



DUNE

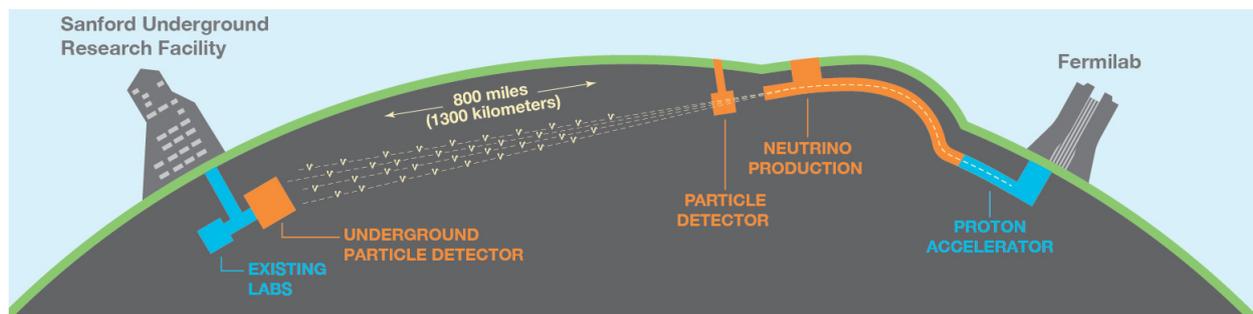
O Experimento DUNE (Deep Underground Neutrino Experiment) pretende investigar propriedades fundamentais dos neutrinos, partículas leptônicas que podem ter um papel importante para a resolução de questões em aberto no ramo da física de partículas, como exemplo, a assimetria entre matéria e anti-matéria no universo atual, decaimento do próton, previsto pela GUT (Grand Unified Theory), e a dinâmica de supernovas, que liberam neutrinos em suas grandes explosões, possibilitando melhor compreensão sobre a evolução do universo.

Uma das características a ser estudada sobre os neutrinos é a oscilação de sabores ao longo do tempo e espaço. Como os estados de interação não são equivalentes aos estados de massa, é gerada uma diferença de fase na propagação das componentes físicas dos neutrinos. Consequentemente os neutrinos podem oscilar de um sabor para outro.

O projeto de pesquisa consiste em estudos sobre as características de DUNE, que produzirá o feixe de neutrino mais intenso do mundo, produzido pelo acelerador de prótons do Fermilab (Fermi National Accelerator Laboratory), além de dois detectores de tais partículas. O projeto engloba também o estudo sobre o formalismo da oscilação de neutrinos e análise da fórmula de probabilidade de oscilação, com os dados obtidos a partir dos experimentos futuros.

DUNE/LBNF

Apesar de serem a segunda partícula mais abundante do universo, os neutrinos raramente interagem com outras partículas. Isso ocorre pois são afetados somente pela interação fraca, intermediada pelos bósons W^\pm e Z . Logo, é preciso um fluxo intenso de neutrinos para realizarmos experimentos com esta partícula, como o que será produzido pelo acelerador de prótons do Fermilab para o Deep Underground Neutrino Experiment - DUNE. Além disso, volumosos detectores são necessários para que sejam detectadas essas interações. Assim, o experimento contará com um detector próximo (*near detector*) à região de produção de neutrinos, localizado no Fermilab, e um segundo detector, maior e mais distante (*far detector*), localizado à 1300 km distante do ponto de produção, em Lead, South Dakota, em Sanford Underground Research Facility (SURF), composto por 40 kton de Argônio líquido (Liquid Argon Time Projection Chamber - LArTPC), instalado 1500 m abaixo do solo. Detectores de neutrinos precisam ser profundos para bloquear a interferência provocada por raios cósmicos que entram na atmosfera a todo momento.



Essas instalações consistem no Long Baseline Neutrino Facility (LBNF) que, em contribuição com o projeto DUNE, constituem um audacioso programa que busca melhor entendimento sobre neutrinos e partículas elementares; além de impactar no conhecimento existente de astrofísica e cosmologia.

O LBNF (Long-Baseline Neutrino Facility), do Fermilab, não faz parte de DUNE. LBNF irá possibilitar a operação dos detectores de DUNE, em Lead, no laboratório de Sanford (*long detector*) e em Illinois, no Fermilab (*near detector*).

A junção DUNE/LBNF objetiva alcançar respostas sobre grandes questões, tais como:

-**Assimetria entre partícula e antipartícula:** Neutrinos são uma possível razão para a existência de maior quantidade de matéria em relação à antimatéria no universo atual.

-**Decaimento do próton:** DUNE irá buscar sinais do decaimento de próton, sendo assim, possivelmente relacionar a instabilidade da matéria com a unificação das teorias físicas (Grand Unified Theory - GUT).

-**Supernovas:** Com a possível detecção de neutrinos formados em explosões estelares, DUNE poderá descobrir mais sobre tais colapsos supernovas, estrelas de nêutron recém nascidas e a formação de buracos negros.

Feixe de Neutrinos

O acelerador de prótons libera píons (π), que são partículas com carga, sendo assim, é possível direcioná-las e escolher o sinal de sua carga, utilizando magnetismo. A escolha entre π^+ e π^- possibilita direcionar um feixe de ν ou $\bar{\nu}$. Os píons rapidamente decaem em outras partículas, incluindo neutrinos ou antineutrinos; as demais são bloqueadas por densas paredes, enquanto os elusivos neutrinos seguem adiante em direção aos detectores.

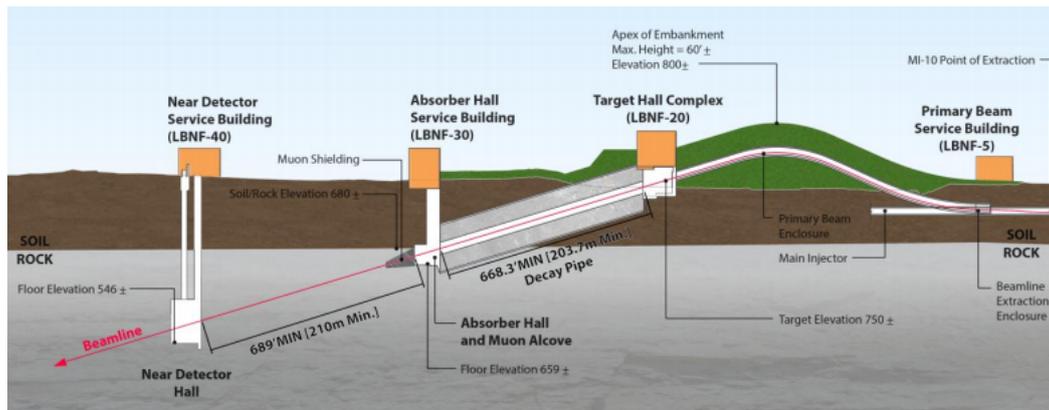
A energia do feixe de próton pode ser ajustada entre 60 e 120 GeV (1,0 a 1,2 MW). Essa variação permite obter um maior espectro de neutrinos para detecção.

Near Detector

A curta distância entre o detector e a fonte de neutrinos permite a detecção de um fluxo mais concentrado, com maior número de interações. A partir disso, é possível caracterizar os neutrinos quanto a sua energia e quantidade; ainda saber seu sabor antes da oscilação ocorrer.

A detecção por um detector a curta distância também é positiva para a busca por neutrinos estéreis e a investigação de interações novas de neutrinos com outras partículas.

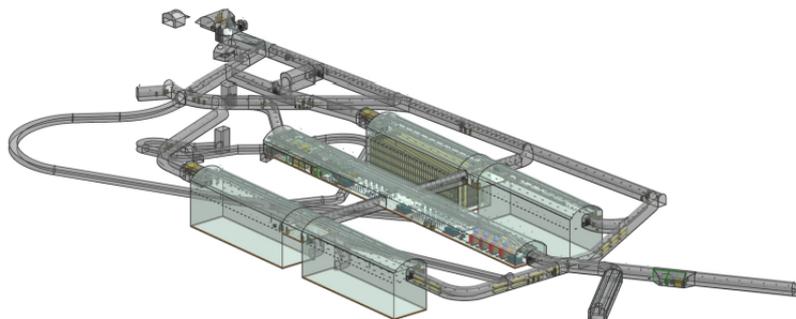
Para que os objetivos de DUNE sejam realizados mais precisamente, a função primária do *near detector* de DUNE é caracterizar o espectro de energia do feixe de neutrinos em sua fonte e controlar as incertezas com maior convicção. Apresentamos esquematicamente uma representação do feixe de neutrinos passando pelo *near detector* na seguinte Figura.



Long Detector

No caminho até o detector de longa distância, os neutrinos oscilam de sabor. O estudo dessa oscilação pode ajudar a solucionar o problema da hierarquia de massa, ou seja, qual neutrino é mais pesado, e qual o tipo de simetria que neutrinos e antineutrinos compartilham.

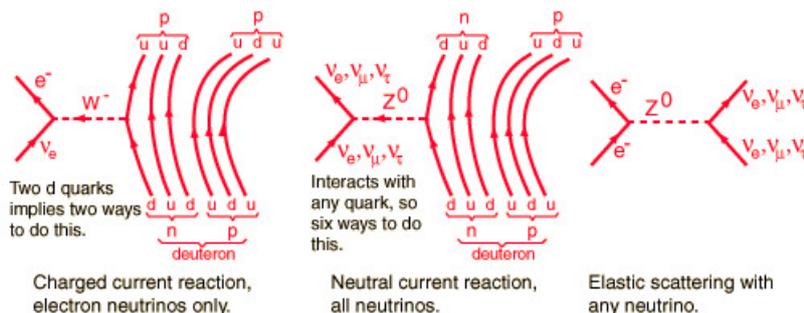
A instalação em SURF, com seu enorme volume, permitirá o estudo de neutrinos por meio de imagens completas das interações de neutrinos com os átomos de Argônio, presentes nos quatro detectores LArTPC. Para que sejam bloqueados os raios cósmicos, que causam interferência nas detecções do feixe de neutrinos, esta instalação será feita a uma profundidade de 1500 m para que as partículas desses raios sejam barradas naturalmente pela camada da Terra superior ao detector.



Física de Neutrinos

É conhecida a existência de três neutrinos diferentes. Seus tipos, ou sabores, são definidos à partir da partícula leptônica associada, liberada na interação fraca desse neutrino com outra partícula. Assim, há o neutrino eletrônico (ν_e), muônico (ν_μ) e tauônico (ν_τ). O elétron (e^-), múon (μ) e tau (τ), de acordo com o modelo padrão, fazem parte cada um de uma geração diferente, assim, cada sabor de neutrino faz parte da mesma família de sua partícula associada.

O neutrino é detectado a partir dos produtos de suas interações com o meio do detector. A força nuclear fraca é a responsável por essas interações, mediada pelos bósons W^+ , W^- e Z^0 .





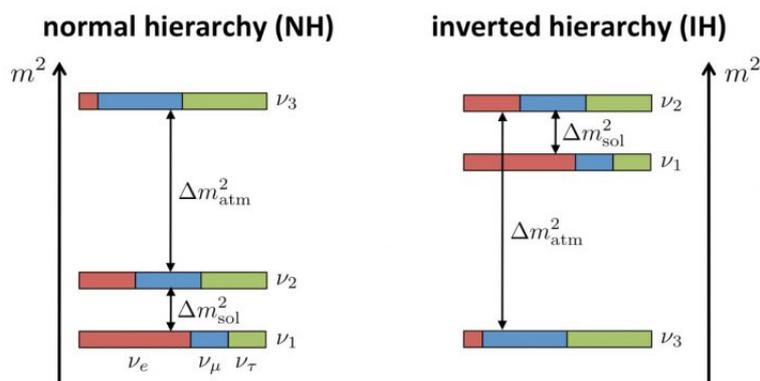
Na Figura, as duas primeiras interações envolvem neutrinos e átomos de deutério. Na primeira reação, por corrente carregada, é trocada uma partícula W^- entre o nêutron(n) do deutério e o neutrino do elétron (ν_e^-), resultando em um elétron(e^-) e dois prótons(p). Essa reação é o decaimento β . Já na interação por corrente neutra, não há troca de cargas entre as partículas pois o bóson Z^0 é neutro.

Corrente Carregada	$\nu_e^- + d \rightarrow p + p + e^-$
Corrente Neutra	$\nu_x + d \rightarrow \nu_x + p + n$
Colisão Elástica	$\nu_x + e^- \rightarrow \nu_x + e^-$

$$(x = e^-, \mu \text{ ou } \tau)$$

As massas do elétron(e^-), múon(μ^-) e tau(τ^-) são conhecidas pela comunidade científica. Sua relação é: $e^- < \mu^- < \tau^-$. Havendo três sabores de neutrinos, poderia se esperar que a proporcionalidade de suas massas seguissem a relação de suas respectivas partículas associadas. Porém, essa propriedade ainda não foi comprovada para os neutrinos. Denominando os neutrinos com massa definida como ν_1 , ν_2 e ν_3 como os neutrinos com a maior fração de ν_e , ν_μ e ν_τ , respectivamente, não se sabe se o ν_3 possui mais ou menos massa que os outros dois, sobrando duas hipóteses para o problema. Na "ordenação de massa normal", temos a relação de massas: $\nu_1 < \nu_2 < \nu_3$. Já na "ordenação inversa", tem-se: $\nu_3 < \nu_1 < \nu_2$. Essa é uma questão a qual DUNE tentará responder, sobre a hierarquia de massas dos neutrinos.

A diferença do quadrado das massas de ν_1 e ν_2 é muito pequena, como mostrado na Figura a seguir, logo, não há a hipótese de que a massa do (ν_3) esteja entre as duas.



Os neutrinos são formados pela combinação do estado de massa dos três sabores. Assim, não se comportam como tendo um único sabor estático. Esses estados de massa (ν_1 , ν_2 e ν_3) possuem diferentes probabilidades de comportar-se como cada sabor.

O primeiro estado de massa (ν_1) interage aproximadamente como ν_e em dois-terços das vezes, um-sexto como ν_μ e outro um-sexto como ν_τ . O segundo estado de massa(ν_2) tem probabilidade igual de interação para cada sabor. Há aproximadamente um-terço de chances para os três. Já no terceiro estado de massa(ν_3), a probabilidade de interação como ν_e é muito baixa, sobrando praticamente metade das chances de interação como ν_μ e outra metade como ν_τ .



Essas frações são mostradas na seguinte Tabela :

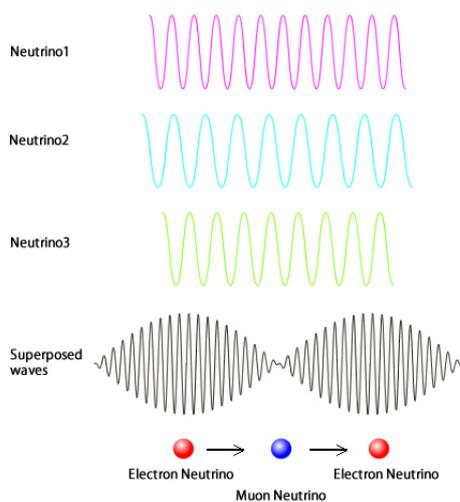
	ν_e	ν_μ	ν_τ
ν_1	$\approx 2/3$	$\approx 1/6$	$\approx 1/6$
ν_2	$\approx 1/3$	$\approx 1/3$	$\approx 1/3$
ν_3	$\ll 1$	$\approx 1/2$	$\approx 1/2$

Oscilação de Neutrinos

A oscilação de neutrinos é denominada como a mudança de sabor de um neutrino para outro, conforme se propaga no espaço, desde sua produção até o momento em que interage com uma partícula e é detectado. Esse é um fenômeno da mecânica quântica, que se deve à natureza de ondas dos neutrinos.[1].

Como visto, o neutrino possui diferentes estados de massa (ν_1 , ν_2 e ν_3), formados pela combinação de massas dos três sabores (ν_e , ν_μ e ν_τ). O comportamento ondulatório dos neutrinos através do espaço, funciona como ondas que possuem diferentes frequências. Em consequente, há oscilação de sabores, pois as fases de onda mudam conforme o neutrino se propaga.

Antes da descoberta da oscilação dos neutrinos, a ideia de que não possuíam massa era aceita pela comunidade científica. Após a evidência da mudança de sabores, verificou-se a existência de uma pequena, porém finita, massa para os neutrinos.



Considerações Finais

DUNE é um ambicioso projeto com grandes objetivos. As medidas de oscilação de neutrinos serão feitas utilizando feixes de ν_μ e $\bar{\nu}_\mu$ (neutrino e antineutrino muônico, respectivamente), produzidos pelo Fermilab. Essas medições incluirão resultados para a determinação da hierarquia de massa (sinal da equação: $\Delta m_{31}^2 = m_3^2 - m_1^2$). Além disso, há a busca pela violação de CP na oscilação de neutrinos, resultado que pode prover maior clareza sobre a assimetria de matéria e antimatéria.

Além disso, o experimento deseja observar o decaimento do próton, sendo ele importante para a união das teorias físicas em uma única (GUT). Outrossim, pretende revolucionar o ramo da astrofísica, medindo resultados que poderão trazer informações únicas sobre as explosões de supernovas e até mesmo o nascimento de buracos negros em decorrência da medição do fluxo de ν_e produzidos no colapso do núcleo de uma supernova.

Conjuntamente com os objetivos principais de DUNE, os resultados auxiliares do programa incluem: violação da CPT (carga, paridade e tempo); neutrinos estéreis; medidas sobre as características do neutrino tauônico; medidas do fenômeno de oscilação por meio de neutrinos atmosféricos; procura por candidatos à matéria escura.

Com maior conhecimento sobre neutrinos, a comunidade científica chegará mais perto de responder questões fundamentais da humanidade. Assim, os três principais objetivos de DUNE são: Procurar pela origem da matéria, aprender mais sobre estrelas de neutron e buracos negros e ter uma maior noção a respeito da unificação das forças da natureza.