



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

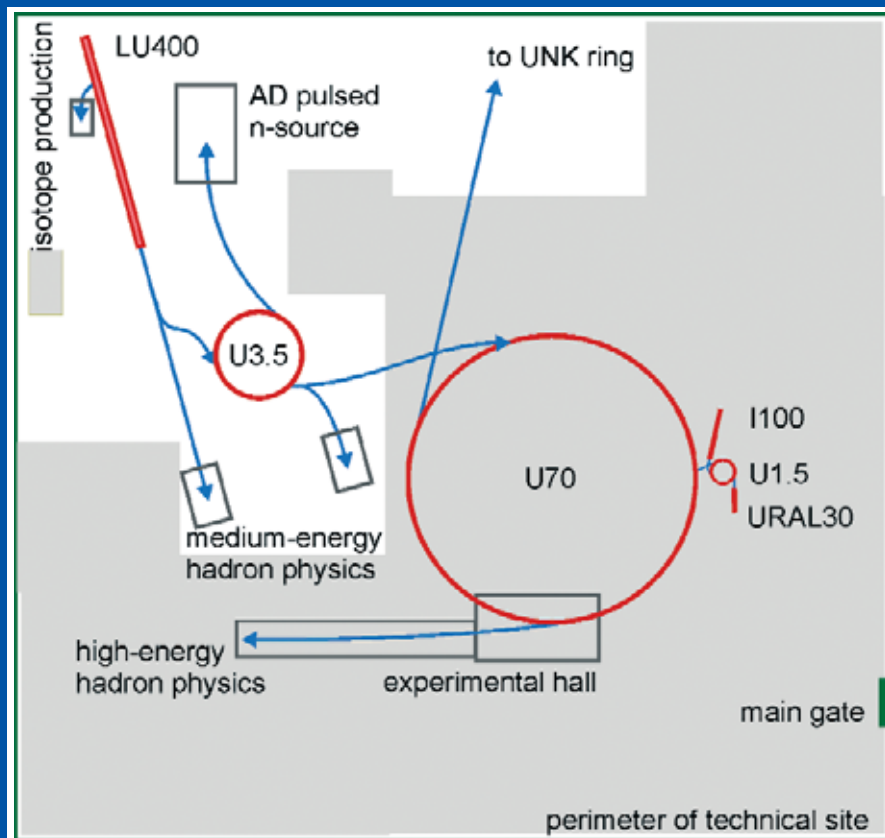
State Research Center of Russian Federation Institute for High Energy Physics



# НОВОСТИ ПРОБЛЕМЫ ФУНДАМЕНТАЛЬНОЙ ФИЗИКИ

№ 2(9) 2010

## Ускорительный комплекс интенсивных адронных пучков Facility for Intense Hadron Beams



## Новости и проблемы фундаментальной физики

Журнал Института физики высоких энергий. Журнал предназначен для освещения текущих событий в жизни научного сообщества, новейших достижений современной фундаментальной физики, новейшей экспериментальной техники и приложений, обзора наиболее принципиальных проблем.

Новости и проблемы фундаментальной физики  
Номер ISSN: 1999-2858

Ключевое название: *Novosti i problemy fundamental'noj fiziki* (Print)  
Сокращенное ключевое название: *Nov. probl. fundam. fiz.* (Print)  
EAN13: 9771999285501

Новости и проблемы фундаментальной физики (online)  
Номер ISSN: 1999-2866

Ключевое название: *Novosti i problemy fundamental'noj fiziki* (Online)  
Сокращенное ключевое название: *Nov. probl. fundam. fiz.* (Online)  
URL <http://www.ihep.su/ihep/journal/journal.htm>

Издатель: ГНЦ ИФВЭ

Редакционная коллегия:

Главный редактор: Н.Е. Тюрин

Члены редколлегии: А.М. Зайцев  
С.В. Иванов  
В.А. Петров  
Ю.Г. Рябов.

Дизайн, печать: «ПРИНТ-Ателье»

## Содержание Contents

Введение Introduction	2
1. Ускорительный комплекс У-70 1. The U-70 Accelerator	6
2. Комплекс ускорителей высокой интенсивности 2. High Intensity Accelerators	14
3. Исследования с пучками ЛУ-400 и У-3,5 3. Application of LU-400 and U-3.5 Beams	28
4. Работы с пучками У-70 4. The U-70 Intense Beams	38
5. Оценка сроков и стоимости сооружения 5. Construction Schedule and Cost Estimations	46
6. Перспективы дальнейшего развития 6. Prospects for Further Development	50
Заключение Conclusion	52
Приложение Attachment	53

© Государственный научный центр  
Российской Федерации  
**Институт физики высоких энергий**

142281, Протвино Московской области,  
Площадь Науки, д. 1.  
Государственный научный центр  
Российской Федерации  
Институт физики высоких энергий

<http://www.ihep.ru>

---

Настоящий документ, озаглавленный «Ускорительный комплекс интенсивных адронных пучков», разработан специалистами ГНЦ ИФВЭ. Предложение направлено на создание крупной многоцелевой ускорительной установки мирового класса с пучками ускоренных протонов мегаваттной мощности в диапазоне энергий от 100 МэВ до 70 ГэВ.

Установка предназначена для проведения в режиме коллективного пользования обширной программы исследований свойств веществ, материалов и изделий в нанометровом и субнанометровом диапазоне, а также для исследования фундаментальных свойств материи.

Н.Е. Тюрин,  
директор ГНЦ ИФВЭ

30 ноября 2010

This document entitled "Facility for Intense Hadron Beams" has been prepared by IHEP, Protvino experts. The proposal aims at construction of a large world class multipurpose accelerator facility with megawatt power proton beams in the energy range from 100 MeV to 70 GeV.

The new facility will allow to conduct on a multiuser basis a comprehensive research program including the investigation of substances, materials and object's properties at nanometer and subnanometer scale and also to study the fundamental properties of matter.

N.E. Tyurin,  
IHEP Director

30 November 2010

## Введение

Развитие физики фундаментальных взаимодействий во второй половине XX века, ознаменовавшееся целым рядом открытий, опиралось прежде всего на достижения ускорительной физики и техники. В наше время ускорители являются важнейшими инструментами не только фундаментальных, но и прикладных исследований.

Одной из основных тенденций развития ускорителей протонов является повышение интенсивности (мощности) пучков. Уже созданы установки с мощностью пучков до 1 МВт, проектируются установки с мощностью пучков до 5 МВт, обсуждаются установки с мощностью до 100 МВт. При этом энергия мегаваттных ускорителей варьируется от десятков МэВ до сотен ГэВ. Такие установки нужны для фундаментальных и прикладных исследований, они определяют развитие ряда важнейших технологий, как в процессе своего создания, так и при выполнении прикладных работ.

**Предлагается** на базе существующего ускорительного комплекса ГНЦ ИФВЭ создать «Ускорительный комплекс интенсивных адронных пучков» мегаваттной мощности.\*

В основу предложения положены следующие принципы:

- ◆ Сохранение работоспособности существующего Ускорительного комплекса У-70 ГНЦ ИФВЭ и обеспечение выполнения уже начатых программ.
- ◆ Минимизация рисков в процессе реализации проекта, использование современных, но освоенных технологий.
- ◆ Разбивка проекта на этапы с их функциональной самостоятельностью и готовностью к использованию на каждом этапе.
- ◆ Интеграция с имеющейся инфраструктурой и научно-техническим комплексом Института.
- ◆ Максимальное использование базовых компетенций ГНЦ ИФВЭ.
- ◆ Консолидация в рамках мегапроекта потенциала российских ускорительных лабораторий на основе использования их достижений и компетенций.
- ◆ "Открытая архитектура" и возможность развития в долгосрочной перспективе.
- ◆ Комплекс должен быть установкой коллективного пользования и предоставлять возможности специалистам из разных областей науки для первоклассных исследований по широкому спектру прикладных и фундаментальных задач.

## Introduction

The development of fundamental physics in the second half of the XX century was marked by a cascade of discoveries based mainly on the achievements in the accelerator physics and technologies. Today, the accelerators have become the most important tools for both the fundamental and applied studies.

One of the leading tendencies in development of the proton accelerators is increase of the beam intensities (power). Already there are facilities with beam power up to 1 MW, accelerator facilities with the beam power up to 5 MW are under design and facilities with the beam power up to 100 MW are under consideration. The energy of megawatt power facilities varies from tens of MeV to hundreds of GeV. Such facilities are requested by fundamental and applied studies, they enable the development of variety of innovative technologies during their construction phase as well as in the process of their use.

It is **proposed** to construct at IHEP the "Facility for Intense Hadron Beams"\* of megawatt power beams.

The proposal is based on the following design grounds:

- ◆ Maintaining the working capacity of the existing 70 GeV accelerator U-70 and continuation of the ongoing projects at IHEP.
- ◆ Lowering the technical risks under the project realization, the use of modern but reliable and proven technologies.
- ◆ Sectioning the project into a few stages with the functional self-sufficiency and readiness for the practical use of each particular stage.
- ◆ Integration with the existing infrastructure of the IHEP as well as with its research and technical facilities.
- ◆ Utmost use of the IHEP staff expertise.
- ◆ Consolidation of the Russian Accelerator Laboratories around this megaproject on the basis of their particular scientific and technical expertise and achievements.
- ◆ "Open architecture" and the opportunities for the development over a long term perspective.
- ◆ The new accelerator and experimental facilities should become the ones of the common use and should provide the scientists from various fields with the possibilities to conduct the first class research programs on wide spectrum of applied and fundamental topics.

\* Условное название: "Проект ОМЕГА"

\* The conventional project name is "The OMEGA Project"

Центральным элементом проекта является новый каскад ускорителей высокой интенсивности с энергией ускоренного пучка протонов 3,5 ГэВ. Этот комплекс ускорителей\*\* будет использоваться для решения двух задач:

- ◆ для обеспечения фундаментальных и прикладных исследований пучком ГэВных энергий мощностью свыше 1 МВт;
- ◆ для инжекции высокоинтенсивного пучка протонов в ускоритель У-70.

Проект ОМЕГА предусматривает также создание на базе пучка с энергией 3,5 ГэВ и мощностью 1,1 МВт импульсного нейтронного источника (исследование биологических структур, наноструктур, веществ, материалов, изделий). Проект ОМЕГА, в совокупности с источниками синхротронного излучения, создаёт уникальные возможности для всесторонних исследований в перечисленных выше направлениях.

Кроме того, такой пучок протонов может быть использован для исследований в области ядерной физики, радиационного материаловедения, исследования управляемых ускорителем подкритических систем, наработки изотопов, а также для изучения фундаментальных процессов с использованием нейтронов, каонов, пионов, мюонов и нейтрино (Рис. 1).

Повышение энергии и интенсивности протонов, инжектируемых в существующий ускоритель У-70 из быстроциклирующего синхротрона У-3,5, позволит получить рекордную интенсивность пучка, ускоренного до энергии 70 ГэВ, что создаст новые возможности для фундаментальных исследований, а также определит перспективы использования инфраструктуры УНК.

Создание нового комплекса ускорителей позволит оптимизировать существующий инжекционный комплекс в составе линейного ускорителя И-100 и бустерного синхротрона У-1,5 для работы с легкими и средними ядрами.

В процессе реализации проекта ОМЕГА на каждом её этапе научное сообщество получит новую уникальную экспериментальную базу и новые технологии.

Предлагаемая установка будет крупнейшим в России центром коллективного пользования, обеспечивающим возможности исследований на современном уровне для специалистов самых различных дисциплин. Создание установки такого уровня позволит сохранить и развить широкий спектр передовых научных направлений и перспективных технологий. По основным параметрам этот комплекс будет в числе лучших в мире установок данного направления (Рис.2), что должно привлекать к нему российских и зарубежных специалистов.

\*\* В дальнейшем использованы следующие термины:

- ◆ **Ускорительный комплекс интенсивных адронных пучков – Проект ОМЕГА**, включает всё (ускорители, высокоинтенсивные пучки и нейтронный источник).
- ◆ **Комплекс высокоинтенсивных ускорителей** включает ЛУ-400 и У-3,5.
- ◆ **У-70** – протонный синхротрон на энергию 70 ГэВ с существующей инжекцией от 1,5 ГэВ кольцевого бустера, наполняемого протонами от 30 МэВ ВЧК-линейного ускорителя УРАЛ-30.

The core element of The OMEGA project is a new cascade of high intensity accelerators with the top proton beam energy of 3.5 GeV. This proposed accelerator facility\*\* will address the two major tasks:

- ◆ to provide fundamental and applied research activities with the beams of GeV energy range and the beam power above 1 MW;
- ◆ to inject the higher intensity proton beams into the U-70 accelerator.

The OMEGA Project also foresees construction of the pulsed spallation neutron source utilizing the 3.5 GeV and 1.1 MW proton beam (the study of biological structures, nanostructures, substances, materials, objects). These features of the neutron studies make The OMEGA Project complimentary to the synchrotron radiation sources thus providing unique opportunities for a comprehensive research in the science fields listed above.

Moreover, such a proton beam can be used for investigations in the field of nuclear physics, radiation material science, to study accelerator driven subcritical systems, to produce isotopes and also to study the fundamental processes using neutrons, kaons, pions, muons and neutrinos (Fig. 1).

Higher energy and higher intensity of the protons injected into the existing U-70 accelerator from the RC PS U-3.5 will result in a record intensity of the 70 GeV protons and, respectively, will create the new possibilities for the fundamental studies as well as open an opportunity for the future use of the UNK infrastructure.

Construction of the new accelerator complex will allow to further optimize the existing U-70 injection chain consisting of the linac I-100 and the 1.5 GeV booster synchrotron for the operation with the light to medium nuclei.

Realization of The OMEGA Project will provide the scientific community with unique experimental facility and innovative technologies at every particular project stage.

The proposed facility will become the largest center for the common use in Russia. It will allow the experts from various fields of science to conduct advanced research programs. The construction of such a front level facility will stimulate the development of a wide spectrum of advanced scientific investigations and technologies. Among similar facilities this one will be the most advanced by its basic parameters (Fig. 2). As such it should attract the experts from Russia and other countries.

\*\* In what follows the use is made of the conventions:

- ◆ **Facility for intense hadron beams – The OMEGA Project**, includes "everything" (accelerators and high intensity beams and n-source).
- ◆ **Complex of high intensity accelerators** – includes LU-400 and U-3.5.
- ◆ **U-70 Accelerator** – 70 GeV proton synchrotron with the existing injection from 1.5 GeV ring booster fed by the protons from the 30 MeV RFQ linac URAL-30.



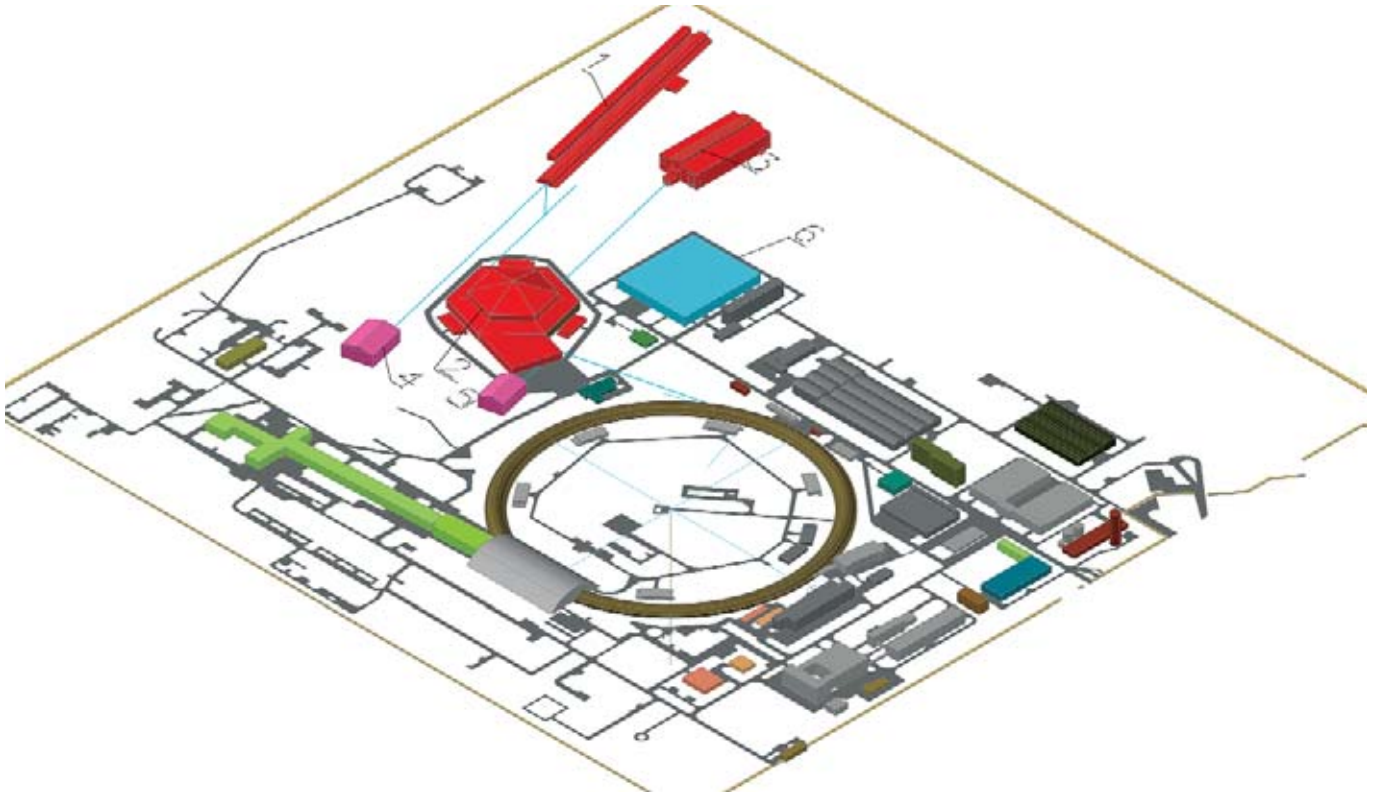


Рис. 1. Расположение комплекса на местности.

Комплекс расположен в северо-западной части технической площадки ГНЦ ИФВЭ: 1 – линейный ускоритель ЛУ-400 (красный цвет); 2 – быстроциклирующий синхротрон У-3,5 (красный цвет); 3 – Т1 – мишень и экспериментальный зал нейтронного источника (красный цвет); 4 – 5 Т2 и Т3 – зоны для экспериментов с высокоинтенсивными пучками (розовый цвет). Существующее здание 6 (голубой цвет) будет использовано для технологического обеспечения комплекса. Бледно-серым и зеленым цветами изображены существующие здания и сооружения. В центре – кольцо ускорителя У-70.

Fig. 1. Location of the Facility for Intense Hadron Beams.

It is located in the north-western part of the IHEP site: 1 – linear accelerator LU-400 (red color); 2 – rapid cycling synchrotron U-3.5 (red color); 3 – T1 – the neutron source target and experimental hall (red color); 4–5 T2 and T3 – areas for experiments with high intensity beams (pink color); 6 – existing building (blue color) is to be used for the technical support. Light-gray and yellow colors mark the existing infrastructure. In the center – the U-70 ring.

В качестве места для реализации этого мегапроекта предлагается техническая площадка ГНЦ ИФВЭ. Такой выбор определяется следующими аргументами:

- ◆ коллектив ГНЦ ИФВЭ обладает значительным, во многих случаях уникальным опытом в разработке, эксплуатации и развитии больших ускорительных комплексов;
- ◆ ГНЦ ИФВЭ обладает в ряде направлений уникальной производственной и технологической базой;
- ◆ в ГНЦ ИФВЭ имеется развитая инженерная инфраструктура, в том числе энергетика;
- ◆ географическое расположение удобно для широкого участия российских и зарубежных специалистов;
- ◆ в ГНЦ ИФВЭ имеется достаточная для создания предлагаемого комплекса территория;
- ◆ ГНЦ ИФВЭ имеет многолетний опыт широкого международного сотрудничества;
- ◆ проект ОМЕГА позволит значительно расширить возможности существующего ускорительного комплекса У-70 (синергетический эффект);
- ◆ проект ОМЕГА имеет перспективы дальнейшего развития, связанные с использованием инфраструктуры УНК.

The IHEP territory is suggested as a construction site for the new megaproject. This particular choice is determined by the following arguments:

- ◆ IHEP staff has a significant and unique expertise in construction, operation and development of large accelerator facilities in Russia;
- ◆ IHEP has in some cases unique technological and production potential;
- ◆ IHEP has a well-developed engineering infrastructure, including the electrical power supply network;
- ◆ IHEP geographic location is attractive for a wide participation of Russian and foreign users;
- ◆ IHEP has a sufficient territory for accommodation of the new facility;
- ◆ IHEP has a longstanding experience in the international cooperation;
- ◆ The OMEGA Project will allow to extend the potential of the existing U-70 accelerator (synergy effect);
- ◆ The OMEGA Project opens the perspectives towards the use of the UNK infrastructure.

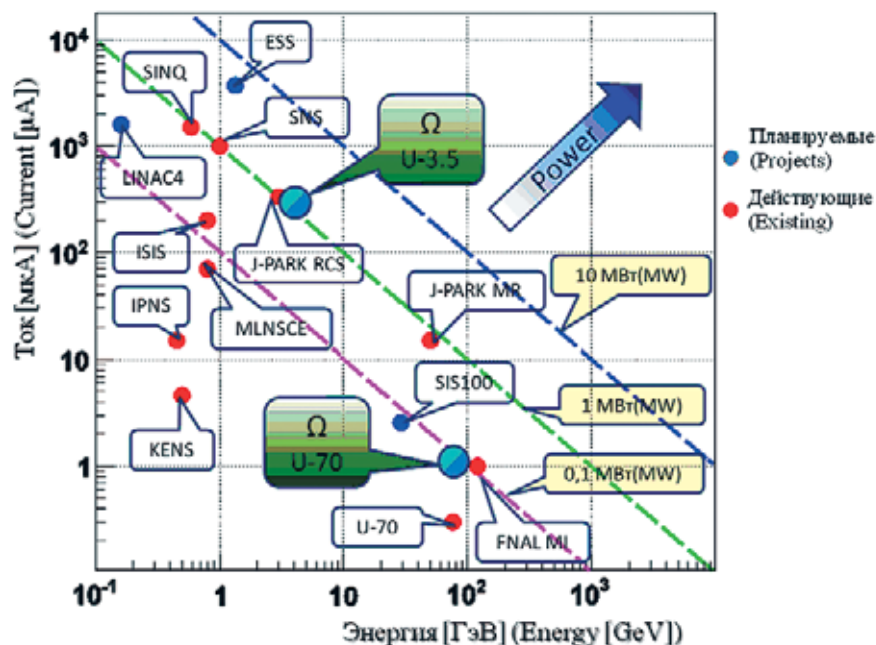


Рис. 2. Характеристики высокоинтенсивных протонных ускорителей.

Пунктирными прямыми линиями изображены уровни постоянной мощности. По этому параметру, важнейшему для большинства задач, предлагаемый проект (У-3,5) будет превосходить все существующие сегодня установки. Для проекта ОМЕГА ( $\Omega$ ) указаны две точки:

- быстроциклирующий синхротрон,  $E=3.5$  ГэВ,  $I=300$  мкА ( $W=1,1$  МВт);
- существующий ускоритель У-70 с новым инжекционным комплексом,  $E=70$  ГэВ,  $I=1,5$  мкА ( $W=0,1$  МВт).

Fig. 2. Parameters of high-intensity proton accelerators.

Dashed lines mark the levels of definite power. By this parameter, most important for many tasks, the proposed project (RC PS U-3.5) will surpass all the existing facilities. The two points are indicated for The OMEGA Project ( $\Omega$ ):

- rapid cycling synchrotron,  $E=3.5$  GeV,  $I=300$   $\mu$ A ( $W=1.1$  MW);
- existing U-70 accelerator with injection from the new complex,  $E=70$  GeV,  $I=1,5$   $\mu$ A ( $W=0.1$  MW).

Предлагаемый проект в силу его масштабности и комплексности ориентирован на широкое вовлечение в его реализацию основных ускорительных лабораторий России, специализированных проектных организаций и промышленных предприятий, а также заинтересованных зарубежных научных центров.

Настоящий материал имеет несколько разделов. В Разделе 1 приведены основные характеристики существующего ускорительного комплекса ГИЦ ИФВЭ и ряда проектов, находящихся на различных этапах развития. В Разделе 2 представлены основные параметры предлагаемого комплекса высокоинтенсивных ускорителей. В Разделе 3 описаны основные направления фундаментальных и прикладных исследований с энергиями протонов до 3,5 ГэВ. В Разделе 4 рассмотрены перспективы исследований на ускорителе У-70 с повышенной интенсивностью.

В последующих разделах приведены оценки стоимости, ориентировочный план-график работ и возможные перспективы дальнейшего развития.

Представленный в разделах 3 и 4 перечень возможных направлений фундаментальных и прикладных работ приведен для справки. В процессе дальнейшей детальной проработки будут определены приоритетные первоочередные направления.

Owing to its scale and complexity, the proposed project is expected to involve the major Russian accelerator laboratories, the specialized technological and manufacturing enterprises as well as the foreign scientific centers interested in the project.

This document is divided in a few sections. In Section 1 the main parameters of the existing IHEP accelerator complex and a number of ongoing at U-70 projects are presented. In Section 2 the basic parameters of the proposed high intensity accelerator complex are specified. In Section 3 the principal fundamental and applied research directions with the intense proton beams at the energies up to 3.5 GeV are described. In Section 4 the perspectives of the experiments at U-70 accelerator with the increased intensity are given.

Other sections of the document provide the cost estimates, preliminary schedule and further development perspectives.

The listing of possible fundamental and applied research directions in Sections 3 and 4 is outlined for reference. Of course, in the process of subsequent detailed study certain priorities are to be adopted.

# 1. Ускорительный комплекс У-70

В этом разделе приведены характеристики существующего ускорительного комплекса ГНЦ ИФВЭ и основные параметры проектов, находящихся в процессе реализации.

## 1.1. Основные характеристики

В настоящее время в состав Ускорительного комплекса У-70 ГНЦ ИФВЭ входят четыре установки, объединенные в единый каскад ускорителей, и один ускоритель, работающий автономно. Список установок комплекса:

- ◆ линейный ускоритель протонов УРАЛ 30 типа ВЧКФ с дрейфовыми трубками на энергию 30 МэВ – штатный протонный инжектор;
- ◆ линейный ускоритель И-100 типа Альвареза (Alvarez) – инжектор легких ионов с энергией 16.7 МэВ/нуклон и/или резервный инжектор протонов с энергией 72.7 МэВ;
- ◆ быстрый протонный синхротрон бустер У-1,5 с магнитной жесткостью 6.9 Тл·м;
- ◆ собственно большой протонный синхротрон У-70 с магнитной жесткостью 233 Тл·м.

Новый линейный ускоритель протонов УРАЛ-30М, предполагаемая замена для УРАЛ-30, находится в режиме испытаний на отдельной технической площадке.

Размещение ускорителей показано схематически на Рис. 1.1. Параметры ускорителей комплекса перечислены в Таблицах 1.1 и 1.2. Ускоритель И-100, использовавшийся как инжектор протонов в У-70, начиная с момента его запуска вплоть до 1985 г., снова интегрирован в цепочку ускорителей с декабря 2007 года. В настоящее время он используется как инжектор легких ионов либо как резервный инжектор, обслуживающий кольцо У-1,5.

Основные усилия в работе на комплексе У-70 направлены на достижение следующих целей:

1. Обеспечение надежной работы, малых простоев и пропусков пучка во время регулярных сеансов работы ускорителя.
2. Улучшение качества протонного пучка путем обеспечения меньших фазовых объемов пучка и получения его более высокой интенсивности, вплоть до  $3 \cdot 10^{13}$  протонов за цикл.
3. Поэтапная реализация программы ускорения легких ионов с отношением заряда к массе  $q/A=0,4-0,5$ .

В совокупности, выбранное направление развития предполагает превращение крупнейшей национальной ускорительной установки У-70 в универсальный адронный ускоритель, способный обеспе-

# 1. The U-70 Accelerator

In this Section the basic parameters of the existing IHEP accelerator complex are specified and an overview of the other ongoing projects is presented.

## 1.1. Basic Parameters

At present, the accelerator complex U-70 of IHEP consists of four machines connected in a cascade and one linear accelerator running in a stand-alone mode. The list of the machines is presented below:

- ◆ The 30 MeV RFQ DTL proton linear accelerator (linac) URAL-30 – the regular proton injector;
- ◆ The Alvarez DTL linac I-100 – the 16.7 MeV/nucleon light-ion and/or backup 72.7 MeV proton injector;
- ◆ The rapid cycling booster synchrotron U-1.5 with a top magnetic rigidity 6.9 T·m;
- ◆ The main ring synchrotron U-70 with a top magnetic rigidity 233 T·m.

The new 30 MeV proton linac URAL-30M, the supposed successor to the URAL-30, is housed on a separate site and is operated in a pre-commissioning regime.

Layout of accelerators is shown schematically in Fig. 1.1. Their parameters are listed in Tables 1.1 and 1.2. Alvarez linac I-100, the former proton injector to the U-70 since its early days till 1985, is back on service since December 2007. It is now operated as either a light-ion or backup proton injector feeding the intermediate booster ring U-1.5.

Major efforts during the accelerator operation are invested to attain the three goals:

1. To ensure stable operation and high beam availability during the regular machine runs.
2. To improve proton beam quality (by providing lower emittances and higher intensities, up to  $3 \cdot 10^{13}$  protons per cycle).
3. To implement gradually a program to accelerate light ions with a charge-to-mass ratio  $q/A=0.4-0.5$ .

Generally, the trend is to convert the largest national facility U-70 into a universal hadron accelerator to fit for ongoing applied and fundamental fixed-target research.



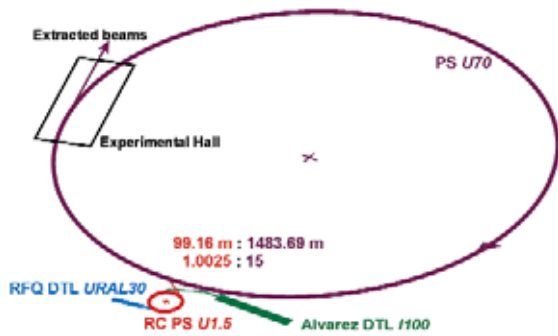


Рис. 1.1. Схематический вид ускорителей ГНЦ ИФВЭ.  
Fig. 1.1. Schematic view of IHEP accelerators.

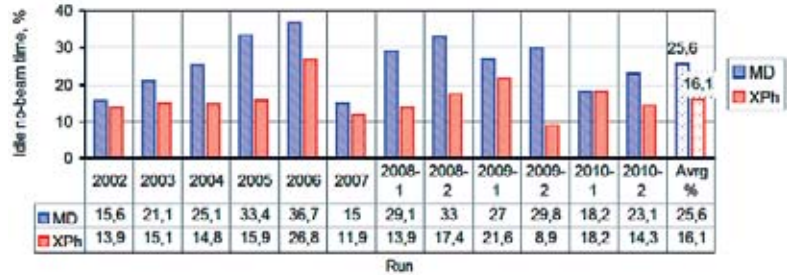


Рис. 1.2. Статистика простоев и пропусков пучка.  
Fig. 1.2. Beam availability statistics.

Таблица 1.1. Характеристики протонных синхротронов.  
Table 1.1. Parameters of proton synchrotrons.

	У-1,5	У-70	
	U-1.5	U-70	
Энергия, $E$ (протоны), ГэВ	0.030–1.32	1.32–69	Energy, $E$ (protons), GeV
Длина орбиты, $L$ , м	99.16	1483.699	Orbit length, $L$ , m
Радиус кривизны орбиты в блоках, $\rho$ , м	5.73	194.125	Curvature radius, $\rho$ , m
Магнитная жесткость, $B\rho$ , Тл·м	0.80–6.87	6.87–233	Magnet rigidity, $B\rho$ , T·m
Коэффициент расширения орбит, $\alpha$	0.07235	0.011120	Compaction factor, $\alpha$
Максимальная интенсивность, $N$ , протонов/импульс	2–9·10 <sup>11</sup>	1.7·10 <sup>13</sup>	Intensity, $N$ , ppp
Время ускорения, $t_R$ , с	0.030	2.75	Ramping time, $t_R$ , s
Период следования циклов, $T$ , с	0.060	9.77	Cycle period, $T$ , s
Кратность ускорения, $h$	1	30	RF harmonic, $h$
Радиочастота, $f_{RF}$ , МГц	0.75–2.75	5.52–6.06	Radio frequency, $f_{RF}$ , MHz
ВЧ напряжение, $V_{RF}$ , кВ	6–60	190–300	RF voltage, $V_{RF}$ , kV
Период магнитной структуры	MDFDM	FODO	Lattice period
Число периодов	12	60	Number of periods
Число супер периодов	12	12	Number of superperiods
Бетатронные частоты (гор/верт)	3.85/3.80	9.9/9.8	Betatron tunes (H/V)

Таблица 1.2. Характеристики линейных ускорителей протонов.  
Table 1.2. Parameters of proton linear accelerators.

	УРАЛ-30	И-100	
	URAL-30	I-100	
Тип	RFQ DTL	Alvarez DTL	Type
Энергия, $E$ (протоны), МэВ	0.1–30	0.7–100	Energy, $E$ (protons), MeV
Длина, $L$ , м	25.3	79.4	Length, $L$ , m
Радиочастота, $f_{RF}$ , МГц	148.5	148.5	Radiofrequency, $f_{RF}$ , MHz
Импульсный ток, $I$ , мА	70	100	Pulsed current, $I$ , mA
Длительность импульса, $t_{PT}$ , мкс	1–10	12–40	Pulse length, $t_{PT}$ , $\mu$ s
Период циклов, $T$ , с	0.060	1–5	Cycle period, $T$ , s
Число секций	5	3	Sectioning

читать потребности прикладных и фундаментальных исследований на фиксированных мишенях.

Ускорительный комплекс У-70 работает два раза в год в течение сеансов, длительностью 1000–1500 час каждый. Работы по собственной программе развития ускорителя длятся около одной недели перед началом использования пучка для целей программы по экспериментальной физике.

Обычно, рабочая энергия составляет 50 ГэВ. Это компромиссная величина, которая приемлема для большинства потребителей пучка, но заметно снижает затраты электроэнергии (-20%), доводя стоимость сеансов до приемлемого значения.

The U-70 accelerator complex is used to run twice a year for 1000–1500 hr per run. Dedicated machine development (MD) activity takes a week prior to delivering beam to the experimental facilities.

Usually, the top energy is about 50 GeV. It is a compromised value, which is acceptable to users and noticeably minimizes electrical power consumption (-20%) thus making the runs more affordable in cost.

На Рис. 1.2 показана статистика простоев и пропусков пучка на времени собственной программы ускорителя (колонки MD) и при работе на физический эксперимент (XPh). Приведены также средние величины за период 2002–10 годов. Экспериментальные установки получают пучок в течение 83–84% отведенного времени. Это соответствует мировым показателям и является результатом плановых и профилактических работ, проводимых в период между сеансами.

В ходе эксплуатации и развития улучшаются базовые характеристики комплекса У-70. Из последних достижений можно отметить создание медленного стохастического вывода протонов (длительность вывода 2–3 сек, интенсивность до  $1 \cdot 10^{13}$  протонов в сбросе) и ускорение ионов дейтерия до удельной кинетической энергии 23.6 ГэВ на нуклон.

В последние годы программа экспериментальных исследований сконцентрирована на следующих направлениях, где параметры пучков У-70 позволяют получать приоритетные результаты мирового класса:

- ◆ распады заряженных каонов;
- ◆ спектроскопия адронов;
- ◆ физика спиновых процессов;
- ◆ адрон-ядерные взаимодействия.

Кроме того, на ускорителе проводятся прикладные работы, в том числе, по протонной радиографии быстропротекающих процессов.

## 1.2. Планы модернизации

В рамках ФЦП «Ядерные энерготехнологии нового поколения» будет выполнен комплекс работ по модернизации ряда основных систем ускорительного комплекса ГНЦ ИФВЭ.

### **ВЧ ускоряющие станции синхротрона У-70**

Система ускоряющих станций предназначена для создания ускоряющего продольного электрического ВЧ поля в основном кольце протонного синхротрона У-70 ГНЦ ИФВЭ.

Создание компактных и более мощных ускоряющих станций позволит вдвое сократить их количество на орбите ускорителя и тем самым высвободить часть прямолинейных промежутков для размещения другого физического оборудования, нужного для развития протонного синхротрона. Кроме того, эта система позволит ускорять пучки более высокой интенсивности.

Переход на современные генераторные лампы позволит сэкономить эксплуатационные расходы. Одновременно будет повышена надёжность оборудования, переведена на современную элементную базу электроника низкого уровня мощности и проведена полная автоматизация ускоряющей системы.

### **Вакуумная система синхротронов У-1,5 и У-70**

Улучшение вакуума (до уровня  $0.8 \cdot 10^{-8}$  Тор) требуется для уменьшения потерь интенсивного пучка протонов и обеспечения длительного времени жизни многозарядных ионов. Для этого система пред-

Fig. 1.2 shows beam availability data during dedicated machine development activity (the MD columns) and runs for a fixed-target experimental program (XPh columns). The averages over 2002–2010 are also presented. Experimental facilities acquire the beam with a fractional availability of 83–84%, which corresponds to the world standards and is an outcome of an intensive routine maintenance carried out during shutdowns.

Operational parameters of the U-70 accelerator complex are getting better. The implementation of a slow stochastic extraction of protons (extraction time 2–3 s, intensity up to  $1 \cdot 10^{13}$  protons per a spill) and acceleration of deuterium ions to a specific kinetic energy of 23.6 GeV per nucleon constitute the latest achievements worth mentioning.

During a few last years, the experimental program is focused on the following topics, in which the U-70 beam parameters allow to obtain valuable results of the world class:

- ◆ charged-kaon rare decays;
- ◆ hadron spectroscopy;
- ◆ physics of spin effects;
- ◆ hadron-nuclei interactions.

Moreover, an applied research is performed with the accelerator facility including proton radiography of rapid processes.

## 1.2. Upgrade Plans

The upgrade of a number of main technological systems of the IHEP accelerator complex will be accomplished in frames of the Federal Target Program (FTP) "New Generation of the Nuclear Power Technologies".

### **RF accelerating system of the U-70 synchrotron**

Cavities of the accelerating system are used to impose the accelerating longitudinal electric RF field along the U-70 proton synchrotron orbit.

The development of compact and more powerful accelerating stations will allow to reduce their number by a factor of two and, therefore, to get some additional space for other equipment required for the machine development. Moreover, the upgraded system will allow accelerating the beams with a higher intensity.

Going to the up-to-date generating tubes will save the operational expenses. At the same time, it is planned to increase the equipment reliability, to switch to the modern components of low-level electronics, and to fully automate the accelerating system.

### **Vacuum system of the U-1.5 and U-70**

In order to decrease the proton beam losses and to increase the lifetime of multi-charged ions, it is necessary to improve the vacuum (down to  $0.8 \cdot 10^{-8}$  Torr). For this purpose, the system of fore-pumping will be

варительной откачки будет переведена на безмасляные турбомолекулярные насосы и спиральные форвакуумные насосы, система измерения вакуума будет оснащена универсальными датчиками вакуума, работающими в диапазоне давлений  $1 \cdot 10^3$  до  $1 \cdot 10^{-11}$  Торр, вакуумные уплотнения будут сделаны на металлических прокладках, из вакуумного объема будут выведены внутренние мишени и приводы кристаллических deflectоров.

### **Системы питания кольцевых электромагнитов**

**Бустер У-1,5.** Основная система питания кольцевого электромагнита ускорителя У-1,5 включает в себя накопительную конденсаторную батарею, зарядное устройство, выпрямители подпитки, мощные коммутирующие устройства, систему подавления импульсных наводок, систему стабилизации и управления. Эти системы будут переведены на современную элементную базу, что позволит исключить из системы экологически опасные конденсаторы, уменьшить сетевые наводки и улучшить возможности управления параметрами магнитного цикла.

**Синхротрон У-70.** В настоящее время в системе питания ускорителя У-70 используются мотор-генераторы с кинетическими накопителями энергии, построенными на массивных маховиках. Это оборудование было разработано и создано полвека назад на базе существовавших тогда технических возможностей. Эксплуатационные характеристики этих устройств не отвечают современным требованиям и не обеспечивают надлежащего энергосбережения. Вместе с тем, современные технические средства позволяют создать новую систему питания электромагнита, свободную от недостатков, присущих существующей системе. Ее основой являются тиристорные преобразователи и трансформаторы.

### **1.3. Развитие экспериментальной базы**

Созданная на ускорителе У-70 система каналов частиц включает в себя каналы, работающие как от внутренних мишеней, так и на основе выведенного из У-70 пучка. Применение внутренних мишеней обеспечило возможность проведения на У-70 первоочередных экспериментов без создания сложных систем для вывода пучка непосредственно после запуска ускорителя, но связано с рядом существенных ограничений. Радиационные нагрузки на оборудование ускорителя, возникающие при работе внутренних мишеней, ограничивают максимальную интенсивность протонного пучка, сбрасываемого на мишень.

Планируемое существенное повышение интенсивности ускоренного протонного пучка открывает новые возможности для проведения физических исследований на ускорительном комплексе У-70.

Перспектива работы с протонным пучком высокой интенсивности определяет необходимость существенной перестройки существующей в настоящее время системы каналов частиц. К основным направлениям такой перестройки следует отнести:

equipped with oil-free turbo-molecular pumps and spiral fore-vacuum pumps. The system of vacuum diagnostics will be supplied with universal vacuum gauges operating at the pressure from  $1 \cdot 10^3$  to  $1 \cdot 10^{-11}$  Torr. Vacuum joints will employ metal seals. The internal targets and bent-crystal deflectors will be removed from the ring vacuum volume.

### **Power supply systems of the ring magnets**

**Booster U-1.5.** The main power supply system of the U-1.5 accelerator ring magnet includes the storage bank of capacitors, charging unit, re-feed rectifiers, high power switching devices, system of pulsed interference filtering, stabilization and control systems. These systems will be equipped with modern components. That will allow removal of the ecologically destructive capacitors, decrease of the power-supply ripples and optimization of the control of magnet cycle parameters.

**Synchrotron U-70.** At present, the power supply system of the U-70 employs the motor-generators with kinetic energy storage units (massive flywheels). This equipment was developed and mounted half a century ago on the base of technical possibilities of that time. Operating parameters of this equipment do not comply with contemporary requirements and do not satisfy the power saving conditions. At the same time, modern technical resources allow to create a new power supply system of the ring magnet without shortcomings of the existing one.

### **1.3. Experimental Areas Development**

The beamline system of the U-70 includes the beams from internal targets and the extracted ones. The use of internal targets provided the possibility to carry out the experiments at the U-70 prior to installation of the beam extraction systems, but also had brought some problems. Irradiation of the accelerator equipment in the process of internal targets operation limits the maximal proton intensity on the target.

Planned increase of the proton beam intensity opens new opportunities for the experiments at the U-70.

At the same time, operation with a proton beam of high intensity requires essential reconstruction of the existing beamlines.

The main trends of such reconstruction are listed below:

- ◆ отказ от внутренних мишеней, развитие системы каналов частиц исключительно на основе выведенного из У-70 протонного пучка, что позволит предотвратить переоблучение магнитной системы ускорителя и существенно повысить интенсивность и качество пучков частиц различного сорта;
- ◆ повышение эффективности использования ускоренного протонного пучка путем увеличения числа одновременно работающих каналов частиц и экспериментальных установок;
- ◆ использование площадей, освободившихся после завершения ряда экспериментальных программ, для создания новых каналов частиц для проведения перспективных фундаментальных, а также проблемно-ориентированных прикладных исследований.

Ниже приведена схема реорганизации системы каналов частиц в экспериментальных зонах У-70, обеспечивающая возможность использования ускоренного протонного пучка более высокой интенсивности.

### Экспериментальный зал

Анализ вариантов реорганизации системы каналов частиц, расположенных в экспериментальном зале У-70, показывает, что наиболее оптимальным в настоящее время представляется медленный вывод ускоренных протонов в направлении существующего канала №4 с расположением внешней мишени на расстоянии ~35 м от начала зала. При этом внутренние мишени, расположенные в 24 и 27 магнитных блоках ускорителя, ликвидируются. Вывод протонного пучка в этом направлении может быть осуществлен в одном цикле с существующим выводом пучка в направлении галереи путем деления стола магнитного поля ускорителя.

Используя внешнюю мишень, в южной части зала и примыкающей к нему начальной части галереи может быть размещено от трех до четырех поочередно работающих каналов, длина двух из которых (каналы 1 и 2 на рис. 1.3) позволяет формировать пучки вторичных частиц с высокими параметрами, а по направлению канала 1 также и пучки поляризованных протонов от распада  $\Lambda$ -гиперонов. Направления 3 и 4 могут быть использованы для организации тестовой зоны, а также канала частиц низких энергий. Оснащение внешней мишени системой из трех отклоняющих магнитов позволит обеспечить одновременную работу как минимум двух из рассматриваемых каналов.

Максимальная интенсивность сбрасываемого на внешнюю мишень ускоренного протонного пучка, а, следовательно, и интенсивность формируемых на экспериментальные установки пучков частиц будет определяться размерами необходимой биологической защиты, как самой мишени, так и каналов частиц. Можно ожидать, что интенсивность протонного пучка на мишени составит не менее  $2 \cdot 10^{13}$  протонов за цикл, а интенсивность пучков вторичных частиц в зоне экспериментальных установок – до  $10^8$  частиц за цикл.

На существующей трассе медленного вывода (канал 8) может быть сооружена система деления протонного пучка, что позволит увеличить количество одновременно работающих установок.

- ◆ to exclude the internal targets; to develop beam-line system fed exceptionally with the extracted proton beam and, thus, to eliminate over-irradiation of accelerator equipment and noticeably increase the intensity and quality of various beams;
- ◆ to increase the efficiency for accelerated proton beam usage by increasing number of simultaneously operating experimental setups;
- ◆ to use the existing experimental areas after completed experimental programs for construction of the new beamlines for advanced fundamental and applied researches.

The outline for beamlines rearrangement in the U-70 experimental areas for proton beam of higher intensity is presented below.

### Experimental Hall

The analysis of the feasible options for beamline system shows that the optimal way is to arrange the slow extraction of accelerated protons in the direction of the existing beamline #4 and to place the external target on the distance of about 35 m from the east side of the Hall. Internal targets in the magnet blocks 24 and 27 are to be removed. The extraction in this direction may be realized in one cycle with the extraction to the experimental gallery by means of the flat-top sharing.

With the external target, it is possible to place 3–4 beamlines in the south part of the Hall and in the head of the adjacent gallery. The length of the two beamlines (##1 and 2 in Fig. 1.3) allows to form the beams of the secondary particles with good parameters. In direction of the beamline #1 it is also possible to construct the polarized proton beams from  $\Lambda$ -hyperon decays. Directions 3 and 4 may be used to organize the test area and the low energy beamline. The external target if equipped with the system of 3 bending magnets will allow simultaneous work of at least two of the described beamlines.

Maximal intensity of accelerated proton beam on external target and, therefore, the intensity of particle beam at experimental facilities will be determined by the biological shielding both of the target and of the beamlines. One can expect the intensity of protons on the target to be not less than  $2 \cdot 10^{13}$  protons per cycle. The intensity of the secondary particle beams in the experimental area will be up to  $10^8$  particles per cycle.

On existing path of slow extraction (beamline # 8) there is a room for proton beam splitting. That will increase the number of simultaneously working setups. In the future the south part of the Experimental Hall can



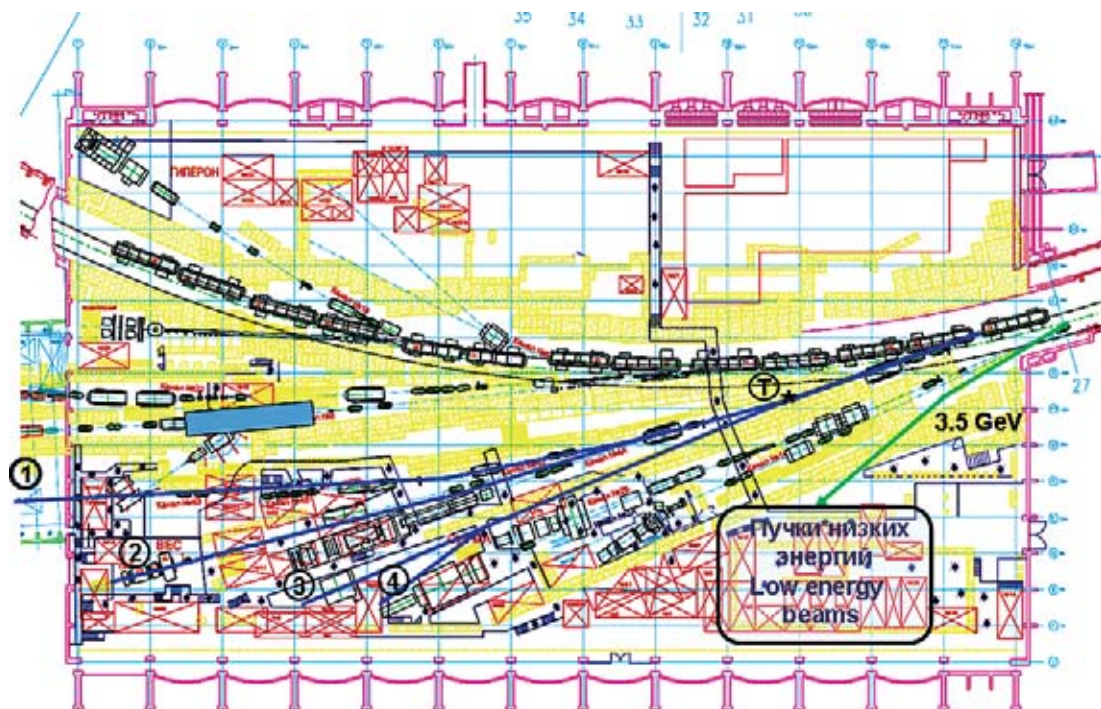


Рис. 1.3. Схема размещения каналов частиц (1, 2, 3, 4) в экспериментальном зале на основе нового медленного вывода ускоренного пучка из У-70. Пунктиром показано возможное место размещения системы деления протонного пучка на существующей трассе медленного вывода. В южной части зала показана зона интенсивных пучков низких энергий.

Fig. 1.3. Schematic layout of beamlines in Experimental Hall on the base of new slow extraction. Dashed line marks possible place for new system of proton beam splitting. The area of intense beams of low and medium energies is placed in south part of the hall.

В дальнейшем, южная зона экспериментального зала может быть использована для создания зоны высокоинтенсивных пучков средних энергий (до энергии 3,5 ГэВ) при работе У-70 в режиме накопителя-растяжителя пучка У-3,5.

be used for construction of the area of high intensity beams of medium energies (up to 3.5 GeV), while the U-70 works in a storage-stretching mode of the U-3.5 beam.

#### 1.4. Протонная радиография

#### 1.4. Proton Radiography

В течение более чем полувека основным инструментом для исследования быстропротекающих процессов являлась импульсная рентгеновская радиография. Она обладает рядом преимуществ, таких как простота метода и относительная дешевизна установок, основным элементом которых является ускоритель электронов. В основном этими достоинствами и обусловлено широкое распространение рентгенографии.

During more than half a century, the pulsed X-ray radiography is the basic instrument to study the rapid processes. X-radiography has a number of advantages, such as simplicity of the method and relatively low cost of facilities based on electron accelerators. These features made X-ray radiography a widespread technique.

Протонное излучение можно уверенно применять для изучения структуры толстых объектов, например, содержащих, например, 50 см стали или 25 см вольфрама (урана), что практически невыполнимо при гамма облучении. Многие из проблем, присущих рентгенографии, отсутствуют в протонной радиографии. При толщине порядка 300 г/см<sup>2</sup> сквозь объект проходит около 20% протонов, тогда как поток гамма квантов ослабляется в миллион раз. Поэтому для формирования радиографического изображения необходимо в миллионы раз меньше протонов, чем гамма квантов. Наличие заряда у протонов, позволяет управлять направленными их потоками для получения многокадровой и многолучевой съемки на базе единственного ускорителя. Использование двух наборов детекторов дает уникальную возможность определять Z или A вещества в каждой точке исследуемого объекта.

Protons as the probing particles can be successfully used to study the structure of thick systems or objects, containing, for example, 50 cm of steel or 25 cm of wolfram (uranium) that is practically impossible in the case of gamma irradiation. Many problems of X-radiography method are absent in proton radiography. At the thickness about 300 g/cm<sup>2</sup> approximately 20% of the protons pass through the object, while the gamma flux is reduced by a factor of 10<sup>-6</sup>. That is why the producing the radiographs requires millions times less protons than gammas. The fact that protons have a charge allows one to control their fluxes in order to obtain multi-frame and multi-axis radiography with the use of single accelerator. Usage of two sets of detectors provides the unique possibility to measure Z or A of the substance at each point of the object under study.

Главным требованием для осуществления протонной радиографии является наличие интенсивного пучка высокоэнергичных протонов с энергией 50–70 ГэВ. Причём такие высокие энергии требуются не только для обеспечения глубины просвечивания оптически толстого объекта, но и для получения высокой чёткости изображения, так как с увеличением энергии протонов уменьшается размытие изображения за счёт хроматических aberrаций и многократного кулоновского рассеяния. Использование специальной магнитной оптики позволяет существенно уменьшить влияние кулоновского рассеяния и получить оптическое разрешение менее 1 мм для объектов с оптической толщиной более 300 г/см<sup>2</sup>.

Наличие ускорителя протонов с энергией 70 ГэВ и развитой системы вывода позволили в 2004–2006 годах создать на У-70 усилиями ГНЦ ИФВЭ и РФЯЦ ВНИИЭФ уникальную установку для исследования объектов практически любой представляющей интерес толщины методом протонной радиографии. В пучках протонов от У-70 были выполнены статические и динамические эксперименты с использованием тест-объектов различной сложности, экспериментально доказаны преимущества метода протонной радиографии, подготовлена основа для широкого внедрения и развития этого мощного метода.

Планируемые повышение интенсивности и уменьшение фазового объема пучка протонов в У-70 улучшает характеристики протонного луча и открывает новые возможности для увеличения многокадровости и времени экспозиции и, тем самым, расширяет область применения протонной радиографии при исследовании быстропротекающих процессов и внутренней структуры объектов сложной геометрии.

### 1.5. Ионные медицинские пучки

Одним из наиболее перспективных методов лучевой терапии является использование ионов углерода, которые обладают всеми преимуществами пространственного распределения дозы, позволяющими добиваться максимальной избирательности облучения, и одновременно – достоинствами плотно ионизирующего излучения, способного эффективно воздействовать на радиорезистентные опухоли и другие новообразования, нечувствительные к традиционным видам излучения. В последние годы специалистами Государственного научного центра «Институт физики высоких энергий» – ГНЦ ИФВЭ (г. Протвино, Московская область) и Медицинского радиологического научного центра – МРНЦ (г. Обнинск, Калужская область) разработан проект первого в России Центра ионной лучевой терапии (ЦИЛТ) на базе У-70 для лечения онкологических заболеваний.

Характеристики ускорительного комплекса ГНЦ ИФВЭ и его возможности по формированию пучка ионов углерода идеально подходят для решения этой проблемы. МРНЦ – ведущее радиологическое учреждение России и единственный медицинский центр, обладающий практическим опытом протонной и нейтронной терапии.

Одной из основных проблем современной радиологии, наряду с преодолением резистентности злокачественных новообразований, является задача оптимизации облучения. Характерной особенностью корпускулярных излучений является их высокая относительная биологическая эффектив-

Usage of proton radiography requires the intense proton beam with the energy of 50–70 GeV. Such high energies are needed not only to provide the irradiation depth of the thick object, but also to obtain high resolution images, because increasing of the incident proton energy results in improvement of the image contrast, and the effects of chromatic aberrations and multiple Coulomb scattering are decreasing. By the use of special magnetic optics one can significantly decrease the influence of Coulomb scattering and obtain image resolution better than 1 mm for the objects with the thickness exceeding 300 g/cm<sup>2</sup>.

Proton accelerator with the energy of 70 GeV and well-developed beam extraction system allowed IHEP and RFNC-VNIIEF to create jointly in 2004–2006 the unique facility to test the objects of any practically required thickness with the proton radiography technique. The various experiments were realized with the U-70 proton beams and the test objects of various complexity. The advantages of proton radiography over X-ray technique were experimentally proven. There appeared the basis for a wide appliance and development of this powerful method.

The planned increasing intensity and improving the U-70 proton beam parameters will open the new possibilities to increase number of frames and exposure time. It will widen the range of proton radiography applications under the study of the rapid processes and internal structure of the objects.

### 1.5. Ion Beams for Medicine

The most advanced method of radiation therapy is the use of carbon ions having all the advantages of spatial distribution of the dose and allowing the maximal selectiveness of irradiation. At the same time this method has the advantages of dense ionizing radiation providing the effective treatment of the radioresistant tumors and other neoplasms insensitive to the traditional kinds of irradiation. During the last few years The State Research Center – Institute for High Energy Physics (IHEP, Protvino, Moscow region) and The Medical Radiological Research Center (MRRС, Obninsk, Kaluga region) have developed the project of the first Russian Center of Ion Beam Therapy (CIBT) aimed at medical treatment of the cancers.

The parameters of the IHEP accelerator complex and the abilities to form carbon ion beams are in conformity with this task. The MRRС is a leading radiological institute in the Russian Federation and the only medical center which has practical experience in proton and neutron therapy.

One of the key problems of the modern radiology alongside with the overcoming the resistance of malignant neoplasms is the problem of irradiation optimization. The characteristic feature of corpuscular radiation is their high Relative Biological Effectiveness (RBE). For the protons the RBE doesn't exceed too much that of



ность (ОБЭ). И если радиобиологическая эффективность протонов не намного выше традиционно используемого в лучевой терапии фотонного излучения и электронов, то ионы углерода имеют втрое более высокие значения коэффициентов ОБЭ. В целом, решающее преимущество ионной лучевой терапии связано с включением на последних сантиметрах пробега ионов дополнительного прямого воздействия излучения на клеточное содержимое. Этот механизм позволяет эффективно разрушать даже резистентные опухоли.

Большой интерес к углеродной лучевой терапии связан с доказанными на практике высокой эффективностью лечения и большой пропускной способностью медицинских центров с пучками ионов углерода.

Для создания медицинских ионных пучков потребуются следующие элементы ускорительного комплекса и инфраструктуры ГНЦ ИФВЭ:

- ◆ лазерный источник ионов углерода (имеется);
- ◆ линейный ускоритель И-100, ускоряющий ионы углерода (имеется);
- ◆ канал перевода пучка ионов из И-100 в бустер (имеется);
- ◆ системы ввода пучка в бустер (имеется);
- ◆ кольцевой ускоритель-бустер У-1,5 (имеется);
- ◆ синхротрон У 70, работающий в режиме накопителя (имеется);
- ◆ система вывода пучка из У-70 в процедурные помещения (создается);
- ◆ процедурные помещения для облучения пациентов (требуется создать);
- ◆ подготовительная медицинская инфраструктура (~3000м<sup>2</sup>) (требуется создать).

Система каналов должна обеспечить доставку пучка до трех медицинских процедурных кабин (каньонов).

Часть здания, непосредственно примыкающего к экспериментальному залу, предполагается переоборудовать для медицинского применения. В этом здании должны располагаться помещения для приема и размещения пациентов, ожидающих процедур и проходящих предлучевую и послелучевую подготовку. Здесь же будут располагаться помещения для медицинского и технического персонала, занятого обслуживанием пациентов, пульта контроля и управления, служебные помещения. В рамках проекта ЦИЛТ планируется также создание на базе имеющихся объектов ГНЦ ИФВЭ инфраструктуры медицинского назначения для размещения пациентов, а также рабочих комнат для установки оборудования симуляции ионного излучения и планирования процедуры лучевой терапии.

Относительно невысокая стоимость проекта центра ионной лучевой терапии ИФВЭ–МРНЦ в этих центрах уже имеются основные компоненты: ускорительный комплекс, необходимые площади для амбулаторного и стационарного отделений и квалифицированный персонал.

Этот проект, позволит:

- ◆ в ближайшие годы создать первый в России центр с углеродным пучком, отработать методику углеродной терапии;
- ◆ приступить к лечению больных;
- ◆ организовать обучение лучевых терапевтов для будущих центров лучевой терапии.

photon radiation and electrons, but for carbon ions the RBE is almost three times larger than the one for X-rays or protons. The key advantage of the ion beam therapy is related to the effect of the additional direct impact on cellular content at the last centimeters of ions free path length. This mechanism results in effective treatment of even resistant tumors.

The great interest to the carbon beam therapy is caused by high efficiency of the medical treatment proved by practice and higher patient flow capacity of the medical centers utilizing carbon ion beams.

In order to create the medical ion beams as well as conditions for their usage at IHEP, Protvino the following accelerator components and the infrastructure elements are required:

- ◆ laser source of carbon ions (exists);
- ◆ linac I-100 accelerating carbon ions (exists);
- ◆ channel of ion beam transportation from I-100 to the booster (exists);
- ◆ injection system to accommodate the ion beam into the booster (exists);
- ◆ circular accelerator-booster U-1.5 (exists);
- ◆ synchrotron U-70 operating in a storage mode (exists);
- ◆ extraction system for the beam from U-70 into the treatment area (is under way);
- ◆ treatment canyons for patient irradiation (to be installed);
- ◆ preparatory medical infrastructure (~3000 m<sup>2</sup>) (to be done).

The system of beam lines is to transport the carbon ions beam to the three medical treatment rooms (canyons).

The part of the existing building located closely to experimental hall is assumed to be converted for the medical purposes. The reception and accommodation rooms for patients waiting the treatment and undergoing pre-radiation and after-radiation procedures are to be provided in this building. In the same building the rooms for medical and technical staff attending the patients, control and service rooms will be placed. As a part of CIBT project it is supposed also to create on the basis of the existing IHEP infrastructure the medical facility for patients' accommodation and rooms for the beam therapy simulations and planning.

The cost of the IHEP-MRRC ion beam therapy project is relatively low because the main project components – the accelerator facility, the infrastructure units and well-trained staff – already exist in IHEP and MRRC.

This project will provide:

- ◆ creation in the near future the pilot Russian medical facility with the use of carbon beams, getting an extensive radiobiological and clinical experience and improvement of the carbon ions therapy technique;
- ◆ beginning the patients treatment;
- ◆ training the radiation oncologists for the future hadron therapy centers.

## 2. Комплекс ускорителей высокой интенсивности

Комплекс ускорителей высокой интенсивности состоит из линейного ускорителя ионов  $H^-$  и протонов на энергию 400 МэВ и быстроциклирующего протонного синхротрона на энергию 3,5 ГэВ.

### 2.1. Линейный ускоритель ЛУ-400

В настоящем разделе представлены общие схемы комплекса линейных ускорителей, сформулированы требования к ускоряющим структурам, а также представлены ориентировочные значения параметров этих структур.

#### Начальная часть ускорителя (НЧУ)

В качестве НЧУ до энергии единиц МэВ применяется разработанная в ИФВЭ структура с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой (ПОКФ или RFQ). Основная функция этой структуры состоит в захвате, адиабатической группировке и фокусировке пучка. Electrodes структуры представляют собой четырехпроводную длинную линию с модулированным по определенному закону расстоянием от оси пучка до поверхности электродов по длине (рис. 2.1а). Electrodes установлены в резонаторе с продольным магнитным полем. Электромагнитные поля имеют квадрупольную поперечную симметрию вблизи оси структуры. На рис. 2.1б показан резонатор типа 2Н, используемый в ГНЦ ИФВЭ.

При любом выборе резонаторов общими параметрами структуры начальной части ускорителя (НЧУ) являются:

- ◆ Рабочая радиочастота 148,5 МГц;
- ◆ Энергия входа 0,1 МэВ, энергия выхода 2,0 МэВ;
- ◆ Максимальная напряженность на поверхности  $\leq 2 E_k$  (единиц Килпатрик);
- ◆ Длина структуры  $\leq 4$  м.



Рис. 2.1а. Electrodes ускоряющей структуры с пространственно однородной квадрупольной фокусировкой (ПОКФ).

Fig. 2.1a. Electrodes of accelerating structure with spatially-homogeneous quadrupole focusing (RFQ).

## 2. High Intensity Accelerators

The complex of high-intensity accelerators comprises a linear accelerator of  $H^-$  ions and protons with the energy of 400 MeV followed by a rapid cycling synchrotron with the energy of 3.5 GeV.

### 2.1. Linear Accelerators

In this section, the general layout of linear accelerators is presented. The requirements for accelerating structures are specified and the parameters of these structures are given.

#### Initial Part of Accelerator (IPA)

As an initial (front-end) part of accelerator with the energy of a few MeV, the structure with spatially-homogeneous quadrupole focusing (RFQ) developed in IHEP is used. The main task of this structure is to capture, to bunch adiabatically and to focus the beam. The inner electrodes constitute the four-wire long transmission line with a specifically modulated distance from beam axis to electrode surface along the line (Fig. 2.1a). Electrodes are mounted into the cavity with a longitudinal magnet field. The EM-fields have a quadrupole symmetric distribution in transverse plane near the axis. Fig. 2.1b shows the cross-sections of cavities of 2H-type used in IHEP.

For any feasible choice of the cavity design, the general parameters of initial part of accelerator (IPA) will be:

- ◆ Operating radiofrequency 148.5 MHz;
- ◆ Input energy 0.1 MeV, output energy 2.0 MeV;
- ◆ Maximal field strength on the surface  $\leq 2 E_k$  (Kilpatrick);
- ◆ Structure length  $\leq 4$  m.

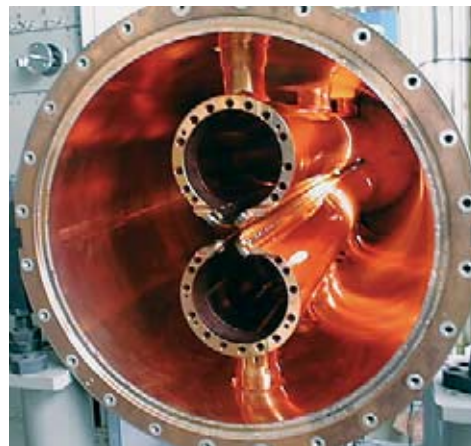


Рис. 2.1б. 2Н-резонатор (ИФВЭ).

Fig. 2.1b. 2H-cavity (IHEP).



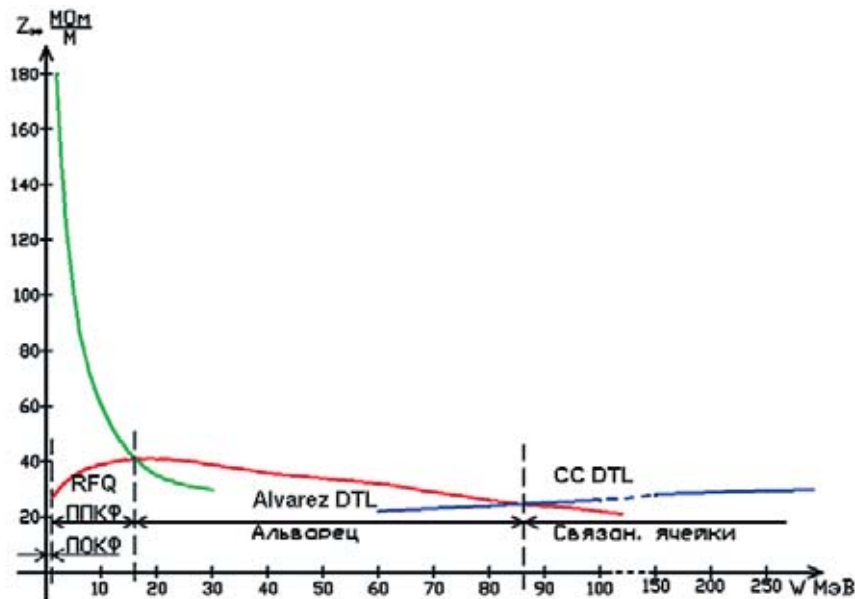


Рис. 2.2. Зависимость эффективного шунтового сопротивления от энергии для различных структур.  
 Fig. 2.2. Dependence of the effective shunt impedance upon energy for various structures.

### Основная часть ускорителя (ОЧУ)

Важной характеристикой ускоряющей структуры является эффективное шунтовое сопротивление  $Z_{eff}$ . Его величина пропорциональна квадрату темпа ускорения и обратно пропорциональна потерям ВЧ-мощности на единицу длины структуры. На рис. 2.2 показана зависимость  $Z_{eff}(W)$ , где  $W$  – кинетическая энергия, для различных ускоряющих структур, построенная на основе наших данных и данных, приведенных в литературе. Эта зависимость ориентировочная. Для получения более точных значений требуется расчет конкретной структуры.

### Основная часть ускорителя – ОЧУ-1: ППКФ

В соответствии с приведенным графиком (рис. 2.2) применение структуры с пространственно-периодической квадрупольной фокусировкой (ППКФ) существенно выгодней использования структуры Альвареца до энергии ~18 МэВ. Период ускорения структуры состоит из ускоряющего и фокусирующего зазоров, разделенных промежуточным электродом (рис.2.3а).

### Main part of accelerator (MPA)

The important parameter of an accelerating structure is the effective shunt impedance  $Z_{eff}$ . Its value is proportional to a square of acceleration rate and inversely proportional to the losses of RF-power per unit of the structure length. Fig. 2.2 shows the plot of  $Z_{eff}$  versus kinetic energy  $W$  for various accelerating structures. The data for this plot are recovered from local experience and from the references elsewhere. Still, this dependence is only approximate one since, to obtain more precise values, it is necessary to compute out the specific structure.

### MPA-1 with spatially-periodic quadrupole focusing

According to the plot in Fig.2.2, it is noticeably more efficient to use the structure with spatially-periodic quadrupole focusing than Alvarez structure up to the energy of around 18 MeV. The relevant accelerating structure period consists of accelerating and focusing gaps separated by an intermediate (spacer) electrode (Fig.2.3a).

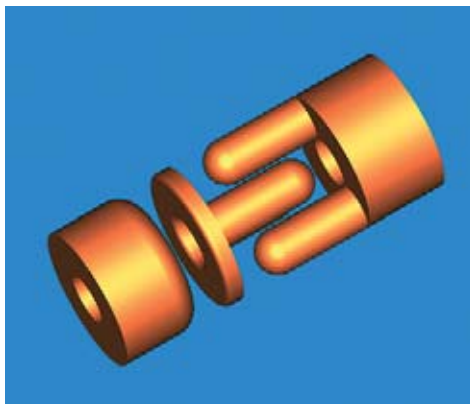


Рис. 2.3а. Электроды периода ускорения с ППКФ (RFQ DTL).  
 Fig. 2.3а. Electrodes of accelerating period with spatially-periodic quadrupole focusing (RFQ DTL).

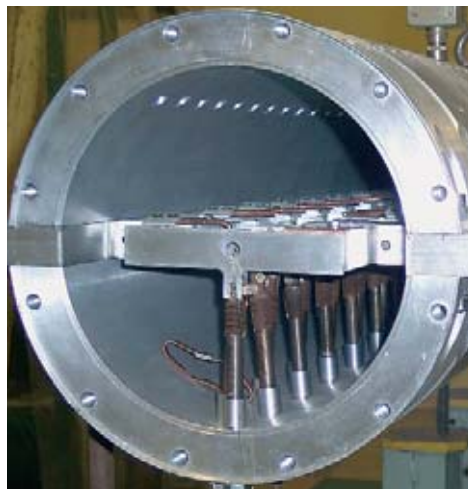


Рис. 2.3б. 2К-резонатор.  
 Fig. 2.3б. 2K-cavity.

Анализ приводит к выбору ускорителя с ППКФ на 2К-резонаторе:

Основные параметры:

- ◆ Рабочая радиочастота 148,5 МГц;
- ◆ Энергия входа 2 МэВ, энергия выхода 18 МэВ;
- ◆ Максимальная напряженность  $\leq 2 \text{ Ек}$ ;
- ◆ Средний темп ускорения  $\geq 1,3 \text{ МэВ/м}$ ;
- ◆ Количество секций 3;
- ◆ Общая длина до 13 м.

**Основная часть ускорителя – ОЧУ-2: Альварец**

Для дальнейшего ускорения на энергиях, больших 18 МэВ (Рис. 2.2.), становится выгодной ускоряющая структура Альвареца (рис. 2.4). Структура представляет собой последовательность трубок дрейфа, расположенных на оси цилиндрического резонатора, возбуждаемого на виде колебаний E010. Напряжения на соседних периодах ускорения синфазны, т.е. структура работает на  $2\pi$ -волне. Фокусировка осуществляется квадрупольными линзами внутри трубок дрейфа.



Рис. 2.4. Основная часть ускорителя ОЧУ-2 (Альварец).

Fig. 2.4. Main part of accelerator MPA-2 (Alvarez).

As a result of the analysis, an RFQ DTL with a 2K-cavity design was chosen. Its main parameters are:

- ◆ Operating radiofrequency 148.5 MHz;
- ◆ Input energy 2 MeV; output energy 18 MeV;
- ◆ Maximal field strength  $\leq 2 \text{ Ек}$ ;
- ◆ Average accelerating rate  $\geq 1.3 \text{ MeV/m}$ ;
- ◆ Number of sections 3;
- ◆ Structure length up to 13 m.

**MPA-2 Alvarez**

For further acceleration to the energies above 18 MeV, Alvarez accelerating structure becomes more efficient (Fig. 2.4).

The structure consists of a sequence of drift tubes placed onto the axis of a cylindrical cavity excited at oscillation type E010. The voltages across the adjacent accelerating periods are driven in-phase, i. e. the structure operates at the  $2\pi$ -mode. Focusing is accomplished by means of lenses inside the drift tubes.

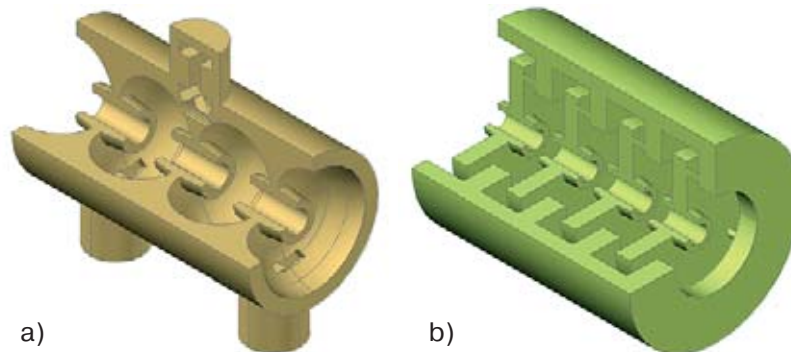


Рис. 2.5. Основная часть ускорителя ОЧУ-3 (CCDTL): связанные ячейки.  
Fig. 2.5. Main part of accelerator MPA-3 (CCDTL): Coupled Cavities.

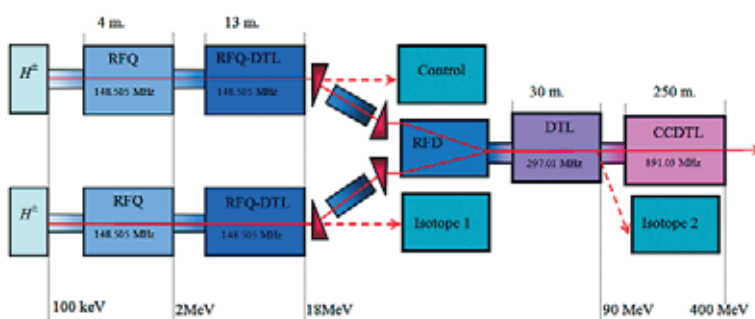


Рис. 2.6. Структурная схема линейного ускорителя.  
Fig. 2.6. Structure scheme of the linear accelerator.

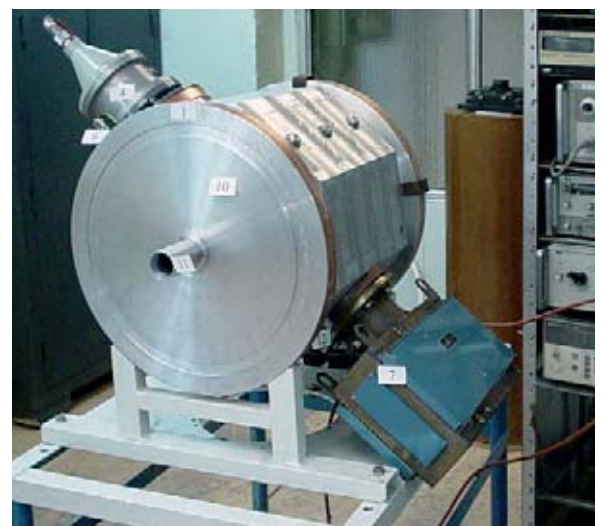


Рис. 2.7. Радиотехнический макет резонатора-дефлектора на испытательном стенде.  
Fig. 2.7. "Cold" (radiotechnical) model of cavity deflector on a test bench.

Основные параметры ОЧУ-2 Альварец (DTL):

- ◆ Рабочая частота  $148,5 \times 2 = 297$  МГц;
- ◆ Энергия входа 18 МэВ, энергия выхода 90 МэВ;
- ◆ Максимальная напряженность на поверхности  $\leq 1,7$  Ек;
- ◆ Темп ускорения 2,5 МэВ/м;
- ◆ Общая длина до 30 м;
- ◆ Количество секций 4 шт.;
- ◆ Внутренний диаметр резонаторов  $\sim 0,6$  м;
- ◆ Фокусировка – электромагнитные квадрупольные линзы.

### Основная часть ускорителя – ОЧУ-3: связанные ячейки

Согласно приведенной ранее зависимости  $Z_{эф}(W)$  для ускорения частиц после 90 МэВ применяются бипериодические структуры, работающие на  $\pi/2$  типе колебаний с более высокой по сравнению со структурой Альвареца частотой. На рис. 2.5 показаны конструкции таких бипериодических структур. На ускорителе LINAC4 (CERN) используется структура с боковыми ячейками связи (рис. 2.5а), на ускорителе МЕГАН (ИЯИ) – структура с шайбами и диафрагмами (рис. 2.5б). Обе структуры пригодны для применения в рассматриваемом ускорителе.

Основные параметры ОЧУ-3 (CC DTL) связанные ячейки:

- ◆ Рабочая радиочастота 891,0 (148,5×6) МГц;
- ◆ Энергия входа 90 МэВ, энергия выхода 400 МэВ;
- ◆ Максимальная напряженность на поверхности  $\leq 1,7$  Ек;
- ◆ Темп ускорения 1,4 МэВ/м;
- ◆ Общая длина  $\sim 250$  м;
- ◆ Фокусировка – межсекционные электромагнитные линзы.

### Структурная схема ускорителя

На рис. 2.6 показана структурная схема ускорителя, состоящего из описанных ранее ускоряющих структур. Ускоритель должен иметь следующие параметры:

- ◆ Средний ток ионов водорода до 2 мА;
- ◆ Сквасность по току  $\sim 40$ ;
- ◆ Сквасность по ВЧ-импульсам  $\sim 10$ ;
- ◆ Энергия на выходе 400 МэВ;
- ◆ Нормализованный эмиттанс  $(2-3)\pi$  мм·мрад.

НЧУ и ОЧУ-1 ускорителя работают на частоте 148,505 МГц. Рабочая частота ОЧУ-2 на структуре Альвареца в 2 раза выше – 297,01 МГц, что делает структуру Альвареца более приемлемой для работы в режиме малой сквасности. Для устранения пропуска одного периода ВЧ-колебаний при ускорении в ОЧУ-2 предлагается сложение на входе ОЧУ-2 двух пучков от двух идентичных ускорителей НЧУ–ОЧУ-1. В этом случае ток и мощность пучка на выходе ОЧУ-2 удваиваются. Сложение проводится с помощью резонаторного ВЧ-дефлектора, осуществляющего параллельный перенос пучков. Такая схема сложения обеспечивает минимальный рост

The basic parameters of MPA-2 Alvarez (DTL):

- ◆ Operating radiofrequency 148,5×2=297 MHz;
- ◆ Input energy 18 MeV, output energy 90 MeV;
- ◆ Maximal field strength on the surface  $\leq 1.7$  Eк;
- ◆ Acceleration rate 2.5 MeV/m;
- ◆ Structure length up to 30 m;
- ◆ Number of sections 4;
- ◆ Inner diameter of cavities  $\sim 0.6$  m;
- ◆ Focusing – electromagnetic quadrupole lenses.

### MPA-3 Coupled Cavity

According to the function  $Z_{эф}(W)$  plotted earlier in Fig. 2.2, for acceleration particles above 90 MeV it is necessary to use the bi-periodic structures operating at the  $\pi/2$  mode of oscillations with a higher frequency than that of the Alvarez structure. Fig. 2.5 shows the geometry of such bi-periodic structures. In LINAC4 accelerator (CERN), the structure with side coupled cavities is used (Fig. 2.5a). In the MEGAN accelerator, the structure with washers and diaphragms is used (Fig. 2.5b). Both these structures can be employed in the accelerator in question.

The basic parameters of MPA-3 (CC DTL) Coupled Cavities:

- ◆ Operating radiofrequency 891.0 (148.5×6) MHz;
- ◆ Input energy 90 MeV, output energy 400 MeV;
- ◆ Maximum field strength on the surface  $\leq 1.7$  Eк;
- ◆ Acceleration rate 1.4 MeV/m;
- ◆ Structure length  $\sim 250$  m;
- ◆ Focusing – electromagnetic lenses between the sections.

### Structure scheme of the linear accelerator

Fig. 2.6 shows the structure scheme of the linear accelerator consisting of the accelerating sections described earlier. The accelerator will have the following design parameters:

- ◆ Average current of hydrogen ions up to 2 mA;
- ◆ Duty factor in beam current  $\sim 1/40$ ;
- ◆ Duty factor in RF-pulses  $\sim 1/10$ ;
- ◆ Output energy 400 MeV;
- ◆ Normalized emittance  $(2-3)\pi$  mm·mrad.

Both IPA and MPA-1 operate at radiofrequency value of 148.505 MHz. Operating frequency of MPA-2 with Alvarez structure is twice higher, 297.010 MHz. That makes the Alvarez structure more suitable for operation in a high duty factor mode. In order to fill one missing (empty) period of RF oscillations during the acceleration in MPA-2, it is proposed to merge at the MPA-2 input two beams from the two identical accelerators IPA and MPA-1 operating in a counter-phase regime. In this case, both the current and power of the beam at the output of MPA-2 are doubled. The beam funneling is accomplished by means of RF cavity deflector providing parallel beam transfer. Such a scheme of beam funnel-

эмиттанса пучка. На рис. 2.7 показан радиотехнический макет дефлектора, построенного на 2К-резонаторе, работающего на частоте 148,5 МГц.

Ускорение на энергиях более 90 МэВ проводится на структуре со связанными ячейками, работающими на шестой гармонике начальной частоты 891,03 МГц. Между отдельными частями ускорителя расположены согласующие каналы, содержащие

ing provides the minimal blow-up of beam emittance. Fig. 2.7 presents radiotechnical model of RF deflector built on 2K-cavity operating at frequency 148.5 MHz.

Acceleration to the energies above 90 MeV is accomplished by means of the structures with coupled cavities initial at the sixth harmonic of driving radiofrequency, at 891.03 MHz. Between separate sections of the accelerator the matching beam lines containing

Проект Project	Ион Ion	Ток Current (mA)	Длит. импульса Pulse duration (ms)	Частота Frequency (Hz)	Duty factor %	Ср. ток Average current (mA)	E (keV)	$E_{4rms-norm}$ ( $\pi$ mm-mrad)
ESS	H <sup>-</sup>	65	1.2	50	6	3.9	90	1.2
DESY-CERN LINAC4	H <sup>-</sup>	80	0.4	2	0.08	0.07	95	1
CERN -SPL	H <sup>-</sup>	50	1,5	50	7.5	3,5	95	1
SNS (USA)	H <sup>-</sup>	50	1	60	6	3.0	65	0.8
ИЯИ(Троицк) источник из ИЯФ СО INR (Troitsk) source from BINP of SB of RAS	H <sup>-</sup>	40	0.2	2-50	0.04-1	0.4	400	≤3,5

Структура Structure	Ток в им- пуль- се, mA Current in pulse, mA	При- рост энер- гии, МэВ Energy gain, MeV	ВЧ-мощ- ность на ускорение в импуль- се, МВт RF power for accele- ration in pulse, MW	Удельные тепловые потери кВт/м Specific heat losses, kW/m	Длина струк- туры м Struc- ture length, m	ВЧ-мощ- ность на тепловые потери в импульсе, МВт RF power for heat losses in pulse, MW	ВЧ-мощ- ность в импуль- се, МВт RF power in pulse, MW	Генератор- ные прибо- ры оконч- ных усили- телей Generators of final amplifiers	Средняя мощность потребле- ния от сети, МВт Power consump- tion from supply line, MW
<b>RFQ 2H<sup>-</sup> резонатор</b> RFQ 2H <sup>-</sup> cavity									
A)	60	1.9	0.114	65	4.0	0.26	0.374	*	0.035
B)	60	1.9	0.228	65	4.0	0.52	0.748	*	0.147
<b>RFQ DTL 2K<sup>-</sup> резонатор</b> RFQ DTL 2K <sup>-</sup> cavity									
A)	40	16	0.64	90	13	1.17	1.81	*	0.131
B)	40	16	1.28	90	13	2.34	3.62	*	0.610
<b>DTL Альварец</b> DTL Alvarez									
A)	40	72	2.88	120	30	3.6	6.46	**	0.48
B)	80	72	5.76	120	30	3.6	9.36	**	1.1
<b>СС DTL, связанные ячейки</b> СС DTL, coupled cavities									
A)	40	310	12.4	100	250	25.0	37.4	***	3.3
B)	80	310	24.8	100	250	25.0	49.8	***	7.6
<b>Итого:</b> Total:									
A)	40	399.9	16.03			30.03	46.04		4.0
B)	80	399.9	32.07			31.46	63.5		9.5

\* Тетрод TH 526 фирма THALES.  
Tetrode TH 526, THALES.

\*\* Аналог триода GI-54A , завод «СВЕТЛАНА».  
Analogue of triod GI-54A , plant "SVETLANA".

\*\*\* Клистрон аналог КИУ-40 ИЦМЭП или аналог E3766 TOSHIBA.  
Klystron, analogue of KIU-40 ICMEP or analogue of E3766 TOSHIBA.



линзы, диафрагмы, корректоры и другие элементы согласования и диагностики пучка. Между НЧУ и ОЧУ-1 включен чоппер, с помощью которого оказывается воздействие на отдельные сгустки пучка.

### Источник Н-минус

Важный отдельный вопрос – источник ионов водорода, способный работать в режиме малой скважности. Источник ионов Н-минус с требуемыми параметрами в ГНЦ ИФВЭ отсутствует. В таблице 2.1 приведены параметры источников ионов Н-минус, разработанных для сильноточных ускорителей в крупнейших ускорительных центрах.

Из этой таблицы видно, что в ряде центров имеются источники с требуемыми параметрами.

В качестве источников ионов Н-минус наиболее предпочтительны с точки зрения продолжительности и надежности работы мультипольные источники с ВЧ-возбуждением плазмы, разработанные в DESY. Такие источники планируется использовать, например, в проекте LINAC4 CERN. Серийно такие источники не выпускаются. Представляется целесообразным привлечение смежных организаций, в том числе зарубежных, к созданию источника Н-минус для реализации проекта.

### Оценка энергетических параметров линейного ускорителя

Оценка энергетических параметров проводилась для двух вариантов построения линейного ускорителя. Вариант первого этапа А) – создание ускорителя без сложения пучков предполагает следующие параметры пучка на выходе: частота повторения импульсов тока 25 Гц, длительность импульса 300 мкс, импульсное значение тока 40 мА, среднее значение тока 0,3 мА, скважность по току 133, скважность по ВЧ-импульсам 33. На втором этапе В) – реализуется схема со сложением пучков. Для этого варианта проведена оценка параметров для среднего тока на выходе линейного ускорителя 2 мА при скважности по току 40 и скважности по ВЧ-импульсам 10. Результаты расчетов приведены в таблице 2.2.

Из этой таблицы видно, что энергопотребление комплекса линейных ускорителей оказывается на уровне 10 МВт, в связи с чем использование сверхпроводящих структур в ЛУ-400 нецелесообразно, поскольку создание сверхпроводящего линейного ускорителя потребует очень больших усилий на разработку и дополнительных капитальных затрат на сооружение.

## 2.2. Быстроциклирующий синхротрон (У-3,5)

### Основные параметры

Быстрый протонный синхротрон У-3,5 исполняет две функции:

1. драйвер  $n$ -генерирующих мишеней,
2. новый кольцевой инжектор для У-70.

Основные характеристики установки представлены в таблице 2.3

В последующем периметр  $\Pi$  может быть изменен на малую  $\Delta\Pi$  для обеспечения взаимного скольже-

lenses, diaphragms, correctors and other elements of beam matching and diagnostics are foreseen. Between IPA and MPA-1, the chopper is inserted, fast enough to affect individual bunches.

### Source of H-minus ions

The important dedicated question is the hydrogen ion source which is able to operate in a high duty factor mode. Source of H-minus ions with required parameters is not available at IHEP. Table 2.1 lists the parameters of H-minus ion sources developed for high-current accelerators world-wide.

From this table, one can see that in a number of centers there are H-minus sources available with the required parameters.

Multipole sources with RF-excitation of plasma developed at DESY are the most preferable H-minus ion sources because of sustainability and reliability of their maintenance-free operation. Such sources are supposed to be used in the project LINAC4 (CERN). Still, these sources are not available commercially. In this case it is advisable to cooperate with the other organizations, Russian and/or foreign, in manufacturing and delivering the H-minus source for the project.

### Estimation of power supply parameters of the linear accelerator

The estimation of power consumption parameters was carried out for the two options of the linac design taken into account. In version of the first stage А) – construction of accelerator without beam funneling – we assume the following output beam parameters: rate of current pulse repetition 25 Hz, pulse duration 300  $\mu$ s, pulsed current 40 mA, average current 0.3 mA, duty factor in current 1/133, duty factor in RF pulses 1/33. In the second stage В), the scheme of beam funneling is accounted for. For this option, we have calculated the estimation for average current at the linac output 2 mA at duty factor in current 1/40 and duty factor in RF pulses 1/10. The results are summarized in Table 2.2.

From this table one can see, that power consumption of linac is limited to an acceptable level 10 MW. That is why it is not advisable to use superconducting structures for LU-400. Indeed, construction of superconducting linac will require greater efforts for research and development and more expenses for the construction.

## 2.2. Rapid Cycling Proton Synchrotron (U-3.5)

### Basic parameters

Rapid cycling proton synchrotron U-3.5 operates as:

1. A driver for  $n$ -generating targets;
2. A new ring injector to the U-70.

The basic parameters of the facility are specified in Table 2.3.

Later on, the perimeter  $\Pi$  might be varied by some  $\Delta\Pi$  in order to provide the reciprocal slippage of beams

ния пучков равной энергии в кольцах У-3,5 и У-70 при синхронизации перевода.

Большой синхротрон У-70 принимает до трех циклов инжекции из У-3,5. Структура пучка в У-70 (Рис. 2.8):

$$3 \times (9 \text{ заполненных сгустков} + 1 \text{ пустой сгусток}) = 30, \text{ кратности У-70.}$$

В У-70 ускоряются от 1 до 3 цугов сгустков. Пустые сепаратрисы используются для размещения переднего и заднего фронтов вводного импульсного магнита (создается вновь). Разрывы в пучке также способствуют лучшей когерентной устойчивости интенсивного пучка в У-70.

### Инжекция и кулоновский сдвиг

Здесь и далее эмиттанс и акцептанс определены как произведения полуосей фазового эллипса, без множителя  $\pi$ . Проектные параметры пучка на выходе из линейного ускорителя приведены в таблице 2.4.

При импульсном токе пучка отрицательных ионов водорода  $H^-$  из линейного ускорителя, равном 40 мА, перезарядная многооборотная инжекция будет длиться 145 оборотов пучка в кольце У-3,5 (0.3 мс). В это время будет производиться контролируемое заполнение частицами поперечной фазовой плоскости. После него нормализованные эмиттансы пучка (по уровню  $1\sigma$ ) составят

with equal energies rotating in the U-3.5 and U-70 rings to facilitate the proper beam transfer synchronization.

The large synchrotron U-70 receives up to 3 cycles of injection from the U-3.5. Beam structure in the U-70 (Fig.2.8) is:

$$3 \times (9 \text{ filled buckets} + 1 \text{ empty bucket}) = 30, \text{ RF harmonic number of U-70.}$$

From 1 to 3 trains of bunches are accelerated in the U-70. The empty buckets are used to accommodate the rise and decay fronts of pulsed injection magnet (to be developed anew). The beam gaps would also ensure the better coherent stability of intense beam in the U-70.

### Injection and Coulomb tune shift

Here and in what follows, the emittance and acceptance are defined as the products of semi-axes of a phase ellipse, without factor  $\pi$ . The design beam parameters at exit from the linear accelerator are listed in Table 2.4.

Given 40 mA pulsed beam current of negative hydrogen ions  $H^-$  from the linear accelerator, the stripping multi-turn injection will take over 145 beam turns around the U-3.5 ring (0.3 ms). During injection, the controlled painting of transverse phase planes will be accomplished. After that, the normalized beam emittances (at  $1\sigma$  level) will amount to:

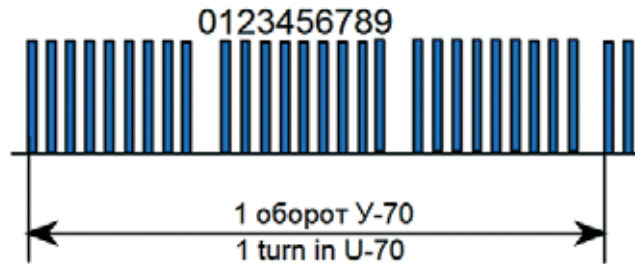


Рис. 2.8. Структура пучка в У-70 с инжекцией из У-3,5.  
Fig. 2.8. Beam structure in the U-70 with injection from the U-3.5.

Таблица 2.3. Основные параметры протонного синхротрона У-3,5.  
Table 2.3. Basic parameters of the proton synchrotron U-3.5.

Ускоряемые частицы	протоны	
	protons	Accelerated particles
Периметр орбиты, $\Pi$ , м	445.110	Orbit perimeter, $\Pi$ , m
	or 3/10 $\Pi$ of U-70	
Энергия инжекции-вывода (кинетическая), ГэВ	0.4–3,5	Energy of injection-extraction (kinetic), GeV
Магнитная жесткость, $B\rho$ , Тл·м	3.183–14.470	Magnetic rigidity, $B\rho$ , T·m
Период обращения пучка по орбите, мкс	2.082–1,519	Period of beam rotation around orbit, $\mu$ s
Кратность ускорения, $q$	9	RF harmonic number, $q$
	or 3/10 $q$ of U-70	
Частота следования циклов, $f_c$ , Гц	25	Cycle frequency, $f_c$ , Hz
Форма магнитного цикла, $B(t)$	$\propto \cos(2\pi f_c t)$	Form of magnetic cycle, $B(t)$
Скорость роста магнитного поля, $\max dB(t)/dt$ , Тл/с	58.0	Rate of magnetic field growth, $\max dB(t)/dt$ , T/s
Интенсивность пучка (в 9 сгустках), $N$	$7.5 \cdot 10^{13}$	Beam intensity (in 9 bunches), $N$
Средний (по циклам) ток пучка, мкА	300	Average (over cycles) beam current, $\mu$ A
Мощность пучка на внешней мишени, МВт	>1.0	Beam power on external target, MW

Таблица 2.4. Параметры пучка на выходе из линейного ускорителя.  
Table 2.4. Parameters of beam at the exit from linear accelerator.

Энергия (кинетическая), $E$ , МэВ	400	Energy (kinetic), $E$ , MeV
Разброс по энергии, $\Delta E (\pm 3\sigma)$ , МэВ	$\pm 1$	Energy spread, $\Delta E (\pm 3\sigma)$ , MeV
Относительный разброс по импульсу, $\Delta p/p_0 (\pm 3\sigma)$	$\pm 4.9 \cdot 10^{-3}$	Fractional momentum spread, $\Delta p/p_0 (\pm 3\sigma)$
Поперечный эмиттанс, нормализованный, по $1\sigma$ , $\mathcal{E}_x = \mathcal{E}_y$ , мм·мрад	2–3	Transverse normalized emittance at $1\sigma$ level, $\mathcal{E}_x = \mathcal{E}_y$ , mm·mrad

$$\Theta_x = 30 \text{ мм·мрад}, \Theta_y = 10 \text{ мм·мрад}.$$

При этом импульсный размер в пучке увеличится примерно в 2,5 раза и составит

$$\Delta p/p_0 = \pm 12 \cdot 10^{-3} \text{ (по уровню } \pm 3\sigma) \quad \text{или} \\ \sigma_p/p_0 = 4 \cdot 10^{-3} \text{ (по } 1\sigma).$$

Кулоновский сдвиг частоты бетатронных колебаний максимален для вертикального направления. Его величина

$$\Delta Q_y \cong -\frac{r_0 N/q}{2\pi B \beta \gamma^2 \Theta_y} \frac{1}{\left(1 + \sqrt{\frac{\langle \beta_x \rangle \Theta_x^{(eff)}}{\langle \beta_y \rangle \Theta_y}}\right)}.$$

Здесь  $r_0$  – классический радиус протона,  $N$  – число частиц в ускорителе;  $q=9$  – кратность ускорения;  $B$  – фактор группировки;  $\beta$  и  $\gamma$  – релятивистские факторы.  $\Theta_x^{(eff)}$  обозначает эффективный нормализованный эмиттанс (по  $1\sigma$ ) с учетом добавки дисперсионной составляющей в горизонтальный размер пучка. При максимальной проектной интенсивности пучка  $N=7.5 \cdot 10^{13}$  протонов в цикле получим приемлемые величины кулоновского сдвига бетатронных частот

$$\Delta Q_y = -0.15, \Delta Q_x = -0.08.$$

Бетатронные размеры пучка определяются его ненормализованным (геометрическим) эмиттансом  $\varepsilon = \Theta/\beta\gamma$ . Поскольку при инжекции приведенный импульс  $\beta\gamma=1.017$ , то с достаточной для целей физического обоснования точностью принимаем

$$\varepsilon_x = 30 \text{ мм·мрад}, \varepsilon_y = 10 \text{ мм·мрад}.$$

### Ускоряющая система

Частота ускорения изменяется в диапазоне 4.322—5.925 МГц. Это диапазон, хорошо освоенный при эксплуатации У-70.

Предполагается синусоидальный закон изменения ведущего магнитного поля. Тогда потребность в суммарной амплитуде ускоряющего поля  $V$

$$\max V = 2\pi \frac{E_0}{e} f_c \frac{\Pi}{c \cos \phi_s} \frac{1}{2} \left( \frac{\max \beta\gamma - \min \beta\gamma}{2} \right),$$

где  $E_0$  – энергия покоя протона;  $e$  – элементарный заряд;  $c$  – скорость света;  $\max \beta\gamma=4.623$ ;  $\min \beta\gamma=1.017$ ;  $\phi_s$  – синхронная фаза.

Для приемлемой величины  $\phi_s=55^\circ$  получим  $\max V=687.9$  кВ. С учетом рабочего резерва потребуем  $\max V=720.0$  кВ на оборот.

При использовании опробованных современных технологий (это 2-зазорные резонаторы с ферритовым заполнением) можно рассчитывать на напряжение  $V_1=20$  кВ на одну ВЧ станцию с габаритными размерами по фланцам  $<2.5$  м. Требуется 36 таких ускоряющих станций. Их число выбрано целым кратным 6, суперпериодичности магнитной структуры У-3,5.

Для размещения ВЧ ускоряющей системы требуется примерно 90 м свободных прямолинейных промежутков.

Коэффициент нагрузки резонатора током пучка

$$k = \frac{2J_q}{V_1/R} = 3.8.$$

$$\Theta_x = 30 \text{ мм·мрад}, \Theta_y = 10 \text{ мм·мрад}.$$

Momentum spread of the bunched beam will increase by a factor of around 2.5 to

$$\Delta p/p_0 = \pm 12 \cdot 10^{-3} \text{ (at } \pm 3\sigma \text{ level)} \quad \text{or} \\ \sigma_p/p_0 = 4 \cdot 10^{-3} \text{ (at } 1\sigma).$$

Coulomb tune shift of betatron oscillations is maximal vertically and is equal to

$$\Delta Q_y \cong -\frac{r_0 N/q}{2\pi B \beta \gamma^2 \Theta_y} \frac{1}{\left(1 + \sqrt{\frac{\langle \beta_x \rangle \Theta_x^{(eff)}}{\langle \beta_y \rangle \Theta_y}}\right)}.$$

Here,  $r_0$  is classical radius of a proton,  $N$  is number of particles in accelerator;  $q=9$  is RF harmonic number;  $B$  is bunching factor;  $\beta$  and  $\gamma$  are relativistic factors.  $\Theta_x^{(eff)}$  is the effective normalized emittance (at  $1\sigma$ ) taking into account the addition of dispersive contribution to horizontal beam size. At the top project beam intensity  $N=7.5 \cdot 10^{13}$  protons per cycle one obtains the acceptable values of Coulomb tune shift of the betatron oscillations

$$\Delta Q_y = -0.15, \Delta Q_x = -0.08.$$

The betatron sizes of a beam are determined by its non-normalized (geometric) emittance  $\varepsilon = \Theta/\beta\gamma$ . Since at injection the product  $\beta\gamma=1.017$ , with a sufficient accuracy one takes

$$\varepsilon_x = 30 \text{ мм·мрад}, \varepsilon_y = 10 \text{ мм·мрад}.$$

### Accelerating system

The radiofrequency varies in the range of 4.322—5.925 MHz during the acceleration. This frequency range is well explored at the U-70 operation.

The magnetic guide field ramps according the sinusoidal law. The required total amplitude of the accelerating field  $V$  is then

$$\max V = 2\pi \frac{E_0}{e} f_c \frac{\Pi}{c \cos \phi_s} \frac{1}{2} \left( \frac{\max \beta\gamma - \min \beta\gamma}{2} \right),$$

where  $E_0$  is rest energy of a proton;  $e$  is elementary charge;  $c$  is velocity of light;  $\max \beta\gamma=4.623$ ;  $\min \beta\gamma=1.017$ ; and  $\phi_s$  is a stable (synchronous) phase angle.

Given the acceptable value  $\phi_s=55^\circ$ , one gets  $\max V=687.9$  kV. On taking into account the operational safety factor, the value is increased to  $\max V=720.0$  kV per turn.

Using up-to-date and proven technologies (2-gap ferrite-loaded cavities) one can expect for the voltage  $V_1=20$  kV per one RF station within an overall flange-to-flange size  $<2.5$  m. The project calls for 36 such accelerating stations. Their number is chosen to be an integer multiple of 6, the superperiodicity of the U-3.5 magnetic lattice.

Accommodation of the RF accelerating system requires approximately 90 m of free straight sections.

The beam loading factor of a cavity is

$$k = \frac{2J_q}{V_1/R} = 3.8.$$

Это достаточно большая величина. Она требует особого внимания к схемотехническим решениям в цепях обратной связи, охватывающих ускоряющий резонатор, для обеспечения устойчивости системы «резонатор+интенсивный пучок».

### Магнитная структура

Используется магнитная структура с разделенными функциями поворота и фокусировки (диполи и квадруполь). Тип фокусировки FODO(90°).

Длина орбиты  $\Pi=445.110$  м, средний радиус  $R=\Pi/2\pi=70.841$  м.

Ускоритель состоит из 6 суперпериодов длиной 74.185 м каждый. В суперпериод входят 6 периодов FODO длиной по 12.364 м.

Схема суперпериода магнитной структуры представлена на рис. 2.9. Суперпериод зеркально симметричен относительно своей центральной точки QD/2.

Суперпериоды (секстанты) кольца идентифицируются по ходу пучка указанием пар своих граничных точек: (a, b), (b, c), ... (f, a). Эти же буквы маркируют 6 поворотных арок орбиты a, b, ... f.

Предлагаемая магнитная структура сочетает привлекательные стороны трех известных магнитооптических решений:

1. Простоту периодического FODO канала.
2. Эффективный контроль над дисперсионной функцией  $D_x$ , коэффициентом расширения орбит  $\alpha$  и критической энергией  $\gamma_t$ , характерный для FODO структур с отсутствующими диполями.
3. Длинные прямолинейные участки с подавленной дисперсией, возможные в схеме ахроматического поворота пучка с помощью четырех диполей.

Дипольные магниты установлены только в 2 периодах из 6. Так освобождается место для прямолинейных промежутков O1, Рис.2.9.

В 3 периодах из 6 полностью подавлена дисперсия,  $D_x=dD_x/ds=0$ . Из них формируется длинный прямолинейный промежуток 6×O1 каждого суперпериода. В одном периоде, свободном от диполей, дисперсия не подавлена (граничные полупериоды на Рис. 2.9).

Список прямолинейных промежутков всего кольца приведен в таблице 2.5. Промежутки O1 с подавленной дисперсией занимают почти 45% периметра орбиты. Половина из них используется для размещения ВЧ ускоряющей системы.

This is a rather high value. It implies that dedicated efforts be spent to develop feedback circuits encircling the accelerating cavity in order to provide the safe stability of the closed-loop system comprising "cavity+intense beam".

### Magnetic lattice

Magnetic lattice with separated functions of bending and focusing (dipoles and quadrupoles) is used. The focusing structure period type is FODO (90°).

The orbit length  $\Pi= 445.110$  m, average radius  $R=\Pi/2\pi=70.841$  m.

The accelerator consists of 6 superperiods with a length of 74.185 m each. A superperiod includes 6 FODO periods with a length of 12.364 m.

The scheme of magnetic lattice structure superperiod is shown in Fig. 2.9. Superperiod obeys the reflection symmetry about its central point QD/2.

Superperiods (sextants) of the ring are identified downstream of the beam by marking the pairs of their boundary points: (a, b), (b, c), ... (f, a). The same letters label 6 bending arcs of the orbit a, b, ... f.

The lattice incorporates the attractive features of the three known solutions in the magnetic optics:

1. Simplicity of a plain periodic FODO beam line.
2. Effective control over dispersion function  $D_x$ , compaction factor  $\alpha$  and transition energy  $\gamma_t$  inherent in a FODO lattice with missing dipoles.
3. Long straight sections with suppressed dispersion, which are possible in the QBA scheme (quadruple bent achromat, i. e. achromatic beam bend with four dipoles).

Dipole magnets are placed only in 2 of 6 periods. Thus, the space for straight sections O1 is released (Fig.2.9).

In 3 of 6 periods, the dispersion is completely suppressed,  $D_x=dD_x/ds=0$ . These periods form the long straight section 6×O1 of each superperiod. In one period without dipoles the dispersion is not suppressed (these are the boundary half-periods in Fig. 2.9).

The list of straight sections of a whole ring is presented in Table 2.5. Dispersion-free straight sections O1 occupy almost 45% of the orbit perimeter. Half of them is used to accommodate the RF accelerating system.

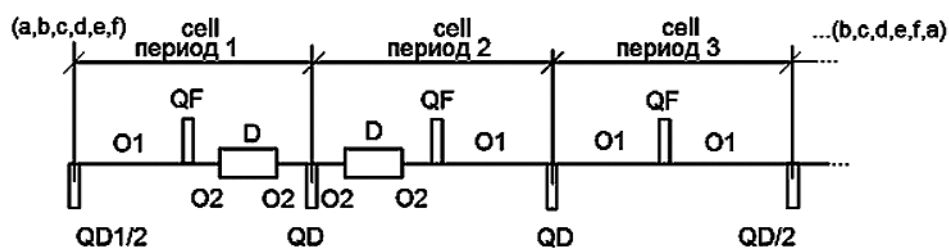


Рис. 2.9. Схема половины суперпериода магнитной структуры.

Fig. 2.9. Scheme of a half superperiod of the lattice.



Таблица 2.5. Прямолинейные промежутки.  
Table 2.5. Straight sections.

Элемент	Тип	Длина, м	Всего в кольце	Сумм. длина, м	
Element	Type	Length, m	Total in ring	Total length, m	
O1	Прямолинейный промежуток, подавленная дисперсия	5.582	36	200.952	Straight section, suppressed dispersion
O1	Прямолинейный промежуток, ненулевая дисперсия	5.582	12	66.984	Straight section, nonzero dispersion
O2	Прямолинейный промежуток	0.791	48	37.968	Straight section

Используются 4 независимые цепи питания:

1. для 24 диполей D (25 с учетом измерительного диполя),
2. для 36 регулярных фокусирующих квадрупольей QF,
3. для 30 регулярных дефокусирующих квадрупольей QD,
4. для 6 дефокусирующих квадрупольей QD1 в центрах арок.

Использование трех семейств квадрупольных линз необходимо для независимого выбора частот бетатронных колебаний (рабочей точки) и подавления дисперсии в длинных прямолинейных промежутках.

Отношение длины магнитной дорожки (дипольной) к периметру орбиты

$$\frac{2\pi r}{\Pi} = \frac{\rho}{R} = 0.216.$$

Выбранная структура не является компактной. Однако эта цель и не преследовалась. Длина орбиты и максимальная энергия пучка диктуются иными соображениями.

Схема размещения основных технологических систем представлена в таблице 2.6 и на Рис. 2.10.

Ориентировочный бюджет распределения места вдоль орбиты приведен в таблице 2.7 (округление с точностью до периода структуры). Он выглядит

The 4 independent power supply circuits are used:

1. For 24 dipoles D (or 25, taking into account a stand-alone reference dipole).
2. For 36 regular focusing quadrupoles QF.
3. For 30 regular defocusing quadrupoles QD.
4. For 6 defocusing quadrupoles QD1 in the arc centers.

The three families of quadrupole lenses are necessary to ensure independent variation of betatron tunes (working point) and suppression of dispersion in the long straight sections.

The ratio of (dipole) magnet path length to orbit length is equal to

$$\frac{2\pi r}{\Pi} = \frac{\rho}{R} = 0.216.$$

The lattice is not the compact one. But that was not the design goal. The orbit length and top beam energy are set by other reasons.

The scheme of arrangement of the basic technological systems is presented in Table 2.6 and in Fig. 2.10.

Tentative distribution of space along the orbit is presented in Table 2.7 (rounding up to a lattice period). It appears well balanced and should not complicate fur-

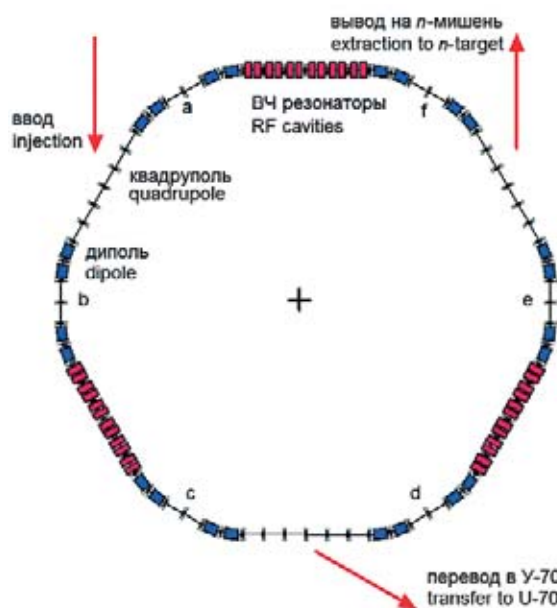


Рис. 2.10. Размещение основных технологических систем У-3,5.

Fig. 2.10. Layout of key technological systems of the U-3.5.

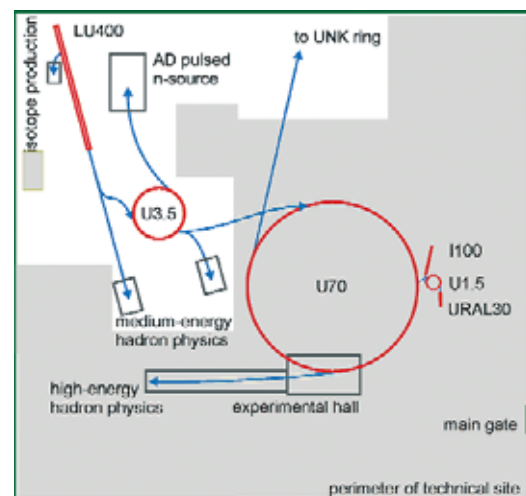


Рис. 2.11. Размещение ускорительного комплекса интенсивных адронных пучков на территории технической площадки ИФВЭ. Заштрихованы зоны, занятые существующими сооружениями.

Fig. 2.11. Layout of the Facility for Intense Hadron Beams on the IHEP site. Shaded area shows a zone occupied with the existing civil engineering.

Таблица 2.6. Размещение основных технологических систем.  
Table 2.6. Arrangement of the basic technological systems.

Промежутки Sections	Суперпериод Superperiod	Система System	Количество Quantity
6×O1	(a, b)	Ввод из линейного ускорителя Injection from the linear accelerator	1
6×O1	(c, d)	Перевод в У-70 Transfer to the U-70	1
6×O1	(e, f)	Вывод на <i>n</i> -генерирующую мишень Extraction to the <i>n</i> -generating target	1
2×O1	в центре арки in the arc center	Технологическое оборудование, резерв Technological equipment, reserved	6
6×O1	(b, c)	Ускоряющие станции по 2 ед. на O1 Accelerating stations, 2 units per O1	12
6×O1	(d, e)	Ускоряющие станции по 2 ед. на O1 Accelerating stations, 2 units per O1	12
6×O1	(f, a)	Ускоряющие станции по 2 ед. на O1 Accelerating stations, 2 units per O1	12
Всего станций Total number of stations			36

Таблица 2.7. Использование места вдоль орбиты.  
Table 2.7. Budget of space along the orbit.

Система	Доля Part	System
Дипольные магниты	1/3	Dipole magnets
Ввод/перевод/вывод	1/4	Injection/transfer/extraction
Ускоряющие станции	1/4	Accelerating system
Иные технологические системы <sup>1)</sup> и резерв	1/6	Other technological systems <sup>1)</sup> and reserve
ИТОГО	1	TOTAL

<sup>1)</sup> Квадрупольные линзы, коррекция магнитного поля и замкнутой орбиты, вакуумная откачка, диагностика пучка, толкатели систем обратной связи, коллимация и очистка гало, сильфоны, фланцы и др.

<sup>1)</sup> Quadrupole lenses, correction of magnet field and closed orbit, vacuum pumping, beam diagnostics, actuators of feedback circuits, collimation and cleaning of halo, bellows, flanges, etc.

сбалансированным и не должен затруднить последующие габаритно-компоновочные решения и возможное развитие установки.

Вариант привязки комплекса к территории технической площадки ГНЦ ИФВЭ показан на Рис. 2.11.

ther equipment assembling solutions and does not preclude future development of the facility.

A tentative layout of the complex on the IHEP site is shown in Fig. 2.11.

### Топология ускоряющей системы

Магнитная структура кольца имеет  $6 \times 6 = 36$  периодов FODO. При кратности ускорения  $q=9$  набег фазы волны ускоряющего поля составляет  $\pi/2$  ВЧ рад на 1 период (или соответственно,  $\pi/4$  рад на каждые полпериода).

Такие набег фазы вместе с симметричным размещением станций упрощают их взаимную синхронизацию, которая требуется для когерентного сложения напряжений отдельных станций на пучке.

Тройки равноудаленных станций, имеющих азимуты, кратные  $2\pi/3$ , образуют синфазные триплеты. Всего 12 триплетов. Эти триплеты собираются в 4 группы по три триплета с относительной фазой ВЧ поля 0 (ведущий триплет),  $\pi/2$  и  $\pi$  рад в каждой группе.

Относительные ВЧ фазы четырех групп выбираются по месту в соответствии с фактическими азимутами ведущих триплетов групп станций.

### Topology of accelerating system

The magnetic lattice of the ring has  $6 \times 6 = 36$  FODO periods. Given RF harmonic number  $q=9$ , the phase advance of accelerating field wave is equal to  $\pi/2$  rad per 1 period (or, correspondingly,  $\pi/4$  rad per a half-period).

Such phase advances, along with a symmetrical arrangement of RF stations, simplify their mutual synchronization required for coherent addition of voltages from individual stations at the beam.

The triplets of equidistant stations that have azimuths integer multiple to  $2\pi/3$  form in-phase triplets. There are 12 such triplets in total. These triplets are united into 4 groups of 3 triplets with relative phase of RF field 0 (leading triplet),  $\pi/2$  and  $\pi$  rad in each group.

Relative RF phases of four groups are selected in situ according the factual azimuths of leading triplets of the group.

## Дипольный магнит

В магнитной структуре используется 24 диполя D. Еще один, 25-й диполь располагается вне структуры и является измерительным (опорным).

Характеристики диполей приведены в таблице 2.8.

Магнитный блок диполя состоит из двух прямоугольных пакетов равной длины. Пакеты развернуты на углы  $\pm 7.5^\circ$  относительно центрального поперечного сечения диполя. Пакеты имеют общую обмотку возбуждения. Угол входа и выхода орбиты в краях блока диполя (угол скоса торцов для краевой фокусировки) равен  $3.75^\circ$ . Копируется техническое решение, принятое для поворотных магнитов бустера У-1,5.

## Dipole magnet

There are 24 dipoles D in magnetic lattice. One more, the 25th dipole, is housed outside the lattice. It is the measuring (reference) dipole.

The dipoles parameters are presented in Table 2.8.

Magnet block of a dipole consists of two rectangular packets of equal length. The packets are turned by  $\pm 7.5^\circ$  about the central cross-section of the dipole. Packets have common exciting coil. The incident angle of orbit at the entry/exit edges of dipole block (angle for edge focusing) is equal to  $3.75^\circ$ . The proven technical solution used for bending magnets of the existing booster U-1.5 is adopted.

Таблица 2.8. Характеристики дипольных магнитов.  
Table 2.8. Parameters of dipole magnets.

Элемент	Тип	Параметр	Типе
Element		Parameter	
D	<b>Поворотный (дипольный) магнит</b>		<b>Bending (dipole) magnet</b>
	Длина вдоль орбиты (по полю), м	4.00	Length along the orbit (over field), m
	Угол поворота, °	15	Bending angle, °
	Радиус кривизны орбиты $\rho$ , м	15.280	Curvature radius of orbit $\rho$ , m
	Число пакетов в блоке	2	Number of packets in a block
	Угол скоса торцов, °	3.75	Edge surface angle, °
	Сагитта в блоке, мм	130.7	Sagitta in a block, mm
	Сагитта в пакете, мм	32.7	Sagitta in a packet, mm
	Поле при инжекции (400 МэВ), Тл	0.208	Field at injection (400 MeV), T
	Поле при выводе (3500 МэВ), Тл	0.947	Field at extraction (3500 MeV), T

Вакуумная камера внутри диполей гнутая с радиусом кривизны  $\rho$ .

Поворотный магнит не напряженный. Имеется примерно 25%-й запас по полю (до 1.2 Тл).

Vacuum chamber inside the dipoles is curved with the orbit curvature radius  $\rho$ .

The bending magnet design is not strained. There is approximately 25% reserve in a bending field (up to 1.2 T).

## Квадрупольная линза

В структуре используется 36 линз QF, 30 линз QD и 6 линз QD1. Конструктивно все 72 квадрупольные линзы идентичны. Их характеристики приведены в таблице 2.9.

При радиусе апертуры линзы, равном, например, 100 мм, имеется двукратный запас по градиенту. Запас обеспечивает техническую возможность для перестройки оптики в процессе эксплуатации.

## Quadrupole lens

There are 36 QF lenses, 30 QD lenses and 6 QD1 lenses in the lattice. All 72 quadrupoles are identical in their design. Their parameters are shown in Table 2.9.

At an aperture radius of, for example, 100 mm, there is double reserve in field gradient. This reserve provides technical possibility for operational tuning the optics.

Таблица 2.9. Характеристики квадрупольных линз.  
Table 2.9. Parameters of quadrupole lenses.

Элемент	Тип	Параметр	Типе
Element		Parameter	
QF	<b>Фокусирующий квадрупольный магнит</b>		<b>Focusing quadrupole magnet</b>
	Длина вдоль орбиты (по градиенту), м	0.60	Length along the orbit (over gradient), m
	Отношение градиента к жесткости $G/B\rho$ , $\text{м}^{-2}$	+0.3845	Ratio of gradient to rigidity $G/B\rho$ , $\text{м}^{-2}$
	Градиент при инжекции (400 МэВ), Тл/м	1.224	Gradient at injection (400 MeV), T/m
	Градиент при выводе (3500 МэВ), Тл/м	5.564	Gradient at extraction (3500 MeV), T/m
QF	<b>Фокусирующий квадрупольный магнит</b>		<b>Defocusing quadrupole magnet</b>
	Длина вдоль орбиты (по градиенту), м	0.60	Length along the orbit (over gradient), m
	Отношение $G/B\rho$ , $\text{м}^{-2}$	-0.3325	Ratio $G/B\rho$ , $\text{м}^{-2}$
	Градиент при инжекции (400 МэВ), Тл/м	-1.058	Gradient at injection (400 MeV), T/m
	Градиент при выводе (3500 МэВ), Тл/м	-4.811	Gradient at extraction (3500 MeV), T/m
QF	<b>Фокусирующий квадрупольный магнит</b>		<b>Focusing quadrupole magnet</b>
	Длина вдоль орбиты (по градиенту), м	0.60	Length along the orbit (over gradient), m
	Отношение $G/B\rho$ , $\text{м}^{-2}$	-0.3593	Ratio $G/B\rho$ , $\text{м}^{-2}$
	Градиент при инжекции (400 МэВ), Тл/м	-1.144	Gradient at injection (400 MeV), T/m
	Градиент при выводе (3500 МэВ), Тл/м	-5.199	Gradient at extraction (3500 MeV), T/m

Таблица 2.10. Характеристики магнитной структуры.  
Table 2.10. Parameters of magnetic lattice.

Горизонтальная бетатронная частота	$Q_x$	9.150	Horizontal betatron tune
Горизонтальная амплитудная $\beta$ -функция, м	$\max \beta_x$	23.939	Horizontal amplitude $\beta$ -function, m
	$\min \beta_x$	1.995	
Вертикальная бетатронная частота	$Q_y$	7.200	Vertical betatron tune
Вертикальная амплитудная $\beta$ -функция, м	$\max \beta_y$	22.423	Vertical amplitude $\beta$ -function, m
	$\min \beta_y$	4.505	
Дисперсионная функция, м	$\max D_x$	4.105	Dispersion function, m
	$\min D_x$	0.0	
Коэффициент расширения орбит	$\alpha$	0.01733	Compaction factor
Критическая энергия кинетическая, ГэВ	$\gamma_t$	7.595	Transition energy kinetic, GeV
		6.188	
Естественная (линейная) хроматичность $\chi=p\partial Q/\partial p$	$\chi_x$	-11.873	Natural (linear) chromaticity $\chi=p\partial Q/\partial p$
	$\chi_y$	-9.099	

### Оптические характеристики

Характеристики магнитной структуры синхротрона перечислены в таблице 2.10. Графики амплитудных и дисперсионной функций показаны на рисунке 2.12а. Выбран набег фазы бетатронных колебаний на период структуры, близкий к  $\pi/2$ . Это почти оптимальная настройка для простого FODO канала. Ускоритель с запасом работает до перехода через критическую энергию:  $\max \gamma=4.549 < \gamma_t=7.595$ .

Потребуется создание системы коррекции хроматичности, позволяющей получить небольшие отрицательные значения  $\chi$  масштаба  $-1 \div -1,5$ . Цель – уменьшение хроматического размера рабочей точки на клетке бетатронных частот и подавление поперечных неустойчивостей типа «голова–хвост».

Положение выбранной проектной рабочей точки (9.15; 7.20) на клетке бетатронных частот показано на Рис. 2.12б. На нем проведены линии магнитооптических резонансов до четвертого порядка включительно. Толщиной (цветом) выделены линии структурных резонансов. Кулоновский сдвиг уменьшает обе бетатронные частоты. При движении в направлении действия кулоновского сдвига последовательно пересекаются резонансы

$$Q_x - Q_y = 2, \quad 2Q_y - Q_x = 5, \quad 3Q_y - Q_x = 12 = 2 \cdot 6.$$

Резонанс связи  $Q_x - Q_y = 2$  может быть скорректирован (косые квадрупольные линзы). Резонанс 4-го порядка (последний в списке) является структур-

### Optical parameters

Parameters of the synchrotron magnetic lattice are listed in Table 2.10. The plots of the amplitude and dispersion functions are shown in Fig. 2.12a. The phase advance of the betatron oscillations per a lattice period is selected to be around  $\pi/2$ . That is a close-to-optimal tuning for a plain FODO beamline. The accelerator operates safely below transition:  $\max \gamma=4.549 < \gamma_t=7.595$ .

It will be necessary to develop the system for chromaticity correction which allows to obtain small negative values of  $\chi$  in the range  $-1 \div -1.5$ . The goal is to squeeze the chromatic size of operating point on the betatron tune plot and to suppress the transverse instabilities of the "head-tail" type.

The adopted operating point (9.15; 7.20) is shown on the betatron tune plot in Fig. 2.12b. This plot shows the lines of magneto-optical resonances up to the fourth order inclusive. The thick (color) lines mark the structure resonances. The Coulomb tune shift decreases both the betatron frequencies. During the motion in direction of the Coulomb shift a particle crosses sequentially the following resonances

$$Q_x - Q_y = 2, \quad 2Q_y - Q_x = 5, \quad 3Q_y - Q_x = 12 = 2 \cdot 6.$$

The coupling resonance  $Q_x - Q_y = 2$  can be corrected (skew quadrupole lenses), if required. Resonance of the 4th order (the last one in a list) is a structure reso-

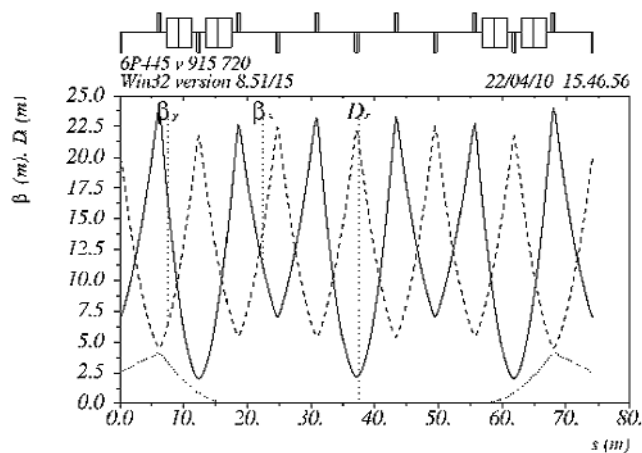


Рис. 2.12а. Динамические функции магнитной структуры.  
Fig. 2.12a. Dynamic functions of magnetic lattice.

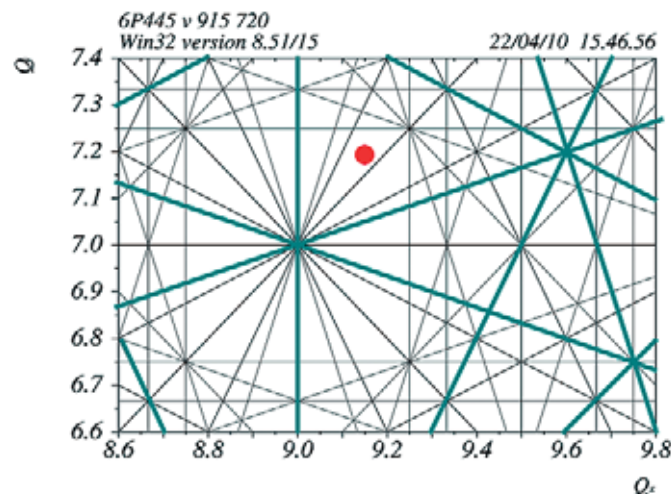


Рис. 2.12б. Клетка бетатронных частот и рабочая точка.  
Fig. 2.12b. Betatron tune plots and operating point.



ным и требует особого внимания. Он и прочие существенные магнитооптические резонансы будут изучены на следующих этапах проектирования.

Впоследствии рабочую точку ускорителя можно будет откорректировать в достаточно широких пределах.

### Апертура камеры и магнитов

Огибающие функции пучка по уровню  $1\sigma$  построены на Рис. 2.13а.

Границу апертуры вакуумной камеры проведем по уровню  $\pm 4\sigma$  пучка от оси. Вакуумная камера эллиптического сечения с внутренними полуосями (горизонтальной, вертикальной)

$$a=126.0 \text{ мм}, b=60.0 \text{ мм}.$$

Бетатронный акцептанс такой вакуумной камеры

$$A_x = \frac{a^2}{\max \beta_x} = 663.2 \text{ мм мрад},$$

$$A_y = \frac{b^2}{\max \beta_y} = 160.5 \text{ мм мрад}.$$

Импульсный акцептанс достигает  $\pm 3.1\%$  (тонкий пучок с  $\epsilon_x=0$ ) или  $\pm 1.6\%$  (полный пучок).

Вакуумная камера внутри магнитов керамическая с толщиной стенки  $\Delta=10$  мм. Выберем монтажный допуск  $\pm 5$  мм. В нем будут размещены установочные прокладки, нагревательные элементы для прогрева при вакуумной тренировке и т. п.

Потребуется дипольный магнит с высотой и шириной зазора

$$h=150 \text{ мм}, w>272 \text{ мм (область хорошего поля)}.$$

Радиус апертуры квадрупольной линзы

$$r=102.9 \text{ мм}.$$

Вид вакуумной камеры внутри полюсных поверхностей магнитов показан на Рис. 2.13б.

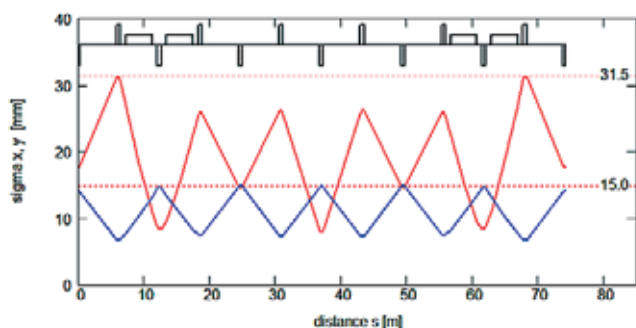


Рис. 2.13а. Огибающие функции пучка (по  $1\sigma$ ).

Fig. 2.13a. Envelope functions of beam at  $1\sigma$  level.

nance and requires a closer attention. This resonance and other essential magneto-optical resonances will be studied on next stages of the project.

Later on, the operating point can be corrected within sufficiently wide limits.

### Aperture of chamber and magnets

The envelope functions at 1 level are plotted in Fig. 2.13a.

The aperture boundary for the vacuum chamber is set at  $\pm 4\sigma$  level of beam from the axis. The vacuum chamber is of an elliptic cross-section with internal half-axes (horizontal and vertical).

$$a=126.0 \text{ мм}, b=60.0 \text{ мм}.$$

Betatron acceptance of such a vacuum chamber is equal to

$$A_x = \frac{a^2}{\max \beta_x} = 663.2 \text{ мм мрад},$$

$$A_y = \frac{b^2}{\max \beta_y} = 160.5 \text{ мм мрад}.$$

Momentum acceptance is  $\pm 3.1\%$  (pencil beam with  $\epsilon_x=0$ ) or  $\pm 1.6\%$  (full beam).

Vacuum chamber inside the magnets is made of ceramics with a wall thickness  $\Delta=10$  mm. The assembling clearances are set to  $\pm 5$  mm. It will allow for accommodating the fittings, heating jackets for baking during the vacuum training, etc.

The dipole magnet is required to have a height and a width of the gap, respectively,

$$h=150 \text{ мм}, w>272 \text{ мм (a good-field region)}.$$

Aperture radius of the quadrupole lens is

$$r=102.9 \text{ мм}.$$

The sketch of vacuum chamber inside pole surfaces of the magnets is shown in Fig. 2.13b.

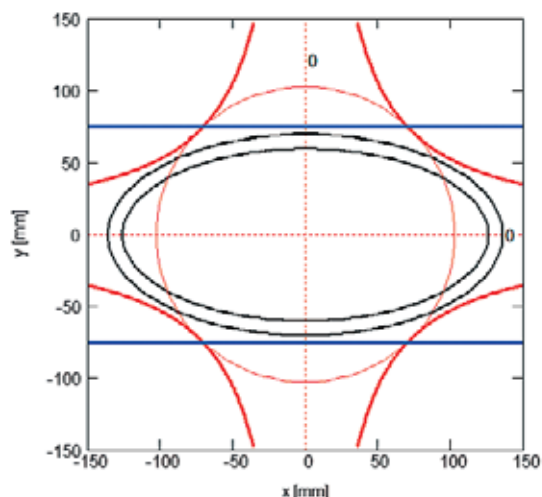


Рис. 2.13б. Вакуумная камера и полюсные поверхности магнитов.

Fig. 2.13b. Vacuum chamber and pole surfaces of magnets.

### 3. Исследования с пучками ЛУ-400 и У-3,5

Мегаваттный пучок протонов из ускорителя У-3,5 позволит инициировать и реализовать широкую программу фундаментальных и прикладных работ.

Наиболее существенной частью проекта является импульсный нейтронный источник, предназначенный для исследований свойств веществ и материалов в нанометровом и субнанометровом диапазоне. Кроме того, высокоинтенсивный протонный пучок предоставляет уникальные возможности для развития ряда других перспективных направлений:

- ◆ исследование веществ и материалов при помощи мюонов;
- ◆ наработка изотопов;
- ◆ исследования при помощи ультрахолодных нейтронов;
- ◆ протонная и нейтронная радиография;
- ◆ измерения нейтрон-ядерных реакций по времени пролета;
- ◆ доплеровская спектроскопия динамических процессов;
- ◆ радиационное материаловедение;
- ◆ исследование подкритических систем.

#### 3.1. Тепловые и холодные нейтроны

##### Характеристики нейтронного источника

Схема нейтронного источника приведена на рис. 3.1. Протонный пучок с энергией  $E=3,5$  ГэВ мощностью 1.1 МВт попадает на мишень нейтронного источника. Длительность импульса – 1,5 мксек, частота следования – 25 Гц. Ртутная мишень, на ко-

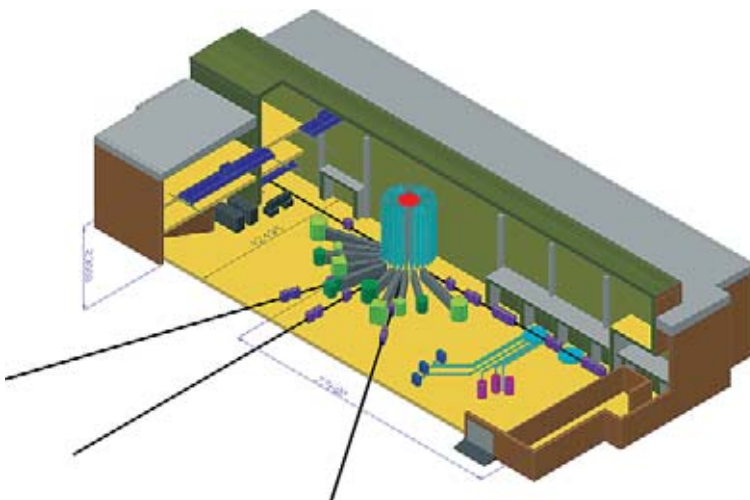


Рис. 3.1. Схема зала с мишенным комплексом, системой каналов и установок для экспериментов с тепловыми и холодными нейтронами.

Fig. 3.1. Layout of experimental hall with target, system of channels and facilities for experiments with thermal and cold neutrons.

### 3. Application of LU-400 and U-3.5 Beams

The accelerator U-3.5 will provide proton beam for comprehensive program of fundamental and applied researches.

The most challenging element of the project is the pulsed spallation neutron source, intended for life and material science at nanometer and subnanometer scale.

On top of it, high intensity proton beam provides the unique opportunities for development of the other promising topics:

- ◆ muon science;
- ◆ isotope production;
- ◆ studies with ultracold neutrons;
- ◆ proton and neutron radiography;
- ◆ measurements of neutron-nuclei reactions by time-of-flight technique;
- ◆ Doppler spectroscopy of dynamic processes;
- ◆ radiation material science;
- ◆ studies of subcritical Accelerator Driven Systems.

#### 3.1. Thermal and Cold Neutrons

##### Parameters of neutron source

The layout of spallation neutron source is presented in Fig.3.1. The proton beam with the energy  $E=3.5$  GeV and power 1.1 MW is directed on the target of neutron source. Pulse duration of the beam is 1.5  $\mu$ s, repetition rate is 25 Hz. Mercury target, where the neutrons of

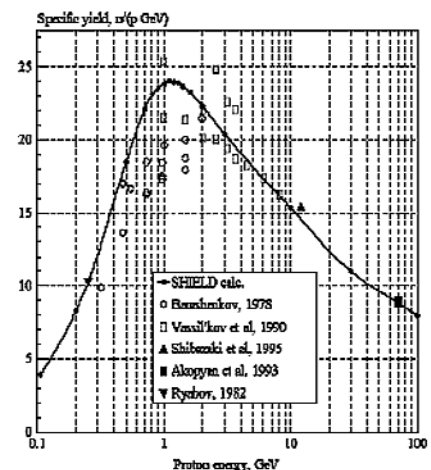


Рис. 3.2. Удельные выходы нейтронов (n/p[ГэВ]) из толстой свинцовой мишени. (из В.С.Барашенков, ЭЧАЯ, 9-11, 1978).

Fig. 3.2. Specific yields of neutrons (n/p[GeV]) from thick lead target. (from V.S.Barashenkov, EPAN, 9-11, 1978).

торой посредством ядерных реакций производятся нейтроны в широком энергетическом диапазоне, окружена радиационной защитой, системами охлаждения и вентиляции. В непосредственной близости от мишени находятся криогенные модераторы, на которых нейтроны замедляются и термализуются. На модераторы смотрят нейтронные каналы, общим количеством около двадцати. Каналы могут открываться и закрываться при помощи массивных дистанционно управляемых затворов. Длина каналов в зависимости от конкретных экспериментов составляет от десяти до ста метров.

Выходы нейтронов из толстой свинцовой мишени в зависимости от энергии протонов приведены на рис. 3.2. При энергии 3,5 ГэВ каждый протон производит около 70 нейтронов, так что при мощности пучка  $W=1.1$  МВт в мишени будет образовываться  $1.3 \cdot 10^{17}$  нейтронов в секунду. При этом импульсная интенсивность потока нейтронов будет примерно на два-три порядка больше, в зависимости от конструкции модераторов.

Спектр нейтронов существенно зависит от конструкции мишени и модераторов. При использовании теплых и холодных модераторов значительная часть нейтронов имеет длину волны в диапазоне от одного до одной десятой нанометра, исключительно важным для исследований широкого комплекса явлений, веществ и материалов.

Для большинства экспериментов наряду с интенсивностью нейтронного потока важнейшим параметром является длительность нейтронного импульса, поскольку именно этой величиной определяется энергетическое разрешение при фиксированной геометрии. Для нейтронов с энергией менее 1 эВ эта длительность оказывается больше двух микросекунд:  $\Delta t(\mu\text{s}) \geq 2E^{-0.5}$  (эВ) (D. F. R. Mildner and R. N. Sinclair, *J. Nucl. Energy* 6, 225 (1979)), так что собственная длительность импульса протонов из ускорителя У-3,5, составляющая 1,5 мксек, не вносит существенного вклада в продолжительность нейтронной вспышки.

Остановимся подробнее на этой важной особенности предлагаемого проекта. Известны три различных подхода к созданию высокоинтенсивных импульсных нейтронных источников:

- ◆ линейный ускоритель протонов с энергией около 1 ГэВ, с очень большим ( $I > 150$  мА) током в импульсе и большим ( $> 5$  мА) средним током (проект ESS, Европа);
- ◆ линейный ускоритель на энергию около 1 ГэВ с источником  $H^-$  с импульсным током масштаба 50 мА, и накопителем-компрессором, сжимающим импульс с  $\sim 1$  мсек до долей микросекунды (проект SNS, США);
- ◆ линейный ускоритель на энергию  $\sim 400$  МэВ со средним током  $H^-$  до  $\sim 0,5$  ма и быстрый синхротрон, повышающий энергию до  $\sim 3$  ГэВ (J-PARC, Япония).

Предлагаемый проект использует структуру проекта J-PARC, но отличается от него в первую очередь тем, что в синхротроне У-3,5 использована довольно длинная орбита. Такое решение позволяет

wide energy spectrum are produced in spallation reactions, is surrounded by the radiation shielding, cooling and ventilation systems. In the vicinity of the target there are cryogenic moderators, where neutrons are decelerated and thermalized. About 20 neutron channels are looking at these moderators. The channels can be opened or closed by means of massive shutters with the remote control. The channel lengths depend on specific experiments and varies from ten to hundred meters.

The neutron yield from thick lead target as a function of proton energy is given in Fig. 3.2. At the energy of 3.5 GeV each proton produces about 70 neutrons, so that at the beam power of 1.1 MW approximately  $1.3 \cdot 10^{17}$  neutrons per second will be produced at the target. The pulsed flux intensity will be 2–3 orders of magnitude greater, depending on moderators design.

The neutron spectrum crucially depends on the design of the target and moderators. With thermal and cold moderators the significant part of neutrons has the wavelength in the range from 0.1 to 1 nanometer. This wavelength is very convenient for research in chemistry, condensed matter physics, materials science, engineering and biology.

For majority of experiments, duration of the neutron pulse is as important parameter as intensity, because the energy resolution at fixed geometry is imposed by this very value. For neutrons with the energy less than 1 eV this duration parameter is more than two microseconds:  $\Delta t(\mu\text{s}) \geq 2E^{-0.5}$  (эВ) (D. F. R. Mildner and R. N. Sinclair, *J. Nucl. Energy* 6, 225 (1979)).

As a result the duration of proton pulse from the U-3.5, which is equal to 1.5  $\mu\text{s}$ , would not deteriorate the neutron flash duration.

We have to draw attention to this important feature of the project. There are three different approaches to the construction of high intensity pulsed neutron sources:

- ◆ proton linear accelerator with energy around 1 GeV, very high ( $> 150$  mA) current in a pulse and high ( $> 5$  mA) average current (project ESS, Europe);
- ◆ linear accelerator with energy around 1 GeV with  $H^-$  source and pulse current of 50 mA and accumulator ring, which compresses pulse from  $\sim 1$  ms to fractions of microseconds (project SNS, USA);
- ◆ linear accelerator with energy  $\sim 400$  MeV, average current  $H^-$  up to  $\sim 0,5$  mA and rapid cycling synchrotron, with energy up to  $\sim 3$  GeV (J-PARC, Japan).

The proposed project uses the topology of the J-PARC project, but differs significantly in a few important details. The main difference is the orbit of synchrotrons which is rather long in the U-3.5 synchrotron.

добиться практически идеальной оптики, снижает количество частиц в отдельном банче и, в конечном счете, позволяет повысить интенсивность пучка. За это приходится платить увеличением длительности протонного импульса, что не ухудшает конечных характеристик нейтронного источника. Такой подход позволяет достичь рекордных характеристик для исследований с нейтронами нанометрового и субнанометрового диапазона длин волн.

Важным достоинством предлагаемого подхода с использованием быстроциклирующего синхротрона является несколько меньшая стоимость в сравнении с источником, построенным исключительно на основе линейных ускорителей.

При сравнении возможностей предлагаемого источника с тем, что можно получить на реакторах, важны два параметра – средняя интенсивность нейтронных потоков и импульсная интенсивность. При сравнении предлагаемого источника с лучшим исследовательским реактором ILL (Гренобль), мы обнаруживаем, что средние потоки нейтронов, получаемые в реакторе, на порядок выше, чем потоки в мегаваттном импульсном источнике, в то время как импульсные потоки нейтронов в последнем случае почти на два порядка выше, чем в реакторе. В результате, для широкого класса экспериментов мегаваттный импульсный источник оказывается более эффективным.

### Основные методы и направления исследований на нейтронном источнике

Для исследования веществ и материалов широко применяются различные виды излучений – синхротронное (рентгеновское) излучение, ускоренные пучки электронов и нейтронное излучение. К важнейшим преимуществам нейтронных исследований относятся: большой диапазон энергий нейтронов, высокая проникающая способность, высокая чувствительность к легким ядрам (протонам), минимальное воздействие нейтронов на исследуемый объект.

Приведем краткий, далеко не полный перечень направлений работ на импульсном нейтронном источнике.

Such a solution gives a room for practically perfect optics, decreases the number of particles in a single bunch and, as a result, provides opportunity for the beam intensity increase. The payment for those advantages is some growth of neutron pulse duration, but as we have seen above, it does not compromise the ultimate parameters of neutron source. Within this approach one can reach record parameters for neutron researches at nanometer and subnanometer wavelength scale. The important advantage of proposed method, which uses the rapid cycling synchrotron, is a lower construction cost in comparison with the source constructed exceptionally with the use of linear accelerators.

In comparison the characteristics of proposed source with what can be reached at nuclear reactors one should take into account the two parameters: average intensity of neutron fluxes and pulsed intensity. Comparing the proposed source with the research reactor ILL (Grenoble), one can find that average neutron fluxes at reactor are of about one order of magnitude greater than the fluxes in megawatt spallation source. At the same time, the pulsed neutron fluxes in megawatt spallation source are almost two orders of magnitude greater than these in reactor. As a result, for wide class of experiments the megawatt spallation neutron source appears to be more effective.

### Basic methods and trends of research with the neutron source

Various projectiles are used for research at nanometer and subnanometer scale: synchrotron (X-ray) radiation, electron beams and neutrons. The main advantages of neutrons are: the wide range of neutron energies, high penetration power, high sensitivity to light nuclei (protons) and minimal influence on studied objects.

Some examples of spallation neutron source applications are listed below.

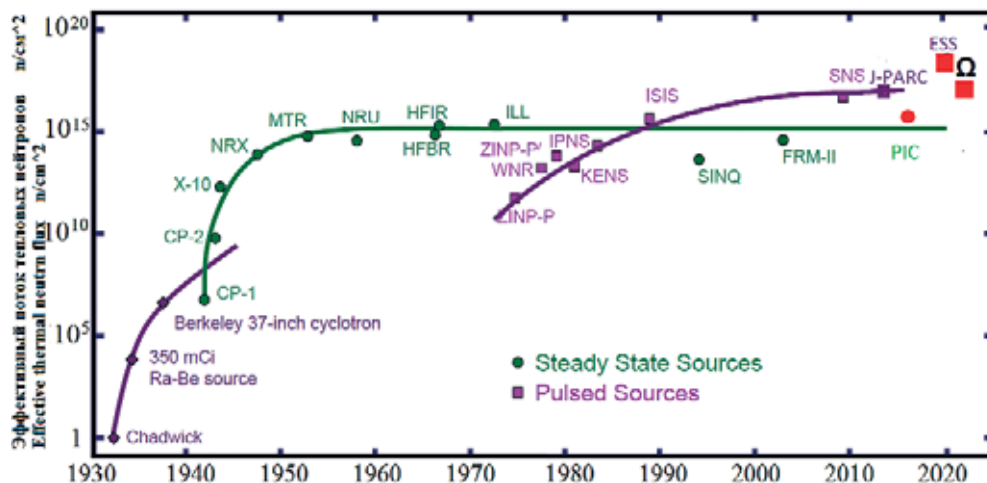


Рис. 3.3. Эффективная интенсивность потоков тепловых нейтронов для различных источников (использована работа *Neutron Scattering*, K. Skold and D. L. Price, eds., Academic Press).

Fig. 3.3. Effective thermal neutron flux intensity for different sources (updated from *Neutron Scattering*, K. Skold and D. L. Price, eds., Academic Press, 1986).



#### Физика твердого тела:

магнитные свойства веществ, в том числе высокотемпературных сверхпроводников; динамика водорода в различных соединениях; квантовые эффекты; исследование магнитного упорядочения; исследование влияния микроструктуры органических полимеров на их оптические, термические, магнитные и другие характеристики; физика поверхностных явлений; структура веществ в экстремальных условиях, фазовые переходы.

#### Физика наноструктур:

процессы самосборки; топография наносфер, нанотрубок, их взаимодействие с атомами и молекулами; механизмы роста нанометровых кристаллических структур в аморфных материалах, их влияние на свойства материалов; влияние внешних условий на характеристики роста наноструктур; магнитные свойства наноструктур.

#### Биология:

морфология и метаболизм мембранных протеинов; кинетика ферментативных реакций; механизмы сворачивания белков; определение форм, размеров и положения ферментов; исследование вирусов в различных условиях, механизмов их взаимодействия с клетками.

#### Химия:

реакции гидролиза, гидратации и гидрогенизации; химическая и кристаллическая структура больших молекул; структура и динамика полимерных систем; механизмы катализа в пористых материалах и других каталитических системах.

#### Материалы:

исследование материалов для водородной энергетики (положение атомов водорода, их связывание и высвобождение); электрохимия материалов для быстрых электрических источников; фазовые переходы в ферроэлектрических и пьезоэлектрических материалах; доменная структура магнитных материалов; нейтронная томография промышленных материалов и изделий; измерение фазового состава веществ.

#### Окружающая среда:

исследование полимерных поверхностей для создания безвредных полимеров; исследование формирования гидратов с целью разработки технологии связывания парниковых газов; анализ загрязнений тяжелыми металлами.

#### Медицина:

исследование структуры лекарственных препаратов и их взаимодействия с рецепторами.

#### Solid state physics:

magnetic properties of materials, including high-temperature superconductors; hydrogen dynamics under various conditions; quantum effects; study of magnetic ordering; study of relationship of organic polymer microstructure with its optical, thermal, magnetic and other characteristics; physics of surface phenomena; materials structure at extreme conditions; phase transitions.

#### Physics of nanostructures:

processes of self-assembly; topography of nanospheres, nanotubes, their interaction with atoms and molecules; mechanisms of nanometer crystalline growth in amorphous materials, their influence on material properties; influence of external conditions on characteristics of nanostructure growth; magnetic properties of nanostructures.

#### Biology:

morphology and metabolism of membrane proteins; kinetics of fermentative reactions; mechanisms of protein folding; mapping of shape, size and position of ferments; study of viruses under different conditions, mechanisms of their interaction with cells.

#### Chemistry:

reactions of hydrolysis, hydration and hydrogenation; chemical and crystal structure of big molecules; structure and dynamics of polymer systems; mechanisms of catalysis in porous materials and other catalyst systems.

#### Materials:

study of materials for hydrogen power engineering (position of hydrogen atoms, their binding and release); electrochemistry of materials for fast electric sources; phase transition in ferroelectric and piezoelectric materials; domain structure of magnetic materials; neutron tomography of industrial materials and products; measurement of phase composition of materials.

#### Environment:

study of polymer surfaces for development of harmless polymers; study of hydrate formation and further development of greenhouse gases binding technology; analysis of impurities caused by heavy metals.

#### Medicine:

study of structure of pharmaceutical drugs and their interaction with receptors.

Методы нейтронных исследований можно разделить на три больших направления – упругое рассеяние нейтронов, неупругое рассеяние нейтронов и взаимодействие нейтронов с магнитным полем.

Спектрометры упругого рассеяния могут быть разделены по величине переданного импульса на детекторы малоуглового рассеяния нейтронов (МУРН), дифрактометры и рефлектометры. Нейтронные дифрактометры используются при определе-

Methods of neutron researches can be subdivided on three big groups: elastic scattering of neutrons, inelastic scattering of neutrons and neutron interaction with magnetic field.

Elastic scattering spectrometers can be subdivided by transmitted momentum on detectors of small angle neutron scattering (SANS), diffractometers and reflectometers. Neutron diffractometers are used for study of atomic and magnetic structure of crystals, local distor-

нии атомной и магнитной структуры кристаллов, локальных искажений, микро- и макронапряжений, МУРН – для исследования неоднородностей, существенно превышающих длину волны нейтронов, например, больших молекул и частиц в растворах, дефектов в материалах. Рефлектометры – для изучения поверхностей, границ раздела сред, длинно-периодических структур.

Типичные задачи, решаемые на спектрометрах неупругого рассеяния, – фазовые переходы; динамика атомов и молекул; плотность колебательных состояний, дисперсия фононов; магнитные фазовые переходы; спиновые волны; возбуждения в электронных системах; магнетики; системы с сильными электронными корреляциями; диффузия в твердых телах (водород), критические явления.

Многообразие задач, решаемых на нейтронном источнике, требует применения различных инструментов. На данном этапе мы не фиксируем конкретный набор установок, а исходим из того, что общее количество каналов должно быть достаточно большим, около двадцати.

### 3.2. Прикладные работы

#### Радиационное материаловедение

Ряд задач радиационного материаловедения (далее РМВ) может решаться на высокоинтенсивном протонном ускорителе У-3,5.

Оценки достижимой на выведенном пучке У-3,5 пиковой плотности потока быстрых нейтронов (с энергией выше 0.1 МэВ) дают  $\sim 1,5 \cdot 10^{21}$  н/см<sup>2</sup>/год для мишени из ртути (расчёт по программе MARS'109), что соответствует примерно 2 сна.

Одно из перспективных направлений РМВ – облучение тонких (50–100 мкм) образцов материалов в режиме многократного прохождения пучка протонов через образец с измерением выбранных параметров в процессе облучения. В таких экспериментах можно достигать уровня облучения тонких образцов масштаба 100 сна/год.

Высокоинтенсивные протонные пучки ускорителя У-3,5 позволяют решать целый ряд актуальных задач РМВ:

- ◆ Разработка методов имитации на ускорителе радиационных явлений, протекающих в материалах активных зон ядерных и термоядерных реакторов.
- ◆ Исследования радиационных дефектов и их влияние на макроскопические свойства материалов.
- ◆ Исследование возможностей регулировки свойств материалов при помощи радиационного облучения.

#### Ядерная физика

Для получения данных о ядерных реакциях под воздействием заряженных частиц перспективным представляется создание канала для исследований в нейтронных спектрах по времяпролётной методике. Данная методика позволяет проводить исследования реакций, индуцированных нейтронами в широком

tions, micro- and macro-tensions, SANS detectors are used for study big nonuniformities, considerably exceeding neutron wavelength, for example, big molecules and particles in solutions, defects in materials. Reflectometers help to study surfaces, boundaries and structures with long periodicity.

Typical problems to be solved with inelastic scattering spectrometers are the following: phase transitions; dynamics of atoms and molecules; density of oscillation states, dispersion of phonons; magnetic phase transitions; spin waves; excitations in electron systems; magnetics; systems with strong electron correlations; diffusion in solid states (hydrogen); critical phenomena.

Different problems to be solved with spallation neutron source require different tools. At this stage we don't fix the list of specific facilities, instead we estimate the total number of channels: it should be sufficiently big, around twenty.

### 3.2. Applied Research

#### Material science

High intensity proton beam from the U-3.5 can be used for experiments on radiation material science.

The estimations of peak flux of fast neutron (with energy higher than 0.1 MeV) for the beam extracted from U-3.5 give approximately  $\sim 1,5 \cdot 10^{21}$  n/cm<sup>2</sup>/year for mercury target (calculated by MARS'109 code), that corresponds approximately to 2 dpa (displacements per atom).

One of perspective approaches to radiation damage studies is the irradiation of thin (50–100 μm) material samples by means of multiple proton beam passing through sample with measurement of selected parameters during irradiation. In such experiments the level of irradiation for thin samples around 100 dpa/year can be achieved.

High intensity proton beams of the U-3.5 accelerator will help to solve a number of topical problems of material science:

- ◆ To develop the methods of imitation with accelerators the radiation phenomena in materials of active zones of nuclear and thermonuclear reactors.
- ◆ To study radiation defects and their influence on macroscopic properties of materials.
- ◆ To study the methods of materials properties regulation with the radioactive irradiation.

#### Nuclear physics

A number of data on nuclear reactions with neutrons can be obtained with the dedicated channel for researches with time of flight (TOF) method. This method helps to study reactions induced by neutrons at wide range of energies on samples with masses as small as 1 mg. That is extremely important while work-

спектре энергий, на образцах массой порядка 1 мг, что исключительно важно при работе с высокоактивными материалами. Разрешающая способность такого канала определяется его длиной и длительностью импульса протонов на мишени, а интенсивность потока нейтронов – параметрами пучка, конструкцией мишени и длиной канала.

Получаемые в экспериментах ядерные данные используются в расчётах физических характеристик ядерно-энергетических установок и в астрофизических расчетах.

Основные направления исследований для подобных установок:

- ◆ для развития ядерных технологий:
  - ◇ исследования сечений взаимодействий ядер с нейтронами для потребностей развития ядерной энергетики;
  - ◇ исследования ядерной структуры (плотность уровней, энергия связи, делимость и т.п.);
  - ◇ исследования по трансмутации ОЯТ;
  - ◇ исследование процессов «отравления» ядерных реакторов средними ядрами;
- ◆ фундаментальные исследования:
  - ◇ измерение сечений для ядерной астрофизики.

### **ADS (Accelerator Driven System) – управляемый ускорителем подкритический реактор**

Пучок протонов, падая на мишень из тяжелого материала, генерирует поток вторичных нейтронов, которые запускают процессы деления в ядерном топливе, окружающем мишень. Такой подкритический реактор будет потреблять нарабатываемый им плутоний а также перерабатывать ОЯТ. Классическая схема ADS – свинцовая мишень и урановое топливо. Возможны другие подходы – например, использование тория.

На выведенном пучке У-3,5 или на пучке ЛУ-400 можно создать прототип ADS для проведения исследований в этой области энергетики и отработки технологических решений для проекта рентабельной «промышленной» ADS.

### **Мюоны**

Интенсивный пучок мюонов может быть использован для исследовательских работ по мюонному катализу. Протонный пучок производит на мишени отрицательно заряженные  $\pi^-$ , распадающиеся на  $\mu^-$  и антинейтрино  $\bar{\nu}_\mu$ . Мюоны направляются в синтезатор, наполненный смесью дейтерия и трития, где происходит образование мезоатомов и мезомолекул с последующим слиянием ядер. Освобождающийся при этом мюон может вновь катализировать последовательность реакций до тех пор, пока не распадется или не захватится. В принципе, такой процесс может представлять интерес для энергетики.

Исследования мюонного катализа также дают информацию для решения фундаментальных физических задач. В их числе:

- ◆ Исследования структуры легких ядер.
- ◆ Мезомолекулярные процессы.
- ◆ Физика атомных столкновений.

ing with highly active materials. Neutron energy resolution is determined by the channel length and duration of proton pulse on target. Neutron flux intensity is determined by beam parameters, target design and channel length.

Nuclear data from these experiments can be used for nuclear power facilities and for astrophysics.

The main tasks for such facilities:

- ◆ for development of nuclear technologies:
  - ◇ study of cross-sections of reactions for nuclear power industry development;
  - ◇ study of nuclear structure (level density, binding energy, fissility and others);
  - ◇ SNF (Spent Nuclear Fuel) transmutation researches;
  - ◇ study of nuclear reactor "poisoning" by medium nuclei;
- ◆ fundamental studies:
  - ◇ study of cross-sections of reactions for nuclear astrophysics.

### **Accelerator Driven System (ADS)**

Proton beam falling on target made of heavy material generates flux of the secondary neutrons, which "triggers" the process of fission in nuclear fuel surrounding the target. Such subcritical reactor would consume produced plutonium and will transmute Spent Nuclear Fuel – both its own and others. Classic scheme of ADS is lead target and uranium fuel. The other approaches are under investigation – for example, usage of thorium.

The extracted beams of U-3.5 or LU-400 can be used for the prototype of ADS aimed for researches in power engineering and for prototyping technological solutions for would be commercial ADS.

### **Muons**

Intensive muon beam can be used for researches on muonic catalysis. Negatively charged pions produced by proton beam decay to  $\mu^-$  and antineutrino  $\bar{\nu}_\mu$ . Muons pass to synthesizer filled with mixture of deuterium and tritium, where mesoatoms and mesomolecules are produced with further nuclear fusion. Muon released during this process can again catalyze the sequence of reactions up to the moment, when it will be decayed or captured. In principal, such process could be interesting for nuclear power development.

Study of muon catalysis also gives the information for fundamental physics including:

- ◆ Light nuclei structure.
- ◆ Mesomolecular processes.
- ◆ Physics of atomic collisions.

Другая возможность использования мюонов на У-3,5 –  $\mu$ SR (Muon Spin Rotation/Relaxation/Resonance) – исследования вещества с использованием мюона в качестве зонда. Положительные мюоны могут выступать как примесная частица, моделирующая поведение однозарядных примесей (например, протона). Образующийся в веществе экзотический атом мюония ( $\mu^+e^-$ ), аналогичный атому водорода, используется в изучении быстрых химических процессов. Отрицательно заряженные мюоны, останавливаясь в веществе, образуют мюонные атомы, которые могут использоваться для исследования кристаллической решетки.

Обычно используют два вида мюонных пучков:

- ◆ Часть пионов с мезонообразующей мишени отбирается в мюонный канал, где и распадаются «на лету». В результате получаются пучки мюонов с импульсом 100–200 МэВ/с и степенью поляризации 0.6–0.9, которые могут быть использованы для исследования достаточно протяженных образцов (30–50 г/см<sup>2</sup>).
- ◆ Второй тип пучков – так называемые «поверхностные мюоны», образующиеся от распада пионов, поглотившихся внутри мишени. Такие мюоны имеют импульс около 30 МэВ/с (энергия 4 МэВ) и практически 100% поляризацию, пробег в веществе около 0.15 г/см<sup>2</sup>.

В ускорительном комплексе высокоинтенсивных адронных пучков при использовании малой доли (<1%) интенсивности протонного пучка У-3,5 можно получить высококачественные мюонные пучки низких энергий с интенсивностью свыше 10<sup>6</sup>  $\mu$ /с, заведомо удовлетворяющей потребностям экспериментов  $\mu$ SR.

### Изотопы

Радиоактивные изотопы широко используются в диагностической и терапевтической ядерной медицине, промышленности и исследовательских проектах. На новом инжекционном комплексе возможна организация производства изотопов как на линейном ускорителе, так и на У-3,5.

Традиционно в мире нарабатываются и применяются главным образом следующие изотопы: I<sup>123</sup>, F<sup>18</sup>, C<sup>11</sup>, N<sup>13</sup>, O<sup>15</sup>, Rb<sup>81, 82</sup>, Ga<sup>67</sup>, Ta<sup>201</sup>, Re<sup>188</sup>, Sr<sup>82</sup>, Sn<sup>117m</sup>, Se<sup>72</sup>, Ac<sup>225</sup>. Вместе с тем, расширение доступного изотопного спектра может существенно повлиять на развитие этого перспективного направления ядерных технологий.

Энергия ЛУ (100–400 МэВ) позволяет производить «традиционные», широко используемые радиоактивные изотопы. Сравнительно высокая энергия протонов У-3,5 даёт дополнительную возможность производить нейтронно-дефицитные изотопы, как-то: Ag<sup>110</sup>, At<sup>204, 210</sup>, Cu<sup>61</sup>, Er<sup>165</sup>, I<sup>124</sup>, In<sup>111, 114m</sup>, Ir<sup>192</sup>, Mo<sup>99</sup>, Re<sup>186</sup>, Rh<sup>103</sup>, Tc<sup>99</sup>, Tm<sup>170</sup>, Yb<sup>169</sup>.

Таким образом, проектируемый ускорительный комплекс мог бы одновременно являться фабрикой изотопной продукции.

В предлагаемой схеме комплекса система линейных ускорителей имеет запас интенсивности. Поэтому наработка изотопов с помощью линейных

One more direction in muon physics is  $\mu$ SR (Muon Spin Rotation/Relaxation/Resonance), the study of substances with muons used as a probe. Positive muons can be considered as impurity particle modeling the behavior of single-charge impurities (for example, proton). Exotic atom of muonium ( $\mu^+e^-$ ) formed in a substance is similar to hydrogen atom and can be used in study of fast chemical processes. Negatively charged muons stopped in a substance form muon atoms, which can be used for crystal lattice studies.

There are two types of muon beams in use:

- ◆ Part of pions from meson-forming target is directed to muon channel, where pions decay "in fly". As a result, muon beams with momentum of 100–200 MeV/c and polarization level 0.6–0.9 can be obtained. These beams can be used for the study of sufficiently thick samples (30–50 g/cm<sup>2</sup>).
- ◆ Another type of beams, so-called "surface muons", can be produced with decay of pions absorbed inside the target. Such muons have the momentum about 30 MeV/c (energy 4 MeV) and polarization of nearly 100%, their path in a substance is about 0.15 g/cm<sup>2</sup>.

At the OMEGA facility by using the small fraction (<1%) of U-3.5 proton beam it is possible to form high quality muon beams with low energies and intensity above 10<sup>6</sup>  $\mu$ /s. This intensity satisfies the requirements of  $\mu$ SR experiments.

### Isotopes

Radioactive isotopes are widely used in diagnostic and therapeutic nuclear medicine, industry and research projects. The production of isotopes can be organized both at linear accelerator and at U-3.5.

The following isotopes are widely produced and applied: I<sup>123</sup>, F<sup>18</sup>, C<sup>11</sup>, N<sup>13</sup>, O<sup>15</sup>, Rb<sup>81, 82</sup>, Ga<sup>67</sup>, Ta<sup>201</sup>, Re<sup>188</sup>, Sr<sup>82</sup>, Sn<sup>117m</sup>, Se<sup>72</sup>, Ac<sup>225</sup>. The widening of available spectrum of isotopes could significantly affect the development of this perspective area of nuclear technologies.

Energy of LU (100–400 MeV) allows production of "traditional", widely used radioactive isotopes. Comparatively high energy of U-3.5 protons gives additional possibility to produce neutron-deficit isotopes such as: Ag<sup>110</sup>, At<sup>204, 210</sup>, Cu<sup>61</sup>, Er<sup>165</sup>, I<sup>124</sup>, In<sup>111, 114m</sup>, Ir<sup>192</sup>, Mo<sup>99</sup>, Re<sup>186</sup>, Rh<sup>103</sup>, Tc<sup>99</sup>, Tm<sup>170</sup>, Yb<sup>169</sup>.

Thus, projected accelerator complex could be at the same time the factory of isotope products.

In proposed scheme the system of linacs has a reserve in intensity. That is why isotope production on linac system can be made without intensity losses at the U-3.5.



ускорителей может осуществляться без потери интенсивности в У-3,5. Этот ускоритель как производитель изотопов аналогов в России не имеет.

Для эффективной переработки облученных образцов надо разделять изотопы либо там, где они производятся, либо где-то недалеко. Одним из возможных решений может быть сотрудничество с ГНЦ ФЭИ (Физико-энергетический институт), расположенным в 50 км от ИФВЭ.

Производство короткоживущих изотопов эффективно вблизи медицинского центра, использующего ядерные методы диагностики и терапии. Таким центром может быть Медицинский радиологический научный центр – МРНЦ (г. Обнинск).

### **Исследование динамических процессов при помощи доплеровской спектроскопии**

Высокоинтенсивный протонный пучок создает уникальные возможности для исследований быстропротекающих процессов методами доплеровской спектроскопии медленных нейтронов. В этом методе импульсный протонный пучок используется для создания высокоинтенсивного потока нейтронов с энергиями масштаба десятков эВ. При прохождении через исследуемый образец нейтроны рассеиваются (поглощаются) на специально введенных в образец ядрах с узкими линиями поглощения при энергиях в диапазоне 10–50 эВ. Положение и ширина линии поглощения определяется по спектру нейтронов, измеряемому по времени пролета. При движении исследуемого образца относительно источника линия смещается, а при разогреве образца – уширяется. Этим методом можно получать данные об уравнениях состояния различных веществ при очень высоких температурах и давлениях, реализуемых в быстрых динамических процессах.

### **3.3. Исследования фундаментальных процессов**

#### **Ультрахолодные нейтроны**

Высокоинтенсивный протонный пучок может оказаться весьма эффективным для создания источника ультрахолодных нейтронов ( $E < 10^{-7}$  эВ). Такие нейтроны особенно эффективно образуются при замедлении холодных нейтронов в переохлажденном ( $t \sim 1\text{K}$ ) гелии или в твердом дейтерии.

Существует ряд источников ультрахолодных нейтронов (УХН), построенных на выведенных из реактора нейтронных пучках. На таких источниках удается получить плотность ультрахолодных нейтронов вплоть до  $10^3$  н/см<sup>3</sup>. Создание источника УХН вблизи активной зоны реактора, где поток нейтронов особенно велик, наталкивается на две проблемы:

- ◆ как правило, в реакторах нет места для размещения больших криогенных устройств;
- ◆ тепловая нагрузка на криогенную систему препятствует ее размещению вблизи активной зоны.

Есть только один проект (реактор ВВР-М в ПИЯФ), где планируется преодолеть эти препятствия.

As an isotope producer, this accelerator does not have analogues in Russia. For effective processing of irradiated samples it is necessary to separate isotopes either on producer site or not far away from it. One of possible solutions could be the collaboration with the State Research Center PEI (Physics Energy Institute, Obninsk) situated in 50 km from IHEP.

Production of short-living isotopes is effective near the hospital, which uses nuclear methods of diagnostic and therapy. Natural option for this is Medical Radiological Research Center – MRRC (Obninsk). The need of these products on market deserves further investigation.

### **Study of dynamic processes with Doppler spectroscopy**

High intensity booster beam opens the unique possibilities for study rapid dynamic processes by means of Doppler spectroscopy of slow neutrons. In this method the pulsed proton beam is used for production of high intensity neutron flux with energies of tens of eV. Passing through investigated sample neutrons are scattered (absorbed) on admixture nuclei. These nuclei are specially included in the sample material. Admixture element has narrow absorption lines at energies in a range of 10–50 eV. Position and width of absorption line are determined by neutron spectra measured with the TOF method. The motion of sample relatively to the source leads to Doppler shift, and the sample heating leads to the line broadening. With this method the data on state equations for various substances at very high temperatures and pressures realized in rapid dynamic processes can be obtained.

### **3.3. Studies of Fundamental Processes**

#### **Ultracold neutrons**

High intensity proton beam can be very effective for making the ultracold neutron source ( $E < 10^{-7}$  eV). Such neutrons are formed effectively while slowing down the cold neutrons in supercooled ( $t \sim 1\text{K}$ ) helium or in solid deuterium.

There are several sources of ultracold neutrons built on neutron beams extracted from reactor. The density of ultracold neutrons up to  $10^3$  n/cm<sup>3</sup> can be obtained with these sources. The construction of ultracold neutron source near active zone of reactor, in regions with highest neutron flux, is faced with two problems:

- ◆ as a rule, in reactors there is no enough space to arrange large cryogenic tools;
- ◆ the heat load on cryogenic system prevents from placing it near active zone.

There is only one project (reactor WWR-M at PNPI), where these obstacles are planned to be overcome.

В нейтронном источнике на основе высокоинтенсивного протонного пучка эти проблемы значительно смягчаются, поскольку в мишенной станции, где генерируются нейтроны, намного больше свободы для размещения криогенных устройств и, вдобавок, на единицу мощности производится впятеро больше нейтронов, чем в реакторе. Такой подход к созданию источника ультрахолодных нейтронов реализован в Лос-Аламосе (LANSCE) и Цюрихе (PSI), проектируется в Канаде (TRIUMF).

Высокоинтенсивный источник ультрахолодных нейтронов с плотностью  $\sim 10^4$  н/см<sup>3</sup>, который может быть реализован с использованием предлагаемого комплекса, позволит проводить исследования по широкому спектру задач физики фундаментальных взаимодействий:

- ◆ поиск электрического дипольного момента (ЭДМ) нейтрона;
- ◆ измерение времени жизни нейтрона;
- ◆ измерение асимметрии  $\beta$ -распада нейтрона;
- ◆ изучение макроскопических квантовых эффектов нейтрона;
- ◆ поиск нейтрон–антинейтрон осцилляций;
- ◆ поиск осцилляций нейтрон–зеркальный нейтрон.

Для создания такого источника будет необходима отдельная мишенная станция с мощностью пучка  $>100$  кВт.

### Высокоинтенсивный пучок мюонов

В этом разделе кратко рассмотрены эксперименты с мюонами по поискам эффектов за пределами стандартной модели. Особенность этих экспериментов состоит в том, что они не могут быть выполнены на универсальных установках и требуют специальных, порой очень сложных и дорогих установок. Такие эксперименты могут стать заметной частью научной программы ОМЕГА-проекта.

### Распады мюонов

Высокоинтенсивный протонный пучок средних энергий позволяет создать высококачественные мюонные пучки для исследования распадов мюонов ( $\mu \rightarrow e\gamma$ ,  $\mu \rightarrow eee$ ,  $\mu \rightarrow e\nu\bar{\nu}$ ) и  $\mu^- \rightarrow e^-$  конверсии, а также для измерения статических характеристик – аномального магнитного момента мюона ( $g-2$ ), фермиевской константы и поиска электрического дипольного момента мюона.

Для экспериментов по распадам и конверсии прежде всего необходимо сформировать высокоинтенсивный пучок мюонов низких энергий, которые должны останавливаться в мишени и распадаться ( $\mu^+$ ), либо образовывать связанное состояние с ядром для поиска возможной  $\mu^- \rightarrow e^-$  конверсии. Для оптимального использования интенсивности и минимизации фона этот пучок должен иметь специфическую временную структуру – короткие банчи через  $\sim 1,5$  мксек. Такая мишенная станция предложена в ИЯИ свыше 20 лет назад, но пока не реализована. В настоящее время в ряде лабораторий предлагаются, планируются и готовятся эксперименты, претендующие на существенное, более чем на три порядка, повышение чувствительности. Для

At the spallation neutron source based on high intensity proton beam all these problems are reduced, because at the target station, where neutrons are generated, there is more space to arrange the cryogenic tools and, in addition, five times more neutrons are produced at spallation source than in the nuclear reactor with the same power. This approach to ultracold neutron source is realized at Los-Alamos (LANSCE), Zurich (PSI) and is projected in Canada (TRIUMF).

High intensity source of ultracold neutrons with density around  $\sim 10^4$  n/cm<sup>3</sup>, which can be realized at the OMEGA facility, can be used for experiments in various directions of fundamental science:

- ◆ search of electrical dipole moment (EDM) of neutron;
- ◆ measurement of neutron lifetime;
- ◆ measurement of  $\beta$ -decay asymmetry of neutron;
- ◆ study of macroscopic quantum effects for neutron;
- ◆ search for neutron-antineutron oscillations;
- ◆ search for neutron-mirror neutron oscillations.

The dedicated target station with beam power  $>100$  kW is necessary for this source.

### High intensity muon beam

This section briefly describes muon experiments on searches the effects beyond the Standard Model. These experiments cannot be performed on universal setups and require special, often very complicated and expensive, facilities – that is the peculiarity of such experiments. Muon experiments could become the important part of research program at OMEGA facility.

### Muon decay

High intensity proton beam of medium energies is especially effective for production the high quality muon beams to study muon decays ( $\mu \rightarrow e\gamma$ ,  $\mu \rightarrow eee$ ,  $\mu \rightarrow e\nu\bar{\nu}$ ) and  $\mu^- \rightarrow e^-$  conversions and also to measure static characteristics: anomalous magnetic moment ( $g-2$ ), Fermi constant and search for electrical dipole moment of muon.

For experiments on muon decays and conversion one has first of all to form high intensity beam of muons with low energies, which should be stopped in the target and decay ( $\mu^+$ ) or captured by nucleus to search for a possible  $\mu^- \rightarrow e^-$  conversion. This type of target station was proposed at INR more than 20 years ago, but was not yet realized. At present several laboratories propose, plan and prepare experiments based on this approach. To use optimally the intensity and to minimize the background this beam should have specific time structure: short bunches approximately each  $1.5 \mu\text{s}$ . This time structure can be realized at OMEGA facility.

оптимального использования интенсивности и снижения фона пучок должен иметь специфическую временную структуру: короткие банчи через каждые ~1,5 мксек. Такая временная структура может быть реализована в комплексе ОМЕГА.

#### Статические характеристики мюонов

В связи с повышением точности прецизионных измерений параметров стандартной модели возникает потребность в более точном измерении одного из фундаментальных параметров – фермиевской константы. Такие измерения проводятся на мюонных пучках PSI.

Одной из актуальных задач является повышение точности в измерении аномального магнитного момента мюона ( $g-2$ ). В настоящее время наблюдается рассогласование  $\sim 3\sigma$  между измеренным и вычисляемым в стандартной модели значением  $g-2$ . В ряде лабораторий рассматриваются новые эксперименты по измерению  $g-2$  традиционными методами, использованными в БНЛ, но с существенно более высокой статистической точностью и несколько улучшенной систематической ошибкой. Кроме того, обсуждаются новые методы измерения  $g-2$ , где одно и то же кольцо используется для накопления мюонов и протонов (калибруется протонами), что позволяет исключить значительную часть систематической ошибки.

Проблемы с описанием в стандартной модели аномального магнитного момента мюона заставляют более внимательно отнестись к поискам возможного электрического дипольного момента (EDM). В J-PARC предложен оригинальный метод радиального электрического поля для подавления прецессии за счет аномального магнитного момента, позволяющий повысить точность измерения EDM вплоть до  $10^{-24}$  е·см.

#### Использование У-70 в качестве накопителя-растяжителя пучка, инжектируемого из У-3,5

В ряде случаев временная структура пучка У-3,5 далека от оптимальной для проведения тех или иных экспериментов. Этот недостаток преодолевается благодаря использованию ускорителя У-70 в режиме накопителя-растяжителя. В этом режиме ускоритель У-70 все время стоит на энергии инжекции  $E=3,5$  ГэВ. Инжектированный в У-70 пучок (3 или меньше цикла У-3,5 – 0,12 сек) выводится из У-70 медленным выводом за время масштаба 1 сек. В таком режиме временную структуру пучка можно оптимизировать для проведения конкретных экспериментов, например, организовать сгустки через ~1,5 мксек, что крайне важно при исследовании распадов мюонов.

Вывод пучка из У-70 в этом режиме можно организовать из 22-го прямолинейного промежутка в южную зону большого экспериментального зала.

Высокоинтенсивный протонный пучок с энергией 3,5 ГэВ, интенсивностью свыше  $10^{14}$  р/сек и широким спектром возможностей варьирования временной структуры может быть использован также в различных экспериментах с пионами и каонами.

#### Static characteristics of muons

Steadily improvement of accuracy in precision measurements of Standard Model parameters requires more precise measurement one of the fundamental parameters – Fermi constant. Such measurements are in progress at PSI.

One of the present-day tasks is the accuracy increase in the measurement of anomalous magnetic moment of muon ( $g-2$ ). At present time one can observe the tension of  $\sim 3\sigma$  between measured value  $g-2$  and that calculated in Standard Model. New experiments for measuring the  $g-2$  with known methods used by BNL, but with considerably higher statistics and improved systematic error, are proposed. Moreover, new methods of  $g-2$  measurement are discussed. These new methods use one and the same ring for storage of muons and protons (the ring is calibrated by protons). That opens the way for reduction significant part of systematic error.

Problems with anomalous magnetic moment of muon in Standard Model require for more carefully looking on possible electrical dipole moment (EDM). Significant improvement in precision of EDM measurement can be reached with new method suggested at J-PARC. With the ring based on radial electrical field one can suppress the unwanted spin precession caused by anomalous magnetic moment. That gives a chance for increase the precision of EDM measurements up to  $10^{-24}$  e·cm.

#### Using U-70 for beam storage and stretching

In a number of cases the time structure of the U-3.5 beam is far from optimal for some experiments. At the OMEGA Project this defect will be overcome due to operation of the U-70 in a mode of beam storage-stretching. In this mode the U-70 accelerator is working all the time at the injection energy 3.5 GeV. The beam injected into the U-70 (3 or less cycles of U-3.5 – 0.12 s) is extracted from U-70 by slow extraction in about 1 s. In such a mode the time structure of the beam can be optimized for specific experiments. For example, it is possible to organize short bunches every ~1.5  $\mu$ s, that is extremely important while studying the muon decays.

Beam extraction from the U-70 in this mode can be organized at straight section #22 in the direction of south area of experimental hall.

High intensity proton beam with energy of 3.5 GeV, high intensity  $>10^{14}$  pps and variety of possibilities in the time structure can be used also in various experiments with pions and kaons.

## 4. Работы с пучками У-70

## 4. The U-70 Intense Beams

### 4.1. Основные направления работ

В результате реализации проекта ускоритель У-70 будет обладать широким набором возможностей:

- ◆ протоны с энергией до 70 ГэВ и интенсивностью  $\sim 10^{14}$  р/цикл;
- ◆ легкие ядра с энергией до 32 ГэВ/нуклон и интенсивностью в диапазоне  $10^9$ — $3 \cdot 10^{10}$  А/цикл;
- ◆ ионы углерода  $^{12}\text{C}$  с энергией до 420 МэВ на нуклон с пучком, оптимизированным для использования в ионной терапии;
- ◆ высокоинтенсивный ( $>10^{14}$  р/сек) пучок протонов с энергией 3,5 ГэВ.

Такой набор пучков позволяет проводить широкий комплекс фундаментальных исследований и прикладных работ.

В области фундаментальной физики открываются хорошие перспективы по ряду направлений исследований:

- ◆ физика заряженных и нейтральных каонов;
- ◆ спектроскопия адронов;
- ◆ спиновая физика;
- ◆ физика гиперонов;
- ◆ адрон-ядерные и ядро-ядерные взаимодействия;
- ◆ мюонная физика;
- ◆ нейтринная физика;
- ◆ физика легких и средних нестабильных ядер.

В последующих разделах этой главы рассмотрены основные направления исследований на ускорителе У-70 с повышенной интенсивностью. Основное внимание уделено первоочередным экспериментам, где уже на первых этапах их реализации можно получить приоритетные научные результаты.

### 4.2. Физика заряженных и нейтральных каонов

Интерес к физике каонов увеличивается в последние годы. Это связано с тем, что каоны являются уникальными объектами для поиска новых частиц и новых взаимодействий. При этом новые частицы могут проявляться как в реальном виде среди продуктов распада каонов, так и в виртуальном, через влияние на кинематические характеристики продуктов распада. Исследование распадов заряженных каонов дает уникальную информацию о фундаментальных законах природы, таких как нарушение CP и T симметрии.

В ГНЦ ИФВЭ, ИЯИ РАН и ОИЯИ накоплен большой материал по распадам заряженных каонов.

### 4.1. Research Directions

Within this project the U-70 accelerator will be developed to multipurpose machine with a variety of beams:

- ◆ protons with energy up to 70 GeV and intensity up to  $\sim 10^{14}$  p/cycle;
- ◆ light nuclei with energy up to 32 GeV/nucleon and intensity in a range of  $10^9$ — $3 \cdot 10^{10}$  A/cycle;
- ◆ carbon ions  $^{12}\text{C}$  with energy up to 420 MeV per nucleon with the beam optimized for ion therapy needs;
- ◆ high intensity ( $>10^{14}$  pps) beam of protons with energy of 3.5 GeV.

Such a beam set opens new possibilities for fundamental researches and applied works in a number of directions:

- ◆ physics of charged and neutral kaons;
- ◆ hadron spectroscopy;
- ◆ spin physics;
- ◆ hyperon physics;
- ◆ hadron-nucleus and nucleus-nucleus interactions;
- ◆ muon physics;
- ◆ neutrino physics;
- ◆ physics of light and medium unstable nuclei.

In subsequent sections of this chapter the principal issues of researches at the U-70 accelerator with increased intensity are described. Primary attention is paid to first and foremost experiments where the high priority results can be obtained at the initial stages of the project.

### 4.2. Physics of Charged and Neutral Kaons

Interest to the physics of kaons increases during last few years. It is connected to the fact, that kaons are unique objects for searching new particles and new interactions. New particles can appear both in real forms among the products of kaon decay and in virtual forms through the influence on kinematic characteristics of decay products. Study of charged kaons decays gives unique information concerning fundamental laws of nature, such as CP and T symmetry violation.

IHEP, INR-RAS and JINR have accumulated at U-70 a lot of data concerning charged kaon decays. Results





тенсивность медленного вывода можно использовать как для прямого увеличения интенсивности пучка  $K_L$ , так и для формирования пучка с малой примесью нейтронов. Для этого нейтральный пучок должен формироваться из вторичного пучка отрицательно заряженных частиц. Высокоинтенсивные пучки нейтральных каонов позволят продвинуться и в поисках других исключительно редких распадов, например  $K_L \rightarrow \mu e$ .

### Эксперименты с заряженными каонами

Эксперименты с заряженными каонами можно разбить, в свою очередь, на два направления: опыты с пучками с импульсом  $\sim 500$  МэВ/с и пучками высоких энергий с  $p > 10$  ГэВ/с.

#### ◆ Эксперименты с пучками низких энергий

Такие пучки создаются с помощью использования двух электростатических ЕХВ сепараторов. Лучший пучок такого типа использовался в эксперименте E949 в BNL. Он имел интенсивность  $\sim 5 \cdot 10^6 K^+$  при  $10^{13}$  выведенных протонов. На этом пучке было наблюде-но 7 распадов  $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ . В программе У-70 кроме продолжения исследования этого распада, очень интересно провести поиск поперечной поляризации мюона в распаде  $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu \pi^0$ . Такая поляризация указывает на нарушение Т-четности в этом распаде и чувствительна к физике вне СМ. Такой поиск проводился в КЕК, где было получено ограничение  $P_T < 4 \cdot 10^{-3}$ . Это ограничение может быть существенно, более чем на порядок, улучшено на модернизированном комплексе У-70. Медленные каоны представляют также большой интерес для экспериментов по спектроскопии барионов

#### ◆ Эксперименты с пучками высоких энергий

Эту программу исследований логично рассматривать, как продолжение и развитие экспериментов на установке «ОКА». Наиболее принципиальное и приоритетное направление здесь – это изучение редких и сверхредких распадов, таких как  $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ . Для наблюдения  $\sim 100$  событий этого распада надо иметь пучок каонов с интенсивностью  $\sim 10^7$ /сек. Для этого нужен медленный вывод с интенсивностью  $> 10^{14}$ /сброс У-70 и модернизированная система сверхпроводящих высокочастотных дефлекторов с СВЧ полями  $\sim 5$  Мв/метр. Кроме этой «сверхзадачи» для модернизированного эксперимента ОКА можно предложить исследование на большой статистике реакций с мишенями из вещества с большим Z, где взаимодействие идет с виртуальными фотонами:

- ◆  $K^+ Z \rightarrow K^+ \gamma Z$  – этот процесс позволит определить поляризуемость каона;
- ◆  $K^+ Z \rightarrow K^+ \pi^0 Z$ ,  $K^+ Z \rightarrow K_S \pi^+ Z$ , в этих процессах проявляются тонкие эффекты киральной теории возмущений.

beam intensity and to form the beam with small neutron background. In this case neutral beam should be formed from secondary beam of negatively-charged particles. Neutral kaon beams of high intensity will give the opportunity to make an advance in searching for other extremely rare decays, for example  $K_L \rightarrow \mu e$ .

### Experiments with charged kaons

Experiments with charged kaons can be divided on two parts: experiments with beams with pulse  $\sim 500$  MeV/s and high energy beams with  $p > 10$  GeV/s.

#### ◆ Experiments with low energy beams

Such beams are formed with the help of two electrostatic E×B separators. The best beam of such type was used in experiment E949 at BNL. It had the intensity  $\sim 5 \cdot 10^6 K^+$  at  $10^{13}$  extracted protons. In this beam 7 events of the decay  $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$  were observed. In U-70 program, besides the study of this decay, it would be interesting to carry out a search for transversal muon polarization in the decay  $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu \pi^0$ . Such a polarization points on T-parity violation in the decay and is sensitive to physics beyond Standard Model. The search at KEK gave the limit  $P_T < 4 \cdot 10^{-3}$ , which could be considerably, by one order of magnitude, improved at upgraded U-70 complex. Slow kaons are, as well, of great interest for experiments on baryon spectroscopy.

#### ◆ Experiments with high energy beams

This research program can be considered as a prolongation and development of experiments at OKA setup. The most principal and primary trend here is the study of rare and super rare decays, such as  $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ . To observe  $\sim 100$  events of this decay it is necessary to have kaon beam with intensity of  $\sim 10^7$ /sec. Slow extraction with intensity  $> 10^{14}$ /spill at U-70 and upgraded system of superconducting RF deflectors with RF field of  $\sim 5$  mV/m are required. Except this "super task" one can propose for modernized OKA experiment a large statistics study of reactions with targets made from substance with large Z, where the interaction with virtual photons is possible:

- ◆  $K^+ Z \rightarrow K^+ \gamma Z$  – this process allows to determine the kaon polarizability.
- ◆  $K^+ Z \rightarrow K^+ \pi^0 Z$ ,  $K^+ Z \rightarrow K_S \pi^+ Z$  – fine effects of chiral perturbation theory can show up in these processes.

### 4.3 Спектроскопия адронов

Спектроскопия легких адронов является одним из основных методов экспериментального исследования сильных взаимодействий в непертурбативной области. ГНЦ ИФВЭ имеет большие традиции исследований в этой области. Здесь прежде всего можно отметить исследования скалярных мезонов и состояний с высокими спинами на установке ГАМС, редких распадов на установках ГАМС и ЛЕПТОН, экзотических состояний на установке ВЕС. Значительная часть исследований по адронной спектроскопии на ускорителе У-70 выполнена в совместных экспериментах с отечественными и зарубежными институтами – ЦЕРН, ОИЯИ, ИТЭФ.

В экспериментальном плане спектроскопию легких мезонов удобно разделить на три больших направления:

- ◆ **Низкоэнергетическая область**, где могут быть использованы такие подходы, как эффективные лагранжианы и киральная теория возмущений. Здесь особенно важным является исследование различных процессов с участием легчайших скалярных мезонов, поскольку их свойства тесно связаны с конкретикой спонтанного нарушения киральной симметрии.
- ◆ **Высокие возбуждения резонансов**  
В настоящее время именно это направление в мезонной спектроскопии привлекает особое внимание. Получены экспериментальные указания на то, что для достаточно высоких возбуждений массы резонансов следуют простому закону, характерному для струнных моделей. Обсуждается возможное восстановление киральной симметрии для высоких возбуждений. В целом, при переходе от низших состояний к высоким возбуждениям можно ожидать существенного изменения свойств адронов, поскольку в первом случае их характеристики определяются главным образом спонтанным нарушением киральной симметрии, источником которого являются преимущественно инстантоны, а в последнем – свойства адронов определяются струной, в формировании которой определяющая роль принадлежит другим непертурбативным вакуумным флуктуациям.  
Удивительным образом, на сегодняшний день остаются неизвестными многие базовые характеристики высоковозбужденных состояний – массы, ширины, относительные вероятности распадов.
- ◆ **Экзотические состояния**  
Экзотическими состояниями принято называть объекты, выпадающие из простейшей кварковой ( $q\bar{q}$ ,  $qqq$ ) модели. Возможны различные экзотические состояния – глюболы ( $gg$ ), гибриды ( $(q\bar{q}g, qqgq)$ ), устроенные разными способами многокварковые состояния, мезон-мезонные, барион-мезонные или барион-антибарионные состояния и всевозможные

### 4.3 Hadron Spectroscopy

Spectroscopy of light hadrons is one of the main methods of experimental study of strong interactions in non-perturbative area. IHEP has long-standing traditions of researches in this field. First of all, one can mention the study of scalar mesons and high spin states at GAMS facility, study of rare decays at GAMS and LEPTON facilities, study of exotic states at VES facility. Sizeable part of research on hadron spectroscopy at U-70 is done in collaboration with domestic and international scientific centers (CERN, JINR, ITEP).

Spectroscopy of light mesons can be subdivided on three large experimental areas:

- ◆ **Low energy range**, where such approaches as effective Lagrangians and chiral perturbation theory can be used. In this case the most important task is the study of various processes with the lightest scalar mesons, because their properties are closely connected with the mechanism of spontaneous chiral symmetry breaking.
- ◆ **High excitations of resonances**  
At present time exactly this field in meson spectroscopy attracts the special attention. Experimental results confirm that for sufficiently high excitations the resonance masses follows simple laws, typical for string models. The restoration of chiral symmetry for high excitations is widely discussed. As a whole, at the transition from low states to the high excitations one can expect essential changes of hadron properties. That is because in the first case their characteristics are driven mostly by spontaneous chiral symmetry breaking, due to instantons, and in the second case the hadron properties are defined mainly by strings, which are formed by other non-perturbative vacuum fluctuations.  
It is astonishing, but at the present time many base characteristics of high excited states are unknown, including masses, widths, branching ratios etc.
- ◆ **Exotic states**  
Generally, the exotic states are the objects, which do not fit the simplest quark ( $q\bar{q}$ ,  $qqq$ ) model. Various exotic states are possible: glueballs ( $gg$ ), hybrids ( $(q\bar{q}g, qqgq)$ ), multi-quark states made in diverse ways, meson-meson, baryon-meson or baryon-antibaryon states and all possible combinations of above mentioned states. Some

смеси всего вышеперечисленного. Существует целый ряд наблюдений, свидетельствующих о существовании экзотических объектов.

### Спектроскопия барионов

С созданием высококачественного канала и «ско-рострельной» установки появляются новые возможности в спектроскопии барионов, где сложилась интересная экспериментальная ситуация. С одной стороны – в экспериментальных данных не видно большого количества состояний, предсказываемых в кварковых моделях, а с другой – периодически появляются указания на существование экзотических состояний.

Следует отметить, что подавляющее большинство результатов по барионным резонансам с нулевой странностью получено в пучках пионов и  $\gamma$ -квантов, в то время как о процессах образования барионных резонансов объектами, лежащими на других траекториях, известно немного. В экспериментах на U-70 можно существенно продвинуться в этом направлении используя для возбуждения барионов реакции в пионном или каонном пучке с образованием летящих вперед мезонов с теми или иными квантовыми числами.

### Требования к пучку

Энергия ускорителя U-70 исключительно удобна для исследований спектроскопии легких адронов по целому ряду причин:

- ◆ состояния с массами до 2,5–3 ГэВ образуются в разнообразных эксклюзивных реакциях с достаточно большими сечениями;
- ◆ фазовый объем реакций как правило достаточно велик для эффективного разделения различных процессов;
- ◆ продукты реакции как правило лежат в удобном кинематическом диапазоне, где можно с высокой точностью измерять характеристики частиц и идентифицировать их.

Канал с параметрами, оптимальными для экспериментов по спектроскопии, может быть создан в экспериментальном зале при сбросе на мишень медленно выведенного протонного пучка с интенсивностью  $\sim 2 \cdot 10^{13}$  протонов/цикл.

## 4.4. Спиновая физика

Изучение спиновых явлений представляет эффективный способ исследования структуры частиц и динамики их взаимодействий. Спиновые эффекты являются весьма чувствительными к детальной динамике взаимодействия частиц и позволяют провести эффективную проверку теоретических представлений. Использование методов теории возмущений в рамках квантовой хромодинамики испытывает серьезные трудности при описании экспериментальных результатов.

Спиновые эффекты являются важными также с точки зрения изучения структуры частиц, в частности, вопроса о связи спина частиц и спина составляющих и механизма взаимодействия составляющих

observations confirm the existence of exotic objects.

### Baryon spectroscopy

Creation of high quality dedicated channel and  $4\pi$  spectrometer with fast DAQ opens new opportunities for baryon spectroscopy, where experimental situation is far from being simple. On the one hand, an experimental data do not demonstrate a number of states predicted by quark models. On the other hand, some states looks like exotics.

One should mention that most of results on baryon resonances with zero strangeness are obtained in pion and  $\gamma$ -quanta beams, while the processes of baryon resonances production by other projectiles are not so well studied. At experiments with U-70 beams the full set of virtual meson projectiles is acceptable by using for baryon excitations the reactions in pion or kaon beam with production fast spectator mesons with various quantum numbers.

### Beam requirements

Energy of U-70 accelerator is exceptionally convenient for studying light hadrons spectroscopy by number of reasons:

- ◆ states with masses up to 2.5–3 GeV are produced in various exclusive reactions with sufficiently large cross-sections;
- ◆ as a rule, the phase space of reactions is sufficiently high for effective separation of different processes;
- ◆ most of the reaction products has convenient kinematical parameters, where particles can be identified and their characteristics can be measured with high accuracy.

Beam line with optimal parameters for experiments on spectroscopy can be constructed on the base of slow extracted protons with intensity of  $\sim 2 \cdot 10^{13}$  protons/cycle.

## 4.4. Spin Physics

Spin studies are the effective method to obtain knowledge on the particle structure and interaction dynamics. The spin effects are very sensitive to particular details of particle interactions and allows one to test effectively the theory. Besides that, the perturbative quantum chromodynamics predictions for the spin observables are in the serious disagreement with the existing experimental results.

Spin effects are important also for the particles structure studies, in particular, they are needed to establish a relation between the particle spin and spin of particle constituents. It is established that spin



ющих. Трудности, которые встретила квантовая хромодинамика при использовании теории возмущений, свидетельствуют о том, что спиновые эффекты могут быть связаны с непертурбативными явлениями, например, с явлением спонтанного нарушения киральной симметрии. Изучение спиновых явлений позволяет получать новые сведения о динамике взаимодействий частиц и проводить детальный анализ различных теоретических представлений и подходов.

Спиновые степени свободы также полезны при поиске и исследовании свойств кварк-глюонной плазмы.

Получение интенсивных пучков поляризованных протонов и антипротонов позволит решить принципиально новую задачу – исследование спиновых характеристик в реакциях образования частиц, содержащих очарованные кварки, что позволит изучать спиновую структуру протона благодаря измерению функций распределения продольно и поперечно поляризованных кварков с помощью измерения различных односпиновых и двухспиновых эффектов. Образование таких состояний в столкновениях нуклонов особенно интересно, так как конечные частицы с квантовыми числами  $J^{PC}=1^{-}, 1^{++}, 2^{++}$  несут информацию о плотности глюонов в нуклонах.

Также не менее важным направлением исследований является изучение поляризации в упругом рассеянии различных частиц. Их сравнительное изучение может прояснить роль составляющих кварков в адронных процессах с изменением спиральности.

Обсуждаемая здесь программа экспериментов существенно ориентирована на использование высокоинтенсивного пучка поляризованных протонов и пучка поляризованных антипротонов, которого больше нет нигде. Такие вторичные (третичные) пучки могут быть созданы на базе новой высокоинтенсивной мишени на выведенном из У-70 пучке протонов. При сбросе на мишень  $2 \cdot 10^{13}$  протонов за цикл интенсивность поляризованного протонного пучка будет достигать  $2 \cdot 10^7$  протонов. Поляризация протонов коррелирована с их координатой на вертикальном коллиматоре и в максимуме достигает 65%. Интенсивность поляризованных антипротонов будет  $\sim 3 \cdot 10^5$  за цикл. Канал должен предусматривать вращение вектора поляризации.

#### 4.5. Нейтринная физика

Значительное повышение интенсивности протонного пучка создает перспективы для развития нейтринных экспериментов. Эти эксперименты можно условно разбить на несколько больших групп:

- ◆ эксперименты со сверхдальними нейтрино по измерению параметров осцилляций ( $\Delta m_{ij}$ , углы смешивания и фаза) в диапазоне  $\Delta m^2 = 3 \cdot 10^{-3} - 5 \cdot 10^{-5}$  эВ<sup>2</sup>;
- ◆ эксперименты по поиску быстрых осцилляций на малой базе, например, поиск осцилляций  $\tilde{\nu}_\mu \rightarrow \tilde{\nu}_e$  с параметрами осцилляций в диапазоне  $\Delta m^2 = 0,1 - 1$  эВ<sup>2</sup>;

effects should be associated with the non-perturbative dynamics, for example, with phenomenon of spontaneous breaking of chiral symmetry. Thus, the studies of the spin phenomena allow one to obtain new information on dynamics of particle interactions and to perform detailed analysis of various theoretical ideas.

The spin degrees of freedom are also useful while searching and studying the quark-gluon plasma (QGP) properties.

The availability of the beams of polarized protons and antiprotons will allow to resolve a principally new problem – the study of spin characteristics in the reactions producing charmed particles. This study will allow to investigate the spin structure of proton by measuring the distribution functions of longitudinally and transversally polarized quarks with the help of various one-spin and two-spin effects. Formation of such states in collisions of nucleons is especially interesting, since the final particles with quantum numbers  $J^{PC}=1^{-}, 1^{++}, 2^{++}$  provide the information about gluon density in nucleons.

Also important direction is the study of polarization in elastic scattering of various particles. Their comparative study can clear up the role of constituent quarks in hadron processes where the helicities change.

The Experimental program is oriented mostly on using high intensity beam of polarized protons and beam of polarized antiprotons, which do not yet exist anywhere. Such secondary (tertiary) beams can be produced on the base of a new high intensity target in proton beam extracted from U-70. At  $2 \cdot 10^{13}$  protons per cycle spilled on target the intensity of polarized proton beam will be  $\sim 2 \cdot 10^7$  protons. Polarization of protons is correlated with their coordinate on vertical collimator and achieves in maximum 65%. Intensity of polarized antiprotons will be  $\sim 3 \cdot 10^5$  per cycle. The beamline is supposed to provide the rotation of polarization.

#### 4.5. Neutrino Physics

Significant rise of proton beam intensity at U-70 opens perspectives for new generation of neutrino experiments. These experiments can be conditionally divided on several big groups:

- ◆ long base line neutrino experiments on measurement oscillation parameters ( $\Delta m_{ij}$ , angles of mixture and phase) in the range  $\Delta m^2 = 3 \cdot 10^{-3} - 5 \cdot 10^{-5}$  eV<sup>2</sup>;
- ◆ experiments on search for fast oscillations, for example, the search for oscillations  $\tilde{\nu}_\mu \rightarrow \tilde{\nu}_e$  with oscillation parameters in the range  $\Delta m^2 = 0,1 - 1$  eV<sup>2</sup>;

- ◆ исследование влияния вещества на движение нейтрино;
- ◆ исследование глубоких слоев земли при помощи нейтрино;
- ◆ прецизионное изучение взаимодействий нейтрино низких и средних энергий;
- ◆ поиск новых нейтральных слабовзаимодействующих частиц.

Нейтринные эксперименты могут развиваться также на основе высокоинтенсивного пучка быстроциклирующего синхротрона У-3,5.

Конкретная программа исследований с нейтринными пучками должна формулироваться несколько позднее в зависимости от результатов проводимых в настоящее время экспериментов и с учетом возможностей планируемых экспериментов на других установках.

#### 4.6. Исследования с пучками легких ионов

В ускорителе У-70 возможно ускорение пучков дейтронов с интенсивностью до  $5 \cdot 10^{10}$  протонов за цикл и ионов углерода с интенсивностью до  $3 \cdot 10^9$  за цикл. В дальнейшем, с созданием соответствующих источников, можно будет ускорять и более тяжелые ядра, вплоть до железа.

В качестве первого шага в этом направлении в ускорительном комплексе ИФВЭ проведено ускорение дейтронов до энергии 24 ГэВ/нуклон.

Из множества возможных первоочередных задач остановимся на трех:

- ◆ изучение кумулятивных эффектов;
- ◆ изучение характеристик ядро-ядерных взаимодействий вблизи предполагаемой точки фазового перехода;
- ◆ изучение легких нестабильных ядер.

#### Кластерные структуры в ядрах

Энергия пучков ядер У-70 оптимальна для поиска и детального исследования кластерных структур в ядрах. Вызванные кластерами (флуктонами) эффекты особенно удобно изучать при энергиях У-70, поскольку при меньших энергиях они замазаны фермиевским движением нуклонов в ядрах, а при более высоких энергиях сечения подлежащих исследованию жестких процессов оказываются слишком малыми для детального изучения.

В экспериментах на У-70 хорошие возможности для исследования кумулятивных адронов под нулевым углом реализуются на канале №22, где есть мишень на медленно выведенном пучке и канал вторичных частиц, пригодный для детального анализа состава пучка в широком кинематическом диапазоне. Измерение спектров в кумулятивной области на различных мишенях и при различных энергиях под большими углами, а также измерения корреляций между кумулятивным адроном и вылетающими в противоположную сторону адронами возможно на установках ФОДС и СПИН.

#### Поиск и исследование фазового перехода

В центральных столкновениях тяжелых ядер при  $\sqrt{s_{NN}} \approx 7.5$  ГэВ наблюдается резкое изменение ряда

- ◆ study of matter effects on neutrino propagation;
- ◆ study of earth density with neutrinos;
- ◆ precision study of low and medium energy neutrino interactions ;
- ◆ search for new neutral weakly interacting particles.

Neutrino experiments can be developed also on the base of high intensity beam at the U-3.5.

Specific program of researches with neutrino beams should be formulated in some future. It depends on the results of experiments conducted at present time and also should take into account the planned experiments at other facilities.

#### 4.6. Research with the Light Ions

The acceleration of deuteron beams with intensity up to  $5 \cdot 10^{10}$  ppp and carbon ions with intensity up to  $3 \cdot 10^9$  per cycle is possible at U-70. Later on, after the construction of proper sources, it will be possible to accelerate even more heavy nuclei, tentatively up to iron.

As the first step in this direction the acceleration of deuterons in U-70 up to energy of 24 GeV/nucleon was attained in 2010.

Here we touch three of possible primary tasks:

- ◆ study of cumulative effects;
- ◆ study of nuclei-nuclei interactions near supposed point of phase transition;
- ◆ study of light unstable nuclei.

#### Cluster structures in nuclei

Energy of nuclear beams at U-70 is optimal for search and detailed study cluster structures in nuclei. It is especially convenient to study the effects produced by clusters (fluctons) at energies of U-70, because at lower energies these effects are smeared by Fermi motion of nucleons in nuclei and at higher energies the cross-sections of relevant hard processes are too small for detailed study.

The good opportunities for studying the cumulative hadrons at zero angle are realized in channel #22. In this channel there is a target on slow extracted proton beam and secondary particles channel, which can be used for detailed analysis of beam composition in wide kinematical range. Inclusive spectra at high transverse momentum in cumulative region at various targets and at various energies and also the correlations of cumulative hadrons with hadrons flying in opposite direction can be measured at existing facilities FODS and SPIN.

#### Search and study of phase transition

In central collisions of heavy nuclei at  $\sqrt{s_{NN}} \approx 7.5$  GeV a number of interaction parameters demonstrates sud-

основных характеристик взаимодействий:

- ◆ отношение выходов  $K^+$  и  $\pi^+$ ;
- ◆ температура  $K^+$ ;
- ◆ флуктуации кинематических характеристик;
- ◆ зависимость выходов  $\pi$  от энергии.

Причины таких изменений неизвестны. Распространено предположение о том, что наблюдаемые явления вызваны фазовым переходом.

Энергия ускоренных ядер в U-70  $\sqrt{s_{NN}} \approx 8$  ГэВ достаточна для изучения эффекта. Спектр исследований весьма широк – от детального изучения зависимости инклюзивных спектров от начальной энергии и атомного номера ядер пучка и мишени до исследования зависимости различных корреляций от тех же параметров. При планируемой интенсивности пучков в этих экспериментах можно будет проводить исследования с исключительно высокой светимостью, вплоть до  $L=10^{32}/\text{см}^2 \cdot \text{сек}$ , что делает их вполне содержательными в сравнении с экспериментами на коллайдерах.

### Исследование нестабильных легких ядер

На основе первичных пучков  $^{12}\text{C}$  с импульсом до 35 АГэВ/с могут быть получены вторичные пучки ядер с  $A < 12$ , включая радиоактивные ядра, за счёт фрагментации ядер  $^{12}\text{C}$  на различных мишенях из лёгких элементов, например, углероде, с последующей магнитной сепарацией фрагментов. Во вторичный канал могут быть выведены пучки радиоактивных ядер  $^{11}\text{C}$ ,  $^{10}\text{C}$ ,  $^{10}\text{Be}$ ,  $^9\text{Li}$ ,  $^8\text{B}$ ,  $^8\text{Li}$ ,  $^8\text{He}$ ,  $^6\text{He}$  и  $^7\text{Be}$  с интенсивностью от  $2 \cdot 10^7$  до  $\sim 10^4$  ионов/цикл. При высокой энергии продукты фрагментации ядра (фрагменты) продолжают лететь по направлению движения ядра практически с прежней скоростью. Вследствие такой кинематики обычный канал с  $\Delta p = \pm 3\%$   $\Delta \theta = 3$  mrad отбирает (сепарирует) нужные фрагменты с высокой эффективностью ( $\approx 50\%$ ) и низким фоном ( $< 10^{-3}$ ).

Ускорение ядер  $^{12}\text{C}$  на ускорителе U-70 открывает возможности для экспериментов по дифракции нейтронно-избыточных ядер на ядре и в кулоновском поле при рекордно высоких энергиях. Методической особенностью экспериментов на пучках ядер U-70 при импульсах 25–35 АГэВ/с является возможность калориметрической идентификации релятивистских нейтронов с высокой эффективностью.

При энергии пучков U-70 появляется новая уникальная возможность исследования характеристик нестабильных ядер при помощи упругого и неупругого рассеяния ядер на электронах мишени:  $e^- + A \rightarrow e^- + A'$ . При номинальной жесткости ускорителя U-70 ускоренное ядро движется с  $\gamma$ -фактором  $\gamma = E/2m_N = 35$ , так что в системе покоя ядра энергия налетающего электрона составляет  $E_e = \gamma \cdot m_e = 18$  МэВ. Эта энергия достаточна для возбуждения практически всех уровней исследуемых ядер и непрерывного спектра. Таких возможностей нет и не предвидится на других ускорителях (кроме, может быть, SPS).

den variations:

- ◆ Ratio of yields  $K^+$  and  $\pi^+$ .
- ◆ Temperature of  $K^+$ .
- ◆ Fluctuations of kinematic parameters.
- ◆ Energy dependence of the  $\pi$  yields.

The reason of such changes is an open issue. Quite often it is supposed, that observed phenomena are caused by phase transition in hot nuclear media.

Energy of accelerated nuclei at U-70  $\sqrt{s_{NN}} \approx 8$  GeV is sufficient for study these effects. Scope of experiments is quite extensive – from detailed study of the inclusive spectra dependence on energy and atomic number to search for various correlations in dependence on the same parameters. The beam intensity is sufficient for experiments with exceptionally high luminosity up to  $L=10^{32}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$ . That fact makes these researches complementary of experiments with colliders.

### Study of unstable light nuclei

Having primary beam  $^{12}\text{C}$  with momentum up to 35 AGeV/c it is possible to generate secondary nuclear beams with  $A < 12$  (including radioactive nuclei) by fragmentation  $^{12}\text{C}$  nuclei on various targets, for example, on carbon, with subsequent magnetic separation of fragments. The intensity of these beams of radioactive nuclei  $^{11}\text{C}$ ,  $^{10}\text{C}$ ,  $^{10}\text{Be}$ ,  $^9\text{Li}$ ,  $^8\text{B}$ ,  $^8\text{Li}$ ,  $^8\text{He}$ ,  $^6\text{He}$  and  $^7\text{Be}$  will be from  $2 \cdot 10^7$  to  $\sim 10^4$  ions/cycle. At high energy the products of nucleus fragmentation (fragments) continue to fly in the initial direction practically with the same momentum. Due to such kinematics the ordinary channel with  $\Delta p = \pm 3\%$   $\Delta \theta = 3$  mrad will separate wanted fragments with high efficiency ( $\approx 50\%$ ) and low background ( $< 10^{-3}$ ).

Acceleration of  $^{12}\text{C}$  nuclei at U-70 opens good opportunities for experiments on diffraction of neutron-rich nuclei on nucleus and in Coulomb field at record high energies. The advantage of experiments on nuclei beam of U-70 at momentum 25–35 AGeV/c is the possibility of calorimetric identification of high energy neutrons with high efficiency.

New unique opportunity for studying the unstable nuclei by elastic and inelastic scattering of high energy nuclei on target electrons appears at the U-70 beam energy:  $e^- + A \rightarrow e^- + A'$ . At nominal U-70 rigidity accelerated nucleus moves with  $\gamma$ -factor  $\gamma = E/2m_N = 35$ , so that in the nucleus CM system the energy of flying electron is  $E_e = \gamma \cdot m_e = 18$  MeV. This energy is sufficient for excitation of practically all nuclear levels as well as for disintegration to continuous spectrum. Such possibilities do not exist at other accelerators (except, perhaps, SPS).

## 5. Оценка сроков и стоимости сооружения

## 5. Construction Schedule and Cost Estimations

### План-график

В таблице 5.1 приведен ориентировочный план-график работ.

Выделенные голубым цветом позиции плана-графика (Таблица 5.1) не входят в состав проекта. Соответствующие задачи решаются в рамках текущих плановых работ ГНЦ ИФВЭ и приведены в таблице для полноты картины развития ускорительно-го комплекса У-70.

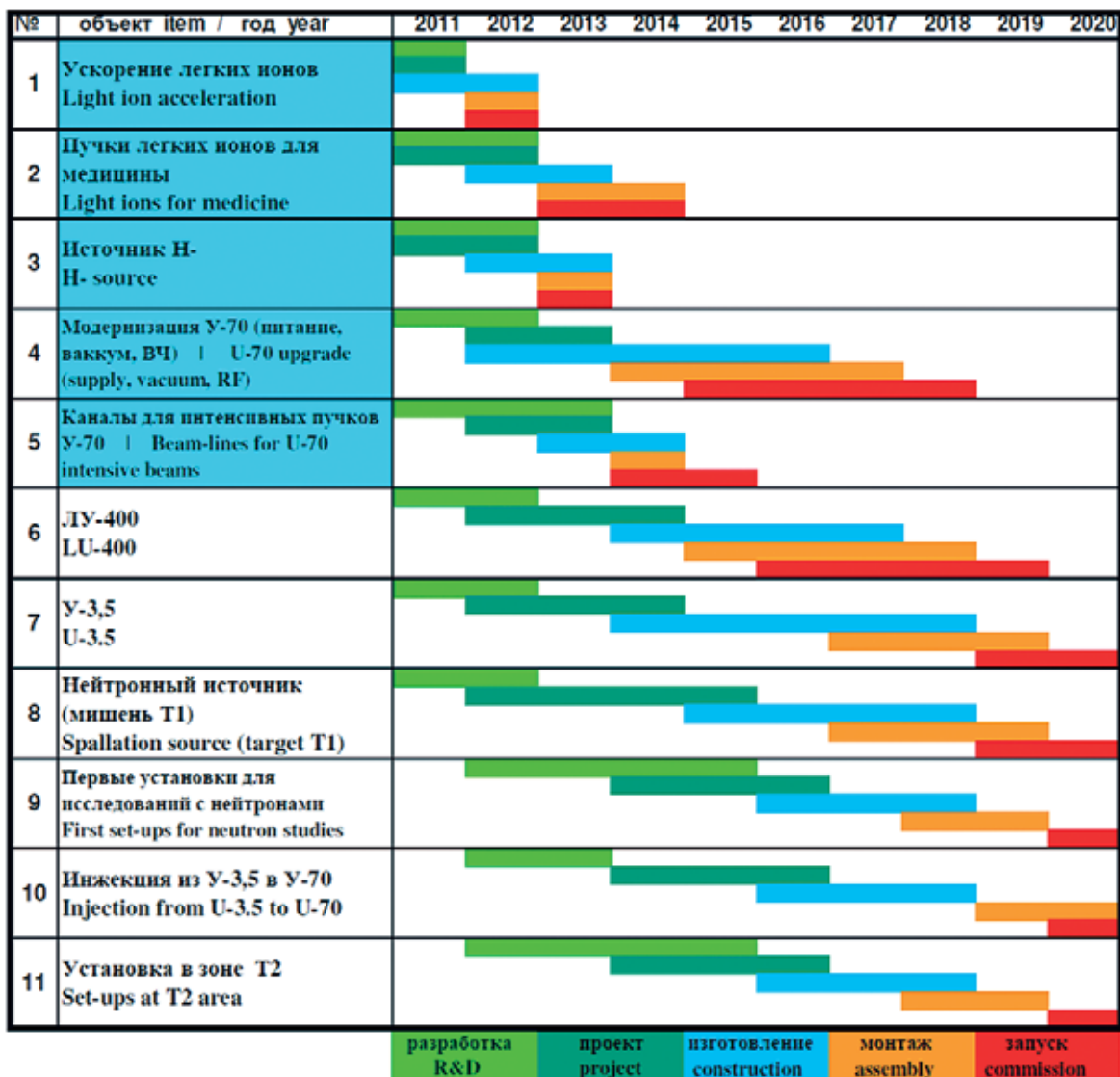
### Provisional construction schedule

Table 5.1 represents provisional schedule for the OMEGA project realization.

The items marked with blue color (Table 5.1) are not part of the project. These tasks are to be performed in the framework of the already planned programs. They are shown in Table 5.1 in order to represent the scope of the IHEP accelerator complex development.

Таблица 5.1.

Table 5.1.



В этом плане-графике можно выделить несколько ключевых позиций:

- ◆ 2012 год: ускорение в У-70 ионов дейтерия и углерода, первые эксперименты с пучками ускоренных ядер;
- ◆ 2013 год: начало работ с пучком H<sup>-</sup>;

There are several milestones in this overall schedule:

- ◆ 2012: acceleration of deuteron and carbon ions in the U-70; first experiments with the accelerated nuclei;
- ◆ 2013: start of the H<sup>-</sup> source operation;



- ◆ 2014 год: создание пучков углерода для радиационной терапии; создание зоны высокоинтенсивных пучков; выпуск проекта нового комплекса высокоинтенсивных ускорителей;
- ◆ 2015 год: завершение модернизации технологических систем У-70; завершение проектирования и утверждение проекта ОМЕГА;
- ◆ 2016 год: запуск головной части линейного ускорителя, начало работ с высокоинтенсивным пучком;
- ◆ 2018 год: запуск линейного ускорителя ЛУ-400;
- ◆ 2019 год: запуск ускорителя У-3,5;
- ◆ 2020 год: начало работ с мегаваттным нейтронным источником; инжекция высокоинтенсивного пучка в У-70.

- ◆ 2014: delivery of carbon beams for the radiation therapy; the high intensity beams zone construction; the design completion for the new complex of high intensity accelerators;
- ◆ 2015: improvement of the U-70 basic technological systems; completion of the Technical Design for The OMEGA Project and getting its approval;
- ◆ 2016: the start-up of the front-end part of linear accelerator; starting initial operation with high intensity beam;
- ◆ 2018: start-up of the linac LU-400;
- ◆ 2019: start-up of the RC PS U-3.5;
- ◆ 2020: starting the operation with megawatt spallation neutron source; injection of high intensity proton beam to the U-70 machine.

### Оценка стоимости

В таблице 5.2 приведены оценки капитальных затрат на создание ускорительного комплекса интенсивных адронных пучков.

Оценка стоимости основывается на литературных данных о стоимости сооруженных, проектируемых или предлагаемых зарубежных аналогов.

Расходы на НИОКР оцениваются в 4 млрд. руб.

На рис. 5.1 приведен профиль финансирования при планируемом сроке завершения проекта – 10 лет с момента начала финансирования НИОКР.

### Cost estimations

Table 5.2 provides the capital costs estimations for the Facility of Intense Hadron Beams.

These cost estimations are based in particular on the cost data for facilities already completed or the projects under design or the proposed ones. For this project the R&D expenses are estimated at the level of 4 billion Rubles in the current prices.

Fig. 5.1 represents the funding profile required for the project completion during the time period of 10 years from the start of the R&D program funding.

Таблица 5.2.

Table 5.2.

№	Объект	Стоимость, млн.руб. Cost, million rubles	Object
1	ЛУ-400	7 200	Linac LU-400
2	У-3,5	10 100	RC PS U-3.5
3	Нейтронный источник (мишень Т1)	8 400	Neutron source (target station T1)
4	Установки для исследований с нейтронами	1 500	Neutron research set-ups
5	Инжекция из У-3,5 в У-70	800	Injection from U-3.5 to U-70
6	Мишени станции Т2 и Т3	800	Target stations T2 and T3
7	Инженерная инфраструктура	700	Infrastructure
	Всего	29 500	Total

### Организация работ

Предлагаемый проект является естественным развитием работ, проводимых в ГНЦ ИФВЭ в последние годы в рамках различных программ:

- ◆ Линейные ускорители с ВЧК фокусировкой разрабатываются в ГНЦ ИФВЭ для собственных нужд, а также для других потребителей.
- ◆ Модернизация основных технологических систем ускорителя У-70 включена в ФЦП «Ядерные энерготехнологии нового поколения».
- ◆ Развитие работ по ускорению ядер проводится в рамках договоров с ГК «Росатом». В 2011 году планируется ускорение ионов углерода в У-70, а также вывод углеродного пучка из У-70

### The organizational matters

The proposed project appears to be a natural development and continuation of the already performed or ongoing tasks conducted at IHEP in the frameworks of various programs:

- ◆ Linear accelerators with RF-focusing are developed at IHEP for its own needs and also for some of applied (mainly medical) projects.
- ◆ Upgrade of the main technological systems of the U-70 accelerator is part of the Federal Target Program (FTP) "New Generation of The Nuclear Power Technologies".
- ◆ The development towards acceleration of the light nuclei with the ultimate energy of 34 GeV/nucleon in the U-70 machine is support-

на энергии инъекции для медицинских приложений.

- ◆ Выполняются работы по развитию возможностей протонной радиографии.
- ◆ Создание на базе ускорительного комплекса У-70 Центра ионной лучевой терапии в составе Центра высокотехнологичной ядерной медицины (г. Обнинск) одобрено комиссией по модернизации при Президенте РФ. Этот проект будет реализован ГНЦ ИФВЭ совместно с Медицинским радиологическим научным центром – МРНЦ (г. Обнинск, Калужская область) в рамках ФЦП по ядерной медицине.

ed by the Sate Corporation "Rosatom". It is planned to accelerate carbon ions in 2011. Carbon ions beam will be also extracted from the U-70 ring for the medical applications at the injection energy.

- ◆ The development of proton radiography technique is to be continued.
- ◆ The Center for Ion Beam Therapy on the base of the U-70 accelerator has been approved by The Commission for Modernization and Technological Development attached to the President of the Russian Federation. This task is to be performed by IHEP in close cooperation with The Medical Radiation and Science Center from the nearby town of Obninsk (Kaluga region) in the framework of FTP on nuclear medicine.

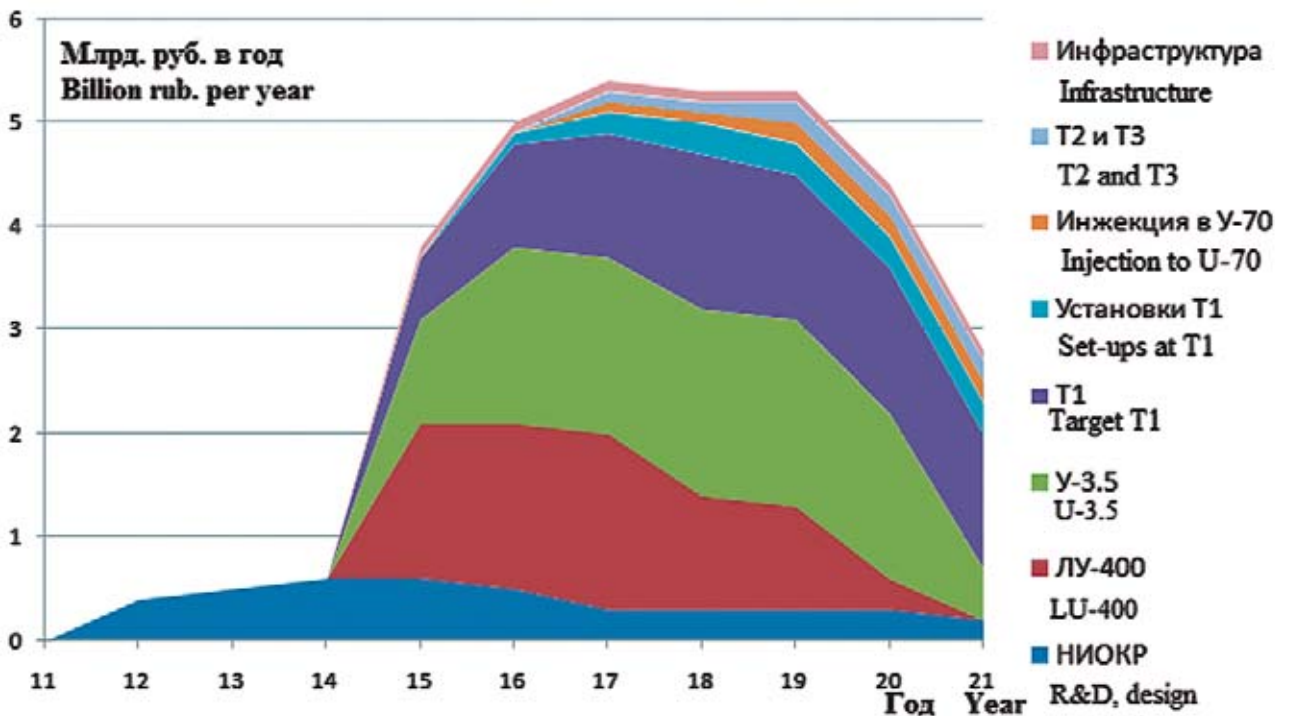


Рис. 5.1. Профиль финансирования.  
Fig. 5.1. Funding profile.

Необходимым условием реализации такого масштабного проекта является привлечение значительного количества высококвалифицированных специалистов. Эта важнейшая задача будет решаться по нескольким направлениям.

1. ГНЦ ИФВЭ имеет значительный опыт подготовки специалистов высокой квалификации. В течение ряда лет институт является базовым для кафедр МГУ, МФТИ и МИФИ, готовящих специалистов по физике высоких энергий, сотрудничает с филиалом университета «Дубна». Институт планирует значительно расширить объем подготовки специалистов.
2. Проект ОМЕГА предполагает широкое участие в его разработке и реализации организаций, обладающих соответствующими компетенциями. К числу этих организаций относятся не только российские ускорительные лаборатории, традиционно сотрудничающие в реали-

zation of such a large-scale project requires participation of a considerable number of highly skilled scientists and engineers. This is one of the most important prerequisites. It is to be solved in several ways:

1. IHEP has a large experience in teaching and training. During many years IHEP is the basic Science&Education Center for the chairs of MSU, MIPT and MEPHI specialized in high energy physics and accelerators. Also, IHEP closely cooperates with the Protvino branch of the Moscow Regional University "Dubna". It is planned to widen the program of specialists' training.
2. The OMEGA project assumes wide participation of the organizations having the required competences both for the R&D and construction phases. These organizations include not only the Russian accelerator laboratories traditionally cooperating in large accelerator projects, but

зации больших ускорительных проектов, но и научные и проектные организации, имеющие опыт в разработках ядерных энергетических установок. Это связано с тем, что разработка и создание мишеней для высокоинтенсивных пучков требует специфических знаний, которыми специалисты по ядерным реакторам обладают в наибольшей степени.

3. Поскольку одной из основных задач проекта является создание уникального импульсного нейтронного источника, важнейшим условием успешной реализации проекта является широкое участие в нем специалистов по нейтронным исследованиям.
4. С созданием импульсного нейтронного источника появятся уникальные возможности для проведения исследований специалистами различных направлений. В связи с этим должно получить развитие сотрудничество с различными организациями, занимающимися нанотехнологиями, а также с университетскими кафедрами, для которых предлагаемая установка должна стать базовым инструментом для экспериментальных исследований.

Реализация проекта ОМЕГА потребует развития в России или восстановления ряда технологий в таких направлениях как, специальная силовая электроника, вакуумная техника, мощные высокочастотные системы, мощная импульсная техника, криогеника и ряда других. Эти технологии принадлежат к числу определяющих направления инновационного развития. Важнейшей особенностью проекта является то, что основной объем заказов пойдет в высокотехнологичные отрасли промышленности. Это будет способствовать созданию новых рабочих мест и, в целом, развитию этих отраслей.

also scientific and engineering institutes and companies with the experience in development of nuclear power facilities. In fact, the development and construction of the target stations for the high intensity beams assume a specific knowledge, and the experts on nuclear reactors are the most competent specialists in the field.

3. Since one of the main topics is construction of the neutron source the ultimate condition for successful realization of the overall OMEGA project is to be a wide participation of the neutron research experts.
4. Creation of the pulsed spallation neutron source will open the unique possibilities for conducting research in different fields of science. In this connection there is a necessity for close collaboration with various organizations dealing with nanotechnologies as well as cooperation with the universities, for which the proposed facility should become the basic facility for their research programs.

Realization of the OMEGA project will require development or restoration of the technologies in such fields as special electronics, high vacuum technology, powerful RF-systems, powerful pulsed technology, cryogenics and some others. These technologies are among the crucial ones determining the tendencies for innovative development. The main feature of the project is the fact that the major part of the contracts will be addressed to high-tech sectors of the industry. That will provide conditions for the new jobs appearance and boost for the industry.

## 6. Перспективы дальнейшего развития

В данной главе рассмотрены возможные направления развития Ускорительного комплекса интенсивных адронных пучков в долгосрочной перспективе. Несмотря на то, что эти работы не входят в состав проекта, анализ перспектив развития необходим для оптимизации общей структуры комплекса и для выбора отдельных технических решений.

### Антипротонный источник

В предлагаемом проекте мощность протонного пучка У-70 будет достигать 100–200 кВт, что ставит его в один ряд с такими источниками антипротонов, как PS(ЦЕРН), MI(ФНАЛ) и SIS100(ФАЙР). На данном этапе антипротонная программа не рассматривается в качестве первоочередной, поскольку для развития такой программы требуется сооружение сложных высокотехнологичных установок для аккумуляции и охлаждения антипротонов, что нецелесообразно делать одновременно с созданием комплекса высокоинтенсивных ускорителей. В дальнейшем такая программа может оказаться востребованной, особенно при повышении интенсивности протонного пучка.

### Высокоинтенсивный синхротрон на энергию до 100 ГэВ

Существующий синхротрон У-70 еще достаточно долго будет оставаться центральным элементом всего ускорительного комплекса.

Уже в ближайшее время ускоритель будет приспособлен для работы в режиме накопителя-растяжителя углеродного пучка для медицинских приложений, а также для ускорения легких и средних ядер до энергии 34 ГэВ/нуклон.

В предлагаемой программе его функциональные возможности существенно расширятся:

- ◆ благодаря новому инжектору значительно повысится интенсивность протонного пучка, при этом радиационная нагрузка на элементы ускорителя останется приемлемой вследствие ликвидации внутренних мишеней;
- ◆ для оптимального использования пучка различными экспериментами будут реализованы режимы с уменьшенной энергией, в том числе, работа в режиме накопителя с пучком 3,5 ГэВ.

В долгосрочной перспективе основные характеристики ускорителя У-70 будут сдерживать развитие ряда важнейших направлений. На смену У-70 должен придти новый синхротрон с энергией пучка масштаба 100 ГэВ и мощностью в Мегаваттном диапазоне. Ускоритель У-3,5 будет прекрасным инжектором для такого синхротрона.

## 6. Prospects for Further Development

In this section possible ways of further development of The Facility for Intense Hadron Beams are considered for a long term perspective. Despite these options are not included in the project, the dedicated analysis is mandatory for optimization of the whole project structure and for the choice of technical solutions.

### Antiproton Source

The beam power of the U-70 protons will achieve 100–200 kW according to the project. By this parameter the future facility will be comparable with such antiproton sources as PS (CERN), MI (FNAL) and SIS100 (FAIR). At this stage the antiproton program is not considered as a top-priority one because it requires construction of the additional high-tech accelerating facilities for accumulation and cooling of antiprotons. Simultaneous development of the project and the antiproton program seems too ambitious and unreasonable. But in the future such a program could become important, especially in case of increasing the proton beam intensity.

### High Intensity Synchrotron with the Energy up to 100 GeV

The existing U-70 synchrotron will remain the central element of the IHEP accelerator complex during a long time. Already in the near future the U-70 will be adapted for acceleration of the light nuclei with the energy of 34 GeV/nucleon as well as to function as accumulator and debuncher of the carbon ions used for medical treatment purposes.

In the framework of the proposed project the U-70 functionality will be essentially extended:

- ◆ due to the new injector the intensity of proton beam will be essentially increased; under this the irradiation of accelerator elements will remain acceptable due to removing the internal targets;
- ◆ for optimal beam usage by various experiments the operational modes with decreased energies will be realized, including the storage mode with the energy of 3.5 GeV.

Nevertheless the main parameters of U-70 will limit development of a number of important trends in long term perspective. The U-70 accelerator is to be eventually replaced by a new synchrotron with the energy of about 100 GeV and the beam power of the megawatt range. The accelerator U-3.5 could serve as an excellent injector for such a synchrotron.



## Накопитель в тоннеле УНК

Развитие базовых ускорителей ГНЦ ИФВЭ открывает новые перспективы для использования существующего тоннеля УНК. В этом тоннеле может быть сооружено накопительное кольцо на энергию 50 ГэВ. Это может быть сделано с использованием оборудования, уже созданного для проекта УНК.

Протонный накопитель на энергию 50 ГэВ открывает новые возможности для многокадровой протонной радиографии динамических процессов.

Кольцо в тоннеле УНК за 14 циклов заполняется банчами из ускорителя У-70 (29 или 27 банчей), идущими через 160 нс, а затем эта последовательность банчей (всего около 400 банчей) выводится из накопителя за один оборот (70 мкс) и направляется на исследуемый объект. Обсуждаемый здесь накопитель с точки зрения ускорительной физики оказывается относительно простым по ряду причин:

- ◆ низкое поле в магнитной системе;
- ◆ низкое потребление электроэнергии (масштаба 1 МВт);
- ◆ постоянное поле магнитной системы;
- ◆ минимальная ВЧ система, нужная только для поддержания группировки пучка;
- ◆ очень низкая радиационная нагрузка на оборудование (несколько циклов накопления-вывода в сутки).

Конечно, в силу больших геометрических размеров это достаточно сложный объект.

Такая установка создаст беспрецедентные возможности для протонной радиографии широкого класса динамических процессов.

## Ускоритель с очень высокой интенсивностью

При наличии высокоинтенсивного ускорителя с энергией до 100 ГэВ и тоннеля длиной 21 км. представляется естественным создание в перспективе ускорителя на высокие энергии (300–500 ГэВ) с предельно высокой мощностью пучка, масштаба 5 МВт. Это должен быть ускоритель на обычных магнитах, поскольку радиационные нагрузки будут большими, и быстроциклирующий, с циклом в несколько секунд. Большой периметр кольца позволит ускорять и выводить рекордные интенсивности. Такой пучок может быть востребован разными экспериментами, в первую очередь нейтринными. Высокая средняя мощность пучка и исключительно высокая мощность в импульсе создают новые возможности и для различных прикладных работ.

Приведенный выше анализ демонстрирует перспективы дальнейшего развития проекта ОМЕГА в различных направлениях. Важнейшими составляющими, определяющими возможности разновекторного развития в отдаленной перспективе, являются открытая архитектура проекта и развитая инженерная инфраструктура ГНЦ ИФВЭ.

## Storage Ring in the UNK Tunnel

The development of the IHEP accelerators would open new possibilities for the use of the existing 21 km UNK tunnel. The 50 GeV storage ring may be constructed in this tunnel. This could be done by using the equipment earlier produced for the UNK project.

Proton storage ring with the energy of 50 GeV provides the new opportunities for multi-frame proton radiography of rapid processes. Indeed, the UNK ring is filled with proton bunches (29 or 27 bunches) during each of 14 cycles of the U-70. The bunch space is equal to 160 nanoseconds. Then the train of about 400 bunches is extracted from the storage ring in single turn (70  $\mu$ s) and directed to the object under study. The discussed storage ring is a relatively simple facility from point of view of accelerator physics due to number of reasons:

- ◆ low magnetic field;
- ◆ low electric power consumption (about 1 MW);
- ◆ constant field of magnet system;
- ◆ a reduced RF-system used for the proton bunching only;
- ◆ low irradiation of the equipment due to particular operation mode with very few cycles of the beam storage and extraction per a day.

Of course, one should recognize that it is a rather complex object because of its large geometrical size. Such a facility could provide the unique possibilities for proton radiography of wide range fast processes.

## Accelerator of Super High Intensity

Both the high intensity accelerator with the energy of 100 GeV (as injector) and the existing 21 km long tunnel open the possibility to suggest in the future construction of high energy accelerator (300–500 GeV) with extremely high beam power of the order of 5 MW. This machine would use the conventional warm magnets because of high irradiation and is to be rapid cycling one with several seconds cycle duration. The large machine perimeter will allow acceleration and extraction of the super high intensity beams. The scope of their potential use is extended from the fundamental neutrino experiments to applied use of high beam power as well as of extremely high pulsed power.

The above considerations demonstrate the options for the further development of the OMEGA project. Open architecture of the project and well developed technical infrastructure at IHEP are the significant features determining variety of the opportunities.

---

## Заключение

Исследования веществ, материалов, изделий, биологических и других объектов, равно как и фундаментальных свойств материи, необходимы государству, стремящемуся к развитию экономики на инновационной основе. Ускорительный комплекс интенсивных адронных пучков (мегапроект ОМЕГА) создаст возможности для таких исследований на мировом уровне.

Этот проект во многом опирается на опыт ГНЦ ИФВЭ в развитии ускорительных технологий и современного физического эксперимента. Важнейшим условием успешной реализации проекта является объединение возможностей и усилий отечественных ускорительных лабораторий.

В процессе создания установки будут развиты новые перспективные технологии, будут созданы новые рабочие места в высокотехнологичных отраслях промышленности, будут подготовлены высококвалифицированные специалисты для работы на передовых направлениях науки и техники.

## Conclusion

Studies of substances, materials, biological and other objects as well as studies of the fundamental properties of matter are the ultimate research clusters for the state progressing its economy on the innovative basis. The Facility for Intense Hadron Beams (The OMEGA Project) will boost such investigations on a frontier level.

This project is based on the IHEP expertise in the accelerator technologies and instrumentation as well as in physics research. The necessary condition for successful realization of the project is participation and cooperation of the Russian accelerator laboratories in the project.

The project will initiate development of the new advanced technologies and the new jobs in high-tech industries. As a result, number of new highly skilled personnel will appear in the advanced field of science and technologies.

# Приложение

# Attachment

## Полезные формулы

### Ток пучка:

$$J [\text{Ампер}] = I [\text{секунда}^{-1}] \cdot Q [\text{Кулон}]$$

Ток пучка = Интенсивность · Заряд частицы

Для ускорителя У-3,5:

$$I = 7.5 \cdot 10^{13} \cdot 25 \text{ с}^{-1}$$

$$Q = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ С}$$

$$J = 7.5 \cdot 10^{13} \cdot 25 \cdot 1.6 \cdot 10^{-19} = 0.30 \text{ мА}$$

### Мощность пучка:

$$W [\text{Вт}] = J [\text{А}] \cdot E [\text{эВ}] \text{ или } W [\text{МВт}] = J [\text{мА}] \cdot E [\text{ГэВ}]$$

Мощность пучка = Ток · Энергия

При токе пучка 0,3 мА и энергии 3,5 ГэВ

$$W = 1.05 \text{ МВт}$$

**Характерная энергия** нейтронов, находящихся в тепловом равновесии со средой (модератором) с температурой  $t$ ,

$$E [\text{эВ}] = t [\text{К}] \cdot k [\text{эВ/К}]$$

( $k = 8.6 \cdot 10^{-5} \text{ эВ/К}$  – константа Больцмана).

$$\text{Для } t = 300 \text{ К } E = 2.6 \cdot 10^{-2} \text{ эВ}$$

### Длина волны нейтрона с энергией $E$ :

$$\lambda [\text{м}] = 2\lambda \cdot \hbar c [\text{МэВ} \cdot \text{м}] / p [\text{МэВ}]$$

$$\hbar c = 1.97 \cdot 10^{-7} \text{ эВ} \cdot \text{м}$$

Для  $E = 10^{-2} \text{ эВ}$   $p = \sqrt{(2 m_n \cdot E)} = 4.3 \cdot 10^3 \text{ эВ}$

$$\lambda = 2\pi \cdot \hbar c / p = 2.9 \cdot 10^{-10} \text{ м} = 0.29 \text{ нм}$$

В удобных единицах:  $\lambda [\text{нм}] = 0.029 / \sqrt{E [\text{эВ}]}$

## Useful formulas

### Beam current:

$$J [\text{Ampere}] = I [\text{second}^{-1}] \cdot Q [\text{Coulomb}]$$

Beam current = Beam intensity · Particle charge

For U-3.5:

$$I = 7.5 \cdot 10^{13} \cdot 25 \text{ с}^{-1}$$

$$Q = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

$$J = 7.5 \cdot 10^{13} \cdot 25 \cdot 1.6 \cdot 10^{-19} = 0.30 \text{ mA}$$

### Beam power:

$$W [W] = J [A] \cdot E [eV] \text{ or } W [MW] = J [mA] \cdot E [GeV]$$

Beam power = Beam current · Beam energy

At beam current of 0.3 mA and beam energy

of 3.5 GeV the power  $W = 1.05 \text{ MW}$

**Characteristic neutron energy** at thermal equilibrium with moderator at temperature  $t$ :

$$E [\text{эВ}] = t [\text{К}] \cdot k [\text{эВ/К}], \text{ where } k = 8.6 \cdot 10^{-5} \text{ eV/K is Boltzmann constant.}$$

At  $t = 300 \text{ K}$   $E = 2.6 \cdot 10^{-2} \text{ eV}$

### Wavelength of neutron with energy $E$ :

$$\lambda [\text{m}] = 2\lambda \cdot \hbar c [\text{MeV} \cdot \text{m}] / p [\text{MeV}]$$

$$\hbar c = 1.97 \cdot 10^{-7} \text{ eV} \cdot \text{m}$$

For  $E = 10^{-2} \text{ eV}$   $p = \sqrt{(2 m_n \cdot E)} = 4.3 \cdot 10^3 \text{ eV}$

$$\lambda = 2\pi \cdot \hbar c / p = 2.9 \cdot 10^{-10} \text{ m} = 0.29 \text{ nm}$$

In convenient units:  $\lambda [\text{nm}] = 0.029 / \sqrt{E [\text{eV}]}$



Государственный научный центр  
Российской Федерации  
**Институт физики высоких энергий**

142281, г. Протвино  
Московской области,  
Площадь Науки, д. 1

[www.ihep.ru](http://www.ihep.ru)

