

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ НАБЛЮДЕНИЕ ЭЛЕКТРОННОГО ПАРАМАГНЕТИЗМА МЮОННЫХ АТОМОВ

*В. Г. Варламов, Ю. П. Добрецов, Б. А. Долгошеин,  
В. Г. Кириллов-Угрюмов*

Как нами было установлено, в благородных газах, ядра которых не имеют спина, отсутствует ларморовская прецессия спина  $\mu^-$ -мезона на частоте прецессии свободного мюона [1, 2]. Ниже будет показано, что причина этого – спинобитальное взаимодействие мюона с электронной оболочкой мюонного атома <sup>1)</sup>

Рассмотрим ядро  $Z$  с отрицательным мюоном на  $K$ -орбите, представляющее собой систему размером  $\sim 10^{-10}$  см, обладающую эффективным зарядом  $Z - 1$  и магнитным моментом мюона. Будем в дальнейшем называть ядро с мюоном на  $K$ -орбите "мезоядром". При полном заполнении электронной оболочки мезоядра, разрушенной при каскадных переходах мюона, на мезоядре  $Z - 1$  возникает мюонный атом, эк-

<sup>1)</sup> Предварительные результаты докладывались на IV Международной конференции по физике высоких энергий и структуре ядра, Дубна, 1971, стр. 415.

вивалентный по своим свойствам обычному атому элемента с зарядом  $Z - 1$ . Отметим, что в гелии образуется водородоподобная система на мезоядре гелия, близкая по своим свойствам к мюонию.

Нами экспериментально исследовалось ядро мезонезона  $(\mu^{-10}\text{Ne}_{20})^{\dagger 9}$  которое эквивалентно ядру  ${}^9\text{F}_{20}$  со спином и магнитным моментом  $\mu^-$ -мезона. В столкновениях с атомами мишени мезоядро неона должно набирать электронную оболочку атома фтора, причем полное заполнение оболочки фтора возможно только в случае, если в составе мишени есть атомы с потенциалом ионизации, меньшим, чем потенциал ионизации фтора. Для этой цели мы использовали примесь ксенона ( $I_{Xe} = 12,08 \text{ эВ}$ ,  $I_F = 17,4 \text{ эВ}$ ).

Наличие магнитного момента электронной оболочки атома фтора обуславливает парамагнитные свойства атома, возникающего на мезоядре  $(\mu^- \text{Ne})$ . В слабом магнитном поле сохраняется полный момент атома мезонезона  $F = J \pm I$ , где  $J$  – момент оболочки,  $I$  – момент мезоядра, т. е. спин  $\mu^-$ -мезона. Частота прецессии в магнитном поле полного момента  $F$  определяется фактором Ланде  $g(F)$  для сверхтонкой структуры мюонного атома.

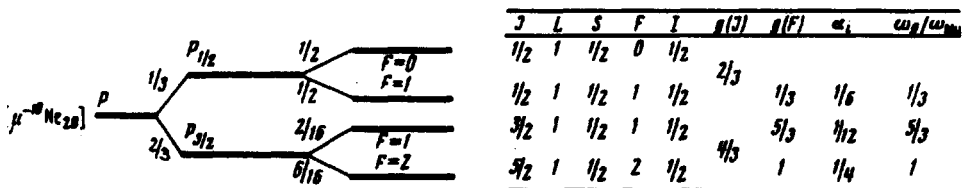


Рис. 1. Схема уровней и их квантовые числа атома мезонезона:  $S$  – спин электронной оболочки,  $L$  – орбитальный момент,  $g(F)$  – фактор Ланде оболочки

На рис. 1 приведена структура уровней атома мезонезона, их квантовые числа, относительные статистические заселенности состояний, сохраняющих поляризацию, и вычисленные значения фактора Ланде. Частота прецессии полного момента атома мезонезона в слабом магнитном поле определяется выражением  $\omega = g(F) H M_e$ , где  $H$  – напряженность магнитного поля,  $M_e$  – электронный магнетон Бора. Из рис. видно, что при остановке  $\mu^-$ -мезона в неоне должна возникать прецессия полного момента атома мезонезона на трех частотах. Соответствующее распределение электронов имеет вид:

$$N(t) = N_0 \exp(-\lambda t) \{ 1 + \alpha [ 1/6 \cos(1/3 \omega_1 t + \phi) + 1/4 \cos(\omega_1 t + \phi) + 1/12 \cos(-5/3 \omega_1 t + \phi) ] \}, \quad (1)$$

где  $\lambda$  – время жизни мюона в мезоатоме,  $\alpha$  – коэффициент асимметрии, соответствующий остаточной поляризации отрицательного мюона на  $K$ -оболочке,  $\omega_1 = \omega_{M_e}$  (при  $g(F) = 1$  частота прецессии совпадает с частотой прецессии спина триплетного мюония, т. е. примерно в 100 раз больше частоты прецессии спина свободного мюона).

Для регистрации остановок мюонов нами была разработана управляемая газовая мишень оригинальной конструкции [3], в которой с высокой эффективностью регистрировались электроны распада от остановок мюонов в газе. Измерения проводились при наполнении газовой мишени смесью газов  $\text{Ne}(42 \text{ атм}) + \text{Xe}(1 \text{ атм})$ . Экспериментальное распределение электронов распада, возникающее при прецессии полного момента атома мезонеона в слабых магнитных полях (1,1 и 2,1 э) обрабатывалось при использовании зависимости (1) методом наименьших квадратов (МНК). Результаты обработки приведены в таблице. Из таблицы видно, что частота прецессии  $\omega_1$  совпадает в пределах экспериментальной точности с частотой прецессии спина триплетного мюония в магнитном поле той же напряженности. При сопоставлении данных для отрицательных мюонов, полученных на углероде и неоне, обращает на себя внимание относительно большая величина остаточной поляризации мюона на  $K$ -оболочке мезоатома неона.

### Результаты обработки спектров электронного распада по МНК

Пучок	Мишень	Магнитное поле (эрс) <sup>2</sup>	Коэффициент асимметрии	Частота прецессии (рад/мксек)	Теоретические значения частот прецессии (рад/мксек)
$\mu^-$	$\text{Ne}^{1)}$	1,1	$0,13 \pm 0,03$	$9,0 \pm 0,2$	$\omega_1 = 9,7 \pm 0,9$
$\mu^-$	Ne	2,1	—	$19,8 \pm 0,4$	$\omega_2 = 18,5 \pm 0,9$
$\mu^+$	Ne	2,1	$0,07 \pm 0,01$	$19,5 \pm 0,2$	$\omega_{M\mu} = 18,5 \pm 0,9$
$\mu^-$	C в газовой мишени	61,2	$0,052 \pm 0,006$	$5,34 \pm 0,08$	$\omega_\mu = 5,23 \pm 0,1$

<sup>1)</sup>  $\text{Ne}(42 \text{ атм}) + \text{Xe}(1 \text{ атм})$ .

<sup>2)</sup> Систематические погрешности в измерении магнитного поля  $\pm 0,1 \text{ э}$ .

На рис. 2 приведены результаты обработки с использованием простой зависимости

$$N(t) = N_0 \exp(-\lambda t) [1 + b \cos(\omega t + \phi)],$$

при этом частота прецессии изменялась в интервале  $0,1 < \omega/\omega_{M\mu} < 2$ . На рис. 2 показаны коэффициенты асимметрии  $b(\omega)$ , полученные при такой обработке суммарной статистики по МНК. Ясно видно, что экспериментальное распределение электронов распада имеет собственные частоты прецессии, хорошо согласующиеся с ожидаемыми теоретическими значениями.

Таким образом, экспериментальное наблюдение прецессии полного спина атома мезонеона: 1) доказывает существование стабильной (в течение времени жизни мюона) системы атома мезонеона с ожидаемы-

ми парамагнитными свойствами; 2) объясняет отсутствие прецессии отрицательных мюонов в благородных газах на ларморовской частоте свободного мюона в магнитном поле [ 2].

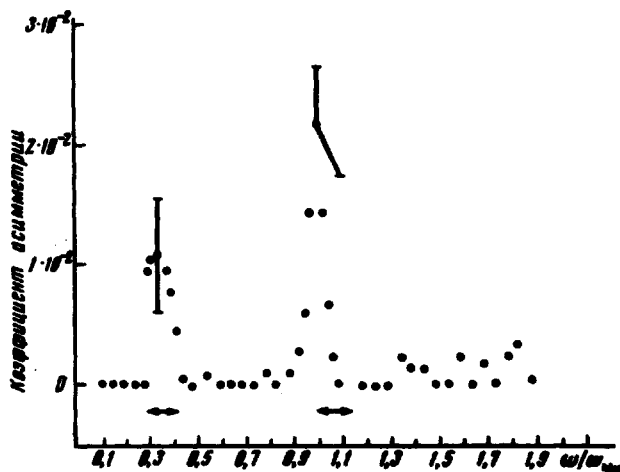


Рис. 2. Зависимость коэффициента асимметрии  $b$  от отношения  $\omega/\omega_{\mu}$  при обработке спектров электронов распада по функциональной зависимости (2). Стрелками показаны ожидаемые теоретические значения частот прецессии

Изучение мюонных атомов типа атома мезонеона с использованием явления прецессии полного момента мюонного атома в магнитном поле открывает новые возможности для исследований, полностью аналогичные тем, которые возникают при изучении мюония в магнитном поле. Однако, если в случае мюония мы имеем дело только с водородоподобным атомом, мюонные атомы типа мезонеона могут обладать, в принципе, произвольной электронной оболочкой.

Открываются новые возможности в исследовании сверхтонких расщеплений мюонных атомов (например, методами резонансных переходов в сверхтонкой структуре [ 4]). Изучение сверхтонкой структуры атома мезогелия  $[(\mu^{-}\text{He})^{+}e^{-}]$ , близкой по своим свойствам мюонию, может позволить еще одним методом определить постоянную тонкой структуры  $\alpha = e^2/\hbar c$ .

Авторы благодарны профессору С.С.Герштейну, чл.-корр. АН СССР И.И.Гуревичу и Л.И.Смилге за полезные дискуссии и интерес к проблеме, а также чл.-корр. АН СССР В.П.Джелепову и профессору Л.И.Лapidусу за помощь в проведении работы.

Московский инженерно-физический институт

Поступила в редакцию  
28 декабря 1972 г.

### Литература

- [ 1 ] В.Г.Варламов, Ю.П.Добрецов, Б.А.Долгошеин, В.Г.Кириллов-Угрюмов, А.М.Рогожин. Письма в ЖЭТФ, 16, 318, 1972.  
[ 2 ] D.Buckle, J.Kane, G.Siegel, R.Wetmore. Phys. Rev. Lett., 20, 705, 1968.

- [3] В.Ф.Варламов, Ю.П.Добрецов, Б.А.Долгошеин, А.М.Рогожин. Труды Международной конференции по аппаратуре физики высоких энергий, Дубна, 1970, стр. 800.
- [4] K. Ziock, V.Huges, R.Prepost, J.Bailey, W.Cleland. Phys. Rev. Lett., 8, 103, 1962.
-