

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

曹俊杰

合作者：郭小飞，潘雨丝，尚亮亮，岳远方

河南师范大学

arXiv:1807.03762

2018年8月20日



河南师范大学  
HENAN NORMAL UNIVERSITY

# 目录

- 1 研究背景
  - WIMP仍是暗物质最佳候选者
  - 暗物质直接探测实验强烈限制超对称理论
  - Sneutrino是理想的暗物质候选者
  - 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. 随着实验的进展，越来越多的研究者对WIMP暗物质产生质疑。

上述观点其实缺乏足够的理论和实验支持:

- WIMP的本质:  $\langle\sigma v\rangle_{FO} \sim 10^{-26} \text{cm}^3 \text{s}^{-1}$ ;
- $\langle\sigma v\rangle_{FO}$ 与 $\sigma_{\chi-N}$ 、 $\sigma(pp \rightarrow \chi + X)$ 没有必然联系, 后者模型依赖;
- 应用: 假定暗物质湮灭以s-波为主, 且不考虑“禁止湮灭”情形,

$$\langle\sigma v\rangle_{FO} \sim \langle\sigma v\rangle_{Today} \sim 10^{-26} \text{cm}^3 \text{s}^{-1},$$

后果: 取决暗物质质量和湮灭产物, 该过程可能被间接探测到;

例: 假定s-波为主, CMB、Fermi-LAT要求(见arXiv:1805.10305):

$$m_{\chi} \gtrsim 20 \text{GeV},$$

么正性要求:  $m_{\chi} \lesssim 100 \text{TeV}$ 。

**WIMP仍旧是最自然的暗物质候选者!**



## 2. 暗物质直接探测实验强烈限制超对称模型预言WIMP暗物质。

在经济的超对称(譬如MSSM)中, 最轻的Neutralino是暗物质的唯一候选者, 它与原子核的散射通过 $t$ -道传播CP-even Higgs实现:

$$\sigma_{\tilde{\chi}_1^0-N} \propto \left( \sum_i \frac{f_i(m_{\tilde{\chi}_1^0}, \rho_{Higgs})}{m_{h_i}^2} \right)^2,$$

$f_i \equiv C_{\tilde{\chi}_1^0 \tilde{\chi}_1^0 h_i} C_{NNh_i}$ : 依赖暗物质质量和Higgs部分的参数 $\rho_{Higgs}$ ,

$$f_i(m_{\tilde{\chi}_1^0}, \rho_{Higgs}) \propto \frac{1}{\mu} \left( a + \frac{b}{\mu} + \dots \right).$$

注意:

- $\rho_{Higgs}$  被LHC和LEP实验强烈限制, 如要求125GeV SM-like Higgs;
- $\mu$ : Higgsino质量, 与Z-boson质量的关系为

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

若 $\mu \lesssim 300\text{GeV}$ ,  $\sigma_{\tilde{\chi}_1^0-N} \gtrsim 10^{-45}\text{cm}^2$ ; 实验:  $\sigma_{\tilde{\chi}_1^0-N} \lesssim 10^{-47}\text{cm}^2$ 。



### 3. 为了解决该问题，经济的超对称模型需要扩充——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，是最经济解决该问题的途径(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。



#### 4. 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 $\Theta$ 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 $\Theta$ 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:

$1\sigma$  和  $2\sigma$  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:  $1\sigma$  和  $2\sigma$  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	$(\mathbf{0}, \mathbf{1}, \mathbf{1})$
$\hat{\nu}$	$\tilde{\nu}_R^*$	$\nu_R^*$	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  $0.1\text{eV}$ , 因此汤川耦合  $Y_\nu$  的量级大约为  $\mathcal{O}(10^{-6})$ 。
- 考虑中微子振荡数据,  $m_\nu$  在味空间必须是非对角的。假定  $Y_\nu$  是非对角而  $\lambda_\nu$  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  $Y_\nu$  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 $Y_\nu$ , 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。
- $\tilde{\nu}_1 \tilde{\nu}_1 \rightarrow h_s^{(*)} \rightarrow \tilde{H}\tilde{H}$ ,  $\tilde{H}\tilde{H} \rightarrow XY$ :  $m_{\tilde{\nu}_1} \simeq \mu$ 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:  $\lambda$ 、 $\kappa$ 、 $\tan\beta$ 、 $\mu$ 、 $A_\lambda$ 和 $A_\kappa$ , 这些参数决定 $Z_{ij}$ 和 $m_{h_i}$ ;
  - Sneutrino部分参数:  $\lambda_\nu$ 、 $A_{\lambda_\nu}$ 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 $\lambda_\nu$ 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 $\Delta_{FT}$ :

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

$\Delta_{FT}$ 越大, 理论越不自然。



## 具体研究中应该考虑情形:

- $h_1$ 对应SM-like Higgs boson:
  - $\tilde{\nu}_1$ 为CP-even情形: 对应 $Z$ 最大;
  - $\tilde{\nu}_1$ 为CP-odd情形: 对应 $Z$ 次大;
- $h_2$ 对应SM-like Higgs boson:
  - $\tilde{\nu}_1$ 为CP-even情形: 对应 $Z$ 较小;
  - $\tilde{\nu}_1$ 为CP-odd情形: 对应 $Z$ 最小;
- 前者暗物质物理和后者有很大区别:
  - Bayesian Evidence表明实验数据倾向前者;
  - 后者:  $\tilde{\nu}_1\tilde{\nu}_1 \rightarrow h_1h_1$ 是主要湮灭道;
  - 后者: 暗物质-原子核散射截面比较大;
  - 后者被暗物质直接探测实验强烈限制。





## 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:

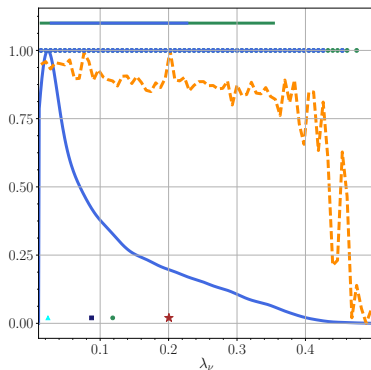
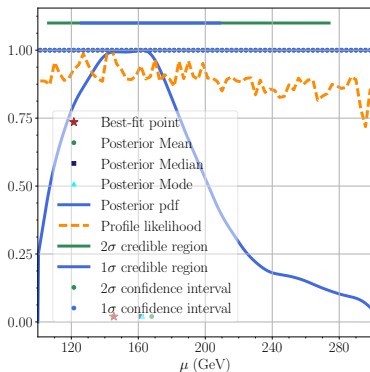
$$\mathcal{L}(\Theta) = \mathcal{L}_{Higgs} \times \mathcal{L}_{Br(B_s \rightarrow \mu^+ \mu^-)} \times \mathcal{L}_{Br(B_s \rightarrow X_s \gamma)} \times \mathcal{L}_{\Omega_{\tilde{\nu}_1}} \times \mathcal{L}_{DD} \times \mathcal{L}_{ID}.$$

- $\mathcal{L}_{Higgs}$ : 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

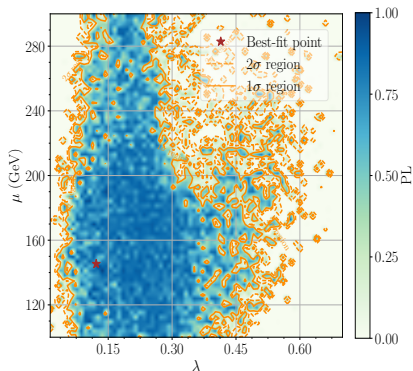
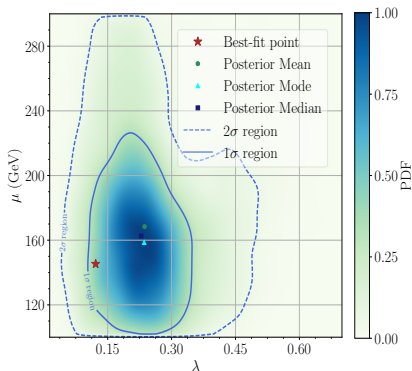
一维分布图：如何画？如何理解？



- $\mu$  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。
- $\lambda_\nu$  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。



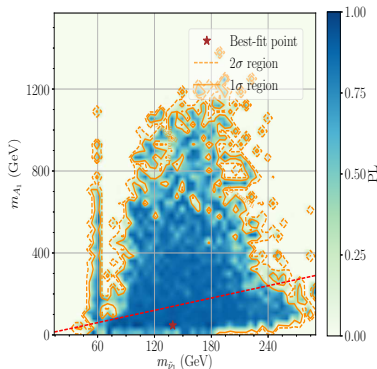
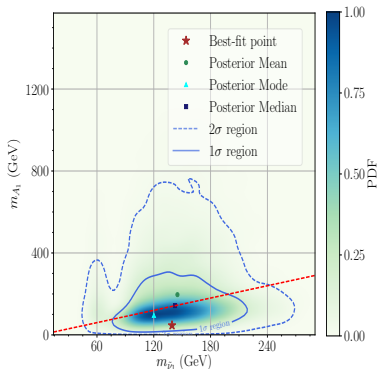
## 二维分布图：如何画？



$2\sigma$  Credible Region和 $1\sigma$  Confidence Interval类似，  
反映结果与先验分布选取近似无关。

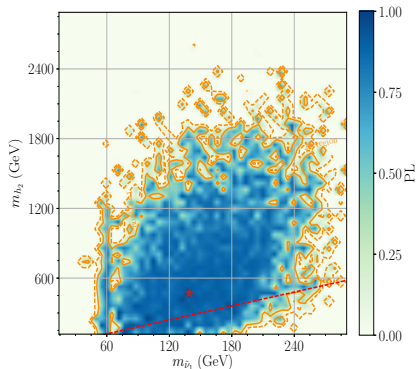
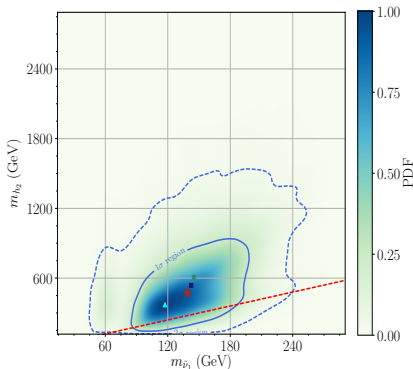


### 3.3 暗物质湮灭机制



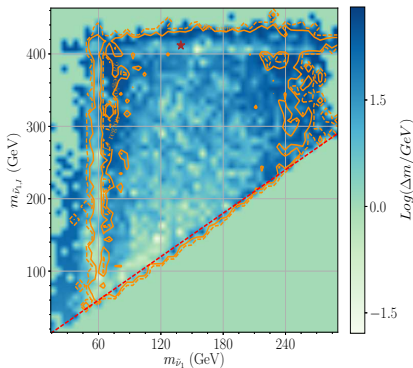
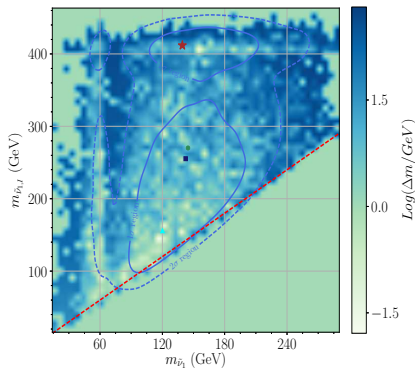
- 对于绝大多数点， $m_{\tilde{\nu}_1} > m_{A_1}$ ， $\tilde{\nu}_1 \tilde{\nu}_1 \rightarrow A_1 A_1$ ；
- $\tilde{\nu}_1$ 和 $A_1$ 构成一个Dark Sector，与SM Sector通过 $A_1$ (单态场为主)通信，典型的Secluded/Hidden DM Scenario。





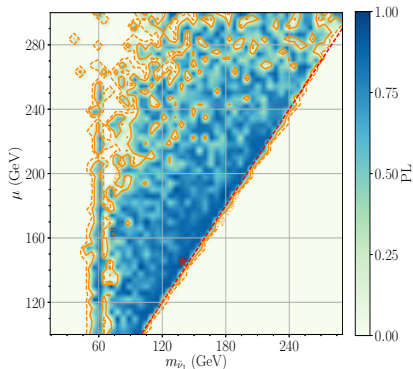
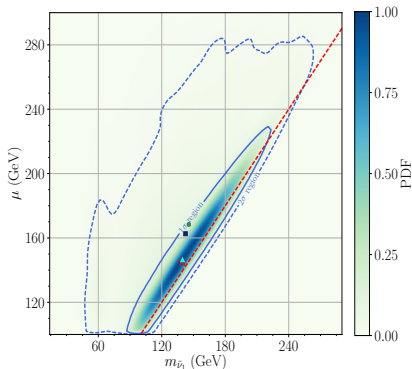
- $s$ -道  $h_2$  诱导的湮灭:  $\tilde{\nu}_1 \tilde{\nu}_1 \rightarrow h_2^{(*)} \rightarrow XY$ ;
- 特点:  $m_{h_2}$  倾向大于  $2m_{\tilde{\nu}_1}$ ;  
 $\langle \sigma v \rangle_{FO} > \langle \sigma v \rangle_{Today}$ , 有利于逃脱暗物质间接探测限制!
- 可共振湮灭。





- Coannihilation 类型I:  $\tilde{\nu}_1 \tilde{\nu}'_1 \rightarrow A_1^{(*)} \rightarrow XY$ , 要求  $m_{\tilde{\nu}_1} \sim m_{\tilde{\nu}'_1}$ ;
- $\Delta m = |m_{A_1} - m_{\tilde{\nu}_1} - m_{\tilde{\nu}'_1}|$ ; 若  $\Delta m \simeq 0$ , 共振湮灭。



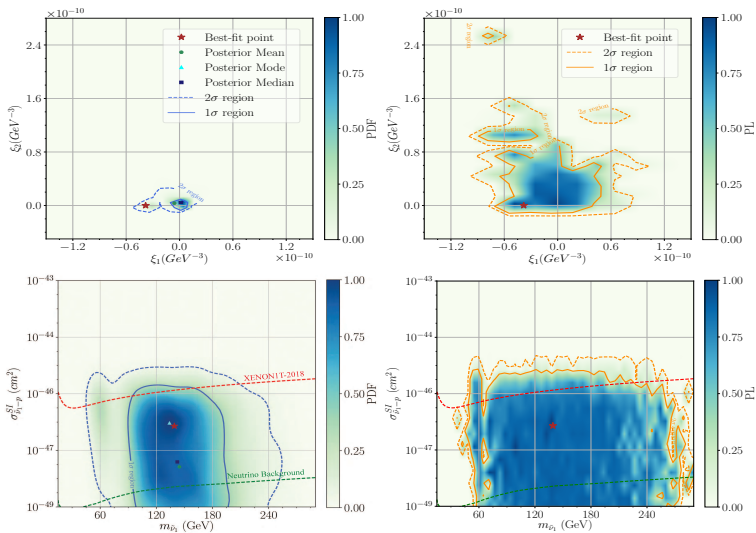


- Coannihilation 类型II:  $\tilde{\nu}_1 \tilde{\nu}_1 \rightarrow h_s^{(*)} \rightarrow \tilde{H} \tilde{H}$ ; 要求  $m_{\tilde{\nu}_1} \simeq 2\mu$ ;
- 通常而言, Sneutrino暗物质是多种湮灭方式共存, 考虑限制后倾向模式:

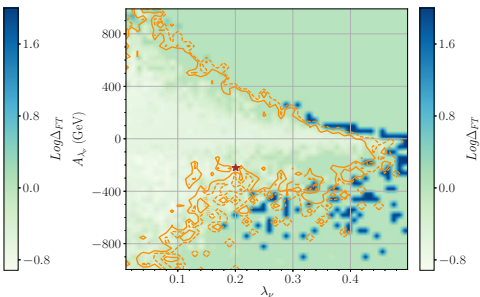
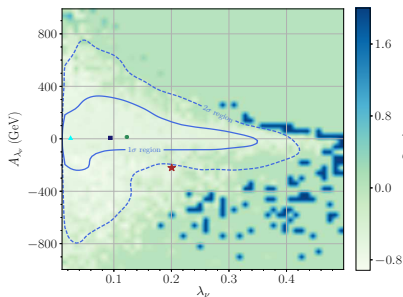
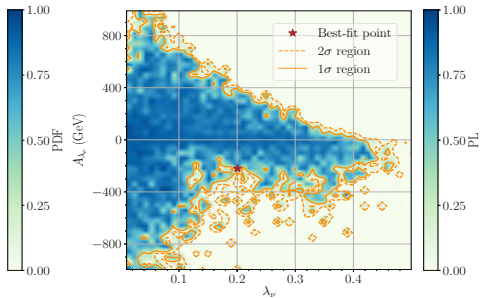
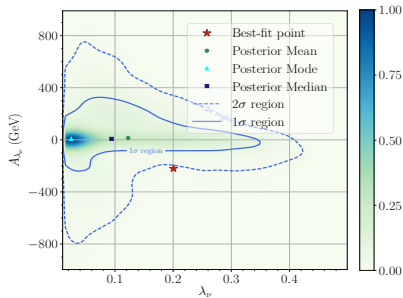
$$m_{\tilde{\nu}_1} \gtrsim m_{A_1}, \quad m_{h_2} \gtrsim 2m_{\tilde{\nu}_1}, \quad m_{\tilde{\nu}_1} \simeq \mu.$$



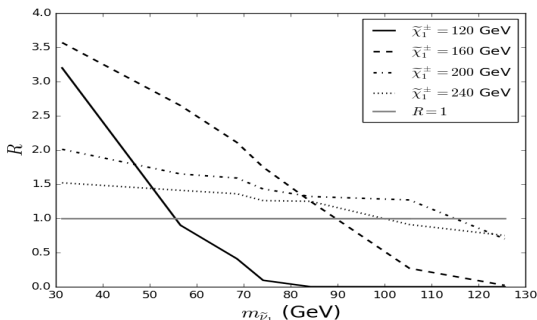
## 3.4 暗物质核子散射







### 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；
- 暗物质物理很强地倾向对传统的超对称进行扩充；
- 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 $\mu$ -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：
  - $\mu$ 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)。



## 新物理研究中物理想法是第一位的，但需要学习和开发计算工具！

- 模型构建：FeynRules, SARAH, 我们已构建7个新物理模型；
- 扫描工具：Easyscan-HEP, 我们2012年开始开发，
  - 随机扫描；
  - 马尔科夫链扫描，单线程或多线程；
  - MultiNest扫描，单机版和服务端版；
  - PolyChord扫描，单机版和服务端版；
  - 机器学习辅助工具。
- 蒙卡模拟：MadGraph/MadEvent, CheckMATE；  
2015年加入CheckMATE合作组，已为其提供十几个实验分析代码；
- 暗物质物理：micrOMEGAs, 能修改内部代码；
- Higgs物理：HiggsSignal和HiggsBounds；
- 味物理：FlavorKit。



该工作共花费10万核小时(Intel I-9 CPU)。为什么非常耗时？

- 为了给出较好的统计行，计算量比较大—约 $10^8$ 个参数点；
- 程序包micrOMEGAs计算暗物质物理非常耗时(感谢宇峰和庆宏)；
- 不同程序包之间通过输入/输出流进行传递，没有进行封装：效率低，可控性不是很好。

**国家超算中心可较好地解决计算瓶颈：**

- Type-I Seesaw + NMSSM
  - $h_1$ 作为SM-like Higgs Boson，见本报告；
  - $h_2$ 作为SM-like Higgs Boson，已有初步结果；
- Inverse Seesaw + NMSSM
  - $h_1$ 作为SM-like Higgs Boson，递交上海超算，正计算；
  - $h_2$ 作为SM-like Higgs Boson，递交上海超算，正排队。



## 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!

