

1. *Карта неба по данным Fermi LAT*

Спутник Fermi LAT регистрирует фотоны с энергиями выше 100 МэВ, приходящие с различных направлений. Данные представляют собой упорядоченный по времени список зарегистрированных фотонов [3].

- Разбить небо на пиксели одинаковой площади одним из существующих методов [4].
- Построить карты интенсивностей излучения на небе для диапазонов энергий  $E > 100$  МэВ,  $E > 1$  ГэВ и  $E > 10$  ГэВ.
- Построить отдельные карты для событий с различным типом конверсии.

2. *Происхождение галактических космических лучей*

В недавней работе А. Неронова и Д. Семикоза [5] обнаружены протяженные источники гамма-лучей с энергией выше 100 ГэВ и показано, что эти источники могут производить галактические космические лучи.

Используя фотоны с энергией выше 100 ГэВ, принадлежащие классу ULTRACLEAN (cls=4) [3]:

- Разработать алгоритм поиска пространственных кластеров (групп фотонов) с характерным масштабом  $1^\circ$ .
- Для каждого из обнаруженных кластеров, учитывая функцию рассеяния точки (PSF) для класса событий ULTRACLEAN [6], определить могут ли все фотоны группы принадлежать точечному источнику.
- Проверить утверждение работы [5] о том, что все точечные источники соответствуют внегалактическим объектам, а все протяженные – галактическим остаткам сверхновых возрастом не более 30 тысяч лет, содержащих в центре пульсар.

3. *Быстрый поиск событий Fermi LAT*

При заданных галактических координатах  $l, b$  и угле  $\alpha$  требуется получить выборку фотонов Fermi LAT, удаленных от заданных координат на угловое расстояние не более  $\alpha$ . Практически интересные значения  $\alpha$  от 0.2 до 10 градусов, что соответствует ширине функции рассеяния точки для различных энергий.

- Реализовать алгоритм выборки путем последовательного чтения файла с жесткого диска.
- Загрузить все данные в оперативную память и производить выборку путем последовательного чтения массива в памяти.
- Загрузить данные в оперативную память в форме дерева, упорядоченного по  $b$  (например, std::map или другая реализация) и производить сканирование только части дерева от  $b - \alpha$  до  $b + \alpha$ .

- Предложить алгоритм хранения и выборки обеспечивающий более высокую производительность.
- Сравнить скорость работы различных алгоритмов. Для этого требуется выполнять последовательно выборки со случайно заданными координатами и угловым размером. Время первичной загрузки данных в оперативную память не учитывать.

#### 4. Угловое разрешение *Fermi* LAT по наблюдению пульсара Краба

Среди фотонов, зарегистрированных *Fermi* LAT [3], выделить пришедшие из окрестности пульсара Краба.

- Построить график зависимости плотности числа фотонов от углового расстояния до источника для нескольких энергетических диапазонов ( $100 \text{ МэВ} < E < 200 \text{ МэВ}$ ,  $200 \text{ МэВ} < E < 400 \text{ МэВ}$  и т.д.). Построить отдельные графики для фотонов с различным типом конверсии [3].
- Определить угловой размер, в пределах которого содержится 68% всех фотонов от источника. Сравнить зависимость полученного углового размера от энергии и типа конверсии с результатом, полученным коллаборацией *Fermi* LAT Монте-Карло моделированием [6] (данные на диске соответствуют классу событий P7SOURCE\_V6).

#### 5. Поиск гамма-всплесков в данных *Fermi* LAT

- Реализовать метод скользящего окна для поиска групп фотонов, пришедших за короткий интервал времени ( $\sim 100$  сек) с небольшого участка неба (в пределах углового разрешения  $\lesssim 10^\circ$ ) [7]. Один из примеров, который должен быть обнаружен данным методом - гамма-всплеск GRB090902B с координатами  $l = 51.5^\circ$ ,  $b = 26.9^\circ$  и временем  $t = 273582308.313$  [3, 6].
- Для координат обнаруженных всплесков рассчитать средний поток фотонов за весь период наблюдений. Оценить вероятность случайной флуктуации такого же размера, как обнаруженный всплеск. Учесть, что каждая точка неба находится в поле зрения спутника примерно  $1/6$  от общего времени наблюдения.

Замечание: поток гамма-лучей из Галактики  $|b| \lesssim 20^\circ$  значительно выше, чем извне, поэтому поиск галактических и внегалактических всплесков удобно разделить, используя различные параметры алгоритма.

#### 6. Спектральный анализ данных на неравномерной решетке

Быстрое преобразование Фурье требует набор данных на равномерной решетке. Условия эксперимента могут приводить к тому, что реальная решетка будет неравномерной. Так, в методе “photon echo”, широко применяемом в фемтосекундной спектроскопии, отклик исследуемого образца измеряется как функция относительных задержек между несколькими короткими лазерными импульсами, пересекающимися в образце. Изменение задержки происходит за счет изменения оптического пути луча посредством механического перемещения зеркала. Техническая особенность механики состоит в том, что позицию не удается

выставить с пренебрежимо малой ошибкой. С другой стороны, точная позиция зеркала измеряется интерференционным методом независимым прибором.

В файле `photon_echo.dat` [1] приведены результаты измерения интенсивности сигнала в зависимости от временной задержки. Формат файла (первая колонка – положение зеркала в мкм, вторая колонка – интенсивность сигнала в произвольных единицах). Временная задержка определяется как  $t = \frac{2l}{c}$ , так как положение зеркала входит в оптический путь дважды. Для данной задачи измерены около 30 точек на период сигнала основной частоты. В реальном эксперименте измеряют не более 2.5 точек на период (так чтобы частота сигнала была несколько ниже частоты Найквиста), так как время выполнения эксперимента имеет критическое значение.

- Выполнить интерполяцию сплайнам и привести данные к равномерной решетке. Вычислить спектр методом ФФТ.
- Равномерно проредить данные, уменьшая число точек на период оставляя только каждую  $k$ -ую из экспериментальных точек. Построить спектр для различных  $k$  вплоть до предельно возможных значений, при которых основная частота превышает частоту Найквиста.
- Реализовать метод преобразования Фурье для данных на неравномерной решетке без интерполяции, согласно алгоритму Ломба [2, 8]. Построить спектр для различных  $k$ .
- Сравнить точность спектров полученных с интерполяцией и без для различных значений  $k$ . Какой метод позволяет лучше работать с наиболее разреженными данными? При сравнении, в качестве референс-спектра использовать спектр, полученный с полным набором данных.
- Можно ли, корректно учитывая эффект наложения, получить спектр при значениях  $k$ , при которых основная частота сигнала превышает частоту Найквиста?

#### 7. Статистическая проверка гипотез о химическом составе космических лучей

Одна из величин, измеряемая в эксперименте Telescope Array – глубина максимума широких атмосферных ливней (ХМАХ), вызванных частицами сверхвысоких энергий. По данной величине можно судить о типе первичной частицы (в рамках двух крайних гипотез - протон или ядро железа). В докладе [9] на слайдах 21-25 приведены распределения ХМАХ в различных диапазонах энергий в сравнении с Монте-Карло моделированием, выполненном в предположении первичных протонов и железа. Из графиков видно, что данные лучше согласуются с гипотезой протонов, чем с гипотезой первичного железа, что согласуется с результатом эксперимента HiRes [10], но противоречит результату эксперимента Pierre Auger [11].

- Проверить статистическим тестом согласие данных с гипотезами первичных протонов и железа в каждом из энергетических диапазонов. Использовать тесты Колмогорова-Смирнова, Купера и Смирнова-Крамера-фон Мизеса. Количество степеней свободы в данных приведено на слайде 27, количество степеней свободы на графике Монте-Карло считать бесконечным.

- Выполнить предыдущий пункт для объединенного набора событий (слайд 20).
- Пусть гипотеза заключается в том, что некая доля  $\alpha$  всех событий – железо, а остальные – протоны. Теоретическое предсказание для такой гипотезы можно получить взвешенным сложением Монте-Карло распределений для протонов и железа. При каких  $\alpha$  гипотеза исключена в каждом из энергетических диапазонов, включая  $E > 10^{19}$  эВ с уровнем достоверности не менее 95%.

#### 8. Поиск максимального равномерно распределенного подмножества событий

В эксперименте Telescope array производится измерение некой величины  $C$  с целью обнаружить присутствие в наборе событий, вызванных фотонами сверхвысоких энергий [12]. Файл `Cvalue.dat` [1] содержит значение данной величины для 335 событий с энергиями выше  $10^{19}$  эВ. Известно, что для фотонных событий величина  $C$  распределена равномерно, принимая значения от 0 до 1. В то же время распределение величины  $C$  для нефотонных событий неизвестно, так как неизвестен химический состав космических лучей. Распределение величины  $C$  для данных сильно отличается от равномерного, что исключает возможность фотонного происхождения всех событий. Задача состоит в том, чтобы поставить ограничение на число фотонов в данном наборе событий. Пусть в наборе  $k$  событий фотоны. В этом случае существует по крайней мере один набор из  $k$  событий, являющийся поднабором исходного, распределение которых совместно с равномерным.

- Гипотезу, что в наборе 1 или 2 фотона исключить невозможно.
- Выбрать три события, для которых распределение значений  $C$  наиболее близко к равномерному. Убедиться, что такая гипотеза также не исключена.
- Увеличивая  $k$  искать наиболее совместный с равномерным распределением поднабор исходного набора. Найти  $k$  при котором все поднаборы из  $k$  элементов несовместны с равномерным распределением на уровне не менее 95%.

Замечание: для решения задачи можно использовать любой статистический тест, но перебор всех подмножеств — ресурсоемкая процедура. При использовании дискретной версии теста Смирнова-Крамера-фон Мизеса (омега-квадрат) минимизация по поднаборам может быть упрощена.

## Список литературы

- [1] Прилагаемый DVD-диск.
- [2] W. H. Press, S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling, B. P. Flannery, “Numerical Recipes: The Art of Scientific Computing,” 3rd edition, Cambridge University Press. 2007.
- [3] Файл `fermi_100M.dat` на прилагаемом DVD-диске содержит фотоны с энергией выше 100 МэВ, зарегистрированные спутником Fermi LAT в период с 4 августа 2008 г. по 26 марта 2012 г. В каждой строке файла информация об одном

зарегистрированном фотоне в формате: t,E,l,b,c,cls, где t – время в секундах с 1 января 2001 года, E – энергия в МэВ, l,b – галактические координаты в градусах, c - тип конверсии (0 - зарегистрировано фронтальной частью детектора, 1 - не зарегистрировано фронтальной частью), cls – класс события (2 - SOURCE, 3 - CLEAN, 4 - ULTRACLEAN). Файл содержит более 52 миллионов фотонов.

- [4] M. R. Calabretta and E. W. Greisen, “Representations of celestial coordinates in FITS,” *Astron. Astrophys.* **395**, 1077 (2002) [arXiv:astro-ph/0207413].
- [5] A. Neronov and D. V. Semikoz, “Origin of TeV Galactic Cosmic Rays,” arXiv:1201.1660 [astro-ph.HE].
- [6] [http://fermi.gsfc.nasa.gov/ssc/data/analysis/documentation/Cicerone/Cicerone\\_LAT\\_IRFs/IRF\\_PSF.html](http://fermi.gsfc.nasa.gov/ssc/data/analysis/documentation/Cicerone/Cicerone_LAT_IRFs/IRF_PSF.html)
- [7] A. Bouvier, “Gamma-Ray Burst Observations at High Energy with the Fermi Large Area Telescope”, PhD thesis, <http://arxiv.org/abs/1012.0558>
- [8] Lomb, N.R., “Least-squares frequency analysis of unequally spaced data,” *Astrophysics and Space Science* 39:447-462 1976.
- [9] Y.Tameda, “HiRes and TA Composition Measurements”, International Symposium on Future Directions in Ultra-high Energy Cosmic Ray Physics. CERN Feb.13-16, 2012, <http://indico.cern.ch/contributionDisplay.py?contribId=75&confId=152124>; также файл `xmax_tameda.pdf` на прилагаемом DVD.
- [10] R. U. Abbasi *et al.* [HiRes Collaboration], *Indications of Proton-Dominated Cosmic Ray Composition above 1.6 EeV*, *Phys. Rev. Lett.* **104** (2010) 161101 [arXiv:0910.4184].
- [11] J. Abraham *et al.* [Pierre Auger Observatory Collaboration], *Measurement of the Depth of Maximum of Extensive Air Showers above  $10^{18}$  eV*, *Phys. Rev. Lett.* **104** (2010) 091101 [arXiv:1002.0699].
- [12] G.Rubtsov, “Search for ultra-high energy photons using Telescope Array surface detector”, International Symposium on the Recent Progress of Ultra-high Energy Cosmic Ray Observation. Nagoya, JAPAN Dec.10-12, 2010, файл `rubtsov_uh10.pdf` на прилагаемом DVD.