

BRACE YOURSELF!
THIS PRESENTATION HAS 21 SLIDES

$$e^{+}e^{-} \rightarrow p\bar{p} @CMD3$$

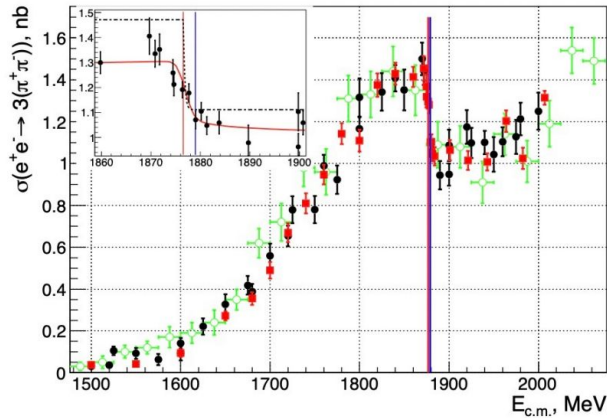
Даниил Иванов

МОТИВАЦИЯ

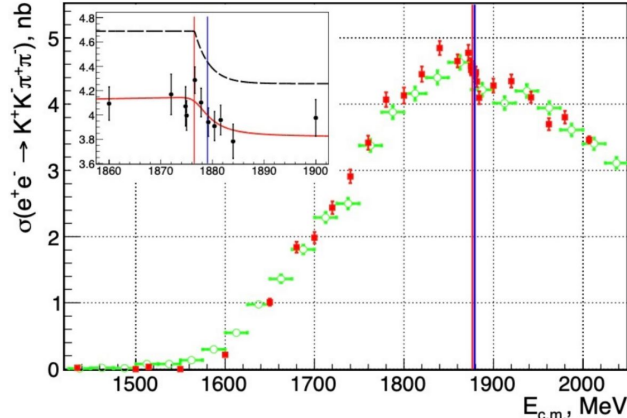
- [1]: [Phys. Lett. B 723 \(2013\) 82-89](#)
[2]: [Phys. Lett. B 794 \(2019\) 64-68](#)
[3]: [Phys. Rev. D 73, 052003](#)
[4]: [Phys. Rev. D 85, 112009](#)

- Сечение NN_{bar} в припороговой области по энергии включает в себе важную информацию о внутренней структуре нуклонов: **электрические и магнитные форм факторы ($\Phi\Phi$) G_E и G_M** .
- Из-за сильного взаимодействия в конечном состоянии зависимость сечения от энергии имеет сложный характер.
- Открытие каналов NN_{bar} влияет на сечения многоадронных процессов, приводя к его резкому падению.

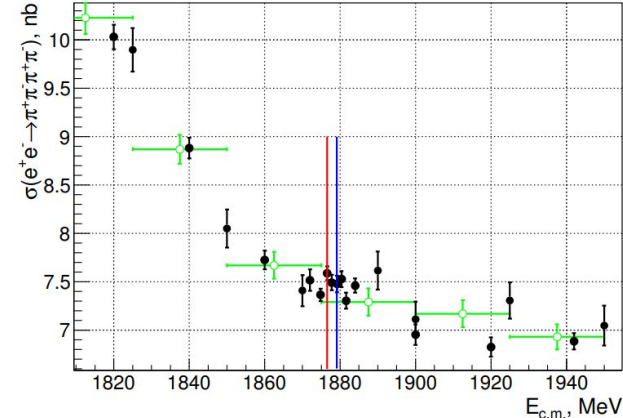
До сих пор **точность** измерения сечения и $\Phi\Phi$ (s-канал) **недостаточна** для построения надёжных теоретических/феноменологических моделей.



The $e^+e^- \rightarrow 3(\pi^+\pi^-)$ Born cross section^[1-3]



The $e^+e^- \rightarrow K^+K^-\pi^+\pi^-$ Born cross section^[2, 3]



The $e^+e^- \rightarrow 2(\pi^+\pi^-)$ Born cross section^[2,4]

МОТИВАЦИЯ

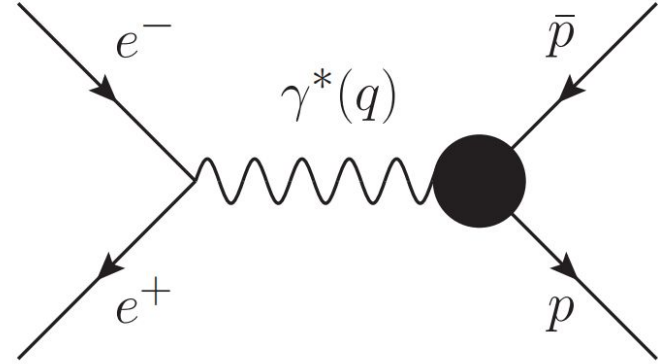
[1]: doi:[10.1103/PhysRevD.87.092005](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.87.092005),

[2]: arXiv:[2102.10337](https://arxiv.org/abs/2102.10337)

[3]: arXiv: [1507.08013](https://arxiv.org/abs/1507.08013) [hep-ex]

Ранее BaBar^[1] и BES III^[2] исследовали данный процесс в области у порога рождения. В их работах использовался ISR подход. Также CMD-3^[3] публиковали результаты, полученные сканированием области до $\sqrt{s} = 2 \text{ GeV}$.

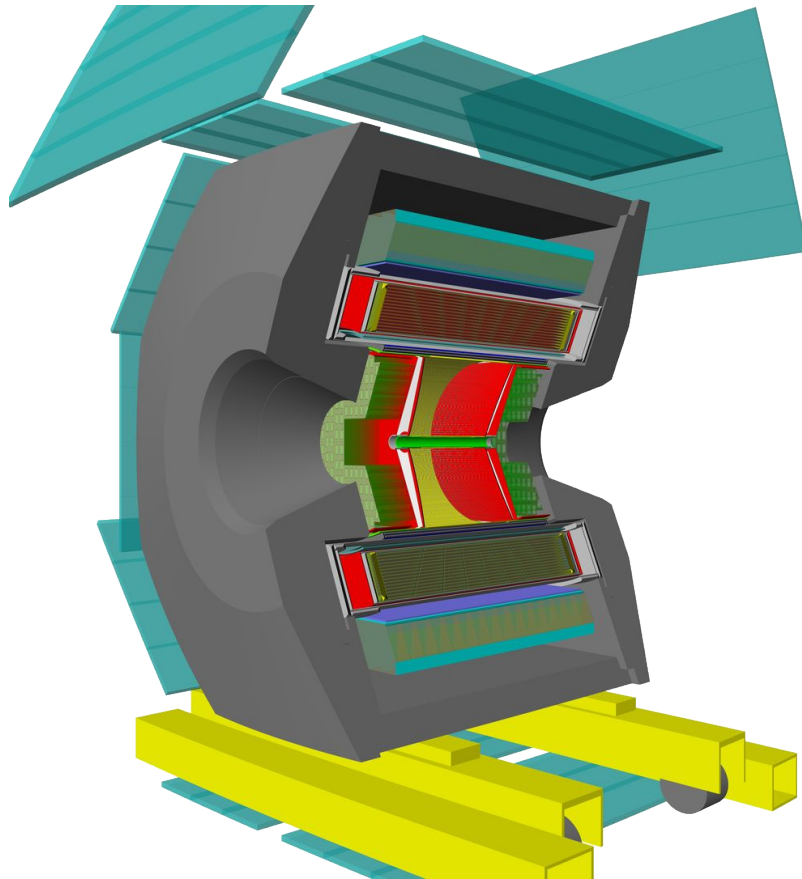
Тем не менее в свете **17-кратного** увеличения статистики, а также **улучшения используемых методов** новое исследования представляет большой интерес.



Experiment	BaBar		BES III (ISR)	CMD-3 (2016)	This work	
Events	2172		1386	2741	46484	
Data-taking Season	2019	2020	2021	2022	Total	Sub Threshold*
$\int \text{Ldt, pb}^{-1}$	14	37	48	136	235	93

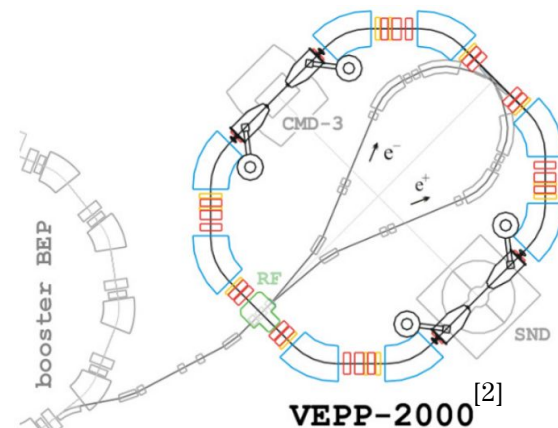
* — $\sqrt{s} = 1.75 - 1.87 \text{ GeV}$

C^[1] M D 3



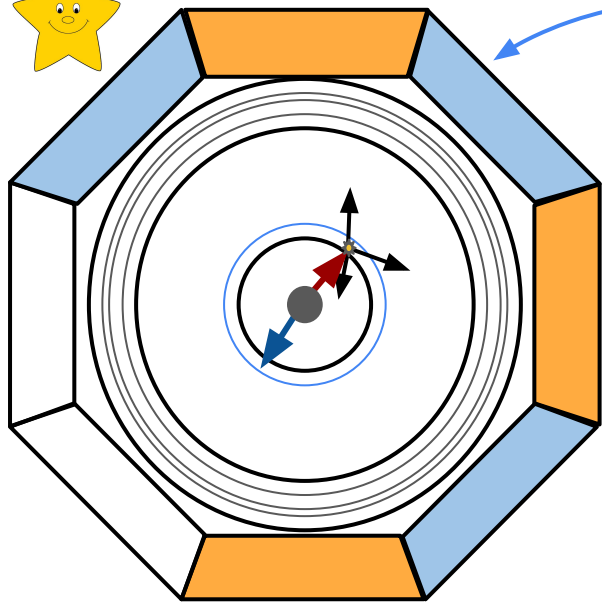
[1]: [Physics and Detectors for VEPP-2000](#)

[2]: [Project of a new electron-positron collider VEPP-2000](#)



- $\sqrt{s} = 0.3 - 2.007 \text{ GeV}$
- Luminosity up to $1 \times 10^{32} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
- Drift Chamber (DC)
 - $\sigma_{R\phi} \sim 100 \mu\text{m}, \sigma_Z \sim 2-3 \text{ mm}$
- EM calorimeters ($13.5 X_0$)
 - Barrel: LXe + CsI
 - End Caps: BGO
- Time of Flight (TOF)
- Muon counters
- Magnetic field 1.0-1.3 T

ДВА ТИПА СОБЫТИЙ

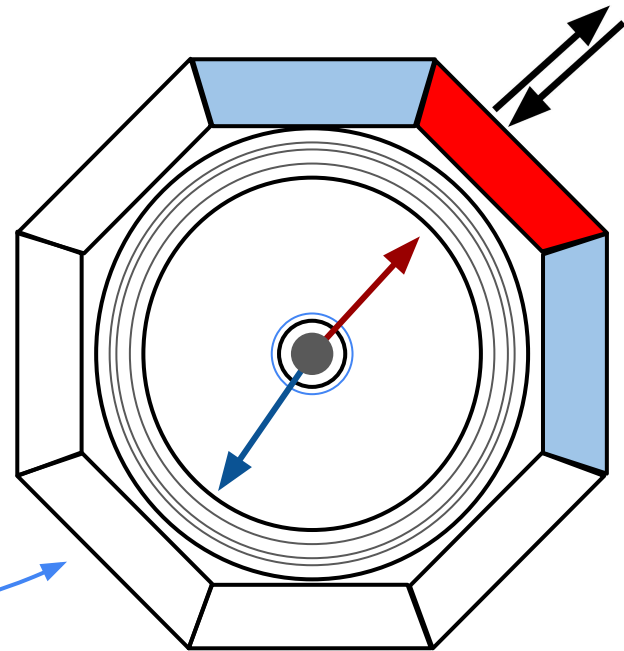


**Аннигиляционные
события**

$$\sqrt{s} \lesssim 1.920^* \text{ GeV}$$

Вблизи порога рождения
антипротоны ещё “мягкие”.
Поэтому они застревают в мёртвом
веществе до DC и **аннигилируют**.

На более высоких энергиях
нуклоны выходят в чувствительный
объём DC и дают два
коллинеарных трека.



**Коллинеарные
события**

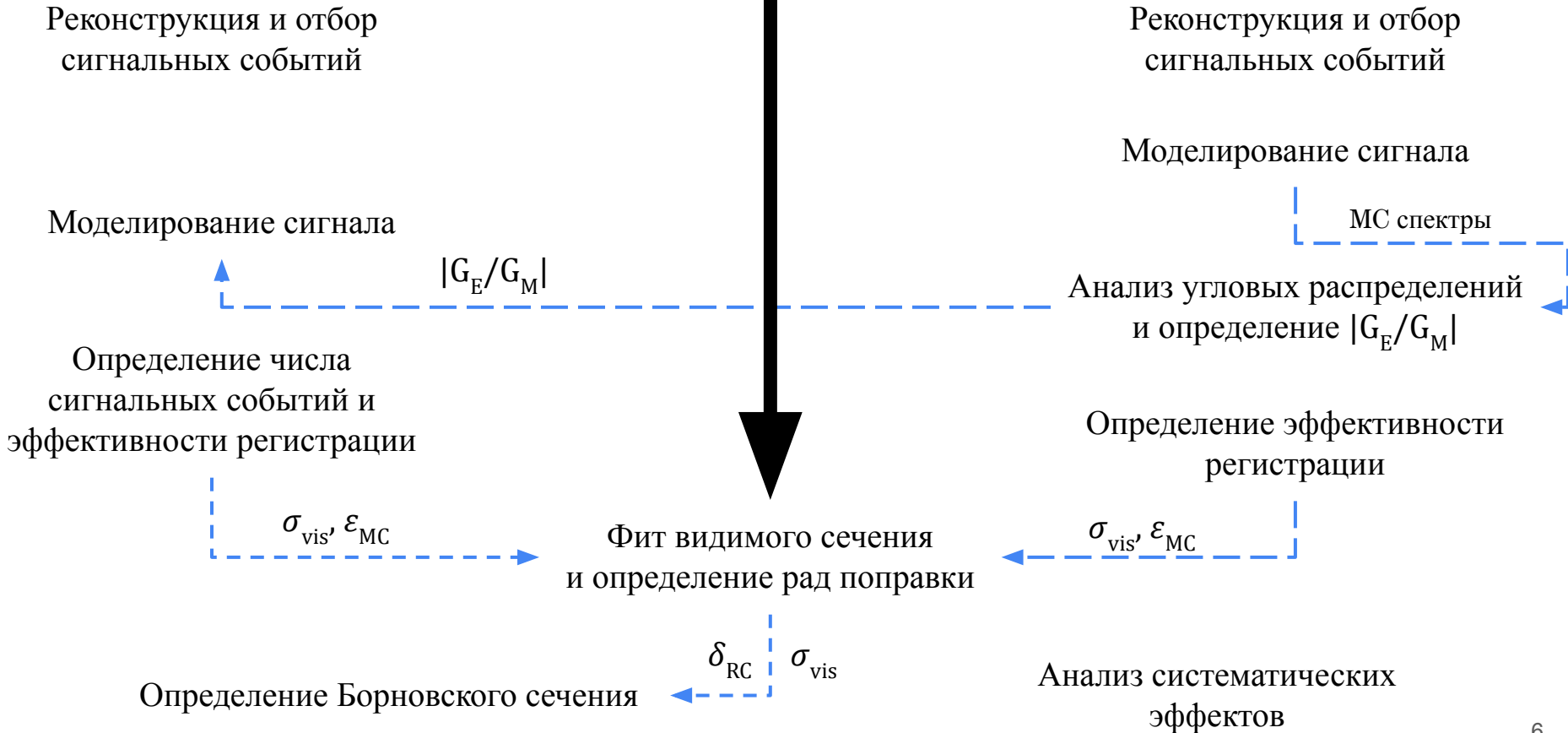
$$\sqrt{s} \gtrsim 1.906 \text{ GeV}$$

Подход к этим типам
событий в многом **разный**

* — На самом деле во всём диапазоне энергий.



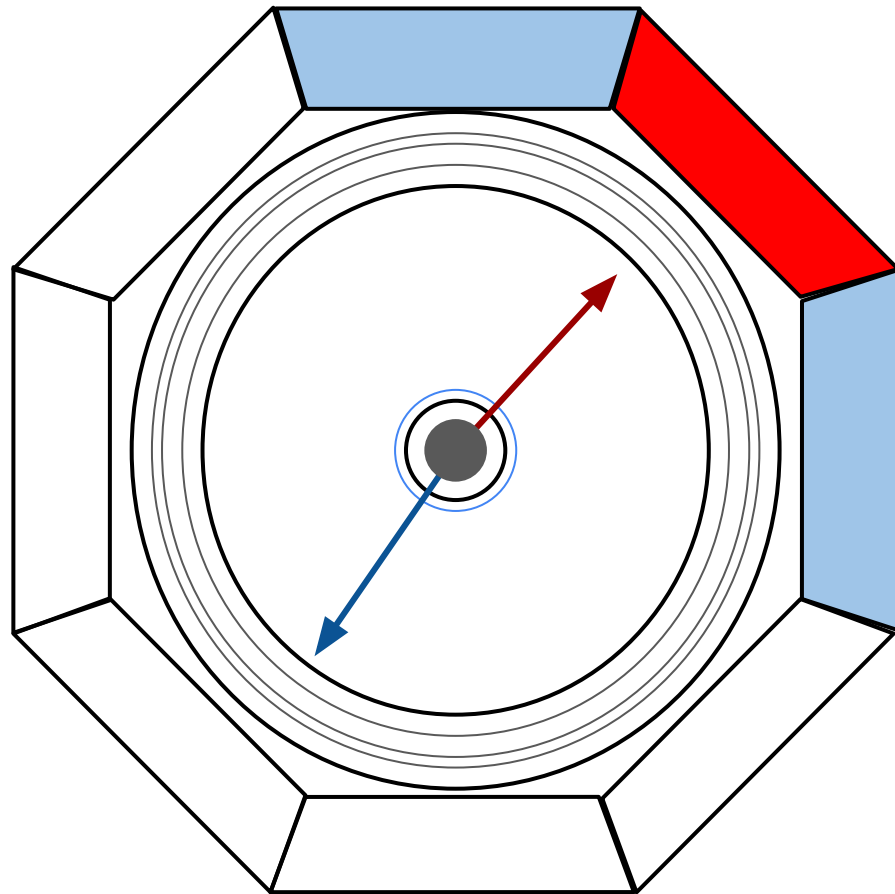
WORKFLOW





Коллинеарные события

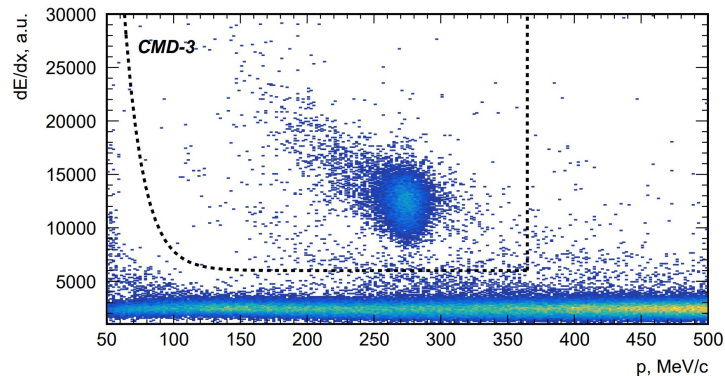
1. Отбор сигнальных
событий
2. Анализ угловых
распределений
3. Эффективность
реконструкции трека
4. Фит видимого сечения*





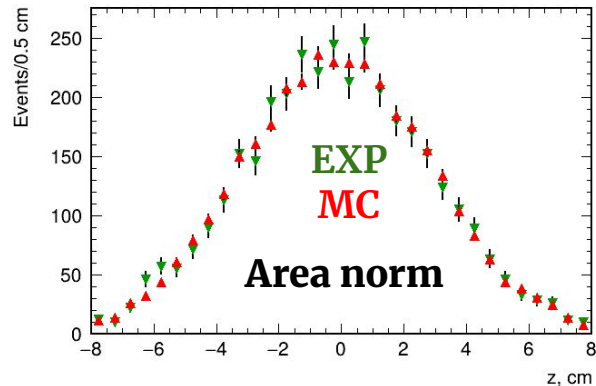
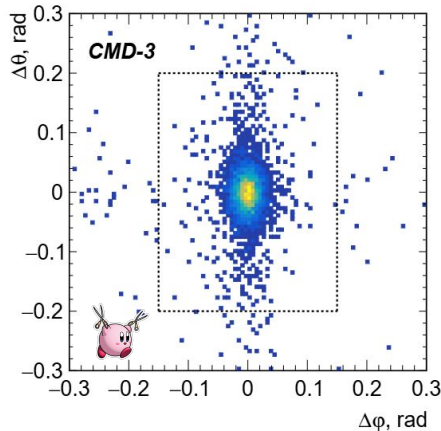
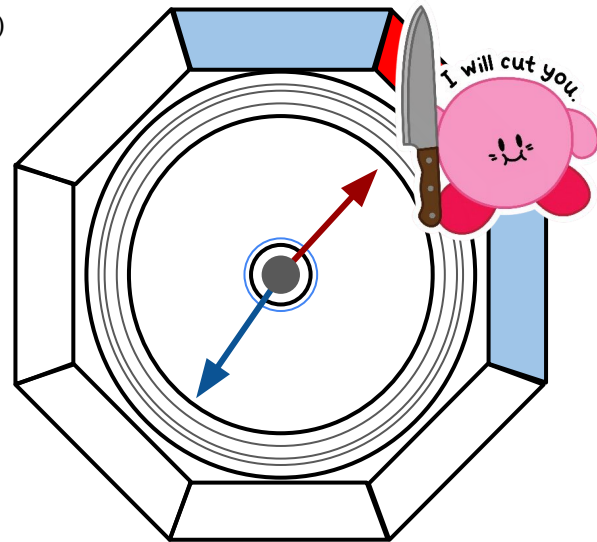
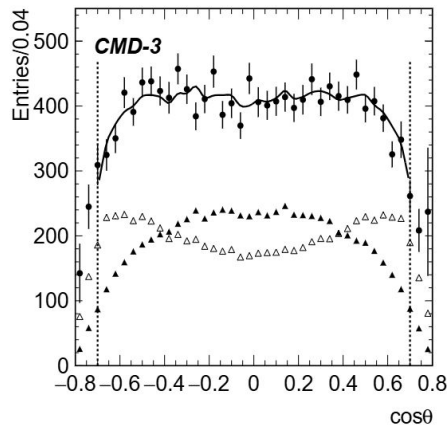
Отбор сигнальных событий

1. Есть 2 трека
2. У каждого трека $\chi^2_{r-\phi} < 15$, $\chi^2_z < 10$
3. $|\cos(\theta)| < 0.7$
4. $\rho_{\text{vertex}} < 1 \text{ cm}$ и $|z_{\text{PCA}}| < 8 \text{ cm}$
5. Энерговыделение $E_{\text{cal}} > 200 \text{ MeV}$
6. $\Delta\phi = ||\phi_+ - \phi_-| - \pi| < 0.15 \text{ rad}$
7. $\Delta\theta = |\theta_+ + \theta_- - \pi| < 0.2 \text{ rad}$
8. dE/dx_{track} соответствует протону
9. $P < 1.3 \times P_{\text{nominal}}$



Нет фона (subThrs + hadron MC test)

$$N_{\text{sig}} \equiv N_{\text{selected}}$$

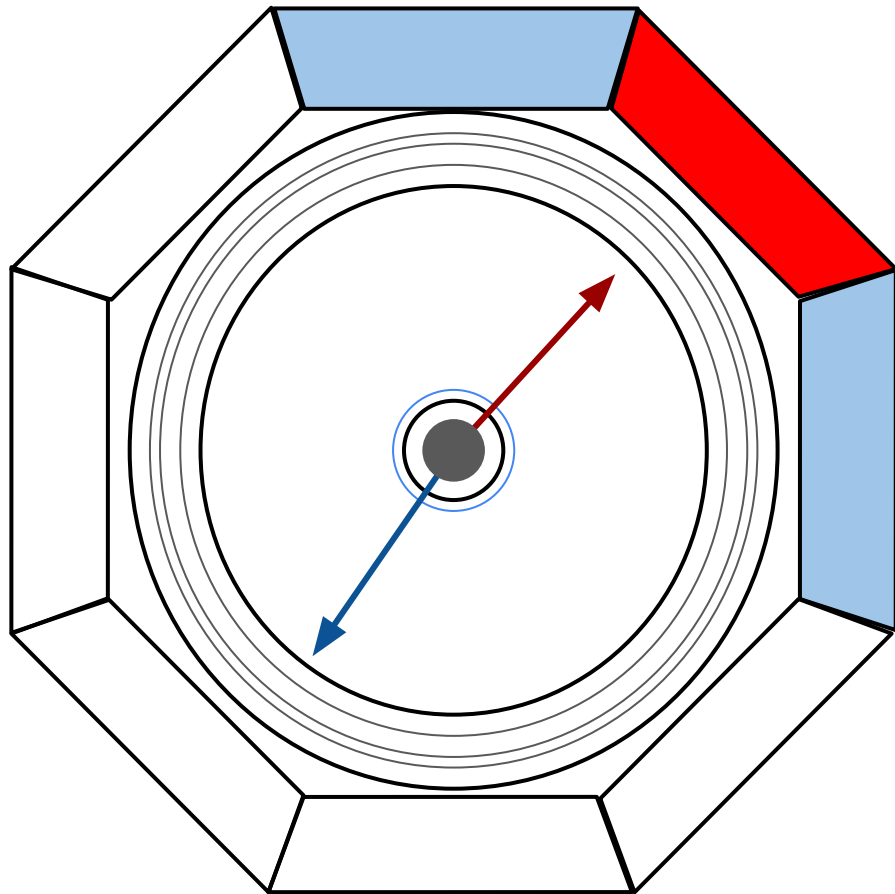


0.4% систематическая
неопределенность



Коллинеарные события

1. Отбор сигнальных событий
2. Анализ угловых распределений
3. Эффективность реконструкции трека
4. Фит видимого сечения*



Эффективность/EM FFs

NB: Эффективность регистрации **зависит** от $|G_E/G_M|$.

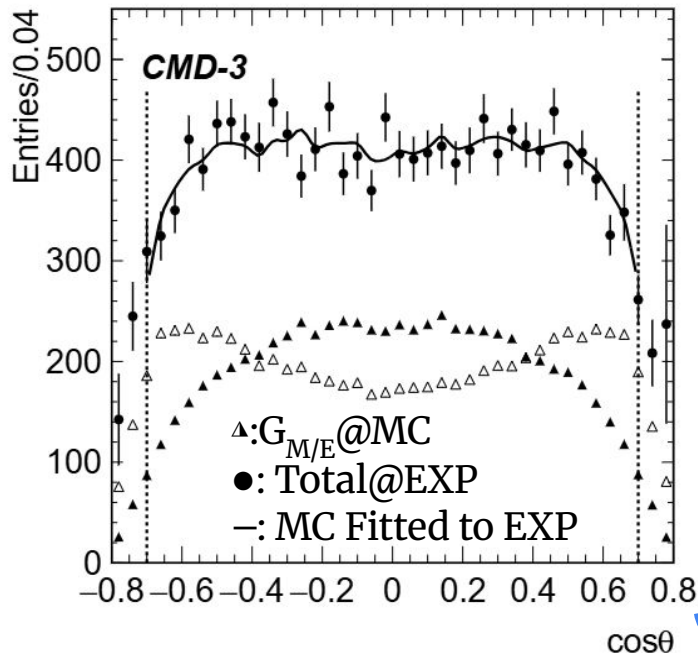
$$\frac{dN}{d \cos \theta} \propto \left[D_M(\theta) + \frac{4M_p^2}{s} \left| \frac{G_E(s)}{G_M(s)} \right|^2 D_E(\theta) \right]$$

$$\begin{cases} D_E = \sin^2 \theta \\ D_M = 1 + \cos^2 \theta \end{cases}$$

**data-MC отличие
учтено**

$|G_E/G_M|$ *извлекается из фита* угловых распределений.

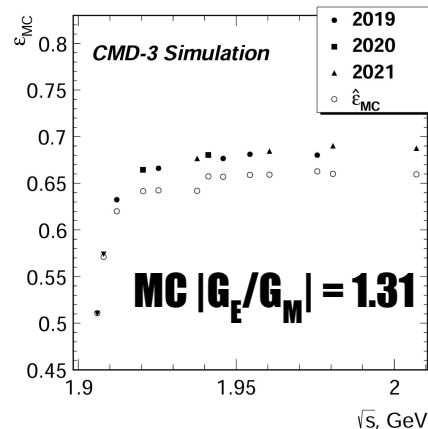
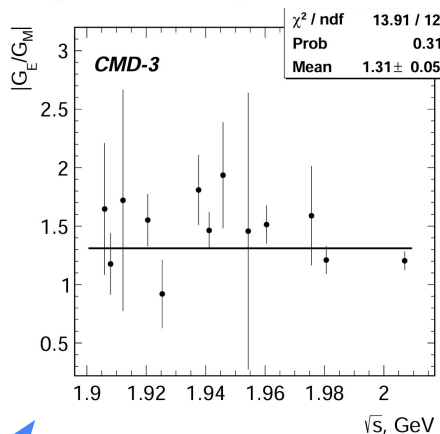
HIGH2021: 1003.5_103608



Отборы

- ⊕ диапазон фита
- ⊕ track reso эффективность

$$|G_E/G_M| = 1.31 \pm 0.05_{(\text{stat.})} \pm 0.09_{(\text{syst.})}$$

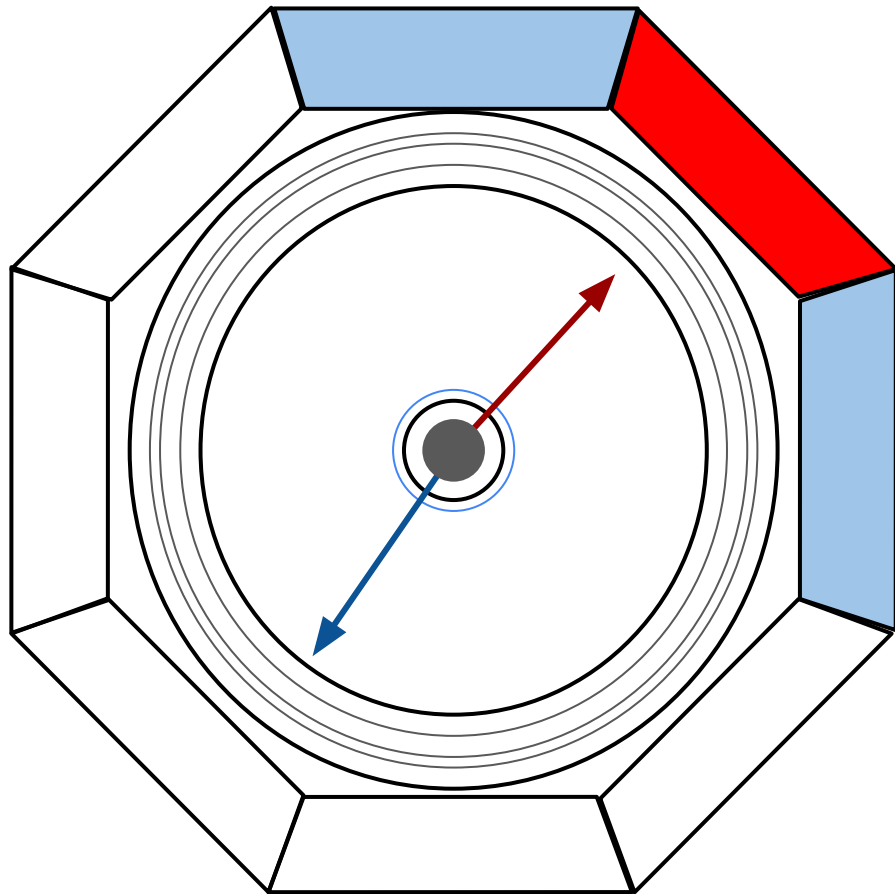


2.2% систематическая
неопределенность



Коллинеарные события

1. Отбор сигнальных событий
2. Анализ угловых распределений
3. Эффективность
реконструкции трека
4. Фит видимого сечения*



Эффективность

реконструкции трека

Tag антипротон:

- 0) Не более двух “центральных” треков
 $\rho_{PCA} < 3 \text{ cm}$
- 1) Трек с $\rho_{PCA} < 0.2 \text{ cm}$, $|z_{PCA}| < 4 \text{ cm}$,
хорошим $\chi^2_{r-\phi}$ и χ^2_z , и $q < 0$
- 2) dE/dx_{track} соответствует
антипротонам.
- 3) Импульс лежит P не далее 3σ от
среднего P_{mean} для точки по энергии
- 4) Энерговыделение $E_{\text{cal}} > 200 \text{ MeV}$

И **probe** протон:

- 1) Такие же отборы, но $|z_{PCA}| < 6 \text{ cm}$ и $q > 0$
- 2) Коллинеарен tag антипротону $\Delta\phi < 0.15 \text{ rad}$
and $\Delta\theta < 0.2 \text{ rad}$

$$\varepsilon(\theta) = \frac{N(p|\bar{p})}{N(\bar{p})} \delta_{\text{track}} = \frac{\varepsilon_{\text{track}}^{(\text{EXP})}}{\varepsilon_{\text{track}}^{(\text{MC})}}$$

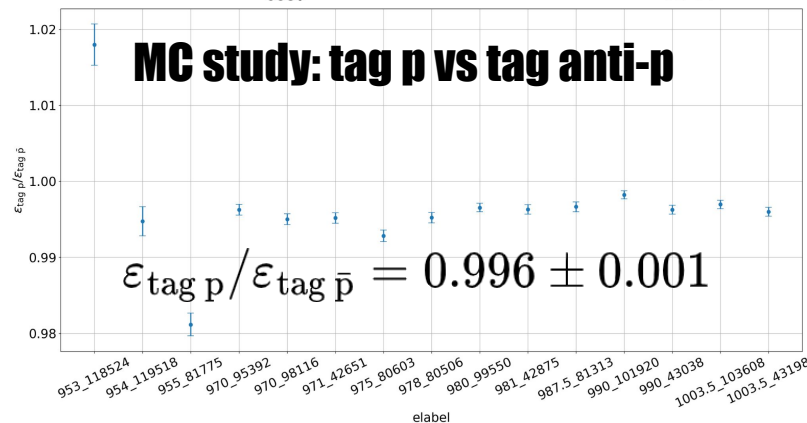
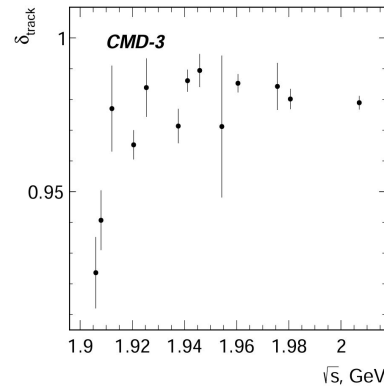
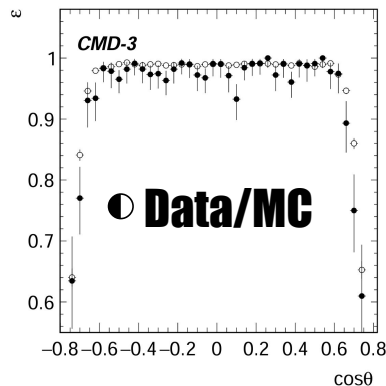
$$D_{E,M}^{\text{EXP}} \text{ corrected}(\theta) = D_{E,M}^{\text{EXP}}(\theta) \delta_p \delta_{\bar{p}}$$

$$\varepsilon_{\text{MC}}^{(\text{corrected})} = \varepsilon_{\text{MC}} \delta_{\text{track}}^2 \quad 2\% \text{ систематическая неопределенность}$$

data-MC отличие
учтено

$$\frac{dN}{d\cos\theta} \propto \left[D_M(\theta) + \frac{4M_p^2}{s} \left| \frac{G_E(s)}{G_M(s)} \right|^2 D_E(\theta) \right]$$

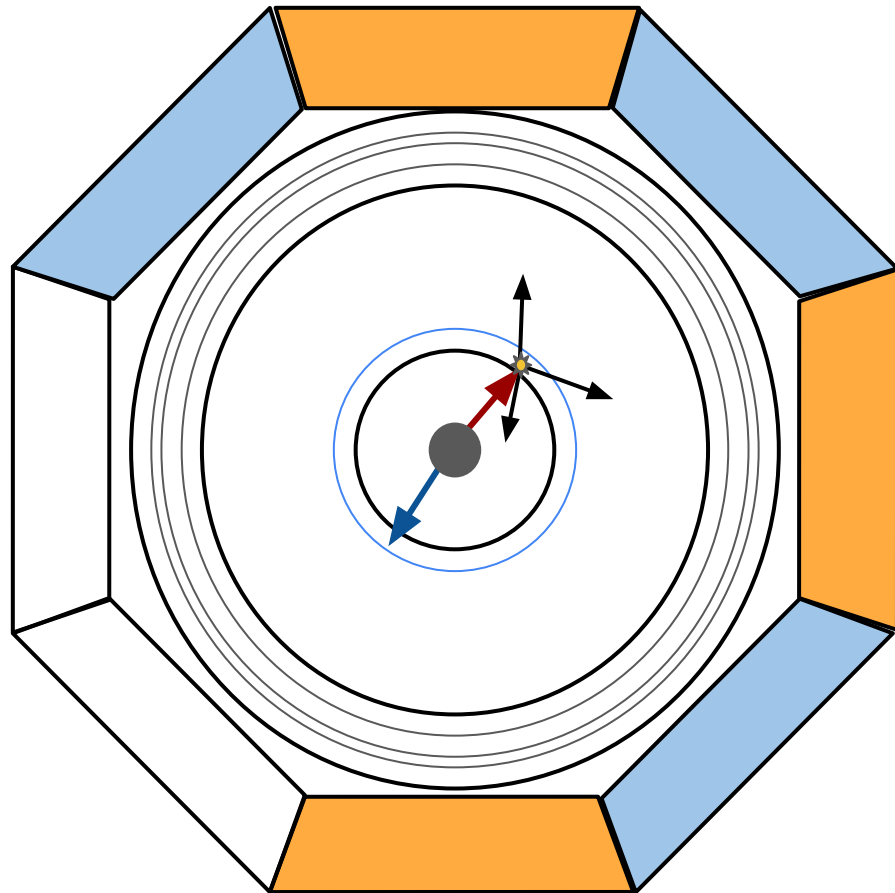
$$\begin{cases} D_E = \sin^2 \theta \\ D_M = 1 + \cos^2 \theta \end{cases}$$





Аннигиляционные события

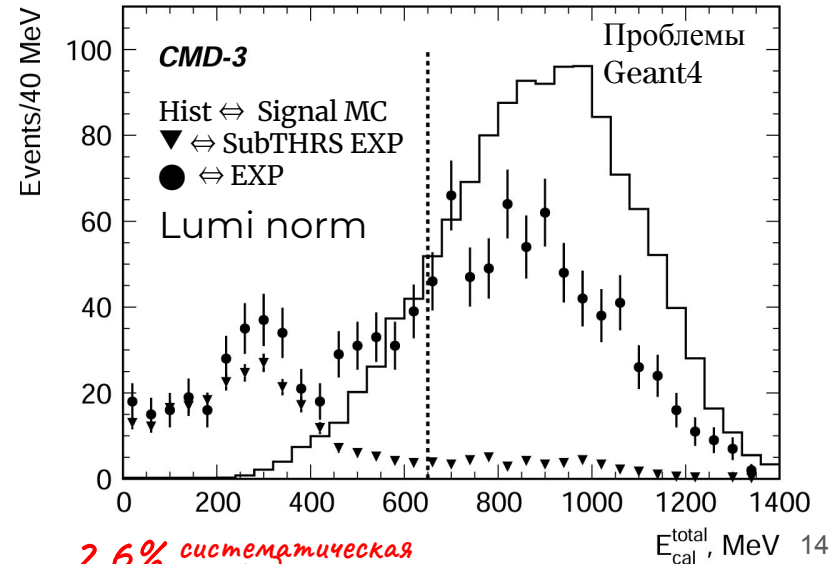
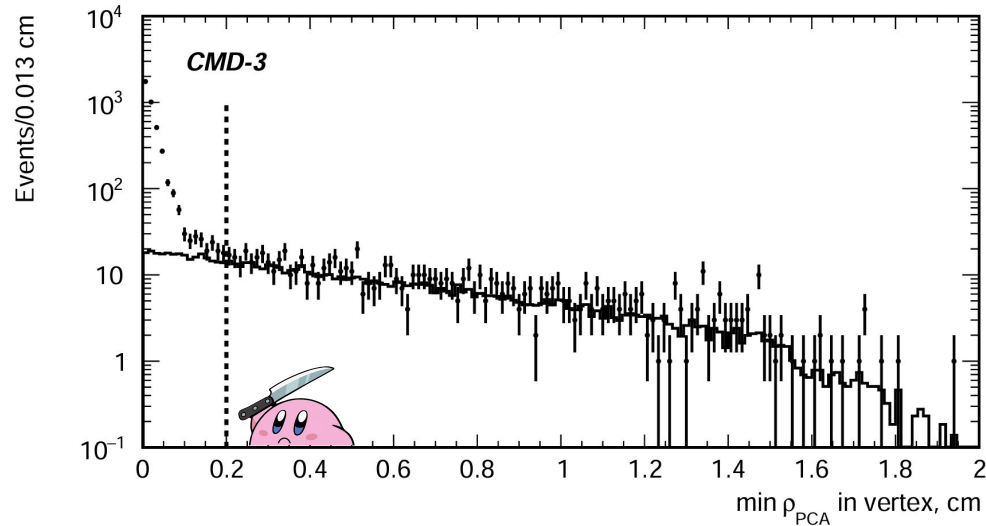
1. Отбор сигнальных
событий
2. Определение числа
сигнальных событий
3. Эффективность
регистрации
4. Фит видимого сечения*



Отбор сигнальных событий

1. Энерговыделение для каждого трекового кластера < 400 MeV,
2. Есть вершина с как минимум 3 треками с $\rho_{PCA} > 0.2$ cm,
3. В вершине нет вторичных протонов,
4. Полное энерговыделение $E_{tot} > 500$ MeV
5. Минимальный импульс треков $p_{min} > 50$ MeV
6. В вершине нет пар коллинеарных треков

Производится
вершинный фит^[1]

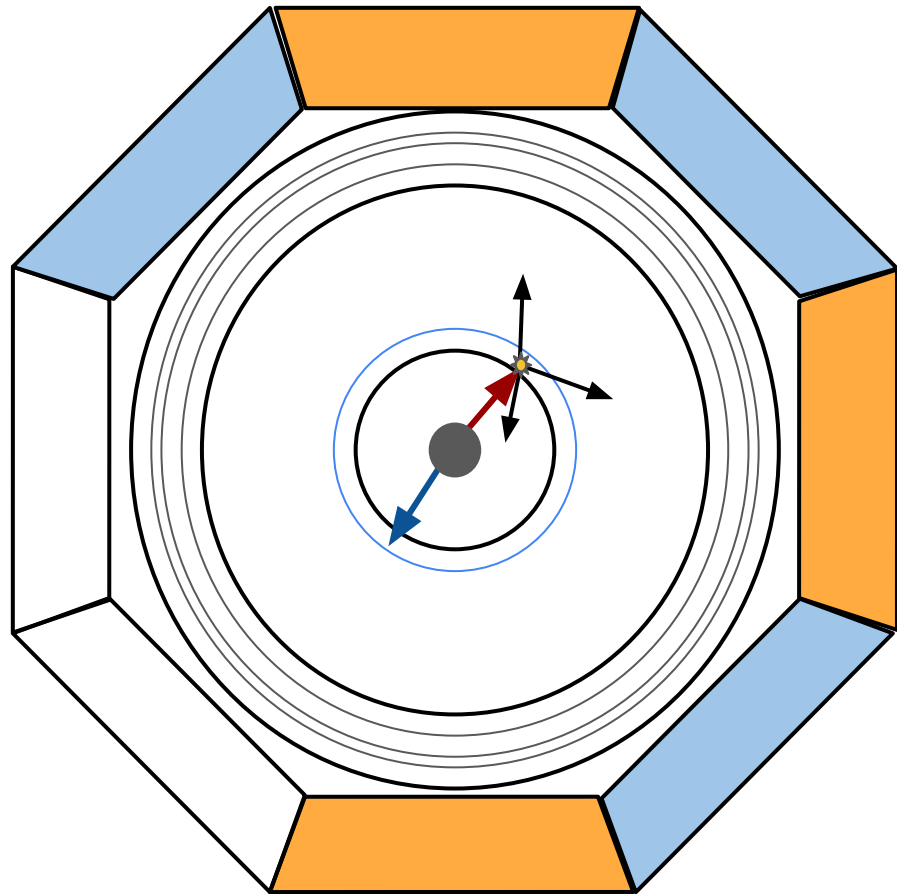


2.6% систематическая
неопределенность



Аннигиляционные события

1. Отбор сигнальных событий
2. Определение числа
сигнальных событий
3. Эффективность
регистрации
4. Фит видимого сечения*





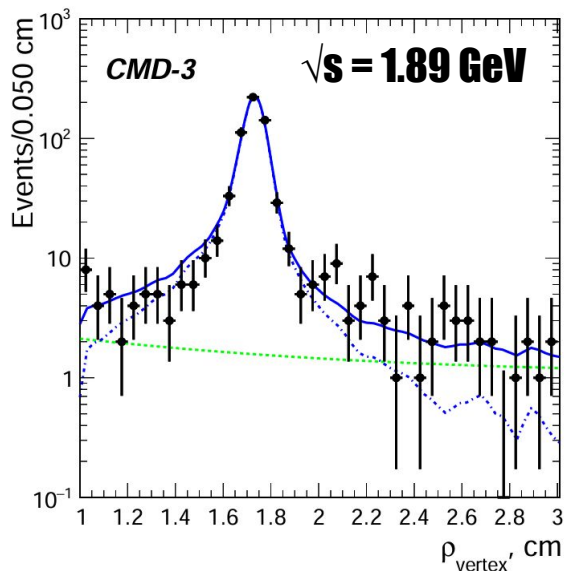
Определение числа сигнальных событий

Число сигнальных событий извлекается из фита
распределения отлёта вершины ρ_{vertex} :
 $\text{sig}(\text{MC}) + \text{bkg}(\text{expo} + \text{pol0}) \rightarrow \text{data}$.

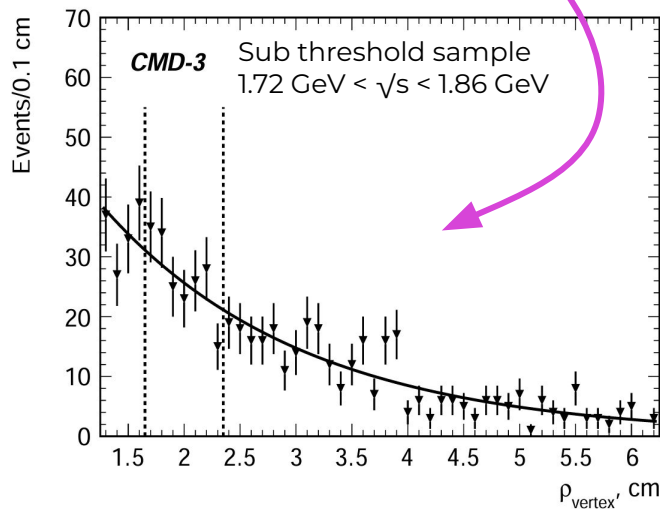
MC спектры получены с $|G_E/G_M| = 1.31$.

Значение $|G_E/G_M|$:

*1.5% систематическая
неопределенность*

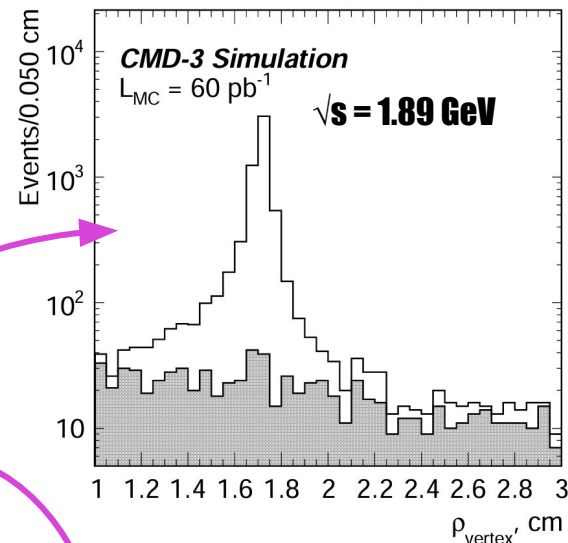


Распределение для
фоновых событий

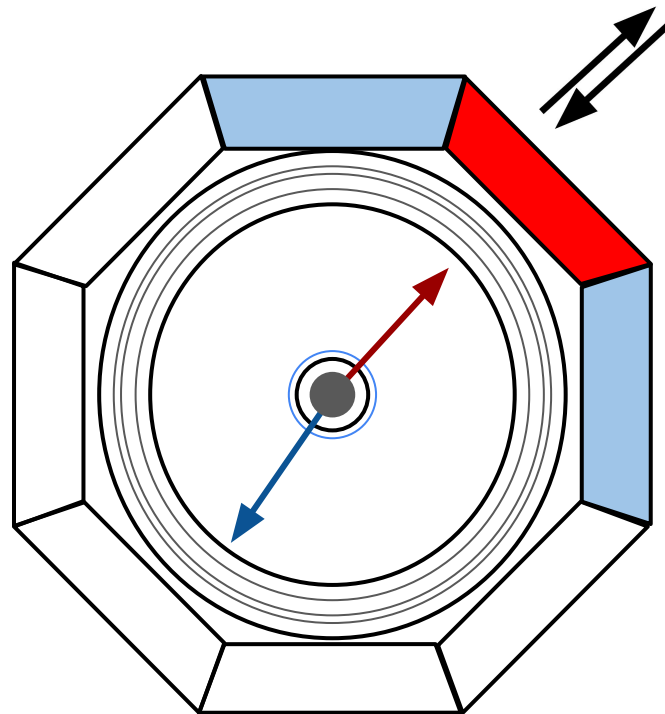
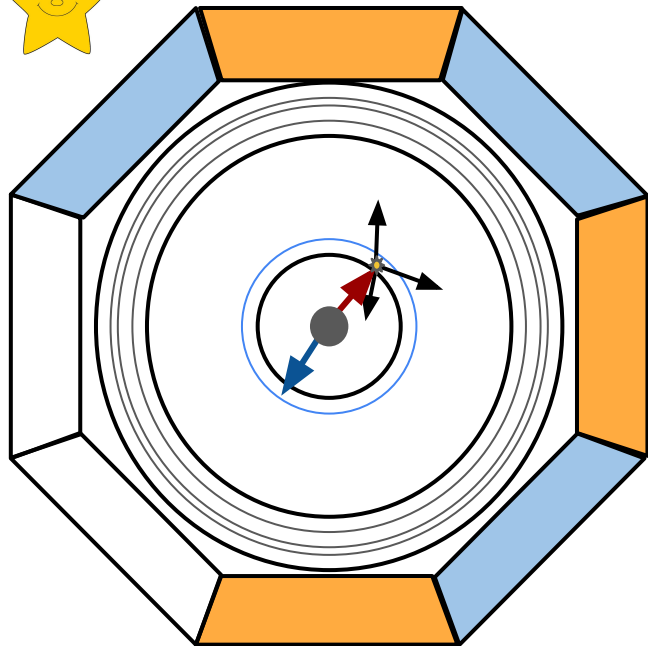


Модель фона:

*1% систематическая
неопределенность*



ФИТ ВИДИМОГО СЕЧЕНИЯ*



* — будет сейчас

$$\sigma_{\text{vis}} = N_{\text{sig}}/L \Rightarrow \text{Fitting Magic}^{[1]} \Rightarrow \sigma_{\text{Born}}$$

[1]: [arXiv:2108.07539](https://arxiv.org/abs/2108.07539) [hep-ex]

$$\sigma_{\text{vis}}^{\text{model}}(s) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_E^2(s)}} \int_{-\infty}^{+\infty} \exp\left(-\frac{(\sqrt{\hat{s}} - \sqrt{s})^2}{2\sigma_E^2(s)}\right) \times \\ \int_0^{1-s_T/\hat{s}} F(x, \sqrt{\hat{s}}) \varepsilon_{\text{MC}}(s \times (1-x)) \sigma_{\text{Born}}^{\text{model}}(\sqrt{\hat{s}}(1-x)) dx d\sqrt{\hat{s}}$$

Ошибки определяются
методом переноса
ошибок

$$\sigma_{\text{Born}}^i = \frac{\sigma_{\text{vis}}^i}{1 + \delta(s^i)},$$

$$1 + \delta^i(s) = \frac{\sigma_{\text{vis}}^{\text{model}}(s)}{\sigma_{\text{Born}}^{\text{model}}(s)},$$

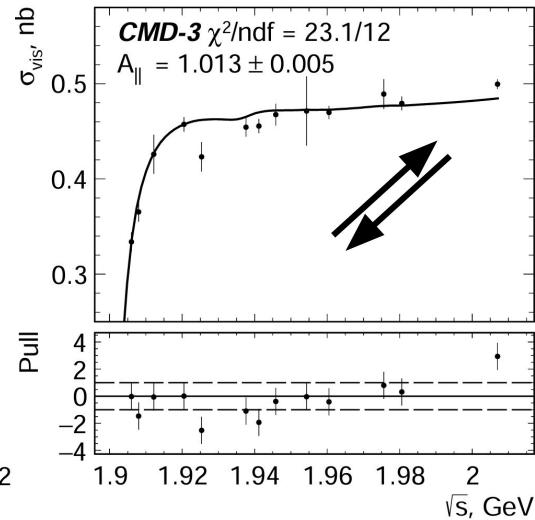
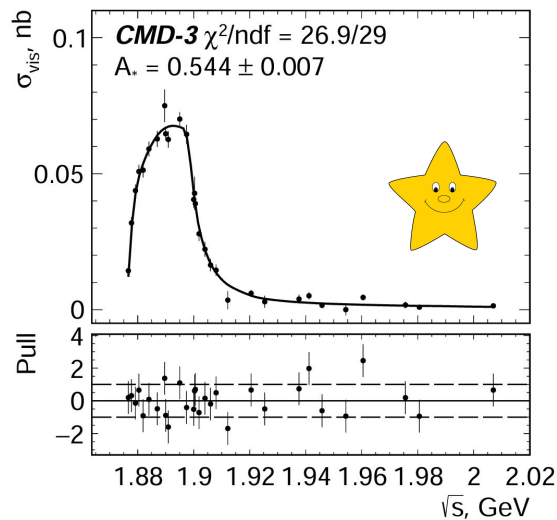
Модель Борновского сечения: Milstein-Salnikov 2018

систематическая неопределенность:

Светимость ~ 1%

Рад поправка ~ 0.2%

Модель Борновского сечения 0.5-2%



Поправка на неправильность моделирования
взаимодействия антипротон-вещество

$$k = A_*/A_{||} = 0.537 \pm 0.007,$$

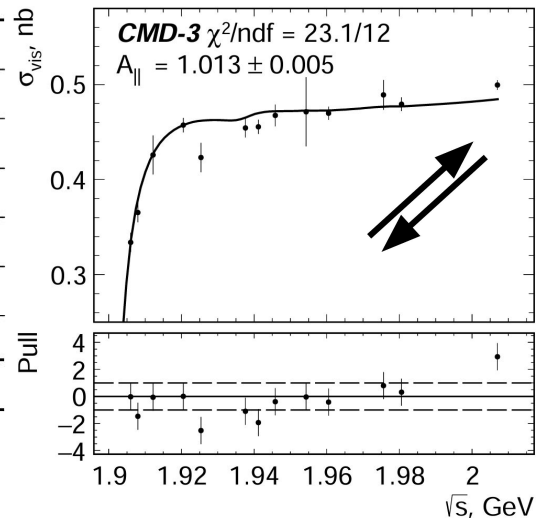
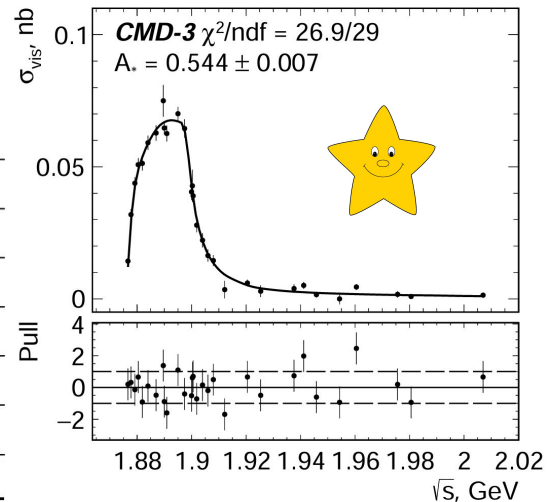
$$\sigma_{\text{Born}} = \tilde{\sigma}_{\text{Born}}/k,$$

Аннигиляционные события

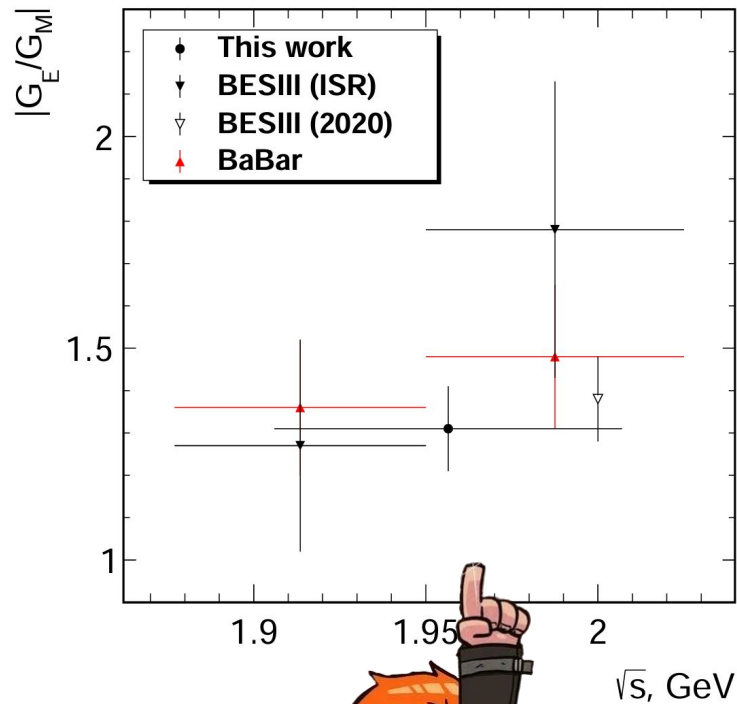
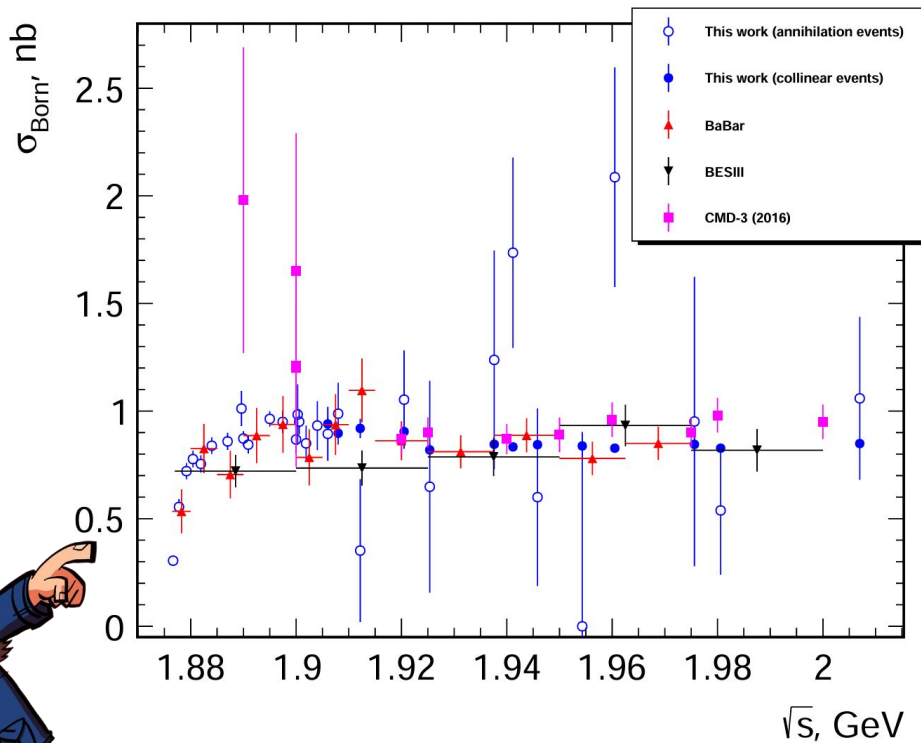
Отбор на полное энергосвечение	2.6%
Остальные условия отбора	0.5%
Число сигнальных событий	1%
Светимость	1%
ISR	0.2%
$ G_E/G_M $	1.5%
Модель Борновского сечения	2%
Суммарно	3.9%

Коллинеарные события

Условия отбора	0.4%
$ G_E/G_M $	2.2%
Светимость	1%
ISR	0.2%
Реконструкция трека	2%
Модель Борновского сечения	0.5%
Суммарно	3.2%



Сравнение Результатов



РЕЗУЛЬТАТЫ

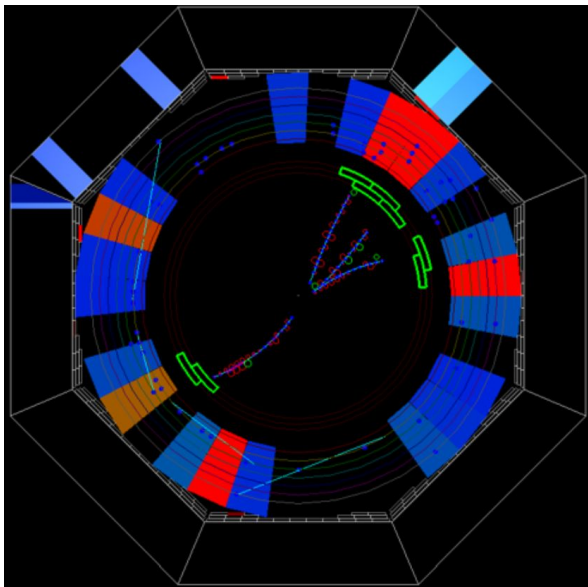
- Разработана/улучшена процедура реконструкции и отбора сигнальных событий
- Измерено отношение электрического и магнитного ФФ $|G_E/G_M|$ протона в зависимости от энергии
- Измерено сечение процесса $e^+e^- \rightarrow p\bar{p}$ в диапазоне от порога рождения до $\sqrt{s} = 2.007 \text{ GeV}$
- Полученная точность превосходит ранее полученных результатов

*Необходимо улучшение
трекинговой системы и
больше данных.*



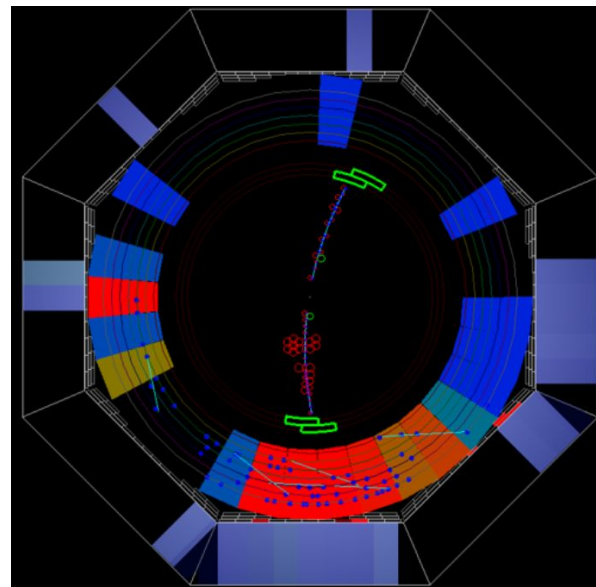
**BACK UP
SLIDES**

CMD-3 Event Display



Annihilation events

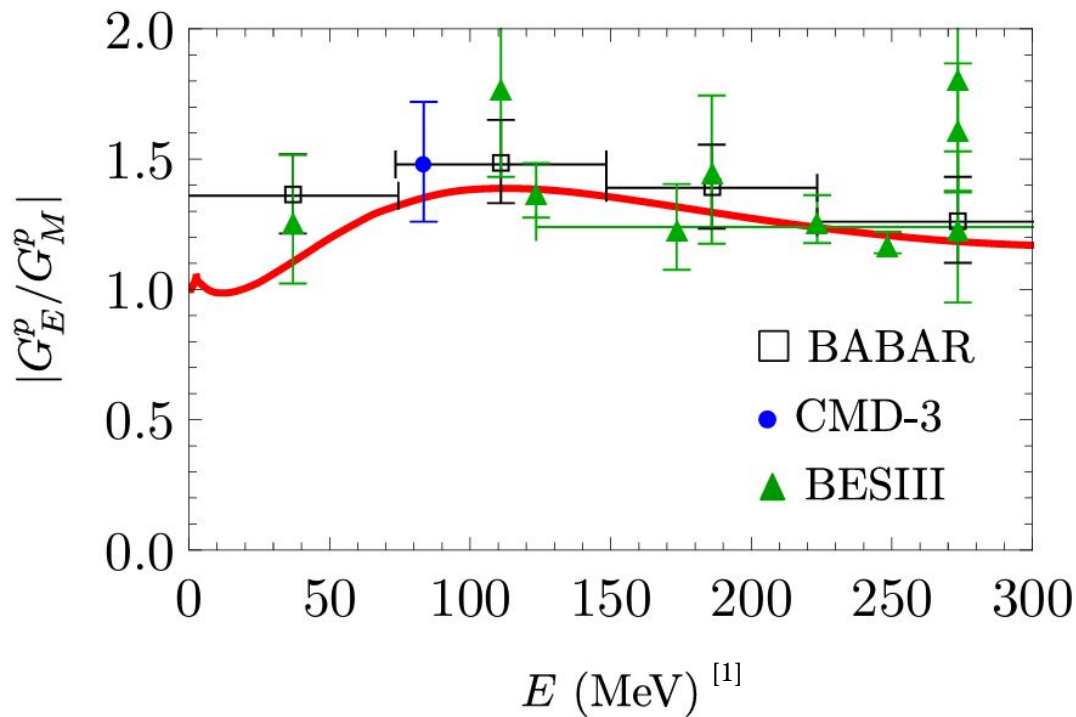
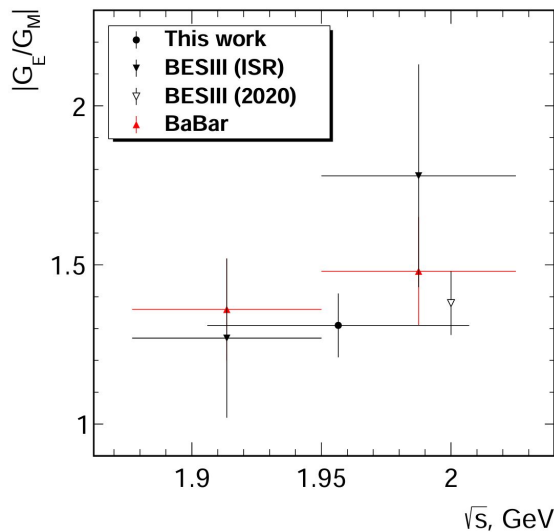
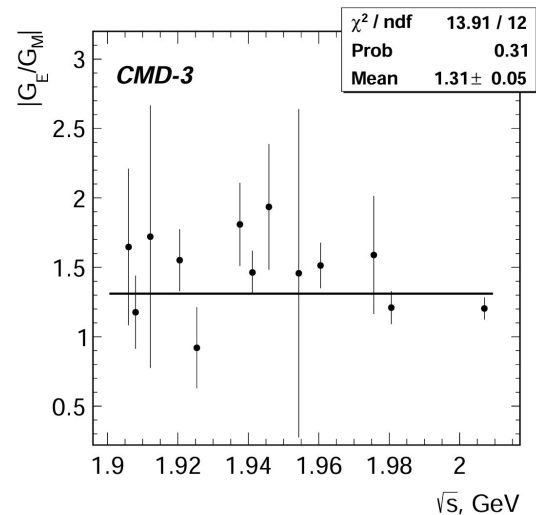
$$E_{\text{c.m.s}} \lesssim 1.920^* \text{ GeV}$$



Collinear events

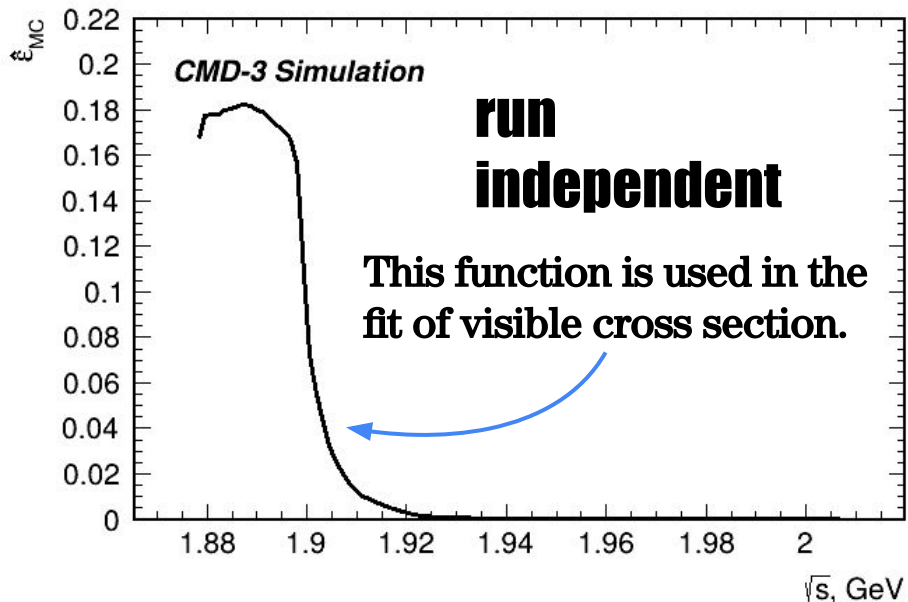
$$E_{\text{c.m.s}} \gtrsim 1.906 \text{ GeV}$$

Сравнение Результатов





Efficiency



To account for the difference in data-taking conditions we apply normalization factor δ_{norm} to the visible cross section.

We build ϵ vs s dependence using run independent MC simulation sample. The spline is created using [Akima interpolator](#).

~1% systematic uncertainty

"run dependent" data "run independent" spline

$$\delta_{\text{norm}} = \epsilon_i / \hat{\epsilon}(s)$$

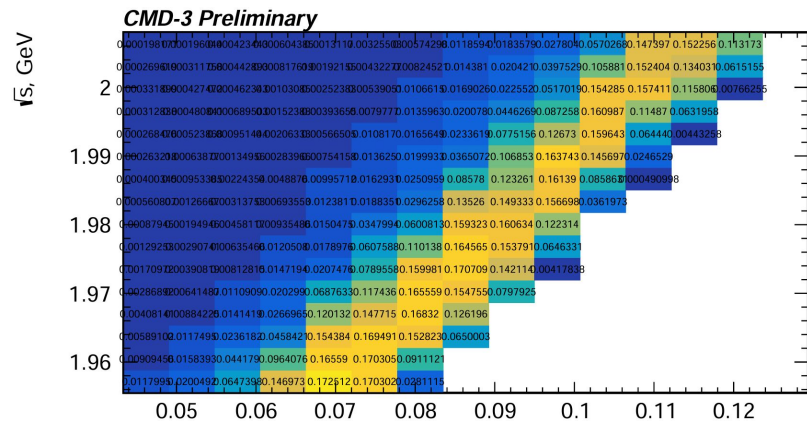
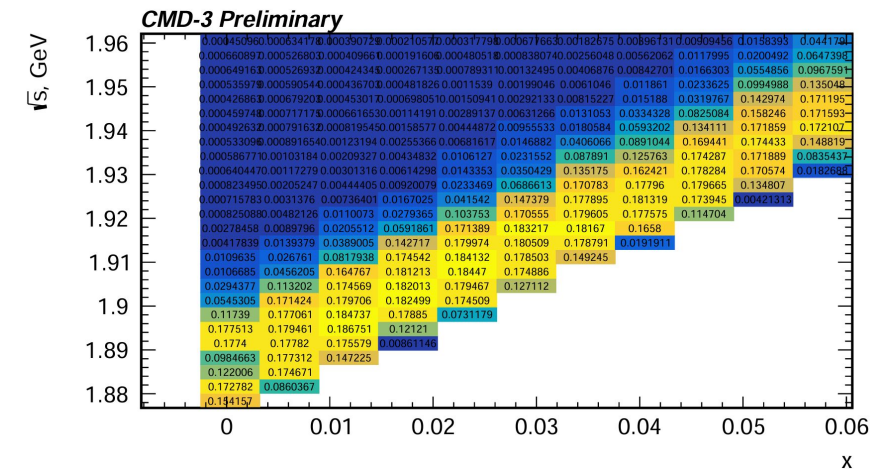
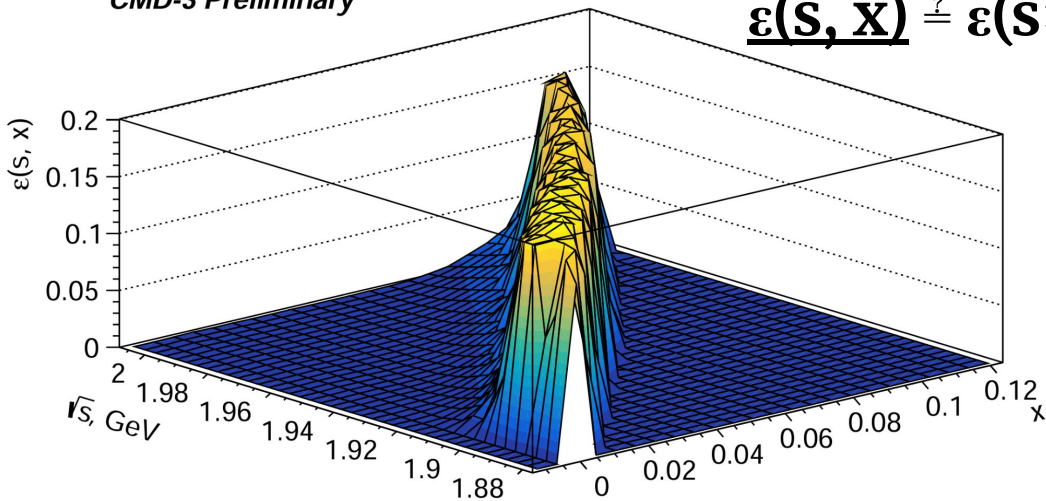
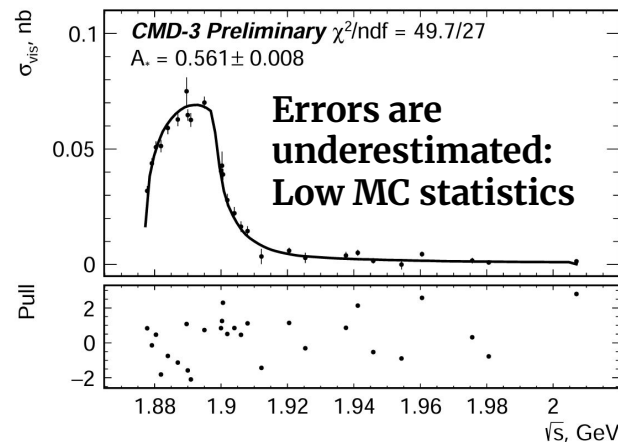
$$\sigma_{\text{vis}} = \frac{N_{\text{sig}}}{L \delta_{\text{norm}}}$$

ALL OF MY
HOMIES
ARE
NORMIES

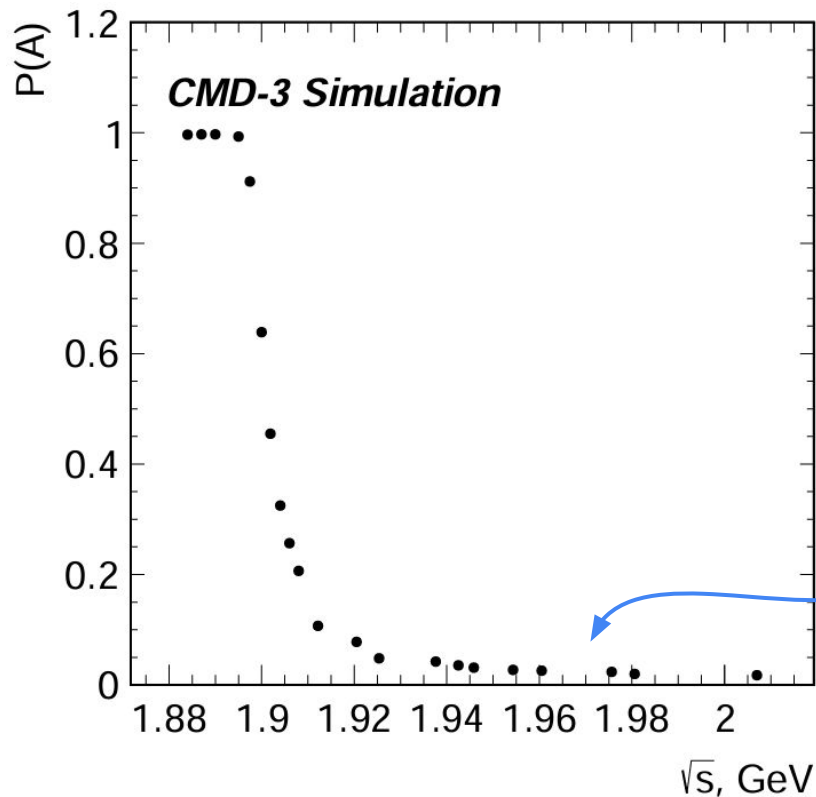
CMD-3 Preliminary

$$\underline{\varepsilon(s, x)} \stackrel{?}{=} \varepsilon(s \times (1-x))$$

Using $\varepsilon(s, x)$

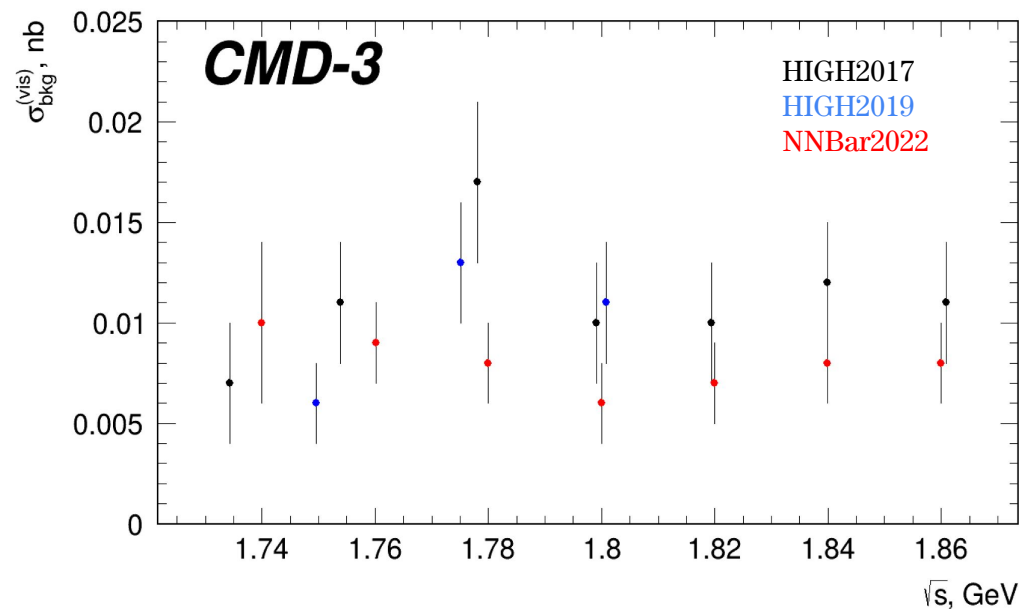


Вероятность аннигиляции антипротона в веществе до CMD-3 DC



На высоких энергиях ($\sqrt{s} > 1.92$ GeV)
аннигиляция в многом обусловлена
радиационным возвратом в область около
порога рождения

Сечение фона в допороговой области



Согласованность сечения фона с константой объясняется его природой.