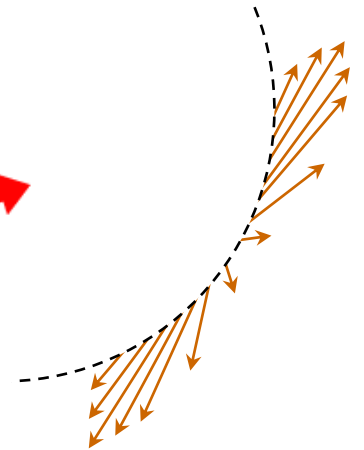
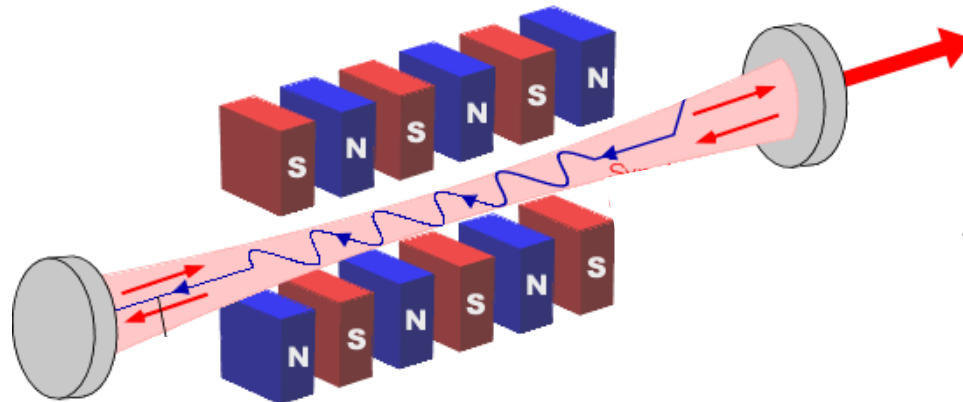
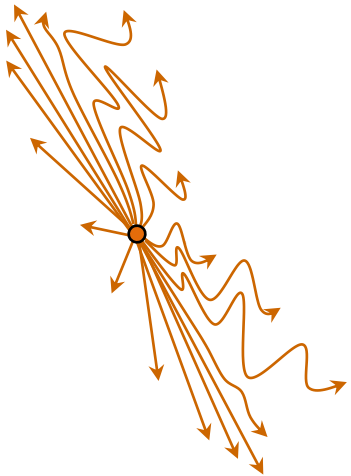
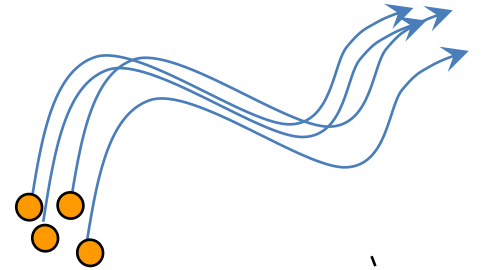
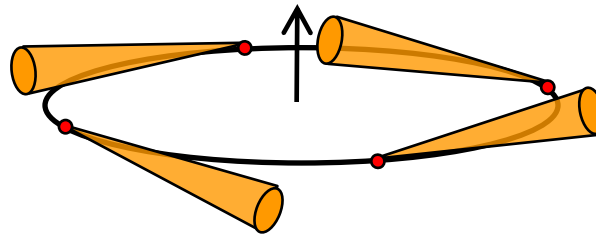
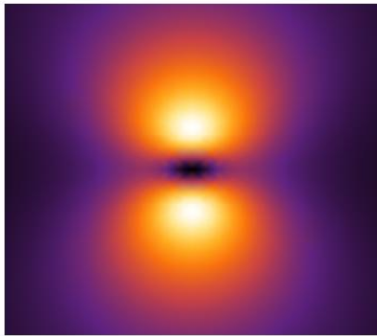
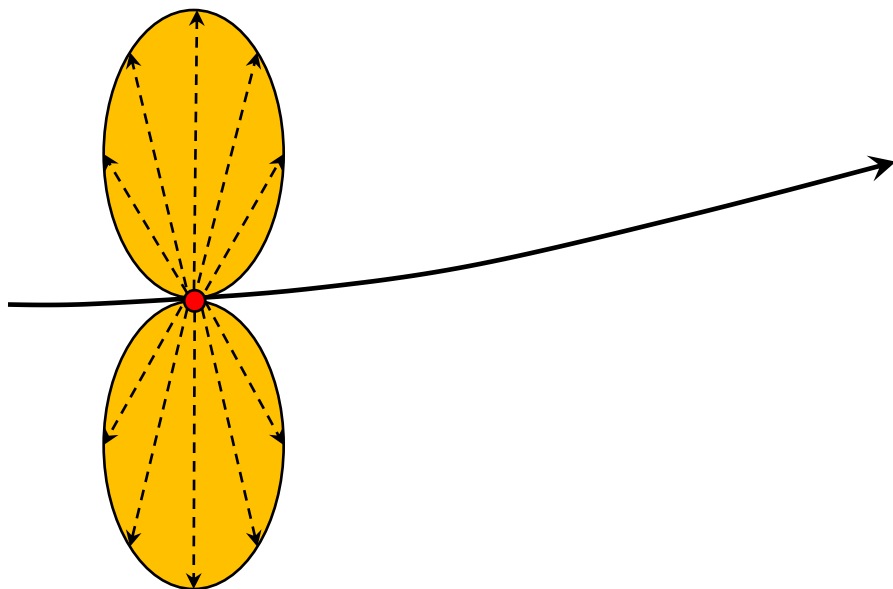




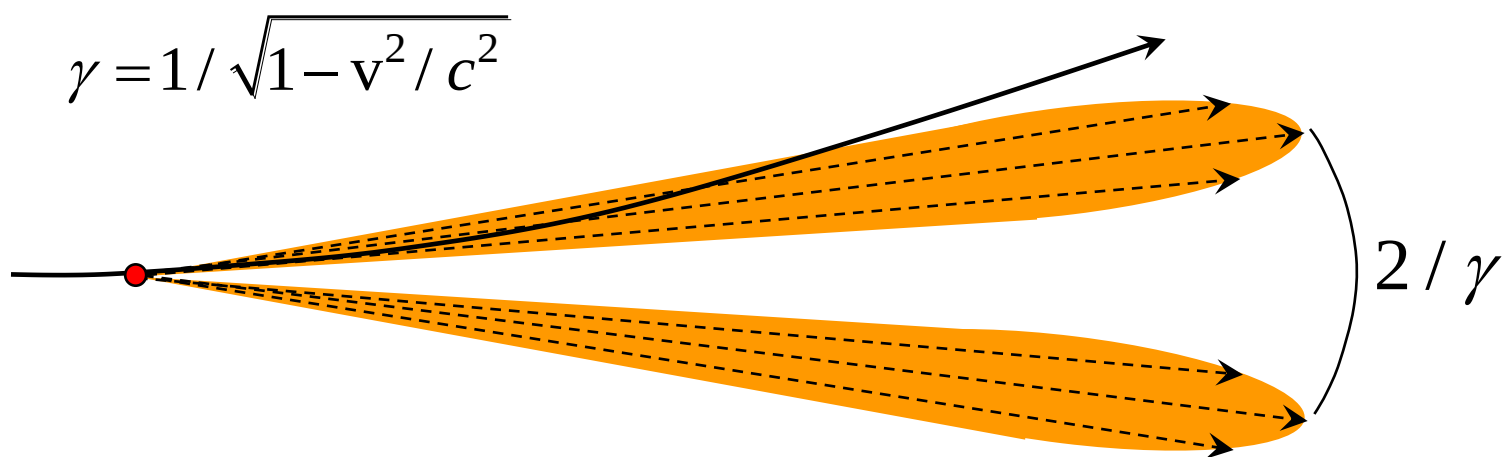
ДЖЕРЕЛА ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ НА ОСНОВІ РЕЛЯТИВІСТСЬКИХ ЕЛЕКТРОНІВ



КУТОВИЙ РОЗПОДІЛ ВИПРОМІНЮВАННЯ



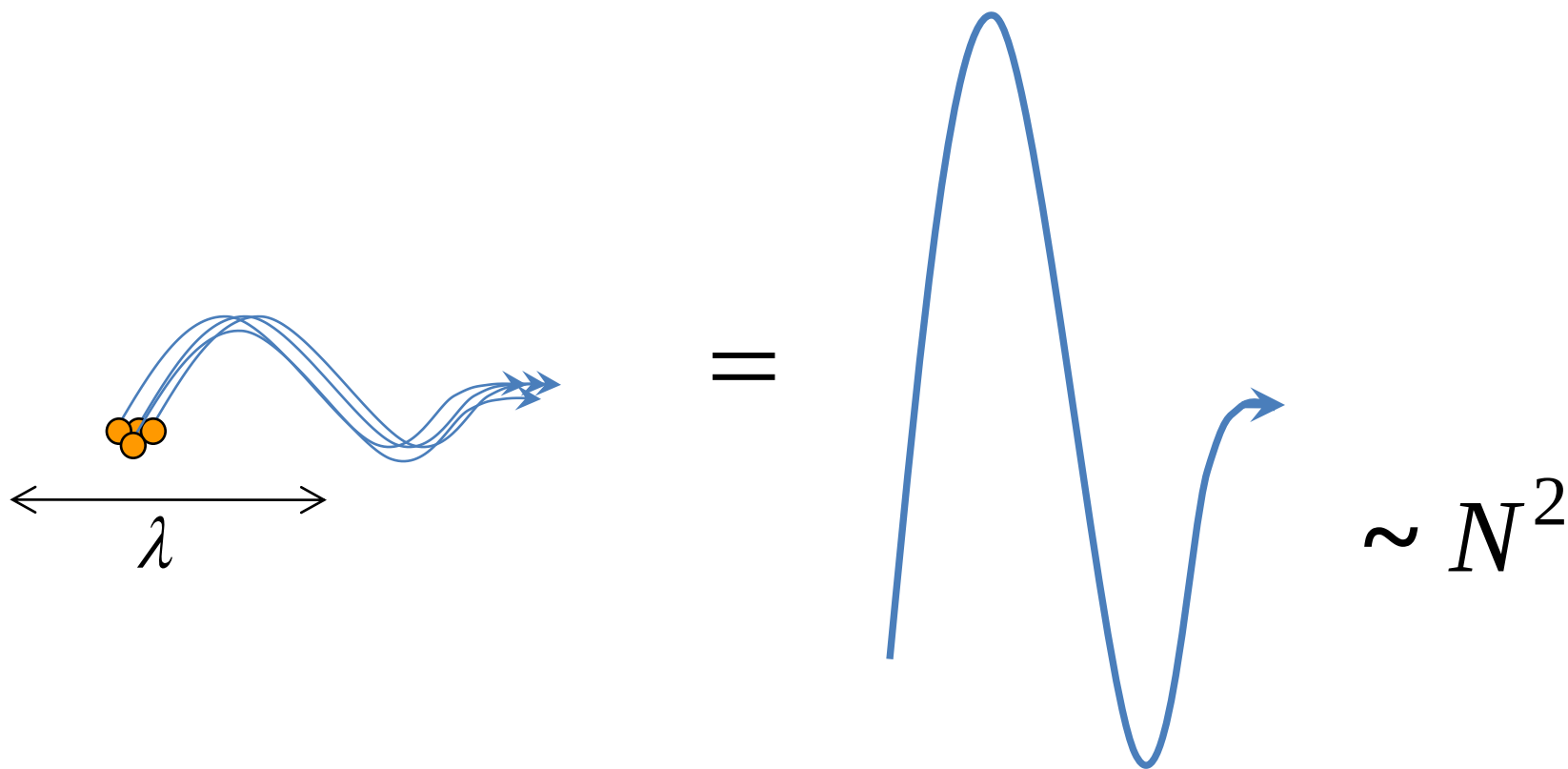
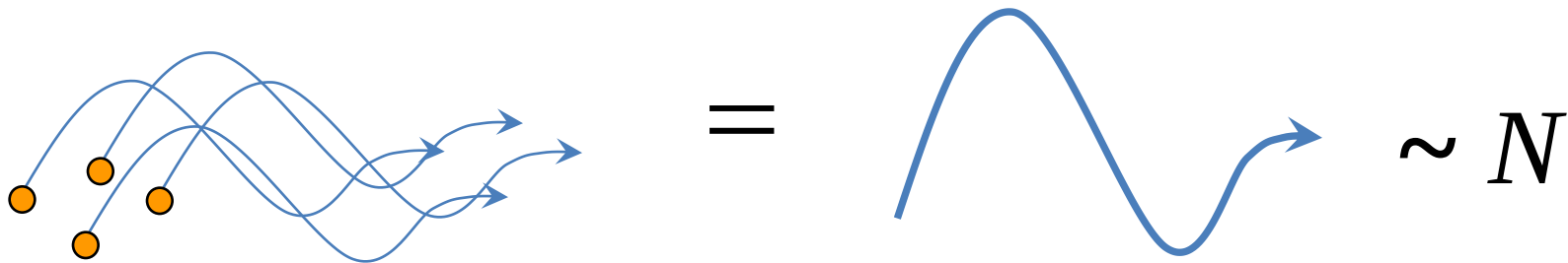
$$v \ll c$$



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

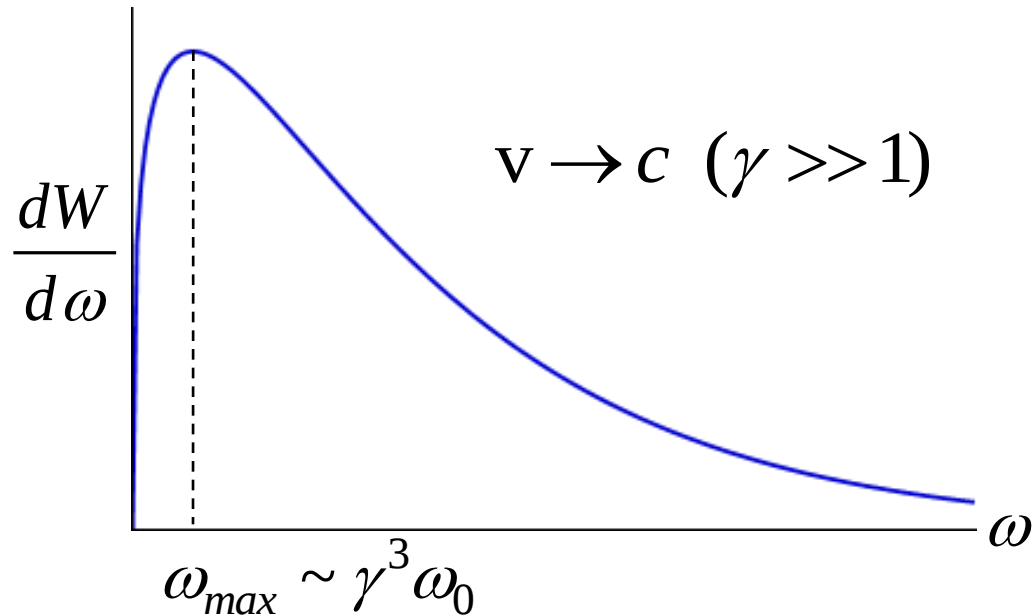
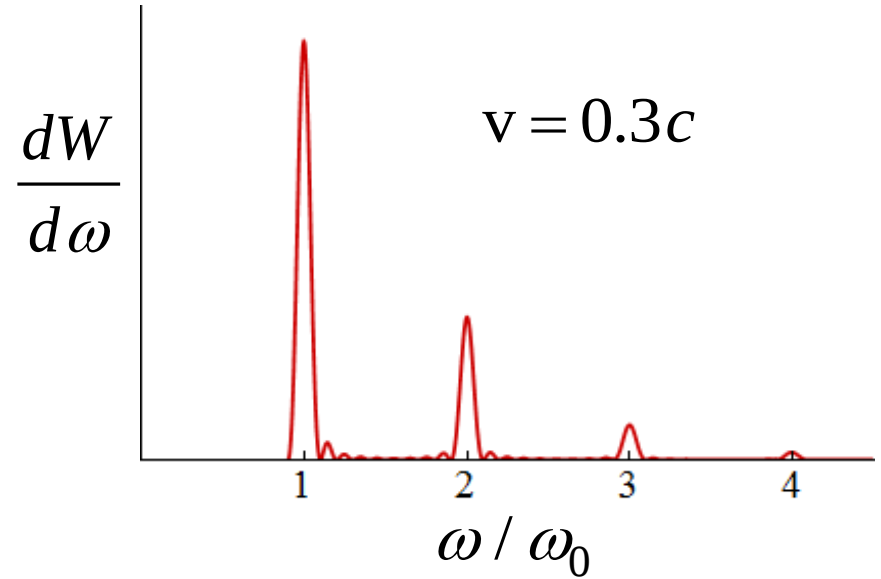
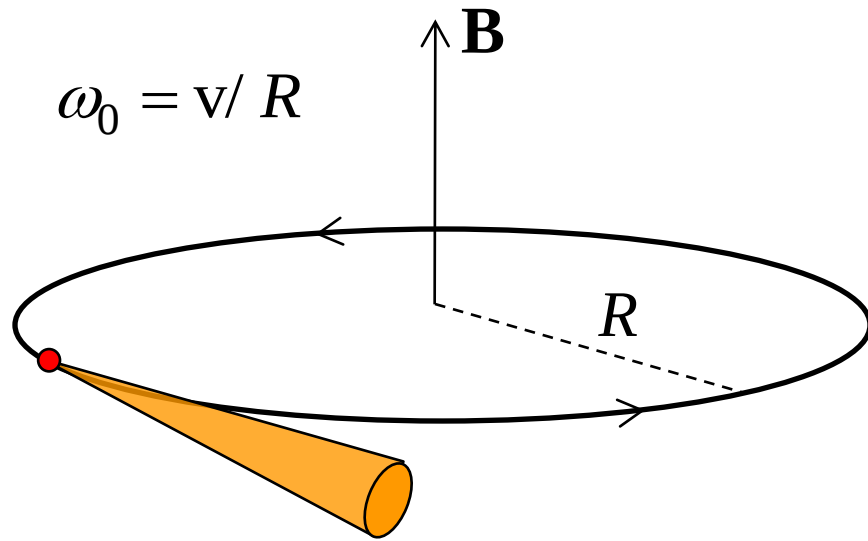
$$v \rightarrow c$$

КОГЕРЕНТНИЙ ЕФЕКТ У ВИПРОМІНЮВАННІ

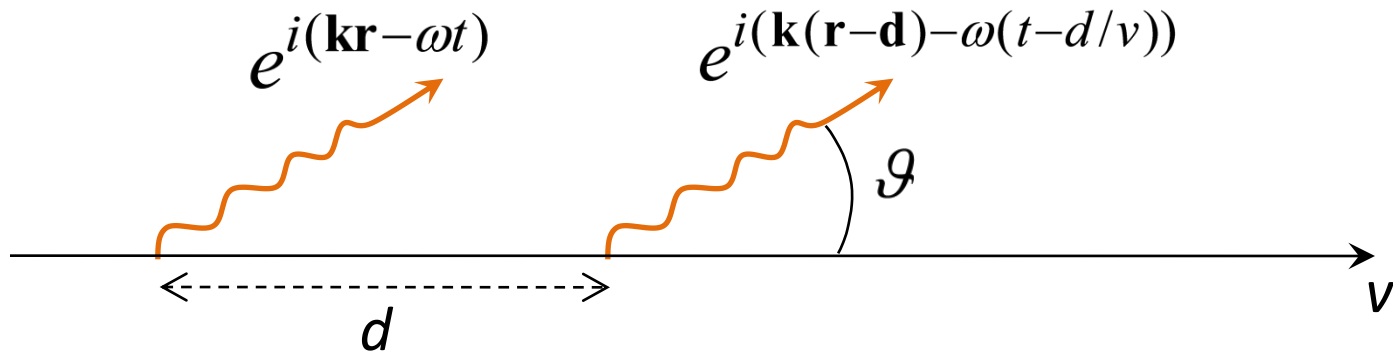


СИНХРОТРОННЕ ВИПРОМІНЮВАННЯ

Якщо $R \sim 5m$,
то $\omega_0 \sim 50 \text{ MHz} \rightarrow 30m$



Довжина формування випромінювання



Послідовно випромінені хвилі інтерферують конструктивно, якщо різниця фаз $\Delta\varphi$ між ними менша за ~ 1

$$\Delta\varphi = \frac{\omega d}{v} - \mathbf{k}\mathbf{d} = 1 \quad \Rightarrow \quad \frac{\omega d}{v} - \frac{\omega d \cos \vartheta}{c} = 1$$

$$\mathbf{d} = d \mathbf{e}_v$$

$$\mathbf{k} = \omega \mathbf{n} / c$$

$$d\mathbf{n} = d \cos \vartheta$$

ділянка траєкторії частинки, яка робить внесок у випромінювання:

$$d = \frac{v}{\omega[1 - (v/c) \cos \vartheta]} \equiv l_F$$

при $\gamma \gg 1$:

$$1 - (v/c) \cos \vartheta \approx (1 - v/c + \vartheta^2 / 2) \approx (\gamma^{-2} + \vartheta^2) / 2$$

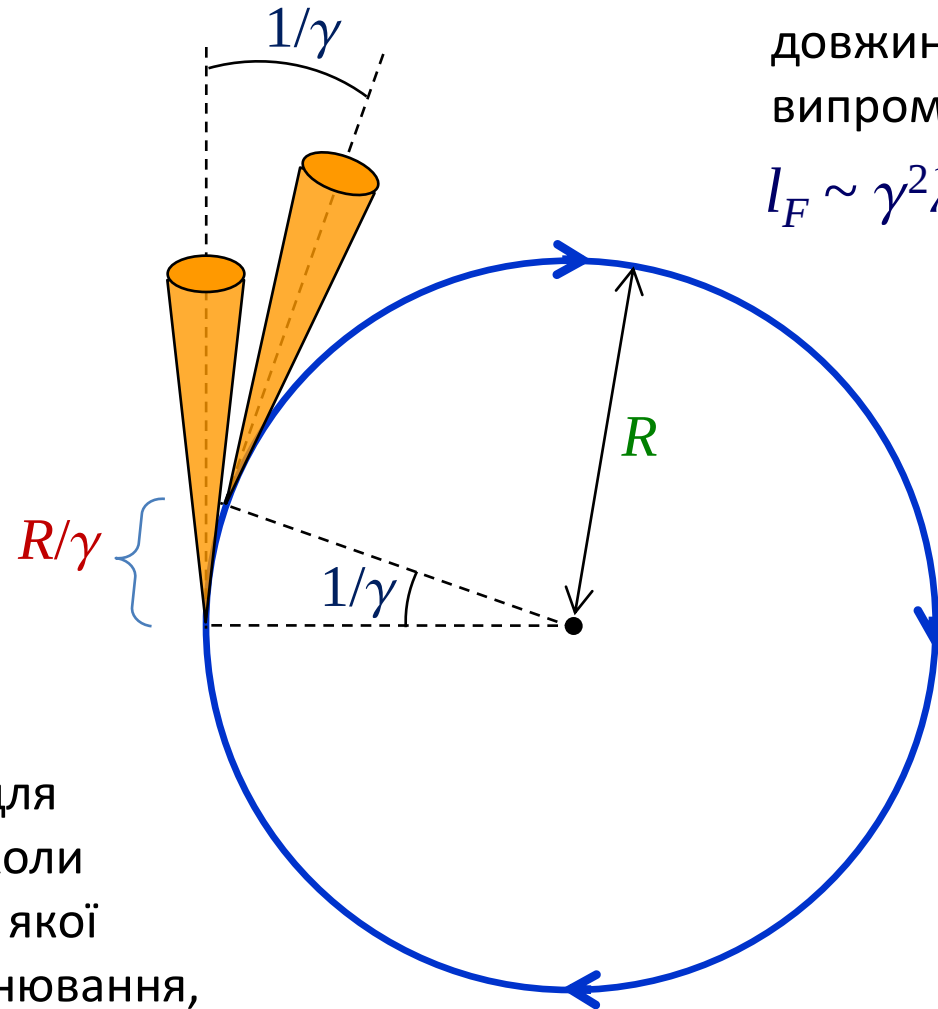
$$1 - \frac{v}{c} = \frac{(1 - \frac{v}{c})(1 + \frac{v}{c})}{1 + \frac{v}{c}} \approx \frac{1 - \frac{v^2}{c^2}}{2} = \frac{1}{2\gamma^2}$$

$$l_F \approx \frac{2c}{\omega(\gamma^{-2} + \vartheta^2)}$$

довжина
формування
випромінювання

$$\text{при } \vartheta \sim 1/\gamma : l_F \sim \gamma^2 c / \omega$$

Оцінка частоти максимуму спектра синхротронного випромінювання



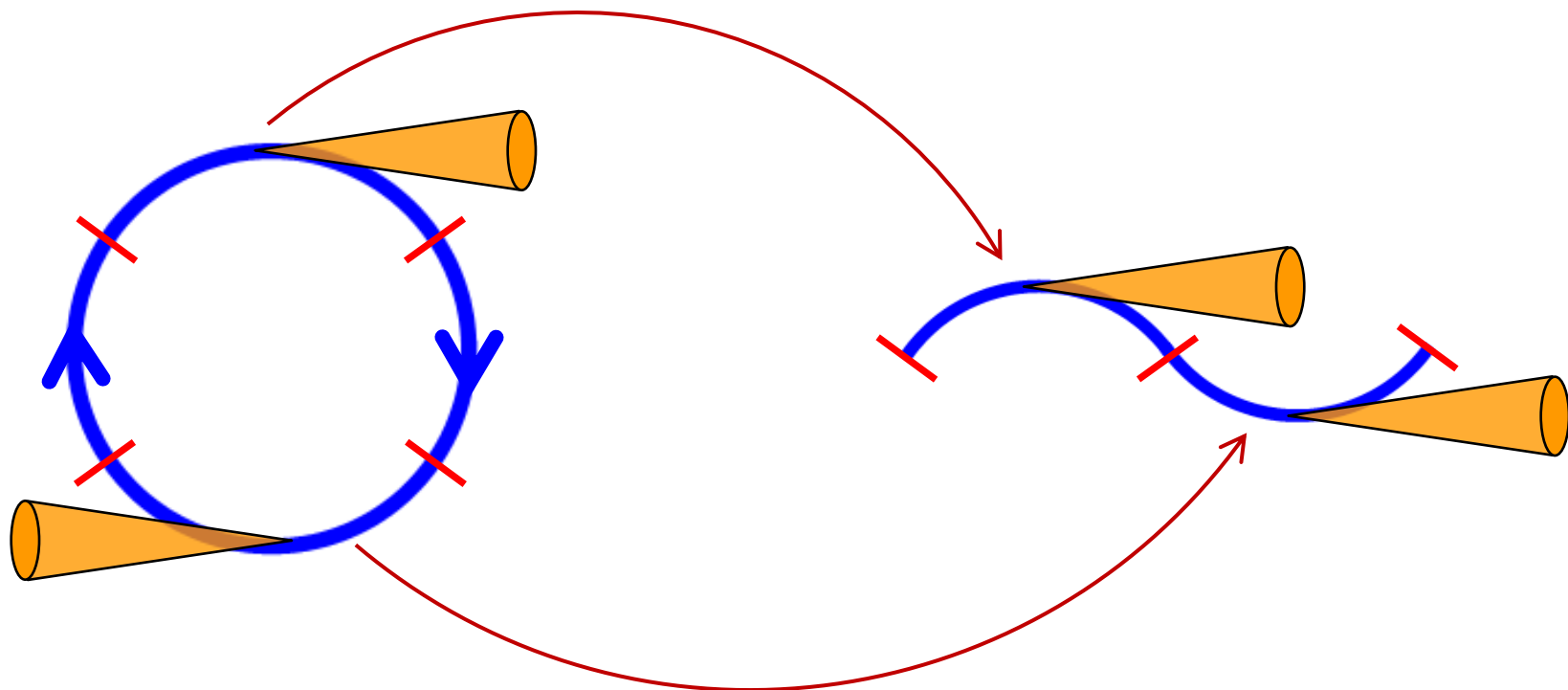
довжина формування
випромінювання:

$$l_F \sim \gamma^2 \lambda \sim \gamma^2 c / \omega$$

оптимальна умова для
випромінювання – коли
ділянка траєкторії, з якої
збирається випромінювання,
збігається з l_F :

$$R/\gamma \sim l_F \sim \gamma^2 c / \omega \quad \longrightarrow \quad \omega \sim \gamma^3 c / R = \gamma^3 \omega_0$$

ОНДУЛЯТОРНЕ ВИПРОМІНЮВАННЯ



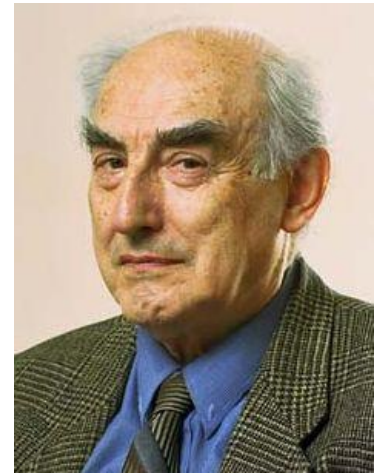
$\alpha < 1/\gamma$ ондулятор

$\alpha > 1/\gamma$ віглер α

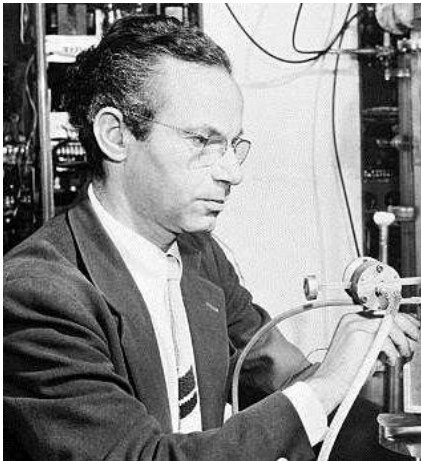
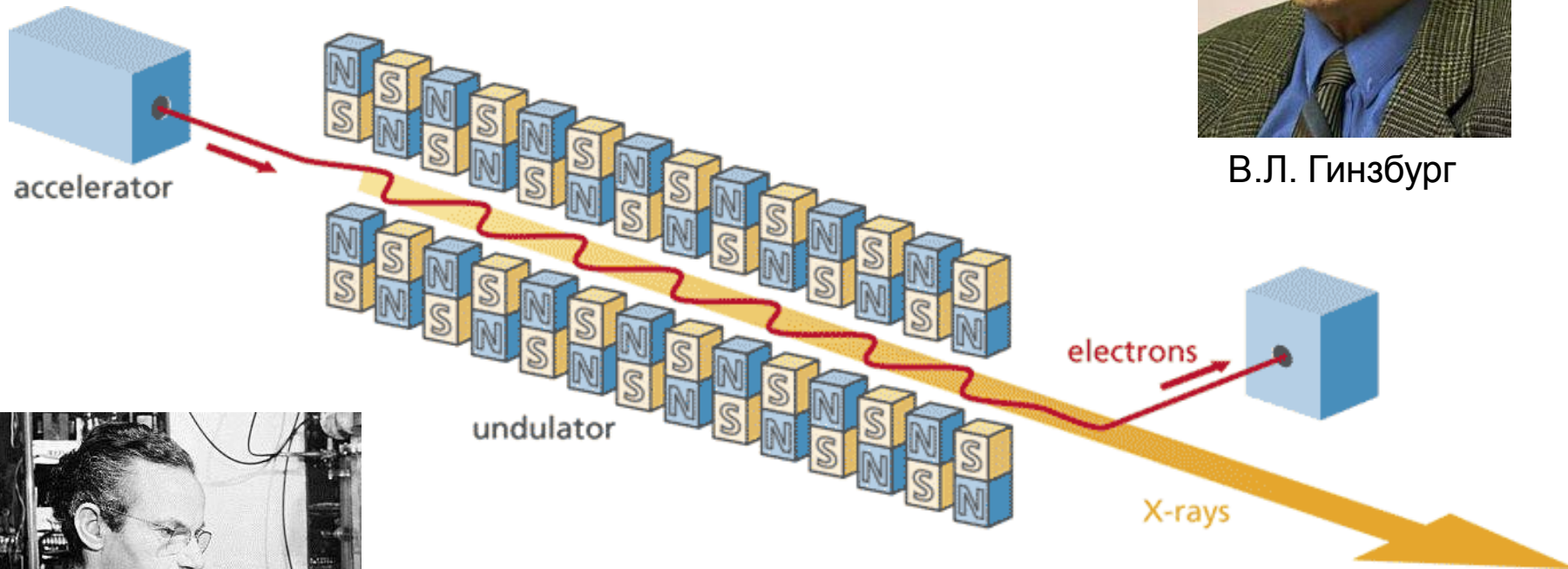


ОНДУЛЯТОРНЕ ВИПРОМІНЮВАННЯ

Теоретично розглянуто В.Л. Гінзбургом у 1947



В.Л. Гинзбург

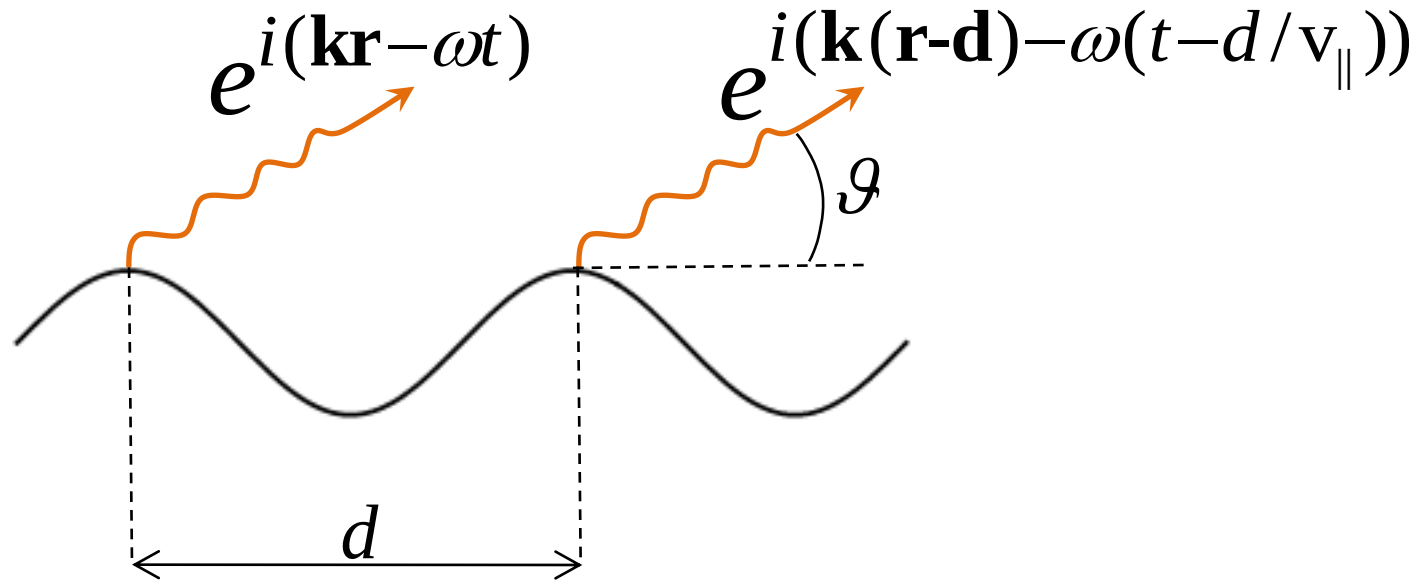


H. Motz

Перший ондулятор побудовано Г. Мотцем зі співробітниками у Стенфорді у 1953

+ інтенсивність
+ монохроматичність

ОНДУЛЯТОРНЕ ВИПРОМІНЮВАННЯ



$$\Delta\varphi = \mathbf{k}\mathbf{d} - \omega d / v_{\parallel} = 2\pi m \quad m = 1, 2, 3, \dots$$

$$\mathbf{k} = \omega \mathbf{n} / c$$

$$\omega_0 = 2\pi v_{\parallel} / d$$

$$\omega = \frac{m\omega_0}{1 - (v_{\parallel} / c) \cos \vartheta} \approx \frac{2m\omega_0}{\gamma^{-2} + \vartheta^2}$$

ОНДУЛЯТОРНЕ ВИПРОМІНЮВАННЯ

$$\omega \approx \frac{2\omega_0}{\gamma^{-2} + \vartheta^2}$$

Найбільша частота при $\vartheta = 0$

$$\omega_{max} \approx 2\omega_0\gamma^2$$

Інтенсивність (для даного кута спостереження)

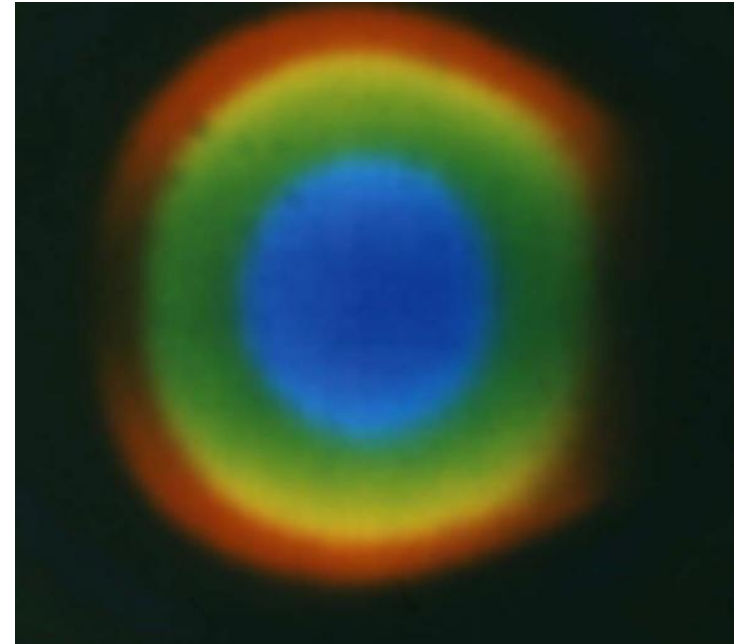
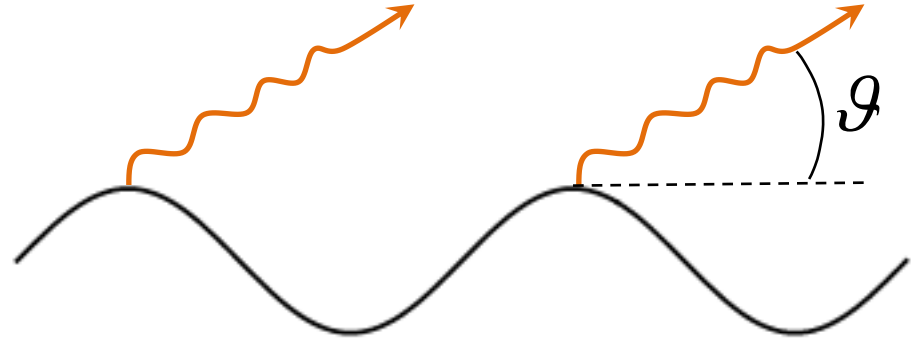
$$\sim n^2$$

Імпульс із частотою ω
зосереджений всередині кута

$$\sim 1/(\gamma\sqrt{n})$$

Інтенсивність усього імпульсу при даному ω

$$\sim n$$

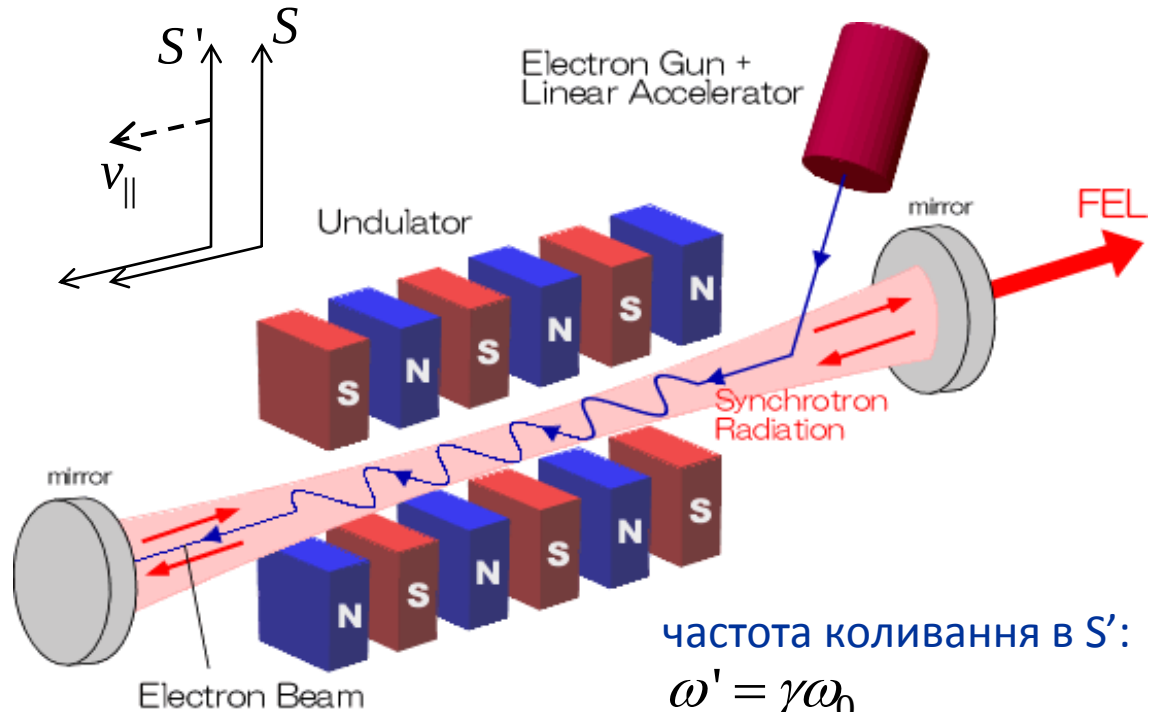


ЛАЗЕР НА ВІЛЬНИХ ЕЛЕКТРОНАХ (ЛВЕ) (Free-Electron Laser – FEL)



Створений Джоном Мейді у
Стенфорді у 1971

діапазон частот від інфрачервоного ($500 \mu\text{m}$ або 0.002 eV) до рентгенівського ($1 \text{ \AA}$ або 10 keV)



частота коливання в S' :

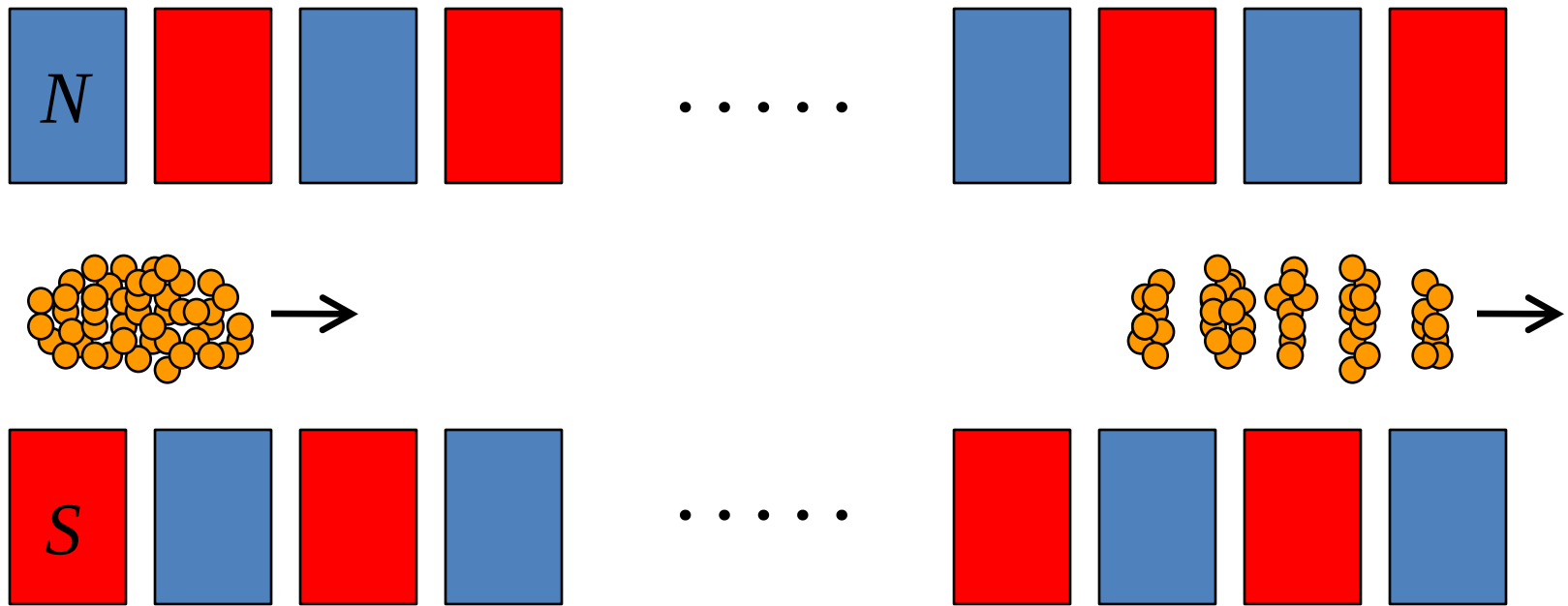
$$\omega' = \gamma\omega_0$$

частота хвилі в S' :

$$\begin{aligned}\omega' &= \gamma\omega(1 - \beta \cos \vartheta) = \\ &= \gamma(2\omega_0\gamma^2)(1 - \beta) = \\ &= \gamma(2\omega_0\gamma^2)(1/2\gamma^2) = \\ &= \gamma\omega_0\end{aligned}$$

Принцип роботи: в ондулятор запускається «затравочна» хвиля з резонансною частотою $\omega \approx 2\omega_0\gamma^2$, яка підсилюється вимушеним ондуляторним випромінюванням (ОВ) електронів; для «затравки» можна використовувати безпосередньо ОВ

ЛАЗЕР НА ВІЛЬНИХ ЕЛЕКТРОНАХ



В **інфрачервоному** діапазоні застосовується також багаторазова циркуляція хвилі між дзеркалами

В **ультрафіолетовому** та **рентгенівському** діапазонах підсилення випромінювання виключно за рахунок банчування пучка електронів і, як наслідок, когерентного ефекту (працює також у режимі SASE – self-amplified spontaneous emission)

ПЕРЕВАГИ ЛВЕ

- 1) дозволяє отримати випромінювання на декілька порядків інтенсивніше ондулятора
- 2) єдине джерело когерентного випромінювання в інфрачервоному (10-500 μm), ультрафіолетовому і далекому ультрафіолетовому діапазонах
- 3) можливість регулювання частоти випромінювання (зміна параметрів установки або енергії пучка)
- 4) відсутність активного середовища $\rightarrow$ немає обмеження на потужність і частоту пропускання

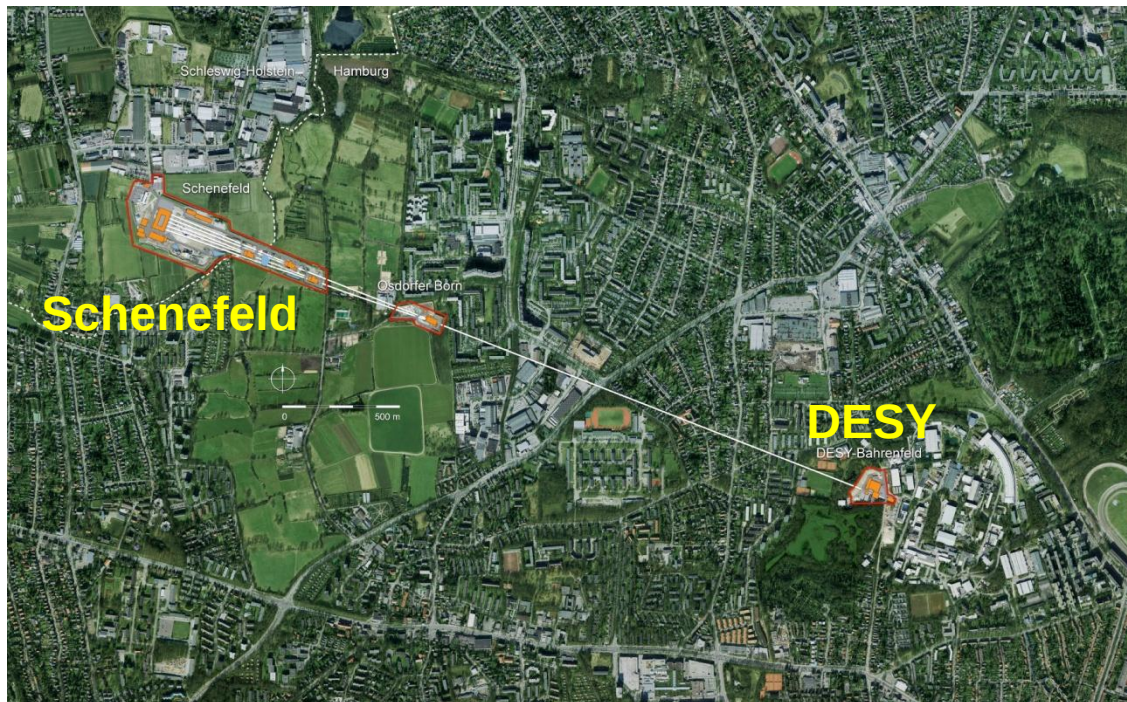
EUROPEAN X-RAY FREE-ELECTRON LASER

Найпотужніший рентгенівський ЛВЕ у світі – введений в експлуатацію у 2017

довжина установки 3.4 км

довжини хвиль: 0.05 - 4.7 нм (або 0.25 – 25 keV)

тривалість імпульсу 100 fs



3D зображення наноструктур, молекулярної структури вірусів, білкових молекул, «відеозйомка» швидких хімічних реакцій та ін.