

# Исследования широких атмосферных ливней для астрофизики и физики частиц


Сергей Троицкий  
(ИЯИ РАН)

*НИИЯФ-75, 16 февраля 2021*





*Включены результаты, полученные в соавторстве с:*

- Telescope Array (TA) Collaboration 
- Working Group on Hadronic Interactions and Shower Physics (WHISP)
- Ю.А. Фоминым, Н.Н. Калмыковым, Г.В. Куликовым, В.П. Сулаковым (НИИЯФ МГУ),  
И.С. Карпиковым, М.Ю. Кузнецовым, Г.И. Рубцовым (ИЯИ РАН)

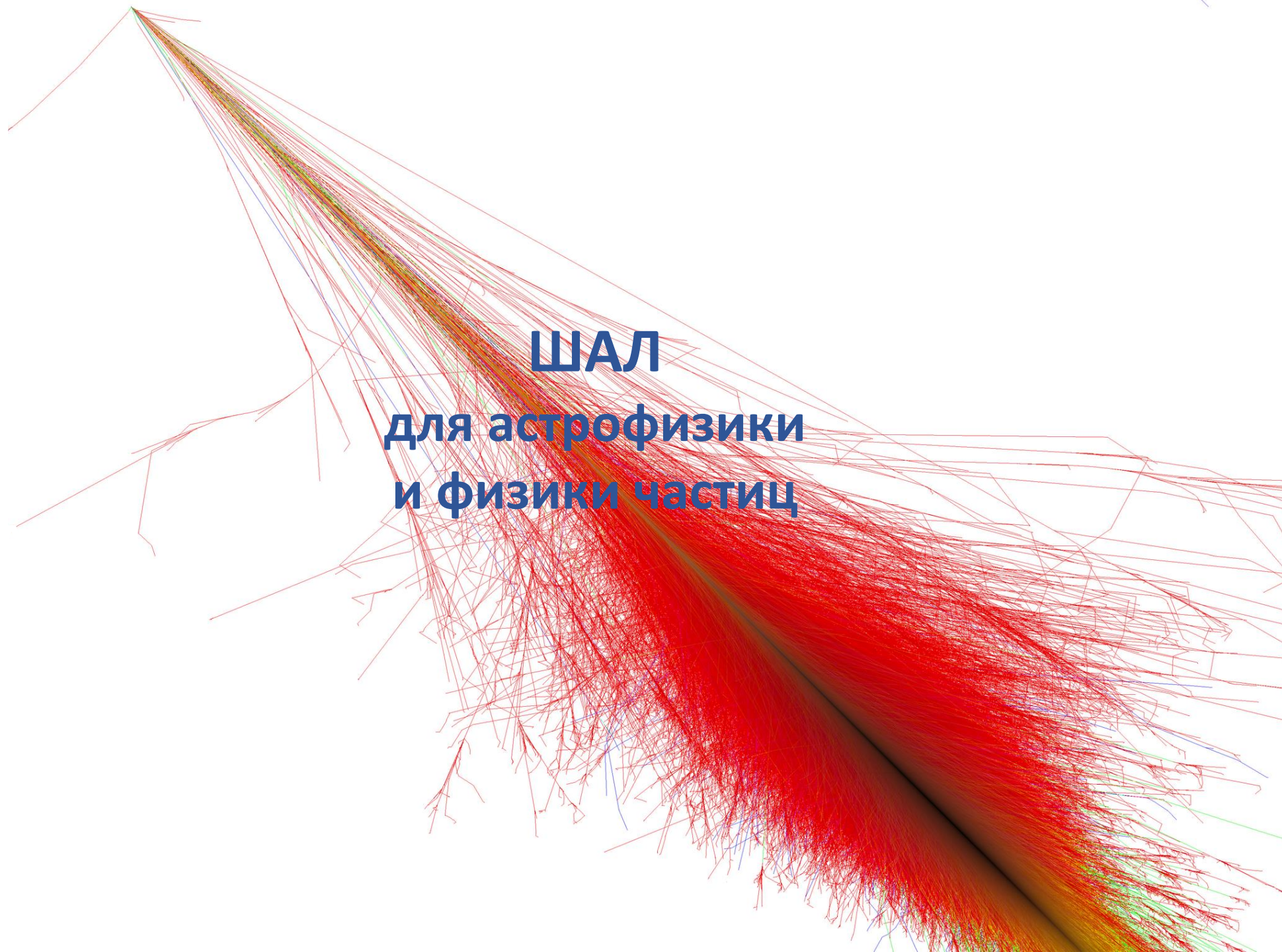


*Благодарность за интересные обсуждения:*



Н.Н. Калмыкову (НИИЯФ МГУ), Г.И. Рубцову, Ю.В. Стенькину, О.Б. Щеголеву (ИЯИ РАН)

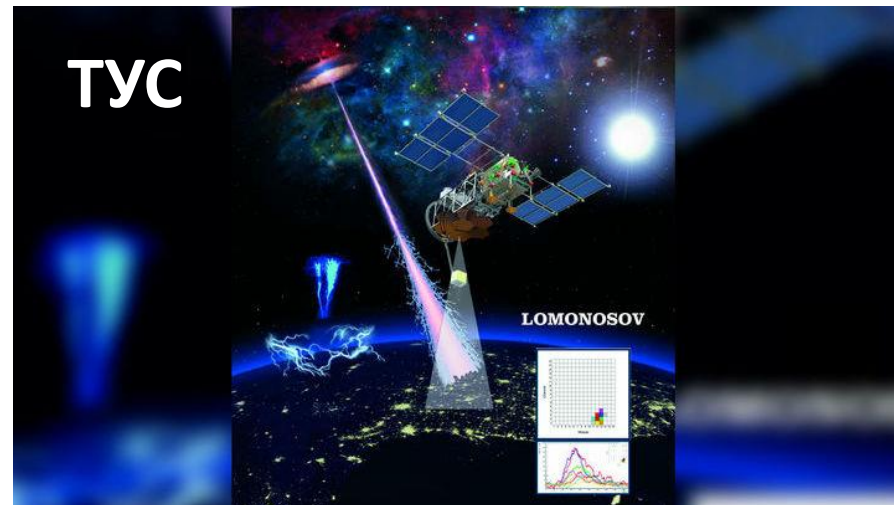





**ШАЛ**  
**для астрофизики**  
**и физики частиц**

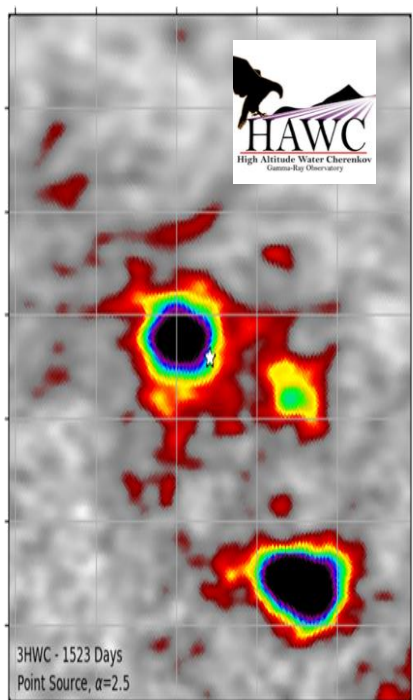


# ШАЛ для НИИЯФ МГУ



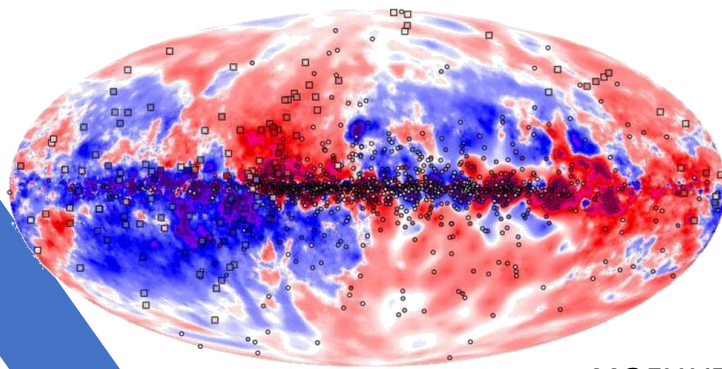
The image shows a night sky filled with stars, with a curved building silhouette at the bottom. The building has several windows, some of which are illuminated from within, showing interior structures. The sky is dark, and the stars are scattered across the frame, with a slight concentration in the center. The overall scene is a combination of natural starlight and artificial light from the building.

**История первая**  
**ШАЛ для астрофизики**



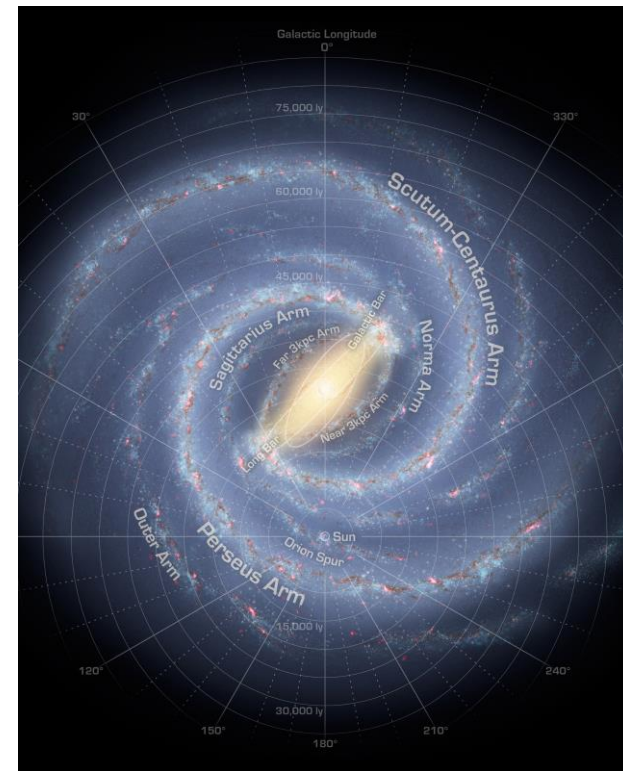
космические  
лучи  
низких энергий  
рождаются в  
Галактике

наблюдение фотонов и нейтрино  
выше 100 ТэВ подтверждает ускорение  
протонов **до  $\sim 10^{15}$  эВ** в нашей Галактике

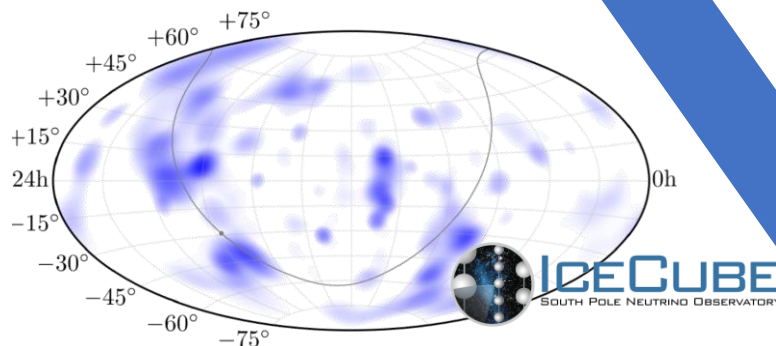
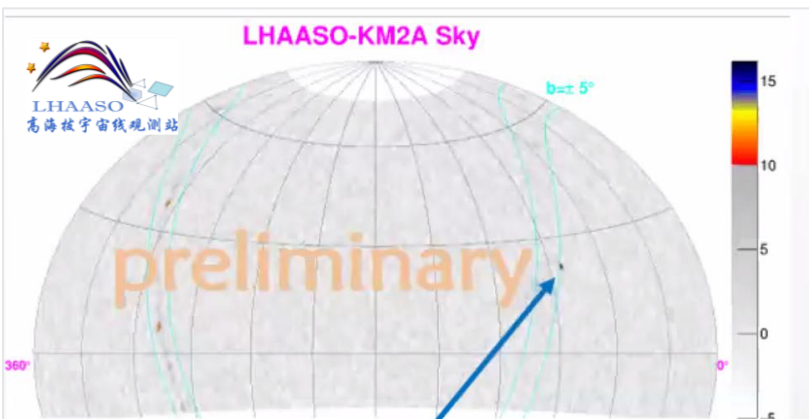
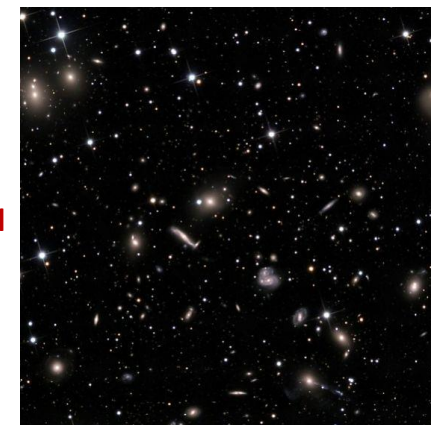


магнитное поле  
нашей Галактики  
не может удержать протоны  
с энергиями **выше  $\sim 10^{18}$  эВ**

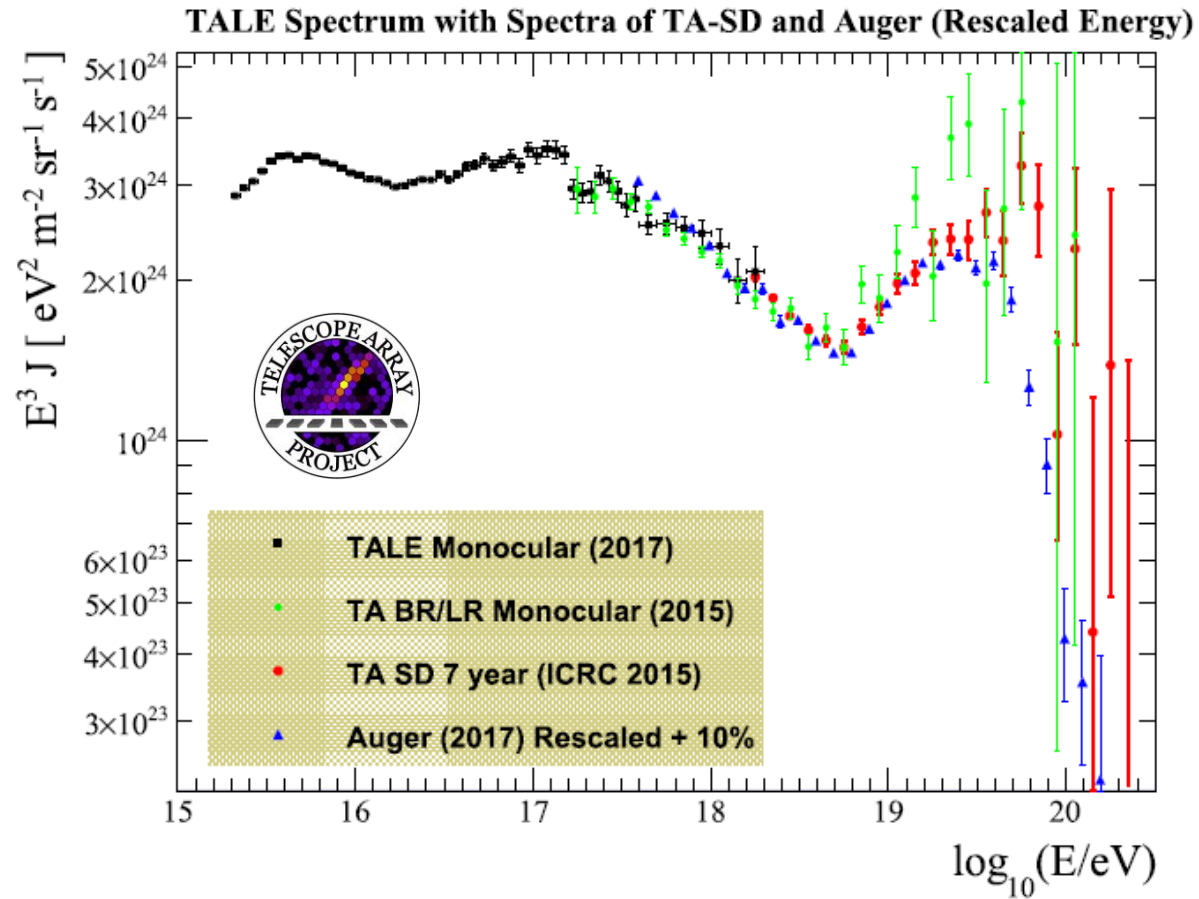
**$10^{15} - 10^{18}$  эВ**  
**?**



космические лучи  
высоких энергий  
собираются  
со всей  
Вселенной



# Переход от галактических к внегалактическим источникам: излом в спектре, но где?

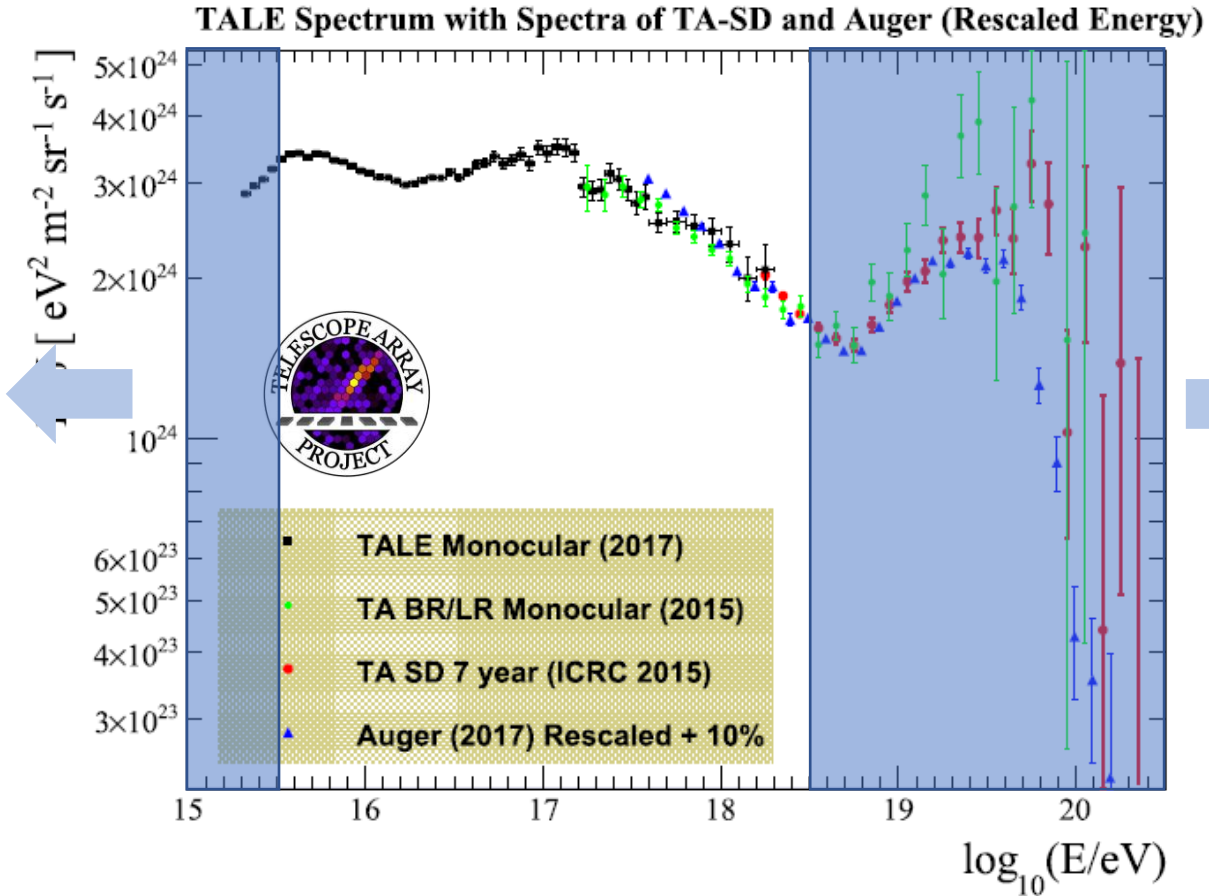


TA 2018





# Переход от галактических к внегалактическим источникам: излом в спектре, но где?



галактические  
(аргумент с гамма-  
наблюдениями и др.)

внегалактические  
(аргумент с магнитным  
полем и др.)

TA 2018



# Переход от галактических к внегалактическим источникам: открытие излома, ШАЛ-МГУ 1958

SOVIET PHYSICS JETP

VOLUME 35 (8), NUMBER 3

MARCH, 1959

ON THE SIZE SPECTRUM OF EXTENSIVE AIR SHOWERS

G. V. KULIKOV and G. B. KRISTIENSEN

Moscow State University

Submitted to JETP editor April 22, 1958

J. Exptl. Theoret. Phys. (U.S.S.R.) 35, 635-640 (September, 1958)

Particles of  $> 10^{16}$  ev, propagating practically in straight lines, leave the galaxy. If we assume that a similar process takes place in other galaxies as well, it is evident that the particles with  $E \geq 10^{16}$  ev may have a metagalactic origin.

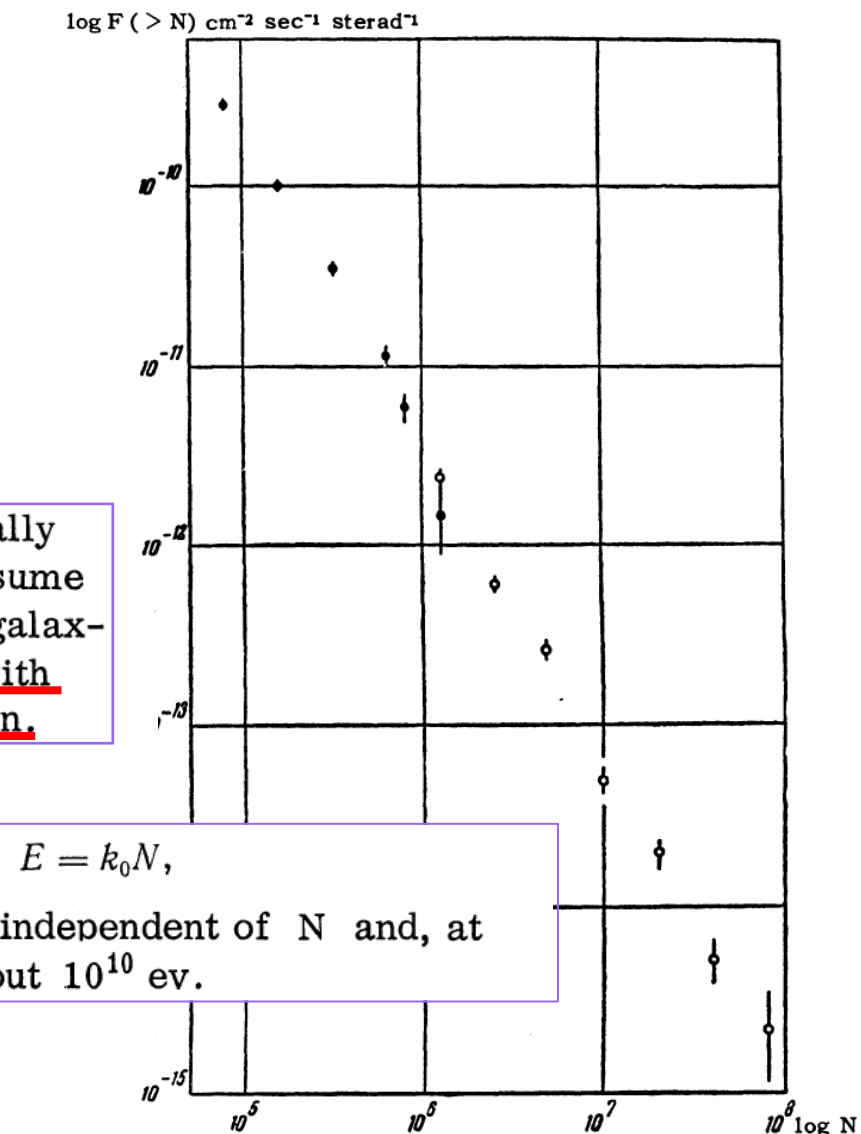


FIG. 2. Integral size spectrum of EAS. ● – measurements of the present experiment, ○ – measurements of reference 7.

# Переход от галактических к внегалактическим источникам: открытие излома, ШАЛ-МГУ 1958

SOVIET PHYSICS JETP

VOLUME 35 (8), NUMBER 3

MARCH, 1959

ON THE SIZE SPECTRUM OF EXTENSIVE AIR SHOWERS

G. V. KULIKOV and G. B. KRISTIANSEN

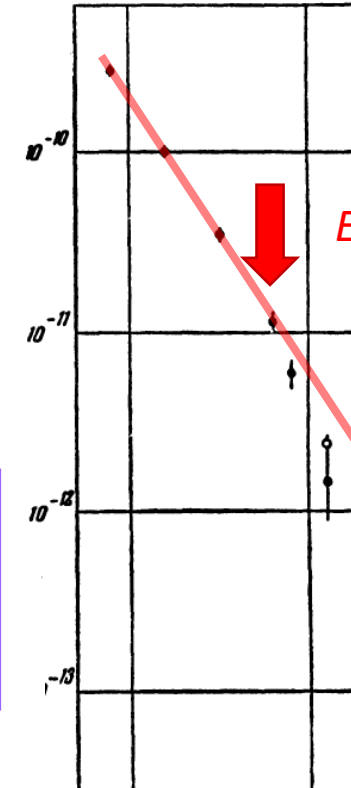
Moscow State University

Submitted to JETP editor April 22, 1958

J. Exptl. Theoret. Phys. (U.S.S.R.) 35, 635-640 (September, 1958)

Particles of  $> 10^{16}$  ev, propagating practically in straight lines, leave the galaxy. If we assume that a similar process takes place in other galaxies as well, it is evident that the particles with  $E \geq 10^{16}$  ev may have a metagalactic origin.

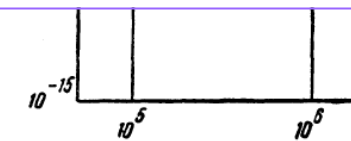
$\log F (> N) \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1} \text{ sterad}^{-1}$



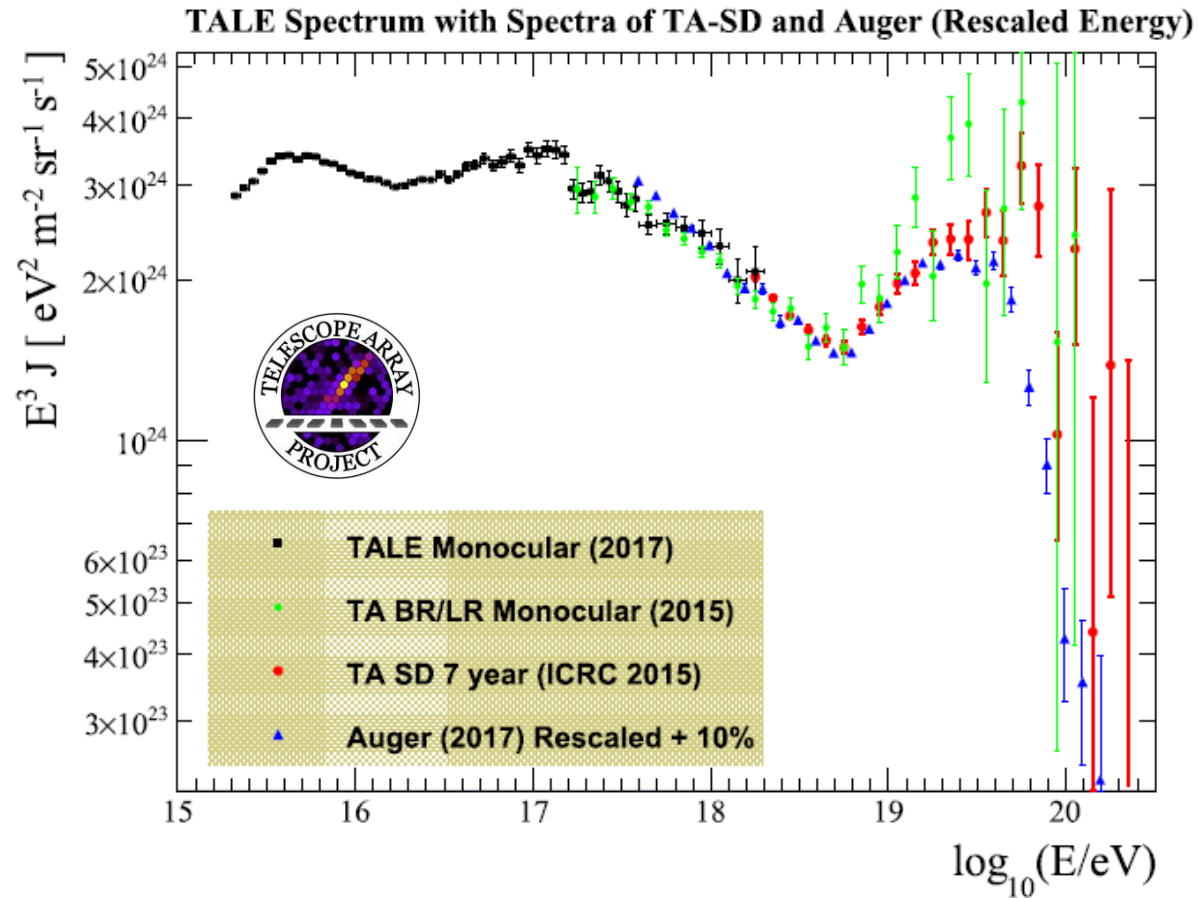
$E \approx 8 \times 10^{15} \text{ эВ}$

$$E = k_0 N,$$

where  $k_0$  is almost independent of  $N$  and, at sea-level, equals about  $10^{10}$  ev.



# Переход от галактических к внегалактическим источникам: что происходит при $10^{17}$ эВ?



TA 2018



# Переход от галактических к внегалактическим источникам: что происходит при $10^{17}$ эВ?

PRL 107, 171104 (2011)

PHYSICAL REVIEW LETTERS

week ending  
21 OCTOBER 2011

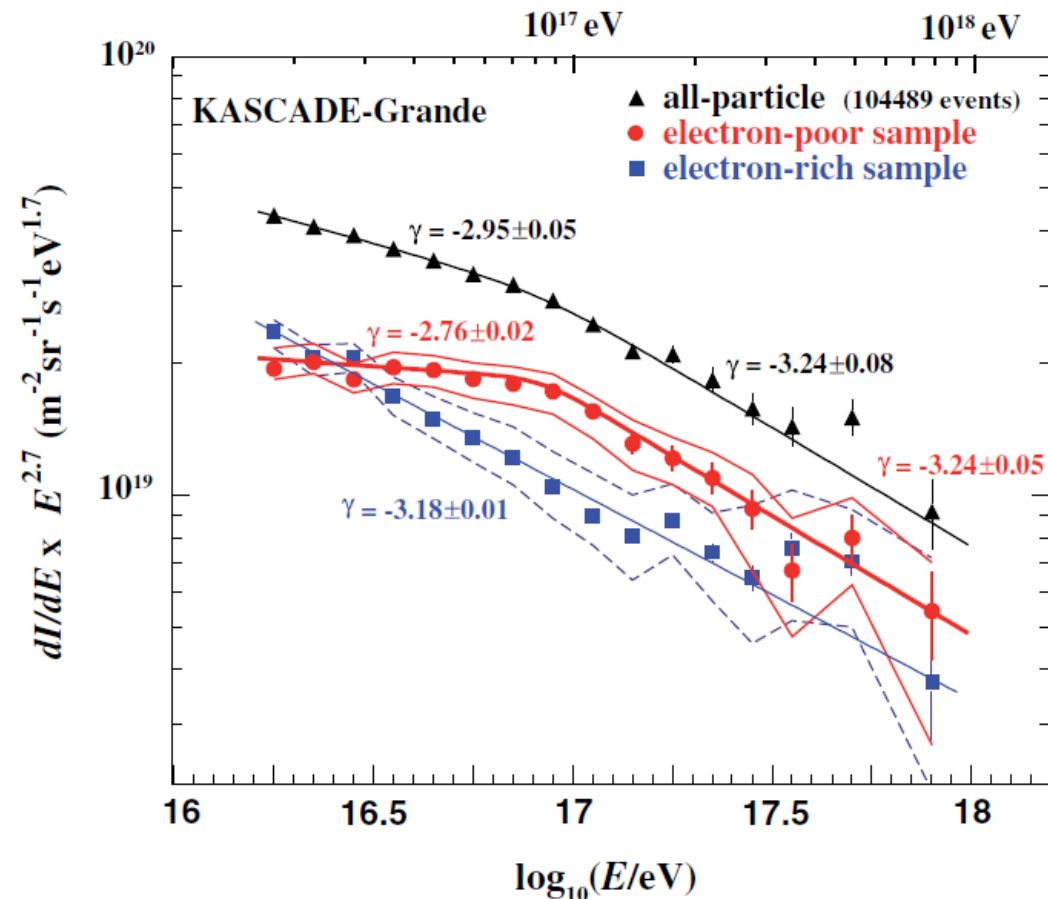
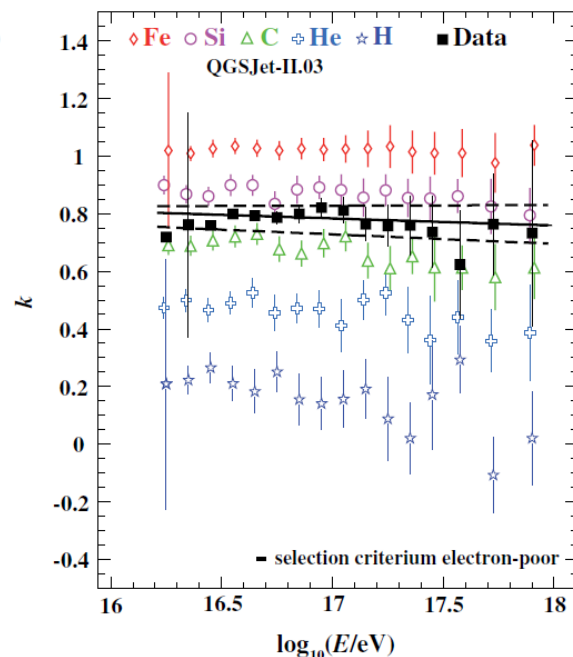


## Kneelike Structure in the Spectrum of the Heavy Component of Cosmic Rays Observed with KASCADE-Grande

W. D. Apel,<sup>1</sup> J. C. Arteaga-Velázquez,<sup>2</sup> K. Bekk,<sup>1</sup> M. Bertaina,<sup>3</sup> J. Blümer,<sup>1,4</sup> H. Bozdog,<sup>1</sup> I. M. Brancus,<sup>5</sup> P. Buchholz,<sup>6</sup> E. Cantoni,<sup>3,7</sup> A. Chiavassa,<sup>3</sup> F. Cossavella,<sup>4,\*</sup> K. Daumiller,<sup>1</sup> V. de Souza,<sup>8</sup> F. Di Piero,<sup>3</sup> P. Doll,<sup>1</sup> R. Engel,<sup>1</sup> J. Engler,<sup>1</sup> M. Finger,<sup>4</sup> D. Fuhrmann,<sup>9</sup> P. L. Ghia,<sup>7</sup> H. J. Gils,<sup>1</sup> R. Glasstetter,<sup>9</sup> C. Grupen,<sup>6</sup> A. Haungs,<sup>1,11</sup> D. Heck,<sup>1</sup> J. R. Hörandel,<sup>10</sup> D. Huber,<sup>4</sup> T. Huege,<sup>1</sup> P. G. Isar,<sup>1,7</sup> K.-H. Kampert,<sup>9</sup> D. Kang,<sup>4</sup> H. O. Klages,<sup>1</sup> K. Link,<sup>4</sup> P. Łuczak,<sup>11</sup> M. Ludwig,<sup>4</sup> H. J. Mathes,<sup>1</sup> H. J. Mayer,<sup>1</sup> M. Melissas,<sup>4</sup> J. Milke,<sup>1</sup> B. Mitrica,<sup>5</sup> C. Morello,<sup>7</sup> G. Navarra,<sup>3,3‡</sup> J. Oehlschläger,<sup>1</sup> S. Ostapchenko,<sup>1,8</sup> S. Over,<sup>6</sup> N. Palmieri,<sup>4</sup> M. Petcu,<sup>5</sup> T. Pierog,<sup>1</sup> H. Rebel,<sup>1</sup> M. Roth,<sup>1</sup> H. Schieler,<sup>1</sup> F. G. Schröder,<sup>1</sup> O. Sima,<sup>12</sup> G. Toma,<sup>5</sup> G. C. Trinchero,<sup>7</sup> H. Ulrich,<sup>1</sup> A. Weindl,<sup>1</sup> J. Wochele,<sup>1</sup> M. Wommer,<sup>1</sup> and J. Zabierowski<sup>11</sup>

(KASCADE-Grande Collaboration)

детекторы мюонов и  
э/м компоненты  
позволяют разделить  
первичные частицы  
на легкие и тяжелые



Излом при  $10^{17}$  эВ связан с тяжелыми ядрами



# Переход от галактических к внегалактическим источникам: результаты TALE

Telescope Array –  
гибридный эксперимент по регистрации UHECR,  
крупнейший в Северном полушарии (Юта) –  
США, Япония, Россия, Корея, Бельгия



Наземная решетка 700 кв. км → 2400 кв. км



Флуоресцентные телескопы

TALE = Telescope Array Low-energy Extension  
флуоресцентный телескоп, «смотрящий вверх»



# Переход от галактических к внегалактическим источникам:

## TALE

- флуоресцентные телескопы регистрируют также и черенковский свет
- это позволяет наблюдать КЛ от ПэВ до ЭэВ одним инструментом
- одновременно спектр и состав

ТА 2018, 2021

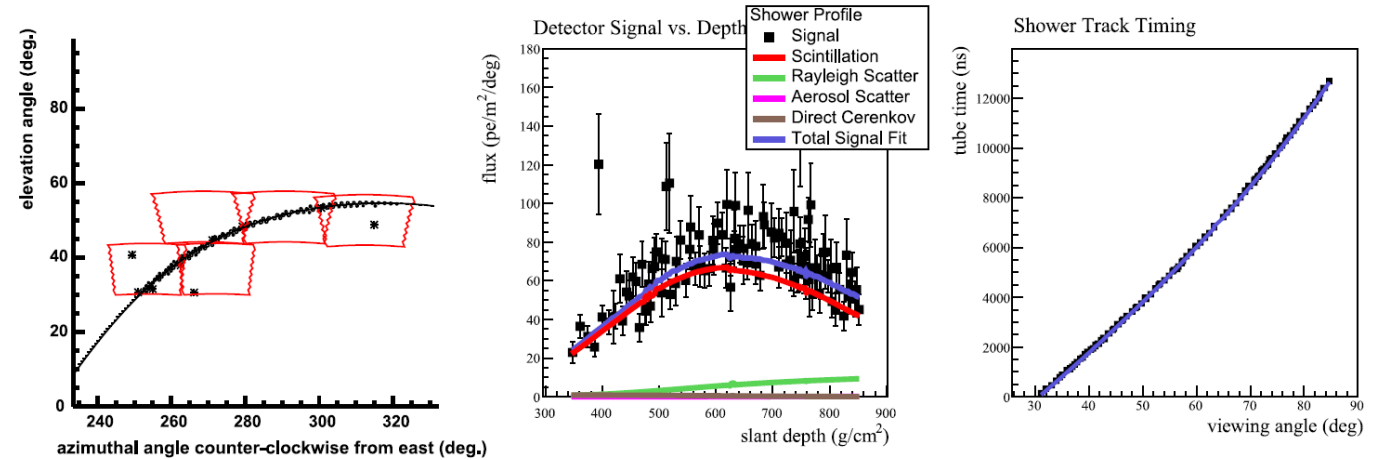
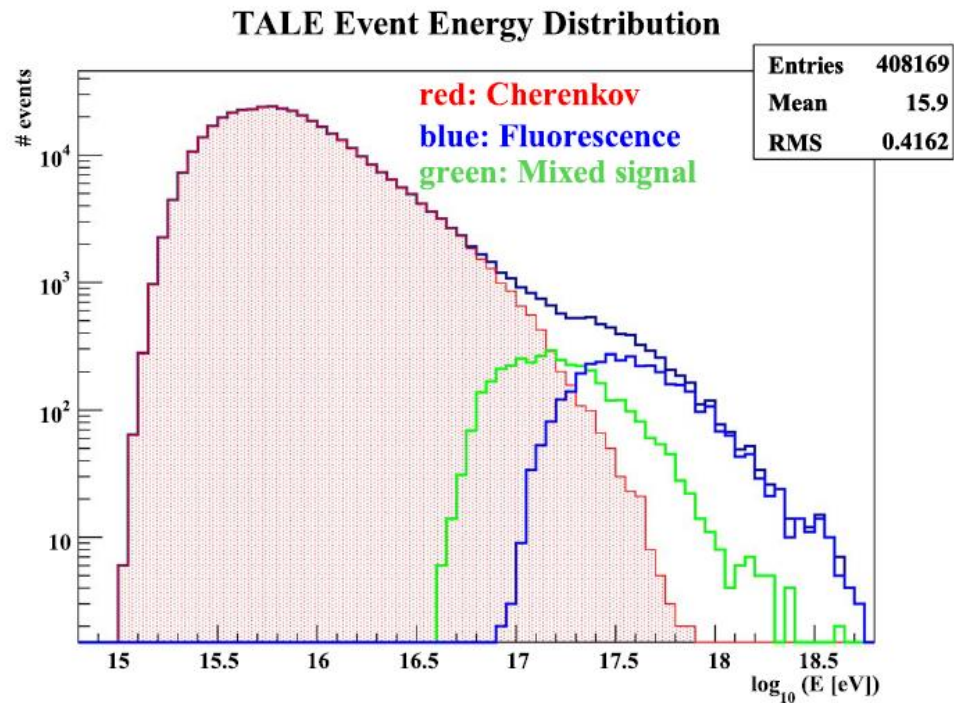


Figure 5. Five-telescope fluorescence event. The display panels show the event image (PMT trigger pattern), the reconstructed shower profile with relative contributions of FL/CL and scattered CL, and the time progression of triggered PMTs.

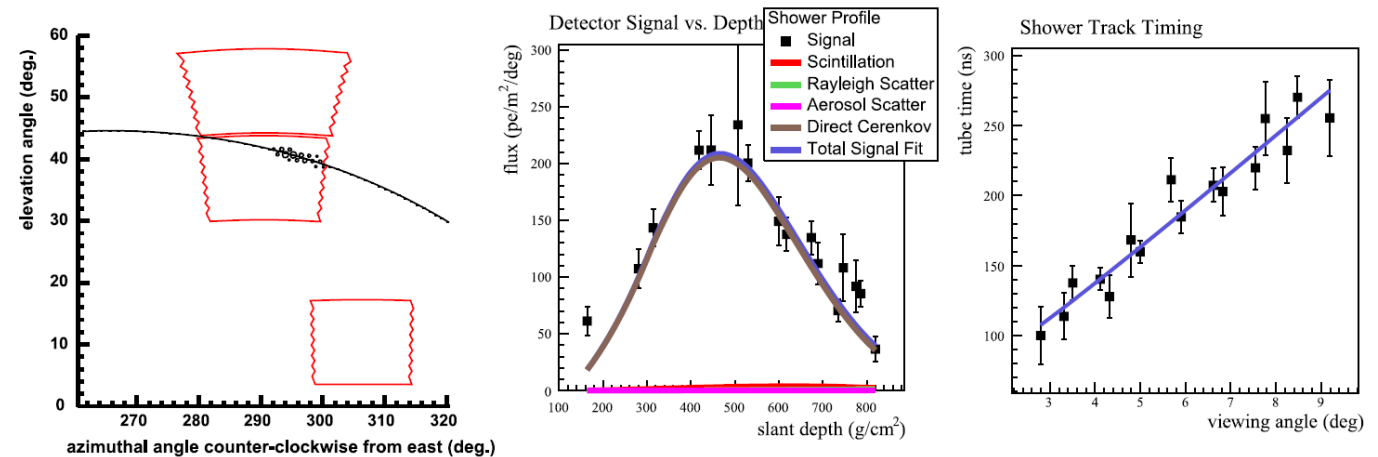
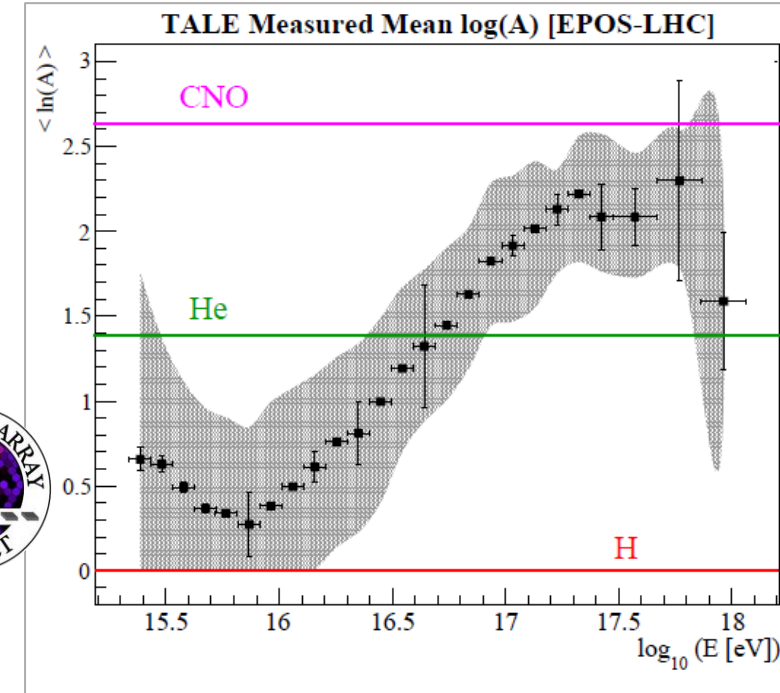
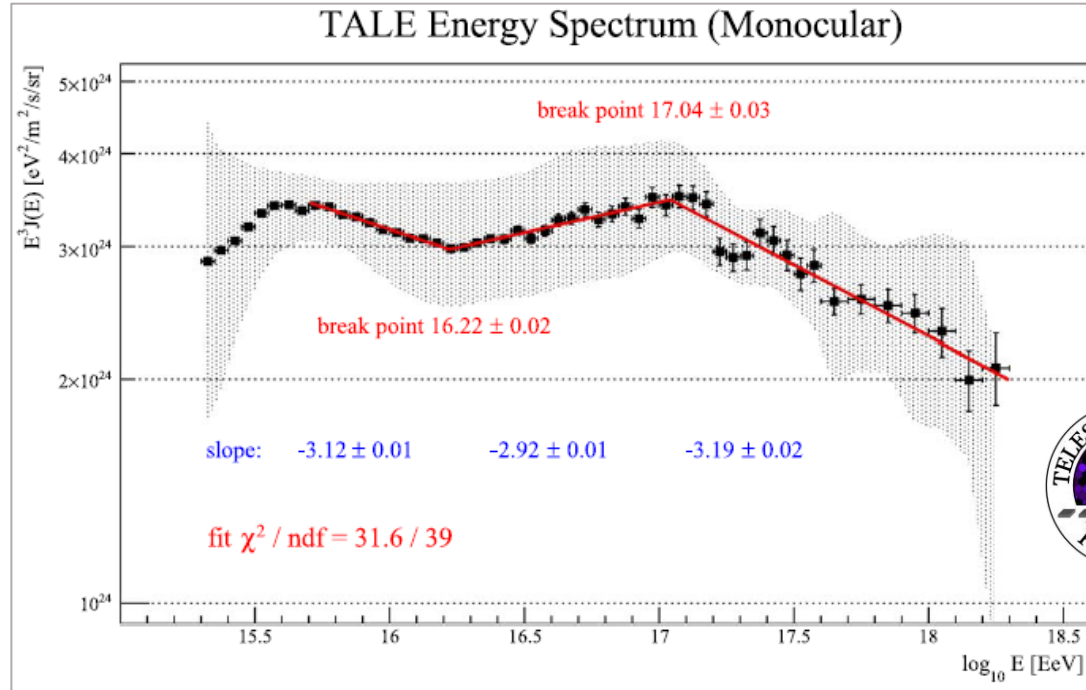


Figure 6. One-telescope Cherenkov event. The display panels show the event image (PMT trigger pattern), the reconstructed shower profile with relative contributions of FL/CL and scattered CL, and the time progression of triggered PMTs.



# Переход от галактических к внегалактическим источникам: TALE, результаты



- первый излом на  $10^{15.6}$  эВ
- второй излом на  $10^{17.04}$  эВ
- утяжеление состава от первого излома ко второму

максимальная энергия  
галактических источников  
разных типов ядер?





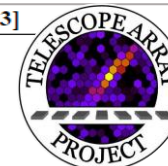
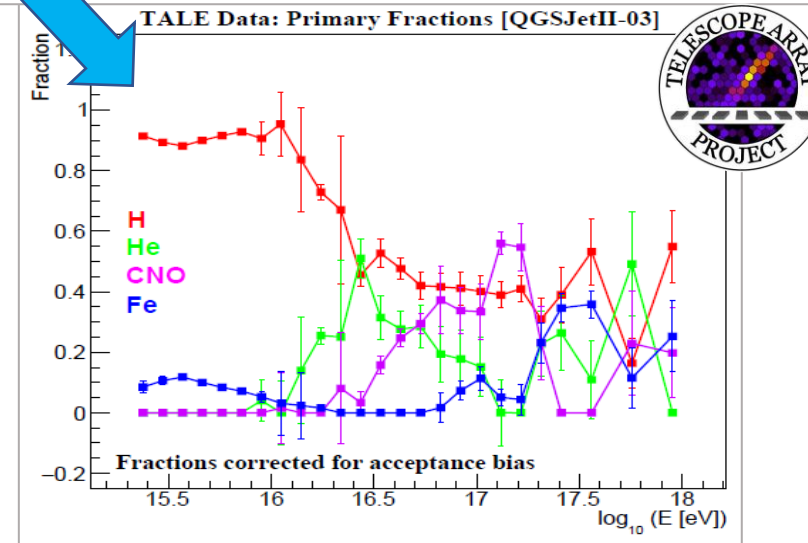
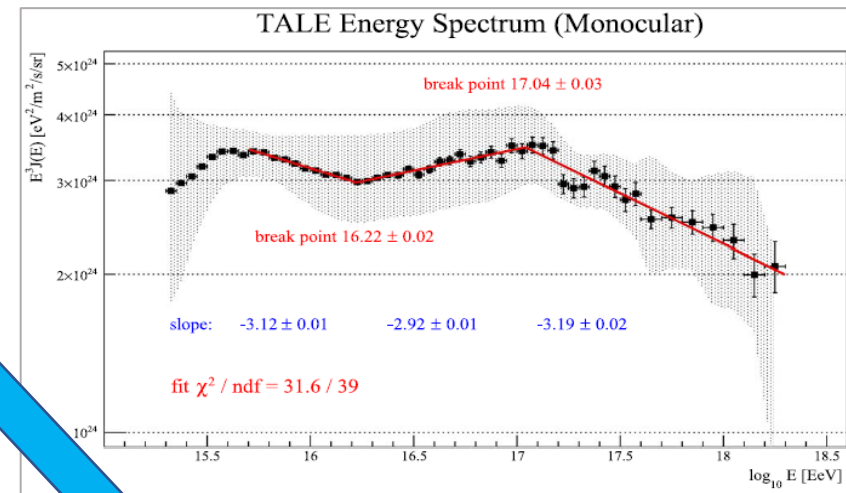
# Переход от галактических к внегалактическим источникам:

## TALE, результаты

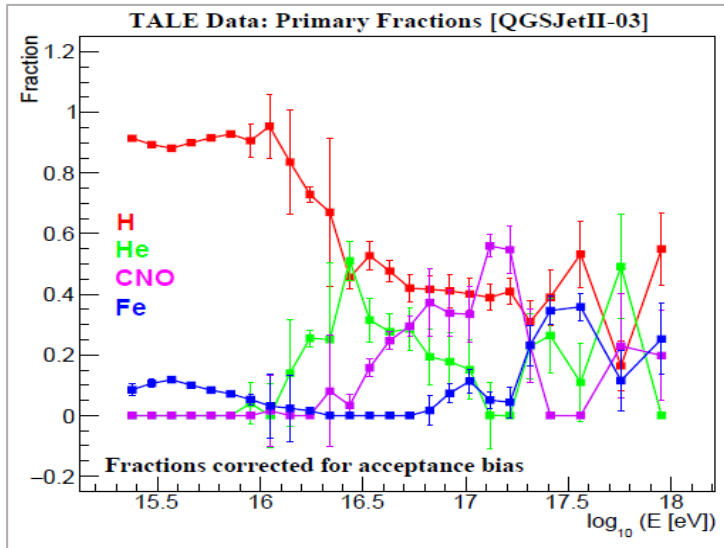
Попытка покомпонентного фита:  
последовательно доминируют всё более тяжелые ядра!

Условия ускорения	Максимальная энергия	Fe/p
Хиллас (размер ускорителя)	$\sim Z$	26
Диффузное (потери на излучение)	$\sim A^4/Z^4$	21.5

*Ptitsyna, ST 2010*



# Где гелий?



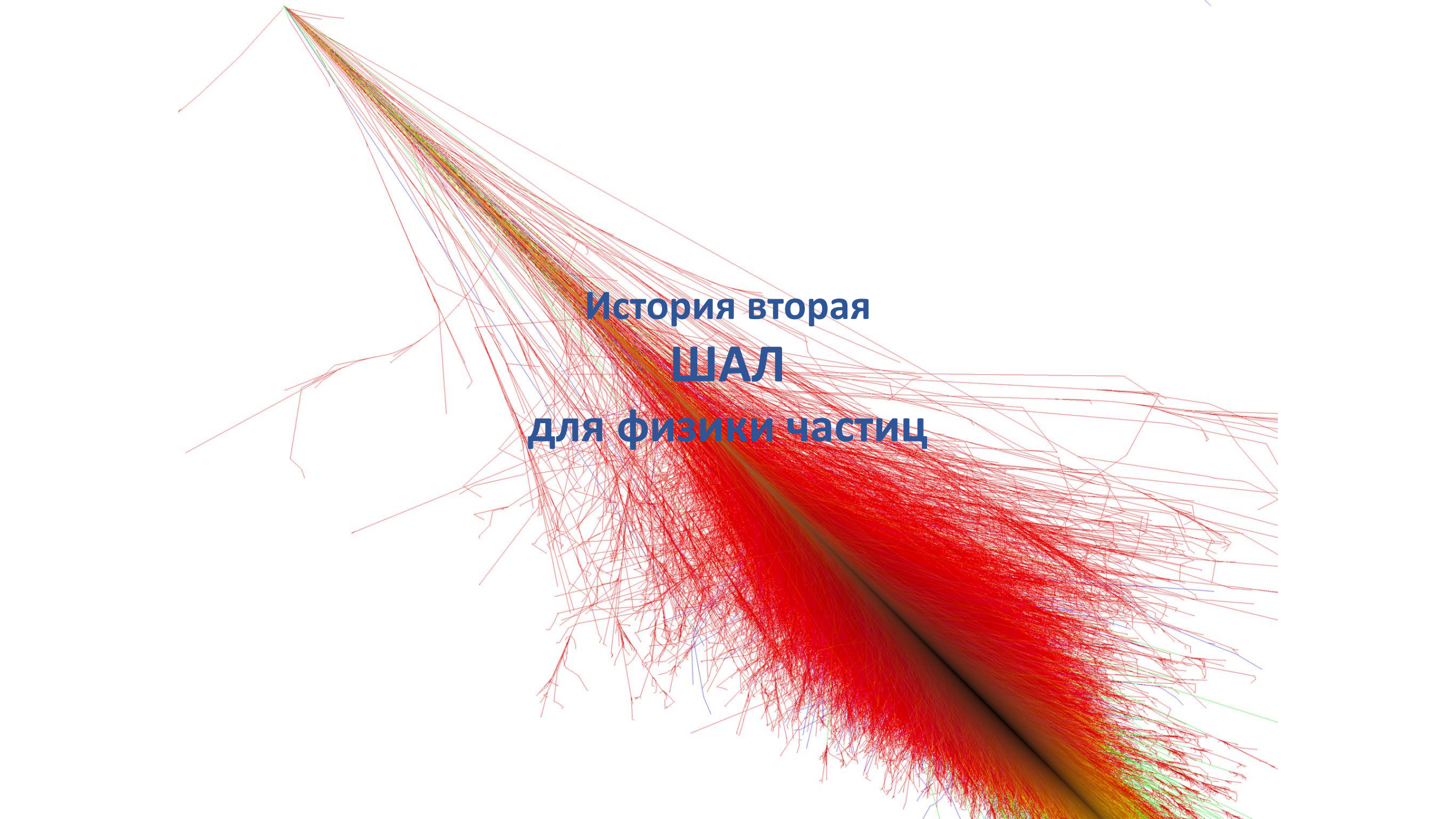
- TALE: совместно с чисто протонным составом на  $10^{15.5}$  эВ
- KASCADE, IceTop, Tunka – значительная доля гелия

- разные способы – разные энергии
- разные способы – разный состав

- флуоресцентные детекторы – энергия ниже
- состав по мюонам – тяжелее

**НЕКОРРЕКТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛИВНЯ – ФИЗИКА ЧАСТИЦ!**



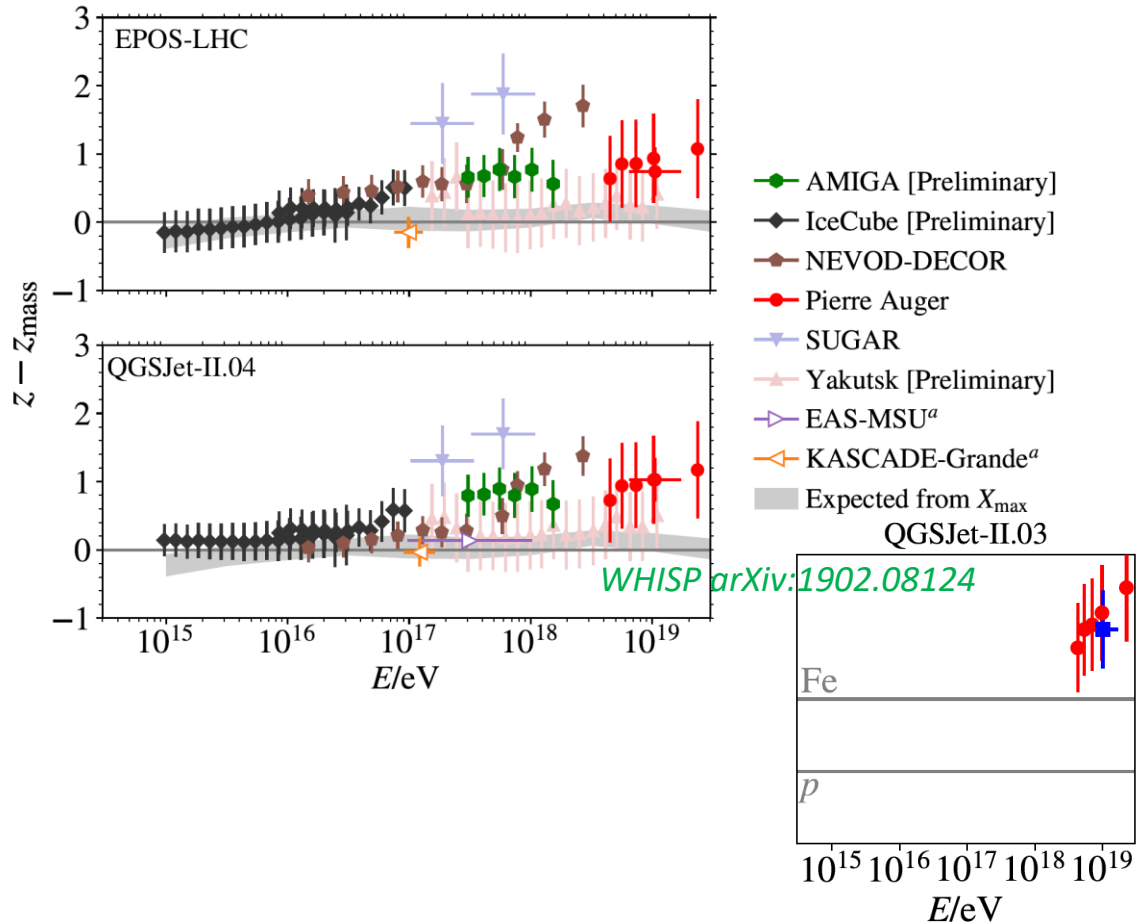


**История вторая**  
**ШАЛ**  
**для физики частиц**

# “Мюонный избыток”: в реальных ШАЛ видят больше мюонов, чем в Монте-Карло?

*Disclaimer:* I am a member of WHISP\* and endorse the WHISP mu-excess plots as the best possible representation of reported data. However, I am not representing WHISP in this discussion, these are my own comments.

\* WHISP= Working group on Hadronic Interactions and Shower Physics (Auger, TA, IceCube, KASCADE, NEVOD-DECOR, Yakutsk, EAS-MSU, SUGAR, AGASA)



Состав, определенный по мюонам, тяжелее, чем по другим критериям. При высоких энергиях состав по мюонам становится тяжелее железа



# “Мюонный избыток”: не наблюдается в данных ШАЛ-МГУ!

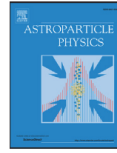
Astroparticle Physics 92 (2017) 1–6



Contents lists available at ScienceDirect

Astroparticle Physics

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/astropartphys](http://www.elsevier.com/locate/astropartphys)



No muon excess in extensive air showers at 100–500 PeV primary energy: EAS–MSU results

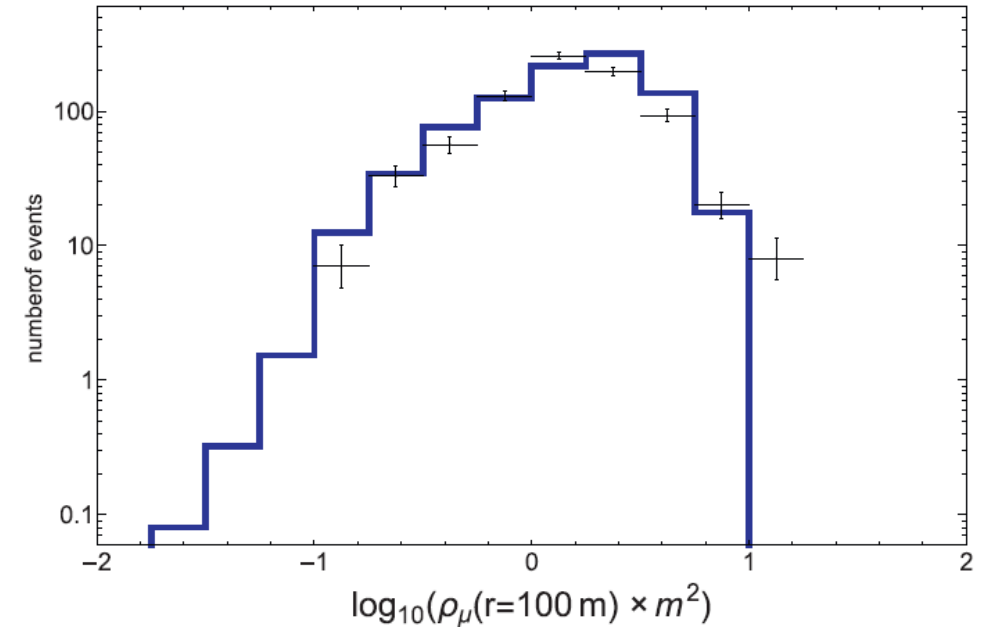


Yu.A. Fomin<sup>a</sup>, N.N. Kalmykov<sup>a</sup>, I.S. Karpikov<sup>b</sup>, G.V. Kulikov<sup>a</sup>, M.Yu. Kuznetsov<sup>b</sup>, G.I. Rubtsov<sup>b</sup>, V.P. Sulakov<sup>a</sup>, S.V. Troitsky<sup>b,\*</sup>

<sup>a</sup>D.V. Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia

<sup>b</sup>Institute for Nuclear Research of the Russian Academy of Sciences, 60th October Anniversary prospect 7A, 117312 Moscow, Russia

- фиксируем состав по возрасту ливней
- моделируем мюоны с этим составом
- идеальное согласие с данными!



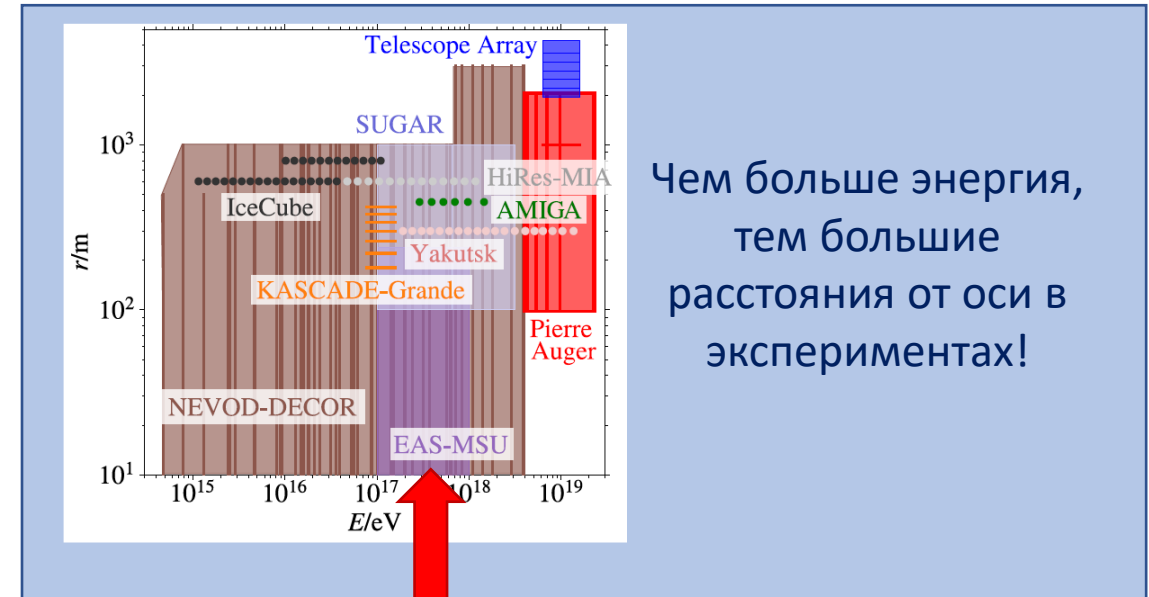
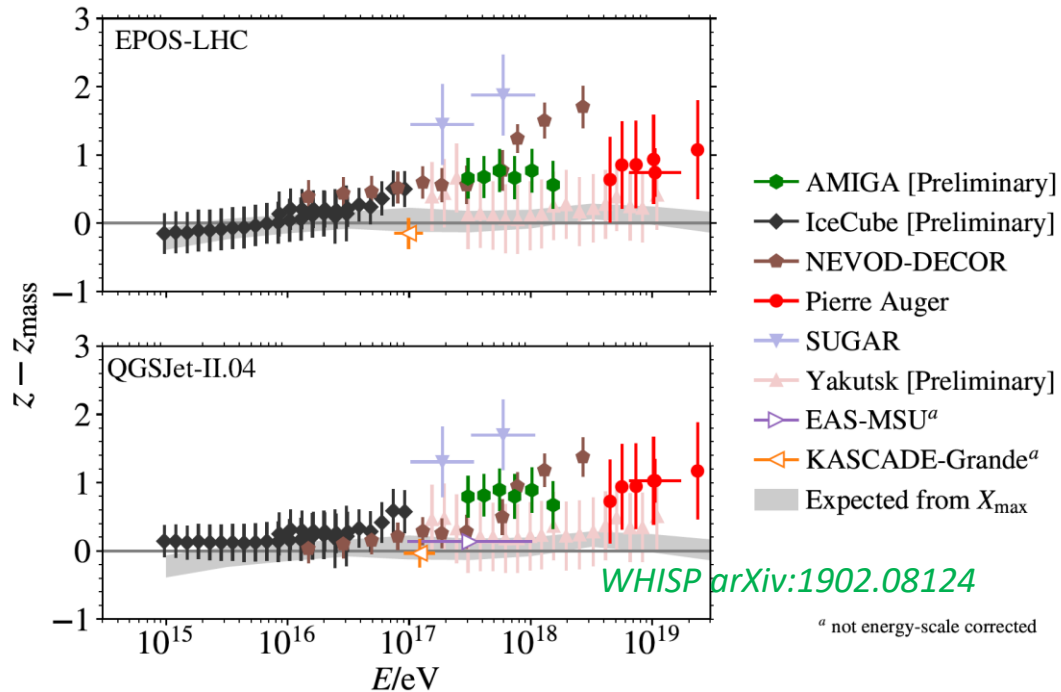
распределение ШАЛ по мюонной плотности  
гистограмма: Монте-Карло  
точки с ошибками: данные



# “Мюонный избыток”: зависит от расстояния до оси, не от энергии?

*Disclaimer:* I am a member of WHISP\* and endorse the WHISP mu-excess plots as the best possible representation of reported data. However, I am not representing WHISP in this discussion, these are my own comments.

\* WHISP= Working group on Hadronic Interactions and Shower Physics (Auger, TA, IceCube, KASCADE, NEVOD-DECOR, Yakutsk, EAS-MSU, SUGAR, AGASA)



Чем больше энергия,  
тем большие  
расстояния от оси в  
экспериментах!

ШАЛ-МГУ: ближе всего к оси!

- изменить **полное** число мюонов?
  - резкое изменение адронных взаимодействий сразу выше энергий LHC, например удвоить сечение
- изменить число мюонов **на больших расстояниях** от оси?
  - скромное, вполне возможное и интересное изменение при больших переданных импульсах

*Ostapchenko*





**С ДНЁМ РОЖДЕНИЯ, НИИЯФ!**

