



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

ИФВЭ 2001–55

ОНФ,ОЭФ

С.В. Клименко, Н.Г. Минаев, В.Д. Самойленко,  
В.К. Семенов, Е.А. Слободюк

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ  $e/\pi$ –РЕЖЕКЦИИ  
НА УРОВНЕ ТРИГГЕРА**

Протвино 2001

### Аннотация

Клименко С.В., Минаев Н.Г., Самойленко В.Д., Семенов В.К., Слободюк Е.А. Исследование возможности  $e/\pi$ -режекции на уровне триггера: Препринт ИФВЭ 2001–55. – Протвино, 2001. – 10 с., 7 рис., библиогр.: 20.

Обсуждаются возможности идентификации частиц и достижимые пределы на величину  $e/\pi$ -фактора подавления (режекции) [ $R(e/\pi) = (\text{эффективность регистрации электрона})/(\text{эффективность регистрации адрона})$ ]. Предложен ряд схем реализации такого триггера электронов, использующих комбинации двух счетчиков частиц различного типа. Даны детальные оценки свойств счетчиков электронов и адронов, расположенных в области максимумов каскадных кривых соответствующих ливней. Было опробовано перспективное решение для первичной обработки сигналов со счетчиков, использующее классификатор, основанный на теории нейронных сетей. Этот классификатор использовался для замены обычной пороговой электроники, включенной по схемам совпадений и антисовпадений. Показано, что использование нейросетевых алгоритмов может по крайней мере на порядок улучшить фактор подавления адронов.

### Abstract

Klimenko S.V., Minaev N.G., Samoylenko V.D., Semenov V.K., Slobodyuk E.A. The Performance of the  $e/\pi$  Rejection on the Trigger Level: IHEP Preprint 2001–55. – Protvino, 2001. – p. 10, figs. 7, refs.: 20.

In this paper we investigate the capability of particle identification and the feasible limit value on  $e/\pi$ -rejection factor [ $R(e/\pi) = (\text{electron detection efficiency})/(\text{hadron detection efficiency})$ ] at the trigger level for a case of isolated particles. Several schemes to realize such an “electron” trigger have been proposed in which a combination of two different counters was used. Fairly detailed estimates of the performance of electron and hadron counters positioned at the region of a corresponding cascade curve maximum have been done. We tested a promising solution for signals data acquisition using the classifier based on neuron networks. This classifier has been applied as alternatives to the conventional threshold electronics switched at coincidence and anti-coincidence to zero level trigger. Using the neuron network algorithm could improve limit on rejection factor at least to order.

## Введение

В данной работе обсуждаются возможности идентификации частиц и достижимые пределы на величину электрон/адронного фактора подавления (режекции)  $[R(e/\pi)$  (эффективность регистрации электрона)/(эффективность регистрации адрона)]. Предложен ряд схем реализации такого триггера электронов, использующих систему счетчиков частиц и электронику принятия решения (классификатор), основанную на теории искусственных нейронных сетей. Проведено детальное рассмотрение свойств электронного и адронного счетчиков, расположенных в области максимумов соответствующих каскадных кривых. Для демонстрации преимуществ использования нейросетевого классификатора сравниваются его применения с традиционными методами, основанными на схемах совпадений и антисовпадений.

В качестве счетчиков электронов и адронов были рассмотрены следующие комбинации:

- Простейший случай — отдельные плоскости сцинтилляционных счетчиков, расположенные в максимуме электромагнитного ливня ( $S_1$ ) и в максимуме адронного ливня ( $S_2$ ) (рис. 1) и включенные соответственно на совпадение и антисовпадение с триггером нулевого уровня.
- Более сложный случай — первый счетчик простейшего случая ( $S_1$ ) заменен на счетчик-сэндвич ( $S_S$ ) толщиной в 15 радиационных длин ( $X_0$ ) (рис. 2).
- Для идентификации электронов на фоне адронов используется составной электрон-адронный калориметр [1], состоящий из модульных электромагнитного и адронного счетчиков-сэндвичей полного поглощения, толщиной  $15X_0$  и 5 длин ядерного поглощения ( $\lambda_{nucl}$ ) соответственно (рис. 3).

Следующим шагом рассматриваемой модели построения триггера электронов явилась замена схем совпадения и антисовпадения с дискретной логикой на классификатор, основанный на принципах искусственной нейронной сети.

Возможности  $e/\pi$ -сепарации при использовании первых двух комбинаций были исследованы с помощью расчетов Монте-Карло по программе моделирования электромагнитных и адронных ливней GEANT [20], ранее отлаженной и проверенной нами на экспериментальных данных, опубликованных в работе [1]. Счетчики  $S_1$  и  $S_2$  рассматривались несекционированными в поперечном направлении и имели размеры  $50 \times 50 \times 1$  см<sup>3</sup>.

Идентификация частиц в составном калориметре была изучена на экспериментальном материале [1].

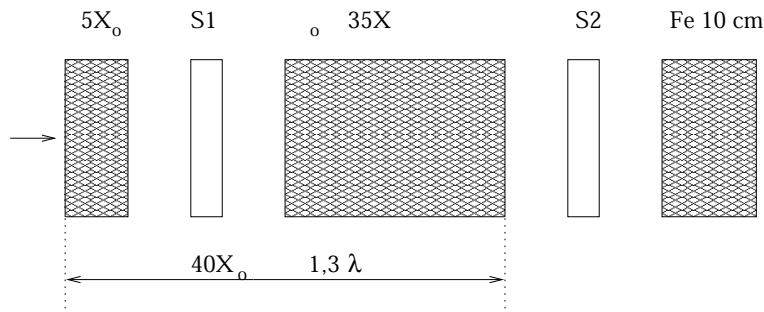


Рис. 1. Расположение счетчиков для первой комбинации.

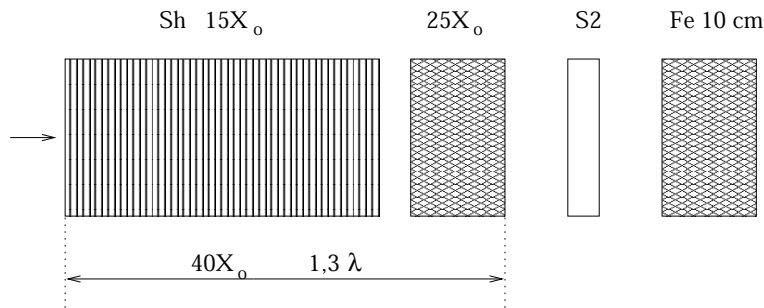


Рис. 2. Расположение счетчиков для второй комбинации.

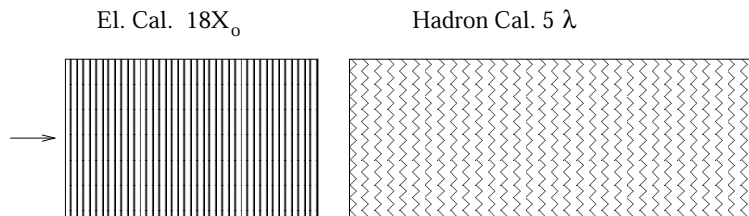


Рис. 3. Схема составного калориметра.

## 1. Сепарация электронов и адронов с помощью комбинации одноплоскостных счетчиков

### 1.1. Расположение счетчиков и включение их в триггер

Электромагнитный счетчик  $S_1$  располагался в свинцовом конверторе в области максимума каскадной кривой электромагнитного ливня (на глубине  $5X_0$ ). Счетчик адронов  $S_2$  был размещен в том же конверторе на глубине  $40X_0$  или  $1,3 \cdot \lambda_{nuc}$ . Причем, как это обычно бывает в эксперименте, за ним располагался поглотитель (в нашем случае 10 см стали). Это позволило учесть фоновое увеличение сигнала в счетчике  $S_2$  за счет альbedo эффекта.

Предполагалось, что при организации триггера для выделения события от электрона сигналы с обоих счетчиков поступают на соответствующие пороговые дискриминаторы, которые вырабатывают логические импульсы в случае, если амплитуда входного сигнала

(пропорциональная выделившейся в счетчике энергии  $\Delta E$ ) превышает значение заданного порога. Согласно выбранной нами логике отбора кандидатов в «электронные» события, счетчик  $S_1$  включается на совпадения, а  $S_2$  — на антисовпадения с триггером нулевого уровня.

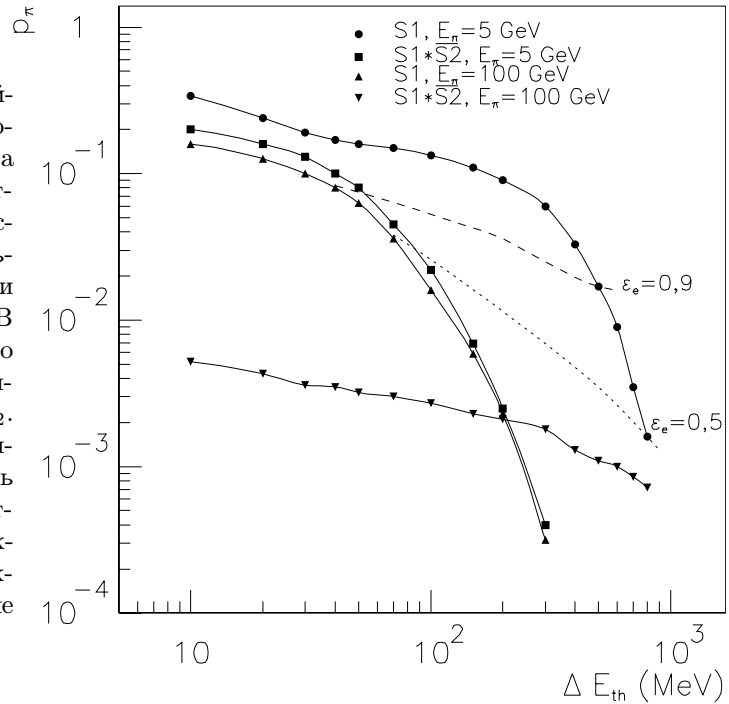
Случай применения нейросетевого классификатора будет рассмотрен отдельно.

## 1.2. Результаты моделирования

При моделировании развития электромагнитных и ядерных каскадов в свинце вычислялось энерговыделение ( $\Delta E$  в МэВ) в каждом из счетчиков ( $S_1$  и  $S_2$ ) и набирались его дифференциальные спектры. Расчеты были проведены для электронов и  $\pi$ -мезонов с энергиями 5 и 100 ГэВ. Эти значения были выбраны как крайние границы изучаемой нами энергетической области. По расчетным спектрам вычислялись вероятности регистрации частиц выбранного сорта для заданного порога энерговыделения ( $\Delta E_{th}$ ).

На рис. 4 приведены зависимости вероятности ложной регистрации  $\pi$ -мезона как электрона счетчиком  $S_1$  без и при включении адронного счетчика  $S_2$  в триггер. Величина порога срабатывания счетчика  $S_2$  была выбрана равной наиболее вероятному значению энерговыделения ( $\approx 2$  МэВ) одиночной минимально ионизирующей частицы (1 *mip*). При изменении этой величины от 1 до 4 МэВ фактор подавления  $\pi$ -мезонов меняется в обратно пропорциональной зависимости.

Рис. 4. Вероятность  $\pi$ -мезону пройти критерии отбора электрона в зависимости от порога на энерговыделение в счетчике  $S_1$ . Кривые:  $\bullet$ ,  $\blacktriangle$  — использование в триггере только сигнала счетчика  $S_1$  при энергиях  $E_\pi = 5$  и 100 ГэВ соответственно;  $\blacksquare$ ,  $\blacktriangledown$  — то же с привлечением счетчика  $S_2$  по алгоритму  $S_1 \cap \bar{S}_2$ . Пунктирная и точечная кривые учитывают зависимость от величины порога в счетчике  $S_2$  так, чтобы эффективность регистрации электронов оставалась на уровне 0.9 и 0.5 соответственно.



Включение только одного счетчика  $S_2$  (без  $S_1$ ) в антисовпадения к триггеру дает довольно слабое подавление  $\pi$ -мезонов (от 2 до 5 раз) при изменении их энергии от 5 до 100 ГэВ. Полученные методом моделирования уровни подавления  $\pi$ -мезонов находятся в хорошем согласии с экспериментальными результатами исследования характеристик одиночного счетчика, расположенного в области максимума электромагнитного ливня [2].

Из данных, приведенных на рис. 4, следует, что при использовании комбинации двух счетчиков, расположенных в области максимумов электромагнитного и ядерного каскадов, можно ожидать дополнительное подавление адронов примерно на два порядка при эффективном отборе электронов ( $\varepsilon_e \approx 90\%$ ) на уровне триггера в диапазоне энергий от десятков до сотен ГэВ. Недостатком этого метода  $e/\pi$ -сепарации является:

- значительная нелинейность отклика  $\Delta E(E_e)$  счетчика  $S_1$  при регистрации электромагнитных ливней, что является следствием смещения максимума электромагнитного ливня при изменении его энергии;
- примерно на порядок худшее (по сравнению с электромагнитным калориметром полного поглощения) энергетическое разрешение (из-за значительных флуктуаций сигнала по причине указанной выше).

Эти особенности не позволяют существенно улучшить уровень подавления адронов и точность измерения энергии электронов при off-line обработке с привлечением трековой информации и амплитудного анализа сигналов счетчика. Следует отметить, что примерно тот же уровень отбора (как и на рис. 4) можно получить, если счетчик  $S_2$  располагать на меньшей глубине в свинце, но при этом использовать для него следящий, а не фиксированный порог, т.е. отбор производить по величине отношения  $k = \Delta E_{S_1} / \Delta E_{S_2}$  энерговыделений в счетчиках  $S_1$  и  $S_2$ . Так, при расположении  $S_2$  на глубине  $25X_0$  получено оптимальное отношение сигналов  $k = 0,1$ .

## 2. $e/\pi$ -режекция с использованием счетчика-сэндвича в комбинации с адронным антисчетчиком

Использование электромагнитных счетчиков полного поглощения позволяет осуществить режекцию адронов при off-line обработке на уровне  $10^{-3}$  [3], а в триггере (особенно в пороговой моде) —  $10^{-1} \div 10^{-2}$  [4].

С целью изучения возможности улучшения уровня отбора событий с электроном на уровне триггера мы исследовали степень подавления адронов счетчиком-сэндвичем  $S_S$  с привлечением дополнительной информации от адронного счетчика  $S_2$ , описанного в разделе 1, для режима антисовпадений.

Для определенности в расчеты была заложена конструкция счетчика  $S_S$  с экспериментально оптимизированным для  $e/\pi$ -режекции сэмплингом [3]. Счетчик  $S_S$  представлял собой сэндвич с чередующимися пластинами свинца и сцинтиллятора толщиной 1,5 и 4 мм соответственно. После счетчика  $S_S$  располагался свинцовый поглотитель толщиной  $25X_0$  так, чтобы счетчик  $S_2$  оказался на глубине  $40X_0$ , как в разделе 1. Схема включения счетчиков  $S_S$  и  $S_2$  аналогична используемой в разделе 1.

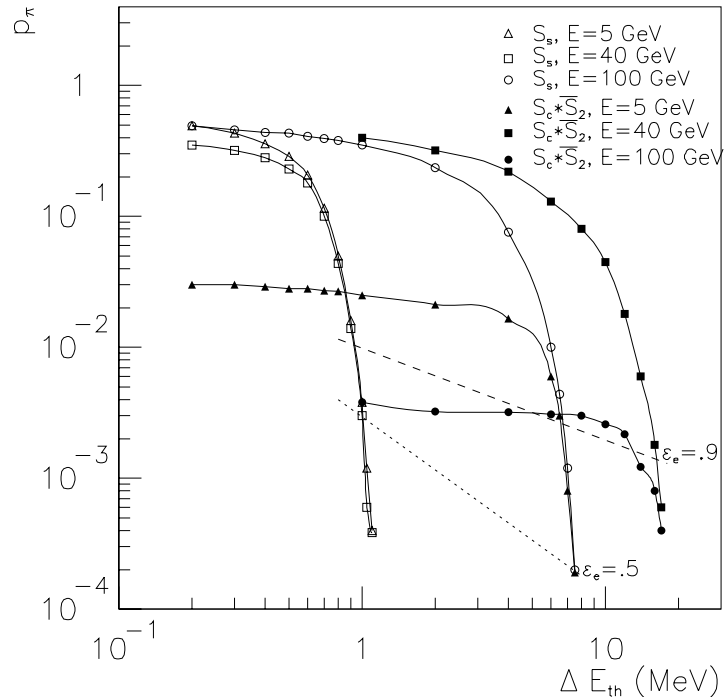
Регистрируемое (видимое) энерговыделение ( $\Delta E$ ) электромагнитного ливня в сцинтилляторах счетчика  $S_S$  соответствовало  $\approx 1/5$  от начальной энергии электрона  $E_e$ , а энергетическое разрешение, определяемое в наших расчетах только сэмплинг-флуктуациями, следовало зависимости  $\sim 7/\sqrt{E_e}$  ГэВ.

Возможности такого способа  $e/\pi$ -сепарации представлены на рис. 5. Здесь изображены зависимости вероятности ложного принятия  $\pi$ -мезонов, аналогичные приведенным на рис. 4, с той лишь разницей, что вместо порога на энерговыделение в счетчике  $S_1$  использовался порог на энерговыделение в счетчике-сэндвиче  $S_S$ . Расчетные результаты

с хорошей точностью подтверждаются экспериментальными данными по  $e/\pi$ -сепарации для счетчиков-сэндвичей полного поглощения [3,4].

Следует отметить, что уровень подавления  $\pi$ -мезонов при использовании комбинации пороговой моды регистрации в электромагнитном счетчике-сэндвиче и добавочного подавления адронным счетчиком практически совпадает с расчетными величинами при отборе событий по отношению энергосвечения в части ( $\approx 15X_0$ ) электромагнитного калориметра к полному энергосвечению (полная толщина  $\approx 40X_0$ ) [5]. Правда, в случае [5] довольно высокий уровень отбора достигается при известном импульсе частицы и ценой значительного усложнения аппаратуры — использования секционированного по глубине калориметра с полной толщиной более  $\approx 44X_0$ .

Рис. 5. Вероятность  $\pi$ -мезону пройти критерии отбора электрона в зависимости от порога на энергосвечение в счетчике  $S_S$ . Остальное, как и на рис. 4, добавлена кривая для энергии 40 ГэВ.



### 3. Идентификация частиц в сегментированном фотон-адронном сэмплинг-калориметре

При исследовании характеристик составного калориметра [1] был использован экспериментальный материал, на основе которого получены приведенные ниже результаты по разделению электронов и адронов.

Фотонная (ФК) и адронная (АК) части составного калориметра располагались на пучке частиц друг за другом в непосредственной близости. ФК представлял собой матрицу из  $5 \times 5$  счетчиков-сэндвичей с поперечным сечением  $75 \times 75$  мм<sup>2</sup> [6]. АК был собран в виде матрицы  $3 \times 3$  счетчиков-сэндвичей сечением  $150 \times 150$  мм<sup>2</sup> [6]. Конструктивно счетчики-сэндвичи были собраны из пластин металлических конверторов и литых полистирольных сцинтилляторов [8]. Сбор сцинтилляционного света осуществлялся световодами-смещителями спектра в виде тонких пластин. Более подробное описание конструктивных особенностей, параметров и характеристик составного калориметра приведено в работах [1,6,9,10]. Измерения проводились на пучках электронов с энергией

$E_e = 26,6$  ГэВ,  $\pi^-$ -мезонов с  $E_\pi = 40$  ГэВ и гамма-квантов от распада  $\pi^0$ -мезонов, выделенных в реакции перезарядки  $\pi^-$ -мезонов на водороде [10].

Сепарацию электронных и адронных событий с помощью составного калориметра можно осуществить на уровне триггера аналогично решениям, изложенным в разделах 1 и 2. Но теперь вместо адронного счетчика  $S_2$  используется АК полного поглощения  $S_H$ . Кроме того, поперечную сегментацию составного калориметра можно использовать для выработки дополнительного критерия для  $e/\pi$ -сепарации. В качестве этого критерия обычно используется ширина распределения энерговыделения соответствующего ливня в поперечном направлении. В качестве меры ширины ливней была выбрана величина дисперсии  $D$  соответствующего профиля ливня.

Подробный анализ зависимости  $D$  от координаты оси ливня в счетчике-модуле калориметра, его размеры, сорта и энергии частиц и их влияние на уровень  $e/\pi$ -сепарации приведен в работе [7]. Основным достоинством этого метода является, несомненно, возросшая устойчивость уровня отбора в условиях большой множественности вторичных частиц [13]. Причем современный уровень развития электроники позволяет применить этот критерий в триггере первого уровня.

Применение отбора по дисперсии  $D$  позволит улучшить коэффициент  $e/\pi$ -режекции во всем исследуемом диапазоне изменения величины порога  $E_{th}$  примерно на порядок величины по сравнению с простой пороговой модой режекции, которая хорошо описывается расчетами Монте-Карло.

Кроме того, наблюдается совпадение экспериментально наблюдаемого уровня отбора адронов по отношению сигналов адронной и электромагнитной частей составного калориметра с расчетным уровнем при использовании простого адронного счетчика по схеме антисовпадений  $S_2$ . Распределения отношений энерговыделений в адронном ( $E_h$ ) и электромагнитном ( $E_e$ ) счетчиках-сэндвичах составного калориметра для электромагнитных и адронных ливней приведены в работе [10].

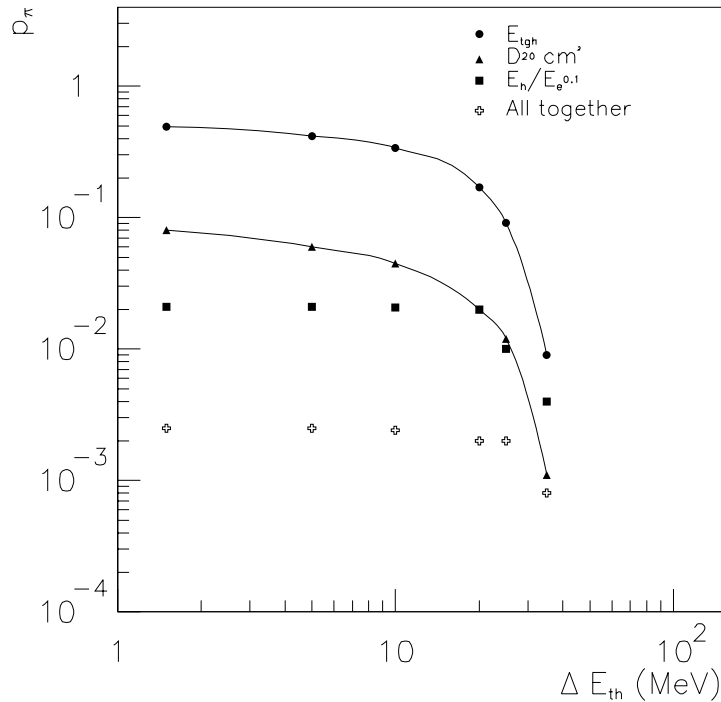


Рис. 6. Вероятность  $\pi$ -мезону пройти критерии отбора электрона в зависимости от порога на энерговыделение в электромагнитном калориметре ( $S_{\Phi K}$ ). Кривые: ● — только порог в электромагнитном калориметре; ▲ — он же, но с учетом поперечного распределения ливня; ■ — он же, но с учетом отношения  $E_h/E_e$ ; швейцарский крест — применение всех критериев одновременно.



Как видно из рис. 6, коэффициент режекции адронов  $\approx 2 \cdot 10^{-3}$  может быть достигнут одновременным применением всех трех вышеперечисленных критериев отбора: пороговой моды, ограничения на ширину ливня в электромагнитной части составного калориметра и отбора по отношению амплитуд сигналов  $E_h/E_e$  в адронной и электромагнитной составных частях. Причем при off-line анализе с использованием трековой информации об импульсе частицы уровень  $e/\pi$ -режекции может быть доведен до величины  $< 10^{-3}$ .

Расчетные и экспериментальные данные, полученные нами в этом разделе, согласуются с результатами по  $e/\pi$ -сепарации в комбинированном жидкоаргоновом калориметре [13].

#### 4. Использование нейронной сети в задаче $e/\pi$ -режекции

Выше нами были рассмотрены три комбинации счетчиков электронов и адронов для решения задачи  $e/\pi$ -сепарации. Было показано, что на уровне выработки триггера достижимым пределом электрон/адронного фактора подавления является величина  $\approx 2 \cdot 10^{-3}$ . Такое ограничение связано с двумя причинами:

- естественными флуктуациями амплитуды сигналов счетчиков (детекторов) электронов и адронов, отражающими стохастическую природу развития соответствующих ливней в веществе;
- ограничениями, накладываемыми линейностью пороговой модели обработки этих сигналов с использованием схем совпадений и антисовпадений.

Факт наличия значительных корреляций сигналов счетчиков  $S_1/S_S$  и  $S_2/S_H$  очевиден и имеет множество экспериментальных доказательств (см., например, [1]). Однако использование этой полезной информации затруднено из-за сложности формализации соответствующей математической модели. С другой стороны, здесь мы сталкиваемся с типичной задачей распознавания образов. Для решения подобных задач в физике высоких энергий (ФВЭ) последних лет все чаще используют классификаторы, построенные на принципах теории нейронных сетей (см., например, обзор [15]). Нейронная сеть, благодаря своей нелинейной природе [16], особенно полезна для тех случаев, когда алгоритм решения плохо формализуется на языке привычных вычислений с последовательной логикой. Важно, что свои свойства классификатора нейронная сеть приобретает на основе опыта (обучения) [16,17,18].

Обычно классификаторы для задач ФВЭ строятся на основе нейронной сети прямого распространения, также известной как многослойный персептрон [17,18]. Выходной сигнал многослойного персептрона тренируется (обучается) методами минимизации, например среднего квадрата функции ошибки. Такой отклик нейронной сети прямым образом аппроксимирует *апостериорную вероятность Бейеса* без необходимости вычисления ряда *условных вероятностей*, а главное, *априорных* вероятностей гипотез, расчет которых затруднителен и обычно недоказуем [19].

Напомним, что теорема Бейеса применительно к теории проверки гипотез для дискретных событий имеет вид

$$p(\theta_i | \vec{X}) = p(\vec{X} | \theta_i)p(\theta_i)/p(\vec{X}),$$

где  $\theta_i$  — множество различных гипотез (в нашем случае  $i = 1, 2$  так, что  $\theta_1 = 1$  означает “электрон”, а  $\theta_2 = 1 -$  “адрон”);  $\vec{X}$  — экспериментальные значения (в нашем случае  $\vec{X} = (S_1, S_2)$ );  $p(\theta_i | \vec{X})$  —

соответствует апостериорному знанию;  $p(\vec{X} | \theta_i)$  — вероятность наблюдать  $\vec{X}$ , если справедлива гипотеза  $\theta_i$  (это может быть функция правдоподобия);  $p(\theta_i)$  — соответствует априорному знанию или степени веры в различные гипотезы;  $p(\vec{X})$  — вероятность наблюдать результат  $\vec{X} = (S_1, S_2)$  (так как в нашем случае набор гипотез, взаимоисключающий либо электрон, либо адрон, и образует полный набор  $p(\vec{X}) = \sum_{i=1}^2 p(\vec{X} | \theta_i)p(\theta_i)$ ).

Нами была сделана попытка построения модели классификатора для  $e/\pi$ -сепарации с использованием искусственной нейронной сети. Выбранная трехслойная архитектура нейронной сети довольно проста: два нейрона первого слоя, предназначенные для ввода в классификатор сигналов от счетчиков  $S_1/S_S$  и  $S_2$ ; второй (скрытый) слой — из  $n$  нейронов; один нейрон выходного слоя, выдающий логический сигнал электрон/адрон.

Классификатор изучался на искусственных событиях для конфигураций, описанных в разделах 1 и 2.

Для компьютерного моделирования нейросети использовалась программа Jetnet 3.0 [14]. Способ обучения сети — алгоритм Manhattan [14]. Обучающая выборка составляла  $1,5 \cdot 10^3$  событий каждого класса. Испытание работоспособности обученной нейросети проводилось на тестовой выборке из  $5 \cdot 10^2$  электронных и адронных событий, не участвующих в процессе обучения. Структура признаков событий в 2-мерном пространстве входных параметров (см. рис. 7) такова, что изменение количества узлов ( $n$ ) в скрытом слое слабо сказывается на работе классификатора. Поэтому для его построения была выбрана нейросеть с минимальной архитектурой 2–3–1. Нейронная сеть достигает эффективности выделения электронов выше 0,95 уже при 20 эпохах обучения.

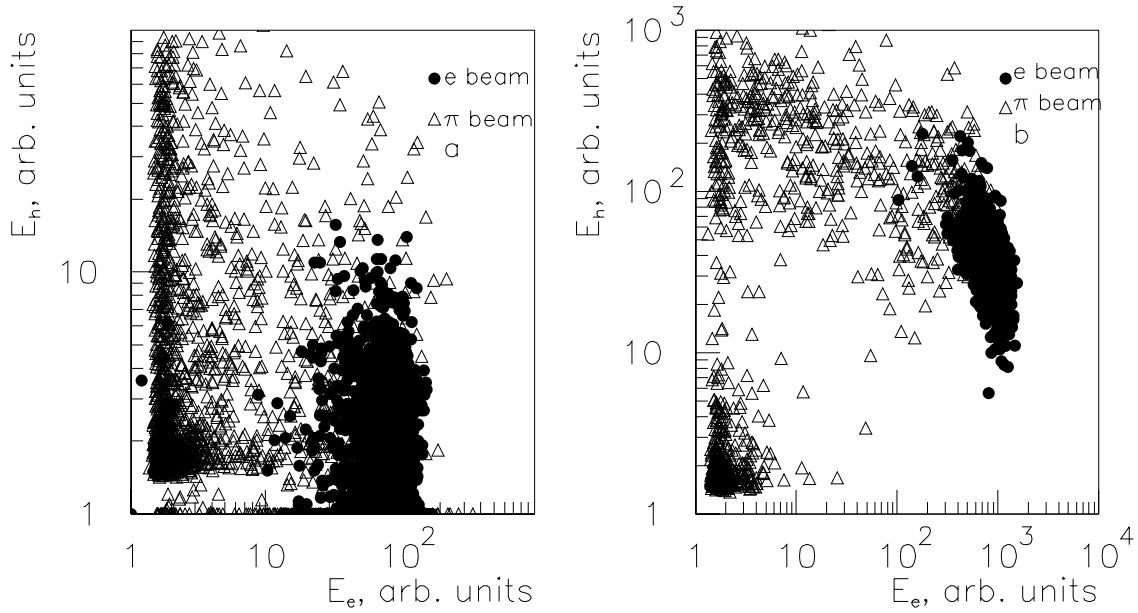


Рис. 7. Биplot энерговыделения в счетчиках  $S_1$  и  $S_2$  для электронов и  $\pi$ -мезонов, демонстрирующий пространство признаков для нейросетевого классификатора: **a** — для энергии 5 ГэВ; **b** — для энергии 100 ГэВ.

Преимущество использования нейросетевого классификатора особенно ощутимо при малых энергиях ( $\approx 5$  ГэВ). Оцененная вероятность принять пион как электрон составляет  $7 \cdot 10^{-2}$ , что значительно лучше, чем при использовании порогового метода в той же области энергий. При больших энергиях события в пространстве признаков распределены в разных областях, и преимущество нейронного классификатора не столь значительно.

Современный уровень развития электроники в физике высоких энергий позволяет использовать сложные методы отбора событий в реальном масштабе времени, т.е. на уровне триггера. В частности, задача  $e/\pi$ -режекции может быть эффективно решена с помощью классификатора на основе нейронных сетей. Нейронная сеть с малым временем принятия решения достаточно просто реализуется на СБИС с программируемой логикой. Кроме того, на рынке микросхем в настоящее время существует большое количество специализированных нейросетевых СБИС как с дискретными, так и с аналоговыми входами. Исследования аппаратной реализации классификатора для  $e/\pi$ -режекции будут нами продолжены.

### Заключение

В настоящей работе рассмотрены три постепенно усложняющиеся конфигурации детекторов частиц, которые могут быть использованы для улучшения сепарации электронов и адронов на уровне триггера (для быстрого отбора). Все три рассмотренные схемы объединяет одна особенность: они построены на использовании сигналов от электромагнитного счетчика, включенного на совпадения, и адронного счетчика, включенного на антисовпадения с триггером нулевого уровня.

В качестве электромагнитных счетчиков рассмотрено использование одиночной плоскости регистрации, расположенной в области максимума электромагнитной каскадной кривой, и счетчика-сэндвича (толщиной  $15X_0$ ). Адронный счетчик располагался позади электромагнитного счетчика в области максимума ядерной каскадной кривой (на глубине  $40X_0$  или  $1,3 \cdot \lambda_{nuc}$ ) в виде одиночной плоскости или счетчика-сэндвича, представляющего собой адронную часть составного фотон-адронного калориметра.

Как показали расчеты Монте-Карло по программе GEANT и измерения на пучке частиц, по мере усложнения аппаратной схемы отбора реализуется все более высокая избирательная способность по разделению электронов и адронов на уровне триггера первого уровня от  $10^{-1}$  до  $2 \cdot 10^{-3}$  в диапазоне энергий от десятков до сотен ГэВ.

Однако следует отметить, что из-за больших флуктуаций ядерных каскадов в веществе даже простой антисчетчик, расположенный в максимуме каскада, не намного уступает в  $e/\pi$ -режекции сложным калориметрам. Это утверждение усиливается, если на уровне первичной обработки сигнала используется интеллектуальный классификатор, основанный на нейросетевом алгоритме.

Была продемонстрирована перспективность использования классификатора  $e/\pi$ -событий, основанного на принципах нейронной сети. Использование такого классификатора позволит на порядок улучшить фактор  $e/\pi$ -режекции. Простая архитектура нейросети 2-3-1 позволяет надеяться на скорую возможность его аппаратной реализации.

В заключение авторы выражают благодарность за плодотворные дискуссии, помощь в измерениях и оформлении А.С. Вовенко, В.Н. Горячеву, В.Н. Кузнецову, Ю.И. Саломатину.

Данная работа была поддержана грантом РФФИ 00-01-00607.

## Список литературы

- [1] Барков Б.П. и др. Препринт ИФВЭ 93-122, Протвино, 1993.
- [2] Amatuni Ts. et al. // Nucl. Instr. and Meth., v. A203, p. 183, 1982.
- [3] Atoyán G.S. et al. // Nucl. Instr. and Meth., v. A320, p. 144, 1992; Preprint INR-736/91, Moscow, 1991.
- [4] Dagoret S. et al. Preprint CERN - PRE/93-147, 1993.
- [5] Жолобов Г.В., Рыкалин В.И. Препринт ИФВЭ 90-79, Протвино, 1990.
- [6] Барков Б.П. и др. Препринт ИФВЭ 93-174, Протвино, 1993.
- [7] Гаврищук О.П. и др. Препринт ОИЯИ 91-554, Дубна, 1991.
- [8] Кадыков М.Г., Семенов В.К. и Суздаев В.И. Препринт ОИЯИ 13-90-16, Дубна, 1990.
- [9] Барков и др. Препринт ИФВЭ 93-15, Протвино, 1993.
- [10] Барков Б.П. и др. Препринт ИФВЭ 93-49, Протвино, 1993.
- [11] Алди Д. и др. Препринт ИФВЭ 88-182, Серпухов, 1988; Nucl. Instr. and Meth., v. A268, p. 112, 1988.
- [12] Acosta D. et al. Preprint CERN EP/90-37, 1990.
- [13] Jakobe K. ATLAS Note CAL-No-19, 1993; TGT Note 025.
- [14] Peterson C., Rognvaldsson T. Jetnet 3.0, LU TP 93-29.
- [15] Клименко С.В., Самойленко В.Д., Слободюк Е.А., Ухова Т.Л. «Искусственные нейронные сети в физике высоких энергий» (Часть I). – Информационные технологии, 1998, **12**, с.17-24.  
Клименко С.В., Самойленко В.Д., Слободюк Е.А., Ухова Т.Л. «Искусственные нейронные сети в физике высоких энергий» (Часть II). – Информационные технологии, 1999, **1**, с. 13-23.
- [16] Simon Haykin “Neural networks”. Macmillan College Publishing Company, New York, 1993.
- [17] Ruck D.W. et al., IEEE Trans. Neural Network **1**, 296, 1990.
- [18] Bishop C.M. “Neural Networks for Pattern Recognition”, Clarendon, Oxford, 1998.
- [19] Идье В., Драйард Д. и др. Статистические методы в экспериментальной физике. – М.: Атомиздат, 1976.
- [20] Brun R. et al. Preprint CERN-DD/EE/84-1, 1987.

*Рукопись поступила 29 декабря 2001 г.*

С.В. Клименко и др.  
Исследование возможности  $e/\pi$ -режекции на уровне триггера.

Оригинал-макет подготовлен с помощью системы L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X.  
Редактор Н.В.Ежела. Технический редактор Н.В. Орлова.

---

Подписано к печати 14.02.2002. Формат  $60 \times 84/8$ . Офсетная печать.  
Печ.л. 1,25. Уч.-изд.л. 1. Тираж 130. Заказ 30. Индекс 3649.  
ЛР №020498 17.04.97.

---

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий  
142284, Протвино Московской обл.

