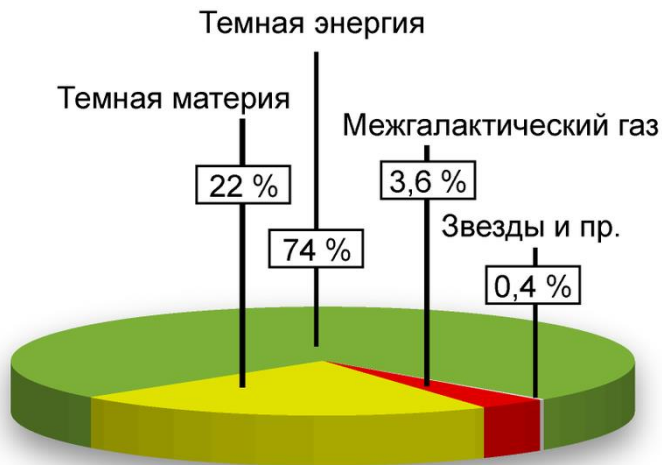
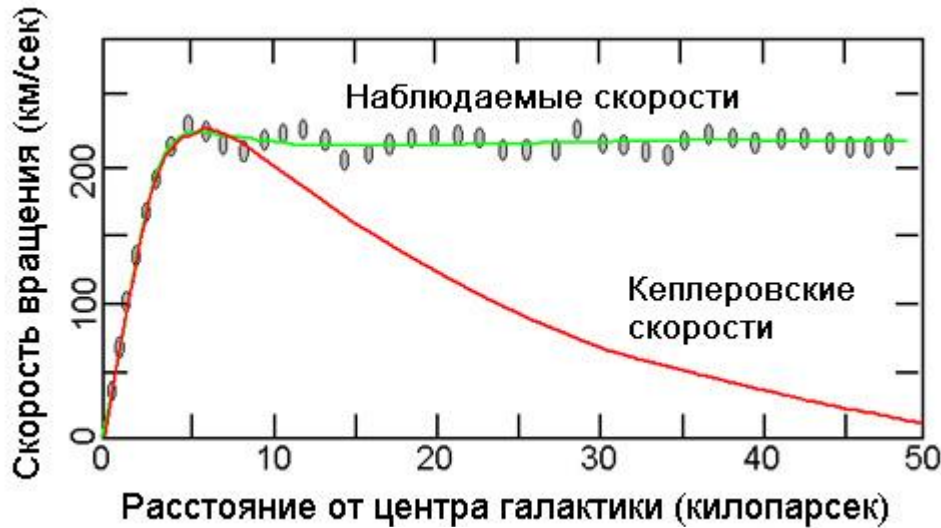


Dark Matter Search at Colliders (non SUSY)

V.Maleev

(PNPI)

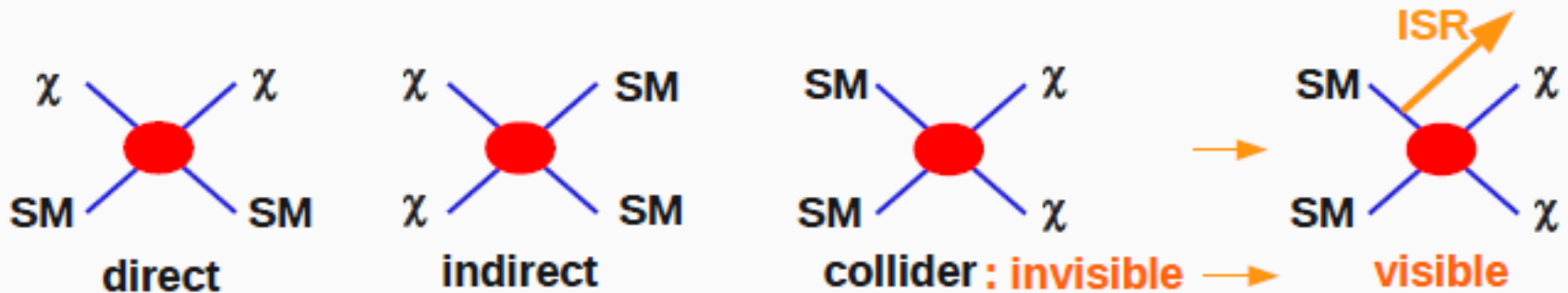
Dark Matter Evidence



| Parameter | Symbol | Value |
|--------------------------|-----------------------|---|
| Hubble parameter | h | 0.704 ± 0.025 |
| Cold dark matter density | Ω_{cdm} | $\Omega_{\text{cdm}} h^2 = 0.112 \pm 0.006$ |
| Baryon density | Ω_{b} | $\Omega_{\text{b}} h^2 = 0.0225 \pm 0.0006$ |
| Cosmological constant | Ω_{Λ} | 0.73 ± 0.03 |
| Radiation density | Ω_{r} | $\Omega_{\text{r}} h^2 = 2.47 \times 10^{-5}$ |

- Существование тёмной материи следует из астрофизических и космологических наблюдений
- Её количество оценено из совокупности данных WMAP

Dark Matter Searches

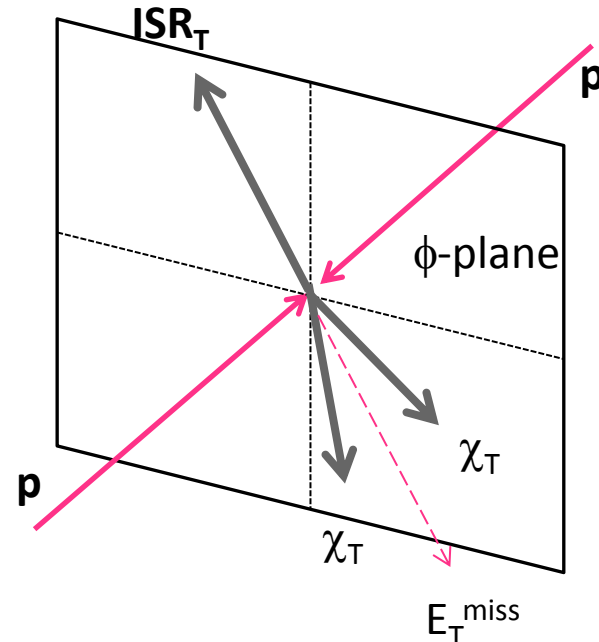


hadronic recoil:
deep underground,
cryogenic

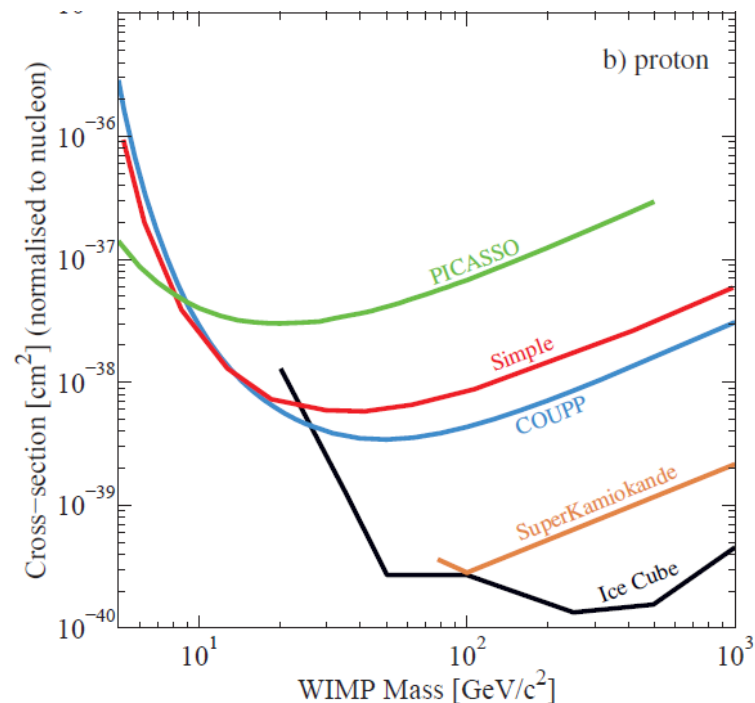
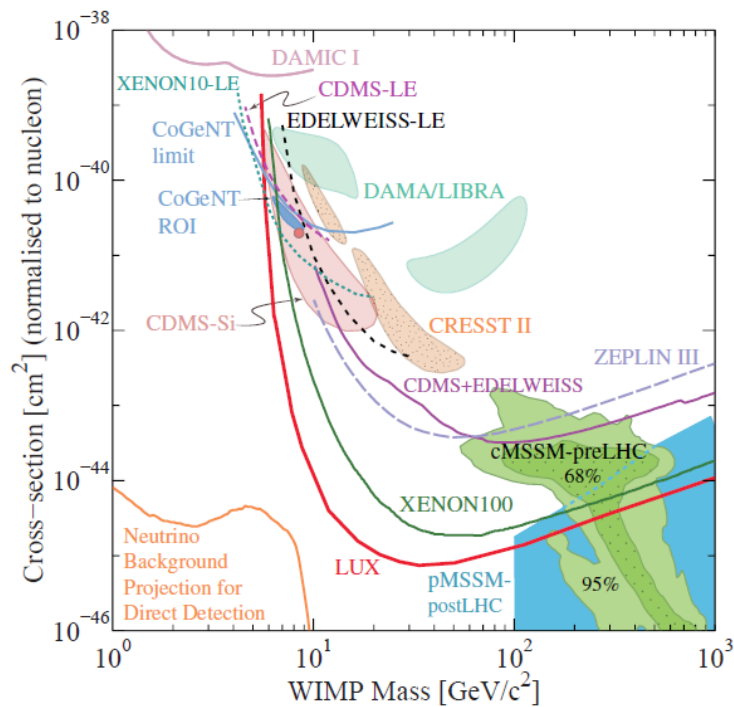
cosmic rays:
ground-based or
space observatories

missing transverse
energy in particle
collisions

- ISR (Initial State Radiation) может быть глюон, фотон, W - или Z -бозон
- Недостаточная поперечная энергия сбалансирована ISR



Motivation for collider search

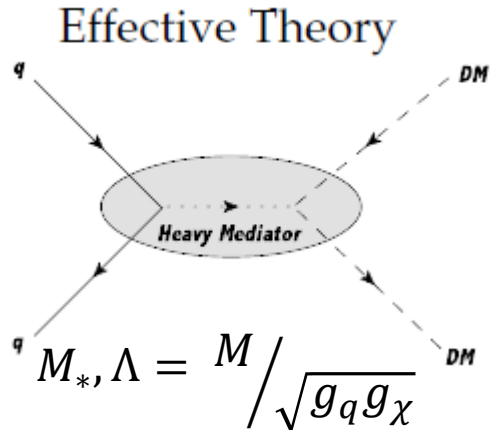


- Поиск частиц тёмной материи в коллайдерных экспериментах служат как дополнением к прямым и косвенным поискам тёмной материи, так и их проверкой
- Эксперименты по прямому и косвенному поиску тёмной материи имеют естественные ограничения в области малых масс, в то время как коллайдерные поиски таких ограничений не имеют
- Если тёмная материя взаимодействует преимущественно со вторым или третьим поколениями, то только коллайдерные эксперименты будут чувствительны к таким взаимодействиям

Search strategy

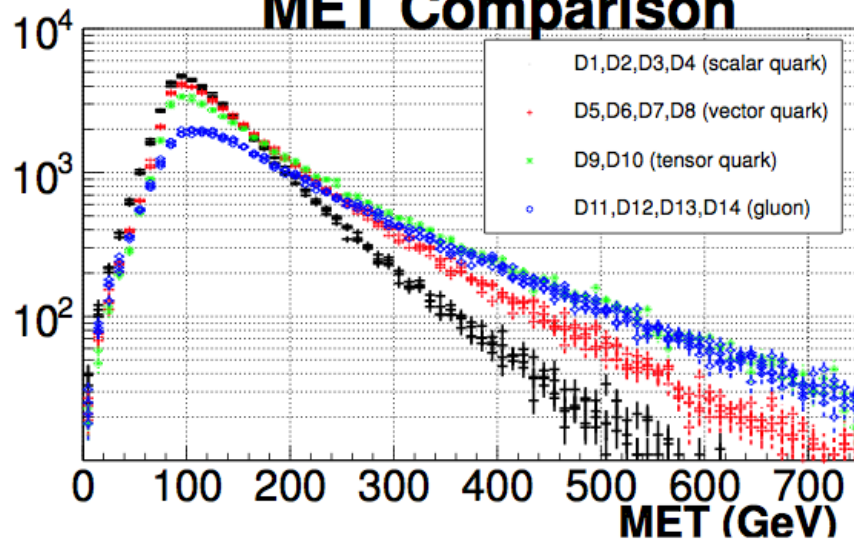
- Отбираются события с рассматриваемой сигнатурой (струя, фотон, W - или Z -бозон и большой E_T^{miss})
- Резонанс не подразумевается, поэтому counting experiment – сравнивается число событий в данных с фоном СМ для E_T^{miss} больше порогового значения
- Если статистика позволяет, выделяются несколько сигнальных областей, например в mono-jet анализе $E_T^{\text{miss}} > 250, 300, 350, \dots, 550$ GeV
- Если превышения данных над фоном не обнаружено, устанавливается предел на параметры модели

<http://arxiv.org/pdf/1008.1783v2.pdf>



EFT применима до $m_\chi \leq 2\pi M_*$

MET Comparison



| Name | Operator | Coefficient |
|------|---|--------------------|
| D1 | $\bar{\chi}\chi\bar{q}q$ | m_q/M_*^3 |
| D2 | $\bar{\chi}\gamma^5\chi\bar{q}q$ | im_q/M_*^3 |
| D3 | $\bar{\chi}\chi\bar{q}\gamma^5q$ | im_q/M_*^3 |
| D4 | $\bar{\chi}\gamma^5\chi\bar{q}\gamma^5q$ | m_q/M_*^3 |
| D5 | $\bar{\chi}\gamma^\mu\chi\bar{q}\gamma_\mu q$ | $1/M_*^2$ |
| D6 | $\bar{\chi}\gamma^\mu\gamma^5\chi\bar{q}\gamma_\mu q$ | $1/M_*^2$ |
| D7 | $\bar{\chi}\gamma^\mu\chi\bar{q}\gamma_\mu\gamma^5q$ | $1/M_*^2$ |
| D8 | $\bar{\chi}\gamma^\mu\gamma^5\chi\bar{q}\gamma_\mu\gamma^5q$ | $1/M_*^2$ |
| D9 | $\bar{\chi}\sigma^{\mu\nu}\chi\bar{q}\sigma_{\mu\nu}q$ | $1/M_*^2$ |
| D10 | $\bar{\chi}\sigma_{\mu\nu}\gamma^5\chi\bar{q}\sigma_{\alpha\beta}q$ | i/M_*^2 |
| D11 | $\bar{\chi}\chi G_{\mu\nu}G^{\mu\nu}$ | $\alpha_s/4M_*^3$ |
| D12 | $\bar{\chi}\gamma^5\chi G_{\mu\nu}G^{\mu\nu}$ | $i\alpha_s/4M_*^3$ |
| D13 | $\bar{\chi}\chi G_{\mu\nu}\tilde{G}^{\mu\nu}$ | $i\alpha_s/4M_*^3$ |
| D14 | $\bar{\chi}\gamma^5\chi G_{\mu\nu}\tilde{G}^{\mu\nu}$ | $\alpha_s/4M_*^3$ |

D1 – скаляр

D5 – вектор

D8 – аксиальный вектор

D9 – тензор

D11 – скаляр

спин независимый

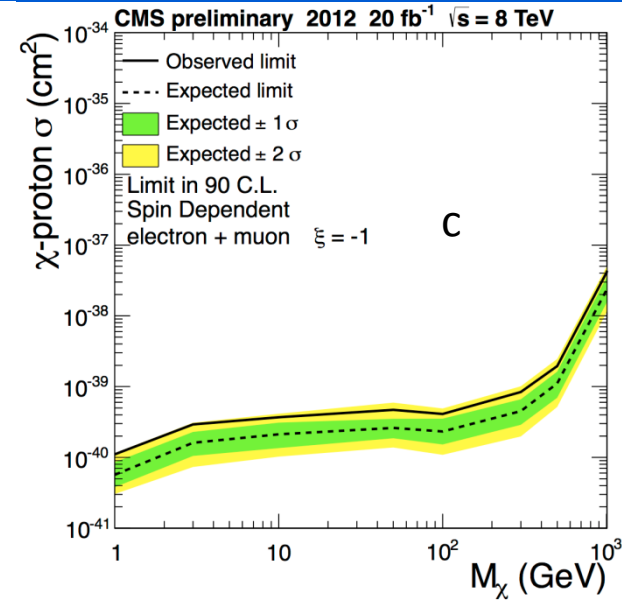
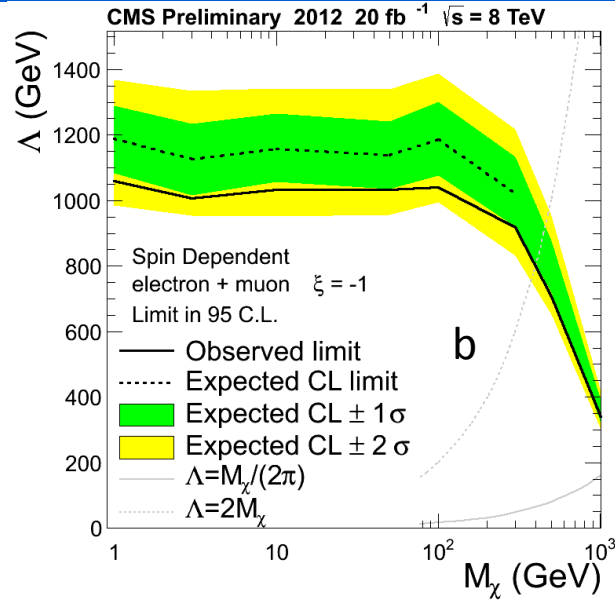
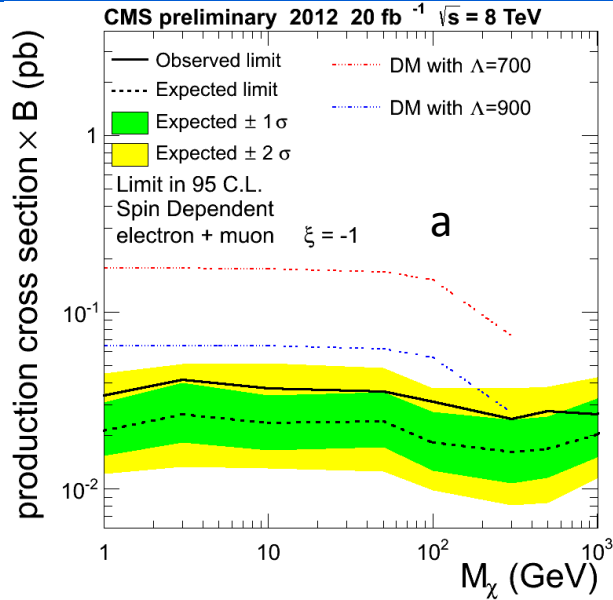
спин независимый

спин зависимый

спин зависимый

спин независимый

Limit setting



- Из полученных данных устанавливается предел на $\sigma \times B$ (a)
- Полученный предел на сечение рождения может быть пересчитан

– в предел на M_* (Λ) $M_*^{limit} = M_*^{gen} \left(\frac{\sigma_{gen}}{\sigma_{limit}} \right)^{\frac{1}{2n}}$ (b)

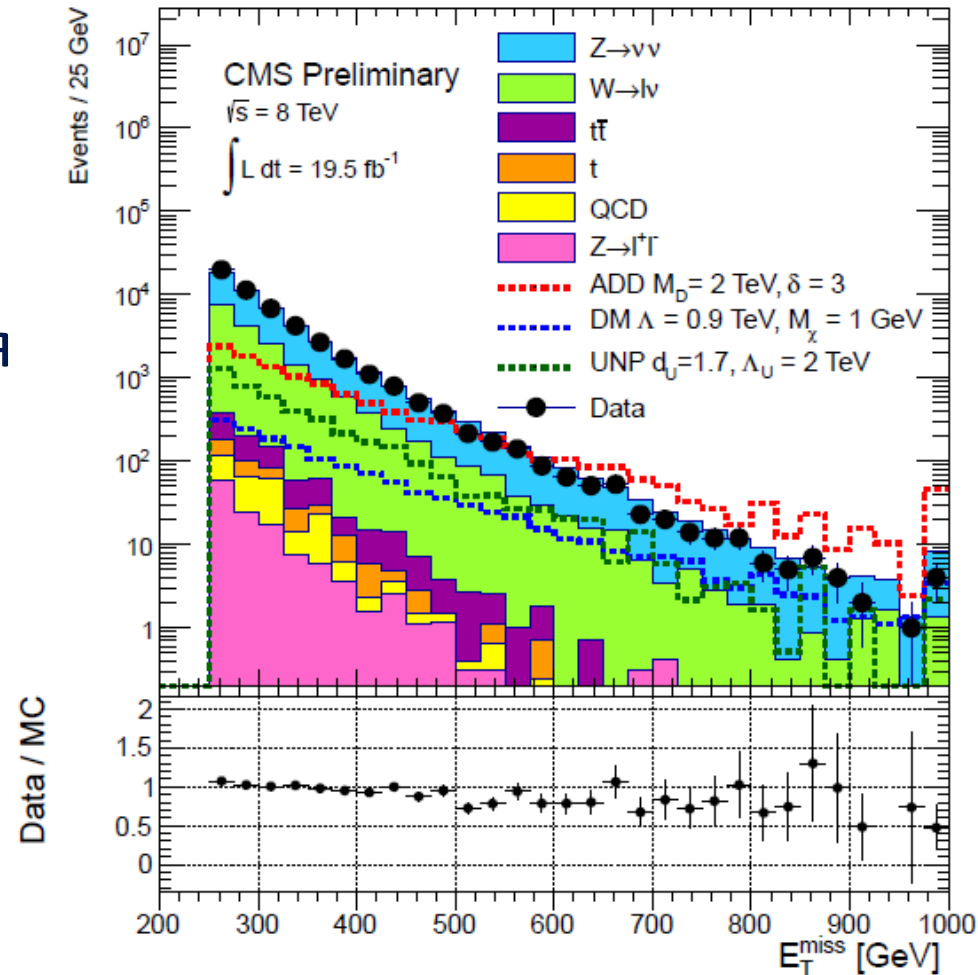
- в предел на взаимодействие с нуклонами (c)

$$\sigma_0^{D8,D9} = 9.18 \times 10^{-40} \text{ cm}^2 \left(\frac{\mu_\chi}{1 \text{ GeV}} \right)^2 \left(\frac{300 \text{ GeV}}{M_*} \right)^4$$

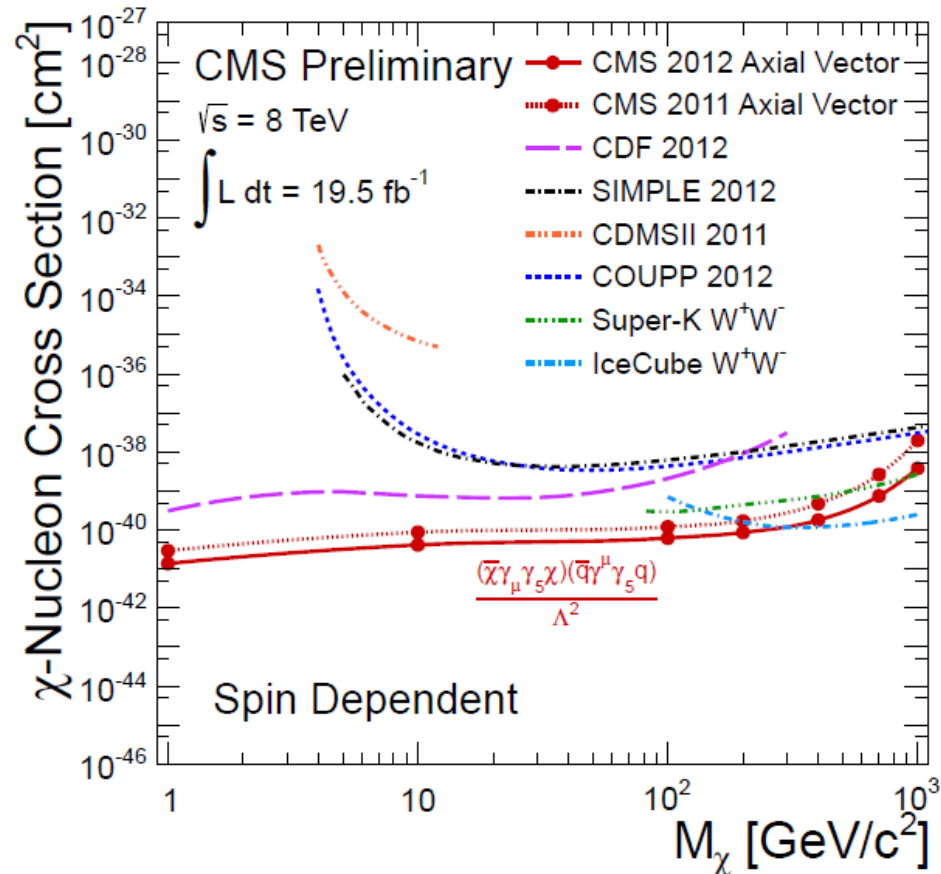
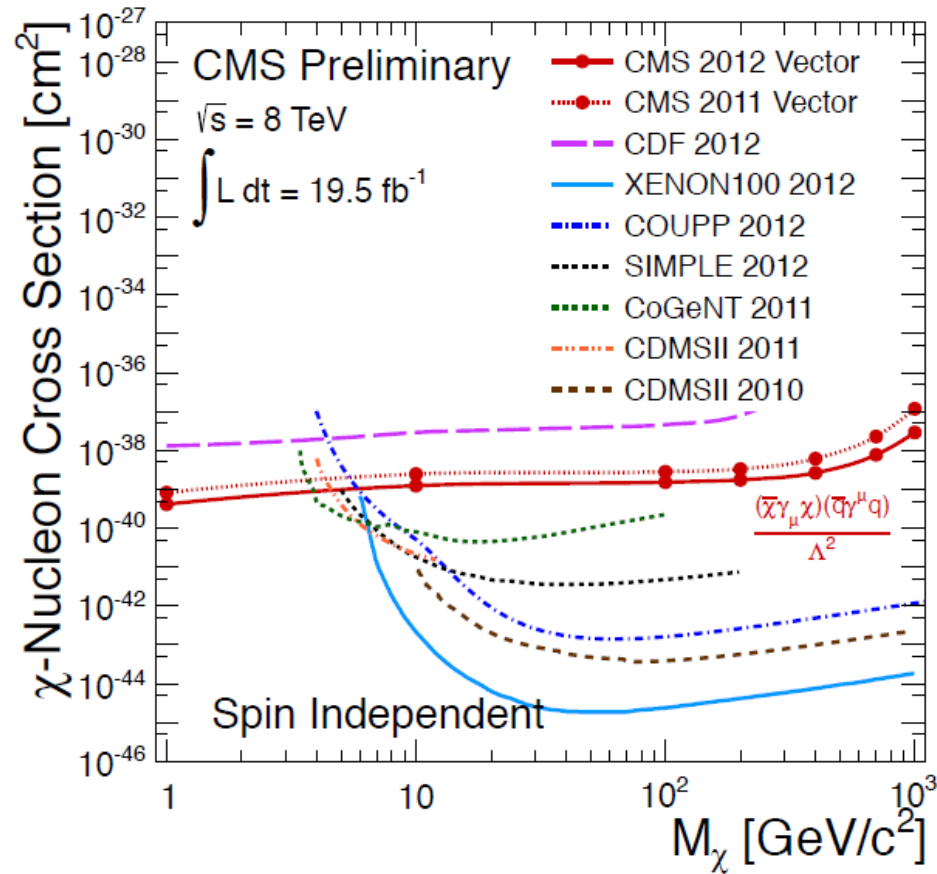
(<http://arxiv.org/pdf/1008.1783v2.pdf>)

Mono-jet (CMS PAS EXO-12-048)

- Основной канал, так как статистика максимальна
- Отбираются события с не более, чем двумя струями с $P_T > 30$ GeV, лидирующая струя с $P_T > 120$ GeV
- Основной фон – $Z \rightarrow \nu\nu$
- Семь сигнальных областей с $E_T^{\text{miss}} > 250, 300, 350, 400, 450, 500, 550$ GeV



Mono-jet



Пределы на взаимодействие частиц тёмной материи с веществом для спин-независимого оператора D5 (слева) и спин-зависимого оператора D8 (справа)

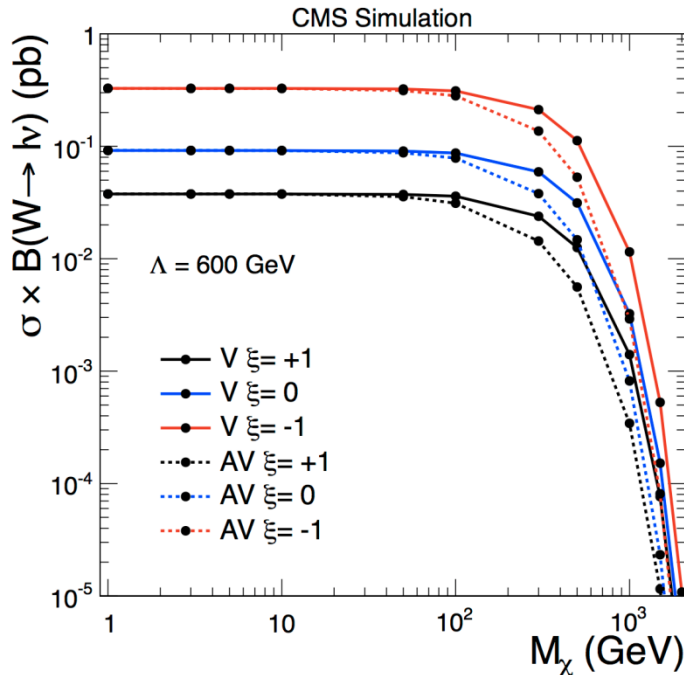
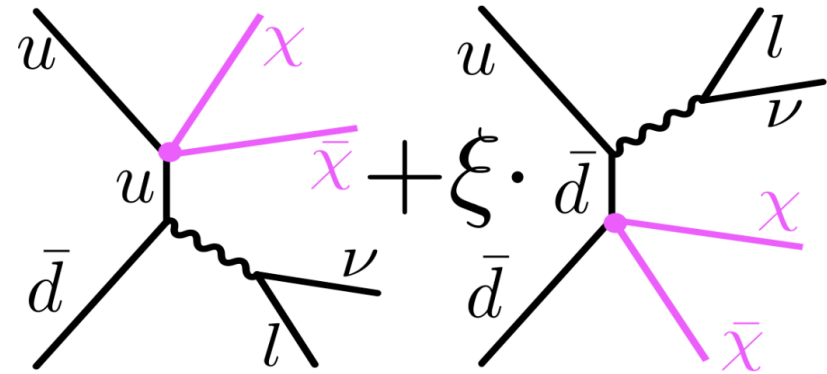
- Достигнутой чувствительности для спин-независимого взаимодействия недостаточно, чтобы исключить результат DAMA/CoGeNT
- Для спин-зависимого взаимодействия LHC эксперименты дают более сильные ограничения, чем косвенные эксперименты

Mono-W (CMS PAS EXO-13-004)

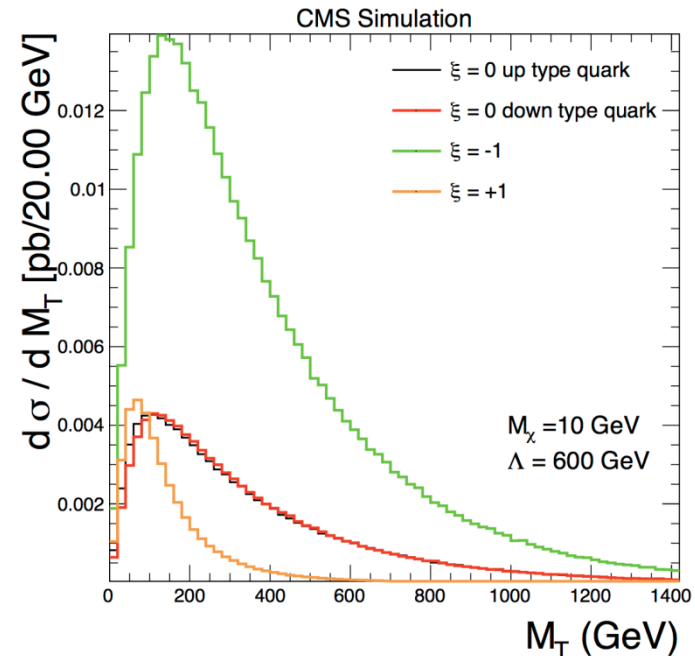
- Канал интересен тем, что чувствителен к разным константам взаимодействия частиц тёмной материи с u- и d-кварками

<http://arxiv.org/pdf/1208.4361v2.pdf>

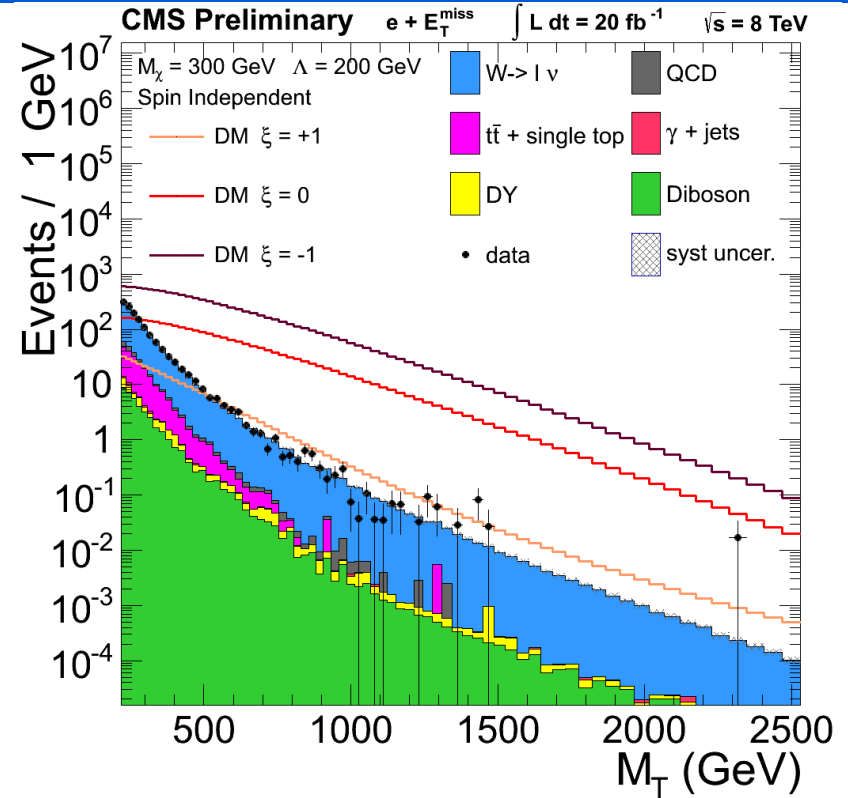
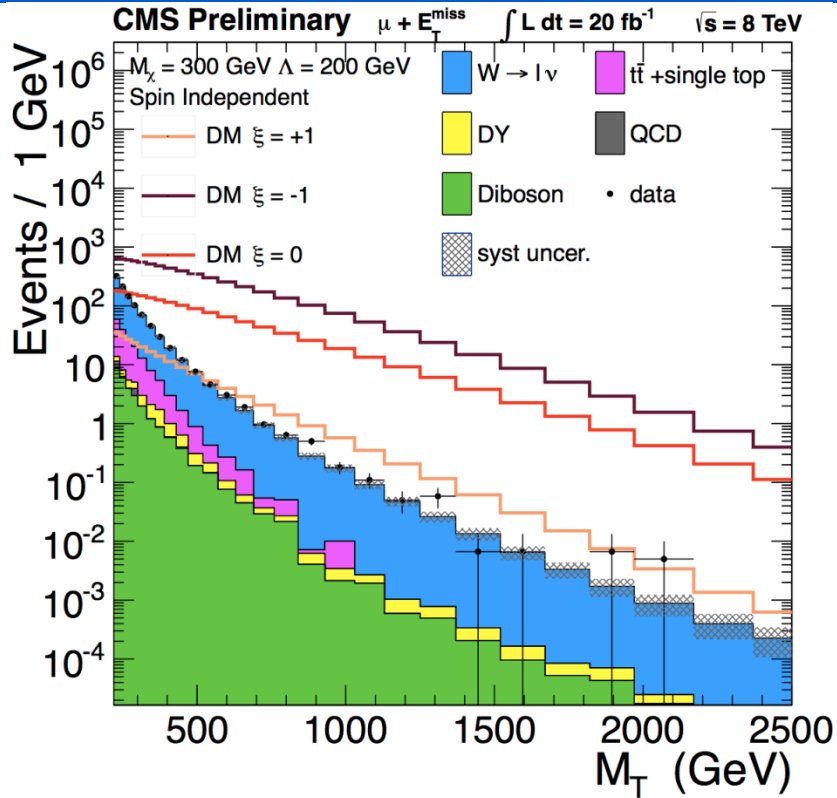
- ξ - отношение констант связи тёмной материи с u- и d-кварками



Различие между векторным и аксиально-векторным взаимодействиями становится заметным при массах $M_\chi > 100$ GeV



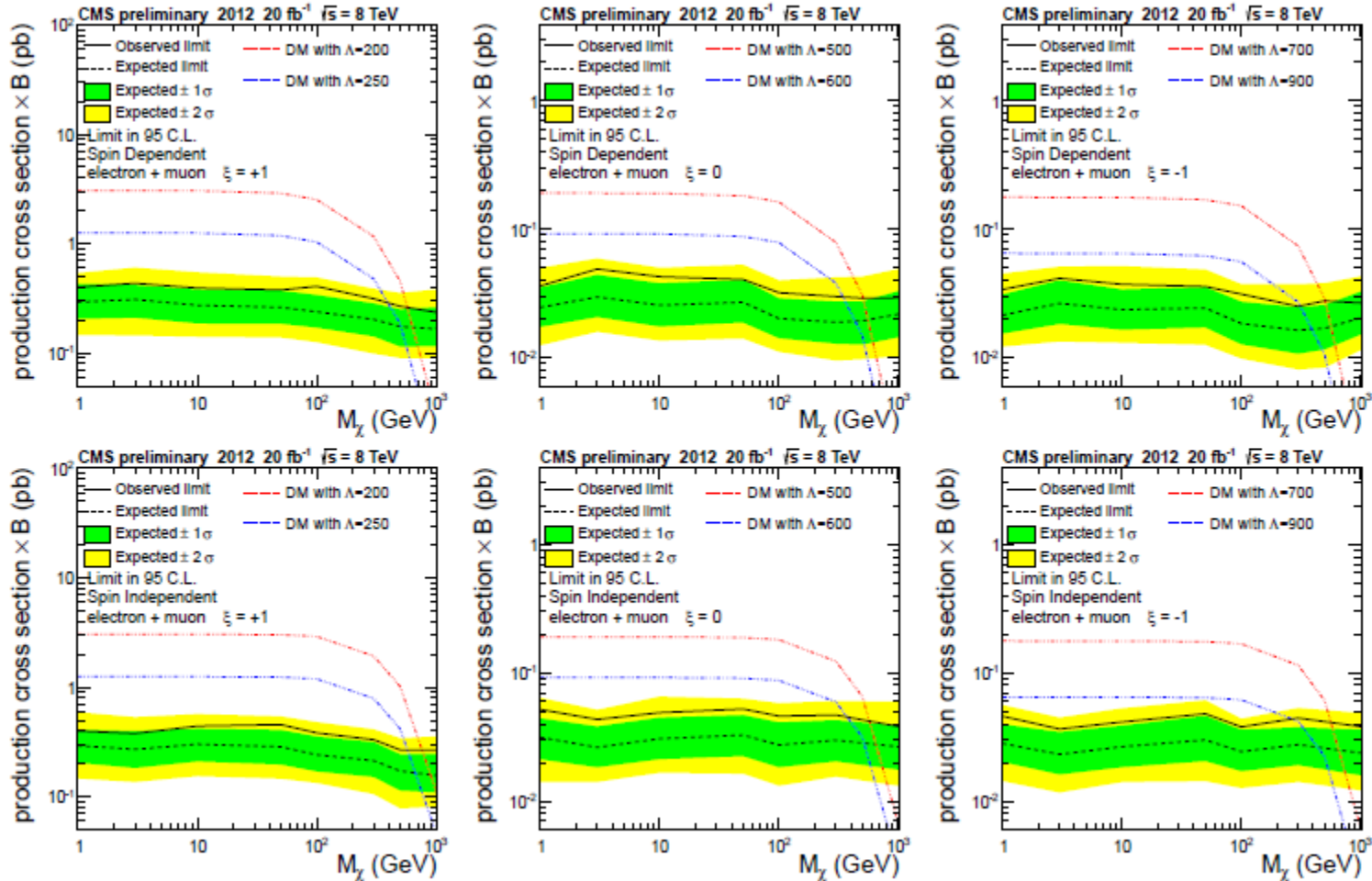
Mono-W



$$M_T = \sqrt{2 \cdot p_T^l \cdot E_T^{\text{miss}} \cdot (1 - \cos \Delta\phi_{l,\nu})}$$

- Анализ проводился отдельно для электронного и мюонного каналов, комбинировались установленные пределы

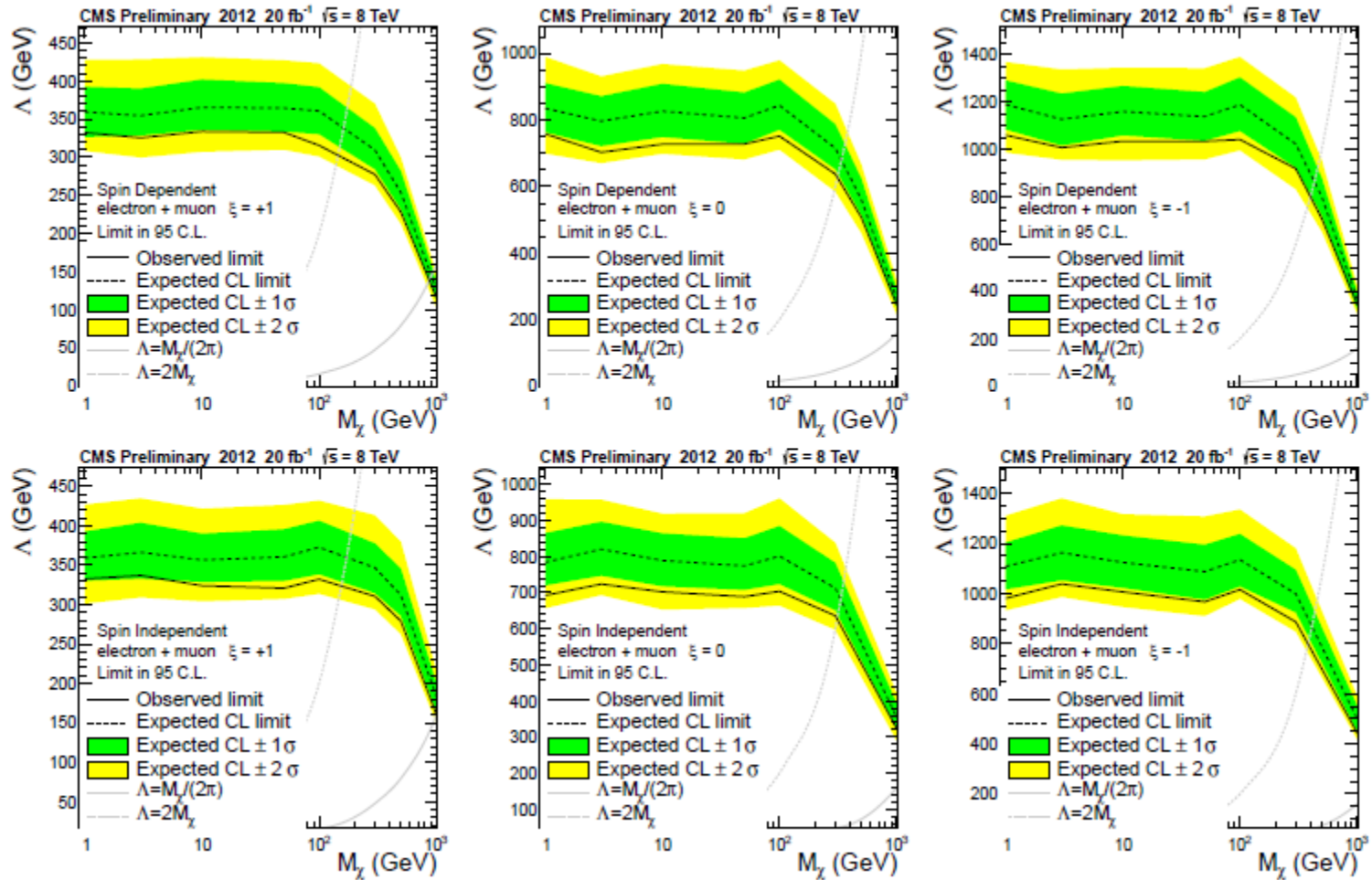
Mono-W



Основной результат – пределы на сечение процесса

- Рождение частиц тёмной материи исключается с $\sigma \times v > 0.4 \text{ pb}$ для $\xi = +1$ (слева) и $\sigma \times v > 0.05 \text{ pb}$ для $\xi = 0, -1$ (в центре, справа) как для аксиально-векторного (верхний ряд), так и векторного (нижний ряд) взаимодействий

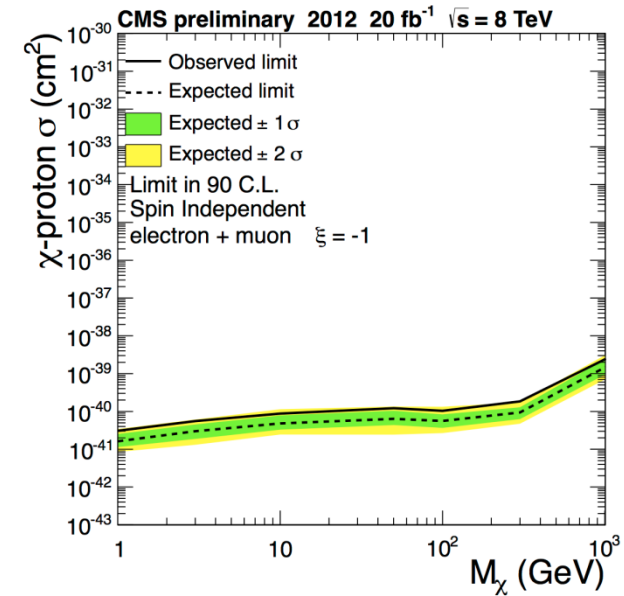
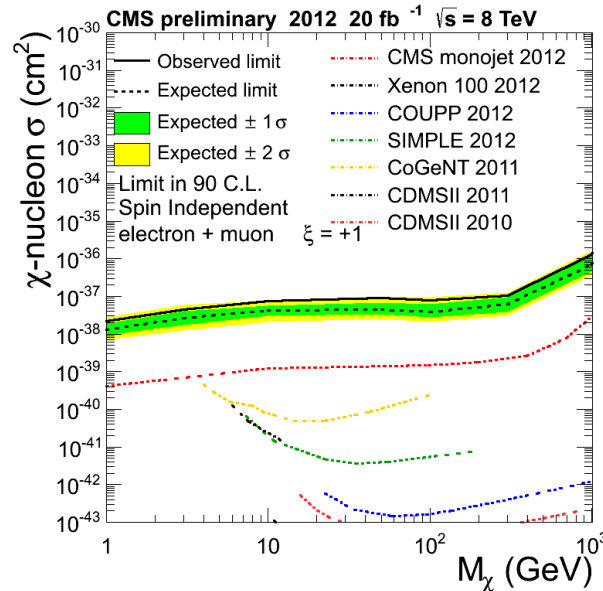
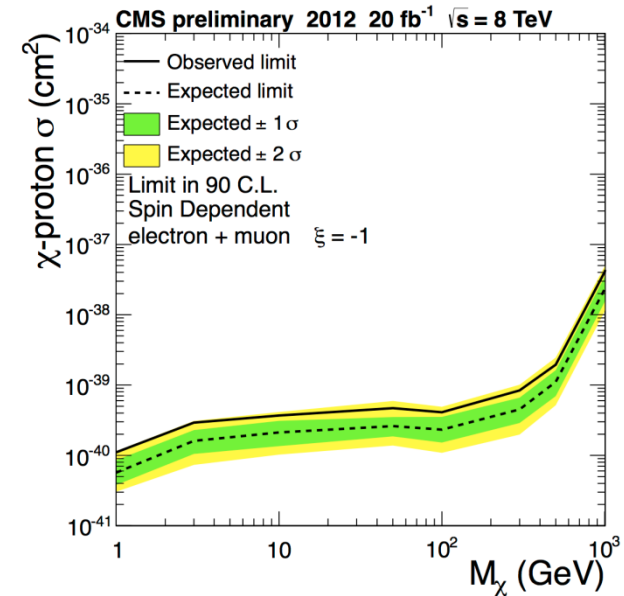
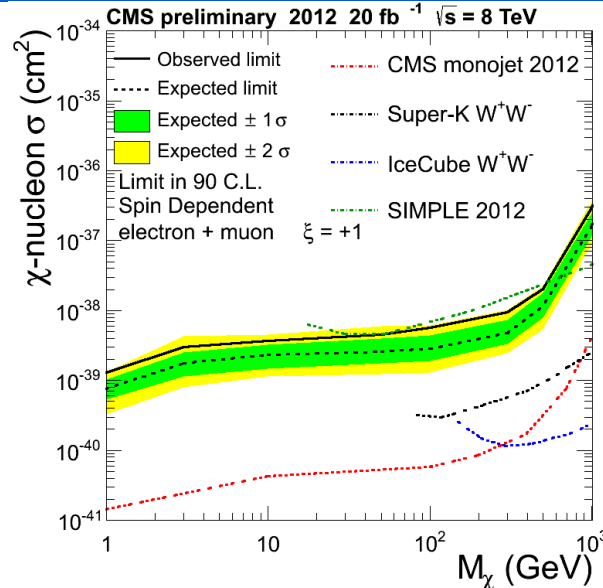
Mono-W



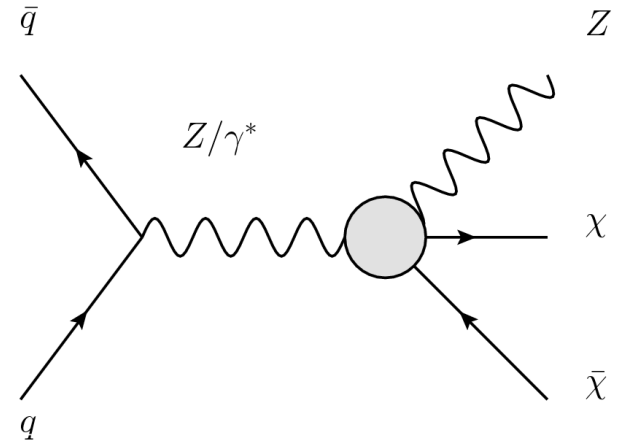
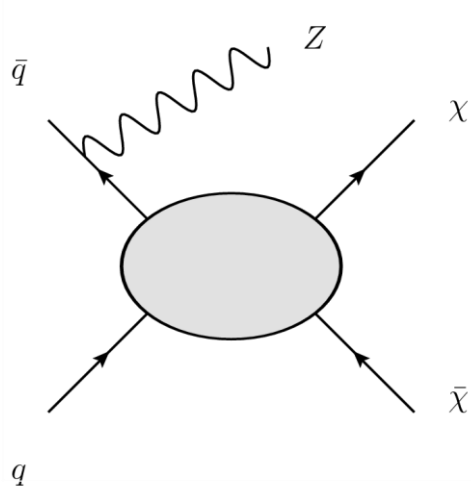
- и ограничения на масштаб взаимодействия

Mono-W

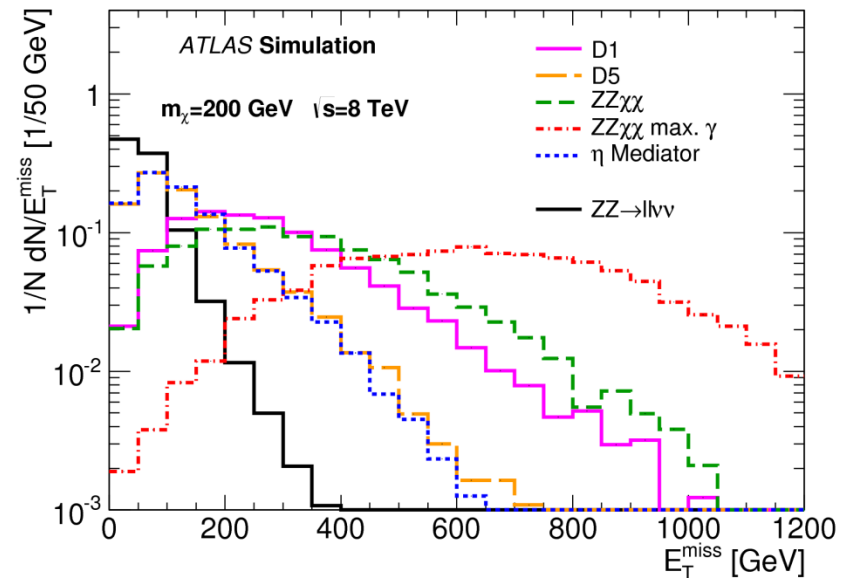
Предел на взаимодействие частиц тёмной материи с обычным веществом в случае конструктивной интерференции ($\xi=+1$) сравним с результатами моно-jet анализа, а в случае спин-независимого взаимодействия даже превосходит и может рассматриваться как основной канал поиска



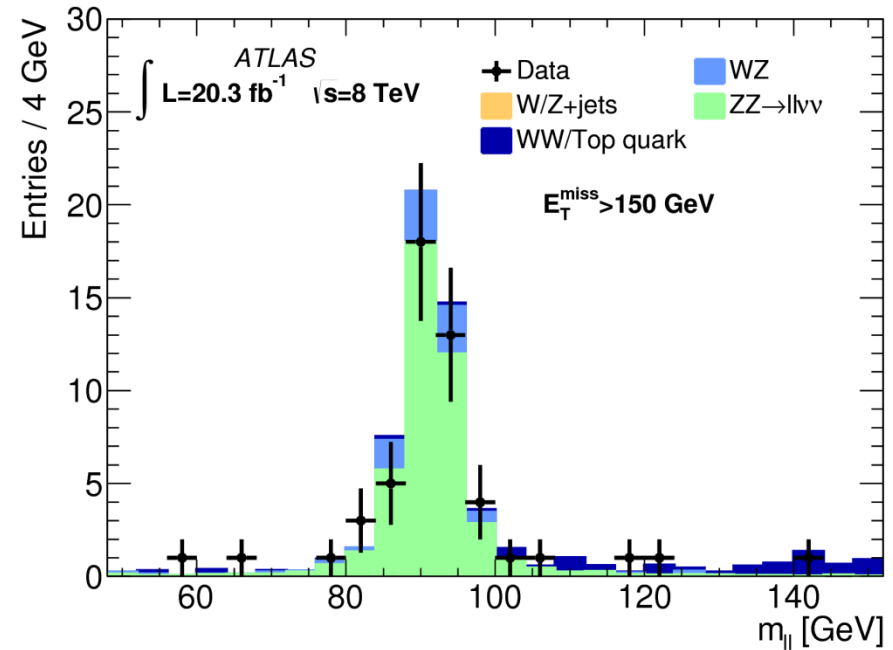
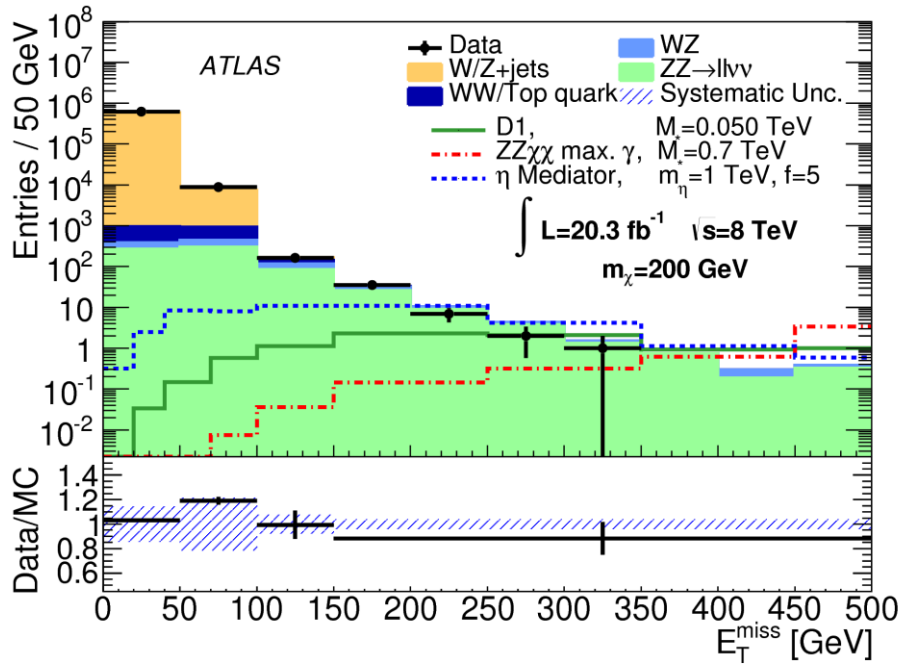
Mono-Z ([arXiv:1404.0051](https://arxiv.org/abs/1404.0051))



- Существуют модели взаимодействия тёмной материи с частицами СМ через Z-бозон(правая диаграмма)
- Только моно-Z анализ чувствителен к такому взаимодействию
- В анализе рассматриваются оба процесса: D1, D5 и D9 для модельно-независимой EFT и взаимодействие через Z-бозон

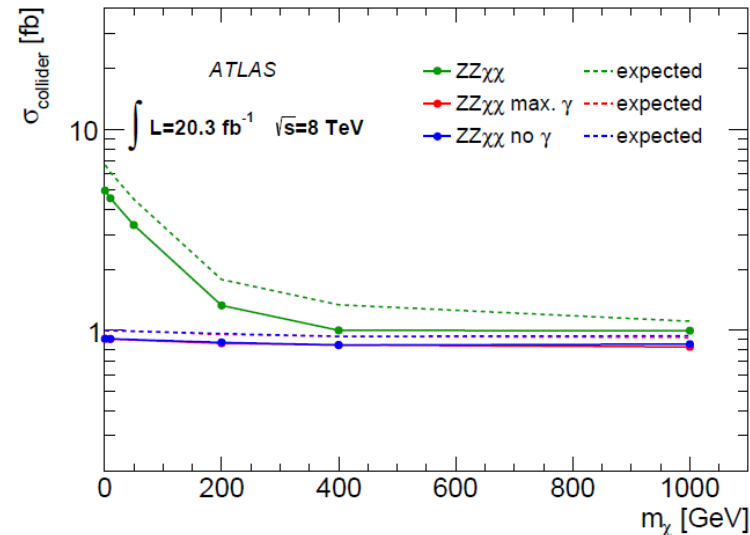
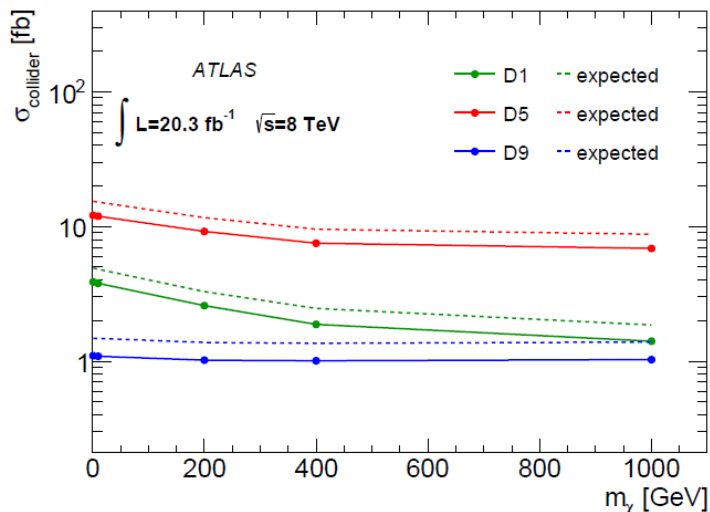


Mono-Z

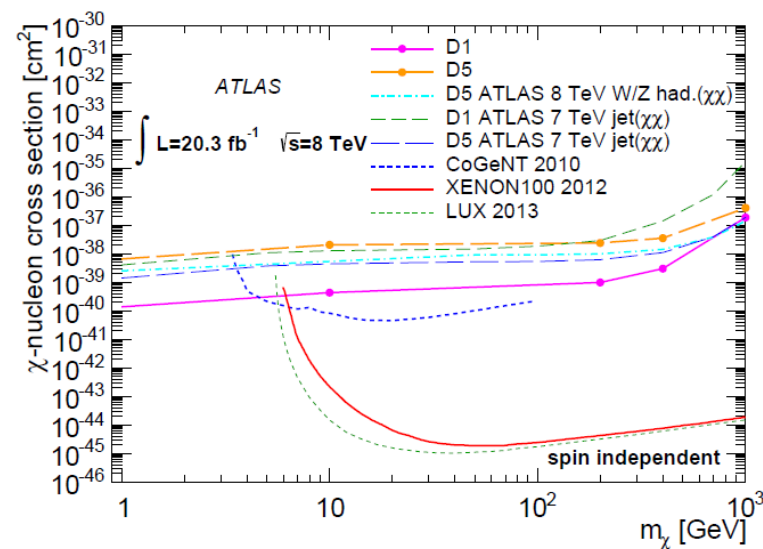
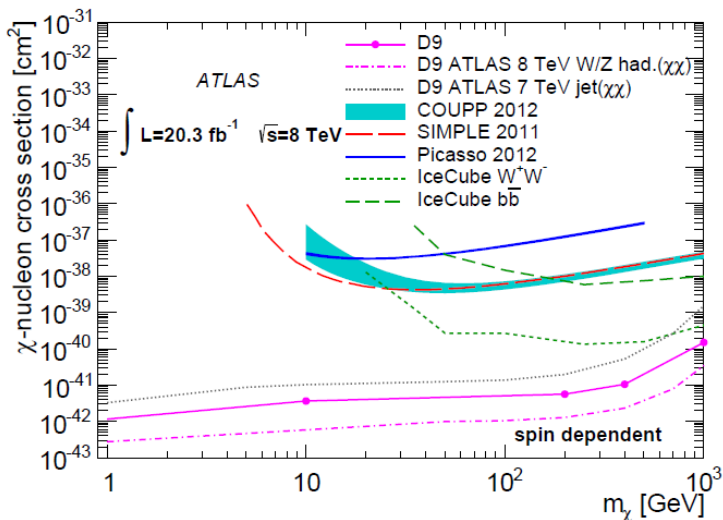


- Слева: распределение отобранных событий по E_T^{miss} (видно, что при $E_T^{\text{miss}} > 100$ GeV основным фоном является ZZ процесс)
- Рассматриваются четыре сигнальные области $E_T^{\text{miss}} > 150, 250, 350, 450$ GeV

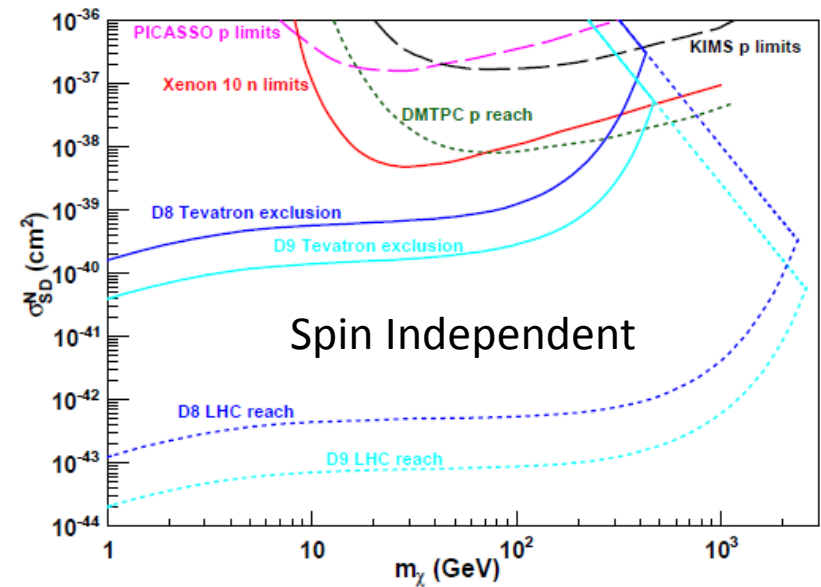
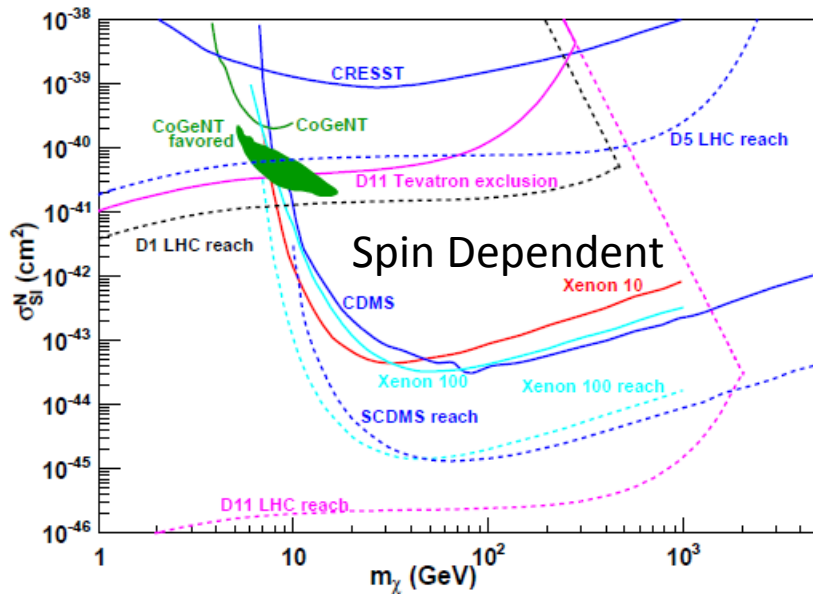
Mono-Z



- D5 исключается с $\sigma_{\text{collider}} > 10 \text{ fb}$ и D9 - с $\sigma_{\text{collider}} > 1 \text{ fb}$
- Процесс $pp \rightarrow ZZ\chi\chi$ исключается с $\sigma_{\text{collider}} > 1 \text{ fb}$ для масс $> 400 \text{ GeV}$



LHC@14 TeV

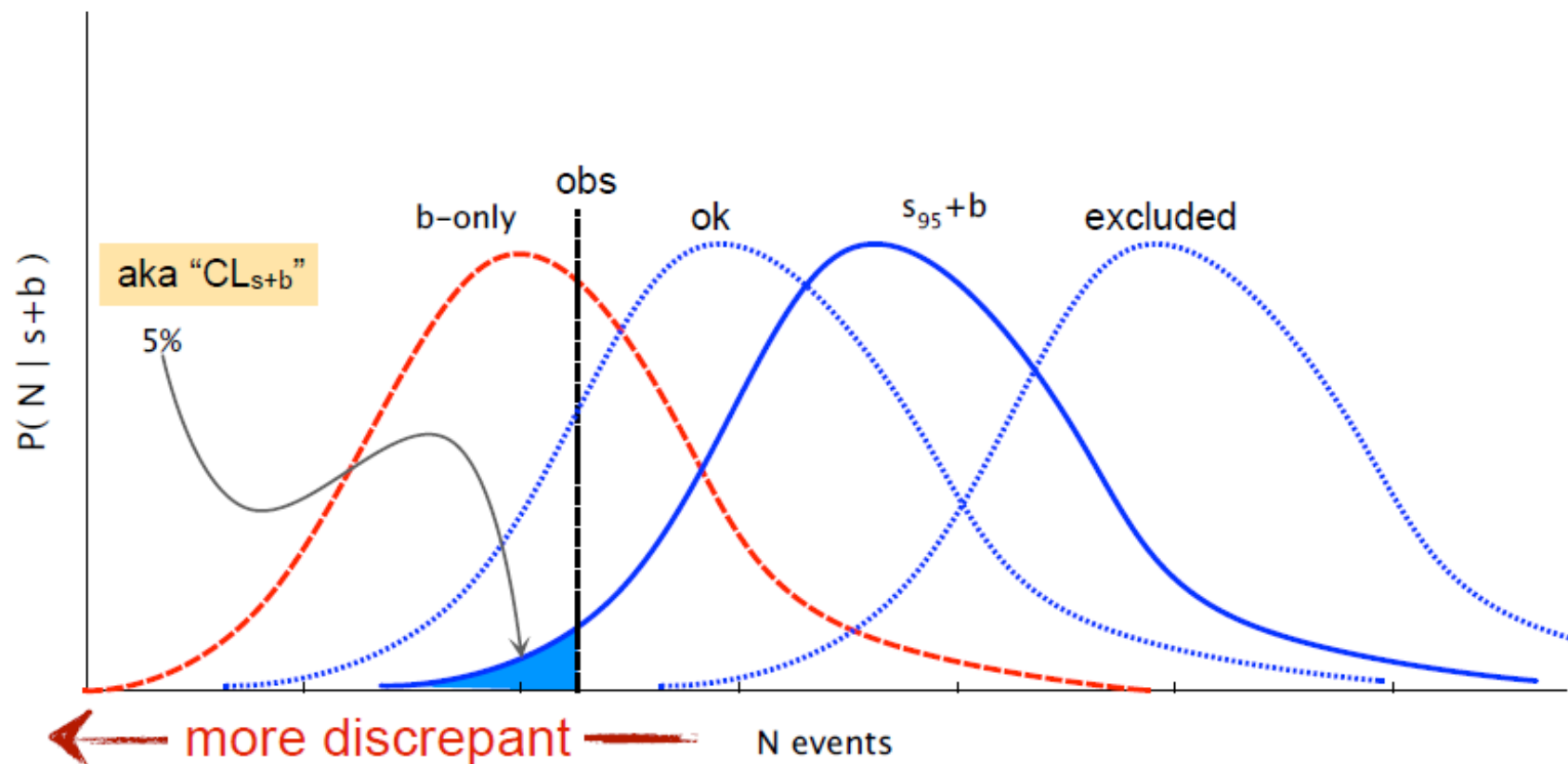


- В 2015 году LHC будет работать при энергии столкновений 14 TeV и до остановки в конце 2017 года ожидается $\sim 100 \text{ fb}^{-1}$
- На рис. представлены ожидаемые пределы

BACKUP

Recall, what we mean by 95% upper-limit

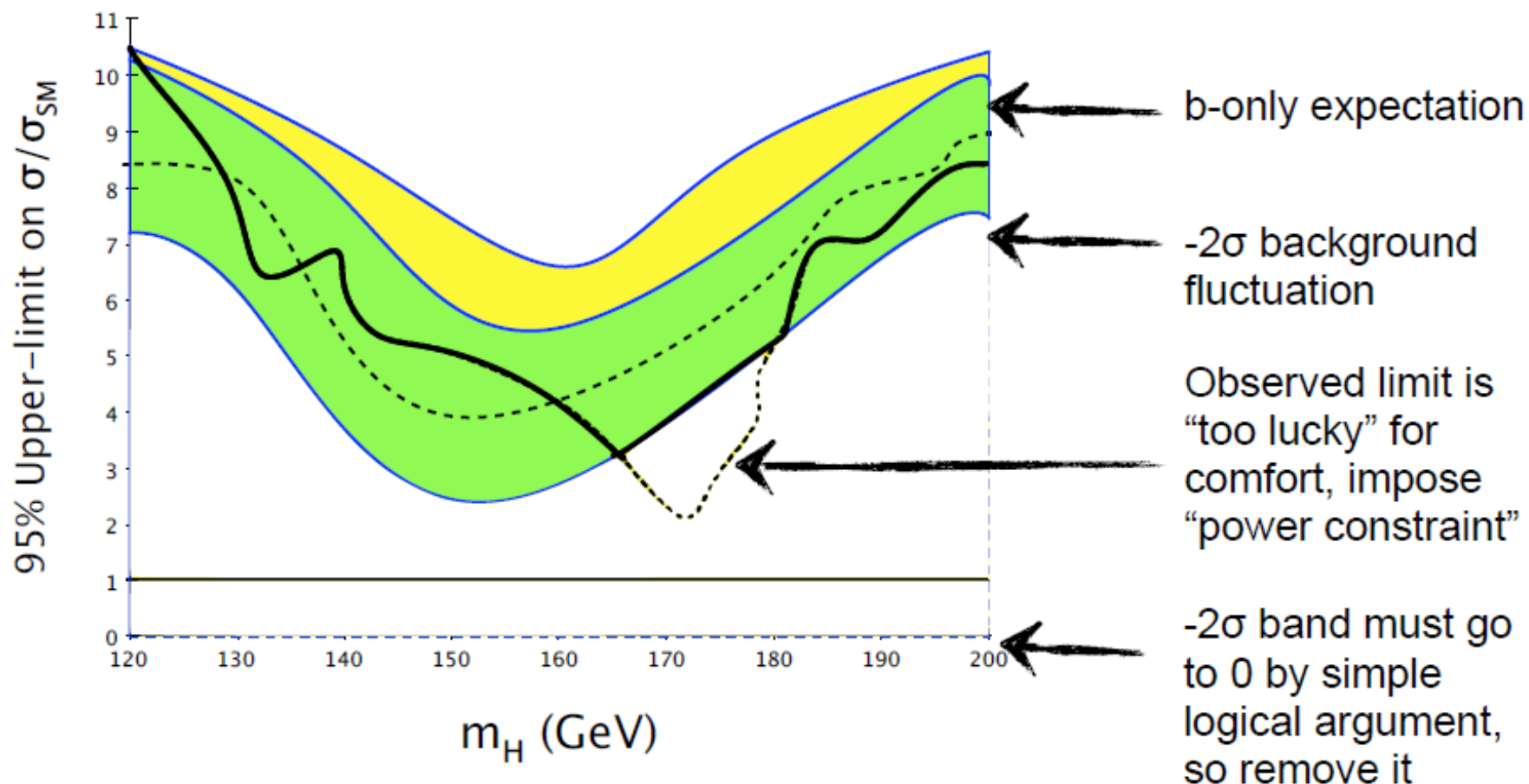
- increase s until tail probability is 5%



The recommended plot looks like the one below

- ▶ We have been using the -1σ band as the power-constraint
 - yes, it's a 16% is a convention... just like 95% is a convention

Focus here is on the importance of the bands



Вычисление предела

- Вероятность обнаружить n событий при предсказании μ

$$\mathcal{L}(n|\mu) = \frac{\mu^n e^{-\mu}}{n!}, \mu = \sum_j N_j = N_{sig} + N_{bkg}, n = N_{data}$$

- Число предсказанных событий может варьироваться из-за неопределённостей

$$\mu = \sum_j N_j \prod_i (1 + G(\theta_{ij}, \delta_{ij}))$$

- Функция правдоподобия вычисляется для каждого бина массового спектра

$$\mathcal{L}(n|N_{ij}, \theta_{ij}) = \prod_k \frac{\mu_k^{n_k} e^{-\mu_k}}{n_k!}$$

- Затем производится интегрирование по всем параметрам за исключением N_{sig}

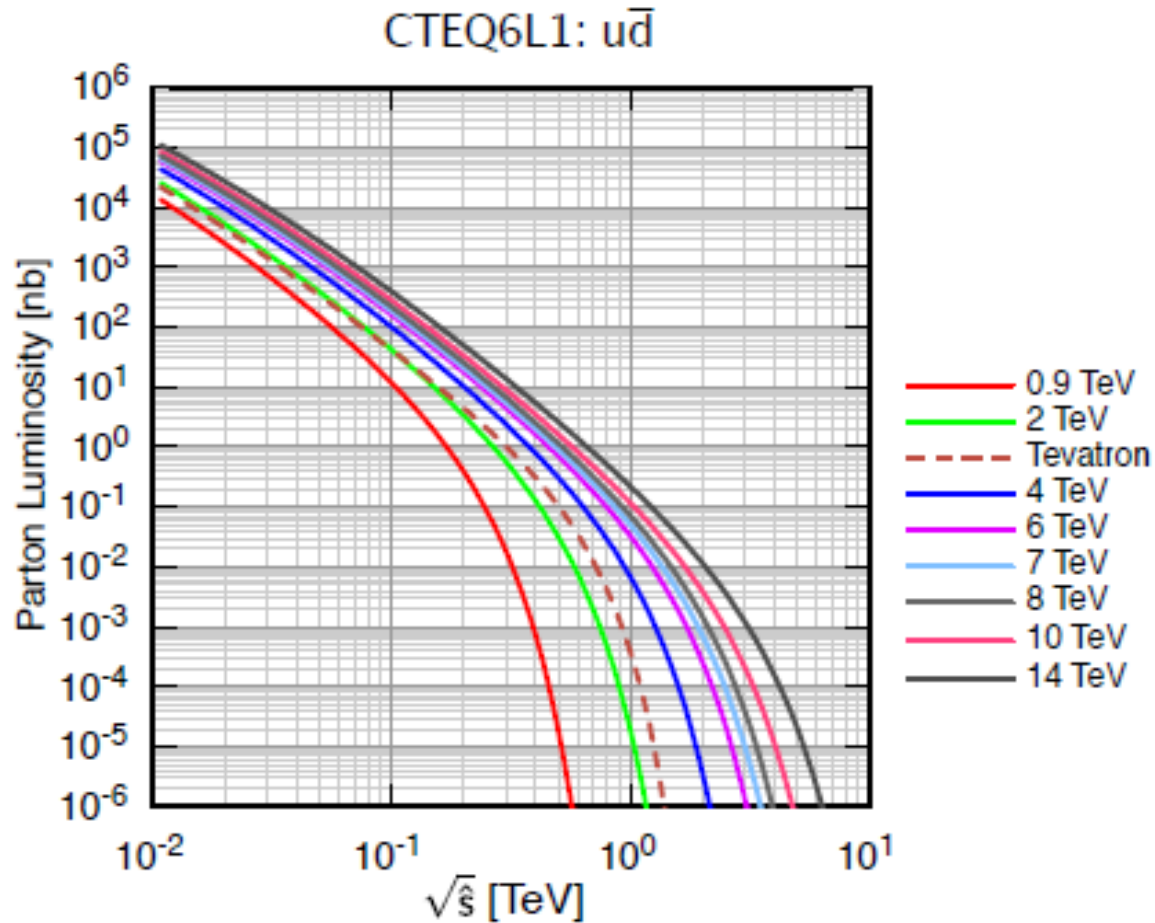
$$\mathcal{L}'(n|N_{sig}) = \int \mathcal{L}(n|N_{sig}, N_{bkg}, \theta_0, \theta_1, \theta_2, \dots) d\theta_0, d\theta_1, d\theta_2, \dots$$

- Переход от числа событий к сечению осуществляется по формуле

$$\sigma_{sig} B = \frac{N_{sig}}{A_{sig}} \frac{N_Z}{A_Z} \sigma_Z B$$

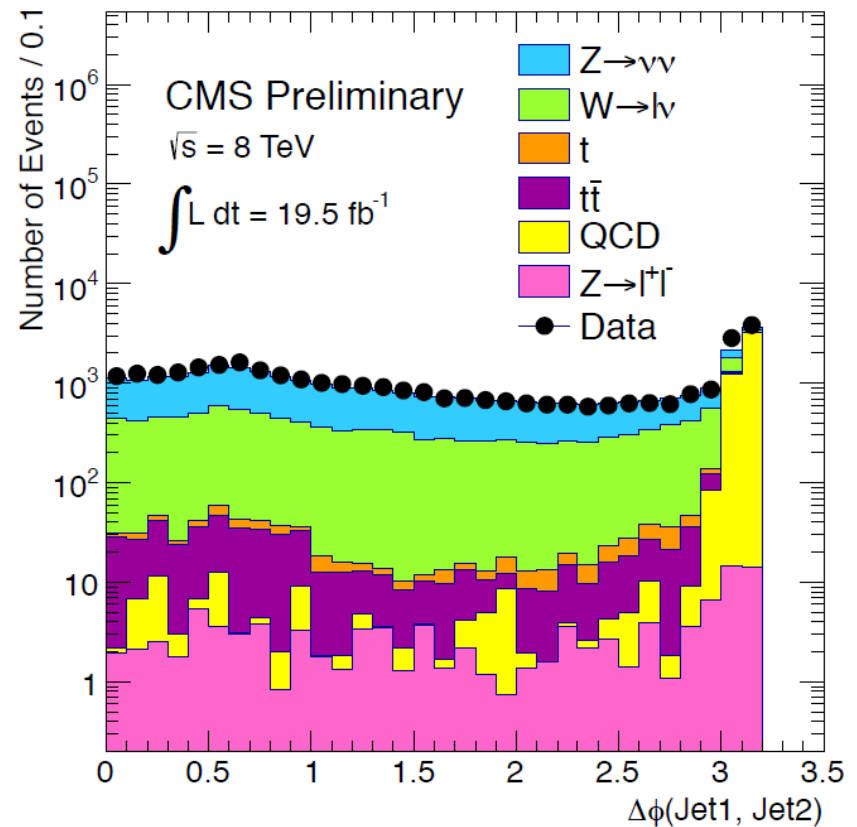
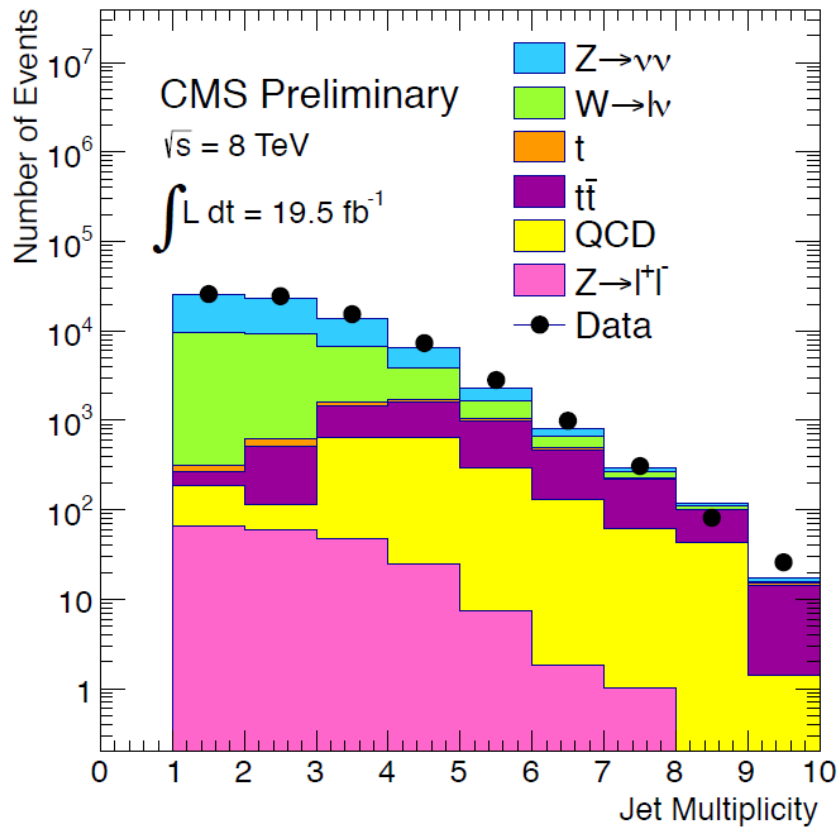
- Все эти вычисления производятся с помощью пакета Bayesian Analysis Toolkit [A. Caldwell, D. Kollar, and K. Kröninger, *BAT - The Bayesian Analysis Toolkit*, Comput. Phys. Commun. 180 (2009) 2197.]

Parton luminosity tail



- Энергия взаимодействия партонов для разных энергий столкновения протонов
- <http://arxiv.org/pdf/1101.3201.pdf>

Mono-jet



Mono-W

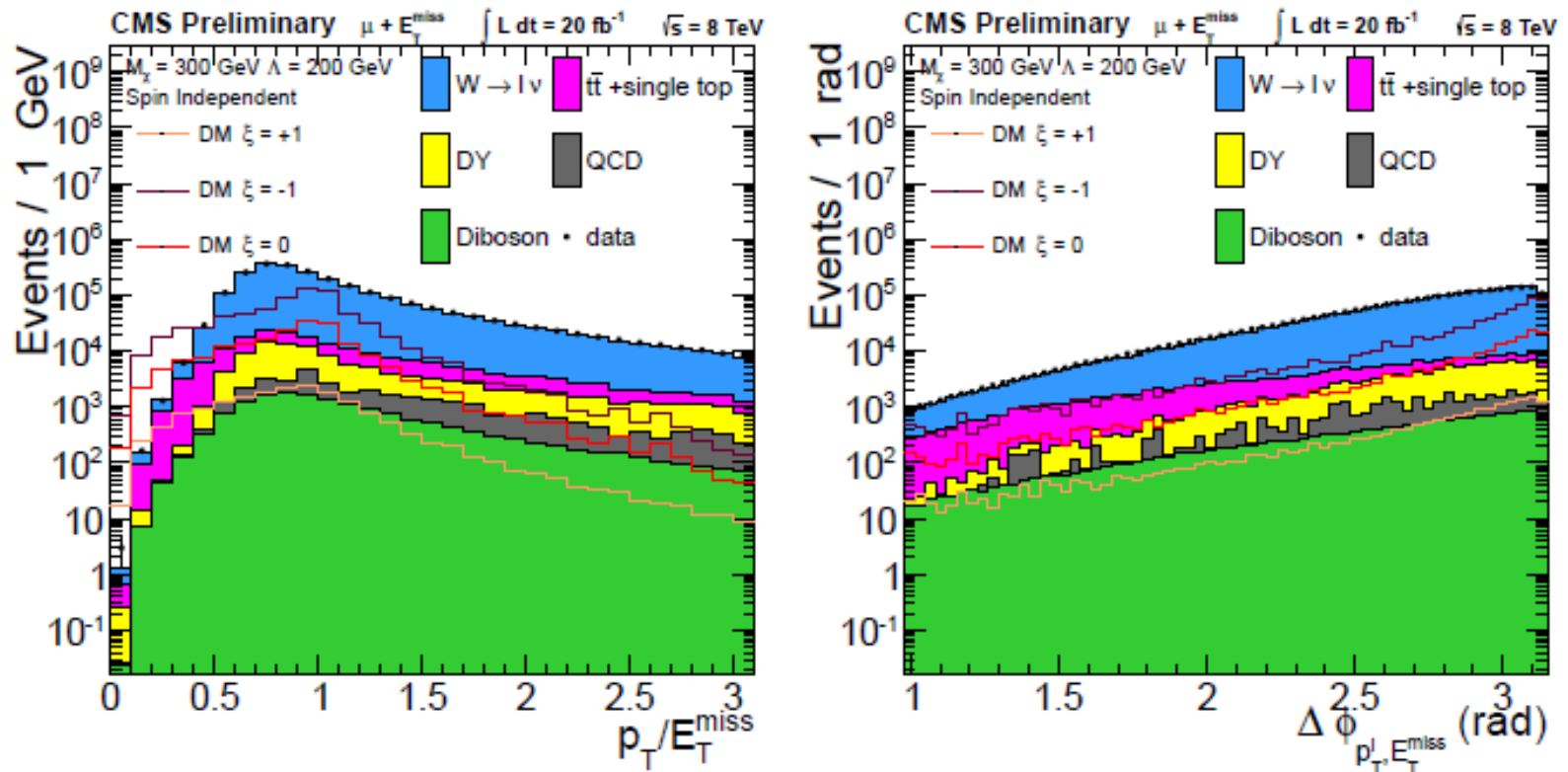


Figure 4: Left: p_T/E_T^{miss} -distribution for the muon channel. Right: $\Delta\phi$ -distribution for the muon channel.

Mono-Z

