

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУКСОВЕЩАНИЯ И КОНФЕРЕНЦИИ**НАУЧНАЯ СЕССИЯ ОТДЕЛЕНИЯ ОБЩЕЙ ФИЗИКИ
И АСТРОНОМИИ АКАДЕМИИ НАУК СССР
(30 сентября—1 октября 1970 г.)**

30 сентября и 1 октября 1970 г. в конференц-зале Физического института им. П. Н. Лебедева АН СССР состоялась научная сессия Отделения общей физики и астрономии АН СССР. На сессии были заслушаны доклады:

1. С. Б. Пикельнер, Магнитогидродинамика солнечных образований.
2. В. Л. Гинзбург, Пульсары (Современное состояние проблемы).
3. Я. Г. Дорфман, Новые результаты изучения физики Платона.
4. И. Д. Рожанский, К вопросу о возникновении античной атомистики.
5. Д. А. Варшалович, М. И. Дьяконов, Квантовая теория модуляции электронного пучка на оптических частотах.

Ниже публикуется краткое содержание прочитанных докладов.

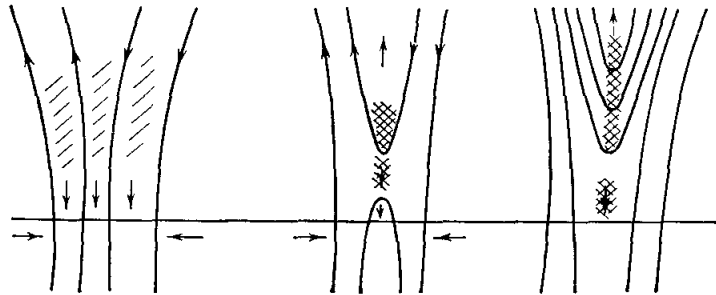
С. Б. Пикельнер. Магнитогидродинамика солнечных образований

Большая часть явлений, наблюдаемых на поверхности Солнца — пятна, факелы, флоккулы, протуберанцы, вспышки, тонкая структура хромосферы, так или иначе связана с влиянием магнитного поля. Источником избыточной энергии свечения верхней фотосферы и хромосферы активных областей служит усиление конвекции, вызванное тем, что поле подавляет турбулентность и уменьшает турбулентную вязкость. Вспышки происходят в нейтральных поверхностях сильного магнитного поля, где происходит аннигиляция магнитной энергии. Во всех этих проблемах существенную роль играет построение адекватной модели явления. Подробно рассматриваются протуберанцы и тонкая структура хромосферы — спиккулы и волокна.

Протуберанцы представляют собой тонкие слои плотного газа, висящие вертикально. Этот газ поддерживается магнитным полем, наиболее вероятная модель которого напоминает арку с впадиной на вершине. Чтобы протуберанец был устойчивым, эта впадина должна быть и без веса тяжелого газа. Основным вопросом является причина образования протуберанца, причина его конденсации. Обычно предполагается, что это связано с тепловой неустойчивостью, с обратной зависимостью мощности излучения газа короны от температуры. Однако тепловая неустойчивость привела бы к распаду короны на две фазы, к появлению конденсаций всюду, тогда как протуберанцы образуются в определенных конфигурациях поля, и их масса сравнима с массой всей короны. Другая гипотеза — сжатие газа магнитными силами — не соответствует структуре полей и тому факту, что газ стекает из спокойных протуберанцев вниз, а не поднимается вверх. Здесь показано, что появление арки с вдавленной вершиной должно автоматически приводить к образованию протуберанца. Корона нагревается потоком магнитозвуковых и магнитогидродинамических волн, идущих снизу. Эти волны не проходят во впадину — ускоренные из-за сильной рефракции, замедленные и альвеновские — потому, что они не распространяются поперек силовых линий. Поэтому газ во впадине охлаждается, равновесие его нарушается, начинается течение, как в сифоне. Газ перекачивается из хромосферы вдоль арки во впадину и там конденсируется. Расчет этого течения проведен с учетом теплопроводности (анизотропной) и излучения. Он показал, что поток приведет к конденсации при размерах арок

порядка наблюдаемых в короне и что вещество протуберанца обновляется за 1—2 дня, что также соответствует наблюдениям.

Спикулы представляют собой почти однородные столбы газа, поднимающиеся до высоты 7—12 тыс. км. Скорость подъема их 20—30 км/сек. Их образование связано с неоднородной структурой магнитного поля. Конвективные движения переносят силовые линии, и в результате такой диффузии структура поля становится весьма сложной, поля противоположного знака соседствуют на близком расстоянии. Эти поля сжимаются конвективным движением к периферии ячеек. У нейтральных поверхностей раздела полярности поле сжимает газ, который конденсируется и стекает вниз под действием силы тяжести. В результате сжатие продолжается и в конце концов



градиент напряженности достигает значительной величины. Он связан с током, который нагревает электронную компоненту и генерирует ионный звук. При этом возрастает диссипация магнитной энергии, силовые линии просачиваются через слой сжатого газа, аннигилируют, происходит перезамыкание силовых линий (см. рисунок). Образующиеся магнитные петли поднимают газ хромосферы вверх, образуя спикулу. Условие равновесия дает необходимую величину поля, а условие генерации ионного звука — скорость перезамыкания поля и отсюда скорость подъема. Обе величины хорошо согласуются с наблюдениями.

Существенным элементом структуры хромосферы являются малые волокна, расположенные вдоль силовых линий и связывающие две точки с разной полярностью. Здесь нужно объяснить, почему эти волокна поднимаются выше хромосферы и почему они почти не расширяются к середине, хотя силовые линии должны расширяться. Нормальная хромосфера граничит с короной, где температура и теплопроводность высоки. За счет потока тепла из короны верхняя часть хромосферы испаряется, так что граница проходит ниже, чем в модели без теплопроводности. В случае когда магнитная дуга проходит низко над хромосферой, в ней не формируется корона, так как замкнутая дуга не получает потока тепла. Получается хромосферного типа газовая дуга выше среднего уровня. Давление газа падает с высотой, тогда как в окружающей короне оно практически постоянно. Поэтому внешнее давление сжимает волокно, пока магнитное давление не уравновесит его. Это объясняет малую толщину волокна.

Материалы доклада опубликованы в статье автора в «Астрономическом журнале» № 2 за 1969 г., публикуются в «Астрономическом журнале» № 2 за 1971 г., в журнале «Solar Physics», 1971. Кроме того, цитируются более старые работы автора: «Астрономический журнал» № 4 за 1960 г. и № 3 за 1962 г.

В. Л. Гинзбург. Пульсары (Современное состояние проблемы)

В в е д е н и е. В качестве несколько условной даты обнаружения пульсаров Э. Хьюиш указывает¹ на 28 ноября 1967 г. Первое сообщение об открытии пульсаров было опубликовано в номере «Nature» от 24 февраля 1968 г. С тех пор появилось уже около 500 статей, посвященных экспериментальному и теоретическому исследованию пульсаров. При этом уже около года наблюдается известное насыщение в том смысле, что не появлялось каких-либо новых результатов принципиального, качественного характера. В этой связи обзор ситуации, сделанный на одной из сессий ООФА² в 1969 г., сохраняет свое значение. Подробнее имеющиеся экспериментальные данные сопоставлены в¹. Поэтому ниже приводится лишь краткое содержание той части доклада, которая отражает существующие теоретические представления, касающиеся пульсаров (подробнее см.³).

1. **Природа пульсаров.** Пульсары пытались связать с нейтронными звездами, белыми карликами, двойными звездами и объектами «нового типа». При учете гравитационного излучения, что необходимо, гипотеза о пульсарах — двойных звездах отпадает. Считать пульсары объектами «нового типа» сейчас нет никаких

оснований. Если долгопериодические и короткопериодические пульсары по своей природе тождественны, как это наиболее вероятно, то пульсары не могут быть вращающимися или пульсирующими белыми карликами, а также пульсирующими нейтронными звездами. Напротив, все пульсары можно отождествить с вращающимися нейтронными звездами (при этом период пульсара равен периоду вращения звезды или, в некотором частном случае, половине этого периода вращения). Таким образом, весьма вероятно, хотя строго и не доказано, что пульсары представляют собой вращающиеся нейтронные звезды.

2. О вращающихся намагниченных нейтронных звездах. При превращении звезды в нейтронную момент инерции сильно уменьшается. Поэтому можно ожидать, что нейтронные звезды быстро вращаются (угловая скорость $\Omega \leq 10^3$). Столь же вероятно, что в результате сжатия хорошо проводящей исходной звезды магнитное поле в нейтронных звездах является очень сильным ($H \leq 10^{12} - 10^{13}$ э). При этом магнитный момент звезды m , вообще говоря, не должен совпадать с направлением ее угловой скорости Ω . Тем самым вполне естественным образом приходим для пульсаров к модели наклонного ротатора (вращающейся намагниченной нейтронной звезды с несопадающими осью вращения и осью магнитной симметрии).

3. Строение нейтронных звезд и пульсары. В связи с недостаточным точным знанием уравнения состояния вещества при сверхвысоких плотностях ($\rho \geq 10^{11}$ г·см⁻³) количественные расчеты для нейтронных звезд еще ненадежны. Тем не менее, можно думать, что для «типичной» нейтронной звезды масса $M \sim 0,5 \odot$, радиус $r_0 \sim 10 - 30$ км и плотность в центре $\rho_c \sim 10^{15}$ г·см⁻³. При плотностях $\rho \leq 3 \cdot 10^{11}$ г·см⁻³ вещество звезды состоит из ядер и электронов, т. е. находится в плазменном состоянии. При этом, если не считать тонкого поверхностного газового слоя, плазменная часть звезды является твердой — образует кору (речь идет о звездах с температурой $T \leq (1 - 5) \cdot 10^8$ градусов; более горячими нейтронные звезды могут оказаться лишь сразу после их образования). В области плотностей $3 \cdot 10^{11} \leq \rho \leq 5 \cdot 10^{13}$ г·см⁻³ в твердой плазменной коре присутствуют также нейтроны, количество которых возрастает с увеличением плотности. Наконец, при плотностях $\rho \geq 5 \cdot 10^{13}$ г·см⁻³ звезда состоит в основном из нейтронов с примесью нескольких процентов протонов и равного им числа электронов (мезоны и гипероны в заметном количестве появляются лишь при $\rho \geq 10^{15}$). Нейтронно-протонно-электронная область нейтронных звезд является жидкой и как бы состоит из смеси нейтронной, протонной и электронной жидкостей. Имеются веские основания полагать, что в нейтронных звездах нейтронная жидкость находится в сверхтекучем состоянии, а протонная жидкость в сверхпроводящем состоянии. В пользу справедливости такой гипотезы свидетельствует, хотя еще и не доказывает ее, анализ изменения периода пульсара PSR 0833—45 в Вела X после скачка его периода, наблюдавшегося в 1969 г. Так или иначе изучение немонотонностей (скачков и других возмущений) в ходе векового увеличения периода пульсаров открывает перспективу «заглянуть» внутрь нейтронных звезд.

4. Об электродинамике вращающихся намагниченных нейтронных звезд. Находящаяся в вакууме вращающаяся намагниченная нейтронная звезда — наклонный ротатор излучает низкочастотные электромагнитные волны, а также выбрасывает заряженные частицы с поверхности звезды. В результате угловая скорость вращения звезды уменьшается. Отсюда можно оценить магнитное поле H_0 на поверхности звезды, причем это поле оказывается очень сильным ($H_0 \sim 10^{12} - 10^{13}$ э). Учет влияния окружающей звезду плазмы может, однако, существенно изменить ситуацию, и оценка $H_0 \sim 10^8 - 10^9$ э также еще не представляется исключенной. Одной из главных (и еще нерешенных) задач теории пульсаров нужно считать согласованное определение параметров плазмы вблизи нейтронной звезды. Только после этого можно будет надежно оценить поле звезды, выяснить вопрос о вековом изменении угла между магнитным моментом m и угловой скоростью Ω и т. д.

5. О механизмах излучения пульсаров. Оптическое и рентгеновское излучение пульсара NP 0532 в Крабовидной туманности можно считать некогерентным излучением совокупности частиц. Конкретно, наиболее вероятно, что речь здесь идет о некогерентном синхротронном излучении релятивистских электронов. Радионизлучение пульсаров, напротив, должно быть связано с каким-либо когерентным механизмом излучения, так как яркостная температура радионизлучения пульсаров исключительно высока ($T_b > 10^{20}$ градусов).

Известны два существенно различных типа когерентных механизмов излучения — антенный и мазерный. Антенный механизм в простейшем случае действует, когда частицы образуют ступки с размерами, меньшими длины волны излучения. В космических условиях, однако, появление и устойчивость таких ступков очень маловероятны. Когерентные механизмы мазерного типа не требуют образования ступков, в основе их действия лежит усиление волн, обусловленное инверсной заселенностью энергетических уровней. Мазерные механизмы (их известно несколько) весьма эффективны и, в принципе, вполне способны объяснить все особенности

радиоизлучения пульсаров (то же относится к ряду компонент солнечного радиоизлучения и космическому радиоизлучению молекул ОН и других).

6. Некоторые модели излучающих областей пульсаров. Построение конкретных моделей излучающих областей пульсаров затруднено не в связи с вопросом о механизме излучения, а в основном в результате отсутствия сведений о плотности и других характеристиках плазмы, а также магнитного поля около пульсаров. Остается, в частности, неясным тип диаграммы направленности излучения пульсаров. Эта диаграмма может быть, например, «карандашной» с осью, совпадающей с направлением магнитного диполя m . Другая возможность — это «ножевая» диаграмма, расположенная в плоскости магнитного экватора звезды. В докладе в качестве примера приводятся некоторые возможные параметры излучающих областей пульсара NP 0532. Центр тяжести проблемы лежит, однако, не столько в подборе этих параметров на основе данных о спектре излучения, сколько в создании самосогласованной картины плазменной оболочки пульсара. Если бы эту задачу удалось решить, то вопрос об излучении пульсаров выяснился бы, вероятно, более или менее автоматически.

7. Использование пульсаров в астрономии и физике. Открытие пульсаров особенно существенно с точки зрения возможности изучать нейтронные звезды и их активность (в частности, их роль в оболочках сверхновых). Но пульсары могут использоваться и уже фактически используются также для решения других важных астрономических проблем: определения меры дисперсии (количества электронов на луче зрения между пульсаром и Землей) и меры вращения плоскости поляризации в межзвездном пространстве, для изучения неоднородностей межзвездной среды, а также для некоторых других целей.

Заключительные замечания. В заключение сделано несколько замечаний общего характера, касающихся развития астрономии и физики в их связи с изучением нейтронных звезд — пульсаров.

ЛИТЕРАТУРА

1. Э. Хьюиш, Доклад на XIV Генеральной Ассамблее Международного астрономического союза (19 августа 1970 г.); A. Hewish, *Highlights of Astronomy*, 1970; см. также: *Ann. Rev. Astron. and Astrophys.* 8, 265 (1970).
2. УФН 99, 514 (1969).
3. В. Л. Гинзбург, Доклад на XIV Генеральной Ассамблее МАС (19 августа 1970 г.), УФН 103 (3), 393 (1971).

Я. Г. Дорфман. Новые результаты изучения физики Платона

Физические представления Платона содержатся главным образом в его диалоге «Тимей». В литературе по истории физики они редко приводятся и по-разному оцениваются^{1, 2}. Ф. Розенбергер считает их ничтожно не значащими, а Э. Гоппе признает их наивысшим достижением античной атомистики. «Тимей» изучался и переводился на современные языки почти исключительно филологами и философами^{3, 4, 5}. Поэтому мною было предпринято подробное изучение подлинника и переводов «Тимея». Оно позволило уточнить наши сведения о физике Платона и выяснить в ней ряд новых особенностей*). Основное содержание этого произведения, относящегося к середине IV века до н. э., составляет доклад, прочитанный в Афинах неким «образованнейшим астрономом и естествоиспытателем» Тимеем. В докладе чередуются мистические сказания об идеальном Мире, подчиненном Разуму, и научное описание реально наблюдаемого Мира, подчиненного Необходимости, т. е. законам Природы. Здесь, наряду с опытными фактами, изучаются «наиболее правдоподобные» представления о строении материи и внутреннем механизме физических процессов.

В основе физики Платона лежит классификация всех наблюдаемых нами тел на четыре вида ($\gamma\epsilon\upsilon\eta$), или четыре группы: 1) «землеобразные», 2) «водообразные», 3) «воздухообразные», 4) «огнеобразные». Эти четыре группы тел (кратко именуемые — земля, вода, воздух и огонь) не являются ни химическими элементами, ни агрегатными состояниями в обычном смысле. К группе «землеобразных» Платон относит все практически неплавящиеся твердые тела (камни и руды); к группе «водообразных» отнесены тела, способные существовать как в твердом, так и в жидком состоянии (металлы, вода); к группе «воздухообразных» относятся пары и воздух, а к группе «огнеобразных» — пламя, свет, тепло и воспламеняющиеся испарения. Все тела предполагаются состоящими из единой первичной материи и построены они из невидимых частиц

*) Ценную помощь в этом исследовании мне оказал И. Д. Рожанский.

(общая). Каждая группа тел характеризуется формой своих частиц. Платон считает «наиболее правдоподобной» форму правильных многогранников. Он приписывает частицам (1) группы форму кубов, частицам (2) группы форму икосаэдров, частицам (3) группы форму октаэдров и частицам (4) группы форму тетраэдров. Согласно Платону, (2), (3) и (4) способны превращаться друг в друга благодаря тому, что грани икосаэдра, октаэдра и тетраэдра представляют собою равносторонние треугольники. Распадаясь на отдельные треугольные пластинки (грани), пустотелые многогранники перестраиваются, превращаясь друг в друга. «Землеобразные» кубы (1) лишены этой возможности. Платон считает многогранники и треугольники весомыми частицами. Он даже утверждает, что они скрепляются друг с другом посредством «бесчисленных минаиатурных штифтиков»^{*}). Каждая из четырех групп охватывает огромное число веществ, отличающихся друг от друга только размерами своих невидимых многогранников.

Платон подробно описывает процессы взаимных превращений различных видов материи. Проникновение «острых» частиц огня в «водообразную» твердую фазу вызывает плавление. Огненные тетраэдры разрывают на пластинки икосаэдры расплава и заставляют их перестраиваться в «воздухообразные» октаэдры пара. Удаление частиц «огня» приводит к застыванию, к выпадению твердой фазы из расплава. При всех этих процессах перестройки частиц строго соблюдается сохранение исходного количества треугольных пластинок. Платон формулирует это в виде своеобразных уравнений баланса такого типа:

$$1 \text{ «вода»} \rightarrow 2 \text{ «воздуха»} + 1 \text{ «огонь»}$$

(т. е. 20 треугольников воды превращаются в 2×8 треугольников воздуха + 4 треугольника огня). Помимо этого правила, регулирующего количественную сторону подобных процессов, Платон формулирует законы фазовых равновесий, определяющие направление процессов (на них до сих пор историки не обращали внимания). Так, первый закон равновесия фаз утверждает, что одинаковые частицы друг друга не разрушают, поэтому однородная система всегда находится в устойчивом равновесии и покое. Второй закон гласит, что при наличии нескольких фаз (например, смесь частиц «огня» и «водообразных» частиц) возникают движения, т. е. борьба между ними, причем фаза, менее прочная и находящаяся в меньшей концентрации, подвергается разрушению; ее частицы перестраиваются, принимая структуру преобладающей фазы. Наконец, третий закон равновесия фаз рассматривает смесь двух примерно одинаковых по прочности и по концентрации фаз. Их взаимная борьба приводит к диссоциации частиц, которая продолжается до тех пор, пока либо частицы одной из фаз соберутся вместе и выпадут, либо частицы этой фазы перестроятся в однородную массу, сходную с другой фазой, и растворятся в ней. В свете этих законов Платон рассматривает не только «смеси» огня и жидкостей, но и растворы твердых солей в воде. Таким образом, мы здесь встречаем развернутую систему молекулярной физики, не имеющую аналога в античной науке. Физика Платона не была понята античными натурфилософами (например, Аристотелем), но она оказала влияние на физиков и химиков XVI—XVIII веков.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ф. Розенбергер, История физики. Перевод под ред. И. Сеченова, ч. 1, М.—Л., 1933.
2. Е. Норре, Handbuch der Physik, Band 1. Kap 1. Geschichte der Physik, Berlin, 1926, S. 8—9.
3. P l a t o n Oeuvres complètes, tome X. «Timée», texte établi et traduit par Albert Rivaud, Paris, 1925.
4. E v a S a c h s, Die fünf platonischen Körper (Philologische Untersuchungen 24), 1917.
5. Ch. Mugler, La physique de Platon, Paris, 1960.
6. W. Heisenberg, Physics and philosophy N.Y., 1958, p. 69 (перевод: Физика и философия, М., ИЛ, 1963).

И. Д. Рожанский. К вопросу о возникновении античной атомистики

Проблема возникновения античной атомистики относится к числу наиболее загадочных проблем в истории науки. Из того, что мы знаем об атомистике Левкиппа и Демокрита, следует, что она была последовательным и хорошо разработанным учением. Были ли у нее предшественники в Греции или в других странах? Если нет,

^{*} Поэтому трактовка Гейзенбергом этих треугольников как математических абстракций⁶ ошибочна.

то в чем состояли стимулы, побудившие ранних греческих мыслителей прийти к идее атома, как мельчайшей структурной единице материи? Известное аристотелевское объяснение, выводящее атомистику из учения элеатов, представляется с этой точки зрения недостаточным. Для того чтобы понять, каким образом идея атома могла зародиться в ту эпоху, когда еще не было ни физики, ни научных методов исследования, полезно рассмотреть некоторые особенности донаучного мышления вообще. Одна из этих особенностей состоит в оперировании парами противоположных понятий — таких, как свет и тьма, правое и левое, чет и нечет и другие, — которым приписывалось особое, подчас магическое значение. Специфическая черта греческой психики состояла в том, что важнейшей из пар такого рода считалась пара предел — беспредельное. Именно эта пара стоит на первом месте в системе пифагорейских противоположностей, которые, по словам Аристотеля, играли у пифагорейцев роль первоначал. Идея предела для греков той эпохи была эквивалентна идеям порядка, оформленности, гармонии; противоположная ей идея беспредельного выражала беспорядок, бесформенность, неустроенность. Будучи переведена в космический план, пара предел — беспредельное оказывалась родственной другой паре, также чрезвычайно характерной для греческого мышления, а именно паре космос — хаос.

Начало V века до н. э. в греческой науке характеризуется оформлением целого ряда понятий, которые в предшествующую эпоху либо еще не существовали, либо еще только смутно намечались. В частности, именно в это время происходит четкое осознание идеи пространственной бесконечности. Левкипп дополнил эту идею идеей множественности миров, которая до того времени была чужда греческому космологическому мышлению. В это же время зарождается идея внутреннего строения вещей, определяемого первичными структурными единицами, из которых построен мир. Именно в этом духе Эмпедокл перестраивает древние представления о четырех стихиях — элементах. Левкипп подходит к этой проблеме по-другому, чем Эмпедокл. Он переносит коренную для греческого мышления противоположность предела и беспредельного из космического плана в план микроскопический. Противопоставление космоса хаосу переходит при этом в противопоставление мельчайших материальных частиц — атомов пустому пространству. Неделимые, непроницаемые, всегда неизменные атомы выражают, в конечном счете, греческую идею предела; с этим связано то обстоятельство, что именно форма является основным и, в сущности, единственным позитивным признаком атомов. Наоборот, идея беспредельного оказывается естественным образом представлением бесконечным пространством, не имеющим ни границ, ни внутренних членений. То, что дело обстоит именно таким образом, явствует из аристотелевских текстов, в которых речь идет об атомистике; все они пронизаны идеей дуализма полного и пустого, существующего и несуществующего, атомов и бесконечного пространства.

Отмеченные концептуальные особенности ранней атомистики еще не полностью ее характеризуют. Другой аспект атомистической гипотезы — вечное движение атомов, «мечущихся во все стороны». Этот аспект невозможно объяснить на основе одних лишь спекуляций с идеями предела и беспредельного; здесь надо искать аналогию или наглядную модель, взятую из жизни. Сочинение Аристотеля «О душе» указывает нам эту модель — это пылинки, носящиеся в воздухе и становящиеся видимыми лишь в солнечном луче. Эта аналогия, несомненно принадлежавшая основателям атомистики, оживленно обсуждалась позднейшими авторами.

Таким образом, соображения, которыми руководствовались создатели атомистического учения в Греции, представляли собою смесь отвлеченных спекуляций и умозаключений, делавшихся на основании наглядных аналогий.

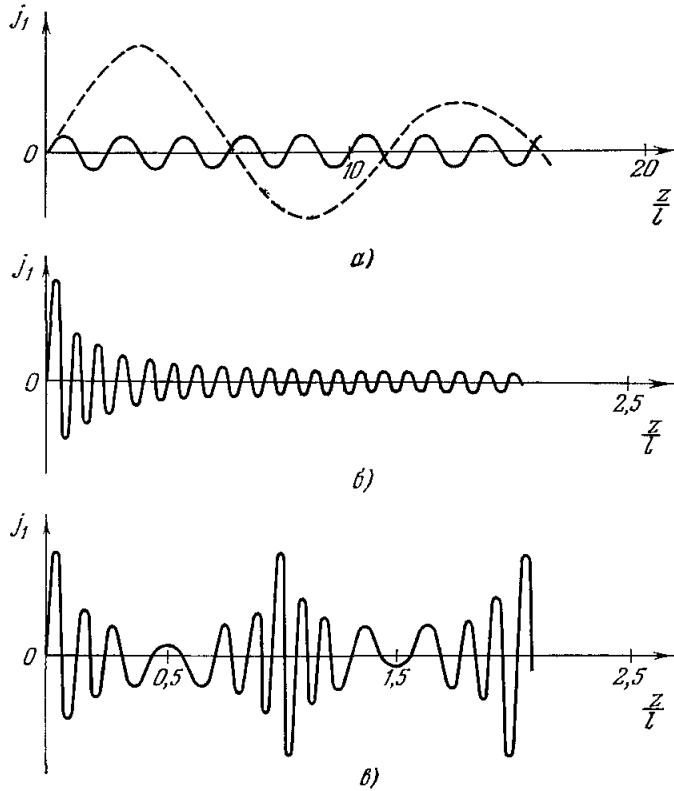
Д. А. Варшалович, М. И. Дьяконов. Квантовая теория модуляции и электронного пучка на оптических частотах

Модуляция пучка электронов на частотах радиодиапазона всесторонне исследована как теоретически, так и экспериментально и широко используется в радиотехнике. Что же касается оптического диапазона, то здесь модуляция была получена лишь совсем недавно в экспериментах Шварца и Хора¹. Пучок быстрых электронов с энергией $E_0 = 50$ кэВ проходил через тонкую пленку, помещенную в поле световой волны лазера. Возникающая при этом модуляция приводила к появлению свечения с частотой лазерного излучения при попадании пучка на нелюминесцирующий, металлический экран.

Появление модуляции в эксперименте¹ можно объяснить следующим образом. В поле лазерной волны вещество пленки поляризуется, возникают поверхностные заряды. Взаимодействуя с этими зарядами, электрон теряет (или приобретает) энергию и импульс в результате вынужденного излучения (или поглощения) фотонов. Эти процессы становятся возможными лишь благодаря наличию дополнительного тела — пленки. В некотором смысле поверхности пленки можно уподобить паре сеток,

к которым приложена разность потенциалов $U \sin \omega t$, меняющаяся с оптической частотой ω .

При классическом описании электрон, проходя через пленку, ускоряется либо замедляется в зависимости от фазы поля в момент пересечения поверхности пленки. Электроны, вылетевшие из пленки в различные моменты времени, имеют разные



Зависимость амплитуды переменной составляющей электронного тока j_1 на частоте ω от расстояния z .

а) $V/\hbar\omega = 0, 1$, пунктир — классическая теория, сплошная линия — квантовая теория; б) $V/\hbar\omega = 10$, классическая теория; в) $V/\hbar\omega = 10$, квантовая теория.

скорости. Быстрые электроны догоняют вылетевшие ранее более медленные. Это приводит к их пространственной группировке, так что плотность тока оказывается модулированной на частоте ω и ее гармониках. Скорости электронов в модулированном пучке распределены в интервале от $v \left(1 - \frac{U}{2E_0}\right)$ до $v \left(1 + \frac{U}{2E_0}\right)$, где v — начальная скорость электронов. Непрерывный характер распределения по скоростям приводит к затуханию модуляции на расстояниях $z \gg l_0$, где $l_0 \sim \frac{v}{\omega} \frac{E_0}{U}$.

Согласно квантовой механике, электрон, прошедший через пленку, не обладает определенными энергией и импульсом. Его волновая функция представляет собой суперпозицию состояний, возникших в результате испускания или поглощения n квантов $\hbar\omega$ ($n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$). Модуляция плотности и тока электронов обусловлена интерференцией этих состояний. Таким образом, в противоположность тому, что дает классическое рассмотрение, распределение электронов по скоростям в модулированном пучке имеет дискретный характер с $\Delta v \approx v \frac{\hbar\omega}{2E_0}$. Эта дискретность приводит к тому, что зависимость глубины модуляции от расстояния за пленкой z получается существенно иной, чем зависимость, которую дает классическая теория. Оказывается, что области, где модуляция велика, периодически, с периодом $l = 4\pi \frac{v}{\omega} \frac{E_0}{\hbar\omega}$, повторяются в пространстве на больших расстояниях за пленкой, где, согласно классической

механике, модуляция уже отсутствует (см. рисунок). Лишь на малых расстояниях результаты квантового и классического рассмотрений совпадают.

В радиодиапазоне расстояние l весьма велико; на таком расстоянии пространственная группировка электронов обычно уже отсутствует вследствие немонахроматичности исходного пучка, и квантовые эффекты не сказываются. В случае модуляции на оптических частотах величина l может быть малой. Так, в экспериментах Шварца и Хора¹ период l по нашим оценкам составлял 0,9 см, а расстояние от пленки до экрана было 25 см. Таким образом, наблюдавшийся в этих экспериментах эффект имел квантовую природу. Указанная нами² пространственная периодичность модуляции с периодом l недавно была обнаружена на опыте (частное сообщение проф. Х. Шварца).

Теоретическое рассмотрение показывает, что при попадании модулированного пучка на экран возникает когерентное монохроматическое излучение на частоте ω и ее гармониках. Если диаметр пучка много больше длины волны света, то это излучение будет остронаправленным.

Однако, как отметил акад. Я. Б. Зельдович, имеется существенная трудность в интерпретации излучения, наблюдавшегося Шварцем и Хором¹; в условиях их эксперимента интенсивность некогерентного переходного излучения во всем видимом диапазоне частот должна была превосходить интенсивность когерентного излучения.

Характер излучения, возбуждаемого электронным пучком, пока еще экспериментально не изучен.

ЛИТЕРАТУРА

1. H. Schwarz, H. Hora, Appl. Phys. Lett. 15, 349 (1969).
 2. Д. А. Варшалович, М. И. Дьяконов, Письма ЖЭТФ 11, 594 (1970); ЖЭТФ 60, 90 (1971).
-