

インターナショナルターゲットを利用した ミュオン生成とその利用

ILCの多目的活用を考える会 2017年11月29日

KEK/J-PARC 河村 成肇

従来のミュオン生成

- ハドロン(陽子)を固体標的にぶつけて、 π を生成し、その崩壊を待って μ を得る
 - 陽子のエネルギーは320MeV($2.3m_\pi$)以上あれば良く、1970年代以降に作られた“中間子工場”は全てこれ
 - 陽子ビームの強度増＝ミュオンビームの強度増
 - 比較的確立した技術で建設可能
 - ×得られるミュオンのエネルギーはせいぜい数100MeVが限界(静止した π からは4MeV、in-flightで数100MeV)低い方も高い方も制限がかかっている
 - ×ビームエミッタンスはかなり大きい(数100 π cm-mrad)
 - ×エネルギー Spredd(運動量バイト)も大きい($< \pm 5\%$)
 - ×標的周りの放射化が激しい



陽電子によるミュオン生成

- 原理は山崎氏が説明済み
 $\sqrt{s} \gtrsim 2m_\mu$ の陽電子 (Lab系で $E \gtrsim 44$ GeV) からは
(従来の生成方法と比べて比較的) 高エネルギー、
低ミッタンスの $\mu^+\mu^-$ ペアが作られる
- このトークは22GeVの $\mu^+\mu^-$ (エミッタンス: 0.1 $\mu\text{m}\text{-mrad}$ 、
エネルギー Spredd: 1%) ができたところから開始
45GeV e^+ on 1cm厚くらいのBe標的?
- 従来のミュオンビームとは大きく異なる特徴を持つが、
実際にどういう実験に使えるのか?

IT生成ミュオンの利用

- 物質・生命科学等での利用
 - 偏極率は恐らく低い(0%?) ↔ 従来の施設(100%)
 - エネルギーが高すぎて“試料”に止められない
止められるほど大きな(厚い)試料は準備できない
 - 試料中にミュオンを止めて、核スピン等によるミュオンスピンの減偏極を観測し、磁性情報等を取り出す μ SR (物質・生命科学)には向かない
- 透過ミュオンによる構造物のイメージング
 - 22GeVで140m water-evまで透過可能
 - 小さめのピラミッドならいける?
- 高エネルギー・低エミッタンス・ $\mu^+\mu^-$ 対生成
 - コライダー！！



IT生成ミュオンによる コライダー実験のメリット・デメリット

○低エミッタンス

ionization coolingのような未確立の機構は不要

○23 GeV (high β)

ミュオンの寿命 ($2.2 \mu\text{s}$) によるロスが抑えやすい

⇔レーザー共鳴イオン化法による冷却 (g-2/EDM)

ただし、 $\gamma_\mu \cong 220$ のため長時間の蓄積は無理

移動距離は $\gamma_\mu \tau c = 150 \text{ km}$ が目安

○同時に同数の $\mu^+ \mu^-$ 対が得られる

○すぐ横にILCがあるので、再加速に使える？

△運転モードの複雑化？

×標的周りの複雑化？



$\mu^+\mu^-$ collider アイデアスケッチ

メインリニアアック
Main Linac

ダンピングリング
Damping Rings

陽電子
Positrons

ARからLCに戻して再加速
 $\sqrt{s} = 4 \text{ TeV}$ を目指す場合、
LCの増強が必要？

45GeV出射

電子
Electrons

標的

23GeV μ^- AR

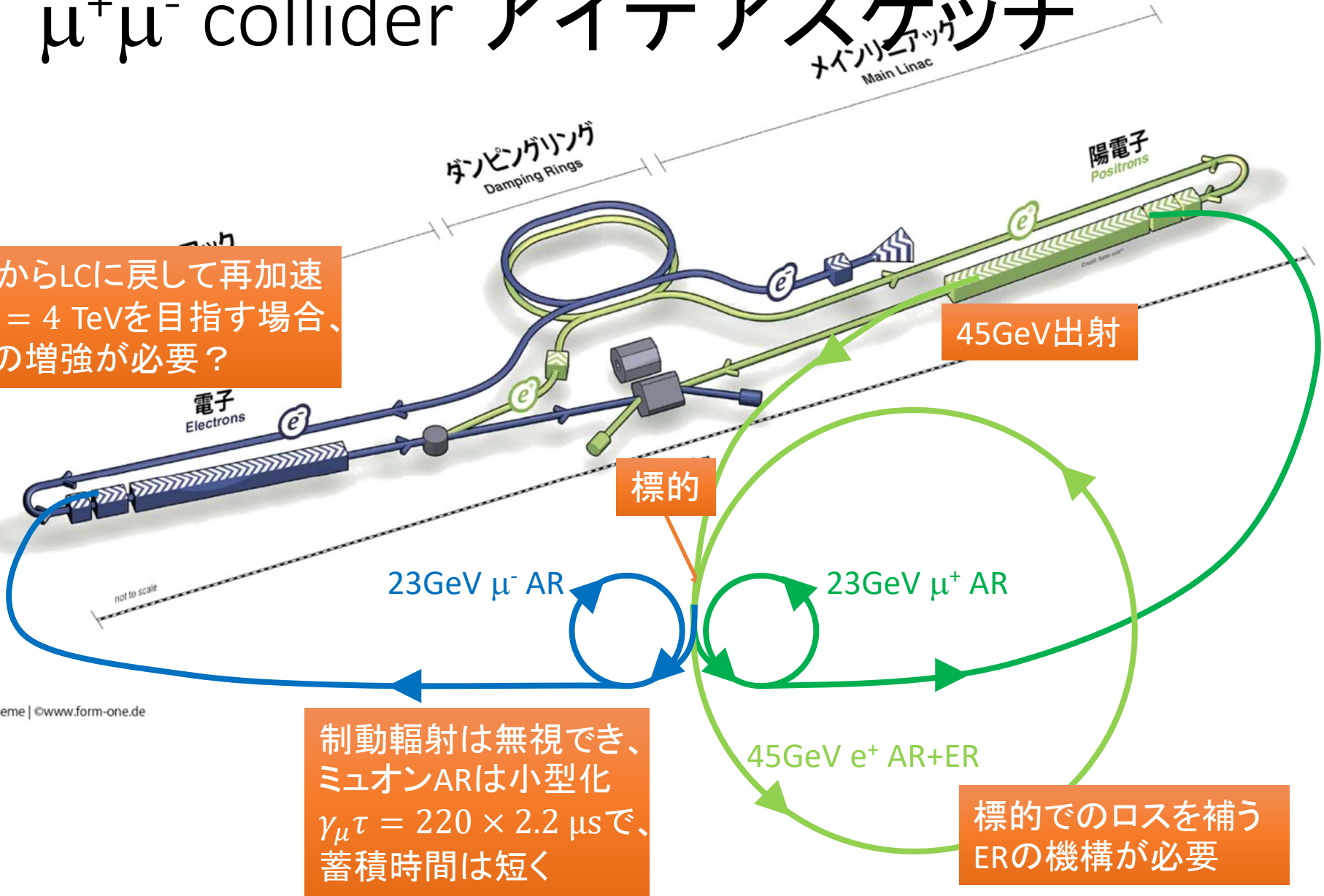
23GeV μ^+ AR

45GeV e^+ AR+ER

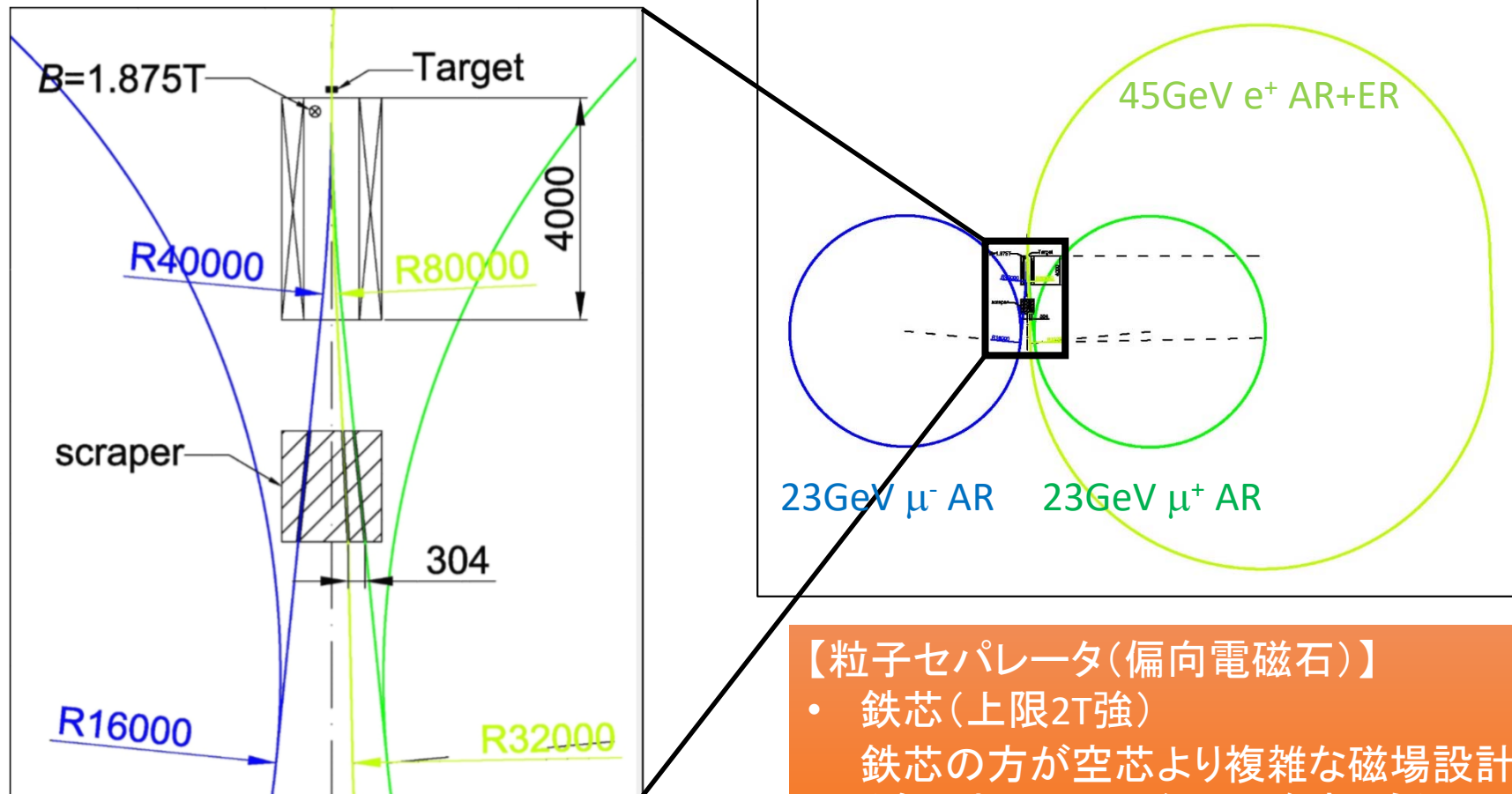
標的でのロス補う
ERの機構が必要

制動輻射は無視でき、
ミュオンARは小型化
 $\gamma_\mu \tau = 220 \times 2.2 \mu\text{s}$ で、
蓄積時間は短く

not to scale



標的部のアイデアスケッチ



【粒子セパレータ(偏向電磁石)】

- 鉄芯(上限2T強)
鉄芯の方が空芯より複雑な磁場設計が容易
(今のところその必要はなさそう)
- 曲率半径: $80\text{ m}(e^+)$ 、 $40\text{ m}(\mu^+\mu^-)$

【AR+ER、AR】

- $32\text{ m} + \alpha / >670\text{ ns}(e^+)$ 、 $16\text{ m} / 335\text{ ns}(\mu^+\mu^-)$

ルミノシティーの評価

- $$\begin{cases} e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^- (\lesssim 1 \mu\text{b}) \\ e^+e^- \rightarrow e^+e^-\gamma (\approx 0.6 \text{ mb}) \end{cases}$$

陽電子の最大0.1%程度が $\mu^+\mu^-$ 対生成に寄与
なお、Bhabha散乱は $E_\gamma < 10 \text{ MeV}$ 、 $\theta_\gamma > 10^\circ$ を要請
(大きく散乱されたもの以外は回収・ERで再利用)
- e^+ AR+ER、 $\mu^+\mu^-$ ARの周回サイクル(周長)をILCの bunch間隔と同期できるように設計
335 ns \Leftrightarrow 半径16mのリング($\mu^+\mu^-$)
陽電子は16mの整数倍のリングで同期
- 陽電子リングは32m(制動輻射の影響は?)とすると、
1 turnで672 ns、1000 turnで670 $\mu\text{s} \sim \gamma_\mu \tau = 470 \mu\text{s}$

ルミノシティーの評価 cont.

- 標的の物質量は陽電子が1000回の衝突で燃え尽きる程度とする
- 2×10^{10} e/bunchの0.1%で 2×10^7 μ /bunch
- bunch間隔とミュオンの周回サイクルを完全に同期することで、すべての μ bunchを一つに重ねることができたとすると $2820 \times 2 \times 10^7$ μ /bunch
(実際には2820 bunchの入射時間950 μ sは μ 寿命 $\gamma_{\mu}\tau = 470$ μ sの2倍となり、 μ -e崩壊によるロスは無視できないが、とりあえず無視 space charge limitも無視)
- 輸送効率諸々はとりあえず100%とする

ルミノシティーの評価 cont.

- 2820 bunchs/train、4 trains/sの主モードから、1 bunch/trainを抜き、 $\mu^+\mu^-$ colliderの運転は各trainの合間に行う(試験モード)では、

$$\mathcal{L} = \frac{f_{col} N^2}{4\pi\sigma_x\sigma_y} = 1 \times 10^{20} [\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}]$$

$$f_{col} = 4 \text{ Hz}, N = 2 \times 10^7, \sigma_x = \sigma_y = 10 \mu\text{m}$$

- 全てのbunchを使うとして $N = 2820 \times 2 \times 10^7$ 、 $f_{col} = 4 \text{ Hz}$ 、 $\sigma_x = \sigma_y = 0.1 \mu\text{m}$ でも
$$\mathcal{L} = 1 \times 10^{31} [\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}]$$

- $\mu^+\mu^-$ 生成効率の向上がキモになる
(Bhabha散乱した陽電子の回収率を上げるとか)



まとめ

- ILCから45GeVの陽電子を抜き出し、固体標的などに当てることで、23GeV低エミッタンスの $\mu^+\mu^-$ ビームを生成できる
- e^+ のbunch、 e^+ AR+ER、 $\mu^+\mu^-$ ARの同期が必要どの程度ambitiousなのかは？
- ルミノシティを上げるには、Bhabha散乱により散った陽電子を回収し、いかに律速している $\mu^+\mu^-$ の生成効率を上げられるかがキモ