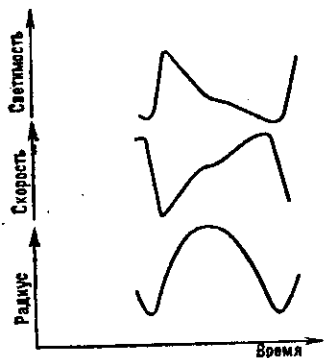


дни нарастание амплитуды колебаний не будет происходить неограниченно, при определ. амплитуде достигается баланс между раскачивающим действием зоны ионизации и затуханием в более глубоких областях, и в дальнейшем колебания происходят с пост. амплитудой. Рассчитанные амплитуды установившихся пульсаций цефеид и звезд типа RR Лирь согласуются с наблюдаемыми значениями. Для моделей звезд типа  $\delta$  Щита раскачивающий эффект зон ионизации при амплитудах, близких к наблюдаемым, ещё далёк от насыщения, и предполагают, что ограничение амплитуды пульсаций этих звезд связано с взаимодействием разл. мод колебаний, в данном случае с перекачкой энергии от неустойчивых мод к устойчивым.

Типичное для классич. цефеид и звезд типа RR Лирь поведение поверхностных характеристик при установившихся нелинейных пульсациях показано на рис. Вариации светимости или блеска определяются в осн. изменениями эфф. темп-ры, достигающими для этих звезд ок. 1500 К. Кривая лучевой (радиальной) скорости является приблизительно зеркальным отражением

Изменение поверхностных характеристик модели звезды  $\delta$  Цефея при установившихся пульсациях (по результатам нелинейных расчётов). Амплитуда колебаний блеска составляет 1,2 звездной величины, лучевой скорости — 40 км/с, радиуса — 13% относительная амплитуда). Поведение кривых и оценки амплитуд качественно согласуются с наблюдениями.



кривой блеска. Поэтому звезда оказывается наиб. яркой не в момент наиб. сжатия, как можно было бы ожидать из простейших соображений, а при прохождении равновесного состояния во время последующего расширения. Данный эффект, называемый фазовым запаздыванием, связан с быстрым перемещением зоны ионизации водорода по звездному веществу в фазе макс. сжатия, благодаря чему эта зона примерно через четверть периода наиб. близко подходит к поверхности. Из теории лучистого переноса в звездных атмосферах следует, что светимость звезды тем больше, чем меньше масса слоя, лежащего над областью ионизации водорода. Из-за асимметрии кривых типичное фазовое запаздывание составляет не четверть, а 0,1—0,2 периода. Теория радиальных колебаний, возбудимых ионизац. механизмами, хорошо объясняет осн. особенности П. з. в полосе неустойчивости: периоды и амплитуды пульсаций, характер изменений блеска и лучевой скорости и их взаимосвязь, положение и наклон самой полосы неустойчивости. Анализ нелинейного взаимодействия мод вследствие простого или параметрич. резонанса позволяет понять такие эффекты, как модуляция амплитуды колебаний, двухпериодич. пульсации нек-рых цефеид и др. Пульсации долгопериодич., полуправильных и неправильных переменных изучены значительно хуже из-за трудностей, связанных со сложным взаимодействием пульсаций и конвекции, с сильными нелинейными эффектами, приводящими к образованию ударных волн и пульсац. потере массы, с проблемами переноса излучения в холодных протяженных атмосферах, с высокой степенью неадиабатичности пульсаций вследствие соизмеримых динамической и тепловой шкал времени для этих звезд (см. *Эволюция звезд*). Нелинейные эффекты могут приводить также к трансформации правильных колебаний в хаотические, напр. через последоват. удвоение периода.

Нерадиальные пульсации звезд. Переменность белых карликов, др. горячих вырожденных звезд, нек-рых переменных типа  $\beta$  Цефея, звезд спектрального класса В с перем. профилями спектральных линий, нек-рых магн. звезд с аномалиями хим. состава вызвана, вероятно, их нерадиальными колебаниями. Наряду с нетривиальной геом. формой нерадиальные колебания звезд отличаются от радиальных ещё рядом особенностей. Нерадиальный аналог радиальных пульсаций — акустические, или  $p$ -моды, обусловленные эффектами сжимаемости вещества. Для этих мод систематика периодов (в частности, увеличение собств. частоты с возрастанием порядка обертона) и распределение амплитуд вдоль радиуса (характер негомологии колебаний, расположение узлов) подобны радиальным пульсациям. Др. ветвь частотного спектра нерадиальных колебаний — гравитационные, или  $g$ -моды, аналогичные внутр. гравитац. волнам в океане и земной атмосфере и обусловленные эффектами плавучести. Их периоды больше периодов радиальных и нерадиальных акустич. мод и растут с увеличением порядка моды. Относит. амплитуды колебаний в недрах, как правило, больше, чем во внеш. слоях; в недрах же локализованы узлы и пучности обертонов. Типичные периоды наблюдаемых осциллирующей белых карликов составляют 100—1000 с, их можно объяснить только гравитац. колебаниями, т. к. периоды радиальных пульсаций этих звезд не превышают неск. секунд. На нерадиальный характер пульсаций др. звезд указывают, в частности, выявленные из наблюдений и предсказываемые теорией закономерности частотного спектра мультипериодич. пульсаций, напр. эквидистантность частот высоких акустич. обертонов.

Наряду с классич. ионизац. механизмами возбуждения П. з. определ. роль может играть возбуждение посредством термоядерных реакций, сильно чувствительных к темп-ре; предложен также ряд механизмов, обусловленных конвекцией и магн. полем.

Солнце также является своеобразной пульсирующей звездой, испытывающей разл. виды радиальных и нерадиальных колебаний с периодами от неск. минут до неск. часов. Общее число уверенно идентифицированных собств. колебаний составляет более тысячи. В силу того, что частоты разл. мод по-разному чувствительны к распределению вещества вдоль радиуса, наблюдаемая совокупность колебаний позволяет проводить «сейсмическое зондирование» солнечных недр (см. *Солнечная сейсмология*).

Лит.: Жеванкин С. А., Теория звездных пульсаций, в кн.: Пульсирующие звезды, М., 1979; Nonradial oscillations of stars, Токио, 1979; Кокс Дж., Теория звездных пульсаций, пер. с англ., М., 1983; Северный А. Б., Некоторые проблемы физики Солнца, М., 1988.

**ПУЧКОВАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ** — одна из наиб. распространенных неустойчивостей в плазме, обусловленная резонансным взаимодействием пучка заряж. частиц, движущегося в плазме, с возбуждаемыми им волнами. П. н. предсказана А. И. Ахпезером, Я. Б. Файнбергом (1949), а также независимо Д. Бомом (D. Bohm), Е. Гроссом (E. Gross, 1949) и экспериментально обнаружена И. Ф. Харченко, Я. Б. Файнбергом, Е. А. Корниловым, А. К. Березиным и др. (1957—1958).

П. н. заключается в том, что при первоначально невозмущенном движении пучка с пост. плотностью и скоростью через плазму существующие в нём и в плазме флуктуации плотности заряда и порождаемые ими эл.-статич. или эл.-магн. поля самопроизвольно нарастают и распространяются в виде волн с экспоненциально увеличивающейся амплитудой. Экспоненциальный рост имеет место только на начальной, линейной стадии развития П. н., в дальнейшем ряд нелинейных процессов ограничивает этот рост. Возникновение неустойчивости в системе плазма — пучок оказывается возможным, т. к. она неравновесна; неравновесность создаётся пучком, из к-рого черпается энергия воз-