

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИФИ»

УДК 524.83

ОТЧЕТ  
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ  
ПАРНОЕ РОЖДЕНИЕ ГРАВИТИНО НА LHC

Научный руководитель	_____ К.М. Белоцкий
Консультант	_____ М.В. Савина
Студент	_____ С.Д. Франк-Каменецкая

Москва 2026

# СОДЕРЖАНИЕ

<b>1</b>	<b>Введение</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>Тёплая тёмная материя</b>	<b>4</b>
2.1	Преимущества модели WDM . . . . .	4
2.2	Гравитино как кандидат в тёмную материю . . . . .	4
<b>3</b>	<b>Модели нарушения суперсимметрии</b>	<b>5</b>
<b>4</b>	<b>Суперсимметричные модели</b>	<b>6</b>
4.1	Состав полей MSSM . . . . .	6
4.2	Супергравитация (SUGRA) . . . . .	6
4.3	GMSB . . . . .	7
4.3.1	Общее калибровочное посредничество (GGM) . . . . .	7
4.3.2	Упрощённая суперсимметричная модель (SSM) . . . . .	7
<b>5</b>	<b>Моделирование парного рождения гравитино</b>	<b>8</b>
5.1	GGM. Канал 1 . . . . .	9
5.2	GGM. Канал 2 . . . . .	10
5.3	SSM. Слабый канал . . . . .	12
5.4	SSM. Сильный канал . . . . .	13



# 1. ВВЕДЕНИЕ

Гравитино — суперпартнёр гравитона, возникающий в локальной суперсимметрии (супергравитации). Благодаря слабому взаимодействию с частицами Стандартной модели и стабильности (как легчайший суперпартнёр, LSP) гравитино является перспективным кандидатом на роль частицы тёплой тёмной материи.

Цель работы — оценка наблюдаемости парного рождения гравитино на LHC.

## 2. ТЁПЛАЯ ТЁМНАЯ МАТЕРИЯ

Тёплая тёмная материя (WDM) выходит из кинематического равновесия с веществом (отщепляется) будучи ещё релятивистской, но к моменту перехода от радиационно-доминированной (RD) к материально-доминированной (MD) стадии становится нерелятивистской.

### 2.1 Преимущества модели WDM

- Подавление образования карликовых галактик (возмущений с современными длинами волн, соответствующих карликовым галактикам).
- Возможное объяснение наблюдаемых данных о профиле плотности тёмного гало.

### 2.2 Гравитино как кандидат в тёмную материю

- Легчайший суперпартнёр (LSP), стабилен.

- Слабо взаимодействует с частицами Стандартной модели на низких энергиях.
- Масса  $m_{\tilde{G}} \approx 1$  КэВ.

### 3. МОДЕЛИ НАРУШЕНИЯ СУПЕРСИММЕТРИИ

Суперсимметрия является приближённой симметрией и должна быть спонтанно нарушена. Глобальное нарушение SUSY приводит к появлению голдстино, тогда как локальное нарушение — к супергравитации (SUGRA) и массивному гравитино.

В минимальной суперсимметричной стандартной модели (MSSM) нет поля с ненулевым вакуумным средним, поэтому вводятся три сектора:

- Видимый сектор (MS),
- Скрытый сектор (HS), в котором происходит нарушение SUSY,
- Посредники (messengers), переносящие нарушение из HS в MS.

Основные механизмы посредничества:

- Gravity mediated,
- Gauge mediated,
- Gaugino mediated.

В данной работе рассматриваются модели с калибровочным посредничеством.

# 4. СУПЕРСИММЕТРИЧНЫЕ МОДЕЛИ

## 4.1 Состав полей MSSM

В таблице 1 приведён состав суперполей в MSSM.

Таблица 1 — Состав полей MSSM

Суперполе		Бозоны		Фермионы		$SU(3)$	$SU(2)$
Вектор	$G^a$	глюон	$g^a$	глюино	$\tilde{g}^a$	8	0
	$V^k$	слабые	$W^k (W^\pm, Z)$	вино, зино	$\tilde{w}^k (\tilde{w}^\pm, \tilde{z})$	1	3
	$V'$	гиперзаряд	$B(\gamma)$	бино	$\tilde{b}(\tilde{\gamma})$	1	1
Материя	$L_i$	слептоны	$\tilde{L}_i = (\tilde{\nu}, \tilde{e})_L$	лептоны	$L_i = (\nu, e)_L$	1	2
	$E_i$		$\tilde{E}_i = \tilde{e}_R$		$E_i = e_R$	1	1
	$Q_i$	скварки	$\tilde{Q}_i = (\tilde{u}, \tilde{d})_L$	кварки	$Q_i = (u, d)_L$	3	2
	$U_i$		$\tilde{U}_i = \tilde{u}_R$		$U_i = u_R^c$	$3^*$	1
	$D_i$		$\tilde{D}_i = \tilde{d}_R$		$D_i = d_R^c$	$3^*$	1
Хиггс	$H_1$	хиггс	$H_1$	хиггсино	$\tilde{H}_1$	1	2
	$H_2$		$H_2$		$\tilde{H}_2$	1	2

## 4.2 Супергравитация (SUGRA)

В супергравитации:

$$\text{гравитон } G, s = 2, m = 0 \quad \rightarrow \quad \text{гравитино } \tilde{G}, s = 3/2, m_{3/2} = \frac{F_0}{\sqrt{3}M_{\text{Pl}}}.$$

## 4.3 GMSB

### 4.3.1 Общее калибровочное посредничество (GGM)

В данной работе анализируются два канала рождения гравитино в GGM:

- Слабый канал (weak channel),
- Сильный канал (strong channel) — в GGM отсутствует.

### 4.3.2 Упрощённая суперсимметричная модель (SSM)

В SSM рассматриваются оба канала. Исходные параметры моделей сведены в таблицу 2.

Таблица 2 — Сравнение GGM и упрощённой суперсимметричной модели

	GGM	SSM
strong channel	–	+
weak channel	+	+
	$m_u = m_d = m_e = m_\mu = 8 \text{ TeV}$	$m_e = m_h = 8 \text{ TeV}$
скварки, глюино, глюино-глюоны	$m_{\tilde{q}} = 8 \text{ TeV}$	$m_u = m_d = m_g = 1.5 \text{ TeV}$
нейтралино	$\tilde{\chi}_3^0, \tilde{\chi}_4^0 : m > 2.5 \text{ TeV}$ $m_{\tilde{\chi}_2^0} > m_{\tilde{\chi}_1^0}$ $\Delta = 250 \text{ GeV}$	$\tilde{\chi}_3^0, \tilde{\chi}_4^0 : m > 2.5 \text{ TeV}$ $m_{\tilde{\chi}_1^0} = m_{\tilde{\chi}_2^0} = m_{\tilde{\chi}_1^\pm}$
чарджино	$m_{\tilde{\chi}_2^\pm} > 2.5 \text{ TeV}$ $m_{\tilde{\chi}_1^\pm} < 2.5 \text{ TeV}$	$m_{\tilde{\chi}_2^\pm} > 2.5 \text{ TeV}$ $m_{\tilde{\chi}_1^0} = m_{\tilde{\chi}_2^0} = m_{\tilde{\chi}_1^\pm}$
распады	$\tilde{\chi}_3^0/\tilde{\chi}_4^0 \rightarrow \tilde{\chi}_2^0, \tilde{\chi}_1^0$ $\tilde{\chi}_2^0 \rightarrow \tilde{\chi}_1^0$	$\tilde{\chi}_3^0/\tilde{\chi}_4^0 \rightarrow \tilde{\chi}_2^0, \tilde{\chi}_1^0$ $\tilde{\chi}_2^0 \not\rightarrow \tilde{\chi}_1^0 (m_{\tilde{\chi}_2^0} = m_{\tilde{\chi}_1^0})$ $\tilde{\chi}_1^0 \rightarrow \tilde{G}$ $\tilde{g}\tilde{g} \rightarrow \tilde{\chi}_1^0\tilde{\chi}_1^0, \tilde{g}\tilde{g} \rightarrow \tilde{\chi}_1^0\tilde{\chi}_1^\pm$

## 5. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАРНОГО РОЖДЕНИЯ ГРАВИТИНО

Моделирование выполнено на основе параметров, приведённых в работе [CMS:2017kys]. В ней представлены гистограммы для сканирования по массам первого и второго нейтралино.

## 5.1 GGM. Канал 1

На рисунке 2 показана зависимость сечения парного рождения гравитино от масс  $\tilde{\chi}_1^0$  (бино-лайк) и  $\tilde{\chi}_2^0$  (зино-лайк).

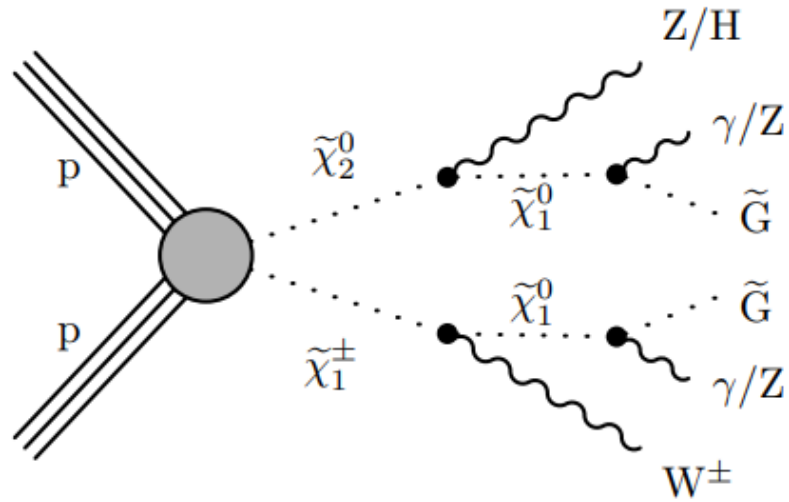


Рисунок 1 — Сечение парного рождения гравитино в GGM, канал 1:  $pp \rightarrow \tilde{G}\tilde{G} + a + a + z + w^\pm$

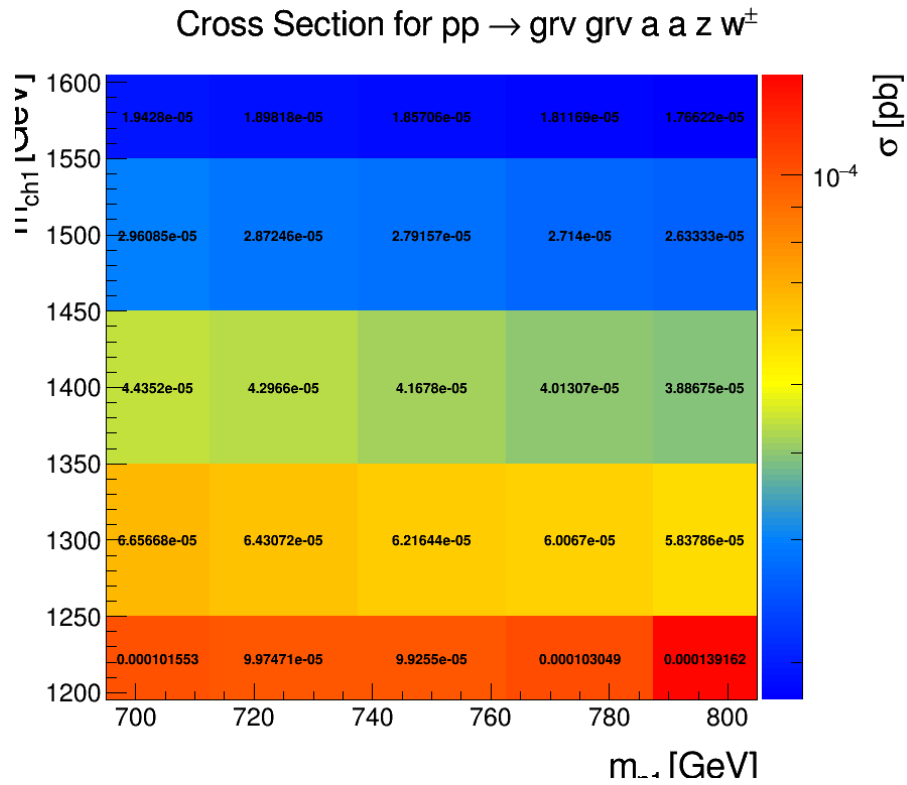


Рисунок 2 — Сечение парного рождения гравитино в GGM, канал 1 (2D распределение)

## 5.2 GGM. Канал 2

Аналогичная зависимость для второго канала представлена на рисунке 4.

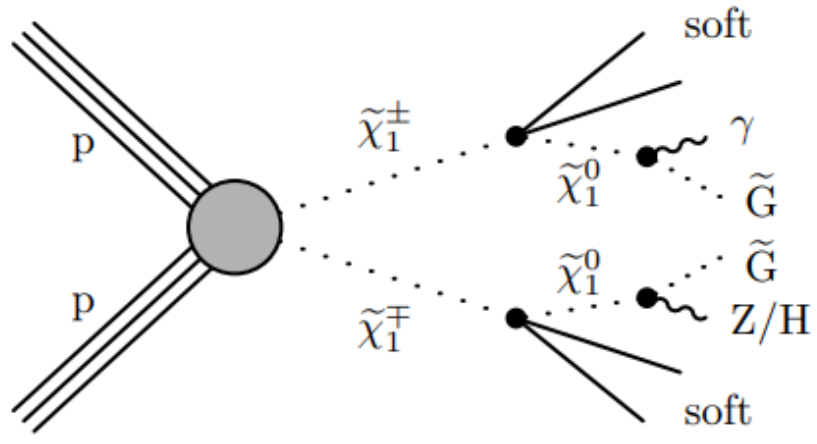


Рисунок 3 — Сечение парного рождения гравитино в GGM, канал 2

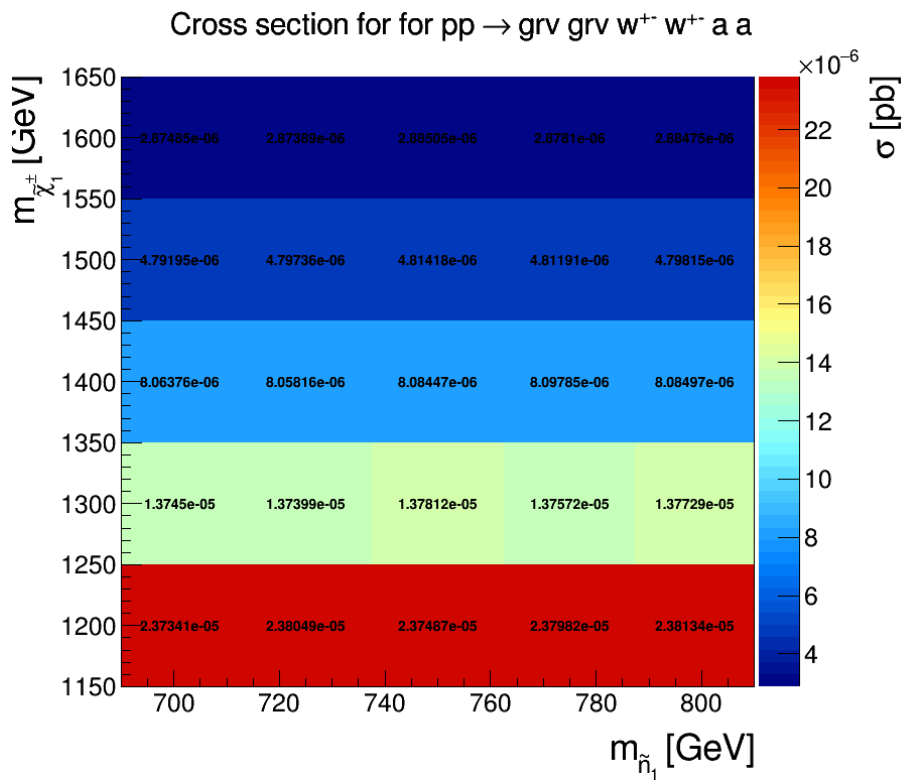


Рисунок 4 — Сечение парного рождения гравитино в GGM, канал 2 (2D распределение)

### 5.3 SSM. Слабый канал

Для упрощённой модели в слабом канале получены сечения, представленные на рисунке 6.

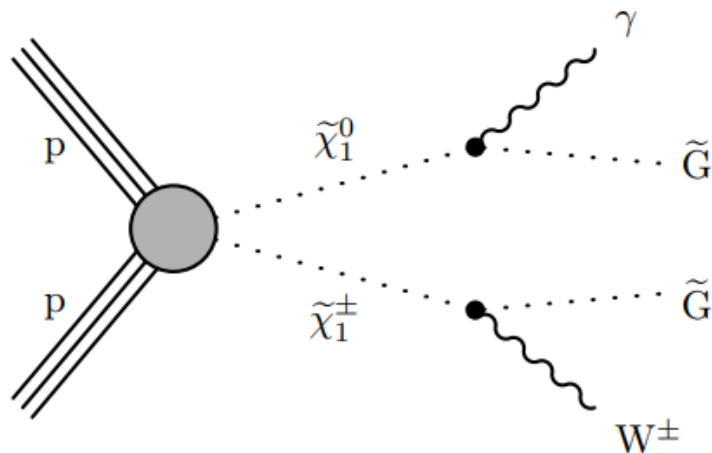


Рисунок 5 — Сечение парного рождения гравитино в SSM, слабый канал

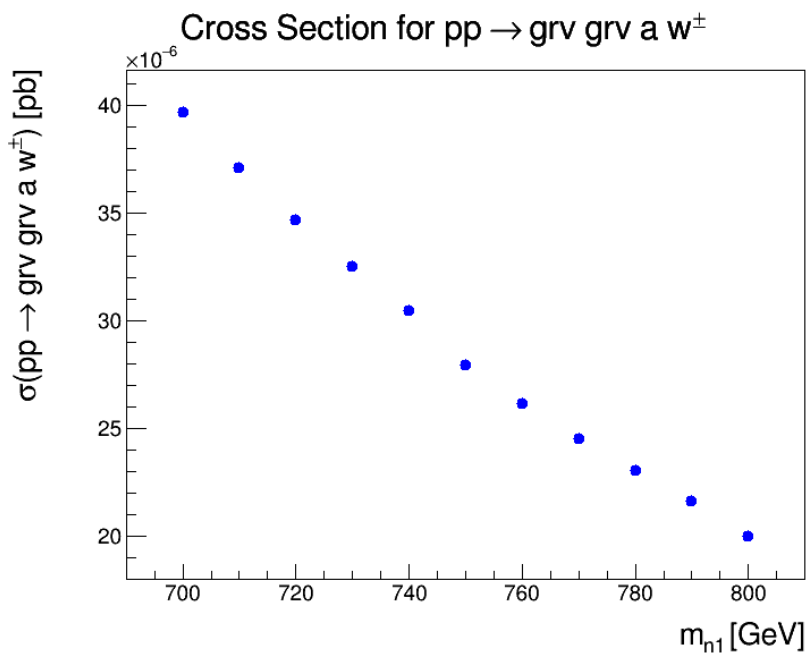


Рисунок 6 — Сечение парного рождения гравитино в SSM, слабый канал (равные массы)

## 5.4 SSM. Сильный канал

Результаты для сильного канала в SSM приведены на рисунках 7–11.

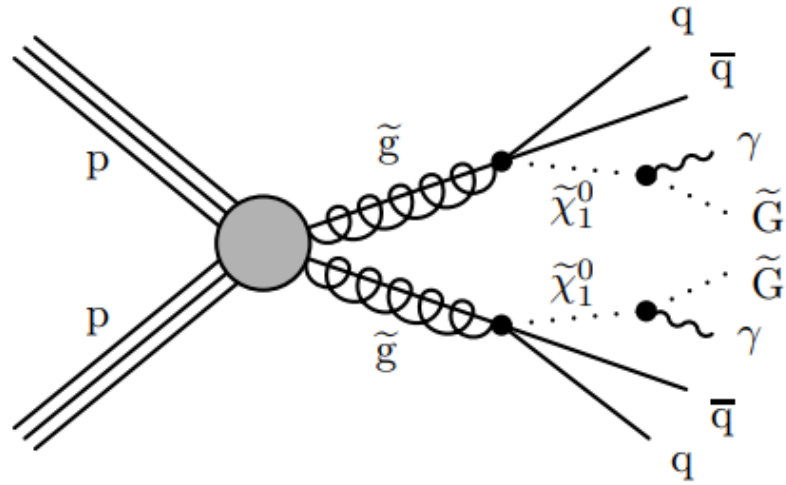


Рисунок 7 — Сечение парного рождения гравитино в SSM, сильный канал

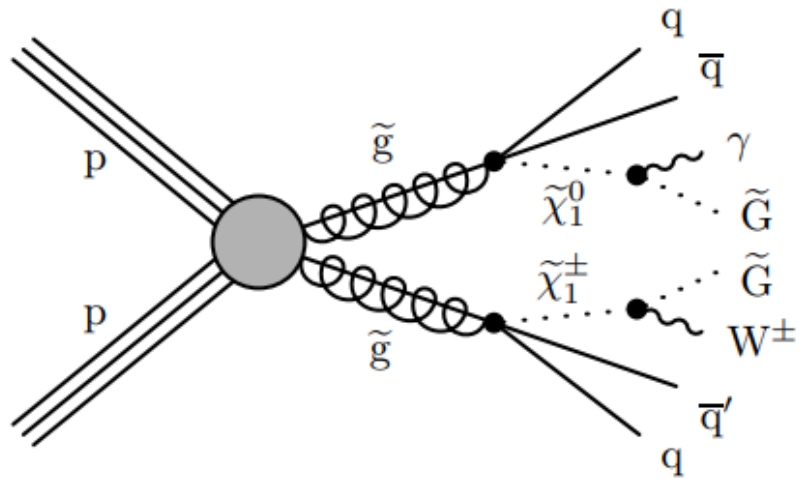


Рисунок 8 — Сечение парного рождения гравитино в SSM, сильный канал

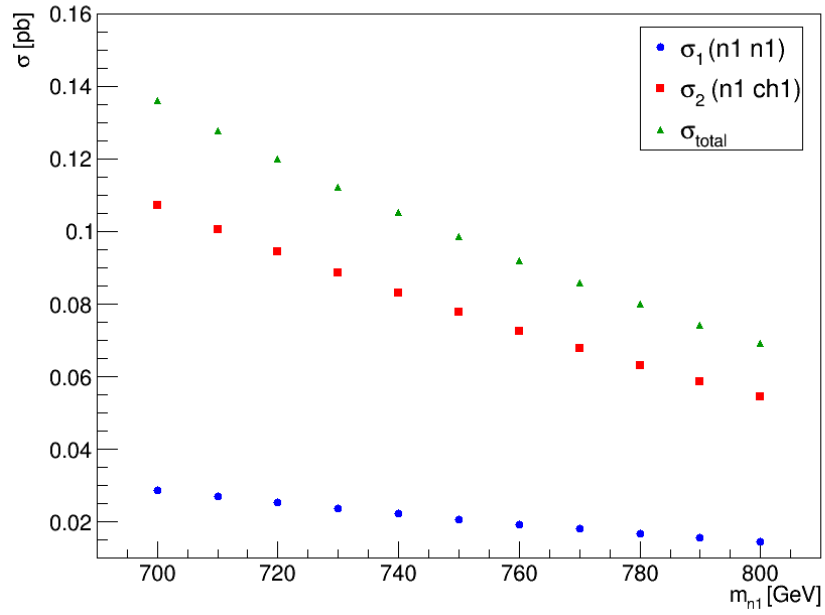


Рисунок 9 — Объединённое сечение для SSM

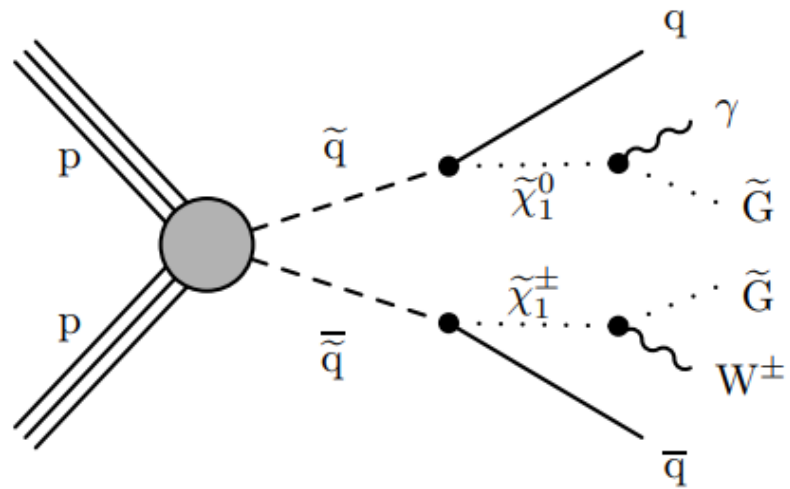


Рисунок 10 — Сечение парного рождения гравитино в SSM, сильный канал

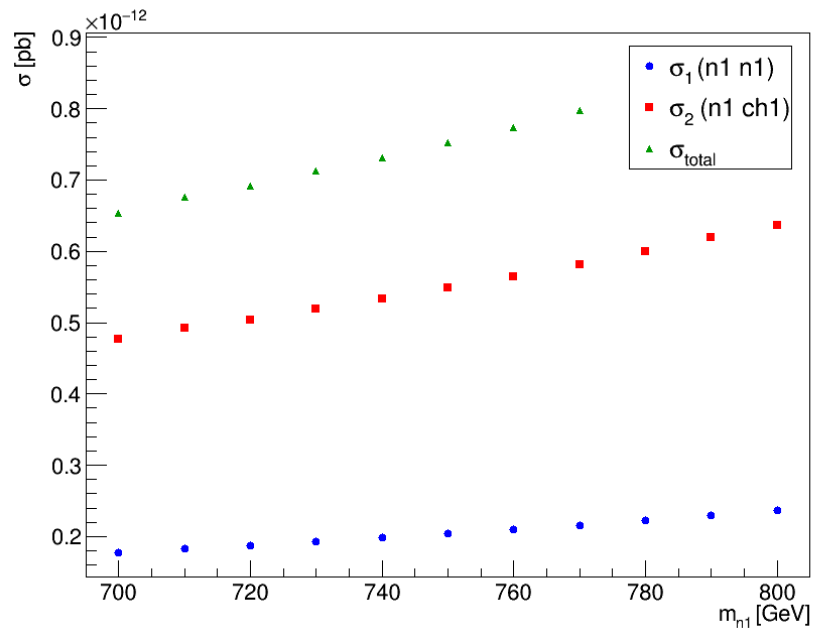


Рисунок 11 — Комбинированные результаты для SSM

## 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- По первичным оценкам процесс парного рождения гравитино (с массой  $m_{\tilde{G}} \approx 1$  КэВ, что задаёт определённый масштаб нарушения SUSY) на ЛHC является наблюдаемым.
- В SSM при исследованных параметрах рождение гравитино по сильному каналу подавлено.

### Дальнейшие планы

- Расширить область исследования параметров.
- Учесть адронизацию элементарных частиц.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

0. *Giudice G., Rattazzi R.* Theories with Gauge-Mediated Supersymmetry Breaking. — 1998. — Файл: 9801271.pdf.
0. *CMS Collaboration.* Search for gauge-mediated supersymmetry in events with at least one photon and missing transverse momentum in pp collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV. — 2018. — Файл: GMSB\_CMS.pdf.
0. *Dimopoulos S., Thomas S., Wells J.* Sparticle spectroscopy and electroweak symmetry breaking with gauge-mediated supersymmetry breaking. — 1997. — Файл: 9609434v2.pdf.
0. *Oexl B.* Gravitino production at colliders : дис. ... канд. / Oexl Bettina. — 2014. — Диссертация (PhD Thesis). Файл: thesis-bettina-oexl-pheno-phd-2014(1).pdf.

0. *Казаков Д.* Суперсимметричное расширение стандартной модели фундаментальных взаимодействий. — 2014.
0. *Rubakov V. A., Gorbunov D. S.* Introduction to the Theory of the Early Universe: Hot Big Bang Theory. — 2nd. — Singapore : World Scientific, 2017. — ISBN 978-981-320-987-2. — DOI: 10.1142/10447.