

Моделирование процессов рождения лёгких суперсимметричных кандидатов в частицы тёмной материи для эксперимента CMS на LHC

Научный руководитель

Консультант

Студент

К. М. Белоцкий

М.В. Савина savina@cern.ch

С.Д. Франк-Каменецкая frankkam@jinr.ru

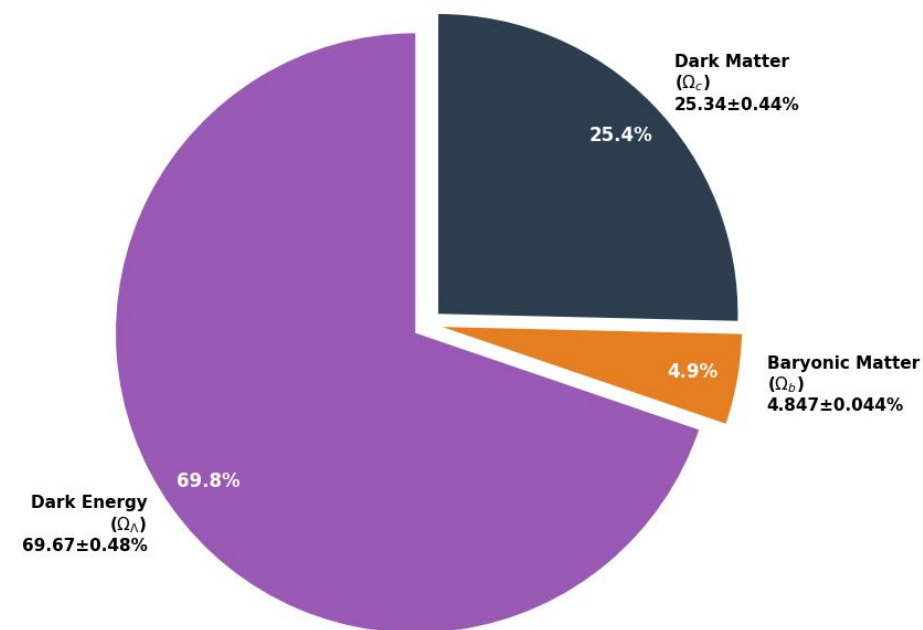
Цель работы:

Оценка наблюдаемости процесса парного рождения гравитино на эксперименте CMS на LHC

Актуальность:

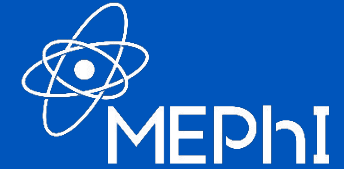
Актуальность работы обусловлена отсутствием в Стандартной модели кандидатов в тёмную материю, отрицательными результатами в поисках WIMP's, что требует исследования альтернативных сценариев, в частности суперсимметричных моделей с долгоживущими сигнатурами (LLP).

Cosmic Composition from P-ACT-LB Data
(Planck + ACT + CMB Lensing + BAO)



P.1. Состав Вселенной в модели Λ CDM по результатам совместного анализа данных 'экспериментов DESI и Planck.^[1]

Теплая темная материя



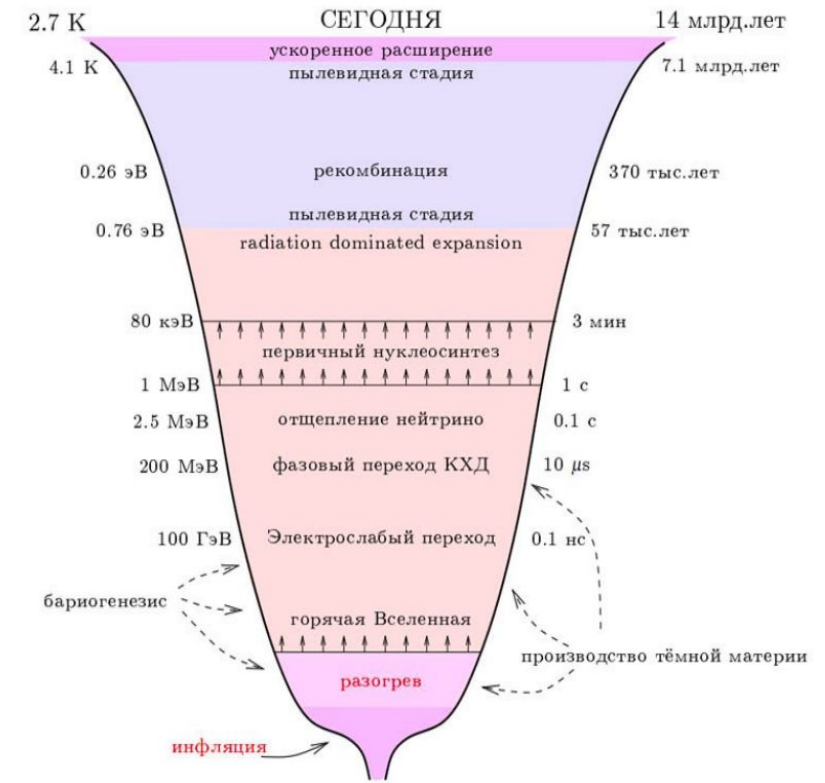
Теплая темная материя (WDM, ТТМ) - отщепляется релятивистской (как горячая ТМ), но к моменту перехода со стадии доминирования излучения на пылевидную - не релятивистская (как холодная ТМ).

Обсуждается в контексте таких космологических проблем, как:

- проблема недостатка спутников [2]
- проблема профиля плотности ТМ [3-4]
- “too big to fail” problem [5-7]

Объединенный анализ данных от сильного гравитационного линзирования и наблюдаемого количества галактик-спутников Млечного пути устанавливает нижнее ограничение на массу частиц теплой темной материи - **9.7 кэВ** [8-9].

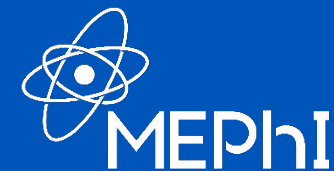
В рассматриваемой модели **гравитино** (легчайший супер партнер, LSP) - кандидат на роль частиц ТТМ с массой **10 кэВ**.



P.2. Стадии эволюции Вселенной

[9]. Nadler, E. O., Birrer, S., Gilman, D., (2021). Dark matter constraints from a unified analysis of strong gravitational lenses and Milky Way satellite galaxies. The Astrophysical Journal, *917*(1), 7.

Минимальная суперсимметричная Стандартная модель (МССМ)



Superfield	Bosons		Fermions		$SU(3)$	$SU(2)$	$U_Y(1)$
Vector							
G^a	gluon	g^a	gluino	\tilde{g}^a	8	0	0
V^k	weak	$W^k (W^\pm, Z)$	wino, zino	$\tilde{w}^k (\tilde{w}^\pm, \tilde{z})$	1	3	0
V'	hypercharge	$B (\gamma)$	bino	$\tilde{b}(\tilde{\gamma})$	1	1	0
Matter							
L_i	sleptons	$\tilde{L}_i = (\tilde{\nu}, \tilde{e})_L$	leptons	$L_i = (\nu, e)_L$	1	2	-1
E_i		$\tilde{E}_i = \tilde{e}_R$		$E_i = e_R$	1	1	2
Q_i	squarks	$\tilde{Q}_i = (\tilde{u}, \tilde{d})_L$	quarks	$Q_i = (u, d)_L$	3	2	1/3
U_i		$\tilde{U}_i = \tilde{u}_R$		$U_i = u_R^c$	3*	1	-4/3
D_i		$\tilde{D}_i = \tilde{d}_R$		$D_i = d_R^c$	3*	1	2/3
Higgs							
H_1	Higgs	\tilde{H}_1	Higgsino	\tilde{H}_1	1	2	-1
H_2		\tilde{H}_2		\tilde{H}_2	1	2	1

$$\text{graviton } G, s = 2, m = 0 \rightarrow \text{gravitino } \tilde{G}, s = 3/2, m_{3/2} = \frac{F_0}{\sqrt{3}M_{Pl}}$$

Нейтралино — суперпозиция фотино (бино), зино и нейтральных хиггсино.

Чарджино - суперпозиция вино и заряженных хиггсино.

Симметрия между бозонами и фермионами:

- Обобщение алгебры Пуанкаре добавлением новых генераторов $Q_\alpha^I, \bar{Q}_{\dot{\alpha}}^I$ и их перестановочных соотношений:

$$[P_m, Q_\alpha^I] = 0, \quad [P_m, \bar{Q}_{\dot{\alpha}}^I] = 0,$$

$$[J_{mn}, Q_\alpha^I] = -i(\sigma_{mn})_\alpha^\beta Q_\beta^I, \quad [J_{mn}, \bar{Q}_{\dot{\alpha}}^I] = i(\tilde{\sigma}_{mn})_{\dot{\alpha}}^{\dot{\beta}} \bar{Q}_{\dot{\beta}}^I,$$

$$\{Q_\alpha^I, Q_\beta^J\} = \epsilon_{\alpha\beta} Z^{IJ}, \quad \{\bar{Q}_{\dot{\alpha}}^I, \bar{Q}_{\dot{\beta}}^J\} = \epsilon_{\dot{\alpha}\dot{\beta}} \bar{Z}^{IJ},$$

$$\{Q_\alpha^I, \bar{Q}_{\dot{\alpha}}^J\} = 2(\sigma^m)_{\alpha\dot{\alpha}} P_m \delta^{IJ},$$

- Групповой элемент SUSY:

$$G(x^\mu, \theta, \bar{\theta}) = e^{i(-x^\mu P_\mu + \theta Q + \bar{\theta} \bar{Q})}$$

- Генераторы SUSY переводят бозоны и фермионы друг в друга.
- Гравитино** возникает как калибровочное поле в локальной суперсимметрии (SuGRA) при спонтанном её нарушении оно поглощает голдстино и приобретает массу.

Суперсимметрия должна быть нарушена, но так как в МССМ нет полей с ненулевым вакуумным средним, необходимых для механизма Хиггса:

1. Скрытый сектор (в котором нарушается SUSY)
2. Видимый сектор материи
3. Переносчики (мессенджеры) (переносят нарушение из скрытого сектора в видимый)

Механизмы переноса нарушения суперсимметрии:

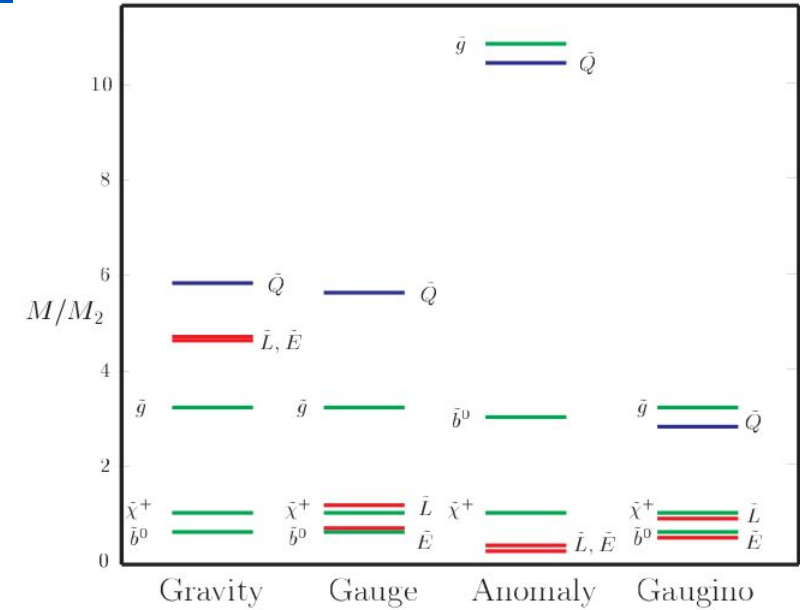
- Гравитацией
- Калибровочными полями
- Аномалиями
- Калибринными полями

Калибровочном механизм переноса нарушения SUSY (GMSB):

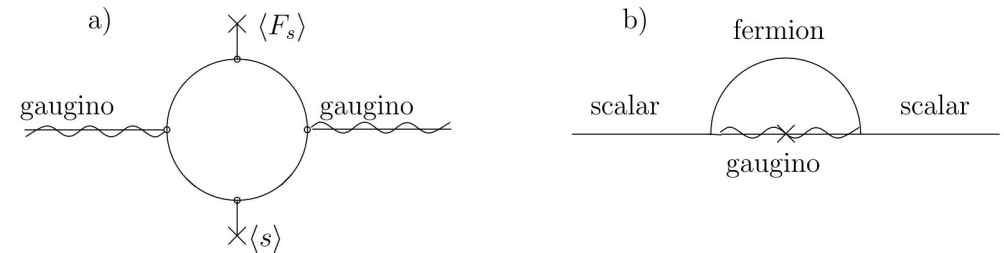
В скрытом секторе - одно поле X:

$$\langle X \rangle = \langle x \rangle + F\theta^2$$

$$\mathcal{L}_{Yukawa} \propto X S \bar{S}, \text{ where } S, \bar{S} - \text{messengers fields.}$$



P.3. Типичные массовые спектры для разных механизмов переноса нарушения SUSY [10].

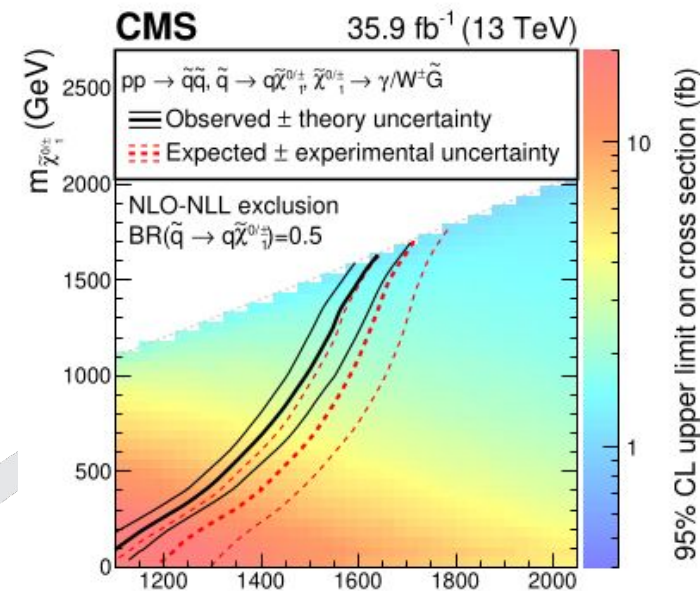
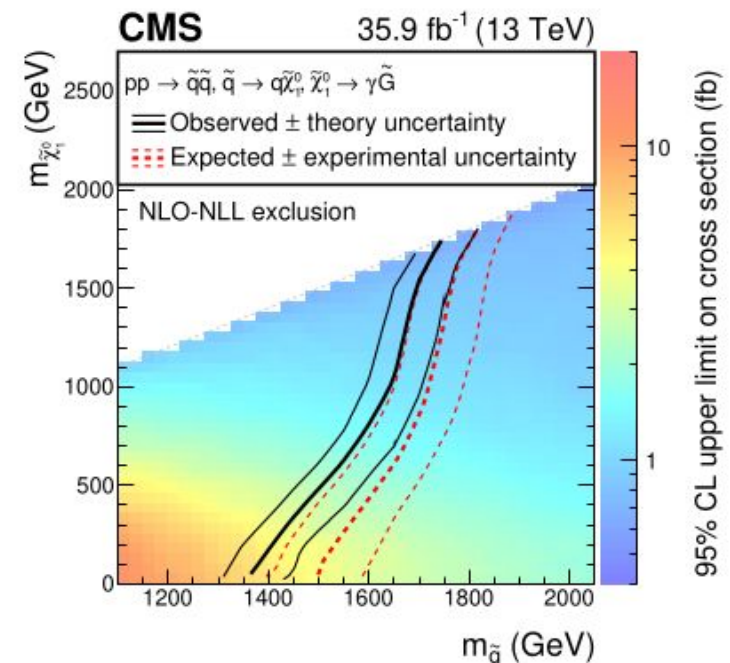


P.4. a) Гейджино приобретают массы за счёт диаграмм с петлями полей-посредников (мессенджеров). b) Типичная диаграмма, дающая вклад в мягкие массы скаляров в МССМ. [11]

Результаты CMS по поиску гравитино ($m=1\text{ЭВ}$) в prompt сигналах

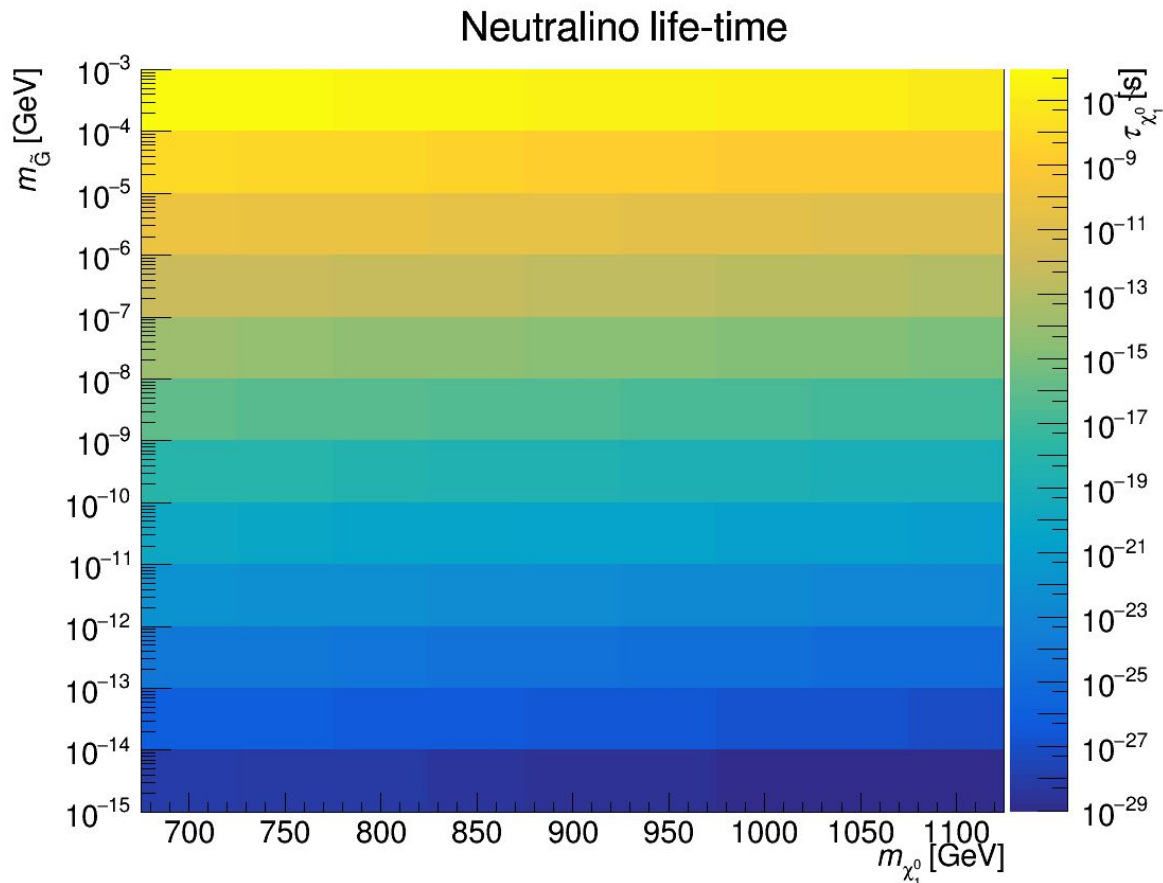
Ключевые результаты поиска SUSY с GMSB с фотонными событиями и недостающим поперечным моментом при 13 фбн^{-1} и 13 ТэВ группой CMS [12]:

- Отклонений от Стандартной модели не обнаружено — данные согласуются с предсказаниями СМ; признаков новой физики не выявлено.
- Установлены нижние ограничения на массу частиц суперпартнеров:
 - рождение электрослабых калибровочных фермионов (в рамках модели обобщённого калибровочного медирования): при близких значениях масс вино и бино массы ниже 980 ГэВ исключаются на 95%-м доверительном уровне;
 - сценарий TChiWg — исключается масса NLSP ниже 780 ГэВ ;
 - сценарий TChiNg — исключается масса NLSP ниже 950 ГэВ ;
 - глюино (T5gg, T5Wg) исключаются до масс 2100 ГэВ ;
 - скварки (T6gg, T6Wg) исключаются до масс 1750 ГэВ .



P.5. Ограничения на 95% доверительном уровне для SSM T6gg (слева) и T6Wg (справа) на плоскости масс скварк/чарджино.

Моделирование парного рождения с MadGraph5

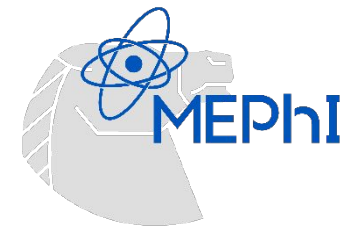


P.6. Время жизни NLSP (нейтралино) в зависимости от его массы и массы гравитино.

В моделях с массой гравитино более 0,1 кэВ длина пробега нейтралино (NLSP) до распада превышает 1 мкм, вследствие чего сигнатуры событий становятся долгоживущими. При этом верхнее ограничение на массу гравитино, следующее из условия длины пробега для долгоживущих сигнатур (LLP), составляет 1 МэВ.

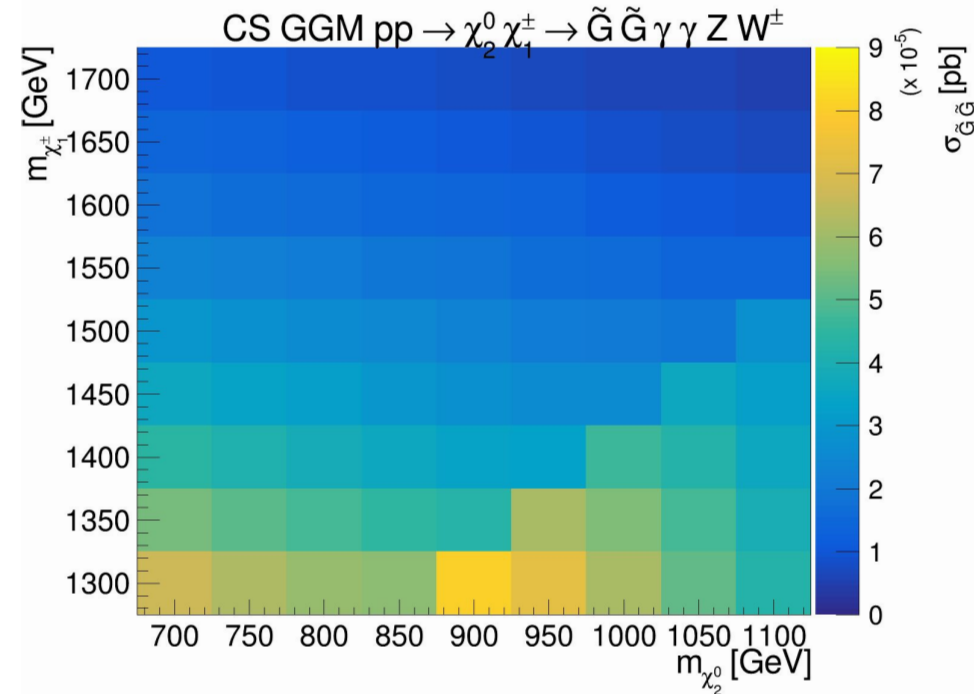
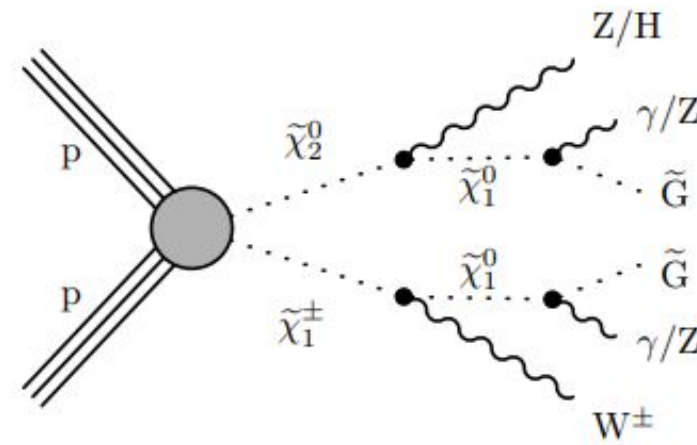
$$\Gamma_{\chi_1^0} \propto \frac{m_{\chi_1^0}^5}{m_{\tilde{G}}^2 M_{Pl}^2}$$

GGM



GGM

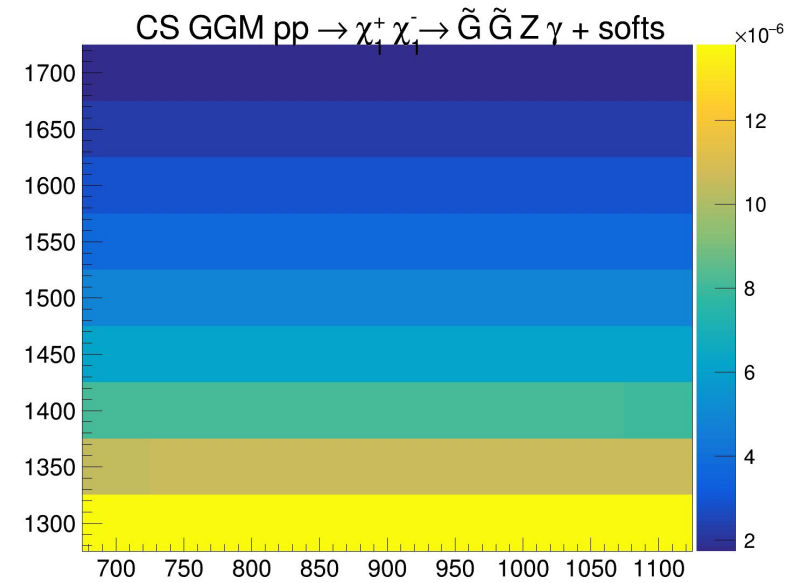
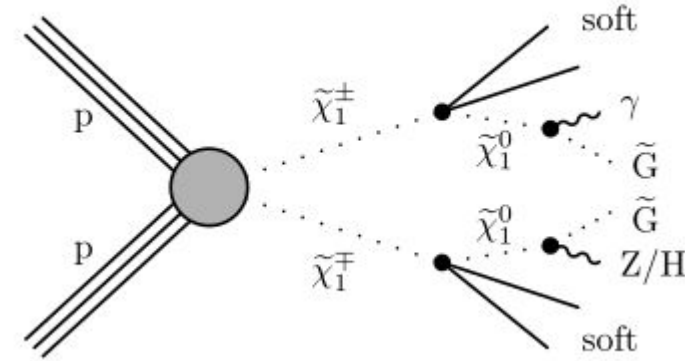
рождение по сильному каналу	нет
рождение по слабому каналу	есть
массы суперчастиц	$m_{\tilde{q}} = m_{\tilde{g}} = m_{\tilde{l}} = m_{\tilde{H}} = 8 \text{ TeV}$
другие параметры	$\tan \beta = 9.74$ $\mu = 8 \text{ TeV}$
нейтралино	$\tilde{\chi}_3^0, \tilde{\chi}_4^0 : m = 8 \text{ TeV}$ $m_{\tilde{\chi}_2^0} > m_{\tilde{\chi}_1^0}$ $\Delta = 200 \text{ GeV}$ $m_{\tilde{\chi}_2^0}$ – зино-подобный $m_{\tilde{\chi}_1^0}$ – бино-подобный
чарджино	$m_{\tilde{\chi}_2^\pm} > 2.5 \text{ TeV}$ $m_{\tilde{\chi}_1^\pm} = m_{\tilde{\chi}_2^0}$ $m_{\tilde{\chi}_1^\pm}$ – вино-подобный
распады	$\tilde{\chi}_3^0 / \tilde{\chi}_4^0 \rightarrow \tilde{\chi}_2^0, \tilde{\chi}_1^0$ $\tilde{\chi}_2^0 \rightarrow \tilde{\chi}_1^0$
конечная сигнатура	$p_T^{\text{miss}} + 2\gamma + 2\ell^\pm + \ell'$
Ожидаемое число событий	$N_{GG} = L_{\text{CMS}} \times \sigma_{GG} \approx 5 \div 50$



P.7. Сечение парного рождения гравитино на LHC. Ось абсцисс - масса второго нейтралино, ось ординат - масса первого нейтралино.

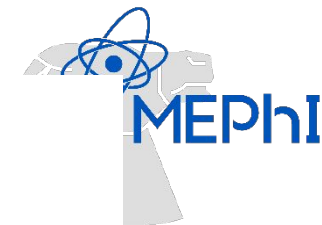
GGM

GGM	
рождение по сильному каналу	нет
рождение по слабому каналу	есть
массы суперчастиц	$m_{\tilde{q}} = m_{\tilde{g}} = m_{\tilde{t}} = m_{\tilde{b}} = 8 \text{ TeV}$
другие параметры	$\tan \beta = 9.74$ $\mu = 8 \text{ TeV}$
нейтралино	$\tilde{\chi}_3^0, \tilde{\chi}_4^0 : m = 8 \text{ TeV}$ $m_{\tilde{\chi}_3^0} > m_{\tilde{\chi}_1^0}$ $\Delta = 200 \text{ GeV}$ $m_{\tilde{\chi}_2^0}$ – зино-подобный $m_{\tilde{\chi}_1^0}$ – бино-подобный
чарджино	$m_{\tilde{\chi}_2^\pm} > 2.5 \text{ TeV}$ $m_{\tilde{\chi}_1^\pm} = m_{\tilde{\chi}_2^0} \text{ TeV}$ $m_{\tilde{\chi}_1^\pm}$ – вино-подобный
распады	$\tilde{\chi}_3^0 / \tilde{\chi}_4^0 \rightarrow \tilde{\chi}_2^0, \tilde{\chi}_1^0$ $\tilde{\chi}_2^0 \rightarrow \tilde{\chi}_1^0$
конечная сигнатура	$p_T^{\text{miss}} + \text{soft jets} + \gamma + 2\ell^\pm$
Ожидаемое число событий	$N_{G\tilde{G}} = L_{\text{CMS}} \times \sigma_{G\tilde{G}} \approx 1 \div 5$

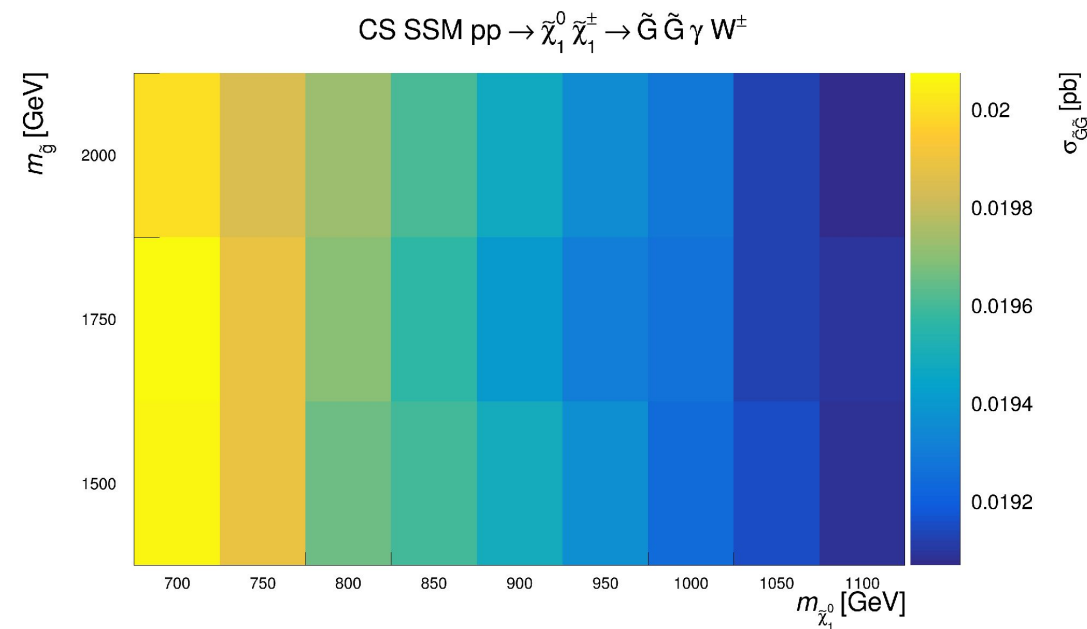
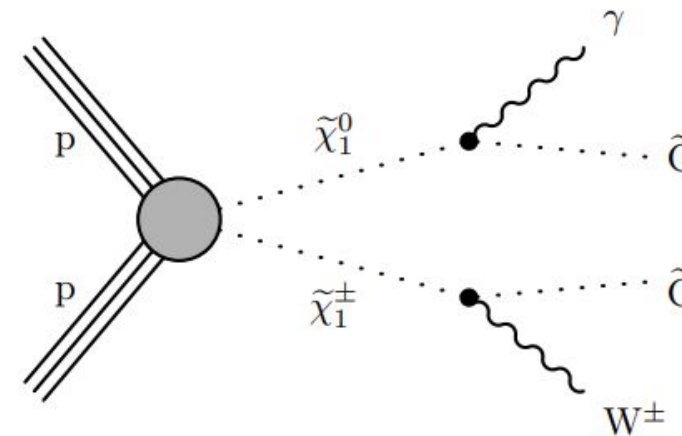


P.8. Сечение парного рождения гравитино на LHC. Ось абсцисс - масса чарджино, ось ординат - масса первого нейтралино.

SSM (TChiWg). Слабый канал.

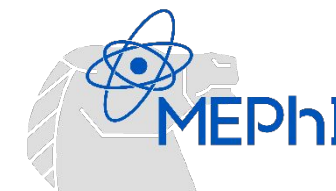


TChiWg	
рождение по сильному каналу	нет
рождение по слабому каналу	есть
массы суперчастиц	$m_{\tilde{t}} = m_{\tilde{b}} = 8 \text{ TeV}$ $m_{\tilde{q}} = m_{\tilde{g}}$ – сканируются
другие параметры	$\tan \beta = 9.74$ $\mu = 8 \text{ TeV}$
нейтралино	$\tilde{\chi}_2^0, \tilde{\chi}_3^0, \tilde{\chi}_4^0 : m = 8 \text{ TeV}$ $m_{\tilde{\chi}_2^0} \approx m_{\tilde{\chi}_1^\pm}$ $m_{\tilde{\chi}_1^0}$ – бино-подобный (LSP)
чарджино	$m_{\tilde{\chi}_2^\pm} > 2.5 \text{ TeV}$ $m_{\tilde{\chi}_1^\pm} = m_{\tilde{\chi}_1^0}$ $m_{\tilde{\chi}_1^\pm}$ – вино-подобный
распады	$\tilde{\chi}_2^0 / \tilde{\chi}_3^0 / \tilde{\chi}_4^0 \rightarrow \tilde{\chi}_1^0$ $\tilde{\chi}_1^0 \rightarrow \tilde{G} + \gamma$
конечная сигнатура	$p_T^{\text{miss}} + \gamma + \ell^\pm$
Ожидаемое число событий	$N_{GG} = L_{\text{CMS}} \times \sigma_{GG} \approx 10^5$

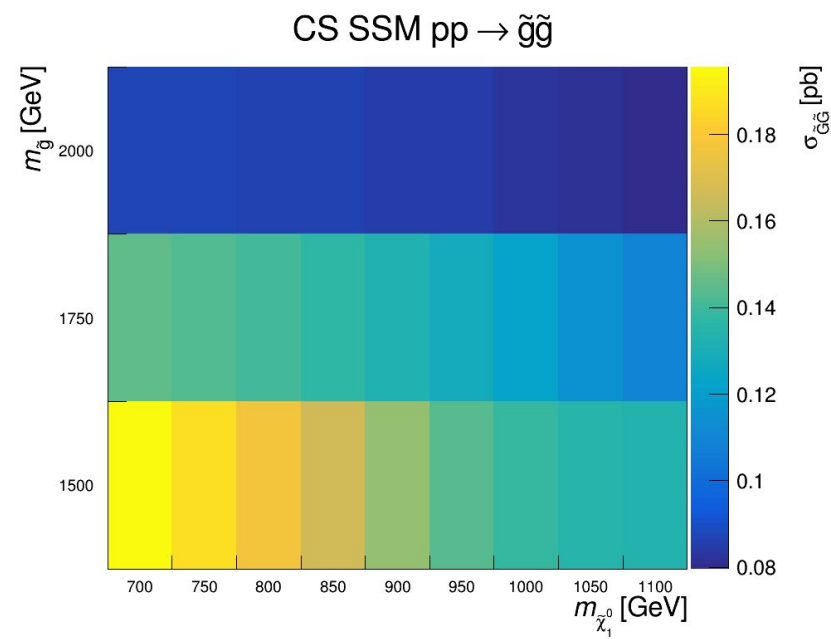
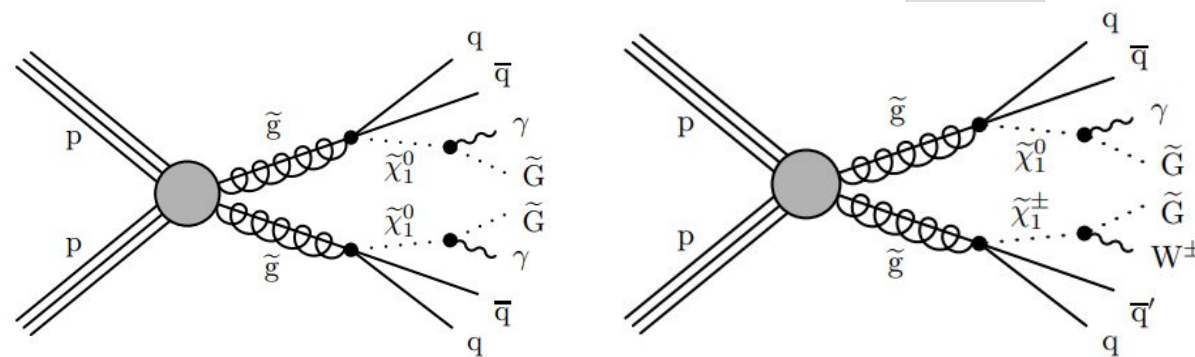


P.9. Сечение парного рождения гравитино на LHC. Ось абсцисс - масса глюино, ось ординат - масса первого нейтралино.

SSM (T5gg&T5Wg). Сильный канал.

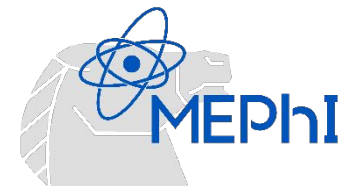


	T5gg	T5Wg
рождение по сильному каналу	есть ($\tilde{g}\tilde{g}$)	есть ($\tilde{g}\tilde{g}$)
рождение по слабому каналу	нет	нет
массы суперчастиц	$m_{\tilde{t}} = m_{\tilde{b}} = 8 \text{ TeV}$ $m_{\tilde{q}} = m_{\tilde{g}}$ – сканируются	$m_{\tilde{t}} = m_{\tilde{b}} = 8 \text{ TeV}$ $m_{\tilde{q}} = m_{\tilde{g}}$ – сканируются
другие параметры	$\tan \beta = 9.74$ $\mu = 8 \text{ TeV}$	$\tan \beta = 9.74$ $\mu = 8 \text{ TeV}$
нейтралино	$\tilde{\chi}_2^0, \tilde{\chi}_3^0, \tilde{\chi}_4^0 : m = 8 \text{ TeV}$ $m_{\tilde{\chi}_1^0}$ – бино-подобный (LSP) $\tilde{\chi}_1^0 \rightarrow \tilde{G} + \gamma$	$\tilde{\chi}_2^0, \tilde{\chi}_3^0, \tilde{\chi}_4^0 : m = 8 \text{ TeV}$ $m_{\tilde{\chi}_1^0}$ – бино-подобный (LSP) $\tilde{\chi}_1^0 \rightarrow \tilde{G} + \gamma$
чарджино	$m_{\tilde{\chi}_2^\pm} > 2.5 \text{ TeV}$ $m_{\tilde{\chi}_1^\pm} = 8 \text{ TeV}$	$m_{\tilde{\chi}_2^\pm} > 2.5 \text{ TeV}$ $m_{\tilde{\chi}_1^\pm} = 8 \text{ TeV}$
распады	$\tilde{\chi}_2^0/\tilde{\chi}_3^0/\tilde{\chi}_4^0 \rightarrow \tilde{\chi}_1^0$ $\tilde{\chi}_1^0 \rightarrow \tilde{G} + \gamma$	$\tilde{\chi}_2^0/\tilde{\chi}_3^0/\tilde{\chi}_4^0 \rightarrow \tilde{\chi}_1^0$ $\tilde{\chi}_1^0 \rightarrow \tilde{G} + \gamma$
конечная сигнатура	$p_T^{\text{miss}} + 4 \text{ jets} + 2\gamma$	$p_T^{\text{miss}} + 4 \text{ jets} + \gamma + \ell^\pm$
Ожидаемое число событий	$N_{\tilde{G}\tilde{G}} = L_{\text{CMS}} \times \sigma_{\tilde{G}\tilde{G}} \approx \approx 10^4 \div 4 \times 10^4$	$N_{\tilde{G}\tilde{G}} = L_{\text{CMS}} \times \sigma_{\tilde{G}\tilde{G}} \approx \approx 3 \times 10^4 \div 6 \times 10^4$

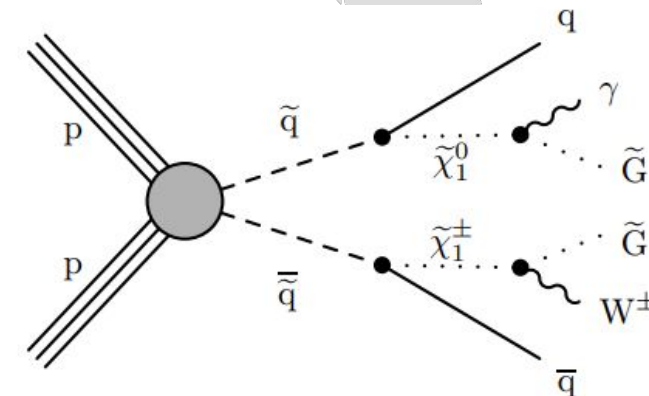
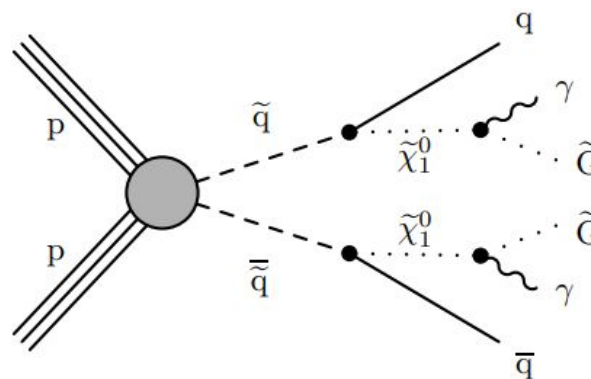


P.10. Сечение парного рождения гравитино на LHC. Ось абсцисс - масса глюино, ось ординат - масса первого нейтралино.

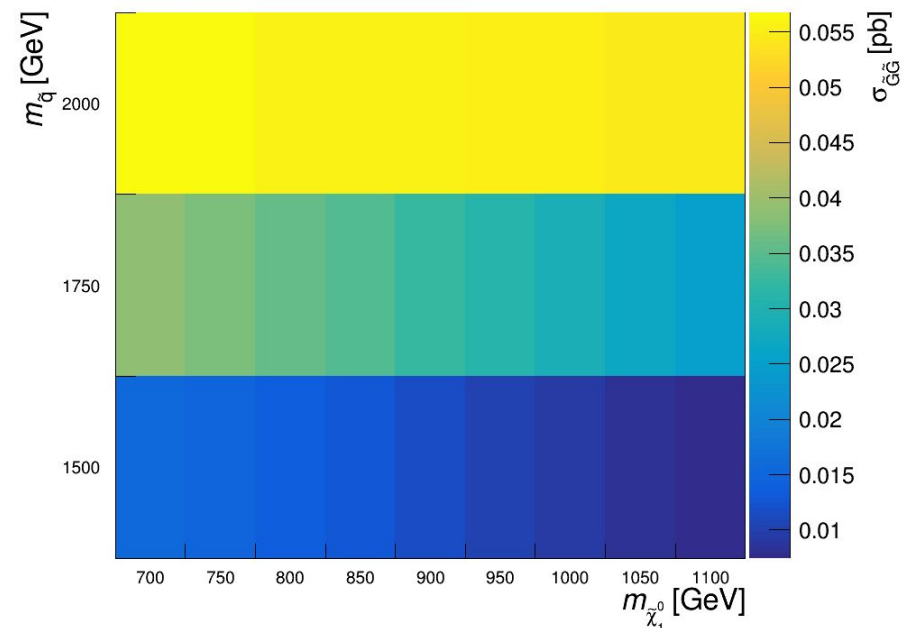
SSM (T6gg&T6Wg). Сильный канал



	T6gg	T6Wg
рождение по сильному каналу	есть ($\tilde{q}\tilde{q}$)	есть ($\tilde{q}\tilde{q}$)
рождение по слабому каналу	нет	нет
массы суперчастиц	$m_{\tilde{l}} = m_{\tilde{H}} = 8 \text{ TeV}$ $m_{\tilde{q}} = m_{\tilde{g}}$ – сканируются	$m_{\tilde{l}} = m_{\tilde{H}} = 8 \text{ TeV}$ $m_{\tilde{q}} = m_{\tilde{g}}$ – сканируются
другие параметры	$\tan \beta = 9.74$ $\mu = 8 \text{ TeV}$	$\tan \beta = 9.74$ $\mu = 8 \text{ TeV}$
нейтралино	$\tilde{\chi}_2^0, \tilde{\chi}_3^0, \tilde{\chi}_4^0 : m = 8 \text{ TeV}$ $m_{\tilde{\chi}_1^0}$ – бино-подобный (LSP) $\tilde{\chi}_1^0 \rightarrow \tilde{G} + \gamma$	$\tilde{\chi}_2^0, \tilde{\chi}_3^0, \tilde{\chi}_4^0 : m = 8 \text{ TeV}$ $m_{\tilde{\chi}_1^0}$ – бино-подобный (LSP) $\tilde{\chi}_1^0 \rightarrow \tilde{G} + \gamma$
чарджино	$m_{\tilde{\chi}_2^\pm} > 2.5 \text{ TeV}$ $m_{\tilde{\chi}_1^\pm} = 8 \text{ TeV}$	$m_{\tilde{\chi}_2^\pm} > 2.5 \text{ TeV}$ $m_{\tilde{\chi}_1^\pm} = 8 \text{ TeV}$
распады	$\tilde{\chi}_2^0/\tilde{\chi}_3^0/\tilde{\chi}_4^0 \rightarrow \tilde{\chi}_1^0$ $\tilde{\chi}_1^0 \rightarrow \tilde{G} + \gamma$	$\tilde{\chi}_2^0/\tilde{\chi}_3^0/\tilde{\chi}_4^0 \rightarrow \tilde{\chi}_1^0$ $\tilde{\chi}_1^0 \rightarrow \tilde{G} + \gamma$
конечная сигнатура	$p_T^{\text{miss}} + 2 \text{ jets} + 2\gamma$	$p_T^{\text{miss}} + 2 \text{ jets} + \gamma + \ell^\pm$
Ожидаемое число событий	$N_{\tilde{G}\tilde{G}} = L_{\text{CMS}} \times \sigma_{\tilde{G}\tilde{G}} \approx \approx 5 \times 10^3 \div 2.5 \times 10^4$	$N_{\tilde{G}\tilde{G}} = L_{\text{CMS}} \times \sigma_{\tilde{G}\tilde{G}} \approx \approx 3 \times 10^2 \div 3.5 \times 10^3$

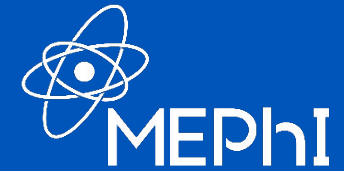


CS SSM $pp \rightarrow \tilde{q}\tilde{q}$



P.II. Сечение парного рождения гравитино на LHC. Ось абсцисс - масса скварков, ось ординат - масса первого нейтралино.

Погрешности оценки сечений



Условия триггера:

$$p_T^{miss} > 300 \text{ ГэВ}; p_T^\gamma > 180 \text{ ГэВ}$$

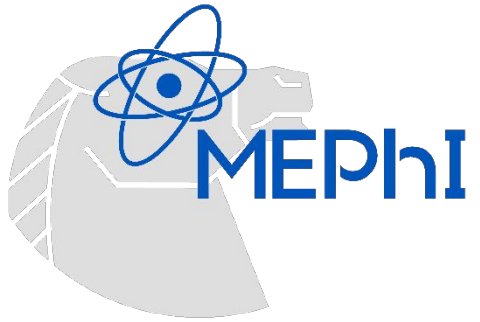
Вклады в погрешности сечений:

Теоретические		Экспериментальные
Константы связи	~1-2%	Статистическая
Погрешность PDF для протонных пучков	~20%	Ошибки реконструкции для LLP сигнатур
Расчет/моделирование на древесном уровне (LO)	<1%	Ошибки оценок, например, изолированности фотона
Масштаб факторизации	нет	

Проведен анализ наблюдаемости процессов парного рождения гравитино на LHC в рамках GMSB. Учтены также астрофизические ограничения на массу частиц тёплой тёмной материи, для которых гравитино является правдоподобным кандидатом.

- Для модели GGM ожидаемое число событий за три сеанса работы LHC составляет от 6 до 55.
- Для SSM ожидаемое число событий лежит в диапазоне от 100 000 до 210 000.

Модель	Количество событий
GGM	6 - 55
SSM (TChiWg)	100.000
SSM (T5gg&T5Wg)	3.000-100.000
SSM (T6gg&T6Wg)	500-10.000



Спасибо за внимание!



1. DESI Collaboration. (2025). DESI 2024 VI: Cosmological constraints from the measurements of baryon acoustic oscillations. *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, *2025*(02), 021. <https://doi.org/10.1088/1475-7516/2025/02/021>
2. Kim, S. Y., Peter, A. H. G., & Hargis, J. R. (2018). Missing satellites problem: Completeness corrections to the number of satellite galaxies in the Milky Way are consistent with cold dark matter predictions. *Physical Review Letters*, *121*(21), 211302. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.121.211302>
3. Del Popolo, A., & Le Delliou, M. (2021). Review of solutions to the cusp-core problem of the Λ CDM model. *Universe*, *7*(4), 90. <https://doi.org/10.3390/universe7040090>
4. Macciò, A. V., Paduroiu, S., Anderhalden, D., Schneider, A., & Moore, B. (2012). Cores in warm dark matter haloes: a Catch 22 problem. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, *424*(2), 1105-1112. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2012.21284.x>
5. Boylan-Kolchin, M., Bullock, J. S., & Kaplinghat, M. (2011). Too big to fail? The puzzling darkness of massive Milky Way subhaloes. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters*, *415*(1), L40-L44. <https://doi.org/10.1111/j.1745-3933.2011.01069.x>
6. Lovell, M. R., Gonzalez-Perez, V., Bose, S., Boyarsky, A., Cole, S., Frenk, C. S., & Ruchayskiy, O. (2017). Addressing the too big to fail problem with baryon physics and sterile neutrino dark matter. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, *468*(3), 2836-2849. <https://doi.org/10.1093/mnras/stx598>
7. Lovell, M. R., Frenk, C. S., Eke, V. R., Jenkins, A., Gao, L., & Theuns, T. (2014). The properties of warm dark matter haloes. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, *439*(1), 300-317. <https://doi.org/10.1093/mnras/stu023>
8. Gannon, C., Nierenberg, A., Benson, A., Keeley, R., Du, X., & Gilman, D. (2025). Dark matter substructure: A lensing perspective. *Manuscript in preparation*.
9. Nadler, E. O., Birrer, S., Gilman, D., Wechsler, R. H., Du, X., Benson, A., Nierenberg, A. M., & Treu, T. (2021). Dark matter constraints from a unified analysis of strong gravitational lenses and Milky Way satellite galaxies. *The Astrophysical Journal*, *917*(1), 7. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ac05b3>
10. Kazakov, D. I. (2000). Beyond the Standard Model (In search of supersymmetry). CERN Yellow Report, CERN-2001-003, 125-198. <https://doi.org/10.5170/CERN-2001-003.125>
11. Dubovskii, S. L., Gorbunov, D. S., & Troitskii, S. V. (1999). Gauge mechanism of mediation of supersymmetry breaking. *Physics-Uspekhi*, *42*(7), 623-651. <https://doi.org/10.1070/PU1999v042n07ABEH000537>
12. CMS Collaboration. (2018). Search for gauge-mediated supersymmetry in events with at least one photon and missing transverse momentum in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV. *Physics Letters B*, *780*, 118-143. <https://doi.org/10.1016/j.physletb.2018.02.045>