ディテクター周辺

田内利明 (高エネ研) 、OHO'95,1995年9月1日

1. はじめに

2. バックグランド

2.1 シンクロトロン光

2.2 ミューオン

2.3 電子陽電子対

2.4 ミニジェット

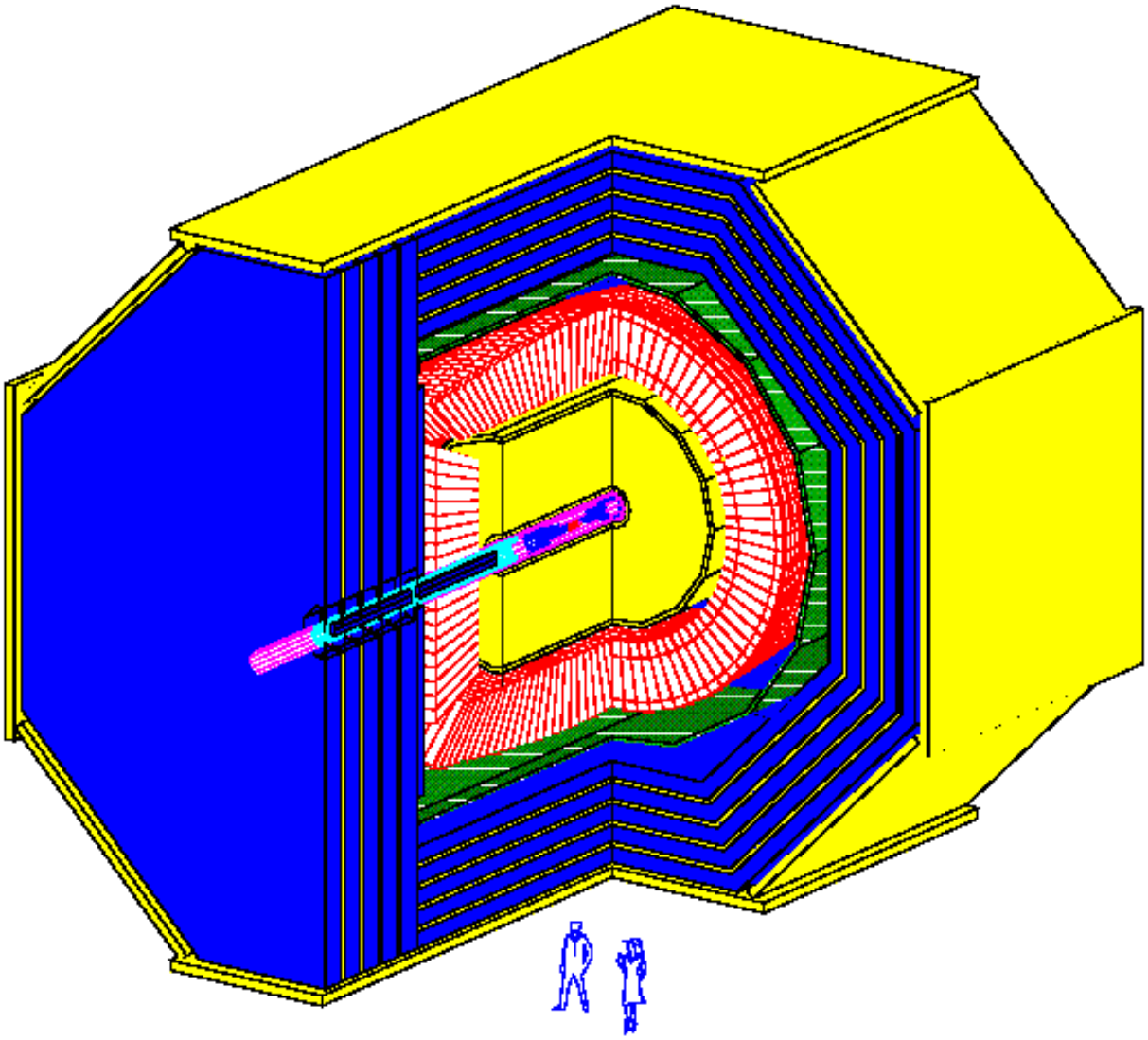
3. マスクシステム

4. 軌跡検出器でのバックグランド

5. JLC測定器

6. まとめ

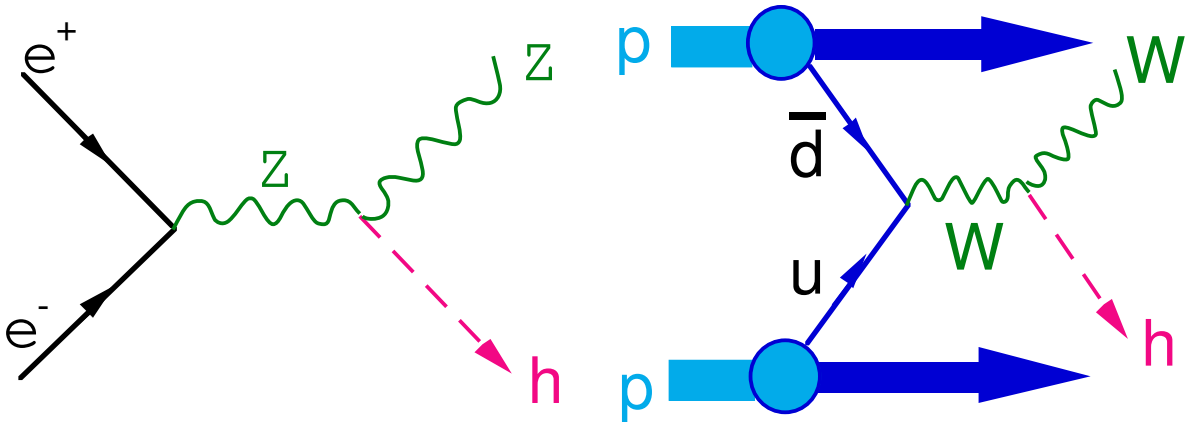
JLC測定器



1. はじめに

電子陽電子衝突実験の特徴:『クリーン』

全重心系エネルギーが反応の素過程に使用される。



例）　e^+e^- 衝突 (LC)　　p p 衝突 (LHC)

それぞれのシミュレーション図を見れば明らか。

（１）反応の終状態の明確な識別

（２）精密実験

注：予想外の大きなビームテールによるバックグランド　<-　SLC 実験

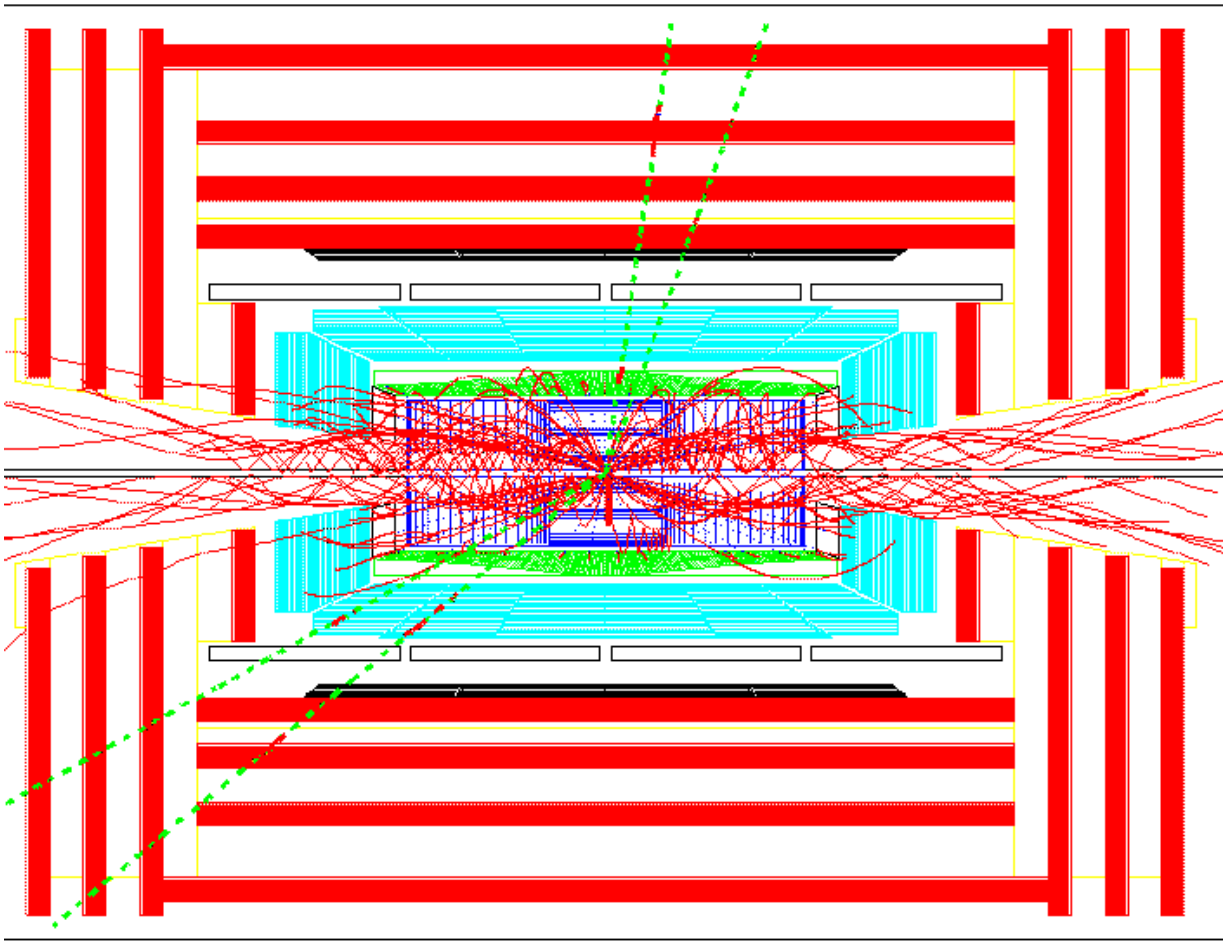
LHC at Ecm=14 TeV

pp → H X

H → Z Z → $\mu^+\mu^-$ $\mu^+\mu^-$

CMS

Compact Muon Solenoid



From F.Pauss,ETHZ-IPP PR-94-8, Apri 1994

CMS at LHC

pp → H X

H → Z Z → $\mu^+\mu^-$ $\mu^+\mu^-$

with 30 minimum-bias events

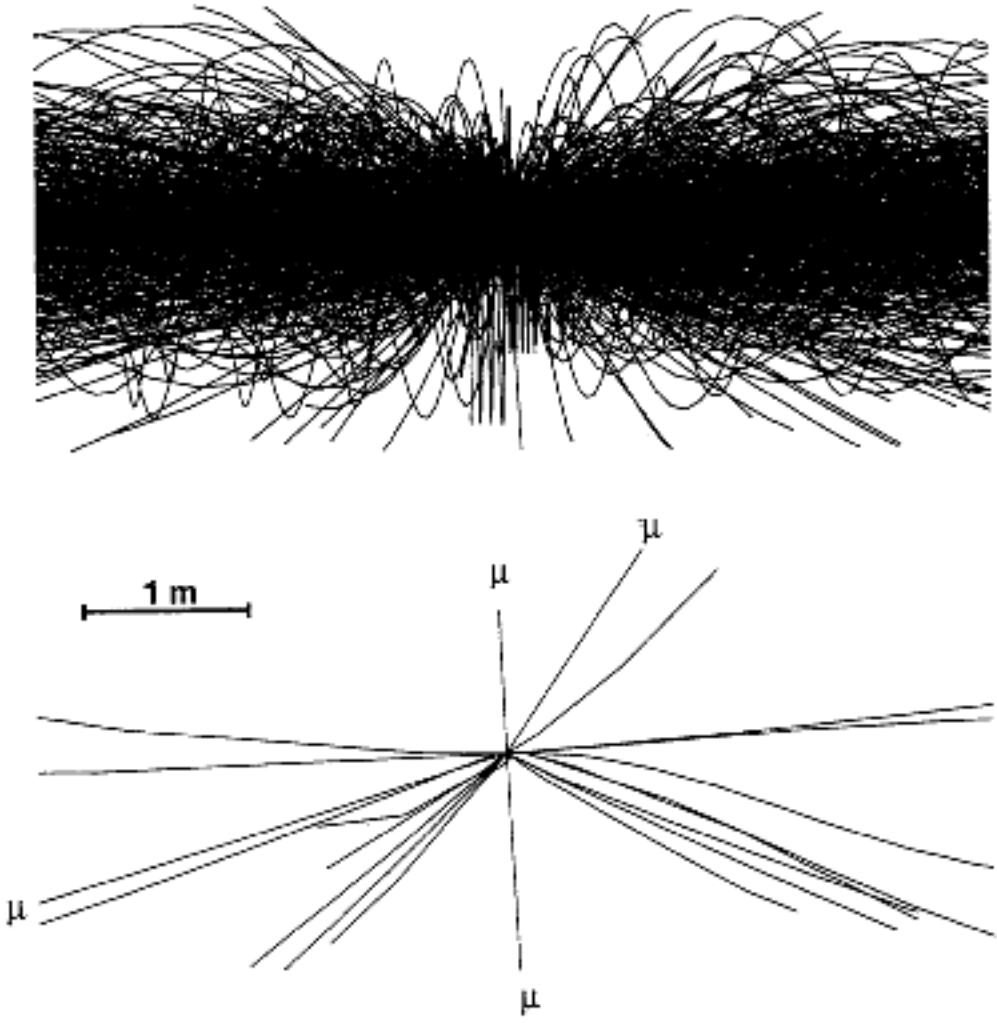


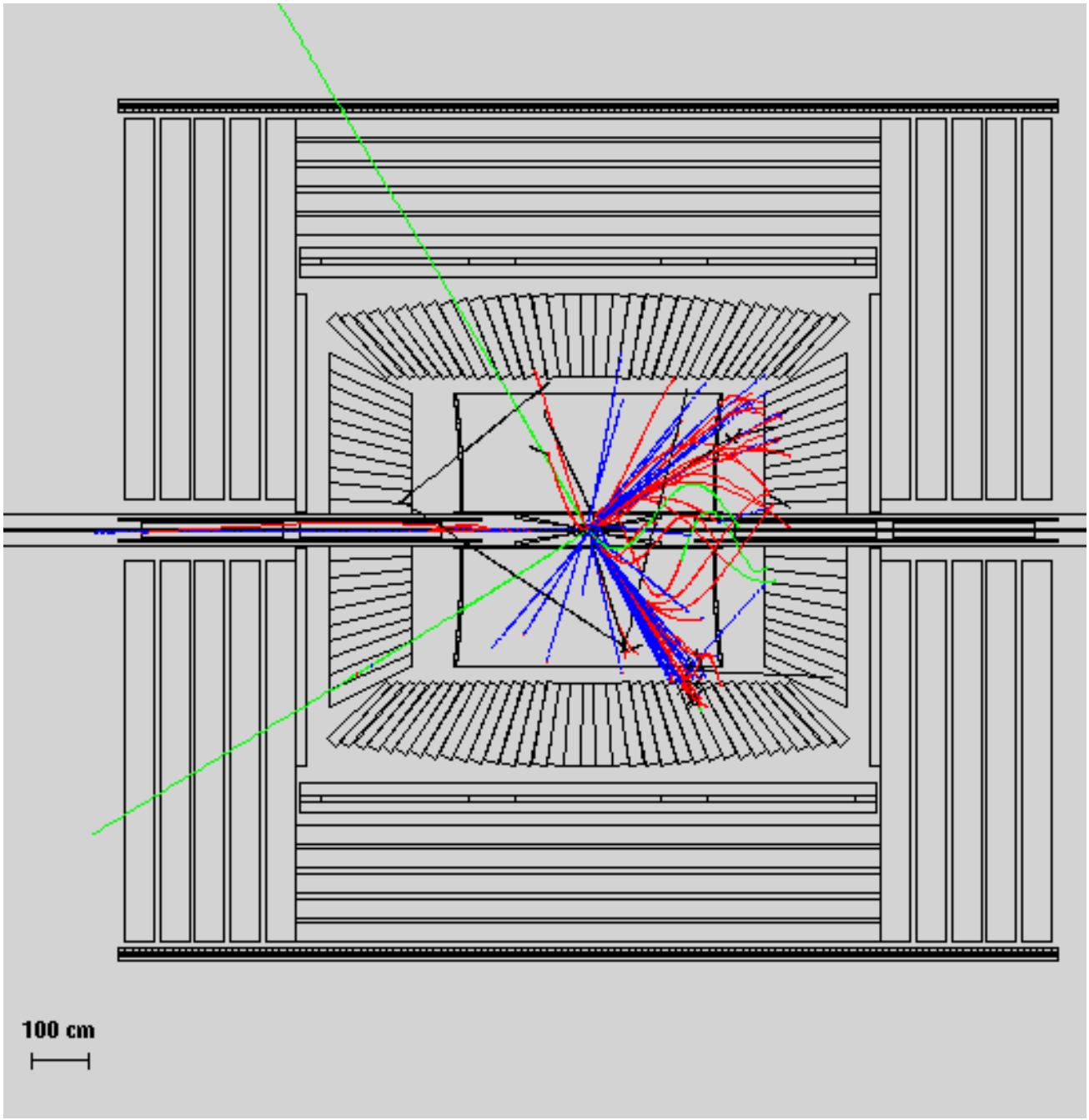
Fig. 3. A longitudinal view of a H → ZZ → 4μ event superposed on 30 minimum-bias events simulated in the CMS tracking volume. All charged tracks are shown (top) and only tracks with p_T > 2 GeV are plotted (bottom).

e^+e^- → Z h E_{cm} =300 GeV

Z → $\mu^+\mu^-$ h → $b\bar{b}$

R-Z view

by JIM (I. Nakamura)

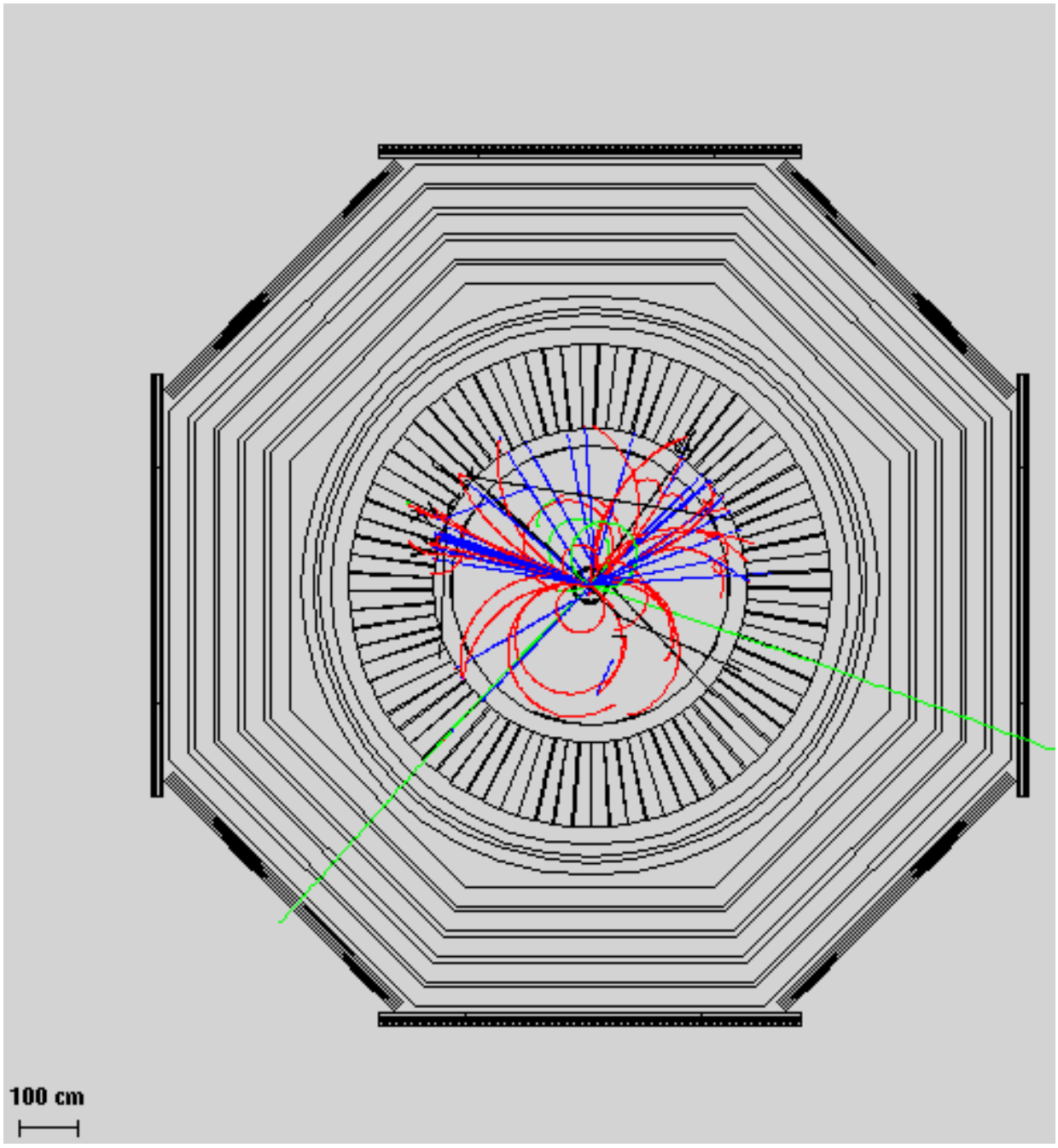


e^+e^- → Z h E_{cm} =300 GeV

Z → $\mu^+\mu^-$ h → $b\bar{b}$

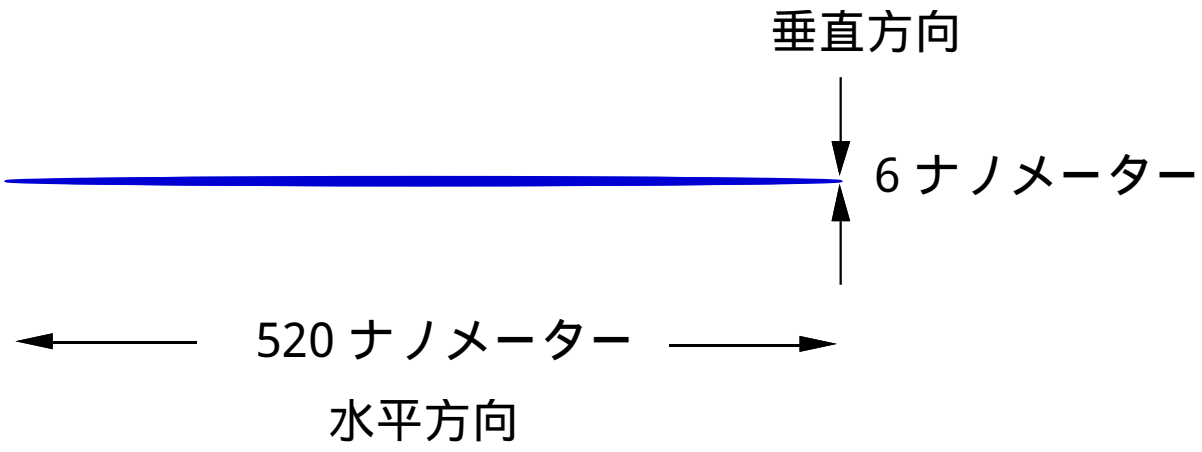
R-ϕ view

by JIM (I. Nakamura)



リニアコライダーの特徴

(1) ビームサイズ：超偏平



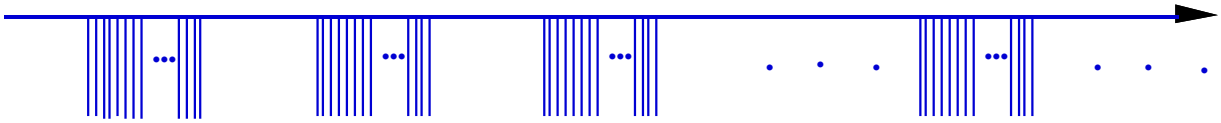
1 ナノメーター = 1 千分の 1 ミクロンメーター

(2) ビーム強度：超高輝度

200μmの長さ (1バンチ) に百億(10^{10})個の電子

(3) 衝突頻度：バンチ・トレイン構造

電子ビーム(バンチの時間間隔1.45.6ナノ秒)



50 ~ 90バンチから成るトレインが150ヘルツで衝突する。

(4) ビームエネルギー

250 GeV (2千5百億電子ボルト)

2. バックグランド

（１）シンクロトロン光

強度はビーム強度と同程度で、光子10^{10}個／バンチ。

光子エネルギーはMeVからKeVまで連続的に分布。

もし測定器中に散乱して入ってくるなら大混乱。

例えば、荷電粒子の通過によるガスのイオン化（KeV程度の電離エネルギー）を利用している飛跡検出器では、その全読み出しチャンネルが光子の作るシグナルで覆い尽くされてしまう。（SLD/SLC実験の例）

（２）ミューオン

ビームコリメーション：　$\pm 6\sigma_x$，　$\pm 35\sigma_y$

コリメーター物質とビーム粒子の電磁相互作用で生成。

1～2 km上流から測定器を直激する。（SLD/SLC実 験の例）

カロリメーターが(1)の飛跡検出器と同じ影響を受ける。

（３）電子陽電子対

ビームビーム衝突中、電磁相互作用で生成。

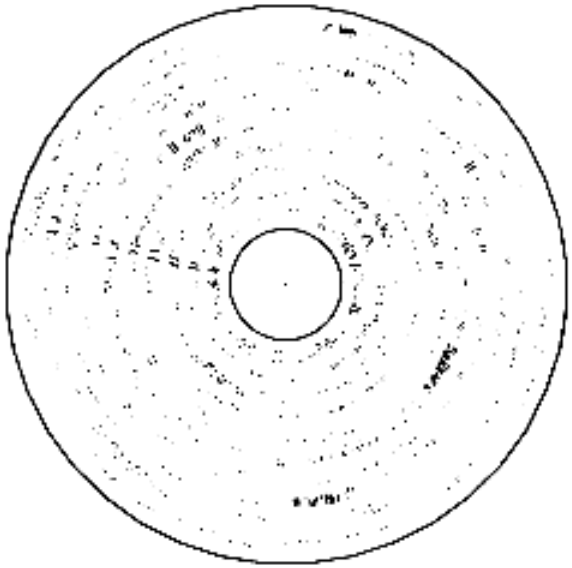
（４）ミニジェット

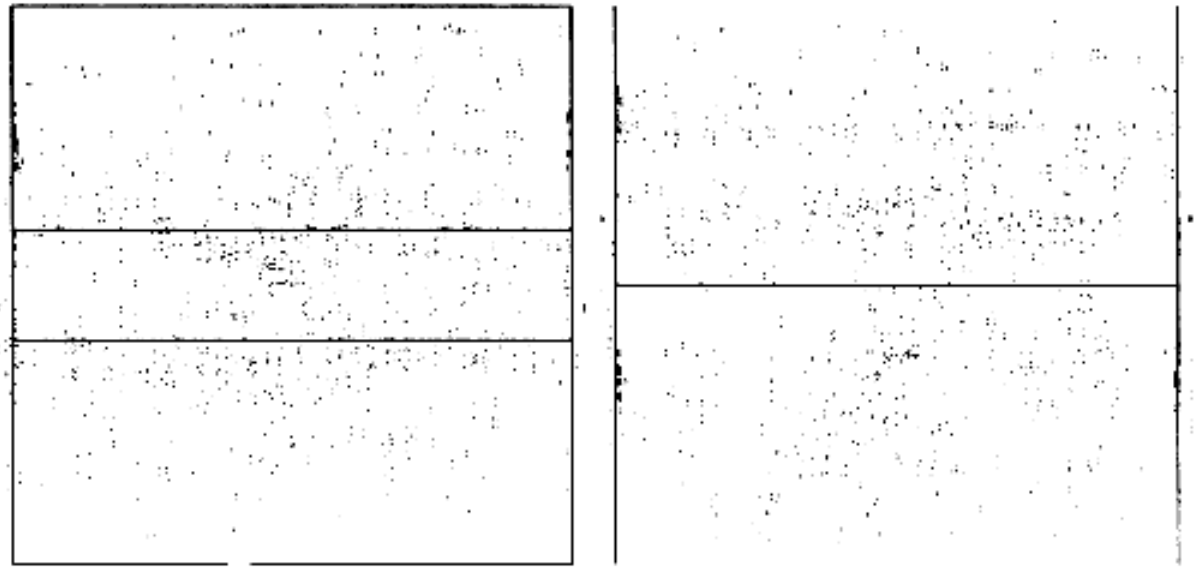
ビームビーム衝突中、量子色力学過程で生成。

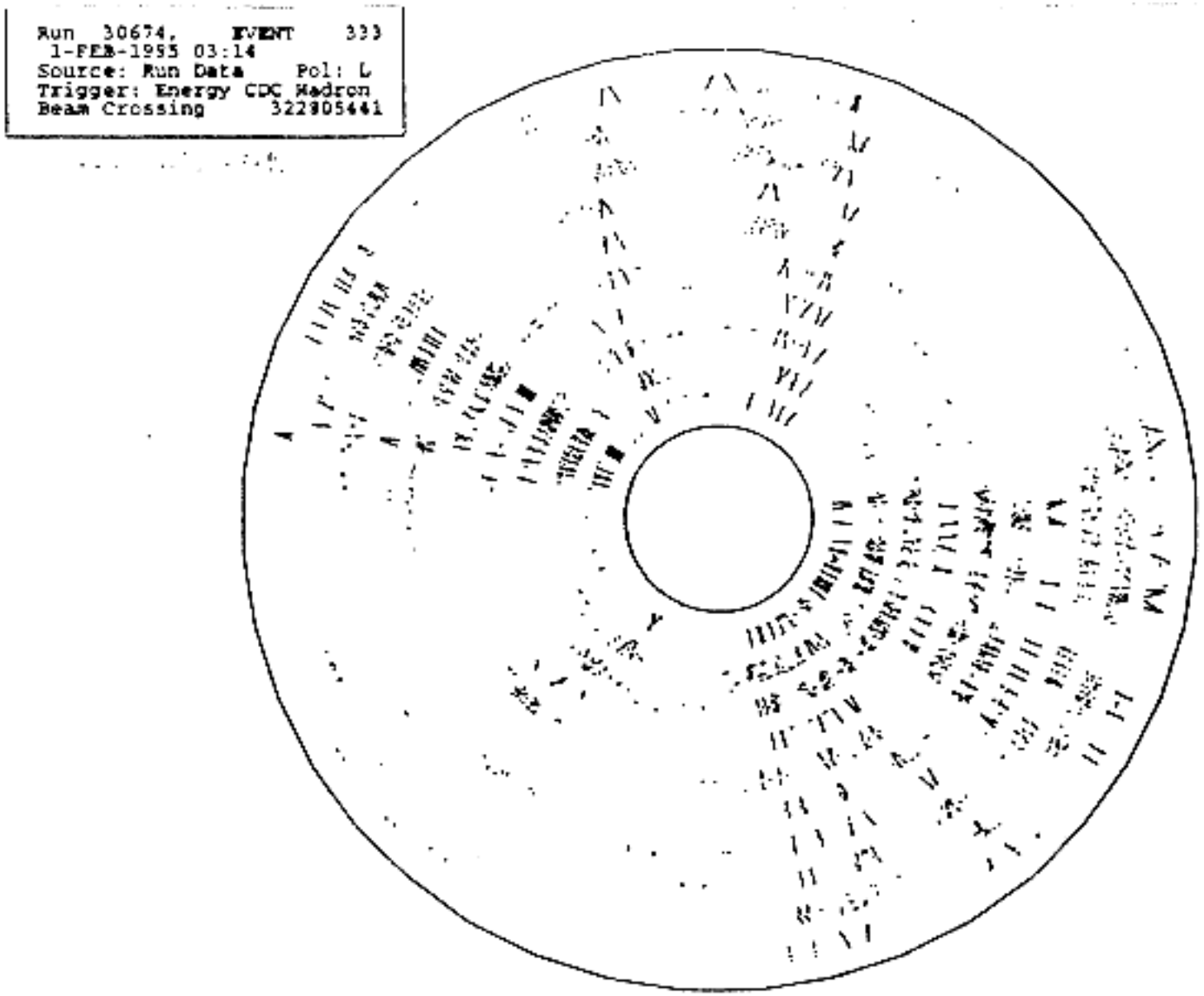
(3),(4)が物理事象と重なる。又、超前方に生成された電子と最終収束用電磁石との衝突で後方散乱される光子。

Run 10022, EVENT 6
29-FEB-1992 18:32
Source: Run Data
Trigger: Timeout
Beam Crossing 2883161

FFIR 92



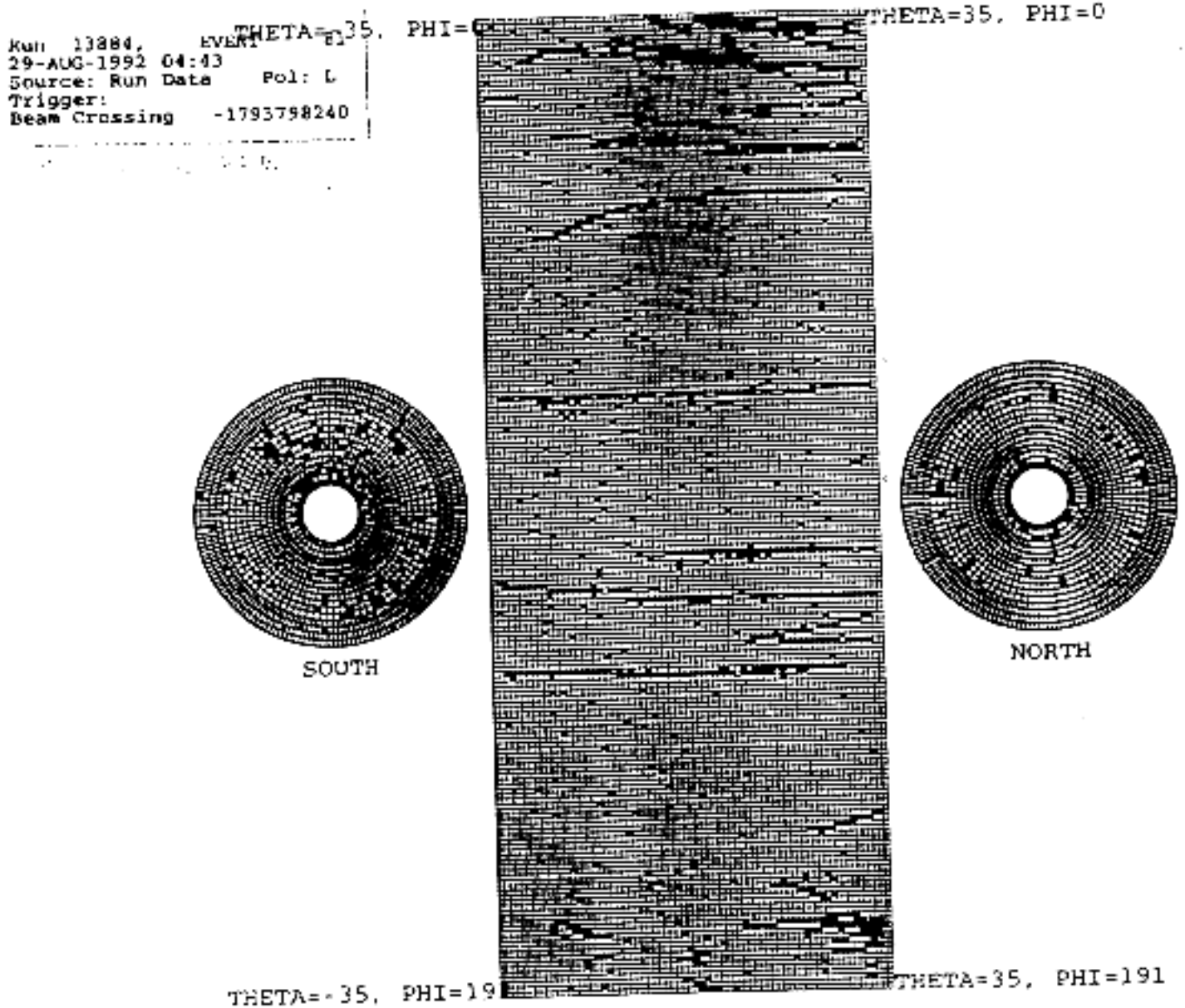




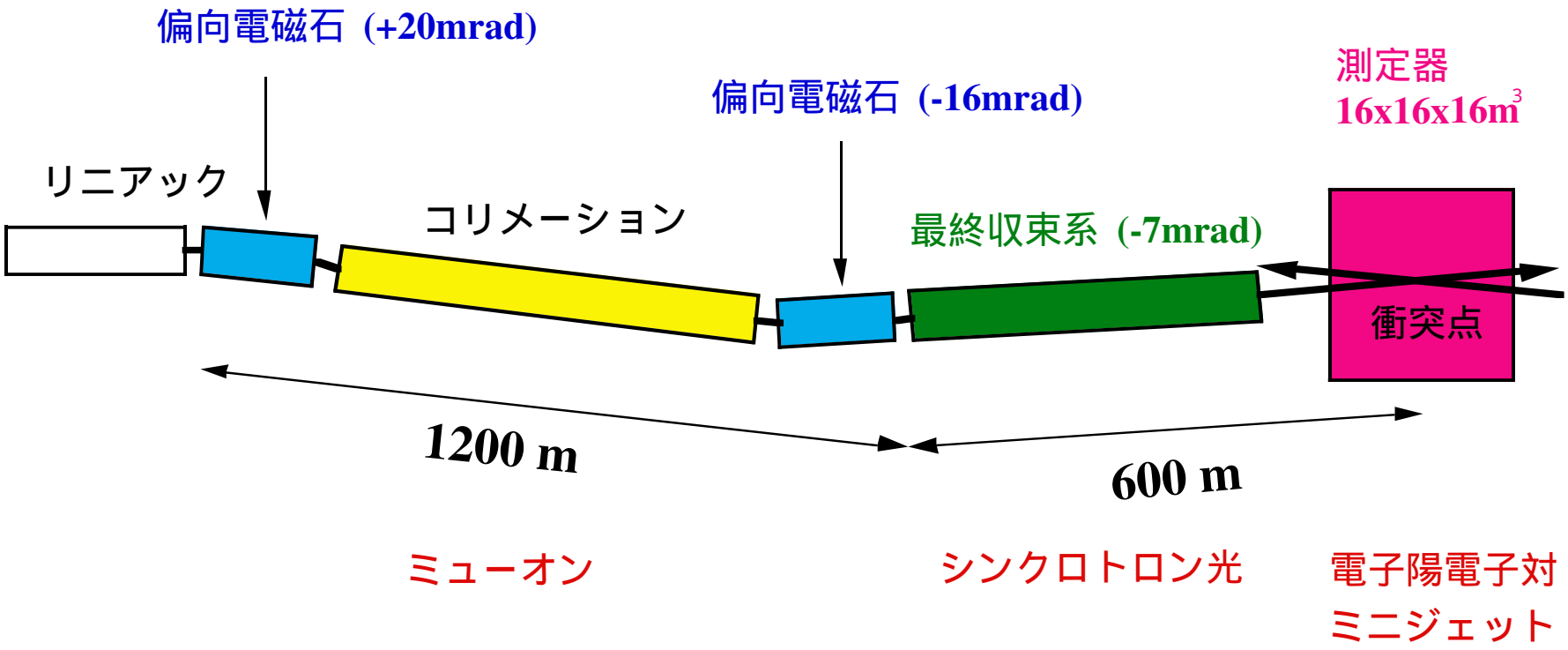
T. Markiewicz
Gran Sasso
30 May 1995

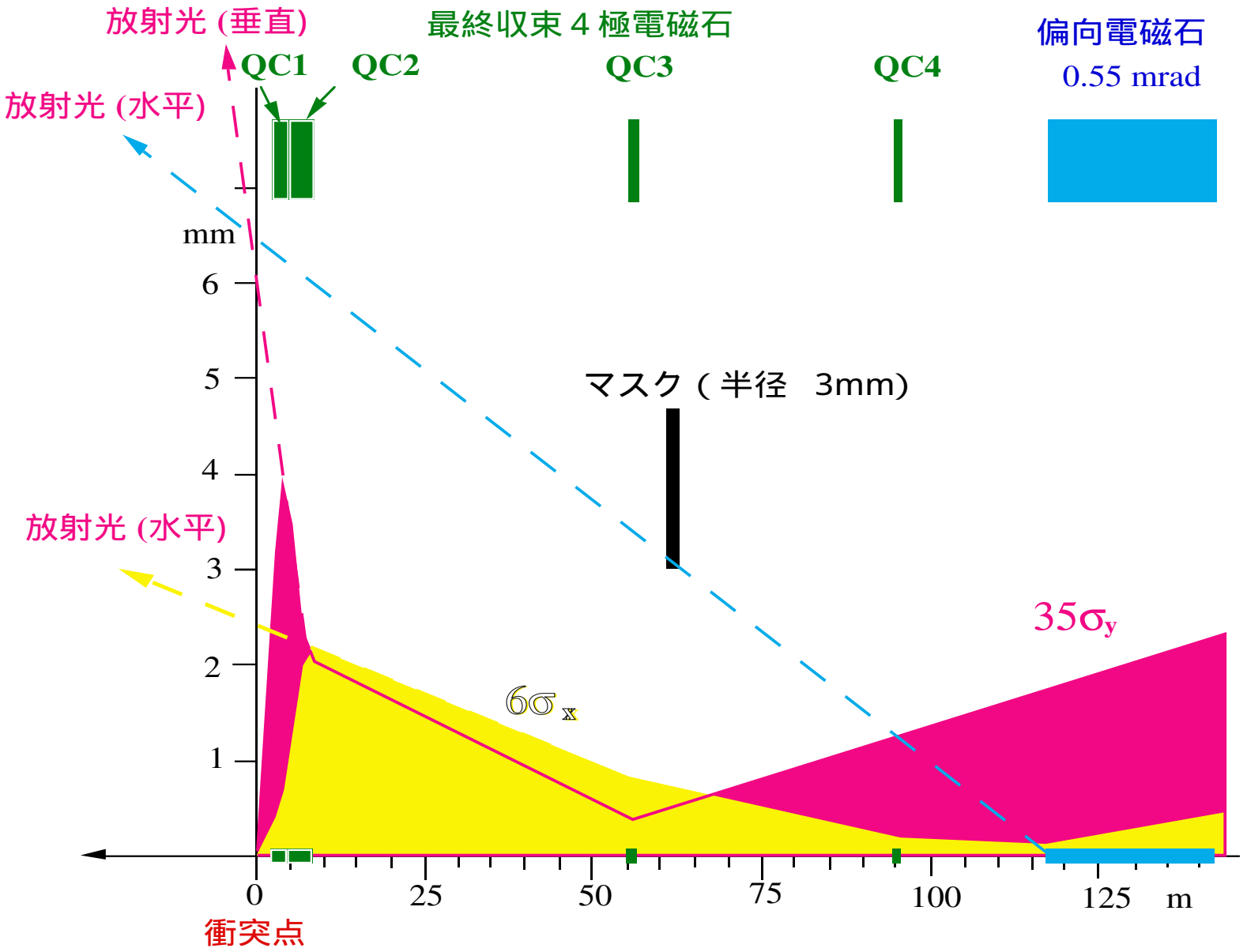
Z

T. Markiewicz
Gran Sasso
30 May 1995



リニアックより測定器まで

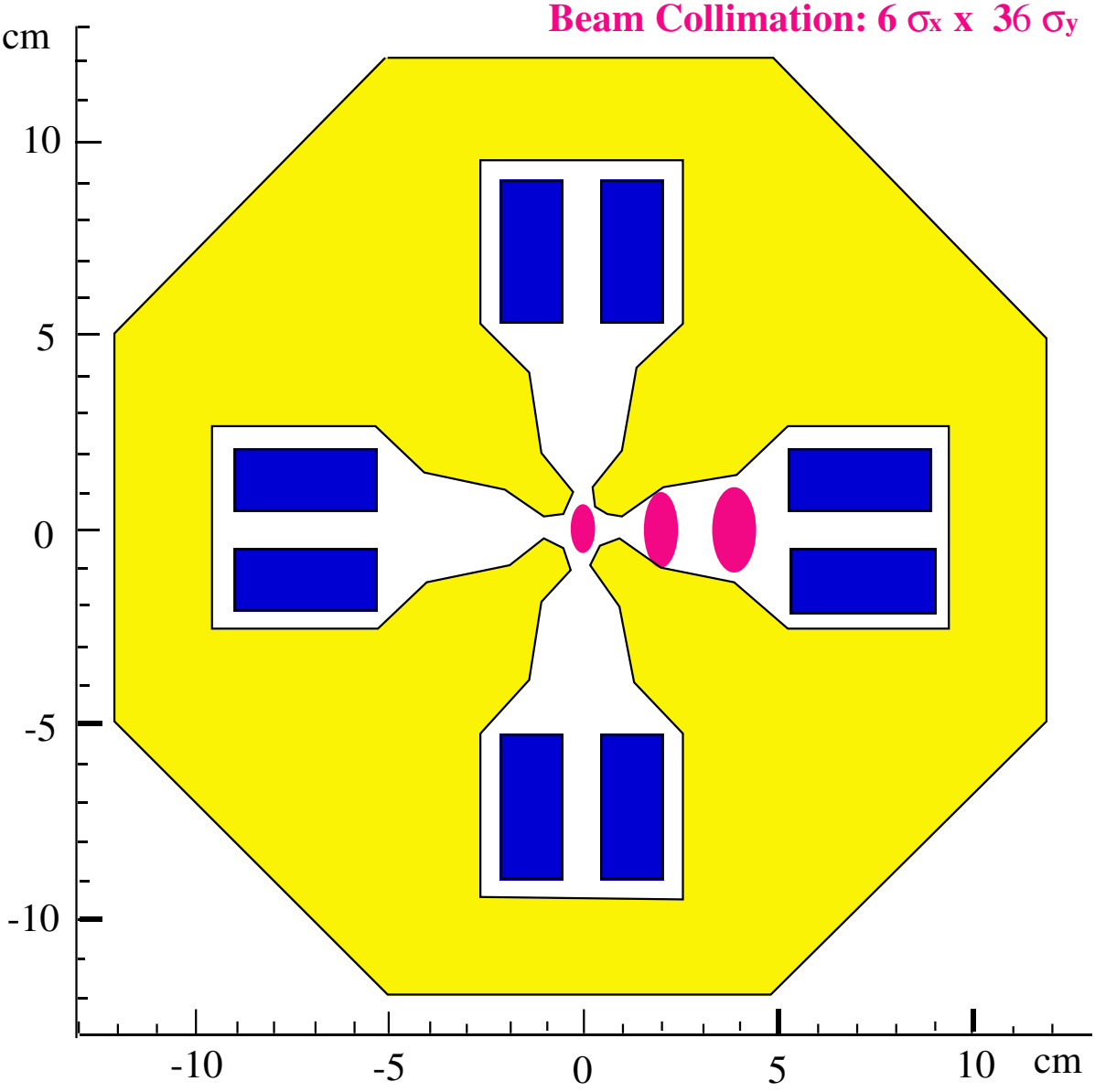



放射光 (垂直)
最終収束 4 極電磁石
偏向電磁石
0.55 mrad
QC1
QC2
QC3
QC4
放射光 (水平)
mm
6
5
4
3
2
1
マスク (半径　3mm)
放射光 (水平)
35σy
6σx
0
25
50
75
100
125
m
衝突点

QC1断面上でのシンクロトロン光の拡がり

JLC-1,E_{beam}=250GeV, 8 mrad crossing

Beam Collimation: 6 σ_x x 36 σ_y



2.1 シンクロトロン(放射)光

光の拡がりはビームの拡がりと放射角度で決まる。

⇑ ⇑

コリメーション $\sqrt{\frac{\varepsilon_{X(Y)}}{\beta_{X(Y)}}}$

$6\sigma_x \times 35\sigma_y$

○ 電子が磁場で曲げられるとき、その軌道の接線方向にシンクロトロン光を放射する。

発生場所：偏向電磁石、　最終収束電磁石

衝突点より117.4m上流　　QC1 ~ QC4

シンクロトロン光が磁極やビームパイプに当たり散乱され、測定器の中に入るとバックグランドとなる。

コリメーションが不完全か、予想以上にビームのエミッタンス($\varepsilon_{x(y)}$)が大きいときに問題となる。

対策

前者：二重のコリメーションで10^{-8}のボケ(不完全さ)。ビームテールの再生長は10^{-10}トールの真空で問題ない。

後者：加速器の運転初期に問題となる。このとき、大きな$\beta_{x(y)}$を用いなければならない。低いルミノシティー。

2.2 ミューオン

コリメーションでビームテールは吸収されるが、ミューオンが生成される。

その生成確率(N_μ)は、ミューオンエネルギー(E_μ)が2 ~ 5 GeV以上に対して、

$$N_\mu = 3.9 \sim 2.3\ 10^{-4}\ E_e / 250\ \mathrm{GeV}$$

である。

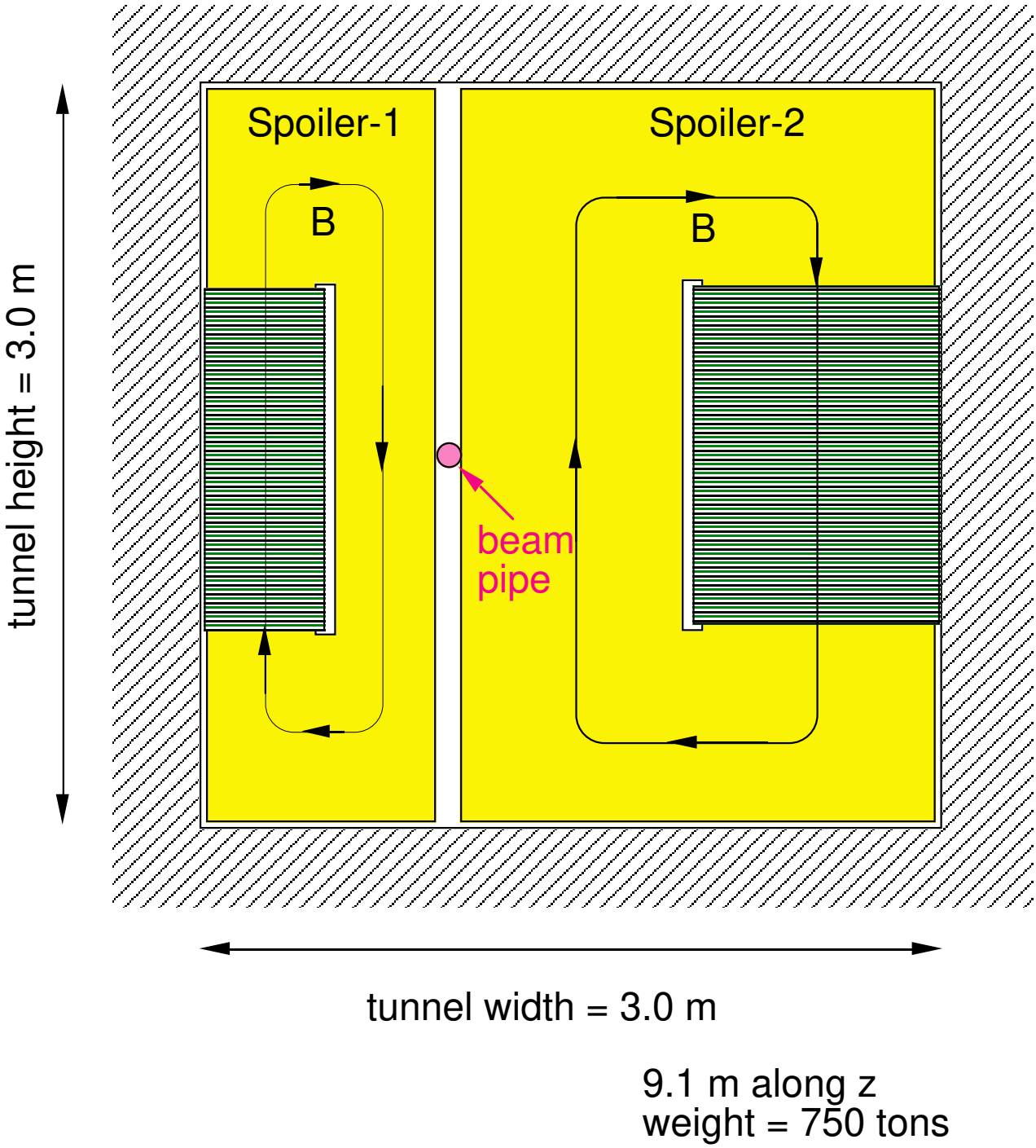
1 %のビームテールを仮定すると1 トレイン当たり、3 ~ 2 10^6個のミューオンが生成される。

シミュレーションによるとその0.1 %すなわち約1000個のミューオンが測定器を通過する。

対策 $\Longrightarrow$ 1 個以下にせよ。

(1) ミューオンスポイラー

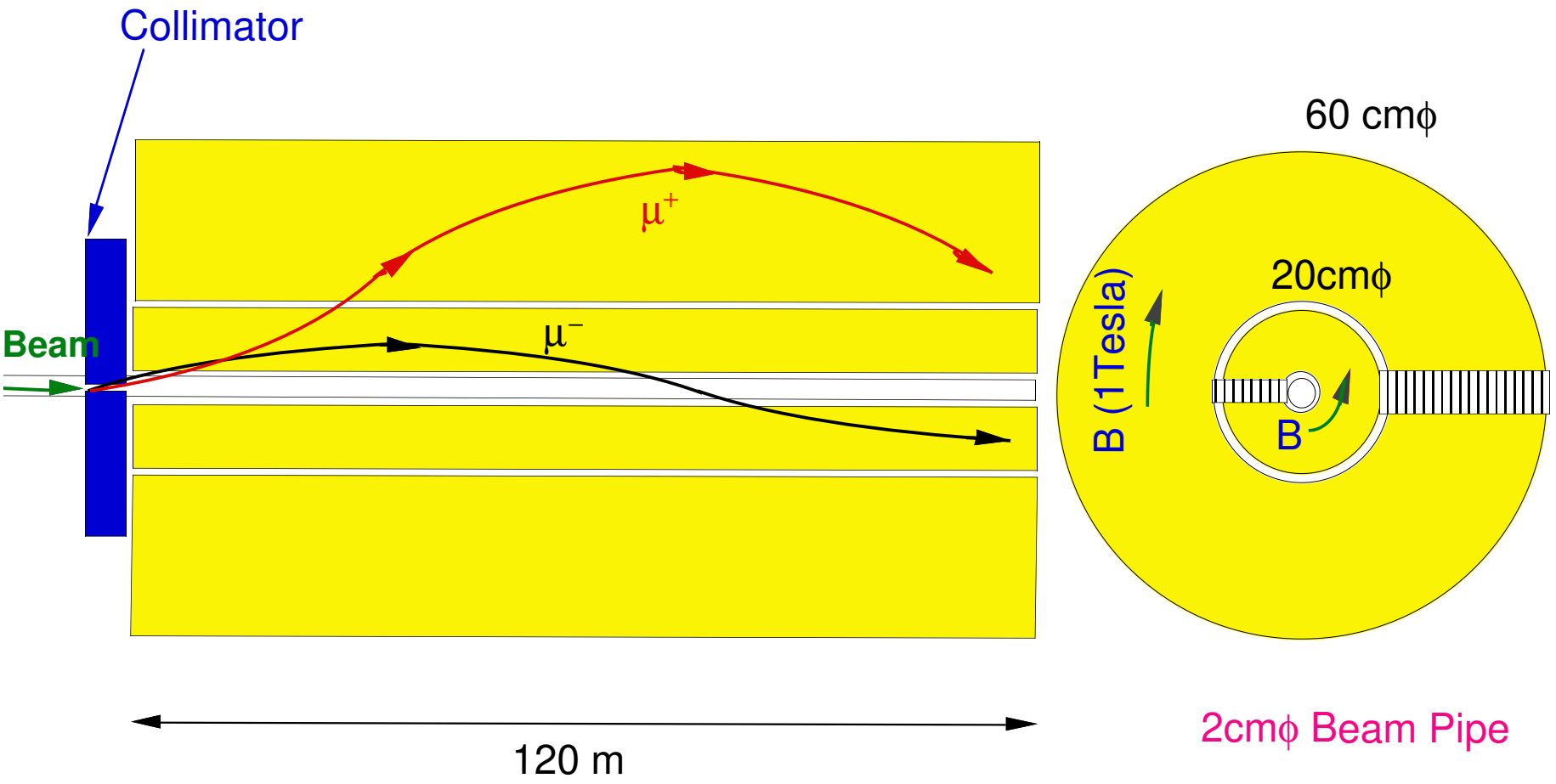
L.Keller,LC93



9.1 m along z
weight = 750 tons

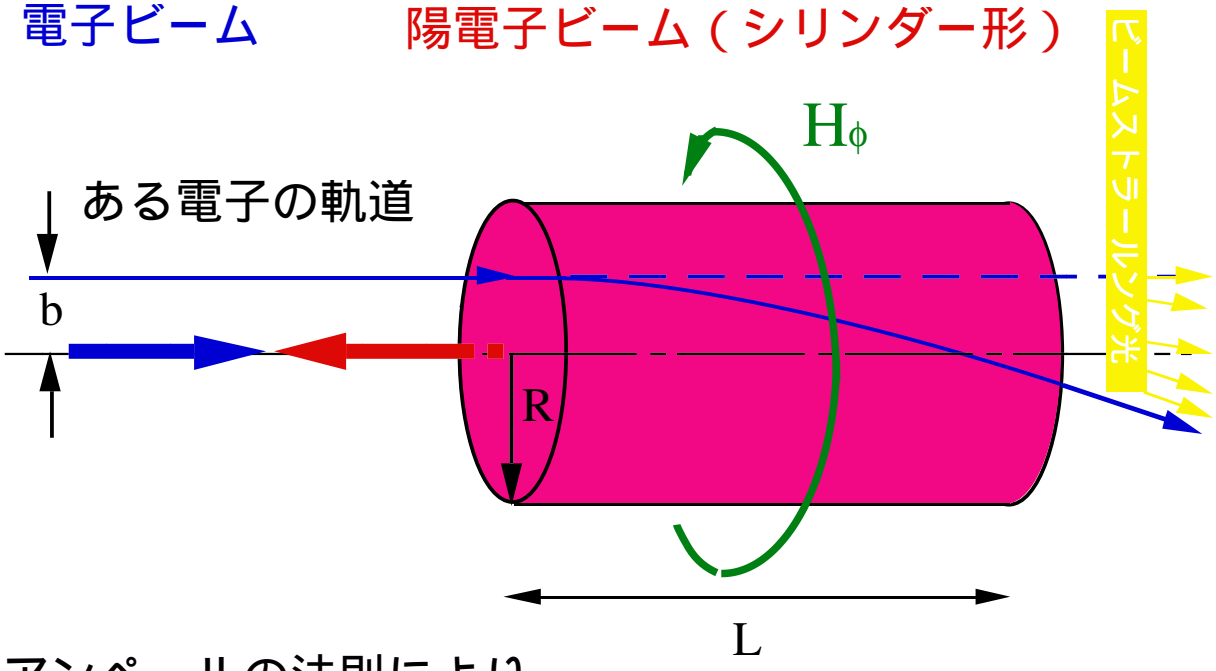
（２）ミューオンアテネター

E.A.Kushnirenko, LC92



ビームビーム相互作用

相手側のビームの作る電磁場によって、ビーム電子がどれくらい曲げられるか考える。先ず簡単のためにビームの断面は円形であると仮定する。



アンペールの法則により、

$$\oint H_\phi dl = \frac{4\pi}{c} I = 2\pi b H_\phi$$

$$I = \frac{N^* ec}{L} \cdot \frac{\pi b^2}{\pi R^2}$$

$$H_\phi = \frac{2N^* eb}{LR^2} \approx O(10{,}000\ \mathrm{Tesla})$$

N*は粒子数で10^{10}個、R ~ b ~ 10^{-9} m、バンチ長Lは約100μmである。

磁場H_ϕによるローレンツ力F_rにより電子はビーム軸に向かう半径方向の力(電子のエネルギーにほとんど依らない)を受ける。

$$F_r = -e\frac{v}{c} \times H_\phi = -\frac{2N^* e^2 b}{LR^2}$$

この力を相手側のビームを通過する間 $\Delta t = L/2c$ 受けているとすると、電子は通過後に以下の曲げ角度を持つ。

$$\Delta r' = \frac{\Delta p}{p} = \frac{2F_r \Delta t}{\gamma m_e c} = -\frac{2N^* r_e b}{\gamma R^2} \approx 0.01 \text{ radian}$$

ここで、$p=\gamma m_e c$、$r_e = \alpha/m_e$は古典電子半径と呼ばれるもので$2.8\ 10^{-15}$mである。

実際の偏平ビームでは次のようになる。

$$\Delta x' = -\frac{2N^* r_e}{\gamma}\frac{1}{\sigma_x + \sigma_y}\frac{x}{\sigma_x} = D_x \frac{x}{\sigma_z}$$

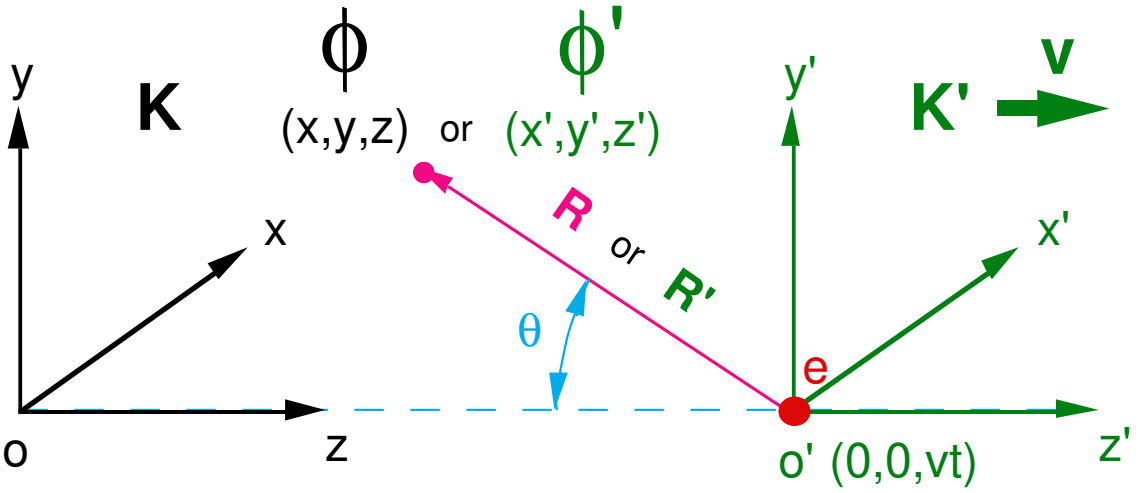
$$\Delta y' = -\frac{2N^* r_e}{\gamma}\frac{1}{\sigma_x + \sigma_y}\frac{y}{\sigma_x} = D_y \frac{y}{\sigma_z}$$

$$\therefore \Delta x' \approx \Delta y' \approx \Delta r'/100 \approx 0.0001 \text{radian}$$

ビーム中での振動回数は約$\sqrt{D_{x(y)}}/2\pi$であり、D_x=0.2、D_y=18であり、実際には振動しない。注：$\gamma = E_{beam}/m_e$

一様に動いている電子の作る電磁場

K静止系と速度vでZ方向に一様に進んでいるK'系を考える。K'系の原点には電子１個があり系と同速度で動いている。この電子の作る電磁場をK系で計算する。また、KとK'系とはt=0の時、完全に重なっていたとする。



クーロンポテンシャル:

$$\phi = \gamma\phi' = \gamma\frac{e}{R'}$$

$$x' = x,\ y' = y,\ z' = \gamma(z - vt),\quad \gamma = \left(1-\frac{v^2}{c^2}\right)^{-1/2}$$

$$R'^2 = x'^2 + y'^2 + z'^2 = \gamma^2 R^2\left(1-\frac{v^2}{c^2}\sin^2\theta\right)$$

ここで

$$\vec{R} = (x, y, z - vt),\qquad \sin^2\theta = \frac{x^2+y^2}{R^2}$$

$$\phi = \frac{e}{R\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}\sin^2\theta}} \xrightarrow{v\approx c} \gamma\frac{e}{R_\perp}$$

$$R^2 = x'^2 + y'^2 + \frac{z'^2}{\gamma^2} \xrightarrow{v\approx c} x'^2 + y'^2 \equiv R'^2_\perp = R^2_\perp$$

電磁場は；

$$\vec{E} = -\vec{\nabla}\phi = \frac{e\vec{R}}{\gamma^2 R^3\left(1-\frac{v^2}{c^2}\sin^2\theta\right)^{3/2}}$$

$$\vec{H} = \frac{\vec{v}}{c}\times\vec{E}$$

○　電磁場のローレンツ変換 (H'=0);

$$E_z = E'_z,\quad E_\perp = \gamma E'_\perp,\qquad H_z = 0,\quad H_\perp = \gamma\frac{\vec{v}}{c}\times\vec{E}'$$

$$E_\perp = \gamma\frac{e}{R^2}\frac{R_\perp}{R}\quad,\qquad E_z < \frac{e}{R^2} \ll E_\perp$$

$\sin^2\theta = 1$　　$\sin^2\theta = 0$ and $z\text{-}vt = R\cos\theta \approx R/\gamma$

したがって横方向の電磁場のみが働く。(ローレンツ収縮)

２次元のクーロンポテンシャル問題となる。

どれくらいの収縮度,そして時間働くのか;

$$1-\frac{v^2}{c^2}\sin^2\theta\approx 0 \xrightarrow{\theta\approx 1/2\pi+\Delta\theta} \Delta\theta = \sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}} = \frac{1}{\gamma}$$

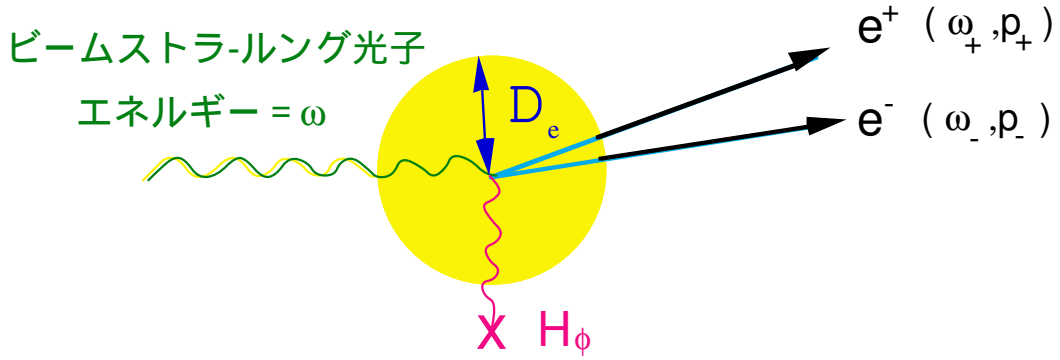
$$\sin^2\theta = \frac{R_\perp^2}{R_\perp^2+(v\Delta t)^2} \xrightarrow{\theta\approx 1/2\pi+\Delta\theta} \Delta t = \frac{R_\perp}{\gamma v}$$

互いに同じ方向 (同じバンチ内) 又は正反対方向 (正面衝突) に運動している電子同士に働く力は；

$$\vec{F}/e = \vec{E} \pm \frac{\vec{v}}{c}\times\vec{H} = \left(1\mp\frac{v^2}{c^2}\right)\vec{E} \pm \frac{\vec{v}}{c^2}\vec{v}(\vec{v}\cdot\vec{E}) \approx \begin{cases} 0 \\ 2\vec{E} \end{cases}$$

2.3 電子陽電子対

コヒーレント過程



電子陽電子対の静止系：電場 $E = \omega / 2m_e \cdot H_\phi$

対生成の条件（$\omega > 2m_e$）；

電荷 e が電子コンプトン波長($D_e = h/m_e c = 3.86\times10^{-13}\,m$)進んだ時に電子質量($m_e$)に相当するエネルギーを電場 Eより獲得する。

$$eED_e = m_e$$

初期・終状態のエネルギー保存;

$$\omega^2 = 2m_e \cdot 2eED_e = 2e\omega H_\phi D_e$$

$$\omega^2 = \left(\sqrt{m_e^2+p_+^2}+\sqrt{m_e^2+p_-^2}\right)^2 - \left(\vec{p}_+ + \vec{p}_-\right)^2 \approx \frac{m_e^2\omega^2}{\varepsilon_+\varepsilon_-} \geq \frac{m_e^2\omega}{\varepsilon_+}$$

近似の条件：$\cos\theta_{+-} \approx 1$　　$\varepsilon_- \leq \omega$

陽電子のエネルギーのしきい値；一般に高い

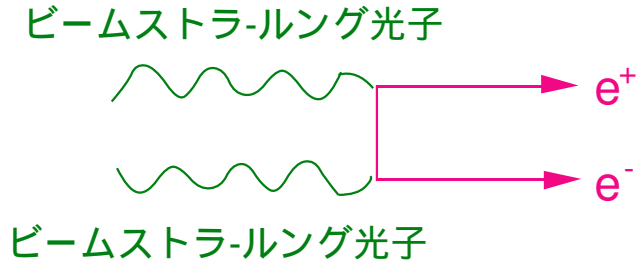
$$\varepsilon_+ \geq \frac{H_c}{2H_\phi D_e}, \qquad H_c \equiv \frac{m_e^2c^3}{eh} = 4.4\times10^9\ \text{Tesla}$$

$$x_+ \equiv \frac{\varepsilon_+}{m_e\gamma} \geq \frac{1}{2Y} \qquad Y \equiv \gamma\frac{H_\phi}{H_c}, \quad \gamma = \frac{E_{beam}}{m_e}$$

非コヒーレント過程

(1) BW (Breit-Wheeler)過程

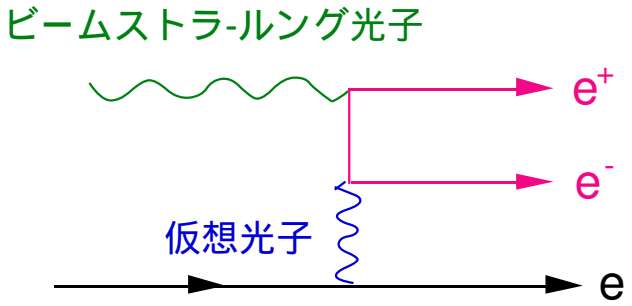
全断面積 / 生成数



~10^{-27}cm

1.9 x 10^{3}個 / バンチ

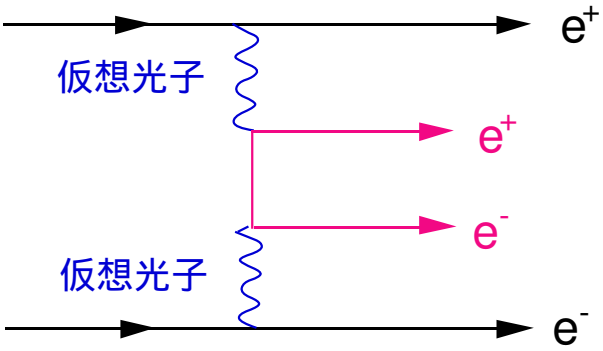
(2) BH (Bethe-Heitler)過程



~10^{-25}cm

2.2 x 10^{5}個 / バンチ

(3) LL (Landau-Lifshits)過程



~10^{-26}cm

4.5 x 10^{4}個 / バンチ

仮想光子は不確定性原理より有限の衝突係数をもつ。

$$\Delta P_t \Delta b \leq h$$

コヒーレント過程との際立った違い

生成される(陽)電子のエネルギーにしきい値が存在しない。むしろ、ひじょうに低いエネルギーに多く生成される。

例: LL過程のエネルギー分布は、$x=E_e/E_{beam}<<1$とすると；

$$\frac{d\sigma}{dx} = \frac{112\alpha^2 r_e^2}{9\pi}\frac{1}{x}\ln\frac{1}{x}\ln 4\gamma^2 x$$

低エネルギー電子c　H_ϕにより大きな曲げ

ビームエネルギーに対して、0.0001 ラジアンの曲がり

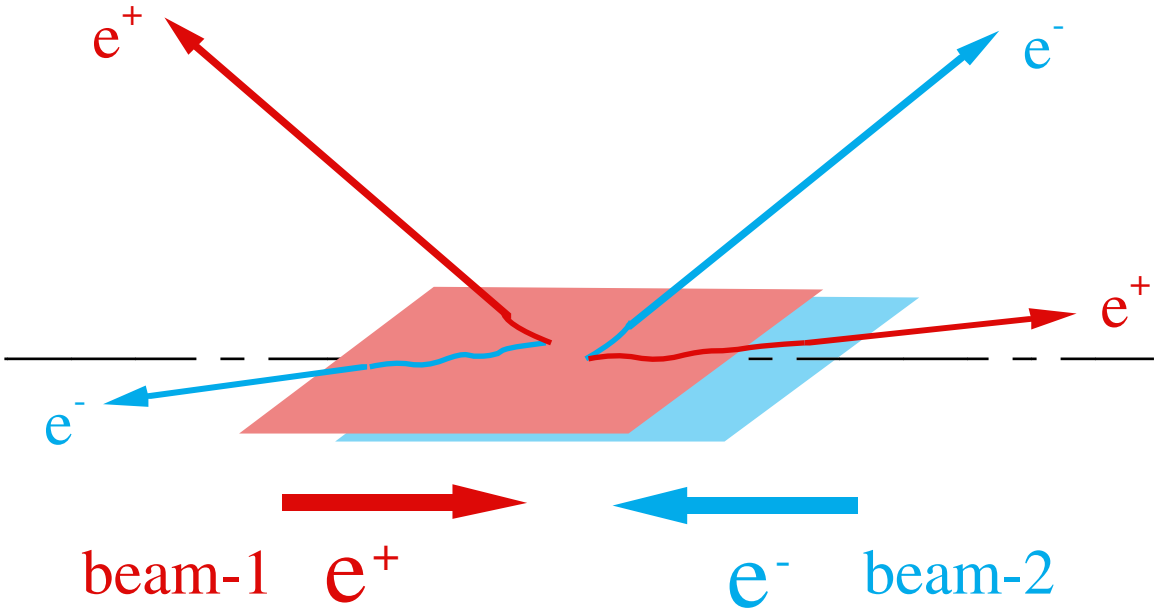
m

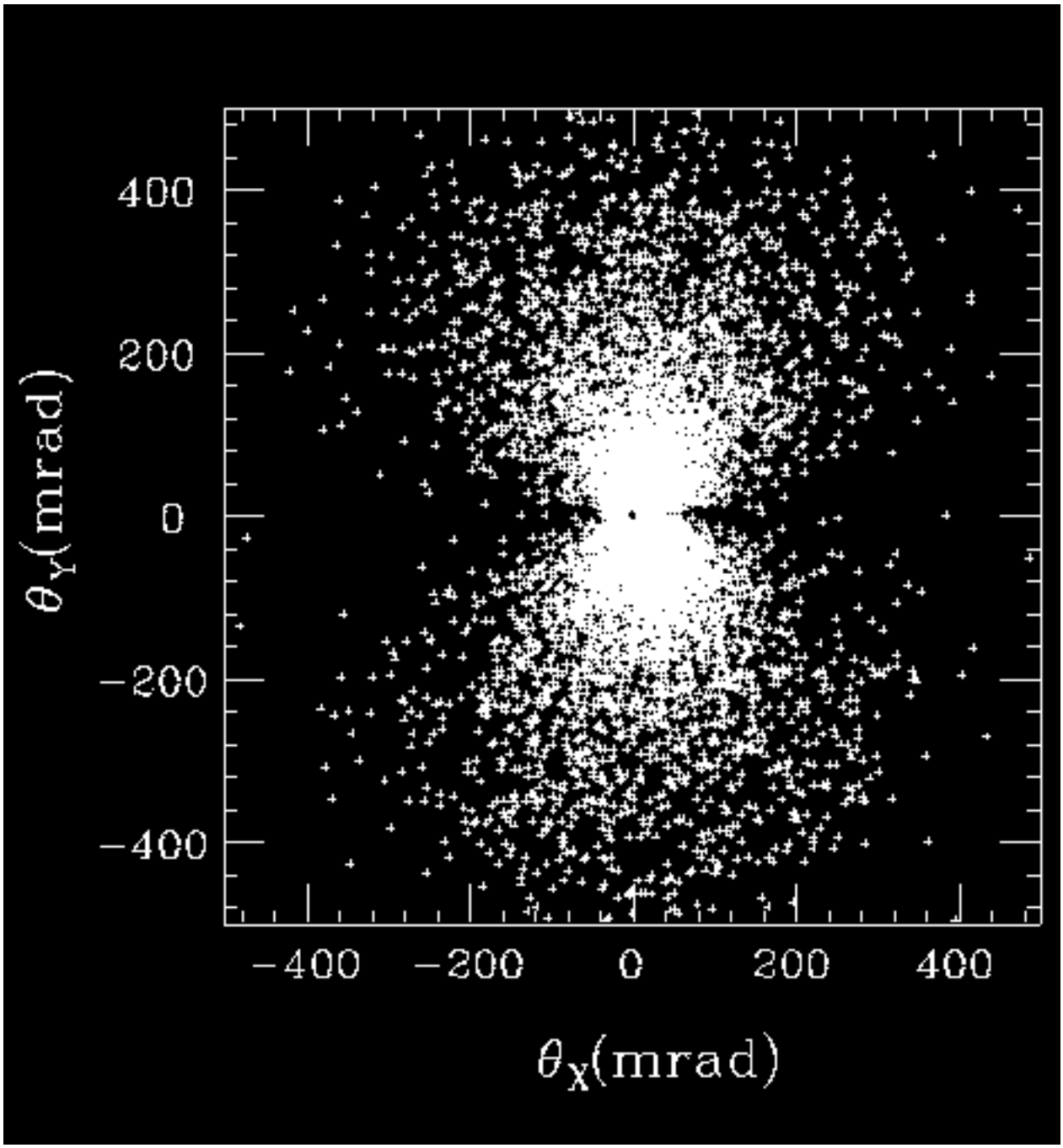
250MeV(x=0.001)の電子に対して、0.1 ラジアンの曲がり

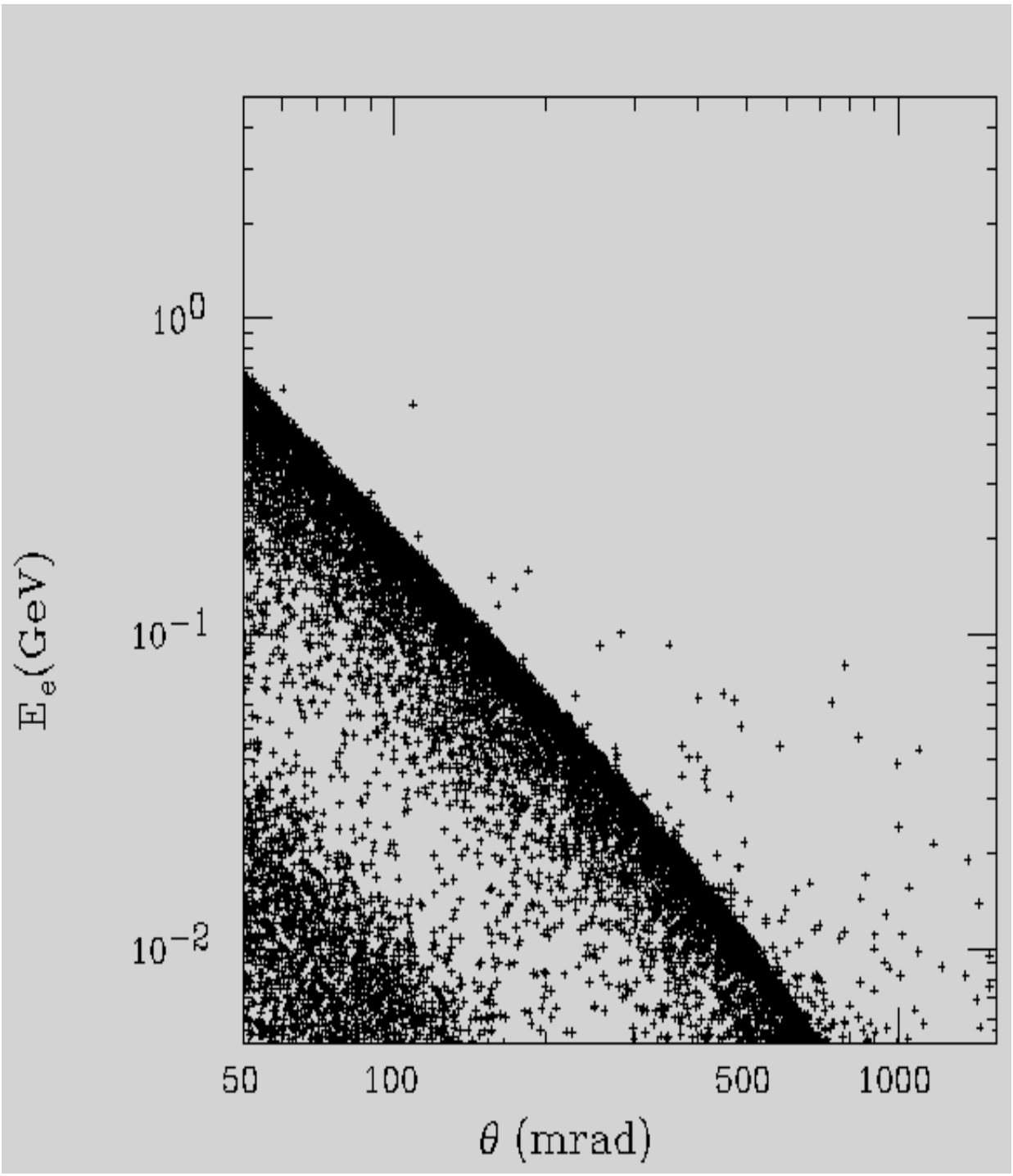
m

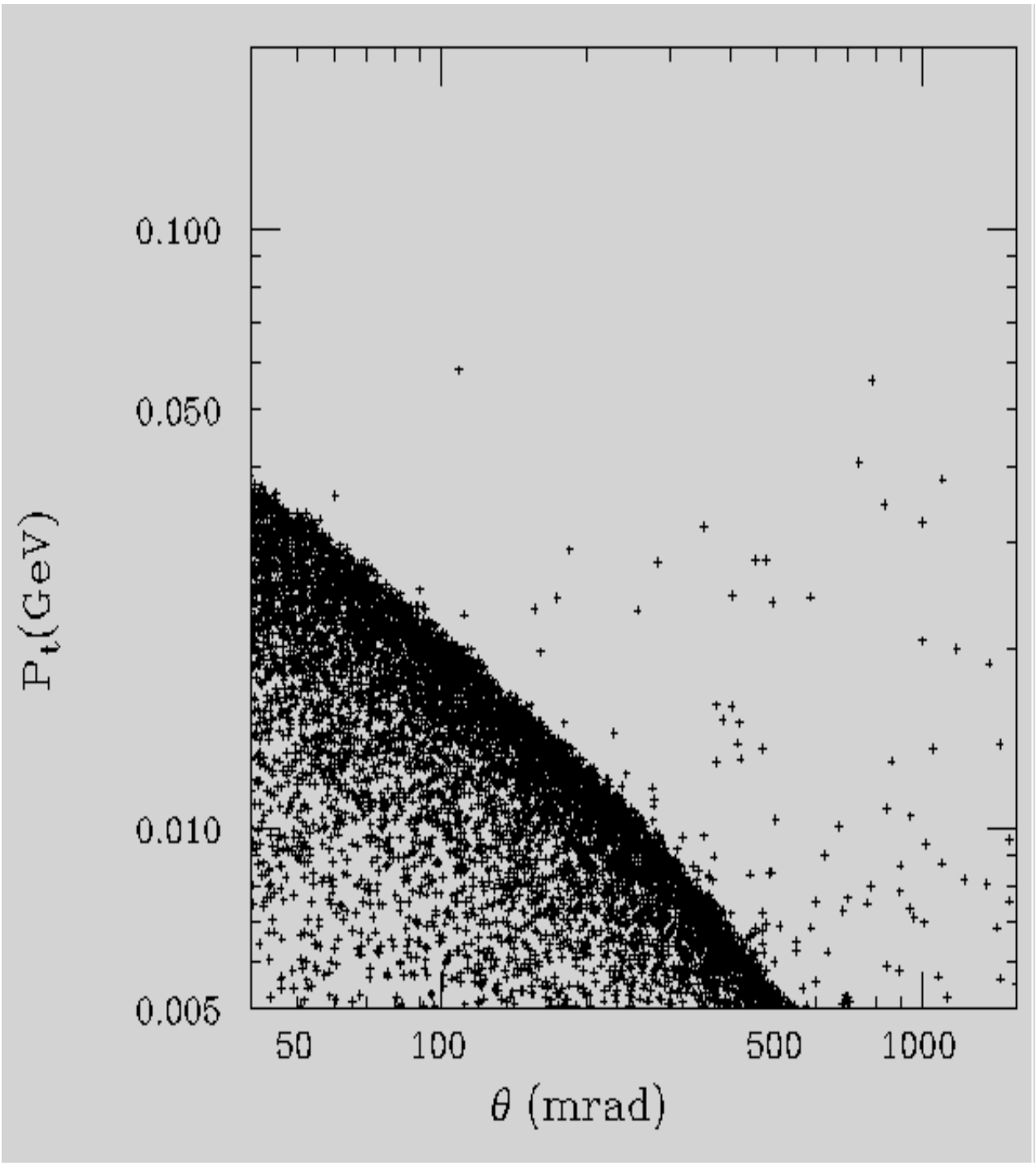
バックグランド

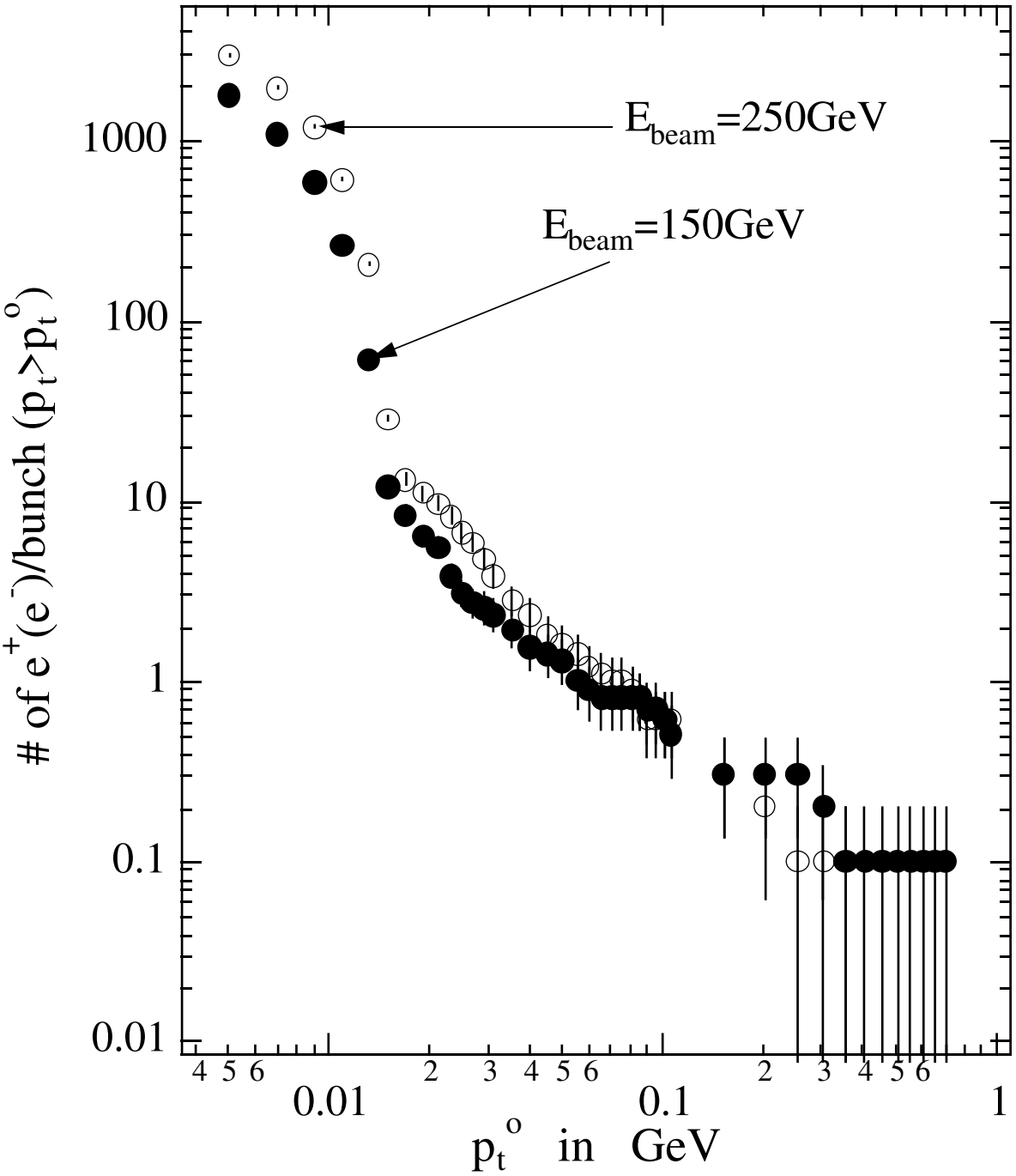
ビームビーム効果を含めてABELプログラム　によりシミュレーションで詳しく研究されている。



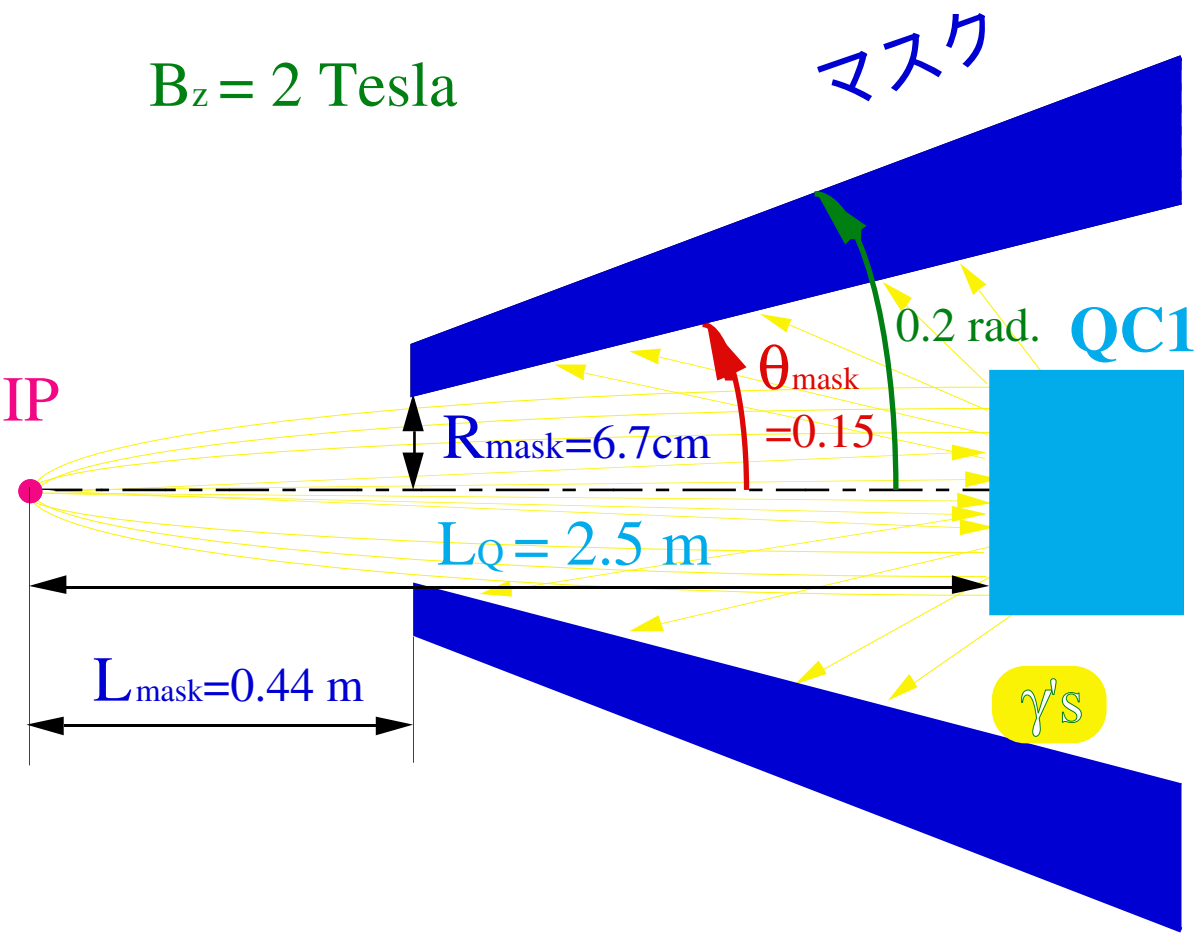

400
200
0
−200
−400
θ_Y(mrad)
−400
−200
0
200
400
θ_X(mrad)


10^0
10^{-1}
10^{-2}
E_e(GeV)
50
100
500
1000
θ (mrad)


0.100
0.050
0.010
0.005
P_t(GeV)
50
100
500
1000
θ (mrad)


E_beam=250GeV
E_beam=150GeV
# of e+(e-)/bunch (pt>pt^o)
1000
100
10
1
0.1
0.01
4 5 6
2 3 4 5 6
2 3 4 5 6
0.01
0.1
1
pt^o in GeV

3. マスクシステム

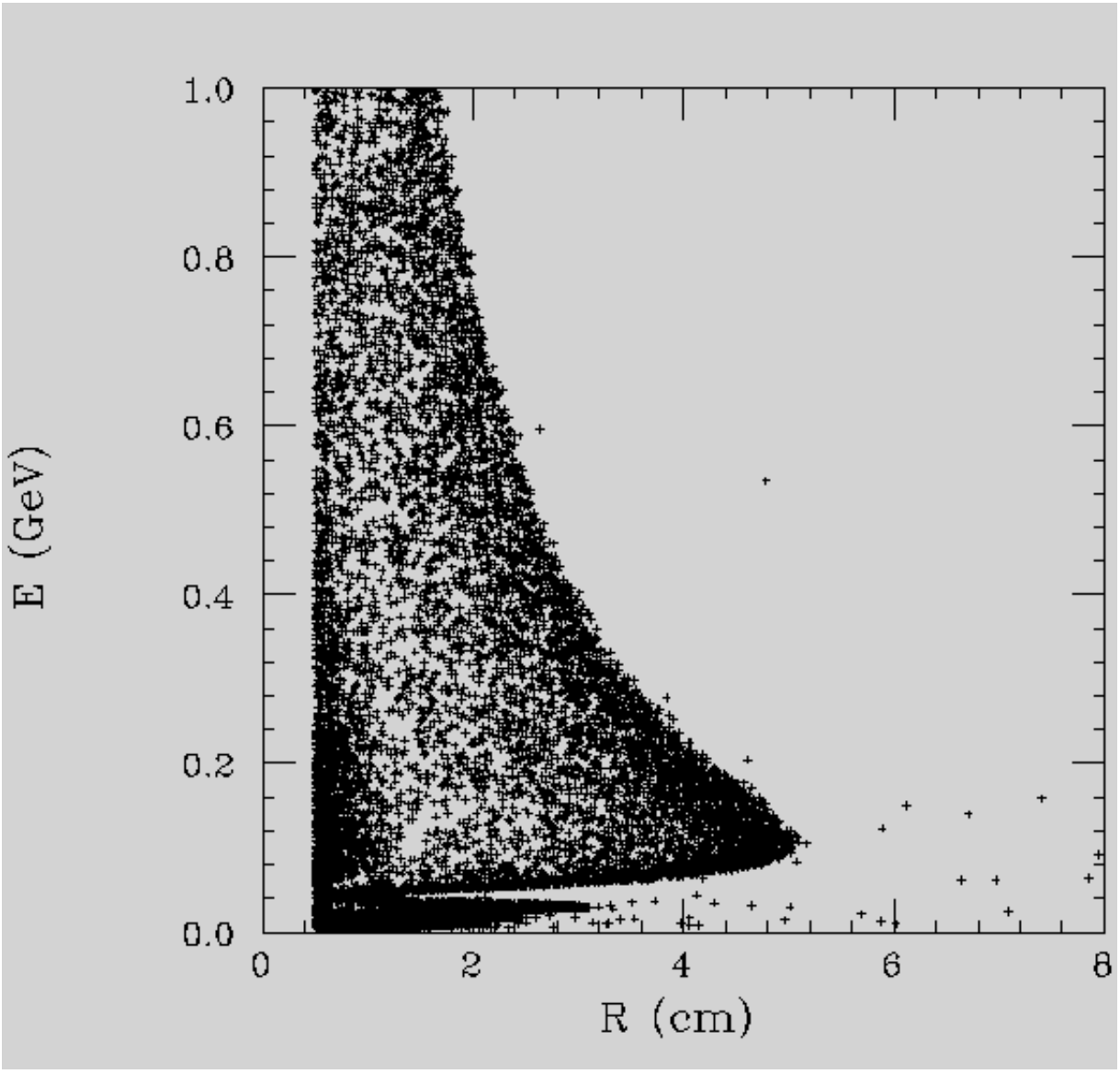


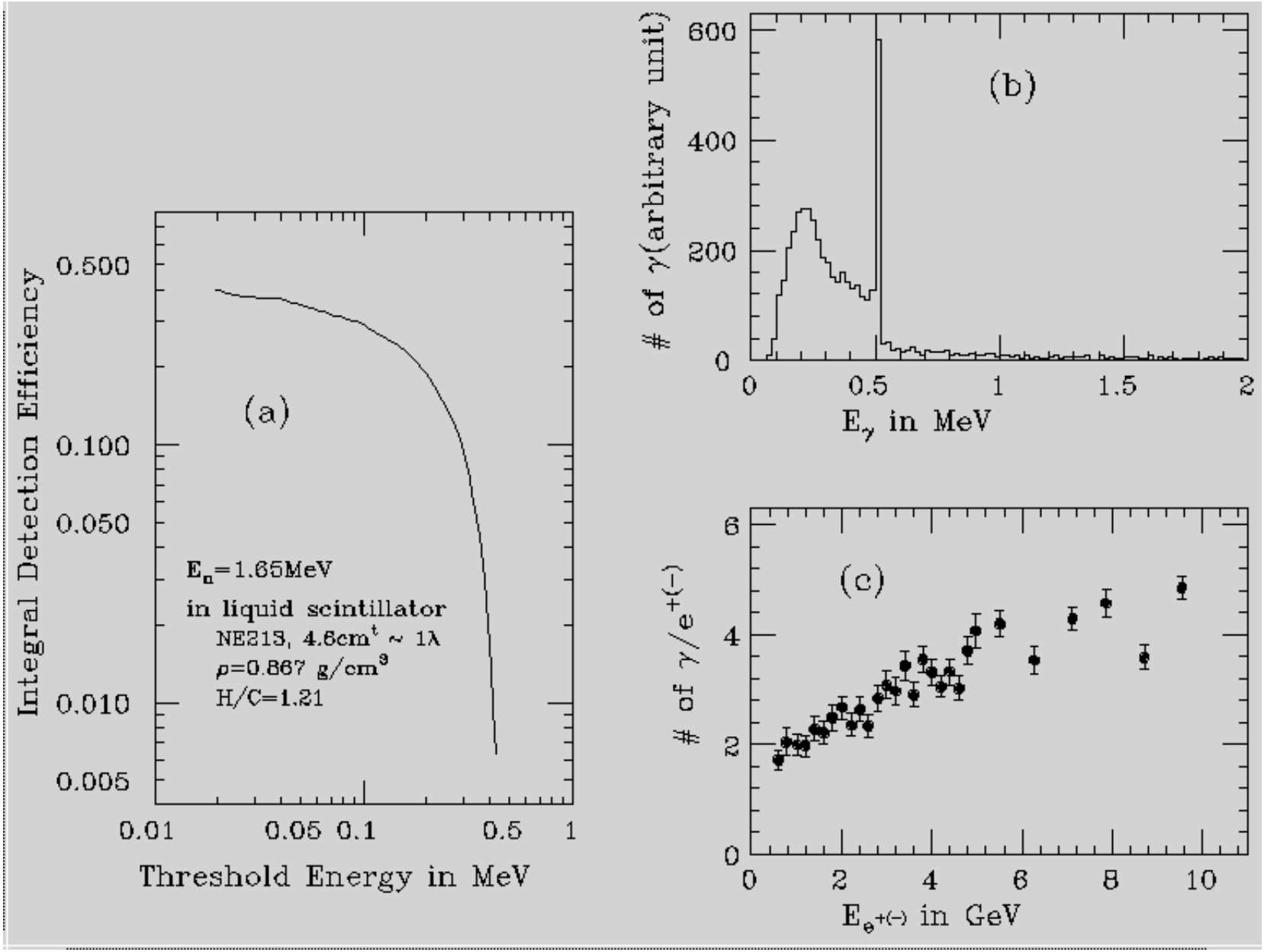
マスク:後方散乱する多量の光子の遮蔽

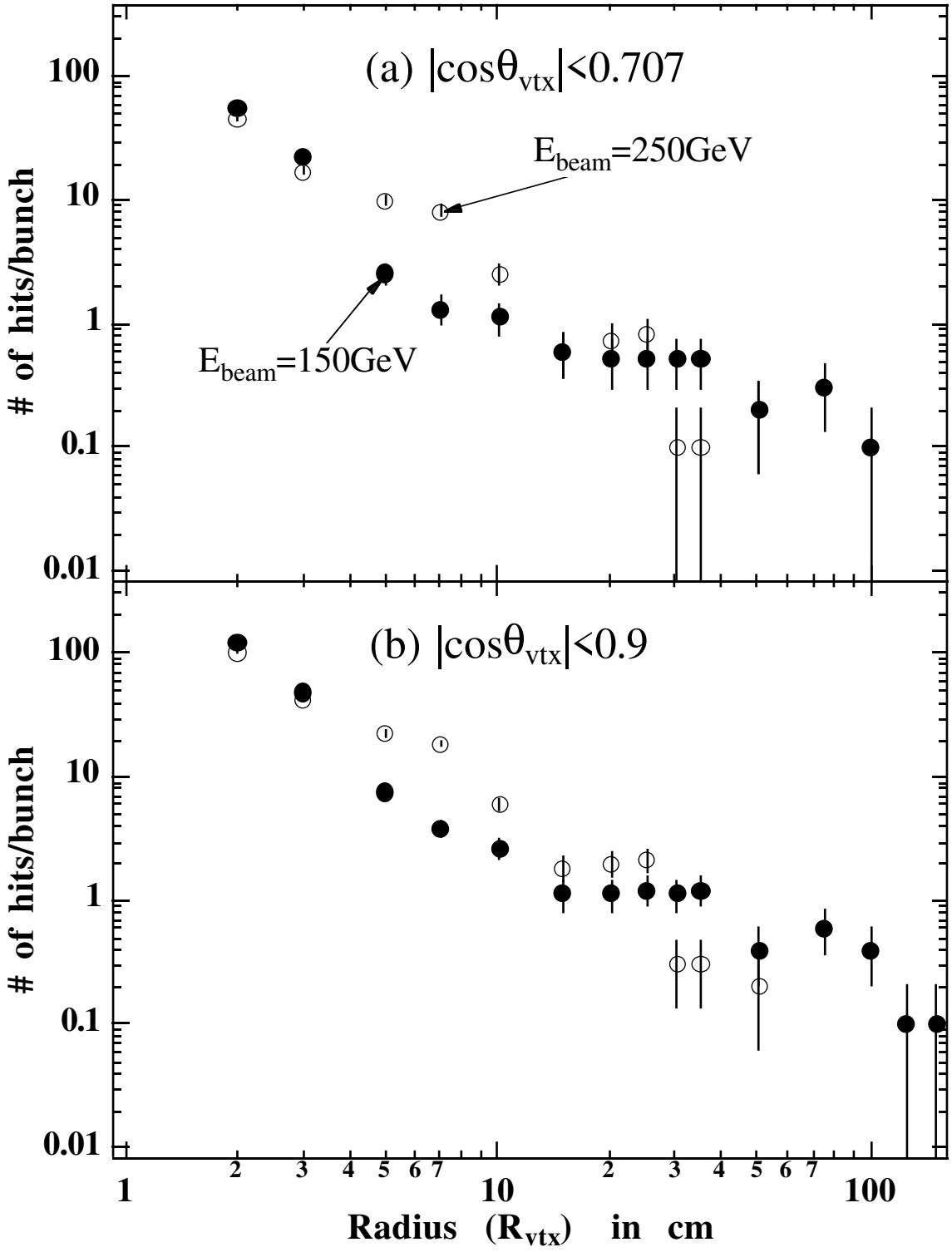
（１）前方に飛び散る膨大な数の電子・陽電子を通過させるに十分大きな間口で、しかも後方散乱光子の遮蔽のために十分小さな間口であること。

$$\eta_{mask} \sim 2.7 \times 10^{-4}$$

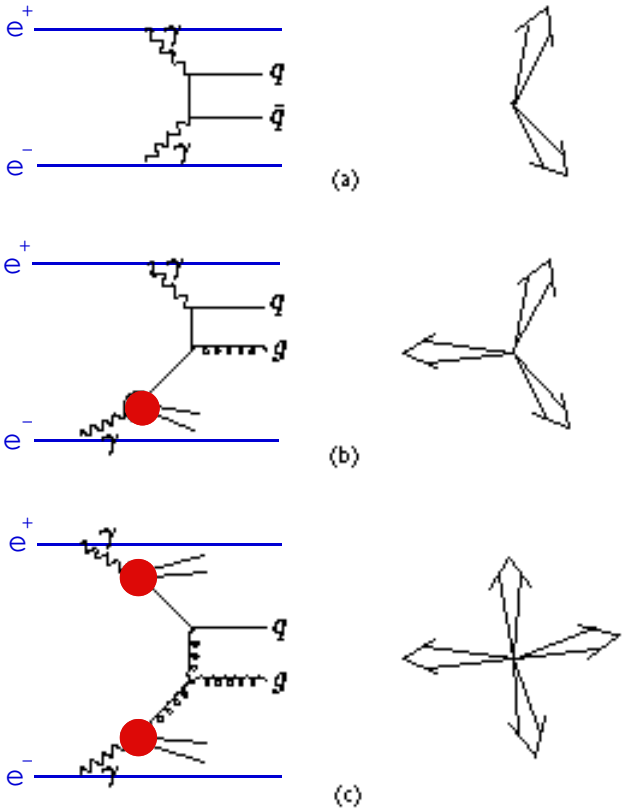
（２）十分な厚さ（大きな光子吸収）。タングステンで5cm以上。


1.0
0.8
0.6
0.4
0.2
0.0
E (GeV)
0
2
4
6
8
R (cm)


Integral Detection Efficiency
0.500
0.100
0.050
0.010
0.005
(a)
E_n=1.65MeV
in liquid scintillator
NE213, 4.6cm^t ~ 1λ
ρ=0.867 g/cm^3
H/C=1.21
0.01
0.05
0.1
0.5
1
Threshold Energy in MeV
# of γ(arbitrary unit)
600
400
200
0
(b)
0
0.5
1
1.5
2
E_γ in MeV
of $\gamma/e^{+(-)}$
6
4
2
0
(c)
0
2
4
6
8
10
$E_{e^{+(-)}}$ in GeV


(a) |cosθvtx|<0.707
Ebeam=250GeV
Ebeam=150GeV
# of hits/bunch
100
10
1
0.1
0.01
(b) |cosθvtx|<0.9
# of hits/bunch
100
10
1
0.1
0.01
1
2
3
4
5
6
7
10
2
3
4
5
6
7
100
Radius (Rvtx) in cm

2.4 ミニジェット　pp 衝突とよく似ている。



ビームストラールング光子

仮想光子

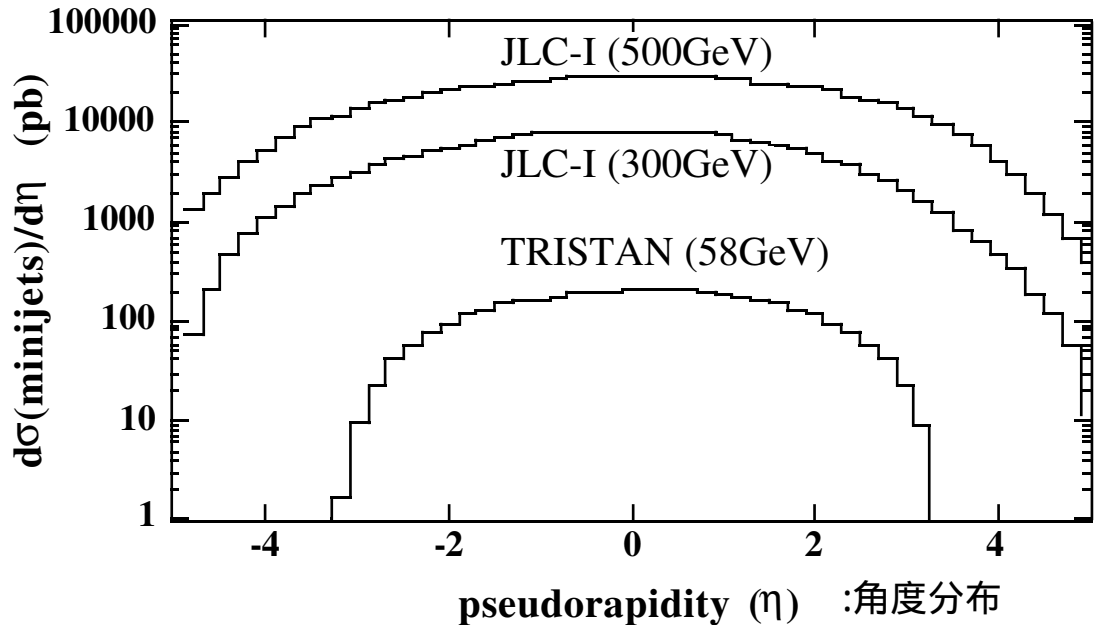
$\gamma = \rho + \omega + \phi$ ...

ベクターメゾン

e

光子の構造

断面積；(b),(c)が主。　重心系エネルギーとともに増大。



:角度分布

事象数 < 0.2 ミニジェット / バンチ衝突 (Ecm = 500GeV)

(Pt > 2.4GeV ; LAC1)

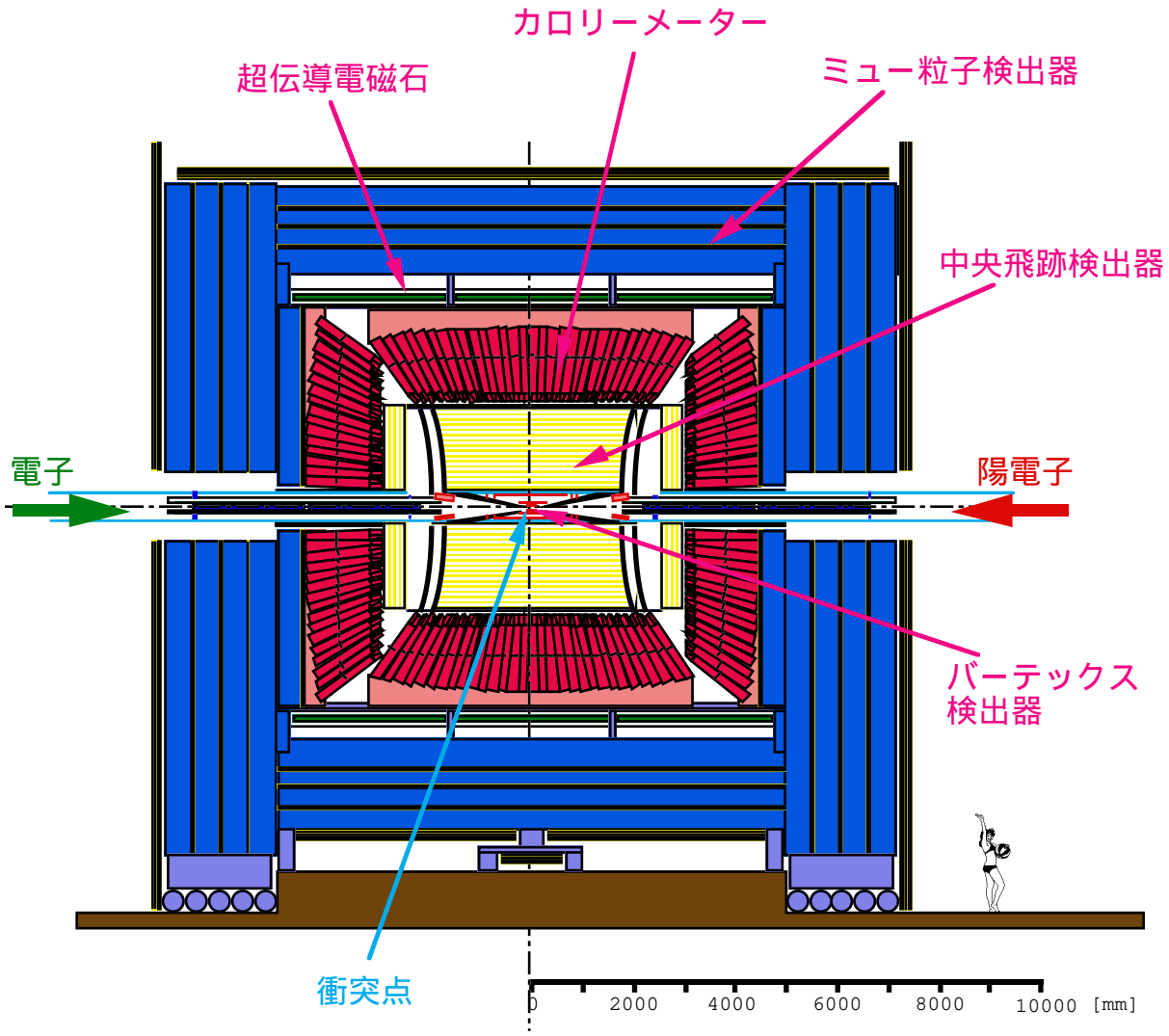
JLCの測定器

測定すべき物理量

反応で生成された各々の粒子について

(t,x)　：時間と位置
(E,p)
：エネルギーと運動量

測定器の構成



6. まとめ：測定器と加速器

少ないバックグランド

m

コリメーション：ビームテール $< 6\sigma_x \times 35\sigma_y$

m

シンクロトロン光　　ミューオン

m

最終収束電磁石 a, l^*, L_Q　　スポイラー,アテネーター

ビームの水平交叉角：ϕ_{cross}

i

マスク R_{mask}, L_{mask} ;ソレノイド磁場(2 テスラ)

i

ビームビーム相互作用：σ_x^*

i

電子陽電子対生成　　超偏平ビーム

i

高いルミノシティー：N^*, σ_y^*

バックグランドの制御

『クリーン』な実験

さらに詳細な研究を通じて実験・加速器の最適化

高性能な測定器

CDC,CAL,VTX,Support-tube等開発研究

安定な加速器の運転

高い積分ルミノシティー

ATF,FFTBなどのLC開発研究

m

新粒子・新しい物理の発見

精密実験（理論に含まれるパラメーターの決定）

国際的なワークショップ；LCWS95 盛岡,9月8-12日開催

統一理論（物理学者の夢）の検証

期待：21世紀初めに実現；10年後！