

тия вещества увеличивается и оно приобретает большую скорости расширения. Расширение выброшенного вещества сопровождается адиабатич. охлаждением и, следовательно, уменьшением внутр. энергии. Адиабатич. охлаждение определяется гл. обр. радиусом звезды накануне вспышки: чем больше радиус, тем меньше адиабатич. потери внутр. энергии и выше светимость С. з. Поэтому наблюдаемые светимости С. з. могут быть получены при нач. радиусах, сопоставимых с радиусом фотосферы в максимуме блеска ($\sim 10^4 R_{\odot}$). Для значительно меньших нач. радиусов необходимо предполагать существование дополнит. источника энергии, к-рый в процессе расширения вещества непрерывно компенсирует адиабатич. потери. Таким источником энергии является распад радиоакт. изотопа никеля в кобальт и далее в железо. Каждый распад сопровождается излучением неск. гамма-квантов с энергией ~ 1 МэВ, к-рая преобразуется в тепловую энергию при их взаимодействии с веществом.

Звёзды, вспыхивающие как С. з. I типа, в ходе эволюции потеряли богатые водородом слои и имеют радиусы ($\sim 0,01 R_{\odot}$), значительно уступающие радиусу фотосферы в максимуме блеска. Поэтому кривые блеска С. з. I типа полностью определяются радиоакт. источником энергии. Необходимое кол-во радиоакт. изотопа никеля $\approx 0,4-1 M_{\odot}$. Такое кол-во изотопа никеля может образоваться в результате взрыва вырожденного С-О-ядра, отвечающего вспышке С. з. I типа.

С. з. II типа (за исключением подобных SN1987A) являются результатом взрыва звёзд с радиусом ок. $5 \cdot 10^3 R_{\odot}$. Их кривые блеска до квазиэкспоненц. стадии объясняются высвечиванием внутр. энергии, запасённой при взрыве. Масса выброшенного вещества С. з. II типа ок. $5 M_{\odot}$, III типа — существенно меньше. Уникальные свойства кривой блеска SN1987A (рис. 3) — прямое следствие относительно малого нач. радиуса звезды ($30-60 R_{\odot}$), к-рому соответствуют большие адиабатич. потери и меньшая светимость (по сравнению с другими С. з. II типа). Вблизи максимума блеска и на квазиэкспоненц. стадии оптич. светимость SN1987A обеспечивается радиоакт. источником энергии. По-видимому, и в других С. з. II типа на квазиэкспоненц. стадии радиоакт. источнику энергии принадлежит доминирующая роль. Вспышки С. з. II типа, вероятнее всего, происходят при взрывах, инициированных гравитац. коллапсом невырожденных ядер звёзд.

Лит.: Шкловский И. С., Сверхновые звезды, 2 изд., М., 1976; Имшенник В. С., Надежди и Д. К., Конечные стадии эволюции звезд и вспышки сверхновых, в кн.: Итоги науки и техники, сер. Астрономия, т. 21, М., 1982; их же, Сверхновая 1987A в Большом Магеллановом Облаке: наблюдения и теория, «УФН», 1988, т. 156, в. 4, с. 561; Woosley S. E., Weaver T. A., The physics of supernova explosions, «Ann. Rev. Astron. Astroph.», 1986, в. 24, р. 205; Владимиров С. И., Лозинская Т. А., Чугаев Н. Н., Сверхновые звезды и остатки вспышек сверхновых, в кн.: Итоги науки и техники, сер. Астрономия, т. 32, М., 1987.

В. П. Утробин.

СВЕРХПРОВОДИМОСТЬ — явление, заключающееся в том, что у мя. хим. элементов, соединений, сплавов (наз. *сверхпроводниками*) при охлаждении ниже определ. (характерной для данного материала) темп-ры T_c наблюдается переход из нормального в т. н. сверхпроводящее состояние, в к-ром их электрич. сопротивление пост. току полностью отсутствует. При этом переходе структурные и оптич. (в области видимого света) свойства сверхпроводников остаются практически неизменными. Электрич. и магн. свойства вещества в сверхпроводящем состоянии (фазе) резко отличаются от этих же свойств в нормальном состоянии (где они, как правило, являются металлами) или от свойств др. материалов, к-рые при тех же темп-рах в сверхпроводящее состояние не переходят.

Явление С. открыто Г. Камерлинг-Оннесом (H. Kamerlingh-Onnes, 1911) при исследовании низкотемпературного хода сопротивления ртути. Он обнаружил,

что при охлаждении ртутной проволоки ниже 4 К её сопротивление скачком обращается в нуль. Нормальное состояние может быть восстановлено при пропускании через образец достаточно сильного тока [превышающего критический ток $I_c(T)$] или помещением его в достаточно сильное магн. поле [превышающее критическое магнитное поле $H_c(T)$].

В 1933 Ф. В. Мейснером (F. W. Meissner) и Р. Оксенфельдом (R. Ochsenfeld) обнаружено др. важнейшее свойство, характерное для сверхпроводников (см. *Мейснера эффект*): внеш. магн. поле, меньшее нек-рого критич. значения (зависящего от типа вещества), не проникает в глубь сверхпроводника, имеющего форму бесконечного сплошного цилиндра, ось к-рого направлена вдоль поля, и отлично от нуля лишь в тонком поверхностном слое. Это открытие позволило Ф. и Г. Лондонам (F. London, H. London, 1935) сформулировать феноменологич. теорию, описывающую магнитостатику сверхпроводников (см. *Лондонов уравнение*), однако природа С. оставалась неясной.

Открытие в 1938 сверхтекучести и объяснение этого явления Л. Д. Ландау на основе сформулированного им критерия (см. *Ландау теория сверхтекучести*) для систем бозе-частиц давали основание предполагать, что С. можно трактовать как сверхтекучесть электронной жидкости, однако фермиевская природа электронов и кулоновское отталкивание между ними не позволили просто перенести теорию сверхтекучести на С. В 1950 В. Л. Гинзбург и Ландау на основе теории фазовых переходов 2-го рода (см. *Ландау теория*) сформулировали феноменологич. ур-ния, описывающие термодинамику и эл.-магн. свойства сверхпроводников вблизи критич. темп-ры T_c . Построение микроскопич. теории (см. ниже) обосновало Гинзбурга — Ландау теорию и уточнило входящие в феноменологич. ур-ния постоянные. Открытие зависимости критич. темп-ры T_c перехода в сверхпроводящее состояние металла от его изотопного состава (*изотопический эффект*, 1950) свидетельствовало о влиянии кристаллич. решётки на С. Это позволило Х. Фрелиху (H. Fröhlich) и Дж. Бардину (J. Bardeen) продемонстрировать возможность возникновения между электронами в присутствии кристаллич. решётки специфического притяжения, к-рое может преваллировать над их кулоновским отталкиванием, а впоследствии Л. Купера (L. Cooper, 1956) — возможность образования электронами связанных состояний — куперовских пар (*Купера эффект*).

В 1957 Дж. Бардином, Л. Купером и Дж. Шриффером (J. Schrieffer) была сформулирована микроскопич. теория С., к-рая объяснила это явление на основе бозеконденсации куперовских пар электронов, а также позволила в рамках простой модели (см. *Бардина — Купера — Шриффера модель*, модель БКШ) описать мн. свойства сверхпроводников.

Практич. использование сверхпроводников ограничивалось низкими значениями критич. полей (~ 1 кЭ) и темп-р (~ 20 К). В 1952 А. А. Абрикосов и Н. Н. Заварицкий на основании анализа эксперим. данных о критич. магн. полях токовых сверхпроводящих плёнок указали на возможность существования нового класса сверхпроводников (с их необычными магн. свойствами ещё в 1937 столкнулся Л. В. Шубников, одним из важнейших отличий от обычных сверхпроводников является возможность протекания сверхпроводящего тока при неполном вытеснении магн. поля из объёма сверхпроводника в широком диапазоне магн. полей). Это открытие определило в дальнейшем разделение сверхпроводников на *сверхпроводники первого рода* и *сверхпроводники второго рода*. Использование сверхпроводников 2-го рода впоследствии позволило создать сверхпроводящие системы с высокими критич. полями (порядка сотен кЭ).

Поиск сверхпроводников с высокими критич. темп-рами стимулировал исследование новых типов материалов. Были исследованы мн. классы сверхпроводящих