

- JLCでの測定器 -

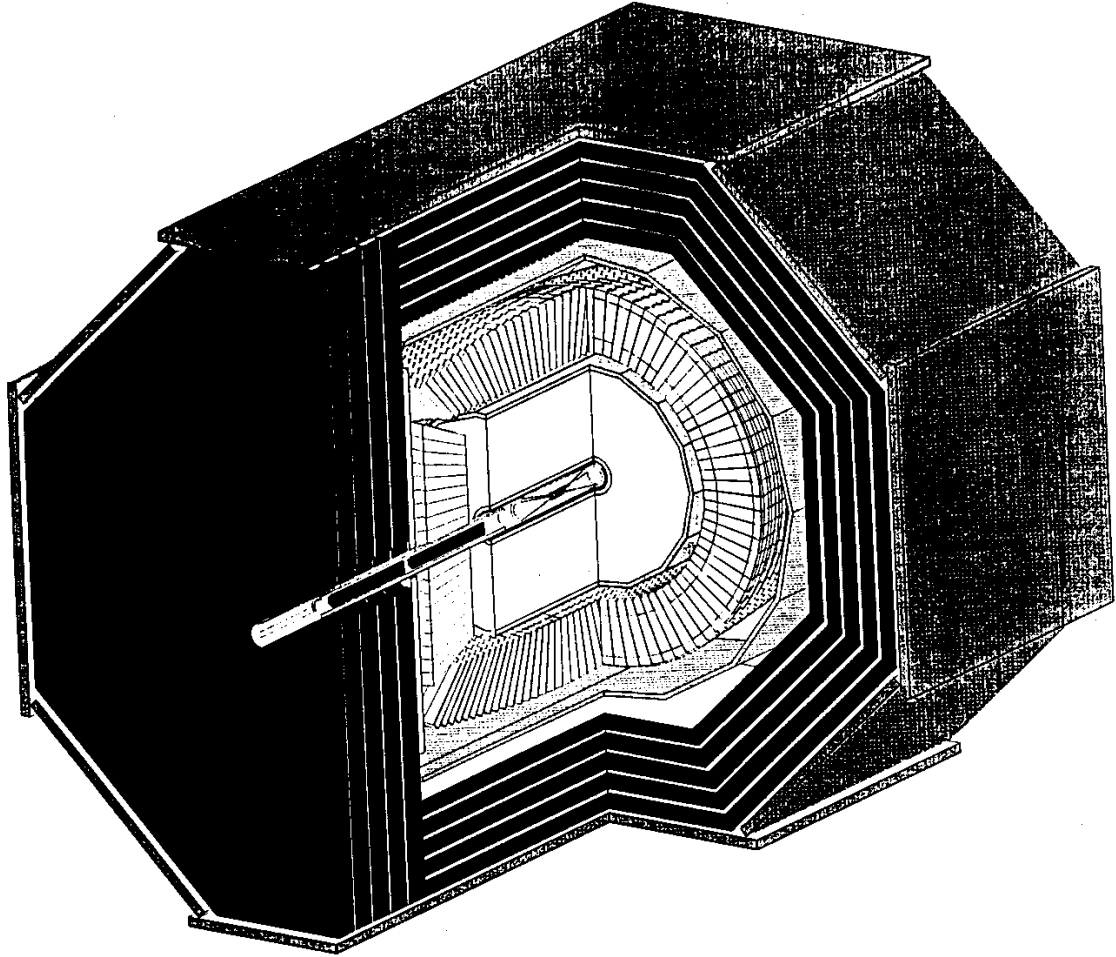
素粒子反応を観測
するとは？

講義：1999年 総研大 夏期実習

実習テーマ：素核研/JLC

講師：大森恒彦 (素核研)
KEK

1999年5月18日



この講義は

比較的わかりやすい例
をいくつか示して、
素粒子実験のふんいき
をつかんでもらう事を
目的としている。

系統的・定量的な
知識を目的としている。

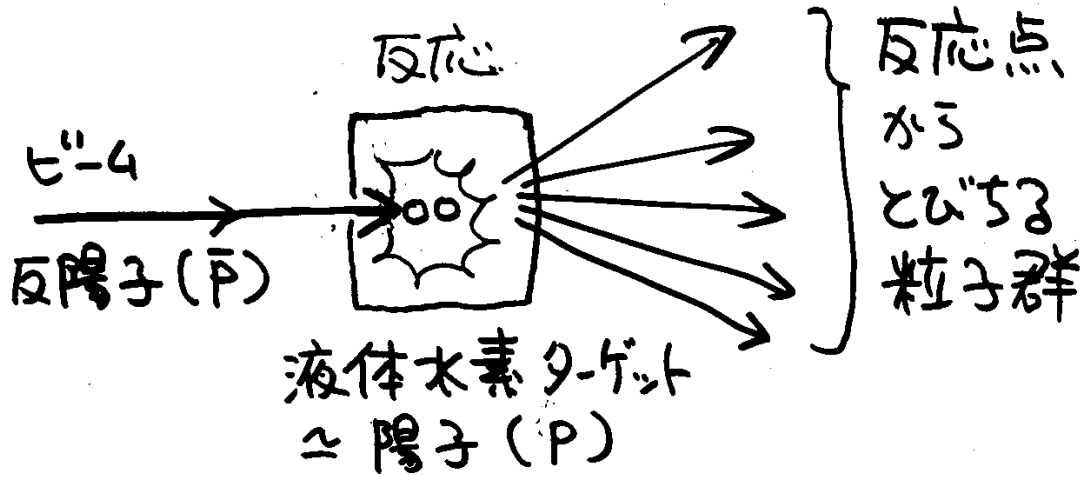
今日の話

1. 素粒子反応の観測の
おぼろげ
2. 個々の粒子の情報測り方
3. 基本となる測定器の例
4. 衝突ビーム実験 (JLC など)
の測定器
5. JLC で ヒッグス粒子が
見つかった (仮定) 場合の例
6. まとめ

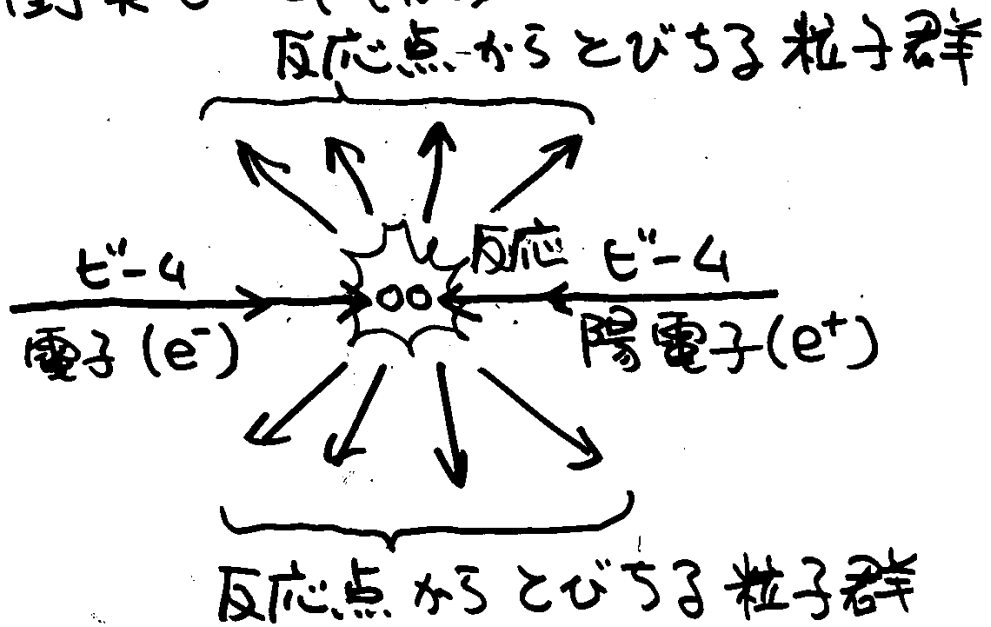
素粒子反応
の観測の
あらまし

素粒子実験

● 固定標的(例)



● 衝突 $E=4$ (例)



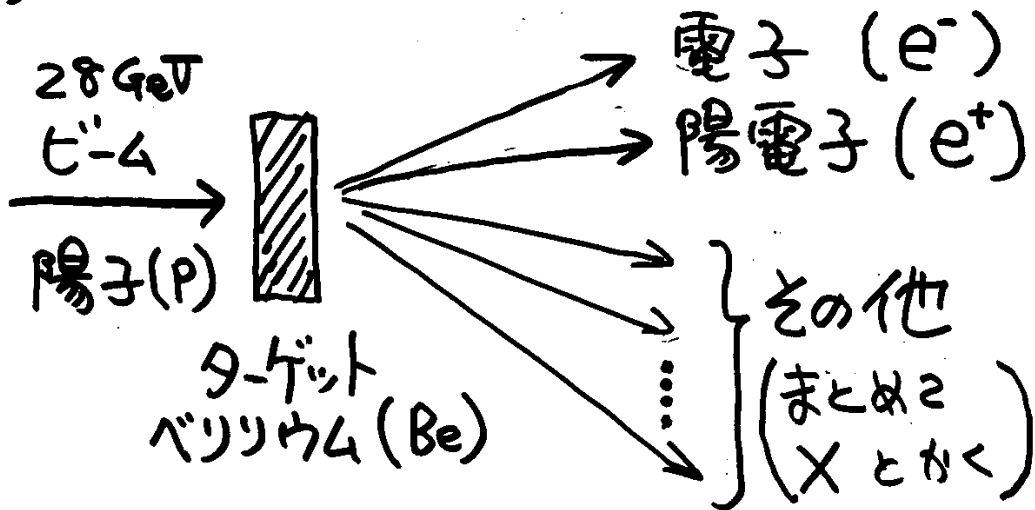
素粒子反応の観測



通例は「とびちる粒子群」の
粒子1ヶ1ヶを(いろいろな種類
の粒子がまざっている)測定し
(エネルギー、運動量、粒子の種類
などを測定)それから「反応」
の性質や、「反応」で作られた
(新)粒子を再現(再構成)
する事。

例) J/ψ粒子を発見した
2つの有名な実験.

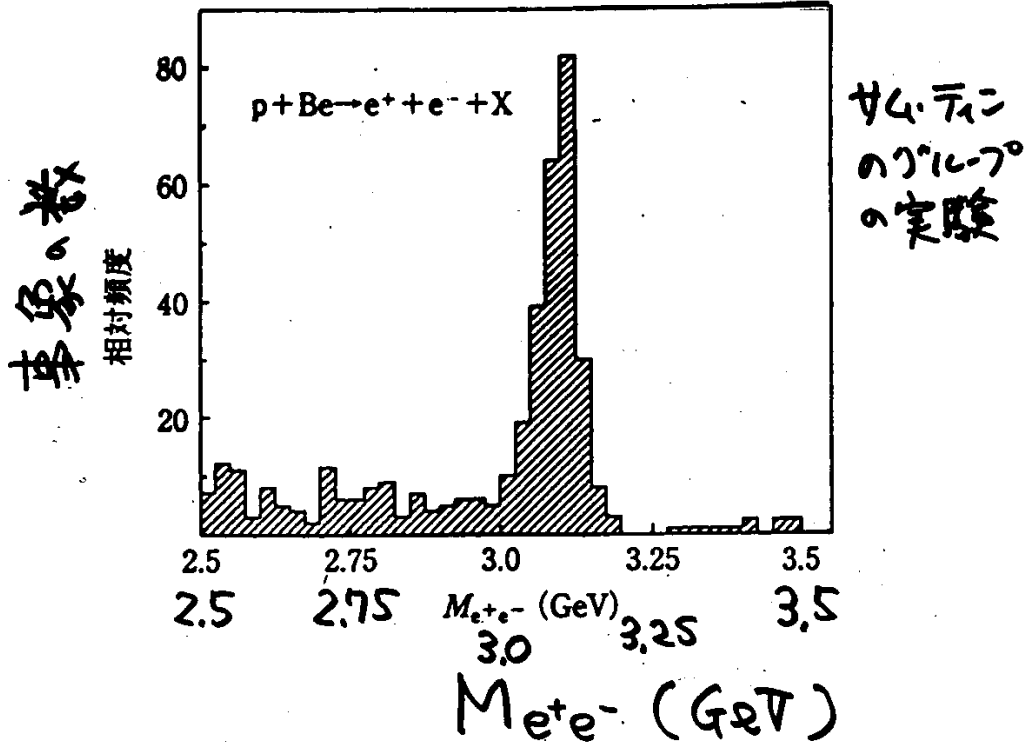
1) サム・ティン(丁)のグループの実験(J)



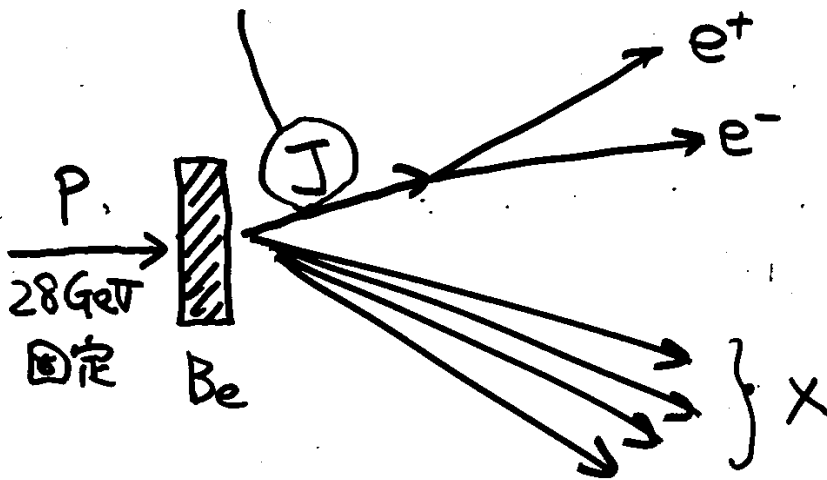
$$M_{e^+e^-}^2 \equiv (E_{e^+} + E_{e^-})^2 - (P_{xe^+} + P_{xe^-})^2 - (P_{ye^+} + P_{ye^-})^2 - (P_{ze^+} + P_{ze^-})^2$$

(注: Xの中に他の電子, 陽電子
がいてもよい)

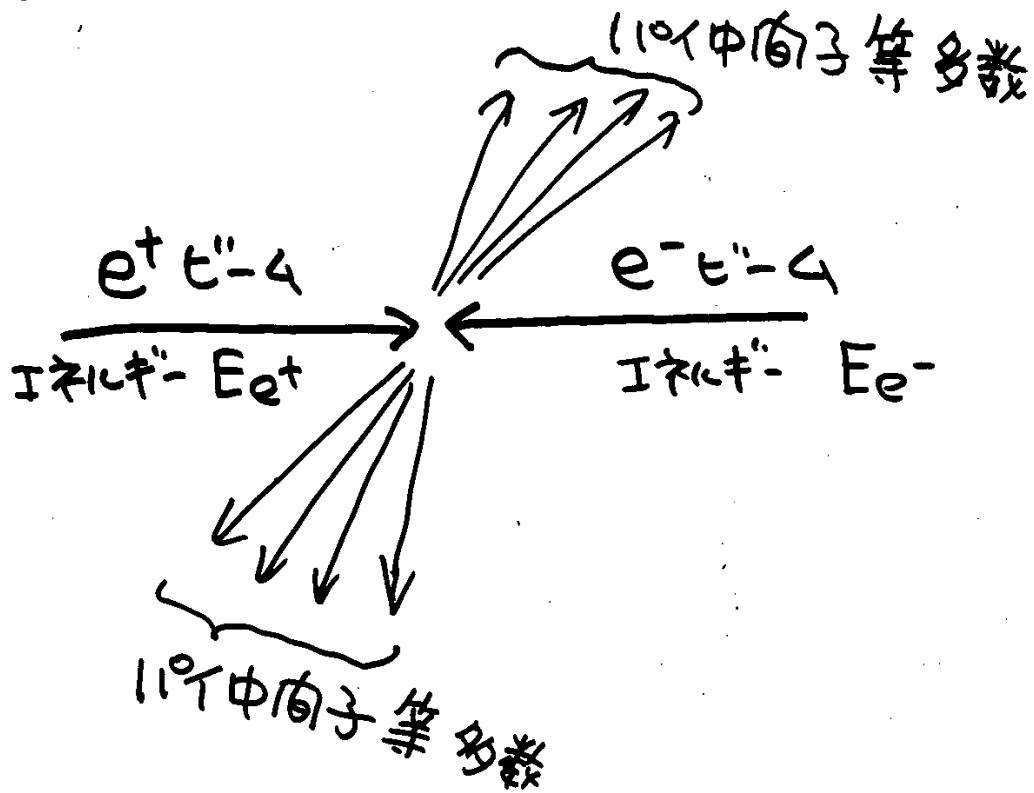
新粒子(J)の証拠



粒子 \equiv 質量の確定した状態



2) リヒター-のグール-7°の実験 ($\psi = J$)



($E_{e^+} + E_{e^-}$) の大きさを

少しずつ変えながら

上記のような反応が**発生する**
率の変化をみる。

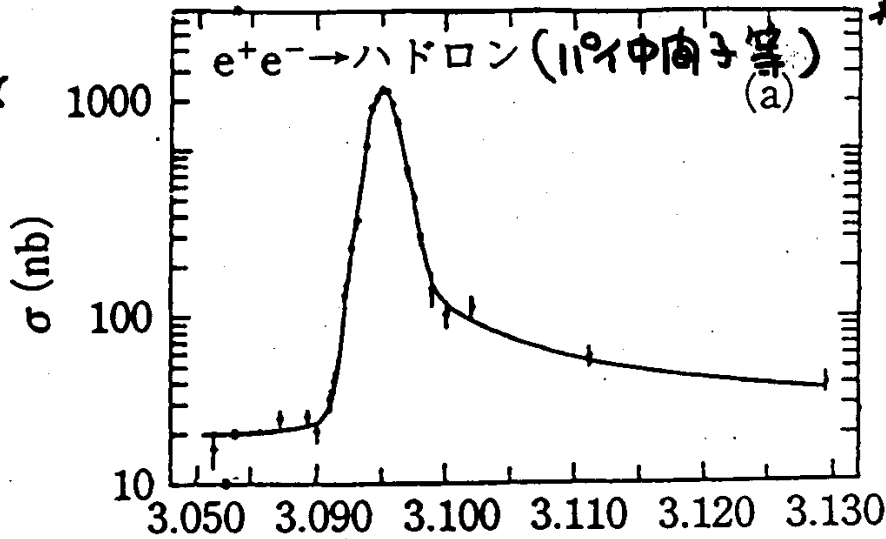
測定器は「上記の反応が起った」事
を確認しただけ。

$M \approx 3.1 \text{ GeV}/c^2$ の新粒子が
ある証拠

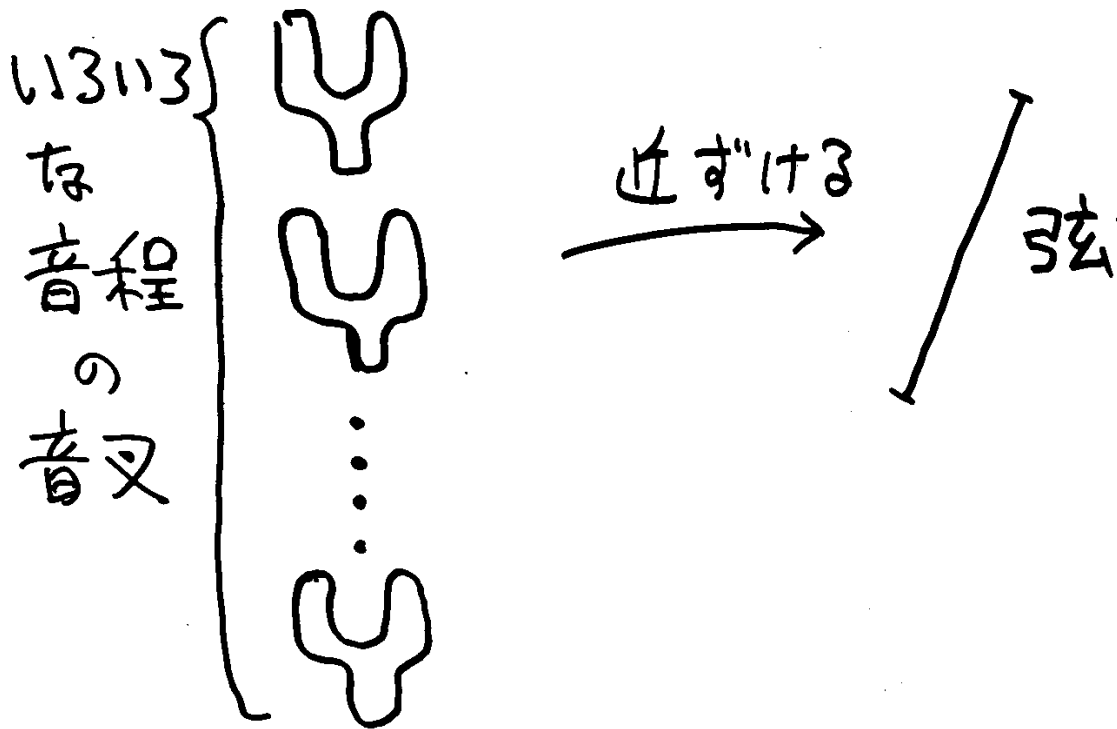


e^+e^- のゲルマンの
実験

(反応の発生率に相当)
反応の断面積



$E_{e^+} + E_{e^-}$
ビームエネルギーの和 (GeV)
= 重心系エネルギー



音叉の音程が弦の固有振動数に一致すると、音叉からエネルギーが弦に効率よく移って弦が鳴る。

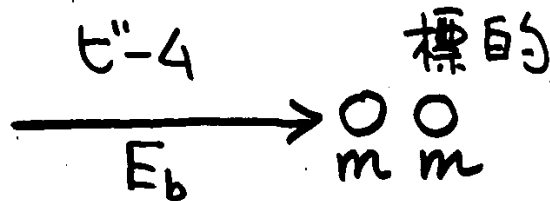
音叉 $\iff e^-$ と e^+ の衝突

弦 \iff 真空

音叉の音程 $\iff e^-$ と e^+ のエネルギーの和

固定標的と衝突ビーム

● 固定標的の実験



$$p_\mu = (E, pc, 0, 0) \quad p_\mu = (mc^2, 0, 0, 0)$$

$$\downarrow E^2 = (mc^2)^2 + (pc)^2$$

重心系エネルギー E^* を計算

$$(E^*)^2$$

$$= (E + mc^2)^2 - (pc)^2$$

$$= 2Emc^2 + 2(mc^2)^2$$

$\gamma = 32$

$$E_b = E - mc^2 \approx E \leftarrow \begin{matrix} \text{高エネルギー加速器} \\ \text{では } E \gg mc^2 \end{matrix}$$

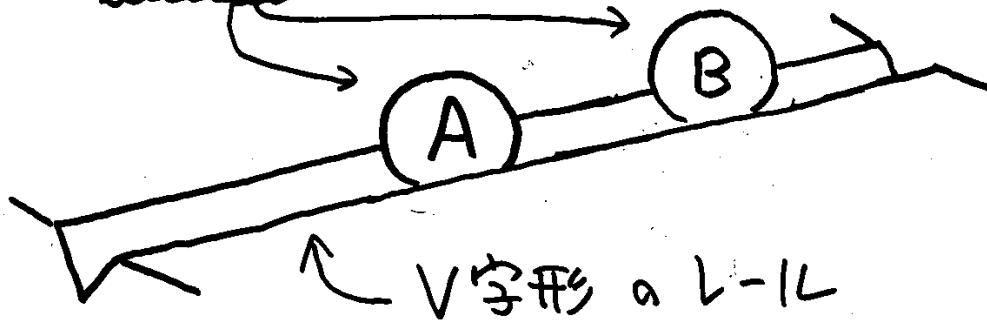
≒ 運動エネルギー

例) $E_b = 60 \text{ GeV}, \quad mc^2 = 0.5 \text{ MeV} (e^+, e^-)$

$E^* = 0.17 \text{ GeV} \leftarrow$ 氷のホッ子!
大損!!

⑤ 続・固定標的実験

ビー玉どやこみよ



(1) $\textcircled{A} \rightarrow \textcircled{B}$ ← 止まっている。
AをはじいてBにぶつける。

(2) $\textcircled{A} \textcircled{B} \rightarrow$
止まる。Bはさきほどまでの
Aとほぼ同じ速さ
で走り始める。

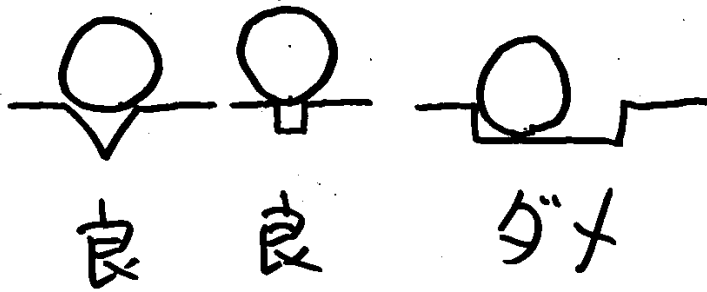
運動のエネルギーの大部分は

A → B に移っただけ。

反応(音: カチッ!)に使われるのはわずか。

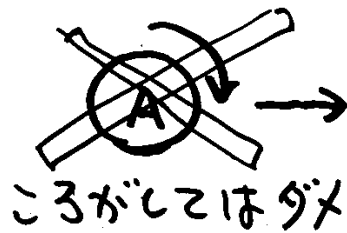
注1)

レールは 正面衝突 が
保証されるものを用意
する事

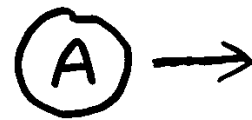


(ふすまのしきい等)

注2) こぶがしては ダメ



こぶがしてはダメ



レール上を
すべらせるように。

- ◎かたくて、つるつるした玉。(ビーズ)
- ◎玉の中心をはじく
- ◎近くなるにつけて

● 衝突ビーム実験



$$P_\mu = (E, pc, 0, 0) \quad P_\mu = (E, -pc, 0, 0)$$

$$\downarrow \quad \downarrow$$

$$E^2 = (mc^2)^2 + (pc)^2 \quad E^2 = (mc^2)^2 + (pc)^2$$

$$E_b = E - mc^2 \approx E \quad E_b = E - mc^2 \approx E$$

重心系エネルギー E^* を計算

$$(E^*)^2 = (E + E)^2 - \{pc + (-pc)\}^2$$

$$= (2E)^2$$

$$\therefore E^* = 2E$$

例) $E_b = 30 \text{ GeV}$
 $mc^2 = 0.5 \text{ MeV} \quad (e^+, e^-)$ } のとき

$$E^* = 60 \text{ GeV}$$

E_b の有効利用!

豆知識

ルートエス \sqrt{s}

高エネルギー/素粒子業界の
用語で

$$(E^*)^2 = s$$

のように (重心系エネルギー)²
の事を s で表わすのが
通例である。

したがって \sqrt{s} = 重心系エネルギー

日常会話で ことわりもなく
ルートエス などと 出てきたら
この意味である。

個々の
粒子の
情報の方
測り方

● 磁場で曲げて運動量を測る

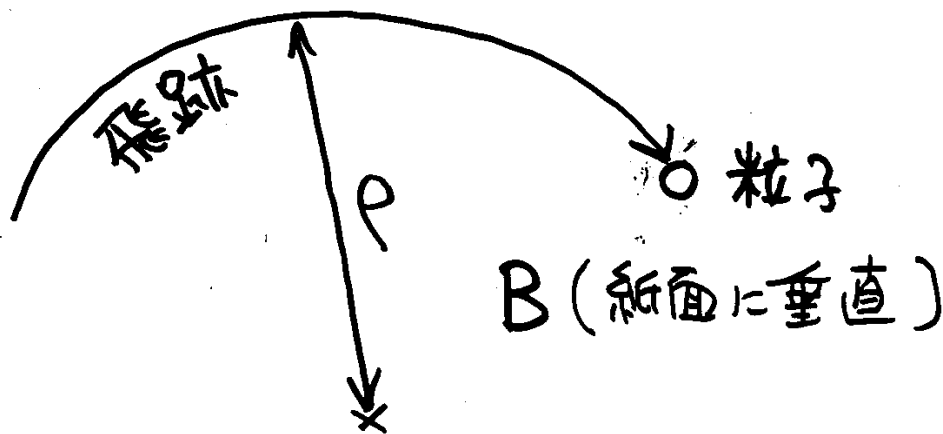
粒子: 電荷アリ, 寿命長い.

例) e^\pm (電子/陽電子) $c\tau = \infty$

π^\pm (荷電パイ中間子) $c\tau = 7.8m$

[注) 実際に飛ぶキョリは $\gamma c\tau$
$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}$$

例) $p = 1 \text{ GeV}/c$ の $\pi^\pm \rightarrow \gamma = 7$
 $\gamma c\tau = 55m$

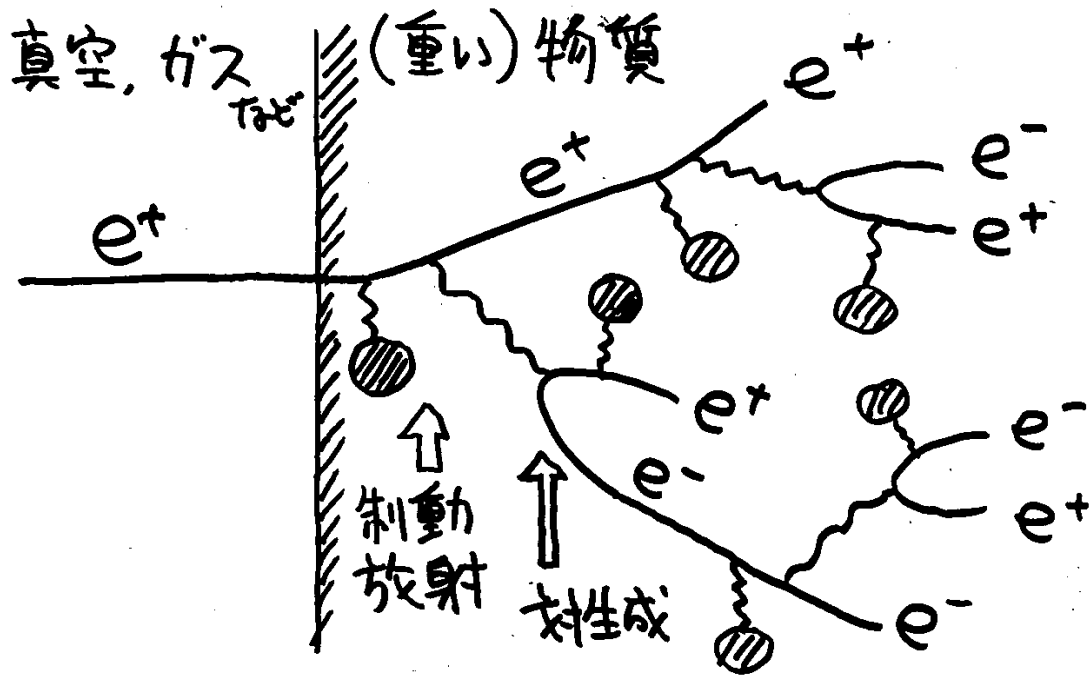


p を測る \Rightarrow $p = 0.3 B \rho$: p がわかる.

ρ [m], B [Tesla] $p =$ [GeV/c]

● 電磁シャワーを作らせて
エネルギーを測る。

粒子: e^\pm (電子/陽電子)
 γ (ガンマ線 = 高エネルギー光子)



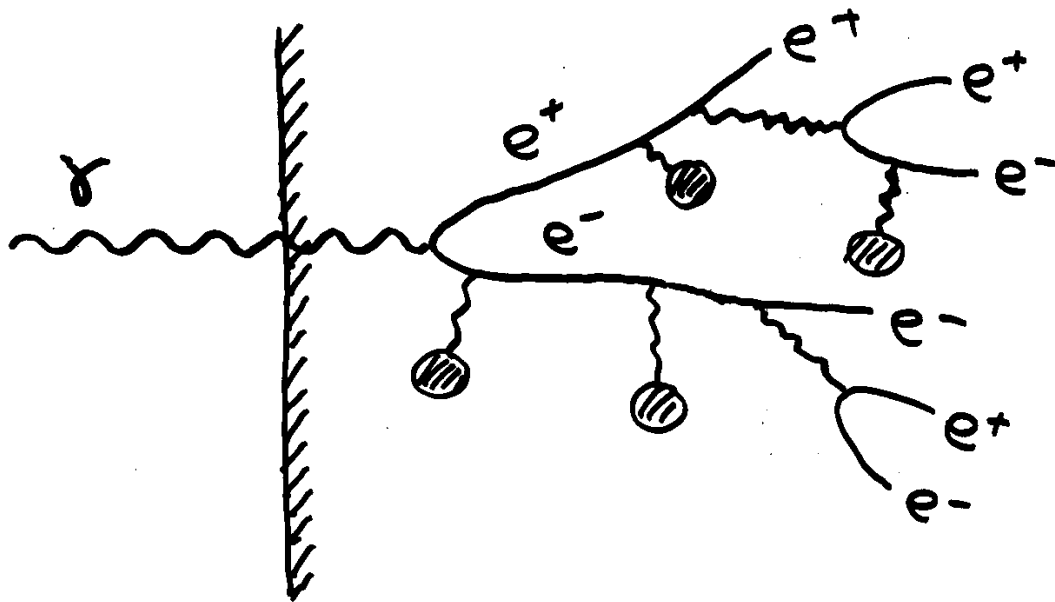
⊙ : 原子核

— : e^+, e^-

~~~~ : 光子

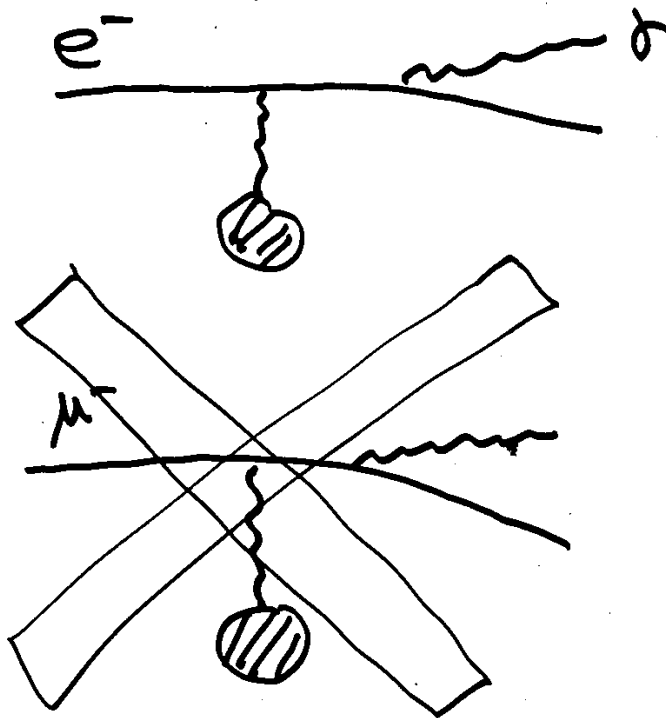
(重い)物質中を走った  $e^+, e^-$  の総数  
 $\propto$  最初の  $e^+ (e^-, \gamma)$  のエネルギー

④ 電磁相互作用:  $\gamma$  が入った場合



⊛ 電磁シャワー： $\mu^\pm$ は作らない。

$$\frac{m_\mu}{m_e} = \frac{105 \text{ MeV}/c^2}{0.5 \text{ MeV}/c^2} = 210 \text{ 倍}$$

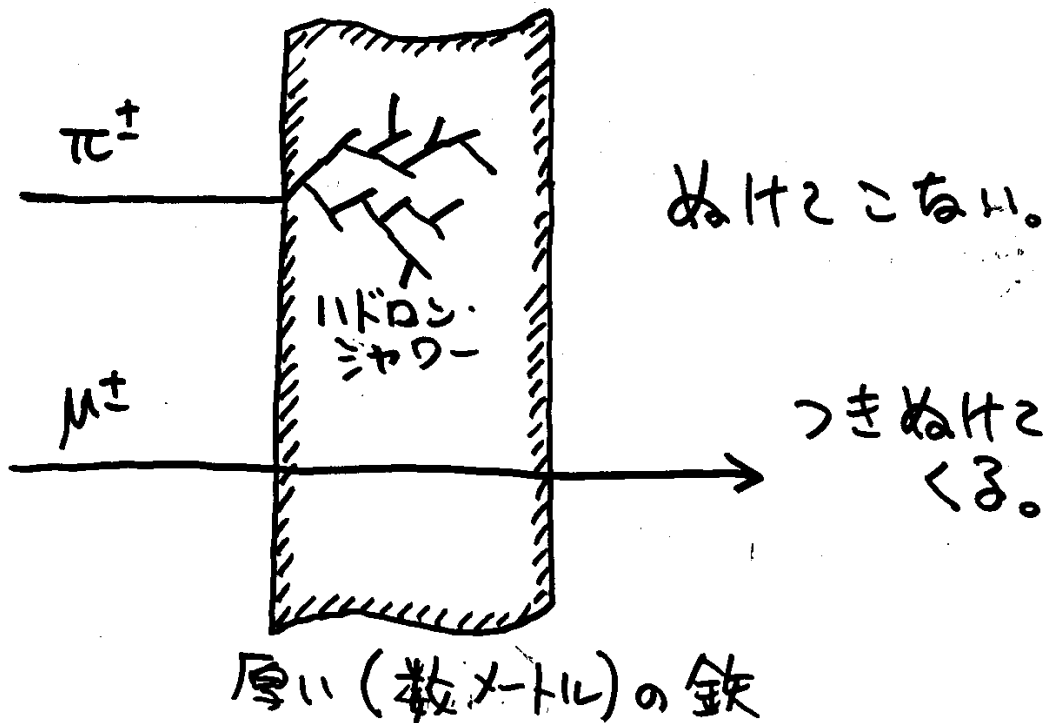


確率

$$\left(\frac{1}{210}\right)^2$$

● フィルター（重く、厚い物質）を置いて、通りぬけるかどうかをみる

| 例)       | $\mu^\pm$ | と | $\pi^\pm$ の区別 |
|----------|-----------|---|---------------|
| 電磁シャワー   | X         |   | X             |
| ハドロンシャワー | X         |   | O             |
| （強い相互作用） | X         |   | O             |



● ハドロン・シャワーを作らせ  
エネルギーを測る。

粒子：ハドロン ≡ 強い相互作用を  
する粒子

例)  $\pi^+$  p, n, ……  
(パイ) (陽子) (中性子)

ハドロン・シャワー  
= 強い相互作用で発達するシャワー  
→ 電磁シャワーと異なり、  
すみやかに発達しないので  
使いにくい。

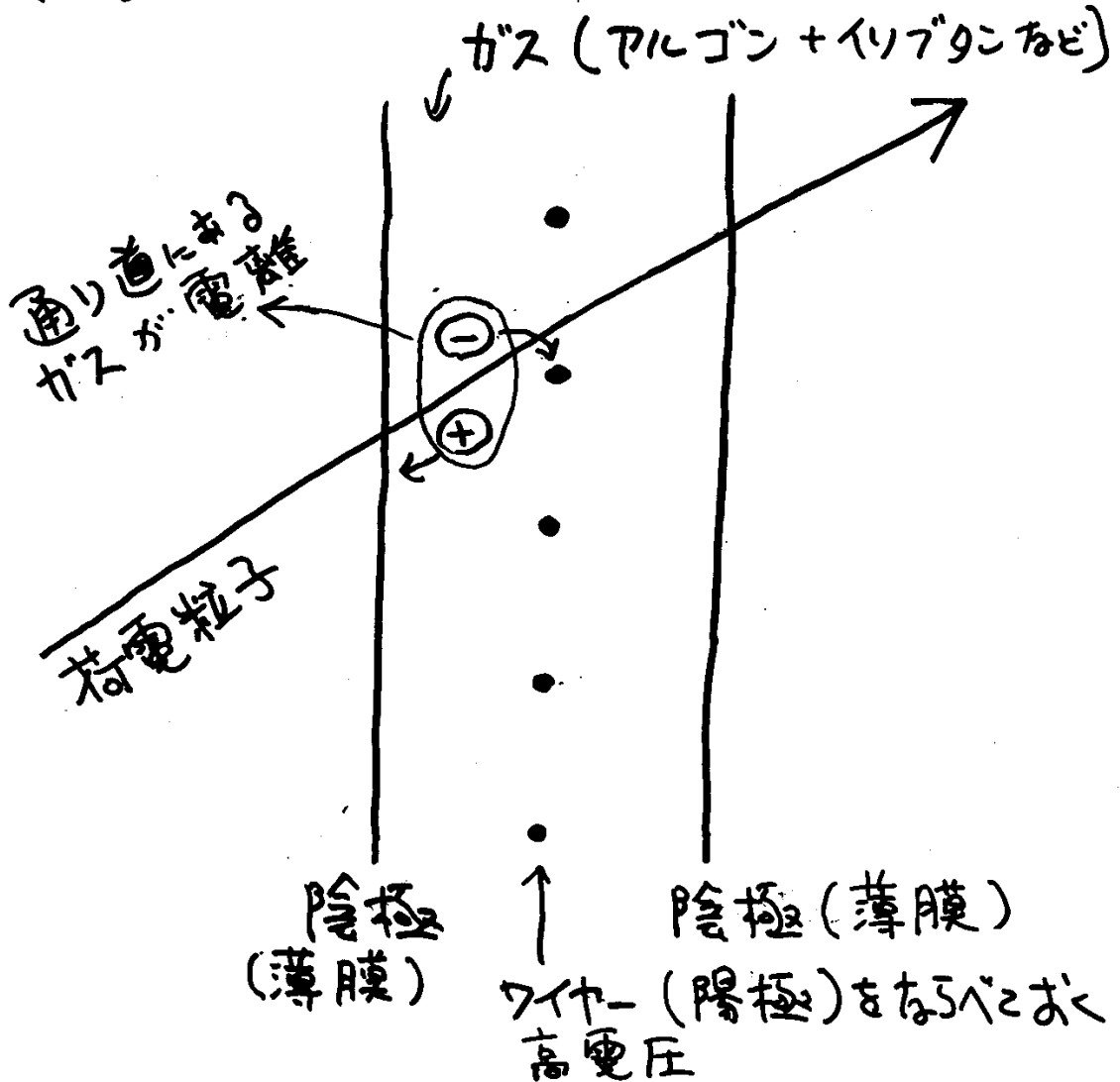
くわしい事は  
むづかしいので  
略



基本となる  
測定器の  
例

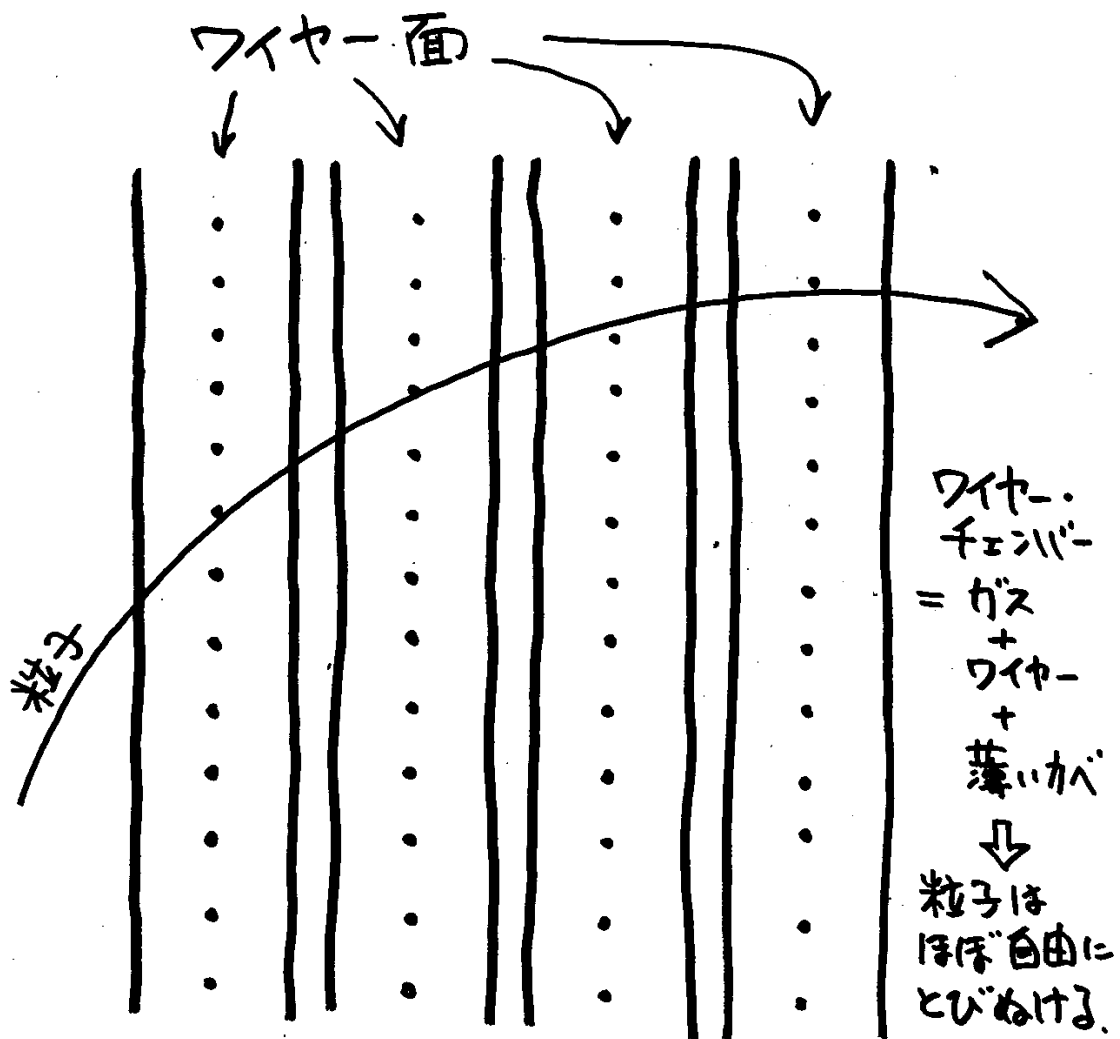
# ● (ワイヤー) チェンバー

(例) 多線式 フロホニオナル・チェンバー



⊕ イオンは陰極に, 電子(⊖)はワイヤーにドリフトする。

→ 粒子の通った近くのワイヤーに電気シグナルが出る。



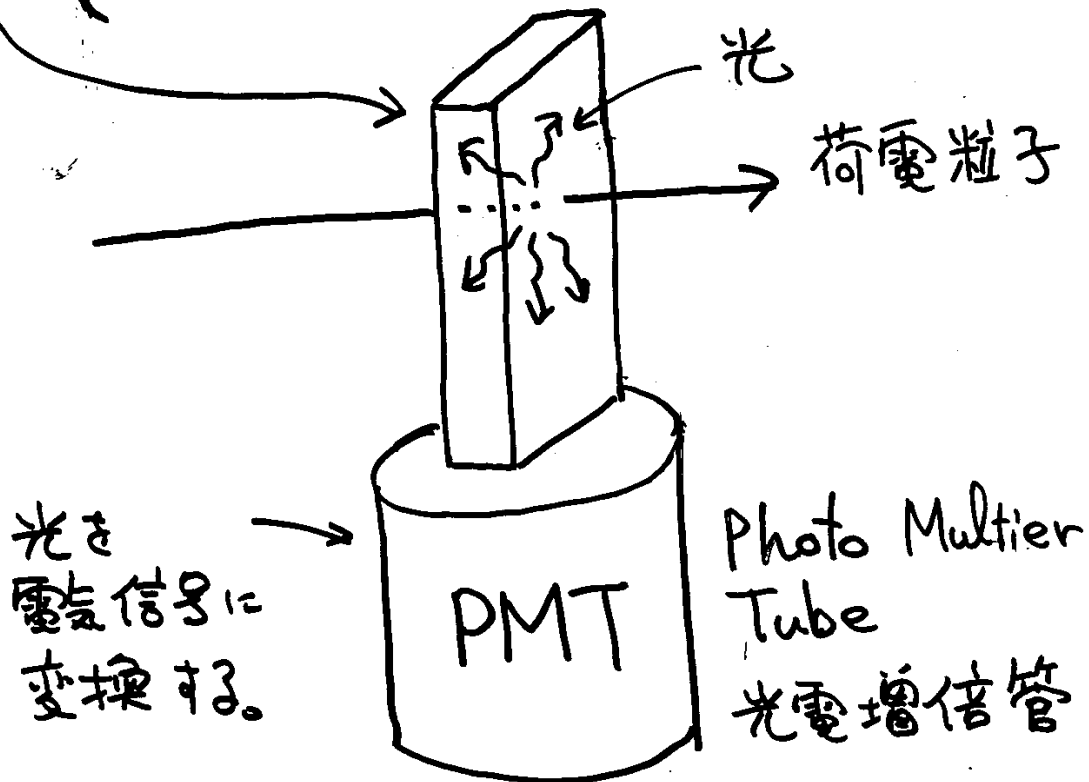
- ◎ ワイヤ-面をいっぱいなるべると  
飛跡がわかる。
- ◎ ここでは紙面に垂直に磁場があると仮定
- ◎ じっさいにはドリフト-チェンバーを使うことが  
多い

# ● シンチレーター

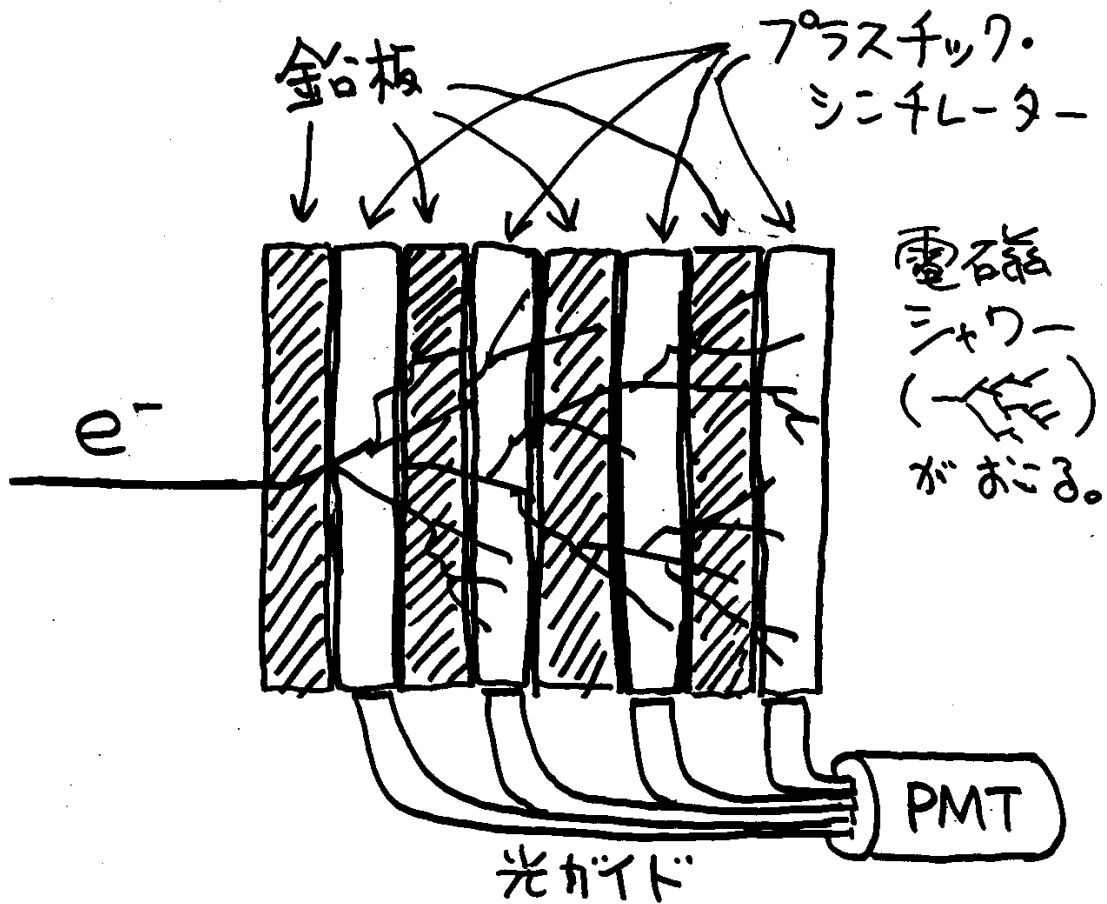
= 蛍光物質

= 荷電粒子が通過すると  
分子レベルが励起され  
蛍光を発する。

プラスチック・シンチレーター  
(透明なプラスチックにシンチレーターを  
とかしたものだもの)



● 電磁カロリメーター  
E M



もとの  $e^-$  のエネルギー

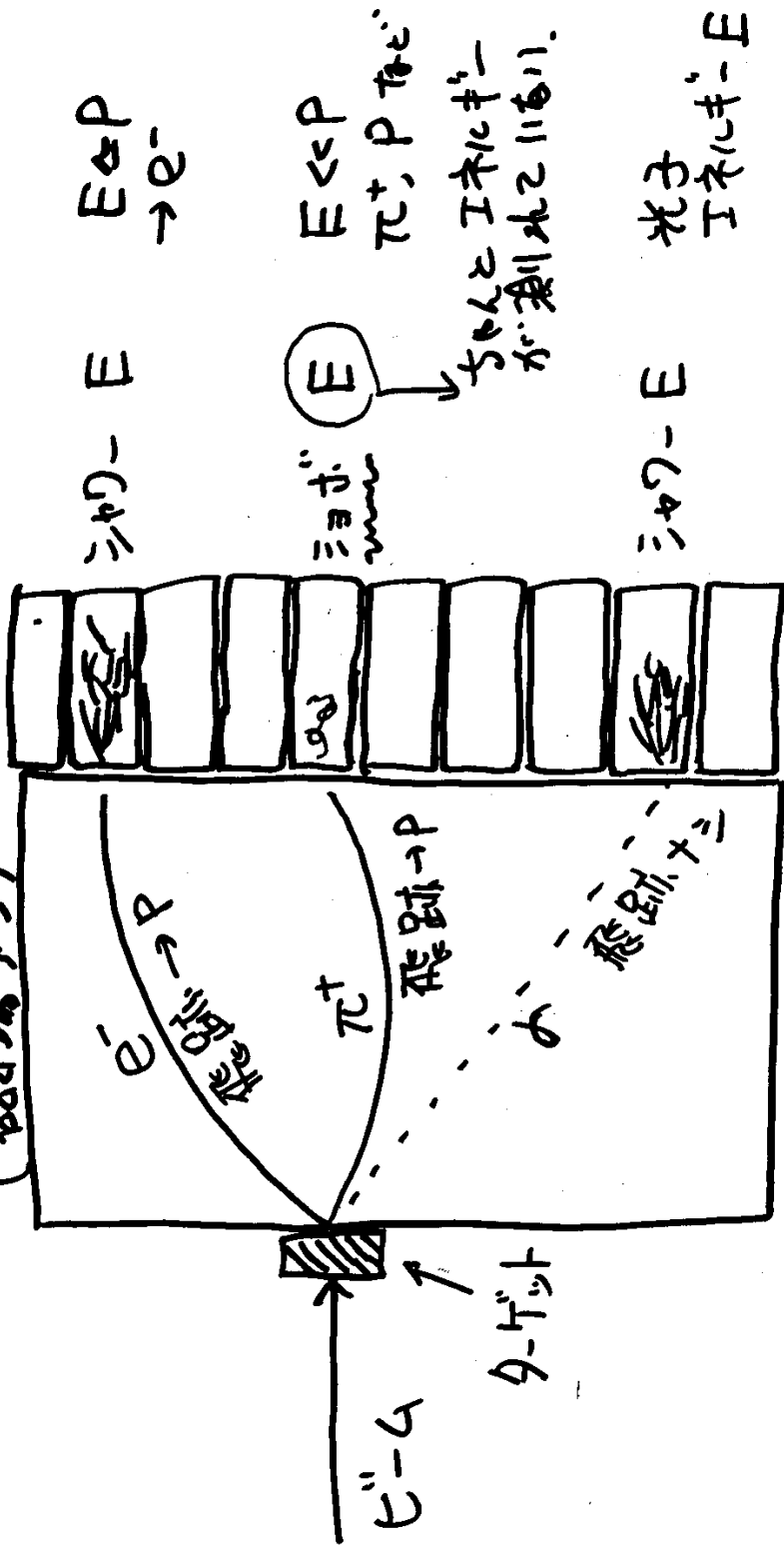
$\propto$  電磁シャワーで生成された  $e^+/e^-$  の総数

$\propto$  PMT の信号

# ● 合わせ技の例

ダイヤ・フェンバー  
(磁場アリ)

電磁加リ-Y-タ-



衝突ビーム

実験

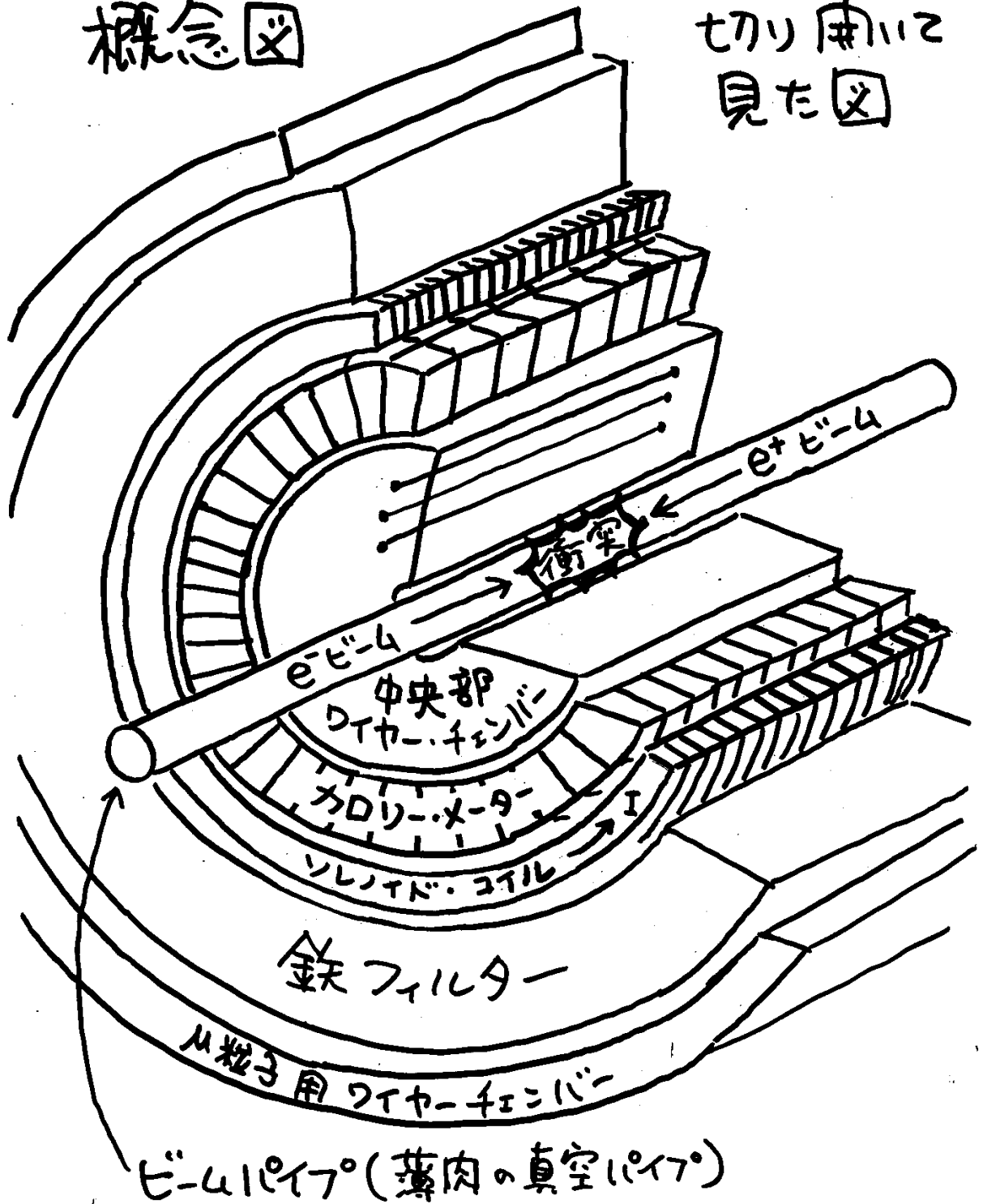
(JLC など)の

測定器

# $e^+e^-$ 衝突実験用・測定器

概念図

切り開いて  
見た図





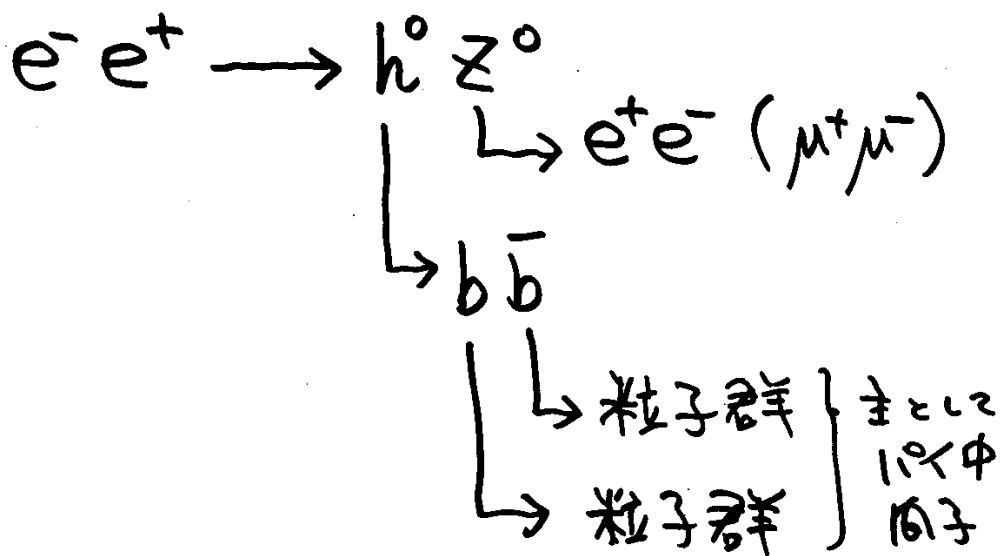
JLCCで  
ヒッグス粒子( $h^0$ )  
が見つかった(仮定)  
場合の例

例) 以下のような仮定で考える。

◎ 質量  $80 - 140 \text{ GeV}/c^2$  の範囲に  
ヒッグス粒子 ( $h^0$ ) がある。

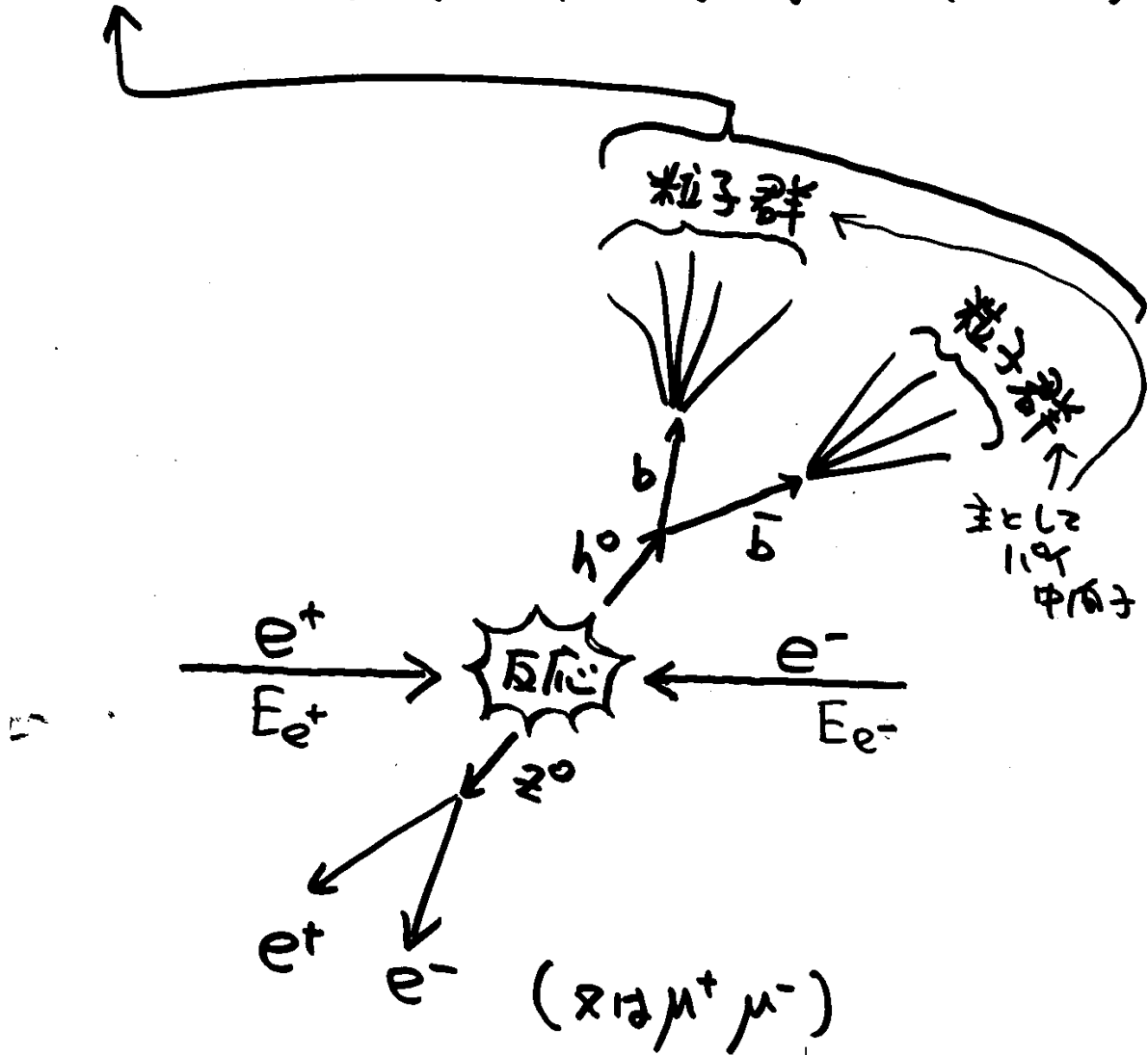
◎ リニアコライダー JLC の  
重心エネルギーは  $300 \text{ GeV}$   
に固定。

◎ ヒッグス粒子を以下の反応  
を用いて探す

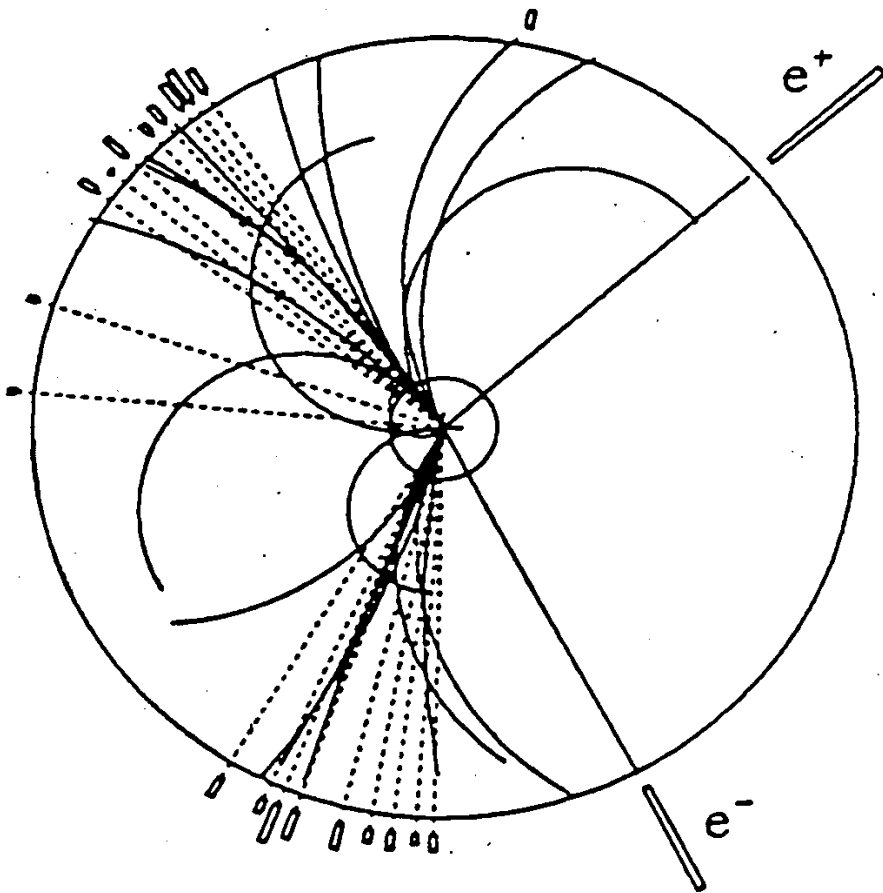
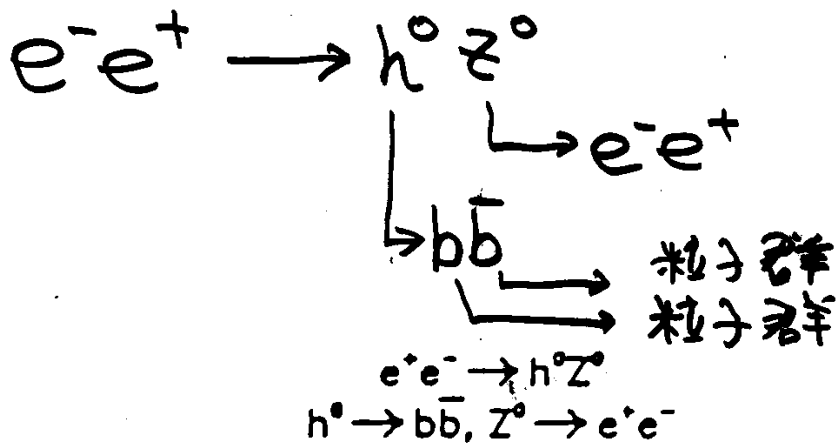


この粒子群全体の不変質量を作ってみる。

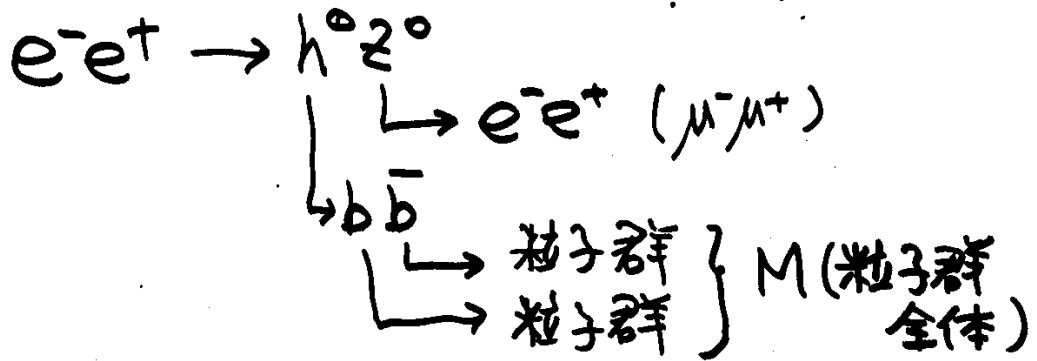
$$M^2 = (\sum E_i)^2 - (\sum P_{xi}c)^2 - (\sum P_{yi}c)^2 - (\sum P_{zi}c)^2$$



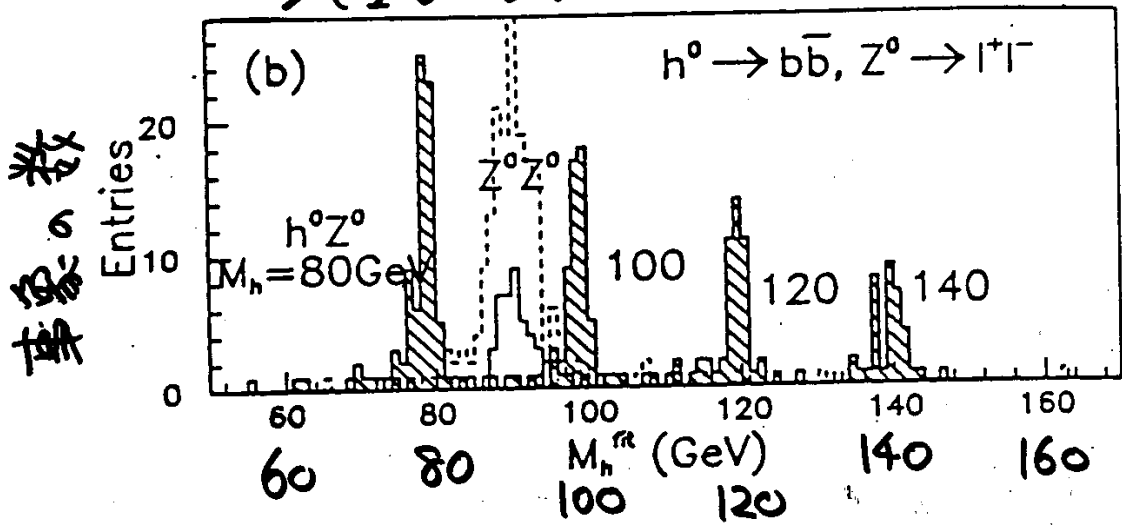
重心系エネルギー =  $E_{e^+} + E_{e^-} = 300 \text{ GeV}$   
 固定




シミュレーション!



シミュレーション



$M$  (粒子群全体)

このグラフは ヒッグス 粒子の 質量が  
 80, 100, 120, 140  $\text{GeV}/c^2$  の 場合  
 を まとめて 1枚に かいて いる。  
 ヒッグス 粒子の シグナには   
 が 示さ れ ている。

まとめ

## まとめ

(1) 素粒子反応の反応点からとびちる粒子群の1ヶ1ヶの粒子を測定する。とれるの情報からもとの反応の性質や、反応で作られた(新)粒子を再現する。

(2) もとの反応の起こし方には  
{ 固定標的実験と  
衝突ビーム実験がある。  
衝突ビーム実験の方が  
エネルギーが得ずる。  
JLC はこのタイプ

(3) 各々の粒子の情報には  
ワイヤー・チェンバー  
カロリメーター  
シチレーター  
磁場

などを使い、またそれらの  
合わせ技で測定する。

(4) 衝突ビーム実験の測定器は  
ビームパイプのまわりに各種の  
測定器がとりまく  
合わせ技型である。

(5) JLCでヒッグス粒子などが  
見つかることよいなあ(願望)。



## お薦めの教科書

「高エネルギー物理学実験」 (初版) 真木晶弘著  
(丸善：パリティ物理学コース)

「クォークとレプトン」 (初版) F. ハルツェン・A.D. マーチン共著  
小林徹郎・広瀬立成共訳 (培風館)

「サブアトミック フィジクス - 素粒子・原子核の物理 -」 (上) (下)  
フラウエンフェルダー・ヘンレイ共著 / 藤井忠男訳 (産業図書)  
注：良い教科書だが古い (1974原著出版)。  
例えば  $J/\Psi$  は載っていない。

「素粒子物理学」 (初版) 坂井典佑著 (培風館：物理学基礎コース10)

「素粒子物理」 (初版) 戸塚洋二著 (岩波：現代の物理学10巻)