

## SASE-FEL

新竹 積 理化学研究所, 播磨研究所, 電子ビーム光学研究室  
〒679-5148 兵庫県佐用郡三日月町光都 1-1-1  
E-mail: shintake@spring8.or.jp

SASE-FEL (サセ・FEL) は, 近い将来, 夢のX線波長のレーザーが実現すると期待される新しい方式の自由電子レーザー (FEL: Free Electron Laser) です。ちなみに SASE は, Self-Amplified Spontaneous Emission の略であり, 日本語にすると自己増幅型自然放射光となりますが, 普段は簡単に「サセ」と呼んでいます。

動作原理を理解するには, アンジュレータ放射を知る必要があります, それには, まず私どものホームページ<sup>2)</sup>から Radiation2D というソフトウェアをダウンロードしましょう (フリーソフトです)。さてソフトを起動すると Fig. 1 の画面が現れます。中央の電子 (赤丸) をマウスで左クリックしたまま, 上下左右に移動させると, 電子から四方八方に伸びていた青い電気力線が, マウスの動きにしたがって折れ曲がり, これが四方へ広がっていくのが見られます。これが電磁波, つまり電波です。「電子の電気力線が

折れ曲がったものが電磁波」なのです。折れ曲がりの波が伝わる速さが「光の速さ」なのです。電気力線は磁力線とともに, ファラデー (Michael Faraday, 1791~1867) が空間を伝わる電気, 磁気の力を表現するために導入したものです。電気力線は, その名のとおりに「力」を伝えるため, その先に電荷があると, 電荷を動かそうとする力を発生します。

つぎにアンジュレータ。Fig. 2 のように, 多数の永久磁石を交互の磁場を発生するように配列し, この中へ電子を入射させると電子は磁場と垂直な方向にサイン波状に振動し, 「前方方向にアンジュレータ放射光を発生します」とよく解説書に書かれていますが, SASE-FEL を理解するには, そのメカニズムを詳細に見てみる必要があります。ちなみにアンジュレータとは英語の波動, うねりという意味の undulation が語源。さてアンジュレータの中を走る

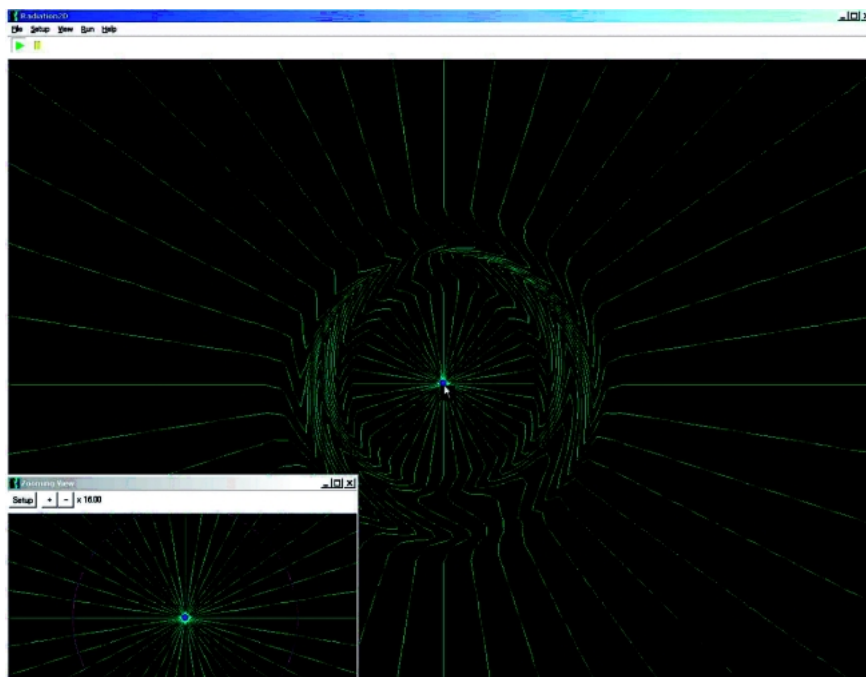


Fig. 1 Graphic by the “Radiation2D” simulator. Moving the electron (the center point) by a mouse, electric field lines (blue color) follow its movement. The deformation of the electric field line propagates outward as the electromagnetic radiation. Radiation2D is available from <http://www-xfel.spring8.or.jp>.

## Undulator

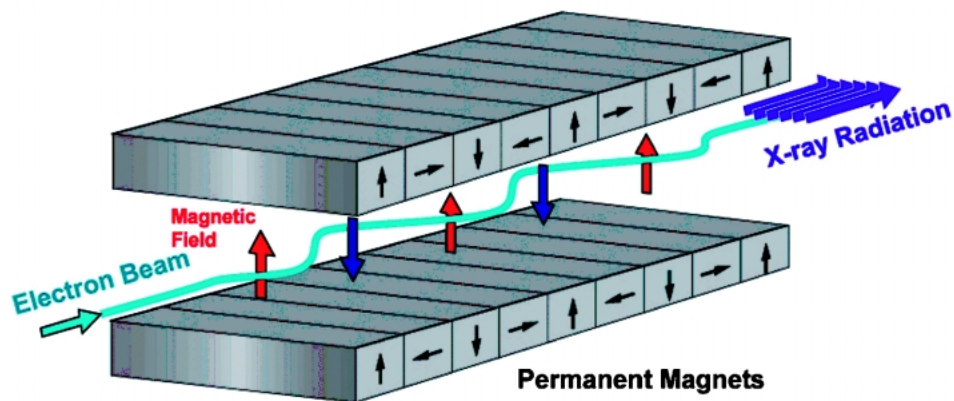


Fig. 2 The Undulator. A pair of magnetic array creates periodic magnetic field of vertical oriented, in which the ultra-relativistic electron beam is injected and undulates transversely. It radiates focused quasi-monochromatic radiation in the beam direction.

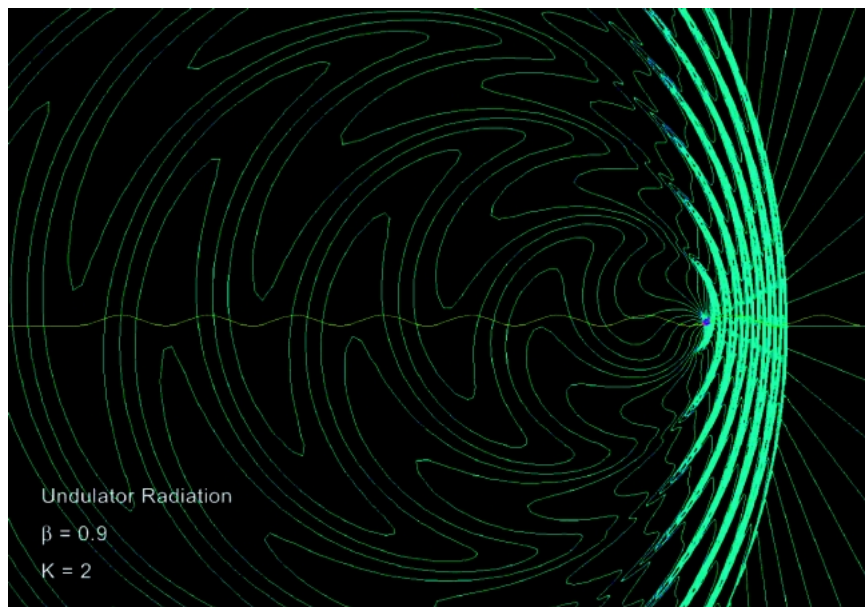


Fig. 3 The undulator radiation simulated by Radiation2D. Dense short wavelength radiation is accumulated in front of the electron along its undulating trajectory.

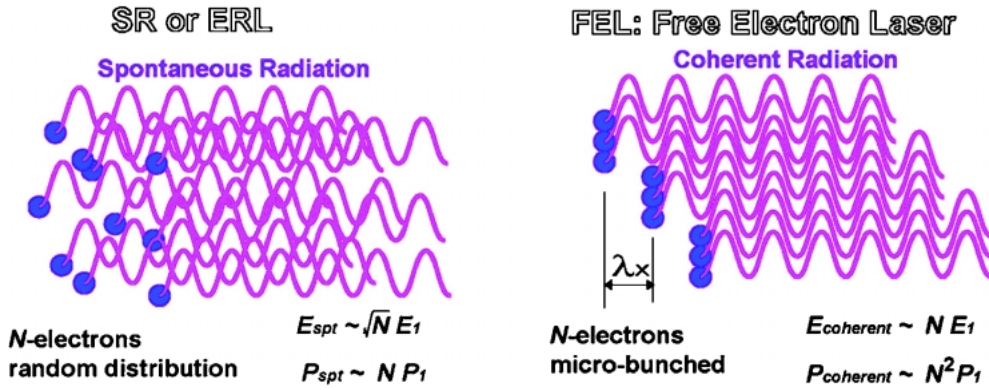
電子に遅れないようにいっしょに並行移動しながら眺めると、電子は上下（磁場に垂直な方向）に振動しており、これがもとでおそらくは、例のダイポール放射をするはずで。そこで Radiation2D にて、Setup/Trajectory/Undulator を選ぶと Fig. 3 のように、確かに電子は曲がるたびにダイポール放射をするのですが、四方八方に広がらず、前方方向にエネルギーが集中します。これがアンジュレータ放射です。

前方の波長はドップラー効果によって短くなっています。ご存知のように、音波を含め波動は、その波源が移動すると前方方向で波長が短くなります。つまり電子は曲がるたびに球面波を出しますが、電子がつねにそれを追いか

けるため、次に波をだすと、波面と波面との距離が短くなり、波長が短縮されます。アンジュレータ放射光の波長（軸上前方）は、このドップラー効果から簡単に計算でき、

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

となります。ここで、 $\lambda_u$  はアンジュレータ磁場の周期長、 $\gamma$  は電子のエネルギーです。 $K$  はアンジュレータの強さをあらわす規格化したパラメータであり通常  $K=1\sim 2$  です。これは、アンジュレータの磁場が強くなると、電子が横方向へ大きく蛇行するために、進行方向の速度が低下し



**Fig. 4** (Left) Spontaneous radiation: A large number of electrons run in the electron accelerators as a bunched form. Since the electrons are randomly distributed, radiations sometimes cancel each others or build up, as a result, the average field intensity becomes proportional to the square-root of the particle number. (Right) Coherent radiation case: The electrons are regularly distributed with longitudinal displacement equal to the radiation wavelength, thus radiations interfere constructively. The total field intensity is proportional to the number of particles  $N$ , and the power becomes much higher than the spontaneous radiation.

て、ドップラー効果による波長圧縮率が低くなる効果を表します。例として、電子ビームのエネルギーを 6 GeV、アンジュレータの周期長を 15 mm,  $K$  を 1 とすると、 $\lambda_x = 1 \text{ \AA}$  となり X 線の波長が得られます。これが、我々が構想している X 線 FEL のパラメータです。

さて、いままで見てきた Radiation2D の電気力線は、1 個の電子が作り出すものでした。実際の加速器では多数の電子が一塊 (バンチ) となって走っておりますが、電子それぞれの位置はランダムです。したがってそれぞれの電子からのアンジュレータ放射光は、Fig. 4 左のように、位相がランダムとなるために、あるときは重ね合わせて強くなるが、あるときは逆符号でキャンセルして消しあうために、 $N_e$  個のすべての電子で合成した場合の電界強度とパワーの期待値は、

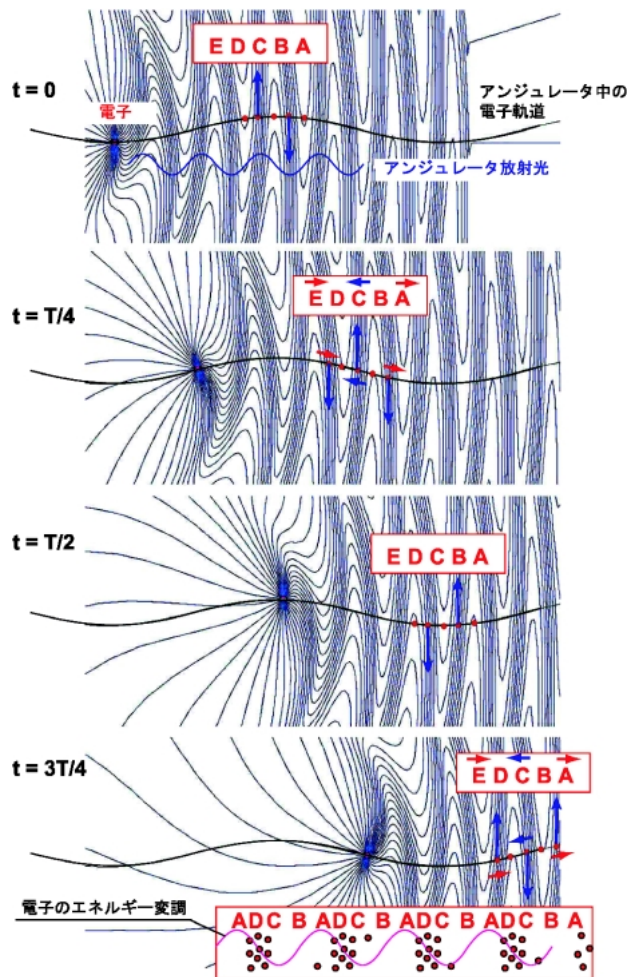
$$\begin{aligned} E_{spt} &= \sqrt{N_e} \cdot E_1 \\ P_{spt} &= N_e \cdot P_1 \end{aligned} \quad (2)$$

にしかありません。が、もし、Fig. 4 右のように、電子の位置を光の波長で規則正しくそろえることが出来れば、常に重ね合わせが成り立つために、電界とパワーは、

$$\begin{aligned} E_{coherent} &= N_e \cdot E_1 = \sqrt{N_e} \cdot E_{spt} \\ P_{coherent} &= N_e^2 \cdot P_1 = N_e \cdot P_{spt} \end{aligned} \quad (3)$$

となり、非常に強くなるはずですが。

ではどうやって電子の位置をそろえればよいか。Fig. 5 をご覧いただきたい。これは、電子バンチの中のある電子からアンジュレータ放射を Radiation2D で計算し、同じバンチのなかで前を走っている 4 個の電子 A, B, C, D が受ける力と、それによる進行方向の力成分、つまりは加速、減速の度合いを時間とともに追いかけたものです。



**Fig. 5** The electrons receive periodic transverse force from the radiation emitted by an electron running behind of them. Due to the trajectory slope, the transverse force is converted to a longitudinal acceleration which creates periodic energy modulation at the radiation wavelength.

$t=0$ では、電子が下のカーブを上へ曲がろうとしており、一方4個の電子は上のカーブを下へ曲がろうとしている。電子の間隔は、4個でアンジュレータ放射光の1波長分としている。

$t=0$ では、B, D電子が電界に従って上下方向の力を受けるが、軌道が水平であり、効率よく進行方向の力を発生しない。

$t=T/4$ では、A, C, E電子が電界に従って上下方向の力を受け、軌道が斜めであり、進行方向に力が発生する。これによって、A, Eは加速、Cは減速される。

$t=T/2$ では、B, D電子が電界に従って上下方向の力を受けるが、軌道が水平であり、効率よく進行方向の力を発生しない。

$t=3T/4$ では、A, C, E電子が電界に従って上下方向の力を受け、軌道が斜めであり、進行方向に力が発生する。これによって、A, Eは加速、Cは減速される。

注意したいのは、 $t=T/4$ と $t=3T/4$ とでは、軌道の傾きも逆転しているが、ちょうど電界方向が逆転しているために、A, Eは常に加速、Cは常に減速され、次第にエネルギー差が発生することです。この同期現象は、もとの電子が常に波動を前に送り出しているために、軌道を反周期進むと、反周期分のアンジュレータ放射が前の電子を追い越して行くから成り立っているのです。

しばらく走ると、Fig. 5の最下部に書いたように、Dの位置に電子が集中し、逆にBの位置の電子密度は低くなる。こうやって、電子の位置が自然にそろってまいります。すなわち、ひとつのバンチの中のある電子が出したアンジュレータ放射光が前方の電子の位置を揃えようとする

効果（集群、バンチング）があります。もともとアンジュレータ放射には、こういう性質が備わっていたわけである。それに伴って、式(3)で見たように放射パワーが増大していきつづけることになります。

しかし実際には、電子の軌道の傾き角度が非常に小さいために、アンジュレータ放射から進行方向の加速減速に変換する効率が低く、また実際の加速器の電子ビームはバンチの内部でランダムな運動がある（エミッタンスという）ために、せっかくの集群効果がかく乱されてしまい、この集群に時間がかかります。

そこで、Fig. 6のように従来のFEL（自由電子レーザー）では、2枚のミラーからなる光共振器の中にアンジュレータを入れ、電子バンチからの光をミラーで反射して上流にもどし、この光に重なるように次のバンチを入れることで、繰り返し集群作用を行わせて、電子の位置を波長にそって規則正しく揃えることが行われてきました。赤外線、可視光のFELがこれであり、特に赤外線領域では、大電力の発振が実現しており、他のレーザーが追従できないFELの独壇場となっており、米国では工業的な応用がスタートしています。

しかしながら、発振波長を短くしようとすると、波長170 nm以下では、効率の良い反射ミラーを作ることができないため、共振器型のFELは実現できません。

そこで、もう一度、基本にもどって、Fig. 5で見たプロセスを直接利用する方式が提案されたわけです。ミラーを用いず、アンジュレータの中の自然に集群する効果のみを利用する。それもX線の波長で。式(1)でみたように、波長は電子エネルギーの2乗に逆比例して短くなるので、

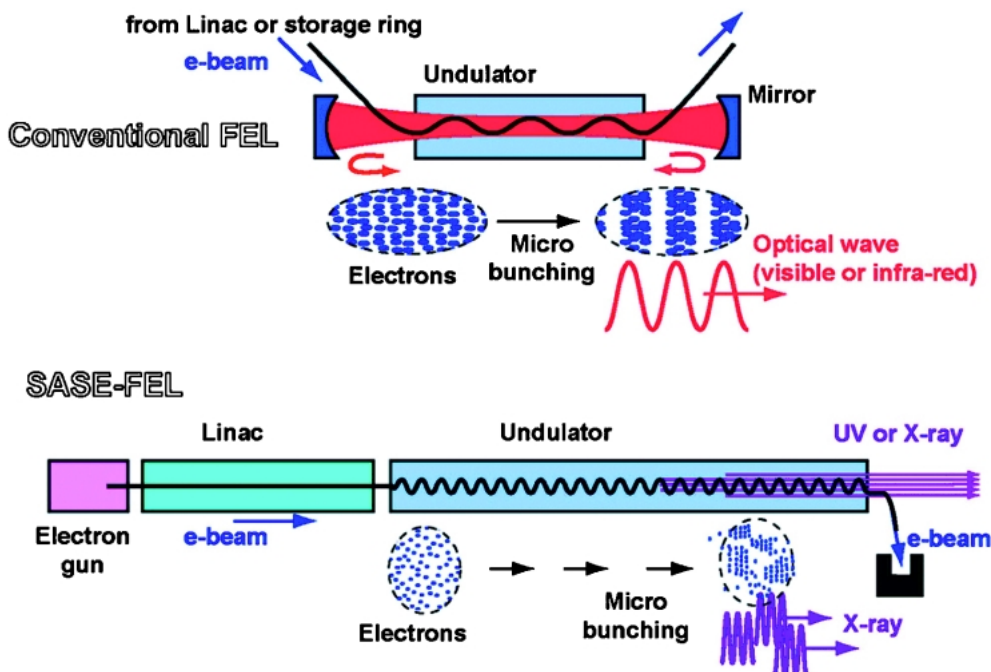


Fig. 6 Configurations of the conventional FEL and the SASE-FEL.

必要な電子のエネルギーが高くなります。すると電子軌道の振幅はエネルギーとともに小さくなり、軌道の傾きも小さくなり、FELゲイン（集群の速度）が低くなってしまいます。これに打ち勝って、十分な集群を達成する（飽和という）には、

- (1) 電子バンチ内部の熱運動を小さくする。まず縦方向エミッタンスの小さいビームを使う必要があり、蓄積リングの電子ビームは偏向磁石でのシンクロトロン光の放射にともなう反作用のためエネルギー幅が大きくSASE-FELには使えない。そこで線型加速器の電子ビームを使う。また横方向に電子がランダムに走ると、アンジュレータ放射光が拡散する原因となるので、横方向にもエミッタンスの小さいビームをつくる必要がある。
- (2) 1波長あたりに出来るだけ多数の電子が存在すれば、わずかの集群でも放射パワーが大きくなり、これがさらに次の集群を押し進める（ゲインが高くなる）ので、電子密度を出来る限り高くする。つまり電子ビームのピーク電流値を高くする。現実に提案されている多数のSASE-FELのプロジェクトでは、ピーク電流は1 kA~4 kAと非常に高い。
- (3) ゲインが低く集群に時間がかかるのだから、とにかく長いアンジュレータが必要となる。50 mから200 mという長いアンジュレータを用いる。ただし、精度の良いアンジュレータを製造する技術、そして電子ビームをまっすぐに軌道制御する技術が必要となる。

これらの要求を満足すべく、各国で技術開発が行われています。また多くのSASE-FELプロジェクトが提案されています。これらの現状については、参考文献[1]を参照

してください。現在までのところ、DESY-TTFやANL-LUTEL、BNL-ATFなどの試験加速器による実証ビーム試験によって、SASE-FELが理論どおり動作することの確認がなされています。ただし、その発振波長は目標のX線波長からは程遠く、100 nm以下でFELが実験的に動作したのは、ドイツ・ハンブルグのDESY-TTFのみです。

各国のプロジェクト提案や、技術開発競争が華々しく報じられるX線FEL業界ではありますが、本格的なX線FELを実現し、これを実用にするまでには、数多くの技術的課題を克服しなくてはなりません。目標の発振波長が短くなると、急激に高い技術が要求されるようになることと、発生する光のハンドリングに高い技術を要するためです。しかしながら、X線FELの光源としてのユニークさ（フェムト秒の短いパルス、ギガワット以上の瞬間強度、コヒーレンシー）のために、世界各国にて活発な研究開発が継続的に実施されるでしょう。これによって、おそらく5年以内には最初のX線FELが運転を開始し、すぐに世界各国のX線FEL施設がこれにつづくと思われます。日本がこの分野でも立ち遅れないよう、すでに理研・播磨研究所では基礎技術の開発を開始しており、いくつか成果が得られていますが、これを実機のX線FELにスムーズにつなげてゆくには、早期のプロジェクトの立ち上げが急務と思っております。

#### 参考文献

- 1) 北村英男, 新竹 積, 石川哲也: 放射光 16, No. 2 (2003).
- 2) <http://www-xfel.spring8.or.jp>