

Güneş Nötrinolarının Salınımında Çeşni Evrenselliğini Bozan Nötrino Etkileşmelerinin İncelenmesi

İnanç ŞAHİN¹, Banu ŞAHİN¹, Deniz YILMAZ²

¹ Ankara Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Bölümü, 06100 Tandoğan-Ankara

² Ankara Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Fizik Mühendisliği Bölümü,
06100 Tandoğan Ankara

¹⁻² Department of Physics, University of Wisconsin, Madison, WI 53706, USA

Received: 17.10.2008, Accepted: 03.11.2008

Özet: Güneşteki nükleer reaksiyonlar tarafından meydana gelen elektron-nötrinolar güneşteki yoğun madde ile nötral ve yüklü akım etkileşimleri gerçekleştirmektedir. Nötrinoların bu madde etkileşimleri elektron nötrinoların başka bir çeşnideki nötrinoya geçmesine neden olur. Nötrino-Z bozon ve nötrino-W bozon etkileşimlerindeki evrenselliği bozabilecek yeni fizik katkıları güneşten gelen elektron-nötrinoların salınımları üzerinde etkilidir. Bu etkinin büyüklüğü dört güneş nötrino deneyinin (Homestake, Gallium, Super-Kamiokande ve SNO) kombine analizi ile araştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler : Nötrino Salınımı, Çeşni Evrenselliği

Investigation of the flavor universality violating neutrino interactions in neutrino oscillations for the sun neutrinos

Abstract: Electron-neutrinos emitted by the nuclear reactions in the sun interact with the intense matter via neutral and charged current reactions. These matter interactions can cause a conversion of electron neutrinos to another flavor of neutrinos. New physics contributions of universality violating neutrino-Z boson and neutrino-W boson interactions influence neutrino oscillations. This influence has been

investigated via combine analysis of the four solar neutrino experiments (Homestake, Gallium, Super-Kamiokande and SNO).

Keywords: Neutrino Oscillations, Flavor Universality

1. Giriş

Nötrinoların sıfırdan farklı kütlelere sahip olduklarının ilk deneysel kanıtı, 1998 yılının haziran ayında gerçekleştirilen Süper-Kamiokande deneyinde elde edilmiştir [1]. Nötrinoların sıfırdan farklı kütlelere sahip olması kütle ve çeşni öz durumlarının karışmasına ve sonuçta nötrino salınımlarına yol açar [2]. Nötrino kütleleri ve karışımı problemi günümüz yüksek enerji fiziğinin en ilgi çeken problemlerinden biri olarak karşımıza çıkmaktadır. Nötrino kütlelerinin belirlenmesi evrendeki kayıp madde probleminin çözülmesi açısından da büyük önem taşımaktadır.

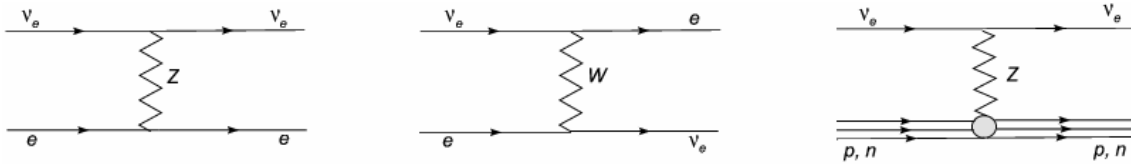
Güneş yakınıımızdaki en büyük nötrino kaynağıdır. Güneşteki ana yanma reaksiyonu pp zinciridir. CNO (Karbon-Nitrojen-Oksijen) döngüsü ise güneş enerjisinin yaklaşık % 2' sinden sorumludur [3]. Bu reaksiyonlar sonucunda bol miktarda nötrino üretilir. Güneş'te üretilen nötrinoların sayısı yaklaşık olarak saniyede 10^{38} kadardır. Bu nötrinolar, fotonların aksine, Güneş' in çekirdek bölgesinden geçebilir ve üretim noktaları ile ilgili ilk bilgiyi taşıyarak Güneş'ten kaçabilirler. Bu nedenle, Güneş' ten gelen nötrinoların ölçülmesi hem Güneş fiziğinin anlaşılmasında hem de nötrino salınımlarının ölçülmesi yoluyla parçacık fiziğinin temel kuramı olan Standart Model' in doğruluğunun test edilmesi ve Standart Model ötesindeki yeni fiziğin araştırılması açısından önemlidir.

Dünya üzerindeki güneşsel nötrino ölçümlerinin, standart Güneş model tahmininin yaklaşık üçte biri kadar olduğu deneysel olarak hesaplandıktan sonra, nötrino salınımları deney ve teori arasındaki bu açığı açıklayabilecek bir mekanizma olarak sunuldu. Nötrino salınımları Güneş elektron nötrinosunu (n_e) başka bir nötrino çeşnisine (n_m, n_t) dönüştürür. Kayıp Güneş nötrinoları probleminde vakum nötrino salınımlarının yanı sıra Mikheyev-Smirnov-Wolfenstein (MSW) etkisi bir diğer çözüm olarak öne sürülmüştür [4]. Bu çözüme göre, nötrinoların madde içerisindeki koherent ileri saçılması bir çeşnideki nötrinoların başka bir çeşnideki nötrinolara dönüşmesine neden olur. MSW çözümünde dört güneş nötrino deneyi (Homestake, Gallium, Super-Kamiokande ve SNO) [5-12] ile bir reaktör nötrino deneyinin (KamLAND) [13] global

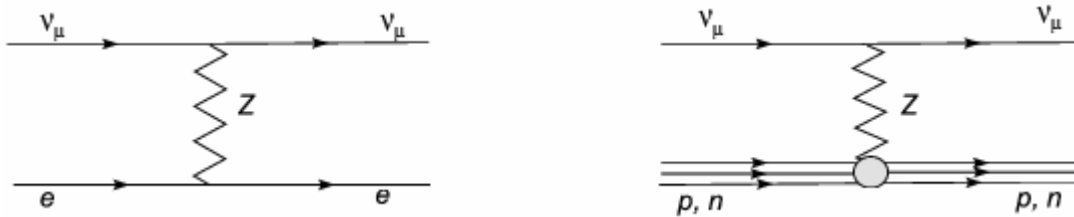
analizi, karışım açısı(θ)ve kütle kare farkı (Δm^2) parametre uzayındaki üç çözüm bölgesinden (büyük karışım açısı LMA, küçük karışım açısı SMA ve düşük Δm^2 LOW) büyük karışım açısı bölgesini (LMA) en olası çözüm bölgesi olarak göstermiştir [14-16].

Elektron nötrinoları Güneş'teki yoğun madde ortamında ilerlerken, proton ve nötronlarla nötral akım ve elektronlarla hem nötral hem de yüklü akım etkileşimleri gerçekleştirirler (Şekil 1). Nötral akım etkileşimleri Z bozon değişimiyle ve yüklü akım etkileşimleri W bozon değişimiyle gerçekleşir. Müon ve tau nötrinoları (ν_μ, ν_τ) ise yalnızca nötral akım etkileşimleri gerçekleştirirler (Şekil 2). Bu sebeple elektron nötrinoların hissettiği potansiyel müon ve tau nötrinoların hissettiği potansiyelden farklıdır.

Standart Model ötesinden gelebilecek katkılar, nötrino-Z bozon ve nötrino-W bozon etkileşmelerinin değişmesine neden olurlar. Böylece nötrino salınımlarında MSW etkisine ek katkılar getirirler. Bu katkıların güneş nötrino deneylerinin kombine analizine etkilerini araştırmak bu çalışmanın temel amacını oluşturmaktadır. Bu çalışmada ikinci bölümde önce Nötrino-Z ve nötrino-W etkileşmelerinde efektif lagranjiyen yaklaşımı, sonra da madde etkili nötrino salınımlarına yeni fizik katkıları incelenmiş ve sonuçlar Şekil 4 ve Şekil 5' te gösterilmiştir.



Şekil 1. Elektron nötrinoların nötral ve yüklü akım etkileşimleri.



Şekil 2. Müon nötrinoların nötral akım etkileşimleri.

2. Yöntem ve bulgular

2.1. Nötrino-Z ve nötrino-W etkileşmelerinde efektif lagranjiyen yaklaşımı

Standart Model ötesindeki yeni fizik modelden bağımsız olarak efektif lagranjiyen yöntemi ile incelenebilir. Bu yöntemdeki temel prensip, Standart Model'in geçerli olduğu enerji skalasının ötesinde Standart Model'i bir alt simetri olarak içeren daha temel bir teorinin var olduğu fikrine dayanmaktadır. Buna göre, Standart Model bu temel teorinin düşük enerji limiti olarak ortaya çıkan efektif bir teoridir. Standart Model' in mutlak doğru olmadığını ve belirli bir enerji skalasından sonra geçerliliğini yitireceğini kabul ettiğimize göre, daha genel efektif lagranjiyenler oluşturmakta hiçbir sakınca yoktur. Standart model lagranjiyeninde bulunmayan bu yeni terimlerin varlığına ilişkin elde edilebilecek deneysel sinyaller, hem Standart Model' in efektif bir teori olduğunun deneysel kanıtı olacak hem de Standart Model ötesindeki yeni fiziğin kurulmasında yol gösterici nitelikte olacaktır. Günümüzdeki enerji skalasında Standart Model iyi çalışan bir model olduğuna göre, bu genel efektif lagranjiyene başat katkı Standart Model lagranjiyeninden gelmeli ve eklenen Standart Model ötesi yeni terimler küçük katkılar getirmelidir. Efektif lagranjiyen yönteminin geçerli olabilmesi için, çalışılan enerji skalasının yeni fiziğin başladığı enerji skalasının altında olması gerekir.

Nötrino-Z ve nötrino-W etkileşmelerinin efektif lagranjiyen ile çalışılmasında Buchmüller ve Wyler tarafından gerçekleştirilen efektif lagranjiyen analizi [17] kullanılacaktır. $U_Y(1) \times SU_L(2)$ ayar simetrisine sahip, nötrino-Z ve nötrino-W etkileşmelerinde çeşni evrenselliğini bozan mümkün katkılar aşağıdaki 6 boyutlu efektif operatörler ile tasvir edilir [17]:

$$O_k = i(f^\dagger D_m f)(\bar{\mathbf{l}}_k g^m \mathbf{l}_k) \quad (1)$$

$$O'_k = i(f^\dagger D_m \hat{t} f)(\bar{\mathbf{l}}_k g^m \hat{t} \mathbf{l}_k) \quad (2)$$

Burada $\mathbf{l}_k$, $k=e,m,t$ çeşnisi için sol elli lepton ikilisi; f skaler ikili ve D_m kovaryant türevidir. Kovaryant türev şu şekilde tanımlıdır:

$$D_m = \partial_m + i \frac{g}{2} \hat{t} \cdot \mathbf{W}_m + i \frac{g'}{2} Y B_m \quad (3)$$

Bu tanımda g ve g' $SU_L(2)$ ve $U_Y(1)$ ayar bağlaşımları ve Y hiperyüktür. $W_m^{(i)}$ ve B_m alanları, $SU_L(2)$ 'nin üçlü ve $U_Y(1)$ 'nin tekli temsillerinde yer alırlar.

Nötrino-Z ve nötrino-W etkileşmelerinde çeşni evrenselliğini bozan, $U_Y(1) \times SU_L(2)$ simetrisine sahip ve 6 boyutlu operatörlere kadar katkılar içeren en genel efektif lagranjiyen şu şekilde verilir:

$$L_{eff} = L_{SM} + \sum_{k=e,m,t} \frac{1}{\Lambda^2} (a_k O_k + a'_k O'_k) \quad (4)$$

Burada L_{SM} Standart Model lagranjiyeninin ilgili kısmı, Λ yeni fiziğin enerji skalası ve a_k, a'_k anormal bağlaşımlardır. Efektif lagranjiyen Standart Model lagranjiyeni ile birlikte kendiliğinden simetri kırılmasına uğrar. Böylece temel fermiyonlar ve ayar bozonları kütle kazanır. Kendiliğinden simetri kırılması sonrasında (4) efektif lagranjiyeni aşağıdaki forma indirgenir:

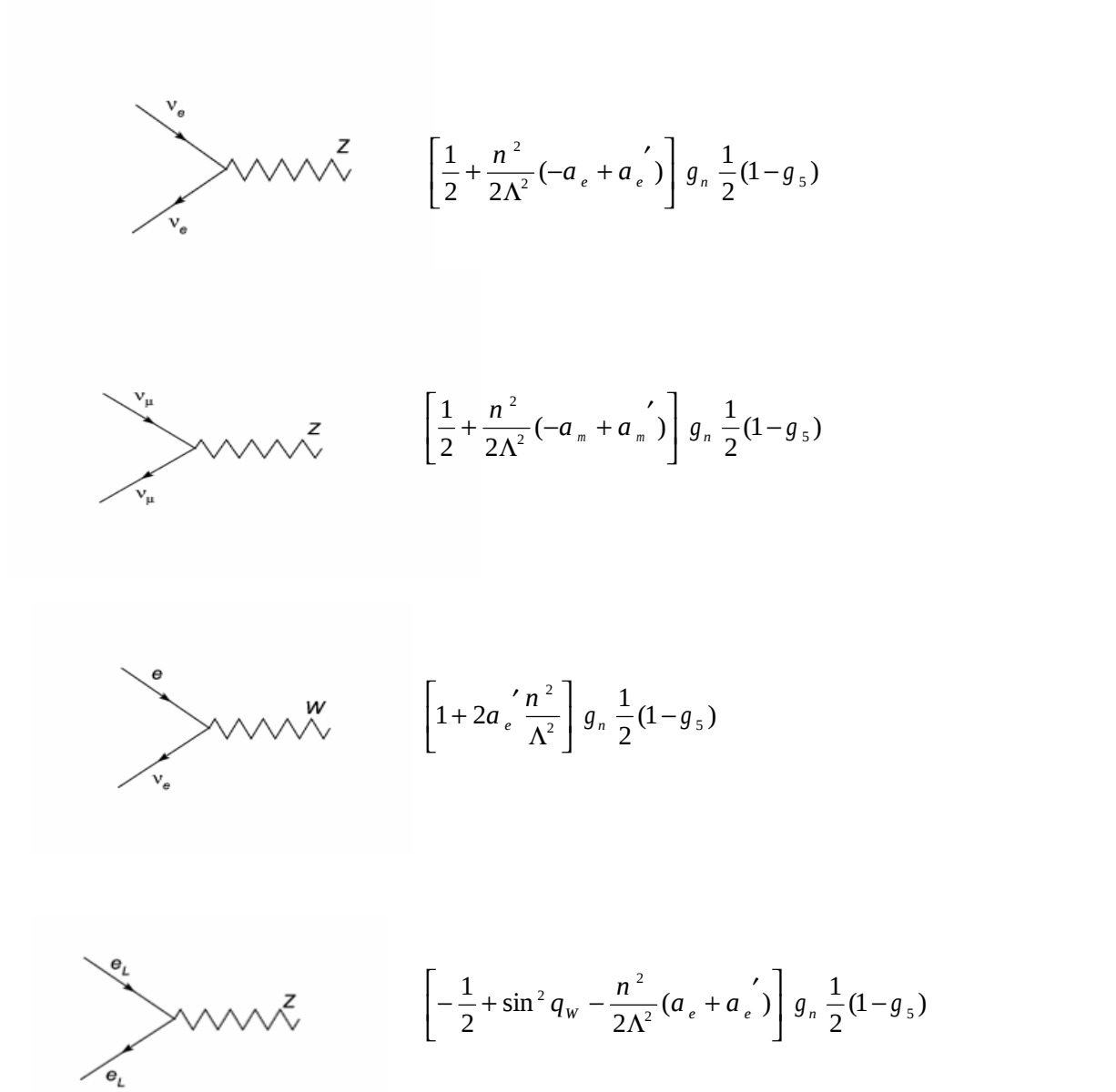
$$L'_{eff} = \frac{g}{\sqrt{2}} (J_m^C W^{+m} + J_m^{C\dagger} W^{-m}) + \frac{g}{\cos q_w} J_m^N Z^m \quad (5)$$

Bu ifadedeki yüklü ve nötral akım terimleri şu şekilde verilir:

$$J_m^C = \left[1 + 2a'_k \frac{n^2}{\Lambda^2} \right] \bar{n}_{kL} g_m \mathbf{1}_{kL} \quad (6)$$

$$J_m^N = \left[\frac{1}{2} + \frac{n^2}{2\Lambda^2} (-a_k + a'_k) \right] \bar{n}_{kL} g_m n_{kL} + \left[-\frac{1}{2} + \sin^2 q_w - \frac{n^2}{2\Lambda^2} (a_k + a'_k) \right] \bar{\mathbf{1}}_{kL} g_m \mathbf{1}_{kL} \quad (7)$$

Burada q_w Weinberg açısı, $n = 246$ GeV skaler alanın vakum beklenen değeridir. (6) ve (7) terimlerinden görüldüğü gibi efektif lagranjiyen Standart Model Znn ve Wen köşelerini modifiye etmektedir. Bu modifikasyon farklı nötrino çeşnileri için farklı anormal bağlaşım sabitleri ($a_k, a'_k; k=e,m,t$) içerdiğinden çeşni evrenselliğini bozmaktadır. (6) ve (7) terimlerinden görülen bir diğer modifikasyon da efektif lagranjiyenin yalnızca Znn ve Wen köşelerini değil aynı zamanda sol-elli yüklü lepton akımını da değiştirmesidir. Öte yandan sağ-elli yüklü lepton akımı değişikliğe uğramaz. İlerideki bölümlerde kullanacağımız efektif köşe faktörleri şekil 3. 'de özetlenmiştir.



Şekil 3. Efektif köşe faktörleri

2.2. Madde etkili nötrino salınımlarına yeni fizik katkıları

Nötrino çeşni özdurumlarının madde içerisindeki evrim denklemi

$$i \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} n_e \\ n_m \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\Delta m^2}{2E} \sin^2 q + V_e & \frac{\Delta m^2}{4E} \sin 2q \\ \frac{\Delta m^2}{4E} \sin 2q & \frac{\Delta m^2}{2E} \cos^2 q + V_m \end{bmatrix} \begin{pmatrix} n_e \\ n_m \end{pmatrix} \quad (8)$$

şeklindedir. İki nötrino çeşnisi göz önüne alındığında (ν_e, ν_μ) , evrim denkleminde vakum kütle matrisinden ve madde etkileşimleri matrisinden katkı gelir. Denklem (8)'deki ifadede q kütle ve çeşni öz durumları arasındaki karışım açısı, Δm^2 kütle kare farkı ve E nötrino enerjisidir. V_e (V_m) elektron-nötrino (müon-nötrino) madde etkileşme potansiyelleridir. Bu potansiyellerin değerleri Standart Model'de

$$V_e = \sqrt{2}G_F \left(N_e - \frac{N_e}{2} - \frac{N_n}{2} - \frac{N_p}{2} \right), \quad V_m = -\frac{1}{\sqrt{2}}G_F (N_e + N_n + N_p) \quad (9)$$

şeklinde verilir. Burada G_F Fermi sabiti, N_e , N_n ve N_p sırasıyla ortamdaki elektron, nötron ve proton yoğunluk fonksiyonlarıdır. Bu makalede Güneş nötrinolarının salınımı incelendiğinden Güneş için ilgili yoğunluk fonksiyonları kullanılmıştır.

Şekil 3.'de verilen efektif etkileşmeler, elektron-nötrino ve müon-nötrino madde etkileşme potansiyellerinin değişmesine yol açar. Efektif lagranjiyenin getirdiği yeni fizik katkılarının dikkate alınmasıyla madde etkileşme potansiyelleri şu hale gelir:

$$V_e = \sqrt{2}G_F \left[\left(1 + 2a'_e \frac{n^2}{\Lambda^2} \right)^2 N_e - \left(1 + \frac{n^2}{\Lambda^2} (-a_e + a'_e) \right) \left(1 - \frac{n^2(a_e + a'_e)}{2\Lambda^2(-\frac{1}{2} + 2\sin^2 q_w)} \right) \frac{N_e}{2} - \left(1 + \frac{n^2}{\Lambda^2} (-a_e + a'_e) \right) \frac{(N_n + N_p)}{2} \right] \quad (10)$$

$$V_m = -\frac{1}{\sqrt{2}}G_F \left[\left(1 + \frac{n^2}{\Lambda^2} (-a_m + a'_m) \right) \left(1 - \frac{n^2(a_e + a'_e)}{2\Lambda^2(-\frac{1}{2} + 2\sin^2 q_w)} \right) N_e + \left(1 + \frac{n^2}{\Lambda^2} (-a_m + a'_m) \right) (N_n + N_p) \right] \quad (11)$$

Nötrino salınımları açısından, evrim denklemindeki Hamiltoniyen matrisinin köşegeni üzerindeki ortak fazlar katkı getirmezler. Bu sebeple Hamiltoniyen matrisi aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\begin{bmatrix} \frac{\Delta m^2}{2E} \sin^2 q + V_e & \frac{\Delta m^2}{4E} \sin 2q \\ \frac{\Delta m^2}{4E} \sin 2q & \frac{\Delta m^2}{2E} \cos^2 q + V_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\Delta m^2}{2E} \sin^2 q_e & \frac{\Delta m^2}{4E} \sin 2q \\ \frac{\Delta m^2}{4E} \sin 2q & \frac{\Delta m^2}{2E} \cos^2 q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{(V_e - V_m)}{2} & 0 \\ 0 & -\frac{(V_e - V_m)}{2} \end{bmatrix} \quad (12)$$

Burada gerekli sadeleştirmeler yapıldıktan sonra,

$$\frac{(V_e - V_m)}{2} = \frac{G_F}{2\sqrt{2}} \frac{n^2}{\Lambda^2} [(a_e - a_m) - (a'_e - a'_m)] (2N_e + N_n) + \left(1 + 4 \frac{n^2}{\Lambda^2} a'_e\right) 2N_e \quad (13)$$

şeklinde düzenlenebilir.

Yeni fizik katkılarının nötrino salınımları üzerindeki etkisini incelemek amacıyla dört Güneş nötrino deneyi; Homestake, Gallium, Super-Kamiokande ve SNO deneylerinin kombine analizini yapacağız. Bu konuda gerçekçi bir inceleme istatistik analiz yöntemlerinin kullanılmasını gerektirir. Bu çalışmada istatistik analiz yöntemlerinden c^2 analizini kullanılmıştır. c^2 fonksiyonu aşağıdaki şekilde tanımlanır [18-20]:

$$c^2 = \sum_n^N \frac{(R_n^{(teo)} - R_n^{(den)})^2}{(d_n^{den})^2} \quad (14)$$

Burada $R_n^{(den)}$ n. deneyden ölçülmüş olay oranlarıdır. $R_n^{(teo)}$ ise teorik olay oranlarına karşı gelir. d_n^{den} n. deneydeki hatayı gösterir. İndisler Güneş nötrino deneylerini belirtir. Gerçekleştirdiğimiz c^2 analizinde, bahsetmiş olduğumuz bu dört Güneş nötrino deneyinin kombine analizi Δm^2 ve $\tan^2 q$ 'nın en iyi fit değerlerinde ($\Delta m^2 = 7 \times 10^{-5} \text{ eV}^2$, $\tan^2 q = 0.47$) [15] yapılmıştır.

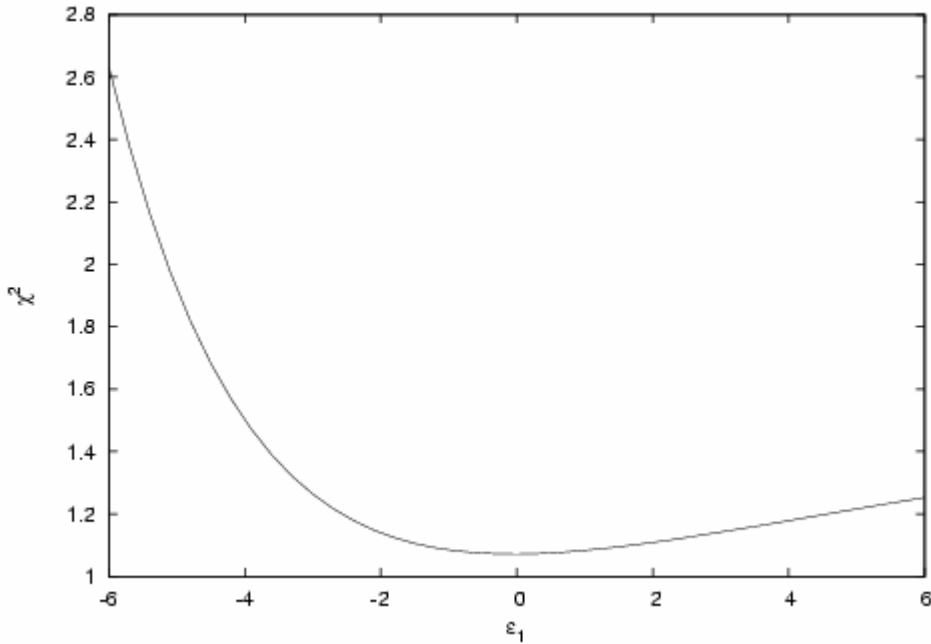
Şekil 4. 'de $a'_e = a'_m = 0$ durumu için $e_1 - c^2$ grafiği çizilmiştir. Burada $e_1 = a_e - a_m$ olarak tanımlıdır. Fiziksel olarak e_1 elektron-nötrino ve müon-nötrino etkileşme şiddetleri arasındaki farklılığın bir ölçüsüdür. Nötrino etkileşmelerinde çeşni evrenselliğinin kırılmadığı durumda $e_1 = 0$ olması gerekir. Şekil 5. 'de $a_e = a'_e$ ve $a_m = a'_m$ durumu için $a'_e - c^2$ grafiği çizilmiştir. Dikkat edilirse bu durumda, yalnızca (13) ifadesindeki son terimden katkı gelir. Şekil 3.'deki üçüncü diyagramdan görüldüğü gibi a'_e bağlaşımı $n_e eW$ köşesine katkıda bulunmaktadır. Elektron-nötrino yüklü zayıf akımına yeni fizikten gelebilecek çeşni evrenselliğine uymayan etkileşmeler a'_e bağlaşımı ile tasvir edilir.

3. Sonuç ve tartışma

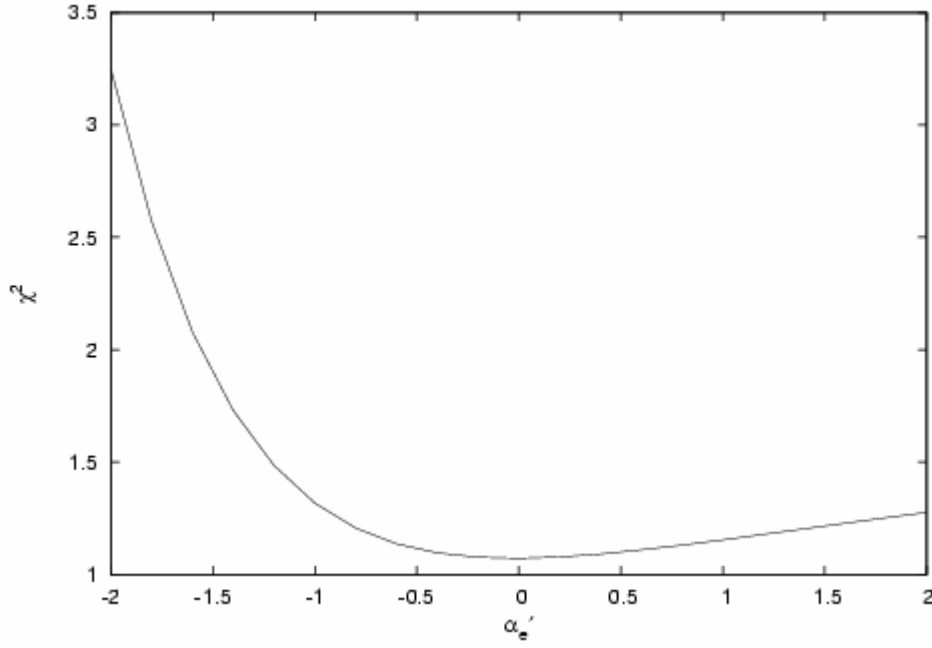
Elektrozayıf etkileşmelerin Standart Model'ine ilişkin pek çok parametre CERN e^+e^- çarpıştırıcısı LEP 'de yüksek bir hassasiyetle test edilmiştir. Ancak özellikle nötrino-Z bozon bağlaşımına ilişkin ölçümler iyi bir hassasiyetten uzaktır. Örnek

vermek gerekirse Z bozonun yüklü leptonlarla olan bağlaşımları $O(10^{-4})$ mertebesinde bir duyarlılıkla ölçülmüşken nötrinolarla olan bağlaşımları $O(10^{-2})$ mertebesinde bir duyarlılıkla ölçülmüştür [21]. Öte yandan LEP’de nötrino-Z bağlaşımları Z bozonun görünmez bozunum (Z bozonun dedekte edilemeyen parçacıklara bozunumu) genişliğinin ölçülmesi ile gerçekleştirilir. Z bozonun görünmez bozunumu bütün nötrino çeşnilerinden katkı aldığından çeşni evrenselliğini bozan nötrino etkileşmelerinin Z bozonun görünmez bozunum genişliğinin ölçülmesi ile sınırlandırılması mümkün değildir.

Nötrino etkileşmelerinde çeşni evrenselliğini bozan bağlaşımların nötrino salınım deneyleri ile sınırlandırılabilceğini gösterdik. Güneş nötrinosu salınım deneyleri için c^2 analizi şekil 4. ve şekil 5. ‘de verilmiştir. Şekillerden görüldüğü gibi anormal bağlaşımların (e_1 ve a'_e) negatif olduğu bölgedeki limitler kuvvetlidir. Örnek vermek gerekirse, e_1 bağlaşımı için 1 s güvenilirlik düzeyindeki alt limit $-5.2 \leq e_1$ ve a'_e bağlaşımı için $-1.6 \leq a'_e$ şeklindedir.



Şekil 4. $a'_e = a'_m = 0$ durumu için $e_1 - c^2$ grafiği



Şekil 5. $a_e = a_e'$ ve $a_m = a_m'$ durumu için $a_e' - c^2$ grafiği

Teşekkür

Değerli öneri ve yardımlarından dolayı Wisconsin Üniversitesi öğretim üyesi Prof. Dr. A. Baha BALANTEKİN'e teşekkürlerimizi sunarız. Bu çalışmanın yazarları Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) BİDEB-2219 burs desteğine teşekkür eder.

Kaynaklar

- [1] Super-Kamiokande Collaboration, Phys. Rev. Lett. 81 (1998) 1562-1567
- [2] Pontecorvo B., Zh. Eksp. Teor. Fiz. 53 (1967) 1717.
- [3] Bahcall J N 1989 Neutrino Astrophysics (Cambridge University Press)
<http://www.sns.ias.edu/~jnb/>
- [4] Mikheyev S. P., Smirnov A. Yu., Sov. J. Nucl. Phys. 42, 913 (1985); Nuovo Cimento 9C, 17 (1986); Wolfenstein L., Phys. Rev. D 17, 2369 (1978).
- [5] Cleveland B T 1998 AstrophysJ (496) 505
- [6] Abdurashitov J N *et al.* (SAGE Collaboration) 2002 J. Exp. Theor. Phys.(95) 181
- [7] Abdurashitov J N *et al.* 2002 Zh. Eksp. Teor.Fiz.(122) 211(Preprint astro-ph/0204245)
- [8] Hampel W *et al* (GALLEX Collaboration) 1999 Phys. Lett. B (447) 127

- [9] Altmann M *et al.* (GNO Collaboration) 2000 Phys. Lett. B (490) 16 (Preprint hep-ex/0006034)
- [10] Ahmad Q R *et al.* (SNO Collaboration) 2001 Phys. Rev. Lett. (87) 071301 (Preprint nucl-ex/0106015)
- [11] Ahmad Q R *et al.* (SNO Collaboration) 2002 Phys. Rev. Lett. (89) 011301 (Preprint nucl-ex/0204008)
- [12] Fukuda S *et al.* (Super-Kamiokande Collaboration) 2001 Phys. Rev. Lett. (86) 5651 (Preprint hep-ex/0103032)
- [12] Fukuda S *et al.* (Super-Kamiokande Collaboration) 2001 Phys. Rev. Lett. (86) 5656 (Preprint hep-ex/0103033)
- [13] KamLAND Collaboration, S Abe *et al.* 2008, hep-ex/08062237
- [14] Bahcall J N *et al.* 2001 hep-ph/0106258
- [15] Balantekin A B *et al.* 2003 J. Phys. G (29) 665
- [16] Bandyopadhyay A *et al.* 2003, hep-ph/0309236
- [17] Buchmüller, W. and Wyler, D., Nucl. Phys. B, 268; 621-653 (1986).
- [18] Feldman J G and Cousins R D 1998 Phys. Rev. D (57) 3973
- [19] Fogli G L and Lisi E 1995 Astropar. Phys. (3) 185
- [20] Fogli G L and Lisi E hep-ph/0206162
- [21] Yao W. M. *et al.* [Particle Data Group], J. Phys. G 33, 1 (2006).