

Nötrino Fiziğine Giriş ve Hızlandırıcı Tabanlı Nötrino Deneyleri

Nilay Bostan

Marmara Üniversitesi
Fizik Bölümü



`nilay.bostan@cern.ch`

29 Ağustos 2026

İçerik

- 1 Nötrininonun Keşfi ve Nötrinolar
- 2 2015 Nobel Fizik Ödülü
- 3 Nötrino Karışımı ve Salınımları
- 4 Hızlandırıcı Tabanlı Nötrino Salınım Deneyleri
- 5 Fermilab NuMI Nötrino Demeti
- 6 Fermilab Derin Yeraltı Nötrino Deneyi
- 7 LArTPC dedektörü
- 8 Tokai-to-Kamiokande & Hyper-Kamiokande
- 9 Uzak Dedektörde Nötrino Etkileşim Tespiti: T2K SK
- 10 DUNE Salınımları
- 11 Nötrino Salınımlarında Güncel Durum
- 12 PMNS son kısıtlar: T2K ekibi *Nature* 580, 339–344 (2020).
- 13 Özet
- 14 Kaynaklar

Nötrino Öngörüsü: Pauli ve β Bozunumu

- β bozunumunda (**nötron** $\rightarrow$ **proton + elektron + ?**) deneysel olarak gözlenen elektronların enerji spektrumu, **sürekli bir dağılım** gösteriyordu.
- Eğer bozunum yalnızca iki parçacıklı olsaydı,

$$A \rightarrow B + e^{-},$$

enerji ve momentum korunumu gereği elektronun enerjisi **tek ve belirli bir değere** sahip olmalıydı. Ancak elektronlar farklı enerjilerle yayıldığı için, enerji ve momentumun bir kısmının **gözlenmeyen bir parçacık tarafından taşındığı** fikri ortaya çıktı.

1930 — Wolfgang Pauli

Pauli, enerji, momentum ve açısal momentum korunumunu sağlamak amacıyla yeni bir parçacığın varlığını önerdi.

Önerilen parçacığın özellikleri:

- elektriksel olarak yüksüz,
- çok küçük kütleli,
- maddeyle çok zayıf etkileşen.

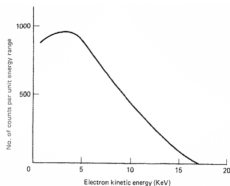


Fig. 1.5 The beta decay spectrum of tritium (${}^3\text{H} \rightarrow {}^3\text{He}$).
(Source: Lewis, G. M. (1970) *Neutrinos*, Weylham, London, p. 10)

Eksik enerji
ve momentum



Yeni parçacık

Bu parçacık, bozunumda elektronun taşıyamadığı **enerji ve momentumu** taşıyacaktı.

Pauli'nin önerisi: $n \rightarrow p + e^{-} + \text{nötr parçacık}$

Nötrino Öngörüsünden Nötrino Kavramına

- **1932 – James Chadwick:** Yüksüz ve kütlesi protona yakın olan parçacığı keşfetti ve bu parçacığa **nötron** adını verdi.
- Nötronun keşfiyle, Pauli'nin β bozunumunu açıklamak için önerdiği parçacığın **nötrondan farklı** olduğu anlaşıldı.
- **1934 – Enrico Fermi:** β bozunumunun ilk başarılı zayıf etkileşim teorisini geliştirdi.
- Fermi, Pauli'nin öngördüğü parçacık için İtalyanca “küçük nötr” anlamına gelen **nötrino** adını kullandı.



James Chadwick



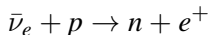
Enrico Fermi

Nötronun keşfi $\rightarrow \beta$ bozunumu teorisi $\rightarrow$ “Nötrino” kavramı

Nötrinin Deneyisel Keşfi: Cowan ve Reines

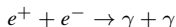
- **1956 – Clyde Cowan ve Frederick Reines:** Savannah River nükleer reaktöründe yayılan **elektron antinötrinolarını** ($\bar{\nu}_e$) ilk kez deneyisel olarak tespit ettiler.
- Reaktör, çok yoğun bir $\bar{\nu}_e$ kaynağı sağlıyordu. Nötrinolar protonlarla etkileşerek pozitron ve nötron üretebiliyordu.

Ters beta bozunumu



1. Pozitron sinyali

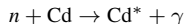
Pozitron, bir elektronla yok olur:



İki γ fotonu eşzamanlı olarak tespit edilir.

2. Nötron sinyali

Nötron kadmiyum tarafından yakalanır:



Gecikmeli γ sinyali ikinci bir imza oluşturur.

Eşzamanlı pozitron + gecikmeli nötron sinyali $\Rightarrow \bar{\nu}_e$ etkileşimi

Nötrinoların Temel Özellikleri

Aile	Yüklü lepton	Nötr lepton
I	e^-	ν_e
II	μ^-	ν_μ
III	τ^-	ν_τ

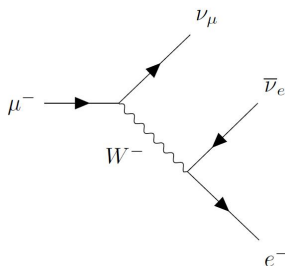
- Nötrinolar, Standart Model'in lepton sektöründe yer alan temel parçacıklardır.
- Temel özellikleri:
 - Elektrik yükleri yoktur ($Q = 0$)
 - Çok küçük fakat sıfır olmayan kütlelere sahiptirler
 - Spin-1/2 fermiyonlardır
- Üç bilinen nötrino çeşni (flavor) vardır:

$$\nu_e, \quad \nu_\mu, \quad \nu_\tau$$

- Standart Model'de zayıf etkileşimlere katılırlar:

$$W^\pm, \quad Z^0$$

Müon Bozunumu ve Nötrino Çeşnileri



Müon bozunumu

$$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$$

Zayıf etkileşim

- Müon, **zayıf etkileşim** yoluyla bozunur ve bir elektron, bir elektron antinötrinosu ve bir müon nötrinosu üretir.
- Son durumda iki farklı nötrino çeşnisi bulunur:

ν_μ	$\bar{\nu}_e$
-----------	---------------

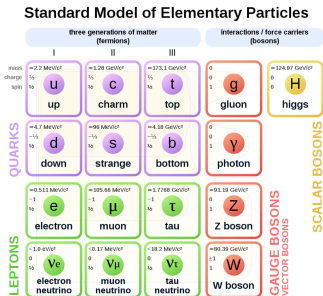
- Elektron ve nötrinolar, bozunum enerjisini **paylaşır**. Bu nedenle elektronun enerjisi tek bir değerde değil, **sürekli bir spektrum** gösterir.
- Elektron ve müon lepton sayıları bu bozunumda korunur:

$$L_e : 0 \rightarrow (+1) + (-1)$$

$$L_\mu : +1 \rightarrow +1$$

Fiziksel önemi: Müon bozunumu, ν_μ ve ν_e 'nin **farklı nötrino çeşnileri** olarak tanımlanmasının temelini oluşturur.

Standart Model (SM) ve Nötrinolar



- **Standart Model (SM)**, kütleçekimini içermeksizin, temel parçacıkları ve üç temel etkileşimi tanımlar:

Elektromanyetik, Zayıf, Güçlü

- Leptonlar üç aile halinde bulunur:

$$(e, \nu_e), (\mu, \nu_\mu), (\tau, \nu_\tau)$$

- **(Minimal) Standart Model'de** nötrinolar kütesizdir:

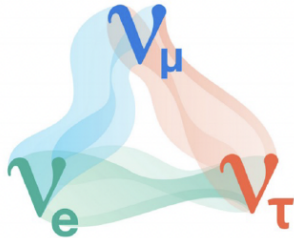
$$m_{\nu_i} = 0$$

- Ancak nötrino salınımlarının gözlenmesi,

$$\Delta m_{ij}^2 \neq 0$$

olduğunu ve dolayısıyla nötrinoların **sıfır olmayan kütlelere sahip olduğunu** göstermiştir.

Nötrino Kütlesi: Standart Model Ötesi Fizik



*Symmetry Magazine &
Fermilab – Neutrinos*

- 1998 yılında **Super-Kamiokande** işbirliği atmosferik nötrino salınımlarını gözlemledi.
- Nötrino salınımları:

$$\nu_{\alpha} \rightarrow \nu_{\beta}$$

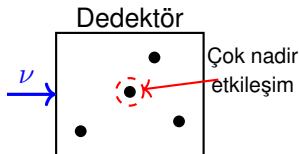
farklı çeşnilerin birbirine dönüşebildiğini gösterdi.

- Bu durum nötrinoların sıfır olmayan kütleyle sahip olduğunu gösterir:

$$\Delta m_{ij}^2 \neq 0$$

- **Nötrino kütlelerinin varlığı, Standart Model'in ötesinde yeni fizik gerektiren önemli bir göstergedir.**

Nötrinolar Neden Zor Ölçülür?



- Nötrinolar elektrik yükü taşımazlar:

$$Q = 0$$

Bu nedenle elektromanyetik etkileşime girmezler. Güçlü kuvvetle etkileşmezler.

- Sadece zayıf etkileşim yoluyla gözlenebilirler:

$$\nu + N \rightarrow l + X$$

- Etkileşim olasılığı çok küçüktür:

$$\sigma_{\nu} \sim 10^{-38} \text{ cm}^2 \quad (E_{\nu} \sim \text{GeV})$$

- Bu nedenle nötrino deneylerinde: büyük dedektör hacimleri, yoğun nötrino demetleri kullanılır.

Neden Nötrino Fiziği Çalışıyoruz?

- Nötrinolar elektrik yükü olmayan, çok küçük kütleli temel parçacıklardır.
- Standart Model'de nötrinolar yalnızca:

$$W^{\pm}, Z^0$$

aracılığıyla gerçekleşen **zayıf etkileşim** ile gözlenebilirler.

- Nötrinoların çok küçük etkileşim olasılığı ve farklı çeşniler arasında dönüşebilmeleri, onları Standart Model ötesi fiziği araştırmak için eşsiz bir araç yapmaktadır.

★ **Günümüz nötrino deneylerinin temel soruları:** ★

- **Leptonik CP (Yük-Parite) ihlali var mı?** $\delta_{CP} ?$
- **Nötrino kütle sıralaması nedir?** $m_1, m_2, m_3 ?$
- **Nötrinoların mutlak kütlesi nedir?** $\sum_i m_i ?$

Nötrino Fiziğinde Açık Sorular

- **CP İhlali:**

$$\nu \neq \bar{\nu}?$$

Nötrino ve antinötrino salınımları arasındaki fark δ_{CP} **fazı** ile belirlenir.

- **Kütle Sıralaması:**

Nötrino kütlelerinin hiyerarşisi henüz tam olarak bilinmemektedir.

$$\Delta m_{21}^2 \simeq 7.5 \times 10^{-5} \text{ eV}^2$$

$$|\Delta m_{31}^2| \simeq 2.5 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$$

- **Karışım Parametreleri:**

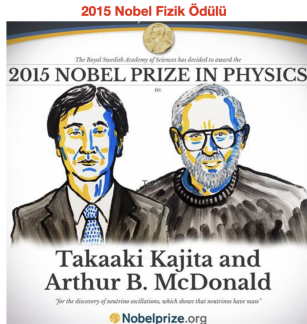
Özellikle:

$$\theta_{23}$$

karışım açısının değeri ve oktantı halen araştırılmaktadır.

- Bu soruların cevaplanması, evrendeki madde-antimadde asimetrisini ve Standart Model ötesi fiziği anlamamız için kritik öneme sahiptir.

2015 Nobel Fizik Ödülü



"Nötrinoların kütleye sahip olduğunu gösteren nötrino salınımlarının keşfi için"

- 2015 Nobel Fizik Ödülü, **nötrino salınımlarının keşfi** nedeniyle verildi.
- **Takaaki Kajita**
Super-Kamiokande
 - Atmosferik nötrino salınımlarını gözlemledi.
- **Arthur B. McDonald**
Sudbury Neutrino Observatory (SNO)
 - Güneş nötrinolarının çeşni değiştirdiğini gösterdi.
- Bu keşifler: $\Delta m_{ij}^2 \neq 0$ olduğunu göstererek **nötrinoların sıfır olmayan kütleye sahip olduğunu** ortaya koydu.
- Nötrino kütlesi, Standart Model ötesi **yeni fizik (BSM)** araştırmalarına kapı açtı.

Çeşni ve Kütle Öz Durumları

Çeşni	Kütle
ν_e	ν_1
ν_μ	ν_2
ν_τ	ν_3

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = U_{\text{PMNS}} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

- Nötrinolar iki farklı temel durumda tanımlanır:
Çeşni öz durumları

$$|\nu_\alpha\rangle$$

Dedektörlerde gözlenen durumlar:

$$\nu_e, \quad \nu_\mu, \quad \nu_\tau$$

Kütle öz durumları

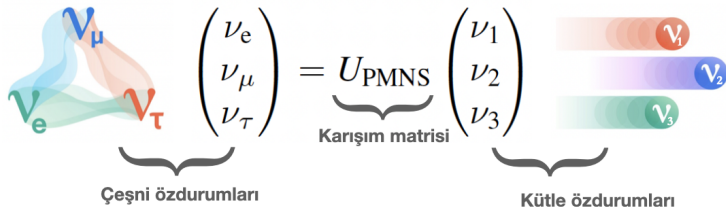
$$|\nu_i\rangle$$

Yayılim sırasında:

$$\nu_1, \quad \nu_2, \quad \nu_3$$

- İki baz arasındaki dönüşüm: $\nu_\alpha = \sum_i U_{\alpha i} \nu_i$
- Çeşni ve kütle öz durumları arasındaki karışım nötrino salınımının temelidir.**

Nötrino Salınımları: 3-çeşni (ν_e, ν_μ, ν_τ)



$$U_{\text{PMNS}} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta_{CP}} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{i\delta_{CP}} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

burada $c_{ij} = \cos \theta_{ij}$, $s_{ij} = \sin \theta_{ij}$. $\nu_\mu \rightarrow \nu_{\text{other}}, \bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_{\text{other}}$: **Atmosferik ve hızlandırıcı deneylerinden**

$\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_{\text{other}}$: **Reaktör deneylerinden** $\nu_e \rightarrow \nu_{\mu,\tau}$: **Güneş deneylerinden**

Ölçüm değeri	$\theta_{12} \sim 34^\circ$	$\theta_{13} \sim 8.5^\circ$	$\theta_{23} \sim 45^\circ$
Global hassasiyet	$\sin^2 \theta_{12} \sim 4\%$	$\sin^2 \theta_{13} \sim 3\%$	$\sin^2 \theta_{23} \sim 5\%$

Nötrino Salınımları

- Nötrinoların çeşni öz durumları, kütle öz durumlarının süperpozisyonu olarak ifade edilir:

$$|\nu_\alpha\rangle = \sum_{i=1}^3 U_{\alpha i}^* |\nu_i\rangle$$

Burada $|\nu_\alpha\rangle$ çeşni öz durumlarını, $|\nu_i\rangle$ ise kütle öz durumlarını temsil eder. Bu ifade, çeşni öz durumlarının kütle öz durumlarının bir karışımı olduğunu gösterir.

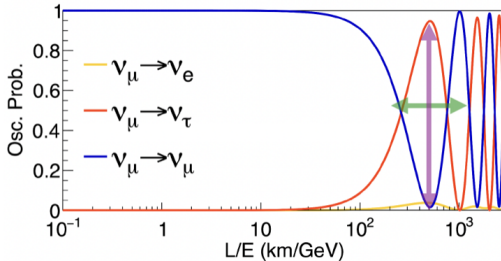
- Nötrinolar dedektörlerde **çeşni öz durumları** olarak etkileşirler; ancak uzayda **kütle öz durumları** olarak yayılırlar. **Bir çeşniden diğerine salınım olasılığı:**

$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) = \left| \sum_i U_{\beta i} e^{-i \frac{m_i^2 L}{2E}} U_{\alpha i}^* \right|^2$$

- Salınım olasılığı; **PMNS karışım matrisi (U)** ve **nötrino kütle kare farkları**

$$\Delta m_{ij}^2 = m_i^2 - m_j^2$$

tarafından belirlenir. Burada L : yayılım mesafesi, E : nötrino enerjisi'dir.



Oscillation Probability

$$P_{\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta} = \left| \sum_j U_{\beta j}^* U_{\alpha j} \exp \left(-1.27i \frac{\Delta m_{j1}^2 L}{E} \right) \right|^2$$

For 3-Flavour Oscillations, PMNS Mixing Matrix

$$U_{\alpha j} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13} e^{-i\delta_{CP}} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13} e^{i\delta_{CP}} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

6 parameters

$\Delta m_{21}^2, \Delta m_{32}^2$, governs oscillation frequency

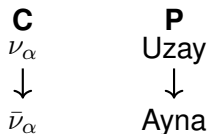
$\theta_{12}, \theta_{13}, \theta_{23}$, governs oscillation magnitude

δ_{CP} , governs $\nu - \bar{\nu}$ differences

L (baseline), E (energy) are experimental choices

L/E is characteristic of oscillations

CP İhlali ve Leptonik Sektör



$$CP = C \times P$$

$$\delta_{CP} \neq 0, \pi$$

CP ihlali

- Doğada iki temel dönüşüm:

C : Parçacık $\rightarrow$ Karşı parçacık

P : Uzay $\rightarrow$ Ayna görüntüsü

- CP dönüşümü, parçacığın karşı parçacığa dönüşümünü ve uzaysal koordinatların ters çevrilmesini içerir.
- CP korunumu durumunda:

$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) = P(\bar{\nu}_\alpha \rightarrow \bar{\nu}_\beta)$$

- CP ihlali durumunda:

$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) \neq P(\bar{\nu}_\alpha \rightarrow \bar{\nu}_\beta)$$

CP İhlali ve Leptonik Sektör

- CP ihlali durumunda nötrino ve antinötrino salınımları farklı olur:

$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) \neq P(\bar{\nu}_\alpha \rightarrow \bar{\nu}_\beta)$$

- Nötrino salınımlarındaki bu fark, PMNS matrisindeki **CP fazı**

$$\delta_{CP}$$

ile ilişkilidir.

- PMNS matrisinin elemanları karmaşık hale gelir:

$$U_{\alpha i} = U_{\alpha i}(\delta_{CP})$$

ve bu karmaşık faz salınım olasılıklarını etkiler.

- **Leptonik CP ihlali neden önemlidir?**
 - Evren neden madde-antimadde asimetrisine sahiptir?
 - Lepton sektöründeki CP ihlali, bu temel sorunun anlaşılmasına katkı sağlayabilir.

PMNS Matrisi ve Elemanları

$$U_{\text{PMNS}} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta_{CP}} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{i\delta_{CP}} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

- θ_{23} : **Atmosferik karışım açısı**

$$\nu_{\mu} \leftrightarrow \nu_{\tau}$$

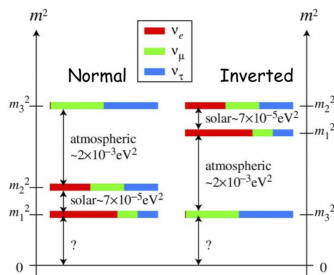
- θ_{13} ve δ_{CP} : **CP ihlali ile ilişkili sektör**

$$\delta_{CP} = 0, \pi \Rightarrow \text{CP korunumu}$$

$$\delta_{CP} \neq 0, \pi \Rightarrow \text{CP ihlali}$$

- θ_{12} : **Güneş nötrino karışım açısı**
- **Temel soru:** ν ve $\bar{\nu}$ aynı oranda mı salınır?

Nötrino Kütle Sıralaması (Mass Ordering)



- Nötrino salınımları doğrudan kütleleri değil, **kütle kare farklarını** ölçer:

$$\Delta m_{ij}^2 = m_i^2 - m_j^2$$

- Deneylerden bilinen:

$$\Delta m_{21}^2 > 0$$

$$|\Delta m_{31}^2| \simeq 2.5 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$$

- Ancak Δm_{31}^2 işareti bilinmemektedir.

Açık soru: Kütle sıralaması nedir?

$$m_1 < m_2 < m_3 \rightarrow \text{Normal Ordering}$$

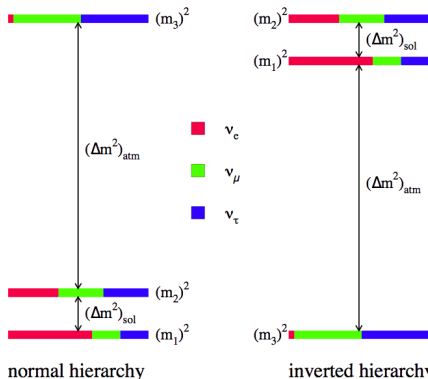
$$m_3 < m_1 < m_2 \rightarrow \text{Inverted Ordering}$$

Nötrino Kütle Sıralaması

- *Salınım deneyleri, nötrinoların mutlak kütle ölçeğini belirleyemez.*
- Kütle-kare farklarını ölçerler:

$$\Delta m_{21}^2 \sim 10^{-5} \text{ eV}^2, \quad |\Delta m_{31}^2| \sim 10^{-3} \text{ eV}^2.$$

- Δm_{31}^2 'in işareti henüz bilinmemektedir. Bu durum, nötrino **kütle sıralaması** problemini ortaya çıkarır.



Normal Sıralama (NO)

$$m_1 < m_2 < m_3$$

Ters Sıralama (IO)

$$m_3 < m_1 < m_2$$

Günümüz Nötrino Fiziğinin Temel Soruları

- **Kütle sıralaması (Mass Ordering)**

- Normal mi, terslenmiş (inverted) mi?

- θ_{23} **karışım açısı**

- Maksimum karışım mı?
- Alt oktant mı, üst oktant mı?

- **CP ihlali (δ_{CP})**

- Nötrinolar ve antinötrinolar aynı şekilde mi salınıyor?

$$P(\nu) \stackrel{?}{=} P(\bar{\nu})$$

- **Madde-antimadde asimetrisi**

- Leptonik CP ihlali bu sorunun cevabını açıklayabilir.

Hızlandırıcı Kaynaklı Nötrino Deneylerinin Çalışma Prensibi

Proton Demeti $\Rightarrow$ Hedef $\Rightarrow$ Nötrino Demeti

Yakın Dedektör $\Rightarrow$ Uzak Dedektör

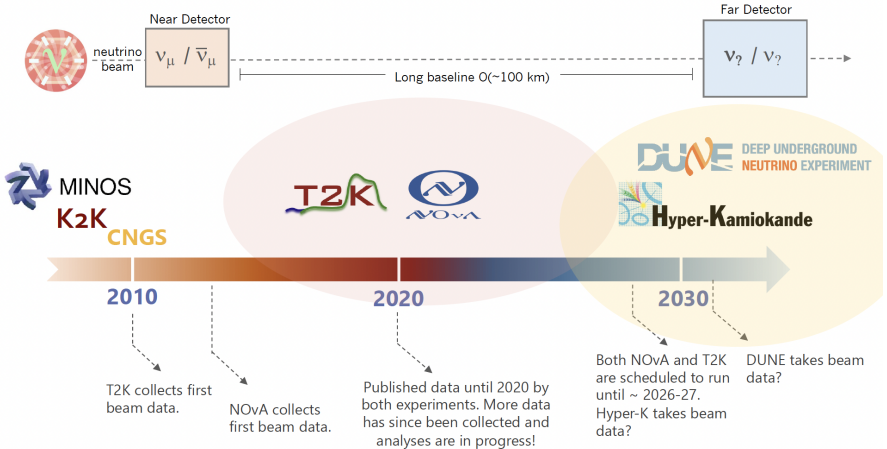
Başlangıç akısı Salınım sonrası ölçüm

Yüzlerce kilometre

- Proton demeti hedefe çarptırılarak baskın olarak pion ve kaonlar üretilir.
- Bu parçacıkların bozunumuyla yoğun bir **nötrino demeti** elde edilir.
- **Yakın dedektör**, başlangıç nötrino akısını ve enerji spektrumunu ölçerek sistematik belirsizlikleri azaltır. **Uzak dedektör**, uzun mesafe sonunda salınımına uğrayan nötrinoları gözler.
- İncelenen temel salınım kanalları: $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ (**appearance, görünüm**) ve $\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu$ (**disappearance, kaybolum**)

Uzun temel hatlı nötrino salınım deneyleri

credit Zoya Vallari Neutrino Seminar, Fermilab, 2023



Uzun Temel Hatlı Nötrino Salınım Deneyleri

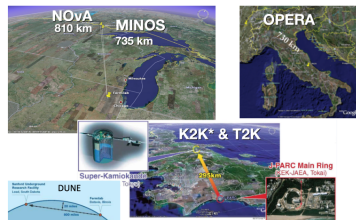
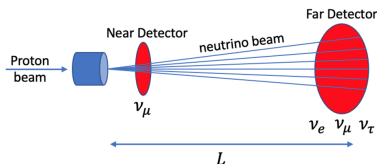
T2K, NOvA, Hyper-K ve DUNE'nin temel özellikleri:

Deney	Yıl	E [GeV]	L [km]	Dedektör Kütlesi
T2K	2009–	~ 0.6	295	50 kt
NOvA	2014–	~ 2	810	14 kt
Hyper-K	2027–	~ 0.6	295	187 kt
DUNE	2030–	~ 2.5	1285	40 kt

★ *Demet enerjisi, salınımın birinci maksimumunu hedefleyecek şekilde seçilir.*

Deney	Dedektör	Ana Fizik hedefleri
T2K	Su Cherenkov	CP ihlali, salınım parametreleri
NOvA	Sıvı sintilatör	Kütle sıralaması, CP ihlali
Hyper-K	Su Cherenkov	CP ihlali, proton bozunumu, süpernova ν
DUNE	LArTPC	δ_{CP}, kütle sıralaması, süpernova ν, proton bozunumu

Hızlandırıcı Tabanlı Nötrino Salınım Deneyleri



- Hızlandırıcı deneyleri, **GeV** mertebesinde enerjilere ve **uzun taban uzunluklarına** (L) sahiptir.
- Nötrino salınımları esas olarak

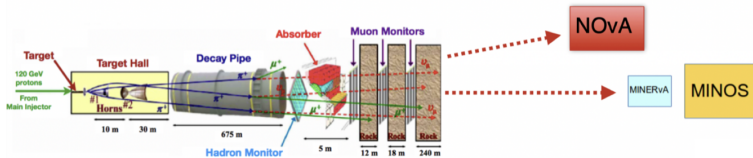
$$\frac{L}{E}$$

oranına bağlıdır.

- İki çeşnili yaklaşımda salınım olasılığı:

$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) = \sin^2(2\theta) \sin^2\left(1.27 \frac{\Delta m^2 L}{E}\right)$$

Fermilab NuMI Demet Hattı ve Nötrino Deneyleri



● Fermilab NuMI demeti:

- 120 GeV protonlar grafit (Carbon) hedefe çarptırılır.
- Üretilen π^+ ve K^+ parçacıkları manyetik hornlarla (hunilerle) odaklanır.
- Bozunumlar sonucunda yoğun bir ν_μ demeti elde edilir.

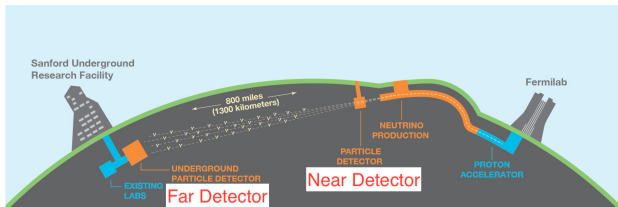
● MINERvA

- Nötrino-çekirdek etkileşimlerini (ν -A) araştıran yakın dedektördür.

● NOvA

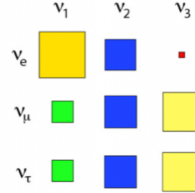
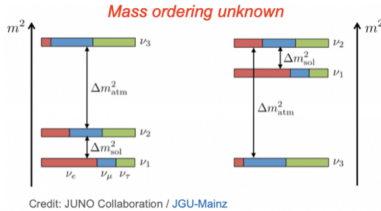
- NuMI demetini kullanan uzun taban hatlı salınım deneyidir.
- Yakın dedektör: Fermilab
- Uzak dedektör: Ash River, Minnesota

DUNE: Derin Yeraltı Nötrino Deneyi



- **DUNE (Deep Underground Neutrino Experiment):** Fermilab'dan üretilen yüksek yoğunluklu nötrino ışınının özelliklerini ve nötrino salınımlarını araştırarak olan uzun taban hatlı bir nötrino deneyidir.
- **Yakın Dedektör @ Fermilab:** Nötrino ışınının karakterizasyonu ve nötrino etkileşimlerinin yakın bölgede ölçülmesi için.
- **Uzak Dedektör @ SURF, South Dakota:** Yaklaşık 1.5 km yeraltında bulunacak olan, dört adet yaklaşık 10 kt'lık sıvı argon TPC modülünden oluşacak.
- **Taban hat çizgisi:** Fermilab ile SURF arasındaki nötrino uçuş mesafesi yaklaşık 1300 km'dir.
- Nötrino ve antinötrino salınımlarının karşılaştırılması yoluyla δ_{CP} ve leptonik CP ihlalinin araştırılması.
- Nötrino kütle sıralaması, salınım parametreleri, süpernova nötrinoları ve yeni fizik araştırmaları.
- **Uluslararası işbirliği:** 1500'den fazla araştırmacı, 228 kurum, 38 ülke + CERN.

LBNF/DUNE Fizik Programı



Credit: Sheldon Stone

● Nötrino Salınım Fiziği

- Leptonik CP ihlalinin araştırılması
- Nötrino kütle hiyerarşisinin belirlenmesi
- Hassas salınım parametre ölçümleri (θ_{23} oktantı, NSI, vb.)

● Nükleon Bozunumu

- Özellikle $p \rightarrow K^+ + \bar{\nu}$ kanalında hassas aramalar

● Süpernova Nötrinoları ve Astrofizik

● Diğer Araştırma Konuları

- Nötrino etkileşim fiziği
- Atmosferik ve steril nötrinolar
- Karanlık madde aramaları ve temel simetri testleri

Sıvı Argon Zaman Projeksiyon Odası (LArTPC)

Carlo Rubbia tarafından 1977'de önerilen bu teknik, sintilasyon ve iyonlaşmayı kullanarak parçacık etkileşimlerini 3B olarak yeniden yapılandırır.

→ **LArTPC teknolojisi**, nötrino-argon etkileşimlerinde üretilen iyonlaşma elektronlarını algılar. **Yüklü parçacıklar**, sıvı argon ortamını iyonlaştırır.

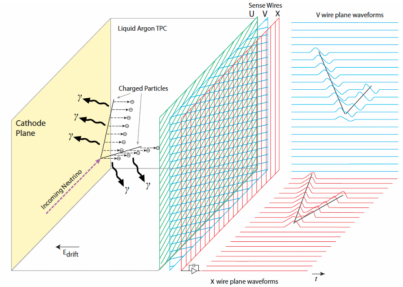
→ İyonlaşma elektronları, düzgün bir elektrik alanı içerisinde **anot düzlemlerine doğru sürüklenir**.

→ Elektrik alanı, çevreleyen bir **field cage** (alan kafesi) tarafından korunur.

→ DUNE, elektron sürüklenmesinin **yatay veya dikey** olduğu farklı dedektör konfigürasyonlarını araştırmaktadır.

Anot tel düzlemleri:

- **U, V:** bipolar indüksiyon sinyalleri; **X:** unipolar toplama sinyali. U, V ve X düzlemleri **3B iz ve enerji yeniden yapılandırmasını** sağlar. **Bethe-Bloch enerji kaybı** iyonlaşmaya aktarılır ve ölçülebilir bir yük olarak toplanır.



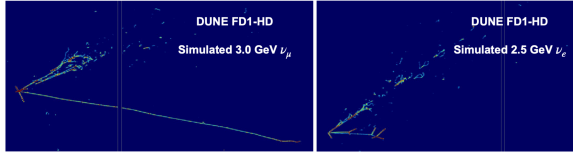
U, V: İndüksiyon düzlemleri

Bipolar sinyaller (çift kutuplu) → parçacığın konum bilgisi belirlenir; toplam yük doğrudan ölçülmez.

X: Toplama düzlemi

Unipolar sinyaller (tek kutuplu) → toplam yük ve buna bağlı olarak enerji ölçülür.

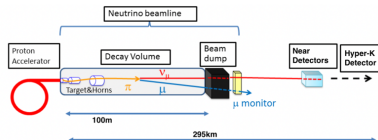
Sıvı Argon Time Projection Chamber (LArTPC)



- **LArTPC, parçacıkların üç boyutlu görüntülenmesini sağlar**
 - Nötrino etkileşme noktası ve etkileşmeden çıkan parçacıkların izleri ayrıntılı olarak görüntülenebilir.
 - **3.0 GeV ν_μ** CC olayında görülen uzun ve düz iz, oluşan **müonun** karakteristik izidir.
 - **2.5 GeV ν_e** CC olayında ise elektronun oluşturduğu daha karmaşık ve yayvan **elektromanyetik duş** gözlenir.
- **ν_μ ve ν_e CC olaylarının ayrımı**
 - Müon: uzun ve düzgün iz (*track*). Elektron: daha kısa sürede gelişen, dallanan/duş benzeri yapı (*shower*)
 - Etkileşme noktasından çıkan proton ve diğer hadron izleri, olayın topolojisinin belirlenmesine katkı sağlar.
- **Düşük enerji eşikleri ile hassas ölçümler**
 - İzler boyunca oluşan iyonizasyon ve enerji depozisyonu ölçülür. Lepton ve hadron enerjilerinin yüksek hassasiyetle yeniden yapılandırılması mümkün olur. Bu bilgiler, geniş enerji aralığında nötrino enerjisinin belirlenmesine katkı sağlar.

TPC, yüklü parçacıkların iyonizasyon izlerini ve enerji kaybını ölçerek parçacıkların özelliklerini belirleyen dedektördür.

T2K ve Hyper-K Deneyleri



- Yüksek yoğunluklu **30 GeV proton ışını**, **90 cm karbon hedefe** gönderilir.
- Üretilen hadronlar, üç elektromanyetik odaklama konisi (hunisi, horn) ile odaklanır ve bozunum hacminde nötrino demeti oluşturulur:

$$\pi \rightarrow \mu + \nu_{\mu}$$

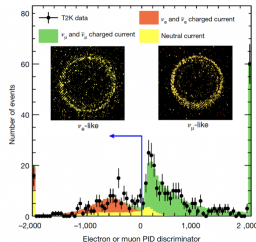
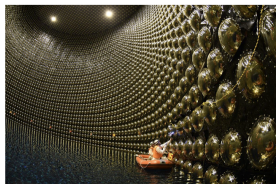
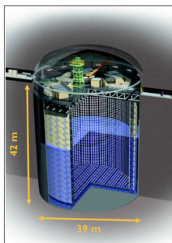
- T2K, $\sim 2.5^{\circ}$ eksen dışı (off-axis) nötrino demeti kullanarak:

$$\nu_{\mu} \rightarrow \nu_e \quad \text{ve} \quad \nu_{\mu} \rightarrow \nu_{\mu}$$

salınımlarını ölçer.

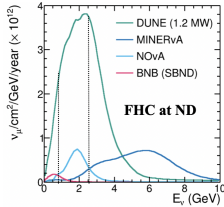
- T2K deneyinin başarısı üzerine, Japonya'da **3. nesil dev su Çerenkov dedektörü Hyper-Kamiokande** inşa edilmektedir.
- **Hyper-Kamiokande programının 2027'de başlaması planlanmaktadır.**

Uzak Dedektörde Nötrino Etkileşim Tespiti: T2K SK



- Super-Kamiokande (SK), fotoçoğaltıcı tüpler (PMT)'ler ile donatılmış **50 kt'lık su Çerenkov dedektörüdür.**
- Nötrino etkileşimi sonucunda oluşan yüklü parçacıklar, suda Çerenkov ışığı üretir. Çerenkov ışığı, PMT'ler tarafından algılanan **halka şeklinde izler** oluşturur.
- Halka şekli ve keskinliği, parçacık çeşnisinin belirlenmesinde kullanılır:
 - **Müonlar → keskin halkalar**
 - **Elektronlar → elektromanyetik saçılma nedeniyle bulanık halkalar**
- Bu parçacık tanımlama yöntemi, $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ salınım ölçümlerinde kritik öneme sahiptir.

DUNE: Geniş Enerji Aralığında Nötrino Demeti



- DUNE, **geniş bantlı nötrino demeti** sayesinde farklı E_ν değerlerinde $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ salınımını ölçebilir.
- Salınım olasılığı, yaklaşık olarak **salınım fazına** bağlıdır:

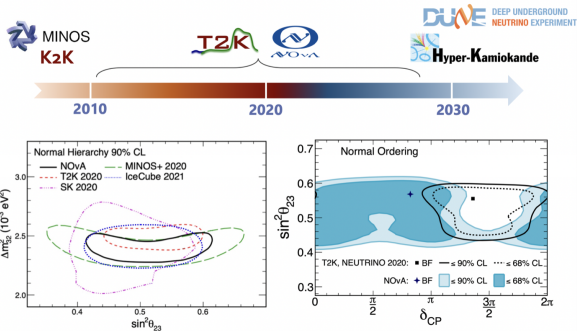
$$\Delta m_{31}^2 \frac{L}{4E_\nu} = (2n - 1) \frac{\pi}{2}, \quad n = 1, 2, \dots$$

- DUNE'un $L \simeq 1300$ km'lik baseline'ı için yaklaşık olarak:

$$E_\nu^{(1)} \sim 2.5 \text{ GeV}, \quad E_\nu^{(2)} \sim 0.8 \text{ GeV}$$

- Birinci ve ikinci salınım maksimumlarının birlikte ölçülmesi, nötrino salınım parametreleri ve **CP ihlali** hakkında daha güçlü bilgi sağlar.
- **Birinci maksimum**, $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ salınım olasılığının ilk maksimumudur ($E_\nu \sim 2.5$ GeV). **İkinci maksimum** ise daha düşük enerjideki bir sonraki maksimumdur ($E_\nu \sim 0.8$ GeV).

Nötrino Salınımlarında Neredeyiz?



Credit: Zoya Vallari, The 7th Symposium on Neutrinos and Dark Matter in Nuclear Physics (NDM22)

$$\Delta m_{32}^2$$

Kütle kare farkı
iyi kısıtlanmış

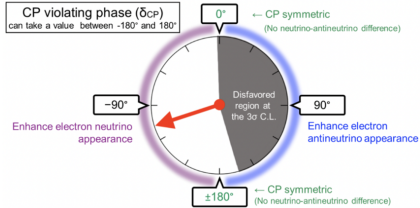
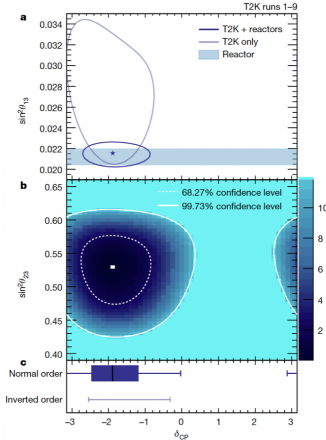
$$\theta_{23}$$

Karışım açısı
iyi kısıtlanmış

$$\delta_{CP}$$

CP-ihlal fazı
hâlâ belirsiz

Temel mesaj: θ_{23} ve Δm_{32}^2 iyi belirlenmişken, δ_{CP} **hâlâ açık bir sorudur**. Dolayısıyla salınım parametrelerinin büyük bir kısmını anlamış olsak da, leptonik CP ihlalinin doğası hâlâ açık bir soru. DUNE ve Hyper-K'nin önemli hedeflerinden biri de bu soruyu daha yüksek hassasiyetle cevaplamak.



- > δ_{CP} 'nin -180 dereceden +180 dereceye kadar olası değerleri alındığında -1,7 dereceden 164,6 dereceye kadar olan değerleri dışarılandı.
- > Bu, Standart Modelde bu temel parametrenin deneysel olarak ölçüldüğü ilk çalışmadır.
- > T2K sonuçlarının diğer önemli tarafı, δ_{CP} 'nin en olası değerlerinin -90 dereceye yakın olmasıdır, **bu da nötrinelardaki CP simetrisinin maksimum ihlalini ima eder.**
- > Ok, verilerle en uyumlu değeri gösterir. Gri bölge %99,7 (3 σ) güven seviyesinde dışarılandı. Bu sonuçlar ile olası değerlerin neredeyse yarısı dışarılanmış oldu.

a) Tercih edilen normal sıralamada δ_{CP} için %68, 27 CL ile $\sin^2 \theta_{13}$ arasındaki 2-D güven aralıkları. T2K etiketli aralıklar yalnızca $\sin^2 \theta_{13}$ üzerindeki harici kısıtlama kullanılmadan elde edilen ölçümü gösterirken, T2K + reaktör aralıkları harici kısıtlamayı kullanır. Yıldız, tercih edilen normal kütle sıralamasına uyan T2K + reaktörlerin en iyi uyum noktasını göstermektedir.

b) T2K + reaktörler δ_{CP} 'ye karşı $\sin^2 \theta_{23}$ için %68, 27 ve %99, 73 güven aralığındaki 2-D güven aralıkları normal sıralamaya uyar; renk ölçeği, her parametre değeri için olasılığın logaritmasının negatif iki katını temsil eder.

c) T2K + reaktörler δ_{CP} 'ye ilişkin tek boyutlu güven aralıkları hem normal hem de ters sıralamalara uyar. Gölge kutudaki dikey çizgi δ_{CP} 'nin en uygun değerini gösterir, gölge kutunun kendisi %68, 27 güven aralığını gösterir ve hata çubuğu %99, 73 güven aralığını gösterir. Ters sıralamada %68, 27 aralığında hiçbir değerin bulunmadığını görüyoruz.

Geleceğin Nötrino Deneyleri

● DUNE

- Uzun temel hat: $L \simeq 1300$ km
- Leptonik CP ihlalinin araştırılması
- Nötrino kütle sıralamasının belirlenmesi
- Salınım parametrelerinin hassas ölçümü
- Süpernova nötrinoları ve nötrino astrofiziği
- Proton bozunumu ve nadir olayların araştırılması

● Hyper-Kamiokande

- Yüksek istatistikli nötrino salınım ölçümleri
- Leptonik CP ihlalinin araştırılması
- Proton bozunumu ve nadir olayların araştırılması
- Süpernova nötrinoları ve nötrino astrofiziği

● Birleşik Analizler

DUNE + Hyper-K + T2K + NOvA

- Farklı deneylerin tamamlayıcı hassasiyetlerinden yararlanmak
- Salınım parametreleri ve CP fazı üzerindeki kısıtları güçlendirmek

● Uzun vadeli hedef:

Nötrino sektörünü hassasiyetle test etmek ve yeni fiziğin izlerini aramak

Özet

- **T2K ve NOvA deneyleri**, nötrino salınım parametreleri üzerinde önemli kısıtlamalar sağlamıştır.
 - θ_{23} , θ_{13} ve Δm_{32}^2 ölçümleri iyi belirlenmiştir.
 - δ_{CP} için hâlâ önemli belirsizlikler bulunmaktadır.
- **DUNE**, uzun temel hat çizgisi (~ 1300 km) ve geniş bantlı nötrino demeti sayesinde:
 - Nötrino kütle sıralamasını belirlemeyi,
 - δ_{CP} ölçüm hassasiyetini artırmayı,
 - Hassas salınım fiziği çalışmalarını gerçekleştirmeyi hedeflemektedir.
- DUNE, üç-nötrino çeşni paradigmasını test ederek **Standart Model Ötesi (BSM) fizik** arayışlarına katkı sağlayacaktır.
- **DUNE + Hyper-Kamiokande** birleşik analizleri, leptonik CP ihlalinin keşfi için güçlü bir potansiyel sunacaktır.
- T2K ve NOvA'nın tam veri setleri ile yapılacak ortak analizler, gelecekteki hassas nötrino ölçümleri için önemli bir temel oluşturacaktır.

Teşekkür ederim!

Sorularınız?

Nilay Bostan
Marmara Üniversitesi
nilay.bostan@cern.ch



Kaynaklar



M. C. Gonzalez-Garcia and R. Wendell, "Neutrino Masses, Mixing, and Oscillations," Review of Particle Physics, Particle Data Group (2025).



Y. Fukuda et al. [Super-Kamiokande Collaboration], "Evidence for Oscillation of Atmospheric Neutrinos," Phys. Rev. Lett. **81**, 1562 (1998).



Q. R. Ahmad et al. [SNO Collaboration], "Direct Evidence for Neutrino Flavor Transformation from Neutral-Current Interactions in the Sudbury Neutrino Observatory," Phys. Rev. Lett. **89**, 011301 (2002).



K. Abe et al. [T2K Collaboration], "Constraint on the matter-antimatter symmetry-violating phase in neutrino oscillations," Nature **580**, 339–344 (2020).



M. A. Acero et al. [NOvA Collaboration], "Improved measurement of neutrino oscillation parameters by the NOvA experiment," Phys. Rev. D **106**, 032004 (2022).



B. Abi et al. [DUNE Collaboration], "Deep Underground Neutrino Experiment (DUNE), Far Detector Technical Design Report, Volume II: DUNE Physics," arXiv:2002.03005 [hep-ex] (2020).



B. Abi et al. [DUNE Collaboration], "Long-baseline neutrino oscillation physics potential of the DUNE experiment," arXiv:2006.16043 [hep-ex] (2020).



C. Rubbia, "The Liquid-Argon Time Projection Chamber: A New Concept for Neutrino Detectors," CERN-EP/77-08 (1977).



J. A. Formaggio and G. P. Zeller, "From eV to EeV: Neutrino Cross Sections Across Energy Scales," Rev. Mod. Phys. **84**, 1307 (2012).



L. Wolfenstein, "Neutrino Oscillations in Matter," Phys. Rev. D **17**, 2369 (1978).



S. P. Mikheyev and A. Yu. Smirnov, "Resonance Amplification of ν Oscillations in Matter and Solar Neutrino Spectroscopy," Nuovo Cim. C **9**, 17 (1986).



The Nobel Prize in Physics 2015, "Neutrino Oscillations," Takaaki Kajita and Arthur B. McDonald.

Kaynaklar



I. Esteban et al., "The Fate of Hints: Updated Global Analysis of Three-Flavor Neutrino Oscillations," JHEP **09**, 178 (2020), arXiv:2007.14792 [hep-ph].



Z. Vallari, "The Neutrino Oscillation," NDM22, Caltech, May 16, 2022. Slayt 15'teki görsel ve sunum düzeni bu kaynaktan uyarlanmıştır.



Nobel Prize, "James Chadwick – Biographical," The Nobel Prize, 1935. James Chadwick görseli bu kaynaktan alınmıştır.
<https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1935/chadwick/biographical/>



Wikipedia, "Enrico Fermi," Wikipedia. Enrico Fermi görseli bu kaynaktan alınmıştır.
https://en.wikipedia.org/wiki/Enrico_Fermi



Wikipedia, "Wolfgang Pauli," Wikipedia. Wolfgang Pauli görseli bu kaynaktan alınmıştır.
https://en.wikipedia.org/wiki/Wolfgang_Pauli



Wikipedia, "Standard Model," Wikipedia. Standart Model tablosu bu kaynaktan alınmıştır.
https://en.wikipedia.org/wiki/Standard_Model



S. F. King, "Neutrino Mass Models," Steve King's Neutrino Mass Models, Neutel11, 2011. Slayt 21'deki "Pictorial representation of the neutrino mass hierarchies" görseli bu kaynaktan alınmıştır.
<https://neutel11.wordpress.com/2011/03/16/neutrino-mass-models-by-steve-king/>



Wikipedia, "Neutrino Mass Hierarchy," Wikipedia. Slayt 22'deki "Pictorial representation of the neutrino mass hierarchies" görseli bu kaynaktan alınmıştır. https://en.wikipedia.org/wiki/Neutrino_mass_hierarchy

Yedekler

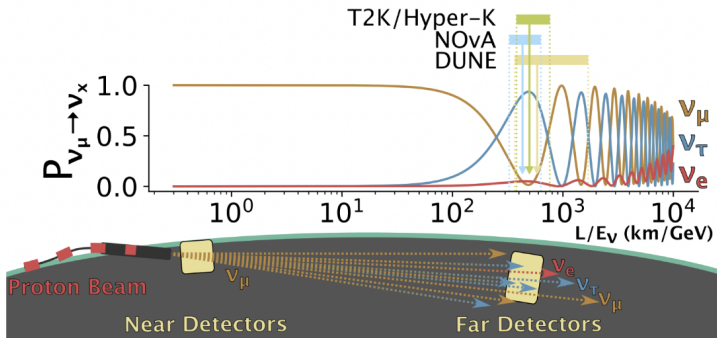


Figure 1: A schematic of an LBL neutrino oscillation experiment. The probability for a muon neutrino to oscillate to a particular flavour is shown as a function of the distance travelled divided by the neutrino energy (L/E_ν), calculated with the NuFit 5.2 best fit parameter values [21, 22]. The span in L/E_ν covered by current and future experiments is indicated, where L is fixed at the experiments' baseline and the full width at half the maximum of E_ν is used. The flux peaks are marked by arrows.

[arXiv:2605.28671v1]

Nötrino Karışım Açıları Nasıl Ölçülür?

Temel fikir

Nötrino deneyleri karışım açılarını **doğrudan ölçmez**. Farklı flavor'larda gözlenen nötrino sayıları ve enerji dağılımları **osilasyon olasılıkları** ile karşılaştırılarak θ_{12} , θ_{13} ve θ_{23} belirlenir.

$$\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta \quad \Longrightarrow \quad P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta)$$

1. Beam oluşturulur

$$\nu_\mu \xrightarrow{L} \text{Far Detector}$$

Near Detector'da başlangıçtaki ν_μ flux ve etkileşimler ölçülür.

2. Flavor değişimi gözlenir

$$\nu_\mu \rightarrow \nu_e$$

ve

$$\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$$

appearance / disappearance olayları araştırılır.

Örnek: θ_{23}

3. Enerji spektrumu ölçülür

$$N_{\text{data}}(E_\nu)$$

ile teorik beklenti

$$N_{\text{pred}}(E_\nu; \theta_{ij}, \Delta m^2, \delta_{\text{CP}})$$

karşılaştırılır.

4. Parametre fit'i

Likelihood veya χ^2 analizi ile

$$\theta_{12}, \theta_{13}, \theta_{23}, \Delta m^2, \delta_{\text{CP}}$$

için en iyi uyum bulunur.

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau) \simeq \sin^2(2\theta_{23}) \sin^2\left(\frac{\Delta m_{32}^2 L}{4E_\nu}\right)$$

$\theta_{23} \simeq 45^\circ$ ise mixing maksimuma yakındır.

1934 - Enrico Fermi ve Zayıf Etkileşim Teorisi

Fermi'nin temel fikri

1934 yılında **Enrico Fermi**, β bozunumunu açıklamak üzere ilk başarılı zayıf etkileşim teorisini geliştirdi.

β^- bozunumu:

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$$

Bu süreçte:

$$d \rightarrow u + W^- \rightarrow u + e^- + \bar{\nu}_e$$

- Zayıf etkileşimden kaynaklanır.
- Enerji ve momentum korunur.
- Elektronun sürekli enerji spektrumunu açıklar.
- Nötrino/antinötrino kavramının deneysel olarak araştırılmasının temelini oluşturur.

Fermi Etkileşim Noktası

Fermi'nin orijinal teorisinde etkileşim, dört fermiyonun tek bir noktada etkileşmesi şeklinde tanımlanır:

$$\mathcal{L}_F = - \frac{G_F}{\sqrt{2}} \left[\bar{\psi}_p \gamma^\mu (1 - g_A \gamma^5) \psi_n \right] \times \left[\bar{\psi}_e \gamma_\mu (1 - \gamma^5) \psi_\nu \right] + \text{h.c.}$$

- $\mathcal{L}_F$: Fermi etkileşim Lagrangian'ı
- G_F : Fermi sabiti, zayıf etkileşimin şiddetini belirler
- ψ_n, ψ_p : nötron ve proton alanları
- ψ_e, ψ_ν : elektron ve nötrino alanları
- γ^μ : Dirac gamma matrisleri
- γ^5 : kiraliteyi (chirality) belirleyen matris
- g_A : nükleer eksenel bağlaşım sabiti

$$G_F \simeq 1.166 \times 10^{-5} \text{ GeV}^{-2}$$

Önemi: Fermi teorisi, daha sonra geliştirilen **elektrozayıf teorinin** temel taşlarından biri oldu.

Cherenkov Işıması

Temel fikir

Yüklü bir parçacık, bir ortamda ışığın o ortamdaki hızından daha hızlı hareket ederse Cherenkov ışıması oluşur:

$$\boxed{v > \frac{c}{n}} \quad \Longleftrightarrow \quad \boxed{\beta n > 1}$$

Nasıl oluşur?

- Parçacığın elektrik alanı ortamı polarize eder.
- Yeterince hızlı parçacık için oluşan elektromanyetik dalgalar **koherent olarak üst üste biner**.
- Sonuçta parçacığın arkasında bir **Cherenkov ışığı konisi** oluşur.

Cherenkov açısı

$$\boxed{\cos \theta_C = \frac{1}{\beta n}}$$

$$\beta = \frac{v}{c}$$

Su için:

$$n \simeq 1.33, \quad \beta \simeq 1$$

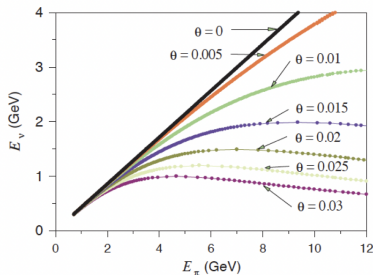
$$\boxed{\theta_C \simeq 41^\circ}$$

Önemli

Parçacık c hızını aşmaz; yalnızca ortam içindeki ışığın hızından (c/n) daha hızlı hareket eder.

For a particular off-axis angle, neutrino energies peak around

$$E_\nu = \frac{0.43 \frac{m_\pi}{\theta}}{2} \quad \Rightarrow \quad E_\nu/\text{GeV} = \frac{0.03}{\theta}$$



On-axis: neutrino beam with spectrum of pions from the target $E_\nu = 0.43E_\pi$

Off-axis: neutrino beam peaked around a certain energy $E_\nu/\text{GeV} = \frac{0.03}{\theta}$

Kısaca Nötrinoların tarihi:

credit APS

Adapted “The Growing Excitement of Neutrino Physics”
by APS

- ★ 1930: On-paper appearance as “desperate” remedy by W. Pauli
- ★ 1956: Anti- ν_e first experimentally discovered by Reines & Cowan
- ★ 1962: ν_μ existence confirmed by Lederman *et al*
- ★ 1986: Existence of ν_τ was established
- ★ 1998: Atmospheric ν oscillations discovered by Super-K
- ★ 2000: ν_τ first evidence reported by DONUT experiment
- ★ 2001: Solar ν oscillations detected by SNO (KamLAND 2002)
- ★ 2011: $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ transitions observed by OPERA
- ★ 2011-13: $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ observed by T2K and $\text{anti-}\nu_e \leftrightarrow \text{anti-}\nu_e$ by Daya Bay
- ★ 2015: Nobel prize for ν oscillations, Breakthrough prize (2016)
- ★ 2018: T2K hints on leptonic CP violation

Pauli predicts the Neutrino Fermi's theory of weak interactions Reines & Cowan discover (anti)neutrino muon neutrinos discovery Solar neutrino anomaly

1930

~25 years

1956

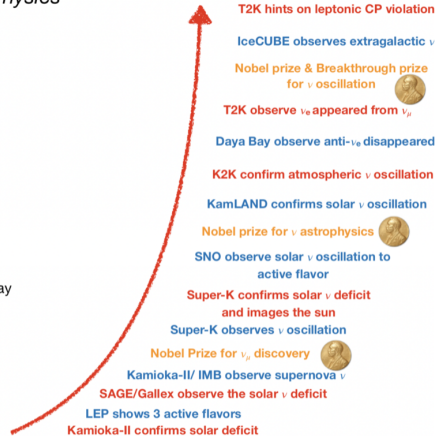
1962

1964

1980

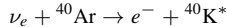
1998

2018



Süpernova Nötrinoları

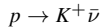
- Çekirdek çökmesi süpernovası (çöken büyük kütleli bir yıldızdan gelen MeV mertebesindeki nötrino patlaması), $\sim 10^{58}$ nötrino (birkaç onlarca MeV) açığa çıkarır.
- DUNE (LArTPC), ν_e nötrinolarına özellikle şu tepkime üzerinden duyarlıdır:



- Patlamanın zaman, enerji ve çeşni yapısını ölçer. Burada K^* , nötrino argonla etkileştikten sonra oluşan uyarılmış potasyum-40 çekirdek durumudur.
- **İncelenen konular:**
 - süpernova patlamasının dinamikleri ve nötron yıldızı oluşumu
 - yoğun maddede nötrino salınımları

Proton Bozunumu Aramaları

- Büyük etkin kütle (~ 40 kt LAr) $\Rightarrow \sim 10^{34}$ proton
- Temel bozunma kanalı:



- LArTPC aşağıdakileri mümkün kılar:
 - hassas iz takibi ve parçacık tanımlama (ör. K^+ tanımlanması)
 - düşük arka plan ile bozunma topolojisinin yeniden yapılandırılması
- $\gtrsim 10^{34}$ yıl mertebesindeki proton ömürlerine duyarlıdır.
- Tek bir protonun bozunma olasılığı çok düşük olsa da, çok büyük sayıdaki proton sayesinde DUNE, proton ömrünün 10^{34} yıldan kısa mı yoksa uzun mu olduğunu test edebilir.