

ЖС-86



**ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

13-83-643

**ЖУКОВ**

Василий Александрович

**РАЗРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЕ  
В ИССЛЕДОВАНИЯХ НА УСКОРИТЕЛЯХ  
НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ДЕТЕКТОРОВ ЧАСТИЦ  
И КРИОГЕННЫХ УСТАНОВОК**

Специальность 01.04.01 - экспериментальная физика

Автореферат диссертации на соискание ученой  
степени доктора физико-математических наук

Дубна 1983

Работа выполнена в Объединенном институте ядерных исследований.

Официальные оппоненты:

член-корреспондент АН СССР  
доктор физико-математических  
наук  
доктор физико-математических  
наук

В.М. Лобашев  
А.И. Мухин  
В.Т. Смолянкин

Ведущее научно-исследовательское учреждение:  
Московский инженерно-физический институт.

Защита диссертации состоится " 18 февраля 1984 г.  
в \_\_\_\_\_ часов на заседании Специализированного совета  
Д 047.01.03 при Лаборатории ядерных проблем Объединенного инсти-  
тута ядерных исследований, г.Дубна, Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Автореферат разослан "18" февраля 1983 г.

Ученый секретарь Совета  
доктор физико-математических наук

Ю.А. Батусов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В методике физического эксперимента на ускорителях можно выделить ряд важных задач, имеющих общее значение для многих направлений исследований:

1. Разработки высокоэффективных вершинных трековых детекторов для гибридных установок в физике высоких энергий. Эта проблема стала особенно актуальной в связи с изучением редких процессов образования новых частиц с временами жизни  $10^{-12}$ ,  $10^{-15}$  с. В качестве вершинных детекторов для исследования таких частиц все чаще используются пузырьковые камеры небольших размеров, которые должны обладать пространственным разрешением в микронном диапазоне и высоким быстродействием. В настоящее время уже достигнуты значительные успехи в получении изображений треков, состоящих из пузырьков с размерами от нескольких до десятков микрон. Однако быстродействие пузырьковых камер пока ограничивается применяемыми системами расширения и составляет 10-50 Гц. Поэтому повышение быстродействия таких камер является перспективной задачей и, в связи с этим, заслуживает внимания поиски новых способов приведения рабочей жидкости в состояние чувствительности к ионизирующему излучению без использования традиционных расширительных устройств.

2. Разработки и исследования электронных детекторов с плотной рабочей средой, в качестве которой используется благородный газ (Ar, Xe) при высоком давлении или тот же газ в конденсированном состоянии. Применение таких детекторов в физическом эксперименте позволяет решить многие задачи, связанные с регистрацией нейтрального излучения, точным определением координат частиц, измерением их энергии по методу полного поглощения и др. В настоящее время накоплен большой опыт использования детекторов на основе конденсированных благородных газов в физике высоких энергий. Однако мало изучены их возможности при промежуточных энергиях. Недостаточны сведения об ионизационных процессах в плотных благородных газах и их смесях, полученных путем повышения давления при одновременном понижении температуры. Противоречивы также сведения об условиях регистрации частиц в твердых аргоне и ксеноне.

3. Развитие экспериментальной методики на базе сверхпроводящих устройств. Системы на основе сверхпроводящих магнитов существенно расширяют возможности физического эксперимента по сравнению с обычными

ми магнитами. Традиционно сверхпроводящие магнитные устройства (как и обычные магниты) применяются для фокусировки частиц, их отклонения и анализа по импульсам. Однако существует ряд интересных областей исследований, где сверхпроводящие магнитные системы могут выполнять и другие функции, вытекающие из специфических экспериментальных требований. Одно из перспективных направлений связано с применением сверхпроводящих магнитных ловушек для решения задач, когда необходимо сосредоточить в небольшой области пространства интенсивные потоки изучаемых частиц. Известным предложением, сделанным впервые на основе этой методики, является пионная и мюонная магнитная ловушка как источник электронных и мюонных нейтрино \*.

4. Развитие методики изучения вещества с помощью  $\mu$ SR-метода при низких температурах. Эти исследования особенно интересны в связи с тем, что в условиях низких и сверхнизких температур могут наиболее отчетливо проявиться квантовые эффекты при взаимодействии с веществом положительного мюона, который используется в  $\mu$ SR-методе в качестве пробной частицы.

Цель работы. Целью диссертации является разработка, исследование и применение в физических экспериментах новых детекторов и экспериментальных установок, работающих в области криогенных температур. Основные разделы диссертации посвящены поискам путей создания жидководородной пузырьковой камеры, с использованием воздействия ультразвука на рабочую среду; исследованиям и разработкам электронных детекторов на основе аргона и ксенона большой плотности; разработкам криогенных устройств – сверхпроводящей магнитной ловушки и криогенных мишеней – для перспективных экспериментов, связанных с изучением процессов, вызванных остановившимися мюонами и пионами в веществе.

#### Новизна работ:

1. Получены треки ионизирующих частиц в жидководородной пузырьковой камере при одновременном воздействии на рабочую жидкость ультразвука и механической расширительной системы, которая обеспечивала понижение давления в рабочем объеме камеры, соответствующее началу ее чувствительности к ионизирующему излучению. Проведено детальное исследование условий формирования треков в жидком водороде в поле давления ультразвуковой волны.

2. Предложена и испытана модель новой системы расширения пузырьковой камеры на основе электродинамического привода со сверхпроводящими обмотками.

\* Lobashev V.M. and Serdyuk O.V. Nucl. Instr. and Meth., 1976, v.136, p.61.

3. Получены систематические экспериментальные данные о процессах регистрации частиц в пропорциональных счетчиках, заполненных аргоном, ксеноном и их смесями при большой плотности, создаваемой за счет повышения давления (до 100 атм.) и понижения температуры (до 150 K) заполняющего газа. При этих условиях в смеси аргона с ксеноном обнаружен неметастабильный эффект Пеннинга, приводящий к росту ионизации в лавине.

4. Детально изучены детектирующие свойства счетчиков и камер на основе конденсированного аргона и ксенона. Показано, что для счетчиков, заполненных твердыми аргоном и ксеноном, характерным является стабильный ионизационный режим работы, когда импульс на выходе счетчика обусловлен сбором электронов ионизации. Показана также эффективность использования многоэлектродных ионизационных камер на жидком аргоне для спектрометрии частиц промежуточных энергий.

5. Для  $\mu$ SR-метода разработана и применена в экспериментах серия криогенных мишеней, позволившая произвести исследования ряда процессов, связанных с взаимодействием положительных мюонов с веществом в диапазоне температур 4,2+300 K. Существенным результатом этих исследований явилось экспериментальное открытие явления квантовой некогерентной диффузии положительного мюона в металлах.

6. Разработана и введена в действие крупная сверхпроводящая магнитная ловушка многоцелевого назначения, позволяющая удерживать в рабочем объеме интенсивные потоки изучаемых частиц с импульсами до 100 МэВ/с.

#### Практическая значимость

1. Исследования, позволившие получить следы заряженных частиц в жидком водороде при воздействии на него ультразвуком, важны для создания ультразвуковых пузырьковых камер.

2. Результаты исследований пропорциональных счетчиков высокого давления, наполненных смесью аргона и ксенона, используются в совместном предложении МИФИ-ОИЯИ-ИТЭФ для развития метода изучения нейтринных взаимодействий с помощью многотонного детектора нейтрино на основе такой смеси \*.

3. Разработки криогенных мишеней для изучения вещества с помощью  $\mu$ SR-метода на ускорителе типа синхротрон в области температур 4,2+300 K служат основой дальнейшего развития подобной аппаратуры для этого перспективного направления исследований на ускорителях с высокой интенсивностью пучков (в частности, на установке "Ф") в широком диапазоне температур вплоть до сверхнизких.

\* Вишневский А.В., Голутвин И.А., Долгошеин Б.А. и др. Препринт ИТЭФ-59, Москва, 1979.

4. Применение сверхпроводящих магнитных ловушек эффективно для решения многих задач, связанных с изучением легких мезоатомов, когда в качестве среды, где они образуются, используется газообразное вещество\*.

Положения диссертации, представленные для защиты

1. Результаты исследования влияния ультразвука на рост пузырьков, инициированных ионизирующим излучением, в жидководородной пузырьковой камере и обоснование возможности создания ультразвуковой жидководородной пузырьковой камеры.

2. Электродинамическая система расширения пузырьковой камеры на основе сверхпроводящих обмоток.

3. Экспериментальные результаты исследования:

а) газовых пропорциональных счетчиков на основе аргона, ксенона и их смеси высокой плотности, полученной путем увеличения давления до 100 атм. и понижения температуры до 150 К рабочего газа;

б) счетчиков на основе твердых аргона и ксенона;

в) многоэлектродной жидкоаргоновой камеры, предназначенной для спектрометрии и идентификации частиц промежуточных энергий.

4. Обнаруженный в смеси аргона с ксеноном при высоких давлениях неметастабильный эффект Пеннинга.

5. Криогенные мишени для исследования вещества в области низких температур с помощью  $\mu$ SR-метода.

6. Экспериментальные результаты, иллюстрирующие применение криогенных мишеней в  $\mu$ SR-экспериментах по изучению диффузии положительных мюонов в металлах, исследованию свойств сверхпроводящего свинца, поискам атома мюония в металлах.

7. Сверхпроводящая магнитная ловушка для экспериментов, требующих концентрации в ограниченном пространстве интенсивных потоков короткоживущих частиц (пионов, мюонов) с импульсами до 100 МэВ/с.

8. Предложения по практическому использованию результатов диссертации.

Апробация работ. Результаты диссертации докладывались на семинарах ЛЯП ОИЯИ, МИФИ, на Международной конференции по приборам для физики высоких энергий (Фраскати, Италия, 8-12 мая 1973 г.), на Рабочем совещании по технике пузырьковых камер (Дубна, 8-11 апреля 1969 г.) на III Международном совещании по пропорциональным и дрейфовым камерам (Дубна, 6-10 июня 1978 г.).

\* Амальский Г.М., Гераскин Е.В., Гребинник В.Г. и др. Препринт ЛЯФ, № 337, Ленинград, 1977.

Florentini G., Pitzurra O. Nuovo Cimento, 1978, v.43A, p.396.

Публикации. По результатам выполненных исследований опубликовано 20 работ в материалах указанных выше конференций и совещаний, а также в журналах ЭЧАЯ, ЖЭТФ, Письма в ЖЭТФ, ЖТФ, ДАН, Акустический журнал, в препринтах и сообщениях ОИЯИ, в бюллетене ОИПОТЗ.

Объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, выводов и заключения общим объемом 238 страниц, включая 87 рисунков, 9 таблиц и список литературы, содержащий 315 названий.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении кратко излагаются предпосылки возникновения ряда перспективных задач в методике физического эксперимента на ускорителях; обосновываются актуальность, новизна и практическая значимость работы в связи с решением этих задач; характеризуется содержание отдельных глав диссертации.

Первая глава посвящена разработкам и исследованиям быстродействующих жидководородных пузырьковых камер, главным образом, камер, приводимых в состояние чувствительности к ионизирующему излучению с помощью ультразвука.

Ультразвуковые пузырьковые камеры (УЗПК) привлекают внимание быстродействием и тем, что в них сложная механическая система расширения рабочего объема заменяется малоинерционной ультразвуковой системой. В УЗПК на зародышевый паровой пузырек в жидкости действует переменное поле давления:

$$P(t) = P_0 + P_m \sin(2\pi f t),$$

где  $P_0$  - статическое давление в камере,  $P_m$  - амплитуда давления в ультразвуковой волне,  $f$  - частота ультразвукового поля (УЗП). При характерных частотах ультразвука порядка десятков и сотен кГц времена растяжения жидкости в зонах чувствительности к ионизирующему излучению около  $10^{-4}$ - $10^{-5}$  с, что существенно больше времени роста зародышевых пузырьков до критических размеров ( $\sim 10^{-10}$  с). Поэтому пороговая амплитуда давления  $P_{mk}$  ультразвукового поля, ниже которой пузырек растет в УЗПК, может быть оценена таким же образом, как и величина сброса давления в обычной пузырьковой камере, т.е.

$$P_{mk} \approx \Delta P_k + \Delta P_0,$$

где  $\Delta P_k$  - кавитационная прочность жидкости при статическом растяжении,  $\Delta P_0$  - статическое пережатие жидкости, характеризующее превышение статического давления  $P_0$  над давлением насыщенных паров  $P_s$ .

Характерные величины амплитуды давления  $P_m$  в ультразвуковой волне, необходимые для регистрации частиц, составляют для жидкого водорода

при 27 К ~ 3 атм., жидкого гелия при 4,2 К ~ 0,3 атм., фреона при 34°С ~ 8 атм. Соответствующие интенсивности ультразвукового поля составляют 90 Вт/см<sup>2</sup> для жидкого водорода; 1,8 Вт/см<sup>2</sup> для жидкого гелия и 82 Вт/см<sup>2</sup> для фреона. Достижение таких амплитуд давления и интенсивностей ультразвукового поля (за исключением случая жидкого гелия) является весьма сложной задачей.

Можно выделить несколько этапов в развитии методики регистрации частиц в жидкостях, подверженных влиянию ультразвука.

На ранней стадии исследований (см., например, \*) были получены доказательства существенного снижения кавитационных порогов  $\Delta P_K$  для многих жидкостей при облучении их ионизирующими частицами. Затем делались неоднократные попытки получить треки частиц с помощью ультразвука (например, \*\*).

Принципиально вопрос о регистрации частиц с помощью ультразвука был решен в наших работах для случая жидкого водорода и в проведенных независимо работах группы ЦЕРН — для случая жидкого гелия \*\*\*.

Возможность создания жидководородной УЗПК была обоснована в экспериментах, выполненных с помощью действующей жидководородной пузырьковой камеры, в которой одновременно с возбуждением ультразвуковых колебаний мог осуществляться ограниченный перегрев жидкости, вызванный обычным расширительным устройством. Диаграмма давлений в такой комбинированной системе представлена на рис.1. Величина давления  $P_0$  менялась в процессе эксперимента в зависимости от выбора степени расширения рабочего объема камеры и могла достигать исходного статического давления  $P'_0$ .

В первых опытах использовалась цилиндрическая фокусирующая ультразвуковая система. Цилиндрический излучатель из секционированной керамики титаната бария излучал ультразвуковые колебания на резонансной частоте  $f_0 = 14$  кГц и создавал давление в ультразвуковой волне  $P_m \sim 1,2$  атм. при электрическом напряжении на обкладках керамики  $\sim 1,2$  кВ. Жидкий водород в камере находился при температуре  $T = 27$  К (что соответствовало давлению насыщенного пара  $P_G = 4,8$  атм.) и исходном статическом давлении  $P'_0 = 5,8$  атм. При перегреве, созданном обычной расширительной системой, соответствующем минимальной чувствительности камеры к ионизирующему излучению, после введения ультразвукового им-

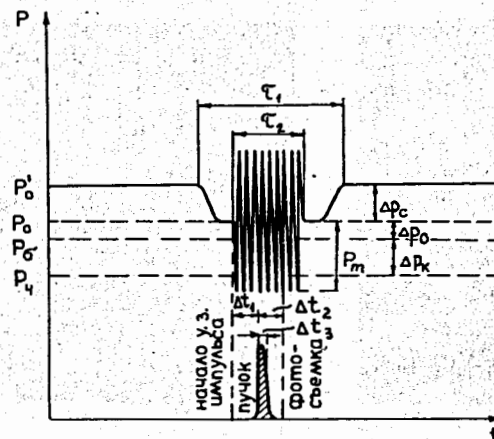


Рис.1 Диаграмма изменения давления во времени в рабочем объеме пузырьковой камеры при совместном действии ультразвука и механической расширительной системы:  $P'_0$  — исходное статическое давление;  $P_0$  — статическое давление в жидкости, создаваемое расширительной системой на период введения ультразвука;  $P_G$  — давление насыщенных паров;  $P_4$  — давление пороговой чувствительности;  $P_m$  — амплитуда давления ультразвукового поля;  $\Delta P_0$  — статическое пережатие жидкости;  $\Delta P_K$  — кавитационная прочность жидкости;  $\Delta P_C$  — изменение давления, создаваемое расширительной системой;  $\tau_1$  — длительность импульса механического расширения;  $\tau_2$  — длительность импульса ультразвука;  $\Delta t_1$  — задержка пучка частиц после начала ультразвукового импульса;  $\Delta t_2$  — задержка фотосъемки после ввода пучка частиц;  $\Delta t_3$  — длительность импульса пучка частиц.

пульса длительностью 10–15 мс. наблюдались непрерывные по всему пространству треки  $\Pi$ -мезонов с энергией 340 МэВ (рис.2).

В дальнейшем нами использовались специально разработанные для криогенных жидкостей составные плоскостержневые излучатели, состоящие из керамических шайб, сжатых армирующим напряжением. С помощью направленных навстречу друг другу двух таких излучателей были сформированы в жидком водороде плоские стоячие волны на частоте 38,4 кГц с амплитудой давления  $P_m \sim 3$  атм. В результате были получены следы  $\Pi$ -мезонов с энергией 340 МэВ при статическом давлении в УЗПК  $P_0 = P'_0 = 5,15$  атм., которое превышало давление насыщенных паров  $P_G = 4,8$  атм. ( $T = 27$  К) на 0,35 атм. Длительность ультразвукового импульса составляла 4,5 мс.

\* Sette D. and Wanderlingh F. Phys. Rev., 1962, v.125, p.409.

\*\* Hughes A.L. In: Proc. Intern. Conf. Instrum. for High Energy Physics, 1960, Berkeley, p.99.

\*\*\* Brown R.C.A., Nilke H.J., Rogers A.H. Nature, 1968, v.220, p.1177.

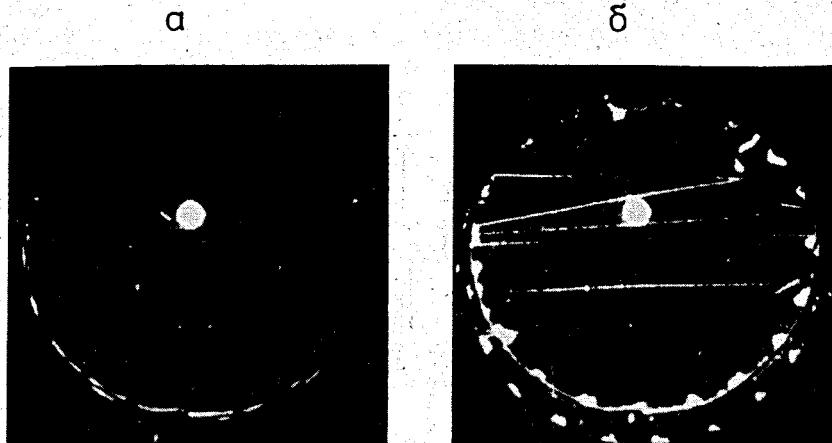


Рис.2 Фотографии следов отрицательных пионов с энергией 340 МэВ в жидководородной пузырьковой камере в ультразвуковом поле при степени расширения, соответствующей минимальной чувствительности камеры. а - без ультразвука, б - с ультразвуком. Условия эксперимента:  $T = 27$  К,  $P_0 = 4,8$  атм.,  $P'_0 = 5,8$  атм.,  $P_m \approx 1,2$  атм.,  $\tau_1 = 10$  мс,  $\tau_2 = 15$  мс,  $f = 14$  кГц.

Исследования условий формирования треков в УЗПК показали ограничивающее влияние кавитационных явлений на поверхности излучателей на амплитуду  $P_m$  давления ультразвукового поля, позволили оценить время роста ( $\sim 2$  мс) пузырьков до размеров  $\sim 2 \cdot 10^{-2} + 10^{-1}$  см, проследить изменение плотности пузырьков на следе частицы со временем, провести сравнение экспериментальных данных о росте пузырька с теоретическими расчетами. Зависимость радиуса пузырька от времени, растущего в ультразвуковом поле, для случая жидкого водорода, представлена на рис.3.

Эксперименты показали, что зародышевый пузырек критического размера, образованный в полупериод колебаний, соответствующий минимуму давления в ультразвуковой волне, в следующий полупериод, когда давление достигает максимума, не захлопывается, а только сокращается до некоторых размеров. В последующем пузырек вырастает до видимых размеров за несколько периодов ультразвукового поля. Физическая причина такого роста может быть связана с эффектом выпрямленной теплопередачи\*.

\* Акулничев В.А., Алексеев В.Н., Наугольных К.А., Ткачев Л.Г., Шестаков В.Д. ОИИИ, Р13-5327, Дубна, 1970.

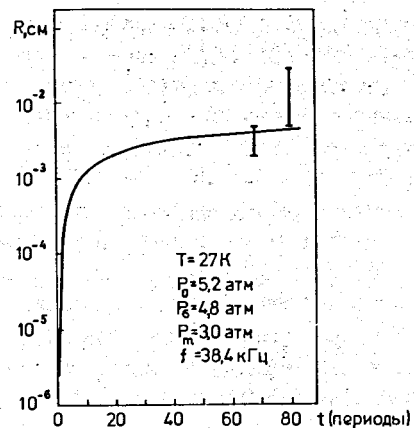


Рис.3 Сравнение расчетов с экспериментальными результатами по росту пузырьков для жидководородной УЗПК.

приводящей к тому, что в среднем во времени поток тепла в ультразвуковом поле оказывается направленным из жидкости в пузырек. Об этом свидетельствует качественное согласие на рис.3 экспериментальных результатов с теоретическими расчетами (сплошная кривая), полученными Л.Г.Ткачевым и В.Д.Шестаковым в рамках представлений о выпрямленной теплопередаче.

В первой главе представлены также результаты испытания предложенной для быстрого действующей пузырьковой камеры модели электродинамической системы расширения, силовой привод которой включает в себя сверхпроводящую подвижную катушку, помещенную в рассеянное магнитное поле сверхпроводящего соленоида камеры и взаимодействующую с этим полем в результате протекания по ней переменного тока, коммутируемого по определенному закону.

Вторая глава диссертации посвящена разработкам и исследованиям электронных детекторов с плотной рабочей средой на основе благородных газов.

Несмотря на успехи в развитии этих детекторов, приведшие к существенному расширению возможностей физического эксперимента в области измерений координат частиц, спектрометрии электронов и  $\gamma$ -квантов малых энергий, калориметрии электромагнитных и адронных ливней при высоких энергиях, существует ряд проблем их применения. Для детекторов с традиционным газовым наполнением (Ar, Xe и их смеси с  $CH_4$ ) при значительном увеличении давления наполняющего газа наблюдается снижение скорости дрейфа носителей заряда, уменьшение максимального коэффициента газового усиления, увеличение рабочего напряжения счетчиков, ухудшение энергетического разрешения, появление нестабильностей в работе счетчиков. Для детекторов на твердых и жидких Ar и Xe (за исключением проволочных счетчиков на жидком Xe) возникает проблема получения пропорционального размножения. Для калориметров на основе жидких Ar и Xe недостаточно изучены их возможности для спектрометрии и идентификации частиц промежуточных энергий.

Представленные в диссертации исследования газонаполненных счетчиков ( $\varnothing$  анода 10+30 мм,  $\varnothing$  катода 6-14 мм) включают в себя изучение зависимости коэффициента размножения (амплитудные характеристики) и энергетического разрешения от приложенного напряжения в интервалах изменений давления 5+100 атм. и температуры 100+300 К наполняющего газа (Ar, Xe) или газовых смесей (Ar + CH<sub>4</sub>, Ar + Xe, Ar + Xe + CH<sub>4</sub>).

Качественно новые результаты получены при исследовании счетчиков, заполненных смесью аргона с ксеноном. В отличие от счетчиков высокого давления на чистом Ar, для смеси Ar + 0,5% Xe наблюдается значительный сдвиг амплитудных характеристик в область меньших рабочих напряжений как при комнатной, так и при низких температурах; сохраняется довольно высокое значение ( $\sim 10^3$ ) максимального коэффициента газового усиления вплоть до температур  $\sim 150$  К (рис.4) и приблизительно в два раза улучшается энергетическое разрешение (рис.5).

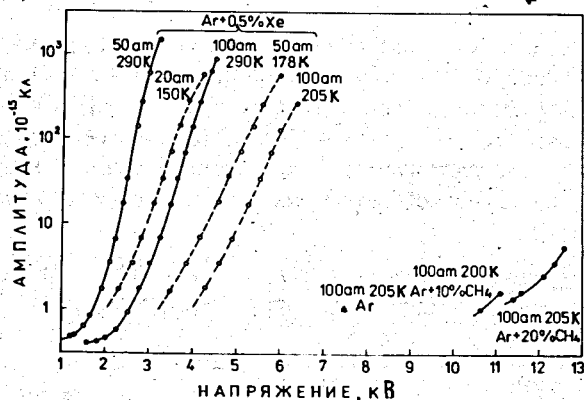


Рис.4 Амплитудные характеристики пропорционального счетчика при высоких давлениях и низких температурах.

На основании полученных экспериментальных данных для Ar, Xe и смеси Ar + 0,5% Xe найдены зависимости первого коэффициента Таундсенда  $\alpha$  в виде  $\frac{\alpha}{P} = f\left(\frac{E}{P}\right)$ , где P - давление, E - напряженность электрического поля. Полученные значения  $\frac{\alpha}{P}$  при больших давлениях заметно выше, чем при низких \* давлениях.

\* Kruithof A.A. Physica, 1940, v.7, p.519.

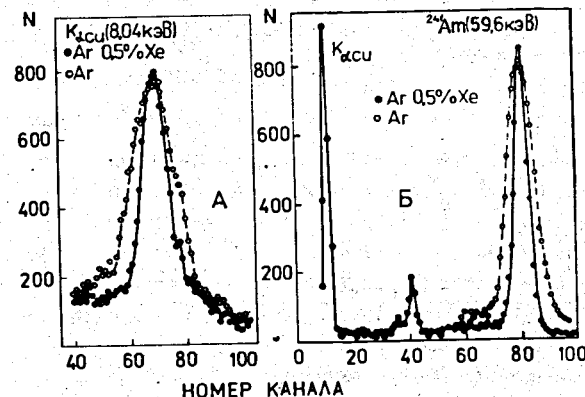
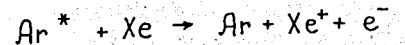


Рис.5 Спектры импульсов при давлении 50 атм. и комнатной температуре: А - от рентгеновских  $\gamma$ -квантов K-линии меди для аргона ( $\sim 27\%$  FWHM) и смеси Ar + 0,5% Xe ( $\sim 13,6\%$  FWHM); Б - от  $\gamma$ -квантов <sup>241</sup>Am для аргона ( $\sim 12\%$  FWHM) и смеси Ar + 0,5% Xe ( $\sim 6,2\%$  FWHM).

Показано, что новые качества счетчиков высокого давления на смеси Ar + 0,5% Xe связаны с дополнительной ионизацией в лавине за счет процесса:



Этот процесс, известный для газовых смесей низкого давления \* как "неметастабильный эффект Пеннинга", был обнаружен нами в смесях Ar и Xe при высоких давлениях.

Исследования счетчиков ( $\varnothing$  анода 10 мм,  $\varnothing$  катода 6 мм), заполненных твердыми аргоном и ксеноном, показали, что для таких счетчиков характерным является стабильный ионизационный режим работы, когда импульс на выходе обусловлен сбором электронов ионизации. Наряду с этим наблюдается усиление части импульсов до амплитуд, превышающих амплитуды ионизационных импульсов в  $\sim 100$  раз. Большие импульсы характеризуются нестабильностью во времени по амплитуде и интенсивности.

Сравнение амплитуд импульсов от счетчиков, заполненных твердой и жидкой фазами, показало, что в кристалле захват электронов примесями при дрейфе к аноду оказывает заметно меньшее влияние на величину сигнала на выходе. Проведенная оценка коэффициентов рекомбинации K в жидких и твердых Ar и Xe подтверждает этот результат:

\* Kubota S.J. Phys. Soc. Jap., 1970, v.29, p.1017.



$$K_{\text{ТВ. Ar}} = 0,41 \pm 0,03 \text{ кВ/см}$$

$$K_{\text{Ж. Ar}} = 0,52 \pm 0,02 \text{ кВ/см}$$

$$K_{\text{ТВ. Xe}} = 0,19 \pm 0,08 \text{ кВ/см}$$

$$K_{\text{Ж. Xe}} = 0,42 \pm 0,03 \text{ кВ/см}^*$$

Другая важная характеристика счетчиков – энергетическое разрешение – составляет ~12% (полная ширина на половине максимума) в случае жидкого и твердого Ar и ~15% в случае твердого Xe для  $E_{\gamma} = 660$  кэВ.

Во второй главе представлены также описание и результаты испытания жидкоаргоновой многоэлектродной ионизационной камеры, предназначенной для измерения пробегов и ионизации частиц (протонов, пионов) небольших энергий ( $< 100+200$  МэВ). Детектирующая часть камеры представляет собой стопку (общей высотой ~100 мм) из 48 плоских тонких (20 мкм) электродов диаметром 100 мм, разделенных промежутками ~2 мм. Сигнальные и высоковольтные электроды детектирующей части чередуются так, что вся камера разделяется на 24 секции. Сигнал от центрального электрода каждой секции подается на отдельный предусилитель. Испытания камеры проводились с помощью радиоактивных  $\gamma$ - и  $\alpha$ -источников  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{241}\text{Am}$  и от космических лучей. Результаты испытаний показали, что энергетическое разрешение в отдельной секции составляет ~150 кэВ (полная ширина на половине максимума), по оценкам точность измерения пробега частицы может быть ~100+400 мкм.

В третьей главе дается описание ряда криогенных устройств для экспериментальных установок на ускорителях.

Для нового направления исследований вещества с помощью  $\mu\text{SR}$ -метода разработана и введена в действие серия низкотемпературных мишеней, позволившая выполнить цикл экспериментов в интервале температур 4,2+300 К по изучению диффузии положительных мюонов в веществе, поискам атома мюония в металлах, исследованию свойств сверхпроводящих и магнитных материалов.

В  $\mu\text{SR}$ -методе частицами, зондирующими вещество, являются поляризованные положительные мюоны. Свойства вещества изучаются по изменению в нем начальной поляризации пучка мюонов, за которой можно следить, наблюдая угловое распределение позитронов  $\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$ -распада. Экспериментальные данные получаются в виде временного спектра  $N_{\theta}(t)$ , где  $N_{\theta}$  – число зарегистрированных позитронов  $\mu^+ \rightarrow e^+$ -распада, вылетающих в определенном направлении, а  $t$  – время между моментами останова мюона в веществе и вылета позитрона распада. Из анализа этого спектра (гл. IV) могут быть получены сведения о свойствах вещества и о взаимодействии с веществом положительного мюона.

\* Ободовский И.М., Покачалов С.Г. Ф.Н.Т., 1979, 5, с.829.

В данных экспериментах использовался пучок положительных мюонов от синхротрона ЛЯП ОИЯИ с импульсами 190 МэВ/с, интенсивностью  $2 \cdot 10^5$  I/с и поляризацией 85%. Особенности исследований в пучках мюонов небольшой интенсивности (по сравнению с интенсивностями пучков мезонных фабрик) предъявляют специфические требования к криогенным мишеням. На основе этих требований мишени были выполнены таким образом, что они обеспечили большой телесный угол (а следовательно, высокую скорость счета) для регистрации позитронов  $\mu^+ \rightarrow e^+$ -распада, позволили уменьшить фон (до 10%) от взаимодействия мюонов со стенками криостатов, создали условия для быстрого установления температуры образца и стабильного ее поддержания ( $\pm 0,1$  К) в диапазоне 4,2+300 К.

На рис.6 представлен схематический чертёж одной из таких мишеней, работающей на принципе обдува образца потоком холодного газа, температура которого регулируется на входе к образцу с помощью нагревателя, управляемого автоматически.

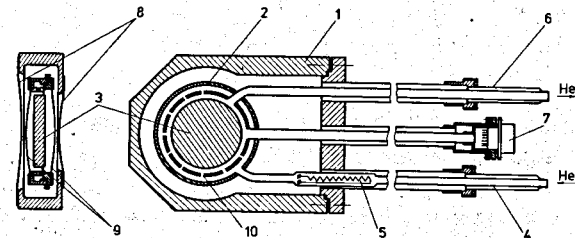


Рис.6 Схема криостата для  $\mu\text{SR}$ -экспериментов в диапазоне температур 4,2+300 К. 1 – вакуумный кожух, 2 – контейнер для образца, 3 – образец, 4 – трубка для подачи холодного газа, 5 – нагреватель, 6 – выход газа, 7 – электрический разъем, 8 – окно из майлара, 9 – окно из бериллиевой бронзы, 10 – отверстие для обдува образца.

Криогенные мишени обеспечили эффективное проведение  $\mu\text{SR}$ -экспериментов. При интенсивности мюонного пучка  $2 \cdot 10^5$  I/с число остановок мюонов в веществе ( $\sim 4$  г/см<sup>2</sup>) составило  $\sim 10^4$  I/с, а скорость счета позитронов  $\mu^+ \rightarrow e^+$ -распада  $\sim 1,5 \cdot 10^3$  I/с. При этом время набора требуемой статистики ( $\sim 2 \cdot 10^6$  событий) для одной температурной точки не превышало 20+30 мин.

В этой же главе представлены описание и результаты испытаний крупной сверхпроводящей магнитной ловушки многоцелевого назначения (рис. 7). Одно из перспективных применений такой ловушки связано с изучением экзотических атомов. Основные характеристики ловушки следующие:

Внутренний диаметр катушек	- 380 мм
Внешний диаметр катушек	- 750 мм
Высота катушек	- 186 мм
Число катушек	- 2
Расстояние между центрами катушек	- 700 мм
Сверхпроводящий материал	- NbTi, NbZr
Магнитная индукция в центре	- 2 Т
Магнитная индукция в "пробках"	- 3,7 Т
Запасенная магнитная энергия	- 1,5 МДж
Рабочий ток	- 950 А
Конструктивная плотность тока	- $5 \cdot 10^3$ А/см <sup>2</sup>
Время быстрого вывода энергии	- ~ 25 с
Время ввода тока	- ~ 35 мин.
Расход жидкого гелия	- 20 л/час.

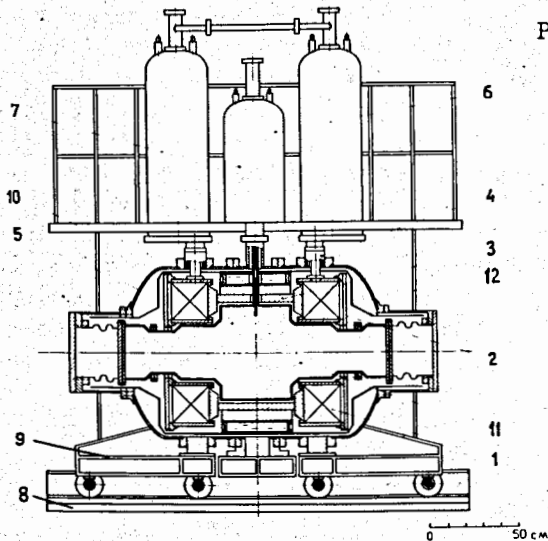


Рис. 7 Схематический чертеж сверхпроводящей магнитной ловушки. 1 - сверхпроводящая катушка, 2 - криостат катушки, 3 - опорное кольцо между криостатами, 4 - станина криостата, 5 - вакуумный кожух, 6 - азотный бачок, 7 - гелиевый бачок, 8 - ферма, 9 - тележка станины криостата, 10 - площадка для обслуживания, 11 - камера, в которой удерживаются захваченные ловушкой частицы, 12 - азотный экран.

Четвертая глава иллюстрирует применение разработанной криогенной аппаратуры в  $\mu$ SR-экспериментах. Здесь представлено несколько наиболее существенных экспериментальных результатов, полученных при изучении вещества с помощью положительных мюонов при низких температурах.

В  $\mu$ SR-методе экспериментальный спектр  $N_0(t)$ , представляющий зависимость от времени числа позитронов распада  $\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$ , для случая, когда магнитный момент мюона прецессирует в поперечном магнитном поле, описывается выражением\*:

$$N(t) = N_0 e^{-t/\tau_\mu} [1 - a_3 P(t) \cos \omega_\mu t],$$

где  $N_0$  - число отсчетов в момент времени  $t = 0$ ;  $\tau_\mu = 2,2$  мкс - период полураспада  $\mu^+$ ;  $a_3$  - экспериментальный коэффициент асимметрии углового распределения позитронов распада в момент времени  $t = 0$ ;  $P(t)$  - функция затухания поляризации в результате дипольных взаимодействий и диффузии положительного мюона в кристаллической решетке;  $\omega_\mu = \gamma_\mu \cdot B$  - частота ларморовской прецессии спина  $\mu^+$  в поле B (где  $\gamma_\mu = \frac{e}{m_\mu c} = 0,85 \cdot 10^5$  рад/с·Гс).

Функция  $P(t)$  имеет следующий вид\*\*:

$$P(t) = \exp \left\{ -2\sigma^2 \tau^2 \left[ e^{-t/\tau} - 1 + t/\tau \right] \right\},$$

где  $\tau$  - среднее время пребывания диффундирующей частицы в элементарной ячейке кристалла,  $\sigma$  - скорость затухания поляризации в отсутствие диффузии. Функция  $P(t)$  для недиффундирующего мюона переходит в  $P(t) = e^{-\sigma^2 t^2}$ , а для быстродиффундирующего мюона - в  $P(t) = e^{-2\sigma^2 \tau t}$ . При описании экспериментальных данных используется также величина  $\Lambda = 1/t_e$ , где  $t_e$  - время затухания поляризации в "e" раз. В отсутствие диффузии  $\Lambda = \sigma$ .

Впервые метод изучения диффузии положительных мюонов в металлах предложен в работе И.И. Гуревича и др.\*\*\*. На основе этого метода и разработанной низкотемпературной методики измерений, проведено детальное изучение диффузии положительных мюонов в меди и ряде других металлов. В результате было экспериментально открыто новое явление - квантовая некогерентная диффузия положительных мюонов в кристаллической решетке металла.

\* Garwin R.L. et al. Phys. Rev., 1960, v.118, p.271.

\*\* Абрагам А. Ядерный магнетизм. ИЛ, М., 1963, с.407.

\*\*\* Gurevich I.I., Meleshko E.A., Muratova I.A., Nikolsky B.A., Roganov V.S., Selivanov V.I., Sokolov B.V. Phys. Lett., 1972, 40A, p.143.

Ниже приводятся результаты, полученные для меди. Образец помещался в поперечное магнитное поле напряженностью 70 Э. При сопоставлении по методу наименьших квадратов  $N_3(t)$  с  $N(t)$  были определены величины  $\Lambda$ ,  $\tau$  и их зависимости от температуры (рис.8). Из рис.8А видно, что при  $T < 80$  К величина  $\Lambda$  принимает постоянное значение ( $\tau$ ), что свидетельствует об отсутствии диффузии. При  $T > 80$  К наблюдается подбарьерная диффузия положительного мюона в меди, которая для интервала температур  $T = 100 \pm 250$  К (рис.8Б) хорошо описывается формулой:

$$\frac{1}{\tau} = \nu_M e^{-Q_M/T}$$

где  $\nu_M = 10^{(7,6 \pm 0,04)}$  - частота туннелирования,  $Q_M = (562 \pm 17)$  К - энергия, необходимая для расширения поры в элементарной ячейке. Величина  $\nu_M$  может быть представлена в виде:

$$\nu_M = \nu_0 e^{-2/\hbar \sqrt{2 m_M U} \cdot b}$$

где  $\nu_0$  - частота колебаний примеси в кристаллической решетке ( $\sim 10^{13}$  1/с),  $\hbar$  - постоянная Планка,  $m_M$  - масса мюона,  $U$  - высота потенциального барьера ( $\sim 4000$  К),  $b$  - ширина потенциального барьера ( $\sim 1,5 \pm 2 \cdot 10^{-8}$  см).

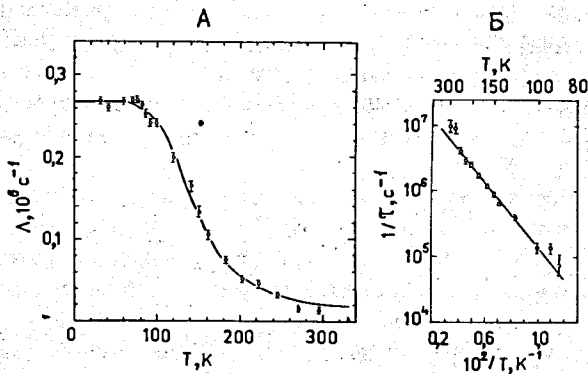


Рис.8 Результаты изучения диффузии положительного мюона в монокристалле меди. А - температурная зависимость скорости релаксации  $\Lambda$  спина положительного мюона. Плавная кривая представляет собой расчетную зависимость  $\Lambda(T)$ . Б - зависимость  $\frac{1}{\tau} = f\left(\frac{1}{T}\right)$ . Прямая - расчетная зависимость.

$\mu$ SR-метод эффективен также для получения количественных данных о свойствах сверхпроводников. Это демонстрируется на примере свинца (сверхпроводник I рода), для которого при различных значениях внешнего магнитного поля  $H$  были измерены внутренние магнитные поля, оценена их неоднородность в нормальных областях промежуточного состояния сверхпроводника и найдены отношения между объемами, занимаемыми нормальной и сверхпроводящей фазами.

Следующий эксперимент, основанный на методе, предложенном в работе И.И.Гуревича с сотрудниками\*, связан с поисками атома мюония в металлах. В результате обменного рассеяния электронов проводимости на электроны мюония происходит опрокидывание спина электрона мюония с частотой, значительно превышающей частоту сверхтонкого расщепления основного состояния атома мюония. Вследствие этого в металле независимо от того, существует или не существует в нем мюоний, наблюдается прецессия спина практически свободного мюона во внешнем поле  $B$  с частотой  $\omega = \frac{eB}{m_M c}$ . Поэтому атом мюония искался по изменению частоты прецессии спина мюона вследствие температурного изменения на нем контактного поля  $B_K$  поляризованного электрона мюония. Наблюдаемая частота прецессии спина  $\mu^+$  запишется\*:

$$\omega_{\text{набл.}}(T) = \frac{e}{m_M c} (B + B_K) = \omega + \Delta\omega = \omega \left(1 + \alpha \frac{H}{T}\right),$$

где  $\alpha = \rho(0)/[\rho(0)]_{\text{вак.}}$ ,  $\rho(0)$  и  $[\rho(0)]_{\text{вак.}}$  - плотности волновых функций электрона на мюоне мюония в веществе и в вакууме, соответственно.

Сопоставление теоретической зависимости  $\omega_{\text{набл.}}$  с экспериментальными измерениями частоты прецессии ( $\omega_{\text{эксп.}}$ ) при температурах  $T_1 \sim 4,2$  К и  $T_2 \sim 90$  К приводят для Al, Cu и Zn к значениям  $\alpha = (0 \pm 1) \cdot 10^{-4}$ ,  $(-1,5 \pm 1) \cdot 10^{-4}$  и  $(0 \pm 1) \cdot 10^{-4}$ , соответственно, что можно интерпретировать как отсутствие связанного парамагнитного состояния ( $\mu^+ e^-$ ) в исследованных металлах.

В пятой главе рассматриваются перспективы использования разработанных детекторов частиц и криогенной аппаратуры. В частности, оцениваются возможности ультразвуковых пузырьковых камер в составе гибридных установок в физике высоких энергий; обсуждается использование результатов, полученных для электронных детекторов на основе аргона и ксенона большой плотности; намечаются пути дальнейшего развития криогенной аппаратуры для  $\mu$ SR-метода; рассматриваются перспективные применения сверхпроводящей магнитной ловушки в экспериментах на ускорителях.

\* Гребинник В.Г., Гуревич И.И. и др. Письма в ЖЭТФ, 1975, 22, с.36.

Выводы содержат основные результаты, полученные в диссертации:

1. Выполнена серия экспериментов, направленных на создание нового трекового детектора — жидководородной ультразвуковой пузырьковой камеры. В результате этих экспериментов впервые получены отчетливые треки ионизирующих частиц ( $\Pi^-$ -мезонов с энергией 340 МэВ) под действием сфокусированной ультразвуковой волны в жидководородной пузырьковой камере, в которой на момент ввода ультразвука давление понижалось с помощью механической расширительной системы до предела, соответствующего началу ее чувствительности. С усовершенствованными ультразвуковыми излучателями, при воздействии на жидкость только одного ультразвука, достигнута чувствительность к ионизирующему излучению в жидком водороде, находящемся под избыточным давлением 0,35 атм. по отношению к давлению насыщенного пара. Предложена и защищена авторским свидетельством конструкция ультразвуковой пузырьковой камеры.

2. Исследованы условия формирования треков ионизирующих частиц под действием ультразвука в жидком водороде. Показана ограничивающая роль кавитационных явлений на поверхности ультразвуковых излучателей при формировании треков частиц, оценена скорость роста пузырьков до видимых размеров и рассмотрено влияние на конечные размеры пузырьков эффектов их объединения в ультразвуковом поле.

3. Разработана и испытана модель электродинамической системы расширения рабочего объема пузырьковой камеры, основанная на взаимодействии сверхпроводящей обмотки силового привода, по которой протекает переменный ток, коммутируемый по определенному закону, с рассеянным магнитным полем сверхпроводящего соленоида камеры. Конструкция такой системы защищена авторским свидетельством.

4. Проведено систематическое исследование амплитудных характеристик и энергетического разрешения пропорциональных счетчиков, заполненных благородными газами (Ar, Xe) и их смесями при давлениях до 100 атм. и температурах в диапазоне 150–300 К. В результате этих исследований в смеси аргона с ксеноном большой плотности обнаружен неметастабильный эффект Пеннинга, приводящий к росту ионизации в лавине. Показано, что, по сравнению с чистым аргоном, для смеси Ar + 0,5% Xe наблюдается значительное улучшение характеристик пропорциональных счетчиков во всем исследованном диапазоне температур. При этом существенно (в 1,5–2 раза) снижается рабочее напряжение счетчика, сохраняется довольно высокое ( $\sim 10^3$ ) значение максимального коэффициента газового усиления, улучшается ( $\sim$  в 2 раза) энергетическое разрешение.

5. Выполнен цикл исследований электронных детекторов на конденсированных аргоне и ксеноне. Цикл включает в себя изучение детектирующих свойств цилиндрических счетчиков, заполненных жидкими и твердыми аргоном и ксеноном, а также многоэлектродной ионизационной камеры, запол-

ненной жидким аргоном. Для счетчиков на твердых аргоне и ксеноне показано, что характерным режимом их работы является ионизационный режим (без размножения). Для счетчиков на жидких и твердых аргоне и ксеноне получены количественные данные об энергетическом решении и коэффициентах рекомбинации электронов в конденсированной среде. Исследования многосекционной жидкоаргоновой ионизационной камеры с полезным объемом  $\sim 1$  л, разделенным множеством тонких плоских электродов на слои толщиной  $\sim 2$  мм, показали, что такая камера может быть использована для спектрометрии и идентификации частиц (пионов, протонов) с энергиями  $< 100+200$  МэВ. При этом точность определения пробега частицы может достигать 100+400 мкм, а энергетическое разрешение в отдельной секции составляет  $\sim 150$  кэВ.

6. Разработаны для  $\mu$ SR-экспериментов криостаты, позволяющие производить исследования образцов в диапазоне температур 4,2–300 К при точности поддержания температуры  $\pm 0,1$  К на разных температурных уровнях. Криостаты обеспечили эффективное проведение большого цикла исследований вещества с помощью  $\mu$ SR-метода на синхротронном ЛЯП. Наиболее важные результаты этих исследований следующие: открыто явление подбарьерной некогерентной диффузии положительных мюонов в кристаллической решетке металлов; впервые выполнен эксперимент по поискам атома мюония в ряде металлов, результат которого интерпретируется как отсутствие парамагнитного связанного состояния ( $\mu^+e^-$ ) в исследованных металлах; показана эффективность  $\mu$ SR-метода для количественного изучения свойств сверхпроводников.

7. Создана для проведения экспериментов на ускорителях многоцелевая сверхпроводящая магнитная система, состоящая из двух автономных катушек с внутренним диаметром  $\sim 40$  см, расстояние между которыми может выбираться исходя из условия эксперимента. Проведено испытание системы при использовании ее в качестве сверхпроводящей магнитной лопушки, в результате чего получено магнитное поле в центре  $\sim 2,0$  Т и на краях (в "пробках")  $\sim 3,7$  Т.

Результаты диссертации опубликованы в работах:

1. Акуличев В.А., Жуков В.А., Ткачев Л.Г. Ультразвуковые пузырьковые камеры. ЭЧАЯ, 1977, т.8, с.580–630.
2. Акуличев В.А., Гаврилов Л.Р., Гребинник В.Г., Жуков В.А., Либман Г., Маныч А.П., Рудин Ю.И., Розенберг Л.Д., Селиванов Г.И. Акустическая пузырьковая камера. Авторское свидетельство СССР № 275243 от 10.03.69 г. Бюллетень ОИПОТЗ, 1974, № 29, с.174.
3. Акуличев В.А., Гаврилов Л.Р., Гребинник В.Г., Жуков В.А., Либман Г., Маныч А.П., Рудин Ю.И., Розенберг Л.Д., Селиванов Г.И. Исследование влияния ультразвука на формирование треков частиц высоких энергий в жидководородной пузырьковой камере. ДАН СССР, 1969, 189, с.973–975.

4. Акуличев В.А., Гребинник В.Г., Жуков В.А., Красильников В.А., Маньч А.П., Селиванов Г.И. Исследование формирования треков ионизирующих частиц в ультразвуковом поле в жидководородной пузырьковой камере. Акустический журнал, 1973, 19, с.486-493.
5. Акуличев В.А., Гребинник В.Г., Жуков В.А., Копова А.М., Красильников В.А., Маньч А.П., Селиванов Г.И., Ошин В.П. Треки ионизирующих частиц в жидководородной ультразвуковой пузырьковой камере. ДАН СССР, 1974, 216, с.517-519.
6. Grebinnik V.G., Manych A.P., Selivanov G.I., Shestakov V.D., Tkachev L.G., Zhukov V.A., Akulich V.A., Alekseev V.N., Korova A.M., Krasilnikov V.A., Yushin V.P. Development of the Liquid Hydrogen Ultrasonic Bubble Chamber in Dubna. In: 1973 Intern. Conf. Instrum. for High Energy Physics, Frascati, 1973, p.41-43.
7. Богач В.А., Гребинник В.Г., Жуков В.А., Маньч А.П., Рудин Ю.И., Селиванов Г.И. Расширительное устройство для пузырьковой камеры, помещенной в магнитное поле соленоида. Авторское свидетельство СССР № 241551 от 12.04.68 г. Бюллетень ОИИОТЗ, 1969, № 14, с.48.
8. Богач В.А., Гераскин Е.В., Гребинник В.Г., Жуков В.А., Кечкин В.Ф., Маньч А.П., Рудин Ю.И., Селиванов Г.И. Электродинамическое расширительное устройство для пузырьковой камеры. В кн.: Пузырьковые камеры. ОИЯИ, 13-4466, Дубна, 1969, с.169-172.
9. Гребинник В.Г., Додохов В.Х., Жуков В.А., Лазарев А.Б., Ноадрин А.А., Столупин В.А., Травкин В.И. Исследование газового пропорционального счетчика, заполненного смесью аргона и ксенона, имеющей большую плотность. В кн.: Пропорциональные и дрейфовые камеры. Труды III международного совещания. ОИЯИ, 13-11807, Дубна, 1978, с.304-307.
10. Додохов В.Х., Жуков В.А. Первый коэффициент Таундсенда в аргоне, ксеноне и их смеси. ЖТФ, 1981, т.5, вып.9, с.1858-1864.
11. Гребинник В.Г., Додохов В.Х., Жуков В.А., Лазарев А.Б., Ноадрин А.А., Писарев А.Ф., Столупин В.А., Травкин В.И. Исследование детектирующих свойств счетчика, заполненного твердым аргоном. ЖТФ, 1976, т.71, вып. 2(8), с.417-423.
12. Гребинник В.Г., Додохов В.Х., Жуков В.А., Лазарев А.Б., Ноадрин А.А., Столупин В.А., Травкин В.И. Исследование детектирующих свойств счетчика, заполненного твердым ксеноном. ОИЯИ, P13-11165, Дубна, 1977, 12 с.
13. Акимов В.К., Додохов В.Х., Жуков В.А., Калинин А.И., Нгуен Нгок Лам, Тыпиков В.К., Шилов С.Н. Многосекционная жидкоаргоновая ионизационная камера. Устройство и результаты испытаний. ОИЯИ, P13-80-605, Дубна, 1980, 9 с.
14. Жуков В.А. Сверхпроводящие соленоиды для жидководородных пузырьковых камер. В кн.: Пузырьковые камеры. ОИЯИ, 13-4466, Дубна, 1969, с.129-137.

15. Багдасаров С.К., Богач В.А., Гераскин Е.В., Гребинник В.Г., Жуков В.А., Кечкин В.Ф., Кленин Б.А., Малаяев В.Х., Маньч А.П., Оконова М.И., Рудин Ю.И., Селиванов Г.И. Сверхпроводящий соленоид для 8-литровой жидководородной пузырьковой камеры. В кн.: Пузырьковые камеры. ОИЯИ, 13-4466, Дубна, 1969, с.138-141.
16. Белесев А.И., Гераскин Е.В., Гребинник В.Г., Дугинов В.Н., Жуков В.А., Лазарев А.Б., Маньч А.П., Медведев В.И., Селиванов Г.И., Смирнов А.И., Соколов Г.Л., Травкин В.И., Чернов Н.Н. Сверхпроводящая магнитная ловушка и мезорентгеновская мишень установки для исследования рентгеновского излучения легких мезоатомов. ОИЯИ, P13-83-47, Дубна, 1983, 16 с.
17. Гребинник В.Г., Жуков В.А., Лазарев А.Б., Маньч А.П., Никольский Б.А., Селиванов В.И., Селиванов Г.И., Суетин В.А. Криостаты для исследования вещества с помощью положительных мюонов при низких температурах. ОИЯИ, P13-83-20, Дубна, 1983, 10 с.
18. Гребинник В.Г., Гуревич И.И., Жуков В.А., Маньч А.П., Мелешко Е.А., Муратова И.А., Никольский Б.А., Селиванов В.И., Суетин В.А. Подбарьерная диффузия  $\mu^+$ -мезонов в меди. ЖЭТФ, 1975, 68, с.1548-1556.
19. Гребинник В.Г., Гуревич И.И., Жуков В.А., Ивантер И.Г., Маньч А.П., Никольский Б.А., Селиванов В.И., Суетин В.А. Поиски атома мюония в алюминии, меди, цинке и углероде. Письма в ЖЭТФ, 1976, 23, с.11-14.
20. Гребинник В.Г., Гуревич И.И., Жуков В.А., Левина Л.А., Лазарев А.Б., Майоров В.Н., Маньч А.П., Никольский Б.А., Селиванов В.И., Суетин В.А. Измерение  $\mu^+$ -методом внутреннего магнитного поля в сверхпроводящем свинце. Письма в ЖЭТФ, 1979, 29, с.82-85.

Рукопись поступила в издательский отдел  
14 сентября 1983 года.