

Experimento DUNE e a Contribuição Brasileira

Hélio da Motta

CBPF

pelo DUNE-BR

¹CBPF, ²CTI-Renato Archer, ³UEFS, ⁴UFABC, ⁵UFF, ⁶UFG, ⁷UFJF, ⁸UFRJ,
⁹UFSCAR, ¹⁰UNICAMP, ¹¹UNIFAL, ¹²UNIFESP, ¹³UTFPR

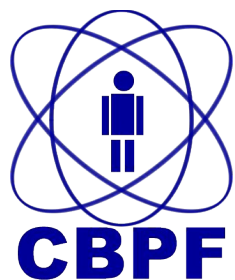
(Hélio da Motta (co-coordenador), Renato Santana, João dos Anjos)¹, (Maria Cecília Queiroga Bazetto, Vinicius Lago Pimente)², (Germano Guedes)³, (Célio Adrega de Moura Junior, Laura Paulucci, Marcelo Leigui, Felipe Kamiya, Vitor Luzio)⁴, (Diego Rossi Gratieri, Rogerio Menezes de Almeida)⁵, (Ricardo Avelino Gomes)⁶, (Rafael Nobrega)⁷, (João Ramos Torres de Mello Neto, Leonardo da Silva Peres, Marcelo Oliveira)⁸, (Franciole Marinho)⁹, (Ettore Segreto, Ana Amélia Machado, Ernesto Kemp, Marcelo Moraes Guzzo, Orlando Luis Goulart Peres (Coordenador), Pedro Cunha de Holanda, Suprabh Prakash, Ewerton Belchior Batista das Chagas, Greg Souza, Bruno Gelli, Henrique Vieira de Souza, Pedro Dedin Neto, Heriques Frandini, Renan Silva Soares, Frederico Demolin)¹⁰, (Gustavo do Amaral Valdivieso, Anibal Thiago Bezerra)¹¹, (Rodolfo Valentim, Carlos Senise, Marco Dias)¹², (André Fabiano Steklain Lisboa, Marcio Adames, Francisco Ganacim, Marcelo Antoniassi, Luciana Rocha Hirsch, Adilson Barros, Marlos Oliveira Ribas)¹³

DUNE – uma colaboração global

1347 colaboradores de 204 instituições em 33 países + CERN



DUNE-BR 47 colaboradores brasileiros de 13 instituições

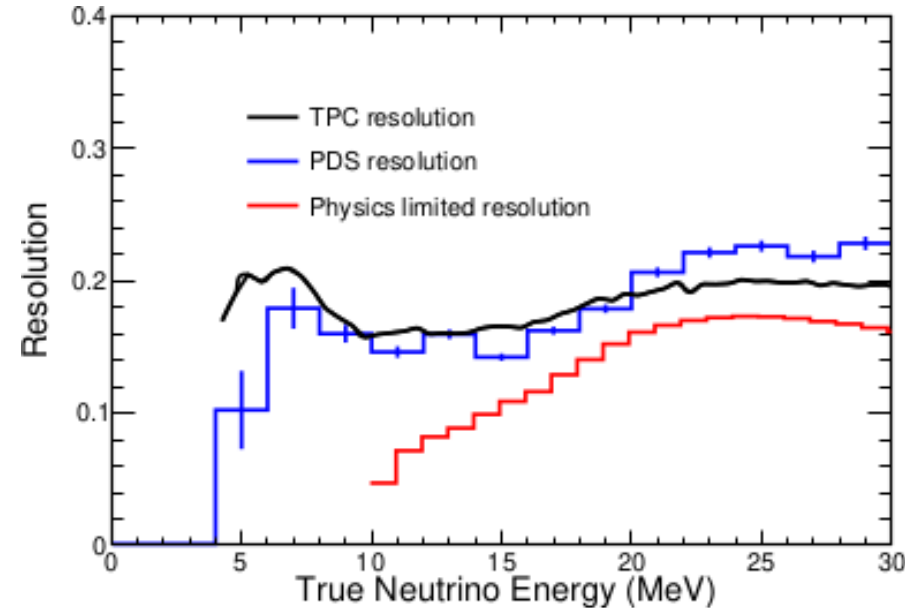


Programa de física do DUNE

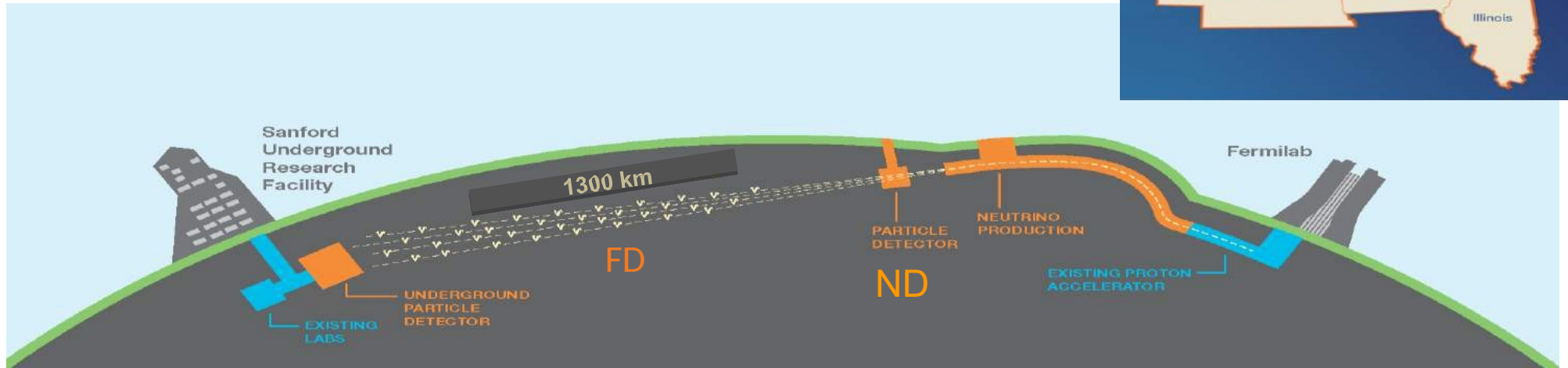
- ***Física de oscilação de neutrinos***
 - Alta sensibilidade à violação leptônica de CP
 - Hierarquia de massa dos neutrinos
 - Física de oscilação de neutrinos em alta precisão e teste de oscilações com três sabores
- ***Busca pelo decaimento do próton***
 - Prevista por teorias BSM. Busca do decaimento favorecido por SUSY $p \rightarrow K^{++} \nu$
- ***Física e astrofísica de explosões de SuperNova***
- ***Neutrinos solares e atmosféricos***

Neutrinos de SuperNova – Sistema de PD

- Contribuição fundamental do sistema de detecção de fótons nesta faixa de energias => ***melhor resolução de energia que LarTPC***
- Pode melhorar a resolução geral de energia do DUNE



Deep Underground Neutrino Experiment



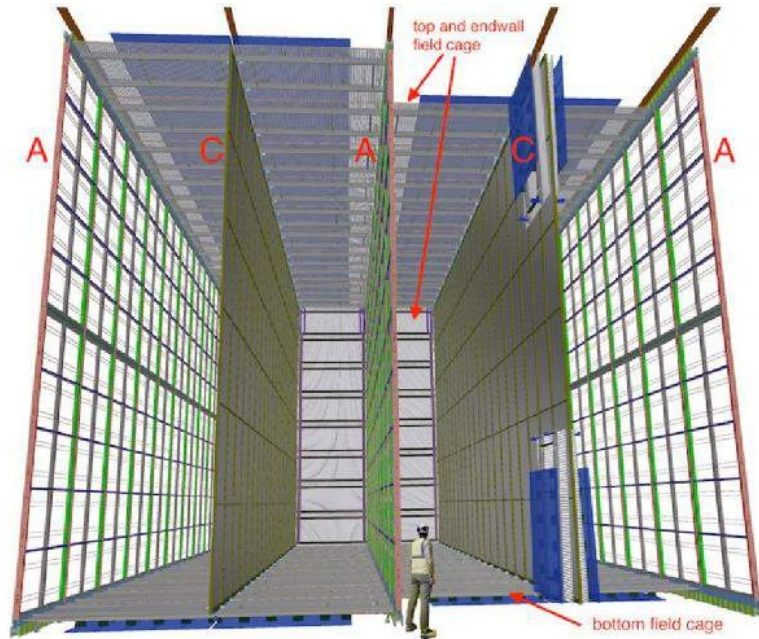
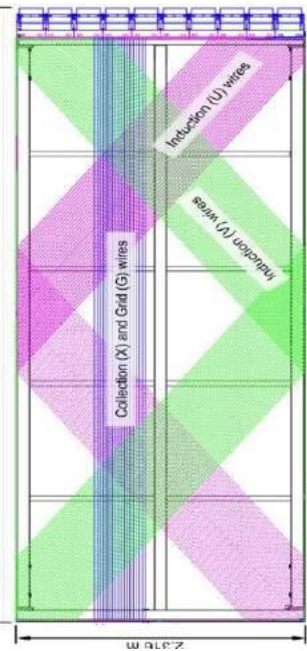
Feixe de neutrinos de banda larga de alta potência (energia na faixa de \sim GeV).
Um Detector Distante (FD) de \approx 40 kt de argônio líquido em Dakota do Sul, 1478 m abaixo da superfície em uma antiga mina de ouro.

Um Detector Próximo (ND) a cerca de 575 m da fonte de neutrinos no Fermilab próximo a Chicago.

Tecnologias de leitura de LAr

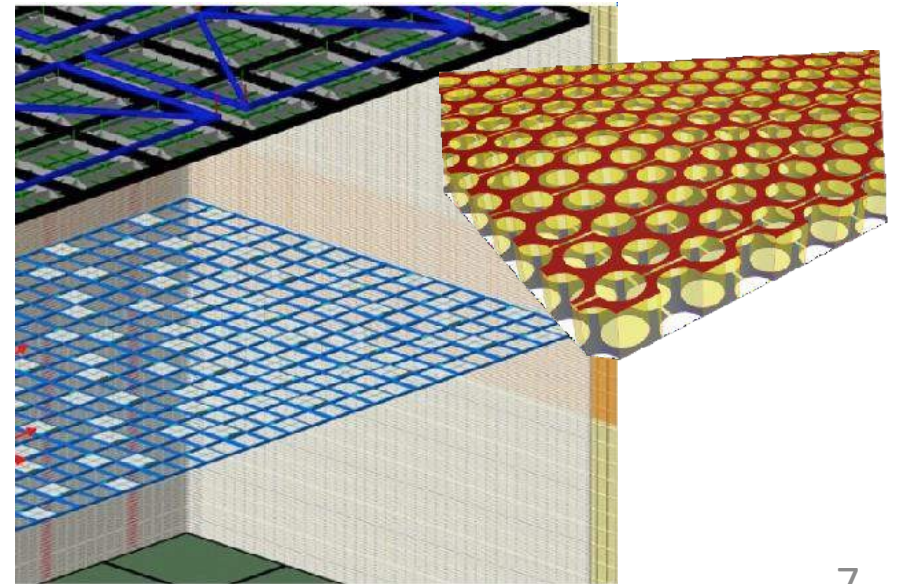
Módulo #1

- 3,6 m deriva horizontal
- planos de anodos de fios verticais
- catodos resistivos verticais
- detectores de fótons

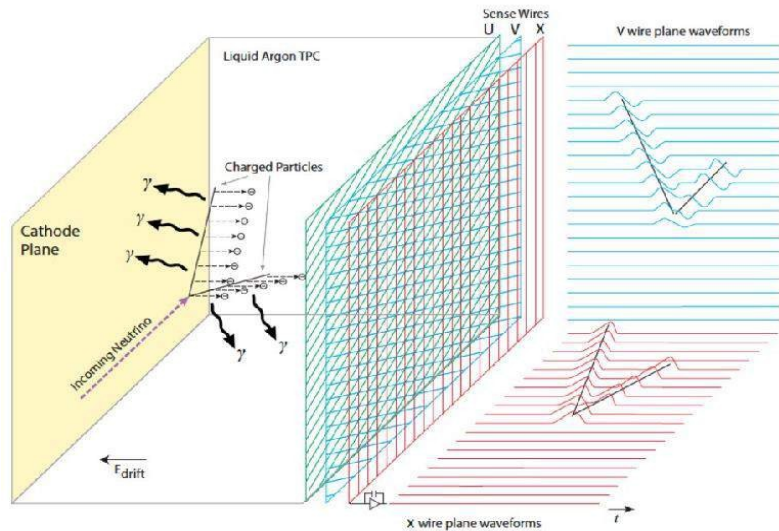


Módulo #2

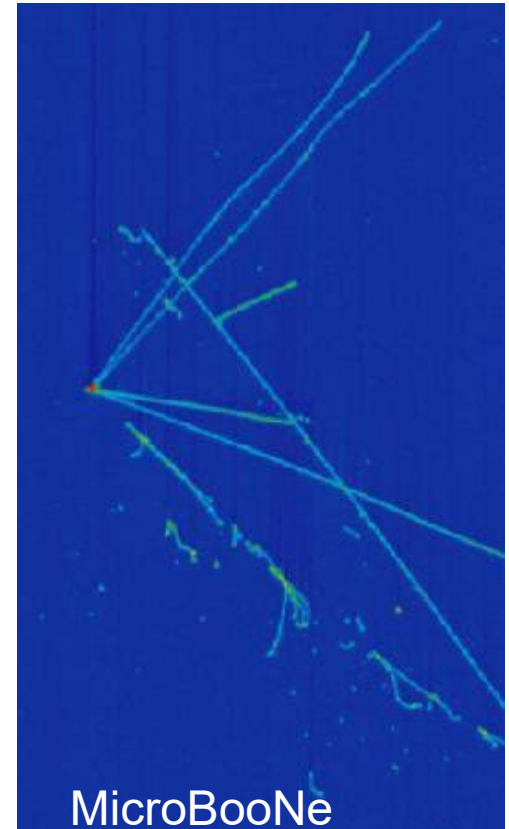
- 6,5 m deriva vertical
- horizontal PCB anode readout (CRP)
- grade de catodo horizontal
- detectores de fótons



Câmara de Projeção Temporal (deriva horizontal)



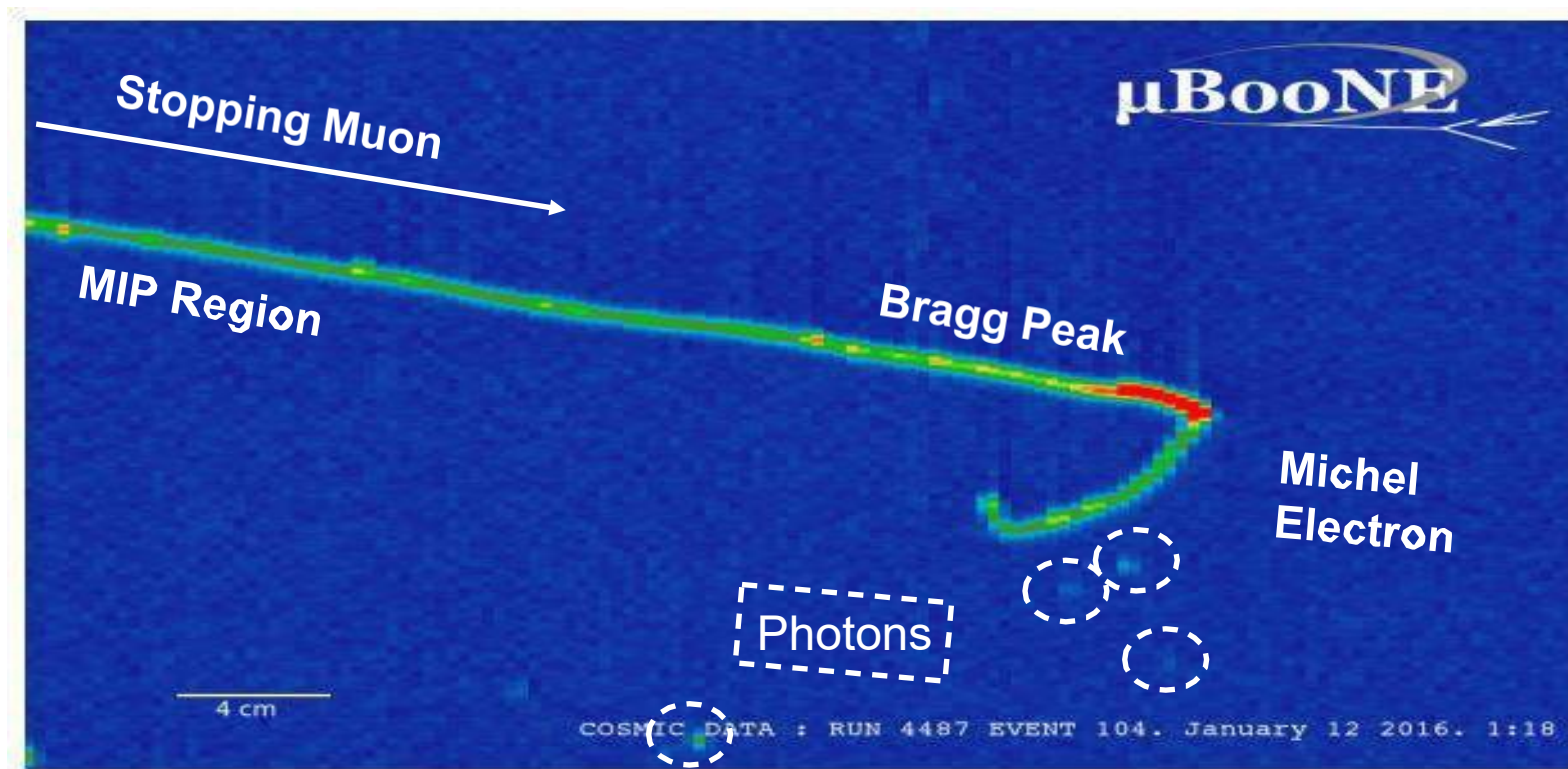
princípio geral de operação do LArTPC de fase única. Elétrons resultantes de ionização do meio deslocam-se horizontalmente no campo elétrico E dentro do LAr e são coletados no anodo constituído de fios sensores U, V e X. A parte à direita da figura representa as projeções temporais em duas dimensões quando ocorre o evento. Detectores de luz, que não são mostrados na figura, fornecem o t_0 da interação.



MicroBooNe

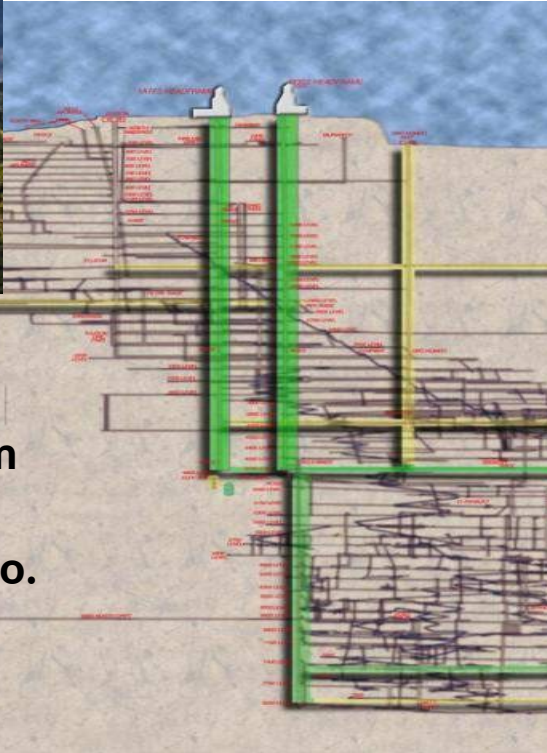
Uma câmara de bolhas de argônio líquido*

* Or Cloud Chamber!



• **Resolução na ordem de mm; Excelente medida de energia; Excelente separação e- γ ;**
Identificação de partículas por dE/dx , alcance,...; Tempo a partir da cintilação(luz)

Instalação de Pesquisa Subterrânea de Sanford (SURF)



- Instalações Experimentais a 1478 m de profundidade , em Dakota do Sul.
- Dois poços verticais de acesso.
- Excavação iniciada em 2017

1478 m

Status em Sanford

- ***Fase de Pre-excavação completa*** – equipamento e sistemas para mover o material da escavação para a superfície e depositá-lo em área aberta
- ***Excavação*** – construção de **três cavernas DUNE em curso**. Trabalho iniciado em abril de 2021 e com término previsto para abril de 2024
- ***Pronto para início de instalação dos sistemas de serviço (ventilação, ar condicionado, energia, e outros) assim que a excavação for completada em 2024.***



Concepção do Detector Próximo

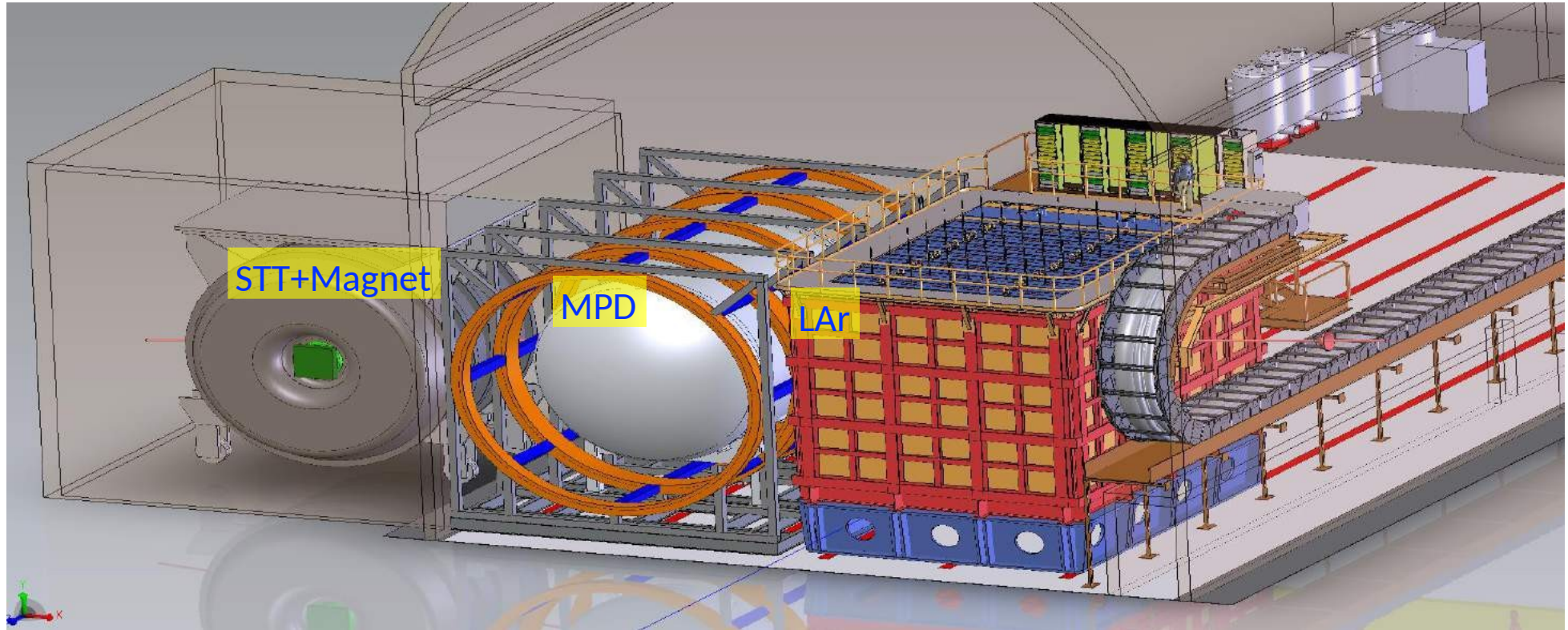




Illustration by Sandbox Studio, Chicago with Pedro Rivas

ARAPUCA: Façam-se armadilhas para a luz

10/24/19 | By Lauren Biron

As instituições latino-americanas são imprescindíveis para a criação dos detectores de fótons usados na Experiência de Neutrinos em Grande Profundidade.



UNICAMP

ARAPUCA

Um **sistema inovador para detecção de fótons** foi **integralmente desenvolvido no Brasil** e está sendo **implementado no experimento**. Este sistema, conhecido como Arapuca, consiste em um **dispositivos que “prende” os fótons em uma caixa de onde não conseguem escapar e são, eventualmente, coletados** (daí o nome Arapuca por tratar-se de uma armadilha para pegar fótons). Este artefato implica **significativo aumento na eficiência de coleção de fótons** e são, portanto, de grande importância para os detectores acima descritos. Trabalho desenvolvido em nosso grupo consiste em simulações, testes, montagem, instalação de Arapucas, desenvolvimento de instrumentação associada bem como análise de seus resultados e **possibilidades de empenho** não apenas no DUNE mas **em outros experimentos e aplicações onde a detecção de fótons seja necessária**. Trata-se de importante e significativa contribuição tecnológica e de inovação. Atualmente o projeto foi atualizado resultando em um avanço do sistema que é conhecido como X-Arapuca. Para testes dos detectores e técnicas de detecção do experimento DUNE construiu-se no CERN um detector conhecido como ProtoDUNE onde diversos sistemas podem ser testados e desenvolvidos.



UNICAMP

ARAPUCA no DUNE

- A ARAPUCA, desenvolvida na UNICAMP e com a colaboração de muitos colegas Brasileiros e Latino Americanos foi escolhida pela Colaboração DUNE como o sistema de detecção de luz do far detector. Um dos maiores detectores de partículas nunca construído
- Conseguimos atrair muitos pesquisadores Europeus e dos EUA
- E o projeto está ainda em fase de crescimento com o desenho do módulo 2 do far detector

A world map with orange callout boxes pointing to specific regions. The callouts are: 'Fotossensores e eletrônica fria (Espanha, Itália, República Checa)' pointing to Europe; 'Eletrônica de leitura (Colômbia, Peru, Paraguai, EUA)' pointing to South America; 'Óptica, mecânica e montagem (Brasil)' pointing to Brazil; and 'Consórcio internacional' with a list of participants pointing to the Americas and Europe. The map uses orange for highlighted regions and grey for others.

Fotossensores e eletrônica fria
(Espanha, Itália, República Checa)

Eletrônica de leitura
(Colômbia, Peru,
Paraguai, EUA)

Óptica, mecânica e montagem
(Brasil)

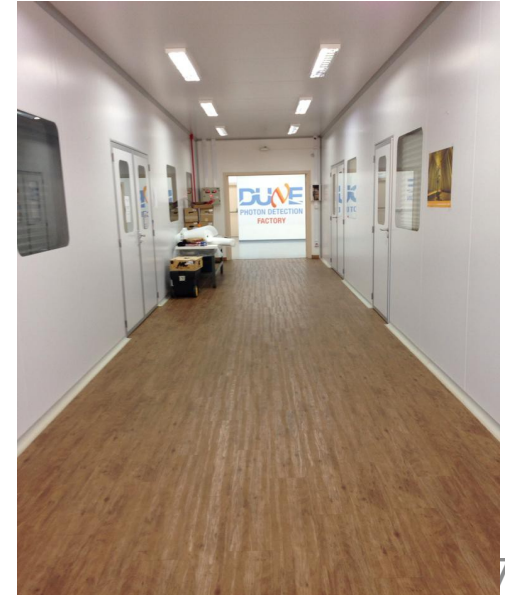
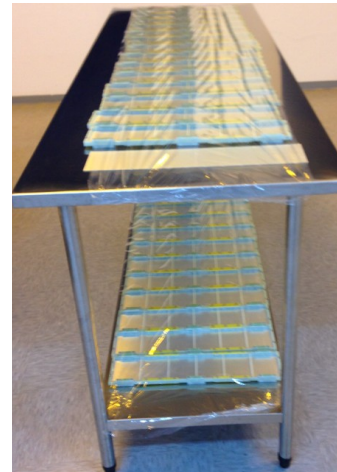
Consórcio internacional

46 instituições participantes
Iguamente distribuídas entre
América Latina (17),
América do Norte (12) e
Europa (17)

dentro do espírito internacional
da Colaboração DUNE

Produção no Brasil

A montagem final das ARAPUCAs irá acontecer na UNICAMP, no Laboratório de Leptons



25/04/2022

Produção no Brasil

- As partes mecânicas e óticas das ARAPUCAs estão sendo produzidas por empresas do Estado de São Paulo, respectivamente Equatorial (São Jose dos Campos) e os filtros dichroicos são produzidos pela OPTO (São Carlos)
- A limpeza dos filtros é feita no CTI Renato Archer (Campinas) e a evaporação do wavelength shifter é feita na UNICAMP

X-ARAPUCAs em protoDUNE



protoDUNE

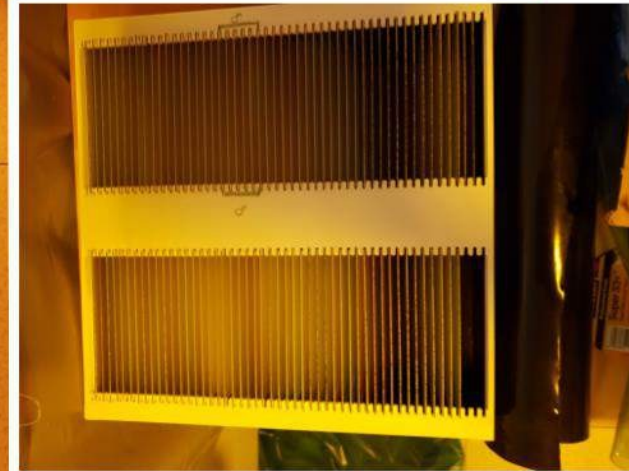
40 módulos de X-ARAPUCAs vão ser testados no prototipo do DUNE no CERN (proto-DUNE)



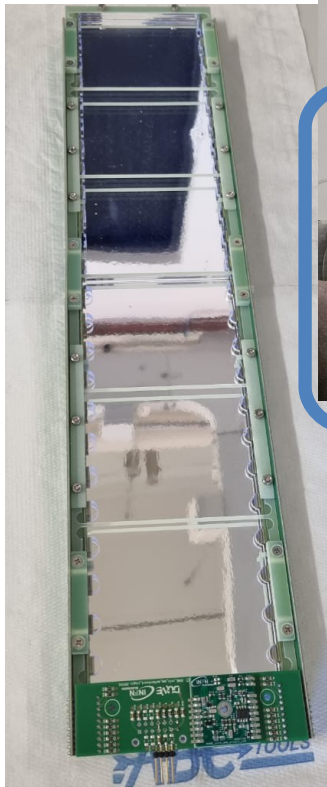
Primeiro módulo



Filtros OPTO evaporados na UNICAMP



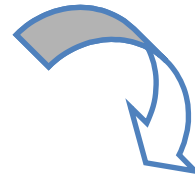
Teste das X-ARAPUCA em Milão e Montagem final dos módulos no CERN



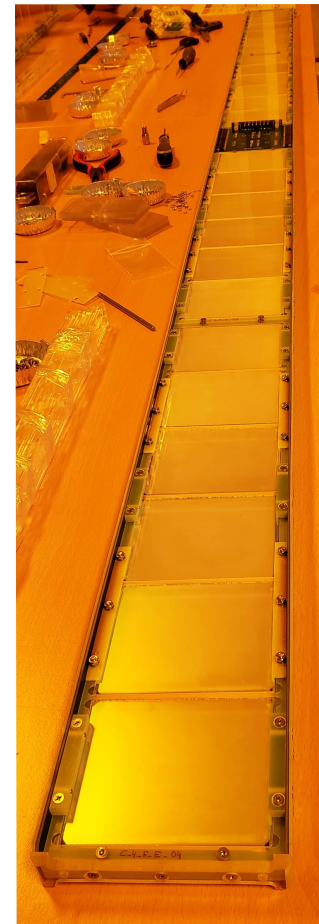
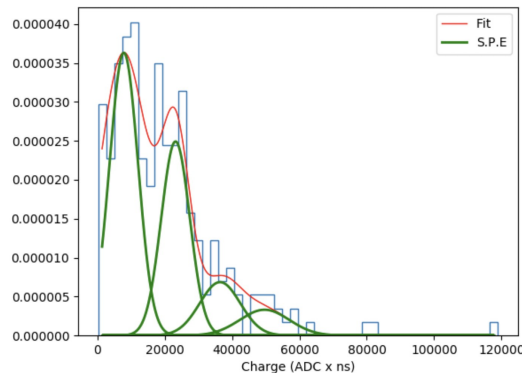
25/04/2022



As X-ARAPUCAs antes de serem montadas em módulos (1 módulo = 4 X-ARAPUCAs) são testadas em Milão e em Madrid antes de serem enviadas para o CERN.



No CERN os módulos são montados, são colocados os filtros dicróicos e são instalados no protoDUNE.





Trabalho apoiado pela FAPESP através do projeto 2016/01106-5

25/04/2022

21

PULArC

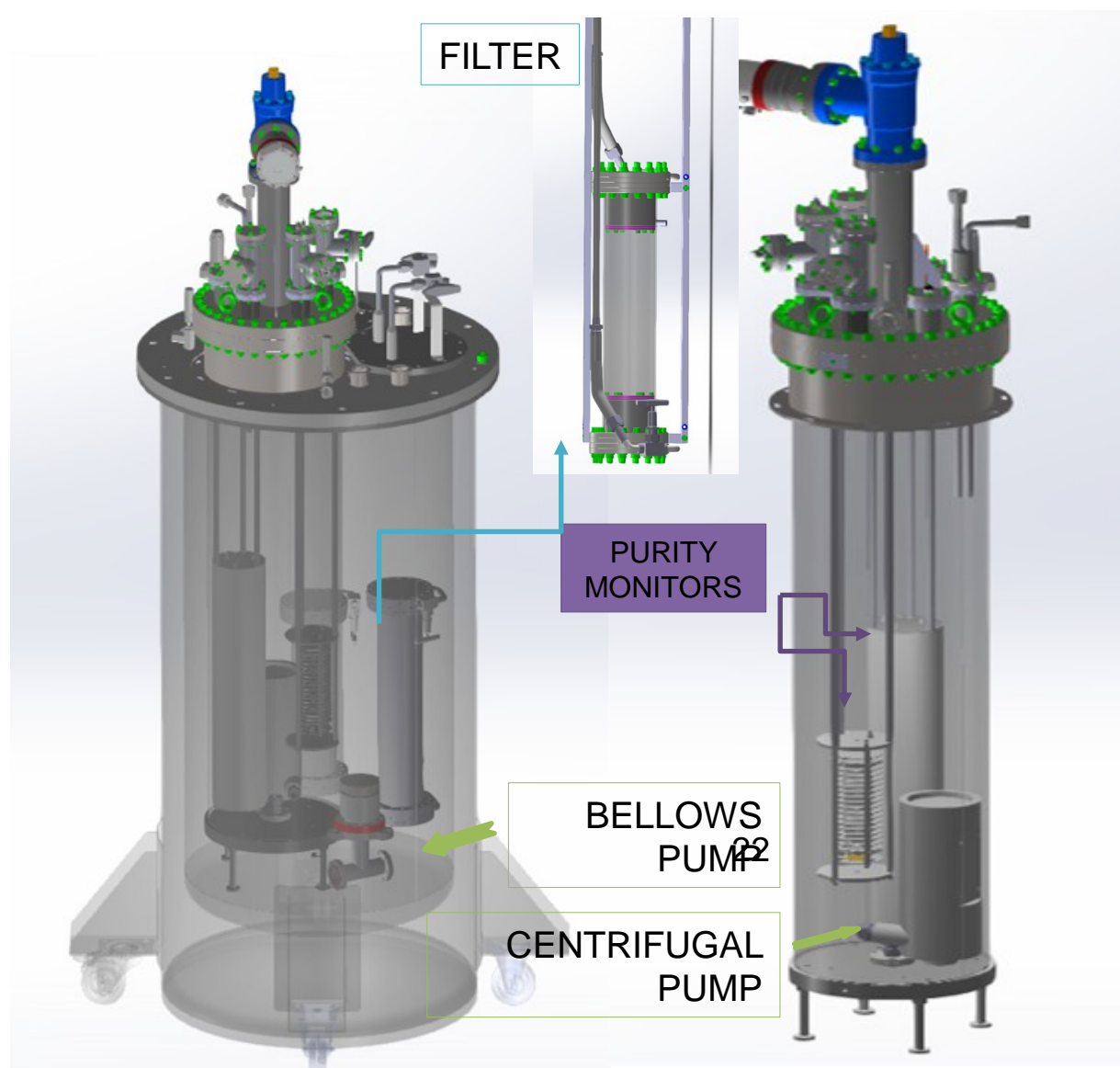
PURIFICATION LIQUID
ARGON CRYOSTAT

Criostato construído
para testar novos
materiais usados na
purificação do Argônio
Líquido.

Colaboração:
UNICAMP
CBPF
UFSCAR
FERMILAB

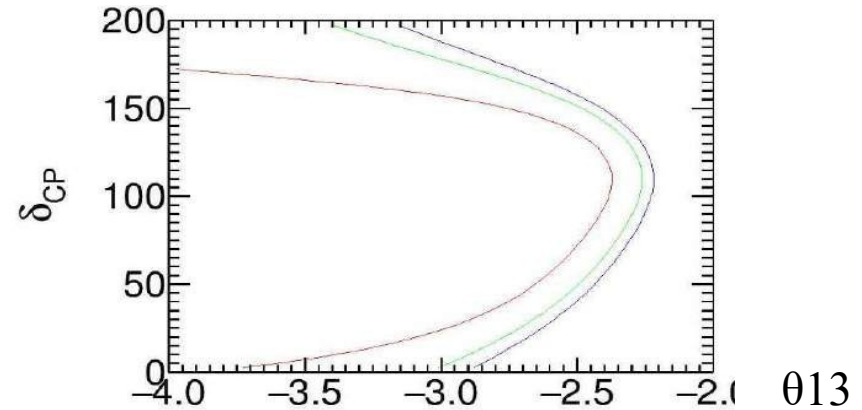
FAPESP 2020/01609-2

25/04/2022



Fenomenologia de Física Além do Modelo Padrão

- Colaboração com a UFABC
- Estudo teórico de modelos baseados na quebra da simetria de Lorentz.
 - Uso de *Machine Learning* para explorar mais eficientemente parâmetros de teorias além do Modelo Padrão em DUNE.



Correlação entre θ_{13} e δ_{CP} para DUNE (apenas erros sistemáticos, dentro do modelo padrão).

Simulação da eficiência de Sistemas X-ARAPUCA

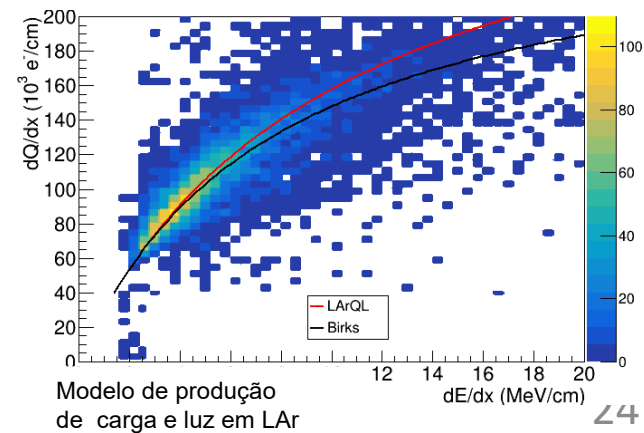
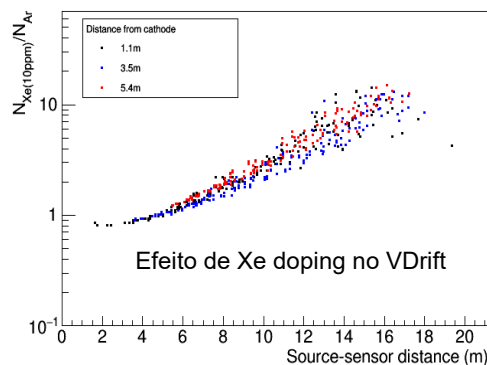
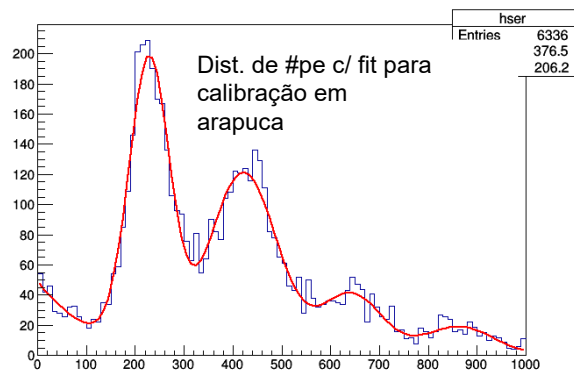
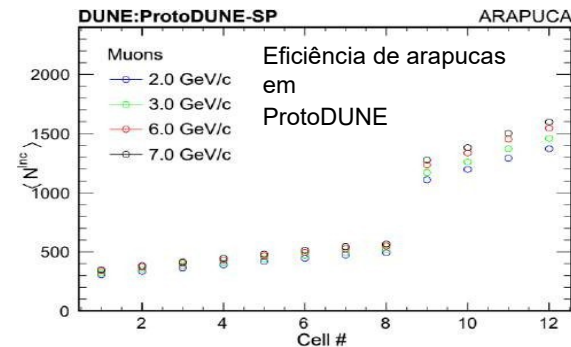
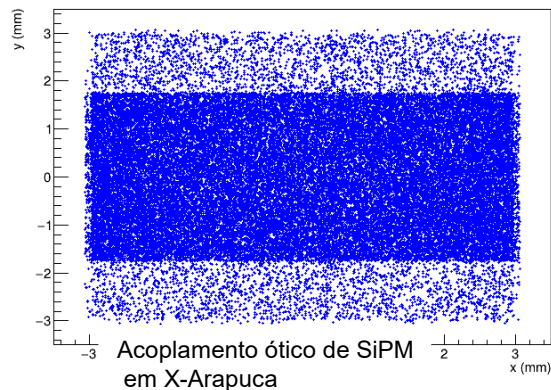
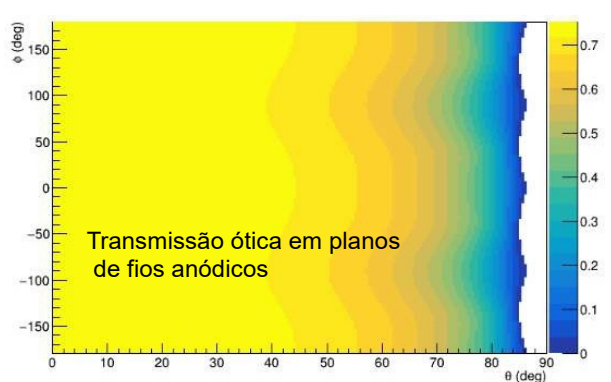
Estudo da eficiência do X-ARAPUCA para diferentes configurações.
Simulações para implementação no sistema Vertical Drift (Mega Cell)

Otimização de atributos através de Machine Learning

Simulação stand-alone baseada em Python (montagem das geometrias) e C++ (propagação de fótons)

Simulação do novo modelo de X-ARAPUCA com covas circulares.

- Modelagem de produção e propagação de luz de cintilação em LAr
- Simulação e análise de dados dos detectores e PDS do (Proto)DUNE





Participação nos seguintes grupos

- Simulação dos módulos de detecção de luz (**PDS-"photon detection system"**) usando o software próprio da colaboração, o **LArSoft** visando uma possível caracterização destes módulos para a detecção de neutrinos solares usando o Vertical **Drift PDS**, que consistirá no segundo "**far-detector**" do experimento **DUNE**.
- Grupo de produção de simulações de **MonteCarlo** (**DUNE-Production**) voltado à análise experimental sob demanda da colaboração **DUNE** e do **ProtoDUNE**. Esta contribuição permite análise de dados para o experimento ProtoDUNE e traçar perspectivas de design para o experimento **DUNE**.

Trabalho fenomenológico

- Para obter uma perspectiva de detecção de matéria escura em uma extensão do Modelo Padrão, o chamado modelo Scotogênico, no contexto do experimento **DUNE**

Formação de pessoal

- Um mestrando e um doutorando

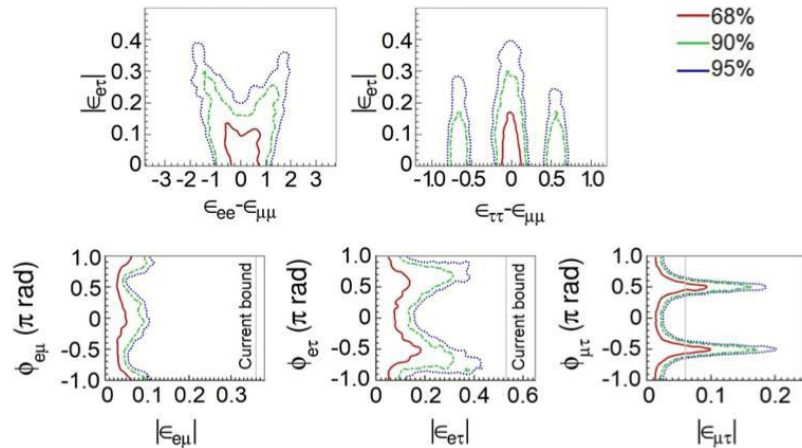
Perspectivas

- Estabelecer uma estrutura computacional dentro da Unifesp a partir de um projeto financiado pela FAPESP com o objetivo de auxiliar o processamento de dados do DUNE.

$$i \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \Delta \left[\underbrace{U \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & r_\Delta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} U^\dagger}_{\text{SO Vacuum}} + \underbrace{r_A \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}}_{\text{SO Matter Effect}} + \underbrace{r_A \begin{pmatrix} \epsilon_{ee} & \epsilon_{e\mu} & \epsilon_{e\tau} \\ \epsilon_{e\mu}^* & \epsilon_{\mu\mu} & \epsilon_{\mu\tau} \\ \epsilon_{e\tau}^* & \epsilon_{\mu\tau}^* & \epsilon_{\tau\tau} \end{pmatrix}}_{\text{NSI}} \right] \begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix}$$

$$\Delta = \frac{\Delta m_{31}^2}{2E_\nu}; \quad r_{r_\Delta} = \frac{\Delta m_{21}^2}{\Delta m_{31}^2}; \quad r_A = \frac{A}{\Delta m_{31}^2}; \quad A = 2E_\nu V_{CC}; \quad V_{CC} = \sqrt{2}G_F n_e$$

UFABC: → DUNE beam → Fig 8.7 of DUNE- TDR



Our goals:

i- Use ν_{Atm} to remove the degeneracies

ii- We can use atmospheric neutrinos to constrain the NSI

iii- Stronger bounds can be obtained from combined analysis with the beam data

Vinicius Pimentel, Maria CQ Bazetto

- Estabelecimento de protocolos e limpeza e preparação de componentes mecânicos, análise por espectroscopia de massa de contaminação de filtros dicroicos e testes funcionais SiPM's (SBND e DUNE).



- Inspeção, limpeza & embalagem de cerca de 500 filtros para ProtoDUNE



Caracterização do protótipo do X-Arapuca com partículas alpha, raios gama e múons usando SiPM Hamamatsu tipo VE

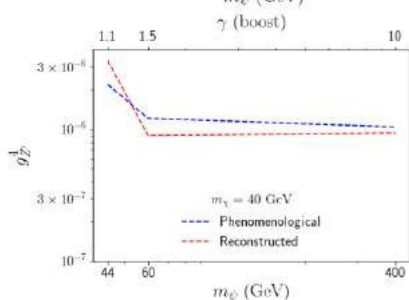
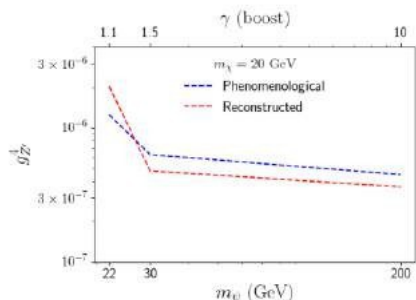
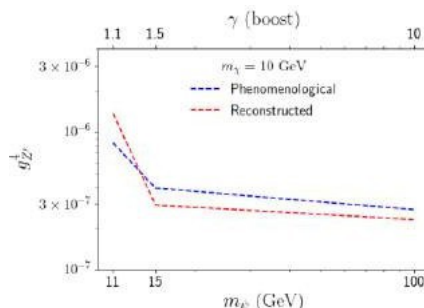
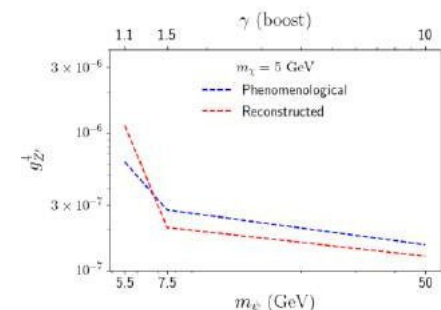
Jinst PUBLISHED BY IOP PUBLISHING FOR SISSA MEDIALAB
 RECEIVED: June 9, 2021
 REVISED: September 28, 2021
 ACCEPTED: October 15, 2021
 PUBLISHED: November 4, 2021

Liquid argon characterization of the X-ARAPUCA with alpha particles, gamma rays and cosmic muons

H.V. Souza,^{a,1,*} E. Segreto,^{a,1,*} A. A. Machado,^a R.R. Sarmiento,^a M.C.O. Bazetto,^b L. Paulucci,^c F. Marinho,^d V.L. Pimentel,^d F.L. Demolin,^d G. de Souza,^a A.C. Fauth^a and M.A. Ayala-Torres^a

Análise da amostra de reconstrução de neutrinos atmosféricos e matéria escura.

Linha de atuação: Estimar a sensibilidade usando a cadeia completa de reconstrução do DUNE para estudos fenomenológicos.



Matéria Escura:

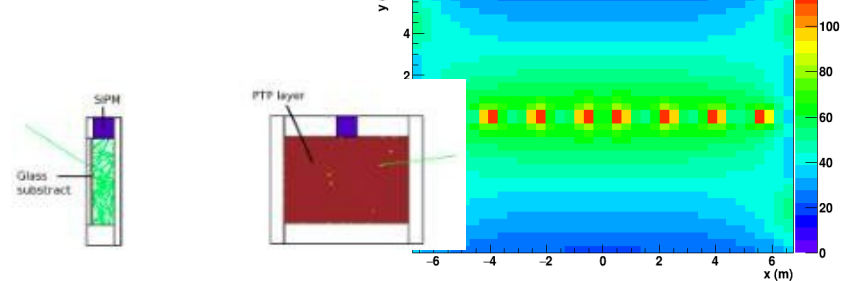
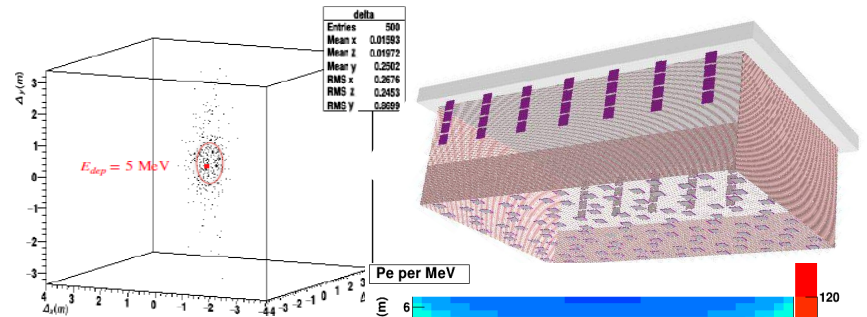
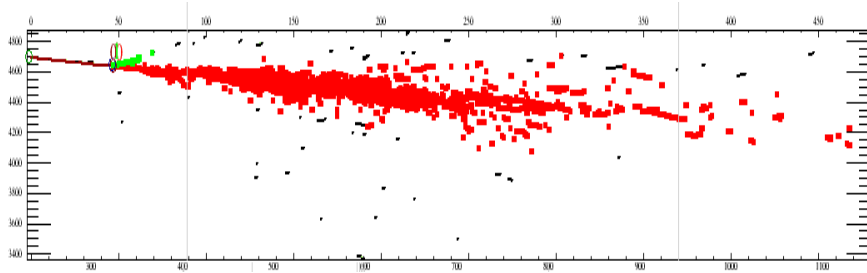
Utilizando a cadeia de reconstrução, o resultado permaneceu consistente com o estudo fenomenológico ([Phys. Rev. D 103,095012](https://arxiv.org/abs/1009.5012)). Atualmente uma análise multivariada está sendo feita.

Neutrinos Atmosféricos:

Análise em fase inicial, pretende-se estimar a sensibilidade para dois estudos fenomenológicos ([arXiv:2110.00003](https://arxiv.org/abs/2110.00003) e [PhysRevLett.123.081801](https://arxiv.org/abs/123.081801)) usando a reconstrução de eventos do experimento.

- Os resultados e propostas acima foram discutidos junto a colaboradores do grupo de altas energias e apresentados em quatro reuniões da colaboração.
- É esperada a publicação dos resultados da sensibilidade de matéria escura este ano.

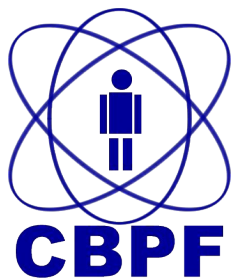
Sistema de Detecção de Fótons



Simulação e análise:
 Sistema de detecção de fótons,
 Física de supernovas,
 Física além do modelo padrão

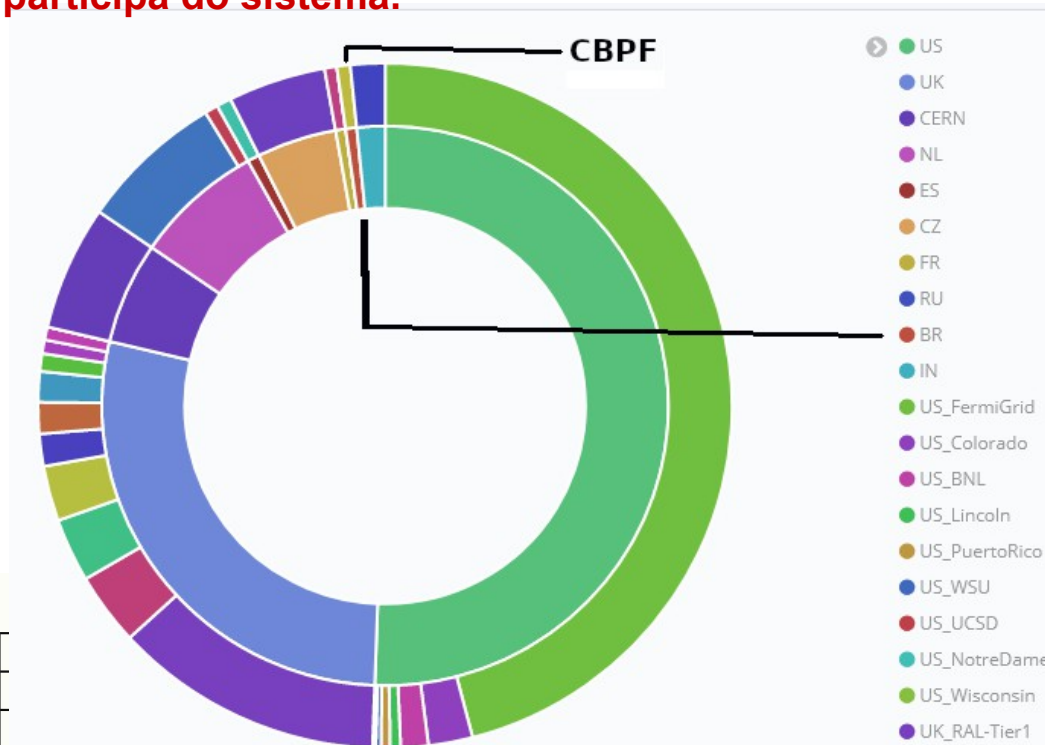
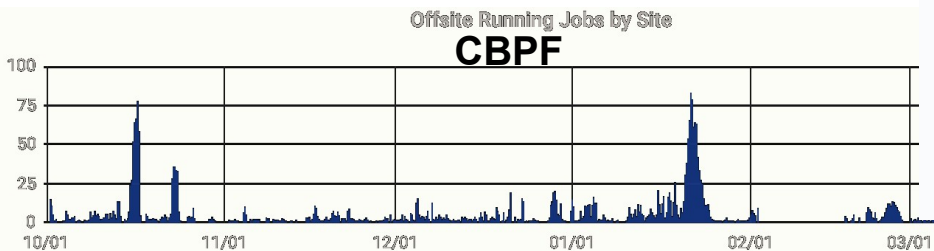
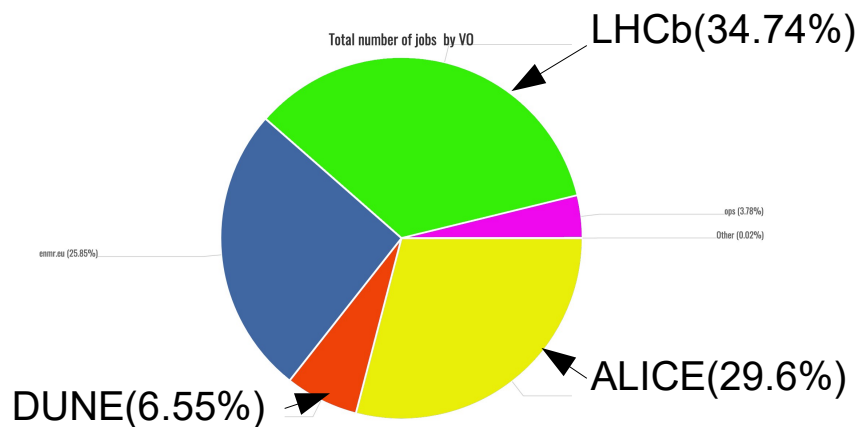
Física além do modelo padrão

- Estudos de sensibilidade de**
- Interações não-padrão (NSI)
 - Não-unitariedade (NU)
 - Violação de simetrias de Lorentz (LIV) e CPT
 - Propriedades eletromagnéticas de neutrinos (raio de carga)



Hélio da Motta, João dos Anjos, Renato Santana

O CBPF incluiu seu cluster de computadores no sistema mundial de computação do DUNE. O Brasil é, através do CBPF, o único país da AL que participa do sistema.



Uso do sistema mundial de computação do DUNE em um período de 31 dias.

Produção bibliográfica

- Artigos completos publicados em periódicos (1344)
- Livros publicados/organizados ou edições (18)
- Capítulos de livros publicados (24)
- Trabalhos completos publicados em anais de congressos (323)
- Resumos expandidos publicados em anais de congressos (65)
- Resumos publicados em anais de congressos (258)
- Artigos aceitos para publicação (3)
- Apresentações de trabalho (480)
- Demais tipos de produção bibliográfica (89)
- Total de produção bibliográfica (2604)

Produção técnica

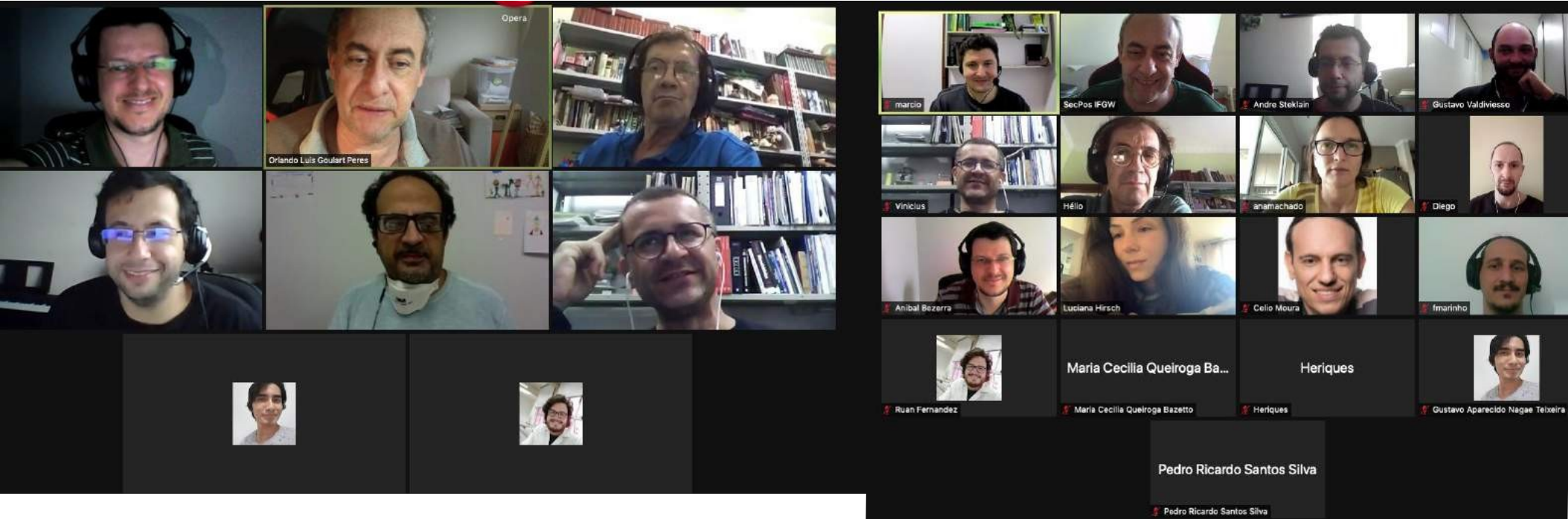
- Produtos tecnológicos (7)
- Processos ou técnicas (2)
- Trabalhos técnicos (97)
- Demais tipos de produção técnica (85)
- Total de produção técnica (191)

Participação em comitês do experimento (presentes e passadas)

- **E. Segreto** é o líder do Consórcio do Photon Detection System desde 2017.
(O Consórcio tem a responsabilidade de desenvolver, construir e instalar o Sistema de PD dos dois módulos do far detector).
é membro do executive board do experimento
- **A. Machado** é convenor do Photon Detection working group do Consórcio
é membro do Speakers Commtee
- **L. Paulucci** é convenor do Photon Collection working group do Consórcio
- **O. Peres** é membro do Authorship and Publication Board
- **H. da Motta** é membro do Outreach and Education Board
é representante do Brasil no Computing Resources Group
foi membro do Co-Spokes Person Searching Committee
- **C. de Moura** é subject-leader do Beyond Standard Model Group
- **J. Torres** foi mebro do Authorship and Publication Board
- **G. Valdiviesso** é convenor do QA/QC working group do Consórcio

Sumário

O Brasil participa em diferentes aspectos do experimento DUNE, photon detection system, simulação, Física Além do Modelo Padrão, computação. O grupo DUNE-BR foi formado para discussões dos temas relevantes, otimização de recursos, integração da atuação no DUNE. Participamos de diversos comitês do experimento. Nossa participação deverá aumentar nos próximos anos.



OBRIGADO