

А. Л. Барабанов

**СИММЕТРИИ
И СПИН-УГЛОВЫЕ
КОРРЕЛЯЦИИ
В РЕАКЦИЯХ И РАСПАДАХ**



В383.2
F24

УДК 539.1
ББК 22.38
В24

А. Л. Барабанов

СИММЕТРИИ И СПИН-УГЛОВЫЕ КОРРЕЛЯЦИИ В РЕАКЦИЯХ И РАСПАДАХ



МОСКВА
ФИЗМАТЛИТ®
2010

Тверской государственный университет



Научная библиотека 00246333

Ф2

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	10
О ядрах и частицах	10
Об атомном проекте и ядерной физике	11
О своевременности	12
О науке и технологиях	13
Об истине	13
О ценности науки	15
О физике вещества	15
О ценности ядерной физики	16
О симметриях	17
О целостности науки	18
Об ориентированных ядрах	19
О спин-угловых корреляциях	20
О содержании монографии	20
О структуре монографии	22
О спиновых матрицах плотности	23
О квантовой теории углового момента	23
О форме монографии	24
Благодарности	25

I Взаимодействие спин-ориентированных частиц и проблема обращения времени

Глава 1. Полное сечение взаимодействия поляризованных нейтронов и ориентированных ядер	29
1.1. Поехали... ..	29
1.2. Слабые взаимодействия в ядрах и \mathcal{P} -чётность	30
1.3. Динамическое усиление	31
1.4. Нарушение \mathcal{P} -чётности в реакциях с нейтронами	33
1.5. \mathcal{P} -нечётные эффекты в нейтронных резонансах	34
1.6. Есть только миг... ..	35
1.7. Включаюсь... ..	37
1.8. Спин-угловые корреляции в амплитуде рассеяния на угол 0	38
1.9. Свойства S -матрицы и наблюдаемые	41

1.10. Физика спин-угловых корреляций	42
1.11. Проблема T -инвариантности	44
1.12. Гипотезы о природе $TVPV$ - и $TVPC$ -взаимодействий	46
1.13. Эволюция представлений о TV -силах	48
1.14. Ограничения на $TVPV$ - и $TVPC$ -взаимодействия	50
1.15. Что нового дают ориентированные ядра?	52
1.16. T -неинвариантная P -чётная 5-векторная корреляция	53
1.17. «Наивные» оценки и 5-векторная корреляция	54
1.18. Двадцать лет спустя...	56
Глава 2. Тройное деление поляризованных ядер	58
2.1. Шире круг...	58
2.2. 3- и 5-векторные корреляции как «нуль-наблюдаемые»	60
2.3. T -нечётная корреляция в тройном делении	62
2.4. «Наивная» оценка тройной T -нечётной корреляции в делении	64
2.5. Схематическая квантовая модель тройного деления	66
2.6. Спин-орбитальный механизм формирования T -нечётной корреляции	68
2.7. Тройная T -нечётная корреляция в двухступенчатой реакции	71
2.8. T -нечётная корреляция в реакции $^{10}\text{B}(n, \alpha\gamma)$	73
2.9. ROT-эффект	75
Глава 3. Зависимость сечений и спин-угловых корреляций от энергии сталкивающихся частиц	77
3.1. Перевожу дыхание...	77
3.2. P -нечётный эффект в полном сечении	78
3.3. Энергетическая зависимость P -нечётного дихроизма	79
3.4. Явление резонансного усиления	81
3.5. Резонансное усиление и 5-векторная корреляция	82
3.6. Проблема парциальных нейтронных ширин p -волновых резонансов	83
3.7. Динамическое усиление и 5-векторная корреляция	85
3.8. Выстроенные ядерные мишени	88
3.9. Новые времена...	90
3.10. T -инвариантность и «обычные» спин-угловые корреляции	91
3.11. Энергетический сдвиг, обусловленный нарушением T -инвариантности	93
3.12. В защиту метода энергетического сдвига	95
Глава 4. Спин-угловые корреляции и проверка симметрии по отноше- нию к обращению времени.	97
4.1. Что такое осень...	97
4.2. Метод выделения угловых корреляций	99
4.3. Ориентированные частицы, реакции и распады	102
4.4. Инвариантные сферические функции	105
4.5. На далёкой Амазонке...	106
4.6. Новые предложения по выстраиванию ядер	108

4.7. Статистическая оценка 5-векторной корреляции в полном сечении	110
4.8. Матричный элемент $TVPC$ -смешивания	113
4.9. Оценка $TVPC$ -эффектов для p -волновых резонансов ядра ^{127}I	114
4.10. Перспективы поиска 5-векторной корреляции	117

II Обращение времени, пространственная чётность и взаимодействие нейтронов с ядрами

Глава 5. Упругое рассеяние нейтронов на ядрах	121
5.1. Поляризованные нейтроны и поляризованные ядра	121
5.2. T -неинвариантная P -нечётная 3-векторная корреляция	123
5.3. Ложные эффекты	124
5.4. Кто бы мог подумать...	126
5.5. Два способа измерения P -нечётного дихроизма	127
5.6. P - A теорема	128
5.7. Уточнение P - A теоремы	129
5.8. Продольная поляризация и продольная асимметрия	131
5.9. Оценка величины отличия продольной поляризации от продольной асимметрии	133
5.10. Дифракционное рассеяние нейтронов	135
5.11. P - A теорема в брэгговском отражении нейтронов	137
5.12. Поперечная асимметрия	140
5.13. Упругое рассеяние назад	142
5.14. Дифференциальное сечение упругого рассеяния	144
5.15. Асимметрия некогерентного упругого рассеяния назад	147
5.16. Ещё одна формулировка P - A теоремы	148
5.17. Численные оценки	149
5.18. Практическая ценность и актуальность	152
Глава 6. Модель резонансного взаимодействия нейтронов и ядер	154
6.1. Формула Эриксона	154
6.2. Модель компаунд-резонанса	157
6.3. Уточнение модели	159
6.4. Метод связанных каналов	160
6.5. Поправки к S -матрице	163
6.6. Двухканальная модель нейтронного резонанса	164
6.7. Модель сферической ямы с плоским дном	165
6.8. Упрощённое описание узких резонансов	167
6.9. Смешивание s - и p -волновых резонансов	169
6.10. Величина эффекта смешивания	170
6.11. Явный вид поправок к S -матрице	173
6.12. Вопросы, вопросы...	174

III Электродинамика, нейтронные резонансы и симметрии

Глава 7. Угловой момент классического электромагнитного поля	181
7.1. Угловой момент электромагнитного поля	181
7.2. Законы сохранения в классической электродинамике	182
7.3. Энергия и угловой момент в дипольном излучении	183
7.4. Законы сохранения для канонических величин	186
7.5. Угловой момент, уносимый излучением	189
7.6. Мультипольное разложение интенсивности излучения	191
7.7. Мультипольное разложение потока углового момента	193
Глава 8. Радиационный захват нейтронов ядрами	196
8.1. Радиационный захват и проблема нейтронных ширин	196
8.2. Волновая функция начального состояния	198
8.3. Коэффициенты при угловых корреляциях	201
8.4. Особенности извлечения x и y из экспериментальных данных	203
8.5. Роль s -волны в формировании угловых корреляций	206
8.6. Положение отрицательного s -волнового резонанса в ядре ^{117}Sn	210
8.7. Гипотеза о двух отрицательных s -волновых резонансах	213
8.8. Поля излучений электрического и магнитного диполей	216
8.9. Интерференция, чеширский кот и проблема памяти	219
Глава 9. Особенности p -волнового взаимодействия нейтронов и ядер	222
9.1. Интерференционные эффекты в полном сечении	222
9.2. Связь между P -нечётными эффектами в упругом канале	222
9.3. P -нечётные эффекты и положения резонансов	225
9.4. P -нечётные эффекты в интерференционных минимумах	228
9.5. Корреляция p -волновых нейтронных амплитуд	231
9.6. Влияние корреляции нейтронных амплитуд на полное сечение	233
9.7. Деформационный эффект в p -волновых резонансах	235
9.8. P -нечётный дихроизм на выстроенных ядрах	238

IV Слабое взаимодействие лептонов и ядер

Глава 10. Релятивистские поправки 1-го и 2-го порядка в гамильтониане для нуклонов, вовлечённых в электромагнитные и слабые взаимодействия	241
10.1. Ценности и стоимости	241
10.2. Джорджа Сороса птенцы	244
10.3. Проблема формфактора g_P	245
10.4. . . . и не только	247
10.5. Сверхтонкое взаимодействие и μ -захват	249

10.6. Сверхтонкий эффект и слагаемые 2-го порядка по v/c	251
10.7. Слагаемые 2-го порядка по v/c и потенциал	254
10.8. Слагаемые 2-го порядка по v/c в операторе полулептонного перехода	256
10.9. Релятивистская модель ядра	258
10.10. Усиление слагаемых, подобных спин-орбитальному взаимодействию, в операторе полулептонного перехода	260
10.11. Электромагнитное взаимодействие в ядрах	262
Глава 11. Захват мюонов ядрами.	265
11.1. Эффект выстроенности в угловом распределении нейтрино	265
11.2. Поляризация и выстроенность мезоатомов	267
11.3. Чеширский кот опять улыбается	269
11.4. Угловое распределение нейтрино для гамов-теллеровского перехода	272
11.5. Мультипольные разложения для слагаемых 2-го порядка по v/c	273
11.6. Общее выражение для углового распределения нейтрино	276
11.7. Сверхтонкий эффект с точностью до слагаемых 2-го порядка по v/c	278
11.8. Амплитуды μ -захвата с точностью до слагаемых 2-го порядка по v/c	281
11.9. Ещё раз о вычислении углового распределения нейтрино	284
Глава 12. Захват мюонов с распадом дочерних ядер	288
12.1. Постановка задачи	288
12.2. Волновая функция системы $\alpha + N + N$	288
12.3. Состояния дискретного и непрерывного спектров в системе $\alpha + N + N$	290
12.4. Захват мюона ядром ${}^6\text{Li}$ с переходом в непрерывный спектр ядра ${}^6\text{He}$	292
12.5. Спин-угловые корреляции в системе $\alpha + n + n$	294
12.6. T -инвариантность и захват мюонов	296
12.7. T -неинвариантная поляризация нейтронов в системе $\alpha + n + n$	297

V Симметрии и механизм деления ядер

Глава 13. Формализм спиральности и деление	303
13.1. Отцы-основатели.	303
13.2. Вдоль обрыва по-над пропастью.	306
13.3. Институты и установки	308
13.4. Проекты и судьбы	310
13.5. Угловое распределение продуктов распада ядра	312
13.6. Каналы деления О. Бора	315
13.7. Метод Струтинского	317
13.8. Представление спиральности	319
13.9. P -нечётные и P -чётные корреляции в реакции (n, f)	321

Глава 14. Деление выстроенных ядер нейтронами	325
14.1. Угловые распределения и аналитические вычисления	325
14.2. Научный руководитель ставит задачу	326
14.3. Деление спин-ориентированных ядер быстрыми нейтронами	328
14.4. Полное и дифференциальное сечения деления спин-ориентированных ядер нейтронами	331
14.5. Спин-тензоры и интуиция	333
14.6. Деление s -волновыми нейтронами	337
14.7. Деление p -волновыми нейтронами	338
14.8. Гексадекаполюсная составляющая углового распределения осколков	340
Глава 15. Спиновая ориентация осколков деления ядер	343
15.1. Спиновая ориентация осколков	343
15.2. Представление спиральностей осколков	345
15.3. Матрица коэффициентов передачи ориентации	347
15.4. Оценки коэффициентов передачи ориентации	350
15.5. Коэффициенты передачи продольной и поперечной поляризации ..	352
15.6. Угловая анизотропия γ -квантов и тройное деление	354
15.7. Свойства каскадного γ -излучения	356
15.8. Тройное деление и выстраивание осколков	358
Глава 16. Деление поляризованными нейтронами ориентированных ядер	360
16.1. Бывает всё на свете хорошо... ..	360
16.2. Унитарные преобразования S -матрицы	361
16.3. R -матрица и приближение Райха-Мура	364
16.4. Представление спиральности и чётность	367
16.5. Представление чётности и спиральности	369
16.6. Коэффициенты b_Q в $(F K \Pi)$ -представлении	370
16.7. Читаем классиков... ..	373
16.8. Классики о R -симметричных ядрах	377
16.9. Волновая функция компаунд-ядра	380
16.10. Делительные амплитуды	382
16.11. Редукция делительных каналов	385
16.12. Угловые корреляции в делении ядер медленными нейтронами	387
16.13. Приближение изолированных уровней. Отличия от модели Сушкова-Фламбаума	390
16.14. Симметрия ядра на барьере и каналы с $K = 0$	393
Заключение	397
Об основных идеях	397
О вечном	398
Приложение А. Рабочие инструменты I: элементы теории спиновой ориентации и угловых корреляций	399

A.1. Спиновые состояния, волновые функции, матрица плотности	399
A.2. Поляризация частиц со спином $1/2$	401
A.3. Поляризация и выстроенность частиц с произвольным спином	403
A.4. Общее описание ансамбля спин-ориентированных частиц с произвольным спином. Спин-тензоры ориентации	407
A.5. Вектор поляризации и спин-тензоры 1-го ранга для частиц со спином $1/2$. Векторные гармоники	414
A.6. Коэффициенты Клебша–Гордана, функции Рака и $9j$ -символы	419
A.7. Обобщённые и инвариантные сферические функции от нескольких направлений (биполярные, триполярные, ... гармоники)	426
Приложение Б. Рабочие инструменты II: элементы формальной теории реакций	431
B.1. Кинематическое описание бинарных столкновений спин-ориентированных частиц: полные и дифференциальные сечения упругого рассеяния и реакций, спиновая ориентация разлетающихся частиц	431
B.2. R-матричное описание резонансов в бинарных реакциях	446
B.3. Основы метода гиперсферических гармоник в задаче трёх тел	454
Приложение В. Рабочие инструменты III: элементы теории электромагнитных и слабых взаимодействий	458
V.1. Мультипольные разложения в классической и квантовой теориях электромагнитного излучения	458
V.2. Гамильтониан слабого полуплептонного взаимодействия и мультипольные разложения в полуплептонных процессах	477
Список литературы	496