Anatolia Science and Technology Journal (ASTEJ)

ASTEJ, 2025, 2(1)
DOI: 10.5281/zenodo.17427457
Derleme Makalesi/ Review Article

Nötrino Fiziği ve Güncel Gelişmeleri Üzerine

Yusuf SAĞLAM[1*]
[1]Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Astronomi ve Astrofizik Ana Bilim Dalı, 25240, Erzurum, Türkiye

Özet

Nötrinolar; maddeyle çok zayıf etkileşen, elektriksel olarak yüksüz, çok küçük kütleli temel parçacıklardır. Elektron, müon ve tau olmak üzere üç türü bulunur. Tarihsel olarak, varlıkları ilk kez 1930'da Wolfgang Pauli tarafından beta bozunumundaki enerji korunumunu açıklamak için öne sürülmüş ve 1956'da Cowan ve Reines tarafından deneysel olarak ispatlanmıştır. O günden bugüne kadar farklı keşiflerle yüksek enerji fiziği çalışmalarına ışık tutmuştur. Nötrino fiziğindeki en önemli keşif, bu parçacıkların yol alırken bir türden diğerine dönüşebildiğini gösteren "nötrino salınımları" dır. İlk olarak güneşten gelen nötrinoların beklenenden az saptanmasıyla ipuçları elde edilen bu olgu, 1998'de Super-Kamiokande deneyinin atmosferik nötrinoların salınımını gözlemlemesiyle kesin olarak kanıtlanmıştır. Salınım olgusu, nötrinoların çok küçük de olsa bir kütleye sahip olmaları gerektiğini ortaya koymuştur. Bu durum, nötrinoları tamamen kütlesiz varsayan ve yalnızca sol-elli bileşenlerini içeren Parçacık Fiziği Standart Modeli ile çelişmektedir. Bu çelişki, Standart Model'in ötesinde yeni bir fiziğin varlığına işaret eden en güçlü kanıtlardan biri haline gelmiştir. Nötrinoların kütlesini açıklamak için geliştirilen en popüler teorik çerçeve, çok ağır sağ-elli (steril) nötrinoların varlığını öngören "seesaw mekanizması"dır. Aynı zamanda karanlık madde adayı olarak da görülen bu varsayımsal parçacıklar, mevcut ve gelecek deneylerin (DUNE, Hyper-Kamiokande vb.) ana hedeflerindendir. Nötrinolar evrenin temel yapısına dair en derin soruların merkezinde yer almaktadır. Bu çalışmada nötrino fiziğinin temelleri ve gelecek perspektifi detaylıca ele alınmıştır.

Anahtar Kelimeler: Atomaltı parçacık, nötrino, nötrino salınımı, seesaw mekanizması, standart model (SM)

On Neutrino Physics and Current Developments

Yusuf SAĞLAM[1*]
[1]Atatürk University, Institute of Sciences, Astronomy and Astrophysics, 25240, Erzurum, Türkiye

Abstract

Neutrinos are fundamental particles that interact very weakly with matter, are electrically neutral, and have very small masses. There are three types: electron, muon, and tau. Historically, their existence was first proposed in 1930 by Wolfgang Pauli to explain energy conservation in beta decay and was experimentally proven in 1956 by Cowan and Reines. Since then, various discoveries have shed light on high-energy physics research. The most significant discovery in neutrino physics is "neutrino oscillations," which demonstrate that these particles can transform from one type to another as they travel. This phenomenon, first hinted at by the detection of fewer neutrinos from the sun than expected, was definitively proven in 1998 when the Super-Kamiokande experiment observed the oscillation of atmospheric neutrinos. The oscillation phenomenon revealed that neutrinos must have a mass, albeit very small. This contradicts the Standard Model of Particle Physics, which assumes that neutrinos are completely massless and contain only left-handed components. This contradiction has become one of the strongest pieces of evidence pointing to the existence of new physics beyond the Standard Model. The most popular theoretical framework developed to explain the mass of neutrinos is the "seesaw mechanism," which predicts the existence of very heavy right-handed (sterile) neutrinos. These hypothetical particles, which are also considered candidates for dark matter, are the primary targets of current and future experiments (DUNE, Hyper-Kamiokande, etc.). Neutrinos are at the center of the deepest questions about the fundamental structure of the universe. This study provides a detailed examination of the fundamentals of neutrino physics and its future prospects.

Keywords: Neutrino, neutrino oscillation, seesaw mechanism, standard model (SM), subatomic particle

* Sorumlu Yazar/ Corresponding Author: Yusuf SAĞLAM (Yüksek Lisans), e-posta: yusuf.saglam18@ogr.atauni.edu.tr, ORCID: https://orcid.org/0009-0009-7697-6951
**Geliş/Received: 13/06/2025, Düzeltme/Revised: 15/08/2025, Kabul/Accepted: 17/08/2025, Yayınlanma/Published: 24/10/2025.

1. Giriş

1.1. Nötrinonun Tarihsel Arka Planı

Nötrino kavramı ilk kez 1930 yılında Wolfgang Pauli tarafından, beta bozunması sırasında gözlemlenen enerji spektrumunun sürekliliğini açıklamak ve enerji-momentum korunumunu sağlamak amacıyla öne sürülmüştür. Pauli, bu bozunumda doğrudan tespit edilemeyen, yüksüz ve çok hafif bir parçacığın yayıldığını ileri sürerek, doğada bu şekilde "görünmeyen" bir parçacığın var olması gerektiğini belirtmiştir (Pauli, 1930; Jarlskog, 2018). Bu fikir, 1934 yılında Enrico Fermi tarafından geliştirilen kuantum alan kuramı tabanlı beta bozunması modeli ile kuramsallaştırılmış ve parçacığa İtalyanca "küçük nötr olan" anlamına gelen nötrino adı verilmiştir. Fermi'nin kuramı, zayıf etkileşimleri açıklamada ilk başarılı teorik çerçeve olmasının yanı sıra, nötrinoların ya kütlesiz ya da çok küçük kütleli olduklarını varsaymaktaydı (Fermi, 1934).

Nötrinoların varlığına dair ilk doğrudan deneysel kanıt 1956 yılında Clyde Cowan ve Frederick Reines tarafından "Project Poltergeist" adı verilen deneyle elde edilmiştir. Bu deneyde, nükleer reaktörden yayılan elektron antinötrinoları, ters beta bozunması reaksiyonuyla ($\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$) gözlemlenmiş ve açığa çıkan pozitronların bir elektronla etkileşimi ($e^+ + e^- \rightarrow 2\gamma$) sonucu elde edilen gama fotonlarıyla, elektron nötrinosunun varlığı teyit edilmiştir (Cowan vd., 1956; Reines, 1996). Bu başarı, nötrinonun deneysel olarak keşfi anlamına gelirken, Reines'e 1995 yılında Nobel Fizik Ödülü kazandırmıştır. 1962 yılında Brookhaven Ulusal Laboratuvarı (BNL)'nda Leon Lederman, Melvin Schwartz ve Jack Steinberger tarafından gerçekleştirilen bir diğer önemli deneyde, müon bozunumundan kaynaklanan nötrino akısı incelenmiş ve elektron nötrinosundan farklı bir tür olan müon nötrinosu keşfedilmiştir (Danby vd., 1962). Bu keşif, nötrinoların birden fazla türe sahip olduğunu göstermiş ve bu çalışmayla araştırmacılar 1988 yılında Nobel Fizik Ödülü'ne layık görülmüştür.

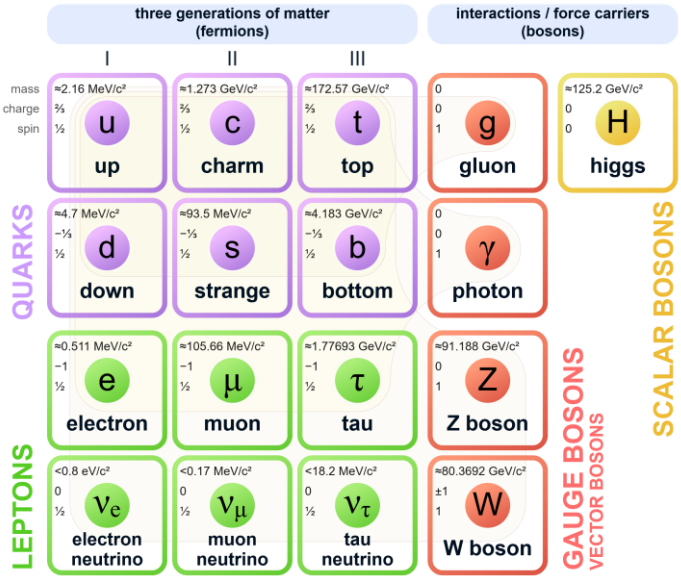
1970'li yıllarda tau nötrinosunun keşfi (Perl vd., 1975) ve Z bozonunun bozunma genişliğinin hassas ölçümleri, üç aktif nötrino türünün (ν_e, ν_μ, ν_τ) varlığını dolaylı olarak doğrulamıştır (Feldman vd., 1989). Nihayetinde, 2000 yılında Fermilab'da gerçekleştirilen DONUT (Direct Observation of Nu-Tau) deneyi ile tau nötrinosu doğrudan gözlemlenmiş ve böylece üçlü nötrino türü tamamlanmıştır (Kodama vd., 2001). Bu süreçte, Bruno Pontecorvo 1950'lerde (o dönemde yalnızca elektron nötrinosu bilinmesine rağmen) nötrinoların türler arası dönüşüm geçirebileceğini (tek bir türün farklı hallere bürünmesi) yani nötrino osilasyonu fikrini ortaya atmıştır (Pontecorvo, 1958). Bu fikir, uzun yıllar kuramsal kalsa da 1968'de Ray Davis'in güneşten gelen elektron nötrinolarını beklenenden üçte bir oranında daha az tespit etmesiyle gündeme gelmiş ve "güneş nötrino problemi" olarak anılmıştır (Bahcall & Davis, 1976). Bu eksiklik, farklı nötrino türlerine dönüşüm olasılığıyla açıklanmıştır.

1998 yılında Japonya'daki Super-Kamiokande deneyi, atmosfer kökenli müon nötrinolarının kaybolduğunu göstererek nötrino osilasyonlarına doğrudan kanıt sağlamıştır (Fukuda vd., 1998). Ardından Kanada'daki Sudbury Nötrino Gözlemevi (SNO), 2001–2002 yıllarında gerçekleştirdiği deneylerle güneşten gelen elektron nötrinolarının diğer nötrino türlerine dönüştüğünü net biçimde göstermiştir (Ahmad vd., 2002). Reaktör kökenli nötrinolarla yapılan KamLAND (Kamioka Liquid Scintillator Antineutrino Detector) deneyi ve Avrupa Nükleer Araştırma Merkezinden (CERN) Gran Sasso'ya gönderilen demet üzerinde çalışan OPERA (The Oscillation Project with Emulsion-tRacking Apparatus) deneyi gibi çalışmalar, osilasyonun farklı deneysel sistemlerde de gözlendiğini ortaya koymuştur (Eguchi vd., 2003; Adam vd., 2012). Bu gelişmelerin sonucunda Takaaki Kajita ve Arthur B. McDonald, nötrino osilasyonlarını deneysel olarak teyit etmeleri nedeniyle 2015 yılında Nobel Fizik Ödülü'ne layık görülmüşlerdir. Nötrino osilasyonlarının gözlemlenmesi, aynı zamanda nötrinoların kütleli olduğunun bir kanıtıdır. Çünkü teorik olarak, osilasyon olayının gerçekleşebilmesi için nötrino türlerinin farklı kütlelere sahip olması gerekir. Böylece nötrinoların kütleli olduğu ve türler arası geçiş yapabildiği gerçeği, modern parçacık fiziğinin temel taşlarından biri haline gelmiştir.

1.2. Nötrino Türleri ve Temel Özellikleri

Nötrinoları tanımlayabilmek için ilk olarak iki temel kavramı açıklamak gerekir. Bunlardan biri Fermiyon diğeri ise Leptonlar'dır. Fermiyon, temel parçacık fiziğinde, maddeyi oluşturan iki temel parçacık sınıfından biridir (diğeri bozonlardır). Fermiyonları tanımlayan en temel özellik, yarım tam sayılı spine (1/2, 3/2 vb.) sahip olmalarıdır. Bu spin özelliği, onların çok önemli bir kuantum mekaniksel ilkeye, Pauli Dışlama İlkesi'ne

uymalarını zorunlu kılar. Pauli Dışlama İlkesi, iki özdeş fermiyonun aynı anda aynı kuantum durumunda (yani aynı enerji seviyesi, aynı spin yönelimi gibi tüm kuantum sayılarına sahip olma durumu) bulunamayacağını belirtir. Maddenin kararlı ve hacimli olmasının temel nedeni bu ilkedir. Temel fermiyonlar kuarklar ve leptonlar olmak üzere iki ana gruba ayrılır. Kuarklar, proton ve nötron gibi parçacıkları oluşturan temel bileşenlerdir (up, down, charm, strange, top, bottom). Leptonlar ise elektron, müon, tau ve onlara karşılık gelen üç tür nötrinolardan meydana gelmektedir (bkz. Şekil 1). (Griffiths, 2020)



Şekil 1. Temel Parçacıkların Standart Modeli
Figure 1. *The Standard Model of Elementary Particles*

Nötrinolar, temel lepton parçacık grubuna ait, yalnızca zayıf nükleer kuvvet ve kütleçekim kuvveti (ihmal edilebilir düzeyde de olsa) yoluyla etkileşime giren elektriksel olarak yüksüz ve ½ spin değerine sahip fermiyonlardır. Spin, temel parçacıkların ve atom çekirdeklerinin, yörüngesel hareketten bağımsız olarak sahip oldukları içsel (oluşum temelinden gelen) bir kuantum mekaniksel açısal momentumdur. Bu momentumun herhangi bir ölçüm eksenine göre izdüşümü sürekli değerler almak yerine yalnızca ayrık ve kuantize olmuş değerlerle sınırlıdır (aşağı/yukarı spin).

Standart Model (SM) kapsamında üç temel nötrino türü tanımlanmıştır: Elektron nötrinosu (ν_e), Müon nötrinosu (ν_μ), Tau nötrinosu (ν_τ). Her temel parçacık gibi, nötrinoların da karşıt parçacıkları vardır. Bunlar elektron antinötrinosu ($\bar{\nu}_e$), müon antinötrinosu ($\bar{\nu}\mu$) ve tau antinötrinosu ($\bar{\nu}\tau$)'dur (bkz. Tablo 1). Her bir tür, sırasıyla elektron, müon ve tau leptonlarıyla zayıf nükleer kuvvet yoluyla etkileşimde rol alır.

$$\nu_e + n \rightarrow p + e \qquad (1)$$

Burada bir elektron nötrinosu (ν_e), bir nötronla (n) etkileşime girdiğinde; bir proton (p) ve bir elektron (e) üretimini göstermektedir. Nötrinoların en belirgin özelliklerinden biri elektriksel olarak yüksüz olmalarıdır. Bu durum onların elektromanyetik kuvvetle ve güçlü nükleer kuvvetle etkileşmediği anlamına gelir. Bu nedenle, nötrinolar maddeyle yalnızca zayıf nükleer kuvvet ve kütleçekim kuvveti (ihmal edilebilir düzeyde de olsa) yoluyla etkileşirler. (Giunti & Studenikin, 2015) Zayıf etkileşimlerin doğası gereği çok kısa menzilli ve "zayıf" olması, nötrinoların maddeyle son derece seyrek etkileşmesine yol açar. Bir nötrino, örneğin Dünya veya Güneş ile neredeyse hiç etkileşmeden bu gök cisimlerinden geçebilir. Bu özellikleri nedeniyle doğrudan tespit edilmeleri oldukça zordur. Dolayısıyla uzun yıllar boyunca nötrinoların kütlesiz olduğu varsayılmıştır (Navas vd., 2024). Ancak 1998 yılında Super-Kamiokande deneyinin atmosferik nötrinolarla (Fukuda vd., 1998) ve ardından SNO deneyinin güneş nötrinolarıyla (Ahmad vd., 2002) yaptığı gözlemler, nötrinoların farklı türlere dönüşebildiğini (salınım yapabildiğini) kesin olarak göstermiştir. Nötrino salınımları, ancak ve ancak nötrinoların kütleleri varsa ve bu kütleler birbirinden farklıysa gerçekleşebilir. Dolayısıyla, bu deneyler nötrinoların çok küçük de olsa sıfırdan farklı kütlelere sahip olması gerektiğini kanıtlamıştır. Ancak bu kütleler, diğer temel parçacıkların kütleleriyle karşılaştırıldığında son derece küçüktür. Örneğin, en hafif yüklü lepton olan elektronun kütlesi yaklaşık 0.511 MeV/c² iken, elektron nötrinosu için

KATRIN (The Karlsruhe Tritium Neutrino) deneyi tarafından belirlenen en güncel doğrudan kütle üst sınırı yaklaşık 0.8 eV/c² 'dir (KATRIN, 2025). Diğer nötrino türleri için doğrudan kütle ölçümleri daha zordur ancak kozmolojik gözlemler (örneğin Planck+DESI verileri), üç aktif nötrinonun kütlelerinin toplamının ($\sum m_\nu$) yaklaşık olarak 0.072 eV/c²'den küçük olması gerektiğini göstermiştir (Naredo-Tuero vd., 2024). Bu, her bir tür için nötrino kütlelerinin çok daha küçük olması gerektiği anlamına gelir. Nötrinoların mutlak kütle değerleri ve bu kütlelerin birbirlerine göre sıralaması (kütle hiyerarşisi) hala aktif bir araştırma konusudur.

Tablo 1. Üç Nötrino Türünün Özellikleri (Tanabashi vd., 2018; Zyla vd., 2020., Navas vd., 2024; KATRIN, 2025; Naredo-Tuero vd., 2024)
Table 1. *Properties of the Three Neutrino Types*

Özellik	**Elektron Nötrinosu (ν_e)**	**Müon Nötrinosu (ν_μ)**	**Tau Nötrinosu (ν_τ)**
İlgili Lepton	Elektron (e^-)	Müon (μ^-)	Tau (τ^-)
Kütle (üst sınır)	<0.8 eV/c²	<0.17 MeV/c² (dolaylı)	<18.2 MeV/c² (dolaylı)
Toplam Kütle	<0.072 eV/c²	<0.072 eV/c²	<0.072 eV/c²
Spin	½	½	½
Elektrik Yükü	0	0	0
Etkileşim Türü	Yalnızca zayıf kuvvet ve kütleçekim	Yalnızca zayıf kuvvet ve kütleçekim	Yalnızca zayıf kuvvet ve kütleçekim
Antiparçacığı	Elektron antinötrinosu ($\bar{\nu}_e$)	Müon antinötrinosu ($\bar{\nu}\mu$)	Tau antinötrinosu ($\bar{\nu}\tau$)
Üretim Kaynağı	Beta bozunması, güneş reaksiyonları	Pion ve kaon bozunmaları atmosferik CR	Yüksek enerjili parçacık etkileşimleri
Tespit Deneyleri	Homestake, SNO, Borexino,KATRİN	Super-Kamiokande, MINOS, T2K, NOvA	OPERA, DONUT, IceCube (dolaylı olarak)

Burada ν_μ ve ν_τ için verilen dolaylı sınırlar, ilgili yüklü leptonların ve mezonların bozunma kinematiğinden gelmektedir.

1.3. Nötrinoların Doğasındaki Temel Kavramlar: Helisite (Helicity), Kiralite (Chirality) ve CP İhlali

Nötrinoların ve genel olarak temel parçacıkların zayıf etkileşimlerdeki davranışını anlamak için helisite ve kiralite kavramları önem taşımaktadır. SM'de nötrinoların yalnızca sol-elli (ya da sol-kiral) olması, bu özelliklerle yakından ilişkilidir. Helisite, spin vektörünün (S) momentum vektörüne (p) göre olan izdüşümünü tanımlar:

$$h = S \cdot \hat{p} \,/\, |S| \qquad (2)$$

Burada $\hat{p} = p/|p|$ momentum yönündeki birim vektörü, "h" ise parçacığın helisite değerini temsil eder.Eğer spin, hareket yönüyle aynı yöndeyse (yani spin izdüşümü 1/2 ölçülmüşse) parçacık sağ-elli (right-handed, h= 1), hareket yönüyle aynı yöndeyse (yani spin izdüşümü $-1/2$ ölçülmüşse) sol-elli (left-handed, h=−1) kabul edilir. Ancak, kütleli bir parçacık için helisite Lorentz değişmezi değildir; yani parçacıktan daha hızlı hareket eden bir gözlemci için helisite tersine dönebilir. Kütlesiz parçacıklar ışık hızında hareket ettikleri için helisiteleri Lorentz değişmezidir ve gözlemcinin referans çerçevesine bağlı değildir. Kiralite, bir parçacığın Lorentz grubunun spinor temsillerine göre nasıl davrandığını tanımlayan daha temel bir özelliktir. Dirac denkleminin çözümleri olan dört bileşenli spinorlar (ψ), kiralite operatörü (Denklem 3) kullanılarak sağ-kiral (Denklem 4) ve sol-kiral (Denklem 5) bileşenlere ayrılabilir. Kiralitelerin toplamı ise Denklem 6 ile gösterilmiştir. Kütlesiz parçacıklar için kiralite ve helisite aynı anlama gelir: sol-kiral parçacıklar sol-elli, sağ-kiral parçacıklar ise sağ-ellidir. Ancak kütleli parçacıklar için kiralite ve helisite farklı kavramlardır, ancak yüksek enerjilerde (enerji kütleden çok büyükken, E≫m) yaklaşık olarak aynı olurlar. Zayıf etkileşimler,

kiraliteye duyarlıdır: yalnızca sol-kiral fermiyonlar ve sağ-kiral antifermiyonlar zayıf yüklü akım etkileşimlerine katılır aynı zamanda "V-A teorisi" olarak bilinmektedir. (Peskin & Schroeder, 1995)

$$\gamma^5 = i\gamma^0\gamma^1\gamma^2\gamma^3 \quad (3)$$

$$\psi_R = \frac{1+\gamma^5}{2}\psi \quad (4)$$

$$\psi_L = \frac{1-\gamma^5}{2}\psi \quad (5)$$

$$\psi = \psi_L + \psi_R \quad (6)$$

Daha basit bir şekilde; bir temel parçacığın spinini, kendi ekseni etrafında dönen bir topaca benzetebiliriz. Bu "dönüşün" bir yönü vardır. Helisite, işte bu dönüş yönünün, parçacığın hareket yönüyle olan ilişkisidir. Yani helisite, bir parçacığın hareket ederken hangi yöne doğru "döndüğünü" anlatan, gözlemlenebilir bir özelliktir. Kiralite ise daha temel bir özelliktir. Bunu anlamak için sağ ve sol elimizi düşünebiliriz (Birbirlerinin yerine geçemezler. Sol el, temelde "sol" bir yapıya sahipken, sağ el ise "sağ" bir yapıya sahiptir). Yani bir parçacık, hareketinden veya dönüşünden bağımsız olarak, doğası gereği ya "sol-kiral" ya da "sağ-kiral" bir yapıya sahiptir. Bu durum onun kimliği gibidir, değişmez.

Zayıf etkileşimlerin, parçacıkların bu "elli" yapısına duyarlı olduğu ve doğada bir tarafı tercih ettiği fikri, teorik bir varsayım olarak kalmamıştır. Bu durum, 1957 yılında Chien-Shiung Wu ve çalışma arkadaşları tarafından gerçekleştirilen Wu deneyi ile deneysel olarak doğrulanmıştır. Kobalt-60 atomlarının düşük sıcaklıklarda manyetik alan içinde hizalanarak yapılan beta bozunması deneyinde, yayılan elektronların tercihli olarak çekirdek spinine zıt yönde çıktığı gözlemlenmiştir. Bu sonuç, zayıf etkileşimlerin parite simetrisini (P simetrisi, yani ayna yansıması altındaki değişmezlik) maksimal olarak ihlal ettiğini ve aynı zamanda yük eşlenik simetrisini (C simetrisi, parçacık-antiparçacık değişimi altındaki değişmezlik) de ihlal ettiğini göstermiştir (Wu vd., 1957).

Bu keşfi takiben, hâkim görüş, bu iki simetrinin birleşik dönüşümü olan CP simetrisinin evrenin temel bir değişmezi olabileceği yönündeydi. Söz konusu hipotez uyarınca, bir fiziksel sürecin kendisi ile, o süreçteki tüm parçacıkların anti-parçacıklarıyla değiştirilip uzamsal koordinatlarının ters çevrildiği (parite inversiyonu) CP-dönüşümlü hali arasında gözlemlenebilir bir fark olmamalıydı (Landau, 1957). Ancak bu öngörü, 1964 yılında nötral kaon (K^0) sisteminde gerçekleştirilen bir deneyle çürütülmüştür. James Christenson ve çalışma arkadaşları, uzun ömürlü nötral kaonların (K_L) bozunumlarını incelerken, CP simetrisinin mutlak korunumu durumunda yasaklı olan iki pionluk bozunum ($K_L \rightarrow \pi^+\pi^-$) modunu tespit etmişlerdir. K_L durumu CP-özdeğeri -1 olan bir durum olarak tanımlanırken, iki pionluk nihai durumun CP-özdeğeri +1'dir. Dolayısıyla, bu bozunumun düşük bir dallanma oranıyla dahi gerçekleşmesi, zayıf etkileşimlerin CP simetrisini de ihlal ettiğinin kesin kanıtını teşkil etmiştir (Christenson vd., 1964).

CP ihlalinin SM içerisindeki teorik çerçevesi, 1973 yılında Makoto Kobayashi ve Toshihide Maskawa tarafından oluşturulmuştur. Kobayashi ve Maskawa, kuarkların bilinen iki nesilden daha fazla, en az üç nesil olması durumunda, kuarkların kütle ve zayıf etkileşim öz durumları arasındaki ilişkiyi tanımlayan Cabibbo-Kobayashi-Maskawa (CKM) matrisinin, Lagrangian'da giderilemeyen bir kompleks faz içerebileceğini ortaya koymuşlardır. Bu kompleks fazın varlığı, bir parçacığın dahil olduğu süreç ile onun anti-parçacığının dahil olduğu süreç arasında, bozunum oranları gibi gözlemlenebilir niceliklerde bir asimetriye yol açarak CP ihlalini tutarlı bir biçimde açıklar (Kobayashi & Maskawa, 1973).

CP simetrisinin ihlali, evrenin mevcut yapısının anlaşılması adına temel bir gereklilik olarak kabul edilmektedir. Gözlemlenen evrenin neredeyse tamamen baryonik maddeden oluşması ve anti-maddenin ihmal edilebilir düzeyde olması (Baryon Asimetrisi Problemi), Büyük Patlama'nın simetrik başlangıç koşullarıyla bir tutarsızlık arz eder. Andrei Sakharov, 1967'de, evrenin ilk anlarında bu baryon asimetrisinin dinamik olarak teşekkül edebilmesi (baryogenez) için üç temel koşulun gerekliliğini ifade etmiştir: (i) baryon sayısının korunumunun ihlali, (ii) C ve CP simetrilerinin ihlali ve (iii) termal dengeden ayrılma. CP ihlali, madde ve anti-maddenin bozunum yollarının farklılaşmasına olanak tanıyarak, erken evrendeki yok oluş sürecinden arta kalan küçük bir madde fazlasını açıklayan mekanizmayı teşkil eder (Sakharov, 1991).

Böylece, CKM matrisindeki faz tarafından öngörülen CP ihlali, kuarkların zayıf etkileşimlerine ilişkin tüm deneysel gözlemlerle uyumlu olsa da bu mekanizmanın ürettiği asimetrinin büyüklüğünün, gözlemlenen baryon asimetrisini niceliksel olarak açıklamaya yetmediği düşünülmektedir. Bu tutarsızlık, leptonlar alanında (PMNS matrisi aracılığıyla) veya Standart Model Ötesi yeni fizik kuramlarında ek CP ihlali kaynaklarının araştırılmasını teşvik eden başlıca kaynaklarından biridir.

1.4. Standart Model (SM)'deki Yeri ve Eksiklikleri

SM, günümüzde bilinen tüm temel parçacıkları ve bu parçacıklar arasındaki üç temel kuvveti (güçlü nükleer kuvvet, zayıf nükleer kuvvet ve elektromanyetik kuvvet) tanımlayan bir kuantum alan teorisidir. Kuantum alan teorisi, parçacıkları temel alanların kuantize olmuş uyarılmaları olarak ele alır ve etkileşimleri bu alanlar aracılığıyla tanımlar (Griffiths, 2020). SM, temel madde parçacıkları olan fermiyonları ve bu parçacıklar arasındaki etkileşimlere aracılık eden kuvvet taşıyıcı bozonları da içerir. Nötrinolar, SM'nin lepton ailesinin temel üyeleridir. Nötrinoların en belirgin özelliği, yalnızca zayıf nükleer kuvvet ve kütleçekim kuvveti (ihmal edilebilir düzeyde de olsa) aracılığıyla etkileşmeleridir. Elektriksel olarak yüksüz olmaları ve renk yükü taşımamaları nedeniyle elektromanyetik ve güçlü nükleer kuvvetlerle doğrudan bir etkileşime girmezler. Zayıf nükleer etkileşimler ise kütleli W^+, W^- ve W^0 bozonları aracılığıyla gerçekleşir. Nötrinolar, bu bozonlarla etkileşerek beta bozunması gibi nükleer süreçlerde, yıldızların enerji üretim mekanizmalarında ve yüksek enerjili parçacık çarpışmalarında önemli roller üstlenirler (Mohapatra & Pal, 2004).

SM'nin orijinal formülasyonunda nötrinolar kütlesiz kabul edildiği için, sol-elli nötrinolar aynı zamanda sol-kiral, sağ-elli antinötrinolar ise sağ-kiraldir. SM, yalnızca sol-kiral nötrinoları ve sağ-kiral antinötrinoları içerir; sağ-kiral nötrinolar ve sol-kiral antinötrinolar teorik olarak mümkün olsa da SM içinde etkileşimsiz (steril) olarak ayrı tutulmuştur. Bir parçacığa kütle kazandırmanın standart yolu olan yeniden normalleştirilebilir bir Dirac kütle terimi (bkz. Denklem 7) hem sol-kiral (Ψ_L) hem de sağ-kiral (Ψ_R) alanların varlığını gerektirir. SM'de sağ-kiral nötrinolar ya hiç bulunmadığından ya da steril kabul edilip Higgs alanı ile etkileşmediğinden, bilinen Higgs mekanizması aracılığıyla nötrinolara kütle kazandırmak için böyle bir Dirac kütle terimi yazılamazdı. Alternatif bir kütle mekanizması olan Majorana kütle terimi (bkz. Denklem 8) ise teorik olarak mümkündür. Bu iki kütle teriminin temel farklarını daha detaylı incelemek gerekirse:

Dirac kütlesi, Standart Model'deki elektron ve kuarklar gibi diğer tüm yüklü fermiyonların kütle kazanma mekanizmasıdır. Bu mekanizmayı, bir parçacığın "sol-elli" ve "sağ-elli" versiyonlarını birbirine bağlayan bir köprü gibi düşünebiliriz. Kütle, bu iki farklı kiral durum arasındaki geçişin veya etkileşimin bir ölçüsüdür. Matematiksel olarak bu terim, $\overline{\Psi_R}\Psi_L$ formunda yazılır ve bir sol-elli alanı sağ-elli bir alana dönüştürür. Dolayısıyla, bu "köprünün" kurulabilmesi için doğada hem sol-elli hem de sağ-elli bir alanın mevcut olması zorunludur. Standart Model'de etkileşen bir sağ-kiral nötrino alanı bulunmadığından, bu standart kütle köprüsü nötrinolar için kurulamaz. Dirac kütle mekanizması, lepton sayısı gibi kuantum sayılarını korur.

Majorana kütlesi ise çok daha farklı bir mekanizmadır. Bu mekanizma, yalnızca tek bir kiraliteye sahip alanlarla yazılabilir; örneğin sadece sol-kiral bir alan (Ψ_L) yeterlidir. Bunu, parçacığın kendi "ayna görüntüsüyle" veya başka bir ifadeyle kendi anti-parçacığıyla etkileşmesi gibi düşünebiliriz. Bu mekanizmanın işleyebilmesi için parçacığın elektriksel olarak tamamen nötr olması ve en önemlisi kendisinin anti-parçacığı olması gerekir. Yani bir Majorana parçacığı, parçacık-antiparçacık ayrımı olmayan bir fermiyondur. Bu durum, lepton sayısının korunumunu (Δ_L) iki birim kadar ihlal eder, çünkü kütle terimi bir parçacığı (lepton) doğrudan kendi anti-parçacığına (anti-lepton) dönüştürür. Bu teorik kısıtlamalar nedeniyle, SM'nin en minimal versiyonunda nötrinolar kütlesiz olarak kabul edilmiştir (Kayser, 2003).

$$\mathcal{L}_{\mathcal{D}} = -m_D(\overline{\Psi_R}\Psi_L + \overline{\Psi_L}\Psi_R) \tag{7}$$

$$\mathcal{L}_{\mathcal{M}} = -\frac{1}{2}m_M\left(\overline{\Psi_L^c}\Psi_L + \overline{\Psi_L}\Psi_L^c\right) \tag{8}$$

Ancak, 1998 ve 2002 yıllarında gerçekleşen nötrino salınımlarının keşfi, nötrinoların kütleli olduğunu kesin olarak ortaya koyarak bu varsayımı yeniden değerlendirmeyi zorunlu kılmıştır. Bu dönüşümün gerçekleşebilmesi için, nötrinoların kütleli olması ve kütle öz durumları ile çeşni öz durumlarının birbirinden

farklı olması gerekmektedir. Atmosferik nötrinoları inceleyen Super-Kamiokande deneyi ve Güneş'ten gelen nötrinoları inceleyen SNO (Sudbury Neutrino Observatory) deneyi, bu salınımları kesin olarak kanıtlamıştır. Nötrinoların kütleli olduğunun bu deneysel keşfi, SM'nin orijinal formülasyonuyla doğrudan bir çelişki oluşturmuş ve SM'nin eksik olduğunun en önemli deneysel kanıtlarından birini teşkil etmiştir. Bu eksiklik, SM'nin temel yapısının yanlış olmasından değil, modelin başlangıçta içerdiği parçacık ve simetri varsayımlarının eksik olmasından kaynaklanmaktadır. Minimal SM, gözlemlenen kütleyi üretecek ne uygun bir parçacığa (sağ-kiral nötrino gibi) ne de gerekli etkileşim mekanizmasına (lepton sayısını ihlal eden gibi) sahip değildir. Bu durum, SM'nin genişletilmesi gerekliliğini bir kez daha ortaya koymuştur (Mohapatra & Smirnov, 2006). Eğer nötrinolar kütleliyse, SM'de yer almayan sağ-kiral nötrino bileşenlerinin (veya sol-kiral antinötrino bileşenlerinin) var olması gerekir. Bu bileşenler SM'nin zayıf etkileşimlerine girmiyorsa, "steril nötrinolar" olarak adlandırılırlar.

Kütleli parçacıklar için helisite gözlemciye bağlıdır; ancak kiralite, Lorentz dönüşümlerine göre sabittir. Bu nedenle, zayıf etkileşimde hangi parçacıkların rol aldığını belirleyen esas nicelik kiralitedir (Donoghue vd., 2014). SM'nin sadece sol-kiral nötrinoları içerme varsayımı, kütlesiz olduğu varsayımıyla tutarlıydı, ancak kütlenin keşfiyle birlikte, sağ-kiral bir bileşenin de varlığı zorunlu hale gelmiştir. Bu sağ-kiral bileşenin SM etkileşimlerine katılıp katılmadığı (steril olup olmadığı), nötrino kütle mekanizmasının (Dirac mı Majorana mı) doğasını belirlemede kritik rol oynar. Eğer nötrinolar Dirac parçacıklarıysa (yani kendileriyle antiparçacıkları farklıysa ve lepton sayısı korunuyorsa) ve sağ-kiral bileşen SM'ye göre steril ise, kütle Higgs mekanizmasıyla doğrudan üretilemez. Eğer nötrinolar Majorana parçacıklarıysa (yani kendileriyle antiparçacıkları aynıysa ve lepton sayısı korunmuyorsa), kütle terimleri farklı bir yapıya sahip olur. Bu durum, seesaw mekanizması gibi alternatif kütle mekanizmalarının araştırılmasını gerektirir (Kayser, 2003).

Nötrino kütlelerinin deneysel olarak doğrulanması, SM'nin tamamlanmamış bir teori olduğunun güçlü bir göstergesidir. Bu durum, seesaw mekanizmaları, ekstra uzay-zaman boyutları veya yeni parçacıklar ve etkileşimler içeren çeşitli Standart Model Ötesi (BSM) fizik modellerinin geliştirilmesine yol açmıştır (Mohapatra & Pal, 2004). SM, bilinen temel parçacıkları ve üç temel kuvveti büyük bir başarıyla tanımlasa da, kütleçekimini içermez ve nötrino kütleleri, karanlık madde ve karanlık enerji gibi gözlemsel olguları açıklayamaz. Nötrino kütlelerinin varlığı, SM Lagrangian'ına basitçe bir kütle terimi eklenerek çözülemez (en azından Higgs mekanizması yoluyla bilinen şekilde değil, çünkü sağ-kiral nötrinoları gerektirir). Bu durum, daha temel bir teorinin varlığına işaret eder.

Nötrinoların SM'deki temel etkileşimleri, beta bozunması gibi süreçlerle örneklendirilebilir. Denklem 9'da zayıf etkileşimlerin temel Feynman diyagramlarını göstererek nötrinoların SM içindeki rolünü somutlaştırır. Özellikle bu parçacıkların W bozonu aracılığıyla nasıl etkileştiğini göstermesi önemlidir. Yüklü akım (CC) etkileşimleri (W bozonu değişimi) lepton türünü korurken, yüksüz akım (NC) etkileşimleri (Z^0bozonu değişimi) lepton türünü değiştirmez. Bu ayrım, SNO deneyinin Güneş nötrino problemini çözmesinde kritik rol oynamıştır (Ahmad vd., 2002). Nötrino fiziği, bu nedenle, BSM fizik arayışlarında yeni bir pencere veya rehber rolü üstlenmektedir.

$$n \rightarrow p + e^- + \nu_e^- \qquad (9)$$

Burada, nötrino kavramının teorik olarak ortaya çıktığı nükleer süreci, Fermi kuramı yaklaşımıyla, temsil eder. Bir nötron, bir proton, bir elektron ve bir elektron antinötrinosuna bozunur (Griffiths, 2020).

2. Nötrino Salınımları ve Kütle Problemi

Nötrino salınımlarının keşfi, 20. yüzyılın sonları ve 21. yüzyılın başlarındaki parçacık fiziğinin en önemli buluşlarından biridir. Bu durum, nötrinoların kütleli olduğunu kanıtlamış ve Standart Model'in ötesinde yeni bulguların arayışlarına yeni bir bakış kazandırmıştır.

2.1. Nötrino Salınımlarının Kuramsal Temelleri

Nötrino salınımı, bir nötrinonun zayıf etkileşimlerde belirli bir türde (elektron nötrinosu, müon nötrinosu, tau nötrinosu) üretildikten sonra, uzay-zamanda yol alırken başka bir türe dönüşebilmesi olgusunu ifade eder. Bu dönüşüm, nötrinoların kütleleri ve kuantum mekaniksel doğaları arasındaki karmaşık ilişkiden kaynaklanır. Daha anlaşılır bir ifadeyle, nötrinolar iki farklı "kimlikle" var olurlar: tür öz durumu (flavor

eigenstate) ve kütle öz durumu (mass eigenstate). Bir nötrino, zayıf nükleer kuvvet aracılığıyla bir parçacık bozunmasında ortaya çıktığında, bu her zaman belirli bir tür öz durumundadır (ν_e, ν_μ, ν_τ). Bu, onun hangi lepton (elektron, müon veya tau) ile ilişkili olduğunu tanımlar. Ancak nötrino uzayda hareket ederken, bu tür durumu aslında farklı kütlelere sahip olan üç farklı kütle öz durumunun (ν_1, ν_2, ν_3) kuantum mekaniksel bir süperpozisyonu, yani bir çeşit karışımıdır. Her bir kütle öz durumu, uzay-zamanda farklı bir hızla ilerler. Bu durum, başlangıçta belirli bir türde üretilen nötrinonun, yolculuğu sırasında kütle durumlarının fazlarının değişmesine ve farklı bir tür karışımına dönüşmesine neden olur. Dolayısıyla, bir deneyde müon nötrinosu olarak üretilen bir nötrino, daha uzaktaki bir dedektöre ulaştığında tau nötrinosu veya elektron nötrinosu olarak tespit edilebilir. Bu salınım olgusunun teorik temelleri, ilk olarak Bruno Pontecorvo'nun (1957) nötrino-antinötrino salınımları üzerine yaptığı çalışmalarla atılmıştır. Daha sonra Ziro Maki ve çalışma arkadaşları (1962), bu fikri farklı nötrino türleri arasındaki salınımları içerecek şekilde geliştirerek, tür ve kütle öz durumları arasındaki bu karışım ilişkisini matematiksel bir çerçeveye oturtmuşlardır. Bu dönüşüm, yalnızca nötrinoların kütleli olması ve bu kütle öz durumlarından en az ikisinin farklı kütle değerlerine sahip olması durumunda mümkündür. Bu nedenle nötrino salınımlarının gözlemlenmesi, nötrinoların kütlesi olduğunun doğrudan bir kanıtıdır. (Pontecorvo, 1958; Maki vd., 1962)

Tür öz durumları ile kütle öz durumları arasındaki ilişki, Pontecorvo–Maki–Nakagawa–Sakata (PMNS) matrisi adı verilen 3×3 boyutunda üniter bir matris (U_{PMNS} veya kısaca U) ile tanımlanır;

$$|\nu_\alpha\rangle = \sum_{k=1}^{3} U_{\alpha k}^{*} \, |\nu_k\rangle \qquad (10)$$

Burada tür öz durumu, $|\nu_\alpha\rangle;\ \alpha = e, \mu, \tau$ ve kütle öz durumu $|\nu_k\rangle\ ;\ k = 1, 2, 3$ ile ifade edilmiştir. $U_{\alpha k}$ Elemanları ise k, kütle öz durumunun α, tür öz durumuna olan genliğini temsil eder.

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} \\ U_{\mu 1} & U_{\mu 1} & U_{\mu 1} \\ U_{\tau 1} & U_{\tau 1} & U_{\tau 1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix} \qquad (11)$$

Burada PMNS matrisi üniterdir, bu da toplam olasılığın korunmasını sağlar. Üç nesil nötrino için PMNS matrisi, üç karışım açısı (θ_{12}, θ_{23}, θ_{13}) ve bir CP (yük-parite) ihlal eden Dirac fazı (δ_{CP}) ile parametrize edilir. Eğer nötrinolar Majorana parçacıkları ise (kendi karşıt parçacıkları olması durumu), PMNS matrisinde iki ek Majorana fazı daha bulunur ancak bu Majorana fazları nötrino salınım olasılıklarını etkilemez, sadece lepton sayısını ihlal eden süreçlerde etki eder (Maki vd., 1962; Navas vd., 2024).

Navas ve arkadaşları tarafından kullanılan PMNS matrisinin standart parametrizasyonu şu şekildedir:

$$U = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta_{CP}} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{i\delta_{CP}} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e^{i\alpha_1/2} & 0 & 0 \\ 0 & e^{i\alpha_2/2} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \qquad (12)$$

Burada $c_{ij} = cos(\theta_{ij})$ ve $s_{ij} = sin(\theta_{ij})$ olup, θ_{12} "güneş açısı", θ_{23} "atmosferik açı" ve θ_{13} "reaktör açısı" dır. δ_{CP}, Dirac CP-ihlali fazıdır. En sağdaki matris, Majorana fazlarını içerir ve sadece nötrinolar Majorana parçacıkları ise fizikseldir (geçerlidir); salınım hesaplamalarında genellikle ihmal edilir. PMNS matrisinin üniterliği, toplam olasılığın 1 olmasını sağlar. Kuark alanındaki CKM matrisindeki açılar genellikle küçüktür, bu da nesiller arası karışımın zayıf olduğunu gösterir. Nötrinolarda ise θ_{12} ve θ_{23} oldukça büyüktür, θ_{13} ise daha küçük ama sıfırdan farklıdır (Abe vd., 2021; Navas vd., 2024).

2.2. Salınım Olasılığı

Bir nötrino, belirli bir tür öz durumu ($|\nu_\alpha\rangle$) olarak üretildikten sonra, kütle öz durumlarının ($|\nu_k\rangle$) bir süperpozisyonu olarak yayılır. Kuantum mekaniğine göre, her bir kütle öz durumu, bir düzlem dalga olarak;

$$|\nu_k(t,x)\rangle = e^{-i(E_k t - p_k x)}|\nu_k(0)\rangle \quad (13)$$

şeklinde bir faza sahip olarak yayılır. Burada E_k enerji, p_k ise momentumdur. Nötrinoların neredeyse ışık hızında hareket ettiği ultra-rölativistik durumda ($E \gg m$), enerji $E \approx p + \frac{m_k^2}{2E}$ şeklinde yaklaştırılabilir. Doğal birimler ($\hbar = c = 1$) kullanıldığında ve nötrinonun katettiği mesafenin $L \approx t$ olduğu varsayıldığında, L mesafesi sonrası faz faktörü yaklaşık olarak:

$$e^{-i(E_k - p_k)L} \approx e^{-i\frac{m_k^2 L}{2E}} \quad (14)$$

olur (ħ=c=1 birimlerinde). Farklı kütle öz durumları($k = 1,2,3$) farklı kütlelere(m_k) sahip olduğundan, yayılırken aralarında bir faz farkı oluşur. Bu faz farkları, belirli bir L mesafesi ve E enerjisinde, başlangıçta α türünde olan bir nötrinonun β türünde bulunma olasılığının değişmesine, yani salınıma yol açar.

Başlangıçta saf bir $|\nu_\alpha\rangle$ durumunda olan bir nötrinonun, L mesafesini katettikten sonra $|\nu_\beta\rangle$ durumunda bulunma olasılığı (vakumda);

$$P(\nu_\alpha \to \nu_\beta; L, E) = \left| \sum_{k=1}^{3} U_{\beta k} e^{-i\frac{m_k^2 L}{2E}} U_{\alpha k}^* \right|^2 \quad (15)$$

denklemiyle verilir. Bu genel denklem, üç nötrino salınımlarını tanımlar. İki nötrino türü (ν_α, ν_β) arasındaki salınımları ele alan basitleştirilmiş bir durumda (örnek olarak, sadece iki kütle öz durumu ν_1, ν_2 ve tek bir karışım açısı θ varsayıldığında), $\nu_\alpha \to \nu_\beta$ $(\alpha \neq \beta)$ dönüşüm olasılığı;

$$P(\nu_\alpha \to \nu_\beta; L, E) = \sin^2(2\theta)\sin^2\left(\frac{\Delta m^2 L}{4E}\right) \quad (16)$$

Şekilde ifade edilir. Burada $\Delta m^2 = {m_2}^2 - {m_1}^2$ kütle kareleri farkıdır. $\nu_\alpha \to \nu_\alpha$ olasılığı, yani nötrinonun kendi türünde kalma olasılığı, "hayatta kalma olasılığı" olarak adlandırılır. Bu olasılık $P(\nu_\alpha \to \nu_\alpha) = 1 - P(\nu_\alpha \to \nu_\beta)$ ile hesaplanır.1 − $P(\nu_\alpha \to \nu_\beta)$ olur. Standart olarak kullanılan birimlerle (L kilometre, E GeV, Δm^2 eV^2 cinsinden alındığında) salınım argümanı, yani sinüs fonksiyonunun içindeki ifade genellikle;

$$\frac{\Delta m^2 L}{4E} \approx 1.267 \frac{\Delta m^2[\mathrm{eV}^2] L[\mathrm{km}]}{E[\mathrm{GeV}]} \quad (17)$$

şeklinde yazılır. Bu sonuçlar, salınımların varlığı için iki kritik koşulun gerekliliğini matematiksel olarak gösterir: İlki tür ve kütle öz durumları arasında bir karışım olmalı ($\theta \neq 0$), ikinici olarak en az iki nötrinonun kütlesi farklı olması ($\Delta m^2 \neq 0$) gerektiğini gösterir. Nötrinolar maddeden geçerken, elektronlarla olan koherent ileri saçılmaları nedeniyle etkin potansiyelleri değişir. Bu etki, Mikheyev-Smirnov-Wolfenstein (MSW) etkisi olarak bilinir ve özellikle elektron nötrinoları için önemlidir (Wolfenstein, 1978; Mikheyev & Smirnov, 1985). Bu ek potansiyel, salınım olasılıklarını, özellikle Güneş'in merkezi, süpernovalar gibi yoğun ortamlarda önemli ölçüde değiştirebilmektedir (Bahcall & Davis, 1976).

2.3. Deneysel Kanıtlar ve Parametre Ölçümleri

Nötrino salınımlarının varlığı ve PMNS matrisinin parametreleri, farklı kaynaklardan (Güneş, atmosfer, nükleer reaktörler, parçacık hızlandırıcıları) gelen nötrinoların incelendiği çok sayıda deneyle doğrulanmış ve ölçülmüştür. Bunlar arasında;

Güneş Nötrionları: Homestake deneyi (Bahcall & Davis, 1976), Super-Kamiokande (Fukuda vd., 1998) ve SNO (Ahmad vd., 2002) gibi deneyler, Güneş'ten gelen ν_e akısındaki azalmayı ve $\nu_e \to \nu_{\mu,\tau}$ dönüşümünü kanıtlamıştır.

Reaktör Nötrinoları: Super-Kamiokande ve IceCube/DeepCore gibi deneyler, $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau$ salınımlarını kanıtlamıştır.

Atmosferik Nötrinolar: KamLAND (Eguchi vd., 2003), Daya Bay, RENO ve Double Chooz gibi deneyler, θ_{12}, $\Delta m^2{}_{21}$, ve θ_{13} parametrelerini ölçmüştür.

Hızlandırıcı Nötrinoları: T2K ve NOvA gibi deneyler, θ_{23}, $|\Delta m^2{}_{32}|$, θ_{13} ve δ_{CP} ile kütle hiyerarşisi hakkında bilgi sağlamaktadır (Ajmi, 2024; Abe vd.,2021).

PMNS matrisi parametrelerinin güncel değerlerinde (bkz. Tablo 2) bazı parametreler ortalama değerler sunarken, bazı ayrıntılı aralıklar verir. δ_{CP} değeri için T2K ve NOvA sonuçları arasında hala bir miktar fark bulunmaktadır (Ajmi, 2024; Abe vd.,2021).

Tablo 2. PMNS Matrisi Parametrelerinin Güncel Değerleri (Navas vd., 2024; Esteban vd., 2020).
Table 2. *Current Values of PMNS Matrix Parameters*

Parametre	Normal Hiyerarşide En İyi Uyum Değeri (NH)	Ters Hiyerarşide En İyi Uyum Değeri (IH)	3σ Aralığı (NH)	3σ Aralığı (IH)
$\sin^2(\theta_{12})$	0.307	0.307	0.269 − 0.343	0.269 − 0.343
$\boldsymbol{\Delta m^2_{21}}$ [10^{-5} eV^2]	7.53	7.53	6.82 − 8.04	6.82 − 8.04
$\sin^2(\theta_{23})$	0.558	0.553	0.403 − 0.618)	0.408 − 0.621
$\boldsymbol{\Delta m^2_{3\ell}}$ [10^{-3} eV^2]	+2.455 ($\Delta m^2{}_{32}$)	-2.529 ($\Delta m^2{}_{32}$)	-	-
$\sin^2(\theta_{13})$	0.0219	0.0219	0.02034 − 0.02410	0.02032 − 0.02408
$\boldsymbol{\delta_{CP}}$ [derece]	215° (1.19π rad)	215° (1.19π rad)	132° − 355°	183° − 350°

2.4. Kütleli Nötrinolar ve Standart Model Dışı Fiziğe Açılan Kapı

Nötrino salınımlarının deneysel olarak kanıtlanması, nötrinoların kütlesi olduğunu kesin olarak göstermiştir. Bu bulgu, SM' nin eksik veya tamamlanmamış olduğunun ilk kesin kanıtıdır (Kayser, 2003). SM, nötrinoları kütlesiz parçacıklar olarak tanımlar. Dolayısıyla, bu kütlelerin varlığı, doğada Standart Model'in ötesinde (Beyond the Standard Model-BSM) yeni bir yaklaşımın olması gerektiğini gösterir. Burada cevaplanması gereken temel soru, nötrinoların kütlesi neden sıfır değil ve diğer temel parçacıklara (elektron, kuarklar vb.) kıyasla neden bu kadar küçük olduğudur. Örneğin, en hafif yüklü parçacık olan elektronun kütlesi yaklaşık 511,000 eV iken, nötrino kütlelerinin üst sınırı 1 eV'den daha azdır. Nötrino kütlelerinin bu "anormal" küçüklüğü, yeni fizik modelleri için en önemli yol göstericilerden biri haline gelmiştir.

Standart Model'de parçacıklar, Higgs mekanizması aracılığıyla kütle kazanır. Ancak bu mekanizmayı nötrinolara doğrudan uygulamak, gözlemlenen aşırı küçük kütleleri doğal bir şekilde açıklayamaz. Bu noktada, "etkin operatörler" kullanarak yeni bir çözümler önerilmiştr. Bu çözümlerden en bilineni, Weinberg operatörü olarak adlandırılan ve "Tahterevalli (Seesaw) Mekanizması" adı verilen bir kavrama yol açan yaklaşımdır. (bkz. Denklem 18) Bu yaklaşım, bildiğimiz düşük enerjili SM etkileşimlerinin, aslında çok daha yüksek bir enerji ölçeğinde (Λ) geçerli olan daha temel bir teorinin sadece bir yansıması olduğunu varsayar. Weinberg operatörü, bu yeni ve bilinmeyen yüksek enerji fiziğinin düşük enerjideki etkisini tanımlayan matematiksel bir ifadedir.

$$\mathcal{L}_W = \frac{c_{\alpha\beta}}{\Lambda}(L_\alpha H)\big(L_\beta H\big) + \text{h.c.} \qquad (18)$$

Burada; L_α ve L_β, nötrinoyu içeren SM'nin sol-elli lepton çiftleridir. H, kütle kazandıran Higgs alanıdır. Λ, Standart Model'in geçerliliğini yitirdiği büyük bir enerji ölçeğini temsil eder. $c_{\alpha\beta}$ ise bir katsayı matrisidir.

Denklem 18, Higgs alanı "vakum beklenen değeri"ni aldığında ($\langle H\rangle = v/\sqrt{2}$, burada v≈246 GeV'lik bilinen elektrozayıf enerji ölçeğidir);

$$m_\nu \sim \frac{cv^2}{\Lambda} \qquad (19)$$

doğrudan nötrinolar için bir kütle terimine dönüşür. Burada denklemin pay kısmında bildiğimiz ve görece küçük olan elektrozayıf ölçeğin karesi (v^2), paydada ise varsayımsal, bilinmeyen ve çok büyük olan yeni bir ölçek (Λ) yer alır. Eğer Λ değeri, örneğin Büyük Birleşik Teori (Grand Unified Theory - GUT) ölçeği gibi devasa bir değerdeyse (yaklaşık olarak 10^{15} GeV), ortaya çıkan nötrino kütlesi (m_ν) çok küçük olur. Bu mekanizma, bir tahterevallinin bir ucuna çok ağır bir kütle (Λ) koyduğunuzda, diğer ucundaki kütlenin (m_ν) ne kadar yukarı fırlayacağını gösterir. (Mohapatra & Smirnov, 2006). Bu durum, nötrino kütlelerinin neden küçük olduğunu "tahterevalli" analojisiyle açıklar.
Sonuç olarak, nötrino kütlelerinin varlığı ve küçüklüğü, bizi doğrudan SM'nin çok ötesindeki enerji ölçeklerinde var olan yeni parçacıkların ve etkileşimlerin varlığına dair kanıt sunmaktadır. Bu nedenle, kütleli nötrinolar, modern parçacık fiziğinde yeni ufuklara açılan en önemli kapılardan biri olarak görülmektedir (King, 2025).

2.5. Seesaw (Tahterevalli) Mekanizması

1998 yılında Super-Kamiokande deneyiyle ortaya konulan nötrino salınımları, nötrinoların kütleli olduğunu doğrudan göstermiştir. Fakat Higgs mekanizması, yalnızca sağ elli fermiyonların varlığında fermiyonlara kütle kazandırabilir. SM'nin bu eksikliği, teorik genişletmelerin gerekliliğini ortaya koymuştur.

Seesaw mekanizması (özellikle Tip I seesaw), bu sorunu çözmek amacıyla geliştirilmiştir. Bu mekanizmada, çok ağır sağ elli nötrinolar modele dahil edilir. Bu yeni parçacıklar, Majorana kütle terimleri aracılığıyla nötrinoların çok küçük ama sıfır olmayan kütleler kazanmasına neden olur. Seesaw ilişkisi genel olarak aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$m_\nu \approx \frac{v^2}{M_R} \tag{20}$$

Burada v Higgs alanının beklenen değeridir (yaklaşık 246 GeV), M_R ise sağ elli nötrinonun büyük Majorana kütlesidir (Minkowski, 1977). Sonuç olarak Nötrinoların küçük kütlelerini açıklamak için en popüler mekanizma "seesaw" mekanizmasıdır. Bu mekanizma, aktif nötrinoların kütlelerinin, SM'ye eklenen çok ağır yeni varsayımsal parçacıkların kütleleriyle ters orantılı olduğunu öne sürer (Mohapatra & Senjanović, 1980).

Tip I Seesaw: SM'ye çok ağır sağ-elli Majorana nötrinoları (N_R) eklenir. Aktif nötrino kütle matrisi,

$$m_{\text{light}} \approx -m_D M_R^{-1} m_D^T \tag{21}$$

olur. $M_R \gg m_D$ ise m_{light} küçük olur (King, 2025; Ma, 2006). Bu model, en basit ve en yaygın kabul gören seesaw türüdür.

Tip II Seesaw: SM'ye yeni bir skaler $\text{SU}(2)_L$ Higgs tripleti (Δ) eklenir. Nötrino kütlesi,

$$m_\upsilon \approx y_\Delta \langle \Delta_0 \rangle \tag{22}$$

ile verilir ve $\langle \Delta_0 \rangle \approx \frac{\mu v^2}{M_\Delta^2}$ olduğundan, büyük M_Δ küçük m_υ anlamına gelir. Bu model, LHC gibi çarpıştırıcılarda test edilebilir yeni skaler parçacıklar öngörmektedir. (Mandal vd., 2022)

Tip III Seesaw: SM'ye fermiyonik $\text{SU}(2)_L$ tripletleri (Σ) eklenir ve Tip I'e benzer bir mekanizma işler. Bu tripletlerin nötr bileşenleri, ağır Majorana nötrinoları gibi davranarak hafif aktif nötrino kütleleri üretir (King, 2025).

Seesaw mekanizmalarının önemli bir sonucu, yalnızca nötrino kütlelerinin kökenini açıklamakla kalmayıp, aynı zamanda evrenin gözlemlenen madde-antimadde asimetrisine de bir çözüm sunabilmesidir. Bu bağlantı, leptogenez adı verilen teorik bir süreç üzerinden kurulur (Fukugita & Yanagida, 1986). Leptogenez, "leptonların doğuşu" anlamına gelir ve evrenin başlangıcında leptonlar (elektron, nötrino vb.) ile antileptonlar arasında net bir fazlalık oluşması sürecini ifade eder. Bu lepton fazlalığı, daha sonra standart elektrozayıf teorideki "sfaleron" süreçleri aracılığıyla, bugün gözlemlenen baryon asimetrisine dönüştürülmüştür (Kuzmin, Rubakov, & Shaposhnikov, 1985). Sonuç olarak, Seesaw mekanizması birçok

süreci mümkün kılmaktadır. Dolayısıyla nötrino kütlelerini açıklamak için önerilen aynı fiziksel mekanizma, evrendeki maddenin kökenini de doğal bir şekilde açıklama potansiyeli taşımaktadır.

2.6. Nötrino Kütle Hiyerarşisi Problemi: Normal mi Ters mi?

Nötrino salınım deneyleri, nötrinoların kütleleri arasındaki farkları büyük bir hassasiyetle ölçmüş olsa da bu kütlelerin mutlak sıralaması henüz kesin olarak bilinmemektedir. Bu durum, modern parçacık fiziğinin en temel sorularından birini oluşturur ve nötrino kütle hiyerarşisi problemi olarak adlandırılır. Problem, kütle öz durumlarının (m^1, m^2, m^3) sıralamasının nasıl olduğuyla ilgilidir. Salınım verileri, $\Delta m^2_{21} = m^2_2 - m^2_1$ farkının küçük ve pozitif olduğunu, yani m^2'nin m^1'den biraz daha ağır olduğunu göstermektedir. Ancak m^3 kütlesinin bu ikiliye göre konumu belirsizdir. Bu belirsizlik iki olası duruma yol açmıştır:

Normal Hiyerarşi (Normal Hierarchy - NH): Bu durumda m^3 en ağır kütle durumudur ve sıralama $m_1 < m_2 < m_3$ şeklindedir. Yapı, birbirine yakın kütleli iki hafif durum ve onlardan ayrık daha ağır bir durumdan oluşur.

Ters Hiyerarşi (Inverted Hierarchy - IH): Bu durumda ise m^3 en hafif kütle durumudur ve sıralama $m_3 < m_1 < m_2$ şeklindedir. Bu yapı da tek bir hafif durum ve birbirine yakın kütleli iki ağır durumdan meydana gelir.

Bu iki hiyerarşiden hangisinin doğru olduğunu belirlemek, nötrinoların madde içinden geçerken gösterdikleri davranış farklılıklarını (MSW etkisi) ölçmeye dayalıdır. Bu amaçla, uzun baz uzunluklu hızlandırıcı deneyleri (T2K, NOvA, DUNE), atmosferik nötrino deneyleri (Super-K, IceCube-Upgrade/PINGU, Hyper-K, ORCA) ve orta baz uzunluklu reaktör deneyleri (JUNO) gibi farklı stratejiler kullanan deneyler yürütülmektedir.

Mevcut küresel veri analizleri, NH lehine istatistiksel olarak anlamlı ancak henüz keşif düzeyinde olmayan bir tercih (yaklaşık 2-3σ) göstermektedir. Bu nedenle IH olasılığı kesin olarak dışlanmamıştır (Smirnov, 2013; Qian vd., 2015; Esteban vd., 2020; Ajmi, 2024; Parke vd., 2025). Gelecek nesil deneylerin, özellikle DUNE ve Hyper-K'nin, bu konuda kesin bir sonuca ulaşarak hiyerarşi problemini çözmesi beklenmektedir (Ge vd., 2025).

3. Astrofiziksel Nötrinolar

3.1. Güneş Nötrinoları

Güneş, merkezindeki proton-proton (pp) zinciri ve CNO çevrimi gibi nükleer füzyon reaksiyonları yoluyla büyük ölçekli bir elektron nötrinosu (ν_e) akısı üretir. Standart Güneş Modeli (SSM), bu reaksiyonların oranlarını ve dolayısıyla Dünya'ya ulaşması beklenen ve akısını hassas bir şekilde öngörmektedir. Ancak, 1960'larda başlayan ve Raymond Davis Jr.'ın öncülük ettiği Homestake deneyi, SSM'nin öngördüğü akının yaklaşık üçte birini ölçebilmiştir (Bahcall & Davis, 1976). Öngörülen ve ölçülen akı arasındaki bu belirgin tutarsızlık, parçacık fiziği ve astrofizik alanında on yıllarca süren ve "Güneş Nötrino Problemi" olarak bilinen bir durumu ortaya çıkarmıştır. Bu problemin çözümü, nötrino salınımları hipoteziyle mümkün olmuştur. Çözümün nihai ve doğrudan kanıtı ise SNO (Sudbury Neutrino Observatory) deneyiyle sağlanmıştır. SNO deneyi, ağır su (D_2O) kullanarak Güneş'ten gelen nötrinoları üç farklı reaksiyon kanalıyla tespit etme yeteneğine sahipti. Bunlar;
Yüklü Akım (Charged Current - CC): Sadece ve türüne duyarlı olan bu kanal, Dünya'ya ulaşan elektron nötrinosu akısını ölçtü.
Nötral Akım (Neutral Current - NC): Her üç nötrino türüne de (ν_e, ν_μ, ν_τ) eşit derecede duyarlı olan bu kanal, Güneş'ten gelen toplam nötrino akısını ölçtü.
Elastik Saçılma (Elastic Scattering - ES): Ağırlıklı olarak ν_e' ye duyarlı olmakla birlikte diğer türlere de kısmi hassasiyeti olan bir kanal.
SNO'nun ölçümleri, CC kanalıyla ölçülen ve akısının SSM beklentilerinden düşük olduğunu, ancak NC kanalıyla ölçülen toplam nötrino akısının SSM'nin öngörüleriyle mükemmel bir uyum içinde olduğunu göstermiştir (Ahmad vd., 2002). Bu, kaybolan elektron nötrinolarının aslında kaybolmadığını, Güneş'in yoğun maddesinden geçerken MSW etkisiyle güçlenen salınımlar sonucu diğer türlere dönüştüğünü kesin

olarak kanıtlamıştır. Super-Kamiokande deneyi de Güneş nötrinolarının elastik saçılma gözlemleriyle bu çözüme önemli katkılarda bulunmuştur (Bellerive vd., 2016).

3.2. SN1987A Süpernova Nötrino Gözlemi

23 Şubat 1987'de, Güneş Sistemi dışındaki bir kaynaktan gelen ilk ve şimdiye kadarki tek nötrino gözlemi gerçekleştirildi. Samanyolu'nun uydu galaksisi olan Büyük Macellan Bulutu'nda meydana gelen SN1987A süpernovasından yayılan ve çoğunluğu elektron antinötrinosu olan yaklaşık 20-25 nötrino, birbirinden bağımsız üç ayrı dedektör (Kamiokande-II, IMB ve Baksan) tarafından yaklaşık 13 saniyelik bir zaman dilimi içinde tespit edildi. Bu gözlemin en dikkat çekici yönlerinden biri, nötrino sinyalinin, süpernovanın optik olarak gözlemlenebilir hale gelmesinden yaklaşık üç saat önce Dünya'ya ulaşmasıydı (Arnett vd., 1989). Bu zaman farkı, çekirdek çökmesi teorisinin öngörüleriyle bir uyum içindedir. Teoriye göre, bir yıldızın çekirdeği çöktüğünde, açığa çıkan kütleçekimsel bağlanma enerjisinin %99'u nötrinolar aracılığıyla salınır. Zayıf etkileşen bu nötrinolar, çöken çekirdekten neredeyse anında kaçarken, fotonlar süpernovanın genişleyen ve opak (yoğun) olan dış zarfında hapsolur ancak saatler sonra yüzeye ulaşıp serbest kalabilirler (Pelaggi vd., 2017). Bu gözlem, çekirdek çökmesiyle süpernova patlaması modellerini doğrulamış, nötrino kütlesi ve diğer özellikleri üzerine önemli sınırlar getirmiş ve yıldızların yaşamlarının son anlarına dair yeni bir pencere açmıştır.

3.3. Kozmik Nötrino Arka Planı (CνB veya CNB)

Evrenin erken dönemlerindeki aşırı sıcak ve yoğun ortamda, sıcaklık genellikle parçacıkların ortalama enerjisini ifade eden enerji birimleriyle (elektron-volt, eV) tanımlanır. Büyük Patlama'dan yaklaşık 1 saniye sonra, evrenin ortalama parçacık enerjisi yaklaşık 1 Mega-elektron-volt'a (MeV) düştüğünde (bu, 10 milyar Kelvin'den daha yüksek bir sıcaklığa denktir), nötrinolar diğer parçacıklarla etkileşmeyi bırakarak serbest kalmıştır. Bu olayla oluşan ve o andan beri evrende serbestçe yayılan bu nötrinolara Kozmik Nötrino Arka Planı (Cosmic Neutrino Background - CνB) denir. Evrenin genişlemesiyle soğuyan bu nötrinoların bugünkü sıcaklıklarının ~1.95 K ve her bir aktif tür için sayı yoğunluğunun ~112 cm^{-3} olduğu tahmin edilmektedir (Scott, 2024). CνB'nin doğrudan tespiti mevcut teknolojiyle son derece zor olsa da varlığına dair güçlü dolaylı kanıtlar mevcuttur. Büyük Patlama Nükleosentezi (BBN) sırasında hafif elementlerin oluşum oranları ve Kozmik Mikrodalga Arka Planı (CMB) anizotropileri (örneğin Planck uydusu verileri), CνB'nin varlığı ve öngörülen özellikleriyle tutarlıdır. Bu kozmolojik gözlemler, CνB'nin evrenin yapısının oluşumundaki kütleçekimsel etkisi sayesinde, üç aktif nötrino türünün kütlelerinin toplamı (Σm_ν) üzerine de güçlü sınırlar koymaktadır. En güncel verilerin birleşik analizi, bu toplam kütlenin %95 güvenilirlik seviyesinde $\Sigma m_\nu < 0.072\ eV/c^2$ olduğunu göstermektedir (Adame vd., 2025; Naredo-Tuero vd., 2024). Ayrıca gelecekte ise, PTOLEMY (Princeton Tritium Observatory for Light, Early-universe, Massive-neutrino Yield) gibi tasarlanan deneyler, trityum beta bozunmasını hassas bir şekilde ölçerek CνB'yi doğrudan tespit etme gibi bir hedefi amaçlamaktadır (Hernandez-Molinero vd., 2025).

3.4. Diğer Astrofiziksel Nötrino Üretim Mekanizmaları

Güneş ve süpernovaların yanı sıra, nötrino fiziği ve astronomisi için temel öneme sahip başka astrofiziksel nötrino üretim mekanizmaları da mevcuttur. Bunlar:

Atmosferik Nötrinolar: Bu nötrinolar, birincil kozmik ışınların (çoğunlukla protonlar ve atom çekirdekleri) Dünya atmosferinin üst katmanlarındaki atom çekirdekleriyle çarpışması sonucu oluşan parçacık saçılmalarından doğar. Bu etkileşimler, kısa ömürlü pion ve kaon gibi mezonlar üretir. Bu mezonların ve ardından onların bozunma ürünü olan müonların zincirleme bozunmaları, tüm türleri içeren bir nötrino akısı oluşturur. Atmosferik nötrinoların gözlemlenmesi, nötrino salınımlarının ilk kesin kanıtını sunmuştur. Super-Kamiokande deneyi, farklı yönlerden gelen nötrino akılarını karşılaştırarak, özellikle $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau$ salınım kanalını keşfetmiş ve bu buluşla "atmosferik nötrino anomalisini" çözmüştür (Fukuda vd., 1998).

Yüksek Enerjili Astrofiziksel Nötrinolar: Bunlar, enerjileri TeV (Tera-elektron-volt) ile PeV (Peta-elektron-volt) ve ötesine uzanan, evrenin en şiddetli olaylarında üretilen nötrinolardır. Kaynakları arasında Aktif Galaktik Çekirdekler (AGN), blazarlar, gama ışını patlamaları (GRB) ve yıldız oluşum galaksileri gibi çok yüksek enerjili ortamlar bulunmaktadır. Yüksüz ve zayıf etkileşen parçacıklar oldukları için, manyetik alanlardan

sapmadan ve madde tarafından soğurulmadan kozmolojik mesafeleri kat edebilirler. Bu özellikleri sayesinde, geldikleri kaynaklara dair doğrudan bilgi taşıyarak nötrino astronomisi adı verilen yeni bir alan açmışlardır. IceCube Nötrino Gözlemevi, bu dağınık kozmik nötrino akısını ilk kez tespit eden ve kaynaklarıyla ilgili ipuçları sunan öncü deneydir (IceCube Collaboration, 2013).

Jeo-nötrinolar (Geoneutrinos): Dünya'nın kabuğunda ve mantosunda bulunan, uzun ömürlü radyoaktif izotopların (başlıca Uranyum-238 ve Toryum-232 zincirleri) beta bozunmalarından kaynaklanan elektron antinötrinolardır. Bu nötrinolar, gezegenimizin iç yapısı ve kimyasal bileşimi hakkında doğrudan bilgi sağlar. KamLAND ve Borexino gibi deneyler tarafından tespit edilmiştir. (Fiorentini vd., 2007)

Hızlandırıcılarda Üretilen Nötrinolar: T2K, NOvA gibi deneylerde salınım parametrelerini hassas bir şekilde ölçmek ve nötrino etkileşimlerini incelemek için kontrollü nötrino demetleri kullanılmıştır (Ajmi, 2024).

4. Yüksek Enerjili Nötrinolar ve Çoklu-Mesajcı (Multi-Messenger) Astrofizik

4.1. IceCube ve Benzeri Dedektörler

IceCube, Güney Kutbu'ndaki Antarktika buz tabakasının derinliklerine yerleştirilmiş, yaklaşık 1 km³ hacimli bir Çerenkov dedektörüdür. Yüksek enerjili bir nötrino buzla etkileştiğinde oluşan yüklü parçacıkların (müon, elektron, tau veya hadronik sağanaklar) yaydığı Çerenkov ışığını, binlerce optik sensör (DOM) aracılığıyla tespit etmektedir. Olaylar, genellikle iyi yön çözünürlüğü sağlayan "track" (iz) olayları (çoğunlukla ν_μ kaynaklı) ve iyi enerji çözünürlüğü sağlayan "cascade" (sağanak) olayları (çoğunlukla $\nu_e \upsilon_\tau$ ve tüm türlerin yüksüz akım etkileşimlerinden) olarak sınıflandırılırmıştır. IceCube, 2013 yılında Güneş Sistemi dışından gelen, TeV-PeV enerjili bir astrofiziksel nötrino akısı keşfederek yüksek enerjili nötrino astrofiziği çağını başlatmıştır (Halzen, 2024). Akdeniz'deki KM3NeT ve Baykal Gölü'ndeki Baikal-GVD gibi diğer büyük hacimli nötrino teleskopları da bu alanda önemli katkılar sunmaktadır.

4.2. Yüksek Enerjili Nötrino Kaynakları

Yüksek enerjili astrofiziksel nötrinoların üretimi için temel mekanizma, astrofiziksel ortamlarda çok yüksek enerjilere hızlandırılmış protonların (kozmik ışınlar) çevredeki madde (p-p etkileşimleri) veya foton alanları (p-γ etkileşimleri) ile etkileşerek pionlar üretmesi ve bu pionların bozunmasıdır (Murase vd, 2020). Bu süreçler aynı zamanda yüksek enerjili gama ışınları da üretir. Potansiyel kaynakları ise şunlardır:

Aktif Galaksi Çekirdekleri (AGN) ve Blazarlar: Merkezlerinde süper kütleli kara delikler bulunan ve güçlü jetler fırlatan bu nesneler, özellikle jetleri Dünya'ya yönelik olan blazarlar, önemli nötrino kaynağı adaylarıdır. 22 Eylül 2017'de IceCube tarafından tespit edilen ~290 TeV enerjili IceCube-170922A nötrinosu, gama ışını parlaması gösteren TXS 0506+056 blazarıyla ilişkilendirilmiştir (Aartsen vd., 2018a; Aartsen vd., 2018b). Bu, bir blazarın yüksek enerjili nötrino kaynağı olduğuna dair ilk güçlü multi-messenger kanıtıydı.

Gama Işını Patlamaları (GRB): Evrendeki en güçlü patlamalar olan GRB'lerin ultra-göreli jetlerinde nötrino üretimi beklenir, ancak bugüne kadar kesin bir ilişkilendirme yapılamamıştır (Murase vd, 2020).

Nötron Yıldızı Birleşmeleri: Nötron yıldızı birleşmeleri, evrendeki en şiddetli olaylar arasında yer alır ve kütleçekimsel dalgaların yanı sıra yüksek enerjili nötrinolar için de güçlü birer kaynak adayı olarak kabul edilirler. Tarihi bir olay olan GW170817 nötron yıldızı birleşmesi sırasında, IceCube ve ANTARES gibi büyük nötrino gözlemevleri bu olaydan gelebilecek bir sinyali aramış, ancak istatistiksel olarak anlamlı bir nötrino tespiti yapılamamıştır. Bu sonuç, bu tür birleşmelerdeki nötrino emisyon mekanizmalarının ve enerjilerinin üst sınırları hakkında önemli bilgiler sağlamıştır (Albert vd., 2017).

Yıldız Patlaması Galaksileri ve Saklı Kaynaklar: Yoğun gazla etkileşen kozmik ışınlar dağınık bir nötrino akısı üretebilir. Yani bu galaksilerdeki yoğun yıldız oluşum faaliyetleri, yüksek miktarda kozmik ışın üretir. Bu kozmik ışınların, galaksinin yoğun gaz ve toz ortamıyla etkileşime girmesi (özellikle proton-proton çarpışmaları), pion adı verilen parçacıkların ve ardından bu parçacıkların bozunmasıyla nötrinoların oluştuğu bir mekanizma sunar. Evrendeki tüm bu "saklı" kaynaklardan gelen nötrinoların birleşerek, gözlemlenen

dağınık astrofiziksel nötrino akısının önemli bir kısmını oluşturabileceği teorisi, güncel araştırmalarda güçlü bir hipotez olarak test edilmektedir (Murase vd., 2013).

4.3. Nötrino + Foton + Kütleçekimsel Dalga Korelasyonları (Multi-Messenger Astrofizik)

Çoklu-mesajcı astrofizik (multi-messenger astrophysics), aynı astrofiziksel kaynaktan yayılan farklı kozmik mesajcıları (elektromanyetik dalgalar, nötrinolar, kütleçekimsel dalgalar ve kozmik ışınlar) birleştirerek evreni bütüncül bir yaklaşımla inceler. Her bir mesajcı, kaynağın farklı bir fiziksel yönü hakkında bilgiler taşımaktadır:

Kütleçekimsel Dalgalar: Birleşen kara delikler veya nötron yıldızları gibi olayların merkezindeki "motoru", yani kütle-enerjinin dinamik hareketini ve uzay-zamanın bükülmesini ortaya çıkarır.
Nötrinolar: Yoğun ve opak ortamlardan neredeyse hiç etkileşmedikleri için, bir süpernovanın çöken çekirdeği veya birleşen nötron yıldızlarının etrafındaki disk gibi, ışığın kaçamadığı bölgelerdeki nükleer süreçler ve temel parçacık etkileşimleri hakkında doğrudan bilgi sunar.

Fotonlar (Elektromanyetik Dalgalar): Patlamadan kaynaklanan enkazın çevredeki ortamla etkileşimini, element sentezini ve şok dalgalarını görmemizi sağlar.

Bu alandaki ilk başarılar, bir nötrino sinyalinin (SN1987A) veya yüksek enerjili bir nötrinonun (TXS 0506+056 olayı) elektromanyetik gözlemlerle ilişkilendirildiği nötrino-foton korelasyonları olmuştur. Ancak çoklu-mesajcı çağını başlatan en büyük gelişme, kütleçekimsel dalga-foton korelasyonunun keşfiyle yaşanmıştır. 17 Ağustos 2017'de gözlemlenen GW170817 olayı, iki nötron yıldızının birleşmesinden kaynaklanan kütleçekimsel dalgaların LIGO (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory) tarafından tespit edilmesinin hemen ardından, bu olayın bir kısa gama ışını patlamasından (GRB) bir kilonovaya (iki nötron yıldızının veya bir nötron yıldızı ile bir kara deliğin birleşmesi sonucu meydana gelen çok büyük bir patlama) kadar tüm elektromanyetik spektrumda takip edilmesiyle gerçekleşmiştir. Bu olay sırasında, IceCube ve ANTARES (Astronomy with a Neutrino Telescope and Abyss environmental Research) gibi nötrino gözlemevleri de hemen kaynağı izlemiş fakat anlamlı bir nötrino sinyali tespit edilememiştir. Bu tespit edememe durumu bilimsel olarak anlamlıdır çünkü bu tür birleşmelerdeki nötrino emisyon mekanizmaları, jetlerin yapısı ve olaya bakış açımız hakkında önemli teorik kısıtlamalar getirmiştir (Abbott vd., 2017a; Abbott vd., 2017b).

Gelecekteki hedef, özellikle yakın bir galakside meydana gelecek bir çekirdek çökmesi süpernovasından veya bir nötron yıldızı birleşmesinden kaynaklanan üç mesajcıyı da (kütleçekimsel dalga + nötrino + foton) aynı anda tespit etmektir.SNEWS (SuperNova Early Warning System) ve AMON (Astrophysical Multimessenger Observatory Network) gibi küresel ağlar, dünya genelindeki farklı dedektörlerden gelen sinyalleri birleştirerek bu tür eş zamanlı gözlemleri mümkün kılmak ve koordine etmek için kurulmuştur (Razhkov vd., 2025).

4.4. Ekstragalaktik Nötrino Kökeni Araştırmaları

IceCube tarafından gözlemlenen yüksek enerjili (TeV-PeV) astrofiziksel nötrino akısının büyük ölçüde Samanyolu dışından (ekstragalaktik) kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu dağınık akının kesin kaynakları hala tam olarak bilinmemektedir. TXS 0506+056 gibi bireysel kaynaklar tanımlanmış olsa da, gözlemlenen toplam akının tamamını açıklamak için daha fazla kaynak veya farklı kaynak popülasyonları gerekebilir. Gelecek nesil nötrino teleskopları olan IceCube-Gen2 ve KM3NeT, bu araştırmalarda kritik rol oynayacaktır (Song vd., 2021).

5. Nötrino Fiziğinde Açık Sorular, Güncel Tartışmalar ve Gelecek Perspektifi

5.1. Nötrino Kütlesinin Doğası

Nötrinoların kütleli olduğu kesinleşmiş olsa da bu kütlenin doğası Dirac mı, yani kendisinden farklı bir karşıt parçacığa mı sahip, yoksa Majorana mı, yani kendi karşıt parçacığı mı hala bilinmemektedir. Bu soruyu yanıtlamanın yollarından biri, nötrinosuz çift beta bozunması ($0\nu\beta\beta$) adı verilen varsayımsal bir nükleer bozunma sürecini aramaktır.

$$(A, Z) \rightarrow (A, Z+2) + 2e^{-} \quad (23)$$

Burada, lepton sayısını 2 birim ihlal eder ve yalnızca nötrinolar Majorana parçacıkları ise ve kütleleri varsa gerçekleşebilir. Gözlemlenmesi, lepton sayısı ihlalini, nötrinoların Majorana doğasını kanıtlayacak ve etkin Majorana nötrino kütlesi hakkında bilgi vermektedir.

$$\langle m_{\beta\beta} \rangle = \left| \sum_{i=1}^{3} U_{ei}^{2} m_i \right| \quad (24)$$

Bu, SM ötesi fiziğe dair önemli araştırma konularından biridir. Çünkü şu an için varsayımsal bir bozunma sürecidir fakat hala gözlemlebiridir. Çünkü değildir.Dünya çapında GERDA, Majorana Demonstrator, CUORE, EXO-200, KamLAND-Zen gibi deneyler bu bozunmayı aramış ve yarı ömür için $>10^{22}$ - 10^{26} yıl gibi alt sınırlar belirlemiştir. Gelecek nesil deneyler arasında LEGEND, nEXO, SuperNEMO ve SNO+ bulunmaktadır (bkz. Tablo 3). Mevcut deneyler, ters hiyerarşi durumunda beklenen $\langle m_{\beta\beta} \rangle$ değerlerine ulaşmaya başlamıştır, ancak henüz bir sinyal gözlemlenmemiştir (Cardani, 2019; Dolinski vd., 2019;JINR News, 2024; Abgrall vd., 2025).

Tablo 3. Başlıca Nötrinosuz Çift Beta Bozunması (0νββ) Deneyleri ve Güncel Yarı Ömür Limitleri (%90 C.L.) (Dolinski vd., 2019; Abgrall vd., 2025; JINR News, 2024; Brugnera vd.,2025).
Tablo 3. *Başlıca Nötrinosuz Çift Beta Bozunması (0νββ) Deneyleri ve Güncel Yarı Ömür Limitleri (%90 C.L.)*

İzotop	Deney	$T^{0\nu}_{1/2}$ (yıl)	$\langle m_{\beta\beta} \rangle$(meV) (NME'ye bağlı aralık)
^{76}Ge	GERDA	$> 1.8 \times 10^{26}$	79 − 180
	Majorana Demonstrator	$> 8.3 \times 10^{25}$	113 − 266
	LEGEND-200 (proje)	$> 10^{27}$ (hedef)	35 − 80 (hedef)
^{130}Te	CUORE	$> 2.2 \times 10^{25}$	90 − 305
^{136}Xe	KamLAND-Zen	$> 2.3 \times 10^{26}$	36 − 156
	EXO-200	$> 5.7 \times 10^{25}$	75 − 200
	nEXO (proje)	$> 1.35 \times 10^{28}$ (hedef)	5.7 − 17.7 (hedef)

5.2. Steril Nötrinolar: Var mı yok mu?

SM'de yer alan ve sadece sol-elli (left-handed) kiraliteye sahip olan üç aktif nötrino (ν_e, ν_μ, ν_τ) türünün aksine, steril nötrinoların sağ-elli (right-handed) kiraliteye sahip olduğu öngörülür. Bu ayar etkileşimlerinden "steril" olmaları, onların doğrudan üretimini ve tespitini zor kılarken, varlıklarının potansiyel kanıtı, aktif nötrinolarla kütle karışımı mekanizması üzerinden ortaya çıkar. Bu karışım, standart 3x3 Pontecorvo-Maki-Nakagawa-Sakata (PMNS) leptonik karışım matrisinin daha büyük boyutlu bir üniter matrise genişletilmesini gerektirir. Sonuç olarak; aktif nötrinolarla kütle karışımı yoluyla etkileşebilen varsayımsal sağ-elli nötrinolar "steril nötrinolar" olarak adlandırılır (Abazajian vd., 2012). Steril nötrinoların varlığı, bazı deneysel anomalileri açıklamayı hedeflemektedir. Bunlardan bazıları şu şekildedir:

LSND Anomalisi: Los Alamos Sıvı Sintilatör Nötrino Dedektörü (LSND) deneyi,$\overline{\nu_\mu} \rightarrow \overline{\nu_e}$ salınımlarına işaret eden bir $\bar{\nu}_e$ fazlalığı gözlemlemiştir (Abbasi, 2024; Du vd., 2025).

MiniBooNE Anomalisi: LSND sonucunu test etmek için yapılan MiniBooNE deneyi de düşük enerjilerde elektron benzeri olaylarda bir fazlalık gözlemlemiştir (Abbasi, 2024; Du vd., 2025).

Galyum Anomalisi: Radyoaktif kaynaklarla kalibre edilen galyum bazlı güneş nötrino deneyleri (SAGE, GALLEX), beklenenden daha düşük bir ν_e yakalama oranı göstermiştir. Bu durum, BEST deneyi tarafından da doğrulanmıştır (Abbasi, 2024; Barinov vd., 2022).

Reaktör Antinötrino Anomalisi: Kısa mesafeli reaktör deneylerinde gözlemlenen $\bar{\nu}_e$ akısında teorik beklentilere göre bir eksiklik durumudur (JINR News, 2024).

Bu anomaliler, ~1 eV² mertebesinde bir kütle kare farkına sahip dördüncü bir steril nötrino türünün varlığıyla açıklanmaya çalışılmıştır (3+1 modeli). Ancak, diğer birçok deney özellikle ν_μ ve ν_e kaybolma kanallarını inceleyenler (IceCube DeepCore, MINOS+, Daya Bay gibi) bu parametre bölgesinde steril nötrino varlığına dair bir kanıt bulamamış ve güçlü sınırlar getirmiştir. Bu nedenle, steril nötrino hipotezi hala tartışmalıdır ve farklı deney sonuçları arasında bir farklılık bulunmaktadır (Abbasi, 2024; Du vd., 2025; JINR News, 2024). Kozmolojik gözlemler de (CMB, BBN, LSS) steril nötrinoların özelliklerine sınırlar koymaktadır (Du vd., 2025). keV mertebesindeki steril nötrinolar ise sıcak karanlık madde adayı olarak kabul edilebilmektedir (Abazajian vd., 2012).

5.3. CP İhlali ve Leptogenez Senaryoları

Evrenimizdeki gözlenen madde-antimadde asimetrisi (baryon asimetrisi), parçacık fiziği ve kozmolojinin en büyük gizemlerinden biridir. Sakharov koşulları (baryon sayısı ihlali, C ve CP simetrilerinin ihlali, termal dengeden sapma) bu asimetrinin dinamik olarak nasıl oluşabileceğini açıklamaktadır (Sakharov, 1991). Leptogenez teorisi, evrenin erken dönemlerinde (genellikle seesaw mekanizmasındaki ağır Majorana nötrinolarının CP ihlal eden bozunmaları yoluyla) bir lepton asimetrisinin üretildiğini ve bu lepton asimetrisinin daha sonra SM'deki sphaleron süreçleriyle bir baryon asimetrisine dönüştüğünü öne sürer (Lin, 2024; Ginnett vd., 2025).

Leptogenez için gerekli olan CP ihlali, ağır Majorana nötrinolarının Yukawa eşleşmelerindeki karmaşık fazlardan veya PMNS matrisindeki CP ihlal eden faz (lar)dan kaynaklanabilmektedir (Ginnett vd., 2025). Düşük enerjili nötrino salınımlarında gözlemlenebilen Dirac CP fazı, leptogenez için gerekli olan yüksek enerjili CP ihlaliyle doğrudan ilişkili olmasa da lepton türünde CP ihlalinin varlığına dair bir kanıt sunar ve leptogenez senaryolarını desteklemektedir (Blanchet & Di Bari, 2006). T2K ve NOvA gibi mevcut deneyler CP fazının değeri hakkında ipuçları vermektedir ve CP fazının CP korunumlu değerlerden (0 veya π) farklı olma olasılığı giderek artmaktadır (Ajmi, 2024; Abe vd.,2021). Gelecekte yapılması planlanan deneyler olan DUNE ve Hyper-Kamiokande, CP fazını yüksek hassasiyetle ölçerek leptonik CP ihlalinin varlığını kesin olarak belirlemeyi ve leptogenez modelleri için önemli kısıtlamalar getirmeyi hedeflemektedir (Jamieson, 2022; Song vd., 2021).

5.4. Gelecek Deneyler: DUNE, JUNO, Hyper-Kamiokande, IceCube-Gen2

Nötrino fiziğindeki açık soruları yanıtlamak için birçok yeni nesil deney planlanmakta veya inşa edilmektedir. Bunlar;

DUNE (Deep Underground Neutrino Experiment): Amerika Birleşik Devletleri'nde yürütülen büyük ölçekli bir fizik projesidir. Deney kapsamında, Fermilab'da üretilen yoğun bir nötrino demeti, 1300 kilometrelik bir mesafeyi yerkabuğunun altından kat ederek Güney Dakota'daki Sanford Yeraltı Araştırma Tesisi'ne gönderilir. Burada, gelen nötrinoları tespit etmek için oldukça büyük ve hassas Sıvı Argon Zaman Projeksiyon Odaları (LArTPC) kullanılır (https://www.dunescience.org/). DUNE'un temel amaçları; nötrinoların kütle sıralamasını kesin olarak belirlemek, madde ile antimadde arasındaki davranış farkını açıklayabilecek CP ihlalini araştırmak, protonun temel kararlılığını test etmek üzere olası bir bozunma arayışına girmek ve patlayan yıldızlardan (süpernova) yayılan nötrinoları saptamaktır (Jamieson, 2022; Song vd., 2021).

JUNO (Jiangmen Underground Neutrino Observatory): Çin'de inşa edilen JUNO, nükleer reaktörlerden gelen antinötrinoları incelemek için 20 kilotonluk bir sıvı sintilatör dedektörü kullanılması planlanmaktadır. (https://juno.ihep.cas.cn/). Temel amacı, ν_e^- enerji spektrumundaki hassas ölçümlerle nötrino kütle hiyerarşisini belirlemek ve salınım parametrelerini($\sin^2(\theta_{12}), \Delta m^2_{21}, |\Delta m^2_{ee}|$) kesin olarak ölçmektir (Jamieson, 2022; Song vd., 2021).

Hyper-Kamiokande (Hyper-K): Japonya'da Super-Kamiokande'nin devamı olarak inşa edilen Hyper-K, çok daha büyük bir su Çerenkov dedektörü (260 kiloton toplam hacim, ~190 kiloton iç hacim) olacaktır (https://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/hk/). J-PARC'tan gelen yükseltilmiş bir nötrino demetiyle birlikte çalışarak CP fazını ölçecek, proton bozunması aramalarını önemli ölçüde geliştirecek ve astrofiziksel

nötrinolar (güneş, atmosferik, süpernova) için hassasiyeti artırmayı planlanmaktadır. (Jamieson, 2022; Song vd., 2021). Daha yüksek verimli foton sensörleri ve geliştirilmiş elektronikler kullanılacaktır.

IceCube-Gen2: Güney Kutbu'nda yer alan mevcut IceCube gözlemevinin bir uzantısı olarak planlanan IceCube-Gen2, daha büyük bir optik sistem, bir yüzey dizisi ve bir radyo sistemi içerecektir (https://icecube-gen2.wisc.edu/). Bu geliştirmeler, TeV'den EeV enerjilerine kadar yüksek enerjili nötrino gökyüzünü çözümlemeyi, kozmik ışın ve gama ışını ölçümlerini iyileştirmeyi ve BSM fizik ile karanlık madde aramalarını mümkün kılacaktır (Jamieson, 2022; Song vd., 2021).

6. Sonuç

Nötrino fiziği, Pauli'nin beta bozunumundaki enerji korunumunu açıklamak üzere öne sürdüğü teorik bir hipotezden, yaklaşık bir asırlık süreçte temel parçacık fiziği ve kozmolojinin önemli araştırma alanlarından biri haline gelmiştir. Bu derlemede ele alındığı gibi, nötrino salınımlarının deneysel olarak kanıtlanması, "Güneş Nötrino Problemi" gibi uzun süredir devam eden sorunları çözmekle kalmamış, aynı zamanda SM kütlesiz nötrino varsayımını geçersiz kılarak SM ötesi fizik arayışları için somut bir zemin oluşturmuştur. Bu keşif, parçacık fiziğindeki olguları önemli ölçüde etkilemiş ve nötrinoları, yeni teorileri test etmek için önemli bir araç haline getirmiştir.

SN1987A'dan gelen nötrino verileri ve IceCube tarafından astrofiziksel kaynaklarla ilişkilendirilen yüksek enerjili nötrinoların tespiti, nötrinoların evrenin yüksek enerjili olaylarını incelemek için önemli haberciler olduğunu göstermiş ve multi-messenger astronomi alanını ileriye taşımıştır. Ancak, kaydedilen bu önemli ilerlemelere rağmen, nötrino fiziği alanı henüz yanıtlanmamış temel sorular barındırmaktadır. Nötrinoların mutlak kütle ölçeği ve kütle durumlarının sıralaması (hiyerarşi), bu parçacıkların kendi karşıt parçacıkları olup olmadığı (Dirac veya Majorana doğası), lepton sektöründe CP simetrisinin ihlal edilip edilmediği ve bunun evrenin madde-antimadde asimetrisine olası katkısı (leptogenez) ile deneysel anomalilerin işaret ettiği olası steril nötrinoların varlığı gibi konular, günümüz fiziğinin öncelikli araştırma hedefleri arasındadır. Bu açık sorular, hem Seesaw mekanizması gibi teorik modellerin geliştirilmesini önemli kılmakta hem de büyük ölçekli deneysel projelere yön vermektedir. DUNE, Hyper-Kamiokande, JUNO, IceCube-Gen2 ve nötrinosuz çift beta bozunumu deneyleri gibi gelecek projeler, bu temel gizemleri çözmek için yüksek bir hassasiyetle tasarlanmaktadır. Bu deneylerden elde edilecek verilerin, sadece nötrinoların doğasına ilişkin bilgimizi derinleştirmekle kalmayıp, aynı zamanda evrenin temel yapıları, simetrileri ve kozmolojik evrimine dair mevcut paradigmaları test edecek veya geliştirecek bilgiler sunma potansiyeli bulunmaktadır. Sonuç olarak, nötrinolar evrenin anlaşılmasına yönelik önemli katkılar sunmaya devam etmekte ve gelecek yıllarda da önemli keşif potansiyeli barındıran bir alan olmayı sürdürmektedir.

Çıkar Çatışması Beyanı/ Conflict of Interest
Yazar, çıkar çatışması veya kişisel ilişki bulunmadığını beyan etmektedir./ The author has no conflicts of interest to declare.

Finansal Destek/ Funding
Yazar, bu çalışma için finansal destek almadığını beyan etmiştir./ The author declared that this study has received no financial support.

Hakem Değerlendirmesi/Peer-review
Dış bağımsız/Externally peer-reviewed.

Yazar Katkıları/Author Contributions: Concept/Tasarım-YS.; Dizayn/Design-YS; Denetleme/Supervision-YS; Kaynaklar/Resources-YS; Veri Toplanması ve/veya İşlemesi/Data Collection and/or Processing-YS; Analiz ve/ veya Yorum/Analysis and/or Interpretation-YS; Literatür Taraması/Literature Search-YS; Yazıyı Yazan/ Writing Manuscript-YS; Eleştirel İnceleme/Critical Review-YS.

Kaynakça

Aartsen, M. G., et al. (IceCube Collaboration). (2018a). Multimessenger observations of a flaring blazar coincident with high-energy neutrino IceCube-170922A. *Science, 361*(6398), eaat1378.

Aartsen, M. G., et al. (IceCube Collaboration). (2018b). Neutrino emission from the direction of the blazar TXS 0506+056 prior to the IceCube-170922A alert. *Science, 361*(6398), 147-151.

Abazajian, K. N., Acero, M. A., Agarwalla, S. K., Aguilar-Arevalo, A. A., Albright, C. H., Antusch, S., ... & Schwetz, T. (2012). Light sterile neutrinos: a white paper. *arXiv preprint arXiv:1204.5379*.

Abbasi, R., Ackermann, M., Adams, J., Agarwalla, S. K., Aguilar, J. A., Ahlers, M., ... & Hidvegi, A. (2024). Search for a light sterile neutrino with 7.5 years of IceCube DeepCore data. *Physical Review D, 110*(7), 072007.

Abbott, B. P., Abbott, R., Abbott, T. D., Acernese, F., Ackley, K., Adams, C., ... & Bersanetti, D. (2017a). Multi-messenger Observations of a Binary Neutron Star Merger** Any correspondence should be addressed to lvc. publications@ ligo. org. *The Astrophysical Journal Letters*, *848*(2), l12.

Abbott, B. P., Abbott, R., Abbott, T. D., Acernese, F., Ackley, K., Adams, C., ... & Cahillane, C. (2017b). GW170817: observation of gravitational waves from a binary neutron star inspiral. *Physical review letters, 119*(16), 161101.

Abe, K., Akhlaq, N., Akutsu, R., Ali, A., Alt, C., Andreopoulos, C., ... & Malek, M. (2021). Improved constraints on neutrino mixing from the T2K experiment with 3.13× 10 21 protons on target. *Physical Review D, 103*(11), 112008.

Adam, T., Agafonova, N., Aleksandrov, A., Altinok, O., Alvarez Sanchez, P., Anokhina, A., ... & Sahnoun, Z. (2012). Measurement of the neutrino velocity with the OPERA detector in the CNGS beam. *Journal of High Energy Physics, 2012*(10), 1-37.

Adame, A. G., Aguilar, J., Ahlen, S., Alam, S., Alexander, D. M., Alvarez, M., ... & Rich, J. (2025). DESI 2024 VI: cosmological constraints from the measurements of baryon acoustic oscillations. *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics, 2025*(02), 021.

Ahmad, Q. R., Allen, R. C., Andersen, T. C., Anglin, J. D., Barton, J. C., Beier, E. W., ... & Smith, A. R. (2002). Direct evidence for neutrino flavor transformation from neutral-current interactions in the Sudbury Neutrino Observatory. *Physical review letters, 89*(1), 011301.

Ahmad, Q. R., Allen, R. C., Andersen, T. C., Anglin, J. D., Barton, J. C., Beier, E. W., ... & Smith, A. R. (2002). Measurement of day and night neutrino energy spectra at SNO and constraints on neutrino mixing parameters. *Physical Review Letters, 89*(1), 011302.

Ajmi, A. (2024, August). Latest Results from the T2K and NOvA Experiments. In *16th International Conference on Heavy Quarks and Leptons* (p. 24).

Albert, A., et al. (ANTARES Collaboration). (2017). First all-flavor neutrino point-like source search with the ANTARES neutrino telescope. *Physical Review D, 96*(8), 082001.

Arnett, W. D., Bahcall, J. N., Kirshner, R. P., & Woosley, S. E. (1989). Supernova 1987A. *IN: Annual review of astronomy and astrophysics. Volume 27 (A90-29983 12-90). Palo Alto, CA, Annual Reviews, Inc., 1989, p. 629-700. Research supported by the University of Arizona.*, *27*, 629-700.

Bahcall, J. N., & Davis, R., Jr. (1976). Solar neutrinos: A scientific puzzle. *Science, 191*(4224), 264-267.

Bahcall, J. N., & Davis Jr, R. (1982). An account of the development of the solar neutrino problem. *Essays in Nuclear Astrophysics*, 243-285.

Barinov, V. V., Cleveland, B. T., Danshin, S. N., Ejiri, H., Elliott, S. R., Frekers, D., ... & Zvir, A. I. (2022). Results from the Baksan experiment on sterile transitions (BEST). *Physical review letters, 128*(23), 232501.

Bellerive, A., Klein, J. R., McDonald, A. B., Noble, A. J., Poon, A. W. P., & SNO Collaboration. (2016). The sudbury neutrino observatory. *Nuclear Physics B, 908*, 30-51.

Blanchet, S., & Di Bari, P. (2006). Leptogenesis beyond the limit of hierarchical heavy neutrino masses. *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics, 2006*(06), 023.

Brandt, T. J., Burke-Spolaor, S., Burns, E., Conklin, J. W., Fryer, C., Gezari, L. S., ... & Tomsick, J. (2020). *Physics of the cosmos program analysis group (physpag) study analysis group (sag) on multimessenger astrophysics (mma) final report*.

Brugnera, R., & LEGEND collaboration. (2025). Neutrinoless double-beta decay search with the LEGEND experiment. *Journal of Instrumentation, 20*(03), C03050.

Cardani, L. (2019). Neutrinoless double beta decay overview. *SciPost Physics Proceedings, (1)*, 024.

Christenson, J. H., Cronin, J. W., Fitch, V. L., & Turlay, R. (1964). Evidence for the 2 π Decay of the K 2 0 Meson. *Physical Review Letters, 13*(4), 138.

Cowan Jr, C. L., Reines, F., Harrison, F. B., Kruse, H. W., & McGuire, A. D. (1956). Detection of the free neutrino: a confirmation. *Science, 124*(3212), 103-104.

Danby, G., Gaillard, J. M., Goulianos, K., Lederman, L. M., Mistry, N., Schwartz, M., & Steinberger, J. (1962). Observation of high-energy neutrino reactions and the existence of two kinds of neutrinos. *Physical Review Letters, 9*(1), 36.

Dolinski, M. J., Poon, A. W., & Rodejohann, W. (2019). Neutrinoless double-beta decay: Status and prospects. *Annual Review of Nuclear and Particle Science, 69*(1), 219-251.

Donoghue, J. F., Golowich, E., & Holstein, B. R. (2014). *Dynamics of the standard model*. Cambridge university press.

Du, G. H., Li, T. N., Wu, P. J., Feng, L., Zhou, S. H., Zhang, J. F., & Zhang, X. (2025). Cosmological search for sterile neutrinos after DESI 2024. *arXiv preprint arXiv:2501.10785*.

DUNE Collaboration. (n.d.). *Deep Underground Neutrino Experiment (DUNE)*. Retrieved June 12, 2025, from https://www.dunescience.org/

Eguchi, K., Enomoto, S., Furuno, K., Goldman, J., Hanada, H., Ikeda, H., ... & (KamLAND Collaboration). (2003). First results from KamLAND: evidence for reactor antineutrino disappearance. *Physical review letters, 90*(2), 021802.

Esteban, I., González-García, M. C., Maltoni, M., Schwetz, T., & Zhou, A. (2020). The fate of hints: updated global analysis of three-flavor neutrino oscillations. *Journal of High Energy Physics, 2020*(9), 1-22.

Feldman, G. J. (1989). *Measurement of the Z boson resonance parameters* (No. SLAC-PUB-5143; CONF-8908142-5). Stanford Linear Accelerator Center, Menlo Park, CA (USA).

Fermi, E. (1934). Versuch einer Theorie der β-Strahlen. I. *Zeitschrift für Physik, 88*(3), 161-177.

Fiorentini, G., Lissia, M., & Mantovani, F. (2007). Geo-neutrinos and earth's interior. *Physics Reports, 453*(5-6), 117-172.

Fukuda, Y., Hayakawa, T., Ichihara, E., Inoue, K., Ishihara, K., Ishino, H., ... & Super-Kamiokande Collaboration. (1998). Evidence for oscillation of atmospheric neutrinos. *Physical review letters, 81*(8), 1562.

Fukugita, M., & Yanagida, T. (1986). Barygenesis without grand unification. *Physics Letters B, 174*(1), 45-47.

Ge, S. F., & Tan, L. (2025). Identifying neutrino mass ordering with cosmic gravitational focusing. *Physical Review D, 111*(8), 083539.

Ginnett, I., & Tait, T. M. (2025). Leptogenesis During an Era of Early SU (2) Confinement. *arXiv preprint arXiv:2503.09723*.

Giunti, C., & Studenikin, A. (2015). Neutrino electromagnetic interactions: a window to new physics. *Reviews of Modern Physics, 87*(2), 531-591.

Griffiths, D. (2020). *Introduction to elementary particles*. John Wiley & Sons.

Halzen, F., & Kheirandish, A. (2024). IceCube and high-energy cosmic neutrinos. In *The Encyclopedia of Cosmology: Set 2: Frontiers in Cosmology Volume 2 Neutrino Physics and Astrophysics* (pp. 107-235).

Hernandez-Molinero, B., Jimenez, R., & Garay, C. P. (2025). Effects of the Cosmic Neutrino Background Capture on Astrophysical Objects. *arXiv preprint arXiv:2503.07788*.

IceCube Collaboration*. (2013). Evidence for high-energy extraterrestrial neutrinos at the IceCube detector. *Science, 342*(6161), 1242856.

Jamieson, B. (2022). Future neutrino experiments. *arXiv preprint arXiv:2207.05044*.

Jarlskog, C. (2018, September). Birth of the neutrino, from Pauli to the Reines-Cowan experiment. In *History of the Neutrino 2018 conference proceedings*.

JINR News. (2024, June). Neutrino-2024: Review of important results. *JINR*.

KATRIN Collaboration†, Aker, M., Batzler, D., Beglarian, A., Behrens, J., Beisenkötter, J., ... & Zeller, G. (2025). Direct neutrino-mass measurement based on 259 days of KATRIN data. *Science, 388*(6743), 180-185.

Kayser, B. (2003). Neutrino mass, mixing, and flavor change. In *Neutrino Mass* (pp. 1-24). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

King, S. F. (2025). Right-handed neutrinos: seesaw models and signatures. *arXiv preprint arXiv:2502.0*.

Kobayashi, M., & Maskawa, T. (1973). CP-violation in the renormalizable theory of weak interaction. *Progress of theoretical physics, 49*(2), 652-657.

Kodama, K. T., Ushida, N., Andreopoulos, C., Saoulidou, N., Tzanakos, G., Yager, P., ... & DONut Collaboration. (2001). Observation of tau neutrino interactions. *Physics Letters B, 504*(3), 218-224.

Kuzmin, V. A., Rubakov, V. A., & Shaposhnikov, M. E. (1985). On anomalous electroweak baryon-number non-conservation in the early universe. *Physics Letters B, 155*(1-2), 36-42.

Landau, L. (1957). On the conservation laws for weak interactions.

Lin, C. (2024). Analysis on Neutrino Masses and Leptogenesis in the CP-Violating Standard Model. *arXiv preprint arXiv:2408.10621*.

Ma, E. (2006). Verifiable radiative seesaw mechanism of neutrino mass and dark matter. *Physical Review D—Particles, Fields, Gravitation, and Cosmology, 73*(7), 077301.

Maki, Z., Nakagawa, M., & Sakata, S. (1962). Remarks on the unified model of elementary particles. *Progress of theoretical physics, 28*(5), 870-880.

Mandal, S., Miranda, O. G., Garcia, G. S., Valle, J. W., & Xu, X. J. (2022). Toward deconstructing the simplest seesaw mechanism. *Physical Review D, 105*(9), 095020.

Mikheev, S. P., & Smirnov, A. Y. (1985). Resonance enhancement of oscillations in matter and solar neutrino spectroscopy. *Soviet Journal of Nuclear Physics, 42*(6).

Mohapatra, R. N., & Senjanović, G. (1980). Neutrino mass and spontaneous parity nonconservation. *Physical Review Letters, 44*(14), 912.

Mohapatra, R. N., & Pal, P. B. (2004). *Massive neutrinos in physics and astrophysics* (Vol. 72). World scientific.

Mohapatra, R. N., & Smirnov, A. Y. (2006). Neutrino mass and new physics. *Annual Review of Nuclear and Particle Science, 56*(1), 569-628.

Murase, K., Ahlers, M., & Lacki, B. C. (2013). Testing the hadronuclear origin of PeV neutrinos observed with IceCube. *Physical Review D—Particles, Fields, Gravitation, and Cosmology, 88*(12), 121301.

Murase, K., Kimura, S. S., Zhang, B. T., Oikonomou, F., & Petropoulou, M. (2020). High-energy neutrino and gamma-ray emission from tidal disruption events. *The Astrophysical Journal, 902*(2), 108.

Naredo-Tuero, D., Escudero, M., Fernández-Martínez, E., Marcano, X., & Poulin, V. (2024). Critical look at the cosmological neutrino mass bound. *Physical Review D, 110*(12), 123537.

Navas, S., Amsler, C., Gutsche, T., Hanhart, C., Hernández-Rey, J. J., Lourenço, C., ... & Piepke, A. (2024). Review of particle physics. *Physical Review D, 110*(3), 030001.

Parke, S. J., & Funchal, R. Z. (2025). Mass ordering sum rule for the neutrino disappearance channels in T2K, NOvA, and JUNO. *Physical Review D, 111*(1), 013008.

Pauli, W. (1930). Pauli's Letter-Dear Radioactive Ladies and Gentlemen. *Tübingen, December, 4*.

Pelaggi, G. M., Sannino, F., Strumia, A., & Vigiani, E. (2017). Naturalness of asymptotically safe Higgs. *Frontiers in Physics, 5*, 49.

Perl, M. L., Abrams, G. S., Boyarski, A. M., Breidenbach, M., Briggs, D. D., Bulos, F., ... & Wiss, J. E. (1975). Evidence for anomalous lepton production in e+− e− annihilation. *Physical Review Letters, 35*(22), 1489.

Peskin, M. E., & Schroeder, D. V. (1995). *An introduction to quantum field theory*. Addison-Wesley.

Pontecorvo, B. (1958). *Zh. É ksp. Teor. Fiz. 33, 549 1957 Sov. Phys. JETP, 6*, 429.

Qian, X., & Vogel, P. (2015). Neutrino mass hierarchy. *Progress in Particle and Nuclear Physics, 83*, 1-30.

Reines, F. (1996). The neutrino: From poltergeist to particle. *Reviews of Modern Physics, 68*(2), 317.

Rozhkov, V., & Troitsky, S. (2025). Multimessenger astronomy. *Physics of Particles and Nuclei, 56*(1), 104-111.

Sakharov, A. D. (1991). Violation of CPin variance, Casymmetry, and baryon asymmetry of the universe. *Usp. Fiz. Nauk, 161*, 61-64.

Scott, D. (2024). The cosmic neutrino background. *arXiv preprint arXiv:2402.16243*.

Smirnov, A. Y. (2013). Neutrino mass hierarchy and matter effects. *arXiv preprint arXiv:1312.7309*.

Song, N., Li, S. W., Argüelles, C. A., Bustamante, M., & Vincent, A. C. (2021). The future of high-energy astrophysical neutrino flavor measurements. *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics, 2021*(04), 054.

Tanabashi, M., Hagiwara, K., Hikasa, K., Nakamura, K., Sumino, Y., Takahashi, F., ... & Quadt, A. (2018). Review of Particle Physics: particle data groups. *Physical Review D, 98*(3), 1-1898.

The KATRIN Collaboration. Direct neutrino-mass measurement with sub-electronvolt sensitivity. *Nat. Phys.* **18**, 160–166 (2022). https://doi.org/10.1038/s41567-021-01463-1

Wolfenstein, L. (2018). Neutrino oscillations in matter. In *Solar neutrinos* (pp. 294-299). CRC Press.

Wu, C. S., Ambler, E., Hayward, R. W., Hoppes, D. D., & Hudson, R. P. (1957). Experimental test of parity conservation in beta decay. *Physical review, 105*(4), 1413.