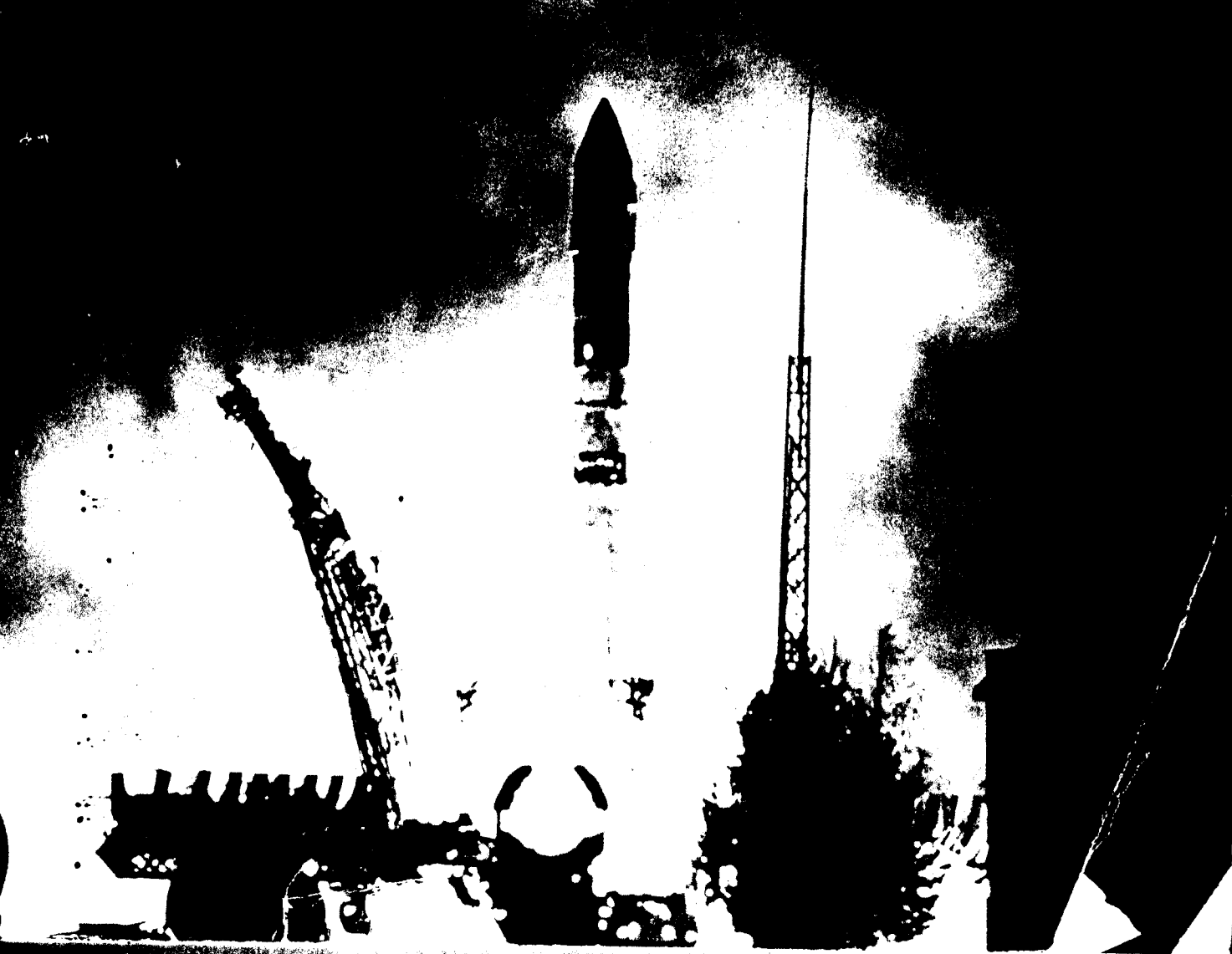
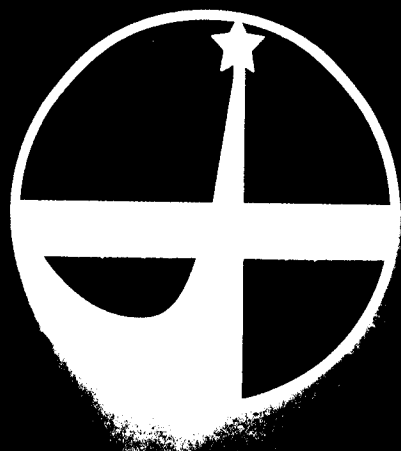


# МАТЕРИАЛЫ

Международной  
научной конференции  
"Интеркосмос-30"



# **МАТЕРИАЛЫ**

**Международной научной конференции  
«Интеркосмос-30»**

**9-10 апреля 2001 г.**

**Москва, Ленинский проспект, д. 32**

**Москва**

**«БЛОК-Информ-Экспресс»**

**2003**

# ЭЛЕКТРОНЫ ПРЕДЕЛЬНО ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ, ЗАРЕГИСТРИРОВАННЫЕ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ НА СПУТНИКЕ «ИНТЕРКОСМОС-6»

Р.А.Ныммик

НИИ ядерной физики им. Д.Скобелевича Московского государственного университета, Москва, Россия  
Факс: 7 (095) 939-5034; E-mail: nymmik@sinp.msu.ru

В апреле 1972 г. на возвращаемом спутнике «Интеркосмос-6» был проведен эксперимент по исследованию потока частиц космических лучей с энергией  $10^{12}$ - $10^{13}$  эВ.

В процессе анализа природы первичных частиц, вызвавших видимые невооруженным глазом электронно-фотонные ливни в большой камере ядерной фотоэмульсии, которая экспонировалась в открытом космосе, были обнаружены три электрона с энергией  $E \geq 10^{12}$  эВ. Для потока электронов таких экстремально высоких энергий получаем величину  $F(E \geq 10^{12}) = (2.0 \pm 1.2) \cdot 10^{-5} \text{ м}^{-2} \text{ ср}^{-1} \text{ эВ}^{-1}$ .

## ВВЕДЕНИЕ

Электроны с энергией  $\geq 10^{12}$  эВ (1 ТэВ), двигаясь в космическом пространстве, быстро теряют свою энергию на синхротронное излучение и обратный комптон-эффект. Поэтому определение величины потока таких частиц позволяет узнать возраст источника частиц и его расстояние от Земли. Несмотря на многочисленные эксперименты, проводившиеся в течение более 30 лет, к настоящему времени поток электронов таких экстремально-высоких энергии удалось обнаружить лишь в двух экспериментах. Первый - большая серия баллонных полетов свинцово-эмульсионных камер американско-японской коллаборации [1, 2], второй - практически неизвестный научной общественности, осуществленный на спутнике «Интеркосмос-6» в 1972 г. (его результаты опубликованы в 1981 г.) [3].

## ЭМУЛЬСИОННАЯ КАМЕРА

В состав научной аппаратуры, установленной на спутнике «Интеркосмос-6», кроме сцинтилляционных счетчиков, искровых камер и ионизационного калориметра, входила большая камера ядерной фотоэмульсии (48 л и 190 кг) [4]. Весь комплекс предназначался для изучения взаимодействия ядер при энергиях 1-10 ТэВ. В то же время данные, накопленные за 100 часов полета, позволяли, опираясь на накопленную в эмульсионной камере информацию, решить другую самостоятельную задачу - определение потока электронов при энергии  $\geq 1$  ТэВ.

Камера состояла из 806 слоев релятивистской эмульсии БР-2 [5] с чувствительностью  $31,4 \pm 1,0$  сгустков на 100 мкм следа релятивистской частицы. Размер одного слоя эмульсии составлял  $600 \times 200 \times 0,45$  мм. Особое внимание обращалось на равномерность толщины слоев. Использование стандартной технологии полива, при которой горячая эмульсия наливалась на холодное дно кюветы, привело к тому, что поверхность дна кюветы при нагревании расширялась и выпучивалась, из-за чего эмульсионные слои оказались вогнутыми. Поскольку собрать из таких слоев камеру, пригодную для прецессионных измерений, невозможно, в технологию полива было внесено изменение. Оно состояло в том, что кюветы перед поливом нагревали до температуры горячей эмульсии [6]. Чередую при сборке выпуклые и вогнутые слои эмульсии, удалось собрать камеру, суммарная толщина которой по углам и в центре отличалась от средней (372 мм) меньше, чем на 0,5 мм. В итоге, благодаря высокому качеству эмульсионных слоев, можно было проследить трек любой однозарядной релятивистской частицы через всю камеру.

## МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

За 100 часов полета спутника в эмульсионной стопке было зафиксировано около 500 видимых невооруженным глазом электронно-фотонных каскадов. Из них 278 имели длину проекции в плоскости эмульсии 100 мм. Отбор таких событий позволяет проводить прецизионные измерения пространственно-угловых характеристик треков частиц для полной идентификации деталей процессов, происходивших в камере.

Все каскады частиц прослеживались под микроскопом до точки входа в эмульсию. Так как эмульсионную камеру, установленную на спутнике, окружали со всех сторон другие детекторы и элементы аппаратуры, большая часть событий входила в камеру в виде вторичных частиц - продуктов взаимодействий, происходящих за ее пределами. Нужно обратить внимание на следующее: хотя толщина окружающего камеру аппаратуры составляла от 7 до 50 г/см<sup>2</sup>, максимальное удаление вещества от нее не превышала 60 см.

Для выделения электронов из потока первичных частиц последовательно использовались следующие критерии. Из рассмотрения исключались:

- события, когда первичная частица - протон (70),  $\alpha$ -частица (39) или более тяжелое ядро (10 событий) - взаимодействовала в камере;
- фрагменты распада первичных ядер (9), обнаруженные в каскаде, входившем в камеру снаружи, или первичные ядерные взаимодействия (68), появившиеся в камере в ходе развития каскада.

Анализ оставшихся событий опирался на следующие критерии. Первичная частица считалась электроном, если внутри или вне камеры частица теряла энергию исключительно за счет тормозного излучения. В этом мы считали, что, согласно [6], электрон с энергией  $E \geq 1$  ТэВ испускает  $\gamma$ -кванты под углом порядка

$$\theta_{\text{min}} = \frac{mc^2}{E_{\gamma}} \ln \frac{E_{\gamma}}{mc^2} = 4 \cdot 10^{-4} \quad (1)$$

В то же время, для протонов и тяжелых частиц основным процессом, приводящим к образованию каскада, является распад  $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$ , для которого минимальный угол разлета двух  $\gamma$ -квантов с энергиями  $E_1$  и  $E_2$  составляет:

$$\theta_{\pi^0} = \frac{m_{\pi^0} c^2}{\sqrt{E_1 E_2}} = 2,7 \cdot 10^{-4}, \quad (2)$$

где  $m_{\pi^0}$  - масса  $\pi^0$ -мезона.

Следовательно, даже если электрон испускал первые  $\gamma$ -кванты на максимально-возможном расстоянии от камеры, расстояние между входящими в камеру следами частиц не должно превышать нескольких мкм. Имитировать такие узкие пучки частиц продукты взаимодействия протонов и ядер не могут, т.к. углы величины (2) легко измеряются, и к тому же, на глубине 2 t-единицы в этом случае наблюдается заметная структура каскада.

Учитывая все изложенное, возможными кандидатами в каскады от электронов могли быть семь событий. Проведенный для них тщательный замер координат всех треков позволит восстановить полную картину развития каскада в камере на глубине до 2 t-единиц.

В результате такого анализа в четырех каскадах были обнаружены явления, не совместимые с представлением о чистых электронно-фотонных каскадах или об электроне, как первичной частице.

Оставшиеся события идентифицировались как электроны. Порожденные ими каскады отвечали всем признакам чистых электронно-фотонных. Энергия первичных электронов для этих событий определялась по пространственному распределению электронов на глубине 2, 3, 4, 5 и 6 t-единицы [7] с учетом данных о величине эффекта Чудакова [8], возникающего при разлете наиболее энергичных электрон-позитронных пар. Энергии зарегистрированных электронов равнялись 1,1; 1,2 и 3 ТэВ. Схемы развития каскадов от этих трех электронов представлены на рис. 1.

**Событие 216.** Электрон,  $E = 1,1$  ТэВ. В камеру входит одна частица в сопровождении нескольких  $\gamma$ -квантов (A, B, C, D), которые испустила первичная частица за пределами стопки. Углы испускания намного меньше, чем при возможном распаде  $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$ .

**Событие 343.** Электрон,  $E = 3,0$  ТэВ. В камеру входит частица высокой энергии. Извне  $\gamma$ -квантов на расстоянии менее 10 мкм нет. На глубине 27 мм рождается пара от  $\gamma$ -кванта энергии 2,1 ТэВ (определено по величине эффекта Чудакова).

**Событие 370.** Электрон,  $E = 1,2$  ТэВ. В камеру входят три частицы в круге радиусом 1 мкм. Все частицы испускают  $\gamma$ -кванты согласно условию (1). На расстоянии менее 5 мкм электрон генерирует до входа в стопку еще несколько  $\gamma$ -квантов.

Для частиц, падающих из верхней полусферы, при длине проекции каскада в одном слое  $> 1$  мм и при условии, что путь каскада в камере  $\geq 11$  см (4 t-единицы), что необходимо для достижения его максимума, геометрический фактор F эмульсионной камеры составил  $0,42 \text{ м}^2 \text{ ср}$ . Принимая во внимание, что эффективность регистрации электронно-фотонных каскадов для использованной в эксперименте эмульсии при длине проекции  $> 1$  мм равна единице, величина интегрального потока электронов с энергией  $> 1$  ТэВ вычислялась по формуле:

$$F = (2,0 \pm 1,2) \cdot 10^{-5} \text{ м}^2 \text{ ср}^{-1} \text{ с}^{-1}.$$

Для дифференциального потока в интервале энергии 1-3 ТэВ имеем:

$$E^3 \cdot \frac{dF}{dE} = 64 \pm 37 \text{ м}^2 \text{ ср}^{-1} \text{ с}^{-1} \text{ ТэВ}^2.$$

### ОБСУЖДЕНИЕ

Прежде всего, интересно сравнить результат, полученный нами более 20 лет назад, с последними данными о потоках электронов экстремально высоких энергии (рис. 2).

Оказывается, поток электронов с энергией  $> 1$  ТэВ измерялся кроме рассматриваемой работы только в серии японо-американских экспериментов [1, 2]. В обоих случаях использовались весьма близкие методики для идентификации природы частиц применялась ядерная фотоэмульсия, а энергия частиц определялась по каскадным кривым. Разница состоит лишь в том, что в экспериментах [1, 2] электроны регистрировались в стратосфере, где над детекторами на десятки километров простирается остаточная атмосфера, а при регистрации частиц в небольшом количестве тонких (100 мкм) слоев ядерной фотоэмульсии определялся лишь заряд релятивистской частицы, без детального изучения ее природы (протон, электрон), т.е. способа передачи

энергии частицам электронно-фотонного каскада. Поэтому процесс каскада от протонов и  $\gamma$ -квантов, порожденных ядерными взаимодействиями в остаточной атмосфере более поразительно, что результаты этой серии экспериментов оказались такими же, как в нашей работе, так и поток электронов измерялся непосредственно, и не было необходимости вводить какие-либо поправки.

Во многих работах, в частности в [1, 2], подчеркивалось большое значение измерений потоков электронов экстремально высоких энергий, ибо они позволяют уточнить расстояния до ближайших вспышек сверхновых и время этих исторических событий. Энергетический спектр электронов в области энергии 100 ГэВ складывается из потоков частиц, проходящих от большого количества далеких ( $\sim 1$  кпс) сверхновых, взорвавшихся относительно давно ( $1 \cdot 10^5$  лет). Такой спектр можно условно описать степенной функцией с тем или другим спектральным индексом. В области более высоких энергий потоки частиц состоят из ограниченного количества ближайших к Солнечной системе источников, вспыхнувших в недалеком, по космическим масштабам, прошлом, вследствие чего спектр становится нерегулярным [2]. Тем временем, из экспериментов пока не удается получить точных и достоверных данных о потоках частиц даже при энергиях  $> 10^4$  эВ. Наметилась четкая тенденция - эксперименты, выполненные с применением электронных средств регистрации протонов [9-11] при энергиях 10-200 ГэВ, приводят к разным спектральным индексам, ни один из которых надежно не согласуется с результатами измерения потока электронов при  $E \geq 100$  ГэВ.

К сожалению, статистической точности измерения потоков электронов при  $E \geq 100$  ГэВ недостаточно, чтобы сделать вывод о вкладе того или иного конкретного источника в регистрируемый поток электронов. Можно лишь совсем немного уточнить наш вывод, сделанный еще в 1981 г. [3], что «источник зарегистрированного нами электронов с энергией 3 ГэВ находится ближе 1 кпс от Солнечной системы, и возраст источника может немного превышать  $10^5$  лет».

Представляется, что дальнейший прогресс в измерениях потоков электронов в этой области энергий зависит от развития методики спутниковых измерений с усовершенствованной мюонной методикой, ибо, как показывает опыт предыдущих экспериментов, продвижение электронных методов измерений в область  $> 10^4$  эВ требует не только больших технических усилий, но и методической достоверности.

1. Nishimura T., Tani K. et al., *J. Geophys. Res.*, 1980, v. 85, p. 2391-2400.
2. Nishimura T., 1980, *ApJ*, v. 238, p. 301.
3. Nishimura T., 1981, *Proceedings of 25 ICRC*, 1997, v. 4, p. 233-236.
4. Ныммик Р.А. Наблюдение электронов с энергией  $\geq 10^{12}$  эВ в первичном космическом излучении. Космические исследования. 1981, т. XIX, вып. 6, с. 884-888.
5. Ведешин Л.А., Ныммик Р.А. и др. Исследования частиц космического излучения на ИСЗ «Интеркосмос-6». Вестник Академии наук СССР, 1973, № 11, с. 59-66.
6. Богомолов К.С., Романовская К.М. и др. Релятивистская ядерная фотоэмульсия для стопок большого объема. ПТЭ, 1975, № 5, с. 63-65.
7. Романовская К.М., Ныммик Р.А. и др. Авторское свидетельство №. 650044 от 4.11.1978.
8. Аминева Т.П., Астафьев В.А. и др. Исследование мюонов сверхвысоких энергий. Метод рентгено-мюонных камер. М.: Наука, 1975, с. 38.
9. Чудаков А.Е. Об одном ионизационном эффекте, связанном с наблюдением электронно-позитронных пар при очень больших энергиях. Известия АН СССР, сер. физ. 1955, № 19, с. 651-656.
10. Golden R.G., Mauger B.G. et al. A measurement of the absolute flux of cosmic-ray electrons. 1984, *ApJ*, v. 287, p. 622-632.
11. Barwick S.W., Beatty J.J. et al., The energy spectra and relative abundance's of electrons and positrons in the galactic cosmic radiation. 1998, *ApJ*, v. 498, p. 779-789.
12. Tang K.K. The energy spectrum of electrons and cosmic -ray confinement: a new measurement and its interpretation: 1984, *ApJ*, v. 278, p. 881-892.

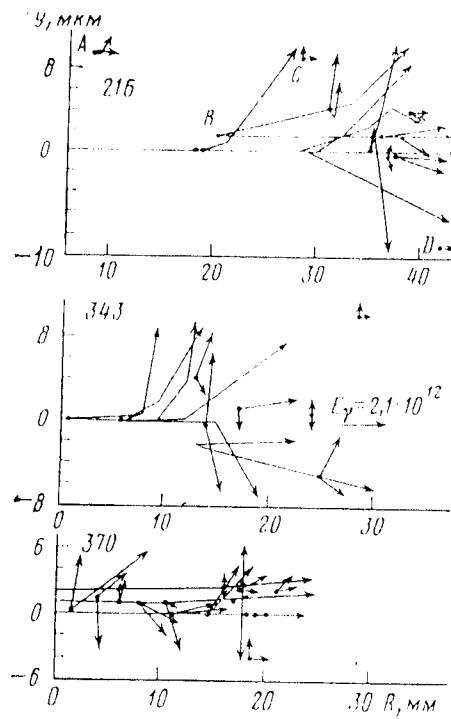


Рис. 1. Схемы развития каскадов частиц, для которых первичная частица идентифицировалась как электрон  
 Fig. 1. Development schematics of the cascades whose primary particle was identified to be an electron

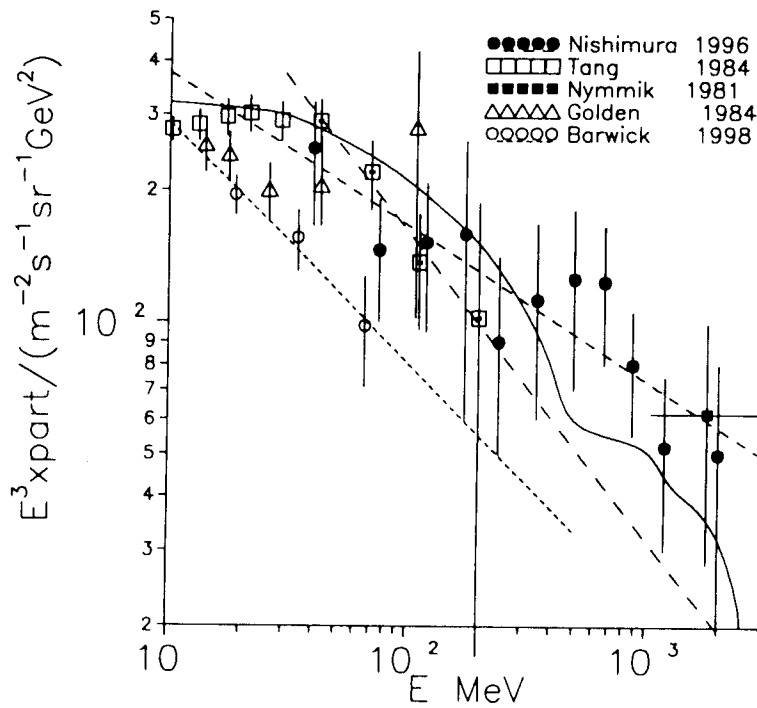


Рис. 2. Энергетические спектры высокоэнергичных электронов. Пунктирная и штриховые (короткие и длинные) линии - аппроксимации результатов работ [10], [2] и [11] соответственно. Непрерывная линия - результат расчета спектра из работы [2].

Fig. 2. Energy spectra of extremely-high energy electrons. The dotted, short-dash, and long-dash lines approximate the spectrum according to [10], [2], and [11], respectively. The solid curve is the calculated from astrophysical data spectra from [2]