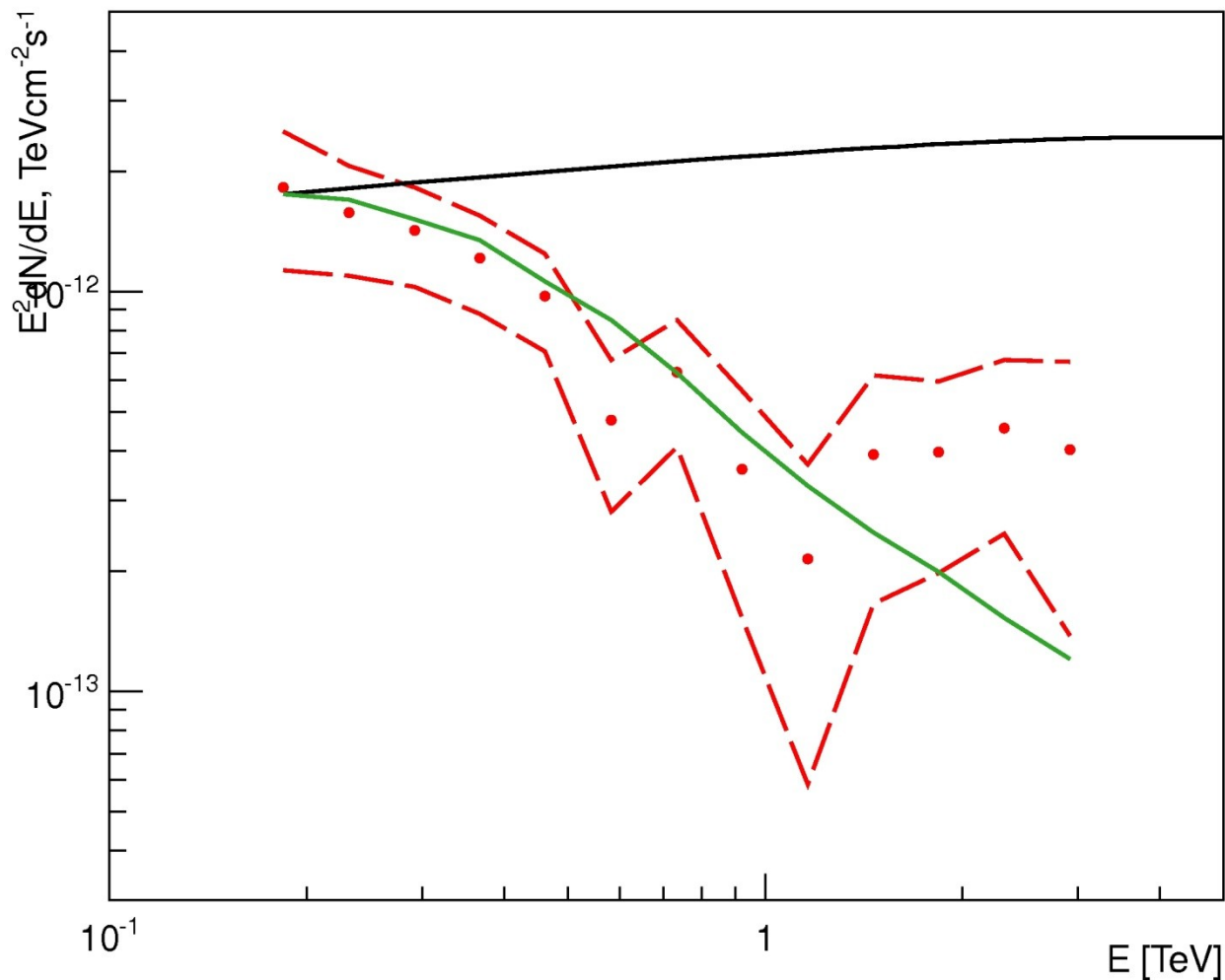


# Каскадная модель аномалии гамма-спектров блазаров при очень высоких энергиях



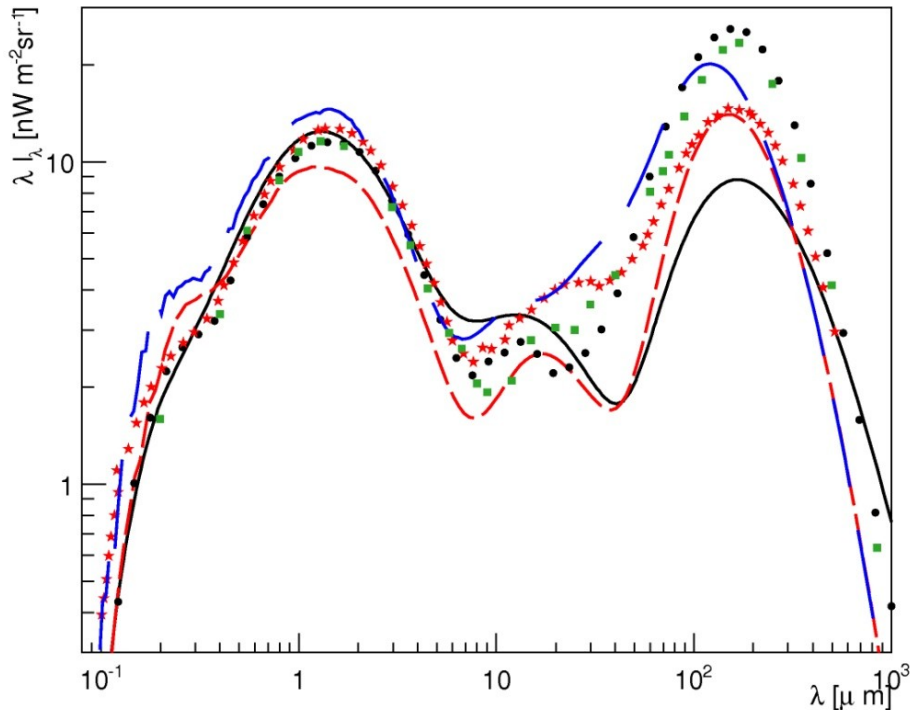
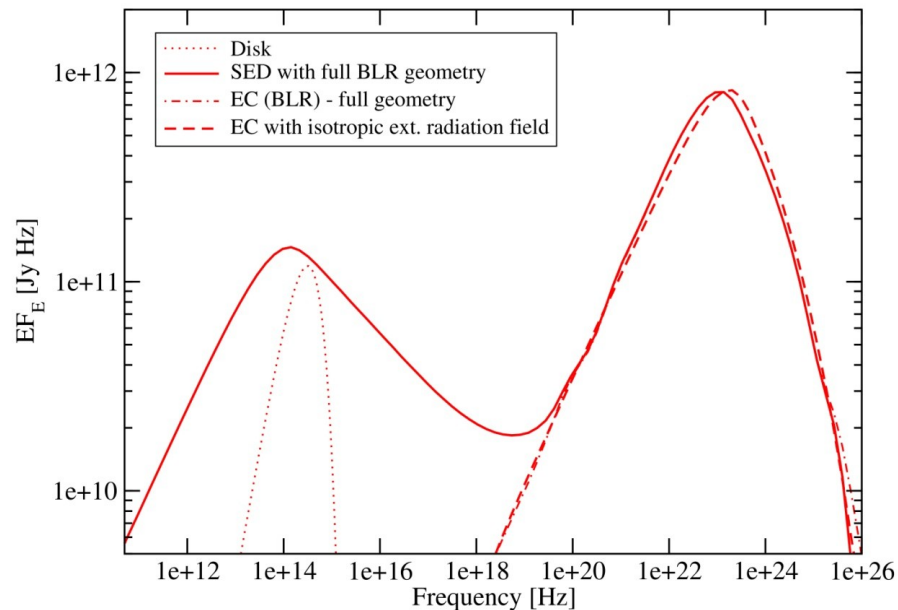
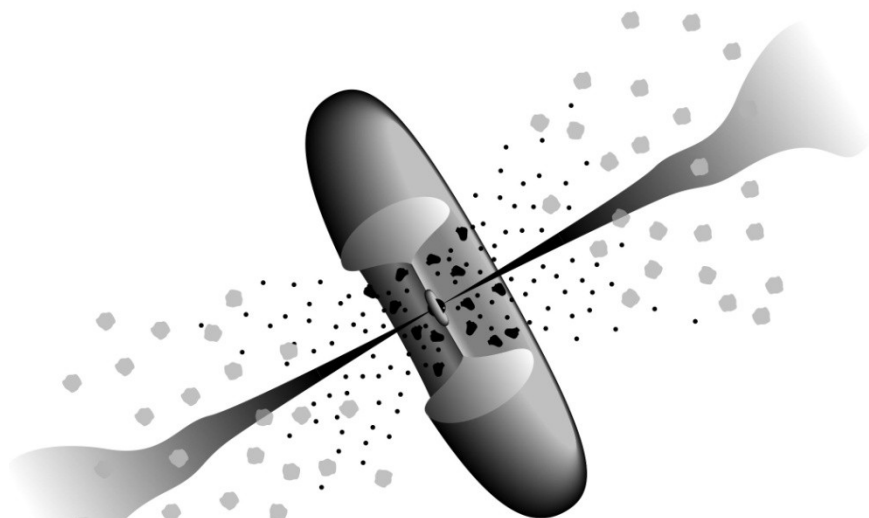
Т. А. Джатдоев (НИИЯФ МГУ)

33-я ВККЛ (2014)

# Содержание

1. Введение: блазары; типичное спектральное распределение энергии (SED) их излучения; модели SED экстрагалактического фонового излучения (Extragalactic Background Light, EBL).
2. “Аномалия рождения пар” и ее возможные объяснения.
3. Электромагнитные каскады и величина экстрагалактического магнитного поля (Extragalactic Magnetic Field, EGMF).
4. Методика анализа.
5. Значимость “аномалии” в отсутствие каскадной компоненты.
6. Возможная модель спектра объектов.
7. Результаты статистического анализа.
8. Выводы.

Схема геометрии (слева <sup>1</sup>) и типичного SED блазара (справа <sup>2</sup>);  
 модели (SED) EBL (снизу <sup>3</sup>)

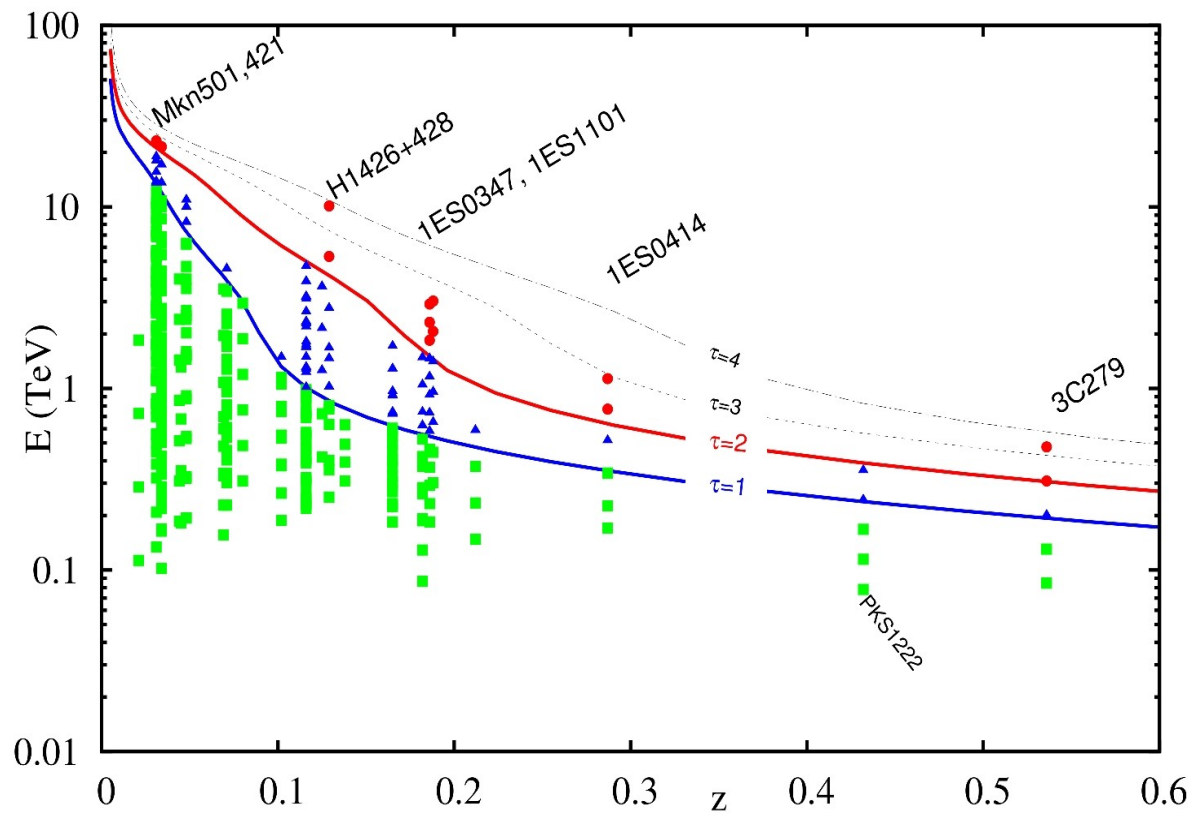


<sup>1</sup> C.M. Urry, P. Padovani, *PASP*, **107**, 803 (1995); подробнее: R. Antonucci, *ARA&A*, **31**, 473 (1993)

<sup>2</sup> M. Boettcher et al., *ApJ*, **768**, 54 (2013)

<sup>3</sup> модель Т.М. Kneiske & Н. Dole (2010) показана красным пунктиром

Оптическая толщина  $\tau(z,E)$  процесса  $\gamma\gamma \rightarrow e^+e^-$ ;  $z$  — красное смещение,  $E$  — наблюдаемая энергия фотона (D. Horns & M. Meyer, JCAP, 02, 033 (2012))



При  $\tau > 2$  наблюдается рост отношения наблюдаемого количества фотонов к ожидаемому — “pair-production anomaly”; статистическая значимость эффекта  $4.2 \sigma$  (определена из сравнения распределений для  $1 < \tau < 2$  и  $\tau > 2$ ).

Аномалия такого рода известна уже давно (R.J. Protheroe & H. Meyer, Phys. Lett. B, **493**, 16 (2000))

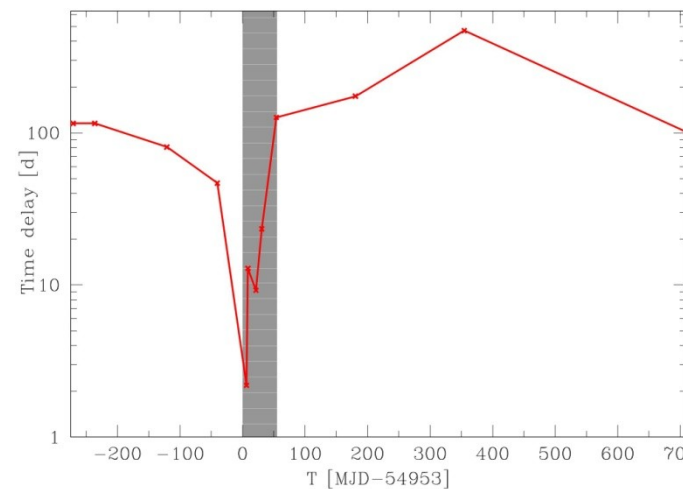
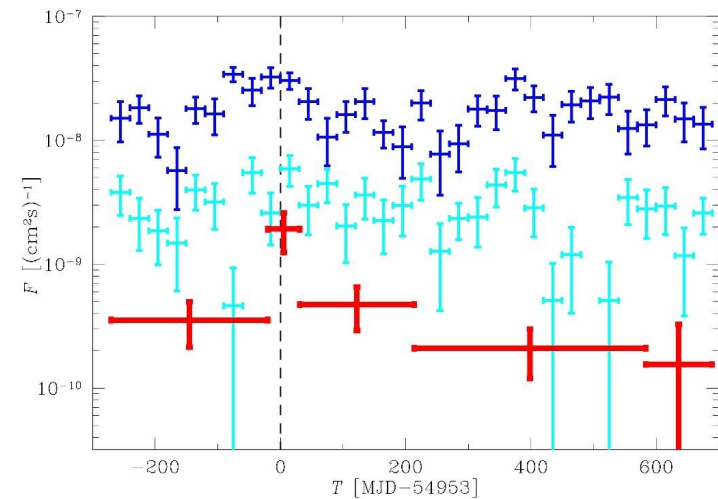
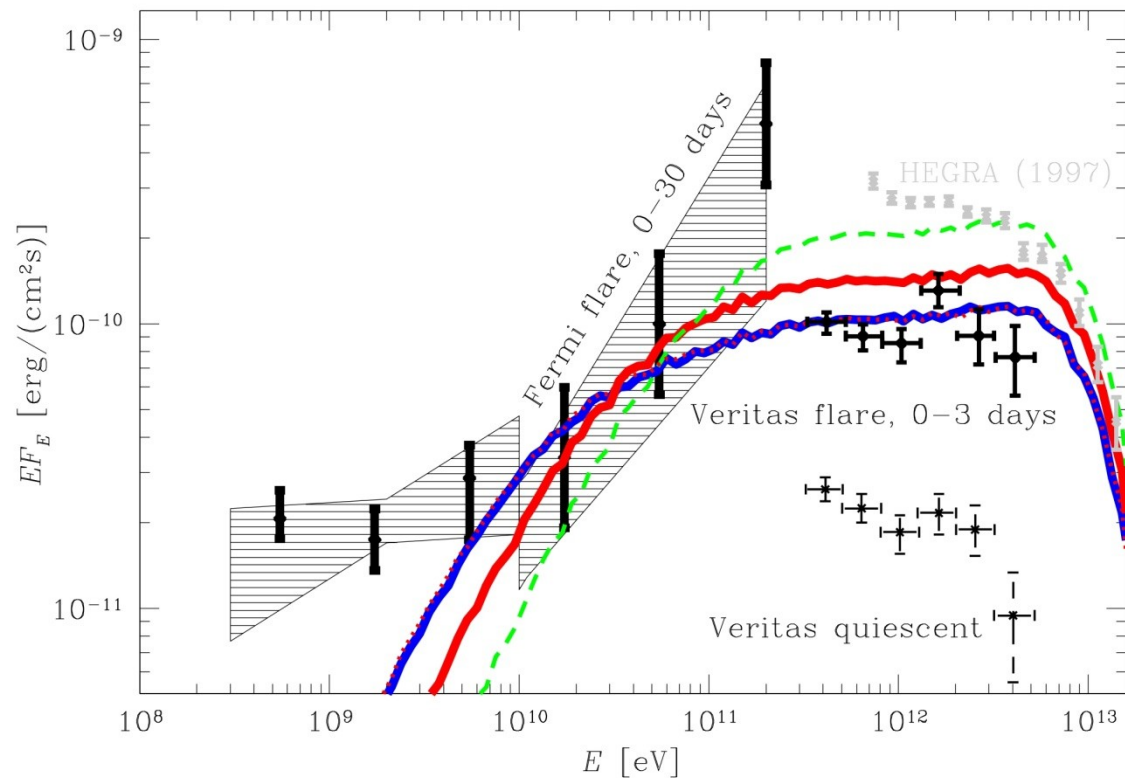
Может ли рождение вторичных фотонов в электромагнитных каскадах тем или иным способом уменьшить статистическую значимость “аномалии”?

Модели “аномалии”;  $E$  — энергия  $\gamma$ -кванта,  $\varepsilon$  — энергия фонового фотона,  $B$  — напряженность экстрагалактического магнитного поля (EGMF)

Механизм	Примечания	Ссылки
Искажение формы спектра при поглощении $\gamma$ -квантов в фотонных полях источника	Работает только в определенной области энергий $E=f(\varepsilon)$ ; излучение каскадных электронов высокой энергии в направлении наблюдателя нежелательно	F.A. Aharonian et al., MNRAS, <b>387</b> , 1206 (2008)
Рождение вторичных $\gamma$ -квантов протонами по пути к наблюдателю	Сохранение хорошей коллимации пучка протонов на выходе из источника; $B < 10^{-14}$ G	W. Essey & A. Kusenko, APh, <b>33</b> , 81 (2010)
Синхротронное излучение $e$ вблизи источника	Работает только в определенной области энергий $E=f(\varepsilon)$ и только для части объектов; возможно, влечет слишком большую интенсивность гало фотонов вокруг источника	F. Oikonomou et al., astro-ph/1406.6075 (2014) (Accepted by A&A)
Осцилляции $\gamma$ -квантов в экзотические нейтральные частицы в магнитном поле	Выход за рамки Стандартной Модели; требуется высокая эффективность конверсии для различных направлений на источник	M.A. Sanchez-Conde et al., Phys. Rev. D, <b>79</b> , 123511 (2009)

Все перечисленные модели имеют некоторые трудности

A. Neronov et al., A&A, **541**, A31 (2012): возможно, каскадные фотоны уже наблюдались в спектре Мкп 501.  $B = 10^{-16} - 10^{-17}$  G ( $L_c = 1$  Мpc), задержка  $< 10$  дней (90 % CL) при энергии  $\sim 100$  GeV.



В дальнейшем предполагается  $B < 10^{-16}$  G, т.к. в случае  $B > 10^{-14}$  G объяснение аномалии, по-видимому, выходит за рамки Стандартной Модели, а  $B = (10^{-14}, 3 \cdot 10^{-16})$  поставлены под сомнение.

Каскадная модель ранее рассматривалась в работах:

F.A. Aharonian et al. (HEGRA), *A&A*, **349**, 11 (1999)

F.A. Aharonian et al., *A&A*, **384**, 834 (2002)

(анализ спектра Mkn 501)

d'Avezac et al., *A&A*, **469**, 857 (2007)

(анализ спектра 1ES1101-232)

A. Neronov et al., *A&A*, **541**, A31 (2012)

Детальное моделирование с использованием современной модели EB $\gamma$ L и статистический анализ выборки спектров проводится в настоящей работе впервые.

# Методика анализа

Для расчета наблюдаемых спектров использован код ELMAG 2.02 (M. Kachelriess et al., *Comp. Phys. Comm.*, **183**, 1036 (2012)). Полное статистическое моделирование (параметр  $a_{\text{smp}} = 0$ ). Спектр в источнике  $\sim E^{-\gamma} \cdot \exp(-E/E_c)$ ,  $E > 100$  GeV. Модель EBL: T.M. Kneiske & H. Dole, *A&A*, **515**, A19 (2010) (option2).

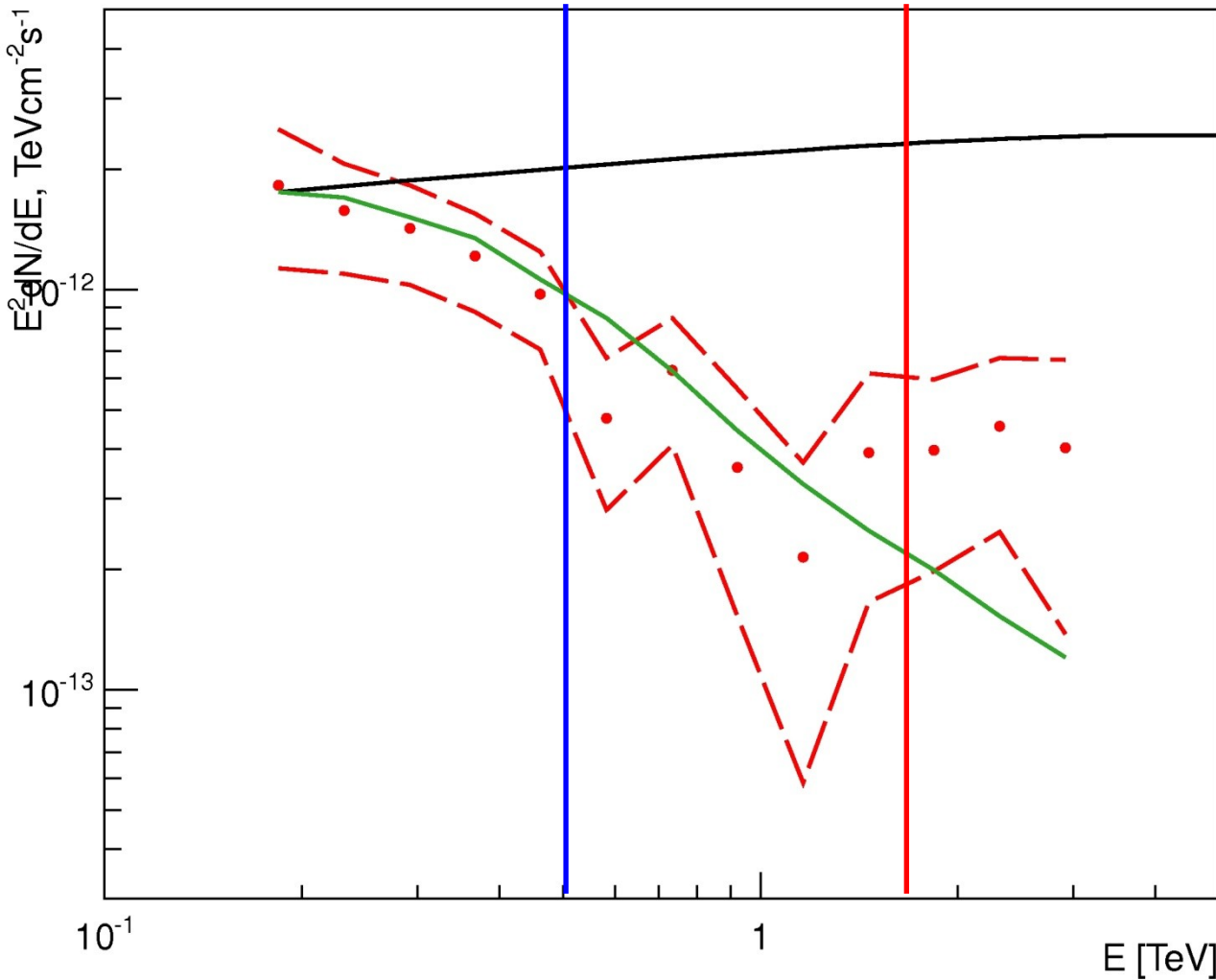
Использовано одномерное приближение.

Расчет статистической значимости на основании количества зарегистрированных фотонов в определенных интервалах  $\tau$  (см., например, G. Cowan et al., *EPJ C*, **71**, 1554 (2011), разд. 5.1 “Counting experiment”).

Характерный угловой раствор струи  $\theta_{\text{Jet}} \sim 1$  градус  $\sim 10^{-2}$  rad; угловое распределение в акте взаимодействия имеет ширину  $\theta \sim (1/\Gamma)$ ;  $\Gamma = E/m_e$  — Лоренц-фактор частицы,  $m_e$  — энергия покоя электрона. При  $E = 100$  GeV =  $10^5$  MeV  $\rightarrow \Gamma \sim 10^5$ ;  $\theta \sim 10^{-5} \ll \theta_{\text{Jet}}$  и в случае  $B = 0$  одномерное приближение оправдано.



Пример: спектр объекта 1ES1101-232 ( $z=0.186$ )  
в отсутствие каскадной компоненты



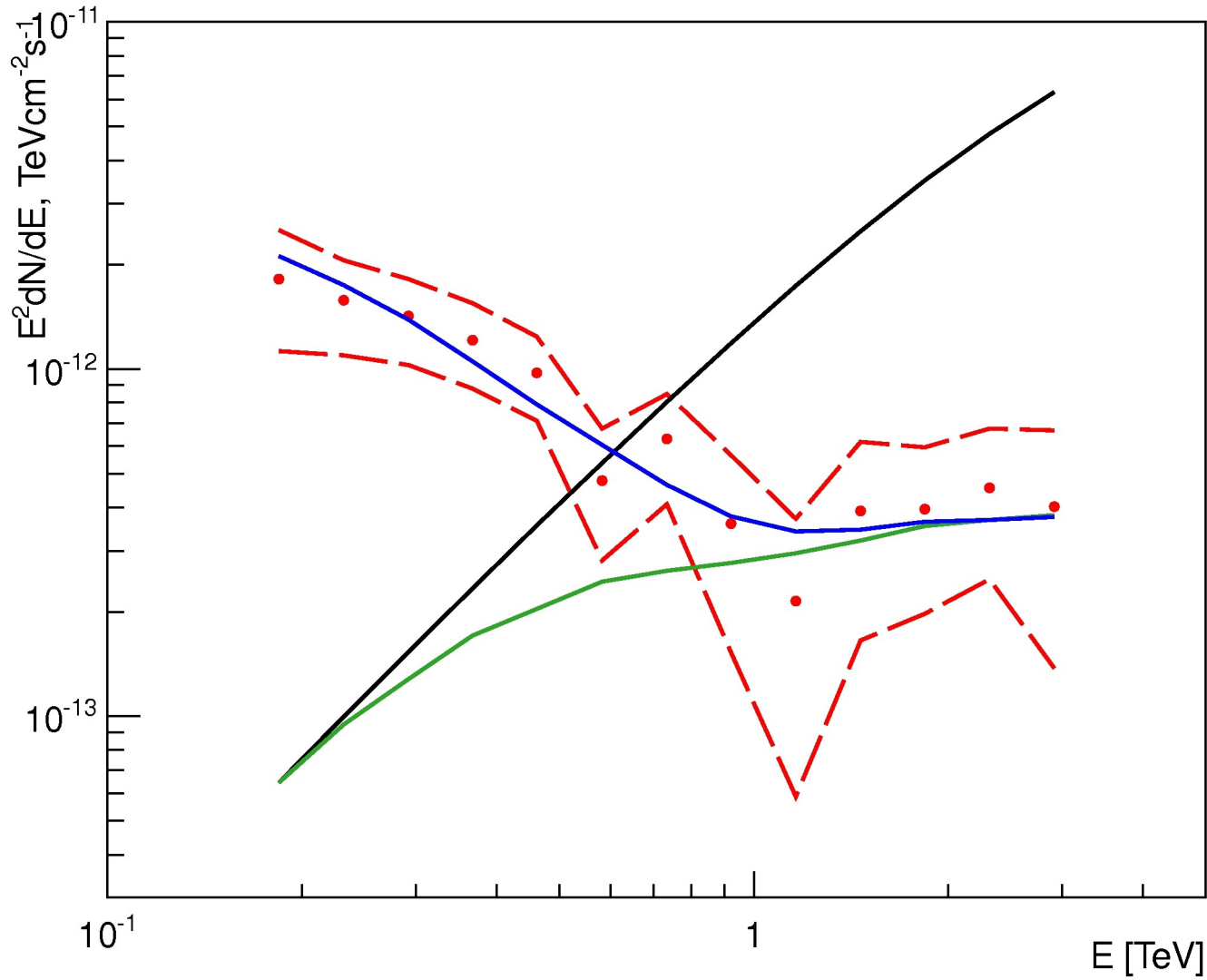
Красные кружки и пунктир: измерения и полные  $(\text{stat.}^2 + \text{syst}^2)^{0.5}$  погрешности

Черная линия: спектр в источнике (без усреднения по энергетическим бинам)

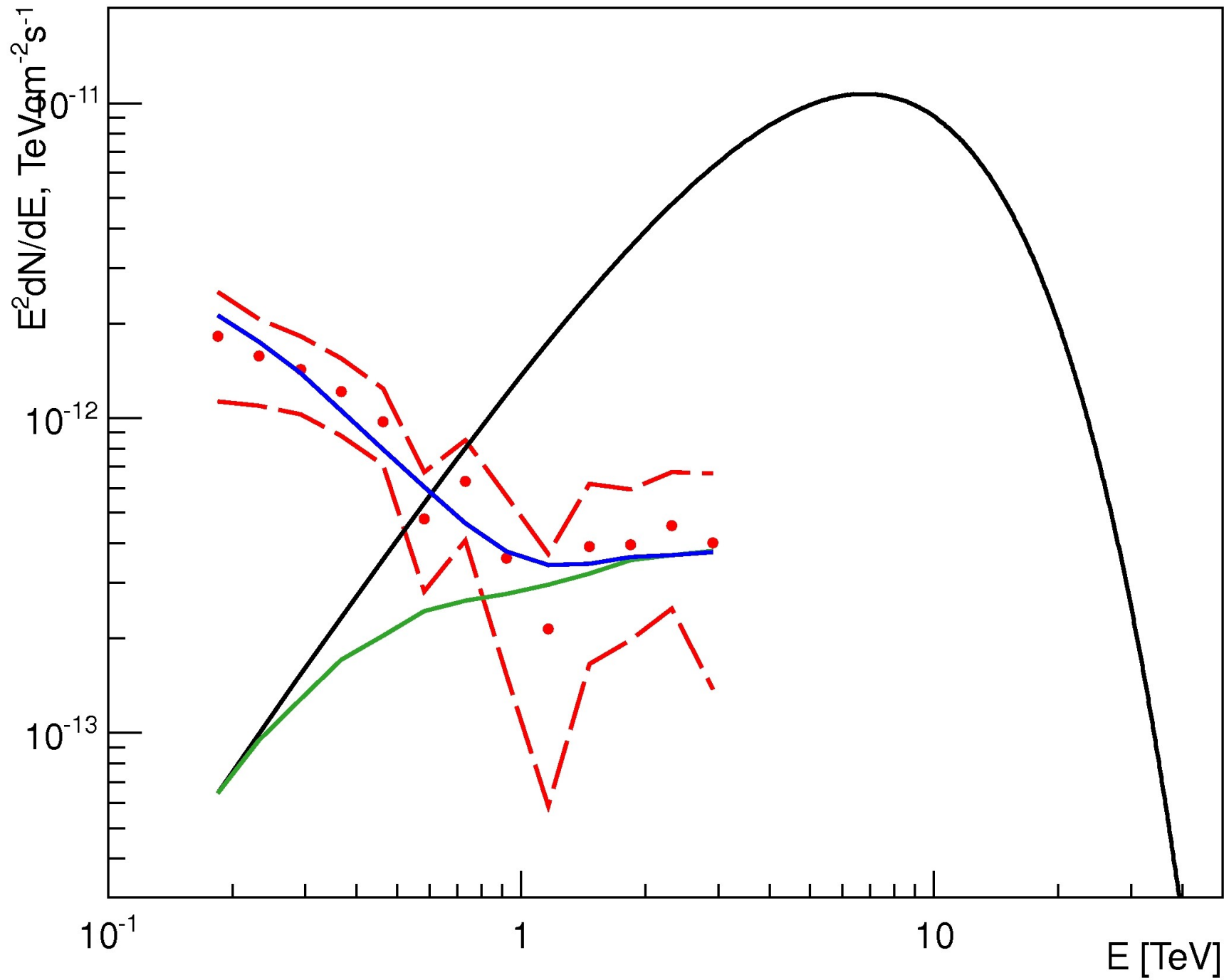
Зеленая линия: аппроксимация наблюдаемого спектра (бины соответствуют экспериментальным)

Статистическая значимость аномалии: при  $\tau > 1$   $Z = 1.57 \sigma$  ( $p = 5.87 \cdot 10^{-2}$ ), при  $\tau > 2$   $Z = 2.11 \sigma$  ( $p_0 = 1.72 \cdot 10^{-2}$ ).

Пример: спектр объекта 1ES1101-232 (полная интенсивность с учетом каскадной компоненты показана синим)



Статистическая значимость аномалии при  $\tau > 2$   $Z = 0.46 \sigma$  ( $p_m = 0.322$ );  $K = p_m/p_0 = 18.7$ .



# Результаты

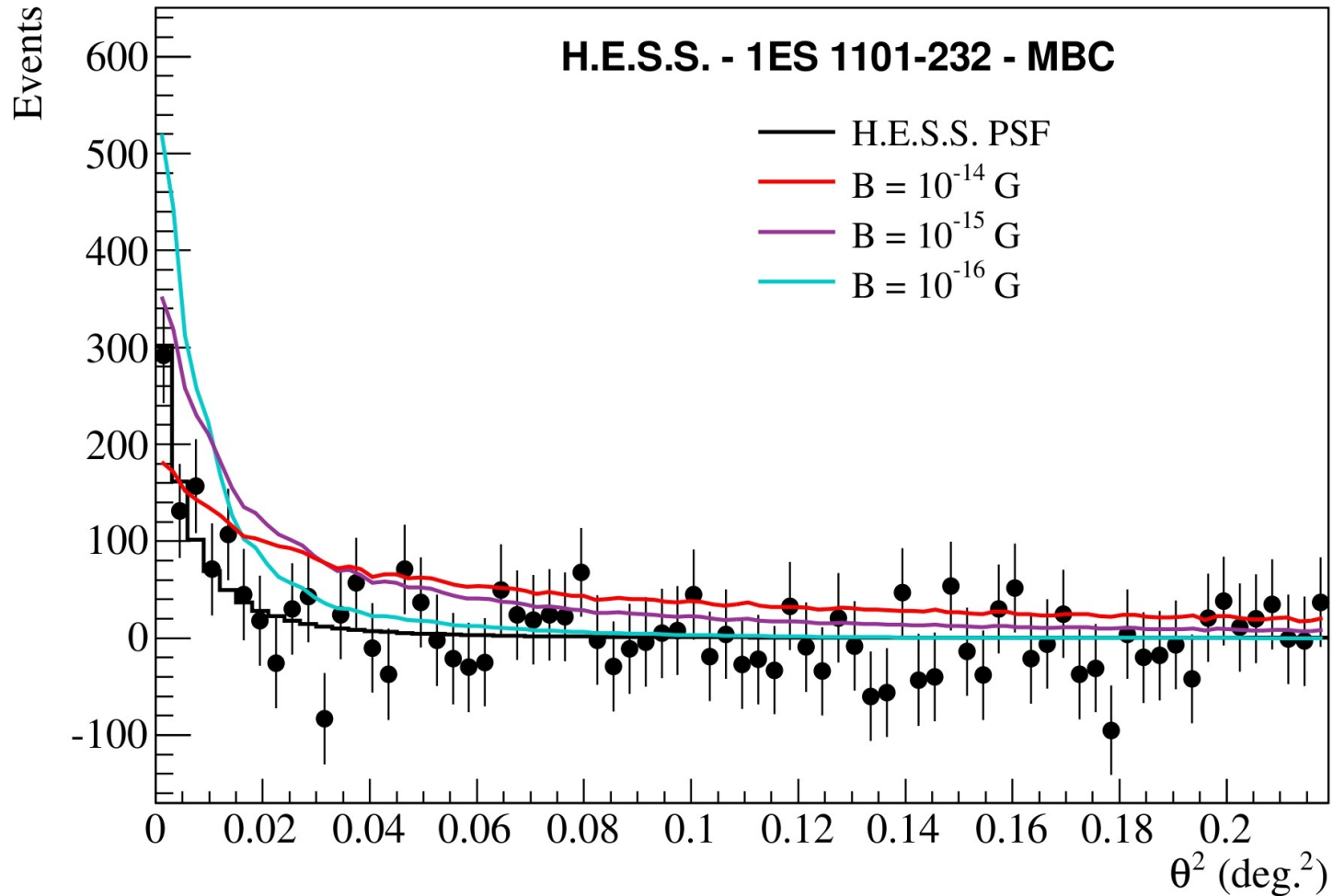
Всего проанализировано 6 спектров (из D. Horns & M. Meyer, (2012)): 1. Mkn 421 ( $z=0.031$ ), Mkn 501 ( $z=0.034$ ), H1426+428 ( $z=0.129$ ), 1ES1101-232 ( $z=0.186$ ), 1ES0347-121 ( $z=0.188$ ), 1ES0414+009 ( $z=0.287$ ).

В случае отсутствия каскадной компоненты ( $\tau > 2$ )  $Z_c = 3.1 \sigma$  ( $p_c = 7.61 \cdot 10^{-4}$ ); с учетом каскадной компоненты  $Z_c = 0.36 \sigma$  ( $p_c = 0.358$ ) (в последнем случае аномалия практически отсутствует).

4 объекта с  $z > 0.12$  не обнаруживают быстрой переменности с периодом менее нескольких месяцев; в 2 близких объектах вклад каскадной компоненты мал.

Примечание: при расчете значимости использовано распределение Гаусса с асимметричными “плечами”. Для более последовательного анализа необходимо другое асимметричное распределение, например, см. A.A. Kirillov, I.A. Kirillov, APh, **19**, 101 (2003); A.A. Kirillov, I.A. Kirillov, Proc 28<sup>th</sup> ICRC (Tsukuba), **2**, 535 (2003).

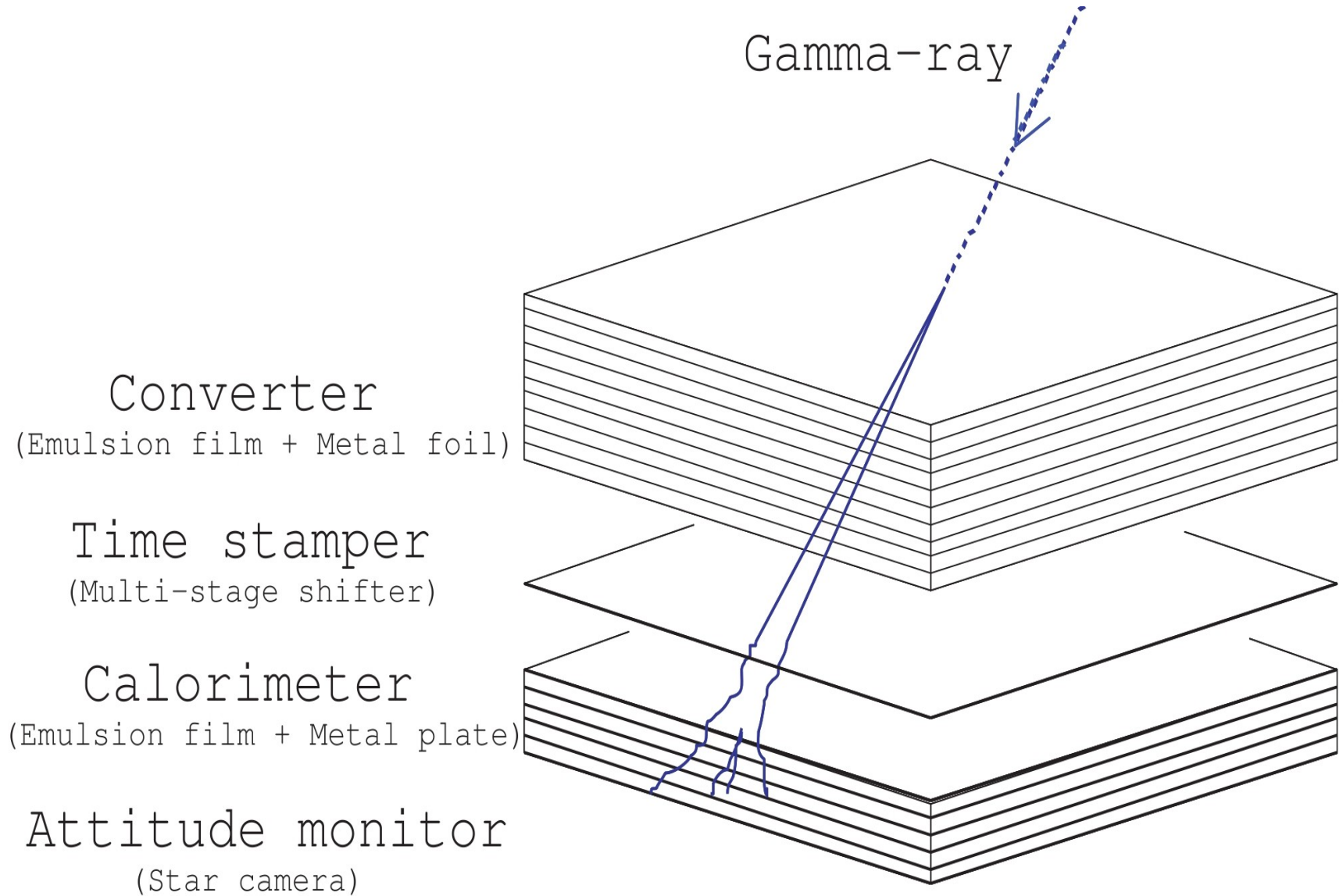
Перспективы косвенного измерения магнитного поля (показано угловое распределение приходящих фотонов, A. Abramowski et al. (H.E.S.S.), A&A, **562**, A145 (2014))



Угловое разрешение: СТА:  $\sim 4'$  (B.S. Acharya et al., APh, **43**, 3 (2013))

# Эмульсионный гамма-телескоп? (Aoki, 1202.2529 et al. (2012))

Достижимо угловое разрешение  $\sim 2'$  при  $E > 10$  GeV



# Выводы

I. Статистическая значимость аномалии в спектре 6 блазаров в отсутствие каскадной компоненты составляет  $3.1 \sigma$ . Этот результат, в целом, согласуется с выводами работы D. Horns & M. Meyer, (2012).

II. Существующие модели, претендующие на объяснение указанной аномалии, не свободны от трудностей.

III. Если  $B < 10^{-16}$  Г, вторичные фотоны от электромагнитных каскадов могут давать заметный вклад в наблюдаемый спектр. Простая модель, рассмотренная в настоящей работе, в принципе, способна описывать спектры рассмотренной выборки источников, в том числе, при высоких энергиях.

IV. Ограничения на величину экстрагалактического магнитного поля и исследования переменности источников чрезвычайно важны для тестирования каскадной модели спектра блазаров.

# Благодарности

Расчеты проведены на кластере Центра данных оперативного космического мониторинга НИИЯФ МГУ. Автор благодарен В.В. Калегаеву за разрешение использовать оборудование и В.О. Бариновой, М.Д. Нгуену, Д.А. Парунакяну за поддержку.

Работа частично поддержана грантом Президента РФ НШ 3110.2014.2 (“Школа им. Г.Т. Зацепина”).

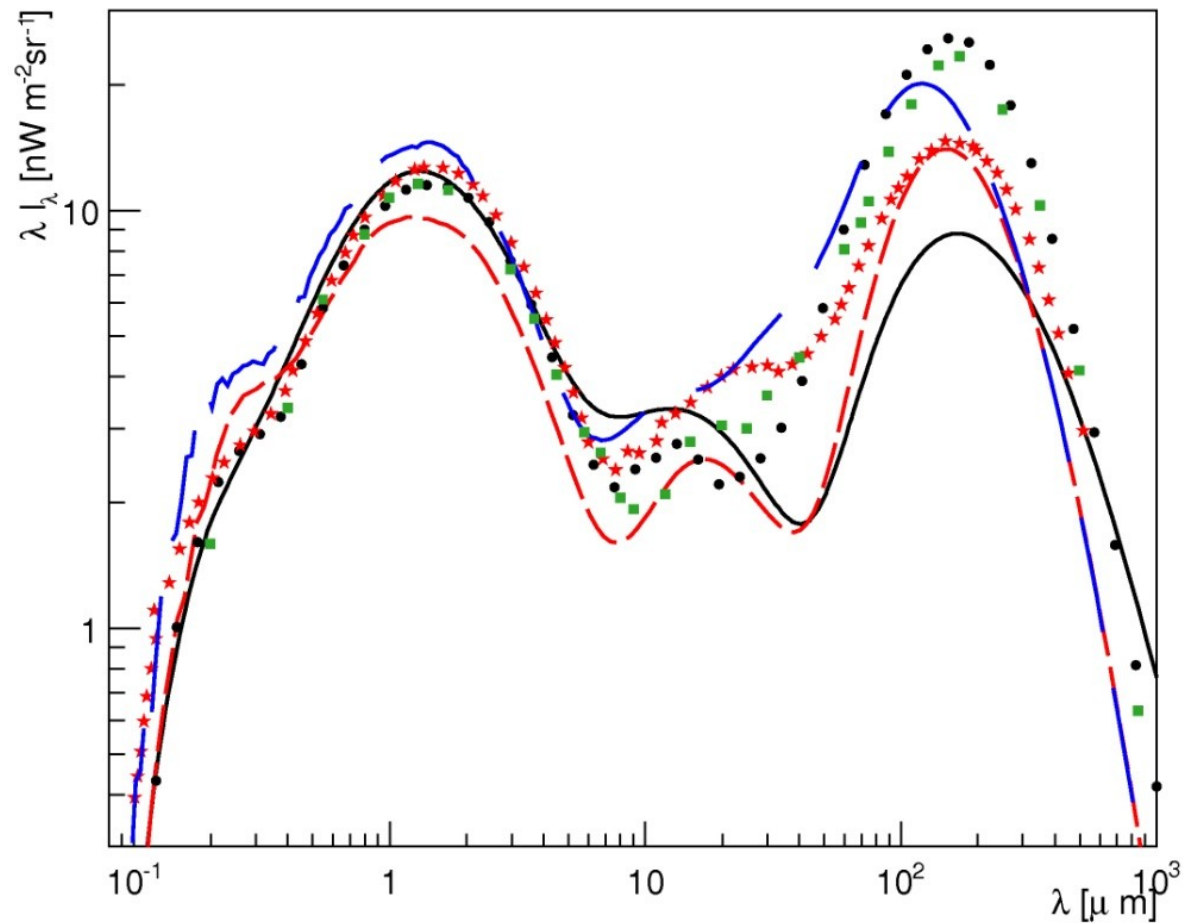


# Дополнительные слайды

I. Модели EBL

II. Ограничения на экстрагалактическое магнитное поле (Extragalactic Magnetic Field, EGMF)

# Модели EBL



1. Черная линия: J.D. Finke et al., *ApJ*, **712**, 238 (2010)

2. Красный пунктир: T.M. Kneiske & H. Dole, *A&A*, **515**, A19 (2010)

3. Черные кружки: A. Dominguez et al., *MNRAS*, **410**, 2556 (2011)

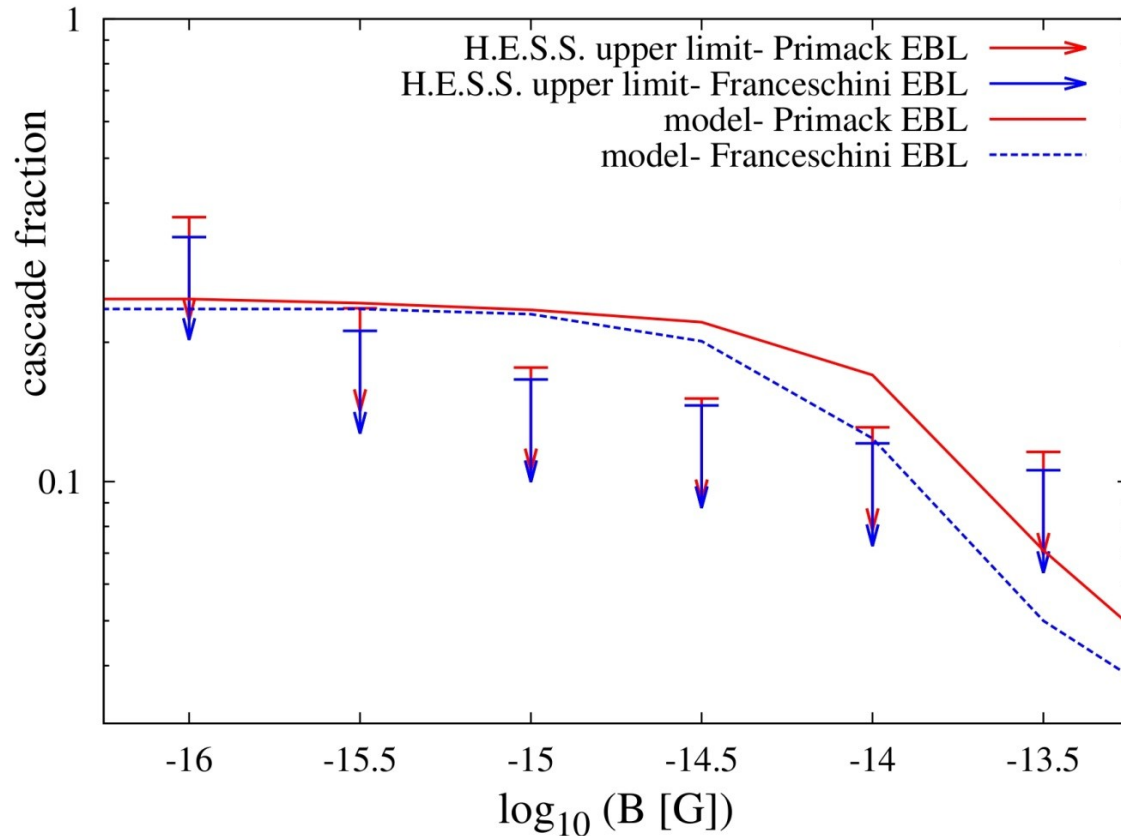
4. Красные звезды: J.R. Primack et al., *AIPCSP*, **1085**, 71 (2008)

5. Синий пунктир: T.M. Kneiske et al., *A&A*, **413**, 807 (2004)

6. Зеленые кружки: A. Franceshini et al., *A&A*, **487**, 837 (2008)

см. также: F.W. Stecker et al., *ApJ*, **648**, 774 (2006)

# Ограничения на экстрагалактическое магнитное поле (EGMF)



A. Abramowski et al. (H.E.S.S.),  
 A&A, **562**, A145 (2014):  
 ненаблюдение уширения  
 углового распределения  
 гамма-квантов позволило  
 исключить область  $B = (10^{-14}, 3 \cdot 10^{-16})$  G (99 % CL).  
 Ограничения сверху:  $B < 10^{-9}$  G  
 (P. Kronberg, Phys. Rep. (1994))  
 $B = 2 \cdot 10^{-12}$  G (“comoving  
 intensity”) достаточно для  
 формирования магнитного  
 поля в кластерах галактик (K.  
 Dolag et al. (2004))

Ограничения снизу (ненаблюдение каскадной компоненты в области энергий  
 $< 100$  ГэВ):  $B > 10^{-15} - 10^{-18}$  G, например:  
 A. Neronov & I. Vovk (2010); K. Dolag et al. (2011); C. Dermer et al. (2011)

Однако (T.C. Arlen et al., astro-ph/1210.2802 (2012)):

INTERGALACTIC MAGNETIC FIELDS AND GAMMA RAY OBSERVATIONS OF EXTREME TEV BLAZARS

TIMOTHY C. ARLEN, VLADIMIR V. VASSILEV

Department of Physics and Astronomy, University of California, Los Angeles, CA 90095, USA

THOMAS WEISGARBER, SCOTT P. WAKELY

Enrico Fermi Institute, University of Chicago, Chicago, IL 60637, USA

S. YUSEF SHAFI

Department of Electrical Engineering and Computer Sciences, University of California, Berkeley, CA 94720, USA

*Draft version July 29, 2013*

The intergalactic magnetic field (IGMF) in cosmic voids can be indirectly probed through its effect on electromagnetic cascades initiated by a source of TeV gamma-rays, such as active galactic nuclei (AGN). AGN that are sufficiently luminous at TeV energies, “extreme TeV blazars” can produce detectable levels of secondary radiation from inverse Compton (IC) scattering of the electrons in the cascade, provided that the IGMF is not too large. We review recent work in the literature which utilizes this idea to derive constraints on the IGMF for three TeV-detected blazars-1ES 0229+200, 1ES 1218+304, and RGB J0710+591, and we also investigate four other hard-spectrum TeV blazars in the same framework. Through a recently developed detailed 3D particle-tracking Monte Carlo code, incorporating all major effects of QED and cosmological expansion, we research effects of major uncertainties such as the spectral properties of the source, uncertainty in the UV - far IR extragalactic background light (EBL), undersampled Very High Energy (VHE; energy  $\geq 100$  GeV) coverage, past history of gamma-ray emission, source vs. observer geometry, and jet AGN Doppler factor. The implications of these effects on the recently reported lower limits of the IGMF are thoroughly examined to conclude that presently available data are compatible with a zero IGMF hypothesis.

presently available data are compatible with a zero IGMF hypothesis.