

International Seminar on Intermediate Energy Physics (INES-89), Moscow, 1990. V.2. P.96.

- [21] *A.S.Denisov, O.L.Fedin, M.P.Gur'ev, Yu.M.Ivanov, L.P.Lapina, P.M.Levchenko, A.A.Petrinin, Yu.P.Platonov, A.G.Sergeev, A.I.Smirnov, V.M.Suvorov and A.V.Zhelamkov.* // The Proceedings of the 23rd INS International Symposium on Nuclear and Particle Physics with Meson Beams in the 1 GeV/c Region, Tokyo, 1995. P.319.
- [22] *A.S.Denisov, O.L.Fedin, M.P.Gur'ev, Yu.M.Ivanov, L.P.Lapina, P.M.Levchenko, A.A.Petrinin, Yu.P.Platonov, A.G.Sergeev, A.I.Smirnov, V.M.Suvorov and A.V.Zhelamkov.* // The Proceedings of the XIV International Conference on Particles and Nuclei, Williamsburg, 1996, in press.
- [23] *Particle Data Group.* Phys.Rev.D, V.50. 1994. P.1173.
- [24] *К.Е.Кирьянов, О.Л.Федин.* Препринт ЛИЯФ–1016, Ленинград, 1984. 25 с.
- [25] *М.П.Гурьев, А.С.Денисов, А.В.Желамков, Ю.М.Иванов, Л.П.Лапина, П.М.Левченко, А.А.Петрунин, Ю.П.Платонов, А.Г.Сергеев, А.И.Смирнов, В.М.Суворов, О.Л.Федин.* // Письма в ЖЭТФ, 1993. Т.58. С.69.
- [26] *Г.М.Амальский, Е.В.Гераскин, В.Г.Гребинник, В.А.Жуков, Л.Н.Кондурова, А.П.Маньч, А.Ф.Мезенцев, А.Н.Прокофьев, А.И.Смирнов, Г.Л.Соколов.* Препринт ЛИЯФ–337, Ленинград, 1977. 23 с.
- [27] *К.Е.Кирьянов, Л.Н.Кондурова, В.И.Марушенко, А.Ф.Мезенцев, А.А.Петрунин, В.М.Самсонов, С.Г.Скорняков, Е.В.Гераскин, М.И.Грачев, В.А.Кутузов, О.В.Пономарев.* // Труды V Всесоюзного семинара "Программа экспериментальных исследований на мезонной фабрике ИЯИ АН СССР", Звенигород, 1987. С.193.
- [28] *К.Е.Кирьянов, Л.Н.Кондурова, В.И.Марушенко, А.Ф.Мезенцев, А.А.Петрунин, С.Г.Скорняков.* Препринт ЛИЯФ–1287, Ленинград, 1987. 22 с.
- [29] *К.Е.Kiryanov, A.V.Kravtsov, V.I.Marushenko, A.F.Mezentsev, A.A.Petrinin, Yu.V.Filatov, P.A.Pavlov.* PNPI Reseach Report 1992-1993, Gatchina, 1994. P.64.

- [9] *G.de Chambrier, W.Beer, F.W.N.de Boer, K.Bos, A.I.Egorov, M.Eckhause, K.L.Giovanetti, P.F.A.Gouldsmit, B.Jeckelmann, K.E.Kir'yanov, L.N.Kondurova, L.P.Lapina, H.J.Leisi, V.I.Marushenko, A.F.Mezentsev, A.A.Petrinin, A.I.Smirnov, A.G.Sergeev, G.Strassner, V.M.Suvorov, A.Vacchi, D.Wieser.* // Nucl. Phys., 1985. V.A442. P.637.
- [10] *Григорьев, Ю.М.Иванов, К.Е.Курьянов, Л.Н.Кондурова, В.И.Марушенко, А.Ф.Мезенцев, А.А.Петрунин, С.Г.Скорняков, А.И.Смирнов, Г.А.Шишкина.* Препринт ЛИЯФ-1232, Ленинград, 1986. 50 с.
- [11] *Курьянов, В.И.Марушенко, А.Ф.Мезенцев, А.А.Петрунин, С.Г.Скорняков, А.И.Смирнов.* // "Мезоны в веществе". Труды международного симпозиума по проблемам мезонной химии и мезомолекулярных процессов в веществе, Дубна, 1977. С.166.
- [12] *В.И.Марушенко, А.Ф.Мезенцев, А.А.Петрунин, С.Г.Скорняков, А.И.Смирнов.* // Тезисы докладов XXVII Совещания по ядерной спектроскопии и структуре ядра, "Наука", 1977. С.224.
- [13] *П.М.Левченко, Л.Ф.Павлова, А.Г.Сергеев, А.И.Смирнов, В.М.Суворов.* Препринт ЛИЯФ-1341, Ленинград, 1987. 24с.
- [14] *B.L.Birbrair, A.V.Gridnev, L.P.Lapina, A.A.Petrinin, A.I.Smirnov.* Preprint LNPI-1627, Leningrad, 1991. 17 p.
- [15] *B.L.Birbrair, A.V.Gridnev, L.P.Lapina, A.A.Petrinin, A.I.Smirnov.* // Nucl. Phys., 1992. V.A547 P.645.
- [16] *А.С.Денисов, А.В.Желамков, В.М.Железняков, А.Н.Кознов, В.И.Марушенко, А.Ф.Мезенцев, Н.В.Мохов, А.А.Петрунин, С.Г.Скорняков, А.И.Смирнов, В.М.Суворов.* Препринт ЛИЯФ-459, Ленинград, 1979. 27 с.
- [17] *Ю.Б.Бушин, В.Н.Гресь, Ю.П.Давыденко, А.С.Денисов, А.В.Желамков, Ю.М.Иванов, В.Г.Ивочкин, С.Н.Лапицкий, Р.А.Рзаев, В.П.Сахаров, В.С.Селезнев, А.И.Смирнов, В.М.Суворов, В.И.Терехов.* Препринт ИФВЭ 82-130, Серпухов, 1982. 12 с.
- [18] *А.С.Денисов, Б.В.Григорьев, А.В.Желамков, Ю.М.Иванов, В.Г.Ивочкин, А.Н.Кознов, П.М.Левченко, В.Д.Малахов, А.А.Петрунин, А.И.Смирнов, Г.П.Солодов, В.М.Суворов, О.Л.Федин.* // Материалы XII Международного симпозиума по ядерной электронике, Дубна, 1985. С.27.
- [19] *И.С.Байшев, А.С.Денисов, А.В.Желамков, Ю.М.Иванов, В.Г.Ивочкин, А.Н.Кознов, П.М.Левченко, В.Д.Малахов, Н.В.Мохов, А.А.Петрунин, А.И.Смирнов, Г.П.Солодов, В.М.Суворов, О.Л.Федин.* Препринт ЛИЯФ-1234, Ленинград, 1986. 10 с.
- [20] *M.P.Gur'ev, A.S.Denisov, A.V.Zhelamkov, Yu.M.Ivanov, P.M.Levchenko, V.D.Malakhov, A.A.Petrinin, Yu.P.Platonov, I.A.Rykov, A.I.Smirnov, A.G.Sergeev, V.M.Suvorov, S.N.Taranetz, O.L.Fedin.* // The Proceedings of the

2. Исследование экзотических атомов на ускорителях высоких энергий

Успешные эксперименты в ИФВЭ показали, что применение кристалл-дифракционной методики на пучке протонов высокой энергии открывает новые перспективы для изучения каонных и гиперонных атомов, а также обеспечивает превосходные условия для изучения пионных атомов.

В ИФВЭ принят к постановке эксперимент E-177, в котором с помощью кристалл-дифракционной установки "Кварц" планируется измерить массу Σ^- -гиперона с точностью 10 ррм, и обсуждается возможный эксперимент по измерению массы π^- -мезона с точностью 3 ррм.

Также готовится предложение по исследованию экзотических атомов во ФНАЛ (США), где к 2000 году планируется получить пучок 120 ГэВ протонов с интенсивностью 10^{13} с^{-1} . Более высокая интенсивность (на порядок выше, чем в ИФВЭ) позволит существенно улучшить точность измерений масс частиц и впервые приступить к изучению Ξ - и, возможно, Ω -атомов. Высокое разрешение проектируемой установки позволит исследовать тонкую структуру переходов в гиперонных атомах и определить параметры центрального и спин-орбитального потенциала гиперон-ядерного взаимодействия. Этой проблеме были посвящены многочисленные эксперименты с гиперядрами в ЦЕРН, БНЛ (США) и КЕК (Япония), но она все еще далека от решения.

Список литературы

- [1] *O.I.Sumbaev, A.I.Smirnov.* // Nucl.Instr. Meth., 1963. V.22. P.125.
- [2] *О.И.Сумбаев, А.Ф.Мезенцев.* // ЖЭТФ, 1965. Т.49. С.459.
- [3] *О.И.Сумбаев.* // УФН, 1978. Т.124. С.28.
- [4] *В.И.Марушенко, А.Ф.Мезенцев, А.А.Петрунин, С.Г.Скорняков, А.И.Смирнов.* // Письма в ЖЭТФ, 1976. Т.23. С.80.
- [5] *К.Е.Кирьянов, В.И.Марушенко, А.Ф.Мезенцев, А.А.Петрунин, С.Г.Скорняков, А.И.Смирнов.* // Ядерная физика, 1977. Т.26. С.1300.
- [6] *А.С.Денисов, А.В.Желамков, Ю.М.Иванов, Л.П.Лапина, П.М.Левченко, В.Д.Малахов, А.А.Петрунин, А.Г.Сергеев, А.И.Смирнов, В.М.Суворов, О.Л.Федин.* // Письма в ЖЭТФ, 1991. Т.54. С.557.
- [7] *М.П.Гурьев, А.С.Денисов, А.В.Желамков, Ю.М.Иванов, П.М.Левченко, В.Д.Малахов, А.А.Петрунин, Ю.П.Платонов, А.Г.Сергеев, А.И.Смирнов, В.М.Суворов, О.Л.Федин.* // Письма в ЖЭТФ, 1993. Т.57. С.389.
- [8] *W.Beer, K.Bos, G. de Chambrier, K.L.Giovanetti, P.F.A.Goudsmit, B.V.Grigoryev, B.Jeckelmann, L.Knecht, L.N.Kondurova, J.Langhans, H.J.Leisi, P.M.Levchenko, V.I.Marushenko, A.F.Mezentsev, H.Obermeier, A.A.Petrinin, U.Rohrer, A.I.Smirnov, A.G.Sergeev, S.G.Skornjakov, E.Steiner, G.Strassner, V.M.Suvorov, A.Vacchi.* // Nucl. Instr. Meth., 1985. V.A238. P.365.

фокусирующий кристалл-дифракционный спектрометр для исследования пи-атомов водорода и дейтерия в ПИЯФ в 1977г. [26]. Недавно в PSI (Leisi, 1994) были измерены сдвиг $\epsilon_{1s} = 7.106 \pm 0.062$ эВ и ширина $\Gamma_{1s} = 0.97 \pm 0.15$ эВ $1s$ -уровня в пионном атоме водорода. Это позволяет впервые получить длины b_0 и b_1 при нулевой энергии:

$$b_0 = -0.11 \pm 0.10 \text{ Фм}, \quad b_1 = -0.136 \pm 0.010 \text{ Фм}.$$

Точность b_1 равна 7%, а для b_0 она составляет $\sim 90\%$, то есть изоскалярная длина пион-нуклонного рассеяния фактически остается неопределенной. Определение b_0 с хорошей точностью необходимо для адекватного описания пион-ядерного взаимодействия. Кроме того, величина b_0 непосредственно связана с такой фундаментальной проблемой в физике адронов, как нарушение киральной симметрии, в частности, от b_0 существенно зависит значение и точность определения пион-нуклонного σ -члена. В настоящее время идет подготовка эксперимента по исследованию π -H-атомов на Московской мезонной фабрике [27-29].

Измерение массы π^- -мезона

Наиболее точное значение массы π^- -мезона получено в PSI (Leisi, 1986). Новый анализ этих данных (Jeskelmann, 1994) привел к двум возможным значениям m_{π^-} , разница между которыми в 6 раз превосходит экспериментальную ошибку. Неоднозначность связана с неопределенностью поправки на электронное экранирование. Для устранения указанной неоднозначности мы планируем новое измерение массы π^- -мезона.

Исследование спин-зависящего сильного пион-нуклонного взаимодействия

Этот тип взаимодействия приводит к дополнительному сверхтонкому расщеплению π -атомных уровней с $l \neq 0$. Как показывают расчеты [27-29], величина эффекта сравнима с электромагнитным расщеплением для $2p$ -уровней π -атомов с $Z \leq 5$. До сих пор указанный эффект экспериментально не наблюдался. Мы планируем провести измерение сверхтонкого расщепления $3d - 2p$ -переходов в легчайших π -атомах: ${}^6,7\text{Li}$, ${}^9\text{Be}$, ${}^{10,11}\text{B}$.

Для решения описанных задач в 1995 г. создан дифракционный спектрометр с двумя плоскими кристаллами, конструкция которого позволяет проводить измерения энергии рентгеновских квантов в диапазоне от 2.5 кэВ до 100 кэВ. Прибор будет размещен на протонном пучке Московской мезонной фабрики. Геометрия мишени аналогична той, которая была использована при измерении массы π^- -мезона в ПИЯФ [4].

Энергетическое разрешение спектрометра в области энергии $3p - 1s$ -перехода в π -атоме водорода (~ 3 кэВ) составляет ~ 0.6 эВ, что позволяет измерить ширину $1s$ -уровня $\Gamma_{1s} \sim 0.9$ эВ с точностью не хуже 5%. Использование в качестве реперов рентгеновских K_{α_1} и K_{α_2} линий Ag с энергиями (2957.790 ± 0.009) и (2955.661 ± 0.012) эВ позволяет измерить сдвиг $1s$ -уровня π -водорода ϵ_{1s} с точностью не хуже 1%.

Высокое разрешение спектрометра (ширина приборной линии ~ 1 угл.сек.) позволяет измерить сверхтонкое расщепление $2p$ -уровней легчайших π -атомов и выделить вклад спин-зависящего взаимодействия.

То же обстоятельство дает возможность при соответствующем выборе мезоатомных переходов разделить компоненты, отвечающие различному числу электронов на K -орбите. Это устранил главную неоднозначность при измерении массы π^- -мезона, связанную с учетом электронного экранирования.

образование медленных (например, при трехчастичном распаде η) π^- -мезонов с большими орбитальными моментами относительно ядра-остатка, что может приводить к заселению π -атомных состояний с $l \neq 0$. Разрядка таких состояний должна сопровождаться испусканием характеристического рентгеновского излучения, и оно может быть использовано в качестве сигнала.

Мы предприняли попытку обнаружить с помощью кристалл-дифракционного спектрометра в спектре магниевой мишени, облучаемой пучком 70 ГэВ протонов, излучение $3d - 2p$ -перехода π -Ne-атома с расчетной энергией 51 519 эВ (выбор Ne удобен тем, что он заведомо не содержится в мишени из чистого Mg). Результат показан на рис. 8.

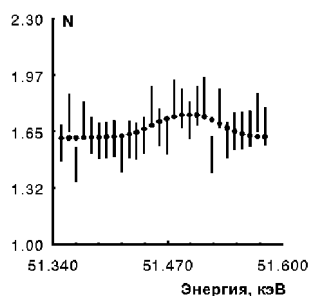


Рис.8. Результат поиска $3d - 2p$ -перехода π -Ne-атома. N — число счетов на 10^{12} протонов.

Возможный пик имеет амплитуду (0.36 ± 0.15) счета на 10^{12} протонов, его положение соответствует энергии $(51\,521 \pm 14)$ эВ, ширина не превышает 100 эВ. Из этого измерения верхний предел на сечение образования возбужденного π -Ne-атома в столкновении 70 ГэВ протона с ядром Mg найден равным 0.5 мб.

Перспективы

1. Исследование мезоатомов на Московской мезонной фабрике с помощью двухкристального дифракционного спектрометра

Определение амплитуд (длин) пион-нуклонного рассеяния при нулевой энергии

Длины пион-нуклонного рассеяния определяются с помощью дисперсионных соотношений из фазового анализа данных по πp -рассеянию при низких энергиях и экстраполяции к нулевой энергии. Этот непрямой метод приводит к неоднозначным результатам как из-за разброса экспериментальных данных, так и вследствие различий результатов фазового анализа. Иной способ определения пион-нуклонных длин рассеяния — исследование $(np - 1s)$ -переходов в пи-мезоатоме водорода. Сдвиг $1s$ -уровня ϵ_{1s} обусловлен упругой, а ширина Γ_{1s} — неупругой частью пион-нуклонного взаимодействия. Точность получаемых при этом изоскалярной b_0 и изовекторной b_1 длин, определяющих амплитуду s -волнового πN -рассеяния $f_{\pi N} = b_0 + b_1(\vec{\tau} \cdot \vec{t})$, не содержит теоретических неопределенностей и зависит только от экспериментальных погрешностей. Впервые предложено использовать

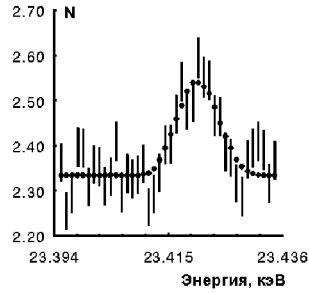


Рис.7. Дифракционный профиль $5g - 4f$ -перехода в Σ^- -C-атоме. N – число счетов на 10^{12} протонов.

Результат измерения показан на рис.7. Энергия, соответствующая измеренному пику, была найдена равной $(23\,420.47 \pm 0.49 \pm 0.62)$ эВ и находится в хорошем согласии с расчетным значением $23\,420.72$ эВ, вычисленным с табличными значениями массы и магнитного момента Σ^- -гиперона. Расчет был выполнен с помощью программы, описанной в [24], интегрированием уравнения Дирака с потенциалом для ядра конечных размеров, включавшим кулоновское и сильное взаимодействие, и с учетом всех существенных поправок. Совпадение энергий позволило надежно идентифицировать измеренную линию как излучение $5g - 4f$ -перехода в Σ^- -C-атоме.

По измеренной энергии перехода было выполнено новое определение массы Σ^- -гиперона:

$$m_{\Sigma^-} = 1\,197.417 \pm 0.040 \text{ МэВ } (\pm 34 \text{ ppm}).$$

Ошибка этого результата в 1.5 меньше ошибки средневзвешенной массы, полученной из остальных экспериментов.

Скорость счета на максимуме измеренного перехода составила 320 час^{-1} , что даже немного превосходит интенсивность K -атомной линии. Полученный результат означает, что образование гиперонных атомов в мишени обусловлено преимущественно рождением гиперонов в неупругих взаимодействиях протонов с ядрами. Этот механизм обеспечивает интенсивность излучения, достаточную для проведения систематических исследований Σ^- -атомов, а также делает перспективным поиск излучения Ξ^- - и, возможно, Ω^- -атомов.

Исследование возможного образования пионных атомов при распаде адронных резонансов

Значительная интенсивность π^- -атомного излучения в экспериментах на ускорителе ИФВЭ стимулировала нашу работу по поиску рождения π^- -мезонов на ядрах в связанные состояния [25]. Такое рождение теоретически рассматривалось для реакций фоторождения (γ, π^-), электророждения ($e, e'\pi^-$) и передачи пиона нуклоном ($n, p\pi^-$), но пока не наблюдалось экспериментально. Предсказано, что π^- -мезоны должны рождаться преимущественно в s -состояниях и исследование этих состояний возможно путем регистрации выходящей частицы.

При высоких энергиях заметная часть π^- -мезонов образуется через рождение и последующий распад адронных резонансов. Наличие распадного промежутка делает возможным

атомов.

Энергии каонного $4f - 3d$ - и пионного $4d - 2p$ -переходов были найдены равными $(22\,105.61 \pm 0.26 \pm 0.14)$ и $(24\,828.36 \pm 0.15 \pm 0.15)$ эВ. Первой здесь указана статистическая ошибка, второй систематическая.

Экспериментальная энергия пионного $4d - 2p$ -перехода в пределах ошибки совпала с расчетным значением, что подтвердило правильность использованной методики измерений и обработки (ошибка расчета равнялась 0.37 эВ и определялась погрешностью поправки на электронное экранирование, большая величина расчетной ошибки исключила возможность использования этого измерения для нового определения π^- -массы).

Масса K^- -мезона была определена сравнением расчетной энергии перехода с экспериментальным значением. Расчетная энергия была найдена численным интегрированием уравнения Клейна-Гордона с потенциалом для ядра конечных размеров, включавшим кулоновское взаимодействие, потенциал поляризации вакуума вплоть до третьего порядка и оптический потенциал сильного взаимодействия. Были учтены также релятивистская поправка на приведенную массу и поправки на ядерную поляризацию, электронное экранирование и отдачу атома. Погрешность расчета была не более 0.02 эВ. В результате фитирования для массы K^- -мезона было получено новое значение:

$$m_{K^-} = 493.696 \pm 0.007 \text{ МэВ } (\pm 14 \text{ ppm}),$$

которое по точности превосходит все предыдущие измерения [23].

Измерение массы Σ^- -гиперона

Следующим шагом в развитии экспериментальных исследований на установке "Кварц" в ИФВЭ стала работа по поиску излучения Σ -атомов, которая в итоге привела к новому определению массы Σ^- -гиперона [7,23].

Нужно отметить, что исследование гиперонных атомов встречает большие трудности, связанные с коротким временем жизни гиперонов, препятствующим получению интенсивных гиперонных пучков низкой энергии. До наших опытов единственный способ получения гиперонных атомов был основан на ядерном поглощении остановившихся в веществе K^- -мезонов, которое с вероятностью порядка 10% приводит к рождению низкоэнергетичных Σ^- -гиперонов, успевающих до распада замедлиться и перейти в связанное атомное состояние.

Очевидно, что этот механизм должен был обеспечить и в нашем случае интенсивность Σ -атомного излучения, как минимум, на уровне 10 % от интенсивности K -атомного излучения. Но наряду с этим заметный, если не основной, вклад следовало ожидать от образования Σ^- -гиперонов в результате неупругих взаимодействий 70 ГэВ протонов с ядрами мишени. Теоретические оценки этого вклада были весьма неопределенны, и окончательный ответ мог быть получен только экспериментальным путем.

Для измерений был выбран $5g - 4f$ -переход в Σ -С-атоме, имеющий энергию 23.4 кэВ. В качестве реперных были использованы $K_{\alpha 1}$ линия серебра и $K_{\alpha 2}$ линия олова с энергией 25.0 кэВ, контрольное измерение было сделано на $4d - 2p$ -переходе в π -С-атоме. Ввиду поискового характера работы статистика накапливалась только в одном положении прибора, хотя это и увеличило систематическую погрешность определения энергии линий. Мишень и параметры спектрометра были такие же, как и в опыте по определению массы K^- -мезона.

шелей коллиматора, и слоев меди, обернутых молибденовой фольгой, расположенных напротив перегородок коллиматора. Медные слои служили для увеличения числа остановок в графите, а молибденовые – для ослабления фона от тормозного излучения электронов. Интенсивность, положение и поперечные размеры протонного пучка на мишени измерялись с помощью камер вторичной эмиссии и учитывались при обработке. С целью уменьшения потерь в воздухе при прохождении излучения от мишени к детектору (≈ 10 м) установка была оборудована гелиевым трактом.

Для дифракции излучения была использована пластина природного кварца с отражающими плоскостями (130), нормальными большим граням. При толщине 1.1 мм и радиусе изгиба 5 м пластина имела упругую квазимозаику, равную 12 угл.сек. Изгиб осуществлялся зажатием пластины между стальными цилиндрическими зеркалами с отверстием для излучения 8×8 см². Рабочий диапазон углов дифракции составлял примерно $\pm 15^\circ$, угловое положение кристалла определялось с помощью оптического интерферометра с ценой отсчета 0.04 угл.сек.

Дифрагировавшее излучение регистрировалось Ge(Li) детектором с рабочим объемом $4 \times 5 \times 160$ мм³ и разрешением 1.8 кэВ. При ширине приемной щели перед детектором, равной 0.35 мм, и высоте 160 мм угловое разрешение кристалл-дифракционного спектрометра равнялось 14 угл.сек., что соответствовало энергетическому разрешению 6.3 эВ для излучения с энергией 22.1 кэВ. Такое разрешение исключало вклад нециркулярного $4d-3p$ -перехода в экспериментальную линию, устраняя связанную с его учетом систематическую погрешность. Эффективность установки для исследуемого излучения составляла $2 \cdot 10^{-9}$.

На рис.6 показаны измеренные дифракционные профили $4d-2p$ -перехода в π -С-атоме и $4f-3d$ -перехода в K -С-атоме.

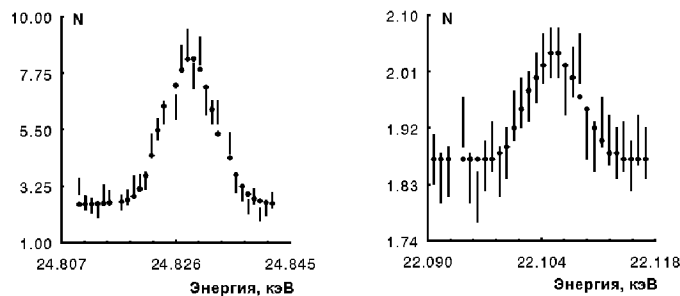


Рис. 6. Дифракционные профили $4d-2p$ перехода в π -С-атоме и $4f-3d$ -перехода в K -С-атоме. По оси ординат (N) – число счетов на 10^{12} протонов. Точками показан результат фитирования.

При средней интенсивности пучка 70 ГэВ протонов, равной $4 \cdot 10^{11}$ с⁻¹, скорость счета на максимуме K -атомной линии составила 300 час⁻¹, а уровень фона 3000 час⁻¹. В случае нециркулярной $4d-2p$ π -атомной линии скорость счета равнялась 9800 час⁻¹ при фоне около 4000 час⁻¹. В пересчете на скорость счета циркулярного $3d-2p$ -перехода это дает значение 50 000 час⁻¹ при том же уровне фона. Измеренные интенсивности находятся в согласии с расчетными значениями. Сравнение с другими экспериментами приводит к заключению, что использование пучка протонов высокой энергии не только позволяет исследовать каонные атомы, но и обеспечивает превосходные условия для изучения пионных

Таблица 2.

	E_{3d-2p} , эВ	ϵ_{2p} , эВ	Γ_{2p} , эВ
^{12}C	18401.88 ± 0.10	3.16 ± 0.16	1.36 ± 0.22
^{16}O	32858.28 ± 0.16	15.05 ± 0.26	6.76 ± 0.36
^{18}O	32892.79 ± 0.17	15.50 ± 0.27	7.47 ± 0.44
^{24}Mg	74403.18 ± 0.41	128.45 ± 0.62	72.5 ± 1.8
^{26}Mg	74436.45 ± 0.43	126.08 ± 0.63	81.1 ± 1.9
^{28}Si	101573.7 ± 1.2	284.7 ± 1.4	196.2 ± 5.3
^{30}Si	101605.2 ± 1.9	281.6 ± 2.1	195.5 ± 7.9

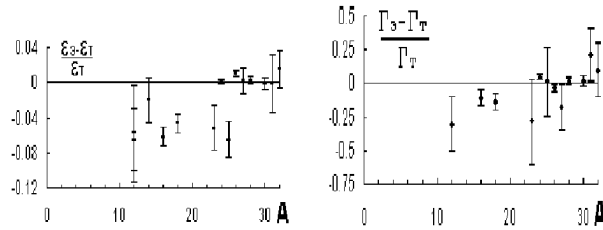


Рис. 5. Относительная разница экспериментальных (э) и теоретических (т) значений сдвигов энергий (ϵ) и ширин (Γ) $2p$ -уровней пионных атомов, обусловленных сильным взаимодействием, в зависимости от массового числа.

На первом этапе работы в 1980-83 гг. в составе установки использовался спектрометр, описанный в [10]. С его помощью были измерены интенсивности ряда пионных линий, получены верхние оценки для интенсивности каонных и гиперонных линий, изучены спектры сплошного излучения различных мишеней в рентгеновской области [19].

На основе этих данных в 1987-89 гг. в ПИЯФ был спроектирован и построен новый спектрометр того же типа (см. рис. 1) с расширенным в мягкую область до 20 кэВ рабочим диапазоном, улучшенной светосилой, с угломерной системой на базе интерферометра оригинальной конструкции, новым детектором, усиленной защитой от фона вторичных частиц и рядом других усовершенствований. Параллельно в ИФВЭ был введен в строй бустер, что в несколько раз увеличило интенсивность пучка в ускорителе. В совокупности это позволило осуществить первые в мировой практике успешные опыты по исследованию рентгеновского излучения каонных и гиперонных атомов с помощью кристалл-дифракционной методики [6,7,20-22].

Первым важным результатом, полученным на новой установке, стало определение массы K^- -мезона [6], которое сильно изменило мировое среднее этой величины [23]. В опыте был измерен $4f-3d$ -переход K -С-атома с энергией 22.1 кэВ. Для калибровки спектрометра были использованы $K_{\alpha 1}$ и $K_{\alpha 2}$ -линии серебра с энергиями 22.16 и 21.99 кэВ. Контрольный опыт был выполнен путем измерения нециркулярного $4d-2p$ -перехода в π -С-атоме с энергией 24.8 кэВ (в 5 раз более интенсивный циркулярный $3d-2p$ -переход с энергией 18.4 кэВ лежал за пределами рабочего диапазона спектрометра).

В качестве источника мезорентгеновского излучения была использована толстая составная мишень из чередующихся слоев сверхплотного графита, расположенных напротив

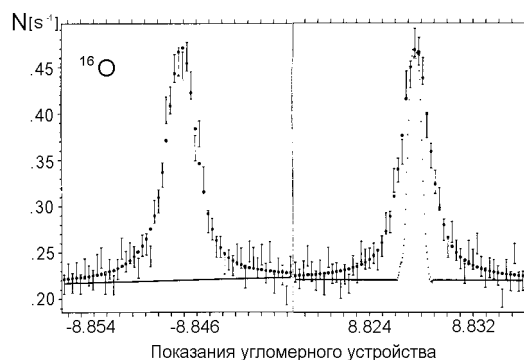


Рис. 4. Дифракционные профили $3d - 2p$ -перехода в $\pi^{-16}\text{O}$ для левого и правого положений спектрометра. Внутри экспериментального профиля (справа) показана форма приборной линии. Уширение экспериментальной кривой обусловлено неупругой частью пион-ядерного взаимодействия.

С помощью кристалл-дифракционного спектрометра в PSI были исследованы $3d - 2p$ -переходы в π -атомах ^{12}C , $^{16,18}\text{O}$, $^{24,26}\text{Mg}$, $^{28,30}\text{Si}$. Эти атомы представляют интерес по ряду причин. Свойства основных состояний легких ядер достаточно хорошо известны, что облегчает определение параметров пион-ядерного взаимодействия. Зарядовые распределения для этой области ядер хорошо изучены, что позволяет надежно определить распределение протонов, а распределение нейтронов, по крайней мере, для $N=Z$, считать подобным протонному. Поскольку для перечисленных π -атомов радиус $2p$ -орбиты много больше радиуса ядра, сдвиги $2p$ -уровней почти полностью определяются p -волновой (нелокальной) частью пион-ядерного взаимодействия. В то же время для определения s -волновой части взаимодействия могут быть использованы имеющиеся в литературе данные по сдвигам и ширинам s -состояний.

В таблице 2 представлены результаты измерений, выполненных на Швейцарской мезонной фабрике [9] (обозначения те же, что в табл.1). Из таблицы видно, что точность измерения энергий π -атомных переходов составляет $4 \div 18$ ppm, а точность измерения ширины $2 \div 14\%$, что в $3 \div 5$ раз выше точности, достигнутой в работе [5] (см. табл.1).

Для всех исследованных π -атомов были выполнены расчеты сдвигов и ширины $2p$ -уровней как в рамках оптической модели [5,9,11], так и в рамках подхода, учитывающего ядерный релятивизм [14,15]. Качество описания в обоих подходах примерно одинаково. Сравнение теоретических и экспериментальных величин сдвигов и ширины для подхода, учитывающего ядерный релятивизм, показано на рис. 5.

Измерение массы K^- -мезона

Естественным развитием исследований, начатых в ПИЯФ, стало предложение эксперимента [16] по изучению каонных и гиперонных атомов на протонном синхротроне ИФВЭ. В 1979 г. это предложение было принято и в результате сотрудничества двух институтов ИФВЭ и ПИЯФ на выведенном протонном пучке с энергией 70 ГэВ была создана кристалл-дифракционная установка "Кварц" [17,18].

Таблица 1.

	E_{3d-2p} , эВ	ϵ_{2p} , эВ	Γ_{2p} , эВ
^{23}Na	62447 ± 2.0	86 ± 2.0	60 ± 14
^{24}Mg	74405 ± 1.2	133 ± 1.2	87 ± 6.3
^{25}Mg	74427 ± 2.5	137 ± 2.5	76 ± 19
^{26}Mg	74437 ± 2.0	130 ± 2.0	76 ± 7.1
^{27}Al	87480 ± 3.4	210 ± 3.4	102 ± 19
^{28}Si	101571 ± 3.4	288 ± 3.4	181 ± 15.3
^{31}P	116797 ± 13	410 ± 13	246 ± 60
^{32}S	133126 ± 21	619 ± 21	635 ± 145

Исследования были продолжены на Швейцарской мезонной фабрике (PSI), где в начале 80-х гг. по нашему проекту совместно с PSI был создан кристалл-дифракционный спектрометр по Дю-Монду [8,13]. На рис. 3 показана схема этой экспериментальной установки. Мезорождающая мишень состояла из двух бериллиевых пластин.

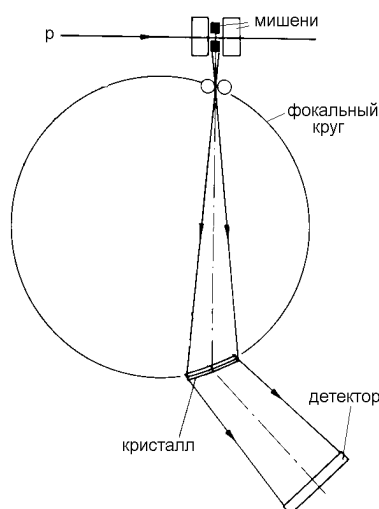


Рис. 3. Схема установки в PSI.

мишень находилась между бериллиевыми пластинами и представляла собой кольцо из исследуемого вещества, в котором останавливались π^- -мезоны, образуя π -атомы. Мезорентгеновское излучение мишени дифрагировало на изогнутом по цилиндру с радиусом 5 м кристалле кварца и регистрировалось сцинтилляционным детектором. Схема Дю-Монда позволяла работать с мезорентгеновскими мишенями сравнительно малого веса (до 5 г), что дало возможность исследовать образцы с обогащенным изотопическим составом.

Для измерения углов дифракции применялся лазерный интерферометр, обеспечивавший точность ± 0.02 угл.сек. в диапазоне углов от $+20^\circ$ до -20° . При токе протонов 20 мкА скорость счёта полезных квантов на максимуме дифракционной линии составляла от 0.1 с^{-1} до 5 с^{-1} (в зависимости от исследуемого изотопа) при отношении эффекта к фону ~ 1 (см. рис. 4).

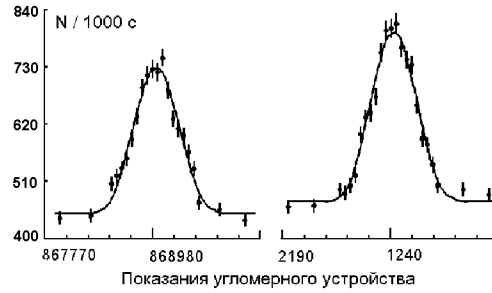


Рис. 2. Левый и правый дифракционные профили 4f-3d перехода в π -Ca.

средневзвешенное значение массы π^- -мезона:

$$m_{\pi^-} = 139\,565.7 \pm 1.7 \text{ кэВ } (\pm 12 \text{ ppm}).$$

Таким образом, предложенная нами схема эксперимента позволила на ускорителе с током ~ 0.2 мкА улучшить точность измерения массы отрицательного пиона почти на порядок.

Описанная методика получила широкое распространение. С ее использованием были проведены измерения массы π^- -мезона в США (Wu, 1980; относительная точность 6.4 ppm) и на Швейцарской мезонной фабрике (Leisi, 1986 и Jeckelmann, 1994; относительная точность 2.6 ppm). В последнем случае был использован спектрометр ПИЯФ-PSI, описанный в [8].

Высокая точность определения массы π^- -мезона стимулировала цикл работ по прецизионному измерению импульса мюона в распаде $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$ (Frosch, 1994). В итоге предел на массу мюонного нейтрино был понижен

$$\text{с } m_{\nu_\mu} \leq 2.7 \text{ МэВ (Shafer, 1967)} \quad \text{до } m_{\nu_\mu} \leq 0.16 \text{ МэВ (Frosch, 1994)}.$$

Исследование сильного пион-ядерного взаимодействия в легких пионных атомах

Сильное взаимодействие π^- -мезона с ядром приводит к сдвигу и уширению уровней в π -атомах. Экспериментальные значения энергий переходов и ширин уровней можно сравнивать с теоретическими расчетами, основанными на различных подходах. Для детальной проверки теоретических моделей и уточнения их параметров необходимы высокая экспериментальная точность при высоком энергетическом разрешении, а также расширение круга исследуемых π -атомов.

Методика, разработанная в ПИЯФ и позволившая увеличить скорость счета более, чем на два порядка, открыла новые возможности для систематического изучения π -атомов. В 1977 г. на синхроциклотроне ПИЯФ были проведены исследования $3d - 2p$ -переходов в пионных атомах ^{23}Na , $^{24,25,26}\text{Mg}$, ^{27}Al , ^{28}Si , ^{31}P , ^{32}S [5,10-12], в которых была существенно улучшена точность измерения сдвигов и ширин $2p$ -уровней. При этом естественные ширины $3d - 2p$ -переходов были впервые измерены непосредственно. Результаты представлены в таблице 1 (E_{3d-2p} – энергия перехода, ϵ_{2p} и Γ_{2p} – соответственно, сдвиг и ширина $2p$ -уровня, обусловленные сильным пион-ядерным взаимодействием.)

ускорителях с интенсивностью пучка протонов $\sim 10^{12} \text{ с}^{-1}$. Экспериментальная установка схематически показана на рис. 1.

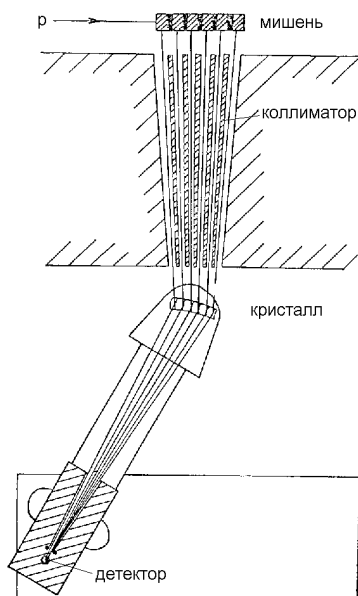


Рис. 1. Схема установки.

Пучок протонов с энергией 1 ГэВ облучал мезорождающую мишень, состоявшую из 25 медных дисков толщиной 2 мм и диаметром 20 мм, установленных в тени пластин многослойного коллиматора, расположенного в защитной стене. Мезорентгеновская мишень из исследуемого вещества, в которой останавливались π^- -мезоны, образуя π -атомы, находилась напротив щелей коллиматора в непосредственной близости от мезорождающей мишени. В такой геометрии плотность числа остановок π^- -мезонов в мезорентгеновской мишени повышается более, чем на два порядка, по сравнению с экспериментами на мезонных пучках. Ряд измерений был выполнен с мишенью, служившей одновременно и мезорождающей, и мезорентгеновской.

Исследуемое мезорентгеновское излучение проходило через многослойный коллиматор, дифрагировало на кристалле, изогнутом по цилиндру, и регистрировалось Ge(Li) детектором. В данном эксперименте был использован кристалл кварца (отражающие плоскости 1340) толщиной 4.7 мм с радиусом изгиба 5 м и рабочей апертурой $80 \times 90 \text{ мм}^2$. Полуширина дифракционного профиля составила 20 угловых секунд. Калибровка прибора осуществлялась по K_{α_1} -линии вольфрама с энергией 59.3 кэВ и γ -линиям, сопровождающим β -распад ^{182}Ta , с энергией 67.7 и 101.1 кэВ. Относительная точность спектрометра в диапазоне энергий $50 \div 100 \text{ кэВ}$ составила $\simeq 5 \cdot 10^{-6}$.

В эксперименте были измерены $4f - 3d$ -переходы в пионных атомах титана и кальция. На рис.2 показаны дифракционные профили перехода в π -Ca-атоме в левом и правом положениях прибора. При интенсивности протонного пучка 10^{12} с^{-1} скорость счета на максимуме дифракционной линии составила 1200 час^{-1} при фоне 1500 час^{-1} .

Для энергий $4f - 3d$ -переходов в пионных атомах титана и кальция были получены значения $(87\,649.2 \pm 1.9)$ и $(72\,347.0 \pm 1.1)$ эВ, соответственно, по которым было найдено

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКЗОТИЧЕСКИХ АТОМОВ С ПОМОЩЬЮ КРИСТАЛЛ-ДИФРАКЦИОННЫХ СПЕКТРОМЕТРОВ

Ю.М.Иванов, К.Е.Кирьянов, А.Ф.Мезенцев, А.А.Петрунин, А.И.Смирнов

Кристалл-дифракционная методика успешно развивается в ПИЯФ на протяжении многих лет. На кристалл-дифракционных спектрометрах, позволяющих проводить наиболее точные измерения энергий рентгеновских и гамма-линий, были выполнены широкие исследования ядерных спектров в (n, γ) -реакциях, изотопических и химических сдвигов рентгеновских линий [1–3].

С середины семидесятых годов в институте разрабатывается новое направление, связанное с применением дифракционных спектрометров для исследования рентгеновских спектров пионных и других экзотических атомов на протонных ускорителях ПИЯФ [4,5], ИФВЭ [6,7] и на Швейцарской мезонной фабрике (PSI) [8,9].

Измерение массы π^- -мезона

Первым экспериментом по исследованию экзотических атомов на синхротроне ПИЯФ было измерение массы π^- -мезона [4]. Высокая точность определения массы π^- -мезона имеет важное значение для улучшения экспериментального ограничения на массу мюонного нейтрино и для изучения сильного пион-ядерного взаимодействия с помощью пионных атомов. Ограничение на массу мюонного нейтрино находится из закона сохранения энергии–импульса для распада покоящегося π^+ -мезона:

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu.$$

В соответствующее уравнение входят три измеряемые величины: масса и импульс μ^+ и масса π^+ , причем, в качестве последней на основании CPT -теоремы берется масса π^- -мезона, известная с более высокой точностью.

Впервые измерение массы π^- -мезона с помощью кристалл-дифракционного спектрометра было выполнено на циклотроне в Беркли (Shafer, 1967). В этом эксперименте была использована схема спектрометра по Дю-Монду с мишенью, расположенной на выведенном пучке π^- -мезонов. Масса π^- -мезона была определена из измеренных энергий переходов между высокими боровскими орбитами пионных атомов, для которых влияние сильного пион-ядерного взаимодействия малó настолько, что его учет не вносит существенной ошибки. Опыт позволил в 4 раза улучшить точность определения массы π^- -мезона и довести относительную ошибку до 96 ppm (part per million). При скорости счета на максимуме дифракционной мезорентгеновской линии 3 час⁻¹ набор статистики продолжался 800 часов, и поэтому перспектива дальнейшего улучшения точности связывалась с созданием мезонных фабрик.

В 1974 г. в ПИЯФ была предложена новая постановка опыта, основанная на использовании в качестве источника мезорентгеновского излучения составной мишени, облучаемой непосредственно первичным протонным пучком. В 1975 г. был создан и размещен на протонном пучке синхротрона ПИЯФ дифракционный спектрометр по Кошуа [4,10], реализовавший это предложение. Новая схема эксперимента позволила существенно увеличить число полезных событий и проводить исследования экзотических атомов на обычных