Н. М. Кочарян и Г. С. Саакян

Генерация мезонов и электронов в нижних слоях атмосферы

(Представлено А. Л. Шагиняном 25 I 1955)

Вопрос спектра рождения π и μ -мезонов нуклонами на различных глубинах атмосферы был обстоятельно исследован в работе Гарибьяна и Гольдмана (1), а также в работе Сандса (2). В настоящей заметке, исходя из наших измерений спектра μ -мезонов на высоте 3200 м над уровнем моря (3) и используя данные других авторов относительно спектра μ -мезонов на уровне моря и высотного хода интенсивности μ -мезонов (4), вычисляется энергия, передаваемая нуклонной компонентой на образование π -мезонов в слое воздуха между высотой 3200 м н. уровнем моря.

Пусть $N(E, s)$ — дифференциальный спектр энергии вертикального потока μ -мезонов на глубине s , $n(E_0, s)$ — вертикальная интенсивность μ -мезонов с энергией $E \geq E_0 = 0.215$ BeV на глубине s , $\tau_0 = 2,15 \cdot 10^{-6}$ сек. — время жизни покоящегося μ -мезона и $\beta \approx 2 \text{ MeV} \left(\frac{2}{\text{см}^2}\right)^{-1}$ — ионизационные потери энергии релятивистских частиц на 1 г/см² пути воздуха. Из закона сохранения энергии имеем:

$$\int_{E_0}^{\infty} EN(E, s_2) dE - \int_{E_0}^{\infty} EN(E, s_1) dE + \frac{Hm_{\mu}c}{\tau_0} \int_{s_1}^{s_2} n(E_0, s) \frac{ds}{s} + \beta \int_{s_1}^{s_2} n(E_0, s) ds = \epsilon_{\mu} \tag{1}$$

где $\int_{E_0}^{\infty} EN(E, s) dE$ — поток энергии μ -мезонов на глубине s , $s_1 =$

$= 705 \text{ г/см}^2$ и $s_2 = 1030 \text{ г/см}^2$, $\beta \int_{s_1}^{s_2} n(E_0, s) ds$ — ионизационные потери

энергии потока μ -мезонов между высотой 3200 м и уровнем моря;

$H = 8 \cdot 10^5$ см — высота однородной атмосферы: $\frac{Hm_\mu c}{\tau_0} \int_{s_1}^{s_2} n(E_0, s) \frac{ds}{s}$ — по-

ток энергии распадающихся μ -мезонов между глубинами s_1 и s_2 и, наконец, ϵ_2 — дополнительный поток энергии μ -мезонов, рождающихся при распаде $\pi^\pm$ -мезонов, образованных в результате ядерных столкновений нуклонов в рассмотренном слое атмосферы.

При расчете третьего и четвертого интегралов мы исходили из интенсивности жесткой компоненты с ионизационными пробегами $R \geq 167$ г/см² ($E = 0,215$ BeV), приведенной в работе (4). Однако для получения функции $n(E_0, s)$ были внесены две поправки. Первая поправка учитывала фон протонов в жесткой компоненте. Этот фон был вычислен исходя из отношения чисел протонов и μ -мезонов на высоте 3200 м, приведенного в работе (3), и предполагалось, что интенсивность протонов с глубиной меняется пропорционально $\exp\left(-\frac{s-s_1}{125}\right)$.

Вторая поправка была введена для учета влияния широтного эффекта на интенсивность μ -мезонов. Эта поправка вычислялась приблизительно следующим образом. По нашим измерениям интенсивность вертикального потока μ -мезонов с $E \geq 0,215$ BeV после вычета фона протонов равна $n(E_0, 705) = 0,0142$ см² сек⁻¹ стерад⁻¹, тогда как по данным Росси после вычета фона протонов $n(E_0, 705) = 0,0149$ см⁻² сек⁻¹ стерад⁻¹. Таким образом, разница в этих интенсивностях составляет примерно $\Delta = 0,0007$. Далее предполагалось, что интенсивность μ -мезонов на уровне моря не зависит от геомагнитной широты и, что Δ с глубиной убывает линейно, стремясь к нулю при $s = 1030$ г/см². В табл. 1 приведен высотный ход интенсивности вертикального потока μ -мезонов с энергией $E \geq 0,215$ BeV ($R \geq 167$ г/см² Pb), после внесения вышеуказанных поправок.

Таблица 1

Высотный ход интенсивности вертикального потока μ -мезонов с энергией $E \geq 0,215$ BeV для геомагнитной широты 35°

s г/см ²	$n(E, s)$	s г/см ²	$n(E, s)$	s г/см ²	$n(E, s)$
705	0,0142	825	0,0114	945	0,0093
725	0,0136	845	0,0110	965	0,0091
745	0,0130	865	0,0107	985	0,0087
765	0,0125	885	0,0103	1005	0,0086
785	0,0122	905	0,0099	1030	0,0084
805	0,0116	925	0,0095		

После вычисления входящих в (1) интегралов получим:

$$\int_{E_0}^{\infty} EN(E, s) dE = 0,0340 \text{ BeV } \text{см}^{-1} \text{сек}^{-1} \text{стерад}^{-1},$$

$$\int_{E_0}^{\infty} N(E, s_2) E dE = 0,0229 \text{ BeV } \text{см}^{-2} \text{сек}^{-1} \text{стерад}^{-1},$$

(2)

$$\frac{Hm_{\mu}c}{\tau_0} \int_{s_1}^{s_2} n(E_0, s) \frac{ds}{s} = 0,0054 \text{ BeV } \text{см}^{-2} \text{сек}^{-1} \text{стерад}^{-1},$$

$$\beta \int_{s_1}^{s_2} n(E_0, s) ds = 0,0069 \text{ BeV } \text{см}^{-2} \text{сек}^{-1} \text{стерад}^{-1}.$$

Подставляя значения интегралов (2) в уравнение (1), получим:

$$\varepsilon_{\mu} = 0,0012 \text{ BeV } \text{см}^{-2} \text{сек}^{-1} \text{стерад}^{-1}. \quad (3)$$

Таким образом, между высотой 3200 м и уровнем моря вертикальный поток энергии μ -мезонов теряет на распад и ионизационные потери $0,0123 \text{ BeV } \text{см}^{-2} \text{сек}^{-1} \text{стерад}^{-1}$, в то время как этот поток пополняется на величину, в десять раз меньшую приведенной.

Теперь вычислим энергию, расходуемую потоком нуклонов на образование мягкой (т. е. электронно-фотонной) компоненты космического излучения между высотами 3200 метров н. уровнем моря. Для этого сперва определим общую энергию $\pi^{\pm}$ -мезонов, образованных в слое $s_1 \leq s \leq s_2$.

Считая, что угловое распределение μ -мезонов и нейтрино в системе покоя распадающегося π -мезона является изотропным, получаем:

$$E_{\mu} = \frac{m_{\pi}^2 + m_{\mu}^2}{m_{\pi}^2 - m_{\mu}^2} E_{\nu}, \quad (4)$$

где m_{π} — масса $\pi^{\pm}$ -мезонов, E_{μ} и E_{ν} — энергии, уносимые μ -мезоном и нейтрино в лабораторной системе координат. Отсюда находим, что энергия распадающегося π -мезона равна

$$E_{\pi} = \frac{2m_{\pi}^2}{m_{\pi}^2 + m_{\mu}^2} E_{\mu} \approx 1,27 E_{\mu}. \quad (4')$$

Отсюда, имея в виду формулу (4') для полной энергии π -мезонов, образованных в слое $705 \leq s \leq 1030 \text{ г/см}^2$, имеем:

$$\varepsilon_{\pi^{\pm}} = 1,27 \varepsilon_{\mu} \approx 0,0015 \text{ BeV } \text{см}^{-2} \text{сек}^{-1} \text{стерад}^{-1}. \quad (5)$$

Предполагая, что на образование нейтральных π -мезонов расходуется в два раза меньше энергии, чем на образование заряженных π -мезонов, из (5) находим

$$\varepsilon_{\pi^0} \approx 0,0008 \text{ BeV } \text{см}^{-2} \text{сек}^{-1} \text{стерад}^{-1}. \quad (6)$$

Эта энергия представляет собой как раз ту энергию, которая передается нуклонами через π^0 -мезоны на образование электронно-фотонной компоненты между высотой 3200 м и уровнем моря.

Из (2) имеем, что на распад μ -мезонов в слое $705 \leq s \leq 1030$ г/см² расходуется энергия $0,0054$ BeV см⁻²сек⁻¹стерад⁻¹. ²/₃ этой энергии уносят нейтрино. Следовательно, за счет распада μ -мезонов с энергией $E \geq 0,215$ BeV в рассмотренном слое электронно-фотонной компоненты передается энергия

$$\varepsilon_e = 0,0018 \text{ BeV см}^{-2}\text{сек}^{-1}\text{стерад}^{-1}. \quad (7)$$

По сравнению с этой энергией вклад быстрых δ -электронов в электронно-фотонную компоненту будет мал. Нетрудно показать, что поток энергии от δ -электронов будет около $0,0004$ BeV см⁻²сек⁻¹стерад⁻¹. Таким образом, поток энергии мягкой компоненты за счет распада и δ -процессов от μ -мезонов составит $0,0022$ BeV см⁻²сек⁻¹стерад⁻¹. Сравнивая эту величину с (6), видим, что примерно 30% электронов, образованных в атмосфере ниже высоты 3200 м, рождаются в ядерных столкновениях нуклонов в рассмотренном слое воздуха, а остальные 70% рождаются за счет распада μ -мезонов.

Авторы выражают благодарность С. Н. Вернову и Н. П. Григорову за ценное обсуждение работы.

Институт физики
Академии наук Армянской ССР

Ն. Մ. ՔՈՉԱՐՅԱՆ ԵՎ Գ. Ա. ՍԱՀԱԿՅԱՆ

Մեզոնների եվ էլեկտրոնների առաջացումը մթնոլորտի ստորին շերտերում

Աշխատանքում հաշված է էներգիայի այն հոսքը, որ ծախսվում է նուկլոնային կոմպոնենտի կազմից, ծովի մակարդակի և 3200 մ բարձրությունների միջև ընկած սղի շերտում, π -մեզոններ ստեղծելու վրա:

Ցույց է տրված, որ այդ շերտում առաջացած $0,275$ BeV-ից ավելի էներգիա ունեցող լիցքավորված π -մեզոնների լրիվ էներգիայի հոսքը մոտավորապես հավասար է $0,0015$ BeV. սմ⁻² վրկ⁻¹ ստերադ⁻¹: Ենթադրելով, որ շեղոր π -մեզոնների առաջացման վրա ծախսվում է երկու անգամ պակաս էներգիա, այստեղից ստանում ենք, որ նույն շերտում առաջացած և նույն էներգիա ունեցող շեղոր π -մեզոնների լրիվ էներգիայի հոսքը մոտավորապես կազմում է $0,0008$ BeV. սմ⁻² վրկ⁻¹ ստերադ⁻¹: $0,215$ BeV-ից ավելի էներգիա ունեցող μ -մեզոնների տրոհման շնորհիվ առաջացած էլեկտրոնա-ֆոտոնային կոմպոնենտի էներգիայի հոսքը հավասար է $0,0018$ BeV. սմ⁻² վրկ⁻¹ ստերադ⁻¹: Վերջին երկու թվերի համեմատությունից հետևում է, որ 3200 մ բարձրությունից դեպի ծով սղի շերտում առաջացած էլեկտրոնները մոտավորապես 30% ձևավորում են այդ շերտում տեղի ունեցող միջուկային բախումներում դոյացած շեղոր π -մեզոնների տրոհման շնորհիվ, իսկ մնացած 70% ստեղծվում են μ -մեզոնների տրոհման անուանքով:

ЛИТЕРАТУРА — Գ Ր Ա Կ Ա Ն Ո Ւ Թ Յ Ո Ւ Ն

¹ Г. М. Гарибян и И. И. Гольдман, ЖЭТФ, 26, 257, 1954. ² М. Сандс, Phys. Rev, 77, 180, 1950. ³ Н. М. Кочарян, М. Т. Айвазян и З. А. Киракосян, А. С. Алексанян, ДАН АрмССР, XX, 5 (1955). ⁴ Б. Росси, Rev. Mod. Phys., 20, 537, 1948.