

как бы в условиях полной теплоизоляции, без теплообмена с окружающими слоями. Анализ адиабатич. П. з. не может дать информации о пульсациях, устойчивости звезды, т. е. о нарастании или затухании малых колебаний с течением времени. Однако такой анализ обычно даёт хорошее описание механич. свойств звезды, в частности весьма точные значения периодов и правильное представление о распределении амплитуды пульсаций вдоль радиуса.

Возбуждение пульсаций звёзд. Хотя неадиабатич. эффекты малы, они приводят к медленному изменению амплитуды П. з. Если в момент наиб. сжатия выделенный в звезде слой получает нек-рое кол-во теплоты, то последующее расширение будет происходить при большем давлении, чем сжатие. В результате работа, совершённая слоем за цикл колебаний, будет положительной, т. е., как и в любой тепловой машине, будет иметь место превращение тепловой энергии в механическую. Такой слой будет вносить вклад в возбуждение (раскачку) колебаний. Если же в момент наиб. сжатия слой теряет теплоту, то он вносит вклад в затухание колебаний. Если суммарная работа всех слоёв в звезде за цикл колебаний положительна, то звезда пульсационно неустойчива (колебания нарастают), в противном случае — устойчива (колебания затухают).

Накопление или потеря теплоты выделенным слоем звёздного вещества (если в слое нет источников энергии) зависит от того, какое изменение претерпевает идущий через слой поток излучения. В большинстве звёзд поток излучения в момент наиб. сжатия возрастает в направлении от центра к поверхности, т. е. через внеш. границу выделенного слоя выходит больше теплоты, чем поступает в слой через внутр. границу. Каждый слой в момент наиб. сжатия теряет теплоту и способствует затуханию колебаний (звезда устойчива). Такое поведение потока излучения обусловлено в осн. изменениями коэф. непрозрачности звёздного вещества κ ($\kappa = a/\rho$, где a — поглощения коэффициент). Обычно при сжатии κ уменьшается, причём из-за негомолгичности колебаний уменьшение на внеш. границе выделенного слоя будет большим, чем на внутренней, и поэтому слой будет терять теплоту. Нек-рый отток тепла из слоя при сжатии может иметь место и при постоянном κ .

Существование большого числа длительно пульсирующих звёзд указывает на то, что в пульсирующей звезде должен постоянно действовать механизм раскачки колебаний. Для классич. переменных звёзд (цефеид, переменных типа RR Лиры и др. звёзд в полосе неустойчивости, см. Герцшпрунга — Расселла диаграмма) самым эффективным оказывается действие зон частичной ионизации водорода и гелия, особенно зоны второй ионизации гелия. Раскачивающее действие этих зон основано на том, что при сжатии они способны несколько задерживать проходящий через них поток излучения, а при расширении — наоборот, усиленно терять энергию, отдавая её внеш. слоям. Действительно, в зоне ионизации энергии, выделяющаяся при сжатии, идёт не только на нагрев газа, но и на его ионизацию. Относит. изменения плотности $\delta\rho/\rho$ связаны с относит. изменениями темп-ры $\delta T/T$ соотношением: $\delta T/T \approx (\gamma - 1)\delta\rho/\rho$. В зоне второй ионизации гелия $\gamma \approx 1,2 - 1,3$ вместо обычного значения $\gamma = 5/3 \approx 1,67$ для идеального одноатомного газа, т. е. при сжатии повышение темп-ры в зоне ионизации оказывается меньшим, чем в прилегающих более глубоких слоях. Для заданного коэф. непрозрачности поток излучения $\sim T^4$, поэтому при сжатии в зоне ионизации произойдёт задержка потока излучения, идущего изнутри. Данный эффект, связанный с прямым влиянием темп-ры на поток излучения, наз. γ -механизмом. Значительную, если не основную, роль играют и изменения непрозрачности. Коэф. непрозрачности зависит от T и ρ по закону $\kappa \sim \rho^m T^{-s}$ ($m \approx 0,8 - 1,0$; $s \approx 3 - 4$). Из-за малых вариаций темп-ры в зоне ионизации при П. з. измене-

ния κ определяются в осн. изменениями плотности, т. е. при сжатии κ увеличивается (в др. областях звезды κ уменьшается из-за сильного повышения темп-ры). Поток излучения обратно пропорционален κ , поэтому из-за увеличения κ в зоне ионизации при сжатии также произойдёт задержка излучения. Этот эффект наз. γ -механизмом. Рассмотренные механизмы не являются независимыми, их разделение довольно искусственное.

Эффекты изменений темп-ры и непрозрачности сами по себе ещё недостаточны для обеспечения раскачки П. з. Во внутр. частях зоны ионизации, где γ уменьшается в направлении от центра (достигая минимума около середины зоны), происходит задержка потока излучения при сжатии; во внешних же частях этой зоны, где γ увеличивается в направлении от центра, при сжатии может происходить усиленный отток тепла, т. е. будет вклад в затухание П. з. Суммарный раскачивающий эффект зоны ионизации может оказаться малым или вообще отсутствовать. Из-за очень низкой плотности самых внеш. слоёв их пульсации характеризуются сильным теплообменом между отд. слоями, и оказывается, что такие разреженные слои не способны эффективно задерживать проходящий через них поток излучения: в любой момент времени выделенный слой теряет через свою внеш. границу столько же энергии, сколько получает изнутри. Т. о., самые внеш. слои не вносят никакого вклада в возбуждение или затухание П. з.

Следовательно, для создания заметного раскачивающего эффекта зона ионизации должна располагаться на нек-рой оптим. глубине под поверхностью звезды, так, чтобы в её внутр. части происходило сильное возбуждение пульсаций и в то же время во внеш. части и выше неё благодаря неадиабатич. эффектам практически отсутствовало затухание. Именно такая ситуация, по-видимому, реализуется в зоне He II \rightleftharpoons He III переменных звёзд. Вторая ионизация гелия происходит при темп-ре ок. $4 \cdot 10^4 K$ (в середине зоны). Поэтому в звёздах с разной эффективной температурой T_e зона ионизации расположена на разл. глубине под поверхностью. Если она слишком близка к поверхности (T_e слишком велика), то колебания всей зоны характеризуются сильной неадиабатичностью и зона не вносит вклада в возбуждение П. з. Если же зона лежит слишком глубоко (T_e слишком мала), неадиабатич. эффекты малы по всей зоне, и поэтому раскачивающее действие внутр. части компенсируется затуханием во внеш. части. Т. о., должен существовать довольно узкий диапазон значений T_e , для к-рого возможно возбуждение пульсаций в зоне второй ионизации гелия. Существование на диаграмме Герцшпрунга — Расселла узкой, почти вертикальной полосы неустойчивости, населённой переменными звёздами, служит доказательством эфф. действия рассмотренного ионизац. механизма в классич. переменных звёздах.

Аналогично зоне второй ионизации гелия могут действовать зоны ионизации водорода и первой ионизации гелия, особенно в относительно холодных звёздах. Однако в оболочках холодных звёзд перенос энергии осуществляется преим. конвекцией, к-рая, по-видимому, препятствует возбуждению П. з. Почти несомненно, что именно появление эфф. конвекции во внеш. слоях звёзд и определяет положение низкотемпературной границы полосы неустойчивости на диаграмме Герцшпрунга — Расселла.

Нелинейные пульсации звёзд. Анализ пульсаций устойчивости звезды относительно малых возмущений (линейный анализ устойчивости) не даёт представления об амплитуде установившихся П. з., а также о форме кривых блеска (зависимостей блеска от времени) и лучевой скорости. Зависимость эффективности механизмов возбуждения и затухания от амплитуды колебаний исследуется в нелинейной теории П. з. Из-за конечной поглощат. способности зон частичной ионизации