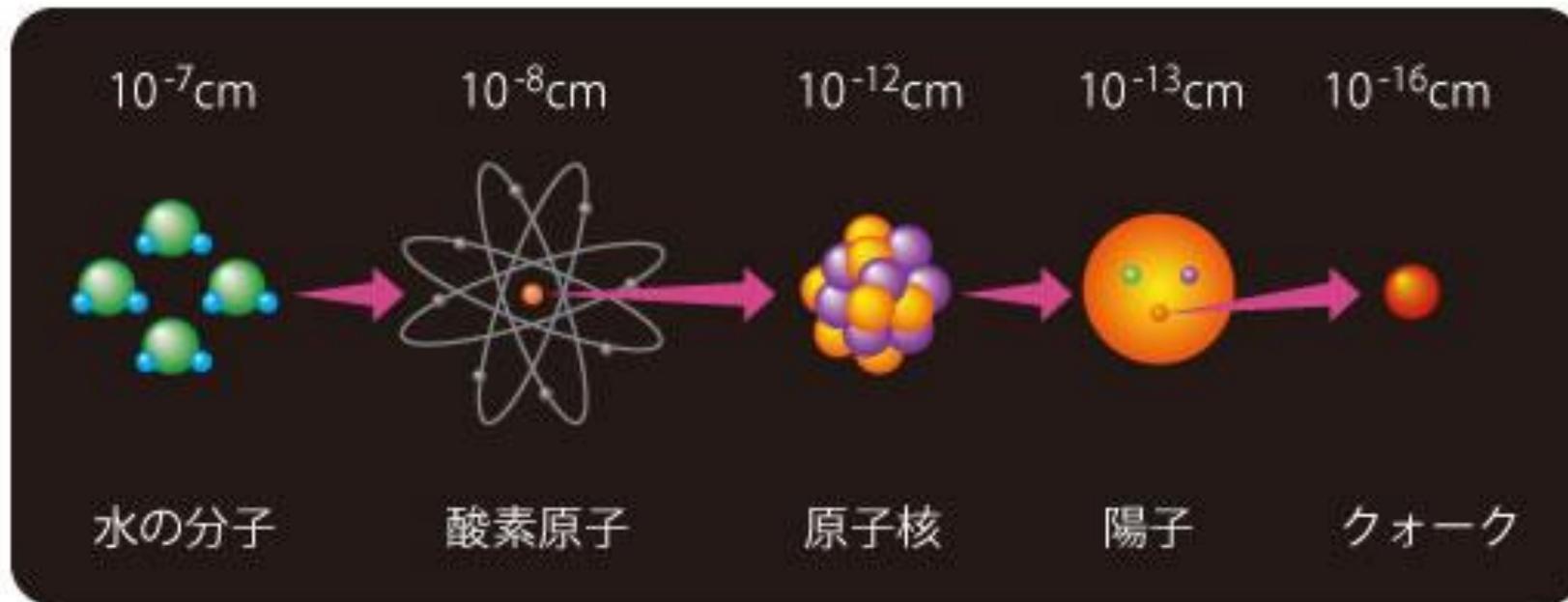


高エネルギー素粒子物理学研究室(N研)

B-Labを遣った未知粒子の探索

素粒子物理学

- 素粒子：物質を形づくる最も基本的な(素な)粒子。
- 素粒子物理学とは：
 - 物質を分解していった時に最後に残るものは何か？
 - どのような種類があるのか？
 - どのような物理法則に支配されているか？を明らかにすることを目指す。
(原理的に)世の中の事象を全て説明できる究極の理論の探求



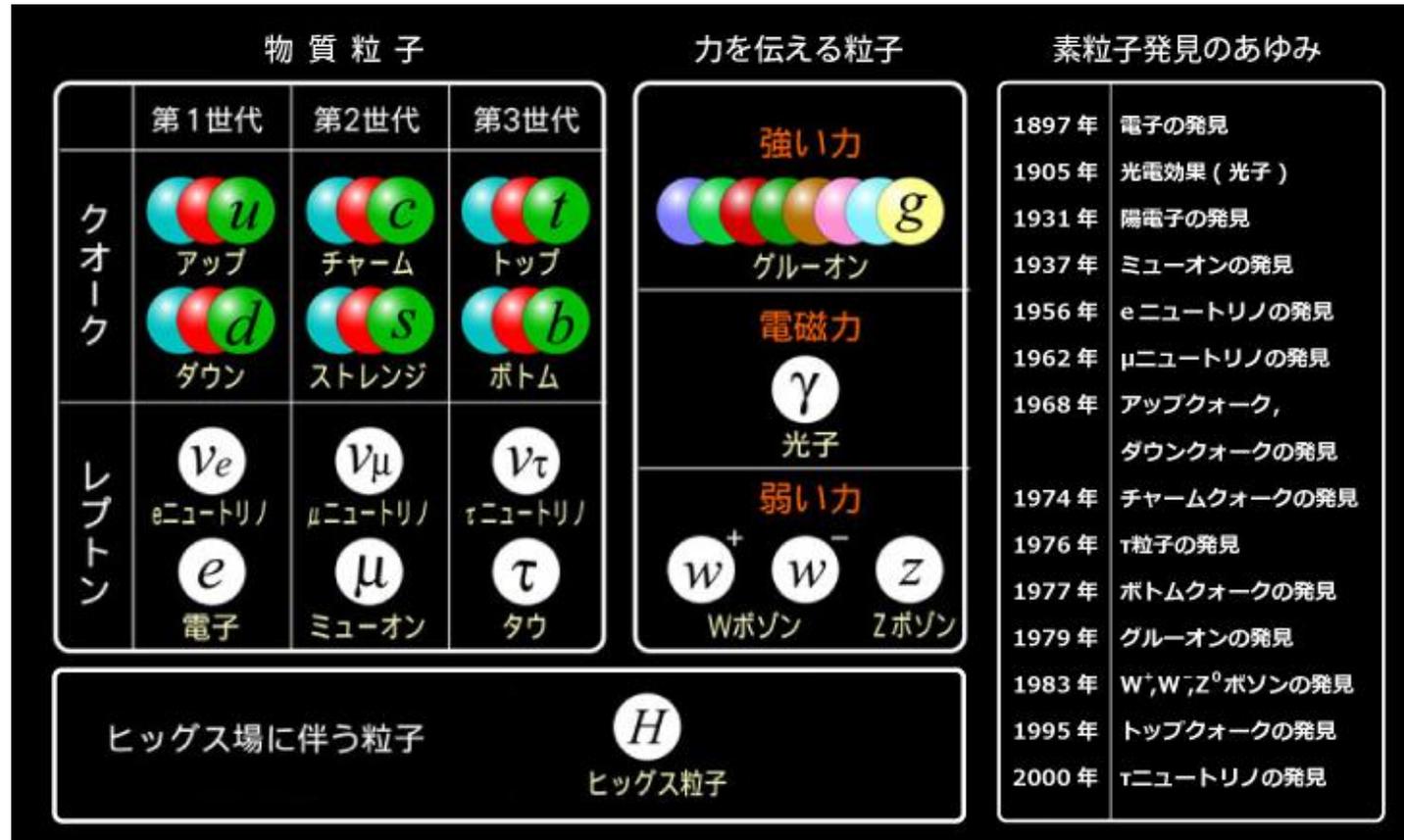
素粒子に至る歴史

ハドロンの名前	記号	クォーク
陽子	p	uud
中性子	n	udd
パイ中間子	π	$u\bar{d}$
K中間子	K	$u\bar{s}$
デルタ	Δ	uuu
ラムダ	Λ	uds
グザイ	Ξ	uss

u:アップクォーク, d:ダウルクォーク, s:ストレンジクォーク
上にバーが付いてるのは電荷が逆の反クォーク

- 1932年、原子核の構成要素である中性子が発見され、原子を形作る電子・陽子・中性子の3つが素粒子だと考えられていた。
- しかし、その後陽子や中性子と似た性質を持つ”ハドロン”と呼ばれる粒子が数多く見つかった。(現在350以上見つかった)
- あまりにもたくさん見つかったため、原子の周期律表から原子が基本粒子でないことを推測したように、ハドロンはより基本的な粒子から出来ていると考えられるようになり、最終的にクォークの発見に至った。
- 今では例えば陽子、中性子はそれぞれ3つのクォークから構成されていることが分かっている。
(陽子はアップクォーク2つとダウルクォーク1つ
中性子はアップクォーク1つとダウルクォーク2つ)

素粒子の標準模型

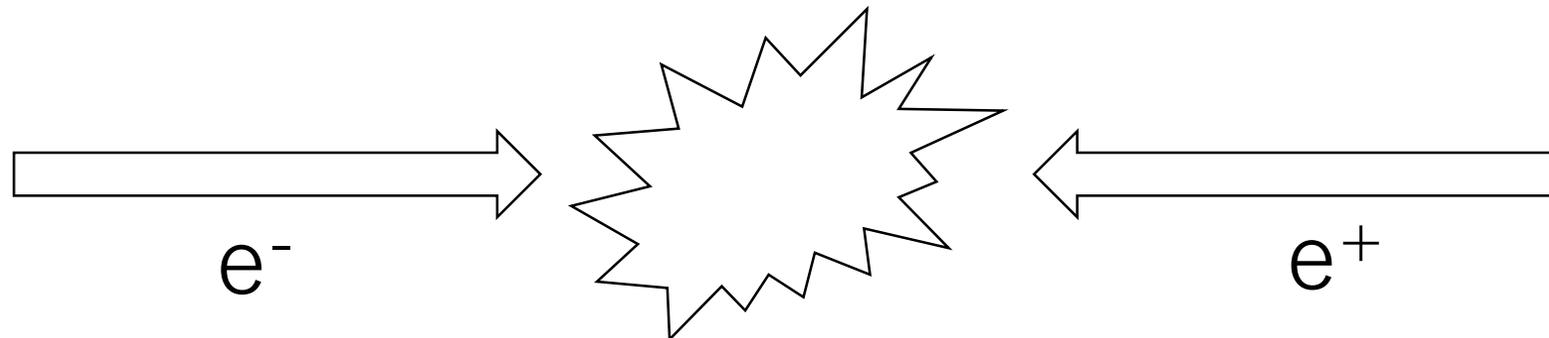


<https://www.kek.jp/ja/NewsRoom/Highlights/20120727150000/>より引用

- 素粒子の世界の現象を非常に良く説明する理論。
- それぞれ6種類のクォークとレプトン、力を伝える4種の粒子、そしてヒッグス粒子が登場人物。
- 新たな粒子を**実験的に観測し**、素粒子物理は発展してきた
(クォークは直接観測されておらず、前ページの”ハドロン”という形で発見されてきた)。
- それぞれの粒子を特徴づけるものの1つが**質量**。

相対性理論に基づく質量, エネルギー

- 高校で運動エネルギー $E = \frac{1}{2}mv^2$ と習ったが、これは v が光速 c よりずっと小さい場合のみ成り立つ。
- 相対性理論によれば、止まっている物質も $E = mc^2$ で表されるエネルギーを持っている。(静止エネルギー)
→未知の重い粒子を作るには**エネルギーが必要**。
- 例えば、電子(e^-)とその反粒子である陽電子(e^+)にエネルギーを与えて衝突させると、2つの粒子は”対消滅”し、エネルギーが残る。
そのエネルギーから、新たな粒子が生まれる。
粒子にエネルギーを与えて(加速させて)衝突させる装置 = **加速器** (次ページ)



Belle実験=KEKB加速器+Belle検出器

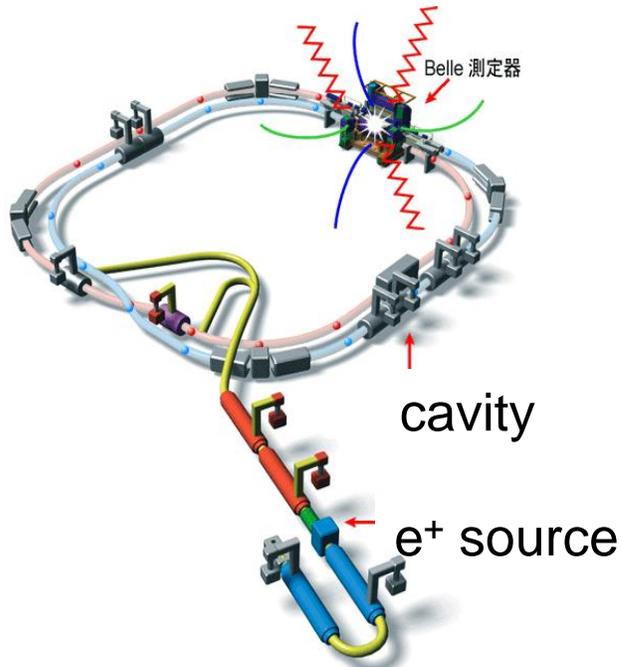
KEKB加速器:

茨城県つくば市にある高エネルギー加速器研究機構(KEK)に作られた加速器。
電子(e^-)と反粒子である陽電子(e^+)を電場で加速して、約10.58 GeVというエネルギーで正面衝突させる。(GeV: 10^9 ボルトで電子を加速した場合のエネルギー)

Belle検出器:

電子と陽電子の衝突点に置かれた検出器 (詳細はまた後で)。

概略図 Belle detector



鳥瞰図(加速器自体は地下にある)



相対性理論に基づく質量, エネルギー, 運動量

- 高校で運動エネルギー $E = \frac{1}{2}mv^2$ と習ったが、これはvが光速cよりずっと小さい場合のみ成り立つ。

- 相対性理論によれば、止まっている物質も $E = mc^2$ で表されるエネルギーを持っている (静止エネルギー)。 前にもした説明。

- 次に、粒子が運動している場合を考える。

- 運動量pで運動している場合のエネルギーは

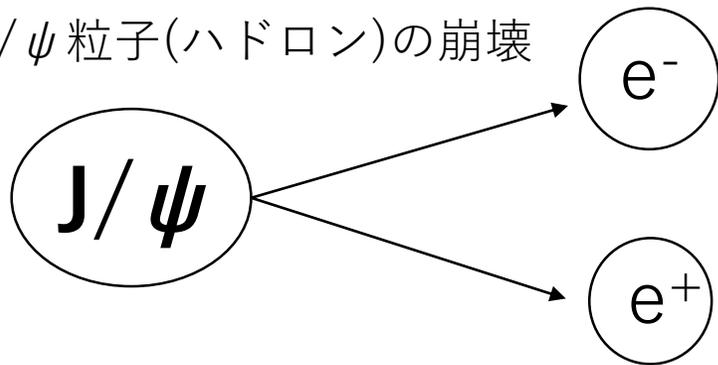
$E = \sqrt{m^2c^4 + p^2c^2}$ で表される。これと静止エネルギーの差が運動エネルギー。

- 逆に、粒子のエネルギーと運動量が分かれば、質量は $mc^2 = \sqrt{E^2 - p^2c^2}$ と与えられる。

-粒子の再構成-

- 衝突によって生まれた新しい粒子の”質量”を測定したい。 $M = \sqrt{E^2/c^4 - p^2/c^2}$ なので、**運動量とエネルギー**が分かれば良い。
- 大抵の粒子には**寿命**がある。
 - 生成されてすぐ質量が軽い粒子へ”崩壊”するため、**直接検出器には入らない**。
 - 検出器に入るのは寿命が長い限られた粒子のみ：
電子、ミュー粒子、 π 中間子、K中間子、陽子、光子、これらの反粒子。
 - 検出器はこれらの粒子の識別、運動量とエネルギーの測定を行う。
- 運動量とエネルギーは崩壊前後で**保存する**ので、崩壊によって生まれた**子粒子を全て測定**すれば、親粒子の運動量とエネルギーも分かる。

例：J/ ψ 粒子(ハドロンの)崩壊



$$M_{J/\psi} = \sqrt{E_{J/\psi}^2/c^4 - p_{J/\psi}^2/c^2}$$

$$\vec{p}_{J/\psi} = \vec{p}_{e^+} + \vec{p}_{e^-}$$

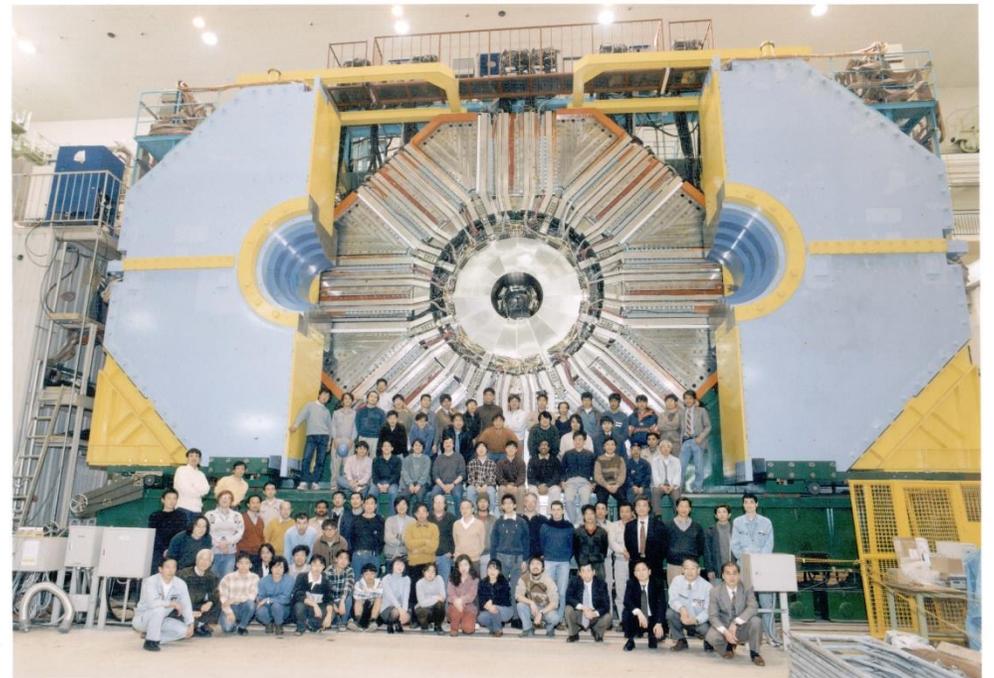
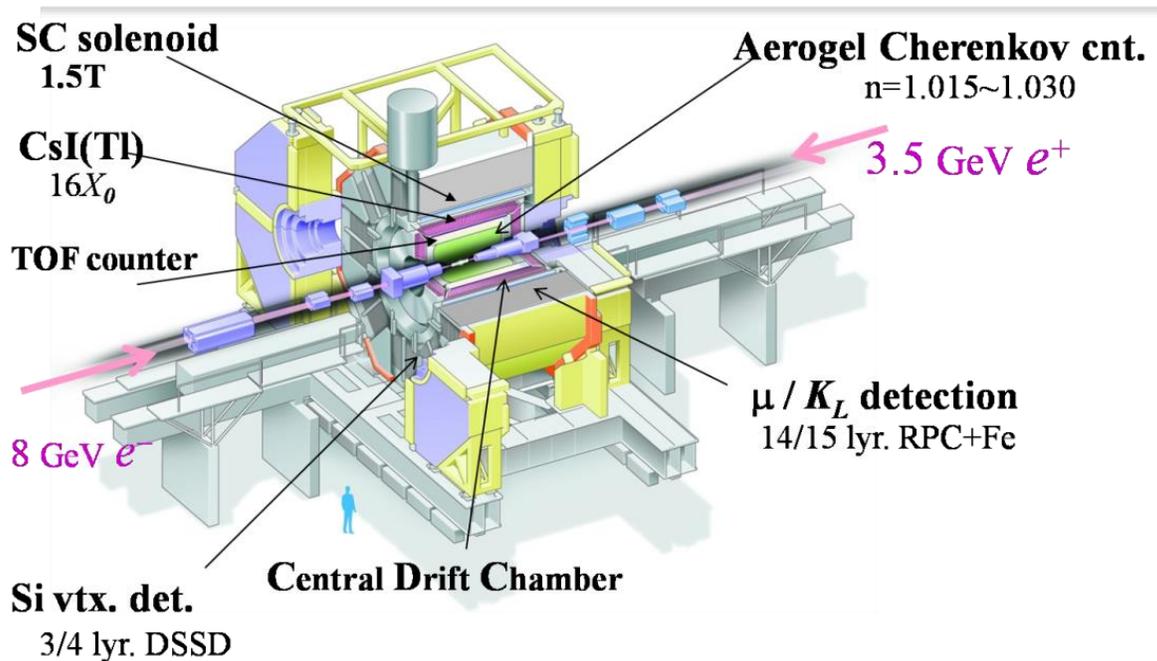
$$E_{J/\psi} = E_{e^+} + E_{e^-}$$

- ただし、電子と陽電子はJ/ ψ 粒子の崩壊以外での様々な過程からも生成される。その場合、計算された質量はランダムな量になる。

-検出器-

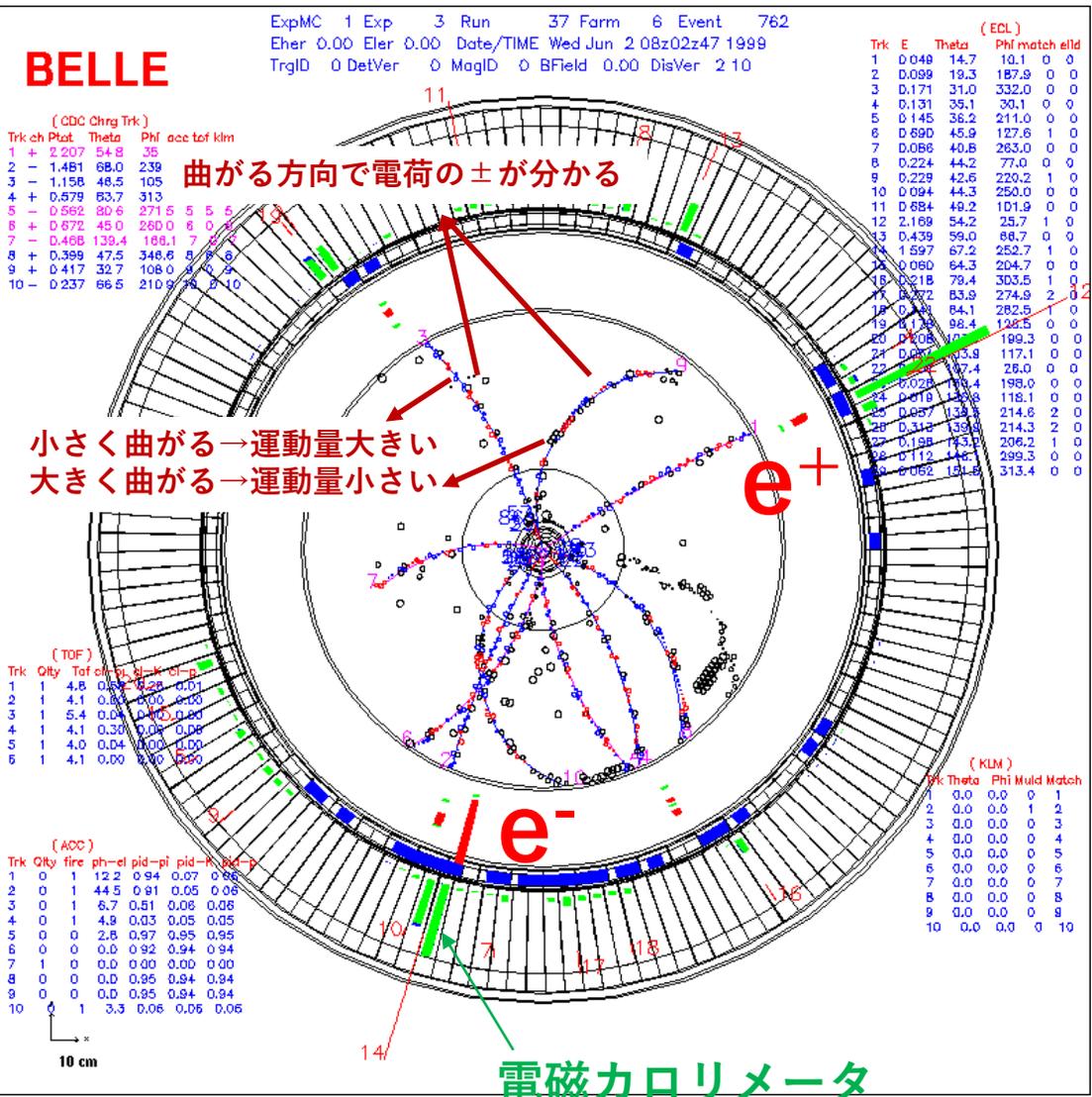
- ・ 加速器された粒子の衝突によって生成された長寿命の粒子を検出する。
- ・ 役割に応じて様々なサブ検出器によって構成されている。
- ・ Belle検出器の場合、大きさは8m x 8m x 8m、重量は1,500トン！
- ・ より詳細はまた後ほど

Belle検出器



粒子検出の例

Belle検出器で再構成されたJ/ψ → e⁺e⁻の例
(それ以外の粒子もたくさん検出されてる)



運動量の測定

左図では紙面方向に磁場がかかっている。
ローレンツ力の元での円運動は $p = \frac{eB}{r}$ と記述される。
(e:電荷, v:速度, r:回転半径)

→電荷と磁場がわかる状況で回転半径が分かれば、運動量が分かる。

エネルギーの測定

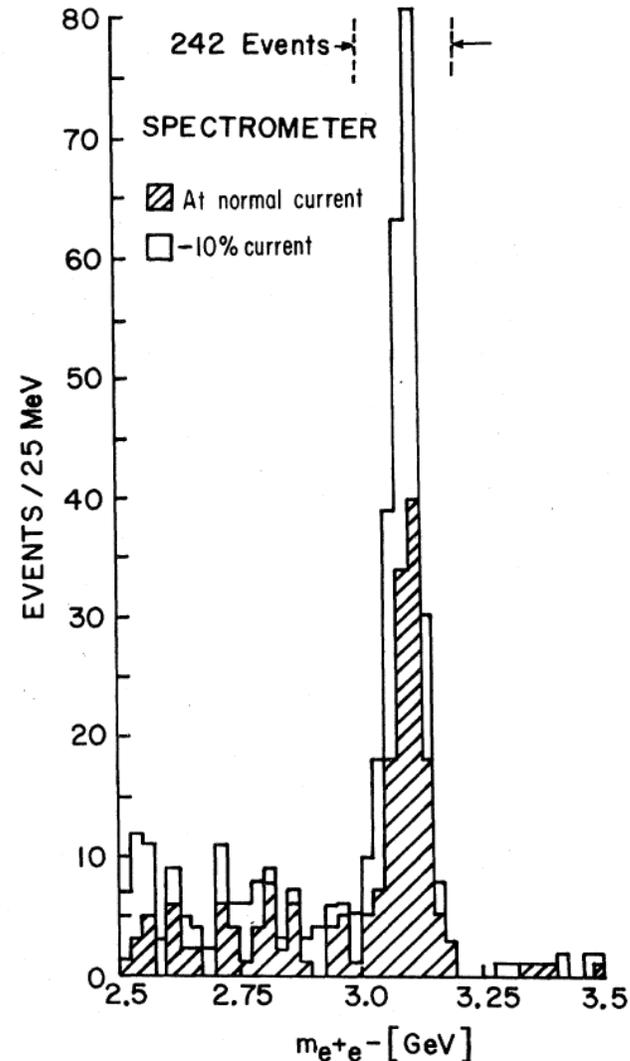
外側にある電磁カロリメータで電子のエネルギーを測定する。

粒子の識別

通った粒子が電子であることを識別する必要もある。
粒子の識別については付録を参照。

新粒子の発見例 (1) – J/ψ 粒子の発見 (1974) –

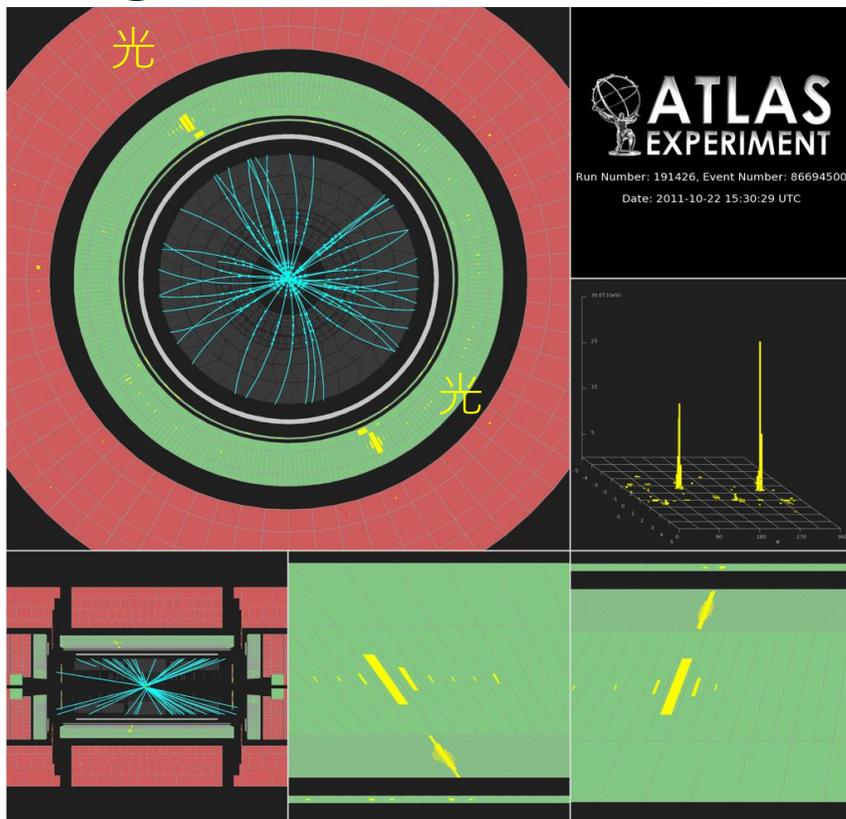
チャームクォーク(J/ψ)の発見
(2つの電子への崩壊)



- たくさんの事象を集めて計算された質量の”度数分布”(ヒストグラム)を作る。
- 親粒子の崩壊から来てない粒子の組み合わせで計算された質量は滑らかな分布になる。
- 新粒子が存在すれば、質量の度数分布に”ピーク”が現れる。このピークの位置が、新粒子の質量。
- 誰も見たことのない質量にピークを見つければ大発見!

新粒子の発見例(2) – ヒッグス粒子の発見 (2012) –

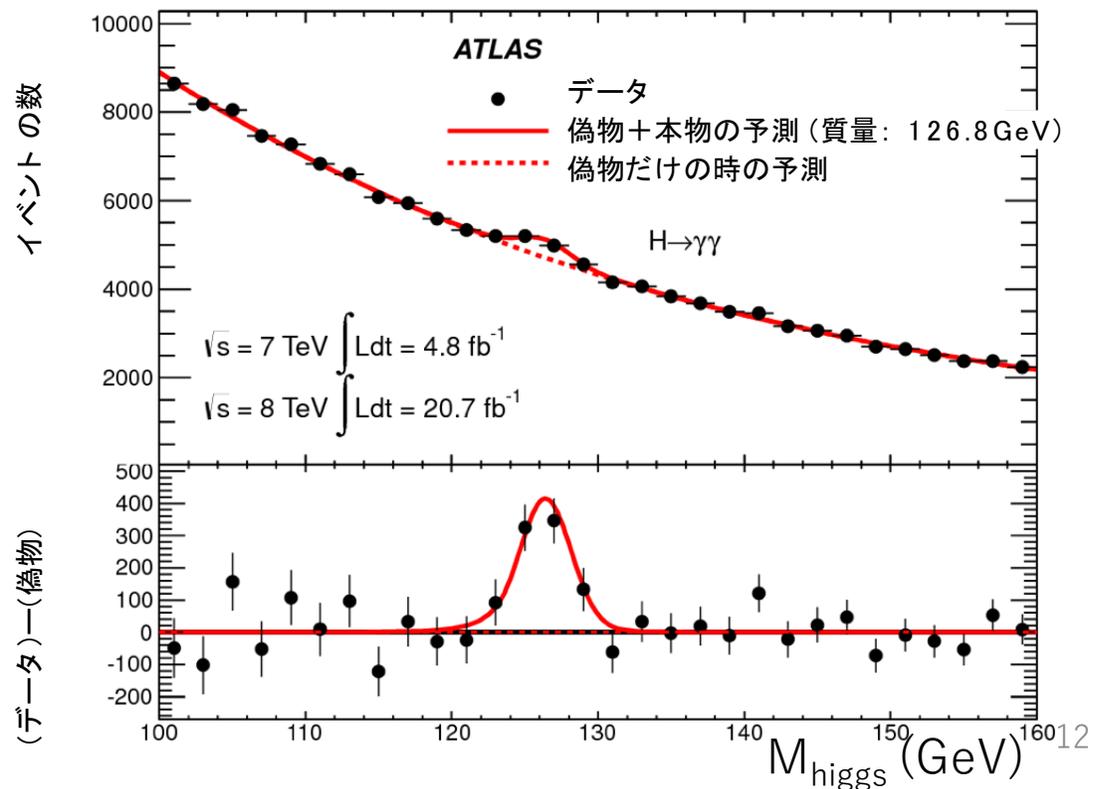
- LHC加速器を用いたATLAS実験で発見された (加速器と検出器は付録を参照)
- 2つの光 (γ)のエネルギーと運動量から測定した質量の度数分布の125GeV付近にピークを発見
→ 後の研究からヒッグス粒子であることがわかった



$$M_{Higgs} = \sqrt{E_{Higgs}^2 / c^4 - p_{Higgs}^2 / c^2}$$

$$\vec{p}_{Higgs} = \vec{p}_{\gamma 1} + \vec{p}_{\gamma 2}$$

$$E_{Higgs} = E_{\gamma 1} + E_{\gamma 2} \quad \text{Phys. Lett. B716 (2012)}$$



実験課題

**Belle実験で取得されたデータの一部を使い、未知の粒子を探す
B-Lab**

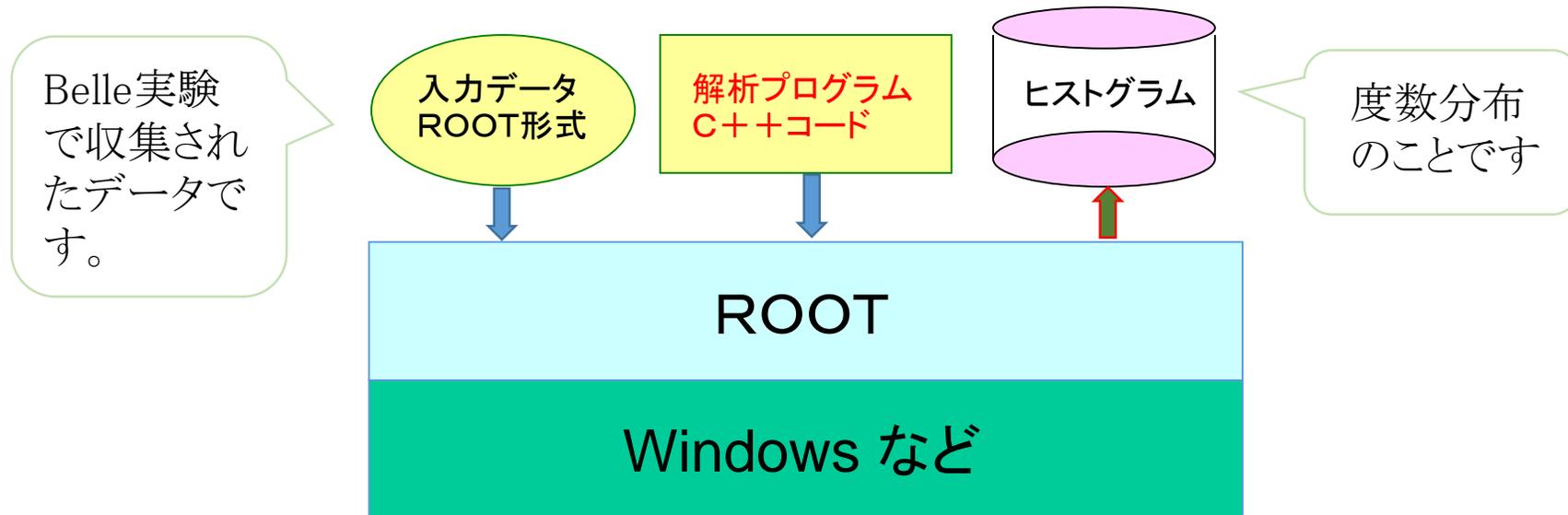
B-Labについて

- B-Labは高エネルギー加速器研究機構（KEK）で行なわれているBelle実験で得られたデータをインターネットを通じて一般に公開し、その中に潜む新粒子の探索を行なってもらおうという試みです。
- このような試みは世界初です。
- このプログラムは高校生にも参加できるように構成されています。



B-Lab

- データ公開プログラムB-LabではROOT（ルート）と呼ばれる解析システムを使います。
- この上で実行される解析コードの例が与えられています。それを自由に書き換えていろいろな新粒子探索が行えます。このコードはC++というコンピュータ言語で書かなければなりません。



B-Labについては <http://belle.kek.jp/b-lab> もご覧ください。

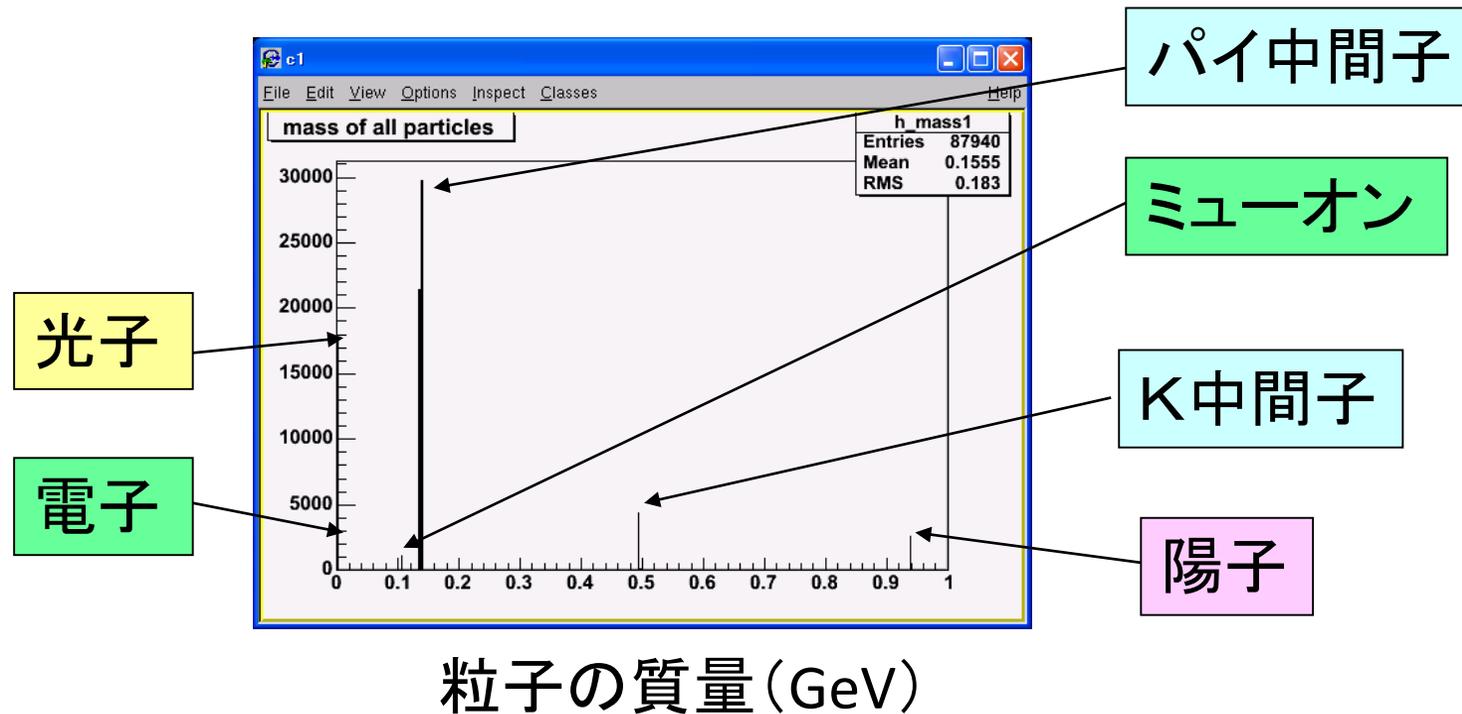
データに含まれている粒子をみてみよう

- デスクトップにある「コマンドプロンプト」をダブルクリックして、コマンドプロンプトを立ち上げます。
- コマンドプロンプト内にコマンドを入力して、プログラムを実行することができます。例えば、今のディレクトリに存在するファイルの一覧を見るには、
`dir`
と入力します。
`cd b-lab`
と入力して、プログラムとデータのあるディレクトリ(フォルダ)に移動します。
- まずROOTを動かす環境を設定します。
`startroot`
- 次にROOTを起動します。
`root`
- 例題 (イ) の解析コードであるmlist.ccを読み込ませます (ここからROOTの中です)。
`.L mlist.cc`
- 次に入力データファイルと解析するイベント数を指定して解析を実行させます。
`analysis("hadron-1.root",5000)`
- 解析が終わると度数分布 (ヒストグラム) が画面に出てきます。これが結果です。

データに含まれている粒子をみてみよう

イベント中に含まれる各粒子の質量を計算して、その度数分布 (ヒストグラム) を作れ。

答えは以下ようになります。



ここに入っているのは検出器で直接観測される粒子 (前のページの説明でいう子粒子)のみです。

データの中身を直接見てみよう

- コマンドプロンプトで
TBroser t
と入力します。