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 синхроциклотроне 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:

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

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 мало́ 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 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 $\sim 10^{12}$ с$^{-1}$. Экспериментальная установка схематически показана на рис. 1.

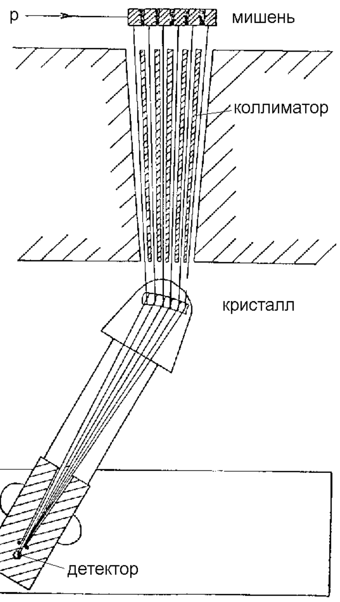

Рис. 1. Схема установки.

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 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 многощелевой коллиматор, дифрагировало на кристалле, изогнутом по цилиндру, и регистрировалось Ge(Li) детектором. В данном эксперименте был использован кристалл кварца (отражающие плоскости $13\bar{4}0$) толщиной 4.7 мм с радиусом изгиба 5 м и рабочей апертурой 80×90 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 $50 \div 100$ кэВ составила $\simeq 5\cdot10^{-6}$.

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 $(87\,649.2\pm1.9)$ и $(72\,347.0\pm1.1)$ эВ, соответственно, по которым было найдено

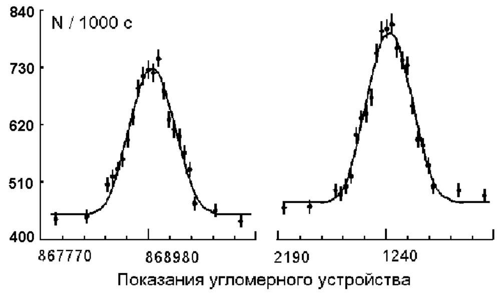

Рис. 2. Левый и правый дифракционные профили 4f-3d перехода в π-Ca.

средневзвешенное значение массы π^--мезона:

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

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 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 $\pi^+ \to \mu^+\nu_\mu$ (Frosch,1994). В итоге предел на массу мюонного нейтрино был понижен

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

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}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 ($E_{3d\text{-}2p}$ – энергия перехода, ϵ_{2p} и Γ_{2p} – соответственно, сдвиг и ширина $2p$-уровня, обусловленные сильным пион-ядерным взаимодействием.)

Таблица 1.

	$E_{3d\text{-}2p}$, 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. Мезорентгеновская

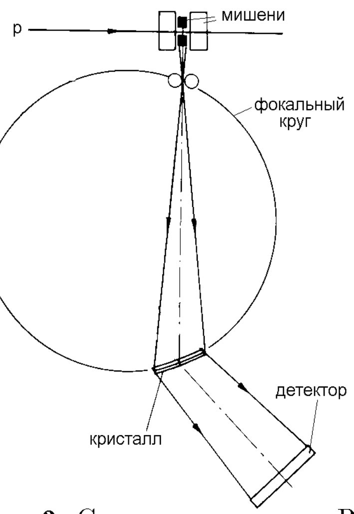

Рис. 3. Схема установки в PSI.

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 $+20^o$ до -20^o . 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).

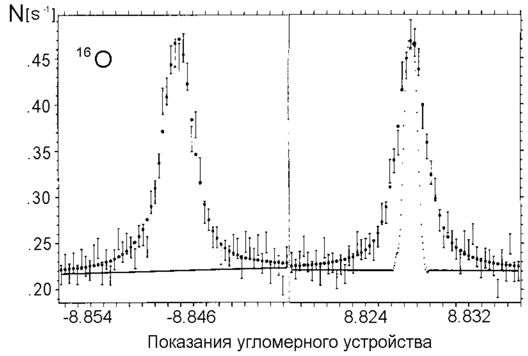

Рис. 4. Дифракционные профили $3d-2p$-перехода в π-^{16}O для левого и правого положений спектрометра. Внутри экспериментального профиля (справа) показана форма приборной линии. Уширение экспериментальной кривой обусловлено неупругой частью пион-ядерного взаимодействия.

С помощью кристалл-дифракционного спектрометра в PSI были исследованы $3d-2p$-переходы в π-атомах ^{12}C, ^{16,18}O, ^{24,26}Mg, ^{28,30}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 $4\div18$ ppm, а точность измерения ширин $2\div14\%$, что в $3\div5$ раз выше точности, достигнутой в работе [5] (см. табл.1).

Для всех исследованных π-атомов были выполнены расчеты сдвигов и ширин $2p$-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 ширин 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.

	$E_{3d\text{-}2p}$, 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

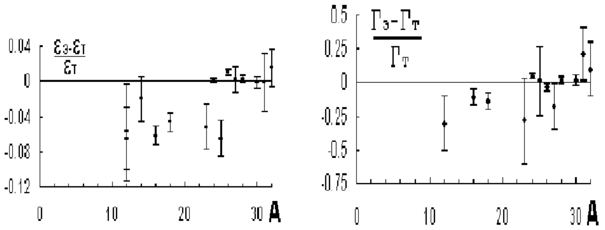

Рис. 5. Относительная разница экспериментальных (э) и теоретических (т) значений сдвигов энергий (ϵ) и ширин (Γ) $2p$–уровней пионных атомов, обусловленных сильным взаимодействием, в зависимости от массового числа.

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 дететором, 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 $K_{\alpha1}$ и $K_{\alpha2}$-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 щелей 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 см^2. Рабочий диапазон углов дифракции составлял примерно $\pm 15^o$, 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^3 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.

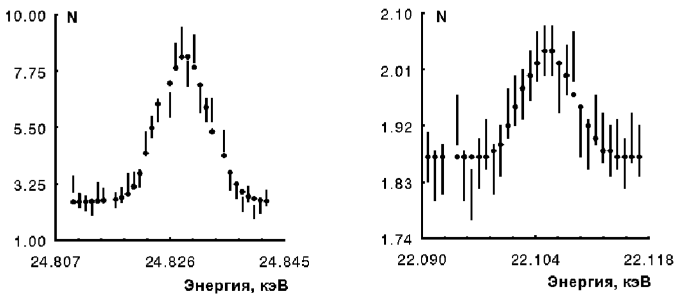

Рис. 6. Дифракционные профили $4d - 2p$ перехода в π–С-атоме и $4f - 3d$-перехода в K–С-атоме. По оси ординат (N) – число счетов на 10^{12} протонов. Точками показан результат фитирования.

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 атомов.

Энергии каонного $4f-3d$- и пионного $4d-2p$-переходов были найдены равными $(22\,105.61\pm0.26\pm0.14)$ и $(24\,828.36\pm0.15\pm0.15)$ 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:

$$m_{K^-}=493.696\pm0.007\quad\text{МэВ}\quad(\pm14\ \text{ppm}),$$

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–C-атоме, имеющий энергию 23.4 кэВ. В качестве реперных были использованы $K_{\alpha1}$ линия серебра и $K_{\alpha2}$ линия олова с энергией 25.0 кэВ, контрольное измерение было сделано на $4d-2p$-переходе в π–C-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.

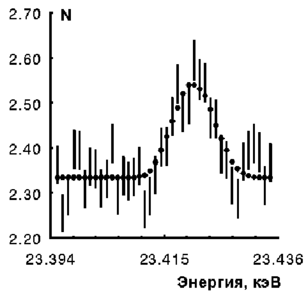

Рис.7. Дифракционный профиль $5g - 4f$-перехода в Σ–С-атоме. N – число счетов на 10^{12} протонов.

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–С-атоме.

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

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

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 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.

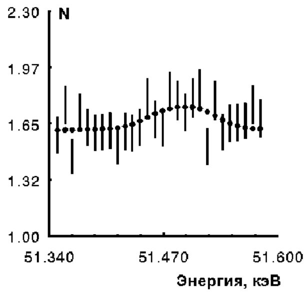

Рис.8. Результат поиска $3d-2p$-перехода π–Ne-атома. N – число счетов на 10^{12} протонов.

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

Дли́ны 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 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:

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

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 (Jeckelmann, 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}Li, ^{9}Be, ^{10,11}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 ($\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_{α_1} и K_{α_2} линий Ar 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 $\sim$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 устранит главную неоднозначность при измерении массы π^--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 Е-177, в котором с помощью кристалл-дифракционной установки "Кварц" планируется измерить массу Σ^--гиперона с точностью 10 ppm, и обсуждается возможный эксперимент по измерению массы π^--мезона с точностью 3 ppm.

Также готовится предложение по иследованию 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.Petrunin, 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.Petrunin, 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.Кирьянов, 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] *Кирьянов, 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.B.Gridnev, L.P.Lapina, A.A.Petrunin, A.I.Smirnov.* Preprint LNPI–1627, Leningrad, 1991. 17 p.

[15] *B.L.Birbrair, A.B.Gridnev, L.P.Lapina, A.A.Petrunin, A.I.Smirnov.* // Nucl. Phys., 1992. V.A547 P.645.

[16] *А.С.Денисов, А.В.Желамков, В.М.Железняков, А.Н.Костров, 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.Бушнин, 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.Костров, 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.Костров, 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.Petrunin, 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.Petrunin, 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.Petrunin, 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.Маныч, 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] *K.E.Kiryanov, A.V.Kravtsov, V.I.Marushenko, A.F.Mezentsev, A.A.Petrunin, Yu.V.Filatov, P.A.Pavlov.* PNPI Reseach Report 1992-1993, Gatchina, 1994. P.64.