

# 陽電子入射器

栗木雅夫

広島大学 先進理工系科学

# 目次

**01 陽電子とは？**  
電子とほとんど同じであり、かつ全く違うもの。

**02 陽電子生成**  
陽電子をつくるのは楽じゃない

**03 陽電子の捕捉と安定加速**  
陽電子をかき集める

**04 ILC陽電子入射器**  
二つの設計案

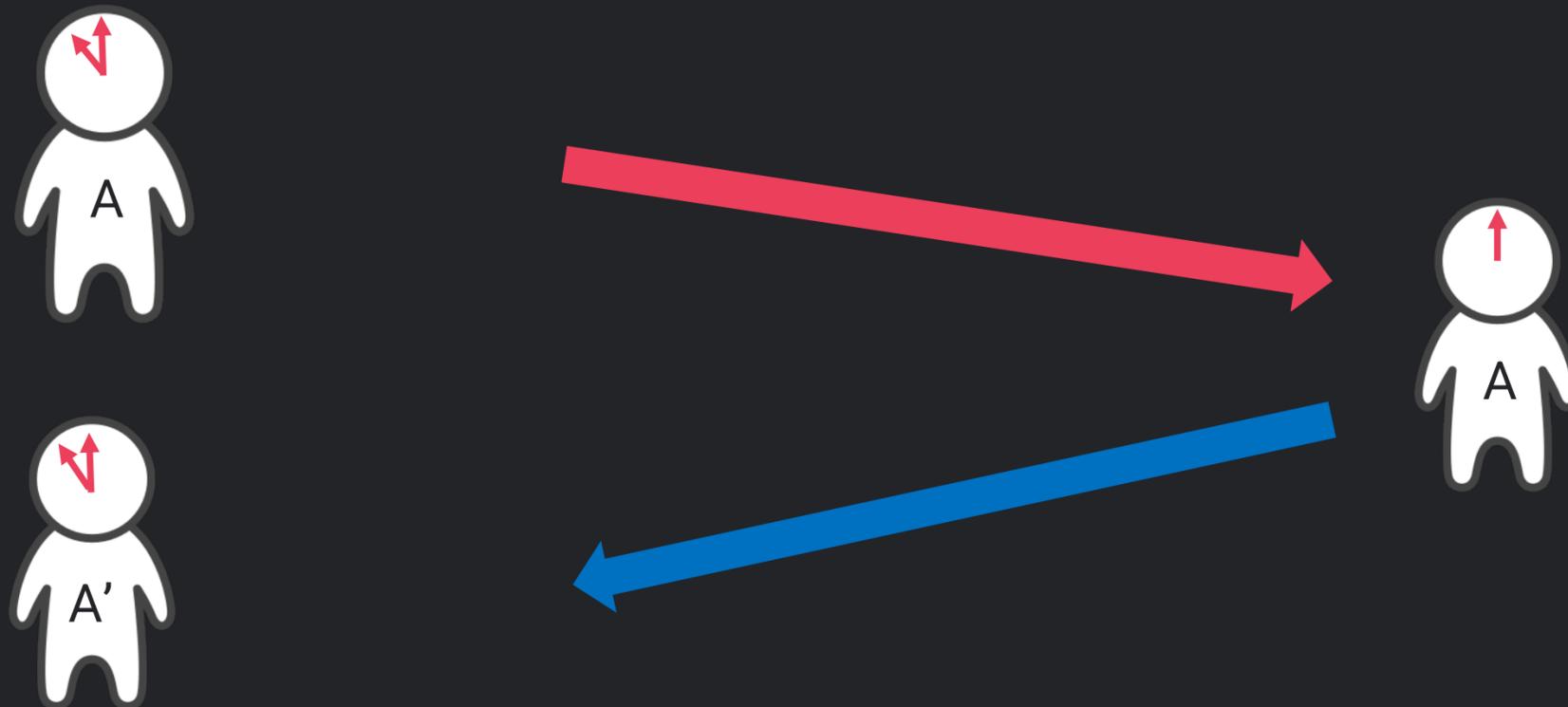
**05 まとめ**

陽電子とは？

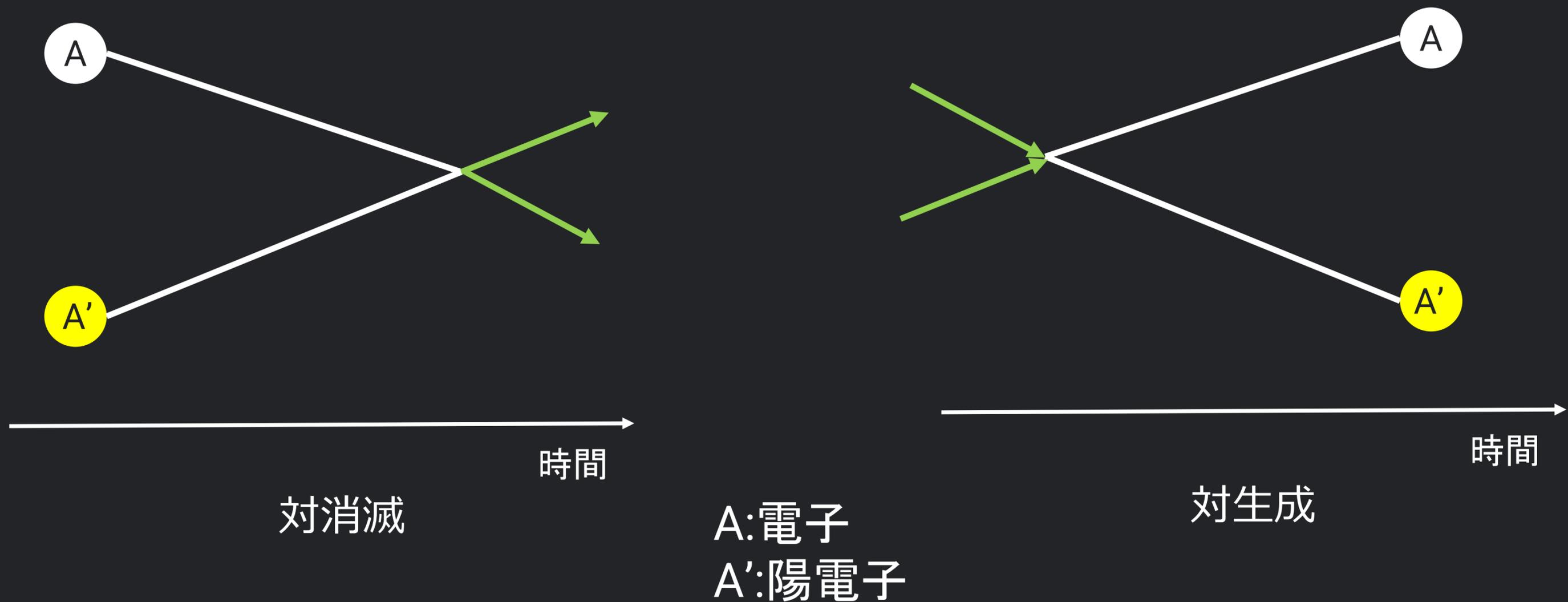


# 時間が逆行する回転扉

- 時間が逆行する回転扉にある人物Aが入っていった。
- Aの持っている時計は、扉に入った瞬間には正午を指していた。そこから時計は逆回りし始める。従って、Aの時計は決して正午以降を指さない。すなわち、正午以降の世界にAは存在しない。
- 正午前の世界には、順行する時計を持ったAと、逆行する時計を持ったA（仮にA'とする）が存在する。

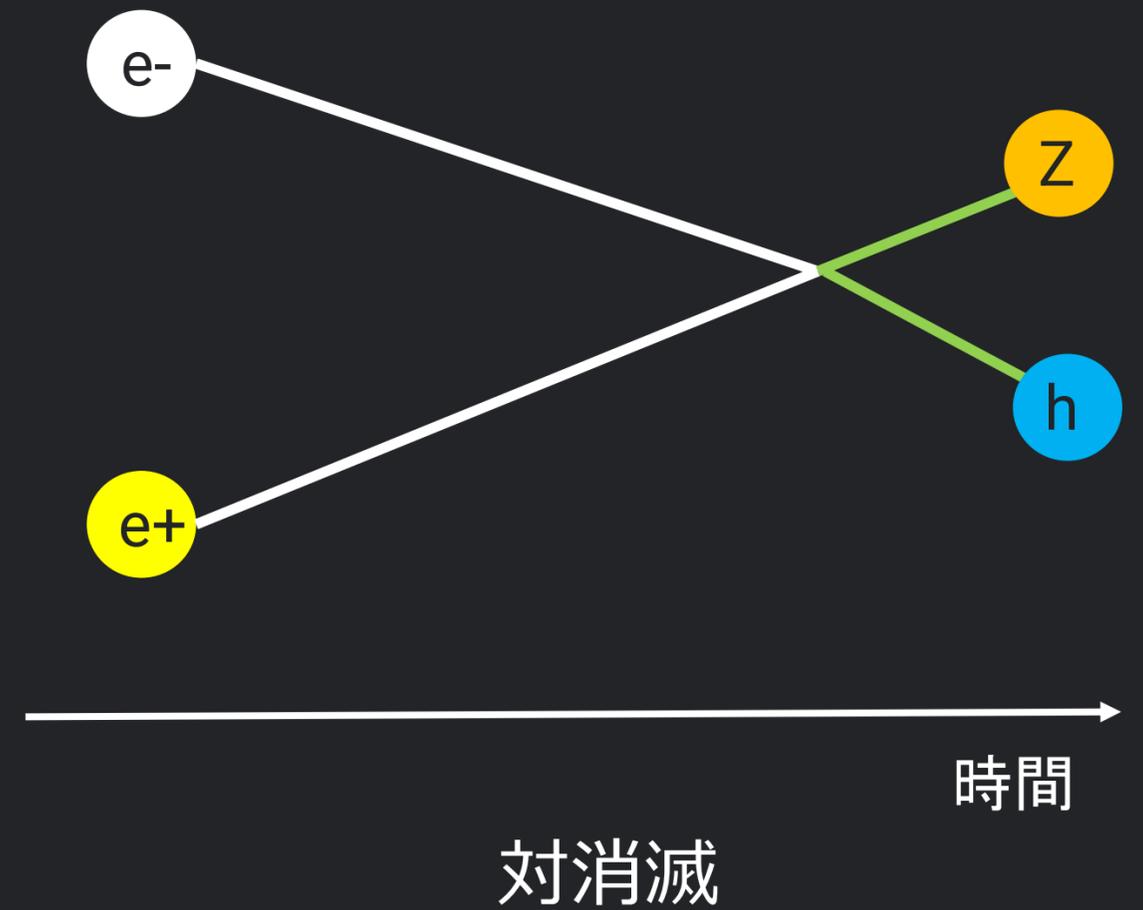
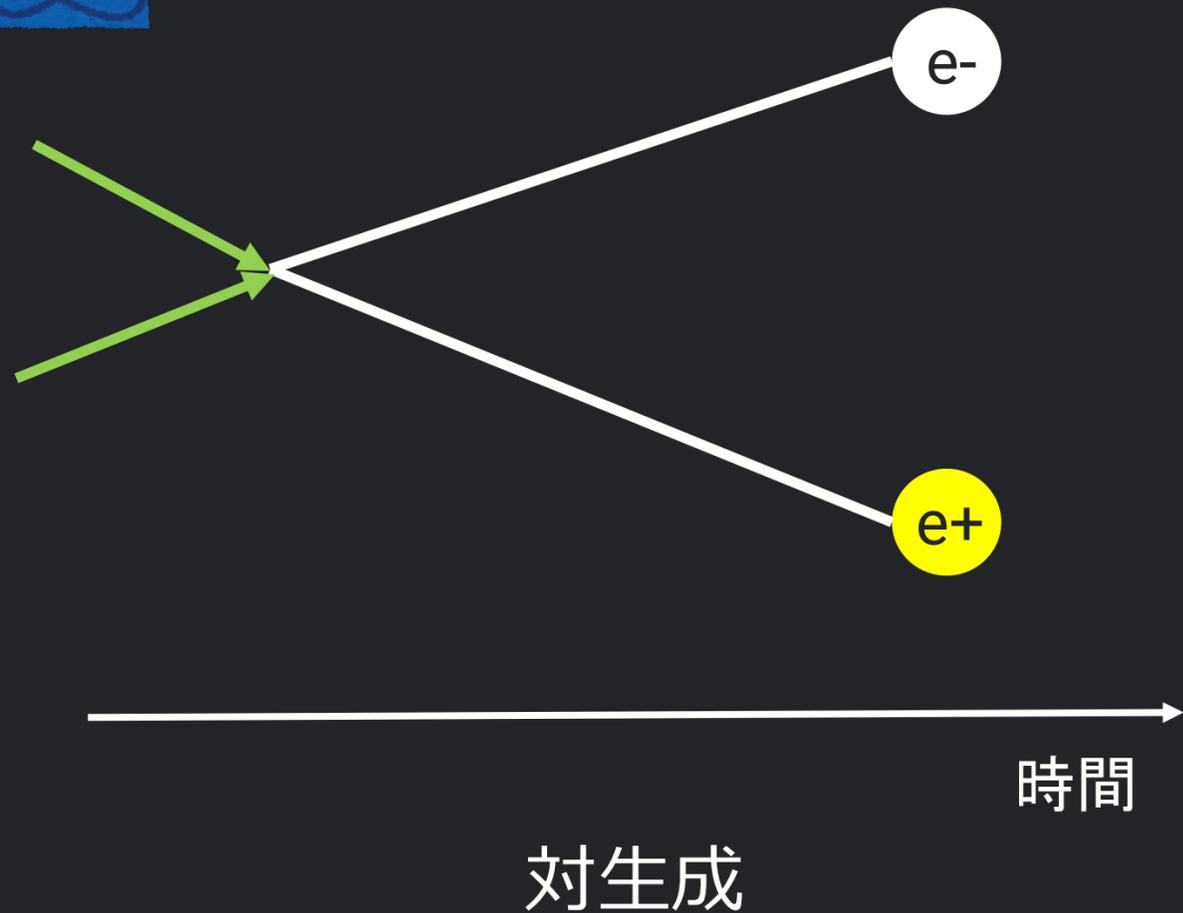


# 時間を逆行する粒子





# ILC という装置



# 疑問

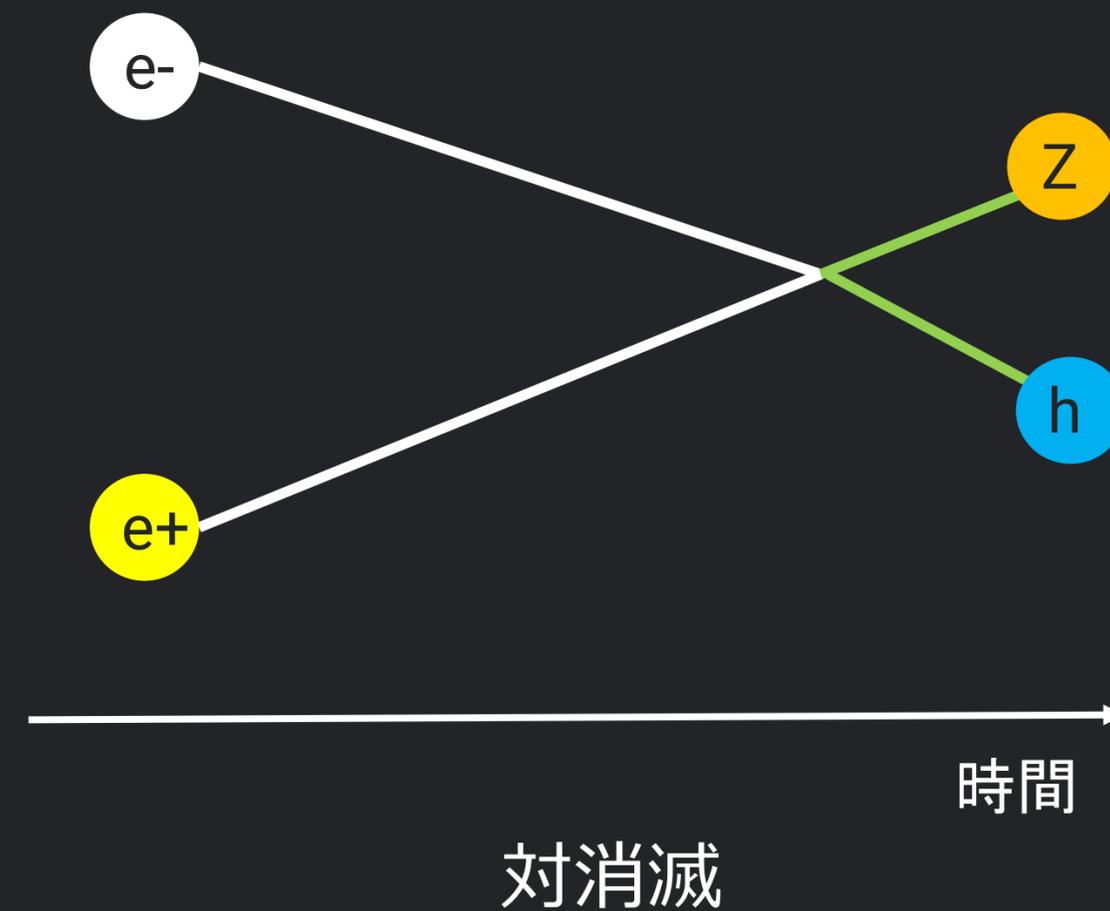
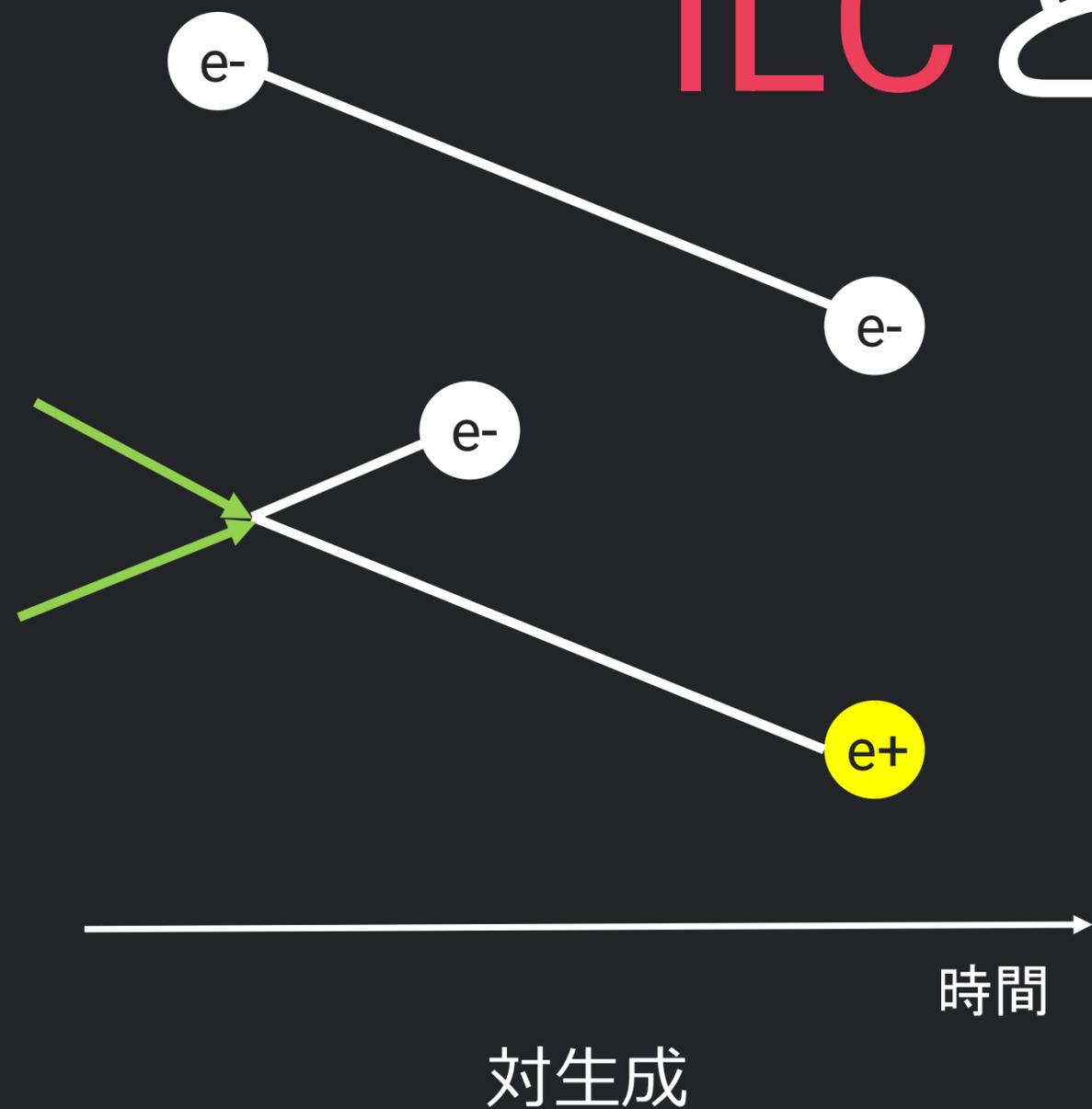
Q:ILCが対生成で電子と陽電子をつくり、加速して、対消滅させる装置であることは分かった。電子入射器では光電効果により電子をつくっていたので、対生成など使っていない。前のページの説明はおかしいのではないか？

A:電子が特別なのです。電子だけではなく「物質」と呼ばれる一群の粒子にこの世は支配されています。その反対である「反物質」はこの世界には存在しません。

電子を作っているのではなく、ただそこにあるものを利用しているだけです。

一方、陽電子は無いので、つくらないといけない。

# ILCという装置





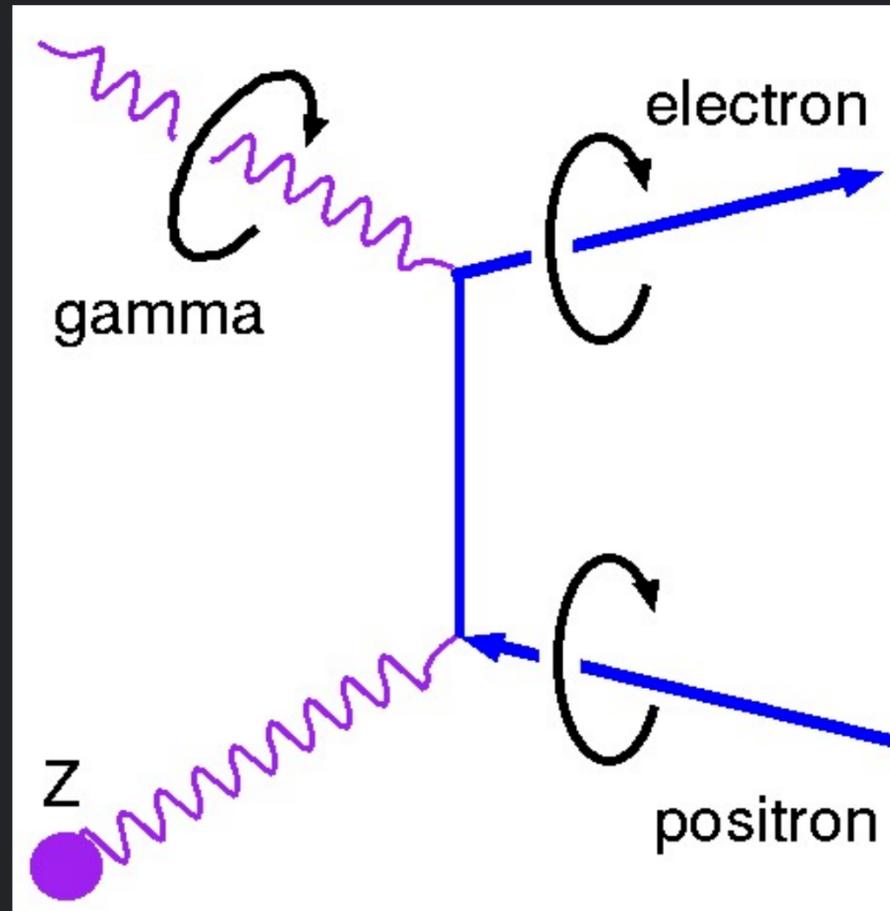
# 陽電子の生成

カインを殺すアベル  
(ルーベンス)



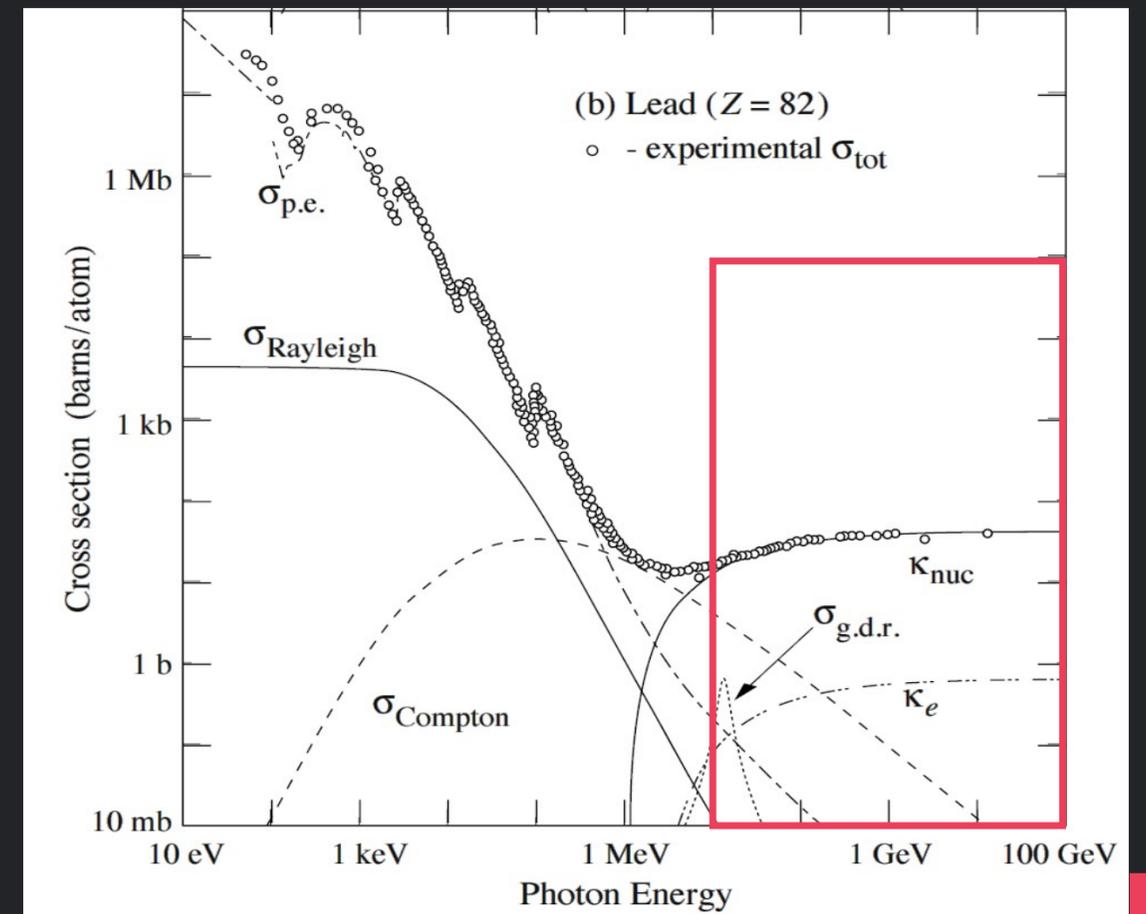
# 対生成反応

- 1.02 MeV以上のエネルギーのガンマ線が物質と相互作用を行うと、電子と陽電子が対となって現れる反応、対生成反応が生じる。
- しかし、ガンマ線を作るのは簡単ではない。



## ガンマ線と物質の相互作用

- 0 – 1keV : 光電効果
- 1keV – 10 MeV : コンプトン散乱
- 10 MeV - : 対生成



# ガンマ線源

- ガンマ線とは電磁波の一種。X線よりも波長が短く、エネルギーが高い。
- 軌道電子の遷移による放射をX線、原子核の遷移による放射をガンマ線と呼ぶ。
- 技術的に、X線を生成するのは比較的容易。
- 一方で、ガンマ線を発生させるのは容易ではない。
- ガンマ線の生成法により、陽電子源の技術的な解が3種類存在する。



ガンマ線バースト  
のイメージ

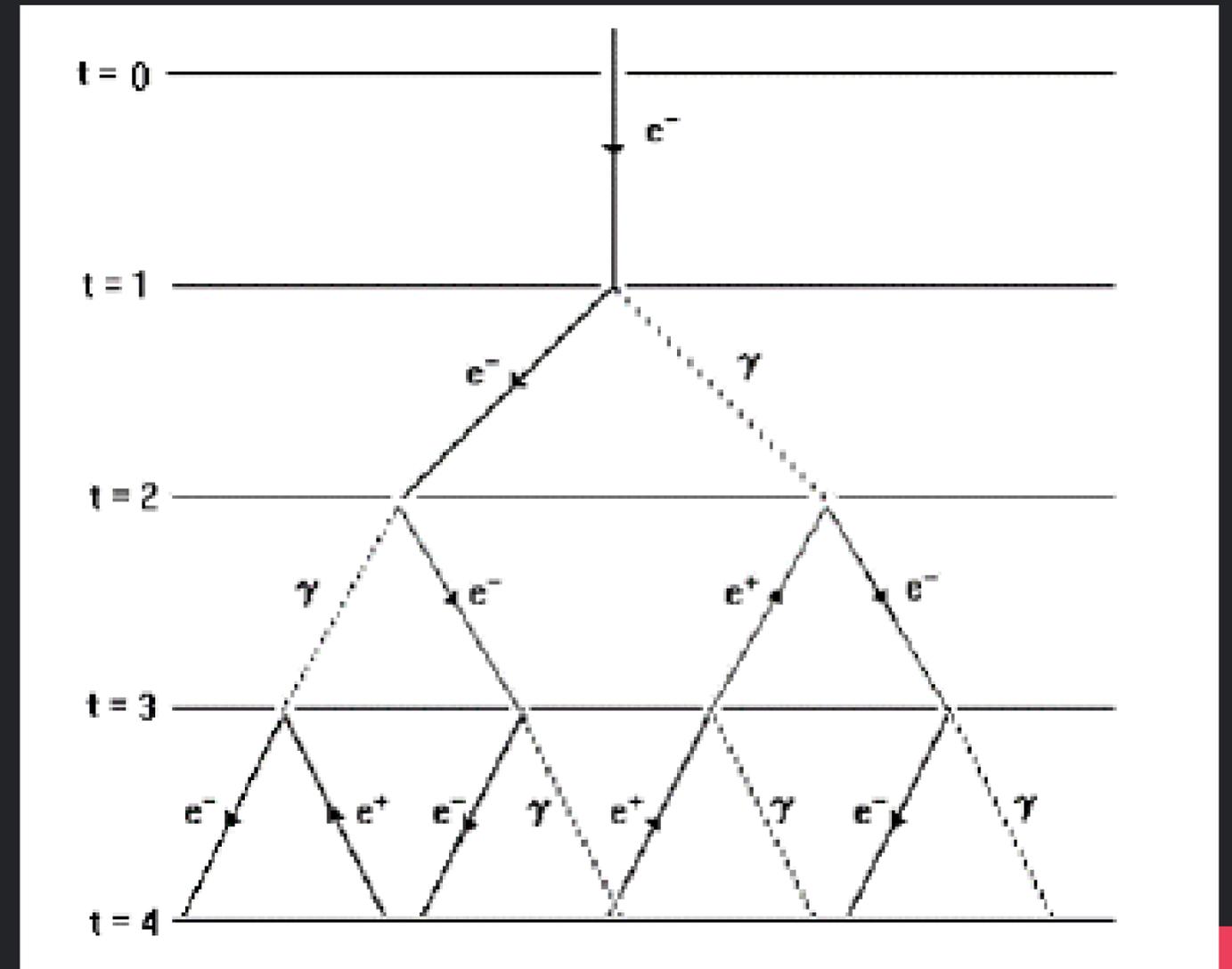
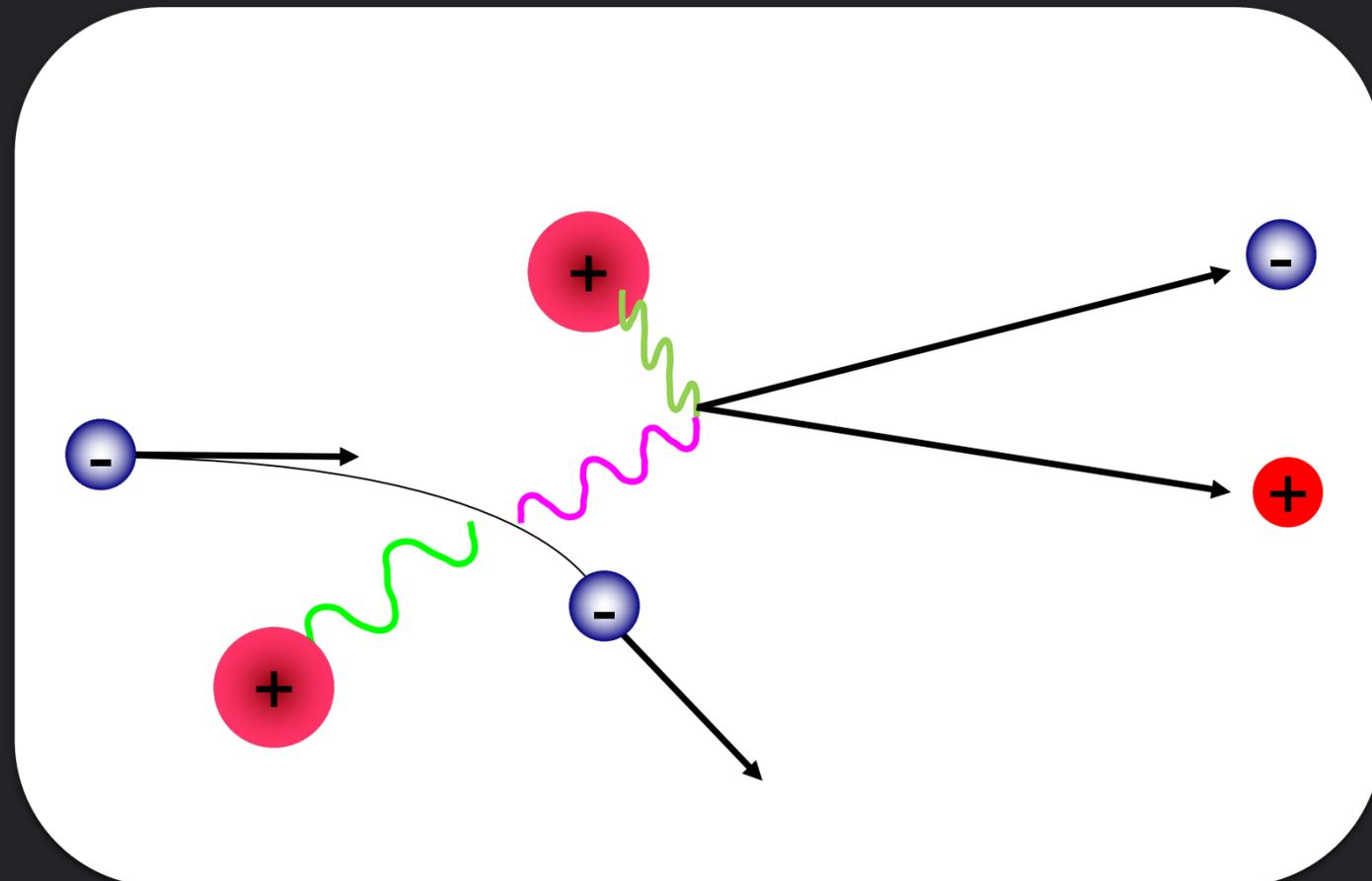
初期のX線写真



# 制動輻射と電磁シャワー

- 電子が物質内に入ると急制動を受け、エネルギー保存から高エネルギーガンマ線を放出する(制動輻射、Bremsstrahlung).
- ガンマ線から対生成で発生した電子と陽電子も制動放射を行って、ガンマ線を放出する。

- 最初のひとつの電子が、沢山のガンマ線と電子・陽電子を作り出す(電磁シャワー)。

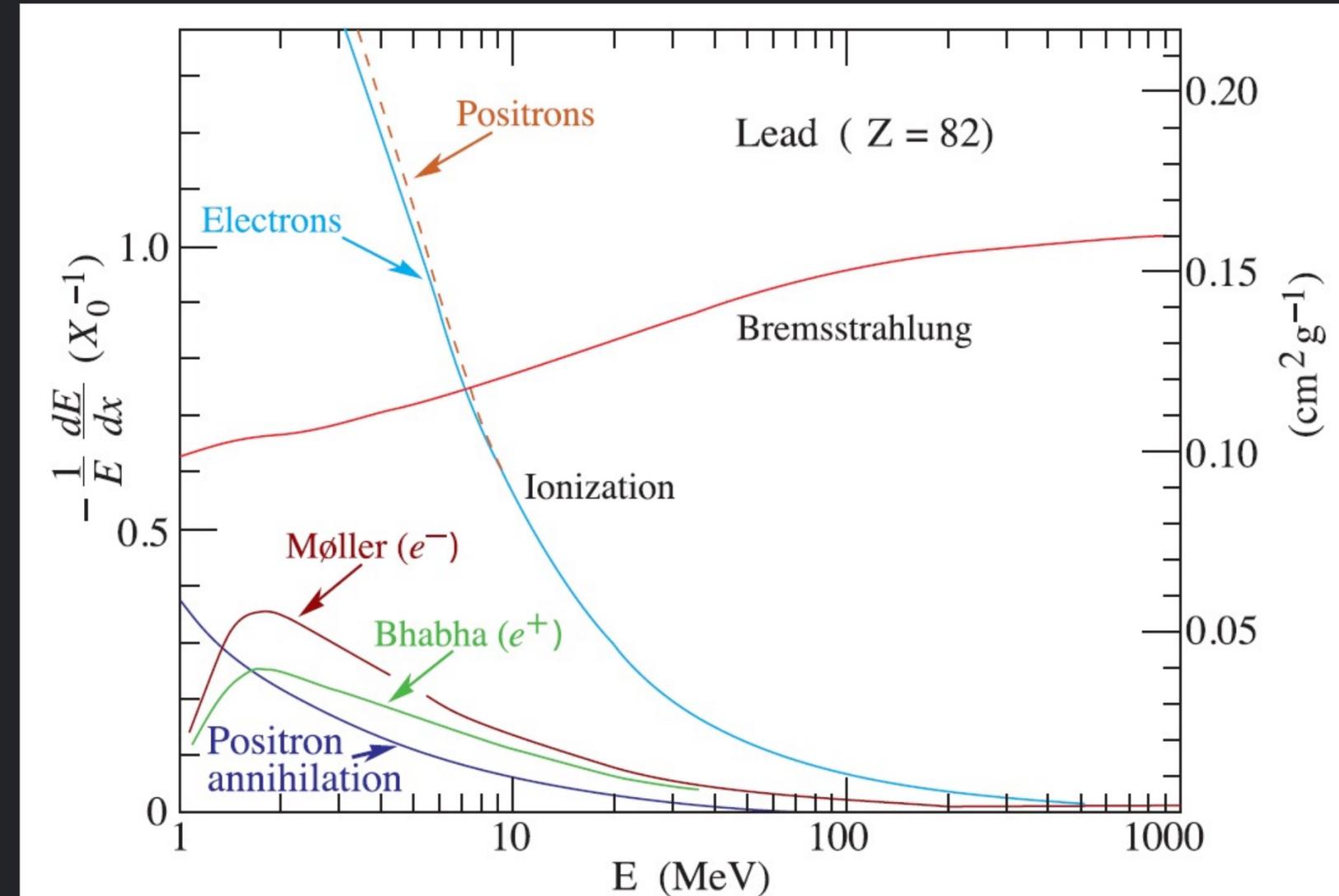


# 電磁シャワー

- シャワーの発達により、電子（陽電子）のエネルギーは低減していく。
- あるエネルギー（閾値エネルギー）よりも低くなると、イオン化によるエネルギー損失が支配的となる。閾値エネルギーとなるまで、シャワーが発達する。

$$E_c = \frac{800}{Z + 1.2} [MeV] \quad (181)$$

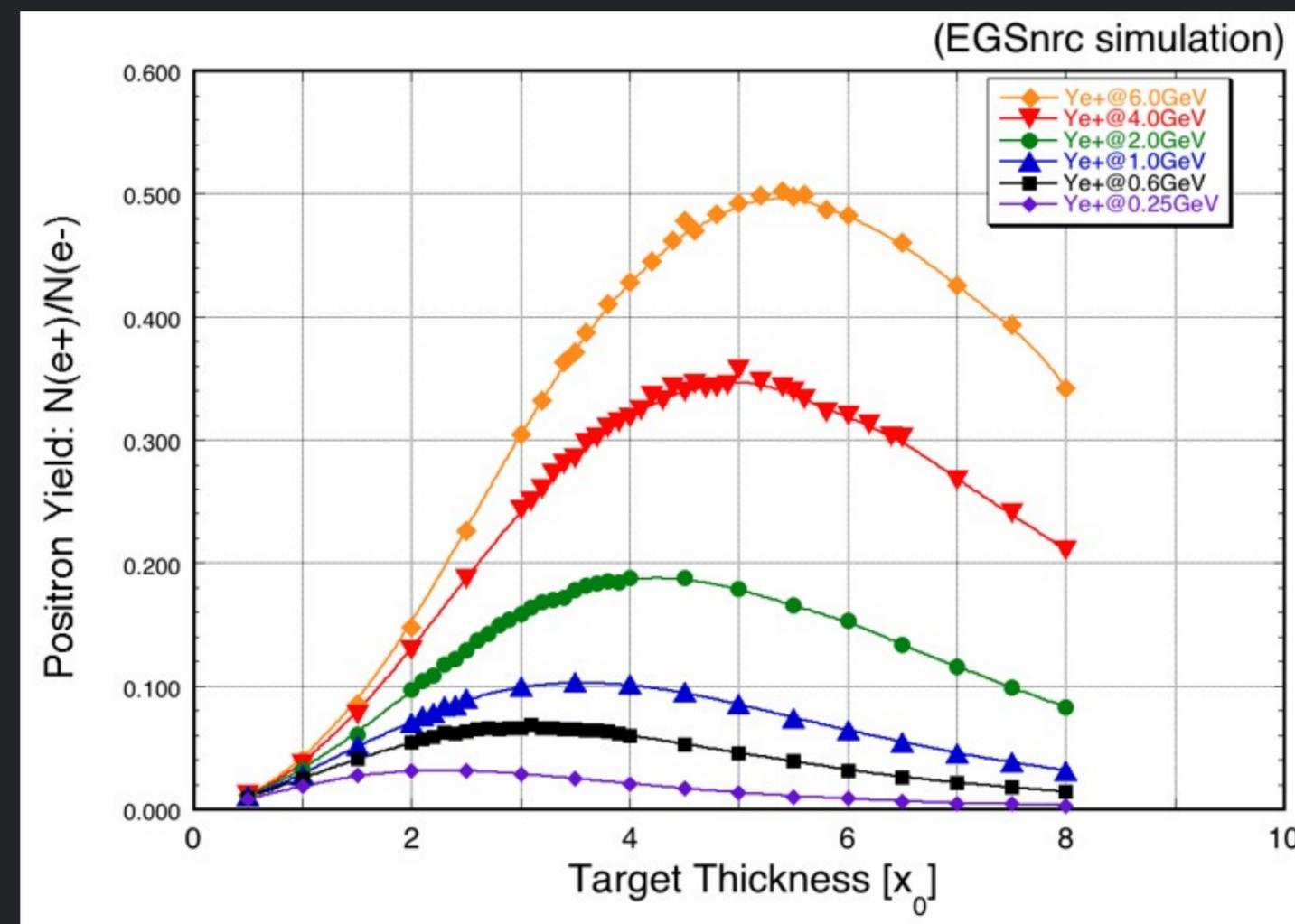
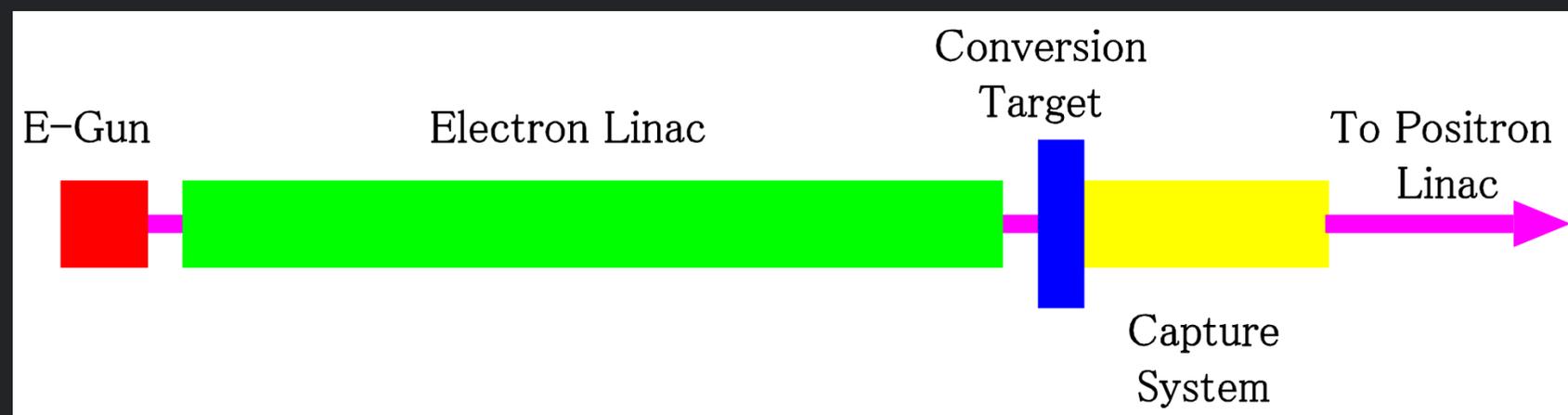
$$x_{max} = X_0 \ln \left( \frac{E_0}{E_C} \right) / \ln 2.$$



# 電子ドライブ陽電子源

- 数100MeVから数GeV程度のエネルギーの電子ビームを標的に入射。Brems+対生成で陽電子を生成。
- エネルギーにより最適な標的厚みがきまる。

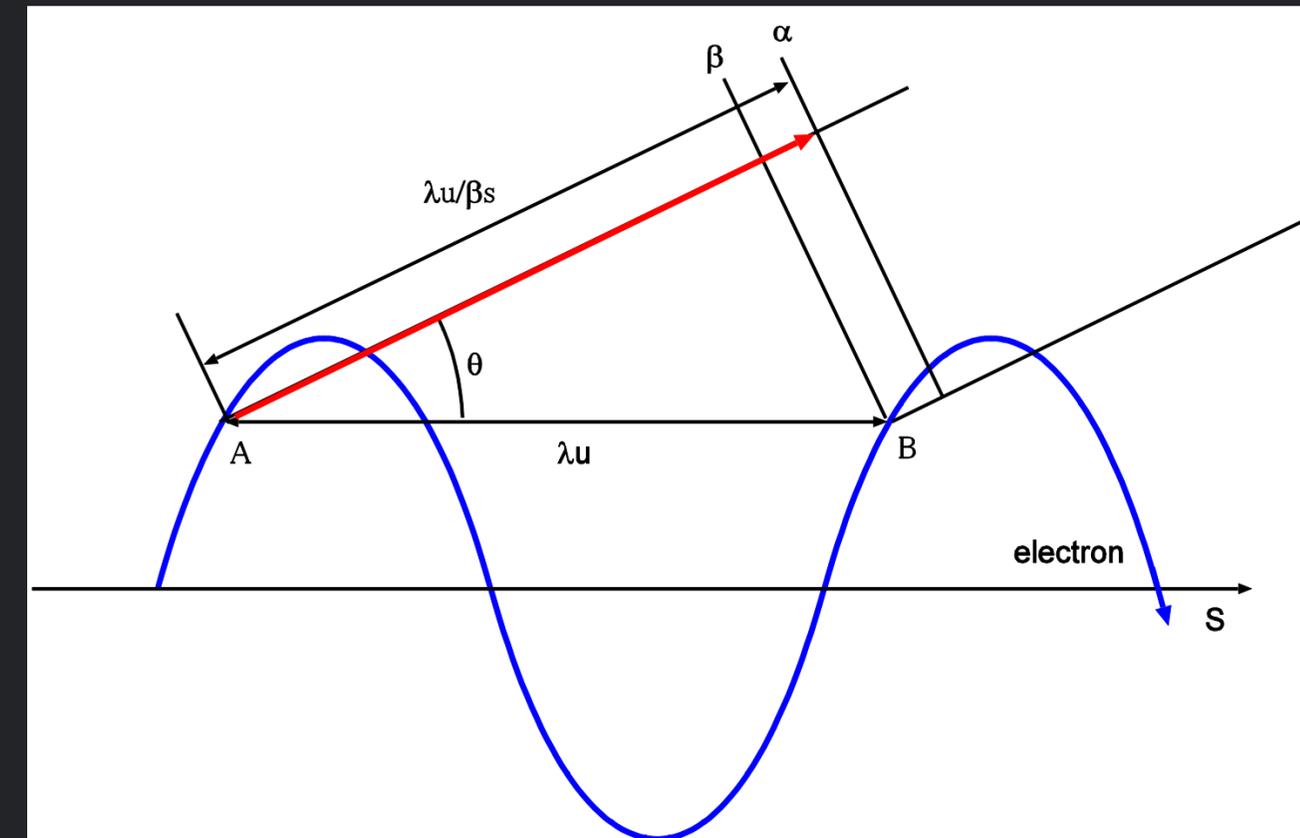
$$x_{max} = X_0 \ln \left( \frac{E_0}{E_C} \right) / \ln 2.$$



紙谷

# アンジュレーター輻射

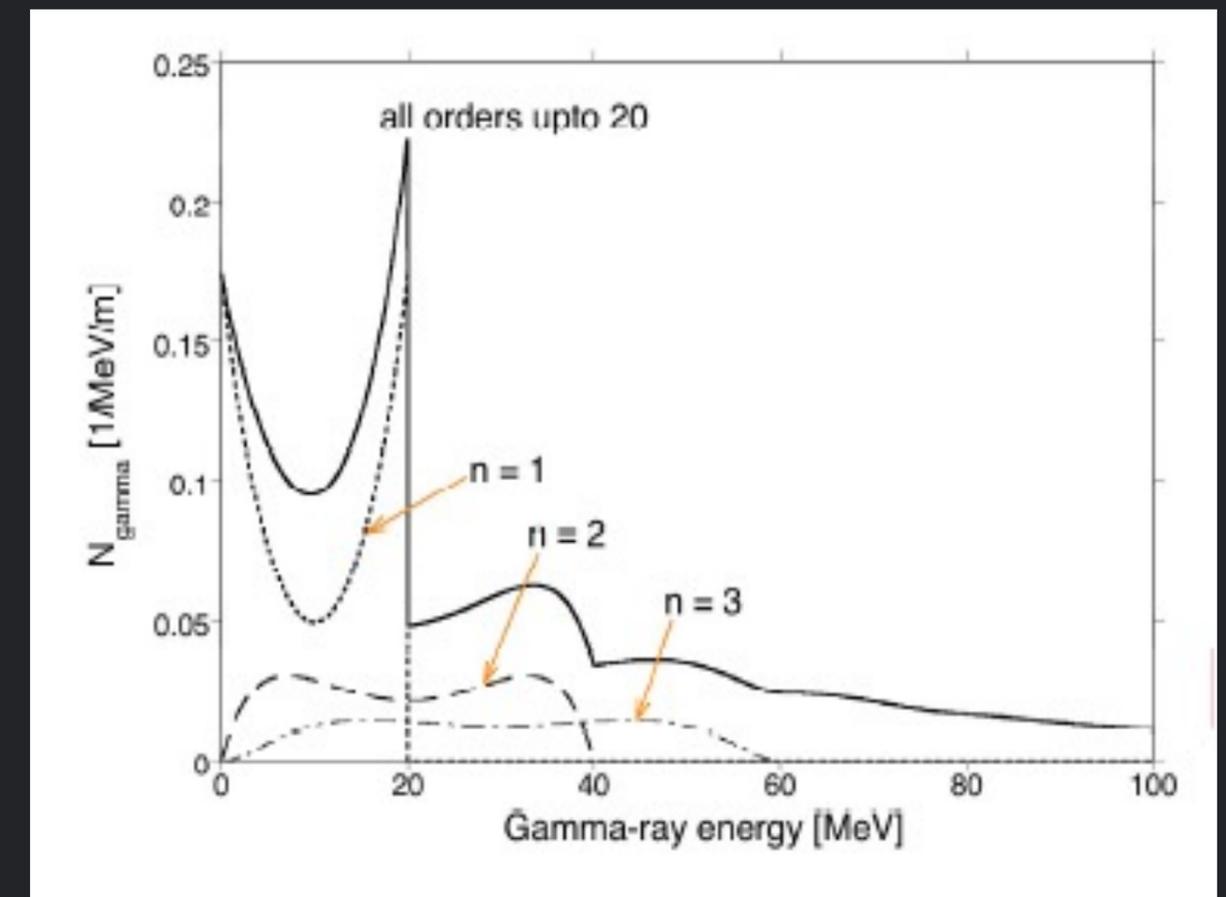
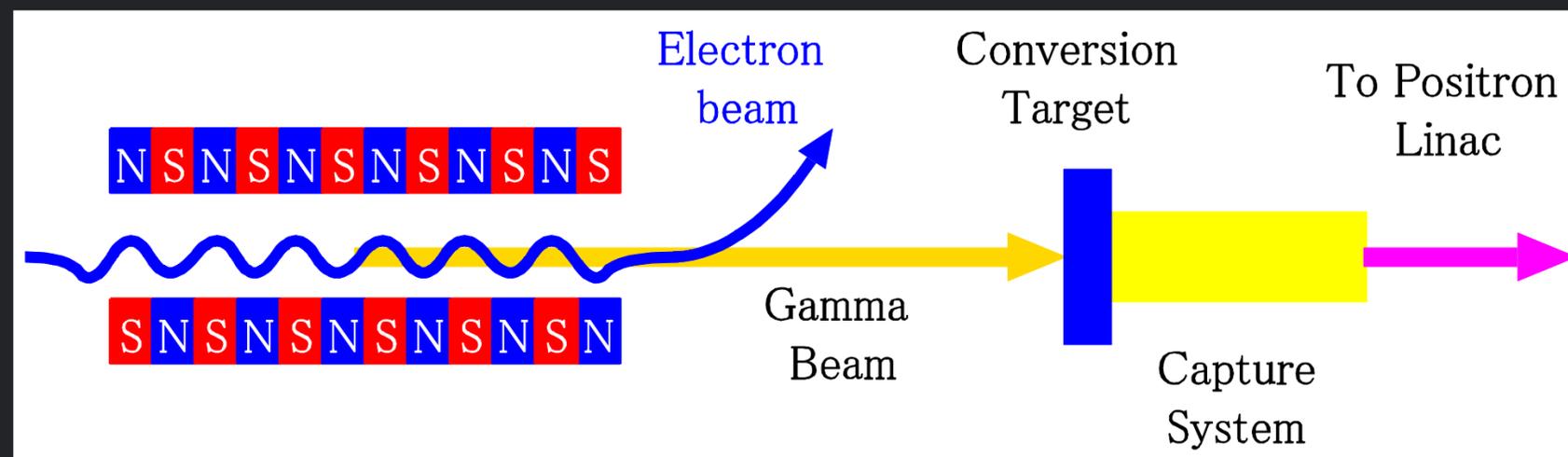
- 交番磁場により、電子はジグザグ運動をする。
- 加速を受けることにより、電子は電磁波を輻射する（シンクロトロン輻射）。
- 電子の  $s$  軸方向の速度は、光速よりも小さいので、電子は自分が発生した光に追い越される。
- 自分が一周前に放射した光の波面との差が波長の  $n$  倍 ( $n$ : 整数) の時、光は干渉により強められる（アンジュレーター輻射）
- $E=150\text{GeV}$ ,  $K=1$ ,  $B=1.0\text{T}$ ,  $\lambda=10\text{mm}$  で、 $E_{ph}=10\text{MeV}$ .



$$E_{ph}[eV] = 950 \frac{nE^2[GeV]}{\lambda_u[cm](1 + \frac{1}{2}K + \theta^2\gamma^2)}, \quad (190)$$

# アンジュレーター—陽電子源

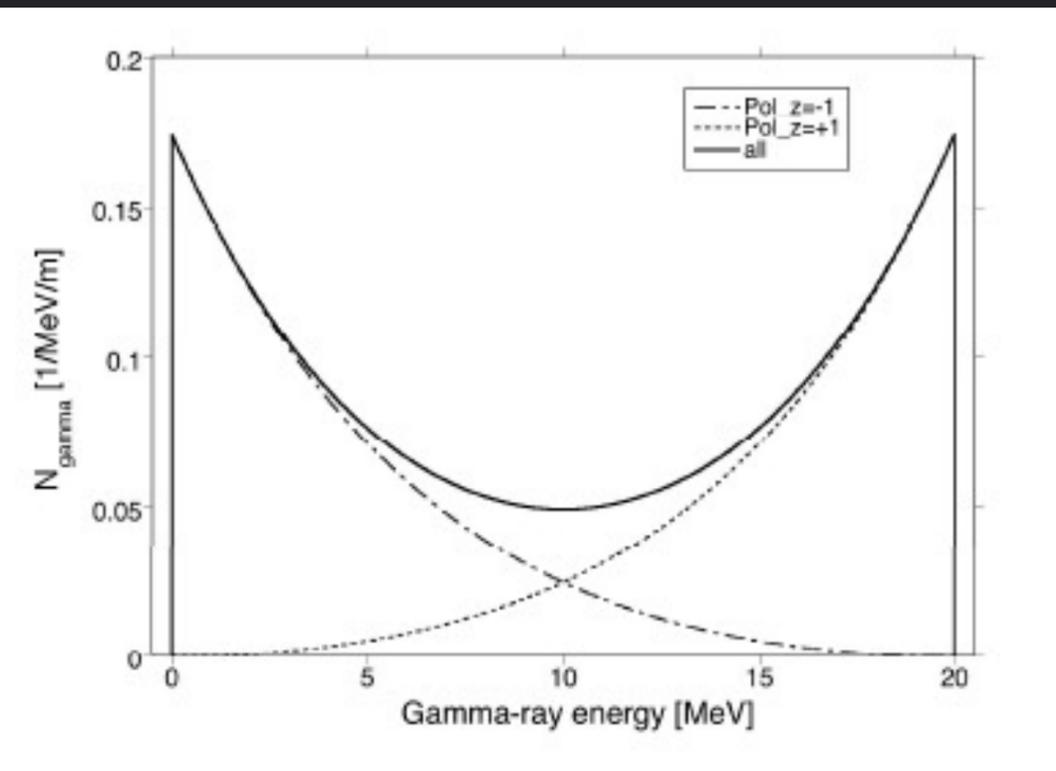
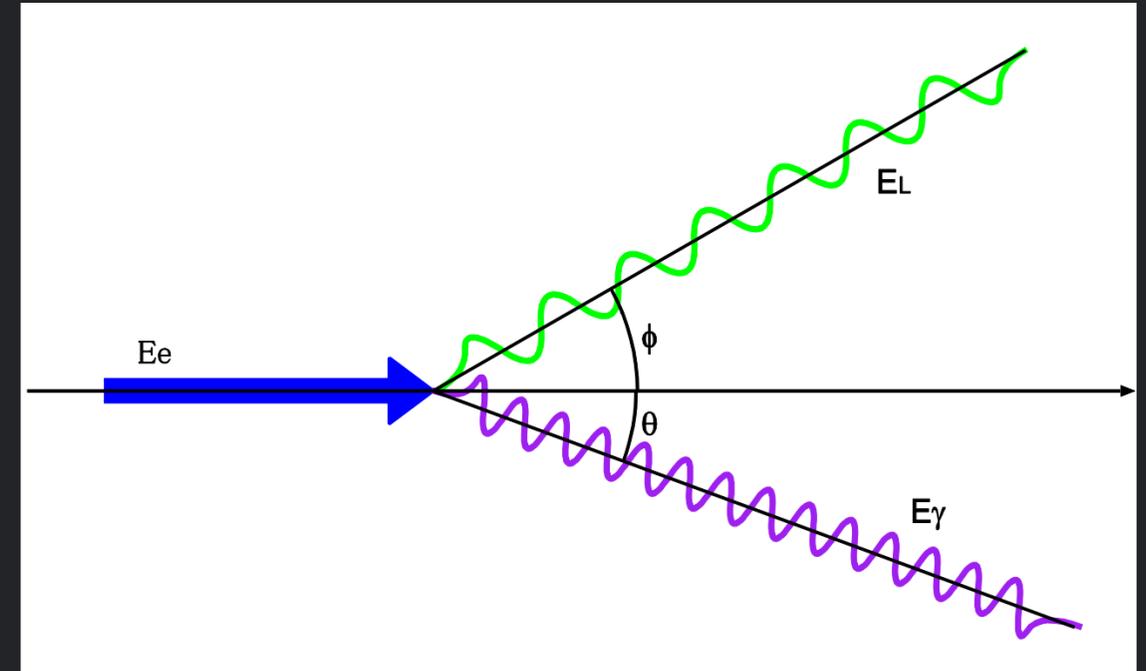
- アンジュレーター輻射からのガンマ線により陽電子を生成する。
- 10MeV程度のガンマ線ではシャワーは発達しない（5MeVの電子はイオン化が支配的）。
- いままでに人類が実現した電子ビームの最高エネルギーは104GeV. アンジュレーターによる陽電子生成に足りない。
- ILCでは衝突用の高エネルギー電子ビーム(125 GeV)を利用する。
- 円偏光アンジュレーターを使うと、陽電子は偏極。



# Laser Compton 散乱

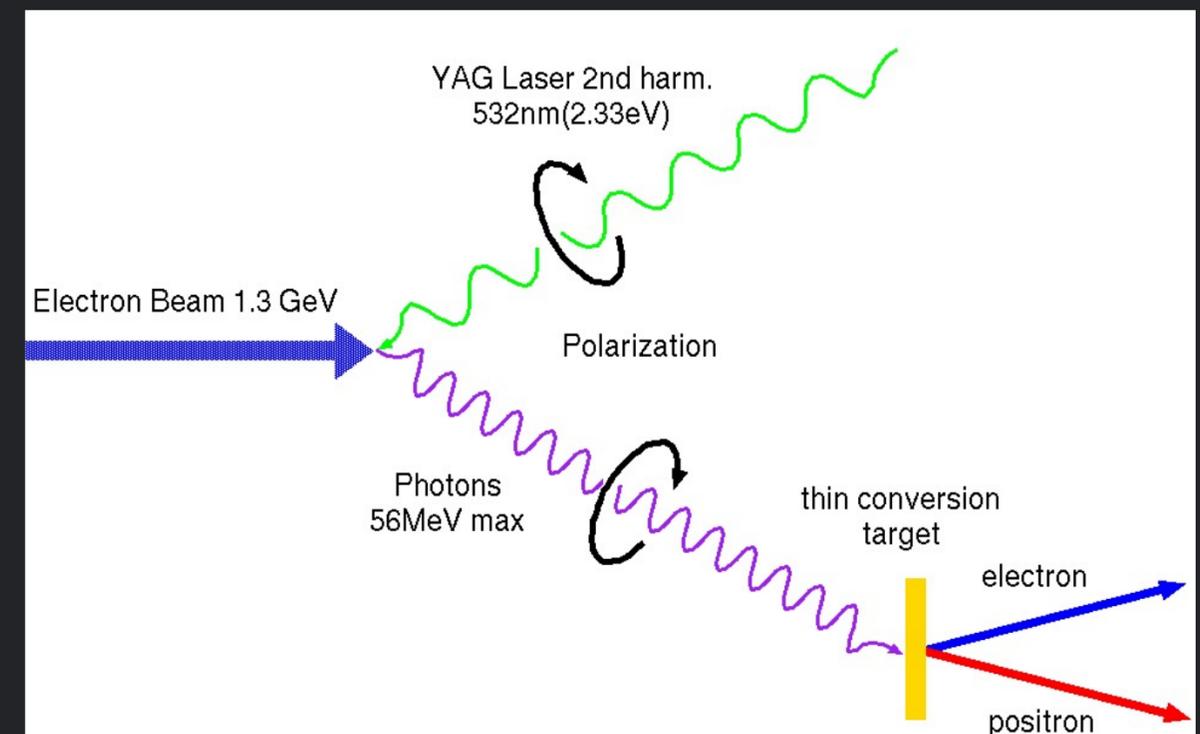
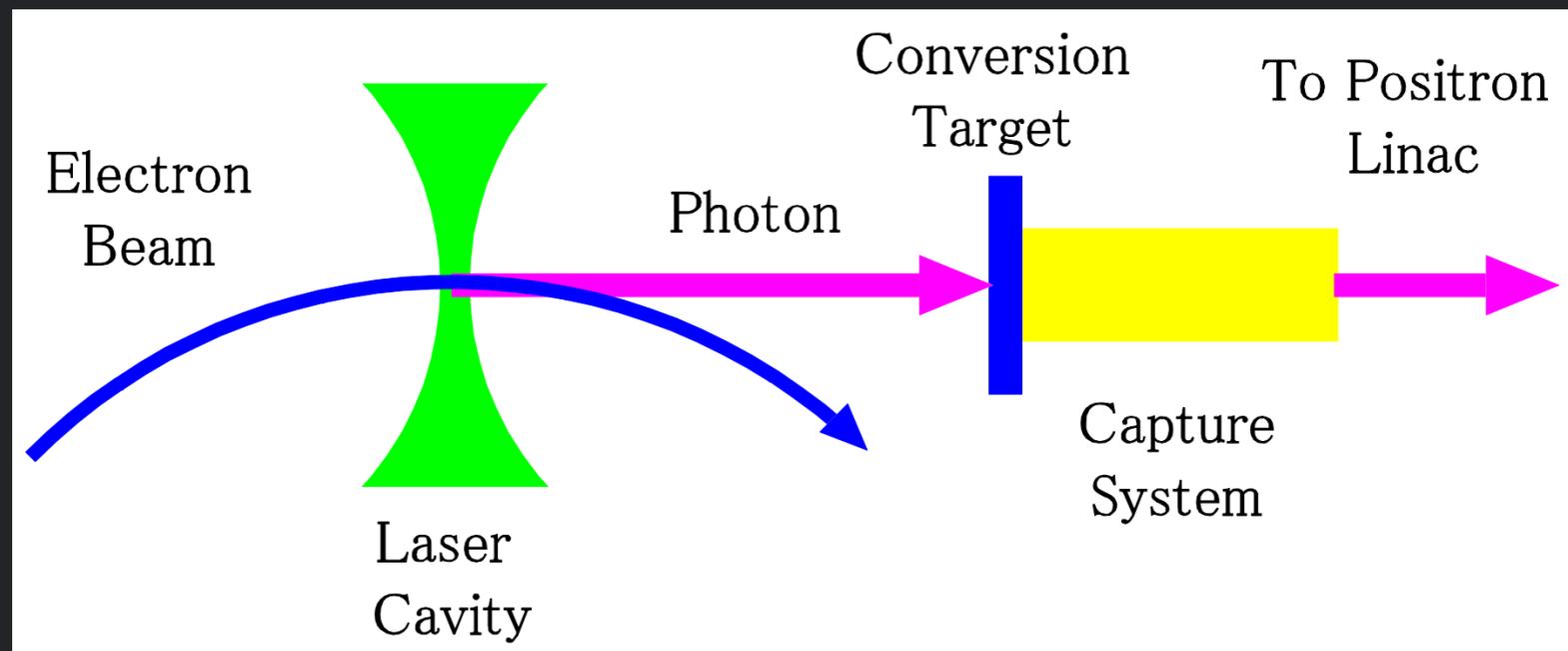
- Laser光子と高エネルギー電子とのコンプトン散乱。
- 電子ビームがブーストされていると、散乱後の光子はガンマ線領域になる。
- レーザー光子1eV、電子ビーム1GeVとすると、散乱後の光子のエネルギーは16 MeVとなる。

$$E_{\gamma} \sim \frac{4\gamma^2 mc^2 E_L}{mc^2 + 4\gamma E_L}$$



# Laser Compton陽電子源

- Laser Compton散乱から発生したガンマ線により陽電子を生成。
- 10MeV程度のガンマ線ではシャワーは発達しない。
- 大量のガンマ線が必要であるが、反応断面積は小さく、必要なガンマ線、陽電子を確保するのは容易ではない。
- 円偏光レーザーを使うと、発生する陽電子は偏極する。



# 陽電子の一生

## 電子ビーム

両親の結婚

電子ビームを生成加速。  
ガンマ線を発生させるための  
ドライバー

## ガンマ線生成

お母さんのお腹の中

対生成のためのガンマ線を  
放射により生成。

## 対生成

誕生

標的内の電磁場を利用して、  
ガンマ線から対生成反応に  
より陽電子を生成。

# 陽電子の一生

## 磁気収束

### 就学前教育

大きな横方向運動量を、磁場を用いて収束。

## RF補足

### 初等教育

RFバケツ（安定して加速される領域）内に陽電子を押しこめる。

## シケイン

### 中学受験

電子を取り去り、陽電子のみを通過させる。

# 陽電子ビームの一生

## 加速

### 受験勉強

陽電子を、DRへの入射エネルギーである5GeVまで加速する。

## エネルギー圧縮

### 入学試験

DRに上手く入れるように、エネルギーを圧縮する。

## DR

### 高等教育

ルミノシティの最大化のため、放射減衰による非対称エミッタンスビームとする。

# 陽電子ビームの一生

## バンチ圧縮

### 職業研修

DRで伸びきったバンチ長を、主加速で必要な長さまで圧縮。

## 主加速

### 就業

衝突エネルギー（ヒッグスFなら125GeV）まで超伝導加速器で加速する。

## 衝突

### 人生の総決算

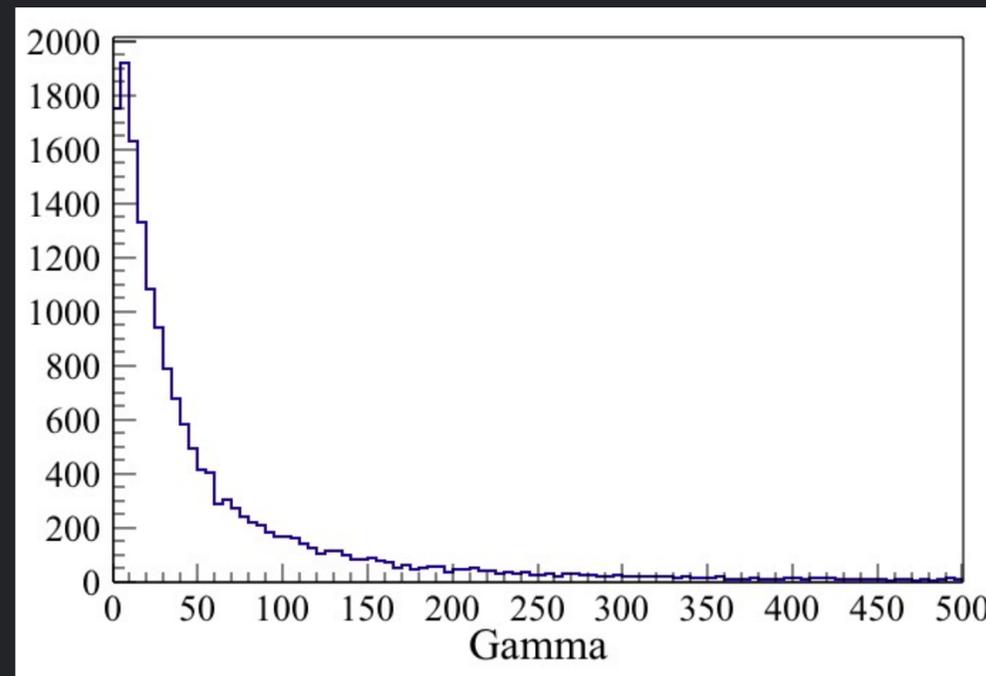
衝突する。あるものはヒッグスを生成し、あるものはダンプの熱となる。

# 陽電子の捕捉と安定加速



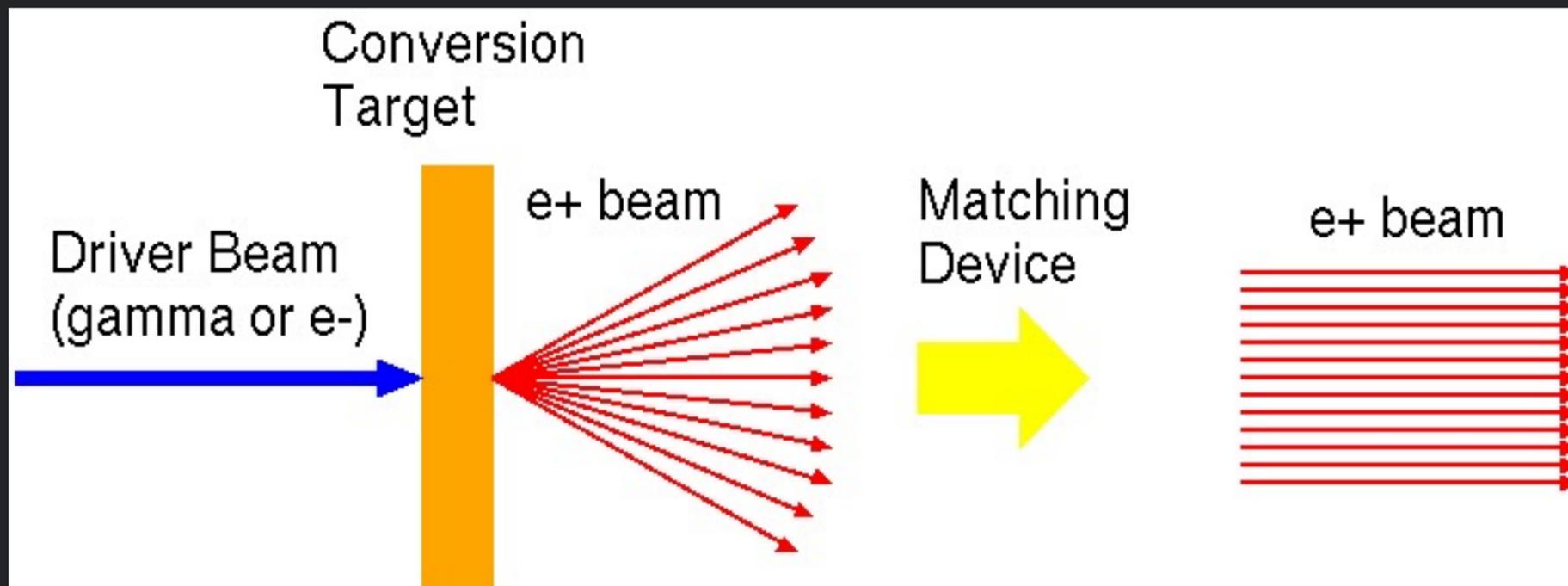
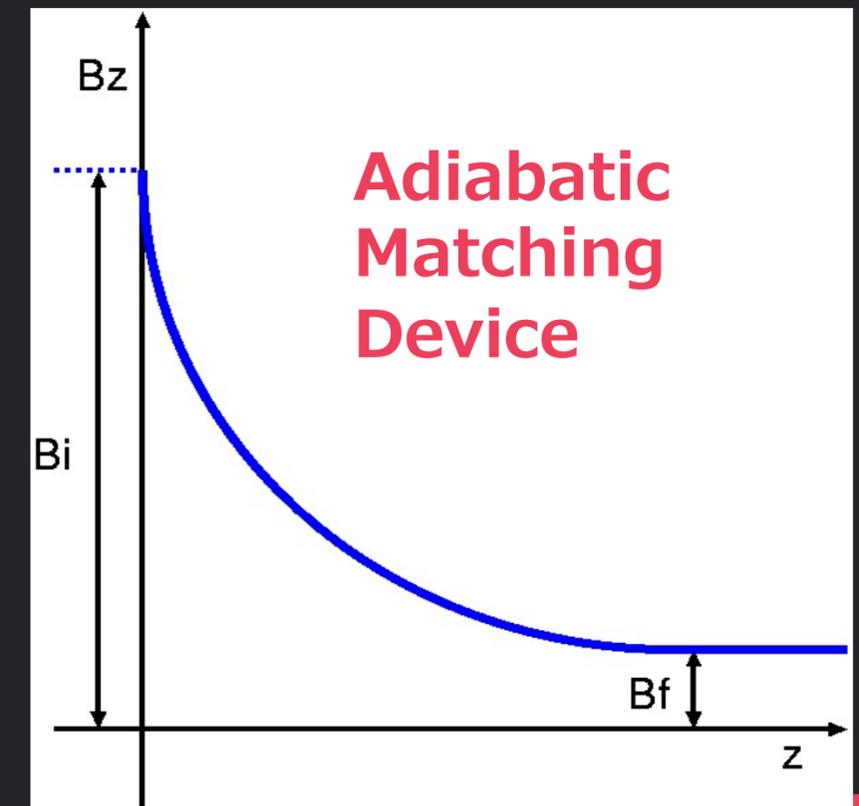
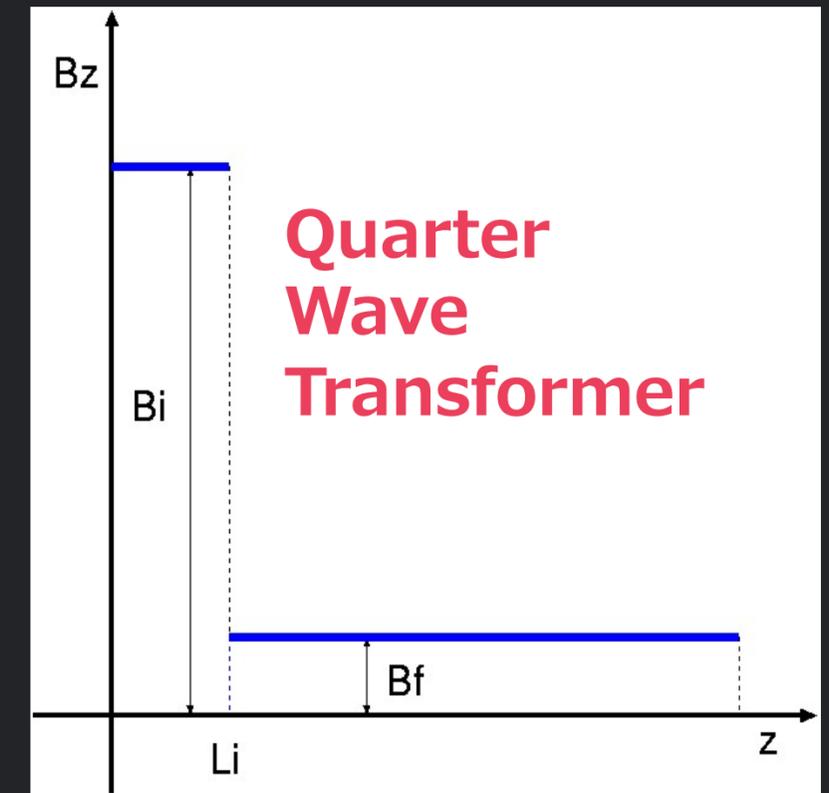
# 陽電子の捕捉

- 生まれた陽電子は大きなエネルギー分布（テール）、大きな横方向運動量を持ち、そのままではRF加速さえできない。
- 陽電子をRF加速できる形にすることが陽電子の捕捉である。
- 陽電子補足は関連する次の二つからなる。
  - 横方向運動量抑制（ $x$ - $y$  位相空間）
  - RFバケツへの捕捉（ $z$  位相空間）



# 横方向運動量抑制

- 生成された陽電子は横方向に大きな運動量を持つ。
- このような陽電子はビームサイズも大きくなり、また位相スリップ（後述）も起こすため、ほとんどがうまく加速されない。
- $B_z$ を利用して、横方向運動量を抑制する。



# Flux Concentrator as AMD

- Flux Concentratorという特殊なパルス磁石により、AMDの機能を実現する。

- AMD磁場

$$B_z = \frac{B_0}{1 + \mu z}$$

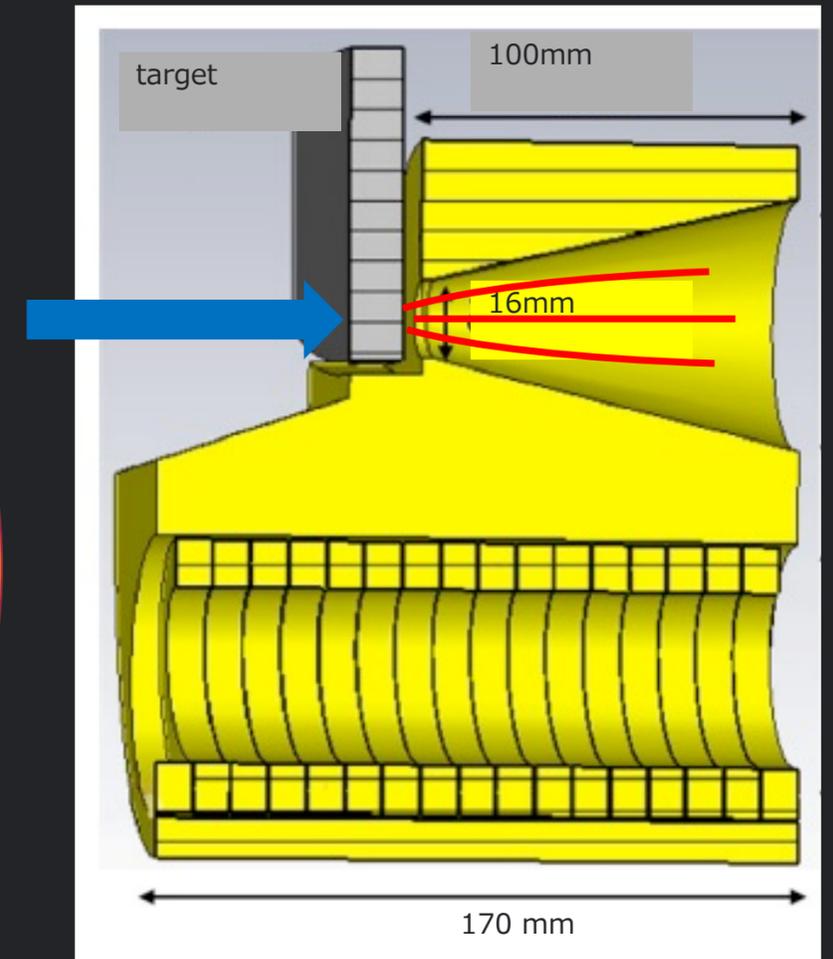
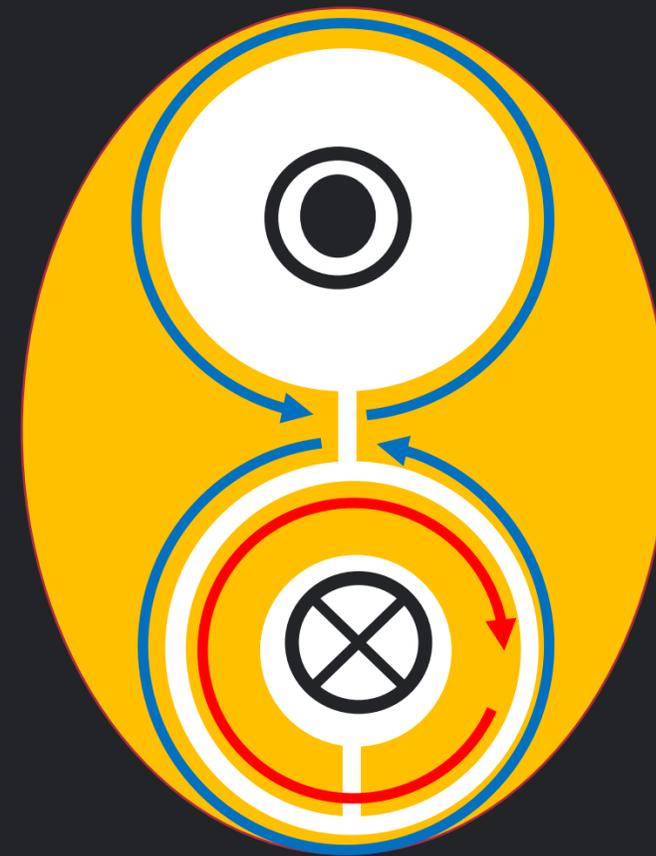
- 陽電子は磁場により回転運動（サイクロトロン運動）をするが、磁場が弱くなるに従い、回転半径は増大し、横方向運動量は減少する。

- 断熱不変量 (Adiabatic invariance)

$$\frac{1}{2\pi} \int p dq = 2\rho p_t = 2 \frac{p_t^2}{eB}$$

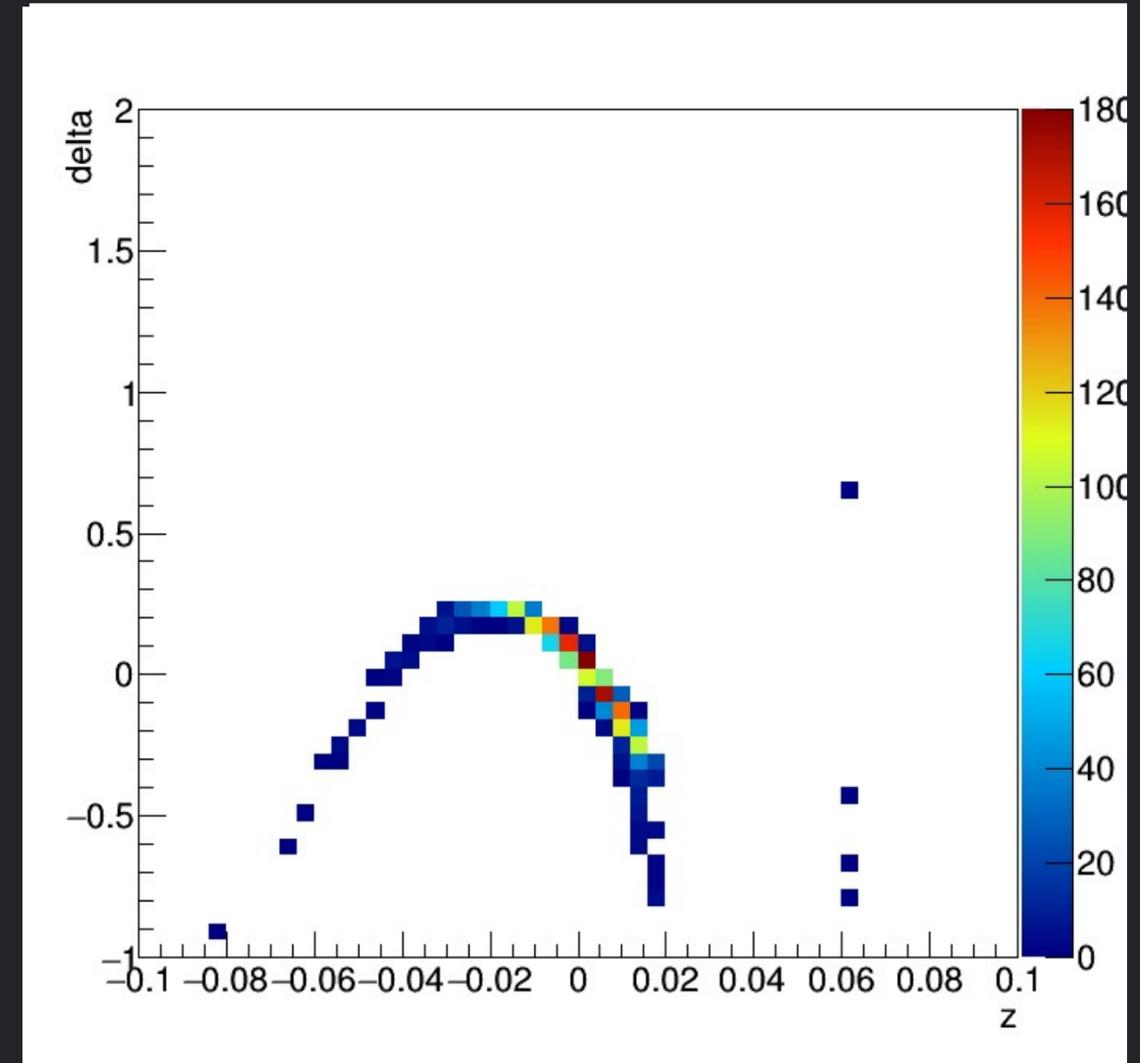
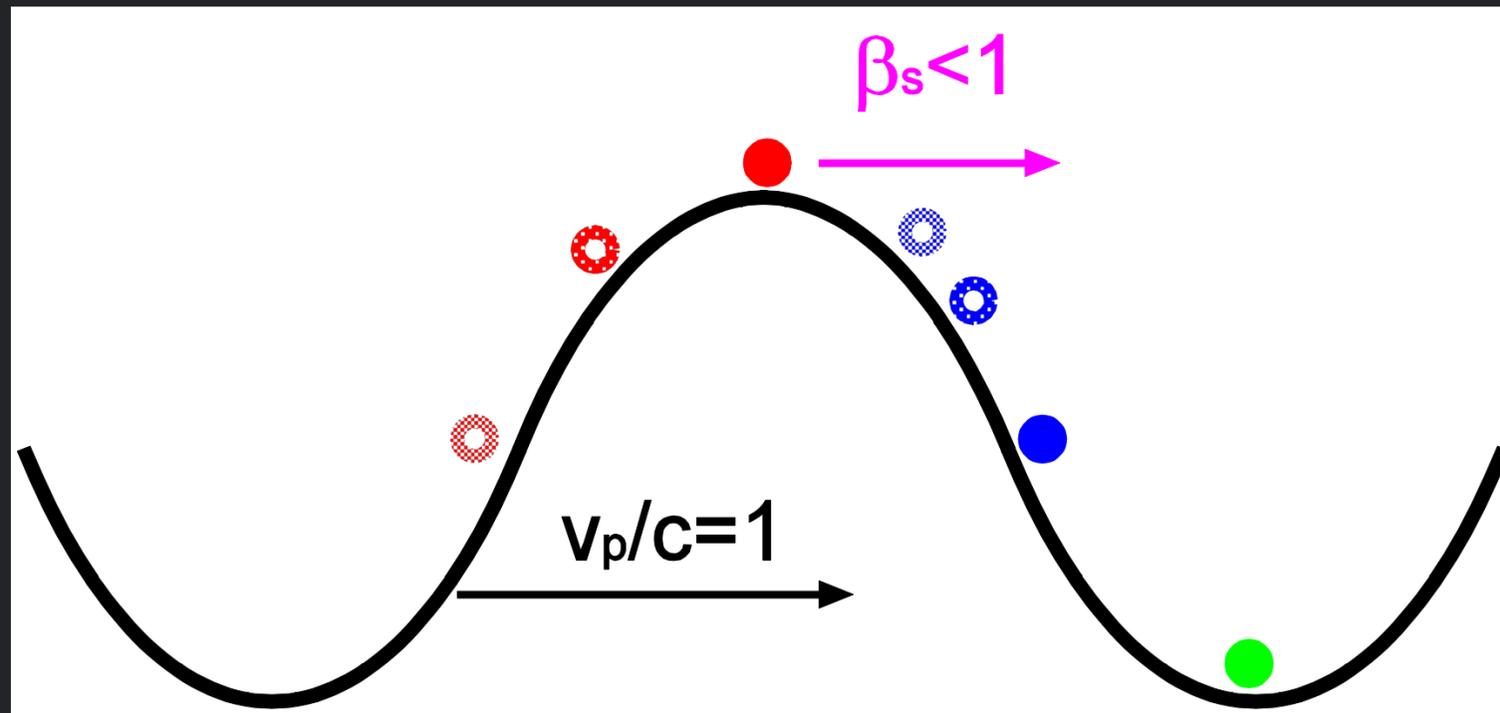
$$p_{t(z)} = \sqrt{\frac{B(z)}{B_i}} p_{t0}$$

- $B_i > B(z)$ なので、磁場低減に従い、横方向運動量が減少。



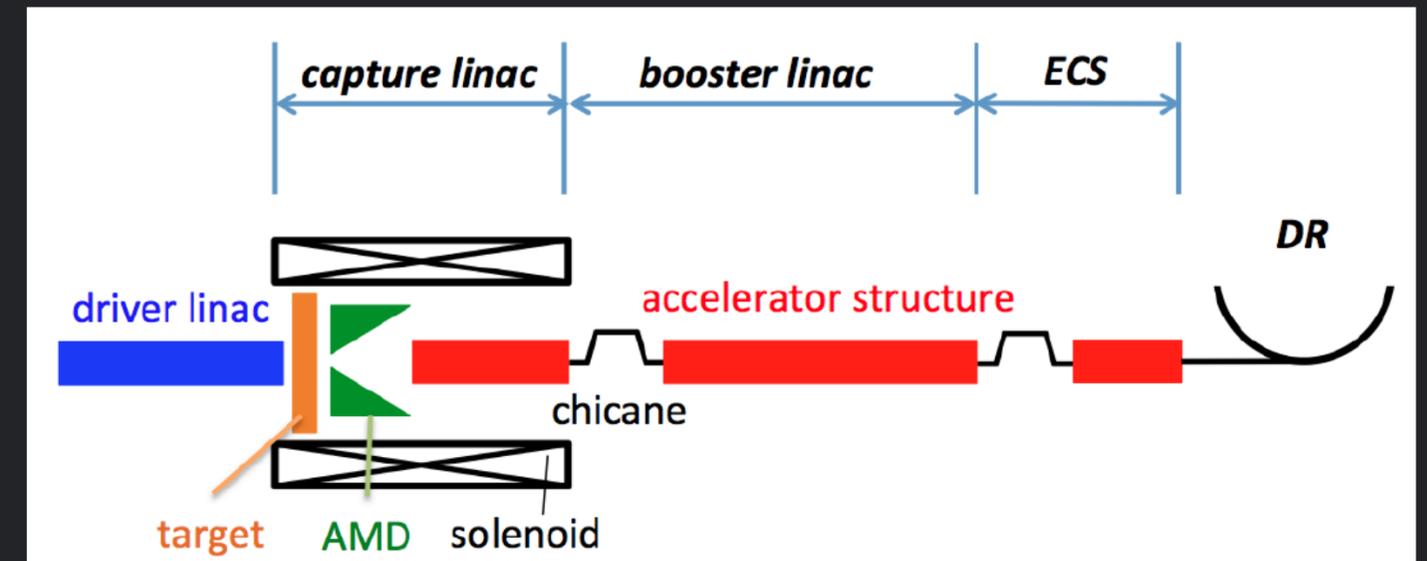
# RF補足

- 標的直後の陽電子は時間的には局在しているが、横方向に大きく拡がり、エネルギー的にも大きく拡がっている。
- 陽電子を**減速位相**に乗せる。陽電子は速度が小さくなり、後ろの位相にずれていく。
- 陽電子は徐々に加速位相に入り、加速される。
- 加速された陽電子はそれ以上遅れないので、陽電子は**加速位相にかき集められる**。(減速RFキャプチャー)



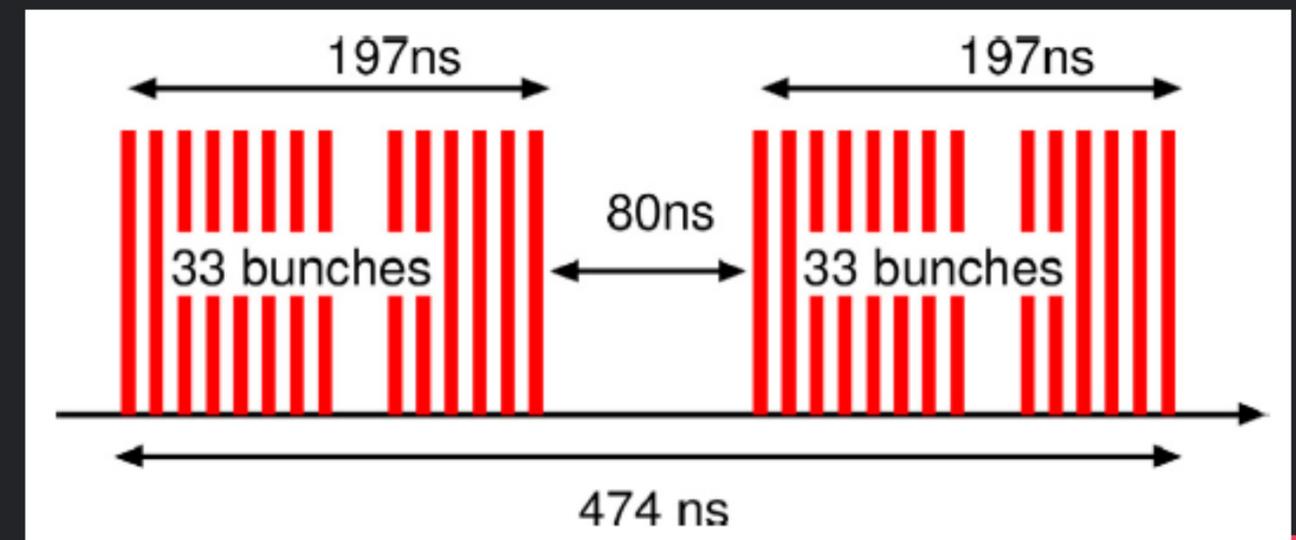
# 安定加速

- 電子ドライブ陽電子源では、パルス内平均電流 0.78Aの特殊なマルチバンチ構造で陽電子を生成する。
- 補足線形加速器は定在波型空洞、ブースターは進行波型空洞を利用する。
- 各々において、ビーム負荷による電圧変動（ビームによる電圧の減少）が起きるため、その補償が必要。



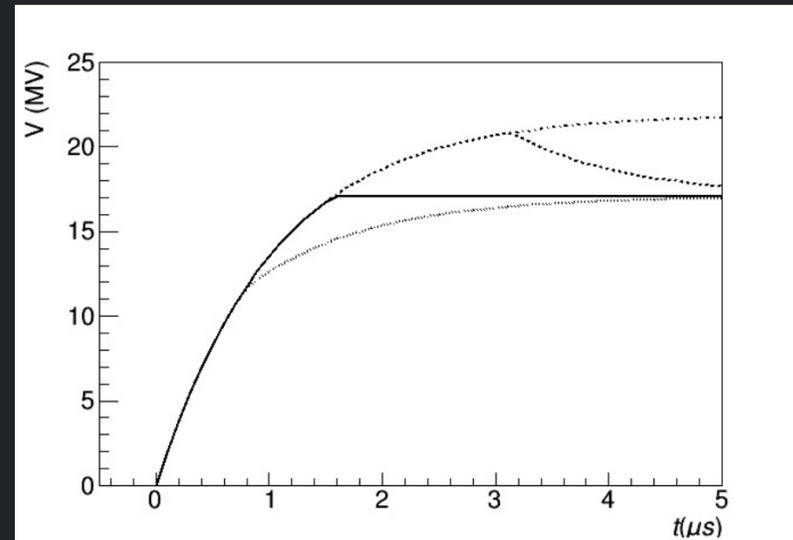
例：定在波型加速管の電圧

$$V(t) = \frac{2\sqrt{\beta P_0 R}}{1 + \beta} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) - \frac{\omega R I_{B0}}{1 + \beta} \left(1 - e^{-\frac{t-t_b}{\tau}}\right) e^{i\theta}$$

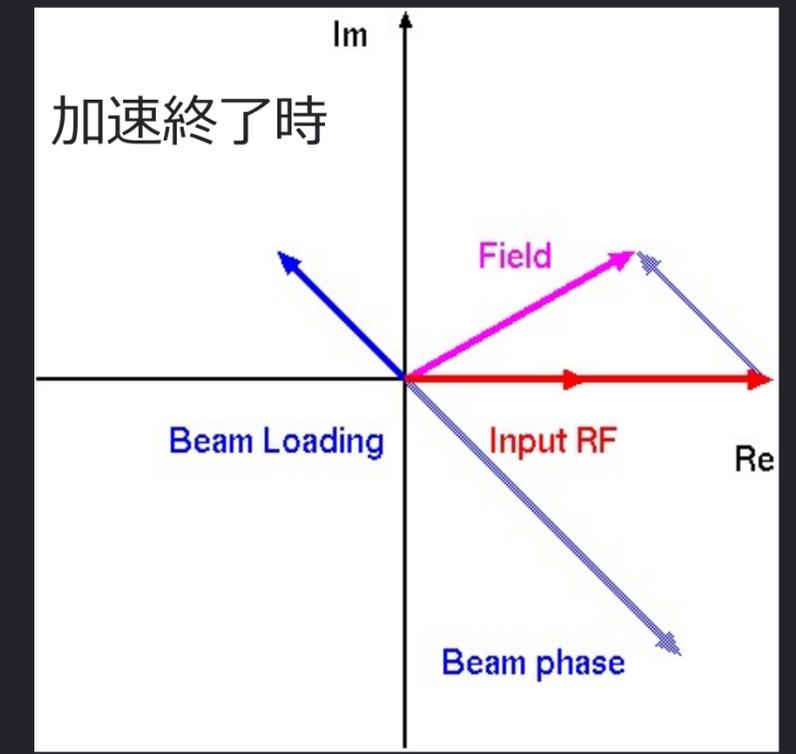
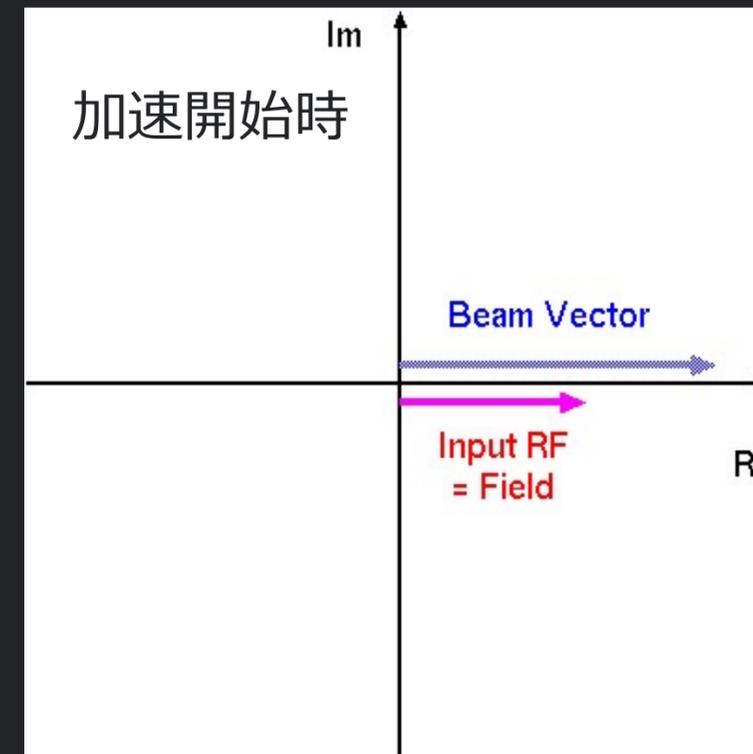
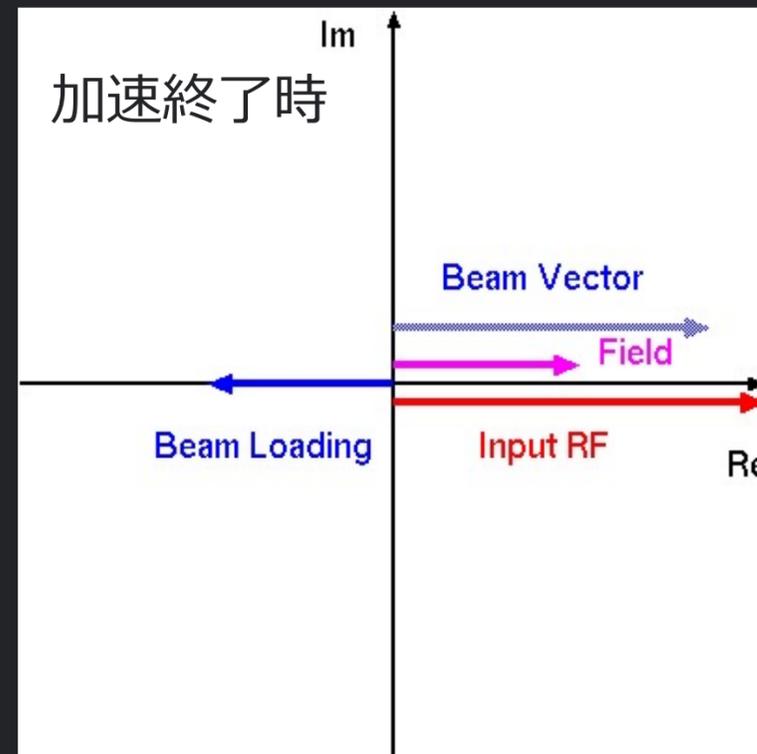
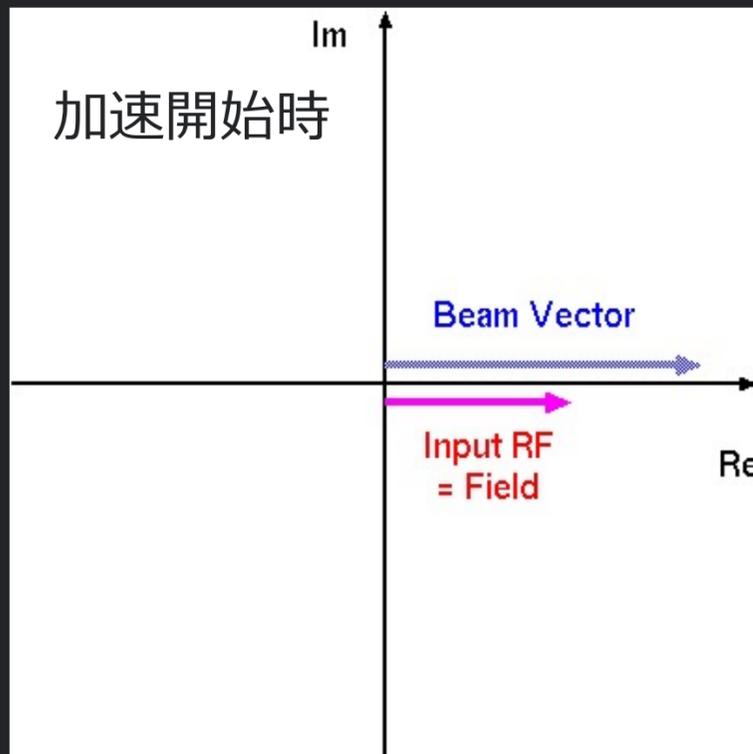


# 補足線形加速器におけるビーム負荷

- 普通の加速 (on crest 加速)
- 加速開始時と終了時で加速電場が等しくなるように調整。



- Capture Linacの場合 (off crest 加速)
- RF電場とビーム電場が同位相にない。
- いくら条件を合わせようとしても、位相が異なるので、RF電場をうまく調整しても、ビーム電場を打ち消すことができない。



# 補足線形加速器における補償（加速の場合）

- 入力RFに対する位相変調を考える。

$$V_c(t) = V_{RF0} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) e^{i\varphi} + V_B \left(1 - e^{-\frac{t-t_b}{\tau}}\right) e^{i\theta}$$

- 加速開始時  $t = t_b$  における空洞電圧  $V_{c0}$  を一定にするには、RFとビームの漸近値が空洞電圧と等しければよい。

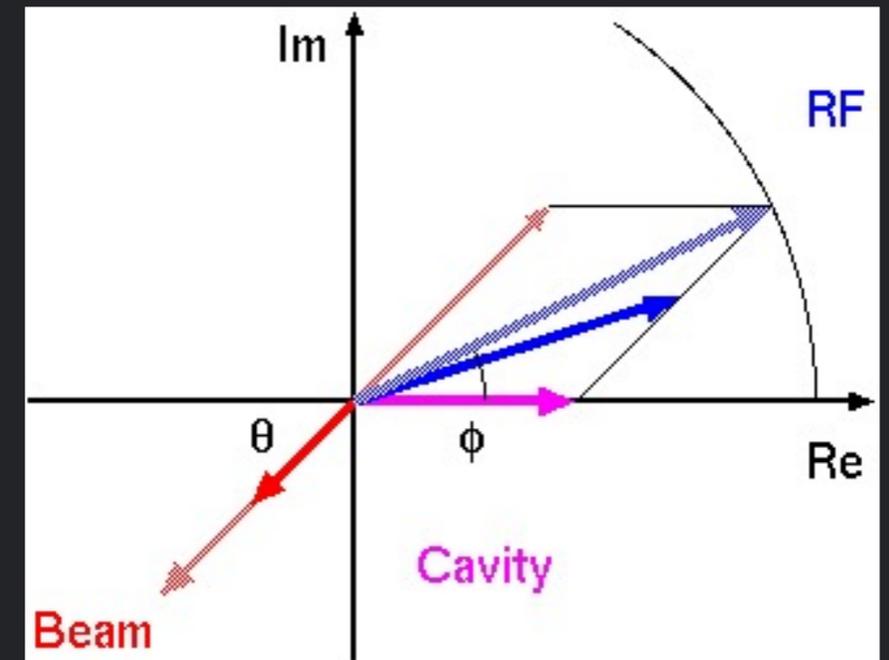
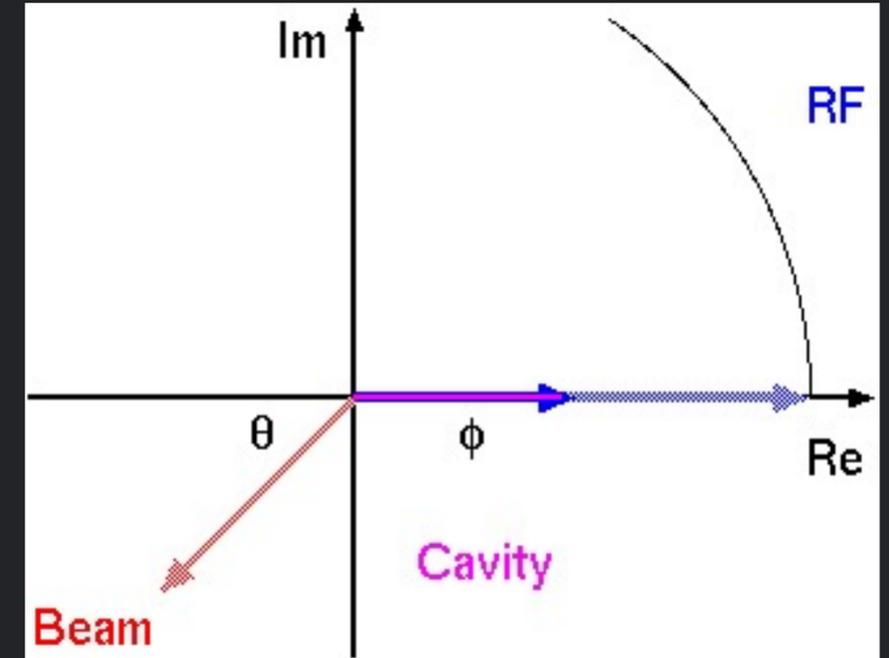
$$V_{RF0} e^{i\varphi} + V_B e^{i\theta} = V_{c0} = V_{RF0} \left(1 - e^{-\frac{t_b}{\tau}}\right)$$

入力RFのパワーを一定とすると、

$$\varphi = \sin^{-1} \left( -\frac{V_B}{V_{RF0}} \sin \theta \right)$$

$$V_{c0} = \sqrt{V_{RF0}^2 - (V_B \sin \theta)^2} + V_B \cos \theta$$

$$t_b = -\tau \log \left( 1 - \frac{V_{c0}}{V_{RF0}} \right)$$



# 補足線形加速器における補償（減速の場合）

- 基本的に同じ考え。ただ、ビームが減速される状態の場合、ビーム負荷は加速場なので、空洞の安定電場が、入力RFの漸近値より大きい

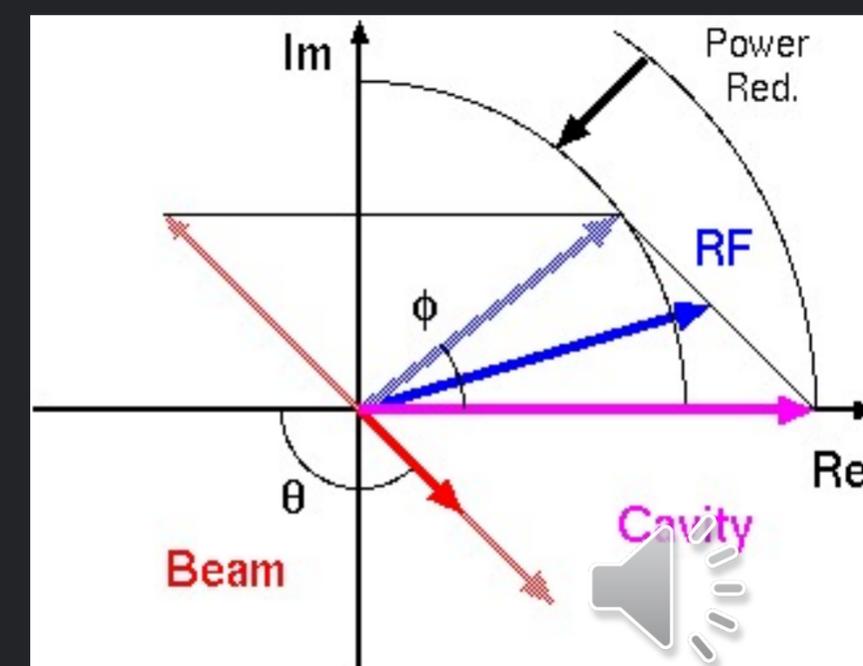
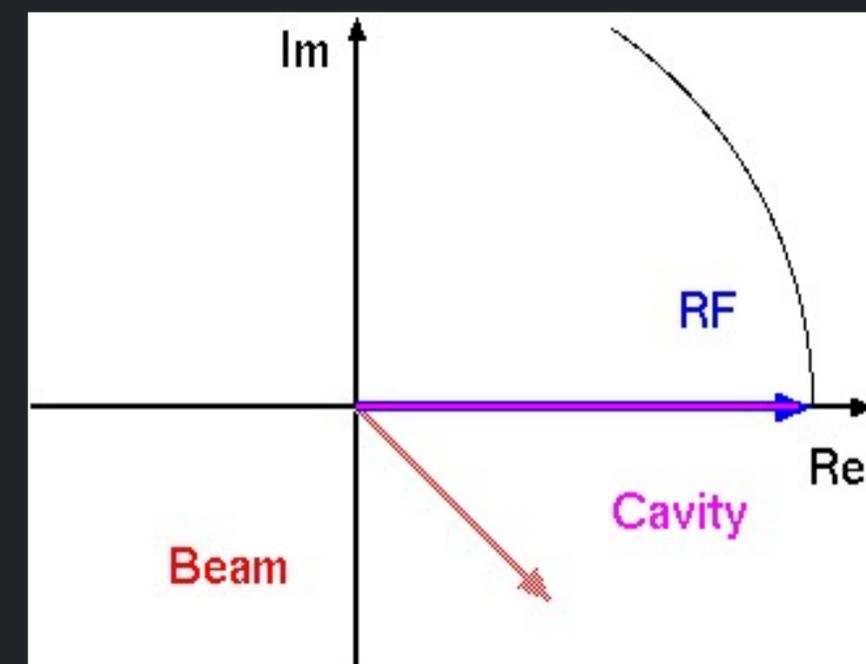
$$|V_{RF}e^{i\varphi} + V_B e^{i\theta}| > V_{RF0}$$

- 入力RFの漸近値を安定電場とする条件を考えると、入力RFのパワーを下げる必要。

$$V_{RF1}e^{i\varphi} + V_B e^{i\theta} = V_{C0} = V_{RF0}$$

$$\varphi = \sin^{-1} \left( -\frac{V_B}{V_{RF1}} \sin \theta \right)$$

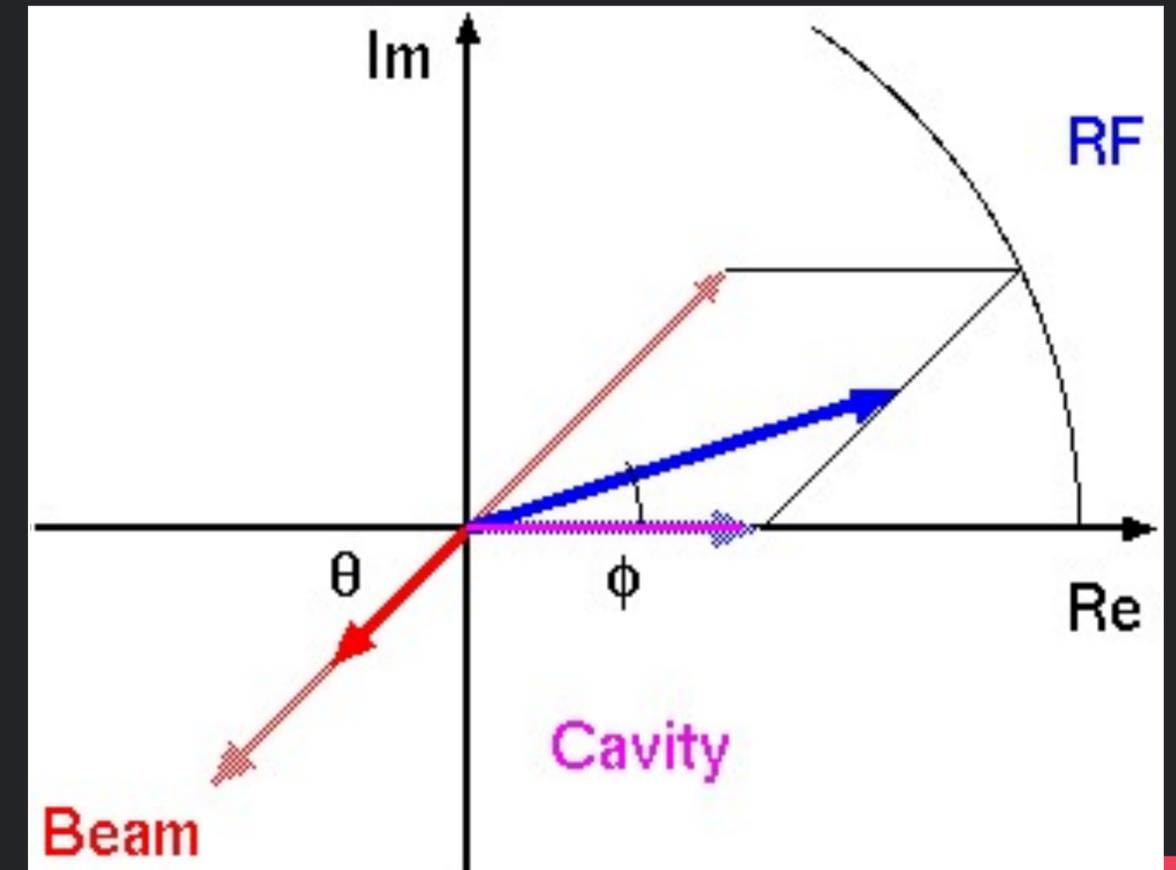
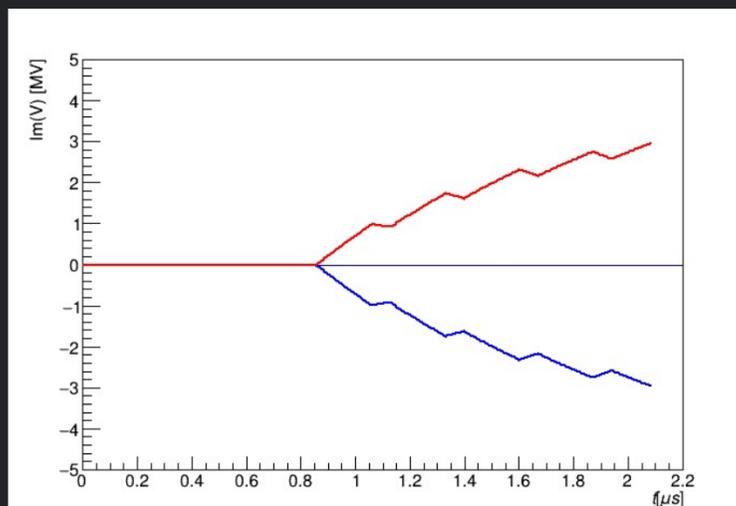
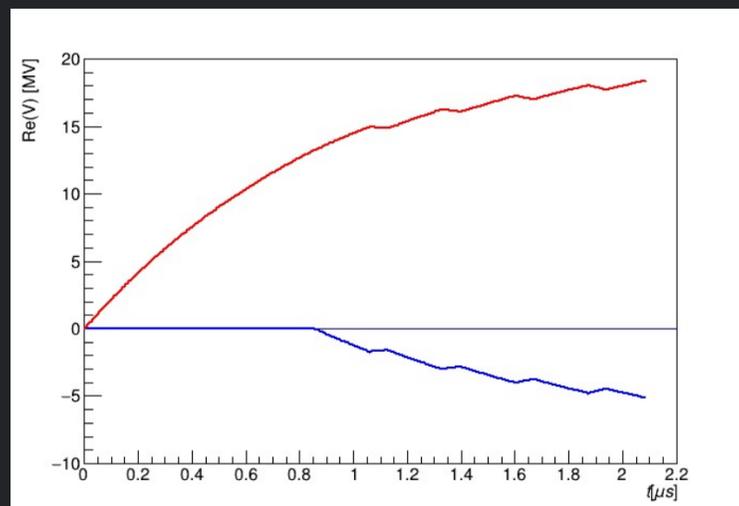
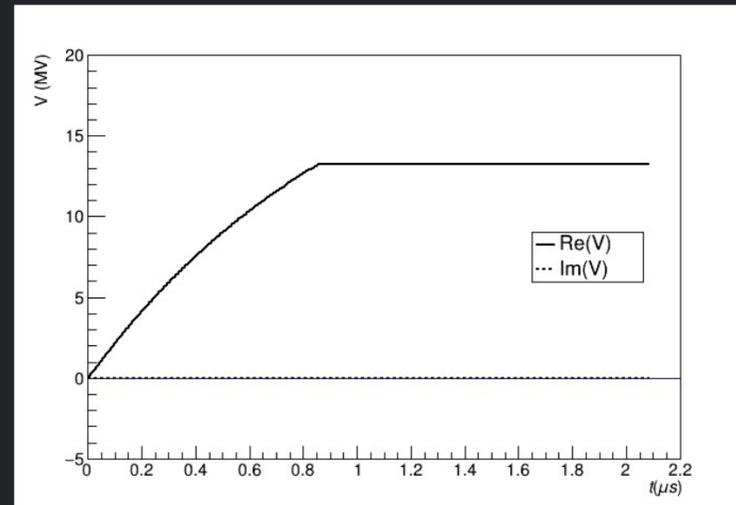
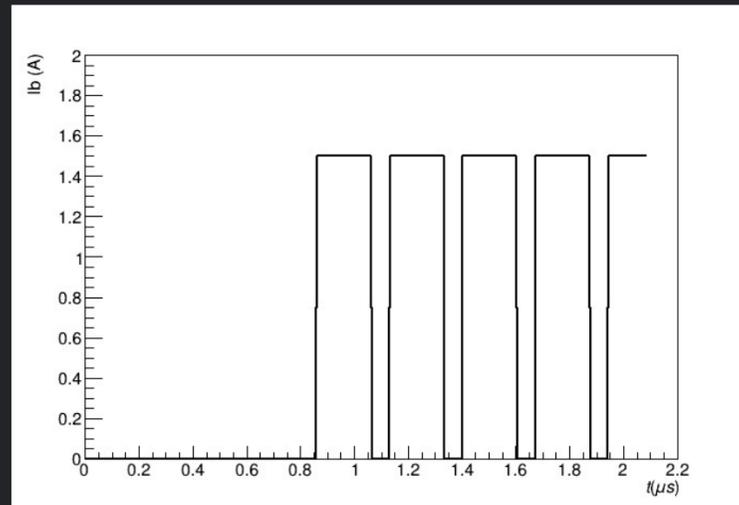
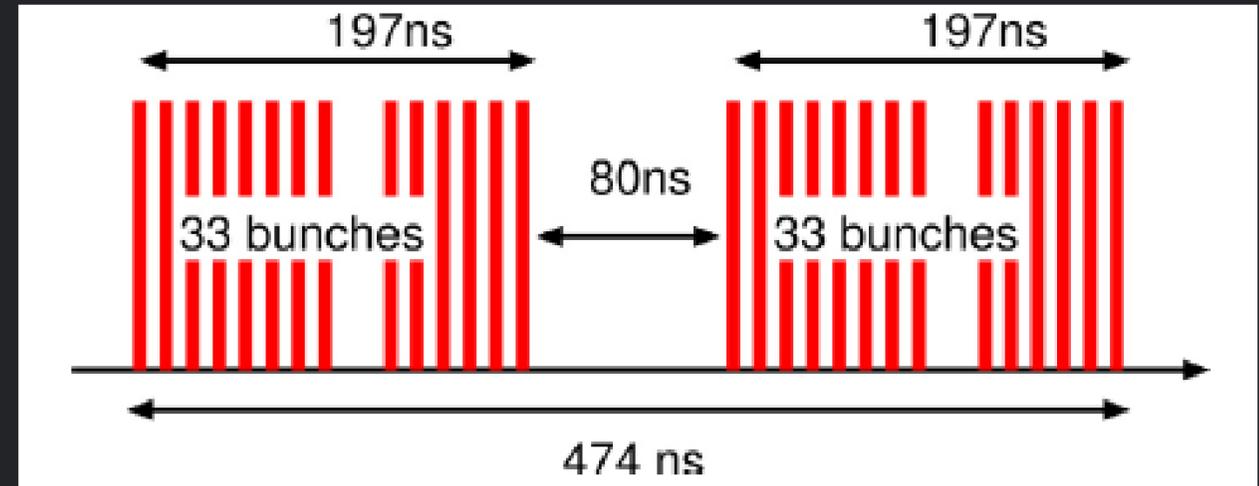
$$V_{RF1} = \sqrt{V_{RF0}^2 - V_B^2 - 2V_{RF0}V_B \cos \theta}$$



# 間隙への対応

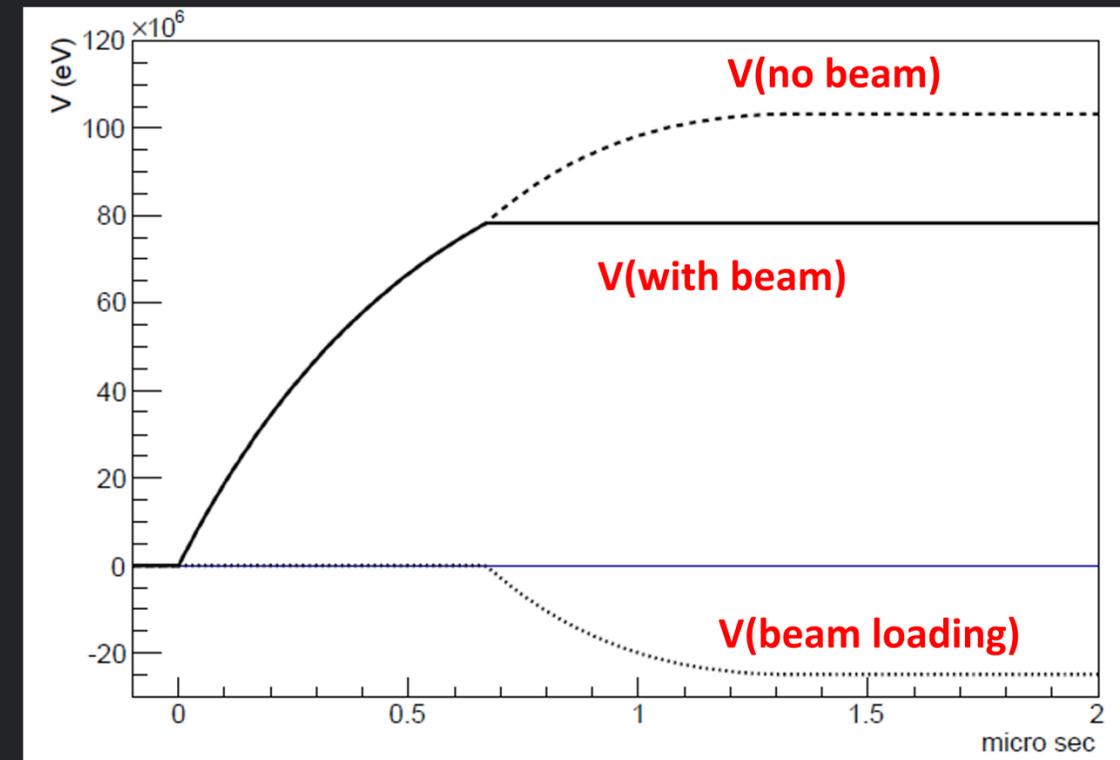
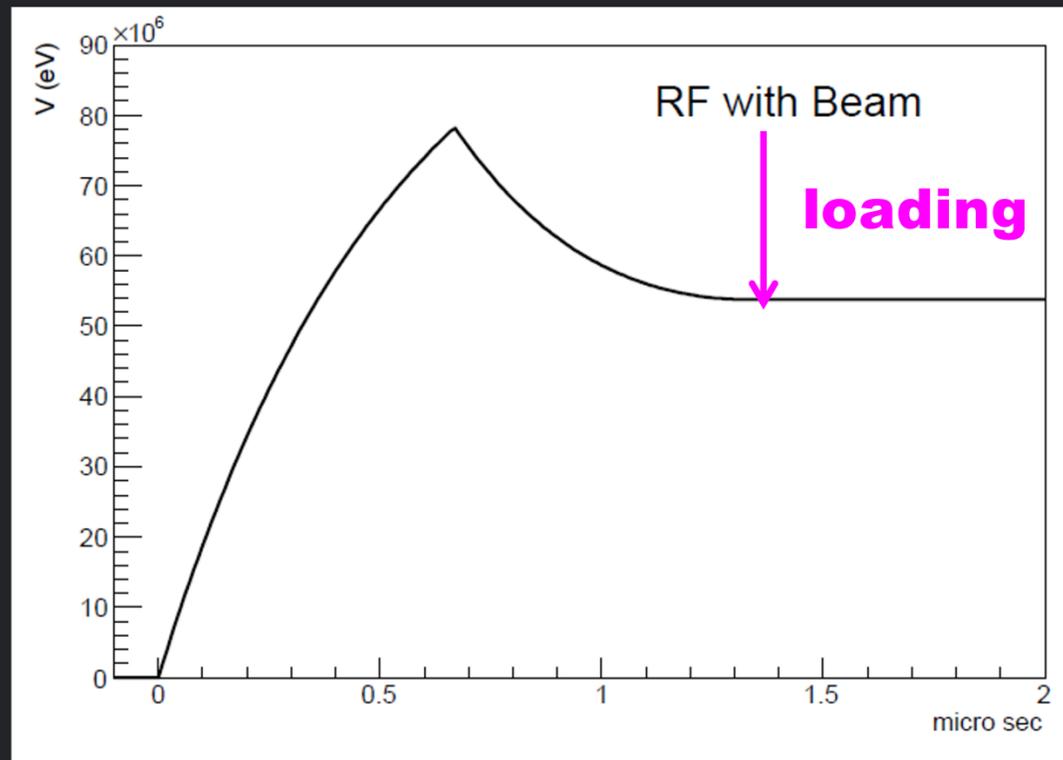
バンチ列に隙間があると、その部分ではビーム負荷が消滅する。  
つぎのようにスイッチすると変動しない。

$$V_{RF} = \begin{cases} V_{RF0} & (0 < t < t_b) \\ V_{RF0} e^{i\varphi} & \text{for beam pulse} \\ V_{C0} & \text{for gap} \end{cases}$$



# 進行波型加速管でのビームローディング補償

- ブースターでもCapture Linacと同様に、ビームローディングの補償が必要。
- ビームは加速位相の真上に乗っかるので、こちらは位相変調の必要はない。
- 一方で、進行波型加速管におけるビームローディング補償は複雑でややこしい。
- 電場の減少を補うために、ビーム加速と同時にRFパワーを増大させる：Amplitude modulation.



# AM変調

任意の時間の関数である入力RFパワーに対して発生する進行波型加速管の電圧は、ラプラス変換を利用して求めることができる。（電気回路と一緒に）

$$V(s) = \frac{\omega L}{Q(1 - e^{-2\tau})} \frac{1}{s + \omega/Q} \mathbf{E(s)} \left(1 - e^{-(s+\omega/Q)t_f}\right) \quad \leftarrow \text{RFによる電場}$$



$$-\frac{\omega r_0 L}{2Q(1 - e^{-2\tau})} \frac{I_0}{s^2} e^{-st_f} \left[ 1 - e^{-\frac{\omega}{Q}t_f} - \frac{\omega(1 - e^{-st_f - 2\tau})}{Q(s + \omega/Q)} \right],$$

ビームによる電場

逆ラプラス変換により、時間ドメインでの電場を計算できる。

# 階段状の変調

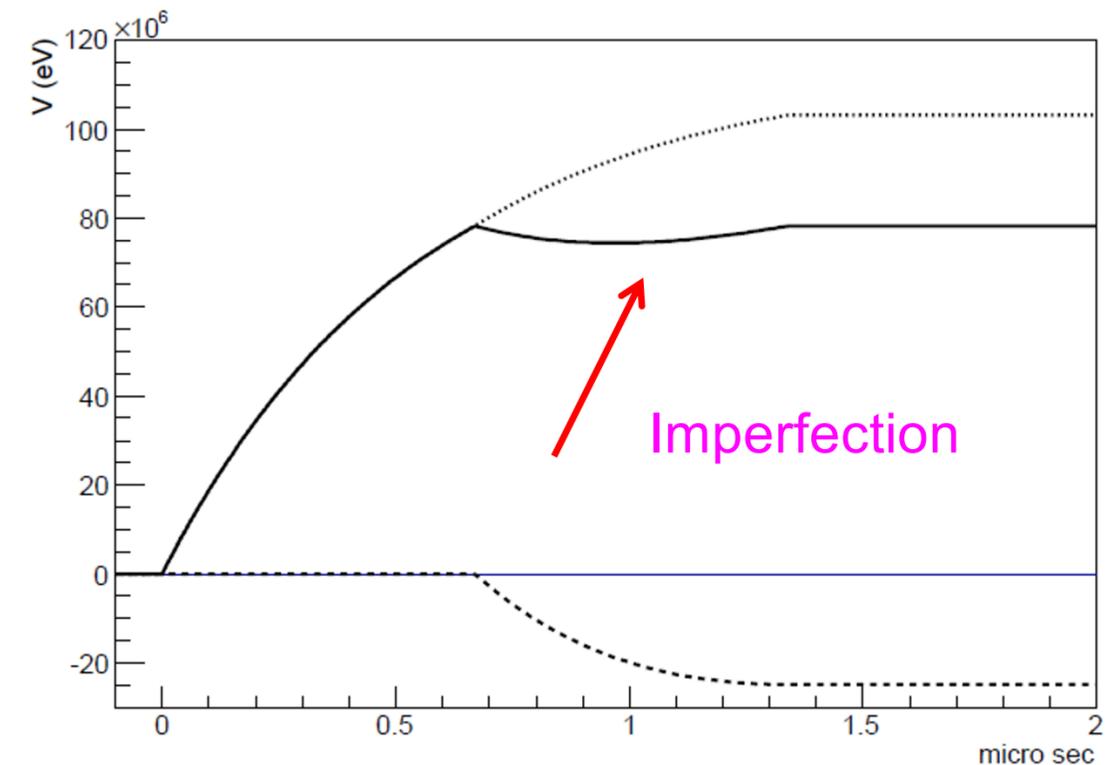
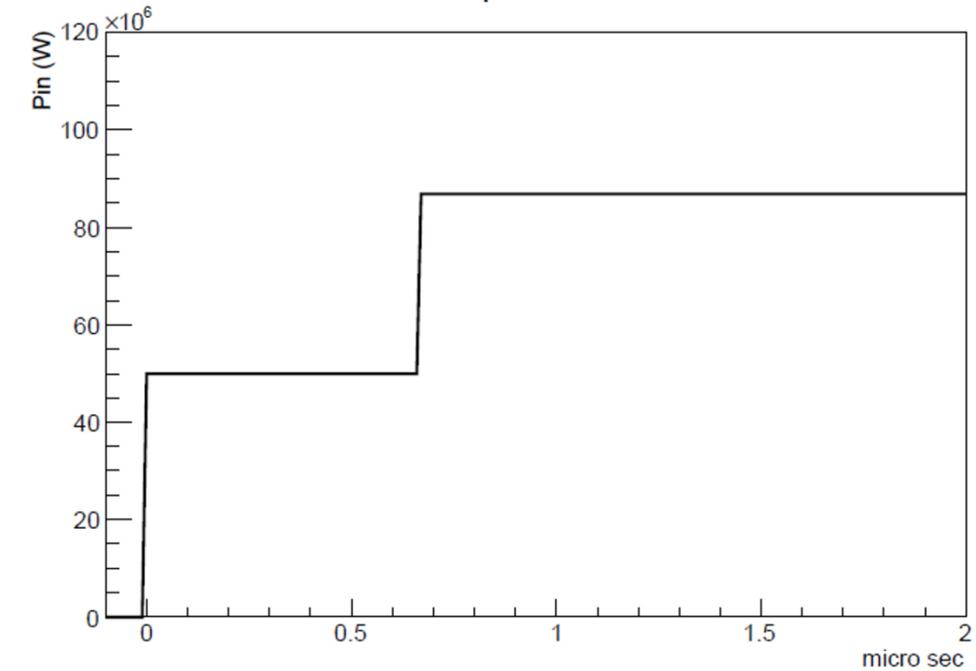
$$E(t) = E_0U(t) + E_1U(t - t_f),$$

$$E(s) = \frac{E_0}{s} + \frac{E_1}{s}e^{-st_f},$$

$$V(t) = E_0L + \frac{LE_1}{1 - e^{-2\tau}} \left(1 - e^{-\frac{\omega}{Q}(t-t_f)}\right).$$

$$\left[ -\frac{r_0LI_0}{2(1 - e^{-2\tau})} \left[ -\frac{\omega}{Q}e^{-2\tau}(t - t_f) + 1 - e^{-\frac{\omega}{Q}(t-t_f)} \right] \right]$$

$$E_1 = \frac{r_0I_0}{2} \left( \frac{2\tau e^{-2\tau}}{1 - e^{-2\tau}} - 1 \right)$$



# のこぎり波変調

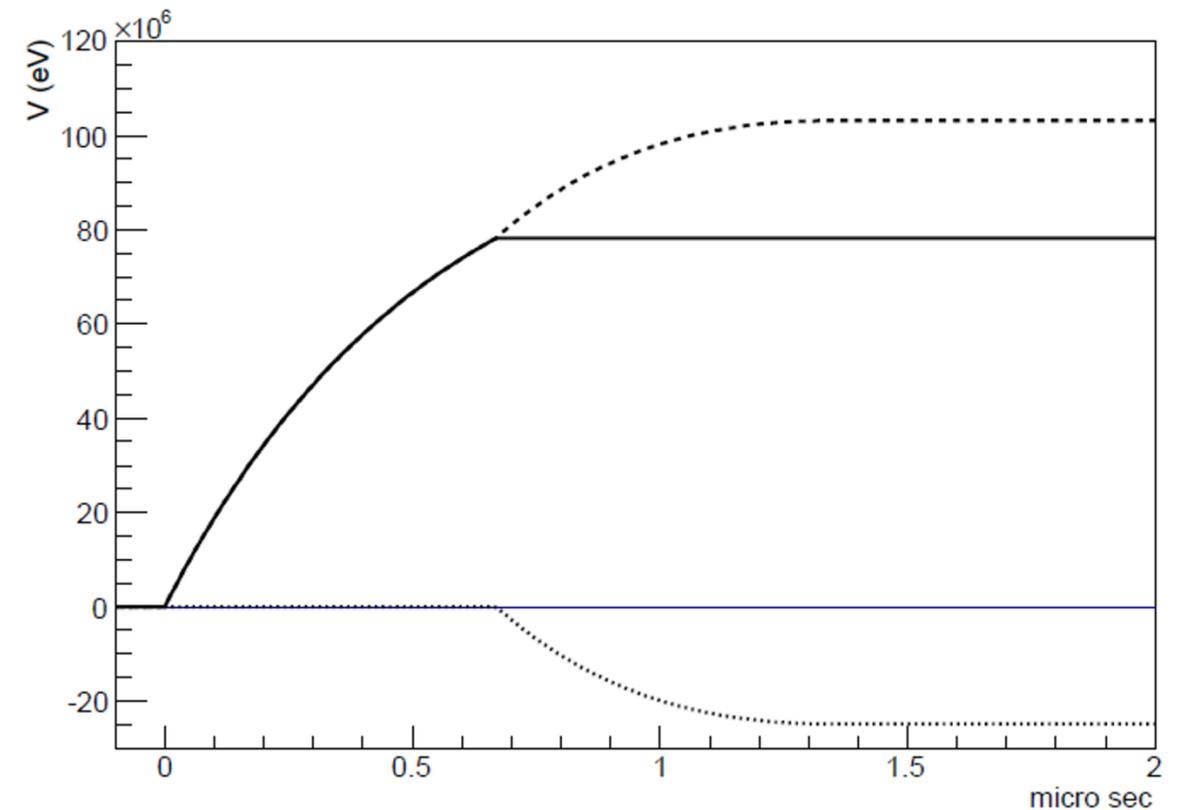
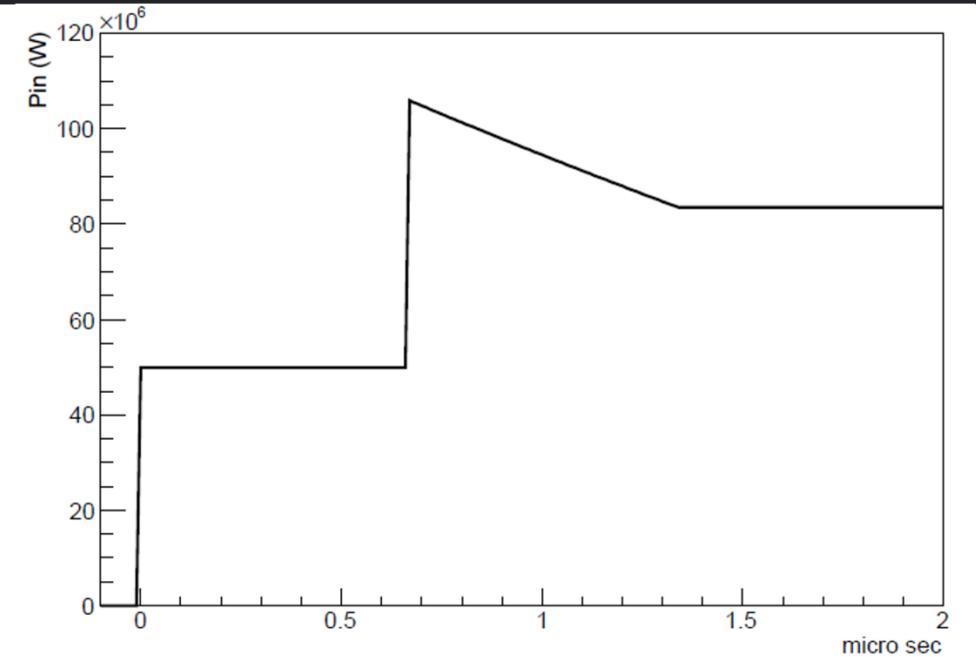
$$E(t) = E_0 U(t) + E_1 U(t - t_f) + \frac{E_2}{t_f} (t - t_f) U(t - t_f)$$

$$E(s) = \frac{E_0}{s} + \frac{E_1}{s} e^{-st_f} + \frac{E_2}{t_f s^2} e^{-st_f}$$

$$V(t) = E_0 L + \frac{L}{1 - e^{-2\tau}} \left( E_1 - \frac{Q}{\omega} E_2 \right) \left( 1 - e^{-\frac{\omega}{Q}(t-t_f)} \right) + \frac{L e^{-2\tau}}{1 - e^{-2\tau}} E_2 (t - t_f) - \frac{r_0 L I_0}{2(1 - e^{-2\tau})} \left[ -\frac{\omega}{Q} e^{-2\tau} (t - t_f) + 1 - e^{-\frac{\omega}{Q}(t-t_f)} \right],$$

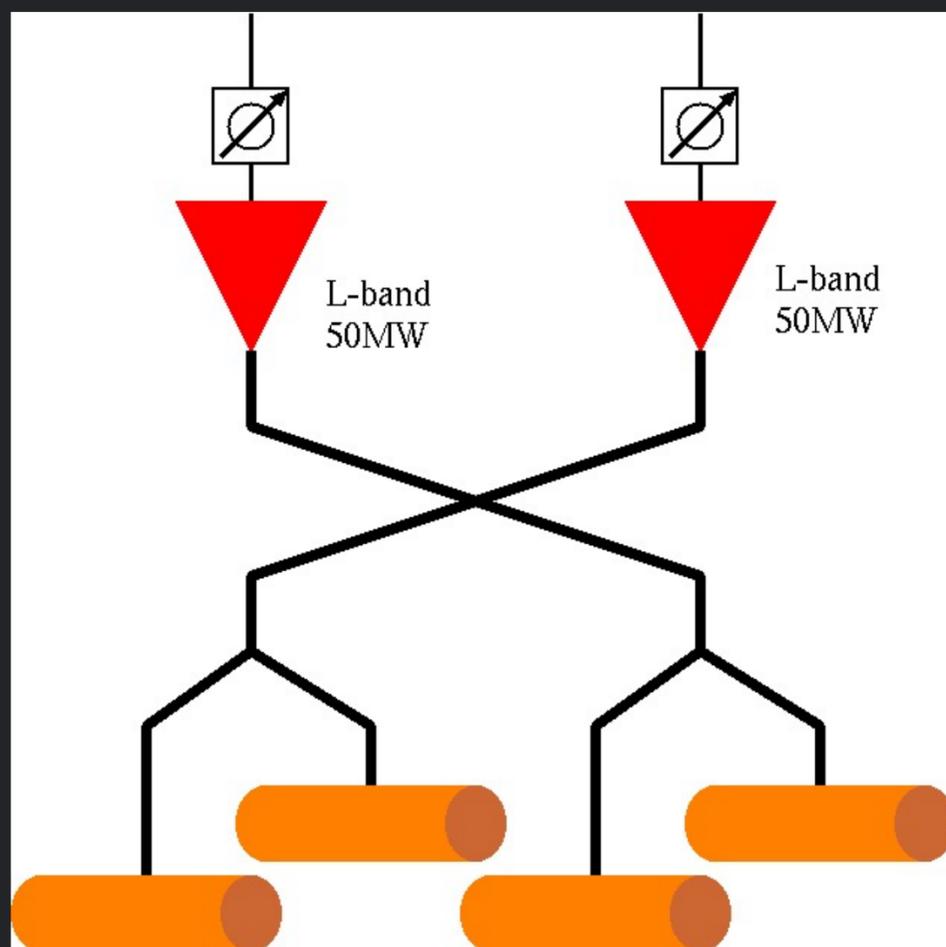
$$E_1 = \frac{r_0 I_0}{2} (1 - e^{-2\tau}),$$

$$E_2 = -\frac{r_0 I_0}{2} \frac{\omega}{Q} e^{-2\tau},$$



# Phase and Amplitude Modulation

- Capture Linac ではPM、Booster LinacではAMによる変調で、ビームローディングによる電圧変動を補償する。
- PMおよびAMを、二つの入力RFへのPMで実現する。
- 同相および逆相のPMを組み合わせて、任意のAMおよびPMを実現する。



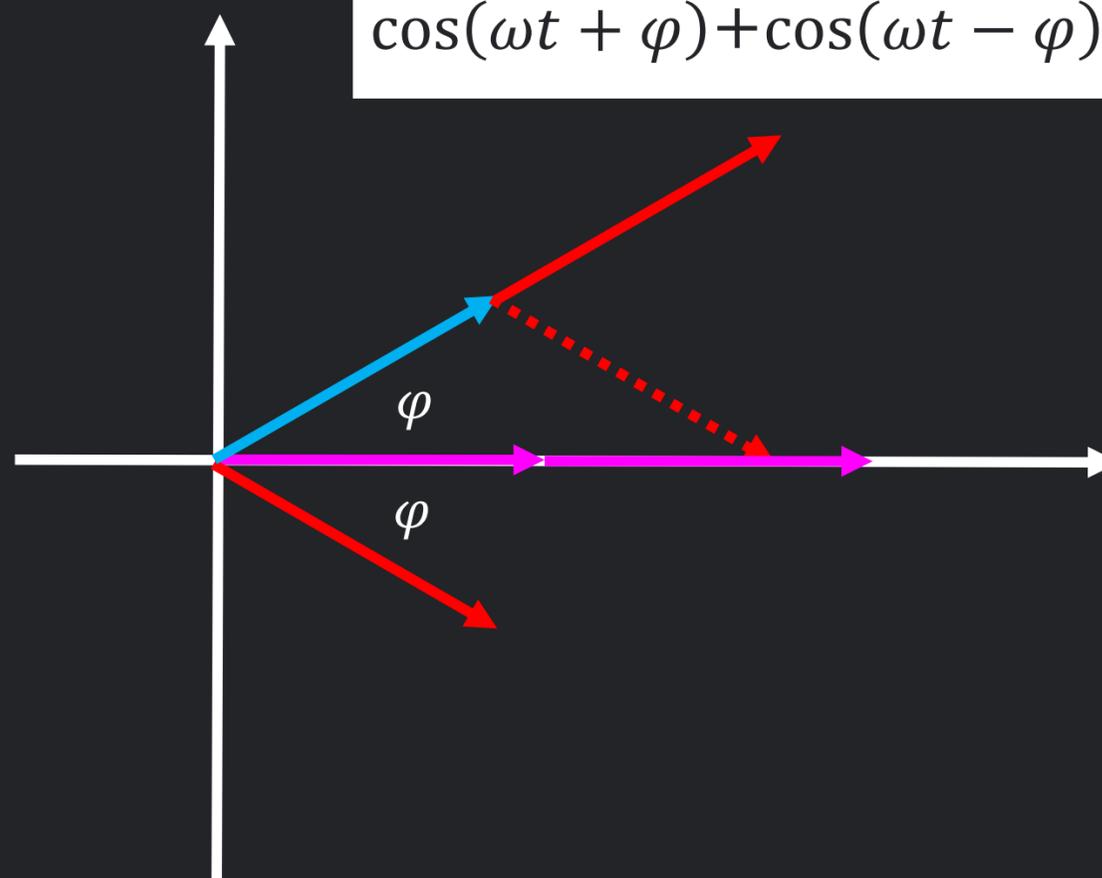
変調前 :  $\cos \omega t + \cos \omega t = 2 \cos \omega t$

同相の変調 : 位相変調

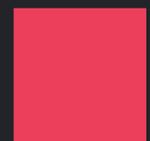
$$\cos(\omega t + \varphi) + \cos(\omega t + \varphi) = 2 \cos(\omega t + \varphi)$$

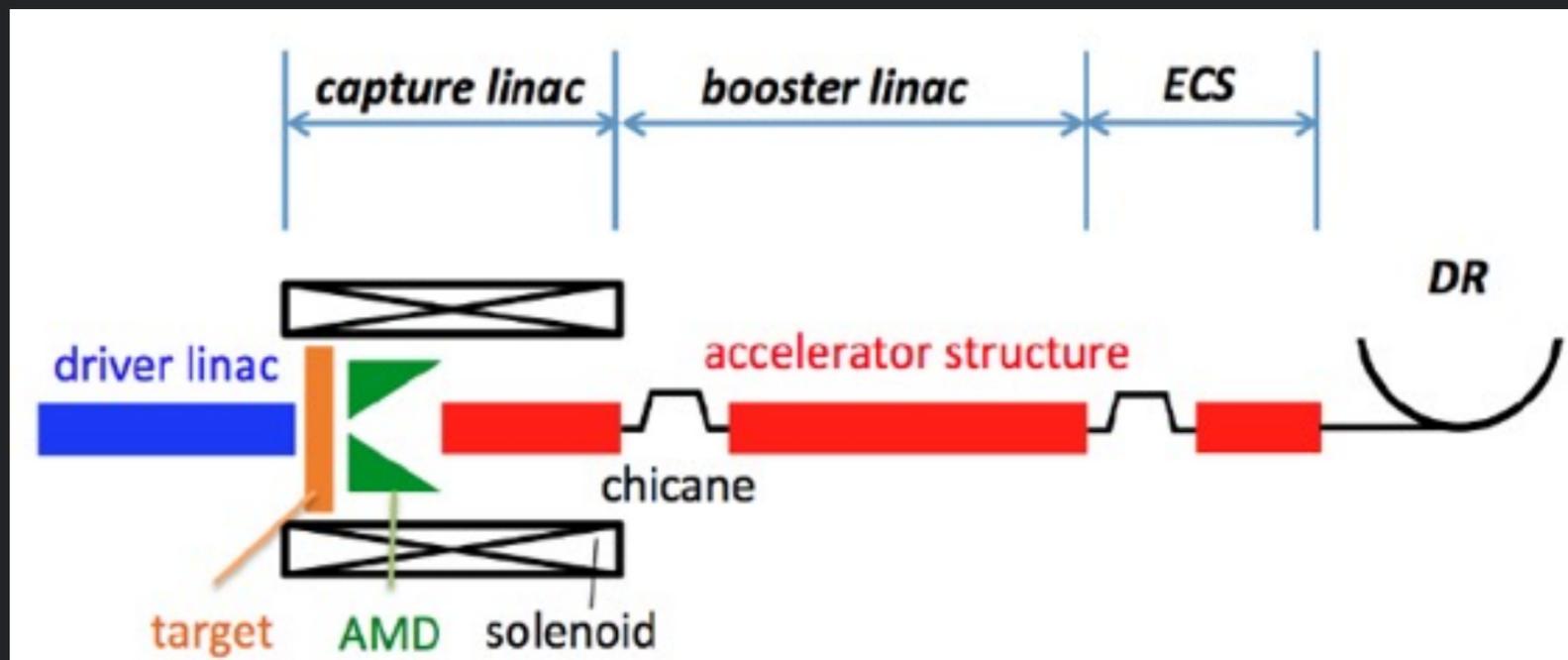
逆相の変調 : 振幅変調

$$\cos(\omega t + \varphi) + \cos(\omega t - \varphi) = 2 \cos \varphi \cos(\omega t)$$



# ILC陽電子入射器

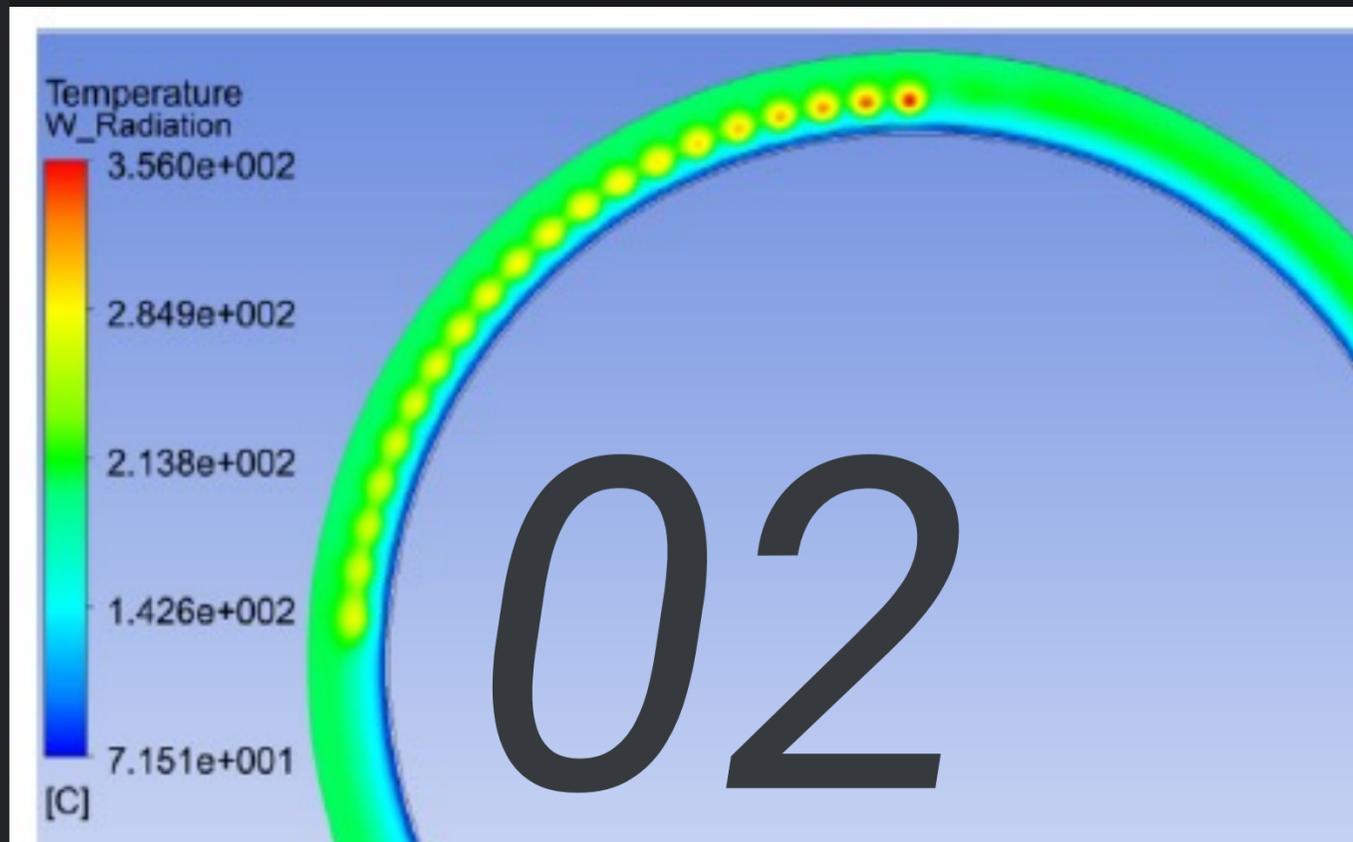




## 電子ドライバー

# 電子ドライブ 陽電子源

3 GeV、4.0 nCバンチ電  
荷の電子ビームを生成



WRe(24)合金による16mm厚  
の回転標的。

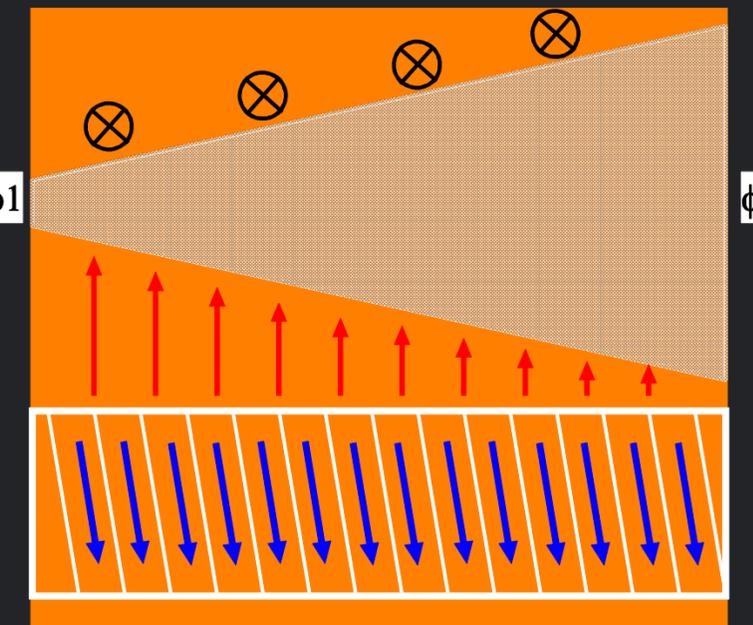
直径50cmの回転速度

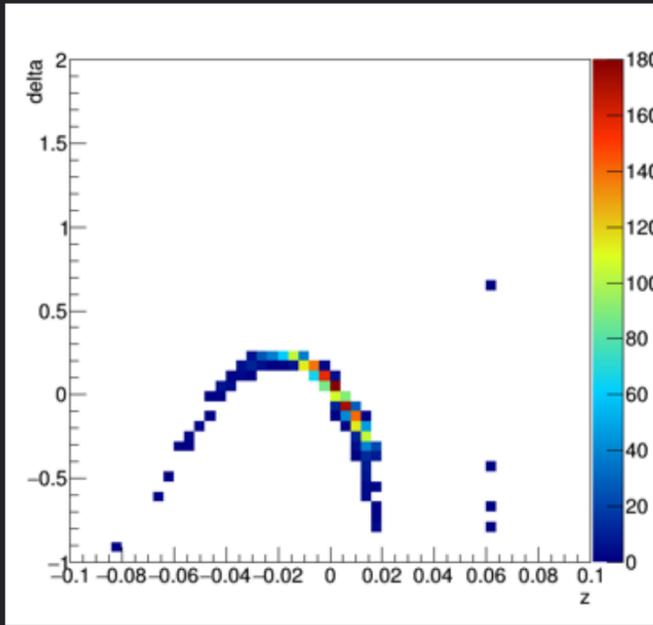
220RPM(5m/s接線速度)

## 陽電子生成標的

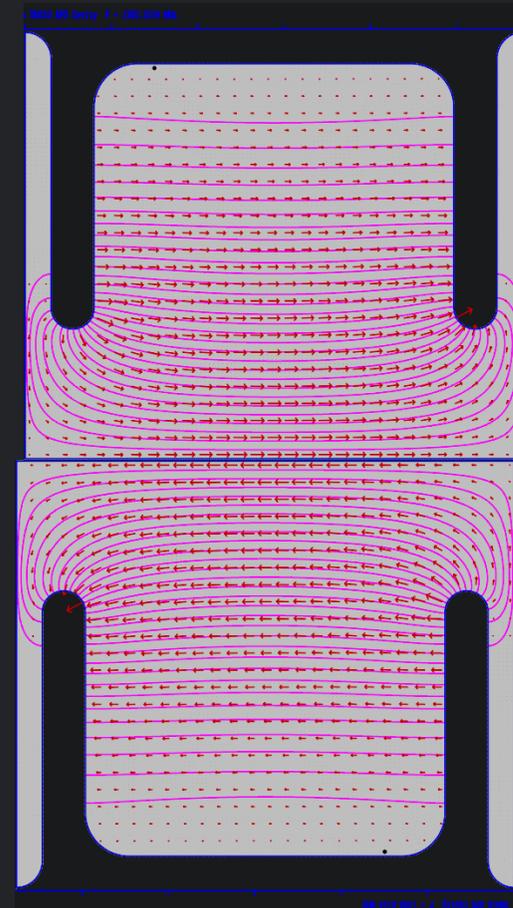
## 03 AMD

- 二導体FCによるAMDで横方向運動量を抑制。
- ピーク磁場5T.



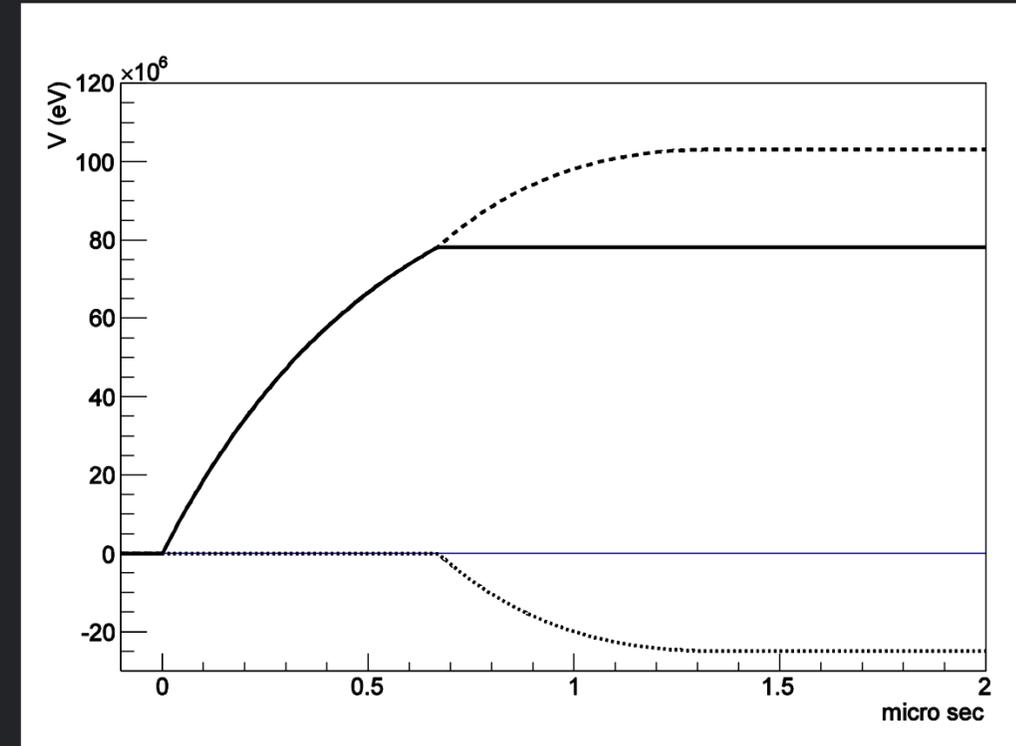


## 陽電子補足線形加速器

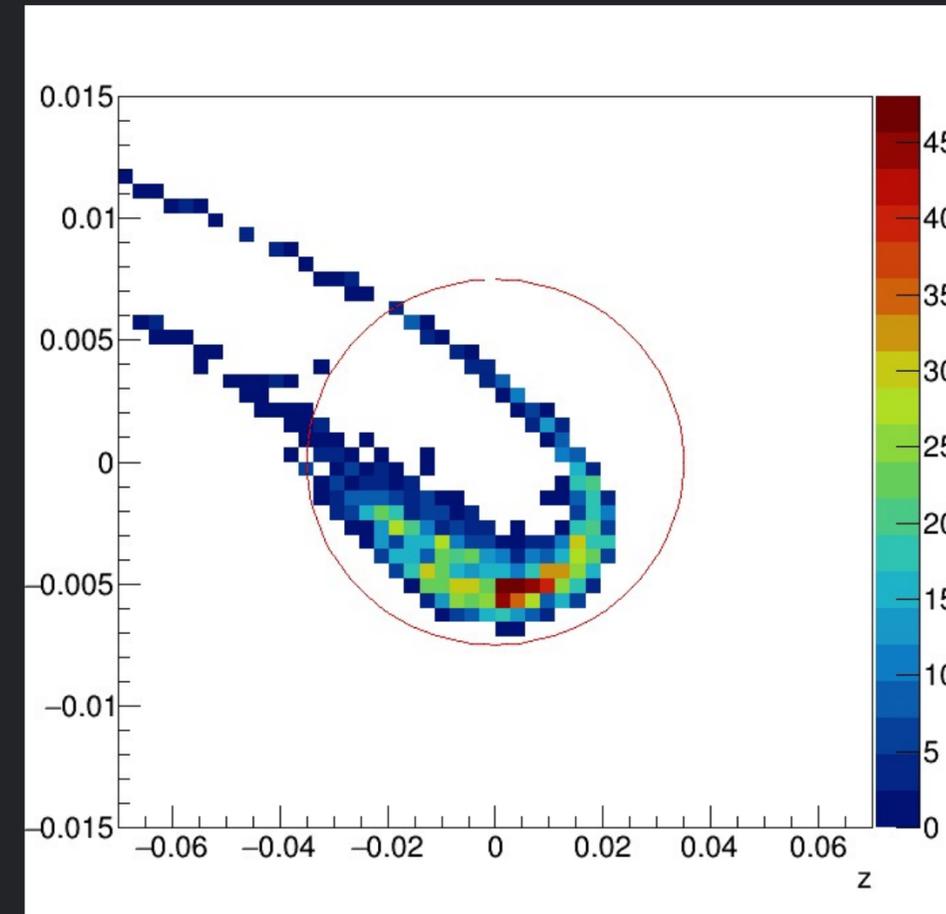
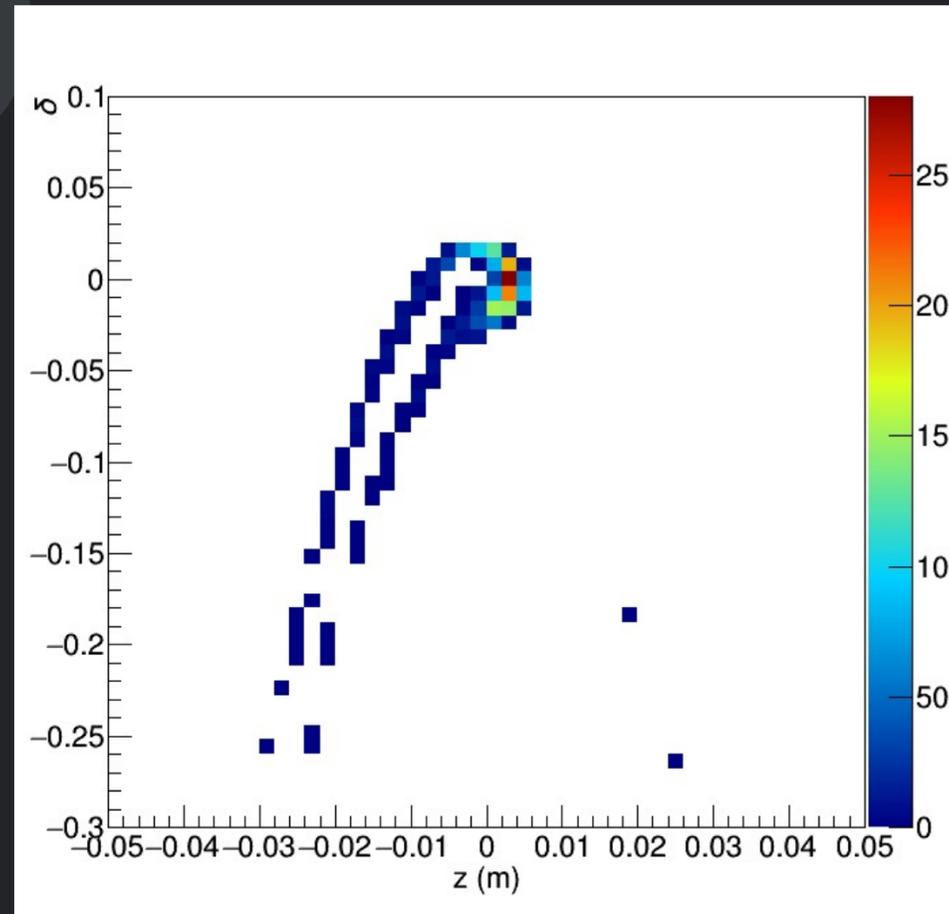


- APS(Alternate Periodic Structure, 陪周期構造)  $\pi/2$ モード定在波空洞による線形加速器。
- PM制御により、マルチバンチを均一加速。
- RFバケツに陽電子を補足。

## 陽電子Booster

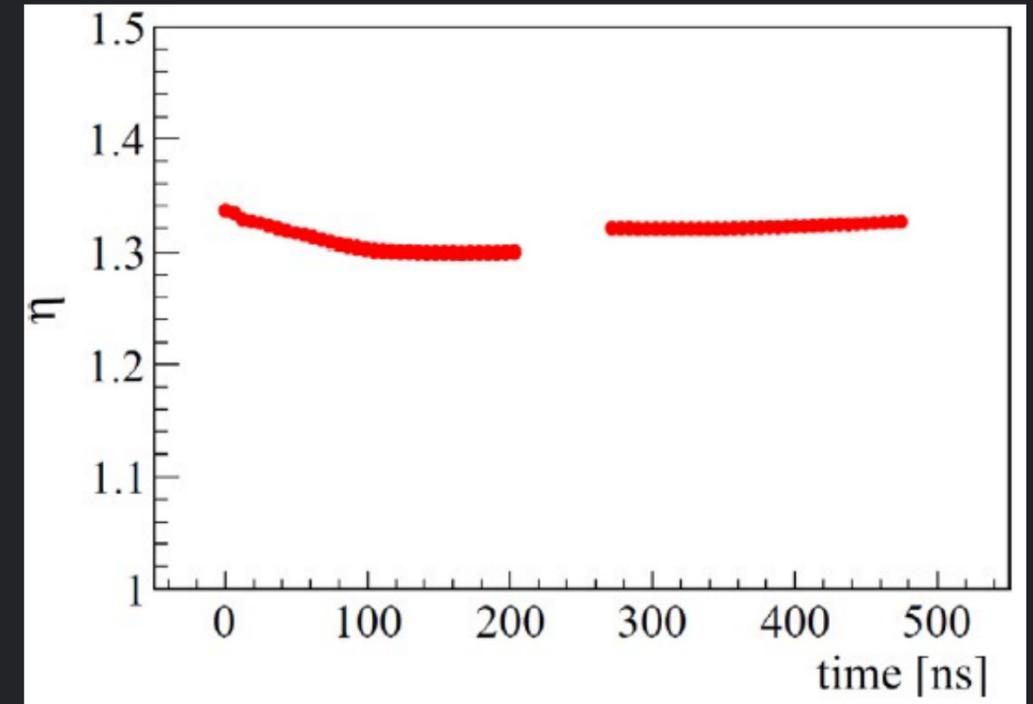
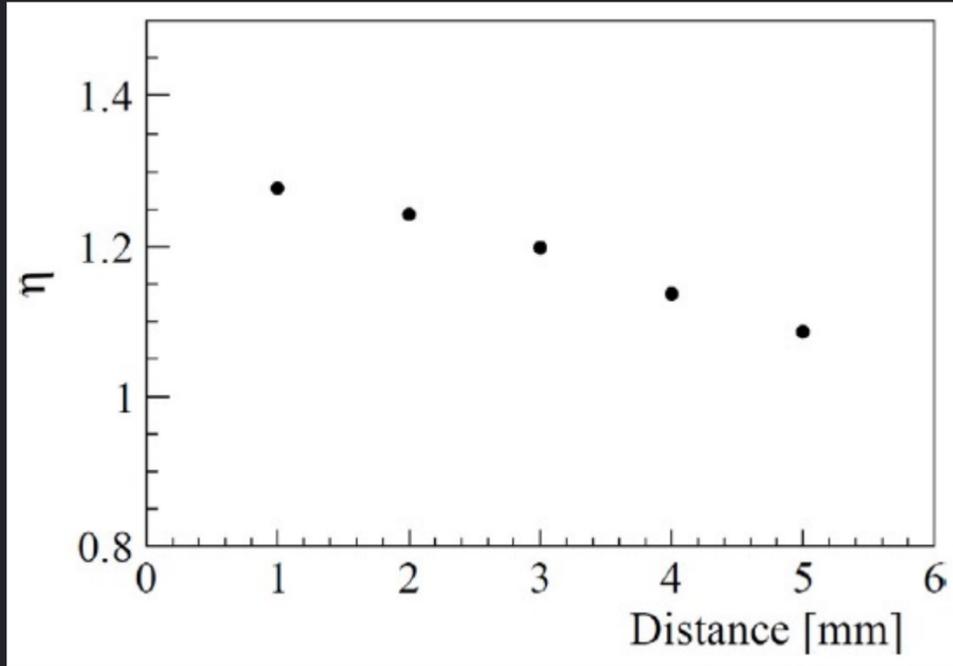


L-bandおよびS-bandの進行波型加速管により、陽電子を5GeVまで加速。AM制御によりマルチバンチを均一加速。



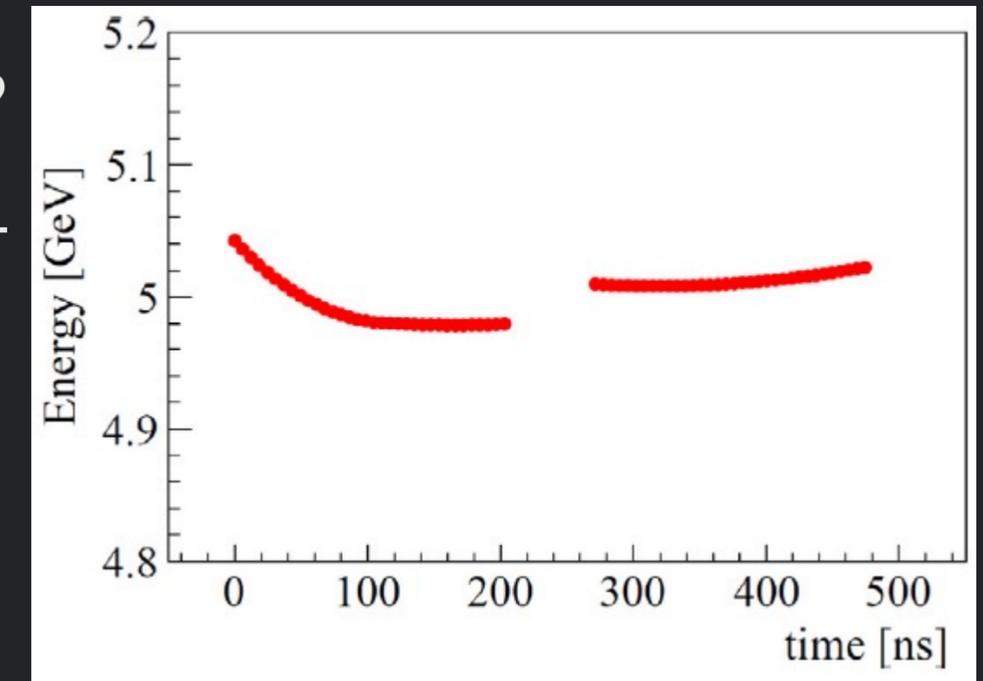
## Energy Compression

DRの進行方向アクセプタンスは70mm and 1.5 % (full width). ECSにより、エネルギー圧縮をして、DRへ入射。

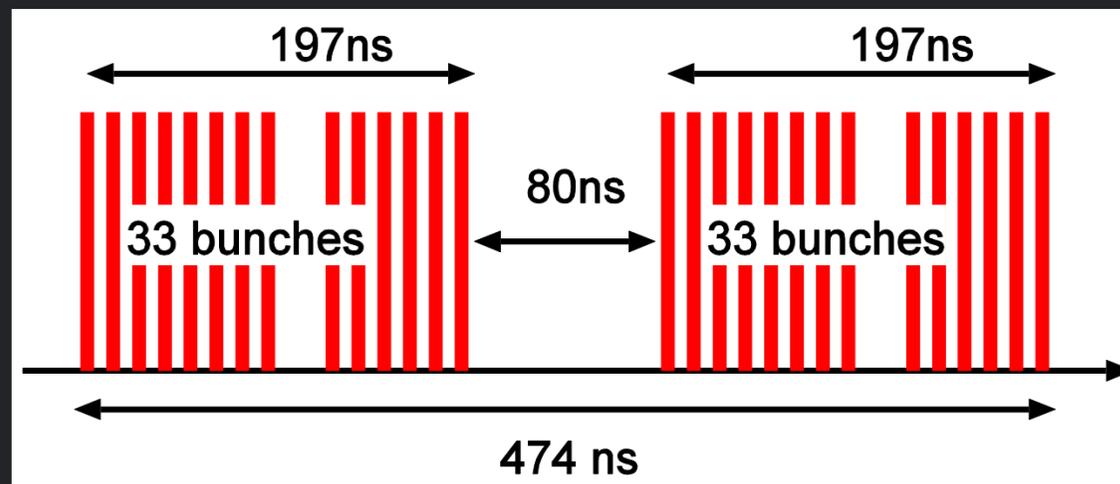
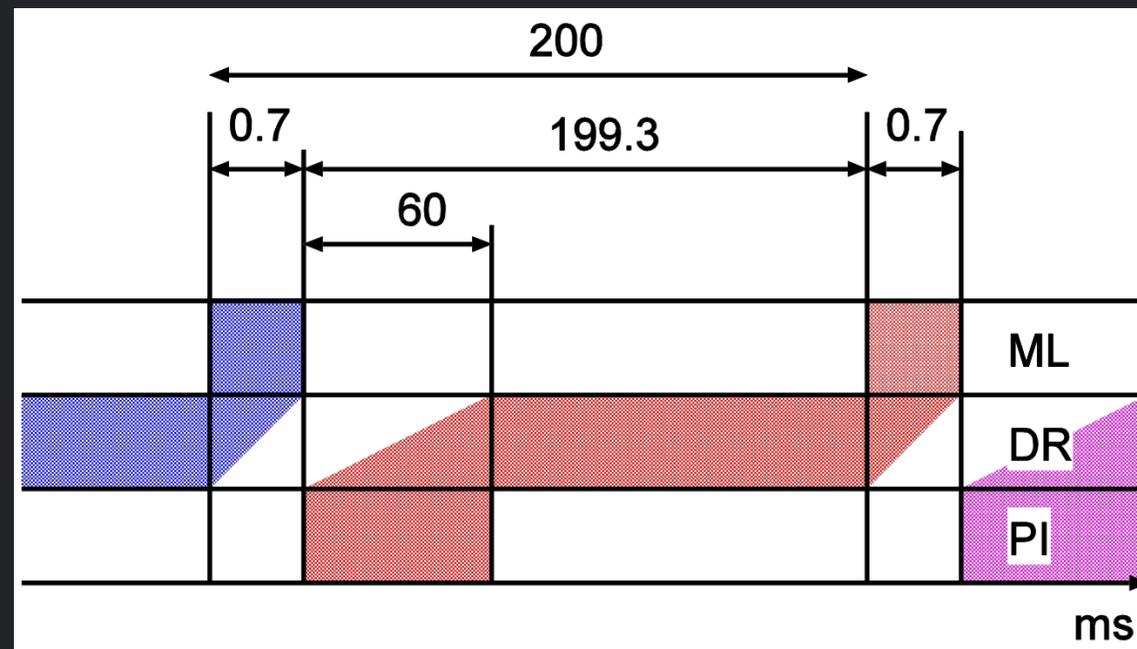


No Yes

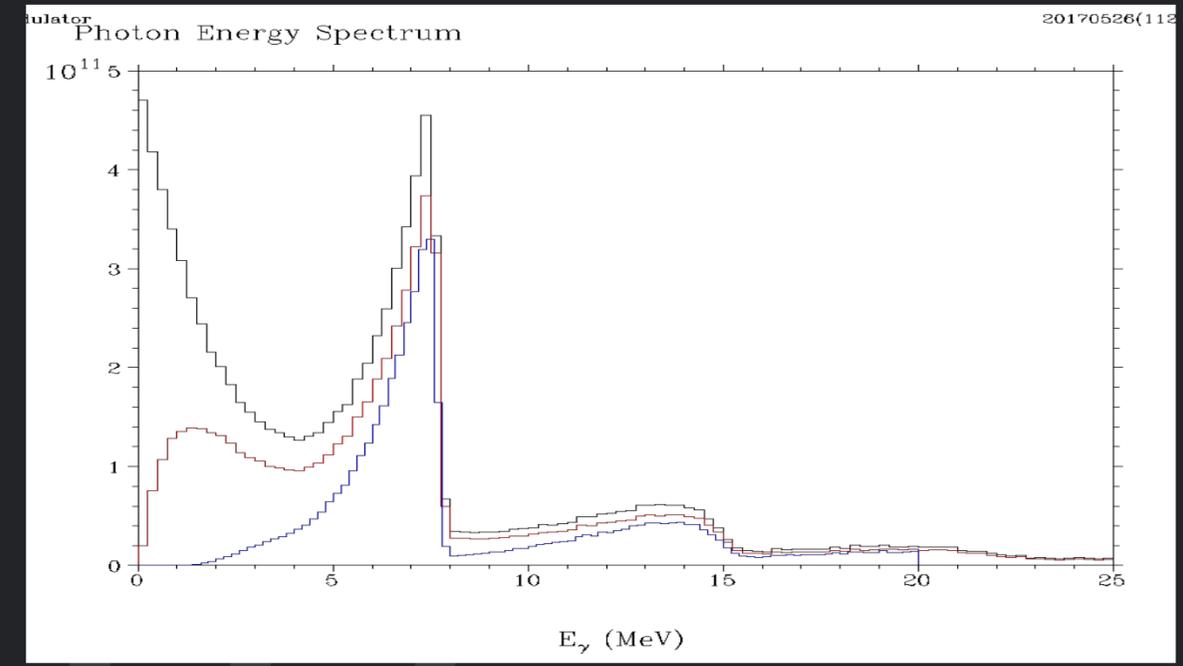
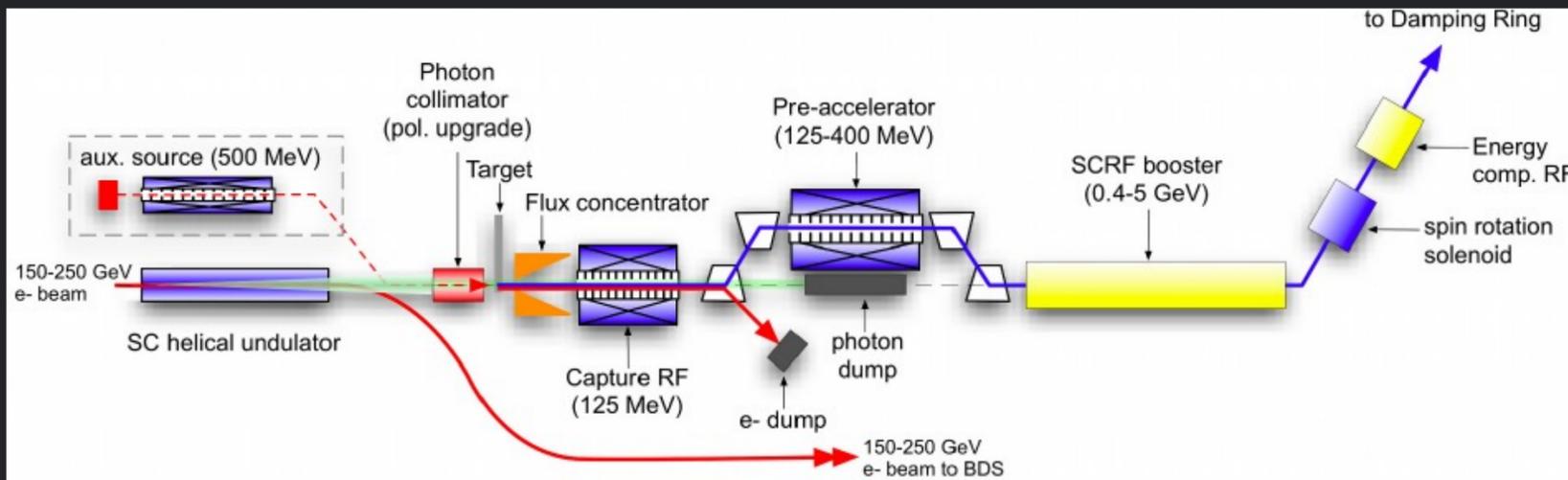
DOES DR ACCEPT THE POSITRON?  
 DRアクセプタンス (ダイナミックアパーチャー) 内の陽電子のみが受けつけられる。



# 運転パターン



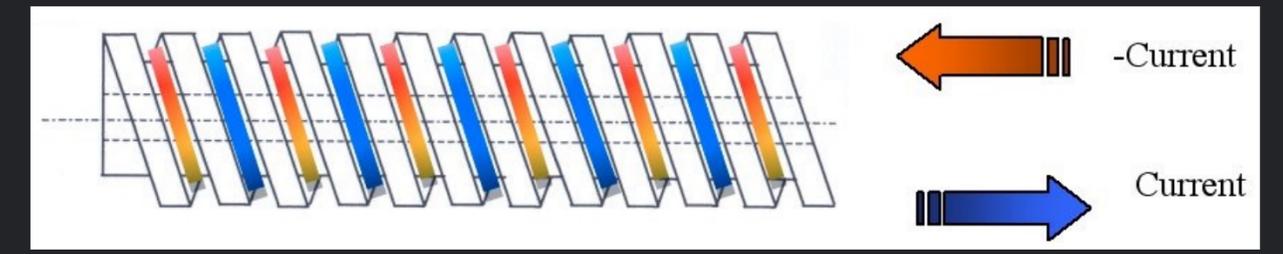
- 電子ドライブ陽電子源では、必要な陽電子を60msかけてつくる。
- 加速器を一回動かして作るのは下の66バンチ。これを3.3ms毎に20回繰り返す。
- 139.7msの間、DRで蓄積される。
- 0.7msかけてDRから主加速器、IPへと陽電子を送り出す。
- 全部取り出しが終わってから、新しい陽電子をつくる。



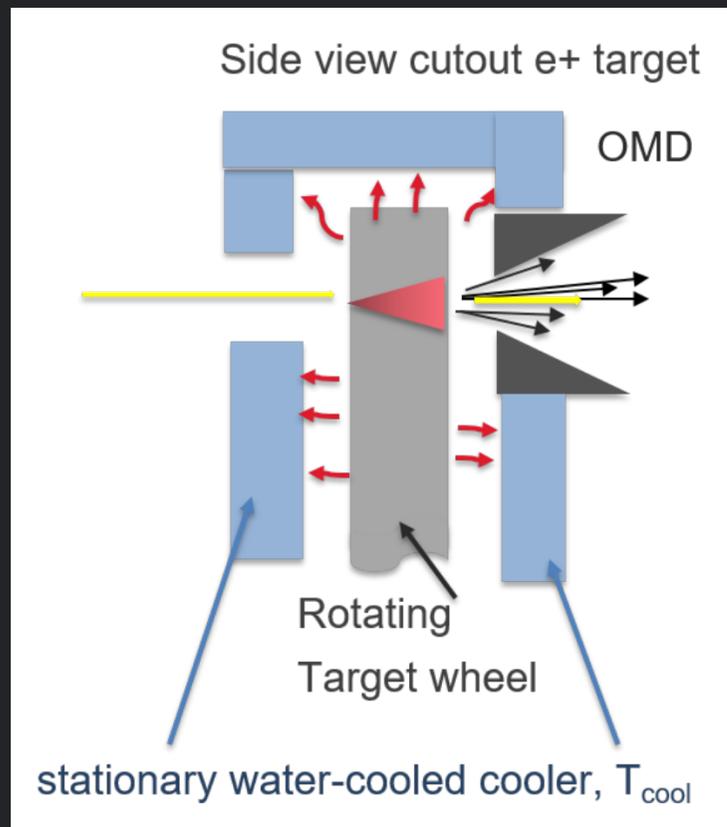
# 電子ドライバー

# アンジュレータ 陽電子源

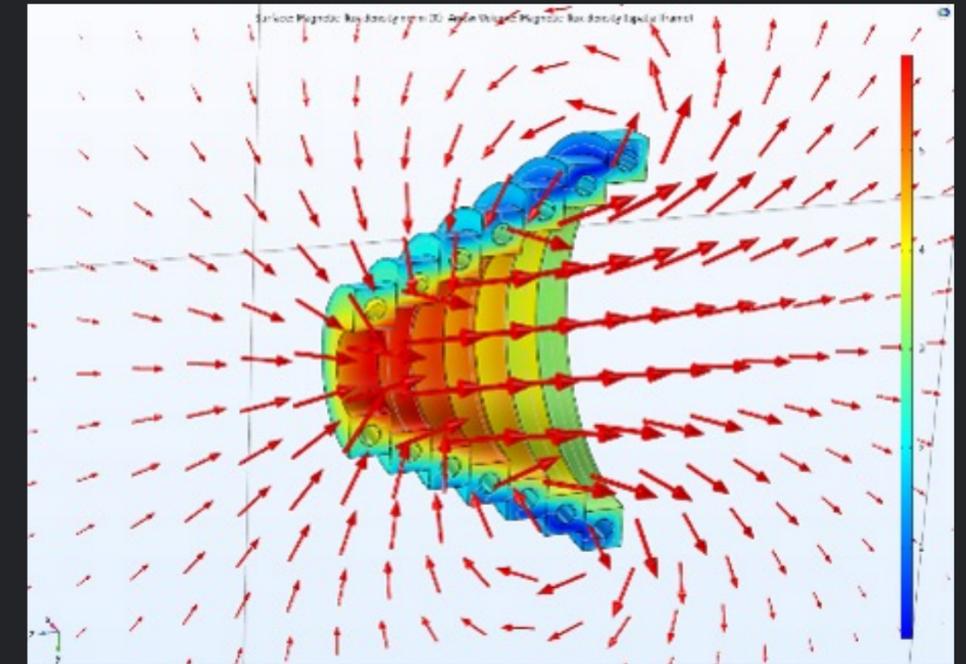
主加速器で加速された  
125GeV電子ビームがアンジュレーターを通過。  
ガンマ線を生成。



# 陽電子生成標的



Ti合金による7 mm厚の回転標的。直径100cmの回転速度2200RPM(100 m/s接線速度)放射冷却。

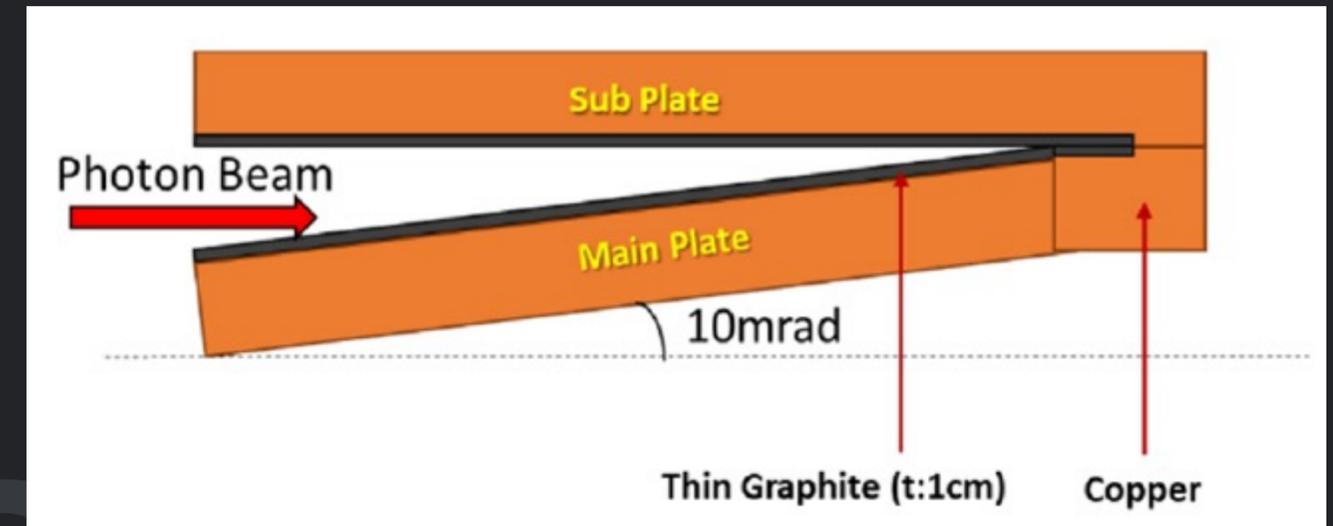


## AMD

- パルスソレノイドに比較的長いパルス電流を流すことにより、0.7msという長いパルス内で安定したAMD磁場の生成を行う。

## 陽電子補足線形加速器

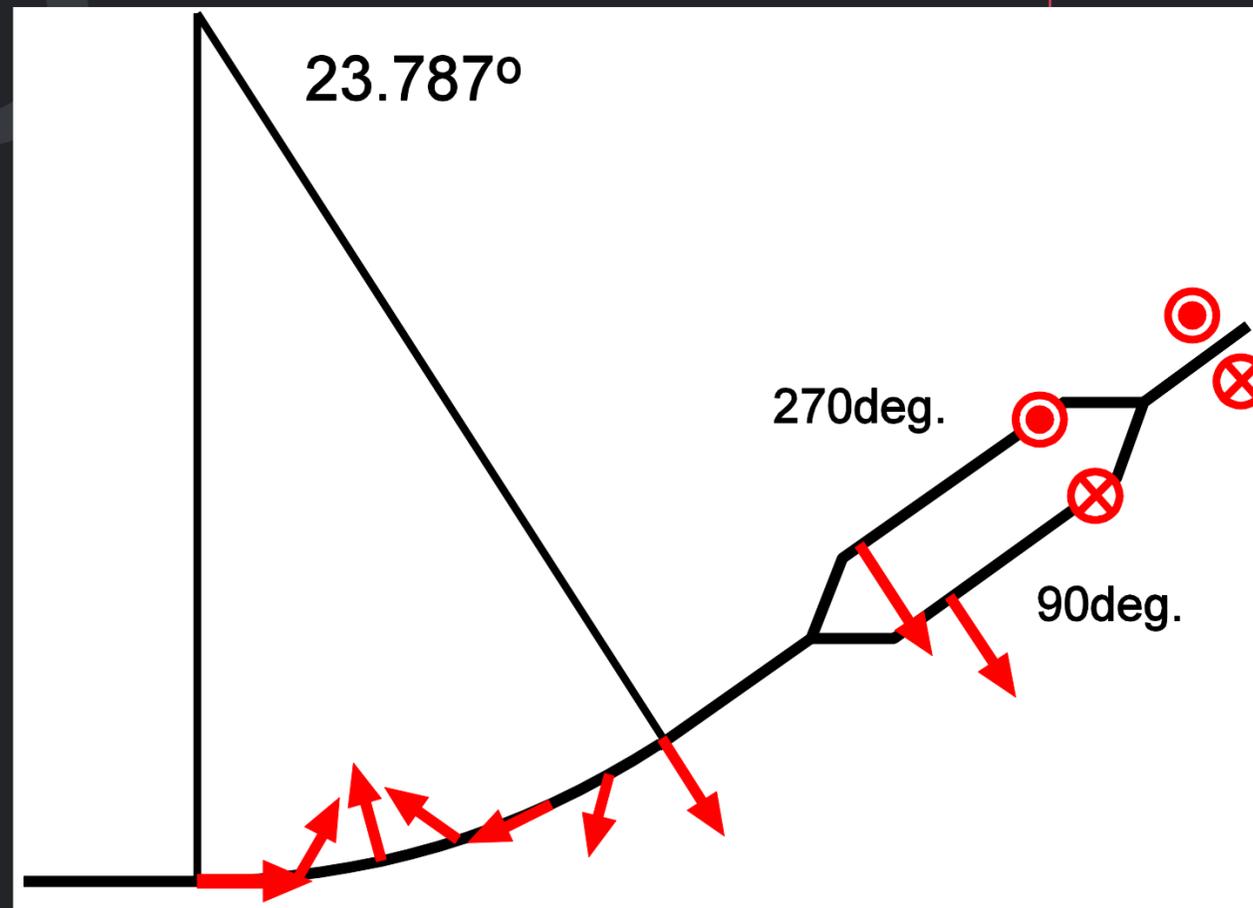
- 常伝導 $\pi$ モード定在波空洞、常伝導進行波型空洞を使用。常伝導を利用しているのは、ソレノイド磁場を使用するため。



## 陽電子Booster

L-band超伝導加速空洞（ほぼ主加速器と同様）を使用。

平行して、光子グラフィイトダンブを設置。



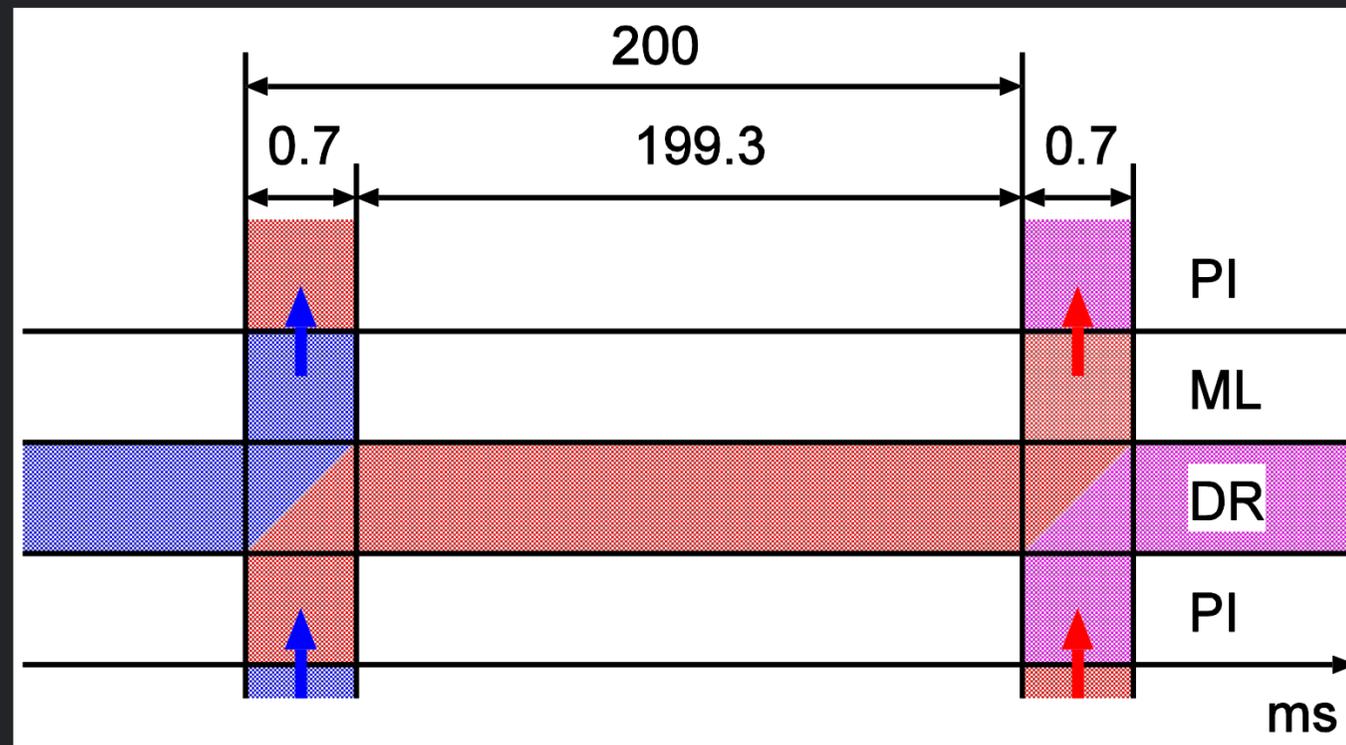
## Energy Compression & Spin rotation

DRの進行方向アクセプタンスは70mm and 1.5 % (full width). ECSにより、エネルギー圧縮をして、DRへ入射。

ブースター出口のアーク ( $23.787^\circ$ ) で、スピンを $270^\circ$ 回転。アンジュレーターは一方方向のスピン偏極陽電子しか生成できないので、二つのソレノイドローターを設置。

ソレノイドローター1 :  $90^\circ$ 回転。  
ソレノイドローター2 :  $270^\circ$ 回転。

# 運転パターン



- 電子ビーム（125GeV）が新たな陽電子を生成する。
- 新たに生成された陽電子はDRへと送られるが、DRにはまだ取り出し途中の修行を終えた陽電達がまだたくさん残っている。空いている部屋を探して、新しい陽電子をDRに収容する。
- 199msの間、DRに蓄積し、その後、主加速器、IPへと送られる。
- ほぼ同時に新しい陽電子がやってくる。

# アンジュレーターー陽電子入射器

## 運転上の課題

陽電子生成が電子ビームの運転と完全に結合していることから、以下の二つの課題が発生。

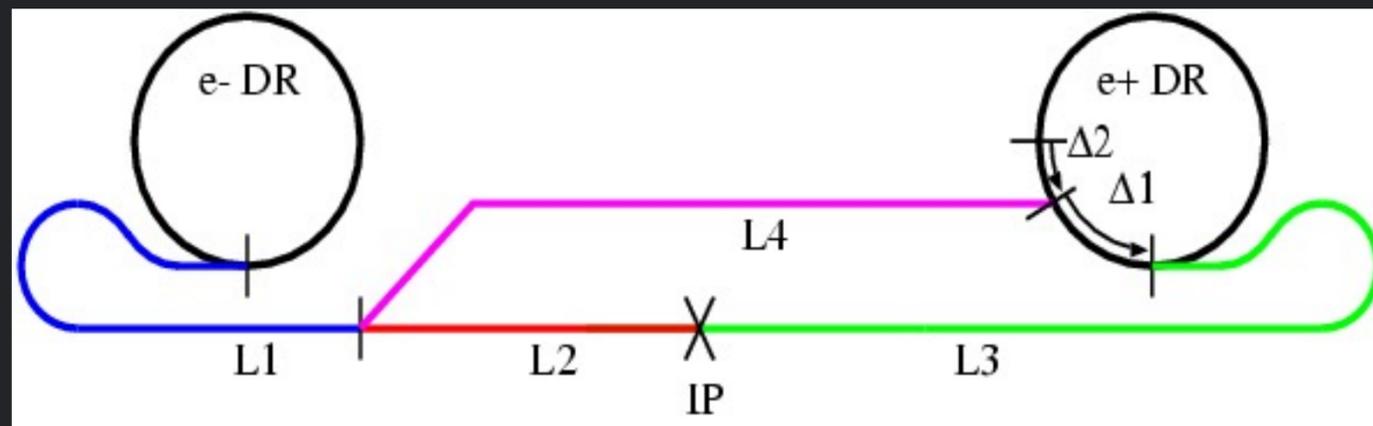
### 道のり問題

陽電子の生成と衝突が同時に起こるので、陽電子がまだたくさんDRにいるときに、新しい陽電子を收容しなくては行けない。

陽電子を生成した電子の衝突相手がいた場所に新しい陽電子を收容する（自己複製条件）

物理長の合わせが必要

$$L_3 + L_4\Delta_1 = L_2 + nC_{DR} \quad (302)$$

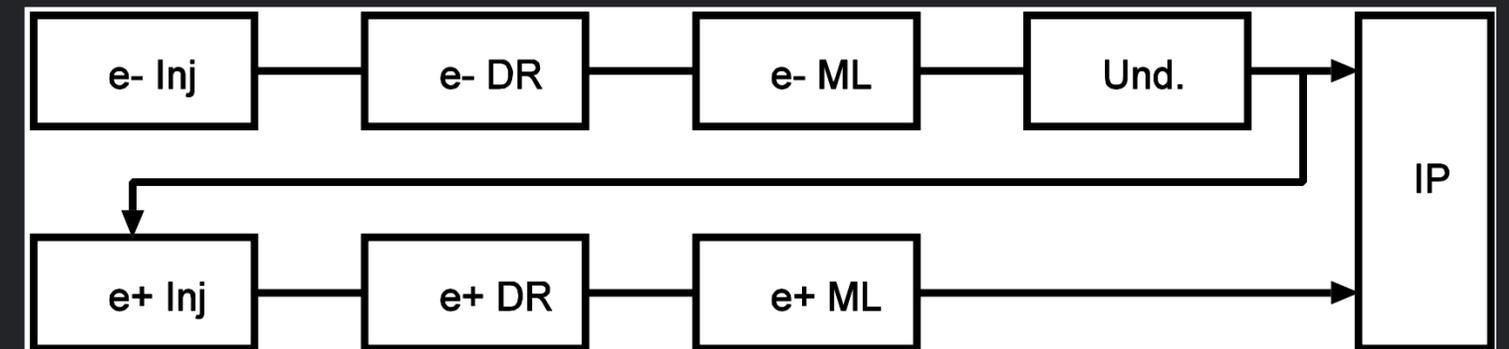


### 稼働率問題

陽電子源は電子源に依存しているため、陽電子源の稼働率が原理的に低下する。個々のシステムの稼働率を全体的に高める必要がある。

$$MTTR_{ilc} = MTTR_e + MTTR_{und}$$

$$MTTR_{ilc} = \max(MTTR_e, MTTR_{edvn})$$



# ILC陽電子入射器 まとめ

## ILC陽電子入射器

■ 制動輻射を使う電子ドライブ方式、アンジュレーター輻射を使う方式が検討されている。

## 陽電子生成法

■ 対生成反応のもととなるガンマ線の作り方に3種類ある。制動輻射、アンジュレーター輻射、そしてレーザーコンプトン散乱。

## 陽電子は電子の反粒子

■ 陽電子は天然には存在しないので、対生成反応によりつくる。

THANK YOU FOR  
WATCHING!

ANY QUESTIONS?