

**ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА**

P1-86-185

И.Иванов¹, В.А.Кузнецов, М.Малы,² В.А.Русаков,
В.А.Самсонов

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
ВЫСОКОРАЗРЕШАЮЩЕГО МЕТОДА
РЕГИСТРАЦИИ ТРЕКОВ ЧАСТИЦ
В УЛЬТРАФИОЛЕТОВОМ СВЕТЕ**

Направлено в журнал
"Приборы и техника эксперимента"

¹ ИЯИЯЭ БАН, София

² ФИ ЧСАН, Прага

1986

I. Введение

Для исследования элементарных частиц, обладающих новыми квантовыми числами (шарм, бьюти, топ) и средним временем жизни (10^{-12} - 10^{-14})с, созданы и проектируются гибридные спектрометры, в которых акт рождения и распада короткоживущих частиц регистрируется в вершинном детекторе с высоким пространственным разрешением^{/1-3,21/}. Важное место среди трековых вершинных детекторов занимают небольшие пузырьковые и стримерные камеры высокого давления, в которых регистрация треков осуществляется, как правило, с использованием лазерного излучения^{/4-9/}.

Вершинный детектор должен обеспечить эффективную регистрацию редких событий, идущих с сечениями $\sim 10^{-3}$ от полного сечения взаимодействия нуклонов. Одной из основных характеристик детектора является возможность регистрации элементов трека с диаметром пузырьков ϕ в несколько мкм и большой их плотностью n на единицу длины трека. Для типичных высокоразрешающих трековых детекторов в настоящее время получены следующие характеристики: водородная пузырьковая камера

HOLEVC с классической оптикой - $\phi = (16 - 20)$ мкм,
 $n = 100^1/\text{см}^1/10-12/$; голографическая фреоновая пузырьковая камера
HQVC - $\phi = 12$ мкм, $n = (95-200)^1/\text{см}^1/13,14/$; голографическая фреоновая камера ДИЯФ АН СССР в тестовом режиме - $\phi = 20$ мкм,
 $n = (120 - 1000)^1/\text{см}^1/15/$; стримерная камера высокого давления
 $\phi = 8$ мкм, $n = (50 - 100)^1/\text{см}^1/9/$.

Классическое фотографирование позволяет получить высокое разрешение только в узком слое детектора в связи с известным соотношением между диаметром светящегося точечного объекта ϕ , длиной волны излучения λ и глубиной резкости $\Delta x'$: $\phi = \kappa \sqrt{\lambda \cdot \Delta x'}$.

Считается, что голографическая методика регистрации треков позволяет обеспечить высокое разрешение по всему объему детектора при существенном увеличении числа пучковых треков^{/16,17/}. На практике, однако, увеличение числа пучковых частиц, проходящих через пузырьковую камеру, приводило к сильному голографическому фону на пленке, и для получения качественных фотографий приходилось снижать как число частиц, так и быстродействие детектора. Пока что выполнен один экспе-

римент, в котором регистрация треков очарованных частиц осуществлялась по голографической методике^{/14/}. Как оказалось, вследствие голографических помех и сложности обработки голограмм на трехмерных измерительных приборах, требуется большое время для получения конечных результатов^{/18/}.

Поэтому в настоящее время ведутся работы и предлагаются новые методики регистрации треков, использующие лазерное излучение и предусматривающие снижение влияния голографических шумов^{/19-22/}.

В связи с проводящимися в ОИЯИ работами по созданию вершинных детекторов для исследования короткоживущих частиц и ядер^{/19,21/} нами были выполнены экспериментальные исследования высокоразрешающего метода регистрации треков частиц с использованием созданного импульсного азотного лазера. Эксперименты проводились с целью проверки следующих вопросов:

1. Как влияют интерференционные помехи, связанные с когерентностью источника лазерного излучения?
2. Как скажется уменьшение длины волны лазерного излучения на контрастность изображения в выбранной оптической схеме?
3. Хватит ли энергии лазерного излучения данного лазера для съемки объема детектора в полномасштабном эксперименте при использовании малочувствительной и высокоразрешающей пленки типа МИКРАТ-300?

2. Основные соотношения между разрешающей способностью, глубиной фотографирования и длиной волны света

Фотографирование трековой камеры, работающей как вершинный детектор для обнаружения короткоживущих частиц, должно обеспечить максимальную разрешающую способность системы регистрации данного объема.

Основные требования к системе регистрации можно сформулировать следующим образом:

1. Разрешение оптической системы должно лимитироваться только дифракционными явлениями (волновые aberrации системы много меньше длины волны света λ).
2. Разрешающая способность фотопленки существенно выше разрешения оптической системы (фотопленка не снижает разрешения системы).
3. Малое время экспонирования пленки.
4. Малая длина волны света.

Последнее требование вытекает из того факта, что диаметр дифракционного пятна ϕ (диаметр первого темного кольца дифракционной картины) прямо пропорционален длине волны света λ ^{/23-25/} (рис. 1),

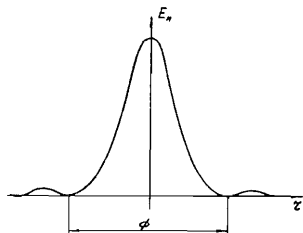


Рис. 1. Распределение освещенности в дифракционном пятне.

где

$$\phi = 2,44 \cdot \lambda \cdot A ; A = \frac{x'}{D'} \quad (1)$$

A – относительное отверстие оптической системы; x' – расстояние от выходного зрачка до плоскости пленки; D' – диаметр выходного зрачка.

Для оценки достаточного разрешения оптической системы при фотографировании пространства определенной глубины необходимо учесть волновую aberrацию $\Delta \delta$, вызванную дефокусировкой $\Delta x'$ и ее влиянием на форму дифракционной картины (рис. 2). Волновая aberrация $\Delta \delta$ является разностью стрелок прогиба волновых фронтов в выходном зрачке оптической системы:

$$\Delta \delta = \frac{1}{8} \cdot \frac{1}{A^2} \cdot \Delta x' \quad (2)$$

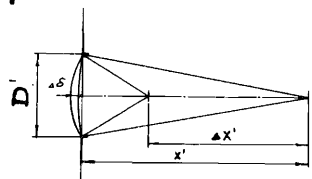


Рис. 2. Графическая связь величин относительного отверстия оптической системы A и волновой aberrации $\Delta \delta$ (к формулам (1) и (2)).

При $\Delta \delta = \lambda/4$ освещенность в центре дифракционной картины уменьшается на 20%, а при $\Delta \delta = \lambda/2$ – на 60% (рис. 3).

Считаем, что минимальное расстояние между двумя точками $\Delta \ell'$, которые отличаются друг от друга (рис. 4), линейно связано с диаметром дифракционного пятна:

$$\Delta \ell' = \kappa_1 \cdot \phi \quad (3)$$

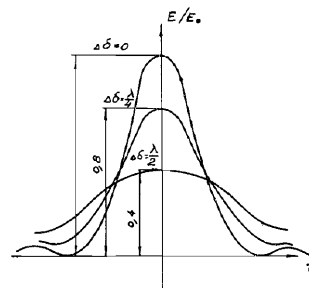
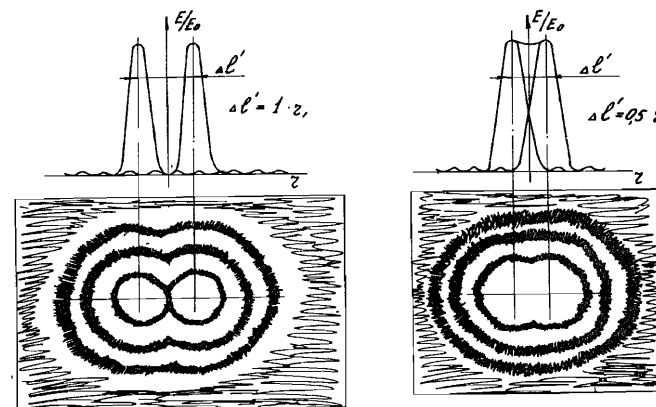


Рис. 3. Распределение освещенности в дифракционном изображении точки.



а

б

Рис. 4. Дифракционная картина от двух светящихся точек, расположенных на расстоянии $\Delta \ell' = z$, (а) и $\Delta \ell' = 0,5 z$, (б).

и допустимая разность фаз за счет дефокусировки для разных длин волн одинакова:

$$\Delta \delta_{max} = \kappa_2 \cdot \lambda, \quad (4)$$

тогда из соотношений (1), (2), (3), (4) можно сделать следующее заключение:

$$\Delta \ell'_{min} = 0,863 \cdot \kappa \cdot \sqrt{\lambda \cdot \Delta x'},$$

$$\kappa = \sqrt{\frac{\kappa_1^2}{\kappa_2}}, \quad (5)$$

$$A = \sqrt{\frac{1}{8 \kappa_2}} \cdot \sqrt{\frac{\Delta x'}{\lambda}},$$

где постоянная κ - критерий разрешения, и ее выбор определяют, в основном, условия обработки и требования эксперимента. Количество точек, разрешаемых на единицу длины, $\rho = 1/\Delta \ell'_{min}$. Количество точек на единицу площади $P = \rho^2$.

Результат можно тогда сформулировать следующим образом: количество точек, различимых в плоскости изображения идеальной оптической системы, которая изображает пространство заданной глубины, обратно пропорционально длине волны света.

В таблице I приведены расчетные допустимые значения плотности пузырьков на один сантиметр длины трека для двух длин волн:

$\lambda = 694,3$ нм (рубиновый лазер) и $\lambda = 337,1$ нм (азотный лазер) при глубине фотографируемого пространства 10 мм, 5 мм, 2 мм ($\Delta x = \pm 5$ мм, $\pm 2,5$ мм, ± 1 мм). В скобках показано необходимое относительное отверстие A .

Расчет проведен для 3 значений постоянной $\kappa = 2; 1,4; 1$.

Критерий с $\kappa = 2 (\kappa_1 = 1; \kappa_2 = 0,25)$ можно определить как строгий. Дифракционные пятна соприкасаются темными кольцами, и освещенность в центре дифракционного пятна за счет дефокусировки уменьшается всего на 20%.

Критерий с $\kappa = 1,4 (\kappa_1 = 1; \kappa_2 = 0,5)$ можно определить как взвешенный.

Вероятность событий в плоскости наводки из-за неравномерного распределения первичных частиц в пучке больше, чем на краю объема.

Критерий с $\kappa = 1 (\kappa_1 = 0,5; \kappa_2 = 0,25)$ является классическим и для большой плотности пузырьков вряд ли пригоден, так как трек в предельном случае сливается в сплошную линию с 20% модуляцией между центрами дифракционных пятен.

Примечание: формулы (1) и (2) рассматривались в пространстве изображения ($A = \frac{x}{D}$).

Учитывая то, что в идеальной оптической системе волновая aberrация во входном зрачке по величине такая же, как в выходном зрачке,

Таблица I

Количество пузырьков η на 1 см длины трека в зависимости от λ	$\kappa = 2$	$\kappa = 1,4$	$\kappa = 1$	Глубина фотографирования
	$\kappa_1 = 1$ $\kappa_2 = 0,25$	$\kappa_1 = 1$ $\kappa_2 = 0,5$	$\kappa_1 = 0,5$ $\kappa_2 = 0,25$	
$P_{694,3}$ нм	100	140	200	10 мм
	(60)	(42)	(60)	
$P_{337,1}$ нм	140	200	280	5 мм
	(86)	(60)	(86)	
$P_{694,3}$ нм	140	200	280	2 мм
	(42)	(30)	(42)	
$P_{337,1}$ нм	200	280	400	
	(61)	(43)	(61)	
$P_{694,3}$ нм	220	310	440	
	(27)	(19)	(27)	
$P_{337,1}$ нм	320	450	630	
	(38)	(27)	(38)	

можно в формуле подставить $A = \frac{x}{D}$, где x - расстояние от плоскости предмета до входного зрачка, D - диаметр входного зрачка.

Таким образом, разрешение в пространстве предметов при одинаковом диаметре входного зрачка и одинаковом расстоянии до плоскости предмета не зависит от масштаба фотографирования.

3. Экспериментальная установка и оптическая схема эксперимента

На рис. 5 показана блок-схема экспериментальной установки с импульсным азотным лазером. Аналогичная установка подробно описана в работе^{26/}.

На рис. 6 приведена принципиальная схема электронного блока запуска лазера.

На рис. 7 - оптическая схема эксперимента.

Фотографирование проводилось в масштабе 1:1 (кувета и фотопленка находились около центра кривизны зеркала). Зеркало (5) одновременно выполняло роль коллектива и объектива. Входным зрачком системы является точечная диафрагма (3), выходным зрачком - ее изображение в апертурной диафрагме (6), где при работе в темном поле помеща-

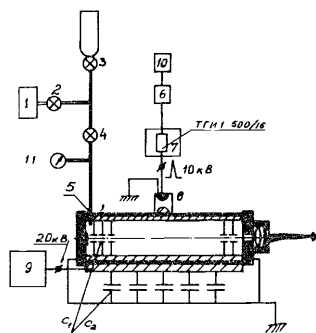


Рис.5. Блок-схема экспериментальной установки с импульсным азотным лазером: 1 - форвакуумный насос; 2-4 - вентили; 5 - импульсный азотный лазер: $\lambda = 337,1$ нм, длина трубки $L = 300$ мм, давление газа в трубке $3,87$ кН/м², межэлектродное расстояние $l = 29$ мм, энергия $0,5 \cdot 10^{-3}$ Дж, время вспышки 7 нс, частота работы 1 Гц (при дополнительном обеспечении охлаждения электродов возможна работа лазера с частотой до 10 Гц); 6 - линия задержки; 7 - блок запуска лазера; 8 - разрядник; 9 - высоковольтный блок питания ВС20/10, $C_T = 470$ пФ $\times 20$, $C_2 = 0,01$ мкФ $\times 4$; 10 - генератор запуска; 11 - вакуумметр.

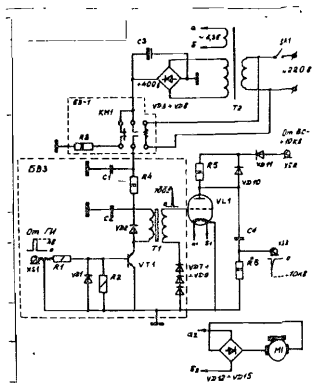


Рис.6. Схема электронного блока запуска лазера: БЗ - блок защиты; БВЗ - блок высоковольтного запуска; БС - блок низковольтного питания; ВС - высоковольтный источник питания ВС20/10; VD1 - лавинный транзистор; Т1 - высоковольтный импульсный трансформатор; ТТИ - водородный тиратрон ТТИ 500/16; М1 - блок охлаждения.

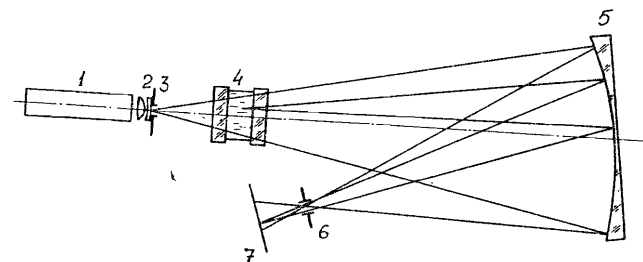


Рис.7. Оптическая схема эксперимента.

1 - импульсный азотный лазер; 2 - формирователь пучка; 3 - диафрагма пространственной фильтрации (диаметр 200 мкм); 4 - фотографируемый объем; 5 - сферическое зеркало с тонким покрытием для длины волны $\lambda = 337,1$ нм; 6 - апертурная диафрагма (с экраном); 7 - фотопленка.

лась кварцевая пластинка с экранирующей точкой (диам. 500 мкм). Для строгого стигматического изображения входного зрачка зеркало должно иметь форму эллипсоида с осью вращения, проходящей через входной и выходной зрачки системы. При применении сферического зеркала возникает астигматизм в изображении зрачка. Его можно просто компенсировать цилиндрической линзой (положительной или отрицательной), помещенной между диафрагмой (3) и фотографируемым объемом (4).

Правильное положение компенсационной линзы (расстояние от диафрагмы (3) и ее ориентацию) легко установить, просматривая изображение диафрагмы (3) в апертурной диафрагме (6) микроскопом.

В нашем случае компенсация астигматизма входного зрачка системы не применялась, так как при небольшом поле зрения и малом наклоне зеркала пятно в перетяжке между фокальными плоскостями имеет диаметр меньше, чем экранирующая точка.

Такая схема фотографирования кроме своей простоты имеет большое преимущество в том, что отсутствуют хроматические aberrации, и истировку можно вести в видимом свете.

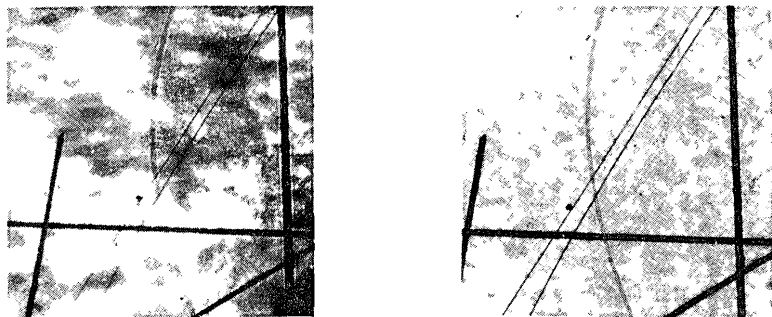
Высококачественное зеркало (отклонение от сферы $< \lambda/4$) при диафрагме (6), соответствующей относительным отверстиям $1:50$ и

1:100, обеспечивало разрешение, ограниченное только дифракцией.

4. Экспериментальные результаты

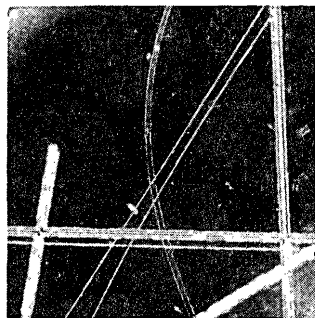
В качестве объекта фотографирования, имитирующего треки, были использованы в первом случае - кварцевые волокна диаметром 16 мкм и 150 мкм, во втором - пузырьки в жидкости. Для того, чтобы индикатриса рассеяния, по возможности, приближалась к условиям фотографирования в водородной камере, где разность показателей преломления пузырек-жидкость равна $\Delta n \approx 0,1$, кювета с кварцевыми окнами, в которой располагались тонкие волокна, заполнялась дистиллированной водой (разность показателей преломления $\Delta n \approx 0,13$).

На фотографиях (рис. 8): два тонких сфокусированных волокна и одно - согнутое. Расстояние между ними - 50 мкм.



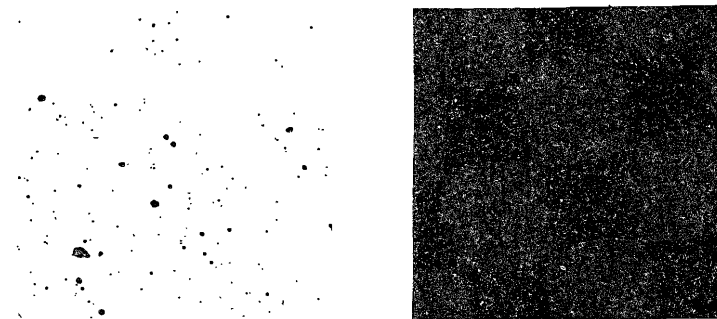
а

б



в

Рис.8. Изображение тонких волокон: а - освещение $He-Ne$ - лазером ($\lambda = 694,3$ нм), светлое поле. Четко видны интерференционные помехи; б, в - освещение N - лазером, соответственно светлое и темное поле. Интерференционные помехи практически отсутствуют, контраст изображения, согласно теории, выше, чем в (а). На фото в - на толстых (150 мкм) волокнах видны три светящиеся линии - центральная соответствует преломленным лучам, а краевые - отраженным.



а

б

Рис.9. Фотографии пузырьков в жидкости на светлом и темном поле: а - светлое поле, самые крупные пузырьки имеют диаметр 200 мкм, на негативе четко различимы пузырьки с диаметром ≈ 20 мкм; б - темное поле, на негативе видны черные точки одинакового диаметра - дифракционные пятна, плотность которых зависит от диаметра пузырьков. Судя по количеству точек, которых больше, чем на светлом поле, а также по проведенным измерениям, зарегистрированы пузырьки с диаметром $\approx (10 - 20)$ мкм.

В данной оптической схеме, работающей на вершине индикатрисы, рассеяния пузырька, количество энергии, падающей на входной зрачок системы, пропорционально квадрату фокусного расстояния шаровой линзы (пузырька или капли): $f = d/4\Delta n$, где d - диаметр шаровой линзы, Δn - разность показателей преломления.

Так как разность показателей преломления для водородного пузырька $\Delta n_{H_2} \approx 0,1$, а для пузырьков в жидкости $\Delta n_n \approx 0,5$, следует, что регистрация пузырьков с диаметром 20 мкм теоретически должна позволить регистрацию пузырька водорода с диаметром ≈ 4 мкм.

В заключение приводим голограмму Габора пучка тонких волокон, полученную при освещении макета пузырьковой камеры созданным азотным лазером (рис. 10).

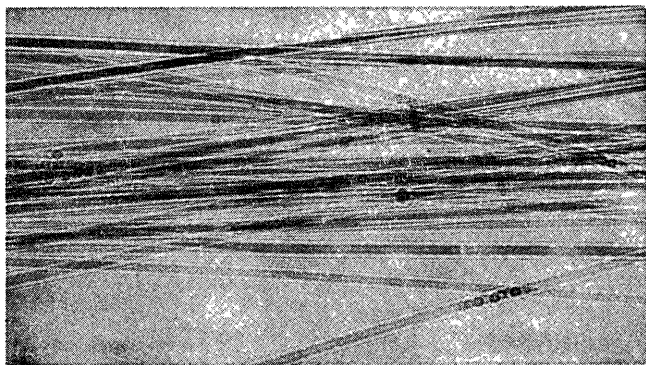


Рис.10. Голограмма тонких волокон диаметром (16-20) мкм, расположенных в макете камеры на глубине 15 мм. Схема голографирования подобна показанной на рис. 7, пленка МИКРАТ 200 располагалась на расстоянии 110 мм от камеры. При освещении голограммы He-Ne-лазером и соответствующем фокусировании происходит четкое восстановление изображения волокон на сильном голографическом фоне. На нижнем волокне видны голограммы капель с диаметром ≈ 10 мкм.

Заключение

На основании проведенных экспериментов можно сделать следующие выводы:

1. Создан импульсный азотный лазер с параметрами: длина волны $\lambda = 337,1$ нм, энергия $E \approx 0,5 \cdot 10^{-3}$ Дж, длительность вспышки $t = 7$ нс, частота работы - 1 Гц.
2. С помощью лазера получены фотографии макетов треков на светлом и темном поле с разрешением ≈ 10 мкм. Интерференционные помехи из-за малой когерентности лазера практически отсутствуют.
3. Сравнение фотографий макетов треков, полученных при освещении азотным (длина волны $\lambda = 337,1$ нм) и гелий-неоновым (длина волны $\lambda = 694,3$ нм) лазерами, показывают, что с уменьшением длины волны излучения контрастность изображения увеличивается.
4. Энергия излучения азотного лазера обеспечивает фотографирование трековой камеры диаметром 150 мм в масштабе 1:1.

Выполненные теоретические оценки достижимого разрешения в выбранной оптической схеме и проведенные исследования дадут возможность надежной регистрации в водородной пузырьковой камере пузырьков с диаметром 4 мкм. Предполагаемая плотность пузырьков $n \approx 100 \text{ см}^{-1} / 11,27$ дает возможность регистрировать треки на глубине ≈ 20 мм без потери информации.

Авторы благодарят Ю.А.Шербакова за предоставление информации о конструкции азотного лазера, М.Д.Шафранова за полезные обсуждения, А.И.Савельева за изготовление импульсной лазерной установки и оптической схемы.

ЛИТЕРАТУРА

1. L.Montanet, CERN 82-01, 22 March, 1982. Photonic Applied to Nuclear Phys.: 1, Strasbourg, Council of Europe, 9-12 Nov., 1981, Geneva 1982, p.82-83.
2. L.Montanet, S.Rencroft, Phys.Rev.C, 1982, v.83, p.61; русский перевод: УФН, 1984, т.142, В4, стр.635.
3. А.М.Моисеев, ЭЧАЯ, 1984, т.15, В3, стр.656.
4. A.Herve et al., Photonic Applied to Nucl.Phys. 1, Strasbourg, Council of Europe, 9-12 Nov., 1981, Geneva 1982, p.69.
5. A.Herve et al., Photonic Applied to Nucl.Phys. 1, Strasbourg, Council of Europe, 9-12 Nov., 1981, Geneva 1982, p.47.
6. J.Sandweiss, Phys.Rev.C, 1982, v.83, p.39.
7. V.Eckardt, S.Vonig, Nucl.Instr.Meth., 1983, v.213, p. 217.
8. P.Lecog et al., CERN 85-10, 12 July 1985, Photonic Applied to Nucl.Phys. 2, Nucleophot, Strasbourg, Council of Europe, 5-7 December 1984, Geneva, 1985, p.120.
9. R.Majka, CERN 85-10, 12 July 1985, Photonic Applied to Nucl.Phys. 2, Nucleophot, Strasbourg, Council of Europe, 5-7 December, 1984, Geneva 1985, p.136.
10. R.B.Bizzarri, CERN/EP/EHS/PA 81-11, 27 July, 1981.
11. A.Herve et al., Nucl.Instr.Meth., v.202 (1982), p.417.
12. A.Herve et al., CERN 82-01, Geneva, 1982, p.69.
13. J.L.Benichou et al., CERN/EP 83-15, Geneva, 1983.

14. J.L.Benichou et al., Nucl.Instr.Meth., 214 (1983), pp.245-251.
15. Л.В.Баканов и др. ОИЯИ,РІЗ-84-285, Дубна, 1984.
16. F.R.Bisler, Nucl.Instr.Meth., 1979, v.163, p.105.
17. Е.Бартке и др., ОИЯИ,РІ-83-742, Дубна, 1983.
18. O.Brigner et al., CERN/EP 85-165, 8 October, 1985.
19. Е.Бартке и др., ОИЯИ,БІ-82-566, Дубна, 1982.
20. А.М.Зарубин, А.И.Ларкин, Авторское свидетельство СССР, №И40085, от 15.02.85г., Бюлл. ОИ, 1985, №6, стр.148.
21. А.М.Андрюшин и др., ИФВЭ, 84-3, Серпухов, 1984.
22. Е.Паршин и др., Авторское свидетельство СССР № И40091, от 15.02.85, Бюлл. ОИ, 1985, №6, стр.149.
23. А.Тудоровский, Теория оптических приоб., т.І, М.,Изд-во АН СССР,1948.
24. Ю.А.Александров и др. Пузырьковые камеры, Гос. изд-во литературы по атомной науке и технике, Москва, 1963, стр.162.
25. М.И.Апенко, А.С.Дубовик, Прикладная оптика, Москва, "Наука", Главная редакция физико-математической литературы,1982, стр.203.
26. А.Будзяк и др., ОИЯИ, ІЗ-І2778, Дубна, 1979.
27. C.Fisher et al., CERN/SPSC 78-103, 1978.

Рукопись поступила в издательский отдел
31 марта 1986 года.

Иванов И. и др. P1-86-185
Экспериментальные исследования
высокоразрешающего метода
регистрации треков частиц в ультрафиолетовом свете

Приведены результаты экспериментальных исследований высокоразрешающего метода регистрации треков в ультрафиолетовом свете. Получены фотографии макетов треков на светлом и темном поле с разрешением /10-20/ мкм. Предложенная методика регистрации треков с освещением объема детектора импульсным азотным лазером дает возможность надежной регистрации в прецизионной водородной пузырьковой камере рожденья и распада короткоживущих частиц с временем жизни $\approx 10^{-13}$ с.

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1986

Перевод О.С.Виноградовой

Ivanov I. et al. P1-86-185
Experimental Investigation of High-Resolution Method
of Track Registration in Ultraviolet Light

Results of an experimental study of a high-resolution method of track registration in ultraviolet light are described. Photographs of track imitation on the light and dark fields have been obtained with a resolution of (10-20) mkm. When the detector volume is illuminated with a pulsed nitrogen laser, the proposed method of track detection makes it possible to register reliably bubbles ≈ 4 mkm in diameter in a precision hydrogen bubble chamber and to fix the production and decay of short-lived particles with a lifetime of $\approx 10^{-13}$ s.

The investigation has been performed at the Laboratory of High Energies, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1986