

эволюции П. Ранее считалось, что П. по истечении времени $\sim 2t_0$ выключается как радиисточник [$t_0 \approx (2-3) \cdot 10^8$ лет — ср. возраст П.]. Согласно теории *тесных двойных звёзд*, П. должны образоваться раньше, чем белый карлик. Следовательно, PSR 0655 + 64, входящий в двойную систему со старым белым карликом, должен иметь возраст $\geq 2 \cdot 10^9$ лет, т. е. более чем в 100 раз больше ср. возраста П.

П. концентрируются к плоскости Галактики. Пространственная плотность П. ρ изменяется с расстоянием z от галактич. плоскости по закону: $\rho(z) = \rho_0 \exp(-|z|/230)$. Здесь z в пк, ρ_0 — плотность П. в плоскости Галактики.

Одним из замечат. свойств П., отличающих их от остальных астр. объектов, является чрезвычайно высокая *яркостная температура* T_b их радиоизлучения. Действительно, размер l области излучения не превышает величину $c\Delta t \sim 3 \cdot 10^6 - 3 \cdot 10^8$ см ($\Delta t = 10^{-4} - 10^{-2}$ с — длительность импульса), т. е. меньше диаметра Земли. При радиосветимости П. $\sim 10^{25} - 10^{30}$ эрг/с это соответствует яркостной темп-ре $10^{25} - 10^{31}$ К. У объектов, известных до открытия П., величина T_b не превосходила $10^{15} - 10^{16}$ К. Во время коротких всплесков радиоизлучения П. их яркостная темп-ра достигает значений $10^{30} - 10^{31}$ К. Столь высокая яркостная темп-ра указывает на то, что радиоизлучение П. генерируется за счёт какого-то когерентного механизма.

Теория пульсаров. Сразу после открытия П. было высказано предположение о том, что они являются вращающимися *нейтронными звёздами* с магн. полем на их поверхности $\sim 10^{12}$ Гс. Данная модель П. общепризнана. Согласно этой модели, излучение П. сильно анизотропно и испускается в малом телесном угле. При вращении нейтронной звезды наблюдатель, попадающий в диаграмму направленности излучения П., видит импульсы излучения, повторяющиеся с периодом, равным периоду вращения звезды. Высокой стабильностью периода вращения нейтронной звезды и объясняется высокая стабильность периода повторения импульсов излучения П. Медленное увеличение периода П. обусловлено потерей энергии вращения нейтронной звезды:

$$L = d\mathcal{E}_{\text{кин}}/dt = -I\Omega d\Omega/dt,$$

где $\mathcal{E}_{\text{кин}} = I\Omega^2/2$ — кинетич. энергия вращения нейтронной звезды с моментом инерции I ($\sim 10^{45}$ г·см²), вращающейся с угл. скоростью $\Omega = 2\pi/P$. Эта энергия трансформируется в энергию нетеплового излучения П. в следующей последовательности процессов: вращение нейтронной звезды; возникновение вследствие *униполярной индукции* сильного электрич. поля в окрестности нейтронной звезды; ускорение частиц в электрич. поле до ультрарелятивистских энергий; генерация γ -излучения при движении ультрарелятивистских частиц вдоль искривлённых магн. силовых линий (см. *Изгибное излучение*); поглощение γ -квантов в сильном магн. поле и рождение электрон-позитронных пар; развитие плазменных неустойчивостей в сильноравновесной ультрарелятивистской электрон-позитронной плазме; генерация нетеплового излучения П. Концентрация электрон-позитронной плазмы вблизи поверхности П. $\sim 10^{13} - 10^{19}$ см⁻³ и убывает при удалении от П. пропорционально напряжённости его магн. поля. Энергии электронов и позитронов плазмы от $10 m_e c^2$ до $10^4 m_e c^2$. Ультрарелятивистская плазма пронизывается либо электронным, либо позитронным пучком частиц с энергией $(10^8 - 10^7) m_e c^2$ и концентрацией в $10^3 - 10^4$ раз меньшей, чем концентрация плазмы. В сильном магн. поле П. электроны и позитроны плазмы и пучка из-за потерь на синхротронное излучение практически мгновенно теряют перпендикулярную магн. полю составляющую импульса и истекают из окрестностей нейтронной звезды, двигаясь почти вдоль магн. силовых линий. Т. о., электроны и позитроны имеют сильноравновесные одномерные ф-ции распределения по импуль-

сам. В такой плазме могут, в принципе, развиваться двухпоточковая, циклотронная, филаментационная, дрейфовая и др. *неустойчивости плазмы*. Пока неясно, какие неустойчивости развиваются в действительности и приводят к генерации радиоизлучения.

Наблюдения П. используются для решения большого числа актуальных проблем физики и астрофизики. Напр., при наблюдении PSR 1913 + 16, входящего в тесную двойную систему, впервые было получено косвенное подтверждение генерации *гравитационных волн*. Вследствие потерь энергии двойной системой на гравитац. излучение происходит сближение PSR 1913 + 16 и его звезды-компаньона. При этом орбитальный период системы уменьшается. Это уменьшение происходит в соответствии с общей теорией относительности, чем и подтверждается применимость данной теории для описания процесса генерации гравитац. волн. Из анализа времени прихода импульсов оптич. излучения PSR 0531 + 21 на разных частотах был получен верх. предел на изменение скорости света с изменением частоты: $\Delta c/c \leq 10^{-16}$. Этот предел на неск. порядков ниже полученного в лаб. условиях. По запаздыванию импульсов радиоизлучения PSR 0531 + 21 на разных частотах получено также ограничение на массу покоя реального фотона: $m_\gamma < 10^{-44}$ г. Данное ограничение более слабое, чем полученное из анализа земного магн. поля, однако анализ земного магнетизма даёт ограничение на массу виртуальных фотонов. Благодаря широкополосности, сильной линейной поляризации и импульсному характеру излучения П. являются идеальными зондами для исследования межзвёздной среды, самой природой разбросанными по объёму Галактики. С помощью наблюдений П. было найдено, напр., что ср. концентрация электронов в межзвёздной среде равна $0,03 \pm 0,1$ см⁻³. Было установлено также, что галактич. магн. поле однородно в масштабах > 1 кпк и в ср. составляет $(2,2 \pm 0,4) \cdot 10^{-6}$ Гс.

Лит.: Манчестер Р., Тейлор Д., Пульсары, пер. с англ., М., 1980; Taylor J. H., Stinebring D. R., Recent progress in the understanding of pulsars, «Ann. Rev. Astr. Astroph.», 1986, в. 24, р. 285.

В. В. Усов.

ПУЛЬСАЦИИ ЗВЁЗД — собственные колебания звёзд, проявляющиеся в их периодич. расширении и сжатии. Простейший вид собств. колебаний звезды — радиальные сферически-симметричные пульсации. В общем случае нерадиальных колебаний меняется и форма звезды, напр. звезда периодически принимает форму то вытянутого, то сплюснутого эллипсоида. Пульсации обуславливают переменность цефеид, звёзд типа RV Тельца, RR Лиры, δ Кита, β Цефея, ZZ Кита и нек-рых др. типов физ. *переменных звёзд*.

Большинство звёзд обладает значит. концентрацией массы к центру: плотность вещества в центре на неск. порядков превышает ср. плотность звезды. Как следствие, П. з. негомологичны: относит. амплитуда колебаний в центре намного меньше, чем на поверхности.

Период P собств. колебаний звезды определяется в основном ср. плотностью вещества звезды $\bar{\rho}$. Теоретич. соотношение имеет вид $P \sqrt{\bar{\rho}} = \text{const}$, где постоянная различна для разных мод и немного зависит от распределения вещества внутри звезды. Периоды большинства перемен. звёзд согласуются с гипотезой радиальных колебаний в осн. моде (это колебание не имеет узлов вдоль радиуса), но у нек-рых звёзд наблюдаются пульсации в обертонах или даже в неск. модах, в т. ч. нерадиальных. Для звёзд конкретного типа переменности, напр. типа RR Лиры, подобных друг другу по структуре, соотношение период — ср. плотность выполняется хорошо.

В пульсирующей звезде, за исключением её самых внеш. областей, колебания происходят почти адиабатически, в том смысле, что в течение цикла колебаний любой выделенный в звезде слой никак не изменяет проходящий через него поток излучения и пульсирует