

A Bayesian analysis of sneutrino DM in the NMSSM with Type-I seesaw mechanism

曹俊杰

基于arXiv:1807.03762

arXiv: 1606.04416, 1609.00204, 1810.09143

2018年10月26日



河南师范大学
HENAN NORMAL UNIVERSITY

目录

1 研究背景

- 超对称现状
- 传统超对称理论的合理扩充
- 统计学在新物理模型分析中的应用

2 Type-I Seesaw扩充的NMSSM

- 模型概况
- 暗物质湮灭
- 暗物质直接探测

3 数值结果

- 扫描策略
- 倾向的参数空间
- 暗物质湮灭机制
- 暗物质-核子散射
- LHC实验限制

4 结论

一、研究背景

1. 超对称现状

- 2012年7月4日，发现Higgs粒子，质量在125GeV
 - MSSM已经不再自然：对质量的圈图修正和树图大小相当；
 - 流行的超对称破缺模型很难同时解释Higgs质量和Muon反常磁矩；
 - 对Higgs粒子性质的测量排除一批超对称模型。
- 2018年7月，ATLAS分析36.1 fb⁻¹实验数据
 - 二重态为主非标准模型Higgs粒子： $m_H \gtrsim 400\text{GeV}$ ；
 - $m_{\tilde{g}} \gtrsim 2\text{TeV}$ ， $m_{\tilde{t}} \gtrsim 1\text{TeV}$ ， $m_{\tilde{W}} \gtrsim 600\text{GeV}$ ， $m_{\tilde{\tau}} \gtrsim 500\text{GeV}$ ；
 - 对自然的超对称给以很强的限制；
- 暗物质直接寻找实验:自旋相关和无关测量互补！
 - 自旋无关截面上限：2009年， $8 \times 10^{-44}\text{cm}^2$ (CDMS)；
2018年， $4 \times 10^{-47}\text{cm}^2$ (XENON-1T)；
 - 自旋相关截面上限： $2 \times 10^{-41}\text{cm}^2$ (LUX-2017)；
 - 传统的超对称需引入精细调节才能满足实验限制。



自然的超对称模型

在超对称模型中， m_Z 和 m_h 都是通过计算得到：

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

$$m_h^2 = m_Z^2 \cos^2 2\beta + \lambda^2 v^2 \sin^2 2\beta + \Delta_{\tilde{t}}.$$

定义精细调节指标：

$$\Delta_Z = \max_i \left| \frac{\partial \log m_Z^2}{\partial \log p_i} \right|, \quad \Delta_h = \max_i \left| \frac{\partial \log m_h^2}{\partial \log p_i} \right|,$$

p_i 代表超对称模型的输入参数。

- Δ_Z 、 Δ_h 的大小，反映理论能否自然地预言 m_Z 和 m_h 。
- 定义自然的超对称：

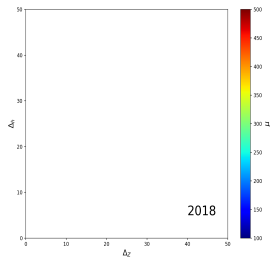
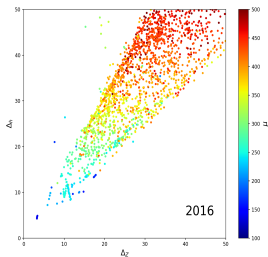
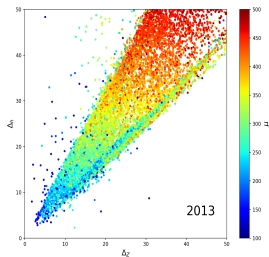
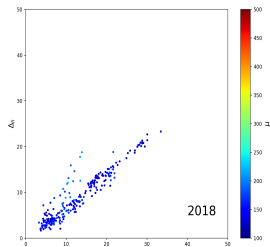
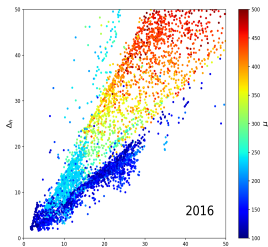
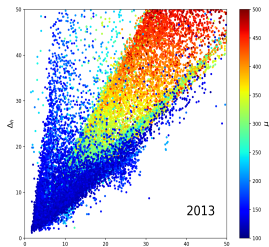
$$\Delta_Z \leq 50, \quad \Delta_h \leq 50,$$

此时理论对应的精细调节程度为 $1/\Delta = 2\%$ 。



自然的超对称模型

以次最小超对称为例说明。



自然的超对称模型

存活点的特点：暗物质只能以Singlino为主，

- 暗物质-原子核自旋无关截面：不同贡献之间强烈抵消，这将引入1%层次的精细调节；
- 暗物质-原子核自旋相关截面： $|N_{13}|^2 - |N_{14}|^2 \lesssim 0.03$ ；
- Compressed Sparticle Spectrum: $m_{\tilde{H}} - m_{\tilde{\chi}_1^0} \lesssim 20\text{GeV}$

内在原因：自然性 \rightarrow 要求轻的Higgsino \rightarrow 如何规避实验限制？
次最小超对称以一种不自然的方式实现了自然的超对称！

正确的超对称理论应该提供物理机制：

- 自然地预言 m_Z 和 m_h ；
- 自然地压低暗物质-原子核自旋无关截面；
- 自然地压低暗物质-原子核自旋相关截面；
- 自然地预言 Compressed Sparticle Spectrum。



2. 经济的超对称模型，如MSSM和NMSSM，的扩充一路在何方？

潜在的候选模型：

- 物质场扩充：Singlet Extensions, Triplet Extensions, Dirac Gaugino, Seesaw Extensions;
- 规范群扩充：U(1) Extensions, Left-Right Extensions;
- 两者兼具：规范群扩充往往需要额外的物质场。

对NMSSM进行Seesaw扩充，并取Sneutrino为暗物质，是最经济解决上述问题的途径(见arXiv: 1707.09626, 1807.03762):

- 中微子性质测量要求Seesaw扩充;
- MSSM的Seesaw扩充提供不了合适的暗物质候选者;
- Type-I Seesaw + NMSSM 是最经济的模型，最敏感参数：9个;
- Inverse Seesaw + NMSSM 也是经济的模型，敏感参数：12个。



3. 研究方法—在分析新物理模型时，经常遇到如下问题：

- 模型参数众多，扫描参数时如何获取完整的物理空间？
 - 随机扫描：扫描效率特别低，结果具有统计性；
 - Importance Sampling (重点采样)：
优点：快，但容易囿于似然函数大的区域，造成模型信息缺失；
 - Multinest Sampling (多重抽样)：获取似然函数等高线压缩参数空间
优点：只要采样足够大，能全面反映模型的信息，具有统计性；
缺点：为了提供丰富信息，计算量很大，程序优化后也非常耗时；
 - 机器学习：辅助手段，全参数空间训练耗时，个别观测量难训练。
- 扫描会得到大量参数点，如何分析理解背后的物理？
采取统计的方法进行分析：
 - 1、Bayesian分析：结果多多少少依赖先验概率分布；
 - 2、频率论：没有考虑相空间因素。



Bayesian分析：反映实验结果对研究者对模型认知的影响。

Bayesian定理：

$$P(\Theta|M, D) = \frac{P(D|O(M, \Theta))P(\Theta|M)}{Z}$$

- $P(\Theta|M)$: 模型M中参数 Θ 的先验分布，具有一定人为性；
- $P(D|O(M, \Theta))$: 观测量O对应的Likelihood function (似然函数), D为对应实验数据；
- Z: Bayesian evidence

$$Z(D|M) \equiv \int P(D|O(M, \Theta))P(\Theta|M) \prod d\Theta_i.$$

Z可看作似然函数在整个参数区间的平均值，依赖先验概率分布；
同一模型不同Scenario，Z值的大小可用来评判Scenario的优劣；

- $P(\Theta|M, D)$: 后验概率分布，反映参数点 Θ 的当前状态。



- Marginal Posterior PDF: 后验概率分布对参数空间的积分

$$P(\Theta_A|D) = \int P(\Theta|M, D)d\Theta_1d\Theta_2 \cdots d\Theta_{A-1}d\Theta_{A+1} \cdots \cdots,$$

$$P(\Theta_A, \Theta_B|D) = \int P(\Theta|M, D)d\Theta_1d\Theta_2 \cdots d\Theta_{A-1}d\Theta_{A+1} \cdots d\Theta_{B-1}d\Theta_{B+1} \cdots$$

由此可定义统计量:

1σ 和 2σ Credible Regions 和 Posterior Mean (Median, mode)。

Bayesian统计缺点: 结果多多少少依赖先验分布。

- **频率论: Best Point** $\mathcal{L}_{max} = \max_{\Theta_1, \Theta_2, \dots} \mathcal{L}(\Theta),$

- Profile Likelihood: 定义为某一区域似然函数最大值

$$\mathcal{L}(\Theta_A) = \max_{\Theta_1, \dots, \Theta_{A-1}, \Theta_{A+1}, \dots} \mathcal{L}(\Theta),$$

$$\mathcal{L}(\Theta_A, \Theta_B) = \max_{\Theta_1, \dots, \Theta_{A-1}, \Theta_{A+1}, \dots, \Theta_{B-1}, \Theta_{B+1}, \dots} \mathcal{L}(\Theta)$$

可定义统计量: 1σ 和 2σ Confidence Intervals。



二、Type-I Seesaw扩充的NMSSM

2.1 模型概况

2.1.1 场的配置（假定规范群不变）

在NMSSM基础上引入了一个新的右手中微子场 $\hat{\nu}$ ，产生中微子质量：

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	$(\mathbf{0}, \mathbf{1}, \mathbf{1})$



2.1.2 Lagrangian

$$W = \tilde{W}_{MSSM} + \lambda \hat{S} \hat{H}_u \cdot \hat{H}_d + \frac{1}{3} \kappa \hat{S}^3 + \lambda_\nu \hat{S} \hat{\nu} \hat{\nu} + \mathbf{Y}_\nu \hat{\mathbf{I}} \cdot \hat{\mathbf{H}}_u \hat{\nu},$$

$$L_{\text{soft}} = m_{H_d}^2 |H_d|^2 + m_{H_u}^2 |H_u|^2 + m_S^2 |S|^2 + m_{\tilde{\nu}_R}^2 \tilde{\nu}_R \tilde{\nu}_R^*$$

$$+ (\lambda A_\lambda S H_u \cdot H_d + \frac{1}{3} \kappa A_\kappa S^3 + \lambda_\nu \mathbf{A}_{\lambda_\nu} S \tilde{\nu}_R^* \tilde{\nu}_R^* + \mathbf{Y}_\nu \mathbf{A}_\nu \tilde{\nu}_R^* \tilde{\mathbf{I}} H_u + \text{h.c.}) + \dots$$

粒子谱:

- CP-even Higgs: $h_1, h_2, h_3, m_{h_1} < m_{h_2} < m_{h_3}$;
 - SM-like Higgs: 主要成分为 h_u ;
 - Heavy Doublet-dominated Higgs: 主要成分为 h_d ;
 - Singlet-dominated Higgs: 质量可以很轻;
- CP-odd Higgs: $A_1, A_2, m_{A_1} < m_{A_2}$;
 - Heavy Doublet-dominated Higgs: 主要成分为 $\cos \beta A_u + \sin \beta A_d$;
 - Singlet-dominated Higgs: 质量可以很轻;
- Charged Higgs: $H^\pm = \cos \beta H_u^\pm + \sin \beta H_d^\pm$;
 - 荷电Higgs与以二重态为主的重Higgs粒子质量近似简并。



2.1.3 Sneutrino质量

- $m_\nu = Y_\nu v_u M^{-1} Y_\nu^T v_u$, 其中 $M = 2\lambda_\nu v_S$, 由于中微子的质量大约为 0.1eV , 因此汤川耦合 Y_ν 的量级大约为 $\mathcal{O}(10^{-6})$ 。
- 考虑中微子振荡数据, m_ν 在味空间必须是非对角的。假定 Y_ν 是非对角而 λ_ν 是对角的, 且其他软破缺参数为对角的, 则Sneutrino质量矩阵的味混合被 Y_ν 的非对角元严重压低。
- 上述假定下, 研究Sneutrino暗物质时只需考虑一代情况。

将Sneutrino场分为CP-even和CP-odd两部分:

$$\tilde{\nu}_L \equiv \frac{1}{\sqrt{2}}(\tilde{\nu}_{L1} + i\tilde{\nu}_{L2}), \quad \tilde{\nu}_R \equiv \frac{1}{\sqrt{2}}(\tilde{\nu}_{R1} + i\tilde{\nu}_{R2}),$$



Sneutrino质量项:

$$\frac{1}{2}(\tilde{\nu}_{L1}, \tilde{\nu}_{R1}) \begin{pmatrix} m_{L\bar{L}}^2 & m_{LR}^2 + m_{L\bar{R}}^2 \\ m_{LR}^2 + m_{L\bar{R}}^2 & m_{R\bar{R}}^2 + 2m_{RR}^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tilde{\nu}_{L1} \\ \tilde{\nu}_{R1} \end{pmatrix} \\ + \frac{1}{2}(\tilde{\nu}_{L2}, \tilde{\nu}_{R2}) \begin{pmatrix} m_{L\bar{L}}^2 & -m_{LR}^2 + m_{L\bar{R}}^2 \\ -m_{LR}^2 + m_{L\bar{R}}^2 & m_{R\bar{R}}^2 - 2m_{RR}^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tilde{\nu}_{L2} \\ \tilde{\nu}_{R2} \end{pmatrix}.$$

$$m_{L\bar{L}}^2 \equiv m_j^2 + |Y_\nu v_u|^2 + \frac{1}{8}(g_1^2 + g_2^2)(v_d^2 - v_u^2),$$

$$m_{LR}^2 \equiv Y_\nu (-\lambda v_s v_d)^* + Y_\nu A_{Y_\nu} v_u,$$

$$m_{L\bar{R}}^2 \equiv Y_\nu v_u (-\lambda v_s)^*,$$

$$m_{R\bar{R}}^2 \equiv m_\nu^2 + |2\lambda_\nu v_s|^2 + |Y_\nu v_u|^2,$$

$$m_{RR}^2 \equiv \lambda_\nu (A_{\lambda_\nu} v_s + (\kappa v_s^2 - \lambda v_d v_u)^*).$$

- 手征混合正比 Y_ν , 可忽略不计, 质量本征态与手征本征态相一致;
- 存在轻子数破坏项, CP-even和CP-odd态出现质量劈裂:

$$\Delta m^2 \equiv m_{\text{even}}^2 - m_{\text{odd}}^2 = 4m_{RR}^2.$$



2.2 暗物质湮灭

在Seesaw扩充的NMSSM中，单态场为主Higgs粒子可作为Sneutrino暗物质湮灭产物或传播暗物质湮灭，Higgsino也可和暗物质共同湮灭—模型巧妙之处。

Sneutrino暗物质湮灭道为(V: 矢量粒子, S: 标量粒子, XY: 任意可能粒子):

- $\tilde{\nu}_1 \tilde{\nu}_1 \rightarrow VV^*$, VS , $f\bar{f}$: s-道交换一个CP-even Higgs粒子。
- $\tilde{\nu}_1 \tilde{\nu}_1 \rightarrow SS^*$: s-道交换Higgs, t/u-道交换Sneutrino, 标量四顶角耦合。
- $\tilde{\nu}_1 \tilde{\nu}_1 \rightarrow \nu_R \bar{\nu}_R$: s-道交换Higgs, t/u-道交换Neutralino。
- $\tilde{\nu}_1 \tilde{\nu}'_1 \rightarrow A_i^{(*)} \rightarrow XY$: $\tilde{\nu}'_1$ 与 $\tilde{\nu}_1$ 的CP值相反, $m_{\tilde{\nu}'} \simeq m_{\tilde{\nu}}$ 时, 影响残留密度。
- $(\tilde{\nu}_1 \tilde{\nu}_1 \leftarrow h_s^{(*)} \rightarrow \tilde{H}\tilde{H}), \tilde{H}\tilde{H} \rightarrow XY$: $m_{\tilde{\nu}_1} \simeq \mu$ 时, 与Higgsino共同湮灭。

原因: 宇宙早期 $\tilde{\nu}_1 \tilde{\nu}_1$ 通过单态Higgs场与 $\tilde{H}\tilde{H}$ 相互转化, 两者处于热平衡; 由于 $\tilde{H}\tilde{H}$ 会以较大的截面湮灭到标准模型粒子, 这推动 $\tilde{\nu}_1 \tilde{\nu}_1$ 的数目减少。当宇宙膨胀速度大于 $\tilde{\nu}_1$ 湮灭速度时, 退藕。



2.3 暗物质直接探测

$\tilde{\nu}_1$ 是一个有确定CP数和轻子数的右手标量场，与核子 N ($N = p, n$)的散射只能通过交换CP-even Higgs发生:

$$\sigma_{\tilde{\nu}_1-N}^{\text{SI}} \propto \left(\sum_i \xi_i \right)^2$$

$$\xi_i \simeq -\frac{g}{8m_W} \frac{C_{\tilde{\nu}_1\tilde{\nu}_1 h_i}}{m_{h_i}^2 m_{\tilde{\nu}_1}} \left(\frac{Z_{i2}}{\sin\beta} + \frac{Z_{i1}}{\cos\beta} \right)$$

$$C_{\tilde{\nu}_1\tilde{\nu}_1 h_i} = \frac{2\lambda\lambda_\nu M_W}{\sqrt{2}g} (\sin\beta Z_{i1} + \cos\beta Z_{i2}) + \left[\frac{\sqrt{2}}{\lambda} (4\lambda_\nu^2 + 2\kappa\lambda_\nu) \mu + \frac{\lambda_\nu A_{\lambda_\nu}}{\sqrt{2}} \right] Z_{i3}$$

- $C_{\tilde{\nu}_1\tilde{\nu}_1 h_i}$: $\tilde{\nu}_1\tilde{\nu}_1 h_i$ 相互作用系数;
- Z : 对角化CP-even Higgs质量矩阵。
 - Z_{i1} : h_i 中包含 h_d 的分量;
 - Z_{i2} : h_i 中包含 h_u 的分量;
 - Z_{i3} : h_i 中包含 h_s 的分量。



$\sigma_{\tilde{\nu}_1-N}^{\text{SI}}$ 呈现如下特点(理论诱人之处):

- 依赖参数众多, 有更大的自由度调整大小:
 - Higgs部分参数: λ 、 κ 、 $\tan\beta$ 、 μ 、 A_λ 和 A_κ , 这些参数决定 Z_{ij} 和 m_{h_i} ;
 - Sneutrino部分参数: λ_ν 、 A_{λ_ν} 以及 $m_{\tilde{\nu}_1}$;
- 每一个 h_i 的贡献都存在压低因子:
 - Heavy Doublet-dominated Higgs: 被 $1/m_{h_i}^2$ 压低;
 - SM-like Higgs: 被 λ_ν 或 $\cos\beta$ 压低;
 - Singlet-dominated Higgs: 被 Z_{i1} 和 Z_{i2} 压低。

为了表征各 h_i 贡献抵消程度, 定义精细调节量 Δ_{FT} :

$$\Delta_{FT} = \max_i \left\{ \frac{\xi_i^2}{(\sum_j \xi_j)^2} \right\}$$

Δ_{FT} 越大, 理论越不自然。



三、数值结果

3.1 扫描策略

参数区间:

$$0 < \lambda_\nu \leq 0.5, \quad 0 < \lambda \leq 0.7, \quad |\kappa| \leq 0.7, \quad 1 \leq \tan\beta \leq 60,$$

$$|A_{\lambda_\nu}|, |A_\kappa| \leq 1\text{TeV}, \quad 100\text{GeV} \leq \mu \leq 300\text{GeV},$$

$$0 \leq m_{\tilde{\nu}} \leq 300\text{GeV}, \quad |A_t| \leq 5\text{TeV}.$$

采取的似然函数:

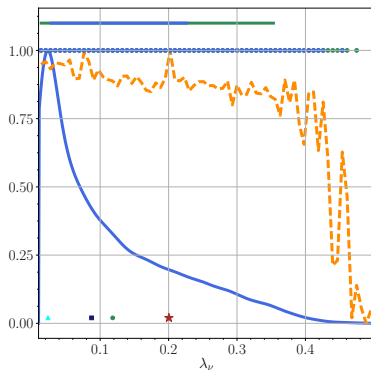
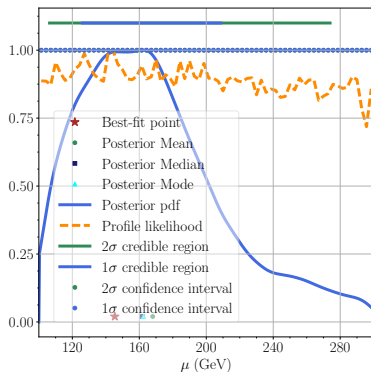
$$\mathcal{L}(\Theta) = \mathcal{L}_{Higgs} \times \mathcal{L}_{Br(B_s \rightarrow \mu^+ \mu^-)} \times \mathcal{L}_{Br(B_s \rightarrow X_s \gamma)} \times \mathcal{L}_{\Omega_{\tilde{\nu}_1}} \times \mathcal{L}_{DD} \times \mathcal{L}_{ID}.$$

- \mathcal{L}_{Higgs} : 对撞机上寻找Higgs的似然函数, 程序HiggsSignal和HiggsBounds 计算;
- $\mathcal{L}_{Br(B_s \rightarrow \mu^+ \mu^-)} / \mathcal{L}_{Br(B_s \rightarrow X_s \gamma)}$: 来自B物理的似然函数, 需计算B介子衰变;
- $\mathcal{L}_{\Omega_{\tilde{\nu}_1}}$: 暗物质残留密度对应似然函数, 需计算暗物质各种湮灭过程;
- \mathcal{L}_{DD} : XENON1T-2018实验对应的似然函数, 需计算暗物质-原子核散射;
- \mathcal{L}_{ID} : Fermi-LAT寻找矮星系结果对应似然函数, 需计算暗物质湮灭光子谱。



3.2 倾向的参数空间

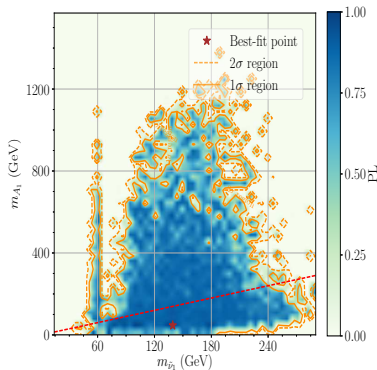
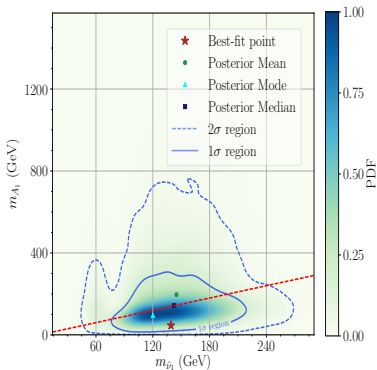
一维分布图：如何画？如何理解？



- μ 倾向取较小值，能自然地预言 Z 玻色子质量——理论优点；
原因：单态场在暗物质物理中起着重要作用，额外任务。
- λ_ν 倾向取很小的值， $C_{\tilde{\nu}_1 \tilde{\nu}_1 h_1}$ 以及暗物质与原子核散射截面被压低。

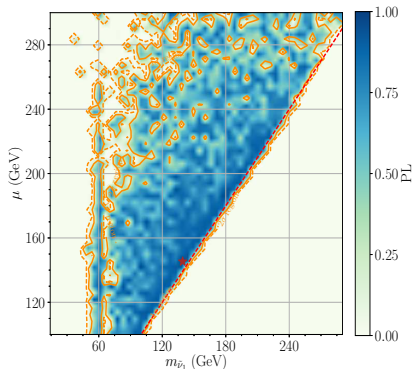
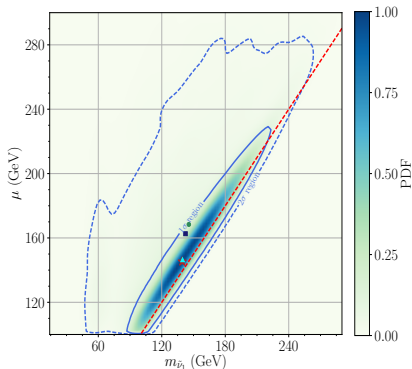


3.3 暗物质湮灭机制



- 对于绝大多数点， $m_{\tilde{\nu}_1} > m_{A_1}$ ， $\tilde{\nu}_1 \tilde{\nu}_1 \rightarrow A_1 A_1$ ；
- $\tilde{\nu}_1$ 和 A_1 构成一个Dark Sector，与SM Sector通过 A_1 (单态场为主)通信，典型的Secluded/Hidden DM Scenario。





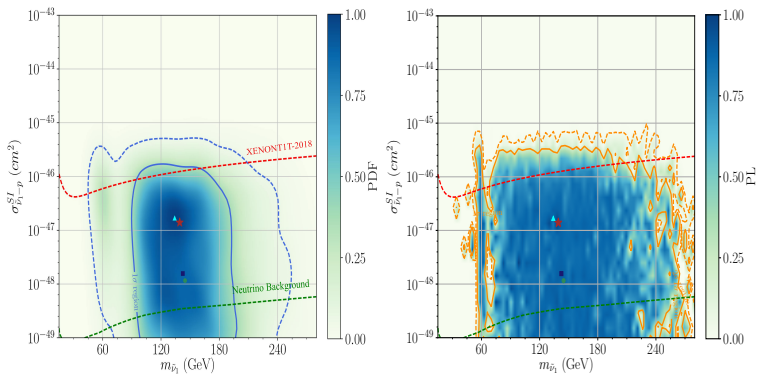
- Coannihilation 类型II: $(\tilde{\nu}_1 \tilde{\nu}_1 \leftarrow h_s^{(*)} \rightarrow \tilde{H} \tilde{H}), \tilde{H} \tilde{H} \rightarrow XY$; 要求 $m_{\tilde{\nu}_1} \simeq 2\mu$;

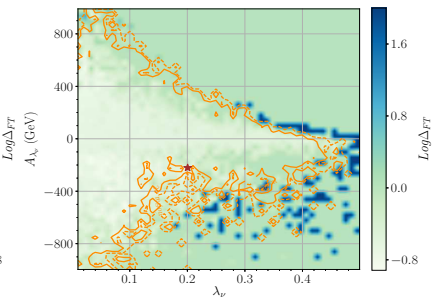
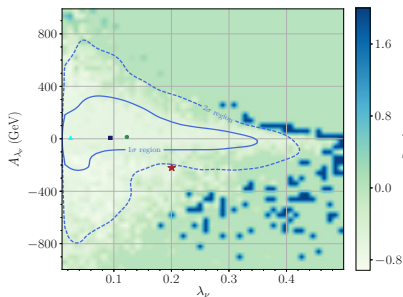
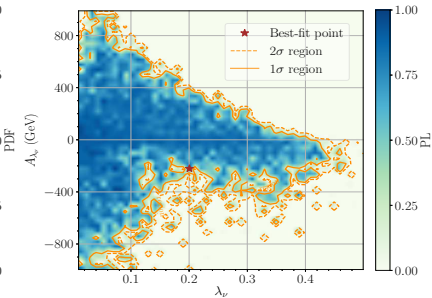
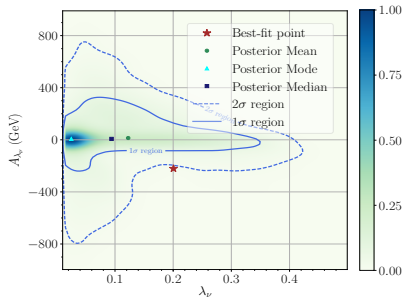
- 通常而言, Sneutrino暗物质是多种湮灭方式共存, 考虑限制后倾向模式:

$$m_{\tilde{\nu}_1} \gtrsim m_{A_1}, \quad m_{h_2} \gtrsim 2m_{\tilde{\nu}_1}, \quad m_{\tilde{\nu}_1} \simeq \mu.$$

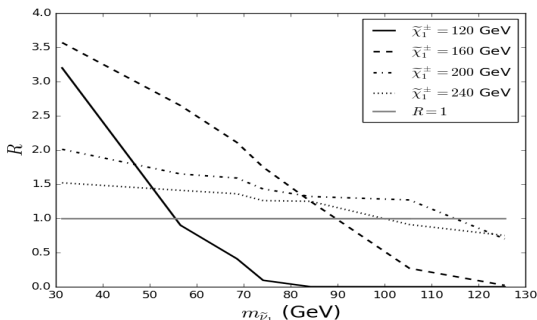


3.4 暗物质核子散射





3.5 LHC实验限制



- 中性Higgsino要和Singlino混合: $\tilde{\chi}^0 \rightarrow \tilde{\nu}_1 \nu_R$, LHC上信号过于复杂:
 $pp \rightarrow \tilde{\chi}^0 \tilde{\chi}^0 \rightarrow 2(\tilde{\nu}_1 \nu_R)$, $\nu_R \rightarrow W^{(*)} l, Z^{(*)} \nu_L, h^{(*)} \nu_L$;
- 荷电Higgsino主要衰变道: $\tilde{\chi}_1^\pm \rightarrow \tilde{\nu}_1 \tau, \tilde{\nu}'_1 \tau, \tilde{\chi}^0 jj' / \pi^\pm$, 可能信号:
 $pp \rightarrow \tilde{\chi}_1^\pm \tilde{\chi}_1^\mp \rightarrow (2\tilde{\nu}_1) \tau^+ \tau^-$;
- 利用8 TeV-LHC对 $2\tau + E_T^{miss}$ 信号分析, 计算对应的 $R \equiv S/S_{95}^{OBS}$,
 假定 $Br(\tilde{\chi}_1^\pm \rightarrow \tilde{\nu}_1 \tau^\pm) = 100\%$.



- 中微子物理要求传统的超对称，如MSSM和NMSSM，必须扩充；
- 暗物质物理要求传统的超对称进行扩充—又一个重要进展！
- 在Seesaw扩充的超对称中，Sneutrino可以作为暗物质候选者；
- Type-I + NMSSM 是最经济的框架，单态场起多重作用：
 - 辅助电弱对称性破缺，解决 μ -参数问题；
 - 给右手中微子提供质量；
 - 作为暗物质湮灭产物或媒介，可类似Hidden DM Scenario；
 - 诱导暗物质-原子核散射等。
- 模型优点：
 - μ 参数倾向比较小，能自然地解释Z玻色子质量；
 - 暗物质-原子核散射被自然压低—与XENON1T-2018结果一致；
 - 超粒子信号更为复杂，增加寻找难度—与LHC实验结果一致。
- 模型预言：较轻的右手中微子，较轻的Higgsino(往往对应 E_T^{miss} 信号)。



Type-I seesaw扩充的MSSM不能提供合适的Sneutrino暗物质:

- Sneutrino暗物质为纯右手Sneutrino或左右手Sneutrino;
- 前者: 暗物质与普通物质的耦合被中微子汤川耦合压低, 湮灭截面太小;
- 后者: 手征混合需要非传统的超对称破缺机制, 很难同时满足暗物质丰度和暗物质-核子散射的实验观测要求。

原因: 暗物质湮灭缺乏媒介!

