

# Массовый состав космических лучей определенный по доле мюонов в ШАЛ с энергией выше $5 * 10^{18}$ эВ по данным Якутской установки

С.П. Кнуренко ([knurenko@ikfia.ysn.ru](mailto:knurenko@ikfia.ysn.ru))

И.С. Петров ([igor.petrov@ikfia.ysn.ru](mailto:igor.petrov@ikfia.ysn.ru))

ИКФИА СО РАН

poster-id: 21

# Введение

Астрофизика космических лучей (КЛ) предельных энергий, выше  $10^{18}$  эВ, является важной областью исследований для получения знаний об эволюции и процессах, происходящих во Вселенной. В то же время астрофизический аспект КЛ с такой энергией остается мало изученной областью. Отсутствуют достоверные сведения о природе происхождения таких КЛ. В частности, не совсем известны источники и их расположение во Вселенной. Достоверно не установлен механизм генерации, ускорения и распространения частиц. Не известно, каким образом происходит взаимодействие частиц при их транспортировке в космическом пространстве с магнитными полями и реликтовым излучением.

В последнее время на крупнейших установках по изучению широких атмосферных ливней (ШАЛ), ТА и Оже, были получены такие данные по КЛ для энергий выше  $10^{18}$  эВ: спектр КЛ, массовый состав (МС) и анизотропия прихода частиц предельных энергий. Верификация полученных данных пока остается небольшой и требуется продолжение исследований по этим направлениям.

МС в этих работах получен по оптическим измерениям, т.к. такие измерения сильно зависят от атмосферных условий и многих других условий, необходимо использовать другую методику измеряющую другую компоненту ШАЛ, например мюоны.

Мюонная компонента чувствительна к МС КЛ, как было показано расчетами по модели QGSJetII-04 для первичного протона и ядра железа. И эту компоненту можно использовать для оценки МС в широком диапазоне энергии. В данной работе рассматриваются ливни с энергиями  $5 \cdot 10^{18}$  эВ и зенитными углами ниже  $60^\circ$ . В области этих энергий сформирована нерегулярность типа “dip” и “bump” в спектре космических лучей, которая интерпретируется как взаимодействие галактических протонов с реликтовым излучением. Проверить эту гипотезу можно только имея сведения о МС КЛ в области  $5 \cdot 10^{18}$ - $5 \cdot 10^{19}$  эВ. В настоящей работе для этого был проведен анализ относительного содержания мюонов в ливнях предельных энергий.

# Мюонные детекторы на Якутской установке

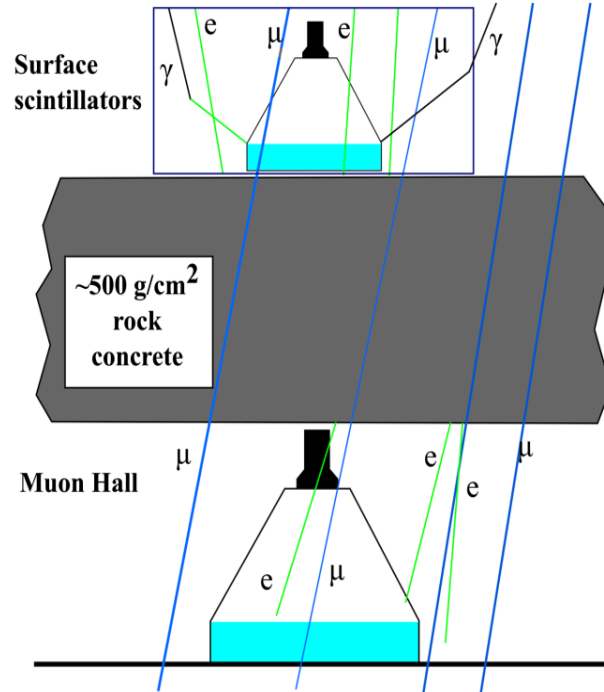


Схема мюонного телескопа

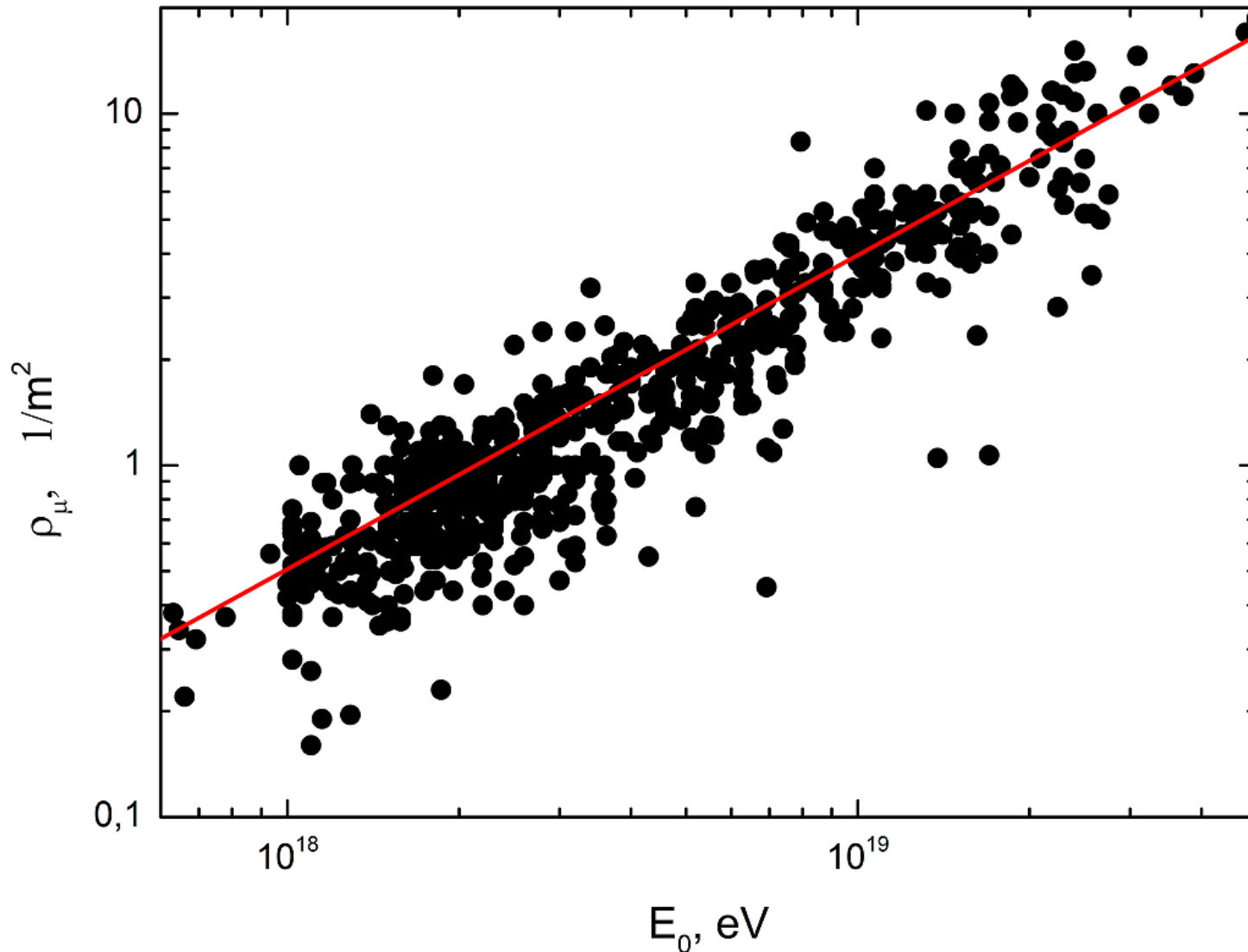
На Якутской установке 6 мюонных детекторов расположенных на расстоянии 800, 500, 300 и 150 м от центра, а также три мюонных телескопа.

Площади детекторов: 16 м<sup>2</sup>, 20 м<sup>2</sup>, 190 м<sup>2</sup>, площади мюонных телескопов 2 м<sup>2</sup>.

Площадь Якутской установки 13 км<sup>2</sup>. Область контроля установки по энергии составляет  $10^{15}$ - $10^{20}$  эВ, что позволяет регистрировать галактические и метagalacticкие КЛ.



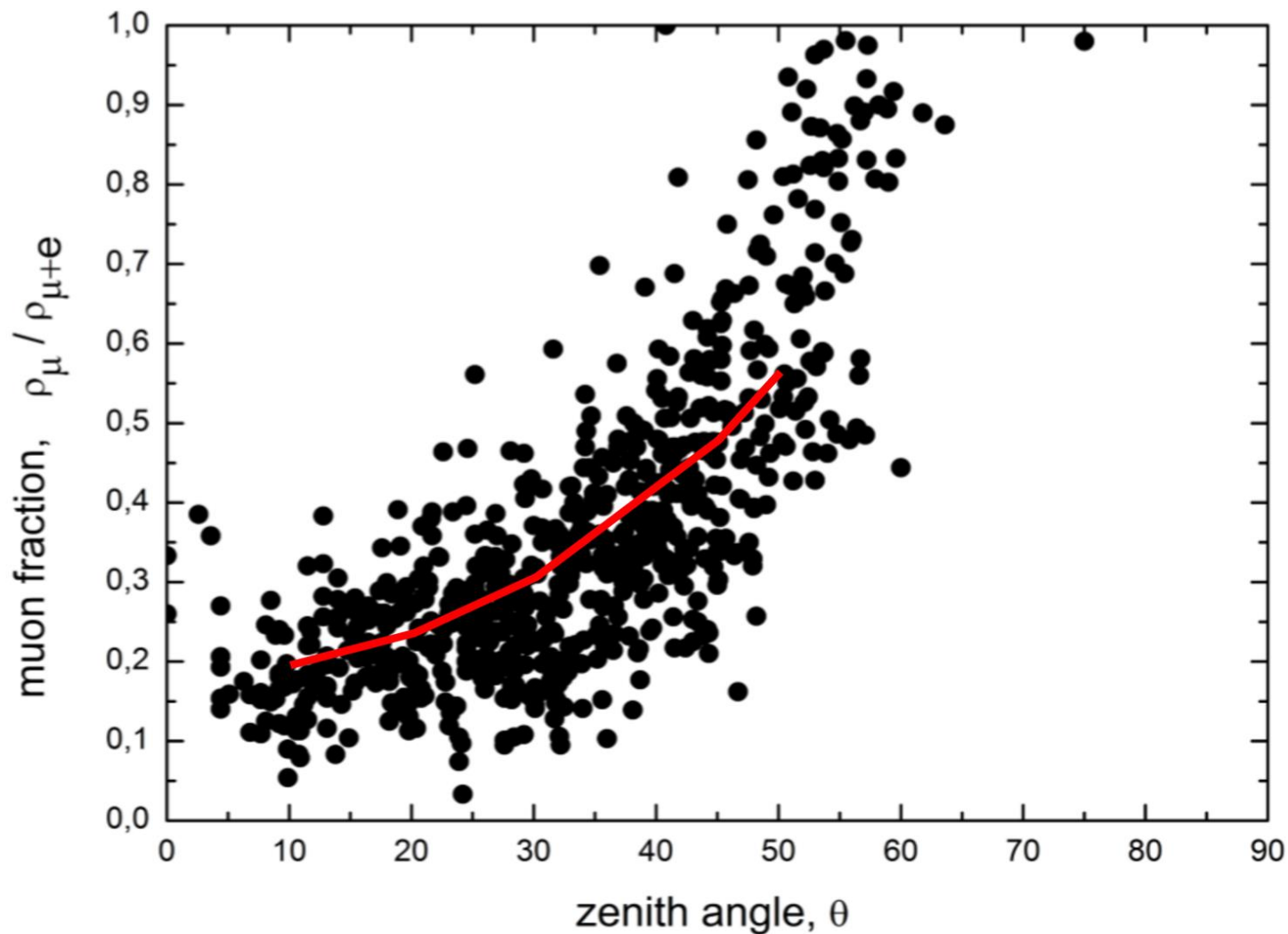
# Корреляция энергии и плотности потока мюонов



На слайде приводится корреляция классификационного параметра  $\rho_\mu$  энергией ШАЛ  $E_0$ . Здесь  $\rho_\mu$  — плотность потока мюонов на расстоянии 600 м от оси ливня. Прямой линией показана аппроксимирующая кривая, которая проведена согласно формуле:

$$\log_{10} E_\mu = 18.33 + 1.12 \cdot \log_{10} \rho_\mu$$

# Зависимость доли мюонов от зенитного угла

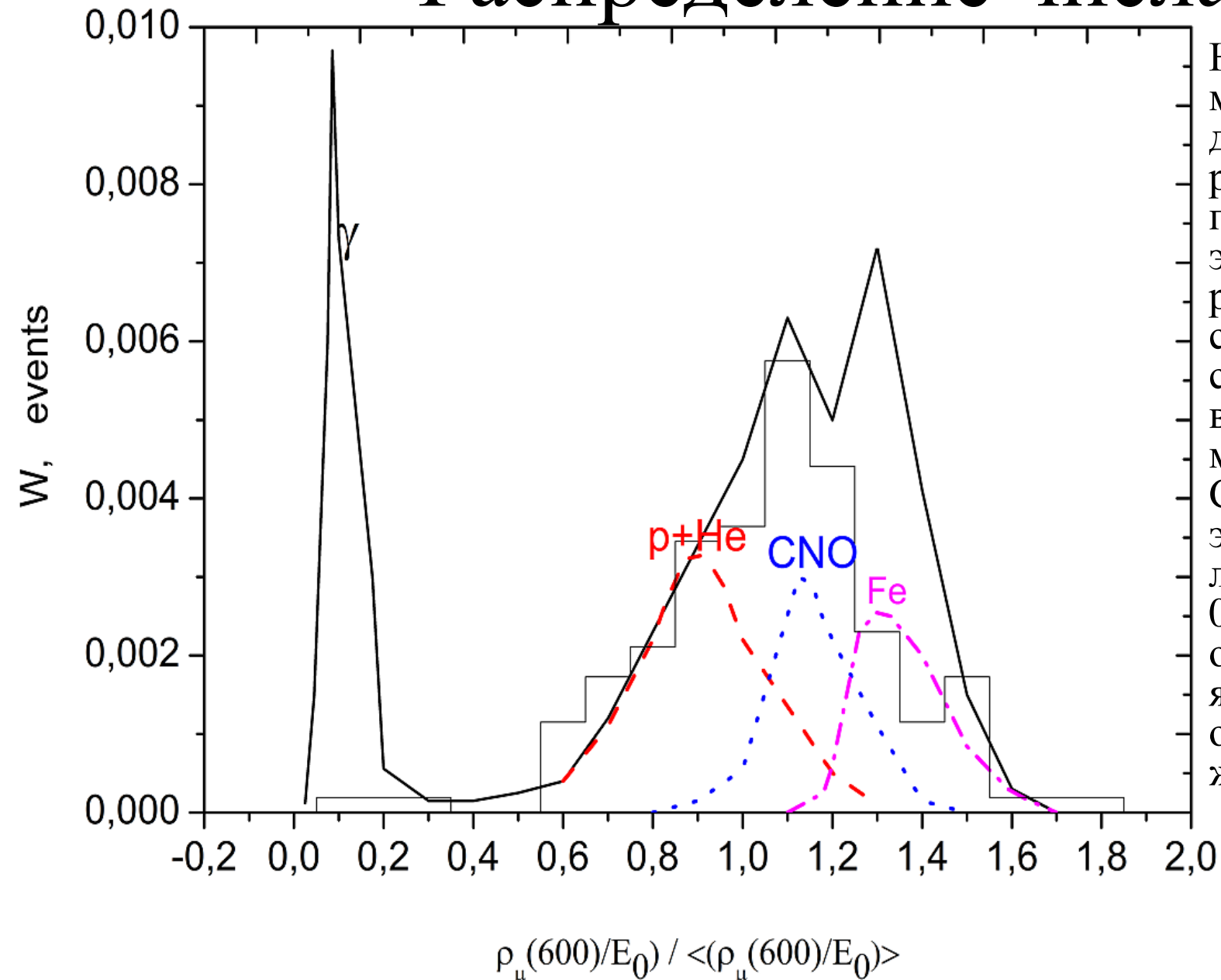


На слайде показана зависимость доли мюонов на расстоянии 600 м от оси от зенитного угла. Отношение заметно растет с углом и почти достигает 100% при углах  $\sim 60^\circ$ .

Точки – это индивидуальные ливни. Их разброс обусловлен ошибкой в определении зенитного угла и незнанием МС частиц рождающих ШАЛ. Кривая аппроксимация экспериментальных данных, согласно уравнения:

$$A_{\theta=0^\circ} = A_\theta - (1.98 \pm 0.45) \cdot \log_{10} \sec \theta \\ + (0.06 \pm 0.02) \log_{10} \rho_{\mu+e}.$$

# Распределение числа мюонов



На слайде показано распределение доли мюонов и расчеты по модели QGSJetII-04 для разных ядер. Для удобства сравнения с расчетами, экспериментальные данные приведены к вертикали и нормированы на энергию ливня. Как видно из рисунка, распределение имеет несколько слабовыраженных максимумов, которые согласно расчетам с большой вероятностью сформированы разными по массе первичными частицами. Сравнивая результаты расчетов с данными эксперимента можно выделить группу ливней с малым содержанием мюонов (0-0.3), группу с (0.4-1.3) – которая, вероятно, образована легкими ядрами, протонами и ядрами гелия, группа с (0.8-2.0) – образована ядрами группы CNO и ядрами железа.



# Заключение

- По результатам измерений мюонов с порогом выше 1 ГэВ на Якутской установке ШАЛ была установлена связь параметра  $\rho_\mu$  с энергией ливня  $E_0$ ;
- Найдена зависимость доли мюонов  $\rho_\mu/\rho_{\mu+e}$  от зенитного угла  $\theta$ ;
- Сделана оценка массового состава ШАЛ в области энергий выше 5 ЕэВ по мюонной компоненте;
- Распределение доли мюонов (сл. 6) имеет несколько максимумов и эти максимумы сформированы частицами с разным атомным весом. Количественное сравнение экспериментальных данных с расчетами показали, что состав космических лучей в области предельных энергий состоит из:
  - а) 40-50 % протонов и ядер гелия;
  - б) 1-2 % ШАЛ, вероятно, рождены гамма-квантами сверхвысоких энергий;
  - в) оставшаяся часть ливней рождена более тяжелыми ядрами CNO и Fe.

# Список литературы

- В.Л. Гинзбург. Современная астрофизика. М., 1970. 192 стр.  
В.Л. Гинзбург // УФН. 1999, том 160, № 4, 419 – 441.  
G.B. Gelmini, O.E. Kalashev, and D.V. Semikoz. // CERN-PH-TH / 2007 – 173.  
P. Bhattacharjee, G. Sigl. Phys. Rev. **327** (2000) 109.  
F. Halzen & D. Hooper. Rep. Prog. Phys. **65**, 2002, 1025.  
J.-T. Li, E. Hodges-Kluck, Ye. Stein et al. arXiv:1901.10536 (ApJ in press).  
K. Mannheim, R.J. Protheroe and J.P. Rachen. 2001. PRD, 63, 023003.  
H. Kang, D. Ryu & T.W. Jones. 1996. ApJ, 456, 422.  
J.P. Rachen & P.L. Biermann. 1993, A&A, 272, 161.  
E. Waxman. 1995. PRL, 75, 386.  
V.S. Berezinsky et al. // Phys. Lett. B **28** (1969) 423.  
T. Stanev, P.L. Biermann, T.K. Gaisser. 1993. A&A, 274, 902.  
J.K. Becker. Phys. Rep. **458**, 2008, 173.  
M. Ahlers, L.A. Anchordoqui, M.C. Gonzalez-Garcia et al. Astropart. Phys. **34**, 2010, 106.  
K. Kotera, D. Allard, A.V. Olinto. JCAP. **10**, 2010, 013.  
G. Gelmini, O. Kalashev, D. Semikoz. // J. Theor. Phys. **106** (2008) 1061.  
A. Aab, P. Abreu, M. Aglietta et al. //JCAP04(2017)038.  
R.U. Abbasi, M. Abe, T. Abu-Zayyad et al. //Astropart. Phys. **80** (2016) 131-140, [1511.07510].  
S. Knurenko and I. Petrov. Advances in Space Research **64**, 2570-2577 (2019).  
E.G. Berezhko, S.P. Knurenko, L.T. Ksenofontov. // Astroparticle Physics **36** (2012) pp. 31-36.  
W. Hanlon, J. Bellido, J. Belz et al. Proc. 2016 Int. Conf. Ultra-High Energy Cosmic Rays (UHECR2016), JPS Conf. Proc. **19**, 011013 (2018). <https://doi.org/10.7566/JPSCP.19.011013>  
K-H Kampert and M. Unger. Astroparticle Physics. **35**, No. 10, 2012, page 660-678.  
S. Knurenko and I. Petrov. EPJ Web of Conference 99, 04003 (2015).  
S. Thoudam, J.P. Rachen, A. van Vliet, A. Achterberg, S. Buitink, H. Falcke, J.R. Horandel. A&A, **595**, A33 (2016).  
A. Aab, P. Abreu, M. Aglietta et al. Phys.Rev. D90 (2014) 122006.  
R.U. Abbasi, M. Abe, T. Abu-Zayyad et al. Astropart. Phys. **64** (2015) 49-62.  
S.P. Knurenko, A.A. Ivanov, I.Ye. Sleptsov. Nucl. Phys. B (Pros. Suppl.) **196**, p. 391-394 (2009).  
A.A. Иванов. Письма в ЖЭТФ, т. **87**, вып 4, 2008, стр. 215-219.  
P. Abreu, M. Aglietta, E.J. Ahn et al. Astrophys. J. Suppl. **203**, 34 (2012).  
С.П. Кнуренко, И.С. Петров. Письма в ЖЭТФ, т. **107**, вып. 11, с. 709-716 (2018).  
S. Ostapchenko. Phys. Rev. D **83**, 014018 (2011).  
A.A. Атрашкевич, Н.Н. Калмыков, Г. Б. Христиансен, Письма в ЖЭТФ, **33**, 236 (1981).  
V.S. Berezinsky, S.I. Grigorieva, B.I. Hnatyk, APh **21**, 617 (2004).  
В.П. Артамонов, Б.Н. Афанасьев, А.В. Глушков и др. Изв. РАН, сер. физ., т.**58**, №12, 92-97 (1994).  
Y. Egorov, Z. Petrov, S. Knurenko. Proc. of Science **301**, 462 (2018).  
S.P. Knurenko, Z.E. Petrov, I.S. Petrov. NIM A 866, 230–241 (2017).  
С.П. Кнуренко, В.А. Колосов, З.Е. Петров и др. Наука и Образование, № 4, с. 46–50 (1998).  
А.В. Глушков, М.Н. Дьяконов, Т.А. Егоров и др. Известия РАН, сер. физ., т.**57**, №4, с. 91-93 (1993).  
J. Abraham, M. Aglietta, I.C. Aguirre et al. NIM A **523** (2004) 50-95.  
T. Abu-Zayyad, R. Aida, M. Allen. NIM A **689** (2012) 87-97.  
А.А. Иванов, С.П. Кнуренко, М.И. Правдин, И.Е. Слепцов. Вестник МГУ, физика, 2010, № 4, с. 56 - 63.  
S. Knurenko, Z. Petrov and Y. Yegorov. 2013 *J. Phys.: Conf. Ser.* **409** 012090.  
С.П. Кнуренко, Ю.А. Егоров, З.Е. Петров и др. Известия РАН, серия физическая, т. **81**, № 4, с. 510-513 (2017).  
A.V. Glushkov, N.N. Efimov, N.N. Efremov et al. Пространственное распределение и полное число мюонов с энергией выше 1 ГэВ в составе ШАЛ с  $E_0 = 10^{17} - 10^{19}$  эВ. // В кн.- Космические лучи с энергией выше  $10^{17}$  эВ. Якутск. Якутский филиал СО АН СССР. 1983, с. 3 – 18.  
С.П. Кнуренко, А.К. Макаров, М.И. Правдин, А.В. Сабуров. Изв. РАН. Серия физич., 2011, т. **75**, № 3, с. 320 – 322.  
А.А. Иванов, С.П. Кнуренко, И.Е. Слепцов. ЖЭТФ, 2007, в. **131**, № 6, с. 1001–1017.  
С.П. Кнуренко, А.А. Иванов, И.Е. Слепцов, А.В. Сабуров. Письма в ЖЭТФ, 2006, т. **83**, вып. 11, с. 563-567.  
Н.Н. Ефимов, Д.Д. Красильников, С.И. Никольский и др. Проблемы физики космических лучей. М: «Наука», с. 186-199.  
S.P. Knurenko, A.A. Ivanov, V.A. Kolosov et al. Intern. Jour. of Modern Physics A, V. 20, № 29, p. 6897 – 6900 (2005).  
С. П. Кнуренко. Диссертация. Якутск (2003).  
А.А. Иванов. Диссертация. Якутск (2005)  
N.N. Kalmykov and S.S. Ostapchenko. //Phys. At. Nucl. **56** (1993) 346.  
S. Ostapchenko. //Nucl. Phys. B, Proc. Suppl. **151** (2006) 143.  
S.P. Knurenko, Z.E. Petrov, I.S. Petrov, I.Ye. Sleptsov. Journal Proceeding of Science. Proc. 35<sup>th</sup> ICRC, Busan (Korea), (2017), PoS(ICRC2017) **301**, 331.  
R. Abbasi, M. Abe, T. Abu-Zayyad et al. Phys. Rev. D **99**, 02002 (2019).  
J. Bellido, A. Aab, P. Abreu et al., Proc. of Science **301**, 506 (2018).