

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ВРАЩАЮЩИХСЯ МАССИВНЫХ ТЕЛ*)

П. М. С. Блэкет

ОТ РЕДАКЦИИ

Печатаемая ниже перевод интересной статьи проф. П. Блэкета, мы считаем необходимым дополнить приводимый автором исторический обзор указанием на известную работу П. Н. Лебедева «Магнитометрическое исследование вращающихся тел. Сообщение первое» (Журн. Русского физико-химич. общества. Часть физическая, т. 45, стр. 484, 1911; см. также Собрание сочинений, стр. 207. Москва, 1913 **.) Опубликованное первое сообщение представляет собою только начало большой работы, оборвавшейся вследствие преждевременной смерти П. Н. Лебедева. В этой работе Лебедев поставил себе задачу «непосредственно магнитометрически исследовать магнитные явления, вызываемые вращением тел». Толчком к работе послужило открытое Гэлем (в 1909 г.) магнитное поле солнечных пятен. В первой части работы были подвергнуты экспериментальной проверке две гипотезы: 1. Гипотеза Сузерленда (см. стр. 56 статьи Блэкета); 2. Гипотеза центробежных сдвигов, согласно которой вращающееся тело приобретает отрицательный поверхностный заряд вследствие центробежных ускорений, так что отрицательные заряды, согласно этой гипотезе, испытывают большие ускорения, нежели положительные. Для проверки этих гипотез Лебедевым была построена установка, в которой испытываемое тело (кольцо диаметром в 6 см) приводилось во вращение со скоростью в 30 000—35 000 оборотов в минуту, и магнитное поле измерялось непосредственно чувствительным магнетометром.

Опыты дали отрицательный результат, хотя подсчет, сделанный на основании обеих гипотез, показывал, что чувствительности магнетометра было бы с избытком достаточно для обнаружения магнитного поля, если бы эти специальные гипотезы были правильны.

*) Доложено 15 мая 1947 г. в Королевском Обществе в Лондоне. Nature, May 17, 1947, vol. 159, pp. 658—666, № 4046. Перевод К. Э. Виллер.

**) Работа П. Н. Лебедева была опубликована также и на немецком языке: Ann. d. Physik, 39, 840 (1912).

В заключение своей работы Лебедев пишет: «Как показали опыты, вышеприведённые гипотезы образования магнитных полей вокруг вращающихся тел оказались не выдерживающими прямой опытной проверки. Указанными двумя гипотезами далеко не исчерпывается возможная связь движения материи с образованием магнитных полей, которую мы наблюдаем в случае солнечных пятен и явлений нормального геомагнетизма. Другие гипотезы, которые могут быть сделаны относительно этой связи и которые достаточны для объяснения магнитных сил очень больших двигающихся масс, заставляют ожидать, что при условиях и размерах описанных выше опытов могут возникнуть только очень слабые магнитные поля, которые не могут быть обнаружены магнитометрически; для проверки этих гипотез самую схему опытов надо изменить, чтобы получить достаточно чувствительность измерений, во много раз большую той, которой можно было пользоваться в описанных выше предварительных исследованиях».

Эти слова, лишний раз свидетельствующие о замечательном физическом чутье П. Н. Лебедева, стоит сравнить с результатами подсчётов, приводимых в § 5.3 статьи Блэкета.

Краткое резюме

Уже давно было известно, особенно из работ Шустера, Сузерленда и Вильсона, которым, правда, в последнее время уделялось мало внимания, что магнитные моменты P Земли и Солнца почти пропорциональны их угловым моментам U и что коэффициент пропорциональности приблизительно равен корню квадратному из гравитационной константы G , делённому на скорость света c . Мы можем таким образом написать:

$$P = \beta \frac{G^{1/2}}{2c} U,$$

где β — постоянная порядка единицы.

Недавно было впервые измерено магнитное поле звезды 78 Девы (Бэбкокк, 1947). Вычисленное с помощью этого уравнения по наиболее точным из известных значениям её массы, радиуса и скорости вращения, магнитное поле этой звезды согласуется с измеренным. Мы имеем, таким образом, грубое подтверждение справедливости этого уравнения для трёх тел: Земли, Солнца и 78 Девы, причём значения P и U варьируют в пределах $10^{10}:1$, в то время как измеренные значения магнитного поля отличаются лишь в отношении $2000:1$. Автор поэтому считает, что приведённое выше уравнение заслуживает серьёзного внимания ввиду того, что оно выражает возможный общий закон природы для всех вращающихся массивных тел.

Если белые карликовые звёзды образовались путём сжатия из звёзд, подобных Солнцу, то они должны иметь тот же угловой момент и, следовательно, согласно приведённому выше уравнению — и тот же магнитный момент. Ввиду их малых размеров, магнитное поле на их поверхности должно быть порядка 10^6 гаусс. Высказывается мысль, что магнитные поля такого порядка могут частично явиться причиной большой ширины балмеровых линий у большинства белых карликовых звёзд, а также полного отсутствия каких бы-то ни было линий у некоторых очень плотных звёзд. Рассмотрены различные исключаяющие друг друга теории магнитного поля Земли и Солнца.

Выдвигается предварительное предложение считать, что, по имеющимся налицо доказательствам, приведенное выше уравнение выражает новое основное свойство вращающейся материи. Возможно, что это соотношение даст давно отыскиваемую связь между электромагнитными и гравитационными явлениями.

§ 1. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ЗЕМЛИ, СОЛНЦА И ЗВЕЗДЫ

При исследовании возможного влияния магнитных полей звёзд галактики на космическое излучение я обратил внимание на два факта, которые показались мне чрезвычайно интересными с физической точки зрения. Магнитные моменты P Земли и Солнца почти пропорциональны их угловым моментам U , которые вычисляются по формуле

$$U = \frac{2}{5} \omega MR^2 \quad (1)$$

для равномерно плотной сферы с массой M , радиусом R и угловой скоростью ω . В этой пропорциональности можно убедиться по данным табл. 1.

Таблица 1

Тело	Масса M (г)	Радиус R (см)	Угловая скорость ω (сек ⁻¹)	U	H_p (гаусс)	P	P/U
Земля	$6,0 \cdot 10^{27}$	$6,37 \cdot 10^8$	$7,3 \cdot 10^{-5}$	$7,1 \cdot 10^{40}$	0,61	$7,9 \cdot 10^{25}$	$1,11 \cdot 10^{-15}$
Солнце	$2,0 \cdot 10^{33}$	$6,97 \cdot 10^{10}$	$2,9 \cdot 10^{-6}$	$1,12 \cdot 10^{49}$	53	$8,9 \cdot 10^{33}$	$0,79 \cdot 10^{-15}$

Здесь приведены также и измеренные значения магнитных полей у полюсов. Они связаны с магнитными моментами выражением:

$$H_p = 2P/R^3. \quad (2)$$

Давно было известно, что друг с другом связаны также и направления вращения и магнитных моментов обоих тел; действительно, южные магнитные полюса обоих тел расположены близко от их северных географических полюсов.

Естественно было сравнить среднее отношение $(P/U)_1$ магнитного момента к угловому для этих двух астрономических тел с подобным же отношением для боровского магнетона

$$(P/U)_2 = e/2mc = 0,88 \cdot 10^7 \text{ см}^{1/2} \text{ г}^{-1/2}. \quad (3)$$

Мы получаем

$$(P/U)_1 / (P/U)_2 = 1,08 \cdot 10^{-22} \quad (4)$$

и сразу же видим, что это численное значение близко к значению хорошо известного безразмерного отношения

$$G^{1/2}m/e = 4,90 \cdot 10^{-22} \quad (5)$$

гравитационной массы электрона к его заряду, выраженному в электростатических единицах. Мы можем таким образом написать:

$$(P/U)_1 = \beta \frac{G^{1/2}m}{e} (P/U)_2, \quad (6)$$

где β — есть малая численная константа порядка $1/4$, откуда, пользуясь (3), получаем следующее соотношение между магнитным и угловым моментами обоих астрономических тел:

$$P = \beta \frac{G^{1/2}}{2c} U. \quad (7)$$

Простота этого результата, будь то в форме (6) или (7), подсказала мысль, что он должен иметь глубокое физическое значение.

Это побудило меня заняться изучением обширной литературы, касающейся происхождения магнитных полей Земли и Солнца, и, к моему удивлению, я обнаружил, что сущность этих фактов была известна уже в течение многих лет, но по различным причинам этими вопросами в последнее время перестали интересоваться. В следующем параграфе будет дан краткий обзор более ранних работ.

В поисках дальнейших способов проверки уравнения (7) я сразу же подумал о возможности измерить магнитное поле какой-нибудь быстро вращающейся звезды. Я обязан профессору С. Чандрасекару, сообщившему мне о впервые произведённом измерении магнитного поля звезды. Уже опубликованные в настоящее время измерения Бэбкокка¹ над звездой 78 Девы дали для поля на её полюсе 1500 гаусс. Для того чтобы вычислить P и U , мы должны знать массу звезды, её радиус и угловую скорость. Статистические данные для звёзд подобного типа дают для этих величин, выраженных через те же величины для Солнца, следующие значения: $M = 2,3$, $R = 2,0$, $\omega = 25$ (см. § 4). Табл. 2 даёт искомые данные для звезды.

Таблица 2

Тело	M	R	ω	U	H	P	P/U
78 Девы	$4,6 \cdot 10^{83}$	$1,4 \cdot 10^{11}$	$7,3 \cdot 10^{-5}$	$2,6 \cdot 10^{51}$	1500	$2,1 \cdot 10^{96}$	$0,81 \cdot 10^{-15}$

Мы снова получаем приближённо то же отношение для P/U , показывающее, что уравнение (7) справедливо не только для Земли и

Солнца, но также и для звезды 78 Девы. Соотношение между направлениями вращения и магнитного поля неизвестно.

Это дальнейшее подтверждение справедливости уравнения (7) говорит, с одной стороны, о том, что оно заслуживает серьезного внимания, как выражающее возможный новый общий закон природы, и, с другой стороны, что необходимо произвести более строгую проверку его законности с учётом вариации плотности и, возможно, также и вращения внутри тел.

§ 2. ПЕРВЫЕ ТЕОРИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ И СОЛНЦА

Хотя и известно, что основное дипольное поле Земли внутреннего происхождения, однако, как оно возбуждается, всё ещё неясно. Чэппен и Бартельс² (1940) рассмотрели критически обширную литературу по этому вопросу. Более ранние обзоры Шустера³ (1912), Брэнта⁴ (1913) и Суонна⁵ (1923) и сейчас ещё представляют большую ценность. В одной из последних статей Каулинга⁶ (1945) рассмотрены возможные теории поля Солнца.

Теории основного поля Земли или Солнца удобно разбить на два класса, которые можно назвать частными и общими теориями.

Частная теория приписывает магнитные свойства вращающегося тела специфическим свойствам материи, из которой оно состоит; по этой теории магнитный момент вращающегося массивного тела будет зависеть от удельных электрических, магнитных, термических и механических свойств материала и, по всей вероятности, будет иметь совершенно различные значения для различных физических состояний тела.

Первая теория этого рода, согласно которой Земля считалась ферромагнитной, была давно отвергнута, поскольку внутренняя температура Земли почти наверное много выше точек Кюри для любого материала, который может там находиться. Другим возможным вариантом является, очевидно, предположение о существовании в Земле электрического тока проводимости. Трудность здесь заключается в том, чтобы найти механизм, который его поддерживает. Для того чтобы оправдать знак поля, необходимо, чтобы положительный ток шёл с востока на запад, либо чтобы отрицательный шёл с запада на восток.

Эльзассер⁷ недавно (1939) пытался приписать ток термоэлектрическим э. д. с., возникающим вследствие разности температур в жидком ядре, обусловленной конвекционными движениями. Требуемая для создания циркуляции вокруг оси существенная асимметрия приписывается им действию кориолисовых сил на массы, находящиеся в конвекционном движении. В последующей статье⁸ (1941) Эльзассер рассматривает соотношение между сильным основным дипольным полем Земли и иррегулярной его частью, составляющей несколько про-

центров от основного поля. Он считает, что оба эти поля создаются центральным ядром из расплавленного металла, радиус которого равен около $0,55 R$.

Несколько похожая теория Френкеля⁹ (1945) вводит ещё дополнительно механизм самовозбуждения, такой же, какой по предположению Гуревича и Лебединского¹⁰ обуславливает магнитное поле солнечных пятен. Впервые теория, предполагающая наличие самовозбуждения, или механизма динамо, была выдвинута Лармором¹¹ (1919) и затем детально разработана Каулингом¹² (1933), но оказалось, что она не смогла объяснить ни магнитного поля солнечных пятен, ни основных полей Земли и Солнца. Каулинг⁶ (1945) показал также, что термические эффекты, вызываемые конвекцией во вращающемся Солнце, дают лишь правильный знак поля, а по величине только 10^{-7} измеренного значения его. Он показал также, что время электромагнитного спадания общего магнитного поля Солнца составляет 10^{10} лет, так что могло бы быть, что наблюдаемое нами в настоящее время поле представляет собой остатки совершенно отличного первобытного состояния. Однако Лэмб (см., например,² стр. 704) давно показал, что спадание токов в Земле происходило бы слишком быстро для того, чтобы можно было допустить, что поле, наблюдаемое нами в настоящее время, является пережитком.

Общая теория приписывает наличие дипольного поля некоторому общему свойству вращающейся материи. Ещё в 1891 г. Шустер¹³, подозревая, на основании вида солнечной короны, что Солнце может иметь магнитное поле, поставил вопрос о том, не «является ли всякая вращающаяся масса магнитом».

Единственным очевидным атомным эффектом является намагничивание при вращении, т. е. giro-магнитный эффект. Это даёт правильный знак поля, но величину магнитного момента в 10^{19} раз меньше (² стр. 705). Однако, как показал Шустер³, при таком равномерном намагничивании полный момент пропорционален объёму сферы и, следовательно, поле на поверхности не зависит от радиуса. Таким образом, любая такая теория может быть исключена.

В целом ряде работ Сузерлэнд¹⁴ (1900—1908) принимал, что магнитное поле Земли обусловлено тем, что Земля обладает положительным объёмным зарядом, который компенсируется отрицательным поверхностным зарядом. Он вычислил требуемую плотность заряда и показал, что это влечёт за собой наличие внутри Земли электрических полей порядка 10^8 В/см. Он обратил также внимание на то, что разделение зарядов, вычисленное по измеренному магнитному полю Земли, имеет почти ту же величину, какая получится, если считать, на основании лоренцевской дорелятивистской теории (см. напр. ³), что разделение объясняется небольшой разницей в электрических силах, действующих между двумя протонами, двумя электронами и электроном и протоном. Это есть по существу первое подтверждение численного результата, установленного позднее в явной

форме Вильсоном¹⁵, который даёт несколько иное выражение для результата, приведённого нами выше в параграфе 1.

В 1912 г. Шустер сделал обзор³ возможных теорий и их трудностей и подробно исследовал одну из них, подобную теории Сузерленда, основанную на предположении неравных сил, действующих между одинаковыми и неодинаковыми частицами атома. Брэнт⁴ (1913) рассмотрел много различных теорий и также показал, что разделение положительного и отрицательного зарядов Солнца не может обусловить больше, чем 10^{-15} магнитного поля Солнца.

Следуя идее Шустера, Т. А. Вильсон¹⁵ (1923) показал, что правильный порядок величины полей Земли и Солнца получается, если предположить, что движущийся элемент массы M , измеренной в гравитационных единицах, вызывает тот же магнитный эффект, что и движущийся электрический заряд Q , измеренный в электростатических единицах. Мера M массы тела в гравитационных единицах определяется уравнением $F = M_1 M_2 / r^2$ для силы притяжения между двумя массами. Сравнивая это с выражением $F = G m_1 m_2 / r^2$, где m_1 и m_2 измерены в граммах, мы получаем $M = G^{1/2} m$, откуда гравитационная единица материи равна $G^{-1/2} = 3,870$ г.

Выраженная формально, гипотеза Вильсона равносильна предположению, что элемент массы в m грамм, или в M гравитационных единиц, при движении со скоростью v даёт на расстоянии r магнитное поле

$$H = -\frac{M}{cr^3} [\mathbf{V} \cdot \mathbf{r}] = -\frac{G^{1/2} m}{cr^3} [\mathbf{V} \cdot \mathbf{r}], \quad (8)$$

по аналогии с нерелятивистским выражением для магнитного поля движущегося заряда в Q эл.-ст. ед., которое равно

$$H = \frac{Q}{cr^3} [\mathbf{V} \cdot \mathbf{r}]. \quad (9)$$

Из (8) получаем интегрированием, что магнитный момент P сферы с массой M , равномерной плотностью ρ , радиусом R и угловой скоростью ω даётся выражением

$$P = \frac{1}{5} \frac{G^{1/2}}{c} \omega M R^2. \quad (10)$$

Заметим, что (1) и (10) вместе дают (7), но без константы β . Согласно (2) магнитное поле на поверхности у полюса равно

$$H_P = \frac{2}{5} \frac{G^{1/2}}{c} \frac{\omega M}{R} \quad (11)$$

или, выраженное через плотность ρ :

$$H_P = \frac{8}{15} \pi \frac{G^{1/2}}{c} \omega \rho R^2. \quad (11a)$$

Вильсон показал, что (11) даёт правильное отношение полей Солнца и Земли, но численные значения получаются в три раза больше.

Этот результат можно ещё иначе выразить следующим образом: магнитное поле Земли таково, как если бы Земля обладала отрицательным объёмным зарядом плотности σ , заданной через плотность массы ρ выражением:

$$\sigma \simeq G^{1/2} \rho. \quad (12)$$

Ангенгайстер¹⁶ (1925) также обратил внимание на то обстоятельство, что предположение о пропорциональности между плотностью электрического заряда и плотностью массы даёт приближённо правильное отношение магнитных полей Солнца и Земли. Он ясно сознавал физические трудности, связанные с предположением о существовании реальных зарядов такой величины и сильных электрических полей, которые должны им сопутствовать, в таком электрически проводящем материале, как ядро Земли.

Вильсон¹⁵ (1928) произвёл лабораторный эксперимент с качающимся железным стержнем с целью проверить гипотезу о том, что движущаяся масса создаёт магнитное поле. Он экспериментально показал, что поля, определяемого (8) в предположении, что m есть масса Земли и v относительная скорость железного стержня, не существует. Другие аргументы против этой гипотезы приводятся в параграфе 5.

Шломка¹⁷ (1933) подробно рассмотрел теорию, основанную по существу на гипотезе Шустера о неравных кулоновых силах, действующих на дальнем расстоянии между одинаковыми и неодинаковыми частицами.

Хаалк¹⁸ (1937—1938) приписывает требуемое разделение зарядов не разнице в кулоновых силах, действующих между электронами и ядрами, а силам, действующим на малом расстоянии между электронами и молекулами, т. е. силам, обусловливающим упругие свойства материала. Он предполагает, что такие силы должны привести к разделению зарядов, пропорциональному некоторой степени радиуса и имеющему максимум в центре Земли.

Суонн¹⁹ (1927) разработал сложную теорию, основанную на малом произвольном изменении уравнений электродинамики, выбранном таким образом, что они дают требуемое магнитное поле без нежелательного электрического поля. Однако основная гипотеза Суонна заключалась в том, что магнитное поле вращающегося тела пропорционально $\rho \omega^4 R^4$, а не $\rho \omega R^2$, согласно (11a). Это было принято для того, чтобы избежать трудности, связанной с поступательным движением, и равносильно предположению, что магнитное поле, создаваемое элементом массы, зависит от определённых производных его скорости по времени и, таким образом, равно нулю при равномерно-поступательном движении. Суонн выбрал эту особую форму потому, что она даёт правильное отношение полей Солнца и Земли. Однако эта теория даёт также и относительно большие значения для полей вращающихся тел лабораторных масштабов, существование которых было

позднее опровергнуто опытами Суонна и Лонгсикра²⁰ (1918), чем были опровергнута и эта теория, по крайней мере, для малых тел. Теория Суонна встречает ещё и другие возражения, а именно в том, что представляется мало вероятным, чтобы векторная величина $\mathbf{P}$ могла зависеть от чётной степени вектора $\boldsymbol{\omega}$, и, кроме того, эта теория не даёт правильного численного значения магнитного момента, за исключением случаев, когда вводятся произвольные параметры.

Случай, когда оправдывается общая теория

Чэпмен и Бартельс² (1940, т. 2, стр. 707) довольно подробно рассматривают все различные теории, но они не придают особого значения отдельным частям работ Сузерленда, Шустера, Вильсона и Ангенгайстера, которые вместе устанавливают приведённые выше результаты. Они в общем приходят к заключению против общей теории и в пользу частной теории некоторого типа, но они не считают, что какой-нибудь из существовавших в то время частных теорий можно пользоваться с уверенностью. Их главные доводы против общей теории заключаются в наличии наклона магнитной оси к оси вращения, который равен для Солнца 4° и для Земли 12° , а также в существовании вековой вариации. Для Земли это означает, что если бы общая теория и смогла бы даже объяснить существование её основного симметричного магнитного поля, то всё же оставалось бы ещё объяснить наличие поля, достигающего до 10% от основного. Мне кажется, однако, что если бы удалось найти общее объяснение существования основного поля, то легко может оказаться, что изменения, вносимые в него конвекционными движениями и т. д., которые должны существовать внутри Земли, будут достаточны для того, чтобы дать наблюдаемое поле.

Несомненно, гораздо труднее найти такую частную теорию, которая привела бы к следующим двум поразительным результатам: (а) что магнитные моменты Солнца и Земли почти пропорциональны их угловым моментам при вариации их в пределах, отличающихся больше чем $10^8:1$, (б) что коэффициент пропорциональности приближённо равен $G^{1/2}/c$, нежели объяснить отклонение направлений обеих осей и существование вековой вариации.

Представляется исключительно маловероятным, чтобы приближённая справедливость уравнения (7) могла оказаться случайной. Простота этого уравнения, содержащего лишь две макроскопические константы G и c , являет резкий контраст со сложным и произвольным характером выдвинутых до сих пор специальных теорий, не сумевших дать качественного объяснения ни существованию поля Земли или Солнца, ни тем более их обоих.

Наличие одной только константы $G^{1/2}/c$, умножаемой на угловой момент, повидимому, исключает, не считая случая поразительного количества численных совпадений, возможность определения магнитного

момента вращающегося тела иными его частными свойствами, кроме его размеров, массы и вращения.

Если P действительно зависит только от макроскопических величин M , R , ω , G , c , то тогда из соображений размерностей можно найти функциональные зависимости соответствующего вида. Ограничиваясь рассмотрением случаев, когда P пропорционально M , мы находим, что P может быть выражено в виде:

$$P \propto G^{1/2} c^{-1} \omega M R^2 f(\omega R/c). \quad (13)$$

Для $f(\omega R/c) = \text{constant}$ это даёт наше первоначальное выражение (7). Поскольку P должно зависеть от нечётной степени ω , то наиболее вероятное выражение для него получится, если положить $f(\omega R/c) = (\omega R/c)^2$, что даёт

$$P \propto G^{1/2} c^{-3} \omega^3 M R^4. \quad (14)$$

В то время как наше первоначальное выражение даёт как наблюдаемую зависимость P от M , ω и R , так и грубо правильно его численную величину, это выражение не даёт ни того, ни другого. Легко заметить, что последнее выражение отличается от первого лишь множителем $(\omega R/c) = v/c$, если v — периферическая скорость. Разумеется возможно, что при очень больших периферических скоростях придётся ввести релятивистскую поправку, содержащую $(v/c)^2$.

§ 3. УГЛОВОЙ МОМЕНТ ЗВЕЗДЫ

Как уже было пояснено выше, приближённая справедливость уравнения (7) была впервые замечена при сравнении магнитных моментов Земли и Солнца в предположении равномерной плотности их обоих. Однако в действительности это далеко не так, особенно для Солнца, и поэтому при вычислении угловых моментов необходимо принять во внимание уплотнение этих тел в центре.

Удобно ввести отношение

$$k = I/I_0 \quad (15)$$

момента инерции заданной сферы, уплотнённой в её центре, к моменту инерции сферы того же радиуса и вращающейся с той же угловой скоростью, но с равномерной плотностью, равной средней плотности сферы, уплотнённой в центре. Тогда вместо (1) мы получаем

$$U = \frac{2}{5} k \omega M R^2. \quad (16)$$

Для Земли и большинства планет k известно из работ Джеффриса²¹ (1924, 1937). Для Солнца и других звёзд необходимо вычислить его значение, приняв какую-нибудь данную звёздную модель. Мы имеем прежде всего эмпирические политропические газовые сферы,

для которых Эддингтон²² (1926) приводит распределение плотности для трёх различных значений показателя политропы n . Существует ещё затем более поздняя точечная конвекционная модель Каулинга²³ (1935), для которой новые вычисления сделаны Бланшем, Лоуаном, Маршаком и Бете²⁴ (1941) и Маршаком и Бланшем²⁵ (1946).

Из распределения плотности были грубо вычислены с помощью графического интегрирования значения k , которые приводятся в табл. 3 вместе с отношением плотности в центре тела ρ_0 к средней плотности $\bar{\rho}$.

Таблица 3

Плотность в центре ρ_0 и относительный момент инерции звёздных тел

	$\rho_0/\bar{\rho}$	$k = I/I_0$
Однородная сфера	1,00	1,00
Политропа $n = 2$	11,4	0,40
" $n = 2,5$	24,1	0,28
" $n = 3,0$	54,3	0,20
Точечная конвекционная модель	79,3	0,14
Земля	3,3	0,88
Юпитер	?	0,66

Таким образом, для Солнца значение k отличается значительной неопределённостью. Ниже мы примем для него значение 0,16, как среднее для точечной конвекционной модели и политропы с показателем $n = 3$.

Неравномерное вращение

Из соображений устойчивости представляется вероятным, что угловая скорость газового звёздного тела не будет равномерной, но должна возрастать по направлению к его центру (см. Мильн²⁶, 1930, стр. 241). С другой стороны, известно, что скорость вращения на поверхности Солнца у полюсов на 40% меньше, чем на экваторе. Хотя до сих пор, повидимому, ещё не существует надёжного способа оценки этого эффекта, удобно ввести величину:

$$\eta = U/U_0,$$

где U — истинный момент и U_0 — угловой момент, вычисленный по измеренной периферической скорости на экваторе с учётом вариации плотности, но не вариации угловой скорости. Тогда мы знаем, что η будет порядка единицы, но по всей вероятности больше единицы.

Я обязан проф. Каулингу сообщением о том, что имеющиеся данные о среднем периоде вращения всей массы Солнца очень неопределённые, но что период этот, вероятно, короче десяти дней, хотя в

действительности он может быть и больше двадцати пяти дней. Это даёт для η пределы между 2,5 и, скажем, 0,7.

Мы имеем, таким образом, следующее выражение для углового момента вращающегося небесного тела:

$$U = \frac{2}{5} k \eta \omega M R^2, \quad (17)$$

что даёт вместе с (2) и (7):

$$H_p = \frac{2}{5} \beta G^{1/2} k \eta \omega M / R c, \quad (18)$$

где ω — измеренная угловая скорость на поверхности на экваторе. Только для немногих звёзд M и R точно известны, вообще же их приходится выводить статистически. Значения k и η могут быть, конечно, получены только из определённой теоретической модели внутреннего строения звезды.

§ 4. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ЗВЕЗДЫ

4.1. Измерения Бэбкокка над звездой 78 Девы

Давно было известно, что многие звёзды вращаются гораздо быстрее Солнца, и, следовательно, согласно нашей гипотезе, что уравнение (7) выражает общий закон, — эти звёзды должны иметь очень сильные магнитные поля. Однако только совсем недавно было впервые измерено магнитное поле некоторой звезды, кроме Солнца. Это было сделано Бэбкокком¹ (1947) для звезды 78 Девы (спектральный тип A2) и, как уже сообщалось выше, приятно было обнаружить, что в пределах довольно большой ошибки измерения магнитного поля и статистической неопределённости определения массы, радиуса и угловой скорости результаты согласуются с тем, что мы ожидали, хотя соотношение между направлениями магнитного поля и вращения неизвестно.

Скорость вращения звёзд измеряется по расширению вследствие Доплер-эффекта спектральных линий света, исходящего от различных частей диска. Общее описание метода дано Элвей²⁷ (1930), Росселандом²⁸ (1936, стр. 202) и Беккером²⁹ (1942, стр. 66). Звёзды ранних спектральных типов O, B и A и ранние F обычно находятся в быстром вращении, причём чаще всего их периферическая скорость равна около 100 км/сек, по сравнению со скоростью Солнца (тип G0) в 2 км/сек. Небольшая часть звёзд вращается со скоростями больше 200 км/сек (см. табл. 4). Вращение как бы внезапно пропадает у звёзд, относящихся к типам между F2 и F5, и никакого поддающегося наблюдению вращения, т. е. периферических скоростей больше, скажем, 20 км/сек для звёзд более поздних спектральных типов не наблюдалось. Однако немногие звёзды ранних типов дают тонкие спектральные линии, и это интерпретируется как указание на то, что оси их вращения направлены параллельно

линии зрения. Только на таких звёздах и можно в настоящее время измерять Зееман-эффект.

Измерения Бэбкокка для 78 Девы дают для её поля на полюсе 1500 гаусс. Он принимает её периферическую скорость равной 60 км/сек и, сравнивая полученные им цифры с полем в 53 гаусса и периферической скоростью 2 км/сек для Солнца, приходит к выводу, что поле пропорционально периферической скорости. Однако с физической точки зрения это не внушает доверия.

Для проверки уравнения (7) нам необходимо знать M , R и ω . Из данных Беккером²⁹ (1942, стр. 64) таблиц для различных спектральных классов мы находим для звезды типа A2 $M=2,3$ и $R=2,0$ по отношению к значениям этих же величин для Солнца. Из данных Беккером (стр. 69) скоростей вращения, приведённых в табл. 4, следует, что среднее значение периферической скорости звёзд типа A равно скорее около 100 км/сек, чем 60 км/сек, принятых Бэбкокком. Угловая скорость ω должна быть поэтому в 25 раз больше скорости Солнца, т. е. почти та же, что и для Земли.

Таблица 4

Распределение периферических скоростей вращения для звёзд ранних спектральных типов (Беккер 1942)

Скорость (км/сек)	Тип O, B (%)	Тип A (%)	Скорость (км/сек)	Тип O, B (%)	Тип A (%)
25	—	13	150	15	12
50	27	17	175	—	8
75	—	11	200	4	7
100	53	10	225	—	4
125	—	14	250	1	1

Если предположить, что k и η имеют те же значения для Солнца и 78 Девы, то согласно (11) отношение их полей у полюсов должно быть пропорционально $\omega M/R$ и, следовательно, оно должно равняться 29, в то время как измеренное значение равно 28. Принимая во внимание статистический характер данных для звезды, который отчётливо виден из табл. 4, нужно считать такое близкое совпадение совершенно случайным. Направление магнитного поля было определено, но направление вращения, разумеется, нет. Таким образом, для этой звезды нельзя произвести сравнения знаков P и U .

4.2. Сопоставление данных для Земли, Солнца и звезды 78 Девы

В табл. 5 собраны данные для всех трёх тел. Для Земли приведены данные Чэпмена³⁰ (1943) для компоненты дипольного момента в направлении оси вращения.

Совсем недавно была выяснена одна неопределённость, а именно, относительно характера и величины дипольного поля Солнца. Ранние измерения Хэля дали гораздо более быстрое ослабление H с высотой в атмосфере Солнца, чем это должно было быть в соответствии с дипольным полем. Однако работа Тиссена³¹ (1946), повидимому,

Таблица 5

 Отношение P/U с учётом уплотнения в центре

	Магнитный момент $P = \frac{1}{2} H_p R^3$	k	Угловой момент $U = \frac{2}{5} k \omega M R^2$	$\frac{P}{U}$	$\beta = \frac{P}{U} : \frac{G^{1/2}}{2c}$
Земля . . .	$7,9 \cdot 10^{25}$	0,88	$6,22 \cdot 10^{40}$	$1,30 \cdot 10^{-15}$	0,30
Солнце . .	$8,9 \cdot 10^{33}$	0,16	$1,80 \cdot 10^{48}$	$4,9 \cdot 10^{-15}$	1,14
78 Девы . .	$2,1 \cdot 10^{36}$	0,16	$4,2 \cdot 10^{50}$	$5,0 \cdot 10^{-15}$	1,16

окончательно установила существование дипольного поля Солнца и дала для поля у полюса величину 53 ± 12 гаусс.

В последнем столбце табл. 5 приведены значения β , вычисленные с помощью уравнения (7) по измеренным значениям P и U для $G^{1/2}/2c = 4,31 \cdot 10^{-5} \text{ см}^{1/2} \text{ с}^{-1/2}$.

Легко заметить, что β равно почти единице для Солнца и 78 Девы, но только около 0,3 для Земли; это последнее обстоятельство было впервые замечено Вильсоном¹⁵ (1923). β может быть ещё иначе получено непосредственно из выражения:

$$\beta = \frac{5}{2} H_p R c / k \omega M G^{1/2}. \quad (18a)$$

Этим уравнением удобно пользоваться, так как из него видно, как влияют на величину β ошибки определения различных величин.

Необходимо заметить, что почти точная пропорциональность между P и U для Земли и Солнца, найденная в предположении равномерной плотности их, нарушается, если учесть уплотнение в центре Солнца и Земли.

В табл. 6 приведены для сравнения измеренные относительные значения H_p для трёх тел, а также вычисленные из уравнения (7), причём для случая равномерной плотности угловые моменты вычислялись с помощью уравнения (1), а для сфер, уплотнённых в центре, с помощью уравнения (16).

Таблица 6

Измеренные и вычисленные значения поля у полюса

	H_p (измерения)		Равномерн. плотность $\frac{M\omega}{R}$	Уплотнение в центре	
	в гауссах	относит. значения		k	$\frac{M\omega}{R}$ (относ.)
Земля . . .	0.61	1,0	1,0	1,0	1,0
Солнце . . .	53 ± 12	86	121	0,16	20
78 Девы . . .	1500	2450	3500	0,16	550

4.3. Возможность дальнейшей проверки главного вывода на звёздах

Ясно, что для проверки теории чрезвычайно важно произвести дальнейшие измерения величины и направления магнитного поля быстро вращающихся звёзд. Бэбкокк¹ (1947) утверждает, что соотношение между направлениями H и ω можно было бы определить на видимых двойных звёздах. Как видно из табл. 4, некоторые звёзды, относящиеся к ранним спектральным классам и до известной степени подобные 78 Девы, имеют почти в 2,5 раза большую скорость вращения [см. также Струве³² (1930), Уэстгейт³³ (1933, 1934)]. Поэтому поле таких звёзд у полюсов должно быть порядка 4000 гаусс.

Максимум магнитного поля определяется пределом Роша*), указывающим максимальную угловую скорость ω_m для устойчивости. Эта максимальная угловая скорость выражается

$$\omega_m = 1,52 \bar{\rho}^{1/2} R^{1/2}, \quad (19)$$

где $\bar{\rho}$ — средняя плотность (Джинс³⁴, 1928, стр. 246). Это говорит о том, что возможны угловые скорости, превышающие скорость 78 Девы в 4 раза, а следовательно, максимальное поле звёзд этого типа может доходить до 6000 гаусс. Если мы подставим в (11a) ω_m из (19), то мы получим, что максимально возможное поле H_m звезды пропорционально $\bar{\rho}^{1/2} R^2$. Вариация $\bar{\rho}$ и R в зависимости от спектрального типа звезды¹ (стр. 62) показывает, что для главной серии H_m сравнительно медленно изменяется при переходе от одного типа к другому. Мы находим относительно значения H_m для Солнца: $H_m = 1,2$ для звёзд типа (M0) и $H_m = 0,5$ для типа (B0). Звёзды последних типов, хотя, повидимому, нормально не вращаются быстро, способны динамически создавать более сильные поля, чем звёзды ранних типов.

*) См. Jeans, Astronomy and Cosmogony, 1928, p. 246.

Проверить теорию было бы лучше всего на звезде, для которой можно было бы непосредственно измерить величину и направление как магнитного поля, так и угловой скорости, а не опираться при определении угловой скорости на статистические данные, как в случае 78 Девы. Принципиально это представляется осуществимым одновременным измерением Зееман-эффекта и Допплер-эффекта света, приходящего от почти затемнённого края задней составляющей затмеваемой двойной звезды. Однако здесь, вероятно, будут очень большие экспериментальные трудности.

4.4. Белые карлики

Белые карлики, если они вращаются с угловыми скоростями, сравнимыми со скоростью Солнца, также должны иметь сильное поле, ввиду большого значения отношения M/R , от которого зависит величина поля [уравнение (11)]. Для многих белых карликов величина этого отношения, которое определяет также и красное смещение, в 20—30 раз превышает его значение для Солнца (Рэссел³⁵, 1945, стр. 760) и, следовательно, их поле должно быть порядка 1300 гаусс. Однако, если, например, тёмный спутник Сириуса имеет ту же угловую скорость вращения, что и сам Сириус, т. е. если его период обращения равен 8 дням, то магнитное поле его будет порядка 5000 гаусс.

Кюипер³⁶ (1941) высказал мысль, что белые карлики могут обладать угловыми моментами, сравнимыми с моментом Солнца, что и следовало ожидать, если карлики образовались в результате сжатия таких звёзд, как Солнце. Сириус В имеет ту же массу, что и Солнце, в то время как его радиус составляет лишь $1/50$ радиуса Солнца. Если его угловой момент равен моменту Солнца, то согласно нашей гипотезе будут также равны и их магнитные моменты. Магнитное поле Сириуса В будет, следовательно, в 50^3 раз больше поля Солнца, т. е. поле на его экваторе будет равно $3 \cdot 10^6$ гаусс.

Наиболее резко выделяющимися и часто единственными линиями спектра карликов являются бальмеровы водородные линии. Однако эти линии шире, чем у нормальных звёзд главной серии. Такая ширина обычно приписывается расширению линий под действием давления, т. е. Штарк-эффекту, обусловленному атомными столкновениями, которые в этих звёздах должны быть исключительно интенсивными ввиду высокого давления, связанного с очень сильными гравитационными полями. Из рассуждений Кюипера³⁶ (1941) следует, что можно дать грубое количественное объяснение этих линий.

Интересно, однако, отметить, что магнитное поле в несколько миллионов гаусс вызовет такое же расширение спектральных линий. Ввиду того, что двойное зеемановское расщепление нормального триплета длины волны $H\gamma$ приблизительно равно $2 \cdot 10^{-5}$ Å/гаусс, ширина зеемановского расщепления должна быть порядка 60 Å. Необходимо помнить, что ввиду эффекта Пашена-Бака бальмеровы ли-

нии дадут почти нормальный триплет. Поскольку поле у полюсов в два раза превышает поле на экваторе, то вычисленное значение ширины даст приближённо двойную ширину для половины интенсивности света от всей звезды в целом. Сам Сириус В, повидимому, даёт сравнительно тонкие бальмеровы линии шириной меньше $60 \text{ \AA}$, а также некоторые металлические линии. Однако целый ряд карликов, например, 40 Эридана В и Вульф 1346, даёт бальмеровы линии шириной около $50 \text{ \AA}$ (Кюипер³⁶, 1941). Таким образом нельзя считать неправдоподобным предположение о том, что линии белых карликов заметно шире, чем у звёзд главной серии, не только вследствие сильного Штарк-эффекта, но частично также и вследствие сильного Зееман-эффекта. Произведённое Кюипером сопоставление спектров 40 Эридана В и звезды сравнения показывает, что ширина линий последней, связанная, повидимому, с расширением от давления, была бы достаточной для того, чтобы затемнить типичную для белого карлика структуру зеемановского расщепления в виде двойного триплета.

Многие из этих звёзд дают широкие бальмеровы линии и сравнительно тонкую центральную часть спектра, которую трудно объяснить Штарк-эффектом, и возможно, что она обязана своим существованием несмещённым компонентам зеемановского расщепления, которые остаются неизменными по всему диску.

Важное значение, быть может, имеет то обстоятельство, что большинство карликов, размеры которых предполагаются ещё меньшими, чем Сириуса В, либо не дают совсем бальмеровых линий (Вульф, 489, 457, 219), либо дают очень слабые (АС 70, 8247). Одна звезда (Росс 627) представляет в этом отношении аномалию, так как она даёт сравнительно тонкие линии, однако, несмотря на это, предполагается, что она обладает большой плотностью.

В спектре звезды (АС 70, 8247) имеются две слабые линии шириной больше $100 \text{ \AA}$ с центром на $4480 \text{ \AA}$ и $4140 \text{ \AA}$. Если считать, что эти линии соответствуют $H\gamma$ (4341) и $H\delta$ (4102), и приписать их ширину Зееман-эффекту, то оказывается, что требуемое для этого магнитное поле должно быть порядка 10^7 гаусс. Если воспользоваться кюиперовской оценкой радиуса как 0,004 радиуса Солнца, то магнитный момент, а также угловой момент звезды относительно тех же моментов Солнца будут $(10^7/25) \cdot (0,004)^3 = 0,024$. Возможно, однако, что наблюдаемые слабые линии представляют собой не полные линии поглощения, а лишь их более тонкую центральную часть. Истинная ширина в этом случае будет значительно больше $100 \text{ \AA}$ и, следовательно, и угловой момент будет больше и ближе к моменту Солнца.

Ясно, что срочно требуется произвести измерения поляризации на спектрах белых карликов, а также вычислить профили линий, которые получатся в результате Зееман-эффекта в сильных полях с одновременным расширением от давления.

Я обязан проф. Х. Х. Пласкету указанием на существование одного белого карлика, Вульф 489 (см.³⁶ стр. 211), который подтверждает правильность объяснения расширения линий скорее Зееман-эффектом, чем Штарк-эффектом. Эта звезда необычна тем, что она принадлежит к более позднему цветному типу (G8) и, следовательно, она должна иметь интенсивные линии ионизированного кальция. В действительности же она не даёт никаких линий. Поскольку линии Ca^+ гораздо менее подвержены действию Штарк-эффекта, чем линии водорода, то их отсутствие трудно объяснить Штарк-эффектом. Следовательно, Зееман-эффект, к которому линии H и Ca^+ одинаково чувствительны, даёт более правдоподобное объяснение.

Поскольку ширина зеемановского расщепления $\Delta\lambda_z$ пропорциональна магнитному полю на поверхности, а следовательно, согласно (2) и (7) также и U/R^3 , в то время как ширина доплеровского смещения $\Delta\lambda_D$ пропорциональна периферической скорости, т. е. U/MR , то отношение $\Delta\lambda_z/\Delta\lambda_D$ пропорционально M/R^2 и, следовательно, не зависит от скорости вращения. Для очень маленьких и плотных звёзд ширина зеемановского расщепления становится больше ширины доплеровского смещения. Для Сириуса В $\Delta\lambda_z$ почти в 20 раз больше $\Delta\lambda_D$. Для звезды, масса которой равна массе Солнца, а радиус в 5 раз больше радиуса Сириуса В, обе эти величины будут равны. Если угловой момент Сириуса В такой же, как у Солнца, то период его вращения равен 15 минутам, а периферическая скорость — 100 км/сек. Ввиду её большой плотности, предельный период этой звезды, обусловленный пределом Роша, составляет около 40 секунд.

4.5. Самые большие планеты

Представляет также интерес возможность, что Юпитер обладает магнитным полем, поддающимся измерению. Если взять для k данное Джеффрисом²¹ значение 0,66 при $R=7,0 \cdot 10^9$ см, $\bar{\rho}=1,35$, $T=9,8$ часа, то мы получим из (18а) для поля у полюса 30 гаусс для β такого же, как для Земли, и 120 гаусс для β такого же, как для Солнца. Такое слабое поле, повидимому, нельзя будет измерить, ибо единственно доступными для нас линиями будут полосы поглощения метана и аммиака, однако может помочь низкая температура около 150° абс., вызвав сужение этих линий.

§ 5. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ДИСКУССИЯ

5.1

Как уже было сказано выше, при первых попытках объяснить на основании общей теории существование магнитного поля Земли, провизорно принимали, что Земля каким-то образом электрически заряжена. Поскольку Земля обладает очень слабым внешним электрическим

полем, то оказалось необходимым принять, что результирующий её заряд равен нулю, и таким образом постулировали, что внутри Земли происходит разделение положительного и отрицательного зарядов. Для объяснения знака магнитного поля оказалось необходимым предположить, что отрицательный заряд распределён ближе к поверхности Земли. Частным случаем такого распределения (Сузерленд¹⁴, 1904) является равномерное распределение положительного заряда по объёму при равномерном распределении по поверхности отрицательного заряда той же общей величины.

Теория, основанная на предположении такого рода распределения зарядов, отличается тем достоинством, что она очень просто объясняет как существование магнитного поля у вращающегося тела, так и отсутствие его при чисто поступательном движении. Однако если считать, что здесь действительны нормальные законы электромагнетизма, то совершенно невозможно поверить в существование действительного разделения зарядов требуемой величины. Оно задано выражением (12), и для Земли требуемая плотность заряда равна 10^{-3} эд.-ст. единиц, или 10^6 электронов на единицу объёма. Однако такое распределение зарядов означает, что внутри Земли мы должны иметь электрическое поле порядка 10^8 В/см, превышающее электрическую прочность любого из известных материалов. Невозможность существования такого поля внутри Солнца ещё более очевидна. Поскольку проводимость как центрального ядра Земли, так и ионизированной материи Солнца относительно велика, то всякие такие заряды, если бы они и создавались какими-нибудь статическими э. д. с., быстро отводились бы. Согласно расчётам Чэпмена³⁷ (1928) и Каулинга⁶ (1945), проводимость материи в центре Солнца того же порядка, что и проводимость меди при нормальной температуре.

В действительности в ионизированном газе, находящемся в гравитационном поле, будет, конечно, иметь место некоторое разделение положительного и отрицательного зарядов вследствие большой разницы в массах электронов и положительных ионов. Паннекук³⁸ (1922) и Росселанд³⁹ (1924) рассмотрели этот вопрос и с помощью уравнения Максвелла-Больцмана доказали, что плотность заряда величины

$$\sigma_e = g\rho\mu/e, \quad (20)$$

где μ — масса положительных ионов и e — электронный заряд, вызывается стремлением электронов двигаться в области с более высоким гравитационным потенциалом.

Средний молекулярный вес Солнца по отношению к атому водорода равен около 2,2. Сравнивая (20) с (12), мы видим, что отношение плотности заряда, а следовательно, и электрического поля, вызываемых разделением электронов и ионов в гравитационном поле, к плотности заряда и электрическому полю, которыми можно было бы объяснить существование земного магнитного поля, равно около 10^{-17} . Тот же результат по существу был получен раньше Брэн-

том⁴ (1913) в менее общей форме. Знак распределения заряда тот же, что и требуется для объяснения земного магнитного поля, а именно отрицательный заряд — самый наружный.

Каулинг⁴⁰ (1929) указал, что когда ионизированная среда движется в гравитационном поле под прямым углом к магнитному полю, то электрическое поле, вызванное разделением зарядов, значительно больше чем даваемое выражением (20). Однако оно всё же слишком мало для того, чтобы им можно было объяснить наблюдаемые магнитные моменты.

Если считать, что применимы нормальные законы электромагнетизма, то тогда ясно, что никакое адекватное реальное разделение зарядов существовать не может. Тогда становится неизбежным изменение основных уравнений. Трудно, однако, поверить, что можно так изменить уравнения электродинамики, что они допустят существование в Земле и Солнце реальной плотности заряда требуемой величины. Всё же возможно, что теории Шустера, Шломка и др. о разделении зарядов, связанные с гипотезой об отсутствии точного равенств между электронами и протонами и т. п., полезно подвергнуть дальнейшему изучению.

Другого рода изменение уравнений электромагнетизма было предложено Вильсоном, который постулировал, что даже электрически нейтральная масса, двигаясь со скоростью v , создаёт магнитное поле, определяемое выражением (8).

Однако эта гипотеза, разумеется, неверна, если интерпретировать v как относительную поступательную скорость. Так, например, можно считать, что наблюдатель, движущийся в самолёте со скоростью 500 км/час относительно Земли, находится в покое, в то время как Земля проносится мимо него с той же самой скоростью. Тогда согласно (8) он должен был бы наблюдать магнитное поле порядка 1 гаусса, направление которого было бы совершенно отлично от направления реального земного поля. Это соотношение было также опровергнуто лабораторными опытами Вильсона.

Существует, конечно, и теоретическое возражение против существования какого бы то ни было магнитного поля, связанного с поступательным движением нейтральной массы. Дело в том, что нормальные лоренцовские преобразования для свободного пространства показывают, что определяемое выражением (8) магнитное поле может существовать только тогда, когда масса, которую принимают «нейтральной», имеет заряд $Q \sim G^{1/2}m$, а это противоречит предположению, что эта масса не заряжена.

Мы должны, таким образом, прийти к заключению, что нейтральная масса, движущаяся с чисто поступательной скоростью, не создаёт магнитного поля, соответствующего (8). Однако для подтверждения правильности уравнения (7) возможно и не будет необходимости в предположении, что выражение (8) справедливо для чисто поступательного движения. Так, например, если понимать скорость элемен-

та массы dm как скорость относительно наблюдателя, обусловленную абсолютным вращением тела, то тогда можно пользоваться выражением (8) для подтверждения справедливости уравнения (7), не делая непременно заключения о том, что нейтральная масса при чисто поступательном движении создаёт магнитное поле. Мы приходим, таким образом, к заключению, что при введении дополнительного множителя β выражение (8) может быть в виде пробы использовано для подтверждения справедливости уравнения (7), если только v определена как относительная скорость, обусловленная вращением, измеренным по отношению к инерциальной системе отсчёта вселенной, т. е. уравнением $v = [\omega \cdot R]$, где ω — измеренная абсолютная скорость вращения и R — радиус-вектор от центра тяготения.

Для меня, однако, неясно, возможно ли сохранить выражение (8) для вращательного движения и считать его непригодным для поступательного движения, не внося далеко идущих изменений в уравнения электромагнетизма и динамики. Никаких трудностей не возникает при пользовании этим выражением в случае одного жёсткого вращающегося тела, но как избежать трудностей, возникающих в связи с орбитальным движением, скажем, планет или двойной звезды, пока ещё не так ясно. Как уже было указано выше, в случае гипотезы о реальном разделении зарядов никаких трудностей не возникает. Дело в том, что мы здесь имеем два уравнения типа (9). одно относительно положительных Q и H и другое относительно отрицательных. Взаимное уничтожение магнитных полей, создаваемых противоположными зарядами, и даёт в результате магнитное поле при вращательном, но не при поступательном движении. Возникает вопрос, возможно ли с помощью одного только уравнения (8) получить тот же самый результат. Если это окажется невозможным, то может случиться, что мы будем вынуждены вернуться снова к какой-нибудь теории, эквивалентной предположению о виртуальных электрических зарядах, т. е. зарядах, вызывающих магнитное поле без электрического. Рассмотрение поля нейтрона может навести на мысль, как это можно было бы сделать.

В те времена, когда делались первые попытки объяснить существование земного магнитного поля, никаких магнитных полей, кроме связанных с движением электрических зарядов или с изменением во времени электрических напряжений, известно не было. В настоящее время, однако, хорошо известно, что нейтрон обладает магнитным моментом. Он достигает 1,80 боровских ядерных магнетонов, и векторы магнитного момента и спина (углового момента) направлены противоположно друг другу, так же как и для Земли и Солнца. В некоторых современных теориях поля мезона разница между магнитными моментами нейтрона и протона приписывается существованию виртуальных мезонов, т. е. вводятся виртуальные, а не реальные электрические заряды. Возможно, что это можно было бы принять за намёк, что магнитное поле вращающегося массивного тела

можно приписать такому виртуальному разделению зарядов. Наблюдаемая линейная зависимость H от ω показывает, что такое виртуальное разделение зарядов не может вызываться вращением, а должно быть свойством массивного тела в покое.

Поскольку отношение P/U составляет около 10^{-3} от этого отношения для боровского атомного магнетона, то, как это видно из (6), никакой явной численной зависимости между P/U для массивного тела и P/U для нейтрона не существует, если не ввести произвольно такое безразмерное отношение, как $e^2/\hbar c = 1,16 \cdot 10^{-3}$. В настоящее время представляется невозможным найти объяснение тому факту, что $\beta \cong 0,3$ для Земли и около единицы для Солнца и 78 Девы. Эффект от экранирующего действия ферромагнитных материалов земной коры вряд ли может достигать 1 процента. Возможно, конечно, что ошибка лежит в принятых нами для Солнца и 78 Девы значениях k и η . Если бы оказалось, что в действительности произведения $k\eta$ в три раза больше, чем мы приняли, то расхождение было бы устранено. То же самое было бы, если бы β имело для Солнца и 78 Девы заманчивое для нас значение около единицы.

Другое возможное объяснение состоит в том, что эта разница вызывается некоторым слабым действием частных свойств земной и звёздной материи, которое накладывается на общий механизм, ответственный за существование и порядок величины основного поля. Можно было бы, конечно, приписать разницу в значениях β , скажем, содержанию свободных электронов в материи, либо отношению числа протонов к числу нейтронов.

Ясно, что экспериментальная зависимость (7) и её гипотетическое объяснение (8) годятся лишь для нерелятивистского случая. При периферических скоростях, сравнимых с c , естественно, нужно ожидать изменений.

Вообще говоря, представляется весьма вероятным, что удовлетворительное объяснение уравнения (7) может быть найдено лишь на основе единой теории поля. В связи с этим уравнение (6) может приобрести особое значение ввиду той важной роли, которую должно играть в любой такой теории безразмерное отношение $G^{1/2}m/e$.

5.2. Магнитное поле асимметричного тела

До сих пор мы молчаливо принимали, что статическое магнитное поле, заданное уравнением (7) для сферы, должно в конечном счёте выражаться как интеграл, взятый по всем частям тела. Хотя уравнение (8) представляет дифференциальную форму, которая даёт результат, совпадающий с наблюдениями для сферы, если не считать коэффициента β , всё же необходимо выяснить, возможны ли ещё решения других типов. По излагаемым ниже причинам это представляется маловероятным. Во-первых, то обстоятельство, что, согласно экспериментальным данным, H изменяется пропорционально ρ [см. уравне-

ние (11a)], означает, что H должно выразиться как векторная сумма всех δH от каждого элемента массы отдельно. Если бы, например, δH от каждого данного элемента массы зависело не только от δt , но, скажем, ещё от гравитационного потенциала на этом элементе, то тогда H для всего тела в целом не было бы линейной функцией от ρ . Поэтому, если считать, что каждый элемент массы делает независимый вклад в общее поле, то тогда уравнение (8) представляется единственной формой, которая даёт экспериментально наблюдаемую линейную зависимость H от ρ .

Возможно, конечно, что правильное решение будет иметь не форму (8), а скорее (9), если под δQ подразумевать некоторого рода виртуальный заряд, принимающий как положительное, так и отрицательные значения. Если это так, то тогда δQ для любого элемента объёма может зависеть не только от δt , а от всей конфигурации тела, как и в случае реального разделения зарядов.

До тех пор, пока не будет решён этот вопрос, нельзя будет вычислять магнитное поле асимметричного тела, например, массивного эллипсоида, вращающегося вокруг своей самой короткой оси. Это имеет важное значение в связи с возможным осуществлением лабораторных опытов, так как технически может оказаться легче измерить переменное магнитное поле, которого можно было бы ожидать у такого асимметричного тела, чем статическое поле симметричного тела.

Тогда возникает общий вопрос, возможно ли в действительности экстраполировать (7) и (8) до лабораторных масштабов. Хотя грубо уравнение (7) экспериментально подтверждается для трёх астрономических тел в пределах вариации $U \cdot 10^{10}:1$, однако это ещё не оправдывает требуемой экстраполяции в отношении $10^{28}:1$ от случая Земли к случаю, скажем, бронзовой сферы диаметром в 1 метр, вращающейся со скоростью 100 об/сек, которая должна дать около 10^{-8} гаусс (см. следующий параграф).

Физические условия материала такой опытной сферы так резко отличаются от условий для Земли не только в отношении размеров, но и температуры, давления, натяжения, отношения сил тяготения к центробежным и т. п., что до тех пор, пока не будет найдена надёжная теория уравнения (7), возможны лишь весьма ограниченные заключения.

Можно отметить, что для указанных выше трёх астрономических тел величины R , ω и ρ варьируют в следующих пределах: 20:1, 25:1 и 14:1. Экстраполяция на опытную сферу влечёт за собой экстраполяцию в отношении $1:10^{-7}$ для R и $1:10^7$ для ω .

5.3. Возможность осуществления лабораторных опытов

Если предположить, что экстраполяция дозволена, то тогда мы можем вычислить поле сферы из заданного материала. Давая ρ значение 0,30, как для Земли, мы получаем из (11a) для поля на по-

люсе вращающейся сферы;

$$H_P = 1,07 \cdot 10^{-1} \rho \omega R^2. \quad (21)$$

В это выражение мы должны подставить максимально возможное значение ω_m рад/сек, соответствующее максимально допустимой силе натяжения S г/см²; пользуясь данным Сведбергом (1940) для диска выражением для ω_m , которое может быть написано в виде

$$\omega_m = 50 S^{1/2} \rho^{-1/2} R^{-1}, \quad (22)$$

мы получаем:

$$H_P = 5,4 \cdot 10^{-14} S^{1/2} \rho^{1/2} R. \quad (23)$$

Мы видим, таким образом, что $H_P \sim R$, т. е. что выгоднее взять большое тело, вращающееся соответственно медленно. Если взять, например, $\rho = 8$ и $S = 3,0 \cdot 10^6$ г/см² или 43 000 фунтов/кв. дюйм, то мы получаем:

$$H_P = 2,6 \cdot 10^{-10} R. \quad (24)$$

Для сферы диаметром в 1 метр ($R = 50$ см) максимальная скорость будет равна 100 об/сек, а $H_P = 1,3 \cdot 10^{-8}$ гаусс. Для сферы диаметром в 10 метров скорость будет только 10 об/сек, а поле $1,3 \times 10^{-7}$ гаусс. Если бы оказалось, что правильным значением β будет то же, что и для Солнца, а не для Земли, то тогда полученные значения поля нужно будет умножить на три.

Если взять асимметричное тело с теми же линейными размерами, то поле его было бы меньше, чем для сферы, однако, то обстоятельство, что это поле было бы переменным, позволило бы легче его обнаружить, чем более сильное статическое поле.

Единственной попыткой обнаружить магнитное поле вращающегося тела были опыты Суонна и Лонгейкра (1928)*), которые вращали сферу диаметром в 10 см со скоростью 200 об/сек. Согласно (20), поле этой сферы должно было быть равно около 10^{-9} гаусс. Однако чувствительность их метода позволяла лишь установить, что поля порядка 10^{-4} гаусс обнаружено не было.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Babcock, *Astrophys. J.*, **105**, 105 (1947).
2. Chapman and Bartels «*Geomagnetism*» (Oxford, 1940).
3. Schuster, *Proc. Phys. Soc.*, London, **24**, 121 (1912).
4. Brunt, *Astr. Nachr.*, **196**, 169 (1913).

*) А также опыты П. Н. Лебедева, повидимому, не известные автору. См. введение «От редакции» в начале этой статьи — *Ред.*

5. Swan'n, J. Franklin Inst. (1932).
 6. Cowling, Mon. Not. Roy. Ast. Soc., 105, 166 (1945).
 7. Elsasser, Phys. Rev., 55, 489 (1939).
 8. Elsasser, Phys. Rev., 60, 876 (1941).
 9. Frenkel, C. R. Ac. Sci. U. S. S. R., 49, 98 (1945).
 10. Gurevich and Lebedinsky, C. R. Acad. Sc. U. S. S. R., 49, 92 (1945).
 11. Larmor, Brit. Assoc. Rept., 159 (1919).
 12. Cowling, Mon. Not. Roy. Ast. Soc., 94, 40 (1933).
 13. Schuster, Brit. Assoc. Rept. (1891).
 14. Sutherland, Terr. Magn., 5, 73 (1900); 8, 49 (1903); 9, 167 (1904); 13, 155 (1908).
 15. Wilson, Proc. Roy. Soc., A, 104, 451 (1923).
 16. Angenheister, Phys. Zeits. 26, 367 (1925).
 17. Schlomka, Gerlands Beitr. Geophys., 38, 357 (1933).
 18. Haalck, Zeits. f. Phys., 105, 81 (1937); Gerlands Beitr. Geophys., 52, 25 (1938).
 19. Swann, Phil. Mag., 3, 1088 (1927).
 20. Swann and Longacre, J. Frankl. Inst., 206, 421 (1928).
 21. Jeffries, Mon. Not. Roy. Ast. Soc., 84, 534 (1924); Mon. Not. Roy. Ast. Soc., Geophys. Suppl., 4, 63 (1937).
 22. Eddington «Internal Constitution of the Stars» (Cambridge, 1936).
 23. Cowling, Mon. Not. Roy. Ast. Soc., 96, 57 (1935).
 24. Blanch, Lowan, Marshak and Bethe, Astrophys. J., 94, 37 (1941).
 25. Marshak and Blanch, Astrophys. J., 104, 82 (1946).
 26. Milne, «Thermodynamics of Stars» (Berlin, 1930).
 27. Elvey, Astrophys. J., 71, 771 (1930).
 28. Rosseland, «Theoretical Astrophysics» (Oxford, 1936), 202—215.
 29. Becker, «Sterne und Sternsysteme» (Leipzig, 1942).
 30. Chapman, Mon. Not. Roy. Ast. Soc., 103, 116 (1943).
 31. Thiessen, Ann. Astrophys., 9, 101 (1946).
 32. Struve, Astrophys. J., 72, 1 (1930).
 33. Westgate, Astrophys. J., 78, 46 (1933); 79, 357 (1934).
 34. Jeans, «Astronomy and Cosmogony» (1928).
 35. Russel, Dugan, Stewart, «Astronomy» (Ginn, 1945).
 36. Kuiper, «Novae and White Dwarfs» (Herman, Paris, 1941).
 37. Chapman, Mon. Not. Roy. Ast. Soc., 89, 57 (1928).
 38. Pannecoeck, Bull. Ast. Inst. Netherlands, No. 19 (1922).
 39. Rosseland, Mon. Not. Roy. Ast. Soc., 84, 720 (1924).
 40. Cowling, Mon. Not. Roy. Ast. Soc., 90, 40 (1929).
-