

сих пор существующая благодаря поддержке дирекции ИОФ РАН во главе с И.А. Щербаковым. В функции этой цепочки входят: разработка и поддержание пико-фемтосекундных лазерных установок, предназначенных для динамической калибровки ЭОП и фотоэлектронных пушек; создание программного обеспечения и компьютерное моделирование электронно-оптических систем фокусировки и отклонения; конструирование, развитие технологии и изготовление экспериментальных образцов ЭОП, а также фотоэлектронных пушек и камер на их основе; проведение статических и динамических испытаний разрабатываемых фотоэлектронных приборов с последующей отработкой методики их применения в физическом эксперименте. Сохранение, поддержание и развитие для будущих поколений существующего в ИОФ РАН исследовательско-технологического потенциала в области сверхскоростной фотоэлектроники — достойнейшая из задач!

В заключение автор сердечно благодарит всех сотрудников отдела фотоэлектроники за их преданность данному научному направлению. Особой благодарности заслуживают С.В. Андреев, Г.И. Брюхневич, Н.С. Воробьев, В.П. Дегтярева, М.А. Монастырский, Е.А. Кузьменко и А.В. Смирнов за помощь в подготовке данной рукописи к печати.

Список литературы

1. Завойский Е К, Фанченко С Д *ДАН СССР* **100** 661 (1955)
2. Завойский Е К, Фанченко С Д *ДАН СССР* **108** 218 (1956)
3. Courtney-Pratt J S *Research* **2** 287 (1949)
4. Courtney-Pratt J S *Photogr. J. B* **92** 137 (1952)
5. Бутслов М М *Успехи научной фотографии* (6) 76 (1959)
6. Butslav M M и др., in *Proc. IV Intern. Congress on High-Speed Photography, Cologne, 1958*, p. 230
7. Фанченко С Д *Приборы и техника эксперимента* (1) 5 (1961)
8. Zavoisky E K, Fanchenko S D *Appl. Opt.* **4** 1155 (1965)
9. Завойский Е К, Фанченко С Д "Высокоскоростная фотография с экспозицией 10^{-9} — 10^{-14} сек. на основе применения электронно-оптических преобразователей", Препринт (Москва: ИАЭ им. И.В. Курчатова, 1966)
10. Завойский Е К, Фанченко С Д *ДАН СССР* **226** 1062 (1976) [Zavoiskii E K, Fanchenko S D *Sov. Phys. Dokl.* **21** 107 (1976)]
11. Прохоров А М *Вестник РАН* **73** 483 (2003) [Prokhorov A M *Herald Russ. Acad. Sci.* **73** 249 (2003)]
12. Иванов В С и др., в сб. *Оптико-электронные измерения* (Под ред. В С Иванова) (М.: Университетская книга, 2005) с. 430
13. Брагин Б Н и др., в сб. *Оптико-электронные измерения* (Под ред. В С Иванова) (М.: Университетская книга, 2005) с. 462
14. Щелев М Я *Квантовая электроника* **31** 477 (2001) [Schelev M Ya *Quantum Electron.* **31** 477 (2001)]
15. Щелев М Я *Квантовая электроника* **33** 609 (2003) [Schelev M Ya *Quantum Electron.* **33** 609 (2003)]
16. Щелев М Я *Квантовая электроника* **37** 927 (2007) [Schelev M Ya *Quantum Electron.* **37** 927 (2007)]
17. Щелев М Я *Квантовая электроника* **41** 577 (2011) [Schelev M Ya *Quantum Electron.* **41** 577 (2011)]
18. Прохоров А М и др. *Квантовая электроника* **32** (4) 283 (2002) [Prokhorov A M et al. *Quantum Electron.* **32** 283 (2002)]
19. Monastyrski M A et al. *Proc. SPIE* **4948** 305 (2003)
20. Vartak S D, Lawandy N M *Optics Commun.* **120** 184 (1995)
21. Mourou G, Williamson S *Appl. Phys. Lett.* **41** 44 (1982)
22. Mourou G et al. *Proc. SPIE* **0348** 313 (1982)
23. Zewail A H *Science* **242** 1645 (1988)
24. Zewail A H *Sci. Am.* **263** (12) 76 (1990)
25. Zewail A H *J. Phys. Chem.* **100** 12701 (1996)
26. Williamson J C et al. *Nature* **386** 159 (1997)
27. Щелев М Я *Труды ФИАН* **155** 3 (1985)
28. Щелев М Я *УФН* **170** 1002 (2000) [Schelev M Ya *Phys. Usp.* **43** 931 (2000)]
29. Fanchenko S D *Proc. SPIE* **3516** 15 (1998)
30. Monastyrski M A, Andreev S V, Tarasov V A *Proc. SPIE* **2869** 92 (1996)
31. Degtyareva V P et al. *Proc. SPIE* **4948** 281 (2003)
32. Ageeva N V et al. *Proc. SPIE* **7126** 71261B (2008)
33. Losovoi V et al. *Proc. SPIE* **4948** 297 (2003)
34. Holst G et al. *Physica* **1** 297 (1934)
35. Scherzer O Z. *Phys.* **101** 593 (1936)
36. Арцимович Л А *Изв. АН СССР Сер. физ.* **8** 313 (1944)
37. Monastyrski M A, Andreev S V *Proc. SPIE* **2869** 92 (1996)
38. Andreev S V et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **427** (1–2) (1999)
39. Greenfield D E et al., in *Software Demonstrations, Intern. Conf., Cambridge, UK, 2006, Abstract Book*, p. 23
40. Andreev S V et al. *Proc. SPIE* **6279** 62797O (2006)
41. Прохоров А М, Щелев М Я *Труды ФИАН* **155** 233 (1985)
42. Брюхневич Г И и др., в сб. *14-й Международ. конгресс по высокоскоростной фотографии и фотонике, Москва, 19–24 окт. 1980, Тезисы докладов* (М., 1980) с. 170
43. Брюхневич Г И и др., Авт. свид. № 13535 от 14 ноября 1980 г. с приоритетом от 5 апреля 1978 г.
44. Брюхневич Г И и др. *Письма в ЖТФ* **2** 1009 (1976) [Bryukhnevich G I et al. *Sov. Tech. Phys. Lett.* **2** 396 (1976)]
45. *Квантовая электроника* **7** 2060 (1980) [Sov. J. Quantum Electron. **10** 1198 (1980)]
46. Vorob'ev N S et al. *Proc. SPIE* **1032** 16 (1988)
47. Degtyareva V P et al. *Proc. SPIE* **491** 239 (1984)
48. Degtyareva V P et al. *Proc. SPIE* **1801** 44 (1992)
49. Ageeva N N и др. *Приборы и техника эксперимента* (4) 108 (2011) [Ageeva N N et al. *Instrum. Exp. Tech.* **54** 548 (2011)]
50. Nebeker S, Prokhorov A M, Schelev M Ya *Laser Focus World* (12) 125 (1991)
51. "Imacon 468", Technical brochure, Hadland Photonics, UK (1998)
52. Нолле Э Л, Щелев М Я *Письма в ЖТФ* **30** (8) 1 (2004) [Nollé É L, Shchelev M Ya *Tech. Phys. Lett.* **30** 304 (2004)]
53. Нолле Э Л, Щелев М Я *ЖТФ* **75** (11) 136 (2005) [Nolle E L, Schelev M Ya *Tech. Phys.* **50** 1528 (2005)]
54. Nolle E L, Khavin Yu B, Schelev M Y *Proc. SPIE* **5580** 424 (2005)
55. Нолле Э Л и др. *УФН* **177** 1133 (2007) [Nolle É L *Phys. Usp.* **50** 1079 (2007)]
56. Niu H et al. *Proc. SPIE* **1032** 79 (1988)
57. Niu H et al., Авт. свид. № 1626989 от 8 октября 1990 г. с приоритетом от 20 июня 1988 г.
58. Prokhorov A M, Schelev M Ya *SPIE* **1359** 280 (1990)
59. Greenfield D E et al. *Proc. SPIE* **7126** 71260D (2008)

PACS numbers: 14.60.Pq, 29.40.Gx, **29.50.+v**
DOI: 10.3367/UFNr.0182.201206g.0656

Достижения в ядерно-физических исследованиях на трековых детекторах и перспективы использования трековой методики в астрофизике, физике элементарных частиц и прикладных работах

Н.Г. Полухина

Представлен краткий обзор результатов ядерно-физических исследований, выполненных с помощью трековых детекторов. О преимуществах и перспективах трековой методики в физике элементарных частиц, нейтринной физике, астрофизике и других областях рассказывается на примере результатов работ на комплексе ПАВИКОМ (Полностью Автоматизированный Измерительный КОМПлекс) Физического института им. П.Н. Лебедева РАН (ФИАН). Уникальный комплекс ПАВИКОМ, удовлетворяющий лучшим мировым стандартам для трековых детекторов, успешно работает около десяти лет. Обсуждаются результаты исследований по поиску прямого рождения таонного нейтрино в пучке мюонных

Н.Г. Полухина. Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, РФ. E-mail: poluhina@sci.lebedev.ru

нейтрино в рамках крупного международного эксперимента OPERA (Oscillation Project with Emulsion-tRacking Apparatus). В ФИАНе на ПАВИКОМ реализована возможность сканирования ядерных эмульсий детектора OPERA, что позволяет российским физикам участвовать в обработке и анализе данных этого эксперимента. Приводятся спектры сверхтяжёлых элементов в галактических космических лучах, полученные при измерениях треков ядер в кристаллах оливинов из метеоритов: зарегистрированы ядра с зарядами в диапазоне $105 < Z < 130$. Сообщается о перспективах использования трековой методики, например, для работ по нейтринной физике (поиск двойного бета-распада) и прикладных работ по мюонной радиографии (неразрушающий контроль крупных строительных объектов, поиск полезных ископаемых и др.).

Трековые детекторы широко используются в физике элементарных частиц на протяжении очень многих десятилетий. В трековых детекторах регистрация элементарных частиц сопровождается появлением наблюдаемых следов (треков), повторяющих траекторию движения элементарной частицы. Это пузырьковые и искровые камеры, ядерные эмульсии, кристаллы хлористого серебра и травимые твердотельные трековые детекторы [1–14]. Такая популярность и столь продолжительная жизнь методики трековых детекторов не случайна и обусловлена целым рядом их достоинств: уникально высоким пространственным разрешением, наглядностью восстановления пространственной картины взаимодействия частиц, относительной простотой и дешевизной, способностью накапливать информацию в течение длительного времени и др.

Началом развития методики стали работы А. Беккереля [1–3] 1896 г. Первыми трековыми детекторами были обычные фотографические пластинки — А. Беккерель открыл естественную радиоактивность, обнаружив полностью засвеченные фотопластинки, лежавшие в непрозрачном материале вместе с флуоресцирующим уранил-сульфатом калия.

В так называемой камере Вильсона используется конденсация жидкости из пересыщенного пара (при подходящих условиях ионизация, произведённая в веществе заряженной частицей, может вызвать в нём фазовый переход). Прибор был изобретён в 1912 г. Ч. Вильсоном [4], в течение многих лет изучавшим физику образования облаков в атмосфере. Пузырьковая камера была изобретена и усовершенствована в начале 1950-х годов Д. Глезером [6] (используется перегретая жидкость, вскипающая вблизи центров зародышеобразования, которыми служат локальные участки энерговыделения ($\geq 0,1$ кэВ) на траектории частицы в перегретой жидкости). Камеры Вильсона и пузырьковые камеры тоже позволяют непосредственно наблюдать следы частиц. Это означает, что положение частицы может быть определено с точностью до размера капли или пузырька, т.е. с точностью примерно до 1 мм.

Одной из первых областей применения трековых детекторов было определение зарядового спектра ядерного компонента первичного космического излучения [15, 16]. В исследованиях тяжёлого компонента первичных космических лучей использовались стопки ядерных эмульсий [17]. Преимущества трековых детекторов как интегральных приборов, накапливающих информацию в условиях малых потоков частиц, использовались не

только в аэростатных, но и в спутниковых экспериментах с космическими лучами [18]. Проводилось долговременное облучение на спутнике стопки полимерных трековых детекторов для исследования спектров космических ядер с целью получения информации о процессах нуклеосинтеза и длине свободного пробега космических ядер в межзвёздной среде [19]. В 1970-х годах самыми распространёнными трековыми детекторами являлись пузырьковые и искровые камеры [20]. Например, с их помощью определены многие свойства странных частиц: масса, время жизни, спин, чётность [21]. Большое число экспериментов с камерами было посвящено изучению резонансных состояний частиц и исследованию слабых взаимодействий [22–25]. Благодаря трековым детекторам были открыты ядерные распады и реакции, а также новые частицы (позитрон, мюон, заряженные пионы, странные и очарованные частицы).

Таким образом, трековые детекторы сыграли выдающуюся роль в развитии ядерной физики благодаря наглядности и возможности получения исчерпывающей пространственной картины изучаемых процессов. Это подтверждается целой серией Нобелевских премий:

1903 г. — А. Беккерель;

1927 г. — Ч. Вильсон;

1936 г. — В. Гесс, за открытие космических лучей. В составе его аппаратуры были фотопластинки и стробоскопы;

1950 г. — С.Ф. Пауэлл, за разработку фотографического метода исследования ядерных процессов и открытие мезонов;

1960 г. — Д. Глезер, за изобретение и усовершенствование пузырьковой камеры;

1962 г. — Л. Альварес, за открытие множества резонансных состояний, ставшее возможным благодаря использованию водородных пузырьковых камер;

1992 г. — Ж. Шарпак, за многопроволочную пропорциональную камеру.

В таблице 1 приведены сравнительные характеристики трековых детекторов. Стоит отметить, что термодинамические детекторы (камера Вильсона и пузырьковая камера) сейчас уже почти не применяются, но зато появляются новые виды трековых детекторов, например полупроводниковые, которые по пространственному разрешению пока уступают только ядерным фотоэмульсиям. Ядерная эмульсия используется в экспериментах по физике частиц на протяжении многих десятилетий. Столь продолжительная жизнь методики, безусловно, связана с упоминавшимся уникально высоким простран-

Таблица 1. Характеристики различных детекторов

Детектор	Пространственное разрешение, мкм	Временное разрешение	Время восстановления
Ядерная фотоэмульсия	1	—	—
Камера Вильсона	1000	10 мс	10 с
Пузырьковая камера	10–150	10 мкс	50 мс
Искровая камера	100	1 мкс	1 мс
Пропорциональная камера	50–300	2 нс	200 нс
Стримерная камера	300	2 мкс	100 мс
Дрейфовая камера	50–300	2 нс	100 нс
Полупроводниковый детектор	2	10 нс	10 нс

ственным разрешением и возможностью разделения треков частиц. Ни один из известных детекторов элементарных частиц не может обеспечить пространственное разрешение, которое даёт эмульсия: при размере зерна 0,3–1,0 мкм отклонение зёрен от восстановленной траектории движения частицы в среднем не превышает 0,8 мкм и при определённых условиях может составлять 0,2 мкм. Использование двусторонней эмульсии позволяет достигать точности в определении углов лучшей, чем 1 мрад. Кроме того, ядерная фотоэмульсия позволяет определить целый ряд других характеристик частиц: энергию, заряд, массу, импульс, а также даёт возможность проводить экспозиции в отсутствие экспериментатора и изучать реакции со сложными топологиями распадов. Ядерная фотоэмульсия — чрезвычайно "ёмкий" детектор. Наши коллеги из Нагойского университета [26] отметили, что DVD-диск может содержать информацию объёмом до 8,5 Гб, в то время как на двустороннюю пластину ядерной фотоэмульсии можно записать 556 Гб информации (оценивался объём информации на пластине размером 10 см × 12 см: с двух сторон на майларовую основу толщиной 200 мкм наносятся 50-микронные слои эмульсии, такие пластины используются в детекторе эксперимента OPERA). К недостаткам ядерной эмульсии следует отнести отсутствие временной привязки — регистрируются все частицы, прошедшие через неё. Это приводит к регистрации значительного числа фоновых частиц и уменьшает время допустимой экспозиции, например, на ускорителе.

Сейчас трудно найти такую область науки и техники, в которой не использовались бы трековые детекторы. Такие детекторы широко применяются в физике высоких энергий, физике космических лучей, реакторной физике, металлургии, геологии, археологии, медицине, биологии, исследованиях метеоритов и образцов лунных пород.

Например, данные об энергетическом спектре нейтронов от реактора получают с помощью нейтронных дозиметров, содержащих делящиеся слои и трековые детекторы [27]. С использованием трековых детекторов получают информацию о распространении важнейших с радиологической точки зрения α -излучающих природных ядер инертных газов ^{222}Rn и ^{230}Rn (соответственно от распадов ^{238}U и ^{232}Th), которые, диффундируя из твёрдого тела (из горных пород или конструкционных материалов), попадают в атмосферу и могут создать опасный уровень радиации [28]. Контроль времени облучения радоном шахтёров на урановых рудниках проводится с использованием полосок нитрата целлюлозы, закрепляемых на шахтёрских шлемах [29]. Метод регистрации α -частиц от радонового газа использовался для предсказания землетрясений, поскольку, как было замечено, повышение сейсмической опасности в период, предшествующий землетрясениям, часто сопровождается возникновением трещин и напряжений, при этом выделяется большее количество радона от содержащихся в земной коре урана и тория [30]. Трековая методика также применяется при изучении процессов обмена в тропосфере, где в качестве индикатора используется радон [31]. Трековые детекторы используются в пучках отрицательных пионов в радиотерапии для изучения событий с высокими линейными потерями энергии [32, 33].

Простота трековых детекторов — их существенное преимущество. Однако это преимущество можно реализовать только при наличии эффективных средств извле-

чения содержащейся в детекторах информации. Обработка данных трековых детекторов, проводившаяся оператором на оптических микроскопах вручную, требовала огромных затрат труда и времени. Скорость измерений при этом оказывалась невысокой, что определяло низкую статистику обработанных событий. Кроме того, при таких измерениях достаточно велика вероятность появления трудно улавливаемых ошибок, поэтому результаты измерений плохо поддавались проверке на возможные сбои, возникающие при обработке материала (например, потери измерителями следов частиц и другие ошибки). Поэтому одновременно с методикой детектирования развивались также методы автоматизации измерений [34–42].

Полная автоматизация измерений в трековых детекторах стала возможной после появления приборов с зарядовой связью (Charge-Coupled Device, CCD), в которых CCD-камеры используются для регистрации и оцифровки оптических изображений, что привело к созданию микропроцессорно-ориентированных систем для автоматической обработки треков частиц в детекторах. Распознавание треков частиц и восстановление их пространственного положения в этих системах выполняется компьютерами по специально разработанным программам. Всё это позволило провести полную автоматизацию обработки для исключения изнурительного визуального труда микроскопистов. При измерениях в таком автоматическом режиме оцифрованные изображения следов заряженных частиц и ядер в эмульсии, полученные с помощью CCD-камер, вводятся в компьютеры, математическое обеспечение которых позволяет производить поиск, распознавание и изучение треков. Такой автоматизированный метод измерений в трековых детекторах значительно ускоряет процесс обработки данных, позволяя обрабатывать большие массивы экспериментальных данных и существенно увеличивать статистику событий для широкого круга экспериментов, что ранее было практически нереальным.

Совокупность достоинств ядерной фотоэмульсии, главное из которых — уникально высокое пространственное разрешение, и полная автоматизация измерений привели к появлению многих экспериментов, использующих большое количество ядерной фотоэмульсии, например: CHORUS (CERN Hybrid Oscillation Research apparatus) — 770 кг ядерной фотоэмульсии; DONUT (Direct Observation of the NU Tau) — 200 кг; OPERA — 100 т.

Ни одна из производимых промышленностью систем для автоматического анализа изображений не была сконструирована специально для обработки данных, получаемых с помощью детекторов с протравленными треками. Это заставляло исследователей либо создавать собственные системы обработки, либо самостоятельно дорабатывать или приспосабливать коммерческие системы для своих целей. При этом необходимо решить две основные задачи: первая — выделение объектов с уровнем потемнения, большим заданного, вторая — распознавание особенностей формы объектов. Заметим, что автоматическое распознавание треков в эмульсии существенно отличается от аналогичной процедуры для других визуальных детекторов: для эмульсий автоматизированное восстановление проникающих треков частиц осуществляется на основе нескольких томографических изображений на разных глубинах [43]. Существуют два разных подхода к автоматизации измерений — европей-

ский и японский. В японской системе многие этапы обработки и распознавания изображений заложены в специальный микрочип, и поэтому можно обрабатывать эмульсии со скоростью до $75 \text{ см}^2 \text{ ч}^{-1}$ (эмульсии из детектора эксперимента OPERA). Обладая чрезвычайно высоким быстродействием и высокой эффективностью распознавания треков, японская система вместе с тем имеет существенный недостаток: при изменении условий эксперимента и/или характеристик эмульсии требуются дорогостоящая разработка и изготовление нового процессора. В отличие от этого в автоматизированных системах для обработки трековых детекторов, используемых в Европе, основная часть обработки изображения (скорость обработки $20 \text{ см}^2 \text{ ч}^{-1}$) выполняется специальным программным обеспечением, что делает эти системы более гибкими в смысле адаптации к разным условиям задач.

В мире работает более 50 автоматизированных микроскопов для обработки данных от трековых детекторов. Такой автоматизированный комплекс мирового уровня — ПАВИКОМ — существует и в ФИАНе. Комплекс состоит из трёх микроскопов (на рис. 1 представлен один из трёх микроскопов ПАВИКОМ). Эти микроскопы, так же как и микроскопы в европейских системах, сконструированы с ориентацией главным образом на возможности программного обеспечения. Ни один из микроскопов ПАВИКОМ не был полностью произведён промышленностью, многие элементы конструкции были разработаны и сделаны в ФИАНе или собраны из комплектующих разных производителей (высокоточная немецкая механика, швейцарская видеотехника, японская оптика; точность перемещения микроскопного столика $0,5 \text{ мкм}$ при диапазоне перемещений до 80 см , скорость обработки — до 500 кадров в 1 с). Для того чтобы оценить столь высокую точность механического перемещения столика, достаточно вспомнить, что толщина человеческого волоса — 50 мкм . Изначально комплекс создавался для обработки материалов эксперимента ФИАНА в ЦЕРНе — EMU-15 (EMU — от англ. EMUlsion) [39, 44–49], в котором эмульсионная камера,

включающая в себя свинцовую мишень толщиной $0,4 \text{ мм}$ с последующей стопкой из 38 слоёв фотоэмульсии, облучалась пучком ядер свинца с энергией 158 ГэВ/нуклон . Однако универсальность и потенциально большие аппаратные возможности комплекса ПАВИКОМ, предусмотренные при его создании, позволили использовать его для существенно более широкого круга задач [49]. На ПАВИКОМ обрабатываются практически все известные типы твердотельных трековых детекторов. Это и ядерные эмульсии, и рентгеновские плёнки, и полимерные детекторы CR-39 и др. Сотрудники примерно десяти российских и нескольких иностранных институтов совместно с фиановской группой ПАВИКОМ проводят обработку и анализ экспериментальных данных. Фактически ПАВИКОМ используется в режиме центра коллективного пользования, и в этом смысле он не имеет аналогов в мире. Ниже очень кратко рассказывается о результатах, полученных на ПАВИКОМ, и подробнее — о двух основных направлениях исследований в настоящее время и планах на будущее.

Эксперимент EMU-15. В эксперименте ФИАНА EMU-15 в ЦЕРНе, где в качестве детектора использовалась ядерная фотоэмульсия, основной целью являлся поиск возможных сигналов образования кварк-глюонной плазмы при сверхвысоких температурах и сверхплотных состояниях материи. В EMU-15 использовалось 16 эмульсионных камер в форме цилиндра длиной 260 мм и диаметром 95 мм . Каждая камера содержала тонкую (400 мкм) свинцовую мишень и 38 слоёв ядерной фотоэмульсии (каждый толщиной 50 мкм), нанесённых на майларовую подложку толщиной 25 мкм . Один слой эмульсии находился непосредственно перед мишенью, остальные размещались за мишенью. Общая толщина каждой камеры составляла всего $0,07$ каскадных длин, что крайне важно при регистрации центральных столкновений ядер свинца очень высокой энергии, в которых генерируются несколько тысяч вторичных частиц. Камера помещалась в поперечное магнитное поле напряжённостью 2 Тл таким образом, чтобы плоскости мишени и ядерных фотоэмульсий были перпендикулярны пучку. Суммарное число ядер Pb при облучении каждой из 16 фотоэмульсионных камер составляло примерно 10^4 . В каждой камере было обнаружено около 10 центральных Pb–Pb-взаимодействий с множественностью вторичных частиц более 1000 (критерием отбора таких событий служит большая множественность вторичных заряженных частиц и отсутствие фрагментов с зарядом $Z \geq 2$).

Разработанные для этого эксперимента методы обработки изображений и поиска микротреков позволили впервые в России [50] произвести в автоматизированном режиме поиск треков вторичных заряженных частиц в центральных ядро-ядерных взаимодействиях с множественностью > 1500 в ядерной фотоэмульсии. Для автоматизированной обработки треков в ядерной эмульсии потребовалось создание программного обеспечения для управления передвижением столика микроскопа, видеосъёмки изображений, их анализа и восстановления геометрической картины разлёта вторичных заряженных частиц. Результат восстановления геометрии разлёта частиц после ядро-ядерного взаимодействия — псевдобыстротное распределение вторичных частиц, которое затем подробно анализировалось с помощью различных математических методов.



Рис. 1. Автоматизированный микроскоп ПАВИКОМ-3: оптическая система "Nikon"; прецизионный стол "miCos" (перемещение по осям: $X = 120 \text{ мм}$, $Y = 120 \text{ мм}$, $Z = 30 \text{ мм}$; точность измерения координат $0,5 \text{ мкм}$); CMOS-видеокамера "Mikrotron MC-1310" (глубина цвета до 10 бит; размер изображения 1280×1024 пикселей, скорость — до 500 кадров в секунду) (CMOS — от англ. Complementary-symmetry/Metal-Oxide-Semiconductor — комплементарная логика на транзисторах металл–оксид–полупроводник); рабочая станция, плата оцифровки и обработки изображений "Matrox Odyssey XPro".

Анализ распределения вторичных частиц в фазовом пространстве составлял основную задачу исследования, так как позволял сделать заключение о динамике процесса. Сделать это непросто, даже если измеряются только углы вылета частиц (полярный и азимутальный), поскольку число вторичных частиц иногда превышает 1000. Задача сводилась к распознаванию образов, созданных на плоскости мишенной диаграммы таким количеством точек. Вейвлет-анализ позволил решить эту задачу. При обработке данных EMU-15 для двумерного вейвлет-анализа спектров частиц впервые был использован вейвлет Добеши. Результат этого анализа продемонстрирован на примере исследования внутренней структуры разлёта вторичных частиц локально и на разных масштабах. Показано, что на распределении вторичных заряженных частиц по псевдобыстроте коррелированные группы имеют тенденцию располагаться в виде кольца вокруг центра диаграммы. Это соответствует группировкам частиц при постоянном полярном угле, т.е. фиксированной псевдобыстроте. Механизм возникновения этих структур в сильных взаимодействиях может быть объяснён либо аналогом черенковского излучения (глюоны выступают как аналог фотонов), либо возникновением ударных волн Маха [39, 51, 52]. Оба указанных механизма имеют сходную природу — возникновение излучения при движении тела в среде со скоростью, превышающей фазовую скорость распространения возмущения в этой среде.

Наиболее значимым признаком существования кольцевых структур является присутствие двух пиков в псевдобыстротном распределении (рис. 2). При этом на плоскости мишенной диаграммы видны кольцевые структуры [51]. Таким образом, результаты обработки данных EMU-15 подтвердили несимметричный характер распределения по азимутальному углу вторичных заряженных частиц в сочетании с пиками по псевдобыстроте в индивидуальном событии. Это свидетельствует об особенностях разлёта, вызываемых многочастичными корреляциями, появление которых, в частности, ожидалось при сравнительно небольшом числе испущенных черенковских глюонов в каждом кольце. Стоит отметить, что впервые в физике высоких энергий при обработке данных EMU-15 для анализа особенностей распределения вторичных заряженных частиц и их локализации было использовано вейвлет-преобразование [39, 48, 52].

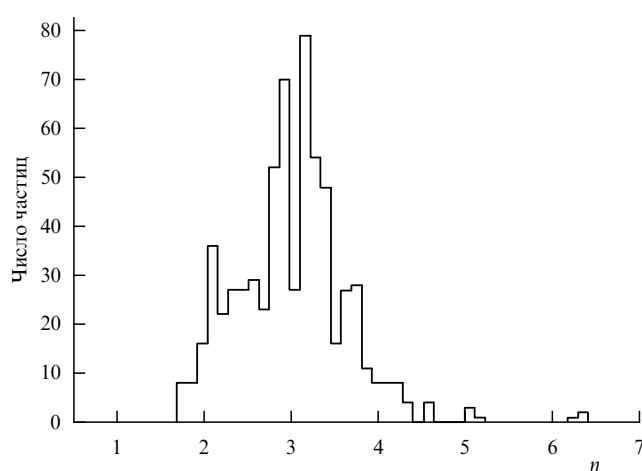


Рис. 2. Распределение псевдобыстрот вторичных заряженных частиц $\eta = -\ln(\tan \theta/2)$, где θ — угол между направлением трека и осью события, в одном из событий (условное обозначение события 5c15e) эксперимента EMU-15 после автоматизированной обработки.

Эксперимент RUNJOB (Russia – Nippon JOint Bal-lon). Одним из пользователей комплекса ПАВИКОМ была коллаборация RUNJOB (Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова (НИИЯФ МГУ), ФИАН, семь японских университетов). С целью изучения поэлементных энергетических спектров первичного космического излучения в рамках российско-японского эксперимента RUNJOB с 1995 г. по 1999 г. было проведено десять успешных полётов высотных автоматических аэростатов с эмульсионными камерами на борту общей продолжительностью 1440 ч в среднем на высоте 32 км [53–58]. Камеры имели сложную слоистую структуру с несколькими десятками слоёв фоточувствительных детекторов (рентгеновской плёнки и ядерной эмульсии), слоями углерода или стали в мишени, а также слоёв свинца в тонком калориметре. Обработка фоточувствительных слоёв проводилась четырьмя группами в России и Японии. Использование ПАВИКОМ дало возможность российским физикам на равных с японскими коллегами участвовать в обработке экспериментального материала. Созданное программное обеспечение для автоматического сканирования и анализа микроизображений позволило обрабатывать большие площади ($0,5 \text{ м}^2$) фоточувствительных материалов с высоким пространственным разрешением (более 7 мкм на 1 пиксель) и большой скоростью ($16 \text{ см}^2 \text{ мин}^{-1}$). Коллаборацией RUNJOB были получены результаты по спектрам протонов, ядер гелия, ядер группы CNO, железа по спектру всех частиц, проведено сравнение с данными других экспериментов, в том числе эксперимента ATIC (Advanced Thin Ionization Calorimeter), при этом не было обнаружено заметных разногласий в пересекающейся области энергий. Показано, что спектры протонов и ядер гелия имеют близкие показатели и не проявляют заметного укручения в области энергий до 1 ПэВ на частицу. RUNJOB признан одним из самых успешных аэростатных экспериментов и весьма широко цитируется в мире.

Проект "Беккерель". Изучение процессов фрагментации лёгких радиоактивных ядер, а также получение обзорной информации по зарядовым состояниям вторичных частиц при фрагментации промежуточных и тяжёлых ядер являлось целью исследований в рамках эксперимента "Беккерель" (Объединённый институт ядерных исследований (ОИЯИ)). Обработка на ПАВИКОМ ядерных эмульсий, облучённых лёгкими релятивистскими ядрами He^4 , Li^6 , Li^7 , Be^7 , B^{10} , C^{12} , N^{14} , O^{16} , Ne^{22} , Mg^{24} и Si^{28} , полученными на нуклотроне ОИЯИ, с энергией свыше 1 ГэВ/нуклон, позволила выявить образовавшиеся в процессе дифракционной диссоциации кластеры вторичных частиц и исследовать характеристики частиц даже внутри узко коллимированных кластеров. При этом были определены особенности фрагментации лёгких ядер, измерены отношения и вероятности их распадов по разным каналам [44, 59–65].

Проект "Энергия плюс трансмутация". Крупный международный проект "Энергия плюс трансмутация" выполнялся также в ОИЯИ на базе ускорителя "Нуклотрон". Ускорители заряженных частиц с энергиями ≥ 1 ГэВ, созданные в своё время для фундаментальных исследований в области ядерной физики, могут использоваться для создания на их базе интенсивных импульсных источников нейтронов и экспериментальных уста-

новок для исследования электроядерного способа производства энергии и изучения трансмутации радиоактивных отходов атомной энергетики. В 1999 г. в ОИЯИ в рамках проекта "Энергия плюс трансмутация" [66, 67] была создана и испытана модель уран-свинцовой сборки на протонном пучке синхрофазотрона. Эксперименты на U/Pb-сборке и её модели проводились с целью прямого измерения мощности энерговыделения как по числу делений урана естественного изотопного состава, так и по количеству тепла, выделяемого в объёме бланкета [67]. Исследование нейтронного спектра в объёме бланкета имело исключительно большое значение. Широкое применение в этом эксперименте для изучения нейтронных спектров твердотельных трековых детекторов (ТТД) на основе лавсана (полиэтилентерефталата) было обусловлено их особенностями: высокой эффективностью регистрации осколков деления, низким собственным фоном и простотой технологии обработки. ТТД использовались в калориметре установки для мониторинга и определения профиля пучка; изучения распределения событий деления в бланкете; исследования деления урана тепловыми, резонансными и быстрыми нейтронами; определения усреднённого сечения деления в бланкете.

Трековые детекторы, изготовленные в виде сплошных полосок с различными радиаторами, в сеансах облучения размещались на линии, перпендикулярной оси симметрии установки, под несколькими углами. На основании результатов подсчёта треков определялись парциальные интегралы деления ядер естественного урана тепловыми, резонансными и быстрыми нейтронами в зависимости от радиуса модели уранового бланкета. Для измерения скоростей пороговых ядерных реакций использовался комплект мишеней из 23 химических элементов, в том числе Th^{232} , Au^{197} . Полученные значения скоростей реакций использовались для анализа количества делений в радиаторах с различным порогом деления, находящихся на поверхности установки "Энергия плюс трансмутация" и между секциями сборки. Они позволяли восстановить спектр быстрых нейтронов для модели U/Pb-сборки, а также рассчитать наведённую активность химических элементов, которые могут быть использованы как конструкционные материалы для создания электроядерных и других ядерно-физических установок. Методика определения абсолютного числа событий деления ядер урана с помощью ТТД позволяет проводить измерение распределения количества реакций в зависимости от радиуса и тем самым мощности энерговыделения в бланкете.

Однако визуальный подсчёт треков на большом числе (несколько десятков или сотен) детекторов представляет собой весьма трудоёмкую и длительную процедуру. Для автоматизированной обработки таких плёночных детекторов на ПАВИКОМ было разработано математическое обеспечение [68], которое позволило в полностью автоматизированном режиме оцифровывать оптические изображения следов на плёнках, распознавать следы осколков и подсчитывать их концентрацию. Возможность проводить измерения в ТТД в автоматическом режиме значительно облегчила обработку данных и увеличила как число обрабатываемых детекторов, так и их площадь. В частности, по результатам автоматизированной обработки трековых детекторов, облучённых в ноябрьском сеансе 1999 г., было определено число де-

лений нейтронами (отдельно тепловыми, резонансными и быстрыми) в зависимости от расстояния от оси симметрии уран-свинцовой сборки. Наблюдалась тенденция возрастания вклада медленных нейтронов с увеличением радиуса. Основной вклад в процесс деления U^{238} внесли быстрые нейтроны [67].

Спектры электронов внутренней конверсии редкоземельных элементов. Сотрудниками Института теоретической и экспериментальной физики им. А.И. Алиханова (ИТЭФ) и ОИЯИ выполнялось экспериментальное исследование спектров электронов внутренней конверсии (ЭВК) методом ядерной спектроскопии, который позволяет получать информацию о свойствах ядерных состояний — энергиях, чётностях, изотопических спинах и других характеристиках. Исследуя спектры ЭВК, можно изучать переходы между ядерными уровнями. Сравнение экспериментальных величин коэффициентов внутренней конверсии или относительных интенсивностей линий конверсионных электронов с их соответствующими теоретическими значениями позволяет определить мультипольность ядерных переходов, а следовательно, получить данные о спине и чётности ядерных состояний. Зная коэффициент внутренней конверсии, в ряде случаев (при смешанной мультипольности гамма-излучения) можно найти соотношения между матричными элементами и сделать выводы о характере возбуждения ядра и ядерных волновых функциях. Изучение конверсии — основной путь исследования 0–0-переходов в ядрах и получения экспериментальных значений ядерных матричных элементов. Прецизионные измерения интенсивности электронов внутренней конверсии, обеспечиваемые современной эмульсионной техникой, дают возможность изучать аномалии в значениях коэффициента внутренней конверсии и другие явления.

Переход от техники микрофотометрии к технике микроскопных эмульсионных измерений при исследовании спектров электронов внутренней конверсии изотопов редкоземельных элементов открывает возможность выявить мультипольность переходов, интенсивности которых на 3–4 порядка меньше интенсивностей известных переходов.

В совместной работе ИТЭФ и ОИЯИ эмульсионные слои размером $25 \times 450 \text{ мм}^2$ и толщиной 600 мкм облучались на бета-спектрометре ОИЯИ электронами внутренней конверсии, испускаемыми изотопами редкоземельных элементов. Величиной, подлежащей определению на этапе обработки на ПАВИКОМ экспериментального материала фотоэмульсионных линеек со спектрами ЭВК, являлась интенсивность почернения фотослоя, нанесённого на стеклянную подложку, как функция расстояния от источника электронов до точки наблюдения.

Для выделения линий спектра при сканировании эмульсий на ПАВИКОМ было создано оригинальное программное обеспечение, в котором использовалась для оцифрованных изображений идея суммирования степени почернения в заданном направлении для усиления выделяемого эффекта и обнаружения слабых линий на большом фоне. Измерения, выполненные на ПАВИКОМ, позволили определить интенсивности уровней, а также получить интенсивности 0–0-переходов, недоступные в обычной технике гамма-спектроскопии [69, 70]. Результаты, полученные при такой обработке данных, показали, что у некоторых изотопов редкоземельных элементов существует несколько десятков ранее

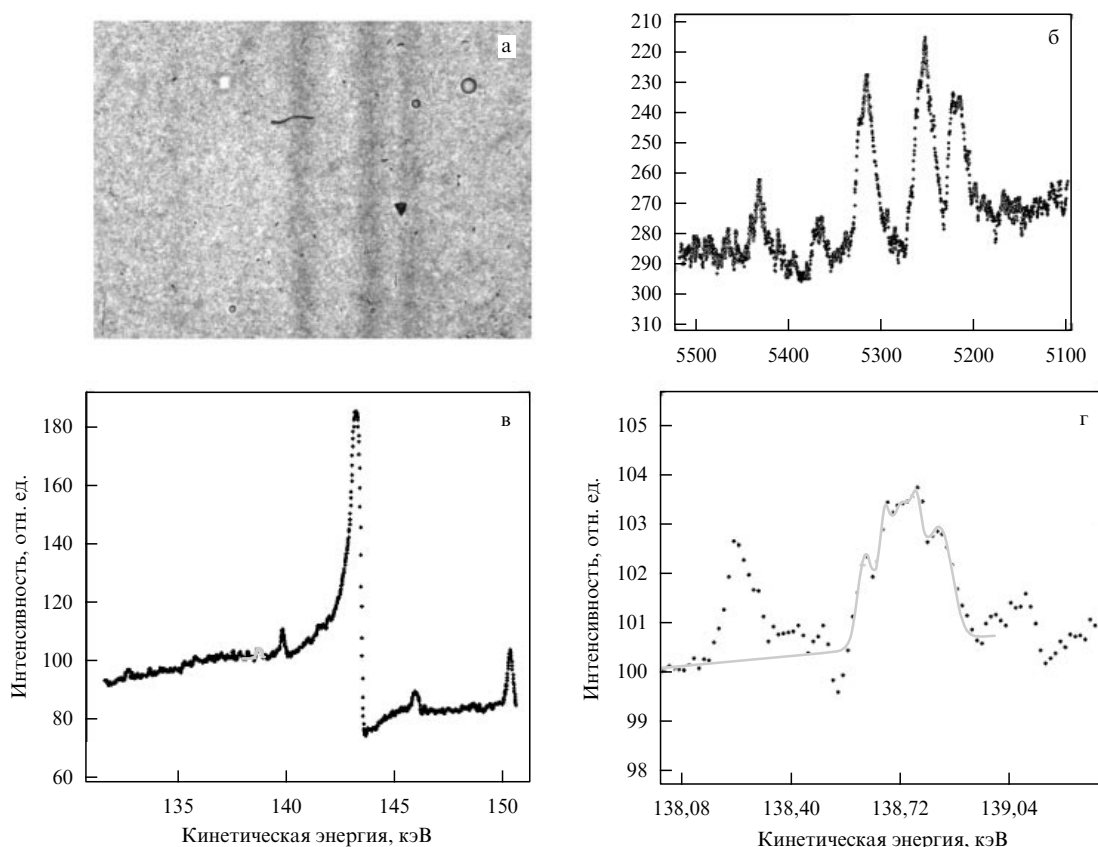


Рис. 3. Результаты обработки спектров электронов внутренней конверсии изотопа Eg^{68} . (а) Изображение одного поля зрения размером 3×4 мм в эмульсии, облучённой электронами внутренней конверсии. (б) То же поле зрения после компьютерной обработки: по оси ординат — суммарная степень почернения (почернение изменяется в пределах от 0 до 255 байт, 0 соответствует чёрному цвету, 255 — белому), по оси абсцисс отложены условные единицы разбиения кадра при суммировании, общая длина кадра 4 мм. (в) Участок спектра в пересчёте на энергии электронов. (г) Увеличенный фрагмент рис. в: видна тонкая структура спектра — линии L_2 и L_3 .

неизвестных ядерных переходов, которые дополнили мировую базу данных по линиям ЭВК.

В частности, при исследовании спектра электронов внутренней конверсии с помощью техники микрофотометрии не удалось измерить интенсивность линий L_2 и L_3 γ -перехода с энергией 148,16 кэВ [71]. Это связано с наличием в этом энергетическом интервале К-линии ЭВК ($E_c = 139,9$ кэВ) интенсивного γ -перехода с энергией 195,5 кэВ в изотопе $^{158}\text{Eg}^{68}$. Искомые линии L_2 и L_3 $^{161}\text{Eg}^{68}$ попадают на правый и левый склоны указанной К-линии $^{158}\text{Eg}^{68}$ и "тонут" во флуктуациях фона. Тем не менее, используя корректную аппроксимацию спектральной линии, удалось выделить линии L_2 и L_3 на огромном фоне (эффект/фон $\sim 1/100$) (рис. 3).

Исследование нейтронно-избыточных ядер. Эксперимент Института ядерных исследований РАН — исследование структуры лёгких нейтронно-избыточных ядер — имеет целью получить информацию о возможности существования нейтронных кластеров в экзотических ядрах, например в ядре гелия-6. Несколько стопок из 4–6 бесподложечных ядерных фотоэмульсий с толщиной каждого слоя 400 мкм облучались направленным перпендикулярно к поверхности стопки пучком лёгких ядер ^6He , ^{11}Li и др. с энергиями $3 < E < 15$ МэВ/нуклон на ускорителе лаборатории ядерных реакций им. Г.Н. Флёрова ОИЯИ. В качестве мишеней служили ядра элементов, входящих в состав эмульсии (^{12}C , ^{14}N , $^{79,81}\text{Br}$,

$^{107,109}\text{Ag}$). Поскольку энергия продуктов реакции в заданном интервале энергий полностью поглощается в эмульсионной стопке толщиной 1600–2000 мкм, фотоэмульсия в этом эксперименте регистрирует все частицы в диапазоне углов 4π . Это обстоятельство существенно повышает эффективность метода по сравнению с эффективностью метода на основе электронных приборов. Сканирование эмульсий выполнялось на ПАВИКОМ, для чего было изготовлено дополнительное оборудование и разработано специальное программное обеспечение.

На примере 50 восстановленных событий рассеяния ядра ^6He на протоне с образованием ядер Т и D получена информация о двух случаях реакции: с передачей протону двух нейтронов и с передачей одного. С использованием результатов розыгрыша реакций с двухнейтронной и однеитронной передачей показано, что восстановленные события ложатся на обе кинематические области, подтверждая присутствие в ^6He обеих конфигураций [72, 73].

Методика автоматизированного определения зарядов ядер. На ПАВИКОМ была разработана и реализована методика автоматизированного определения зарядов релятивистских ядер в фотоэмульсии. Для выбора оптимальной процедуры определения заряда были рассмотрены и опробованы все известные методы определения заряда частиц по характеристикам их треков. Так, при

определении зарядов в интервале $Z = 3-7$ используется метод счёта числа разрывов (промежутков) между сгустками проявленных зёрен 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 [74]:

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

где T — кинетическая энергия дельта-электронов, x — количество вещества, пройденного ионизирующей частицей, N_A — число Авогадро, A — атомный вес атомов среды, z — заряд атомов среды, $\beta = v/c$, v — скорость ионизирующей частицы, c — скорость света. Параметр F , зависящий от спина ионизирующей частицы, при релятивистских энергиях считается постоянным, m_e и r_e — масса и классический радиус электрона, так что множитель $4\pi N_A r_e^2 m_e c^2 = 0,3071 \text{ МэВ см}^2 \text{ г}^{-1}$.

В работе, выполненной на ПАВИКОМ, использован комплексный метод определения заряда ядер, сочетающий в себе достоинства всех известных методик. В результате создан алгоритм, позволивший проводить с достаточной точностью измерение заряда ядер с $Z > 3$ [75]. При условии сканирования трека ядра длиной 3 мм точность определения его заряда по нашей методике, учитывающей несколько параметров, составляет 2%. Причём бывают случаи, когда вручную заряд определить невозможно, а программа это делает весьма успешно. В таблице 2 приведены результаты тестовых измерений, в которых использовались эмульсии, облучённые и маркированные в ОИЯИ (номер клетки в первой колонке таблицы обозначает область на эмульсионной пластине, в которой находится трек исследуемого ядра).

Дозиметрия медицинского углеродного пучка. При настройке медицинского углеродного пучка в ИТЭФ для дозиметрии облучаемого фантома человека использовались полимерные детекторы CR-39. Детекторы такого типа обеспечивают получение данных не только о средних значениях энергии частиц и энерговыделении частиц в объекте, но и о распределении плотности пучка в его сечении, количестве и месте попадания частиц, разбросе энергий частиц. Обработка этих детекторов также

проводилась на ПАВИКОМ. Диаметр поля пучка 45 мм, размер пластин $2 \times 2 \text{ см}^2$. Для подсчёта числа частиц, а также измерения размера кластеров производилось сканирование части пластины размером $5 \times 5 \text{ мм}^2$. Использовались объективы с увеличением в 100 раз (размер каждого кадра $420 \times 350 \text{ мкм}^2$).

Всё изложенное выше — лишь краткий рассказ о некоторых работах, которые были выполнены на ПАВИКОМ за 10 лет. При этом участие фиановской группы отнюдь не сводилось к простому предоставлению в аренду оборудования. Это всегда была совместная деятельность: вместе с коллегами из других институтов сотрудники ПАВИКОМ занимались сканированием, разрабатывали программное обеспечение, покупали дополнительно необходимое оборудование, проводили физический анализ данных. По результатам этих работ на ПАВИКОМ за 10 лет защищено три кандидатских (две — НИИЯФ МГУ, одна — ФИАН) и две докторских диссертации (обе — ФИАН).

Усилия фиановской группы ПАВИКОМ в настоящее время сконцентрированы в основном на двух проектах: участие в эксперименте OPERA и в проекте ОЛИМПИА.

Эксперимент OPERA — крупный международный эксперимент, целью которого является поиск осцилляций нейтрино.

Мы живём в практически нейтринной Вселенной — количество нейтрино очень велико, одним из основных их источников является Солнце. Каждую секунду через 1 см^2 на Земле проходит от 60 до 100 млрд этих частиц; в теле каждого человека примерно один раз в 70 лет происходит взаимодействие нейтрино. Нейтрино очень слабо взаимодействуют, и невыясненных вопросов о природе нейтрино достаточно много. Изучение свойств нейтрино имеет фундаментальное значение для физики элементарных частиц, астрофизики и космологии. В связи с этим хотелось бы напомнить слова, сказанные более 40 лет тому назад М.А. Марковым, который внёс большой вклад в изучение этой "загадочной" частицы: "Современнику трудно гадать, какое истинное место займёт нейтрино в физике будущего. Но свойства этой частицы столь элементарны и своеобразны, что естественно думать, что природа создала нейтрино с какими-то глубокими, пока для нас не всегда ясными целями" [76].

Несмотря на очевидные успехи, трудности экспериментов с нейтрино привели к тому, что сих пор не

Таблица 2.

Номер клетки	Заряд, определённый микроскопистом		Заряд, определённый посредством автоматизированной обработки	
	Первичный	Фрагмент	Первичный	Фрагмент
174-43/153 90-39	12	10	$12,2 \pm 0,4$	$10,2 \pm 0,3$
174-43/174 80-48		5		$4,9 \pm 0,3$
174-43/180 67-52	12		$12,2 \pm 0,4$	$10,2 \pm 0,3$
174-43/88 44-55	12	6	$12,2 \pm 0,4$	$6,6 \pm 0,5$
174-43/169 75-48	10		$9,7 \pm 0,6$	$4,2 \pm 0,9$
174-43/129 48-39	10	6	$9,3 \pm 0,6$	$5,9 \pm 0,4$
174-43/59 08-68	14	13	$14,0 \pm 0,5$	$13,3 \pm 0,5$

определены многие важнейшие характеристики нейтрино, такие, например, как массы различных сортов (ароматов) нейтрино, углы смешивания, не установлена природа массивных нейтрино и т.п. Нет фундаментальных причин полагать нейтрино безмассовыми, однако долгое время (согласно "научному общественному мнению") считалось, что массы покоя нейтрино равны нулю. С нулевыми значениями нейтринных масс согласовывались результаты многих экспериментов, в которых эти массы определялись исходя из кинематики слабых распадов, вероятности безнейтринного 2β -распада, а также из анализа нейтринных сигналов от сверхновой SN-1987A. Также предполагалось, что каждое из лептонных чисел, определяющих тип нейтрино (L_e , L_μ , L_τ), сохраняется во всех процессах. Если массы нейтрино отличны от нуля, то собственные состояния нейтрино с данной массой не совпадают с собственными состояниями нейтрино с данным лептонным числом. Поэтому должно существовать смешивание нейтрино, аналогичное смешиванию кварков, описываемому матрицей Кобаяси – Маскавы. Смешивание нейтрино должно приводить к нейтринным осцилляциям. Гипотеза о возможности нейтринных осцилляций была предложена Б.М. Понтекорво в 1957 г. Нейтринные осцилляции представляют собой периодический процесс полного или частичного изменения аромата движущегося в вакууме или веществе нейтринного пучка.

Вопрос об осцилляциях нейтрино и их массе настолько важен, что в мире проводится очень много самых разных экспериментов с целью выяснения этого вопроса. Успех "осцилляционных" экспериментов в значительной мере обусловлен использованием так называемых дальних нейтрино, т.е. нейтрино, которые проходят от источника до детектора значительное расстояние L . Дело в том, что чувствительность экспериментов к малой величине разности квадратов масс нейтрино $\Delta m_{ij}^2 = m_i^2 - m_j^2$ определяется пролётной базой эксперимента L , т.е. расстоянием между источником нейтрино и детектором. Для наблюдения осцилляций необходимо, чтобы пролётная база была близка к так называемой длине осцилляций $L = 4\pi E_\nu / \Delta m_{ij}^2$, которая при малых значениях Δm_{ij}^2 может быть очень велика. Таким образом, теория требует от экспериментов, в которых предполагается прямая регистрация осцилляций, наличия большой пролётной базы, высоких энергии и интенсивности пучка. До сих пор все осцилляционные эксперименты исследовали "выбывание". То есть предполагается, что должно быть зарегистрировано определённое количество нейтрино одного аромата, и если их приходит меньше, то делается заключение, что произошли осцилляции. Первым экспериментом "на появление" стал начавшийся в 2006 г. эксперимент OPERA, в детекторе которого возможна прямая регистрация появления таонного нейтрино в пучке мюонных нейтрино посредством прямой регистрации короткоживущего тау-лептона (время жизни τ -лептона $2,9 \times 10^{-13}$ с).

Для того чтобы выполнить этот эксперимент по поиску нейтринных осцилляций, в ЦЕРНе был построен специальный километровый канал для вывода нейтринного пучка в крупнейшую подземную лабораторию Гран Сассо (Италия). Практически чистый пучок мюонных нейтрино (вклад в ν_μ -пучок нейтрино других типов не превышает следующих значений: $\nu_e/\nu_\mu = 0,8\%$, $\bar{\nu}_\mu/\nu_\mu = 2,0$, $\bar{\nu}_e/\nu_\mu = 0,05\%$) проходит расстояние 732 км, имея

среднюю энергию 17 ГэВ, в результате их осцилляций могут возникнуть таонные нейтрино. Число взаимодействий, произошедших в 1 кт массы детектора на каждый сброшенный на мишень протон, составляет около $5,44 \times 10^{-17} \nu_\mu$ по каналу заряженного тока на один протон на 1 кт.

Детектор OPERA массой 1,25 кт состоит из двух независимых супермодулей, включающих в себя блоки мишени и мюонные спектрометры. Основной элемент детектора — эмульсионный "кирпич", состоящий из 56 свинцовых пластин, толщиной 1 мм каждая, и 57 эмульсионных пластин. Площадь "кирпича" $12,8 \times 10,2$ см², толщина 7,9 см (около 10 радиационных единиц). За каждой стенкой из мишенных блоков находятся стриповые электронные детекторы, используемые для получения целеуказания на эмульсионный кирпич, в котором произошло взаимодействие [77]. В эксперименте OPERA рассматривается несколько типов событий, но главной целью является поиск взаимодействия по каналу заряженного тока, когда может родиться тау-лептон. Задача эксперимента — выделить взаимодействия таонных нейтрино на преобладающем фоне взаимодействий нейтрино других ароматов по характерной для такого рода событий топологии. Особенности топологии связаны с распадами короткоживущего таона. Тау-лептон идентифицируется по распаду с образованием одного видимого следа частицы (электрона, мюона или адрона) или трёх видимых частиц. При распаде тау-лептона по одной из указанных схем образуется характерный излом трека, который при исследовании топологии события является основным признаком образования тау-лептона. После получения целеуказания от системы электронных детекторов и подтверждения его по результатам сканирования двух специальных сменных слоёв эмульсионные кирпичи отправляются на обработку в различные лаборатории Италии, Японии, Швейцарии, в России — пока только на ПАВИКОМ.

В 2010 г. коллаборация OPERA сообщила о регистрации первого тау-лептона в детекторе OPERA. Обработка этого события была выполнена дважды, независимо в двух лабораториях было проведено сканирование большой площади ядерной фотоэмульсии, что позволило полностью реконструировать картину взаимодействия (рис. 4). Найдено одно событие в адронном канале распада тау-лептона. Если рассматривать только канал с рождением адрона ($\tau^- \rightarrow h^-(\pi^0) \nu_\tau$), то вероятность наблюдения одного события по отношению к флуктуациям фона составляет 1,8 % при $2,36\sigma$. Если включать в рассмотрение все моды распада тау-лептона, то вероятность наблюдения одного события с учётом фона составляет 4,5 %. Это соответствует $2,01\sigma$ [78]. Таким образом, с вероятностью 98,2 % на уровне достоверности $2,36\sigma$ детектор коллаборации OPERA зарегистрировал рождение тау-лептона и его последующий распад по адронной моде (см. рис. 4).

Безусловно, факт регистрации первого прямого появления таонного нейтрино в пучке мюонных — событие для мировой физики, что было отмечено в специальном письме директора ЦЕРНа Рольфа Хойера от 31 мая 2010 г. и в целом ряде публикаций научных журналов. Эксперимент продолжается, и прямая регистрация новых случаев осцилляций нейтрино позволит продвигаться дальше в понимании свойств этих необычных частиц, окружающих нас в очень большом количестве. К марту 2012 г. по результатам обработки было выде-

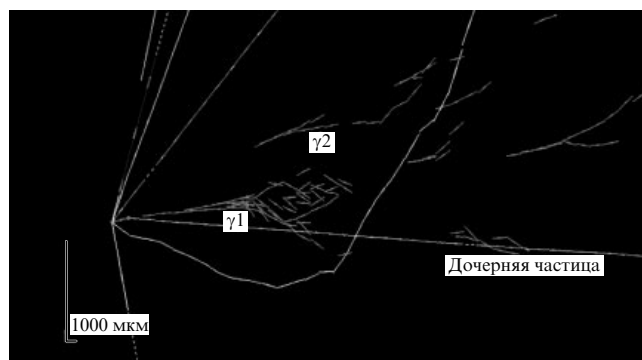


Рис. 4. Наблюдение первого кандидата на взаимодействие ν_τ по каналу заряженного тока в детекторе эксперимента OPERA в подземной лаборатории Гран Сассо Национального института ядерной физики (Италия). Кандидат был идентифицирован в выборке событий, соответствующих $1,89 \times 10^{19}$ pot (protons on target) в пучке ν_μ от ускорителя ЦЕРНа в сторону Гран Сассо. Предполагаемый τ^- -лептон распадается на $h^-(\pi^0)\nu_\tau$.

лено и сейчас анализируется 3054 событий взаимодействий нейтрино по каналу заряженного тока, из них 55 событий идентифицировано как события с рождением очарованных частиц, 24 события — с ν_e , одно событие — регистрация тау-лептона; продолжается поиск новых случаев появления тау-лептонов, по результатам обработки готовится доклад на международной конференции по нейтринной физике в Японии в июне 2012 г.

Проект ОЛИМПИА. Весьма важной работой, проводимой на ПАВИКОМ, является проект ОЛИМПИА (ОЛИвины из Метеоритов — Поиск тяжёлых и сверхтяжёлых Ядер). Проблема поиска тяжёлых и сверхтяжёлых ядер в природе связана с вопросом о существовании островов стабильности в Периодической системе элементов. В.Л. Гинзбург считал эту проблему одной из самых важных для физики XXI в. и включил её в свой знаменитый список первоочередных задач. По инициативе В.Л. Гинзбурга в ФИАНе начали заниматься поиском следов тяжёлых и сверхтяжёлых ядер в кристаллах оливинов из метеоритов [79] (рис. 5). Работа выполняется вместе с сотрудниками Института геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского (ГЕОХИ) при поддержке лаборатории ядерных реакций ОИЯИ.

В 1869 г. Д.И. Менделеев сформировал Периодическую систему элементов, внося в неё 63 известных к тому времени элемента. Периодичность изменения химических свойств отражает периодичность заполнения электронных оболочек атома. Создание таблицы позволило предсказать и открыть галлий (1875 г.), скандий (1879 г.), германий (1886 г.). В 2009 г. официальные границы были расширены до 114-го элемента, сейчас проходит процедура сертификации 114-го и 116-го элементов, а в ускорительных экспериментах уже получены первые ядра элемента 118. Сколько элементов содержится всего в таблице? Где её граница? Чем больше заряд ядра, т.е. чем больше порядковый номер элемента, тем сильнее притягиваются к ядру внутренние электроны. В конечном итоге должен наступить момент, когда они начнут захватываться ядром. Первые расчёты показывали, что элементы с порядковыми номерами более чем 170–180 существовать не могут — поглощение отрицательно заряженного электрона уменьшает заряд ядра. Однако последующее развитие физики показало, что границу



Рис. 5. Образцы метеоритов, используемые для исследования в проекте ОЛИМПИА: верхний, большего размера, — часть метеорита Марьялахти (Финляндия, 1 июня 1902 г.); размер целого метеорита ≈ 30 см, вес ≈ 45 кг, возраст 185 млн лет (музей геологической службы Финляндии). Нижний образец, меньшего размера, — часть метеорита Игл Стейшен (США, 1880 г.); размер целого метеорита ≈ 25 см, вес ≈ 38 кг, возраст 300 млн лет.

таблицы определяет не нестабильность электронной оболочки атома, а нестабильность ядра — источника электрического поля, в котором формируются электронные оболочки. Наиболее стабильны ядра, содержащие так называемое магическое число нейтронов или протонов (2, 8, 20, 50, 82, 126). Как и атомные электроны, нуклоны в ядрах образуют оболочки. По мере увеличения числа частиц в ядре происходит последовательное заполнение оболочек. Подобно тому как в периодической системе наиболее стабильны инертные газы, наиболее стабильны те ядра, у которых целиком заполнены нейтронные и протонные оболочки. Таким замкнутым оболочкам как раз и соответствуют магические числа (кальций, олово, свинец). Вопрос о существовании сверхтяжёлых ядер имеет важнейшее значение для понимания свойств ядерной материи. Прежде всего представляет интерес проверка предсказания [80] значительного увеличения стабильности ядер вблизи магических чисел $Z = 114$ и $N = 184$ (N — число нейтронов), которое могло бы приводить к существованию в этой области "островов стабильности" сверхтяжёлых ядер.

В трансурановых ядрах даже ядерные силы притяжения с трудом сдерживают огромные электростатические силы отталкивания между протонами. Поэтому чем больше порядковый номер ядра, тем меньше его время жизни. Плутоний-244 живёт 100 млн лет, калифорний-250 — около 10 лет, фермий-252 — 20 ч. Виноваты альфа-распад и спонтанное деление. Чем тяжелее ядро, тем больше роль деления. Ядро урана ($Z = 92$) — самое тяжёлое из найденных на Земле. Следующие ядра были синтезированы искусственно.

Теория предсказывает, что элемент с зарядом 110 и атомной массой 294 должен жить сто миллионов (а может и миллиард) лет. Но если изменить число нейтронов или протонов на 2–3 единицы, т.е. всего на 1 %, то время жизни должно уменьшиться в 10 млн раз. Такой эффект наблюдается, например, у дважды магического ядра свинца: 82 протона и 126 нейтронов. Этот свинец-208 настолько стабилен, что никто ещё не наблюдал его

распада. Но свинец со 127 нейтронами распадается за 3,3 ч.

Вполне понятен научный интерес к определению границы Периодической системы, но зачем нужны искусственные сверхтяжёлые элементы?

Самым "работающим" из всех синтезированных элементов оказался плутоний-239. В ядерных реакторах сжигают уран-235, которого содержится всего 0,7 % в природном уране, а основную массу составляет уран-238, который не является ядерным горючим. В реакторах на быстрых нейтронах после сгорания 1 кг урана-238 получается 1,6 кг плутония-239, который является ядерным горючим лучшего качества, чем уран-235. В настоящее время применение синтетических элементов огромно — это и космос, и медицина и др. Их производство возросло от нескольких миллиардных долей грамма до многих килограммов и даже тонн.

Предсказания теории говорят о том, что за ураном должны существовать острова стабильности сверхтяжёлых элементов. Именно поэтому работы по искусственному синтезу сверхтяжёлых элементов продолжались всегда.

Первые искусственные элементы были синтезированы так называемым реакторным способом — прямым присоединением нейтронов к ядру. Однако возможности такого синтеза на Земле были достаточно быстро исчерпаны. Последний элемент, полученный таким прямым нейтронным синтезом, — это 100-й элемент, фермий, который был найден в грунте после ядерного взрыва. Для такого синтеза требуются слишком большие плотности потоков нейтронов и большие энергии. Сейчас таким образом элементы могут синтезироваться только в астрофизических процессах, а в земных условиях на ускорителях сверхтяжёлые ядра синтезируются в столкновениях двух различных ядер.

Согласно существующим представлениям, элементы, от углерода и до более тяжёлых, образуются в недрах звёзд и при взрывах сверхновых [81]. Тяжёлые и сверхтяжёлые элементы, находящиеся в таблице Менделеева за висмутом, образуются в результате г-процессов (быстрых процессов захвата нейтронов), которые происходят при высокой концентрации нейтронов и могут приводить к образованию сверхтяжёлых ядер с числом нейтронов вплоть до $N = 184$. Кроме этих традиционных механизмов, обсуждается возможность образования очень тяжёлых ядер (с массовым числом до 500) при большой плотности нейтронов (порядка 10^{30} см^{-3}) и умеренной температуре $T < 10^8 \text{ К}$ [82]. Такая ситуация может реализоваться в неравновесных оболочках нейтронных звёзд, выбросы из которых приведут к появлению сверхтяжёлых элементов в межзвёздной среде, звёздах и планетах [83, 84].

Одним из мировых лидеров по синтезу новых элементов в земных условиях является лаборатория ядерных реакций ОИЯИ. Сотрудникам лаборатории удалось синтезировать 12 из 18 трансфермиевых элементов (102, 103, 104, 105 (дубний), 106 — под руководством Г.Н. Флёрова; 112, 113, 114, 115, 116, 117, 118 — под руководством Ю.Ц. Оганесяна).

Экспериментальные данные по сверхтяжёлым ядрам в природе чрезвычайно бедны, таких ядер очень мало — всего лишь 1–2 ядра на 1 м^2 в год, для трансфермиевых ядер достаточно надёжные данные вообще отсутствуют. Отсутствуют также какие-либо данные и о возможном

существовании экзотических сверхтяжёлых ядер. Поэтому для поиска их в природе требуются детекторы с очень большими площадями и длительные экспозиции.

Измерение потоков и спектров тяжёлых и сверхтяжёлых ядер в космических лучах является эффективным способом изучения состава источников космических лучей, процессов, происходящих как в самих источниках, так и в межзвёздной среде, в которой распространяются космические лучи, и моделей удержания космических лучей в галактике. Согласно оценке Г.Н. Флёрова, предложившего рассматривать метеорит как естественный детектор космических лучей, при возрасте метеорита несколько сотен миллионов лет исследование его вещества объёмом 1 см^3 эквивалентно проведению эксперимента с 1 т фотоэмульсии в космосе в течение года. Использование фактора длительной экспозиции метеоритов в космосе обеспечивает огромное преимущество метода поиска сверхтяжёлых элементов в кристаллах оливинов из метеоритов над методами, основанными на использовании различных спутниковых и аэростатных детекторов. При поиске реликтовых треков, оставленных частицами космических лучей в минералах, входящих в состав некоторых метеоритов, используется способность силикатных кристаллов, содержащихся в метеоритах (оливинов, пироксенов), регистрировать и сохранять в течение длительного времени ($> 10^8$ лет) треки ядер с $Z > 20$. Типичный возраст метеоритов и, следовательно, время их экспозиции в потоке космических лучей оценивается как 10^7 – 10^9 лет. Поэтому они могут содержать большое число треков космических ядер. Как показывают оценки, в 1 см^3 таких кристаллов, расположенных на глубине $< 5 \text{ см}$ от доатмосферной поверхности метеорита, за 10^8 лет может образоваться 10^2 – 10^3 треков ядер с $Z > 90$, а в кристаллах из поверхностных участков метеорита (глубина $< 1 \text{ см}$) — до 10^4 треков. Измеряя параметры треков, можно не только идентифицировать частицы, но и определить их энергетические спектры. Метеориты типа палласитов состоят из железо-никелевой "матрицы", в объёме которой имеются включения кристаллов оливина — полупрозрачного минерала жёлтого цвета — размером до 1–2 см. Как и предыдущие эксперименты с оливинами, эксперимент ОЛИМПИА основан на использовании метода твердотельных трековых детекторов, в котором частицы регистрируются по производимым ими радиационным повреждениям в материале детектора.

Исследуются образцы двух метеоритов: Марьялахти (185 млн лет) и Игл стейшен (300 млн лет). Оба этих метеорита — палласиты.

Разработанная в проекте ОЛИМПИА методика впервые позволяет просматривать весь объём кристалла и тем самым существенно увеличивать статистику обработанных треков. Созданное на ПАВИКОМ программное обеспечение позволяет выделять области кристаллов, находить и измерять геометрические параметры треков ядер, а также осуществлять пространственное сшивание следов. Основная задача проекта ОЛИМПИА заключается в определении зарядового состава космических лучей в области тяжёлых и сверхтяжёлых ядер. Величина заряда связана с характеристиками протравленного трека. Основной из них является травимая длина L_{etch} , однако для очень тяжёлых ядер L_{etch} превышает размеры образцов оливина. Для выхода из создавшегося

положения было предложено использовать дополнительную величину — скорость травления. Последняя изменяется во время травления, возрастая по мере приближения к точке остановки частицы [85, 86].

Обработано примерно 170 кристаллов с размерами не более 2 мм. Уже получено зарядовое распределение около 6000 ядер галактических космических лучей с зарядом более чем 55. Отношение распространённости ядер с $Z \geq 88$ к распространённости ядер с $74 \leq Z \leq 87$ равно $0,045 \pm 0,015$ (Марьялахти) и $0,025 \pm 0,020$ (Игл Стейшн). Эти величины несколько больше, чем в эксперименте UHCRE (Ultra Heavy Cosmic Ray Experiment) ($0,0147 \pm 0,0032$) [87], но хорошо согласуются с данными экспериментов TREK (Time Reversal Experiment with Kaons), HEAO (High Energy Astrophysics Observatory) и "Ariel" [88–90]. Но в зарядовом распределении, полученном в проекте ОЛИМПИА при обработке детекторов со временем наблюдения 185–300 млн лет, присутствуют намного более тяжёлые ядра [91].

В начале 2010 г. в ходе выполнения проекта ОЛИМПИА обнаружены три сверхдлинных ($L_{\text{etch}} > 700$ мкм) трека, скорость травления которых $V_{\text{etch}} > 35$ мкм ч^{-1} . Если учесть, что экспериментально измеренная максимальная величина скорости травления треков в оливине для ядер урана перед их остановкой $V_{\text{etch,U}} = (26 \pm 1)$ мкм ч^{-1} , то становится ясно, что заряды этих ядер существенно превышают $Z = 92$. Так как в этой области зарядов функция $Z(\text{RR}, V_{\text{etch}})$ неизвестна (RR — остаточная длина пробега), для оценки заряда трансурановых ядер в первом приближении произведена экстраполяция функции $Z(\text{RR}, V_{\text{etch}})$ по ядрам, для которых имеются экспериментальные данные калибровочных измерений. Была получена в первом приближении оценка границ заряда трёх ультратяжёлых ядер галактических космических лучей в интервале $105 < Z < 130$. Этот результат был представлен на 32-й Международной конференции по космическим лучам в августе 2011 г. [92]. Проведённый регрессионный анализ позволил уточнить оценку заряда одного из трёх ядер — он равен 119_{-6}^{+10} с вероятностью 95 % (рис. 6). Именно такие ядра должны образовывать острова стабильности, их обнаружение в природе подтверждает справедливость теоретических предсказаний и оправдывает усилия по их синтезу в земных условиях.

Таким образом, трековая методика даёт возможность получать приоритетные результаты, чрезвычайно важные для понимания физической картины мира.

Кроме того, как говорилось выше, эта методика успешно применяется во многих прикладных работах. Прежде всего — это работы по мюонной радиографии. Нобелевский лауреат Луис Альварес ещё в прошлом веке предложил использовать для "просвечивания" египетских пирамид потоки мюонов — частиц с массой, в 200 раз большей массы электрона, обладающих высокой энергией и проникающей способностью и составляющих около 70 % частиц вторичного космического излучения, достигающего Земли. Плотность потока мюонов зависит от количества вещества на его пути, и если на пути есть пустоты, как в пирамидах, то из этого направления частиц придёт больше. Л. Альварес, используя пузырьковую камеру, с помощью метода мюонной радиографии "просветил" примерно 10 % объёма двух египетских пирамид. Ограниченность просмотренного им объёма была связана со сложностью обработки данных пузырьковой камеры. Современная автоматиза-

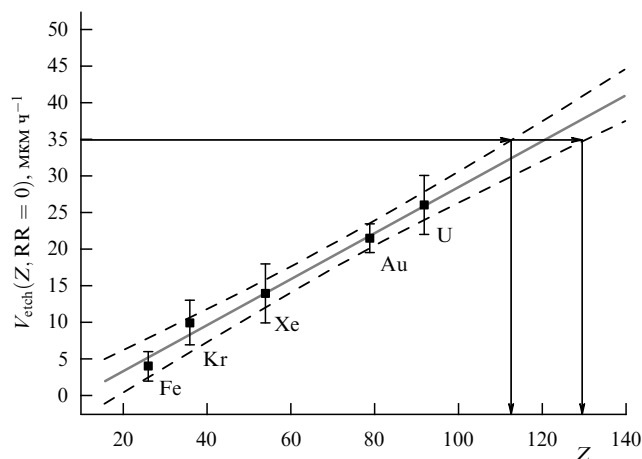


Рис. 6. Результат оценки заряда одного из трёх ультратяжёлых ядер на основе регрессионного анализа: на уровне достоверности 95 % заряд ядра, оставившего трек, имеющий скорость травления вблизи точки остановки 35 мкм ч^{-1} , равен $Z = 119(+10, -6)$. Сплошная линия — описание экспериментальных точек прямой, штриховыми линиями показан коридор ошибок на уровне достоверности 95 %. Вертикальные линии выделяют возможный интервал заряда на уровне достоверности 95 % при скорости травления вблизи точки остановки.

ция измерений в ядерной эмульсии и её исключительно высокое пространственное разрешение обусловили резкое увеличение объёма работ в мире по мюонной радиографии с использованием эмульсионной методики. В настоящее время мюонная радиография активно используется в Японии и Италии для неразрушающего контроля промышленных объектов (например, ядерных реакторов, доменных печей сталелитейных комбинатов и опор мостовых конструкций) и изучения внутренней структуры вулканов. Исследуется структура вулканов Асама и Унзен в Японии, Стромболи и Везувия в Италии. По-видимому, единственно приемлемым является предложение японских физиков использовать эмульсионные стопки и мюонную радиографию для просвечивания полуразрушенного реактора Фукусимы. Действительно, в условиях повышенного радиационного фона, невозможности обеспечить энергоснабжение, ограниченности пространства лучшим способом восстановления внутренней структуры с наиболее высокой пространственной точностью является именно использование эмульсионных стопок.

Бёрнский университет проводит исследование месторождения полезных ископаемых в Канаде с помощью метода мюонной радиографии и трековой методики. При соотношении плотностей 1 к 3 показана эффективность использования именно этой методики.

В настоящее время разрабатываются перспективы использования ПАВИКОМ и накопленного опыта автоматизированного распознавания изображений для изучения безнейтринного двойного бета-распада [93], исследования внутренней структуры промышленных объектов методами мюонной радиографии, расширения возможностей ПАВИКОМ для распознавания объектов на изображениях в различных инновационных работах, например в автоматизации медицинских измерений параметров крови.

Таким образом, очевидно, что ядерно-физическая трековая методика открывает возможность получать

ответы на многие актуальные вопросы современной физики, а также извлекать реальную практическую пользу благодаря модернизации подходов к решению широкого круга важных прикладных задач.

Список литературы

1. Becquerel H C.R. Acad. Sci. **122** 420 (1896)
2. Becquerel H C.R. Acad. Sci. **122** 501 (1896)
3. Becquerel H C.R. Acad. Sci. **122** 1086 (1896)
4. Wilson C T R Phil. Trans. **189** 265 (1897)
5. Hess V Phys. Z. **14** 610 (1913)
6. Glaser D A Phys. Rev. **87** 665 (1952)
7. Photographie Corpusculaire, Strasbourg 1–6 Juillet 1957 (Paris: Centre National de la Recherche Scientifique, 1958)
8. Csikai J, Szalay A ЖЭТФ **35** 1074 (1958) [Sov. Phys. JETP **8** 749 (1959)]
9. Childs C B, Slifkin L M Rev. Sci. Instrum. **34** 101 (1963)
10. England J B A Techniques in Nuclear Structure Physics Pt. 1 (New York: Wiley, 1974)
11. Fleischer R L, Price P B, Walker R M Nuclear Tracks in Solids: Principles and Applications (Berkeley: Univ. of California Press, 1975)
12. Haase G, Schopper E, Granzer F, in Solid State Nuclear Track Detectors: Proc. of the 9th Intern. Conf., Munich, Suppl. I, Nucl. Tracks (Eds F Granzer, H Paretzke, E Schopper) (Oxford: Pergamon, 1978) p. 199
13. Durrani S A, Bull R K Solid State Nuclear Track Detection: Principles, Methods, and Applications (Oxford: Pergamon Press, 1987) [Дюррани С, Балл Р Твердотельные ядерные детекторы (М.: Энергоатомиздат, 1990)]
14. Charpak G Rev. Mod. Phys. **65** 591 (1993); in Nobel Lectures, Physics, 1991–1995 (Singapore: World Scientific, 1997); http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1992/charpak-lecture.html; Шарпак Ж УФН **163** (10) 57 (1993)
15. Price P B et al. Phys. Rev. **164** 1618 (1967)
16. Price P B et al. Phys. Rev. Lett. **21** 630 (1968)
17. Fowler P H et al. Proc. R. Soc. Lond. A **318** 1 (1970)
18. Chan J H, Price P B Phys. Rev. Lett. **35** 539 (1975)
19. O'Sullivan D et al., in Solid State Nuclear Track Detectors: Proc. 10th Intern. Conf. Solid State Nucl. Track Detectors, Lyon, Suppl. 2, Nuclear Tracks (Oxford: Pergamon Press, 1980) p. 1011
20. Shutt R P (Ed.) Bubble and Spark Chambers Vol. 2 (New York: Academic Press, 1967)
21. Adair R K, Fowler E C Strange Particles (New York: Wiley Intersci., 1963)
22. Dalitz R H Annu. Rev. Nucl. Part. Sci. **13** 339 (1963)
23. Byers N, Fenster S Phys. Rev. Lett. **11** 52 (1963)
24. Intern. Conf. on Fundamental Aspects of Weak Interactions, Brookhaven Nat. Lab., Upton, Long. Island, 1963 (Rep. BNL 837(C-39)) (Upton: BNL, 1964)
25. Feinberg G, Lederman L M Annu. Rev. Nucl. Part. Sci. **13** 431 (1963)
26. Yoshida J, OPERA Meeting, Nagoya, Japan, March 2010, poster
27. Burger G, Frunauer F, Paretzke H, in Proc. Symp. Adv. Rad. Detectors (Vienna: Intern. Atomic Energy Agency, 1970) paper Sm-143.17
28. Fremlin J H, Abu-Jarad F Nucl. Instrum. Meth. **173** 197 (1980)
29. Frank A L, Benton E V "Active and passive radon-daughter osimeters using track-etch detectors", Tech. Report 39 (San Francisco: Dept. of Physics, Univ. of San Francisco, 1975)
30. Savvides E et al. Int. J. Appl. Radiat. Isotop. **36** 79 (1985)
31. Birot A, Adroguer B, Fontan J J. Geophys. Res. **75** 2373 (1970)
32. Fowler F H, Perkins D H Nature **189** 524 (1961)
33. Benton E V et al., in Proc. 7th Intern. Colloq. Corpuscular Photography and Visual Solid Detectors, Barcelona, 1970, p. 423
34. Cross W G, Tommasino L Health Phys. **15** 196 (1968)
35. Tommasino L, Klein N, Solomon P Nucl. Track Detection **1** 63 (1977)
36. Harvey J R, Weeks A R Nucl. Tracks Radiat. Meas. **6** 201 (1982)
37. Tommasino L "Electrochemical etching of damaged track detectors by H.V. pulse and sinusoidal waveform", International Rept. Lab. Dosimetria e Standardizzazione (Rome: CNEN Casaccia, 1970)
38. Wang H, in 12th Intern. Conf. on Ultra-Relativistic Nucleus-Nucleus Collisions, Heidelberg, May 1996
39. Astafyeva N M et al., in 6th Conf. on the Intersections of Particle and Nuclear Physics, 1997, p. 269
40. Di Liberto S, Ginobbi P Nucl. Instrum. Meth. **147** 75 (1977)
41. Abmayr W et al. Nucl. Instrum. Meth. **147** 79 (1977)
42. Schott J U, Schopper E, Staudte R Nucl. Instrum. Meth. **147** 63 (1977)
43. Niwa K, Hoshino K, Niu K, in Proc. of the Intern. Cosmic Ray Symp. on High Energy Phenomena (Tokyo: Cosmic Ray Lab., Univ. 1974) p. 149
44. Фейнберг Е Л, Котельников К А, Полухина Н Г ЭЧАЯ **35** 763 (2004) [Feinberg E L, Kotelnikov K A, Polukhina N G Phys. Part. Nucl. **35** 409 (2004)]
45. Boos E G et al., in Experiments at CERN in 1996 (Geneva, 1996) p. 122
46. Chernavskaya O D et al., in 28th Intern. Conf. on High Energy Physics, Proc., Warsaw, 1996, Vol. 1, p. 941
47. Добротин Н А и др. Изв. РАН, сер. физ. **63** 485 (1999)
48. Dremir I M et al. Phys. Lett. B **499** 97 (2001); hep-ph/0007060
49. Полухина Н Г, Дисс. ... докт. физ.-мат. наук (М.: ФИАН, 2006)
50. Александров А Б, Дисс. ... канд. физ.-мат. наук (М.: ФИАН, 2009)
51. Dremir I M et al., in Proc. of the 4th Rencontres du Vietnam, 2000, p. 531
52. Dremir I M Nucl. Phys. A **767** 233 (2006); hep-ph/0507167
53. Aranasenko A V et al. (RUNJOB Collab.) Astropart. Phys. **16** 13 (2001)
54. Апанасенко А В и др. (Сотруд. RUNJOB) Изв. РАН, сер. физ. **65** (3) 433 (2001)
55. Kamioka E et al. (RUNJOB Collab.) Adv. Space Res. **26** 1839 (2001)
56. Publichenko P A et al. (RUNJOB Collab.), in Proc. of 27th Intern. Cosmic Ray Conf. August 2001 Germany, Hamburg 2001 Vol. 6, p. 2131
57. Hareyama M et al. (RUNJOB Collab.) Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A **512** 553 (2003)
58. Furukawa M et al. (RUNJOB Collab.) Proc. 28th ICRC **4** 1885 (2003)
59. Kovalenko A D et al. Few-Body Syst. Suppl. **14** 241 (2003)
60. Adamovich M I et al. Письма в ЭЧАЯ (2) 29 (2003)
61. Адамович М И и др. ЯФ **67** 533 (2004) [Adamovich M I et al. Phys. Atom. Nucl. **67** 514 (2004)]
62. Adamovich M I et al., nucl-ex/0301003
63. Bradnova V et al. Acta Phys. Slovaca **54** (4) 351 (2004)
64. Андреева Н П и др., Препринт № P1-2004-91 (Дубна: ОИЯИ, 2004)
65. Андреева Н П и др. ЯФ **68** 484 (2005) [Andreeva N P et al. Phys. Atom. Nucl. **68** 455 (2005)]
66. Тумендэлгэр Ц и др., Препринт № P1-99-247 (Дубна: ОИЯИ, 1999)
67. Кривопустов М И и др., Препринт № P1-2000-168 (Дубна: ОИЯИ, 2000)
68. Котельников К А и др., Препринт № 25 (М.: ФИАН, 2001)
69. Азаренкова И Ю и др. ИТЭ (1) 66 (2004) [Azarenkova I Yu et al. Instrum. Exp. Tech. **47** 58 (2004)]
70. Апачева И Ю и др., в сб. Труды 54-го Международ. совещания по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра (Белгород, 2004) с. 276
71. Абдуразаков А А и др. Атлас спектров электронов внутренней конверсии нейтрондефицитных радиоактивных нуклидов в области $A = 131$ –172 (Ташкент: Узбекистон, 1991)
72. Старков Н И, Дисс. ... докт. физ.-мат. наук (М.: ФИАН, 2010)
73. Беловицкий Г Е и др. Изв. РАН, сер. физ. **70** 650 (2006)
74. Powell C F, Fowler P H, Perkins D H The Study of Elementary Particles by the Photographic Method (London: Pergamon Press, 1959) [Пауэлл С, Фаулер П, Перкинс Д Исследование элементарных частиц фотографическим методом (М.: ИЛ, 1962)]
75. Александров А Б и др., Препринт № 29 (М.: ФИАН, 2005)
76. Марков М А Нейтрино (М.: Наука, 1964)
77. Acquafredda R et al. JINST **4** P04018 (2009)
78. Agafonova N et al. (OPERA Collab.) Phys. Lett. B **691** 138 (2010)
79. Гинзбург В Л и др. Докл. РАН **402** 472 (2005) [Ginzburg V L et al. Dokl. Phys. **50** 283 (2005)]
80. Strutinsky V M Nucl. Phys. A **95** 420 (1967)
81. Гинзбург В Л УФН **169** 419 (1999) [Ginzburg V L Phys. Usp. **42** 353 (1999)]
82. Зельдович Я Б ЖЭТФ **38** 1123 (1960) [Zel'dovich Ya B Sov. Phys. JETP **11** 812 (1960)]
83. Бисноватый-Коган Г С, Четчин В М УФН **127** 263 (1979) [Bisnovatyi-Kogan G S, Chechetkin V M Sov. Phys. Usp. **22** 89 (1979)]
84. Крамаровский Я М, Чечев В П Синтез элементов во Вселенной (М.: Наука, 1987)
85. Perron C, Maury M Int. J. Radiat. Appl. Instrum. D **11** (1/2) 73 (1986)

86. Perron C, Bourot-Denise M *Int. J. Radiat. Appl. Instrum. D* **12** 29 (1986)
87. Donnelly J et al., in *Proc. of the 26th Intern. Cosmic Ray Conf., 1999*, OG1.1.30
88. Westphal A J et al. *Nature* **396** 50 (1998)
89. Binns E V et al. *Astrophys. J.* **346** 997 (1989)
90. Fowler P H et al. *Astrophys. J.* **314** 739 (1987)
91. Александров А Б и др. *УФН* **180** 839 (2010) [Aleksandrov A B et al. *Phys. Usp.* **53** 805 (2010)]
92. Aleksandrov A B et al., in *32nd Intern. Cosmic Ray Conf., Beijing, August 2011*
93. Ашитков В Д и др. *Краткие сообщения по физике ФИАН* (10) 22 (2011) [Ashitkov V D et al. *Bull. Lebedev Phys. Inst.* **38** (10) 297 (2011)]

PACS numbers: 74.25.Na, 74.25.Op, **74.50.+r**, **74.72.-h**, 74.72.Hs
DOI: 10.3367/UFNr.0182.201206h.0669

Высокотемпературные сверхпроводники в сильных и сверхсильных магнитных полях

С.И. Веденеев

1. Введение

Высокотемпературные сверхпроводники (высокие температуры сверхпроводящего перехода, T_c) — семейство материалов с общей структурной особенностью — относительно хорошо разделёнными медно-кислородными плоскостями. Их также называют купратами. Величина T_c , которая может быть достигнута в некоторых составах в этом семействе, является самой высокой среди температур сверхпроводящего перехода всех известных сверхпроводников. В настоящее время получено рекордно высокое значение $T_c = 135$ К (под давлением $T_c = 165$ К). Высокотемпературная сверхпроводимость появляется при легировании изолятора Мотта носителями заряда и существует в узком интервале концентраций носителей. На рисунке 1 приведена типичная фазовая диаграмма купратов. Дальний антиферромагнитный порядок (при $T = 0$) исчезает при концентрации дырок на атом меди $p \approx 0,03$, и сверхпроводимость в недолегированных образцах возникает при $p \approx 0,05$. Уровень оптимального легирования соответствует максимальной величине T_c .

Купраты с различными составами в нормальном и сверхпроводящем состояниях показывают целый ряд общих особенностей, многие из которых не могут быть объяснены в рамках теории Бардина–Купера–Шриффера (БКШ). Последовательной теории сверхпроводимости в купратах в настоящее время не существует. Так, с открытием высокотемпературной сверхпроводимости возникли три следующих крайне важных и фундаментальных вопроса.

— Образуют ли носители заряда в нормальном состоянии ферми-жидкость?

— Какова связь высоких T_c с псевдощелью — корреляциями нормального состояния, которые появляются при $T^* > T_c$ или ниже T_c , но выше верхнего критического поля H_{c2} ?

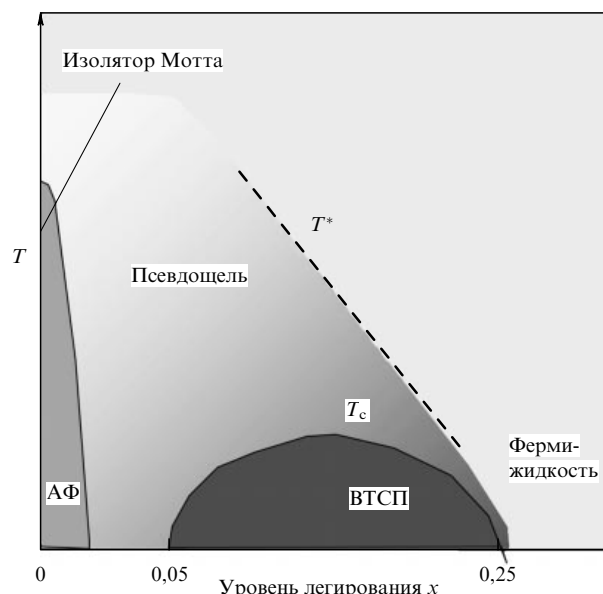


Рис. 1. Фазовая диаграмма купратов (АФ — антиферромагнетик).

— Какова природа сверхпроводящего перехода при T_c ?

Однозначный ответ получен пока лишь на первый вопрос. Для объяснения двух других вопросов было предложено несколько моделей. Наиболее обсуждаемыми являются две из них. Первая предполагает, что появление псевдощели при температурах выше T_c обусловлено неким влиянием антиферромагнитного упорядочения в высокотемпературном сверхпроводнике (ВТСП), которое возникает, когда он не легирован или слабо легирован носителями зарядов. В этом случае сверхпроводящий переход происходит по обычному БКШ-сценарию с "закрытием" сверхпроводящей щели и исчезновением макроскопической волновой функции. Это должно означать, что состояние с псевдощелью по своей сути несовместимо с d-волновой сверхпроводимостью, которая имеет место в ВТСП, и поэтому конкурирует с ней. Вторая теория утверждает, что сверхпроводящий переход происходит по сценарию с фазовым разупорядочением, когда термически рождённые вихри нарушают фазовую когерентность дальнего действия, конденсат пар теряет фазовую жёсткость, но сохраняется при температурах, значительно превышающих T_c , в состоянии с псевдощелью. Эти два состояния должны очень мало различаться, но их различие является фундаментальным в механизме образования сверхпроводящих пар.

По мере изучения ВТСП стало ясно, что их сверхпроводящие свойства в значительной степени должны определяться их свойствами в нормальном состоянии, которые, как и первые, в большинстве своём являются аномальными и сильно изменяются с изменением концентрации носителей. Поэтому изучение проводимости монокристаллов ВТСП в нормальном состоянии, и особенно межслоевой проводимости, даёт информацию о свойствах квазичастиц, что весьма важно для понимания механизма высокотемпературной сверхпроводимости.

Одной из необычных особенностей свойств ВТСП в нормальном состоянии является сосуществование "металлической" температурной зависимости удельного сопротивления вдоль слоёв CuO_2 (*ab*-плоскости)