

# 加速器の基本概念

## V : 高周波加速の基礎

高田耕治

KEK

*koji.takata@kek.jp*

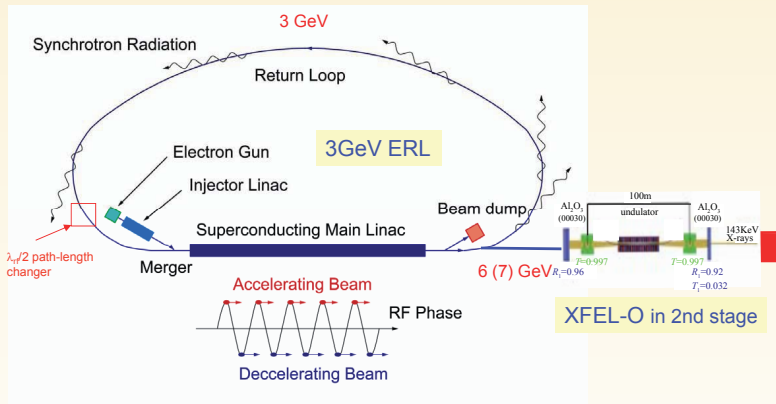
*<http://research.kek.jp/people/takata/home.html>*

総研大加速器科学専攻  
2015年度「加速器概論Ⅰ」講義

2015年4月16日

- §1 粒子加速器のあけぼの
- §2 高エネルギービームの力学 (1)
- §3 高エネルギービームの力学 (2)
- §4 高周波加速技術
- §5 これからの高エネルギー加速器
  - ERL: Energy Recovery Linac
  - LCLS: Linac Coherent Light Source
  - LC : リニアコライダー
  - $\mu$ - $\mu$  コライダー
  - レーザ・プラズマ加速器
  - リビングストーン図
- §6 参考文献

- リニアック: 1.3 GHz 超伝導型
- 極短 (0.1 ps – 3 ps) 電子バンチを 3 GeV まで加速
  - 電子バンチはパルスレーザー光で照射された光カソードで生成



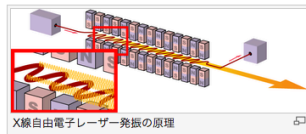
### 特徴

- リニアックで 3 GeV まで加速された電子バンチはリングを 1 周後  
もとのリニアックに戻る
- リングではバンチ長に等しい極めて短いシンクロトロン放射光を放  
出、これは物質中での極めて早い遷移現象の発生・観測に使われる
  - 放射光放出は量子論的確率現象であり電子のエネルギー分布は  
次第に増大→バンチ長も増大、しかし
  - 1 周程度の時間ではこの効果は無視できる (特徴 - 1)
  - 電子バンチを 1 周しか使わないのはエネルギーがもったいない  
→リニアック中ではマイクロ波の減速位相にのせる  
→クライストロンと同じ理屈で電磁波エネルギーを放出、従って  
新たにリニアックに入射された電子バンチの加速に寄与 (特徴 - 2)

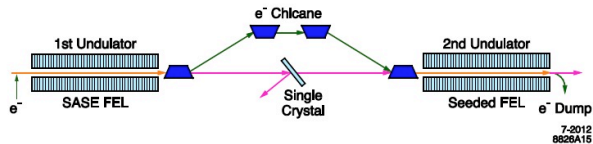
- リング直線部に偏向磁石を周期的に配置し電子軌道をうねらせる  
Undulator というもので放射光の自己増幅 (SASE) をおこなわせる
  - SASE: Self Amplification of Spontaneous Emission
- SLAC ではリングではなく 2 マイルリニアックの電子ビームを使う<sup>1</sup>

自由電子レーザーを作るために、自由電子を相対論的な速度にまで加速させる。自由電子は光線経路に沿って交互に磁石を配置した周期的な横の磁場を通り抜ける。磁界が光線の電子に正弦波経路を通ることを強いるので、この経路に沿って蛇行させられた自由電子はシンクロトロン放射光を発生する。この光を合わせ鏡で構成された光共振器内に閉じ込め、電子ビームと何回も共鳴的な相互作用をさせることによりレーザー発振を行う。発信される光の波長は電子ビームと磁気強度によって変化するので、自由電子レーザーは光の波長を自由にコントロールできる。なお、この多数の磁石で構成された装置をアンジュレータと呼ぶ。

真空紫外、X線領域においては光共振器を構成するための高い反射率を持つ鏡が存在しないため、自然放射の自己増幅 (Self Amplified Spontaneous Emission: SASE) という方式が採用されることが多い。電子ビームは、アンジュレータ磁場を通過する際に蛇行した軌道を取るため光速に比べるとゆっくりと進む。そこで、アンジュレータ磁場の上部部を通過する電子から放出された光は電子ビームと相互作用を行うことが可能となる。上部部で発生した自然放射のうち大きな強度を持つ部分が電子ビームの密度分布に変調を与え、その変調によりその波長において更に強い光が発生する。このような過程を繰り返すことにより自然放射に比べ桁違いに強度の大きな光を発生する。

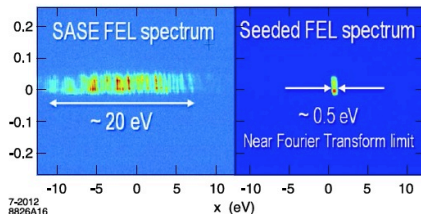


<sup>1</sup><http://ja.wikipedia.org/wiki/自由電子レーザー>



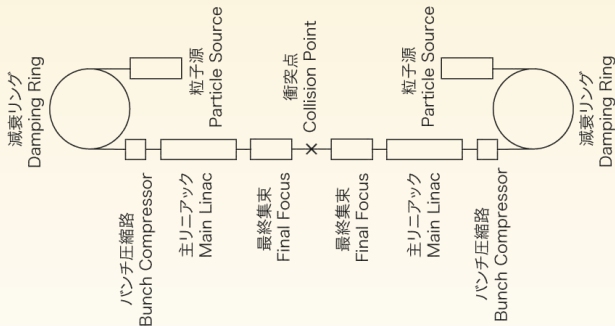
**Figure III-3:** Schematic of the LCLS-II hard x-ray self-seeding FEL, which consists of two undulator systems separated by photon monochromator and electron by-pass chicane.

The hard x-ray self-seeding scheme, illustrated in Figure III-3, delivers a self-seeded FEL beam at the Ångström wavelength scale with a factor of about 40 bandwidth reduction, as demonstrated by the experimental data shown in Figure III-4.

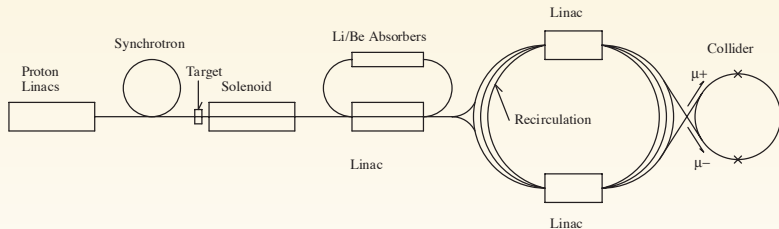


## 基本特徴

- 重心系エネルギーとして 1 TeV あるいはそれ以上をねらうが、リング型ではシンクロトン放射電力が  $\gamma^4$  に比例して増大するので、リニアックを使うしかない
- 加速器の構成は陽電子源を除けば電子と陽電子で同じ
- 衝突点でのルミノシティを確保するためビームのエミッタンスは可能な限り小さくする



- ミュオンは電子と同じレプトンであるが、その質量は電子の 206.7 倍ゆえ、前ページの  $\gamma^4$  問題は無視でき、数 1 TeV の重心系エネルギーでもリング型コライダーが使える
- しかしミュオンは高エネルギー陽子ビームをターゲットに当てて発生させるので、エミッタンスが極めて大きく、この縮小（ビーム冷却）が大問題である
- さらにミュオンの寿命は  $\tau_\mu = 2.2 \mu\text{s}$  と短いので相対論的エネルギーまで急速に加速する必要がある

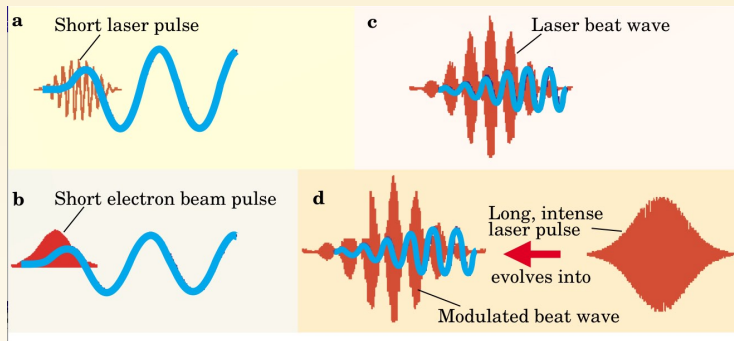


cf. R. Palmer and R. Fernow: *An Overview of Muon Colliders*,  
Beam Dynamics Newsletter **55** (ICFA, Aug. 2011) p.22.



cf. C. Joshi and T. Katsouleas : Physics Today, June 2003, p.47.

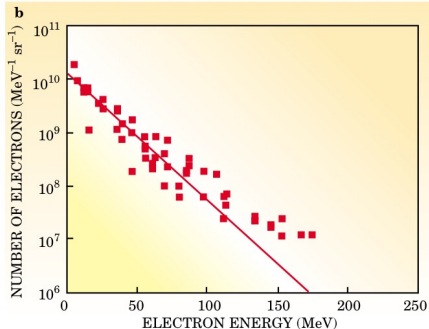
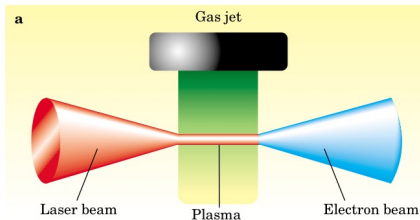
- プラズマ波（相対論的電子の粗密波）を作り出すには4つの可能性



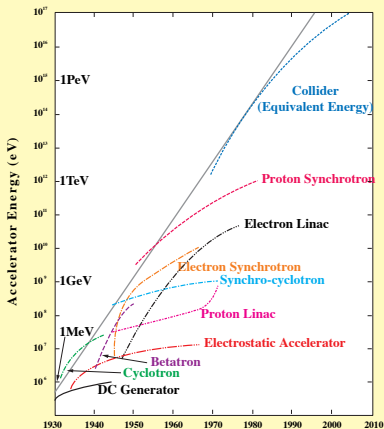
- 現在、電子ビームが数ミリの距離で  $\sim 0.2$  GeV まで加速されている

# レーザー・プラズマ波加速器 (2)

cf. C. Joshi and T. Katsouleas : Physics Today, June 2003, p.47.



# リビングストーン図



- M. S. Livingston & J. P. Blewett:  
"Particle Accelerators, p.6", MacGraw Hill, 1962.
- コライダーの（重心系）エネルギーについては相当する固定ターゲット加速器のビームエネルギーに変換したものを使用
- 従来達成された最高エネルギー：
  - 電子リング:  $2 \times 100$  GeV  
(2000, CERN LEP)
  - 陽子リング:  $2 \times 7$  TeV  
(2010, CERN LHC)  
<http://lhc.web.cern.ch/lhc/>
- ILC (International  $e^+e^-$  Linear Collider)  
目標エネルギー:  $2 \times 500$  GeV? (2030 ?)

この図は加速エネルギーのみに注目したもの、これからはむしろ多様な用途をめざして加速器を開発することになる

- Segrè, E. : *From X-rays to Quarks* (W. H. Freeman and Company, 1980).
  - Historical introduction to the evolution of high energy physics and accelerator science
- Chao, A. W. and Tigner, M. (ed.) : *Handbook of Accelerator Physics and Engineering* (World Scientific, 1999).
  - Compact encyclopedia of accelerator science and technology
- Edwards, D. A. and Syphers, M. J. : *An Introduction to the Physics of High Energy Accelerators* (Wiley, 1993).
  - Concise text book on accelerator physics
- Wiedemann, H. : *Particle Accelerator Physics I, II* (Springer, 1999).
  - Text book on accelerator physics
- Courant, E. D. and Snyder, H. S.: *Annals of Physics*, **3** (1958) p.1.
  - A classical paper on the theory of the strong focusing

## 参考文献 (2)

- Schwinger, J. : *Physical Review*, **75** (1949) p.1912.
  - A classical paper on the theory of the synchrotron radiation
- Gilmour, A. S. : *Microwave Tubes* (Artech House, 1986).
  - Text book on the electron tube technology
- London, F. : *Superfluids* , vol. 1 (Dover 1961).
  - Treatise on Superconductivity and [London Equations](#)
- Padamsee, H., Knobloch, J. and Hays, T. :  
*RF Superconductivity for Accelerators* (John Wiley & Sons, 1998).
  - Text book on RF superconductivity and its application to high energy accelerators
- **!!!! 高エネルギー加速器セミナー OHO の講義録シリーズ !!!!**  
(<http://accwww2.kek.jp/oho/index.html>)
- 超伝導リニアックについては拙文「大強度連続ビームをめざす超伝導陽子リニアック」(<http://research.kek.jp/people/takata/home.html>)