

ЖЕСТКАЯ КОМПОНЕНТА КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

Воротилина М.В., ученица, 10 класс

Научные руководители: Колесников Л.В. д.ф.-м.н., профессор; Урванцева Л.Д. учитель физики

Муниципальное бюджетное общеобразовательное учреждение «Средняя общеобразовательная школа № 45» г. Кемерово.

Космические лучи — это поток частиц, приходящих на Землю из межзвездного пространства.

По происхождению различают Галактические и Солнечные космические лучи.

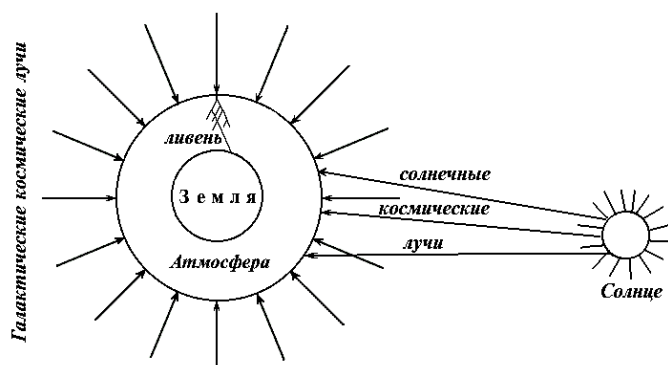


рис.1.

В результате взаимодействия с ядрами атмосферы первичные космические лучи (протоны) создают большое число вторичных частиц — пионов, протонов, мюонов, электронов, позитронов и фотонов. Таким образом, вместо одной первичной частицы возникает большое число вторичных частиц, которые делятся на адронную, мюонную и электронно-фотонную компоненты. Такой каскад покрывает большую территорию и называется Широким Атмосферным Ливнем.

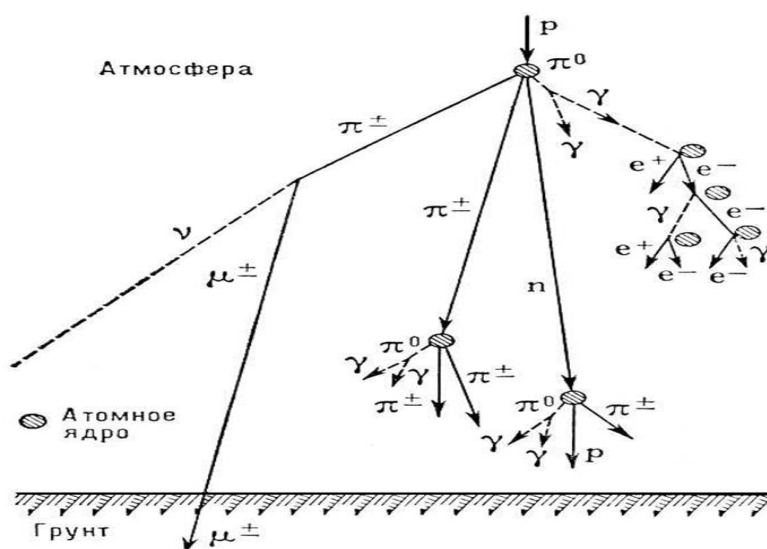
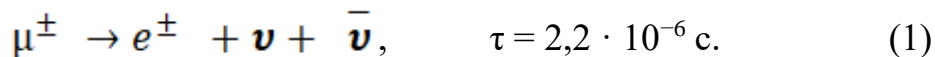


рис.2. ШАЛ. (p — протон; n — нейтрон; π^{\pm}, π^0 — пионы; μ^{\pm} — мюоны; e^{\pm} — позитрон и электрон; ν — нейтрино; γ — квант).

Космическое излучение, приходящее в нижние слои атмосферы, принято делить на мягкую и жесткую компоненты. Мягкая компонента состоит из электронов, позитронов и γ - квантов, которые сильно поглощаются в веществе. Поглощение частиц мягкой компоненты существенным образом зависит от порядкового номера Z вещества поглотителя. Частицы мягкой компоненты почти целиком поглощаются десятисантиметровым слоем свинца. Жесткая компонента состоит из мюонов, которые слабо поглощаются веществом.

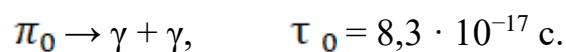
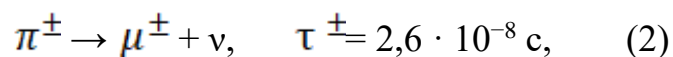
Особенностью мюонов является их распад на электроны, нейтрино и антинейтрино:



В плотной среде поглощение мюонов обусловлено потерей энергии на ионизацию атомов среды. В газообразной среде пробег мюонов велик, и нужно учитывать их выбывание из потока космических лучей за счет спонтанного распада.

Угловое распределение жесткой компоненты космических лучей.

Можно считать, что основная часть мюонов рождается в верхних слоях атмосферы и имеет энергию 1 - 10 ГэВ. Мюоны, входящие в состав жесткой компоненты, возникают в результате распада пионов - продуктов ядерного взаимодействия первичных космических лучей с ядрами атмосферы:



Следовательно, мюоны проходят почти весь слой атмосферы ($\sim 900 \text{ г/см}^2$). При этом они частично поглощаются, частично распадаются. Мюоны, идущие под углом θ к вертикали (рис. 4) и попадающие на уровень моря, проходят в атмосфере путь в $1/\cos \theta$ раз больший, чем мюоны, идущие по вертикали. Поэтому вероятность распада для мюонов, идущих под углом θ , больше. При увеличении угла θ будет увеличиваться также слой воздуха, который должны пройти мюоны. Это приводит к увеличению поглощения за счет ионизационных потерь. Таким образом, оба фактора должны привести к уменьшению интенсивности мюонов с увеличением зенитного угла θ . Можно, однако, выделить ту часть мюонов,

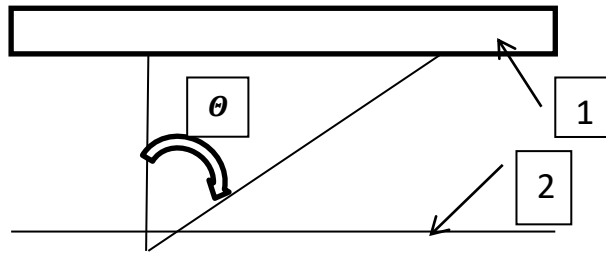


Рис.3. Генерация мюонов и путь их прохождения в атмосфере: 1 — слой генерации; 2 — уровень моря

которые поглотились за счет увеличения количества вещества. Измерения интенсивности вертикального потока мюонов, выполненные на разных глубинах под землей, показали, что число мюонов $N(x)$ уменьшается как функция количества пройденного плотного вещества x ($\text{г}/\text{см}^2$) по следующему закону:

$$N(x) = \left(\frac{900}{900+x}\right)^{1,6} = \left(\frac{900}{\xi}\right)^{1,6} \quad (3)$$

где $\xi = 900 + x$ — полное количество вещества, пройденного мюоном от места генерации до места поглощения (масса вертикального столба воздуха принята равной $900 \text{ г}/\text{см}^2$). Из рис. 4. видно, что $\xi = 900 / \cos \theta$. Таким образом, число мюонов, дошедших до счетчика на уровне моря, уменьшается за счет поглощения в веществе по закону

$$P_1(\theta) \sim (\cos\theta)^{1,6}. \quad (4)$$

С увеличением длины пути, пройденного мюоном, увеличивается вероятность распада мюона. Вероятность прохождения мюоном пути l без распада равна

$$P_2(\theta) = \exp\left(-\frac{l(\theta)}{L}\right), \quad (5)$$

где $L = v \cdot \tau$ - длина распадного пробега; $v = \beta \cdot c$ - скорость мюона; τ - время жизни движущегося мюона; c - скорость света. Из релятивистской механики известно, что

$$\tau = \frac{\tau_0}{\sqrt{1-\beta^2}}, \quad (6)$$

где τ_0 — время жизни покоящегося мюона. Тогда

$$L = \beta \cdot c \frac{\tau_0}{\sqrt{1-\beta^2}} = \beta c \tau_0 \frac{E_\mu}{m_\mu c^2}, \quad (7)$$

где $E_\mu = m_\mu c^2 / \sqrt{1 - \beta^2}$ — полная энергия мюона, E_μ можно принять равной $4 \cdot 10^9$ эВ; m_μ — масса покоящегося мюона, которая в энергетических единицах составляет $105,8 \text{ МэВ}/c^2$.

Отношение числа мюонов, идущих под зенитным углом θ , к числу вертикально падающих мюонов можно записать в виде:

$$\frac{N(\theta)}{N(0^\circ)} = \frac{P_1(\theta) P_2(\theta)}{P_1(0^\circ) P_2(0^\circ)} = (\cos\theta)^{1,6} \cdot \frac{\exp(-\frac{l(\theta)}{L})}{\exp(-\frac{l_0}{L})}, \quad (8)$$

где $P_1(\theta)$ и $P_2(\theta)$ определены формулами (4) и (5). Можно считать, что по вертикали мюоны проходят путь $l_0=15$ км. Путь мюонов под углом θ равен

$$l(\theta) = l_0 / \cos \theta, \quad (9)$$

Воспользовавшись формулами (7) и (9), а также экспериментально определенным отношением $N(\theta)/N(0^\circ)$, с помощью формулы (8) можно получить значение τ_0 .

В таблице 1. приведены экспериментальные значения скорости счета числа мюонов в зависимости от градуса отклонения.

	Градус отклонения, θ^0						
	0	15	30	45	60	75	90
Кол-во частиц, шт.	147	144	153	106	67	53	42

Подставляя в формулу (5) значения $\theta = 60^0$; $\theta^0 = 0^0$ получим время жизни мюона равным $4.2 \cdot 10^{-6}$ с (табличное значение $2.2 \cdot 10^{-6}$ с).

Разница обуславливается тем, что измерительный прибор находился в здании, соответственно, при наклоне телескопа на определенный градус, космическим лучам приходится проходить через стены, предметы... т.е. среда, в которой проходил эксперимент, была не однородной.

Идеальным условиям соответствует безоблачное небо, просторная и свободная местность в горах.

Практическое использование жесткой компоненты космических частиц.

Высокая проникающая способность в сочетании с прямо пропорциональным плотности вещества коэффициент поглощения при умеренных энергиях (десятки и сотни Гэв) делает проникающую компоненту К. л. очень удобным средством для подземной геофизической и инженерной разведки (рис.4). Измеряя интенсивность космических лучей телескопом счётчиков в штольнях и сравнивая полученные данные с известными кривыми поглощения к. л. в воде или грунте, можно обнаруживать или уточнять положения рудных пластов и пустот, а также измерять весовую нагрузку на грунт от стоящих на нём сооружений.

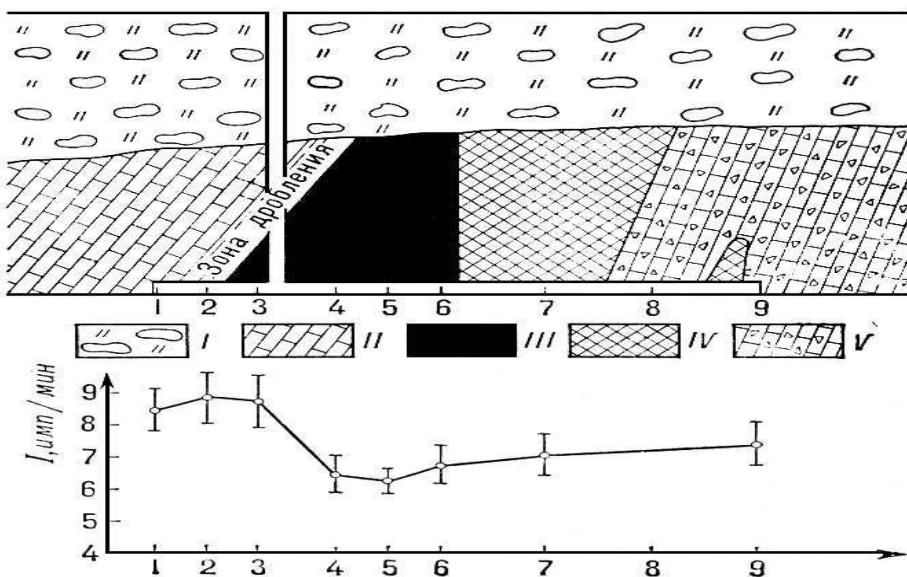


Рис. 4. Пример разведки полезных ископаемых при помощи измерения интенсивности проникающей (мюонной) компоненты космических лучей: а — разрез полиметаллического месторождения (I — наносы, II — известняк, III — богатая руда, IV — бедная руда, V — вкрапленное оруденение); б — интенсивность I космических лучей, измеренная телескопом счётчиков (вертикальные линии на кривой указывают ошибки измерений).

Список литературы

1. Капитонов, И.М. Введение в физику ядра и частиц: учебное пособие / И.М. Капитонов. — Москва, 2002.- 384 с.
2. Григоров Н.Л. Космические лучи/ Н.Л.Григоров, М.А.Кондратьева, И.Д.Рапопорт. — Москва, 1962.- 83 с.
3. Статья «Космические лучи» // <https://www.booksite.ru/fulltext/1/001/008/065/142.htm>

