

Explanation of the Fermi Galactic Center Excess and its test at LHC Run-II

Junjie Cao (曹俊杰)

河南师范大学，基于arXiv:1410.3239

感谢同毕效军研究员、袁强博士及合作者们的讨论



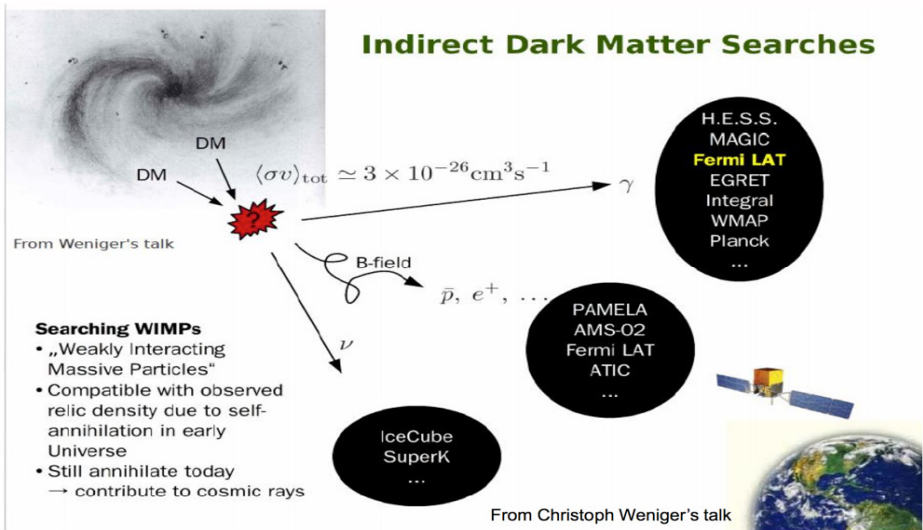
November 11, 2014, Zhejiang University, Hangzhou.

- 1、 银河系中心GeV宇宙线超出 (GCE)
- 2、 次最小超对称模型 (NMSSM) 简介
 - 2.1、 NMSSM的特点
 - 2.2、 对NMSSM的扫描策略
 - 2.3、 研究策略的特别之处
- 3、 NMSSM对GCE的解释
- 4、 LHC对GCE解释的检验
- 5、 结论

1、Fermi Galactic Center Excess

Dark Matter Annihilation and Indirect Detection

Indirect Dark Matter Searches



1、Fermi Galactic Center Excess

Fermi-LAT and Dark Matter Indirect Detection

- ❑ June 11, 2008:
 - **Fermi Gamma-ray Space Telescope** on a Delta II rocket shuttle towards 550 km to orbit Earth every 95 min

- ❑ Bigger and better successor to the EGRET (Energetic Gamma Ray Exp. Telescope) Operational from 1991-2000

- ❑ Fermi includes two scientific instruments:
 - **Large Area Telescope (LAT)**
 - **Gamma-ray Burst Monitor (GBM)**

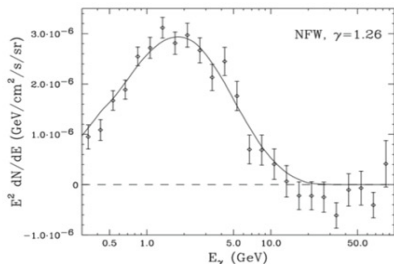
- ❑ Fermi is mainly a gamma-ray telescope, but is a good electron and positron detector too.

From Fermi Collaboration's Talk

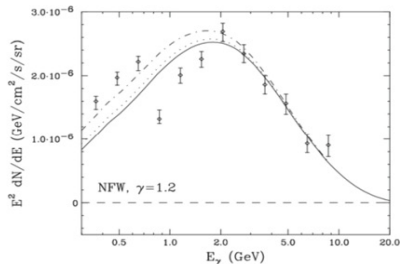


1、Fermi Galactic Center Excess

Spatial Residuals with New Cut



Inner Galaxy



Galactic Center

After the cut on CTBCORE:

- An apparent north/south asymmetry previously noted in the extended (inner Galaxy) excess is removed. The new preferred slope is $\gamma=1.1-1.2$ in the inner Galaxy analysis, $\gamma=1.1-1.2$ in the Galactic Center.
- The spectra measured in different regions are more consistent, especially at low energies.
- The low-energy spectrum becomes harder.

Daylan et al. (1402.6703)

1、Fermi Galactic Center Excess

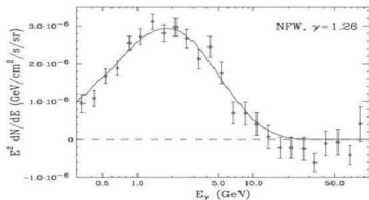
Gamma Rays from Dark Matter Annihilation

可用暗物质s波湮灭, $\chi\chi \rightarrow b\bar{b}$, 解释。要求:
 $m_\chi \sim 35\text{GeV}$, $\langle\sigma v\rangle|_{v\rightarrow 0} \sim 2 \times 10^{-26}\text{cm}^3\text{s}^{-1}$ 。

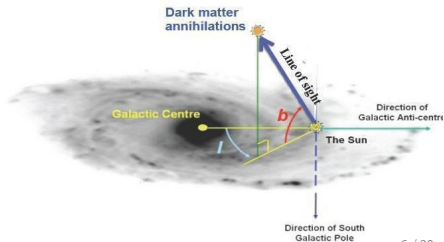
$$\frac{dJ_{\text{ann.}}}{d\Omega dE} = \frac{\langle\sigma v\rangle}{8\pi m_{\text{dm}}^2} \frac{dN}{dE} \times \int_{\text{l.o.s.}} ds \rho(\vec{r}[s, \Omega])^2$$

„Particle Physics
Factor“

Characteristic Energy Spectrum



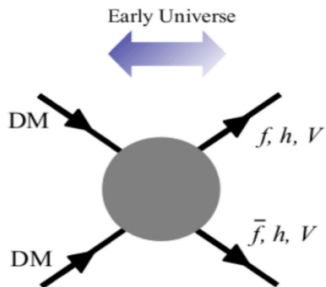
„Astrophysics
Factor“



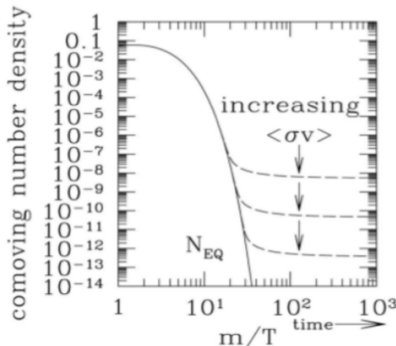
1、Fermi Galactic Center Excess

Dark Matter and Thermal Production

Thermal production of WIMPs



From Alejandro Ibarra's talk



$$\Omega_{\text{DM}} h^2 \simeq 0.11 \times \frac{3 \times 10^{-26} \text{cm}^3 \text{s}^{-1}}{\langle\sigma_{\text{ann}} v\rangle}$$

1、Fermi Galactic Center Excess

若利用 $\chi\chi \rightarrow A_1^* \rightarrow b\bar{b}$ 来解释 GCE,
NMSSM 应具有三个特征:

- 1、当考虑各种实验限制后, A_1 应该满足: $m_{A_1} \simeq 2m_\chi \sim 70\text{GeV}$ 。
作为后果, **MSSM 不能解释 GCE;**
NMSSM 是最经济能解释 GCE 的超对称模型。
- 2、单一过程 $\chi\chi \rightarrow A_1^* \rightarrow b\bar{b}$ 很难同时解释 GCE 和暗物质残留密度。
解决办法:
利用 $\chi\chi \rightarrow Z^* \rightarrow \text{anything}$ 来影响宇宙早期暗物质的湮灭,
从而改变 $\langle\sigma v\rangle|_{v\rightarrow 0}$ 和 $\langle\sigma v\rangle_0$ 的关联。
- 3、在这种方案下, $Z\chi\chi$ 耦合不能太小, χ 必须含有较大 Higgsino 成分。
这种情况应该可以在 LHC 上被检验!
(部分结论同 arXiv:1409.1573, 1409.7864 一致)。

1、Fermi Galactic Center Excess

对特征的分析

考虑有效拉氏量:

$$-\mathcal{L}_{\text{int}} = iy_{A_1\chi\chi}A_1\bar{\chi}\gamma^5\chi + iy_{A_1b\bar{b}}A_1\bar{b}\gamma^5b.$$

暗物质湮灭截面为:

$$\langle\sigma v\rangle_{b\bar{b}}|_{v\rightarrow 0} \propto \frac{y_{A_1\chi\chi}^2 y_{A_1b\bar{b}}^2 m_\chi^2}{(4m_\chi^2 - m_{A_1}^2)^2 + m_{A_1}^2 \Gamma_{A_1}^2}.$$

- 鉴于 $m_\chi \sim 35\text{GeV}$, 若 $m_{A_1} > 85\text{GeV}$ (完全Off-Shell湮灭), GCE 要求大 $y_{A_1b\bar{b}}$, 同LHC寻找Non-Standard Higgs以及 $B_s \rightarrow \mu^+\mu^-$ 矛盾。
- 若 $m_{A_1} < 85\text{GeV}$ 且 $2m_\chi/m_{A_1}$ 较远偏离1时, LEP过程 $e^+e^- \rightarrow h_{SM}A_1$ 进一步要求 $y_{A_1b\bar{b}}$ 不能太大, 这导致不能解释GCE。
- **特征1: 为了解释GCE, $2m_\chi/m_{A_1} \simeq 1$ 。**
- **特征2: 鉴于 $2m_\chi$ 和 m_{A_1} 的关系已相对固定, 很难同时满足:**

$$\langle\sigma v\rangle_{b\bar{b}}|_{v\rightarrow 0} \simeq 2.0 \times 10^{-26} \text{cm}^2 \text{s}^{-1}, \quad \langle\sigma v\rangle_0 \geq 3.0 \times 10^{-26} \text{cm}^2 \text{s}^{-1}.$$

故: Z 在宇宙早期必须对暗物质湮灭有较大贡献!

2、NMSSM模型简介: NMSSM的特点

- NMSSM: MSSM模型最经济的单态场扩充, 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。

- μ 参数通过动力学产生: $\mu = \lambda \langle s \rangle$ 。
- 3 CP-even Higgs, 2 CP-odd Higgs, 5 neutralinos。
Higgs 和暗物质物理非常丰富, 能自然预言125GeV Higgs 粒子;
超粒子在对撞机上的信号可以与MSSM有很大不同。
- 在 $\lambda, \kappa \rightarrow 0$ 极限下, 单态超场与其他场的相互作用退耦;
如果 μ 被固定, NMSSM的唯一象学与MSSM的唯一象学相同。
只有 λ 取值较大时, 两类模型才会产生较大的差异。

2、NMSSM模型简介: NMSSM的特点

定义 $H_{SM} = \sin \beta H_u + \varepsilon \cos \beta H_d^*$, $H_{NEW} = \cos \beta H_u - \varepsilon \sin \beta H_d^*$,

$$H_{SM} = \begin{pmatrix} G^+ \\ v + \frac{\phi_{sm} + iG^0}{\sqrt{2}} \end{pmatrix}, \quad H_{NEW} = \begin{pmatrix} H^+ \\ \frac{\phi_{new} + iP_H}{\sqrt{2}} \end{pmatrix}, \quad H_S = s + \frac{1}{\sqrt{2}} (\phi_s + iP_s).$$

以 $(\mathbf{P}_1 \equiv \mathbf{P}_H, \mathbf{P}_2 \equiv \mathbf{P}_s)$ 为基矢, CP-odd Higgs 的质量矩阵元:

$$M_{-11}^2 = M_A^2 = \frac{\mu}{\sin 2\beta} (A_\lambda + \kappa v_s) \quad \boxed{A_i = \sum_{j=1}^2 V_{ij} P_j}$$

$$M_{-22}^2 = M_P^2 = \frac{1}{4} \left[\lambda \left(\frac{M_A}{\mu / \sin 2\beta} \right) + 6\lambda\kappa \right] v^2 \sin 2\beta - 3\kappa v_s A_\kappa$$

$$M_{-12}^2 = M_{AP}^2 = \frac{1}{2} \lambda v M_A \frac{M_A}{\mu / \sin 2\beta} - 3\lambda\kappa v_s v$$

V_{ij} : P_j 在 CP-odd 质量本征态 (物理粒子) A_i 中的分量。

若 $V_{i1}^2 > \frac{1}{2}$, A_i 以二重态场为主, 应重于约 300 GeV:

(1) 受 LHC 寻找 Higgs 结果限制; (2) 受 B 物理限制, 如 $B \rightarrow X_s \gamma$ 等。

若 $V_{i1}^2 < \frac{1}{2}$, A_i 以单态场为主, 可以很轻, 受 $\Upsilon \rightarrow A_1 \gamma$, $B_s \rightarrow \mu^+ \mu^-$ 限制。

2、NMSSM模型简介: NMSSM的特点

以($\mathbf{S}_1 \equiv \phi_{\text{new}}, \mathbf{S}_2 \equiv \phi_{\text{sm}}, \mathbf{S}_3 \equiv \phi_s$)为基矢, CP-even Higgs的质量矩阵元:

$$M_{11}^2 = M_A^2 + (m_Z^2 - \lambda^2 v^2) \sin^2 2\beta,$$

$$M_{12}^2 = -\frac{1}{2}(m_Z^2 - \lambda^2 v^2) \sin 4\beta,$$

$$h_i = \sum_{j=1}^3 U_{ij} S_j$$

$$M_{13}^2 = -\left(\frac{M_A^2}{\mu/\sin 2\beta} + 2\kappa v_s\right) \lambda v \cos 2\beta,$$

$$M_{22}^2 = m_Z^2 \cos^2 2\beta + \lambda^2 v^2 \sin^2 2\beta,$$

$$M_{23}^2 = 2\lambda\mu v \left[1 - \left(\frac{M_A}{2\mu/\sin 2\beta}\right)^2 - \frac{\kappa}{2\lambda} \sin 2\beta\right],$$

$$M_{33}^2 = \frac{1}{4}\lambda^2 v^2 \left(\frac{M_A}{\mu/\sin 2\beta}\right)^2 + \kappa v_s A_\kappa + 4(\kappa v_s)^2 - \frac{1}{2}\lambda\kappa v^2 \sin 2\beta.$$

U_{ij} : S_j 在CP-even质量本征态(物理粒子) h_i 中的分量;

若 $U_{i2}^2 > \frac{1}{2}$, 我们称 h_i 为类标准模型Higgs粒子;

若 $U_{i3}^2 > \frac{1}{2}$, h_i 组分以单态场为主。

h_1, h_2, h_3 : 最轻、次轻、较重的CP-even Higgs粒子。

2、NMSSM模型简介: NMSSM的特点

大 M_A 极限: $\mathcal{M}_{11}^2 \gg \mathcal{M}_{22}^2 \gg \mathcal{M}_{12}^2$, $(\mathcal{M}_{11}^2 - \mathcal{M}_{33}^2) \gg \mathcal{M}_{13}^2$,
此时, $S_1 \equiv \phi_{new}$ 从 ($S_2 \equiv \phi_{SM}$, $S_3 \equiv \phi_s$) 体系退耦掉。

$$\tilde{M}^2 = \begin{pmatrix} m_Z^2 \cos^2 2\beta + \lambda^2 v^2 \sin^2 2\beta & 2\lambda\mu v \left[1 - \left(\frac{M_A \sin 2\beta}{2\mu} \right)^2 - \frac{\kappa}{2\lambda} \sin 2\beta \right] \\ 2\lambda\mu v \left[1 - \left(\frac{M_A \sin 2\beta}{2\mu} \right)^2 - \frac{\kappa}{2\lambda} \sin 2\beta \right] & \mathcal{M}_{33}^2 - \Delta^2 \end{pmatrix}$$

CP-even Higgs部分具有三个新特征:

- SM-like Higgs质量存在树图水平的额外贡献, $\lambda^2 v^2 \sin^2 2\beta$;
- 若 $\tilde{M}_{11}^2 > \tilde{M}_{22}^2$ 时, 二重态与单态的混合能够抬高SM-like Higgs质量, 此时SM-like Higgs对应于 h_2 ;
- 若 $\tilde{M}_{11}^2 < \tilde{M}_{22}^2$ 时, 二重态与单态的混合能够压低SM-like Higgs质量, 此时SM-like Higgs对应于 h_1 ;
- 若 $M_{33}^2 \sim \Delta^2$, 单态场为主 h_1 可以很轻, 受 $\Upsilon \rightarrow h_1 \gamma$ 和 $B_s \rightarrow \mu^+ \mu^-$ 限制。

2、NMSSM模型简介: NMSSM的特点

Neutralino质量矩阵(以 \tilde{B} , \tilde{W}^0 , \tilde{H}_u^0 , \tilde{H}_d^0 , \tilde{S} 为基矢):

$$\mathcal{M}_0 = \begin{pmatrix} M_1 & 0 & -\frac{g_1 v_d}{\sqrt{2}} & \frac{g_1 v_u}{\sqrt{2}} & 0 \\ 0 & M_2 & \frac{g_2 v_d}{\sqrt{2}} & -\frac{g_2 v_u}{\sqrt{2}} & 0 \\ -\frac{g_1 v_d}{\sqrt{2}} & \frac{g_2 v_d}{\sqrt{2}} & 0 & -\mu & -\lambda v_u \\ \frac{g_1 v_u}{\sqrt{2}} & -\frac{g_2 v_u}{\sqrt{2}} & -\mu & 0 & -\lambda v_d \\ 0 & 0 & -\lambda v_u & -\lambda v_d & \frac{2\kappa}{\lambda} \mu \end{pmatrix},$$

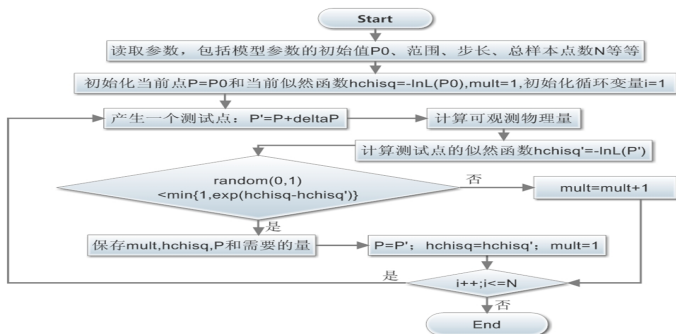
- M_2 和 μ 同时也决定Chargino质量, 必须大于100GeV。
故以Wino或Higgsino为主的Chargino/Neutralino不可能很轻;
- 若摒弃大统一关系: $M_2 \simeq 2M_1$, M_1 原则上可以比较小, 以Bino为主的Neutralino可以比较轻;
- 若 $\kappa \ll \lambda$, 以Singlino为主的Neutralino可以比较轻;
- 在超对称模型中, 由于最轻的Neutralino是暗物质候选者, 暗物质残留密度、暗物质直接探测实验会对其性质给予很强的限制。

2、NMSSM模型简介：NMSSM的特点

- h_1 或 h_2 均可充当类标准模型Higgs粒子；
- A_1 由于可以以单态场为主，可以比较轻；
- 暗物质即可以Bino为主，也可以Higgsino为主；
- 由于可以存在轻的 A_1 ，轻暗物质可以通过交换轻的 A_1 来湮灭，从而达到今天的暗物质残留密度。
在MSSM中，轻暗物质很难满足残留密度要求！

2、NMSSM模型简介：对NMSSM的扫描策略

1、利用马尔可夫链方法扫描参数空间；(MCMC:一种智能扫描方式)



- MCMC: 构造合适的 χ^2 函数；利用 χ^2 控制扫描在参数空间的走向，使得 χ^2 的总体走向变小，但允许一定的概率局部变大。
- χ^2 函数构造原则：简单平滑连续函数，保证扫描区域集中在物理区域。
- $\chi_{MC}^2 = \sum \frac{(\mu_i - \hat{\mu}_i)^2}{\sigma^2}$ ， μ_i 包括几个对超对称参数空间限制最强的限制：
(1) Higgs粒子质量要求；(2) 暗物质残留密度；(3) $B_s \rightarrow \mu^+ \mu^-$ 。

2、NMSSM模型简介：对NMSSM的扫描策略

2、参数空间选取如下：

- 固定 $m_{\tilde{q}_{1,2}}, A_{1,2} = 2 \text{ TeV}, M_2 = M_{\tilde{g}} = 2 \text{ TeV}$;
- 假定统一的标轻子软破缺参数： $m_{\tilde{l}}$;
- 其他参数扫描范围如下：

$$\begin{aligned} 1 < \tan \beta < 40, \quad 0 < \lambda < 0.7, \quad 0 < |\kappa| < 0.7, \\ 0 < |A_{\kappa}| < 2 \text{ TeV}, \quad 0 < A_{\lambda} < 5 \text{ TeV}, \quad |A_t| < 5 \text{ TeV}, \\ 0 < |M_1| < 0.6 \text{ TeV}, \quad 0.1 \text{ TeV} < \mu < 0.6 \text{ TeV}. \end{aligned}$$

3、对MCMC扫描得到的参数点作进一步筛选，使其满足各种实验限制。

- 若实验结果有中心值，要求SUSY的预言与实验中心值偏离不超过 2σ 。
- 若实验只给出一个上限或下限，要求SUSY的预言不同实验限矛盾。

4、对存活点的性质作进一步研究。

2、NMSSM模型简介：对NMSSM的扫描策略

考虑如下限制：

- LEP实验限制：

- ▶ 电弱精确可观测量，如 ρ_l , $\sin^2 \theta_{eff}^l$, M_W , R_b .
与实验结果在95% CL相吻合；
- ▶ 超粒子的质量下限；
- ▶ 来自 $Z \rightarrow \chi_1^0 \chi_1^0$, $e^+ e^- \rightarrow \chi_i^0 \chi_j^0$, $\chi_1^+ \chi_1^-$ 的限制；

- B-physics限制：

- ▶ $B \rightarrow X_s \gamma$, $B^0 - \bar{B}^0$ 混合, $D^0 - \bar{D}^0$ 混合, $K - \bar{K}^0$ 混合以及 $B^- \rightarrow \tau \nu_\tau$;
- ▶ 95% CL 上限: $B_{s,d}^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$, $B \rightarrow X_s \mu^+ \mu^-$;

- Higgs物理限制：

- ▶ 真空态的稳定性；
- ▶ 类标准模型Higgs 质量满足 $123\text{GeV} \leq m_h \leq 128\text{GeV}$ ，拟合最新Higgs数据；
- ▶ LEP、Tevatron and LHC 寻找非类标准模型Higgs(利用HiggsBounds)；

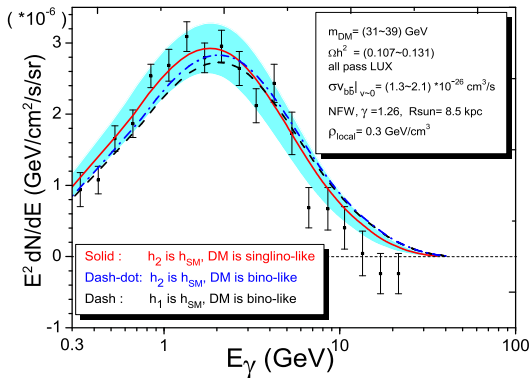
- 暗物质物理限制：

- ▶ 暗物质残留密度实验WMAP+Planck；
- ▶ LUX实验结果；

- 超对称在 2σ 层次解释muon的反常磁矩。

2、NMSSM模型简介：研究策略的特别之处

1、对于每一个参数点，直接产生对应光子谱，与抽取的Fermi数据比较。



很关键的结论：GCE和暗物质残留密度存在Tension。

以前的研究通常要求 $\sigma v|_{v \rightarrow 0}$ 在很大的区间变动，忽略该Tension的存在！

2、系统考虑实验对 A_1 性质的限制： A_1 必须以单态场为主。

3、NMSSM模型对GCE的解释

	h_1 作为 125 GeV Higgs	h_2 作为 125 GeV Higgs
Siglino-DM	Scenario I-S/Capable	Scenario II-S/Most Favored
Bino-DM	Scenario II-B/Unable	Scenario II-B/Capable

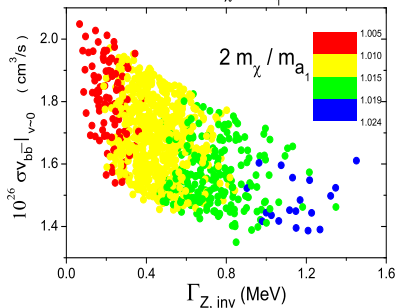
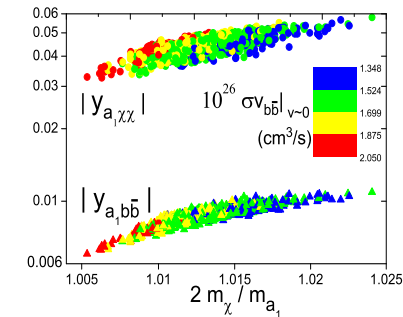
- **Scenario II-S能最好地解释GCE。原因： $y_{A_1\chi\chi}$ 可以比较大！**

$$\langle\sigma v\rangle_{b\bar{b}}|_{v\rightarrow 0} \propto \frac{y_{A_1\chi\chi}^2 y_{A_1 b\bar{b}}^2 m_\chi^2}{(4m_\chi^2 - m_{A_1}^2)^2 + m_{A_1}^2 \Gamma_{A_1}^2}.$$

- **Scenario I-S和II-B只能找到个别点来解释GCE。**
- **Scenario II-B不能解释GCE！原因：模型自身特点决定。**
- **参数点都满足： $m_{A_1} \simeq 2m_\chi$ ，理论需要Tuning。**
- **倾向参数空间： μ 比较小。**

$$10 < \tan\beta < 28, \quad \underline{170 \text{ GeV} < \mu < 340 \text{ GeV}}, \\ \underline{30 \text{ GeV} < m_\chi < 42 \text{ GeV}}, \quad m_{h^\pm} > 500 \text{ GeV}.$$

3、NMSSM模型对GCE的解释



- 1、参数点满足： $m_{A_1} < 2m_\chi$ 。
今天的暗物质湮灭截面通常会大于宇宙早期暗物质湮灭截面！
- 2、Z的贡献必须进来加速宇宙早期暗物质的湮灭。
要求： μ 值不能太大！
- 3、参数空间在LHC上可探测：
 $pp \rightarrow \tilde{\chi}_i^\pm \tilde{\chi}_j^0 \rightarrow 2\tilde{\chi}_1^0 WZ \rightarrow 3\ell + E_T^{miss}$ 。

4、LHC对GCE解释的检验

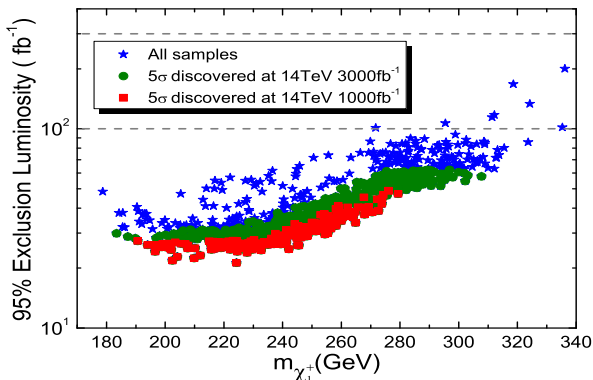
- 利用MadGraph/MadEvent/Pythia, 产生相关事例。
- 利用CheckMATE, 重复ATLAS-CONF-2013-035 8-TeV LHC结果。

Selection	SRnoZa	SRnoZb	SRnoZc	SRZa	SRZb	SRZc	SRZd
$m_{SFOS} [\text{GeV}]$	<60	60-81	< 81 \cup > 101	81-101	81-101	81-101	81-101
$E_T^{miss} [\text{GeV}]$	>50	>75	>75	75-120	75-120	>120	>165
$m_T [\text{GeV}]$	-	-	>110	<110	>110	>110	>110
$p_T^{3rd} [\text{GeV}]$	>10	>10	>30	>10	>10	>10	>10
SR veto	SRnoZc	SRnoZc	-	-	-	-	-

- 将类似分析推广到14-TeV LHC。

	Expected cross section (fb)						
	SRnoZa	SRnoZb	SRnoZc	SRZa	SRZb	SRZc	SRZd
$Z^{(*)}Z^{(*)}$	1.32	0.20	0.03	0.90	0.12	0.04	0.01
$Z^{(*)}W^{(*)}$	4.33	1.96	0.23	22.28	2.06	0.58	0.24
$t\bar{t}$	4.97	1.31	0.28	0.90	0.11	0.06	0.00
Total	10.62	3.47	0.54	24.08	2.29	0.68	0.25

4、LHC对GCE解释的检验



14-TeV LHC在运行一两年后能排除该解释，
或当积分亮度达到 3000fb^{-1} 时，相当大的一部分参数点都将被发现。
模拟时已考虑10%系统误差。

5、结论

若利用 $\chi\chi \rightarrow A_1^* \rightarrow b\bar{b}$ 来解释 GCE, NMSSM 应具有三个特征:

- 1、当考虑各种实验限制后, A_1 应该满足: $m_{A_1} \simeq 2m_\chi$ 。
作为后果, MSSM 不能解释 GCE。
- 2、单一过程 $\chi\chi \rightarrow A_1^* \rightarrow b\bar{b}$ 很难同时解释 GCE 和暗物质残留密度。
解决办法:
利用 $\chi\chi \rightarrow Z^* \rightarrow \text{anything}$ 来影响宇宙早期暗物质的湮灭, 从而改变 $\langle\sigma v\rangle|_{v\rightarrow 0}$ 和 $\langle\sigma v\rangle_0$ 的关联。
- 3、在这种方案下, $Z\chi\chi$ 耦合不能太小, χ 必须含有较大 Higgsino 成分。
这种情况应该可以在 LHC 上被检验!
(部分结论同 arXiv:1409.1573, 1409.7864 一致)。

Exploring the Higgs Sector of a Natural SUSY and its Prediction on Higgs Pair Production

Junjie Cao (曹俊杰)

河南师范大学，基于arXiv:1409.8431



November 11, 2014, Zhejiang University, Hangzhou.

λ -SUSY: 最经济的自然超对称模型

- **MSSM不能够自然地解释Higgs实验结果!**

- ▶ 为了预言125GeV Higgs粒子, 要求 $\delta m_h^2/m_{h,tree}^2 \gtrsim 1$ 。不自然!
- ▶ 根据LHC寻找Stop结果, 稳定电弱标度要求理论的精细调节在0.1%层次。

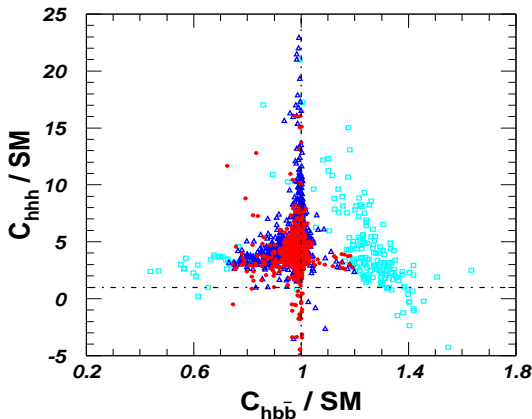
- **λ -SUSY: 最经济的自然模型!**

- ▶ **超势:** $W = W_{MSSM} + \lambda \epsilon_{ij} \hat{H}_u^i \hat{H}_d^j \hat{S} + \dots$
Higgs质量存在树图抬高: $m_{h,tree}^2 = m_{h,tree}^{MSSM,2} + \lambda^2 v^2 \sin^2 2\beta$.
- ▶ 电弱标度对Stop质量的灵敏度被因子 g^2/λ^2 压低!

- **λ -SUSY可能展现出的独特性质:**

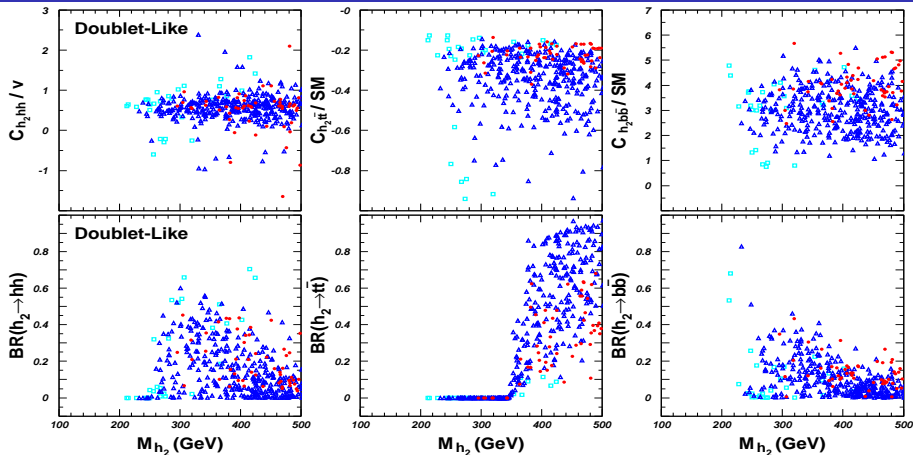
- ▶ **Higgs自耦合能被数十倍抬高。**
MSSM中黑格斯势是由规范相互作用决定, 自耦合不能很大;
 λ -SUSY: $Y_{hhh} \propto \lambda^2$, 故可以很大。
- ▶ $h_2 \bar{t}t$ 相互作用可以不被压低, 主要衰变道可以为 $h_2 \rightarrow hh$ 。
 $Y_{h_2 \bar{t}t} \propto \cot \beta$, $Y_{h_2 \bar{b}b} \propto \tan \beta$, $Y_{h_2 hh} \propto \lambda^2$ 。
- ▶ 以二重态为主的次轻CP-even Higgs粒子 h_2 可以轻至200GeV。
考虑各种实验后, MSSM中 h_2 通常重于300GeV: 直接、间接限制结果。
- ▶ $pp \rightarrow hh$ 可以数百倍地被抬高!
(1) Stop圈图抬高; (2) h_2 共振抬高; (3) 大Higgs自耦合抬高。

λ -SUSY:Higgs自耦合能被大幅度提高



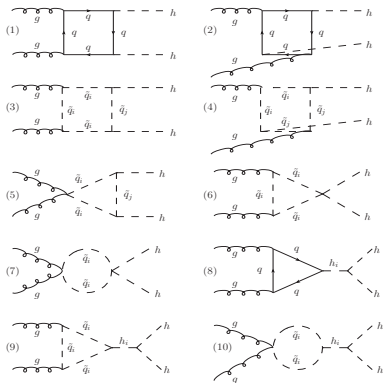
- 天蓝点: 不满足自然性及Higgs数据限制, 但满足其他限制;
- 蓝色点: 不满足自然性要求, 但满足其他(含Higgs数据)限制;
- 红色点: 满足自然性和Higgs数据要求, 同时也满足其他限制。

λ -SUSY: h_2 的性质



- 次轻CP-even Higgs粒子 h_2 可以轻至200GeV；
- $Y_{h_2 t\bar{t}}$ 的大小可以和标准模型预言相当；
- $250\text{GeV} \leq m_{h_2} \leq 400\text{GeV}$ 时, $h_2 \rightarrow hh$ 可以是主要衰变道！

λ -SUSY: $pp \rightarrow hh$ 产生过程

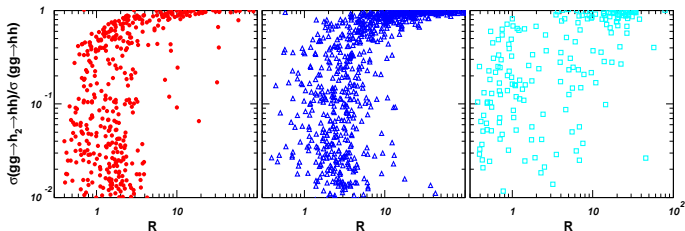


- LHC上Higgs 对产生过程能有效用来探测Higgs粒子的自耦合。
- 抬高机制1: 通过Stop圈图效应。

$$\mathcal{M} \sim \alpha_s^2 Y_t^2 \left(c_1 \sin^2 2\theta_t \frac{A_t^2}{m_{\tilde{t}_1}^2} + c_2 \frac{A_t^2}{m_{\tilde{t}_2}^2} \right).$$

若 $A_t/m_{\tilde{t}_1}$ 较大时, 可提高标准模型结果达一个量级。

λ -SUSY: $pp \rightarrow hh$ 产生过程



- 抬高机制2: 通过 h_2 共振产生。

$$\sigma(gg \rightarrow hh)(pb) \simeq (12.5 \sim 14.5) \times (\cot \beta - \tan \beta A_{\frac{1}{2}}(\tau_b)/A_{\frac{1}{2}}(\tau_t))^2 \times Br(h_2 \rightarrow hh),$$

若 $\tan \beta \sim 1$ 时, 可提高标准模型结果达几百倍。

- 抬高机制3: 通过大Higgs自耦合抬高。

$$\sigma(gg \rightarrow h^* \rightarrow hh)(pb) \simeq (C_{hhh}/SM - 2.5)^2/1.5^2 \times 0.019.$$

对于大 C_{hhh} , 可提高标准模型结果达一百倍。