

ЕРЕВАНСКИЙ ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

На правах рукописи

Чилингарян Ашот Агасиевич

АНАЛИЗ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧНЫХ КОМПОНЕНТ
КОСМИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ МЕТОДАМИ НЕПА-
РАМЕТРИЧЕСКОЙ СТАТИСТИКИ

(01.04.16 - Физика атомного ядра и
элементарных частиц)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Ереван 1984

Работа выполнена в Ереванском Физическом институте

Научные руководители:

Доктор физико-математических наук,
профессор Т.Д. Асатиани

Доктор физико-математических наук,
профессор Э.А. Мамиджян

Официальные оппоненты:

Доктор физико-математических наук,
профессор Ю.П. Пытьев (МГУ)

Кандидат физико-математических наук,
ст. научный сотрудник Р.П. Кокоулин
(МИФИ)

Ведущая организация: Физический институт им.

П.Н. Лебедева АН СССР

Защита состоится 2 октября 1984 г. в 14⁰⁰ час. на заседании специализированного совета Д 0.34.03.01 Ереванского Физического института (375036, г. Ереван, ул. Маркаряна 2).
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЕрФИ.

Автореферат разослан 28 августа 1984г.

Ученый секретарь специализированного

совета ЕрФИ

Висаки
В.А. Шахбазян

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Резкое увеличение экспериментальной информации, характерное для планируемых экспериментов в космических лучах, и необходимость ее совместного анализа с результатами вычислительных экспериментов требуют создания согласованной системы методов, позволяющей проводить анализ больших объемов многомерных данных.

Состояние вопроса. В физике космических лучей до настоящего времени применяются в основном процедуры обработки данных, основанные на предположении известного вида функциональной зависимости, то есть - параметрические методы. Объектом изучения являются характеристики отдельных компонент космического излучения, не развит количественный анализ многомерных данных.

Целью работы является проведение исследований, создание и применение к обработке информации установок физики космических лучей непараметрических методов анализа многомерных данных.

Научная новизна. Предложен, разработан и реализован оригинальный подход анализа существенно многомерной коррелированной информации, регистрируемой комплексными многоканальными установками. В основе этого подхода лежат непараметрические алгоритмы, позволяющие наиболее полно и эффективно использовать всю доступную информацию.

Практическая ценность. Созданные методы, реализованные в рамках пакета прикладных программ статистического анализа, могут быть рекомендованы для обработки данных экспериментальных установок в космических лучах и ускорительных экспериментов при исследовании процессов множественного рождения и идентификации элементарных частиц.

Апробация работы. Результаты, вошедшие в диссертацию, докладывались на всесоюзных конференциях по космическим лучам (Якутск-1977, Ереван - 1979); Международной конференции по математическим методам решения физических задач (Дубна-1979);

Международных конференциях по космическим лучам (Шлодвиг - 1977, Париж - 1981, Бангалор - 1983); на сессии отделения ядерной физики АН СССР (МИФИ - 1983); на всесоюзной конференции по математической теории распознавания образов (Звенигород - 1983); на всесоюзной школе - семинаре по программно-алгоритмическому обеспечению прикладного многомерного статистического анализа (Цахквдзор - 1983) и на рабочих совещаниях эксперимента АНИ (1980 - 1983 гг.).

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав, приложения и заключения. Всего 107 страниц текста, 14 рисунков и 7 таблиц. Список литературы содержит 94 ссылки.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

В введении формулируется общая постановка задачи совместной обработки экспериментальной информации и результатов вычислительных экспериментов.

В первой главе на примере задачи идентификации адронов космического излучения вводятся решающие правила относительного максимума апостериорной плотности:

$$d\vec{x} = \begin{cases} \tilde{p} & , \text{ если } P(p/\vec{x}) > P(\pi/\vec{x}) \\ \tilde{\pi} & , \text{ в противном случае} \end{cases} \quad (1)$$

$$P(p/\vec{x}) = \frac{P(p) \cdot P(\vec{x}/p)}{P(p) \cdot P(\vec{x}/p) + P(\pi) \cdot P(\vec{x}/\pi)} \quad , \quad (2)$$

где \vec{x} - вектор измерения, \tilde{p} - статистическое решение "частица - протон", $\tilde{\pi}$ - "частица π -мезон", $P(p)$, $P(\pi)$ - априорные вероятности, $P(\vec{x}/p)$, $P(\vec{x}/\pi)$ - условные плотности вероятности (функции правдоподобия), $P(p/\vec{x})$, $P(\pi/\vec{x})$ - апостериорные плотности, в которых осуществляется оптимальный синтез априорной и экспериментальной информации.

Использование решающего правила (1) для классификации экспериментальных данных невозможно, так как функции правдоподобия $P(\vec{x}/p)$ и $P(\vec{x}/\pi)$ неизвестны; вся информация о распределении величины \vec{x} заключена в обучающей выборке (ОВ) - на-

борах реализаций вычислительных экспериментов. Поэтому вместо условных плотностей, в работе используются их локальные оценки по ОВ. Простые гистограммные методы не могут обеспечить несмещенное и состоятельное оценивание во всей области изменения многомерной переменной. Развитием гистограммных методов являются КБС (К - ближайших соседей) методы, в которых плотность оценивается с помощью К ближайших к точке \vec{x} , представителей ОВ.

$$\hat{P}_{K,M}(\vec{x}) = \frac{K}{M V_{K,M}(\vec{x})} \quad (3)$$

где K - параметр метода, M - общее число представителей ОВ, $V_{K,M}(\vec{x})$ - объем области содержащей КБС.

Успешному применению КБС методов препятствует наличие в них неопределенных параметров. Преодолеть эту трудность помогает предлагаемая процедура адаптации метода по обучающей выборке. В адаптивном КБС методе способ определения параметров не зависит от неизвестных плотностей и объема ОВ, а полностью определяется информацией, заключенной в ОВ. Адаптивные оценки, как видно из рис.1, значительно лучше оценок, полученных с любым фиксированным параметром K .

Метод адаптивного оценивания был использован для идентификации адронов космического излучения при помощи детектора рентгеновского переходного излучения. Применение байесовского решающего правила и использование априорной информации позволило, как видно из рис.2, повысить достоверность идентификации в сравнении с ранее применяемыми методами.

Во второй главе проведено исследование методов многомерного анализа с целью создания эффективных процедур обработки данных экспериментов с рентген-эмульсионными камерами (РЭК).

Инструментом исследования данных РЭК являются машинные модели, которые служат в качестве приближения к реальной ситуации и помогают понять, как тот или иной параметр взаимодействия влияет на наблюдаемые в эксперименте величины. Характеристики отдельных компонент космического излучения обладают приблизительно одинаковой чувствительностью к параметрам мо-

дела. Переход к исследованию семейств позволяет вовлечь в анализ одновременно несколько признаков. Очевидно, что рассмотрение характеристик семейств в их взаимосвязи позволяет ввести более точную меру различия экспериментальных и модельных семейств и, следовательно, отбросить более широкий класс моделей, что в конечном счете приведет к более точной оценке степени нарушения скейлинга в фрагментационной области. Основной многомерного анализа является исследование распределений в N -мерном признаковом пространстве, когда все координаты рассматриваются в статистическом анализе одновременно и оцениваются совместно.

Выбор количества и состава признаков из исходной косвенной и зашумленной информации является одной из главных задач в многомерном анализе. Чтобы произвести выбор признаков, надо связать с каждым набором число, характеризующее его различительную ценность. Предлагается для этой цели использовать вероятностное расстояние Бхатачария между альтернативными классами ОБ и вероятность ошибки классификации с использованием данного набора и оптимального байесовского решающего правила (байесовский риск R^B).

Вычисление байесовского риска производится путем проведения скользящего экзамена по ОБ, с использованием адаптивных КБС оценок. В последнее время интерес в области исследования массового состава первичного космического излучения сосредоточен вокруг гипотезы о преобладании тяжелых ядер при переходе к энергиям $> 10^{15}$ эВ. Поэтому рассмотрена задача определения доли фотонных (γ) и фотон-адронных ($\gamma-h$) семейств, инициированных тяжелыми ядрами первичного космического излучения. Представим экспериментальные семейства в виде смеси двух распределений

$$p(\vec{x}) = p(Fe)p(\vec{x}/Fe) + p(p)p(\vec{x}/p), \quad (4)$$

где $p(Fe)$ - доля семейств от тяжелых ядер, $p(p)$ - от легких ядер (с атомным весом < 14), $p(\vec{x}/Fe)$, $p(\vec{x}/p)$ - условные плотности выбранных характеристик семейств. Оценку весовых коэффициентов смеси (4) получим с помощью классификации экспериментальных данных по ОБ, состоящей из одинакового количества

семейств двух типов.

$$\hat{p}(Fe) = \frac{P^*(Fe) - R_p}{1 - R_{Fe} - R_p} \quad (5)$$

где $p^*(Fe)$ - доля семейств, отнесенных к тяжелым ядрам, а R_p , R_{Fe} - коэффициенты "перекачки" - вероятности ошибочной классификации событий обеих типов. Таким образом, помимо проведения классификации экспериментальных векторов необходимо оценить байесовский риск.

Однако в действительности неопределенность в выборе модели сильного взаимодействия при энергии $> 10^{15}$ эВ, приводит к тому, что помимо статистической и методической ошибок, зависящих от набранного экспериментального материала, метода вычисления байесовского риска и объема обучающей выборки, существенны ошибки, связанные с несовпадением распределений экспериментальных данных и обучающей выборки. Единственный путь к улучшению оценок - попытаться найти наборы признаков, слабо чувствительных к виду сильного взаимодействия и, одновременно, сильно чувствительных к типу первичного ядра.

В таблице приведены значения байесовских рисков для четырех различных моделей сильного взаимодействия. Видно, что доведение к характеристикам γ -семейств начальной энергии (эксперимент АНИ) или характеристик адронных семейств позволяет стабилизировать коэффициенты "перекачки".

Предложенный метод позволяет, помимо вовлечения в анализ многих характеристик γ и $\gamma-h$ семейств, производить достаточно обоснованный расчет возможных ошибок, даже в случае неопределенности модельных представлений о сильном взаимодействии. Анализ ошибок особенно важен в косвенных методах исследования, основанных на машинном моделировании экспериментальной ситуации, так как всегда остается открытым вопрос, насколько точно моделирование описывает реальность.

В третьей главе приведены методы, позволяющие с высокой точностью проводить определение энергии мюонов космического излучения спектрометрическими и калориметрическими установками. С помощью машинной модели магнитного спектрометра иссле-

дованы всевозможные факторы, влияющие на точность геометрической реконструкции траектории частицы по отсчетам дискретных координатных детекторов. Определены требования к точности расположения координатных детекторов горизонтального канала магнитного спектрометра эксперимента АНИ: при линейных точностях $\sim 0,1$ мм и угловых $\sim 10^{-4}$ рад. можно довести максимально-измеримый импульс спектрометра до 30 ТэВ/с.

Разработанный метод коррекции юстировочных констант по зарегистрированным траекториям позволил повысить максимально-измеримый импульс Арагацкого магнитного спектрометра (безфильмовый канал) с 1 до 2,5 ТэВ/с и провести построение энергетического спектра и определение зарядового отношения мюонов горизонтального потока (совместно с данными фильмового канала). Полученные значения показателя спектра $\gamma = 2,66 \pm 0,03$ и зарядового отношения $N_{\mu^+}/N_{\mu^-} = 1,283 \pm 0,058$ для $P_{\mu} > 200$ ГэВ/с были подтверждены впоследствии на установках MUTRON и BEIS.

Далее приводится краткий обзор методов определения энергии детекторами калориметрического типа. Показано преимущество предлагаемого классификационного метода определения энергии. Экспериментальные векторы (компоненты которых - число вторичных частиц в рядах Арагацкого искрового калориметра) классифицировались по обучающей выборке, состоящей из 13 классов, соответствующих прохождению мюонов с энергией от 5 до 10000 ГэВ через калориметр. Учет корреляций между толчками в рядах калориметра позволил повысить вероятность правильного определения энергетического интервала с 17% (метод кратности и максимального правдоподобия) до 30%.

В настоящее время представляется, что наиболее подходящим детектором для исследования спектра мюонов в области энергий вплоть до 100 ТэВ, являются многослойные установки типа PAIR-METER, регистрирующие продукты электромагнитных взаимодействий мюонов (в основном e^+e^- пары, сечение образования которых почти линейно зависит от энергии мюона).

Однако из-за значительных флуктуаций в продольном раз-

витии, каскады, вызванные ядерными взаимодействиями мюонов и тормозными γ -квантами, имитируют последовательные процессы множественных взаимодействий с малыми передачами (рождение e^+e^- пар) мюонов гораздо больших энергий. Поэтому для того, чтобы исследовать калориметрическими установками мюоны с энергией > 5 ТэВ, необходимо разработать способ дискриминации от фона, вызванного ядерными взаимодействиями мюонов. Предлагаемый метод дискриминации, основанный на сильном различии ковариационных матриц событий двух типов, позволяет, как видно из рис.3, довести уровень дискриминации (вероятность принять фоновое событие за полезное) до 10^{-3} для 28-рядной установки типа PAIR-METER.

В приложении дано краткое описание пакета прикладных программ многомерного статистического анализа, в рамках которого объединены непараметрические алгоритмы, предназначенные для обработки данных и планирования экспериментов в физике космических лучей.

В заключении приведены выносимые на защиту результаты работы, которые сводятся к созданию, исследованию и применению следующих методик:

1. Метод повышения максимально-измеримого импульса мюонных магнитных спектрометров путем коррекции юстировочных констант с помощью алгоритмов случайного поиска и применения непараметрических методов геометрической реконструкции. Применение методов к данным Арагацкого мюонного спектрометра (безфильмовый канал) позволило повысить максимально-измеримый импульс с 1 до 2,5 ТэВ/с.

2. Метод обработки данных калориметрических установок типа PAIR-METER и искровой калориметр, включающий в себя:

а) классификационный способ определения энергии мюонов.

Применение этого метода к данным Арагацкого искрового калориметра позволило увеличить долю правильно классифицируемых мюонов высоких энергий (~ 1 ТэВ) с 17% до 30%;

б) регрессионный способ оценивания энергии, позволяющий учесть априорную информацию об энергетическом спектре

мюонов;

в) метод подавления фона от ядерных взаимодействий низкоэнергетичных мюонов, позволяющий довести уровень дискриминации до 10^{-3} .

3. Метод многомерного анализа данных рентген-эмульсионных экспериментов, включающий:

а) поиск модельно-зависимых комбинаций признаков по результатам моделирования ядерно-электронных каскадов (одновременно рассматриваются комбинации, включающие до 30 различных признаков);

б) выбор теоретической модели исследуемых физических явлений по экспериментальным данным;

в) определение массового состава первичного потока космического излучения в условиях неопределенной модели сильного взаимодействия. Анализ, проведенный в рамках сопоставления различных моделей сильного взаимодействия, показал, что долю γ - h -семейств, инициированных тяжелыми ядрами, можно определить с точностью не хуже 0.05 (средне-квадратичное отклонение);

г) выделение событий определенного типа из первичной информации, например, бинокулярных событий.

4. Классификационный способ идентификации адронов космического излучения. Применение этого метода к обработке данных установки "Пион" позволило уменьшить ожидаемую ошибку идентификации до 13% и учесть априорную информацию об энергии частицы и плотности ливневого сопровождения.

ПУБЛИКАЦИИ ПО МАТЕРИАЛАМ ДИССЕРТАЦИИ:

1. Прохоров В.Н., Чилингарян А.А. Юстировка Арагацкого магнитного спектрометра Препринт ЕФИ - 241 (34)-77, Ереван, 1977.
2. Асатиани Т.Л., Прохоров В.Н., Чилингарян А.А. Программное обеспечение безфильмового канала Арагацкого мюонного спектрометра. Препринт ЕФИ-239(32)/77, Ереван, 1977.
3. Асатиани Т.Л., Алчуджян С.В., Газарян К.А., Козлинер Л.И., Мартиросян Г.С., Прохоров В.Н., Тер-Антонян С.В., Чилингарян А.А. Исследование характеристик высокоэнергичных мюонов космического излучения. Изв. АН СССР, сер. физ., 1980, т.44, с.590-593.
4. Asatiani T.L., Alchudjian S.V., Chilingarian A.A. et al. Momentum Spectrum and Charge Ratio of Cosmic Ray Muons at Zenith Angle 84° . - Proc. 15-th ICRC, Plovdiv, 1977, vol.11, p.362-366.
5. Григорян К.В., Чилингарян А.А. Прецизионный метод определения геометрических параметров системы дискретных координатных детекторов. Материалы совещания по математическим методам физических задач. Дубна, 1977, с.537-542
6. Chilingarian A.A. Programmed Methods to Increase Maximum Detectable Momentum of Magnetic Spectrometers. - Proc. 17-th ICRC, Paris, 1979, vol.10, p.364-367.
7. Чилингарян А.А. Анализ методик интерпретации данных в применении к эксперименту АНИ. ВАНТ, сер. техника физ. эксп., Харьков, 1981, вып.2/8/, с.59-68
8. Chilingarian A.A. The Development of Statistical Methods in Cosmic Ray Physics. - Proc. 18-th ICRC, Bangalore, 1983, vol.5, p.524-526,
9. Чилингарян А.А. Идентификация частиц высоких энергий, как задача распознавания образов. ВАНТ, сер. техника, физ. эксп., Ереван, 1983, вып.1/13/, с.61-68
10. Тер-Антонян С.В., Чилингарян А.А. Об одной возможности улучшения энергетического разрешения многослойных детек-

- торов.
ВАНТ, сер. техника физ. эксп., Ереван, 1982, вып. 3/12/, с. 90-91
11. Chilingarian A.A. On the Efficiency of the High-Energy Particle Identification Statistical Methods.- Preprint EPI-582(69)-82, Yerevan, 1982.
12. Чилингарян А.А. О новой методике обработки данных рентген-эмульсионных камер. ВАНТ, сер. техника физ. эксп., Ереван, 1983, вып. 1/13/, с. 81-84.
13. Chilingarian A.A., Galfayan S.Kh., Zazyan M.Z., Dunaevsky A.A. Selection of Model-Dependent Features in Photon-Hadron Families, Registered by Roentgen-emulsion Chambers.- Proc. 18-th ICRC, Bangalore, 1983, vol. 5, p. 487-490.
14. Chilingarian A.A., Ter-Antonian S.V. On the Possibility of Improving the Multi-Layered Detector Resolution. Preprint EPI-519(6)-82, Yerevan, 1982.
15. Асатиани Т.Л., Иванов В.А., Мнацаканян Э.А., Тер-Антонян С.В., Чилингарян А.А., Ерлыкин А.Д. Использование магнитного спектрометра АНИ для исследования потока мюонов космического излучения. ВАНТ, сер. техника физ. эксп., Ереван, 1983, 1/13/, с. 85-89
16. Чилингарян А.А. Развитие статистических методов в физике космических лучей. Материалы всесоюзной школы семинара. "Программно-алгоритмическое обеспечение прикладного многомерного статистического анализа", Москва, 1983, с. 367-370.

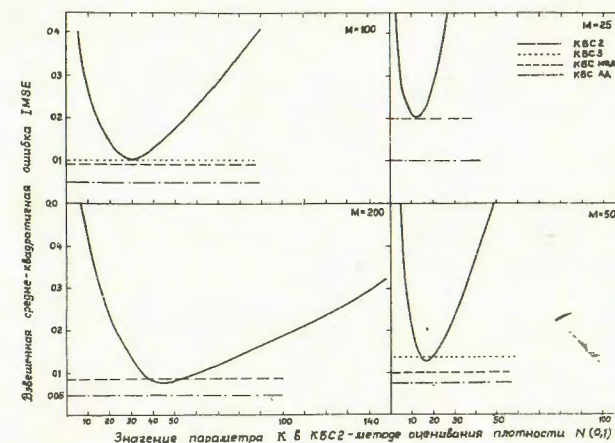


Рис. 1 Зависимость взвешенной среднеквадратичной ошибки различных методов оценивания от объема обучающей выборки.

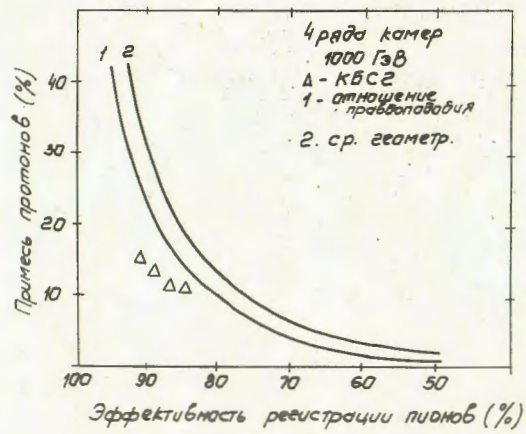


Рис.2 Сравнение статистических методов идентификации адронов по отклику РИИ-детектора.

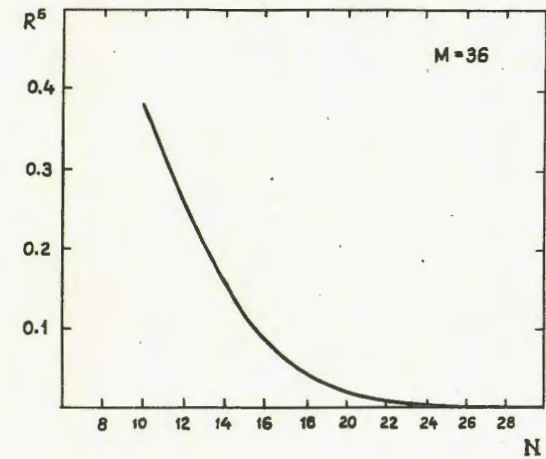


Рис.3 Зависимость уровня дискриминации ядерных взаимодействий от числа рядов установки.

Таблица
Значения байесовских рисков R_{Fe} и R_p для различных
моделей сильного взаимодействия

Набор параметров	$F_{min} + M6$		$F_{min} + M4$		$F_{max} + M4$		$F_{max} + M6$	
	R_{Fe}	R_p	R_{Fe}	R_p	R_{Fe}	R_p	R_{Fe}	R_p
$\Sigma E_\gamma, \bar{R}_\gamma, \lambda_\gamma$	0.212	0.285	0.168	0.212	0.102	0.102	0.1.0	0.230
$\Sigma E_\gamma, \bar{R}_\gamma, \lambda_\gamma, E^0$	0	0.081	0	0.073	0	0.047	0	0.066
$\bar{R}_\gamma, n_h, \bar{R}_h$	0	0.124	0	0.095	0	0.062	0	0.094
n_h, \bar{R}_h, E^0	0	0.093	0	0.072	0	0.078	0	0.062

- 16 -

Подписано в печать 10.08.84г. Формат 60x64/16
 Офсетная печать. .Тираж 170 экз.

Зак. тип. № 757. ВФ-04390

Отпечатано в Ереванском физическом институте
 Ереван 36, Маркарян 2