

## Работы по Ядерной Спектроскопии Выполненные с Участием Монгольских Сотрудников в ЛЯП

Н.Ганбаатар, С.Даваа, Б.Далхсүрэн, Ж.Сэрээтэр

Центр ядерных исследований МонГУ

Abstracts: Decay schemes of  $^{150-157}\text{Er}$  and  $^{148-161}\text{Ho}$  have been studied.  $\beta$ -,  $\gamma$ -, X-rays and conversion electrons were investigated and ten new isotopes and isomeric states were identified at the first time. Endpoint energies of  $\beta^+$ -spectrum were measured using an intrinsic germanium detector, and  $Q_{\text{EC}}$  values have been obtained. A group of proton emitters of Au, Ir, Re and Ta have been identified, and the proton drip line was determined.

Anisotropies of the gamma rays in well deformed Yb isotopes have been measured from the decay of radioactive Lu oriented at low temperature. Multipole mixing ratio of the hundreds transitions have been deduced, about 170 of them uniquely and unambiguous spin assignments were made for 30 levels. External perturbations of two  $^{171}\text{Yb}$  levels have been observed.

Study of the decay for  $^{112-118}\text{In}$  isotopes were the first nuclear physics experimental work in Mongolia. Mini-orange  $\beta^+$ -spectrometer was constructed in Dubna for the inner conversion electrons measurements for neutron deficit nuclides. Measured conversion coefficients were used for determination the transition multipolarities. A specific method for efficiency calibration of mini-orange spectrometer was applied using the continuous  $\beta^+$ -spectrum of  $^{90}\text{Sr}$  in energy range from 500 to 2200 keV.

### 1. Исследование свойств ядер удаленных от полосы бета-стабильности

Методами ядерной спектроскопии изучались радиоактивные распады изотопов: Sm, Eu, Pr, Pm, Tb, Dy, Er, Ho и Tm, период полураспада которых составлял от одной секунды до 6.8 суток. Измерены спектры X,  $\gamma$ -излучений, электронов внутренней конверсии (ЭВК), позитронов и различные совпадения.

Большинство изученных нуклидов-короткоживущие с  $T_{1/2} \leq 2$  м, поэтому такие ядра получились и исследовались на установке ИРИС, работающей "в линию" с протонным пучком синхроциклотрона ( $E_p=1$  ГэВ,  $I_p=0.5$  мкА) Ленинградского (нынешний Санкт-Петербург) института ядерной физики. Для исследования  $^{157,161}\text{Ho}$ ,  $^{161}\text{Tb}$  и  $^{155,157,159,161}\text{Er}$  использовалась "офф-лайн" методика и были выполнены в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ на установке ЯСНАПП.

Идентифицированные новые изотопы и изомеры перечислены в ниже:  $^{155}\text{Ho}$  (~50 мин),  $^{164}\text{Tm}$  (~2 мин),  $^{145}\text{Tb}$  ( $29.5 \pm .5$  с),  $^{145}\text{Dy}$  ( $18 \pm 3$  с),  $^{146}\text{Dy}$  ( $32 \pm 5$  с),  $^{136}\text{Sm}$  ( $42 \pm 4$  с),  $^{147}\text{Ho}$  ( $7 \pm 2$  с),  $^{150}\text{Er}$  ( $17 \pm 2$  с),  $^{152}\text{Tm}$  ( $5 \pm 1$  с) [1÷7].

Для измерения  $\beta^+$ -излучения короткоживущих ядер нами создан спектрометр с детектором из сверхчистого германия. С помощью методики [8] разработанной нами, получены граничные энергии спектров

позитронов, возникающих при распаде 25 ядер в диапазоне массовых чисел  $A=128\div 154$  [9].

Измерение граничных энергий позитронных спектров этих нуклидов [10] и привлечение литературных данных о массах стабильных ядер и энергиях  $\beta^+$ -распадов, позволили нам определить массы ядер (около 40), входящих в длинные цепочки  $\alpha$ -распадов [11].

Определение значений масс нуклидов позволило проанализировать некоторые фундаментальные характеристики ядер, экстремально удаленных от полосы  $\beta$ -стабильности:

Впервые экспериментально определена граница протонной устойчивости нуклидов [12,13]. Идентификация положения границы протонной устойчивости проведена на основании анализа величин масс нуклидов и выявления случаев, когда энергия связи "внешнего" протона становится отрицательной. До того времени такой анализ не мог быть сделан из-за отсутствия экспериментальных данных о массах ядер вблизи границы протонной устойчивости.

Показано, что, по мере приближения к границе протонной устойчивости парная энергия протонов  $\Delta p$  возрастает и у нуклидов вблизи границы значения ее в ряде случаев на ~50% превышает величину  $\Delta p$  в области бета-стабильных ядер, Отмечена регулярность в

поведении значений  $\Delta r$  для всех исследованных случаев [13].

Анализ значений масс нуклидов, полученных нами, позволил привести дополнительные аргументы пользу магического характера  $^{146}\text{Gd}$ . Наиболее наглядным представляется ход зависимости энергий отрыва пары протонов  $\Delta S_{2p} = S_{2p}(z-2) - S_{2p}(z)$  при переходе от ядра к ядру. Поведение величины  $\Delta S_{2p}$  характеризуется четким максимумом при переходе значения  $Z=64$  при значениях  $N=82 \div 85$ . Другим аргументом является большие величины протонной и нейтронной щелей в одночастичном спектре над ( $Z=64, N=82$ ) при равенстве нулю корреляционной функции спаривания  $C_p$  в ядре  $^{146}\text{Gd}$ . Так, для протонной щели получено  $\delta_p = 3440(60)$  кэВ, а для нейтронной  $\delta_n = 3870(20)$  кэВ для случая  $^{208}\text{Pb}$   $\delta_p = 4206(7)$  кэВ, а  $\delta_n = 3432(4)$  кэВ [14]. Эти значения хорошо воспроизводятся расчетами в модели, использующей оптимизированный потенциал типа Вудса-Саксона.

*Исследование распада короткоживущих ядер в области  $A \sim 150$  [15, 16]*

Исследовались спектры  $\gamma$ -лучей, ЭВК и позитронов при распаде ядер гольмия  $A=148 \div 154$ , эрбия  $A=150 \div 154$  "он-лайн" методикой. Предложены схемы распада некоторых нуклидов и анализируются свойства уровней дочерних ядер.

*Распад  $^{149}\text{Ho} \rightarrow ^{149}\text{Dy}$ .* Позитронном спектре обнаружен компонент с  $E_{\text{гр.}} = 3930 \pm 50$  кэВ. Предложена схема распада  $^{149}\text{Ho} \rightarrow ^{149}\text{Dy}$ . Бета-переход на состояние  $1091.1$  кэВ,  $9/2^-$  является разрешенными ( $lgft \sim 4.0$ ). Поэтому разумно приписать основному состоянию  $^{149}\text{Ho}$  характеристики  $I^\pi = 11/2^-$ . Тогда превращение  $^{149}\text{Ho}(11/2^-) \rightarrow ^{149}\text{Dy}(1091.1 \text{ кэВ}, 9/2^-)$  можно трактовать как переход  $\pi h_{11/2} \rightarrow \nu h_{11/2}$ , связанный со спин-флипом.

*Распад  $^{150}\text{Ho}$  и  $^{150}\text{Er}$ .* Был идентифицирован изомер  $^{150m}\text{Ho}$  с периодом полураспада  $T_{1/2} = 84 \pm 10$  с, измерена граничная энергия позитронного спектра  $^{150}\text{Ho}$   $E_{\text{гр.}} = 4555 \pm 150$  кэВ. В спектре излучения изобары  $A=150$  наблюдались характеристическая  $K_x$  линия Ho, которая имела  $T_{1/2} \sim 20$  с. И  $\gamma$ -переход с энергией  $E_\gamma = 476$  кэВ приписываемые нами распаду нового изотопа  $^{150}\text{Er}$  с периодом полураспада  $T_{1/2} = 17 \pm 2$  с

*Распад  $^{151}\text{Ho}$  и  $^{151}\text{Er}$ .* В спектре  $^{151}\text{Ho}$  наблюдались 36 новых  $\gamma$ -переходов, впервые измерен спектр ЭВК и установлены мультипольности для некоторых переходов. В позитронном спектре обнаружен компонент с  $E_{\text{гр.}} = 3530 \pm 50$  кэВ. Предложена схема распада  $^{151}\text{Ho} \rightarrow ^{151}\text{Dy}$ . Бета переход на уровень  $527$  кэВ  $I^\pi = 9/2^-$  характеризуется величиной  $lgft \sim 4.5$  и его можно рассматривать как переход  $\pi h_{11/2} \rightarrow \nu h_{11/2}$ .

В спектре излучения изобары  $A=151$  наблюдались рентгеновская линия и  $\gamma$ -переход с энергией  $E_\gamma = 99.9$  кэВ, имеющие периода полураспада  $T_{1/2} = 21 \pm 4$  с. Эти линии возникают при распаде изотопа  $^{151}\text{Er}$ , период полураспада которого  $T_{1/2} \sim 23$  с. Был получен ранее из наблюдения накопления  $\alpha$ -линий от распада дочернего изотопа  $^{151}\text{Ho}$ . Так образом, была первая прямая идентификация изотопа  $^{151}\text{Er}$ .

*Распад  $^{152}\text{Ho}$  и  $^{152}\text{Er}$ .* Измерения спектров ЭВК позволили определить мультипольности 20 сильных гамма переходов. Предлагается схема распада  $^{152m,g}\text{Ho} \rightarrow ^{152}\text{Dy}$ . Измерена граничная энергия бета-распада  $^{152}\text{Ho}$  ( $52$  с),  $E_{\text{гр.}} = 3390 \pm 100$  кэВ.

Ранее неизвестная  $\gamma$ -линия  $E_\gamma = 179.3$  кэВ с периодом полураспада  $11 \pm 3$  с приписана распаду ядра  $^{152}\text{Er}$ .

*Распад  $^{153}\text{Ho}$  и  $^{153}\text{Er}$ .* В позитронном спектре обнаружен компонент с  $E_{\text{гр.}} = 2835 \pm 50$  кэВ. Предложена схема распада  $^{153m}\text{Ho} \rightarrow ^{153}\text{Dy}$ .

В спектре ЭВК изобары  $A=153$  наблюдалась линия с энергией  $E_c = 132$  кэВ и периодом полураспада  $T_{1/2} \sim 30$ , которую мы интерпретируем как  $K_x$ -линия перехода с энергией  $E_\gamma = 187$  кэВ, возникающего при бета-распаде ядра  $^{153}\text{Er}$ . В  $\gamma$ -спектре кроме  $187$  кэВ ( $I_\gamma = 40$ ), наблюдались переходы с энергиями  $351$  и  $398$  кэВ ( $I_\gamma = 100$  и  $60$ ), интенсивность которых спадала с периодом  $\sim 36$  с. Эти линий также приписаны распаду  $^{153}\text{Er}$ .

*Распад  $^{154}\text{Ho}$  и  $^{154}\text{Er}$ .* Анализ  $\gamma$ -спектра  $^{154}\text{Ho}$  показал, что  $\gamma$ -линий делится на две группы по характеру распада во времени. Одни описываются периодом полураспада  $T_{1/2} \sim 3$  мин и принадлежат высокоспиновому изомеру  $^{154}\text{Ho}$  а остальные принадлежат низкоспиновому изомеру  $^{154}\text{Ho}$  с  $T_{1/2} = 11.8$  мин. Из сравнения интенсивностей  $K_x$ -рентгеновских и  $\gamma$ -лучей ( $E_\gamma = 27$  кэВ) оценена величина разности масс  $Q_c = M(^{154}\text{Er}) - M(^{154}\text{Ho}) = 2.5$  МэВ. Линии с  $E_\gamma = 477$  и  $1248.8$  кэВ также приписаны распаду  $^{154}\text{Er}$ .

Остановимся лишь на некоторых общих закономерностях, вытекающих из результатов полученных нами при изучении распадов  $^{148-154}\text{Ho}$  и  $^{148-154}\text{Er}$ .

1. В спектрах возбуждения четно-четных ядер  $^{148-154}\text{Dy}$ , возникающих при распаде низкоспиновых изомеров  $\text{Ho}$ , хорошо проявляются уровни со спинами  $2^+$  и  $3^+$ . Их взаимное расположение таково, что за исключением ядра  $^{146}\text{Gd}$ , носящем черты дважды магического ядра, октупольные уровни  $3^+$  располагаются выше квадру-полных  $2^+$ . Это хорошо согласуется с систематикой. Интересным представляется наблюдение в наших опытах состояния со спином  $0^+$  в ядре  $^{152}\text{Dy}$ , которое принадлежит переходной по форме области ядер. Значение энергии этого состояния  $E_0 = 775$  кэВ, по-видимому, отражает к увеличению энергии первого возбужденного  $0^+$  состояния по мере приближения к магическому числу нейтронов  $N=82$ . Такая же тенденция наблюдается в ядрах  $\text{Nd}$ ,  $\text{Sm}$  и  $\text{Gd}$ .

2. Нечетные по массовому числу  $^{149,151,153}\text{Dy}$  одинаковую структуру одночастичного спектра, в котором в качестве основного состояния выступает орбиталь  $f_{7/2}$ , а возбужденными являются уровни  $h_{9/2}$ ,  $h_{11/2}$  или  $f_{7/2} \otimes 2$  и  $i_{13/2}$ . В то же время модель оболочек не может объяснить наблюдаемые низколежащие состояния с  $I^\pi = 3/2^-$  и  $5/2^-$  в ядре  $^{153}\text{Dy}$ . Поэтому заслуживает внимание вопрос о сосуществовании в  $^{153}\text{Dy}$  сферических и деформированных состояний. Например, уровень 1068 кэВ  $I^\pi = 11/2^-$  рассматривается как нильссоновское состояние  $11/2^- [505]$ , уровень 1381.2 кэВ  $I^\pi = 13/2^-$  - его ротационное состояние.

3. Менее однозначна ситуация с интерпретацией уровней нечетных изотопов  $^{151,153}\text{Ho}$ , ненаблюдение  $E3$  конвертированных переходов в этих ядрах ставит под сомнение возможность приписания основным состояниям этих ядер значения спина  $5/2^-$ . Наиболее вероятными значениями, в таком случае, будут  $3/2^-$  или  $1/2^-$ . Так как основные состояния ядер  $^{151,153}\text{Ho}$  связаны  $\alpha$ -распадом с аналогичными состояниями  $^{147,149}\text{Tb}$ , то и эти состояния  $\text{Ho}$  должны иметь спины  $3/2^+$  или  $1/2^+$ . Это существенно подкрепляет предложенную спиновую идентификацию основных состояний ядер  $^{151,153}\text{Ho}$  как  $d_{3/2}$  или  $s_{1/2}$ .

4. Информация о возбужденных состояниях нечетно-нечетных изотопов  $^{150-154}\text{Ho}$  сводится к следующему: общим для всех схем является наличие превалирующего разрешенного  $\beta$ -распада на уровень  $1^+$  в дочерное ядро с

последующей разрядкой в основное состояние  $2^-$  переходом мультипольности  $E1$ . Спины  $1^+$  и  $2^-$  можно объяснить конфигурациями  $(\pi h_{11/2}, \nu h_{9/2})$  и  $(\pi d_{3/2}, \nu f_{7/2})$   $2^-$  по оболочечной модели. Отметим, что спины основных состояний нечетно-нечетных ядер  $\text{Ho}$  по правилам сложения спинов  $\{\pi h_{11/2}\} \uparrow + \{\nu h_{9/2}\} \downarrow$  в четно-нечетных сферических ядрах получается вычитанием  $\{\nu f_{7/2}\} \uparrow - \{\pi d_{3/2}\} \downarrow$  и что важно, в качестве орбитали нечетного протона используется состояние  $d_{3/2}$ . Это обстоятельство еще раз подчеркивает правильность идентификации спинов, сделанную выше для нечетных изотопов  $^{151,153}\text{Ho}$ .

5. В исследуемой области ядер при  $A \sim 150$  выделена большая группа бета-переходов, характеризующихся аномально большими для тяжелых ядер приведенными вероятностями  $\beta$ -распада ( $lgft \sim 4$ ). Измерения периодов полураспада, ветвления и энергий бета-переходов, а также коэффициентов ЭВК, позволили идентифицировать чистые гамма-теллеровские переходы типа спин-флип,  $\pi h_{11/2} \rightarrow \nu h_{9/2}$  и получить экспериментальные значения матричных элементов бета-распадов. Примечательно, что эти переходы вбирают в себя почти всю интенсивность бета-распада.

Непосредственная близость исследуемых  $\beta$ -излучателей к магическому остову  $^{146}\text{Gd}$  открывает уникальную возможность корректного расчета приведенных вероятностей  $\beta$ -распада. Результаты расчетов в сопоставлении с экспериментальными данными (в скобках) для  $\beta$ -излучателей с числом нейтронов  $N=82$  следующей: для  $^{147}\text{Tb}$   $B_G = 1.20(0.23(3))$ ,  $^{148}\text{Dy}$   $1.54(0.45(3))$ ,  $^{149}\text{Ho}$   $0.90(0.21(3))$ ,  $^{150}\text{Er}$   $2.91(0.97(16))$ .

Несовпадение теоретических и экспериментальных значений можно объяснить неучетом в гамильтониане ядра ненуклонных степеней свободы, например, виртуального возбуждения  $\Delta$  изобары. Подавление силы  $\beta^+$ -распада за счет такого возбуждения описывается перенормировкой в ядре константы слабого аксиально-векторного тока. Среднее по рассматриваемым ядрам перенормированное значение составляет  $|G_A| = 0.67|G_V|$  для свободного нуклона  $|G_A| = 1.25|G_V|$ .

С целью уточнения поведения отдельных состояний в ядрах  $\text{Dy}$  нами выполнены исследования свойств возбужденных состояний дочерних ядер диспрозия с  $A=157,161$  сравниваются с результатами теоретических расчетов. Систематизированы свойства



одночастичных состояний четно-нечетных нуклидов диспрозия с числом нейтронов  $N=89 \div 101$ .

*Распад  $^{157}\text{Ho} \rightarrow ^{157}\text{Dy}$ :* В первые в схему уровня введены состояний с энергиями: 400.9; 401.6; 428.4; 457.2; 611.2; и 628.4 кэВ. При  $\beta^-$ -распаде возбуждаются известные из ядерных реакций уровни основной полосы  $^{157}\text{Dy} \rightarrow 3/2^- [505]$  до уровня  $11/2^-$  полосы  $3/2^+ [532]$  до уровня  $7/2^-$ . Уровень  $E_{ур} = 628.4$  кэВ, который идентифицирован как  $\beta$ -вибрационный уровень основного состояния  $^{157}\text{Dy} 3/2^+ [521]$ .

Определен квадрупольный момент основного состояния  $Q_0 = 4.7 \pm 0.6$  барн. Это значение несколько меньше, чем измеренное другими методами.

*Распад  $^{161}\text{Tb} \rightarrow ^{161}\text{Dy} \leftarrow ^{161}\text{Ho}$ :* Применение различных методик позволило измерить ЭВК почти для всех наблюдавшихся  $\gamma$ -переходов. Методом  $K_x$ - $\gamma$  совпадений определена разность масс ядер  $^{161}\text{Ho}$  и  $^{161}\text{Dy}$ :  $\Delta M = 863 \pm 6$  кэВ. Предложена схема распада  $^{161}\text{Tb} \rightarrow ^{161}\text{Dy} \leftarrow ^{161}\text{Ho}$ , которая включает 17 возбужденных состояний  $^{161}\text{Dy}$ . При распаде  $^{161}\text{Ho}$  в  $^{161}\text{Dy}$  возбуждаются уровни основной ротационной полосы до спина  $11/2^-$ , полосы  $5/2^+ [523]$  до состояния  $11/2^-$ , а также состояния  $5/2^-$  451.4 кэВ полосы  $1/2^- [521]$ , состояние-772.6 кэВ,  $I^\pi = 7/2^-$  и уровень 790.7 кэВ  $5/2^+ [512]$ .

Из абсолютных вероятностей E2-компонент получены величины квадрупольных электрических моментов основного состояния  $^{161}\text{Dy}$  ( $Q_0 = 6.9 \pm 0.8$  барн) и состояния 25.7 кэВ ( $Q_0 = 7.35 \pm 0.75$  барн).

Из сравнения полученных нами сведений о свойствах уровней  $^{157,161}\text{Dy}$  с литературными, а также с результатами теоретических расчетов сделаны следующие выводы:

1.  $^{153}\text{Dy}$ -сферическое ядро, при переходе от  $N=87$  к  $N=89$ , параметр квадрупольной деформации  $\beta_{20}$  очень резко увеличивается до 0.2, а при  $N=93,95$   $\beta_{20} \approx 0.3$ , т.е. ядра диспрозия с  $A=159,161,163$  уже сильно-деформированы. Таким образом, видно, что форма ядер диспрозия резко изменяется при переходе с  $N=88$ .

2. Основные и низколежащие возбужденные уровни нечетных сильнодеформированных ядер диспрозия удовлетворительно описываются сверхтекучей моделью ядра.

3.  $\beta$ -вибрационное состояние в  $^{157}\text{Dy}$  имеет энергию  $E=628.4$  кэВ, близкую энергии  $\beta$ -вибрационного состояния в четно-четном остоле  $^{156}\text{Dy}$   $E_{ур} = 675.4$  кэВ.

4. Для описания энергетики уровней в нечетных ядрах диспрозия  $A=157 \div 163$  и, особенно, вероятностей электромагнитных переходов учитывать эффекты, обусловленные кориолисовым взаимодействием.

*Исследование радиоактивных распада изотопов  $^{155,157,159,161}\text{Er}$ .*

*Распад  $^{155}\text{Er}$ :* При распаде  $^{155}\text{Er}$  возбуждаются уровни  $^{155}\text{Ho}$ , о которых до сих пор ничего не было известно. Предлагается схема распада  $^{155}\text{Er} \rightarrow ^{155}\text{Ho}$ . Основному состоянию  $^{155}\text{Ho}$  приписаны спин и четность  $I^\pi = 5/2^-$ . При распаде  $^{155}\text{Er}$  довольно сильно заселяются уровни  $^{155}\text{Ho}$  со спинами  $7/2^-$  и  $9/2^-$ , что позволяет приписать основному состоянию  $^{155}\text{Er}$   $I^\pi = 7/2^-$ .

Основное состояние  $^{155}\text{Ho}$  и уровень 110.1 кэВ состояния с заметной деформацией: и приписываем им орбитали  $5/2^+ [402]$  и  $7/2^+ [404]$ . Основное состояние  $^{155}\text{Er}$  имеет характеристики  $7/2^+ [523]$ , не исключено, что такими характеристиками обладает состояние с энергией 234 кэВ в  $^{155}\text{Ho}$ .

*Распад  $^{157}\text{Er} \rightarrow ^{157}\text{Ho}$ :* На основе  $\gamma$ - $\gamma$  и  $e$ - $\gamma$  совпадений предлагается схема распада  $^{157}\text{Er} \rightarrow ^{157}\text{Ho}$ . Она содержит 45 возбужденных уровней, из которых 33 уровня введены нами. Хорошо установленными состояниями в ядре  $^{157}\text{Ho}$  мы считаем первое ротационное состояние основной полосы при энергии 83.52 кэВ  $I^\pi = 9/2^-$  и состояние 53.06 кэВ, которое интерпретируем как одночастичное состояние  $5/2^+ [402]$ . Введены уровни 66.97 кэВ  $7/2^+ [404]$ , 174.54 кэВ  $3/2^+ [411]$ , 391.2 кэВ  $5/2^+ [532]$ , 480.0 кэВ  $1/2^+ [541]$ , 570.5 кэВ  $5/2^+ [413]$ . Мультипольный состав ротационного перехода 83.5 кэВ  $M1 + (11 \pm 4)\% E2$ . Оценен квадрупольный момент основного состояния  $^{157}\text{Ho}$ :  $Q_0 \geq 5.4$  барн.

*Распад  $^{159}\text{Er} \rightarrow ^{159}\text{Ho}$ :* Изучая распад  $^{159}\text{Er}$ , нами идентифицирован ряд одночастичных состояний 319 кэВ  $3/2^+ [411]$ , 206 кэВ  $1/2^+ [411]$ , 252 кэВ  $5/2^+ [402]$ , 671 кэВ  $5/2^+ [413]$ , 649 кэВ  $5/2^+ [532]$ , 766 кэВ  $7/2^+ [404]$ . При распаде  $^{159}\text{Er}$  наиболее сильно возбуждаются уровни с энергиями 624.5 и 649.3 кэВ  $I^\pi = 5/2^-$ . Бета-переходы на них характеризуются значениями  $lgf_i = 5.6$  и  $5.7$  соответственно. Уровень 649.3 кэВ мы рассматриваем как одночастичное состояние  $5/2^+ [532]$ . Величины  $lgf_i$  бета-перехода на этот уровень характерна для  $\beta$ -перехода  $3/2^+ [521] \rightarrow 5/2^+ [532]$ . Имеющиеся модели пока не дают объяснения природы уровня 624.5 кэВ с  $I^\pi = 5/2^-$ .

Распад  $^{161}\text{Er} \rightarrow ^{161}\text{Ho}$ : Нами был измерен позитронный спектр  $^{161}\text{Er}$ . Энергия  $\beta$ -распада  $Q_{\beta} = 1982 \pm 19$  кэВ. Установлены величины  $lgft$  для переходов на уровни  $^{161}\text{Ho}$ . Интерпретация уровня 1656.8 кэВ как одночас-тичного, затруднительно. Вероятно его природа имеет коллективный характер. уровень такой природы должен быть с связан с переходом из протонного состояния [523] в нейтронное состояние [523]. По данным наших исследований  $lgft$   $\beta$ -перехода на уровень 1656.8 кэВ равен 5.4, что дает возможность интерпретировать данное состояние как трехквaziчастичное:  $\{\pi[523], \nu[523], \nu[521]\} 5/2^-$ .

В рамках неадиабатической вращательной модели рассчитаны энергии ротационных полос с нечетных ядер  $^{157,163}\text{Ho}$ . Расчеты позволили однозначно интерпретировать низкие вращательные состояния полос  $7/2^- [523]$ ,  $7/2^- [404]$ ,  $1/2^- [411]$ ,  $3/2^- [411]$ ,  $5/2^- [402]$ ,  $1/2^- [541]$ . Расчитаны вероятности электромагнитных переходов, разряжающих нижние уровни в исследуемых ядрах гольмия.

## 2. Изучение свойств сильнодеформированных ядер методом ядерной ориентации

Сильнодеформированные ядра тулия и иттербия с  $A \sim 170$  изучались разными спектроскопическими методами как из радиоактивного распада, так и в различных ядерных реакциях. Однако сравнительно мало было известно о свойствах возбужденных состояний с энергией выше 1 МэВ и особенно недостаточно о вероятностях и параметрах смешивания мультипольностей переходов. Поэтому были ограничены возможности сравнения теоретических и экспериментальных результатов, которые необходимы не только для проверки правильности той или иной модели, но и для дальнейшего развития теории. В связи с этим очень важно иметь наиболее полную и всестороннюю экспериментальную информацию о свойствах этих ядер.

Исследование распада ориентированных ядер производилось при помощи установки СПИН\*, позволяющей измерять угловые распределения  $\gamma$ -лучей, сопровождающих распад

ориентированных ядер, и зависимость этих распределений от температуры. Результаты этих измерений дают возможность получать информацию о квантовых характеристиках основных и возбужденных состояний атомных ядер, о мультипольном составе  $\gamma$  и  $\beta$  излучения, о константах сверхтонкого взаимодействия ядра с ферромагнитной матрицей и др.

Методом ядерной ориентации проведено исследование распада  $^{169}\text{Yb}$  и  $^{167,169,171,172,173}\text{Lu}$  [22-30], причем такое исследование ядер  $^{167,169}\text{Lu}$  выполнено впервые авторами С.Даваа и др. Измерены значения анизотропии углового распределения  $\gamma$ -излучения для 325 переходов между уровнями дочерних ядер  $^{169}\text{Tm}$  и  $^{167,169,171,172,173}\text{Yb}$ , причем для 231 перехода—впервые. Анализ экспериментальных данных позволил установить однозначно спины 31 уровня этих ядер и подтвердить установленные ранее спины примерно 70 уровней. Определены параметры смешивания мультипольностей для 254 переходов, из них для 173 переходов - впервые.

В рамках полумикроскопической квазичастично-фононной модели последовательно рассмотрено влияние взаимодействия Кориолиса на электромагнитные свойства вращательных полос  $^{167,169,171,173}\text{Yb}$ . Были рассчитаны энергии и структура уровней вращательных полос, а также вероятности  $B(E2)$  и  $B(M1)$  и параметры смешивания мультипольностей  $\delta(E2/M1)$  для переходов между этими уровнями ядер  $^{169,171,173}\text{Yb}$  [31-34]. Проведено сравнение полученных результатов с экспериментальными данными. Показано, что модель довольно успешно описывает свойства этих ядер, причем за исключением нескольких случаев при расчетах  $^{167-173}\text{Yb}$  не потребовалось уменьшать кориолисовские матричные элементы, как это было сделано в предыдущих теоретических исследованиях. Заметный успех достигнут при описании изменения знаков и величин параметров смешивания мультипольностей  $\delta(E2/M1)$  для ряда внутриволосных и межволосных переходов:

- Знаки параметров  $\delta(E2/M1)$  для переходов внутри полосы  $1/2^- [521]$  на противоположные при переходе от  $^{169}\text{Yb}$  к  $^{171}\text{Yb}$  и это можно, по-видимому, объяснить тем, что происходит заполнение состояние  $1/2^- [521]$ .
- Разные знаки экспериментальных параметров  $\delta(E2/M1)$  для переходов с уровня  $7/2^-$  полосы  $7/2^- [514]$  на три нижние

\* Установка СПИН состоит из криогенной части, позволяющей производить быстрое охлаждение экспериментальных образцов до температуры  $\sim 10$  мК, сверхпроводящей магнитной системы для поляризации ферромагнитных матриц и системы регистрации  $\gamma$ -излучения [М.Фингер и др. Прикладная ядерная спектроскопия, No.9, Атомиздат, М., 1979, с.3-9].

уровни полосы  $5/2$  [512] в  $^{171,173}\text{Yb}$  представляют особый интерес. Оказалось, что при учете кориоли-совского смешивания теория описывает правильно как знаки, так и величины параметров смешивания мультиполь-ностей для таких межполосных переходов.

Показано, что ядра Lu сильно ориентируются как в гадолинии, так и в железе, а ядра Yb достаточно хорошо ориентируются в железе, тогда как в гадолинии – очень слабо. Получены сведения о том, что в сплаве YbGd осуществляется редкий случай сверхтонкого взаимодействия, когда электрическое квадрупольное взаимодействие сравнимо с магнитным дипольным. Рассмотрено внешнее возмущение ядерных состояний с периодом полураспада  $T_{1/2}=0.45$  нс – 5.25 мс для системы YbGd и TmFe и показана важность учета этого эффекта [45-48]. Для системы YbGd впервые обнаружено ослабление анизотропии углового распределения  $\gamma$ -излучения, связанное с разрядкой уровня с  $T_{1/2}=5.25$  мс в  $^{171}\text{Yb}$ .

### 3. Исследования распадов ядер при помощи разной экспериментальной техники

Первое научное исследование структуры ядер было выполнено на нейтронном генераторе, переданный ОИЯИ Монгольскому госуниверситету. Методом циклической активации, разделенные изотопы индия и олова были облучены быстрыми нейтронами с энергией 14.7 МэВ и в результате (n,p) и (n,2n) реакций образовались изотопы индия 112-118. Исследованы распады основного и изомерного состояния методами ядерной спектроскопии. При исследовании схемы распада  $^{112}\text{In}$  были обнаружены более десятки новых  $\gamma$ -переходов и предложена более полная схема распада  $^{112}\text{In}$ . При исследовании 43-миллисекундного изомерного уровня  $^{114\text{m}}\text{In}$  по  $^{115}\text{In}(n,2n)$  реакции непосредственно доказана принадлежность данного изомерного уровня к изотопу  $^{114}\text{In}$ . Результаты этих и других работ отражены в диссертации Ж.Сэрээтэра [35].

*Составление полной схемы распада  $^{153}\text{Tb}$  ( $T_{1/2}=2.34$  дн.).* Гамма-спектры и спектры  $e\gamma$ -совпадений раньше были измерены на Ge(Li)-спектрометре и на тороидальном магнитном спектрометре типа «апельсин». Хотя схема распада  $^{153}\text{Tb}$  составлялась раньше сотрудниками Отдела на этот раз она получилась более полная, поскольку в схему распада включены десятки  $\gamma$ -переходов, часть которых были обнаружены впервые [36].

Исследование высокоэнергетической части схемы распада  $^{147}\text{Tb}$  ( $T_{1/2}\approx 1.6$  час). Гамма-спектры и  $\gamma$ - $\gamma$ -совпадения этого изотопа были изучены многими авторами и предложена схема распада. В нашей работе были получены наиболее полные данные и в том числе данные о внутренней конверсии электронов с энергией 1-2 МэВ, которые измерены с помощью  $\beta$ -спектрометра типа «мини-апельсина». В результате этих исследований определены мультипольности более десяти  $\gamma$ -переходов с энергией свыше 1 МэВ [37].

*Исследование радиоактивного распада ядер  $^{160}\text{Er} \rightarrow ^{160}\text{Ho} \rightarrow ^{160}\text{Dy}$ .*

Эта работа была выполнена в течении многих лет многочисленными авторами. Вклад автора в эту работу заключался в измерении спектров электронов внутренней конверсии на  $\beta$ -спектрометре типа «мини-апельсин» и обработка полученных спектров. Эта схема распада включает 868  $\gamma$ -переходов и 162 возбужденных состояний из которых 528 переходов и 101 возбужденных состояний впервые были наблюдаемы [38].

*Исследование структуры возбужденных состояний ядер  $^{213}\text{Po}$  и  $^{209}\text{Pb}$  при распаде  $^{213}\text{Bi}$  и  $^{209}\text{Tl}$ .* Исследования возбужденных состояний ядер, образующихся в цепочке распада  $^{225}\text{Ac}$  ( $T_{1/2}=10$  сут.). Источник  $^{225}\text{Ac}$  выделялся из препарата  $^{229}\text{Th}$  ( $T_{1/2}=7.3 \cdot 10^3$  лет). Для получения спектров, несвязанных с излучением нуклидов предшествующих  $^{213}\text{Bi}$  в цепочке распадов  $^{225}\text{Ac}$  ( $^{225}\text{Ac}$ ,  $^{221}\text{Fr}$ ,  $^{217}\text{At}$ ) использовано явление отдачи при  $\alpha$ -распаде. Для этого выделенный  $^{225}\text{Ac}$  из  $^{229}\text{Th}$ , испарялся в вакууме на алюминиевую фольгу. Эта фольга помещалась напротив алюминиевой монеты-коллектор ядра отдачи. Затем монета сбрасывалась в позицию, где циклически измеряется её активность с помощью сверхчистого германиевого детектора. На основании полученных данных составлены схемы распадов  $^{213}\text{Bi}$  и  $^{209}\text{Tl}$  и сравниваются с результатами, полученными другими авторами, опубликованные в Physical Review C vol. 57, 1998 [39].

Магнитный бета-спектрометр типа «мини-апельсин» был создан в Отделе Ядерной Спектроскопии и Радиохимии ЛЯП. Данный спектрометр позволяет освободиться от сплошных позитронных спектров и тем самым измерить слабые линии электронов внутренней конверсии и определить мультипольность  $\gamma$ -переходов [40,41].



*Метод калибровки  $\beta$ -спектрометра типа «мини-апельсин» по эффективности*  
 Калибровка  $\beta$ -спектрометра типа «мини-апельсин» по эффективности с помощью стандартных калибровочных источников в широкой области энергий представляет собой проблему так как не имеется достаточных количеств долгоживущих калибровочных  $\beta$ -источников в этом диапазоне энергий. Для калибровки эффективности в области энергий 1-2 МэВ нами были использованы, кроме  $^{207}\text{Bi}$  относительно короткоживущие изотопы  $^{166}\text{Tm}$  и  $^{152}\text{Tb}$  [42].

Калибровка  $\beta$ -спектрометра типа «мини-апельсин» по эффективности с помощью  $\beta^-$ -спектра  $^{90}\text{Sr}$ . Калибровка мини-апельсина по эффективности в области энергий больше 500 кэВ возникают трудности, так как  $^{207}\text{Bi}$  имеет всего 3  $\gamma$ -перехода и  $^{152}\text{Eu}$  хотя имеют в области энергий 500÷1400 кэВ несколько линий, но они находятся на сплошном  $\beta$ -спектре. Нами разработана конкретная процедура калибровки  $\beta$ -спектрометра по эффективности с использованием  $\beta$ -источника  $^{90}\text{Sr}$  [43].

#### Литература:

1. A. Abdurazakov, B. Dalkhsuren et al. The decay chain  $^{164}\text{Yb} \rightarrow ^{164}\text{Tm} \rightarrow ^{164}\text{Er}$ . Nucl. Phys. 21, 64, 1960, Copenhagen.
2. Б. Далхсурен, И. Ю. Левенберг, и др. Нейтронно-дефицитный изотоп  $^{155}\text{Ho}$ . Атомная энергия, вып 3, 1959.
3. Н. Ганбаатар, В. Г. Калинин, и др. Новые изотопы  $^{145}\text{Tb}$  и  $^{146}\text{Dy}$ . Изв. АН СССР сер. Физ. 45 стр. 1828-1833.
4. N. Ganbaatar, K. A. Mezilev, et al. New Isotope  $^{145}\text{Tb}$ . Warszawa, 1981. Acta Physica Polonica, B12, 175-178.
5. N. Ganbaatar, J. Kormicki, et al. New Isotope  $^{146}\text{Dy}$ . Warszawa, 1981. Acta Physica Polonica, B12, 825-827.
6. Н. Ганбаатар, В. Г. Калинин и др. Новые изотопы элементов Sm, Dy, Ho, Er, Tm. Ленинград, 1981, Препринт ЛИЯФ, N716 10 стр.
7. Н. Ганбаатар, Г. Д. Алхазов, и др. Короткоживущие нейтронодефицитные изотопы изобары A=135 и 136 новый изотоп  $^{136}\text{Sm}$ . В кн: Совещ. по ядерн. спектроскопии и структуре ат. ядра, 32-е Киев, Л-д Наука, 1982, Тезисы докл. стр. 78
8. Н. Ганбаатар, Ю. Н. Новиков, и др. Определение граничных энергий позитронных спектров с помощью детектора из сверхчистого германия. Ленинград, 1985, Препринт ЛИЯФ №1082, с. 1-31
9. Н. Ганбаатар, А. А. Ахмонен, и др. Массы радиоактивных нуклидов в диапазоне массовых чисел A=128-154. Препринт ЛИЯФ №1083, 1-66, Ленинград, 1985.
10. N. Ganbaatar, G. D. Alkhazov, et al. The Study of Short-lived Nuclides in the Region Z=59-68. Proceeding of the International Conference on Nuclear Structure, V1, p. 264 Amsterdam, 1982. W. Germany, Springer-Verlag. Z. Phys. A310, p. 247
11. Н. Ганбаатар, К. Я. Громов, и др. Измерения расностей масс изобар редкоземельных нуклидов, удаленных нуклидов от полосы бета устойчивости. Ленинград. Наука, 1983. В кн: Совещ. По ядер. спектроскопии и структуре ат. ядра, 33-е. Москва, Тезисы докл. с. 87.
12. Н. Ганбаатар, В. Г. Калинин и др. Идентификация границы протонной устойчивости ядер. Ленинград. 1982. Препринт ЛИЯФ №820,
13. G. D. Alkhazov, N. Ganvaatar, et al. Identification of the Proton Drip Line W. Germany, Springer-Verlag. Z. Phys. A311, p. 245-246
14. Н. Ганбаатар, Ю. Н. Новиков и др. К вопросу магичности  $^{146}\text{Gd}$ . В кн: Тезисы докладов XXXVI совещания по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра, Юрмала, с. 86, Ленинград, Наука, 1987,
15. Н. Ганбаатар, Л. Х. Батист, и др. Распад короткоживущих изотопов  $^{151-154}\text{Er}$ . В кн: Совещ. по ядерн. спектроскопии и структуре ат. ядра, 33-е Москва, Тезисы докл. стр. 98, Ленинград, Наука, 1983.
16. Н. Ганбаатар, К. А. Мезилев, и др. Вероятность альфараспада для нечетно-нечетных ядер  $^{152}\text{Ho}$ ,  $^{156}\text{Tm}$  и  $^{160}\text{Lu}$ . Изв. АН СССР сер. физ., т. 45, №11, стр. 2107-2110, 1981
17. Н. Ганбаатар, В. Г. Калинин, и др. Бета-распад  $^{155}\text{Ho}$  и возбужденные уровни  $^{155}\text{Dy}$ . Препринт ОИЯИ Р6-12849, Дубна. Изв. АН СССР, сер физ. Т. 44, N5, стр. 912-917, 1979
18. Ганбаатар, В. Г. Калинин, и др.

- Схема распада  $^{157}\text{Er}$ .  
В кн.: Тезисы докладов XXXVI совещания по ядерной спектроскопии и структуре помного ядра, Юрмала, Ленинград, Наука, 1987, с. 121
19. Н.Ганбаатар, В.Н.Горожанкин, и др. Распад  $^{157}\text{Ho}$ . Москва, Известия, АН СССР серия физ., т. 48, с. 900-910
20. Н.Ганбаатар, Ц.Вылов, и др. Исследование уровней  $^{161}\text{Dy}$ , возбуждаемых из распада  $^{161}\text{Tb}$  и  $^{161}\text{Ho}$ . Дубна, Препринт ОИЯИ Р6-83-181, 1983, стр. 1-16  
Изв. АН СССР, сер физ. Т.48, N1, стр. 2-9, 1984
21. Н.Ганбаатар, Б.А.Аликов, и др. О некоторых свойствах возбужденных состояний ядер Ho нечетными  $A=157-161$ . Тезисы докладов XXXVII совещания по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра, Юрмала, с. 119 Л-д, Наука, 1987
22. а) Даваа С., Дупак. et al. "Ядерная ориентация  $^{169}\text{YbFe}$ ". В кн.: Тезисы докладов XXX совещания по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра, Ленинград, 1980 г., "Наука", Л., 1980, с. 243;  
б) Даваа С., Крацикова Т.И., и др. Ядерная ориентация  $^{169}\text{Yb}$  в железе и гадолинии. Ядерная Физика, 1987, т.45, №3, с.635-641. Препринт ОИЯИ, Р6-85-689, Дубна.
23. Kracikova T.I., Davaa S., et al. Nuclear Orientation Studies of the 51.5 min  $^{167}\text{Lu}$  decay. Czechoslovak Journal of Physics, 1981, B31, №5, p.527-543. JINR, E6-80-427, Dubna.
24. Davaa S., Kracikova T.I., et al. Nuclear Orientation Study of the Decay of  $^{169}\text{Lu}$ . Journal of Physics (London), 1982, G8, №11, p.1585-1604.
25. Kracikova T.I., Davaa S., et al. Nuclear Orientation of  $^{171}\text{Lu}$  and  $^{173}\text{Lu}$ . Hyperfine Interactions, 1983, v.15, № 1-4, p. 37-40.
26. Kracikova T.I., Davaa S., Kvasil J., Finger M., Konicek J., Hamilton W.D. Nuclear Orientation Study of the Decay of  $^{171}\text{Lu}$ . Nuclear Physics (Amsterdam), 1985, A440, №2, p. 203-227.
27. Kracikova T.I., Davaa S., et al. Nuclear Orientation Studies of the States of  $^{146,148}\text{Sm}$  and  $^{172}\text{Yb}$ . In: Abstracts of invited and contributed papers of the VIth Int. Conf.on hyperfine interactions, Groningen, The Netherlands, 1983, p.NP-19.
28. Kracikova T.I., Davaa S., et al. Nuclear Orientation Study of the Decay of  $^{172}\text{Lu}$ . Journal of Physics (London), 1984, G10, №8, p. 1115-1132.
29. а) Даваа С., Крацикова Т.И., и др. "Исследование распада ориентированных ядер  $^{173}\text{Lu}$ ". Сообщение ОИЯИ, Р6-84-556, Дубна, 1984 17с.  
б) Kracikova T.I., Davaa S., Finger M., Lebedev N.A., Pavlov V.N., Slunicka M., Yushkevich Yu.V., Kvasil J. Nuclear Orientation Study of the Decay of  $^{173}\text{Lu}$ . Nuclear Physics, 1997, A621, №3, p. 639-654.
30. С.Даваа  
Изучение свойств сильнодеформированных ядер  $^{169}\text{Tm}$  и  $^{167,169,171,172,173}\text{Yb}$  методом ядерной ориентации. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, 1985, ОИЯИ, 6-85- 569, Дубна, 14 с.
31. Kvasil J., Davaa S., et al. Coriolis Coupling and Electromagnetic Properties of Rotational Bands in Odd-A Yb Nuclei. II. The Nucleus  $^{169}\text{Yb}$ . Czechoslovak Journal of Physics, 1983, B33, №6, p. 626-641.
32. Квасил Я., Даваа С., и др. Влияние взаимодействия Кориолиса на электромагнетные свойства вращательных полос  $^{171}\text{Yb}$ . В кн.: Тез. Докл. XXXIII совещания по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра, Москва, 1983г., "Наука" et al.Л., 1983, с. 135-136.



33. Kracikova T.I., Davaa S., et al.  
Coriolis Coupling and Electromagnetic Properties of Rotational Bands in Odd-A Yb Nuclei. III. The Nucleus  $^{171}\text{Yb}$ .  
Czechoslovak Journal of Physics, 1985, V35, №10, p. 1084-1102.
34. Квасил Я., Даваа С., и др.  
Влияние взаимодействия Кориолиса на электромагнетные свойства вращательных полос  $^{173}\text{Yb}$ .
35. Ж.Сэрээтэр  
Автореферат диссертации. НИИЯФ МГУ, Москва, 1977, 17 с.
36. Я.А.Сайдимов, Ж.Сэрээтэр и др.  
Известия АН СССР сер. Физ. Т.55, №1, с. 20-29, 1991.
37. К.Ya.Gromov, J.Sereeter et al.  
Zeitschrift fur Physik, A357, pp. 39-45, 1997.
38. И.Адам, Ж.Сэрээтэр и др.  
Известия РАН, сер. Физ. Т.66, №10, с. 1384-1446, 2002.
39. К.Я. Громов, С.Я.Кудря, и др.  
Известия РАН сер. Физ. Т.64, №11, с. 2228-2239, 2000.
40. Ж.Сэрээтэр, М.Б.Юлдашев, и др.  
Сообщения ОИЯИ Р13-94-267, Дубна, 1994.
41. В.М.Горожанкин, Ж.Сэрээтэр и др.  
Приборы и техника эксперимента, №3, с. 8-13, 1997.
42. P.N.Usmanov, J.Sereeter et al.  
Turkish Journal of Physics, v.20, №9, pp. 1022-1033, 1996.
43. В.Г.Калинников, Ж.Сэрээтэр и др.  
Сообщения ОИЯИ Р6-2002-159, 2002.