

СООБЩЕНИЯ  
ОБЪЕДИНЕННОГО  
ИНСТИТУТА  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА

И 386

P15-87-276

И.Н.Изосимов\*, О.Е.Крафт\*, С.С.Паржицкий,  
В.М.Сигалов\*, И.В.Сизов\*

КОРРЕЛЯЦИИ ВЕЛИЧИН  $B(E2)$  И  $B(M1)$   
В РЕАКЦИЯХ  $^{58,62}\text{Ni}(p, \gamma) ^{59,63}\text{Cu}$

---

\* Научно-исследовательский институт физики  
Ленинградского государственного университета

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время экспериментальные и теоретические методы ядерной физики позволяют довольно успешно интерпретировать свойства основных и низколежащих состояний атомных ядер. Одним из направлений развития наших представлений о ядре является переход к исследованию высоковозбужденных состояний и резонансов в различных ядерных процессах.

При увеличении энергии возбуждения плотность уровней в ядре быстро нарастает, и волновая функция может иметь достаточно сложную структуру. Решение задачи о диагонализации матрицы гамильтониана с учетом остаточных взаимодействий позволяет в принципе находить волновые функции высоковозбужденных состояний и резонансов, однако она мало осуществима: слишком много конфигураций необходимо принимать во внимание. Поэтому довольно часто предполагают, что структура изучаемых состояний очень сложна, и коэффициенты разложения волновой функции по простейшим конфигурациям подчиняются статистическим закономерностям. В такой статистической модели можно сделать ряд предсказаний о характере возбуждения и распада ядерных уровней. В частности, распределение ширин переходов описывается формулой Портера — Томаса <sup>1/</sup>, отношение амплитуд распадов по различным спиновым каналам — распределением Коши <sup>/1/</sup>, корреляции между различными парциальными ширинами отсутствуют <sup>/2/</sup>.

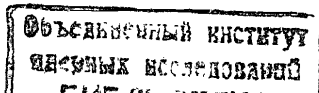
В работе <sup>3,4/</sup> обнаружено отклонение от статистической теории в реакциях  $(p, p')$  и  $(p, \gamma)$ . Экспериментально доказано существование корреляций знака амплитуд при распаде резонансов по различным спиновым каналам, кроме того, в <sup>3</sup> обнаружены корреляции как приведенных амплитуд, так и ширин в  $(p, p')$  реакции.

Данная работа посвящена изучению корреляций приведенных ширин в реакциях  $^{58,82}\text{Ni}(p, \gamma)^{59,63}\text{Cu}$ .

### 1. МЕТОД ПОЛУЧЕНИЯ $\rho(V(E_2), V(M_1))$

Экспериментально изучались угловые распределения  $\gamma$ -излучения при переходе с различных резонансов с фиксированными спином и четностью  $I_1^\pi$  на основное состояние  $I_f$  в реакции  $\text{Ni}(p, \gamma)\text{Cu}$ :

$$W_1(\theta) = \sum_k A_k(i) P_k(\cos \theta). \quad (1)$$



Далее определялись величины (значения  $\delta$  приведены в <sup>18/</sup>):

$$\delta_1 = \frac{\langle f | \hat{E}2 | i \rangle}{\langle f | \hat{M}1 | i \rangle}, \quad (2)$$

$$x_1 = \frac{I_{\gamma 1} \delta_1^2 K_p^2}{(1 + \delta_1^2) E_{\gamma 1}^5 W_1(\theta)}, \quad (3)$$

$$y_1 = \frac{I_{\gamma 1} K_p^2}{(1 + \delta_1^2) E_{\gamma 1}^3 W_1(\theta)}, \quad (4)$$

где  $I_{\gamma 1}$  и  $E_{\gamma 1}$  — интенсивность и энергия  $\gamma$  — перехода из состояния  $|i\rangle$  в состояние  $|f\rangle$ ,  $\hat{E}2$  и  $\hat{M}1$  — операторы электрического квадрупольного и магнитного дипольного  $\gamma$ -перехода,  $K_p$  — волновой вектор падающего на мишень протона.

Затем вычислялся коэффициент корреляции:

$$\rho(x, y) = \frac{\sum_i (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{[\sum_i (x_i - \bar{x})^2 \sum_i (y_i - \bar{y})^2]^{1/2}} \left\{ 1 - \frac{1}{2} \left[ \frac{\sum_i (\Delta x_i)^2}{\sum_i (x_i - \bar{x})^2} + \frac{\sum_i (\Delta y_i)^2}{\sum_i (y_i - \bar{y})^2} \right] \right\}, \quad (5)$$

где  $\bar{x}$  и  $\bar{y}$  — средние значения,  $\Delta x_i$  и  $\Delta y_i$  — погрешности определения  $x_i$  и  $y_i$ .

Хорошо известно, что для проверки гипотезы о ненулевом значении  $\rho$  и указания погрешности  $\Delta\rho$  следует убедиться в нормальном законе распределения величин  $\rho$ . В противном случае необходимо принять ряд мер, которые не всегда позволяют получить надежный результат <sup>15/</sup>.

Для оценки вида распределения  $\rho$  и дисперсии  $(\Delta\rho)^2$  вычисления производились при значении углов  $\theta = 0^\circ, 90^\circ, 60^\circ, 30^\circ$ . В  $\gamma$ -спектрах использовались фотопик, пик одиночного вылета и пик двойного вылета.

Интенсивность  $\gamma$ -перехода в реакции  $(\rho, \gamma)$  записывается следующим образом:

$$I_{\gamma} \sim \frac{1}{K_p^2} \frac{\Gamma_p \Gamma_{\gamma}}{(E - E_0)^2 + \Gamma^2/4} W(\theta), \quad (6)$$

где  $\Gamma_p$  — ширина по входному каналу,  $\Gamma_{\gamma}$  — ширина  $\gamma$ -распада,  $\Gamma$  — полная ширина резонанса.

Если мы работаем с разрешением  $\Delta E_p \gg 1'$ , то, интегрируя (6) по энергии, получим:

$$\rho(x, y) = \rho\left(\frac{V(E2)\Gamma_p}{\Gamma}, \frac{V(M1)\Gamma_p}{\Gamma}\right), \quad (7)$$

полагая  $\Gamma_{\gamma} \ll \Gamma_p$  и  $\Gamma \approx \Gamma_p$ :

$$\rho(x, y) = \rho(V(E2), V(M1)). \quad (8)$$

Если  $\Delta E_p \lesssim \Gamma$ , то, настраиваясь на максимум резонанса, будем иметь:

$$\rho(x, y) = \rho(V(E2)R, V(M1)R), \quad (9)$$

где  $R$  — функция  $\Gamma_p$  и  $\Gamma$ ,  $R \approx \Gamma_p/\Gamma^2$ .

## 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Резонансы в ядре  $\text{Cu}$  возбуждались в реакциях  $^{58,62}\text{Ni}(p, \gamma)^{59,63}\text{Cu}$ . Диапазон энергий возбуждения в  $^{63}\text{Cu}$  составлял от 8,33 до 8,81 МэВ, а в  $^{59}\text{Cu}$  — от 5,56 до 6,43 МэВ.

Протоны ускорялись электростатическим генератором ЭГ-5 ЛНФ ОИЯИ. Мишени из  $\text{Ni}$  имели толщину 10-20 мкг/см<sup>2</sup> ("тонкая" мишень),  $\gamma$ -излучение регистрировалось  $\text{Ge}(\text{Li})$ -детектором объемом 40 см<sup>3</sup> с энергетическим разрешением 8 кэВ для  $\gamma$ -линий с энергией 7 МэВ. При данной энергии протонов измерялись  $\gamma$ -спектры под углами  $0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$  к направлению падающего пучка. При измерении угловых распределений определялись интенсивность пучка протонов и интегральная интенсивность  $\gamma$ -лучей, зарегистрированных кристаллом  $\text{NaJ}(\text{Tl})$ , расположенным под углом  $90^\circ$  к пучку, что позволяло нормировать интенсивность как на число прошедших протонов, так и на число испущенных из мишени  $\gamma$ -квантов <sup>16/</sup>. Разрешение по энергии протонов составляло 2-3 кэВ, что позволяло отделить резонансы друг от друга. Величина  $\Gamma_{\gamma}$  имеет порядок  $10^{-2}$  эВ <sup>16/</sup>,  $\Gamma_p \sim 10-100$  эВ <sup>13/</sup>, т.е. в этом случае реализуется ситуация  $\Delta E_p \gg \Gamma_{\gamma} + \Gamma_p$ . Если предположить, что  $\Gamma \approx \Gamma_{\gamma} + \Gamma_p$ , то:

$$\rho(x, y) = \rho(V(E2), V(M1)), \quad (10)$$

Заметим, что для определения коэффициента корреляции  $\rho(V(E2), V(M1))$  величины  $V(E2)$  и  $V(M1)$  должны быть известны с точностью до постоянного множителя, так как этот множитель, согласно (5), сокращается. Этот факт позволяет использовать относительные интенсивно-

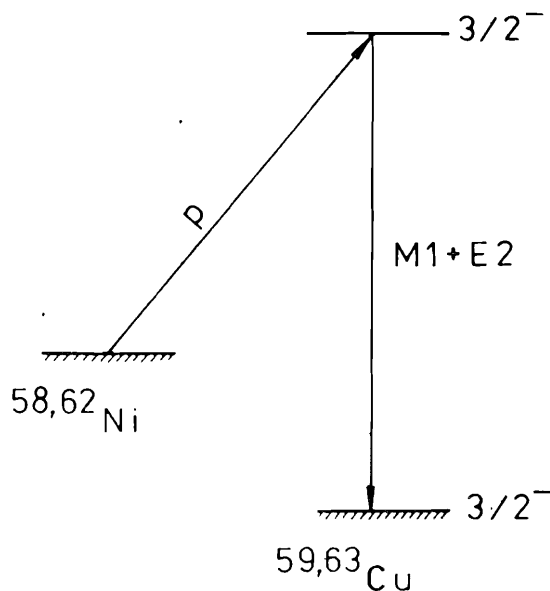


Рис.1. Схема реакции  $(p, \gamma)$  при измерении корреляции приведенных ширин  $\gamma$ -переходов на основное состояние ядер меди.

сти  $\gamma$ -переходов для вычисления  $\rho$ , что уменьшает погрешность результата по сравнению с абсолютными методами. Действительно, в традиционном методе определения  $\Gamma_\gamma$  с "толстой" мишенью  $^{17}\text{Y}$ , необходимо знать изотопный состав мишени, величины тормозной способности вещества мишени, протонный заряд, па-

дающий на мишень, эффективность детектора  $\gamma$ -излучения  $\epsilon$ .

В наших экспериментах необходимо знать лишь относительную величину протонного заряда и эффективности  $\epsilon$ . В исследованном интервале энергий возбуждения можно считать  $\epsilon$  постоянной величиной.

Однако в ряде случаев использование "тонких" мишеней для измерения ширин считается менее надежным способом, так как эти мишени подвержены изменениям при облучении протонами. Поэтому необходимо выбирать интервал энергий, в котором можно контролировать относительные интенсивности  $\gamma$ -излучения при возбуждении резонансов с известными ширинами, или проводить контроль одного и того же резонанса в начале и конце эксперимента.

Рассмотрим случай корреляции приведенных ширин при  $\gamma$ -распаде на основное состояние (рис.1). Мы определили величины  $x$  и  $y$  для 19 резонансов с  $I^\pi = 3/2^-$  при  $\gamma$ -распаде на основное состояние ядра  $^{63}\text{Cu}$ . Оказалось, что  $\rho = 0,6 \pm 0,2$ . Оценка погрешности  $\Delta\rho$  в предположении о нормальном законе исследуемых величин:

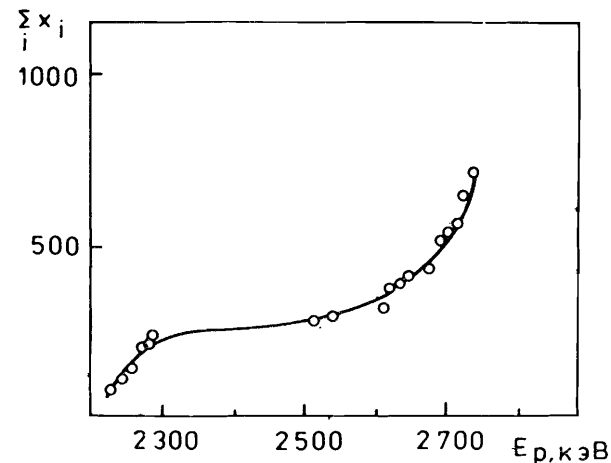
$$\Delta\rho \approx (1 - \rho^2) / \sqrt{n}, \quad n = 19 \quad (11)$$

дает значение, не противоречащее статистическому разбросу.

Для реакции  $^{58}\text{Ni}(p, \gamma)^{59}\text{Cu}$  исследовалось 14 резонансов с  $I^\pi = 3/2^-$ . Получено значение  $\rho = 0,7 \pm 0,2$ .

На рис.2 и 3 приведены зависимости кумулятивных сумм величин  $x$  и  $y$  для  $\gamma$ -распада 19 резонансов с  $I^\pi = 3/2^-$  на основное состояние ядра  $^{63}\text{Cu}$ . Масштаб выбран таким образом, чтобы суммы были одного порядка. Каких-либо аномалий на этих рисунках не наблюдается, в то

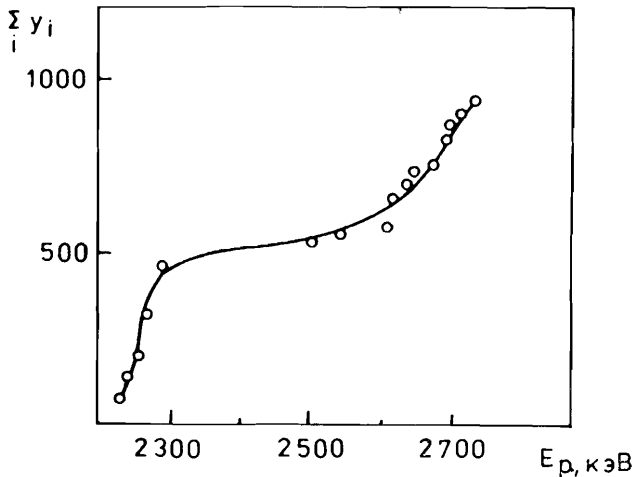
Рис.2. Зависимость кумулятивной суммы  $\sum x_i \sim \sum V_1(E_2)$  от энергии налетающих протонов в реакции  $^{62}\text{Ni}(p, \gamma)^{63}\text{Cu}$ .



же время одинаковый вид кривых, описывающих поведение кумулятивных сумм при изменении энергии налетающих протонов, указывает на наличие корреляций между значениями  $x$  и  $y$ .

Рассмотрим случай корреляции приведенных ширин для  $\gamma$ -переходов на два уровня (рис.4). В этом случае можно определить шесть коэффициентов корреляции:  $\rho(B(E2_1), B(M1_1))$ ;  $\rho(B(E2_2), B(M1_2))$ ;  $\rho(B(E2_1), B(M1_2))$ ;  $\rho(B(M1_2), B(M1_1))$ ;  $\rho(B(E2_2), B(E2_1))$ ;  $\rho(B(E2_2), B(M1_1))$ . В реакции  $^{58}\text{Ni}(p, \gamma)^{59}\text{Cu}$  удалось измерить величину  $\delta$  для распада 13 резонансов со спином  $3/2^-$  на уровень 491 кэВ  $I^\pi = 1/2^-$  (уровень 2 на рис.4). Энергия протонов изменялась от 2668 до 3453 кэВ. При этом положительные и отрицательные значения  $\delta$  встречались одинаково часто, т.е. отклонения от статистической картины не наблюдалось. Кроме того, значения  $\delta$  малы по абсолютной величине, т.е. это практически чистый M1 переход. Для  $\gamma$ -распада на основное состояние ядра  $^{59}\text{Cu}$  все значения  $\delta$  имеют положительный знак, что противоречит статистическому описанию  $^{18}\text{Y}$ , и не малы по абсолютной величине.

Рис.3. Зависимость кумулятивной суммы от энергии налетающих протонов в реакции  $^{62}\text{Ni}(p, \gamma)^{63}\text{Cu}$ ,  $\sum y_i \sim \sum V_1(M1)$ .



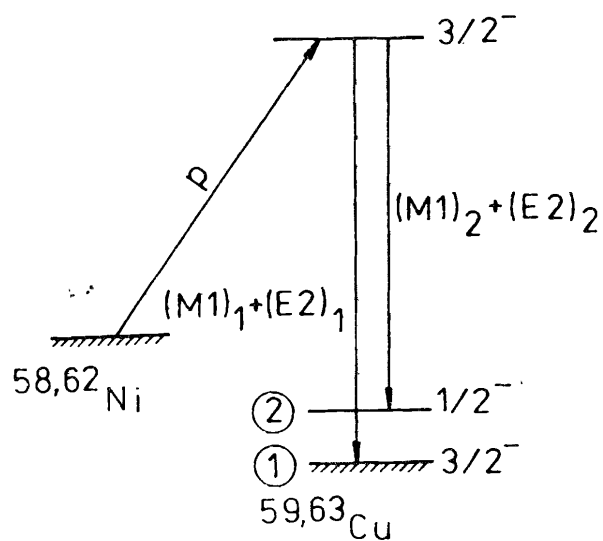


Рис.4. Схема реакции  $(p, \gamma)$  при изучении корреляции приведенных ширин  $\gamma$ -переходов на основное и возбужденное состояние ядер меди.

Используя соотношения (3), (4), мы определили  $\rho(B(M1_2), B(E2_1))$  и  $\rho(B(M1_2), B(M1_1))$ . Оказалось, что:

$$\rho(B(M1_2), B(E2_1)) \approx 0,2$$

$$\rho(B(M1_2), B(M1_1)) \approx 0,1.$$

Поскольку оценки погрешности (11) дают значения,

превышающие  $\rho$ , то говорить о статистически значимых корреляциях уже не приходится. Аналогичный анализ удалось провести для  $\gamma$ -распада 9 резонансов в реакции  $^{62}\text{Ni}(p, \gamma)^{63}\text{Cu}$ , где исследовались  $\gamma$ -переходы на уровень 668 кэВ,  $I^\pi = 1/2^-$ . Диапазон изменения энергии налетающих протонов составлял от 2238 до 2730 кэВ. Статистически значимых корреляций приведенных ширин при распаде на возбужденное состояние 668 кэВ также не наблюдалось. Как и в предыдущем случае, значения  $\delta$  для  $\gamma$ -переходов на уровень 668 кэВ малы по абсолютной величине и не противоречат статистическому распределению. При  $\gamma$ -распаде на основное состояние распределение  $\delta$  отклоняется от статистического<sup>/8/</sup>.

Таким образом,  $\gamma$ -переходы на первый возбужденный уровень в реакциях  $^{58,62}\text{Ni}(p, \gamma)^{59,63}\text{Cu}$  носят статистический характер, в то время как распад на основное состояние ядер Cu не соответствует статистическому описанию. Это подтверждает вывод работы<sup>/9/</sup> о том, что волновые функции исследуемых резонансов содержат два компонента: статистический и нестатистический. Первый обуславливает  $\gamma$ -распад на уровни с энергией 491 кэВ в ядре  $^{59}\text{Cu}$  и 668 кэВ в ядре  $^{63}\text{Cu}$ , второй — на основное состояние ядер Cu.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

1. Экспериментально установлено наличие корреляций приведенных вероятностей E2 и M1  $\gamma$ -переходов в реакциях  $^{58,62}\text{Ni}(p, \gamma)^{59,63}\text{Cu}$ , что говорит о нестатистической природе исследованных резонансов.

2. В работе<sup>/3/</sup> наблюдалась корреляция приведенных ширин в реакции  $(p, p')$  при распаде по различным спиновым каналам. Мы экспериментально исследовали то же явление в  $\gamma$ -канале. Таким образом, корреляции приведенных ширин при распаде по различным спиновым каналам имеют место в двух различных процессах и, по-видимому, носят довольно общий характер.

3. Нами проведена оценка вида распределения величин  $x$  и  $y$ , в обоих случаях не найдено противоречия формуле Портера — Томаса. С достаточной хорошей точностью выполняется характерное для распределения Портера — Томаса соотношение:

$$\langle B(L) - \bar{B}(L) \rangle^2 = 2 \langle B(L) \rangle^2.$$

Так, для распада 19 резонансов в реакции  $^{62}\text{Ni}(p, \gamma)^{63}\text{Cu}$  получено:

$$\langle x - \bar{x} \rangle^2 = 1,8 \langle x \rangle^2, \quad \langle y - \bar{y} \rangle^2 = 2,0 \langle y \rangle^2.$$

4. Совместный анализ корреляций приведенных ширин переходов на возбужденные уровни со спином  $I^\pi = 1/2^-$  и на основное состояние ядер Cu показал, что волновая функция резонанса содержит как статистический, так и нестатистический компоненты. Согласно<sup>/9/</sup>, вклад нестатистического компонента составляет в этом случае десятки процентов.

5. Вопрос описания указанных нестатистических эффектов на микроскопическом уровне в настоящее время открыт.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Kriger T.J., Porter C.E. *Journ. Math. Phys.*, 1963, v.4, p.1272.
2. Бунаков В.Е. *Материалы седьмой зимней школы ЛИЯФ по физике ядра и элементарных частиц. Изд. ЛИЯФ АН СССР, Ленинград, 1972, с.65.*
3. Wells W.K., Bilpuch E.G., Mitchell G.E. *Z.Phys.*, 1980, v.A297, p.215.
4. Быков А.А. и др. *Сообщение ОИЯИ P15-80-786, Дубна, 1980.*
5. Кендалл М., Стьюарт А. В кн.: *Теория распределений, М.: Наука, 1966, с.328.*
6. Наумов Ю.В. и др. *ЭЧАЯ, т.9, с.1288, 1978.*
7. Наумов Ю.В., Крафт О.Е. *Материалы одиннадцатой зимней школы ЛИЯФ по физике ядра и элементарных частиц. Изд. ЛИЯФ АН СССР, Ленинград, 1976, с.140.*
8. Крафт О.Е. и др. *Сообщение ОИЯИ P15-83-736, Дубна, 1983.*
9. Изосимов И.Н. и др. *Изв. АН СССР, сер. физ., 1986, т.50, №10, с.1952.*

Рукопись поступила в издательский отдел  
22 апреля 1987 года.

ТЕМАТИЧЕСКИЕ КАТЕГОРИИ ПУБЛИКАЦИЙ  
ОБЪЕДИНЕННОГО ИНСТИТУТА ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

Индекс	Тематика
1.	Экспериментальная физика высоких энергий
2.	Теоретическая физика высоких энергий
3.	Экспериментальная нейтронная физика
4.	Теоретическая физика низких энергий
5.	Математика
6.	Ядерная спектроскопия и радиохимия
7.	Физика тяжелых ионов
8.	Криогеника
9.	Ускорители
10.	Автоматизация обработки экспериментальных данных
11.	Вычислительная математика и техника
12.	Химия
13.	Техника физического эксперимента
14.	Исследования твердых тел и жидкостей ядерными методами
15.	Экспериментальная физика ядерных реакций при низких энергиях
16.	Дозиметрия и физика защиты
17.	Теория конденсированного состояния
18.	Использование результатов и методов фундаментальных физических исследований в смежных областях науки и техники
19.	Биофизика

Изосимов И.Н. и др.  
Корреляции величин  $B(E2)$  и  $B(M1)$  в реакциях  
 $^{58,62}\text{Ni}(p, \gamma)^{59,63}\text{Cu}$

P15-87-276

Рассмотрен вопрос о корреляциях приведенных вероятностей  $\gamma$ -переходов при распаде протонных резонансов со спином  $3/2^-$  в реакции  $\text{Ni}(p, \gamma)\text{Cu}$ . Экспериментально доказано существование таких корреляций, что говорит о нестатистической природе исследованных резонансов.

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1987

Перевод О.С.Виноградовой

Izosimov I.N. et al.  
 $B(E2)$  and  $B(M1)$  Value Correlation in the  
 $^{58,62}\text{Ni}(p, \gamma)^{59,63}\text{Cu}$  Reactions

P15-87-276

The question about the  $\gamma$ -transition reduced probability correlation for the decay of proton resonances with  $3/2^-$  spin in the  $\text{Ni}(p, \gamma)\text{Cu}$  reaction is considered. The existence of such correlation is proved experimentally. That indicates the nonstatistical nature of the investigated resonances.

The investigation has been performed at the Laboratory of Neutron Physics, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1987