Sneutrino Dark Matter in the NMSSM with Inverse Seesaw Mechanism

曹俊杰，河南师范大学，arXiv: 1707.09626
主要合作者：郭小飞，贺杨乐，尚亮亮，岳远方

CLHCP2017, Nanjing University, Dec 22-24, 2017

目录

介绍一个维持自然性、逃避暗物质探测实验、唯象学有新特点超对称理论。
超对称化的DM Sector + Singlet Higgs Portal 模型。

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. LHC实验对模型的限制
5. ISS-NMSSM的唯象学
6. 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

$$
\begin{aligned}
m_Z^2 &= \frac{2(m_{H_d}^2+\Sigma_d)-2(m_{H_u}^2+\Sigma_u)\tan^2\beta}{\tan^2\beta-1}-2\mu^2, \\
\Sigma_u &\simeq \sum_{i=1}^{2}\frac{3Y_t^2}{16\pi^2}\times m_{\tilde{t}_i}^2\left(\log\frac{m_{\tilde{t}_i}^2}{Q^2}-1\right), \\
\Sigma_d &\simeq \sum_{i=1}^{2}\frac{3Y_b^2}{16\pi^2}\times m_{\tilde{b}_i}^2\left(\log\frac{m_{\tilde{b}_i}^2}{Q^2}-1\right).
\end{aligned}
$$

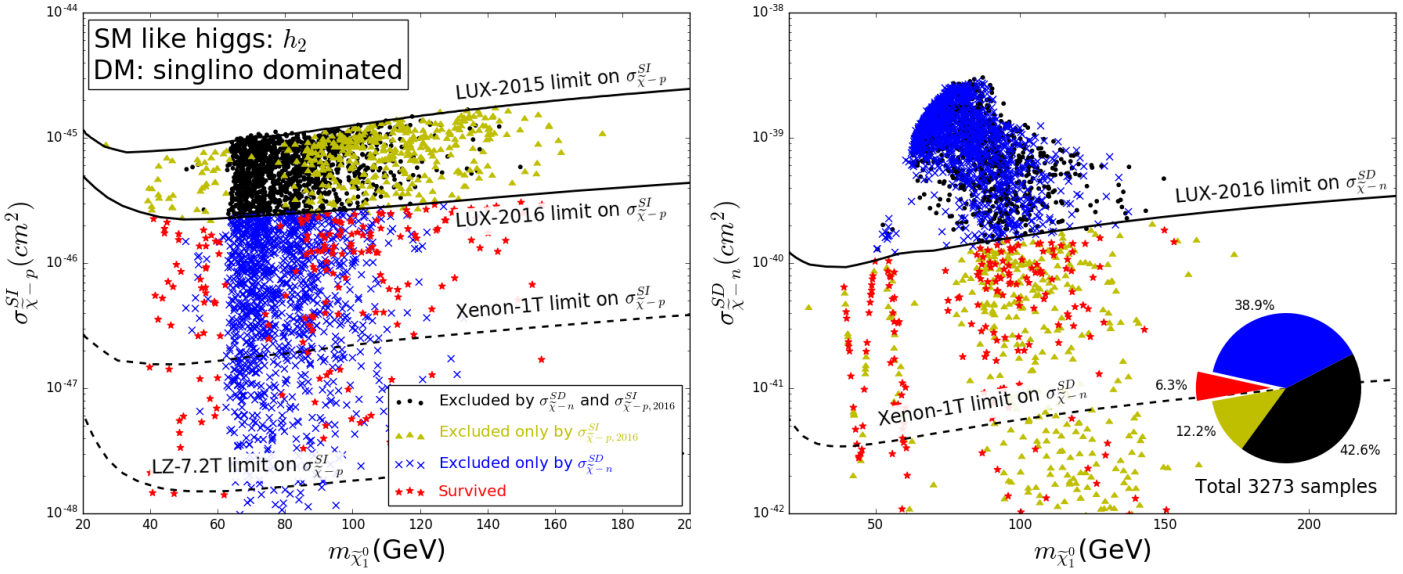
  定义精细调节量：$\Delta_Z=\max|\frac{\partial\log m_Z^2}{\partial\log p_i}|$, $\Delta_h=\max|\frac{\partial\log m_h^2}{\partial\log p_i}|$。
  若要求理论只有10%的精细调节：$\mu\lesssim 200\mathrm{GeV}$，$m_{\tilde{t}}\lesssim 1.5\mathrm{TeV}$。
- **若$\tilde{\chi}_1^0$为暗物质，Higgsino质量μ 会影响暗物质与Higgs粒子的相互作用！**
  例：MSSM中Bino作为暗物质，

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

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：要求理论具有1%的调节能力，95%的参数空间将被排除。

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。



- **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	$(U(1)\otimes \mathrm{SU}(2)\otimes \mathrm{SU}(3))$
$\hat{q}$	$\tilde{q}$	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	$(\frac{1}{3},\mathbf{1},\overline{\mathbf{3}})$
$\hat{u}$	$\tilde{u}_R^*$	u_R^*	3	$(-\frac{2}{3},\mathbf{1},\overline{\mathbf{3}})$
$\hat{e}$	$\tilde{e}_R^*$	e_R^*	3	$(1,\mathbf{1},\mathbf{1})$
$\hat{s}$	S	$\tilde{S}$	1	$(0,\mathbf{1},\mathbf{1})$
$\hat{\nu}$	$\tilde{\nu}_R^*$	ν_R^*	3	$(0,\mathbf{1},\mathbf{1})$
$\hat{X}$	$\tilde{x}$	x	3	$(0,\mathbf{1},\mathbf{1})$

- **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

$$
\begin{aligned}
W &= \left[Y_u\,\hat{q}\cdot\hat{H}_u\,\hat{u} + Y_d\,\hat{H}_d\cdot\hat{q}\,\hat{d} + Y_e\,\hat{H}_d\cdot\hat{l}\,\hat{e} + \lambda\,\hat{s}\,\hat{H}_u\cdot\hat{H}_d + \frac{1}{3}\kappa\,\hat{s}^3\right] \\
&\quad + \left[\frac{1}{2}\mu_\nu\,\hat{\nu}\,\hat{\nu} + \frac{1}{2}\mu_X\,\hat{X}\,\hat{X} + \lambda_N\,\hat{s}\,\hat{\nu}\,\hat{X} + Y_\nu\,\hat{l}\cdot\hat{H}_u\,\hat{\nu}\right], \\
L^{soft} &= -\left[\frac{1}{2}\left(m_1\lambda_{\tilde{B}}^2 + m_2\lambda_{\tilde{W}}^2 + m_3\lambda_{\tilde{g}}^2 + \text{h.c.}\right) + m_{H_d}^2|H_d|^2 + m_{H_u}^2|H_u|^2 + m_S^2|S|^2\right. \\
&\quad + m_{\tilde{q}}^2(\tilde{u}_L^*\tilde{u}_L + \tilde{d}_L^*\tilde{d}_L) + m_{\tilde{u}}^2\tilde{u}_R^*\tilde{u}_R + m_{\tilde{d}}^2\tilde{d}_R^*\tilde{d}_R + m_{\tilde{l}}^2(\tilde{e}_L^*\tilde{e}_L + \tilde{\nu}_L\tilde{\nu}_L^*) + m_{\tilde{e}}^2\tilde{e}_R^*\tilde{e}_R \\
&\quad \left. + (\lambda A_\lambda S H_u\cdot H_d + \frac{\kappa}{3}A_\kappa S^3 + Y_u A_u\tilde{u}_R^*\tilde{q}\cdot H_u + Y_d A_d\tilde{d}_R^* H_d\cdot\tilde{q} + Y_e A_e\tilde{e}_R^* H_d\cdot\tilde{l} + h.c.)\right] \\
&\quad - \left[m_\nu^2\tilde{\nu}_R\tilde{\nu}_R^* + m_x^2\tilde{x}\tilde{x}^* + (\frac{B_{\mu_\nu}}{2}\tilde{\nu}_R^*\tilde{\nu}_R^* + \frac{B_{\mu_X}}{2}\tilde{x}\tilde{x} + \lambda_N A_{\lambda_N} S\tilde{\nu}_R^*\tilde{x} + Y_\nu A_\nu\tilde{\nu}_R^*\tilde{l}H_u + \text{h.c.})\right].
\end{aligned}
$$

- 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_ν以及A_{λ_N}；
  - 轻子数破坏系数：μ_X，$\mu_\nu \lesssim \mathcal{O}(\text{KeV})$，$B_{\mu_X}$，$B_{\mu_\nu}$为对应Bilinear项。
    Y_ν、λ_N、A_ν、A_{λ_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: $V_{\text{soft}} = V_{MSSM} + \tilde{m}_d^2|H_d|^2 + \tilde{m}_u^2|H_u|^2 + \tilde{m}_S^2|S|^2$
  $+(\lambda A_\lambda\varepsilon_{ij}H_u^iH_d^jS + \frac{\kappa}{3}A_\kappa S^3 + h.c.)$。

  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$M_R = \frac{v_s}{\sqrt{2}}\lambda_N$，

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

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

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

- **有效中微子质量矩阵：** 积分掉重中微子场ν_R^*和x

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

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

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

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：**

$$m_D = V^\dagger \mathrm{diag}(\sqrt{M_1}\,,\sqrt{M_2}\,,\sqrt{M_3})\; R\; \mathrm{diag}(\sqrt{m_{\nu_1}}\,,\sqrt{m_{\nu_2}}\,,\sqrt{m_{\nu_3}})\, U^\dagger_{\mathrm{PMNS}}\,,$$

其中V和R定义为：

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

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：**

$$\mu_X = M_R^T\; {m_D^T}^{-1}\; U^*_{\mathrm{PMNS}}\, \mathrm{diag}(m_{\nu_1}\,,m_{\nu_2}\,,m_{\nu_3})\; U^\dagger_{\mathrm{PMNS}}\; {m_D}^{-1} M_R.$$

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:**

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

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

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

$$\begin{aligned} m_{11} &= \frac{1}{4}\left[2v_u^2\Re\left(Y_\nu^T Y_\nu^*\right) + 4\Re\left(m_l^2\right)\right] + \frac{1}{8}\left(g_1^2 + g_2^2\right)\left(-v_u^2 + v_d^2\right)\mathbf{1}, \\ \cdots &\quad \cdots \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \\ m_{33} &= \frac{1}{8}\left(4v_s^2\Re\left(\lambda_N^T\lambda_N^*\right) - 8\Re\left(B_{\mu_X}\right) + 8\Re\left(\mu_X\mu_X^*\right) + 8\Re\left(m_x^2\right)\right). \end{aligned}$$

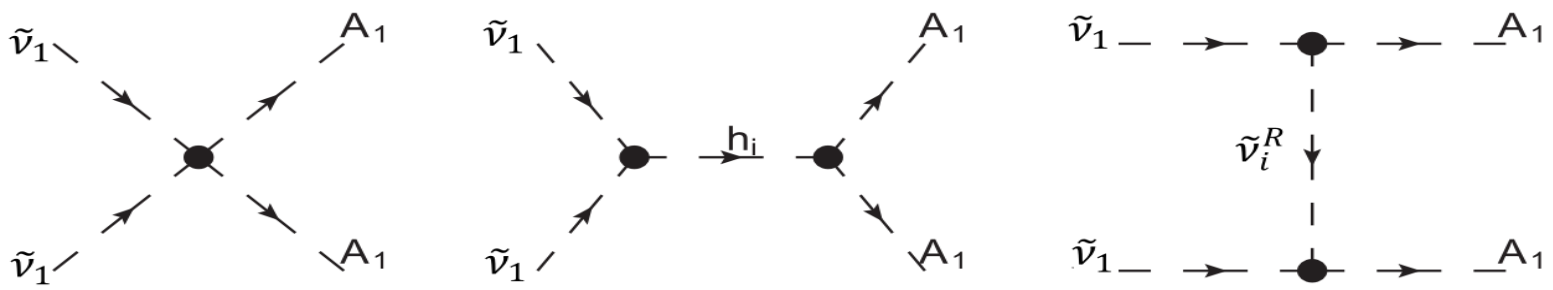
重要结论：若味破坏归结为μ_X，暗物质物理时只需要考虑一代情况!

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

$$m^2_{\tilde{\nu}_R} = m^2_{\tilde{\nu}_I}\big|_{\mu_X \to -\mu_X, B_{\mu_X} \to -B_{\mu_X}}.$$

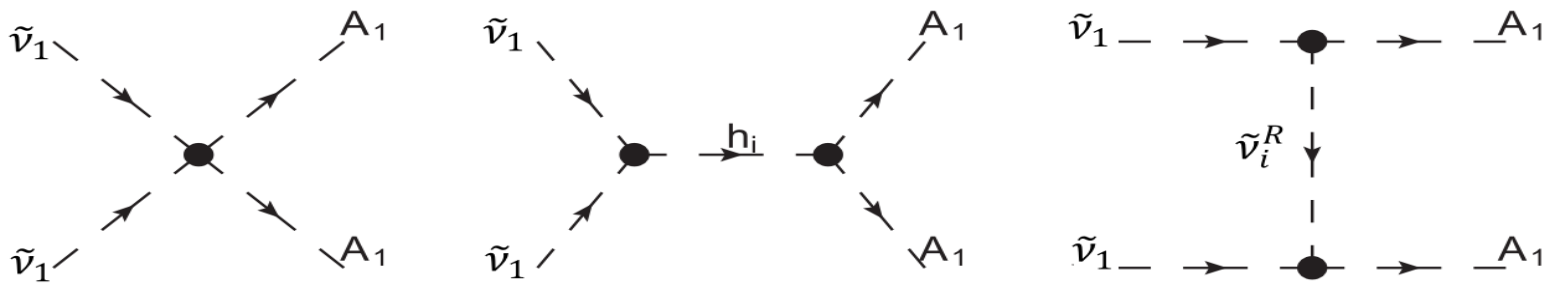
重要结论：成对出现质量近似简并的CP-odd和CP-even Sneutrino。

2、ISS-NMSSM：暗物质的湮灭方式



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



$$
\begin{aligned}
\sigma v|_{\sqrt{s}} &= \frac{\sqrt{1-m_{A_1}^2/s}}{16\pi s}\left\{\left|C_{\tilde{\nu}_1\tilde{\nu}_1A_1A_1}-\sum_i\frac{C_{\tilde{\nu}_1\tilde{\nu}_1h_i}C_{h_iA_1A_1}}{s-m_{h_i}^2}\right|^2\right.\\
&\quad +2C_{\tilde{\nu}_1\tilde{\nu}_1A_1A_1}\sum_i\frac{C^2_{\tilde{\nu}_1\tilde{\nu}_i^RA_1}}{c}\ln\frac{a_i+c}{a_i-c}-2\sum_{i,j}\frac{C_{\tilde{\nu}_1\tilde{\nu}_1h_i}C_{h_iA_1A_1}}{s-m_{h_i}^2}\frac{C^2_{\tilde{\nu}_1\tilde{\nu}_j^RA_1}}{c}\ln\frac{a_j+c}{a_j-c}\\
&\quad \left.+2\sum_{i,j}\frac{C^2_{\tilde{\nu}_1\tilde{\nu}_i^RA_1}C^2_{\tilde{\nu}_1\tilde{\nu}_j^RA_1}}{c(a_i-a_j)}\ln\frac{(a_i-c)(a_j+c)}{(a_i+c)(a_j-c)}\right\}\\
&\simeq a+bv^2,\\
a &= \frac{\sqrt{1-m_{A_1}^2/m_{\tilde{\nu}_1}^2}}{64\pi m_{\tilde{\nu}_1}^2}\left|C_{\tilde{\nu}_1\tilde{\nu}_1A_1A_1}-\sum_i\frac{C_{\tilde{\nu}_1\tilde{\nu}_1h_i}C_{h_iA_1A_1}}{4m_{\tilde{\nu}_1}^2-m_{h_i}^2}+\sum_j\frac{2C^2_{\tilde{\nu}_1\tilde{\nu}_j^RA_1}}{m_{\tilde{\nu}_1}^2+m_{\tilde{\nu}_j^R}^2-m_{A_1}^2}\right|^2,
\end{aligned}
$$

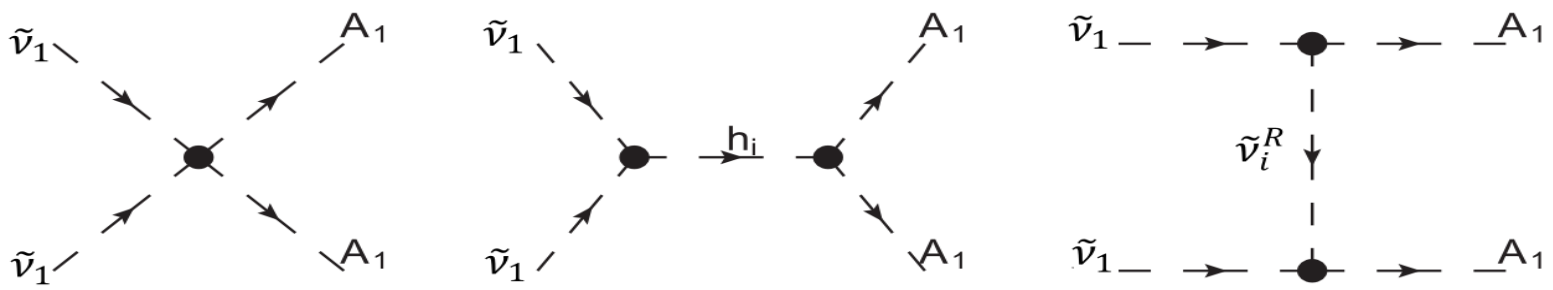
2、ISS-NMSSM：暗物质的湮灭方式

$$
\begin{aligned}
b \quad = \quad & \left(-\frac{1}{4}+\frac{m_{A_1}^2}{8(m_{\tilde{\nu}_1}^2-m_{A_1}^2)}\right)\times a-\frac{\sqrt{1-m_{A_1}^2/m_{\tilde{\nu}_1}^2}}{64\pi m_{\tilde{\nu}_1}^2}\times \\
& \left\{\sum_{i,j}\frac{C_{\tilde{\nu}_1\tilde{\nu}_1 h_i}C_{h_iA_1A_1}C_{\tilde{\nu}_1\tilde{\nu}_1 h_j}C_{h_jA_1A_1}}{(4m_{\tilde{\nu}_1}^2-m_{h_i}^2)(4m_{\tilde{\nu}_1}^2-m_{h_j}^2)}\left(\frac{m_{\tilde{\nu}_1}^2}{4m_{\tilde{\nu}_1}^2-m_{h_i}^2}+i\leftrightarrow j\right)\right. \\
& -\sum_{i,j}\frac{2C_{\tilde{\nu}_1\tilde{\nu}_1 h_i}C_{h_iA_1A_1}C^2_{\tilde{\nu}_1\tilde{\nu}_j^RA_1}}{(4m_{\tilde{\nu}_1}^2-m_{h_i}^2)(m_{\tilde{\nu}_1}^2+m^2_{\tilde{\nu}_j^R}-m_{A_1}^2)}\left(\frac{m_{\tilde{\nu}_1}^2}{4m_{\tilde{\nu}_1}^2-m_{h_i}^2}+\frac{2m_{\tilde{\nu}_1}^2}{m_{\tilde{\nu}_1}^2+m^2_{\tilde{\nu}_j^R}-m_{A_1}^2}\right) \\
& +\sum_{i,j}\frac{2C^2_{\tilde{\nu}_1\tilde{\nu}_i^RA_1}C^2_{\tilde{\nu}_1\tilde{\nu}_j^RA_1}}{(m_{\tilde{\nu}_1}^2+m^2_{\tilde{\nu}_i^R}-m_{A_1}^2)(m_{\tilde{\nu}_1}^2+m^2_{\tilde{\nu}_j^R}-m_{A_1}^2)}\left(\frac{m_{\tilde{\nu}_1}^2}{(m_{\tilde{\nu}_1}^2+m^2_{\tilde{\nu}_i^R}-m_{A_1}^2)}+i\leftrightarrow j\right) \\
& \left.-2C_{\tilde{\nu}_1\tilde{\nu}_1A_1A_1}\left(\sum_i\frac{C_{\tilde{\nu}_1\tilde{\nu}_1 h_i}C_{h_iA_1A_1}m_{\tilde{\nu}_1}^2}{(4m_{\tilde{\nu}_1}^2-m_{h_i}^2)^2}-\sum_j\frac{C^2_{\tilde{\nu}_1\tilde{\nu}_j^RA_1}m_{\tilde{\nu}_1}^2}{(m_{\tilde{\nu}_1}^2+m^2_{\tilde{\nu}_j^R}-m_{A_1}^2)^2}\right)\right\}.
\end{aligned}
$$

在暗物质退藕温度处以及今天：

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

2、ISS-NMSSM：暗物质的湮灭方式



- **Sneutrino暗物质主要湮灭方式如下：**
  - $\tilde{\nu}_1\tilde{\nu}_1 \to ss$； s：以单态场为主的Higgs。
  - $\tilde{\nu}_1\tilde{\nu}_1 \to \eta\eta^*$； η：标准模型粒子或重中微子，通过Higgs共振湮灭。
  - $\tilde{\nu}_1^R\tilde{\nu}_1^R \to ss, \eta\eta^*$和$\tilde{\nu}_1\tilde{\nu}_1^R \to \eta\eta^*$； 伴随湮灭过程。
  - $\tilde{\chi}_i^0\tilde{\chi}_j^0, \tilde{\chi}_i^0\tilde{\chi}_1^\pm, \tilde{\chi}_1^\pm\tilde{\chi}_1^\mp \to \eta_i\eta_j^*$； $\tilde{\chi}$：Higgsino，共同湮灭。
- **若$\tilde{\nu}_1\tilde{\nu}_1 \to ss$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**)：

$$\sigma^{\rm SI}_{\tilde{\nu}_1-p} = \frac{\mu^2_{\rm red}}{4\pi m^2_{\tilde{\nu}_1}} f_p^2 = \frac{4F_u^{(p)2}\mu^2_{\rm red} m_p^2}{\pi}\left\{\sum_i (a_{ui} + a_{di} F_d^{(p)}/F_u^{(p)})\right\}^2 .$$

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。

- **ISS-NMSSM:**

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

  - 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$\tilde{\chi}^0_1$作为暗物质

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

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

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：

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

  - Z: $(\tilde{\nu}_L, \tilde{\nu}_R, \tilde{\nu}_x)$基矢下Snetrino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：$10 \times (Y_\nu Z_{12} \mu / M_1)^4$，$Y_\nu$受非幺正性强烈限制！

- 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$a_{d1} = a_{d2}$:

$$\sigma^{\rm SI}_{\tilde{\nu}_1-p} \propto \left(\frac{S_{13} C_{\tilde{\nu}_1 \tilde{\nu}_1 s}}{(125{\rm GeV})^2 \ {\rm m}_{\tilde{\nu}_1}} \right)^2 .$$

  - 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：10GeV $\sim$ 100GeV。

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

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+ $\tilde{\nu}_R$ + $\tilde{x}$ 构成DM Sector, 单态Higgs场同时作为Mediator。
  - 传递$\tilde{\nu}_1\tilde{\nu}_1 \rightleftharpoons \tilde{\chi}_1^+\tilde{\chi}_1^-, \tilde{\chi}_i^0\tilde{\chi}_j^0$，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

- 指定NMSSM部分参数：

parameter	value	parameter	value	parameter	value
$\tan\beta$	15.8	λ	0.22	κ	0.17
A_λ	2150	A_κ	-18	μ	120.0
$m_{\tilde{q}}$	2000	$m_{\tilde{l}}$	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}	125.2
m_{h_2}	176.3	m_{h_3}	2030	m_{A_1}	67.7
m_{A_2}	2030	$m_{\tilde{\chi}_1^0}$	106.9	$m_{\tilde{\chi}_2^0}$	130.7
$m_{\tilde{\chi}_3^0}$	189	$m_{\tilde{\chi}_1^\pm}$	121.9	$m_{\tilde{\chi}_2^\pm}$	832
S_{11}	0.064	S_{12}	0.995	S_{13}	0.075
S_{21}	0.015	S_{22}	0.076	S_{23}	0.996
S_{31}	0.997	S_{32}	0.063	S_{33}	0.024

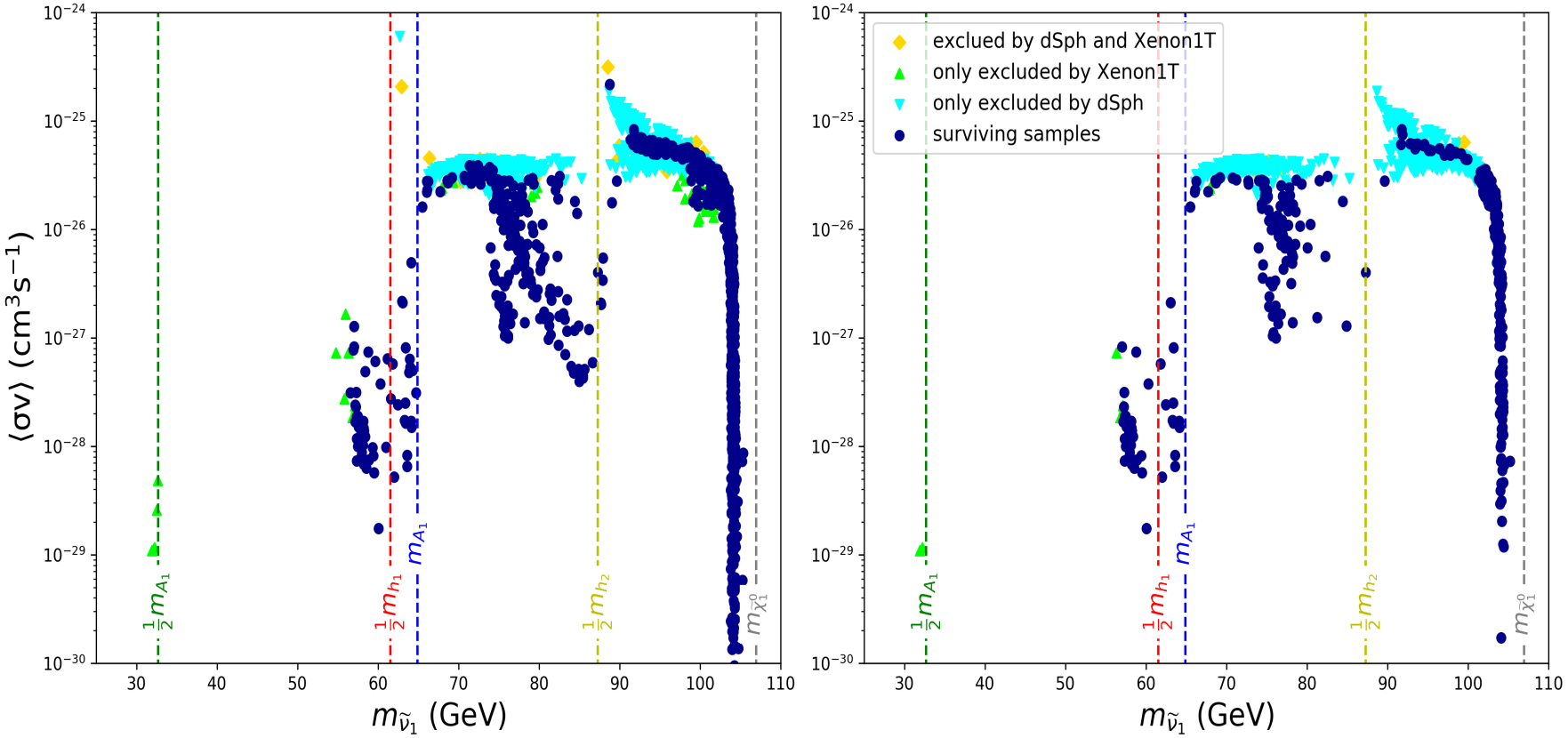
- 扫描Sneutrino部分参数

$0 < \lambda_N, Y_\nu \leq 0.3, \quad -1\mathrm{TeV} < A_{\lambda_N}, A_\nu \leq 1\mathrm{TeV}, \quad 50\ \mathrm{GeV} \leq m_\nu, m_x \leq 150\ \mathrm{Ge}$

- 考虑限制：

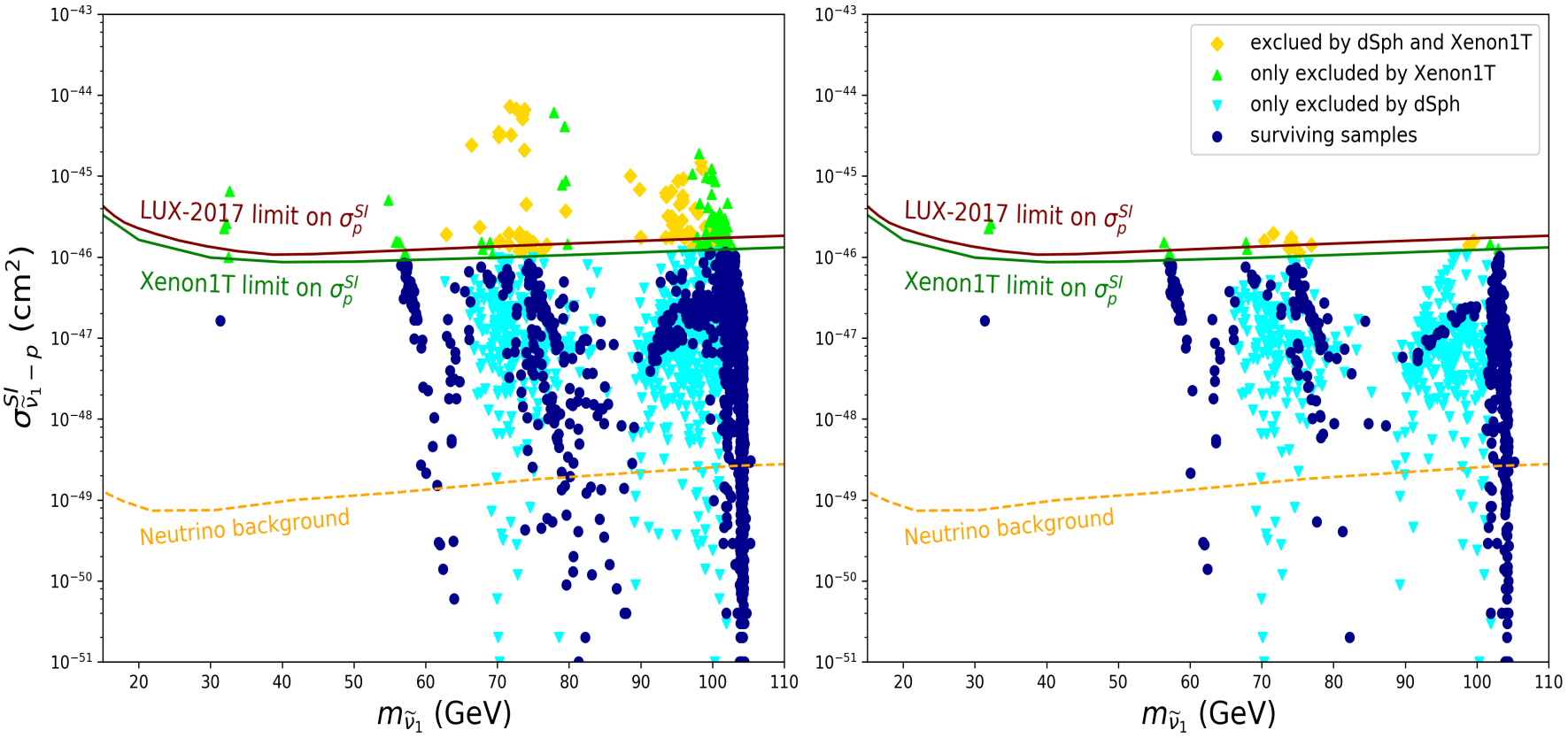
125 GeV Higgs数据，B物理，Muon g-2, 暗物质：残留密度、矮星系观测

3、数值结果展示



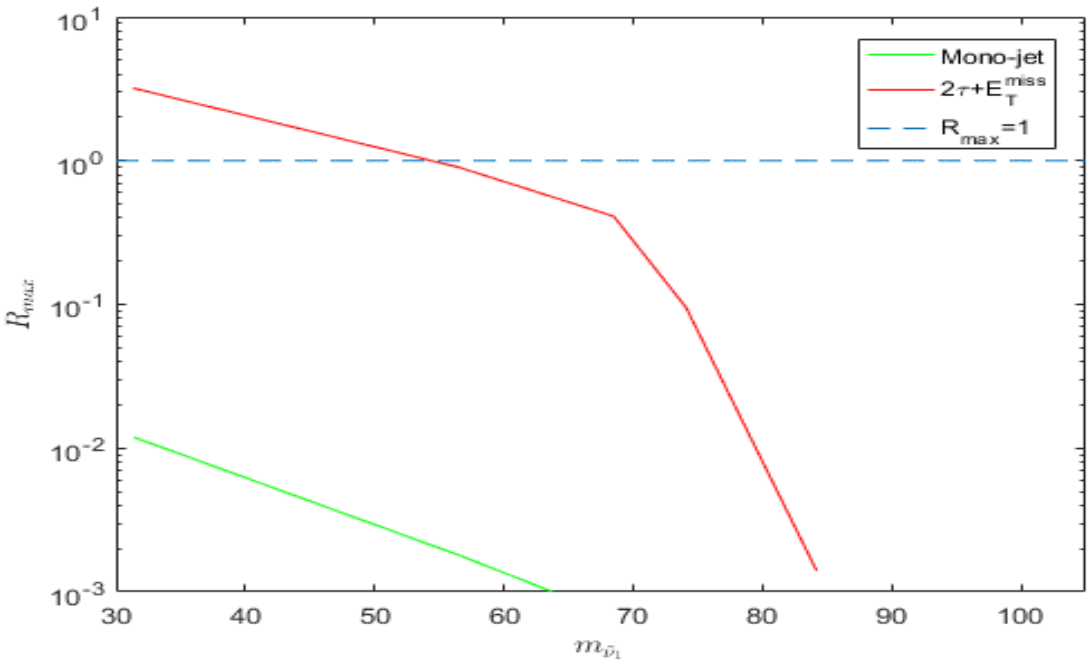
1、$\tilde{\nu}_1\tilde{\nu}_1^R \to A_1^* \to f\bar{f}$；2、$\tilde{\nu}_1\tilde{\nu}_1 \to h_1^* \to f\bar{f}$；3、$\tilde{\nu}_1\tilde{\nu}_1 \to A_1A_1$；
4、$\tilde{\nu}_1\tilde{\nu}_1 \to h_2^* \to A_1A_1$；5、与Higgsino共同湮灭。

3、数值结果展示



右边：进一步考虑幺正性对中微子混合的限制，$Y_\nu v_u/\lambda_N v_s \lesssim 0.1$。

4、LHC实验对模型的限制



所给结果中：

- 假定第三代Sneutrino最轻，且固定Higgsino质量：$\mu = 120\mathrm{GeV}$；
- $Br(\tilde{\chi}^0_{1,2} \to \tilde{\nu}_1 \nu_\tau) = Br(\tilde{\chi}^0_{1,2} \to \tilde{\nu}^R_1 \nu_\tau) \simeq 50\%$，
  $Br(\tilde{\chi}^\pm_1 \to \tilde{\nu}_1 \tau^\pm) = Br(\tilde{\chi}^\pm_1 \to \tilde{\nu}^R_1 \tau^\pm) \simeq 50\%$；
- Mono-jet+E_T^{miss}: $pp \to \tilde{\chi}^\pm_1 \tilde{\chi}^0_{1,2}, \tilde{\chi}^0_{1,2} \tilde{\chi}^0_{1,2}\, j$，考虑四个实验限制；
  $2\tau + E_T^{miss}$: $pp \to \tilde{\chi}^\pm_1 \tilde{\chi}^\mp_1$，考虑三个实验限制。
- $R_i = S_i / S_{95}^{OBS}$，i指信号区域，$R_{max} = max(R_i)$。

5、对NMSSM唯象学的影响

- **唯象学变得异常丰富！**
  - 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$m_{A_1} < 2m_{\tilde{\chi}_1^0}$；
    - ★ $\tilde{\chi}_1^0$以Higgsino为主。

      后果：NMSSM的参数空间得到释放。
  - 存在轻粒子，如非标准模型中微子、轻Higgs等，影响超粒子或Higgs衰变；
  - 存在新的相互作用，影响Chargino/Neutralino、左手Slepton等粒子性质。
    - ★ **对Higgs物理的影响**；
    - ★ **非标准模型中微子在对撞机上的信号，轻子味破坏过程等**；
    - ★ **中微子Yukawa耦合对Muon反常磁矩的影响**。
- **超对称粒子寻找：**
  - Y_ν在味空间对角情况：

    暗物质有特定的轻子味，并且与其他粒子藕合很弱。

    必须通过其他中间粒子衰变到$\tilde{\nu}_1$去，具体模式取决超粒子质量谱。

    Slepton为NLSP，多轻子信号；Higgsino为NLSP，$\tilde{\chi}_{1,2}^0$为E_T^{miss}，$\cdots$
  - Y_ν在味空间非对角情况：

    暗物质不再具有特定的轻子味，超粒子衰变模式更加复杂。

6、结论

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；
- 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。