

## Эксперимент Штерна–Герлаха (1922)

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

## Ральф Крониг

Ральф Крониг: Дрезден (1904), Колумбийский университет. Январь 1925 — Тюбинген, мекка спектроскопистов: Ланде, Герлах, Бак. Письмо Паули к Ланде. Крониг: спин  $s = \frac{1}{2}$ ,  $\mu_B$ . Тонкая структура щелочных металлов, правильная зависимость от  $Z$ . Н: токная структура описывалась формулой Зоммерфельда. Чтобы не испортить согласие, надо, чтобы спин приводил к замене  $l \rightarrow j + \frac{1}{2}$ , тогда уровни  $l = j \pm \frac{1}{2}$  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)  $\gg c$ .

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? Крониг не опубликовал эту идею.

## Джордж (Георг) Уленбек

**1900** Батавия, Голландская Ост-Индия (Джакарта, Индонезия). Отец подполковник, мать — дочь генерал-майора.

**1905** Гаага. В школе интересовался физикой, читал университетский учебник Лоренца, дифференциальное и интегральное исчисление.

**1918** Выпускные экзамены. Чтобы поступить в университет, требовалось знать греческий и латынь, которые изучали только в гимназиях. Технологический институт в Делфте — химическое машиностроение.

**1919** Лейденский университет

**1920** Кандидатские экзамены. Лекции и семинары Эренфеста.

**1922** Домашний учитель сына голландского посла в Риме до 1925. Подружился с Ферми, пригласил его в Лейден к Эренфесту на 3 месяца.

**1925** Лейден, ассистент Эренфеста. Узнал от Гаудсмита о проблемах атомной теории.

**1927** Копенгаген, на обратном пути Гёттинген. Защита диссертации в Лейдене. Мичиганский университет в Энн Арбор (на место Клейна).

## Самуэль Гаудсмит

**1902** Гаага, в семье торговцев-евреев. В школе увлёкся физикой, когда прочитал, что с помощью спектроскопии можно делать химический анализ Солнца и звёзд.

**1919** Лейденский университет, Эренфест. В 1920, 1921 посещал Тюбинген, познакомился с Папеном. Статьи по эффекту Зеемана. Эренфест решил, что из него не выйдет настоящего теоретика, и устроил его на  $\frac{1}{2}$  ставки в лабораторию Зеемана в Амстердаме.

**1925** Дружба с Уленбеком, взгляд с точки зрения более общих физических соображений.

**1926** Посетил Копенгаген, Тюбинген.

1927 Защита диссертации (в тот же день, что Уленбек). Мичиганский университет (вместе с Уленбеком).

1944–45 Миссия Алсос

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. Эйнштейн 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.

Этот релятивистский эффект обсуждал Эмиль Борель в 1913; в том же году 2 молодых математика из Гёттингена вывели формулу для движения по окружности. Принцип Арнольда: Если какой-то закон, эффект, теорема и т. д. назван именем какого-то человека, значит, *не тот* человек первым открыл этот закон (эффект и т. д.). Следствие: этот принцип первым придумал не Арнольд. В том же 1926 эту прецессию описал также Френкель.

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

## Теория излучения Бора–Крамерса–Слэтера

Эйнштейн: Если правительство Германии решит что свет — это волны, то ему придётся запретить фотоэлементы. Если оно решит, что свет — то частицы, то ему придётся запретить дифракционные решётки. Бор: если Эйнштейн завтра получит решающее доказательство существования квантов света и пошлёт мне об этом телеграмму, всё равно эта телеграмма достигнет меня только с помощью радиоволн. Эйнштейна не нравилось, что момент излучения и его направление определены только вероятностно. Бор предполагал, что законы сохранения энергии и импульса не выполняются в отдельных актах излучения и поглощения света, а только статистически.

Эффект Комптона (1923). Крамерс получил формулу Комптона в 1921, но Бор убедил его, что это чушь; Дебай тоже вывел её, а также связь между направлениями вылета фотона и рассеянного электрона. Вильсон наблюдал рассеянные электроны.

Идея Слэтера: и волны, и фотоны. Атом в возбуждённом состоянии  $i$  непрерывно излучает электромагнитные волны со всеми частотами  $\omega_{ij}$ , действуя как набор осцилляторов. Вероятность излучения фотона  $\hbar\omega_{ij}$  в единицу времени = интегралу от вектора Пойнтинга, делённому на  $\hbar\omega$ . В момент излучения атом мгновенно переходит в состояние  $j$ . Вероятность найти фотон в точке  $x$  = плотности энергии поля, делённой на  $\hbar\omega$ . Само поле не имеет энергии. Точное сохранение энергии-импульса.

Слэтер приехал в Копенгаген (декабрь 1923). Бор и Крамерс не признают фотонов. Через 1 месяц написали статью без единой формулы (реально писали Бор и Крамерс).

- Атом в стационарном состоянии = набор виртуальных осцилляторов. Они непрерывно излучают виртуальные волны, не имеющие энергии и импульса.

- Виртуальные волны в точке, где находится атом, могут вызывать реальное вынужденное излучение. Вероятности атомных переходов определяются состоянием атома и виртуальным полем излучения в точке, где он находится. В том числе участвует виртуальное поле того же самого атома.
- Нет причинной связи между переходами в удалённых атомах. Энергия и импульс не сохраняются в индивидуальных актах, а только статистически.

Сферические волны, а не направленное излучение. Если произошёл реальный переход, приведший к увеличению энергии, виртуальные поля меняются таким образом, что увеличивается вероятность реальных переходов с уменьшением энергии, и уменьшается вероятность того, что энергия снова возрастёт. Принцип соответствия: в пределе больших квантовых чисел виртуальное поле излучения есть реальное электромагнитное поле.

Эффект Комптона в теории БКС. Виртуальное поле может привести к переходу электрона в другое состояние. Возникает движущийся виртуальный осциллятор; из-за эффекта Дошлера частота будет другой (и зависеть от угла); при правильном выборе его скорости воспроизводится формула Комптона. Паули, Эйнштейн критикуют.

Эксперимент Боте–Гейгера (1925): совпадения рассеянных квантов и электронов. Эксперимент Комптона–Саймана: камера Вильсона, связь их углов вылета.

## Дисперсия

Друде, Лоренц

$$\begin{aligned} \ddot{x} + \omega_0^2 x &= \frac{e}{m} \mathcal{E} & \mathcal{E} &= \mathcal{E}_0 e^{-i\omega t} & x &= x_0 e^{-i\omega t} \\ d = ex &= \alpha \mathcal{E} & \alpha &= \frac{e^2}{m} \frac{1}{\omega_0^2 - \omega^2} \\ \alpha &= \frac{e^2}{m} \sum_i \frac{f_i}{\omega_i^2 - \omega^2} \\ \omega \rightarrow \infty : & \sum_i f_i = N & & \text{Томас-(Райхе)-Кун} \end{aligned}$$

Ладенбург (1921). Время затухания

$$\begin{aligned} I &= \frac{2\ddot{d}^2}{3c^3} & d &= ex & \ddot{d} &= -\omega_0^2 ex \\ -\frac{dE}{dt} &= \frac{2e^2\omega_0^4}{3c^3} x^2 & \frac{m\omega_0^2 \overline{x^2}}{2} &= \frac{E}{2} & \overline{x^2} &= \frac{E}{m\omega_0^2} \\ -\frac{dE}{dt} &= \frac{2e^2\omega_0^2}{3mc^3} E = \frac{E}{\tau} & \tau &= \frac{3mc^3}{2e^2\omega_0^2} \end{aligned}$$

Атом в состоянии  $i$  —  $f_{ij}$  осцилляторов с частотой  $\omega_{ij} = (E_j - E_i)/\hbar$ . В равновесии с излучением

$$\overline{E} = 3 \frac{w(\omega_{ij})}{\nu(\omega_{ij})} = \frac{3\pi^2 c^3}{\omega_{ij}^2} w(\omega_{ij})$$

т. к. осцилляторы 3-мерные. Классическое излучение

$$-\frac{dE}{dt} = f_{ij} \frac{\overline{E}}{\tau} = f_{ij} \frac{2\pi^2 e^2}{m} w(\omega_{ij})$$

Квантовое поглощение ( $E_j > E_i$ )

$$\frac{dE}{dt} = \hbar\omega_{ij} B_{ji} w(\omega_{ij}) \quad B_{ji} = B_{ij} \quad A_{ij} = \frac{\hbar\omega_{ij}^3}{\pi^2 c^3} B_{ij} \quad \frac{dE}{dt} = \frac{\pi^2 c^3}{\omega_{ij}^2} A_{ij} w(\omega_{ij})$$

В равновесии

$$f_{ij} \frac{2\pi^2 e^2}{m} w(\omega_{ij}) = \frac{\pi^2 c^3}{\omega_{ij}^2} A_{ij} w(\omega_{ij}) \quad f_{ij} = \frac{mc^3}{2e^2 \omega_{ij}^2} A_{ij}$$

Следовательно

$$\alpha = \frac{c^3}{2} \sum_j \frac{A_{ij}}{\omega_{ij}^2 (\omega_{ij}^2 - \omega^2)}$$

Крамерс (1924)

$$\begin{aligned} \alpha_i &= \frac{e^2}{m} \left[ \sum_{j>i} \frac{f_{ij}}{\omega_{ij}^2 - \omega^2} - \sum_{j<i} \frac{f_{ji}}{\omega_{ji}^2 - \omega^2} \right] \\ &= \frac{c^3}{2} \left[ \sum_{j>i} \frac{f_{ij}}{\omega_{ij}^2 (\omega_{ij}^2 - \omega^2)} - \sum_{j<i} \frac{f_{ji}}{\omega_{ji}^2 (\omega_{ji}^2 - \omega^2)} \right] \\ \sum_{j>i} f_{ij} - \sum_{j<i} f_{ji} &= N \quad \text{Томас-(Райхе)-Кун} \end{aligned}$$

Член с отрицательными осцилляторами необходим для принципа соответствия.

Борн (1924) “О квантовой механике”

$$\begin{aligned} \omega \Delta n &= \frac{dH(I)}{dI} \Delta n \rightarrow \frac{E_n - E_{n-\Delta n}}{\hbar} = \frac{H(\hbar n) - H(\hbar(n - \Delta n))}{\hbar} \\ \frac{dF(I)}{dI} \Delta n &\rightarrow \frac{F(\hbar n) - F(\hbar(n - \Delta n))}{\hbar} \end{aligned}$$

Крамерс, Хайзенберг (1925) 1-мерная периодическая система

$$d = \sum_{l=-\infty}^{+\infty} c_l e^{-il\omega t}$$

Включим  $\mathcal{E} = \mathcal{E}_0 e^{-i\omega t}$ . Часть  $d$  с частотой  $\omega$

$$\begin{aligned} d &= \frac{1}{2} \sum_{l=1}^{\infty} l \frac{\partial}{\partial I} \left( \frac{|C_l|^2}{l\omega_0 + \omega} + \frac{l\omega_0 - \omega}{l\omega_0 - \omega} \right) \mathcal{E}_0 e^{-i\omega t} \\ \alpha &= \frac{1}{2\hbar} \sum_{l>0} l \frac{\partial}{\partial n} \left( \frac{|c_l(n)|^2}{l\omega_0 + \omega} + \frac{|c_l(n)|}{l\omega_0 - \omega} \right) \end{aligned}$$

Подстановка

$$\begin{aligned} l \frac{\partial}{\partial n} \left( \frac{|c_l(n)|^2}{l\omega_0 + \omega} + \frac{|c_l(n)|}{l\omega_0 - \omega} \right) &\rightarrow \frac{|c_{n-l,n}|^2}{\omega_{n-l,n} + \omega} + \frac{|c_{n-l,n}|^2}{\omega_{n-l,n} - \omega} - \frac{|c_{n,n+l}|^2}{\omega_{n,n+l} + \omega} - \frac{|c_{n,n+l}|^2}{\omega_{n,n+l} - \omega} \\ \alpha &= \frac{1}{2\hbar} \left[ \sum_{n'<n} \left( \frac{|c_{n'n}|^2}{\omega_{n'n} + \omega} + \frac{|c_{n'n}|^2}{\omega_{n'n} - \omega} \right) - \sum_{n'>n} \left( \frac{|c_{nn'}|^2}{\omega_{nn'} + \omega} + \frac{|c_{nn'}|^2}{\omega_{nn'} - \omega} \right) \right] \end{aligned}$$

В классике

$$I = \frac{2}{3c^3} (l\omega)^4 |c_l(n)|^2 \rightarrow \frac{2}{3c^3} \omega_{n-l,n}^4 |c_{n-l,n}|^2 = A_{n-l,n} \hbar \omega_{n-l,n} \quad |c_{n-l,n}|^2 = \frac{3}{2} c^3 \hbar \frac{A_{n-l,n}}{\omega_{n-l,n}^3}$$

Отсюда

$$\alpha = \frac{3}{4} c^3 \left[ \sum_{n'<n} \frac{A_{n'n}}{\omega_{n'n}^3} \left( \frac{1}{\omega_{n'n} + \omega} - \frac{1}{\omega_{n'n} - \omega} \right) - \sum_{n'>n} \frac{A_{nn'}}{\omega_{nn'}^3} \left( \frac{1}{\omega_{nn'} + \omega} - \frac{1}{\omega_{nn'} - \omega} \right) \right]$$

множитель 3 исчезнет в 3-мерном случае. Рассмотрели также излучение с частотами  $\neq \omega$  — Смекаль (1923); Ландсберг, Мандельштам (1928); Раман.

$$\begin{array}{l} n+l \text{-----} \\ n \text{-----} \\ n-l \text{-----} \end{array} \quad |c_{n,n+l}|^2 \left( \frac{1}{\omega_{n,n+l} + \omega} + \frac{1}{\omega_{n,n+l} - \omega} \right) \\ |c_{n-l,n}|^2 \left( \frac{1}{\omega_{n-l,n} + \omega} + \frac{1}{\omega_{n-l,n} - \omega} \right)$$

## Хендрик Крамерс

- 1894** Роттердам, в семье врача  
увлекался математикой, физикой, литературой; играл на виолончели
- 1911** изучал латынь и греческий, чтобы поступить в университет
- 1912** Лейденский университет, лекции Лоренца, семинары Эренфеста (Эренфест не считал, что он может стать учёным)
- 1916** магистр; учитель в школе. Написал письмо Бору. Бор пригласил в Копенгаген и сделал своим ассистентом.
- 1919** Лейден, диссертация о спектрах. Боровский институт, фактически заместитель Бора.
- 1926** Утрехтский университет, профессор
- 1934** После смерти Эренфеста — Лейденский университет, профессор

## Вернер Хайзенберг

- 1901** Вюрцбург. Отец Август — учитель греческого в гимназии и лектор по греческой филологии в университете. Мать — дочь директора Максимилиановской гимназии в Мюнхене Векляйна.
- 1910** Мюнхен, отец — кафедра византийской филологии. Максимилиановская гимназия. Цели: моральное воспитание в духе христианской этики; патриотическое воспитание; подготовка к поступлению в университет. Предметы: латинский; греческий; немецкий; математика; история; религия; физкультура; французский; география; естественные науки. Увлекался математикой, физикой, музыкой, поэзией.
- 1916** военная подготовка, сельхоз работы
- 1917** ренная зима
- 1918** 7 ноября — революция, 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” — потерял для математики. Зоммерфельд: сразу участие в семинаре. Дружба с Паули.
- 1922** Лекции Бора в Гёттингене. Квадратичный эффект Штарка и дисперсия при  $\omega \rightarrow 0$ . Зима 1922–23: Гёттинген у Борна, возбуждённые состояния He.
- 1923** лето: защита диссертации в Мюнхене. Вин: вопрос про разрешающую способность микроскопа.

**1924** Хабилизация. До 1925: Копенгаген.

**1925** июнь — статья про квантовую механику.