Итак, понятие В. охватывает чрезвычайно разнообразные движения в системах любой природы. В известном смысле это понятие первичное. Даже общепринятое разделение объектов на «В.» и «частицы» не имеет абс. характера. Так, в квантовой физике микрообъекты «объединяют» в себе свойства частиц и В., что означает возможность двоякого описания их поведения (см. *Корпускулярно-волновой дуализм*). Такого рода «дуализм» встречается и в макроскопич. масштабах: уединённые волновые возмущения (см. *Уединённая волна*), локализованные в огранич. области пространства, проявляют свойства дискретных объектов (частиц или квазичастиц); в частности, они способны сохранять неизменной свою структуру при столкновениях (взаимодействиях) друг с другом.

Волновые уравнения. Из всего сложного и разветвлённого семейства волновых движений можно выделить более или менее элементарные, но универсальные типы В., что позволяет рассматривать их поведение с общих позиций, независимо от их физ. природы. Эта общность проявляется прежде всего в том, что волновые движения разл. физ. объектов (полей) описываются однотипными ур-ниями или соотношениями. Для систем с непрерывно распределёнными параметрами это обычно дифференц. ур-ния в частных производных, связывающие изменения ф-ций, характеризующих волновое поле, по времени и координатам. Эти ф-ции могут быть как

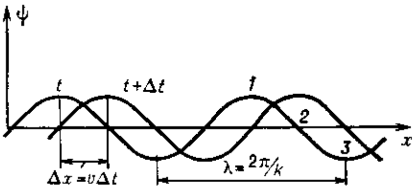

Рис. 1. Распределение в пространстве волновой переменной в бегущей синусоидальной волне в моменты времени t и $t+\Delta t$.

скалярными (напр., давление в газе, скалярный потенциал электрич. поля), так и векторными (скорость частиц, векторные потенциалы, напряжённости эл.-магн. поля и т. п.). Простейший пример — плоские одномерные В., поля к-рых зависят только от времени t и от одной из пространственных координат x. Среди них особо выделяются стационарные бегущие В., профиль к-рых перемещается без искажений с пост. скоростью (рис. 1) и к-рые могут быть описаны одной волновой переменной:

$$\psi(x,\ t)=F(x-vt), \qquad (1)$$

где F — нек-рая ф-ция аргумента $\xi=x-vt$. Значения ψ сохраняются на прямых $\xi=x-vt=\mathrm{const}$ (рис. 2), когда приращение координаты Δx пропорционально приращению времени Δt, что и означает движение с пост. скоростью $\Delta x/\Delta t=v$. Условие постоянства ψ при $\xi=\mathrm{const}$ можно записать в дифференц. форме:

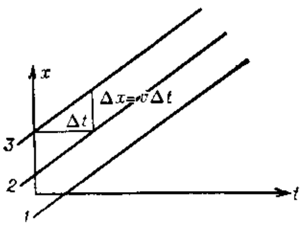

Рис. 2. Траектории фиксированных точек в профиле волны на плоскости xt (характеристики).

$$d\psi\big|_{\xi=\mathrm{const}}=\frac{\partial\psi}{\partial x}dx+\frac{\partial\psi}{\partial t}dt=0;$$

при $dx/dt=v$ получается простейшее ур-ние В.

$$\frac{\partial\psi}{\partial t}+v\frac{\partial\psi}{\partial x}=0, \qquad (2)$$

играющее фундам. роль в теории волновых процессов. Ф-ции (1) являются общими решениями ур-ния (2). Они описывают процесс однонаправленного распространения В., напр. в потоке невзаимодействующих частиц (где v — скорость потока, ψ — отклонение скорости частиц от v). Однако большинство волновых систем описывается ур-ниями 2-го порядка и выше, допускающими одновременно. существование В. вида (1) с двумя или более разл. скоростями. Одно из самых типичных — это волновое ур-ние для ф-ции ψ:

$$\frac{\partial^2\psi}{\partial x^2}-\frac{1}{v}\frac{\partial^2\psi}{\partial t^2}=0 \qquad (3)$$

или два эквивалентных ему ур-ния 1-го порядка, связывающие две ф-ции φ и ψ:

$$\frac{\partial\psi}{\partial x}=\frac{1}{a}\frac{\partial\varphi}{\partial t},\qquad \frac{\partial\varphi}{\partial x}=\frac{1}{b}\frac{\partial\psi}{\partial t}, \qquad (4)$$

где a и b — постоянные, $ab=v^2>0$. Соотношения (4) первоначально были записаны для эл.-магн. линий передачи и наз. *телеграфными уравнениями*, однако область их применимости гораздо шире. Они описывают такую «перекачку» φ и ψ друг в друга, при к-рой изменения во времени одной величины (напр., φ) вызывают изменение в пространстве др. величины (ψ), и наоборот. Этот механизм обусловливает процесс волнообразования в разл. физ. ситуациях. В случае звуковых В. в газах и жидкостях ф-ции φ и ψ соответствуют возмущениям давления и скорости, в случае эл.-магн. В.— напряжённостей электрич. и магн. полей и т. д. Поскольку оба направления $\pm x$ равноправны, то ур-ния (3) и (4) допускают существование двух произвольного вида В. типа (1), бегущих навстречу друг другу со скоростями v и $-v$; их наз. нормальными волнами или модами. Общее решение ур-ний (3) и (4) представляет собой их сумму (суперпозицию).

Волновое ур-ние (3) может быть обобщено на случай трёхмерных возмущений, когда поле ψ зависит от всех трёх пространственных координат x, y, z. Для этого в ур-нии (3) оператор $\partial^2/\partial x^2$ следует заменить на оператор Лапласа:

$$\Delta=\frac{\partial^2}{\partial x^2}+\frac{\partial^2}{\partial y^2}+\frac{\partial^2}{\partial z^2}.$$

При наличии внеш. источника в правую часть вводится определяющая его ф-ция $f(\boldsymbol{r},\ t)$:

$$\Delta\psi-\frac{1}{v^2}\frac{\partial^2\psi}{\partial t^2}=f(\boldsymbol{r},\ t) \qquad (5)$$

(где $\boldsymbol{r}$ — радиус-вектор точки пространства). Это неоднородное волновое ур-ние описывает весьма обширный класс волновых движений в линейных, однородных, изотропных системах без дисперсии.

Под дисперсией обычно понимают зависимость скорости распространения В. от её характерного периода во времени и пространстве (для синусоидальной В.— от её частоты ω или длины λ) и связанные с этим искажения профиля В. Дисперсия обусловлена немгновенностью (временная дисперсия) и нелокальностью (пространственная дисперсия) связей разл. величин в волновых системах, что часто (но не всегда) приводит к повышению порядка ур-ний, их описывающих, по сравнению с (2) или (3) (см. *Дисперсия волн*, *Диспергирующая среда*). Строго говоря, к недиспергирующим можно отнести лишь эл.-магн. В. в вакууме (в их классич. описании) и гравитационные В.

Бегущая гармонич. волна — частный случай стационарных бегущих В., представляет собой распространяющиеся синусоидальные колебания. Во мн. отношениях — это простейшее волновое движение; его выделенность связана с особыми свойствами гармонич. осцилляторов и ротаторов, обусловленными наличием определ. видов симметрии однородного, изотропного пространства. Если в линейной среде без дисперсии остаётся стационарной плоская В. любой формы, то в линейной диспергирующей среде таковой является плоская гармонич. (монохроматич.) В. вида

$$\psi(x,\ t)=A\sin\Phi=A\sin(\omega t-kx-\varphi_0) \qquad (6a)$$