

О. В. Журенков, С. Е. Татаринцев

Использование пространственно-временного распределения черенковского света ШАЛ для классификации ядер ПКИ

Проведён анализ возможности классификации первичных ядер КЛ по пространственно-временному распределению черенковского света ШАЛ. Классификация проводилась методом опорных векторов (SVM). Такой подход позволил провести хорошую классификацию для пятикомпонентной модели ПКИ. Вероятность правильной классификации составила от 78% (для ядер O и p) до 100% (для ядер Fe). При этом по скорости работы данный алгоритм намного превосходит нейросетевые алгоритмы.

1. Введение

В астрофизике сверхвысоких энергий одним из наиболее важных направлений исследований является изучение химического состава первичного космического излучения (ПКИ). Если для регистрации космического излучения невысоких энергий ($\lesssim 100$ ГэВ) используются детекторы, установленные на спутниках и баллонах, то первичные частицы с энергией $E = 0.1 \div 100$ ТэВ преимущественно регистрируются наземными комплексными установками. При этом регистрируются вторичные частицы, образованные в результате адрон-ядерных и электромагнитных взаимодействий, образующих широкий атмосферный ливень (ШАЛ). Многие такие эксперименты оснащены системой атмосферных черенковских телескопов (АЧТ), регистрирующих черенковскую компоненту ШАЛ.

Для определения типа первичного ядра изучаются различные характеристики черенковского света ШАЛ, такие как пространственное распределение, временное распределение, пространственно-угловое распределение (двумерный образ ШАЛ). Наиболее информативной из них является последняя характеристика, т. к. она имеет наибольшую размерность. Однако, для получения двумерного образа требуются более сложные и более дорогие установки — имиджинговые атмосферные черенковские телескопы. В настоящий момент существует много экспериментов, включающих в себя систему обычных АЧТ. С помощью таких установок можно получать либо пространственные, либо временные распределения черенковского света ШАЛ.

В результате детального изучения временных распределений черенковского света ШАЛ, инициированных первичными ядрами высоких энергий [1, 2], был сделан вывод, что пространственно-временное распределение лучше изучать как

двумерную функцию, зависящую от времени прихода черенковских фотонов и от расстояния до оси ливня в плоскости наблюдения.

В предыдущей работе [3] мы показали, как можно преобразовать пространственно-временное распределение в графический образ. Там же был проведён анализ с использованием параметров Хилласа, показана возможность эффективной режекции первичных протонов по некоторым параметрам. Однако, для изучения массового состава ПКИ необходима классификация ШАЛ по типу первичного ядра.

2. Исходные данные

В этой работе мы рассмотрели модель ПКИ из 5-ти частиц: p, α , ядра O, Si, Fe.

Исходные данные были получены программой моделирования ШАЛ «Алтай». Эта программа предназначена для детального моделирования методом Монте-Карло черенковского света ШАЛ, инициированного первичной частицей сверхвысокой энергии. Она хорошо зарекомендовала себя в

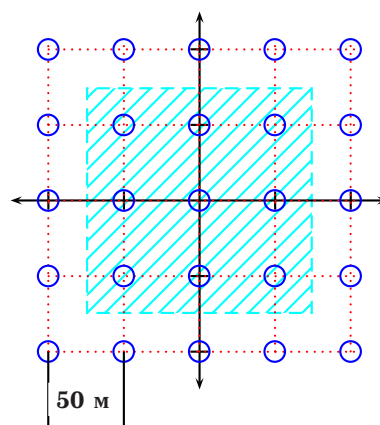


Рис. 1. Геометрия установки

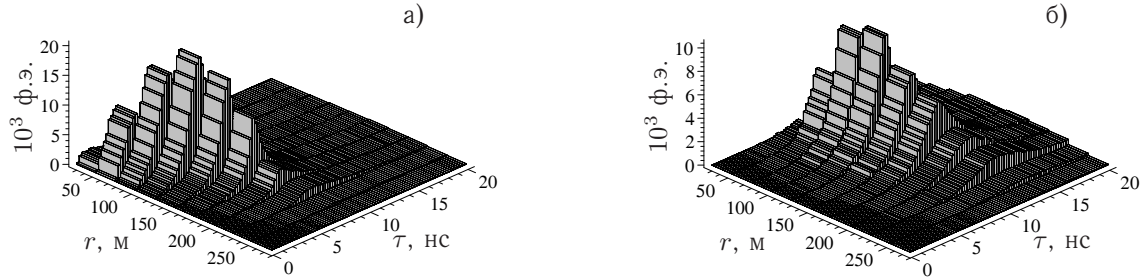


Рис. 2. пространственно-временные распределения черенковского света ШАЛ инициированных первичными протонами (а) $E = 1$ ТэВ и первичными ядрами Fe(б) $E = 5$ ТэВ. Статистика 2000 событий для каждого типа первичной частицы

течение многих лет эксплуатации, в т. ч. в международном проекте HEGRA. Подробное описание алгоритмов вычислительной программы можно прочитать в работах [4, 5].

Для моделирования ШАЛ уровень наблюдения был выбран 800 г/см^2 , что соответствует 2200 м над уровнем моря. Схема расположения телескопов представлена на рис. 1. Положение оси ливня разыгрывалось в центральном квадрате $150 \text{ м} \times 150 \text{ м}$. Радиус зеркала каждого телескопа 1 м. Хотя именно такой системы в действительности не существует, имеются установки с близкими характеристиками, такие как AIROBICC [6], TUNKA-13 [7], Parchmari [8].

Моделировались только вертикальные ливни. Плотность на уровне моря взята $0,00122 \text{ г/см}^3$. Высотная зависимость плотности воздуха определялась в соответствии с моделью стандартной атмосферы. Уровень испускания первичных частиц — 1 г/см^2 . Порог прослеживания электронов — 20 МэВ, порог прослеживания γ -квантов — 20 МэВ, порог прослеживания мюонов — 4 ГэВ, порог для средних ионизационных потерь — 5 МэВ, порог для средних потерь на тормозное излучение — 0,5 МэВ.

Энергии для разных первичных частиц были взяты фиксированные ($E_p = 1$ ТэВ, $E_\alpha = 2$ ТэВ, $E_O = 3$ ТэВ, $E_{Si} = 4$ ТэВ, Fe $E_{Fe} = 5$ ТэВ), но с таким расчётом, чтобы полное количество черенковских фотонов от одного события в среднем было одинаково. Это условие было взято из соображения, что в реальном эксперименте тип частицы, инициирующей ШАЛ, неизвестен, а её энергию можно определить по суммарному количеству черенковских фотонов, зарегистрированных АЧТ (см., например, [9]).

В наших расчётах при моделировании эксперимента окончательно фиксировались номер детектора и время прихода каждого черенковского фотона, образующего отклик в детекторе (с учётом коэффициента конверсии). Время отсчитывалось от времени прихода на уровень наблюдения ультрарелятивистских электронов. Исходя из этих данных, получается пространственно-временное распределение (подробнее см., например, [1] или [10]).

На рис. 2 приведены в качестве примера усреднённые пространственно-временные распределения черенковского света широких атмосферных ливней, инициированных первичными протонами и ядрами Fe. Очевидно различие между этими распределениями. Можно выделить несколько характеристик, по которым можно было бы различать события (как это было сделано в работах [1, 2]). Однако, различия между близкими ядрами не такие существенные, а флуктуации таких характеристик слишком большие, так что классификация по избранным характеристикам с помощью алгоритмов, основанных на методе наименьших квадратов, становится затруднительной.

Использование самообучающихся алгоритмов, например, на основе нейронных сетей (см. [11]), показало возможность классификации ШАЛ по типу первичной частицы, однако, построение решающей функции (в данном случае — обучение нейросети) выполняется слишком долго и нелинейно возрастает с увеличением обучающих данных. При этом использовались лишь некоторые параметры пространственно-временного распределения черенковского света ШАЛ.

3. Классификация пространственно-временных образов ШАЛ

Для классификации пространственно-временных образов ШАЛ и распознавания первичных ядер был использован метод опорных векторов или Support Vector Machine (SVM), реализованный в свободно распространяемой программе Торстена Джоакимса (Thorsten Joachims) SVM-lite [12].

SVM представляет собой алгоритм, обучающийся («с учителем») задаче распознавания объектов двух классов. Этот метод хорошо работает с данными больших объёмов, представленными в упакованной форме (в виде векторов большого размера без нулевых элементов). Классифицирующая функция представляется в виде линейной комбинации скалярных произведений тестового вектора с векторами тренировочного набора. Таким образом, можно использовать линейный классификатор для корректной работы с нелинейно разделяемыми классами без существенного усложнения вычислений.

Все массивы (1000 событий каждого типа) были поделены пополам: одна половина — для обучения, другая — для тестирования. Поскольку классификатор работает только с двумя классами, было создано 5 моделей: для первичных протонов, α -частиц, ядер Si, O и Fe. В модели для ядра nucl подразумевается, что пространственно-временное распределение черенковских фотонов ШАЛ, образованного первичным ядром nucl, является «правильным» событием, а если ШАЛ образован первичным ядром другого типа — «неправильным» событием. Для обучения использовались 500 «правильных» событий и 400 «неправильных» (по 100 каждого типа). Для каждого события 2-мерное пространственно-временное распределение преобразовывалось в одномерное: строился вектор в виде набора пар — $N : I_{ph.e.}(\tau, r)$, где N — порядковый номер ячейки в 1-мерном представлении пространственно-временного распределения, $I_{ph.e.}(\tau, r)$ — количество фотоэлектронов, соответствующих этой ячейке. Такие пары записывались только для ненулевых значений $I_{ph.e.}(\tau, r)$. Первым элементом вектора записывалась '1' — для «правильных» событий и '-1' — для «неправильных» событий. Таким образом было получено 5 моделей, — для каждого типа первичного ядра.

Для тестирования использовались другие 500 событий каждого типа. В результате работы классификатора каждому вектору (событию) было поставлено число. Если это число положительное, то событие классифицировалось как «пра-

вильное» (т.е., принадлежащее классу используемой модели), а если отрицательное, то — «неправильное», причём, чем больше абсолютное значение этого числа, тем больше уверенности в правильности решения.

Классификация проводилась для каждой модели, при этом возникали ситуации, когда получалось несколько положительных или несколько отрицательных решений. В таких случаях критерием для принятия решения служил относительный максимум, т.е. решение принимается в пользу того типа частиц, для модели которого было получено наибольшее число.

Полученные результаты классификации представлены в табл. 1. Как видно, наибольшее число ошибок приходится на соседние ядра. Причём, рассматривая ядра стоящие внутри таблицы (He, O, Si), можно чётко выделить три группы «похожих» для классификатора ядер: p -He, O-Si и группа, образованная одним типом ядер — Fe. Такой результат не противоречит теории и хорошо согласуется с известными экспериментальными данными и результатами моделирования, использующими трёхкомпонентную модель ПКИ (см., например [13, 14]).

Таблица 1
Результаты классификации первичных ядер

Тип ядра	Классификация ядра, как				
	p	He	O	Si	Fe
p	390	89	10	6	5
He	36	457	7	0	0
O	11	36	390	62	1
Si	1	0	21	475	3
Fe	0	0	0	0	500

Несмотря на близкие свойства ядер внутри групп, данная методика всё же позволяет с высокой вероятностью определить правильный тип первичного ядра, что отражено в табл. 2. Для каждого типа ядра nucl мы сосчитали вероятность правильного определения P_{nucl} и эффективность классификации

$$\varkappa_{nucl} = \frac{P_{nucl}}{1 - P_{nucl}}.$$

Таблица 2
Вероятность P_{nucl} и эффективность \varkappa_{nucl} классификации первичных ядер

	p	He	O	Si	Fe
P_{nucl}	0,78	0,91	0,78	0,95	1,00
\varkappa_{nucl}	3,55	10,63	3,55	19,00	∞

Как видно из таблицы, наихудшая вероятность правильного распознавания (для ядер O и p) составляет 78%, для остальных ядер вероятность правильного распознавания больше 90%, ядра Fe по данной методике распознаются с вероятностью 100%.

4. Заключение

Преимущества описанного подхода заключаются в скорости создания моделей и обработке данных. Такой алгоритм (SVM) работает примерно в 1000 раз быстрее алгоритмов, использующих для классификации нейронные сети (см,

например [11]). При этом эффективность классификации не уступает эффективности, достигаемой такими трудоёмкими алгоритмами (см., например [11, 14]).

Главным недостатком метода опорных векторов является принципиальная ограниченность классификации двумя категориями. Для 5-ти компонентной модели ПКИ такой недостаток не является существенным. Однако, при использовании точной модели ПКИ, такой подход представляется затруднительным. По крайней мере, вычислительные затраты возрастут на несколько порядков, и будет утрачено основное преимущество данного метода.

Список литературы

1. 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 ПКИ // *Известия АГУ, спец. выпуск «Астрофизика космических лучей сверхвысоких энергий»*. — 1998. — С. 79–92.
2. Zhurenkov O. V., Plyasheshnikov A. V. About a possibility of the analysis of the mass composition of cosmic rays on the basis of the space-temporal distribution of the EAS Cherenkov light // *Nuclear Physics B (Proc. Suppl.)*. — 1999. — **75A**. — Pp. 296–298.
3. Василенко С. Н., Журенков О. В. Представление пространственно-временного распределения черенковских фотонов ШАЛ в виде графического образа. — Препринт АГУ. — № 1. — Барнаул. — 2003. — 16 с.
4. Plyasheshnikov A. V., Konopelko A. K., Vorobiev K. V. The three-dimensional development of high energy electromagnetic cascades in the atmosphere. — Preprint P.N. Lebedev Physical Institute. — № 92. — Moscow. — 1988. — 48 pp.
5. Konopelko A. K., Plyasheshnikov A. V. ALTAI: computational code for simulations of TeV air showers as observed with the ground based imaging atmospheric Cherenkov telescopes // *Nucl. Instr. Meth. A*. — 2000. — **450**. — Pp. 419–429.
6. Fonseca V., Arqueros F., Bradbury S., Cortina J., Deckers T., Falerio E. The Wide Angle Air Cherenkov Detector AIROBICC at La Palma // *Proc. of 24-th ICRC (Roma)*. — 1995. — **1**. — Pp. 470–473.
7. TUNKA-13 EAS cherenkov light array. <http://www.tunka.bhg.ru>.
8. Very High Energy Gamma Ray Astronomy. <http://www.tifr.res.in/sns.html>.
9. Cortina J., Arqueros F., HEGRA collaboration. Determination of the Depth of Maximum Development and Primary Energy of Cosmic Ray Showers with AIROBICC // *Proc. of 24-th ICRC (Roma)*. — 1995. — **1**. — Pp. 499–502.
10. Журенков О. В., Пляшешников А. В. Пространственно-временное распределение черенковских фотонов ШАЛ, инициированных первичными ядрами в диапазоне энергии 1–20 ТэВ. — Препринт АГУ. — № 2. — Барнаул. — 1999. — 36 с.
11. Бессонов А. С., Журенков О. В. Классификация ядер ПКИ по параметрам пространственно-временного распределения черенковского света ШАЛ с использованием нейронных сетей класса многослойного перцептрона // *Известия АГУ*. — 2004. — № 5. — С. 71–75.
12. SVM-Light Support Vector Machine. <http://svmlight.joachims.org>.
13. Alessandro B., for THE EAS-TOP COLLABORATION. Study of the composition around the knee through the electromagnetic and muon detectors data at EAS-TOP // *Proc. of 27-th ICRC (Hamburg)*. — 2001. — **1**. — Pp. 124–127.
14. Roth M., Antoni T., Apel W.D., Badea F., Bekk K., Bercuci A., Blümer H., Bollmann E., Bozdog H., Brancus I.M., Büttner C., Chilingarian A., Daumiller K., Doll P., Engler J., FeYler F., Gils H.J., Glasstetter R., Haeusler R., Haungs A., Heck D., Hörandel J.R., Holst

T., Iwan A., Kampert K-H., Kempa J., Klages H.O., Knapp J., Maier G., Mathes H.J., Mayer H.J., Milke J., Müller M., Obenland R., Oehlschläger J., Petcu M., Rebel H., Risse M., Schatz G., Schieler H., Scholz J., Thouw T., Ulrich H., Vulpescu B., Weber J.H., Wentz J.,

Wochele J., Zabierowski J., Zagromski S. Non-parametric determination of energy spectra and mass composition of primary cosmic rays for slant depth // Proc. of 27-th ICRC (Hamburg). — 2001. — **1**. — Pp. 88–91.