

FEL の原理

FEL の発振は、非線形過程による自己組織化現象の一種です。

FEL が発振するための電子ビームの条件

- 高い電流密度
 - ▶ 電子パンチを時間方向に圧縮 (パンチ圧縮) して、ピーク電流の高い電子ビームを作ります。
- 個々の電子のエネルギーが良く揃っていること
 - ▶ パンチ圧縮の際にエネルギー幅が広がらないように工夫します。
- 個々の電子の運動方向が良く揃っていること
 - ▶ 低エミッタンスの電子源を用いるとともに、ビームの質が悪化しないように輸送する必要があります。

成長過程

FEL 成長過程の各点での、((θ, p) 位相空間 での) 電子の動き

- 位相空間内での個々の電子の位置
- コヒーレント放射の振幅

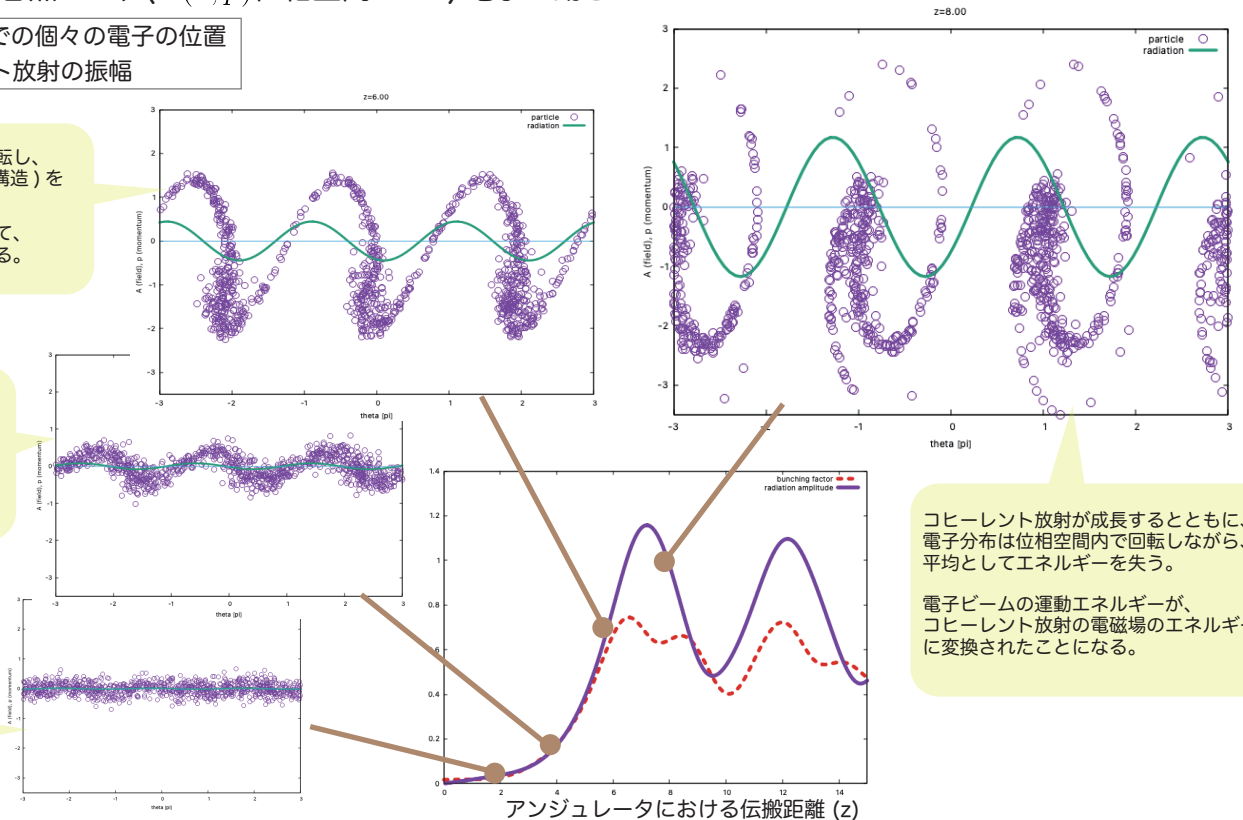
電子分布が位相空間内で回転し、密度分布 (マイクロパンチ構造) を生み出す。

マイクロパンチ構造によって、コヒーレント放射が成長する。

電子分布の僅かな偏りをきっかけに、コヒーレント放射が発生。

コヒーレント放射との相互作用によって、電子のエネルギー分布が変調を受ける。

初期状態は、エネルギー幅の狭い電子が一樣に分布した状態。



コヒーレント放射が成長するとともに、電子分布は位相空間内で回転しながら、平均としてエネルギーを失う。

電子ビームの運動エネルギーが、コヒーレント放射の電磁場のエネルギーに変換されたことになる。

FEL 発振過程の一次元運動方程式

$$\begin{aligned} \frac{d\theta_j}{dz} &= p_j \\ \frac{dp_j}{dz} &= -(\mathcal{A} e^{i\theta_j} + \text{c.c.}) \\ \frac{d\mathcal{A}}{dz} &= \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N e^{-i\theta_j} \end{aligned}$$

個々の電子は、エネルギー変化によって前後に移動する

個々の電子は、コヒーレント放射の電磁場との相互作用によって、エネルギー変化を受ける。

電子密度の濃淡分布によって、コヒーレント放射が発生する。

似た原理による身近な現象 (振り子の同期)

多数の振り子 (メトロノーム) が、共通の動くテーブルに乗っていて、振り子の変動の総和 (コヒーレントな動き) によってテーブルが反作用を受ける系を考えます。

初期状態では、それぞれの振り子がランダムに振動していたとしても、

振り子: 電子ビーム中の個々の電子
振り子の振動: 電子の位相空間での運動
テーブルの振動: コヒーレント放射

