

Sneutrino Dark Matter in the NMSSM with Inverse Seesaw Mechanism and Its Phenomenology

曹俊杰，河南师范大学

合作者：郭小飞，贺杨乐，尚亮亮，岳远方

主要想法见arXiv: 1707.09626.



超对称模型现状

经济的超对称模型变得越来越不自然：

- μ 参数问题，125GeV Higgs粒子质量；
- LHC没有发现超对称粒子的迹象（基于条件过强）；
- 暗物质探测实验对暗物质的性质给以强烈限制（引起广泛关注）。

根本原因：Higgs部分被过度使用。

- 对电弱对称性破缺负责——基本职责；
- 对类标准模型Higgs粒子质量负责——基本职责；
- 要求非标准模型Higgs粒子在低能过程的效应很小——实验要求；
- （很大程度）影响暗物质残留密度和间接探测结果——过度使用；
- 决定暗物质与原子核的散射大小——过度使用；
- 其他：如影响超粒子的衰变和探测等。

解决方案：增加新的场和相互作用，降低Higgs部分所起作用。要求

- 规范群的选取以及场的配置应尽可能经济；
- 应该能够解释中微子数据——实验数据要求；
- 最好能够解释宇称不守恒、大统一等基本问题——更加基础的理论。

介绍一个能维持自然性、逃避暗物质实验限制、唯象学有新特点的理论。超对称化的DM Sector + Singlet Higgs Portal 模型 (Secluded DM)。次最小超对称模型的重要扩充, 解决它面临的很多重要问题。

1. 自然性与暗物质探测实验
2. 具有Inverse Seesaw机制的NMSSM
 - ▶ 理论基本框架
 - ▶ 次最小超对称部分
 - ▶ 中微子物理
 - ▶ 暗物质的湮灭方式
 - ▶ 暗物质与原子核的散射
3. 数值结果展示
4. ISS-NMSSM的唯象学
5. 结论

1、自然性与暗物质探测实验

- **自然性：物理量中各部分贡献的大小不应该比物理量自身大许多！**

例：Z玻色子质量

$$m_Z^2 = \frac{2(m_{H_d}^2 + \Sigma_d) - 2(m_{H_u}^2 + \Sigma_u) \tan^2 \beta}{\tan^2 \beta - 1} - 2\mu^2,$$

$$\Sigma_u \simeq \sum_{i=1}^2 \frac{3Y_t^2}{16\pi^2} \times m_{\tilde{t}_i}^2 \left(\log \frac{m_{\tilde{t}_i}^2}{Q^2} - 1 \right),$$

$$\Sigma_d \simeq \sum_{i=1}^2 \frac{3Y_b^2}{16\pi^2} \times m_{\tilde{b}_i}^2 \left(\log \frac{m_{\tilde{b}_i}^2}{Q^2} - 1 \right).$$

定义精细调节量： $\Delta_Z = \max \left| \frac{\partial \log m_Z^2}{\partial \log p_i} \right|$, $\Delta_h = \max \left| \frac{\partial \log m_h^2}{\partial \log p_i} \right|$ 。

若要求理论只有10%的精细调节： $\mu \lesssim 200\text{GeV}$, $m_{\tilde{t}_i} \lesssim 1.5\text{TeV}$ 。

- **若 $\tilde{\chi}_1^0$ 为暗物质，Higgsino 质量 μ 会影响暗物质与 Higgs 粒子的相互作用！**

例：MSSM 中 Bino 作为暗物质，

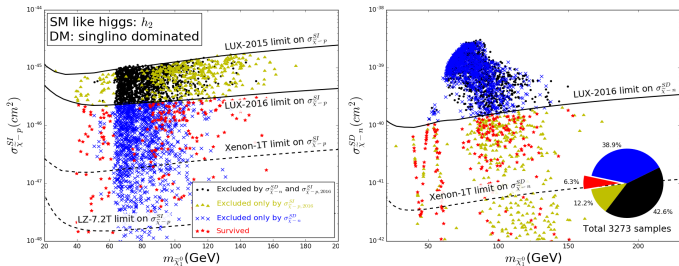
$$C_{\tilde{\chi}_1^0 \tilde{\chi}_1^0 h} \simeq \sqrt{4\pi\alpha} \frac{m_Z}{\mu} \left(\sin 2\beta + \frac{m_1}{\mu} \right).$$

1、自然性与暗物质探测实验

● 暗物质直接探测实验强烈限制理论的自然性！

例：若要求理论具有1%调节能力，随机扫描发现95%的参数空间将被排除（Bayesian分析给出类似结论）。

J. Cao, et. al. JHEP 1610 (2016) 136, arXiv: 1609.00204,
LUX限制来自2016年9月份之前的数据，XENON-1T将上限降低约4倍。



● 解决方案：

- ▶ Blind Spots: 会引入另外的精细调节；
- ▶ Multi-component DM: 使得理论复杂化；
- ▶ 新理论，新暗物质？

2、具有Inverse Seesaw机制的NMSSM:理论基本框架

SF	Spin 0	Spin $\frac{1}{2}$	Generations	$(U(1) \otimes SU(2) \otimes SU(3))$
\hat{q}	\tilde{q}	q	3	$(\frac{1}{6}, \mathbf{2}, \mathbf{3})$
\hat{l}	\tilde{l}	l	3	$(-\frac{1}{2}, \mathbf{2}, \mathbf{1})$
\hat{H}_d	H_d	\tilde{H}_d	1	$(-\frac{1}{2}, \mathbf{2}, \mathbf{1})$
\hat{H}_u	H_u	\tilde{H}_u	1	$(\frac{1}{2}, \mathbf{2}, \mathbf{1})$
\hat{d}	\tilde{d}_R^*	d_R^*	3	$(\frac{1}{3}, \mathbf{1}, \bar{\mathbf{3}})$
\hat{u}	\tilde{u}_R^*	u_R^*	3	$(-\frac{2}{3}, \mathbf{1}, \bar{\mathbf{3}})$
\hat{e}	\tilde{e}_R^*	e_R^*	3	$(\mathbf{1}, \mathbf{1}, \mathbf{1})$
\hat{s}	S	\tilde{S}	1	$(\mathbf{0}, \mathbf{1}, \mathbf{1})$
$\hat{\nu}$	$\tilde{\nu}_R^*$	ν_R^*	3	$(\mathbf{0}, \mathbf{1}, \mathbf{1})$
\hat{X}	\tilde{X}	X	3	$(\mathbf{0}, \mathbf{1}, \mathbf{1})$

● 理论要求:

- ▶ 超势中不引入特定的高能能标;
- ▶ 能自然地、经济地解释Higgs质量, 最好能解释中微子振荡实验;
- ▶ 容易与暗物质实验结果一致, 如**自然地压低暗物质与原子核的散射截面**。

● ISS-NMSSM的理论基本框架:

- ▶ 用最经济的场在NMSSM框架下实现Inverse Seesaw 机制;
- ▶ 轻子数 L 及 Z_3 对称性极轻微破坏, 量子数 $(-1)^L$ 及 R 宇称守恒。

2、具有Inverse Seesaw机制的NMSSM:理论基本框架

$$W = \left[Y_u \hat{q} \cdot \hat{H}_u \hat{u} + Y_d \hat{H}_d \cdot \hat{q} \hat{d} + Y_e \hat{H}_d \cdot \hat{l} \hat{e} + \lambda \hat{s} \hat{H}_u \cdot \hat{H}_d + \frac{1}{3} \kappa \hat{s}^3 \right] \\ + \left[\frac{1}{2} \mu_\nu \hat{\nu} \hat{\nu} + \frac{1}{2} \mu_X \hat{X} \hat{X} + \lambda_N \hat{s} \hat{\nu} \hat{X} + Y_\nu \hat{l} \cdot \hat{H}_u \hat{\nu} \right],$$

$$L^{\text{soft}} = - \left[\frac{1}{2} \left(m_1 \lambda_B^2 + m_2 \lambda_W^2 + m_3 \lambda_g^2 + \text{h.c.} \right) + m_{H_d}^2 |H_d|^2 + m_{H_u}^2 |H_u|^2 + m_S^2 |S|^2 \right. \\ + m_{\tilde{q}}^2 (\tilde{u}_L^* \tilde{u}_L + \tilde{d}_L^* \tilde{d}_L) + m_{\tilde{u}_R}^2 \tilde{u}_R^* \tilde{u}_R + m_{\tilde{d}_R}^2 \tilde{d}_R^* \tilde{d}_R + m_{\tilde{l}}^2 (\tilde{e}_L^* \tilde{e}_L + \tilde{\nu}_L \tilde{\nu}_L^*) + m_{\tilde{e}_R}^2 \tilde{e}_R^* \tilde{e}_R \\ \left. + (\lambda A_\lambda S H_u \cdot H_d + \frac{\kappa}{3} A_\kappa S^3 + Y_u A_u \tilde{u}_R^* \tilde{q} \cdot H_u + Y_d A_d \tilde{d}_R^* H_d \cdot \tilde{q} + Y_e A_e \tilde{e}_R^* H_d \cdot \tilde{l} + \text{h.c.}) \right] \\ - \left[m_\nu^2 \tilde{\nu}_R \tilde{\nu}_R^* + m_X^2 \tilde{X} \tilde{X}^* + \left(\frac{B_{\mu\nu}}{2} \tilde{\nu}_R^* \tilde{\nu}_R^* + \frac{B_{\mu X}}{2} \tilde{X} \tilde{X} + \lambda_N A_{\lambda_N} S \tilde{\nu}_R^* \tilde{X} + Y_\nu A_\nu \tilde{\nu}_R^* \tilde{l} H_u + \text{h.c.} \right) \right].$$

- 黑色: NMSSM的超势及软破缺项;
- 红色: 为实现Inverse Seesaw而引入;
- NMSSM之外引入的参数 (味空间均为 3×3 矩阵):
 - ▶ Yukawa耦合: Y_ν, λ_N ;
 - ▶ 软破缺系数: $m_{\tilde{\nu}}, m_{\tilde{X}}, A_\nu$ 以及 A_{λ_N} ;
 - ▶ 轻子数破坏系数: $\mu_X, \mu_\nu \lesssim \mathcal{O}(\text{KeV})$, B_{μ_X}, B_{μ_ν} 为对应Bilinear项。
 $Y_\nu, \lambda_N, A_\nu, A_{\lambda_N}$ 影响Sneutrino暗物质相互作用及质量。
 $m_{\tilde{\nu}}$ 和 $m_{\tilde{X}}$ 仅影响质量。

2、ISS-NMSSM: 次最小超对称部分

- NMSSM: MSSM模型的单态场扩充, 超势具有 Z_3 不变性。

超势:
$$W = W_{MSSM} + \lambda \varepsilon_{ij} \hat{H}_u^i \hat{H}_d^j \hat{S} + \frac{\kappa}{3} \hat{S}^3.$$

软破缺项:
$$V_{\text{soft}} = V_{MSSM} + \tilde{m}_d^2 |H_d|^2 + \tilde{m}_u^2 |H_u|^2 + \tilde{m}_S^2 |S|^2 \\ + (\lambda A_\lambda \varepsilon_{ij} H_u^i H_d^j S + \frac{\kappa}{3} A_\kappa S^3 + h.c.).$$

W_{MSSM} : MSSM的超势, 但不包含 μ 项。 \hat{S} : 单态超场。

V_{MSSM} : MSSM 软破缺项。 $\varepsilon_{ij} \hat{H}_u^i \hat{H}_d^j \hat{S}$: 二重态与单态Higgs场的相互作用。

- 粒子谱:

- ▶ 三个CP-even Higgs粒子: h_1, h_2, h_3 ; $m_{h_1} < m_{h_2} < m_{h_3}$ 。
- ▶ 两个CP-odd Higgs粒子: A_1, A_2 ; $m_{A_1} < m_{A_2}$ 。
- ▶ 五个Neutralino粒子: $\tilde{\chi}_1^0, \tilde{\chi}_2^0, \tilde{\chi}_3^0, \tilde{\chi}_4^0, \tilde{\chi}_5^0$ 。

- 理论特点:

- ① μ 参数通过动力学产生: $\mu = \lambda \langle s \rangle$; 单态粒子轻时, 自然地在电弱能标。
- ② 能自然预言125 GeV Higgs 质量: 额外树图贡献或Doublet-Singlet混合!
- ③ 单态场为主的Higgs粒子可以很轻, 可以作为超粒子的衰变产物;
- ④ 单态场为主的CP-even Higgs粒子能较大程度影响暗物质与原子核的散射。

2、ISS-NMSSM: 中微子部分

- Yukawa相互作用: Y_ν 、 λ_N 、 $\mu_{\nu,X}$ 为味空间 3×3 矩阵。

$$\mathcal{L}_\nu = \nu_R^* Y_\nu H_u^0 \nu_L + \nu_R^* \lambda_N S X + \frac{1}{2} \nu_R^* \mu_\nu \nu_R^* + \frac{1}{2} X \mu_X X + \text{h.c.}$$

- 质量矩阵: 以 (ν_L, ν_R^*, X) 为基矢, 定义 $M_D = \frac{v_u}{\sqrt{2}} Y_\nu$ 和 $M_R = \frac{v_s}{\sqrt{2}} \lambda_N$,

$$M_{\text{ISS}} = \begin{pmatrix} 0 & M_D^T & 0 \\ M_D & \mu_\nu & M_R \\ 0 & M_R^T & \mu_X \end{pmatrix}.$$

- 质量对角化: $U_\nu^* M_{\text{ISS}} U_\nu^\dagger = \text{diag}(m_i, m_{H_j})$, ($i = 1, 2, 3; j = 1, 2, \dots, 6$).

$$(U_\nu^\dagger)_{9 \times 9} = \begin{pmatrix} U_{3 \times 3} & X_{3 \times 6} \\ Y_{6 \times 3} & Z_{6 \times 6} \end{pmatrix}.$$

- 有效中微子质量矩阵: 积分掉重中微子场 ν_R^* 和 X

$$M_\nu = \left[M_D^T M_R^{T-1} \right] \mu_X \left[(M_R^{-1}) M_D \right] + \mathcal{O}(\mu_{X,\nu}^2) \equiv F \mu_X F^T + \mathcal{O}(\mu_{X,\nu}^2).$$

$$U_{\text{PMNS}}^T M_\nu U_{\text{PMNS}} = \text{diag}(m_{\nu_1}, m_{\nu_2}, m_{\nu_3}).$$

- 么正性破坏: $U \simeq \left(\mathbf{1} - \frac{1}{2} F F^\dagger \right) U \equiv (\mathbf{1} - \eta) U_{\text{PMNS}}$.

2、ISS-NMSSM：中微子部分

为了和中微子振荡数据相一致，对 Y_ν 或 μ_X 进行参数化：

- Casas-Ibarra 参数化：

$$m_D = V^\dagger \text{diag}(\sqrt{M_1}, \sqrt{M_2}, \sqrt{M_3}) R \text{diag}(\sqrt{m_{\nu_1}}, \sqrt{m_{\nu_2}}, \sqrt{m_{\nu_3}}) U_{\text{PMNS}}^\dagger,$$

其中 V 和 R 定义为：

$$M_R \mu_X^{-1} M_R^T = V^\dagger \text{diag}(M_1, M_2, M_3) V^*,$$
$$R = \begin{pmatrix} c_2 c_3 & -c_1 s_3 - s_1 s_2 c_3 & s_1 s_3 - c_1 s_2 c_3 \\ c_2 s_3 & c_1 c_3 - s_1 s_2 s_3 & -s_1 c_3 - c_1 s_2 s_3 \\ s_2 & s_1 c_2 & c_1 c_2 \end{pmatrix}.$$

这里 $c_i \equiv \cos \theta_i$, $s_i \equiv \sin \theta_i$, θ_1, θ_2 和 θ_3 为任意角度。

- 对 μ_X 参数化：

$$\mu_X = M_R^T m_D^{T-1} U_{\text{PMNS}}^* \text{diag}(m_{\nu_1}, m_{\nu_2}, m_{\nu_3}) U_{\text{PMNS}}^\dagger m_D^{-1} M_R.$$

2、ISS-NMSSM：中微子部分

Unitary Constraints:

$$\begin{aligned}(FF^\dagger)_{ee} &< 2.5 \times 10^{-3}, & (FF^\dagger)_{e\mu} &< 6.8 \times 10^{-4}, & (FF^\dagger)_{\mu\mu} &< 4.4 \times 10^{-4}, \\ (FF^\dagger)_{e\tau} &< 2.7 \times 10^{-3}, & (FF^\dagger)_{\tau\tau} &< 5.6 \times 10^{-3}, & (FF^\dagger)_{\mu\tau} &< 1.2 \times 10^{-3}.\end{aligned}$$

For diagonal Y_ν and λ_N ,

$$\frac{(Y_\nu v)_{ee}}{(\lambda_N v_s)_{ee}} < 20.8, \quad \frac{(Y_\nu v)_{\mu\mu}}{(\lambda_N v_s)_{\mu\mu}} < 47.6, \quad \frac{(Y_\nu v)_{\tau\tau}}{(\lambda_N v_s)_{\tau\tau}} < 13.4.$$

Flavor Physics (90% C. L.):

$$\text{Br}(\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma) < 4.2 \times 10^{-13}, \quad \text{Br}(\tau^\pm \rightarrow e^\pm \gamma) < 3.3 \times 10^{-8}, \quad \text{Br}(\tau^\pm \rightarrow \mu^\pm \gamma) < 4.4 \times 10^{-8},$$

$$\begin{aligned}\text{Br}(\mu^+ \rightarrow e^+ e^+ e^-) &< 1.0 \times 10^{-12}, & \text{Br}(\tau^- \rightarrow e^- e^+ e^-) &< 2.7 \times 10^{-8}, \\ \text{Br}(\tau^- \rightarrow \mu^- \mu^+ \mu^-) &< 2.1 \times 10^{-8}, & \text{Br}(\tau^- \rightarrow e^- \mu^+ \mu^-) &< 2.7 \times 10^{-8}, \\ \text{Br}(\tau^- \rightarrow \mu^- e^+ e^-) &< 1.8 \times 10^{-8}, & \text{Br}(\tau^- \rightarrow e^+ \mu^- \mu^-) &< 1.7 \times 10^{-8}, \\ \text{Br}(\tau^- \rightarrow \mu^+ e^- e^-) &< 1.5 \times 10^{-8}.\end{aligned}$$

2、ISS-NMSSM：暗物质的湮灭方式

选取最轻的Sneutrino 作为暗物质！

- Sneutrino场分解:

$$\tilde{\nu}_{L,i} = \frac{1}{\sqrt{2}}(\phi_i + i\sigma_i), \quad \tilde{\nu}_{R,i} = \frac{1}{\sqrt{2}}(\phi_{3+i} + i\sigma_{3+i}), \quad \tilde{\chi}_i = \frac{1}{\sqrt{2}}(\phi_{6+i} + i\sigma_{6+i}).$$

- CP-odd Sneutrino 质量矩阵: 选取基矢为 $(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_9)$:

$$m_{\tilde{\nu}_l}^2 = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{12}^T & m_{22} & m_{23} \\ m_{13}^T & m_{23}^T & m_{33} \end{pmatrix},$$

$$m_{11} = \frac{1}{4} [2v_u^2 \Re(Y_\nu^T Y_\nu^*) + 4\Re(m_l^2)] + \frac{1}{8} (g_1^2 + g_2^2) (-v_u^2 + v_d^2) \mathbf{1},$$

.....

$$m_{33} = \frac{1}{8} (4v_s^2 \Re(\lambda_N^T \lambda_N^*) - 8\Re(B_{\mu_X}) + 8\Re(\mu_X \mu_X^*) + 8\Re(m_x^2)).$$

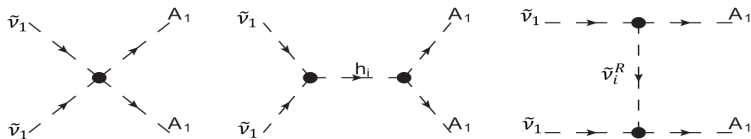
重要结论：若味破坏归结为 μ_X ，暗物质物理时只需要考虑一代情况！

- CP-even Sneutrino 质量矩阵: 选取基矢为 $(\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_9)$:

$$m_{\tilde{\nu}_R}^2 = m_{\tilde{\nu}_l}^2 |_{\mu_X \rightarrow -\mu_X, B_{\mu_X} \rightarrow -B_{\mu_X}}.$$

重要结论：成对出现质量近似简并的CP-odd和CP-even Sneutrino。

2、ISS-NMSSM：暗物质的湮灭方式



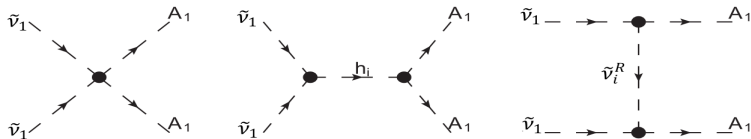
● Sneutrino暗物质主要湮灭方式如下：

- ▶ $\tilde{\nu}_1 \tilde{\nu}_1 \rightarrow ss$ ； s ：以单态场为主的Higgs。
- ▶ $\tilde{\nu}_1 \tilde{\nu}_1 \rightarrow \eta\eta^*$ ； η ：标准模型粒子或重中微子，通过Higgs共振湮灭。
- ▶ $\tilde{\nu}_1^R \tilde{\nu}_1^R \rightarrow ss, \eta\eta^*$ 和 $\tilde{\nu}_1 \tilde{\nu}_1^R \rightarrow \eta\eta^*$ ；伴随湮灭过程，模型极具特色的地方。
- ▶ $\tilde{\chi}_i^0 \tilde{\chi}_j^0, \tilde{\chi}_i^0 \tilde{\chi}_1^\pm, \tilde{\chi}_1^\pm \tilde{\chi}_1^\mp \rightarrow \eta_i \eta_j^*$ ； $\tilde{\chi}$ ：Higgsino，共同湮灭。

● 若 $\tilde{\nu}_1 \tilde{\nu}_1 \rightarrow ss$ 为主要湮灭方式， $\langle\sigma v\rangle_0$ 过大，如何避免矮星系限制？

- ▶ “禁止湮灭”：要求 $m_{\tilde{\nu}_1}$ 比 m_s 略小；
- ▶ 共振湮灭：要求 $m_{\tilde{\nu}_1}$ 比 $m_{h_i}/2$ 略小；
- ▶ 共同湮灭：要求 $m_{\tilde{\nu}_1}$ 比Higgsino质量略小，以Higgsino的湮灭为主；
- ▶ $\tilde{\nu}_1^R$ 在宇宙早期与 $\tilde{\nu}_1$ 共同湮灭，对 $\langle\sigma v\rangle_{T_f}$ 有贡献，但对 $\langle\sigma v\rangle_0$ 无贡献

2、ISS-NMSSM: 暗物质的湮灭方式



$$\begin{aligned}
 \sigma v|_{\sqrt{s}} &= \frac{\sqrt{1 - m_{A_1}^2/s}}{16\pi s} \left\{ \left| C_{\tilde{\nu}_1 \tilde{\nu}_1 A_1 A_1} - \sum_i \frac{C_{\tilde{\nu}_1 \tilde{\nu}_1 h_i} C_{h_i A_1 A_1}}{s - m_{h_i}^2} \right|^2 \right. \\
 &+ 2C_{\tilde{\nu}_1 \tilde{\nu}_1 A_1 A_1} \sum_i \frac{C_{\tilde{\nu}_1 \tilde{\nu}_i^R A_1}^2}{c} \ln \frac{a_i + c}{a_i - c} - 2 \sum_{i,j} \frac{C_{\tilde{\nu}_1 \tilde{\nu}_1 h_i} C_{h_i A_1 A_1}}{s - m_{h_i}^2} \frac{C_{\tilde{\nu}_1 \tilde{\nu}_j^R A_1}^2}{c} \ln \frac{a_j + c}{a_j - c} \\
 &\left. + 2 \sum_{i,j} \frac{C_{\tilde{\nu}_1 \tilde{\nu}_i^R A_1}^2 C_{\tilde{\nu}_1 \tilde{\nu}_j^R A_1}^2}{c(a_i - a_j)} \ln \frac{(a_i - c)(a_j + c)}{(a_i + c)(a_j - c)} \right\} \\
 &\simeq a + bv^2, \\
 a &= \frac{\sqrt{1 - m_{A_1}^2/m_{\tilde{\nu}_1}^2}}{64\pi m_{\tilde{\nu}_1}^2} \left| C_{\tilde{\nu}_1 \tilde{\nu}_1 A_1 A_1} - \sum_i \frac{C_{\tilde{\nu}_1 \tilde{\nu}_1 h_i} C_{h_i A_1 A_1}}{4m_{\tilde{\nu}_1}^2 - m_{h_i}^2} + \sum_j \frac{2C_{\tilde{\nu}_1 \tilde{\nu}_j^R A_1}^2}{m_{\tilde{\nu}_1}^2 + m_{\tilde{\nu}_j^R}^2 - m_{A_1}^2} \right|^2,
 \end{aligned}$$

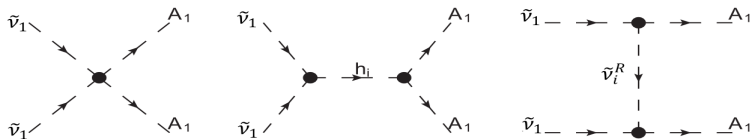
2、ISS-NMSSM：暗物质的湮灭方式

$$\begin{aligned}
 b = & \left(-\frac{1}{4} + \frac{m_{A_1}^2}{8(m_{\tilde{\nu}_1}^2 - m_{A_1}^2)} \right) \times a - \frac{\sqrt{1 - m_{A_1}^2/m_{\tilde{\nu}_1}^2}}{64\pi m_{\tilde{\nu}_1}^2} \times \\
 & \left\{ \sum_{i,j} \frac{C_{\tilde{\nu}_1 \tilde{\nu}_1 h_i} C_{h_i A_1 A_1} C_{\tilde{\nu}_1 \tilde{\nu}_1 h_j} C_{h_j A_1 A_1}}{(4m_{\tilde{\nu}_1}^2 - m_{h_i}^2)(4m_{\tilde{\nu}_1}^2 - m_{h_j}^2)} \left(\frac{m_{\tilde{\nu}_1}^2}{4m_{\tilde{\nu}_1}^2 - m_{h_i}^2} + i \leftrightarrow j \right) \right. \\
 & - \sum_{i,j} \frac{2C_{\tilde{\nu}_1 \tilde{\nu}_1 h_i} C_{h_i A_1 A_1} C_{\tilde{\nu}_1 \tilde{\nu}_j^R A_1}^2}{(4m_{\tilde{\nu}_1}^2 - m_{h_i}^2)(m_{\tilde{\nu}_1}^2 + m_{\tilde{\nu}_j^R}^2 - m_{A_1}^2)} \left(\frac{m_{\tilde{\nu}_1}^2}{4m_{\tilde{\nu}_1}^2 - m_{h_i}^2} + \frac{2m_{\tilde{\nu}_1}^2}{m_{\tilde{\nu}_1}^2 + m_{\tilde{\nu}_j^R}^2 - m_{A_1}^2} \right) \\
 & + \sum_{i,j} \frac{2C_{\tilde{\nu}_1 \tilde{\nu}_i^R A_1}^2 C_{\tilde{\nu}_1 \tilde{\nu}_j^R A_1}^2}{(m_{\tilde{\nu}_1}^2 + m_{\tilde{\nu}_i^R}^2 - m_{A_1}^2)(m_{\tilde{\nu}_1}^2 + m_{\tilde{\nu}_j^R}^2 - m_{A_1}^2)} \left(\frac{m_{\tilde{\nu}_1}^2}{(m_{\tilde{\nu}_1}^2 + m_{\tilde{\nu}_i^R}^2 - m_{A_1}^2)} + i \leftrightarrow j \right) \\
 & \left. - 2C_{\tilde{\nu}_1 \tilde{\nu}_1 A_1 A_1} \left(\sum_i \frac{C_{\tilde{\nu}_1 \tilde{\nu}_1 h_i} C_{h_i A_1 A_1} m_{\tilde{\nu}_1}^2}{(4m_{\tilde{\nu}_1}^2 - m_{h_i}^2)^2} - \sum_j \frac{C_{\tilde{\nu}_1 \tilde{\nu}_j^R A_1}^2 m_{\tilde{\nu}_1}^2}{(m_{\tilde{\nu}_1}^2 + m_{\tilde{\nu}_j^R}^2 - m_{A_1}^2)^2} \right) \right\}.
 \end{aligned}$$

在暗物质退耦温度处以及今天：

$$\begin{aligned}
 \langle \sigma v \rangle_{T_f} & \simeq a + 6b \frac{T_f}{m_{\tilde{\nu}_1}} \simeq a + \frac{6}{25} b \simeq a, & \langle \sigma v \rangle_0 & \simeq a; \\
 \langle \sigma v \rangle_0 & \simeq \langle \sigma v \rangle_{T_f} \sim 10^{-26} \text{cm}^3 \text{s}^{-1}.
 \end{aligned}$$

2、ISS-NMSSM：暗物质的湮灭方式



• Sneutrino暗物质主要湮灭方式如下：

- ▶ $\tilde{\nu}_1 \tilde{\nu}_1 \rightarrow ss$ ； s ：以单态场为主的Higgs。
- ▶ $\tilde{\nu}_1 \tilde{\nu}_1 \rightarrow \eta\eta^*$ ； η ：标准模型粒子或重中微子，通过Higgs共振湮灭。
- ▶ $\tilde{\nu}_1^R \tilde{\nu}_1^R \rightarrow ss, \eta\eta^*$ 和 $\tilde{\nu}_1 \tilde{\nu}_1^R \rightarrow \eta\eta^*$ ；伴随湮灭过程。
- ▶ $\tilde{\chi}_i^0 \tilde{\chi}_j^0, \tilde{\chi}_i^0 \tilde{\chi}_1^\pm, \tilde{\chi}_1^\pm \tilde{\chi}_1^\mp \rightarrow \eta_i \eta_j^*$ ； $\tilde{\chi}$ ：Higgsino，共同湮灭。

• 若 $\tilde{\nu}_1 \tilde{\nu}_1 \rightarrow ss$ 为主要湮灭方式， $\langle\sigma v\rangle_0$ 过大，如何避免矮星系限制？

- ▶ “禁止湮灭”：要求 $m_{\tilde{\nu}_1}$ 比 m_s 略小；
- ▶ 共振湮灭：要求 $m_{\tilde{\nu}_1}$ 比 $m_{h_i}/2$ 略小；
- ▶ 共同湮灭：要求 $m_{\tilde{\nu}_1}$ 比 Higgsino 质量略小，以 Higgsino 的湮灭为主；
- ▶ $\tilde{\nu}_1^R$ 在宇宙早期与 $\tilde{\nu}_1$ 共同湮灭，对 $\langle\sigma v\rangle_{T_f}$ 有贡献，但对 $\langle\sigma v\rangle_0$ 无贡献

2、ISS-NMSSM：暗物质与原子核的散射

暗物质与质子散射截面公式(通过 t -道交换CP-even Higgs实现):

$$\sigma_{\tilde{\nu}_1-p}^{\text{SI}} = \frac{\mu_{\text{red}}^2}{4\pi m_{\tilde{\nu}_1}^2} f_p^2 = \frac{4F_u^{(p)2} \mu_{\text{red}}^2 m_p^2}{\pi} \left\{ \sum_i (a_{ui} + a_{di} F_d^{(p)} / F_u^{(p)}) \right\}^2.$$

a_{ui} : 与算子 $\mathcal{L} = \tilde{\nu}_1 \tilde{\nu}_1 \bar{u} u$ 系数有关; F_q^p : 核物理形状因子。 $\sigma_{\tilde{\nu}_1-p}^{\text{SD}} \equiv 0$ 。

• ISS-NMSSM:

$$a_{ui} = -\frac{g}{8m_W} \frac{C_{\tilde{\nu}_1 \tilde{\nu}_1 h_i}}{m_{h_i}^2 m_{\tilde{\nu}_1}} \frac{S_{i2}}{\sin \beta}, \quad a_{di} = -\frac{g}{8m_W} \frac{C_{\tilde{\nu}_1 \tilde{\nu}_1 h_i}}{m_{h_i}^2 m_{\tilde{\nu}_1}} \frac{S_{i1}}{\cos \beta},$$

- ▶ h_i : 第 i 个CP-even Higgs粒子, 对角化相关质量矩阵得到;
- ▶ S_{i1} : h_i 中 H_d 场所占分量, S_{i2} : h_i 中 H_u 场所占分量;
- ▶ C_{XYZ} : 粒子X、Y、Z相互作用系数。

• MSSM: 以Bino为主的 $\tilde{\chi}_1^0$ 作为暗物质

$$a_{ui} = -\frac{g}{4m_W} \frac{C_{\tilde{\chi}_1^0 \tilde{\chi}_1^0 h_i}}{m_{h_i}^2} \frac{S_{i2}}{\sin \beta}, \quad a_{di} = -\frac{g}{4m_W} \frac{C_{\tilde{\chi}_1^0 \tilde{\chi}_1^0 h_i}}{m_{h_i}^2} \frac{S_{i1}}{\cos \beta},$$

$$C_{\tilde{\chi}_1^0 \tilde{\chi}_1^0 h_i} = g_1 N_{11} (S_{i1} N_{13} - S_{i2} N_{14}) \simeq \sqrt{4\pi\alpha} \frac{m_Z}{\mu} (\sin 2\beta + \frac{M_1}{\mu}).$$

2、ISS-NMSSM: 暗物质与原子核的散射

- h_1 对应125 GeV Higgs, h_2 和 h_3 退藕:

$$\sigma_{\tilde{\nu}_1-p}^{\text{SI}} \propto \left(\frac{\sqrt{2}Y_\nu A_\nu Z_{11}Z_{12} + Y_\nu^2 v_u Z_{12}Z_{12}}{(125\text{GeV})^2 m_{\tilde{\nu}_1}} \right)^2.$$

- ▶ Z : $(\tilde{\nu}_L, \tilde{\nu}_R, \tilde{\nu}_s)$ 基矢下Sneutrino质量矩阵的对角矩阵;
 - ▶ Z_{11} : $\tilde{\nu}_1$ 中含 $\tilde{\nu}_L$ 的成分, 通常很小; Z_{12} : $\tilde{\nu}_1$ 中含 $\tilde{\nu}_R$ 的成分;
 - ▶ 和MSSM相比压低因子: $10 \times (Y_\nu Z_{12} \mu / M_1)^4$, Y_ν 受非么正性强烈限制!
- h_1 对应125 GeV Higgs, h_2 以单态场为主, 且 $m_{h_2} \lesssim v$, h_3 退藕:
假定 $Y_\nu = 0$, 即 $\tilde{\nu}_1$ 只与单态场有耦合, 同时假定 $a_{d1} = a_{d2}$:

$$\sigma_{\tilde{\nu}_1-p}^{\text{SI}} \propto \left(\frac{S_{13} C_{\tilde{\nu}_1 \tilde{\nu}_1 s}}{(125\text{GeV})^2 m_{\tilde{\nu}_1}} \right)^2.$$

- ▶ S_{13} : 类标准模型Higgs中单态场的成分, Higgs数据要求很小;
- ▶ $C_{\tilde{\nu}_1 \tilde{\nu}_1 s}$: $\tilde{\nu}_1$ 与单态场的耦合, 典型量级: $10\text{GeV} \sim 100\text{GeV}$.

对于 $Y_\nu = 0$ 时, 非常有特色的结论:

只考虑 $\tilde{\nu}_1$ 与单态场的相互作用, 就可以预言正确的残留密度, 同时对直接、间接探测有很小的贡献。

2、ISS-NMSSM：暗物质与原子核的散射

Blind Spot Condition for SI cross section (BSC) :

$$\sum_i (a_{ui} + a_{di} F_d^{(p)} / F_u^{(p)}) = 0$$

$$\sum_i \left[\frac{(S_{i1} C_{\tilde{\nu}_1 \tilde{\nu}_1 H_d} + S_{i2} C_{\tilde{\nu}_1 \tilde{\nu}_1 H_u} + S_{i3} C_{\tilde{\nu}_1 \tilde{\nu}_1 s})}{m_{h_i}^2} \left(\frac{S_{i2}}{\sin \beta} + \frac{1.07 S_{i1}}{\cos \beta} \right) \right] \simeq 0$$

$$C_{\tilde{\nu}_1 \tilde{\nu}_1 H_d} = \lambda Y_\nu v_s Z_{11} Z_{12} + \lambda \lambda_N v_u Z_{12} Z_{13} - \frac{1}{4} (g_1^2 + g_2^2) v_d Z_{11} Z_{11},$$

$$C_{\tilde{\nu}_1 \tilde{\nu}_1 H_u} = \lambda \lambda_N v_d Z_{12} Z_{13} - \sqrt{2} T_\nu Z_{11} Z_{12} - Y_\nu^2 v_u Z_{11} Z_{11} - \lambda_N Y_\nu v_s Z_{11} Z_{13} \\ - Y_\nu^2 v_u Z_{12} Z_{12} + \frac{1}{4} (g_1^2 + g_2^2) v_u Z_{11} Z_{11},$$

$$C_{\tilde{\nu}_1 \tilde{\nu}_1 s} = \lambda Y_\nu v_d Z_{11} Z_{12} - 2\kappa \lambda_N v_s Z_{12} Z_{13} - \sqrt{2} T_{\lambda_N} Z_{12} Z_{13} + \sqrt{2} \lambda_N \mu_X Z_{12} Z_{13} \\ - \lambda_N Y_\nu v_u Z_{11} Z_{13} - \lambda_N^2 v_s (Z_{12} Z_{12} + Z_{13} Z_{13}),$$

ISS-NMSSM: 给定Higgs部分，调整Sneutrino部分参数就可以实现BSC。

MSSM和NMSSM: BSC完全通过调整 M_1 和Higgs部分的参数实现。

2、ISS-NMSSM

ISS-NMSSM: Inverse Seesaw机制和NMSSM的完美结合!

单态场在ISS-NMSSM中所起作用:

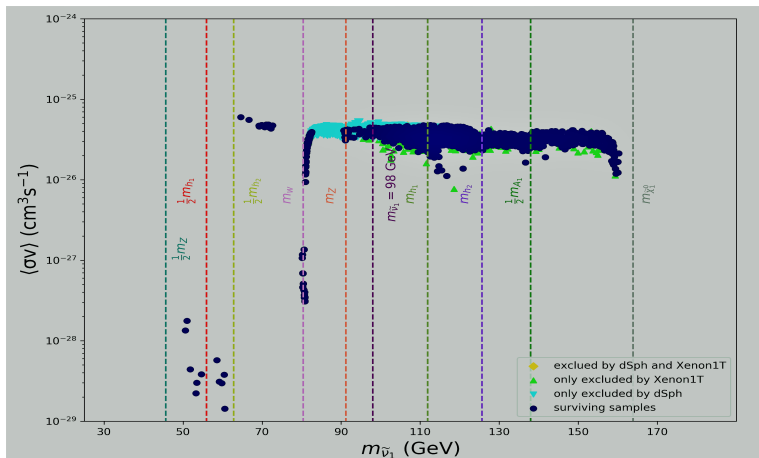
- 负责 μ 参数: $\mu = \lambda v_s$;
- 负责重中微子质量: $\nu_{4-9} \simeq \lambda_N v_s$;
- 负责暗物质物理:
单态Higgs场 + $\tilde{\nu}_R + \tilde{\chi}$ 构成DM Sector, 单态Higgs场同时作为Mediator。
 - 传递 $\tilde{\nu}_1 \tilde{\nu}_1 \simeq \tilde{\chi}_1^+ \tilde{\chi}_1^-, \tilde{\chi}_i^0 \tilde{\chi}_j^0$, 使 $\tilde{\nu}_1$ 与Higgsino 处于热平衡, 共同湮灭创造条件!
 - 单态场可作为主要的暗物质湮灭末态, 也可以传播暗物质的湮灭;
 - $\tilde{\nu}_1$ 与单态场的相互作用影响暗物质与原子核散射截面。

3、数值结果展示

parameter	value	parameter	value	parameter	value
$\tan \beta$	3.3	λ	0.63	κ	0.23
A_λ	759	A_{κ}	-248	μ	248
$m_{\tilde{q}}$	2000	$m_{\tilde{\tau}}$	400	$A_{u,c,d,s}$	2000
$A_{t,b}$	-3000	$A_{e,\mu,\tau}$	400	M_1	400
M_2	800	M_3	2400	m_{h_1}	112
m_{h_2}	125.6	m_{h_3}	841	m_{A_1}	276
m_{A_2}	846	$m_{\tilde{\chi}_1^0}$	164	$m_{\tilde{\chi}_2^0}$	266
$m_{\tilde{\chi}_3^0}$	270	$m_{\tilde{\chi}_1^\pm}$	243	$m_{\tilde{\chi}_2^\pm}$	825
S_{11}	0.252	S_{12}	0.523	S_{13}	0.813
S_{21}	0.178	S_{22}	0.801	S_{23}	0.571
S_{31}	0.951	S_{32}	0.289	S_{33}	0.108

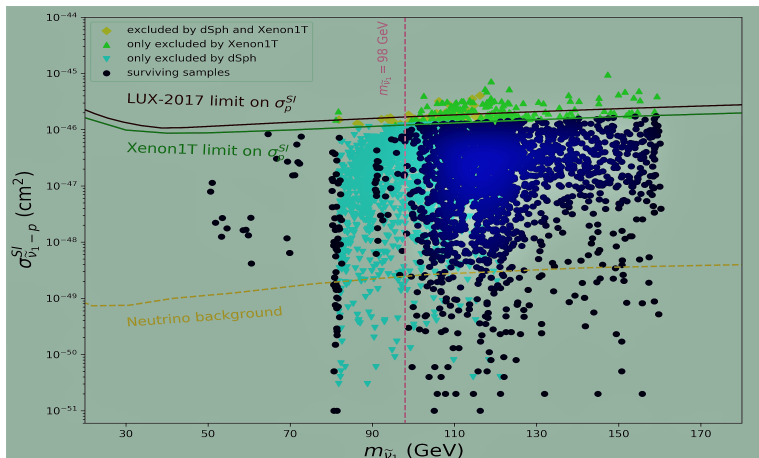
- 指定NMSSM部分参数，利用MultiNest扫描Sneutrino部分参数：
 $0 < \lambda_N, Y_\nu \leq 0.3$, $-1\text{TeV} < A_{\lambda_N}, A_\nu \leq 1\text{TeV}$, $0 \text{ GeV} \leq m_{\nu,x} \leq 200 \text{ GeV}$.
- 采用的Likelihood函数（存活点的疏密程度反映Likelihood分布）：
 125 GeV Higgs数据，B物理，么正性；
 暗物质：残留密度、直接探测实验，矮星系观测（用Fermi-LAT数据）。

3、数值结果展示



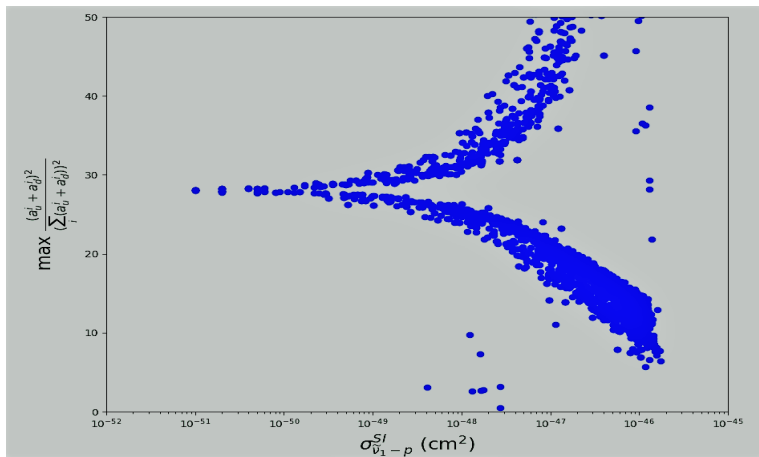
- 共振湮灭: $\frac{1}{2}m_Z$, $\frac{1}{2}m_{h_1}$, $\frac{1}{2}m_{h_2}$, $\frac{1}{2}m_{A_1}$ 。耦合系数可很小(注意大于 $\frac{m_{h_2}}{2}$)；
- 禁止湮灭: m_W , m_Z , m_{h_1} , m_{h_2} 。附近对应暗物质间接探测截面的压低；
- 共同湮灭: $m_{\tilde{\chi}_1^0}$ 。耦合系数可以很小，对应间接探测截面压低。

3、数值结果展示



- 共振湮灭处直接探测截面可以很小；
- 多个湮灭道打开以后直接探测截面可以很小；
- $m_{\tilde{\chi}_1^0}$ 在 $80\text{GeV} - 110\text{GeV}$ 被大量排除。原因 $\tilde{\nu}_1 \tilde{\nu}_1 \rightarrow h_i^* \rightarrow VV$ ，耦合大。

3、数值结果展示



- 不同 h_i 对直接探测截面的贡献与总截面比值的最大值；
- 它反映暗物质-原子核散射截面的精细调节程度；
- 没有共振，精细调节最大为1/30；存在共振，没有精细调节。

4、对NMSSM唯象学的影响

- 在如下情况下，不用考虑暗物质物理的限制！
 - ▶ 存在一个Higgs粒子，满足： $m_{h_1} < 2m_{\tilde{\chi}_1^0}$ 或 $m_{A_1} < 2m_{\tilde{\chi}_1^0}$ 。
暗物质可直接湮灭到Higgs对，或者通过Higgs共振湮灭。
 - ▶ $\tilde{\chi}_1^0$ 以Higgsino为主：暗物质与Higgsino共同湮灭。均满足直接间接探测限制。
后果：NMSSM的参数空间得到释放。
- Y_ν 和 λ_N 引入新的相互作用；存在潜在轻的粒子，如 ν_R ， h_1 ， A_1 等。
 - ▶ **对Higgs物理的影响；**
Higgs衰变到轻粒子，Higgs味破坏衰变，Higgs质量受圈图修正影响等。
 - ▶ **重中微子在对撞机上的迹象；**
 ν_R 质量从几个GeV到几百个GeV，含有小的 ν_L 成分，可在对撞机上产生。
 $Br(\nu_R \rightarrow Wl) : Br(\nu_R \rightarrow Z\nu) : Br(\nu_R \rightarrow h\nu) \simeq 2 : 1 : 1$ 。
 - ▶ **轻子味破坏过程，如 $l_i \rightarrow l_j\gamma$ 等；**
Higgs粒子可诱导上述过程，超粒子圈图也可诱导上述过程。
 - ▶ **对Muon反常磁矩的影响；**
 Y_ν 直接影响Muon反常磁矩，可有效缩小实验和理论的差距(1σ 以上)。
 - ▶ **改变超粒子衰变模式。**
例：考察最简单的情况
 1. \tilde{W} 、 \tilde{B} 以及非标准模型Higgs都很重；
 2. 轻子的Yukawa耦合比较强(譬如大于0.05)，且 $m_{\tilde{l}_L} > m_{\tilde{l}_R}$ 。

4、对NMSSM唯象学的影响

- Higgsino作为NLSP: (Sneutrino场可分解为实部和虚部场, $\tilde{\nu}_\tau$ 对应暗物质)

$$\tilde{\chi}_{1,2}^0 \rightarrow \tilde{\nu}_\tau \nu_{\tau,L}, \quad \tilde{\chi}_1^\pm \rightarrow \tilde{\nu}_\tau \bar{\tau}.$$

- Slepton作为NLSP, Higgsino作为NNLSP:

$$\begin{aligned} \tilde{\chi}_{1,2}^0 &\rightarrow \tilde{l}_L^* l_R, \tilde{l}_R^* l_L, \tilde{\nu}_L^* \nu_R, \tilde{\nu}_R^* \nu_L, & \tilde{\chi}_1^\pm &\rightarrow \tilde{l}_L^* \nu_R, \tilde{l}_R^* \nu_L, \tilde{\nu}_L \bar{l}_R, \tilde{\nu}_R \bar{l}_L, \\ \tilde{\nu}_R &\rightarrow \nu_L \tilde{H}_u^{0*} \rightarrow \nu_L \tilde{\nu}_\tau \nu_{\tau,L}, & \tilde{\nu}_R &\rightarrow l_L \tilde{H}^{\pm*} \rightarrow l_L \tilde{\nu}_\tau \bar{\tau}, \\ \tilde{l}_R &\rightarrow l_L \tilde{H}_d^{0*} \rightarrow l_L \tilde{\nu}_\tau \nu_{\tau,L}, & \tilde{l}_R &\rightarrow \nu_L \tilde{H}^{\mp*} \rightarrow \nu_L \tilde{\nu}_\tau \tau, \\ \tilde{\nu}_L &\rightarrow \nu_R \tilde{H}_u^{0*} \rightarrow \nu_R \tilde{\nu}_\tau \nu_{\tau,L}, & \tilde{\nu}_L &\rightarrow l_R \tilde{H}^{\pm*} \rightarrow l_R \tilde{\nu}_\tau \bar{\tau}, \\ \tilde{\nu}_L &\rightarrow \tilde{\nu}_R h^{(*)} \rightarrow \dots\dots & & \\ \tilde{l}_L &\rightarrow l_R \tilde{H}_d^{0*} \rightarrow l_R \tilde{\nu}_\tau \nu_{\tau,L}, & \tilde{l}_L &\rightarrow \nu_R \tilde{H}^{\mp*} \rightarrow \nu_R \tilde{\nu}_\tau \tau, \\ \tilde{l}_L &\rightarrow \tilde{l}_R h^{(*)} \rightarrow \dots\dots & & \end{aligned}$$

- Stop的衰变:

$$\begin{aligned} \tilde{t}_L &\rightarrow t \tilde{\chi}_1^0, t \tilde{\chi}_2^0, & Br_1 &: Br_2 \simeq 1 : 1, \\ \tilde{t}_R &\rightarrow b \tilde{\chi}_1^\pm, t \tilde{\chi}_1^0, t \tilde{\chi}_2^0, & Br_1 &: Br_2 : Br_3 \simeq 2 : 1 : 1. \end{aligned}$$

4、对NMSSM唯象学的影响：Higgsino的寻找

- 若 $|Y_\nu|_{ii}$ 较大 (如大于0.05)

- ▶ Y_ν 在味空间对角：暗物质有特定轻子味。

- ★ Higgsino对应NLSP

$$Br(\tilde{\chi}_{1,2}^0 \rightarrow \tilde{\nu}_1 \nu_\tau) = Br(\tilde{\chi}_{1,2}^0 \rightarrow \tilde{\nu}_1^R \nu_\tau) \simeq 50\%;$$

$$Br(\tilde{\chi}_1^\pm \rightarrow \tilde{\nu}_1 \tau^\pm) = Br(\tilde{\chi}_1^\pm \rightarrow \tilde{\nu}_1^R \tau^\pm) \simeq 50\%;$$

$pp \rightarrow \tilde{\chi}_1^\pm \tilde{\chi}_{1,2}^0, \tilde{\chi}_{1,2}^0 \tilde{\chi}_{1,2}^0$, j , 信号: Mono-jet + E_T^{miss} , LHC实验限制很弱;

$pp \rightarrow \tilde{\chi}_1^\pm \tilde{\chi}_1^\mp$, 信号: $2\tau + E_T^{miss}$, LHC实验限制较强。

- ★ Slepton对应NLSP

$pp \rightarrow \tilde{\chi}_i \tilde{\chi}_j$, 信号: 多轻子 + E_T^{miss} , 各种末态所占比例取决 $|Y_\nu|_{ii}$ 相对大小。

- ▶ Y_ν 在味空间非对角情况：暗物质不再具有特定的轻子味。

- ★ Higgsino对应NLSP

$\tilde{\chi}_{1,2}^0 \rightarrow \tilde{\nu}_1 \nu_i, \tilde{\nu}_1^R \nu_j$: $\tilde{\chi}_{1,2}^0$ 的信号仍旧为 E_T^{miss} ;

$\tilde{\chi}_1^\pm \rightarrow \tilde{\nu}_1 l_i, \tilde{\nu}_1^R l_j$: $pp \rightarrow \tilde{\chi}_1^\pm \tilde{\chi}_1^\mp$ 的信号可为 $l_i^\pm l_j^\mp + E_T^{miss}$ (DLF)。

- 若 $|Y_\nu|_{ii} \lesssim 0.01$ (非常类似Type I + NMSSM)

- ▶ Higgsino对应NLSP

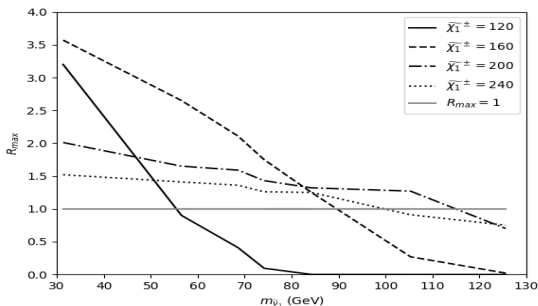
$Br(\tilde{\chi}_1^\pm \rightarrow \tilde{\nu}_1 \tau^\pm) = Br(\tilde{\chi}_1^\pm \rightarrow \tilde{\nu}_1^R \tau^\pm) \simeq 50\%$, $\tilde{\chi}_1^\pm$ 寿命仍旧很短;

$\tilde{\chi}_{1,2}^0$ 含有Singlino分量, 可以衰变为 $\tilde{\nu}_1 \nu_R, \tilde{\nu}_1^R \nu_R$, 信号为 $\nu_R + E_T^{miss}$ 。

- Singlino或Bino作为NLSP

.....

4、LHC实验对模型的限制

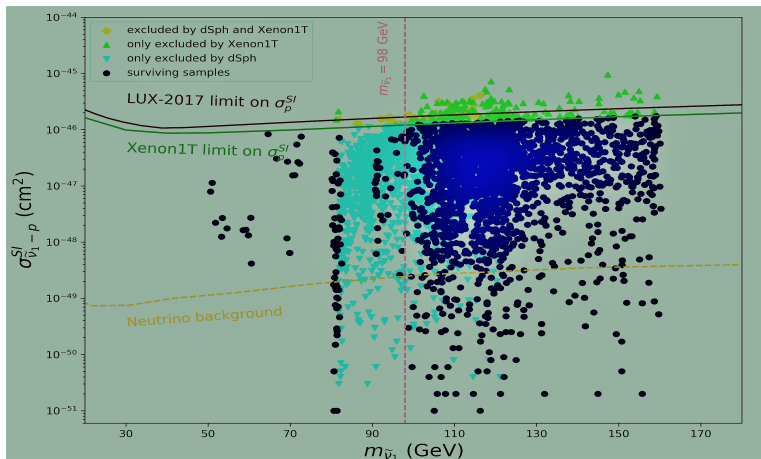


所给结果中：

- 假定第三代Sneutrino最轻，取不同 $\tilde{\chi}_1^\pm$ 质量；
- $2\tau + E_T^{miss}$: $pp \rightarrow \tilde{\chi}_1^\pm \tilde{\chi}_1^\mp$, $Br(\tilde{\chi}_1^\pm \rightarrow \tilde{\nu}_1 \tau^\pm) = Br(\tilde{\chi}_1^\pm \rightarrow \tilde{\nu}_1^R \tau^\pm) \simeq 50\%$;
- $R_i = S_i/S_{95}^{OBS}$, i 指信号区域, $R_{max} = \max(R_i)$;
- R_{max} 取决于 $m_{\tilde{\chi}_1^\pm}$ 和 $m_{\tilde{\nu}_1}$ (或 $\Delta m = m_{\tilde{\chi}_1^\pm} - m_{\tilde{\nu}_1}$), LHC实验要求:

$m_{\tilde{\chi}_1^\pm}$	120GeV	160GeV	200GeV	240GeV
Δm	65GeV	70GeV	85GeV	150GeV

3、数值结果展示



- 共振湮灭处直接探测截面可以很小；
- 多个湮灭道打开以后直接探测截面可以很小；
- $m_{\tilde{\chi}_1^0}$ 在 $80\text{GeV} - 110\text{GeV}$ 被大量排除。原因 $\tilde{\nu}_1 \tilde{\nu}_1 \rightarrow h_i^* \rightarrow VV$, 耦合大。

6、结论

MSSM和NMSSM没有解决一些基础问题，如中微子质量等。

将Inverse Seesaw机制与NMSSM结合，发现

- 如果将Sneutrino作为暗物质，其与原子核散射截面可以自然压低；
- 解决了NMSSM面临的困难，以各种方式丰富了NMSSM的唯象学；
- 和Type-I Seesaw + NMSSM 比较：
 - ▶ 暗物质物理有类似之处，但是ISS-NMSSM的物理更丰富；
 - ▶ 更广阔、更自然的参数空间解释低能实验数据；
 - ▶ 右手中微子信号不同，超粒子唯象学更丰富。

