

cERLでのレーザー変調の案

2013.9.25

ビームダイナミクス打ち合わせ

本田洋介

- 共振器を使用した高効率レーザー加速
- cERLで何かしら試験できないか

全体像

- コンパクトERLに付加価値を与えるべく、コヒーレント放射源の検討
- ERLの特長を生かして、CWで高平均強度
- そこそこ有用と思われるVUVあたりを目標とすると、 $\lambda_u=10\text{mm}$, $K=1$ で、250MeVになる。一応、2ループcERLで想定範囲。
- 放射源に~30nmにマイクロバンチしたビームを供給するのがここでの目標
 - 1ループ目にレーザーにより $1\mu\text{m}$ の変調をつくり、2ループ目のパルス圧縮で~30nmの構造にする。
 - もともとのエネルギー拡がりと同程度以上のエネルギー変調(10^{-4})を与えれば良い。

$$\lambda_1 = \frac{\lambda_u}{2\gamma^2} \left(1 + \frac{K^2}{2}\right)$$

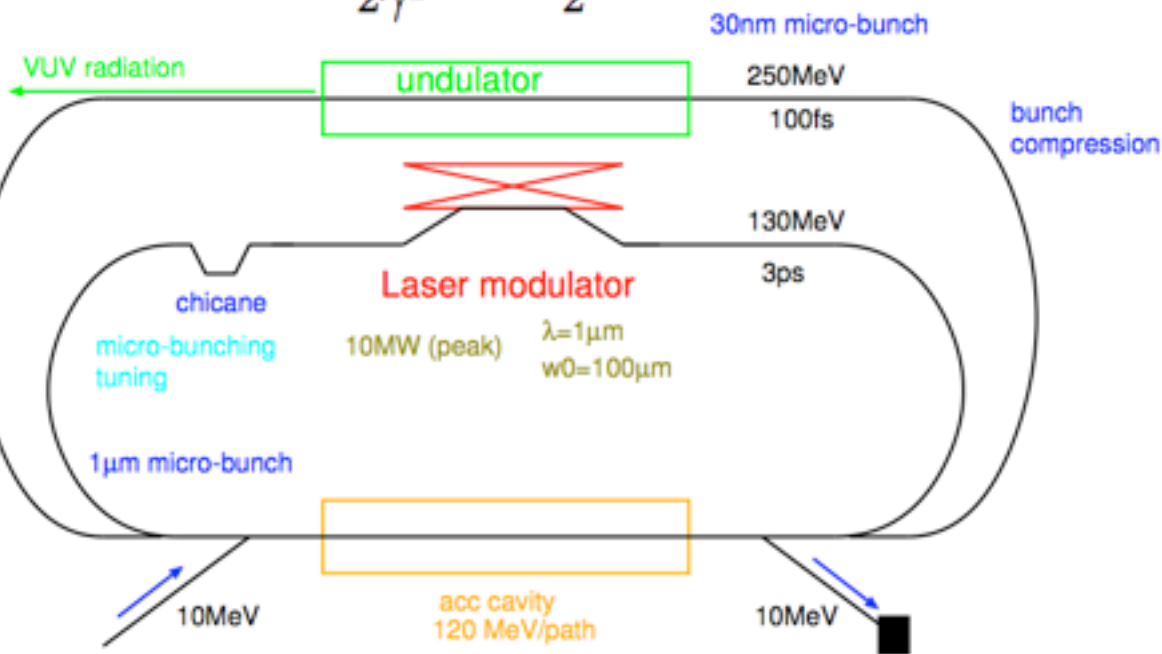


図 6: 250MeV での実証試験のセットアップ

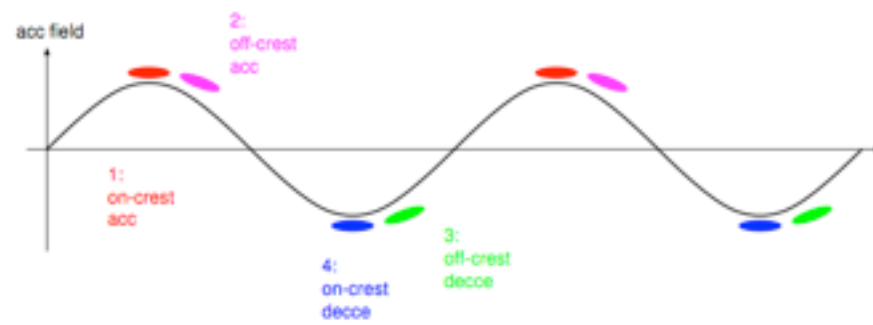


図 2: 主加速器の位相

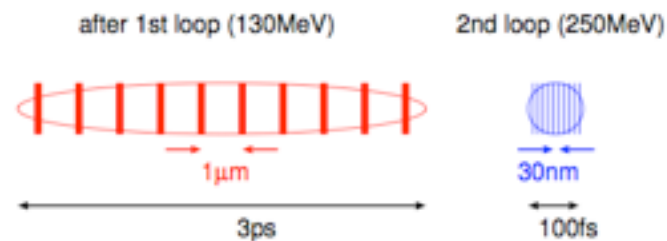


図 3: バunchとマイクロバunchの圧縮の様子

エネルギー変調の与え方(ふつう)

- FELの原理でアンジュレータを使用する方式
 - ほとんどLCLSのレーザーヒータと同じ
 - CW動作するように共振器方式にする
- 130MeV, $\lambda_u=45\text{mm}$, $K=2$ で、 $1\mu\text{m}$ レーザーに共鳴
- 共振器パワーの概算
 - 平均10Wを1000倍して10kW、ピーク強度は1MW
 - $w_0=400\mu\text{m}$ (レーリ長0.5m)にしぼると、 $E_0=137\text{MV/m}$
 - $d\gamma/dz=1.0$ になる。100keVオーダーのエネルギー変調が可能
- ビームのエネルギー拡がり(10^{-4})にたいして十分な変調(10^{-3})
- 共振器の構成
 - アンジュレータとシケインと組み合わせるので、メンドウだが、根本的問題はなさそう。

$$\frac{d\gamma}{dz} \simeq \frac{d\gamma}{cdt} = -\frac{e}{mc^2} \vec{\beta} \cdot \vec{E}$$

$$\frac{d\gamma}{dz} = \frac{eE_0K}{2\gamma mc^2}$$

表 1: LCLS レーザーヒータのパラメータ

parameter	symbol	value
Beam energy	E	135 MeV
Undulator parameter	K	1.38
Undulator period	λ_u	54 mm
No. of periods	N_u	9
Undulator full gap	g_u	34.5 mm
Laser wavelength	λ	758 nm
Laser Rayleigh length	z_0	500 mm
Laser energy	E_L	10~220 μJ
Laser pulse duration	σ_t	15 ps
Laser beam size	σ	180 μm

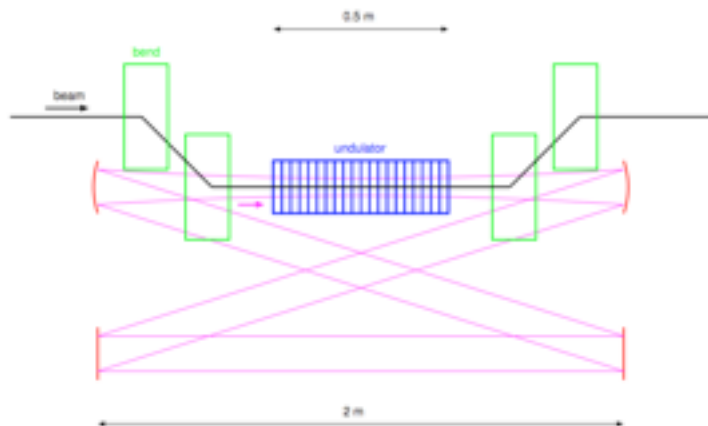


図 2: 共振器の構成

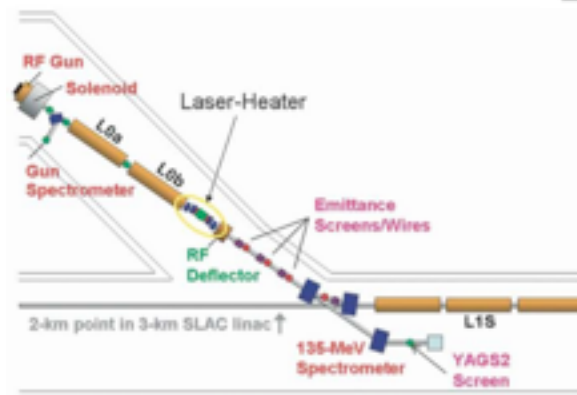
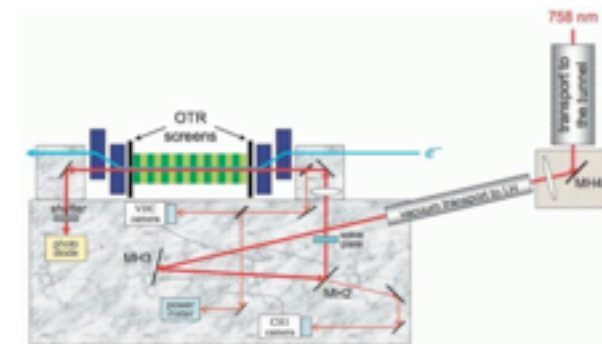


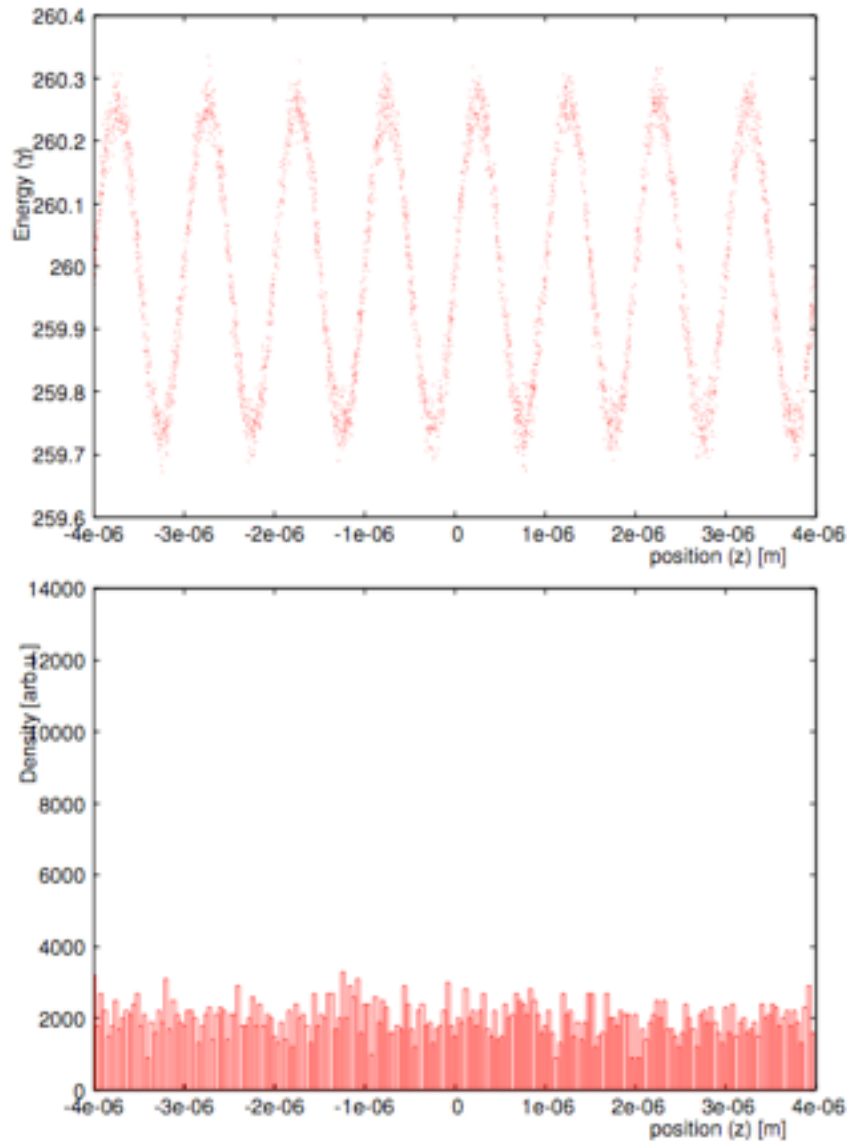
図 3: LCLS レーザーヒータの構成 ([3] より引用)



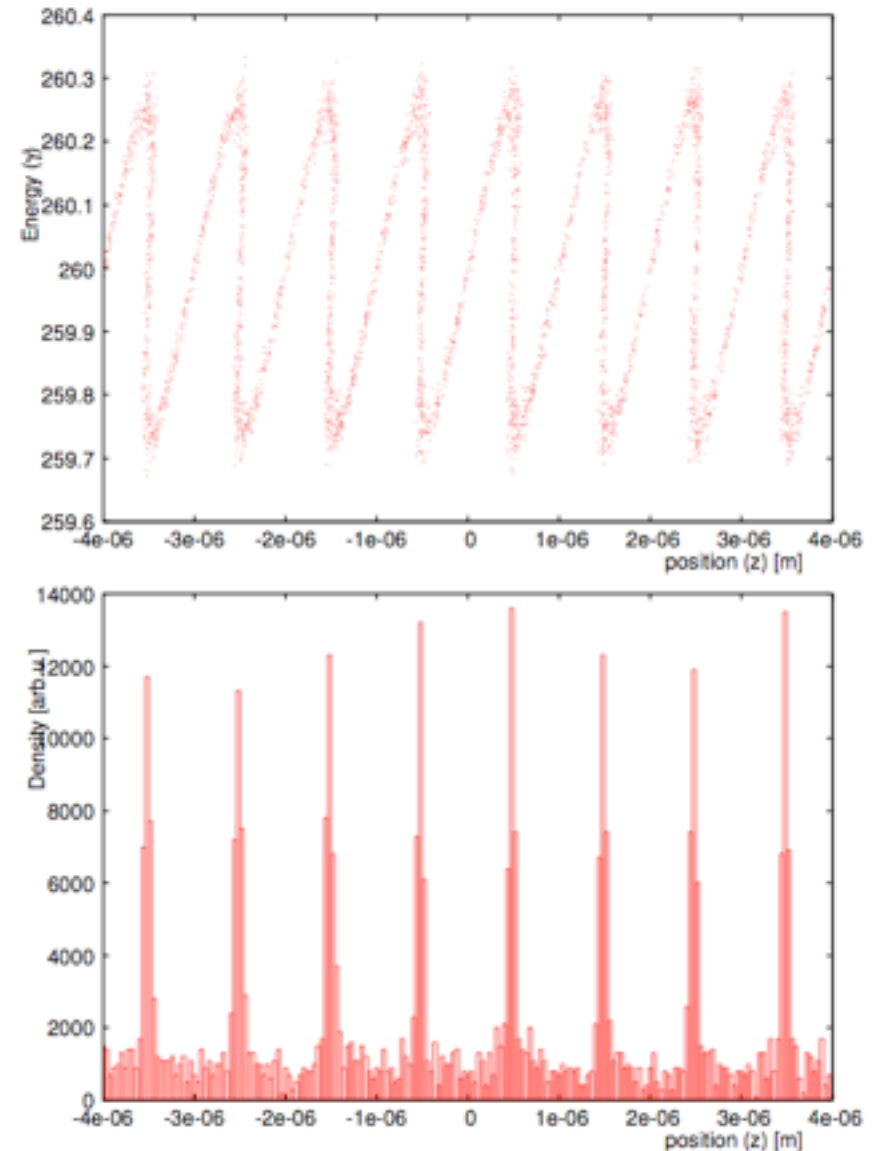
エネルギー変調から密度変調へ

- 距離を飛ばす、あるいは分散を調整する。
- 周期 $1\ \mu\text{m}$ のマイクロバンチ構造

エネルギー変調直後



分散を経過した後



cERL30MeVの場合

- 30MeVで試験できるか、ちょっと考えると
- レーザー関係
 - レーザー波長 $1\mu\text{m}$ に共鳴するには、 $\lambda u=5\text{mm}$ とかになる。
 - そういうアンジュレータを開発している人がいるらしい
 - ギャップが狭く、レーザーと同居するのが非常に苦しい。(ギャップ $\pm 1\text{mm}$ とし、レーザー $100\mu\text{m}$ として、ぎりぎり。)
 - CO₂レーザーでやれば丁度良い感じになるが、だんだん趣旨がずれてくる
- ビーム輸送関係
 - 30MeVだと光速度より遅いので、伝搬するうちに密度変調が崩れる。
 - うまいこと正分散のシケインあるいはアークで調整する必要がある。

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

$$L_{\lambda/4} = \frac{\beta_0 \lambda}{4(\beta_1 - \beta_0)}$$

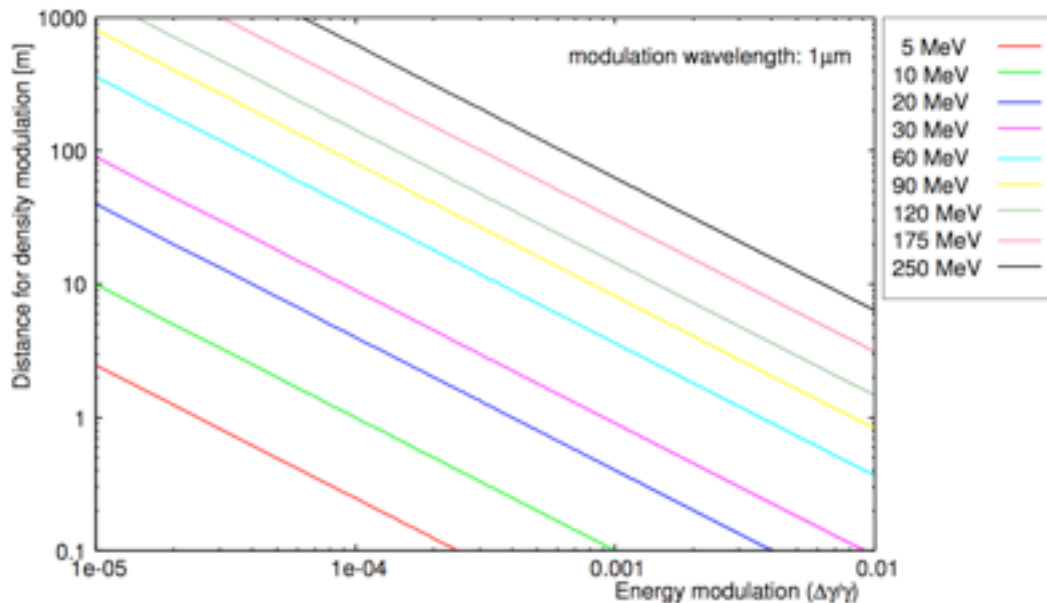


図 2: $L_{\lambda/4}$ とエネルギー変調の大きさ

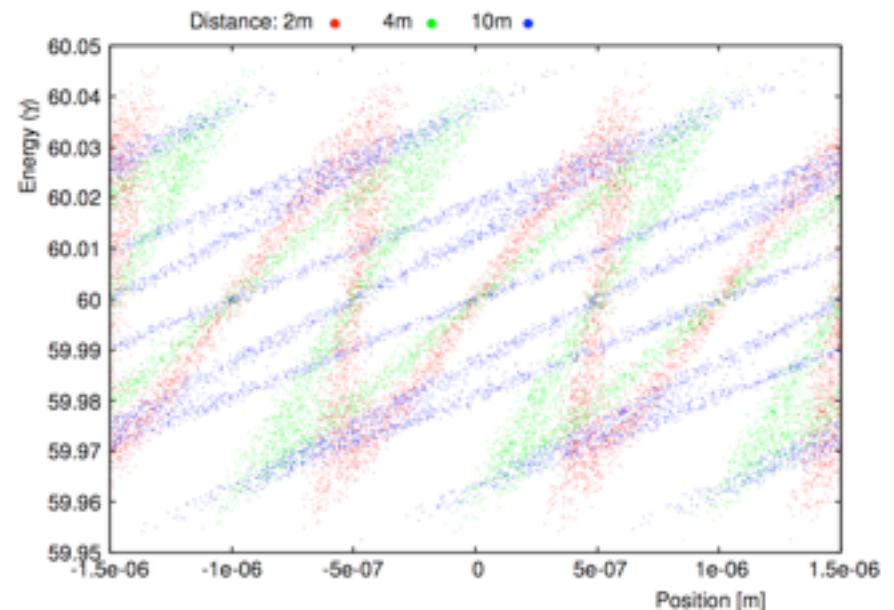


図 3: 伝搬による位相空間分布の変化

エネルギー変調の与え方(レーザー加速)

- アンジュレータと組み合わせるのが厄介なので、レーザーだけでやりたい
- 光は横波なので加速減速は出来ないが、平面波でなければ可能性はある
 - 単にマックスウェル方程式からTM波を仮定して計算
 - 横方向電場の変化率が縦方向電場になる
 - 基本モードは使えない、高次モードが使える

$$E_y = 0$$

$$B_x = 0$$

$$B_y = \frac{1}{c} E_x$$

$$B_z = 0$$

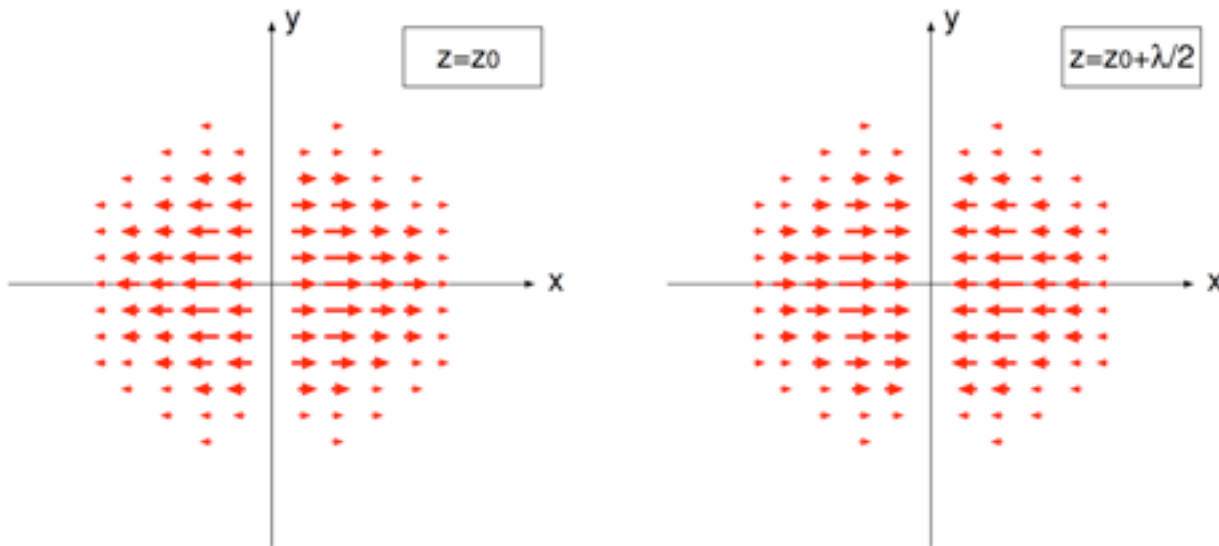


図 1: TEM₁₀ モードの横方向電場

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial E_z}{\partial t} = \frac{\partial B_y}{\partial x} - \frac{\partial B_x}{\partial y}$$

$$ikE_z = \frac{\partial E_x}{\partial x}$$

高次モードの加速電場

$$E_{mn} = E_0 \frac{w_0}{w(z)} H_m\left(\frac{\sqrt{2}x}{w(z)}\right) H_n\left(\frac{\sqrt{2}y}{w(z)}\right) \exp\left[-\frac{x^2 + y^2}{w^2(z)} - ik\frac{x^2 + y^2}{2R(z)} - ikz + i(m+n+1)\phi(z)\right] \exp(i\omega t)$$

- エルミートガウスモードTEM_{mn}
- 共振器にオフセット入射すれば作れる
- 横方向電場の1/kの大きさ程度の加速電場がある
- 加速距離は、レイリー長程度とすると、エネルギーゲインはサイズによらず、パワーだけで決まる。
- 1MWで20keVのゲイン、十分。

$$\phi(z) = \tan^{-1}\left(\frac{z}{z_0}\right)$$

$$z_0 = \frac{\pi w_0^2}{\lambda}$$

$$|E_z| = \frac{E_0}{kw_0}$$

$$E_z = \frac{1}{kw_0^2} \sqrt{\frac{P}{c\epsilon_0}}$$

$$G = E_z \times 2z_0 = e \sqrt{\frac{P}{c\epsilon_0}}$$

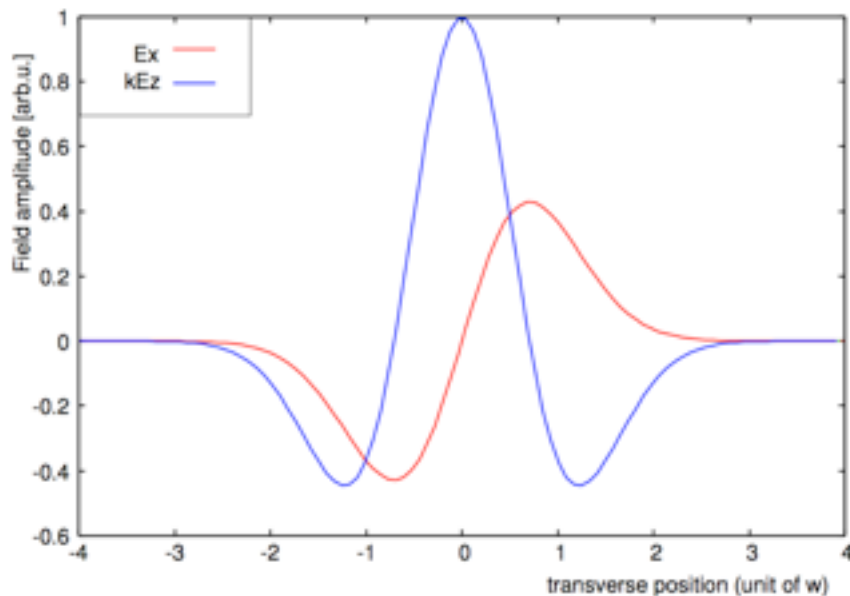


図 2: TEM₁₀ モードの横方向電場と進行方向電場

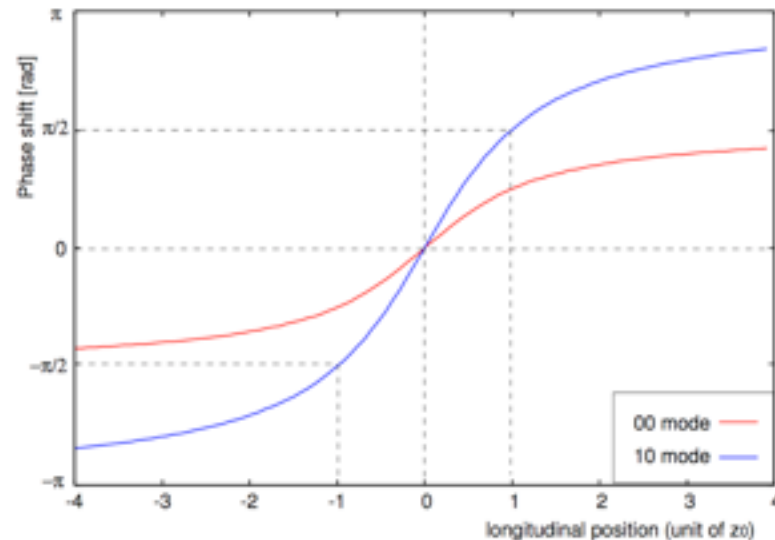


図 3: Gouy 位相の変化

30MeVの場合

- 加速しているうちに位相がずれてはいけない
- 30MeVは光速度より遅いため、長い距離で加速できない
 - 光速度(より少し速く)ですすむレーザーの位相面と、光速度より遅い電子の差がレーザーの波長 $1\mu\text{m}$ より十分小さい範囲。にするために、レイリー長 $z_0 < 5\text{mm}$ ($w_0 < 40\mu\text{m}$)
 - 結果的にビームもこの程度以下に絞る必要がある
- まとめて、共振器に蓄積したレーザーを絞って、ビームも絞って、位置とタイミングを合わせる。
- どこかで聞いた話に似ている。違うのは、レーザーはTEM10モード、ビームとレーザーが同じ方向

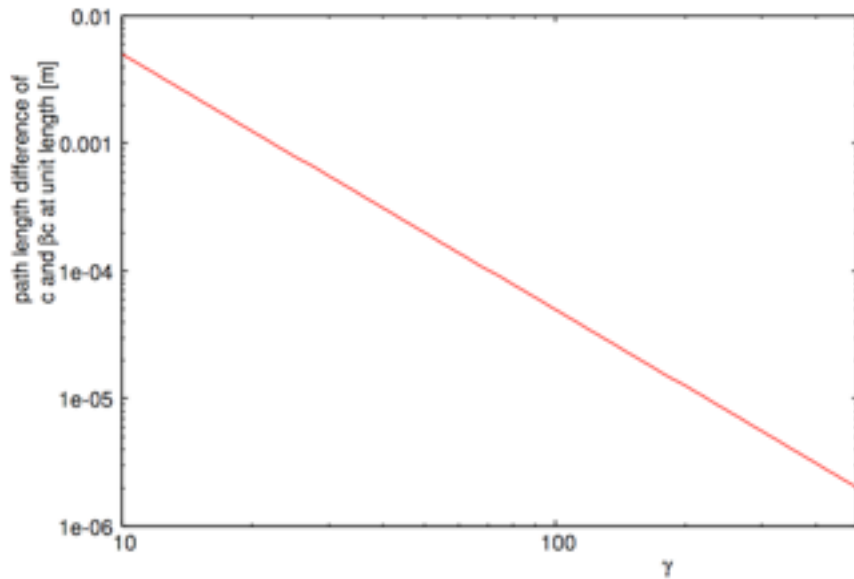


図 4: 有限のエネルギーの電子が、光速度と比較して 1m 伝搬時に生じる距離の差

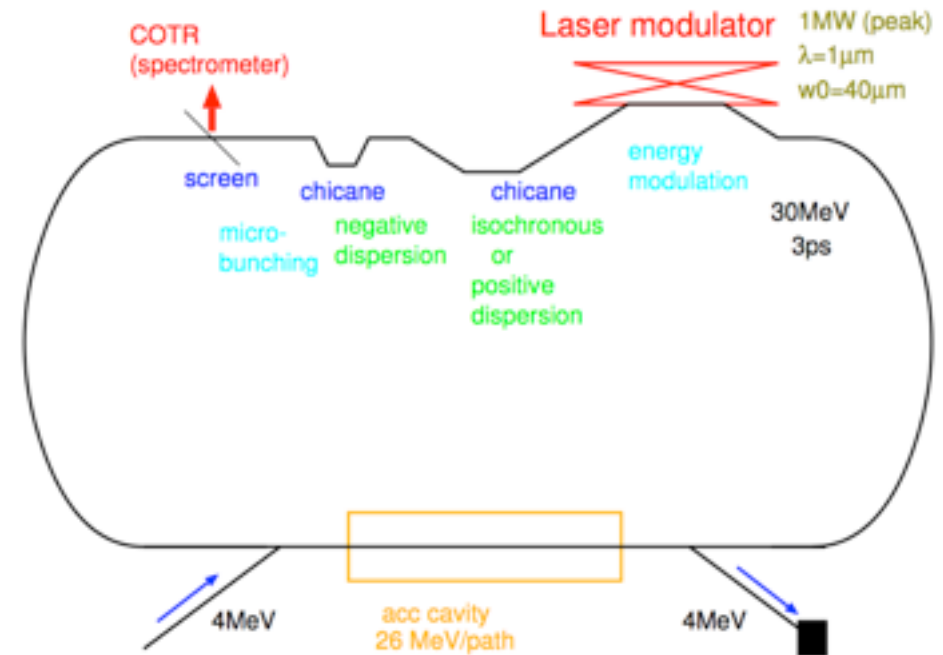


図 5: 30MeV での原理検証試験のセットアップ

コンプトンに相乗りできるか

- 共振器としては、単に逆向きに光を入れて、高次の共鳴を利用すれば良い。
- 現状は有限角衝突、どうがんばっても交差角 0.06rad 以上
- 角度があるとビーム軸上のレーザーの位相速度が速くなってしまふ($c/\cos(\theta)$)。 0.01rad 以下が必要。
- 交差角はほぼゼロになる、シケインを入れた配置でないと無理そう。

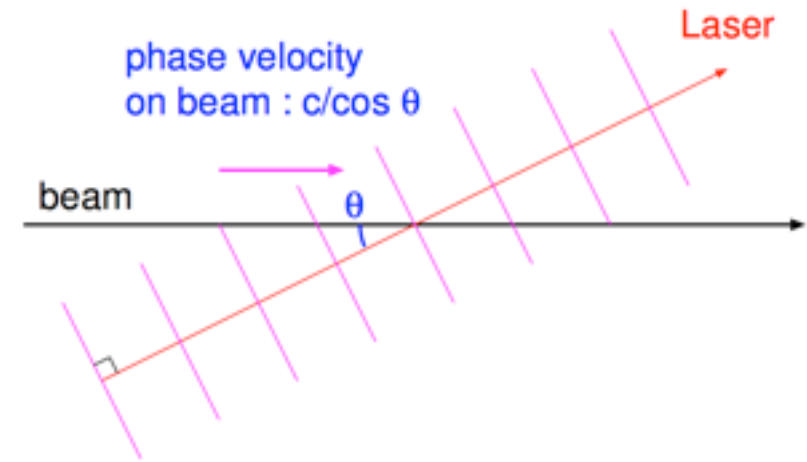


図 2: 有限角のセットアップ

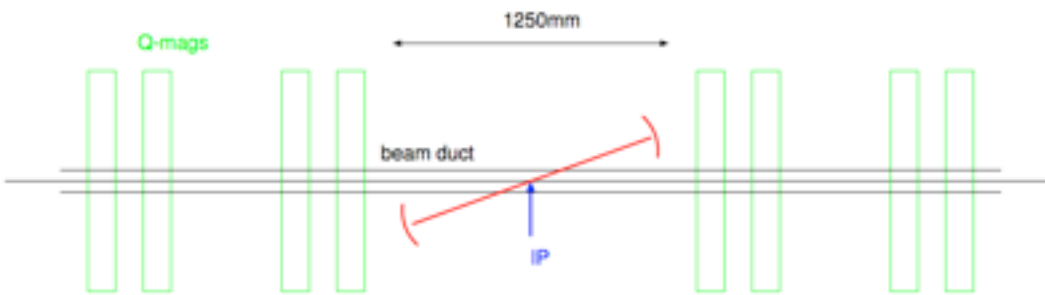


図 1: コンプトン衝突点の様子

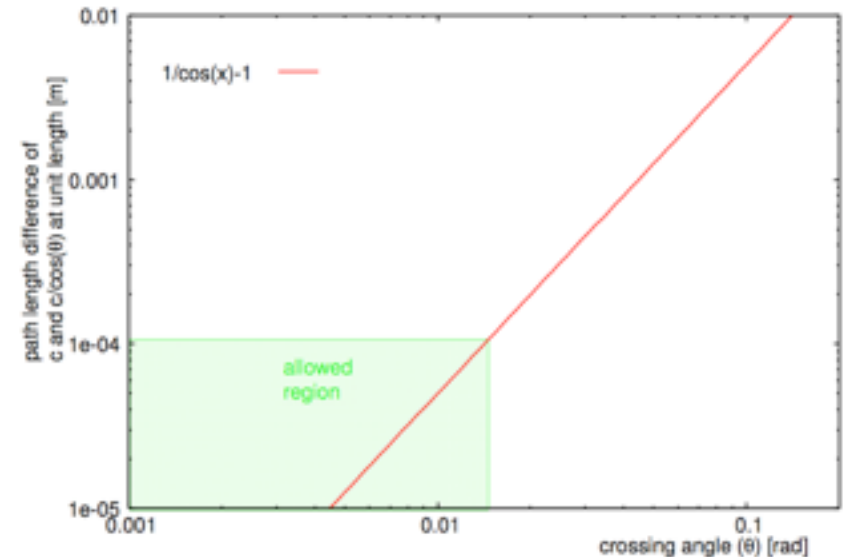


図 3: 1m 伝搬時の電子とレーザー光の等位相面の距離の差

まとめ

- 加速~100MeV、2ループの案だと、それなりに意味をもたせられる。
- 高次モードレーザー共振器
 - レーザー加速自体の試験(共振器方式では例がない)
 - エネルギー変調によるマイクロバンチ化の試験
- 30MeVなのが、いろいろ苦しい
- 正面衝突コンプトンとなら、一石二鳥になる