

УДК 539.128, 539.188

## Measurements of the beam profile of the COSY accelerator

K.Y. Grigoryev, A.A. Vasilyev, P.A. Kravtsov, M.S. Mikirtychyants,  
R. Engels, B. Lorentz, F. Rathmann, H. Seyfarth

### **A b s t r a c t**

This work was done in the frame of the preparation of storage cell for the double polarized experiment at ANKE spectrometer at the COSY accelerator. The results of these measurements will be used to define the storage cell cross-section of the internal gas target for ANKE experiment at COSY.

### **А н н о т а ц и я**

Настоящая работа выполнена в рамках создания поляризованной газовой водороднодейтериевой мишени с накопительной ячейкой для спектрометра ANKE на накопительном кольце COSY. Измерение профиля инжектированного и ускоренного пучка в области мишени является одним из факторов, определяющих размеры накопительной ячейки. В работе описаны методика проведения измерений, измерительное оборудование и представлены результаты измерений.

## Введение

В настоящее время большой интерес в изучении нуклон-нуклонных взаимодействий представляет эксперимент по развалу дейтрона при моменте относительного импульса движения нуклонов внутри ядра  $q = 0.3 \div 0.5$  ГэВ/с. В результате использования поляризованной мишени на поляризованном пучке ускорителя заряженных частиц (двойной поляризованный эксперимент –  $\vec{d}\vec{p} \rightarrow ppn$  [1, 2]) можно определить векторную и тензорную анализирующие способности и спин-корреляционные параметры для энергий протона, а значит получить новую информацию о структуре волновой функции дейтрона. Проведение такого рода экспериментов возможно только на спектрометре ANKE<sup>1</sup> [3] ускорителя COSY<sup>2</sup>, с использованием поляризованной газовой водороднодейтериевой мишени.

### 1. Ускоритель COSY

Ускоритель COSY, расположенный в научно-исследовательском центре (Юлих, Германия), представляет собой накопительное кольцо (Рис. 1) с возможностью создания поляризованных и неполяризованных протонных и дейтронных пучков средней энергии. Для протонного пучка импульсы ускоренных частиц находятся в пределах  $600 \div 3700$  МэВ/с, что соответствует диапазону энергий  $175 \div 2880$  МэВ.

На начальном этапе работы ускорителя пучок заряженных частиц инжектируется из циклотрона (на Рис. 1 он обозначен «cyclotron») во внутреннее кольцо ускорителя с низкой энергией (45 МэВ). После окончания инжекции (при необходимости она может быть многократной) с помощью ВЧ системы пучок ускоряется до заданной энергии, а магнитное поле позволяет фокусировать и удерживать его в накопительном кольце.

---

<sup>1</sup> Apparatus for studies of Nucleon and Kaon Ejectiles

<sup>2</sup> COoler SYnchrotron, Forschungszentrum Jülich, Germany

Ускоренный пучок может циркулировать в кольце или быть выведенным из него, поэтому выделяют два типа экспериментов, проводимых на COSY:

- внутренние – с циркулирующим пучком,
- внешние – с выведенным пучком.

Увеличение плотности ускоренного пучка в месте его взаимодействия с мишенью является одной из задач оптимизации использования ускорительного времени и обеспечения наибольшей светимости в экспериментах. Поэтому во время подготовки к экспериментам необходимо максимально точно фокусировать ускорительный пучок на мишени и уменьшать его поперечные размеры. Одним из способов увеличения интенсивности пучка является его «охлаждение». Под этим термином понимают понижение эффективной температуры пучка, т.е. уменьшение его эффективного размера и снижение разброса по импульсам. Существуют следующие методы<sup>3</sup> охлаждения пучка заряженных частиц:

- электронное [4-6] (на этапе инжекции);
- стохастическое [7, 8] (после ускорения; импульс пучка больше 1.5 ГэВ/с);
- лазерное [9] (не используется).

Метод электронного охлаждения был предложен Г.И. Будкером в работе [4] и в данный момент успешно применяется на ускорителях. Его идея состоит в том, что на прямом участке ускорительного кольца (на Рис. 1 эта секция обозначена «e-Cooler») параллельно протонному пучку по направлению его движения пропускается хорошо сфокусированный пучок электронов со средними скоростями, равными скоростям частиц основного пучка. Таким образом, в результате кулоновского взаимодействия, на общем участке траектории происходит «охлаждение» протонного пучка и «нагрев» электронного. Эта процедура может повторяться до того момента, пока температура протонов в системе центра масс не станет равной температуре электронов.

---

<sup>3</sup> В скобках указаны режимы, при которых применяется тот или иной метод на ускорителе COSY.

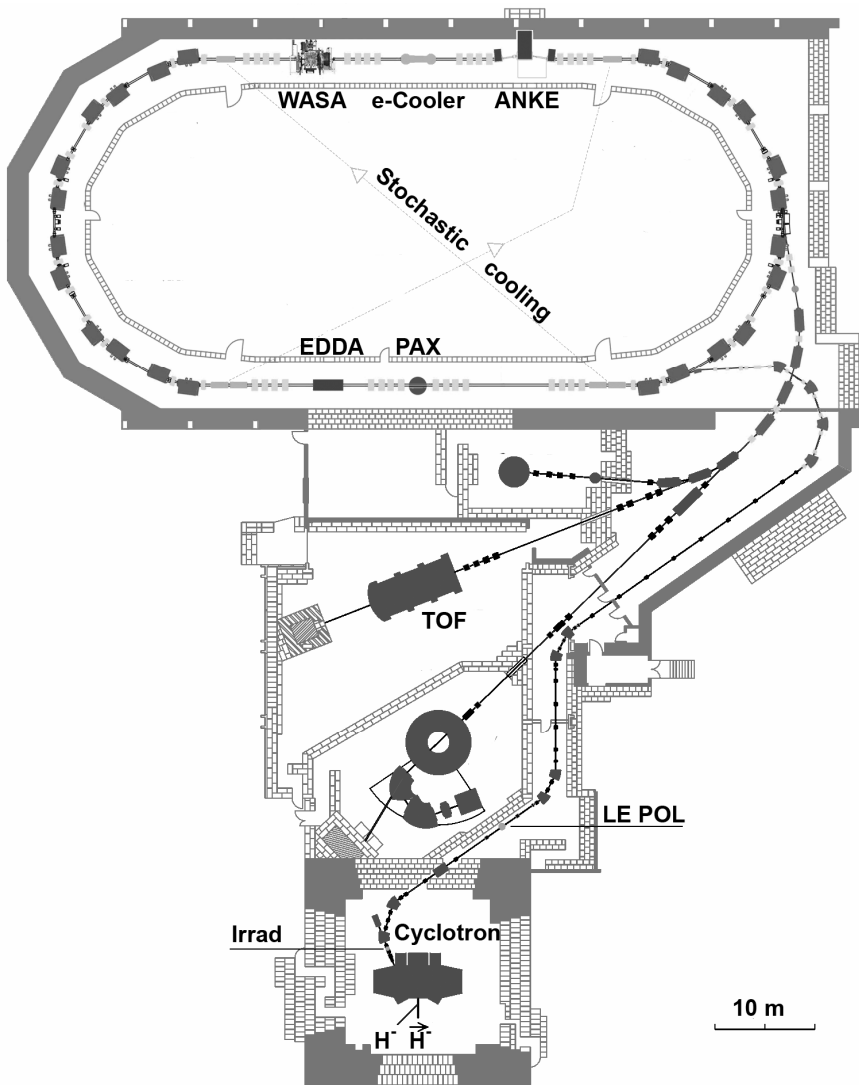


Рис. 1. План ускорителя COSY

Вторым методом охлаждения пучка заряженных частиц на ускорителе COSY является стохастическое охлаждение, предложенное С. Ван Дер Меером [8] и применяемое к ускоренным в накопительном кольце частицам. Суть этого метода состоит в корректировке орбит частиц, отклонившихся от идеальной траектории пучка. При прохождении группы частиц через детектор (Рис. 2) определяется их среднее отклонение от центра масс пучка. Выработываемый сигнал корректировки передается по диагонали исполняющему устройству – корректору. Конечно, траектория случайно взятой частицы может становиться хуже, но общая температура этой группы станет ниже. Эффективность такого охлаждения очень быстро падает с увеличением количества частиц в ускорителе, но зато очень слабо зависит от энергии частиц.

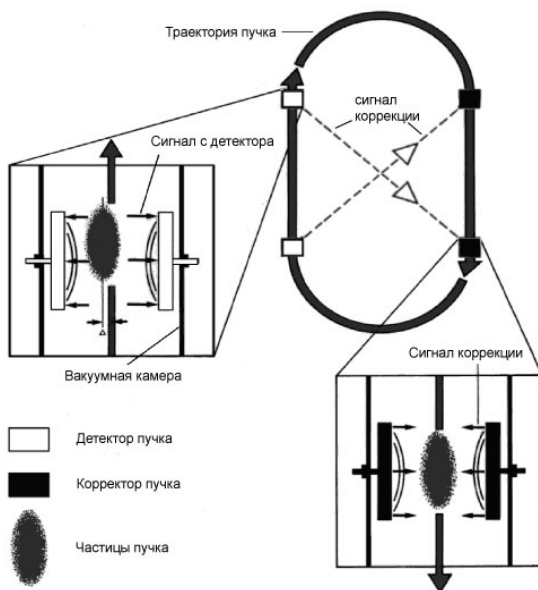


Рис. 2. Упрощенная схема работы стохастического охлаждения на ускорителе COSY

Область применения описанных методов охлаждения на ускорителе COSY указана в таблице.

Таблица

Характеристика методов охлаждения, применяемых на ускорителе COSY

Метод	Тип частиц	Время охлаждения <sup>4</sup> , с	Наиболее удобная начальная температура для охлаждения пучка	Рабочий диапазон энергий
Электронное охлаждение	$p, \bar{p}, d, \bar{d}$	$1 \div 10^{-2}$	низкая	до 100 МэВ
Стохастическое охлаждение	$p, \bar{p}, d, \bar{d}$	$N \cdot 10^{-8}$	высокая	от 1.5 ГэВ

## 2. Эксперимент ANKE

Многообразие экспериментов, проводимых на спектрометре ANKE, предполагает наличие большого набора различных мишеней при одной и той же системе детекторов. В секции эксперимента ANKE создана и установлена специальная вакуумная камера (Рис. 3) с возможностью размещения следующих мишеней:

- поляризованная газовая, струйная;
- поляризованная газовая, с накопительной ячейкой;
- неполяризованная газовая, с накопительной ячейкой;
- кластерная [10, 11];
- пленочная [12, 13].

---

<sup>4</sup> N – количество частиц, циркулирующих в накопительном кольце ускорителя.

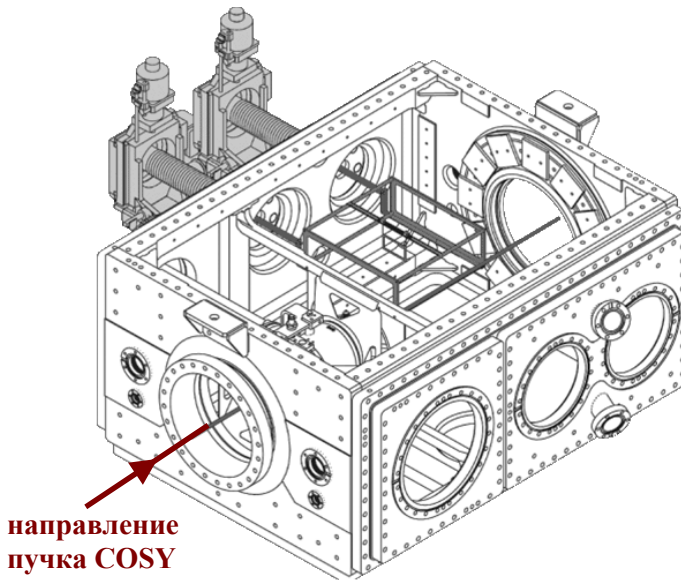


Рис. 3. Вакуумная камера ускорителя COSY для установки мишеней в эксперименте ANKE. Серым цветом обозначена установка измерения профиля инжектированного и ускоренного пучка

Основными элементами, входящими в состав внутренней поляризованной газовой мишени в эксперименте ANKE, являются:

- источник поляризованных атомов (ABS)<sup>5</sup> [14], производящий пучок поляризованных атомов водорода или дейтерия с интенсивностью  $7.8 \cdot 10^{16}$  ат/с [15] для двух сверхтонких состояний водорода и возможной ядерной поляризацией атомарного пучка водорода  $P_z = +0.89 \pm 0.01$  и  $P_z = -0.96 \pm 0.01$ ;
- вакуумная камера с большим количеством фланцевых соединений в стандарте UHV<sup>6</sup>, позволяющая размещать мишени, кремниевые детекторы, системы перемещения ячейки, вакуумные элементы, криопоглотители и т.д.;

<sup>5</sup> Atomic Beam Source.

<sup>6</sup> Ultra High Vacuum.

- накопительная ячейка [16] (Г-образная трубка), устанавливаемая в вакуумную камеру, позволяющая на два порядка увеличить плотность газовой мишени по сравнению со струйной газовой мишенью. В зависимости от материала ячейки поляризация мишени может изменяться из-за столкновений атомов со стенками;
- устройство, измеряющее поляризацию – поляриметр, работающий на основе лэмбовского сдвига (LSP)<sup>7</sup> [17], который позволяет оперативно измерять поляризацию газа мишени.

### 3. Описание измерительной установки

Максимальную светимость при использовании газовой поляризованной мишени с накопительной ячейкой в эксперименте ANKE можно достичь только после детальных измерений и оптимизации профилей пучков ABS [15] и COSY. Для этого была создана и использовалась в измерениях специальная система, размещенная на одном из боковых прямоугольных фланцев вакуумной камеры (Рис. 3).

Эта установка состоит из двух координатных столов<sup>8</sup>, поддерживающих систему диафрагм разного внутреннего сечения (Рис. 4). Вакуумная изоляция выполнена с помощью гибкого тарельчатого сильфона, допускающего многократные деформации. В направлении, перпендикулярном ускорительному пучку, рамка может свободно передвигаться на расстояние 150 мм. Это позволяет выдвигать систему с траектории пучка, чтобы другие эксперименты могли продолжить работу без потери времени на демонтаж установки.

---

<sup>7</sup> Lamb-Shift Polarimeter.

<sup>8</sup> Требования, предъявляемые к вакууму на ускорителе, очень высокие ( $10^{-10}$  мбар), поэтому использовались координатные столы Vacuum Generators с медным вакуумным уплотнением (оборудованные модулями NPT Translator, MRXMOTX и MRXMOTZ, производитель Vacuum Generators Ltd, UK).



Основная диафрагма, использованная в измерениях (слева на Рис. 4), не должна препятствовать прохождению пучка, проведенного через её центр. Размеры этой диафрагмы превышали ожидаемый размер пучка ускорителя в момент инъекции в месте установки мишени и составили 50 мм в горизонтальной плоскости и 25 мм в вертикальной. Правее основной была расположена диафрагма с меньшими внутренними размерами 30 x 10 мм. Она позволила сделать качественную оценку возможностей ускорителя по проведению пучка в накопительную ячейку меньшего размера (справа на Рис. 4). Две маленькие диафрагмы, размещенные друг за другом, помогали определить отклонение орбиты пучка ускорителя от идеальной и правильно расположить протяженную накопительную ячейку в объеме вакуумной камеры. Материал используемых в измерениях диафрагм должен быть немагнитным, поэтому использовался алюминиевый профиль толщиной 1 мм.

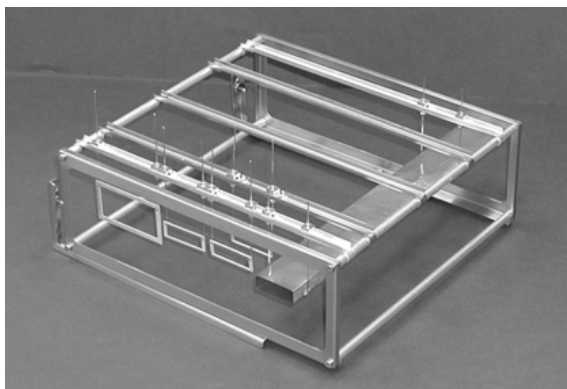


Рис. 4. Рамка с системой диафрагм. Слева – основная диафрагма ( $50 \times 25 \text{ мм}^2$ ), правее – диафрагма с меньшими размерами  $30 \times 10 \text{ мм}^2$ , далее – две диафрагмы  $30 \times 10 \text{ мм}^2$ , расположенные одна за другой, прототип накопительной ячейки с внутренним сечением  $30 \times 10 \text{ мм}^2$

Плавное передвижение рамки внутри камеры и точное определение координат обеспечивалось специальными

прецизионными шаговыми двигателями<sup>9</sup> с шагом 1.25 мкм и поступательным движением за полный оборот 0.25 мм. Каждый двигатель оснащен модулем<sup>10</sup>, подключенным к системе управления по шине ProfiBUS<sup>11</sup> DP. Дистанционное управление осуществлялось с помощью компьютера с программным обеспечением WinCC<sup>12</sup>. Принципиальная схема установки показана на Рис. 5.

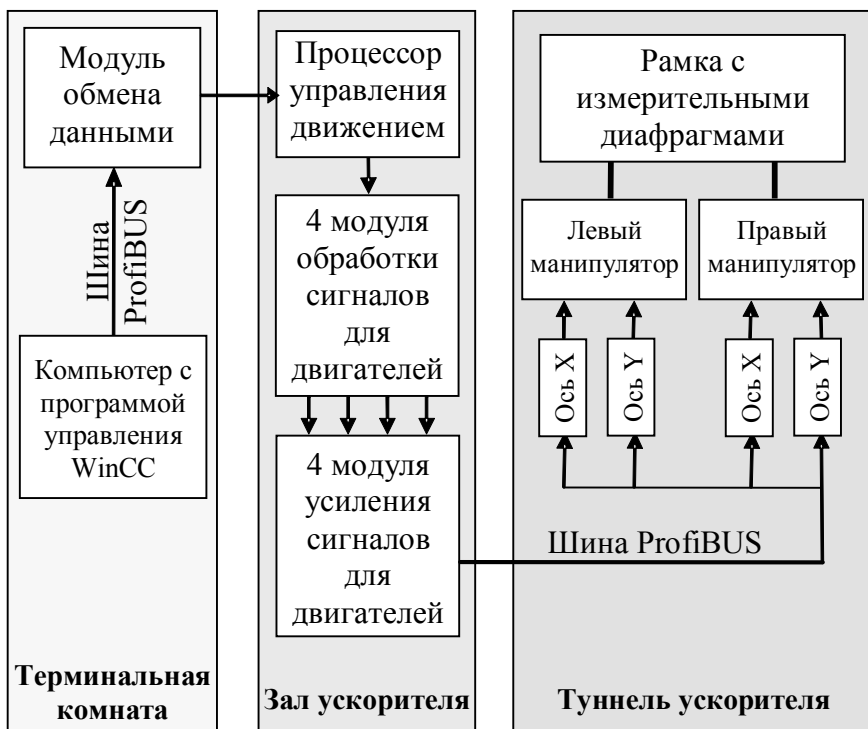


Рис. 5. Схема установки дистанционного управления перемещением рамки с системой диафрагм

<sup>9</sup> Производитель McLennan Servo Supplies Ltd., United Kingdom.

<sup>10</sup> DP encoder. Производитель HEIDENHAIN, Germany.

<sup>11</sup> Международный стандарт IEC 61158.

<sup>12</sup> Программный комплекс SIEMENS для работы с системами управления модулями SIEMENS SIMATIC и создания графического интерфейса.

Из соображений безопасности установка оснащена двумя датчиками крайнего положения, ограничивающими перемещение рамки с диафрагмами внутри вакуумной камеры. Отрегулированные определенным образом, они позволяют избежать повреждения вакуумного сильфона, а также устройств, размещенных в камере ускорителя. В одном из экспериментов с использованием данной системы перемещения с противоположной стороны вакуумной камеры была установлена пленочная мишень, держатель которой находился внутри и мог быть поврежден, если рамка была вдвинута в камеру слишком глубоко.

#### 4. Проведение эксперимента

Возможность проведения экспериментов, направленных на оптимизацию поляризованного дейтронного пучка на COSY, была рассмотрена комитетом PAC<sup>13</sup>, и была выделена одна неделя ускорительного времени [18].

Подготовка к эксперименту проводилась в камере, идентичной установленной на эксперименте ANKE. Была проведена юстировка расположения измерительных диафрагм в рамке, изображенной на Рис. 4. Прохождение пучка ускорителя через геометрический центр тестовой камеры имитировалось с помощью лазера. В результате юстировки были определены координаты центров диафрагм и оптимизировано их взаимное расположение, что позволило максимально эффективно использовать пространство в поддерживающей рамке. Последующая подготовка включала в себя масс-спектрометрические тесты для определения чистоты установки. После этого установка была перемещена на ускоритель. Во время сеанса использовался неполяризованный дейтронный пучок с энергией 2.1 ГэВ. Тесты проводились на разных этапах его формирования:

- во время инжекции пучка в ускоритель (45 МэВ);
- после ускорения до заданной энергии (2.1 ГэВ).

---

<sup>13</sup> Program Advisory Committee – интернациональный комитет, распределяющий время работы на ускорителе COSY.

#### 4.1. Измерение профиля пучка на этапе инжекции

На этапе инжекции центр пучка ускорителя проводился через центр основной измерительной диафрагмы. После окончания инжекции диафрагма смещалась на определенное расстояние от исходного положения, и фиксировалось количество частиц, оставшихся в ускорителе (Рис. 6). Для этого использовался преобразователь (ВСТ)<sup>14</sup>, конвертирующий величину тока пучка ускорителя в напряжение. Принципиальная схема преобразователя показана на Рис. 7.



Рис. 6. Принцип измерения профиля пучка COSY

При прохождении пучка на расположенную в вакуумной камере катушку индуцируется ток, который передается широкополосному усилителю, преобразуется в напряжение и может быть измерен с помощью обычного вольтметра. Зная частоту обращения пучка в накопительном кольце, можно конвертировать напряжение на выходе преобразователя в количество частиц в ускорителе по следующей формуле:

$$N = \frac{I}{f \cdot e},$$

где  $N$  – количество частиц в ускорителе,  $I$  – ток на входе в измеритель (А),  $f$  – частота обращения частиц (Гц),  $e$  – элементарный заряд (Кл).

Ток на входе в измеритель получается из калибровки:

<sup>14</sup> Beam Current Transmitter.

$$I = \frac{U_{BCT}}{100},$$

где  $U_{BCT}$  – напряжение на выходе измерителя (В).

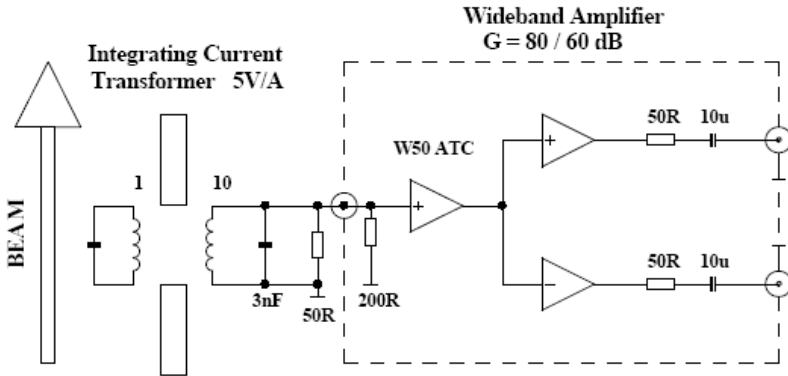


Рис. 7. Принципиальная схема измерителя тока пучка

Зависимость количества частиц в накопительном кольце от положения диафрагмы показана на Рис. 8. После окончания измерения рамка возвращается в исходное положение, проводится следующая инжекция и рамка передвигается на новую позицию. При смещении диафрагмы часть частиц выбывает из накопительного кольца, а при полном перекрытии пучка частиц в накопительном кольце не остается (правое и левое положение диафрагмы на Рис. 8). Сравнивая координаты положения диафрагмы в начале уменьшения числа частиц в накопительном кольце можно с уверенностью заявить, что в момент инжекции центр пучка находился не в центре диафрагмы, а был смещен с геометрического центра вакуумной камеры. Наши предположения о размере инжектируемого пучка, сделанные при выборе размеров измерительной диафрагмы, были верными, т.к. количество частиц в накопительном кольце в случае, когда система диафрагм выведена из пучка (верхняя горизонтальная линия на Рис. 8) и когда пучок проведен через центр диафрагмы, одинаково.

Заштрихованная область на Рис. 8 позволяет восстановить истинный профиль пучка ускорителя, т.к. она отражает количество

выбивших из пучка частиц при смещении диафрагмы в одном из направлений сканирования. Касанием пучка стенкой диафрагмы при перемещении в горизонтальном направлении обрезается вертикальная часть пучка до определенной координаты. Результаты сканирования обрабатывались по закону двумерного распределения Гаусса для получения реального профиля пучка ускорителя (Рис. 10).

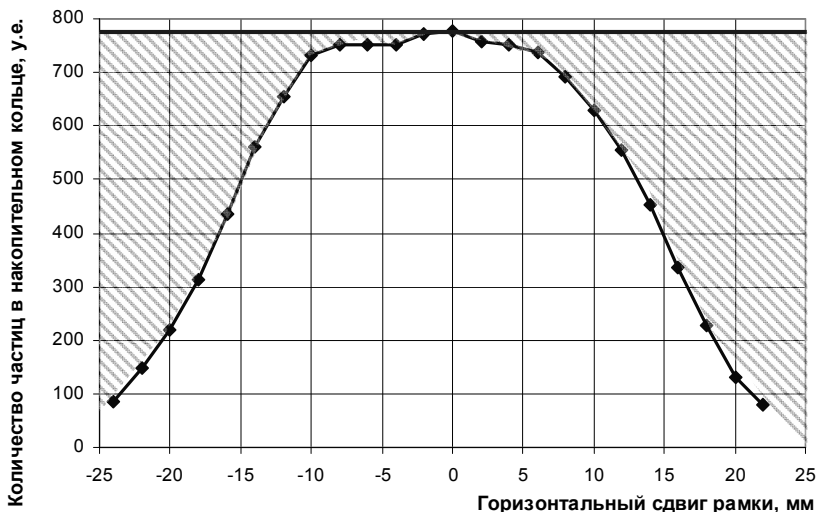


Рис. 8. Измерение числа частиц в накопительном кольце при горизонтальном перемещении рамки с диафрагмами

#### 4.2. Измерение профиля ускоренного пучка

Измерение профиля ускоренного пучка проводилось на протяжении десяти минут, в течение которых ускоренный пучок циркулировал в накопительном кольце. Пучок инжестировался через центр измерительной диафрагмы и ускорялся до заданной энергии. Только после этого производилось перемещение рамки, аналогичное перемещению во время измерения на этапе инъекции. В течение десяти минут, с интервалом в одну минуту, фиксировалось число частиц в накопительном кольце. Таким образом, после перемещения

диафрагмы параллельно измерению интенсивности проводилось измерение времени жизни пучка.

Полученные результаты показывают, что при горизонтальном смещении диафрагмы на 22 мм (не доходя центром пучка ускорителя 3 мм до стенки диафрагмы) время жизни пучка практически не меняется. Перемещение, несомненно, сказывается на интенсивности пучка, но он может быть сфокусирован в магнитной системе ускорителя и продолжить циркулировать в накопительном кольце. Как только центр пучка приближается к стенке диафрагмы ближе, чем на 3 мм, магнитная система не в состоянии хорошо сфокусировать его, и время жизни пучка заметно уменьшается (Рис. 9). Это объясняется тем, что пучок, задевая стенку диафрагмы, при последующем фокусировании в накопительном кольце не становится меньше и снова задевает её, поэтому имеет место значительное уменьшение времени жизни пучка.

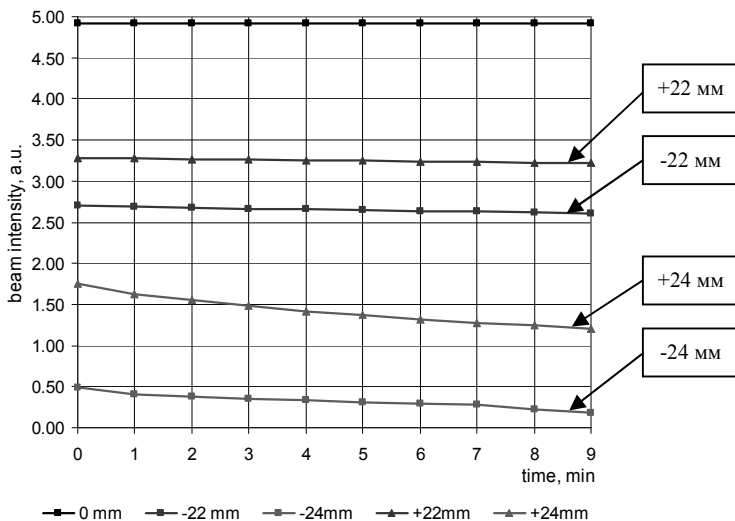


Рис. 9. Время жизни ускоренного пучка COSY

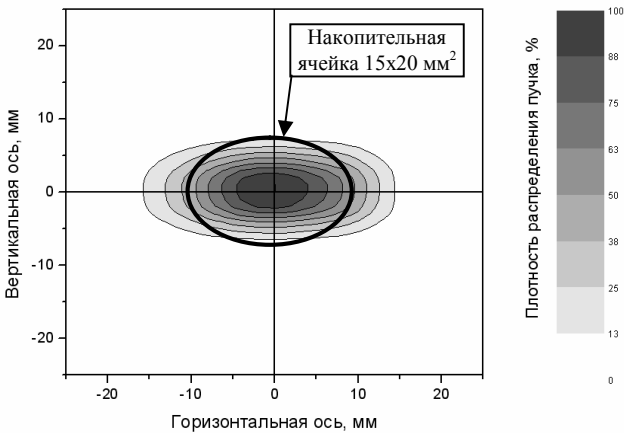
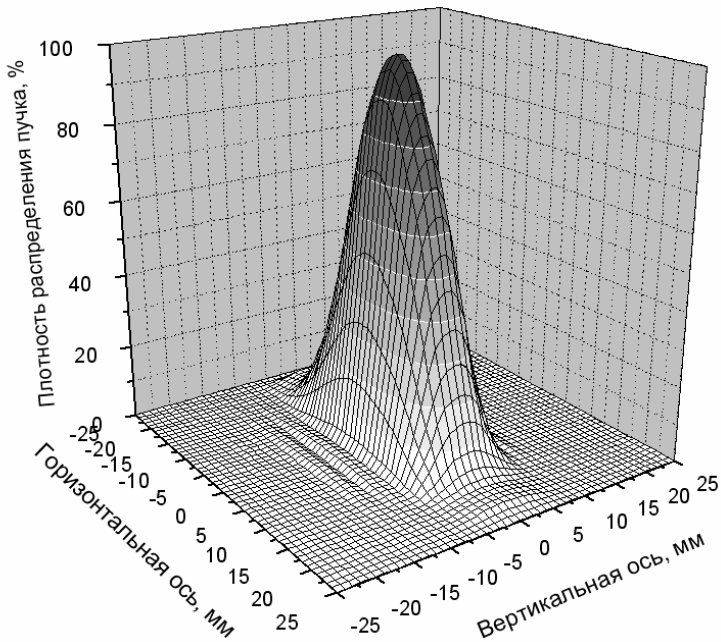


Рис. 10. Восстановленный профиль пучка на этапе инжекции в ускоритель. Максимум соответствует плотности пучка, инжектированного в ускоритель без использования диафрагм, начало координат – геометрическому центру вакуумной камеры



## 5. Результаты

В ходе проведения эксперимента в камере для установки мишеней в эксперименте ANKE на ускорителе COSY были изучены свойства пучка и получены профили на разных этапах формирования пучка. При работе с ускоренным пучком была использована кластерная водородная мишень с плотностью  $\sim 10^{14}$  ат/см<sup>2</sup>, что на порядок выше предполагаемой плотности газовой мишени ABS с накопительной ячейкой. Полученные результаты представлены на Рис. 11.

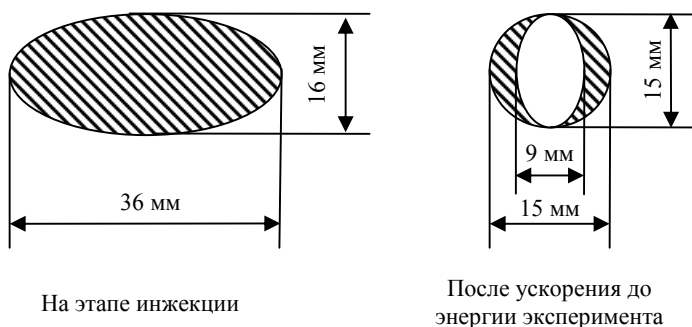


Рис. 11. Размеры пучка ускорителя COSY. На этапе инжекции кластерная мишень не использовалась. При работе с ускоренным пучком: наружный эллипс – размер пучка с использованием кластерной мишени, внутренний – без неё.

На момент инжекции ширина пучка составляет 36 мм, что по сравнению с ускоренным пучком размерами 15 и 9 мм делает невозможной установку мишени с поперечным сечением 15 x 15 мм<sup>2</sup>, т.к. однократная инжекция приведёт к очень низкой интенсивности пучка ускорителя (не более 10% от интенсивности при свободной инжекции в накопительное кольцо).

Пучок практически не изменяет своих вертикальных размеров после инжекции. Это дает возможность зафиксировать вертикальный размер поперечного сечения накопительной ячейки. А сравнение размеров ускоренного пучка без кластерной мишени и с её использованием определяет горизонтальный размер. Таким

образом, при изготовлении накопительной ячейки для проведения поляризационных экспериментов необходимо использовать размеры поперечного сечения не менее  $20 \times 15 \text{ мм}^2$ .

## Заключение

Систематические измерения с использованием созданной системы измерения внутреннего пучка COSY позволили оценить поведение пучка на различных этапах работы ускорителя.

Полученный профиль пучка ускорителя в камере для установки мишеней в эксперименте ANKE определил размеры накопительной ячейки для внутренней газовой мишени.

При проведении измерений стало очевидно, что в экспериментах с накопительной ячейкой необходимо использовать дополнительные способы повышения интенсивности ускоренного пучка, такие, как многократная инжекция, электронное и стохастическое охлаждение.

В последующих экспериментах с накопительной ячейкой созданная установка использовалась для определения центра пучка и прецизионной установки протяженной мишени.

## Литература

- [1] S.V. Dshemuchadze, M.A. Ivanov, V.I. Komarov *et al.*, Exclusive deuteron break-up study with polarized protons and deuterons at COSY // COSY Exp. Proposal #20 (1992), 20 p.
- [2] V.I. Komarov. Exclusive deuteron break-up study with polarized protons and deuterons at COSY // Proc. 105th Int.WE-Heraeus-Seminar, Bad Honaf, Feb.1-3, 1993, pp. 281-292.
- [3] S. Barsov, U. Bechstedt, W. Bothe *et al.*, ANKE, a new facility for medium energy hadron physics at COSY-Jülich // Nucl. Instr. and Meth. **A 462** (2001), pp. 364-381.
- [4] Г.И. Будкер, Proceedings of the Intern. Symposium on Electron and Positron Storage Rings, Saclay, 1966, p. II-1-1; АЭ 22, 346 (1967).

- [5] А.Н. Скринский, В.В. Пархомчук // Физика элементарных частиц и атомного ядра. 1981. Т. 12. С. 557.
- [6] И.Н. Мешков // Физика элементарных частиц и атомного ядра. 1994. Т. 25. С. 1478.
- [7] D. Mohl, CERN Accelerator School Report No. 87-03. 1987.
- [8] S. van der Meer, Stochastic Damping of Betatron Oscillations, preprint CERN/ISR-PO/72-31 (1972).
- [9] R. Grimm *et al.*, Proc. of the Workshop on beam cooling and related topics, Montreux, 1993. CERN 94-03. 1994. P. 39.
- [10] R. Santo *et al.*, The Münster cluster target for internal storage ring experiments, Nucl. Instr. and Meth. **A 386** (1997) 228.
- [11] A. Khoukaz *et al.*, Systematic studies on hydrogen cluster beam production, Eur. Phys. J. D 5 (1999) 275.
- [12] R. Esser, Proc. First Experience with ANKE in COSY, XXXVII Int. Winter Meeting on Nucl. Phys., Bormio, Italy, Jan. 25-30 1999.
- [13] H.R. Koch, Luminosities in ANKE experiments with heavy nuclear targets, Forschungszentrum Juelich annual report, 2001.
- [14] М.С. Микиртычянц, А.А. Васильев, В.П. Коптев *и др.*, Источник поляризованного атомарного водорода и дейтерия для внутренней газовой мишени спектрометра ANKE. // Препринт ПИЯФ-2491, Гатчина (2002) 34 с.
- [15] М.С. Микиртычянц, А.А. Васильев, В.П. Коптев *и др.* Измерения интенсивности пучка источника поляризованного атомарного водорода и дейтерия. // Препринт ПИЯФ-2481, Гатчина (2002) 36 с.
- [16] W. Haeberli, Proc. 2nd Int. Symp. On Polarization Phenomena, eds. P. Huber and H. Schopper, Experientia Suppl. 12, 64 (Birkhauser, Basel, 1966).
- [17] R. Engels, ..., K. Grigoryev *et al.*, Nuclear polarization measurement of H/D atoms extracted from a storage cell with a Lamb-shift polarimeter, Nucl. Instr. Meth. **A 536** (2005) 334-337.
- [18] A. Kacharava *et al.*, The polarised charge-exchange reaction. COSY proposal #125, Spokesperson: A. Kacharava, F. Rathmann (2003).