

## Третье начало термодинамики

Вальтер Нернст

**1864** Германия

**1891** доцент, Гёттинген

**1895** профессор, Гёттинген

**1899** первый частный автомобиль в Гёттингене

**1905** третье начало термодинамики. При  $T = 0$  энтропия  $S = 0$  (формулировка Планка 1911).

**1914** водитель добровольческого автомобильного корпуса. Разработка химического оружия и взрывчатки.

**1920** Нобелевская премия по химии

Электрохимия: гальванические элементы, физическая химия. Разводил карпов. Дифенилметанат плавится при 26deg; если плавился в 11 часов, уводил студентов заниматься греблей и плаванием.

## Формула Сакура–Тетроде

Отто Сакур

**1880** Бреслау

**1901** PhD университет Бреслау

**1903** Лондон (Рамзай), Берлин (Нернст)

**1905** хабилитация

**1911** профессор химии, Бреслау  
Энтропия идеального газа

**1914** институт Фрица Хабера, Берлин  
декабрь — погиб при взрыве

Хьюго Тетроде

**1895** Амстердам. Отец — директор национального банка.

**1911** университет Лейпциг

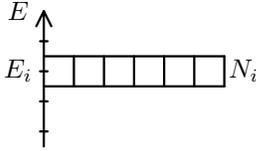
**1912** вернулся в Амстердам  
Энтропия идеального газа

**1931** умер от туберкулёза

Переписывался с Эйнштейном, Лоренцем, Эренфестом. Однажды Эйнштейн и Эренфест зашли к нему в Амстердаме, служанка: “Сэр не принимает гостей”.

Планк: объём ячейки фазового пространства  $2\pi\hbar$ . Способ измерения  $\hbar$ .

# Статистика Больцмана, Бозе–Эйнштейна, Ферми–Дирака

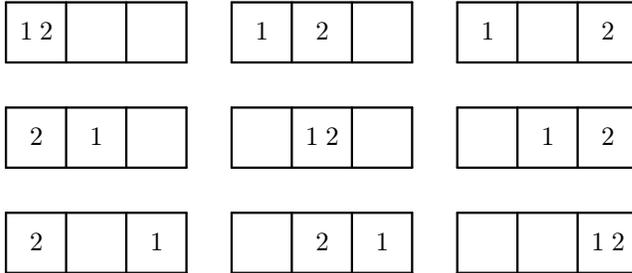


$$W = \prod W_i \quad S = \sum S_i$$

$$S = \max \text{ при } \sum n_i = n, \sum n_i E_i = E$$

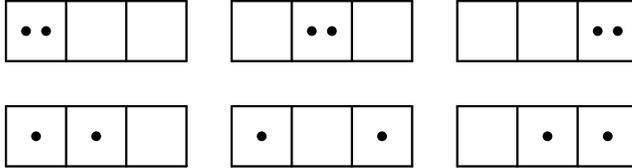
$$\delta \left[ S - \alpha \sum n_i - \beta \sum n_i E_i \right] = 0 \quad \frac{\partial S_i}{\partial n_i} - \alpha - \beta E_i = 0$$

Больцман  $N = 3, n = 2$

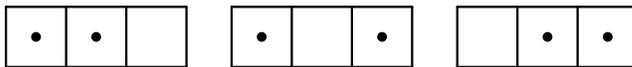


Парадокс Гиббса

Бозе–Эйнштейн



Ферми–Дирак



Больцман	Бозе–Эйнштейн	Ферми–Дирак
$W_i = \frac{N_i^{n_i}}{n_i!}$ $\rightarrow N_i^{n_i} \left( \frac{e}{n_i} \right)^{n_i}$ $S_i = n_i \log N_i - n_i \log n_i + n_i$ $\frac{\partial S_i}{\partial n_i} = \log N_i - \log n_i$ $\log \frac{N_i}{n_i} = \alpha + \beta E_i$ $\frac{n_i}{N_i} = e^{-\alpha - \beta E_i}$	$W_i = \frac{(N_i + n_i - 1)!}{(N_i - 1)! n_i!}$ $\rightarrow \frac{(N_i + n_i)^{N_i + n_i}}{N_i^{N_i} n_i^{n_i}}$ $S_i = (N_i + n_i) \log(N_i + n_i) - N_i \log N_i - n_i \log n_i$ $\frac{\partial S_i}{\partial n_i} = \log(N_i + n_i) - \log n_i$ $\log \left( \frac{N_i}{n_i} + 1 \right) = \alpha + \beta E_i$ $\frac{n_i}{N_i} = \frac{1}{e^{\alpha + \beta E_i} - 1}$	$W_i = \frac{N_i!}{n_i! (N_i - n_i)!}$ $\rightarrow \frac{N_i^{N_i}}{n_i^{n_i} (N_i - n_i)^{N_i - n_i}}$ $S_i = N_i \log N_i - n_i \log n_i - (N_i - n_i) \log(N_i - n_i)$ $\frac{\partial S_i}{\partial n_i} = -\log n_i + \log(N_i - n_i)$ $\log \left( \frac{N_i}{n_i} - 1 \right) = \alpha + \beta E_i$ $\frac{n_i}{N_i} = \frac{1}{e^{\alpha + \beta E_i} + 1}$

Удовлетворяют 3 началу термодинамики.

Сатендра Нат Бозе

**1894** Калькутта. Отец — инженер на железной дороге.

**1913** магистр прикладной математики, Калькуттский университет.

**1916** лектор в Калькутском университете. Вместе с Саха — книга переводов (на английский) статей по теории относительности.

**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.

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*.

Энрико Ферми

**1901** Рим. Отец — железнодорожный служащий, мать — учительница.

**1918** Высшая нормальная школа, Пиза.

**1922** PhD, университет Пизы.

**1923** Гёттинген, Борн.

**1924** Лейден, Эренфест.

**1925** Флорентийский университет.

**1926** Римский университет, профессор.

1926. Газ частиц, подчиняющихся принципу Паули, в осцилляторном потенциале.

Хайзенберг (Копенгаген, лето 1926): атом гелия. Обменное взаимодействие — следствие кулоновского (а не магнитного) взаимодействия электронов. Если им пренебречь, симметричные и антисимметричные (координатные) волновые функции имеют одинаковые энергии. Кулоновское взаимодействие приводит к расщеплению. E1 переходы только между состояниями с одинаковой симметрией. Ортогелий (синглеты) и парагелий (триплеты), для каждого только одна симметрия волновой функции. Количественная модель:  $r < r_0$  — электрон чувствует заряд 2,  $r > r_0$  — заряд 1. Магнитное взаимодействие — тонкая структура.

В классической физике, если в какой-то момент мы сказали: вот эта частица номер 1, а вот эта номер 2, то в любой другой момент можно определить, которая частица номер 1, а которая номер 2, проследив их мировые линии. В квантовой механике это не так. Симметрия. Дирак (1926): волновые функции систем тождественных частиц, симметрия и антисимметрия. Слэтеровский детерминант. Вывел функции распределения. Читал статью Ферми, но забыл.

Электронный газ в металле: теплоёмкость (Зоммерфельд), парамагнетизм (Паули).

## Теорема Блоха

Феликс Блох

**1905** Цюрих

Политехникум, лекции Дебая, Вейля, Шрёдингера; учился вместе с фон Нейманом

**1927** Лейпциг, первый аспирант Хайзенберга

**1928** PhD, волновые функции в периодическом потенциале

Работал с Паули, Крамерсом, Хайзенбергом — ферромагнетизм, доменные стенки, Бором, Ферми.

- 1932 Лейпциг, приватдоцент
- 1933 Цюрих; Париж институт Пуанкаре
- 1934 Стэнфорд. Циклотрон Беркли, магнитный момент нейтрона.  
Лос Аламос; радарный проект в Гарварде
- 1946 ЯМР, уравнение Блоха
- 1952 Нобелевская премия
- 1954 первый генеральный директор ЦЕРН
- 1961 Стэнфорд  
Хайзенберг (1928) ферромагнетизм (чтобы проблемы теории Дирака не раздражали).

## Туннельный эффект

Георгий (Джордж) Гамов

- 1904 Одесса. Отец — преподаватель гимназии.
- 1921 Новороссийский (Одесский) университет
- 1922 Петроградский университет.  
Наблюдатель на метеорологической станции. Зав. метеорологической обсерватории артиллерийской школы — лекции по физике.
- 1924 Гос. оптический институт (Рождественский).
- 1925 Фридман; Крутков. Диплом по адиабатическим инвариантам.  
Гамов, Иваненко, Ландау, Бронштейн.
- 1926 аспирантура
- 1928 Гёттинген, Борн.  $\alpha$  распад, закон Гейгера–Нэттолла.  
Копенгаген, Кембридж.
- 1929 Копенгаген, Кембридж.
- 1931 Ленинград. ЛФТИ Иоффе.
- 1932 самый молодой член-кор. Отказались выпустить на конференцию в Рим.  
Крым  $\Rightarrow$  Турция, байдарка.
- 1933 7 Сольвеевский конгресс.
- 1934 Вашингтон, университет.
- 1936 Переходы Гамова–Теллера.
- 1938 С Бёте — термоядерные реакции в звёздах. Эволюция звёзд.  
Новые и сверхновые.
- 1948 Горячая вселенная
- 1954 Генетический код  
Популяризация

Поблагодарил Кочина за обсуждение математических вопросов:

$$\int_{r_0}^1 \sqrt{\frac{1}{r} - 1} dr$$

Эволюция элементов в ранней вселенной: Альфер, Гамов (1948), включили Бёте.

## Квазиклассическое приближение

Вентцель, Крамерс, Бриллюэн (1926). Точки поворота — линейный потенциал, функции Эйри. Правило квантования Бора–Зоммерфельда с добавочным  $\frac{1}{2}$ .

Молекулы. Приближение Борна–Оппенгеймера. Теория ковалентной связи Гайтлера–Лондона.

## Уравнение Паули

$\psi(x)$  — спинор, 2-компонентная величина. Операторы спина — матрицы Паули. Преобразования при вращении.

$$H = \frac{(\vec{p} - \frac{e}{c}\vec{A})^2}{2m} + eA_0 - \mu\vec{\sigma} \cdot \vec{B}$$

Тонкая структура водорода: в спин-орбитальном взаимодействии томасовскую половинку приходится вводить руками.

## Дирак: теория излучения

Представления Шрёдингера, Хайзенберга, Дирака. 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):  $\psi$  — поле; учёт взаимодействия. Фермионы: Йордан, Вигнер (1928). Пространства Фока (1932).

## Уравнение Дирака

Уравнение Клейна–Гордона: написано Шрёдингером; Клейн; Фок; Гордон (Комптон эффект в теории Шрёдингера) (1926). Фок — уравнение Шрёдингера в магнитном поле. Бор спросил Дирака (1927): чем Вы занимаетесь? Дирак: релятивистским уравнением для электрона. Но эту проблему уже решил Клейн!

Дирак (1928): уравнение Клейна–Гордона приводит к отрицательным вероятностям. Правильное уравнение должно быть 1 порядка по времени. А значит и по координатам.

$$\begin{aligned}(i\gamma^\mu \partial_\mu - m)\psi &= 0 \\ \psi = u e^{-ipx} \quad (\gamma^\mu p_\mu - m)u &= 0 \\ (\gamma^\nu p_\nu + m)(\gamma^\mu p_\mu - m) &= 0 \quad \gamma^\mu \gamma^\nu p_\mu p_\nu - m^2 = 0 \\ \gamma^\mu \gamma^\nu + \gamma^\nu \gamma^\mu &= 2g^{\mu\nu} \quad p^2 - m^2 = 0\end{aligned}$$

Матрицы Дирака. Преобразование Лоренца  $\psi$ . Ток (вероятность положительна), уравнение непрерывности. Внешнее поле. Магнитный момент (впрочем, член Паули). Спектр водорода, тонкая структура в 1 приближении (эффект Томаса автоматически). Гордон, Дарвин (1928): точное решение в кулоновском поле. 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, Отчилиани (Кембридж 1933); Андерсон (1932) — открытие позитронов в космических лучах.

Эренфест (1929): есть ли спинорное исчисление, аналогичное тензорному? ван дер Варден: есть! Спиноры в 1913 ввёл Картан, но физики про это не знали.