**Об ориентационном взаимодействии спиновых систем**

Валерий Эткин

**Введение**

В предыдущей статье [1] при анализе результатов экспериментов по изучению ядерного магнитного резонанса в системе ядерных спинов [2, 3] был сделан вывод о несводимости обнаруженного в экспериментах спин-спинового взаимодействия к теплообмену, а также к электрическому или магнитному мультипольному взаимодействию. Специфика этого взаимодействия, названного нами ориентационным, проявилась в передаче упорядоченной ориентации одной системы ядерных спинов другой и в самопроизвольном установлении при этом единой «средневзвешенной» ориентации различно (в том числе противоположно) направленных спинов. Специфичность этого взаимодействия признается и квантовой механикой, согласно которой главную роль в установлении спин-спинового равновесия играет некоторое особое взаимодействие, названное обменным. Так называют взаимное влияние тождественных частиц, которое обусловлено действием так называемых обменных сил и присутствует даже в случае, если прямым силовыми (электрическим, магнитным) взаимодействием частиц можно пренебречь [4]. Однако обменные силы становятся заметными только тогда, когда среднее расстояние между частицами становится сравнимым с длиной волны де Бройля. Поэтому представляет интерес показать, что ориентационное взаимодействие спиновых объектов имеет место и в макромире.

**Ориентационная составляющая потенциальной энергии**

Известно, что различные положения тела в пространстве и его различные ориентации в нем с механической точки зрения не эквивалентны [5]. Изучению ориентационной составляющей энергии системы (т.е. той её части, которая зависит от взаимной ориентации её частей) до настоящего времени уделялось недостаточно внимания. Возможно, это было связано с тем, что для решения многих практических задач законы движения тел было удобнее сводить к законам движения отдельных материальных точек, ориентация которых в пространстве уже не имела значения. Это позволяло ограничиться рассмотрением так называемых центральных полей, потенциальная энергия которых U(r) зависела только от расстояния между телами (от радиус-вектора центра их инерции r). Иное дело, когда в качестве объекта исследования выбирается вся совокупность взаимодействующих (взаимно движущихся) тел. Именно к ней как к замкнутой системе и относятся законы сохранения. Рассмотрим, в частности, законы сохранения импульса P и момента импульса L замкнутой механической системы, состоящей из k–х тел (k=1,2,...,К):

(1)



где Pk=mkvk;Lk=rk×Pk – импульс k-го тела и момент его импульса; rk, mk, vk – радиус-вектор, масса и скорость центра инерции тела.

Согласно (1), изменение импульса Pk или момента импульса Lk любого из тел замкнутой системы невозможно без равных им по величине и противоположных по знаку изменений импульса или момента импульса всех остальных тел в тот же момент времени. С учетом конечной скорости взаимодействия это означает наличие соответствующих полей сил Fk=dPk/dt и крутящих моментов Mk=dLk/dt во всех точках рассматриваемой системы.

Параметры Pk и Lk можно представить в виде произведения их модулей Pk=|Pk| и Lk=|Lk| и единичного вектора ek, характеризующего их направление, т.е. Pk=Pek и Lk=Lek. Если классифицировать процессы по особым, не сводимым к другим изменениям состояния, которые они вызывают, то следует признать, что производные по времени t от параметров системы Pk и Lk характеризуют, вообще говоря, два различных процесса. Один из них – процесс ускорения соответственно поступательного и вращательного движения ek(dPk/dt) и ek(dLk/dt), выражающийся в изменении величины импульса Pk или его момента Lk при неизменном их направлении ek. Другой – процесс переориентации этого движения Pk(dek/dt) и Lk(dek/dt), выражающийся в изменении направления векторов Pk и Lk при неизменной величине самого импульса Pk или его момента Lk. Следовательно, изменение направления скорости vk или момента импульса Lk каждого из тел рассматриваемой системы также с необходимостью сопровождается переориентацией импульса или момента импульса всех других тел данной системы. Силы, порождающие поля Fk и Mk, принципиально отличаются по своей природе. Если, например, ускорение тела осуществляется полем центральных сил Fk, являющихся полярными векторами, то процесс его переориентации (поворота) – центростремительными силами, силами Кориолиса или магнитной составляющей силы Лоренца, являющимися аксиальными векторами. Принято считать, что эти последние силы не совершают никакой работы, поскольку они всегда направлены по нормали к вектору скорости тела vk. Отсюда якобы следует, что не существует какой-либо формы энергии, соответствующей этим силам. Между тем в замкнутой системе действуют лишь пары таких сил, т.е. крутящие моменты Mk, которые и совершают работу переориентации тел. Действительно, элементарное изменение положения любой материальной точки твердого тела ds можно представить в виде суммы члена dR, характеризующего поступательное движение тела относительно неподвижной системы отсчета, и вектора dφ×r, характеризующего его поворот вокруг мгновенной оси вращения на бесконечно малый угол dφ (где r – радиус-вектор точки в подвижной (сопутствующей) системе координат) [2]:

ds = dR + dφ×r. (2)

Согласно (2), элементарная работа dWk=Fk·dsk какой-либо результирующей силы Fk также складывается из работы смещения тела Fk·dRk и работы его поворота Fk·(dφk×rk)=Mk·dφk, где Mk=dLk/dt=rk×Fk – крутящий момент, действующий на k-е тело. Таким образом, переориентация тел осуществляется полем моментов Mk и также связана с совершением определенной работы, Это свидетельствует о существовании специфической составляющей потенциальной энергии, которую уместно назвать ориентационной энергией.

Наличие поля крутящих моментов Mk, передающего изменение ориентации одних тел другим, свойственно, вообще говоря, любым упорядоченным формам энергии. Известно, например, что поляризация диэлектриков сопровождается не только разделением в пространстве положительных и отрицательных зарядов (т.е. созданием диполей), но и переориентацией по полю уже имеющихся «жестких» диполей с неизменным плечом [6]. На это расходуется часть работы поляризации dWе=E·dZe, где E – напряженность электрического поля, Ze – вектор поляризации. Эта часть в соответствии с вышеизложенным определяется выражением dWе=ZeE·de и может быть представлена в виде произведения действующего на электрический диполь крутящего момента MЕ на элементарный угол его поворота dφе в поле E. Точно так же в процессе намагничивания наряду с изменением плеча магнитных диполей происходит их переориентация во внешнем магнитном поле H. Затрачиваемая на это работа dWм=ZмH·de (где Zм – модуль вектора намагничивания Zм) также может быть представлена в виде произведения действующего на магнитный диполь крутящего момента MН на угол его поворота dφм. Таким образом, в электрических и магнитных полях помимо центральных сил всегда можно выделить ориентационную составляющую, действующую на тела с несферической симметрией. Это относится в полной мере и к гравитационным полям. Рассмотрим, например, потенциальную энергию U(r) гантели с массой грузов m и расстоянием между ними l, расположенных в поле тяжести Земли с массой М на расстоянии r:

E1(r) = –2GMm/r, (3)

где G – гравитационная постоянная.

Однако, если тот же стержень повернуть вокруг неподвижного центра масс в вертикальное положение, координаты центров массы его половинок будут равны соответственно:

r1 = r + l/2 и r2 = r – l/2,

а потенциальная энергия примет значение:

E2(r) = –GMm[1/(r + l/2) + 1/(r – l/2)], (4)

т.е. изменится на величину:

E2(r) – E1(r) = –(2GMm/r)[l/(r – l/2) + l/(r + l/2)]. (5)

Отсюда следует, что поворот в поле тяжести тел с несферической симметрией также требует затраты некоторой работы, связанной с переходом потенциальной энергии центральных сил в ориентационную энергию и обратно. Таким образом, ориентационная составляющая потенциальной энергии систем присуща в принципе всем известным силовым полям. Существование наряду с полем центральных сил Fk поля моментов Mk приводит к тому, что потенциальная энергия тела U=U(r, φ) включает в себя в общем случае две составляющие, зависящие соответственно от положения тела U=U(r) и его ориентации U=U(φ). Это означает, что потенциальная энергия силовых полей является в общем случае функцией шести переменных – трех координат центра инерции и трех углов, определяющих ориентацию тела относительно неподвижной системы отсчета [7].

**Ориентационная энергия спиновых систем**

Вывод о существовании ориентационной составляющей энергии выглядел бы достаточно банальным, если бы он относился только к известным силовым полям. Значительно интереснее показать, что эта составляющая энергии присуща и вращающимся телам независимо от наличия у них упомянутых выше форм энергии. С этой целью рассмотрим систему вращающихся тел с несферической симметрией (уравновешенный волчок или гироскоп – центр тяжести которого совпадает с центром подвеса). Предположим, что момент количества движения любого k-го тела такой системы Lk по каким-либо причинам не совпадает с собственной осью его вращения, так что оно помимо вращения вокруг собственной оси с постоянной угловой скоростью Ωk испытывает регулярную прецессию с угловой скоростью ωk относительно направления вектора момента его количества движения Lk (рис.1).

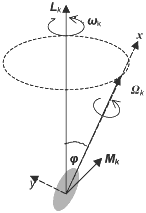


Рис. 1.

Воспользовавшись произвольностью выбора осей координат, совместим вслед за [2] ось x с осью симметрии волчка, а ось y – с плоскостью, образованной векторами Lk и Ωk, как это показано на рисунке. Тогда угловая скорость вращения волчка вокруг собственной оси Ωk = |Ωk| и угловая скорость его прецессии ωk=|ωk| определятся соотношением [2]:

Ωk = Lkcosφ/Ix; ωk = Lk/Iy, (6)

где Lk = |Lk|; Ix, Iy – моменты инерции волчка относительно осей x и y; φ – угол, образованный векторами Lk и Ωk.

Этим угловым скоростям соответствуют кинетические энергии собственного Ekc и прецессионного Ekп вращения, равные:

Ekc = Lk2 cos2φ/2Ix; Ekп = Lk2/2Iy. (7)

Таким образом, суммарная кинетическая энергия рассматриваемого волчка

Ek = Ekc + Ekп = ΔEk = Lk2(cos2φ + Ix/Iy)/2Ix, (8)

является в общем случае функцией не только количества движения Lk, но и угла φ, определяющего ориентацию оси его собственного вращения в пространстве Ek=Ek(Lk,φ).

Сопоставляя Ek(Lk,φ) с величиной Ek0=Lk2/2Ix при том же значении Lk и φ=0, находим:

ΔEk = Ek – Ek0 = Lk2(cos2φ + Ix/Iy – 1)/2Ix = Lk2(Ix/Iy – sin2φ)/2Ix. (9)

Согласно (8), при sinφ<(Ix/Iy)0,5 кинетическая энергия прецессирующего волчка Ek превышает таковую в отсутствие прецессии (при φ=0). Это означает, что для возбуждения прецессионного движения необходимо затратить определенную работу. В условиях замкнутой системы с неизменным суммарным моментом количества движения L0=ΣLk0 это может быть вызвано только превращением в кинетическую потенциальной энергии взаимной ориентации тел U=U(φ). Вычислить эту работу и тем самым найти изменение ориентационной энергии можно из следующих соображений.

Известно, что прецессия волчка или гироскопа (т.е. дополнительное вращение их вокруг оси, не совпадающей с осью собственного вращения) возникает, когда к ним приложен определенный крутящий момент Mk=dLk/dt. Работа dWk=–Mk·dφ, которая затрачивается на отклонение оси гироскопа от его первоначального положения (при φ=0) в условиях Ωk=const и Lk0=IxΩk=const, равна, очевидно, дополнительной кинетической энергии dEkп=ωkdLk, которую приобретает гироскоп в результате прецессии. При этом величина угловой скорости прецессии ωk=|ωk| определяется известным соотношением [4]:

ωk=Mk/IxΩk·sinφ. (9)

Подставляя (9) в выражение dEkп и приравнивая последнее величине dWk, получим:

dLk = Lk0sinφ·dφ, (10)

Интегрируя это выражение в пределах от φ=0 до φ в условиях постоянства Lk, имеем:

(11)



Поскольку при φ=0 прецессия отсутствует, C=1, так что окончательно получаем:

Lk = Lk0(1 – cosφ). (12)

Согласно этому выражению, по мере увеличения угла φ под действием крутящего момента Mk момент количества прецессионного движения Lk также возрастает. Следовательно, с возникновением прецессии у вращающихся тел появляется дополнительная кинетическая энергия внутреннего вращения Eω. Таким образом, кинетическая энергия прецессионного движения Ek(φ) может служить мерой «разориентации» системы вращающихся тел. В этом порядке идей совершенно естественным выглядит тот факт, что прецессия прекращается с исчезновением крутящих моментов Mk. Это соответствует наступлению ориентационного равновесия в системе взаимодействующих тел, т.е. состояния, характеризующегося одинаковой ориентацией осей вращения тел или частиц. При «раскрутке» гироскопов направление Lk у них не изменяется, т.е. ориентационное равновесие не нарушается. Потому-то уравновешенные гироскопы и не изменяют в дальнейшем своей ориентации. Напротив, возникновение прецессии вращающихся тел свидетельствует об отсутствии в системе ориентационного равновесия и о наличии в ней поля крутящих моментов Mk. Источником возмущения при этом может служить, например, относительное движение тел, а в микромире – тепловое движение частиц. Это и объясняет, почему в упомянутых выше экспериментах для достижения спин-спинового равновесия требовались достаточно низкие температуры.

**Обсуждение результатов**

Зависимость всех упорядоченных форм энергии от взаимной ориентации тел с несферической симметрией свидетельствует о существовании в природе специфического ориентационного взаимодействия и соответствующего ему ориентационного равновесия. Специфика этого взаимодействия (независимо от его физической природы) состоит в стремлении к установлению единой ориентации осей симметрии тел (а для вращающихся тел – единой ориентации осей их вращения), соответствующей минимальному значению поля крутящих моментов (ориентационного поля) M(r,φ). Это поле не следует смешивать с гипотетическим торсионным полем (полем кручения), порожденным различной плотностью угловых скоростей Ωk или моментов вращения (спинов) тел и частиц Lk [6]. В отличие от последнего, поле M(r,φ) является составляющей известных силовых полей, т.е. присуще и неподвижным телам. Далее, оно существует и в системе тел (частиц), вращающихся с одинаковой угловой скоростью Ωk. Кроме того, оно направлено по нормали к Ωk и вызывает не ускорение, а переориентацию вектора их угловой скорости, т.е. изменяет ωk, а не Ωk. При этом наглядным проявлением отсутствия ориентационного равновесия является возникновение в спиновых микро- и макросистемах прецессионного движения.

Дальнодействие полей M(r,φ) определяется их конкретной физической природой и в принципе ограничено. Однако это ограничение не относится к волнам, возникающим при осцилляции этих полей. В частности, при осцилляции электромагнитных полей возникают электромагнитные волны, а при нарушении спинового порядка – так называемые спиновые волны, также обнаруженные экспериментально у целого ряда веществ [4]. Сфера распространения волн определяется, как известно, исключительно свойствами проводящей их среды, и для сред типа физического вакуума (с пренебрежимо малой диссипацией ориентационной энергии) может быть практически неограниченной. Поэтому ввиду направленного характера и возможности накопления ориентационного воздействия (в отличие от хаотических возмущений) оно может оказаться достаточным для упорядочивания не только микро, но и макросистем.

Наличие ориентационных полей и взаимодействий объясняет целый ряд явлений, начиная от выстраивания в одной плоскости колец Сатурна до явления спонтанного намагничивания ферромагнетиков. Однако более важным представляется вывод о существовании в Природе наряду с тенденцией к превращению упорядоченных форм энергии в тепловую противоположной тенденции к установлению порядка, обусловленной наличием полей M(r,φ) и ориентационных взаимодействий. Это положение не следовало из классической, статистической и неравновесной термодинамики [7] и является существенным дополнением к ним. Его учет проливает новый свет на процессы «самоорганизации» объектов живой и неживой природы, на противоположные диссипативным процессы в ряде областей Вселенной и другие явления, казавшиеся странными с позиций современного естествознания.

**Список литературы**

ЭткинВ.А. О специфике спин-спинового взаимодействия. НиТ, 2002.

RamseyN.F. Thermodynamics and Statistical mechanics by Negative Absolute Temperature. // Phys. Rev. – 1956. – V.103. – №1. – р.279.

АбрагамА., ПрокторУ. Спиновая температура. // Проблемы современной физики. – М., 1959. – Вып.1. (A.Abragam, W.Proctor. Spin Temperature. // Phys. Rev., 109, 1441...1458 (1958)).

Физический энциклопедический словарь. – М.: Советская энциклопедия, 1984.

ЛандауЛ.Д, ЛившицЕ.М. Теоретическая физика, Т.1 (Механика). М.:Наука, 1973

АкимовА.Е. Эвристическое обсуждение проблемы поиска новых дальнодействий. EGS-концепции. – М., МНЕЦВЕНТ 1992. Препринт №7А, 63с.

ЭткинВ.А. Термокинетика (термодинамика неравновесных процессов переноса и преобразо вания энергии). Издание 2-е. – Тольятти, 1999, 228с.