

# Ферми поверхность

Ферми поверхность (ФП) - изоэнергетическая поверхность в пространстве квазиимпульсов  $p$ , отделяющая область занятых электронных состояний металла от области, в которой при  $T = 0$  К электронов нет. За большинство свойств металлов ответственны электроны, расположенные на Ф. п. и в узкой области пространства квазиимпульсов (векторная величина, характеризующая состояние квазичастицы (например, подвижного электрона в периодическом поле кристаллической решётки)) вблизи неё.

Это связано с высокой концентрацией электронов проводимости в металле, плотно заполняющих уровни в зоне проводимости. Каждый металл характеризуется своей Ф. п., причём формы поверхностей разнообразны. Для «газа свободных электронов» Ф. п. – сфера. Объём, ограниченный Ф. п.  $\Omega_F$  (приходящейся на 1 элементарную ячейку в пространстве квазиимпульсов), определяется концентрацией  $n$  электронов проводимости в металле:

$$2\Omega_F/(2\pi\hbar)^3 = n.$$

# Де Хааза - ван Альфена эффект

- **ДЕ ХААЗА - ВАН АЛЬФЕНА ЭФФЕКТ** - наблюдаемая в металлах и вырожденных полупроводниках при низких температурах осциллирующая зависимость магн. момента  $M$  от внеш. магн. поля  $B$ . Впервые обнаружен В. де Хаазом (W. J. de Haas) и П. ван Альфеном (P. van Alphen) в Вi в 1930. В дальнейшем наблюдался практически у всех чистых металлов, у ряда интерметаллических соединений и др. веществ, имеющих металлич. проводимость ( $MoO_2$ ,  $WO_2$  и др.), а также в вырожденных полупроводниках и двумерных проводниках, в частности гетероструктурах. Д. Х.- в. А. э., как и др. квантовые осцилляции в магн. поле (напр., Шубникова - де Хааза эффект), обусловлен квантованием движения электронов в магн. поле.

# Энергия Ферми

- При  $T=0$  К

$$E_F(0) = \frac{\hbar^2}{2m} (3\pi^2 n)^{2/3}$$

Где  $\hbar$  - постоянная Планка,

$m$  – масса электрона,

$n$  – концентрация электронов

# Энергия Ферми

- При  $T \neq 0$  К

$$E_F \approx E_F(0) \left[ 1 - \frac{\pi^2}{12} \left( \frac{kT}{E_F(0)} \right)^2 \right]$$

Где  $\hbar$  - постоянная Планка,

$T$  - температура

$k$  - постоянная Больцмана

## Продолжение. Поверхность Ферми.

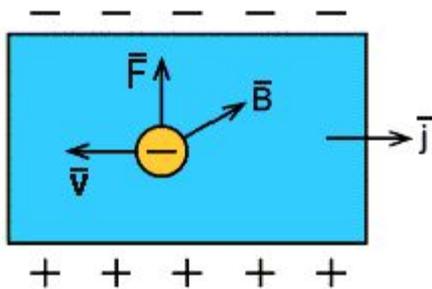
Если Ф. п. непрерывно проходит через всё пространство квазиимпульсов, она называется **открытой**. Если Ф. п. распадается на полости, каждая из которых помещается в одной элементарной ячейке пространства квазиимпульсов, она называется замкнутой, например у Li, Au, Si, Ag – открытые Ф. п., у K, Na, Rb, Cs, In, Bi, Sb, Al – замкнутые. Иногда Ф. п. состоит из открытых и замкнутых полостей. Скорости электронов, расположенных на Ф. п.:

$U_F \approx 10^8$  см/с, вектор (направлен по нормали к Ф. п.)

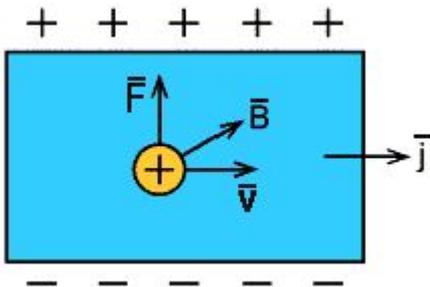
- Геометрические характеристики Ф. п. (форма, кривизна, площади сечений и т.п.) связаны с физическими свойствами металлов, что позволяет строить Ф. п. по экспериментальным данным. Например, Магнетосопротивление Геометрические характеристики Ф. п. (форма, кривизна, площади сечений и т.п.) связаны с физическими свойствами металлов, что позволяет строить Ф. п. по экспериментальным данным. Например, Магнетосопротивление металла зависит от того, открытая Ф. п. или замкнутая, а знак константы Холла (см. Холла эффект) от того, электронная она или дырочная. Период

# Эффект Холла

Действие силы Лоренца на движущийся отрицательный заряд



Действие силы Лоренца на движущийся положительный заряд

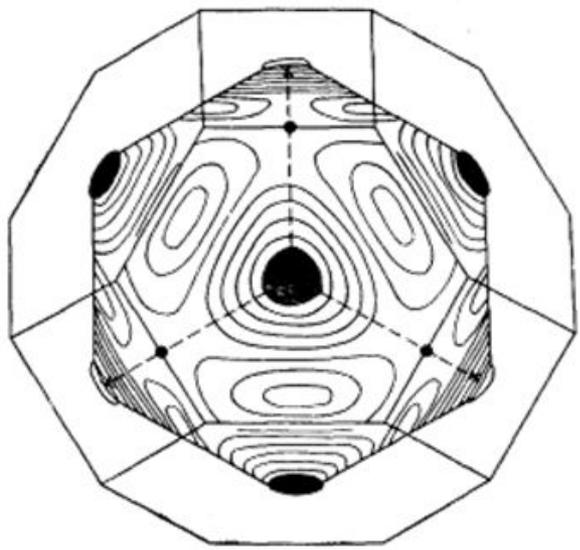


- **Эффектом Холла** называется возникновение поперечного электрического поля и разности потенциалов в проводнике или полупроводнике, по которым проходит электрический ток, при помещении их в магнитное поле, перпендикулярное к направлению тока.
- Если в магнитное поле с индукцией  $B$  поместить проводник или электронный полупроводник, по которому течет электрический ток плотности  $j$ , то на электроны, движущиеся со скоростью  $v$  в магнитном поле, действует сила Лоренца  $F$ , отклоняющая их в определенную сторону

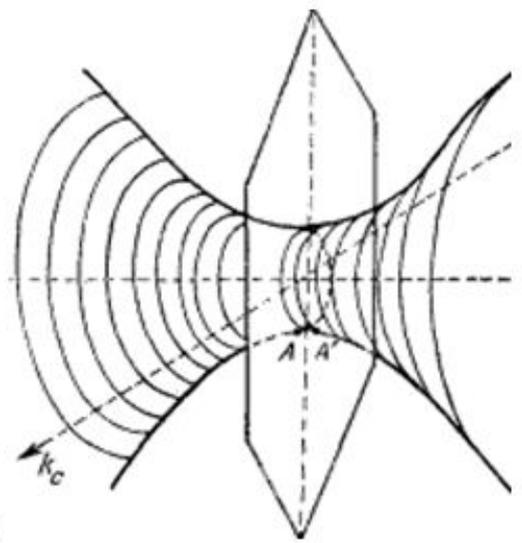
- Для большинства одноатомных металлов и многих интерметаллических соединений ф. п. уже изучены. Теоретическое построение ф. п. основано на модельных представлениях о движении валентных электронов в силовом поле ионов.

# Примеры поверхности Ферми

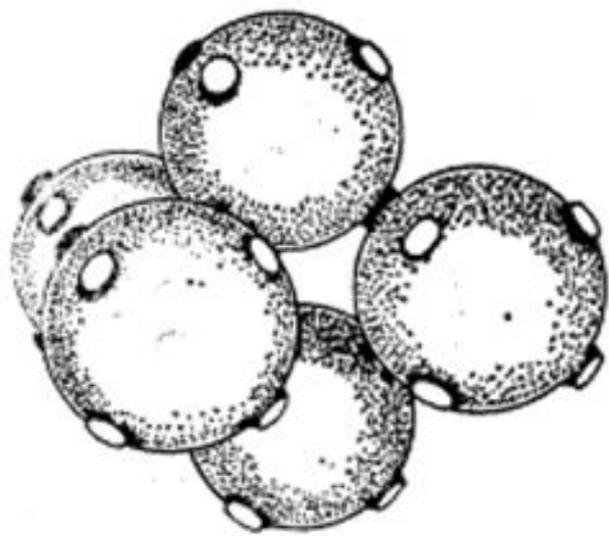
- Топология поверхности Ферми для меди, серебра и золота приблизительно одинаковая и представляет собой гофрированный сфероид, который через узкие трубки соединяется со сфероидами соседних ЗБ. На рис. *а* показан сфероид меди; на рис. *б* изображено соединение двух сфероидов в плоскости гексагональной грани, а на рис. *в* дана общая картина соединения нескольких ферми-сфероидов.



a)

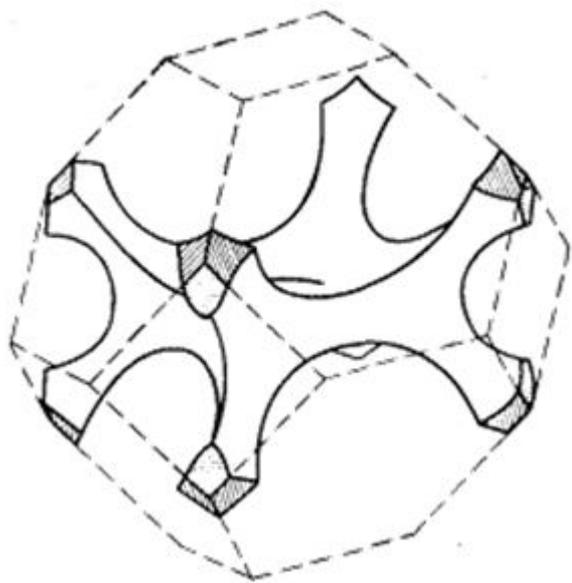


б)

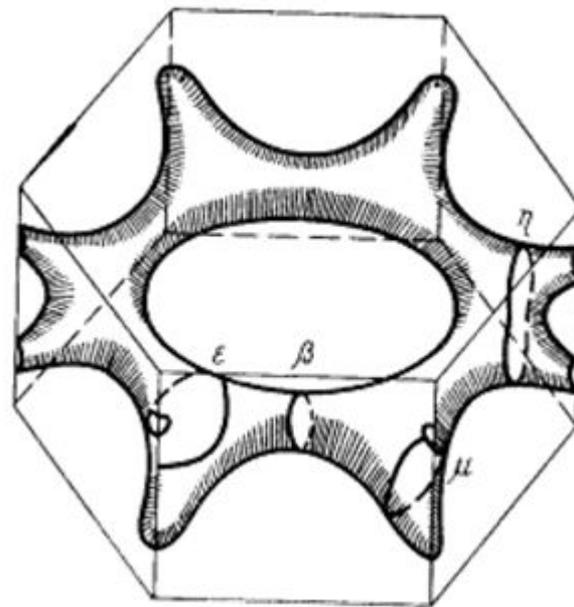


в)

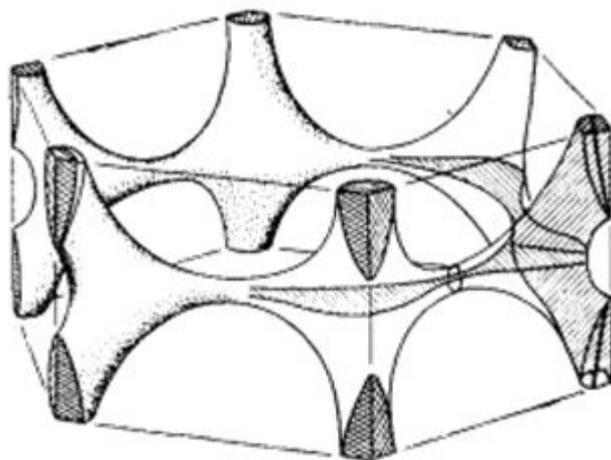
# Многосвязанная ферми-поверхность дырочного типа



кальций

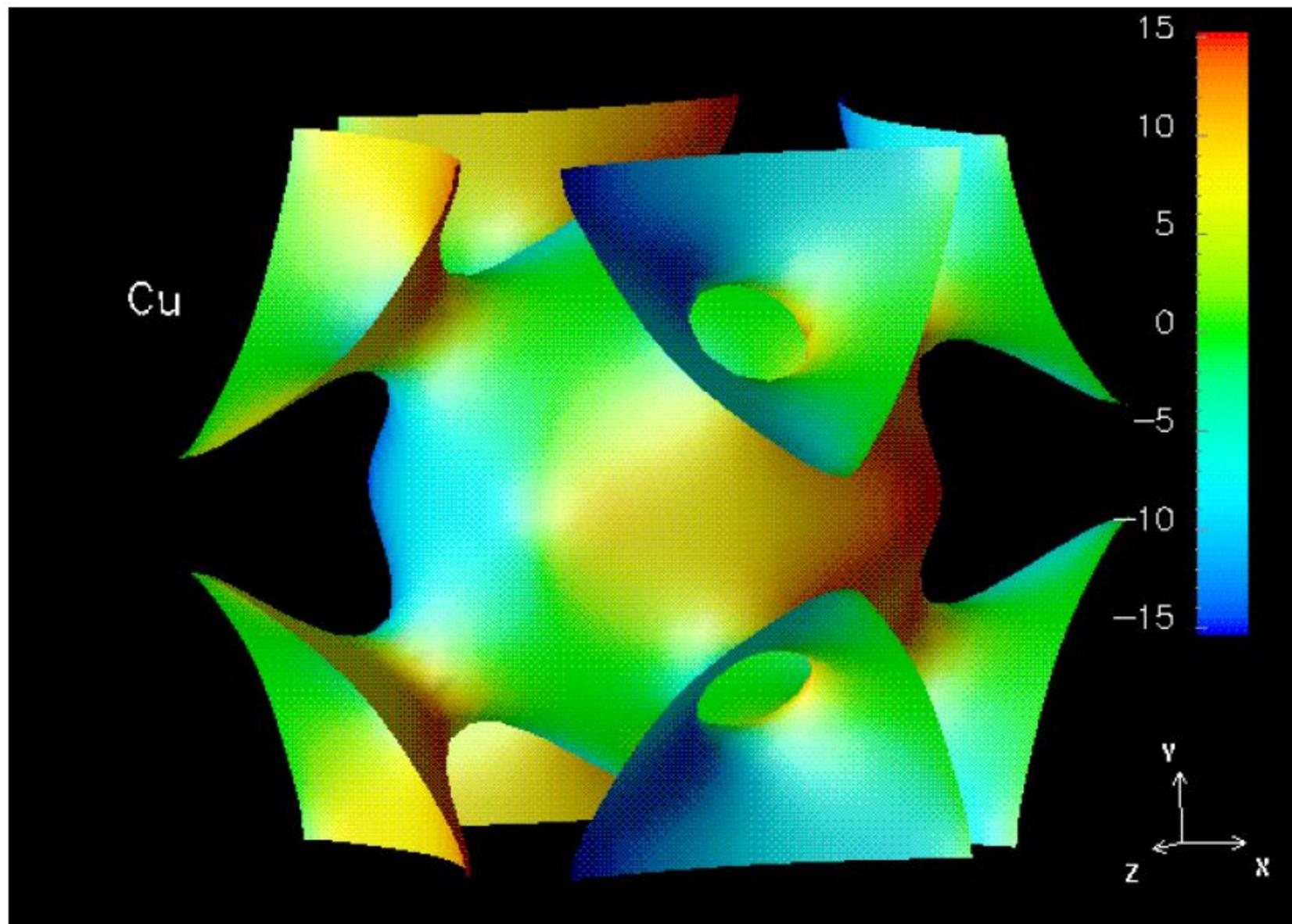


магний

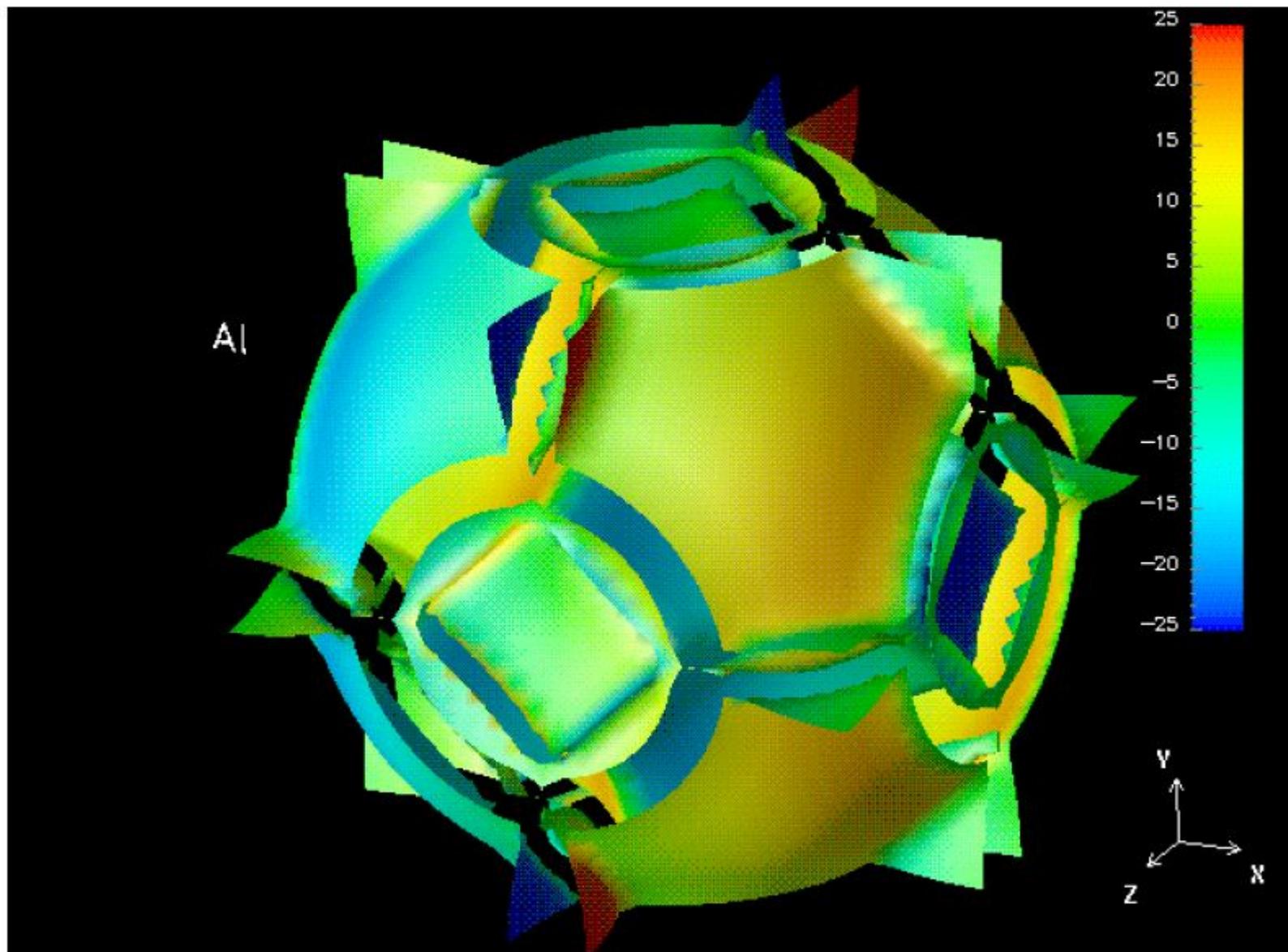


цинк

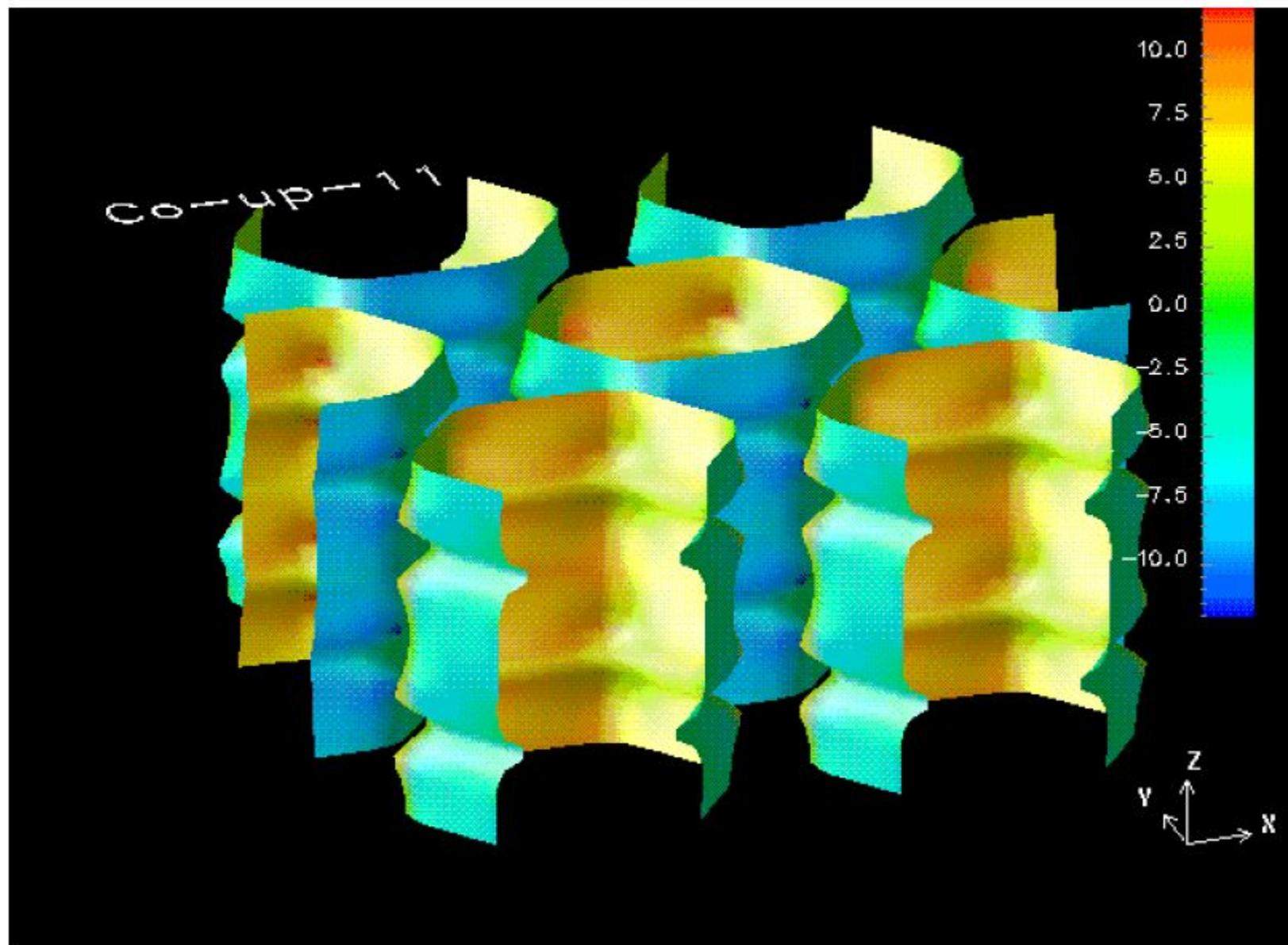
Примеры реальных поверхностей Ферми  
медь



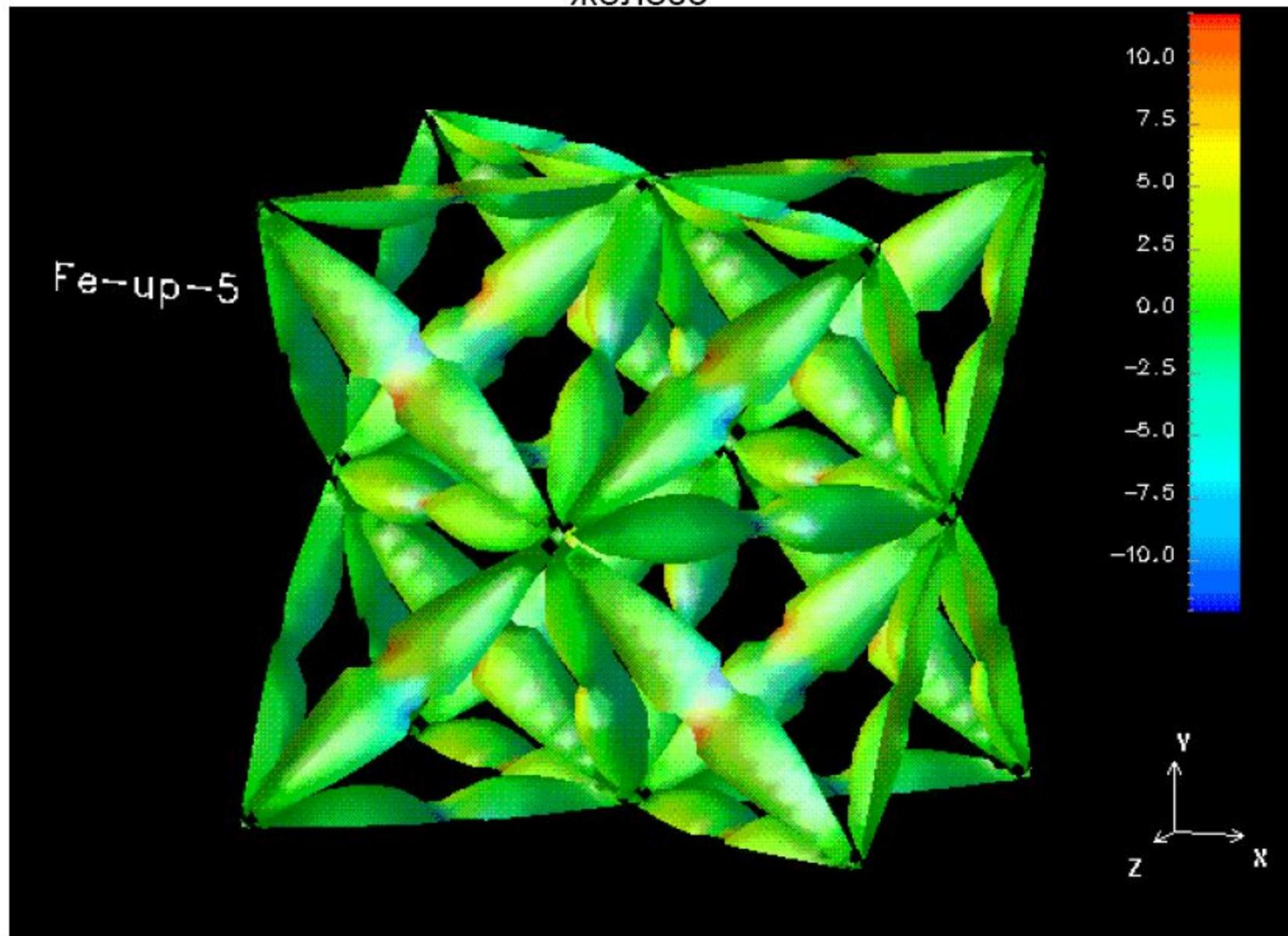
Примеры реальных поверхностей Ферми  
алюминий



1 примеры реальных поверхностей ферми  
кобальт



Примеры реальных поверхностей Ферми  
железо



Напомним теперь несколько важных моментов. Итак:

- поверхность Ферми отделяет заполненные электронные состояния в металлах от незаполненных при абсолютном нуле температуры
- кристаллический потенциал **изменяет форму** поверхности Ферми, но **не меняет ее объема**, который определяется концентрацией электронов проводимости
- импульс электронов на поверхности Ферми  $k_F$  называют **импульсом (или радиусом) Ферми**, энергию электронов на поверхности Ферми  $\varepsilon_F$  называют **энергией Ферми**, а скорость  $v_F = \hbar k_F / m$  – **скоростью Ферми**.

Посмотрим чему равны эти величины. Имея в виду вышеприведенные замечания, будем работать в приближении свободных электронов. Очевидно, что для нахождения числа возможных значений волновых векторов в объеме  $\Omega$  обратного пространства мы должны этот объем умножить на плотность числа состояний, которое, согласно выводам в лекции 2 равно  $V/(2\pi)^3$ , где  $V$  – объем кристалла, и на 2 за счет наличия спина у электрона.

$k_F$  – импульс Ферми

Объем сферы радиусом  $k_F$  равен  $4\pi k_F^3/3$ . Тогда для  $N$  электронов:

$$N = \left( \frac{4\pi k_F^3}{3} \right) \cdot \left( \frac{V}{8\pi^3} \right) \cdot 2 = \frac{k_F^3}{3\pi^2} \cdot V$$

Таким образом, для концентрации электронов в кристалле  $n=N/V$ , которая, как известно имеет порядок  $10^{22}$ - $10^{23}$ см<sup>-3</sup> получаем, что радиус Ферми имеет значение около  $1\text{\AA}^{-1}$ .

- Небольшое отклонение поверхности Ферми от сферы количественно можно охарактеризовать величиной анизотропии поверхности

$$\frac{\Delta S}{S} = 2 \frac{S_{\max} - S_{\min}}{S_{\max} + S_{\min}},$$

где  $S_{\max}$  и  $S_{\min}$  - максимальная и минимальная величины площадей сечения поверхности Ферми плоскостями, проходящими через центр зоны Бриллюэна. Для сферы, очевидно,  $\Delta S/S = 0$

Экспериментально определённые значения анизотропии поверхности Ферми и щелочных металлов при ведены в таблице

Т а б л и ц а

### Анизотропия поверхности Ферми щелочных металлов

Металл	Na	K	Rb	Cs
$\Delta S/ S, \%$	0,2	0,6	0,7	1,4

- Видно, что анизотропия поверхности Ферми не превосходит 1,5%. Поэтому замена реальной поверхности Ферми сферой приводит лишь к незначительной ошибке.