

## ВИКИПЕДИЯ

# 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 Максу 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

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

## Ультррелятивистский предел

Для частиц в ультррелятивистском 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  $v_f$  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

1. Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М., Фейнмановские лекции по физике. Вып. 3–4, 1976, с. 221–222, 412.
2. Louis de Broglie «The Reinterpretation of Wave Mechanics» Foundations of Physics, Vol. 1 No. 1 (1970) (<http://www.springerlink.com/content/n170347gr6h82147/>) (недоступная ссылка)
3. М. Борн. Размышления и воспоминания физика: Сборник статей / Отв. ред. Э. И. Чудинов. — М.: Наука, 1977. — С. 16. — 280 с.
4. Широков Ю. М., Юдин Н. П. Ядерная физика. — М.: Наука, 1972. — С. 17-18
5. Волна де Бройля ([http://www.femto.com.ua/articles/part\\_1/0570.html](http://www.femto.com.ua/articles/part_1/0570.html)) — статья из Физической энциклопедии
6. 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.](#)