

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУКСОВЕЩАНИЯ И КОНФЕРЕНЦИИ

53+523

**НАУЧНАЯ СЕССИЯ ОТДЕЛЕНИЯ ОБЩЕЙ ФИЗИКИ
И АСТРОНОМИИ И ОТДЕЛЕНИЯ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ
АКАДЕМИИ НАУК СССР
(24—25 ноября 1971 г.)**

24 и 25 ноября 1971 г. в конференц-зале Физического института им. П. Н. Лебедева АН СССР состоялась научная сессия Отделения общей физики и астрономии и Отделения ядерной физики АН СССР. На сессии были заслушаны доклады:

1. К. И. Грингауз, Р. З. Сагдеев, Б. А. Тверской. Механизм магнитосферных суббурь.

2. Д. Я. Мартынов. Тесные двойные звезды и их значение для теории звездной эволюции.

3. Б. М. Болотовский, В. Л. Гинзбург. Эффект Вавилова — Черенкова и эффект Доплера в случае источников, движущихся со скоростью больше скорости света в вакууме.

4. А. А. Коломенский, М. С. Рабинович, Я. Б. Файнберг. Коллективные методы ускорения частиц в плазме и в сильноточных электронных пучках.

5. Л. С. Богданкевич, А. А. Рухадзе. Проблемы сильноточных релятивистских электронных пучков.

Ниже публикуется краткое содержание некоторых докладов *).

Д. Я. Мартынов. Тесные двойные звезды и их значение для теории звездной эволюции.

Двойные и кратные звезды более многочисленны, чем одиночные, однако теория звездной эволюции строилась до последнего времени для одиночных звезд. Между тем развитие двойных звезд, особенно тесных двойных, имеет много отличий: из-за относительной близости компонент существует активное взаимодействие между звездами, входящими в пару. С другой стороны, именно двойные звезды доставляют нам такие важные характеристики звезд, как масса, размеры и плотность и даже распределение яркости по диску звезды. Подразумевается, что двойная звезда должна быть изучена спектроскопическими и фотометрическими методами. Таким образом, для познания физических свойств звезд особенный интерес представляют звезды, которые одновременно являются спектрально-двойными и фотометрически-двойными (так называемые *затменные переменные*).

Среди таких звезд встречаются комбинации представителей всех классов звезд: звезды главной последовательности, гиганты, сверхгиганты, субгиганты и белые карлики, бывшие новые звезды и вспыхивающие карликовые новые. Не обнаружены только двойные звезды-пульсары; пока безуспешно разыскиваются среди двойных так называемые «черные дыры», или коллапсары, — звезды, испытывавшие гравитационный коллапс.

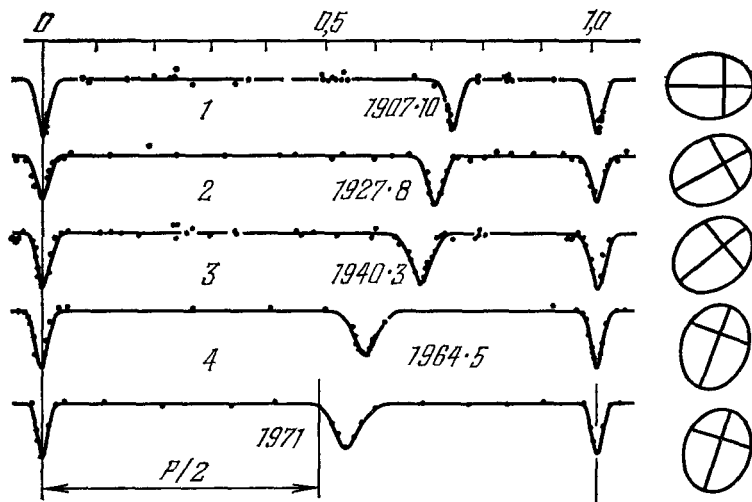
Эволюция одиночной звезды определяется темпами ядерных реакций, вообще говоря, медленными у малых звезд, быстрыми у звезд массивных. Но всегда это либо миллиарды лет либо миллионы (исключая критические фазы). Между тем в тесных двойных системах в процессе эволюции компонент может возникнуть быстрый перенос масс от одной компоненты к другой, в результате чего развитие первой ускорится

*) В журнале «Успехи физических наук» (том 106, вып. 4) уже опубликована статья Б. М. Болотовского и В. Л. Гинзбурга по теме доклада авторов, в связи с чем тезисы этого доклада не приводятся. (Прим. ред.)

в сотни раз, так что за немного тысяч лет в звезде могут произойти изменения, хорошо заметные для наблюдателя. Первоначально более массивная звезда в паре становится вследствие потери массы вторичной компонентой и, быстро эволюционируя, проходит ускоренными темпами поздние стадии развития звезды вплоть до белого карлика.

Качественно теории эволюции с переносом масс в состоянии объяснить почти все комбинации звезд, встречающиеся в звездных парах. Но эти теории еще слишком прямолинейно переносят ядерную эволюцию одиночной звезды на компоненту двойной звезды, учитывая только убыль ее массы. Задачей теории является в настоящее время переход от небесномеханической трактовки переноса материи к газодинамической трактовке с учетом магнитных полей, а также учет влияния быстрого вращения и приливного взаимодействия компонент.

Коллапсировавшие звезды среди компонент двойных звезд можно отыскать в тех звездных парах, где наблюдаются большие значения так называемой *функции масс*, пропорциональной массе невидимой компоненты. При некоторых дополнительных предположениях эта масса может быть оценена, и, в частности, оценка может



привести к массе больше, и даже значительно больше, массы видимой компоненты. Но тогда возникает вопрос: как это может случиться, что более массивная звезда не видна, а менее массивная видна? Возможный ответ: менее массивная звезда — коллапсар. В таком выводе нет, однако, ничего принудительного: если видимая звезда имеет избыточную светимость — раз в 5—10, а невидимая — во столько же раз недостаточную, то вторая «ускользнет» от спектрального анализа.

Внутреннее строение звезды непосредственно не наблюдаемо. Справедливость теорий проверяется сопоставлением наблюдаемых интегральных характеристик с теоретически предсказываемыми. Однако вращение орбиты в своей плоскости у некоторых затменных двойных систем позволяет непосредственно изучать распределение масс внутри звезды. Правда, сам процесс изучения таких явлений занимает десятилетия. На рисунке показан пример вращения орбиты звезды RU Единорога, которую автор наблюдает уже свыше 40 лет, — прогрессивные изменения кривой блеска RU Единорога, вызванные вращением орбиты. Справа на рисунке показаны положения орбиты относительно наблюдателя (находящегося внизу). Первая кривая получена из наблюдений Уэнделла, остальные — из наблюдений автора.

А. А. Коломенский, М. С. Рабинович, Я. Б. Файнберг. Коллективные методы ускорения частиц в плазме и в сильноточных электронных пучках.

В последние годы в разработке и создании ускорителей различных типов достигнуты большие успехи. Однако становится все труднее связывать дальнейший существенный прогресс с еще большим увеличением масштабов классических установок, и будущее развитие этой области во многом зависит от радикального повышения эффективности ускорения. Большие перспективы в этом отношении открывают коллективные методы ускорения, которые, в принципе, дают возможность поднять удельную энергию более чем на один-два порядка и достичь приращения на одном метре до 0,1—1 ГэВ и выше. В докладе рассматриваются некоторые методы, не связанные с использованием релятивистских электронных колец (см., например: УФН 96, 377

(1968)) и развиваемые в Физическом институте им. П. Н. Лебедева АН СССР и в Физико-техническом институте АН УССР (Харьков).

Известны два основных источника сильных коллективных электрических полей: плотная плазма и сильнотоочные релятивистские электронные пучки. В Физико-техническом институте АН УССР ведутся оригинальные работы по ускорению ионов в волнах плотности в плазме, возбуждению сильных электрических полей при плазменно-пучковом взаимодействии, подавлению неустойчивостей и регуляризации колебаний в плазме; сооружен линейный плазменный бетатрон.

Необходимые для ускорения частиц волны в плазме могут возбуждаться как с помощью сторонних СВЧ генераторов в плазменных волноводах, так и электронными потоками. Особенно перспективным будет, по-видимому, использование взаимодействия с плазмой интенсивных релятивистских пучков электронов. По существу, для возбуждения плазменных волн используется неустойчивость, и важнейшая задача в разработке плазменных ускорителей заключается в том, чтобы научиться управлять неустойчивостями и, если нужно, подавлять их. Были предложены и исследованы такие методы управления неустойчивостями, как: 1) первоначальная модуляция электронных потоков (по плотности и по скорости), 2) использование неоднородной плазмы. Как показали эксперименты, задание на входе системы сигнала с интенсивностью, составляющей весьма малую долю от интенсивности возбуждаемых колебаний, уже позволяет управлять спектрами неустойчивостей.

В ФИАН проводятся исследования по разработке новых коллективных методов с использованием релятивистских электронных пучков посредством их сканирования, автоускорения, ускорения ионов в самосфазированных электронных ступках, а также ускорения ионов на фронте ионизации в газе. В методе сканирования электронный пучок, выходящий из некоторой точки, поворачивается и заставляет ускоряться захваченные ионы. При постоянной угловой скорости вращения открывается возможность непрерывного (а не импульсного, как в других методах) ускорения ионов. В методе автоускорения часть энергии сильнотоочного пучка идет на возбуждение ускоряющих полей в пассивных структурных элементах (резонаторах, линиях). При этом происходит перераспределение энергии внутри пучка, т. е. часть частиц ускоряется за счет других.

При ускорении электронов и ионов в самосфазированных электронных ступках последние возбуждают сильные поля в замедляющих системах, например типа волновода с диафрагмами или цепочки резонаторов. Большим электронным током соответствует высокий уровень амплитуды продольного поля. Это связано с тем, что сильнотоочный пучок может переносить через волновод большую объемную плотность энергии, причем с релятивистской скоростью.

Метод ускорения ионов при прохождении электронного пучка через газ развивается на основе экспериментально обнаруженного явления, когда довольно значительное количество ионов получало энергии порядка нескольких мегаэлектрон-вольт на нуклон. Явление связано с тем, что электронный пучок в газе образует ионы и создает сравнительно медленно движущуюся потенциальную яму заряда, в которой эти ионы ускоряются.

Исследования по коллективным методам ускорения попутно привели к некоторым результатам, представляющим самостоятельный интерес и позволяющим рассчитывать на создание генераторов СВЧ-колебаний большой мощности и на реализацию эффективного нагрева электронов и ионов плазмы. Основной экспериментальной базой для развития коллективных методов служат сильнотоочные импульсные электронные ускорители на энергию порядка мегаэлектрон-вольт, в разработке которых за последние годы достигнуты большие успехи.

По теме доклада можно указать следующую литературу: Я. Б. Ф а й н б е р г, Труды VII конференции по ускорителям, т. 2, Ереван, 1970, стр. 465; М. С. Р а б и н о в и ч, Труды I Всесоюзного совещания по ускорителям, т. 2, Москва, 1970, стр. 473; А. А. К о л о м е н с к и й, I. I. L o g a c h e v, Proc. of the 8th Intern. Conference on High-Energy Accelerators, Geneva, CERN, 1971, p. 587; Л. Н. К а з а н с к и й и др., АЭ 30, 27 (1971).

Л. С. Богданкевич, А. А. Рухадзе. Проблемы сильнотоочных релятивистских электронных пучков.

В последние годы в связи с развитием импульсной техники высоких напряжений во многих лабораториях различных стран были созданы сильнотоочные электронные ускорители высокой мощности. Характерные мощности таких ускорителей $W \approx 10^{11} - 10^{12}$ вт, токи в пучке $I \approx 10^5 - 10^6$ а, энергия электронов $\mathcal{E} \approx 1 - 10$ Мэв и длительность импульса $\tau_0 \leq 10^{-7}$ сек. Такие и более мощные электронные ускорители открывают широкий круг чисто физических проблем. Наиболее важной нам представляется проблема нагрева плазмы сильнотоочным пучком до термоядерных температур и получения импульсного термоядерного синтеза. Оценки показывают¹, что для достижения этой цели необходимы электронные пучки с энергией 10 Мэв, сфокусированные на площадь в 0,3 см² при токе 10 ма и длительности импульса

$\tau \approx 3 \cdot 10^{-8}$ сек. Согласно теоретическим расчетам^{2а} такие токи достигаются только при плазменной фокусировке электронных пучков, причем

$$I_{\text{пред}} \approx 17 \gamma^3 \text{ ка}, \quad (1)$$

где $\gamma = \mathcal{E}/mc^2 = [1 - (u^2/c^2)]^{-1/2}$ — релятивистский фактор. При $\gamma \approx 20$ (т. е. при $\mathcal{E} \approx 10$ Мэв) из (1) следует, что $I_{\text{пред}} \approx 10^8$ а. Для фокусировки пучка потребуются импульсные магнитные поля напряженностью

$$B_0 \gtrsim (8\pi n_1 mc^2 \gamma)^{1/2},$$

т. е. при $n_1 \approx 10^{17}$ см⁻³ (что соответствует току $I \approx 10^8$ а) $B_0 \gtrsim 5 \cdot 10^6$ гс. Такие поля на сегодняшний день технически вполне достижимы.

Вторая проблема, для решения которой сильноточные электронные пучки открывают большие перспективы, — это проблема коллективного ускорения ионов и создание ускорителей тяжелых частиц в области энергий ~ 100 — 1000 Мэв при среднем токе ~ 1 — 10 а. Первые эксперименты³ по инжекции сильноточного электронного пучка в газ показали, что на фронте ионизации газа пучком происходит захват и ускорение ионов. Механизм этого явления, основанный на понятии предельных токов в некомпенсированных и компенсированных электронных пучках, предложенный в работах⁴, хорошо объясняет качественные особенности наблюдаемого ускорения ионов.

Третья важная область науки, в развитии которой релятивистские электронные пучки могут сыграть определяющую роль, — это плазменная электроника. Она возникла после работ Ахизера и Файнберга⁵, открывших явления возбуждения электромагнитных волн при взаимодействии электронного пучка с плазмой. Теоретическое рассмотрение задачи о взаимодействии ультрарелятивистского моноэнергетического электронного пучка с плазмой дает следующие значения для к. п. д. генерации электромагнитных волн пучком и относительной ширины линии генерации^{2б}:

$$\eta \approx (n_1/2n_2)^{2/3}, \quad \Delta\omega/\omega \approx (n_1/2n_2)^{1/3}/\gamma,$$

причем частота излучения определяется плотностью плазмы: $\omega = 5 \cdot 10^4 n_2^{1/2}$ сек⁻¹. При токах пучка $I \approx 10$ ка и энергии $\mathcal{E} \approx 30$ — 50 Мэв возможно создание импульсных излучателей электромагнитных волн сантиметрового и миллиметрового диапазонов с относительной шириной $\Delta\omega/\omega \approx 10^{-2}$ — 10^{-3} . Создание таких излучателей — вполне реальная на сегодняшний день задача.

Одной из интереснейших проблем современной физики является проблема фазовых переходов при высоких давлениях. Для решения этой проблемы релятивистские электронные пучки также могут иметь существенное значение. Как указывается в работе⁶, с помощью релятивистских пучков можно создать в твердом теле импульсные давления в несколько миллионов бар при относительно низких температурах среды и затем исследовать таким путем возможности получения металлического водорода.

Наконец, отметим, что сильноточные мощные электронные пучки являются прекрасными источниками направленного рентгеновского излучения. При торможении электронного пучка с энергией ~ 20 — 30 Мэв при токе $I \approx 10^6$ — 10^7 а примерно 1% энергии переходит в энергию рентгеновского излучения. Мощность такого рентгеновского источника могла бы составлять 10^{12} вт при направленности $\theta \approx 1^\circ$. А при инжекции такого пучка в плотный газ возможна даже генерация стимулированного рентгеновского излучения.

Перечень возможных применений сильноточных электронных пучков для решения различных проблем физики можно было бы продолжить, включая сюда создание инжекторов для современных ускорителей, зондирование ионосферы и создание искусственных северных сияний и др. Достаточно, однако, заметить, что само взаимодействие с веществом таких пучков, в которых магнитная энергия поля тока намного превосходит кинетическую энергию частиц, — совершенно не изведанная область физики, и эта область таит в себе немало интересных открытий.

ЛИТЕРАТУРА

1. F. Winterberg, Phys. Rev. **174**, 212 (1968).
2. Л. С. Богданкович, А. А. Рухадзе, а) УФН **103**, 609 (1971); б) Конференция по теории плазмы (Киев, 19—23 октября 1971 г.). Аннотации докладов, Киев, 1971, стр. 45.
3. S. E. Graybill, J. R. Uglum, J. Appl. Phys. **41**, 236 (1970); J. Runder et al., Phys. Rev. Lett. **24**, 283; **25**, 393 (1970).
4. N. Rostoker, Bull. Am. Phys. Soc. II, **14**, 1047 (1969); С. Е. Росинский, В. Г. Рухлин, А. А. Рухадзе, Письма ЖЭТФ **14**, 53 (1971).
5. А. И. Ахизер, Я. Б. Файнберг, ДАН СССР **69**, 555 (1949).
6. О. В. Богданкевич, А. А. Рухадзе, Письма ЖЭТФ **13**, 517 (1971).