

# Searches at LEP

Kiyotomo Kawagoe

Kobe University

Tokyo, November 5th, 2001

ICEPP LEP Symposium

“Beyond the Electroweak Scale”

## Outline of this talk

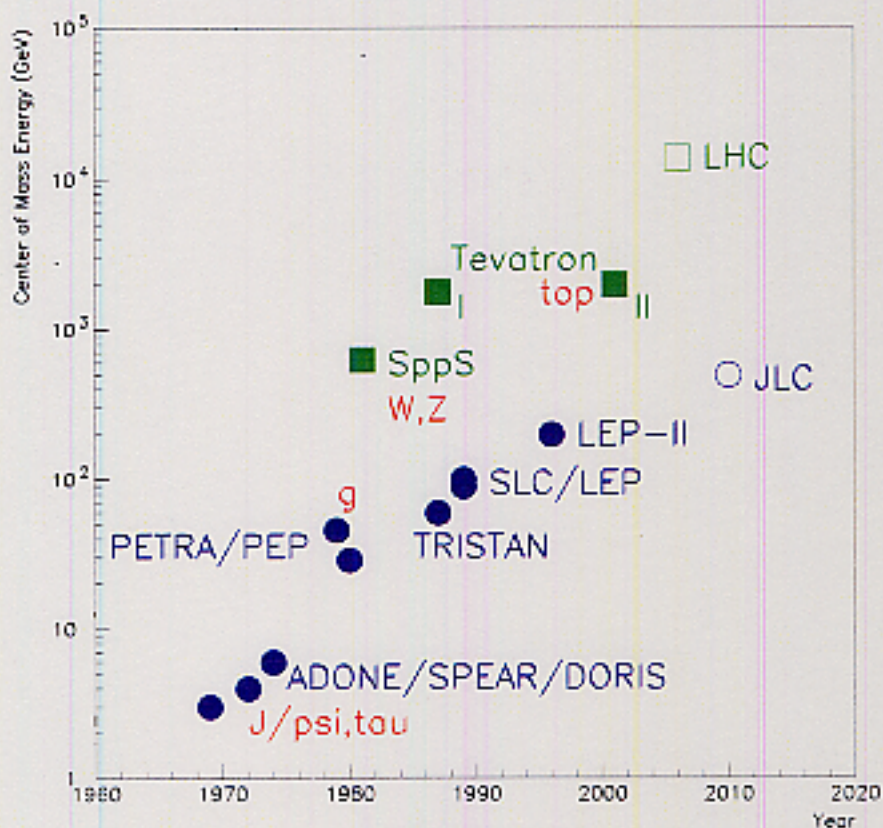
1. INTRODUCTION
2. SUPERSYMMETRY (→ 省略)
3. OTHER EXOTICS (~~たぶん~~ 省略)
4. 消えた ANOMALIES
5. SUMMARY

何もなかった。

## 残念ながら何もなかった。

- 標準理論内の新粒子発見はなかった。
  - 精密測定による  $m_t$  の推定  
⇒ Tevatron がトップクォークを発見。
  - ヒッグス粒子は軽い (115 GeV ??)  
⇒ Tevatron/LHC で発見?
- 標準理論を超える新粒子、新現象もなかった。
  - 第4世代の粒子。
  - Supersymmetry (SUSY)
  - Compositeness
  - Extra Dimensions
- なぜ見つからないか?
  - 加速器屋と実験屋は最大限の努力をした。
  - 理論屋も様々なアイデアを出してきた。
  - 「自然」がそうなっているから仕方ない?

1979年のグルオンの発見 (PETRA) 以来、 $e^+e^-$  コライダーでの新粒子発見はない。



何を得たか?

- 質量や結合定数に対するリミット。
- 理論に対するきびしい制限。
- 新しい解析手法。
- 様々な教訓。

**Positive** に捕え、LHC、JLCにつなげよう。

## LEP:世界最高エネルギーの $e^+e^-$ 衝突実験

### LEP 実験の 2 本柱:

#### 標準理論の精密検証

エネルギーの設定目標が明確。

- $\sqrt{s} \sim M_Z$  (LEP1, 1989–1995)
- $\sqrt{s} \sim 130 - 140$  GeV (LEP1.5, 1995)
- $\sqrt{s} > 2M_W$  (LEP2, 1996–2000)

「堅実なアベレージヒッター」

精密測定 of 理論からのずれ

⇒ 新しい物理の間接的探索。

#### 新粒子の探索

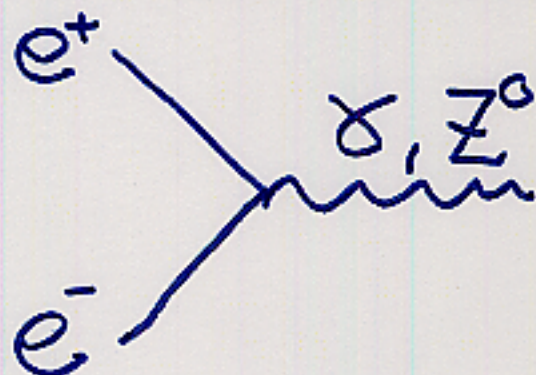
- 直接的探索は、あたればノーベル賞 (級)。  
「三振かホームランか」
- エネルギーは高ければ高いほどよい。  
(どこに何がいるかわからない。)
- ルミノシティも重要。
- あらゆる粒子を徹底的に探索。  
「データを骨の髄までしゃぶりつくす」

## LEP の良いところ

- $e^+e^-$  衝突である。(⇔ハドロン衝突)
  - 素過程なので、イベントが単純。
  - 新粒子生成の振る舞いを理解しやすい。
  - S/N 比がよい。
  - 測定器を良く理解できる ( $Z^0$  による較正)。
  - バックグラウンド事象を理解できている。
- 世界最高エネルギーで高ルミノシティ。
- 独立な 4 実験があったこと (ALEPH/DELPHI/L3/OPAL=ADLO)。
  - 統計は 4 倍 (統計誤差は 1/2)。
  - 測定器による系統誤差は独立。
  - 実験間の健全な競争。
  - 共同作業 (LEP Working Groups)

## どんな粒子を生成できるか

$\gamma/Z^0$  に結合する粒子を  $s$ -channel で生成できる。

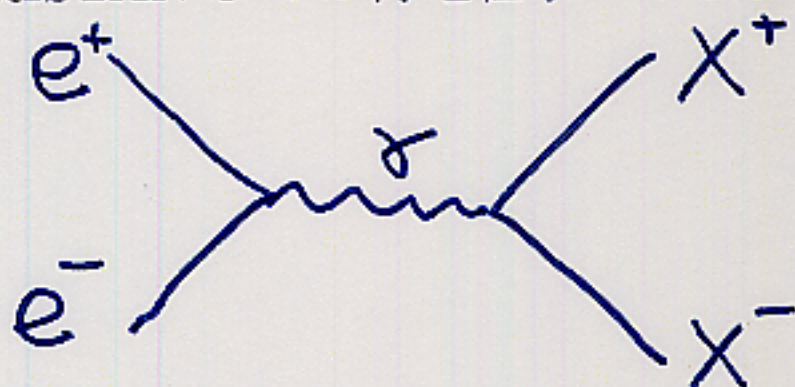


- PETRA/PEP :  $\gamma$  dominant
- TRISTAN :  $\gamma + \gamma Z^0$  interference
- LEP1 :  $Z^0$  dominant
- LEP2 :  $\gamma + Z^0$

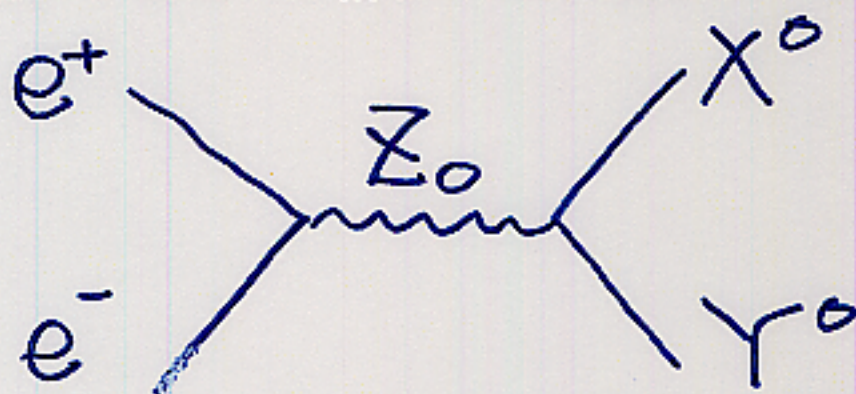
もちろん、 $t$ -channel による生成が重要になる場合もある。

## 中性粒子の生成

TRISTAN までは荷電粒子のみ  $s$ -channel で生成。



LEP では  $Z^0$  に結合する中性粒子も生成可能。



- $e^+e^- \rightarrow Z^0 \rightarrow Z^0 H^0$  (ヒッグス粒子)
- $e^+e^- \rightarrow Z^0 \rightarrow N_4 \bar{N}$  (重い中性レプトン)
- $e^+e^- \rightarrow Z^0 \rightarrow \tilde{\chi}_i^0 \tilde{\chi}_j^0$  (ニュートラリーノ)
- $e^+e^- \rightarrow Z^0 \rightarrow \tilde{\nu} \bar{\tilde{\nu}}$  (スカラーニュートリノ)
- $e^+e^- \rightarrow Z^0 \rightarrow \nu^* \bar{\nu}^*$  (励起ニュートリノ)
- ...



## LEP1 での新粒子探索

### 直接的探索

- $Z^0$  の大量生成、崩壊の中から探す。
- 主なバックグラウンド事象
  - $e^+e^- \rightarrow f\bar{f}(\gamma)$  ( $f = e, \mu, \tau, q$ )。
  - $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma(\gamma)$ 。
  - $e^+e^- \rightarrow e^+e^-\gamma^*\gamma^* \rightarrow e^+e^-f\bar{f}$ 。
- 主な粒子の探索は初期のデータでほぼ kinematic limit に到達。

### 間接的探索

- $Z^0$  の崩壊幅の精密測定。
  - $\Gamma_Z$  のずれ  $\Rightarrow Z^0$  に結合する新粒子
  - $\Gamma_{inv}$  のずれ  $\Rightarrow$  invisible な新粒子

## LEP2 での新粒子探索

### 直接的探索

- 新粒子の生成、崩壊に  $W^\pm, Z^0$  がからむ。
  - 新たなバックグラウンド事象
    - $e^+e^- \rightarrow W^+W^-$ 。
    - $e^+e^- \rightarrow Z^0Z^0$ 。
    - その他の four-fermion 事象。
- $P_T^{miss}$ 、 $\theta_{ACOP}$  は SUSY だけではない。

### 間接的探索

- $e^+e^- \rightarrow f\bar{f}$  の断面積の精密測定
  - Contact interaction
  - Extra Dimensions

## Search Channel List

$e^+e^- \rightarrow hZ$	$h \rightarrow b\bar{b}$ $h \rightarrow \tau^+\tau^-$ $h \rightarrow q\bar{q}$ $h \rightarrow \gamma\gamma$ $h \rightarrow WW^*$ $h \rightarrow \tilde{\chi}^0\tilde{\chi}^0$	$b\bar{b}q\bar{q}, b\bar{b}\nu\bar{\nu}, b\bar{b}l^+l^-$ $\tau^+\tau^-q\bar{q}$ $q\bar{q}q\bar{q}, q\bar{q}\nu\bar{\nu}, q\bar{q}l^+l^-$ $(q\bar{q}, l^+l^-, \nu\bar{\nu}) + \gamma\gamma$ $(\ell\nu q\bar{q}, q\bar{q}q\bar{q}) + (q\bar{q}, \nu\bar{\nu})$ $q\bar{q}, l^+l^- + \cancel{E}$
$e^+e^- \rightarrow hA$	$h, A \rightarrow b\bar{b}, \tau\tau$ $h \rightarrow AA$	$b\bar{b}b\bar{b}, b\bar{b}\tau^+\tau^-$ $b\bar{b}b\bar{b}b\bar{b}$
$e^+e^- \rightarrow H^+H^-$	$H^+ \rightarrow q\bar{q}, \tau\nu$ $H^+ \rightarrow A^0W^{+(*)}$	$q\bar{q}q\bar{q}, q\bar{q}\tau\nu, \tau\nu\tau\nu$ $b\bar{b}b\bar{b} + (\ell\nu q\bar{q}, q\bar{q}q\bar{q})$
$e^+e^- \rightarrow \tilde{\chi}^+\tilde{\chi}^-$	$\tilde{\chi}^- \rightarrow W^*\tilde{\chi}^0$ (In)Direct RPV $(\tilde{\chi}^0 \rightarrow \gamma\tilde{G})$	$\text{jets } (+l^\pm), l^+l^- + \cancel{E}$ $\text{jets}, l^\pm, \nu$ $\text{jets}, l^+l^-, \gamma\gamma + \cancel{E}$
$e^+e^- \rightarrow \tilde{\chi}_2^0\tilde{\chi}_1^0$	$\tilde{\chi}_2^0 \rightarrow Z^0\tilde{\chi}_1^0$ $\tilde{\chi}_2^0 \rightarrow \gamma\tilde{\chi}_1^0$	$2 \text{ jets} + \cancel{E}$ $\gamma + \cancel{E}$
$e^+e^- \rightarrow \tilde{\chi}_1^0\tilde{\chi}_1^0$	$\tilde{\chi}_1^0 \rightarrow \gamma\tilde{G}$ $\tilde{\chi}_1^0$ Lifetime RPV Decays	$\gamma\gamma + \cancel{E}$ non-pointing $\gamma$ $\text{jets}, l^\pm, \nu$
$e^+e^- \rightarrow \tilde{\ell}^+\tilde{\ell}^-$	$\tilde{\ell}^- \rightarrow \ell^-\tilde{\chi}_1^0$ $(\tilde{\chi}^0 \rightarrow \gamma\tilde{G})$ (In)Direct RPV $\tilde{\ell}^\pm$ Lifetime	$l^+l^- + \cancel{E}$ $l^+l^-\gamma\gamma + \cancel{E}$ $2,4,6 \times l^\pm + \cancel{E}$ Kinked Tracks Stable, Charged
$e^+e^- \rightarrow \nu\bar{\nu}$	(In)Direct RPV	$l^+l^-l^+l^-$ $\text{jets} + \cancel{E}$
$e^+e^- \rightarrow \tilde{t}_1\tilde{t}_1$	$\tilde{t}_1 \rightarrow c\tilde{\chi}_1^0$ $\tilde{t}_1 \rightarrow b\ell^+\nu$ (In)Direct RPV	$2 \text{ jets} + \cancel{E}$ $2 \text{ jets} + l^+l^- + \cancel{E}$ $l^+q\ell^-q$
$e^+e^- \rightarrow N\bar{N}$	$N \rightarrow \ell W$	$\text{jets} + l^\pm$
$e^+e^- \rightarrow L^+L^-$	$L^+ \rightarrow \nu W$	$\text{jets}, l^\pm + \cancel{E}$
$e^+e^- \rightarrow \ell^{*+}\ell^{(*)-}$	$\ell^{*+} \rightarrow \ell^+\gamma$	$l^+l^-\gamma(\gamma)$
$e^+e^- \rightarrow \nu^*\nu^*$	$\nu^* \rightarrow \nu\gamma$	$\gamma(\gamma) + \cancel{E}$
$e^+e^- \rightarrow \ell^*\ell, \nu^*\nu$	$\ell^* \rightarrow \ell Z$	$\text{jets}, l^\pm, \nu$
$e^+e^- \rightarrow LQL\bar{Q}$	$LQ \rightarrow \ell q (\nu q)$	$\text{jets}, l^\pm, \nu$

## References

実験結果の詳細はこちらをご覧ください。

### LEP Experiments

<http://alephwww.cern.ch/>

<http://delinfo.cern.ch/Delphi/>

<http://l3www.cern.ch/>

<http://www.cern.ch/Opal/>

### LEP Working Groups

<http://lepsusy.web.cern.ch/lepsusy/>

<http://lepexotica.web.cern.ch/LEPEXOTICA/>

### Conference/Workshop

<http://www.lp01.infn.it/>

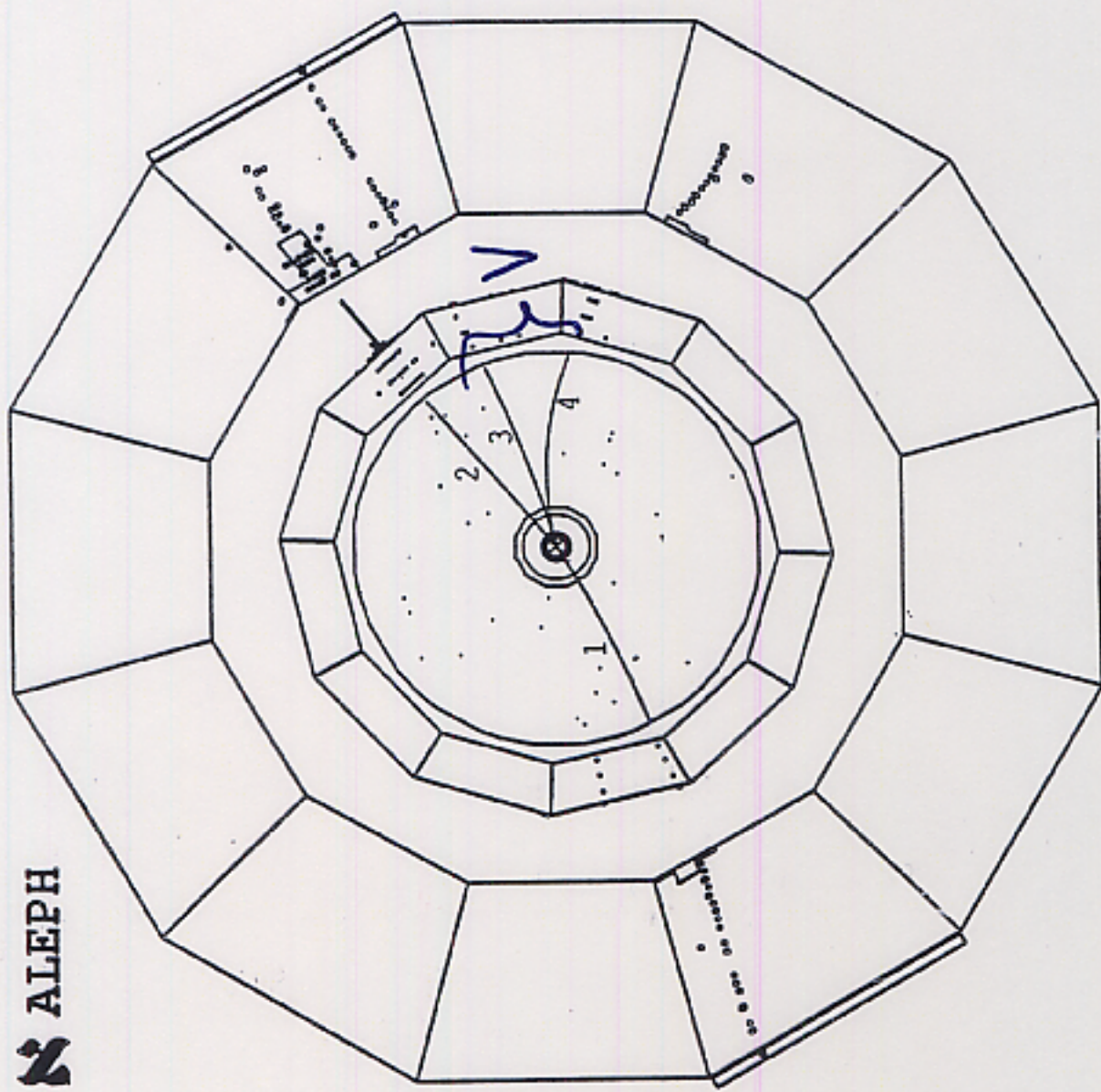
<http://www.bo.infn.it/sminiato/sminiato01.html>

## 4. 消えた ANOMALIES

LEP 実験開始以来、いくつかの ANOMALIES が報告され、消えていった。

- LEP1
  - $\tau^+\tau^-V$  イベントの過剰 (1990 ALEPH)。
  - $M_{\gamma\gamma} \sim 60$  GeV in  $\ell^+\ell^-\gamma\gamma$  (1992 L3)。
- LEP1.5
  - 4-jet anomaly (1995 ALEPH)
- LEP2
  - 60 GeV Charged Higgs (1997 L3)
  - スカラータウ (1999 ADLO)
  - 105 GeV Higgs (1999 ALEPH)
  - 115 GeV Higgs (2000 ALEPH:まだ灰色)。

**ALEPH**



$$\tau^+\tau^- \rightarrow \mu^+\mu^- \quad (4,3)$$

$$\tau^+ \rightarrow \mu^+ \nu \quad (1)$$

$$\tau^- \rightarrow \pi^- \nu \quad (2)$$

$M_V = 803 \text{ MeV}$

Fig. 1

**TABLE 3**

Comparison of Selected Events with Monte Carlo Predictions

Final State	all $\theta_V$				$\theta_V > 11.5^\circ$			
	all $m_V$		$m_V > 2 \text{ GeV}$		all $m_V$		$m_V > 2 \text{ GeV}$	
	exp <sup>a</sup>	obs <sup>b</sup>	exp	obs	exp	obs	exp	obs
ee ee	2.2	3	0.4	1	1.8	2	0.4	0
ee $\mu\mu$	2.0	2	0.4	2	1.7	1	0.3	1
ee $\pi\pi$	3.0	5	0.0	0	2.4	3	0.0	0
ee total	7.2	10	0.8	3	5.8	6	0.8	1
$\mu\mu$ ee	2.0	4	0.3	0	1.6	3	0.3	0
$\mu\mu$ $\mu\mu$	1.8	5	0.4	3	1.5	4	0.4	2
$\mu\mu$ $\pi\pi$	2.8	1	0.0	0	2.2	1	0.0	0
$\mu\mu$ total	6.6	10	0.7	3	5.3	8	0.7	2
$\pi\pi$ ee	1.1	6	0.2	0	1.0	6	0.2	0
$\pi\pi$ $\mu\mu$	0.9	4	0.2	0	0.8	4	0.2	0
$\pi\pi$ $\pi\pi$	1.2	5	0.0	0	1.1	4	0.0	0
$\pi\pi$ total	3.2	15	0.5	0	2.9	14	0.4	0
grand total	17.0	35	2.0	6	14.0	28	1.8	3

<sup>a</sup> exp = expected number of events from electroweak processes

<sup>b</sup> obs = observed number of events

L3  $ll\gamma\gamma$   
 $M_{\gamma\gamma}$

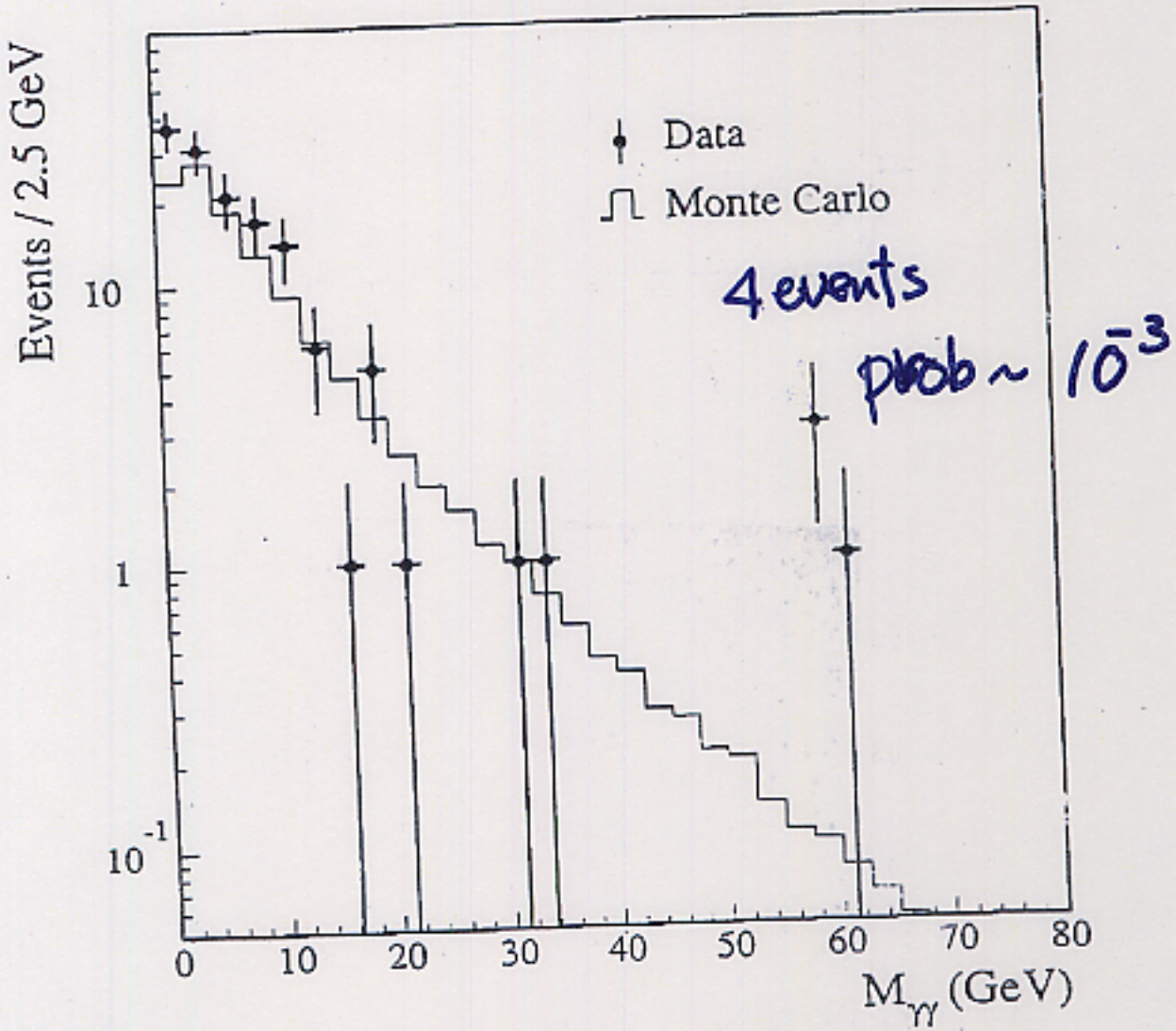


Figure 6



TOPAZ 1-83 energy scan  
 VENUS  
 AMY

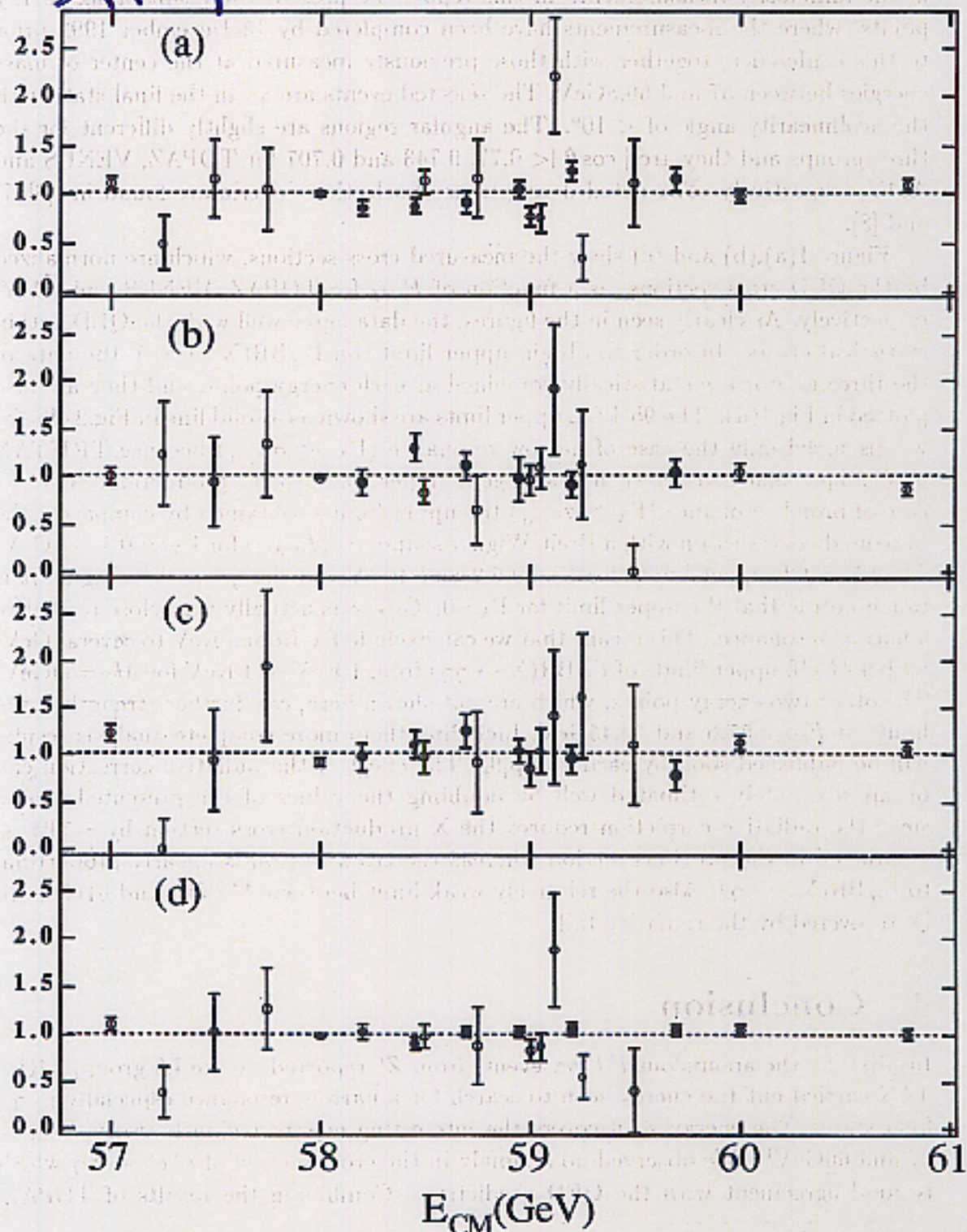


Figure 1: The measured cross sections for  $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$ , which are normalized by the QED ones. The six data points of the present energy scan and the previous ones are marked by black and open circles, respectively. The errors are only statistical. Fig.(a) ,(b), (c) and (d) are those of TOPAZ, VENUS, AMY and their combined data, respectively.

## ALEPH 4-JET ANOMALY

At LEP1.5 ( $\sqrt{s} = 130 - 136$  GeV) in 1995,

- Select 4-jet events.
- Choose a combination that minimizes  $\Delta m = |m_{ij} - m_{kl}|$ .
- Plot  $m_{ij} + m_{kl}$ .

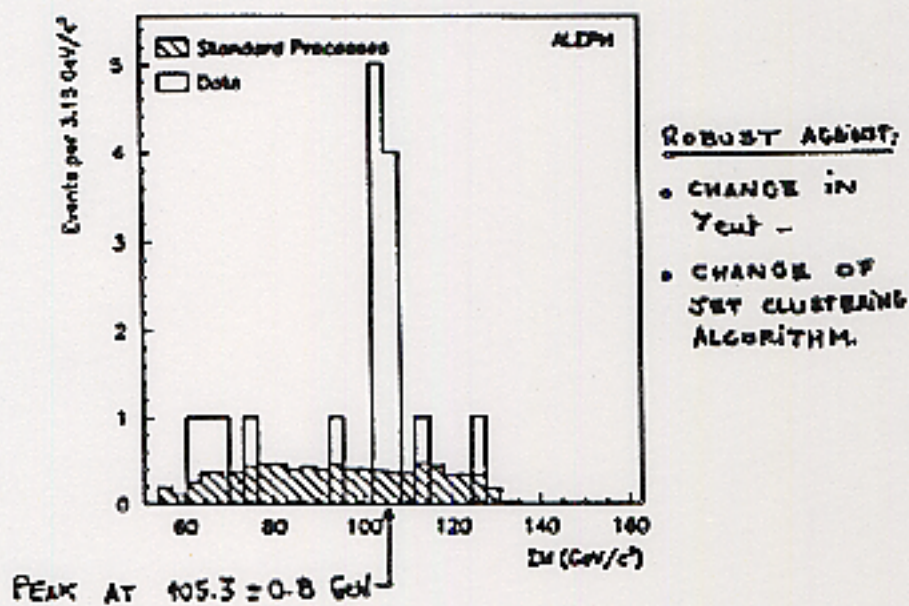
ALEPH observed 9 events around 105 GeV.

Signal for  $e^+e^- \rightarrow hA$  ??

$\Rightarrow$  Second run in 1997.

② IN THE DATA

- WIDTH OF THE BINS :  $3.15 \text{ GeV}/c^2 (\pm 1\sigma_{\Sigma M})$
- ORIGIN OF THE BINS : CHOSEN TO MAXIMIZE THE NUMBER OF EVENTS IN  $\pm 2\sigma_{\Sigma M}$



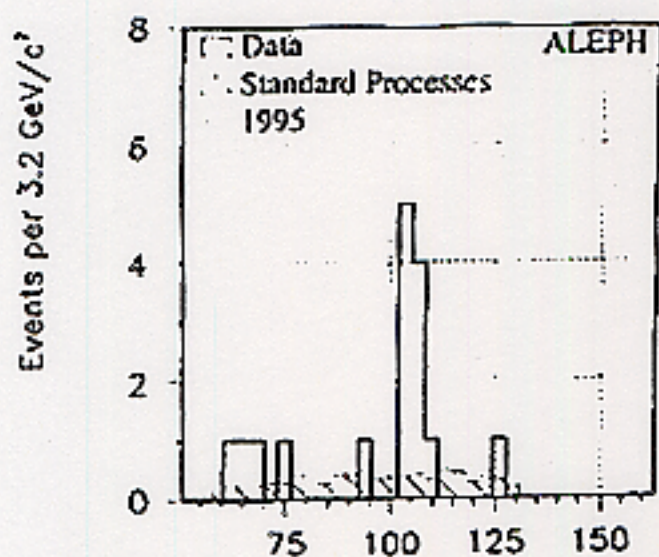
- FOR  $\Sigma M > 90 \text{ GeV}/c^2$  (i.e. beyond LEP1 reach)

•  $\geq 12$  EVENTS VS 4.8 EXPECTED 0.4%

•  $\geq 9$  EVENTS CLUSTERED WITHIN  $\pm 2\sigma$   
 (GIVEN  $\geq 12$  EVENTS OVERALL) 0.1%

↓  
 [ANYWHERE]

# ALEPH 4-jet Effect

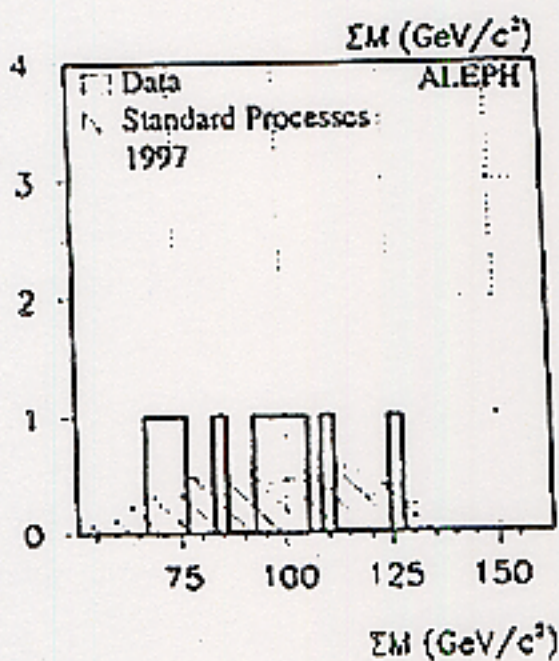


Original (1995)

6 pb-1 @ 130/136 GeV

9 Events Seen

1 Expected



1997 Run

7 pb-1 @ 130/136 GeV

1 Event Seen

1 Expected

- After  $7 \text{ pb}^{-1}$  ALPH have only 1 event.  
expect 1 in mass window
- No overall excess of 4-jet events
- No excess observed by the other  
experiments
- Conclude original observation was a  
statistical fluctuation
- **End Of The 4-JET Story**

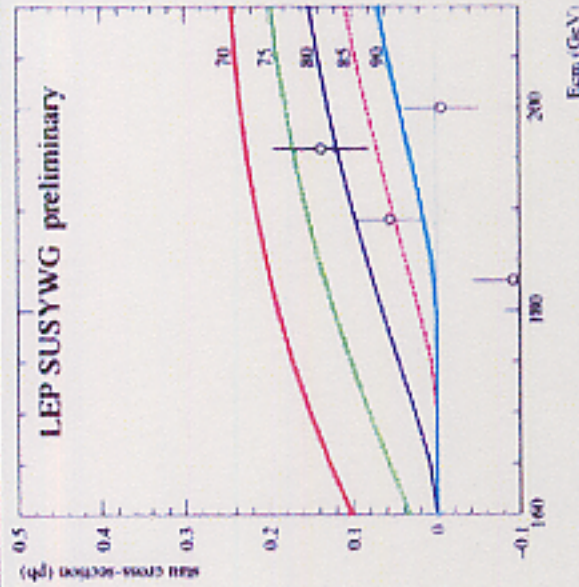
# Stau saga

In SUSY2K :  $\sqrt{s} \leq 202 \text{ GeV}$

$$M_{\tilde{\tau}} = 85 \text{ GeV} / c^2$$

$$M_{\tilde{\chi}} = 22 \text{ GeV} / c^2$$

Excess observed by all four experiments



	Data	SM exp
ALEPH	50	38.0
DELPHI	82	71.4
L3	70	55.3
OPAL	66	57.7

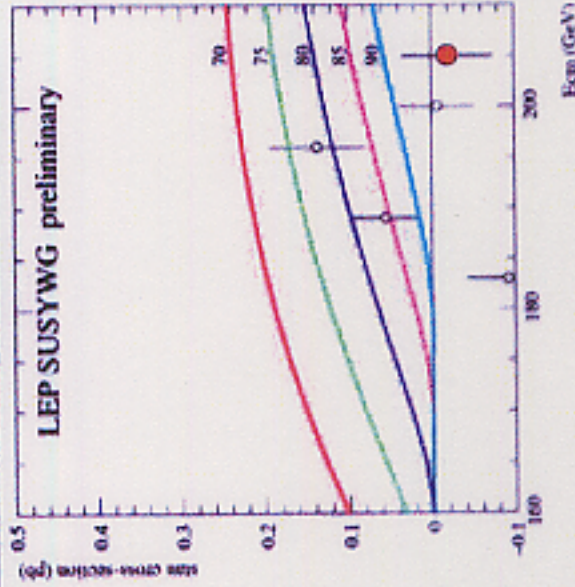
# Stau in Y2K

In ICHEP2000 :  $\sqrt{s} > 202 \text{ GeV}$

$$M_{\tilde{\tau}} = 85 \text{ GeV} / c^2$$

$$M_{\tilde{\chi}} = 22 \text{ GeV} / c^2$$

Excess not confirmed



	Data	SM exp
ALEPH	10	10.0
DELPHI	18	19.7
L3	12	9.3
OPAL	9	12.6

## なぜ ANOMALY がでたか。

### 理論に基づいた探索

- Higgs Boson (ALEPH)
- Charged Higgs (L3)
- $\tilde{\tau}$  (ADLO)

### 理論の「偏見」によらない探索

- $\tau^+\tau^-V$  (ALEPH)
- $l^+l^-\gamma\gamma$  (L3)
- 4-jet anomaly (ALEPH)

**とても重要。** 何があるか分からない。  
あらゆる分布を虚心坦懐にチェックすべき。  
真面目に探していることの証明。

### データは大丈夫か？

- 測定器のキャリブレーション。
- 解析方法の徹底チェック。

⇒ 問題なし。



## 結局は統計のふらつき

- 同じ測定を 1000 回繰り返すと平均 3 回、 $3\sigma$  のシグナルが出る。
  - 1000 個の異なる測定を行うと、平均 3 個の測定で  $3\sigma$  のシグナルが出る。
- ⇒ 各実験が様々な解析で様々な分布を取ると、必ず統計による anomaly はでる。本物かどうか、それだけでは分からない。

「一喜一憂しない。」

## 決着は？

- $3\sigma$  程度のシグナルは単なる手がかり。
  - 独立な実験による追試。
  - もっとデータを取る。
- ⇒  $5\sigma$  まで成長するか？
- 最終的には理論的な裏付けもほしい。

## ANOMALYのご利益

測定器、解析のクオリティが上がる。

- 測定器のキャリブレーション。
- 解析方法の徹底チェック。

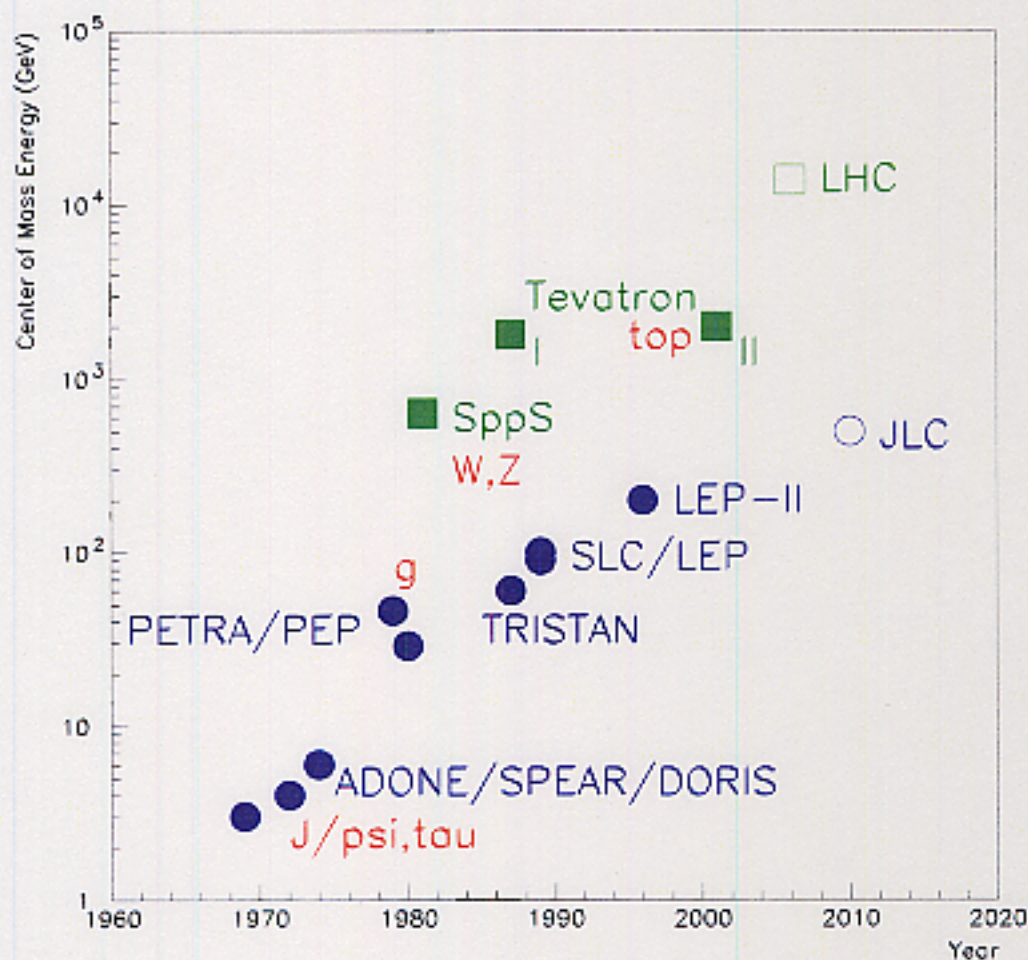
論文が出る。

- 理論家がたくさん論文を書ける。
- 実験も追試の論文を書ける。

# 余計な仕事が増える、との声もあるが...

# SUMMARY

LEP で新粒子の発見はなかった。



次は LHC/JLC で挑戦!!

