

Measurement of the cross section of W-boson pair production at LEP

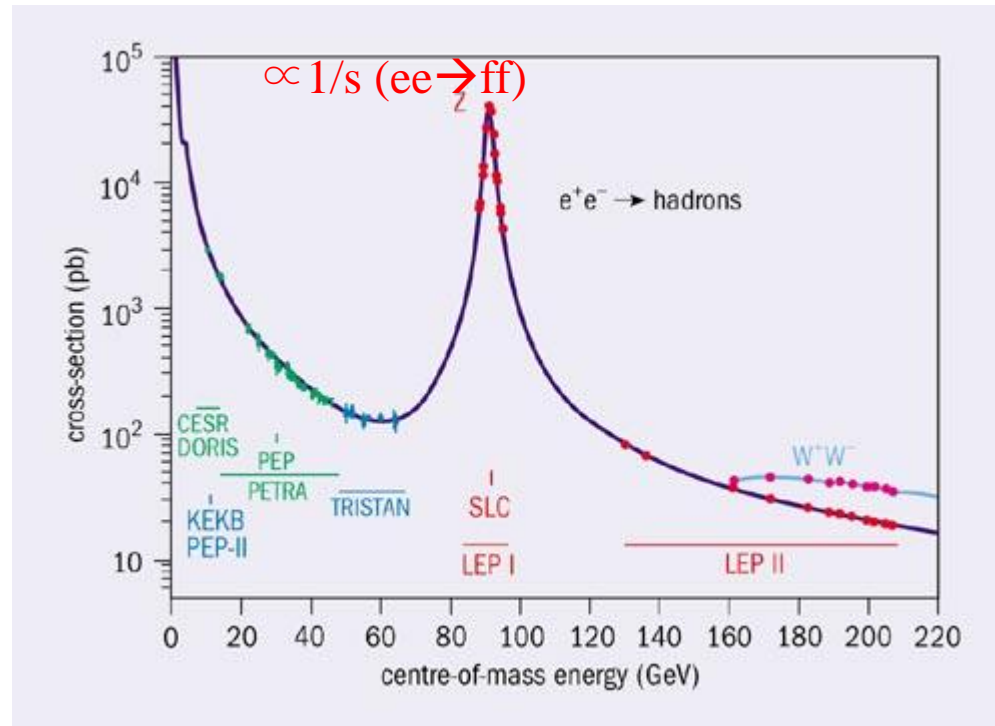
2011/05/27

D2 佐藤 優太郎

LEP

歴史的背景

- 1983年に**SPS**(Super Proton Synchrotron) @CERN でW, Zを発見。
- W, Zの精密測定 → **LEP**(Large Electron-Positron Collider)



- **LEP1**(1989-1995) : **Z physics** (18,000,000 million Z bosons?)
 - **LEP2**(1996-2000) : **W physics** (80,000 W pair?)
- 12年間の運転を終えて、現在は**LHC**(Large Hadron Collider)に!

Four Detector of LEP

ALEPH (Apparatus for LEP PHysics at CERN)

DELPHI (DEtector with Lepton, Photon and Hadron Identification)

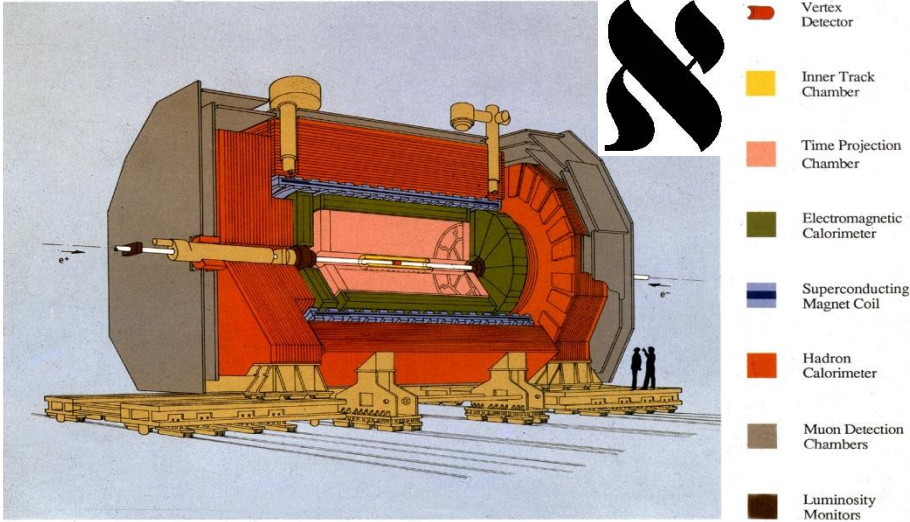
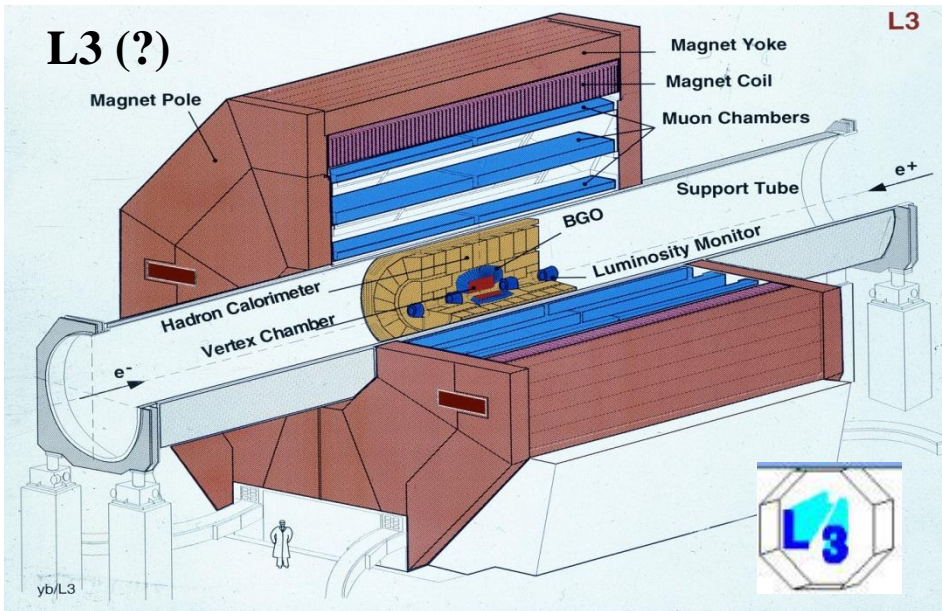
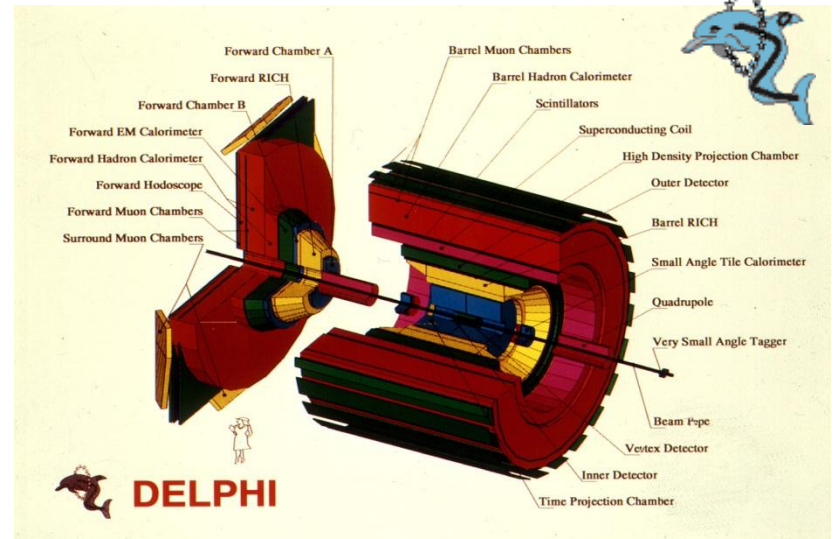
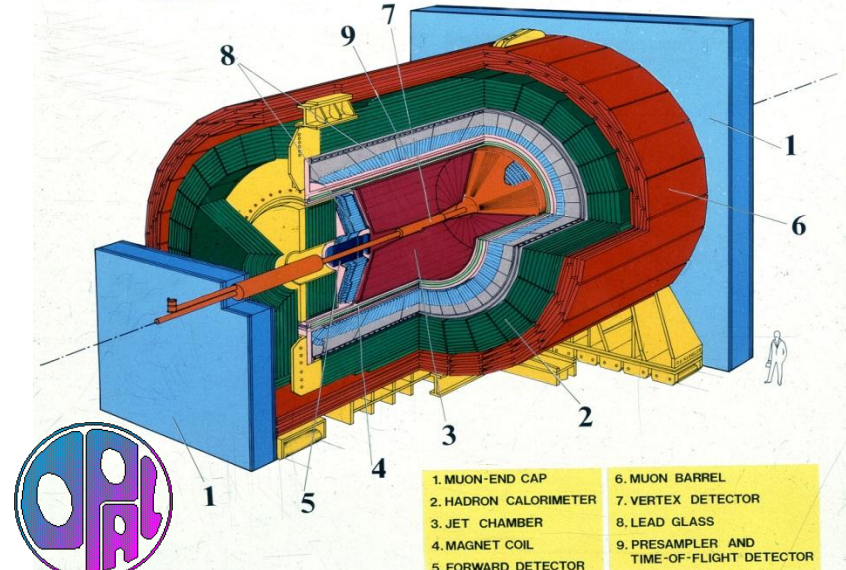


Fig. 1 - The ALEPH Detector

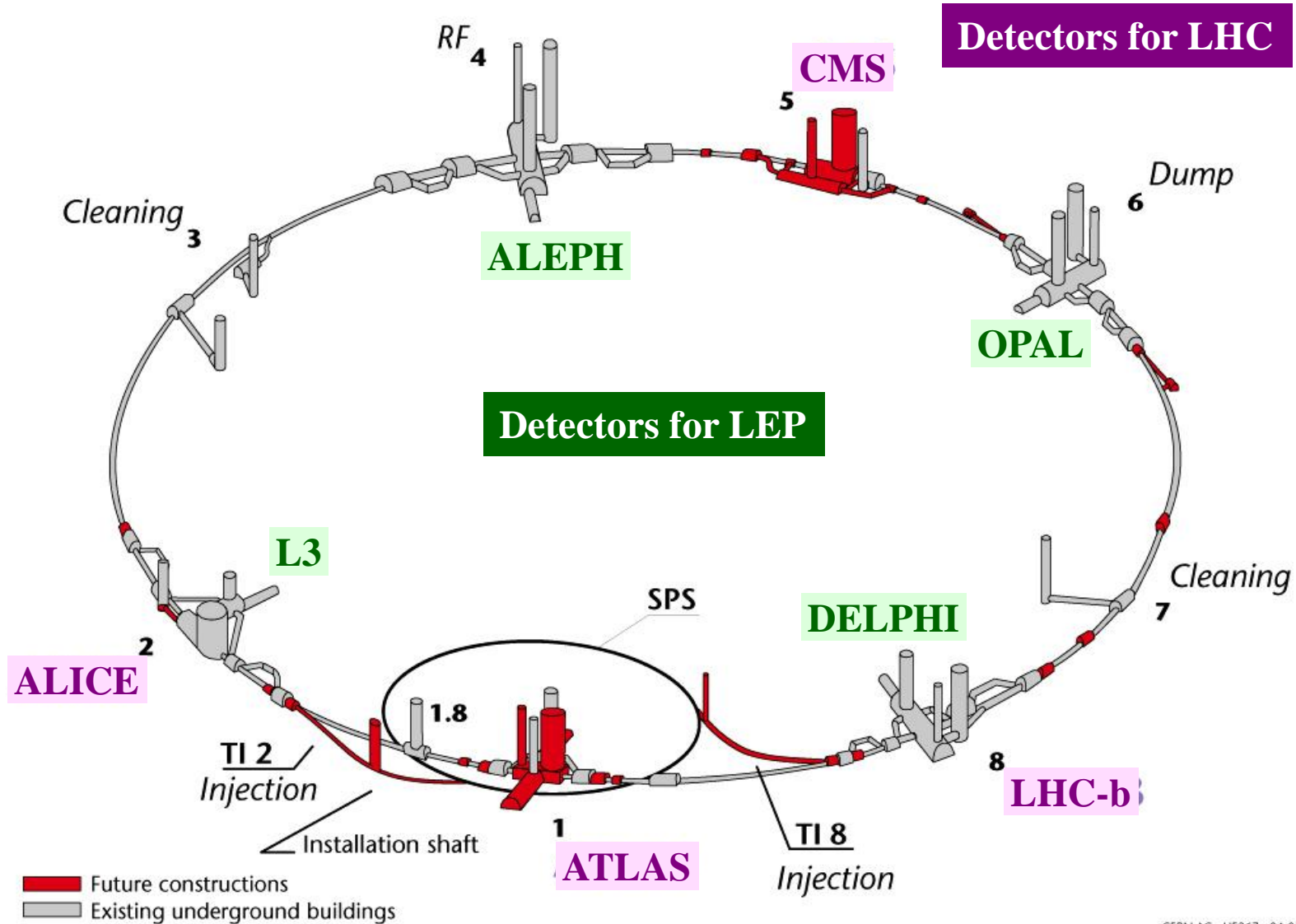


OPAL (Omni-Purpose Apparatus for LEP)



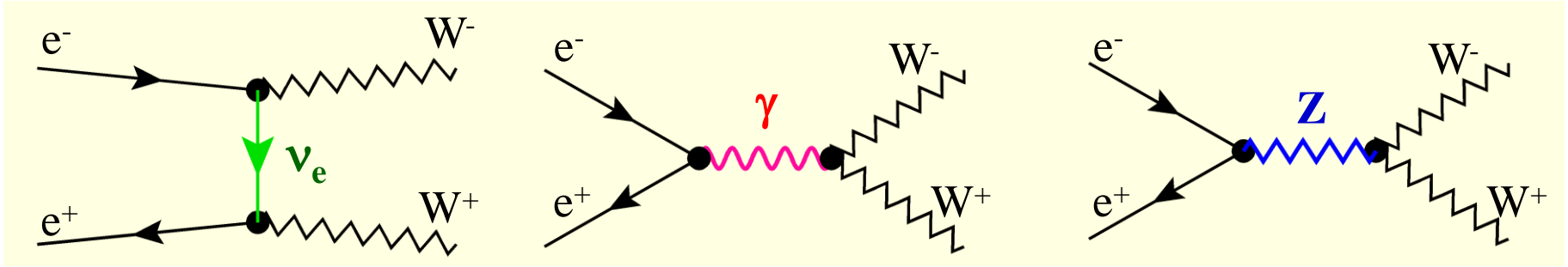
LEP → LHC

Layout of the LEP tunnel including future LHC infrastructures.



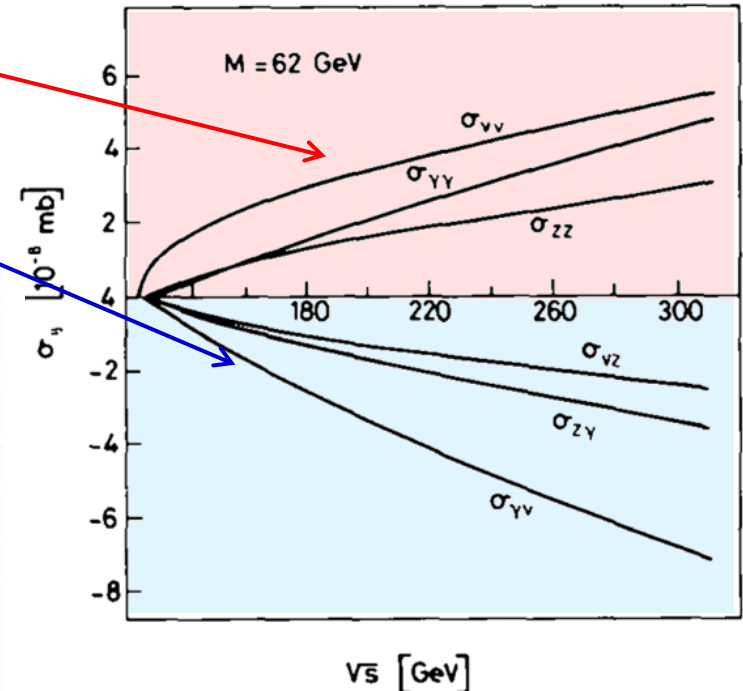
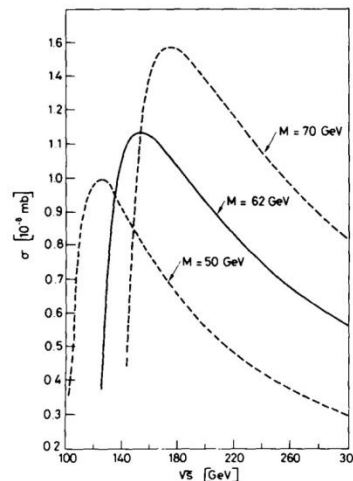
Motivation

- $ee \rightarrow WW$ のダイアグラムは3つ。



- ゲージボソンの3点結合はSU(2)ゲージの性質(非可換)から生じる
- それぞれのダイアグラムは \sqrt{s} で**発散**。
- それぞれのダイアグラムが**干渉**で、
発散しなくなる。

→ **ゲージキャンセレーション**



Data and MC

Data

- L3 で収集した全てのデータ(LEP2)を使用。
 - ルミノシティ：629.4 pb⁻¹
 - 重心系エネルギー：189-209 GeV
 - 重心系エネルギーの精度：±50 MeV

Table 1

Average centre-of-mass energies and integrated luminosities

$\langle\sqrt{s}\rangle$ [GeV]	188.6	191.6	195.5	199.6	201.8	204.8	206.5	208.0
\mathcal{L} [pb ⁻¹]	176.8	29.8	84.1	83.3	37.1	79.0	130.5	8.6

→ 9834 four-fermion events

Signal simulator

- **KandY** : Four-fermion generator KORALW with the O(α) correction
- **RacoonWW** : Used for the estimation of systematic uncertainties.

B.G. simulator

- **KK2f**, **PYTHIA**, **BHAGENE3** and **BHWIDE** for fermion-pair production($ee \rightarrow ff(\gamma)$)
- **TEEGG** for radiative $ee \rightarrow ee\gamma(\gamma)$ events
- **DIAG36** and **LEP4F** for two-photon collisions with lepton-pair final states
- **PHOJET** for two-photon collisions with hadronic final states.
- **PYTHIA** for quark fragmentation and hadronisation processes.
- **LUBOEI BE₃₂ model** : Bose-Einstein correlations between hadrons from W decays

Detector simulation

- The response of the L3 detector is modelled with the **GEANT** detector simulation program.
- Hadronic showers are simulated with **GHEISHA** program

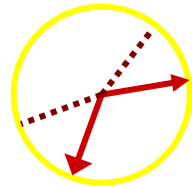
W decay

- W decay modes

W⁺ DECAY MODES	Fraction (Γ_i/Γ)	Confidence level	p (MeV/c)
$\ell^+ \nu$	[b] (10.80 ± 0.09) %		–
$e^+ \nu$	(10.75 ± 0.13) %		40199
$\mu^+ \nu$	(10.57 ± 0.15) %		40199
$\tau^+ \nu$	(11.25 ± 0.20) %		40179
hadrons	(67.60 ± 0.27) %		–

- W pair decay modes

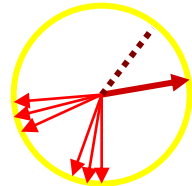
WW → lνlν



BR ~ 10%

(6 modes)

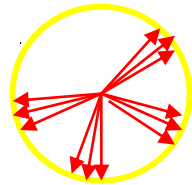
WW → qq̄lν



BR ~ 44%

(3 modes)

WW → qq̄qq̄



BR ~ 46%

(1 modes)

Four-fermion event election

- それぞれのモードの反応断面積の不定性を最小にするようにイベントを選択。
- ダブルカウントを防ぐために、相補的なカットをしている。

電子

- 電磁カロリメータ(BGO) 中のシャワー形状、Central tracking chamber のトラック

ミューオン

- ミューオンチェンバー
- カロリメータの信号でMIP を示す粒子

(ハドロニック) タウジェット

jet-clustering algorithm in a cone of 15° half opening angle

ニュートリノ

- ニュートリノの運動量= 欠損運動量 in qqlv events

クォークジェット

- Durham jet algorithm を用いて、再構成している。
- qqlv モードではレプトンの再構成に使われていない飛跡、クラスターから、ジェットを再構成

lvlv selection

- 2 個のレプトンと欠損エネルギー(ニュートリノ)を要求。
- IDされた電子・ミュオンの数で3つに分類される。
 1. Jet-jet class(e,mu が0)
 2. Lepton-jet class(e,mu が1)
 3. Lepton-lepton class(e,mu が2)
- Lepton-jet or jet-jet では最もエネルギーの高いジェットをtau とする(???)。

方向に関するカット

- e, μ , τ jet from hadronic tau decay direction : $|\cos\theta| < 0.96$ を要求
- 電子が2個IDされた時は、少なくとも1つのlepton が、 $|\cos\theta| < 0.92$ を要求
 - To suppress Bhabha scattering.
- Jet-jet class では、エネルギーの高い2つのジェットは $|\cos\theta| < 0.92$

極端に前方or後方に飛んだトラックは除外。

- Acoplanarity angle
 - > 8 degrees (lepton-lepton, lepton-jet)
 - > 14 degree (jet-jet)
 - To suppress lepton-pair production and cosmicray

レプトン・レプトンがback-to-back ではないことを要求

タイミングに関するカット

- Lepton はビーム衝突のタイミングでscintillator TOF に信号があることを要求。

lvlv selection(cont'd)

運動量・エネルギーに関するカット

- 横運動量が大きいことを要求。 $\sum |P_t| > 8\text{GeV}$
- レプトン・ジェットのエネルギーが大きいことを要求。
 - $E_{lepton1} > 25\text{GeV}, E_{lepton2} > 5\text{GeV}$ for lepton-lepton class
 - $E_{lepton} > 20\text{GeV}, E_{jet} > 8\text{GeV}$ for lepton-jet class
 - $E_{jet1} > 20\text{GeV}, E_{jet2} > 6\text{GeV}$ for jet-jet class

選択されたサンプル

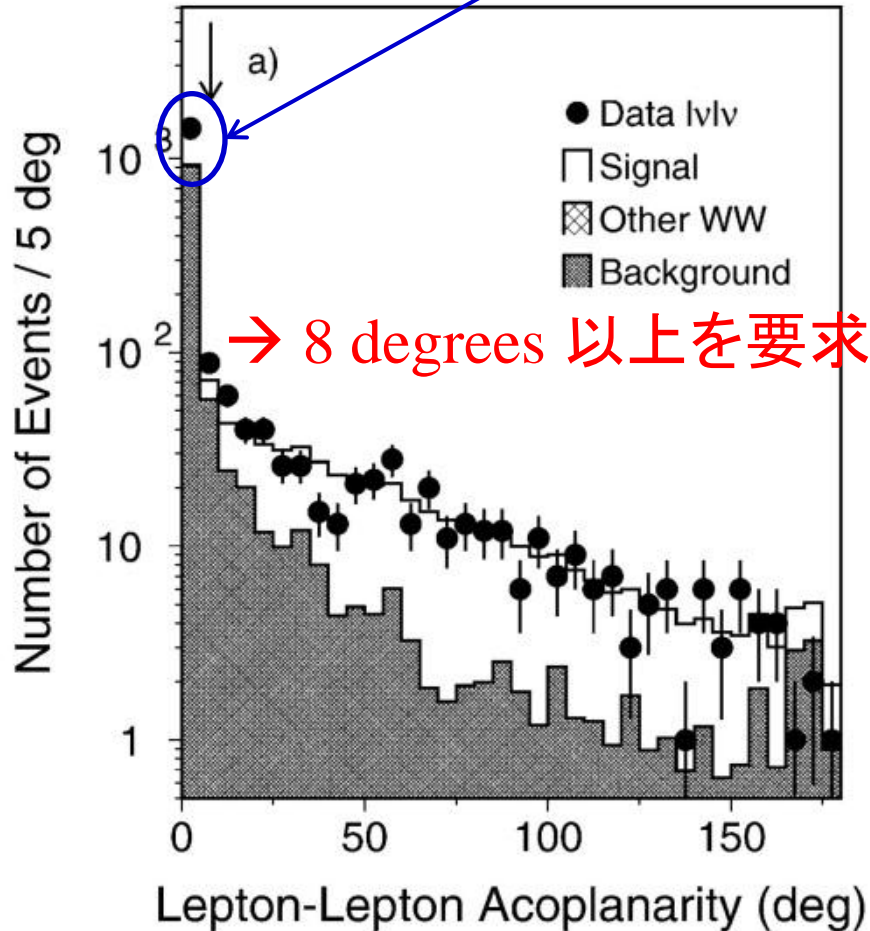
- Purity $\sim 72\%$ @ $\sqrt{s} = 206.5\text{ GeV}$
- 残っているB.G. は
 - Lepton production in two-photon collisions(50%)
 - Lepton-pair production(24%)

lvlv distribution

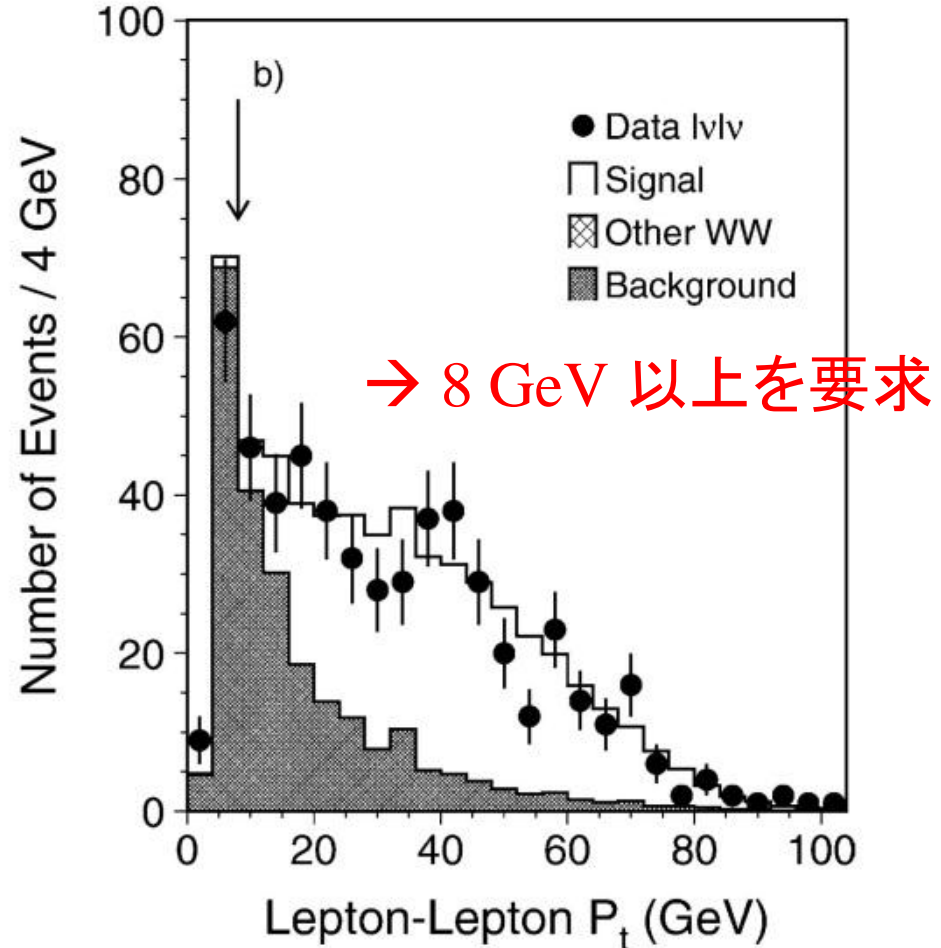
- Fig.2 (a),(b)

Excess is due to cosmic-ray B.G.

Acoplanarity angle(lepton-lepton)



Total transverse momentum



qqev selection

- 20 GeV 以上の電子とhigh particle-multiplicity と大きい欠損運動量を要求
- 再構成した質量

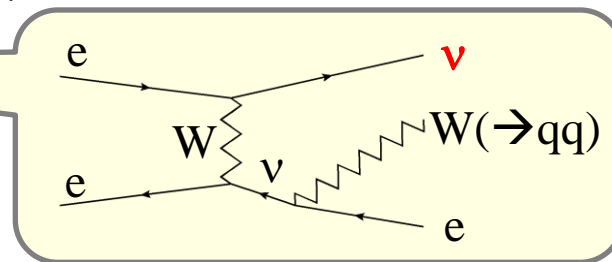
- $M_{jj} > 45 \text{ GeV}$
- $M_{ev} > 63 \text{ GeV}$ ($ee \rightarrow qq\tau\nu$ と区別)

方向に関するカット

- 欠損運動量の方向 : $|\cos\theta_{\text{mis}}| < 0.95$
- The directions of the electron and of the two jets are required to subtend a solid angle of less than $< 5.3\text{sr}$ (???????)

選択されたサンプル

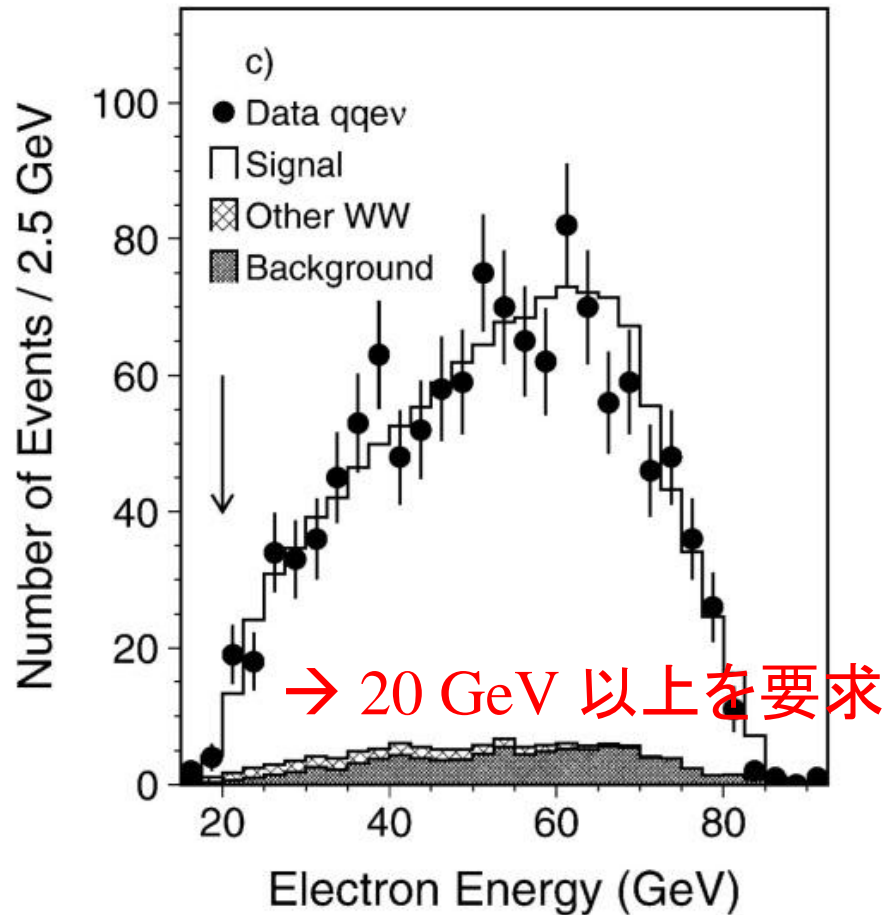
- Purity $\sim 98\%$ @ $\sqrt{s} = 206.5 \text{ GeV}$
- W-boson pair production 以外からのB.G.
 - $ee \rightarrow qqev$ (71%)
 - $ee \rightarrow qq(\gamma)$ (29%)



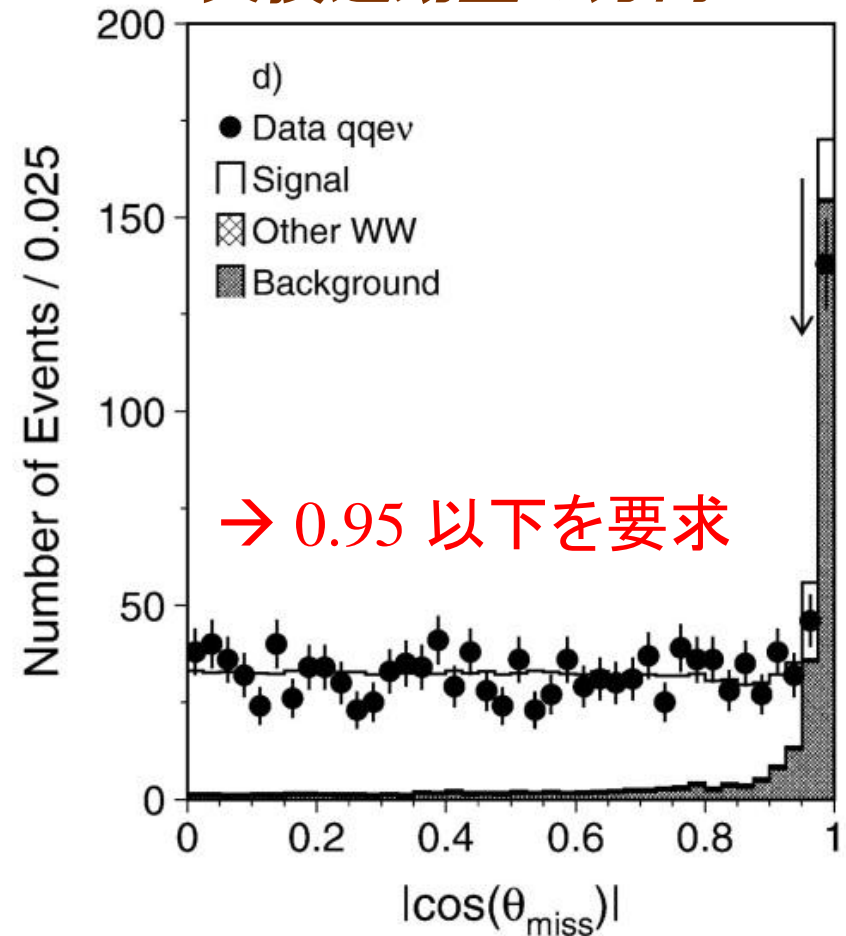
qqev distribution

- Fig2.(c),(d)

電子のエネルギー



欠損運動量の方向



qq $\mu\nu$ selection

- High particle-multiplicity とミューオン(もしくはMIPs) と大きい欠損運動量を要求。

再構成した質量

- 25 GeV < M_{jj} < 125 GeV for events with μ
- 50 GeV < M_{jj} < 98 GeV for events with MIPs.
- M _{$\mu\nu$} > 53 GeV (ee \rightarrow qq $\tau\nu$ と区別)

方向に関するカット

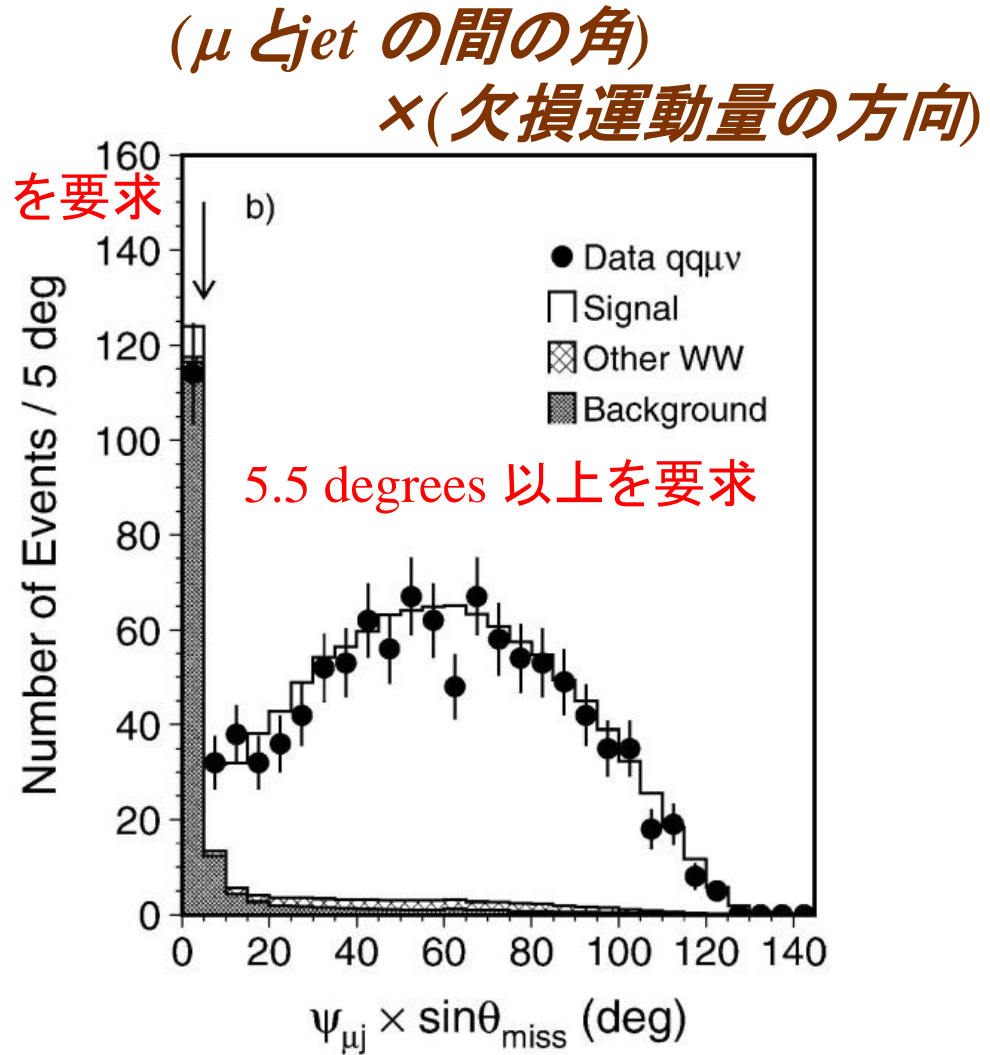
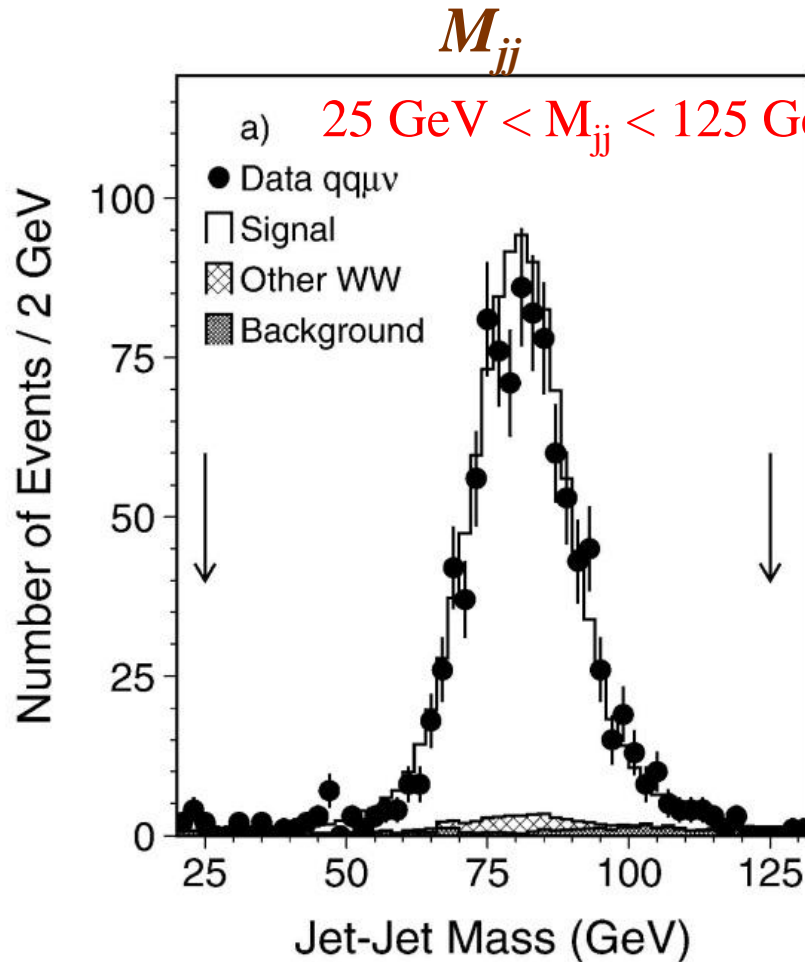
- ee \rightarrow qq $\tau\nu$ と区別するため、変数 $P^* = |p_\mu| - 10 \text{ GeV} (\cos\theta^* + 1)$ を使う。
 - θ^* はW の静止系での μ のdecay angle(???)
 - $P^* > 18.5 \text{ GeV}$ を要求(MIPs イベントの場合は、 $P^* > 15 \text{ GeV}$)
- ee \rightarrow qq(γ) と区別する。
 - $\psi_{\mu j} \times \sin\theta_{\text{mis}} > 5.5 \text{ degrees}$ (20 degrees for events with MIPs)
- W のrelativistic velocity > 0.34~0.49 (ee \rightarrow ZZ \rightarrow qq $\mu\mu$ と区別)

選択されたサンプル

- Purity = 98 % @ $\sqrt{s} = 206.5 \text{ GeV}$
- W boson pair production 以外からのB.G.
 - Z boson pair production (52%)
 - ee \rightarrow qq(γ) (31%)

qq $\mu\nu$ distribution

- Fig.3(a),(b)



qq τ v selection

- 孤立した低運動量の電子・ミュオンもしくは narrow jet in a hadronic environment と大きい欠損エネルギーを要求

運動量カット

- $P_t > 10 \text{ GeV}$

Jet

- $30 \text{ GeV} < M_{jj} < 110 \text{ GeV}$
- 2 ジェット(qq) の反跳質量 : $M_{\text{miss-jj}} > 35 \text{ GeV}$

Tau candidate

- 5 GeV 以上の電子・ミュオンがある場合は、 $M_{e\nu}$ と $M_{\mu\nu}$ によって(相補的に)選択
 - MIPs は tau candidate には、ならない。
- 電子・ミュオンが無い場合は、ニューラルネットワークを使って、tau-jet を探す。
 - Hadronic tau decay の特徴
 - Low multiplicity, small jet opening angle, low jet mass, high electromagnetic fraction of the jet energy
 - ニューラルネットワークの出力の一番高いものをタウとする。

qq $\tau\nu$ selection(cont'd)

Tau jet

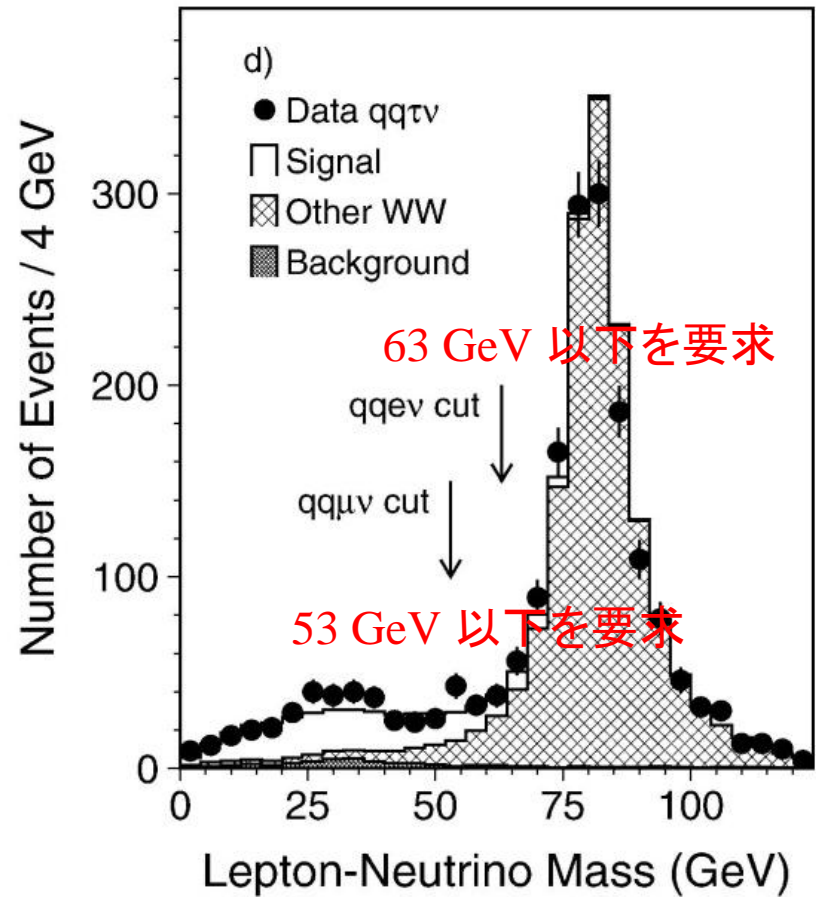
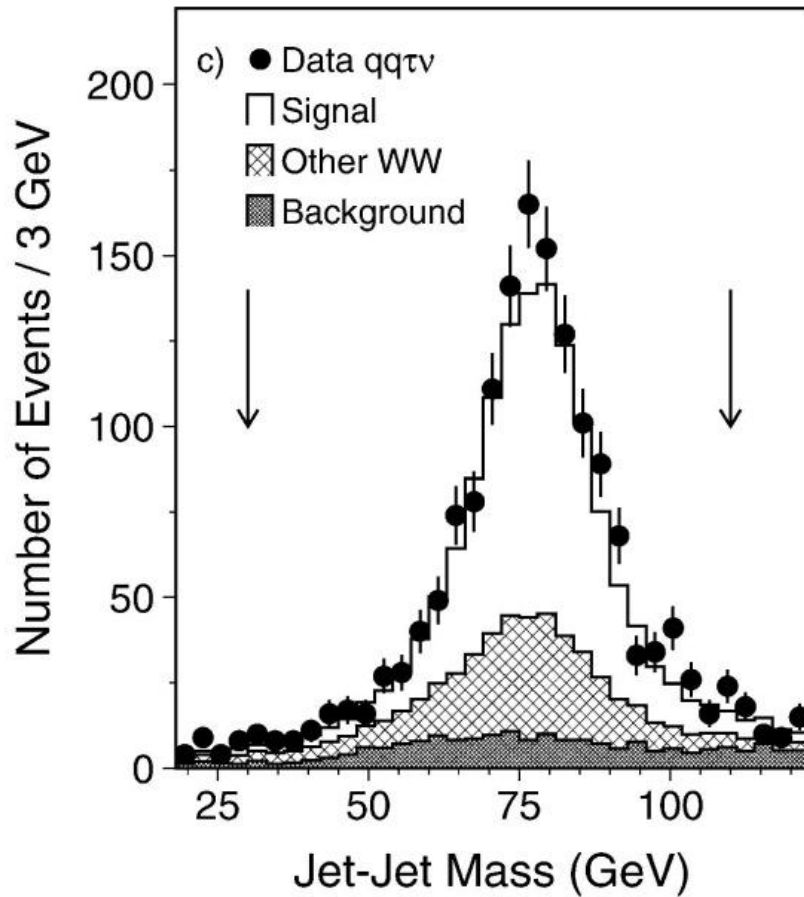
- Tau jet イベントに対しては以下のカットもかける。(ee \rightarrow qq(γ) の低減)
 - $P_t < 20$ GeV ならば、ニューラルネットの出力が期待値に近いことを要求。
 - タウジェットを構成している荷電トラックは多くても3つ。
 - $|\cos\theta_{\text{miss}}| < 0.91$
 - The solid angle subtended by the directions of the tau-jet candidate and the other two jets must be less than 6sr. (???)

選択されたサンプル

- ee \rightarrow WW \rightarrow qq $\tau\nu$ (62 %)
- ee \rightarrow WW \rightarrow others (21 %)
- W-boson pair production 以外からのB.G.
 - ee \rightarrow qq(γ) (54%)
 - ee \rightarrow qqe ν (46%)

qq $\tau\nu$ distribution

30 GeV < M_{jj} < 110 GeV を要求



qqqq selection

- 小さい欠損エネルギー、High multiplicity、four-jet topology を要求。
- Durham jet-resolution parameter $Y_{34} > 0.0015$
- キネマティックフィット(運動量保存)を使用して、エネルギー、角分解能を改善。
- ニューラルネットを使って、イベント選択。
 - $ee \rightarrow qq(\gamma)$ を区別するようにトレーニング。
 - 変数は10 個使用(→ 次のページで説明)。
- Dominant B.G. は $ee \rightarrow qq(\gamma)$ 、主に $qqgg$
- MC では $ee \rightarrow qq(\gamma)$ が4 jet になる確率がうまく記述できていないので、
Z decay (@ $\sqrt{s} = 91 \text{ GeV}$) からMC とData の違い(比)を測定し、補正。

選択されたサンプル

- ニューラルネットの出力0.6 以上を要求すると、purity = 80 % @ $\sqrt{s} = 206.5 \text{ GeV}$
- B.G.
 - $ee \rightarrow qq(\gamma)$ (59%)
 - Z boson pair production(41%)

qqqq selection(cont'd)

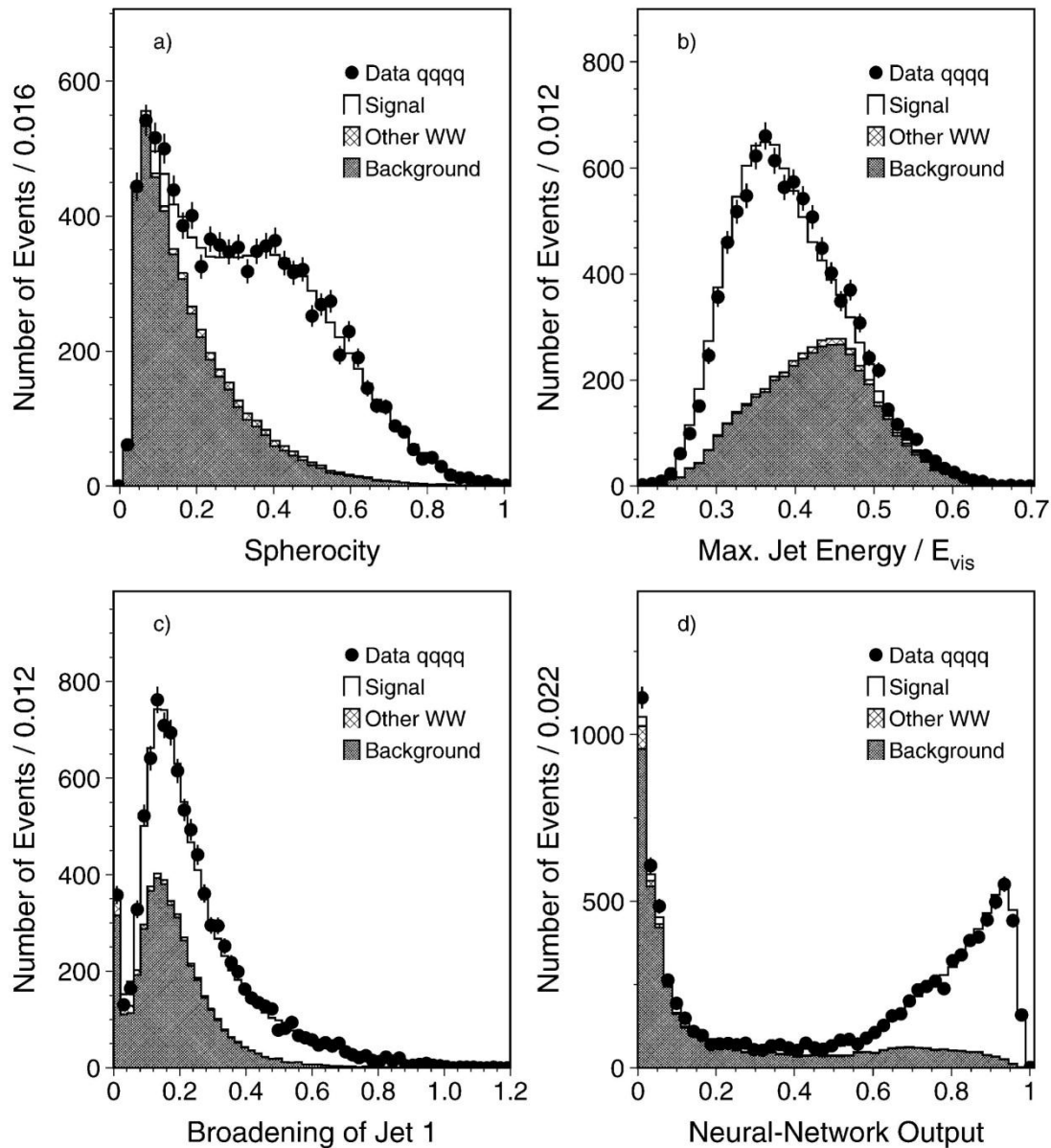
ニューラルネットに使用した10個の変数。

- イベント形状
 - Y_{34}
 - Probability of the kinematic fit
 - Sum of the cosines of the six angles between the four jets.
- ジェット密度 : Lowest jet-multiplicity
- ジェットエネルギー
 - Energies of the most and of the least energetic jets.
 - Difference between the energies of the second and the third most energetic jets
- ジェット形状
 - Spherocity [ref.34]
 - Broadenings[ref.35] of the most and of the least energetic jets

$$S' = \left(\frac{4}{\pi}\right)^2 \left(\frac{\sum |p_{\perp}|}{\sum |p|}\right)^2$$

$$K^c(m, n, Q^2) \equiv \left\langle \sum_{\{c\}} |\underline{p}_{Tc}|^m z^n \right\rangle,$$

qqqq distribution



- Efficiency は10 (modes) \times 10(energy) で求めている(\rightarrow Table.2)。
- 選択されたイベント数と予想されるB.G. 数、測定された反応断面積とSM の理論値(\rightarrow Table.3)。

$e^+e^- \rightarrow$	N_{data}	N_{bg}	$\sigma(\text{CC03})$ [pb]	σ_{SM} [pb]	N_{data}	N_{bg}	$\sigma(\text{CC03})$ [pb]	σ_{SM} [pb]
	$\langle\sqrt{s}\rangle = 188.6$ GeV				$\langle\sqrt{s}\rangle = 201.8$ GeV			
$\ell\nu\ell\nu$	235	57.2	$1.87 \pm 0.17 \pm 0.06$	1.72	40	12.3	$1.47 \pm 0.35 \pm 0.07$	1.81
qqe ν	347	22.9	$2.29 \pm 0.14 \pm 0.03$	2.38	70	5.3	$2.26 \pm 0.30 \pm 0.03$	2.49
qq $\mu\nu$	341	14.9	$2.25 \pm 0.14 \pm 0.04$	2.38	79	3.4	$2.62 \pm 0.33 \pm 0.05$	2.49
qq $\tau\nu$	413	69.7	$2.82 \pm 0.22 \pm 0.07$	2.38	77	13.9	$2.45 \pm 0.47 \pm 0.06$	2.49
qqqq	1477	328.7	$7.17 \pm 0.24 \pm 0.12$	7.42	301	64.6	$7.10 \pm 0.52 \pm 0.12$	7.79
	$\langle\sqrt{s}\rangle = 191.6$ GeV				$\langle\sqrt{s}\rangle = 204.8$ GeV			
$\ell\nu\ell\nu$	35	10.4	$1.67 \pm 0.41 \pm 0.07$	1.76	85	25.9	$1.58 \pm 0.26 \pm 0.05$	1.82
qqe ν	73	4.1	$2.95 \pm 0.37 \pm 0.04$	2.42	176	11.0	$2.78 \pm 0.23 \pm 0.04$	2.50
qq $\mu\nu$	63	2.4	$2.61 \pm 0.36 \pm 0.04$	2.42	142	6.5	$2.30 \pm 0.22 \pm 0.04$	2.50
qq $\tau\nu$	57	11.9	$1.87 \pm 0.48 \pm 0.05$	2.42	164	26.4	$2.63 \pm 0.33 \pm 0.07$	2.50
qqqq	236	57.5	$6.79 \pm 0.56 \pm 0.15$	7.56	656	137.2	$7.66 \pm 0.37 \pm 0.13$	7.81
	$\langle\sqrt{s}\rangle = 195.5$ GeV				$\langle\sqrt{s}\rangle = 206.5$ GeV			
$\ell\nu\ell\nu$	105	30.2	$1.76 \pm 0.25 \pm 0.06$	1.79	128	42.6	$1.42 \pm 0.19 \pm 0.06$	1.82
qqe ν	168	10.9	$2.36 \pm 0.20 \pm 0.03$	2.46	269	16.9	$2.56 \pm 0.17 \pm 0.03$	2.50
qq $\mu\nu$	157	8.2	$2.14 \pm 0.20 \pm 0.03$	2.46	240	11.8	$2.28 \pm 0.17 \pm 0.04$	2.50
qq $\tau\nu$	222	33.8	$3.44 \pm 0.34 \pm 0.08$	2.46	287	45.1	$2.92 \pm 0.27 \pm 0.07$	2.50
qqqq	665	153.5	$6.92 \pm 0.34 \pm 0.11$	7.68	1108	220.1	$8.07 \pm 0.29 \pm 0.13$	7.82
	$\langle\sqrt{s}\rangle = 199.6$ GeV				$\langle\sqrt{s}\rangle = 208.0$ GeV			
$\ell\nu\ell\nu$	87	26.0	$1.68 \pm 0.27 \pm 0.06$	1.80	11	2.4	$2.23 \pm 0.86 \pm 0.06$	1.82
qqe ν	152	11.4	$2.21 \pm 0.20 \pm 0.03$	2.48	14	1.1	$2.02 \pm 0.61 \pm 0.03$	2.50
qq $\mu\nu$	142	7.3	$2.05 \pm 0.20 \pm 0.04$	2.48	23	0.7	$3.59 \pm 0.81 \pm 0.05$	2.50
qq $\tau\nu$	181	32.2	$2.75 \pm 0.32 \pm 0.07$	2.48	17	2.9	$2.43 \pm 1.03 \pm 0.06$	2.50
qqqq	726	151.1	$7.91 \pm 0.36 \pm 0.13$	7.76	65	14.1	$7.28 \pm 1.16 \pm 0.11$	7.82

Fit method

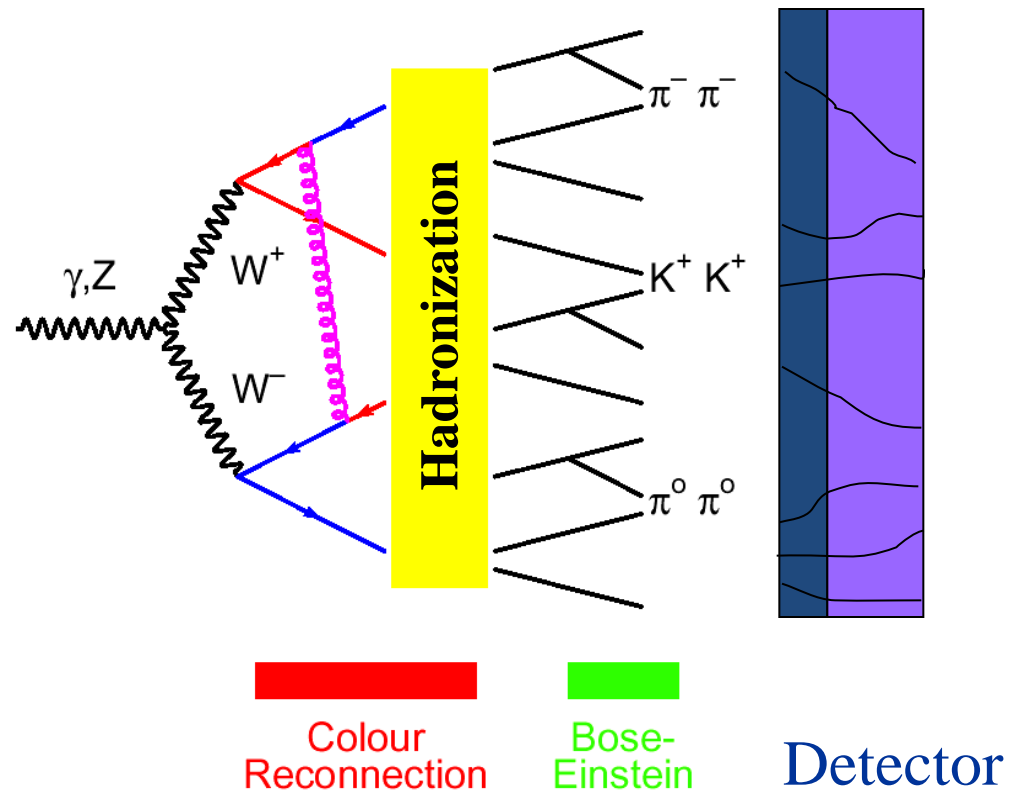
- 反応断面積をMaximum-Likelihood fit で求める。

$$\mu_i = \left(\overset{\text{Signal + cross-feed}}{\sum_{j=1}^{10} \epsilon_{ij} \sigma_j} + \overset{\text{B.G}}{\sum_{k=1}^{N_i^{\text{bg}}} \epsilon_{ik}^{\text{bg}} \sigma_k^{\text{bg}}} \right) \mathcal{L},$$

- lvlv は統計数が少ないので6 mode をまとめた反応断面積を求める。
- LikelihoodはPoissson $P(N_i, \mu_i)$ の積で表される。
- ただし $ee \rightarrow qq\bar{q}\bar{q}$ の場合は、異なる。
 - ニューラルネットの出力の分布をsignal とB.G のnormalization をフロードにしてフィット。 $ee \rightarrow qq(\gamma)$ B.G. の反応断面積を決める(\rightarrow Table.4)。
 - ニューラルネットの分布から求める反応断面積の関数としてLikelihood を作る。

Systematic uncertainties

- Luminosity measurement
- MC statistics
- Detector modeling
- Modeling of the hadronisation processes.
- Bose-Einstein correlation
- Color reconnection
- B.G. cross section
- W mass, width
- ISR, FSR simulation



Results(Cross section σ_{WW})

- Cross-feed があるため、それぞれの反応断面積は相関がある。
- SM のW の崩壊分岐比を仮定して、 σ_{WW} が求められる(→Table.6)。

$$\sigma_{4f} = Br[WW \rightarrow 4f] \times \sigma_{WW}$$

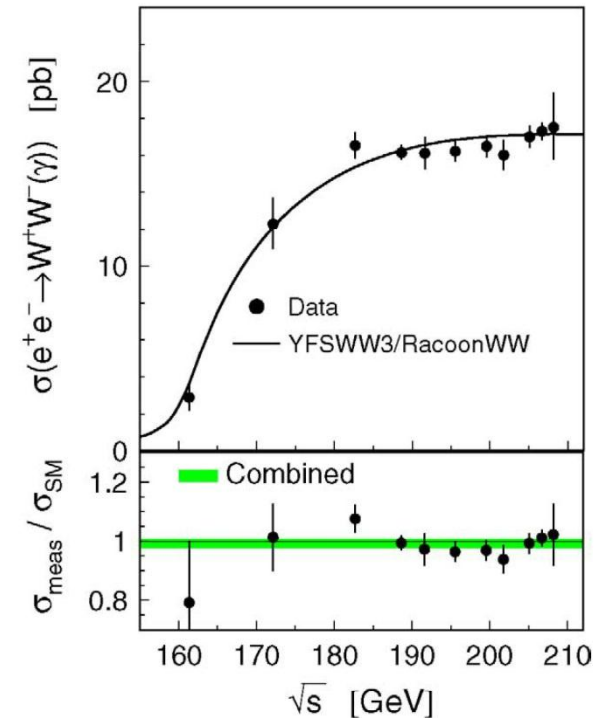
Fig.5

$\sigma_{\text{測定値}}/\sigma_{\text{理論}}$

$$R = 0.992 \pm 0.011 \pm 0.009 \pm 0.005,$$

(誤差) 統計 系統 理論

→ 理論的不定性0.5% の範囲内で良く一致している。



Other results

Branching fraction

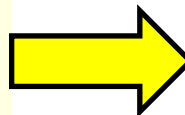
- $\text{Br}(\text{Hadronic}) + \text{Br}(\text{leptonic}) = 1$ と固定して、崩壊分岐比を求めている(\rightarrow Table.7)。
- charged-lepton universality
 - Hypothesis test : 0.8 % (2.6σ)

Branching fraction	Lepton non-universality	Lepton universality	Standard Model
$\text{Br}(W \rightarrow e\nu)$ [%]	$10.78 \pm 0.29 \pm 0.13$	–	
$\text{Br}(W \rightarrow \mu\nu)$ [%]	$10.03 \pm 0.29 \pm 0.12$	–	
$\text{Br}(W \rightarrow \tau\nu)$ [%]	$11.89 \pm 0.40 \pm 0.20$	–	
$\text{Br}(W \rightarrow \ell\nu)$ [%]	–	$10.83 \pm 0.14 \pm 0.10$	10.83
$\text{Br}(W \rightarrow qq)$ [%]	$67.30 \pm 0.42 \pm 0.30$	$67.50 \pm 0.42 \pm 0.30$	67.51

CKM

- W の崩壊分岐比はtop 成分以外のCKM matrix が効いてくるので、CKM 成分が求められる。

$$\begin{aligned} 1/\text{Br}(W \rightarrow \ell\nu) \\ = 3 + 3[1 + \alpha_s(m_W)/\pi] \sum_{i=u,c; j=d,s,b} |V_{ij}|^2, \end{aligned}$$



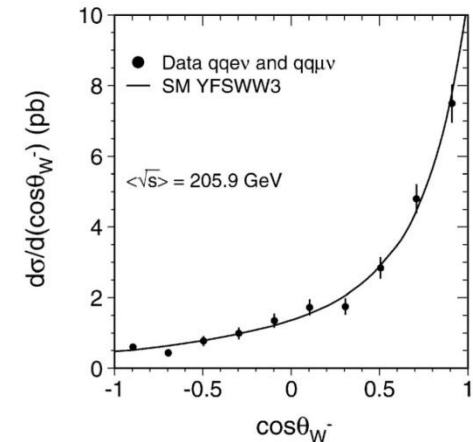
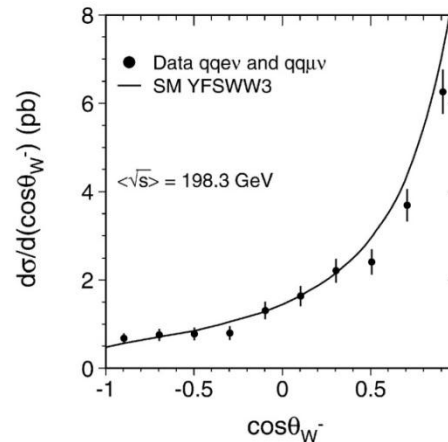
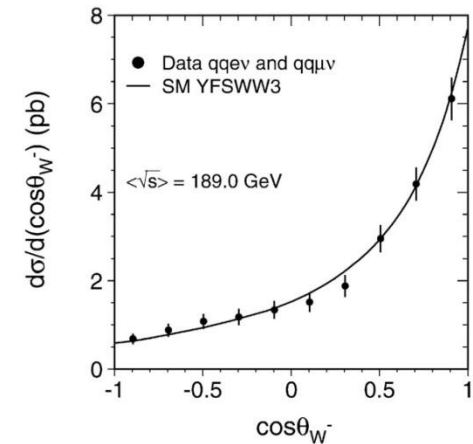
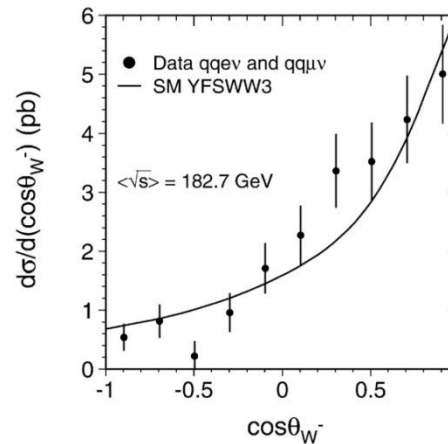
$$\sum_{i=u,c; j=d,s,b} |V_{ij}|^2 = 2.002 \pm 0.038 \pm 0.027,$$

$$|V_{cs}| = 0.977 \pm 0.020 \pm 0.014,$$

Other results(cont'd)

Differential cross section

- $ee \rightarrow qq\bar{e}\nu$ or $qq\bar{\mu}\nu$ を使って、 W^- の方向の関数として微分反応断面積を求めた。
 - レプトンの電荷の符号で W がタグできるので、この2つのモードを使用。
 - $\cos\theta_{W^-}$ は、2 ジェットから方向をレプトンで符号を決める。



- MC とよく一致している。

Conclusion

L3 で収集した全てのデータ(LEP2) を使用。

- ルミノシティ : 629.4 pb⁻¹
- 重心系エネルギー : 189 ~ 209 GeV

結果

- W-boson pair production の反応断面積 → SM と良く一致！
 - $R = 0.992 \pm 0.011(\text{stat}) \pm 0.009(\text{syst.}) \pm 0.005(\text{theo.})$
- W の崩壊分岐比
- W⁻ の方向の関数として微分反応断面積 → SM と良く一致！