

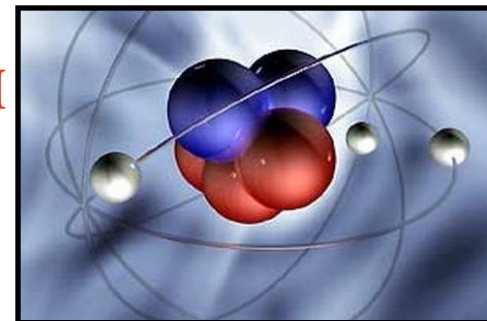
***ФИЗИЧЕСКИЕ  
ОСНОВЫ  
СОВРЕМЕННЫХ  
ТЕХНОЛОГИЙ***  
***Курс лекций***

# Лекция 3

Физические основы методов и  
инструментов  
исследований

# §1. Элементы квантовой механики

## 1. Основные положения

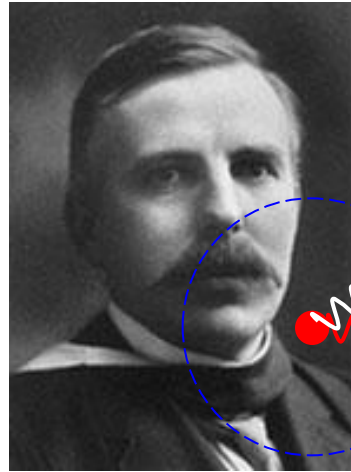
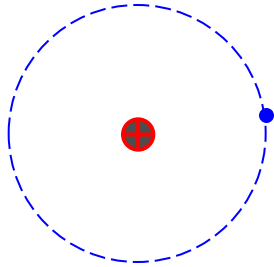


- КМ Описывает процессы микромира (физика атома и ядра)
- У квантовых объектов (например, электрон в атоме) свойства волны и частицы находятся в единстве
- Все законы квантовой механики имеют вероятностный характер, точные значения всех ФВ принципиально неизвестны:

$$\Delta p_x \cdot \Delta x \geq \hbar \quad \Delta E \cdot \Delta t \geq \hbar$$

*(Соотношения неопределенностей)*

# Модель атома Резерфорда



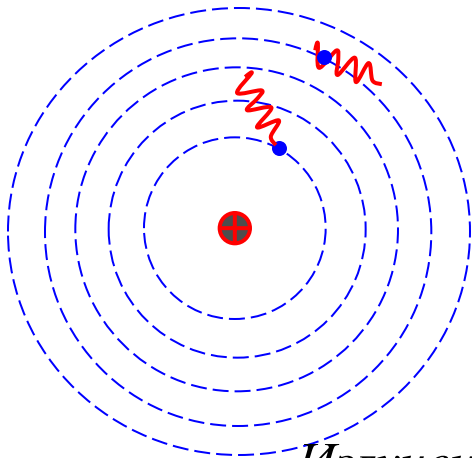
Резерфорд  
(Rutherford)  
Эрнст  
(1871 – 1937)

## 2.2. Постулаты Н.Бора

$$1. E = E_n; \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

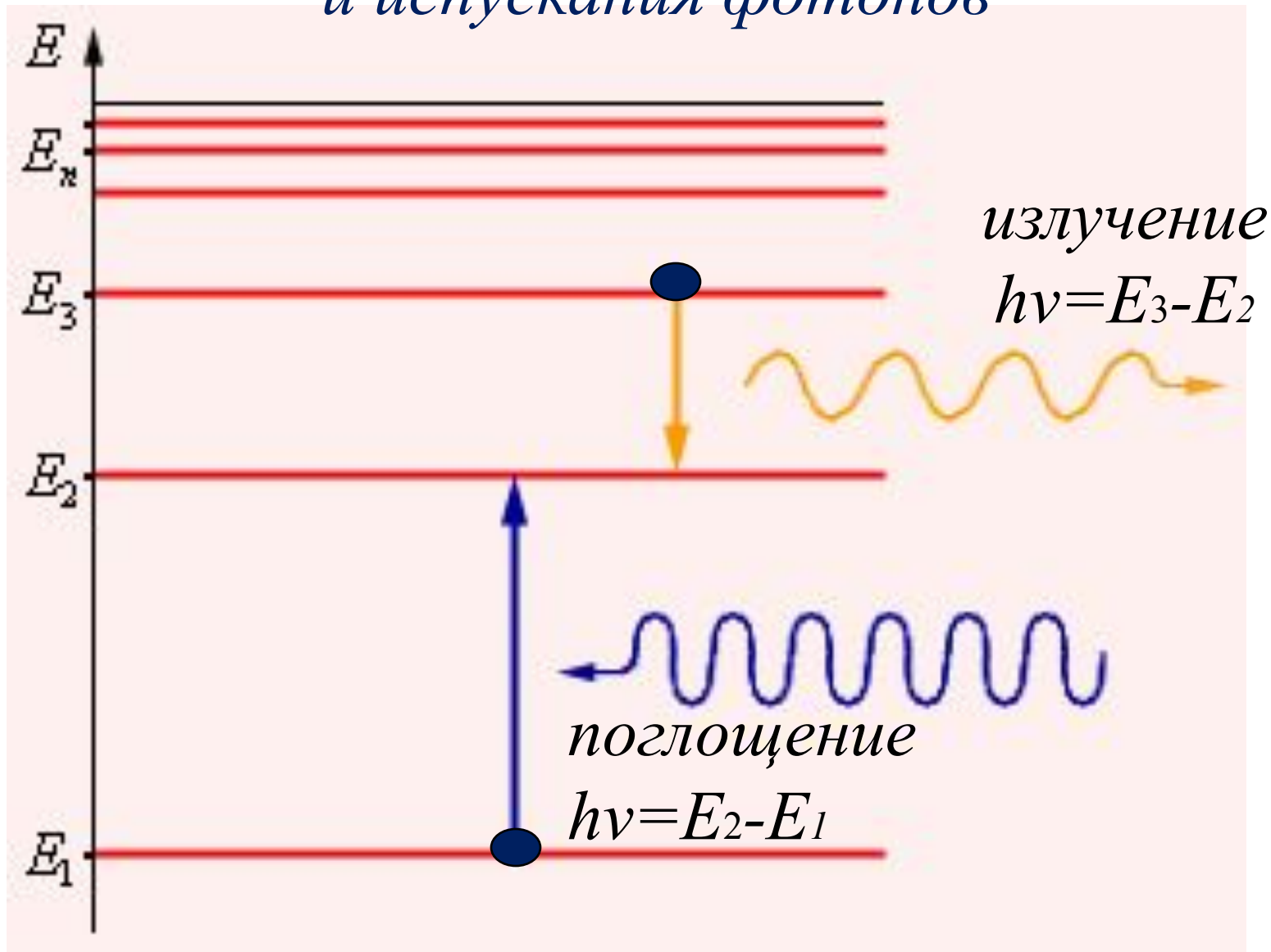
*Электрон в атоме находится в одном из стационарных квантовых состояний с энергией  $E_n$ , при этом он не излучает.*

$$2. h\nu = \hbar\omega = E_n - E_m$$



*Излучение света происходит при переходе электрона из стационарного состояния с большей энергией в стационарное состояние с меньшей энергией. Энергия излученного фотона равна разности энергий стационарных состояний.*

*Энергетические уровни электрона в атоме и  
условное изображение процессов поглощения  
и испускания фотонов*



# 2. Аппарат квантовой механики

## Уравнение Шредингера

$$\nabla^2 \psi + \frac{2m}{\hbar^2} (E - U) \psi = 0 \quad + \text{ граничные условия}$$

Потенциальная энергия

$\{E_1, E_2, \dots, E_n\}$   
(спектр энергий)

$$\psi(x, t) = \psi_0 e^{\frac{i}{\hbar}(px - Et)}$$

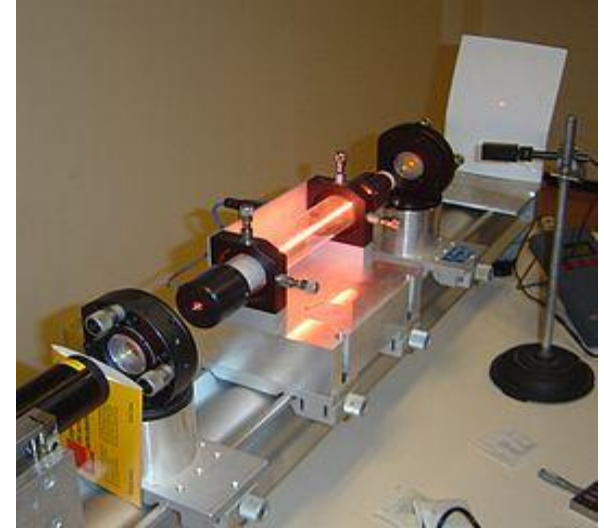
$$dP = |\psi|^2 dV = \psi^* \psi dV$$

$$h\nu = E_n - E_m$$

(спектр излучения)

$$\int_0^\infty |\psi|^2 \cdot dV = 1$$

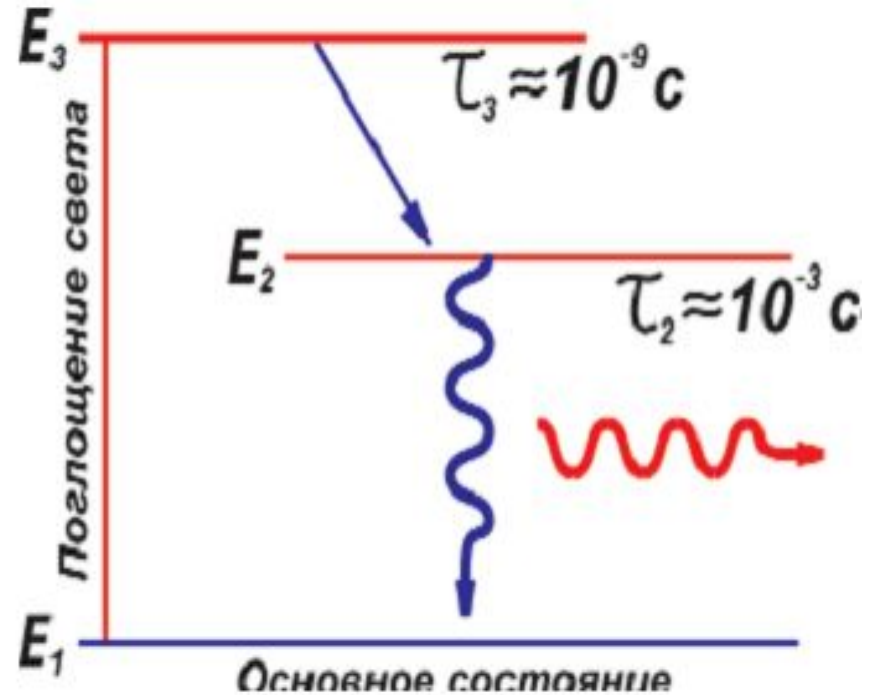
## §2. Лазер



- **Лáзер** (англ. *laser*, от *light amplification by stimulated emission of radiation* «усиление света посредством вынужденного излучения»), или **опт́ический квантовый генерáтор** — это устройство, преобразующее энергию накачки (световую, электрическую, тепловую, химическую и др.) в энергию когерентного, монохроматического, поляризованного и узконаправленного потока излучения.

# Инверсная заселенность уровней в атоме

Из возбужденного состояния электрон всегда стремится вернуться в основное, поэтому время его пребывания в таком состоянии мало – наносекунда. Переход электрона на более низкий энергетический уровень сопровождается излучением кванта света. Такое самопроизвольное излучение принято называть спонтанным.

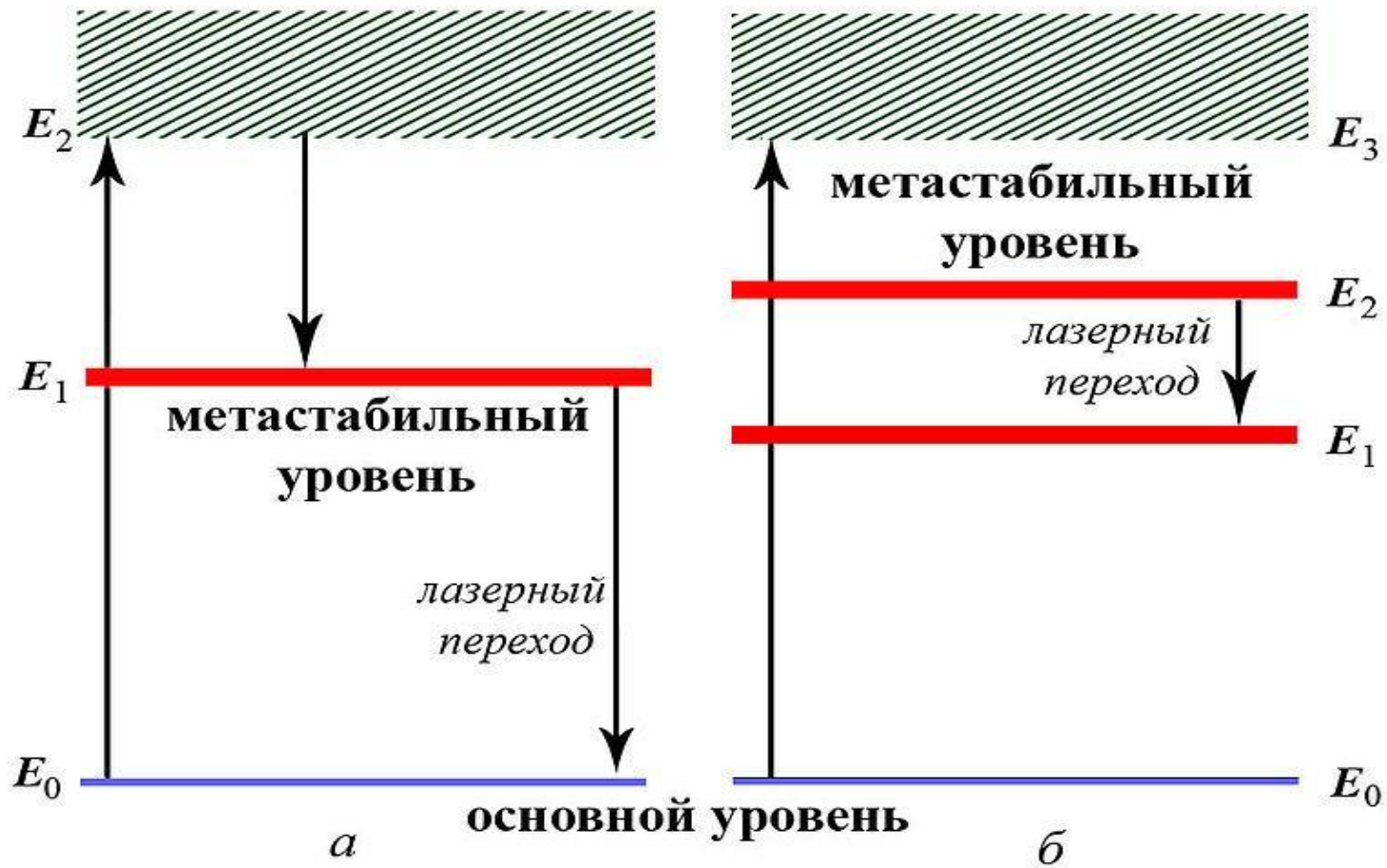


- Для усиления света и получения когерентного излучения надо, чтобы возбужденных атомов было больше, чем в невозбужденном состоянии - «инверсная заселенность» (см. рис.): уровень  $E_2$  – метастабильный, на нем накапливаются электроны.



# Принцип работы лазера

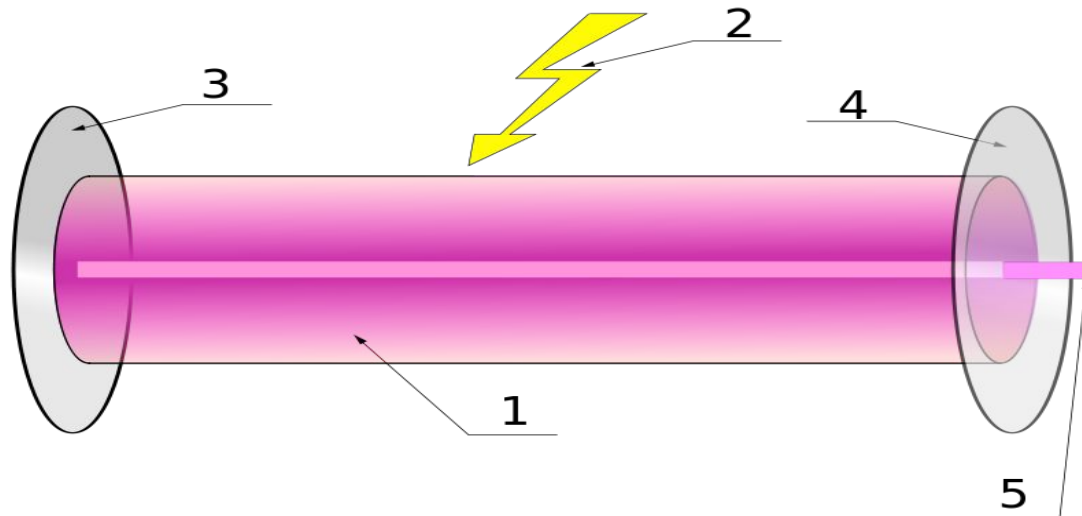
- Физической основой работы лазера служит явление вынужденного (индуцированного) излучения. Суть явления состоит в том, что возбуждённый атом способен излучить фотон под действием другого фотона без его поглощения, если энергия последнего равняется разности энергий уровней атома до и после излучения. При этом излучённый фотон когерентен фотону, вызвавшему излучение (является его «точной копией»). Таким образом происходит усиление света. Этим явление отличается от спонтанного излучения, в котором излучаемые фотоны имеют случайные направления распространения, поляризацию и фазу.



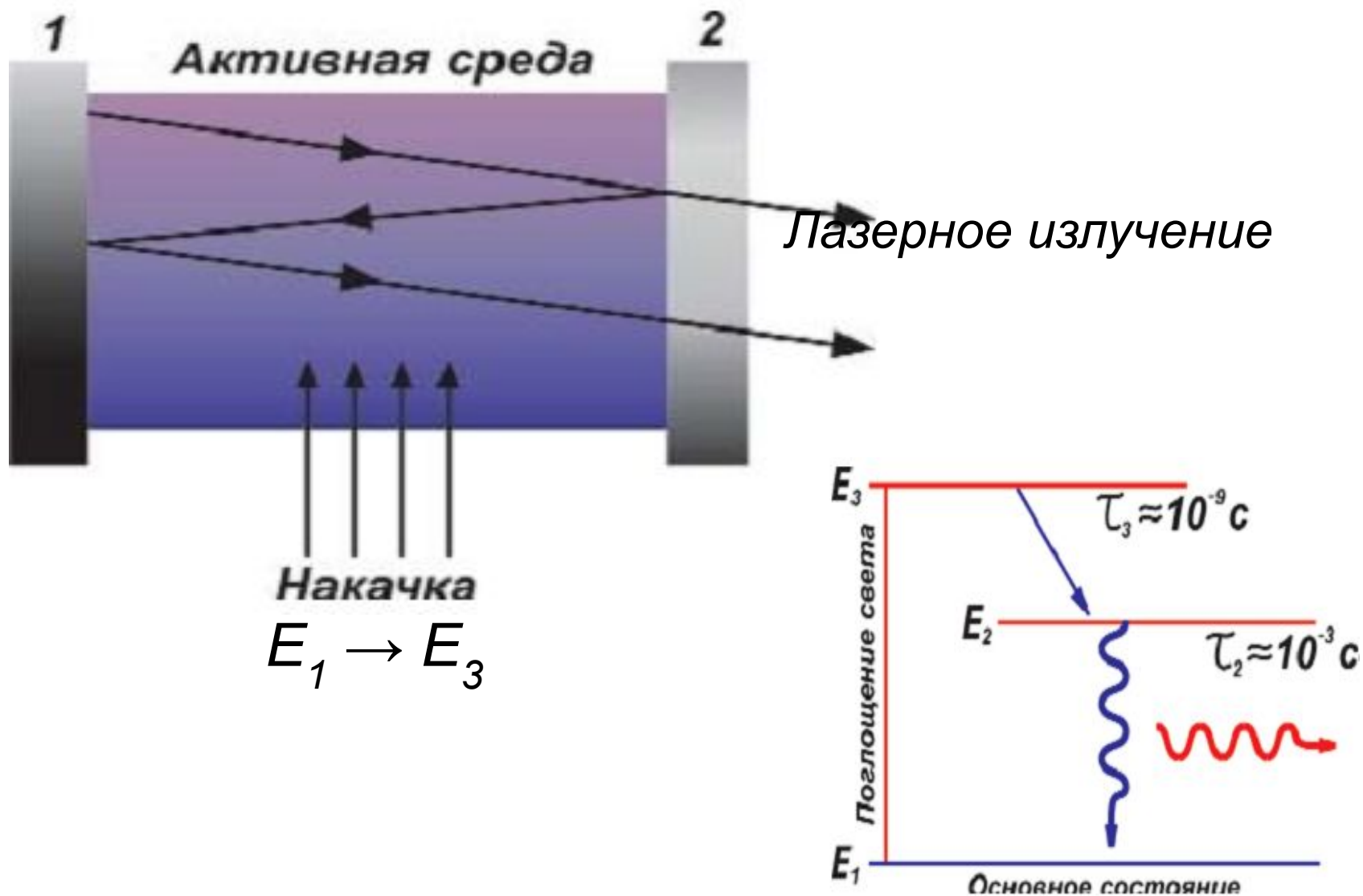
- а — трёхуровневая и б — четырёхуровневая схемы накачки активной среды лазера.

# Основные части лазера

- активная (рабочая) среда (с возможностью создания инверсной заселенности уровней) - 1;
- система накачки (источник энергии – световой импульс, электрический разряд или др. – переводящей электроны в метастабильное состояние) - 2;
- оптический резонатор (3 – зеркало, 4 – полупрозрачное зеркало, 5 – лазерный луч).



# Схема оптического резонатора



# Свойства лазерного излучения

- 1) Малая расходимость пучка:  $0,003^\circ$ , его можно сфокусировать в точку 500 нм;
- 2) Монохроматичность (одна частота  $\nu$  или длина волны  $\lambda$ );
- 3) Высокая интенсивность пучка:  $>10^{20}$  Вт/см<sup>2</sup>;
- 4) Возможность управлять длительностью импульса.

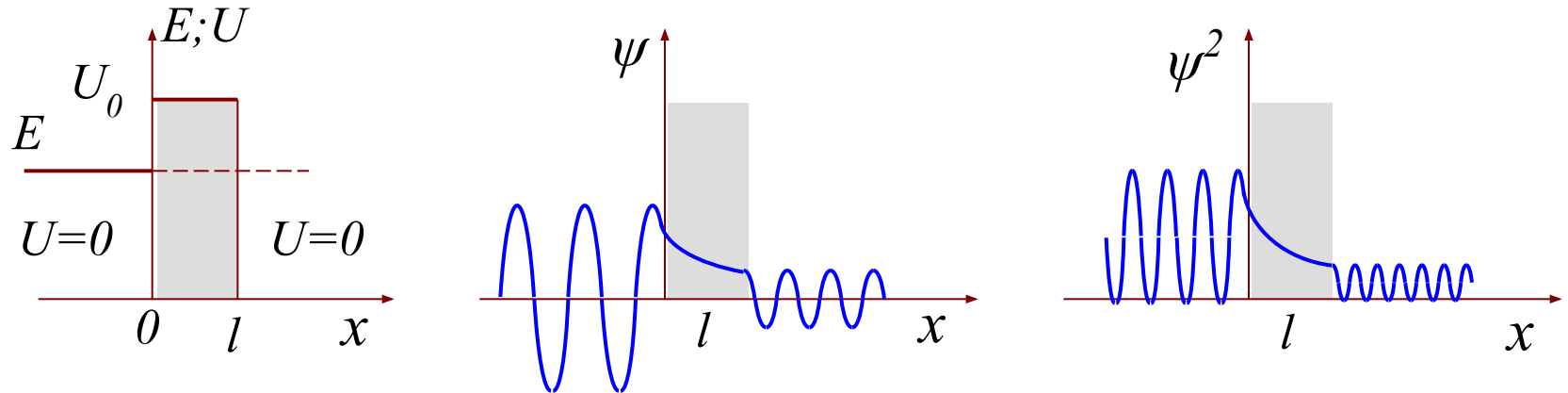
# Применение лазеров

- Для сварки, резки и плавления металлов, в медицине - как бескровные скальпели при лечении разных болезней.
- Лазерная локация позволила измерить скорость вращения планет и уточнить характеристики движения Луны и Венеры.
- Лазеры используются в оптоволоконных линиях связи для передачи и обработки информации.
- Лазеры считывают информацию с компактдисков в каждом компьютере и проигрывателе.
- Для нагрева плазмы в попытках создать термоядерный синтез.

## §3. Туннельный эффект

**Туннельный эффект, туннелирование** - преодоление микрочастицей потенциального барьера в случае, когда её полная энергия меньше высоты барьера.

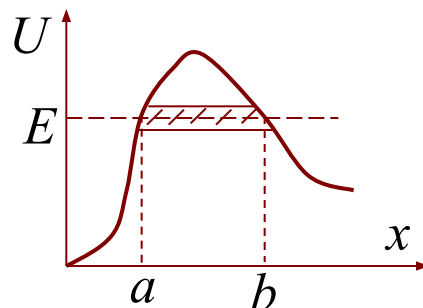
## Потенциальный барьер: туннельный эффект



*Коэффициент прохождения (коэффициент прозрачности) для прямоугольного потенциального барьера:*

$$D = \exp\left[-\frac{2}{\hbar} \sqrt{2m(U_0 - E)}l\right]$$

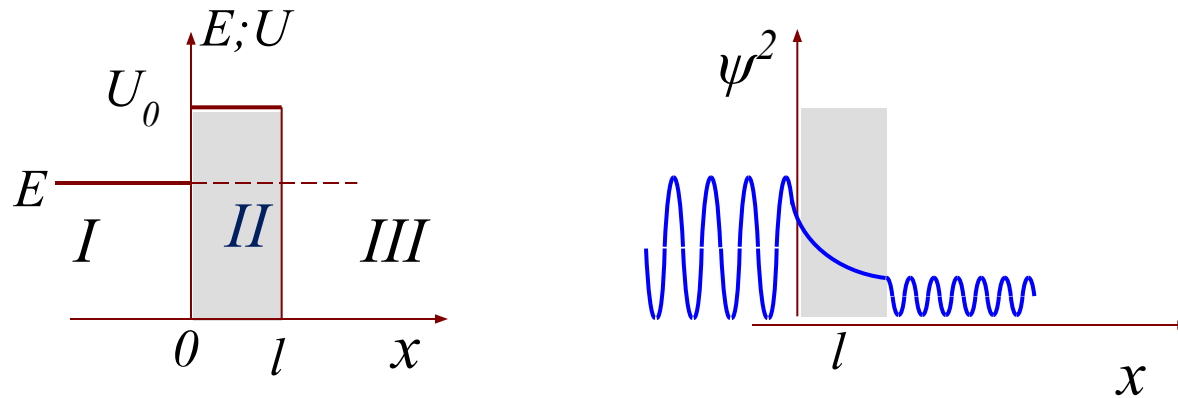
*Коэффициент прохождения барьера произвольной формы:*



$$D = e^{-\frac{2}{\hbar} \int_a^b \sqrt{2m(U_0 - E)} dx}$$



# Объяснение туннельного эффекта следует из решения уравнения Шредингера

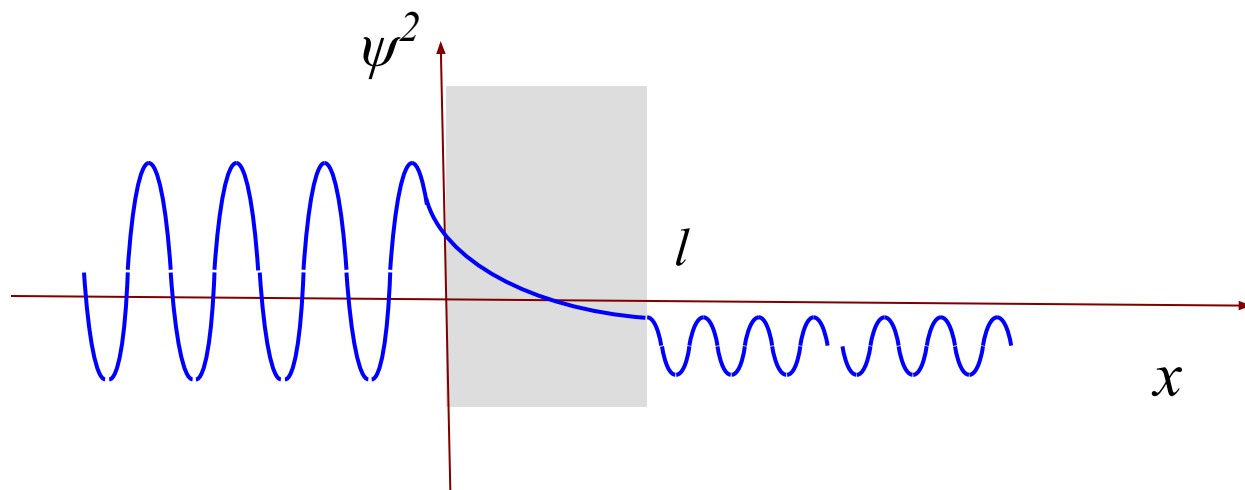


$$\nabla^2 \psi + \frac{2m}{\hbar^2} (E - U_0) \psi = 0$$

$$l_{\text{эф}} = \frac{1}{2k_0} = \frac{\hbar}{\sqrt{2m(U - E)}}$$

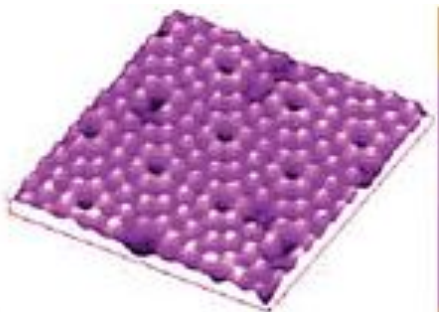
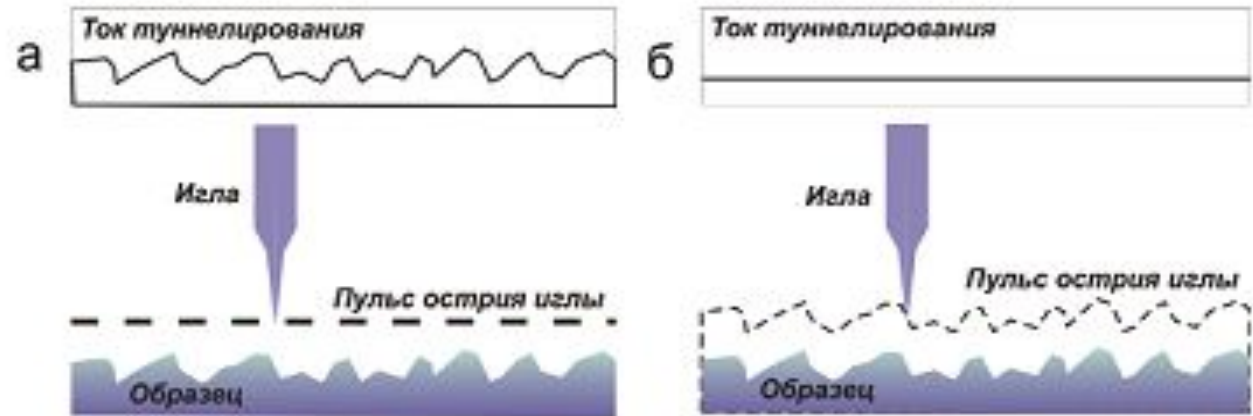
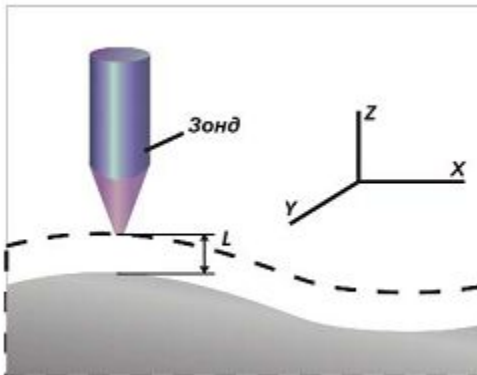
- эффективная глубина проникновения частицы «за барьер» (порядка  $10^{-6}$  м)

Туннельный эффект Т. э. лежит в основе понимания закономерностей альфа-распада радиоактивных ядер, термоядерных реакций, автоэлектронной эмиссии электронов из металлов и полупроводников, контактных явлений.



# Туннельный сканирующий микроскоп (1981 г. IBM Г. Бининг и Г. Рорер, Нобел. Пр. 1985 г.)

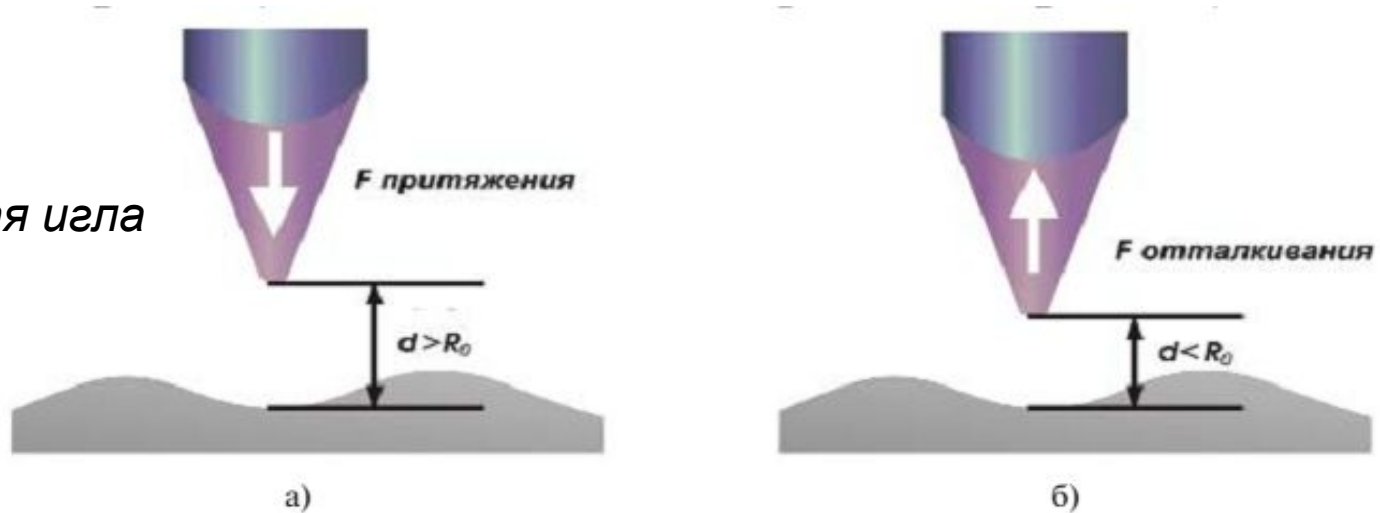
- Зонд- токопроводящая игла;



Изображение поверхности кремния

## §4. Атомно-силовой микроскоп

Зонд - алмазная игла



Работа атомно-силового микроскопа основана на использовании сил межатомных связей. На малых расстояниях (около 0,1 нм) между атомами двух тел действуют силы отталкивания, а на больших – силы притяжения.

*Рис.: Зависимость силы межатомного взаимодействия в функции расстояния между зондом и поверхностью*

# §5. Электронный парамагнитный резонанс



*открыто Завойским Евгением  
Константиновичем в Казанском  
государственном университете. На основе  
этого явления был развит метод  
спектроскопии, который зарегистрирован  
в Государственный реестр научных  
открытий СССР как научное открытие  
№ 85 с приоритетом от 12  
июля 1944 года .*

*Завойский Е.К.  
(1907-1977)*

# Электронный парамагнитный резонанс (ЭПР)

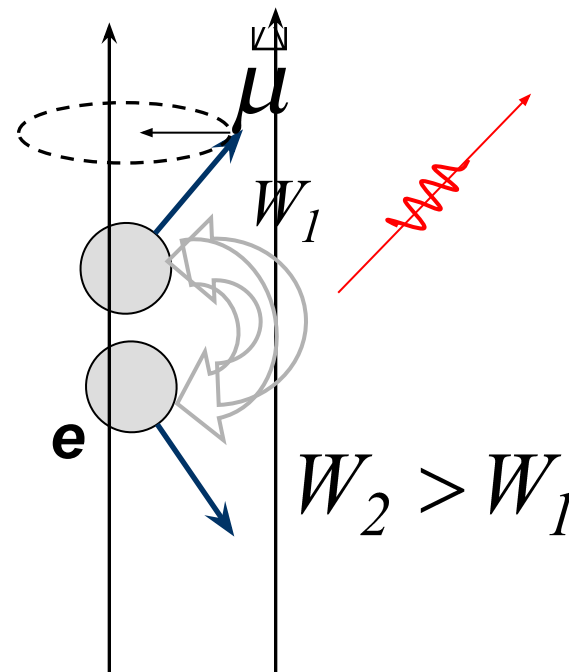
$\vec{B}$

$$E_{\text{э/м}} = h\nu$$

$$\Delta E = -(\vec{\mu} \cdot \vec{B}) = \pm \mu_z \cdot B$$

$$E_{1,2} = E_0 \pm \mu_z \cdot B$$

$$h\nu = E_2 - E_1 = 2\mu_z B$$



Суть явления ЭПР заключается в резонансном поглощении электромагнитного излучения неспаренными электронами вещества, помещенного в магнитное поле и подвергаемого облучению ЭМВ СВЧ

$\mu$  - магнитный момент электрона

Если парамагнитный центр облучить электромагнитным импульсом (фотоном) с энергией  $h\nu$ , совпадающей с энергией электронного перехода, то будет происходить резонансное поглощение СВЧ излучения и магнитные дипольные переходы, подчиняющиеся правилу отбора  $\Delta m = 1$ .

Далее атомы парамагнитных центров будут возвращаться в основное состояние, переизлучая кванты  $h\nu$ . Регистрируя интенсивность и распределение этого вторичного излучения в исследуемом образце, получают информацию о его составе и свойствах.

## Применение ЭПР

Метод ЭПР даёт уникальную информацию о парамагнитных центрах. Он однозначно различает примесные ионы, изоморфно входящие в решётку, от микровключений. При этом получается полная информация о данном ионе в кристалле: валентность, координация, локальная симметрия, гибридизация электронов, сколько и в какие структурные положения электронов входит, ориентирование осей кристаллического поля в месте расположения этого иона, полная характеристика кристаллического поля и детальные сведения о химической связи. И, что очень важно, метод позволяет определить концентрацию парамагнитных центров в областях кристалла с разной структурой.



## §6. Ядерно-магнитный резонанс

**Ядерный магнитный резонанс (ЯМР)** — резонансное поглощение или излучение электромагнитной энергии веществом, содержащим ядра с ненулевым спином во внешнем магнитном поле, на частоте  $\nu$  (называемой частотой ЯМР), обусловленное переориентацией магнитных моментов ядер.



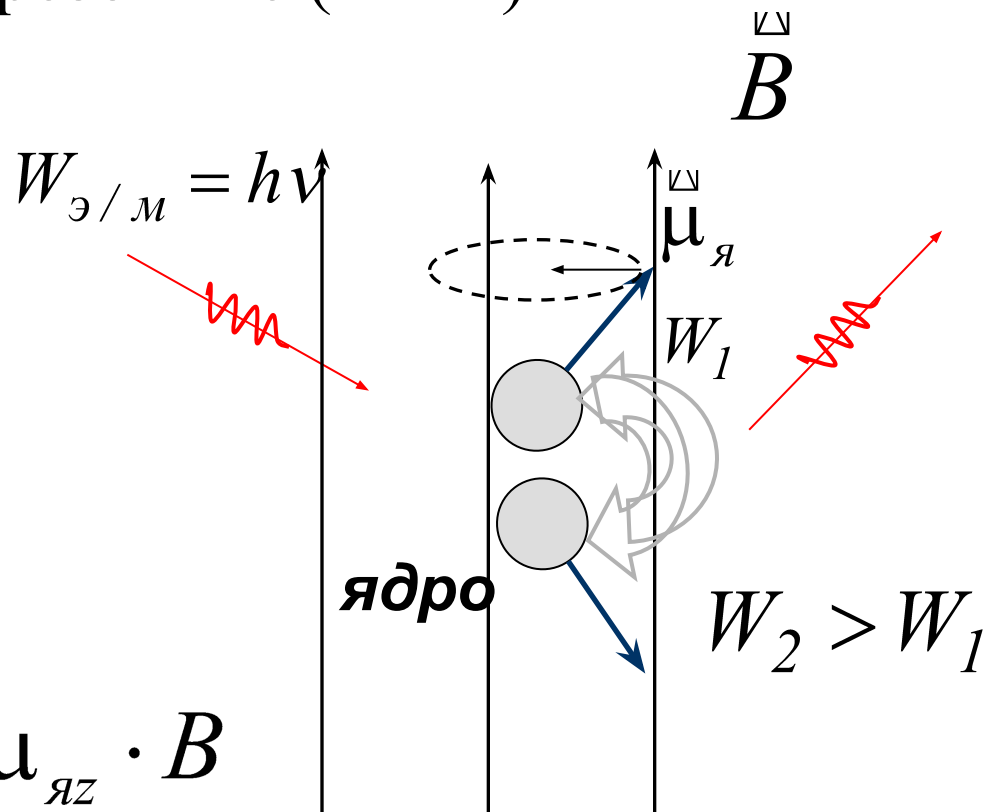
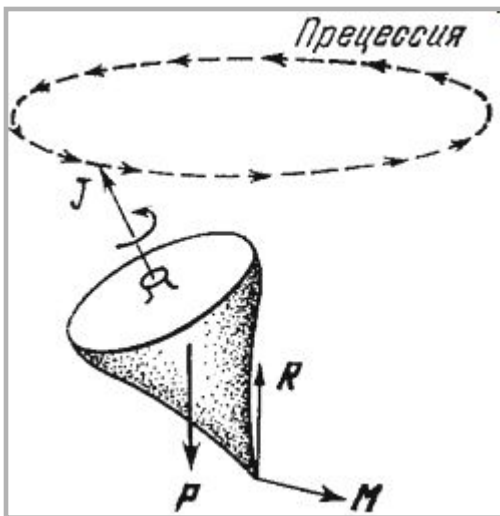
Эдвард Перселл  
(1912-1997)



Феликс Блох  
(1905-1983)

**Нобелевская премия  
по физике 1952 г.**

# Ядерный магнитный резонанс (ЯМР)



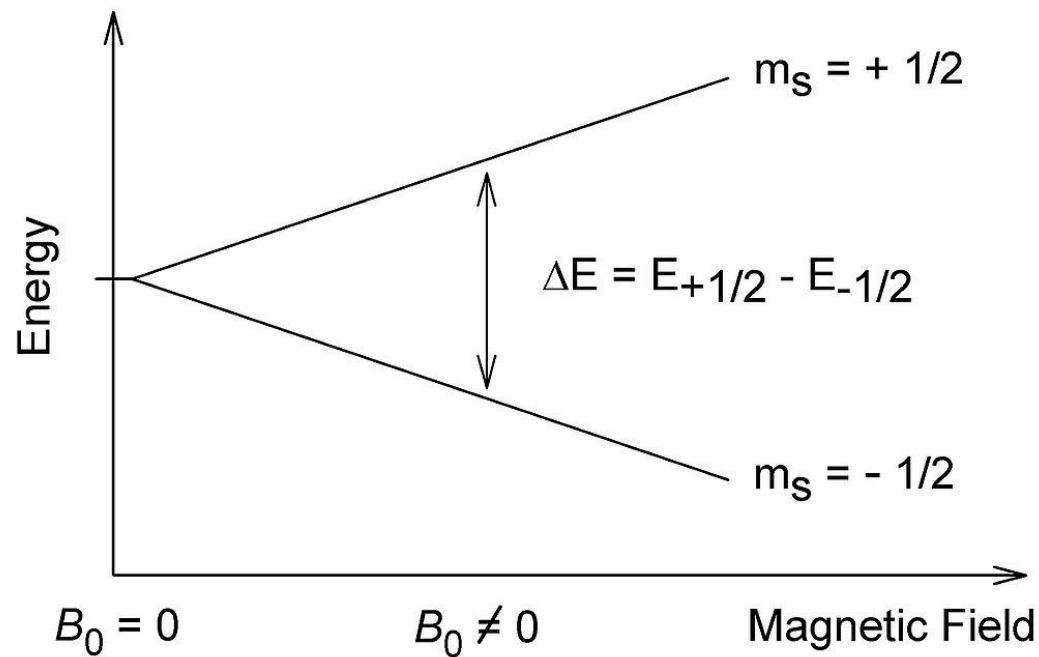
$$\delta E = -(\vec{\mu}_{\text{я}} \cdot \vec{B}) = \pm \mu_{\text{яз}} \cdot B$$

$$E_{1,2} = E_0 \pm \mu_{\text{яз}} \cdot B$$

$$h\nu = E_2 - E_1 = 2\mu_{\text{яз}} B$$

$\mu$  - магнитный момент ядра

Резонансное поглощение электромагнитной энергии веществом, содержащим ядра с ненулевым спином во внешнем магнитном поле, обусловленное переориентацией магнитных моментов ядер.



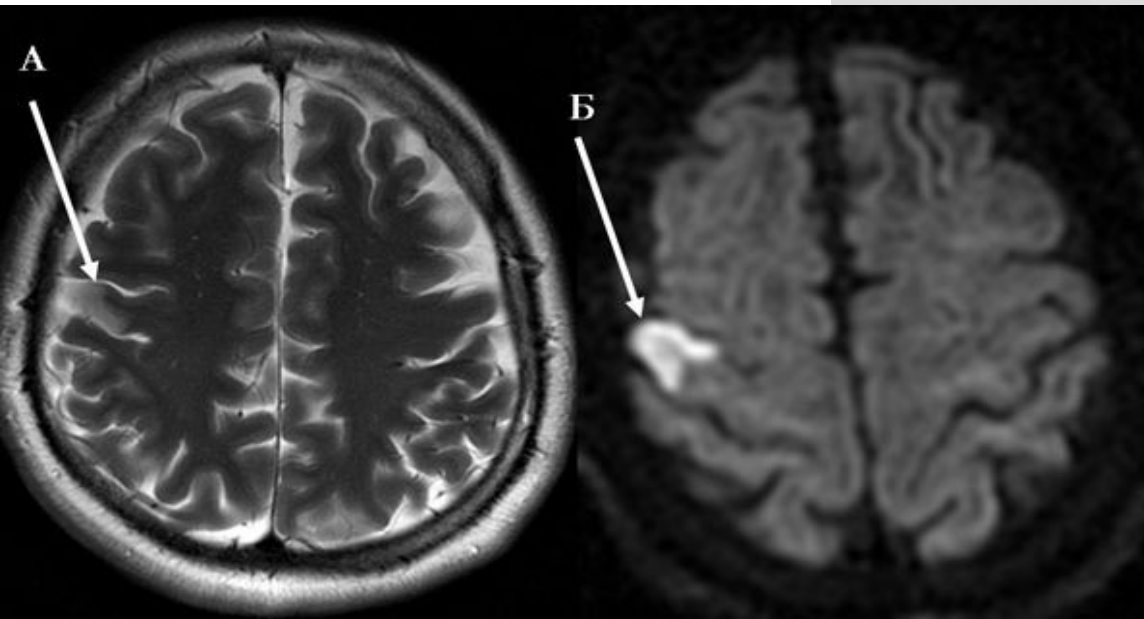
1) образец подвергается радиочастотному облучению неизменной частоты (методом непрерывного облучения, CW, continuous wave), сила магнитного поля  $B$  изменяется, при определенной  $B$  (такой, что  $B = h\nu / 2\mu_{\text{ЯЗ}}$ ) начинается активное поглощение излучения. Метод позволяет измерить магнитный момент ядра.

2) При известном магнитном моменте, изменяя частоту облучения, можно измерить магнитную индукцию.

# ЯМР-исследование (магнитно- резонансная томография, МРТ)

Метод основан на измерении электромагнитного отклика ядер атомов водорода на возбуждение их определённой комбинацией электромагнитных волн в постоянном магнитном поле высокой напряжённости.

магнитный момент  $\mu_p = 2,79\mu_y$



Сверхпроводящая магнитная катушка способна генерировать мощное магнитное поле в 1–3 Тл

**Питер Мэнсфилд и Пол Лотербур Нобелевскую премию 2003 г.**



- Свяжем теорию с практикой ...