

## ФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

## Открытие ядерного анапольного момента

И.Б. Хриплович

PACS numbers: 11.30.-j, 12.60.-i, 24.80.-x

Экспериментально обнаружен [1] анапольный момент ядра цезия  $^{133}\text{Cs}$ . Поиски ядерных анапольных моментов велись на протяжении многих лет несколькими группами. Что же такое анапольный момент и чем он интересен?

Сорок лет назад было показано [2], что в системе, которая не переходит в себя при зеркальном отражении (или, иными словами, не обладает определенной пространственной четностью), возникает своеобразное распределение магнитного поля. Оно выглядит так же, как поле, которое возникает в тороидальной обмотке с током, и отличается от полей, создаваемых обычными электромагнитными мультиполями, такими, как, например, дипольный или квадрупольный момент. Этот своеобразный источник электромагнитного поля был назван, по предложению А.С. Компанейца, анаполем.

В течение многих лет анаполь оставался всего лишь теоретическим курьезом. Ситуация изменилась в связи с исследованием несохранения четности в атомах. Поскольку изучаемые здесь малые эффекты усиливаются с ростом заряда ядра  $Z$ , все эксперименты ведутся с тяжелыми атомами. Основной вклад в явление не зависит от спина ядра и обусловлен слабым взаимодействием так называемых нейтральных токов (электронного и ядерного), нарушающим пространственную четность. Величина этого взаимодействия определяется "слабым" зарядом ядра  $Q$ , который в единой теории электрослабых взаимодействий численно близок (с точностью до знака) к количеству нейтронов в ядре  $N$ . Таким образом, в тяжелых атомах слабое взаимодействие, не зависящее от спина ядра, дополнительно усилено пропорционально  $N$ . Что же касается эффектов, которые зависят от ядерного спина, то в них не только отсутствует указанное когерентное усиление, они еще сильно подавлены численно в той же электрослабой теории. Поэтому наблюдение атомных эффектов нарушения четности, зависящих от спина ядра, выглядело совершенно нереальным.

Однако в 1980 г. было показано [3], что величина этих эффектов в атомах определяется главным образом не

слабым взаимодействием нейтральных токов, а электромагнитным взаимодействием атомного электрона с анапольным моментом (АМ) ядра. Заметим сразу, что магнитное поле анаполя не выходит за пределы источника, который его порождает, подобно тому, как магнитное поле тороидальной обмотки с током полностью заключено внутри этой обмотки. Это означает, что электромагнитное взаимодействие электрона с ядерным анаполем происходит лишь постольку, поскольку волновая функция электрона проникает в ядро. Иными словами, такое электромагнитное взаимодействие столь же локально, как и слабое: они ничем не отличаются по своим проявлениям. АМ ядра возникает благодаря несохранению четности в ядерных силах и пропорционален поэтому той же фермиевской константе  $G$ , которая определяет величину слабых взаимодействий вообще и нейтральных токов в частности. А взаимодействие электрона с АМ вносит в обсуждаемый эффект, в силу своей электромагнитной природы, дополнительную малость, постоянную тонкой структуры  $\alpha = 1/137$ . Каким же образом этот эффект оказывается доминирующим? Ответ следует из той же аналогии с тороидальной обмоткой. Вполне естественно, что величина взаимодействия пропорциональна потоку магнитной индукции через такую обмотку, а следовательно, в нашей задаче — площади сечения ядра, которая, в свою очередь, пропорциональна  $A^{2/3}$ , где  $A$  — атомный номер ядра [4]. В тяжелых ядрах этот фактор усиления близок к 30 и в значительной мере компенсирует малость постоянной тонкой структуры  $\alpha$ . В результате безразмерная эффективная константа  $\kappa$ , характеризующая анапольное взаимодействие электрона с ядром в единицах  $G$  в тяжелых атомах, не столь уж мала: она близка численно к 0,3 (в этой заметке используется определение эффективной константы, принятое в [3, 4]).

Тем не менее обсуждаемое взаимодействие находится всего лишь на уровне примерно процента от основного атомного эффекта нарушения четности, не зависящего от ядерного спина, который обусловлен "слабым" зарядом ядра  $Q$  и, соответственно, усилен пропорционально  $N$ . Чтобы выделить анапольное взаимодействие, следует сравнить эффект несохранения четности на разных сверхтонких компонентах оптического перехода. Основной эффект, не зависящий от спина ядра, будет, очевидно, одним и тем же на всех сверхтонких компонентах. Анапольное же взаимодействие зависит от взаимной ориентации ядерного спина и полного момента элект-

И.Б. Хриплович. Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера  
630090 Новосибирск, Россия  
E-mail: V.V.Sokolov@inp.nsk.su

Статья поступила 29 мая 1997 г.

рона, поэтому оно меняется от компоненты к компоненте. Наблюдение этого малого эффекта — необычайно сложная экспериментальная задача: не случайно открытие ядерного анапольного момента последовало лишь после упорной многолетней работы нескольких групп [5–9].

Результат, полученный в [1] для полной эффективной константы нарушающего четность взаимодействия, которое зависит от спина ядра, составляет  $\kappa_{\text{tot}} = 0,44 \pm 0,06$  (чтобы извлечь это число из экспериментальных данных, здесь использованы результаты атомных расчетов [10, 11]; эти расчеты выполнены в разной технике, но прекрасно согласуются друг с другом). Если исключить отсюда вклад нейтральных токов, зависящий от ядерного спина, а также результат совместного эффекта "слабого" заряда  $Q$  и обычного сверхтонкого взаимодействия, то ответ для анапольной константы составит  $\kappa = 0,37 \pm 0,06$ . Таким образом, существование анапольного момента ядра  $^{133}\text{Cs}$  надежно установлено. Открыто новое, красивое физическое явление, необычный электромагнитный мультиполь.

Но только ли к этому сводится обсуждаемый результат? Заметим, что все детальные расчеты анапольного момента ядра  $^{133}\text{Cs}$  [4, 12–16] находятся в разумном согласии друг с другом. При так называемых "лучших значениях" [17] констант, характеризующих ядерные силы, нарушающие четность, расчетные значения  $\kappa$  лежат в интервале 0,22–0,28. Такая устойчивость теоретических расчетов уникальна для ядерной физики. Еще лучше согласуются друг с другом различные атомные расчеты анапольного эффекта в цезии. Таким образом, надежность теоретических предсказаний (при заданных ядерных характеристиках нарушения четности) в данном случае достаточно высока, так что экспериментальный результат [1] служит серьезным подтверждением упомянутых "лучших значений" ядерных констант. Это подтверждение отнюдь не тривиально. Дело в том, что величина эффектов несохранения четности, полученная в целом ряде ядерных экспериментов, оказывается много меньшей, чем следует из "лучших значений" (см. [18]). Однако во всех этих опытах либо недостаточно высока экспериментальная точность, либо недостаточно убедительна теоретическая интерпретация. Эксперимент [1] выглядит гораздо более надежным и в том, и в другом

отношении и фактически подтверждает упомянутые "лучшие значения". Таким образом, помимо своего общезначимого интереса, изучение ядерных анапольных моментов в атомных экспериментах — это первоклассная, почти настольная ядерная физика.

Семьдесят лет назад исследования сверхтонкой структуры атомов дали первое указание на существование магнитных моментов ядер. С тех пор атомная и молекулярная спектроскопия служит источником ценной информации о свойствах ядер, таких, как их мультипольные моменты и радиусы. Теперь открыта новая глава этой истории: атомная спектроскопия приносит сведения о ядерных силах, нарушающих четность.

## Список литературы

1. Woods C S et al. *Science* **275** 1759 (1997)
2. Зельдович Я Б *ЖЭТФ* **33** 1531 (1957)<sup>1</sup>
3. Фламбаум В В, Хриплович И Б *ЖЭТФ* **79** 1656 (1980)
4. Flambaum V V, Khriplovich I B, Sushkov O P *Phys. Lett. B* **146** 367 (1984)
5. Noecker M C, Masterson B P, Wieman C E *Phys. Rev. Lett.* **61** 310 (1988)
6. Macpherson M J D et al. *Phys. Rev. Lett.* **67** 2784 (1991)
7. Meekhof D M et al. *Phys. Rev. Lett.* **71** 3442 (1993)
8. Vetter P A et al. *Phys. Rev. Lett.* **74** 2658 (1995)
9. Edwards N H et al. *Phys. Rev. Lett.* **74** 2654 (1984)
10. Frantsuzov P A, Khriplovich I B *Z. Phys. D* **7** 297 (1988)
11. Kraftmakher A Ya *Phys. Lett. A* **132** 167 (1988)
12. Haxton W C, Henley E M, Musolf M J *Phys. Rev. Lett.* **63** 949 (1989)
13. Bouchiat C, Piketty C A *Z. Phys. C* **49** 91 (1991)
14. Bouchiat C, Piketty C A *Phys. Lett. B* **269** 195 (1991); *Phys. Lett. B* **274** 526 (1992) (E)
15. Dmitriev V F, Khriplovich I B, Telitsin V B *Nucl. Phys. A* **577** 691 (1994)
16. Dmitriev V F, Telitsin V B *Nucl. Phys. A* **613** 237 (1997)
17. Desplanques B., Donoghue J F, Holstein B R *Ann. Phys. (N.Y.)* **124** 449 (1980)
18. Adelberger E G, Haxton W C *Ann. Rev. Nucl. Part. Sci.* **35** 501 (1985)

<sup>1</sup> В статье упоминается также аналогичный результат, полученный В.Г. Ваксом.