в пределах от 10 до 26 падает ночью по сравнению с днём в $2{,}55 \pm 0{,}25$ раза. Изучено также распределение числа наблюдённых случаев N в зависимости от числа (n) δ-электронов на 100 μ длины следа, что связано со значениями Z ядер. Соответствующие средней высоте 28 *км* кривые для дневного (кривая *1*) и ночного (кривая *2*) полётов приведены на рисунке, где показаны также аналогичные данные для предыдущих измерений[3] на высоте 21 *км* (кривые *3* и *4*, соответственно).

Полученные результаты, повидимому, указывают на тесную связь происхождения тяжёлых ядер первичного излучения с ускоряющим действием электромагнитных полей Солнца.

Г. Б.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. H. Elliot and D. W. N. Dolbear, Proc. Phys. Soc. **A 63**, 137 (1950).
2. J. J. Lord and M. Schein, Phys. Rev. **80**, 394 (1950).
3. J. J. Lorb and M. Schein, Phys. Rev. **78**, 321 (1950).
4. P. S. Freser, E. P. Ney, J. Naugle and C. Anderson, Phys. Rev. **79**, 206 (1950).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТОНКОЙ СТРУКТУРЫ ОДНОКРАТНО ИОНИЗОВАННОГО ГЕЛИЯ

В нашем журнале уже освещались результаты исследований тонкой структуры спектра водорода и однократно ионизованного гелия, выполненных Лэмбом и сотрудниками[1,2]. Эти исследования, проведённые с помощью радиоспектроскопической методики, показали, что, вопреки предсказанию теории Дирака, состояния этих атомов с одинаковыми главными квантовыми числами n и одинаковыми квантовыми числами полного вращательного момента j не вырождены. Наблюдённая разность энергий между уровнями $2^2S_{1/2}$ и $2^2P_{1/2}$ составляла в случае водорода $1062 \pm$ *Мгц* и в случае однократно ионизованного гелия — $14\,020 \pm 100$ *Мгц* (1 *Мгц* $= 4{,}1 \cdot 10^{-9}$ *эв*).

Объяснение этому расщеплению термов водородоподобных атомов было найдено в необходимости учёта взаимодействия атомного электрона с полем излучения — «нулевыми колебаниями вакуума». Весьма подробное рассмотрение теоретических вопросов, связанных с учётом этого взаимодействия, содержится в цитированных обзорах, и мы его касаться не будем. Укажем только, что теоретический расчёт даёт для разности энергий уровней $2^2S_{1/2}$ и $2^2P_{1/2}$ в случае водорода 1051 *Мгц* и в случае однократно ионизованного гелия 13 820 *Мгц* — в хорошем согласии с результатами измерений. Наша заметка имеет целью описать ту экспериментальную методику, с которой были получены указанные результаты; в цитированных обзорах ей не уделено внимания. При этом мы остановимся только на последней работе Лэмба и Скинер[3], посвящённой изучению тонкой структуры однократно ионизованного гелия.

Указание на аномальность (с точки зрения теории) тонкой структуры He^+ было получено ещё в 1916 г. Пашеном, исследовавшим структуру линий с длиной волны $\lambda = 4686$ Å. После обнаружения в 1947 г. Лэмбом и Ризерфордом дублетного расщепления водородных термов ряд спектроскопистов предпринял изучение тонкой структуры He^+ в видимой и ультрафиолетовой областях спектра. Исследованию были подвергнуты

линии $\lambda = 1640$ Å (переход $n = 3 \rightarrow n = 2$) и $\lambda = 4686$ Å (переход, $n = 4 \rightarrow n = 3$). Во всех случаях было обнаружено дублетное расщепление, величина которого, будучи редуцирована к переходу ($n = 3 \rightarrow n = 2$), колебалась (у различных авторов) от $(11{,}4 \pm 1{,}4) \cdot 10^3$ до $(13{,}9 \pm 1{,}5) \cdot 10^3$ *Мгц* и, в общем, оказывалась несколько меньше ожидаемой. Точность указанных измерений, повидимому, значительно ниже точности теоретических расчётов, и поэтому вполне естественным было для получения большей точности обратиться к микроволновой радиоспектроскопии. Возможность её применения в данном случае обусловливалась тем, что величина дублетного расщепления соответствует примерно длине волны 2,2 *см*, т. е. находится в диапазоне, легко доступном для современной микроволновой техники. Бо́льшая точность измерений определялась тем, что, помимо возможности прямых измерений частоты перехода (без анализа сложных компонент), здесь оказывается пренебрежимым влияние эффекта Допплера, существенное при спектроскопических измерениях в видимой и ультрафиолетовой областях спектра.

Как и в случае исследования водорода, экспериментальный метод основывался на метастабильности состояния $2^2S_{1/2}$. В то время как время жизни состояния $2^2P_{1/2}$ составляет 10^{-10} сек. (в 16 раз меньше, чем у водорода), оценка времени жизни состояния $2^2S_{1/2}$ приводит к значению $2{,}2 \cdot 10^{-3}$ сек. (в 64 раза меньше, чем у водорода). Идея метода заключалась в том, чтобы, создав (путём электронной бомбардировки атомарного гелия) достаточное количество ионов He^+, подвергнуть их облучению микроволновой радиацией, индуцирующей переходы ионов гелия из состояния $2^2S_{1/2}$ в состояние $2^2P_{1/2}$, и исследовать изменение населённости состояния $2^2S_{1/2}$ в зависимости от частоты микроволновой радиации.

В случае водорода пучок метастабильных атомов направлялся на металлическую мишень, эжектируя из неё электроны. Вследствие резкого различия в эжекторной способности метастабильного и невозбуждённого атомов изменение населённости метастабильного состояния легко обнаруживалось по изменению электронного тока с мишени. В случае He^+ такой метод оказывается непригодным вследствие высокой эжекторной способности невозбуждённых ионов гелия и относительно малой концентрации метастабильных ионов (при бомбардировке атомарного гелия электронами число образующихся метастабильных ионов составляет около 1% числа неметастабильных ионов). Поэтому в работе с He^+ был использован фотоэлектрический метод детектирования. Если индуцируется переход иона из состояния $2^2S_{1/2}$ в состояние $2^2P_{1/2}$, то в течение 10^{-10} сек. ион переходит затем в основное состояние с испусканием фотона с энергией 41 *эв*. Фотоэлектрический ток, обусловленный этими фотонами, и может служить мерой числа индуцируемых переходов. Однако на этом пути возникает серьёзная трудность. При бомбардировке атомарного гелия электронами наряду с метастабильными ионами возникают (и в значительно бо́льшем количестве) ионы в состояниях n^2P, переходящие затем в основное ионное состояние с испусканием фотона с энергией 41 *эв*. Эти фотоны, попадая на фотоэлектрический детектор (в качестве детектора использовалась медная пластинка), создают фотоэлектронный ток, образующий фон, на котором может потеряться исследуемый эффект. Далее, при бомбардировке возникают атомы гелия, возбуждённые до метастабильного атомного состояния 2^1S_0, которые, достигнув детектора, вырывают из него электроны, увеличивая тем самым уровень фона. Наконец, бо́льшая часть атомов, возбуждаемых при бомбардировке до атомного состояния n^1P_1, переходит в основное атомное состояние

с испусканием фотона с энергией 20 *эв*; эти фотоны, попадая на детектор, также вызывают фотоэлектрический ток, увеличивающий фон.

Как теоретические оценки, так и непосредственные опыты привели к значению отношения уровня полезного сигнала к уровню фона (в оптимальных условиях) порядка 1,5%. Однако при этом для осуществления доброкачественных измерений оказалось бы необходимым наблюдать превышение уровня сигнала над уровнем фона всего в 0,1%, что в свою очередь требовало стабильности уровня фона с точностью до 0,05%, — величины явно неудовлетворительные. Для увеличения отношения уровня сигнала к уровню фона авторы помещали между детектором и областью нахождения метастабильных атомов тонкую коллодийную плёнку (~ 7 *мг/см*^{2}). Такая плёнка полностью задерживала метастабильные атомы и существенно уменьшала количество 20-*эв* фотонов, достигающих детектора. Благодаря этому отношение уровня сигнала к уровню фона в оптимальных условиях увеличилось до 13% и оказалось возможным вести измерения при отношении уровня сигнала к уровню фона (в максимуме сигнала) около 4—5%, что уже обеспечивало получение надёжных результатов.

Следующей трудностью, которую пришлось преодолеть авторам, являлась необходимость варьирования частоты микроволнового излучения в широких пределах. Состояние $2^2P_{1/2}$ имеет естественную ширину 1600 *Мгц*. Таким образом, чтобы получить резонансную кривую, необходимо варьировать частоту микроволнового излучения в пределах примерно 3000 *Мгц*, сохраняя во всём этом интервале строго неизменной мощность излучения. Авторы обошли эту трудность, использовав дополнительное постоянное магнитное поле и изучая индуцированные переходы между отдельными компонентами зеемановского расщепления в зависимости от величины этого расщепления (т. е. напряжённости постоянного поля) при неизменной частоте микроволнового излучения. Иными словами, варьирование частоты излучения при неизменном расщеплении уровней было заменено варьированием расщепления при неизменной частоте излучения Основные данные были получены для перехода

$$2^2S_{1/2}\left(m=+\frac{1}{2}\right)\to 2^2P_{1/2}\left(m=-\frac{1}{2}\right).$$

Вероятность индуцированного перехода

$$\mu\sim\frac{1}{(\nu-\nu_p)^2+\left(\frac{A}{4\pi}\right)^2}, \tag{1}$$

где ν — частота микроволнового излучения, ν_p — частота, соответствующая переходу $2^2S_{1/2}\to 2^2P_{1/2}$ (резонансная частота) и $A=10^{10}$ сек.$^{-1}$ — радиационная полуширина состояния $2^2P_{1/2}$. Для указанных компонент зеемановского расщепления в поле напряжённостью H

$$\nu_p=\nu_0+aH+bH^2, \tag{2}$$

где ν_0 — резонансная частота в отсутствии магнитного поля,

$$a=1{,}866\ \textit{Мгц/гаусс}\ \text{и}\ b=2{,}5\cdot10^{-6}\ \textit{Мгц/гаусс}^2.$$

Таким образом, для рассматриваемых зеемановских компонент

$$\mu\sim\frac{1}{(\nu-\nu_0-aH+bH^2)+\left(\frac{A}{4\pi}\right)^2}. \tag{3}$$

В случае малой мощности радиочастотного поля это выражение даёт форму резонансной кривой, получающейся при варьировании H. Если обозначить через $H_м$ значение H, соответствующее максимуму этой кривой, то

$$\nu_0 = \nu - aH_м - bH_м^2. \quad (4)$$

Полуширина резонансного максимума равна при этом примерно 855 гауссам.

Поперечный разрез прибора показан на рис. 1; A и B — полюсные башмаки электромагнита, создававшего однородное поле напряжённостью до 4000 гаусс. Напряжённость поля была прокалибрована с помощью вращающейся рамки. Отклонения от неоднородности в рабочей области

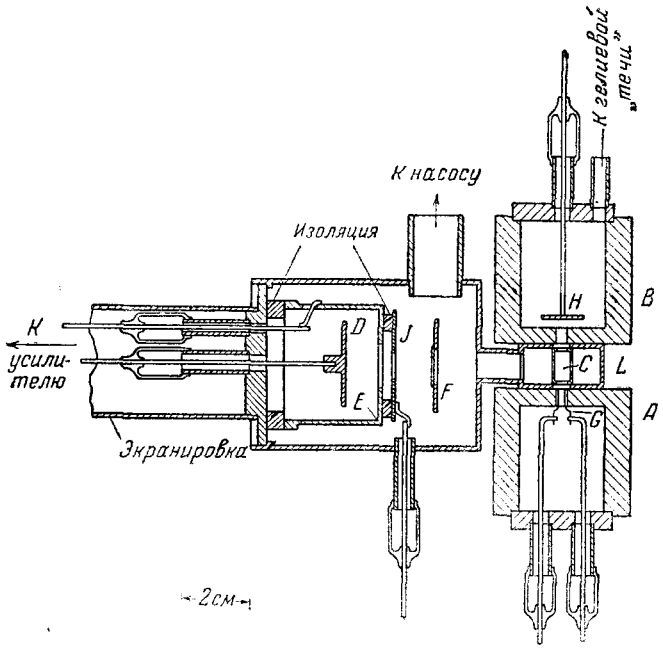

Рис. 1. Схематический разрез установки:

A и B — полюсные башмаки электромагнита; C — волновод K-диапазона (этот волновод мог удаляться из установки, в результате чего образовывался волновод L X-диапазона); D — детекторная пластина; E — собирающий электрод; F — коллодийная плёнка; J — диафрагма, определявшая телесный угол, под которым детекторная пластинка видна из области возбуждения.

не превышали 0,5%. С той же точностью определялась и сама напряжённость поля. Источником радиочастотного излучения служил магнетрон, излучавший (в основных опытах) в области длин волн около 1,6 *см*.

Излучение распространялось по волноводу C сечением $4{,}5 \times 9{,}16$ *мм*². В стенках волновода были вырезаны круглые отверстия диаметром 3,81 *мм*, открывавшие доступ электронному пучку, пронизывавшему волновод, и позволявшие фотонам попасть из волновода на

детектор. Поскольку длина волны микроволнового излучения в волноводе составляла около 33 *мм*, постольку наличие отверстий не вносило сколько-нибудь заметных возмущений в бегущую по волноводу волну типа TE_{01}.

Длина волны измерялась с помощью волномера с точностью 0,1%. Мощность излучения составляла около 40 *мвт* (что соответствовало индуцированию переходов примерно 66% ионов, находящихся в состоянии $2^3S_{1/2}\left(m=+\frac{1}{2}\right)$) и непрерывно контролировалась. Вся установка откачивалась до давления $2\cdot10^{-6}$ *мм* рт. ст. Гелий вводился через «течь», которая получалась путём негерметического запаивания короткой (0,25 *мм*) вольфрамовой проволоки в пайрексовый капилляр диаметром 0,76 *мм*. Давление гелия в приборе измерялось ионизационным манометром с внесением необходимых поправок. В опытах использовались две партии гелия, степень очистки которых составляла 99,95 и 99,99%.

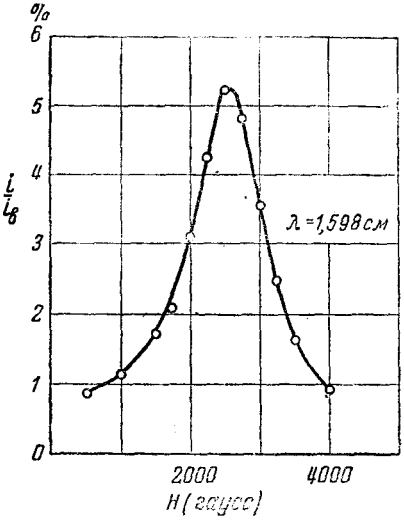

Рис. 2. Одна из экспериментально полученных резонансных кривых.

Возбуждение осуществлялось с помощью электронного пучка, создаваемого раскалённой нитью *G*, находившейся под отрицательным потенциалом. Пучок электронов с энергией около 200 *эв*, пересекая волновод, устремлялся к противоположному башмаку электромагнита и собирался на металлической пластинке *H*. Поскольку число образующихся ионов пропорционально эмиссии с нити, постольку потребовались особые меры для поддержания температуры нити строго неизменной.

В отличие от опытов с водородом, здесь не принималось никаких мер для формирования пучка образующихся ионов гелия. Вместо этого ионы гелия свободно, с тепловыми скоростями, двигались в аппаратуре.

Фотоны, возникающие в результате индуцированного перехода $2^3S_{1/2}\rightarrow2^3P_{1/2}$ и последующего перехода в основное ионное состояние, из области возбуждения попадали на детекторную пластину *D*, отделённую от области возбуждения коллодийной плёнкой *F*. Фотоэлектроны собирались электродом *E*. Фотоэлектрический ток измерялся с помощью электрометрической лампы, включённой по схеме Пеника, и чувствительного гальванометра.

Токовая чувствительность схемы составляла $1{,}2\cdot10^{-16}$ *а/мм* и не испытывала заметных изменений в течение более чем года. Флуктуационная неустойчивость составляла около 1 *мм* шкалы, возрастая в отдельных случаях до 2—3 *мм*.

Для получения резонансных кривых было использовано несколько фиксированных частот, в результате чего резонансные максимумы были получены при значениях напряжённости магнитного поля, варьировавших в довольно широких пределах. Полученная при этом зависимость

резонансной частоты от H_M свидетельствовала, что резонансные кривые действительно относились к переходу

$$2^2 S_{1/2}\left(m = +\frac{1}{2}\right) \rightarrow 2^2 P_{1/2}\left(m = -\frac{1}{4}\right).$$

Типичная резонансная кривая показана на рис. 2.

Значение H_M определялось по кривой графически и затем по формуле (4) определялось ν_0, т. е. частота, соответствующая переходу $2^2 S_{1/2} \rightarrow 2^2 P_{1/2}$ в отсутствии магнитного поля. Оценка ошибок показала, что наибольшая возможная погрешность в определении ν_0 составляет $\pm$ 100 *Мгц*. Статистическая ошибка значительно меньше — $\pm$ 10 *Мгц*.

Полученное авторами среднее значение — 14 020 *Мгц* — на 1,4% выше теоретического — 13 820 *Мгц*, причём и то и другое несколько выше, чем наиболее точные значения, полученные спектроскопически в видимой области спектра.

Авторы расценивают свои измерения как предварительные, причём указывают, что в случае однократно ионизованного гелия может быть достигнута точность бо́льшая, чем в случае водорода, ибо здесь отсутствует осложняющая измерения сверхтонкая структура.

Г. Р.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Я. А. Смородинский, УФН 39, 325 (1949).
2. В. Ф. Вейсконф, УФН 41, 165 (1950).
3. W. E. Lamb and M. Skinner, Phys. Rev. 78, 539 (1950).

ИЗМЕРЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ СВЕТА НА ЗЕРКАЛО, ПОМЕЩЁННОЕ В ПРЕЛОМЛЯЮЩУЮ СРЕДУ

Классические опыты П. Н. Лебедева, так же как и более поздние измерения давления света на зеркало, производились в вакууме. Между тем, согласно теоретическим предсказаниям, давление света должно существенно зависеть от показателя преломления той среды, в которую помещено зеркало. Значительные трудности, стоящие на пути осуществления соответствующего эксперимента, послужили, повидимому, причиной того, что до сих пор (в течение полувека!) это теоретическое предсказание оставалось неподтверждённым на опыте. Правда, опытами Барлоу [1], наблюдавшего появление вращательного момента при пропускании в косом направлении светового луча через стеклянный кубик, было показано существование светового давления на границе двух прозрачных диэлектриков с различными показателями преломления. Однако эти опыты носили качественный характер и, кроме того, могли служить только косвенным подтверждением вывода о зависимости светового давления на зеркало от показателя преломления среды.

Поэтому осуществление автором реферируемой заметки [2] прямых измерений этой зависимости представляет первостепенный интерес. Нельзя, конечно, не согласиться с автором, что они не могут служить пробным камнем для выбора между уже отвергнутыми старыми корпускулярными теориями света, электромагнитной теорией и квантовомеханическими представлениями. Так вопрос не стоит. Однако, вопреки утверждению автора, такие опыты имеют не только иллюстративное, но и в некотором отношении решающее значение. В рамках современной электродинамики до самого последнего времени отсутствовала ясность в выборе выраже-