

АТОМНАЯ И ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА

УДК 539.12; 539.1.01

АНОМАЛЬНОЕ ОТКЛОНЕНИЕ ПАРОВ ЖЕЛЕЗА МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

Н. И. Шпиньков, Н. С. Перов

(кафедра магнетизма)

Обнаружено, что слабое (до 400 Э) магнитное поле с малым градиентом отклоняет небольшое количество распыляемых атомов железа на угол, превышающий 90° , от первоначальной траектории на расстояниях порядка 50 мм. Показано, что полученный результат может быть объяснен наличием на этих атомах нескомпенсированного магнитного заряда.

В 1931 г. Дирак [1] высказал идею о возможности существования магнитного монополя и доказал непротиворечивость этой идеи существующим представлениям. Ни одной серьезной теории, опровергающей возможность существования монополя, до сих пор выдвинуто не было. Но и попытки экспериментального обнаружения магнитного заряда не дали положительных результатов. Как правило, использовались ионизационные или индукционные методы регистрации монополей.

Надо отметить, что отрицательные результаты, по общепринятому мнению, свидетельствуют о малой распространенности магнитных монополей [2]. В то же время в теоретической статье Комэй [3] предположил, что используемые до сих пор методы регистрации магнитного монополя не должны были приводить к положительным результатам в силу его специфических свойств. В частности, там отмечается, что ионизационные методы регистрации рассчитаны на кулоновские заряды, и нет оснований считать, что магнитные заряды действуют на атомы аналогичным образом.

Нетрадиционные методы были использованы в работе В. Ф. Михайлова [4], результаты которой свидетельствуют в пользу существования магнитных зарядов. Его опыты являются развитием работ Эренхафта [5] конца 20-х годов. Визуально наблюдается траектория движения малых ферромагнитных (железных) частиц в переменном магнитном поле при освещении лазерным светом. У некоторых из них траектория соответствует движению магнитно-заряженных частиц, величина магнитного заряда при этом оказывается меньше предсказанной Дираком.

Нами также был предложен и поставлен эксперимент с использованием нетрадиционного метода регистрации магнитных монополей, результаты которого, на наш взгляд, свидетельствуют о существовании магнитных зарядов. В ходе эксперимента металл распыляется в вакууме. По аналогии с частичной самопроизвольной электрической ионизацией паров металла при высокой температуре допустима возможность магнитной «ионизации». При этом предполагается, что магнитные монополи могут присоединяться к испаряющимся атомам и определять характер их движения в магнитном поле.

Для регистрации этого движения на расстоянии L от точечного испарителя I в вакуумной камере (см. рисунок) установлен соленоид $\mathcal{Z}$ с внутренним диаметром около 18 мм. Ось соленоида перпенди-

кулярна направлению движения потока атомов, пролетающих под отверстием соленоида со скоростью, определяемой температурой при их испарении (1700—1800 К). Экран 2 между испарителем и соленоидом препятствует попаданию атомов из пучка 5 внутрь соленоида. При распылении в случае отключенного соленоида ($H=0$) напыление на его внутреннюю поверхность не происходит (было распылено около 1500 мг железа). При включении тока обмотки соленоида напряженность поля под соленоидом равна 200 Э, в центре соленоида — 400 Э, вблизи испарителя — около 10 Э.

В присутствии поля распыление небольших количеств (до 750 мг) железа при давлении остаточных газов около 10^{-5} Тор приводит к попаданию атомов распыляемого металла во внутреннюю полость соленоида и осаждению на стенках по всей высоте соленоида (около 80 мм), а также на подложке, расположенной в торце соленоида.

Полученный результат не объясняется в рамках известных представлений о взаимодействии атомарного пучка с магнитным полем [6]. В частности, любые явления, связанные с магнитным моментом и его движением в градиентном магнитном поле (магнитный момент атомов, ионные токи и т. п.), как показывают количественные оценки, подобного эффекта не должны давать. Покажем это на конкретных примерах.

Нейтральные атомы. В этом случае ситуация подобна той, которая имеет место в опытах Штерна и Герлаха [7]: имеющаяся неоднородность магнитного поля соленоида может отклонить атомарный пучок на величину δZ , определяемую соотношением

$$\delta Z = \frac{1}{2} \frac{L^2 \mu_z}{V^2 m} \frac{\delta H}{\delta Z}.$$

Подставив в это выражение величины, соответствующие условиям нашего эксперимента ($V=10^5$ см/с, $L=2$ см, $\mu_z=4\mu_B=3,6 \cdot 10^{-20}$ эрг/Гс, $m=56 \cdot 1,68 \cdot 10^{-24}$ г, $\delta H/\delta Z=50$ Э/см), получим $\delta Z=4 \cdot 10^{-6}$ см. Направленное вверх ускорение, испытываемое атомом при взаимодействии с неоднородным магнитным полем, $a=2 \cdot 10^4$ см/с².

Однократно ионизированные атомы. Ионизированные атомы движутся в магнитном поле по спирали. Траекторию движения можно разложить на вращение по окружности радиуса r и смещение вдоль силовой линии магнитного поля со скоростью, равной проекции полной скорости, на это направление. Ларморовский радиус (при тех же параметрах частиц, что рассмотрены в предыдущем примере) $r = \frac{mVc}{eH} \approx 2,5$ см. Наличие градиента магнитного поля приводит не только к движению такой частицы вследствие взаимодействия, рассмотренного в предыдущем пункте, но и к выталкиванию диамагнитного момента кругового тока, обусловленного движением заряда по окружности. Сила отталкивания $F = \mu \text{ grad } H \approx 2 \cdot 10^{-13}$ дин, так что ускорение $a=2 \cdot 10^9$ см/с².

Таким образом, при имеющихся условиях эксперимента нейтральные атомы, движущиеся с наиболее вероятной скоростью, практически

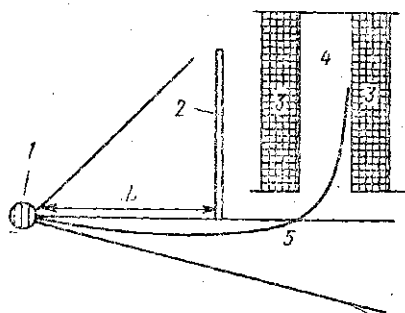


Схема эксперимента: 1 — испаритель, 2 — экран, 3 — обмотка соленоида, 4 — подложка, 5 — пучок распыляемых атомов

не отклоняются внутрь соленоида, а электрически заряженные даже выталкиваются в область более слабого поля. Сила отталкивания компенсируется притяжением диполя в неоднородном поле лишь при скорости $V_{cr} \leq 3 \cdot 10^2$ см/с, что соответствует очень низкой температуре. Если испарение происходит при температуре около 1700 К, наиболее вероятная скорость, в соответствии с распределением Максвелла, в случае железа порядка $7 \cdot 10^4$ см/с. Атомов, покидающих испаритель со скоростью не более $3 \cdot 10^2$ см/с, будет в $2 \cdot 10^6$ раз меньше, чем атомов со скоростью $(7 \pm 0,5) \cdot 10^4$ см/с. Нетрудно показать, что электрически нейтральные из них могут подняться за счет взаимодействий с неоднородным магнитным полем на высоту не более 5 мм. Что касается электрически заряженных атомов, то при данной температуре испарения их доля около 10^{-5} — 10^{-6} . Предполагая, что степень ионизации медленных атомов не меньше степени ионизации всех атомов, получим, что ионизированных атомов, движущихся со столь малыми скоростями, не больше чем $5 \cdot 10^{-12}$ от общего числа атомов, так что обнаружение их на внутренних стенках соленоида практически невозможно.

Наблюдаемое аномальное отклонение атомарного пучка на угол более 90° в плоскости, содержащей первоначальное направление распространения пучка и направление магнитного поля, на столь малых расстояниях (путь пробега атома от испарителя до центра соленоида порядка 100 мм) в слабом магнитном поле при чрезвычайно малом по сравнению с необходимым в опытах Штерна и Герлаха [7] градиенте поля можно объяснить, предполагая наличие нескомпенсированного магнитного заряда на атомах, пролетающих вблизи отверстия соленоидов. При этом магнитно-заряженные, но электрически нейтральные атомы могут попасть на участок поверхности, расположенный за осью соленоида (левая часть внутренней полости соленоида на рисунке). Что касается внутренней поверхности, расположенной от оси ближе к испарителю, то ее запыление, видимо, возможно только в том случае, когда атом несет как магнитный, так и электрический заряд. Двигаясь по окружности ларморовского радиуса, атом увлекается вверх магнитным полем и при таком сложном движении может столкнуться с любой точкой поверхности. При этом необходимо, чтобы сила, действующая вверх, в сторону соленоида, была больше силы отталкивания. Эта величина, как минимум, равна $2 \cdot 10^{-13}$ дин, т. е. в 10^5 раз больше силы взаимодействия дипольного магнитного момента с неоднородным магнитным полем, и ее наличие свидетельствует о том, что на уходящих внутрь соленоида атомах имеется нескомпенсированный магнитный заряд.

Данная работа выполнена на кафедре магнетизма физического факультета МГУ в 1975 г. Авторы не представили тогда результаты к публикации, ибо столь большое количество магнитно-заряженных частиц не увязывалось с энергиями, необходимыми для рождения дираковских монополей. Однако обстоятельные обсуждения со многими учеными (особенно благодарны авторы акад. А. С. Боровику-Романову за всестороннее рассмотрение причин полученного результата) показали, что невозможно объяснить это явление с помощью механизма, не связанного с магнитными зарядами. Теперь, когда В. Ф. Михайловым [4] показано, что, видимо, существуют не предсказанные теорией магнитные заряды, энергия связи которых на 25 порядков меньше, чем для монополя Дирака, авторы считают возможным предать гласности этот результат.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Dirac P. A. M. // Proc. Roy. Soc. 1931. A133. P. 60. [2] Вонсовский С. В. Магнетизм микрочастиц. М., 1973. [3] Comau E. // Lett. Nuovo. Cim. 1985. 43, N 3. P. 150. [4] Михайлов В. Ф. Препринт ИФВЭ АН Каз.ССР № ИФВЭ-85-10. Алма-Ата, 1986. [5] Engrenhaft F. // Phys. Zs. 1930. 31. P. 478. [6] Тамм И. Е. Основы теории электричества. М., 1976. [7] Gerlach W., Stern O. // Ann. Phys. 1924. 74. P. 673.

Поступила в редакцию
24.09.90

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3. ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ. 1991. Т. 32, № 2

РАДИОФИЗИКА

УДК 621.385.6.029.6

КВАЗИОПТИЧЕСКИЙ ГИРОТРОН С ТРЕХЗЕРКАЛЬНЫМ ТЕЛЕСКОПИЧЕСКИМ РЕЗОНАТОРОМ

А. И. Костиненко, А. Ф. Королев, В. М. Перешенн

(кафедра радиофизики)

На основе результатов математического моделирования процессов взаимодействия электронного пучка с электромагнитным полем в квазиоптическом гиротроне предложен новый вид трехзеркального телескопического резонатора. Распределение высокочастотного поля в резонаторе позволяет осуществить оптимальный энергообмен пучок—поле. До 90% поперечной энергии пучка переходит в энергию электромагнитного поля.

Гиротрон является мощным источником излучения миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов. С целью дальнейшего продвижения в область более коротких волн был предложен квазиоптический гиротрон [1, 2, 3]. Он имеет ряд важных преимуществ по сравнению с обычными гиротронами. Во-первых, большой объем взаимодействия позволяет получать большие мощности при сравнительно малой плотности энергии [4]. Во-вторых, увеличением напряженности магнитного поля либо использованием режима работы на гармониках циклотронной частоты можно добиться существенного уменьшения длины волны генерируемого излучения [5, 6]. Однако как в теоретических, так и в экспериментальных исследованиях КПД не превышал 17—20%. Группировка электронов и отбор энергии происходили в одном и том же объеме резонатора, с полем взаимодействовали одновременно разноскоростные, разночастотные электроны, и лишь малая доля их находилась в синхронизме с полем.

Для преодоления этих трудностей была предложена двухрезонаторная конфигурация — квазиоптический гироклистрон [7, 8, 9]. Винтовой пучок, проходя через область сравнительно слабого поля в первом резонаторе, модулируется по скорости; в области дрейфа между резонаторами происходит инерционная фазовая группировка: сгруппированный пучок влетает во второй резонатор, попадает в тормозящую фазу сильного поля и успевает до выхода из резонанса отдать существенную часть своей поперечной энергии. Эффективность таких приборов достигает 50% на основной частоте и 30% на второй гармонике.

Вместе с тем предложенный вариант не решал вопросы эффективного вывода излучения и формирования пучка выходного излучения.