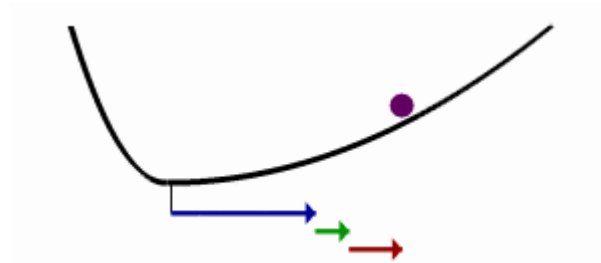
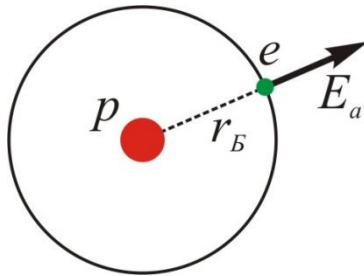


# Сверхсильное световое поле

Амплитуда напряжённости электрического поля волны:

$$I = \frac{\langle dW \rangle}{dSdt} = \langle w \rangle c = \frac{c\epsilon_0 E_0^2}{2} \Rightarrow E_0 = \sqrt{\frac{2I}{c\epsilon_0}} = 27,5 \sqrt{I \left[ \frac{Вт}{м^2} \right]}$$

$$E_a = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e}{r_B^2} = \frac{9 \cdot 10^9 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}}{0,53^2 \cdot 10^{-20}} \frac{В}{м} = 5,1 \cdot 10^{11} \frac{В}{м} \approx 50 В / \text{Å}$$



$$I_{\text{лазер}} = 3,5 \cdot 10^{20} \frac{Вт}{м^2}$$

~~$$\vec{P} = \epsilon_0 \chi^{(1)} \vec{E} + \left[ \epsilon_0 \chi^{(2)} \vec{E}\vec{E} + \epsilon_0 \chi^{(3)} \vec{E}\vec{E}\vec{E} + \dots \right] = \vec{P}^{(л)} + \vec{P}^{(нл)}$$~~

# Практика получения сверхсильного светового поля

Чтобы получать **сверхсильные световые поля**, нужно сокращать **длительность импульса** и/или уменьшать **площадь пятна**, в которое фокусируется излучение.

$$I = \frac{\langle dW \rangle}{dSdt}$$

При  $\tau \sim 30$  фс и небольшой энергии  
(1,5 Дж) пиковая мощность  $\sim 50$  ТВт

При фокусировке в пятно 1 мкм получим:  $I \approx 5 \cdot 10^{25} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$

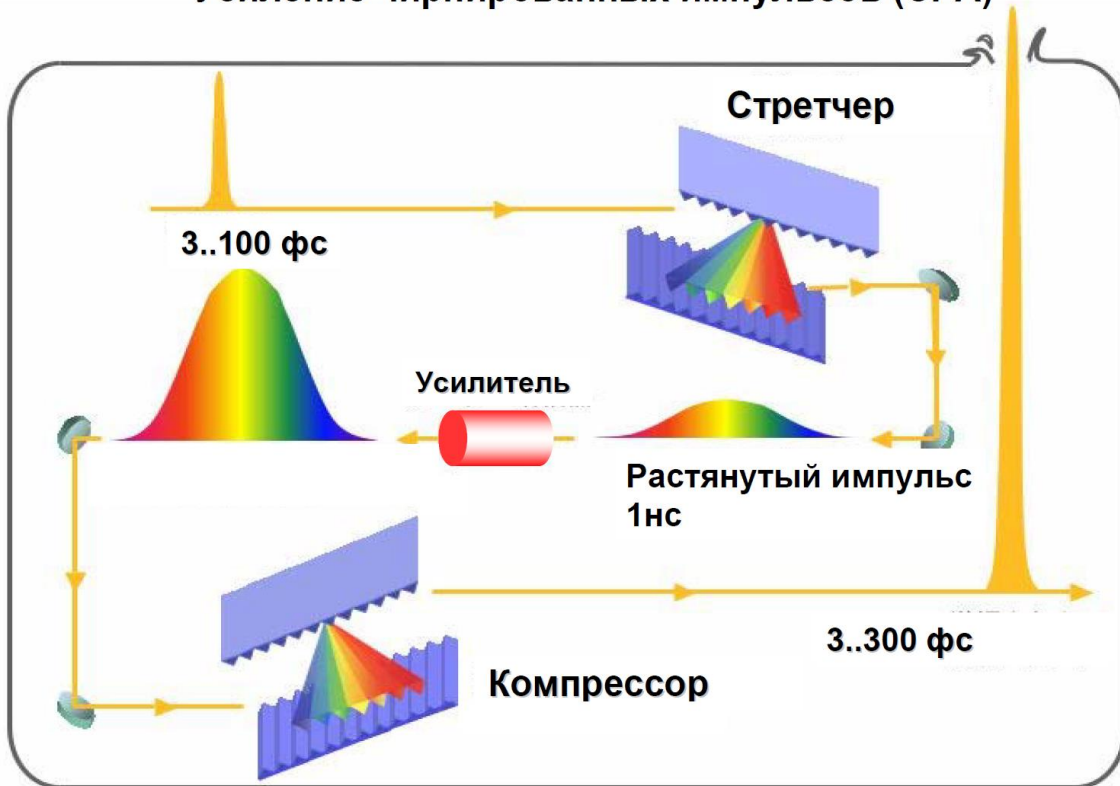
*G.A. Mourou et al .  
Generation and  
characterization of the  
highest laser intensities  
( $10^{22}$  W/cm<sup>2</sup> ), Opt.Lett .  
29, 2837, 2004.*

## Релятивистская интенсивность

$$\left\{ \begin{array}{l} I = c\varepsilon_0 E_0^2 / 2 \\ a = \frac{eE_0}{m} \cos \omega t \\ \langle W_{\text{кин}} \rangle = mc^2 \end{array} \right. \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} V = \frac{eE_0}{m\omega} \sin \omega t \\ \langle W_{\text{кин}} \rangle = \frac{e^2 I \lambda^2}{4\pi^2 m c^3 \varepsilon_0} \end{array} \right. \Rightarrow I_{\text{rel}} = \frac{4\pi^2 \varepsilon_0 m^2 c^5}{e^2 \lambda^2} \approx 1,4 \cdot 10^{22} \frac{1}{\lambda[\text{мкм}]^2} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$$

# Современные технологии получения мощных лазерных импульсов

Усиление чирпированных импульсов (CPA)



D. Strickland, G. Mourou, Opt. Comm. 56, 219 (1985)

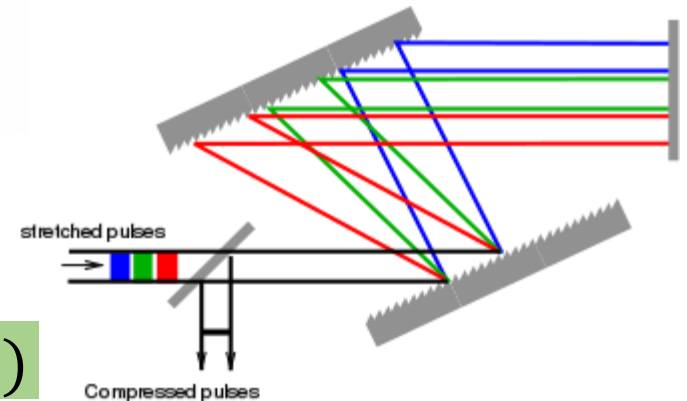
$$P = \frac{W}{\tau}$$

Нобелевская премия по физике, 2018 г.



Самофокусировка лазерного

пучка при  $P > P_{cr} \sim \frac{\lambda^2}{n_2}$   $n(r) = n_0 + n_2 I(r)$

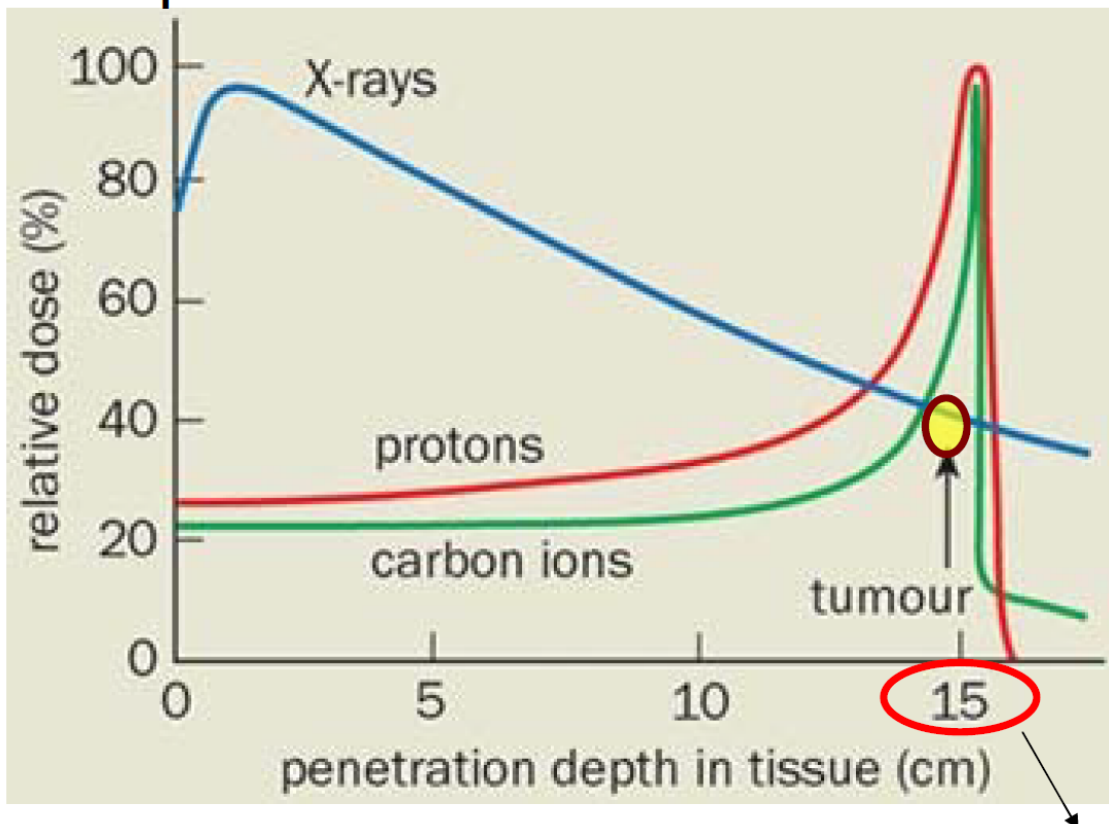


# Протонная терапия раковых заболеваний

## Протонная терапия - 1946г.

*R. R. Wilson, "Radiological use of fast protons," Radiology 47, 487–491, 1946*

Благодаря наличию Брэгговского пика, протонные пучки гораздо предпочтительнее для лечения опухолей, чем фотоны (рентген) и электроны



Первый пациент был вылечен протонными пучками в 1954 г.

За 50 лет в мире вылечено около 40 тысяч пациентов

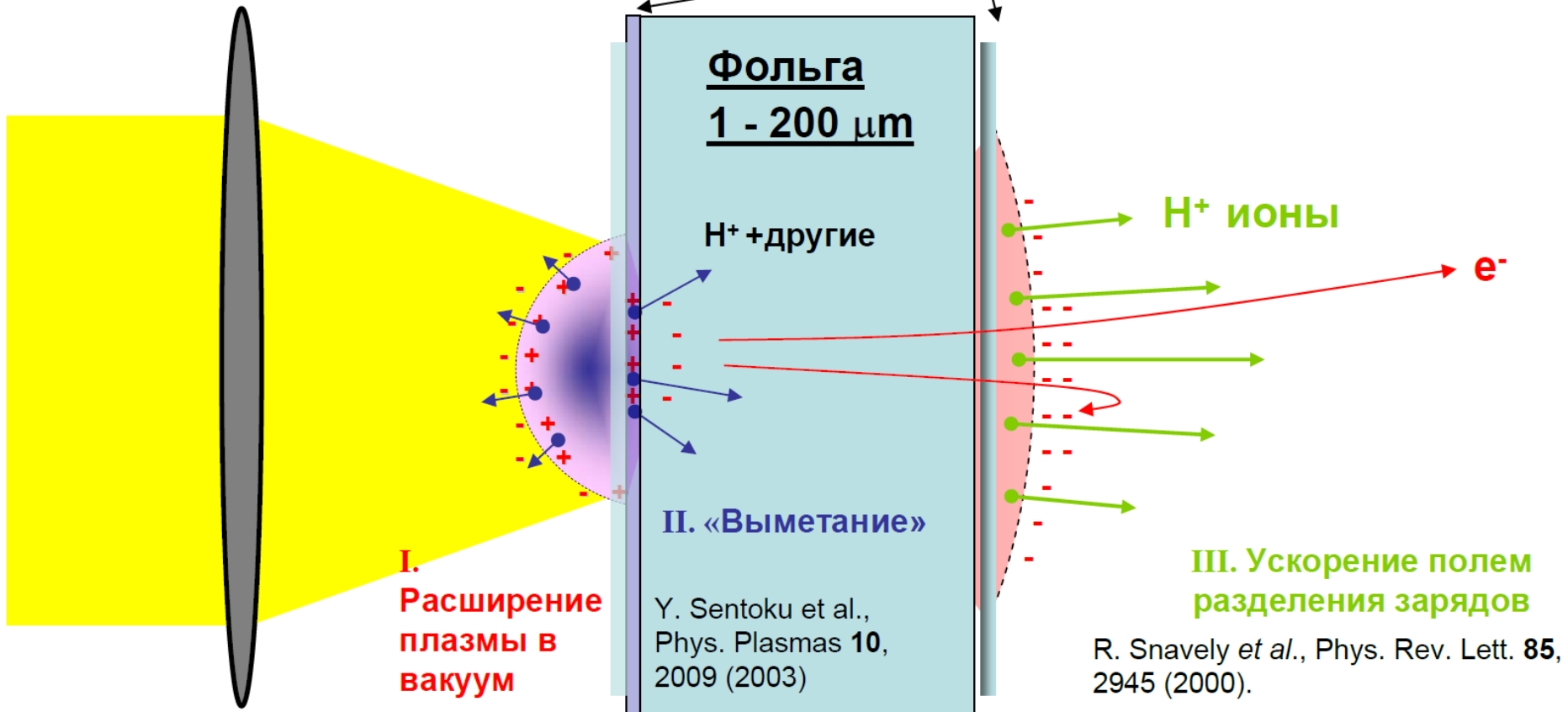
**Почему так мало?!**

Обычные ускорители частиц + инфраструктура  
**> 10<sup>8</sup> \$**

Зависит от энергии протонов. На рисунке – для 150 МэВ.

# Генерация быстрых протонов

Лазерный импульс



S.J. Gitomer *et al.*, Phys. Fluids **29**, 2679 (1986)

# Перспективы применения быстрых протонов, сгенерированных лазерным излучением

- ✓ Протонная радиография высокого разрешения, диагностика плазмы
- ✓ Инжекторы для ускорителей
- ✓ **Компактные ускорители протонов для терапии раковых заболеваний**
- ✓ **Наработка изотопов для Позитронно-Эмиссионной Томографии (ПЭТ)**

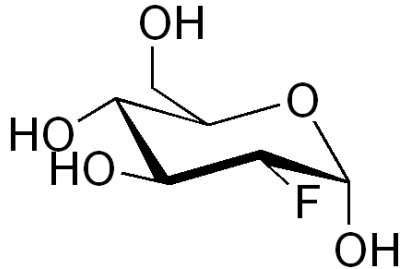
# Лазерные системы для протонной терапии раковых заболеваний

Плюсы	Минусы
Минимум вреда при лечении	Малая энергия протонов
Разрешение 1 мм	Малый ток протонов
Компактность (на 10 мкм протоны приобретают энергию в $\sim 10$ МэВ)	
Простая транспортировка протонов	
Дешёвые	
Минимум инфраструктуры	

Требования к пучку протонов	Существующие характеристики
Энергия до 300 МэВ (глубина проникновения до 30 см)	10-60 МэВ (глубина проникновения до 2 см – <b>хватает для терапии глаз</b> )
Мощность $\sim 10^{10}$ протонов/с	$< 10^9$ протонов/с
Монохроматичность $\Delta E/E \sim 10^{-2}$	$10^{-2}$

# Наработка изотопов для Позитронно-Эмиссионной Томографии

**ПЭТ** основана на регистрации пары гамма-квантов, возникающих при аннигиляции позитронов с электронами. Позитроны возникают при  $\beta$ -распаде радионуклида в составе препарата (~фтордезоксиглюкоза), который вводится в организм перед исследованием.



$^{18}\text{F}$ -фтордезоксиглюкоза  
( $p + ^{18}\text{O} \rightarrow ^{18}\text{F} + n$ )

В основном применяются изотопы элементов второго периода:

*$^{18}\text{F}$  имеет достаточно малый период, чтобы дозовая нагрузка была приемлема. С другой стороны, период достаточно большой для транспортировки препарата в клинику*

Изотоп	$T_{1/2}$ , мин
$^{11}\text{C}$	20,4
$^{13}\text{N}$	9,96
$^{15}\text{O}$	2,03
$^{18}\text{F}$	109,8

100-500	смерть через неделю
10	КТ живота или таза
10	развитие лучевой болезни
8	начало изменений состава крови
3	при рентгеноскопии желудка
1	аварийное облучение населения
~ 0,1	перелёт Москва-Стамбул-Москва
~ 0.02	рентген лёгких

За счёт использования ионизирующего излучения однократное использование  $^{18}\text{F}$ -ФДГ в среднем даёт дозу облучения 14 мЗв.

Как правило, системы ПЭТ совмещают с устройствами КТ.



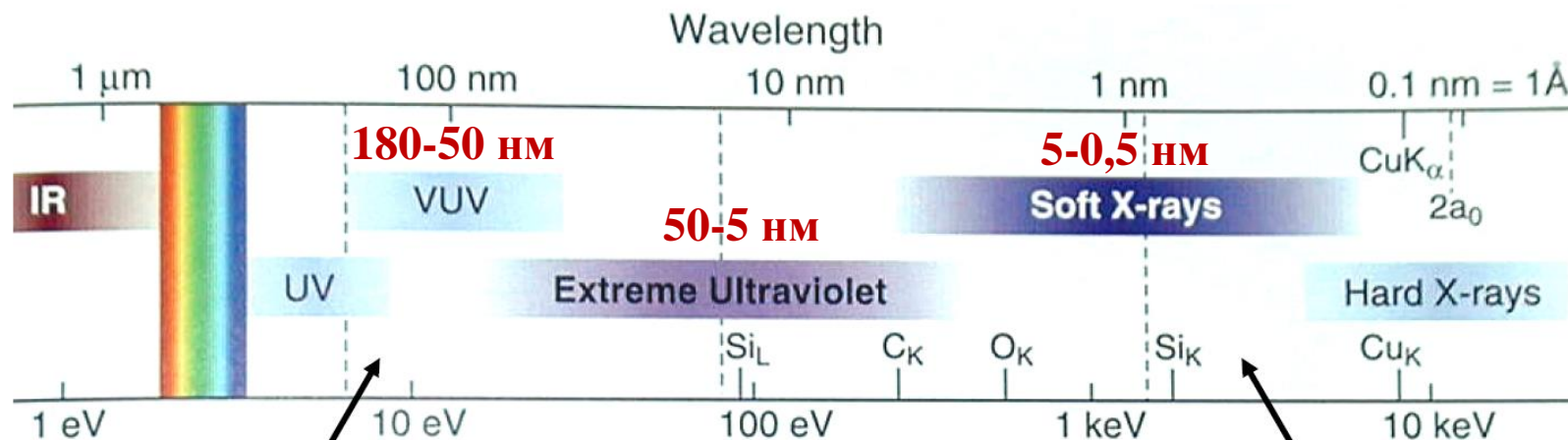
# Генерация коротковолнового излучения

1. **Высокое временное и пространственное разрешение:** малые длина волны и длительность импульсов
2. **Некогерентное излучение** – тормозное излучение, как в рентгеновской трубке (не направлено,  $\tau \sim$  пс)
3. **Когерентное излучение** – гармоники от поверхности плазмы (направлено,  $\tau \sim$  ас)
4. **Монохроматические пучки** ( $\Delta E \sim$  кэВ)

**Приложения:** рентгеновская дифракция, спектроскопия, микроскопия с фс- временным и нм- пространственным разрешениями.

**Альтернативы:**

- ✓ синхротрон,
- ✓ лазер на свободных электронах,
- ✓ рентгеновский лазер

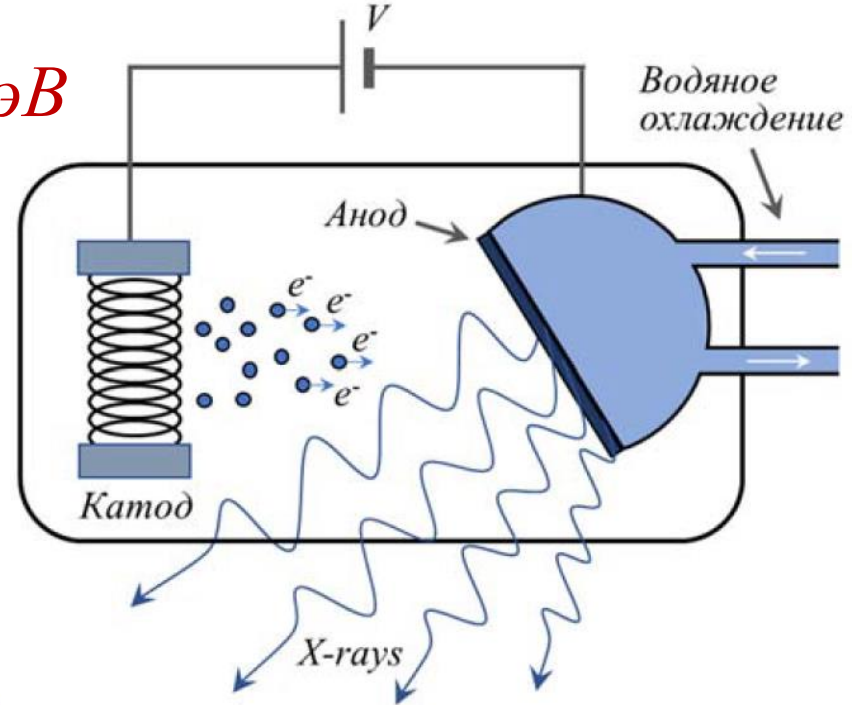


Ионизирующее  
для всех материалов

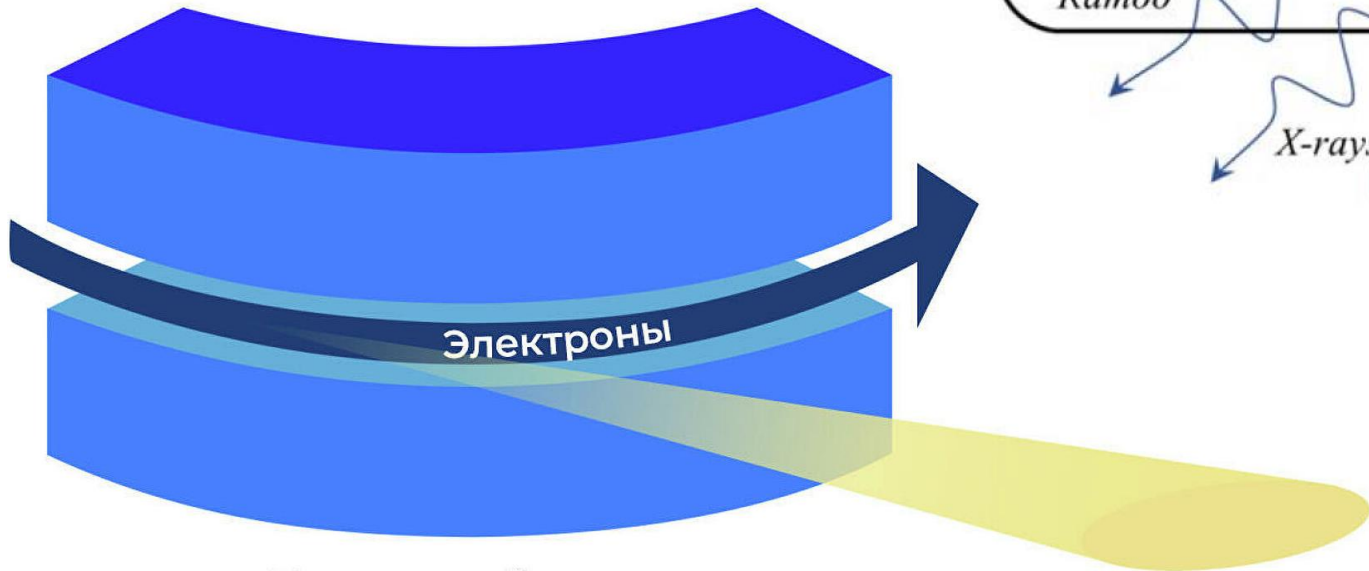
Взаимодействует с электронами  
на внутренних оболочках

# Источники синхротронного излучения

$$W_e \sim 100 \text{ кэВ}$$



$$W_e \sim 1 \text{ ГэВ}$$

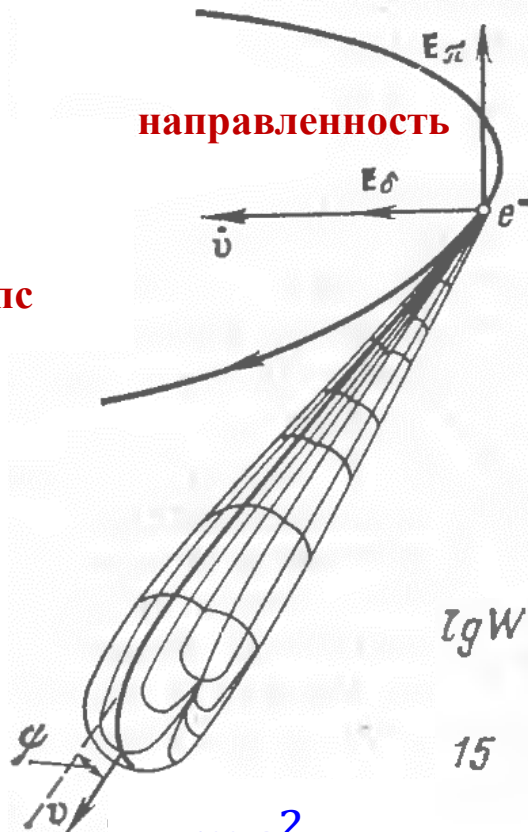
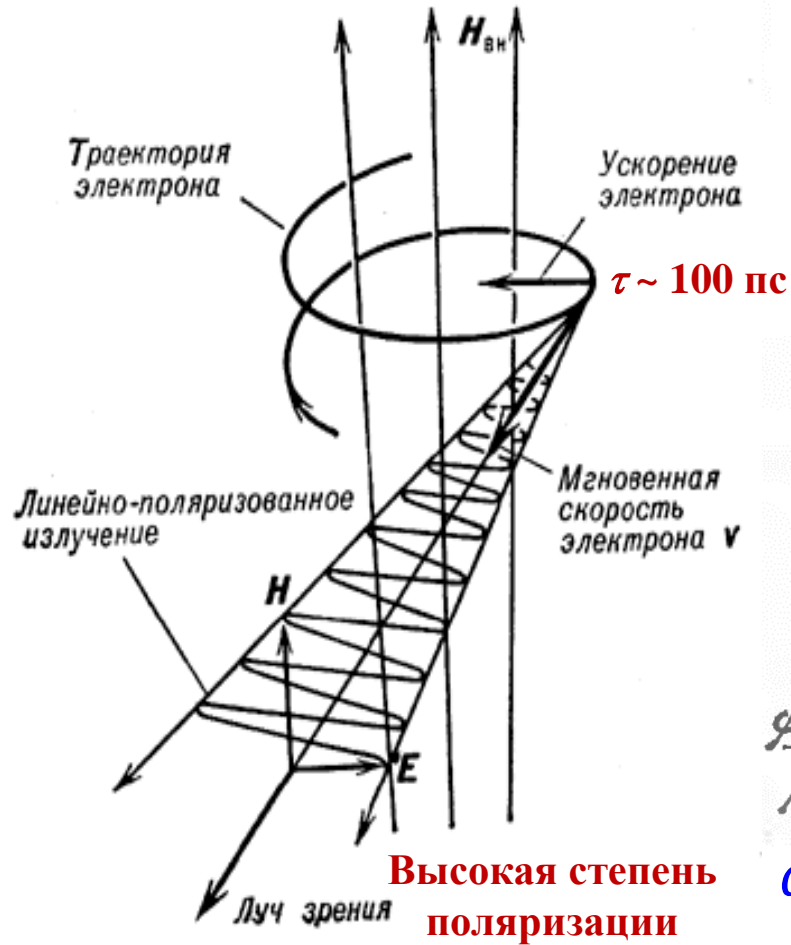


Поворотный магнит

Синхротронное излучение  
(рентген)

# Синхротронное излучение

(магнитотормозное излучение релятивистских заряженных частиц в магнитном поле)

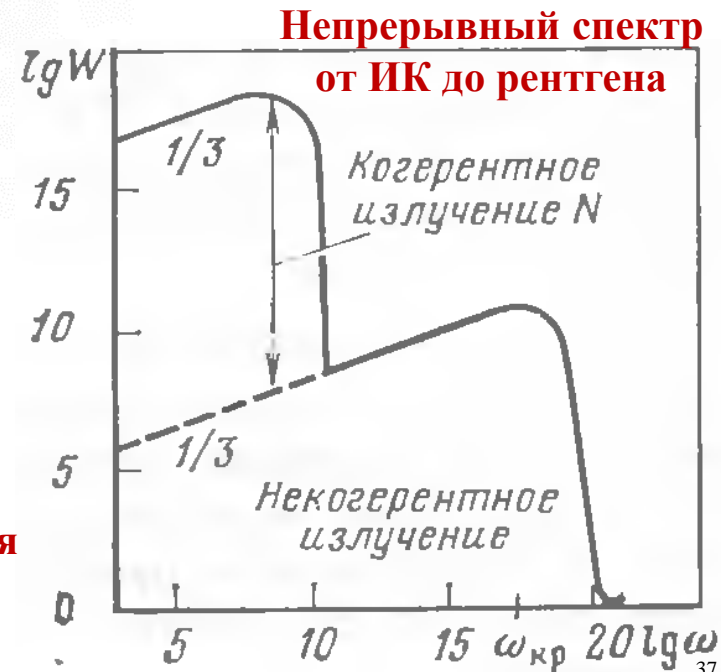


$$W_e = 6 \text{ ГэВ}$$

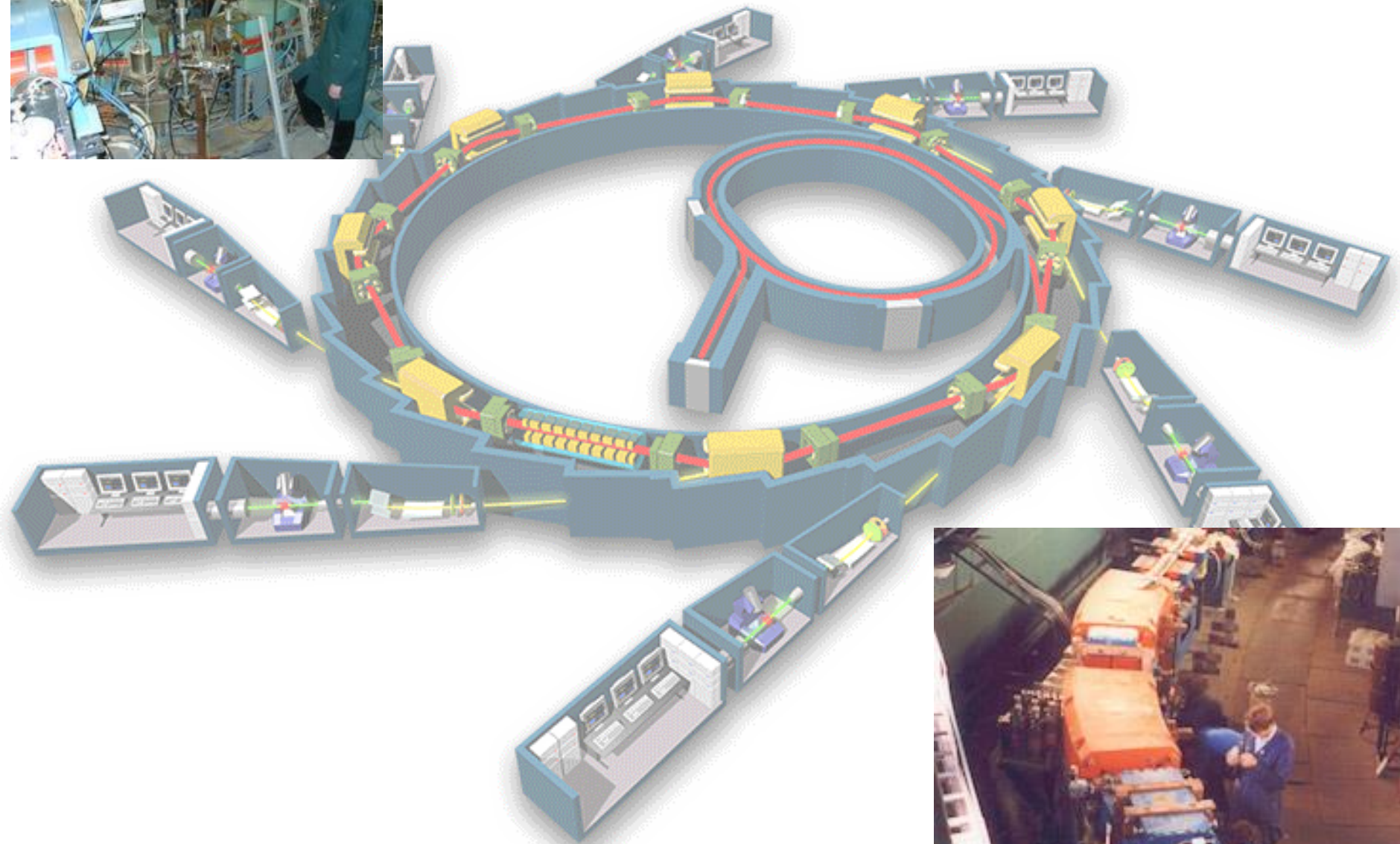
$$W_{\text{изл}} = 20 \text{ кэВ}$$

$$d\psi = \frac{mc^2}{W_e}$$

Высокая спектральная яркость



# Структура синхротрона



# Поколения источников синхротронного излучения

**1 поколение.** Коллайдеры, циклические ускорители, работающие при неизменной энергии электронов в постоянных магнитных полях. СИ считается паразитным – мешает разгонять частицы.

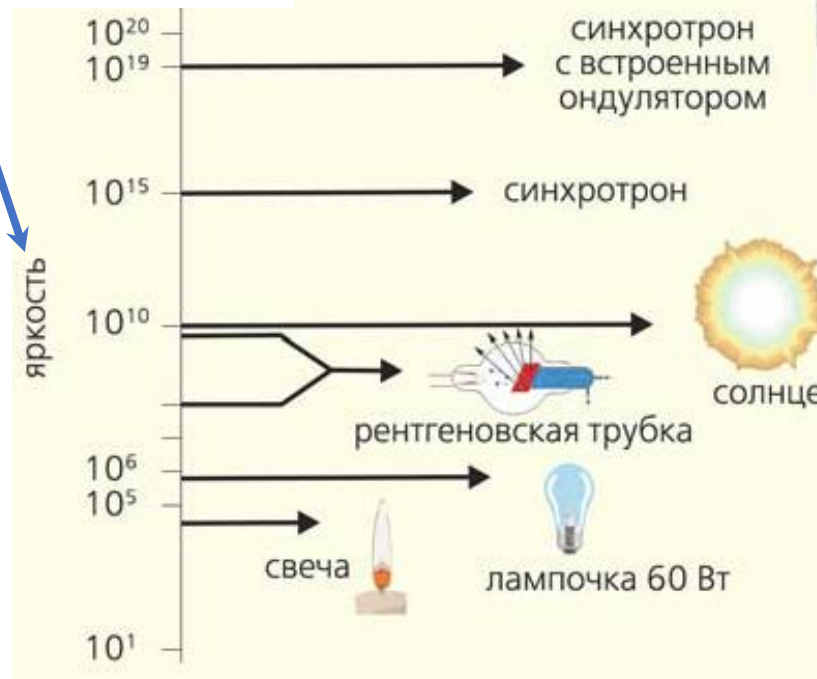
**2 поколение.** Комплексы, оптимизированные для получения СИ.

**3 поколение.** Комплексы с намного большим периметром кольца и малой мощностью СИ из поворотных магнитов. Главные источники СИ – ондуляторы на длинных прямолинейных участках.

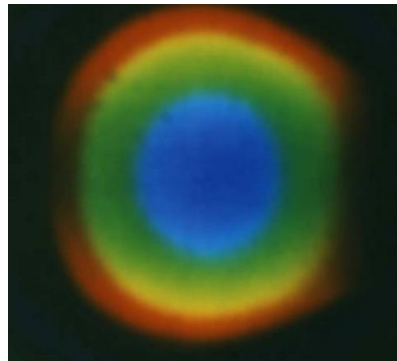
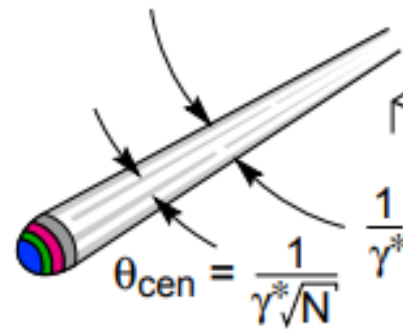
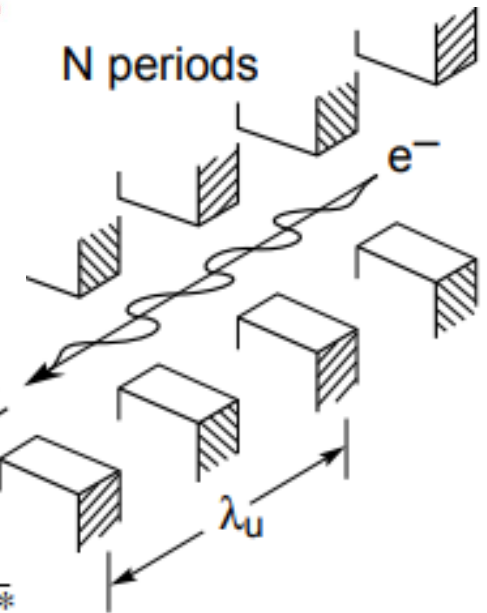
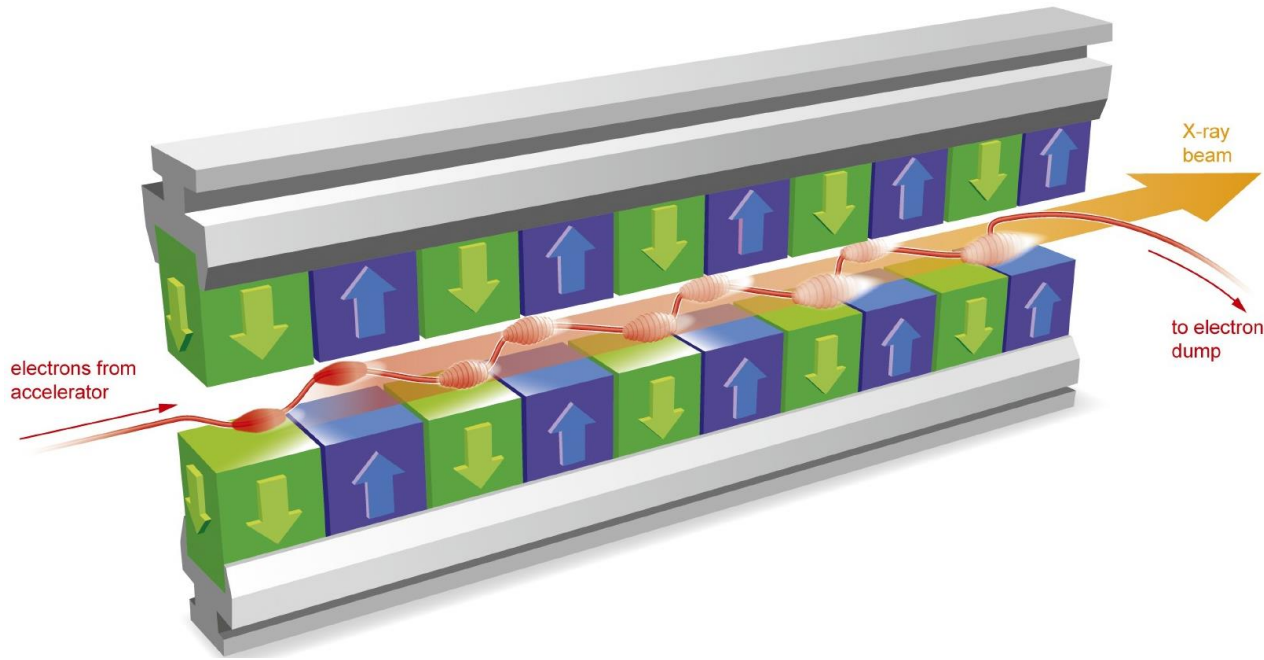
$$B = \frac{F}{\Omega \cdot s_0 \cdot 0.1\% \Delta\lambda / \lambda} \left[ \frac{\text{фотон/сек}}{\text{мрад}^2 \cdot \text{мм}^2 \cdot 0.1\% \text{BW}} \right]$$

## 4 поколение.

Специализированные ускорительно-накопительные комплексы, геометрические и временные параметры излучения которых оптимизированы для генерации ультракоротких, пространственно-ограниченных пучков.



# Ондулятор



спонтанное  
ондуляторное  
излучение

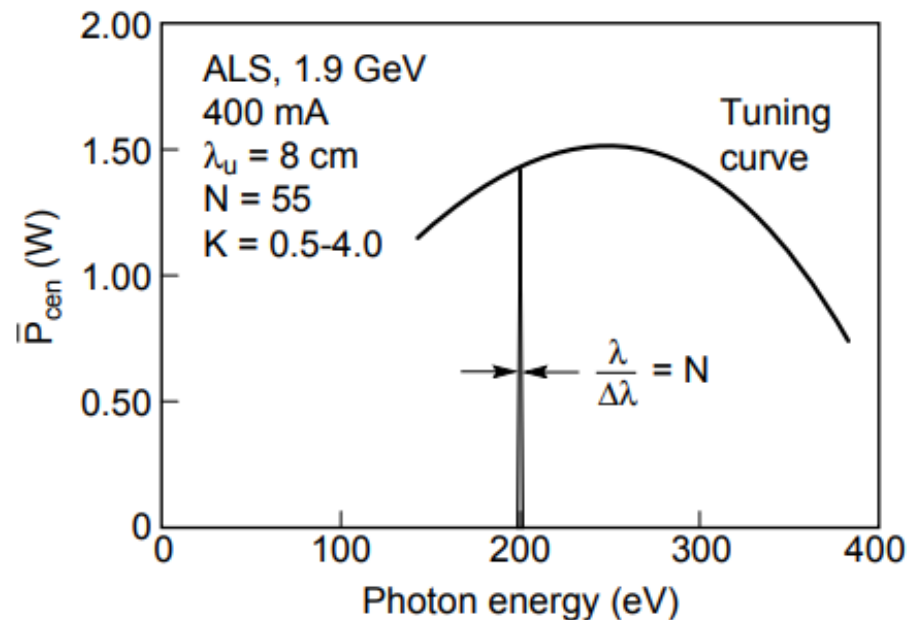
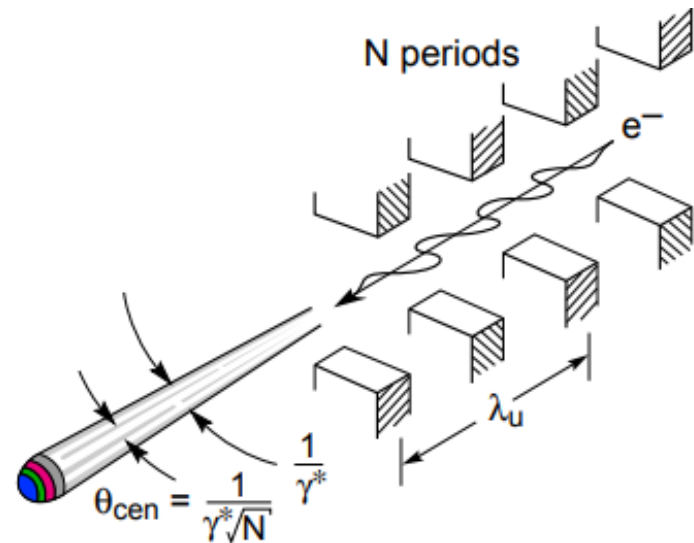
# Ондулятор

$$\lambda_x = \frac{\lambda_u}{2\gamma^2} \left( 1 + \frac{K^2}{2} + \gamma^2 \vartheta^2 \right)$$

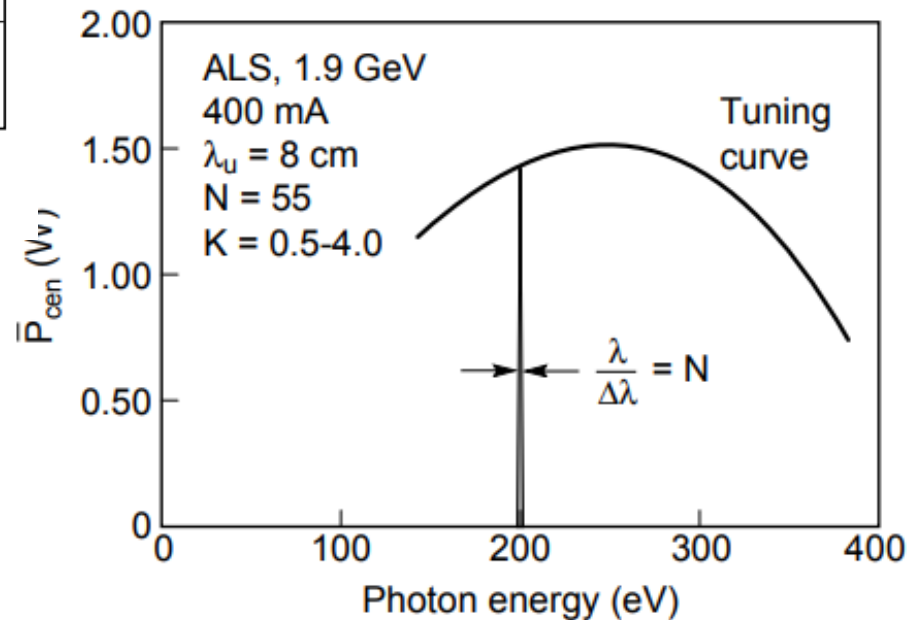
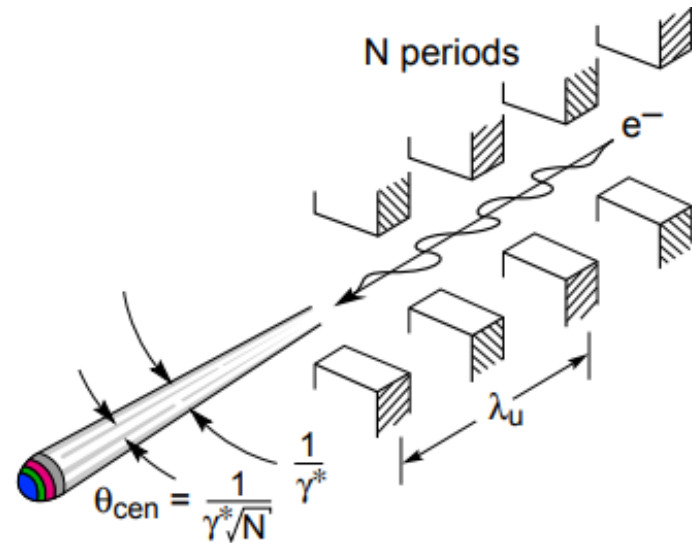
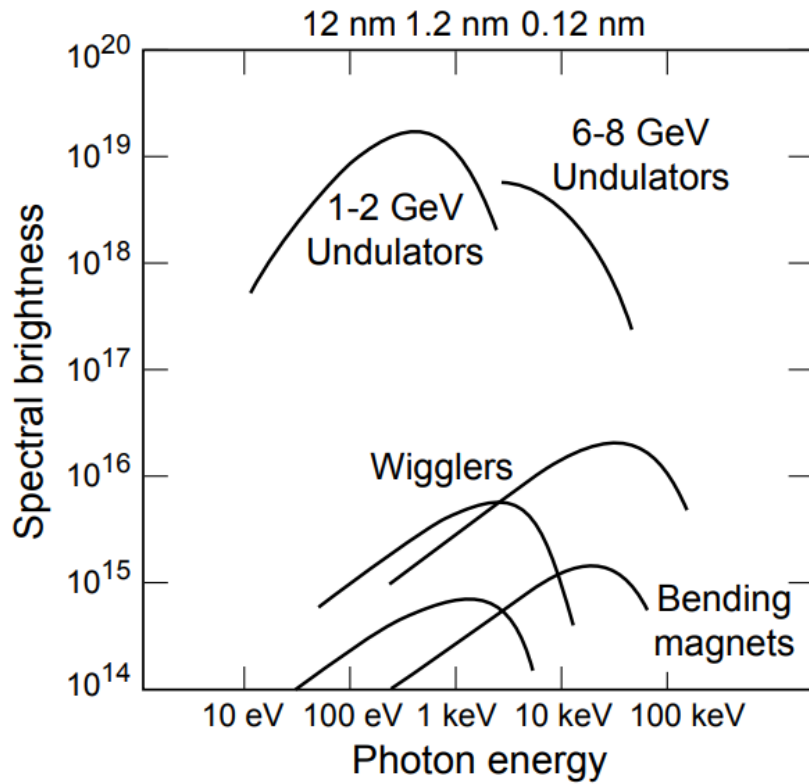
$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

$$K = \frac{eB_0\lambda_u}{2\pi m_0 c}$$

$$\gamma^* = \frac{\gamma}{\sqrt{1 + K^2/2}}$$

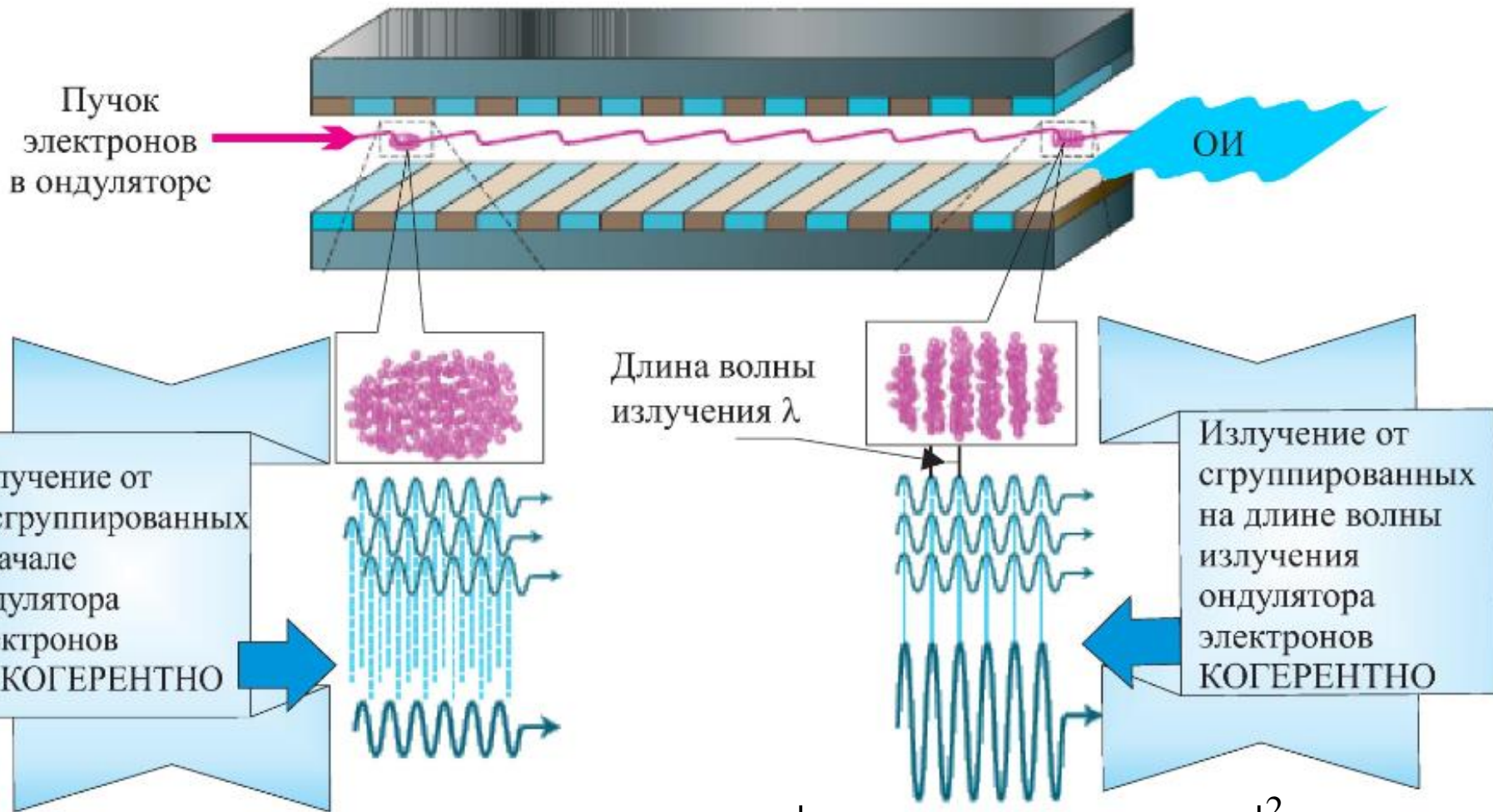


# Ондулятор



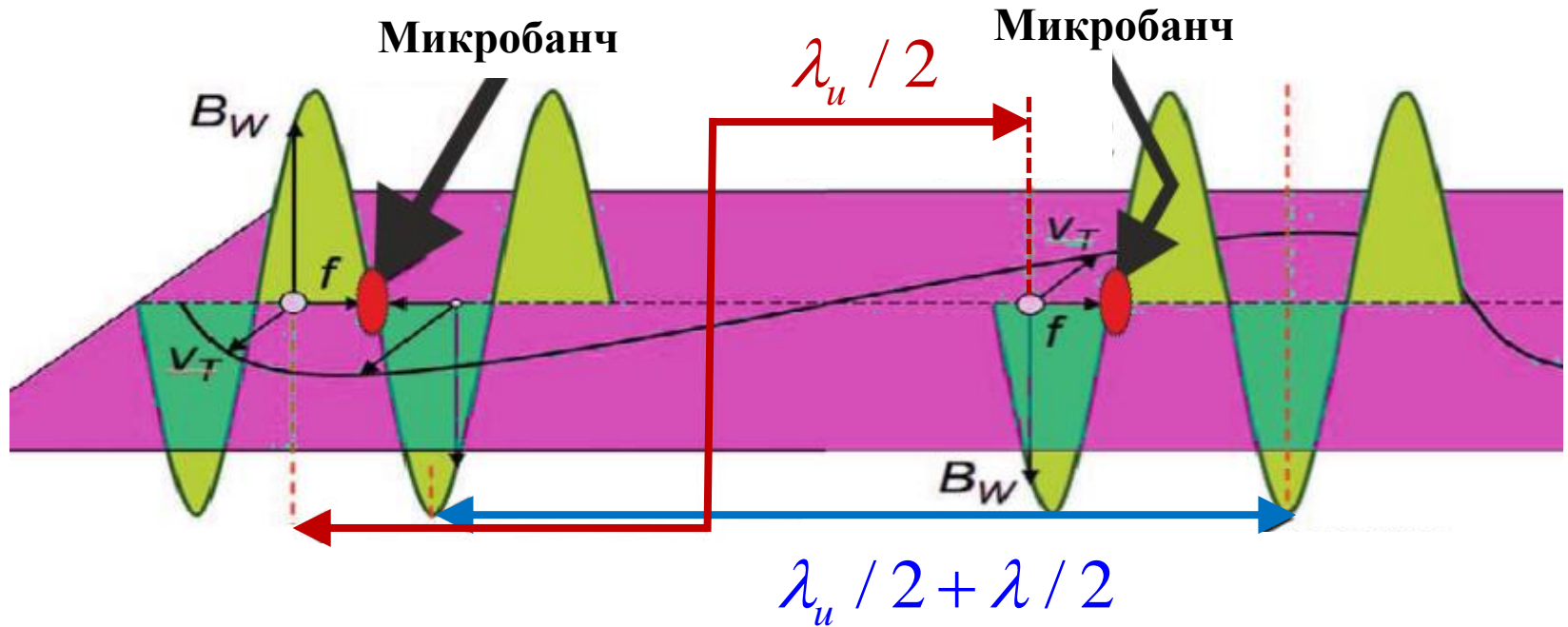


# Лазеры на свободных электронах

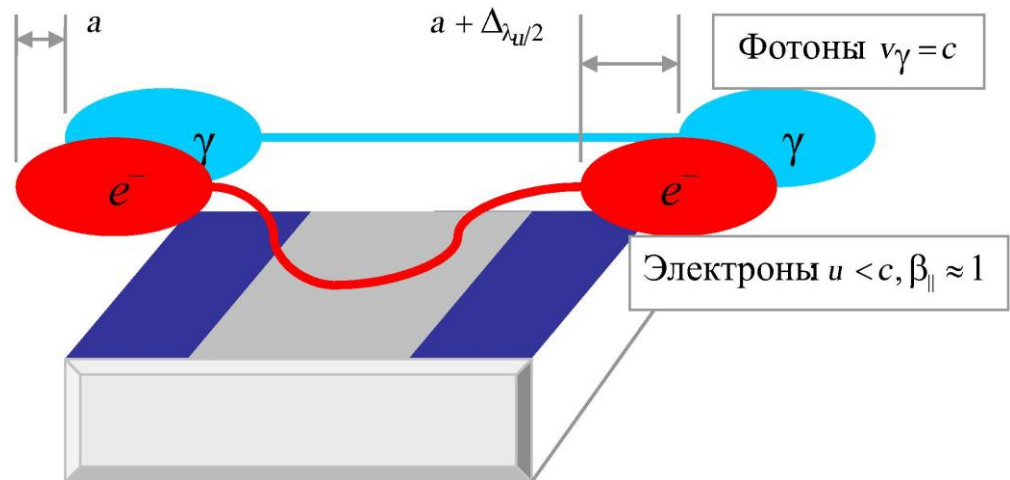


$$P \sim \left| \sum_{j=1}^{N_e} E_j e^{i\varphi_j} \right|^2 = \sum_{j=1}^{N_e} E_j^2 + \left| \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^{N_e} \sum_{k=1}^{N_e} E_j E_k e^{i(\varphi_j - \varphi_k)} \right|^2$$

# Группировка электронов в микробанчи

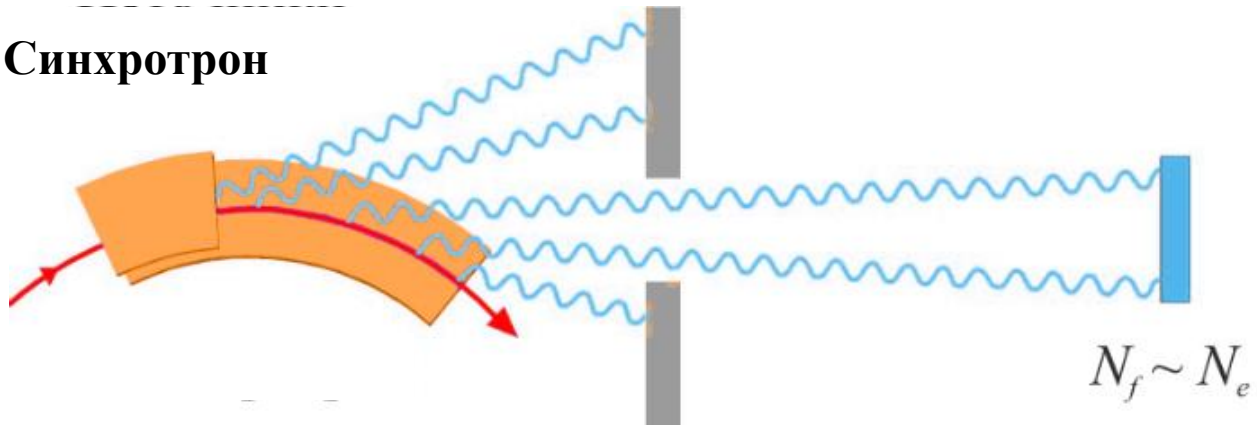


Электрон движется в поле собственной волны, но отстаёт от неё каждые полпериода ондулятора на  $\lambda/2$

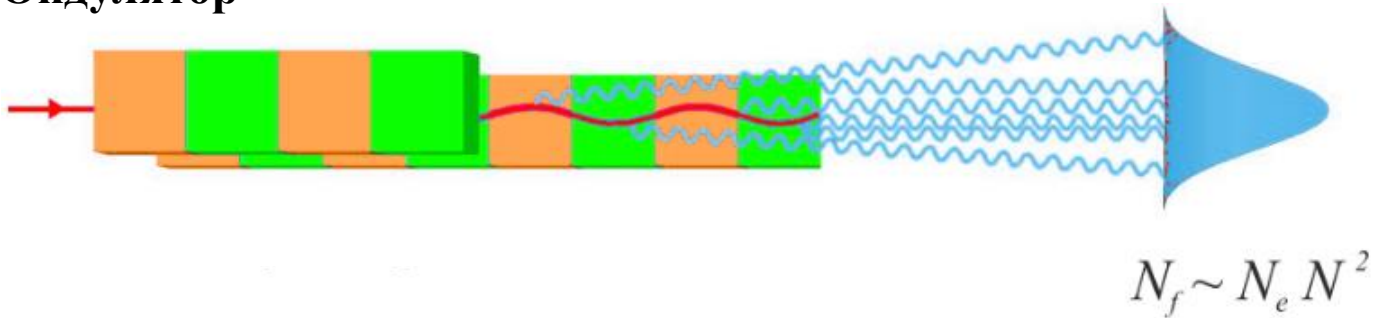


# Сравнение синхротрона, ондулятора и ЛСЭ

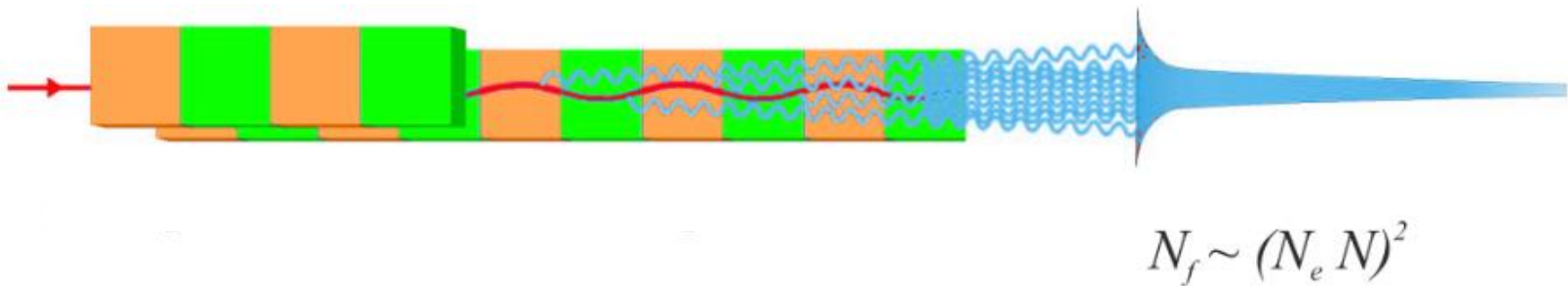
Синхротрон



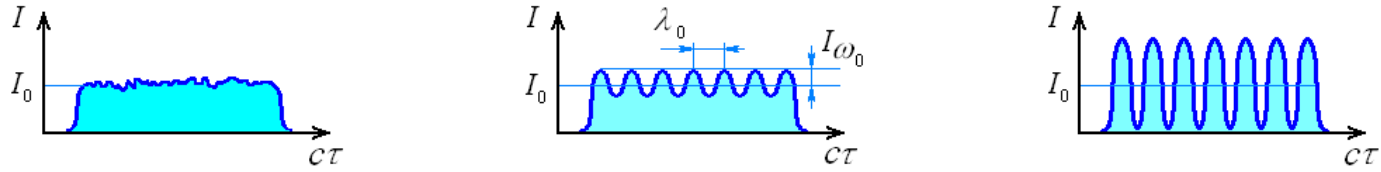
Ондулятор



Лазер на свободных электронах

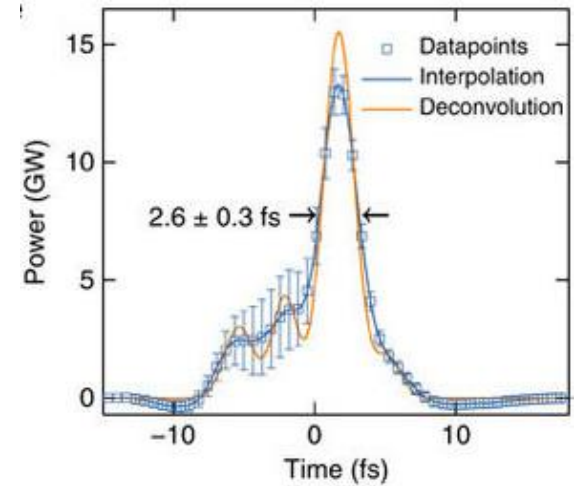
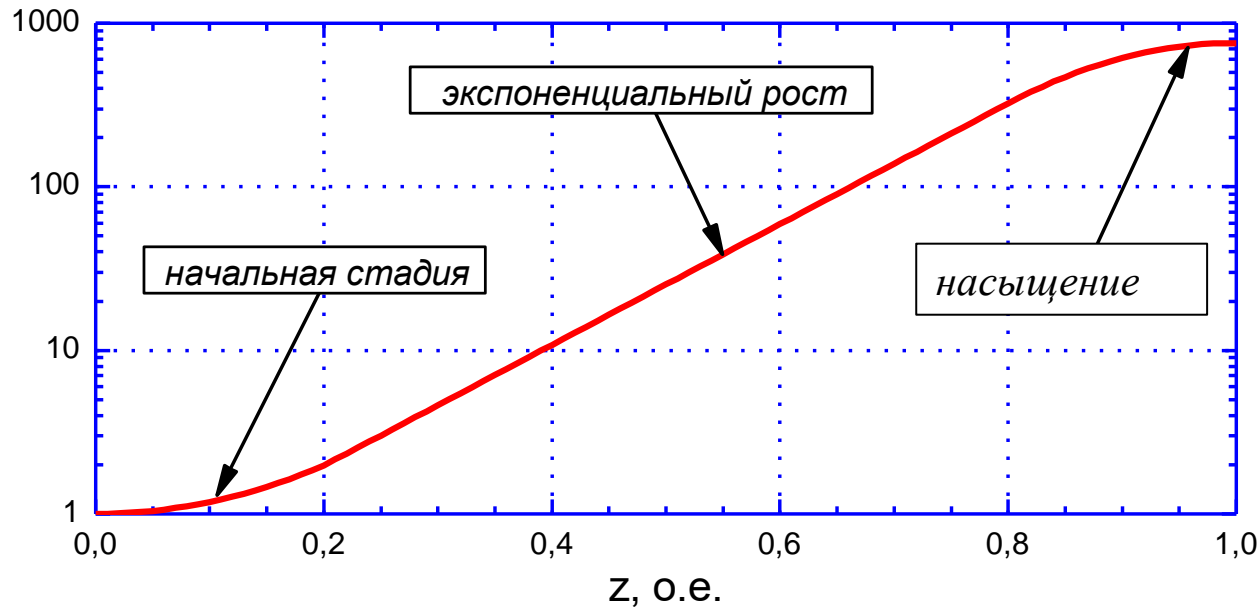
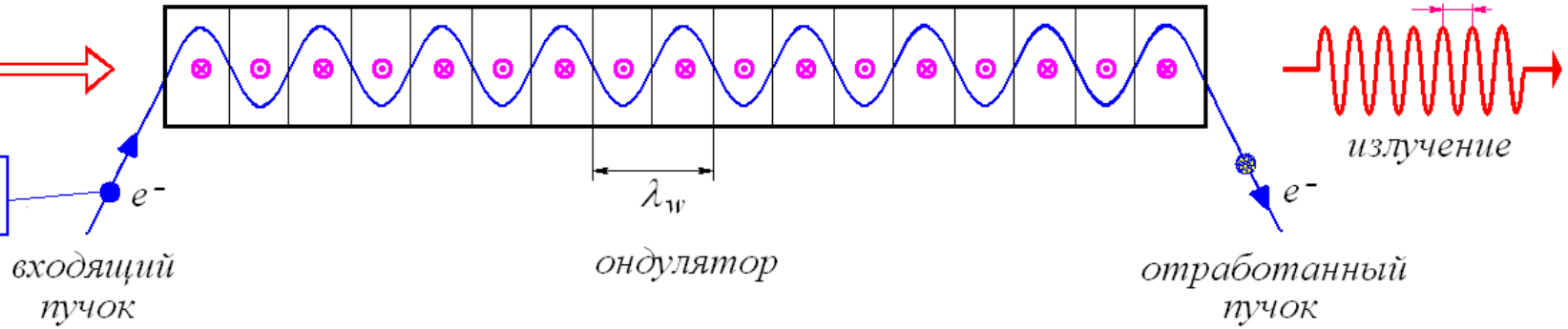


# Переход от ондулятора к ЛСЭ

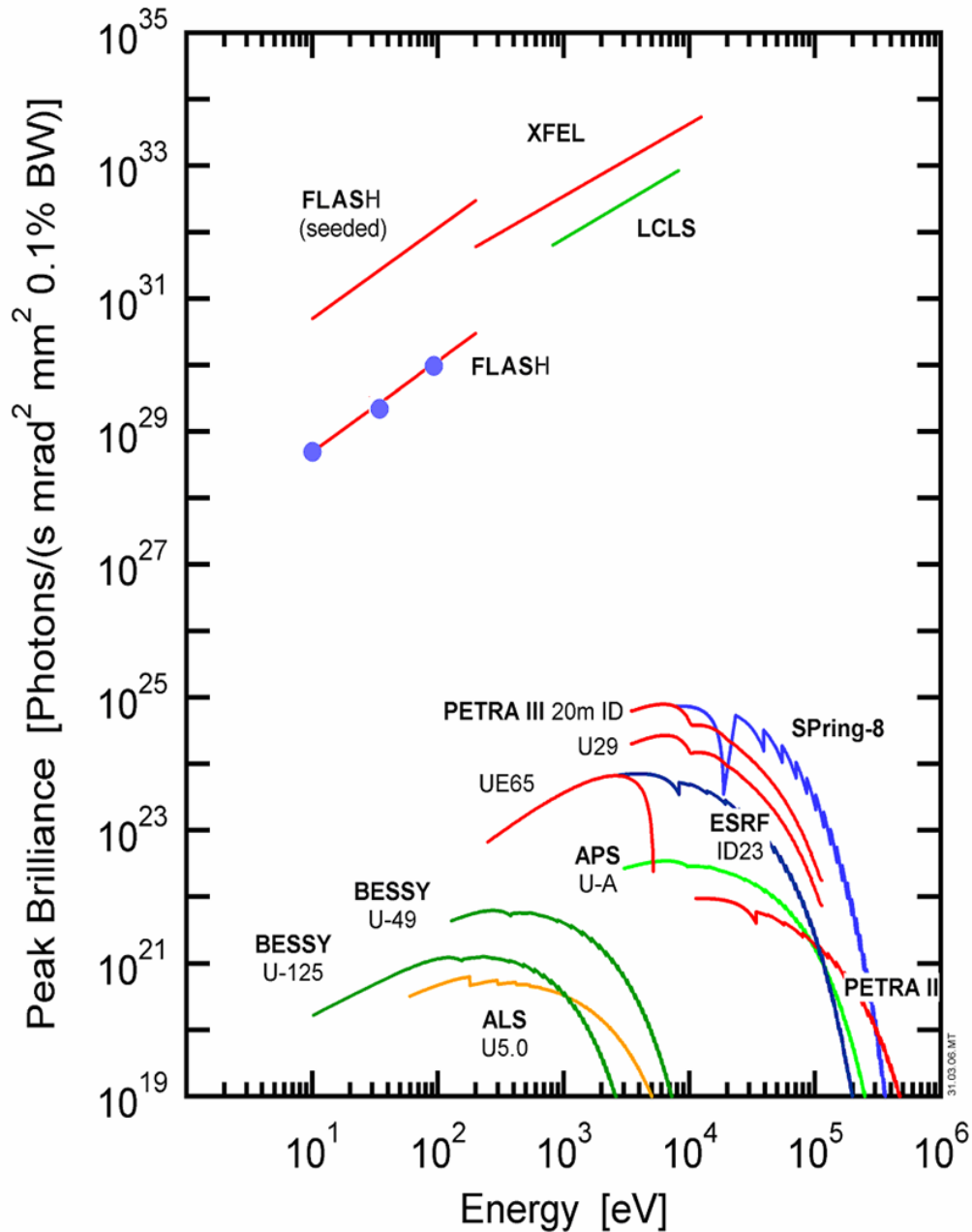


внешний источник

начальные шумы



# Спектральная яркость источников СИ



# XFEL



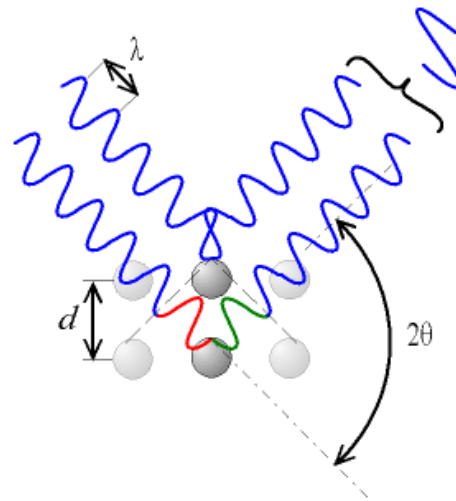
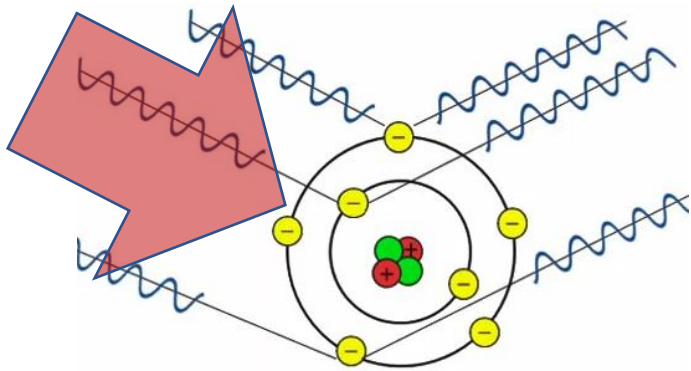
$$\lambda = 0,05 - 6 \text{ нм}$$
$$\tau \approx 100 \text{ фс}$$
$$f \approx 27 \text{ кГц}$$



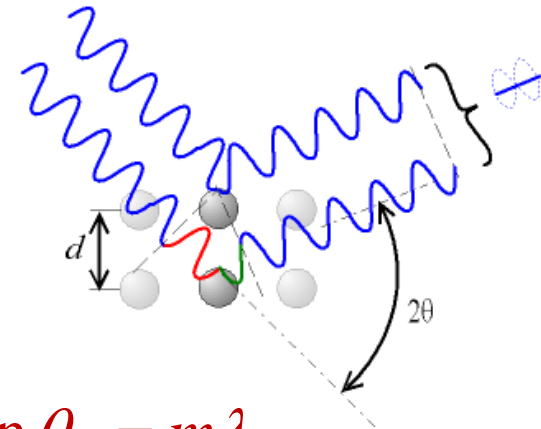
# Дифракция Брэгга (XRD – X-Ray refraction)

Дифракция (рассеяние) рентгеновского пучка – возникновение вторичных отклонённых пучков той же длины волны в результате взаимодействия первичного пучка с электронами вещества.

Простейший случай – дифракция на прямолинейной цепочке атомов

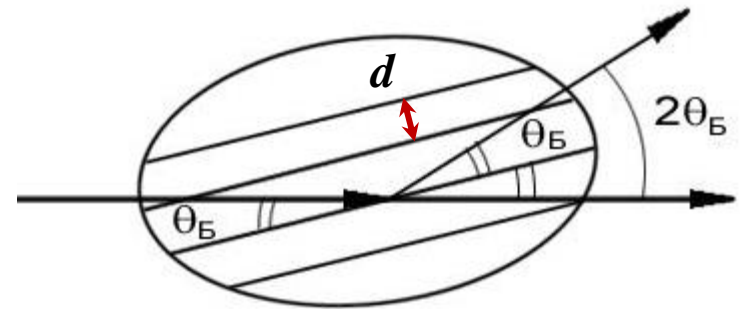


*Рассеянные от разных слоёв пучки интерферируют*



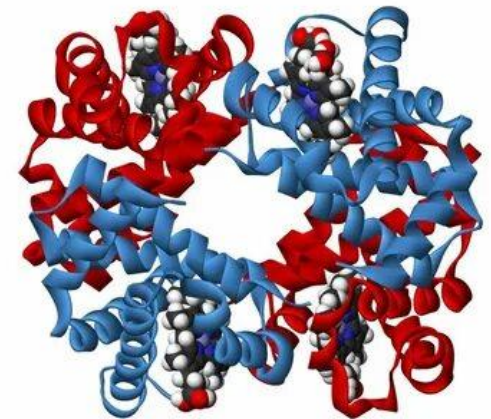
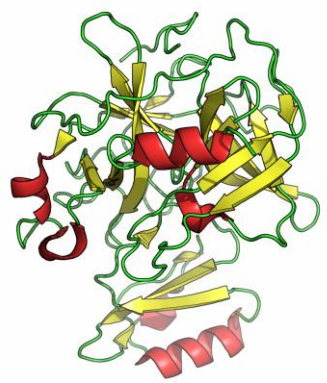
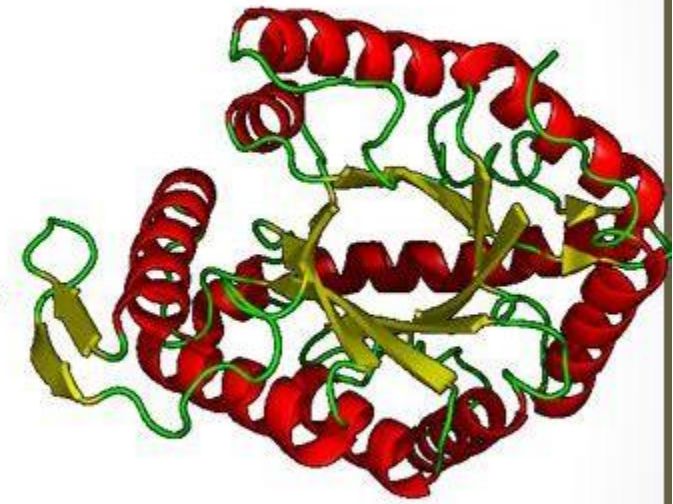
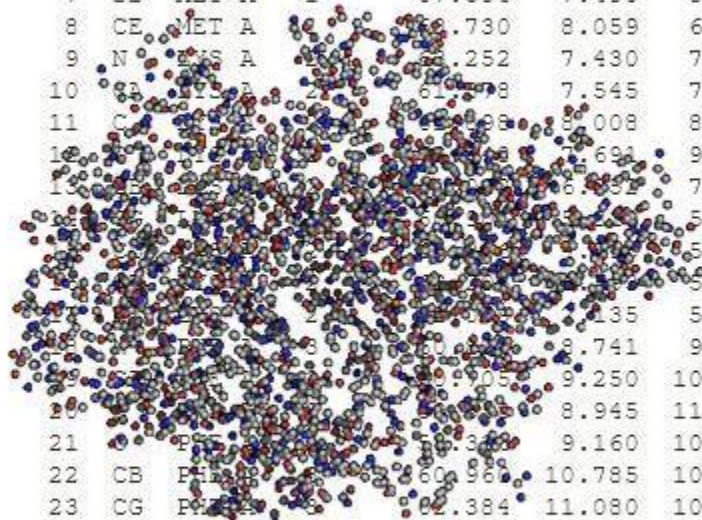
$$2d \sin \theta_B = m\lambda$$

- ✓ Неинвазивная диагностика
- ✓ Высокое пространственное разрешение
- ✓ Необходима кристаллическая решётка



# Трёхмерные структуры белковых молекул

ATOM	1	N	MET	A	1	65.266	8.056	4.367
ATOM	2	CA	MET	A	1	65.196	8.000	5.806
ATOM	3	C	MET	A	1	63.737	8.186	6.154
ATOM	4	O	MET	A	1	63.070	8.989	5.509
ATOM	5	CB	MET	A	1	66.023	9.076	6.485
ATOM	6	CG	MET	A	1	66.327	8.769	7.909
ATOM	7	SD	MET	A	1	67.596	7.490	8.110
ATOM	8	CE	MET	A	1	66.730	8.059	6.902
ATOM	9	N	GLY	A	2	61.252	7.430	7.142
ATOM	10	CA	GLY	A	2	61.478	7.545	7.562
ATOM	11	C	GLY	A	2	61.008	8.995	8.995
ATOM	12	O	GLY	A	2	61.691	9.728	9.728
ATOM	13	CB	GLY	A	2	61.352	7.425	7.425
ATOM	14	CG	GLY	A	2	61.961	5.961	5.961
ATOM	15	CD	GLY	A	2	61.771	5.771	5.771
ATOM	16	CE	GLY	A	2	61.508	5.508	5.508
ATOM	17	N	LEU	A	3	61.135	5.327	5.327
ATOM	18	CA	LEU	A	3	61.741	9.341	9.341
ATOM	19	C	LEU	A	3	61.905	9.250	10.658
ATOM	20	O	LEU	A	3	61.945	8.945	11.298
ATOM	21	CB	PHE	A	3	61.384	9.160	10.669
ATOM	22	CG	PHE	A	3	60.984	10.785	10.678
ATOM	23	CD1	PHE	A	3	62.384	11.080	10.274
ATOM	24	CD2	PHE	A	3	63.412	10.949	11.211
ATOM	25	CE1	PHE	A	3	62.659	11.435	8.954
ATOM	26	CE2	PHE	A	3	64.734	11.202	10.844
ATOM	27	CZ	PHE	A	3	63.980	11.000	10.844
ATOM	28	N	GLY	A	4	64.988	11.000	10.844
ATOM	29	CA	GLY	A	4	59.421	11.000	10.844
ATOM	30	CB	GLY	A	4	58.224	11.000	10.844





# Дифракция Лауэ

В дифракции Лауэ рентгеновский пучок не монохроматичен, но угол падения не варьируется.

При этом условия интерференции для разных кристаллографических осей выполняются на разных длинах волн. Это приводит к появлению ярких точек на фотопластинах.

