

способность энергии создавать гравитац. поле и искривление пространства при наличии сильного гравитац. поля, — определяют существование макс. массы M . з. $M_{\text{макс}}$ при конечной центр. плотности $\rho_{\text{с,макс}}$. Значения $M_{\text{макс}}$ и $\rho_{\text{с,макс}}$ зависят от вида ур-ния состояния при сверхядерных плотностях $\rho \gtrsim \rho_n$, поскольку существ. часть вещества N . з. с массой, близкой к $M_{\text{макс}}$, оказывается сжатой именно до таких больших плотностей. Определение $P(\rho)$ в этом случае представляет очень сложную задачу ядерной физики и физики элементарных частиц, для решения к-рой необходимы детальные сведения о взаимодействиях нейтронов, протонов и появляющихся при сверхядерных плотностях мезонов и гиперонов. Различные реалистич. модели сверхплотного вещества приводят к $M_{\text{макс}} = (1,4-2,7) M_{\odot}$ и $\rho_{\text{с,макс}} = (1,4-6) \cdot 10^{15}$ г/см³ соответственно (масса Солнца $M_{\odot} = 1,99 \cdot 10^{33}$ г). Без учёта упомянутых эффектов ОТО и в предположении, что $P(\rho)$ определяется при любых плотностях свойствами вырожденного газа невзаимодействующих нейтронов, масса N . з. была бы ограничена значением $M_{\text{макс}} = 5,73 M_{\odot}$ — т. н. *Чандрасекара пределом* для нейтронного газа, причём $M_{\text{макс}}$ соответствовала бы бесконечной центральной плотности. Решение задачи о структуре N . з. с тем же ур-нием состояния газа нейтронов, но в рамках ОТО даёт $M_{\text{макс}} \approx 0,7 M_{\odot}$ и $\rho_{\text{с,макс}} \approx 6 \cdot 10^{15}$ г/см³. В данном случае эффекты ОТО уменьшают предельную массу N . з. более чем в 8 раз.

Эксперим. данные физики высоких энергий показывают, что с уменьшением расстояния между нуклонами *ядерные силы* притяжения сменяются силами отталкивания. Поэтому при плотностях $\rho \gtrsim \rho_n$ давление вещества N . з. оказывается больше, чем газа невзаимодействующих нейтронов, т. е. способность звёздного вещества противодействовать сжимающей его силе тяжести увеличивается. В результате $M_{\text{макс}}$ повышается до указанных выше пределов $(1,4-2,7) M_{\odot}$. Кроме того, отталкивание нуклонов с избытком компенсирует эффект, замедляющий рост давления с увеличением плотности, — рождение новых частиц (мезонов, гиперонов). Разброс предсказываемого значения $M_{\text{макс}}$ связан с трудностью построения количеств. теории сверхплотного вещества.

Мин. масса N . з. $M_{\text{мин}} \approx 0,1 M_{\odot}$ ($\rho_{\text{с,мин}} \approx 2 \cdot 10^{14}$ г/см³). Плотность вещества внутри N . з. с массами, близкими к $M_{\text{мин}}$, меньше ядерной. Используемое в этом случае ур-ние состояния основывается на богатом эксперим. материале и поэтому даёт достаточно точное значение $M_{\text{мин}}$. Сам факт существования мин. массы N . з. связан с тем, что при низких плотностях нейтроны n в силу подверженности *бета-распаду* ($n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$) уже не могут быть преобладающим компонентом вещества. При характерных для N . з. (в случае $M > M_{\text{мин}}$) высоких плотностях нейтроны устойчивы и не распадаются, поскольку уже небольшой примеси протонов (p) и электронов (e^-) достаточно, чтобы в соответствии с *Паули принципом* эти частицы воспрепятствовали распаду остальных нейтронов.

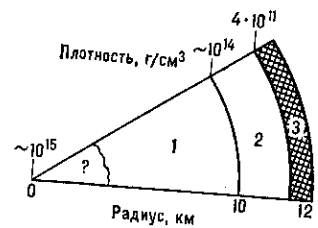
Структура N . з. Радиусы N . з. уменьшаются с ростом массы от $R \approx (100-200)$ км при $M \approx M_{\text{мин}}$ до $R \approx (7-14)$ км при $M \approx M_{\text{макс}}$. Осн. характеристика типичной N . з. приведены в таблице, а её структура изображена на рис. 2.

Основные характеристики типичной нейтронной звезды с массой $M = 1,3 M_{\odot}$

Радиус	$R = 16 - 8$ км
Гравитац. радиус	$r_g = 2GM/c^2 = 3,9$ км
Плотность в центре	$\rho_c = 4 \cdot 10^{14} - 3 \cdot 10^{16}$ г/см ³
Мин. период вращения	$T_{\text{мин}} = (10 - 3) \cdot 10^{-4}$ с
Момент инерции	$I = (2 - 0,6) \cdot 10^{46}$ г·см ²
Гравитац. красное смещение	$z = 0,15 - 0,39$
Гравитац. дефект массы	$\Delta M = (0,08 - 0,18) M_{\odot}$
	$c^2 \cdot \Delta M = (1,4 - 3,2) \cdot 10^{48}$ эрг

Разброс величин в табл. отражает неопределённость ур-ния состояния сверхплотного ($\rho \gtrsim \rho_n$) вещества. Мин. период вращения соответствует равенству гравитац. и центробежной сил на экваторе звезды. В сильном гравитац. поле N . з. становится заметным т. н. гравитац. *красное смещение* z — относит. увеличение всех длин волн эл.-магн. излучения с поверхности N . з., регист-

Рис. 2. Примерный схематический разрез нейтронной звезды: 1 — жидкое ядро, состоящее из вырожденных нейтронов с малой примесью вырожденных протонов и электронов; 2 — внутренняя кора, образованная атомными ядрами, переобогащёнными нейтронами (присутствуют также вырожденные электроны и малая примесь свободных нейтронов); 3 — внешняя кора из образующих кристаллическую решётку атомных ядер и вырожденных электронов. Знак вопроса означает неопределённость свойств сверхплотного вещества.



рируемых далёким наблюдателем [энергия соответствующих фотонов уменьшается в $(1+z)$ раз]. Определение z для N . з. по их рентг. и гамма-спектрам (именно в этих диапазонах эл.-магн. волн можно ожидать наиб. интенсивного излучения поверхности N . з.) представляет собой очень важную, хотя и трудную, задачу совр. астрономии. В силу соотношения $1+z = 1/\sqrt{1-r_g/R}$ значение z определяет один из гл. параметров N . з. — отношение *гравитационного радиуса* $r_g = 2GM/c^2$ (здесь G — гравитац. постоянная) к фактич. радиусу R . Др. важный параметр — гравитац. *дефект массы* ΔM — может быть в принципе измерен методами нейтринной астрономии (см. *Нейтронная астрофизика*), поскольку соответствующая ему энергия $\Delta M_{\odot} \cdot c^2$ выделяется в процессе образования N . з. преим. в виде нейтрино (и антинейтрино) всех трёх типов.

Самые наружные слои не очень молодой и успевшей достаточно остыть N . з. состоят, по-видимому, из Fe с возможной примесью Cr, Ni, Co, к-рые образуют твёрдую внеш. кору звезды (рис. 2). Плотность вещества быстро увеличивается в глубь звезды и уже на глубине неск. сотен метров достигает $4 \cdot 10^{11}$ г/см³. При такой плотности осн. компонентом вещества оказываются ядра железа и соседних с ним элементов в таблице Менделеева, сильно переобогащённые нейтронами. Поэтому под внеш. корой N . з. должна находиться твёрдая насыщенная нейтронами внутр. кора, к-рая граничит с жидким ядром, состоящим в осн. из вырожденных нейтронов с малой примесью вырожденных протонов и электронов. Если центр. плотность N . з. превышает $\sim 10^{15}$ г/см³, то вблизи центра звезды вещество содержит помимо нуклонов и электронов также мезоны, гипероны и др. элементарные частицы. Свойства сверхплотного вещества при $\rho > \rho_n$, пока ещё известны недостаточно точно. Теоретич. расчёты показывают, что вблизи центра N . з. (особенно звёзд с $M \approx M_{\text{макс}}$) возможны такие эффекты, как появление пионного конденсата, переход нейтронной жидкости в твёрдое кристаллич. состояние и даже образование кварк-глюонной и гиперонной плазмы. Большое значение для физики N . з. имеет *сверхтекучесть* нейтронного компонента звёздного вещества, возможная в жидком ядре и во внутр. коре, а также *сверхпроводимость* протонного компонента при плотностях, близких к ядерным.

Образование N . з. Происходит в процессе *гравитационного коллапса* на конечных стадиях эволюции достаточно массивных обычных звёзд (см. *Эволюция звёзд*). Медленная, длящаяся десятки и сотни млн. лет эволюция массивных равновесных звёзд (с массой, по крайней мере в неск. раз превышающей M_{\odot}) может привести к тому, что масса их центр. областей, сильно сжавшихся и исчерпавших запасы ядерного горючего,