

мике), где имеет место аномальный Д. э., сопровождается не затуханием, как при нормальном Д. э., а наоборот, усилением колебаний излучателя. В результате, если излучение на аномальных доплеровских частотах превалирует, возможна раскачка излучателя (осциллятора) за счёт энергии его поступат. движения. С аномальным Д. э. связаны, в частности, генерация волн на поверхности жидкости за счёт раскачки колебаний тела, буксируемого на упругой нити с достаточно большой скоростью, самовозбуждение колебаний в нек-рых электронных приборах и ряд др. движений в автоколебат. системах (см. *Автоколебания*). С квантовой точки зрения, аномальный Д. э. соответствует излучению фотона с одноврем. переходом осциллятора на более высокий энергетич. уровень.

Асимметрия Д. э. относительно движения источника и наблюдателя следует из того, что фазовая скорость  $v$ , входящая в ур-ние (2), вообще говоря, различна в движущейся и неподвижной среде; распространение звука по ветру идёт быстрее, чем против ветра, свет частично увлекается движущейся диэлектрич. средой и т. п. Др. словами, величина Д. э. определяется величиной и направлением скорости как источника, так и приёмника относительно среды, в к-рой распространяются волны. Исключение составляет случай эл.-магн. волн в вакууме, когда, согласно осн. постулату теории относительности,  $v=c$  во всех системах отсчёта и Д. э. полностью определяется относит. скоростью источника и приёмника.

Разновидностью Д. э. является т. н. двойной Д. э. — смещение частоты волн при отражении их от движущихся тел, поскольку отражающий объект можно рассматривать сначала как приёмник, а затем как переизлучатель волн. Если  $\omega_0$  и  $v_0$  — частота и скорость падающей на плоскую границу волн, то частоты  $\omega_i$  вторичных (отражённых и прошедших) волн, распространяющихся со скоростями  $v_i$ , оказываются равными:

$$\omega_i = \omega_0 \frac{1 - \frac{v}{v_0} \cos \vartheta_0}{1 - \frac{v}{v_i} \cos \vartheta_i}, \quad (3)$$

где  $\vartheta_{0,i}$  — углы между волновым вектором соответствующей волны и нормальной составляющей скорости  $V$  движения отражающей поверхности. Ф-ла (3) справедлива и в том случае, когда отражение происходит от движущейся границы изменения состояния макроскопически неподвижной среды (напр., волны ионизации в газе). Из неё следует, в частности, что при отражении от границы, движущейся навстречу волне, частота повышается, причём эффект тем больше, чем ближе скорость границы и скорость распространения отражённой волны друг к другу.

В случае нестационарных сред (когда параметры среды меняются во времени) изменение частоты может происходить даже для неподвижного излучателя и приёмника — т. н. параметрический Д. э.

Д. э. назван в честь К. Доплера (Ch. Doppler), к-рый впервые теоретически обосновал его в акустике и оптике (1842). Первое эксперим. подтверждение Д. э. в акустике относится к 1845. Уточнения, необходимые для наблюдения Д. э. в оптике, были сделаны А. Физо (A. Fizeau, 1848), к-рый рассмотрел, в частности, доплеровское смещение спектральных линий, обнаруженное позднее (1867) в спектрах нек-рых звёзд и туманностей. Поперечный Д. э. был обнаружен Г. Айвсом (H. Ives) и Д. Стилуэллом (D. Stilwell, 1938). Обобщение Д. э. на случай нестационарных сред принадлежит В. А. Михельсону (1899), на возможность сложного Д. э. в средах с дисперсией и аномального Д. э. при  $V \gg v$  впервые указали В. Л. Гинзбург и И. М. Франк (1942).

Д. э. позволяет измерять скорость движения источников излучения или рассеивающих волны объектов

и находит широкое практич. применение. Так, в астрофизике Д. э. используется для определения скорости движения звёзд, а также скорости вращения небесных тел. Измерения доплеровского смещения линий в спектрах излучения удалённых галактик привели к выводу о расширяющейся Вселенной (см. *Красное смещение*). В спектроскопии доплеровское уширение линий излучения атомов и ионов даёт способ измерения их темп-ры. В радио- и гидролокации Д. э. используется для измерения скорости движущихся целей, а также при синтезе апертуры (см. *Антенна*).

Лит.: Ландсберг Г. С., Оптика, 5 изд., М., 1976; Угаров В. А., Специальная теория относительности, 2 изд., М., 1977; Франкфурт У. И., Френк А. М., Оптика движущихся тел, М., 1972; Гинзбург В. Л., Теоретическая физика и астрофизика. Дополнительные главы, 2 изд., М., 1981; Франк И. М., Эйнштейн и оптика, «УФН», 1979, т. 129, с. 685.

М. А. Миллер, Ю. М. Сорокин, Н. С. Степанов.

**ДОПЛЕРОН** — слабозатухающая эл.-магн. волна в металлах, возникновение к-рой обусловлено доплер-сдвинутым *циклотронным резонансом*. Существование Д. связано с фермиевским вырождением электронного газа (электронной плазмы) и является характерной особенностью *металлов*. В этом состоит принципиальное отличие Д. от *геликонов*, *циклотронных* и *альфа-новских волн*, к-рые возбуждаются также и в невырожденной *плазме* — газовой или полупроводниковой (см. *Плазма твёрдых тел*).

Период доплеронных колебаний в металлах пластично зависит от напряжённости пост. магн. поля  $H$ , в к-рое помещена пластина. Их амплитуда обычно возрастает, начиная от ниж. порогового поля  $H_m$ , достигает максимума, а затем падает при верх. пороге  $H_M$ . Д. наблюдается только в одной из круговых поляризацй (см. *Поляризация волн*). В *щелочных металлах* Д. имеет узкую область существования по  $H$ : величины  $H_m$  и  $H_M$  отличаются примерно лишь на 1%. Д. в этих металлах не наблюдается. В анизотропных, т. н. компенсированных, металлах (в к-рых концентрации электронов проводимости и дырок одинаковы) вклады носителей заряда разных знаков в значит. мере компенсируются, что приводит к существенному расширению интервала полей  $H$ , в к-ром наблюдается Д. Закон дисперсии и затухание Д., величина амплитуды и её зависимость от поля  $H$  сильно зависят от вида *ферми-поверхности* в окрестности её сечения  $S$ , на к-ром смещение электронов за *циклотронный период* является экстремальным. Поэтому Д. позволяют получить значительно больше информации об электронах проводимости, чем *геликоны*.

Впервые Д. были обнаружены в кадмии [1]. Описание их свойств в различных металлах см. в [2].

Лит.: 1) Фишер Л. М. и др., Доплероны в кадмии, «ЖЭТФ», 1971, т. 60, с. 759; 2) Скобов В. Г., Доплер-сдвинутые *циклотронные моды* в металлах, в кн.: Платцман Ф., Волны и взаимодействия в плазме твёрдого тела, пер. с англ., М., 1975 (Дополнение).

Э. А. Канер.

**ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ПРИНЦИП** — сформулированное Н. Бором (N. Bohr) в 1927 принципиальное положение квантовой механики, согласно к-рому получение эксперим. информации об одних физ. величинах, описывающих микрообъект (элементарную частицу, атом, молекулу), неизбежно связано с потерей информации о нек-рых др. величинах, «дополнительных» к первым (канонически сопряжённых с первыми). Такими взаимно дополнит. величинами являются, напр., координата и импульс частицы. В квантовой механике дополнительными физ. величинам соответствуют *операторы*, не коммутирующие между собой.

С физ. точки зрения, Д. п. часто объясняют (следуя Бору) влиянием измерит. прибора, к-рый всегда является макроскопич. объектом, на состоянии микрообъекта. При точном измерении одной из дополнит. величин (напр., координаты частицы) с помощью соответствующего прибора др. величина (импульс) в результате взаимодействия частицы с прибором претер-