

## 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  $(n, \gamma)$ -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 $\pi^-$ -мезона

Первым экспериментом по исследованию экзотических атомов на синхроциклотроне ПИЯФ было измерение массы  $\pi^-$ -мезона [4]. Высокая точность определения массы  $\pi^-$ -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  $\pi^+$ -мезона:

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

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

Впервые измерение массы  $\pi^-$ -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  $\pi^-$ -мезонов. Масса  $\pi^-$ -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  $\pi^-$ -мезона и довести относительную ошибку до 96 ppm (part per million). При скорости счета на максимуме дифракционной мезорентгеновской линии  $3 \text{ час}^{-1}$  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 синхроциклотрона 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

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

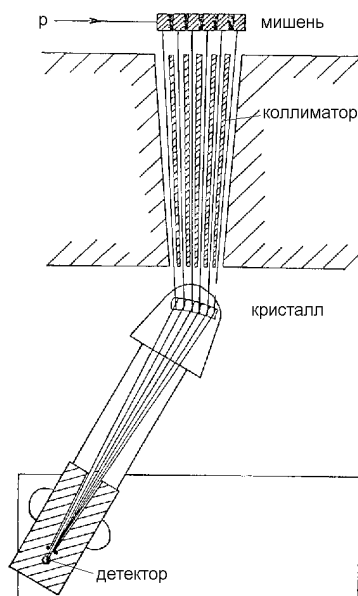


Рис. 1. Схема установки.

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 многощелевого коллиматора, расположенного в защитной стене. Мезорентгеновская мишень из исследуемого вещества, в которой останавливались  $\pi^-$ -мезоны, образуя  $\pi$ -атомы, находилась напротив щелей коллиматора в непосредственной близости от мезорождающей мишени. В такой геометрии плотность числа остановок  $\pi^-$ -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 многощелевой 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  $K_{\alpha_1}$ -линии вольфрама с энергией 59.3 кэВ и  $\gamma$ -линиям, сопровождающим  $\beta$ -распад  $^{182}\text{Ta}$ , 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  $\pi$ -Ca-атоме в левом и правом положениях прибора. При интенсивности протонного пучка  $10^{12} \text{ с}^{-1}$  скорость счета на максимуме дифракционной линии составила  $1200 \text{ час}^{-1}$  при фоне  $1500 \text{ час}^{-1}$ .

Для энергий  $4f - 3d$ -переходов в пионных атомах титана и кальция были получены значения  $(87649.2 \pm 1.9)$  и  $(72347.0 \pm 1.1)$  эВ, соответственно, по которым было найдено

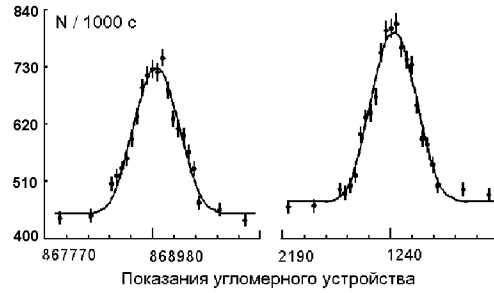


Рис. 2. Левый и правый дифракционные профили 4f-3d перехода в  $\pi$ -Ca.

средневзвешенное значение массы  $\pi^-$ -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  $\sim 0.2$  мкА улучшить точность измерения массы отрицательного пиона почти на порядок.

Описанная методика получила широкое распространение. С ее использованием были проведены измерения массы  $\pi^-$ -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  $\pi^-$ -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  $\pi^-$ -мезона с ядром приводит к сдвигу и уширению уровней в  $\pi$ -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  $\pi$ -атомов.

Методика, разработанная в ПИЯФ и позволившая увеличить скорость счета более, чем на два порядка, открыла новые возможности для систематического изучения  $\pi$ -атомов. В 1977 г. на синхроциклотроне ПИЯФ были проведены исследования  $3d - 2p$ -переходов в пионных атомах  $^{23}\text{Na}$ ,  $^{24,25,26}\text{Mg}$ ,  $^{27}\text{Al}$ ,  $^{28}\text{Si}$ ,  $^{31}\text{P}$ ,  $^{32}\text{S}$  [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,  $\epsilon_{2p}$  и  $\Gamma_{2p}$  – соответственно, сдвиг и ширина  $2p$ -уровня, обусловленные сильным пион-ядерным взаимодействием.)

Таблица 1.

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

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.

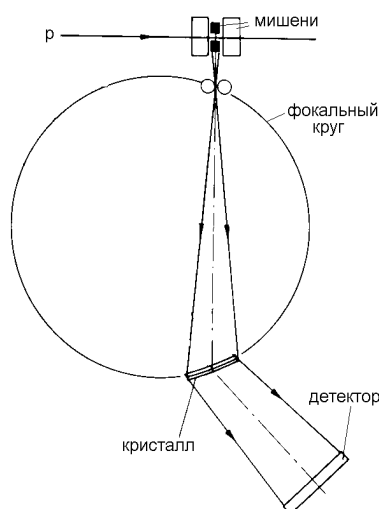
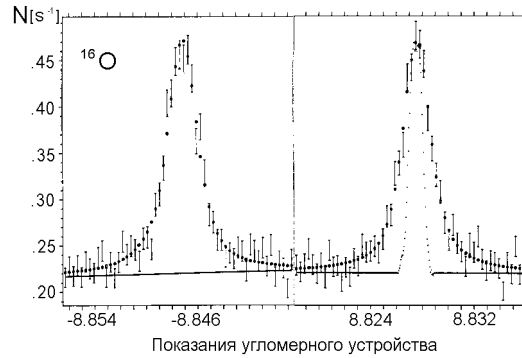


Рис. 3. Схема установки в PSI.

мишень находилась между бериллиевыми пластинами и представляла собой кольцо из исследуемого вещества, в котором останавливались  $\pi^-$ -мезоны, образуя  $\pi$ -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  $\pm 0.02$  угл.сек. в диапазоне углов от  $+20^\circ$  до  $-20^\circ$ . При токе протонов 20 мкА скорость счёта полезных квантов на максимуме дифракционной линии составляла от  $0.1 \text{ с}^{-1}$  до  $5 \text{ с}^{-1}$  (в зависимости от исследуемого изотопа) при отношении эффекта к фону  $\sim 1$  (см. рис. 4).



**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  $\pi$ -атомах  $^{12}\text{C}$ ,  $^{16,18}\text{O}$ ,  $^{24,26}\text{Mg}$ ,  $^{28,30}\text{Si}$ . 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  $\pi$ -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  $\pi$ -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).

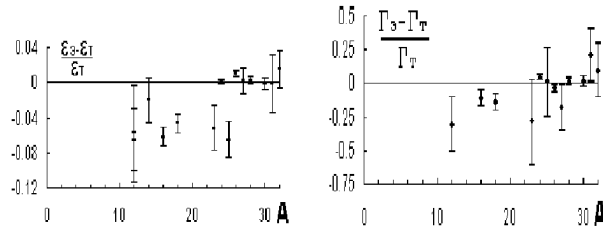
Для всех исследованных  $\pi$ -атомов были выполнены расчеты сдвигов и ширины  $2p$ -уровней как в рамках оптической модели [5,9,11], так и в рамках подхода, учитывающего ядерный релятивизм [14,15]. Качество описания в обоих подходах примерно одинаково. Сравнение теоретических и экспериментальных величин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

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



**Рис. 5.** Относительная разница экспериментальных (э) и теоретических (т) значений сдвигов энергий ( $\epsilon$ ) и ширин ( $\Gamma$ )  $2p$ -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  $\pi$ -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).

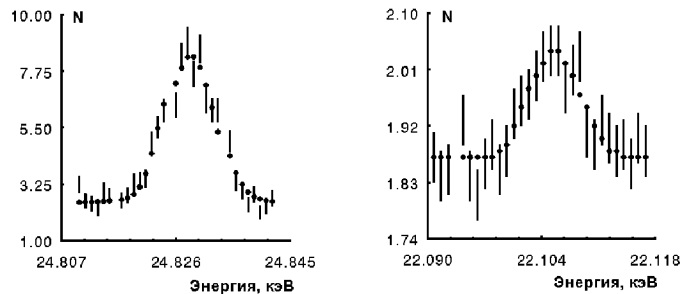
В качестве источника мезорентгеновского излучения была использована толстая составная мишень из чередующихся слоев сверхплотного графита, расположенных напротив

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 ( $\approx 10$  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  $8 \times 8$  см<sup>2</sup>. 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  $4 \times 5 \times 160$  мм<sup>3</sup> 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  $\pi$ -С-атоме и  $4f-3d$ -перехода в  $K$ -С-атоме.



**Рис. 6.** Дифракционные профили  $4d-2p$  перехода в  $\pi$ -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<sup>-1</sup>, скорость счета на максимуме  $K$ -атомной линии составила 300 час<sup>-1</sup>, а уровень фона 3000 час<sup>-1</sup>. В случае нециркулярной  $4d-2p$   $\pi$ -атомной линии скорость счета равнялась 9800 час<sup>-1</sup> при фоне около 4000 час<sup>-1</sup>. В пересчете на скорость счета циркулярного  $3d-2p$ -перехода это дает значение 50 000 час<sup>-1</sup> 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

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  $\pi^-$ -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].

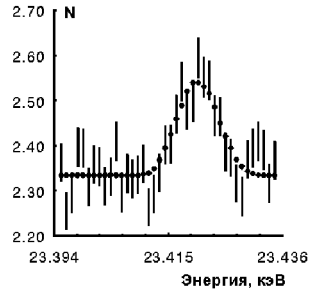
## Измерение массы $\Sigma^-$ -гиперона

Следующим шагом в развитии экспериментальных исследований на установке "Кварц" в ИФВЭ стала работа по поиску излучения  $\Sigma$ -атомов, которая в итоге привела к новому определению массы  $\Sigma^-$ -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  $\Sigma^-$ -гиперонов, успевающих до распада замедлиться и перейти в связанное атомное состояние.

Очевидно, что этот механизм должен был обеспечить и в нашем случае интенсивность  $\Sigma$ -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  $\Sigma^-$ -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  $\Sigma$ -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  $\pi$ -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.



**Рис.7.** Дифракционный профиль  $5g - 4f$ -перехода в  $\Sigma$ -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  $\Sigma^-$ -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  $\Sigma$ -C-атоме.

По измеренной энергии перехода было выполнено новое определение массы  $\Sigma^-$ -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  $320 \text{ час}^{-1}$ , 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  $\Sigma$ -атомов, а также делает перспективным поиск излучения  $\Xi^-$ - и, возможно,  $\Omega$ -атомов.

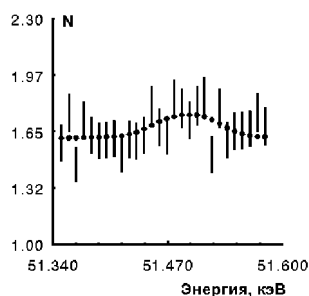
## Исследование возможного образования пионных атомов при распаде адронных резонансов

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

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

образование медленных (например, при трехчастичном распаде  $\eta$ )  $\pi^-$ -мезонов с большими орбитальными моментами относительно ядра-остатка, что может приводить к заселению  $\pi$ -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  $\pi$ -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  $\pi$ -Ne-атома. N — число счетов на  $10^{12}$  протонов.

Возможный пик имеет амплитуду  $(0.36 \pm 0.15)$  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  $\pi$ -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  $\pi p$ -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  $\epsilon_{1s}$  обусловлен упругой, а ширина  $\Gamma_{1s}$  — неупругой частью пион-нуклонного взаимодействия. Точность получаемых при этом изоскалярной  $b_0$  и изовекторной  $b_1$  длин, определяющих амплитуду  $s$ -волнового  $\pi N$ -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

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  $\sigma$ -члена. В настоящее время идет подготовка эксперимента по исследованию  $\pi$ -H-атомов на Московской мезонной фабрике [27-29].

### Измерение массы $\pi^-$ -мезона

Наиболее точное значение массы  $\pi^-$ -мезона получено в PSI (Leisi, 1986). Новый анализ этих данных (Jeskelmann, 1994) привел к двум возможным значениям  $m_{\pi^-}$ , 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  $\pi^-$ -мезона.

### Исследование спин-зависящего сильного пион-нуклонного взаимодействия

Этот тип взаимодействия приводит к дополнительному сверхтонкому расщеплению  $\pi$ -атомных уровней с  $l \neq 0$ . Как показывают расчеты [27-29], величина эффекта сравнима с электромагнитным расщеплением для  $2p$ -уровней  $\pi$ -атомов с  $Z \leq 5$ . До сих пор указанный эффект экспериментально не наблюдался. Мы планируем провести измерение сверхтонкого расщепления  $3d - 2p$ -переходов в легчайших  $\pi$ -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  $\pi^-$ -мезона в ПИЯФ [4].

Энергетическое разрешение спектрометра в области энергии  $3p - 1s$ -перехода в  $\pi$ -атоме водорода ( $\sim 3$  кэВ) составляет  $\sim 0.6$  эВ, что позволяет измерить ширину  $1s$ -уровня  $\Gamma_{1s} \sim 0.9$  эВ с точностью не хуже 5%. Использование в качестве реперов рентгеновских  $K_{\alpha_1}$  и  $K_{\alpha_2}$  линий Ag с энергиями  $(2957.790 \pm 0.009)$  и  $(2955.661 \pm 0.012)$  эВ позволяет измерить сдвиг  $1s$ -уровня  $\pi$ -водорода  $\epsilon_{1s}$  с точностью не хуже 1%.

Высокое разрешение спектрометра (ширина приборной линии  $\sim 1$  угл.сек.) позволяет измерить сверхтонкое расщепление  $2p$ -уровней легчайших  $\pi$ -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  $\pi^-$ -мезона, связанную с учетом электронного экранирования.

## 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  $\Sigma^-$ -гиперона с точностью 10 ppm, и обсуждается возможный эксперимент по измерению массы  $\pi^-$ -мезона с точностью 3 ppm.

Также готовится предложение по исследованию экзотических атомов во ФНАЛ (США), где к 2000 году планируется получить пучок 120 ГэВ протонов с интенсивностью  $10^{13} \text{ c}^{-1}$ . Более высокая интенсивность (на порядок выше, чем в ИФВЭ) позволит существенно улучшить точность измерений масс частиц и впервые приступить к изучению  $\Xi$ - и, возможно,  $\Omega$ -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.

- [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] *V.L.Birbrair, A.V.Gridnev, L.P.Lapina, A.A.Petrinin, A.I.Smirnov.* Preprint LNPI-1627, Leningrad, 1991. 17 p.
- [15] *V.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

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.