



P.N. Lebedev Physical  
Institute of the Russian  
Academy of Science



# Три механизма генерации мюонов с энергиями выше 100 ГэВ в широких атмосферных ливнях в области энергий $10^5$ — $10^7$ ГэВ

Лукьяшин А.В., Деденко Л.Г., Роганова Т.М.

Всероссийская конференция по космическим лучам 2024

ФИАН Москва 2024

# План

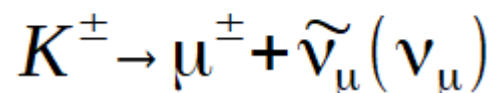
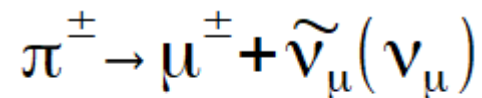
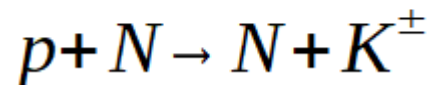
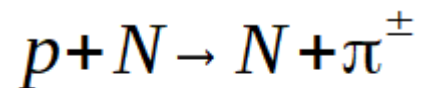
1. Энергетические спектры первичного космического излучения
2. Энергетические спектры вертикальных атмосферных мюонов: данные экспериментов и модельный расчёт
3. Рассмотрение трёх механизмов генерации мюонов
4. Генерация заряженных  $\pi$  и  $K$  мезонов нуклонами ПКИ
5. Генерация резонансов и дельта-изобар
6. Генерация пар мюонов  $\gamma$ -квантами
7. Итоги

# Три механизма генерации мюонов

- Производится расчёт энергетических спектров мюонов на уровне наблюдения, на основе моделей взаимодействия (Пакет программ CORSIKA и модели взаимодействий)
- Рассматривается взаимодействие протонов ПКИ с ядрами атомов воздуха и дальнейшее их возбуждение до резонансного состояния (Учитывается распад резонансных состояний нуклона на заряженные  $\pi$  и  $K$  мезоны).
- Оценивается роль распада резонансных состояний нуклона на нейтральные  $\pi$  и  $K$  мезоны и последующий распад на гамма-кванты и генерация этими гамма-квантами пар мюонов.

# Генерация заряженных $\pi$ и $K$ мезонов нуклонами ПКИ

- Взаимодействие нуклонов ПКИ с ядрами атомов в верхних слоях атмосферы с генерацией заряженных мезонов и последующим их распадом на мюоны и нейтрино.
- Для генерации вторичных заряженных  $\pi^\pm$  и  $K^\pm$  мезонов во взаимодействии частиц ПКИ с ядрами атомов атмосферы важна **энергия на нуклон**. Поэтому для диапазона энергий мюонов  $E_\mu = 10^2 - 10^5$  ГэВ основной вклад будут вносить первичные протоны ( $\sim 90\%$ ) и первичные ядра гелия ( $\sim 10\%$ ) в диапазоне  $E_n = 10^2 - 10^7$  ГэВ. (Вклад более тяжёлых ядер оценивается на уровне  $\sim 1\%$ ).



# Компоненты для расчёта

- Энергетические спектры первичных протонов и ядер гелия в диапазоне от  $10^2$  ГэВ до  $\sim 10^7$  ГэВ
- В работе использована аппроксимация энергетических спектров ПКИ для протонов и ядер гелия. Для уравнений аппроксимации использовались расчёты Бережко Е.Г., нормированные на интенсивность при энергии 1.8 ТэВ по данным эксперимента **AMS-02**
- Пакет программ:  
**CORSIKA 6.9, CORSIKA 7.4 и CORSIKA 7.5**
- Модели взаимодействия адронов:  
**EPOS LHC, QGSJET-01, QGSJETII-03, QGSJETII-04, DPMJET 2.55, VENUS 4.12, SIBYLL 2.1 и SIBYLL 2.3.**

Berezhko E.G. and Völk H.J. *Astrophysical Journal*, 661: L175–L178, (2007)

Berezhko E.G. *Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.)* Vol. 256 - 257, 2335 (2014)

Berezhko E.G., Knurenko S.P., Ksenofontov L.T., *Astropart. Phys.* Vol. 36 3136 (2012).

Aguilar M., Aisa D., Alpat B., et al, (**AMS Collab.**) *P.R.Lett.* Vol. 114, 171103 (2015);

*P.R.Lett.* Vol. 115, 211101 (2015)

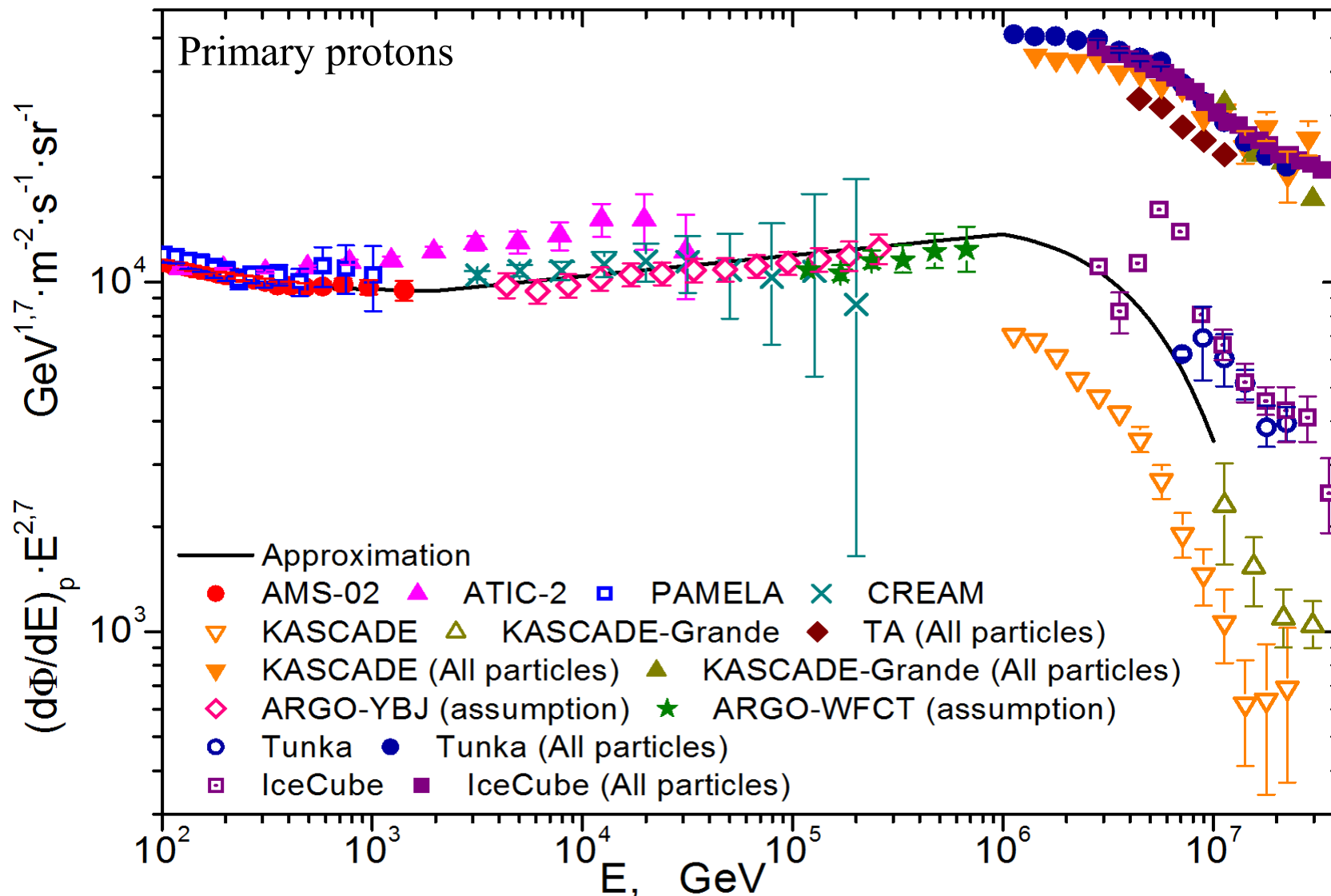
# Аппроксимации энергетических спектров

$$\frac{d\Phi_p}{dE} = \begin{cases} 0,4544 \cdot \left(\frac{E}{45}\right)^{-2,849} \cdot \left[1 + \left(\frac{E}{336}\right)^{5,5417}\right]^{0,024} & E \in [10^2 \div 1.8 \cdot 10^4] \text{ GeV} \\ 8728 \cdot E^{-2,7} \cdot \left(\frac{E}{10^4}\right)^{0,06} & E \in [1.8 \cdot 10^4 \div 10^6] \text{ GeV} \\ 8728 \cdot E^{-2,7} \cdot \left(\frac{E}{10^4}\right)^{0,06} \cdot \text{Exp}\left[-\frac{E - 10^6}{6 \cdot 10^6}\right] & E \in [10^6 \div 10^7] \text{ GeV} \end{cases}$$

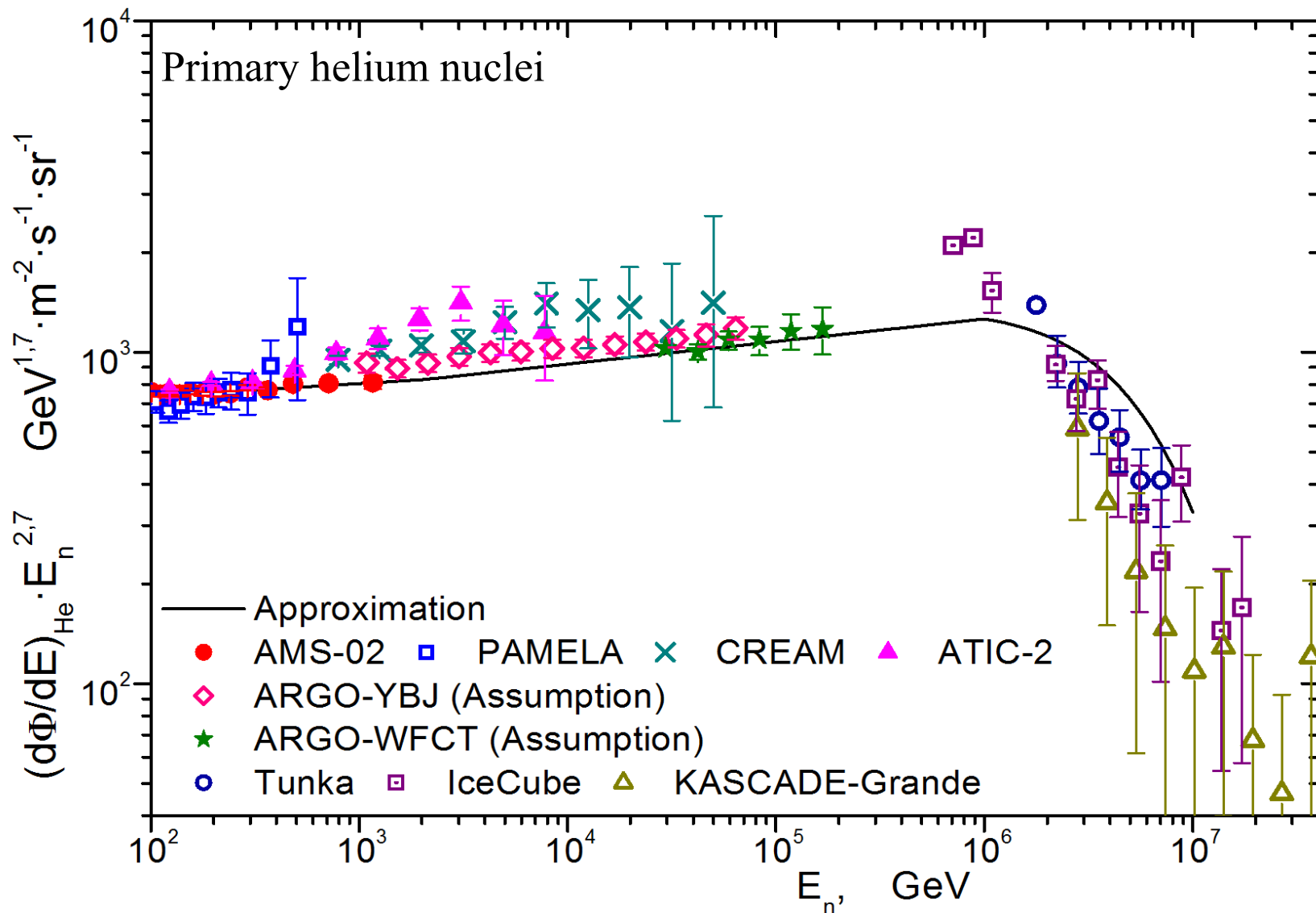
$E$  — энергия  
на нуклон

$$\frac{d\Phi_{He}}{dE} = \begin{cases} 0,1896 \cdot \left(\frac{2 \cdot E}{45}\right)^{-2,78} \cdot \left[1 + \left(\frac{2 \cdot E}{245}\right)^{4,4074}\right]^{0,027} & E \in [10^2 \div 1.8 \cdot 10^4] \text{ GeV} \\ 921 \cdot E^{-2,7} \cdot \left(\frac{E}{10^4}\right)^{0,068} & E \in [1.8 \cdot 10^4 \div 10^6] \text{ GeV} \\ 921 \cdot E^{-2,7} \cdot \left(\frac{E}{10^4}\right)^{0,068} \cdot \text{Exp}\left[-\frac{E - 10^6}{6 \cdot 10^6}\right] & E \in [10^6 \div 10^7] \text{ GeV} \end{cases}$$

# Энергетические спектры первичных протонов



# Энергетические спектры первичных ядер гелия





# ДАННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

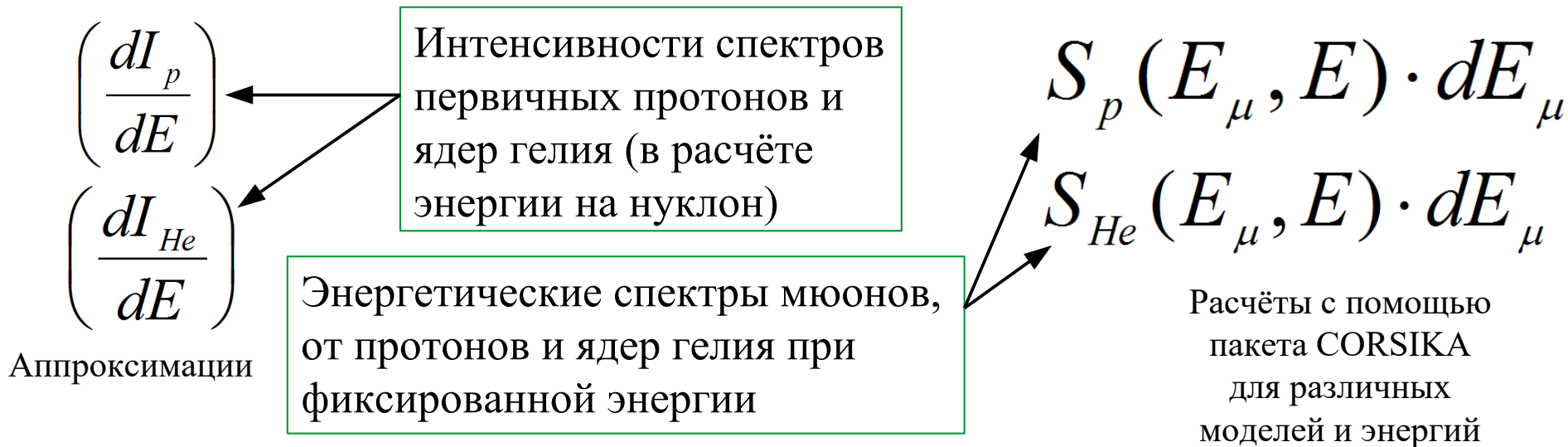
- AMS Collab. P.R.Lett. Vol. 114, 171103 (2015); P.R.Lett. Vol. 115, 211101 (2015).
- PAMELA Collab. Advances in Space Research Vol. 51, 219-226 (2013).
- ATIC Collab., Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. Vol. 71, 494 (2007); Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. Vol. 73, 564 (2009).
- CREAM Collab., , Astrophys.J., 707, 593 (2009).
- ARGO-YBJ Collab. Phys. Rev. D 91, 11, 112017; arXiv:1503.07136 (2015); Chinese Physics C 38, 4, 045001 (2014); Di Sciascio G. et al, J. of Physics: Conf. Series 632, 012089 (2015).
- KASCADE Collab. Astroparticle Physics 24, p. 125 (2005).
- KASCADE-Grande Collab. Astroparticle Physics 47, p. 5466 (2013).
- Tunka Collab. NIM in Physics Research A 756, p. 94101 (2014).
- IceCube Collab. PoS (ICRC2015) 334.
- Telescope Array Collab. PoS (ICRC2015) 349.

# Модельный расчёт потока атмосферных мюонов

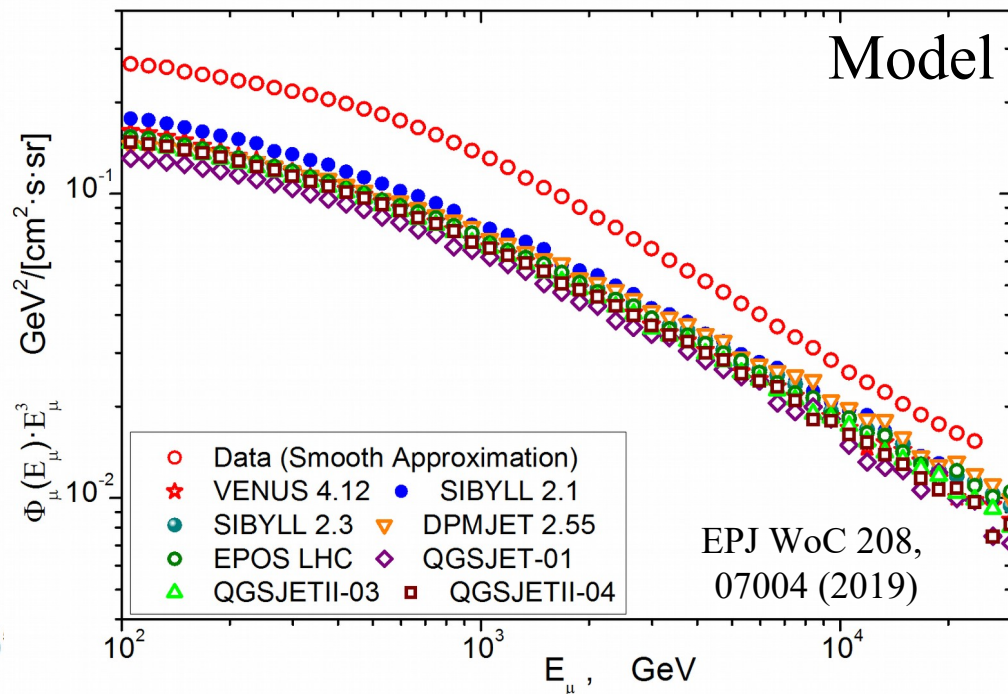
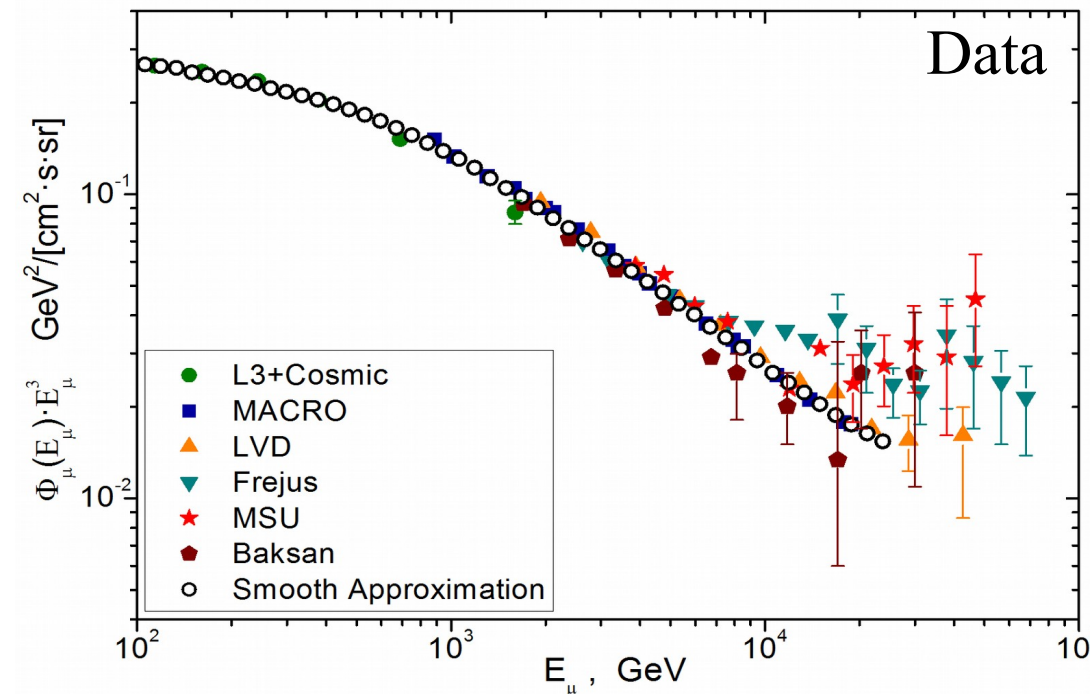
$$D_p(E_\mu) \cdot dE_\mu = \int dE \cdot \left( \frac{dI_p}{dE} \right) \cdot S_p(E_\mu, E) \cdot dE_\mu$$

$$D_{He}(E_\mu) \cdot dE_\mu = \int dE \cdot \left( \frac{dI_{He}}{dE} \right) \cdot S_{He}(E_\mu, E) \cdot dE_\mu$$

$$D(E_\mu) = D_p(E_\mu) + D_{He}(E_\mu)$$



# Спектры вертикальных атмосферных мюонов



- Выполненные с помощью пакета CORSIKA и различных моделей взаимодействий адронов расчёты энергетического спектра вертикальных атмосферных мюонов, показывают, что интенсивности модельных спектров занижены по сравнению с данными экспериментов на  $\approx 20 \div 45\%$  !

**L3+Cosmic**: Achard P. Adriani O., Aguilar-Benitez M., et al. Phys.Lett. B. **598**, 15-32 [arXiv:hep-ex 0408114v1K] (2004)

**MACRO**: Ambrosio M., Antolini R., Auriemma G., et al., Phys.Rev. D. **52**, 3793, (1995)

**LVD**: Aglietta M., Alpat B., Alieva E. D., et al., Phys.Rev. D. **58**, 092005 [arXiv:hep-ex 9806001v1] (1998)

PDG  $\rightarrow$  T.K.Gaisser approximation

# Три механизма генерации мюонов

- Производится расчёт энергетических спектров мюонов на уровне наблюдения, на основе моделей взаимодействия (Пакет программ CORSIKA и модели взаимодействий).
- **Рассматривается взаимодействие протонов ПКИ с ядрами атомов воздуха и дальнейшее их возбуждение до резонансного состояния.**  
**(Учитывается распад резонансных состояний нуклона на заряженные  $\pi$  и  $K$  мезоны).**
- Оценивается роль распада резонансных состояний нуклона на нейтральные  $\pi$  и  $K$  мезоны и последующий распад на гамма-кванты и генерация этими гамма-квантами пар мюонов

# Генерация резонансов и последующий распад

- В качестве источников мюонов максимальных энергий естественно рассматривать процесс возбуждения нуклона до резонансных состояний  $\Delta(1232)$ ,  $N(1440)$ ,  $N(1520)$  и др.
- $\Delta(1232) \rightarrow p + \pi^+$ ;  $(\rightarrow n + \pi^+)$ ;  $(\rightarrow p + \pi^0)$ ;  $(\rightarrow n + \pi^0)$ ;  
 $(\rightarrow p + \pi^-)$ ;  $(\rightarrow n + \pi^-)$  .....
- $N(1440) \rightarrow N\pi$ ;  $N\pi\pi$ ;  $\Delta\pi$  .....
- $N(1520) \rightarrow N\pi$ ;  $N\pi\pi$ ;  $\Delta\pi$  .....
- Рассматриваются двухчастичные распады, сначала в собственной системе отсчёта, а затем в лабораторной.
- Производится оценка доли  $\delta$  энергии передаваемой от родительской частице к дочерней на основе аналитических расчётов кинематики распада частиц.

# Двухчастичный распад в собственной системе

$$\psi = \frac{1}{2} \ln \left( \frac{1+\beta}{1-\beta} \right)$$

$$\gamma = ch(\psi)$$

$$\psi \approx \ln(2\gamma)$$

$$\beta = th(\psi)$$

- Двухчастичный распад  $(m_1, m_2)$  в системе покоя, связанной с родительской частицей  $(m)$

$$m^2 = (P^0)^2 - (P^1)^2 - (P^2)^2$$

$$m_1^2 = (P_1^0)^2 - (P_1^1)^2 - (P_1^2)^2$$

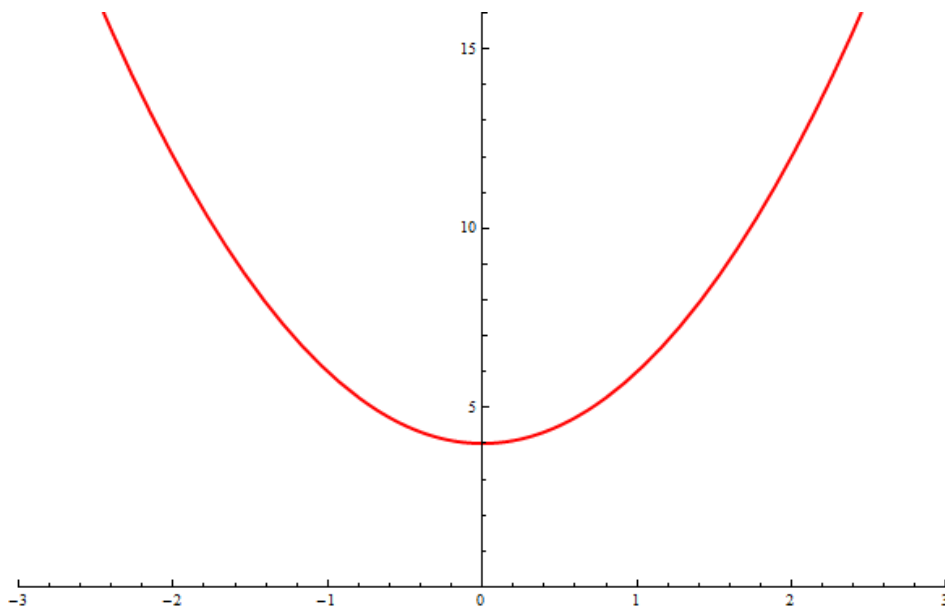
$$m_2^2 = (P_2^0)^2 - (P_2^1)^2 - (P_2^2)^2$$

$$m = m_1 ch \psi_{01} + m_2 ch \psi_{02}$$

$$0 = m_1 sh \psi_{01} + m_2 sh \psi_{02}$$

$$ch \psi_{01} = \gamma_{01} = \frac{m^2 + m_1^2 - m_2^2}{2mm_1}$$

$$ch \psi_{02} = \gamma_{02} = \frac{m^2 + m_2^2 - m_1^2}{2mm_2}$$



# Двухчастичный распад в собственной системе

- Распределение каждой из двух дочерних частиц по углам в этой системе изотропно.
- Пример 1. Распад заряженного  $\pi$  мезона на мюон и нейтрино.
- Пример 2. Распад заряженной  $\Delta^+$  изобары на  $\pi^+$  и нейтрон.

# Двухчастичный распад в лабораторной системе

- Пример 1. Максимальная доля энергии у мюона  $\delta = E_{\mu\max}/E_{\pi} \approx 1$
- Пример 2. Максимальная доля энергии у  $\pi^+$  мезона  $\delta = E_{\pi\max}/E_{\Delta} \approx 0.4$

$$ch\psi = ch\psi_1 ch\psi_2 - sh\psi_1 sh\psi_2 \cos\theta$$

$$E_1 = m_1 c^2 (ch\psi ch\psi_{01} - sh\psi sh\psi_{01} \cos\theta_{01})$$

$$E_{min1} = m_1 c^2 ch\psi (ch\psi_{01} - th\psi sh\psi_{01}) = m_1 c^2 \gamma \gamma_{10} (1 - \beta\beta_{01})$$

$$E_{max1} = m_1 c^2 ch\psi (ch\psi_{01} + th\psi sh\psi_{01}) = m_1 c^2 \gamma \gamma_{10} (1 + \beta\beta_{01})$$



# Энергетический спектр протонов и нуклонных резонансов

$$F(E_p)dE_p = I_p \frac{dE_p}{E_p^\gamma} \quad E_\Delta = \delta E_p \quad F(E_\Delta)dE_\Delta = I_p \delta^{\gamma-1} \frac{dE_\Delta}{E_\Delta^\gamma} \quad I_\Delta = P_1 \delta^{\gamma-1} I_p$$

- $P_1$  — вероятность образования  $\Delta^+$  изобары во взаимодействии протона с ядром в атмосфере
- Энергетический спектр  $\pi^+$  мезонов от спектра  $\Delta^+$  изобар можно представить в виде интеграла:

$$F(E_\pi)dE_\pi \approx I_\Delta C_\Delta dE_\pi \int_{E_{\Delta min}}^{E_{\Delta max}} \frac{dE_\Delta}{E_\Delta^\gamma} = I_\Delta C_\Delta \frac{dE_\pi}{\gamma E_\pi^\gamma} (C_{-\pi}^{-\gamma} - C_{+\pi}^{-\gamma})$$

$$C_{-\pi} = \frac{(m_\Delta/m_\pi)}{ch \psi_{0\pi} - sh \psi_{0\pi}} = 31.057$$

$$C_{+\pi} = \frac{(m_\Delta/m_\pi)}{ch \psi_{0\pi} + sh \psi_{0\pi}} = 2.493$$

$$C_\Delta = \frac{1}{2(m_\pi/m_\Delta) sh \psi_{0\pi}} = 2.71$$

# Сравнение интенсивностей спектров мюонов

- Энергетический спектр  $\mu^+$  от спектра  $\pi^+$  мезонов можно представить как интеграл от спектра  $\pi^+$  мезонов, умноженного на вероятность  $P_\pi$  их распада в атмосфере между глубинами  $x_1$  и  $x_2$  и вероятность  $P_{n0}$  распространения между этими глубинами без взаимодействия с ядрами.

$$F(E_\mu) dE_\mu \approx I_\pi C_\pi P_{n0} dE_\mu \int_{E_{\pi min}}^{E_{\pi max}} \left( 1 - e^{- (B_\pi/E_\pi) \ln(x_2/x_1)} \right) \frac{dE_\pi}{E_\pi^{\gamma-1}}$$
$$P_\pi = \left( 1 - e^{- (B_\pi/E_\pi) \ln(x_2/x_1)} \right) \quad P_{n0} = e^{- (x_2 - x_1)/\lambda_\pi} \approx e^{-1} \approx 0.37$$

- Для энергии мюонов  $E_\mu = 1.8 \cdot 10^3$  ГэВ расчёт даёт оценку:  $I_\mu = P_1 \cdot \delta^{\gamma-1} \cdot 2.1 \cdot 10^3$
- PDG даёт оценку Т.Гайссера:  $I_\mu = 7.1 \cdot 10^2$
- Аппроксимация (эксп. данные) мюонных экспериментов:  $I_\mu \cdot P_1 \cdot \delta^{\gamma-1} \approx 8.0 \cdot 10^2$

Вывод: механизм генерации резонансов  
может обеспечить необходимый поток  
мюонов высокой энергии, при  $P_1=1$ , и  $\delta \approx 0.36$

# Три механизма генерации мюонов

- Производится расчёт энергетических спектров мюонов на уровне наблюдения, на основе моделей взаимодействия (Пакет программ CORSIKA и модели взаимодействий).
- Рассматривается взаимодействие протонов ПКИ с ядрами атомов воздуха и дальнейшее их возбуждение до резонансного состояния (Учитывается распад резонансных состояний нуклона на заряженные  $\pi$  и  $K$  мезоны)
- **Оценивается роль распада резонансных состояний нуклона на нейтральные  $\pi$  и  $K$  мезоны и последующий их распад на гамма-кванты и генерация этими гамма-квантами пар мюонов**

# Генерация пар мюонов $\gamma$ -квантами

Поглощение  $\gamma$ -квантов в атмосфере

Вероятность сохраниться пройдя интервал  $\Delta t = 120 \text{ г/см}^2$

$$N_\gamma \approx N_{0\gamma} e^{-0.73t/t_0} \rightarrow t_0 = 37.1 [\text{г/см}^2] \rightarrow P_\gamma = e^{-120/50.8} \approx 0.0943$$

Пробег для генерации пар мюонов

$$\lambda_e = t_0 / 0.73 = 50.82 [\text{г/см}^2] \rightarrow \lambda_\mu = \lambda_e \left( \frac{m_\mu}{m_e} \right)^2 = 2.17 \cdot 10^6 [\text{г/см}^2]$$

Вероятность генерации пар мюонов:  $P_\mu = P_\gamma \left( 1 - e^{-120/\lambda_\mu} \right) \approx 5.22 \cdot 10^{-6}$

Вероятность распада  $\pi$  мезонов:  $P = P_{n0} P_\pi = e^{-(x_2 - x_1)/\lambda_\pi} \left( 1 - e^{-(B_\pi/E_\pi) \ln(x_2/x_1)} \right)$

- Вероятность распада  $\pi$  мезонов в интервале энергий  $10^2$  —  $10^5$  ГэВ на порядки выше и для граничных энергий эти вероятности равны соответственно  $\sim 0.26$  и  $4.4 \cdot 10^{-4}$
- Вывод: вкладом генерации пар мюонов гамма-квантами в энергетический спектр мюонов можно пренебречь.

# Выводы

- Интенсивности «модельных спектров» вертикальных атмосферных мюонов занижены на  $\approx 20\div 45\%$ .
- Расчёты выполненные в пакете программ CORSIKA для всех моделей (EPOS LHC, QGSJET-01, QGSJETII-03, QGSJETII-04, DPMJET 2.55, VENUS 4.12, SIBYLL 2.1 и SIBYLL 2.3) дают заниженную интенсивность в диапазоне  $E_\mu = 10^2 - 10^5$  ГэВ.
- Механизм генерации резонансов может обеспечить необходимый поток мюонов высокой энергии, если в каждом взаимодействии первичного космического протона с ядром в атмосфере рождается резонанс с долей энергии, не меньшей, чем  $\delta \approx 0.36$
- Вкладом генерации пар мюонов гамма-квантами в энергетический спектр мюонов можно пренебречь.

Спасибо за внимание!

# Cosmic Rays Data

- Aguilar M., Aisa D., Alpat B., et al, (AMS Collab.) P.R.Lett. Vol. 114, 171103 (2015); P.R.Lett. Vol. 115, 211101 (2015).
- Adriani O., Barbarino G. C., Bazilevskaya G. A., et. al., (PAMELA Collab.) Advances in Space Research Vol. 51, 219-226 (2013).
- Panov A. D., Adams J. H., Ahn H. S. et al. (ATIC Collab.), Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. Vol. 71, 494 (2007); Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. Vol. 73, 564 (2009).
- Ahn H. S. Allison P., Bagliesi M. G., et al (CREAM Collab.), , Astrophys.J., 707, 593 (2009).
- Bartoli B., Bernardini P., Bi X., et al (ARGO-YBJ Collab.) Phys. Rev. D 91, 11, 112017; arXiv:1503.07136 (2015); Chinese Physics C 38, 4, 045001 (2014); Di Sciascio G. et al, J. of Physics: Conf. Series 632, 012089 (2015).
- Antoni T., Apel W. D., Badea A. F., et al., (KASCADE Collab.) Astroparticle Physics 24, p. 125 (2005).
- Apel W. D., Arteaga-Velazquez J. C., Bekk K., et al., (KASCADE-Grande Collab.) Astroparticle Physics 47, p. 5466 (2013).
- Prosin V. V., Berezhnev S. F., Budnev N. M., et al., (Tunka Collab.) Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 756, p. 94101 (2014).
- Rawlins K., Feusels T., et al., (IceCube Collab.) PoS (ICRC2015) 334.
- Ivanov D., et al., (Telescope Array Collab.) PoS (ICRC2015) 349.

# Cosmic Rays Data

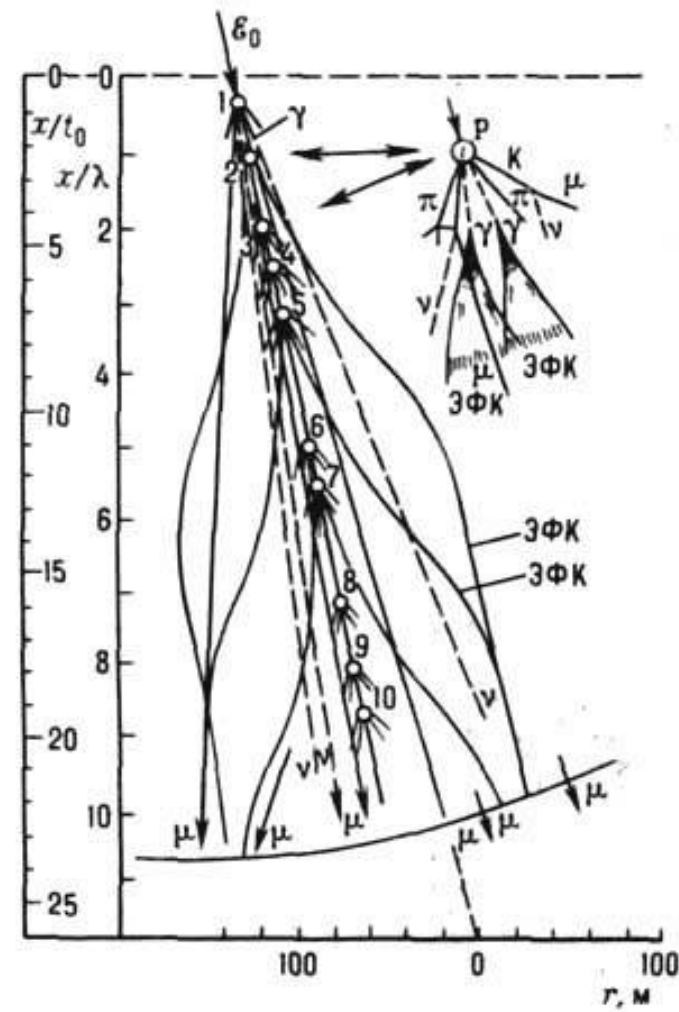
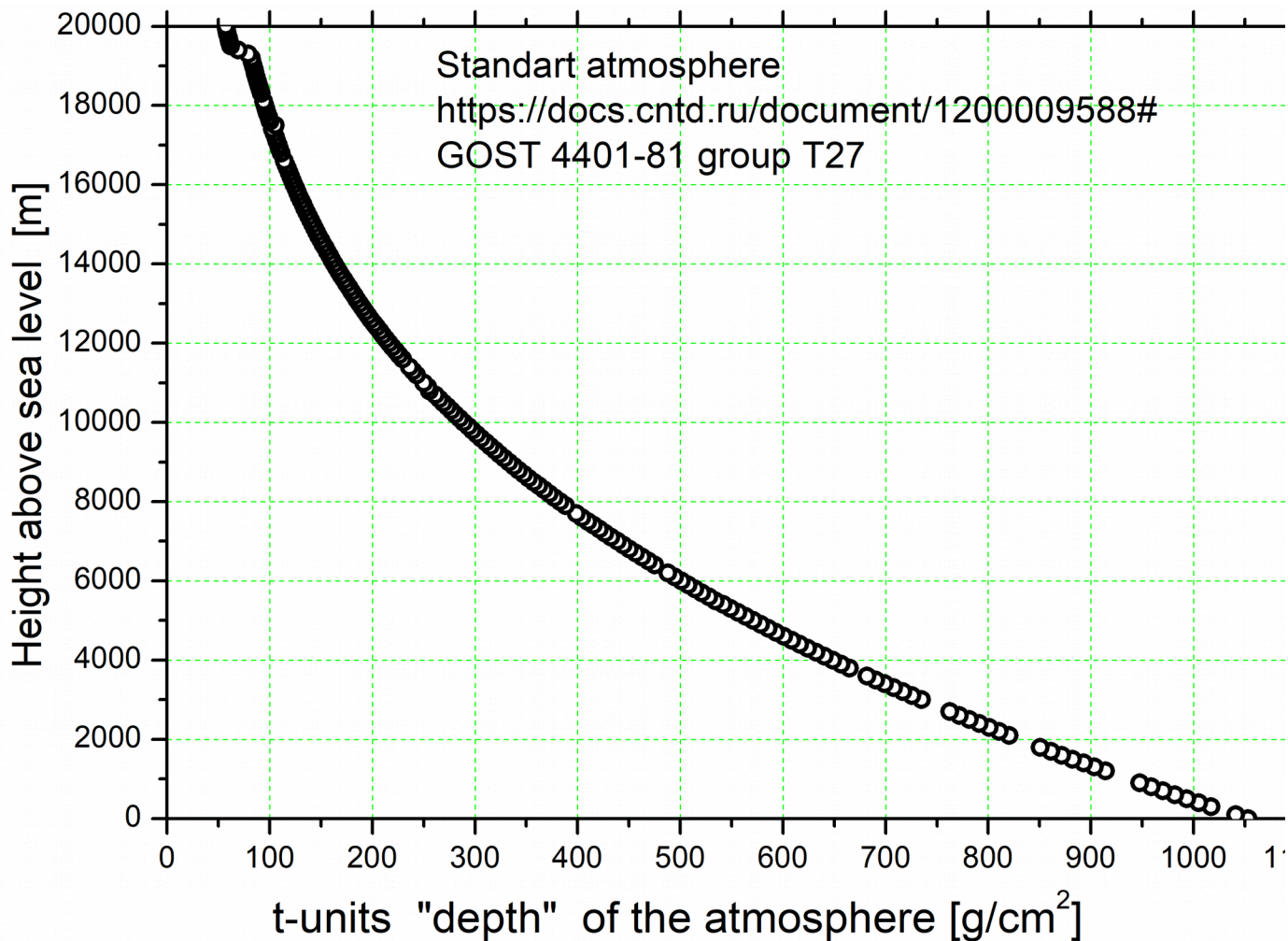
- Berezhko E.G. Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.) Vol. 256 - 257, 2335 (2014);
- Berezhko E.G., Knurenko S.P., Ksenofontov L.T., Astropart. Phys. Vol. 36 3136 (2012).
- Dedenko L.G., Lukyashin A.V., Roranova T.M. and Fedorova G.F., Proceedings of International Symposium on Cosmic Rays and Astroparticles 2017, [http://iscra2017.mephi.ru/content/public/files/presentations/June20\\_Presentation\\_13\\_LukyashinAV.pdf](http://iscra2017.mephi.ru/content/public/files/presentations/June20_Presentation_13_LukyashinAV.pdf)
- The DAMPE collaboration (DARk Matter Particle Explorer) <http://dpnc.unige.ch/dampe/index.html>
- The Fermi-LAT collaboration (The Fermi Large Area Telescope) <http://www-glast.stanford.edu/>
- The CALET collaboration (CALorimetric Electron Telescope) <https://calet.phys.lsu.edu/>
- The ISS-CREAM collaboration (Cosmic Ray Energetics and Mass Experiment for International Space Station) <https://cosmicray.umd.edu/iss-cream/>
- The NUCLEON collaboration <http://nucleon.sinp.msu.ru/sinp.html>



# Muon spectra data

- 1) **L3+Cosmic**: Achard P., Adriani O., Aguilar-Benitez M., et al. Phys.Lett. B. **598**, 15-32 [arXiv:hep-ex 0408114v1K] (2004)
- 2) **MACRO**: Ambrosio M., Antolini R., Auriemma G., et al., Phys.Rev. D. **52**, 3793, (1995)
- 3) **LVD**: Aglietta M., Alpat B., Alieva E. D., et al., Phys.Rev. D. **58**, 092005 [arXiv:hep-ex 9806001v1] (1998)
- 4) **Frejus**: Rhole W., et al., Nucl. Phys. (Proc. Suppl.) **35**, 250-253 (1994)
- 5) **MSU**: Zatsepin G.T., et al. Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. **58**, 2050-2052 (1994)
- 6) **Baksan**: Bakatanov V.N., et al., Phys. Atom. Nucl. Vol. **55**, 8, pp. 2107-2116 (1992)

# Backup slides



# Составляющие

- Средняя множественность вторичных частиц, в основном  $\pi$  и  $K$  мезонов, во взаимодействиях протонов и других ядер первичного космического излучения с ядрами атомов атмосферы довольно значительно возрастает с увеличением их энергии.
- В качестве источников мюонов максимальных энергий естественно рассматривать процессы возбуждения нуклона до резонансных состояний  $\Delta(1232)$ ,  $N(1440)$ ,  $N(1520)$ , и др. в ядерных взаимодействиях протонов и других ядер ПКИ в атмосфере, а также генерацию частиц других поколений и их распады на нейтральные и заряженные  $\pi$  и  $K$  мезоны и нуклоны, и последующие распады мезонов на мюоны и нейтрино, и гамма-кванты (в электрических полях ядер атомов могут генерировать пары мюонов).