ВикипедиЯ

Спин

Материал из Википедии — свободной энциклопедии

Спин (от англ. *spin*, букв. — «вращение, вращать(-ся)») — собственный момент импульса элементарных частиц, имеющий как квантовую, так и классическую природу и тесно связанный с представлениями группы вращений и группы Лоренца (классические аспекты спина см. в книгах H.C. Corben, Classical and Quantum Theories of Spinning Particles (Holden-Day, San Francisco, 1968), Alexei Deriglazov, Classical Mechanics (Second Edition, Springer 2017), Пенроуз и Риндлер, Спиноры и пространство-время). Спином называют также собственный момент импульса атомного ядра или атома; в этом случае спин определяется как векторная сумма (вычисленная по правилам сложения моментов в квантовой механике) спинов элементарных частиц, образующих систему, и орбитальных моментов этих частиц, обусловленных их движением внутри системы.

Спин измеряется в единицах $\hbar$[1] (приведённой постоянной Планка, или постоянной Дирака) и равен $\hbar J$, где J — характерное для каждого сорта частиц целое (в том числе нулевое) или полуцелое положительное число — так называемое ***спиновое квантовое число*** (оно есть число, характеризующее представления группы вращений и группы Лоренца, то есть сколько в нём собственно квантовости и сколько неквантовости, сейчас неизвестно), которое обычно называют просто спином (одно из квантовых чисел). Спин свободной частицы измерить нельзя, так как для измерения требуется внешнее магнитное поле, а оно делает частицу несвободной.

В связи с этим говорят о целом или полуцелом спине частицы. Полуцелый спин фундаментальнее, так как "из него" можно построить целый спин, но обратное невозможно (см. книгу Пенроуза и Риндлера).

Существование спина в системе тождественных взаимодействующих частиц является причиной нового квантово-механического явления, не имеющего аналогии в классической механике: обменного взаимодействия.

Вектор спина является единственной величиной, характеризующей ориентацию частицы в квантовой механике[2]. Из этого положения следует, что: при нулевом спине у частицы не может существовать никаких векторных и тензорных характеристик; векторные свойства частиц могут описываться только аксиальными векторами; частицы могут иметь магнитные дипольные моменты и не могут иметь электрических дипольных моментов; частицы могут иметь электрический квадрупольный момент и не могут иметь магнитный квадрупольный момент; отличный от нуля квадрупольный момент возможен лишь у частиц при спине, не меньшем единицы[3].

Спиновый момент электрона или другой элементарной частицы, однозначно отделённый от орбитального момента, никогда не может быть определён посредством опытов, к которым применимо классическое понятие траектории частицы[4].

Число компонент волновой функции, описывающей элементарную частицу в квантовой механике, растёт с ростом спина элементарной частицы. Элементарные частицы со спином 0 описываются однокомпонентной волновой функцией (скаляр), со спином $\frac{1}{2}$ описываются

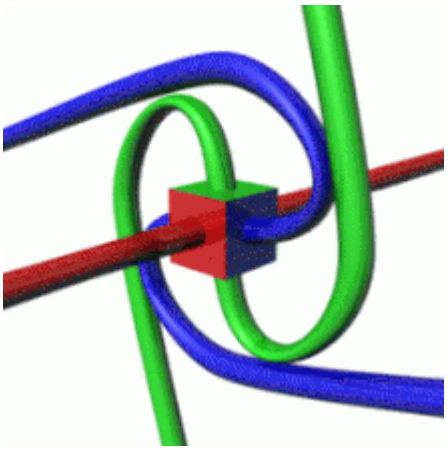
двухкомпонентной волновой функцией (спинор), со спином 1 описываются трёхкомпонентной волновой функцией (вектор), со спином 2 описываются пятикомпонентной волновой функцией (тензор)[5].

Содержание

- Что такое спин — на примерах
- Свойства спина
  - Примеры
  - История
  - Спин и магнитный момент
- Спин и статистика
- Обобщение спина
- Спин классических систем
- См. также
- Примечания
- Литература
- Статьи

Что такое спин — на примерах

Хотя термин «спин» относится только к квантовым свойствам частиц, свойства некоторых циклически действующих макроскопических систем тоже могут быть описаны неким числом, которое показывает, на сколько частей нужно разделить цикл вращения некоего элемента системы, чтобы она вернулась в состояние, неотличимое от начального.



Пример объекта, который требует поворота на 720° для возврата в начальное положение

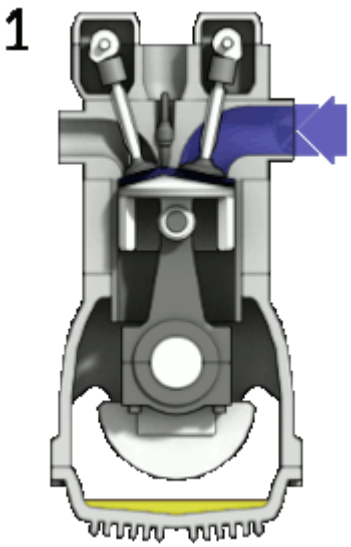
Легко представить себе **спин, равный 0**: это точка — она со всех сторон выглядит одинаково, как её ни крути.

Примером **спина, равного 1**, может служить большинство обычных предметов без какой-либо симметрии: если такой предмет повернуть на 360°, то этот предмет вернётся в своё первоначальное состояние. Для примера — можно положить ручку на стол, и после поворота на 360° ручка опять будет лежать так же, как и до поворота.

В качестве примера **спина, равного 2**, можно взять любой предмет с одной осью центральной симметрии: если его повернуть на 180°, он будет неотличим от исходного положения, и получается, что за один полный оборот он становится неотличим от исходного положения 2 раза. Примером из жизни может служить обычный карандаш, только заточённый с двух сторон или не заточённый вообще — главное чтобы был без надписей и однотонный — и тогда после поворота на 180° он вернётся в положение, неотличимое от исходного. Хокинг в качестве примера приводил обычную игральную карту типа короля или дамы[6]

А вот с полуцелым **спином, равным $^1/_2$** немножко сложнее: в исходное положение система возвращается после 2 полных оборотов, то есть после поворота на 720°. Примеры:

- Если взять ленту Мёбиуса и представить, что по ней ползёт муравей, тогда, сделав один оборот (пройдя 360°), муравей окажется в той же точке, но с другой стороны листа, а чтобы вернуться в точку, откуда он начал, придётся пройти все 720°.
- Четырёхтактный двигатель внутреннего сгорания. При повороте коленчатого вала на 360° поршень вернётся в исходное положение (например, верхнюю мёртвую точку), но распределительный вал вращается в 2 раза медленнее и совершит полный оборот при повороте коленчатого вала на 720°. То есть при повороте коленчатого вала на 2 оборота двигатель внутреннего сгорания вернётся в то же состояние. В этом случае третьим измерением будет положение распределительного вала.



Четырёхтактный двигатель возвращается в исходное состояние при повороте коленчатого вала на 720°, что является неким аналогом полуцелого спина

На подобных примерах можно проиллюстрировать сложение спинов:

- Два заточенных только с одной стороны одинаковых карандаша («спин» каждого — 1), скреплённые боковыми сторонами друг с другом так, что острый конец одного будет рядом с тупым концом другого (↑↓). Такая система вернётся в неотличимое от начального состояния при повороте всего на 180°, то есть «спин» системы стал равным двум.
- Многоцилиндровый четырёхтактный двигатель внутреннего сгорания («спин» каждого из цилиндров которого равен 1/2). Если все цилиндры работают одинаково, то состояния, при которых поршень находится в начале такта рабочего хода в любом из цилиндров, будут неотличимы. Следовательно, двухцилиндровый двигатель будет возвращаться в состояние, неотличимое от исходного, через каждые 360° (суммарный «спин» — 1), четырёхцилиндровый — через 180° («спин» — 2), восьмицилиндровый — через 90° («спин» — 4).

Свойства спина

Любая частица может обладать двумя видами углового момента: орбитальным угловым моментом и спином.

В отличие от орбитального углового момента, который порождается движением частицы в пространстве, спин не связан с движением в пространстве. Спин — это внутренняя, исключительно квантовая характеристика, которую нельзя объяснить в рамках релятивистской механики. Если представлять частицу (например, электрон) как вращающийся шарик, а спин как момент, связанный с этим вращением, то оказывается, что поперечная скорость движения оболочки частицы должна быть выше скорости света, что недопустимо с позиции релятивизма.

> *В частности, было бы совершенно бессмысленным представлять себе собственный момент элементарной частицы, как результат ее вращения „вокруг собственной оси“*[7]

Будучи одним из проявлений углового момента, спин в квантовой механике описывается векторным оператором спина $\hat{\vec{s}}$, алгебра компонент которого полностью совпадает с алгеброй операторов орбитального углового момента $\hat{\vec{\ell}}$. Однако, в отличие от орбитального углового момента, оператор спина не выражается через классические переменные, иными словами, это только квантовая величина. Следствием этого является тот факт, что спин (и его проекции на какую-либо ось) может принимать не только целые, но и полуцелые значения (в единицах постоянной Дирака $\hbar$).

Спин испытывает квантовые флуктуации. В результате квантовых флуктуаций строго определённое значение может иметь только одна компонента спина — например, J_z. При этом компоненты J_x, J_y флуктуируют вокруг среднего значения. Максимально возможное значение компоненты J_z равно J. В то же время квадрат J^2 всего вектора спина равен $J(J+1)$. Таким образом, $J_x^2 + J_y^2 = J^2 - J_z^2 \geqslant J$. При $J = \frac{1}{2}$ среднеквадратические значения всех компонентов из-за флуктуаций равны $\widehat{J_x^2} = \widehat{J_y^2} = \widehat{J_z^2} = \frac{1}{4}$[2].

Вектор спина меняет своё направление при преобразовании Лоренца. Ось этого поворота перпендикулярна импульсу частицы и относительной скорости систем отсчёта[8].

Примеры

Ниже указаны спины некоторых микрочастиц.

спин	общее название частиц	примеры
0	скалярные частицы	π-мезоны, K-мезоны, хиггсовский бозон, атомы и ядра ^{4}He, чётно-чётные ядра, парапозитроний
1/2	спинорные частицы	электрон, кварки, мюон, тау-лептон, нейтрино, протон, нейтрон, атомы и ядра ^{3}He
1	векторные частицы	фотон, глюон, W- и Z-бозоны, векторные мезоны, ортопозитроний
3/2	спин-векторные частицы	Ω-гиперон, Δ-резонансы
2	тензорные частицы	гравитон, тензорные мезоны

На июль 2004 года максимальным спином среди известных барионов обладал барионный резонанс Δ(2950) со спином $15/2$. Среди долгоживущих изотопов химических элементов[2] максимальным спином обладает изотоп висмута ^{209}Bi, его спин составляет $9/2$. Некоторые короткоживущие изотопы и особенно изомеры могут иметь очень высокий спин, например у изотопа таллия ^{205m2}Tl спин $35/2$, а изотоп полония ^{211m3}Po имеет спин $43/2$.

История

В 1922 году опыт Штерна — Герлаха подтвердил наличие у атомов спина и факт пространственного квантования направления их магнитных моментов.

Сам термин «спин» в науку ввели С. Гаудсмит и Д. Уленбек в 1925 г.[9][10].

В 1924 году, ещё до точной формулировки квантовой механики, Вольфганг Паули ввёл новую, двухкомпонентную внутреннюю степень свободы для описания валентного электрона в щелочных металлах. В 1927 году он же модифицировал недавно открытое уравнение Шрёдингера для учёта спиновой переменной. Модифицированное таким образом уравнение носит сейчас название уравнение Паули. При таком описании у электрона появляется новая спиновая часть волновой функции, которая описывается спинором — «вектором» в абстрактном (то есть не связанном прямо с обычным) двумерном *спиновом пространстве*.

В 1928 году Поль Дирак построил релятивистскую теорию спина и ввёл уже четырёхкомпонентную величину — биспинор.

Математически теория спина оказалась очень продуктивной, и в дальнейшем по аналогии с ней была построена теория изоспина.

Спин и магнитный момент

Орбитальный магнитный момент электрона внутри атома кратен магнетону Бора. Но помимо орбитального момента количества движения $\boldsymbol{M_l}$, обусловленного движением вокруг атомного ядра, электрон обладает собственным механическим моментом — спином $\boldsymbol{s = 1/2}$ (в единицах $\hbar$), а также спиновым магнитным моментом (который по факту не кратен магнетону Бора). Спиновый магнитный момент $\boldsymbol{\mu_s = g_e \mu_B s}$, где $\boldsymbol{g_e}$ — g-фактор электрона, равный для электрона по данным экспериментов ~2,00231930436153.

Спин и статистика

Вследствие того, что все элементарные частицы одного и того же сорта тождественны, волновая функция системы из нескольких одинаковых частиц должна быть либо симметричной (то есть не изменяется), либо антисимметричной (домножается на −1) относительно перестановки местами двух любых частиц. В первом случае говорят, что частицы подчиняются статистике Бозе — Эйнштейна и называются бозонами. Во втором случае частицы описываются статистикой Ферми — Дирака и называются фермионами.

Оказывается, именно значение спина частицы говорит о том, каковы будут эти симметрийные свойства. Сформулированная Вольфгангом Паули в 1940 году теорема о связи спина со статистикой утверждает, что частицы с целым спином (s = 0, 1, 2, ...) являются бозонами, а частицы с полуцелым спином (s = 1/2, 3/2, ...) — фермионами[1].

Обобщение спина

Введение спина является удачным применением новой физической идеи: постулирование того, что существует пространство состояний, никак не связанных с перемещением частицы в обычном пространстве. Обобщение этой идеи в ядерной физике привело к понятию изотопического спина, который действует в особом *изоспиновом пространстве*. В дальнейшем при описании сильных взаимодействий были введены внутреннее *цветовое пространство* и квантовое число «цвет» — более сложный аналог спина.

Спин классических систем

Понятие спина было введено в квантовой теории. Тем не менее, в релятивистской механике можно определить спин классической (не квантовой) системы как собственный момент импульса[11]. Классический спин является 4-вектором и определяется следующим образом:

$$S_\nu = \frac{1}{2}\,\varepsilon_{\nu\alpha\beta\gamma}\,L^{\alpha\beta}\,U^\gamma,$$

где

$L^{\alpha\beta} = \sum(x^\alpha p^\beta - x^\beta p^\alpha)$ — тензор полного момента импульса системы (суммирование проводится по всем частицам системы);
$U^\alpha = P^\alpha / M$ — суммарная 4-скорость системы, определяемая при помощи суммарного 4-импульса $P^\alpha = \sum p^\alpha$ и массы M системы;
$\varepsilon_{\nu\alpha\beta\gamma}$ — тензор Леви-Чивиты.

В силу антисимметрии тензора Леви-Чивиты, 4-вектор спина всегда ортогонален к 4-скорости U^α. В системе отсчёта, в которой суммарный импульс системы равен нулю, пространственные компоненты спина совпадают с вектором момента импульса, а временная компонента равна нулю.

Именно поэтому спин называют собственным моментом импульса.

В квантовой теории поля это определение спина сохраняется. В качестве момента импульса и суммарного импульса выступают интегралы движения соответствующего поля. В результате процедуры вторичного квантования 4-вектор спина становится оператором с дискретными собственными значениями.

См. также

- Прецессия Томаса
- Спин-орбитальное взаимодействие
- Преобразование Гольштейна — Примакова
- Спинор
- Теорема Паули (Теорема о связи спина со статистикой)
- Синглет
- Спин-запрещенные реакции

Примечания

1. Фундаментальные частицы и взаимодействия (http://nuclphys.sinp.msu.ru/nucmodl/nml01.htm). Дата обращения: 13 июля 2014. Архивировано (https://web.archive.org/web/20170509172732/http://nuclphys.sinp.msu.ru/nucmodl/nml01.htm) 9 мая 2017 года.
2. Широков, 1972, с. 44.
3. Широков, 1972, с. 45.
4. Паули, 1947, с. 279.
5. Ширков, 1980, с. 147.
6. *STEPHEN HAWKING.* A Brief History of Time from the Big Bang to Black Holes. — Space Time Publications. — Кэмбридж: Carl Sagan Interior Illustrations, 1998. — С. 232. — 232 с. — ISBN 978-5-367-00754-1.
7. *Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М.* Теоретическая физика. Том. III, Гл. VIII, §54 Спин
8. Широков, 1972, с. 276.
9. Гаудсмит С. «Открытие спина электрона» (https://ufn.ru/ru/articles/1967/9/f/) Архивная копия (https://web.archive.org/web/20181011214716/https://ufn.ru/ru/articles/1967/9/f/) от 11 октября 2018 на Wayback Machine // УФН, т. 93, с. 151—158 (1967)

10. *Евгений Берклвич.* Эпизоды «революции вундеркиндов». Эпизод первый. Борн, Паули и спин (https://www.nkj.ru/archive/articles/34566/) // Наука и жизнь. — 2018. — № 10. — С. 48—55. Архивировано (https://web.archive.org/web/20181011214851/https://www.nkj.ru/archive/articles/34566/) 11 октября 2018 года.
11. *Вейнберг С.* Гравитация и космология. — М.: Мир, 1975.

Литература

- Физическая энциклопедия / Под ред. А. М. Прохорова. — М.: Большая российская энциклопедия, 1994. — ISBN 5-85270-087-8.
- *Richard G. Milner.* A Short History of Spin (англ.) // Contribution to the XVth International Workshop on Polarized Sources, Targets, and Polarimetry. — Charlottesville, Virginia, USA, September 9-13, 2013. — arXiv:1311.5016.
- *Широков Ю.М., Юдин Н.П.* Ядерная физика. — М.: Наука, 1972. — 672 с.
- *Ширков Д. В.* Физика микромира. — М.: Советская энциклопедия, 1980. — 527 с.
- *Паули В.* Общие принципы волновой механики. — М.: ОГИЗ, 1947. — 333 с.

Статьи

- Hipple, J. A.; Sommer, H.; Thomas, H.A. (1949). “A precise method of determining the faraday by magnetic resonance” (https://www.academia.edu/6483539). *Physical Review*. **76** (12): 1877—1878. Bibcode:1949PhRv...76.1877H (http://adsabs.harvard.edu/abs/1949PhRv...76.1877H). DOI:10.1103/PhysRev.76.1877.2 (https://doi.org/10.1103%2FPhysRev.76.1877.2).
- *Cohen-Tannoudji, Claude.* Quantum Mechanics / Claude Cohen-Tannoudji, Bernard Diu, Franck Laloë. — 2 volume set. — John Wiley & Sons, 2006. — ISBN 978-0-471-56952-7.
- *Condon, E. U.* Especially Chapter 3 // The Theory of Atomic Spectra / E. U. Condon, G. H. Shortley. — Cambridge University Press, 1935. — ISBN 978-0-521-09209-8.

Источник — https://ru.wikipedia.org/w/index.php?title=Спин&oldid=126162538

Эта страница в последний раз была отредактирована 20 октября 2022 в 07:11.

Текст доступен по лицензии Creative Commons Attribution-ShareAlike; в отдельных случаях могут действовать дополнительные условия.
Wikipedia® — зарегистрированный товарный знак некоммерческой организации Wikimedia Foundation, Inc.