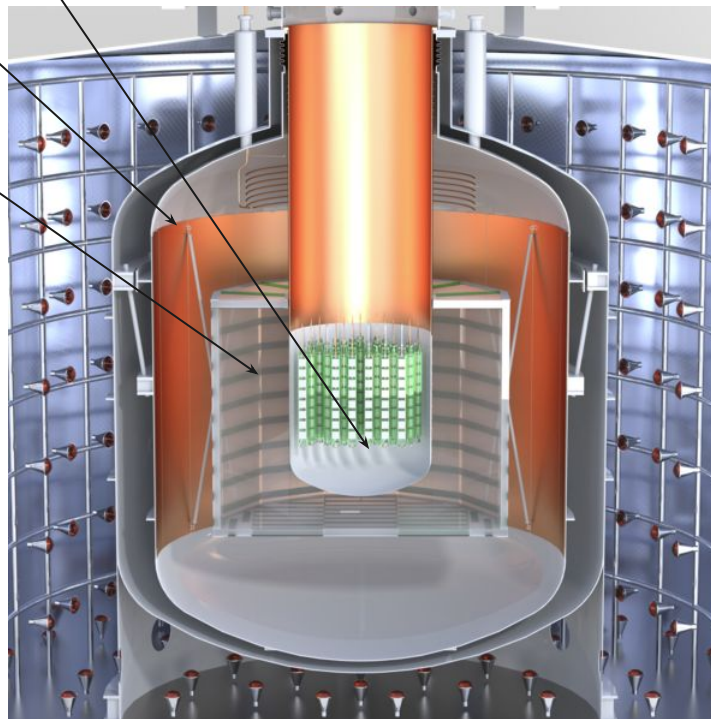
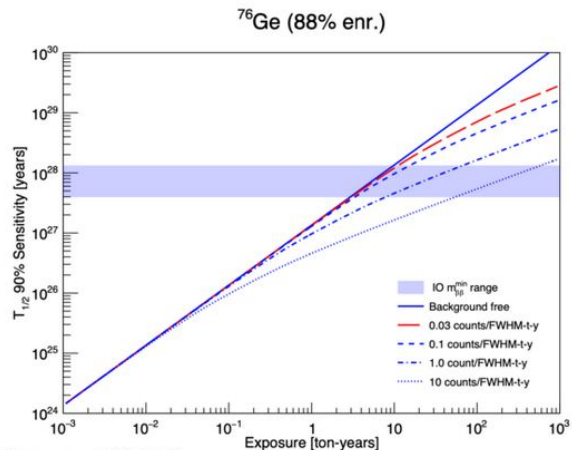
→ Para veto interno de argônio líquido, uso de 30 toneladas argônio subterrâneo (redução em 1400 vezes de ^{42}Ar) + ~ 350 toneladas de argônio atmosférico

→ Neutron Moderator : polietileno + gadolínio ou boro

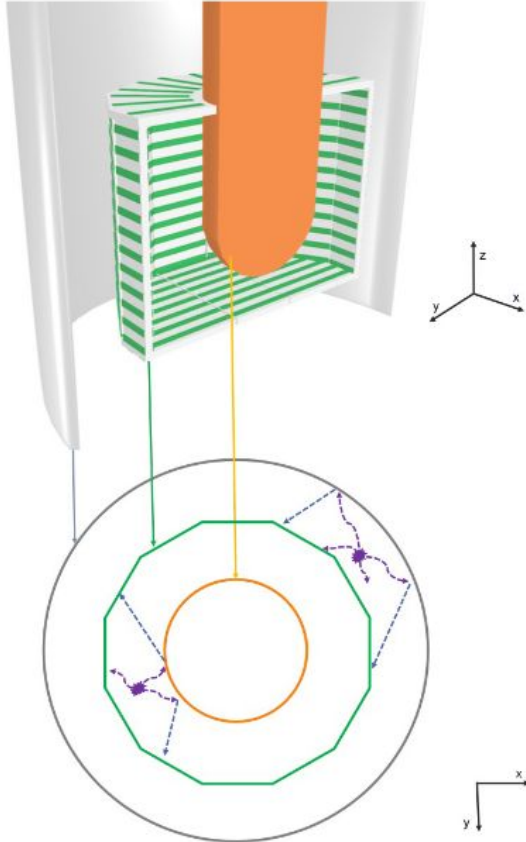
→ $\text{BI} < 10^{-5}$ cts/(keV kg yr) → $T_{1/2} > 10^{28}$ yr

→ Uso de materiais com menos background

→ Usar apenas os detectores IC



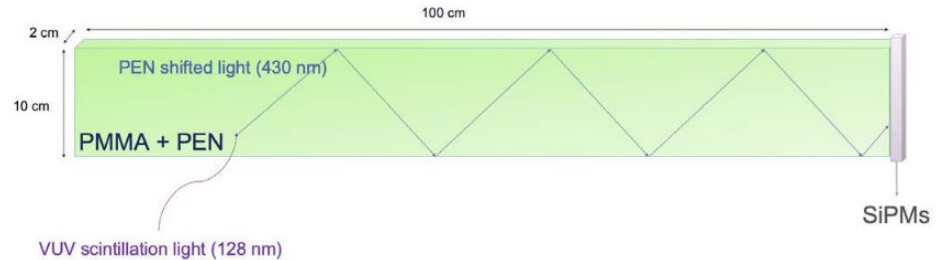
Outer LAR instrumentação referência



Guias de luz de $100 \times 10 \times 2$ cm³ feitos de PMMA e envolvidos com uma fina folha de PEN ou TPB, atuando como WLS (ou 178 nm do LAr dopado com **xenônio**).

Estudo será realizado pelo grupo de Napoli

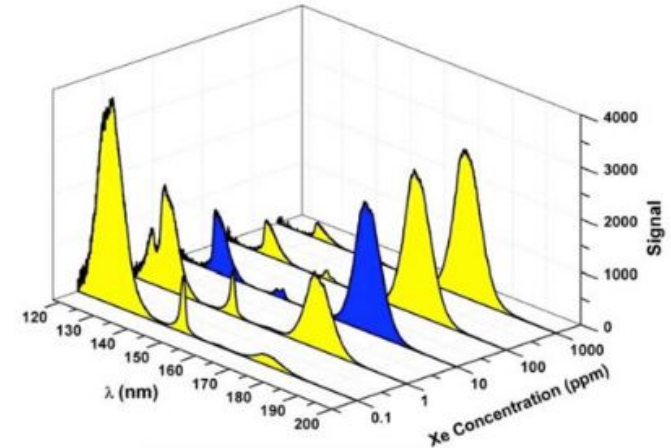
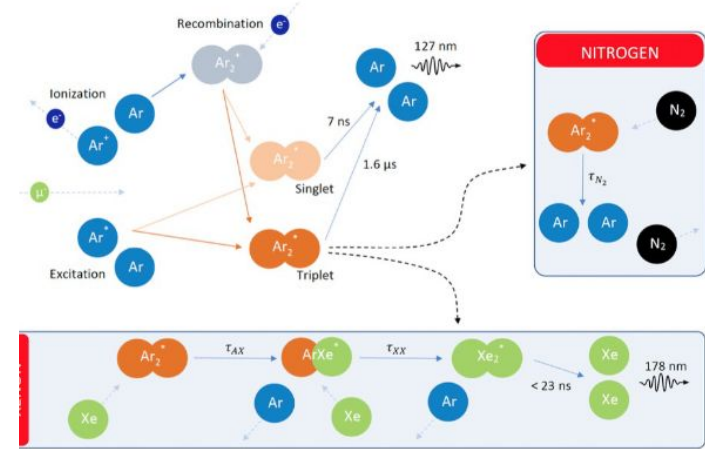
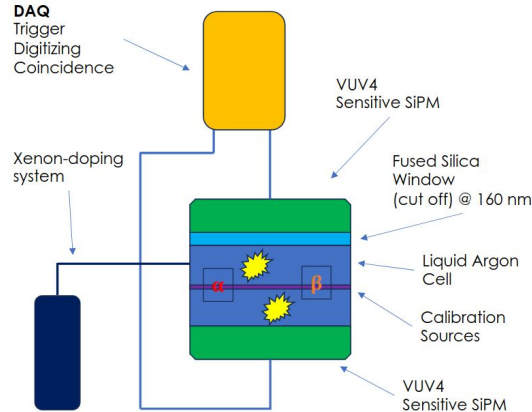
A leitura é feita em uma (ou ambas) extremidade(s) do guia com SiPMs de 12,6 mm².



Xenon doping


Atividades para testar o doping de Xenônio pelo grupo de Napoli

- Boa distribuição volumétrica uniforme do WLS (shifter de comprimento de onda)
- Reemissão no ponto de interação
- Redução da sensibilidade do argônio líquido (LAr) à impurezas
- Aumento do comprimento de espalhamento de Rayleigh
- Tempo de cintilação mais curto
- Melhoria no Light Yield
- Melhor resolução





Conclusão

- 
- O uso combinado de Germânio como detector + alvo, junto com as técnicas de veto utilizando água, argônio e PSD permitem uma ótima coleta de eventos com baixo background

LEGEND 200 (primeiro ano de operação) :

Frequentista: $T_{1/2} > 1.9 \times 10^{26}$ anos @ 90% C.L.

Bayesiana: $T_{1/2} > 2.8 \times 10^{26}$ anos @ 90% C.I.

LEGEND 1000:

Com o uso das mesmas tecnologias em escala maior + UAr + neutron moderator tem o objetivo de diminuir ainda mais o background index e varrer toda a região da ordem invertida dos neutrinos