



# Трудности теории Бора. Квантово-волновой дуализм.

---

© В.Е. Фрадкин, 2004

© В.А. Зверев, 2004

# Трудности теории Бора

---

- В теории Бора сохранились представления об орбитальном движении электронов в кулоновском поле ядра.
- Классическая ядерная модель атома Резерфорда была дополнена в теории Бора идеей о квантовании электронных орбит.
  - Поэтому теорию Бора иногда называют *полуклассической*.

# Трудности теории Бора

---

- В теории Бора сохранились представления об орбитальном движении электронов в кулоновском поле ядра.
- Классическая ядерная модель атома Резерфорда была дополнена в теории Бора идеей о квантовании электронных орбит.
  - Поэтому теорию Бора иногда называют *полуклассической*.



$$\lambda_e = \frac{h}{m\nu}$$

Луи-де-

Бройль

$$E = \underline{h\nu} = mc^2 = pc = h \frac{c}{\lambda}$$

**ФОТОН**

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

**Электрон**

$$\lambda_e = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}$$

# Объяснение правила квантования

---

- В стационарном квантовом состоянии атома водорода на длине орбиты должно укладываться по идее де Бройля целое число длин волн  $\lambda$ , т. е.

$$n\lambda_n = 2\pi r_n.$$

- Подставляя длину волны де Бройля  $\lambda = h/p$ , где  $p = m_e v$  – импульс электрона, получим:

$$n \frac{h}{m_e v} = 2\pi r_n \quad \text{или} \quad m_e v r_n = n \frac{h}{2\pi}.$$

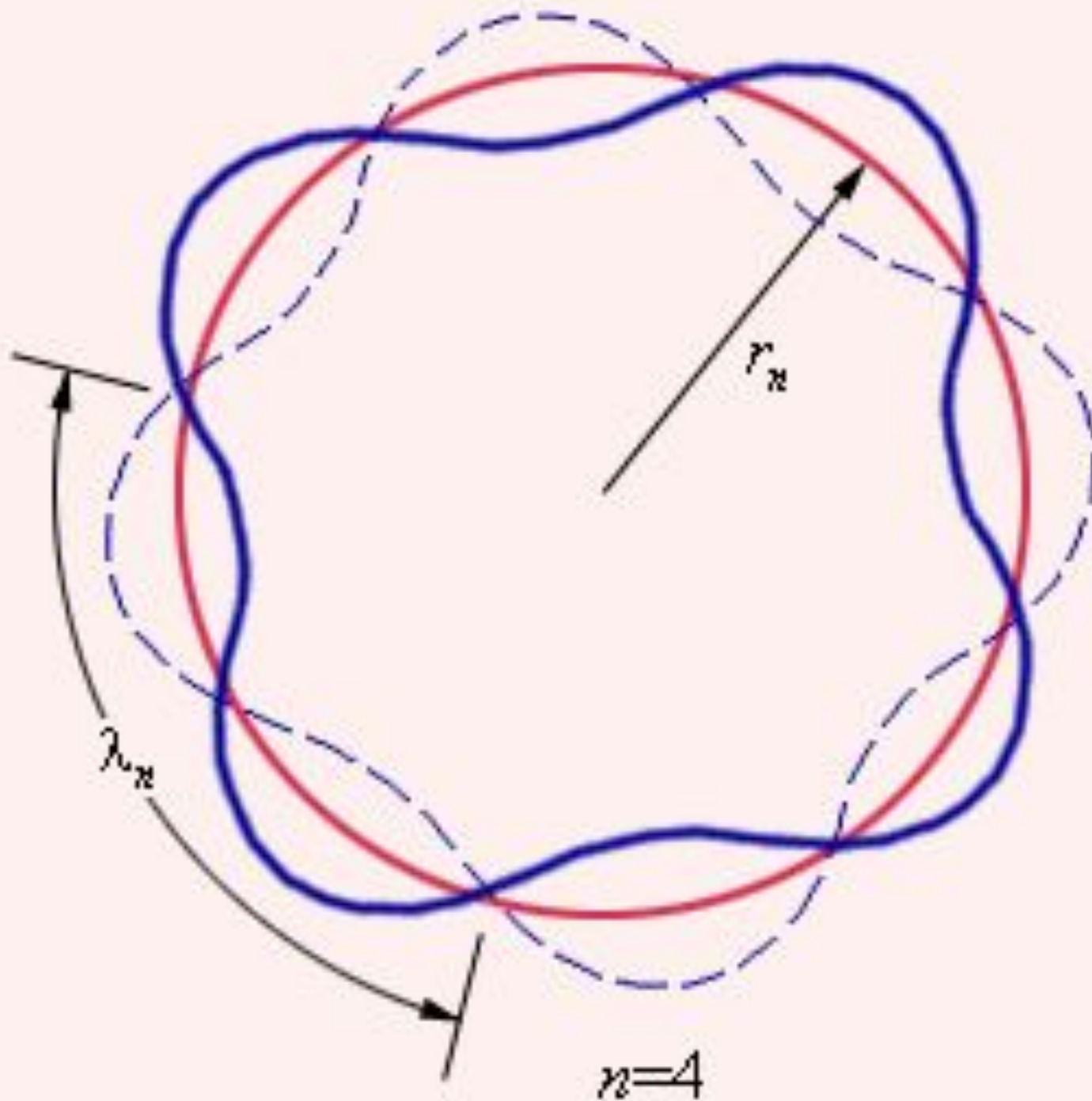
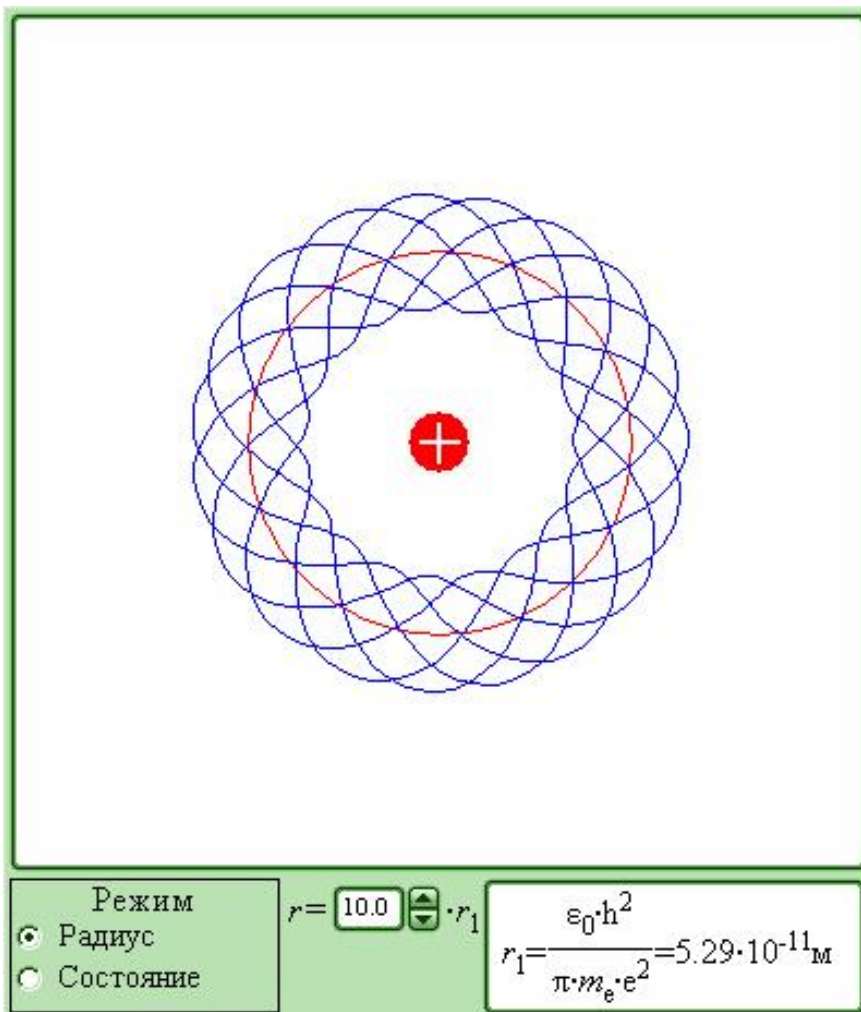


Иллюстрация  
идеи де Бройля  
о  
возникновении  
стоячих волн  
на  
стационарной  
орбите для  
случая  $n = 4$ .

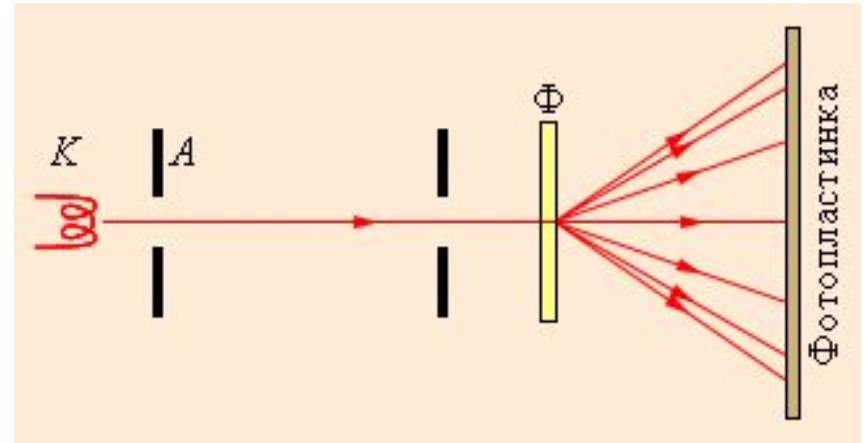
# Квантование электронных орбит





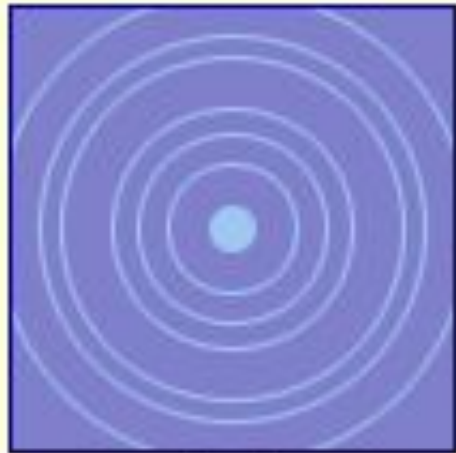
# Экспериментальное подтверждение гипотезы де Бройля.

1927 г. - американские физики К. Девиссон и Л. Джермер: пучок электронов, рассеивающийся на кристалле никеля, дает отчетливую дифракционную картину, подобную той, которая возникает при рассеянии на кристалле коротковолнового рентгеновского излучения. В этих экспериментах кристалл играл роль естественной дифракционной решетки.

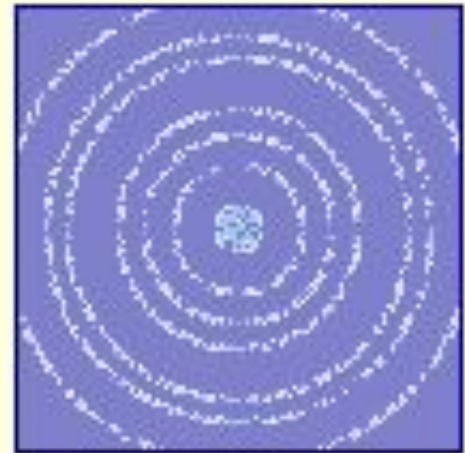


1928 г. английский физик Дж. П. Томсон: наблюдение дифракционной картины, возникающей при прохождении пучка электронов через тонкую поликристаллическую фольгу из золота.

# Дифракция электронов



(a)



(b)

Картина дифракции электронов на поликристаллическом образце при длительной экспозиции (a) и при короткой экспозиции (b). В случае (b) видны точки попадания отдельных электронов на фотопластинку.

# Опыты Фабриканта, Бибермана, Сушкина

---

- Опыт Дж. Томсона был многократно повторен с неизменным результатом, в том числе при условиях, когда поток электронов был настолько слабым, что через прибор одновременно могла проходить только одна частица (В. А. Фабрикант, 1948 г.). Таким образом, было экспериментально доказано, что волновые свойства присущи не только большой совокупности электронов, но и каждому электрону в отдельности.

# Волновые свойства макроскопических тел.

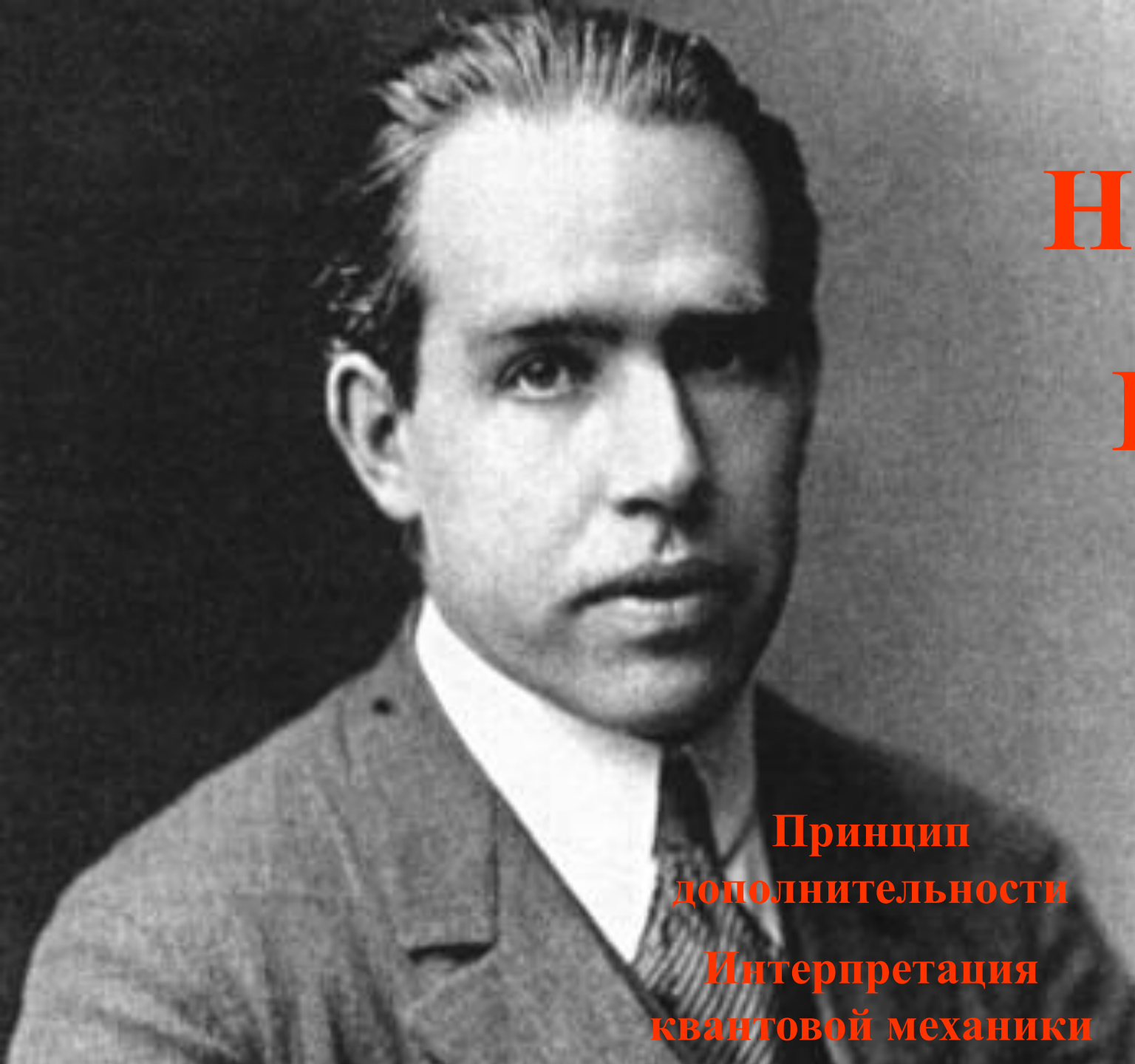
---

- Впоследствии дифракционные явления были обнаружены также для нейтронов, протонов, атомных и молекулярных пучков.
- Экспериментальное доказательство наличия волновых свойств микрочастиц привело к выводу о том, что это универсальное явление природы, общее свойство материи.
- Следовательно, волновые свойства должны быть присущи и макроскопическим телам. Однако вследствие большой массы макроскопических тел их волновые свойства не могут быть обнаружены экспериментально.
  - Например, пылинке массой  $10^{-9}$  г, движущийся со скоростью 0,5 м/с соответствует волна де Бройля с длиной волны порядка  $10^{-21}$  м, т. е. приблизительно на 11 порядков меньше размеров атомов. Такая длина волны лежит за пределами доступной наблюдению области.

# Квантовая механика

---

- Гипотеза де Бройля основывалась на соображениях симметрии свойств материи и не имела в то время опытного подтверждения. Но она явилась мощным революционным толчком к развитию новых представлений о природе материальных объектов. В течение нескольких лет целый ряд выдающихся физиков XX века – *В. Гейзенберг, Э. Шредингер, П. Дирак, Н. Бор, М. Борн* и другие – разработали теоретические основы новой науки, которая была названа *квантовой механикой*.



**Нильс**

**Бор**

**Принцип  
дополнительности  
Интерпретация  
квантовой механики**

# *Принцип*

## *дополнительности Н.Бора*

---

- Всем микрообъектам присущи и волновые, и корпускулярные свойства, однако, они не являются ни волной, ни частицей в классическом понимании.
- Разные свойства микрообъектов не проявляются одновременно, они дополняют друг друга, только их совокупность характеризует микрообъект полностью.
  - Можно условно сказать, что микрообъекты распространяются как волны, а обмениваются энергией как частицы.



# Вернер Гейзенберг

Матричная механика

Соотношение  
неопределенностей



# Соотношение неопределенностей В. Гейзенберга

---

$$\Delta p_x \cdot \Delta x \geq \hbar$$

$$\Delta W \cdot \Delta t \geq \hbar$$

Микрочастицы в принципе не имеют одновременно точного значения координаты и соответствующей проекции импульса.

- Является проявлением двойственной корпускулярно-волновой природы материальных микрообъектов.
- Позволяет оценить, в какой мере можно применять к микрочастицам понятия классической механики.
  - Показывает, в частности, что к микрообъектам неприменимо классическое понятие траектории, так как движение по траектории характеризуется в любой момент времени определенными значениями координат и скорости.



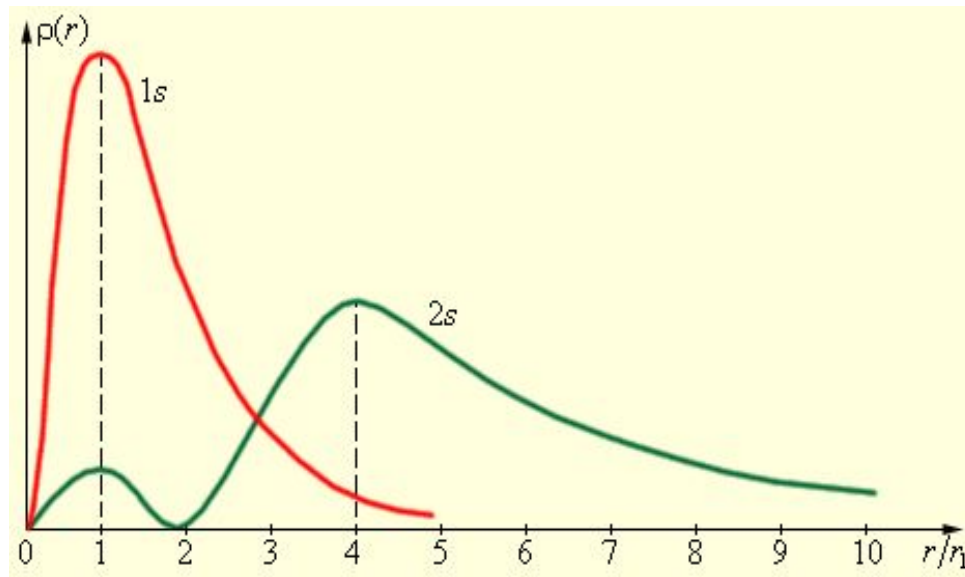
Эрвин

Шредингер

Волновая  
механика

Волновое  
уравнение  
электрона –  
уравнение  
Шредингера

# Распределение вероятности обнаружения электрона в атоме водорода



Вероятность обнаружения электрона в состоянии  $2s$  максимальна на расстоянии  $r = 4r_1$  от ядра.

В обоих случаях атом водорода можно представить в виде сферически симметричного электронного облака, в центре которого находится ядро.

Электрон в состоянии  $1s$  (основное состояние атома водорода) может быть обнаружен на различных расстояниях от ядра. С наибольшей вероятностью его можно обнаружить на расстоянии, равном радиусу  $r_1$  первой боровской орбиты.



# Макс

---

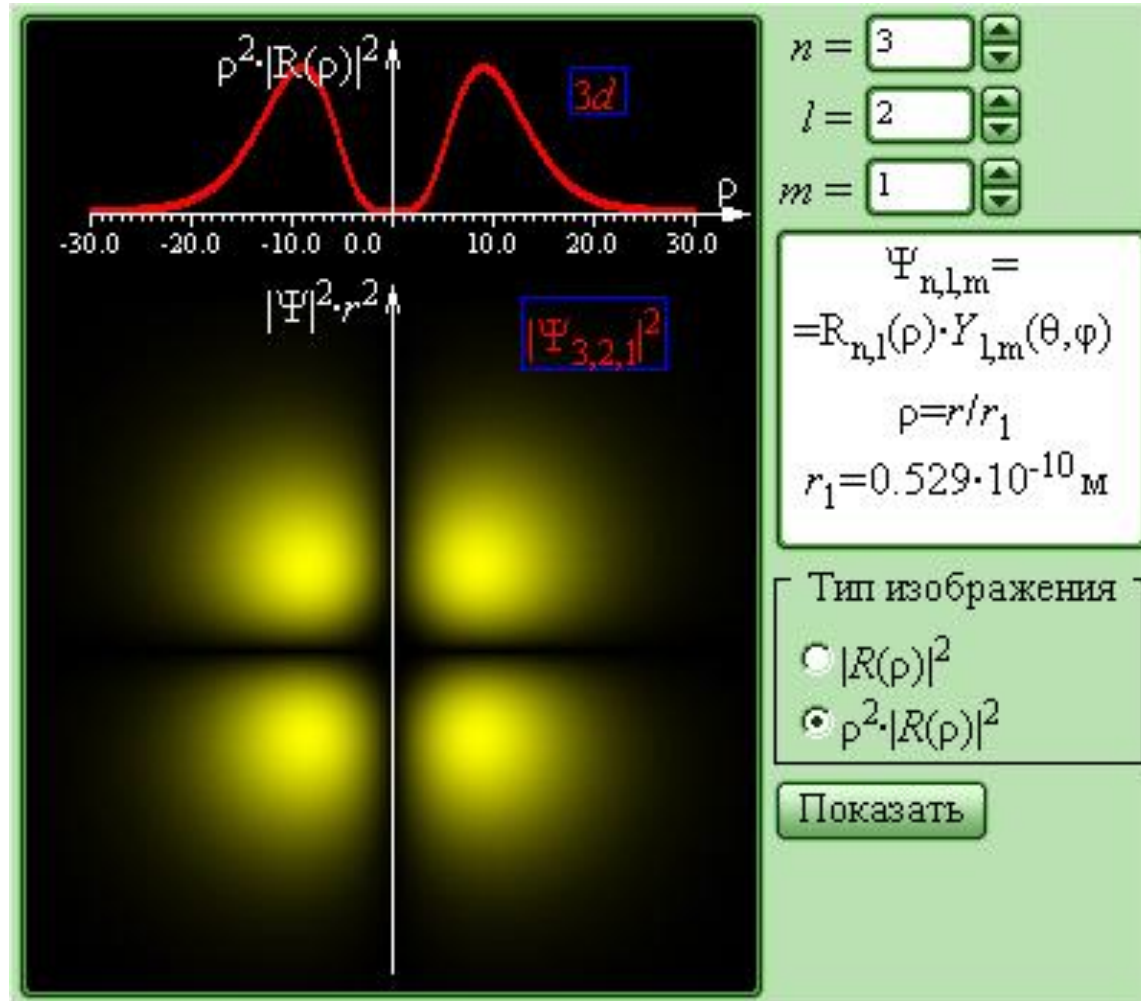
# Борн

Статистическая  
интерпретация волнового  
уравнения

Доказательство  
идентичности волновой и  
матричной механики



# Модель. Атом водорода.



Пауль

---

Эренфест

Доказательство связи  
квантовой и  
классической механики  
(наличие предельного  
перехода)



# ПОЛЬ Дирак

---

Релятивистская  
квантовая механика  
(уравнение Дирака)

