

История квантовой теории

Андрей Грозин
A.G.Grozin@inp.nsk.su

Тепловое излучение

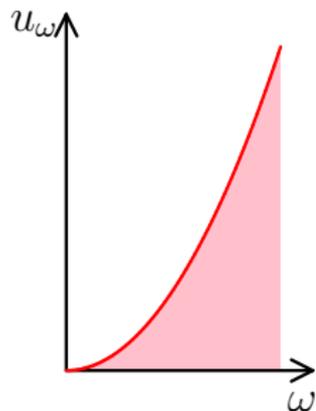
Электромагнитное излучение может находиться в тепловом равновесии со стенками сосуда. Его плотность энергии u зависит от температуры T . Но из T и c невозможно построить величину с размерностью плотности энергии.

Тепловое излучение

Электромагнитное излучение может находиться в тепловом равновесии со стенками сосуда. Его плотность энергии u зависит от температуры T . Но из T и c невозможно построить величину с размерностью плотности энергии.

Спектральная плотность энергии $du = u_\omega d\omega$ по размерности

$$u_\omega \sim \frac{\omega^2 T}{c^3}$$



$$u = \infty$$

Тепловое излучение

Закон Кирхгофа (1859)

$$\frac{E}{A} = \frac{E'}{A'} \quad \frac{E_{\omega}}{A_{\omega}} = \frac{E'_{\omega}}{A'_{\omega}}$$

Абсолютно чёрное тело $A = 1$

Тепловое излучение

Закон Кирхгофа (1859)

$$\frac{E}{A} = \frac{E'}{A'} \quad \frac{E_{\omega}}{A_{\omega}} = \frac{E'_{\omega}}{A'_{\omega}}$$

Абсолютно чёрное тело $A = 1$

Закон Штефана–Больцмана (1884)

$$u = \sigma T^4$$

Тепловое излучение

Закон Кирхгофа (1859)

$$\frac{E}{A} = \frac{E'}{A'} \quad \frac{E_{\omega}}{A_{\omega}} = \frac{E'_{\omega}}{A'_{\omega}}$$

Абсолютно чёрное тело $A = 1$

Закон Штефана–Больцмана (1884)

$$u = \sigma T^4$$

Закон смещения Вина (1893)

$$u_{\omega} = \omega^3 f\left(\frac{\omega}{T}\right) = T^3 g\left(\frac{\omega}{T}\right)$$

Макс Планк

Родился в **1858** в Киле

1867 переезд в Мюнхен,

Максимилиановская гимназия

1874 Мюнхенский университет.

1877 Берлинский университет

Гельмгольц, Кирхгоф

1878 Мюнхенский университет

диссертация

1885 Кильский университет

1889 Берлинский университет (преемник Кирхгофа)

имперский физико-технический институт

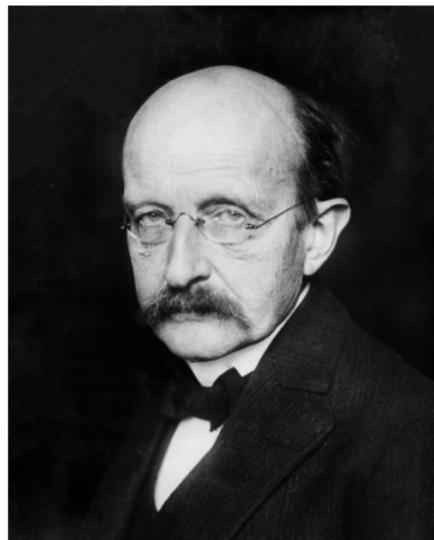
1900 Распределение Планка

проф. Джолли: Молодой человек, зачем Вы хотите

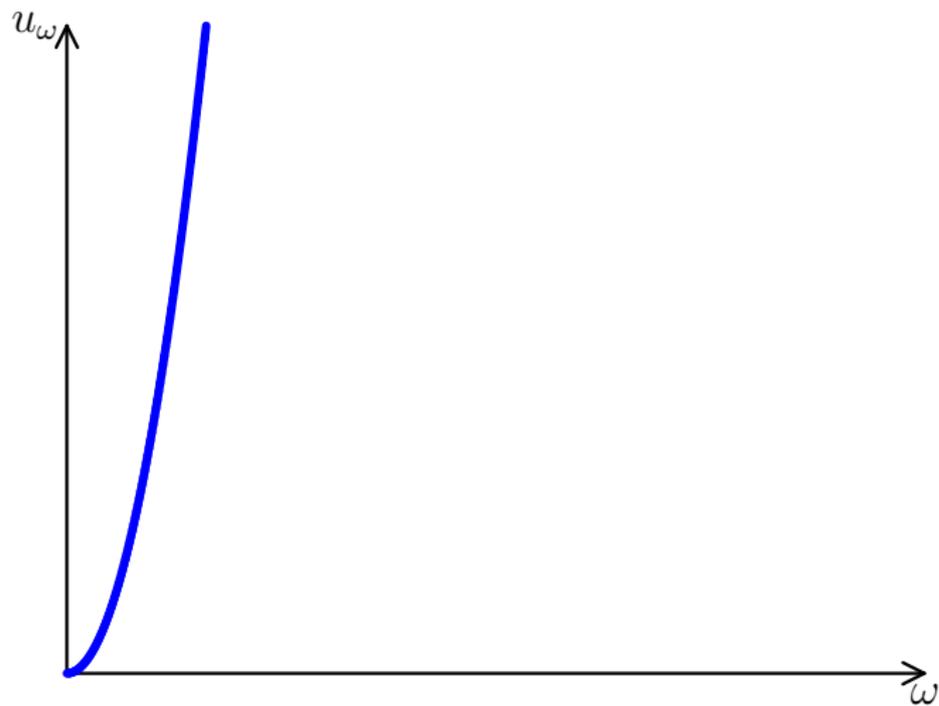
испортить себе жизнь? Теоретическая физика в

основном закончена. Остались отдельные частные

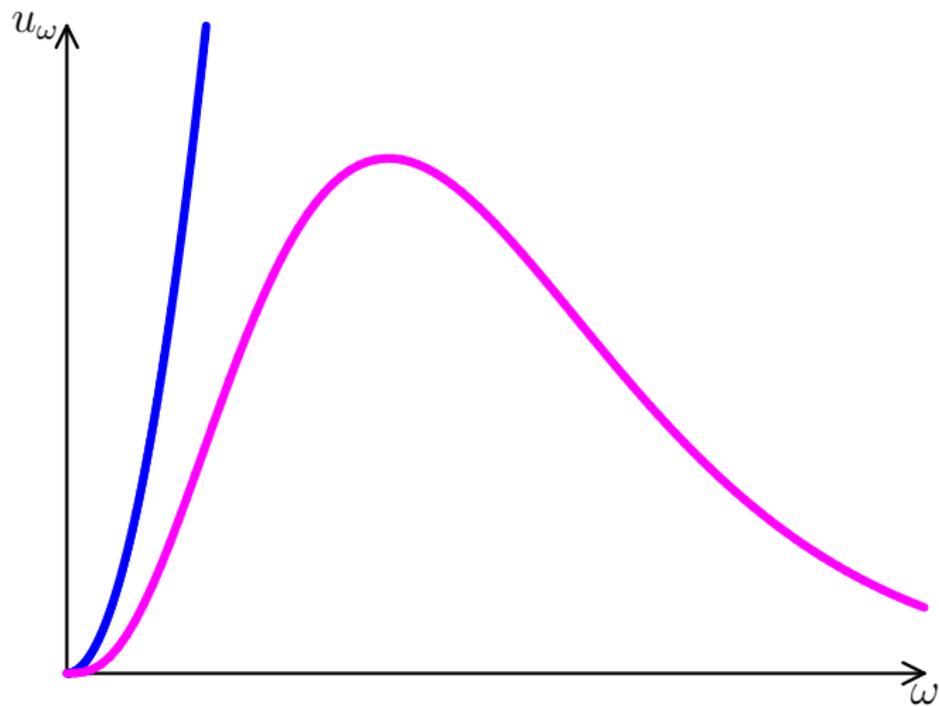
задачи, которые можно решать.



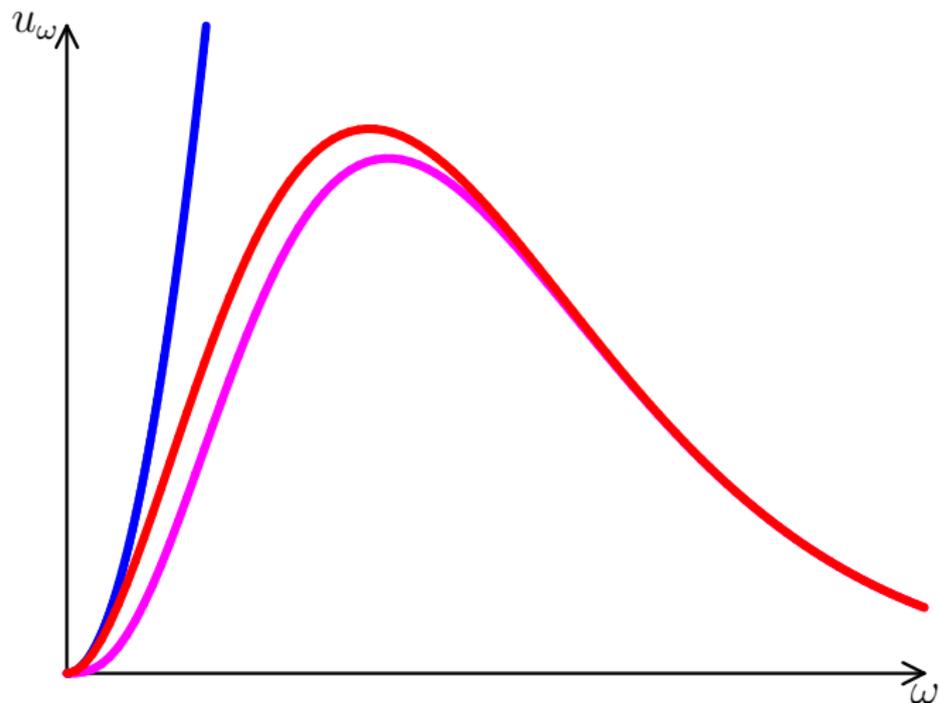
Распределение Планка



Распределение Планка



Распределение Планка



Распределение Планка

В 1890-х: заряженные осцилляторы, взаимодействующие с излучением; кинетическое уравнение, рост энтропии.

Октябрь 1900: экспериментальные данные в инфракрасной области не соответствуют распределению Вина. Интерполяционная формула.

Декабрь 1900: кванты энергии $\hbar\omega$, вывод по Больцману

Альберт Эйнштейн

Родился в **1879** в Ульме

1880 Мюнхен

Гимназия, скрипка

1895 Цюрихский политехникум

1896 Поступил. Гроссман, Марич

1900 Экзамены. Случайные заработки

Гражданство Швейцарии

1902 Берн, патентное бюро

1903 Женился на Милеве Марич

1905 3 знаменитых статьи

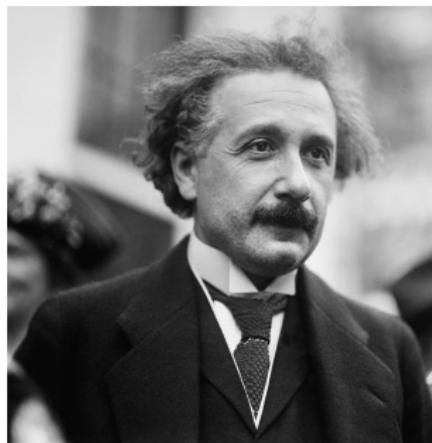
1909 Цюрих, экстраординарный профессор

1911 Прага, профессор

1912 Цюрих, профессор

1913 Берлин, профессор

1915 ОТО

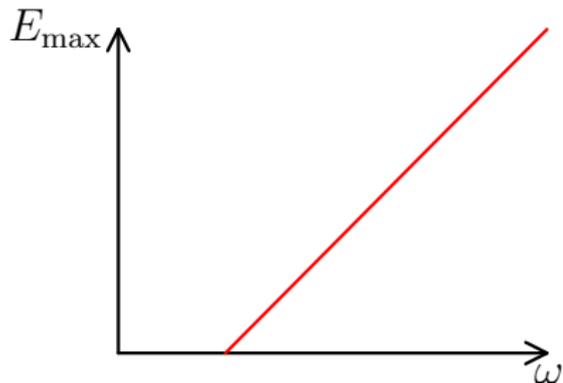


Кванты света

Фотоэффект

$$E_{\max} = \hbar\omega - E_0$$

не зависит от интенсивности света.



Экспериментально подтвердил Милликен (1916).

Если волна — германскому правительству следует запретить фотоэлементы, а если частица, то дифракционные решётки.

Флуктуации — сумма волнового и корпускулярного вкладов.

Теплоёмкость кристаллов

$3N$ колебательных степеней свободы, теплоёмкость на 1 атом $c = 3$.

- ▶ При понижении температуры теплоёмкость уменьшается, $c \rightarrow 0$ при $T \rightarrow 0$. Почему? А у алмаза она и при комнатной температуре слишком низкая.
- ▶ В металлах есть электроны проводимости. Где их вклад?

Теплоёмкость кристаллов

Эйнштейн (1907) — простая модель: все колебания с частотой ω_0 .

Дебай (1912): при $\lambda \gg a$ упругие волны, интерполяционная формула.

Борн, Карман: детальная теория колебаний кристаллической решётки.

АТОМ

- ▶ Атомы имеют определённый размер.
Из m и e невозможно построить величину с размерностью длины. Классически, орбиты электронов могут иметь любые радиусы от 0 до ∞ .

Атом

- ▶ Атомы имеют определённый размер.

Из m и e невозможно построить величину с размерностью длины. Классически, орбиты электронов могут иметь любые радиусы от 0 до ∞ .

- ▶ Атомы стабильны.

Электрон, обращающийся вокруг ядра, должен излучать, и упасть на ядро за $\sim \alpha^{-3} \sim 10^6$ оборотов ($\sim 10^{-10}$ сек). Хуже того, в атоме гелия один электрон может свалиться ближе к ядру и передать другому достаточно энергии, чтобы он улетел на ∞ .

Атом

- ▶ Все атомы одного элемента (и изотопа) одинаковы. Классически, ничто не мешает электронам в разных атомах иметь разные орбиты.

Атом

- ▶ Все атомы одного элемента (и изотопа) одинаковы. Классически, ничто не мешает электронам в разных атомах иметь разные орбиты.
- ▶ Атомы взаимно непроницаемы. Классически, ничто не мешает засунуть один атом в то место, где уже есть другой. Так почему же мы не проваливаемся сквозь пол?

Атом

- ▶ Все атомы одного элемента (и изотопа) одинаковы. Классически, ничто не мешает электронам в разных атомах иметь разные орбиты.
- ▶ Атомы взаимно непроницаемы. Классически, ничто не мешает засунуть один атом в то место, где уже есть другой. Так почему же мы не проваливаемся сквозь пол?
- ▶ Спектральные линии.

Спектры

Бальмер (1885)

$$\omega = R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad n \geq 3$$

Ридберг

Комбинационный принцип Ритца (1908)

$$\omega_{nn'} = T_n - T_{n'}$$

Нильс Бор

Родился в **1885** в Копенгагене

Отец — профессор физиологии

1987 брат Харальд, математик

1903 Копенгагенский университет

1911 диссертация

Кавендиш Томсон

Манчестер Резерфорд

1912 женился на Маргарет

1913 Хансен сказал о спектральных формулах

1914 лектор, Манчестер

1916 профессор, Копенгаген

1921 институт теоретической физики



Атом водорода

Предварительную версию статьи послал Резерфорду. Он решил, что надо сократить. Послал расширенную версию, поехал к Резерфорду.

Атом водорода

Предварительную версию статьи послал Резерфорду. Он решил, что надо сократить. Послал расширенную версию, поехал к Резерфорду.

- ▶ Существуют стационарные состояния с дискретными энергиями, в которых атом не излучает
- ▶ Атом излучает при переходе из более высокого стационарного состояния в более низкое

$$\hbar\omega_{n_1 n_2} = E_{n_1} - E_{n_2}$$

Принцип соответствия

$$\frac{1}{\hbar} (E_n - E_{n-\delta n}) \approx \frac{1}{\hbar} \frac{dE_n}{dn} \delta n = \omega \delta n \quad \frac{dE_n}{dn} = \hbar\omega$$

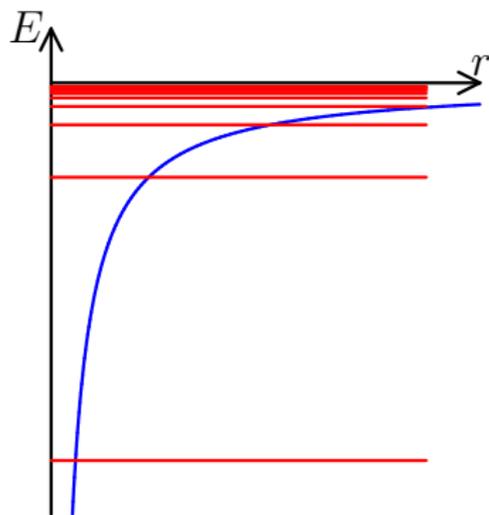
Атом водорода

Круговые орбиты. Момент импульса $M = \hbar n$, радиус
 $r = r_B n^2$

$$r_B = \frac{\hbar^2}{me^2}$$

Энергия

$$E = -\frac{me^4}{2\hbar^2 n^2}$$



Резерфорд: Как электрон решает,
где ему остановиться?

Бор: Это аналогично
branching ratio.

Атом водорода

$$\omega_{nn'} = R \left(\frac{1}{n'^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad R = \frac{me^4}{2\hbar^3}$$

- ▶ $n' = 1$ Лайман (1906) УФ
- ▶ $n' = 2$ Бальмер (1885) 4 видимых; предсказал 5-ю (ближний УФ) — открыл Ангстрем
- ▶ $n' = 3$ Пашен (1908) ИК; предсказал Ритц из комбинационного принципа

Атом водорода

$$\omega_{nn'} = R \left(\frac{1}{n'^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad R = \frac{me^4}{2\hbar^3}$$

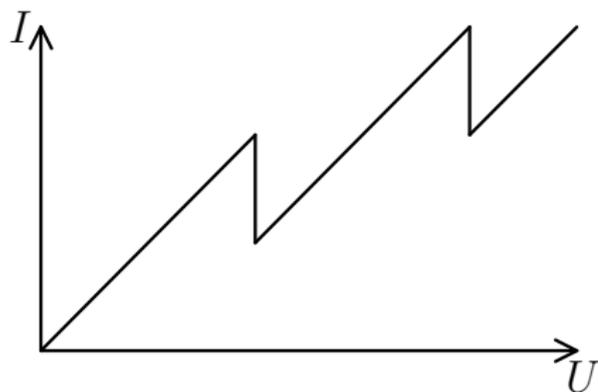
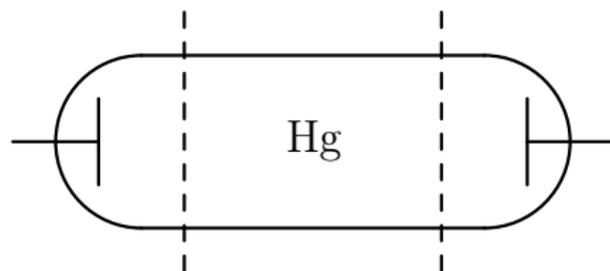
- ▶ $n' = 1$ Лайман (1906) УФ
- ▶ $n' = 2$ Бальмер (1885) 4 видимых; предсказал 5-ю (ближний УФ) — открыл Ангстрем
- ▶ $n' = 3$ Пашен (1908) ИК; предсказал Ритц из комбинационного принципа
- ▶ Пикеринг $n' = 2$; $n = \frac{5}{2}, \frac{7}{2}, \dots$
- ▶ Фаулер $n' = \frac{3}{2}$; $n = 2, 3, \dots$

Бор: это ион гелия, $R_{\text{He}} = 4R_{\text{H}}$, n и n' в 2 раза больше
Маленькие отклонения

Бор: приведённая масса

$$\frac{R_{\text{He}}}{R_{\text{H}}} = 4 \frac{1 + \frac{m}{M}}{1 + \frac{m}{4M}}$$

Опыт Франка–Герца (1914)



Комптон (1922) — излучение линии ртути

Спонтанное и вынужденное излучение

Эйнштейн (1916)

2 —————

1 —————

$$\frac{dE_{\text{изл}}}{dt} = (A_{12} + B_{12}u_{\omega}) n_2 \qquad \frac{dE_{\text{погл}}}{dt} = B_{21}u_{\omega}n_1$$

Отсюда выводится распределение Планка

Спонтанное и вынужденное излучение

Эйнштейн (1916)

2 —————

1 —————

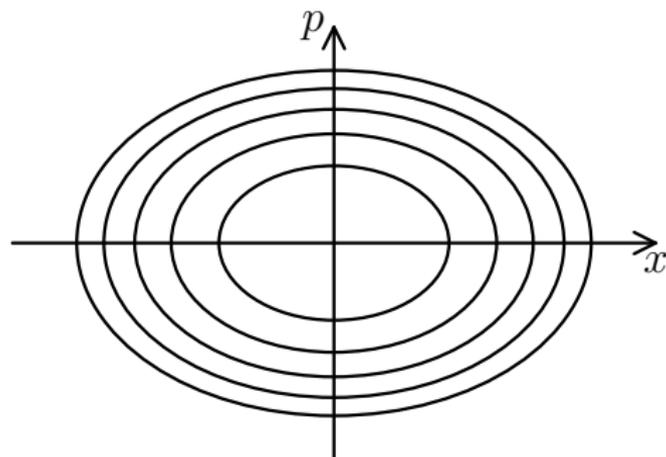
$$\frac{dE_{\text{изл}}}{dt} = (A_{12} + B_{12}u_{\omega}) n_2 \qquad \frac{dE_{\text{погл}}}{dt} = B_{21}u_{\omega}n_1$$

Отсюда выводится распределение Планка

Комптоновское рассеяние (1921)

Правило квантования

Бор, Планк, Дебай, ...

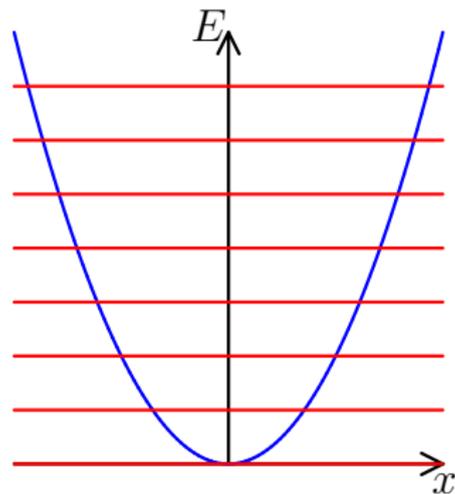


Площадь $2\pi\hbar n$. Принцип соответствия.

Правило квантования

Осциллятор

$$E = \hbar\omega n$$



Адиабатический принцип (1916)

$\langle T \rangle / \omega$ — адиабатический инвариант.

Арнольд Зоммерфельд

Родился в **1868** в Кёнигсберге

1886 Кёнигсбергский университет

1894 Гёттинген, ассистент Клейна

1906 Мюнхенский университет

Дебай, Ланде, Паули, Хайзенберг

1915 Квантование для нескольких степеней свободы

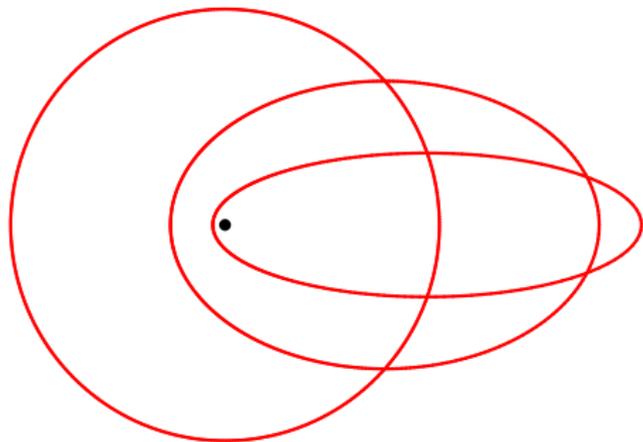
1927 теплоёмкость электронного газа

Защитить диссертацию под руководством Зоммерфельда легко. Пару раз в диссертации проинтегрируйте что-нибудь в комплексной плоскости — и положительная оценка обеспечена.



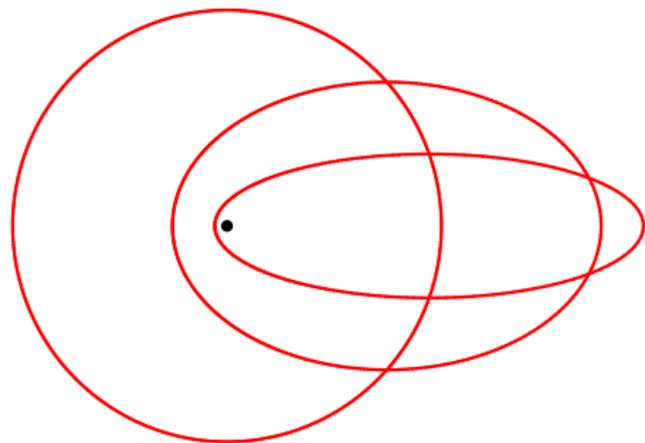
Атом водорода

3 степени свободы: n_r , l , m . Энергия даётся формулой Бора с $n = n_r + l$.



Атом водорода

3 степени свободы: n_r , l , m . Энергия даётся формулой Бора с $n = n_r + l$.



Тонкая структура — релятивистские поправки

Эффект Штарка в водороде

Штарк (1913): водород — расщепление $\sim E$, поляризация.

Эпштейн (1916) получил правильную формулу.

В тот же день получил письмо от Шварцшильда, в нём была ошибка в формуле. Послал ответ; Шварцшильд нашёл у себя ошибку.

Карл Шварцшильд

Родился в **1873** во Франкфурте

гимназия: сделал телескоп, 2 статьи

1891 Страсбургский университет, астрономия

1893 Мюнхенский университет

1896 диссертация, обсерватория в Вене

1901 Гёттинген, профессор, директор обсерватории

1909 Потсдам, директор обсерватории

1914 доброволец, восточный фронт, заболел

1916 фронтовой госпиталь в России

статьи по ОТО: внешнее и внутреннее решения

Шварцшильда — первые точные решения уравнения

Эйнштейна, радиус Шварцшильда

эффект Штарка в водороде

Пауль Эпштейн

Родился в **1883** в Варшаве (Российская империя)
гимназия в Минске

1901 Московский университет

1910 Мюнхенский университет, Зоммерфельд

1914 интернирован как враждебный иностранец
ходатайство Зоммерфельда — мог заниматься
теоретической физикой

1919 Цюрих

Эффект Зеемана

Зееман (1886): расщепление некоторых узких линий на триплеты. Лоренц (1887): осциллятор в магнитном поле. Теорема Лармора: вращение с частотой

$$\omega_L = \frac{eB}{2mc}$$

Магнитный момент

$$\vec{\mu} = \frac{e}{2mc} \hbar \vec{l} = \mu_B \vec{l} \quad \mu_B = \frac{e\hbar}{2mc}$$

Расщепление

$$\delta E = \hbar \omega_L m = \mu_B B m$$

Эффект Зеемана

Зееман (1886): расщепление некоторых узких линий на триплеты. Лоренц (1887): осциллятор в магнитном поле. Теорема Лармора: вращение с частотой

$$\omega_L = \frac{eB}{2mc}$$

Магнитный момент

$$\vec{\mu} = \frac{e}{2mc} \hbar \vec{l} = \mu_B \vec{l} \quad \mu_B = \frac{e\hbar}{2mc}$$

Расщепление

$$\delta E = \hbar \omega_L m = \mu_B B m$$

Аномальный эффект Зеемана

Квантовые числа n, l, j, m_j

$$\delta E = g \mu_B B m_j$$

Вольфганг Паули

Родился в **1900** в Вене

Крёстный отец — Мах

1910 гимназия, вундеркинд

1918 Мюнхенский университет

Обзор по ОТО

То, что сказал господин Эйнштейн,
не так уж и глупо

1921 Гёттинген, Борна

Лекции Бора

1922 Копенгаген

1923 Гамбург

1925 Принцип запрета

1928 Цюрих, высшая техническая школа



Вольфганг Паули

“Как же человек может быть счастливым, если он размышляет об аномальном эффекте Зеемана”

“Физика слишком трудна для меня, я хотел бы быть комиком в кино, лишь бы никогда больше не слышать о физике”

Эффект Паули. В лаборатории Франка в Гёттингене произошёл взрыв, разрушивший большую установку. Именно тогда, когда поезд, в котором ехал Паули, на несколько минут остановился на вокзале Гёттингена. Критический склад ума. “Или неверно, или тривиально”. О неясно написанной статье: “Это даже не неверно”. Перфекционист, “совесть физики”, бич божий.

Заполнение электронных оболочек

Бор (1921): $2n^2$

Паули (1924): замкнутая оболочка — $\vec{L} = 0$, $\vec{S} = 0$.

Щелочной металл — 1 электрон сверх замкнутой оболочки, неклассическая двузначность m_s . Несколько валентных электронов: $M_L = \sum m_l$, $M_S = \sum m_s$.

Стонер (1924): при данном n число уровней электрона в щелочном металле в магнитном поле = числу электронов в замкнутой оболочке инертного газа с тем же n

Паули (1925): не может быть 2 электронов в состоянии с одинаковыми n , l , j , m_j

Сатъендра Нат Бозе

Родился в **1894** в Калькутте.

1913 магистр прикладной математики, Калькуттский университет.

1916 лектор в Калькуттском университете. **1921** лектор в университете Дхака (ныне в Бангладеш).

1924 лекция, вывод распределения Планка — тождественность фотонов. Послал статью в английский журнал, отвергнута. Послал статью Эйнштейну, он перевёл её на немецкий и послал в немецкий журнал.

Сатъендра Нат Бозе

Родился в **1894** в Калькутте.

1913 магистр прикладной математики, Калькуттский университет.

1916 лектор в Калькуттском университете. **1921** лектор в университете Дхака (ныне в Бангладеш).

1924 лекция, вывод распределения Планка — тождественность фотонов. Послал статью в английский журнал, отвергнута. Послал статью Эйнштейну, он перевёл её на немецкий и послал в немецкий журнал.

Эйнштейн обобщил на случай атомных газов (1924–25). Аналогия между газом и излучением. Флуктуации энергии в газе — 2 слагаемых, корпускулярное и волновое. Конденсат.

Статистика Ферми–Дирака

Конец 1925. Йордан написал статью о статистике газа частиц, подчиняющихся принципу Паули, и отдал её Борну как одному из редакторов *Zeitschrift*. Борн уехал в Америку и забыл об этой статье. После его возвращения было уже поздно. Если бы не Борн, возможно, мы бы сейчас говорили *йорданоны*.

Ферми (1926): газ частиц, подчиняющихся принципу Паули.

Статистика Больцмана

12		
----	--	--

1	2	
---	---	--

1		2
---	--	---

2	1	
---	---	--

	12	
--	----	--

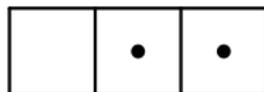
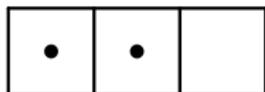
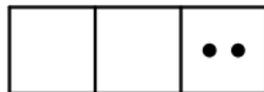
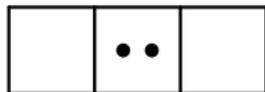
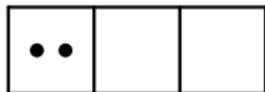
	1	2
--	---	---

2		1
---	--	---

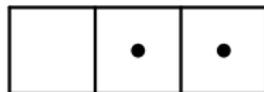
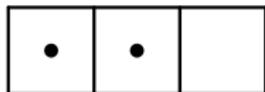
	2	1
--	---	---

		12
--	--	----

Статистика Бозе–Эйнштейна



Статистика Ферми–Дирака



Энрико Ферми



Родился в **1901** в Риме.

1918 Высшая нормальная школа, Пиза.

1922 диссертация, университет Пизы.

1923 Гёттинген, Борн.

1924 Лейден, Эренфест.

1925 Флорентийский университет.

1926 Римский университет, профессор.

Эксперимент Штерна–Герлаха (1922)

Пучок нейтральных атомов вдоль острия клина ферромагнетика. Серебро: 2 узкие полосы, $\mu = \mu_B$.

Ральф Крониг

В январе 1925 приехал в Тюбинген, мекку спектроскопистов: Ланде, Герлах, Бак. Письмо Паули к Ланде. Крониг: спин $s = \frac{1}{2}$, μ_B ($g = 2$). Тонкая структура щелочных металлов, правильная зависимость от Z . H: тонкая структура описывалась формулой Зоммерфельда. Чтобы не испортить согласие, надо, чтобы уровни $l = j \pm \frac{1}{2}$ были вырождены. В системе покоя электрона на него действует магнитное поле, что приводит к магнитному расщеплению. Но оно оказалось в 2 раза больше, чем нужно. Скорость на поверхности электрона (классический радиус) $\gg c$.

Ральф Крониг

Паули: очень остроумная выдумка; отрицательно относился к классическим моделям в квантовой теории. Хайзенберг, Крамерс тоже против. Почему гиромагнитное отношение в 2 раза больше орбитального? Тогда считалось, что ядра состоят из протонов и электронов; где же их магнитный момент?

Джордж Уленбек

Родился в **1900** в Батавии, Голландская Ост-Индия (Джакарта, Индонезия). Отец подполковник.

1905 Гаага. В школе интересовался физикой, математикой. **1918** Чтобы поступить в университет, требовалось знать греческий и латынь, которые изучали только в гимназиях. Технологический институт в Делфте.

1919 Лейденский университет, Эренфест.

1922 Домашний учитель сына голландского посла в Риме. Ферми.

1925 Лейден.

1927 Мичиганский университет.

Самуэль Гаудсмит

Родился в **1902** в Гааге. В школе увлёкся физикой, когда прочитал, что с помощью спектроскопии можно делать химический анализ Солнца и звёзд.

1919 Лейденский университет. Эренфест устроил его на $\frac{1}{2}$ ставки в лабораторию Зеемана в Амстердаме.

1925 Уленбек.

1927 Мичиганский университет

Спин электрона

Осень 1925: идея спина, $g = 2$, сообщили Эренфесту. Он сказал, что это либо очень важно, либо полная чушь. Сказал написать заметку. Спросим Лоренца. Лоренц написал красивую рукопись: скорость на поверхности $\gg c$. Уленбек и Гаудсмит решили не публиковать. Эренфест: я уже давно послал заметку в печать. Вы достаточно молоды, чтобы сделать одну глупость. Не считали тонкую структуру водорода. Хайзенберг спросил про фактор 2. Эпштейн был в Лейдене, помог вывести формулу Кронига. Бору рассказал Эйнштейн про объяснение спин-орбитального взаимодействия. Бор принял эту идею. Паули критикует — новая ересь.

Половинка Томаса

Люэллин Томас, Копенгаген (1926): кинематический релятивистский эффект. При $g = 2$ угловая скорость прецессии Томаса $= -\frac{1}{2}$ угловой скорости ларморовской прецессии в магнитном поле, полученном из преобразований Лоренца. То есть суммарная прецессия в 2 раза меньше \Rightarrow с тонкой структурой Н всё ОК. Бор поверил в спин.

Паули не убеждён, пишет письмо Эренфесту. Эренфест подтвердил, и Паули, наконец, поверил в спин.

Рассеяние света атомом

Лоренц: классические осцилляторы.

Ладенбург (1921): виртуальные осцилляторы, связь с коэффициентами Эйнштейна. Правило сумм Томаса–Куна.

Крамерс (1924): когда атом в начале в возбуждённом состоянии, нужны отрицательные слагаемые — переходы в нижележащие состояния (принцип соответствия).

Борн (1924): рецепт, как заменять производные на конечные разности.

Крамерс, Хайзенберг (1925): посчитали в классике, сделали замены, выразили через коэффициенты Эйнштейна. В том числе рассмотрели неупругое рассеяние (Ланцберг, Мандельштам; Раман).

Хендрик Крамерс

Родился в **1894** в Роттердаме
увлекался математикой, физикой, литературой; играл
на виолончели

1911 изучал латынь и греческий, чтобы поступить в
университет

1912 Лейденский университет, Лоренц, Эренфест

1916 учитель в школе. Написал письмо Бору. Бор
пригласил в Копенгаген и сделал своим ассистентом.

1919 Лейден, диссертация. Боровский институт.

1926 Утрехтский университет

Вернер Хайзенберг

Родился в **1901** в Вюрцбурге.

Отец Август — учитель греческого в гимназии и лектор по греческой филологии в университете.

Мать — дочь директора

Максимилиановской гимназии в Мюнхене Векляйна.

1910 Мюнхен, отец — профессор кафедры византийской филологии.

Учился в Максимилиановской гимназии.

Латинский; греческий; немецкий; математика; история; религия; физкультура; французский; география; естественные науки.

Увлекался математикой, физикой, музыкой, поэзией.



Вернер Хайзенберг

1916 Военная подготовка, сельхозработы

1917 Репная зима

1918 7 ноября Баварская социалистическая республика

1919 май–июнь: белые/красные, с ружьём на крыше

лето – новые следопыты **1920** Университет. Математик

фон Линдемманн: пудель; Вейль “Пространство. Время.

Материя” — потерян для математики. Зоммерфельд:

сразу участие в семинаре. Дружба с Паули.

1922 Лекции Бора в Гёттингене. Зима — у Борна.

1923 лето: диссертация в Мюнхене. Вин: вопрос про разрешающую способность микроскопа.

1924 Копенгаген.

1925 Гёттинген.

Квантовая механика

Весна 1925: слабо нелинейный осциллятор. Идея применить методы Борна и Крамерса прямо к кинематике. Июнь: сенная лихорадка, 10 дней на острове Гельголанд. По пути назад обсудил с Паули. В Гёттингене написал статью и послал Паули. Паули одобрил, Борн послал в печать.

О квантовотеоретическом истолковании кинематических и механических соотношений (июль). Только соотношения между величинами, которые являются в принципе наблюдаемыми. Орбиты и орбитальные частоты ненаблюдаемы, наблюдаемы только частоты и интенсивности спектральных линий. Влияние статьи Эйнштейна по теории относительности. Не заниматься догадками для каждой конкретной задачи (как Крамерс), а один раз угадать теорию, с помощью которой можно решать все задачи.

Макс Борн

Родился в **1882** в Бреслау.

1901 Университет Бреслау.

1903 Университет Гёттинген.

1908 Кристаллическая решётка.

1914 Берлин. Военные работы.

Дружба с Эйнштейном.

1919 Франкфурт, профессор. Штерн.

1921 Сменил Дебая — директор физического института Гёттингенского университета.

Паули, Хайзенберг, Йордан, Хунд.



Борн, Йордан

Сентябрь. Борн понял, что умножение Хайзенберга матричное. Встретил Паули в поезде и предложил ему совместно поработать в этом направлении. Паули отказался: я знаю, что Вам нравятся сложные трудоёмкие вычисления; Вы только испортите физические идеи Хайзенберга своей бесплодной математикой. Йордан хорошо знал матрицы (помогал Куранту в издании его книги с Гильбертом) и стал соавтором Борна.

$$px - xp = -i\hbar$$

Осциллятор. Детальные вычисления делал в основном Йордан. Кратко рассмотрено квантование электромагнитного поля.

Хайзенберг, Борн, Йордан

Ноябрь. Полное и систематическое изложение квантовой механики. Канонические преобразования, теория возмущений (включая вырожденный случай), дискретный и непрерывный спектр, угловой момент, квантование волнового поля (Йордан).

Хайзенберг, Борн, Йордан

Ноябрь. Полное и систематическое изложение квантовой механики. Канонические преобразования, теория возмущений (включая вырожденный случай), дискретный и непрерывный спектр, угловой момент, квантование волнового поля (Йордан).

Хайзенберг, Йордан: аномальный эффект Зеемана (включая интенсивности спектральных линий).
Вращательные и колебательные спектров молекул (аспирантка Ленца Люси Мензинг).

Хайзенберг, Борн, Йордан

Ноябрь. Полное и систематическое изложение квантовой механики. Канонические преобразования, теория возмущений (включая вырожденный случай), дискретный и непрерывный спектр, угловой момент, квантование волнового поля (Йордан).

Хайзенберг, Йордан: аномальный эффект Зеемана (включая интенсивности спектральных линий).
Вращательные и колебательные спектров молекул (аспирантка Ленца Люси Мензинг).

Паули

Решил задачу об атоме водорода (1926) с помощью вектора Германа–Бернулли–Лапласа–Рунге–Ленца–Гамильтона–Гиббса.

Поль Дирак

Родился в **1902** в Бристоле

Отец из Швейцарии

1918 Бристольский университет

1923 Кембриджский университет

Фаулер, статистическая механика

1925 Доклад Хайзенберга

Коммутаторы и скобки Пуассона

1926 Симметрия волновых функций

Теория преобразований

Теория излучения

1927 Уравнение Дирака

1930 Море Дирака

1931 Позитроны



Поль Дирак

- ▶ -2 рыбы.
- ▶ Это утверждение, а не вопрос.
- ▶ В нечётном числе мест (Клейн–Нишина).
- ▶ Не начинать предложения, не зная, как его закончить (Бор).
- ▶ Оптимальное расстояние до женского лица.
- ▶ Паули: Бога нет, и Дирак пророк его.
- ▶ Баночка с таблетками.
- ▶ Очень ветрено сегодня.
- ▶ Привидение: полночь по Гринвичу.

Поль Дирак

Физические законы должны обладать математической красотой. Игра с уравнениями. Бог — математик высочайшего уровня.

Тщательно продумывал в уме, писал ясно и кратко, без исправлений. На лекциях фактически дословно излагал свою книгу; когда студент просил что-то разъяснить, повторял ещё раз.

Поль Дирак

Физические законы должны обладать математической красотой. Игра с уравнениями. Бог — математик высочайшего уровня.

Тщательно продумывал в уме, писал ясно и кратко, без исправлений. На лекциях фактически дословно излагал свою книгу; когда студент просил что-то разъяснить, повторял ещё раз.

Октябрь 1925: во время прогулки — идея об аналогии между коммутаторами и скобками Пуассона.

Воскресенье, библиотека закрыта. Только в понедельник посмотрел определение скобок Пуассона в учебнике.

q -числа. В значительной степени повторил

Борна–Йордана. Пытался решить задачу об атоме водорода (не вполне успешно).

Луи де Бройль

Родился в **1892** во Франции

Отец — 5-й герцог де Брольи

Старший брат Морис

1906 Смерть отца

Морис — 6-й герцог

Луи — князь (prince)

Лицей Жансон-де-Сайи

1909 Бакалавр — философия, математика

1910 Парижский университет, история и право

Военная служба на Эйфелевой башне

1919 Аспирантура парижского университета

Работа в частной лаборатории брата

1923 Волновые свойства материальных частиц

1960 Смерть Мориса, 7-й герцог



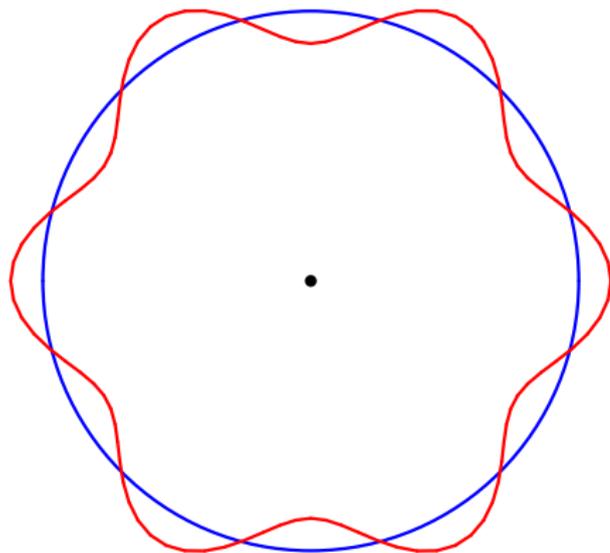
Волновые свойства частиц

Оптико-механическая аналогия Гамильтона
де Бройль: движение частицы сопровождается волной

$$\cos(kx - \omega t) \quad E = \hbar\omega \quad p = \hbar k$$

Групповая скорость

Правило квантования



Волновые свойства частиц

Ланжевен сообщил о работах де Бройля на 4 Сольвеевском конгрессе в 1924 и рассказал о них Эйнштейну. Эйнштейн в это время занимался статистикой Бозе, заинтересовался, упомянул в статье. Эйнштейн рассказал Борну, Борн обсудил с Франком и Эльзассером. Эльзассер: нельзя ли наблюдать экспериментально? Франк: Дэвиссон уже обнаружил дифракцию электронов. Дэвиссон (Нью Йорк, 1921–1923). Франк, Эльзассер: угловые распределения Дэвиссона соответствуют теории де Бройля, длина волны убывает со скоростью. Эльзассер: объяснение эффекта Рамзауэра (1921–1923) (который наблюдали и несколько других экспериментаторов). Эльзассер послал статью в журнал (с благодарностью Франку).

Волновые свойства частиц

Дэвиссон, Джермер (1925): никелевая мишень при высокой температуре, взрыв сосуда с жидким воздухом, трубка разбита, мишень окислилась. Мишень восстановили, испарили внешний слой никеля — длительное нагревание при больших температурах. Несколько крупных монокристаллов. Максимумы при Брэгговских углах. В 1927 надёжные результаты, согласие длины волны с формулой де Бройля. Дальше много экспериментов, аналогичных рентгеновским, например Томсон младший. В 1937 нобелевская премия Дэвиссону и Томсону. Томсон-отец получил нобелевскую премию за то, что доказал, что электроны — это частицы, а Томсон-сын — за то, что доказал, что электроны — это волны.

Эрвин Шрёдингер



Родился в **1887** в Вене

1898 Гимназия, лучший ученик

1906 Университет, Хазенёрль

1914 Артиллерия, итальянский фронт

1921 Цюрихский университет. Дебай, Вейль

1926 Волновая механика

1927 Берлинский университет. Планк, Эйнштейн

1933 Оксфорд

1936 Грац. **1938** Аншлюсс

1939 Дублин, институт высших исследований

Волновая механика

Совместный коллоквиум Цюрихского университета и политехникума. Дебай предложил Шрёдингеру выступить с докладом об идеях де Бройля (ноябрь 1925). После доклада Дебай сказал: Целое число волн на орбите — это детский сад. Как меня учил Зоммерфельд, раз есть волны, они должны подчиняться какому-то волновому уравнению.

Шрёдингер сначала получил релятивистское волновое уравнение (соображения де Бройля были релятивистскими). Сейчас оно известно как уравнение Клейна–Гордона–(Фока). Шрёдингер решил его для атома водорода и получил тонкую структуру, не согласующуюся с экспериментом.

Квантование как задача о собственных значениях

Рождественские каникулы в Арозе. Нерелятивистское волновое уравнение. Вейль помог с решением. Получил правильный спектр (без тонкой структуры).

Январь 1926. Новое выступление на семинаре: теперь я знаю волновое уравнение. Первая статья.

Февраль. Оптико-механическая аналогия, новый вывод волнового уравнения. Несколько частиц: волновая функция в конфигурационном пространстве.

Осциллятор. Ротатор (2 и 3-мерный). Упругий ротатор — молекула.

Май. Теория возмущений — метод Рэлея для звуковых волн. Вырожденный случай. Эффект Штарка в водороде (включая интенсивности линий).

Квантование как задача о собственных значениях

Июнь. Нестационарное волновое уравнение (ψ теперь комплексна). Уравнение непрерывности. Возмущения, зависящие от времени. Теория дисперсии, включая комбинационные частоты. Электрон — волна, $e|\psi|^2$ — плотность заряда.

Июль. Когерентные состояния осциллятора. Хайзенберг: волновые пакеты расплываются, осциллятор — исключение. Кроме того, системы нескольких частиц.

Эквивалентность матричной и волновой механики

Шрёдингер (март 1926): матрицы через волновые функции. Матричное правило умножения. Повторил Борна–Йордана на волновом языке.

Паули, весна 1926, Копенгаген. Апрель, письмо Йордану в Гёттинген.

На семинаре в Берлине. Эйнштейн: недавно у нас не было ни одной квантовой теории, а теперь сразу 2. Это перебор. Кто-то: Паули доказал, что они эквивалентны. Шрёдингер восхищался: Паули легко и просто сделал то, на что он потратил несколько месяцев тяжёлой работы.

Доклад на семинаре в Мюнхене (июнь). Хайзенберг: как объяснить фотоэффект и другие дискретные квантовые процессы? Вин чуть не вышвырнул его из аудитории: Вы должны понять, что со всей этой чушью про квантовые скачки покончено. Профессор Шрёдингер всё со временем объяснит.

Хайзенберг: чем больше я думаю о физическом содержании теории Шрёдингера, тем более ужасной она мне кажется. Шрёдингер: меня отвращала трансцендентная алгебра и отсутствие наглядности.

Дискуссия Бор–Шрёдингер

Сентябрь–октябрь: Шрёдингер в Копенгагене.

Дискуссия началась на вокзале и продолжалась каждый день с утра до ночи. Шрёдингер остановился в доме Бора.

Шрёдингер: идея квантовых скачков абсурдна. Как движется электрон во время скачка?

Бор: мы не можем наглядно представить себе квантовый скачок. Представления обыденной жизни недостаточны для описания атома.

Шрёдингер: Я не хочу обсуждать наши понятия. Я хочу знать, что происходит в атоме. Если электроны — частицы, они должны как-то двигаться. Квантовая механика не говорит как. Если электрон — волна, противоречия исчезают, частоту излучения легко понять.

Дискуссия Бор–Шрёдингер

Бор: Противоречие просто сдвигается в другое место. Распределение Планка требует дискретных энергий атома. Мы видим дискретные события на сцинтилляционном экране или в камере Вильсона. Мы не можем объявить, что квантовых скачков нет.

Шрёдингер: Если нам придётся смириться с этими чёртовыми скачками, я вообще сожалею, что имел дело с квантовой теорией.

Бор: Все остальные благодарны Вам за это. Волновая механика — огромный прогресс.

Шрёдингер заболел (возможно, от напряжения). Бор сидел на край кровати: Но Вы же, конечно, должны понять, что... Они не договорились.

Рассеяние электронов на атомах

Борн (1926). “Кафедры Франка и моя находятся в одном здании в Гёттингене. Каждый эксперимент Франка по рассеянию электронов подтверждает, что они частицы.”

Волновая механика: амплитуда рассеяния, Борновское приближение (теория возмущений). Квантовая механика определяет не конкретное состояние электрона после рассеяния, а вероятности различных конечных состояний. Движение частицы вероятностно, вероятность определяется причинным законом. В классике вероятность определяется нашим неполным знанием, в квантовой механике она объективна.

Теория преобразований

Дирак (1926): полное объединение матричной и волновой механики (для дискретного и непрерывного спектра). δ функция; в математике — теория обобщённых функций (distributions). Общая статистическая интерпретация (также Хайзенберг и Паули). Йордан (1926) — эквивалентный подход, математически более громоздкий.

Книга Борна, Йордана “Элементарная квантовая механика”. Паули: в заключение отметим и достоинства книги: бумага и печать в ней отличные.

Тождественные частицы

Хайзенберг (Копенгаген, лето 1926): атом гелия.

Обменное взаимодействие — следствие кулоновского (а не магнитного) взаимодействия электронов.

Дирак (1926): волновые функции систем тождественных частиц, симметрия и антисимметрия.

Соотношение неопределённостей

Хайзенберг в Копенгагене, ассистент Бора (вместо Крамерса). Осень–зима 1926–27. Хайзенберг думает о проблемах интерпретации квантовой механики, обсуждает их с Бором. Хайзенберг защищает интерпретацию электрона как частицы и квантовые скачки; Бор рассматривает их наравне с волновыми свойствами. Хайзенберг предпочитал сначала посчитать, потом интерпретировать; Бор не соглашался что-нибудь считать, пока полностью не прояснена интерпретация. Траектория электрона в камере Вильсона. В середине февраля Бор уехал на месяц в Норвегию кататься на лыжах.

Соотношение неопределённостей

Хайзенберг: понятие координаты электрона определяется методом её измерения, требуется γ -лучевой микроскоп с как можно более короткой длиной волны. При измерении координаты импульс меняется из-за Комpton-эффекта. Длинное письмо Паули, Паули только слегка покритиковал. Статья “Об интуитивном содержании квантотеоретической кинематики и динамики”.

$$\delta x \delta p \geq \frac{\hbar}{2}$$

Хайзенберг не вполне правильно описал разрешающую способность γ -лучевого микроскопа, постскрипум к статье при корректуре. Причинность: “Если точно знать настоящее, можно предсказать будущее” — неверна посылка, а не заключение.

Принцип дополнительности

Бор: корпускулярно-волновой дуализм. Комо сентябрь: 2 описания, исключают друг друга, оба необходимы. Для них необходимы разные схемы эксперимента. Роль прибора, описываемого классически. Копенгагенская интерпретация (Бор, Хайзенберг, Паули). Паули: 2 классических понятия дополнительны, если устройство для измерения одного из них не может быть создано без разрушения устройства для измерения другого.

Дискуссия Бор–Эйнштейн

5 Сольвеевский конгресс (октябрь 1927). Борн и Хайзенберг: квантовая механика (включая интерпретацию) завершена. Бор: принцип дополнительности. Эйнштейн относился к квантовой механике восхищённо-недоверчиво. Эйнштейн предлагал мысленные эксперименты, опровергающие соотношения неопределённостей. Бор их разоблачал. Продолжили на 6 Сольвеевском конгрессе (1930). Пример, где Эйнштейн не учёл влияния гравитационного поля на часы.

Дискуссия Бор–Эйнштейн

Эйнштейн: мгновенная редукция волновой функции противоречит теории относительности. Хайзенберг, Паули: волновая функция — не физическое поле; она описывает информацию, имеющуюся у физика о квантовой системе. По результатам наблюдения строится волновая функция; она эволюционирует по уравнению Шрёдингера; она представляет собой каталог вероятностей возможных результатов следующего измерения; оно зависит от выбранной схемы эксперимента.

Уравнение Паули со спином. Тонкая структура
водорода: в спин-орбитальном взаимодействии
томасовскую половинку приходится вводить руками.

Уравнение Паули со спином. Тонкая структура водорода: в спин-орбитальном взаимодействии томасовскую половинку приходится вводить руками.

Дирак: теория излучения Нестационарная теория возмущений. Атом в поле электромагнитной классической волны — периодическое возмущение, переходы на $\pm\hbar\omega$ по энергии. Коэффициенты Эйнштейна B . Квантование электромагнитного поля, фотоны. Эквивалентность вторичному квантованию для бозонов. Спонтанное излучение (коэффициенты A).

Йордан: вторичное квантование, квантование волновых полей. Бозоны: Йордан, Клейн (1927): ψ — поле; учёт взаимодействия. Фермионы: Йордан, Вигнер (1928). Пространства Фока (1932).

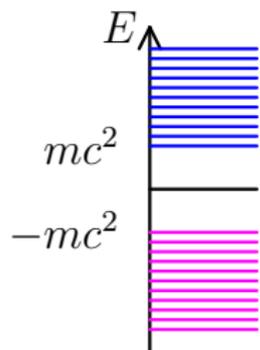
Уравнение Клейна–Фока–Гордона (1926)

Написано Шрёдингером. Бор спросил Дирака (1927):
чем Вы занимаетесь? Дирак: релятивистским
уравнением для электрона. Но эту проблему уже решил
Клейн!

Уравнение Дирака

Дирак (1928): уравнение Клейна–Гордона приводит к отрицательным вероятностям. Правильное уравнение должно быть 1 порядка по времени. А значит и по координатам. Магнитный момент (впрочем, член Паули). Спектр водорода, тонкая структура (эффект Томаса автоматически).

Уравнение Дирака



1930: море Дирака, дырки — протоны. Думал, что кулоновское взаимодействие может увеличить массу дырки. Аннигиляция. Вейль строго доказал, что массы дырки и электрона равны. 1931: антиэлектроны; антипротоны. Блэкет, Оччилиани (Кембридж 1933); Андерсон (1932) — открытие позитронов в космических лучах.