# Süpernova Nötrinoları ve Güncel Nötrino Araştırmaları

Taygun Bulmuş

Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi
Fizik Bölümü

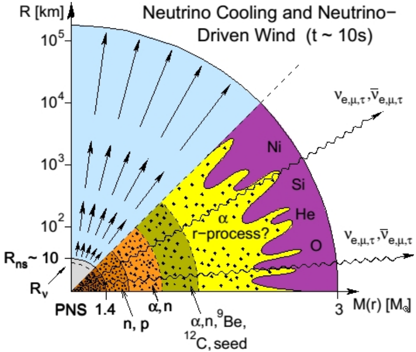
13 Şubat 2015

# Sunum Planı

# Nötrino İçin Önemli Zamanlar

- 1930 Wolfgang Pauli Beta bozunumundaki, elektronun sürekli enerji spectrumunu ve kayıp enerjiyi açıklamak için kütlesiz bir parçacığın fikrini ortaya atmıştır.
- İlk nötrino ismi resmi olarak ilk 1933 Solvay Konferansında geçmiştir.
- 1962 Ziro Maki, Masami Nakagawa and Sakata (MSN) nötrino çeşni karışımını ve çeşni salınımlarını önermiştir.
- 1968 Ray Davis ve arkadaşları solar nötrino problemini ortaya atmıştır. (Homestake madeni, Kuzey Dakota)
- 1987 Kamiokande ve IMB gözlemevleri Süpernova 1987A patlamasından nötrino sinyalleri almıştır. Bu nötrino astrofiziğinin doğuşu sayılır.
- 2000 The DONUT ekibi (Fermilab) ilk defa tau-nötrinoyu direk gözlemlediklerini duyurdular.
- 2001 SNO (Kanada) ekibi, nötrino salınımlarını solar nötrinoları gözlemleyerek deneysel olarak kanıtlamıştır.

# Astrofiziksel Motivasyon



(Janka et. all, 2008)

- Nötrinolar 10km içinde tuzaklı.
- Süpernova büyük oranda nötrinolar ile soğur.
- $\nu - \nu$ saçılmaları.
- Ağır çekirdeklerin oluşumu.

$$(\overline{\nu_e} + p \leftrightarrow n + e^+ \ )$$

$$(\nu_e + n \leftrightarrow p + e^- \ )$$

# Boşluk Osilasyonları

2 çeşnili(flavor) nötrinolar için;
Nötrinolar çeşni bazından, kütle bazına üniter bir matris (MSN) vardır.

$$|\nu_\alpha\rangle = \sum_{k=1}^{2} U^*_{\alpha k} |\nu_k\rangle \qquad U = \begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix}$$

$\nu_\alpha \to \nu_\beta$ geçiş olasılığı

$$P_{\nu_\alpha \to \nu_\beta}(t) = \sum_{k,j} U^*_{\alpha k} U_{\beta k} U_{\alpha j} U^*_{\beta j} \exp\left(-i \frac{\Delta m^2_{kj} t}{2E}\right)$$

Osilasyon Uzunluğu

$$L^{sal}_{kj} = \frac{4\pi E}{\Delta m^2_{kj}}$$

# Boşluk Osilasyonları

Alan teorisine geçersek;

$$a_e(\vec{p}) = a_1(\vec{p})\cos\theta + a_2(\vec{p})\sin\theta$$
$$a_x(\vec{p}) = -a_1(\vec{p})\sin\theta + a_2(\vec{p})\cos\theta$$

Çeşni isospin operatörlerini tanımlayalım. (Çeşni bazında)

$$J^+_{\vec{p}} = a^\dagger_e(\vec{p})a_x(\vec{p}) \qquad J^-_{\vec{p}} = a^\dagger_x(\vec{p})a_e(\vec{p})$$
$$J^z_{\vec{p}} = \frac{1}{2}[a^\dagger_e(p)a_e(\vec{p}) - a^\dagger_x(\vec{p})a_x(\vec{p})]$$

Polarizasyon operatörlerinden SU(2) cebiri oluşturabiliriz.

$$\left[J^+_{\vec{p}}, J^-_{\vec{q}}\right] = 2\delta_{\vec{p}\vec{q}}J^z_{\vec{p}} \qquad \left[J^z_{\vec{q}}, J^\pm_{\vec{q}}\right] = \pm\delta_{\vec{p}\vec{q}}J^\pm_{\vec{p}}$$

# Boşluk Osilasyonları

Çok-parçacık(Many-Body) Hamiltonyeni;

$$H = \sum_{\vec{p}} \left( \frac{m_1^2}{2p} a_1^\dagger(\vec{p}) a_1(\vec{p}) + \frac{m_2^2}{2p} a_2^\dagger(\vec{p}) a_2(\vec{p}) \right)$$

Polarizasyon formalizminde $\vec{B}_{cesni} = (\sin 2\theta, 0, -\cos 2\theta)$;

$$H_{sal} = \sum_{\vec{p}} \frac{\Delta m^2}{2p} \vec{B} \cdot \vec{J}_{\vec{p}}$$

$$H_{sal} = \sum_{\omega} \omega \vec{B} \cdot \vec{J}_{\omega}$$

Yukarıdaki formüller kütle bazında da yazılabilir.

# $\nu - \nu$ Etkileşmesi

Çalışmamızda 2 çeşit saçılmalarla ilgilendik.
"İleri(Forward) saçılma" ve "Momentumu değişen durumlar"
Etkileşim hamiltonyeni ve lagranjiyeni;

$$
\begin{aligned}
H_{\nu\nu} = & \frac{\sqrt{2}G_F}{V} \sum_{\vec{p},\vec{q}} (1 - \cos\theta_{\vec{p}\vec{q}}) \{ \\
& a_e^\dagger(\vec{p}) a_e(\vec{p}) a_e^\dagger(\vec{q}) a_e(\vec{q}) + a_x^\dagger(\vec{p}) a_x(\vec{p}) a_x^\dagger(\vec{q}) a_x(\vec{q}) + \\
& a_x^\dagger(\vec{p}) a_e(\vec{p}) a_e^\dagger(\vec{q}) a_x(\vec{q}) + a_e^\dagger(\vec{p}) a_x(\vec{p}) a_x^\dagger(\vec{q}) a_e(\vec{q}) \}
\end{aligned}
$$

İsospin formülasyonunda;

$$
H_{\nu\nu} = \frac{\sqrt{2}G_F}{V} \sum_{\vec{p},\vec{q}} (1 - cos\theta_{\vec{p}\vec{q}}) \vec{J}_p \cdot \vec{J}_q
$$

# Toplam Hamiltonyen

Toplam Hamiltonyen;

$$H_{Top} = \sum_{\vec{p}} \frac{\Delta m^2}{2p} \vec{B} \cdot \vec{J_\omega} + \mu \sum_{\vec{p},\vec{q}} (1 - \cos\theta_{\vec{p}\vec{q}}) \vec{J_p} \cdot \vec{J_q}$$

Tek açı yaklaşımı kullanıp frekansalar cinsinden ($\cos\theta_{pq} = 0$);

$$H = \sum_{\omega} \vec{B} \cdot \vec{J_w} + \mu \vec{J} \cdot \vec{J} \qquad \vec{J} = \sum_{\omega} \vec{J_\omega}$$

Kütle bazında $\vec{B}_{kutle} = (0, 0, -1)$;

$$H = \sum_{\omega} \vec{B} \cdot \vec{\mathcal{J}_w} + \mu \mathcal{J} \cdot \mathcal{J}$$

Kütle bazında isospin opertörleri;

$$\mathcal{J}^{+}_{\vec{p}} = a_1^\dagger(\vec{p}) a_2(\vec{p}) \qquad \mathcal{J}^{-}_{\vec{p}} = a_2^\dagger(\vec{p}) a_1(\vec{p})$$

$$\mathcal{J}^{z}_{\vec{p}} = \frac{1}{2}(a_1^\dagger(\vec{p}) a_1(\vec{p}) - a_2^\dagger(\vec{p}) a_2(\vec{p}))$$

# Denklemlerin Çözümü

- Denklemler çok-parçacıklı denklemler
- Rastgele-Faz Yaklaşımı (Random-Phase Approximation) uygulayalim

$$\mathcal{O}_1\mathcal{O}_2 \sim \mathcal{O}_1 \langle \mathcal{O}_2 \rangle + \langle \mathcal{O}_1 \rangle \mathcal{O}_2 - \langle \mathcal{O}_1 \rangle \langle \mathcal{O}_2 \rangle$$

- Polarizasyon vektörü: $\vec{P}_p \equiv 2 \left\langle \vec{J}_p \right\rangle$
- Yeni Hamiltonyen;

$$H \sim H^{RFY} = \sum_{\omega} \omega \vec{B} \cdot \vec{J}_\omega + \mu \vec{P} \cdot \vec{J}$$

- Heisenberg denkleminde yerine koyarsak;

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\vec{J}_w = -i\left[\vec{J}_w, H^{RFY}\right] = (\omega\vec{B} + \mu\vec{P}) \times \vec{J}_w$$
$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\vec{P}_w = (\omega\vec{B} + \mu\vec{P}) \times \vec{P}_w$$

# 3 Çeşnili Nötrinoya Genelleştirme

Polarizasyon vektörünü genelleştirelim:

$$\mathcal{T}_{ij}(\vec{p}) = a_i^\dagger(\vec{p})a_j(\vec{p}) \qquad \overline{\mathcal{T}}_{ij}(\vec{p}) = b_j^\dagger(\vec{p})b_i(\vec{p})$$

Yoğunluk Matrisi

$$\rho_{\boldsymbol{p}} \equiv \langle \mathcal{T}_{\boldsymbol{p}} \rangle \qquad \bar{\rho}_{\boldsymbol{p}} \equiv \langle \overline{\mathcal{T}_{\boldsymbol{p}}} \rangle$$

Boşluk Hamiltonyeni;

$$H_0 = \sum_{i,j} \int d^3p [\gamma_{ij}(\vec{p})\rho_{ij}(\vec{p}) + \gamma_{ij}(\vec{p})\overline{\rho}_{ij}(\vec{p})]$$

$$\gamma_{ij} = \frac{1}{3} U_{23}U_{13}U_{12} \begin{pmatrix} \frac{-\delta m_{21}^2 - \delta m_{31}^2}{2p} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\delta m_{21}^2 - \delta m_{32}^2}{2p} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-\delta m_{31}^2 + \delta m_{32}^2}{2p} \end{pmatrix} U_{12}^\dagger U_{13}^\dagger U_{23}^\dagger$$

Etkileşim Hamiltonyeni:

$$H_{\nu\nu} = \frac{1}{2}\left(1 - \sqrt{1 - \frac{R^2}{r^2}}\right)^2 \frac{\sqrt{2} G_F L}{2\pi R^2} \int E^2 dE G^\dagger (\rho(E) - \rho(E)^{c^*}) G$$

Hereket denklemleri

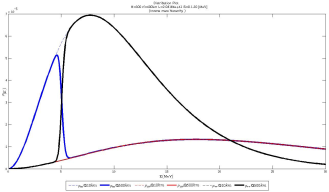
$$\dot{\rho} = -i[(H_0 + H_{\nu\nu}), \rho]$$

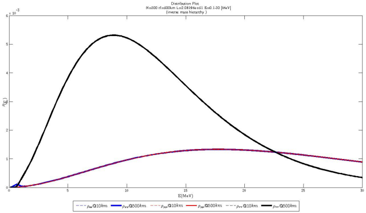
Başlangıçtaki nötrino yoğunluğu:

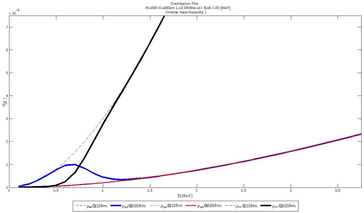
$$\rho_{ee}(E) = \frac{1}{F_4} \frac{1}{T_e^4} \frac{1}{1 + e^{E/T_e}}$$

## 300 Anti-Nötrino, $L = 10^{51}$[erg/sn] Dağılım-Grafiği

## 300 Nötrino, $L = 10^{51}$[erg/sn] Dağılım-Grafiği

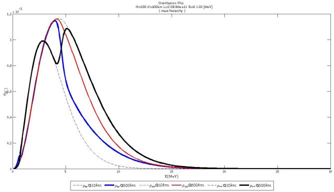


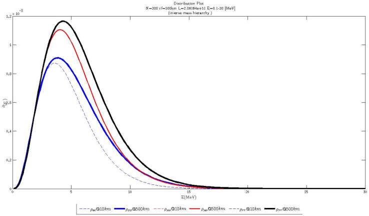



# Simülasyon

## 300 Nötrino, $L \sim 10^{51}$[erg/sn] Dağılım-Grafiği

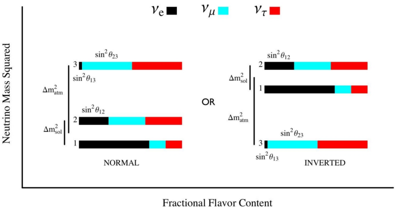



## 300 Nötrino, $L \sim 10^{51}$[erg/sn] Dağılım-Grafiği



# Güncel Problemler

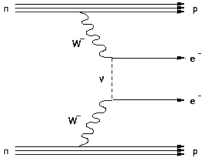
- Nötrino kütle hiyerarşisi




(Kayser et. all, 2009)

Güneş Nötrinoları
Atmosfer Nötrinoları
Reaktör Nötrinoları ($\theta_{13}$ Açısı)

- Dirac-Majorana Nötrinoları




Nötrinosuz Çift Beta Bozunumu

# Güncel Problemler

- Steril Nötrinolar
  1. 4. nesil aile
  2. Steril nötrinolar ağır mı hafif mi ?
  3. Karanlık madde adayı
- CP İhlali
  1. Erken evren parçacık-antiparçacık simetrisi
- Egzotik Nötrino Etkileşimleri
- Nötrino Kütlesi

# Sonuçlar ve Sonrası

- Yoğunluk Matrisi Formülasyonu Önemi
- Spektral Ayrışmanın Anlamı
- MSW Etkisi Katkısı
- Nötrino Manyetik Moment Katkısı

# Referanslar


Pehlivan et. all (2011)
Invariants of Collective Neutrino Oscillations
DOI: 10.1103/PhysRevD.84.065008

Balantekin et. all (2006)
Neutrino-Neutrino Interactions and Flavor Mixing in Dense Matter
DOI: 10.1088/0954-3899/34/1/004

Sigl et. all (1993)
General kinetic description of relativistic mixed neutrinos
DOI: 10.1016/0550-3213(93)90175-O

Janka et. all (2006)
Theory of Core-Collapse Supernovae
DOI: 10.1016/j.physrep.2007.02.002

Teşekkür Ederim.