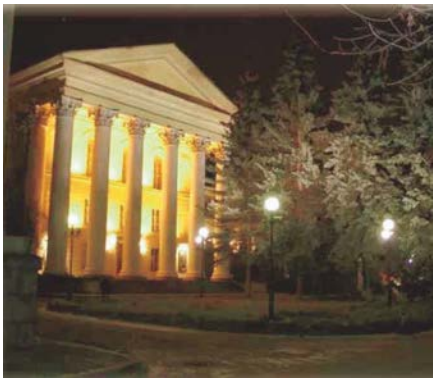
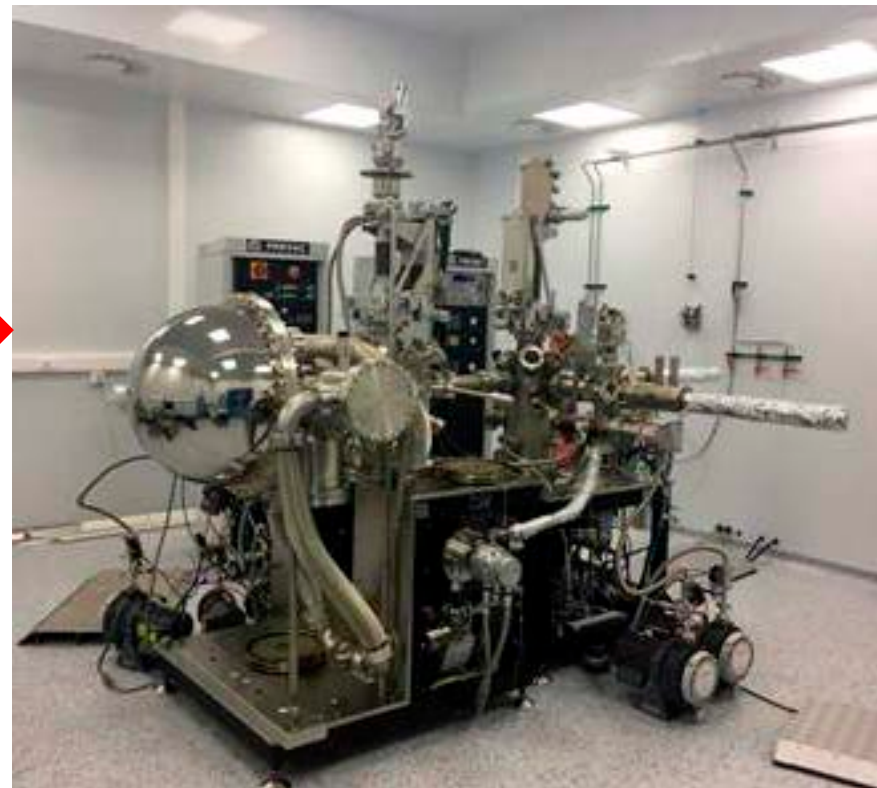




Центр сверхпроводимости и квантовых материалов им. В.Л. Гинзбурга (ФИАН)

**Лекция 13-2. Баллистические методы измерения
энергетического спектра электронов:
ARPES и STS**

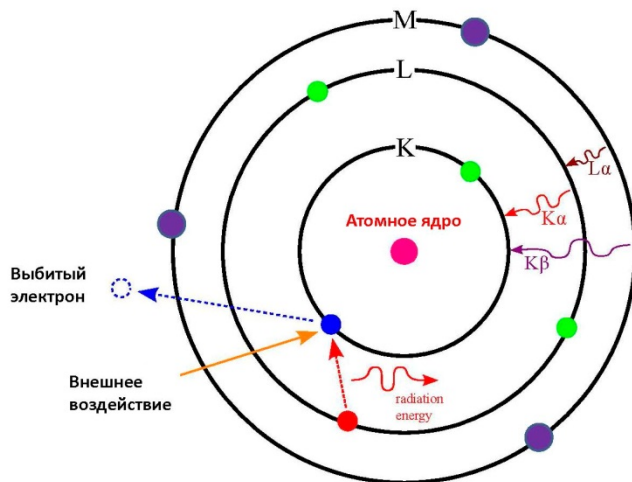
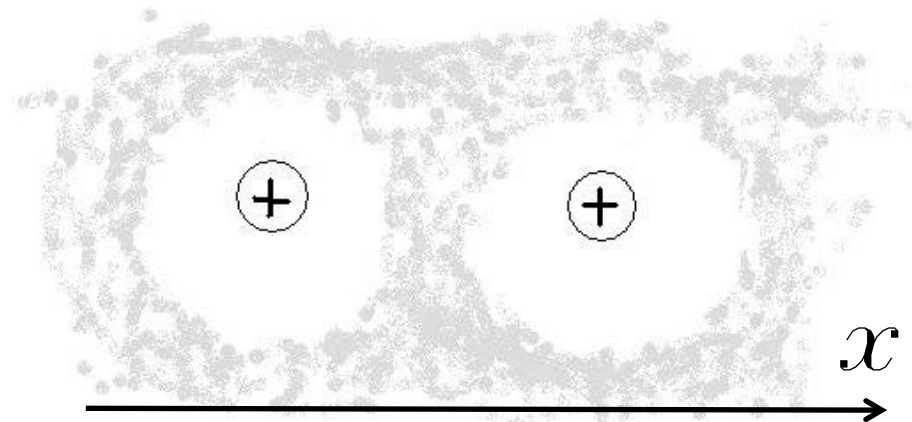
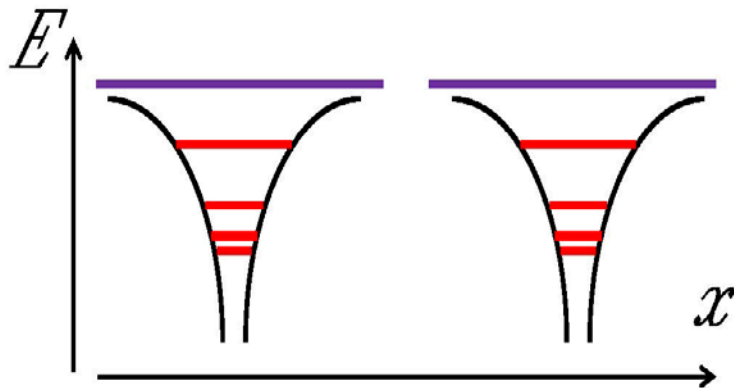
Установка
фотоэлектронной
спектроскопии с
угловым разрешением
(ARPES) Scienta R-4000



Сверхвысоковакуумный
низкотемпературный
сканирующий
туннельный микроскоп
Unisoku 1300 (0.3K/15T)

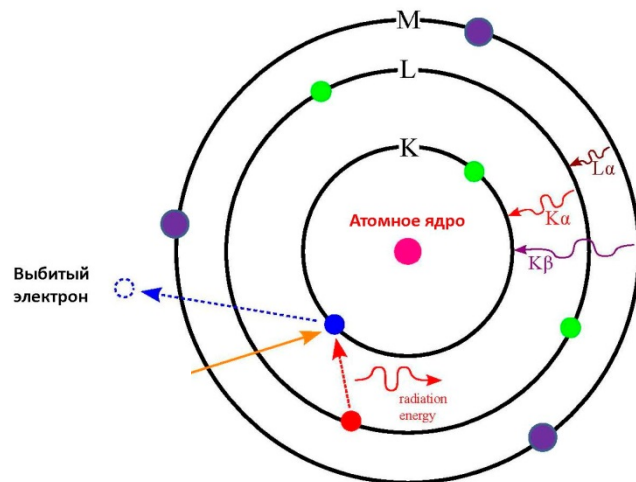
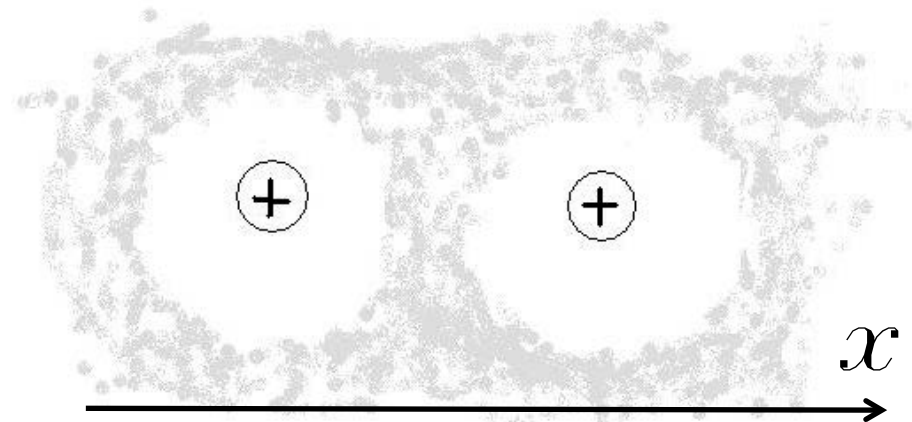
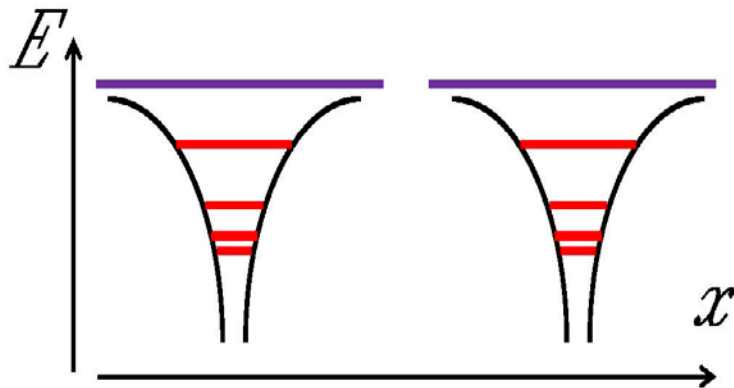
Локальные свойства электронов в металлах, топологических изоляторах, дираковских полуметаллах и сверхпроводниках

“Электроны в металлах” $\equiv$ электроны проводимости



Локальные **свойства** **электронов** в металлах, топологических изоляторах, дираковских полуметаллах и сверхпроводниках

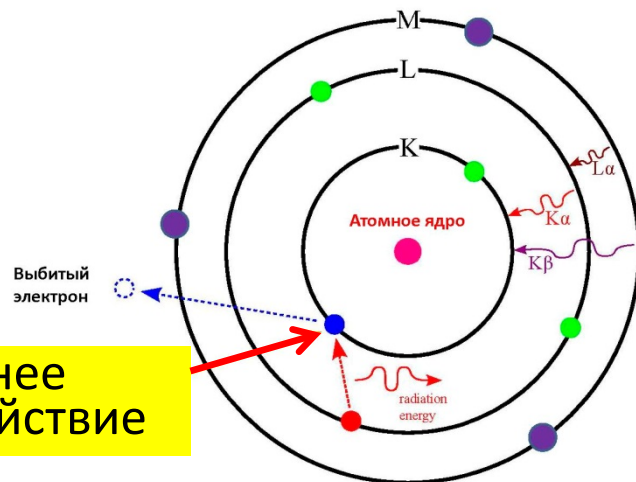
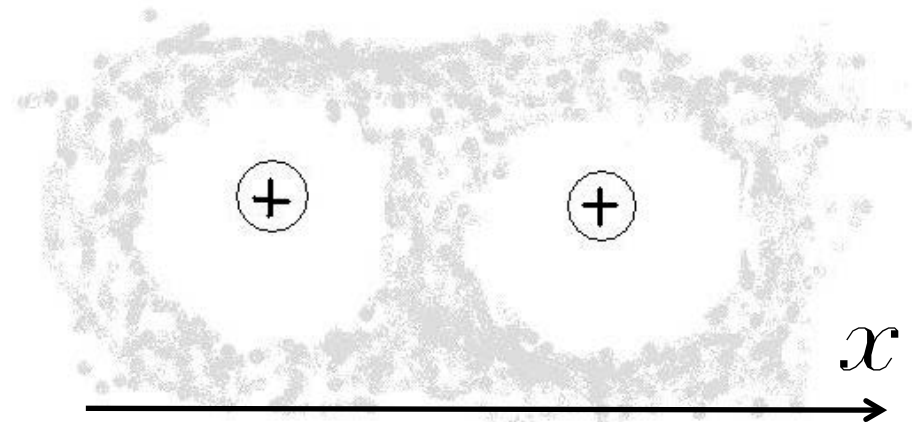
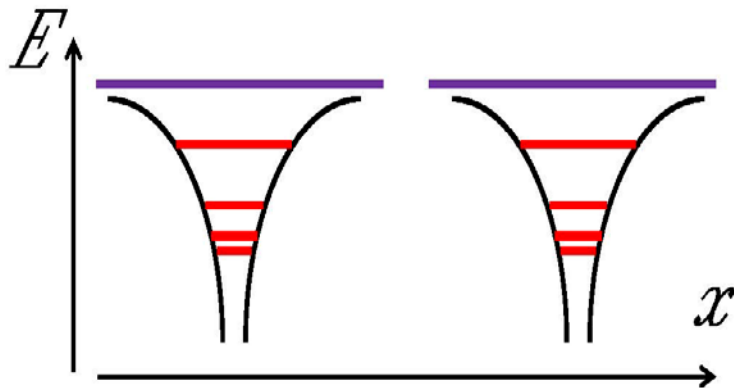
“Электроны в металлах” $\equiv$ электроны проводимости



Свойства ?

Локальные **свойства** **электронов** в металлах, топологических изоляторах, дираковских полуметаллах и сверхпроводниках

“Электроны в металлах” $\equiv$ электроны проводимости



Внешнее
воздействие

Свойства ?

Электронные свойства твердых тел –

- Сверхпроводимость,
- Магнетизм,
- Электроника,
- Спинтроника,
- Квантовые вычисления,...

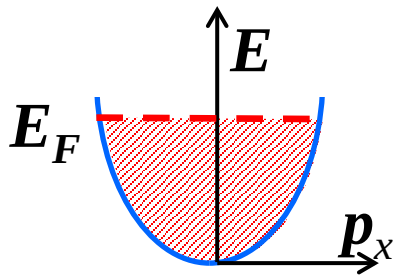
Большинство свойств определяются спектром $E(p)$

1. Свойства электронов вблизи поверхности

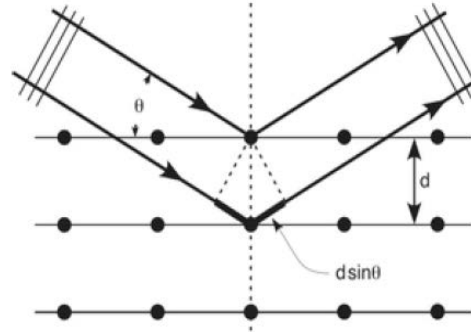
2. Локальные электронные свойства

Электроны в вакууме

$$E = \frac{p^2}{2m} = \frac{p_x^2 + p_y^2 + p_z^2}{2m}$$

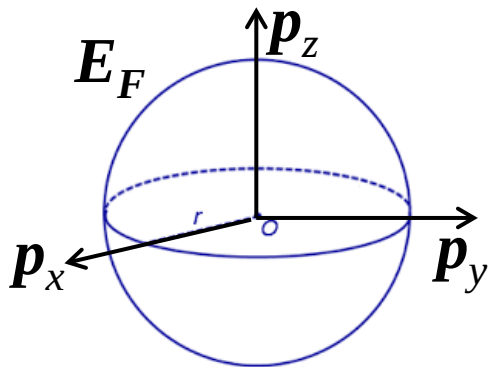


А в кристалле ?



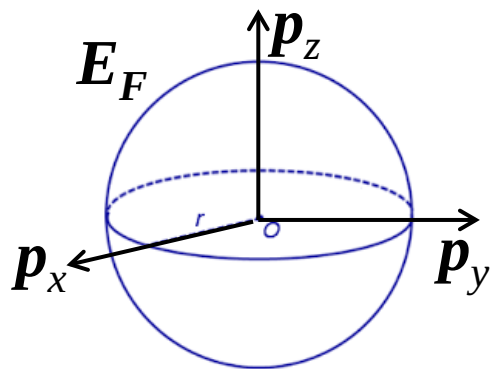
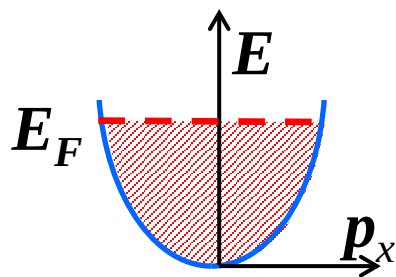
Фотон: $k=2\pi/\lambda$; $\lambda=c/f$; $E=hf$

Электрон: $p=hk/2\pi$; $k=2\pi/\lambda$; $E=p^2/2m = h^2/(2m\lambda)^2$

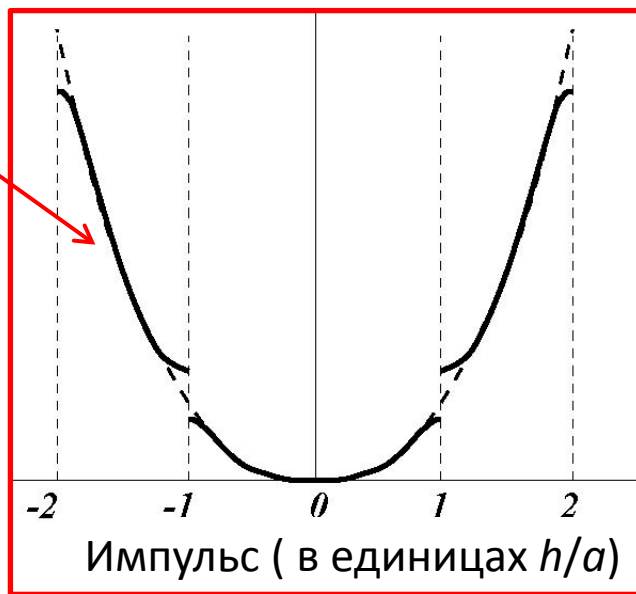
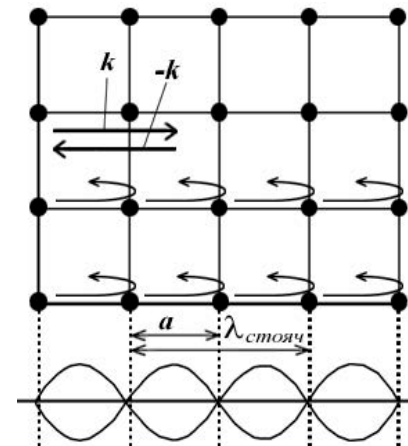
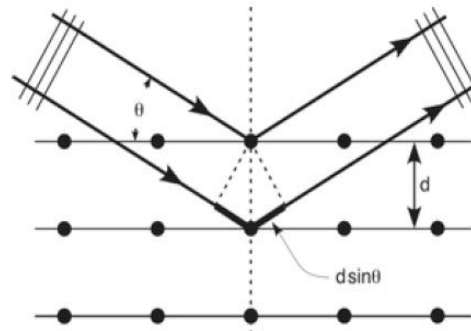


Электронны в вакууме

$$E = \frac{p^2}{2m} = \frac{p_x^2 + p_y^2 + p_z^2}{2m}$$

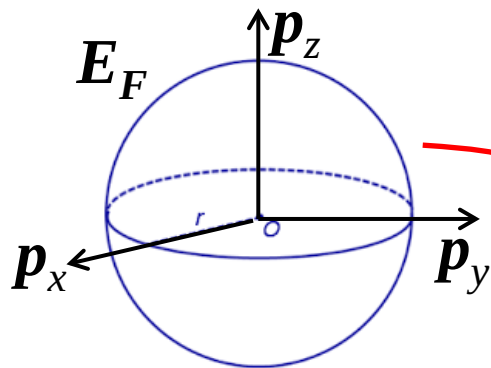
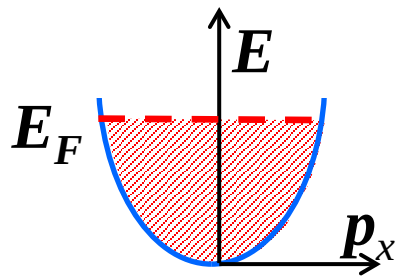


Электронны в кристалле

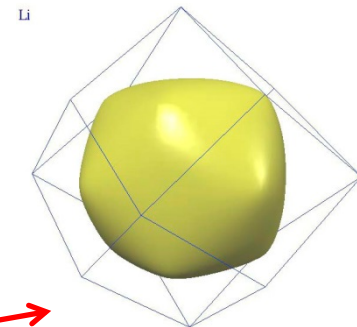
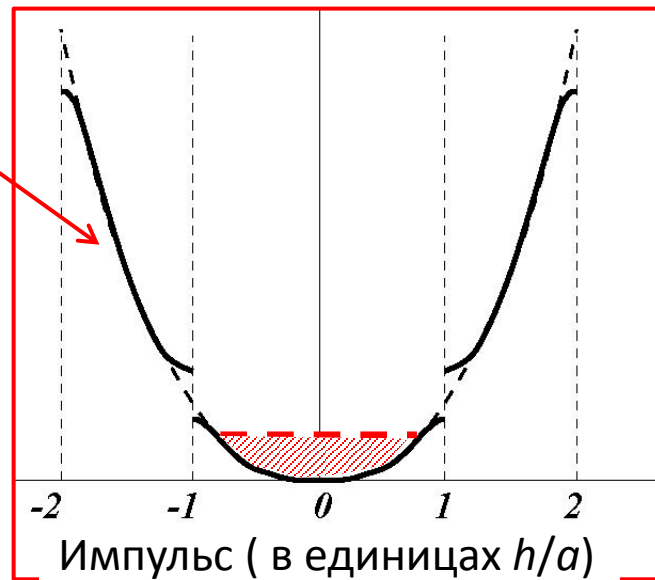
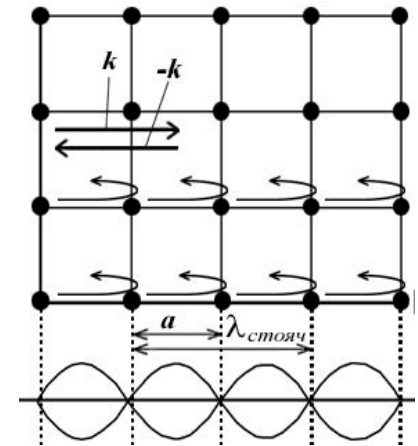
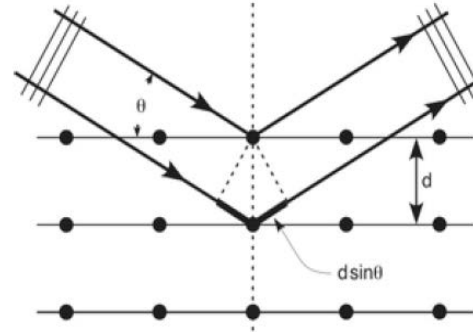


Электрон в вакууме

$$E = \frac{p^2}{2m} = \frac{p_x^2 + p_y^2 + p_z^2}{2m}$$

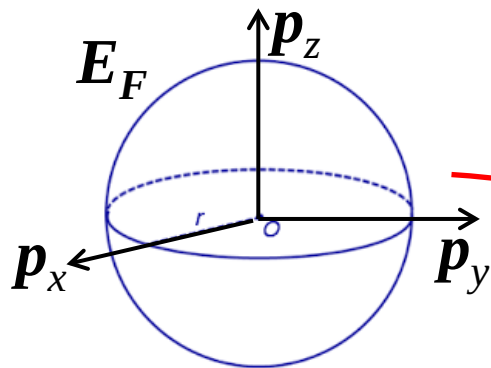
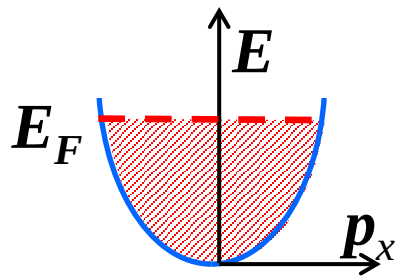


Электрон в кристалле

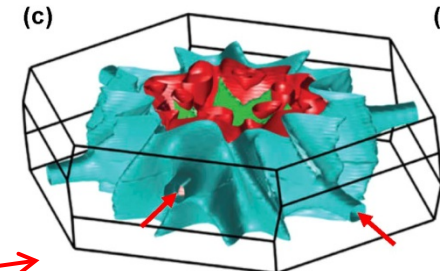
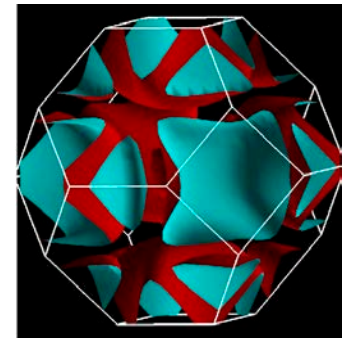
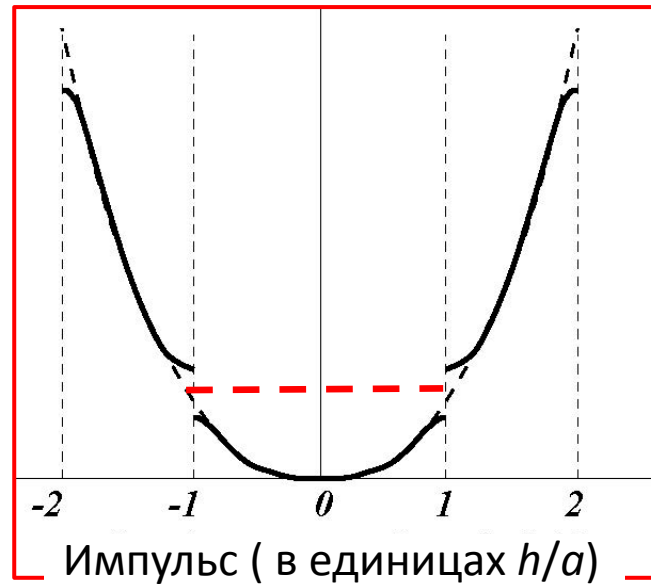
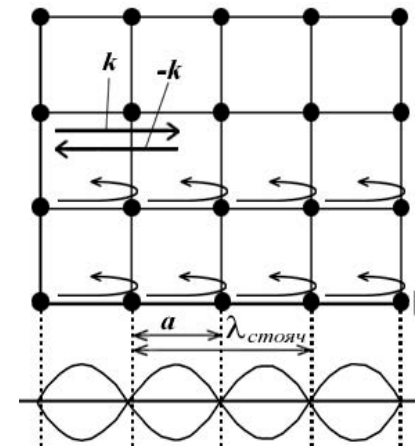
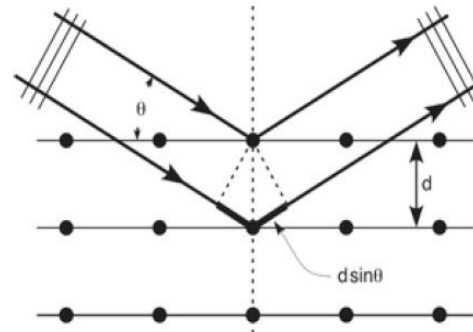


Электрон в вакууме

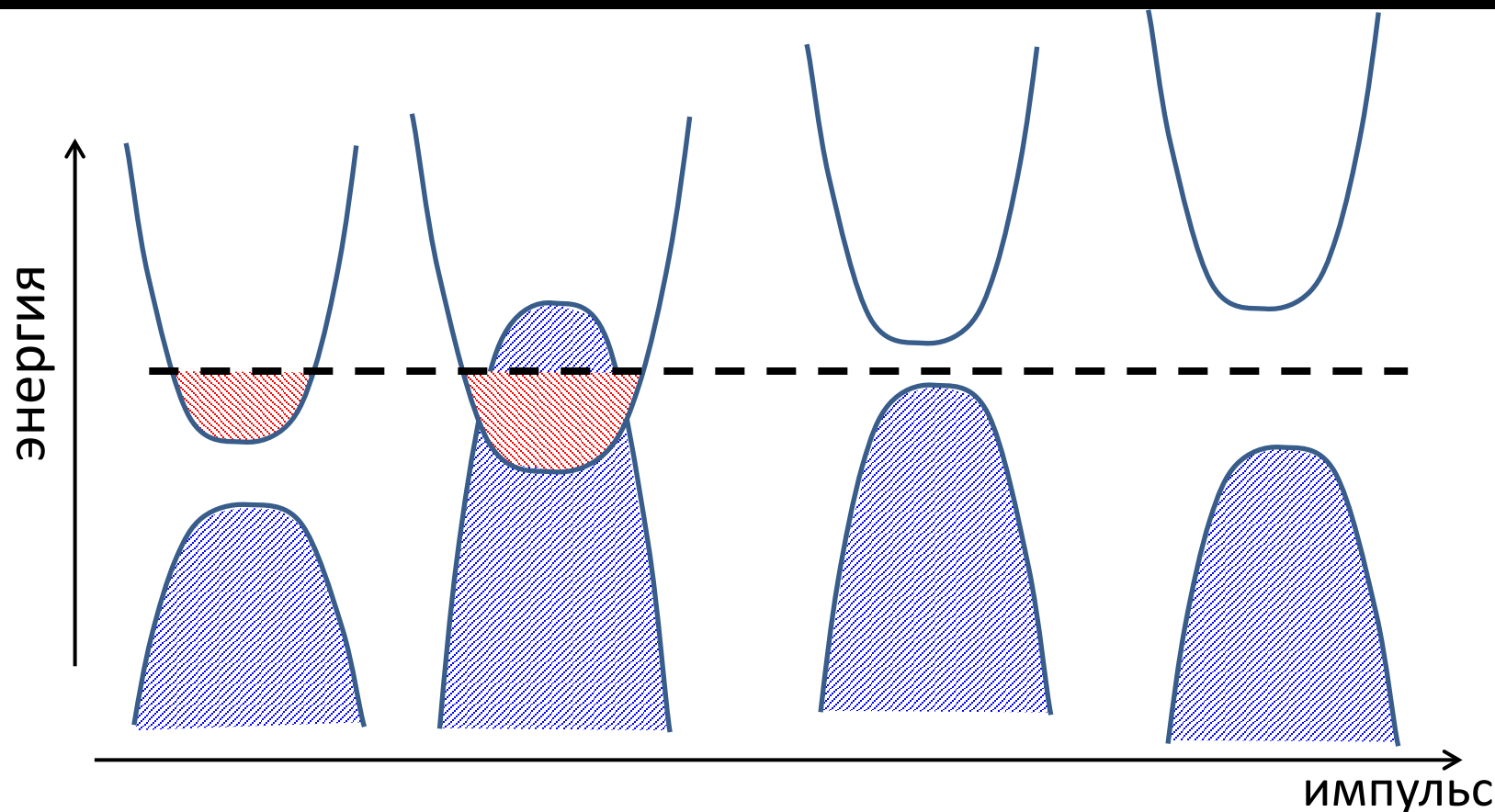
$$E = \frac{p^2}{2m} = \frac{p_x^2 + p_y^2 + p_z^2}{2m}$$



Электрон в кристалле



Энергетический спектр = Зонная структура



1-й металл, 2-й металл, полупроводник, изолятор



**1. Фотоэлектронная спектроскопия
с угловым разрешением (ARPES)**

**2. Сканирующая туннельная
микроскопия/спектроскопия**



Генрих Герц

1886

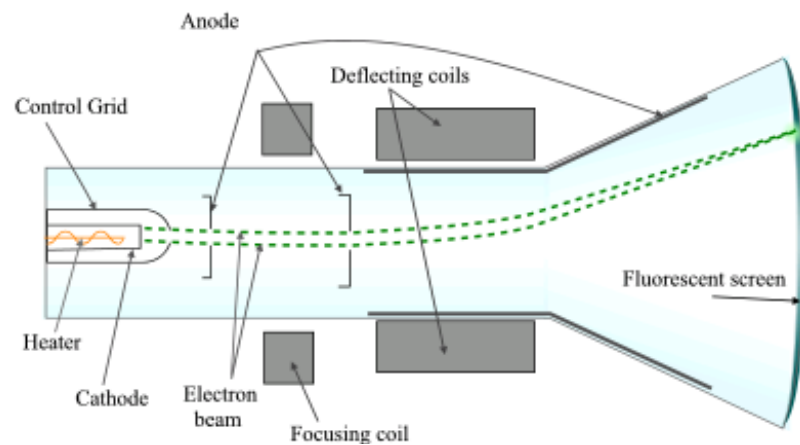


*заряженный конденсатор теряет свой заряд быстрее
при освещении его пластин ультрафиолетовым излучением*

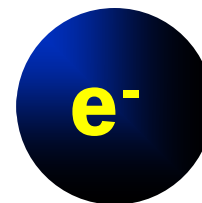
Открытие электрона



Джозеф Джон Томпсон



1899



частица

3 закона фотоэффекта



1889



Александр Г. Столетов

I. При фиксированной частоте света число фотоэлектронов, вырывающихся из катода в единицу времени, пропорционально интенсивности света.

II Максимальная начальная скорость (максимальная начальная кинетическая энергия) фотоэлектронов не зависит от интенсивности падающего света, а определяется только его частотой f .

III. Для каждого вещества существует красная граница фотоэффекта, ниже которой фотоэффект невозможен.

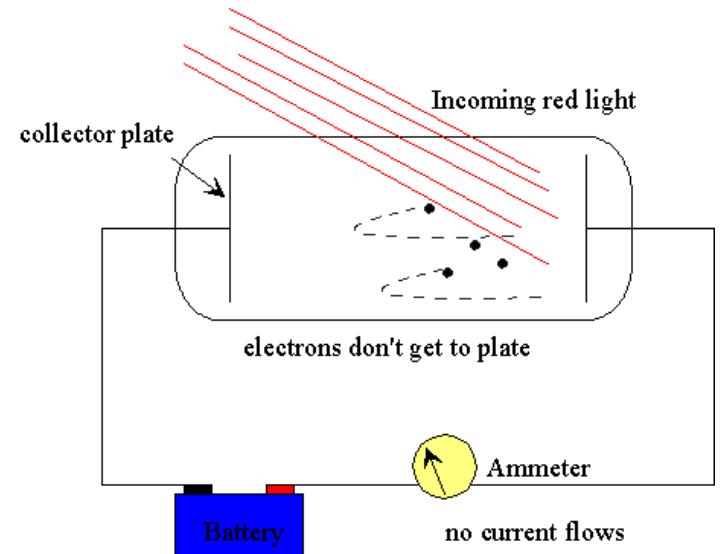
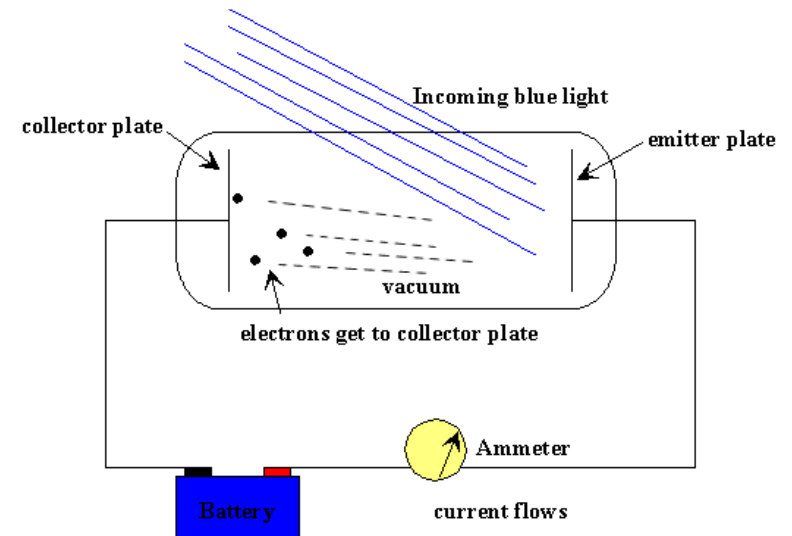
Открытие фотоэффекта



1902

Филипп фон Ленард

Задерживающее напряжение (а значит, и максимальная скорость вылетающих электронов) не зависит от освещённости, а зависит только от цвета (а значит, от частоты) падающего света.



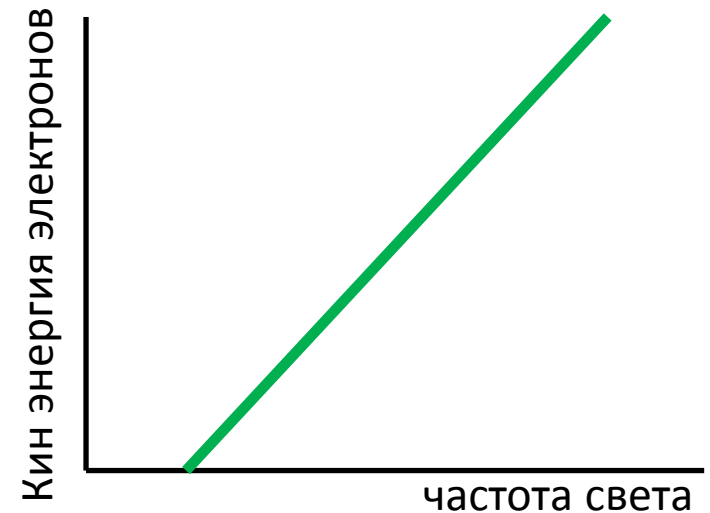
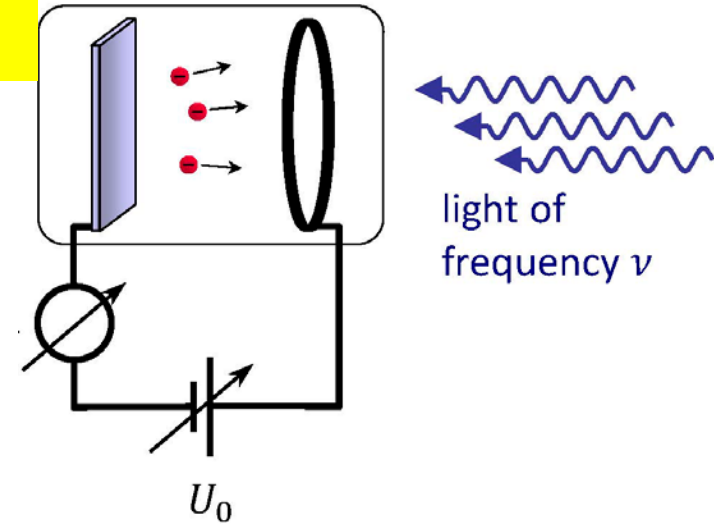
Итак, из опытов Герца, Столетова, Ленарда следует:

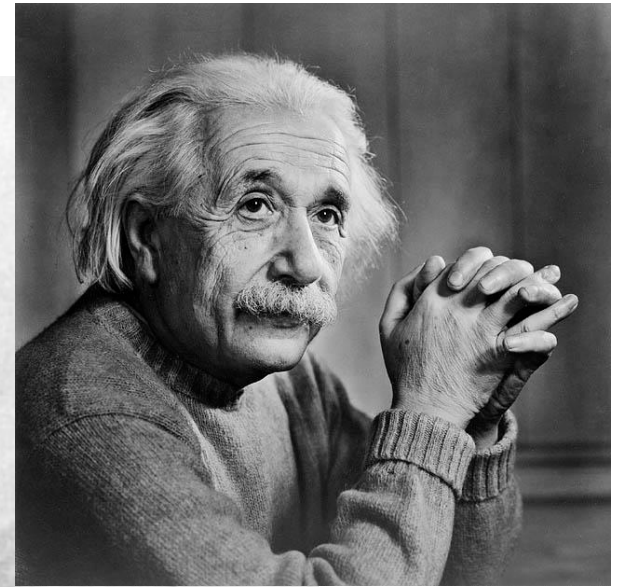
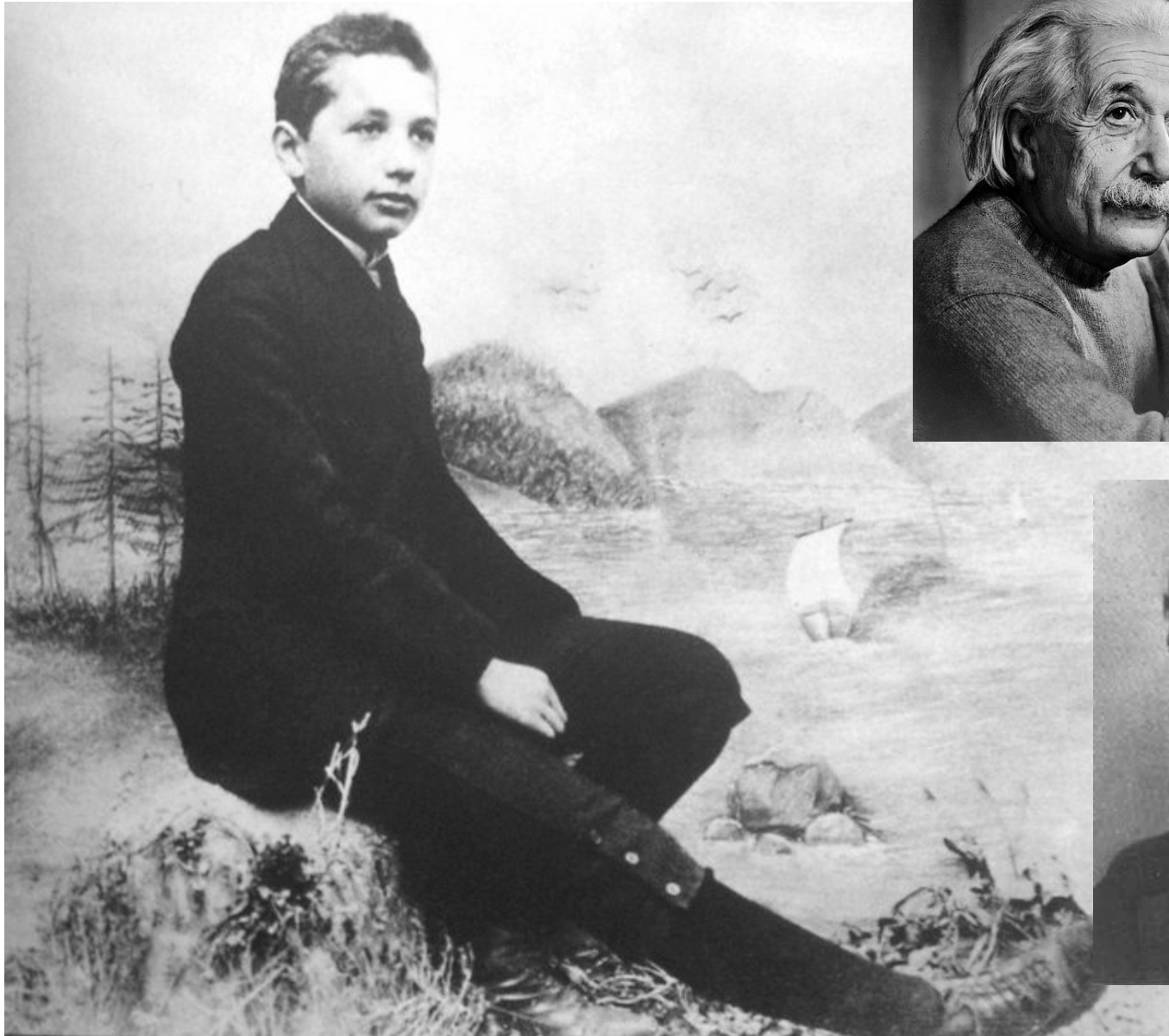
- интенсивность света увеличивает

$$I_{\text{phot}} \quad \text{но не} \quad E_{\text{max}}^{\text{kin}}$$

- $E_{\text{max}}^{\text{kin}}$ зависит от частоты света

$$E_{\text{max}}^{\text{kin}} \propto \nu - \text{const}$$

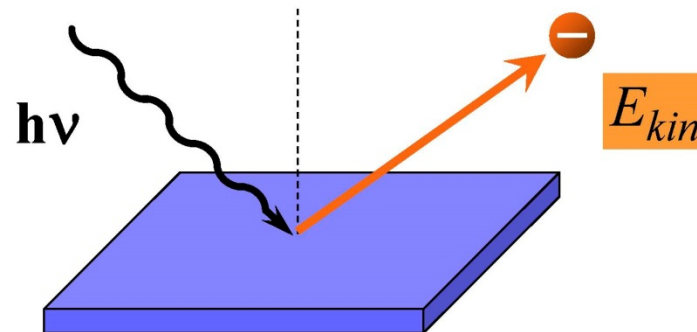




Квантовая теория фотоэффекта



1905



$$E_{kin} = h\nu - \phi$$

Альберт Эйнштейн (26лет)

**Измерил постоянную Планка
с точностью 0.5%
с помощью фотоэффекта**



Роберт Милликен

1916

h

**... и подтвердил
теорию Эйнштейна**

Принцип фотоэлектронной спектроскопии



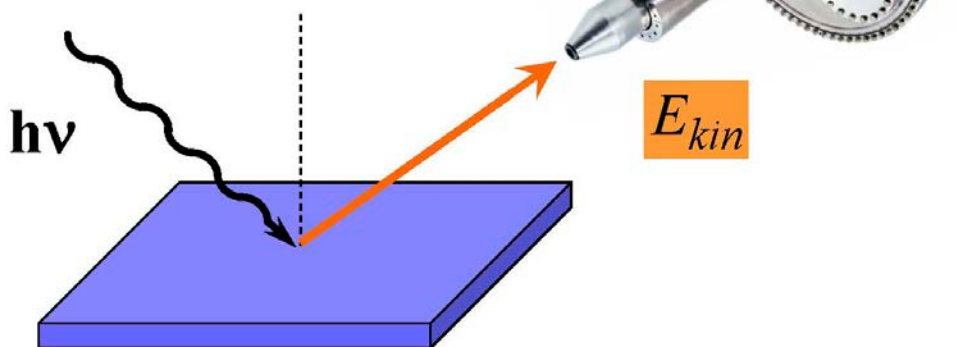
Кай М. Зигбан
Нобелевская
премия 1981

Сохранение энергии

$$E_{kin} = h\nu - \phi - |E_B|$$

1981

анализатор
электронов





E

Линза

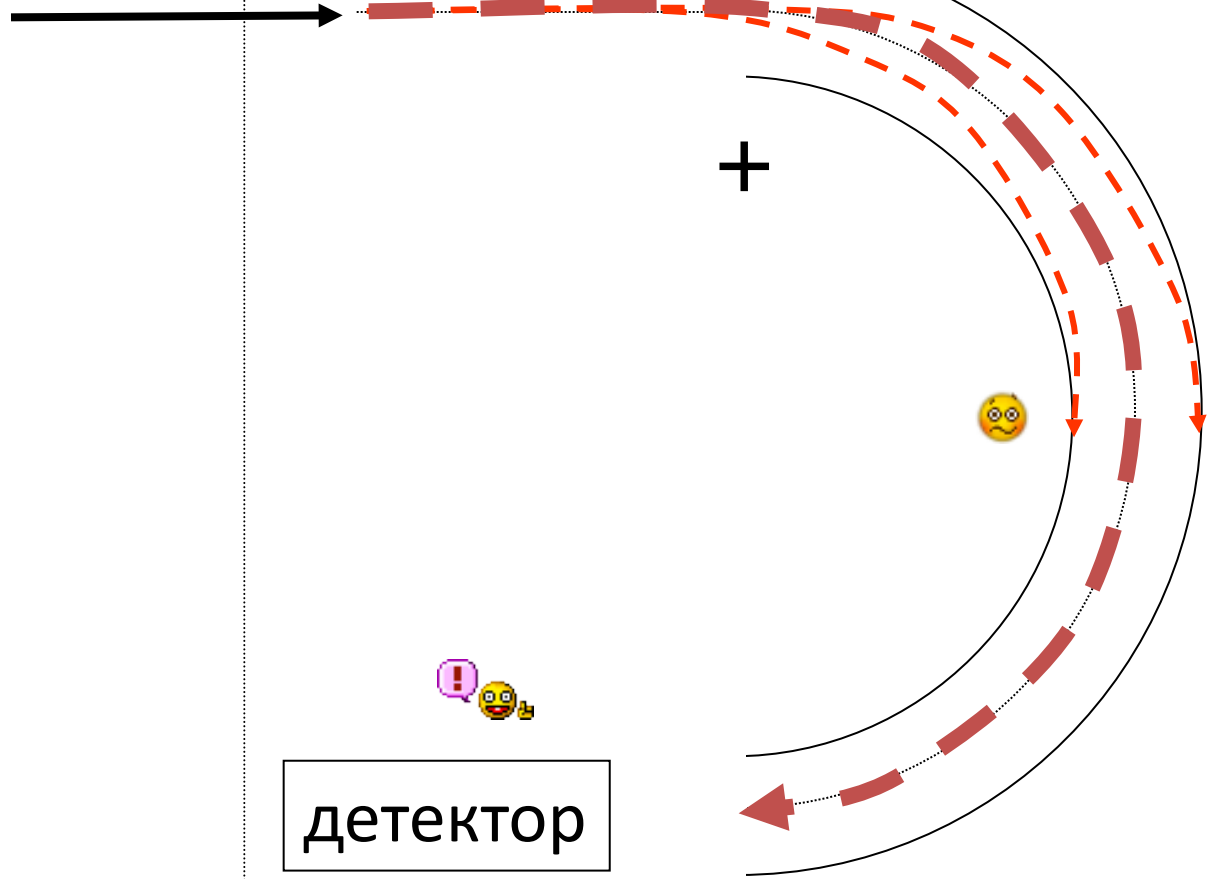
-

+

детектор



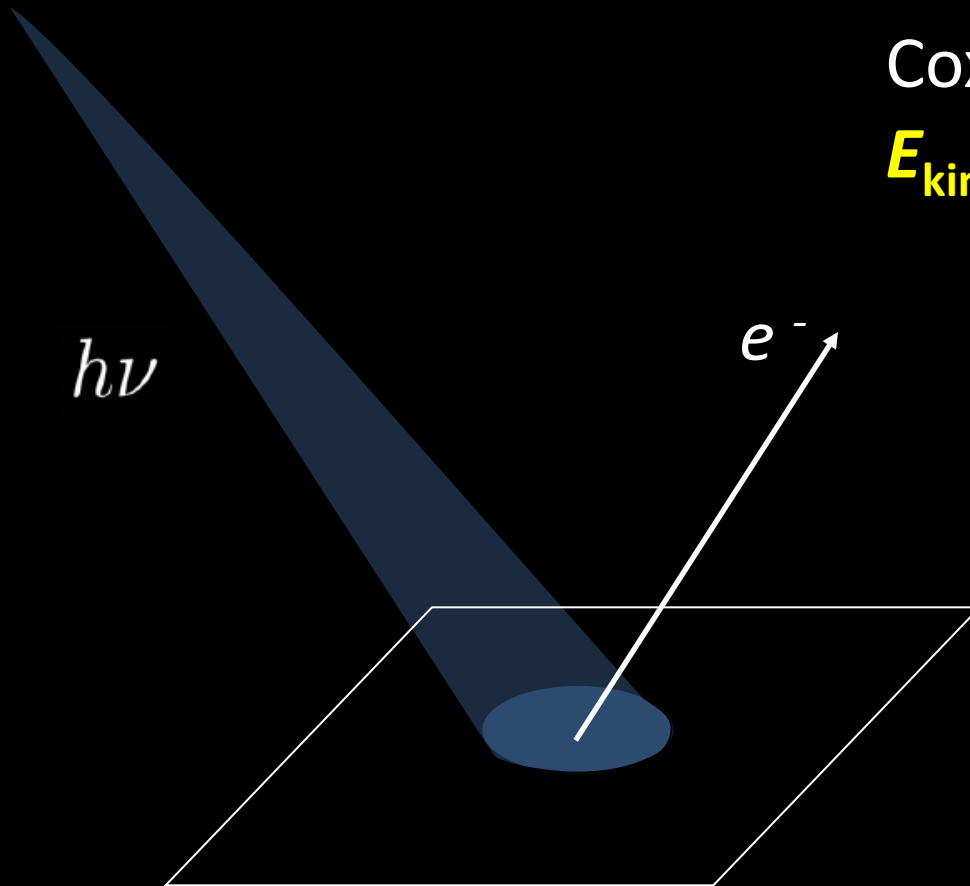
анализатор



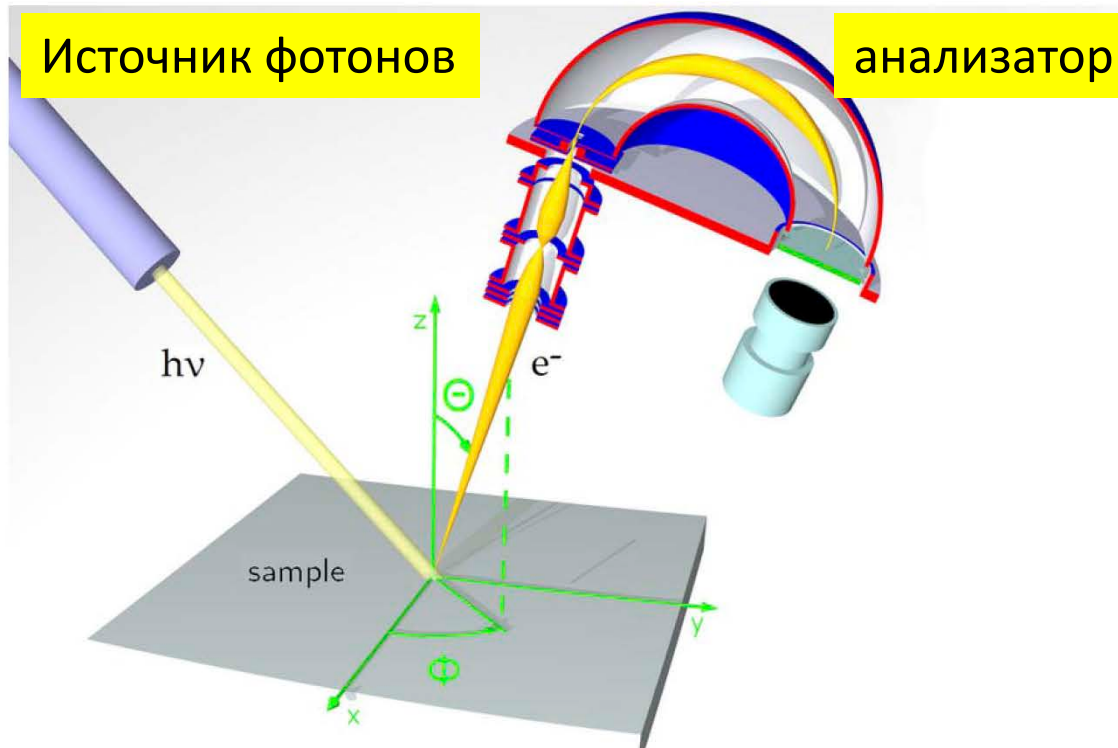
Фотоэлектрический эффект

Сохранение энергии

$$E_{\text{kin}} = h\nu - \phi - |E_{\text{B}}|$$



Измеряется энергия E_{kin} и угол отклонения $\varphi \Rightarrow$ импульс K



$$E_{kin}, \theta, \varphi \rightarrow \vec{K}$$

$$|\vec{K}| = \frac{1}{\hbar} \sqrt{2mE_{kin}}$$

$$K_x = |\vec{K}| \sin\theta \cos\phi$$

$$K_y = |\vec{K}| \sin\theta \sin\phi$$

$$K_z = |\vec{K}| \cos\theta$$

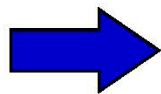
вакуум

Законы сохранения

кристалл

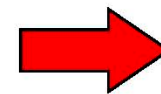
$$E_{kin}$$

$$\vec{K}$$



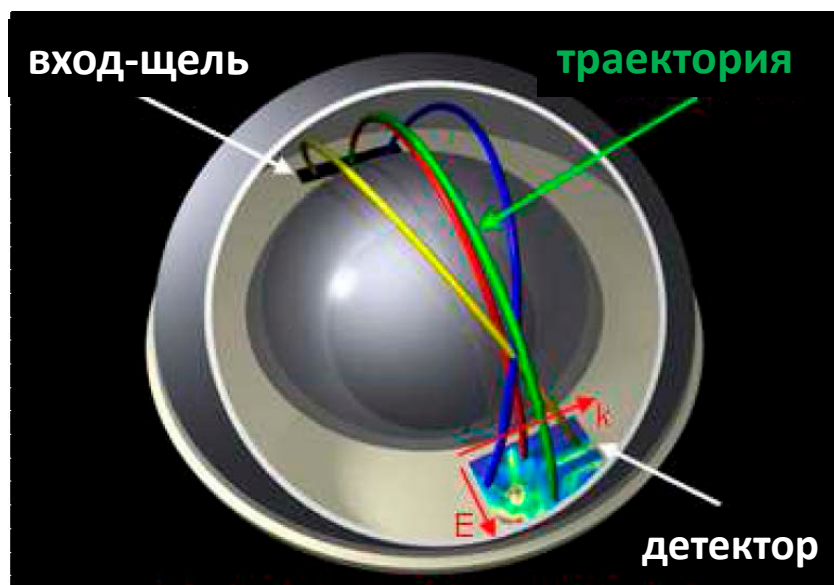
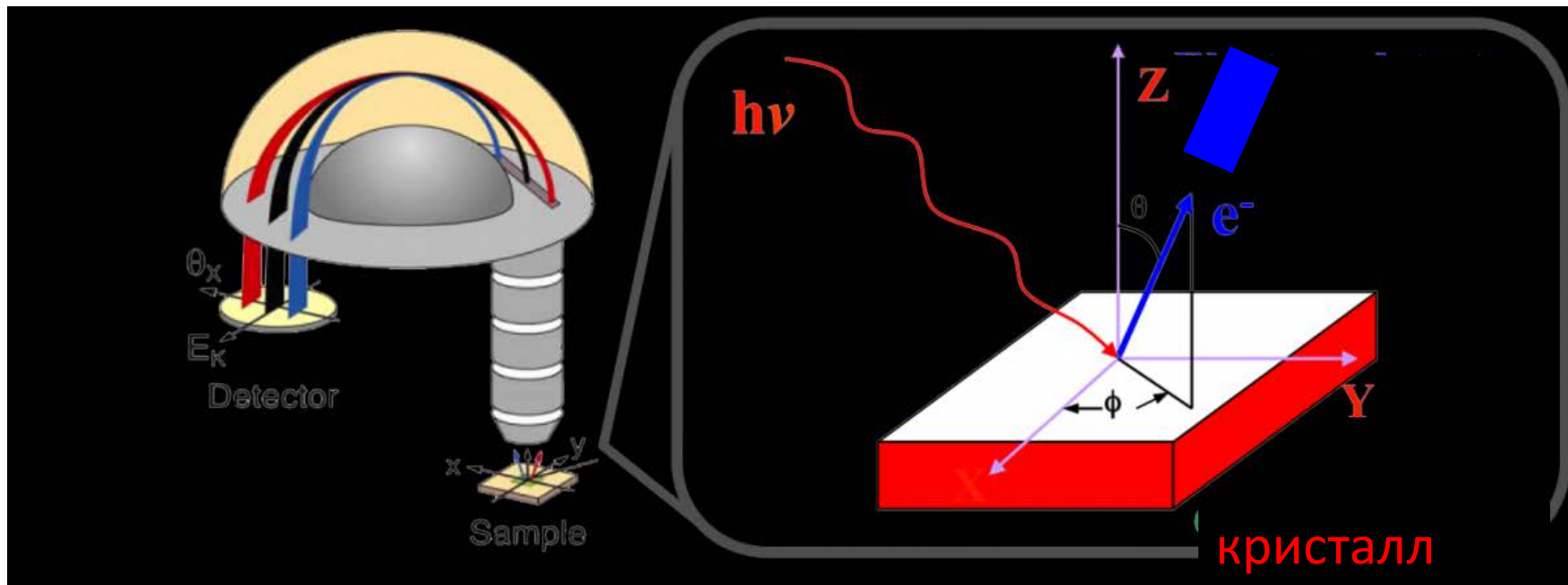
$$E_{kin} = h\nu - |E_B| - \phi$$

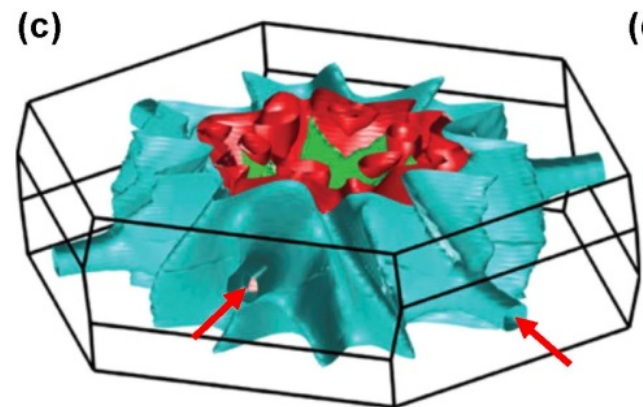
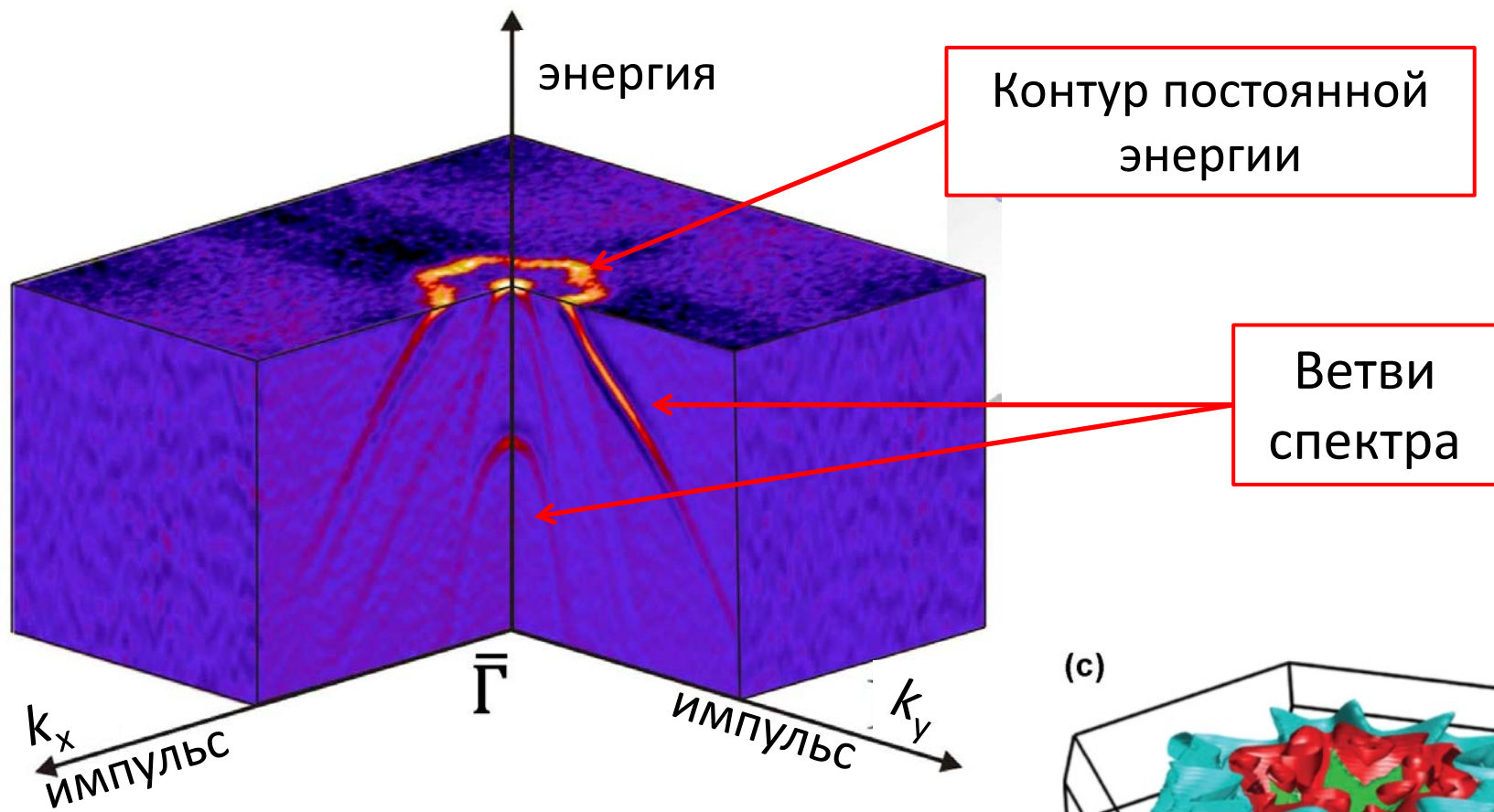
$$\vec{K} = \vec{k} (+\vec{k}_{photon})$$



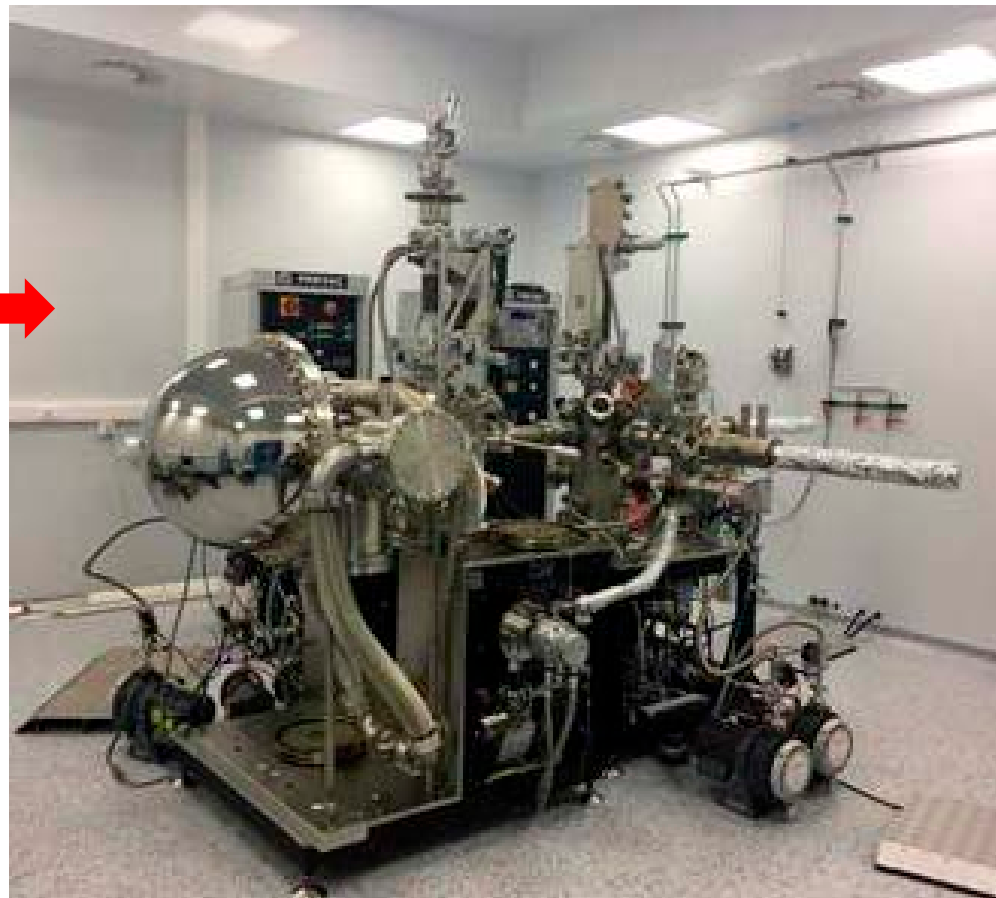
$$E_B$$

$$\vec{k}$$





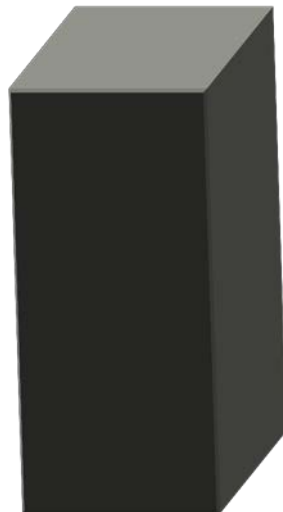
Установка
фотоэлектронной
спектроскопии с угловым
разрешением
(ARPES) Scienta R-4000

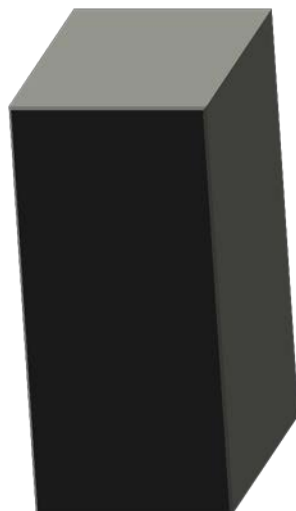
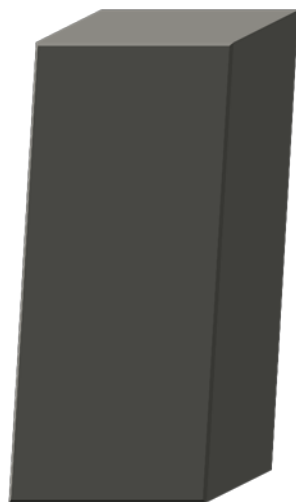


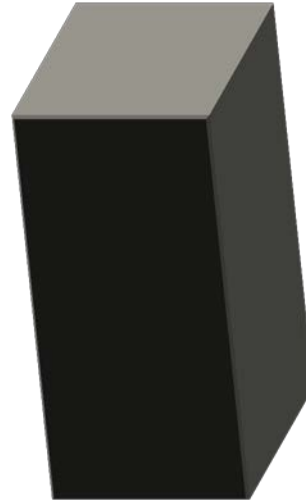
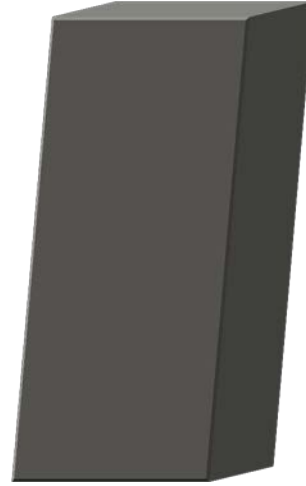
Температура 5-300К,
Рабочий вакуум 10^{-11} Торр
Разрешение по энергии 1 меВ
Энергия фотонов 21эВ, 23эВ, 42эВ
Разрешение по спину: 2D

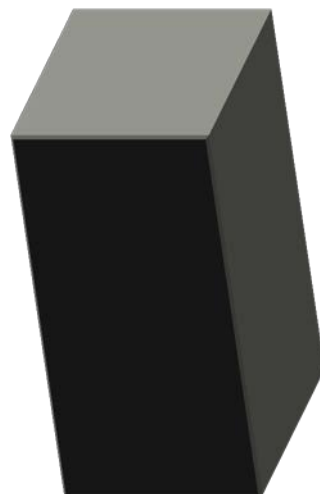
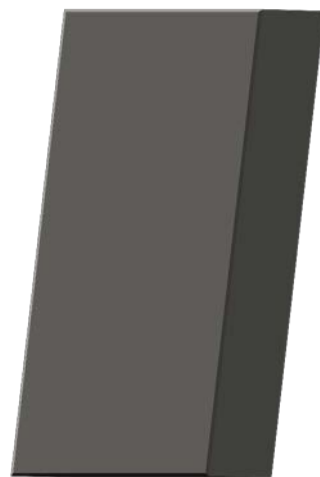


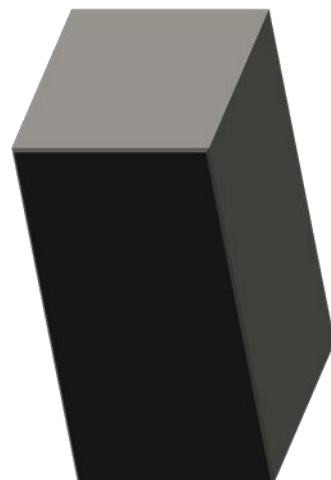
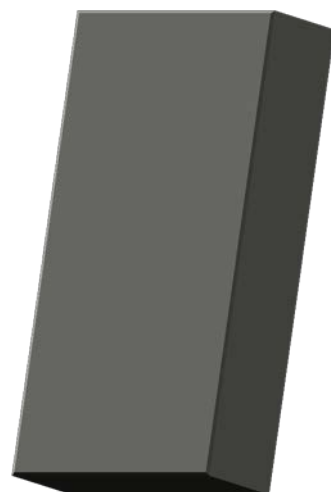
**Для измерений
необходима чистая
поверхность кристалла**

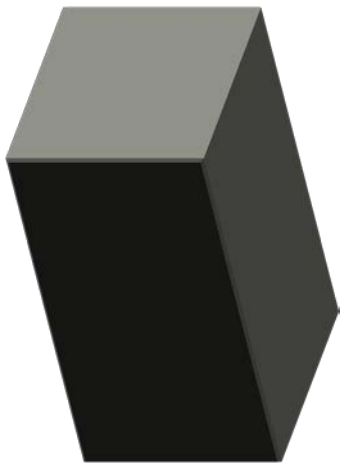
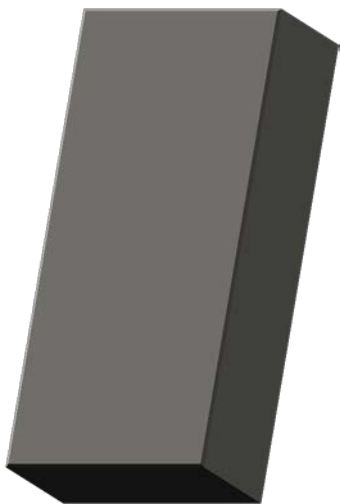


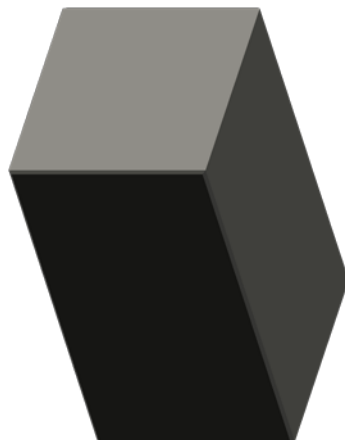
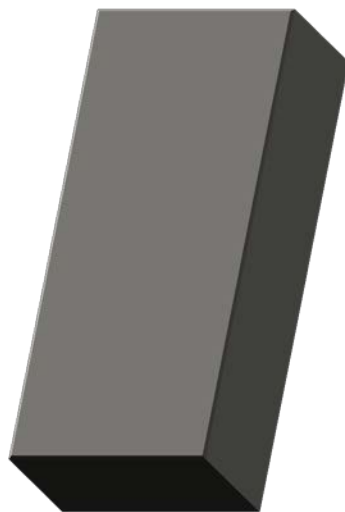


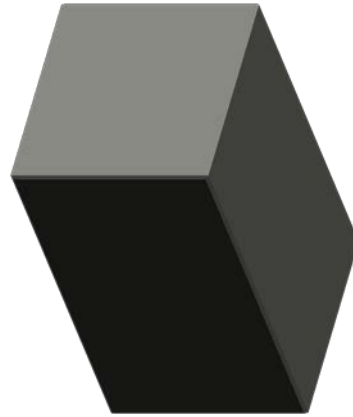
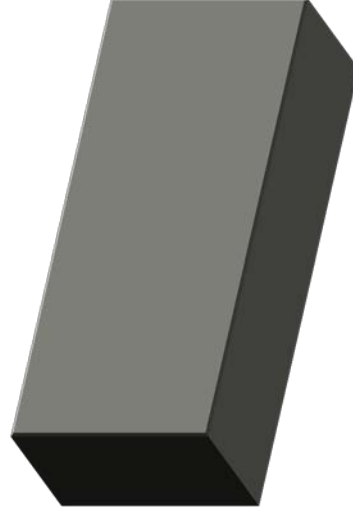


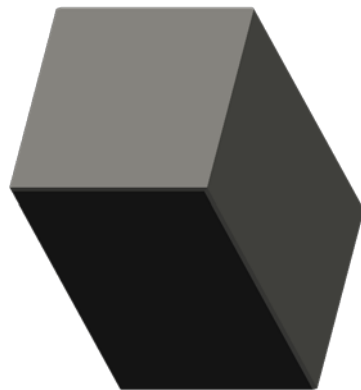


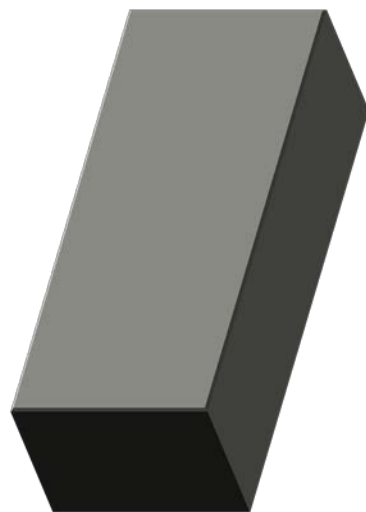


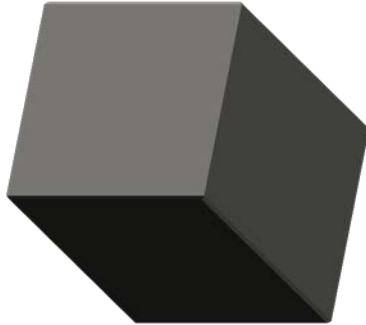
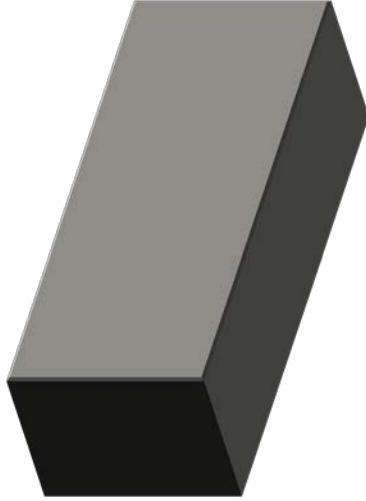


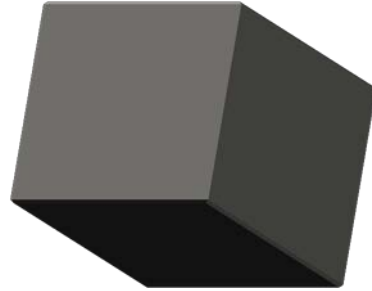
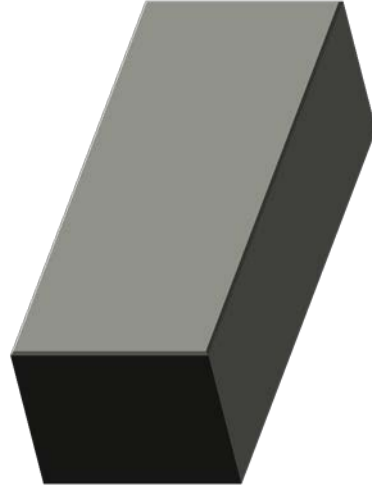


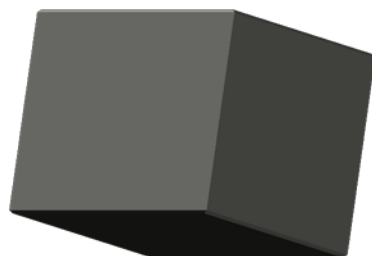
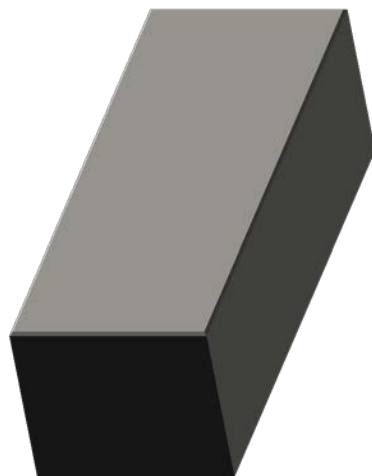


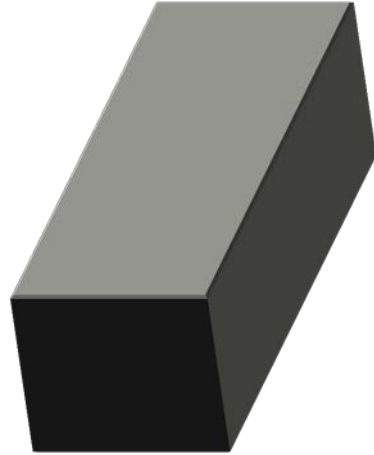


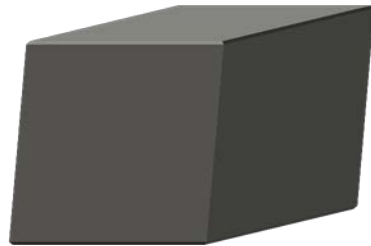
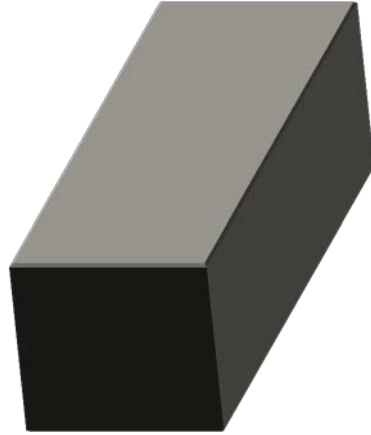


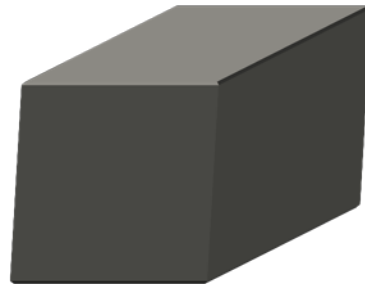
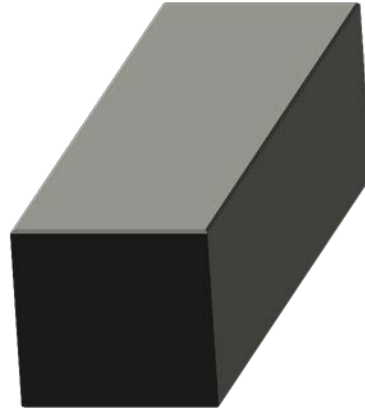


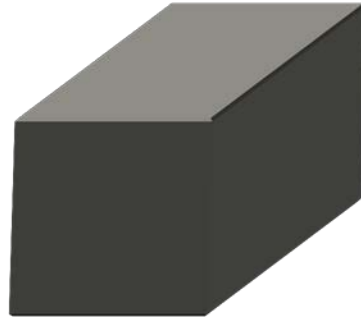
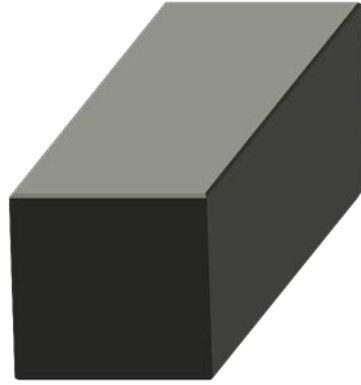




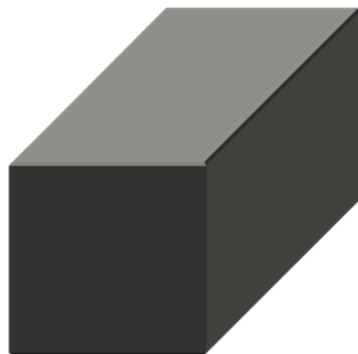
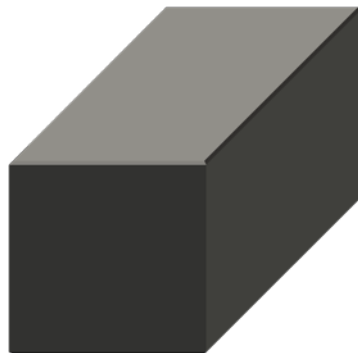




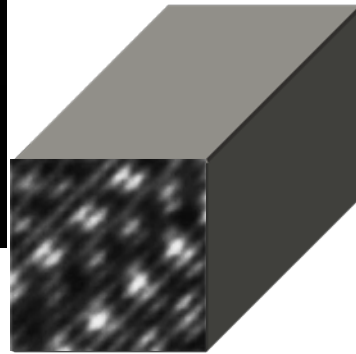
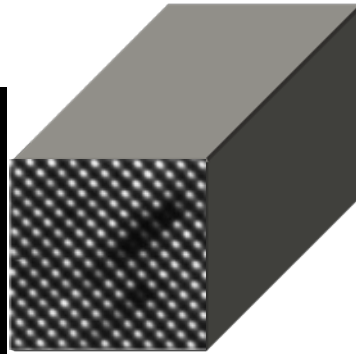
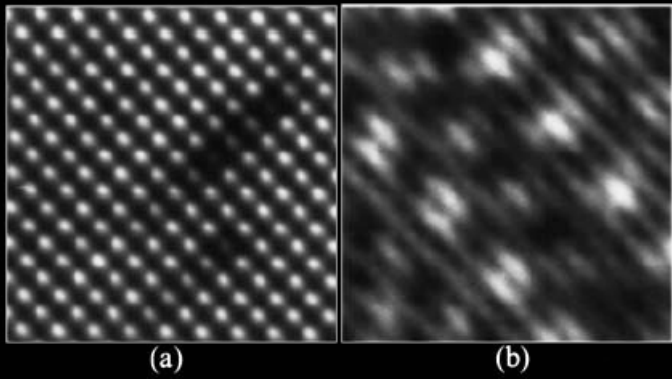




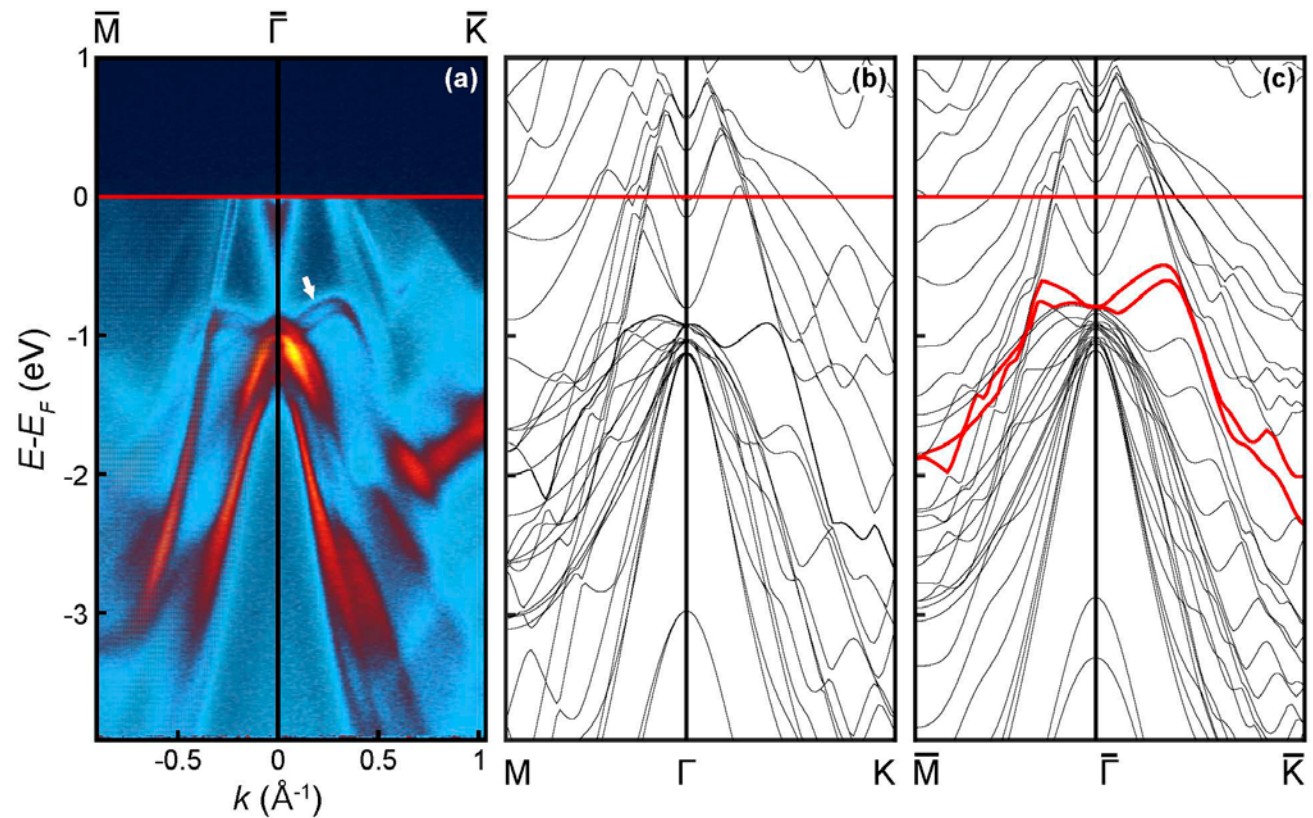
**Для измерений
необходима чистая
поверхность кристалла**



**Для измерений
необходима чистая
поверхность кристалла**

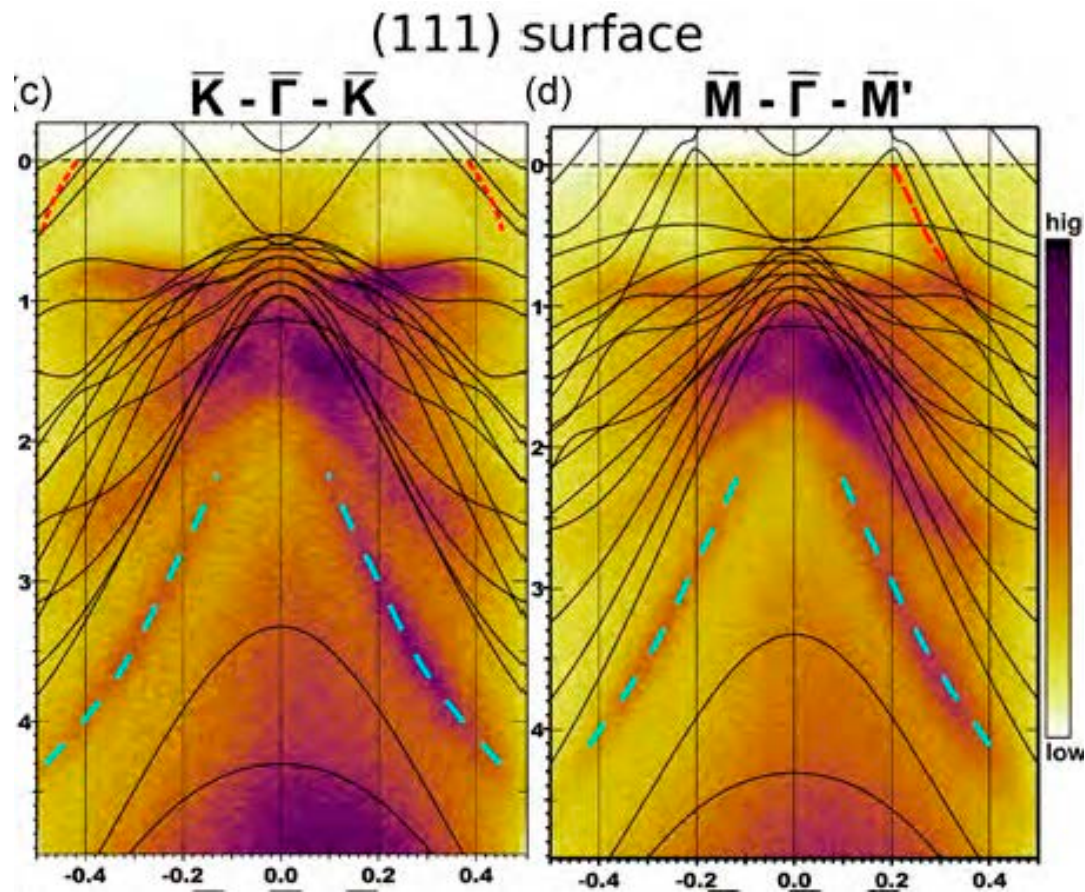


Примеры недавних измерений



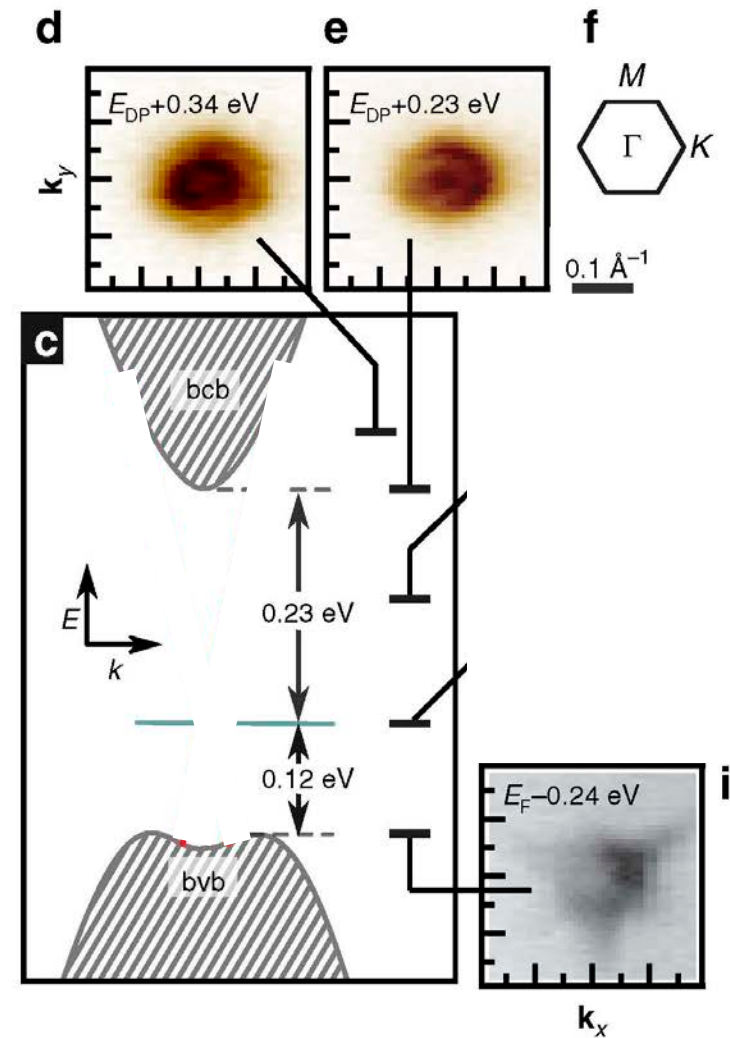
Зонная структура для Sn_4As_3

Примеры недавних измерений

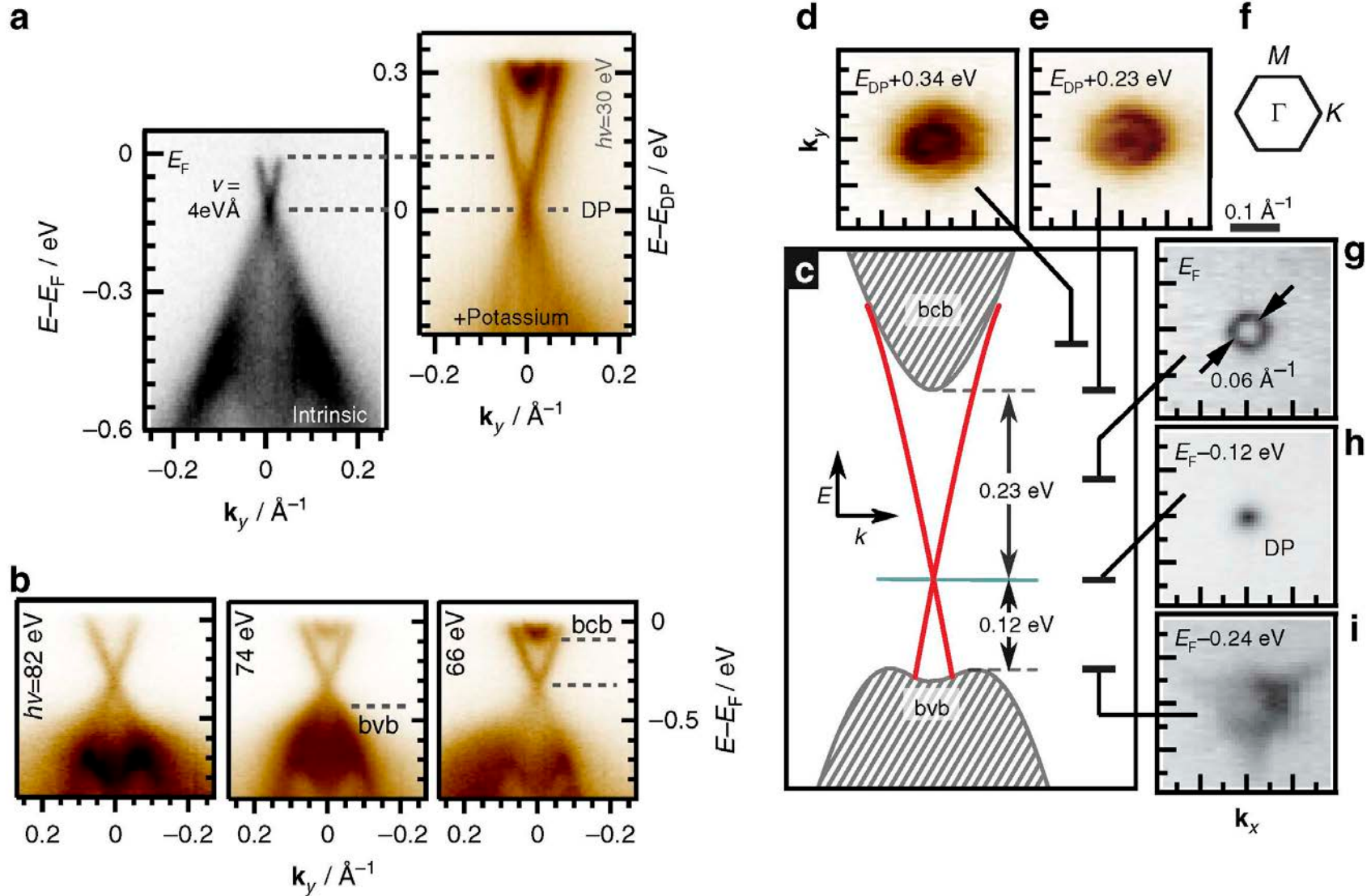


Зонная структура для SnAs

ARPES спектр $E(k)$ топологического изолятора BiSbTe



ARPES спектр $E(k)$ топологического изолятора BiSbTe





**1. Фотоэлектронная спектроскопия
с угловым разрешением (ARPES)**

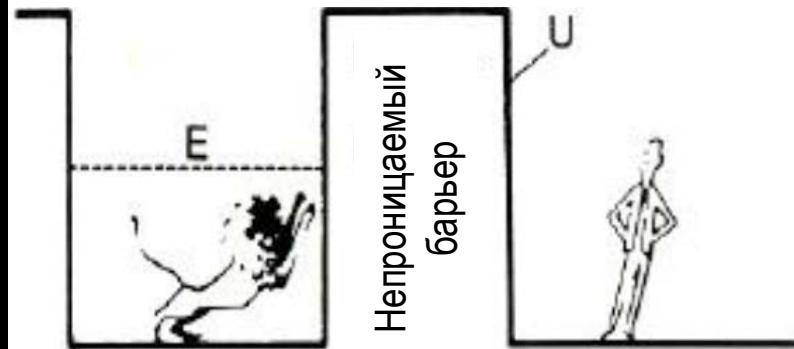
**2. Сканирующая туннельная
микроскопия/спектроскопия (STM/STS)**

Основы квантовой механики: частица-волна $\cos(-kx + \omega t)$

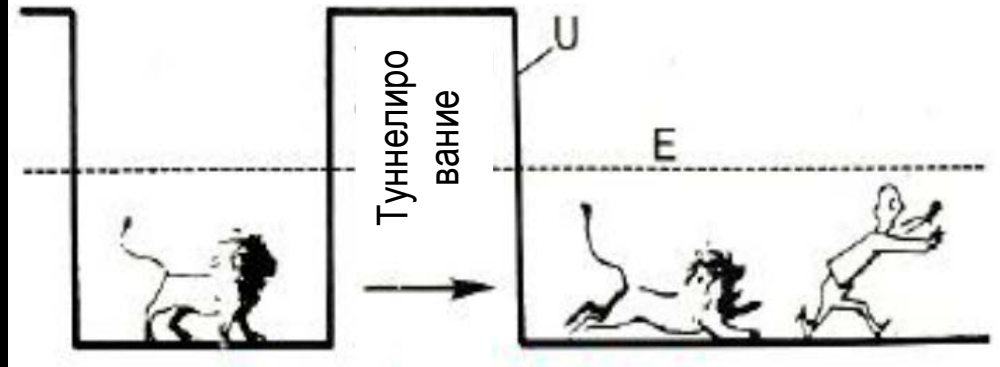
Фотон: $k = 2\pi/\lambda$; $\lambda = c/f$; $E = hf$

Электрон: $p = \hbar k$; $k = 2\pi/\lambda$; $E = p^2/2m = \hbar^2/(2m\lambda)^2$

Классическая модель



Квантовая модель



Туннелирование волны
через барьер

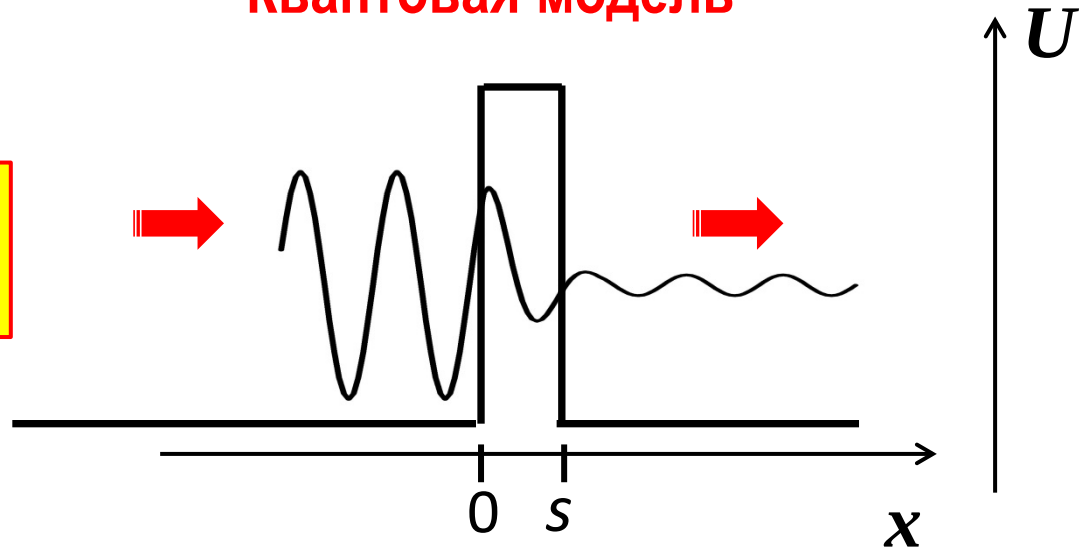
Основы квантовой механики: частица-волна $\cos(kx + \omega t)$

Фотон: $\lambda = c/\nu$; $k = 2\pi/\lambda$; $E = h\nu$

Электрон: $p = mv$; $p/h = k/2\pi$; $k = 2\pi/\lambda$; $E = p^2/2m = h^2/(2m\lambda)^2$

Квантовая модель

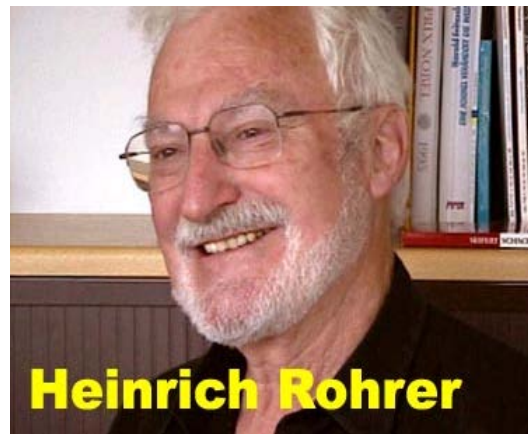
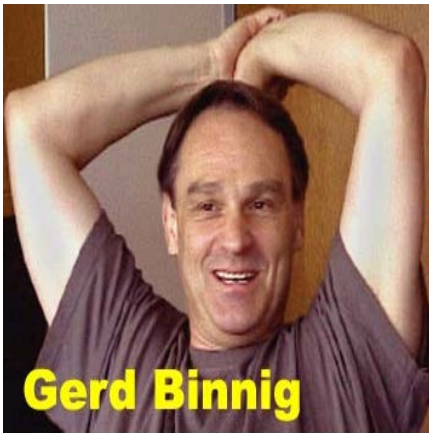
Туннелирование
волны через барьер



$$T \propto e^{-2ks}$$

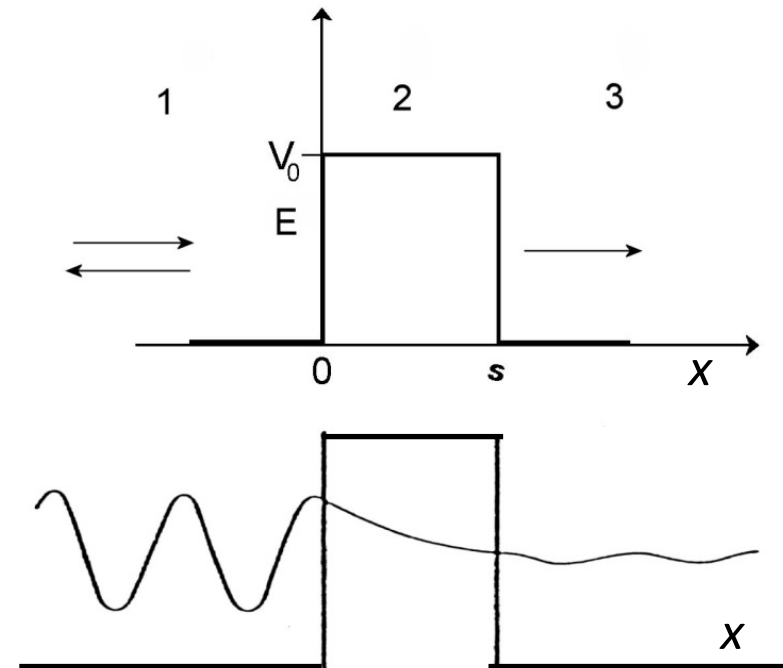
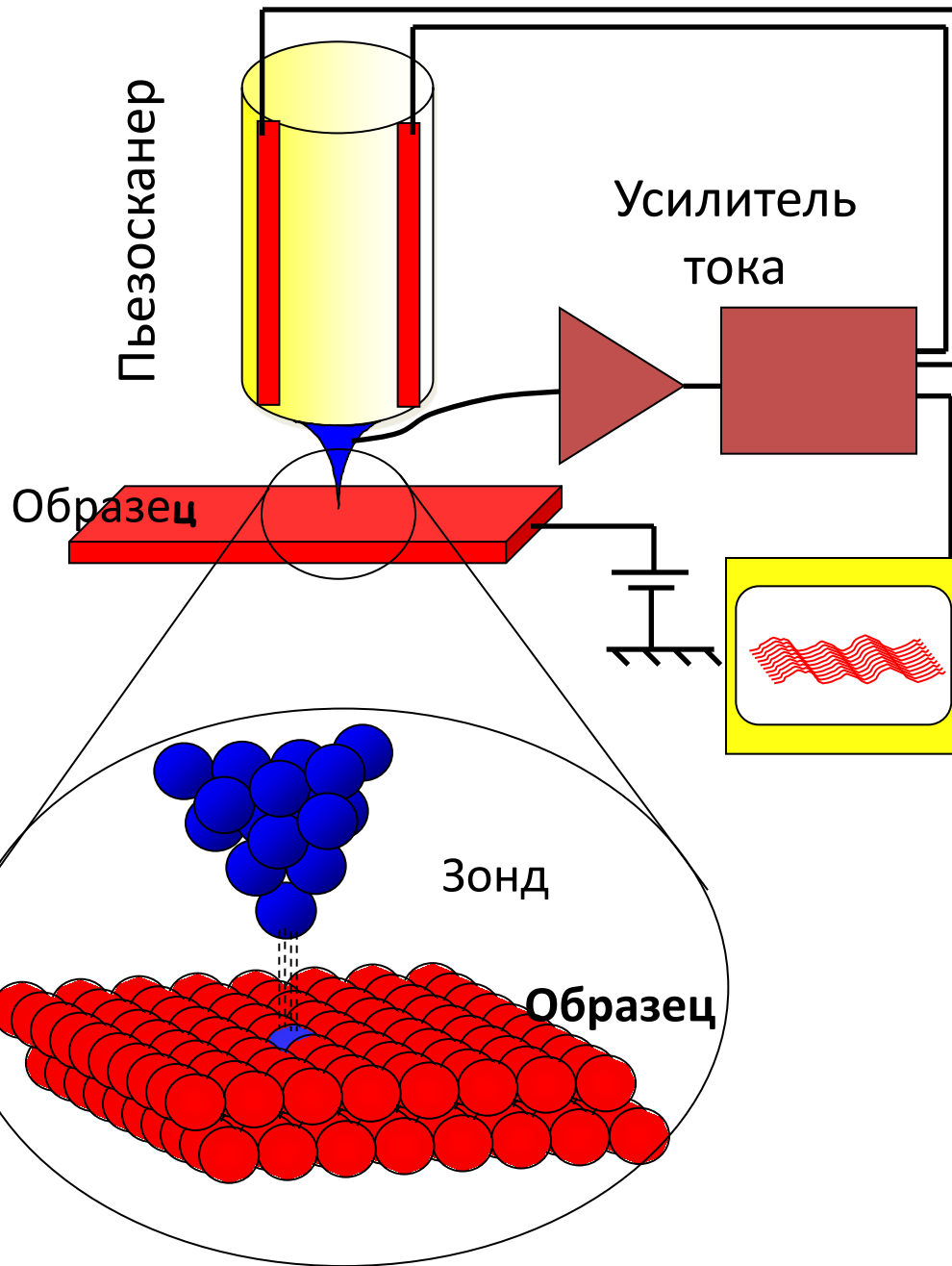
Сканирующая туннельная микроскопия и спектроскопия

Изобретена в 1981г в IBM. Нобелевская премия 1986г.



1986

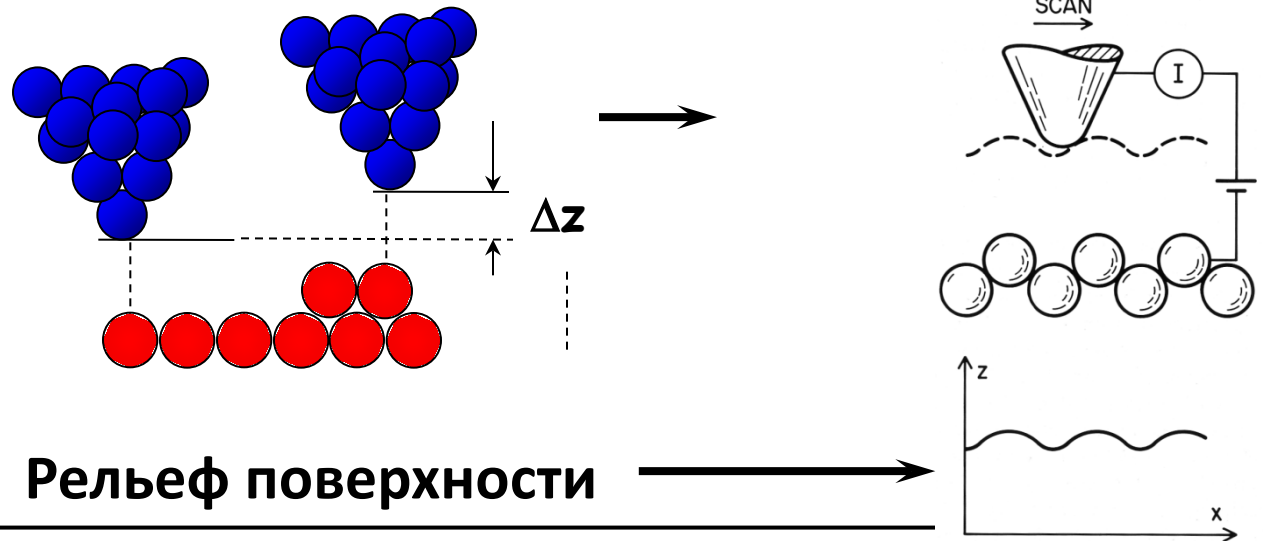
Сканирующая туннельная микроскопия (STM)



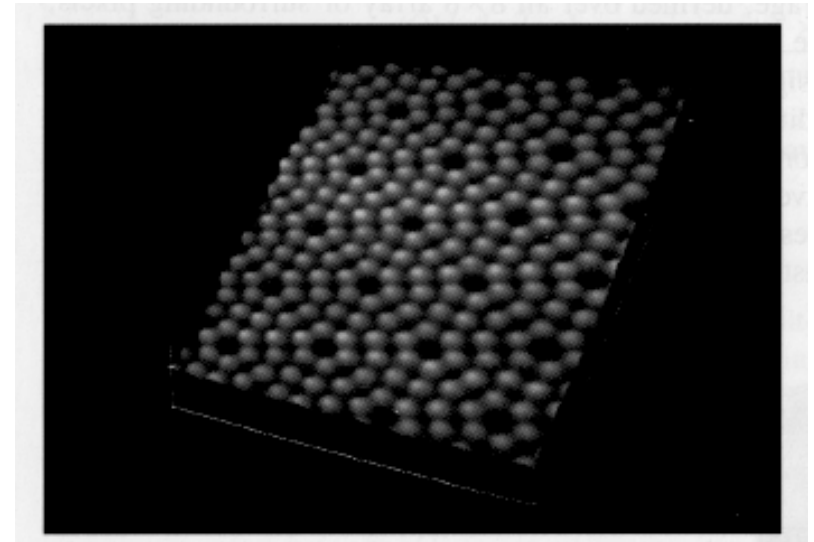
$$T \propto e^{-2ks}$$

$$s = 0.4\text{nm}, \quad T \sim 10^{-4}$$

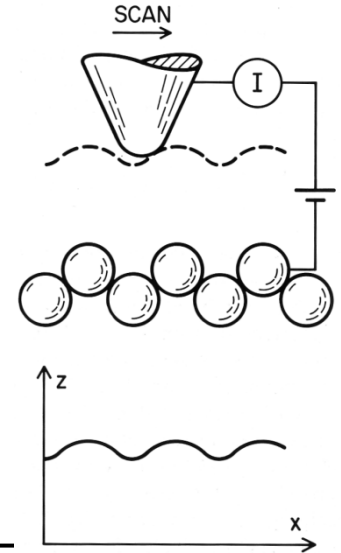
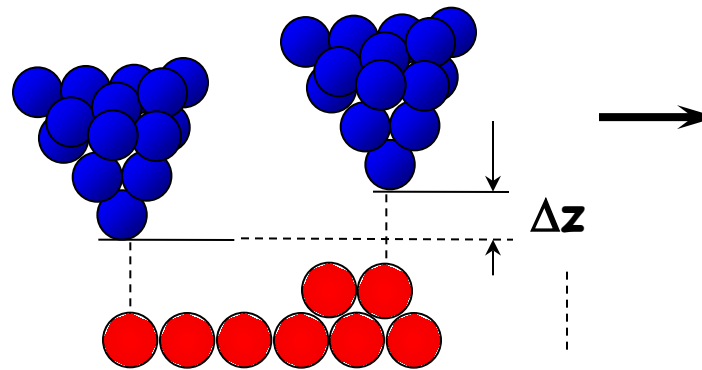
Режим 1: Фиксированный туннельный ток (STM)



Изображение
реконструированной
поверхности Si(111)



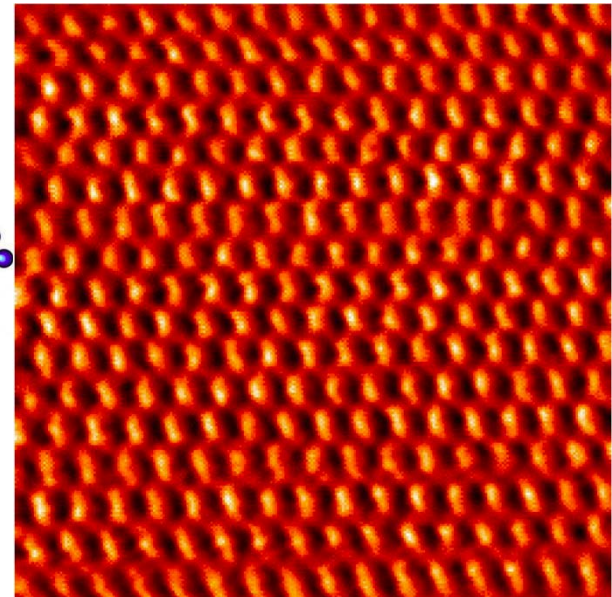
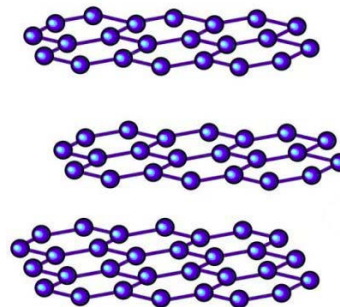
Режим 1: Фиксированный туннельный ток (STM)



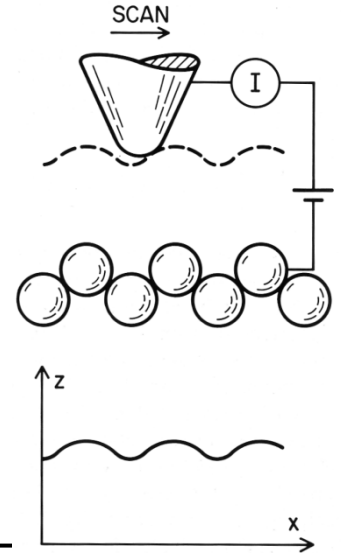
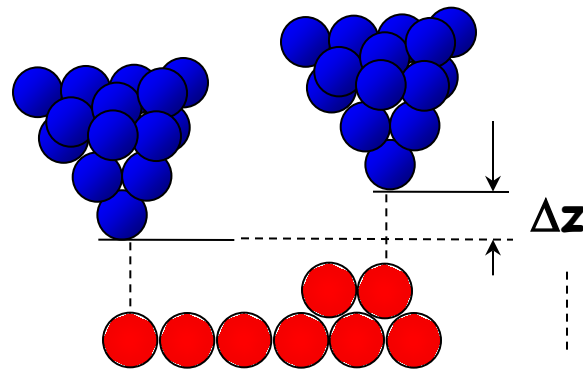
Рельеф поверхности

(0001) 5x5nm

Изображение
поверхности высоко
ориентированного
графита (HOPG)

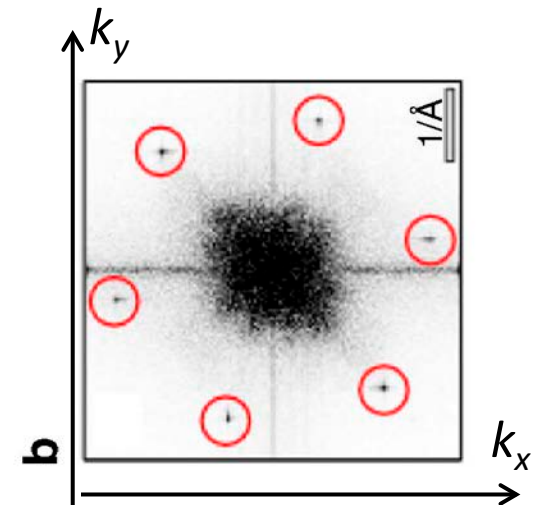
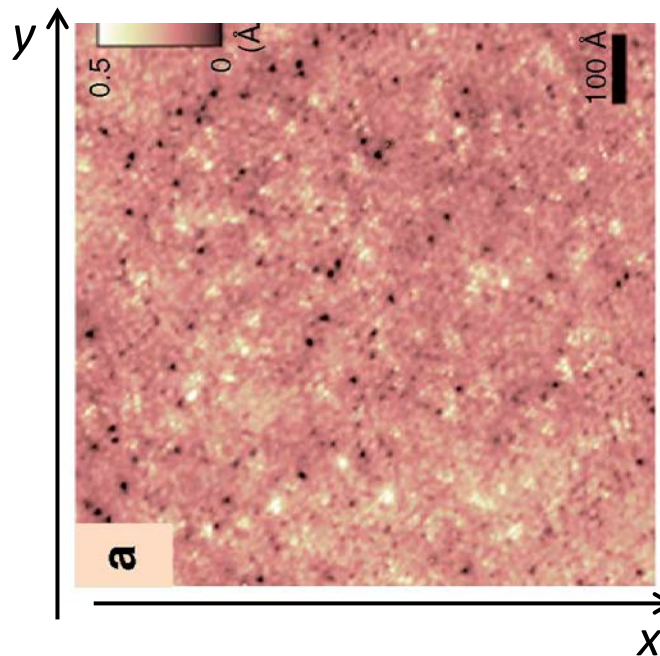


Режим 1: Фиксированный туннельный ток (STM)

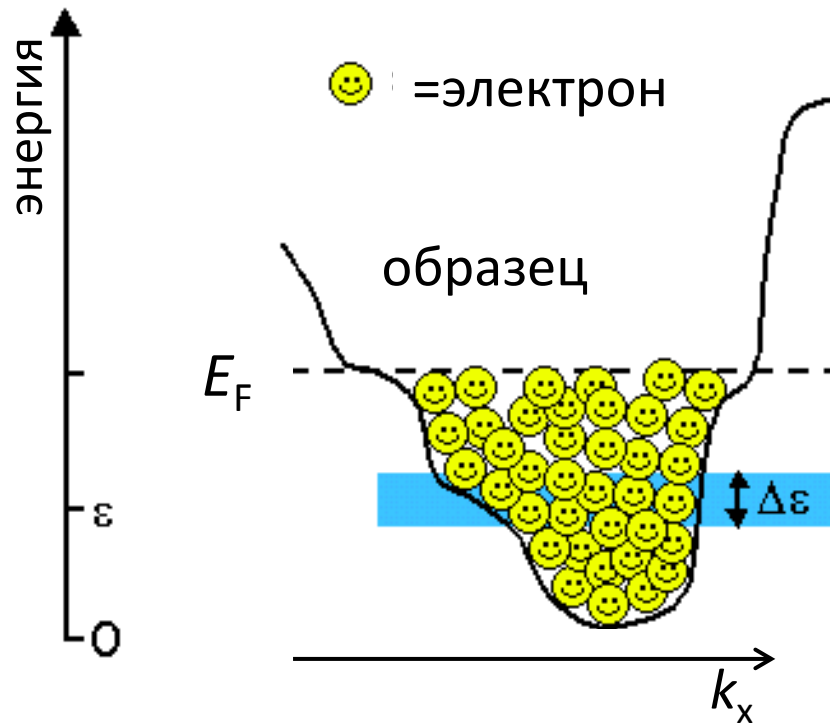


Рельеф поверхности

Изображение
поверхностных
состояний в
кристалле
 $\text{Sn-Bi}_{1.1}\text{Sb}_{0.9}\text{Te}_2\text{S}$
(BiSSTS)

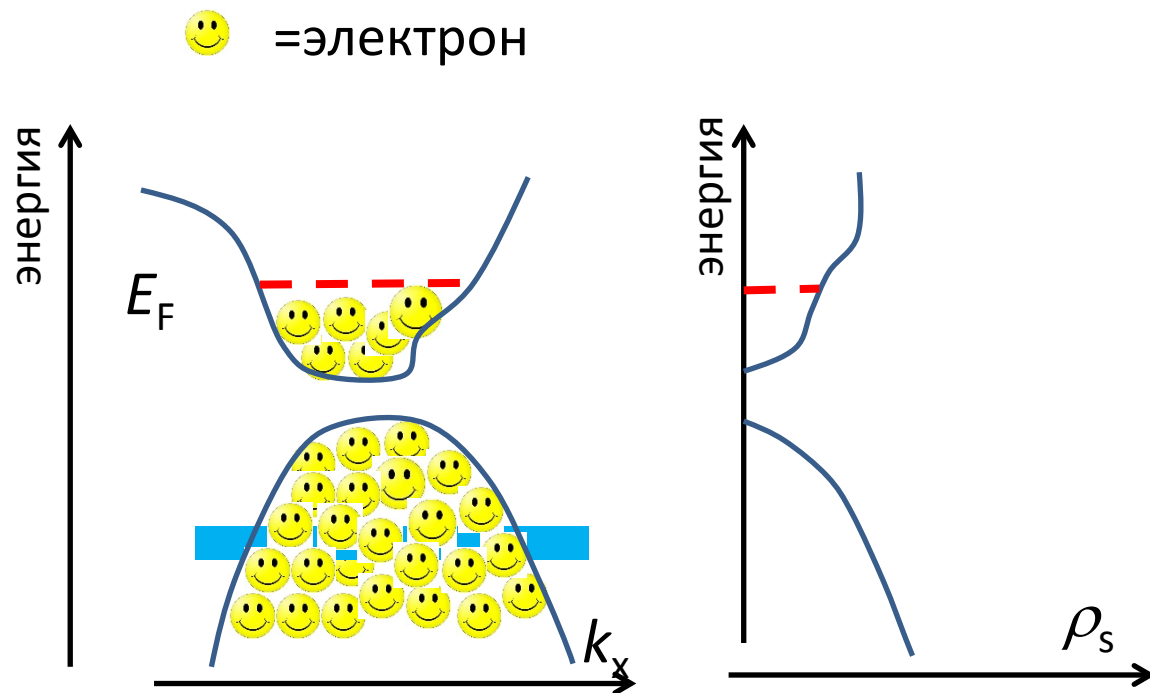


Режим 2: Сканирующая туннельная спектроскопия (STS)

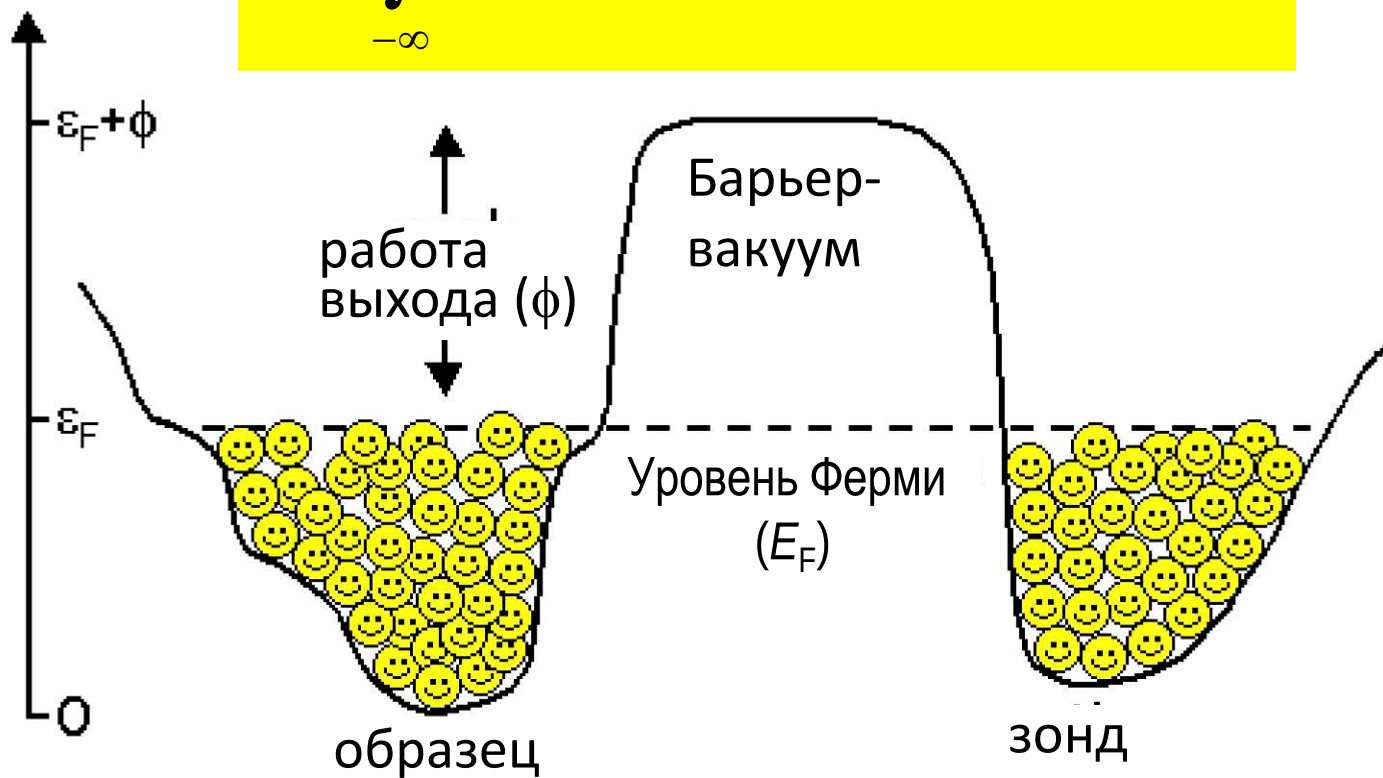


Плотность состояний $\rho(\varepsilon)$
при энергии ε - это число
электронов, сидящих в
полоске, деленное на ее
ширину $\Delta\varepsilon$

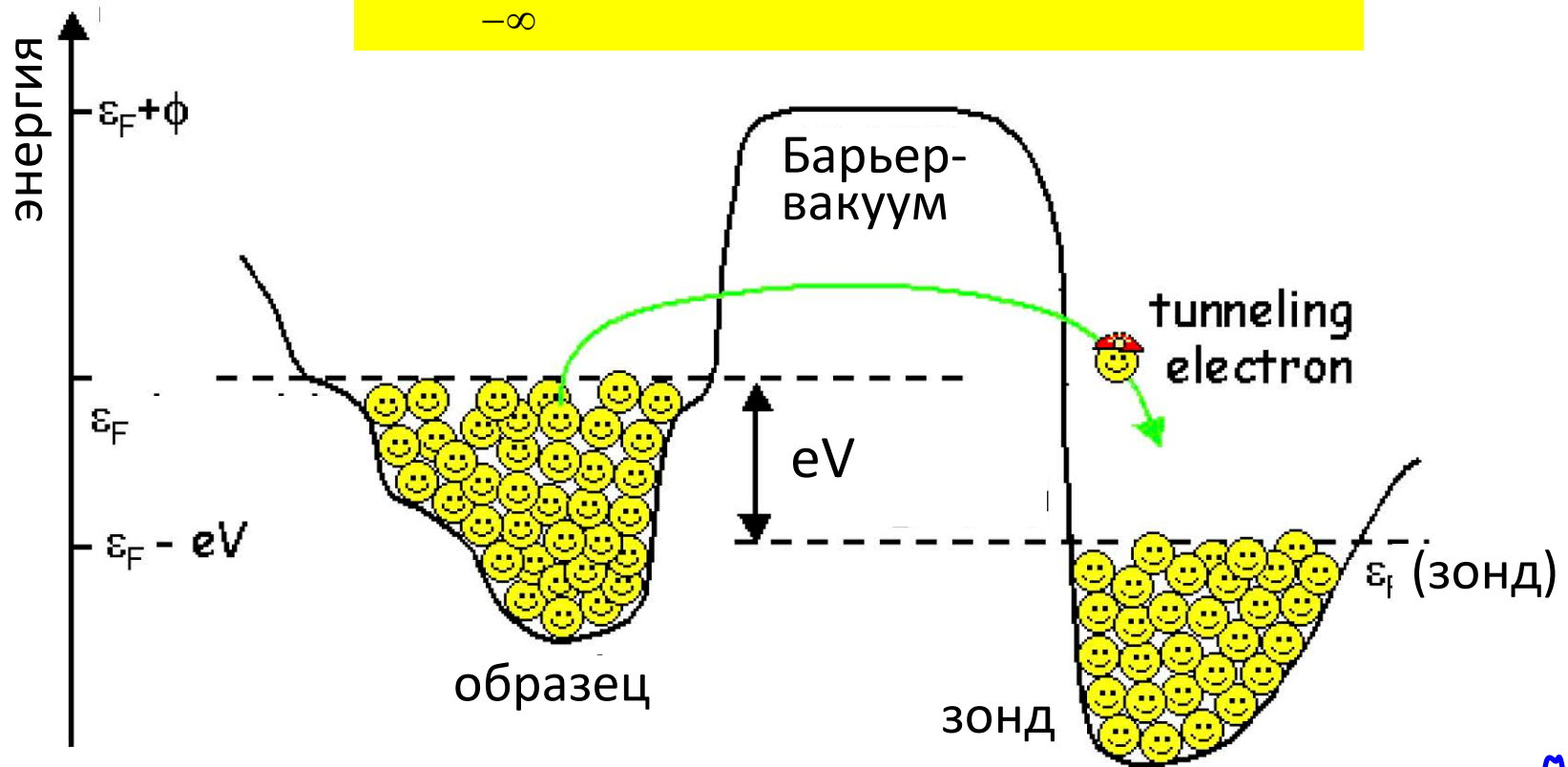
Режим 2: Сканирующая туннельная спектроскопия (STS)



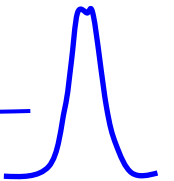
$$I \propto \int_{-\infty}^{+\infty} \rho_s(E) [f(E) - f(E - eV)] dE$$



$$I \propto \int_{-\infty}^{+\infty} \rho_s(E) [f(E) - f(E - eV)] dE$$

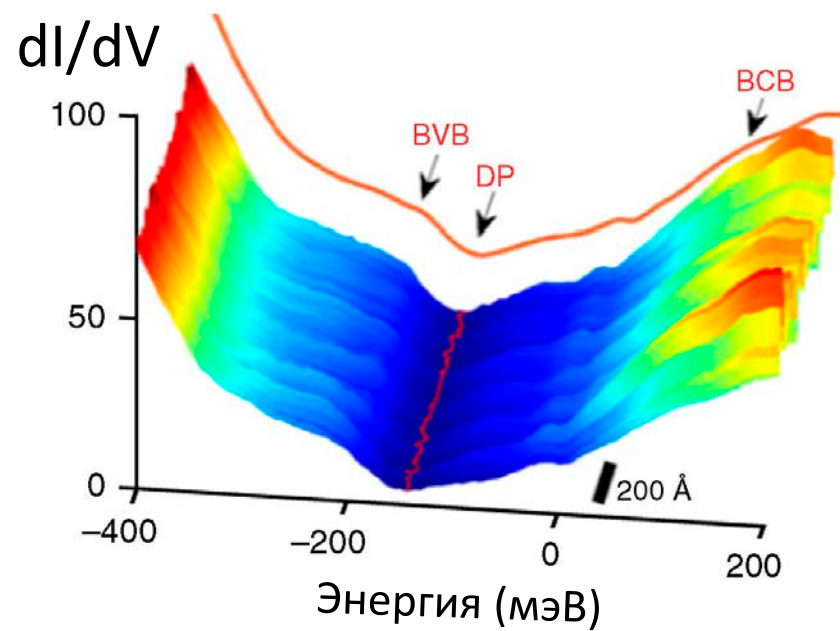
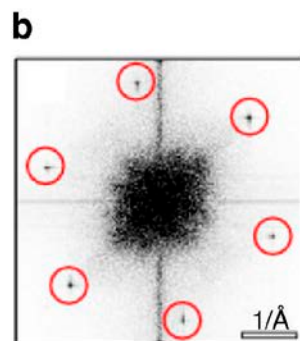
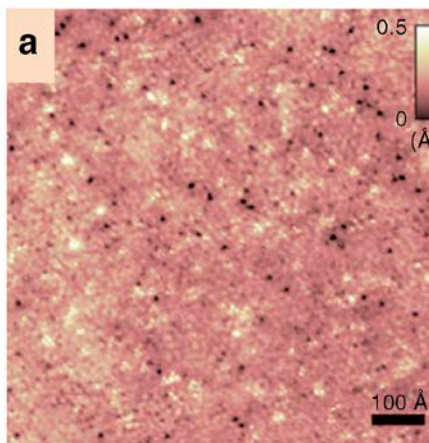


$$\left. \frac{dI}{dV} \right|_{V=V_0} \propto \int_{-\infty}^{+\infty} \rho_s \frac{\partial f(E - eV)}{\partial (eV)} \Big|_{V=V_0} dE$$



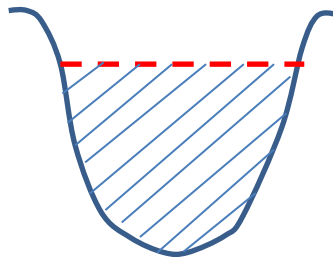
Топологический изолятор Bi-SSTS

STM

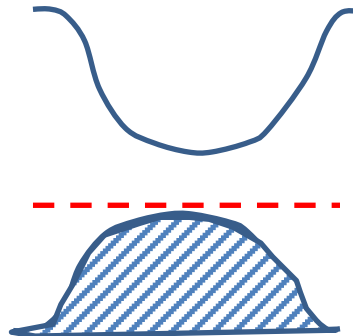


Энергетический спектр сверхпроводника

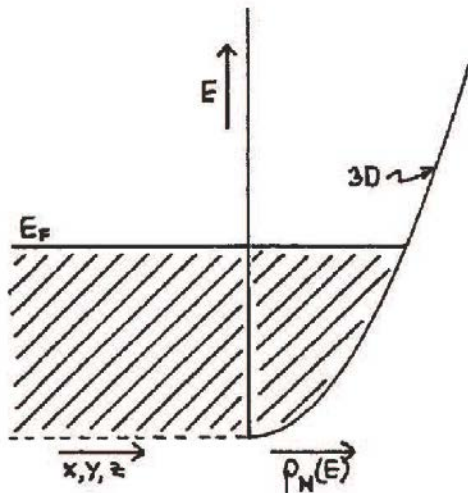
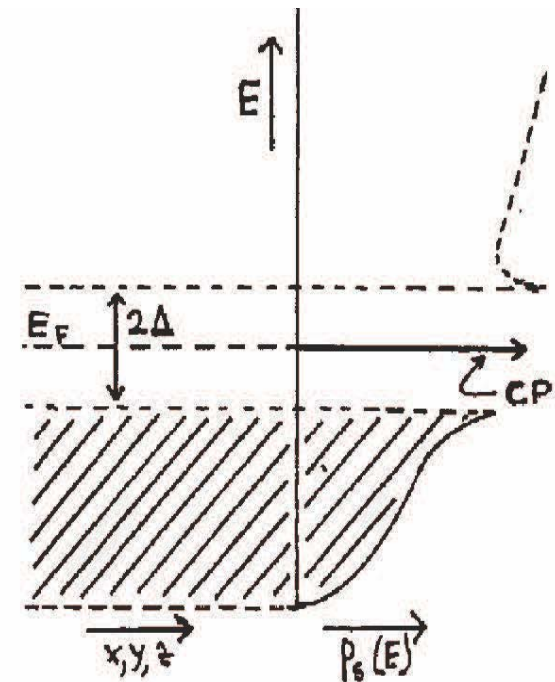
металл



полупроводник
(изолятор)

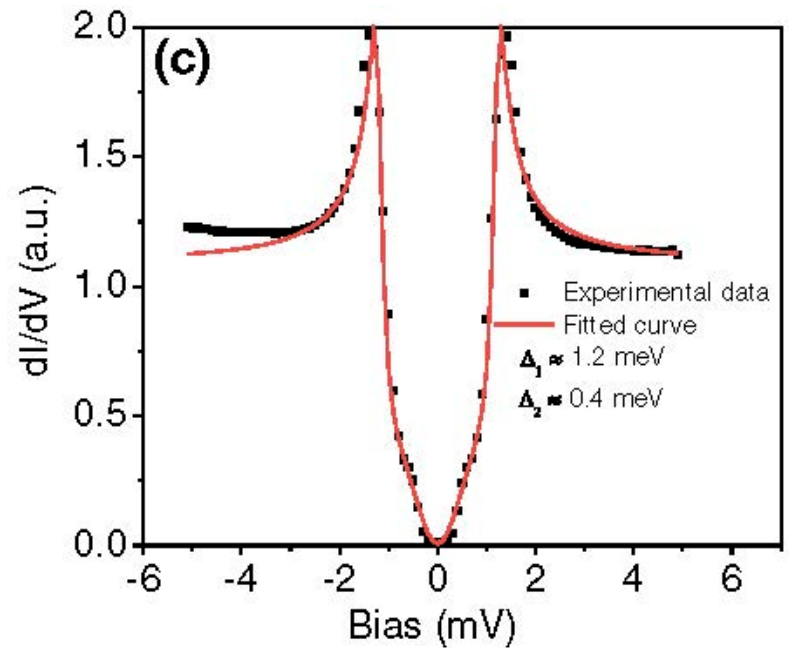
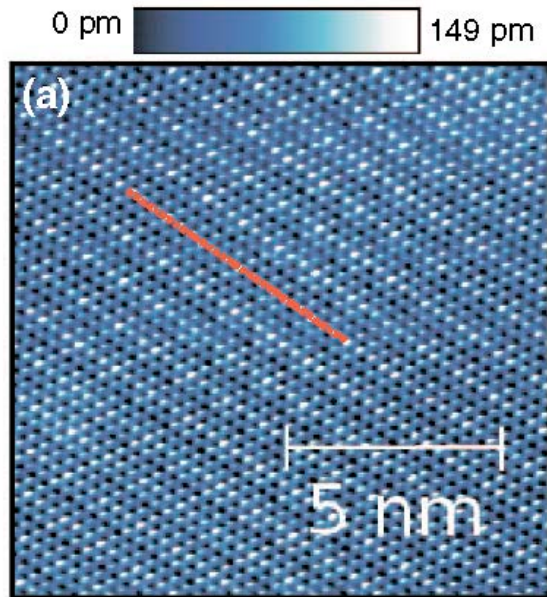


сверхпроводник



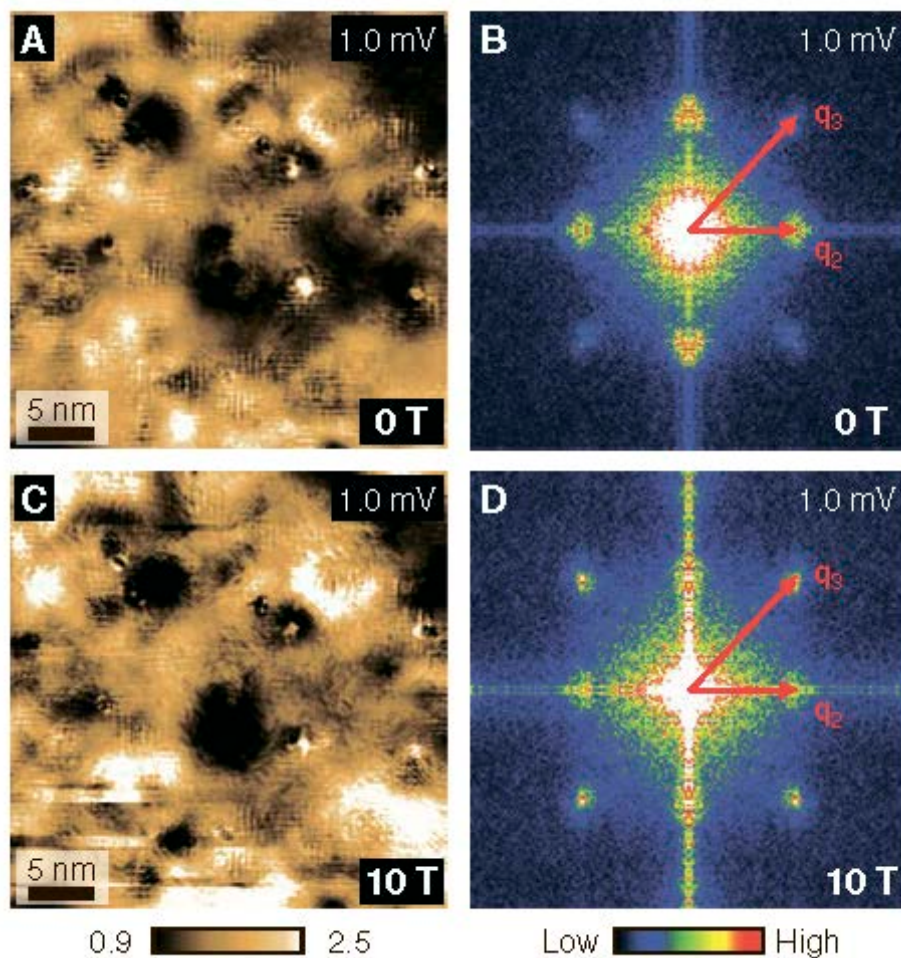
В спектре возникает щель 2Δ

Сверхпроводник NbSe₂

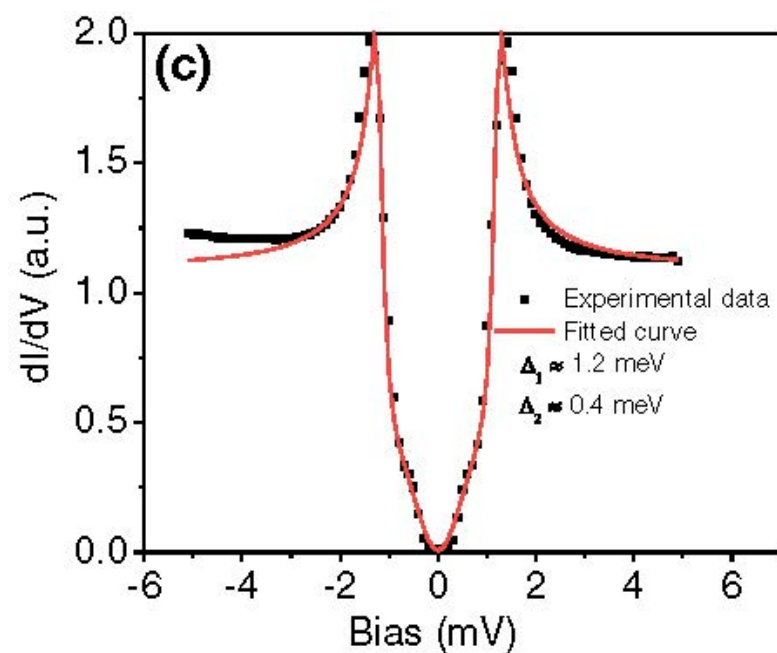


Сверхпроводник NbSe₂

Карта dI/dV и ее Фурье преобразование



dI/dV усредненная по линии

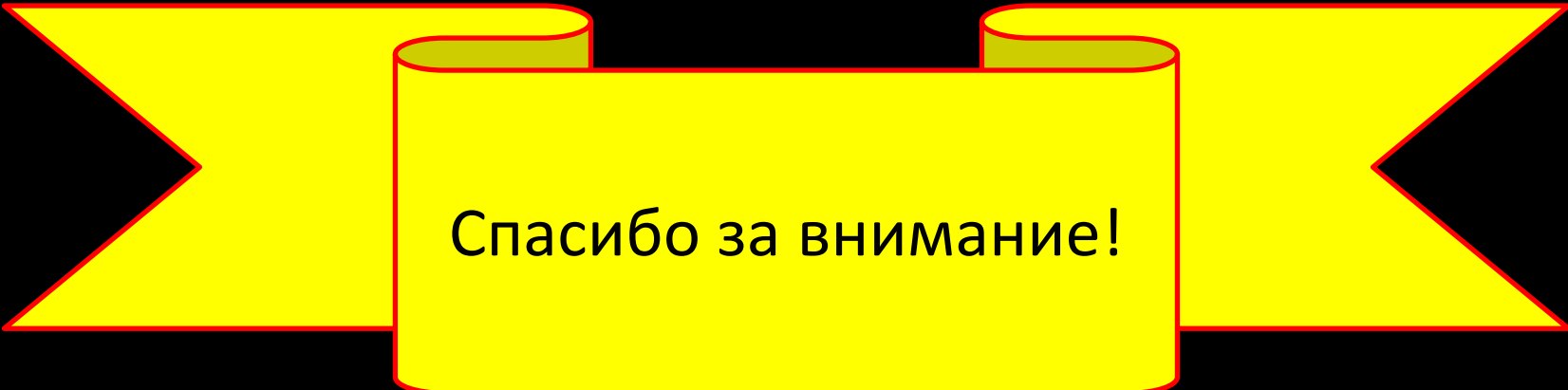


Резюме

Два мощных метода изучения спектра электронов:

- На поверхности интегрально (ARPES)
- На поверхности локально (STM)

С помощью их обнаружены и изучаются новые
квантовые материалы – как основа будущей
спинтроники и квантовых вычислений



Спасибо за внимание!