

# Гипотетическое нарушение Лоренц-инвариантности и мюонный избыток в широких атмосферных ливнях

Н. С. Мартыненко<sup>1,2</sup>    Г. И. Рубцов<sup>1</sup>    П. С. Сатунин<sup>1</sup>  
**А. К. Шарофеев<sup>1,2</sup>**    С. В. Троицкий<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>ИЯИ РАН  
<sup>2</sup>МГУ

Сессия-конференция секции ядерной физики ОФН РАН,  
посвященная 70-летию В. А. Рубакова

# Как можно реализовать нарушение Лоренц-инвариантности?

## 1. Кинематический подход

$$E^2 = k^2 + \sum_{n=1,2,\dots} s_n \frac{k^{2+n}}{M_{\text{LIV},(n)}^n}, \quad (1)$$

Нарушение может быть разным: «подсветовое» и «надсветовое», в каждом из которых поведение физики может быть совершенно разной.

## 2. Подход эффективной теории поля:

$$\mathcal{L}_{\text{LIV}} \supset \mathcal{L}_{\text{SM}} + \sum_n \frac{1}{\Lambda_n} \mathcal{O}_n, \quad (2)$$

в рамках которого реализуется нетривиальное дисперсионное соотношение.

# К чему приводит нарушение Лоренц-инвариантности: тесты

1. Смещённые пороги реакций, другие ширины распадов, сечения рассеяния, временные задержки при распространении на большие расстояния (новые фазовые скорости), двойное лучепреломление... — большое поле для феноменологии.
2. Новые разрешённые процессы, запрещённые законами сохранения.

# Современные ограничения

$e^-/\gamma$	Test of QG	Sub(-) or super(+) luminal	Limits			Source	Ref.
			$ \xi_0 ( \eta_0 )$	$E_{LUV}^{(1)}$ (eV)	$E_{LUV}^{(2)}$ (eV)		
$e^-$	Synch.	both	$2 \times 10^{-20}$	$10^{33}$	$2 \times 10^{25}$	CRAB	[1340,1341,1361]
$e^-$	VC	(+)	$10^{-20}$	$10^{31}$	$10^{23}$	CRAB	[1338,1344,1362]
$\gamma$	PD	(+)	$7.1 \times 10^{-19}$	$1.7 \times 10^{33}$	$1.4 \times 10^{24}$	LH. J2032+4102	[1163]
$\gamma$	PD	(+)	$1.3 \times 10^{-17}$	$2.2 \times 10^{31}$	$8 \times 10^{22}$	MultiSrc	[1356]
$\gamma$	PD	(+)	$1.8 \times 10^{-17}$	$1.4 \times 10^{31}$	$5.8 \times 10^{22}$	eHWCJ1825-134	[1356]
$\gamma$	PD	(+)	$2.2 \times 10^{-17}$	$9.9 \times 10^{30}$	$4.7 \times 10^{22}$	eHWCJ1907+063	[1356]
$\gamma$	$3\gamma$	(+)	-	-	$2.5 \times 10^{25}$	LH. J2032+4102	[1163]
$\gamma$	$3\gamma$	(+)	-	-	$1.2 \times 10^{24}$	eHWC J1825-134	[1356]
$\gamma$	$3\gamma$	(+)	-	-	$1.0 \times 10^{24}$	eHWC J1907+063	[1356]
$\gamma$	$3\gamma$	(+)	-	-	$4.1 \times 10^{23}$	CRAB	[1355]
$\gamma$	AS	(-)	-	-	$1.7 \times 10^{22}$	diffuse (Tibet)	[1164]
$\gamma$	AS	(-)	-	-	$6.8 \times 10^{21}$	LH. J1908+0621	[1164]
$\gamma$	AS	(-)	-	-	$1.4 \times 10^{21}$	CRAB	[1355]
$\gamma$	AS	(-)	-	-	$9.7 \times 10^{20}$	CRAB	[1355]
$\gamma$	AS	(-)	-	-	$2.1 \times 10^{20}$	CRAB	[1361]
$\gamma$	PP	(-)	-	$1.2 \times 10^{29}$	$2.4 \times 10^{21}$	MultiSrc (6)	[1363]
$\gamma$	PP	(-)	$2 \times 10^{-16}$	$2.6 \times 10^{28}$	$7.8 \times 10^{20}$	Mrk 501	[1348,1364]
$\gamma$	PP	(-)	-	$1.9 \times 10^{28}$	$3.1 \times 10^{20}$	MultiSrc (32)	[1359]

**Рис.:** Современные ограничения на нарушение ЛИ в КЭД. Обозначения: Synch. — синхротронное излучение, VC — вакуумное черенковское излучение, PD — распад фотона,  $3\gamma$  — расщепление фотонов, AS — ШАЛ, PP — рождение пар на диффузном внегалактическом фоновом свете. Из Addazi et al., 2022.

# Подход эффективной теории поля в $n = 2$ Лоренц-нарушенной КЭД

Рассматриваемая теория:

$$\mathcal{L} = \mathcal{L}_{\text{QED}} + \mathcal{L}_e + \mathcal{L}_\gamma, \quad (3)$$

Операторы старшей размерности:

$$\mathcal{L}_\gamma = \frac{s_2}{4M_{\text{LIV}}^2} F_{kj} \partial_i^2 F^{kj}, \quad (4)$$

$$\mathcal{L}_e = i\kappa \bar{\psi} \gamma^i D_i \psi + \frac{is_2^e}{M_{\text{LIV}, e}^2} D_j \bar{\psi} \gamma^i D_i D_j \psi, \quad (5)$$

где  $s_2, s_2^e = \pm 1$ .

В  $\mathcal{L}_\gamma$ :  $[s_2] \equiv [m]^0$ ,  $[M_{\text{LIV}}] = [m]^1$ .

В  $\mathcal{L}_e$ :  $[s_2^e] \equiv [m]^0$ ,  $[\kappa] = [m]^0$ ,  $[M_{\text{LIV}, e}] = [m]^1$ .

$M_{\text{LIV}}$  и  $M_{\text{LIV}, e}$  — параметры отклонения от ЛИ.

## Лоренц-нарушенная КЭД для квартичного дисперсионного соотношения

Опустим рассмотрение  $\mathcal{L}_e$ : ограничение на  $M_{\text{LIV},e} = 2 \times 10^{16}$  ГэВ (95% C.L.) из аномального синхротронного излучения и вакуумного черенковского излучения мягких электронов от Crab Nebula (arXiv:1207.0670 [gr-qc]).

Поэтому ограничимся лишь  $\mathcal{L}_\gamma$ , так как современное ограничение для «подсветового» режима составляет (arXiv:2106.06393 [hep-ph])

$$M_{\text{LIV}} > 1.7 \times 10^{13} \text{ ГэВ.} \quad (6)$$

Дисперсионное соотношение для фотонов:

$$E_\gamma^2 = k_\gamma^2 - \frac{k_\gamma^4}{M_{\text{LIV}}^2}. \quad (7)$$

# Мюонная проблема: история

1. Первые признаки расхождения между предсказанием и наблюдаемым числом мюонов были зафиксированы в 1970-х в эксперименте SUGAR.

# Мюонная проблема: история

1. Первые признаки расхождения между предсказанием и наблюдаемым числом мюонов были зафиксированы в 1970-х в эксперименте SUGAR.
2. В 2000 году совместное исследование HiRes и MIA обнаружило несоответствие числа мюонов в моделируемых и наблюдаемых ливнях при энергиях первичной частицы  $10^{17} - 10^{18}$  эВ.



# Мюонная проблема: история

1. Первые признаки расхождения между предсказанием и наблюдаемым числом мюонов были зафиксированы в 1970-х в эксперименте SUGAR.
2. В 2000 году совместное исследование HiRes и MIA обнаружило несоответствие числа мюонов в моделируемых и наблюдаемых ливнях при энергиях первичной частицы  $10^{17} - 10^{18}$  эВ.
3. В 2008 году анализ данных якутской установки EAS показал 1.5-кратный избыток мюонов по сравнению с предсказаниями модели SIBYLL.

# Мюонная проблема: история

1. Первые признаки расхождения между предсказанием и наблюдаемым числом мюонов были зафиксированы в 1970-х в эксперименте SUGAR.
2. В 2000 году совместное исследование HiRes и MIA обнаружило несоответствие числа мюонов в моделируемых и наблюдаемых ливнях при энергиях первичной частицы  $10^{17} - 10^{18}$  эВ.
3. В 2008 году анализ данных якутской установки EAS показал 1.5-кратный избыток мюонов по сравнению с предсказаниями модели SIBYLL.
4. В 2010 году эксперимент NEVOD-DECOR также зафиксировал повышение плотности мюонов.

## Мюонная проблема: история

1. Первые признаки расхождения между предсказанием и наблюдаемым числом мюонов были зафиксированы в 1970-х в эксперименте SUGAR.
2. В 2000 году совместное исследование HiRes и MIA обнаружило несоответствие числа мюонов в моделируемых и наблюдаемых ливнях при энергиях первичной частицы  $10^{17} - 10^{18}$  эВ.
3. В 2008 году анализ данных якутской установки EAS показал 1.5-кратный избыток мюонов по сравнению с предсказаниями модели SIBYLL.
4. В 2010 году эксперимент NEVOD-DECOR также зафиксировал повышение плотности мюонов.

# Мюонная проблема: история

5. Наибольшее внимание к проблеме привлекли результаты крупнейших современных экспериментов Pierre Auger Observatory и Telescope Array.

# Мюонная проблема: история

5. Наибольшее внимание к проблеме привлекли результаты крупнейших современных экспериментов Pierre Auger Observatory и Telescope Array.
6. В то же время в ряде экспериментов, таких как EAS-MSU, KASCADE-Grande, IceTop и другие, избыток мюонов не был зафиксирован.

## Эксперименты ШАЛ: мюонная проблема

Как проверять мюонную проблему:

$$z \equiv \frac{\ln \langle N_{\mu}^{\text{obs}} \rangle - \ln \langle N_{\mu,p}^{\text{MC}} \rangle}{\ln \langle N_{\mu,Fe}^{\text{MC}} \rangle - \ln \langle N_{\mu,p}^{\text{MC}} \rangle}, \quad (8)$$

где  $\langle N_{\mu}^{\text{obs}} \rangle$  — среднее число мюонов, наблюдаемое в эксперименте,  $\langle N_{\mu,p}^{\text{MC}} \rangle$  ( $\langle N_{\mu,Fe}^{\text{MC}} \rangle$ ) — среднее число мюонов, полученное в симуляциях для ливня, инициированного протоном (железом).

Если ливень инициирован протоном, то  $z = 0$ ; если же железом, то  $z = 1$ .

# Мюонная проблема

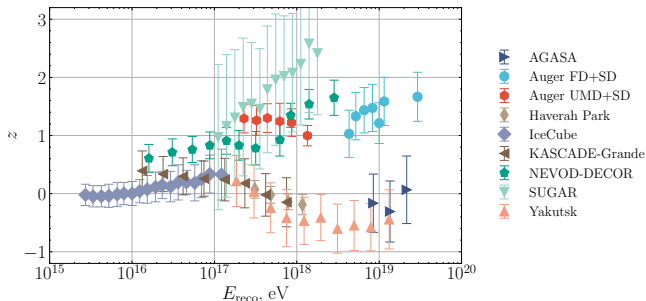


Рис.: Предсказания для параметра  $z$  на основе мюонной плотности в адронной модели EPOS-LHC. WHISP, 2023.

Кто видит мюонную проблему: SUGAR, NEVOD-DECOR, Auger FD+SD, Auger UMD+SD.

## На пути к решению мюонной проблемы

Существенным для развития ШАЛ является процесс Бете-Хайтлера:

$$Z\gamma^*\gamma \rightarrow Ze^+e^- \quad (9)$$

— рождение электрон-позитронной пары внешним фотоном в кулоновском поле ядра. Классический результат (Н. Bethe, W. Heitler, 1934):

$$\sigma_{\text{BH}}^{\text{LI}} = \frac{28Z^2\alpha^3}{9m_e^2} \left[ \log \frac{183}{Z^{1/3}} - \frac{1}{42} \right]. \quad (10)$$

Сравнивая ЛИ рассмотрение с процессом с  $n = 2$  нарушенной Лоренц-инвариантностью:

$$\frac{\sigma_{\text{BH}}^{\text{LIV}}}{\sigma_{\text{BH}}^{\text{LI}}} \simeq \frac{12m_e^2 M_{\text{LIV}}^2}{7E_\gamma^4} \times \log \frac{E_\gamma^4}{2m_e^2 M_{\text{LIV}}^2}. \quad (11)$$



## Как решается мюонная проблема?

Заметим, что

$$\frac{\sigma_{\text{BH}}^{\text{LIV}}}{\sigma_{\text{BH}}^{\text{LI}}} \simeq \frac{12m_e^2 M_{\text{LIV}}^2}{7E_\gamma^4} \times \log \frac{E_\gamma^4}{2m_e^2 M_{\text{LIV}}^2} \sim E_\gamma^{-4} \log E_\gamma^4, \quad (12)$$

следовательно,

$$\sigma_{\text{BH}}^{\text{LIV}} \ll \sigma_{\text{BH}}^{\text{LI}}, \quad (13)$$

поэтому на высоких энергиях  $\lambda^{\text{LIV}} \gg \lambda^{\text{LI}}$ . Это позволяет утверждать, что развитие электрон-позитронного ливня будет меньше в плоскости XY в случае нарушения ЛН (он будет менее «обильным»).

## Как решается мюонная проблема

Анализируя полное развитие ШАЛ выходит, что число  $\langle N_{LIV,e} \rangle < \langle N_{LI,e} \rangle$ . Однако число мюонов остаётся тем же самым (требуется проверка в симуляциях). Происходит недооценка энергии первичной частицы! Тем самым ожидаемое число мюонов недооценивается из-за недостатка электронов, что приводит к большим значениям  $z$ .

## Состав ШАЛ

Число электронов можно оценить степенной функцией:

$$\langle N_e \rangle \propto A_{\text{reco}}^{-\alpha_e} E_{\text{reco}}^{\beta_e}, \quad (14)$$

то есть

$$\ln[E_{\text{reco}}/\text{GeV}] = \varepsilon_e + (\alpha_e \beta_e^{-1}) \ln A_{\text{reco}} + \beta_e^{-1} \ln \langle N_e \rangle, \quad (15)$$

откуда видно, что мы действительно будем недооценивать энергию  $E_{\text{reco}}$ , так как  $\langle N_{\text{LIV},e} \rangle < \langle N_{\text{LI},e} \rangle$ .

Аналогично:

$$N_\mu \propto A^{\alpha_\mu} E^{\beta_\mu} \quad (16)$$

или

$$\ln \langle N_\mu \rangle = -n_\mu + \alpha_\mu \ln A + \beta_\mu \ln[E/\text{GeV}]. \quad (17)$$

## Развятие ШАЛ

Итого:

$$z = \frac{\ln A}{\ln 56} + \frac{\beta_\mu}{\alpha_\mu \ln 56} \ln \left[ \frac{E}{E_{\text{reco}}} \right]. \quad (18)$$

Удобно ввести следующие параметры для анализа:

$$r_e \equiv \ln \left[ \frac{\langle N_{e,\text{LI}} \rangle}{\langle N_{e,\text{LIV}} \rangle} \right], \quad r_\mu \equiv \ln \left[ \frac{\langle N_{\mu,\text{LI}} \rangle}{\langle N_{\mu,\text{LIV}} \rangle} \right]. \quad (19)$$

«Универсальный» параметр:

$$\xi \equiv (m_e M_{\text{LIV}})^{-1/2} A^{-1} E. \quad (20)$$

При этом удобно параметризовать  $r_e(\xi)$  следующим образом:

$$r_e(\xi) = r_{e,0} \ln \left[ 1 + \left( \frac{\xi}{\xi_0} \right)^q \right], \quad r_\mu(\xi) = 0. \quad (21)$$

## Симуляции на CORSIKA 7.7550

EPOS 1.99 (UrQMD 1.3.1) модель для высокоэнергетических (низкоэнергетических) адронных взаимодействий и EGS4 для электромагнитных взаимодействий.

Предполагается рассматривать только вертикальные ШАЛ  $\theta = 0$  с анализом состава частиц на уровне моря. Симуляции проводятся для двух типов частиц: протонов и железа.

Энергетический порог на электроны:  $E_e > 1$  МэВ, на мюоны:  $E_\mu > 1$  ГэВ.

# Алгоритм

1. Нахождение  $\varepsilon_e$ ,  $\alpha_e$ ,  $\beta_e$  и  $n_\mu$ ,  $\alpha_\mu$ ,  $\beta_\mu$  в диапазоне энергий  $10^{16}$  эВ до  $5 \times 10^{19}$  эВ в случае ЛИ. Усреднение по числу ливней.

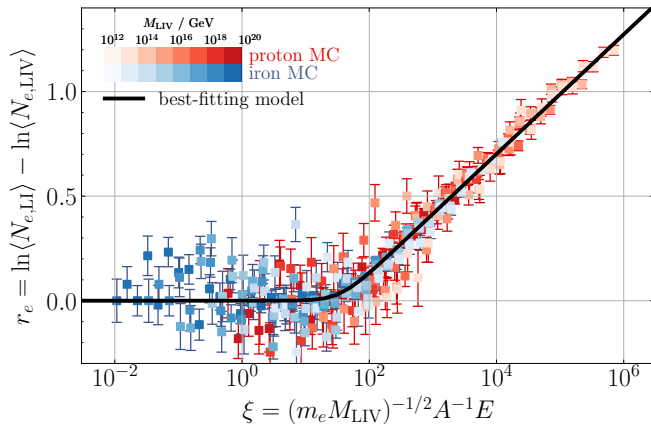
параметры	$\varepsilon_e$	$\alpha_e \beta_e^{-1}$	$\beta_e^{-1}$	$n_\mu$	$\alpha_\mu$	$\beta_\mu$
значение	3.832	0.089	0.890	3.621	0.076	0.921
$1\sigma$	1.169	0.046	0.053	0.173	0.012	0.008

2. Модификация EGS4 в CORSIKA в диапазоне  $M_{LIV} \in \{10^{13}, 10^{14}, \dots, 10^{18}\}$  эВ. Аппроксимируем зависимости  $r_e(\xi)$ . Проверяем, что  $r_\mu(\xi) = 0$ .

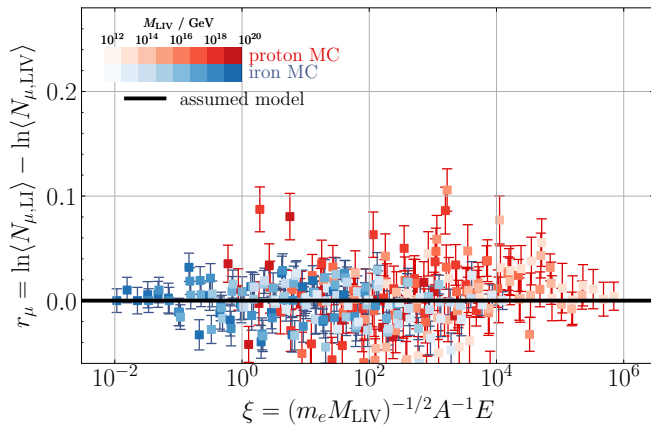
значение	$r_{e,0}$	$\xi_0$	$\varrho$
best-fitting value	0.052	35.290	2.407
$1\sigma$	0.013	2.156	0.568

# Монте-Карло на CORSIKA: $r_e(\xi)$

Первый шаг:

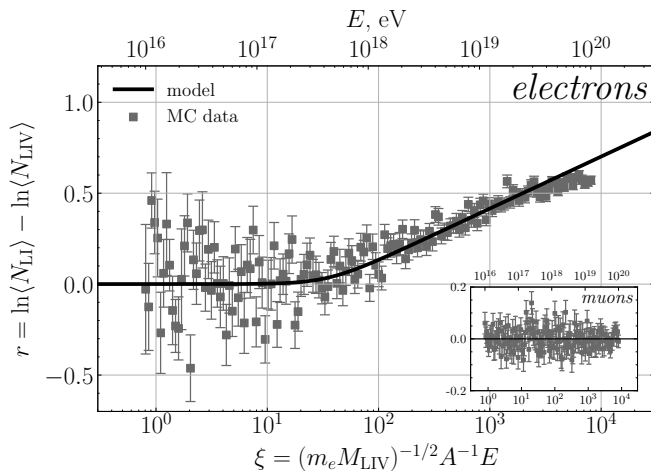


# Монте-Карло на CORSIKA: $r_\mu(\xi)$

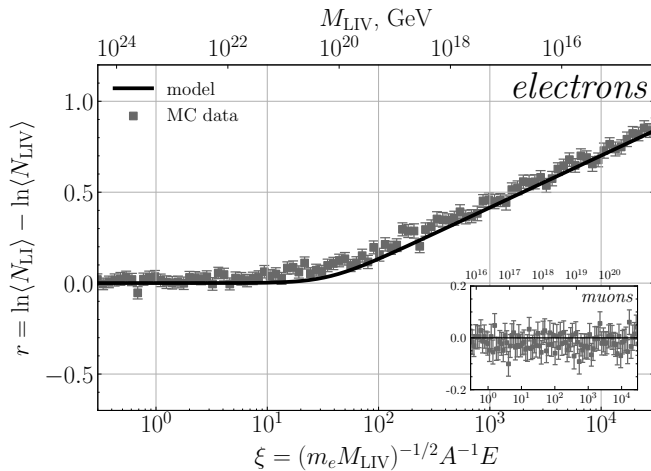




# Монте-Карло на CORSIKA: фиксированный $M_{\text{LIV}} = 3 \times 10^{17}$ ГэВ



# Монте-Карло на CORSIKA: фиксированная энергия $E = 10^{19}$ эВ



# Результаты I

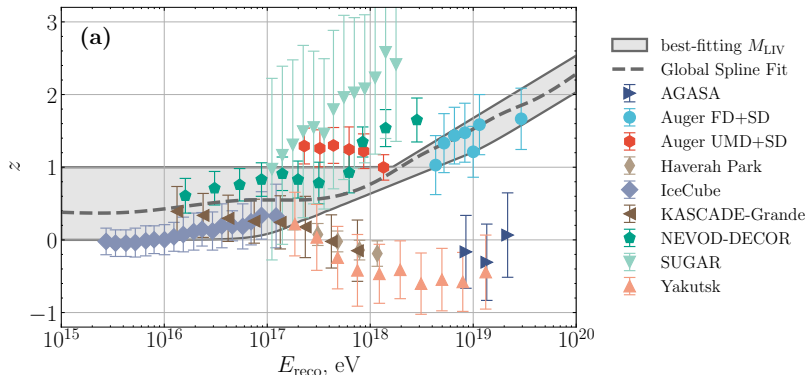


Рис.: Предпочтительное значение параметра  $M_{LIV} = 1.9 \times 10^{16}$  на основе данных Pierre Auger.

## Результаты II

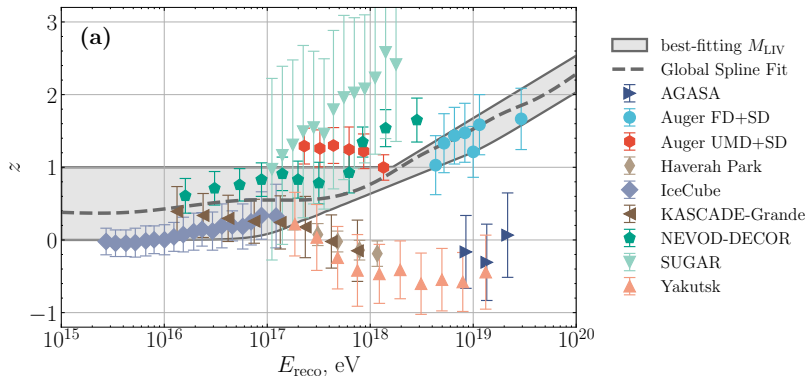


Рис.: Исключено значения  $M_{\text{LIV}} \leq M_{\text{LIV}} = 2.4 \times 10^{14} \text{ ГэВ}$  с 95% C.L.

# Результаты III

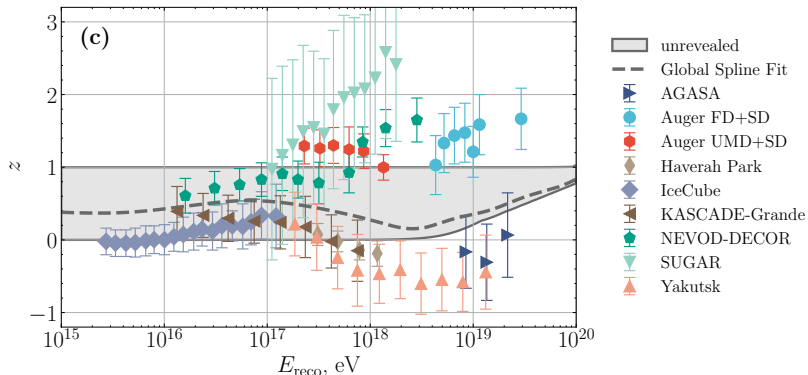


Рис.: Значение  $M_{LIV} > M_{LIV} = 6.3 \times 10^{19}$  будут уже неотличимы от ЛИ случая.

## Заключение

- ▶  $M_{LIV} \sim 10^{16}$  ГэВ может объяснять мюонную аномалию. Такой энергетический диапазон пока экспериментально не закрыт, тем более параметры нарушения Лоренц-инвариантности  $M_{LIV} \sim 10^{15..16}$  ГэВ предпочтительны для моделей гравитации Хоравы-Лифшица.

Спасибо!

Работа выполнена при поддержке РФФ, грант 22-12-00253.

# Дополнительные слайды

# Различные модели адронных взаимодействий

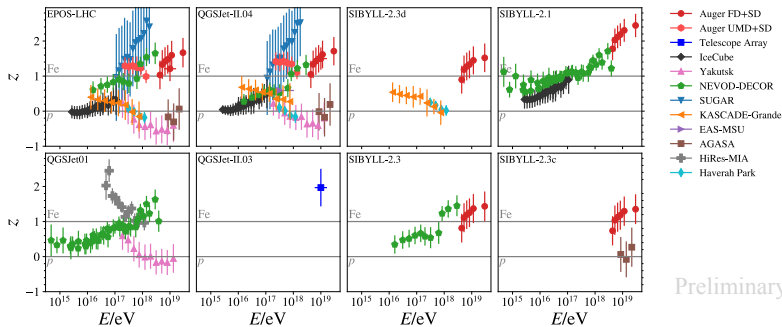


Рис.: Параметр  $z$  в различных адронных моделях. WHISP, 2023.



