

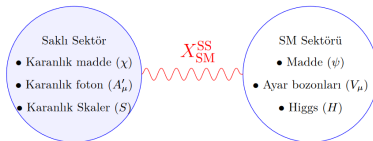
# COHERENT Nötrino Saçılma Verileri ile Minimal Olmayan Karanlık Sektör Senaryolarının Kısıtlanması

A. Elpe<sup>1</sup> E. Akyumuk<sup>1</sup> T.M. Aliev<sup>1</sup> L. Selbuz<sup>2</sup> İ. Turan<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Orta Doğu Teknik Üniversitesi

<sup>2</sup>Ankara Üniversitesi

# Karanlık Sektör Senaryoları



**Figure:** Saklı sektör ile Standart model sektörü arasında  $X_{SM}^{SS}$  arapaçacağı yardımıyla iletişimin tasviri. Burada  $X$  parçacığı hem SM hem de SS altında kuantum sayısı taşımaktadır.

Portal	Parçacıklar	Operatörler
Vektör	Karanlık fotomlat ( $A'_{\mu}$ )	$\epsilon B_{\mu\nu} F^{0\mu\nu}$
Higgs	Karanlık skalerler (S)	$(\mu S + \lambda S^2) H^{\dagger} H$
Axion	Sözde skalerler (a)	$(a/f_a) F_{\mu\nu} \tilde{F}^{\mu\nu}, (a/f_a) G_{i\mu\nu} \tilde{G}_i^{\mu\nu}, (1/f_a) \partial_{\mu} a \bar{\psi} \gamma^{\mu} \gamma^5 \psi$
Nötrino	Steril nötrinolar (N)	$y_N L H N.$

**Figure:** Karanlık sektör ile Standard Model arasında olası portallar, ilgili parçacıklar ve operatörler

Standart Model'in  $U(1)_Y$  hiperyük alanı ile karanlık sektörün  $U(1)_D$  alanının kinetik karışımı

$$\mathcal{L}_{\text{Ayar}}^{\text{KK}} = -\frac{1}{2} \sin \epsilon X_{\mu\nu}^0 Y^{\mu\nu} \quad (1)$$

$U(1)$  teorilerinde alan kuvvet tensörleri kendi başlarına ayar simetriktir.

Standart Model'in  $U(1)_Y$  hiperyük alanı ile karanlık sektörün  $U(1)_D$  alanının kinetik karışımı

$$\mathcal{L}_{\text{Ayar}}^{\text{KK}} = -\frac{1}{2} \sin \epsilon X_{\mu\nu}^0 Y^{\mu\nu} \quad (1)$$

$U(1)$  teorilerinde alan kuvvet tensörleri kendi başlarına ayar simetriktir. Kinetik karışım durumuna ek olarak eğer SM fermiyonları saklı sektörün  $U(1)_D$  ayar grubu altında kuantum sayılarına sahiplerse karanlık foton ile SM fermiyonları arasında ek bir etkileşme daha olur:

$$\mathcal{L}_{\text{Etkileşim}} \supset g_D j_D^\mu X_\mu^0 \quad (2)$$

$$j_D^\mu = q_D \bar{f} \gamma^\mu f \quad (3)$$

Anomali içermeyen  $q_f$  seçeneklerden bir tanesi  $B - L$ 'dir.

Standart Model'in  $U(1)_Y$  hiperyük alanı ile karanlık sektörün  $U(1)_D$  alanının kinetik karışımı

$$\mathcal{L}_{\text{Ayar}}^{\text{KK}} = -\frac{1}{2} \sin \epsilon X_{\mu\nu}^0 Y^{\mu\nu} \quad (1)$$

$U(1)$  teorilerinde alan kuvvet tensörleri kendi başlarına ayar simetriktir. Kinetik karışım durumuna ek olarak eğer SM fermiyonları saklı sektörün  $U(1)_D$  ayar grubu altında kuantum sayılarına sahiplerse karanlık foton ile SM fermiyonları arasında ek bir etkileşme daha olur:

$$\mathcal{L}_{\text{Etkileşim}} \supset g_D j_D^\mu X_\mu^0 \quad (2)$$

$$j_D^\mu = q_D \bar{f} \gamma^\mu f \quad (3)$$

Anomali içermeyen  $q_f$  seçeneklerden bir tanesi  $B - L$ 'dir.

$$\mathcal{L}_{\text{Ayar}}^{\text{KE}} = -\frac{1}{4} W_{3\mu\nu} W_3^{\mu\nu} - \frac{1}{4} Y_{\mu\nu} Y^{\mu\nu} - \frac{1}{4} X_{\mu\nu}^0 X^{0\mu\nu} + \dots \quad (4)$$

$$\mathcal{L}_{\text{Ayar}}^{\text{Kutle}} = \frac{1}{2} m_X^2 X_\mu^0 X^{0\mu} + \frac{1}{2} m_{W_3}^2 W_{3\mu} W_3^\mu + \dots \quad (5)$$

$$\mathcal{L}_{\text{Etkileşim}} = \sum_i \bar{f}_i i \not{D} f_i \quad (6)$$

$$\mathcal{L} = \mathcal{L}_{\text{Ayar}}^{\text{KE}} + \mathcal{L}_{\text{Ayar}}^{\text{KK}} + \mathcal{L}_{\text{Ayar}}^{\text{Kutle}} + \mathcal{L}_{\text{Etkileşim}} \quad (7)$$

Yeni bir baza geçerek kinetik karışım ortadan kaldırılabılır. Bunu göstermek gerekirse  $(Y_\mu, W_{3\mu}, X_\mu^0)$  ayar bazından  $(B_\mu, W_{3\mu}, X_\mu)$  bazına şu şekilde geçilir:

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} B_\mu \\ W_{3\mu} \\ X_\mu \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & \sin \epsilon \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \cos \epsilon \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Y_\mu \\ W_{3\mu} \\ X_\mu^0 \end{pmatrix} \\ &\equiv V_{BX, YX^0} \cdot \begin{pmatrix} Y_\mu \\ W_{3\mu} \\ X_\mu^0 \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (8)$$

Bu dönüşüm kinetik karışımı ortadan kaldırır ancak hem ayar kütle terimlerini hem de etkileşim terimlerini değiştirecektir.

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_{\text{Ayar}}^{\text{Kütle}} &= \frac{1}{2} m_X^2 X_\mu^0 X^{0\mu} + (D_\mu \langle H \rangle) (D^\mu \langle H \rangle)^\dagger \\ &= \frac{1}{2} m_X^2 \sec^2 \epsilon X_\mu X^\mu \\ &+ \frac{1}{8} (g^2 + g'^2) v^2 (-\sin \theta_W B_\mu + \cos \theta_W W_{3\mu} + \tan \epsilon \sin \theta_W X_\mu)^2 \end{aligned} \quad (9)$$

Fiziksel ayar bozonlarına ulaşmak için ek dönüşümler yapılmalıdır.

Weinberg dönüşümü  $(B_\mu, W_{3\mu}, X_\mu) \rightarrow (A_\mu, \widetilde{W}_{3\mu}, X_\mu)$

$$\begin{pmatrix} A_\mu \\ \widetilde{W}_{3\mu} \\ X_\mu \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta_W & \sin \theta_W & 0 \\ -\sin \theta_W & \cos \theta_W & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} B_\mu \\ W_{3\mu} \\ X_\mu \end{pmatrix} \quad (10)$$

Dönüşüm sonrası

$$\mathcal{L}_{\text{Gauge}}^{\text{Mass}} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} A_\mu & \widetilde{W}_{3\mu} & X_\mu \end{pmatrix} \cdot \mathcal{M}_{\text{Gauge}}^2 \cdot \begin{pmatrix} A_\mu \\ \widetilde{W}_{3\mu} \\ X_\mu \end{pmatrix}$$

$$\mathcal{M}_{\text{Gauge}}^2 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_{W_3}^2 & m_{W_3}^2 \tan \epsilon \sin \theta_W \\ 0 & m_{W_3}^2 \tan \epsilon \sin \theta_W & m_X^2 \sec^2 \epsilon + (m_{W_3} \tan \epsilon \sin \theta_W)^2 \end{pmatrix} \quad (11)$$

Son dönüşüm  $(A_\mu, \widetilde{W}_{3\mu}, X_\mu) \rightarrow (A_\mu, Z_\mu, A'_\mu)$

$$\begin{pmatrix} A_\mu \\ Z_\mu \\ A'_\mu \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \xi & \sin \xi \\ 0 & -\sin \xi & \cos \xi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_\mu \\ \widetilde{W}_{3\mu} \\ X_\mu \end{pmatrix} \quad (12)$$





$$\begin{aligned}
 \mathcal{L}_{\text{Etkilesim}} &= \sum_i \bar{f}_i i \not{D} f_i = g' J_Y^\mu Y_\mu + \frac{g}{2} J_{W_3}^\mu W_{3\mu} + g_D J_D^\mu X_\mu^0 \\
 \mathcal{L}_{\text{Ayar}}^{\text{KE}} &= -\frac{1}{4} W_{3\mu\nu} W_3^{\mu\nu} - \frac{1}{4} Y_{\mu\nu} Y^{\mu\nu} - \frac{1}{4} X_{\mu\nu}^0 X^{0\mu\nu} + \dots \\
 \mathcal{L}^{\text{KK}} &= -\frac{1}{2} \sin \epsilon Y_{\mu\nu} X^{0\mu\nu} \\
 \mathcal{L}_{\text{Ayar}}^{\text{Kütle}} &= \frac{1}{2} m_X^2 X_\mu^0 X^{0\mu} + \sum_{i=1}^2 (D_\mu \langle \phi_i \rangle)^\dagger D^\mu \langle \phi_i \rangle \\
 \mathcal{L} &= \mathcal{L}_{\text{Ayar}}^{\text{KE}} + \mathcal{L}_{\text{Ayar}}^{\text{KK}} + \mathcal{L}_{\text{Ayar}}^{\text{Kütle}} + \mathcal{L}_{\text{Etkilesim}}
 \end{aligned} \tag{17}$$

Higgs vakum beklenti değerleri

$$\langle \phi_i \rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{v_i}{\sqrt{2}} \end{pmatrix} \quad i = 1, 2 \tag{18}$$

şu koşulları sağlar:

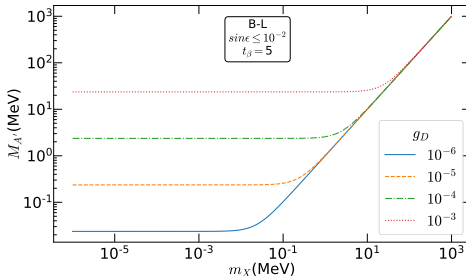
$$\sqrt{v_1^2 + v_2^2} = v = 246 \text{ GeV}, \quad \tan \beta = \frac{v_2}{v_1} \tag{19}$$

Ayar bozon kütleleri  $g_D$  bağımlı olur.

$$M_A^2 = 0, \quad (20)$$

$$M_{A'}^2 = m_X^2 \cos^2 \xi \sec^2 \epsilon + \frac{1}{4} g_D^2 v^2 \cos^2 \xi \sec^2 \epsilon \left[ \cos^2 \beta (Q_D^{\phi_1})^2 + \sin^2 \beta (Q_D^{\phi_2})^2 \right] \\ + g_D v m_{W_3} \cos \xi \sec \epsilon \left( \cos^2 \beta Q_D^{\phi_1} + \sin^2 \beta Q_D^{\phi_2} \right) (\sin \xi - \cos \xi \sin \theta_W \tan \epsilon) \\ + m_{W_3}^2 (\sin \xi - \cos \xi \sin \theta_W \tan \epsilon)^2, \quad (21)$$

$$M_Z^2 = m_X^2 \sin^2 \xi \sec^2 \epsilon + \frac{1}{4} g_D^2 v^2 \sin^2 \xi \sec^2 \epsilon \left[ \cos^2 \beta (Q_D^{\phi_1})^2 + \sin^2 \beta (Q_D^{\phi_2})^2 \right] \\ - g_D v m_{W_3} \sin \xi \sec \epsilon \left( \cos^2 \beta Q_D^{\phi_1} + \sin^2 \beta Q_D^{\phi_2} \right) (\cos \xi + \sin \xi \sin \theta_W \tan \epsilon) \\ + m_{W_3}^2 (\cos \xi + \sin \xi \sin \theta_W \tan \epsilon)^2. \quad (22)$$



Fields	$u_R$	$d_R$	$Q_L$	$L_L$	$e_R$	$\nu_R$	$\phi_2$	$\phi_1$
Dark Charges	$Q'_u$	$Q'_d$	$\frac{Q'_u+Q'_d}{2}$	$-\frac{3(Q'_u+Q'_d)}{2}$	$-(2Q'_u + Q'_d)$	$-(Q'_u + 2Q'_d)$	$\frac{Q'_u-Q'_d}{2}$	$\frac{5Q'_u+7Q'_d}{2}$
$U(1)_C$	$\frac{1}{4}$	$-\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{8}$	$\frac{3}{8}$	0	$\frac{3}{4}$	$\frac{3}{8}$	$\frac{9}{8}$
$U(1)_D$	$\frac{1}{2}$	0	$\frac{1}{4}$	$-\frac{3}{4}$	-1	$-\frac{1}{2}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{5}{4}$
$U(1)_E$	0	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{4}$	$-\frac{3}{4}$	$-\frac{1}{2}$	-1	$\frac{7}{4}$	$-\frac{1}{2}$
$U(1)_F$	$\frac{2}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{2}$	$-\frac{3}{2}$	-2	$-\frac{4}{3}$	$\frac{1}{6}$	$\frac{17}{6}$
$U(1)_G$	$-\frac{1}{6}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{12}$	$-\frac{1}{4}$	0	$-\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{4}$	$-\frac{3}{4}$
$U(1)_{BL}$	$\frac{1}{6}$	$\frac{1}{6}$	$\frac{1}{6}$	$-\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}$	0	1
$U(1)_{BL}^{min}$	$\frac{1}{6}$	$\frac{1}{6}$	$\frac{1}{6}$	$-\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}$	0	-

Figure: Alanların  $U(1)_D$  altında karanlık quantum yükleri, <sup>1</sup>'den uyarlandı.

<sup>1</sup>Miguel D. Campos, D. Cogollo, Manfred Lindner, T. Melo, Farinaldo S. Queiroz, and Werner Rodejohann. Neutrino Masses and Absence of Flavor Changing Interactions in the 2HDM from Gauge Principles. JHEP, 08:092, 2017.

## Koherent Elastik Nötrino Çekirdek Saçılımı ( $CE\nu NS$ )

Gelen nötrino enerjisi 50 MeV'in altında ise etkileşim koherent bir şekilde olur. Nötrino çekirdeğin bileşenlerinden ziyade, tamamı ile bir bütün olarak etkileşir. Standart Model'de bu bölgede elastik saçılmanın tesir kesiti, inelastik saçılma tesir kesitinden bir kaç mertebe büyüktür. Eğer Standart Model'in ötesinde zayıf bir etkileşim varsa bu bölgede baskılanmayacaktır. Bu sürecin Standart Model'de tesir kesiti şu şekildedir:

$$\frac{d\sigma_{SM}}{dT} = \frac{G_F^2 Q_W^2 M}{4\pi} \left( 1 - \frac{T}{E_\nu} - \frac{MT}{2E_\nu^2} + 2J_N \frac{T^2}{E_\nu^2} \right), \quad (23)$$

Burada  $G_F$  Fermi etkileşim sabiti,  $E_\nu$  gelen nötrinonun enerjisi,  $T$  çekirdeğin saçılma enerjisi,  $M$  çekirdek kütlesi,  $J_N$  çekirdeğin açıl momentumu ve  $Q_W$  zayıf nükleer yüküdür.

$$Q_W = N - (1 - 4s_W^2)Z \quad (24)$$

## Koherent Elastik Nötrino Çekirdek Saçılımı ( $CE\nu NS$ )

Gelen nötrino enerjisi 50 MeV'in altında ise etkileşim koherent bir şekilde olur. Nötrino çekirdeğin bileşenlerinden ziyade, tamamı ile bir bütün olarak etkileşir. Standart Model'de bu bölgede elastik saçılmanın tesir kesiti, inelastik saçılma tesir kesitinden bir kaç merteye büyüktür. Eğer Standart Model'in ötesinde zayıf bir etkileşim varsa bu bölgede baskılanmayacaktır. Bu sürecin Standart Model'de tesir kesiti şu şekildedir:

$$\frac{d\sigma_{SM}}{dT} = \frac{G_F^2 Q_W^2 M}{4\pi} \left( 1 - \frac{T}{E_\nu} - \frac{MT}{2E_\nu^2} + 2J_N \frac{T^2}{E_\nu^2} \right), \quad (23)$$

Burada  $G_F$  Fermi etkileşim sabiti,  $E_\nu$  gelen nötrinonun enerjisi,  $T$  çekirdeğin saçılma enerjisi,  $M$  çekirdek kütlesi,  $J_N$  çekirdeğin açıl momentumu ve  $Q_W$  zayıf nükleer yüküdür.

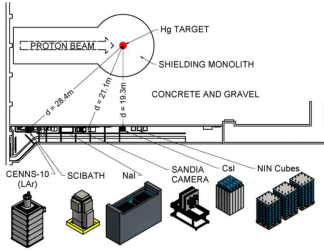
$$Q_W = N - (1 - 4s_W^2)Z \quad (24)$$

Minimal B-L modelinde

$$\begin{aligned} \frac{d\sigma_{BL}^{min}}{dT} = & \frac{F^2(q^2)M}{8\pi \cos^4 \epsilon M_Z^4 (2MT + M_{A'}^2)^2} \left( 1 - \frac{T}{E_\nu} - \frac{MT}{2E_\nu^2} + 2J_N \frac{T^2}{E_\nu^2} \right) \\ & \left[ (2MT + M_{A'}^2) \left( \sqrt[4]{2} \sqrt{G_F} M_Z (\cos \xi \cos \epsilon + \sin \xi \sin \theta_W \sin \epsilon) - g_{BL} \sin \xi \right) \right. \\ & \times \left( -2Ag_{BL} \sin \xi + \sqrt[4]{2} \sqrt{G_F} M_Z (\cos \xi \cos \epsilon Q_W + \sin \xi \sin \theta_W \sin \epsilon (A + 2Z)) \right) \\ & + M_Z^2 \left( \sqrt[4]{2} \sqrt{G_F} M_Z (\sin \xi \cos \epsilon + \cos \xi \sin \theta_W \sin \epsilon) + g_{BL} \cos \xi \right) \\ & \left. \times \left( 2Ag_{BL} \cos \xi + \sqrt[4]{2} \sqrt{G_F} M_Z (Q_W \cos \epsilon \sin \xi + (A + 2Z) \cos \xi \sin \theta_W \sin \epsilon) \right) \right]^2 \quad (25) \end{aligned}$$

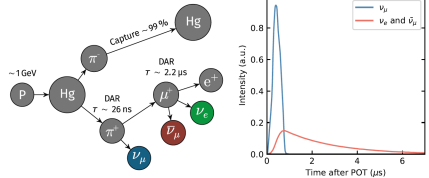
# İlk $CE\nu NS$ Gözlemi

$CE\nu NS$  ilk olarak 2017 yılında COHERENT İşbirliği tarafından Oak Ridge Ulusal Laboratuvarında Csl ve daha sonra 2019 yılında sıvı Argon hedeflerde gözlemlenmiştir.



**Figure:** Nötrino hüzmeleri, 60 Hz'te  $\sim 1 \mu s$  atımlı proton hüzmelerinin civa hedefe çarptırılması ile elde edilmiştir. Bu şekilde günde  $\approx 5 \times 10^{20}$  çarpışma elde edilmiştir. Figür <sup>a</sup>'den alınmıştır.

<sup>a</sup>Akimov, D., et al. "Observation of coherent elastic neutrino-nucleus scattering." Science 357.6356 (2017): 1123-1126.



**Figure:** Nötrino üretim mekanizması <sup>a</sup>

<sup>a</sup>Akimov, D., et al. "Observation of coherent elastic neutrino-nucleus scattering." Science 357.6356 (2017): 1123-1126.

# COHERENT Olay Sayısı

Bir çarpışma deneyi için olay sayısı şudur:

$$N_{olay} = \sigma \mathcal{L}. \quad (26)$$

Burada  $\sigma$  tesir kesiti ve  $\mathcal{L}$  lüminositedir. Sabit hedef deneylerinde şu formu alır:

$$\mathcal{L} = f N_{hedef} \quad (27)$$

$f$  gelen parçacık akısı ve  $N_{hedef}$  hedefteki parçacık sayısıdır. Bunun ötesinde COHERENT sintilatör dedektör kullanılmaktadır. Fotoelektron sayısı ölçümü yapılmaktadır. Toplam olay sayısı şöyle ifade edilir:

$$N_{olay} = \sum_{\nu_\alpha} \sum_{x=\text{çekirdek}} N_{hedef}^x \int_{T_{min}}^{T_{max}} \int_{E_\nu^{min}}^{E_\nu^{max}} f_{\nu_\alpha}(E_\nu) \mathcal{A}(n_{PE}) \left( \frac{d\sigma}{dT} \right) dE_\nu dT \quad (28)$$

# COHERENT Olay Sayısı

Bir çarpışma deneyi için olay sayısı şudur:

$$N_{olay} = \sigma \mathcal{L}. \quad (26)$$

Burada  $\sigma$  tesir kesiti ve  $\mathcal{L}$  lüminositedir. Sabit hedef deneylerinde şu formu alır:

$$\mathcal{L} = f N_{hedef} \quad (27)$$

$f$  gelen parçacık akısı ve  $N_{hedef}$  hedefteki parçacık sayısıdır. Bunun ötesinde COHERENT sintilatör dedektör kullanmaktadır. Fotoelektron sayısı ölçümü yapılmaktadır. Toplam olay sayısı şöyle ifade edilir:

$$N_{olay} = \sum_{\nu_\alpha} \sum_{x=\text{çekirdek}} N_{hedef}^x \int_{T_{min}}^{T_{max}} \int_{E_\nu^{min}}^{E_\nu^{max}} f_{\nu_\alpha}(E_\nu) \mathcal{A}(n_{PE}) \left( \frac{d\sigma}{dT} \right) dE_\nu dT \quad (28)$$

Olay sayısı üzerinden  $\chi^2$  analizi yapıldı.

$$\chi^2(\mathcal{P}) = \frac{(N_{olculen} - N_{beklenen}(1 + \alpha) - B_{on}[1 + \beta])^2}{\sigma_{stat}^2} + \left( \frac{\alpha}{\sigma_\alpha} \right)^2 + \left( \frac{\beta}{\sigma_\beta} \right)^2, \quad (29)$$



# Analiz Sonuçları

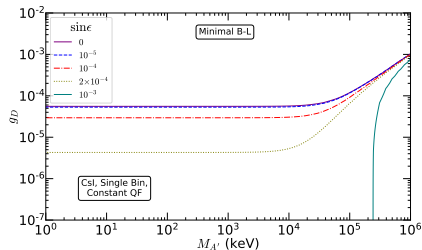
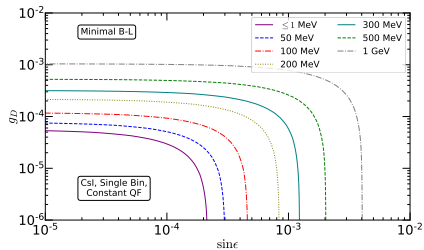


Figure: Minimal B-L için  $(g_D, \sin \epsilon)$  and  $(g_D, M_{A'})$  parametre uzayları için dışarıda bırama eğrileri; eğrilerin üstündeki bölgeler %90 CL ile dışarıda bırakılmıştır.

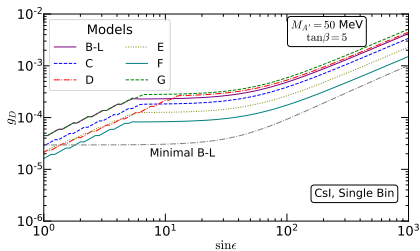
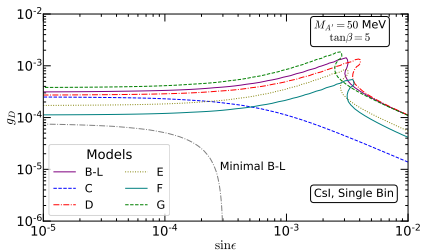


Figure: 2HD modelleri için  $(g_D, \sin \epsilon)$  and  $(g_D, M_{A'})$  parametre uzayları için dışarıda bırakan eğriler; eğrilerin üstündeki bölgeler %90 CL ile dışarıda bırakılmıştır.