# РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК



ПРЕПРИНТ

А.Б. АЛЕКСАНДРОВ, И.Ю. АПАЧЕВА,

Л.А. ГОНЧАРОВА, Г.И. МЕРЗОН,

Н.Г. ПОЛУХИНА, Н.И. СТАРКОВ,

Е.Л. ФЕЙНБЕРГ

23

МЕТОДИКА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ЭМУЛЬСИОННЫХ ТРЕКЕРОВ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ РЬ-РЬ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ ПРИ ЭНЕРГИИ 158 ГэВ/нуклон

# СОДЕРЖАНИЕ

І. Введение	3
II. Методика исследования взаимодействий ядер атомов свинца с энерги	ией
158 ГэВ/нуклон по данным автоматизированной обработки	5
1. Постановка задачи	5
2. Измерительная система	6
3. Характеристики ядерной эмульсии	7
4. Видеосъемка и обработка изображений	7
4.1. Выделение «черных» пикселей	8
4.2. Фильтрация изображений	11
4.3. Бинаризация изображений	12
4.4. Выделение связных областей (кластеризация)	13
4.5. Сшивка различных полей зрения на одной глубине	14
4.6. Отбор кластеров по их размерам	16
5. Проверка кластеринга	17
6. Реконструкция микротреков.	18
6.1. Восстановление микротрека по цепочке кластеров	
(фитинг)	19
6.2. Отбор кластеров для фитинга. Трекинг	20
6.3. Поиск вершины взаимодействия	23
6.4. Вершинный трекинг	24
6.5. Эффективность трекинга	26
6.6. Метод сшивки двух микротреков (линкинг)	26
6.7. Сшивка микротреков из двух соседних слоев эмульсии	28
7. Поиск оси события	30
III. Заключение	31
IV Литература	32

#### І. Введение

Эксперименты на пучках SPS в ЦЕРН, где ионы свинца ускоряются до энергий 158 ГэВ/нуклон, позволяют исследовать свойства ядерной материи при сверхвысоких плотностях и температурах. Полученные таким образом экспериментальные данные дают возможность изучать особенности угловых распределений частиц, проводить поиск многочастичных корреляций, появление которых можно ожидать при адронизации возбужденной ядерной материи, и анализировать эти распределения с целью поиска сигналов, специфичных для кварк-глюонной плазмы или других состояний, с участием цветных частиц. Основным направлением исследования является поиск возможных сигналов образования суб-адронных состояний при высоких температурах и сверхвысокой плотности материи.

Для изучения коллективных эффектов и особенностей разлета вторичных частиц в столкновениях ядер атомов свинца, ускоренных до энергий 32 ТэВ/ядро, с атомами свинца мишени в сотрудниками ФИАН был подготовлен и успешно осуществлен в Европейском центре ядерных исследований (ЦЕРН) эксперимент ЕМU-15 [1-4]. Эксперимент был проведён в 1996 г. на пучке SPS. Коллаборация ЕМU-15 состояла только из российских участников, что является уникальным для ЦЕРН.

Эмульсионная камера эксперимента ЕМU-15 имела форму цилиндра длиной 260 мм и диаметром 95 мм. Она содержала тонкую (400 мкм) свинцовую мишень и 38 слоев ядерной фотоэмульсии, каждый толщиной 50 мкм, политых на основу толщиной 25 мкм. Один слой ядерной эмульсии располагался непосредственно перед свинцовой мишенью, остальные — после мишени. При такой конструкции толщина камеры составляла всего 0.07 каскадных длин, что очень важно при регистрации центральных столкновений ядер свинца, в которых генерируются тысячи вторичных частиц. Камеры помещались в поперечное магнитное поле напряженностью 2 Т и располагались так, чтобы плоскости мишени и ядерных фотоэмульсий были перпендикулярны пучку ядер Рb. Суммарный поток ядер Pb при облучении каждой камеры составлял около  $10^4$  частиц. В каждой камере было найдено приблизительно 10 центральных Pb-Pb взаимодействий с множественностью более  $10^3$  частиц (критерием отбора центрального события служит большая множественность вторичных заряженных частиц и отсутствие фрагментов с  $Z \ge 2$ ).

Главной методической проблемой эмульсионного эксперимента является трудоемкость обработки и большой объем измерительной работы. Эта методическая проблема в значительной мере была решена благодаря прогрессу, достигнутому в

последние годы в производстве прецизионной измерительной техники, и созданию оптических столов с высокой точностью перемещения по командам от компьютеров, широкому применению современных приборов с зарядовой связью (ССD-камеры) для и оцифровки оптических изображений, а также вычислительным возможностям современных компьютеров. Все это позволило провести полную автоматизацию труда микроскопистов. При измерениях в таком автоматическом режиме оцифрованные изображения следов заряженных частиц и ядер в эмульсии, полученные при помощи ССD-камер, вводятся в компьютеры, математическое обеспечение которых производить поиск, распознавание изучение Такой позволяет И треков. автоматизированный метод измерений в ядерных эмульсиях практически полностью исключает использование изнурительного визуального труда микроскопистов и ускоряет процесс обработки приблизительно на три порядка по сравнению с полуавтоматическими методами. Кроме ускорения измерений, новый метод позволяет обрабатывать большие массивы экспериментальных данных и существенно увеличивать статистику событий в широкой области экспериментов, что ранее было практически нереально.

Впервые полностью автоматизированные системы обработки трековых детекторов появились в Японии в 90-х гг. Всего в мире в настоящее время действует около 40 таких систем, в том числе 20 – в Европе, причем в Европе - в Италии, Франции, Германии в течение последних 2 лет стремительно увеличивается количество таких автоматизированных комплексов [5-10].

В России единственный уникальный комплекс подобного уровня, удовлетворяющий современным мировым стандартам, из двух автоматизированных микроскопов был создан в Физическом институте им. П.Н.Лебедева РАН – это высокотехнологичный полностью автоматизированный измерительный комплекс (ПАВИКОМ) для обработки данных эмульсионных и твердотельных трековых детекторов, используемых в ядерной физике, в физике элементарных частиц и в физике высоких энергий [11]. ПАВИКОМ позволил существенно ускорить и облегчить обработку экспериментального материала и предопределил разработку проектов новых экспериментов, проведение которых связано с использованием больших объёмов мишеней и больших площадей эмульсионных и твердотельных трековых детекторов.

В частности, один из микроскопов комплекса ПАВИКОМ был использован для обработки эмульсионных данных эксперимента EMU-15.

# II. Методика исследования взаимодействий ядер атомов свинца с энергией 158ГэВ/нуклон по данным автоматизированной обработки ядерных эмульсий.

#### 1. Постановка задачи

Для автоматизированной обработки ядерной эмульсии необходимо разработать программное обеспечение для механического передвижения столика микроскопа, видеосъёмки изображений, их обработки и восстановления геометрической картины разлета вторичных заряженных частиц. Проблемы управления механическим передвижением столика микроскопа и видеосъёмки изображений в данной работе не рассматриваются.

Задача обработки изображений разбивается на несколько этапов:

- 1. Предварительный поиск посторонних пятен «черных» пикселей.
- 2. Фильтрация изображений.
- 3. Бинаризация изображений.
- 4. Выделение связных областей (кластеризация).
- 5. Сшивка разных полей зрения одной глубины.
- 6. Отбор кластеров по их размерам.

Результатом обработки изображения является множество кластеров.

Задача восстановления геометрии разлета частиц после ядро-ядерного взаимодействия также разбивается на несколько подзадач:

- 1. Восстановление микротрека по цепочке кластеров (трекинг).
  - 1.1. Вычисление параметров микротрека по заданному набору кластеров (фитинг).
  - 1.2. Отбор кластеров для фитинга без учёта информации о вершине взаимодействия (свободный трекинг).
  - 1.3. Поиск вершины взаимодействия.
  - 1.4. Отбор кластеров для фитинга с учётом информации о вершине взаимодействия (вершинный трекинг).
- 2. Продление микротрека в последующий слой эмульсии.
  - 2.1. Вычисление параметров трека по заданному набору микротреков (линкинг).
  - 2.2. Отбор микротреков для линкинга.
- 3. Поиск направления движения первоначального ядра (поиск оси события).

В результате восстановления геометрии разлета частиц после ядро-ядерного взаимодействия получают псевдобыстротное распределение вторичных частиц.

#### 2. Измерительная система

Проявленная эмульсия обрабатывается на микроскопе МПЭ-11 (ЛОМО) [12-13], на котором смонтирован просмотровый автоматический стол фирмы Carl Zeiss с управлением через контроллер МСU-26 и установлена ССD-камера (Рис. 1).



Рис. 1. Микроскоп ЛОМО МПЭ-11, на котором смонтирован просмотровый автоматический стол фирмы Carl Zeiss с управлением через контроллер MCU-26.

Параметры стола следующие:

- Максимальные смещение по осям X и Y равны 10 см, и по оси Z около 1 см.
- Точность измерения координат равна 0.25 мкм для осей X и Y, и  $3.96 \times 10^{-3}$  мкм для оси Z.

Управление столом осуществляется компьютером при помощи контроллера. ССОкамера имеет размеры  $768 \times 576$  пикселей и глубину цвета 8 бит (256 градаций серого). Изображение в камере создаётся объективом микроскопа, с увеличением до  $60^{x}$ . Аналоговый видеосигнал, формируемый видеокамерой, подаётся на вход аналогоцифрового преобразователя – карты захвата и оцифровки изображения, которая передаёт оцифрованный видеосигнал в память компьютера.

#### 3. Характеристики ядерной эмульсии

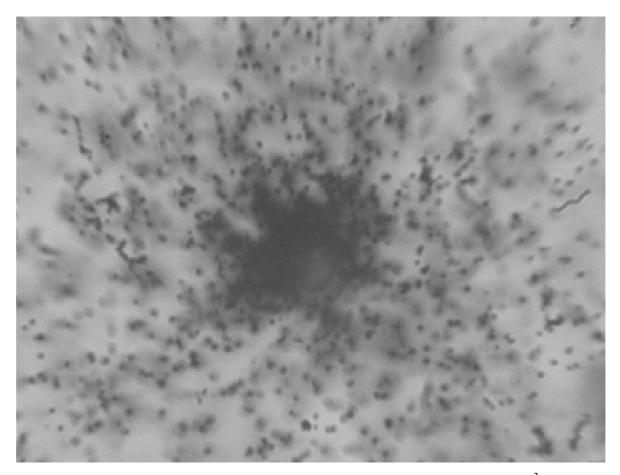
В эксперименте использовалась ядерная фотоэмульсия P2T-50 [14]. При прохождении заряженной частицы в эмульсии образуется трек, который после проявки виден как цепочка зёрен и их скоплений (блобов), плотностью 35±5 блобов на 100 мкм трека. Размер одного блоба примерно 0.7 мкм. Количество фоновых блобов (вуаль): 5.6±1.3 на 100 мкм. Коэффициент усадки эмульсии равен 2.5±0.3

#### 4. Видеосъёмка и обработка изображений

Изображения следов частиц, получаемые ССD-камерой, выглядят как группы тёмных кружков (блобов) на сером фоне (Рис 2.). Для видеосъемки в ядерных фотоэмульсиях эксперимента EMU-15 был выбран размер кадра  $384 \times 288$  пикселей, что при увеличении 60x соответствует полю зрения размером  $82 \times 62$  мкм<sup>2</sup>. Размер одного пикселя равен  $(214\pm2)\times10^{-3}$  мкм.

Каждый пиксель несет некоторую информацию о степени почернения, называемую цветом. Для исходных изображений цвет пикселя лежит в диапазоне от 0 до 255 (8 бит). Для изображений, преобразованных фильтром, цвет описывается действительным числом, а для бинаризованных изображений — «0» или «1».

На заданных глубинах фотоэмульсии осуществляется последовательная съёмка ССDкамерой 25 полей зрения по спирали вокруг предполагаемого центра события. Съёмка каждого поля зрения производится с шагом перекрытия примерно 10 мкм соседних полей зрения для их последующей сшивки.



Puc.2. Центральное поле зрения. Увеличение  $60^x$ .  $Pasmep \sim 82 \times 62 \text{ мкм}^2$ . B центре следы ещё не успели разойтись и идут очень плотно, что делает центральную область более тёмной. Справа видно вытянутое Z-образное пятно, которое является изображением соринки на видеокамере.

### 4.1. Выделение «чёрных» пикселей

Поскольку обработка ядерной эмульсии ведется при увеличении  $60^x$ , то практически невозможно полностью исключить попадание в поле зрения случайной соринки (например, микронного размера ворсинка на видеокамере), что приведет к появлению на изображениях тёмных пятен (множеств «чёрных» пикселей), неотличимых от изображений реальных блобов. Они могут мешать правильному восстановлению микротреков или приводить к появлению ложных микротреков. (Например, на Рис. 2 около правого края хорошо видна Z-образная соринка, но две других соринки неотличимы от блобов).

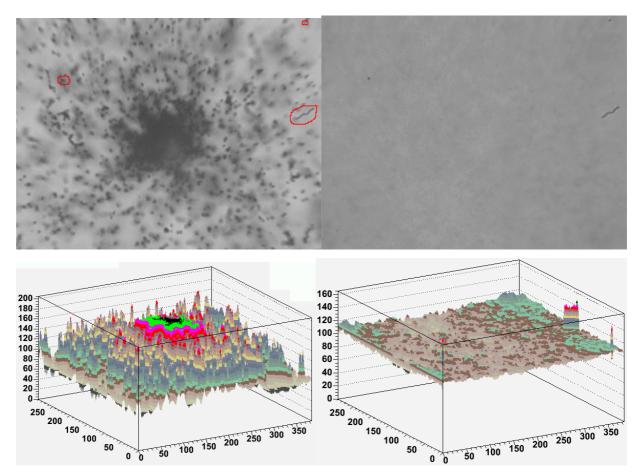


Рис. 3. Слева вверху: исходное изображение. На рисунке отмечены пятна, образованные из множеств «чёрных» пикселей. Слева внизу: координатно-цветовая гистограмма исходного изображения. Справа вверху: изображение, полученное в результате усреднения 25 изображений. Справа внизу: его координатно-цветовая гистограмма. Видно что, в случае усреднения, цвета «чёрных» пикселей не изменяются, что позволяет легко их находить, задавая порог на цвет пикселей.

Предварительный поиск таких пятен (множеств «чёрных» пикселей) основан на том, что на всех изображениях они находятся на одном и том же месте. Если на каком-либо изображении «чёрный» пиксель имеет координаты (*i,j*), то и на всех остальных изображениях пиксель с координатами (*i,j*), будет «чёрным». Поэтому, если усреднить цвета пикселей с одинаковыми координатами по 25 изображениям на одной глубине, то дефектные области должны усилиться: цвет «чёрных» пикселей оказывается значительно больше цвета остальных пикселей (Рис. 3). Теперь пиксели, принадлежащие дефектным областям, можно выделить, задавая порог на цвет, который одинаков для всех полей зрения.

Далее цвета выделенных пикселей усредняются по окрестности размером 20 × 20 пикселей, после чего они становятся практически неотличимы от фона и, тем самым,

исключаются из дальнейшей обработки (Рис. 4). Здесь и далее под фоном подразумевается фон изображения — это пиксели, не принадлежащие изображениям блобов и, следовательно, не несущие какой-либо полезной информации.

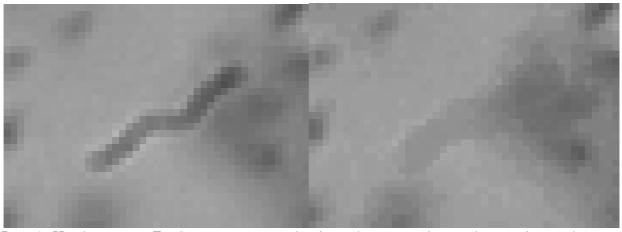


Рис. 4. Изображение Z-образной соринки до (слева) и после (справа) процедуры удаления «чёрных» пикселей.

## 4.2. Фильтрация изображений.

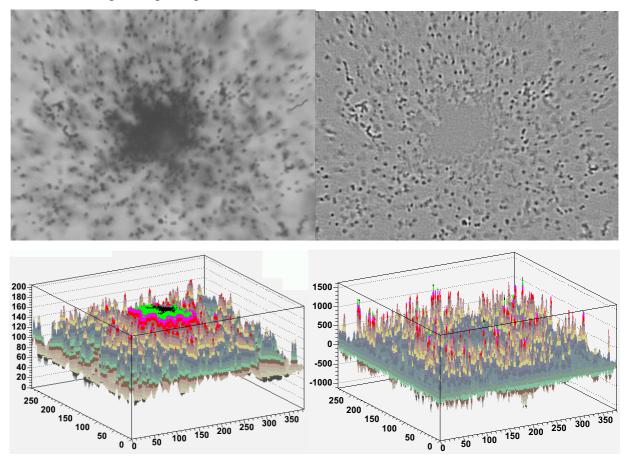


Рис. 5. Слева вверху: исходное изображение. Слева внизу: координатно-цветовая гистограмма исходного изображения. Справа вверху: изображение, обработанное высокочастотным фильтром. Справа внизу: его координатно-цветовая гистограмма. Видно, что фильтр усиливает только пятна определённых размеров и формы.

В математическом отношении фильтрация представляет собой матричную операцию над цветами пикселей:

$$g_{i,j} = TrF^T C_{i,j},$$

$$F = \begin{pmatrix} -3 & -3 & -3 & -3 & -3 \\ -3 & 5 & 5 & 5 & -3 \\ -3 & 5 & 8 & 5 & -3 \\ -3 & 5 & 5 & 5 & -3 \\ -3 & -3 & -3 & -3 & -3 \end{pmatrix},$$

где  $g_{i,j}$  – новый цвет пикселя с координатами (i,j), F – одна из возможных матриц фильров и  $C_{i,j}$  – матрица, составленная из цвета пикселя (i,j) и цветов окружающих его пикселей, так чтобы цвет пикселя (i,j) был центральным элементом матрицы  $C_{i,j}$ . Данное преобразование может выводить цвета пикселей из пространства 256 градаций.

После фильтрации координатно-цветовая гистограмма изображения представляет собой множество узких высоких пиков в тех местах, где на изображении были характерные пятна. Сравнение на Рис. 5 показывает степень усиления блобов при этой операции.

### 4.3. Бинаризация изображений

Бинаризация — это процесс выделения пикселей, принадлежащих изображениям блобов. В начале изображение обрабатывается усредняющим фильтром. Этот фильтр размывает изображения блобов и распределение почернения изображения становится похожим на фоновое, т.е. на распределение, которое получалось бы в отсутствии всех блобов (Рис. 6.).

Для повышения чувствительности в центральной области, где плотность следов вторичных частиц велика, вводится пороговая функция:

$$f_{i,j} = (2\overline{b} - b_{i,j}) \frac{\theta_{\text{max}}}{\overline{b}}$$

где  $b_{i,j}$  – цвет пикселя (i,j) изображения, полученного из исходного путём применения усредняющего фильтра, а  $\bar{b}$  - положение максимума на цветовой гистограмме этого же изображения.

Значение каждого элемента пороговой функции вычисляется по предыдущей формуле, а  $\theta_{\text{max}}$  задаётся на первом шаге, исходя из соображений оптимального выделения кластеров. После этого выделяются (присваивается цвет, равный (I)) пиксели, цвет которых больше чем значение пороговой функции для этого пикселя, остальным присваивается цвет (I)0». В итоге получается бинаризованное изображение, т.е. изображение, пиксели которого могут иметь цвет либо (I)0», либо (I)1».

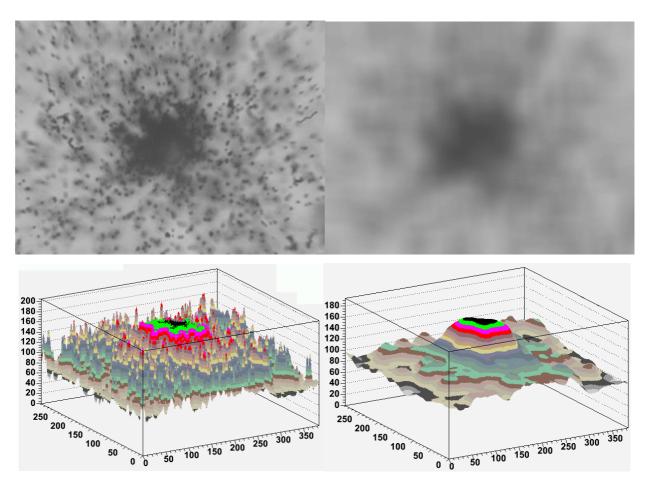


Рис. 6. Слева вверху: исходное изображение. Слева внизу: координатно-цветовая гистограмма исходного изображения. Справа вверху: изображение, обработанное усредняющим фильтром. Справа внизу: его координатно-цветовая гистограмма. Видно, что фильтр размывает изображения всех блобов, оставляя только распределение потемнения, близкое к фоновому.

#### 4.4. Выделение связных областей (кластеризация)

Соседние пиксели с цветом «I», выделенные в процессе бинаризации, объединяются в кластеры, которые отвечают пятнам почернения в ядерной эмульсии. Кластер — это связное множество пикселей с цветом «I». Слово «связное» понимается в том смысле, что любые два пикселя, принадлежащие множеству, можно соединить непрерывной кривой, проходящей только через пиксели того же множества. Непрерывность кривой означает, что пиксели, через которые она проходит, должны примыкать друг к другу только сторонами, но не углами. Используется рекурсивная процедура выделения связных множеств. Зная координаты  $(x_i, y_i)$  каждого пикселя в кластере, можно найти центр масс, средний радиус и площадь кластера.

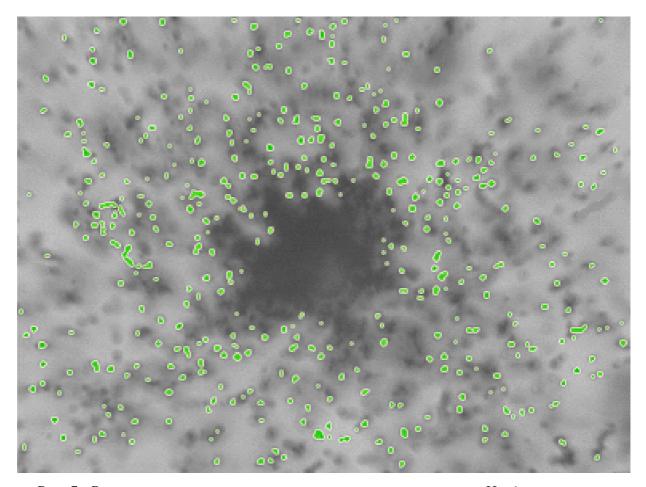


Рис 7. Результат кластеризации центрального поля зрения. Найденные кластеры выделены.

Центр масс кластера находится по очевидным формулам:

$$\overline{x} = \frac{\sum c_{i} x_{i}}{\sum c_{i}}, \sigma_{\overline{x}}^{2} = \frac{\sum \sigma_{x_{i}}^{2} c_{i}^{2}}{(\sum c_{i})^{2}}$$

$$\overline{y} = \frac{\sum c_{i} y_{i}}{\sum c_{i}}, \sigma_{\overline{y}}^{2} = \frac{\sum \sigma_{y_{i}}^{2} c_{i}^{2}}{(\sum c_{i})^{2}},$$

где  $c_i$  – цвет пикселя до бинаризации.

Таким образом, физическим объектам (блобам) сопоставляются математические объекты – кластеры. Результаты кластеризации центрального поля зрения представлены на Рис. 7.

## 4.5. Сшивка различных полей зрения на одной глубине

При сканировании эмульсии, каждому полю зрения ставятся в соответствие координаты (x, y, z), считываемые с контроллера микроскопа. Начало координат каждого поля зрения находится в его геометрическом центре, а оси X и Y параллельны его

сторонам. Координаты кластеров отсчитываются от начала координат того поля зрения, в котором они находятся.

На этапе сшивки производится привязка систем координат полей зрения к системе координат центрального поля зрения. Поскольку поля зрения перекрываются, то на соседних изображениях имеются общие области, содержащие тождественные кластеры. Процедура сшивки производит такой сдвиг соседних полей зрения, чтобы тождественные кластеры совпали с минимальной ошибкой. Для этого в заданной окрестности каждого кластера добавляемого поля зрения (множество B) выбираются кластеры из соседнего к нему поля зрения (множество A), так, чтобы расстояние между ними было не больше заданной величины  $R_0$ . Производится сдвиг всего множества B, так, чтобы центры масс выбранных кластеров совпали. При этом находится количество пар кластеров из разных множеств, таких, что расстояние между кластерами в паре меньше заданной величины  $R_1$ . Если кластеров из A в окрестности  $R_0$  кластера из B более одного, то последовательно рассматривается каждый вариант отождествления кластера из A с кластером из B.

Сдвиг множества  $\mathbf{\textit{B}}$ , при котором совпало максимальное количество кластеров, уточняется методом наименьших квадратов по формулам:

$$\Delta x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} (x_i^A - x_i^B)$$

$$\Delta y = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} (y_i^A - y_i^B)$$

Далее процедура повторяется для всех соседних полей зрения. Блок-схема алгоритма сшивки показана на Рис. 8. Сшитые 25 полей зрения одной глубины показаны на Рис. 9.

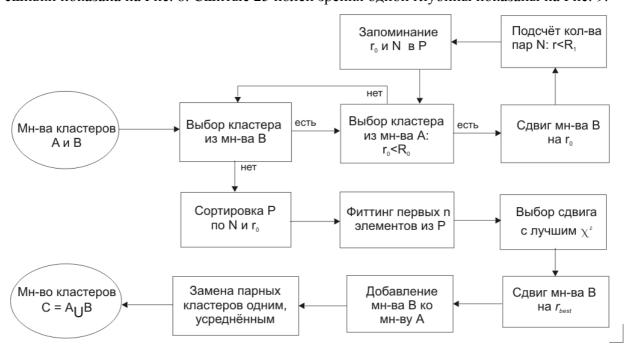


Рис. 8. Блок-схема алгоритма сшивки полей зрения одной глубины.

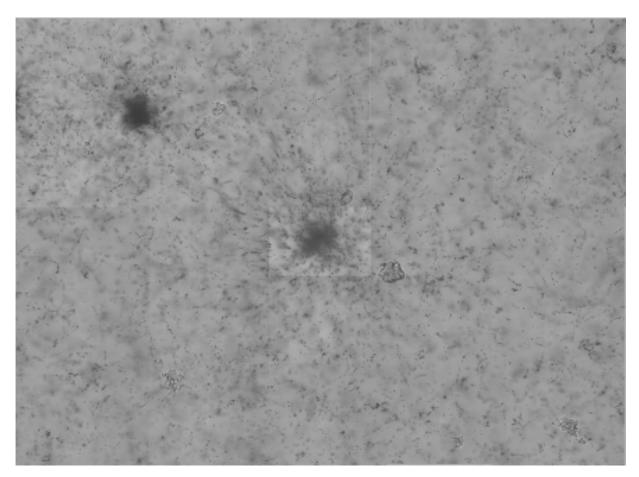


Рис 9. Сиштые 25 полей зрения одной глубины. Размер изображения  $1754 \times 1286$  пикселей, что соответсвует  $377 \times 274$  мкм $^2$ .

#### 4.6. Отбор кластеров по их размерам

Кластеры, сопоставленные блобам, должны иметь примерно те же размеры и форму. Поэтому, следует произвести отбор кластеров по количеству пикселей в кластере для того, чтобы отбросить заведомо большие или малые кластеры. На этом этапе выбираются кластеры, содержащие количество пикселей, которые отвечают строго заданному диапазону. На Рис. 10 показаны распределения количества пикселей в кластере и средних радиусов кластеров соответственно.

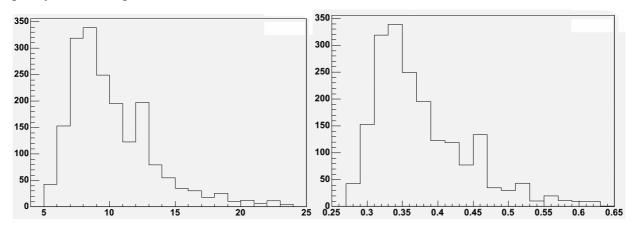


Рис 10. Распределения количества пикселей в кластере (слева) и средних радиусов кластеров (справа).

#### 5. Проверка кластеринга

Для проверки эффективности работы программы кластеринга (т.е. представления блобов в форме кластеров) была проведена методическая видеосъемка одного поля зрения с шагом по глубине  $\frac{1}{4}$  мкм. При таком малом шаге один и тот же блоб будет непременно виден на нескольких глубинах, а значит, ему будут соответствовать несколько кластеров с разной глубиной z и незначительно отличающимися координатами центров (x и y). Был произведён поиск таких кластеров.

На Рис. 11 изображено распределение длин найденных цепочек кластеров. Видно, что при шаге ¼ мкм блоб, в среднем, виден на 6-8 глубинах, т.е. при обычной съёмке (шаг 1 мкм) можно ожидать появления блоба на 1-2 глубинах.

Кластеринг проверялся также и вручную. При такой проверке микроскопист подсчитывал количество блобов, видимое в поле зрения микроскопа. Результат сравнивался с кластерами, найденными в результате автоматического поиска. Эффективность кластеринга при таком методе проверки оказалась 94% для центрального поля зрения и 98% для нецентрального.

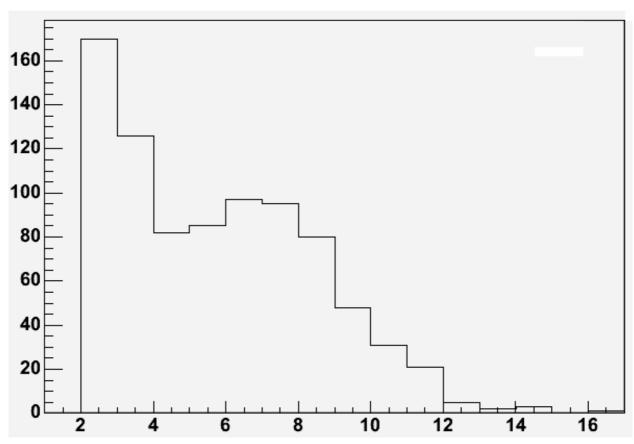


Рис 11. Распределение длин вертикальных цепочек кластеров при сканировании с шагом по z (ось абсцисс) равным ¼ мкм. Видно, что при шаге ¼ мкм блоб, в среднем, виден на 6-8 глубинах, т.е. при обычной съёмке (шаг 1 мкм) можно ожидать появления блоба на 1-2 глубинах.

#### 6. Реконструкция микротреков

В результате выполнения процедуры кластеринга мы имеем множество точек — центров масс кластеров на плоскости. Приписав каждой такой плоскости свою координату Z (глубину поля зрения), мы получим множество кластеров, распределённых в исследуемом объёме. После этого возникает задача нахождения среди этого множества треков частиц. Будем параметризовать микротрек прямой линией, заданной точкой (x,y,z), через которую она проходит, и двумя тангенсами углов наклона (tx,ty) к оси Z, которая считается перпендикулярной к плоскости эмульсии и сонаправленной с пучком частиц. Начало оси Z выбирается на передней (относительно пучка) плоскости мишени.

#### 6.1. Восстановление микротрека по цепочке кластеров – фитинг.

Одна из подзадач, которую необходимо решить, это восстановление микротрека по заданному набору кластеров (проведение прямой линии через известный набор координат центров масс кластеров — фитинг). Эта подзадача решается методом наименьших квадратов (МНК) [15].

Введём следующие обозначения:

 $x_i, y_i, z_i$  - координаты центра i-го кластера в треке;

 $\vec{p} = (x \ tx \ y \ ty)^T$  – вектор параметров микротрека, где tx и ty – тангенсы углов между осью Z и проекцией микротрека на плоскость XZ и YZ соответственно;

 $f_x^i(\vec{p})=x+z_itx$  ,  $f_y^i(\vec{p})=y+z_ity$  — координаты точек пересечения микротрека с плоскостями  $Z=z_i$ ;

$$\overrightarrow{f(\overrightarrow{p})} = \begin{pmatrix} \overrightarrow{f_x} \\ \overrightarrow{f_y} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_x^0 & f_x^1 & \cdots & f_x^{n-1} & f_y^0 & f_y^1 & \cdots & f_y^{n-1} \end{pmatrix}^T - функция модели микротрека.$$

Она составлена из координат точек пересечения микротрека с плоскостями  $Z=z_i$ .

$$w_{x} = \begin{pmatrix} \frac{1}{\sigma_{x_{0}}^{2}} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma_{x_{1}}^{2}} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \frac{1}{\sigma_{x_{n-1}}^{2}} \end{pmatrix}, \quad w_{y} = \begin{pmatrix} \frac{1}{\sigma_{y_{0}}^{2}} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma_{y_{1}}^{2}} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \frac{1}{\sigma_{y_{n-1}}^{2}} \end{pmatrix};$$

$$W = \begin{pmatrix} w_x & 0 \\ 0 & w_y \end{pmatrix}$$
 - весовая матрица;

 $\vec{m} = \begin{pmatrix} x_0 & x_1 & \cdots & x_{n-1} & y_0 & y_1 & \cdots & y_{n-1} \end{pmatrix}^T$ . – вектор измерений. Он составлен из координат кластеров.

Будем использовать линеаризованную функцию модели микротрека:

$$\overrightarrow{f}(\overrightarrow{p}) = \overrightarrow{f}(\overrightarrow{p_0}) + A \cdot (\overrightarrow{p} - \overrightarrow{p_0}) + O((\overrightarrow{p} - \overrightarrow{p_0})^2),$$
 где  $A = \frac{\partial \overrightarrow{f}}{\partial \overrightarrow{p}}|_{\overrightarrow{p} = \overrightarrow{p_0}}$ .

МНК минимизирует функцию

$$M = \left(\overrightarrow{f}(\overrightarrow{p_0}) + A \cdot (\overrightarrow{p} - \overrightarrow{p_0}) - \overrightarrow{m}\right)^T W \left(\overrightarrow{f}(\overrightarrow{p_0}) + A \cdot (\overrightarrow{p} - \overrightarrow{p_0}) - \overrightarrow{m}\right).$$

Её минимум находится в точке

$$\overrightarrow{p} = \overrightarrow{p_0} + (A^T W A)^{-1} A^T W (\overrightarrow{m} - \overrightarrow{f}(\overrightarrow{p_0})).$$

Несложные математические выкладки приводят к следующим формулам:

$$tx = \frac{\sum_{i=0}^{n-1} \frac{1}{\sigma_{x_i}^2} \sum_{i=0}^{n-1} \frac{x_i z_i}{\sigma_{x_i}^2} - \sum_{i=0}^{n-1} \frac{x_i}{\sigma_{x_i}^2} \sum_{i=0}^{n-1} \frac{z_i}{\sigma_{x_i}^2}}{\sum_{i=0}^{n-1} \frac{1}{\sigma_{x_i}^2} \sum_{i=0}^{n-1} \frac{z_i^2}{\sigma_{x_i}^2} - \sum_{i=0}^{n-1} \frac{z_i}{\sigma_{x_i}^2} \sum_{i=0}^{n-1} \frac{z_i}{\sigma_{x_i}^2}}$$

$$ty = \frac{\sum_{i=0}^{n-1} \frac{1}{\sigma_{y_i}^2} \sum_{i=0}^{n-1} \frac{y_i z_i}{\sigma_{y_i}^2} - \sum_{i=0}^{n-1} \frac{y_i}{\sigma_{y_i}^2} \sum_{i=0}^{n-1} \frac{z_i}{\sigma_{y_i}^2}}{\sum_{i=0}^{n-1} \frac{1}{\sigma_{y_i}^2} \sum_{i=0}^{n-1} \frac{z_i^2}{\sigma_{x_i}^2} - \sum_{i=0}^{n-1} \frac{z_i}{\sigma_{y_i}^2} \sum_{i=0}^{n-1} \frac{z_i}{\sigma_{y_i}^2}}$$

$$x = tx \cdot z + \frac{\sum_{i=0}^{n-1} \frac{x_i}{\sigma_{x_i}^2} \sum_{i=0}^{n-1} \frac{z_i^2}{\sigma_{x_i}^2} - \sum_{i=0}^{n-1} \frac{z_i}{\sigma_{y_i}^2} \sum_{i=0}^{n-1} \frac{x_i z_i}{\sigma_{x_i}^2}}{\sum_{i=0}^{n-1} \frac{1}{\sigma_{x_i}^2} \sum_{i=0}^{n-1} \frac{z_i^2}{\sigma_{x_i}^2} - \sum_{i=0}^{n-1} \frac{z_i}{\sigma_{x_i}^2} \sum_{i=0}^{n-1} \frac{z_i}{\sigma_{x_i}^2}}$$

$$y = ty \cdot z + \frac{\sum_{i=0}^{n-1} \frac{y_i}{\sigma_{y_i}^2} \sum_{i=0}^{n-1} \frac{z_i^2}{\sigma_{y_i}^2} - \sum_{i=0}^{n-1} \frac{z_i}{\sigma_{y_i}^2} \sum_{i=0}^{n-1} \frac{z_i}{\sigma_{y_i}^2}}{\sum_{i=0}^{n-1} \frac{z_i^2}{\sigma_{y_i}^2} - \sum_{i=0}^{n-1} \frac{z_i}{\sigma_{y_i}^2} \sum_{i=0}^{n-1} \frac{z_i}{\sigma_{y_i}^2}}$$

Параметр трека z находится путём усреднения z-координат кластеров, входящих в микротрек:

$$z = \frac{\sum_{i=0}^{n-1} \frac{z_i}{\sigma_{x_i}^2} + \sum_{i=0}^{n-1} \frac{z_i}{\sigma_{y_i}^2}}{\sum_{i=0}^{n-1} \frac{1}{\sigma_{x_i}^2} + \sum_{i=0}^{n-1} \frac{1}{\sigma_{y_i}^2}}.$$

#### 6.2. Отбор кластеров для фитинга (трекинг)

Микротрек (цепочка кластеров), пересекающий плоскость ядерной фотоэмульсии, строится в соответствии со следующими общими требованиями:

- С каждой глубины внутри эмульсии (плоскости кластеров) может входить не более одного кластера.
- Расстояние между двумя последовательными кластерами не должно превышать заданной величины.
  - Микротрек должен иметь не менее заданного количества кластеров.

Большое количество кластеров не позволяет осуществить перебор всех вариантов цепочек кластеров во всём объёме за разумное время. Поэтому поиск микротреков проводился в несколько этапов.

#### Свободный трекинг.

Выбирается произвольный кластер ( $x_{i}^{\theta}, v_{i}^{\theta}$ ) на ближайшей к мишени (с наименьшим **Z**  $= z^{\theta}$ ) плоскости эмульсии. Задаётся начальное направление (в качестве которого выбирается перпендикуляр)  $(tx_{\theta}, ty_{\theta})$ , и вокруг него строится конус с вершиной в  $(x_{\theta}^{\theta}, y_{\theta}^{\theta})$  $z^{\theta}$ ) и заданными углами ( $s^{\theta}_{x}$ ,  $s^{\theta}_{y}$  между образующими и осью ( $tx_{\theta}ty_{\theta}$ ). Затем строим вокруг выбранного кластера сферу, которая заведомо захватывает несколько глубин, и отбираем кластеры, которые попадают в сферу. Затем по этим кластерам строим поочередно все возможные комбинации микротреков. С последующих плоскостей отбираются все кластеры, попадающие в конус (множество C). Поочерёдным добавлением одного кластера из C, строится множество цепочек кластеров. Производится фитинг каждой цепочки и полученное множество микротреков сортируется по  $\chi^2$ . При необходимости, для увеличения скорости счёта и уменьшения использования памяти, в последующих вычислениях могут участвовать не все микротреки, а лишь заданное их количество с лучшими  $\chi^2$ . Для каждой цепочки кластеров вышеописанная процедура повторяется. При этом за ось конуса берётся направление микротрека соответствующего цепочке, а вершина конуса строится в точке пересечения этого микротрека с плоскостью Z=zпоследнего кластера в цепочке. В итоге получается множество микротреков (цепочек кластеров), начинающихся из одного общего кластера  $(x^{\theta}_{i}, y^{\theta}_{i})$ . Выбирается трек с наименьшим  $\chi^2$  и числом кластеров не меньшим заданного количества в соответствующей ему цепочке. Кластеры, входящие в микротрек, маркируются как использованные и в дальнейшем трекинге не участвуют. Этой же процедуре подвергаются и все кластеры (кроме уже использованных) на всех следующих плоскостях, так что начало микротрека необязательно находится на самой верхней плоскости. Трекинг прекращается если пройдены все слои, или в нескольких слоях кандидаты отсутствуют. Таким образом, получается набор микротреков некоторых направлений. Блок-схема алгоритма свободного трекинга показана на Рис. 12 и проиллюстрирована на Рис. 13.

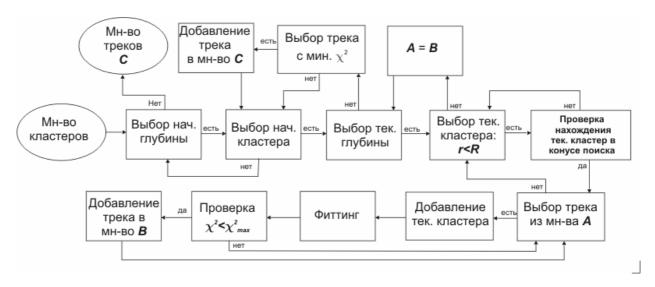


Рис 12. Блок-схема алгоритма свободного трекинга.

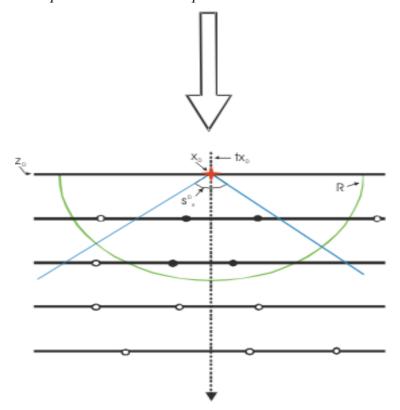


Рис 13. Иллюстрация свободного трекинга (см. текст). Сплошные горизонтальные линии отвечают различным глубинам эмульсии. Ось Z направлена вниз и сонаправлена с пучком частиц (стрелка). Вершина конуса находится в текущем кластере. Направление, вокруг которого строится конус, показано пунктирной линией. Кластеры, попавшие внутрь конуса и расстояние до которых не превышает R, (отмечены чёрными кружками) будут использованы при наращивании трека, остальные кластеры (белые кружки) игнорируются.

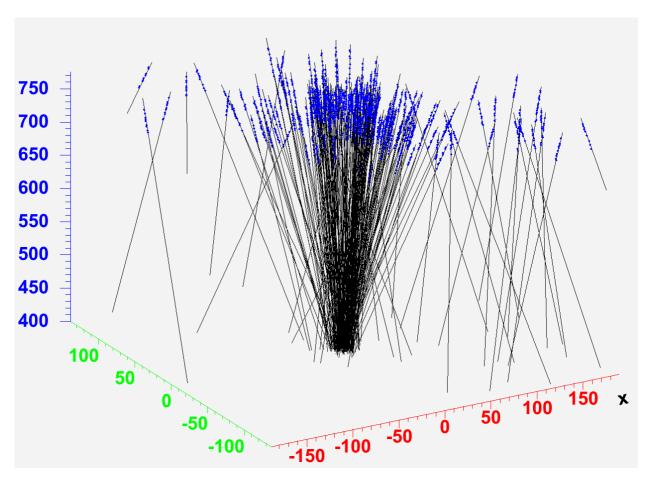


Рис. 14. Результат свободного трекинга. Видно что большинство частиц вылетают из общего центра с  $z \sim 400$  мкм.

# 6.3. Поиск вершины взаимодействия

Алгоритм поиска вершины взаимодействия изображен на Рис. 15. Изначально в множество A входят все найденные микротреки. Чтобы найти начальные значения координат вершины, для каждой пары микротреков из множества A производится поиск пар точек наибольшего сближения (множество B). Находится первоначальное среднее значение  $\mu$  координат точек из B.

Для каждого трека из A находится точка наибольшего сближения с  $\mu$  (множество C) и строятся координатные распределения этих точек (рис. 16). Из гистограмм распределений находятся новые значения  $\mu$  и их ошибки  $\sigma$ . Из множества A исключаются все микротреки, для которых точки наибольшего сближения с  $\mu$  лежат на расстояниях превышающих  $3\sigma$ . Затем снова строится множество C, и процедура повторяется до тех пор, пока все микротреки из A не окажутся внутри  $3\sigma$ , т.е. когда из A нельзя будет исключить ни один микротрек. Областью вершины считается эллиптический цилиндр с размерами осей эллипса по X и Y, зависящими от измерительных ошибок, и высотой Z равной толщине мишени.



Рис. 15. Блок-схема алгоритма поиска вершины взаимодействия.

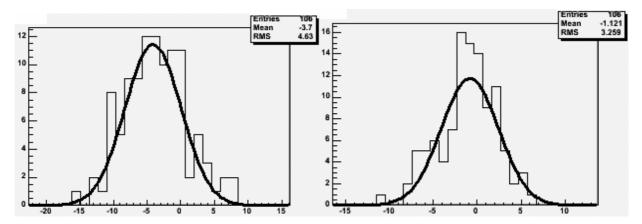


Рис. 16. Пример распределений (х слева и у справа), получаемых при поиске вершины взаимодействия.

#### 6.4. Вершинный трекинг.

Этот вариант трекинга учитывает, что в эксперименте EMU-15 изучаются центральные столкновения. В этом случае проекция события на плоскость (XY), перпендикулярную пучку, имеет ярко выраженный центр, координаты которого ( $x^c$  и  $y^c$ ) могут быть определены с хорошей точностью. В алгоритме задаётся цилиндр, ось которого параллельна оси Z, и проходит через точку ( $x^c, y^c, \theta$ ). Сверху и снизу цилиндр ограничен плоскостями, перпендикулярными оси Z ( $Z = z^c_1$  и  $Z = z^c_2$ ) (Рис. 17,18,19).

Далее выбирается произвольный кластер ( $x^{\theta}_{i}$ ,  $y^{\theta}_{i}$ ) на верхней (с наименьшим  $Z = z^{\theta}$ ) плоскости эмульсии. Со всех следующих слоёв отбираются кластеры (множество C) такие, что прямая, соединяющая любой кластер из C с кластером ( $x^{\theta}_{i}$ ,  $y^{\theta}_{i}$ ), проходит через заданный выше цилиндр. Поочерёдным добавлением одного кластера из C, строится множество цепочек кластеров. Производится фитинг каждой цепочки и полученное множество микротреков сортируется по  $\chi^{2}$ . При необходимости, для увеличения скорости счёта и уменьшения использования памяти, в последующих вычислениях могут участвовать не все микротреки, а лишь заданное их количество с лучшими  $\chi^{2}$ . Для каждой цепочки кластеров вышеописанная процедура повторяется. В итоге получается множество микротреков (цепочек кластеров), начинающихся из одного общего кластера ( $x^{\theta}_{i}$ ,  $y^{\theta}_{i}$ ). Выбирается микротрек, проходящий через цилиндр, с наименьшим  $\chi^{2}$  и с числом кластеров в соответствующей ему цепочке, не меньшим заданного количества. Кластеры, входящие в микротрек, маркируются как использованные и в дальнейшем трекинге не

участвуют. Этой же процедуре подвергаются и другие кластеры (кроме уже использованных) во всех следующих плоскостях, так что начало микротрека необязательно находится на самой верхней плоскости. Далее эта процедура повторяется для следующего слоя.



Рис. 17. Блок-схема алгоритма свободного трекинга.

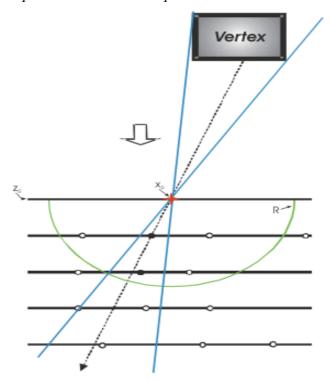


Рис. 18. Иллюстрация вершинного трекинга (см. текст). Сплошные горизонтальные линии отвечают различным глубинам эмульсии. Ось Z направлена вниз и сонаправлена с пучком (стрелка). Вершина конуса находится в текущем. Направление, вокруг которого строится конус, показано пунктирной линией. Кластеры, попавшие внутрь конуса и расстояние до которых не превышает R, (отмечены чёрными кружками) используются при наращивании трека, остальные кластеры (белые кружки) игнорируются.

#### 6.5. Эффективность трекинга

Эффективность трекинга находилась двумя способами: вручную и с помощью генерированного события прохождения заряженной частицы через эмульсию.

При ручной проверке микроскопист ищет микротреки в эмульсии с помощью микроскопа. Результат сравнивают с микротреками, найденными при автоматическом поиске. Эффективность трекинга равна 75% для центрального поля зрения и 95% для нецентрального.



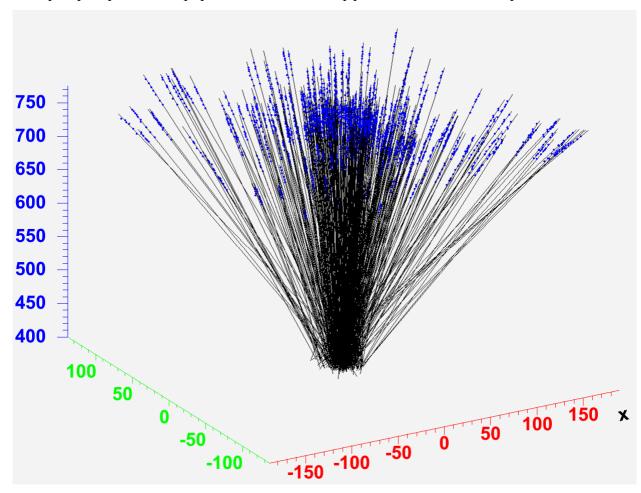


Рис. 19. Результат вершинного трекинга.

#### 6.6. Метод сшивки двух микротреков (линкинг)

Сшивка треков производится путём вычисления параметров трека, наилучшим образом фиттирующего заданный набор микротреков. Эта задача решается методом наименьших квадратов и во многом схожа с задачей фиттинга.

Введём следующие обозначения:

 $x_i, y_i, z_i, tx_i, ty_i$  - параметры i-го трека;

$$\vec{p} = (x tx y ty)^T$$
 - вектор параметров трека;

 $f_x^i(\vec{p})=x+z_itx$  ,  $f_y^i(\vec{p})=y+z_ity$  - координаты точек пересечения трека с плоскостями  $Z=z_i;$ 

$$\overrightarrow{f_{tx}} = \begin{pmatrix} tx & tx & \cdots & tx \end{pmatrix}^T, \quad \overrightarrow{f_{ty}} = \begin{pmatrix} ty & ty & \cdots & ty \end{pmatrix}^T;$$

$$\overrightarrow{f(\overrightarrow{p})} = \left( \left( \overrightarrow{f_x} \right)^T \quad \left( \overrightarrow{f_y} \right)^T \quad \left( \overrightarrow{f_{tx}} \right)^T \quad \left( \overrightarrow{f_{ty}} \right)^T \right)^T - функция модели трека;$$

$$w_{x} = \begin{pmatrix} \frac{1}{\sigma_{x_{0}}^{2}} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma_{x_{1}}^{2}} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \frac{1}{\sigma_{x_{n-1}}^{2}} \end{pmatrix}; \quad w_{y} = \begin{pmatrix} \frac{1}{\sigma_{y_{0}}^{2}} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma_{y_{1}}^{2}} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \frac{1}{\sigma_{y_{n-1}}^{2}} \end{pmatrix};$$

$$w_{tx} = \begin{pmatrix} \frac{1}{\sigma_{tx_0}^2} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma_{tx_1}^2} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \frac{1}{\sigma_{tx_{n-1}}^2} \end{pmatrix}; \quad w_{ty} = \begin{pmatrix} \frac{1}{\sigma_{ty_0}^2} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma_{ty_1}^2} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \frac{1}{\sigma_{ty_{n-1}}^2} \end{pmatrix};$$

$$W = egin{pmatrix} w_x & 0 & 0 & 0 \ 0 & w_y & 0 & 0 \ 0 & 0 & w_{tx} & 0 \ 0 & 0 & 0 & w_{ty} \end{pmatrix}$$
 - весовая матрица;

$$\overrightarrow{m} = \begin{pmatrix} x_0 & x_1 & \cdots & x_{n-1} & y_0 & y_1 & \cdots & y_{n-1} & tx_0 & tx_1 & \cdots & tx_{n-1} & ty_0 & ty_1 & \cdots & ty_{n-1} \end{pmatrix}^T -$$
 вектор измерений.

МНК использует линеаризованную функцию модели трека:

$$\overrightarrow{f}(\overrightarrow{p}) = \overrightarrow{f}(\overrightarrow{p_0}) + A \cdot (\overrightarrow{p} - \overrightarrow{p_0}) + O((\overrightarrow{p} - \overrightarrow{p_0})^2),$$
 где  $A = \frac{\partial \overrightarrow{f}}{\partial \overrightarrow{p}}|_{\overrightarrow{p} = \overrightarrow{p_0}}$ .

Применяемый метод минимизирует функцию

$$M = \left(\overrightarrow{f}(\overrightarrow{p_0}) + A \cdot (\overrightarrow{p} - \overrightarrow{p_0}) - \overrightarrow{m}\right)^T W \left(\overrightarrow{f}(\overrightarrow{p_0}) + A \cdot (\overrightarrow{p} - \overrightarrow{p_0}) - \overrightarrow{m}\right).$$

Её минимум находится в точке

$$\overrightarrow{p} = \overrightarrow{p_0} + (A^T W A)^{-1} A^T W (\overrightarrow{m} - \overrightarrow{f}(\overrightarrow{p_0})).$$

Вычисления приводят к следующим формулам:

$$tx = \frac{\sum_{i=0}^{N-1} \frac{1}{\sigma_{x_i}^2} \left(\sum_{i=0}^{N-1} \frac{x_i z_i}{\sigma_{x_i}^2} + \sum_{i=0}^{N-1} \frac{tx_i}{\sigma_{tx_i}^2}\right) - \sum_{i=0}^{N-1} \frac{x_i}{\sigma_{x_i}^2} \sum_{i=0}^{N-1} \frac{z_i}{\sigma_{x_i}^2}}{\sum_{i=0}^{N-1} \frac{1}{\sigma_{x_i}^2} \left(\sum_{i=0}^{N-1} \frac{z_i^2}{\sigma_{x_i}^2} + \sum_{i=0}^{N-1} \frac{1}{\sigma_{tx_i}^2}\right) - \sum_{i=0}^{N-1} \frac{z_i}{\sigma_{x_i}^2} \sum_{i=0}^{N-1} \frac{z_i}{\sigma_{x_i}^2}$$

$$ty = \frac{\sum_{i=0}^{N-1} \frac{1}{\sigma_{y_i}^2} \left(\sum_{i=0}^{N-1} \frac{y_i z_i}{\sigma_{y_i}^2} + \sum_{i=0}^{N-1} \frac{ty_i}{\sigma_{y_i}^2}\right) - \sum_{i=0}^{N-1} \frac{y_i}{\sigma_{y_i}^2} \sum_{i=0}^{N-1} \frac{z_i}{\sigma_{y_i}^2}}{\sum_{i=0}^{N-1} \frac{1}{\sigma_{y_i}^2} \left(\sum_{i=0}^{N-1} \frac{z_i^2}{\sigma_{y_i}^2} + \sum_{i=0}^{N-1} \frac{1}{\sigma_{y_i}^2}\right) - \sum_{i=0}^{N-1} \frac{z_i}{\sigma_{y_i}^2} \sum_{i=0}^{N-1} \frac{z_i}{\sigma_{y_i}^2}$$

$$x = \frac{\left(\sum_{i=0}^{N-1} \frac{z_i^2}{\sigma_{x_i}^2} + \sum_{i=0}^{N-1} \frac{1}{\sigma_{x_i}^2}\right) \sum_{i=0}^{N-1} \frac{x_i}{\sigma_{x_i}^2} - \left(\sum_{i=0}^{N-1} \frac{x_i z_i}{\sigma_{x_i}^2} + \sum_{i=0}^{N-1} \frac{tx_i}{\sigma_{x_i}^2}\right) \sum_{i=0}^{N-1} \frac{z_i}{\sigma_{x_i}^2}}{\sum_{i=0}^{N-1} \frac{1}{\sigma_{x_i}^2}} + z \cdot tx$$

$$y = \frac{\left(\sum_{i=0}^{N-1} \frac{z_i^2}{\sigma_{y_i}^2} + \sum_{i=0}^{N-1} \frac{1}{\sigma_{y_i}^2}\right) \sum_{i=0}^{N-1} \frac{y_i}{\sigma_{y_i}^2} - \left(\sum_{i=0}^{N-1} \frac{z_i}{\sigma_{y_i}^2} + \sum_{i=0}^{N-1} \frac{ty_i}{\sigma_{y_i}^2}\right) \sum_{i=0}^{N-1} \frac{z_i}{\sigma_{y_i}^2}}{\sum_{i=0}^{N-1} \frac{z_i}{\sigma_{y_i}^2}} + z \cdot ty}$$

$$\sum_{i=0}^{N-1} \frac{1}{\sigma_{y_i}^2} \left(\sum_{i=0}^{N-1} \frac{z_i^2}{\sigma_{y_i}^2} + \sum_{i=0}^{N-1} \frac{1}{\sigma_{y_i}^2}\right) - \sum_{i=0}^{N-1} \frac{z_i}{\sigma_{y_i}^2} \sum_{i=0}^{N-1} \frac{z_i}{\sigma_{y_i}^2} + z \cdot ty}$$

Параметр z трека находится усреднением z-параметров треков, входящих в новый трек:

$$z = \frac{\sum_{i=0}^{N-1} \frac{z_i}{\sigma_{x_i}^2} + \sum_{i=0}^{N-1} \frac{z_i}{\sigma_{y_i}^2}}{\sum_{i=0}^{N-1} \frac{1}{\sigma_{x_i}^2} + \sum_{i=0}^{N-1} \frac{1}{\sigma_{y_i}^2}}.$$

#### 6.7 Сшивка микротреков из двух соседних слоёв эмульсии

Для более точного нахождения такой физической характеристики как псевдобыстрота производится сшивка микротреков из соседних слоёв эмульсии (Рис. 20). Для этого каждый микротрек из эмульсионного слоя A сшивается с каждым микротреком из слоя B. Из всего многообразия вариантов выбирался трек с минимальным  $\chi^2$  и удовлетворяющий критерию попадания в вершину взаимодействия. Данная процедура повторяется для всех микротреков. В результате такой процедуры получается множество треков, состоящих из двух микротреков, и имеющих меньшую угловую неопределённость, чем каждый отдельный микротрек.

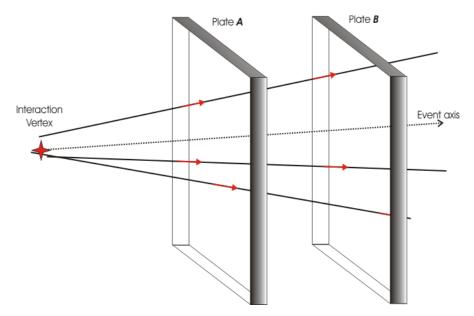


Рис 20. Сишвка двух различных слоёв эмульсии (см. текст).

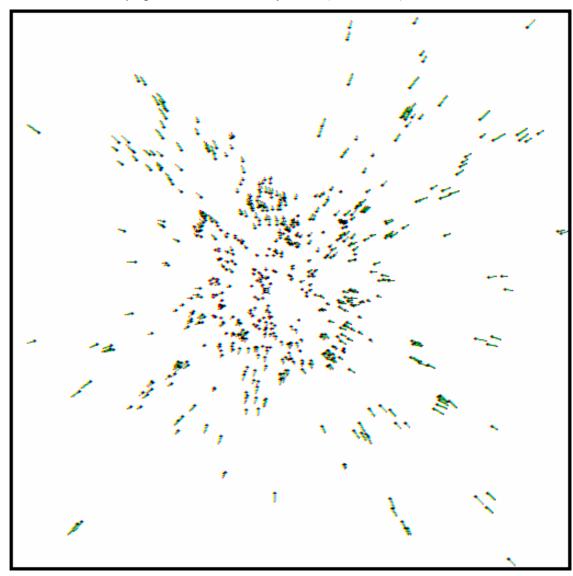


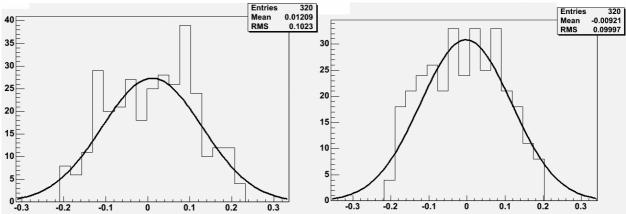
Рис. 21. Результат трекинга и сшивки двух слоёв эмульсии: мишенная диаграмма 647 частиц.

#### 7. Поиск оси события.

Направление движения первоначального ядра может быть не перпендикулярно плоскости события вследствие расхождения пучка. В то же время ось события связана с направлением движения первоначального ядра. Алгоритм поиска оси события (Рис. 22) во многом схож с алгоритмом поиска вершины взаимодействия. На основе данных о вершине взаимодействия c строится множество точек максимального сближения треков из множества A с вершиной c. Из первоначального множества треков A исключаются все треки, точки максимального сближения которых находятся за  $3\sigma_c$ . Углы оставшихся треков усредняются и находится первоначальное направление оси  $\mu$ . Затем строятся гистограммы угловых распределений (Рис. 23), из которых находятся новые значения направления оси  $\mu$  и  $\sigma$ . Из A исключаются треки, угол между направлением которых и направлением оси  $\mu$  превышает  $3\sigma$ . Затем снова строятся гистограммы угловых распределений и процедура повторяется до тех пор, пока углы между направлениями всех треков из A и  $\mu$  не окажутся внутри  $3\sigma$ , т.е. когда из A нельзя будет исключить ни один трек.



Рис 22. Блок-схема алгоритма поиска оси события.



Puc. 23. Пример угловых распределений (tx слева и ty справа), полученных при поиске оси события.

#### **Ш ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Таким образом, результаты этой работы во многом определили успешный ввод в эксплуатацию и возможность многоцелевого использования комплекса ПАВИКОМ - для автоматизированной обработки данных эмульсионных детекторов разработаны программы автоматического перемещения стола "CARL ZEISS" микроскопа при разных режимах сканирования и соответствующее программное обеспечение для обработки и сохранения видеоизображений. В режиме полной автоматизации осуществляется поиск и оцифровка треков заряженных частиц в материале детектора, распознавание и прослеживание треков с помощью компьютера, систематизация и первичная обработка ланных.

Созданное программное обеспечение на ПАВИКОМ успешно используется не только для эксперимента EMU-15, для которого оно первоначально создавалось, но также для целого ряда других задач - для автоматизированной обработки данных экспериментов по изучению структуры гало ядер, для анализа ядерных реакций при низких энергиях, обработке твердотельных трековых детекторов типа CR-39 [16-18].

В соответствии с алгоритмом программы обработки изображений, созданной в ходе выполнения настоящей работы, применительно к эксперименту EMU-15, последовательно производится выделение «чёрных» (фоновых) пикселей, фильтрация изображений, бинаризация изображений, выделение связных областей (кластеризация), сшивка разных полей зрения одной глубины, фильтрация кластеров. Выполнена тщательная проверка всех этапов программы. Для этого проведена методическая съемка событий взаимодействия с шагом по глубине ¼ мкм. Практически полное соответствие результатов работы программы характеристикам реальной эмульсии подтверждает правильность разработанного и реализованного алгоритма кластеризации.

Проверена эффективность блока программ трекинга посредством контрольных визуальных измерений, а также на модельном взаимодействии. Эффективность восстановления треков заряженных частиц превышает 90%. Полученные таким образом экспериментальные данные позволяют исследовать особенности угловых распределений частиц, проводить поиск многочастичных корреляций, появление которых можно ожидать при адронизации возбужденной ядерной материи, и проанализировать эти распределения с целью поиска сигналов, специфичных для кварк-глюонной плазмы.

Работа выполнена при финансовой поддержке в рамках программы «Уникальные установки» Минобразования и грантом РФФИ № 03-02-16134.

#### Литература:

- 1. Chernavskaya O.D. et. al. CERN Experiment EMU-15 on Ultrarelativistic Very Heavy Ion Central Collision.// Preprint N 7 of Lebedev Physical Institute of RAS, 1994.
- 2. Chernavskaya O.D. et.al. The Central Pb-Pb Interactions with Energies 158 GeV/nucleon// 28<sup>th</sup> International Conference on High Energy Physics, Proc., Warsaw, 1996, V.1. P.941-942.
- **3.** Добротин Н.А. и др. Исследования центральных Pb-Pb взаимодействий при высоких энергиях// Изв.АН, сер. физ. 1999. т.63. №3. с.485-488.
- **4.** Boos E.G., Kvochkina T.N., Loktionova N.A. et al.; Investigation of Central Pb-Pb Interactions at Energies of 160 GeV/Nucleon with the Help of the Emulsion Magnetic Chamber; "Experiments at CERN in 1996", Geneva, ISSN 0259-093X, p.122-123.
- **5.** Aoki S. et al; A Hybrid Experiment to Serach for Beauty Particles// Nucl. Inst. and Methods. 1989. A274. P.64-79.
- **6.** Kodama K. et al; Hybrid Emulsion Spectrometer for the Detection of Hadronically Produced Heavy Flavor States// Nucl. Inst. and Methods. 1990. A289. P.146.
- 7. Aoki S.; Historical Review of Automatic Scanning// Proc. of 2nd International Workshop on Nuclear Emulsion Techniques (2002), in print
- **8.** Chorus Coll; Eskut et al.// Nucl. Inst. and Methods. 1997. A401. P.7
- Kodama K. et al. The OPERA ν<sub>μ</sub>↔ν<sub>τ</sub>oscillation experiment in the neutrino beam// Proc. of the 1 International Workschop on Nuclear Emulsion Techniques Nagoya. 1998.
   P.576.
- **10.** Aoki S. The large area Emulsion Tracker of the CHORUS experiment// Preprint CERN-EP-2001-074; in print Nucl. Instrum. Methods Phys. Res.
- 11. Котельников К.А., Калинин С.А., Мартынов А.Г., Фейнберг Е.Л., Полухина Н.Г. Полностью автоматизированный комплекс ПАВИКОМ// Наука-производству. 2000. №12. с.29.
- 12. Aleksandrov A.B., Apacheva I.Yu., Feinberg E.L., Goncharova L.A., Konovalova N.S., Martynov A.G., Polukhina N.G., Rousettsskii A.S., Starkov N.I., Tsarev V.A. "COMPLETELY AUTOMATED MEASUREMENT FACILITY (PAVICOM) FOR TRACK-DETEC-TOR DATA PROCESSING» Nuclear Instruments&Methods in Physics Research, A, 535 (2004) 542-545.

- 13. Aleksandrov A.B., Apacheva I.Yu., Feinberg E.L., Goncharova L.A., Martynov A.G., Polukhina N.G., Rousettsskii A.S., Starkov N.I., Tsarev V.A. «COMPLETELY AUTOMATED MEASUREMENT FACILITY (PAVICOM) FOR TRACK-DETECTOR DATA PROCESSING» Proc. of "Channeling 2004" International Conference on Charged and Neutral Particles Channeling Phenomena (November 2-6, 2004, Frascati), Proc. of SPIE, vol. 5974 (2005), in print.
- **14.** Мыльцева В.А., Кочетов И.А. и др. Характеристики ядерных фотоэмульсий различных модификаций на основе эмульсии Р-2// ПТЭ. 2002. №6. С.34-37.
- **15.** R.K.Bock et. al., Data analysis techniques for high-energy physics 2<sup>nd</sup> ed., Cambridge University Press, 2000.
- **16.** G.E. Belovitsky, E.S. Konobeevski, A.V. Stepanov, V.P. Zavarzina, N.G. Polukhina, N.I.Starkov, S.M.Lukyanov, and Yu.G.Sobolev "Method of study of halo-nucleus structure using neutron transfer reaction". Report on the 19th European Conference on Few-body Problems in Physics August 23-27, 2004, Groningen, The Netherlands. Proc. of Conference.
- **17.** L.A.Goncharova, L.Just, N.G.Polukhina et al. «Studies of Light Nucleus Clustering in Relativistic Multifragmentation Process» Acta Physica Slovaca, 2004, vol.54, N 4, 351-365.
- 18. Л.А.Гончарова, К.А.Котельников, С.П.Кузнецов, Н.Г.Полухина и др. "Автоматизация измерений и анализа трековой информации об энерговыделении в урановом бланкете электроядерной системы" Препринт ФИАН № 25, Москва, 2001 год.