

# Образовательная программа Физика сверхпроводимости и квантовых материалов

На кафедре  
физики и технологии  
наноструктур:

руководитель:  
**В.М. Пудалов**

**Физический институт им П.Н.Лебедева РАН (ФИАН)**

<https://sites.lebedev.ru/ru/ovsisns/4066.html>

<https://sites.lebedev.ru/ru/ovsisns/4074.html>



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

# Синтез новых материалов, рост кристаллов



# Изготовление наноструктур

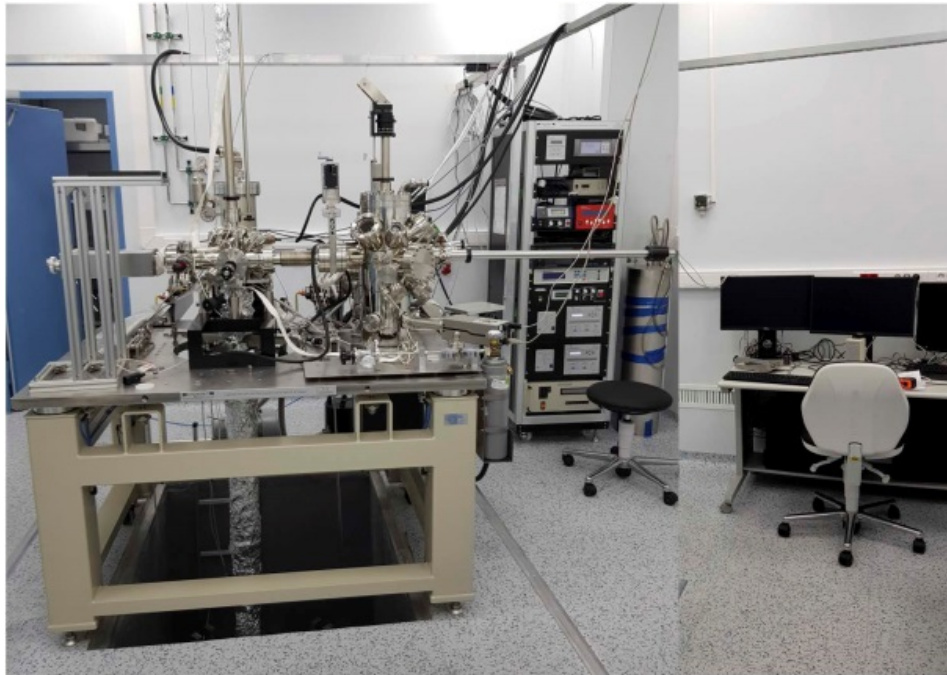
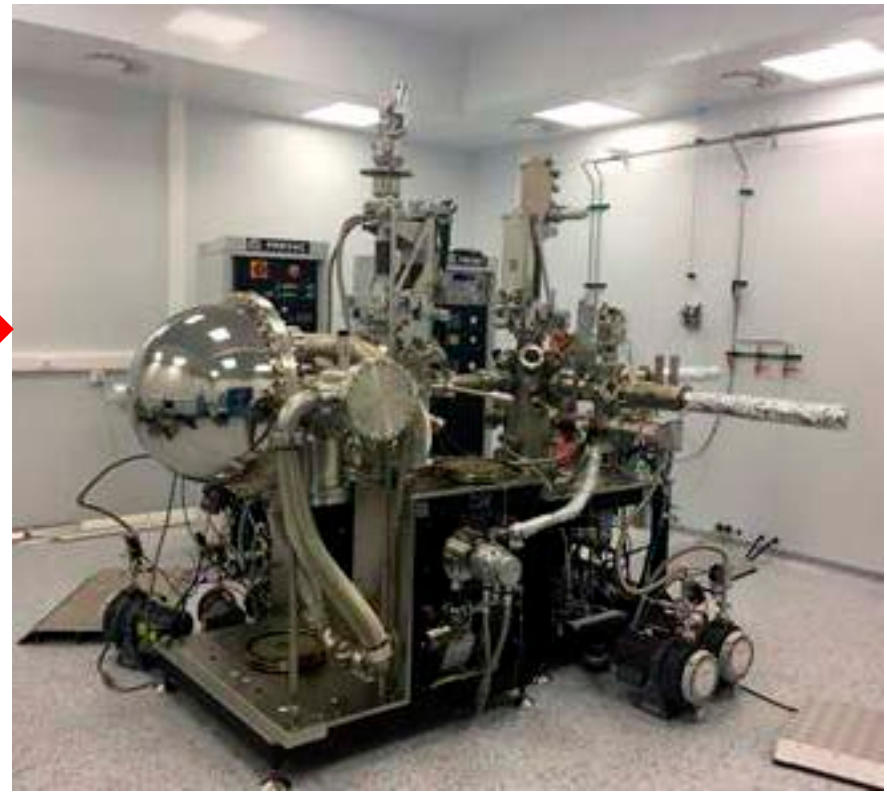




# Измерения физических свойств



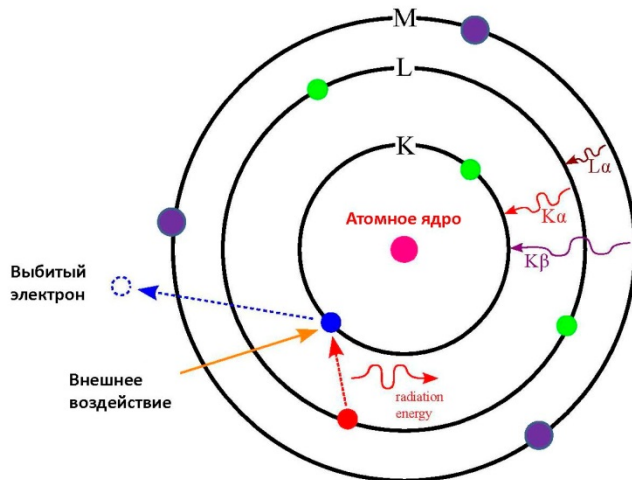
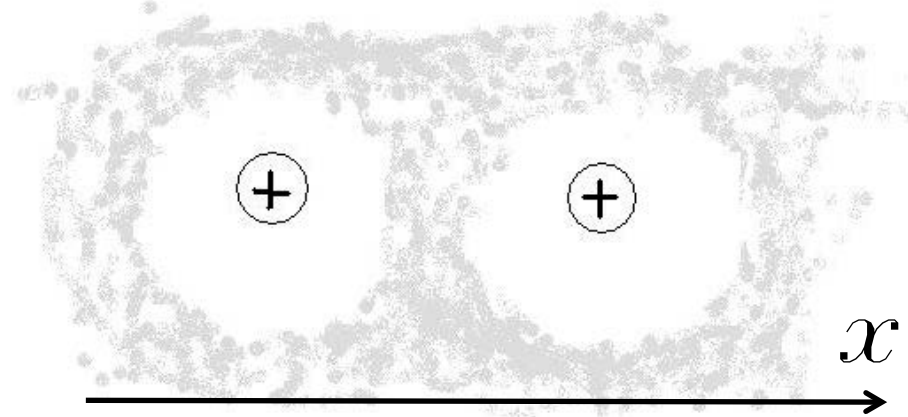
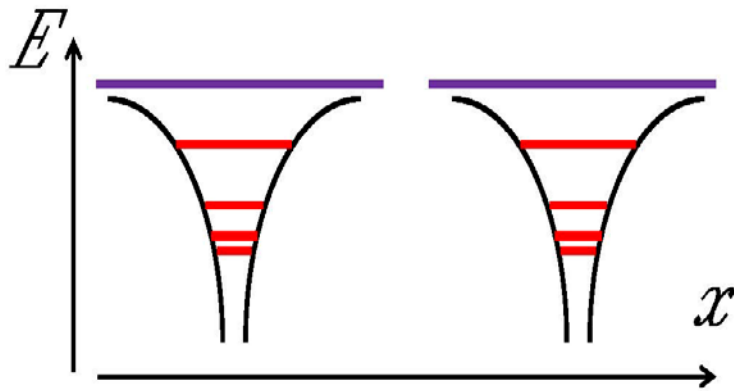
Установка  
фотоэлектронной  
спектроскопии с  
угловым разрешением  
(ARPES) Scienta R-4000



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

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

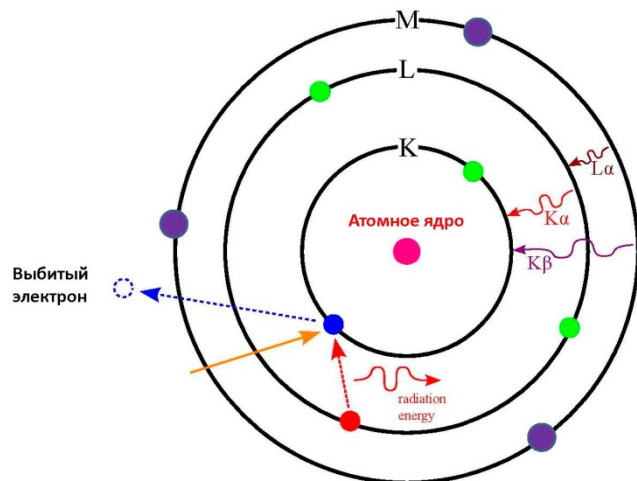
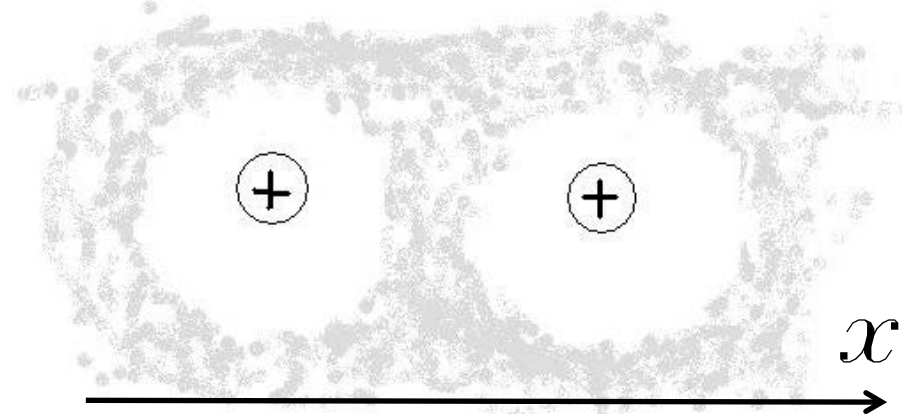
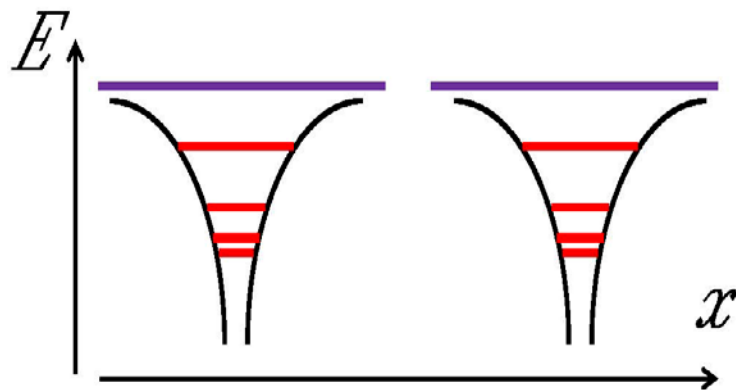
“Электроны в металлах”  $\equiv$  электроны проводимости





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

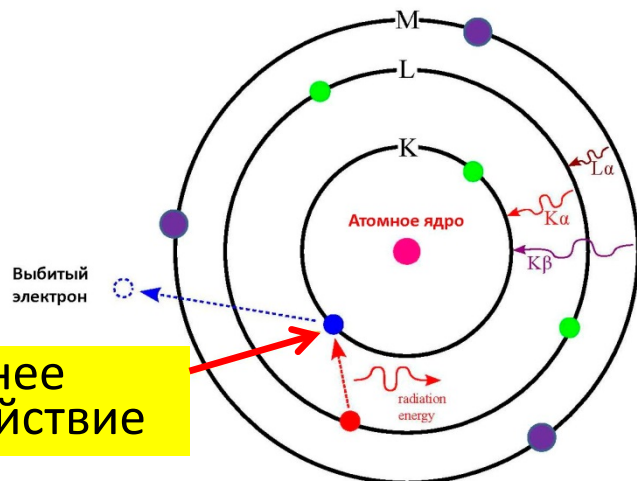
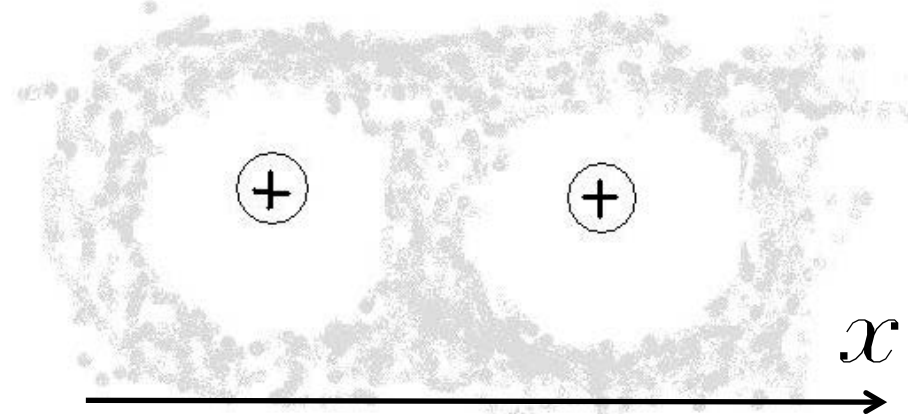
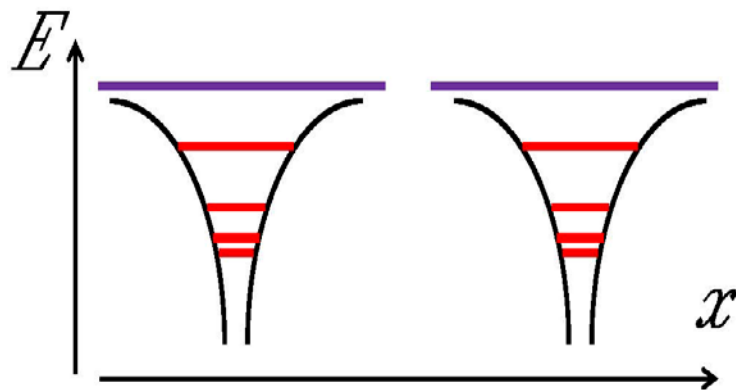
“Электроны в металлах”  $\equiv$  электроны проводимости



Свойства ?

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

“Электроны в металлах”  $\equiv$  электроны проводимости



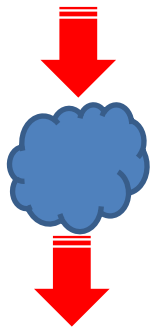
Свойства ?

Внешнее воздействие



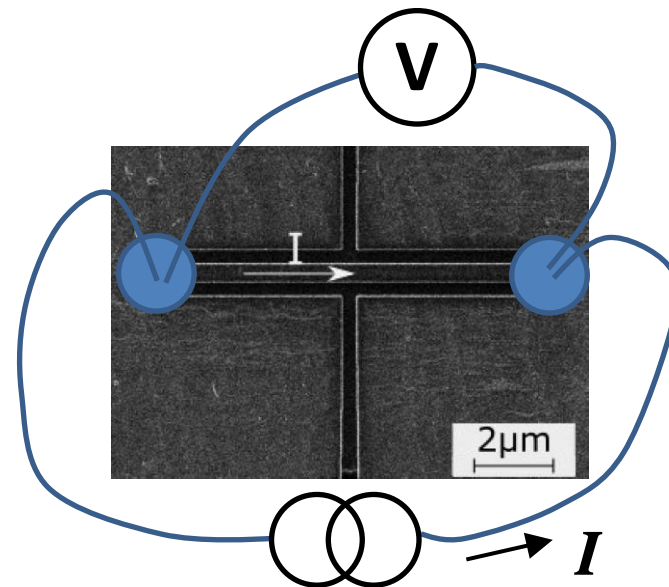
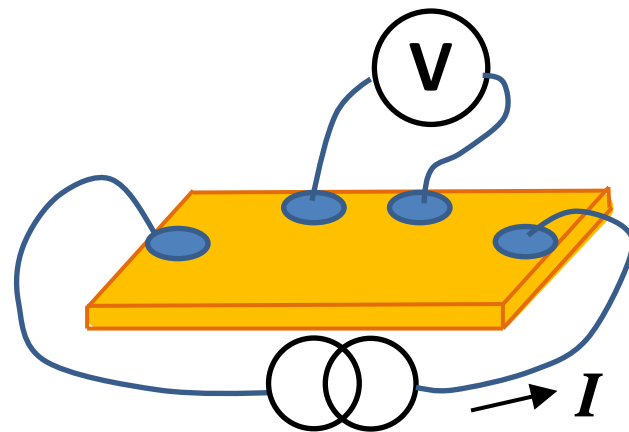
# Свойства ?

Воздействие



Результат

# DC & AC транспорт



## Электронные свойства твердых тел –

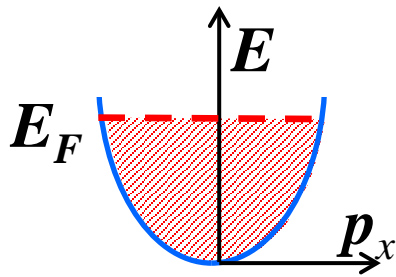
- Сверхпроводимость,
- Магнетизм,
- Электроника,
- Спинтроника,
- Квантовые вычисления,...

Большинство свойств определяются спектром  $E(p)$

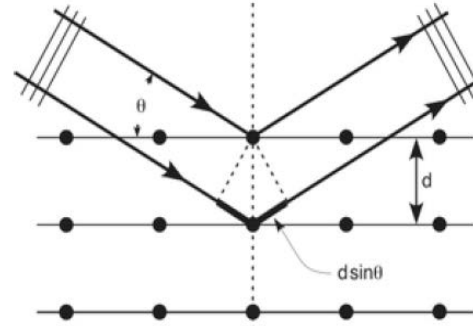
1. Свойства электронов вблизи поверхности
2. Локальные электронные свойства

# Электроны в вакууме

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

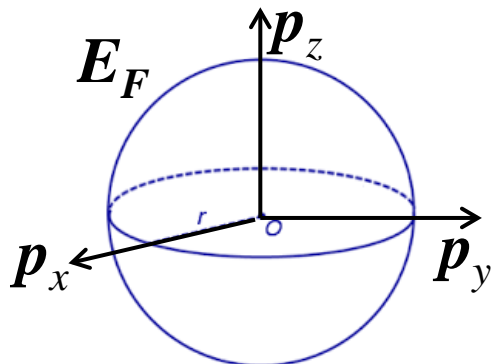


# А в кристалле ?



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

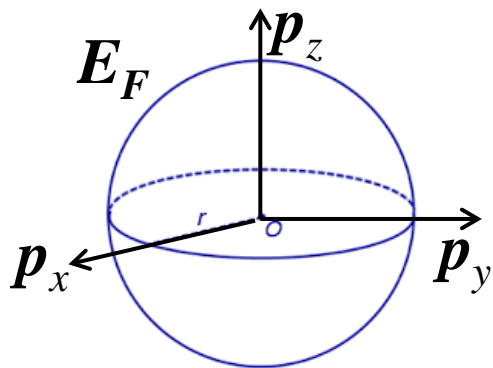
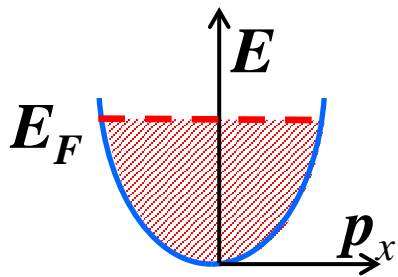
**Электрон:**  $p=hk/2\pi$ ;  $k=2\pi/\lambda$ ;  $E=p^2/2m = h^2/(2m\lambda)^2$



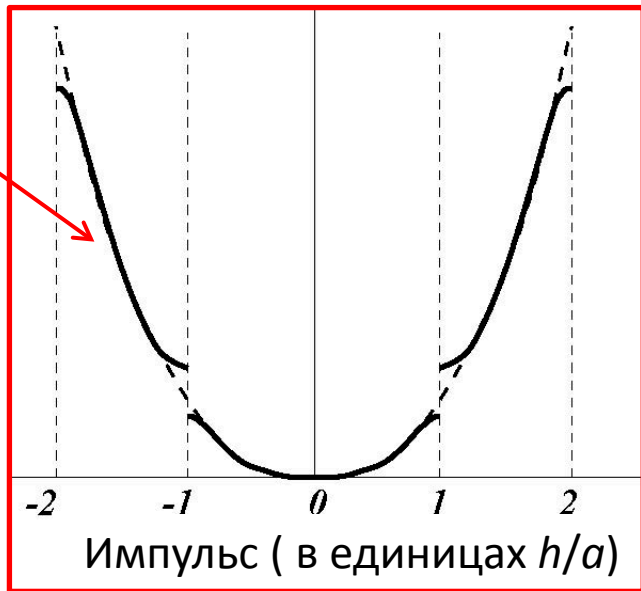
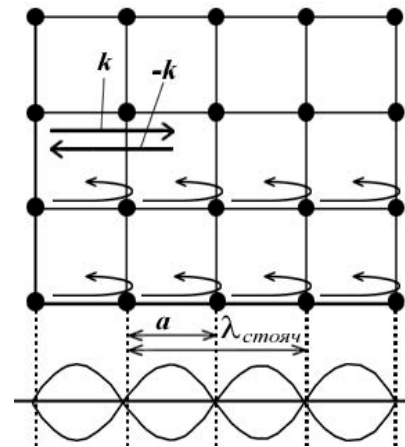
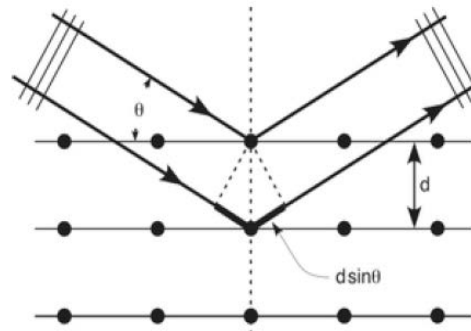


# Электрон в вакууме

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

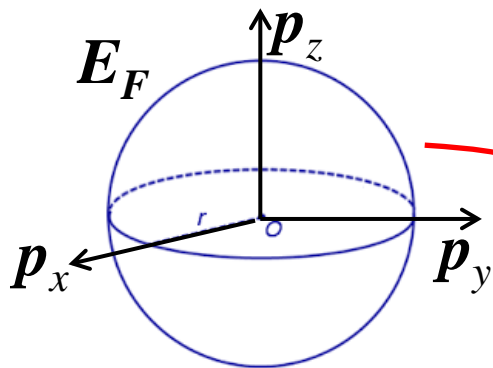
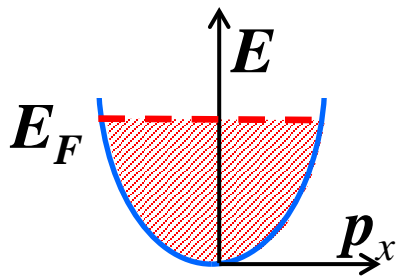


# Электрон в кристалле

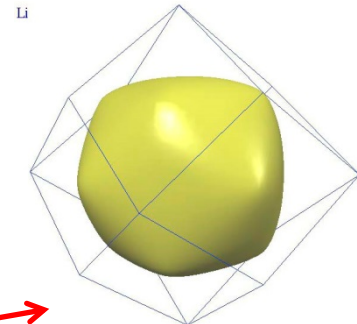
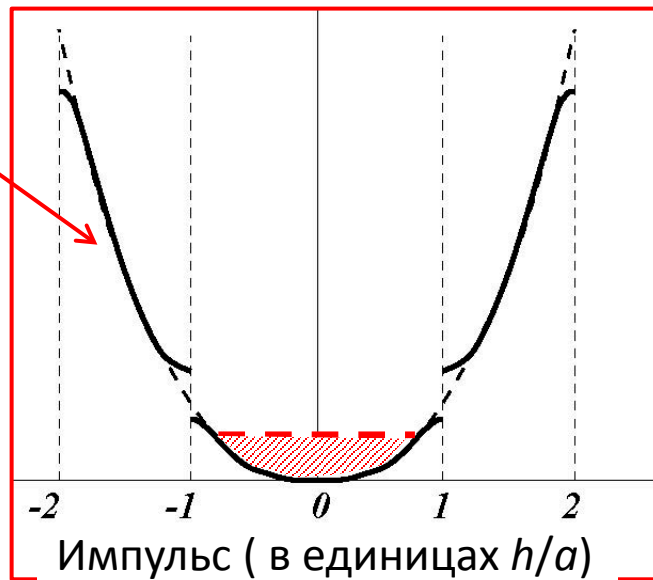
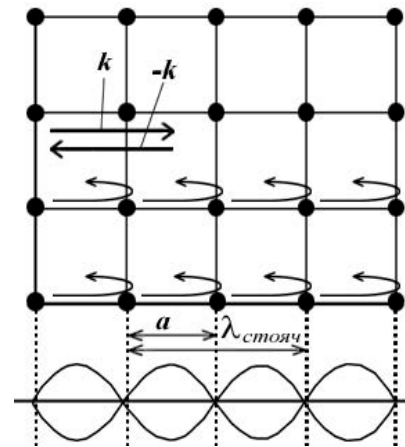
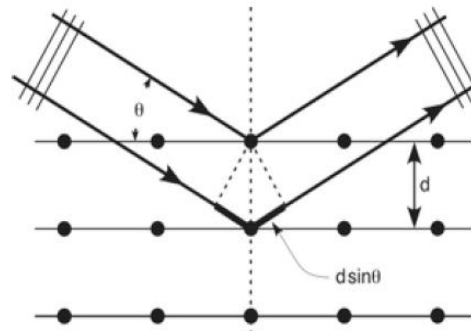


# Электрон в вакууме

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

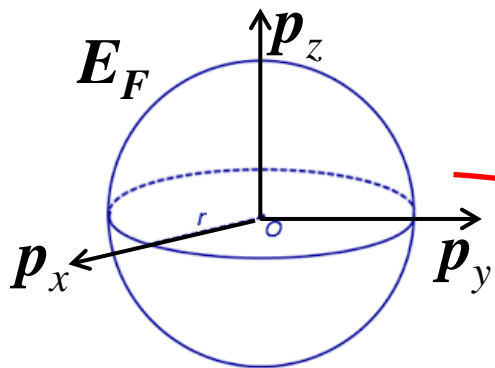
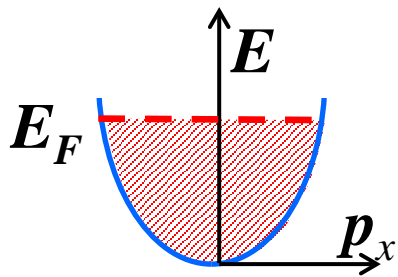


# Электрон в кристалле

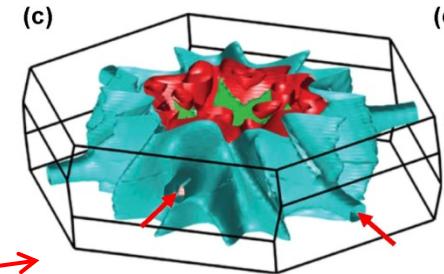
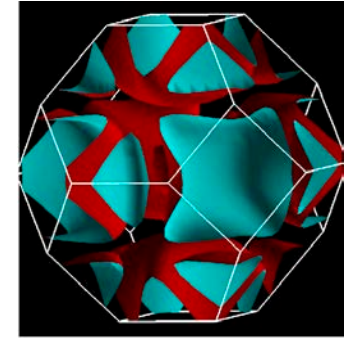
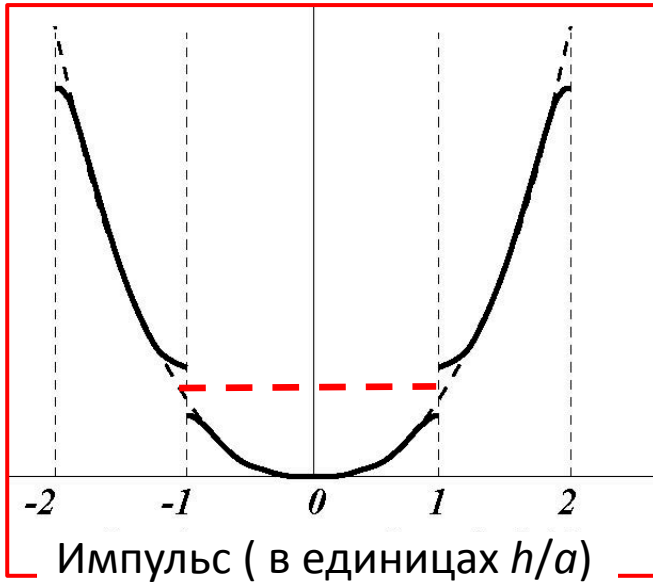
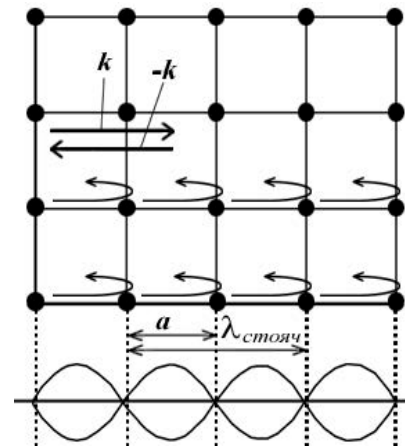
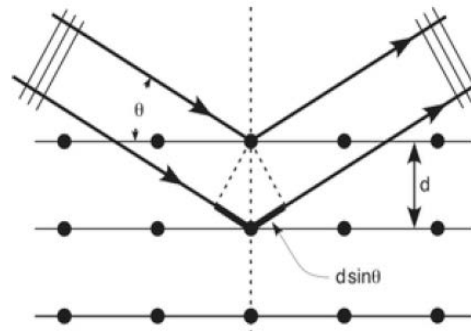


# Электронны в вакууме

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

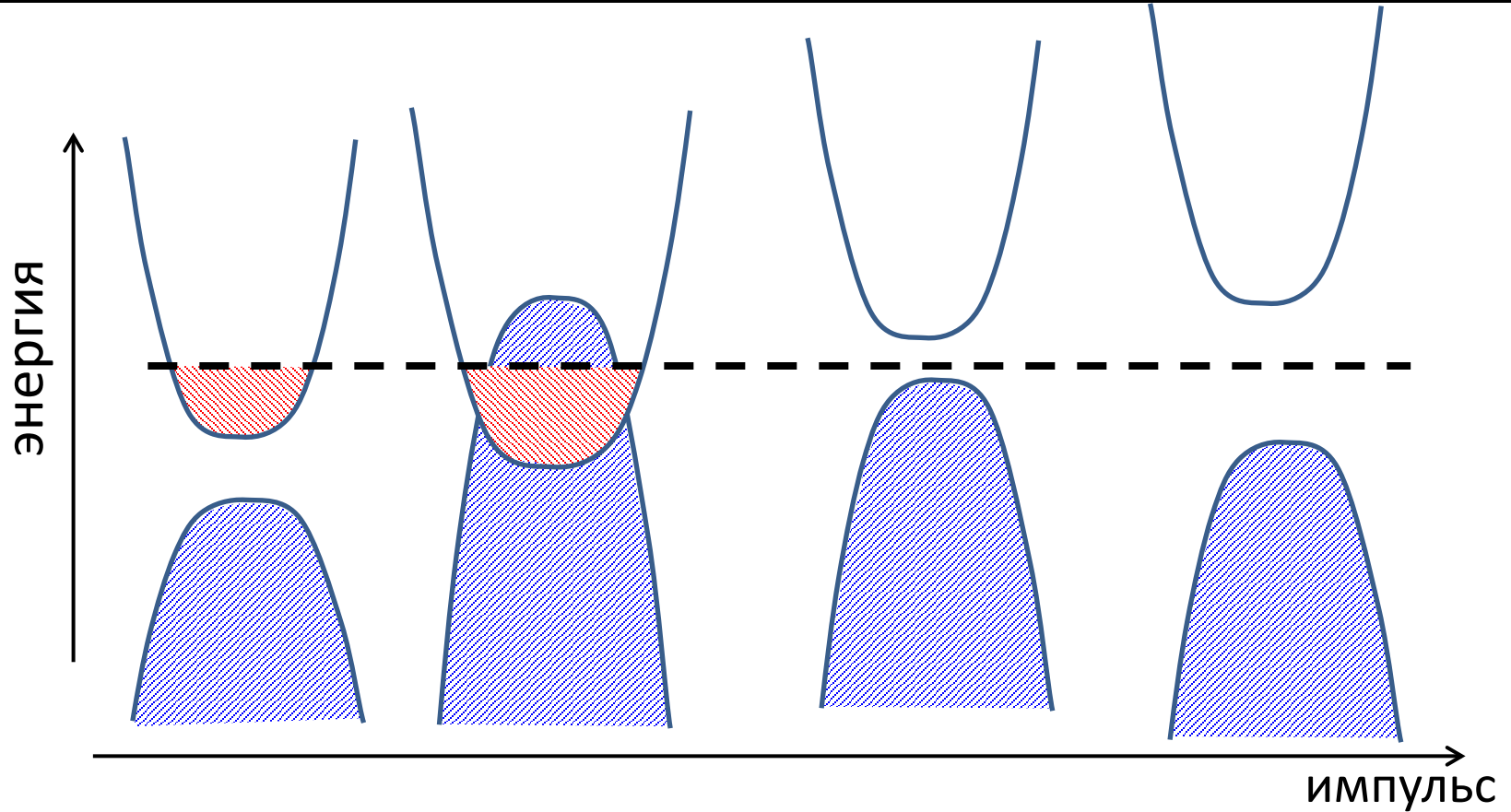


# Электронны в кристалле





# Энергетический спектр = Зонная структура



1-3 металл, 2-3 металл, полупроводник, изолятор



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

**2. Сканирующая туннельная  
микроскопия/спектроскопия**



**Генрих Герц**

1886



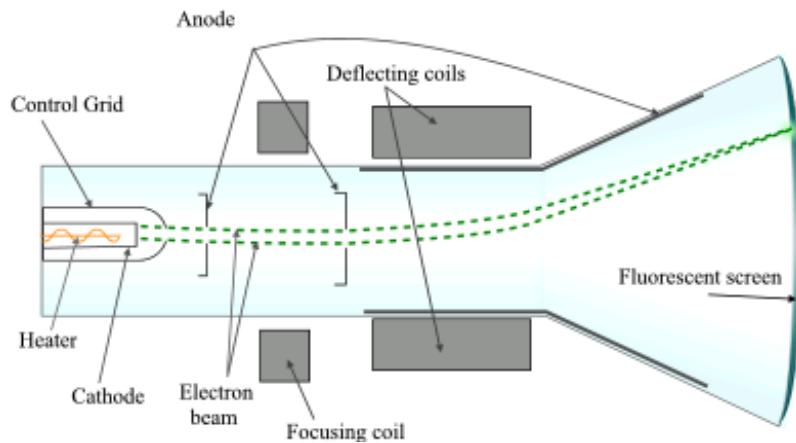
*заряженный конденсатор теряет свой заряд быстрее при освещении его пластин ультрафиолетовым излучением*



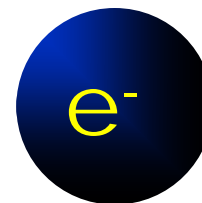
# Открытие электрона



**Джозеф Джон Томпсон**



1899



**частица**

## 3 закона фотоэффекта



1889



## Александр Г. Столетов

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

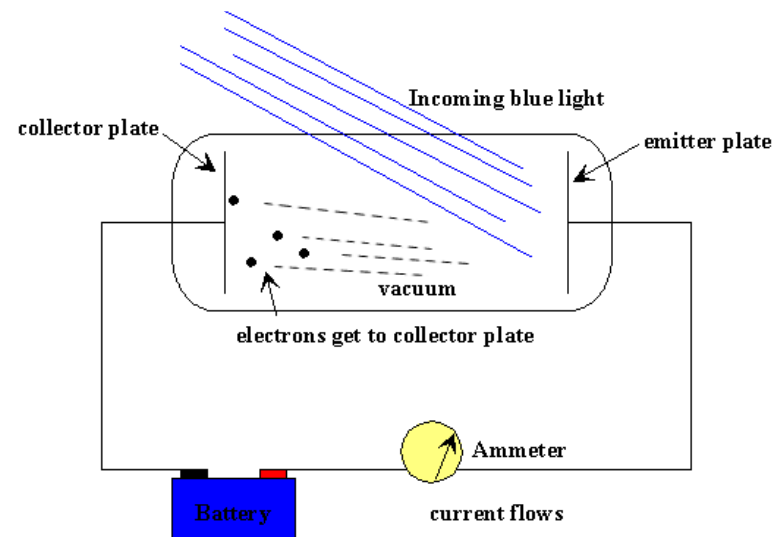
**II Максимальная начальная скорость (максимальная начальная кинетическая энергия) фотоэлектронов не зависит от интенсивности падающего света, а определяется только его частотой  $f$ .**

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

# Открытие фотоэффекта

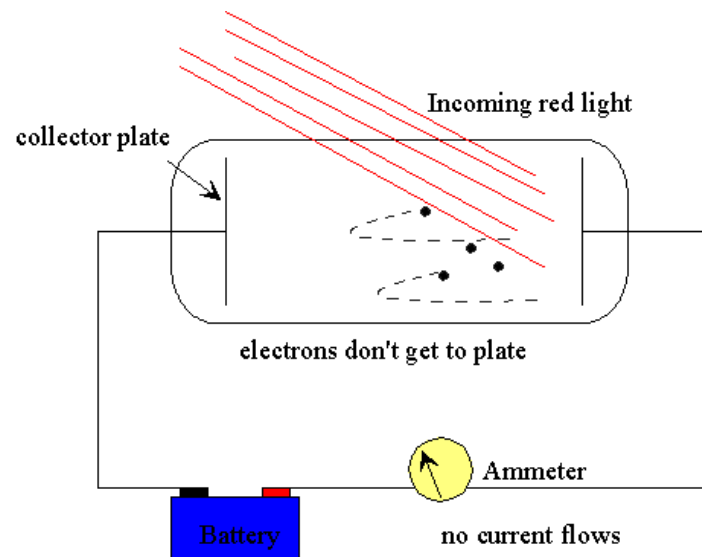


1902



## 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.*



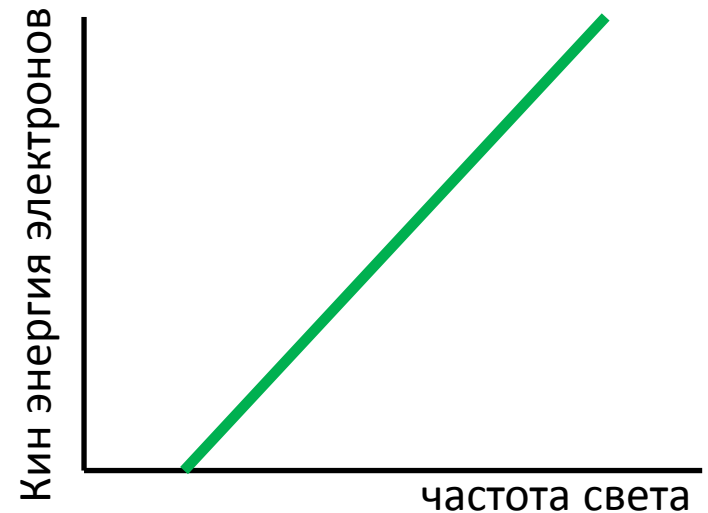
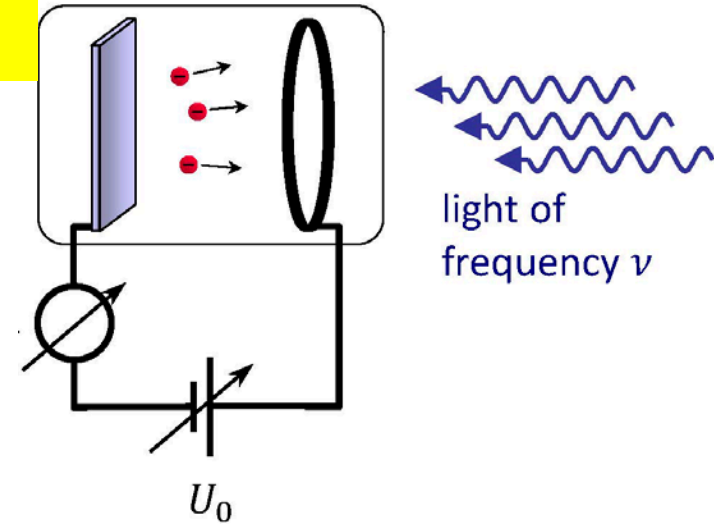
Итак, из опытов Герца, Столетова, Ленарда следует:

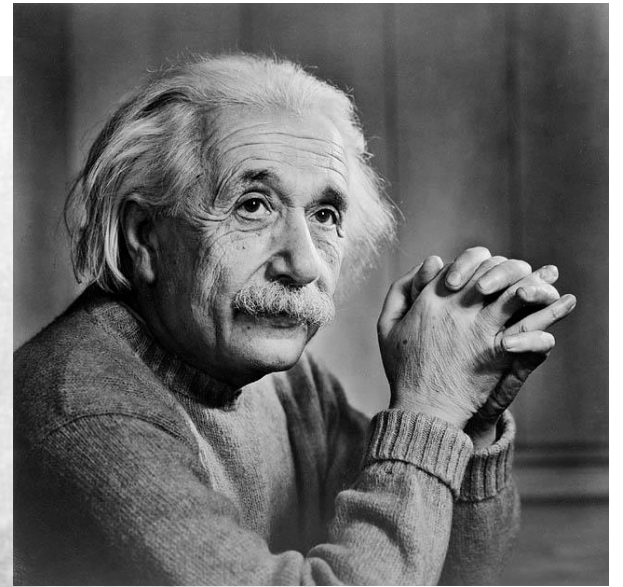
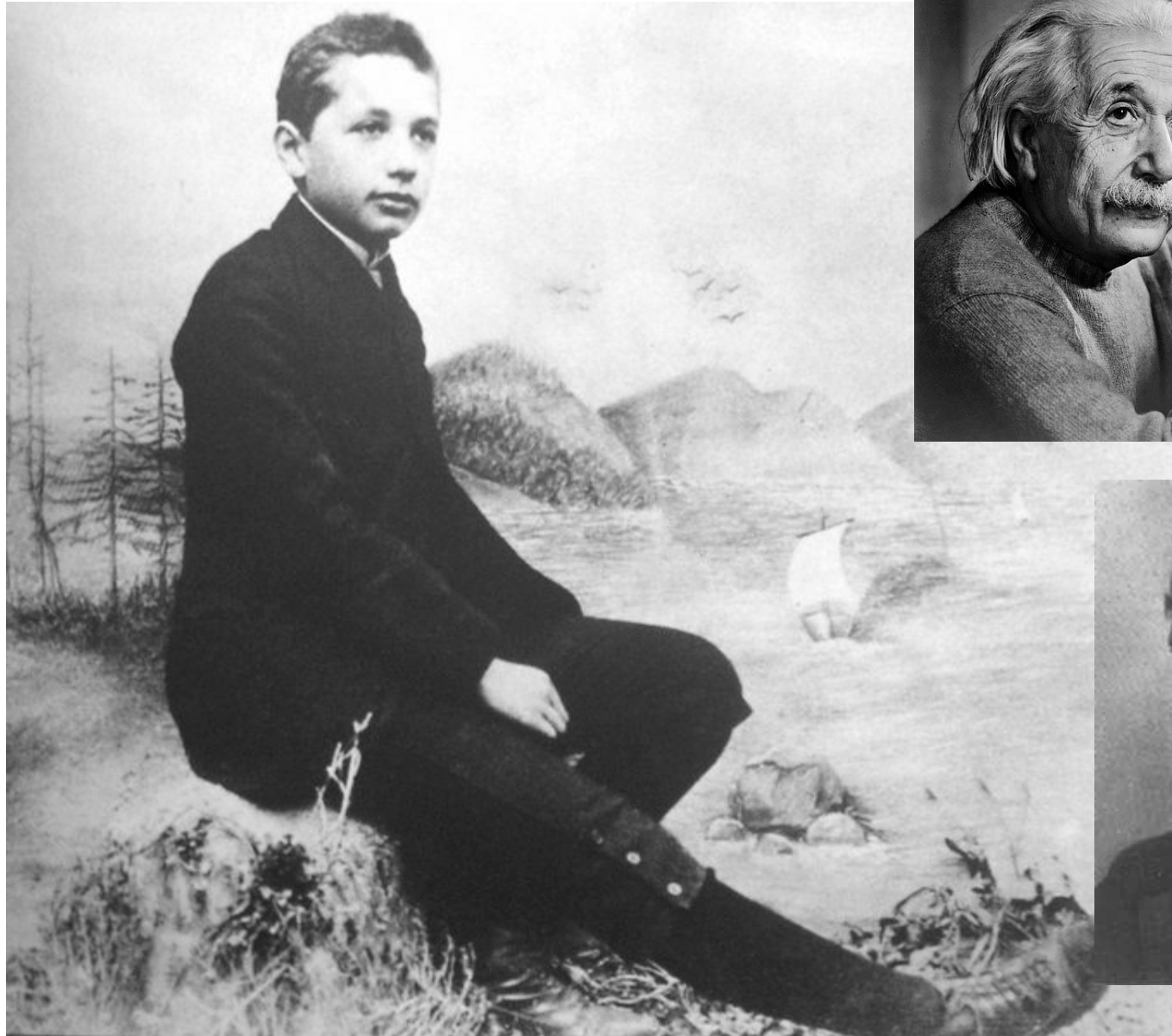
- **ИНТЕНСИВНОСТЬ СВЕТА увеличивает**

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

- $E_{\text{max}}^{\text{kin}}$  **ЗАВИСИТ ОТ ЧАСТОТЫ СВЕТА**

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



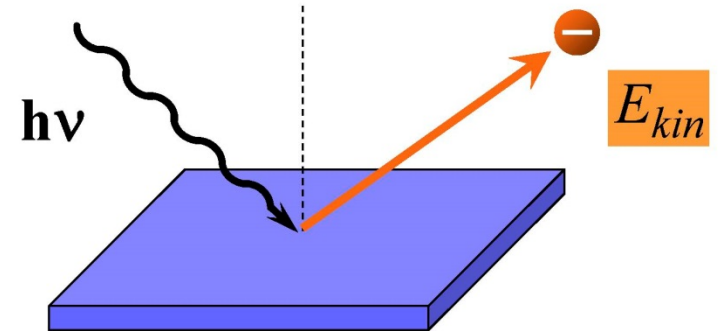




# Квантовая теория фотоэффекта



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



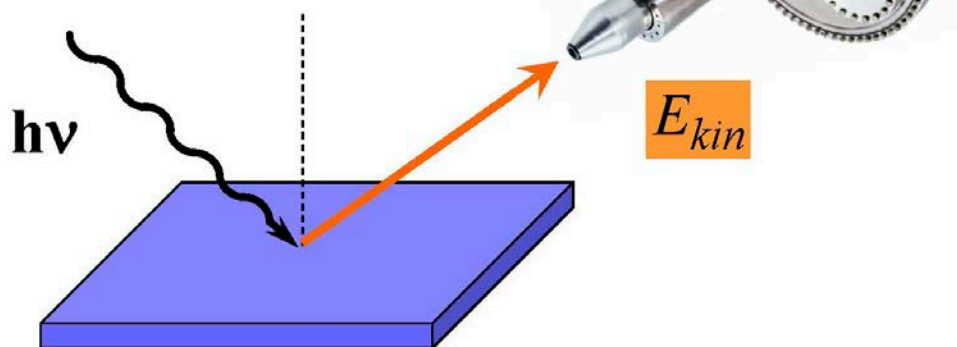
**Кай М. Зигбан**  
Нобелевская  
премия 1981

## Сохранение энергии

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

1981

анализатор  
электронов





$E$

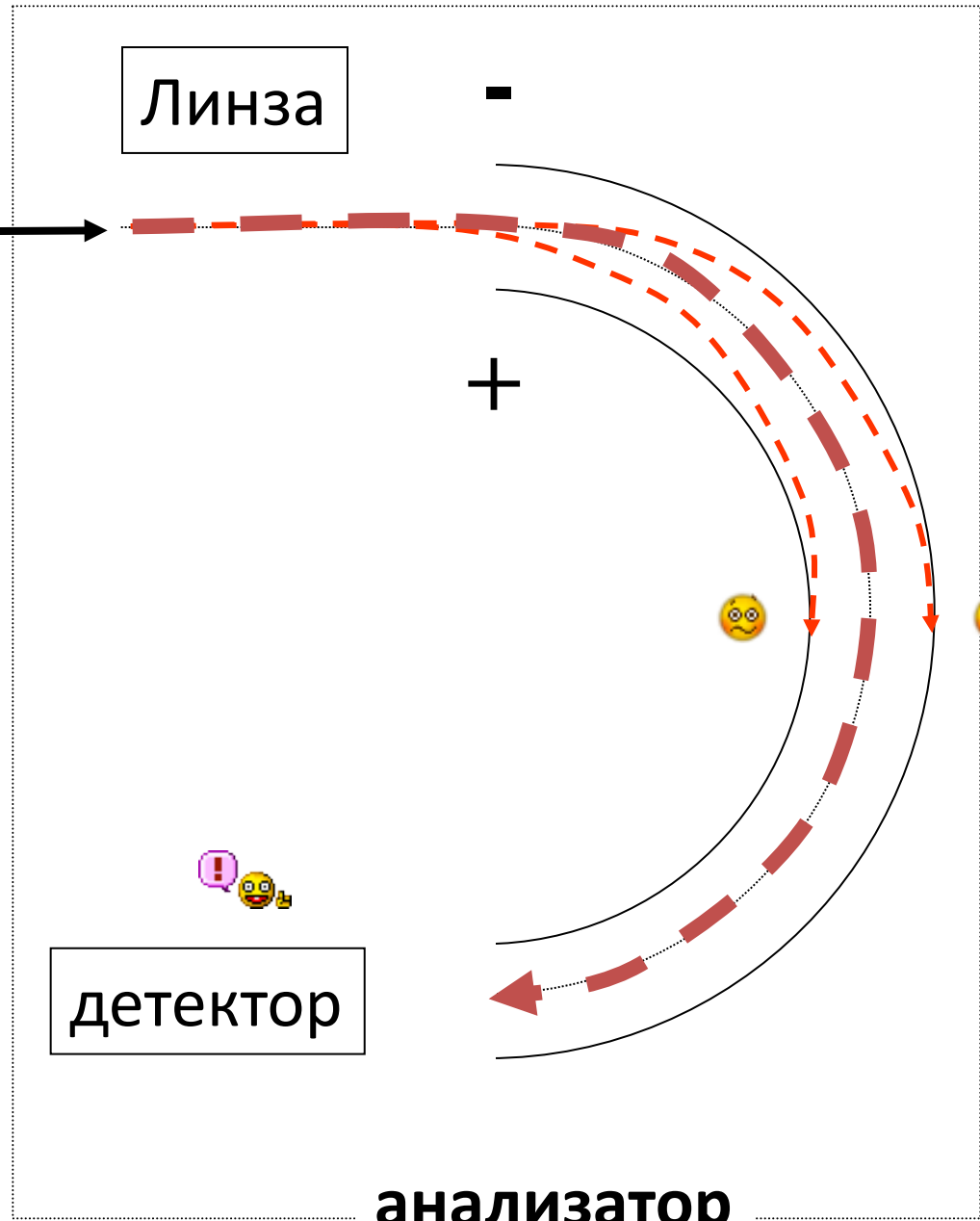
Линза

-

+

детектор

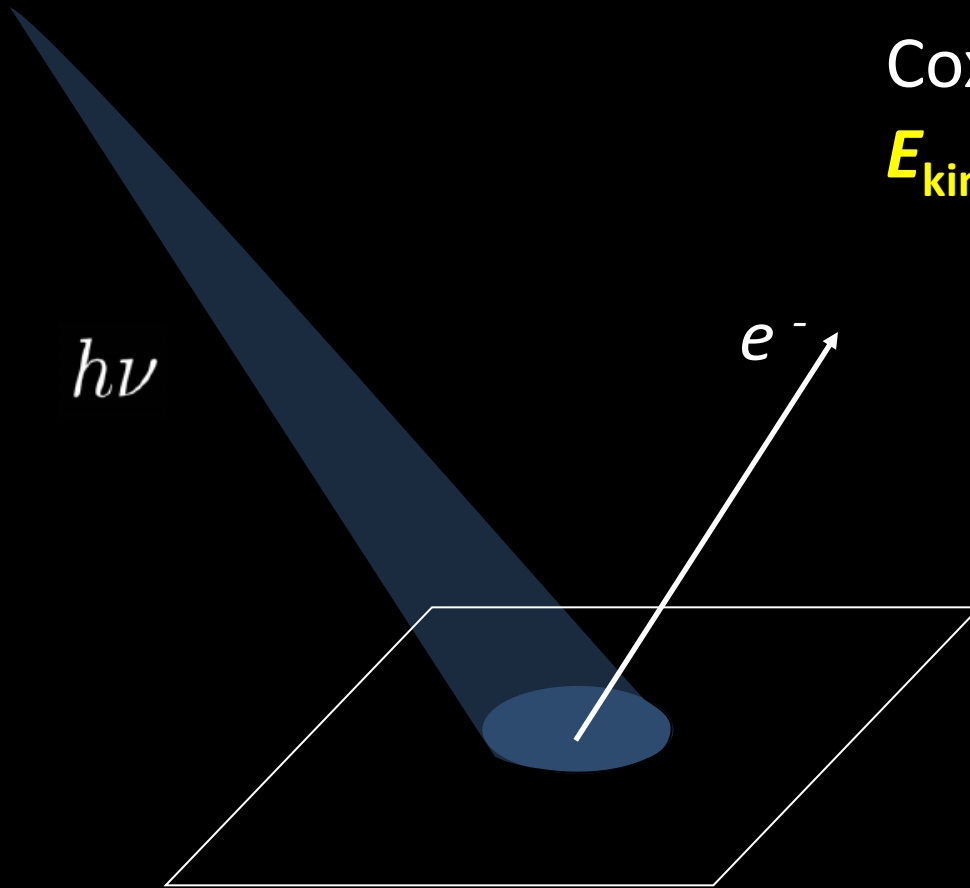
анализатор



# Фотоэлектрический эффект

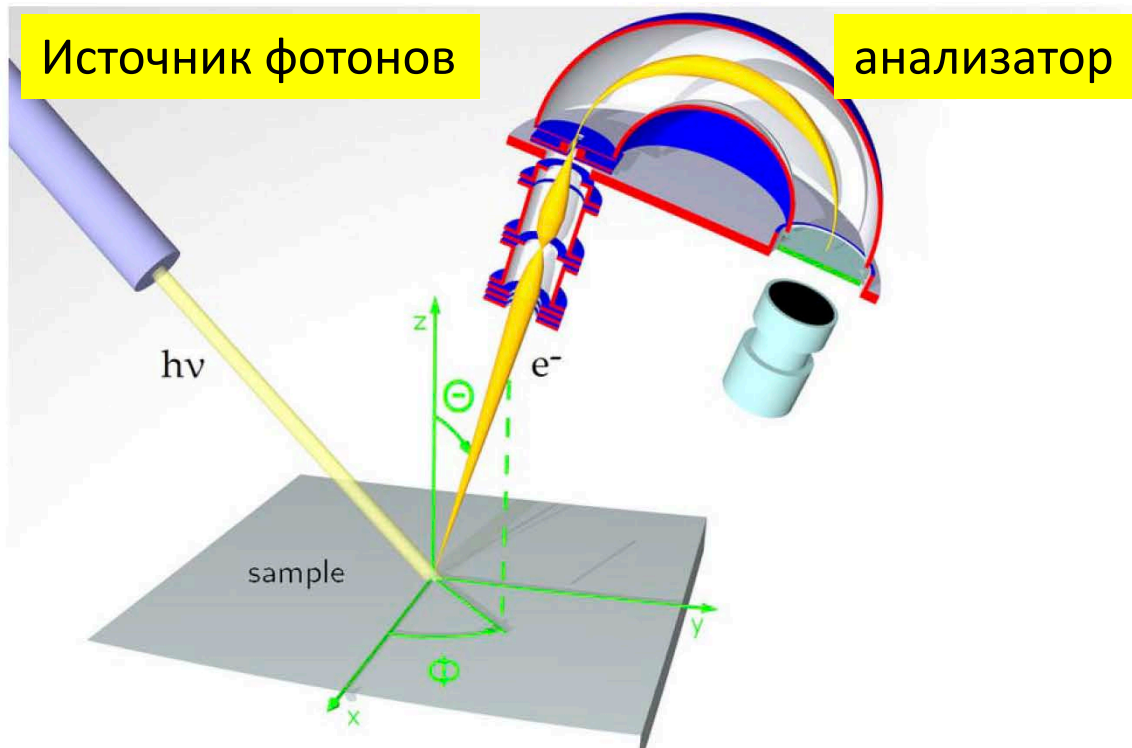
Сохранение энергии

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





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



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

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

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

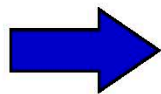
$$K_y = |\vec{K}| \sin\theta \sin\phi$$

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

вакуум

$$E_{kin}$$

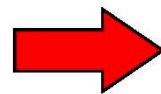
$$\vec{K}$$



Законы сохранения

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

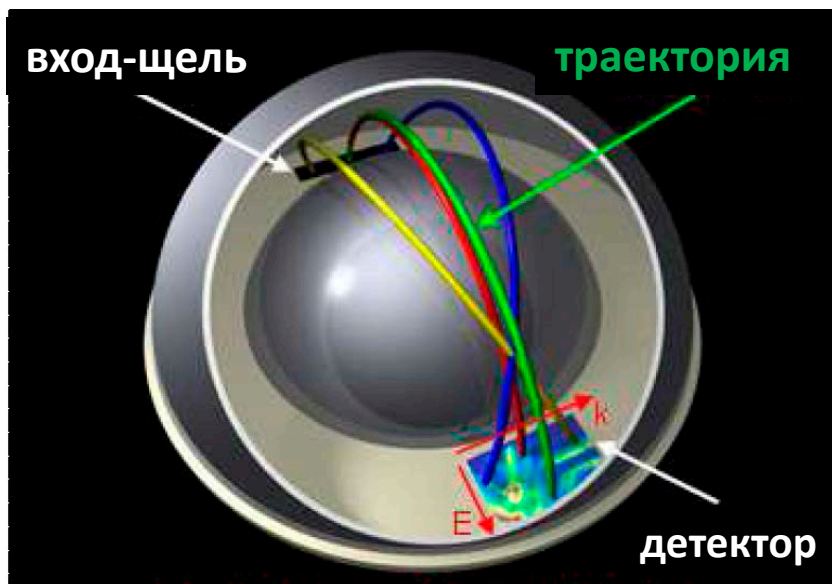
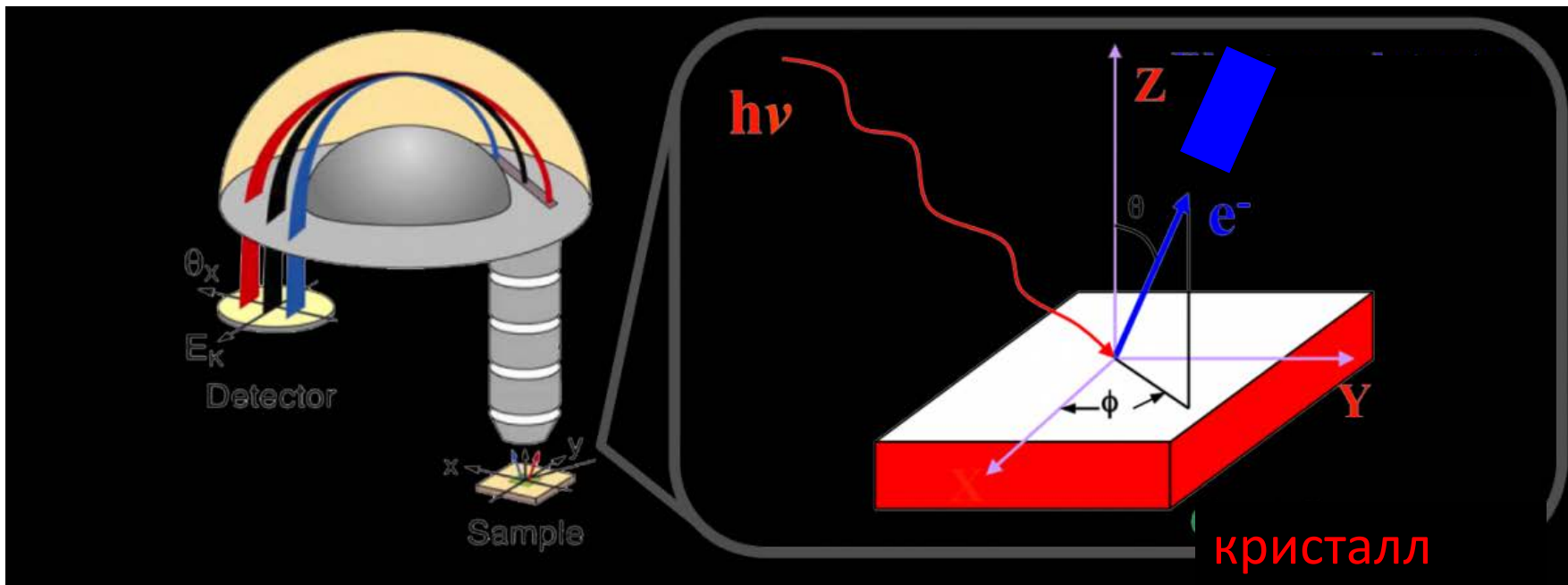
$$\vec{K} = \vec{k} (+\vec{k}_{photon})$$

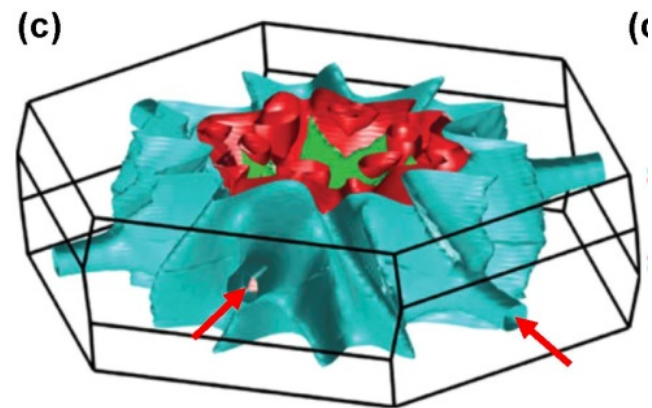
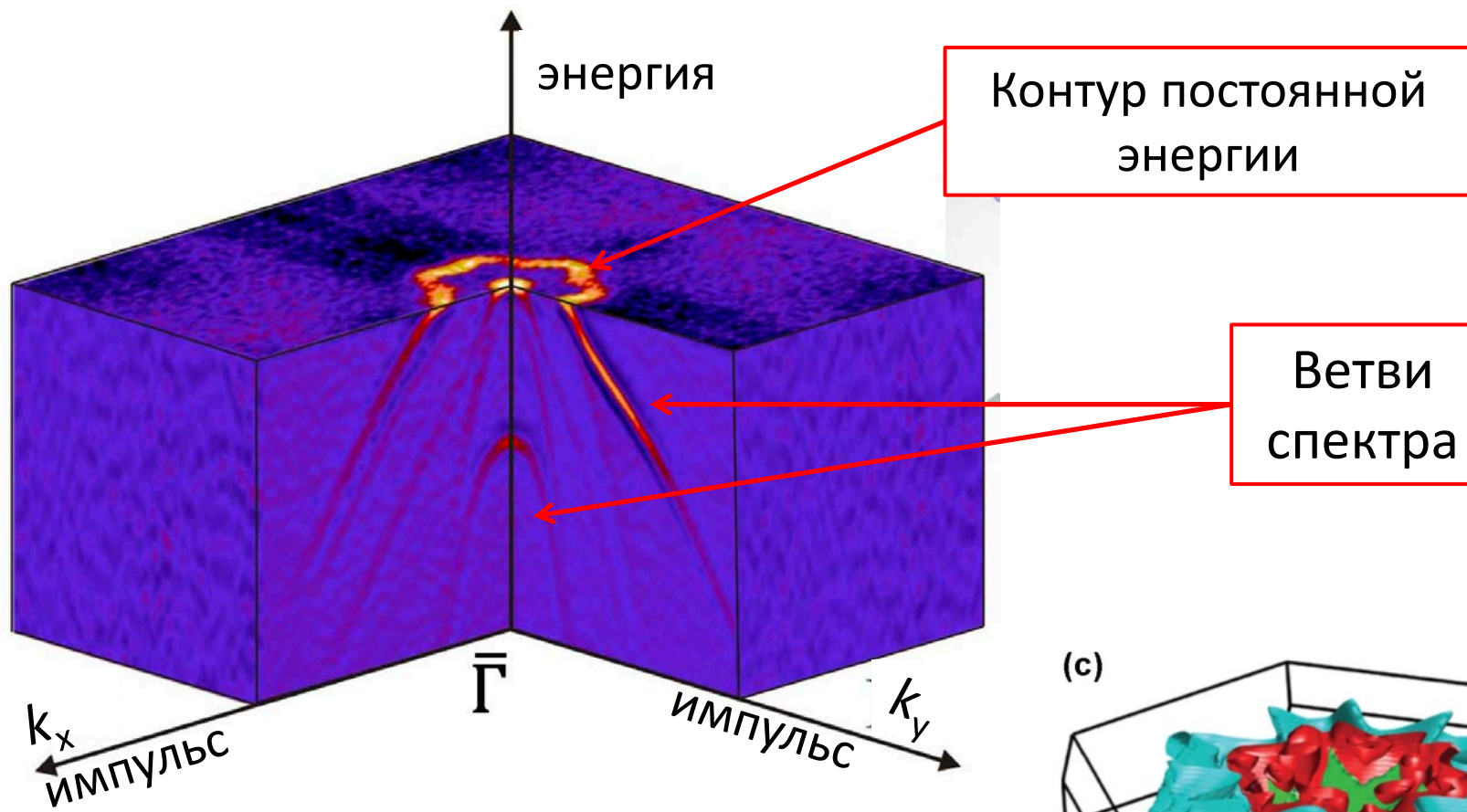


кристалл

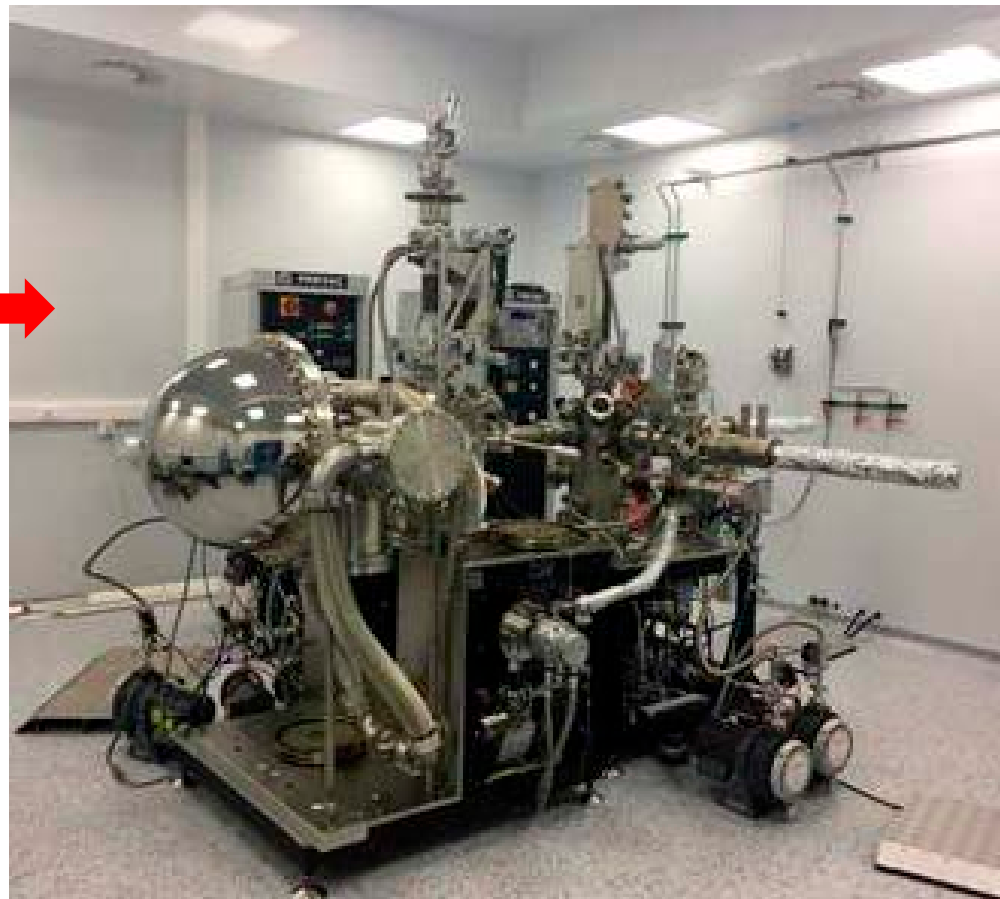
$$E_B$$

$$\vec{k}$$





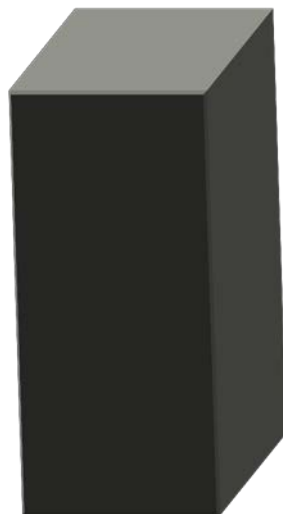
Установка  
фотоэлектронной  
спектроскопии с угловым  
разрешением  
(ARPES) Scienta R-4000



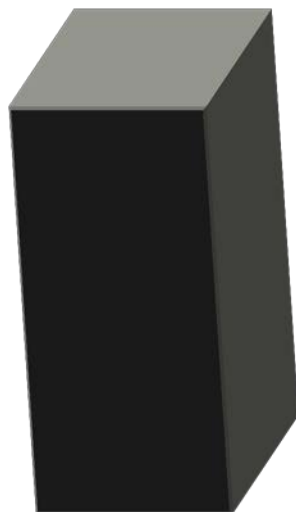
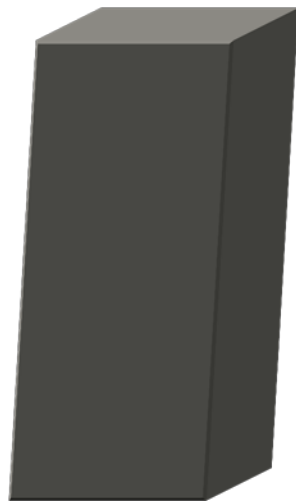
Температура 5-300К,  
Рабочий вакуум  $10^{-11}$ Торр  
Разрешение по энергии 1 меВ  
Энергия фотонов 21эВ, 23эВ, 42эВ  
Разрешение по спину: 2D

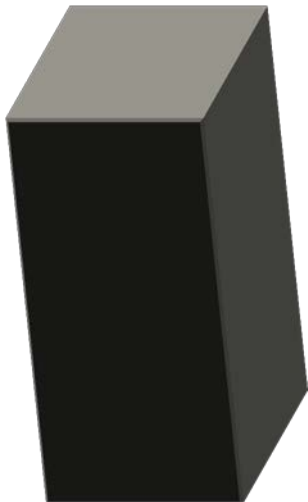
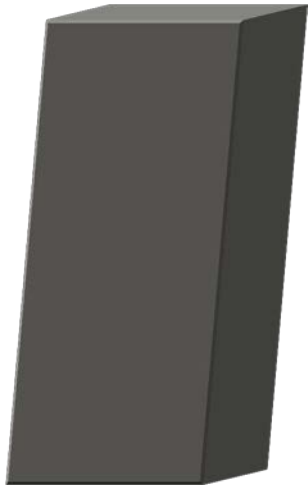


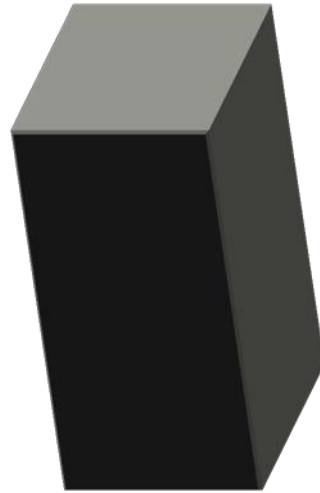
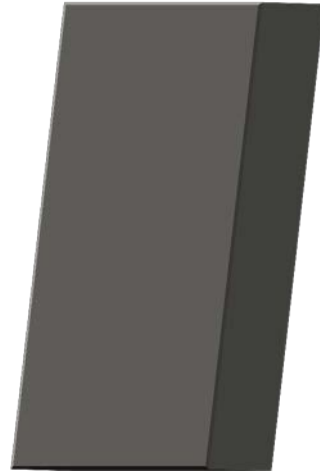
**Для измерений  
необходима чистая  
поверхность кристалла**

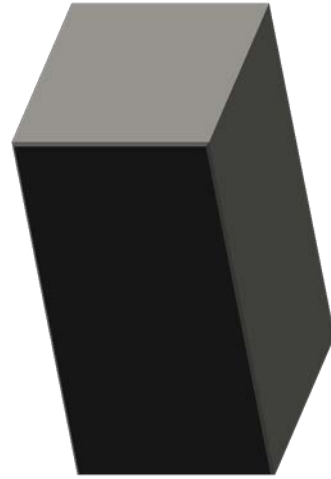
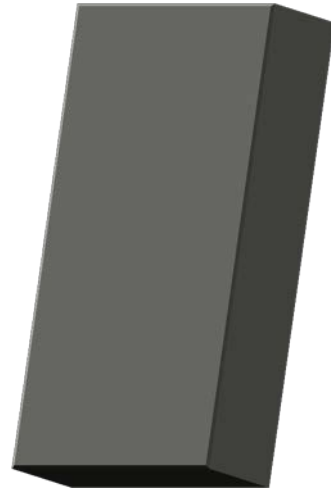


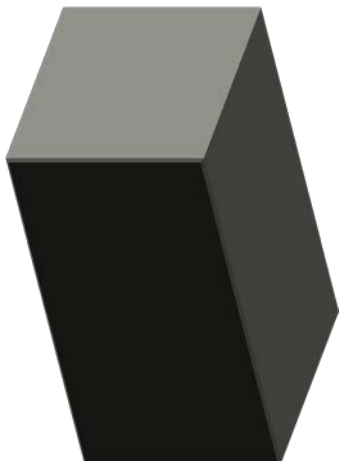
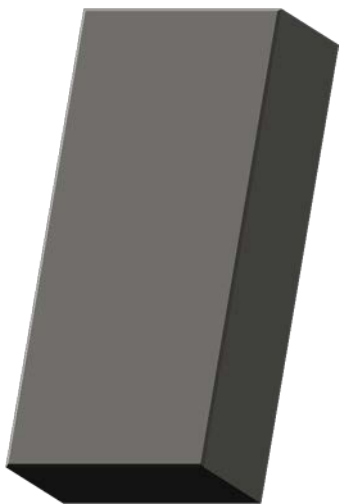




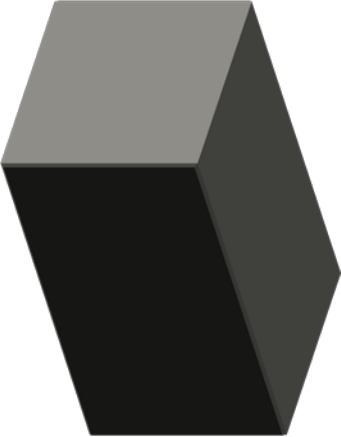
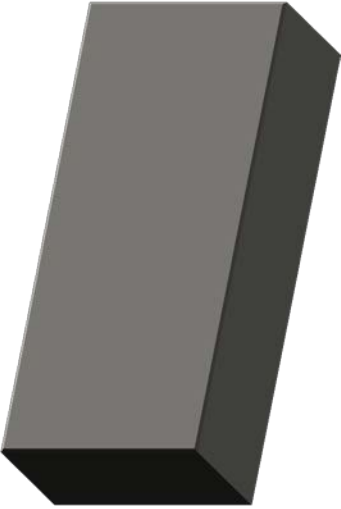


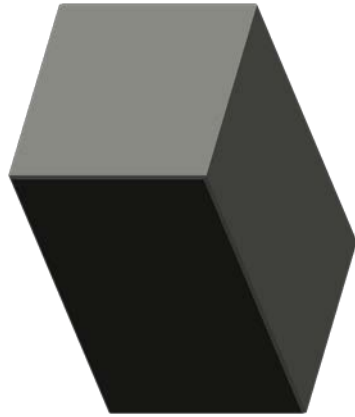
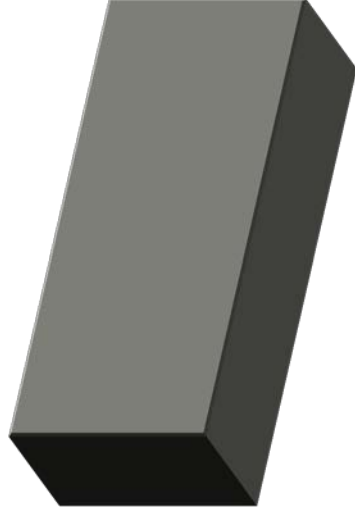


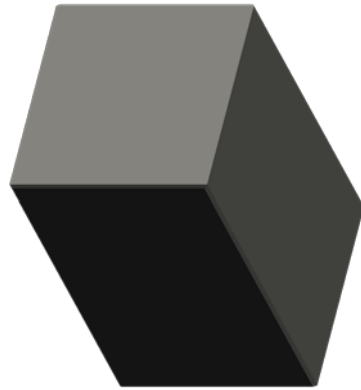
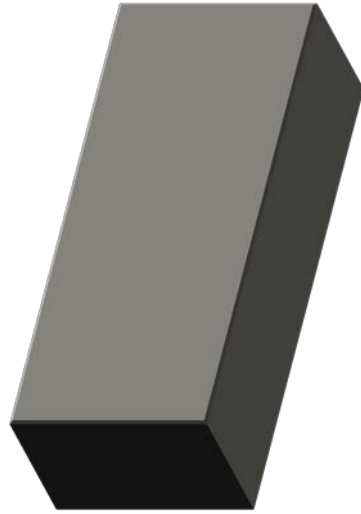


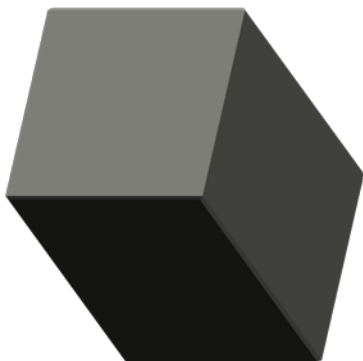
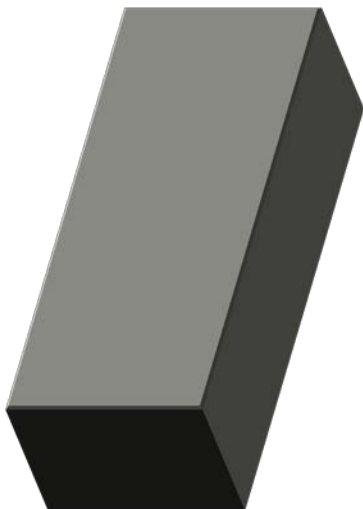


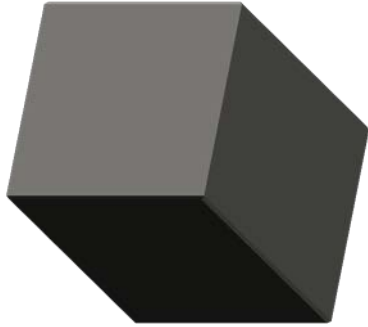
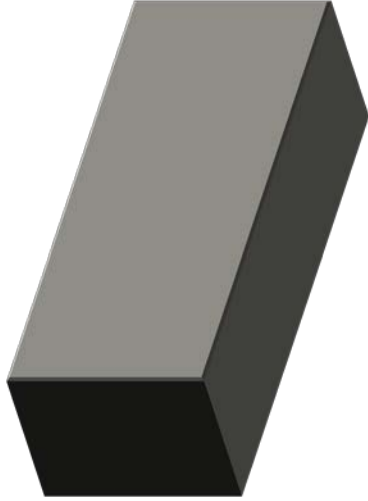


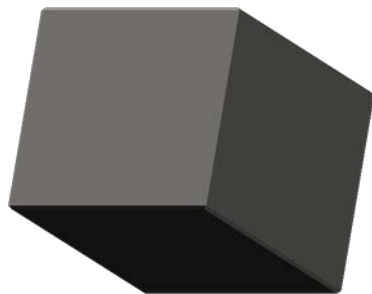
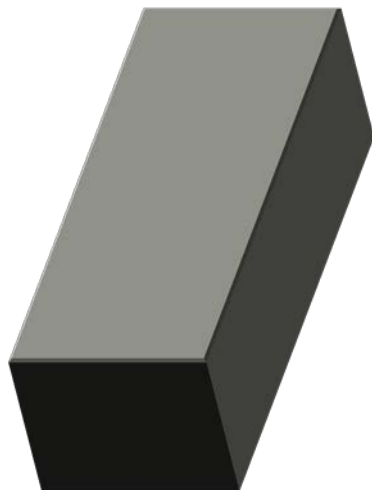




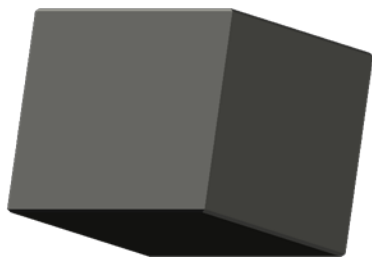
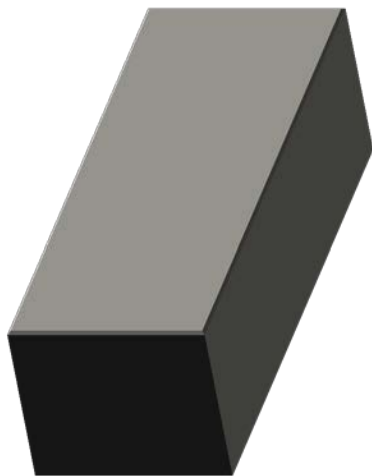


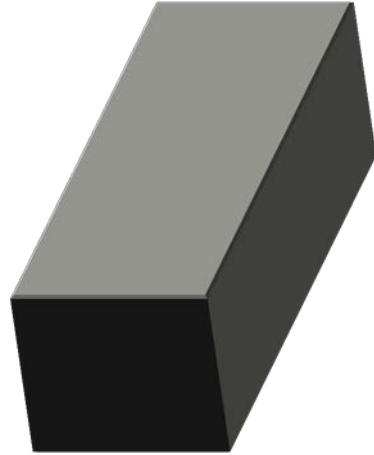


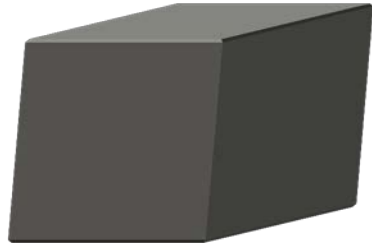
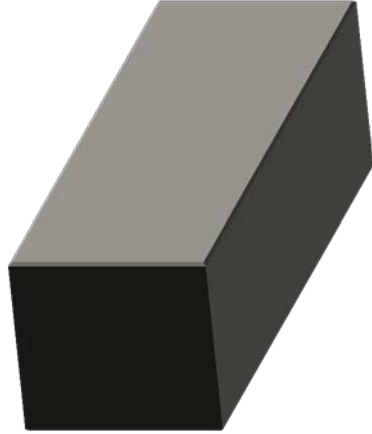


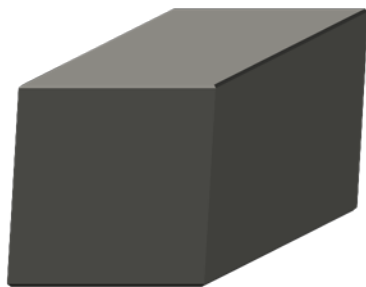
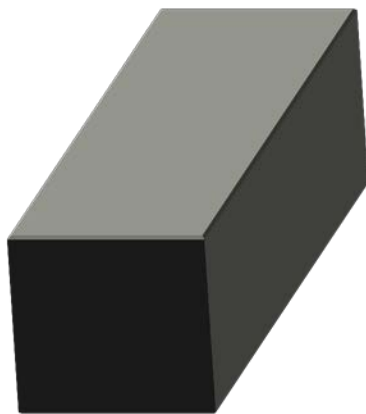


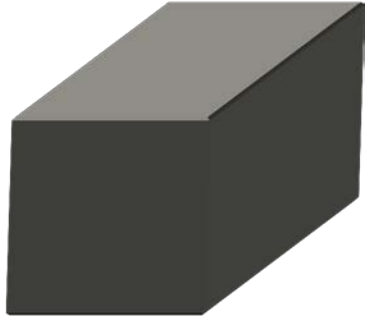
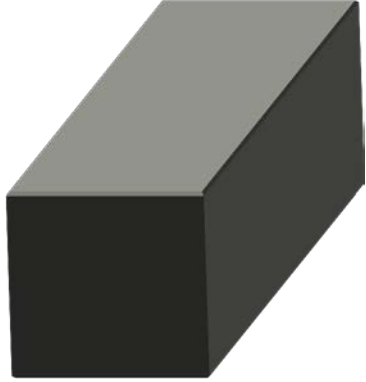




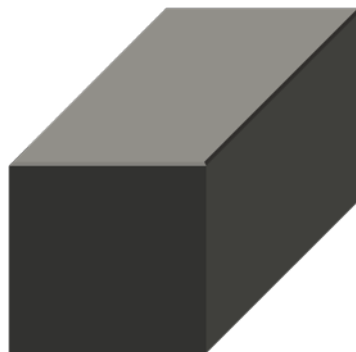
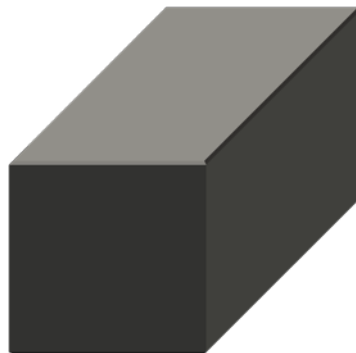




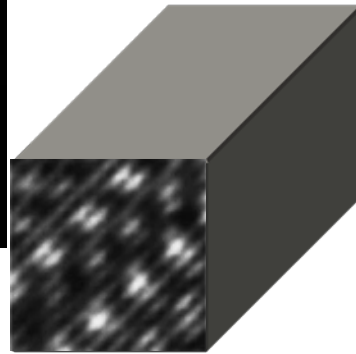
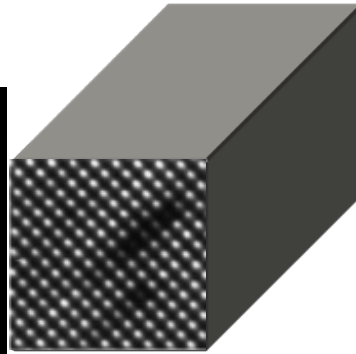
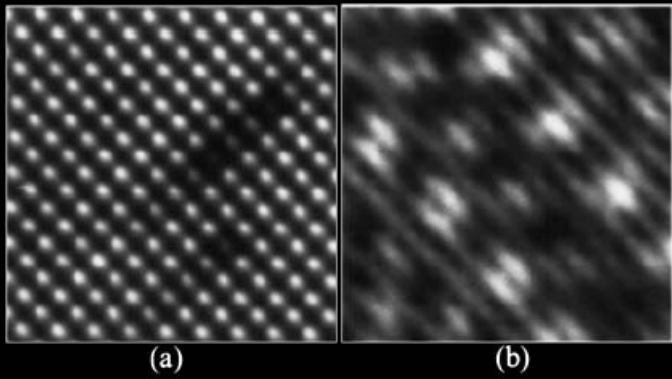




**Для измерений  
необходима чистая  
поверхность кристалла**

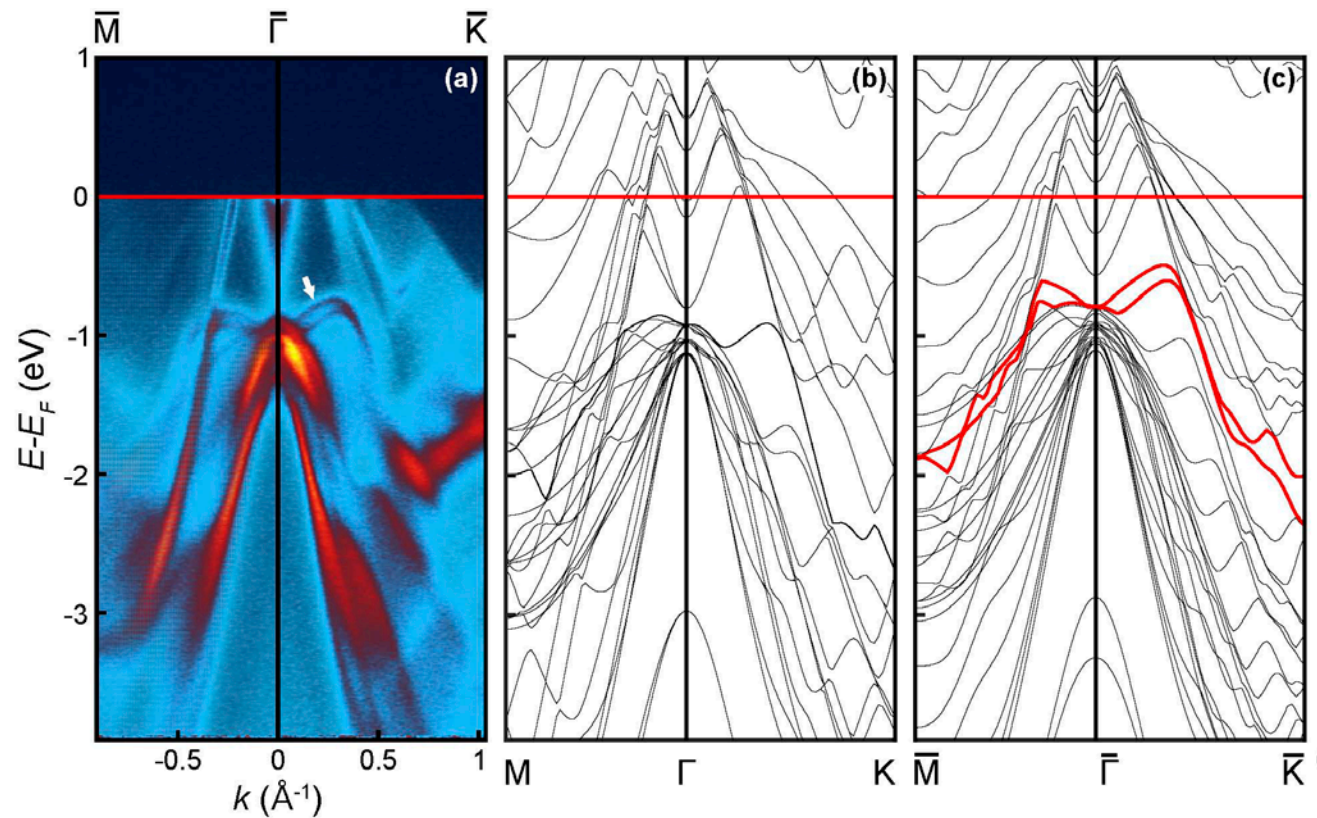


**Для измерений  
необходима чистая  
поверхность кристалла**



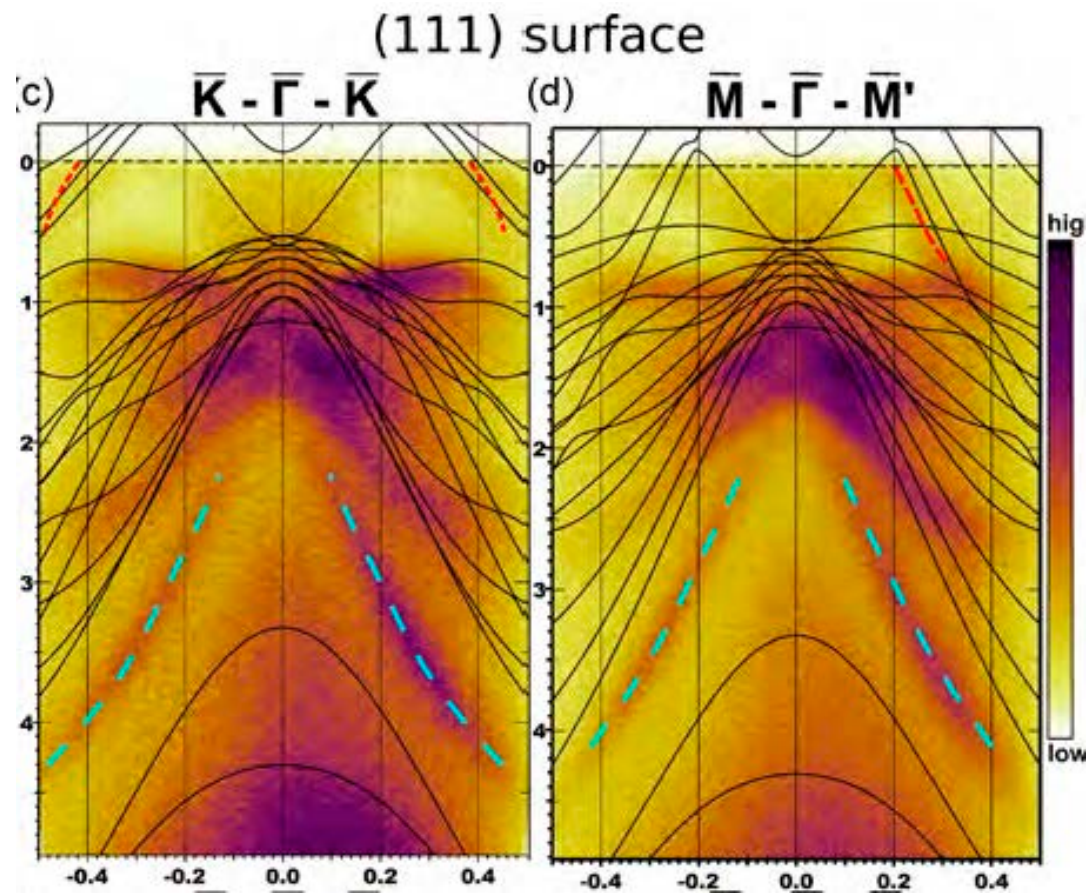


# Примеры недавних измерений



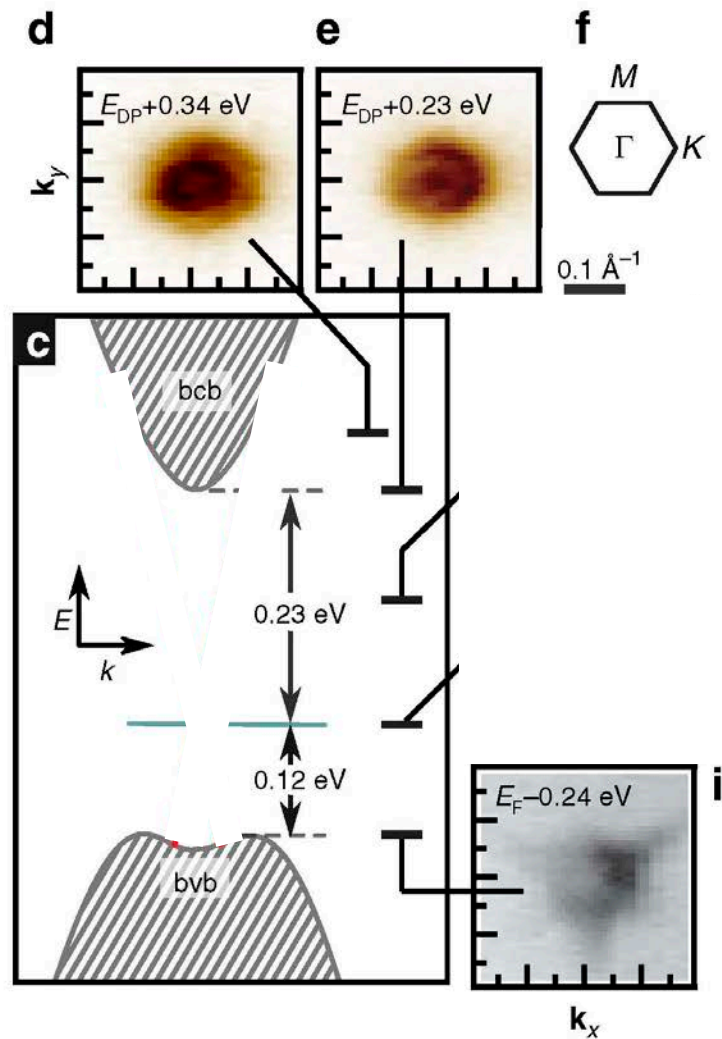
Зонная структура для  $\text{Sn}_4\text{As}_3$

# Примеры недавних измерений

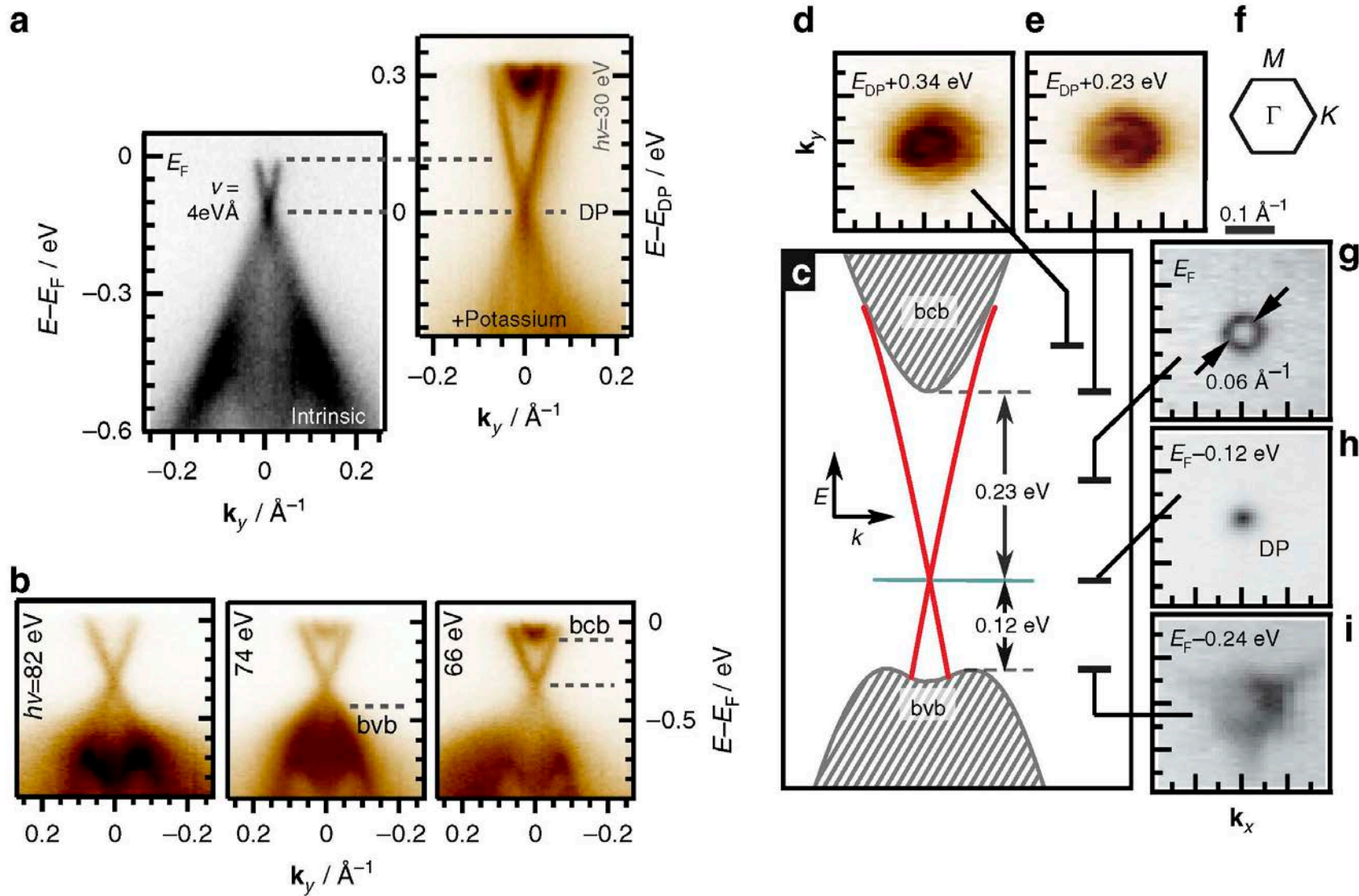



Зонная структура для SnAs

# 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)**

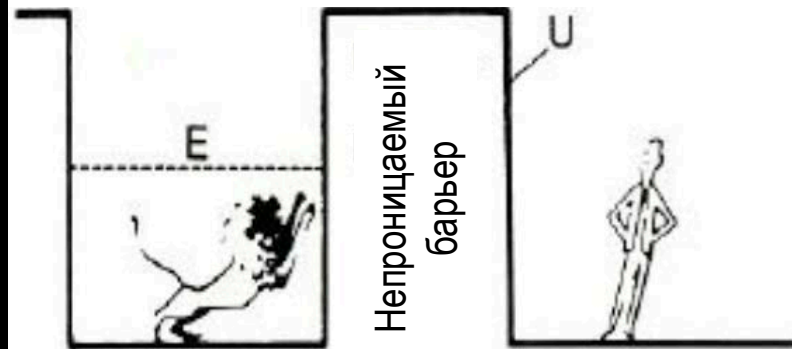


# Основы квантовой механики: частица-волна $\cos(-kx+\omega t)$

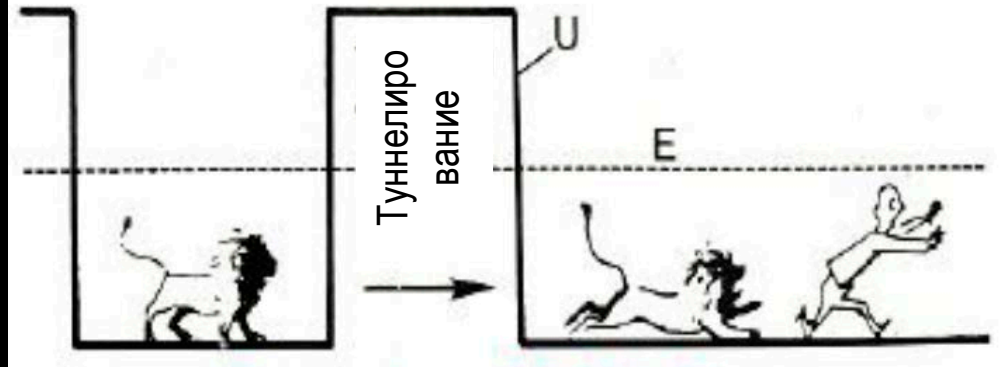
Фотон:  $k=2\pi/\lambda$ ;  $\lambda=c/f$ ;  $E=hf$

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

## Классическая модель



## Квантовая модель



Туннелирование волны  
через барьер



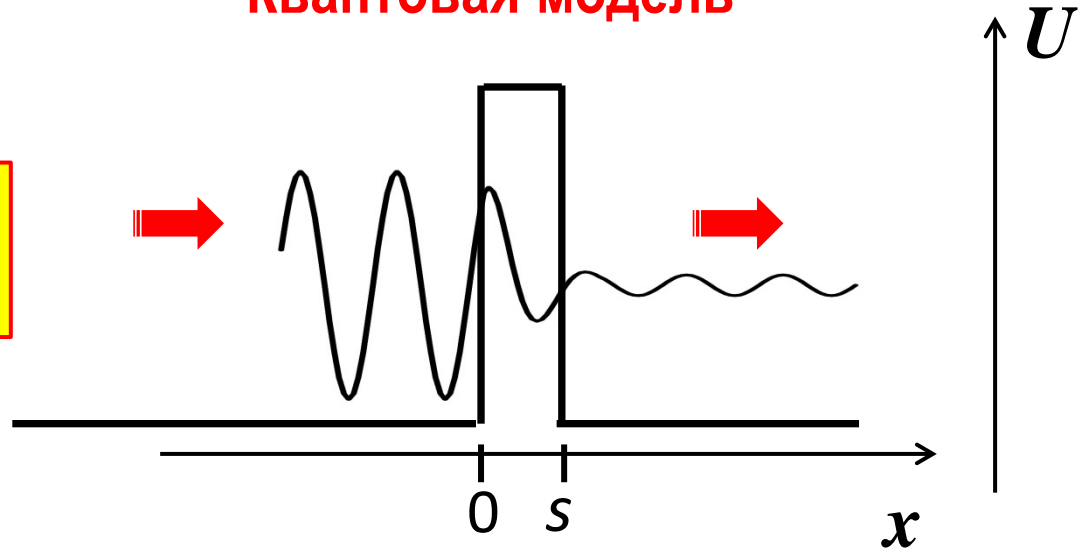
# Основы квантовой механики: частица-волна $\cos(kx+\omega t)$

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

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

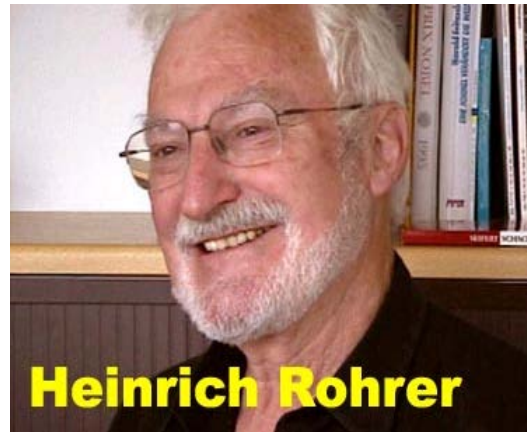
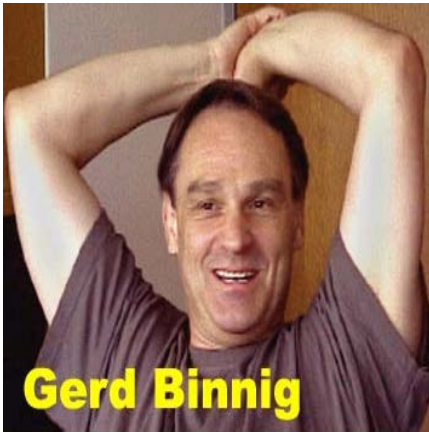


$$T \propto e^{-2ks}$$



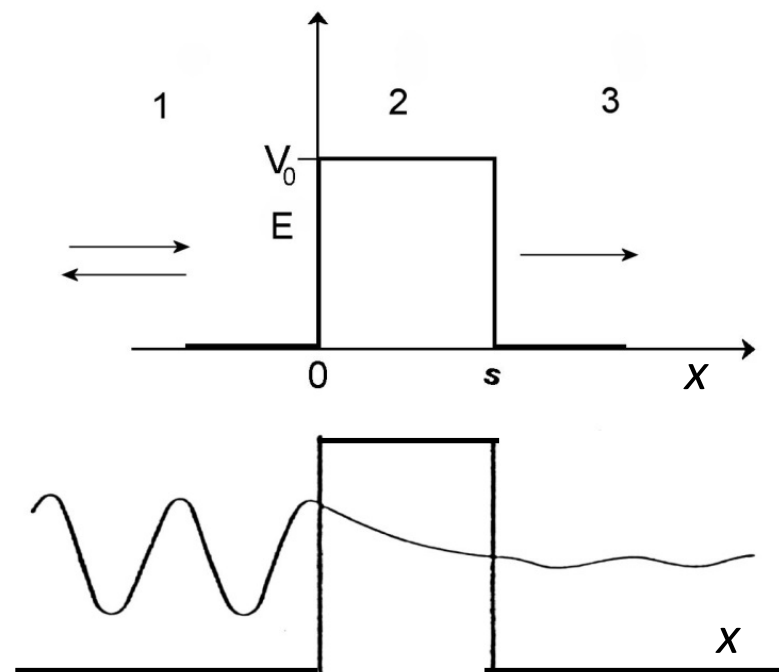
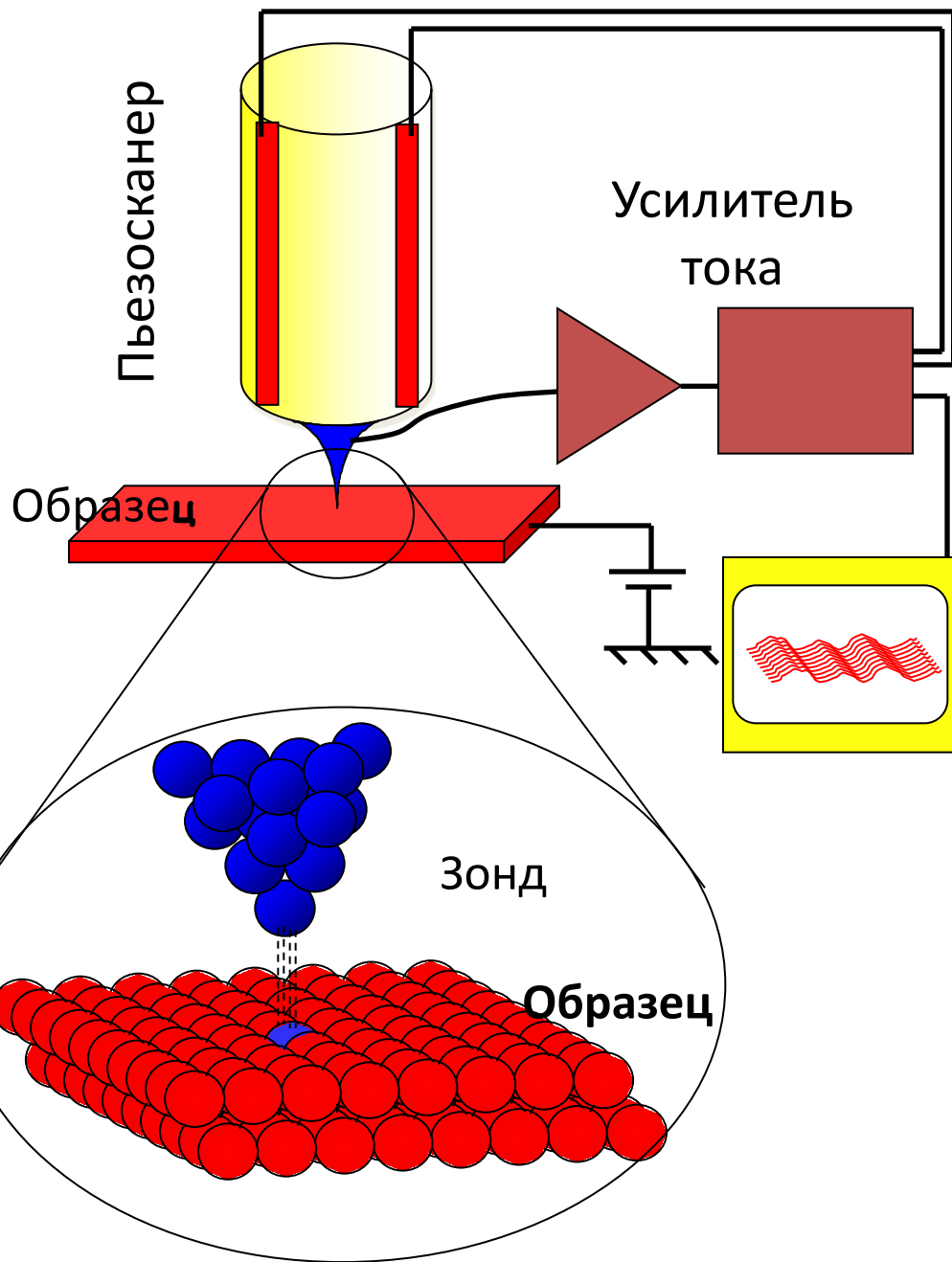
# Сканирующая туннельная микроскопия и спектроскопия

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



1986

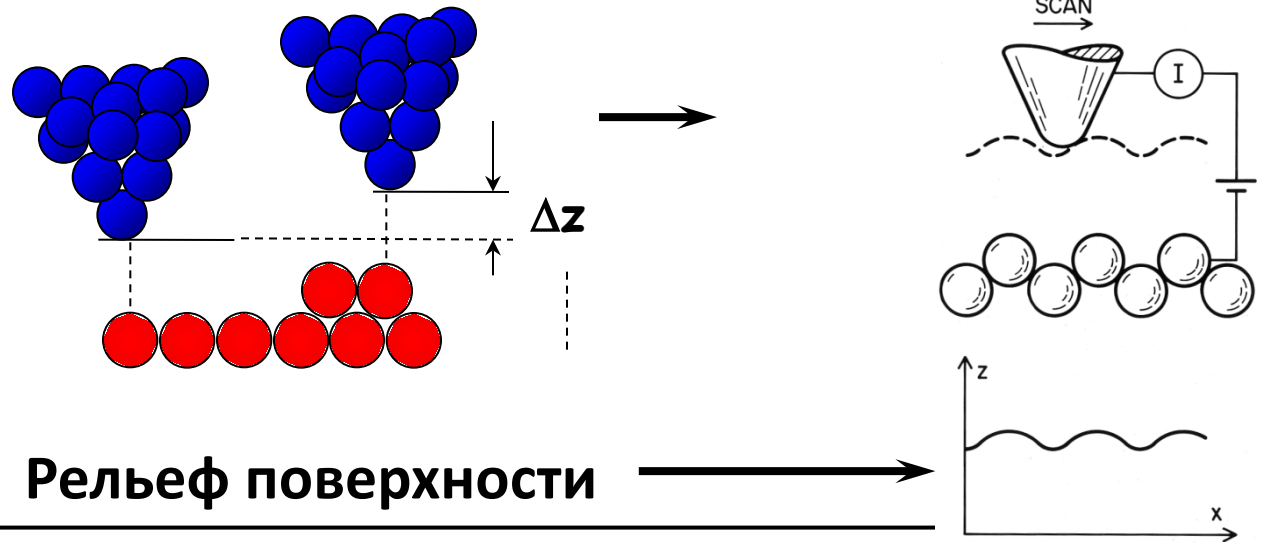
# Сканирующая туннельная микроскопия (STM)



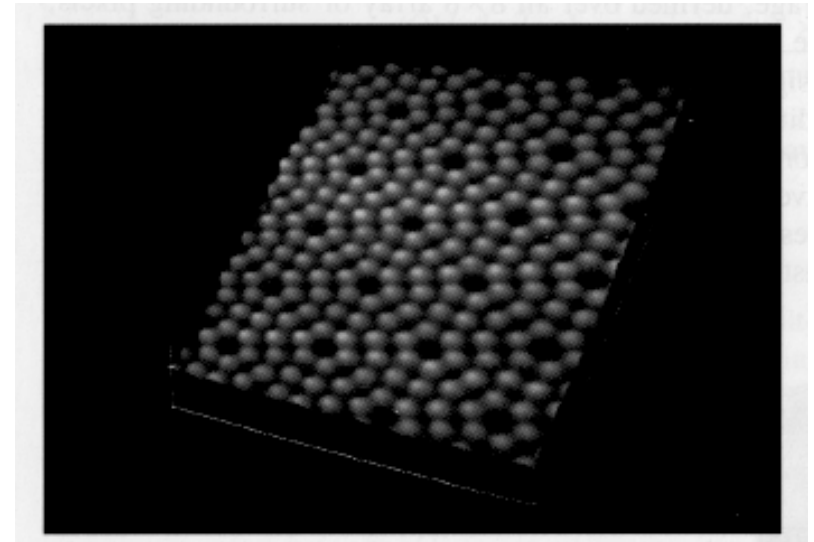
$$T \propto e^{-2ks}$$

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

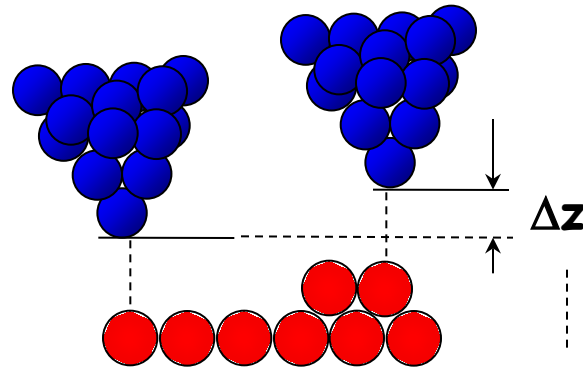
# Режим 1: Фиксированный туннельный ток (STM)



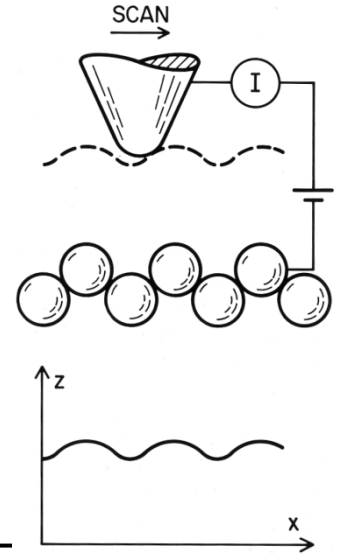
Изображение  
реконструированной  
поверхности Si(111)



# Режим 1: Фиксированный туннельный ток (STM)

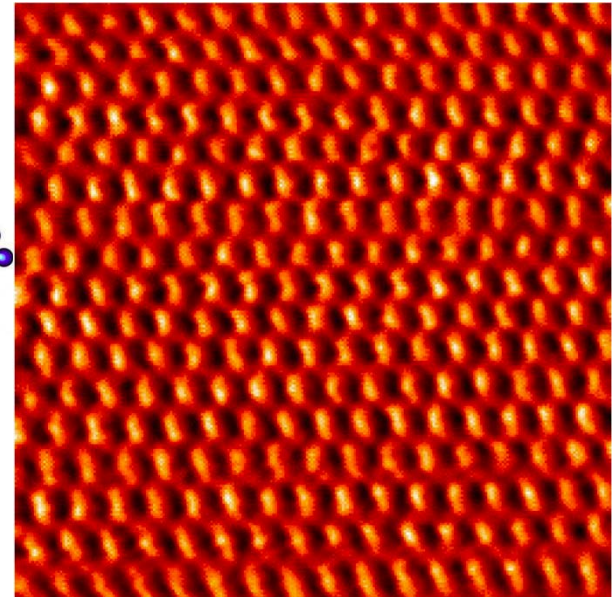
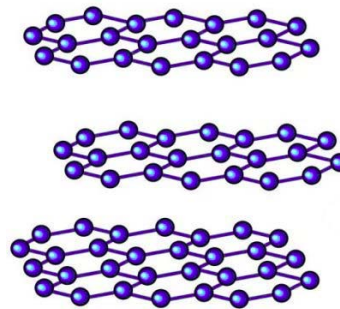


Рельеф поверхности

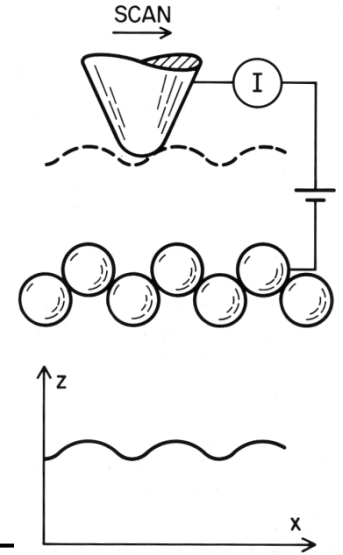
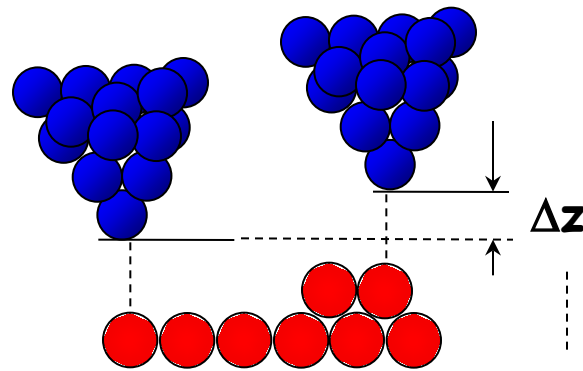


(0001) 5x5nm

Изображение  
поверхности высоко  
ориентированного  
графита (HOPG)

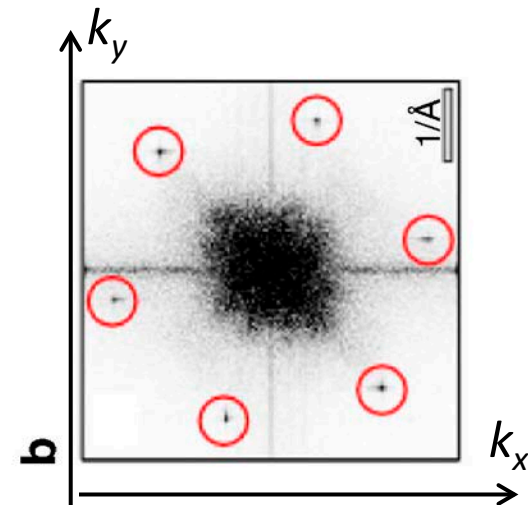
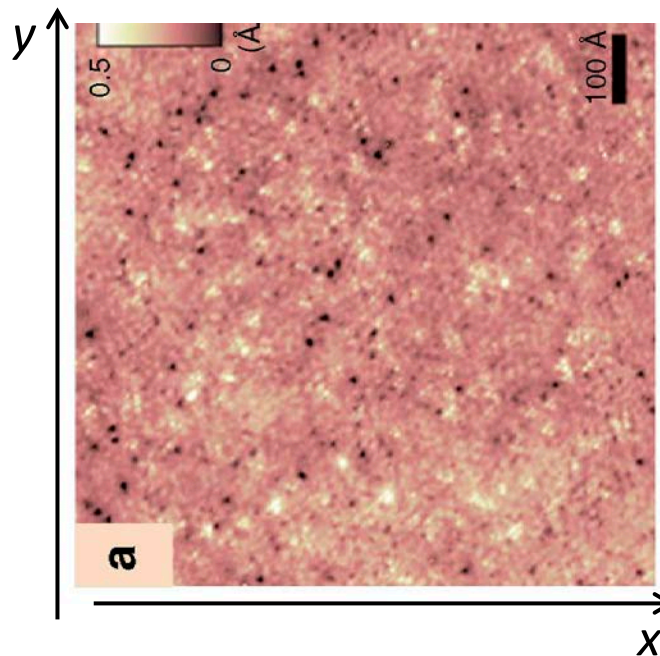


# Режим 1: Фиксированный туннельный ток (STM)

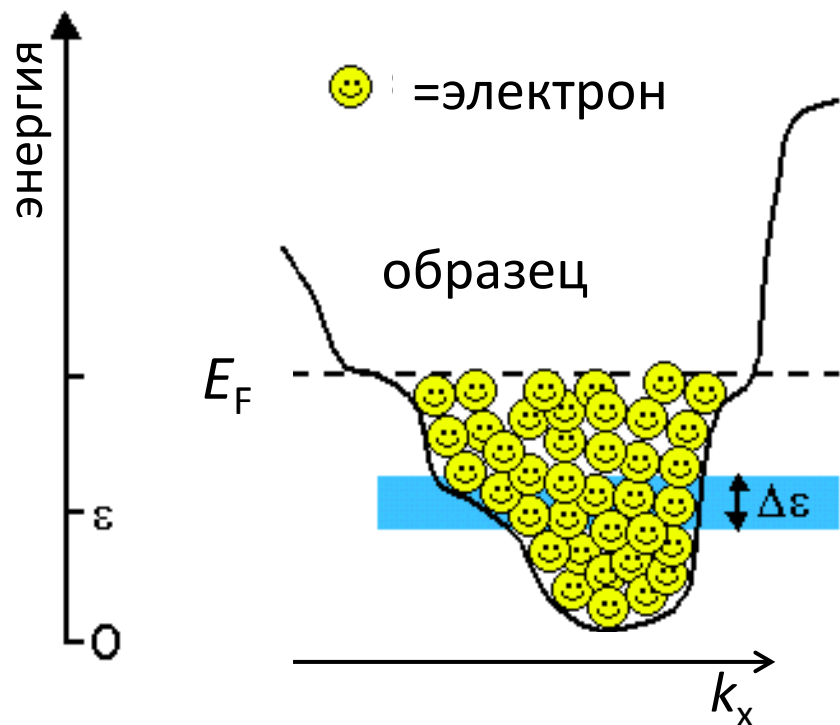


Рельеф поверхности

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



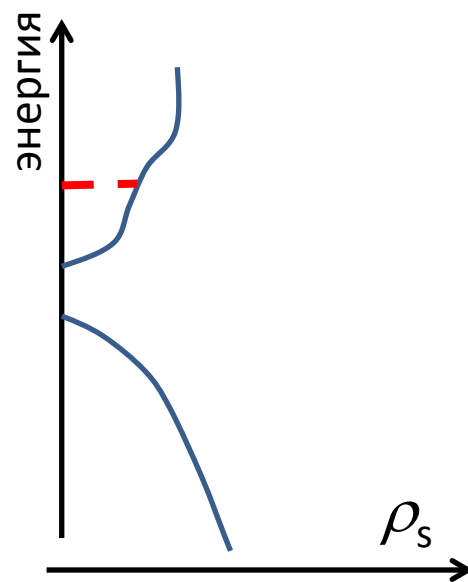
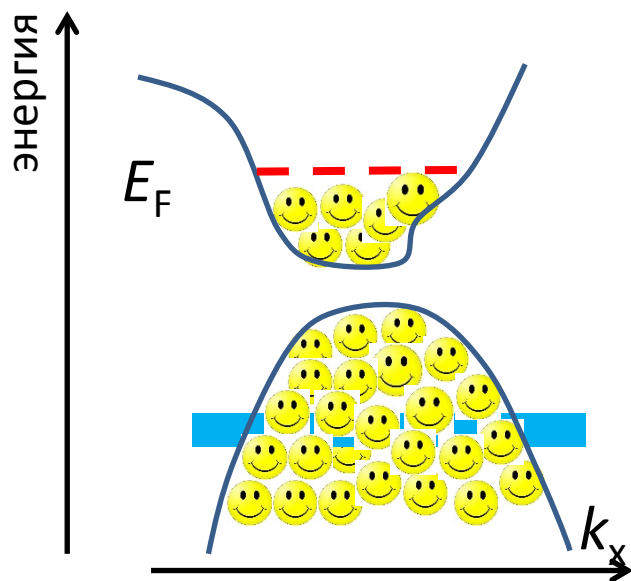
## Режим 2: Сканирующая туннельная спектроскопия (STS)



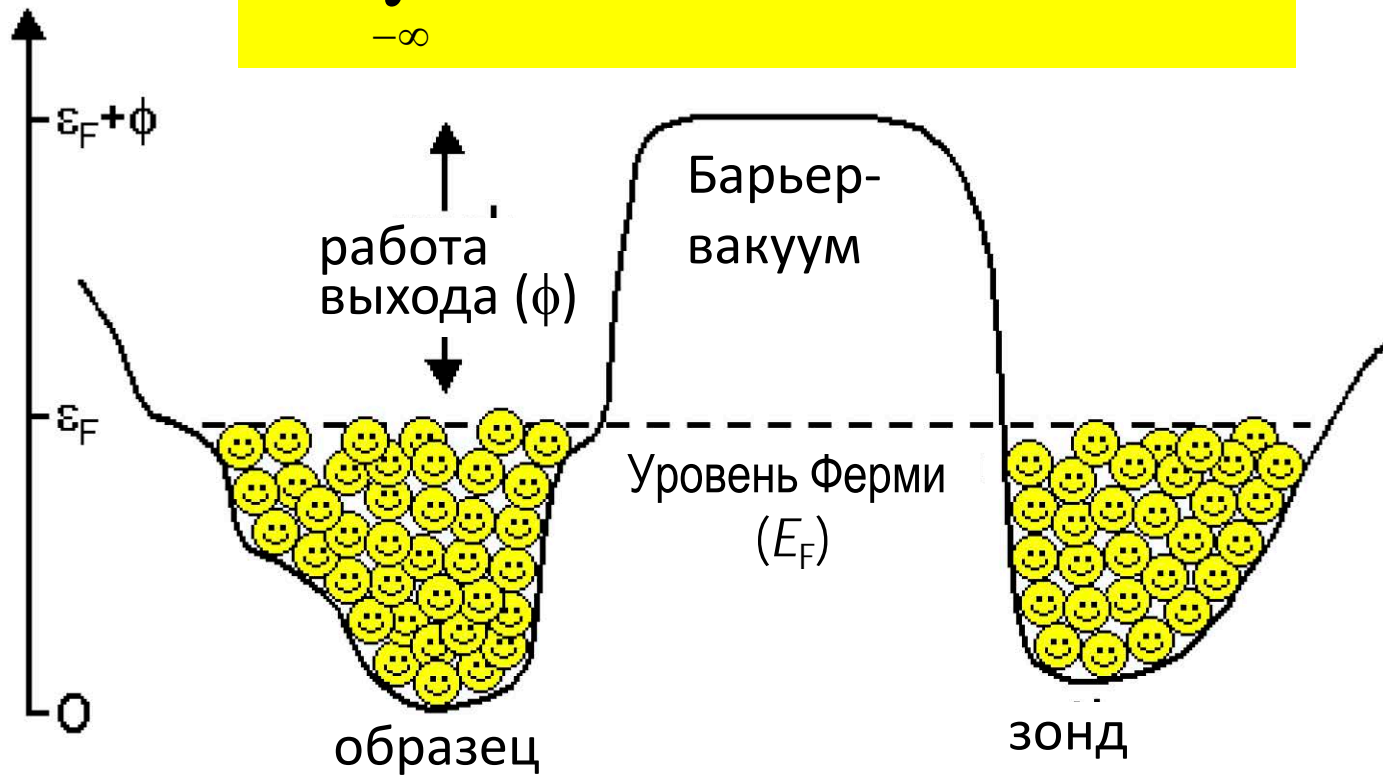
**Плотность состояний  $\rho(\varepsilon)$**   
при энергии  $\varepsilon$  - это число  
электронов, сидящих в  
полоске, деленное на ее  
ширину  $\Delta\varepsilon$

# Режим 2: Сканирующая туннельная спектроскопия (STS)

😊 = электрон

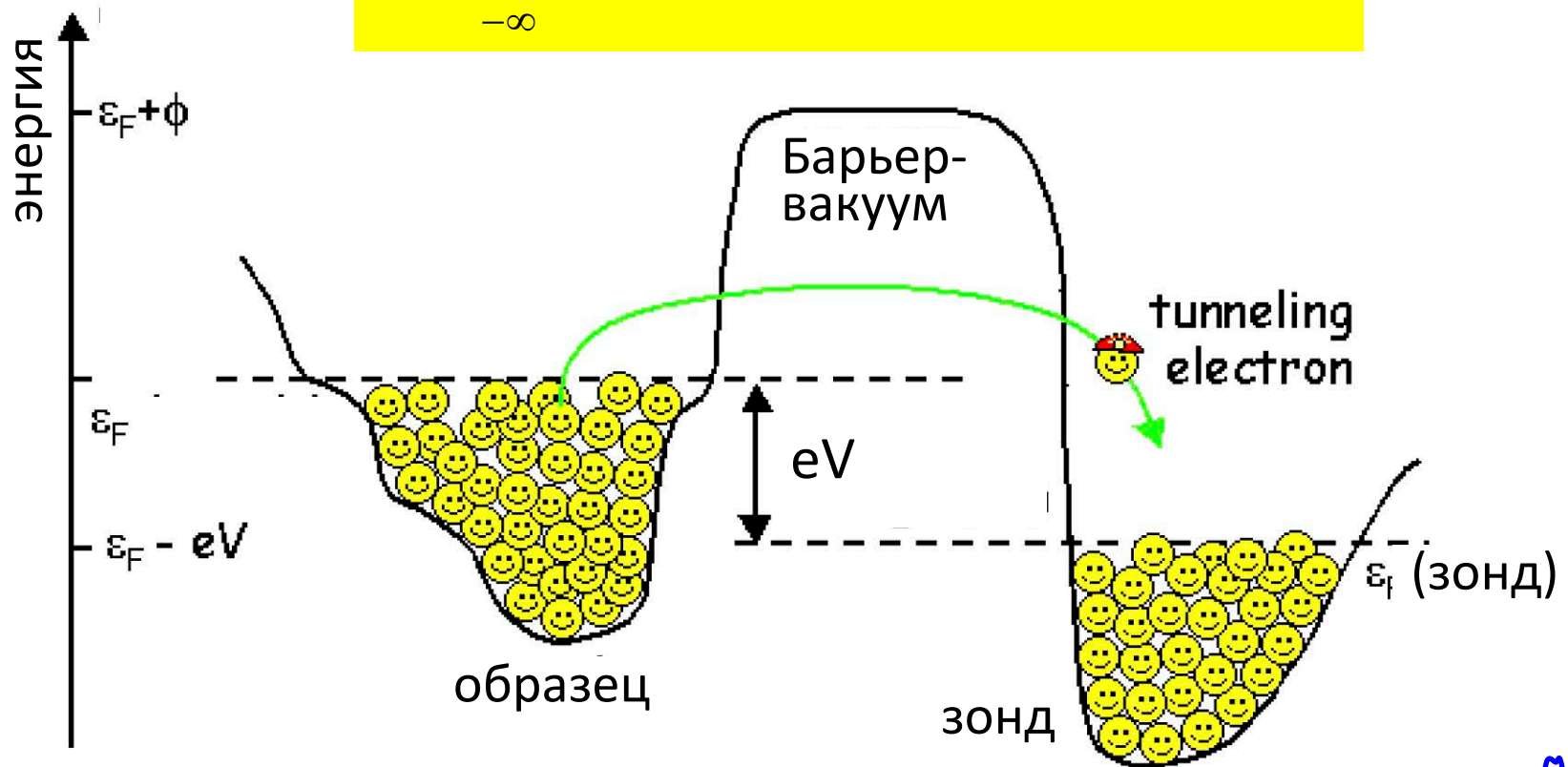


$$I \propto \int_{-\infty}^{+\infty} \rho_s(E) [f(E) - f(E - eV)] dE$$

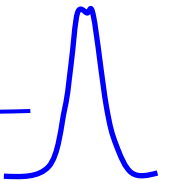




$$I \propto \int_{-\infty}^{+\infty} \rho_s(E) [f(E) - f(E - eV)] dE$$

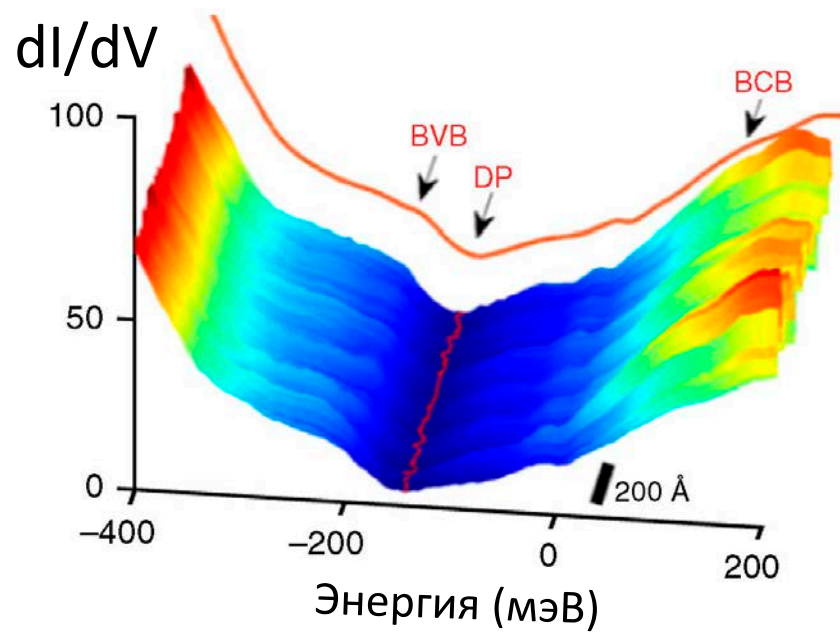
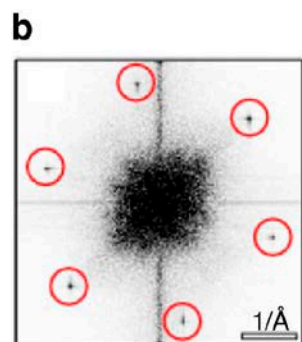
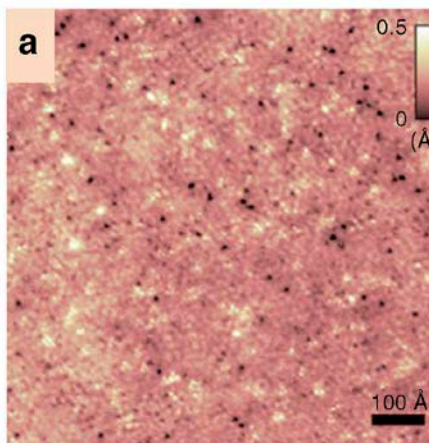


$$\left. \frac{dI}{dV} \right|_{V=V_0} \propto \int_{-\infty}^{+\infty} \rho_s \frac{\partial f(E - eV)}{\partial (eV)} \Big|_{V=V_0} dE$$



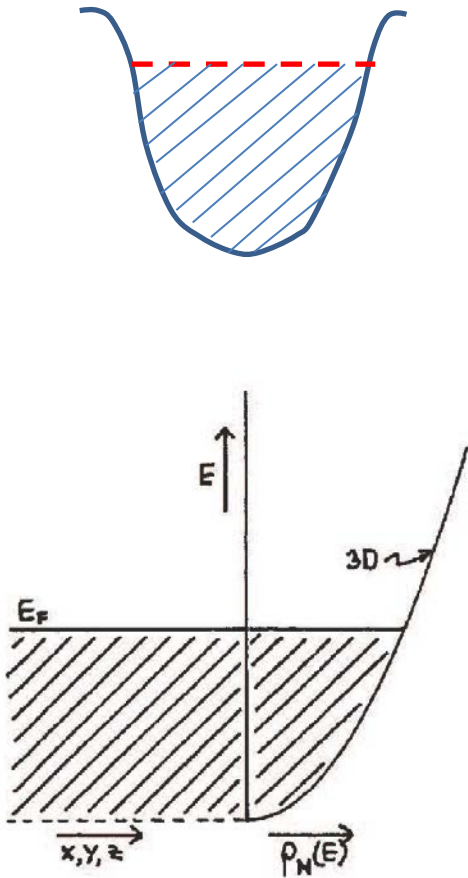
# Топологический изолятор Bi-SSTS

STM

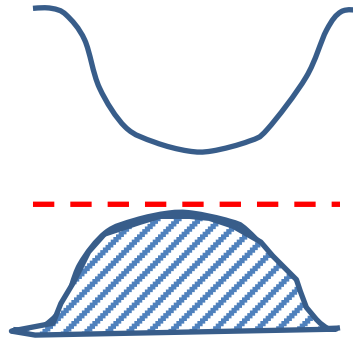


# Энергетический спектр сверхпроводника

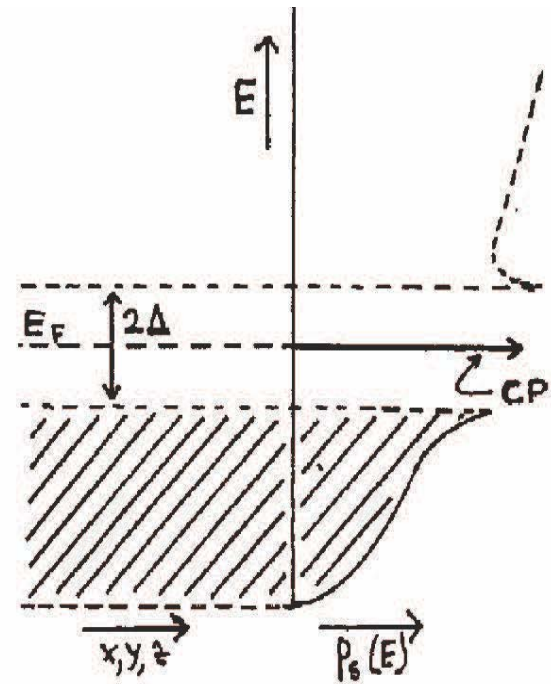
металл



полупроводник  
(изолятор)

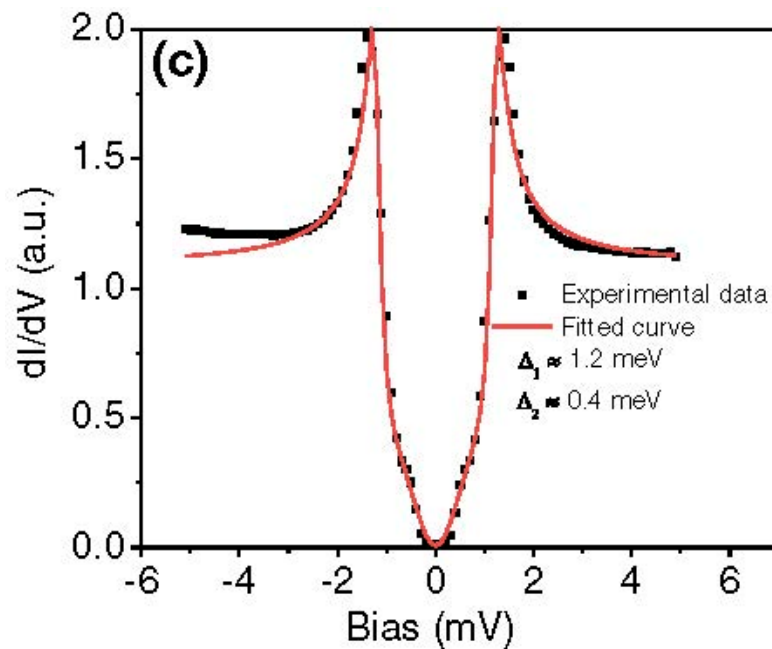
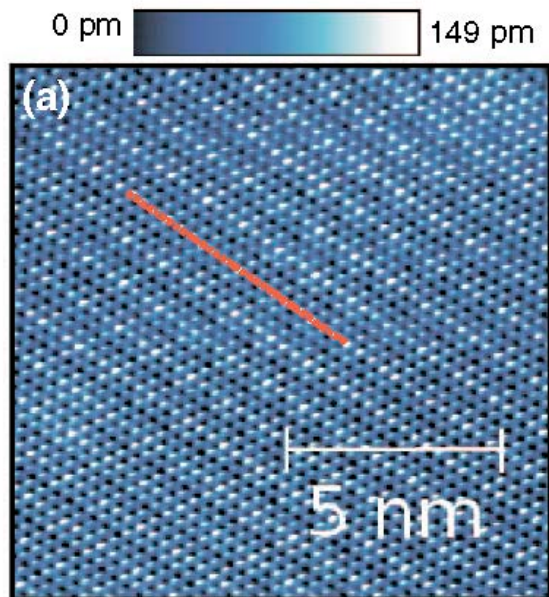


сверхпроводник



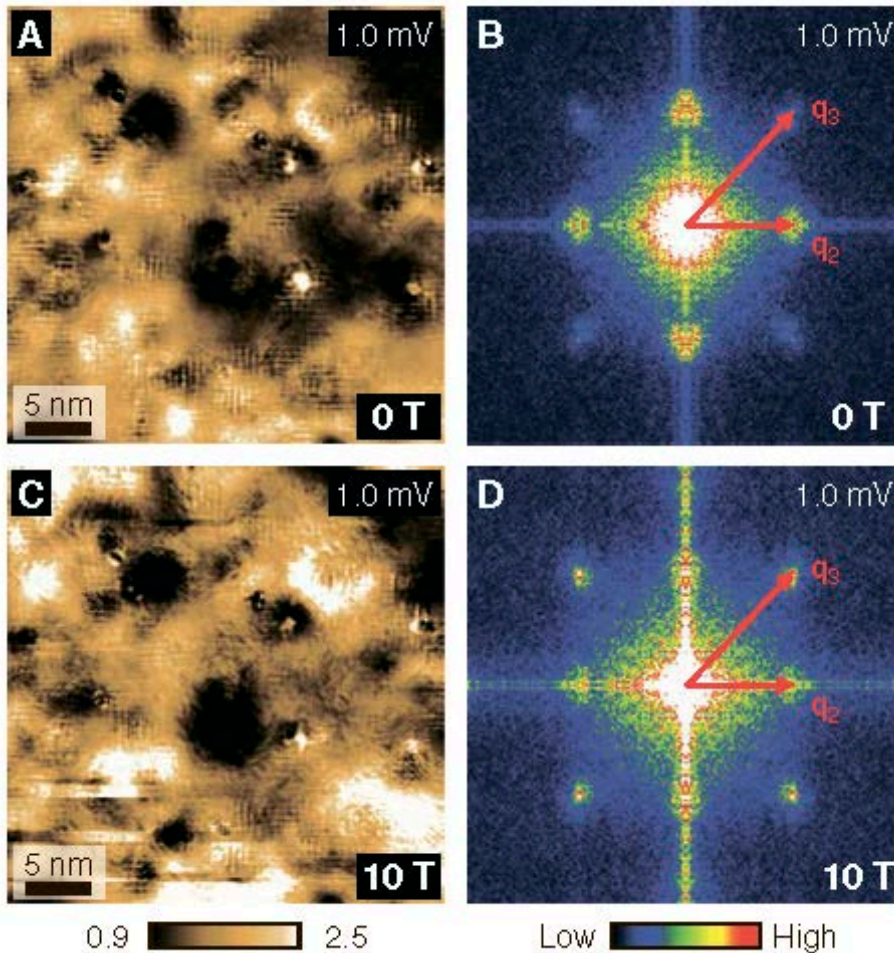
В спектре возникает щель  $2\Delta$

# Сверхпроводник NbSe<sub>2</sub>

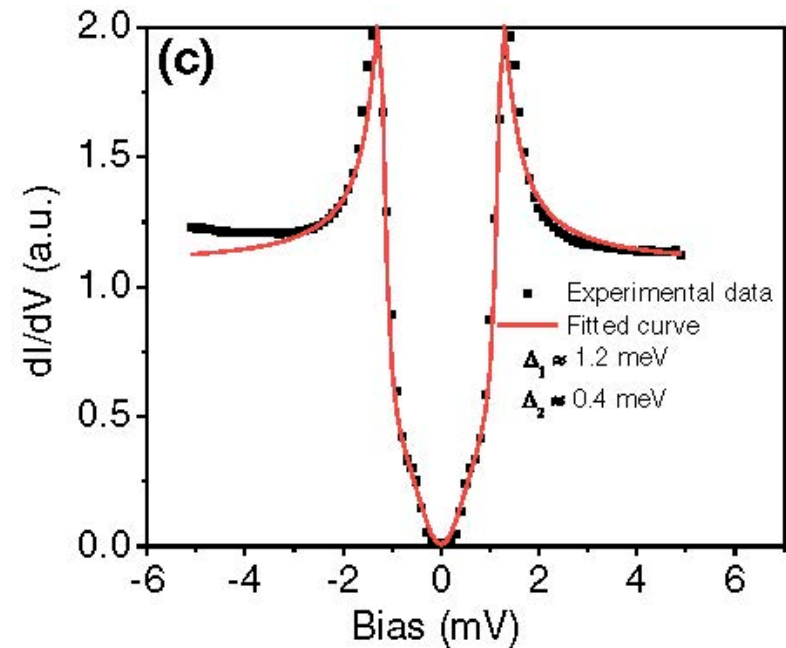


# Сверхпроводник NbSe<sub>2</sub>

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!