

О.В. Журенков

# **К вопросу определения положения оси широкого атмосферного ливня в экспериментах, оснащенных системой атмосферных черенковских телескопов**

В астрофизике высоких энергий одной из важных задач является определение положения оси широкого атмосферного ливня (ШАЛ) в плоскости наблюдения. От решения этой задачи зависит точность определения основных параметров ШАЛ (тип первичной частицы, ее энергия, угол наклона оси и т.п.). Для решения этой задачи используются большие комплексы, состоящие из различных детекторов для регистрации плотности пространственного распределения различных компонент ШАЛ или системы имиджинговых атмосферных черенковских телескопов (АЧТ) [1].

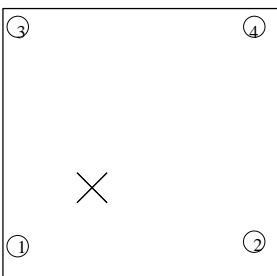
В настоящее время основным и самым распространенным инструментом экспериментальной астрофизики высоких энергий являются атмосферные черенковские телескопы, регистрирующие черенковскую компоненту ШАЛ. Системами таких телескопов оборудованы, почти все экспериментальные комплексы (даже эксперименты, оборудованные более сложными и дорогими – имиджинговыми АЧТ, например HEGRA), предназначенные для изучения ШАЛ, порожденных первичными частицами высоких и сверхвысоких энергий.

Системы АЧТ имеют, как правило, геометрию в виде периодической решетки, как TUNKA [2, р. 129], PACT (Pachmarhi) [3, р. 191]. Учитывая поперечное распределение черенковских фотонов ШАЛ (для первичных ядер оно убывающее), можно предложить следующую схему определения положения оси ливня:

Для определения координат  $(x, y)$  оси ливня (в плоскости установки) берутся четыре телескопа (точнее, их координаты), для которых полное число фотоэлектронов является наибольшим. Предполагаем, что эти телескопы образуют квадрат, а ось ливня проходит внутри него (рис.).

Тогда, для координаты  $x$  запишем:

$$x = \frac{x_1 w_1 + x_2 w_2 + x_3 w_3 + x_4 w_4}{w_1 + w_2 + w_3 + w_4}.$$



Расположение точки пересечения оси ливня с плоскостью установки ( $r$ ) и четырех телескопов, зафиксировавших максимальное количество фотоэлектронов (телескопы пронумерованы в порядке убывания числа фотоэлектронов)

То же и для  $y$ :

$$y = \frac{y_1 w_1 + y_2 w_2 + y_3 w_3 + y_4 w_4}{w_1 + w_2 + w_3 + w_4},$$

где  $x_i, y_i$  – координаты  $i$ -го телескопа, а вес  $w_i$  в данном случае равен полному числу фотоэлектронов.

Данную методику можно обобщить и использовать не четыре телескопа, а  $N$  телескопов, образующих квадрат. В зависимости от геометрии установки это может быть прямоугольник, треугольник, ромб и т. п., т. е. фигура, образующая периодическую решетку, кроме того, можно варьировать число телескопов. Так, для квадратной решетки  $N$  может принимать значения 4, 9, 16, ...

Для численных расчетов мы выбрали геометрию установки с квадратной решеткой, расстояние между соседними телескопами 50 м. При моделировании ШАЛ положение оси ливня разбрызгивалось в центральном квадрате  $150 \times 150$  м. Радиус зеркала каждого телескопа 1 м, соответственно площадь зеркала составляет  $3,14 \text{ м}^2$ . Уровень наблюдения был выбран  $800 \text{ г/см}^2$ . Плотность на уровне моря взята  $0,00122 \text{ г/см}^3$ . Высотная зависимость плотности воздуха определялась в соответствии с моделью стандартной атмосферы. Проводилось моделирование только вертикальных ливней.

Для моделирования развития ШАЛ, инициированных первичными частицами, использован программно-вычислительный комплекс «Алтай», разработанный сотрудниками нашей кафедры. Алгоритм вычислительной программы основан на методе Монте-Карло и описан в работах [4, 5]. Более подробные параметры моделирования представлены в исследованиях О.В. Журенкова и А.В. Пляшешникова [6, 7].

В наших расчетах при моделировании эксперимента окончательно регистрировались номер детектора и время прихода каждого черенковского фотона. Время отсчитывалось от времени прихода на уровень наблюдения ультрарелятивистских электронов.

Для выяснения оптимального количества телескопов  $N$ , участвующих в определении положения оси ливня, были проведены расчеты для первичных ядер железа с энергией  $E_{\text{Fe}} = 20 \div 30 \text{ ТэВ}$



и для протонов с энергией  $E_p = 10 \div 15$  ТэВ. Статистика в обоих случаях – 100 событий. Результаты расчетов приведены в таблице.

Ошибки и среднеквадратичные отклонения координат прохождения оси ливня в зависимости от числа базовых телескопов  $N$  для первичных протонов ( $E_p = 10 \div 15$  ТэВ) и первичных ядер железа ( $E_{Fe} = 20 \div 30$  ТэВ)

N	$Fe (E_{Fe} = 20 \div 30 \text{ ТэВ})$		$p (E_p = 10 \div 15 \text{ ТэВ})$	
	$\Delta x, \text{ м}$	$\Delta y, \text{ м}$	$\Delta x, \text{ м}$	$\Delta y, \text{ м}$
4	$13.8 \pm 9.8$	$10.9 \pm 7.4$	$7.9 \pm 6.6$	$7.8 \pm 7.1$
9	$9.7 \pm 7.9$	$8.7 \pm 7.1$	$6.5 \pm 4.9$	$7.0 \pm 5.8$
16	$17.5 \pm 9.7$	$14.0 \pm 9.6$	$9.6 \pm 8.1$	$9.9 \pm 7.6$
25	$25.0 \pm 15.7$	$26.0 \pm 15.7$	$17.8 \pm 11.7$	$18.3 \pm 11.2$

Как видно из таблицы, оптимальное число телескопов для данной установки – 9, при этом максимальная ошибка в определении положения оси ливня не превышает  $1/2$  базового размера решетки:  $\Delta x_{Fe}^{\max} = 9,7 + 7,9 = 17,6 \text{ м} < 25 \text{ м}$ . С другой стороны, использование максимального количества телескопов (в данном случае – 25) дает наихудший результат. Меньшая ошибка определения координат оси для первичных протонов объяс-

няется тем, что с ростом массового числа первичной частицы возрастают флуктуации пространственного распределения черенковских фотонов ШАЛ.

Полученные результаты сопоставимы с результатами для системы имиджинговых АЧТ ( $\Delta x_0 = 3$ ,  $E_0 = 1$  ТэВ), представленными в работе [1], если учесть, что для первичных  $g$ -квантов флуктуации пространственного распределения черенковских фотонов намного меньше, чем для первичных  $p$ . Кроме того, в предложенной методике используются более простые телескопы.

Предложенную методику можно применять для измерения пространственной и пространственно-временной функций распределения черенковского света ШАЛ, так как такие эксперименты обязательно оснащены системой АЧТ, а для экспериментов, оснащенных имиджинговыми АЧТ, применение данной методики в сочетании с другим позволит снизить погрешность определения положения оси ШАЛ.

## Литература

1. Aharonian F.A., Hofmann W., Konopelko A.K., Vilk H.J. The potential of ground based arrays of imaging atmospheric Cherenkov telescopes. I. Determination of shower parameters // *Astroparticle Physics*. 1997. V. 6.
2. Gress O.A., Gress T.I., Khristiansen G.B., et al. The First Results of TUNKA-13 EAS Cherenkov Light Experiment // *Proc. 25-th ICRC. Durban*, 1997. V. 4.
3. Bhat P.N., Acharya B.S., Chitnis V.R., et al. Padmarhi Array of Imaging Cherenkov Telescopes // *Proc. 26-th ICRC, Salt Lake City*. 1999. V. 5.
4. Plyasheshnikov A.V., Konopelko A.K., Vorobiev K.V. The three-dimensional development of high energy electromagnetic cascades in the atmosphere // *Preprint №92 of P.N. Lebedev Physical Institute. Moscow*, 1988.
5. Konopelko A.K., A.V. Plyasheshnikov ALTAI:

computational code for simulations of TeV air showers as observed with the ground based imaging atmospheric Cherenkov telescopes // *J. Phys. Nucl. Part. Phys.* 2000. V. 26.

6. Журенков О.В., Пляшешников А.В. Применение пространственно-временного распределения черенковских фотонов ШАЛ, инициированных первичными ядрами в диапазоне энергии 1–20 ТэВ, в изучении массового состава ПКК // *Известия АГУ. Спец. выпуск «Астрофизика космических лучей сверхвысоких энергий»*, Барнаул, 1998.

7. Журенков О.В., Пляшешников А.В. Пространственно-временное распределение черенковских фотонов ШАЛ, инициированных первичными ядрами в диапазоне энергии 1–20 ТэВ: *Препринт 99–2 АГУ*. Барнаул, 1999.