

# Волна де Бройля

Материал из Википедии — свободной энциклопедии

**Волна́ де Бро́йля** — волна вероятности (или волна амплитуды вероятности<sup>[1]</sup>), определяющая плотность вероятности обнаружения объекта в заданной точке конфигурационного пространства. В соответствии с принятой терминологией говорят, что волны де Бройля связаны с любыми частицами и отражают их волновую природу.

Идея о волнах, связанных не только с квантами света, но и массивными частицами, предложена Луи де Бройлем в 1923—1924 годах<sup>[2]</sup> и называется гипотезой де Бройля. Хотя трактовка квадрата модуля амплитуды волны как плотности вероятности в конфигурационном пространстве принадлежит Макс Борну<sup>[3]</sup>, по традиции и в знак признания заслуг французского физика говорят о *волнах де Бройля*.

Идея волн де Бройля полезна для приблизительных выводов о масштабах проявления волновых свойств частиц, но не отражает всей физической реальности и потому не лежит в основе математического аппарата квантовой механики. Вместо дебройлевских волн эту роль в квантовой механике выполняет волновая функция, а в квантовой теории поля — полевые операторы.

# Содержание

## Корпускулярно-волновой дуализм фотонов и массивных частиц

## Природа волн де Бройля

## Формулы де Бройля

## Нерелятивистский предел

## Ультрарелятивистский предел

## Формулы де Бройля для четырёхвекторов

## Фазовая и групповая скорость волн де Бройля

## Экспериментальная проверка

## См. также

## Примечания

## Литература

## Ссылки

# Корпускулярно-волновой дуализм фотонов и массивных частиц

Физика атомов, молекул и их коллективов, в частности кристаллов, а также атомных ядер и элементарных частиц изучается в квантовой механике. Квантовые эффекты являются существенными, если характерное значение действия (произведение характерной энергии на характерное время или характерного импульса на характерное расстояние) становится

сравнимым с  $\hbar$  (постоянная Планка). Если частицы движутся со скоростями много меньше, чем скорость света в вакууме  $c$ , то применяется нерелятивистская квантовая механика; при скоростях близких к  $c$  — релятивистская квантовая механика.

В основе квантовой механики лежат представления Планка о дискретном характере изменения энергии атомов, Эйнштейна о фотонах, данные о квантованности некоторых физических величин (например, импульса и энергии), характеризующих в определённых условиях состояния частиц микромира. В то же время было твёрдо установлено, что свет проявляет свойства не только потока частиц, но и волны, то есть обладает корпускулярно-волновым дуализмом.

Де Бройль выдвинул идею о том, что волновой характер распространения, установленный для фотонов, имеет универсальный характер. Он должен проявляться для любых частиц, обладающих импульсом  $p$ . Все частицы, имеющие конечный импульс  $p$ , обладают волновыми свойствами, в частности, подвержены интерференции и дифракции<sup>[4]</sup>.

## Природа волн де Бройля

Волны де Бройля имеют специфическую природу, не имеющую аналогии среди волн, изучаемых в классической физике: квадрат амплитуды волны де Бройля в данной точке является мерой вероятности того, что частица обнаруживается в этой точке. Дифракционные картины, которые наблюдаются в опытах, являются проявлением статистической закономерности, согласно которой частицы попадают в определённые места в приёмниках — туда, где интенсивность волны де Бройля оказывается наибольшей. Частицы не обнаруживаются в тех местах, где, согласно статистической интерпретации, квадрат модуля амплитуды «волны вероятности» обращается в нуль.

## Формулы де Бройля

Формула де Бройля устанавливает зависимость длины волны  $\lambda$ , связанной с движущейся частицей вещества, от импульса  $p$  частицы, а полной энергии  $E$  — от частоты  $\nu$ , в виде релятивистски инвариантных соотношений:

$$\lambda = \frac{h}{p},$$

$$E = h\nu,$$

где  $h$  — постоянная Планка.

Другой вид формул де Бройля:

$$\mathbf{p} = \frac{h}{2\pi} \mathbf{k} = \hbar \mathbf{k},$$

$$E = \hbar \omega,$$

где  $\mathbf{k} = \frac{2\pi}{\lambda} \mathbf{n}$  — волновой вектор, модуль которого  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$  — волновое число — есть число длин волн, укладываемых на  $2\pi$  единицах длины,  $\omega = 2\pi\nu$  — циклическая частота,  $\mathbf{n}$  — единичный вектор в направлении распространения волны,  $\hbar = \frac{h}{2\pi} \approx 1,05 \cdot 10^{-34}$  Дж·с.

Полная энергия  $E = E_K + m_0 c^2$  включает кинетическую энергию  $E_K$  и энергию покоя  $E_0 = m_0 c^2$ , в терминах которых

$$\lambda = \frac{h}{p} = hc[E_K(E_K + 2m_0c^2)]^{-1/2},$$

где  $hc=1240$  эВ×нм, и значения  $m_0c^2$  равны 0 для фотона и других безмассовых частиц,  $m_e c^2 =511$  кэВ для электрона, и  $m_p c^2 =938$  МэВ для протона.

Нерелятивистский предел

У частиц с дорелятивистскими энергиями, движущимися со скоростью  $v \ll c$  (скорости света), для импульса справедлива формула  $p = mv$  (где  $m$  — масса частицы), для кинетической энергии  $W = E - mc^2$  — формула  $W = mv^2/2$ . Тогда длина волны де Бройля

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv} = \frac{h}{\sqrt{2mW}}.$$

В частности, для электрона, который ускорился в электрическом поле с разностью потенциалов  $\Delta\varphi$  вольт

$$\lambda = \frac{12,25}{\sqrt{\Delta\varphi}} \text{ \AA}.$$

Ультрарелятивистский предел

Для частиц в ультрарелятивистском случае, когда их скорость близка к скорости света,  $v \rightarrow c$ ,  $E \gg mc^2$ , длины волны равна  $\lambda = \frac{hc}{E}$ <sup>[5]</sup>.

Формулы де Бройля для четырёхвекторов

В четырёхмерном виде формулы де Бройля связывают четырёхвектор энергии-импульса  $p^\mu$  с четырёхмерным волновым вектором и имеют вид<sup>[6]</sup>:

$$p^\mu = \begin{pmatrix} p_0 \\ p_1 \\ p_2 \\ p_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E/c \\ p_x \\ p_y \\ p_z \end{pmatrix} = \hbar \begin{pmatrix} \omega/c \\ k_x \\ k_y \\ k_z \end{pmatrix}.$$

Энергия и импульс любого материального объекта связаны соотношением:

$$\frac{E^2}{c^2} = m^2 c^2 + p_x^2 + p_y^2 + p_z^2.$$

Аналогичным соотношением связаны частота и волновой вектор<sup>[6]</sup>:

$$\frac{\omega^2}{c^2} = \frac{m^2 c^2}{\hbar^2} + k_x^2 + k_y^2 + k_z^2.$$

Фазовая и групповая скорость волн де Бройля

Фазовая скорость волн де Бройля свободной частицы

$$v_f = \frac{\omega}{k} = \frac{E}{p} = \frac{mc^2}{mv} = \frac{c^2}{v} \simeq \frac{c^2}{h} m \lambda = \frac{c^2 p^2}{2Wh} \lambda.$$

Последние соотношения — нерелятивистское приближение. Зависимость фазовой скорости дебройлевских волн от длины волны указывает на то, что эти волны испытывают дисперсию. Фазовая скорость *v<sub>f</sub>* волны де Бройля хотя и больше скорости света, но относится к числу величин, принципиально неспособных переносить информацию (является чисто математическим объектом).

Групповая скорость волны де Бройля *u* равна скорости частицы *v*:

$$u = \frac{d\omega}{dk} = \frac{dE}{dp} = v.$$

## Экспериментальная проверка

Гипотеза де Бройля объясняет ряд экспериментов, необъяснимых в рамках классической физики<sup>[7]</sup>:

- Опыт Дэвиссона — Джермера по дифракции электронов на кристаллах никеля.
- Опыт Дж. П. Томсона по дифракции электронов на металлической фольге.
- Эффект Рамзауэра аномального уменьшения сечения рассеяния электронов малых энергий атомами аргона.
- Дифракция нейтронов на кристаллах (опыты Г. Хальбана, П. Прайсверка и Д. Митчелла).

Волновые свойства не проявляются у макроскопических тел. Длины волн де Бройля для таких тел настолько малы, что обнаружение волновых свойств оказывается невозможным. Впрочем, наблюдать квантовые эффекты можно и в макроскопическом масштабе, особенно ярким примером этому служат сверхпроводимость и сверхтекучесть.

## См. также

- Волновой пакет
- Комптоновская длина волны
- Ток вероятности

## Примечания

- ↑ *Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М.*, Фейнмановские лекции по физике. Вып. 3—4, 1976, с. 221—222, 412.
- ↑ Louis de Broglie «The Reinterpretation of Wave Mechanics» Foundations of Physics, Vol. 1 No. 1 (1970) (http://www.springerlink.com/content/n170347gr6h82147/) (недоступная ссылка)
- ↑ М. Борн. Размышления и воспоминания физика: Сборник статей / Отв. ред. Э. И. Чудинов. — М.: Наука, 1977. — С. 16. — 280 с.
- ↑ *Широков Ю. М., Юдин Н. П.* Ядерная физика. — М.: Наука, 1972. — С. 17-18
- ↑ *Волна де Бройля* (http://www.femto.com.ua/articles/part\_1/0570.html) — статья из Физической энциклопедии
- ↑ *Паули В.* Общие принципы волновой механики. — М.: ОГИЗ, 1947. — С. 14

7. *Мартинсон Л.К., Смирнов Е.В.* Раздел 2.2. Экспериментальные подтверждения гипотезы де Бройля // *Квантовая физика* ([https://web.archive.org/web/20090426114530/http://fn.bmstu.ru/phys/bib/physbook/tom5/ch2/texthtml/ch2\\_2.htm](https://web.archive.org/web/20090426114530/http://fn.bmstu.ru/phys/bib/physbook/tom5/ch2/texthtml/ch2_2.htm)) . — М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. — Т. 5. — 496 с. — 3000 экз. — ISBN 5-7038-2797-3. Архивная копия ([http://web.archive.org/web/20090426114530/http://fn.bmstu.ru/phys/bib/physbook/tom5/ch2/texthtml/ch2\\_2.htm](http://web.archive.org/web/20090426114530/http://fn.bmstu.ru/phys/bib/physbook/tom5/ch2/texthtml/ch2_2.htm)) от 26 апреля 2009 на [Wayback Machine](#)

## Литература

---

- *Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М.* Фейнмановские лекции по физике. Вып. 3—4. — 3-е изд. — М: Мир, 1976. — 496 с.

## Ссылки

---

- Волны де Бройля ([http://www.bog5.in.ua/lection/quantum\\_optics\\_lect/lect6\\_quant.html](http://www.bog5.in.ua/lection/quantum_optics_lect/lect6_quant.html)) / лекция «Элементы квантовой механики»
  - [Соотношение де Бройля \(http://elementy.ru/trefil/21123\)](http://elementy.ru/trefil/21123) // «Элементы»
- 

Источник — [https://ru.wikipedia.org/w/index.php?title=Волна\\_де\\_Бройля&oldid=107797845](https://ru.wikipedia.org/w/index.php?title=Волна_де_Бройля&oldid=107797845)

---

**Эта страница в последний раз была отредактирована 22 июня 2020 в 11:52.**

Текст доступен по [лицензии Creative Commons Attribution-ShareAlike](#); в отдельных случаях могут действовать дополнительные условия.

Wikipedia® — зарегистрированный товарный знак некоммерческой организации [Wikimedia Foundation, Inc.](#)