

素粒子特論

2016年度前期

河野能知

kono.takanori@ocha.ac.jp

理学部1号館208室

これまでの講義の内容

- クォーク模型
 - ハドロンの分類
 - 弱い相互作用の現象論
 - β 崩壊
 - K中間子、B中間子系におけるC, P, CP対称性の破れ
- 場の量子論の基礎
 - 自由場の量子化
 - 相互作用とFeynmann図
 - ゲージ理論
- 電子・陽電子衝突実験
 - クォーク対生成
 - グルーオンの発見
 - QCDの非摂動論的效果とジェット

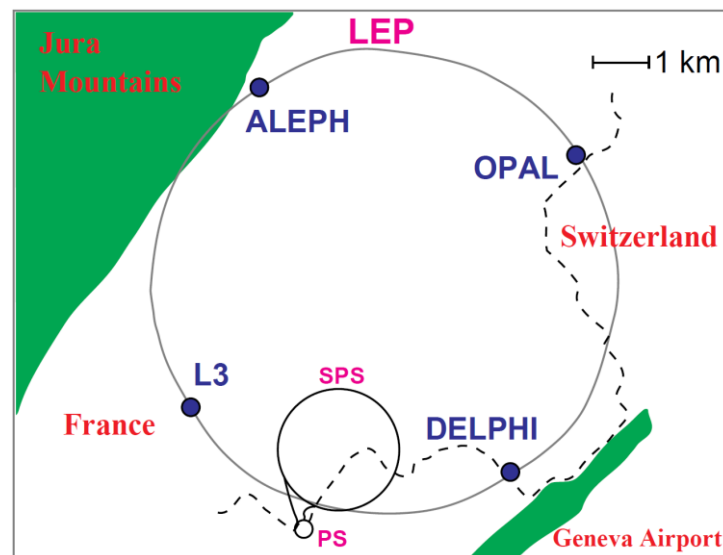
この後の講義の内容

- 電弱統一理論 (標準模型)
 - 弱中性カレント
 - $SU(2)_L \times U(1)$ ゲージ理論とヒッグス機構
 - LEPによる電弱理論の検証
- パarton分布
 - 電子・陽子の深非弾性散乱
 - 陽子の内部構造とparton模型
 - DGLAP発展方程式
 - HERAによるparton分布関数の測定
- LHC実験
 - ヒッグス粒子の発見
 - いろいろな測定

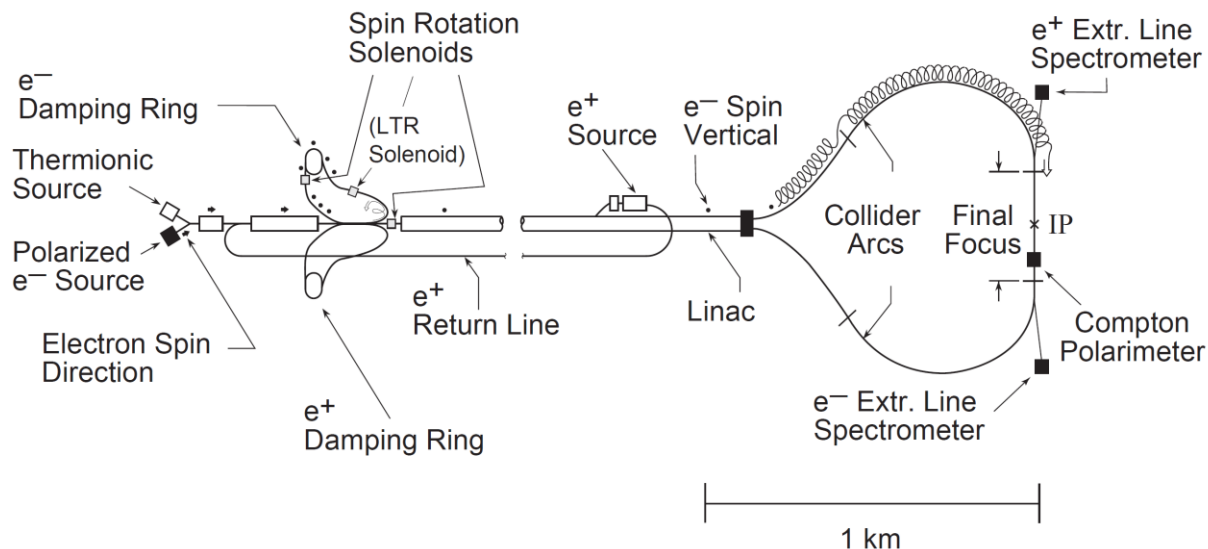
LEPとSLD

電子・陽電子衝突型加速器 ($\sqrt{s} = m_Z$)

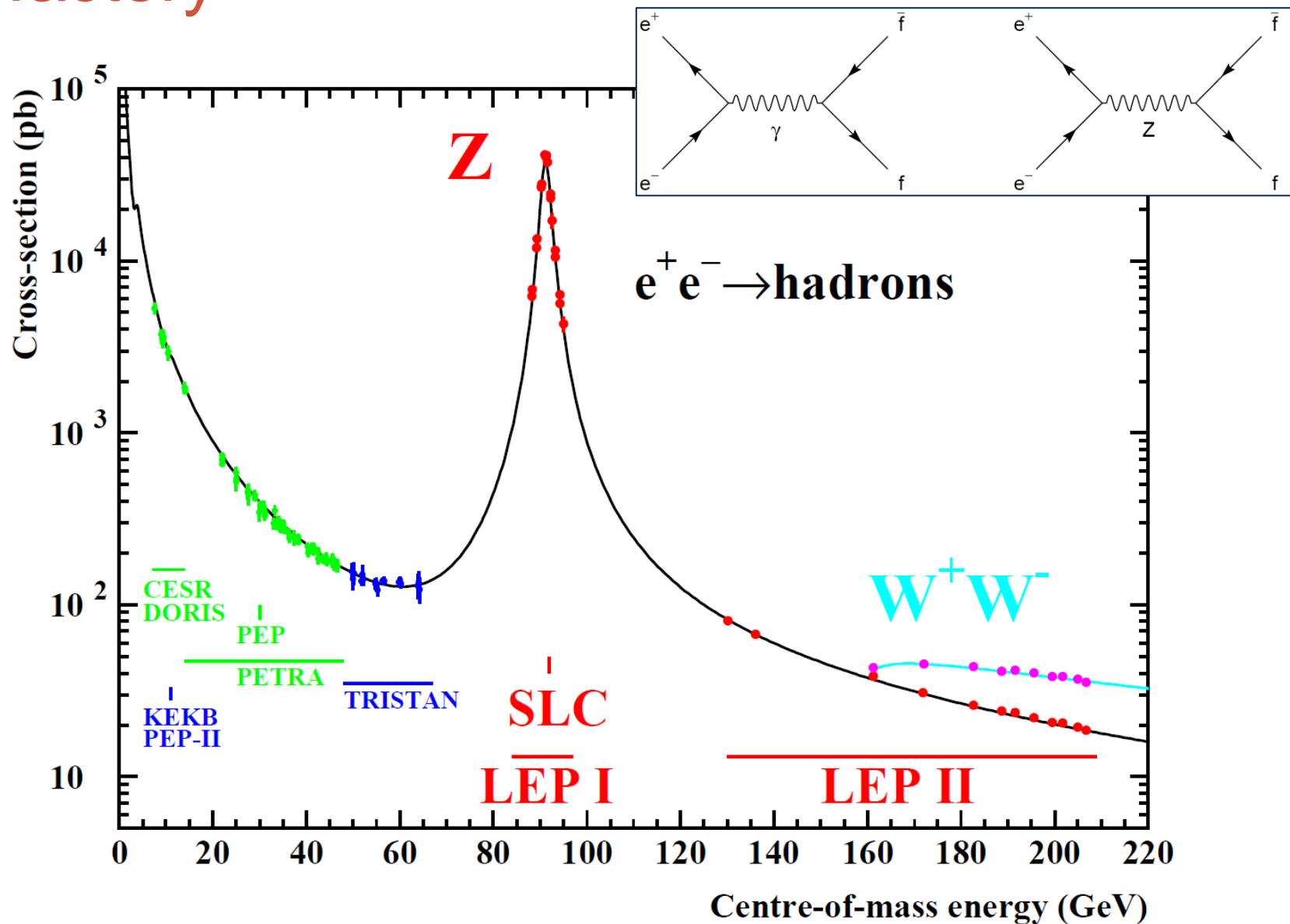
- LEP (Large Electron Positron collider)
 - スイス・ジュネーヴ郊外のCERN研究所



- SLC (Stanford Linear Collider)
 - アメリカ・カリフォルニア州SLAC (Stanford Linear ACcelerator laboratory)



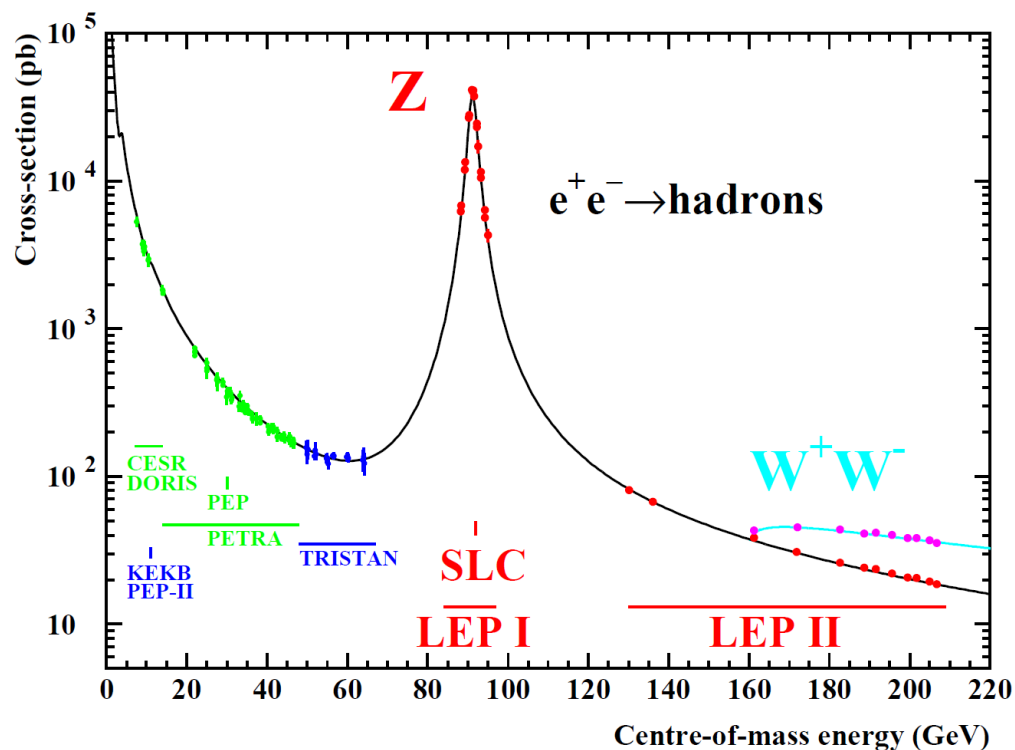
Z⁰ factory



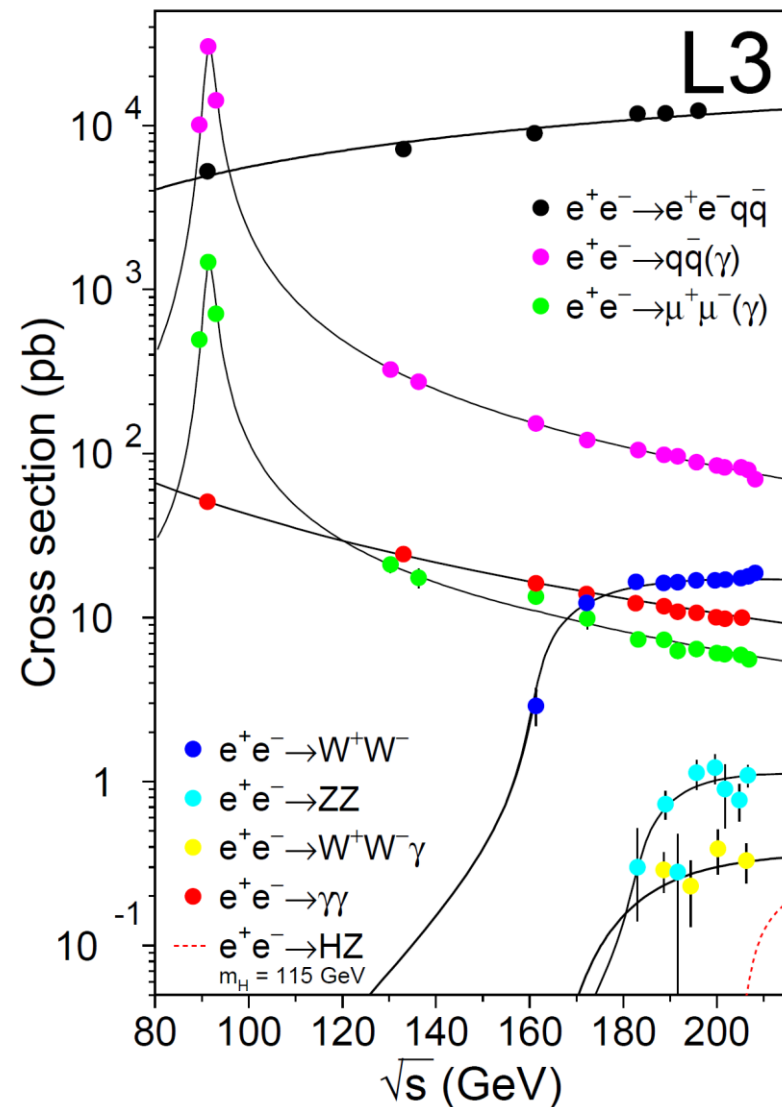
電弱相互作用の精密測定

- LEP-1 (1989 – 1995)
 - 重心系エネルギーを88.2 ~ 94.2 GeVで運転した
 - 4つの衝突点それぞれで、 Z^0 ボソンを約400万事象生成し測定を行った
 - Z^0 ボソンの関係する過程を精密に測定した
 - Z^0 ボソンの質量、幅、断面積
 - 弱中性カレント相互作用(フェルミオンとの相互作用)
 - ニュートリノの世代数を3と決定
- LEP-2 (1996 - 2000)
 - 重心系エネルギーを130 ~ 209 GeVで運転した
 - W^+W^- , Z^0Z^0 生成によりゲージボソンの3点、4点相互作用の測定
 - ヒッグス粒子の探索 ($m_H < 114$ GeV)
- 精密測定により、電弱統一理論の枠組みを検証
 - W, Zボソンの性質
 - 様々なフェルミオンとの相互作用の測定
- 参考文献: Phys. Rept. 427 (2006) 257-454, Phys Rept. 532 (2013) 119-244

LEP-1とLEP-2



- LEP-2では、WやZボソンの対生成も可能
 - ゲージボソンの自己結合の測定
- ヒッグス粒子探索 ($m_H < 114 \text{ GeV}$)

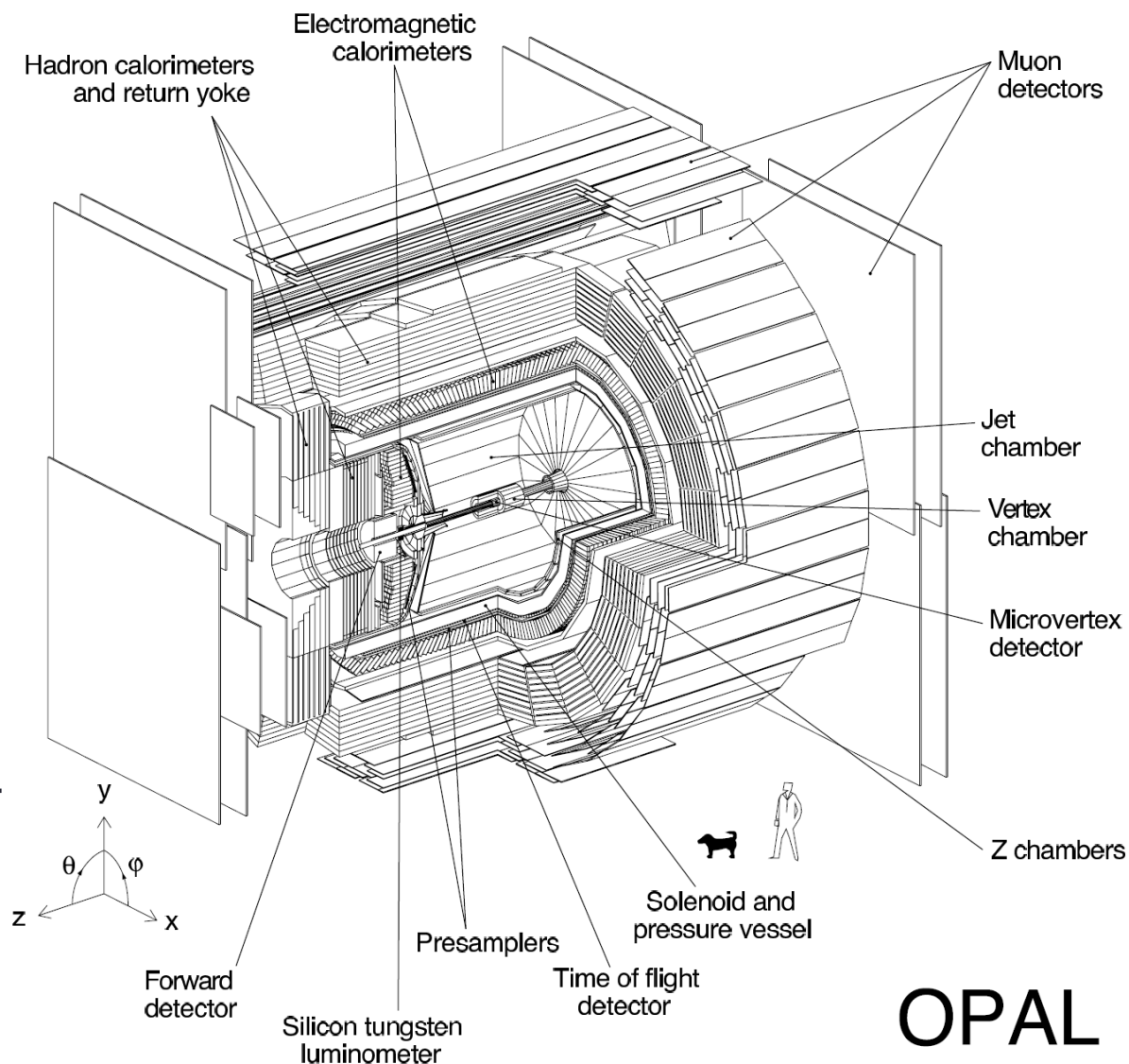


OPAL測定器

測定器は標準的な構成
内側から、

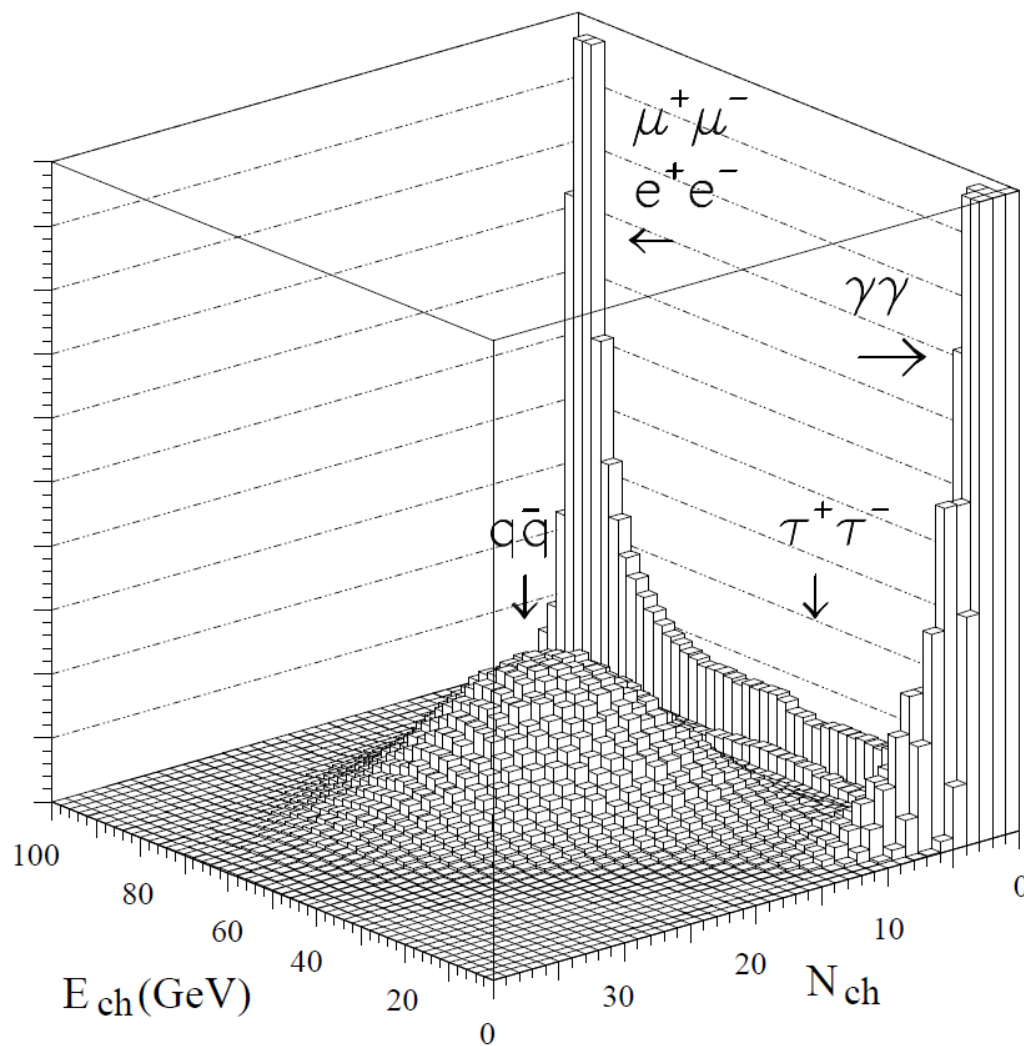
- 衝突点検出器
 - (Si検出器が本格的に使われた)
- 飛跡検出器
- 電磁カロリメータ
- ハドロン・カロリメータ
- ミューオン検出器

日本からは東大ICEPPをはじめとするグループがOPAL
実験に参加



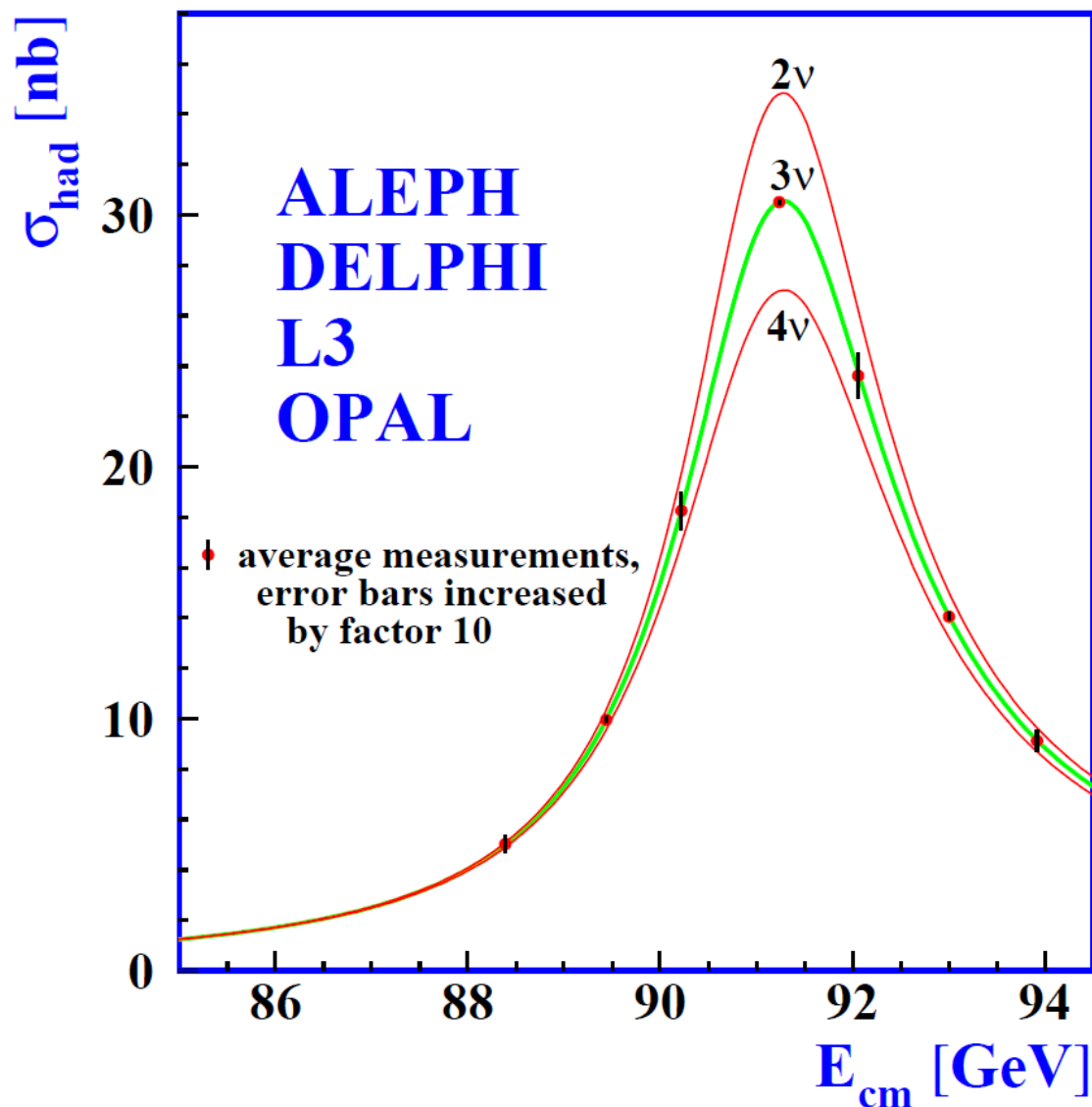
LEP-1における衝突事象の様子

ALEPH



測定された荷電粒子の
数とエネルギーの総和

軽いニュートリノの世代数に対する制限



- Z^0 が崩壊できるモードが多いほど寿命が短くなる
 - 共鳴の幅が大きくなる
- ニュートリノは質量が非常に小さいので、第4世代のものがあれば Z^0 はそれに崩壊するはずで幅に影響が出るはず
- $N_\nu = 2.9840 \pm 0.00016$

Z0生成断面積とLineshape

$$\sigma_{\text{ff}}^Z = \sigma_{\text{ff}}^{\text{peak}} \frac{s\Gamma_Z^2}{(s - m_Z^2)^2 + s^2\Gamma_Z^2/m_Z^2},$$

where

$$\sigma_{\text{ff}}^{\text{peak}} = \frac{1}{R_{\text{QED}}} \sigma_{\text{ff}}^0,$$

and

$$\sigma_{\text{ff}}^0 = \frac{12\pi}{m_Z^2} \frac{\Gamma_{\text{ee}}\Gamma_{\text{ff}}}{\Gamma_Z^2}.$$

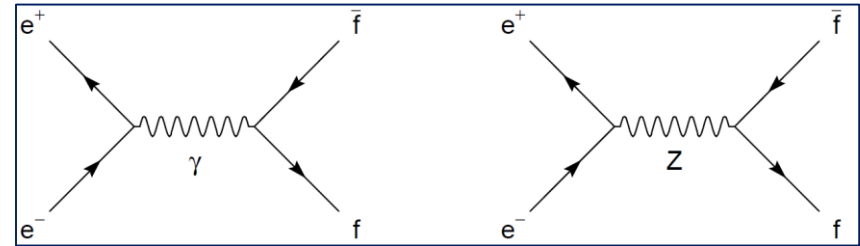
断面積 vs. 重心系エネルギーは
Breit-Wigner型の共鳴

$N(t) = N_0 e^{-\Gamma t} \propto |\psi(t)|^2$
で、 $\psi(t)$ をフーリエ変換してエネルギーの関数として表すとBreit-Wignerの関数になる

$$\Gamma_Z = \Gamma_{\text{ee}} + \Gamma_{\mu\mu} + \Gamma_{\tau\tau} + \Gamma_{\text{had}} + \Gamma_{\text{inv}}$$

Z⁰とフェルミオンの相互作用

$$\frac{2s}{\pi} \frac{1}{N_c^f} \frac{d\sigma_{ew}}{d\cos\theta} (e^+e^- \rightarrow f\bar{f}) =$$



$$\underbrace{|\alpha(s)Q_f|^2 (1 + \cos^2 \theta)}_{\sigma^\gamma}$$

$$\underbrace{-8\Re \left\{ \alpha^*(s)Q_f\chi(s) \left[\mathcal{G}_{Ve}\mathcal{G}_{Vf}(1 + \cos^2 \theta) + \underline{2\mathcal{G}_{Ae}\mathcal{G}_{Af}\cos\theta} \right] \right\}}_{\gamma\text{-Z interference}}$$

前方・後方非対称

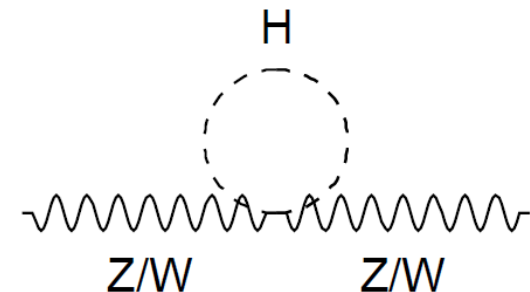
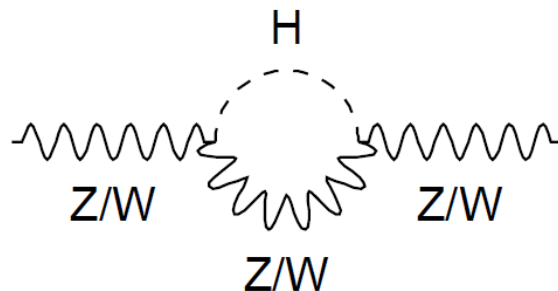
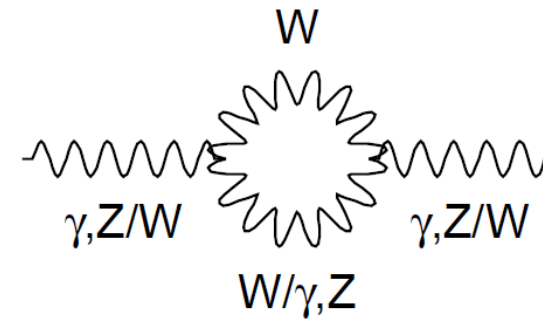
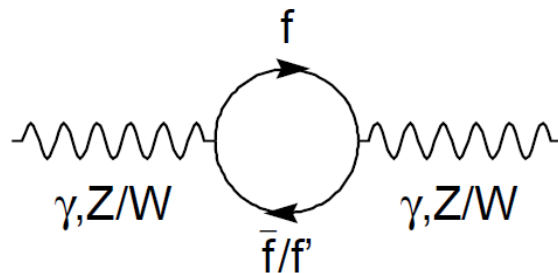
$$\underbrace{+16|\chi(s)|^2 \left[(|\mathcal{G}_{Ve}|^2 + |\mathcal{G}_{Ae}|^2)(|\mathcal{G}_{Vf}|^2 + |\mathcal{G}_{Af}|^2)(1 + \cos^2 \theta) + 8\Re \{ \mathcal{G}_{Ve}\mathcal{G}_{Ae}^* \} \Re \{ \mathcal{G}_{Vf}\mathcal{G}_{Af}^* \} \cos\theta \right]}_{\sigma^Z}$$

ヒッグス粒子やトップ・クォーク質量の予言

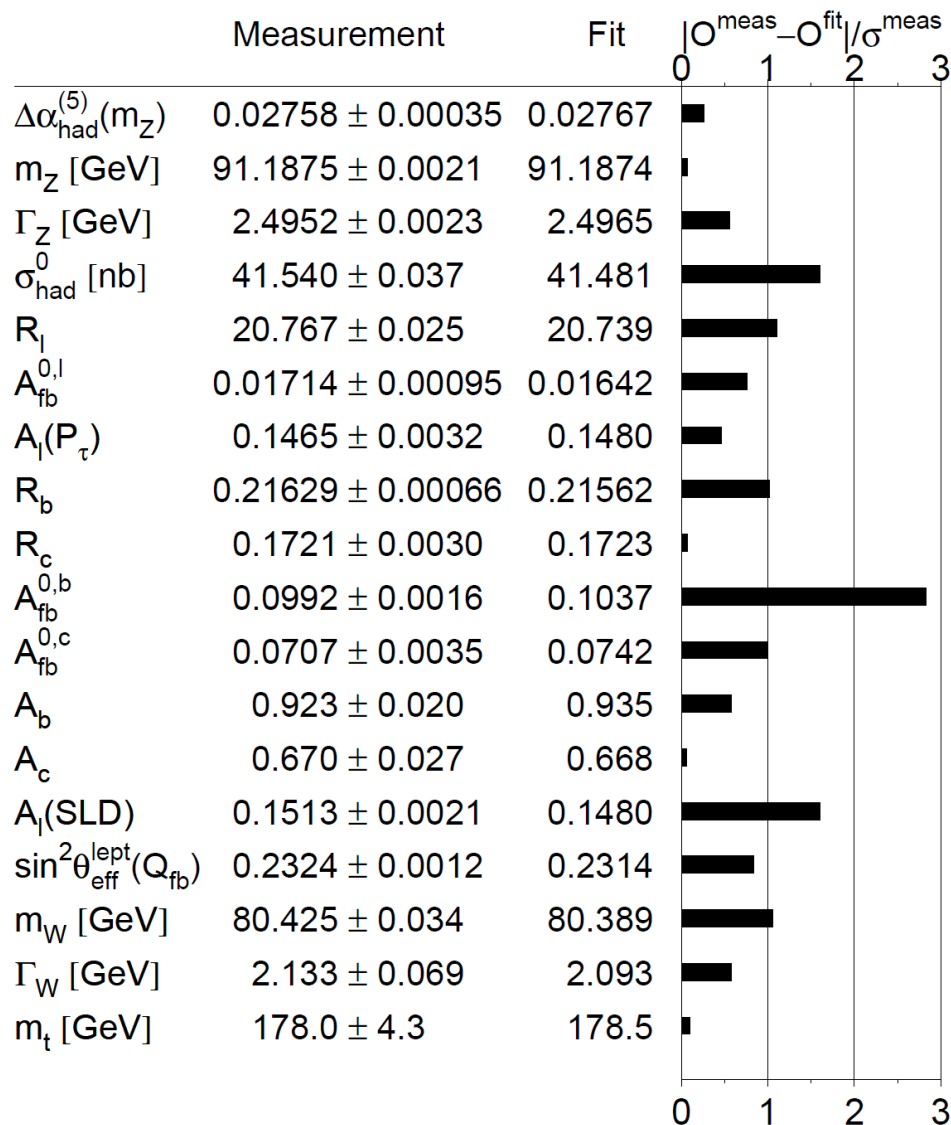
一般に、摂動の高次項によって、結合定数、質量、場の強さは影響を受ける
→ 繰り込み

電弱相互作用による高次の輻射補正の効果

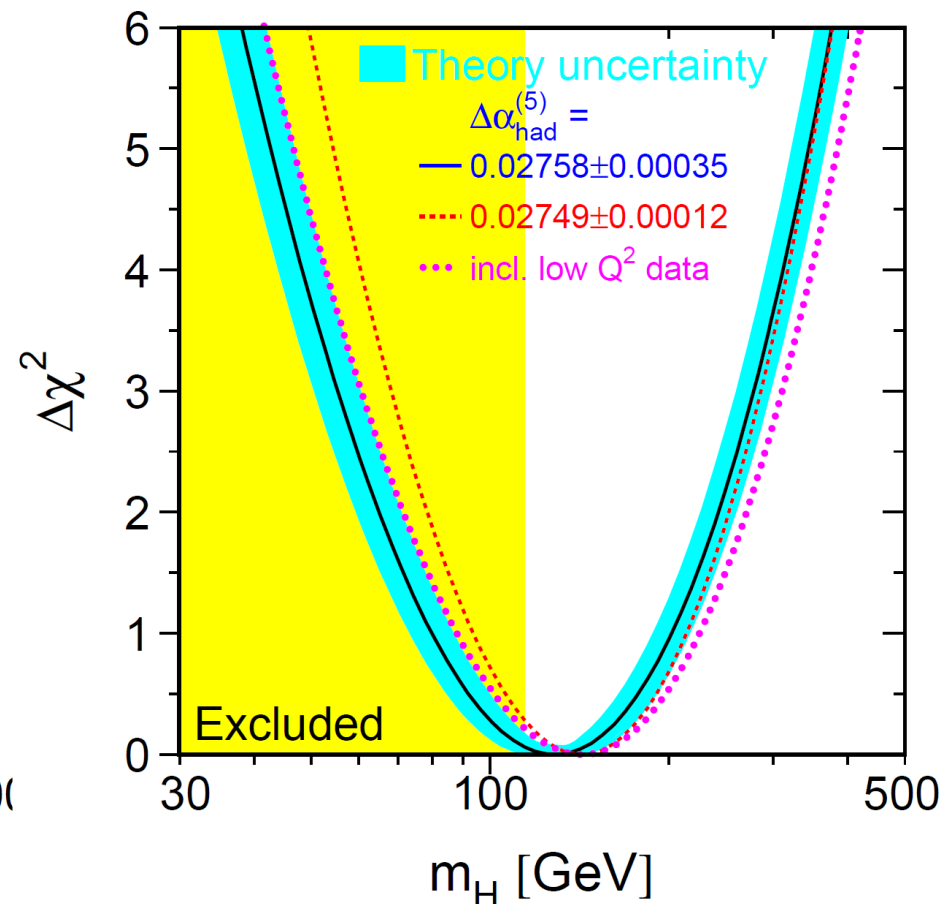
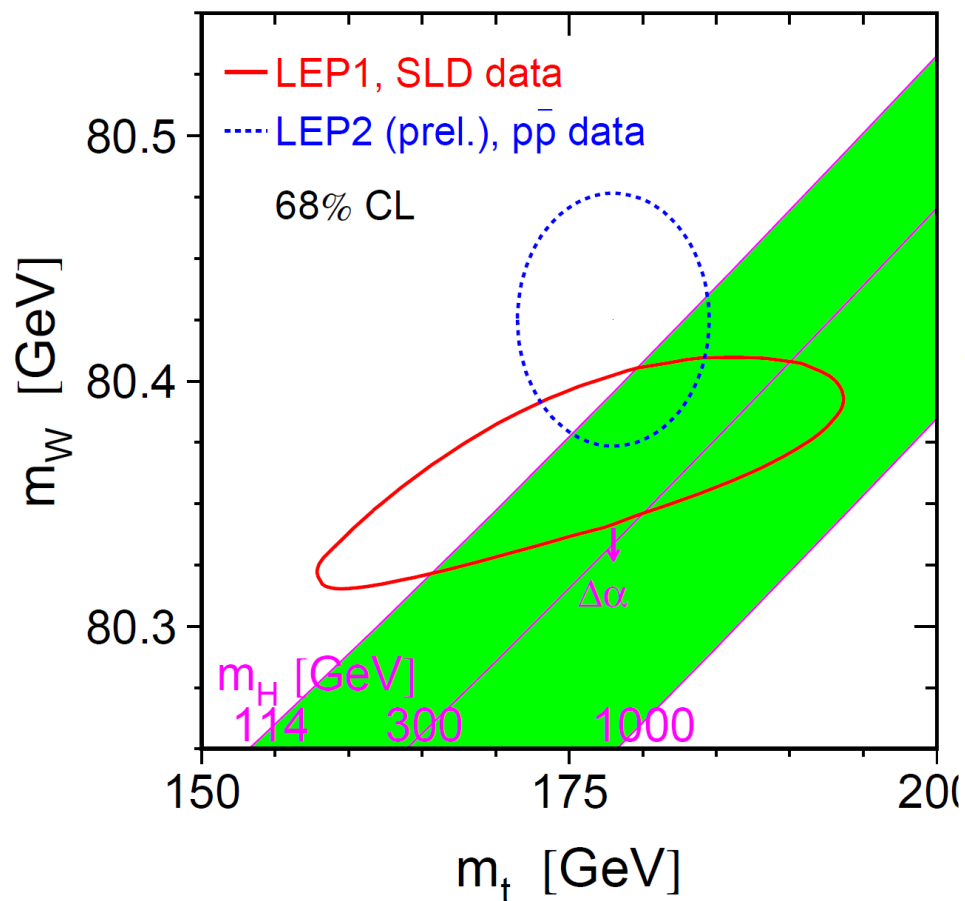
- 粒子の質量 m_W, m_t, m_b の間の関係を利用



精密測定の結果と標準模型の比較



2000年頃の状況



$$m_H = 129_{-49}^{+74} \text{ GeV}$$

