

УДК 537.591

В. Н. Ващенко<sup>1</sup>, П. И. Голубничий<sup>2</sup>, С. Д. Кривоносов<sup>2</sup>,  
В. Н. Павлович<sup>3</sup>, В. Д. Русов<sup>4</sup>, А. Д. Филоненко<sup>2</sup>,  
С. П. Фомин<sup>5</sup>, Н. Ф. Шульга<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Київський національний університет ім. Тараса Шевченка

<sup>2</sup>Східноукраїнський національний університет ім. В. Даля

<sup>3</sup>Інститут ядерних досліджень національної академії наук України, Київ

<sup>4</sup>Одеський національний політехнічний університет

<sup>5</sup>Інститут теоретичної фізики ім. А. И. Ахієзера ННЦ (ХФТД) Національної академії наук України, Київ

## Детектирование потоков космических лучей сверхвысокой энергии на окололунной орбите

Представлено 03.09.07

Представлені основні положення проекту детектора космічного випромінювання надвисокої енергії понад  $10^{22}$  еВ, встановленого на борту супутника Місяця. Показана актуальність проблеми і можливість реалізації такої установки. Потужність радіосигналу, викликаного струмом надлишкових електронів і  $\delta$ -електронів цілком достатня для енергетичного порогу  $10^{22}$  еВ на орбіті висотою 1000 км. Знайдено, що найбільш придатним діапазоном частот є область 50—100 МГц. Орієнтовна швидкість рахування складе 150 подій у рік.

### ВВЕДЕНИЕ

В течение последних нескольких десятилетий физика элементарных частиц тесно взаимодействует с космологией, и эта связь позволяет сейчас рассматривать Вселенную во всей ее полноте и единстве. Законы взаимодействия элементарных частиц определяют все известные явления на Земле и в космосе. К настоящему времени разработано квантово-механическое описание трех из четырех известных взаимодействий. Теория сверхслабых и сильных взаимодействий, на которой основана современная физика элементарных частиц, в настоящее время не противоречит экспериментальным данным. Однако, как и любая другая теория, она имеет внутренние проблемы. Естественное стремление к их устранению, а также к объединению всех фундаментальных сил природы приводит, в

частности, к введению сверхмассивных частиц, которые недоступны для исследования современному поколению ускорителей. Например, даже в рамках стандартной модели, объединяющей электромагнетизм с другими взаимодействиями, возникают решения типа магнитного монополя, который в  $10^{15}$  раз тяжелее протона, и никакой из ускорителей настоящего или ближайшего будущего не способен «разогнать» частицы до столь высоких энергий. Именно по этой причине Вселенная как возможный источник космического излучения сверхвысокой энергии привлекает внимание исследователей.

Космическое излучение сверхвысокой энергии является «откликом» событий, происшедших далеко за пределами нашей Галактики миллиарды лет назад. Это могут быть процессы, связанные, например, с активными ядрами галактик, со сверхновыми или нейтронными звездами или,

наконец, с самыми мощными источниками излучения во Вселенной — гамма-всплесками. Регистрация сверхмассивных частиц, таких как магнитный монополю  $m \sim 10^{16}$  ГэВ, мог бы иметь прямое отношение к процессам, произошедшим в ранней Вселенной. Современная наука не знает определенно, где и в каких космических катаклизмах рождаются частицы с энергиями более  $10^{20}$  эВ. Однако факт их регистрации является общепризнанным, и поэтому породил парадоксы, которые настолько принципиальны, что наиболее радикальная точка зрения на разрешение этих проблем состоит в пересмотре основных постулатов релятивистской теории.

В настоящее время физики пытаются измерить потоки частиц с энергиями более  $10^{20}$  эВ, однако встречаются здесь с трудно преодолимыми проблемами. Хорошо известен пример, показывающий, что в среднем на каждый квадратный километр падает одна частица за 100 лет. Поэтому исследователи, занимающиеся физикой элементарных частиц, вынуждены думать о том, как увеличить площадь детектора до миллионов и более квадратных километров. Самый большой детектор имеет площадь около  $5000 \text{ км}^2$ . За год он регистрирует около 30 событий с энергиями более  $10^{20}$  эВ. Элементарные оценки показывают, что традиционные принципы регистрации не в состоянии удовлетворить запросы современных знаний. Поэтому усилия ученых направлены на создание новейших методов детектирования частиц сверхвысокой энергии.

Принципиально новая идея была опубликована более сорока лет назад в работах Аскарьяна [1—2], в основе которых заложена теоретически доказанная возможность регистрации электромагнитных радиоимпульсов, вызванных широким атмосферным ливнем от частицы очень высокой энергии (более  $10^{16}$  эВ). За прошедшие 40—45 лет сделано много для развития этой идеи, о чем свидетельствует масса экспериментальных и теоретических работ за этот период времени (см., например, [6]). Оригинальность этой идеи состоит в том, что при помощи относительно простой антенны можно зарегистрировать радиоимпульс на значительном расстоянии от каскадного ливня. Поэтому установка с небольшим количеством антенн могла бы контролировать большие площади.

#### ВЫБОР И ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ РАДИОДЕТЕКТОРА

Энергетический порог радиодетектора можно повысить на несколько порядков, если как рабочую площадь установки использовать поверхность Луны. Существует еще ряд не менее важных причин для размещения радиоприемников с антеннами на лунной орбите. Главная из них — это практически полное отсутствие импульсных радиопомех техногенного и атмосферного происхождения вследствие большой удаленности от Земли. Более того, когда спутник находится на противоположной от нас стороне, Луна играет роль экрана, и поэтому даже самые мощные импульсы, приходящие с Земли, будут ослаблены ниже уровня космических радиосуммов. Не менее важным фактором является практически полное отсутствие влаги в лунном реголите.

В работах [3, 10] в 1999 г. был предложен вариант проекта с размещением детекторов на двух окололунных спутниках. Учитывая сложность выполнения такой задачи и требования на ограничения общей массы детектора, ниже предлагаем значительно упрощенный вариант радиодетектора, в котором используется только один модуль. Этого достаточно для определения потока частиц с энергиями более  $10^{22}$  эВ. Такой вариант кажется наиболее рациональным, если принять во внимание практически полное отсутствие предварительного опыта, так как никто и никогда подобных экспериментов не проводил. Возможность и целесообразность размещения радиодетектора на окололунной орбите обоснована в работе [4] (т. н. проект ЛОРД). Заметим, что на возможность размещения детекторов на самой поверхности Луны было указано в работах [1, 2].

**Оценка диапазона частот детектора.** Будем использовать далее выражение для спектральной интенсивности радиоимпульса [7], вызванного частицей с энергией  $W_0$  на расстоянии  $r$  от наблюдателя в лунном реголите

$$\frac{dI(\omega, \theta)}{d\nu dS} = 2\pi \frac{\mu_0}{c} \omega^2 \left( \frac{eN_0 z_0 \alpha \eta}{4\pi r} \right)^2 \times \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{p\omega \alpha z_0}{c} \right)^2 \right] \exp [-(k\rho_1 \sin\theta)^2] \sin^2\theta. \quad (1)$$

Пусть, например, высота орбиты будет 1000 км. Далее, исходя из выбранной частоты, определим диаграмму излучения и уточним рабочую площадь детектора. При выборе частоты можно ориентироваться на анализ выражения (1). Оно показывает, что ширина диаграммы излучения сильно зависит от частоты. В таблице приведены для иллюстрации некоторые параметры импульса, вычисленные согласно (1).

Из таблицы и выражения (1) следует, что максимум излучения приходится на частоту  $\nu = 630$  МГц. Угловая ширина  $\Delta\theta_{1/2}$  черенковского конуса в этом случае составляет всего  $5.7^\circ$ . Однако под каким бы углом ни приходила частица из вакуума в среду, излучение практически не выйдет на поверхность вследствие полного внутреннего отражения, поэтому частоту нужно выбрать так, чтобы диаграмма пространственного распределения излучения должна быть достаточно широкой.

Из таблицы и анализа спектральной интенсивности (1) следует, что предпочтение можно отдать диапазону порядка 50—100 МГц. Этот выбор является компромиссом между двумя несовместимыми требованиями иметь высокую дифференциальную интенсивность излучения и широкую диаграмму направленности. Примем для дальнейшего анализа значение 50 МГц. На рис. 1 представлена диаграмма пространственного распределения излучения для этой частоты. Направление  $V$  соответствует скорости движения ливня.

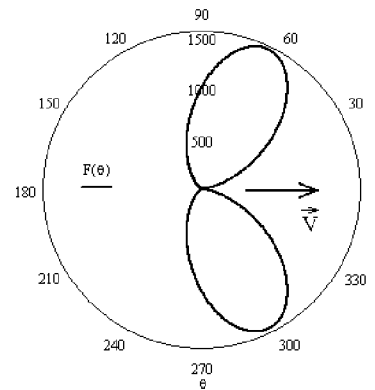


Рис. 1. Диаграмма пространственного излучения для частоты 50 МГц

**Оценка скорости счета событий.** От этого параметра зависит пороговая энергия детектора, которая непосредственно связана и с допустимо минимальной частотой событий. Ее можно предсказать только весьма ориентировочно на основании известных результатов для энергетического диапазона не выше  $10^{20}$  эВ. Известно, что интегральный поток частиц в интервале  $10^{18} \leq W \leq 10^{20}$  эВ выражается как  $J(>W) = A(W/W_0)^{1-\gamma} S \Omega t$ , где  $\gamma \approx 2.7$  — показатель энергетического спектра,  $S$  — площадь детектора,  $\Omega$  — величина телесного угла для возможных направлений прихода космического излучения,  $t$  — длительность наблюдения и  $A \approx 2 \cdot 10^{-3}$  (год $^{-1}$  км $^{-2}$  стер $^{-1}$ ). Более высокой орбите соответствует большая площадь детектора. Однако мощность радиоимпульса падает обратно пропорционально квадрату расстояния. Поэтому увеличение высоты орбиты эффективно только до определенного значения.

Для оценки скорости счета событий необходимо определить произведение  $\Delta\Omega\Delta S$ . Оценим для этого телесный угол возможного прихода частиц и соответствующую этому углу площадь детектора. На рис. 2 показаны направления  $BA$  и  $CA$  возможного прихода частиц.  $DF$  — высота спутника над поверхностью Луны. Для произвольно выбранной точки  $A$  полосы  $AE$  (радиальная прямая  $OD$  является для нее осью симметрии), можно так провести прямые  $BA$  и  $CA$  в плоскости меридиана  $FA$ , что они будут совпадать с границами диаграммы направленности.

Расчетные параметры радиоимпульса

$\nu$ , МГц	Показатель преломления	$I$ , $10^{-26}$ Вт·Гц $^{-1}$ ·м $^{-2}$	$\theta_{\max}$	$\Delta\theta_{1/2}$
10	1	5.2	90°	45—135°
	(1.7)	5.2	90	45—135
30	1	35.6	72	39—113
	(1.7)	41.0	74	41—104
50	1	80	65	35—92
	(1.7)	100	64	41—88
100	1.7	365	58	42—71
200	1.7	1027	55	46—63
630	1.7	3600	54	5.2
1900	1.7	0.47	54	1.8

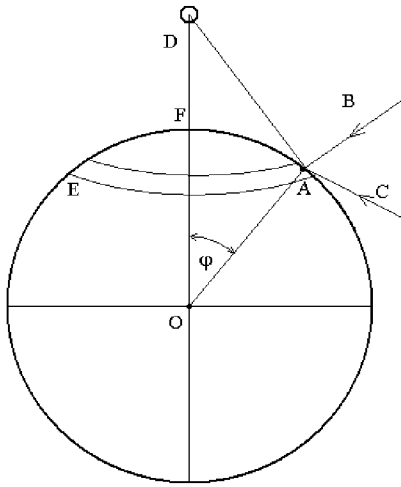


Рис. 2. Направление возможного прихода частиц

Например, если частица приходит по направлению  $BA$ , то верхняя (в плоскости чертежа) граница диаграммы направленности (на полувысоте) совпадает с прямой  $AD$ , а остальная часть диаграммы направлена в сторону Луны. Если же частица пришла по прямой  $CA$ , то нижняя граница диаграммы направленности совпадает с  $AD$ , а остальная часть расположена по правую сторону  $AD$ , т. е. интервал меридиональных углов прихода частиц, при которых спутник будет в области диаграммы (на уровне мощности  $1/2$ ), составляет  $\Delta\theta_{1/2} = 64^\circ$ . Из рис. 2 следует, что максимально возможное значение аксиального угла равно  $\varphi_{\max} \approx 50^\circ$ . При больших углах точка  $A$  будет находиться в области геометрической тени. Минимальное значение этого угла  $\varphi_{\min}$  определяется возможностью попадания спутника  $D$  в пределы диаграммы направленности. Очевидно, что для выбранных значений частоты наблюдения и высоты орбиты величина  $\varphi_{\min}$ , при которой спутник будет в пределах диаграммы направленности для частиц, приходящих в интервале углов  $\Delta\theta_{1/2} = 64^\circ$ , приблизительно равна  $20^\circ$ .

Для азимутальных углов  $\alpha$  ограничений практически нет. Таким образом, на любой элемент площади  $dS = 2\pi R^2 \sin\varphi d\varphi d\alpha$  могут падать частицы в телесном угле  $\Delta\theta_{1/2} \cdot 2\pi$ , и спутник будет находиться в зоне поля излучения. Поэтому произведение телесного угла на площадь будет

приблизительно равно  $\Delta S \cdot \Delta\Omega \approx 2\pi R^2 (\cos\varphi_{\min} - \cos\varphi_{\max}) \Delta\theta_{1/2} \cdot 2\pi$ .

Оценка скорости счета событий согласно выражению  $J(> W) = A \cdot (W/W_0)^{1-\gamma} S\Omega t$  для частиц с энергией  $W > 10^{22}$  эВ дает величину  $J(> W) \approx 160 \text{ год}^{-1}$ .

**Сравнение мощности радиосигнала и мощности космических радиощумов.** Средняя температура небесной сферы на частоте 50 МГц приблизительно равна 5000 К. Поэтому  $P_N = kT = 0.7 \cdot 10^{-19}$  Вт/Гц. Мощность, выделяемая на нагрузке антенны, равна  $P_A = I(\nu) \cdot S_{\text{эф}}/\tau$ , где  $\tau \sim 1$  мкс — длительность импульса для полосы пропускания 1 МГц. Подстановка данных в выражение (1) дает  $P_A = 100 \cdot 10^{-26} \cdot 10 \cdot 10^6 \approx 10^{-17}$  Вт/Гц, т. е. отношение  $P_A/P_N \approx 140$ . Это отношение можно увеличить, если использовать полуволновые вибраторы с рефлекторами. При этом диаграмма направленности антенны должны быть ориентирована в сторону Луны. Следует также учесть, что не вся энергия первоначальной частицы переходит в энергию каскада. Поэтому отношение  $P_A/P_N$  в несколько раз уменьшится.

Таким образом, энергию  $W = 10^{22}$  эВ можно считать существенно превосходящей порог чувствительности детектора.

Пусть для определенности антенна детектора представляет собой три взаимно перпендикулярных полуволновых вибратора. Тогда э.д.с., наводимая на каждом из них, равна

$$\begin{aligned} u_x &= W_0 \frac{AA_1}{R} F(\theta) \cos\xi, \\ u_y &= W_0 \frac{AA_1}{R} F(\theta) \cos\zeta, \\ u_z &= W_0 \frac{AA_1}{R} F(\theta) \cos\psi, \end{aligned} \tag{2}$$

где  $\cos\xi$ ,  $\cos\zeta$  и  $\cos\psi$  — направляющие косинусы вектора напряженности поля в точке расположения антенны,  $A$  — известная константа, связанная с характеристиками приемных антенн,  $A_1$  — множитель, определяемый из (1), и не связанный с направлением  $\theta$ ,  $F(\theta)$  — коэффициент, выражающий диаграмму направленности каскадного ливня,  $W_0$  — его энергия (т. е. фактически энергия частицы),  $R$  — расстояние от

ливня до антенн. Тогда из выражения (2) можно записать

$$W_0 = R\sqrt{u_x^2 + u_y^2 + u_z^2} / AA_1 F(\theta). \quad (3)$$

Расстояние  $R$  для высоты орбиты 1000 км лежит в пределах 1200—1700 км и не слишком влияет на величину э.д.с.,  $F(\theta)$  всегда меньше единицы, поэтому  $W_0$ , вычисленная согласно (3) при  $F(\theta) = 1$ , будет нижним пределом энергии частицы.

Кроме значения энергии зарегистрированных частиц, можно сделать некоторые выводы относительно анизотропии потока с такой энергией. Если для каждого события записывать положение спутника относительно небесной сферы, то при достаточно большом наборе событий можно определить преимущественное направление прихода частицы.

Наконец, важным является тот факт, что при проведении эксперимента открывается реальная возможность проверки радиоастрономического метода [5] сравнением момента прихода частицы на поверхность Луны и момента регистрации радиоимпульсов на Земле (с учетом запаздывания) с помощью радиотелескопа в различных частотных диапазонах.

В заключение заметим, что эффект ЛПМ, во много раз «растягивающий» каскадный ливень при высоких энергиях в плотной среде, для адронных ливней не является существенным, так как  $\pi_0$ -мезоны, ответственные за начало электромагнитного ливня, при больших энергиях взаимодействуют со средой, а не распадаются на  $\gamma$ -кванты [8, 9, 11, 12].

1. Аскарьян Г. А. Избыточный отрицательный заряд электрон-фотонного ливня и когерентное излучение от него // ЖЭТФ.—1961.—41, № 2(8).— С. 616—618.
2. Аскарьян Г. А. Когерентное радиоизлучение от космических ливней в воздухе и в плотных средах атмосферы // ЖЭТФ.—1965.—48, № 3.—С. 988—990.
3. Голубничий П. И., Филоненко А. Д. Детектирование космических лучей сверхвысоких энергий с помощью искусственного спутника Луны // Космічна наука і технологія.—1999.—5, № 4.—С. 87—92.
4. Гусев Г. А., Ломоносов Б. Н., Пичхадзе К. М. и др. Регистрация космических лучей и нейтрино ультравысоких энергий радиометодом с использованием искусст-

венных спутников Луны // Космич. исслед.—2006.—44, № 1.—С. 22—42.

5. Филоненко А. Д. Регистрация космических лучей супервысокой энергии декаметровым радиотелескопом УТР-2 // Письма в ЖЭТФ.—1999.—70, № 10.— С. 639—641.
6. Филоненко А. Д. Детектирование космических лучей по электромагнитной радиоэмиссии ливня и возможности этого метода в диапазоне сверхвысоких энергий // Успехи физ. наук.—2002.—172, № 4.—С. 439—471.
7. Филоненко А. Д. Радиоастрономический метод измерения потока космического излучения сверхвысокой энергии в декаметровом и дециметровом диапазонах длин волн // Письма в ЖЭТФ.—2007.—86, № 5.—С. 339—343.
8. Akhiezer A. I., Shul'ga N. F., Fomin S. P. The Landau-Pomeranchuk-Migdal Effect // Phys. Rev.—2005.—22.— P. 1—215.—(Monograph. — Cambridge: Sci. Pubs, UK, 2005.—215 p.
9. Alvarez-Muniz J., Marques E., Vazques R. A. and Zas E. Radio pulses in dense media: simulation versus approximations // Proc. ICRC-2001, h. 1305—1308.
10. Golubnichiy P. I., Filonenko A. D. The detecting of space rays of superhiger energies with the help of the artificial satellite of the Moon // The fifth Sino-Russian-Ukrainian Symposium on Space Science and Technology Held Jointly with The First International Forum on Astronautics and Aeronautics. — Harbin, P. R. China, 2000.—P. 543—548.
11. Rusov V. D., Sharf I. V. One — parameter cascade model of multiple hadrons production in inelastic  $hh$ -processes at high energies // Nucl. Phys.—2006.—A764.—P. 460—475.
12. Rusov V. D., Zelentsova T. N., Kosenko S. I., et al. Cascade parametrization of multiplicity distributions in inelastic  $pp$  and  $p\bar{p}$  — interactions on energy interval in c.m.s.  $\sqrt{s} = 20$ —1800 GeV // Phys. Lett.—2001.—B504.—P. 213—217.

#### DETECTION OF FLUX COSMIC RAY OF ULTRAHIGH ENERGY IN THE LUNAR ORBIT

*V. N. Vaschenko, P. I. Golubnichiy, S. D. Krivososov, V. N. Pavlovich, V. D. Rusov, A. D. Filonenko, S. P. Fomin, N. F. Shulga*

We present the main features of the project of the detector of space radiation of an ultrahigh energy of over  $10^{22}$  eV a board the Moon satellite. The urgency of the problem and the possibility of realization of such aggregate are shown. Strength of the radio signal caused by the current of excess electron cascade and  $\delta$ -electrons is quite sufficient for a power threshold of  $10^{22}$  eV in an orbit at 1000 km. It is found that the most suitable frequency range is 50—100 MHz. Rough speed of the account will make 150 events in a year in this case in this case.