

NÖTRİNOLAR & NÖTRİNO SALINIMLARI ÖLÇÜM DENEYLERİ

Dr. Nilay Bostan

TENMAK NÜKEN

Hızlandırıcı ve Işınlama Teknolojileri Koordinatörlüğü
YEF Ar-Ge Grubu @Proton Hızlandırıcı Tesisi



nilay.bostan@tenmak.gov.tr

- ν , ilk kez 1930'da Pauli tarafından çekirdekte meydana gelen (o dönem nötronun bu etkileşimin parçası olduğu bilinmiyordu) ve sonucunda 1 e , 1 p ve 1 $\bar{\nu}$ açığa çıktığı β bozunmasında kütle, momentum ve açısal momentum korunumu yasalarının sağlanması için öngörülmüştür.
- Süreç $A \rightarrow B + e$ ise E_e sabit bir değerde olması gerekir. Durum bu olmamalıdır! β bozunmasında enerji-momentum korunmalıdır.

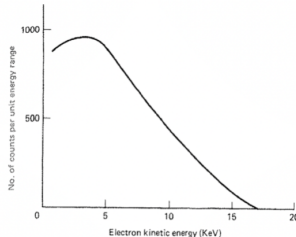


Fig. 1.5 The beta decay spectrum of tritium (${}^3\text{H} \rightarrow {}^3\text{He}$).
(Source: Lewis, G. M. (1970) Neutrinos, Wykeham, London, p. 30.)

- Pauli, enerji-momentum korunumunun ihlal edilmemesi gerektiğini düşündü ve üstteki süreç yerine şu süreci önerdi: $n \rightarrow p^+ + e^- + \bar{\nu}$.
- Umutsuz olarak bir yol önerdi ve bu yeni bir 'görünmez' parçacık olmalıydı ve bu parçacığa nötron adını verdi.

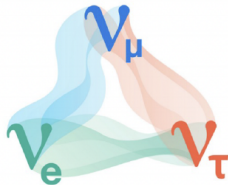


- 1932'de Chadwick, kütlesi daha büyük olan bir parçacık keşfedip ona **nötron** adını vermiştir ve her iki parçacık aynı adı taşımıştır.
- Enrico Fermi, 1930'ların ortasında zayıf kuvvetin ilk formülasyonu olan ν içeren β bozunması için genel bir formül buldu.
- Dünyanın ilk nükleer reaktörünün öncüsü olan Fermi, İtalyanca'da "küçük nötr" anlamına gelen "nötrino" terimini bu teorisiyle birlikte icat etti.
- Bu parçacığın tespit edilmesi 26 yıl sürdü. Cowan ve Reines, Güney Carolina'daki reaktörün yakınına bir dedektör yerleştirdiler ve reaktörlerin verdiği ters beta bozunma sürecini (birkaç olay/saat) gözlemlediler (Savannah River deneyi, 1956): $\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$.
- Bu süreçte n : Cadmium tarafından n-yakalama ve e^+ ise $e^+ + e^- \rightarrow \gamma + \gamma$.

Standart Model (SM) & Nötrinolar

Standard Model of Elementary Particles

three generations of matter (fermions)			Interactions / force carriers (bosons)		
	I	II	III		
mass	~2.2 MeV/c ²	~1.28 GeV/c ²	~173.1 GeV/c ²	0	~124.07 GeV/c ²
charge	2/3	2/3	2/3	0	0
spin	1/2	1/2	1/2	1	0
QUARKS	u up	c charm	t top	g gluon	H higgs
	d down	s strange	b bottom	γ photon	
	e electron	μ muon	τ tau	Z Z boson	
LEPTONS	ν _e electron neutrino	ν _μ muon neutrino	ν _τ tau neutrino	W W boson	



- Parçacık fiziğinin SM'si tüm temel parçacıkları ve onların etkileşimlerini (yerçekimi hariç) açıklar.
- SM'de, **nötrino kütleleri** sıfırdır. → $m_{\nu,i} = 0$
- ANCAK! Süper-Kamiokande (SK) işbirliğinin dikkat çekici *atmosferik nötrino salınımlarının keşfi* ile **sıfır olmayan nötrino kütleleri doğrulandı (1998)**. → $m_{\nu,i} \neq 0$
- SM öngörülerinin aksine, nötrino salınımları **nötrinoların kütleli olduklarını ve bir çeşni(tip)den diğerine salındıklarını** kanıtladı.

Neden nötrino fiziği çalışmak bir hayli önemlidir?

- Nötrinolar **yüksüzdürler**. Gravitasyonel olarak da etkileşime girdikleri varsayılmasına rağmen, **yalnızca zayıf kuvvet (W^\pm, Z^0)** yoluyla etkileşime girdikleri gözlemlendi.

★ **Şu anda nötrino fiziği ve nötrino salınımı deneylerinin ana konuları ve henüz cevaplanamamış sorular:**★

- ν ve $\bar{\nu}$, Yük-Parite'yi ihlal ediyor mu?: **CP-ihlal fazı δ_{CP}** , (“Nötrino çeşnileri arası salınım oranları aynı mı?”)
- Nötrinolarla ilgili diğer soru: **"mutlak kütleleri"** çünkü mevcut durumda yalnızca kütlelerinin karelerinin farklarını bilebiliyoruz.

"Kütle sıralaması problemi"

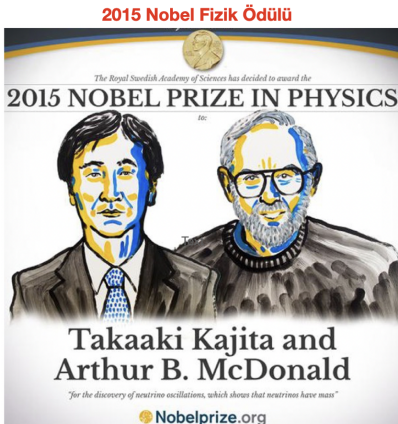
$$\Delta m_{21}^2 \equiv m_2^2 - m_1^2 \sim 10^{-5} \text{eV}^2,$$

$$|\Delta m_{31}^2| \equiv |m_3^2 - m_1^2| \sim 10^{-3} \text{eV}^2.$$

- $\nu_\mu = \nu_\tau$? θ_{23} **karışım açısı üzerinde büyük belirsizlik var**. Bu karışım açısı üzerinde henüz bir kısıt ya da deneylerden gelen net bir bilgi yok.

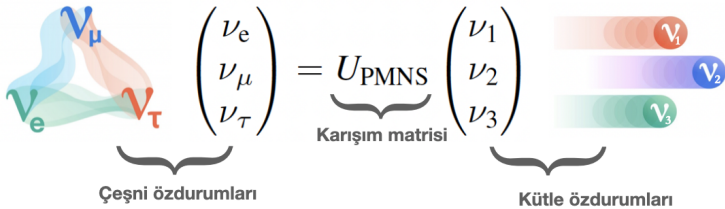
Tüm bu soruların cevaplanabilmesi çok önemlidir. Bunların anlaşılabilmesi için **nötrino deneyleri**, çalışmalarına devam etmektedir.

2015 Nobel Fizik Ödülü



"Nötrinoların kütleye sahip olduğunu gösteren nötrino salınımlarının keşfi için"

SK, 1996 yılında çalışmaya başladı ve 1998 yılında nötrino salınımlarının ilk kanıtını duyurdu. Bu, teorisyenlerin yıllardır üzerinde spekülasyon yaptığı bir olasılık olan, **nötrinoların sıfır olmayan kütleye sahip olduğu teorisini destekleyen ilk deneysel gözlemdi.** 2015 Nobel Fizik Ödülü, nötrino salınımlarını doğrulayan çalışmaları nedeniyle Sudbury Nötrino Gözlemevi'nde Arthur McDonald ile birlikte Süper Kamiokande araştırmacısı Takaaki Kajita'ya verildi. **Nötrino salınımlarının doğrulanması, yeni fizik senaryolarını araştırmak için standart modelin ötesinde (BSM) yeni fizik araştırmalarına yol açtı.**

Nötrino Salınimleri: 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 Salınımı

- Nötrinoların çeşni öz durumları, kütle öz durumlarının karışımıyla oluşur:

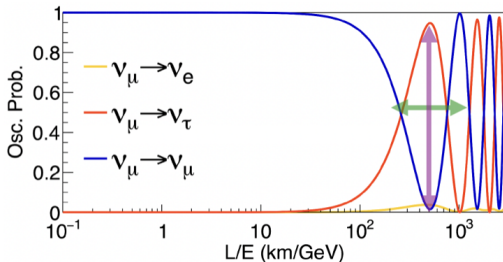
$$|\nu_\alpha\rangle = \sum_{i=1}^3 U_{\alpha i}^* |\nu_i\rangle,$$

ν_α , çeşni öz durumları ve ν_i , kütle öz durumlarıdır. Bu, çeşni öz durumlarının, kütle öz durumlarının bir süperpozisyonu olduğunu gösterir.

- Çeşni öz durumlarında etkileşime girerler ancak kütle öz durumlarında yayılırlar.
- Nötrino çeşnileri arasındaki salınım olasılığı:

$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) = \left| \sum_j U_{\alpha j}^* e^{-im_j^2 L/2E} U_{\beta j} \right|^2,$$

bu, **PMNS karışım matrisi (U)** ve **nötrino kütleindeki (m^2) kare fark** tarafından yönetilir. Burada, L yayılma mesafesidir ve E nötrino enerjisidir.



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

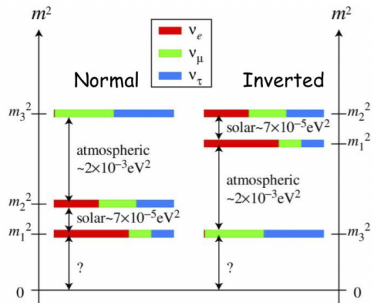
L/E is characteristic of oscillations

PMNS matrisi ve elemanları

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

- 1. matris atmosferik sektörden gelir: θ_{23} (θ_{atm}).
- 2. matris **CP ihlali** ile ilgilidir. δ_{CP} yalnızca $\sin \theta_{13}$ ile kombinasyon halindedir.
- δ_{CP} 'nin, 0 ve π değerleri için CP korunurken, diğer tüm değerler için CP ihlal edilir. Maksimum CP ihlali, $\pi/2$ ve $3\pi/2$, δ_{CP} değerlerinde meydana gelir. PMNS matrisinin CP'yi ihlal eden fazı henüz sadece zayıf bir şekilde ölçülebildi ve **mevcut data** tarafından kısıtlanabildi.
- 3. matris güneş nötrinolarından gelir: θ_{12} (θ_{sol}).
- **S1:** ν ve $\bar{\nu}$ CP'yi ihlal ediyor mu? (“Aynı oranda mı salınıyorlar?”)

Kütle Hiyerarşisi



- Normal ordering (NO): $\Delta m_{31}^2 > 0$,
- Inverted ordering (IO): $\Delta m_{31}^2 < 0$.

- **Nötrinolarla ilgili diğer bilmece:** 'mutlak kütleleri' çünkü mevcut durumda yalnızca kütlelerinin karelerinin farklarını bilebiliyoruz.

$$\Delta m_{21}^2 \equiv m_2^2 - m_1^2 \sim 10^{-5} \text{eV}^2$$

$$|\Delta m_{31}^2| \equiv |m_3^2 - m_1^2| \sim 10^{-3} \text{eV}^2$$

- Şunu biliyoruz: $\Delta m_{21}^2 > 0$, ancak Δm_{31}^2 'in işareti henüz bilinmiyor.
- Bu, "Kütle sıralaması problemi" olarak bilinir.
- **S2:** Kütle sıralaması 'Normal' mi yoksa 'Terslenmiş' midir?

Maksimum Karışım: θ_{23}

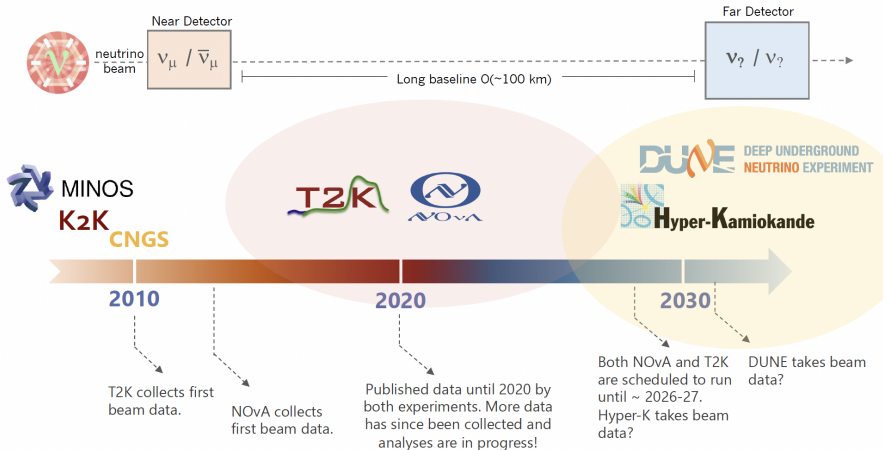
- θ_{23} karışım açısında büyük belirsizlik var.
- **S3:** $\nu_{\mu} = \nu_{\tau}$? θ_{23} : Karışım maksimum düzeyde mi?
- Üst oktantlı: $\theta_{23} > 45^{\circ}$?, Maksimum karışım: $\theta_{23} = 45^{\circ}$?, Alt oktantlı: $\theta_{23} < 45^{\circ}$?

Şu anda nötrino salınımı deneylerinin ana konuları:

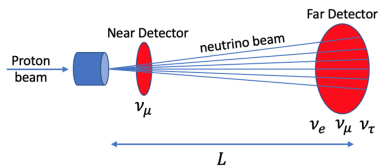
- Yüklü leptonların kütesini belirleyen simetri, ν_1 'in en hafif nötrino olmasını etkiler mi, yoksa tersi mi geçerlidir?
 → Salınım deneyleri bunu yeni nesil deneylerle ölçebilecek mükemmel bir duyarlılığa sahiptir.
- Nötrino kütle sıralaması ve θ_{23} oktant,
- CP'yi ihlal eden faz δ_{CP} ,
 → Nötrinolar ve antinötrinolar CP simetrisini ihlal edecek şekilde farklı mı salınıyorlar? $\delta_{CP} = 0$ mı?
- Evrende neden antimaddeden daha fazla madde var?
 (Leptonlar, Yük-Parite (CP_{ν}) simetrisinin ihlali için cevaplar sağlayabilir!)

Uzun temel hatlı nötrino salınım deneyleri

credit Zoya Vallari Neutrino Seminar, Fermilab, 2023



Hızlandırıcı tabanlı nötrino salınım deneyleri



- Hızlandırıcı tabanlı nötrino deneyleri şu bölgelerin keşfedilmesine olanak tanıyor: $\Delta m^2 \geq 2 \times 10^{-3} \text{eV}^2$, $E \sim 1 \text{ GeV}$ ve uzun mesafeler L .

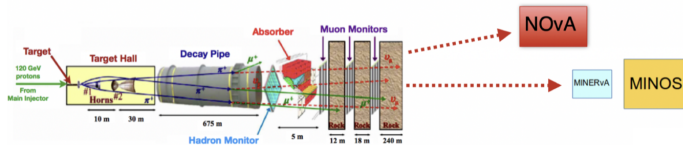
$$\frac{L}{E} \lesssim 10^3 \text{ km/GeV} \quad \Rightarrow \quad \Delta m^2 \gtrsim 10^{-3} \text{eV}^2.$$

- İki nötrino salınımı durumunun olasılığı, SI'da, $p \sim E$ için

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

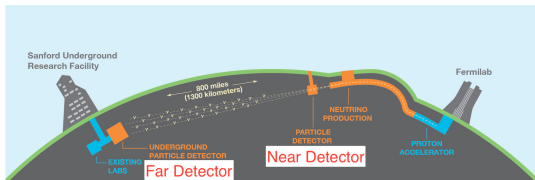
→ '1.27', L 'nin km, E nin GeV ve Δm^2 'nin eV^2/c^4 birimlerinde olduğunu varsayar.

Fermilab NuMI demet hattı ve nötrino deneyleri



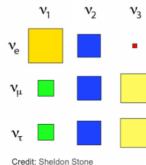
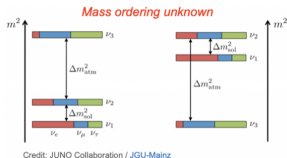
- 120 GeV enerjili protonlar C hedefe çarparak ikincil parçacıkları (baskın olarak π^+) ortaya çıkarırlar. Manyetik boynuzlar tarafından π^+ 'lar odaklanılır.
- Uzun ve düşük yoğunluklu He ile doldurulmuş bozunma çubuğunda π^+ 'lar $\mu^+\nu$ 'ye bozunurlar. Sonuçta ν ışınları dünyadan nötrino deneylerine doğru ilerler.
- **MINERvA deneyi ($\nu - A$ için Ana Enjektör Deneyi)**
 → Fermilab'a yerleştirilmiş aksenal bir deneydir.
 → Fizik veri alımı 2019 yılında tamamlandı. Analizleri devam etmektedir.
- **NOvA deneyi (NuMI eksen-dışı Deneyi)**
 → Eksen-dışı açısı 14.6 mrad ($\sim 0.835^\circ$).
 → Yakın dedektör Fermilab'da, Uzak dedektör Ash River'da.

DUNE: Derin Yeraltı Nötrino Deneyi



- **DUNE:** dünyanın en yoğun nötrino ışını elde edebilmek için yerleştirilmiş iki nötrino dedektöründen oluşacak
- **Yakın dedektör @Fermilab:** ışın karakterizasyonu için
- **Uzak dedektör @SURF, South Dakota:** yerin 1,5 km altında: 4×10 kton (ölçülmüş kütle) Sıvı Argon TPC'ler. Nötrino salınımları ölçümleri için
- Kütleli sıvı argon dedektörleri ve hassas ND
- Taban çizgisi (nötrino kaynağı ile uzak dedektör arasındaki mesafe) \sim **1300 km**'dir.
- δ_{CP} ölçümü için optimize edilmiş deneysel düzenek
- 37 ülke + CERN, 1000'in üzerinde bilim insanı ve mühendis

LBNF/DUNE Bilim Programı



- **Nötrino Salınım Fiziği**

- Leptonik (nötrino) CP ihlali

- Kütle hiyerarşisi

- Hassas salınım fiziği: Parametre ölçümleri (θ_{23} oktant), Mevcut 3-nötrino modelinin test edilmesi, Standart Olmayan Etkileşimler, ..

- **Nükleon Bozunması**

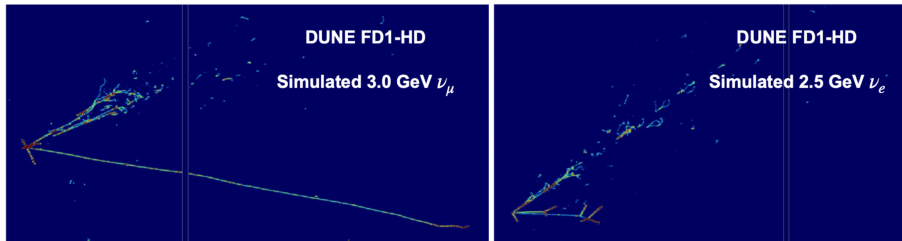
- Özellikle $p \rightarrow K + \bar{\nu}$ için hassasiyet

- **Süpernova fiziği ve astrofizik**

- **Ayrıca diğer birçok önemli araştırma konuları**

- nötrino etkileşim fiziği, atmosferik nötrinolar, steril nötrinolar, WIMP aramaları, Lorentz değişmezlik testleri vb.

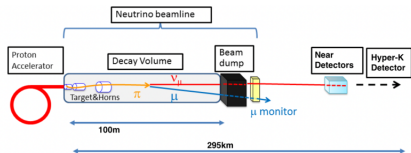
Sıvı Argon (LAr) Time Projection Chamber (TPC)



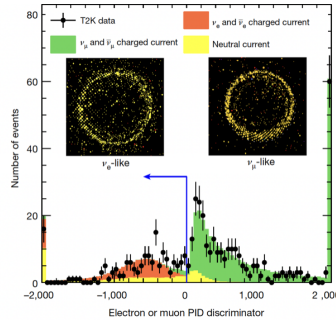
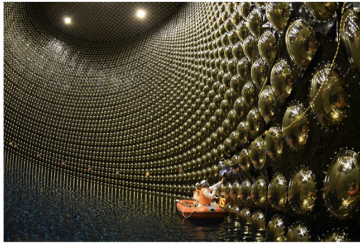
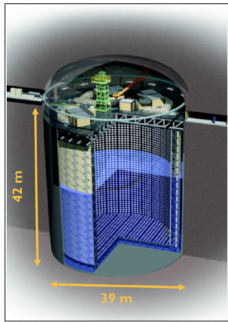
- **LArTPC, parçacık kimliği için mükemmel görüntüleme sağlar.**
→ ν_μ ve ν_e CC olayları için temiz ayırma
- **Yüklü parçacıklar için düşük eşikler:**
→ Lepton ve hadronik enerjinin yüksek hassasiyette yeniden yapılandırılması
→ Geniş enerji aralığında nötrino enerjisinin yeniden yapılandırılması

* TPC, bir gazın içindeki yüklü parçacıkların enerji kaybını ve izlerini ölçen bir cihazdır.

T2K ve Hyper-K Deneyleri

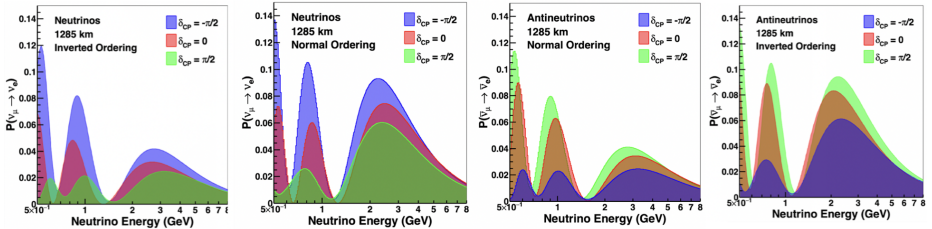


- Yüksek yoğunluklu **30 GeV proton** ışını **90 cm'lik** karbon hedefe çarpar
- Öncelikli hedef ν_μ ya da $\bar{\nu}_\mu$ ışını üretmek, ($\sim 2.5^\circ$) eksen-dışı bir deney, $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ ve $\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu$ **salınımı ölçümleri**
- Hadronlar, 3 adet elektromanyetik odaklama boynuzunda odaklanırlar
- 100 m uzunluğundaki bozunma hacminde $\pi \rightarrow \mu\nu$
- Başarılı T2K deneyinin gücüyle, **3. nesil devasa bir su Çerenkov dedektörü Japonya'da inşa ediliyor.**
- **Hyper-Kamiokande, 2027'de başlayacak** on yıllık bir araştırma programı aracılığıyla fizikteki en büyük çözülmemiş soruları ele alacak.



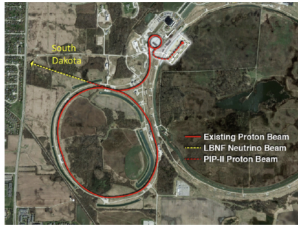
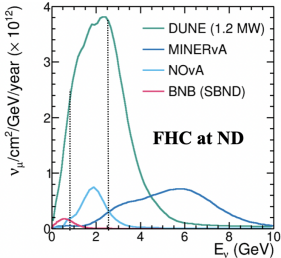
- SK, foto-çoğaltıcı tüp ışık sensörleriyle donatılmış 50 kt'lik bir [su dedektördür](#).
- Suyun e^- ları veya çekirdeği ile bir ν etkileşimi, ışığın sudaki hızından daha hızlı ama ışığın boşluktaki hızından daha yavaş hareket eden yüklü bir parçacık üretebilir.
- Bu, Çerenkov radyasyonu olarak bilinen bir ışık konisi yaratır.
- Yüklü parçacıklar PMT'ler tarafından saptanan Çerenkov ışığını üretir.
- SK'da Çerenkov ışığı, momentum eşliğinin üzerindeki yüklü parçacıkların su içinde seyahat etmesiyle üretilir. Bu ışık, ışık sensörleri tarafından algılanan halka şeklinde yayılır.
- Kütlelerinin düşük olması nedeniyle elektronlar münönlara göre çok daha sık (hem elastik hem de elastik olmayan şekilde) saçılır, dolayısıyla Çerenkov halkaları bulanıktır. Bu bulanıklaşma, yüklü leptonun çeşnisini tanımlamak için kullanılır.

DUNE nötrino salınımları: Eur. Phys. J. C 80 10, 978 (2020).



- Kütle sıralamasının etkisi, CP ihlali, θ_{23} oktant, L/E 'nin bir fonksiyonu olarak farklı şekillere sahiptir.
- Salınımların enerjinin sürekli bir fonksiyonu olarak ölçülmesi dejenerasyonların çözülmesine yardımcı olur.
- Bu, **DUNE'a özgüdür** ve dar akı spektrumlarına (örneğin Hyper-K) sahip diğer deneyleri tamamlayıcı niteliktedir.
- DUNE, tüm olası sonuçlar aralığında **kütle sıralamasını ve δ_{CP} 'yi belirleyebilecektir.**

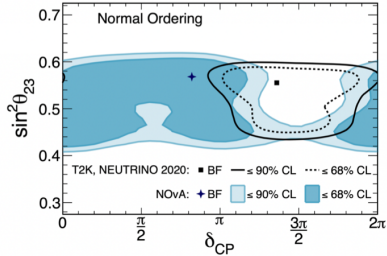
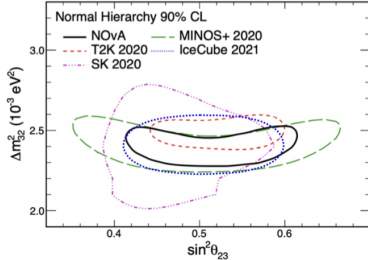
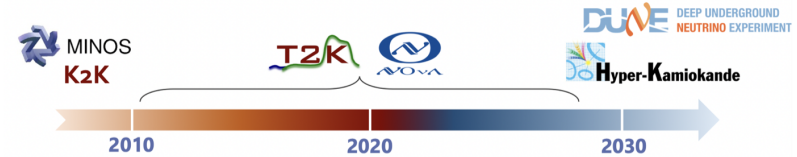
DUNE: çok sayıda nötrino



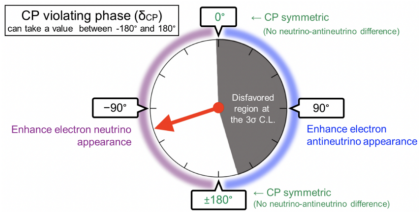
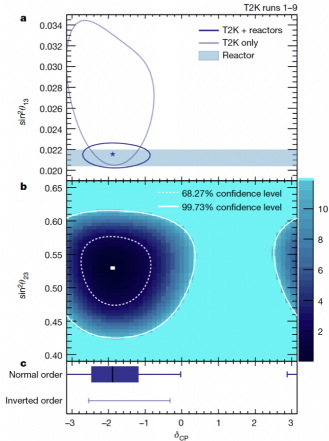
- Birinci salınım maksimum (2,5 GeV) pik, birinci ve ikinci maksimum (0,8 GeV) arasında önemli bir nötrino akışı.
- Öncü terim Δ_{31} 'e bağlı olduğundan, $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_e$ deneylerinin fiziksel karakteristiği, ν_1 ve ν_3 durumları arasındaki karışımın maksimum olduğu, L ve E_{ν} ile belirlenir. $P_{\mu e}^{\nu}$ 'nin salınım terimi için, bu denklemde **salınım maksimumunu** elde ederiz: $\Delta m_{31}^2 L/4E = (2n - 1)\frac{\pi}{2}$.
 → burada n bir tam sayıdır ve $n = 1; 2; \dots$ birinci, ikinci, ...
 $L/E \simeq 500, 1500, \text{ km/GeV}$ vs gibi meydana gelen maksimum salınımlar anlamına gelir.

Neredeyiz?

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



→ Δm_{32}^2 ve θ_{23} ile ilgili global ölçümler iyi bir şekilde uyum sağlarken, δ_{CP} ölçümleri için bir uyumsuzluk söz konusudur.



- > 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 değerinin -90 dereceye yakın olmasıdır, **bu da nötrinolardaki CP simetrisinin maksimum ihlalinin ima eder.**
- > Ok, verilerle en uyumlu değeri gösterir. Gri bölge $\%99,7$ (3σ) 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. Gölgeli kutudaki dikey çizgi δ_{CP} 'nin en uygun değerini gösterir, gölgeli kutunun kendisi $\%68, 27$ güven aralığını gösterir ve hata çubuğu $\%99, 73$ güven aralığını gösterir. Ters sıralamada $\%68, 27$ aralığında hiçbir değer bulunmadığını görüyoruz.

Özet

- **Leptonik sektör için son kısıtlar T2K deneyinden elde edildi**, bu değerler: $\sin^2 \theta_{23} = 0.53_{-0.04}^{+0.03}$ iki kütle sıralaması için de. MO (IO):
 $\Delta m_{32}^2 = 2.45 \pm 0.07 \times 10^{-3} eV^2/c^4$ ($\Delta m_{13}^2 = 2.43 \pm 0.07 \times 10^{-3} eV^2/c^4$).
 $\delta_{CP} \ 3\sigma : [-3, 41, -0, 03]$ (MO) ve $[-2, 54, -0, 32]$ (IO).
 δ_{CP} 'nin, 0 ve π değerleri ruled out.
- DUNE, **nötrino kütle sıralamasını** çözebilecek ve geniş bir parametre alanı aralığında CP ihlali hassasiyetiyle δ_{CP} 'yi ölçebilecek deneysel düzeneğe sahip olacaktır. Veri alımı \sim 2031 yılında başlayacaktır.
- DUNE, **3-çeşni paradigmasını** test etmek için θ_{13} , θ_{23} , Δm_{32}^2 'yi belirleyebilecek ve **3-çeşni salınımlarını** hassas bir şekilde ölçebilecektir. DUNE, **Standart Model Ötesi (BSM)** için de önemli bilgiler verecektir.
- Yakın gelecekteki **DUNE ve Hyper-K** verilerinin birleşik (ortak) analizi, erken bir **$CP\nu$ keşfi** için zemin hazırlayabilecektir.
- **Hem NOvA hem de T2K'nin** \sim 2026-27'ye kadar çalışması planlanıyor. 2027 sonlarında her iki deneyin tüm veri setini içeren yüksek istatistikli ortak bir analiz ile önemli kısıtlar ve bilgiler elde edilecektir.

- Nötrinoların sabit yoğunluklu madde boyunca yayılması durumunda, $P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e)$ ifadesi yaklaşık olarak şu ifade ile hesaplanabilir:

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) \approx 4s_{23}^2 s_{13}^2 c_{13}^2 \frac{\sin^2(\Delta_{31} - aL)}{(\Delta_{31} - aL)^2} \Delta_{31}^2 + 8 \frac{J}{\sin \delta_{CP}} \frac{\sin(\Delta_{31} - aL)}{(\Delta_{31} - aL)} \Delta_{31} \\ \times \frac{\sin(aL)}{(aL)} \Delta_{21} \cos(\Delta_{31} + \delta_{CP}) + 4s_{12}^2 c_{12}^2 c_{13}^2 c_{23}^2 \frac{\sin^2(aL)}{(aL)^2} \Delta_{21}^2,$$

burada $\Delta_{ji} \equiv \Delta m_{ji}^2 L / 4E$ ve $J \equiv s_{23} c_{23} s_{13} c_{13}^2 s_{12} c_{12} \sin \delta_{CP}$, Jarlskog invariantıdır. $\bar{\nu}$ için $\delta_{CP} \rightarrow -\delta_{CP}$ ve $(aL) \rightarrow -(aL)$ 'dir. aL 'nin değeri, uzun taban çizgisi nötrino salınımına bağlı olarak değişir. Deneylerde herhangi bir L için vakum durumunda $aL \rightarrow 0$ olur.

- Madde boyunca yayılma etkileri madde potansiyeli tarafından şu şekilde alınır:

$$a = \frac{G_F N_e}{\sqrt{2}} \approx \frac{1}{3500 \text{ km} \left(\frac{\rho}{3.0 \text{ g/cm}^3} \right)},$$

G_F , Fermi sabiti, N_e , madde içindeki elektron yoğunluğu ve ρ , yayılma yolu boyunca olan yoğunluktur.

- $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ ve $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$ salınım olasılığı, CP'yi ihlal eden terim dahil ancak madde boyunca yayılmanın etkileri ihmal edilerek yaklaşık olarak şu şekilde verilir:

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) \approx \sin^2(2\theta_{13})\sin^2\theta_{23}\sin^2\left(\frac{1.27\Delta m_{32}^2 L}{E}\right) \mp \frac{1.27\Delta m_{21}^2 L}{E} 8J_{\text{CP}} \sin^2\left(\frac{1.27\Delta m_{32}^2 L}{E}\right)$$

- Aynı durum için $\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu$ ve $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_\mu$ salınım olasılığı ise:

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu) \approx 1 - 4\cos^2\theta_{13}\sin^2\theta_{23} \times (1 - \cos^2\theta_{13}\sin^2\theta_{23})\sin^2\left(\frac{1.27\Delta m_{32}^2 L}{E}\right)$$

- Salınım parametreleri ile gözlemlenen nötrino olayları arasındaki ilişki şu şekildedir (N_ν^{goz}):

$$N_\nu^{goz} \sim \Phi \times P_{\nu \rightarrow \nu} \times \sigma,$$

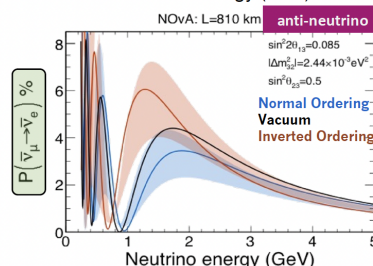
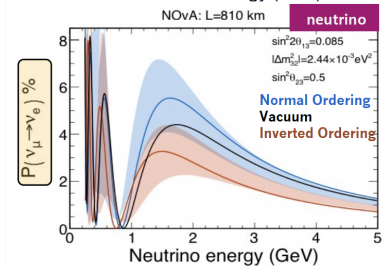
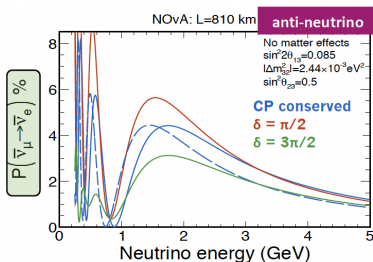
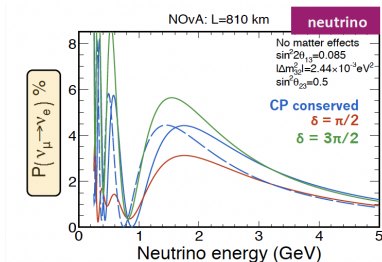
Burada, N_ν^{goz} , gözlemlenen nötrinolar, Φ , nötrino akısı. $P_{\nu \rightarrow \nu}$, salınım olasılığı ve σ ise etkileşim kesit alanıdır.

$$N_{\nu_e}^{UD} = P_{\nu_\mu \rightarrow \nu_e} \times N_{\nu_\mu}^{YD},$$

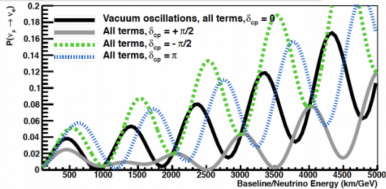
$$N(E_\nu) = \Phi(E_\nu) \times \sigma(E_\nu) \times \epsilon(E_\nu).$$

- Nötrino akısını ve kesit belirsizliklerini (σ) kısıtlamak için son derece yüksek kapasitede yakın dedektörler gereklidir. Burada ϵ , dedektör etkilerini belirtmektedir.

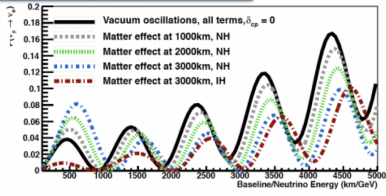
NOvA nötrino salınımları: $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$



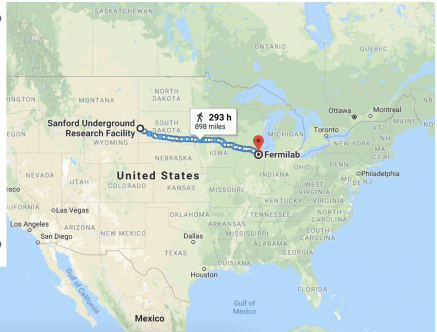
Normal mass hierarchy, different δ_{CP}



$\delta_{CP}=0$, different length values



- Both mass hierarchy and δ_{CP} change the height of the peak
- Each shifts the peak differently in L/E — use shape to disentangle
- DUNE will see first and second oscillation maximums



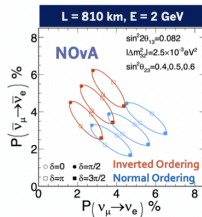
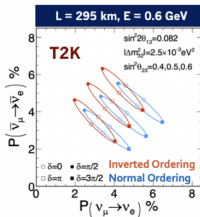
Neredeyiz?

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



Ortak uyum önemli ölçüde daha güçlü bir istatistiksel kısıtlama sağlayacaktır.

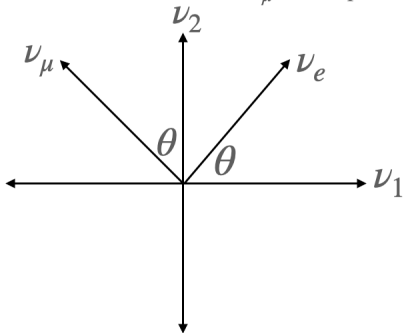
NOvA ve T2K deneylerindeki tamamlayıcı özellikler, bireysel ölçümlerdeki dejenerasyonların kırılması açısından önemli olacaktır.

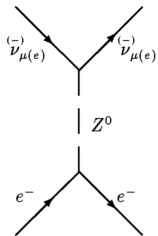


* Kütle hiyerarşisini ve CP'yi ölçmeye çalışırken karşılaştığımız temel sorun, salınım olasılıklarının çok değişkenli fonksiyonlar olmasıdır. $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ salınım modunun olasılığı, genel olarak yazıldığında, tüm karışım açılarının yanı sıra kütle bölünmeleri, madde etkileri, CP ve kütle hiyerarşisinin bir fonksiyonudur. Ancak tek bir ölçüm bize yalnızca bir sayı verir ve bu parametrelerin aynı sayıyı döndürebilecek çok sayıda farklı kombinasyonu vardır. Bu durum, **dejenerasyonları** ifade eder.

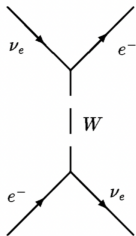
$$\nu_e = \nu_1 \cos \theta + \nu_2 \sin \theta$$

$$\nu_\mu = -\nu_1 \sin \theta + \nu_2 \cos \theta$$

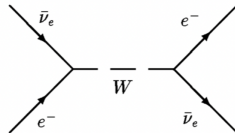




(a)

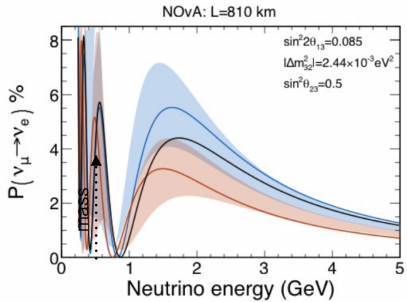
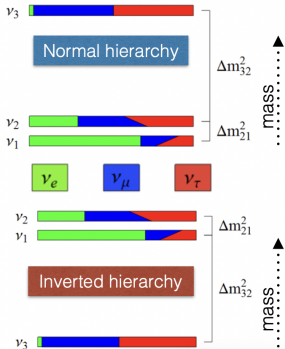


(b)



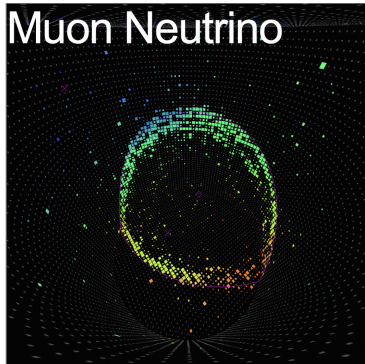
(c)

Figure 1: Feynman diagrams for the processes of neutral current (NC) ν_e -scattering (a), and charged current (CC) $\nu_e e$ -scattering via the exchange of a W -Boson (b,c).

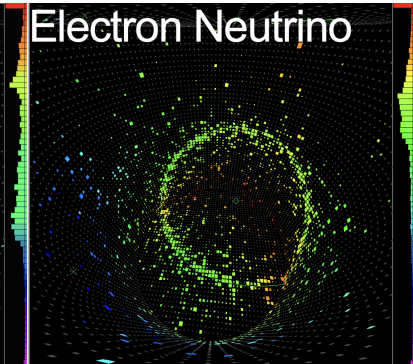


Matter effect: Electron neutrinos experience additional interaction with electrons in the earth

Muon Neutrino

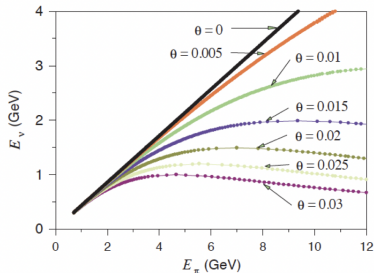


Electron Neutrino



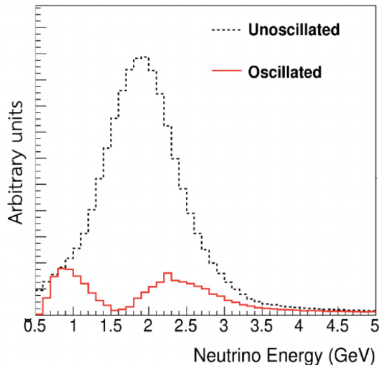
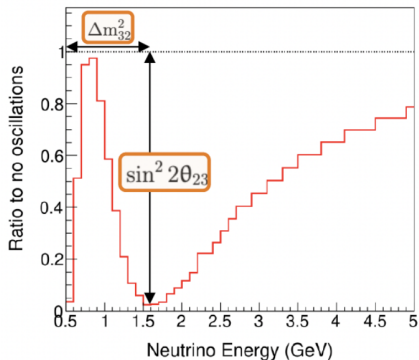
For a particular off-axis angle, neutrino energies peak around

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



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 $E_\nu/\text{GeV} = \frac{0.03}{\theta}$



Bir nötrino ışınının enerji spektrumu, salınımlar başlamadan önce ışın kaynağında ve salınımlar başladıktan sonra uzaktaki dedektörde gözlemlenir. Bu şekil uzak dedektörün nötrino enerji spektrumunun yakın dedektörün nötrino enerji spektrumuna oranını gösterir:

→ Dip, salınan nötrinoların göstergesidir; dip derinliği $\sin^2(2\theta)$ karışım açısının bir ölçüsüdür ve dibin enerji eksenindeki konumu ilgili Δm^2 'nin göstergesidir.

- **Atmosferik Nötrino Deneyleri:**

→ Atmosferdeki kozmik ışın etkileşimleri tarafından üretilen ν 'ları ölçer. Atmosferdeki E_ν spektrumu $\sim 500 \text{ MeV}-100 \text{ GeV}$ enerji aralığında.

→ $\sim 13.000 \text{ km}$ gibi çok uzun mesafelere yayılırlar ve atmosferik nötrinoların enerjisi $\sim 1 \text{ GeV}$ 'dir. Ayrıca atmosferdeki yüklü π ve K bozunmalarından e ve ν_μ üretilir.

- **Güneş Nötrino Deneyleri:**

→ Termonükleer reaksiyonlar yoluyla Güneş'in çekirdeğinde üretilen nötrinoları tespit etmek için. Güneş, enerjileri 100 keV ile 10 MeV arasında olan oldukça yoğun bir ν_e kaynağıdır.

- **Reaktör Nötrino Deneyleri:**

→ Reaktörlerdeki ağır çekirdeklerin β^- bozunumlarından üretilen $\bar{\nu}_e$ 'ların büyük izotropik akışlarını kullanır. Nükleer reaktörler kararsız izotopların bozunmasından kaynaklanan çok iyi bir $\bar{\nu}_e$ kaynağıdır.

- **Hızlandırıcı tabanlı Nötrino Deneyleri:**

→ π ve K gibi ikincil hadronların bozunması sonucu oluşan ν 'ların ölçümü için. Bu ikincil parçacıklar, birincil p ışınının bir hedefe çarpmasından kaynaklanır ve daha sonra μ ve ν_μ 'ya bozunurlar.

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 *anti*- $\nu_e \leftrightarrow$ *anti*- ν_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

T2K hints on leptonic CP violation
IceCUBE observes extragalactic ν
Nobel prize & Breakthrough prize for ν oscillation
T2K observe ν_e appeared from ν_μ
Daya Bay observe anti- ν_e disappeared
K2K confirm atmospheric ν oscillation
KamLAND confirms solar ν oscillation
Nobel prize for ν astrophysics
SNO observe solar ν oscillation to active flavor
Super-K confirms solar ν deficit and images the sun
Super-K observes ν oscillation
Nobel Prize for ν_μ discovery
Kamioka-II/ IMB observe supernova ν
SAGE/Gallex observe the solar ν deficit
LEP shows 3 active flavors
Kamioka-II confirms solar deficit

1930

~25 years

1956

1962

1964

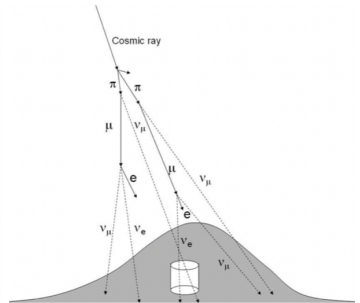
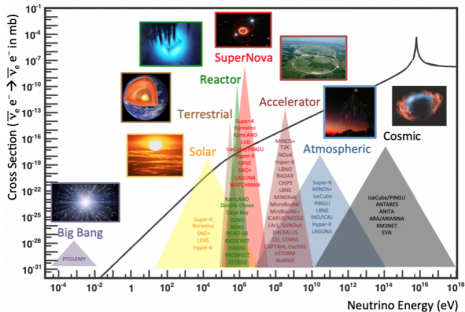
1980

1998

2018

PMNS elemanlarının anlamı:

- θ : Karışım açısıdır. Çeşni durumlarının kütle durumlarından ne kadar farklı olduğunu tanımlar.
 - Eğer $\theta = 0$ ise çeşni durumları kütle durumlarıyla özdeşir yani ν_α kaynaktan detektöre belirli momentuma sahip bir ν_α olarak yayılacaktır. Bu durumda salınımlar gerçekleşemez.
 - Eğer $\theta = \pi/4$ ise salınımların maksimum olduğu söylenir ve kaynak ile detektör arasındaki yol boyunca bir noktada başlayan ν_α 'nın tamamı ν_β 'ya salınacaktır.
- Δm^2 : Eğer 2 çeşni varsa 2 kütle durumu olacaktır. Bu parametre, bu durumların her birinin kütle karelerindeki farktır:
 - Nötrino salınımlarının meydana gelmesi için kütle durumlarından en az birinin sıfırdan farklı olması gerekir. Bu basit ifadenin çok büyük sonuçları var: salınımların gerçekleşmesi için nötrinin kütlesi olması gerekiyor: Kütle durumlarının kütleleri farklı olmalıdır, aksi halde $\Delta m^2 = 0$ ve $P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) = 0$.
- L/E : Bu, deney ile bizim kontrol ettiğimiz parametredir. Işın enerjisini, taban çizgisini (L) veya her ikisini birden değiştirmekte özgürüz. İdeal olarak L'yi maksimuma çıkarmak ve E'yi minimuma indirmek istiyoruz.



Decay	Chanel	Branching ratio (%)
1	$\pi^\pm \rightarrow \mu^\pm + \nu_\mu(\bar{\nu}_\mu)$	99.9877
2	$\pi^\pm \rightarrow e^\pm + \nu_e(\bar{\nu}_e)$	0.0123
3	$K^\pm \rightarrow \mu^\pm + \nu_\mu(\bar{\nu}_\mu)$	63.55
4	$K^\pm \rightarrow \pi^0 + e^\pm + \nu_e(\bar{\nu}_e)$	5.07
5	$K^\pm \rightarrow \pi^0 + \mu^\pm + \nu_\mu(\bar{\nu}_\mu)$	3.353
6	$K_L^0 \rightarrow \pi^\pm + e^\mp + \nu_e$	40.55
7	$K_L^0 \rightarrow \pi^\pm + \mu^\mp + \nu_\mu$	27.04
8	$\mu^\pm \rightarrow e^\pm + \nu_e(\bar{\nu}_e) + \bar{\nu}_\mu(\nu_\mu)$	100.0

The main decay modes that create neutrinos and the branching ratios.