

Лит.: 1) Wigner E., Unitary representations of the inhomogeneous Lorentz group, «Ann. of Math.», 1939, v. 40, p. 149; 2) Терлецкий Я. П., Принцип причинности и второе начало термодинамики, «ДАН СССР», 1960, т. 133, № 2, с. 329; 3) Терлецкий Я. П., Парадоксы теории относительности, М., 1966; 4) Tanaka S., Theory of matter with superlight velocity, «Progr. Theor. Phys.», 1960, v. 24, p. 171; 5) Bilaniuk O. M. P., Deshpande V. K., Sudarshan E. C., Metarelativity, «Amer. J. Phys.», 1962, v. 30, p. 718; 6) Feinberg G., Possibility of faster-than-light particles, «Phys. Rev.», 1967, v. 159, p. 1089; 7) Recami E., Esistono i tachioni?, «Giornale di Fisica», 1969, v. 10, p. 195; 8) Recami E., Mignani R., Classical theory of tachyons, «Riv. del Nuovo Cim.», 1974, v. 4, ser. 2, p. 209; Фрёман П. О., Исторические основания тахионной концепции, «Вестник Росс. ун-та дружбы народов. Сер. физич.», 1993, № 1, с. 160. Ю. П. Рыбаков.

ТВЁРДОЕ ТЁЛО — агрегатное состояние вещества, характеризующееся стабильностью формы и характером теплового движения атомов, к-рые совершают малые колебания около положений равновесия. Различают кристаллич. и аморфные Т. т. Кристаллы характеризуются пространств. периодичностью в расположении равновесных положений атомов (см. *Дальний и ближний порядок*). В аморфных телах атомы колеблются вокруг хаотически расположенных точек. Согласно классич. представлениям, устойчивым состоянием (с мин. внутр. энергией) Т. т. является кристаллическое. Аморфное тело находится в метастабильном состоянии и с течением времени должно перейти в кристаллич. состояние, однако время кристаллизации часто столь велико, что метастабильность вовсе не проявляется (см. *Аморфное состояние, Стеклообразное состояние*).

Все вещества в природе затвердевают при атм. давлении и темп-ре $T > 0$ К. Исключение составляет He, к-рый остаётся жидким при атм. давлении вплоть до $T = 0$ К. Для кристаллизации He необходимо давление 24 атм при $T = 1,5$ К; это уникальное свойство He находит объяснение в квантовой теории Т. т. и жидкостей (см. *Гелий твёрдый*).

При исследовании *твёрдых растворов* изотопов He (под давлением) обнаружено особое состояние вещества, занимающее промежуточное положение между кристаллом и *квантовой жидкостью*. Оно получило назв. *квантового кристалла*. У обычных кристаллов волновые свойства атомов приводят к существованию колебаний кристаллич. решётки при $T = 0$ К (*нулевые колебания*), у квантовых жидкостей эти свойства полностью разрушают кристаллич. структуру, а у квантовых кристаллов волновые свойства атомов, сохраняя выделенность узлов кристаллич. решётки, допускают перемещение атомов с узла на узел (см. ниже).

Понятие «Т. т.», как и понятие «жидкость», имеет характер идеализации (модели), точнее было бы говорить о твердотельных и жидкостных свойствах конденсиров. среды. Напр., с точки зрения упругих свойств, твёрдым следует считать тело с отличным от 0 статич. модулем сдвига \mathfrak{V} (у жидкости $\mathfrak{V} = 0$). При рассмотрении пластич. свойств твёрдым следует считать тело, необратимо деформируемое лишь при конечном надпороговом напряжении (у жидкостей, даже очень вязких, типа смол, пороговое напряжение необратимой деформации равно 0).

Исследования свойств Т. т. объединились в большую область — физику Т. т., развитие к-рой стимулируется как фундам. наукой, так и потребностями техники. Около половины физиков мира работают в области физики Т. т., почти половина всех науч. физ. публикаций относится к исследованию Т. т. Физика Т. т. — источник новых материалов; новые физ. идеи, рождающиеся в физике Т. т., проникают в ядерную физику, астрофизику, биофизику и др.

Историческая справка. Накопление и систематизация данных о свойствах Т. т. (металлов, минералов и др.) начались с 17 в. Был установлен ряд эмпирич. законов, описывающих воздействие на Т. т. механич. сил, света, электрич. и магн. полей и т. д. Были открыты *Гука закон* (1678), *Дюлонга и Пти закон* (1819), *Ома закон* (1826), *Видемана — Фрэнца закон* (1853) и др. В 1-й пол. 19 в. созданы осн. концепции *упругости теории*, для к-рой ха-

рактерно представление о Т. т. как о сплошной (континуальной) среде.

Представление о кристалле как совокупности атомов, упорядоченно расположенных в пространстве и удерживаемых около положения равновесия силами взаимодействия, было в окончательном виде сформулировано О. Браве (А. Bravais) в 1848. Однако эта идея восходит ещё к трактатам Н. Стено (N. Steno, 1669) и Р. Ж. Аюи (1784), к работе И. Ньютона (I. Newton, 1686), в к-рой рассчитана скорость звука в цепочке упруго связанных частиц. Д. Бернулли (D. Bernoulli, 1727), О. Л. Коши (A. L. Cauchy, 1836) и др. В 1890 Е. С. Фёдоров и независимо А. Шёнфлис (A. Schoenflies) доказали возможность существования 230 вариантов упорядоченного расположения частиц в Т. т. (см. *Симметрия кристаллов*).

В 1912 М. Лауэ (M. Laue), П. Книппинг (P. Knipping) и В. Фридрих (W. Friedrich) открыли *дифракцию рентгеновских лучей* на кристаллах, окончательно утвердив представление о кристаллич. Т. т. как упорядоченной дискретной структуре. В 1913 У. Л. Брэгг (W. L. Bragg) и Г. В. Вульф установили соотношение, связывающее период кристаллич. решётки, длину волны рентг. излучения с направлениями дифракц. максимумов (см. *Брэгга — Вульфа условие*). На основе этого были разработаны методы эксперим. определения расположения атомов в кристаллах и измерения межатомных расстояний, что положило начало рентг. структурному анализу и др. дифракц. методам исследования структуры Т. т. В 1927 К. Дж. Дэвиссон (C. J. Davisson) и Л. Х. Джермер (L. H. Germer) наблюдали *дифракцию электронов* на кристалле. Впоследствии была обнаружена дифракция на кристалле нейтронов (см. *Нейтронная дифракция*) и др. частиц.

В дальнейшем физика Т. т. разделилась на ряд областей, обособление к-рых происходит путём выделения либо объектов исследования (физика *металлов*, физика *полупроводников*, физика магнетиков и др.), либо методов исследования свойств Т. т. (механических, тепловых и т. д.).

Квантовые представления в физике Т. т. Физика Т. т. в совр. её понимании как квантовой физики конденсиров. систем, состоящих из огромного числа частиц ($\sim 10^{23}$ в 1 см^3), начала формироваться в нач. 20 в. Одним из осн. результатов квантового подхода к исследованию свойств кристаллич. Т. т. явилась концепция *квазичастиц*. Энергию возбуждённого состояния кристалла вблизи осн. состояния можно представить в виде суммы энергий отд. квазичастиц. Это позволяет ввести понятие «газа» квазичастиц для исследования тепловых, магн. и др. свойств Т. т. и использовать представления кинетич. теории газов. Макроскопич. характеристики Т. т. при этом выражаются через характеристики квазичастиц (длину пробега, скорость и др.). Квазичастицы существуют не в свободном пространстве (как частицы в реальных газах), а в кристаллич. решётке, структура к-рой отражается в их свойствах (см. ниже).

Знание структуры Т. т. и характера движения частиц позволяет установить, какие квазичастицы ответственны за то или другое явление или свойство. Напр., высокая электропроводность металлов обусловлена *электронами проводимости*, а теплопроводность — электронами *проводимости* и *фононами*, нек-рые особенности поглощения света в Т. т. — *экситонами*, ферромагн. резонанс — *магнонами* и т. д. (см. ниже).

Отличие количественных характеристик разл. движених частиц в Т. т. позволяет отделить одно движение от другого. Независимость разл. типов движения Т. т. обусловлена малой энергией взаимодействия между квазичастицами.

Атомы и молекулы в Т. т. Структурными единицами Т. т. являются атомы, молекулы и ионы. Атомно-кристаллич. структура Т. т. зависит от сил, действующих между частицами Т. т. Одни и те же частицы могут образовывать разл. структуры (напр., серое и белое олово, графит и алмаз; см. *Полиморфизм*).

При достаточном повышении темп-ры все Т. т. плавятся (или возгоняются). Подводящая к телу в процессе плавления теплота тратится на разрыв межатомных связей. Темп-