

電弱理論の基礎定数測定

森 俊則

東京大学素粒子物理国際研究センター

日本物理学会シンポジウム「物理定数の最新値と究極への挑戦」

2005年3月24日、東京理科大学

ゲージ理論

ゲージ対称性により

- ・ 相互作用は、coupling constant g によってすべて決まる
- ・ ゲージ粒子の質量はゼロ

自発的に対称性が破れた(真空が対称でない)場合

- ・ 真空に凝縮して対称性を破るもの(ヒッグス粒子)がある
ヒッグス粒子の真空期待値: v
- ・ ゲージ粒子の質量は、 $\sim g v$
- ・ その他の粒子(fermion)の質量はヒッグスとの相互作用(湯川)で決まる
 $m \sim h v$:よく分かっていない

素粒子物理学の標準モデル (Standard Model)

電弱理論 (ElectroWeak Theory)

量子色力学 (QCD)

g_1, g_2, v

α_s

混ぜた

量子電磁気学 (QED)

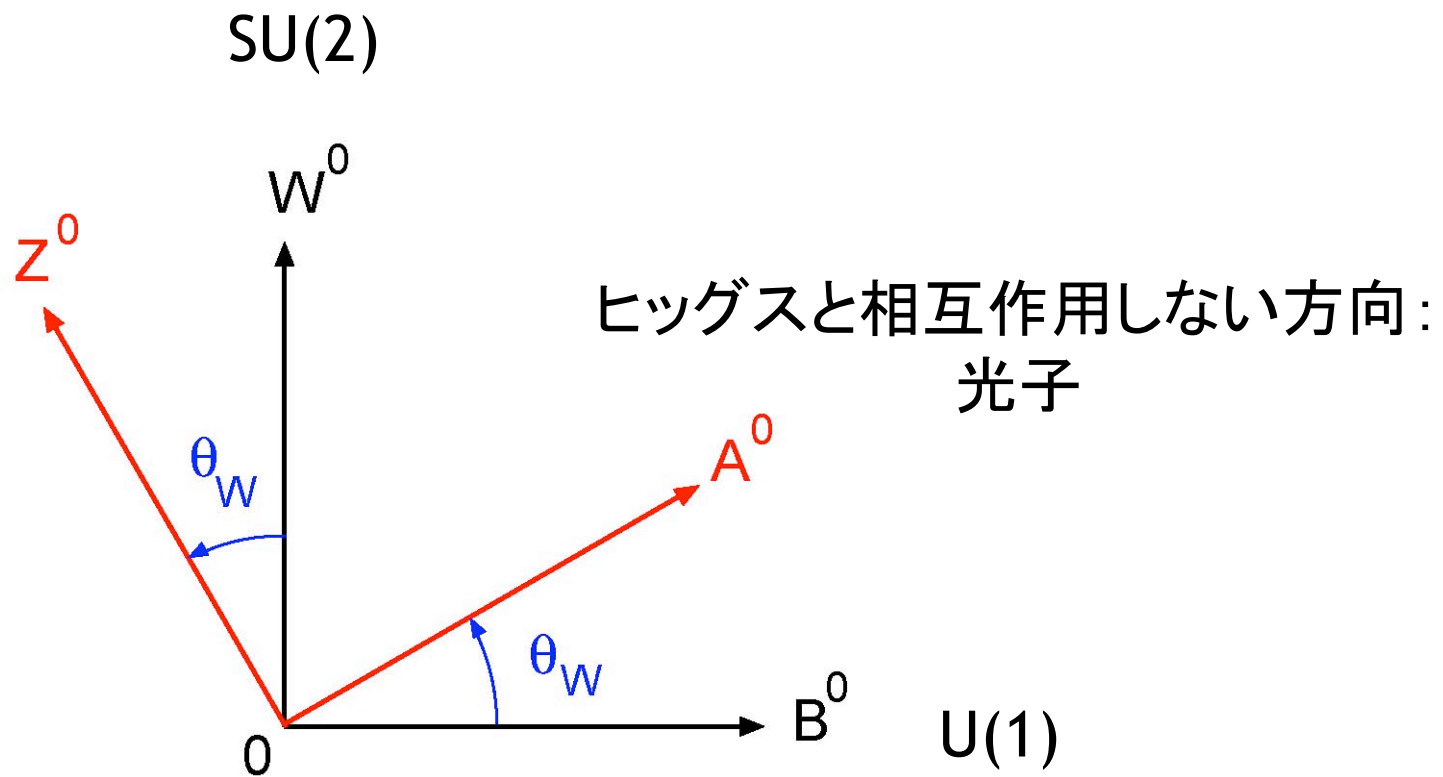
フェルミ理論 (ベータ崩壊)

α

G_F

その他: ゲージ粒子の質量 M_Z, M_W
ヒッグス粒子の質量 M_H 、クォーク・レプトンの質量 M_f

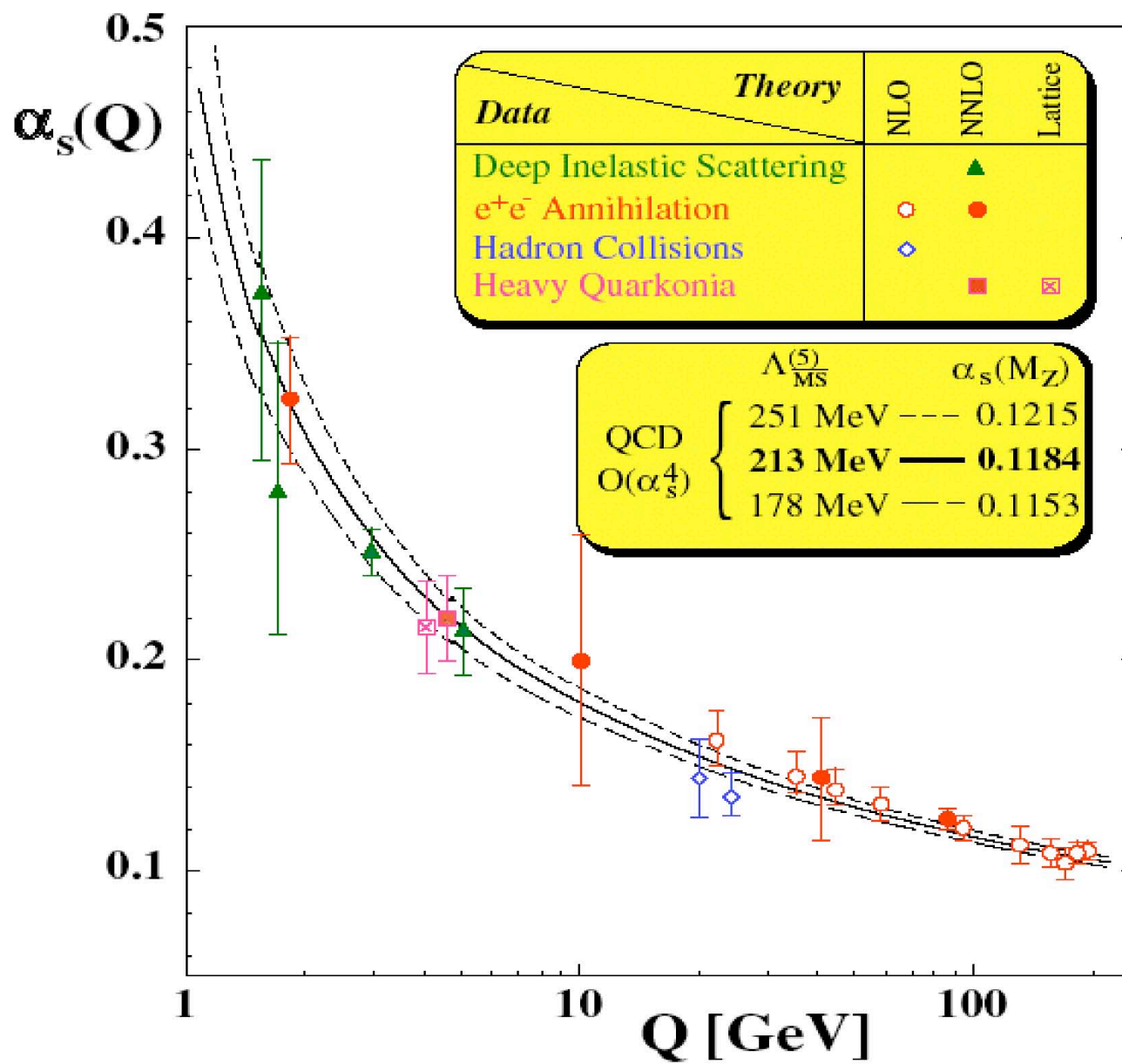
Weak Mixing Angle (Weinberg angle)



4つの基礎定数

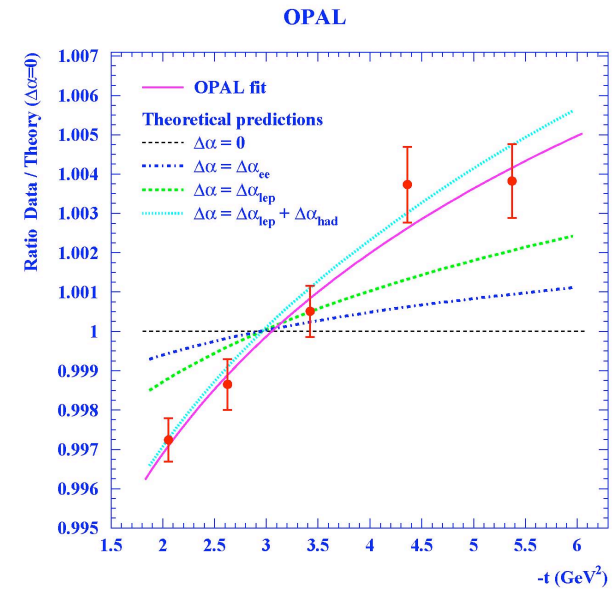
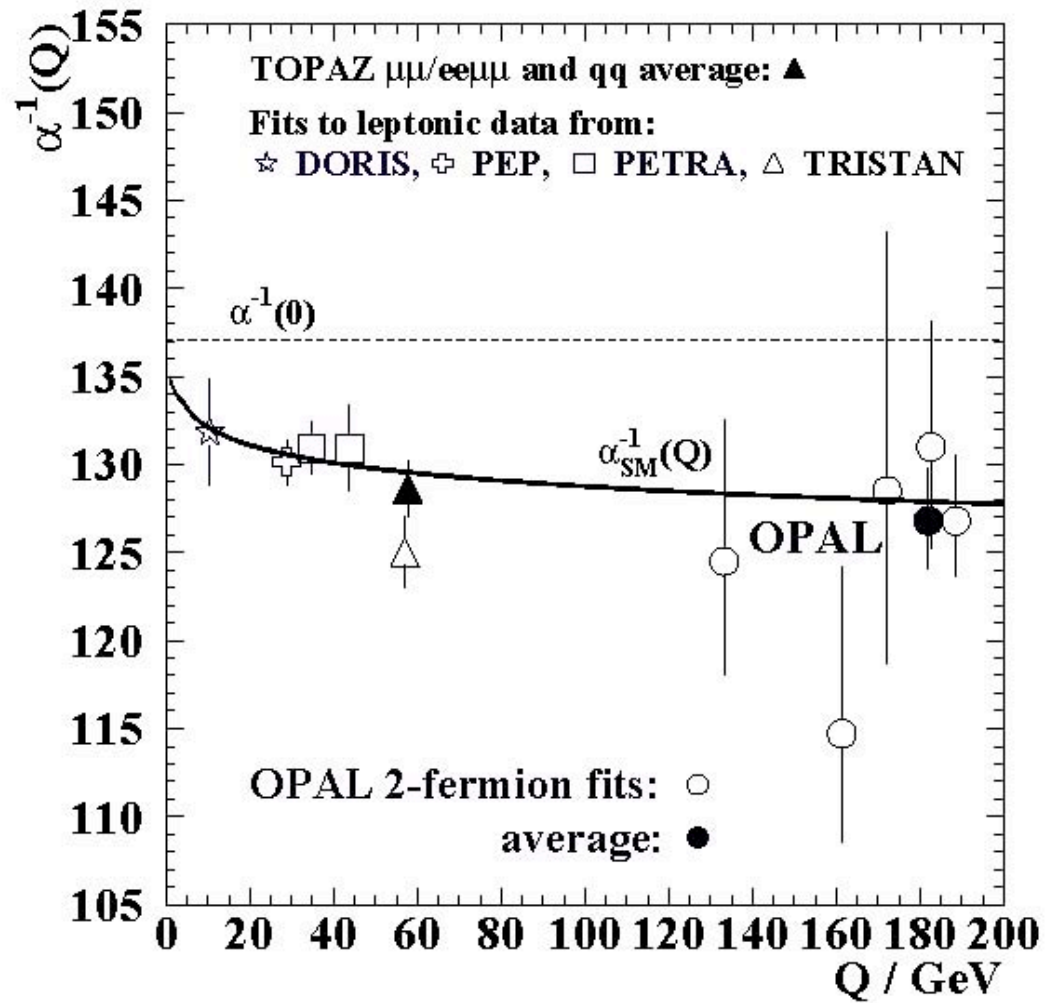
$\alpha^{-1}(0)$	$= 137.03599877(40)$	$\approx 3 \times 10^{-9}$
$\alpha_s(m_Z)$	$= 0.118(2)$	$\approx 2 \times 10^{-2}$
$G_\mu(m_\mu)$	$= 1.16637(1) \times 10^{-5} \text{ GeV}^{-2}$	$\approx 9 \times 10^{-6}$
m_Z	$= 91.1875(21) \text{ GeV}$	$\approx 2 \times 10^{-5}$

これら以外の測定量は、標準モデルの検証となる

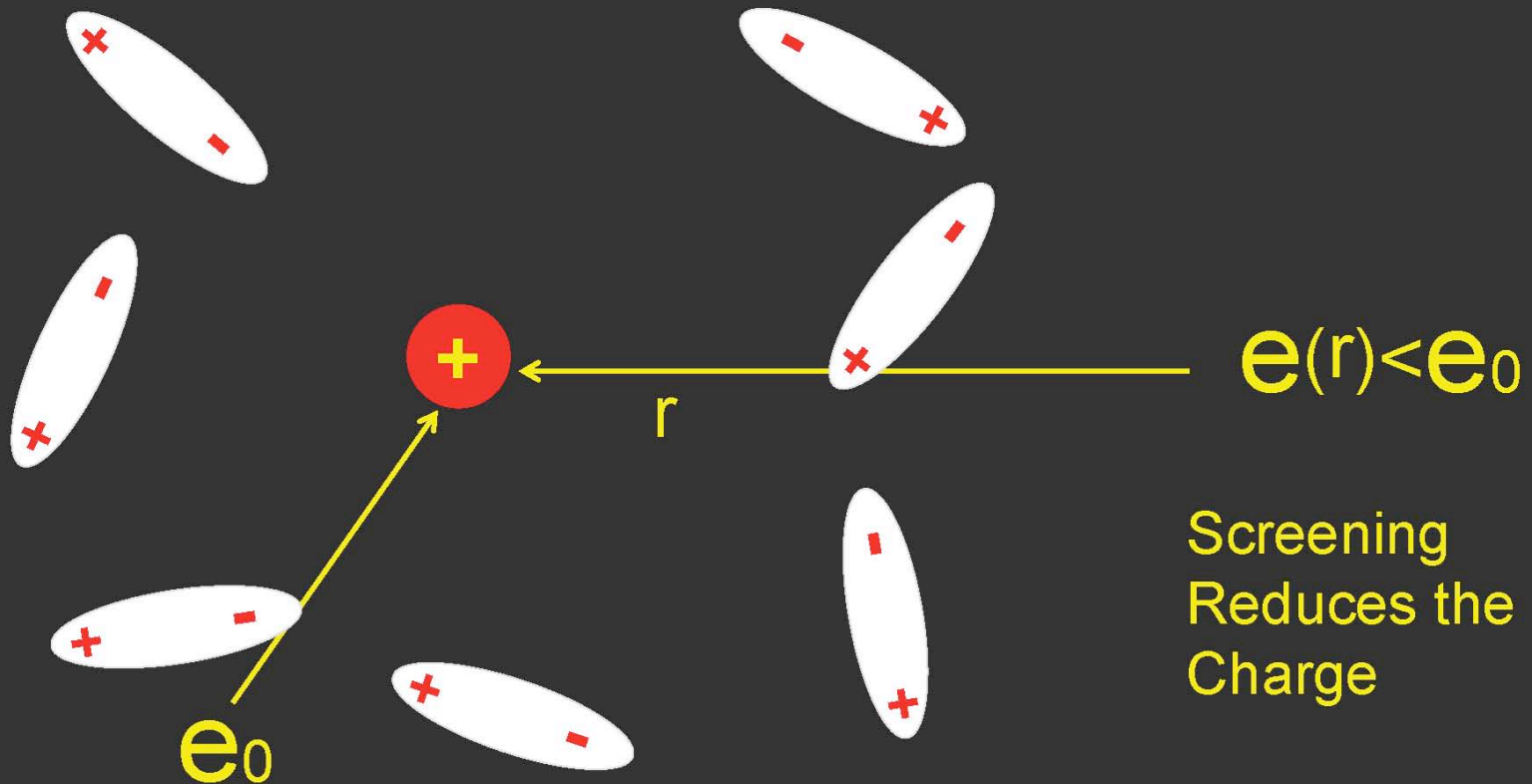


2004 Nobel Prize

Running α



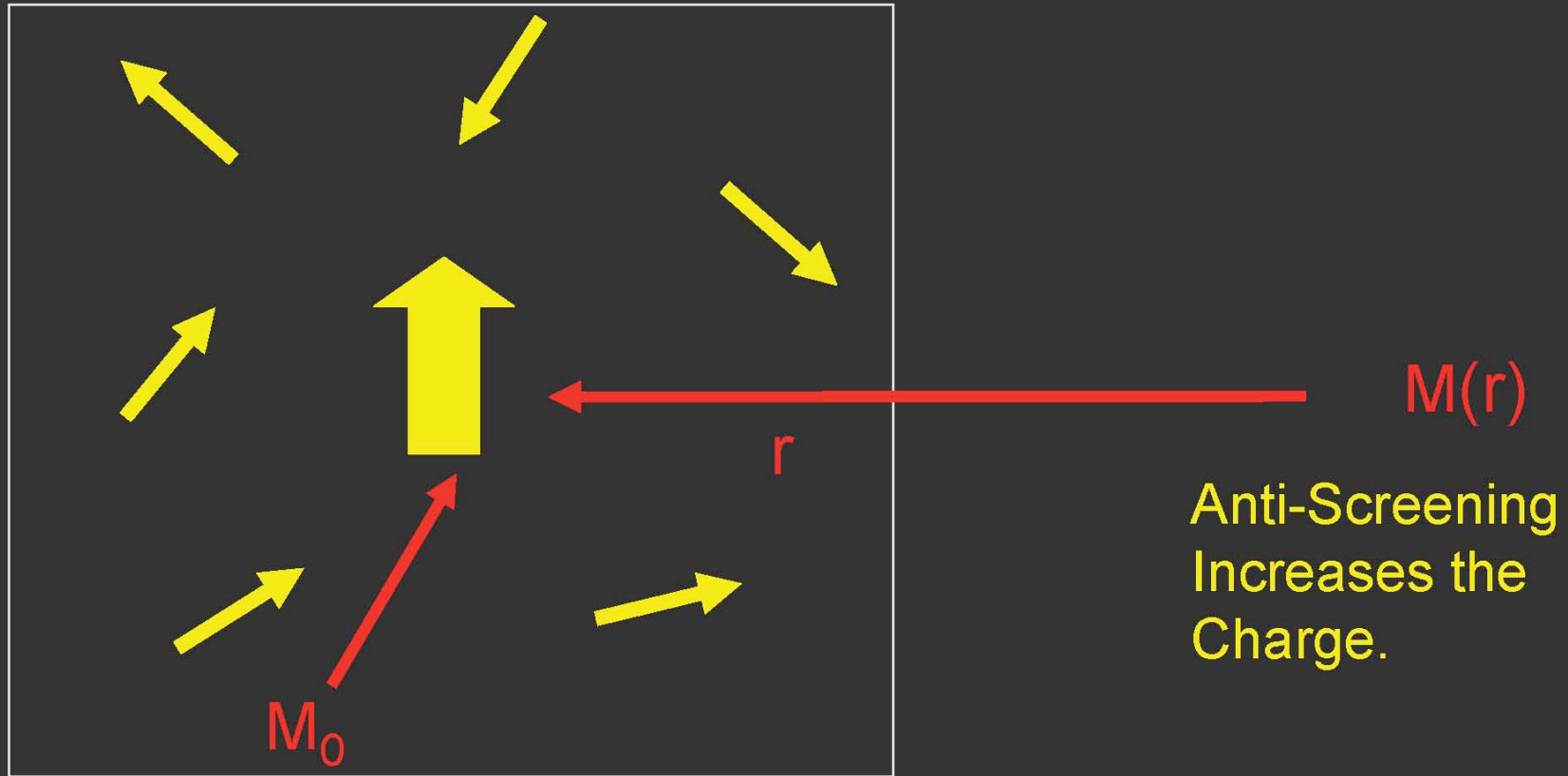
Screening in Q.E.D.



$$\beta(e) \equiv -\frac{d \ln e(r)}{d \ln(r)} > 0$$

**FORCE IS STRONGER
AT SHORT DISTANCES**

The Anti-screening of QCD

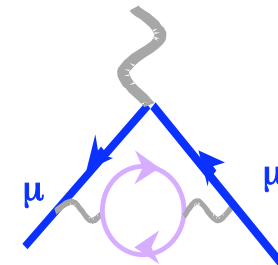


$$\beta(e) \equiv -\frac{d \ln e(r)}{d \ln(r)} < 0$$

**FORCE IS WEAKER
AT SHORT DISTANCES**

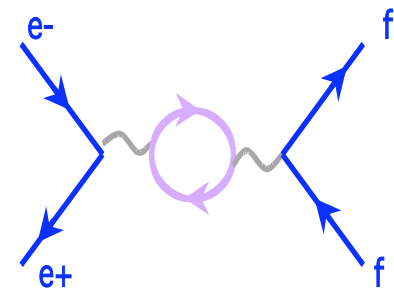
Running α

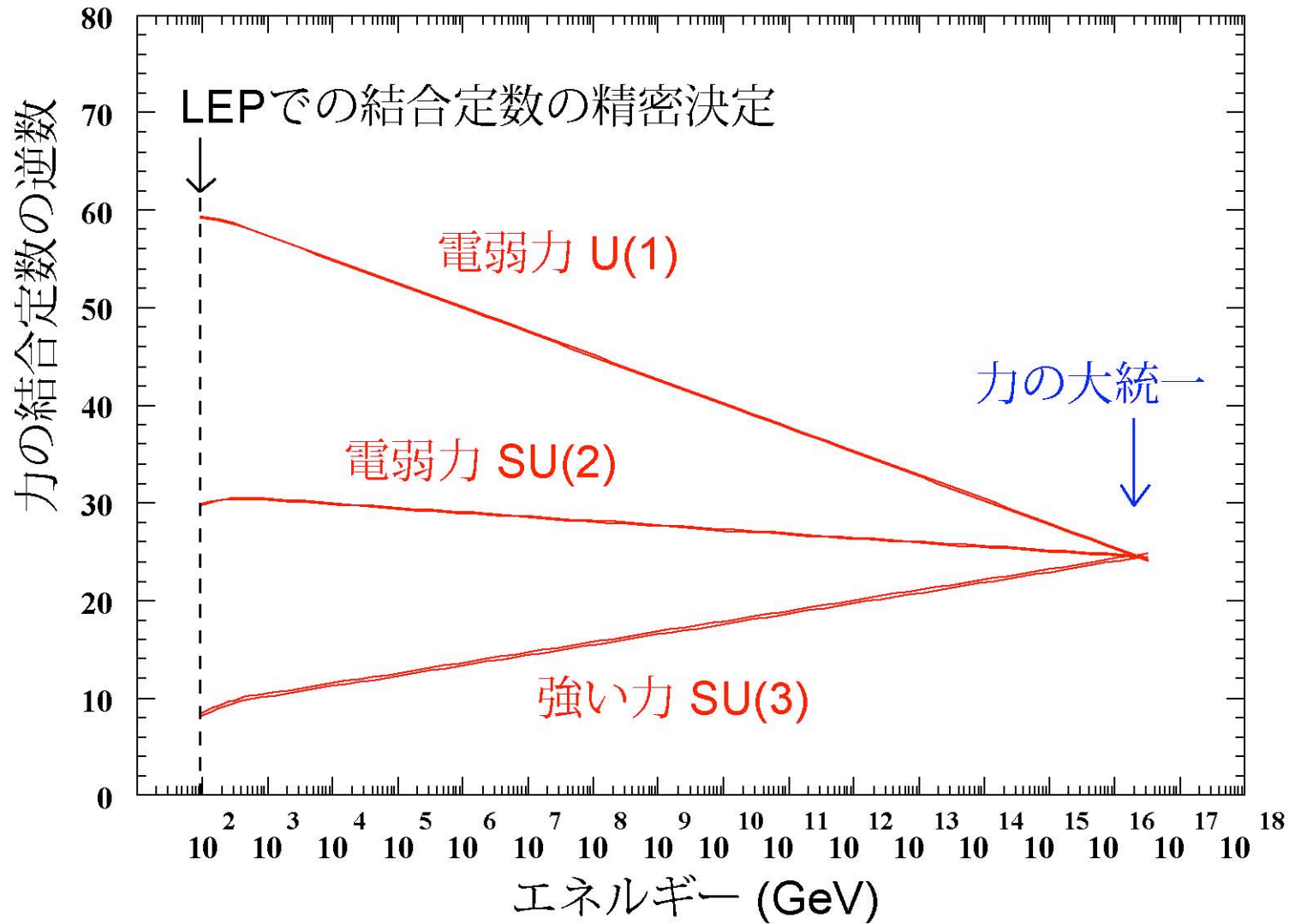
$$\begin{aligned}
 a_{\mu}^{\text{SM}} &= a_{\mu}^{\text{QED}} + a_{\mu}^{\text{had,LO}} + a_{\mu}^{\text{had,HO}} + a_{\mu}^{\text{had,LBL}} + a_{\mu}^{\text{weak}} \\
 &= \text{[diagrams]} \\
 &= (\text{QED}) \quad (11\,658\,470.35 \pm 0.28)10^{-10} \text{ (5-loop!)} \\
 &+ (\text{had,LO}) \quad (684.7 \text{ to } 709.0 \pm 6)10^{-10} \text{ (Big spread, largest error)} \\
 &+ (\text{had,HO}) \quad (-10.0 \pm 0.6)10^{-10} \\
 &+ (\text{had,LBL}) \quad (8.0 \pm 4.0)10^{-10} \text{ (sign change since 1998)} \\
 &+ (\text{weak}) \quad (15.4 \pm 0.2)10^{-10} \text{ (2-loop)}
 \end{aligned}$$



ミュー粒子の異常磁気能率

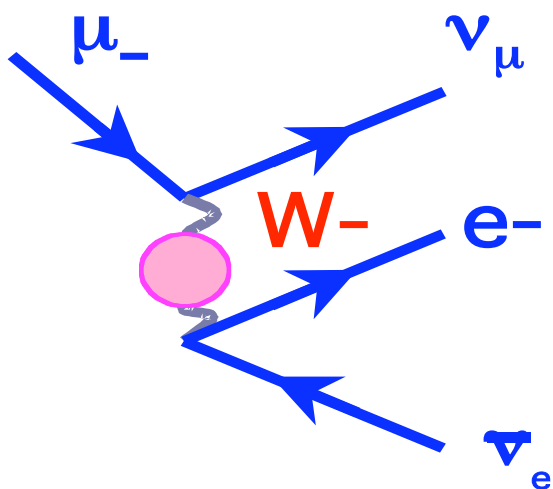
$$\Delta\alpha_{\text{hadron}} = -\frac{\alpha}{3\pi} \int_{4m_{\pi}^2}^{\infty} \frac{m_Z^2 ds'}{s' [s' - m_Z^2]} \frac{\sigma(e^+e^- \rightarrow \gamma^* \rightarrow q\bar{q})}{\sigma(e^+e^- \rightarrow \gamma^* \rightarrow \mu^+\mu^-)}$$





将来はcoupling constantは一つで説明できる？

フェルミ定数 G_F



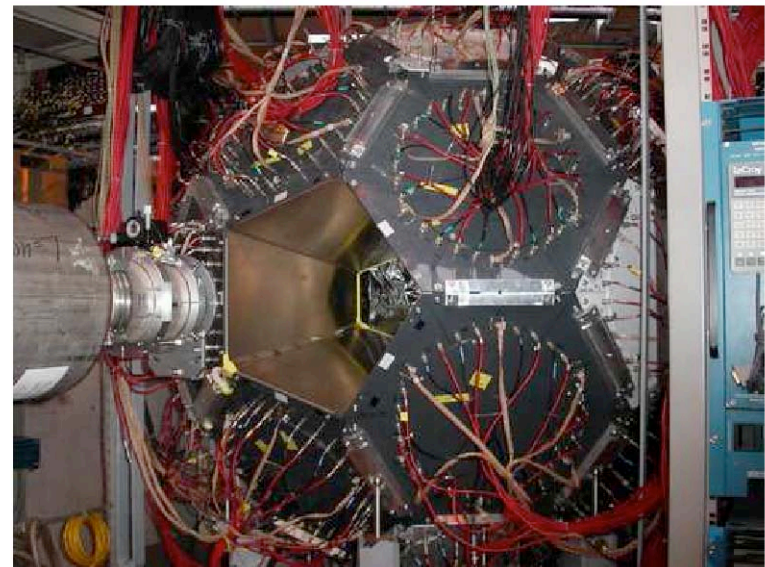
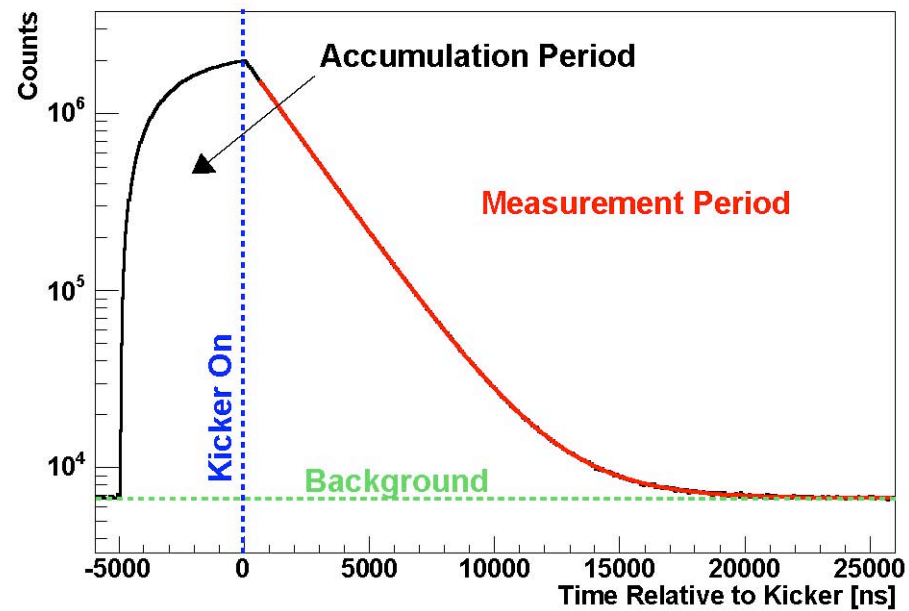
ミュー粒子の崩壊の寿命から
得られる

$$\frac{1}{\tau} = \frac{G_F^2 m_\mu^5}{192\pi^3} F\left(\frac{m_e^2}{m_\mu^2}\right) \left(1 + \frac{3m_\mu^2}{5M_W^2}\right) C$$

The $O(\alpha^2)$ corrections available

$$G_F$$

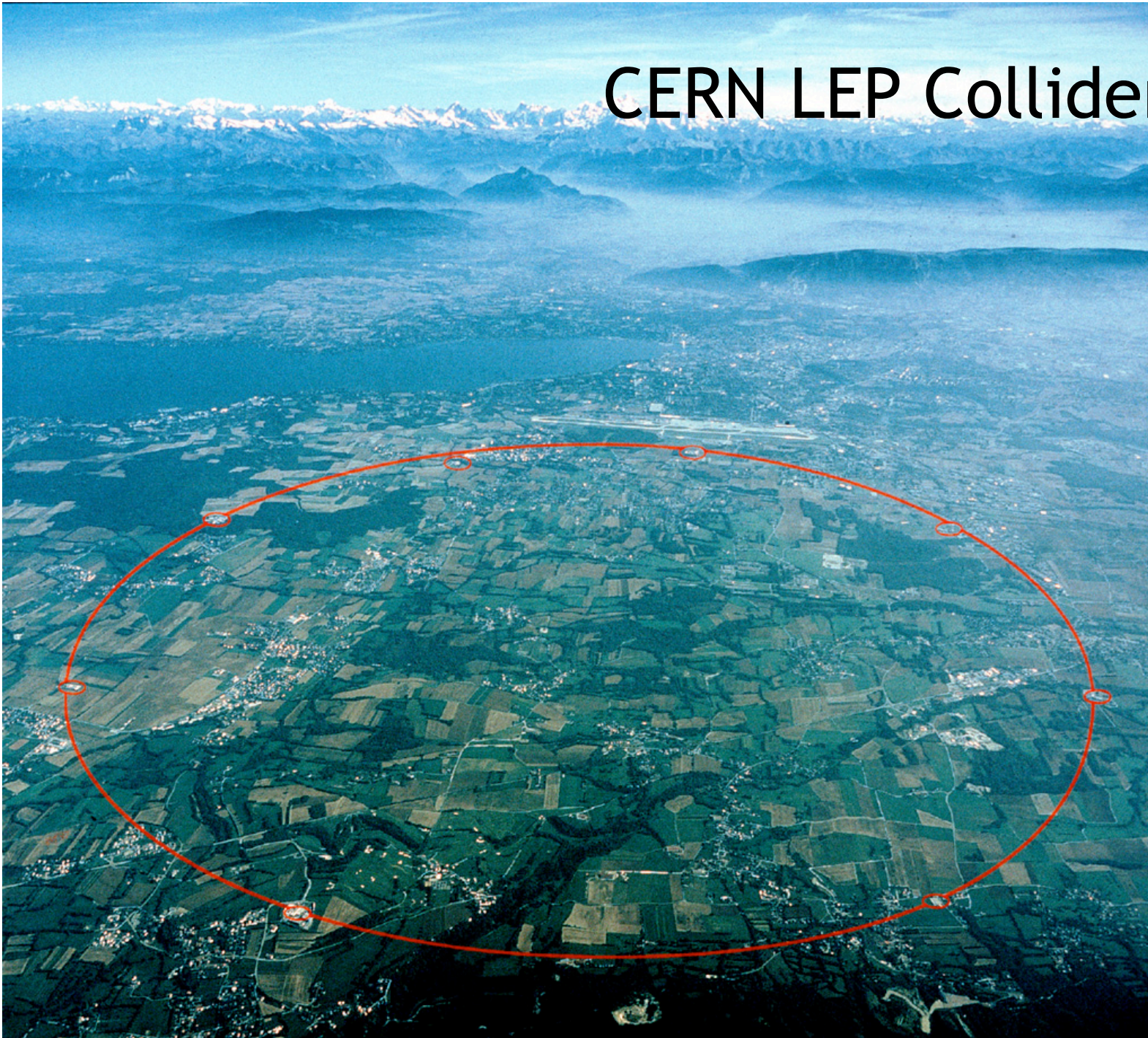
10^{-6} の精度を目指す複数の実験が進行中



$\sim 10^{-12}$ 個のミュー粒子崩壊を測定

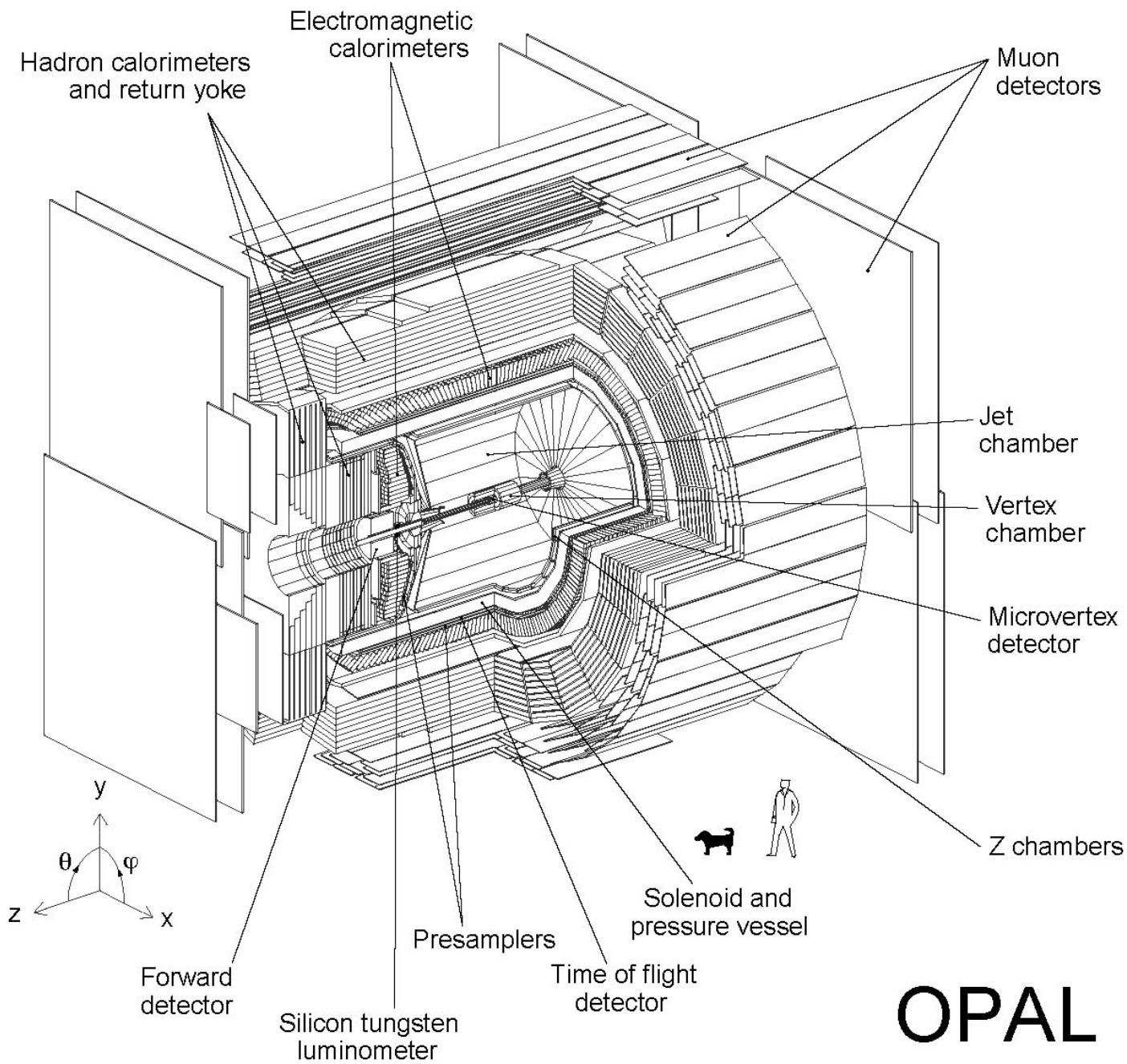
M_z の精密測定

CERN LEP Collider

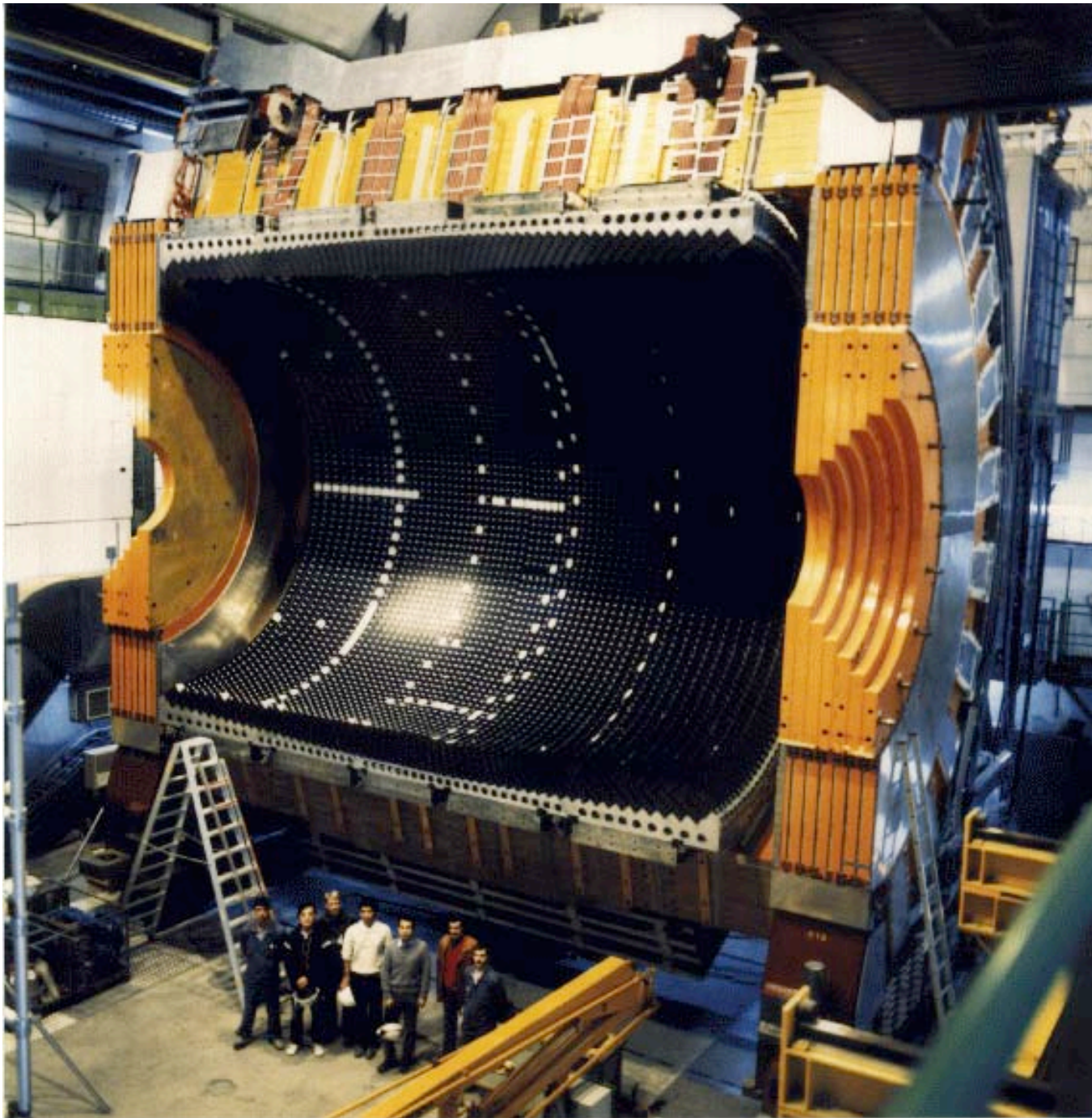


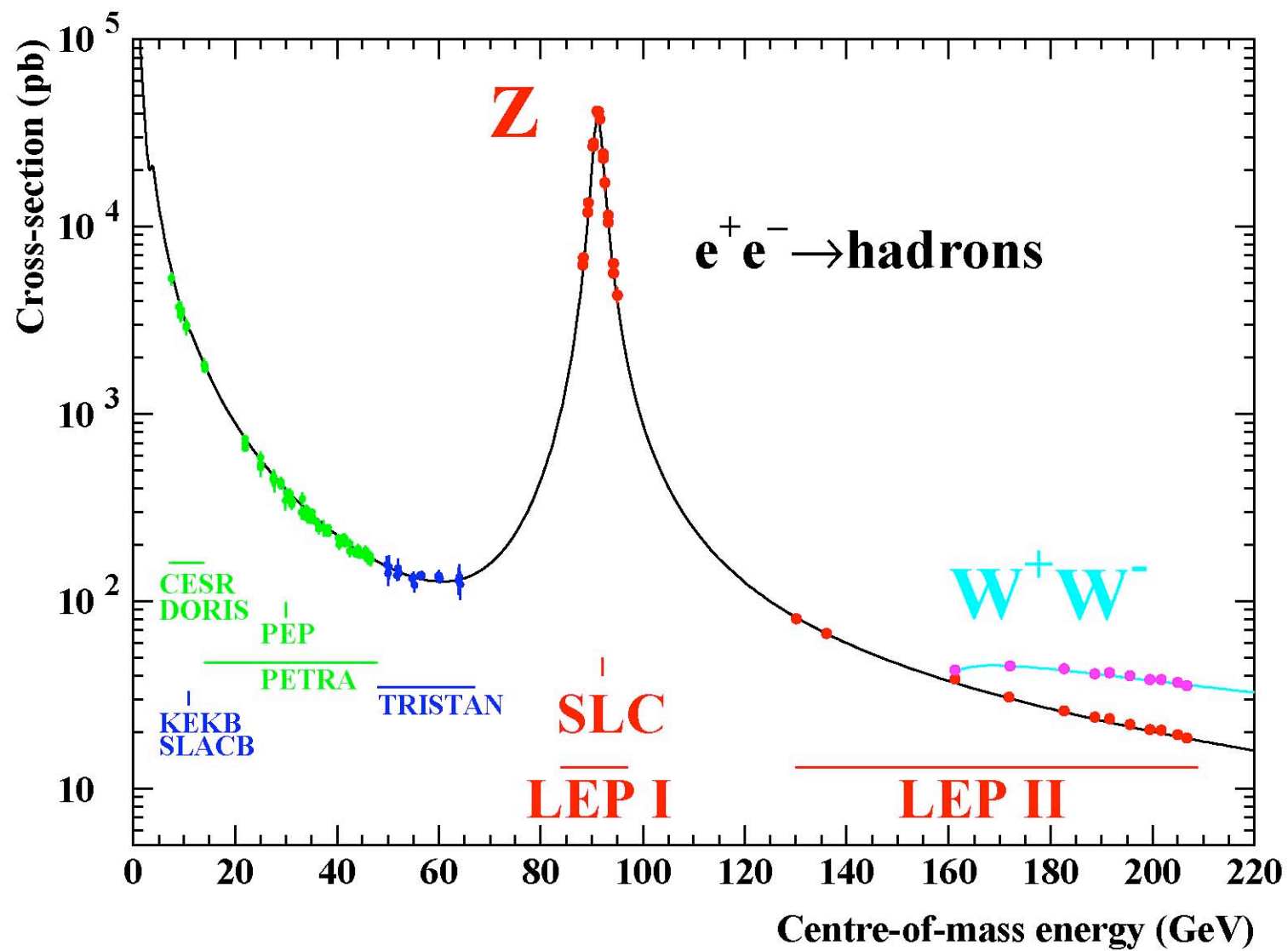
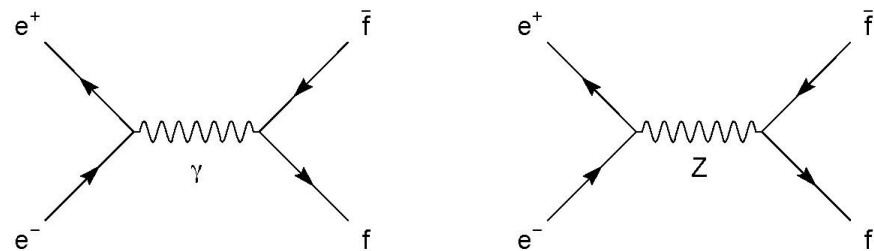


円周およそ 27km、地下約 100m

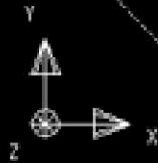
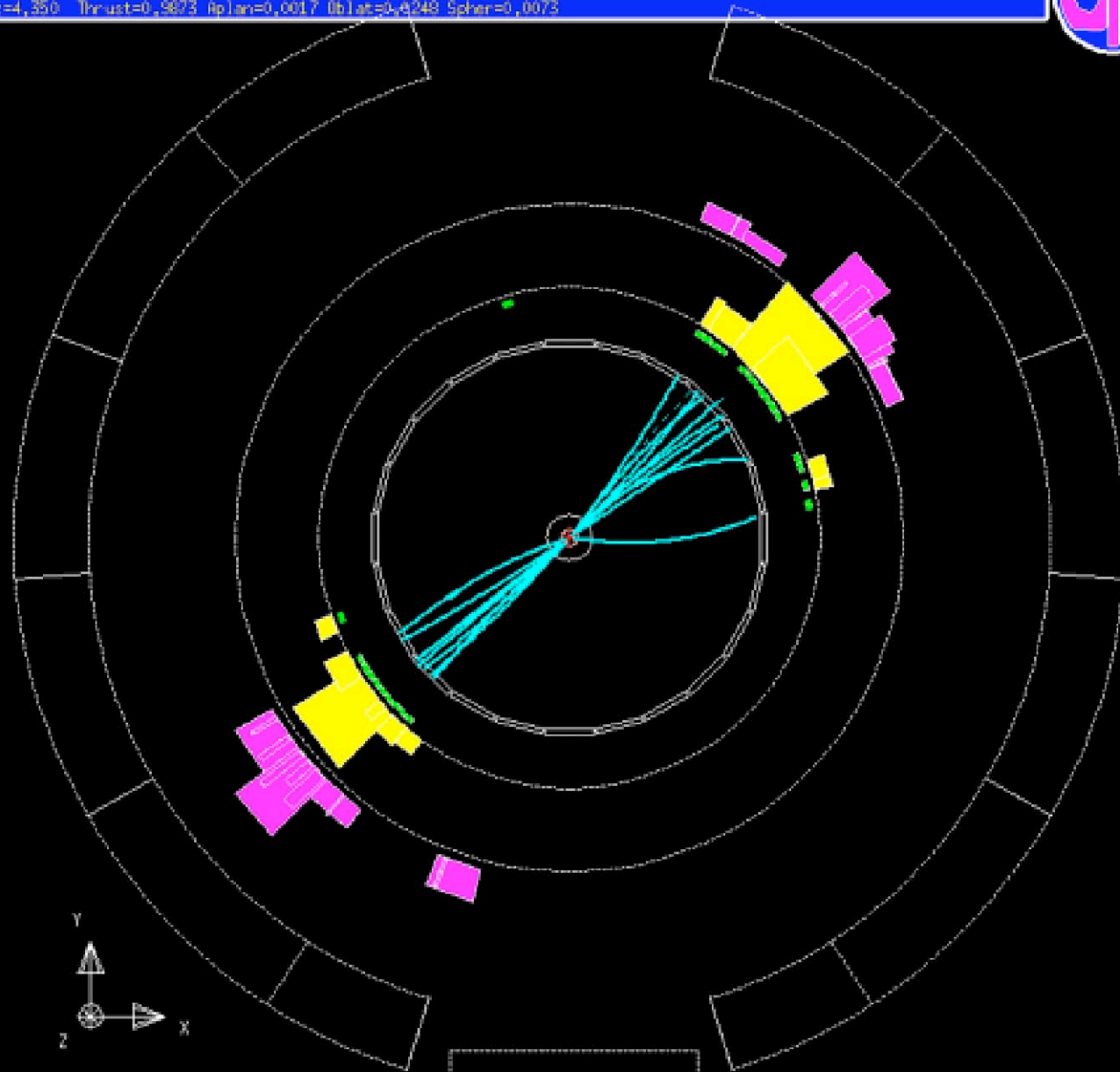


OPAL





Run: event 4093: 1000 Date 93/0527 Time 20716 Ctrk(N= 39 Sum= 73.3) Ecal(N= 25 SumE= 32.6) Hcal(N=22 SumE= 22.6)
Ebeam 45.658 Evis 99.9 Emiss -8.6 Vtx (-0.07, 0.06, -0.80) Muon(N= 0) Sec Vtx(N= 3) Fdet(N= 0 SumE= 0.0)
Bz=4.350 Thrust=0.9873 Aplan=0.0017 Oblate=0.4248 Spher=0.0073

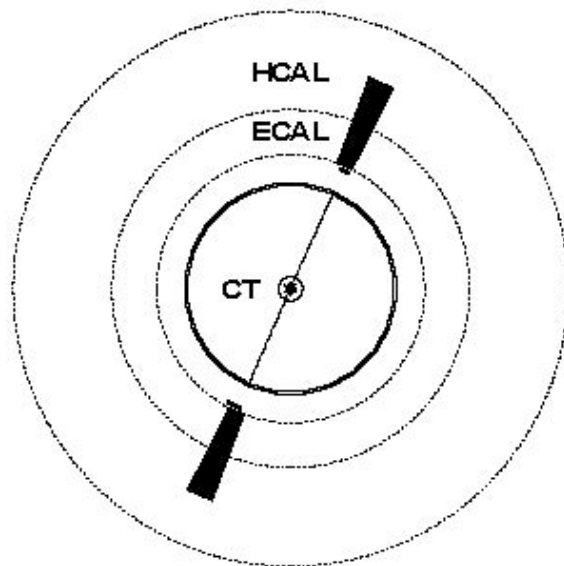


Centre of screen is (0,0000, 0,0000, 0,0000)

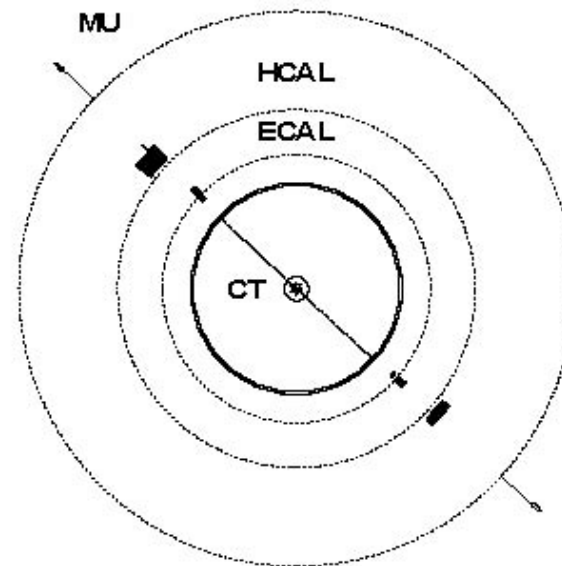
15/07/94 17:14:05 0281

OPAL:SEMO.FIG05T

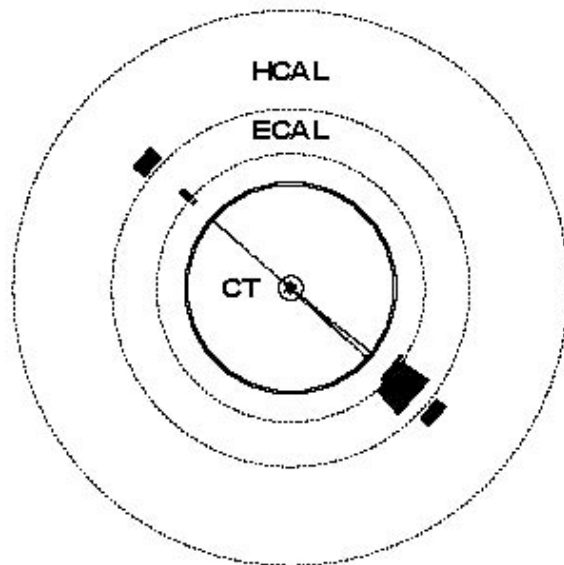
$$e^+e^- \rightarrow e^+e^-$$



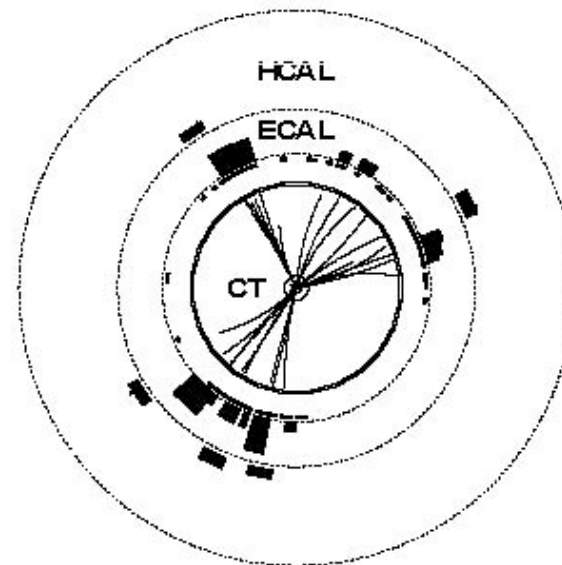
$$e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$$



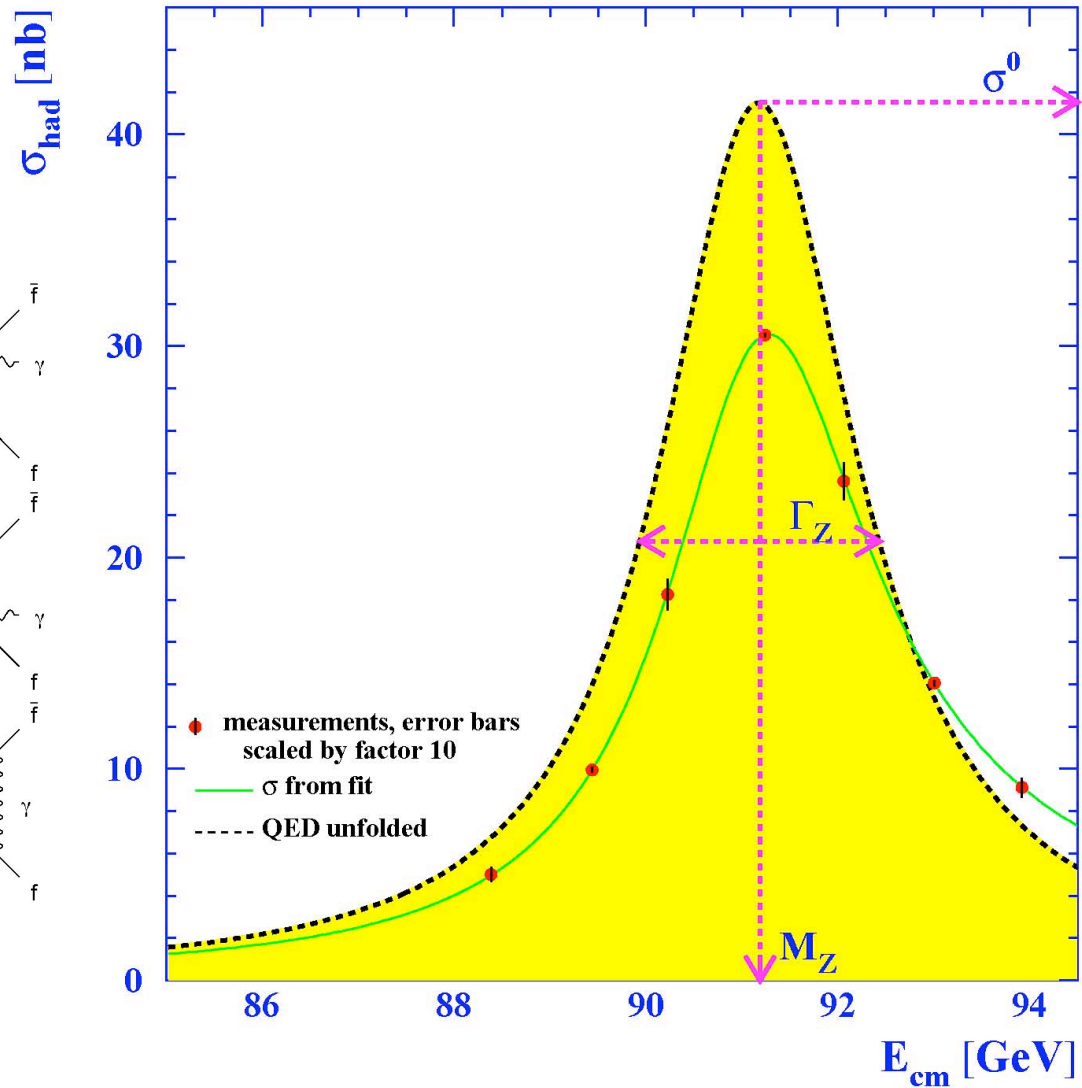
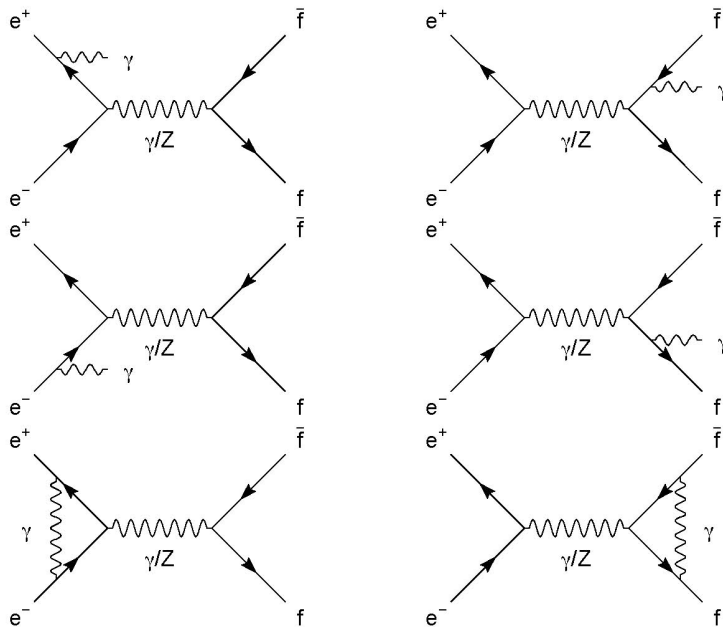
$$e^+e^- \rightarrow \tau^+\tau^-$$



$$e^+e^- \rightarrow q\bar{q}$$



まず、よく分かっている
QED補正を行う



$$\sigma(s) = \int_{4m_f^2/s}^1 dz H_{\text{QED}}^{\text{tot}}(z, s) \sigma_{\text{ew}}(zs).$$

質量の定義

$$\begin{aligned}
 \frac{2s}{\pi} \frac{1}{N_c^f} \frac{d\sigma_{ew}}{d\cos\theta} (e^+e^- \rightarrow f\bar{f}) = & \\
 & \underbrace{|\alpha(s)Q_f|^2 (1 + \cos^2\theta)}_{\sigma^\gamma} \\
 & \underbrace{-8\Re \left\{ \alpha^*(s)Q_f\chi(s) \left[\mathcal{G}_{Ve}\mathcal{G}_{Vf}(1 + \cos^2\theta) + 2\mathcal{G}_{Ae}\mathcal{G}_{Af}\cos\theta \right] \right\}}_{\gamma \text{ Z interference}} \\
 & \underbrace{+16|\chi(s)|^2 \left[(|\mathcal{G}_{Ve}|^2 + |\mathcal{G}_{Ae}|^2)(|\mathcal{G}_{Vf}|^2 + |\mathcal{G}_{Af}|^2)(1 + \cos^2\theta) \right.}_{\sigma^Z} \\
 & \quad \left. + 8\Re \left\{ \mathcal{G}_{Ve}\mathcal{G}_{Ae}^* \right\} \Re \left\{ \mathcal{G}_{Vf}\mathcal{G}_{Af}^* \right\} \cos\theta \right]}
 \end{aligned}$$

with:

$$\chi(s) = \frac{G_F m_Z^2}{8\pi\sqrt{2}} \frac{s}{s - m_Z^2 + is\Gamma_Z/m_Z}, \quad \text{“Breit-Wigner” resonance}$$

cf. S-matrix definition: $\chi(s) \propto s/(s - \bar{m}_Z^2 + i\bar{m}_Z\bar{\Gamma}_Z)$ $\bar{m}_Z = m_Z/\sqrt{1 + \Gamma_Z^2/m_Z^2}$

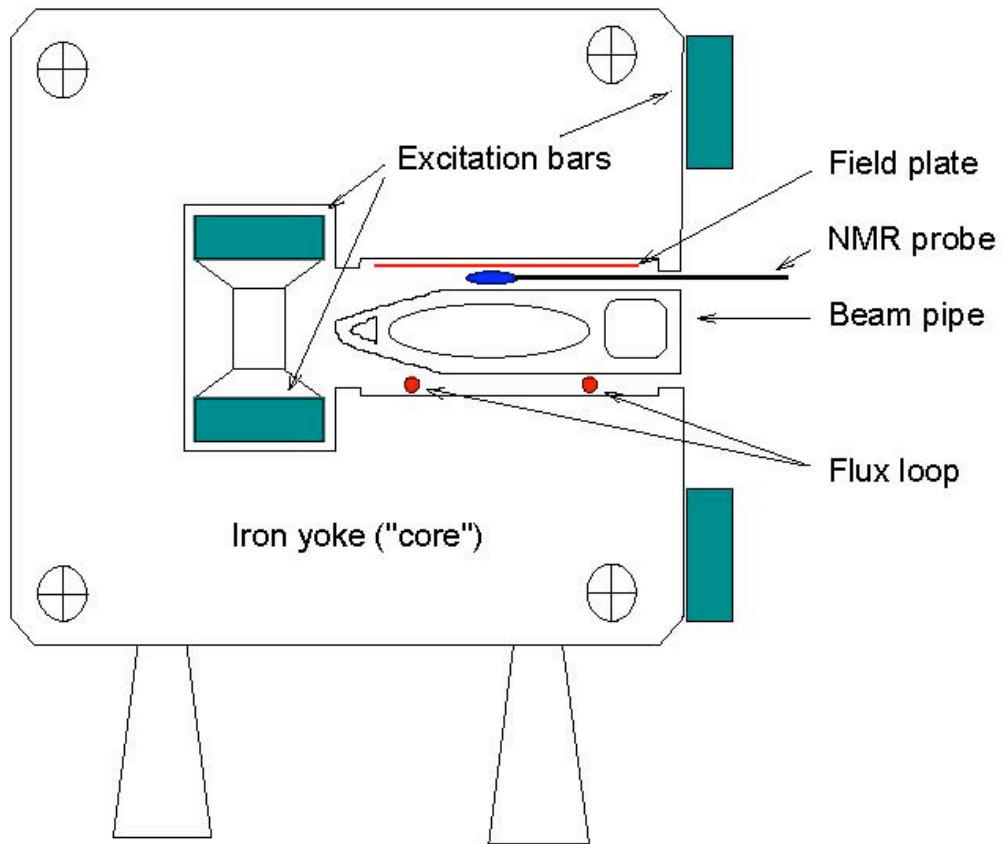
断面積 = (事象の数) ÷ (ルミノシティ)

$$\Delta m_Z \approx 0.5 \Delta(E_{P+2} + E_{P-2})$$

$$\Delta \Gamma_Z \approx \frac{\Gamma_Z}{(E_{P+2} - E_{P-2})} \Delta(E_{P+2} - E_{P-2}) = 0.71 \Delta(E_{P+2} - E_{P-2})$$

ビームエネルギーを正確に知るのが最重要

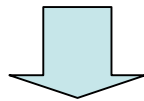
電子が感じる
磁場の積分値が
ビームエネルギーとなる



Depolarization Resonance Measurement

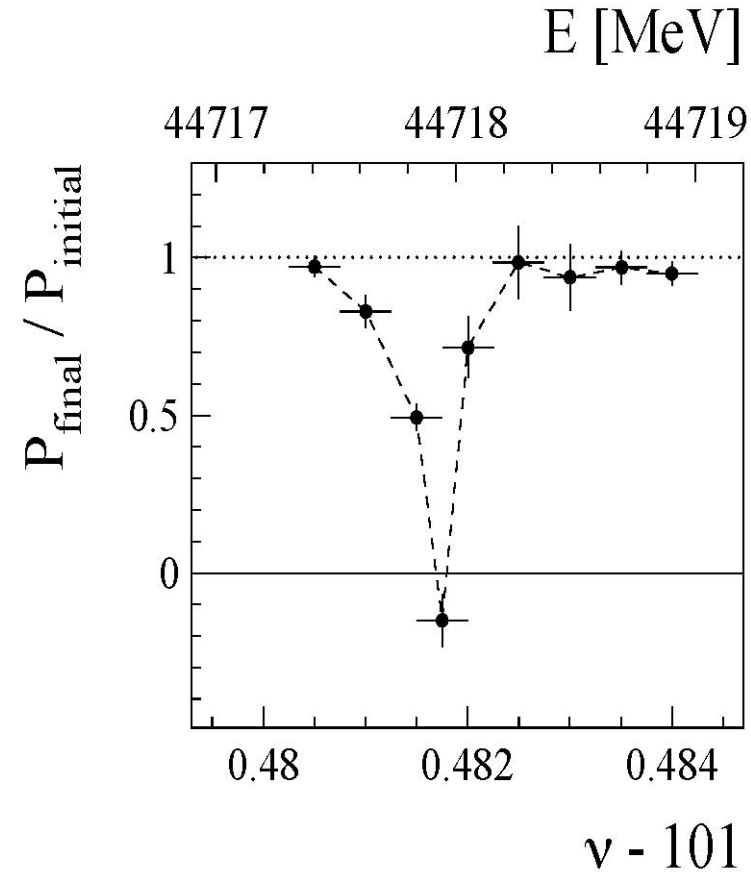
電子が上下方向に偏極

スピンの歳差運動の周期を求める



電子の見る磁場の積分値
= 電子の持つエネルギー

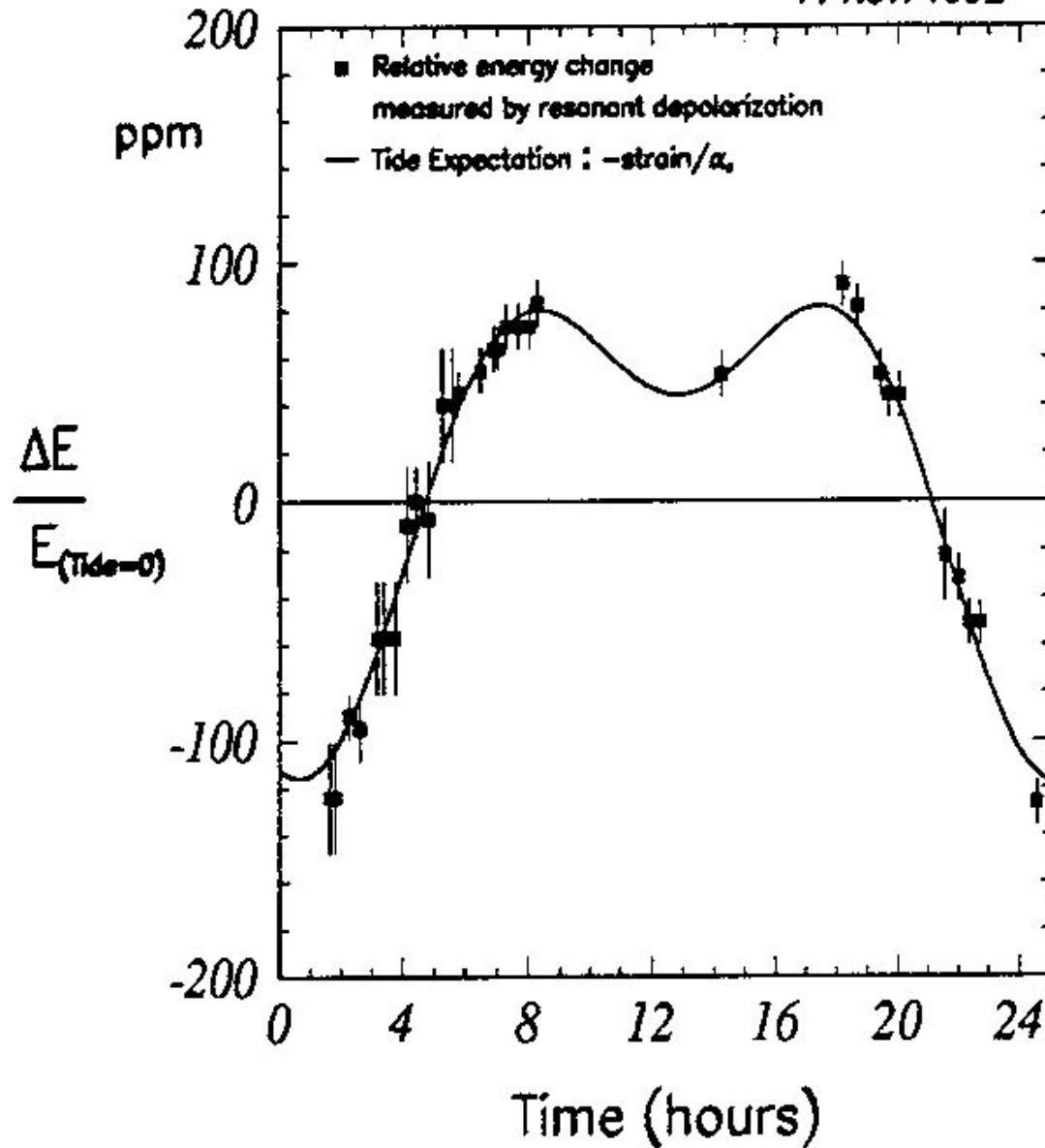
$$\begin{aligned} E_b &= \frac{\nu_s \cdot m_e c^2}{(g_e - 2)/2} \\ &= \nu_s \cdot 440.6486(1) [\text{MeV}] \end{aligned}$$



~0.2MeVの精度

LEP TidExperiment

11 Nov. 1992

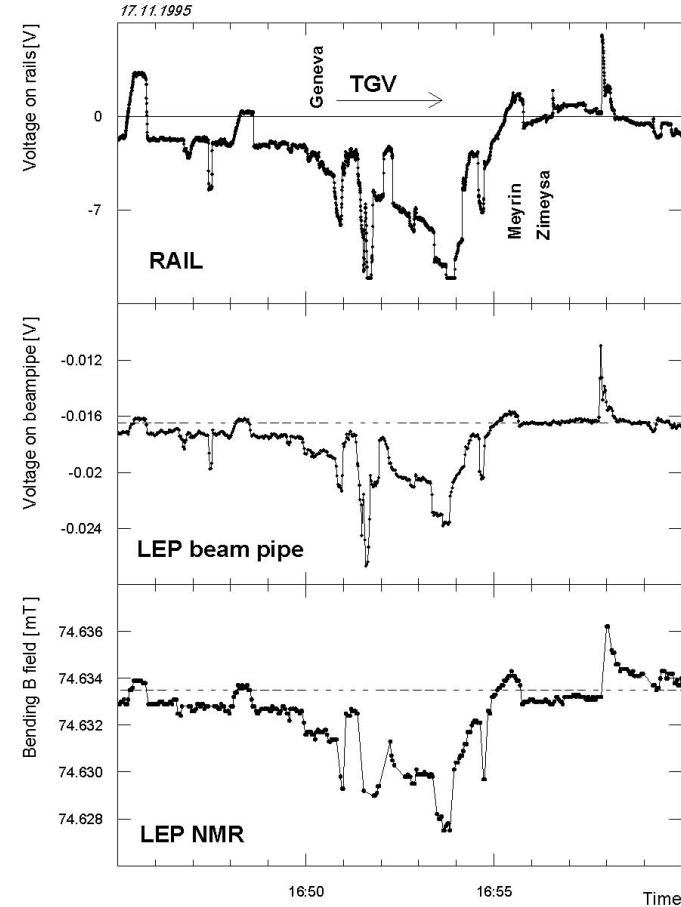
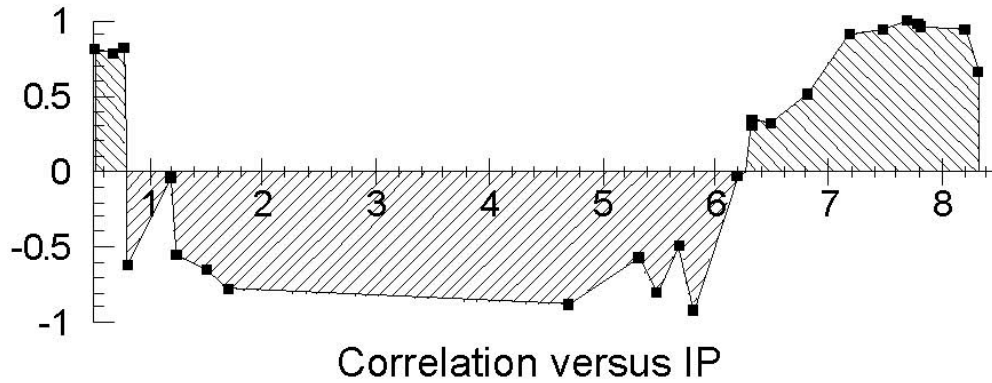
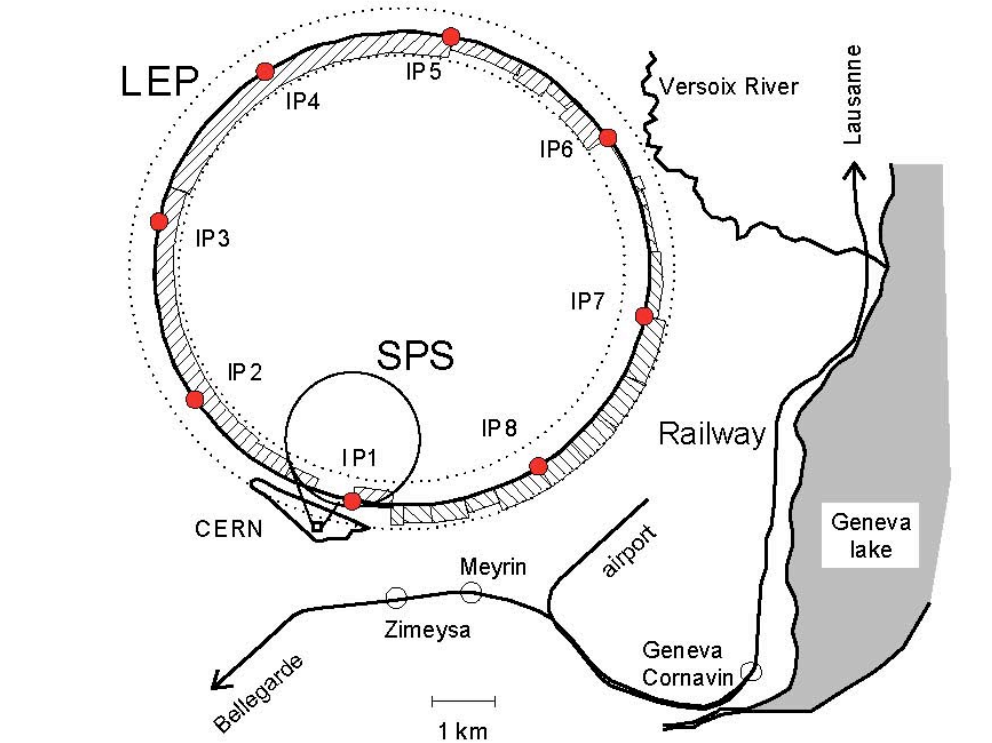


加速器で潮の満ち干き
が分かる！

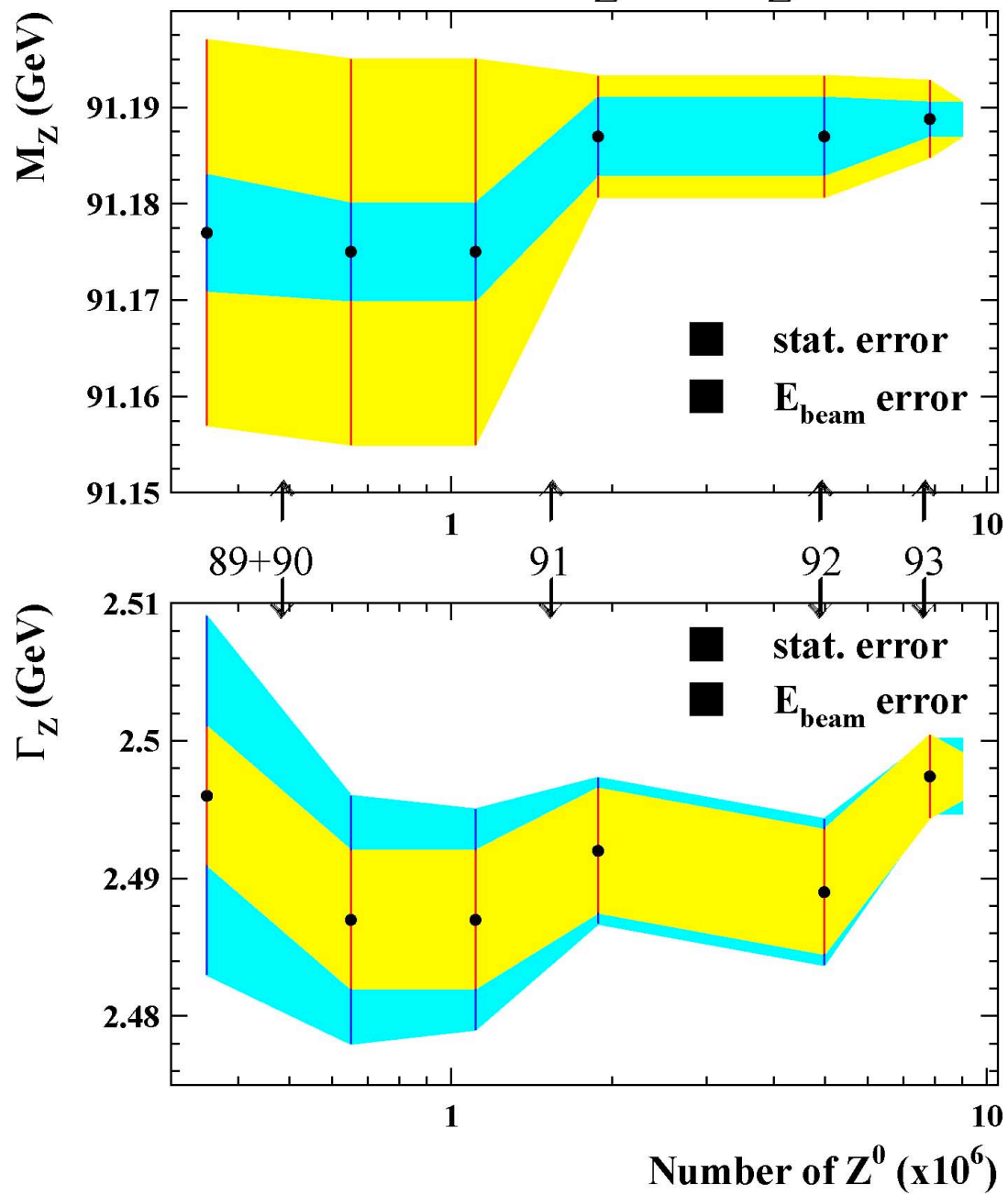
月による潮汐力に
よって周長が $20\mu\text{m}$
ほど変わることにより
ビームエネルギーが変わる

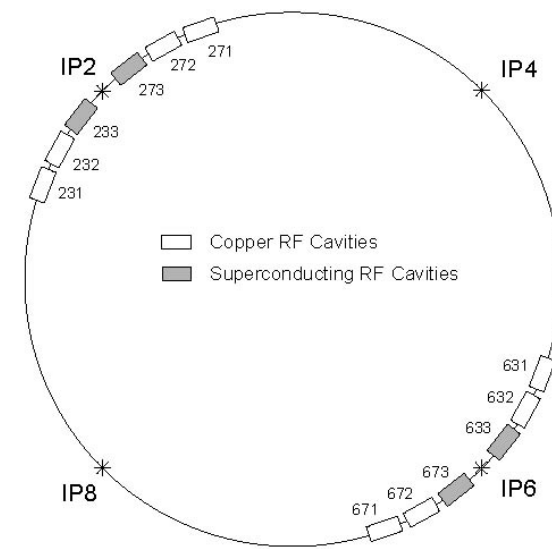
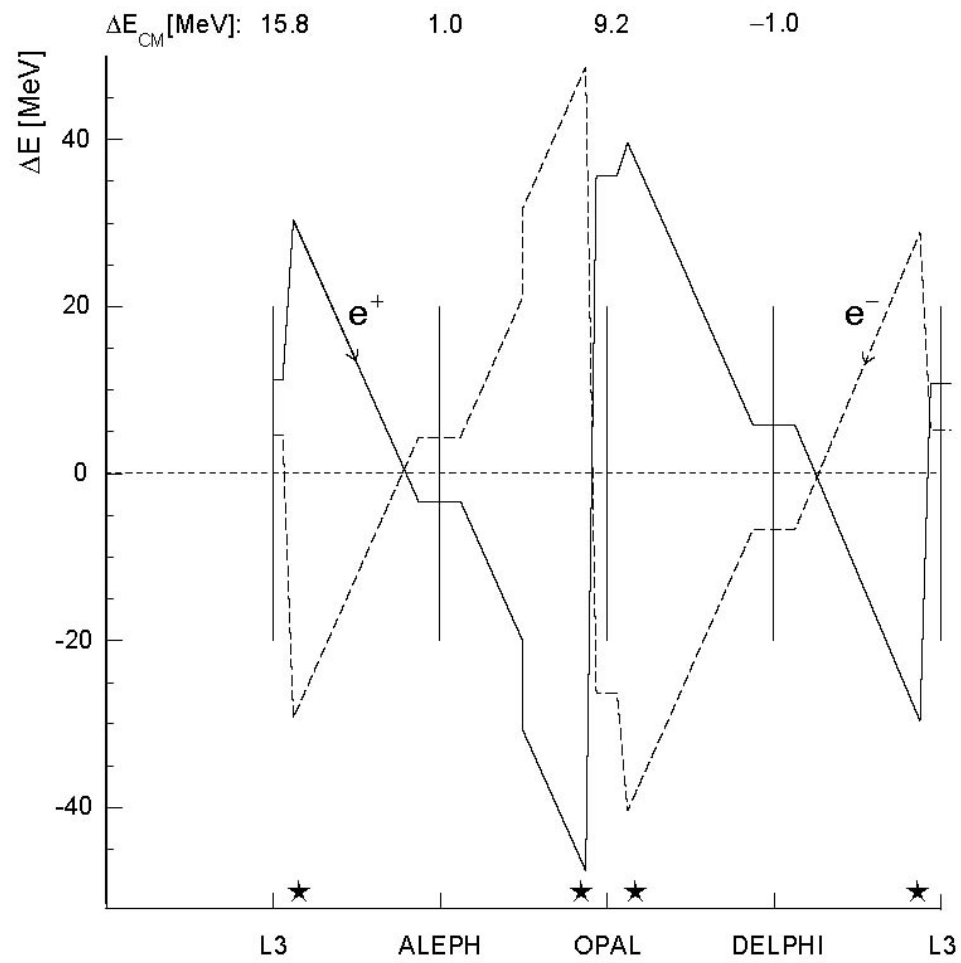
新幹線が走るのも分かる！

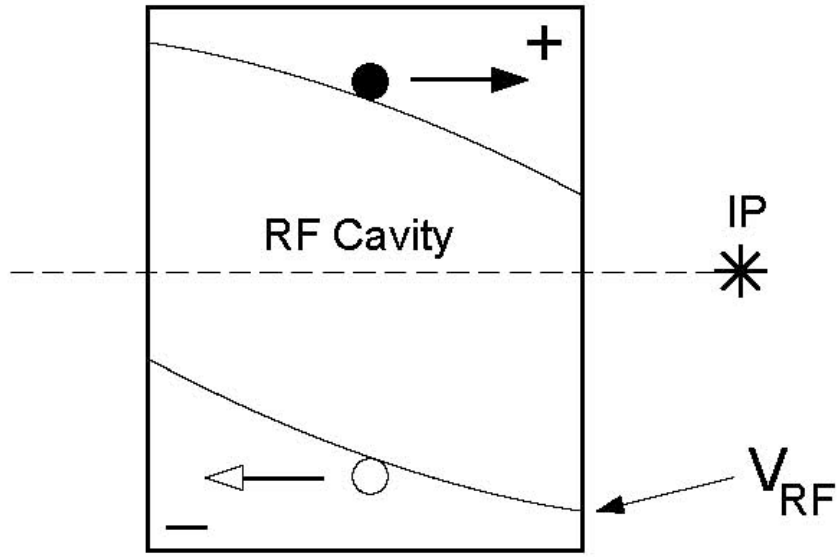
TGV(仏新幹線)効果



History of M_Z and Γ_Z

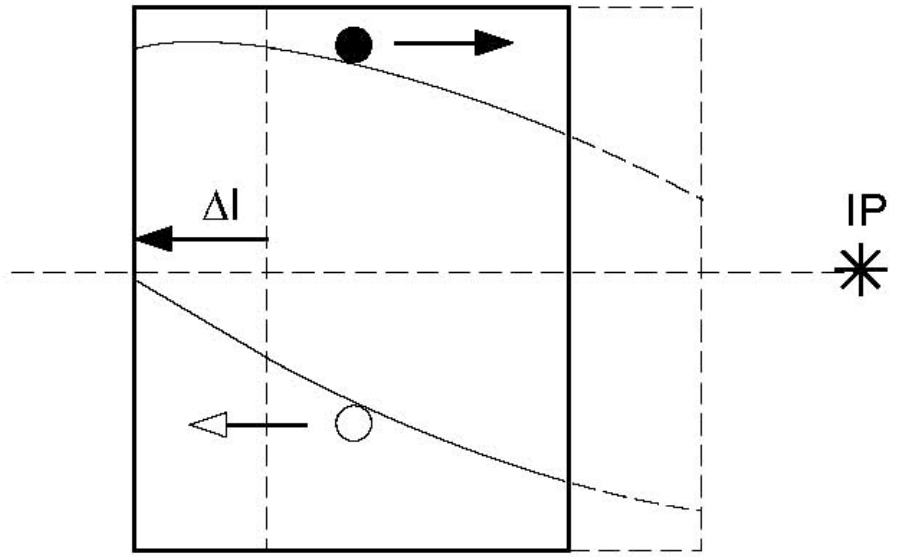






Correct alignment

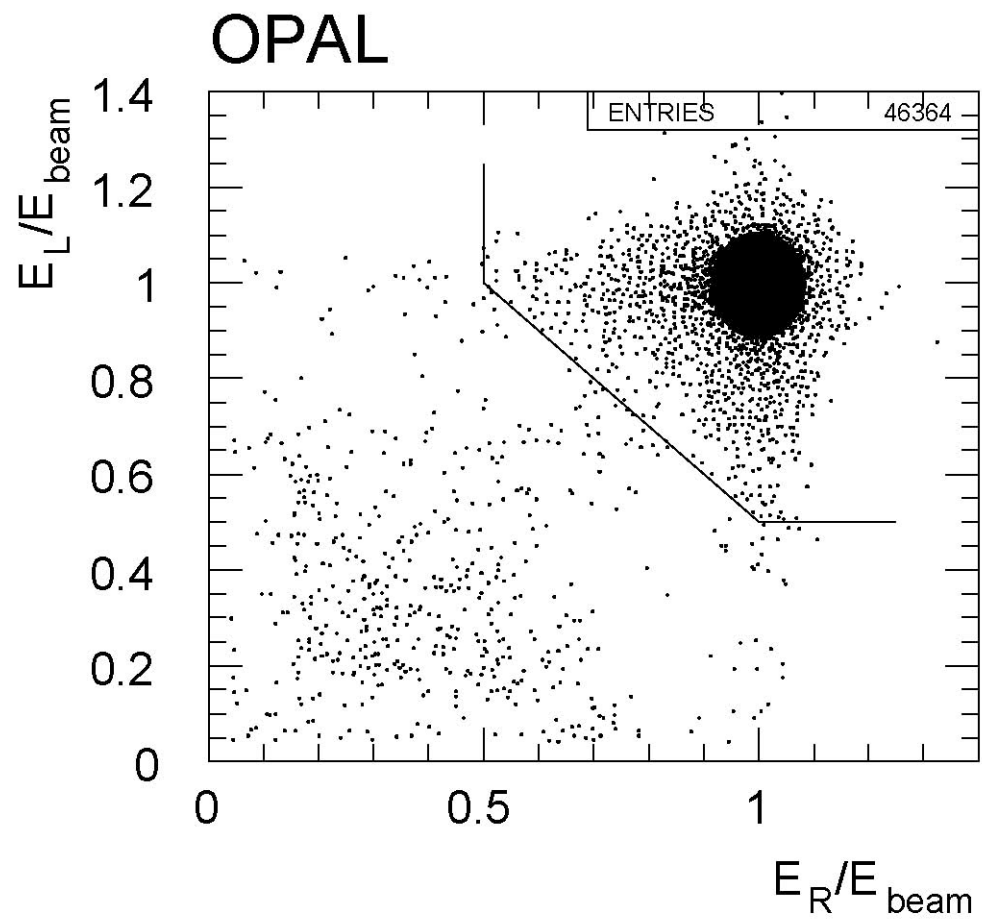
$$E_{\text{gain}}^+ = E_{\text{gain}}^-$$



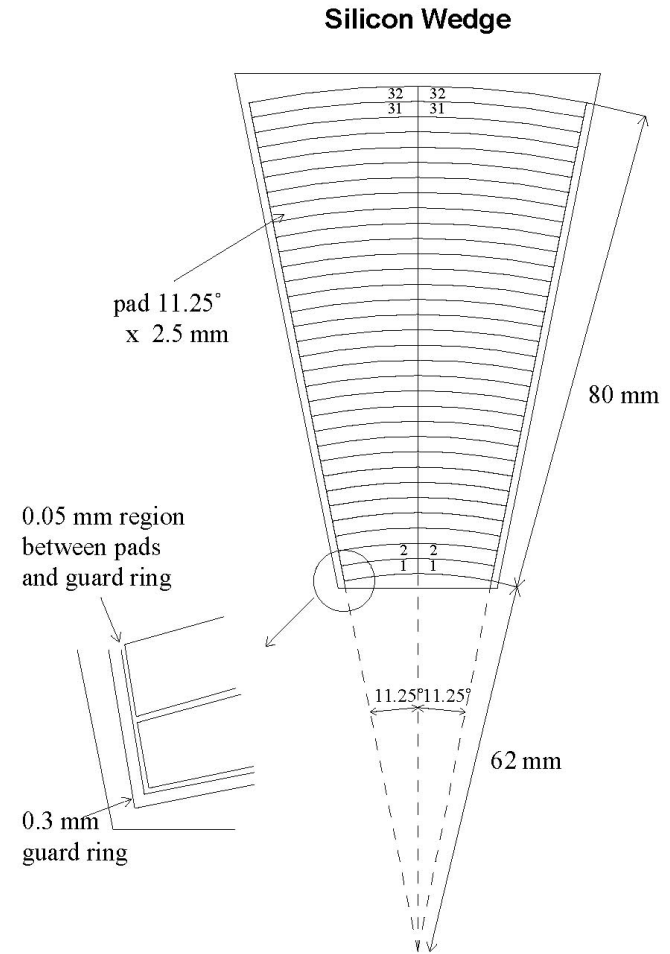
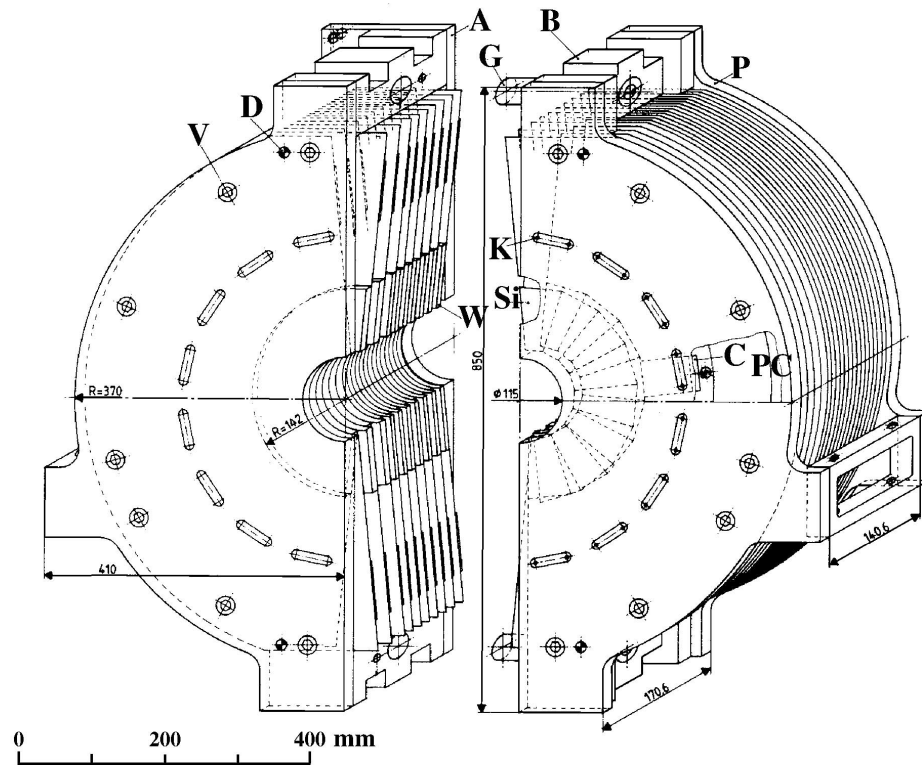
misalignment

$$E_{\text{gain}}^+ > E_{\text{gain}}^-$$

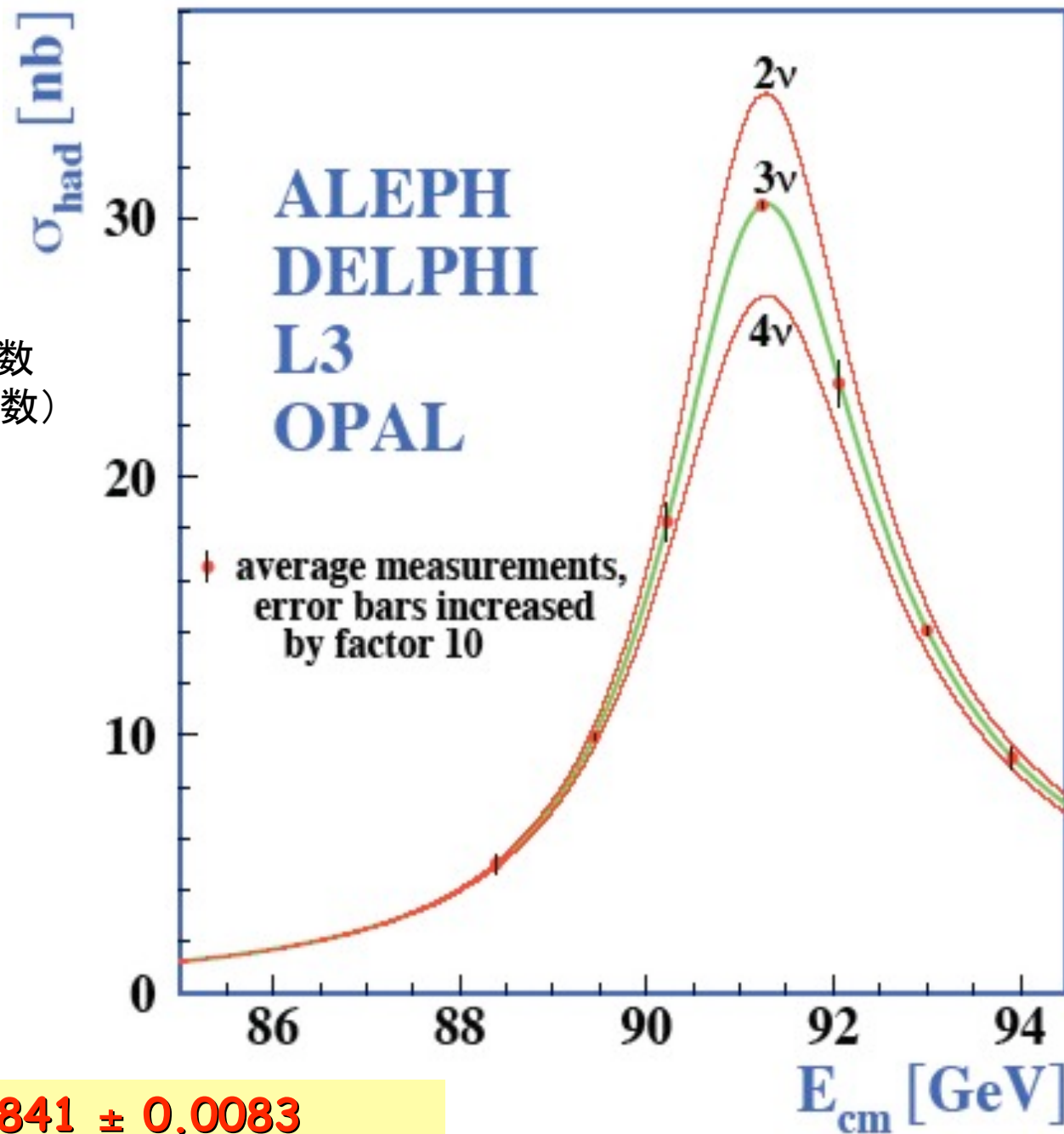
超前方のBhabha事象(ほぼQEDに支配)を用いて
ルミノシティ(ビーム衝突頻度)を測定



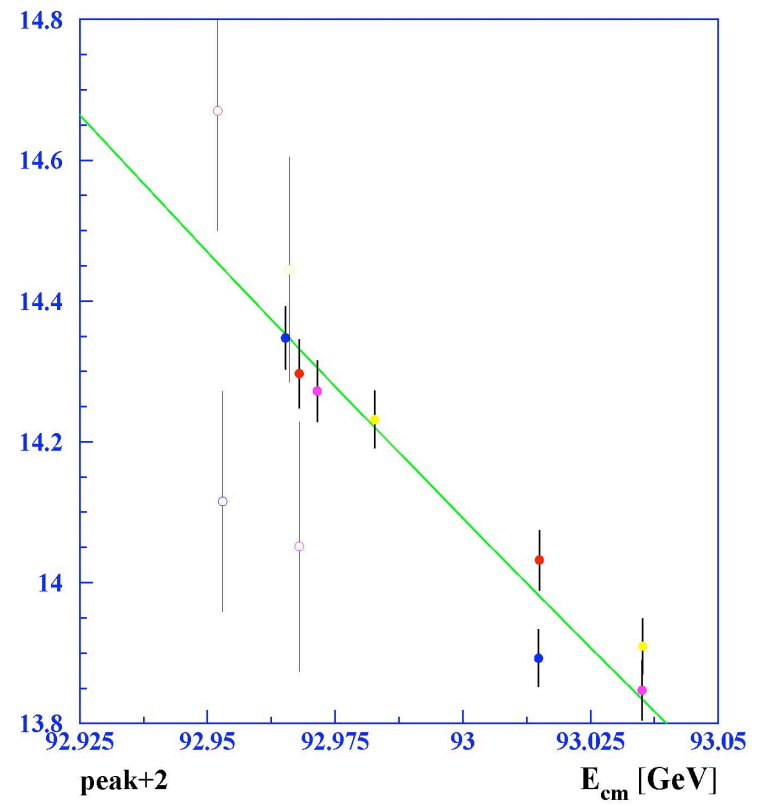
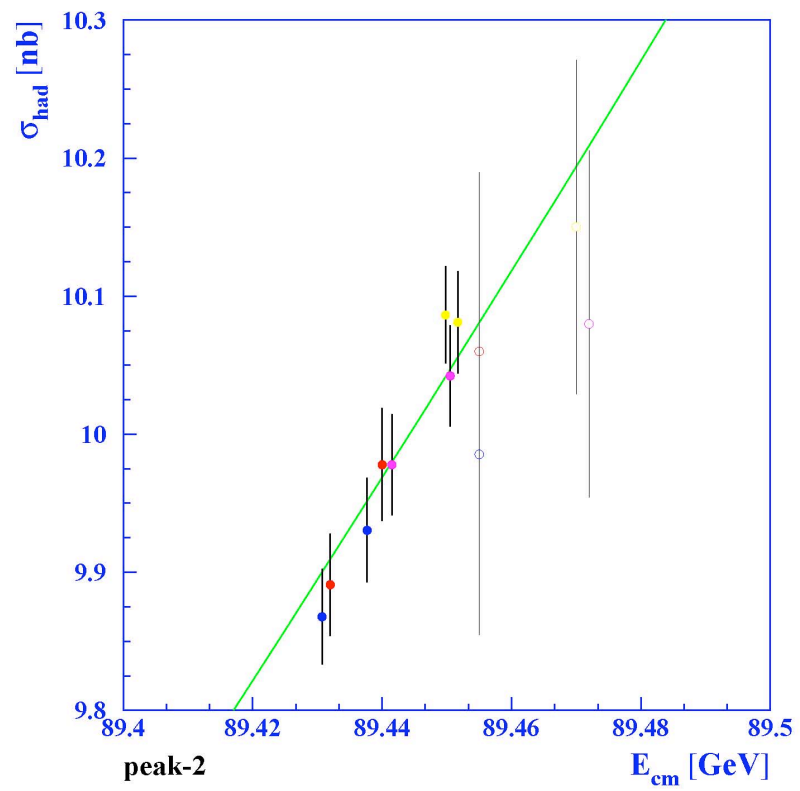
衝突点より 2m 離れた地点で
25 μ m の精度が必要

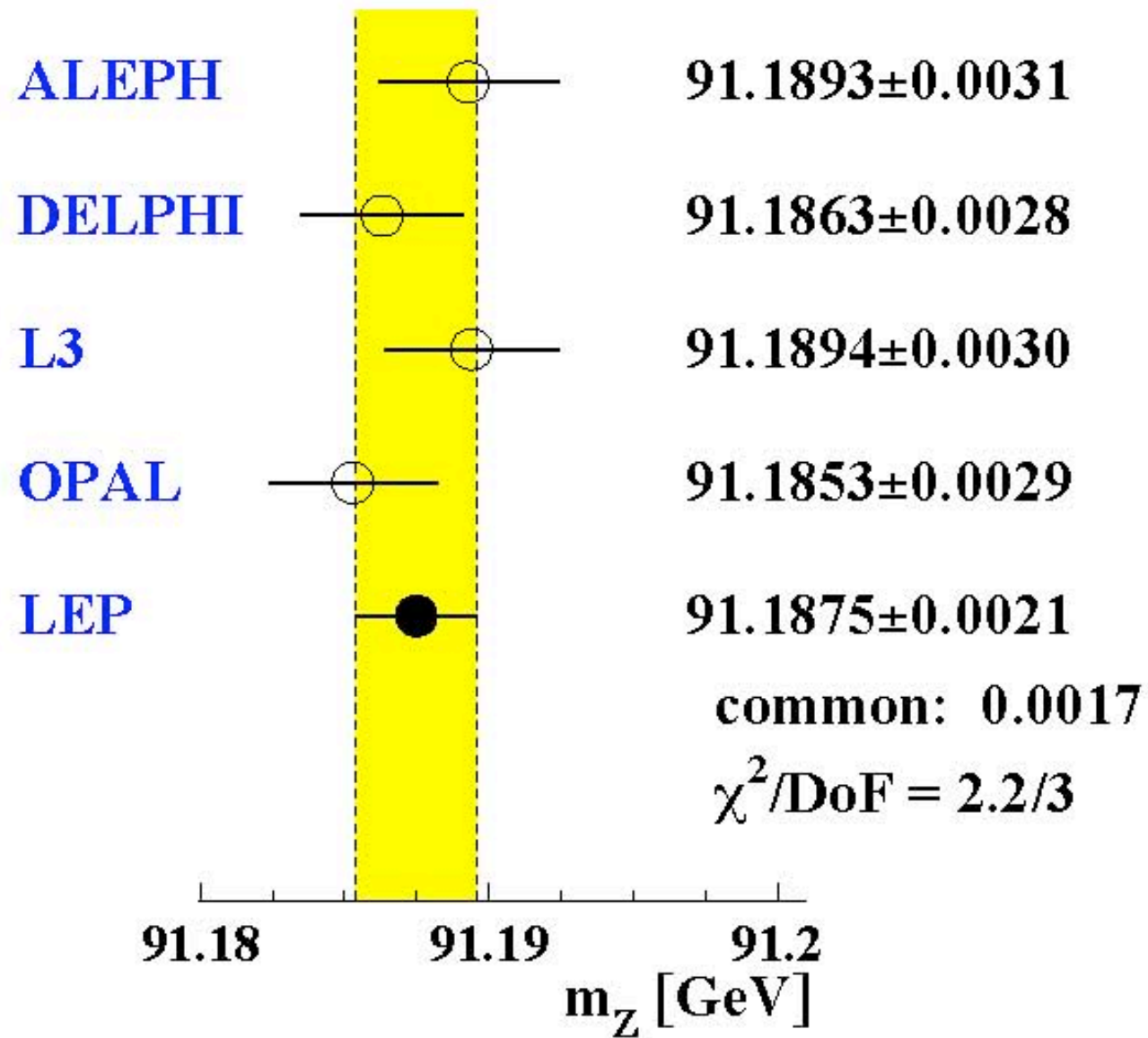


ニュートリノの数
(素粒子の世代数)
を決定



$$N_{\nu} = 2.9841 \pm 0.0083$$





Preliminary

素粒子の標準モデル の検証

高校の教科書に
載せられる程度に
確立



まとめ

- ・素粒子の標準モデルは、輻射補正を含めて 10^{-3} の精度で確立
トッブクォーク質量、W質量のより正確な測定が課題
- ・ G_F はこの2年ほどで 10^{-6} まで精度が上がる可能性
- ・ M_Z などは今後当分精度が上がる見込みはない
- ・ヒッグス粒子は存在すれば、あと5年ほどで発見の見込み
(Z粒子の精密測定により分かった)
クォーク・レプトンの質量:湯川結合の測定

Winter . 2005 - LEP Preliminary

