

## TeV領域のe<sup>+</sup>e<sup>-</sup>リニア・コライダーの基礎研究

高エネルギー物理学研究所

横谷 馨

高エネルギー物理学のための加速器は 日々巨大化しつつあり、現在では 直径数十km、エネルギー数十TeVに及ぶ陽子リングが検討されるようになって来ている。しかし電子加速器に関しては 円型加速器では シンクロトロン放射のために 大きさが(従って費用が)エネルギーの2乗に比例し、現在建設中のLEPが 円型電子加速器の最後のものと考えられる。エネルギー200 GeV程度以上では 電子ビームは 高電界の線型加速器によって加速する方が現実的である。

ここでは 数百GeV以上の e<sup>+</sup>e<sup>-</sup>リニア・コライダーで予想される問題点を検討した。主な問題点は

- (1) Linac に於るビーム不安定性
- (2) Final Focusing System
- (3) Beam-Beam Interaction

であるが、(2) は別の機会に譲り、以下 (1)(3) について検討する。(1) に対しては 加速原理としては 大電力の micro-wave 及び加速管を用いた conservative なものを考えているが、(2)(3) は 加速原理によらず リニア・コライダーでは必ず問題となる事柄である。ビーム・エネルギーとしては 1 TeV を想定した。

### Beam-Beam 相互作用

衝突前の両ビームの 水平方向・鉛直方向の r.m.s beam size を  $\sigma_x, \sigma_y$  とすると、ルミノシティは

$$\mathcal{L} = f_{\text{rep}} \frac{N^2}{4\pi\sigma_x\sigma_y} P$$

で与えられる。ここで  $N$  は各ビーム(バンチ)内の粒子数、 $f_{\text{rep}}$  は繰返(周波数)、 $P$  は ビーム間のクローン相互作用でビームが変形する効果(バンチ効果)による補正因子である。 $P$  の正確な値は 計算機シミュレーションによって求まる。e<sup>+</sup>e<sup>-</sup>の場合は引力であるため 強すぎて break-up (ない限り) ビームは細くなり 通常は  $P > 1$  であるが、 $P$  が大きい時は 次に述べる beam-strahlung の効果が大きくなりすぎるので、 $P$  によって大きな Luminosity enhancement を期待する事はできない。

ビームが衝突を始めると 相手ビームの作る磁場 (以下に掲げるパラメータでは 数百 Tesla に及ぶ) により シンクロトロン放射を起して ビームがエネルギーを損失する。この結果 衝突エネルギーに幅を生じ、物理実験には好ましくない。この放射を beam-strahlung と呼ぶ。平均エネルギー損失は ほぼ

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{2}{3} \frac{\gamma_e^3 N^2 \gamma}{\sigma_x \sigma_y \sigma_z} F(R) \cdot P' \cdot Q(u_c/E)$$

で表わされる。 ( $\gamma =$  ビームエネルギー / rest mass,  $\sigma_z =$  バンチ長,  $\gamma_e =$  古典電子半径,  $R = \sigma_x / \sigma_y$ ,  $P' =$  ピンチ効果の補正因子,  $Q =$  量子力学的補正因子,  $u_c =$  放射の critical energy )

$$F(R) = \begin{cases} 0.325 & (R=1) \\ 1.36/R & (R \gg 1) \end{cases}$$

$Q$  は  $u_c/E$  の小さい時は 1 で、 $u_c/E$  と共に減少し、 $u_c/E \sim 1/3$  のとき  $Q \sim 0.5$  となる。

Critical energy は  $\frac{u_c}{E} \approx \frac{3}{2} \frac{\gamma_e^2 N \gamma}{\alpha \sigma_z \sigma_x}$   $\alpha =$  fine structure constant

で与えられる。ルミノシティを減らす事に  $\Delta E/E$  を減らすには  $R$  を大きくとればよいが、それと共に vertical-beam size が小さくなり 種々の誤差に対する tolerance が厳しくなる。

比較的 reasonable なパラメータを例示すると

$$N = 1 \times 10^{11} \quad (16 \text{ nC}), \quad \text{freq} = 400 \text{ Hz}, \quad \sigma_z = 1 \text{ mm}$$

$$\sigma_x = 1.4 \mu\text{m}, \quad \sigma_y = 0.18 \mu\text{m} \quad (\sqrt{\sigma_x \sigma_y} = 0.5 \mu\text{m}, \quad R = 8)$$

$$\mathcal{L} = 1.7 \times 10^{32} \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1} \quad (P = 1.34)$$

$$u_c \approx 200 \text{ GeV}$$

$$\Delta E/E \approx 0.085$$

$$\text{平均光子数} = 2.6 / \text{electron}, \quad \text{平均光子エネルギー} = 33 \text{ GeV}$$

ルミノシティをこれより上げるには 種々のパラメータの変更が考えられるが、それぞれ以下に列挙するような困難を伴う。

$N \nearrow$  ----- Linac に於けるビーム不安定性

$\sigma_z \nearrow$  ( $\Delta E$  を下げるため) --- Linac での longitudinal wake による energy spread

$\sqrt{\sigma_x \sigma_y} \searrow$  or  $R \nearrow$  ----- Focusing system の error, 振動

f<sub>rep</sub> ↑ ----- 消費電力

エネルギー損失の問題を根本的に解決する方法として charge compensation (2つの e<sup>+</sup>e<sup>-</sup>ビームを用意し衝突直前に e<sup>+</sup>e<sup>+</sup>を混合して total charge を消す方法) が提案されている。要求される精度、operation の複雑さ、final focusing のむづかしさ (符号の異なるビームを同時に achromatic に focus する) 等 種々の問題はあろうか、1 TeV 以上の collider の場合は 十分検討に値する方法である。

### Linac に於るビーム不安定性

加速器の形状の検討を行っていないので、ここでは SLAC の cavity をモデルとして計算する。実際には SLAC 型の cavity は群速度が小さいため消費電力の問題があつてそのままでは使えない。

まず Longitudinal wave field の影響を評価する。これはバンチ後部の粒子を減速するように働くために energy spread を発生させ、final focusing をむづかしくする。N = 1 × 10<sup>11</sup>, σ<sub>z</sub> = 1mm, L (linac 全長) = 10 km の場合 ΔE ≈ -15 GeV (1.5%) に達する。この spread の大部分は RF peak phase より前方約 1mm 程度の位置で加速する事により RF 電圧の time dependence と相殺されて ΔE/E ≈ ±0.3% に下げることができ、この程度なら final focusing system で色収差を消すのは困難ではないと考えられる。

Transverse wake の効果はより重要である。扁平なビームの場合 transverse quadrupole wake の効果も検討する必要があるが、ここでは dipole wake のみ考える。入射の際の振動の振幅を α<sub>0</sub>、加速後のバンチ後端の振動振幅を α<sub>f</sub> とすると

$$\frac{\alpha_f}{\alpha_0} \approx \frac{1}{\sqrt{\gamma_f/\gamma_i}} \frac{0.23}{\eta^{1/2}} e^{1.3 \eta^{1/3}}$$

$$\eta = 0.10 \frac{\lambda_\beta L \gamma_e N W_0}{\gamma_f} \log \frac{\gamma_f}{\gamma_i}$$

(λ<sub>β</sub> = ベータトロンの振動波長, W<sub>0</sub> = (dW<sub>T</sub>/dz)<sub>z=0</sub> = transverse wake の原典での値) 30 m 毎に収束用四極磁石を置いて λ<sub>β</sub> = 240 m とすると η ≈ 120, α<sub>f</sub>/α<sub>0</sub> ≈ 3 となる。前記のパラメータでは linac 出口でのビームサイズは 90 μm (水平) 及び 30 μm (鉛直) 程度となるから α<sub>f</sub>, γ<sub>f</sub> がこれを越えないためには 入射精度として 30 μm

(水平),  $10\ \mu\text{m}$  (鉛直) が必要になるか、不可能な値ではない。入射位置誤差の他に、cavity の misalignment による transverse dipole 効果があるか、許容値は r.m.s で  $0.2\ \text{mm}$  (水平),  $0.08\ \text{mm}$  (鉛直) 程度になる。