

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

АТОМНАЯ И ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА

УДК 537.531.15

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ АТМОСФЕРНЫХ ЛИВНЕЙ СВЕРХВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

Н. Н. Калмыков, А. А. Константинов, Р. Энгель*)

(НИИЯФ)

E-mail: elan@eas.sinp.msu.ru

Выполнен расчет радиоизлучения широких атмосферных ливней (ШАЛ) с энергией до 10^{17} эВ. Результаты по пространственному распределению радиоизлучения находятся в хорошем соответствии с данными эксперимента LOPES-10.

Введение

В 2004 г. в составе установки KASCADE [1] начал работать эксперимент LOPES [2], нацеленный на изучение радиоизлучения ШАЛ и разработку на его основе метода регистрации космических лучей с энергией выше 10^{17} эВ [3]. LOPES призван выполнить начальную калибровку радиометода и тестирование количественной модели радиоизлучения ШАЛ.

В настоящей работе представляются результаты моделирования пространственного распределения радиоизлучения вертикального ШАЛ с энергией 10^{17} эВ. Сравнение результатов расчета с экспериментальными данными LOPES-10 (10 — число радиоантенн, входящих в установку) проводится на расстояниях до 300 м от оси ливня на частотах 40 и 80 МГц.

Моделирование

Расчет радиоизлучения ШАЛ осуществлялся с помощью специально созданной программы, суммирующей излучение от отдельных частиц ливня. Для моделирования электрон-фотонной компоненты ШАЛ использовался код EGSnrc [4]. Плотность и оптические свойства земной атмосферы менялись дискретно с шагом 9.5 г/см^2 . Величина и направление геомагнитного поля соответствуют значениям этих параметров в месте проведения эксперимента LOPES [2].

В приближении Фраунгофера фурье-компонента электрического поля на частоте $\omega = 2\pi\nu$, создаваемая электроном e , который движется прямолинейно и равномерно со скоростью \mathbf{u} в промежутке времени от t_0 до $t_0 + \Delta t$, равна

$$\mathbf{E}_\omega(x_\alpha) = \frac{e}{8\pi^2 \epsilon_0 c} \frac{e^{ikR}}{R} e^{i\omega(t_0 - n\mathbf{e}_R \xi_0/c)} \times \left(\frac{e^{i\omega \Delta t(1 - n\mathbf{e}_R \boldsymbol{\beta})} - 1}{1 - n\mathbf{e}_R \boldsymbol{\beta}} \right) \boldsymbol{\beta}_\perp, \quad (1)$$

где ϵ_0 и c — соответственно диэлектрическая постоянная и скорость света в вакууме, $k = n\omega/c$, n — показатель преломления воздуха, R — расстояние от электрона до точки приема радиосигнала x_α , $\mathbf{e}_R = \mathbf{R}/R$, ξ_0 — радиус-вектор электрона в момент t_0 , $\boldsymbol{\beta} = \mathbf{u}/c$, $\boldsymbol{\beta}_\perp = -[\mathbf{e}_R, [\mathbf{e}_R, \boldsymbol{\beta}]]$. Излучение считалось по формуле (1) для всех частиц выше порога моделирования 100 кэВ.

В настоящее время прямое моделирование ливней методом Монте-Карло ограничено энергией 10^{15} эВ. Традиционным средством повышения предела по энергии является сегодня «истончение» ливней, предложенное в работе [5]. К сожалению, для расчета радиоизлучения ШАЛ названный метод дает выигрыш не более 10 раз, поскольку в радиоволновом диапазоне очень велика роль частиц именно низких энергий (много меньше критической, равной 81 МэВ). Моделирование радиоизлучения от одного вертикального ливня, образованного фотоном с энергией $E_0 = 10^{17}$ эВ, стало возможно за счет использования кластера компьютеров (KASCADE, Институт ядерной физики, Карлсруэ). Истончение ливня проводилось для частиц с энергией ниже 20 ГэВ, что позволяло рассчитывать радиополе на расстояниях до 300 м. Пространственное распределение радиоизлучения было получено на четырех направлениях от оси ливня на частотах 40 и 80 МГц. При одновременной работе 50 процессоров (частота каждого около 2 ГГц) весь расчет занял один месяц.

*) Форшунгсцентрум Карлсруэ. Институт ядерной физики, 3640, D-76021 Карлсруэ, Германия.

Результаты

Расчет радиоизлучения был произведен для ливня, соответствующего средней каскадной кривой. Продольный профиль этого ливня представлен на рис. 1.

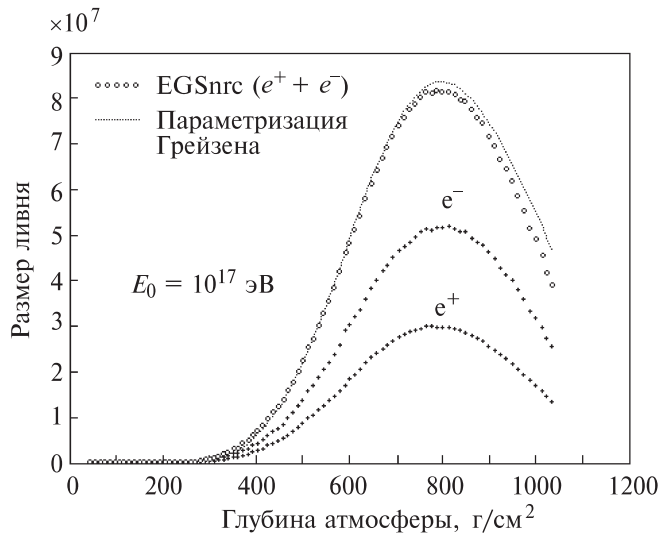


Рис. 1. Продольный профиль вертикального ливня с энергией $E_0 = 10^{17}$ эВ: e^- — число электронов, e^+ — число позитронов, $e^- + e^+$ — их сумма

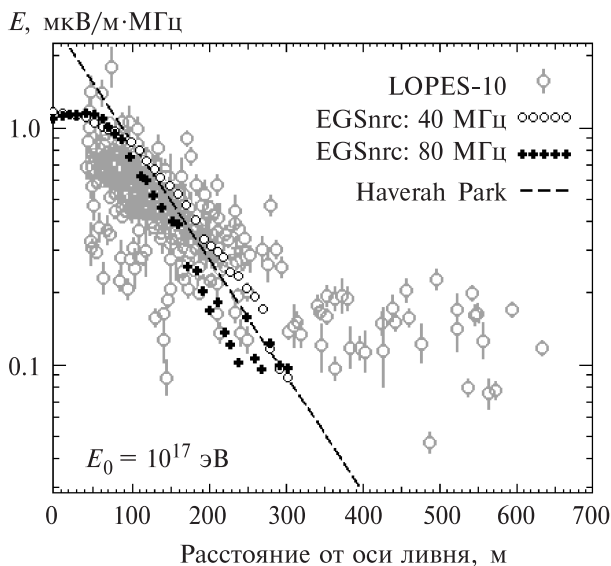


Рис. 2. Пространственное распределение радиоизлучения. Сравниваются результаты настоящей работы (EGSnrc), данные эксперимента LOPES-10 [6] и аппроксимация данных Haverah Park [7]

Результат сравнения теоретической напряженности радиоизлучения с данными LOPES-10 показан на рис. 2, где расчетное поле усреднено по северному, южному, западному и восточному направлениям наблюдения. Экспериментальная зависимость амплитуды радиосигналов ШАЛ построена по выборке

из 372 событий, набранных за 6 месяцев работы LOPES-10 [6]. В выборке представлены ШАЛ с энергиями от $5 \cdot 10^{16}$ до $6 \cdot 10^{17}$ эВ. Как видно, результаты расчета хорошо описывают поведение экспериментальных точек. Простая экстраполяция расчетных кривых на расстояния более 300 м при данном уровне истончения (20 ГэВ) не представляется возможной.

На том же рисунке приведена аппроксимация данных эксперимента Haverah Park [7]. Рассматриваемая аппроксимация, полученная для ШАЛ с энергиями от 10^{17} до 10^{18} эВ и с углами прихода меньше 35° , справедлива в интервале расстояний до 300 м (при частоте 55 МГц). Данные Haverah Park хорошо соответствуют рассчитанному радиополю на расстояниях 100–300 м. Разница при расстояниях R менее 100 м связана с тем, что зависимость вида $f(R) \sim \exp(-R/(110 \text{ м}))$ [7] плохо описывает данные в этом интервале расстояний [7, 8].

Заключение

Реальная граница прямого монте-карловского моделирования радиоизлучения (10^{15} – 10^{16} эВ) еще очень далека от области предельно высоких энергий (10^{20} эВ и выше). Принципиально повысить энергию первичной частицы можно только в рамках макроскопического подхода, рассматривающего ШАЛ в терминах электрических моментов и токов, приобретаемых им за счет накопления избытка электронов и систематического разделения электронов и позитронов в геомагнитном поле. Собственно, только эти два (чисто коллективных) эффекта в развитии атмосферных ливней и вызывают их радиоизлучение [3]. Естественно поэтому перейти от моделирования траекторий отдельных частиц к расчету избытка электронов и геомагнитной поляризации ШАЛ как функций глубины.

Работа выполнена при финансовой поддержке INTAS (грант 05-109-5459).

Литература

1. Antoni T., Apel W.D., Badea A.F. et al. // *Astropart. Phys.* 2005. **24**. P. 1.
2. <http://www.lopes-project.org>.
3. Аскарьян Г.А. // *ЖЭТФ*. 1961. **41**. С. 616.
4. <http://www.irs.inms.nrc.ca/EGSnrc/pirs701>.
5. Hillas A.M. // *Proc. 17 Int. Cosmic Ray Conf. Paris*. 1981. **8**. P. 193.
6. Apel W.D., Asch T., Badea A.F. et al., LOPES Collab. // *Astropart. Phys.* 2006. **26**. P. 332.
7. Allan H.R. // *Progress in Elementary Particle and Cosmic Ray Physics*. Amsterdam. 1971. **10**. P. 171.
8. Vernov S.N., Khristiansen G.B., Abrosimov A.T. et al. // *Proc. 11th Int. Cosmic Ray Conf. Budapest*, 1969.

Поступила в редакцию
23.03.07