

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

**ФИЗИЧЕСКИЙ
ИНСТИТУТ**



*имени
П.Н. Лебедева*

Ф И А Н

ПРЕПРИНТ

29

А.Б. АЛЕКСАНДРОВ, И.Ю. АПАЧЕВА,
Л.А. ГОНЧАРОВА, Н.С. КОНОВАЛОВА,
Г.И. ОРЛОВА, Н.Г. ПОЛУХИНА,
Н.И. СТАРКОВ, Е.Л. ФЕЙНБЕРГ,
М.М. ЧЕРНЯВСКИЙ

**МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ ЗАРЯДОВ
РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЯДЕР
В ФОТОЭМУЛЬСИИ
НА АВТОМАТИЗИРОВАННОМ
КОМПЛЕКСЕ ПАВИКОМ**

МОСКВА 2005

Методика измерения зарядов релятивистских ядер в фотоэмульсии на автоматизированном комплексе ПАВИКОМ

Александров А.Б., Апачева И.Ю., Гончарова Л.А., Коновалова Н.С.,
Орлова Г.И., Полухина Н.Г., Старков Н.И., Фейнберг Е.Л.,
Чернявский М.М.

Abstract.

The methods of the charge measurements of the fragments from nucleus-nucleus collisions detected in nuclear photoemulsion are described.

The technique of automatic measurements based on CCD image procession in conjugation with computer controlled microscope was developed. Calibration curves have been obtained for relativistic heavy ions ($Z \geq 3$) depending on depth in emulsion. The advantages of the method were demonstrated by measuring of fragments of ^{28}Si nuclei.

1. Метод ядерных фотоэмульсий

Возможности использования современной техники для автоматизации измерений в ядерных фотоэмульсиях возродили интерес к использованию этой методики для изучения взаимодействий ускоренных частиц.

В ядерно-физических экспериментах в качестве трекового детектора широко используется ядерная эмульсия – желатиновый раствор, основным элементом которого являются кристаллы AgBr . Ядерные фотоэмульсии относятся к разряду трековых детекторов и позволяют непосредственно (визуально) наблюдать следы заряженных частиц. При прохождении заряженной частицы через эмульсию, некоторые атомы Ag превращаются в металлическое серебро, тем самым, образуя в эмульсии скрытое изображение в виде цепочки микрокристаллов бромида серебра. Во время проявки вокруг металлических атомов серебра, являющихся центрами кристаллизации, нарастают кристаллы серебра. След каждой частицы проявляется как последовательность примерно сферических черных зерен металлического серебра. В зависимости от типа ионизирующей частицы, ее энергии,

химического состава эмульсии и процедуры проявки зерна образуют черную линию разной плотности. Характерный размер зерна – (0.3 – 1) микрон. Во время проявки появляются также фоновые некоррелирующие друг с другом зерна. Этот фон (вуаль) затрудняет последующее распознавание треков частиц, однако помогает легко определять границу эмульсия-воздух, или эмульсия-стекло, или эмульсия-пластик. Ядерные фотоэмульсии обладают наилучшим по сравнению со всеми остальными детекторами пространственным разрешением, ограниченным только размером проявленных зерен серебра, и позволяют полностью восстановить картину исследуемого процесса.

Возможность проводить экспозиции в отсутствие экспериментатора, незначительные размеры и вес фотоэмульсий позволяют использовать их как в экспериментах по физике космических лучей на стратосферных аэростатах, так и в ускорительных экспериментах. Отсутствие возможности управления фотоэмульсией в гибридных экспериментах частично компенсируется системой целеуказаний, когда местонахождение вершины взаимодействия и/или отдельного трека можно предсказать, используя информацию от разного рода электронных детекторов. Такие эксперименты также позволяют дополнять измерения в эмульсии данными о массе, зарядах и импульсах вторичных частиц, полученными в детекторах.

2. Измерение зарядов релятивистских частиц в ядерных фотоэмульсиях

Одной из важнейших процедур при анализе характеристик ядро-ядерных взаимодействий, зарегистрированных в ядерной фотоэмульсии, является определение заряда фрагментов ядра-снаряда, образовавшихся в процессе взаимодействия.

Определение зарядов фрагментов ядра-снаряда необходимо, например, при изучении внутренней структуры ядер, определении параметра удара взаимодействия, оценки числа нуклонов, участвовавших во взаимодействии и др. Эти вопросы возникают при решении глобальных проблем ядерной физики,

таких как, например, исследование синтеза ядер во Вселенной, изучении строения ядер и механизма ядерных взаимодействий.

В процессе взаимодействия ядер при высоких энергиях образуется большое число частиц разной природы. Эти частицы подразделяются на группы по величине заряда, массы, пробега и энергии следующим образом:

1. Частицы, оставляющие в эмульсии следы с ионизацией $I/I_0 < 1,4$ (I_0 – минимальная ионизация в эмульсии). Это однозарядные релятивистские частицы с $\beta \geq 0,7$; в основном π -мезоны, K-мезоны и протоны, в том числе однозарядные фрагменты ядра-снаряда. Заряд однозарядных релятивистских частиц обычно легко определяется визуально.

2. “Серые” следы оставляют частицы с ионизацией $I/I_0 > 1,4$ и пробегом $R > 3000$ мкм; в основном это протоны отдачи из ядра-мишени с энергией больше 26 МэВ.

3. “Черные” следы оставляют частицы с $R < 3000$ мкм; это, так называемые, испарительные частицы - медленные продукты фрагментации ядра-мишени.

4. Быстрые фрагменты налетающего ядра с величиной заряда от 2 до величины заряда ядра-снаряда, которые вылетают в пределах узкого переднего конуса, угол раствора которого определяется первичным импульсом.

В наших экспериментах используются толстослойные фотоэмульсии толщиной ~ 600 мкм, которые для уменьшения искажений проявляются наклеенными на стекло. Такая технология приводит к тому, что эмульсия проявляется неравномерно по всему объему [1]. Ближе к стеклу число проявленных зерен для одного и того же следа меньше, чем у поверхности эмульсионного слоя. Поскольку следы частиц всегда идут под некоторым углом к плоскости эмульсионной пластины, необходимо учитывать изменение их ионизации с глубиной, для чего вводится поправочный коэффициент. Для определения зарядов фрагментов предварительно строится калибровочная кривая на основе измерений ионизации следов частиц с известным зарядом.

Методика измерения в ядерной фотоэмульсии зарядов релятивистских ионов составляет предмет настоящей публикации. Это первый этап начавшейся на

установке ПАВИКОМ работы по полной автоматизации измерений в толстослойных эмульсиях при продольном облучении. Для выбора оптимальной процедуры определения заряда фрагмента были рассмотрены и опробованы все известные методы определения заряда частиц по характеристикам их треков. Так, при определении зарядов в интервале $Z=3\div 7$ используется метод счета числа разрывов (промежутков) между сгустками проявленных зерен на треке. Для частиц с зарядами $Z>7$, треки которых практически не имеют разрывов, применяется метод измерения количества и/или длины следов дельта-электронов, образовавшихся в процессе ионизации среды вдоль трека заряженной частицы. Обоснованием метода служит тот факт, что распределение дельта-электронов по энергии и пробегу зависит от заряда Z ионизирующей частицы [1]:

$$\frac{d^2 N}{dTdx} = \frac{1}{2} 4\pi N_A r_e^2 m_e c^2 Z^2 \frac{z}{A} \frac{1}{\beta^2} \frac{F}{T^2},$$

где T – кинетическая энергия дельта-электронов;

x – количество вещества, пройденного ионизирующей частицей;

A – атомный вес атомов среды;

z - заряд атомов среды;

β - скорость ионизирующей частицы.

Параметр F зависит от спина ионизирующей частицы, но при релятивистских энергиях считается постоянной величиной; m_e и r_e - это масса и классический радиус электрона, поэтому множитель $4\pi N_A r_e^2 m_e c^2$ равен $0.3071 \text{ Мэв} \cdot \text{см}^2 \cdot \text{г}^{-1}$.

Ранее предпринимались попытки определять заряд частицы по ширине оставляемого им следа и по степени его почернения, то есть по плотности произведенной ионизации [2]. Эти попытки, осуществляемые на фотометрах, не получили широкого распространения.

В данной работе предлагается комплексный метод определения заряда ядер, сочетающий в себе все известные методики. Был создан алгоритм, позволивший проводить с достаточной точностью измерение заряда ядер с $Z>3$. Все измерения проводятся на качественно новом уровне с использованием

новой разработки ФИАН – полностью автоматизированного измерительного комплекса (ПАВИКОМ) [3]. На основе ПАВИКОМ в режиме полной автоматизации осуществляются:

- поиск и оцифровывание координат треков заряженных частиц в материале детектора;
- распознавание и прослеживание треков с помощью ЭВМ;
- систематизация и первичная обработка данных.

Исходным материалом для обработки послужили толстослойные ядерные фотоэмульсии типа БР-2 толщиной 600 мкм, облученные пучками релятивистских ядер, полученными на ускорителях. На начальном этапе разработки нового комплексного подхода к измерениям зарядов ядер в эмульсионных экспериментах, для построения калибровочной кривой, проводились измерения ионизации среды, производимой частицами с известными зарядами.

3. Алгоритм процедуры обработки видеоизображения трека на ПАВИКОМ для построения калибровочных кривых с целью определения заряда ядра

Процедура обработки на ПАВИКОМ трека заряженной частицы состоит в следующем. Оптическая система микроскопа, на котором установлен образец ядерной фотоэмульсии, проектирует изображение трека на CCD-матрицу установки ПАВИКОМ-2 [4].

Изображения, подлежащие обработке, накапливаются в файлах в формате BMP с 256 градациями серого. Размер изображения - 384x288 пикселей². Образец одного из кадров представлен на рис. 1. Следам от частицы соответствуют области более темные по сравнению с окружающим фоном.

Обработка производится в несколько этапов.

1. *Фильтрация.* Для увеличения эффективности выделения элементов трека проводится предварительная обработка изображения с помощью специально подобранного математического фильтра. В результате усиливаются

области потемнения, имеющие достаточно резкие границы. Эта процедура позволяет устранить фон и ослабить влияние различий в контрастности и яркости изображений на разных пленках.

2. *Бинаризация и кластеризация.* Все пиксели отфильтрованного изображения разбиваются на два класса: фон и кандидаты на след от частицы. Такое деление осуществляется с помощью обрезания на уровне порога, вычисляемом автоматически по форме гистограммы распределения числа пикселей с определенным значением серого на отфильтрованном изображении. В результате все изображение разбивается на области, имеющие значение пикселей 0 (фон) и 1 (следы частиц и помехи в виде темных пятен, имитирующие следы). Результат этого этапа представлен на рис.2. На изображении, полученном после бинаризации, выделяются кластеры - связанные области пикселей, имеющих значение, равное 1, подлежащие дальнейшей индивидуальной обработке.

3. *Выделение трека заряженной частицы и поиск его оси.* Исследуемая заряженная частица проходит почти параллельно одной из сторон изображения (ось X). Поскольку заряд частицы довольно большой, ее трек представляет собой почти сплошную линию с небольшим числом разрывов. Просуммируем пиксели, имеющие значение 1, вдоль оси X при фиксированном значении Y. При значении Y, соответствующем положению трека, эта сумма будет иметь максимум Y_{\max} . Для построения оси трека сторона изображения вдоль оси X разбивается на 20 полос и на каждой полосе аналогичным образом производится поиск максимума Y_{\max}^i , $i=1,2,\dots,20$. Далее на плоскости задаются 20 точек (X^i, Y^i) , имеющие координаты X^i , равные середине соответствующей полосы, и $Y^i = Y_{\max}^i$. Полученные в результате данной процедуры точки аппроксимируются прямой методом χ^2 . Отдельные точки, дающие аномально большие значения (выбросы), исключаются из подгонки. Данный алгоритм позволяет получить положение оси для треков, проходящих под углом до 30 градусов к одной из сторон изображения. Для выделения кластеров, принадлежащих треку, определяются те из них, которые имеют общие точки с осью. Далее, для всех

пикселей, принадлежащих треку, строится распределение числа пикселей N , как функции расстояний пикселя до оси трека D – гистограмма расстояний. Пример такой гистограммы (для того же кадра на рис.1) приведен на рис. 3 точками. Эта гистограмма используется для вычисления характеристик трека.

4. *Вычисление характеристик трека.* Для вычисления характеристик определяется ширина основной части трека. Для этого на диаграмме расстояний выделяются точки, лежащие вблизи максимума (D_{\max} , N_{\max}) и имеющие высоту не менее $0,1N_{\max}$. Эти точки аппроксимируются функцией Гаусса. Результат аппроксимации изображен на рис. 3 кривой. Точки, лежащие на некотором определенном расстоянии от оси, считаются принадлежащими основному треку, остальные – трекам от дельта-электронов. В дальнейшем вычисляются следующие характеристики.

- сумма (Total Sum) числа всех пикселей на площади основного трека заряженной частицы и всех треков от дельта-электронов;
- число (N_e) дельта-электронов. Для вычисления этой характеристики сверху и снизу от оси проводятся две параллельные ей прямые на определенном расстоянии (для обрабатываемой пластинки это было 1.4 мкм). Числом электронов считается величина, равная половине от числа пересечений прямыми границ кластеров трека;
- сумма (P_e) периметров кривых, огибающих треки дельта-электронов – параметр, позволяющий учитывать длину пробега дельта-электронов;
- количество (N_g) промежутков между сгустками проявленных зерен в треке;
- суммарная длина (L_g) промежутков между сгустками проявленных зерен в треке;
- зависимость ионизации от глубины прохождения ядра в эмульсии (число дельта-электронов на треках ядер ^{28}Si , проходящих на разной глубине в эмульсии).

Далее представлены результаты, полученные на основе анализа этих характеристик.

4. Результаты измерений

Исследуемые фрагменты во взаимодействиях в фотоэмульсии ядер ^{28}Si с импульсом 4.5 ГэВ/нуклон ускоренных на синхрофазотроне ЛВЭ ОИЯИ. Заряды фрагментов налетающего ядра ^{28}Si (с $Z_{\text{фр}}=3,5,6,7,9,11,12,14,16$) были предварительно определены без применения вычислительной техники вручную методами счета разрывов и/или числа дельта-электронов на их треке. На рис.4 представлена зависимость параметра «Total Sum» от заряда фрагментов, измеренная на ПАВИКОМ по описанной процедуре с использованием автоматизированной обработки эмульсии и компьютерного анализа данных. На рисунке видно, что измеренная интенсивность растет с увеличением заряда фрагмента и может быть аппроксимирована в пределах ошибок линейной функцией. Здесь указаны статистические ошибки измерений по 20 кадрам пленки, последовательно расположенным вдоль трека фрагмента. Ошибки вычислялись как стандартное отклонение от среднего для последовательности чисел. Таким образом, данная зависимость может быть использована в качестве калибровочной кривой для обработки эмульсионных экспериментальных данных, т.е. отсканировав на ПАВИКОМ трек частицы в эмульсии на достаточно большой длине и обработав его созданным пакетом программ, можно оценить ее заряд с помощью приведенной на рисунке кривой.

Другим параметром, позволяющим независимо определить или уточнить измеренное другим способом значение заряда ядра, является количество дельта-электронов. Логика процедуры счета числа дельта-электронов при автоматизированной обработке на ПАВИКОМ соответствует процедуре счета числа дельта-электронов при ручной обработке данных. Результаты определения этого параметра для того же набора фрагментов приведены на рис.5. Количество дельта-электронов пропорционально длине пути, пройденного частицей в эмульсии, этот процесс близок к пуассоновскому. Поэтому на рис.5 для каждого Z приведено среднеквадратичное отклонение, равное корню квадратному из N_e .

Кроме того, в рамках проведенного методического исследования, была построена калибровочная кривая зависимости от заряда фрагмента длины кривой, огибающей треки дельта-электронов (параметр P_e). Данные, полученные этим методом, представлены на рис.6. Некоторое искажение параметров, связанных с дельта-электронами, вносят следы фоновых частиц в случае, если они пересекают след исследуемой частицы и рассматриваются программой обработки как треки дельта-электронов. Наибольшее влияние этот эффект оказывает на параметр P_e . Степень таких фоновых искажений можно оценить по величине N_e и P_e для частиц с наименьшим зарядом. После вычитания этого фона оставшаяся зависимость аппроксимируется параболой $N_e, P_e \sim Z^2$ (рис.5,6): $N_e = 0.18 \times Z^2$, $P_e = 1.44 \times Z^2$. Следует отметить, что измерение заряда ядра тремя независимыми методами значительно повышает достоверность результата.

Так же были исследованы зависимости количества промежутков заданной длины между сгустками проявленных зерен на треке $\langle N_g \rangle$ и суммарной длины этих промежутков $\langle L_g \rangle$ от заряда частицы. Полученные зависимости, аппроксимированные функцией $\sim 1/Z$, представлены на рис.7 и 8. Данный метод позволяет определять заряды фрагментов $Z_{фр} \leq 6$ с высокой надежностью, поскольку в этой области значения $\langle N_g \rangle$ и $\langle L_g \rangle$ особенно чувствительны к заряду частицы. Метод определения заряда, использующий длину промежутков между зернами на треке частицы хорошо дополняет выше описанные методы, использующие определение числа δ -электронов, которые максимально эффективны для зарядов $Z_{фр} \geq 7$.

Были проведены измерения, позволившие определить и учесть изменение ионизации трека в зависимости от его глубины, как следствие, упоминавшейся выше, неоднородности проявления эмульсионного слоя. Зависимость параметра N_e от глубины прохождения трека в эмульсии представлена на рис.9. Как видно из рисунка, амплитуда изменения параметра ионизации N_e в зависимости от глубины трека в эмульсии достигает $\sim 25\%$, однако этот эффект существенен, главным образом, в интервале глубин от 0 до 50 микрон от границы эмульсия-стекло.

5. Выводы

В рамках автоматизации процесса обработки эмульсионных данных с помощью прибора ПАВИКОМ, разработана и протестирована методика определения зарядов релятивистских ядер в толстослойной ядерной фотоэмульсии. Заряд определяется независимо по нескольким параметрам:

- по ширине трека с учетом дельта-электронов;
- по количеству образовавшихся вдоль трека ядра дельта-электронов;
- по длине кривой, огибающей треки дельта-электронов;
- по количеству промежутков между сгустками проявленных зерен в треке и суммарной длине этих промежутков (для малых Z).

На этом этапе работы построены калибровочные кривые, позволяющие определять заряд ядра по измеренным параметрам с точностью, зависящей только от длины отсканированного на ПАВИКОМ участка трека ядра. При сканировании участка трека длиной 1.6 мм, как в данной работе, точность определения заряда по параметру “Total Sum” составляет ~5%. При условии использования других обсуждаемых в статье параметров ошибка в определении заряда уменьшается в 1.5 – 2 раза. Увеличение длины сканируемого трека до 3 мм, по нашим оценкам, уменьшит эту ошибку еще в 1.5 раза. Таким образом, точность определения заряда по отсканированному на ПАВИКОМ участку трека ядра длиной 3 мм по совокупности параметров, определяемых созданным программным обеспечением, составит ~2%.

Разработанный метод существенно ускоряет и повышает надежность определения зарядов в фотоэмульсионных экспериментах. Он является необходимым этапом автоматизации современных экспериментов в ядерной физике и востребован рабочими группами эмульсионных экспериментов как внутри России (ФИАН, ИТЭФ, ОИЯИ, ФТИ (СПб), ФТИ (Алма-Ата) и др.) так и за рубежом (Словакия, Румыния, Индия, Китай и др.).

Работа частично поддержана грантом РФФИ № 04-02-16593.

Литература

1. С.Пауэлл, П.Фаулер, Д.Перкинс «Исследование элементарных частиц фотографическим методом», Москва, 1962.

2. Баранов Д.Г., Гагарин Ю.Ф., Н.С.Иванова и др. «Фотометрическое определение заряда ядер в фотоядерной эмульсии» Препринт ФТИ им.А.Ф.Иоффе № 654, Ленинград, 1980.

Войковский Б.А., Галактионов А.И., Третьякова М.И., Чудаков А.Е. «Фотометрирование следов заряженных частиц в фотоэмульсии» ПТЭ, 1957, № 6, стр.38-41.

Воронков А.Е., Соловьева М.Ф., Третьякова М.И., Сухов Л.В., Чернявский М.М. «Опыт работы на приборе по автоматическому измерению ионизации и импульса на следах релятивистских частиц» ПТЭ, 1964, № 4, стр. 75-77.

3. Aleksandrov A.B., Apacheva I.Yu., Feinberg E.L. et al “Completely Automated Measurement Facility (PAVICOM) for Track-Detector Data Processing” Nuclear Instruments&Methods in Physics Research, A, 535 (2004) 542-545

4. Егоров О.К., Полухина Н.Г., Старков Н.И. и др. «Полностью автоматизированный микроскопный комплекс ПАВИКОМ-2» ПТЭ, 2003, № 6, с.133-134.

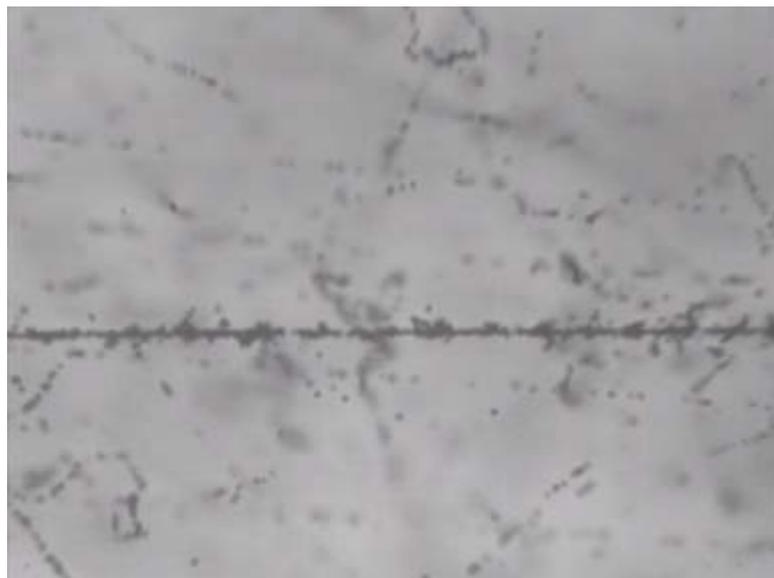


Рис.1.

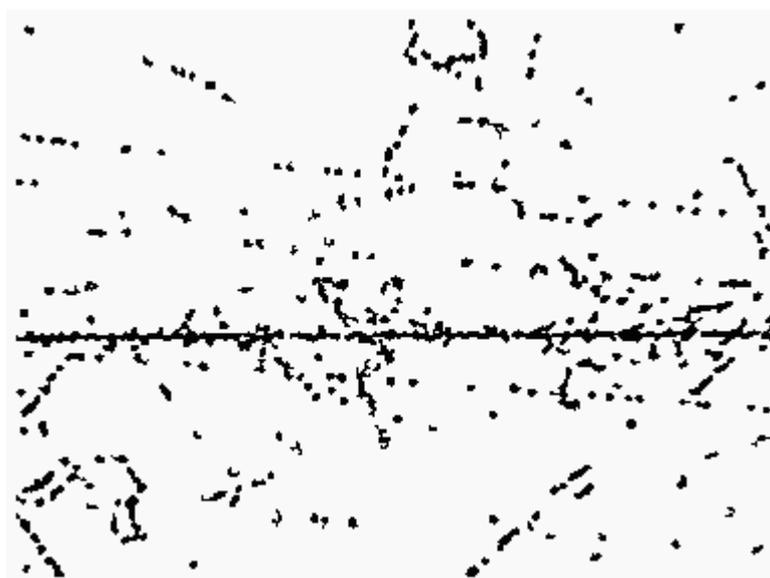


Рис.2

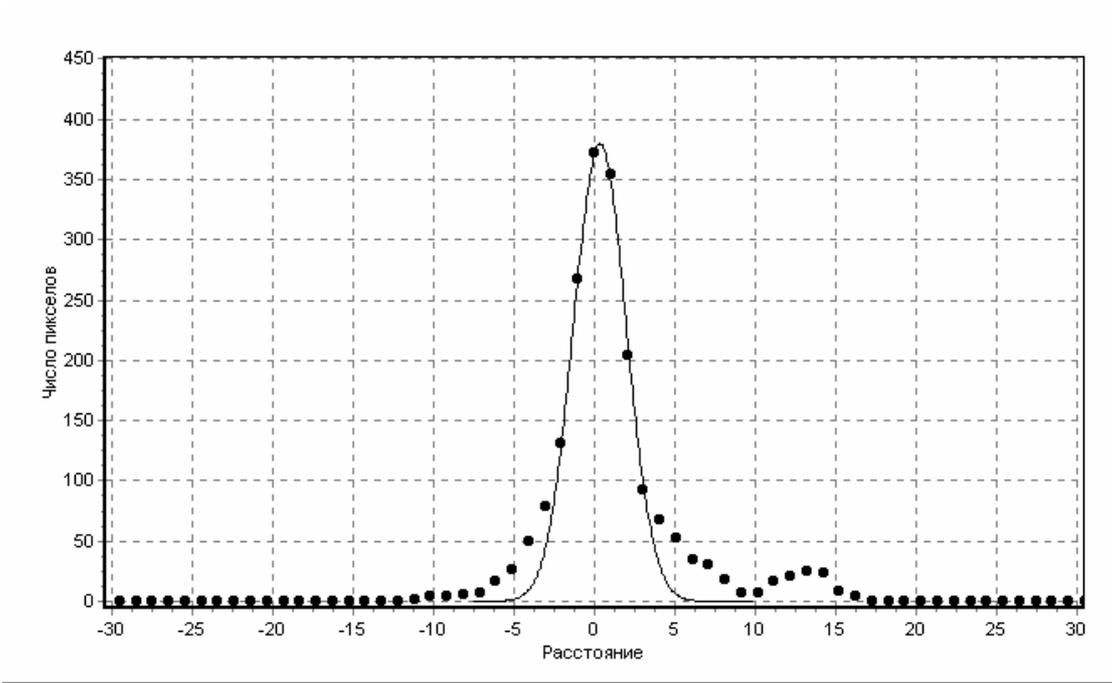


Рис.3

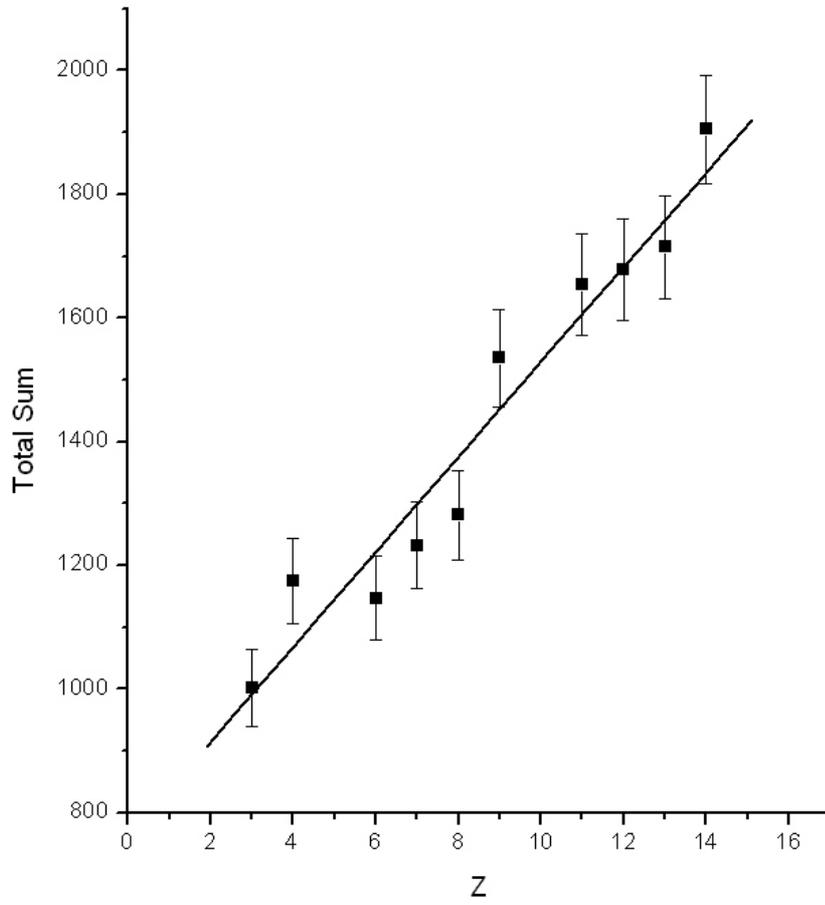


Рис.4

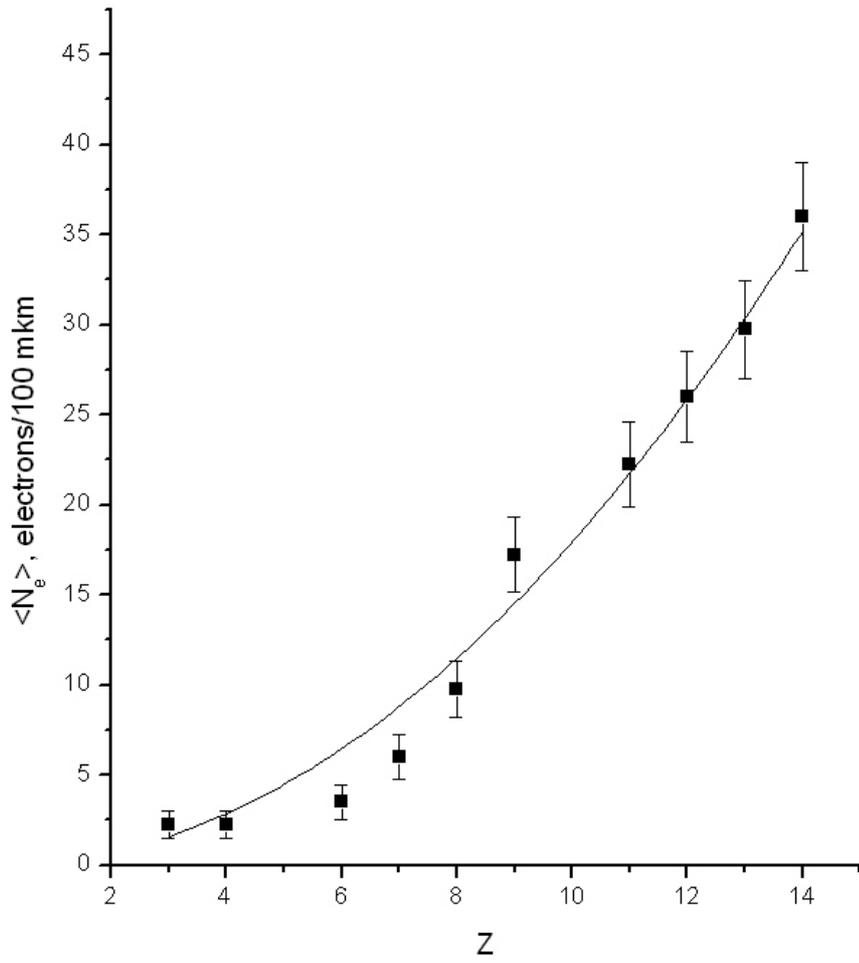


Рис.5

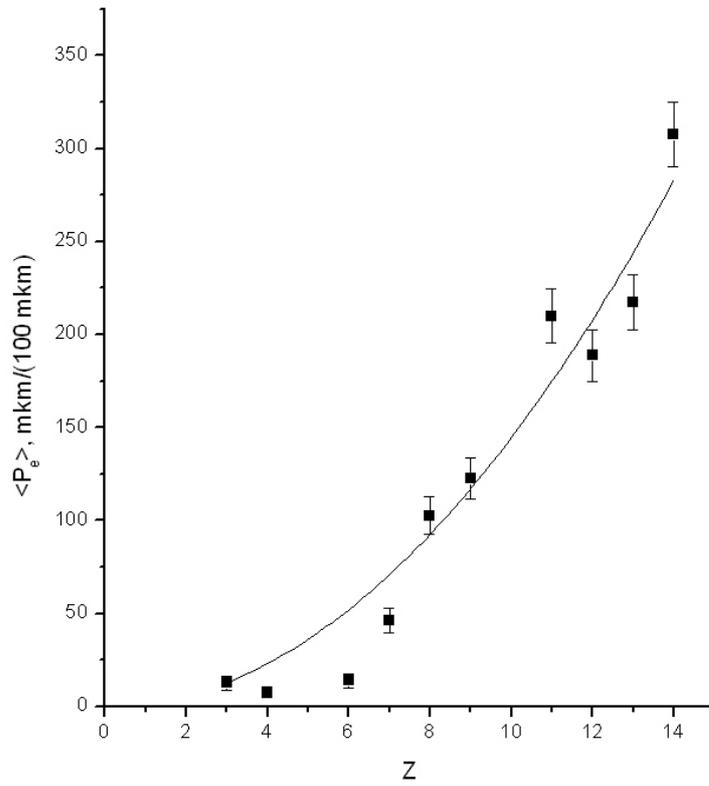


Рис.6

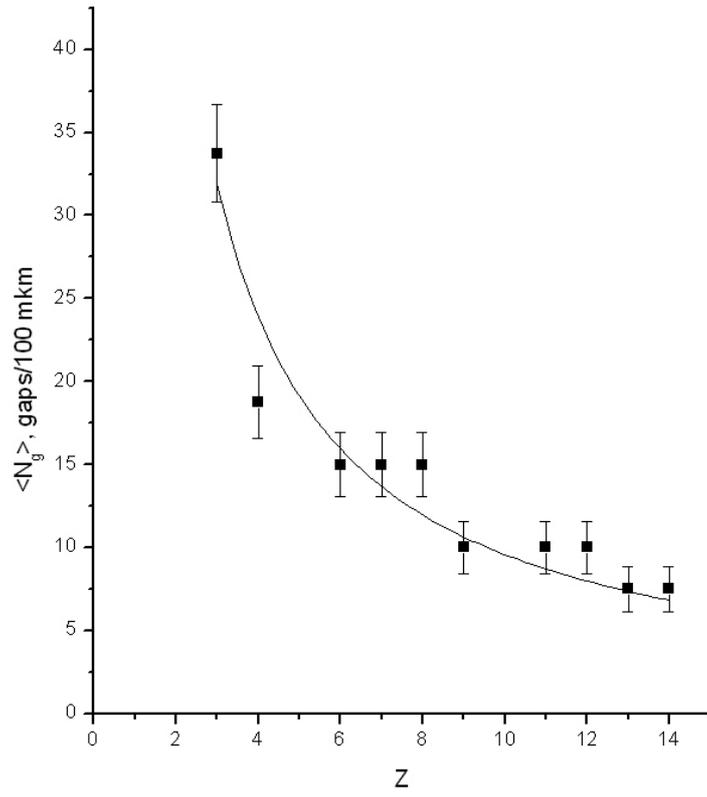


Рис.7

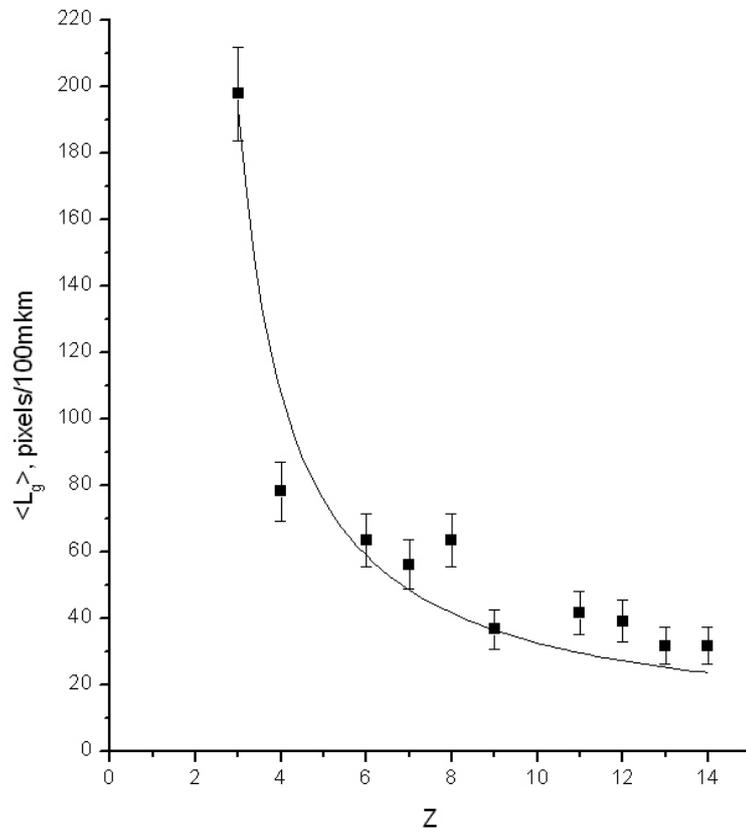


Рис.8

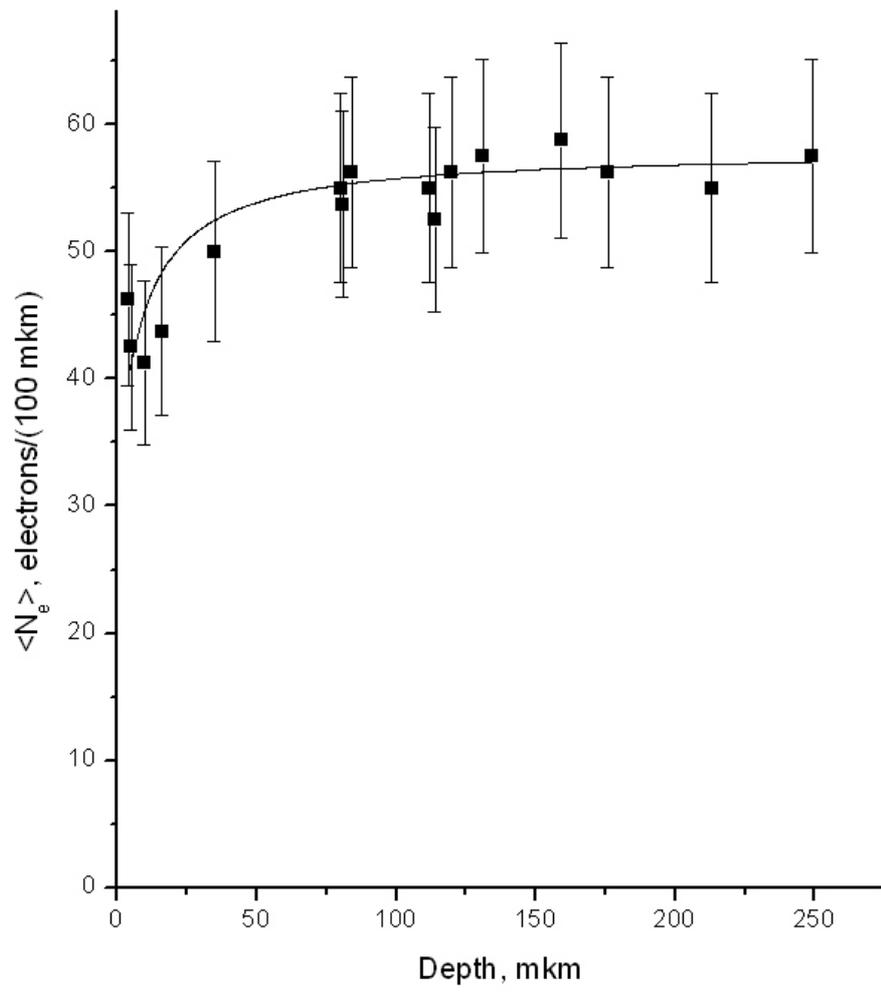


Рис.9