

最高エネルギー電子・陽電子衝突装置LEP-IIでの
OPAL測定器による素粒子の研究

平成11～12年度
科学研究費補助金 基盤研究 (A)(2)
研究成果報告書

平成13年3月

研究代表者 森 俊則
(東京大学素粒子物理国際研究センター・助教授)

目次

研究成果の概要

研究組織・研究経費

研究発表

- (A) 国際会議等における口頭発表
- (B) 国際学術誌への発表
- (C) その他の発表

添付論文

- (1) LEP2 1999
- (2) New Energy Record of LEP 2000
- (3) LEP でのヒッグス兆候観測と実験終了について
- (4) Tests of the Standard Model and Constraints on New Physics from Measurements of Fermion-pair Production at 189 GeV at LEP
- (5) Search for Chargino and Neutralino Production at $\sqrt{s} = 189$ GeV at LEP
- (6) Measurement of the Mass and Width of the W Boson in e^+e^- Collisions at 189 GeV
- (7) Measurement of Triple Gauge Boson Couplings from W^+W^- Production at LEP Energies up to 189 GeV
- (8) Precise Determination of the Z Resonance Parameters at LEP: Zedometry
- (9) Search for the Standard Model Higgs Boson in e^+e^- Collisions at $\sqrt{s} = 192$ – 209 GeV
- (10) Combination Procedure for the Precise Determination of Z Boson Parameters from Results of the LEP Experiments

研究成果の概要

1 はじめに

我々の住むこの宇宙の成り立ちを知りたい — それは、紀元前より続く人類の夢である。現在ではそれが単なる夢ではなく、基礎科学における最も根本的で重要な研究課題となってきた。

この根本的な問題に答えるために、20世紀には次から次へより高いエネルギーの粒子加速器が建設されてきた。エネルギーを上げれば上げるほど物質のより細かい構造が見え、さらに宇宙のより初期の状態へ迫ることができるため、高エネルギー加速器は、その意味で「究極の顕微鏡・望遠鏡」と言うことができる。特に電子を用いた加速器は、電子が最も基本的な粒子の一つであるため、曇りなく未知の世界を見通すことが可能と考えられている。

本研究は、電子とその反粒子である陽電子を、前人未踏の高エネルギーで衝突させ、その反応を詳しく測定することにより、宇宙の成り立ちとそこに働く基本法則を探ろうとするものである。この研究は平成11、12年度の文部省科学研究費補助金の助成を受けて行われた。この報告書は、その2年間にわたる研究の成果をまとめたものである。

2 最高エネルギー電子・陽電子衝突装置 LEP-I、LEP-II

欧州原子核研究機構(CERN、在ジュネーブ)は、素粒子物理学のエネルギーフロンティア最先端を担う加速器として、世界最大かつ最高エネルギーの電子・陽電子衝突装置「LEP」を建設した。本研究を行った東京大学素粒子物理国際研究センターを中心とするグループは、このLEPを用いた大規模な国際共同実験「OPAL」において、中心的な役割を果たしてきた。OPAL実験の提案及び概念設計に重要な貢献をし、測定器の中で最も重要なものの一つである電磁カロリメータの開発から建設、運転を行い、物理解析においても数々の成果を上げてきている。

LEPは、1989年の運転開始以来、衝突エネルギーを Z^0 粒子(弱い相互作用を媒介する質量約91 GeVの粒子)の質量付近に合わせて Z^0 粒子の大量生成を行い、その生成、崩壊の研究を通して、素粒子の世代数の決定や標準理論の詳細検証、大統一理論の可能性の示唆など、多くの成果を産み出した。(この時期はLEP-Iと呼ばれている。)特に、LEPでの測定によりトップクォークの質量を预言するなど、電弱統一理論が精密な物理理論として成り立っていることが証明され、これが1999年のG.トーフフトとM.J.G.ベルトマンのノーベル物理学賞受賞につながった。

その後LEP加速器は1995年度より新たにLEP-IIとして衝突エネルギーの増強を開始し、1996年度にはW粒子(Z^0 粒子と共に弱い相互作用を媒介する粒子)の対生成、更に1997年度には衝突エネルギーがLEP-Iの2倍に達し、 Z^0 粒子も対生成できるようになった。ここでは、未知の最高エネルギーにおける新たな現象の探索をはじめ、W粒子の精密測定、ゲージ粒子間相互作用の測定などによって新たな知見を拡げてきた。

3 加速器および測定器の運転状況

この2年間は、LEP-II最後の2年間ということで、LEP-II加速器の持てる最高の性能を最大限引き出して運転することに多大な努力が行なわれた。特に、未知の高エネルギー反応を開拓するエネルギーフロンティアの加速器として、可能な限り高いエネルギーに到達することに力が注がれた。

1999年は、衝突エネルギーを前年の189 GeVから更に増強するために超伝導加速管を16本追加した。5月から衝突エネルギー192 GeVで運転が開始され、超伝導加速管をうまく調整して加速勾配を設計値の6MV/mから更に上げる試みが行なわれ、6月には196 GeV、8月には加速勾配が平均7MV/mとなり、遂に200 GeVに到達した。その後9月には202 GeVでの運転も可能になった。一方、ビーム強度も増強され、取得したデータ量は前年の 190pb^{-1} を上回る約 230pb^{-1} と、これまでの最高記録を記録した。(添付論文(1)を参照。)

2000年の運転では、更に衝突エネルギーを増すため、以前取り出した常伝導加速空洞を再設置したり、電子軌道の曲がり具合を緩くするなど、ありとあらゆる工夫が試みられた。これらの努力により、運転開始後すぐに205 GeVでの定常運転に入り、その後最高209 GeVまで到達することができた。また、最初から高いエネルギーで衝突を始めるとクライストロンのトリップなどで加速器の運転効率が悪くなるため、少し低いエネルギーで衝突を開始して、ビーム電流が減るにしたがって途中からエネルギーを増やしていく「mini-ramp」という運転方法がとられ、データ量を減らすことなくより高いエネルギーのデータも取ることが可能となった。これにより2000年も1999年とほぼ同じおよそ 220pb^{-1} の大量データが得られた。(添付論文(2)および(3)を参照。)

一方、OPAL測定器の方は、実験開始から10年を越えても特に性能が落ちることもなく、逆にこれまでの経験の蓄積から測定器の隅々にいたるまで詳しい理解が進んで微妙な事象の識別も可能となり、様々な物理解析に役立っている。特に、我々が製作して運転・維持を行なっている電磁カロリメータは、実験開始から現在に至るまで全カウンタ9440本が作動しており、ほとんどすべての物理解析に貢献している。

4 主な研究成果

この2年間の研究成果としては大きく分けて、(1)最高エネルギーにおける未知の粒子・現象の探索、(2)大量の Z^0 粒子、 W^\pm 粒子の精密測定による標準理論ならびにそれを越える理論の検証、の二つがある。以下ではこれらについてそれぞれまとめる。

(1) 未知の探索

ここで世界中の研究者から最も注目されたのはヒッグス粒子の探索であった。ヒッグス粒子の直接探索が可能なのはこの時期LEP-II加速器だけであった。ここでは、これまでの探索研究を引き続き行ない、 Z^0 粒子より少し重いヒッグス粒子が探索された。詳細については添付論文(3)と(9)を見ていただきたいが、LEP-IIの4実験の結果を合わせて、質量がおよそ115 GeVのヒッグス粒子の兆候と考えられる事象が発見された。これらの事象が標準理論で予想される通常の事象である確率は、およそ0.4% (2.9σ のずれ)と

見積もられた。この程度の質量のヒッグス粒子の存在は、後で書くように、 Z^0 や W の精密測定の結果とよく合っている。LEP-II 実験を更に 1 年延長して運転すればこれが本物かどうか 5σ 程度で確定できるはずだが、多くの研究者の強い意見にも拘らず CERN 首脳部は残念ながら LEP の運転延長を認めなかった。

ヒッグス粒子以外の新粒子では、超対称性粒子が最も有望で重要なものであるが、これについては代表的な論文として添付論文 (5) を参照願いたい。残念ながら超対称性粒子は発見されなかったが、宇宙の暗黒物質の最有力候補である最も軽い超対称性粒子の質量が 31.6 GeV 以上と、これまでにない強い制限を与えた。

ヒッグス粒子や超対称性粒子と違って理論の予想がない全く未知の新現象は、どのような形で見えてくるか分からないが、最も確かな方法は、標準理論でよく分かっている反応を詳細に調べて理論の予想とのずれを見てやることである。詳しく調べたところ特に有意なずれはなく、これによって、新しい物理現象のエネルギースケールとしておおよそ数 TeV 以上であることがわかった (添付論文 (4))。

(2) 精密測定

LEP-II では前述のように予想以上に大量のデータを得ることができたので、 W^+W^- 生成の精密測定も統計精度が上がり、更に高い精度で理論の検証を行うことが可能となってきた (添付論文 (6) および (7))。ただし、このような精密測定には、検出器の特性や解析の方法などによる系統的な誤差を正確に見積もる必要があり、最終的な結果が出るまでには今後まだ 2・3 年かかると考えられる。

実際、1995 年夏に終了した LEP-I での Z^0 粒子の精密測定実験の最終結果は、ほぼ 5 年にわたる詳細な系統誤差の検討を経て今回ようやく出版に至った (添付論文 (8) と (10))。また、添付論文としては載せなかったが、 Z^0 のボトムクォークへの崩壊割合 (R_b) に関する最終論文も 1999 年に出版した (研究発表 (B)71)。これらの結果は、少なくとも今後 10-20 年の間、物理学における最も基本的なパラメータの決定として参照され続けると考えられ、物理学の歴史から見ても極めて重要な成果である。

このような LEP-I および LEP-II での精密測定の結果、標準理論との特に有意なずれは見つからなかった。そこでこれらの結果を、米国の SLD 実験での左右非対称性の測定、Tevatron におけるトップクォークと W 粒子の質量の測定と合わせると、まだ見つからないヒッグス粒子の質量が、おおよそ 200 GeV より軽いことが分かった (研究発表 (B)27)。

本研究で見つかった 115 GeV でのヒッグス粒子の兆候は、上記のように、同様に本研究で行われた標準理論の精密測定の結果とうまく整合する。また、標準理論を超える理論として最も有望な超対称性理論からの予想とも非常に良く一致している。LEP-II 実験は 2000 年で終了し、その最終結果は今後数年をかけて得られる予定である。

今後本研究での成果を更に発展させるため、現在 LEP-II のトンネルに建設が開始されている LHC での実験に加えて、軽いヒッグス粒子の詳細研究を含むさらに未知の世界を探るために、LEP-II を超える電子・陽電子衝突装置—リニア・コライダー (JLC)—の早期実現が必要であり、急務となってきた。

研究発表

(A) 国際会議等における口頭発表

1. 駒宮幸男, “LEP の意義と将来計画”
日本物理学会、第 56 回年次大会 シンポジウム講演、中央大学、27-30, March, 2001.
2. 川本辰男, “Test of the Standard Model at LEP”
日本物理学会、第 56 回年次大会 シンポジウム講演、中央大学、27-30, March, 2001.
3. 森俊則, “JLC”
日本物理学会、第 56 回年次大会 シンポジウム講演、中央大学、27-30, March, 2001.
4. 川本辰男, “Standard Model fit results”
The XXXVIth Rencontres de Moriond, QCD and High Energy Hadronic Interactions, Les Arcs, France, 17-24 March, 2001.
5. 中村勇, “Higgs Searches with OPAL”
The XXXVIth Rencontres de Moriond, Electroweak Interactions and Unified Theories, Les Arcs, France, 10-17 March, 2001.
6. 浅井祥仁, “Searches for New Physics at LEP2”
Les Rencontres de Physique de la Vallée d’Aoste, La Thuile, Aosta Valley, Italy, 4-10 March, 2001.
7. 佐伯学行, “Fragmentation studies with fast simulation in OPAL”
WW Physics Workshop - WW MM, Sesimbra, Lisboa, 1st-4th November 2000.
8. 駒宮幸男, “Charge to Participants”
Linear Collider Workshop 2000 - LCWS 2000, Fermi National Accelerator Laboratory, USA, October 24-28, 2000.
9. 森俊則, “LEP における B の物理”
日本物理学会、第 55 回年次大会 シンポジウム講演、新潟大学、22-25, September, 2000.
10. 山下了, “Search for new particles and new phenomena at LEP200 - final year of LEP”
日本物理学会、第 55 回年次大会 特別講演、新潟大学、22-25, September, 2000.
11. 山下了, “Search for the Standard Model Higgs boson at LEP - OPAL/DELPHI/L3 and LEP combined results”
日本物理学会、第 55 回年次大会 特別講演、新潟大学、22-25, September, 2000.
12. 駒宮幸男, “LEP-II Physics”
The 3rd ACFA Workshop on Physics/Detector at the Linear Collider (ACFA-LC3) Taipei, Taiwan, August 9-11, 2000.

13. 山下了, “Higgs at JLC phase-I”
The 3rd ACFA Workshop on Physics/Detector at the Linear Collider (ACFA-LC3)
Taipei, Taiwan, August 9-11, 2000.
14. 山下了, “OPAL Status Report”
LEP experiments Committee (LEPC), CERN, 20 July 2000.
15. 佐伯学行, “LEP2 における標準模型の精密検証”
日本物理学会、2000年春の分科会 特別講演、近畿大学、31, March, 2000.
16. 駒宮幸男, “Summary of Detectors and Towards the Design”
The Second ACFA Workshop on Linear Collider Physics/Detector, Korea University, Seoul, November 3-6, 1999.
17. 山下了, “Higgs Measurement at LC Phase-I”
The Second ACFA Workshop on Linear Collider Physics/Detector, Korea University, Seoul, November 3-6, 1999.
18. 佐伯学行, “Check of Jetset parameters of 4 experiments (ADLO) using fast simulation”
Workshop on WW Physics at LEP200 (WW99), Kolymbari-Chania (Greece), 20-23 Oct. 1999.
19. 川本辰男, “What Is Going On at LEP”
日本物理学会特別講演、島根大学、1999年9月.
20. 上田郁夫, “Effect of beamstrahlung in Higgs measurement”
International Workshop on Linear Colliders (LCWS99), Apr. 28 - May 5, 1999
Sitges, Barcelona, Spain.
21. 上田郁夫, “JLC Trigger and DAQ”
International Workshop on Linear Colliders (LCWS99), Apr. 28 - May 5, 1999
Sitges, Barcelona, Spain.
22. 山下了, “Summary of Session P1: Higgs”
International Workshop on Linear Colliders (LCWS99), Apr. 28 - May 5, 1999
Sitges, Barcelona, Spain.
23. 山下了, “Effects of beam-beam interaction, event-overlap in Higgs measurements”
International Workshop on Linear Colliders (LCWS99), Apr. 28 - May 5, 1999
Sitges, Barcelona, Spain.
24. 川本辰男, “Measurement of Single W production”
International Workshop on Linear Colliders (LCWS99), Apr. 28 - May 5, 1999
Sitges, Barcelona, Spain.

25. 駒宮幸男, “Experimental Overview for e^+e^- linear colliders near future”
International Workshop on Linear Colliders (LCWS99), Apr. 28 - May 5, 1999
Sitges, Barcelona, Spain.
26. 駒宮幸男, “Search for Quantum Gravity Effects in Extra-dimension at Linear Colliders”
International Workshop on Linear Colliders (LCWS99), Apr. 28 - May 5, 1999
Sitges, Barcelona, Spain.
27. 川本辰男, “Results from LEP1 and LEP2”
日本物理学会特別講演、広島大学、1999年3月.

(B) 国際学術誌への発表
(*印の付いたものは添付論文として掲載)

1. * “Combination Procedure for the Precise Determination of Z Boson Parameters from Results of the LEP Experiments”
The LEP collaborations ALEPH, DELPHI, L3 and OPAL and the Lineshape subgroup of the LEP electroweak working group, CERN-EP-2001-153, to be published as part of a review in Physics Reports.
2. * “Search for the Standard Model Higgs Boson in e^+e^- Collisions at $\sqrt{s}=192\text{-}209$ GeV”
The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al., CERN-EP-2000-156, accepted by Phys. Lett. B.
3. * “Precise Determination of the Z Resonance Parameters at LEP : Zedometry”
The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al., CERN-EP-2000-148, Submitted to Euro. Phys. J. C.
4. “A Study of B_s meson oscillation using D_s -lepton Correlations”
The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al., CERN-EP-2000-136, accepted by Euro. Phys. J. C.
5. “Charged Multiplicities in Z Decays into u, d, and s Quarks”
The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al., CERN-EP-2000-128, accepted by Euro. Phys. J. C.
6. “Investigation of the Decay of Orbitally-Excited B mesons and First Measurement of the Branching Ratio $BR(B_j^* \rightarrow B^*\pi(X))$ ”
The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al., CERN-EP-2000-125, Submitted to Euro. Phys. J. C.
7. * “Measurement of triple gauge boson couplings from W^+W^- production at LEP energies up to 189 GeV”
The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al., CERN-EP-2000-114, accepted by Euro. Phys. J. C.
8. “Measurement of W Boson Polarisation and CP-violating Triple Gauge Couplings from W^+W^- Production at LEP”
The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al., CERN-EP-2000-113, accepted by Euro. Phys. J. C.
9. “A Measurement of the Rate of Charm Production in W Decays”
The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al., CERN-EP-2000-100, Phys. Lett. B490 (2000) 71-86.

10. “ W^+W^- Production Cross Section and W Branching Fractions in e^+e^- Collisions at 189 GeV”
The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al., CERN-EP-2000-101, Phys. Lett. B493 (2000) 249-265.
11. * “Measurement of the Mass and Width of the W Boson in e^+e^- Collisions at 189 GeV”
The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al., CERN-EP-2000-099, accepted by Phys. Lett. B.
12. “Combined results on b-hadron production rates, lifetimes, oscillations and semileptonic decays”
ALEPH, DELPHI, L3, OPAL, CDF and SLD Collaborations, CERN-EP-2000-096.
13. “Two Higgs Doublet Model and Model Independent Interpretation of Neutral Higgs Boson Searches”
The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al., CERN-EP-2000-092, accepted by Euro. Phys. J. C.
14. “Measurement of the B^0 Lifetime and Oscillation Frequency using $B^0 \rightarrow D^{*+}l\nu$ decays”
The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al., CERN-EP-2000-090, Phys. Lett. B493 (2000) 266-280.
15. “Comparison of Deep Inelastic Electron-Photon Scattering Data with the Herwig and Phojet Monte Carlo Models”
The LEP Working Group for Two-Photon Physics, ALEPH, L3 and OPAL Collaborations, CERN-EP-2000-109, Submitted to Euro. Phys. J. C.
16. “A Study of One Prong Tau Decays with a Charged Kaon”
The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al., CERN-EP-2000-091, Submitted to Euro. Phys. J. C.
17. “Measurement of the low-x behaviour of the photon structure function F_2^γ ”
The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al., CERN-EP-2000-082, Euro. Phys. J. C18 (2000) 15-39.
18. “Production rates of $b\bar{b}$ quark pairs from gluons and $b\bar{b}b\bar{b}$ events in hadronic Z Decays”
The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al., CERN-EP-2000-123, accepted by Euro. Phys. J. C.
19. “Multiplicities of π^0 , η , K^0 and of Charged Particles in Quark and Gluon jets”
The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al., CERN-EP-2000-070, Euro. Phys. J. C17 (2000) 373-387.

20. "Search for Trilinear Neutral gauge Boson Couplings in $Z \gamma$ production at $\sqrt{s} = 189$ GeV at LEP"
The OPAL Collaboration G. Abbiendi et al., CERN-EP-2000-067, Euro. Phys. J.C17 (2000) 553-566.
21. "First Measurement of the Inclusive Branching Ratio of b Hadrons to ϕ Mesons in Z Decays"
The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al., CERN-EP-2000-065, Phys. Lett. B492 (2000) 13-22.
22. "Searches for Prompt Light Gravitino Signatures in e^+e^- Collisions at $\sqrt{s} = 189$ GeV"
The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al., CERN-EP-2000-078, accepted by Phys. Lett. B.
23. "A Measurement of the tau Mass and the First CPT Test with tau Leptons"
The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al., CERN-EP-2000-056, Phys. Lett. B492 (2000) 23-31.
24. "Searches for Higgs bosons: Preliminary combined results using LEP data collected at energies up to 202 GeV"
The LEP Working Group for Higgs Boson Searches ALEPH, DELPHI, L3, and OPAL, CERN-EP-2000-055.
25. "Photonic Events with Missing Energy in e^+e^- Collisions at $\sqrt{s} = 189$ GeV"
The OPAL Collaboration, CERN-EP-2000-050, Euro. Phys. J. C18 (2000) 253-272.
26. "Measurement of V_{cb} using $B^0 \rightarrow D^{*+}l\nu$ decays"
The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al., CERN-EP-2000-032, Phys. Lett. B482 (2000) 15-30.
27. "A Combination of Preliminary Electroweak Measurements and Constraints on the Standard Model"
The LEP Collaborations ALEPH, DELPHI, L3, OPAL. LEP Electroweak Working Group and the SLD Heavy Flavour and Electroweak Groups, CERN-EP-2000-016 annual report.
28. "Transverse and Longitudinal Bose-Einstein Correlations in Hadronic Z^0 Decays"
The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al., CERN-EP/2000-004, Euro. Phys. J. C16 (2000) 423-433.
29. "Z Boson Pair Production in e^+e^- Collisions at $\sqrt{s} = 183$ and 189 GeV"
The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al., CERN-EP-2000-017, Phys. Lett. B476 (2000) 256-272.

30. “QCD Studies with e^+e^- Annihilation Data at 172-189 GeV”
The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al., CERN-EP/99-178, Euro. Phys. J. C16 (2000) 185-210.
31. “Search for New Physics in Rare B Decays”
The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al., CERN-EP/99-179, Phys. Lett. B476 (2000) 233-242.
32. “QCD Analyses and Determinations of α_s in e^+e^- Annihilation at Energies between 35 and 189 GeV”
The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al., CERN-EP/99-175, Euro. Phys. J. C17 (2000) 19-51.
33. “Search for Unstable Heavy and Excited Leptons at LEP2”
The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al., CERN-EP/99-169, Euro. Phys. J. C14 (2000) 73-84.
34. “Measurements of R_b , A_{FB}^b , and A_{FB}^c in e^+e^- Collisions at 130-189 GeV”
The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al., CERN-EP/99-170, Euro. Phys. J. C16 (2000) 41-60.
35. “Leading Particle Production in Light Flavour Jets”
The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al., CERN-EP/99-164, Euro. Phys. J. C16 (2000) 407-421.
36. “Bose-Einstein correlations in $K^\pm K^\pm$ pairs from Z^0 decays into two hadronic jets”
The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al., CERN-EP/99-163, Submitted to Euro. Phys J. C.
37. “Inclusive Production of D^* Mesons in Photon-Photon Collisions at $\sqrt{s_{ee}}=183$ and 189 GeV and a First Measurement of F_{2c}^γ ”
The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al., CERN-EP/99-157, Euro. Phys. J. C16 (2000) 579-596.
38. “Tau decays with Neutral Kaons”
The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al., CERN-EP/99-154, Euro. Phys. J. C13 (2000) 213-223.
39. “Measurement of the $W^+W^-\gamma$ Cross-section and First Direct Limits on Anomalous Electroweak Quartic Gauge Couplings”
The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al., CERN-EP/99-130, Phys. Lett. B471 (1999) 293-307.
40. * “Search for Chargino and Neutralino Production at $\sqrt{s}=189$ GeV at LEP”
The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al., CERN-EP/99-123, Euro. Phys. J. C14 (2000) 187-198.

41. "Search for Anomalous Production of Acoplanar Di-lepton Events in e^+e^- Collisions at $\sqrt{s} = 183$ and 189 GeV"
The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al., CERN-EP/99-122, Euro. Phys. J. C14 (2000) 51-71.
42. "Precision Luminosity for Z^0 Lineshape Measurements with a Silicon-Tungsten Calorimeter"
The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al., CERN-EP/99-136, Euro. Phys. J. C14 (2000) 373-425.
43. "A Study of Three-Prong Tau Decays with Charged Kaons"
The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al., CERN-EP/99-095, Euro. Phys. J. C13 (2000) 197-212.
44. "Search for pair-produced leptoquarks in e^+e^- interactions at $\sqrt{s}=183$ GeV"
The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al., CERN-EP/99-091, Euro. Phys. J. C13 (2000) 15-27.
45. * "Tests of the Standard Model and Constraints on New Physics from Measurements of Fermion-pair Production at 189 GeV at LEP"
The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al., CERN-EP/99-097, Euro. Phys. J. C 13 (2000) 553-572.
46. "Search for Neutral Higgs Bosons in e^+e^- Collisions at $\sqrt{s} \simeq 189$ GeV"
The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al., CERN-EP/99-096, Euro. Phys. J. C12 (2000) 567-586.
47. "Measurement of the Production Rate of Charm Quark Pairs from Gluons in Hadronic Z^0 Decays"
The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al., CERN-EP/99-089, Euro. Phys. J. C13 (2000) 1-13.
48. "Multi-photon production in e^+e^- collisions at $\sqrt{s} = 189$ GeV"
The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al, CERN-EP/99-088, Phys. Lett. B 465 (1999) 303-314.
49. "A Study of B_s^0 Meson Oscillation Using Hadronic Z^0 Decays Containing Leptons"
The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al., CERN-EP/99-085, Euro. Phys. J. C11 (1999) 587-598.
50. "Search for Higgs Boson and Other Massive States Decaying into Two Photons in e^+e^- Collisions at 189 GeV"
The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al., CERN-EP/99-084, Phys. Lett. B 464 (1999) 311-322.

51. "A Study of Spin Alignment $\rho(770)^\pm$ and $\omega(782)$ Mesons in Hadronic Z^0 Decays"
The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al., CERN-EP/99-082, Euro. Phys. J. C16 (2000) 61-70.
52. "Measurements of inclusive semileptonic branching fractions of b hadrons in Z^0 decays"
The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al., CERN-EP/99-078, Euro. Phys. J. C13 (2000) 225-240.
53. "Total Hadronic Cross-Section of Photon-Photon Interactions at LEP"
The Opal Collaboration, G. Abbiendi et al., CERN-EP/99-076, Euro. Phys. J. C14 (2000) 199-212.
54. "Limits on Higgs Boson Masses from Combining the Data of the Four LEP Experiments at Energies up to 183 GeV"
The LEP Working Group for Higgs Boson Searches ALEPH, DELPHI, L3, and OPAL, CERN-EP/99-060.
55. "Test of the Flavour Independence of α_s Using Next-to-leading Order Calculations for Heavy Quarks"
The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al., CERN-EP/99-045, Euro. Phys. J. C11 (1999) 643-659.
56. "Search for R-parity Violating Decays of Scalar Fermions at LEP"
The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al., CERN-EP/99-043, Euro. Phys. J. C12 (2000) 1-24.
57. "Search for Scalar Top and Scalar Bottom Quarks at $\sqrt{s}=189\text{GeV}$ at LEP"
The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al., CERN-EP/99-036, Phys. Lett. B 456 (1999) 95-106.
58. "Experimental Properties of Gluon and Quark Jets from a Point Source"
The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al., CERN-EP/99-028, Euro. Phys. J. C11 (1999) 217-238.
59. "A Combination of Preliminary Electroweak Measurements and Constraints on the Standard Model"
4 LEP experiments : ALEPH, DELPHI, L3 and OPAL, the LEP Electroweak Working Group, and the SLD Heavy Flavour and Electroweak Groups, CERN-EP/99-015.
60. "Measurements of the QED Structure of the Photon"
The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al., CERN-EP/99-010, Euro. Phys. J. C11 (1999) 409-425.

61. "Intermittency and Correlations in Hadronic Z^0 Decays"
The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al., CERN-EP/99-009, Euro. Phys. J. C11 (1999) 239-250.
62. "Searches for R-Parity Violating Decays of Gauginos at 183 GeV at LEP"
The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al., CERN-EP/98-203, Euro. Phys. J. C11 (1999) 619-642.
63. "Measurement of the W Mass and Width in e^+e^- Collisions at 183 GeV"
The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al., CERN-EP/98-197, Phys. Lett. B 453 (1999) 138-152.
64. "Colour Reconnection Studies in $e^+e^- \rightarrow W^+W^-$ at $\sqrt{s}=183$ GeV"
The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al., CERN-EP/98-196, Phys. Lett. B 453 (1999) 153-168.
65. "Measurement of the B^+ and B^0 Lifetimes and Search for CP(T) Violation using Reconstructed Secondary Vertices"
The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al., CERN-EP/98-195, Euro. Phys. J. C12 (2000) 609-626.
66. "A Measurement of the Product Branching Ratio $f(b \rightarrow \Lambda_b) \times BR(\Lambda_b \rightarrow \Lambda X)$ in Z^0 Decays"
The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al., CERN-EP/98-186, Euro. Phys. J. C9 (1999) 1-9.
67. "Bose-Einstein Correlations in $e^+e^- \rightarrow W^+W^-$ at 172 and 183 GeV"
The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al., CERN-EP/98-174, Euro. Phys. J. C8 (1999) 559-571.
68. " W^+W^- Production and Triple Gauge Boson Couplings at LEP Energies up to 183 GeV"
The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al., CERN-EP/98-167, Euro. Phys. J. C8 (1999) 191-215.
69. "Measurement of the Semileptonic Branching Ratio of Charm Hadrons produced in $Z^0 \rightarrow c\bar{c}$ Decays"
The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al., CERN-EP/98-146 Euro. Phys. J. C8 (1999) 573-584.
70. "Search for Anomalous Photonic Events with Missing Energy in e^+e^- Collisions at $\sqrt{s} = 130, 136$ and 183 GeV"
The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al., CERN-EP/98-143, Euro. Phys. J. C8 (1999) 23-40.

71. "A Measurement of R_b using a Double Tagging Method"
The OPAL Collaboration G. Abbiendi et al., CERN-EP/98-137, Euro. Phys. J. C8 (1999) 217-239.
72. "Search for Chargino and Neutralino Production at $\sqrt{s} = 181-184$ GeV at LEP"
The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al., CERN-EP/98-136, Euro. Phys. J. C8 (1999) 255-272.
73. "Search for Acoplanar Lepton Pair Events in e^+e^- Collisions at $\sqrt{s} = 161, 172$ and 183 GeV"
The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al., CERN-EP/98-122, Euro. Phys. J. C12 (2000) 551-565.
74. "A Study of Parton Fragmentation in Hadronic Z^0 Decays Using $\Lambda \bar{\Lambda}$ Correlations"
The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al., CERN-EP/98-114, Euro. Phys. J. C13 (2000) 185-195.
75. "Di-Jet Production in Photon-Photon Collisions at $\sqrt{s_{ee}}=161$ and 172 GeV"
The OPAL Collaboration, G. Abbiendi et al., CERN-EP/98-113, Euro. Phys. J. C10 (1999) 547-561.
76. "Measurement of the Michel Parameters in Leptonic Tau Decays"
The OPAL Collaboration, K. Ackerstaff et al., CERN-EP/98-104, Euro. Phys. J. C8 (1999) 3-21.
77. "Measurement of Tau Branching Ratios to Five Charged Hadrons"
The OPAL Collaboration, K. Ackerstaff et al., CERN-EP/98-090, Euro. Phys. J. C8 (1999) 183-189.
78. "Production of K_s^0 and Λ in Quark and Gluon Jets from Z^0 Decay"
The OPAL Collaboration, K. Ackerstaff et al., CERN-EP/98-058 Euro. Phys. J. C8 (1999) 241-254.

(C) その他の発表
(すべて添付論文として掲載)

1. 山下了, “LEP でのヒッグス兆候観測と実験終了について”
High Energy News, Volume 19, Number 4 (2000) 130–150.
2. 川本辰男, “New Energy Record of LEP 2000”
High Energy News, Volume 19, Number 1 (2000) 22–23.
3. 上田郁夫, “LEP2 1999”
High Energy News, Volume 18, Number 4 (1999) 86–94.

添付論文（抜粋）

LEP2 1999

東京大学素粒子物理国際研究センター
上田郁夫

ueda@icepp.s.u-tokyo.ac.jp

1999年11月8日

LEP 実験が始まって十周年に当たる今年、LEP のエネルギーは遂に 200 GeV を突破した。二十世紀最後の年となる来年は LEP 実験にとって最後の年であり、LEP は持てるポテンシャルのすべてを注ぎ込んで到達し得る限りのエネルギーで走ることになる。実験の最前線から種々の話題を報告する。

1 はじめに

1989年7月13日、最初のビームが LEP に入射された。それは当初目指されていた7月14日、フランス革命 200 周年の前日であった。それからひと月の間に 850 μA という大きなビーム電流、47.5 GeV までの加速、ビームの絞り込み、5 時間にわたって持続する安定性など、実験に必要な事項が次々に達成され、1989年8月13日に衝突試験が行なわれた。LEP 最初のイベントは幸運にも OPAL 測定器において東京大学の製作した鉛ガラス電磁シャワーカロリメータによって検出された



図 1: LEP 最初の Z 粒子崩壊事象。LEP 実験開始直後、四実験の中で最初に OPAL で観測された。Z 粒子が崩壊して生じた二つのクォークのジェットが、東京大学の製作した電磁シャワーカロリメータで検出された。ジェットチェンバーにはまだ高圧がかかっておらず、トラックは記録されなかった。

(図 1)。

その後の十年間に LEP は Z 粒子のピーク、W 粒子対生成などのエネルギーで実験を行ない(図 2)、トップクォーク以外のすべての既知の粒子について、様々な測定を行なって来た。また、エネルギーフロンティアを走る e^+e^- コライダーとして Higgs 粒子や未知の新粒子の探索を推し進めて来た。LEP における測定によって標準理論が精密に検証され、また、いくつかのパラメータが決定できた。とりわけ、軽いニュートリノが三種類しかないことが確認され、したがって標準理論の枠組の中で、粒子の世代数が 3 であることが確実にされた。また、これらの精密測定の結果、トップクォークの質量をその発見以前にほぼ正確に予言したこと、電弱強の三つの相互作用の結合定数が超対称性を導入した場合に高いエネルギーにおいて極めてよい精度で一致することを示したこと、などが重要な成果として挙げられる。また、年々更新される精密測定をもとに、Higgs 粒子の質量をかなり狭い範囲に予測していることが注目される。

昨年までの LEP の歴史、およびその成果については、昨年の高エネルギーニュースに東大の駒宮氏による非

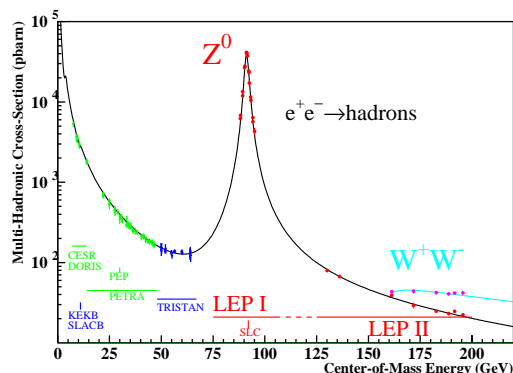


図 2: e^+e^- 衝突実験の重心系エネルギーと反応断面積。現在までに行なわれている種々の実験のエネルギー領域とそこでのマルチハドロン反応断面積の測定値を網羅し、理論値と重ねた。

常に詳しい解説があるので、是非参照して頂きたい [1]。ここでは、この十年の間の LEP 実験の成果などがもたらした進歩について、最近の日本物理学会における東大の川本氏の講演の中から興味深い表を引用しておきたい (表 1)。

2 LEP 加速器のアップグレード

1998 年には、LEP はビームエネルギー 94.5 GeV、衝突エネルギー 189 GeV で運転された。また、ビーム電流は最大 6 mA で、年間のルミノシティは 190 pb^{-1} にも達した。この成功を受けて、1999 年の目標には衝突エネルギー 200 GeV、ビーム電流 8 mA が掲げられた。

1998 年の運転終了後、16 基の超伝導 Nb/Cu 加速管が追加設置され、超伝導 Nb/Cu 加速管は計 272 基、超伝導 Nb 加速管が 16 基、常伝導 Cu 加速管が 48 基、合計 336 基となった。だが、これで安定に運転出来るビームエネルギーはようやく 96 GeV、衝突エネルギー 192 GeV である (表 2)。100 GeV のビームエネルギーに到達するためには、各加速管を設計値の 6 MV/m を上回る 7 MV/m で運転しなければならない。このためには 5 割増しの冷却能力が必要となり、低温設備も増強された。また、加速管の発熱は少なからずビームに由来することが分かっており、その原因が追及された。修理のために取り出された加速管を調べた結果、問題は加速管の調整のために電場をサンプルするアンテナのケーブルがビーム電流によって過熱することにあることが突き止められた。この問題はまた、ルミノシティにも大きな影響を与える。アンテナケーブルが過熱して壊れてしまう

表 1: この十年間の素粒子物理学の種々の測定値の進歩

	1988 PDG	1999
m_Z	$\pm 1.8 \text{ GeV}$	$\pm 2.1 \text{ MeV}$
Γ_Z	$< 5.6 \text{ GeV}$	$\pm 2.4 \text{ MeV}$
g_A^ℓ	-0.498 ± 0.027	-0.50117 ± 0.00027
g_V^ℓ	-0.044 ± 0.036	-0.03772 ± 0.00041
N_ν	< 5.9	2.9835 ± 0.0083
m_W	$\pm 1.3 \text{ GeV}$	$\pm 42 \text{ MeV}$
Γ_W	$< 5.6 \text{ GeV}$	$\approx \pm 100 \text{ MeV}$
m_H	$> 3.9 \text{ GeV}$	$> 102 \text{ GeV}$
α_s	$\alpha_s(34) = 0.14 \pm 0.02$	$\alpha_s(m_Z) = 0.119 \pm 0.002$
$\tau(\tau)$	$0.304 \pm 0.009 \text{ ps}$	$0.2900 \pm 0.0012 \text{ ps}$
$\tau(B)$	$1.31 \pm 0.13 \text{ ps}$	$1.56 \pm 0.04 \text{ ps (B}^0)$

のを防ぐためには、ビームのバンチ長と電流量を調節しなければならない。バンチ長を一定以上に保つため、電磁石や加速振動数の調整がなされ、その結果、1998 年のビーム加速の手続きは複雑なものになり、時間を取られることもあった。また、加速するビームの電流量を抑えた結果、全電流量は 6 mA 以下に抑えられた。この制約を取り払うことが出来れば、ルミノシティをさらに増やすことが出来る。電流の自乗とは行かないまでも、正比例よりは大きな増加が見込めるはずである。このため、1998 年の運転終了後、272 の超伝導 Nb/Cu 加速管すべてのアンテナケーブルをより太いものに交換する作業が行なわれた。

また、加速管毎の加速勾配のばらつきを抑えるため、加速管に伝えられる電力を均一化し、また導波管の電気的長さを合わせて位相のずれをなくす努力が払われた。加速管毎のばらつきをそのままにして加速電圧を上げようとするれば、限界近くで動作している加速管は限界を越えてしまい、無理が生じて安定な運転が出来なくなる。この他にも加速管に供給する電力の増大に伴う高圧系の負荷の問題、電場による加速管の変形振動によって生じる問題など、エネルギーを上げることによって厳しくなり、解決しなければならない問題が数多く存在する。実験に支障をきたさない様、信頼性の高い安定したビームを供給するために、1999 年の運転は、一歩ずつ加速勾配とビーム電流を上げて行くこととなった。その一歩一歩において安定したビームを供給するために必要な加速電圧を表 3 に示した。

例年より早めの 5 月初頭から Z ピークでのキャリブレーション・ランが始められ、5 月中旬には衝突エネルギー

表 2: 加速管を昨年と同じ勾配で運転した場合に得られる加速電圧 [2]。安定して実験を行なうためには、最低一つのクライストロンが停止しても対応出来る余裕がなければならない。この場合に到達出来るビームエネルギーは 96.7 GeV、二つのクライストロンの停止に対する余裕を見込むと、約 96 GeV となる。

	Nr cav's	grad	total MV
Cu	48		100.0
Solid Nb	16	5 MV/m	136.0
Cu/Nb	272	6 MV/m	2774.4
		nominal sum	3010.4
		efficiency %	96
		1 klystron down	-81.6
		2 klystrons down	-163.2
available		2808 MV	96.7 GeV
		2727 MV	96 GeV

ギー 192 GeV での運転が始まった。エネルギーを一定に保って実験を続ける傍ら、加速勾配を上げる試みが続けられた結果、早くも6月初頭に LEP 一周での加速電圧が 3100 MV を越え、衝突エネルギーを 196 GeV に上げての運転が始められた。高いルミノシティで順調な運転が続き、二ヶ月で 60 pb^{-1} を越すデータが蓄積される一方、加速勾配の向上も続けられ、8月2日には遂に衝突エネルギー 200 GeV に到達した(図3)。heforum に宛てて、「名実ともに『LEP200』となった」ことを報告する東大の山下氏の電子メールを御記憶の方もおいでであろう。超伝導 Nb/Cu 加速管の平均加速勾配は 7 MV/m が達成された(図4)。

予想を上回る順調なエネルギー上昇を受け、衝突エネルギーをさらに上げられる可能性が濃厚になった。加速管の調整は続けられたが、しかし、ここで別方面からの問題が立ちふさがった。LEP 建設以前に CERN とフランス当局との間に交わされた取り決めにより、ビームエネルギー 100 GeV 以上は出せない、というのである。勿論、今年衝突エネルギー 200 GeV を目指していた以上、この制限の撤廃するための交渉は昨年から進められていた。それが現実に 200 GeV を達成し、さらにエネルギーを上げることが可能になったこの時になってはまだ終っていなかったのである。

9月24日、ようやく仏当局によって制限の撤廃が認められると、その日の内に 202 GeV での運転が開始された。現在は、3500 MV の加速電圧が達成され、積分ルミノシティも合計 200 pb^{-1} を越える(図5)など、極めて順調に実験が続いている。

3 今年の LEP の物理

ここで、今年の LEP の実験結果を紹介したい。勿論、現在もデータ収集と解析が進行中であり、最終結果が出るのはまだ先であるが、筆者の属する OPAL 実験から、

表 3: 各ビームエネルギーの達成に必要な LEP 全周での加速電圧 [3]。Klystron reserve の数は、それだけの数のクライストロンが停止してもビームエネルギーを保つだけの余裕があることを示している。この数が零になると、一つのクライストロンの停止で直ちに加速電圧が下がるので、安定に実験が出来ない。

Klystron reserve	0	1	2
98 GeV	2970 MV	3065 MV	3160 MV
100 GeV	3220 MV	3315 MV	3410 MV
101 GeV	3345 MV	3440 MV	3535 MV

可能な限り最新の結果を、また、LEP の四実験を総合した結果が出ている場合にはそれを、preliminary ながら紹介する。

なお、ここに紹介し切れない多くの結果が国際学会で発表されており、たとえば以下の URL から参照することが出来る。



図 3: 衝突エネルギー 200GeV を達成した際の LEP の運転状況モニター画面

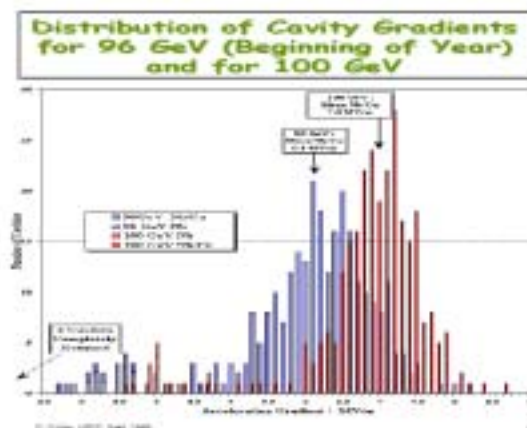


図 4: ビームエネルギー 96 GeV と 100 GeV での加速管毎の加速勾配の分布。超伝導 Nb/Cu 加速管の平均勾配はそれぞれ 6.1 MV/m と 7.0 MV/m。



図 5: 年毎の積算ルミノシティ。一番上の曲線が今年のもので、かつてない順調さでデータを蓄積した昨年をさらに上回るペースのルミノシティが達成されている。

3.1 Higgs 粒子探索

LEP での精密測定と他の実験の結果を加え、標準理論で予言される Higgs 粒子の質量がどのくらいと期待されるかが計算できる。最新の結果では、 $m_H < 215$ GeV (95% C.L.) まで追い詰められている (図 6)。

LEP2 のエネルギーでの Higgs 粒子の生成は、ほとんどが $e^+e^- \rightarrow ZH$ であり、昨年のデータでは、Higgs 粒子があったとしても $e^+e^- \rightarrow ZZ$ と見わけにくい。今年は衝突エネルギーの増強に伴い、探索する Higgs 粒子の質量が Z 粒子の質量を越えたことで、質量のピークが見えやすくなった。

Higgs 粒子を区別する決め手はその崩壊分岐比となる。たとえば Z 粒子の b クォーク対への崩壊は約 15% であるが、Higgs 粒子の場合は、LEP2 で見つかる程度の質量を持つとすると、その約 85% が b クォーク対に崩壊する。従って、終状態に $b\bar{b}$ を含むイベントの同定が重要になる。b クォークから生じる b-ハドロンは比較的寿命が長く、衝突点で生成されてから崩壊するまでにある程度の距離を飛ぶので、衝突点近くの粒子飛跡を精確に測定すると、衝突点から有意に離れた点に飛跡が集中するのが観測できる。また、他のクォークより重いことからジェットの形状などに特徴が現れる。これらを用いて b クォークらしさを計算し、イベントを選別する。

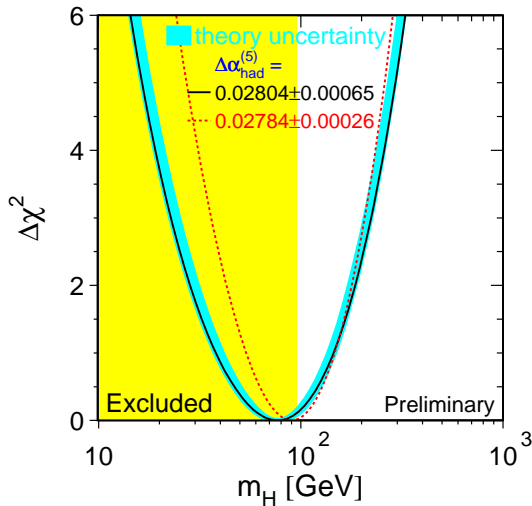


図 6: 標準理論に基づく Higgs 粒子質量の予測。種々の精密測定をパラメータとしてフィットすると、Higgs 粒子質量は 77_{-39}^{+69} GeV、上限は 215 GeV (95% C.L.) となる。一方、LEP における $\sqrt{s} = 189$ GeV までの直接探索により、Higgs 粒子の下限はほぼ 100 GeV (95% C.L.) である。

Higgs 粒子の崩壊の残り約 15% は、 τ 粒子、c クォーク、グルーオンでほぼ占められる。解析では $qqbb$ 、 $\nu\nu qq$ 、 $qq\tau\tau$ 、 $llqq$ などのチャンネルを総動員して Higgs 粒子探索を行なった。また、超対称性を導入して拡張した標準理論で予言される Higgs 粒子 h 、 A 、 H^\pm の探索も行なわれたが、いずれも、衝突エネルギー $\sqrt{s} = 192-196$ GeV のデータからは発見の兆候は見られなかった。この結果、標準理論の Higgs 粒子の質量は 102.6 GeV 以上 (95% C.L.) となる。また、Minimal Supersymmetric Standard Model での中性 Higgs 粒子は 84.3 GeV 以上、荷電 Higgs 粒子は 77.0 GeV 以上との制限が得られる (いずれも 95% C.L.)。

その後さらに高いエネルギー、 $\sqrt{s} = 200-202$ GeV でのデータが蓄積され、解析が進められている。最初の結果は間もなく開かれる LEP Experiments Committee で報告されることになっているが、この原稿を書いている現段階ではまだ準備中であり、ここに紹介出来ないのが非常に残念である。

3.2 標準理論の検証

3.2.1 W Boson Mass

LEP2 の動機のひとつは W 粒子質量の精密測定であった。LEP1 による Z ピーク付近の精密測定などから、標準理論で W 粒子の質量を間接的に決定することが出来、その精度はわずかに 30 MeV 程度であった。昨年以來飛躍的に増大した LEP のルミノシティによって来年の

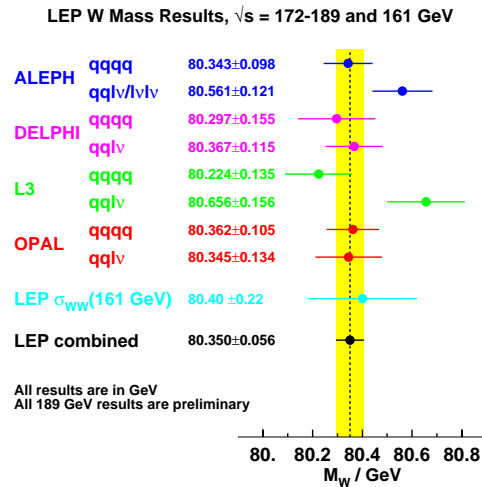


図 7: LEP で測定された W 粒子の質量。 $\sqrt{s} = 172-189$ GeV に於いて四実験各々のチャンネルで測定された結果の他、 $\sqrt{s} = 161$ GeV で測定された W 対生成断面積から W 対生成の閾値効果を用いて計算される質量も示してある。各測定値はほぼ一致しており、LEP 全体で平均して非常に高い精度で W 粒子質量を決定することが出来た。

終りまでに得られる大量のデータを使用すれば、LEP2ではW粒子の質量を30MeV程度の高精度で決定することが可能になると予測されている。これは間接的測定の精度とほぼ同じであり、標準理論検証の強力な手段となる。

図7にLEPの四実験によるW粒子の質量の測定結果を示した。四実験を合わせた値は 80.350 ± 0.056 で、ハドロンコライダーによる測定値 80.448 ± 0.062 とよく一致している。精度もほぼ同程度であり、さらに平均することで、 80.394 ± 0.042 という結果が得られる。この結果は標準理論の予測の通りであり、これを図6のようなHiggs粒子質量の予測に用いることが出来る。LEP2などの測定によって大幅に精度が向上したことにより、W粒子質量はその重要なパラメータとなった。

3.2.2 Fermion-pair Production

LEPにおけるフェルミオン対生成の測定結果は今年のデータでもやはり、標準理論とよい一致を見せている。図8はそうした測定の中のひとつである $e^+e^- \rightarrow q\bar{q}(\gamma)$ の断面積を、衝突エネルギー \sqrt{s} に対してプロットしたものである。測定結果に二種類あるのは、強いinitial state radiationによって e^+e^- 反応が実質的にZピークのエネルギーで起きる‘radiative return’イベントを含めるか含めないかによる。ここでは、W対、Z対に由来するハドロニックイベントは取り除いてあるが、それらを含めた断面積も測定されており、図2の中に示されている。

この他、レプトン対の生成断面積、前後方非対称性も全般に標準理論の予測とよく一致している。これらのうちinitial state radiationの強くない‘non-radiative’なイベント、すなわち衝突エネルギーのほとんどがフェルミオンの対生成に使われたイベントを用いた結果から、このエネルギーでの電磁結合定数 α_{em} が求められる(図9)。130–200 GeVでの結果を合わせた平均は低エネルギー極限での値から 3σ 離れており、結合定数のrunningの効果を示している。

3.2.3 W^+W^- Production

W対生成断面積の測定は、LEP2で初めて可能になった。この測定は、W粒子質量の測定と共に標準理論を検証する上で非常に重要である。

W対生成イベントの解析は、 $l\nu l\nu$, $qq\nu\nu$, $qqqq$ の三つのチャンネルに分けて行なっている。それぞれへの分岐比は標準理論では10.5%, 43.9%, 45.6%となっている。

この分岐比を仮定して三つのチャンネルを結合した結果が図10に示されている。測定された断面積は標準理論に基づく計算とよく一致しており、triple gauge boson coupling(TGC)の効果が明瞭に見えている。

レプトンを含むチャンネルでは、そのタイプ毎にさらにチャンネルを分割し分岐比を比較した結果、三つの分岐比が等しいこと、即ちlepton universalityを確認した。W崩壊のレプトンへの分岐比は、三つの平均から

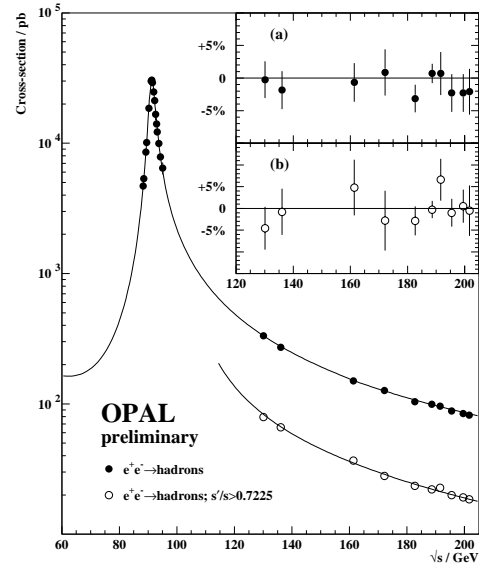


図8: LEP1からLEP2の最新エネルギーまでで測定されたハドロニックイベントの断面積。右端の四点が今年に対応する。(黒)4フェルミオンイベントを除くハドロニックな反応の全断面積。(白)強いinitial state radiationの無い‘non-radiative’な反応の断面積。

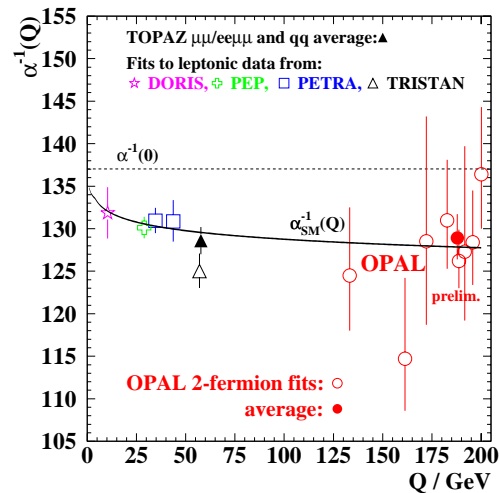


図9: Non-radiativeなフェルミオン対生成に関する測定値をフィットして得られた電磁結合定数 α_{em} と、標準理論に基づく予測(実線)。破線は低エネルギー極限での値。横軸 Q はOPAL実験では衝突エネルギー \sqrt{s} である。

(10.68 ± 0.13)%となった。

3.2.4 ZZ Production

LEP では衝突エネルギーが $\sqrt{s} = 183$ GeV に達して以降 Z 粒子の対生成が可能になり、断面積の測定が続けられている。Z 対生成の断面積は W 対生成のそれよりも一桁も小さく、データ量が少ないために測定誤差が多少大きくなるが、その範囲内で標準理論に基づく計算に合致している (図 11)。

Z 崩壊の b クォーク対への分岐比の測定も行ない、LEP1 などの Z ピークで行なわれた精密測定と比較している。 $\sqrt{s} = 189$ GeV における結果は 0.19 ± 0.06 で、Z ピークでの値 0.1513 ± 0.0006 [4] とほぼ等しい。従って、ここでも Higgs 粒子生成の兆候は見られなかった。

3.3 Gauge Couplings

3.3.1 TGC

標準理論では $W^+W^-\gamma$, W^+W^-Z の二つの triple gauge boson coupling (TGC) の存在が予言されている。LEP2 では、 $W^+W^-\gamma$ と W^+W^-Z の両方の寄与が、W 対生成 ($e^+e^- \rightarrow Z/\gamma \rightarrow W^+W^-$) で、 $W^+W^-\gamma$ のみの寄与が single-W 生成 ($e^+e^- \rightarrow W\nu$) で観測可能である。WW γ と WWZ の効果の分離は、W 対生成における W 粒子およびその崩壊粒子の角分布、あるいは、single-W 生成断面積の測定などから行なうことが出来る。これらの結合のパラメータが標準理論からずれている可能性も含めて解析がなされたが、これまでの測

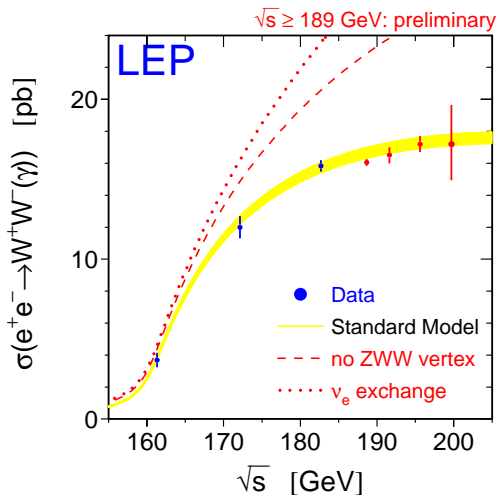


図 10: W 粒子対の生成断面積の測定値と理論値。標準理論に基づく計算の他、ZWW の結合がない場合、さらに WW γ の結合もなく ν_e 交換のみによる場合の計算も示してある。

定では、TGC が標準理論からずれている兆候は見えていない。

また、標準理論からは予期されないが、ZZ γ , ZZZ の TGC があるとすれば、Z 対生成断面積と角分布から測定出来るかも知れない。これについても解析が行なわれたが、この TGC の効果は見られなかった。

3.3.2 QGC

標準理論の中で可能な quartic gauge coupling (QGC) は $W^+W^-W^+W^-$, W^+W^-ZZ , $W^+W^-Z\gamma$, $W^+W^-\gamma\gamma$ の四つである。これらは、LEP のエネルギーではさして大きな役割を持たないが、さらにエネルギーの高い将来の加速器、LHC やリニアコライダーでは意味を持って来るだろう。この解析は世界に先駆けて OPAL で行なわれた。昨年の $\sqrt{s} = 189$ GeV のデータを使って $e^+e^- \rightarrow W^+W^-\gamma e^+e^- \rightarrow \nu\nu\gamma\gamma$ の測定が試みられた結果、標準理論の予測する通りこの結合の効果はほぼゼロであった。

3.4 新粒子探索

標準理論を越える新しい物理が期待されて久しいが、未知の新粒子を直接的に発見することは、電子陽電子コライダーのエネルギーフロンティアを走る LEP にかかる最も大きな期待の一つである。中でも超対称粒子の発見にかかる期待は大きく、精力的に探索が行なわれている。標準理論から相互作用の大統一へ向かう際に出てくる問題を解決し得る、最も有力な方法が超対称性の導入であることが最大の動機であるが、その他の魅力として宇宙の暗黒物質、dark matter を説明出来ることが挙げられる。銀河や銀河団の観測から運動学的に必要となる

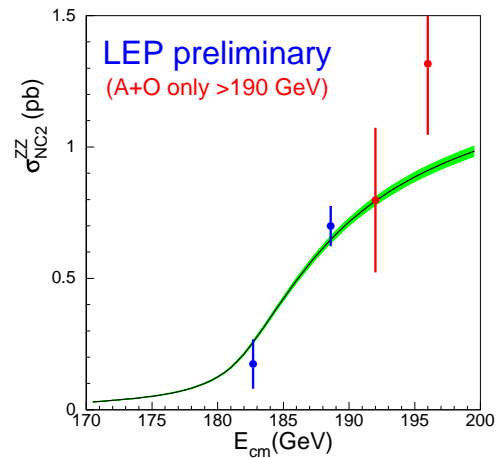


図 11: Z 粒子対生成断面積の測定値と標準理論に基づく予測。

物質質量や、宇宙の平坦性を説明するために必要な物質質量が実際に観測される物質質量よりはるかに多いことから、観測されない物質、dark matter が宇宙に充満していると考えられている。宇宙初期の元素合成の計算と現在の観測結果から、その物質をバリオンが構成しているとは考えられず、また、これまで観測されていないことから通常の粒子との相互作用が極めて小さいはずである。超対称性理論の多くのモデルはこの問題を解決する粒子を提供する。その様な粒子の存在を実験的に確認することは素粒子論だけでなく、宇宙論的にも意義が大きい。

また、こうした標準理論の枠外の粒子の他、理論に依拠せず、イベントのトポロジー毎にデータを丹念に調べる作業も行なわれている。これによって、予想もしなかったような新粒子も見逃すことなく発見することが出来るはずである。

3.4.1 Gravity Mediated SUSY Breaking models

超対称粒子の中で、一般に最も軽いと考えられているのは $\tilde{\chi}_1^0$ 、すなわち最も軽い neutralino で、R-parity が保存するならばあらゆる粒子が最終的に $\tilde{\chi}_1^0$ へと崩壊する。 $\tilde{\chi}_1^0$ はそれ以上崩壊することが出来ず、また、通常の物質との相互作用は極めて小さいので測定器をすり抜けてしまい検出されない。従って、最も低いエネルギーで可能な $\tilde{\chi}_1^0$ 対生成の検出は不可能であり、 $\tilde{\chi}_1^0\tilde{\chi}_2^0$ や $\tilde{\chi}_1^+\tilde{\chi}_1^-$ あるいは、 $\tilde{q}\tilde{q}$, $\tilde{\ell}^+\tilde{\ell}^-$ の対生成を探索することになる。これらのイベントの特徴は、超対称粒子が $\tilde{\chi}_1^0$ へ崩壊する際に放出するクォークのジェットや、レプトンなど検出可能なものの他に、検出されずに測定器から逃げ出して行く $\tilde{\chi}_1^0$ の持ち去る大きなエネルギーと運動量の欠損が存在することである。解析の結果、最終的に選択された候補事象の数は、標準理論の他のプロセスに由来するバックグラウンドの予測値と一致しており、発見の兆候はなかった。この結果、超対称粒子の質量に応じて生成断面積の上限を決定することが出来る。この結果を Constrained MSSM の枠組で解釈し、一定の質量領域をたとえば 95% C.L. で棄却することも出来る (図 12)。ここで重要なのは、軽い neutralino を棄却できることである。Dark matter の直接検出を目指してこれまでに行なわれて来ている実験は、半導体結晶などの中で dark matter 粒子がごく稀に起こす反応による recoil を利用しようとしており、dark matter 粒子がある程度以上の質量を持たないと、検出が極めて難しくなる。Dark matter 粒子が neutralino であったとすると、Constrained MSSM の枠内とは言えその質量が

30 GeV 以上であることを示すこの結果は、即ち dark matter の直接検出が可能であることを示しており、大きな意味がある。

3.4.2 Gauge Mediated SUSY Breaking models

超対称性の破れを媒介する機構として、新たなゲージ相互作用を導入する gauge mediated SUSY breaking モデル (GMSB) には、ゲージ相互作用が flavour blind で

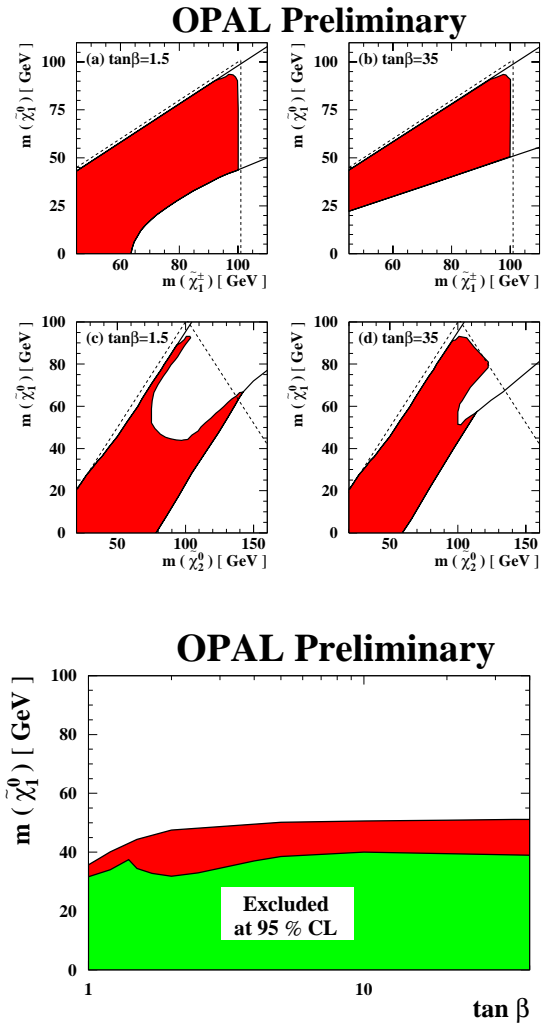


図 12: Constrained MSSM (CMSSM) の枠組内で棄却された chargino と neutralino の質量領域 (95% C.L.)。濃く塗られた部分はパラメータによらず棄却出来る領域を示し、薄く塗られた部分は sfermion が重い場合にさらに棄却出来る領域を示している。(上) 二つの Higgs 二重項の真空期待値の比 $\tan\beta$ を二点選び、その条件下で $\tilde{\chi}_1^0$ と $\tilde{\chi}_2^0$, $\tilde{\chi}_1^\pm$ の質量の棄却された領域。破線は LEP2 実験で生成・崩壊が運動学的に可能な領域の境界、太線は CMSSM で可能な領域の境界を示している。(下) $\tan\beta$ の値 1-40 に対し、 $\tilde{\chi}_2^0$, $\tilde{\chi}_1^\pm$ の質量に依らず棄却される $\tilde{\chi}_1^0$ の質量。

あるために、実験的に flavour changing neutral currents が観測されていないという制限に抵触することなく自然に理論を構築できるという特長がある。GMSB のモデルでは gravitino が最も軽い超対称粒子となるので、 $\tilde{\chi}_1^0$ が $\gamma\tilde{G}$ に崩壊することが可能となる。従って、3.4.1 節の解析のイベント・トポロジーに大きなエネルギーを持った γ が付け加わることになる。また、 $\tilde{\chi}_1^0$ の対生成が $\tilde{\chi}_1^0\tilde{\chi}_1^0 \rightarrow \gamma\tilde{G}\gamma\tilde{G}$ の形で観測可能となる。ただし、理論的に許される $\tilde{\chi}_1^0$ の寿命の範囲が広く、必ずしも測定器の中で崩壊するとは限らないため、これらの γ の数は、0-2 個の場合を想定している。GMSB トポロジーの非常に好ましい候補イベントを図 13 に示した。

4 LEP in 2000

今年よりさらにエネルギーを増強するため、11 月中旬から翌年 4 月の LEP 停止期間中に以下の作業が予定されている。

- 8 基の Cu 加速管の再設置
(Gain: +20 MV, 0.15 GeV)
- LEP の bending 長の増大
(Gain: ~ 0.2 GeV/beam)
- 超伝導加速管の修理、加速勾配の均一化
(Gain: hopefully!)
- 冷却システムの部品交換

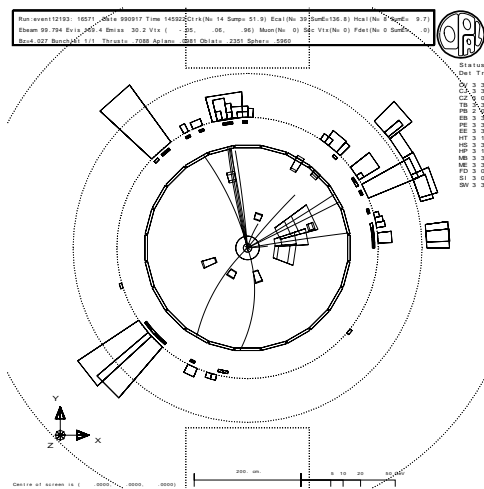


図 13: GMSB topology の候補事象。衝突エネルギー $\sqrt{s} = 200\text{GeV}$ で観測されたイベントで、二つのジェット、電子とその final state radiation、孤立した二つの γ が検出されている。GMSB の立場からは、 $\tilde{\chi}_1^+\tilde{\chi}_1^-$ がそれぞれ $W^\pm\tilde{\chi}_1^0$ に崩壊し、さらに W^+ が $q\bar{q}$ 、 W^- が $e\nu$ 、 $\tilde{\chi}_1^0$ が $\gamma\tilde{G}$ に崩壊したと捉えることが出来る。標準理論では、 W 対生成に際して二つの initial state radiation、あるいは final state radiation の γ が放出されたと考えられる。

(Gain: ~ 2.2 kW)

加速管の追加や修理、bending 長の増大などは、その効果が計算出来る。LEP が 2000 年に到達出来るエネルギーは、従って、超伝導加速管の勾配の均一化にかかっていると見える。これが首尾良く行って 8 MV/m の平均加速勾配が達成されたならば、クライストロン一つ分の余裕を持って 103 GeV のビームエネルギーが達成できると報告されている [3]。来年の LEP の方針が安定してデータを蓄積するために常に余裕を持って運転するのか、それともリミノシティを犠牲にしてでも最高エネルギーを更新するのか、いずれになるかはまだ分からない。限界ぎりぎりの運転によってあまり頻繁に運転停止に陥るようなら、データが不足して折角の最高エネルギーも無意味になってしまう。また、今年のデータで何かの兆候が報告されれば、エネルギーを上げずにデータの蓄積を目指す可能性もある。

運転スケジュールもまだ不明である。更新されたエネルギーで何かの兆候が見えたとしたら、年末の休止期間も返上して走り続けることになるだろう。そればかりか、来年以降にもさらに運転期間を延長し、LHC 建設の合間をぬって実験を続ける決断が下される可能性も無いとは言えない。二十世紀の終りとともに LEP 実験も終わるのか、それとも新世紀の始まりとともに新しい物理の展望が開けるのか、すべては来年前半に運転が順調に行くこと、そしてそこで何が見えるのかにかかっている。

参考文献

- [1] 駒宮幸男 高エネルギーニュース 1998 年 17 巻 4 号 95 頁
- [2] G. Geschonke, Proceedings of Chamonix IX, SPS & LEP Performance WORKSHOP, CERN-SL-99-007 DI, January 1999, <http://www.cern.ch/CERN/Divisions/SL/publications/chamx99/contents.html>
- [3] P. Collier, Presentation at the 52nd meeting of LEP Experiments Committee, September 1999, <http://nicewww.cern.ch/sl/opnews/pageswww/lcsep99/index.htm>
- [4] C. Caso *et al*, The European Physical Journal C3 (1998) 1 and 1999 off-year partial update for the 2000 edition available on the PDG WWW pages (URL: <http://pdg.lbl.gov/>)

New Energy Record of LEP 2000

川本辰男

東京大学素粒子物理国際研究センター

tatsuo.kawamoto@cern.ch

2000年5月5日

1989–1995年のLEP 1プログラムで Z^0 精密測定により大きな成果をあげ、1996年からはW粒子の精密測定やHiggsやSUSY粒子の発見を目指して毎年エネルギーフロンティアを押し進めているLEPは、昨年1999年には当初の見積りを上回る202 GeVの衝突エネルギーを達成した。そして、今年2000年の運転でも最高エネルギーの記録更新を続けている。

1999–2000年の冬のシャットダウンの間に、前年度に性能が十分でなかった超伝導加速空洞を調整し、さらに以前取り出した常伝導空洞を再び設置して加速電場の増強を行なった。また、最高エネルギーの限界をさらに上げるための色々なアイデアが検討された。たとえば、補正用の電磁石を使ってbending radiusを大きくし synchrotron radiationを抑えることや、RF frequencyを100 Hz程度低くして軌道を大きくするなど。さらに、全体的な効率とluminosityのために、fillの初めのビーム電流が強くてRFへの負荷が大きい間はエネルギーを控

え目にしてクライストロンのトリップへの余裕をもたせ、電流が減るにしたがって加速電場を上げてfillの最中に再加速を行うこと(mini ramp)が考えられた。つまり、控え目のエネルギーでluminosityを稼ぎつつ、最高エネルギーのデータも全体の効率を損なうことなく取ろうという算段である。

4月3日に始まった2000年のphysics runでは、初めの約一週間、 Z^0 のエネルギーで測定器のキャリブレーションデータを取る一方、high energyのテストが行なわれた。加速電場は3600 MVを越え、206 GeVでの衝突を達成した(図1)。またmini rampの最中もバックグラウンドは悪化せず、データ収集の効率への影響は微小であることも確認された。

4月11日から本格的なhigh energy runが始まりmini rampをやりながら主に204–206 GeVの衝突エネルギーで順調にデータを取っている(図2)。今後の超伝導cavityの調整が好調で、さらに少しずつエネルギーを稼ぐ各種の方法がうまく働けば、最高209–210 GeV程度まで行けるだろうと期待されている。今のところLEPはまだ調整中で、様子を見ては高いエネルギーの限界に挑戦している。実際、4月20日には207 GeV、4月23日に208 GeV、そして4月29日には208.7 GeVまで加速し衝突を維持することができた。

エネルギー増強の最大の興味はHiggsやSUSY粒子の発見である。Higgsに関しては1999年までのデータを使った探索から質量の下限として約108 GeV(95% CL)が得られている一方、精密測定へのStandard Model fitからその上限として188 GeV(95% CL)が得られており、すぐ近くまで追い込んで来ている感じがする(図3)。Higgsに対する感度は、その質量に対して重心系エネルギーでほとんどスケールするので、今年206 GeVで十分lumi-

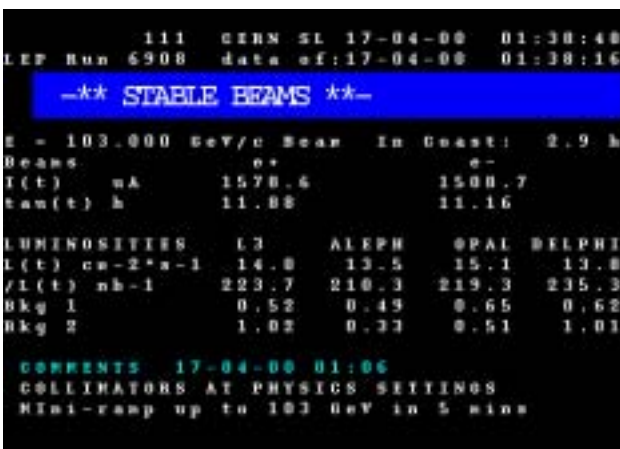


図1: 206 GeVで運転中のLEP status display. 4月28日までに到達した最高エネルギーは208.7 GeVである。

osityがあれば (100 pb^{-1} 程度) Higgs 質量の下限に対する感度は Standard Model Higgs の場合 115 GeV 程度まで上がるだろう。

Cross-section が大きいと期待される Chargino pair に関しては、luminosity が 20 pb^{-1} もあればかなり役に立つので、fill の終りに mini ramp でできるだけ高いエネルギーに行くことは大変意義がある。同時にこれは Higgs search にも大いに役に立つ。

LEP は今世紀最後のエネルギーフロンティアの実験であり、それに続く実験、Tevatron や LHC、linear collider などから Higgs や SUSY に対して LEP を超える物理結果ができるようになるのは 5-10 年ほど先である。もし LEP で 3σ 程度の Higgs の兆候が見られたら、それを 5σ で確定するには、さらに半年程度のデータをとれば可能であろうと期待されている。そのような場合、兆候に結論をつけるために運転の延長を行なうことも考えられる。

今年 は LEP の最後の年であり、極限までエネルギーを上げ、加速器、測定器、人の限界に挑戦して最大の物理結果を引き出そうとしている。

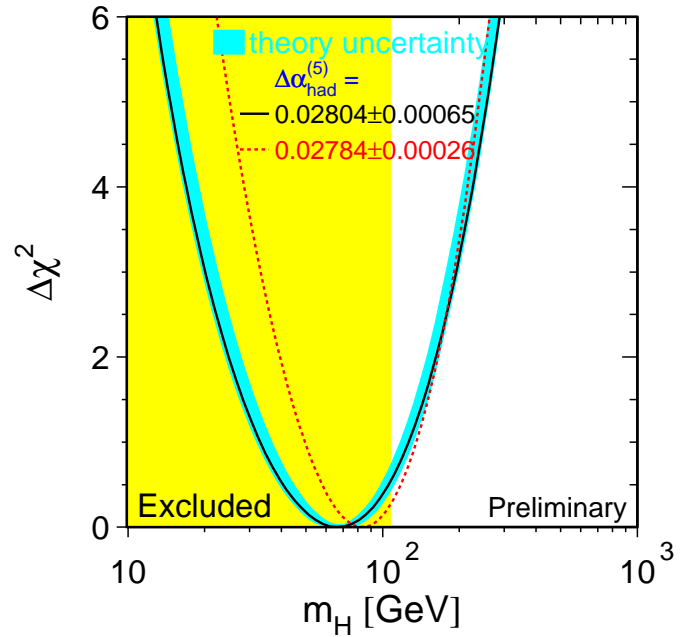


図 3: Electroweak Global fit での χ^2 を Higgs 質量の関数として示したもの (2000 年春の結果)。影をつけた質量の領域は直接探索により棄却されている。

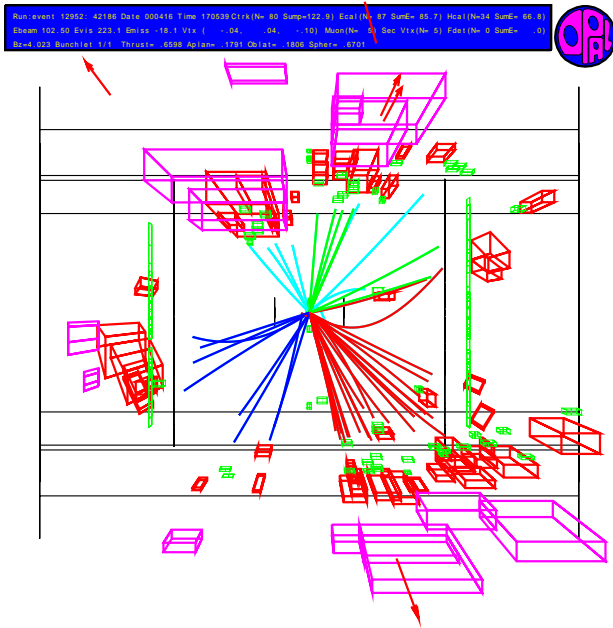


図 2: 2000 年の OPAL データ、 205 GeV での W-pair candidate.

LEPでのヒッグス兆候観測と実験終了について

東京大学素粒子物理国際研究センター

山下 了

Satoru.Yamashita@cern.ch

2000年12月13日

1 はじめに

CERN(欧州素粒子研究所)の世界最大の加速器LEPはその11年間に渡る電子・陽電子衝突のエネルギーフロンティアでの運転を遂に終了することになった。11月17日に緊急に開かれたSpecial Councilでも結論がまとまらなかったため、最終的にCERNのLuciano Maiani所長の提案通りLEPは今年2000年で終了、LHCに移行するための解体作業が既に始まった。このニュースの原稿を最初に依頼されたのは11月9日。その時点では今年見られたヒッグスの兆候観測をうけLEPの2001年運転については12月の正式なCouncilで最終決定を行なうということになっていた。それまでに、科学的な議論の土台となるように全4実験(ALEPH、DELPHI、L3、OPAL)で今年取られた全データの解析を終了してLEP combined resultsを論文にまとめようと徹夜作業を続けていた。この間に緊急Councilが開かれ、突然LEP終了が決まるという我々にとっては大変残念な結果になってしまった。

今は既に12月始め、この間実際に現場に行き、すでに解体が始まっている状況を目の前にして現実にLEPが終ってしまったんだとようやく実感が持っている状況であり、まだ頭の中が整理され尽くされていないが、ここ3カ月の間に起こったこととお知らせしようと思う。

説明の都合上、始めにLEPでのヒッグス探索について述べた後で実際の結果について説明することにした。昨年までの結果については[1]を参照していただきたい。はじめの数ページ、LEPの運転状況、LEPでのヒッグスの生成と崩壊、探索モード、解析の主な様子などはLEPの状況やLEPでのヒッグス探索を知っておられる方は飛ばして結果だけ見て頂ければ結構です。

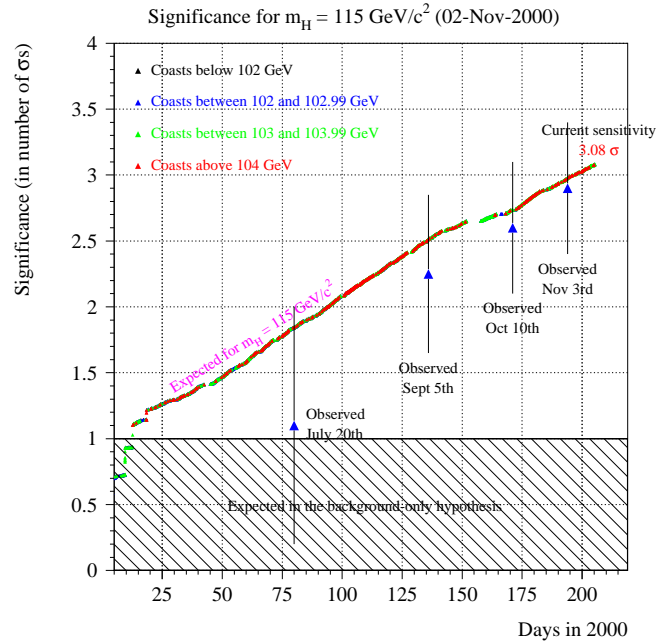


図1: 今年得られた $\sim 115 \text{ GeV}$ ヒッグスの兆候を示す歴史(LEP Higgs Working Group): 横軸は今年のデータを取った日数、縦軸はデータが示すバックグラウンド事象からの超過度をsignificanceで表したもの。標準理論ヒッグスが 115 GeV に存在した場合の予想平均(average sensitivity)は点線で示してある。今年4回のLEP combinationでデータに見られた結果はそれぞれ点で示す。

兆候について一番分かり易いものとして図1を選んだ。この図は 115 GeV の標準理論[2]でのヒッグス[3]があったとして、LEP全体でどれくらいバックグラウンドからのずれが期待されるか、そして、実際にデータで見られた様子を時間を追って示したものである。データが溜るにつれ、バックグラウンドからのずれが、徐々に大きく育っていつている様子が見られるだろう。データで見られたずれは予想ラインをよくフォローしている。この「ずれ」が何であるか、どうやって得られたか、そ

他の結果はどういうものかは、このニュースの中でなるべく分かり易く書いたつもりではある。しかし、誤解がないように正確を期そうとしたあまり、説明が回りくどくなった。

初めの兆候らしい兆候が見られたのは、図からも見られるように9月5日のLEPCミーティングのためのデータである。これは各実験で約 140 pb^{-1} 程度のデータを集めた時点のものである。そのあとわずかにデータを溜めた時点10月に再びLEPデータの取りまとめを行ない、今年のLEPの運転が止まった次の日(11月3日)には再びLEPCでの発表が行なわれた。この時使われたデータは各実験でLEPが止まる1、2週間前までのものが使われている。積分ルミノシティは各実験で約 200 pb^{-1} 程度、ルミノシティで平均した衝突エネルギーは約206.1 GeVである。兆候がどのように変化したかを示すために便宜的に9月5日の発表に使われたデータ(reference data set)と11月3日のLEPCに使われたデータ(total data)、そしてその間のデータ(new data)を用いる。

現在すべてのデータを使った解析が各実験で進められているが、まだLEPでのまとめは終了していないので、今回のニュースではここまでのデータでレポートする。全データでのLEPでのまとめは12月中旬にPhysics Letter Bに投稿する予定である。ただし、結果は本ニュースと近いものである。

2 2000年のLEPの運転状況

LEPの今年の運転状況については[4]にも述べられている。今年LEPは数々の改良と運転の調整でヒッグスと超対称性粒子の兆候を得るべく、当初の設計値を越え、電子・陽電子の衝突エネルギーの世界記録を更新し続けた。LEPの加速器チームにはまったく頭が下がる思いで一杯である。4月に運転は開始され、すぐに衝突エネルギーで205 GeV程度の定常運転を成功し、その後最高で209 GeV付近まで到達している。改良はシンクロトン放射でのエネルギーロスをわずかでも減らそうと加速周波数を調整したり補正用の電磁石を使ってビーム軌道半径をできるだけ大きくしたり、加速空洞間のバランスの調整、前年度取り出した常伝導空洞の再設置などによる加速電場の増強など、できる限りのことをしている。更にエネルギーとルミノシティの両立を

図るために今年導入されたものとして、mini-ramp方式がある。大きい電流を加速するためにはクライストロンからのより強い加速パワーが必要であるが、あまり強いパワーを要求するとクライストロンのトリップを頻繁に誘発することになる。これは超電導加速空洞にも大きな負担を与え、冷却の限界を越えることもありうる。そこで、大強度の電子・陽電子をリングに蓄積したら、初めは205 GeV程度の低いエネルギーで運転し、電流が減ってきたら207 GeV程度に上げる。ここまでは一つのクライストロンがトリップしても残りで頑張れる程度で運転を行ない、なるべくrefillによるタイムロスをなくす方策である。更に減ってきたら全クライストロンをトリップするぎりぎりの208 GeVを越えるエネルギーまで上げることを試みる(大抵はこれはすぐに限界まで達してビームは失われる)。今年ターゲットとなった110–115 GeV ヒッグスの生成断面積は、エネルギーが上がると急激に大きくなるが、エネルギーを上げようとすると加速できるルミノシティの限界に達する。これをうまく調整して最もヒッグス生成が増えるように細心の注意が払われたわけである。これにより、昨年までの決まったエネルギーでの運転と違い、今年の運転では一回のfillの間にもエネルギーが変わり、図2に示すようなルミノシティ分布になっている。それぞれのエネルギーbinでの予想されるヒッグス生成量も見てとれる。

LEPは11月2日朝8時に最後のbeamをダンプして、運転を止めた。

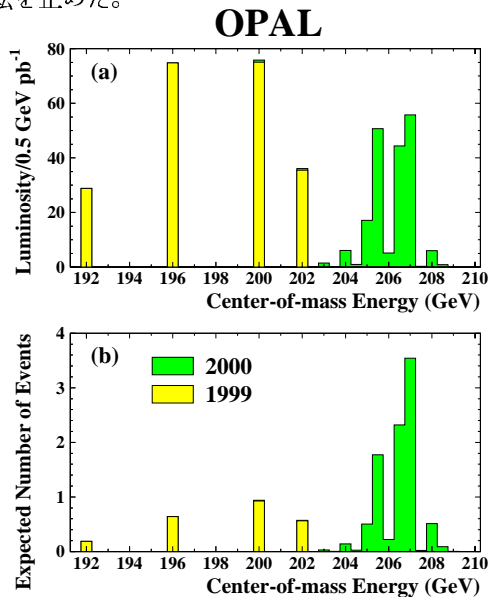


図 2: OPAL 実験における衝突ルミノシティと 115 GeV ヒッグス生成率

3 ヒッグス生成、崩壊、探索モード

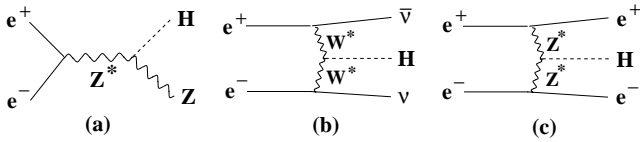


図 3: LEP で重要な 偶 CP のヒッグス (標準理論ヒッグスを含む) の生成過程: (a) Higgs-strahlung (Bijorken) 過程, (b) WW-fusion (c) ZZ-fusion 過程

LEP で感度がある質量領域における標準理論ヒッグス (H^0) は、主に、いわゆる Bijorken(Higgs-strahlung) 過程 $e^+e^- \rightarrow Z^{0*} \rightarrow H^0 Z^0$ で生成される。更に図 3(b) と (c) に示した WW-fusion と ZZ-fusion 過程がわずかに貢献する。Bijorken 過程で生成された H^0 と Z^0 のうち Z^0 が電子ニュートリノと反ニュートリノのペアに崩壊するときや電子・陽電子に崩壊するときはそれぞれこの WW(ZZ)-fusion との干渉項も無視できない効果を持つ。これらの生成過程はヒッグスと Z および W ボソンとの coupling で決まり、これは標準理論ヒッグスではもちろん一意的に決まる。電子・陽電子衝突では始状態がはっきり決まっており、initial state radiation も極めて正確に計算できるため標準理論ヒッグスの生成断面積は電子・陽電子の衝突エネルギーとヒッグスの質量のみで決まる。計算の誤差は 1% 以下である。図 4 にヒッグス生成断面積を示す。

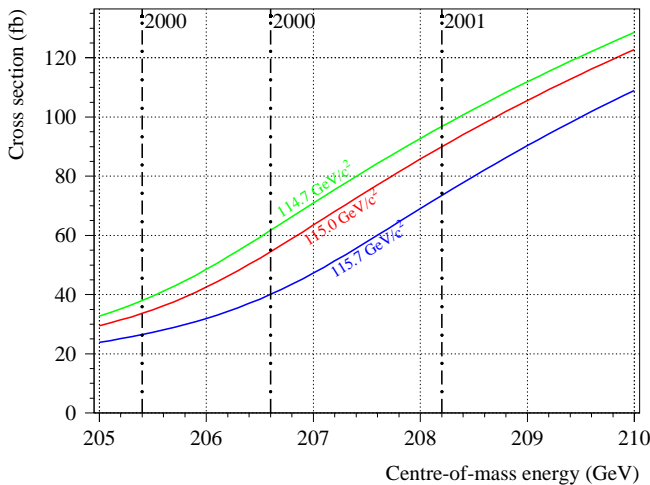


図 4: ビーム重心エネルギーの関数としての標準理論ヒッグスの生成断面積

生成されたヒッグスの崩壊分岐比、崩壊幅も標準理論ではヒッグスの質量の関数として一意的に決定される。LEP で発見できる範囲の質量のヒッグスでは崩壊

幅は数十 MeV 程度であり、測定誤差に比べ無視できる。例えば 115 GeV の標準理論ヒッグスでは約 75% が b-クォーク対に崩壊し、約 7% が $\tau^+\tau^-$ に崩壊し、残りの大半は、W ボソン対、トップクォーク・ループなどからのグルーオン対、そして c-クォーク対に崩壊する。W はヒッグスと結合が強いが、LEP で届く範囲のヒッグスは 2 つの W の質量 (約 160 GeV) よりかなり軽いため、この崩壊は強く抑制される。ヒッグスは fermion と湯川結合で結び付き、これが fermion の質量の源となるわけだから運動学的に許される最も重い fermion 対に多く崩壊する。クォークの質量はヒッグス崩壊の質量まで走らせないといけないが、それでも 2% 以内の誤差で b-クォーク対への崩壊率は計算できる。

現在の LEP での標準理論ヒッグス探索ではこのうち b-クォーク対と $\tau^+\tau^-$ への崩壊のみを考える。残りの崩壊はバックグラウンドを低く押さえ込むのが難しいため使っていないが、標準理論を越えるヒッグス、たとえば SUSY ヒッグスの一部のパラメータ領域での探索や、fermion と結合しないヒッグスなどの探索ではもちろん解析を行なっている。

Bijorken 過程ではヒッグスと同時に生成される Z^0 ボソンの約 70% がクォーク対に、20% がニュートリノ対に、残りがそれぞれ e^+e^- 、 $\mu^+\mu^-$ 、 $\tau^+\tau^-$ に崩壊するから、解析はおおまかに分けると以下の 4 つのモードで行なっている。

- **4 ジェット・モード:** ヒッグスおよび Z^0 がそれぞれクォークに崩壊し、結果として 4 つのジェットになっているもの。115 GeV のヒッグスでは約 50% がこのモードに対応する。
- **ニュートリノ・モード:** Z^0 がニュートリノに崩壊し、ヒッグスが b-quark に崩壊するもの。この場合ニュートリノによる大きなエネルギー欠損が見られるため missing-energy channel と呼ばれる。約 15% のヒッグス生成イベントが対応する。
- **τ ・モード:** ヒッグスが τ に崩壊する、または Z^0 が τ に崩壊するもの。ヒッグス生成の約 7% をカバー。
- **レプトン・モード:** Z^0 が e^+e^- または $\mu^+\mu^-$ に崩壊するもの。バックグラウンドを容易に押さえられる最もきれいなイベントであり、ヒッグスの質量はレプトンの recoil mass などから簡単に割り出せる、いわゆる golden channel。全ヒッグス生成

の約5%程度しかないため残念ながら LEP でこのモードにおいてヒッグス・イベントを捉えられる確率は極めて低い。

以上から分かるように、探索の4つのモードは合わせるとヒッグス生成の約80%をカバーしている。

4 解析

解析はまず各実験の中で閉じた形で行なわれる。それぞれの実験の中には15-30人程度からなるヒッグスを専門とするワーキンググループがある。これには様々なヒッグス、たとえば SUSY ヒッグスや荷電ヒッグスなども含まれる。その中に、事象の再構成や b-tagging などの解析の心臓部を担うものの開発責任者、各モードのイベント選択を行なう多数の学生、そして最終的に確率計算を行なう専門家からなる10人程度の標準理論ヒッグスを探索する特別チームが生まれ、解析を進める。実際には、ヒッグス探索はほとんどすべての測定器部分の情報を使うので、データの質の常時モニターや補正など、すべての共同実験研究者の力があって初めて成り立っている。各実験で得られた結果は最後にモード別にバックグラウンド、シグナル、データ中に選択されたイベントの単純なヒストグラムと選択効率などの関数の形で LEP 全体のヒッグス・ワーキンググループに渡される。この LEP 全体のワーキンググループのメンバーは定義が曖昧であるが、各実験のワーキンググループのメンバーがほとんどである。ミーティングに出ている人数からすれば、大体30人程度と言える。LEP ワーキンググループには、2つの目的がある。一つは4つの実験の結果を組み合わせて、LEP combined の結果を作ること。4実験を合わせれば、単純にデータを4倍にでき、平均的には一つの実験では見えないような小さいシグナルも見えてくる。既に単純な形になった情報を集めて確率計算を4実験の結果を合わせて行なうだけの単純作業であるが、この段階で実験間の違いなどを調べることで各実験の関数に問題を発見するというバグ・バスターとしての機能もある。もう一つの目的は、各実験の詳細な情報を交換すること。昨年までは実験間では互いに競いあっていたが、今年は LEP もシグナルの兆候がなければ最後の年ということになっていたため、かなりの協力体制が取られた。年の始めから情報を交換し合い、シグナルの兆候、候補となるイベントの詳細な情報、解析

の感度の比較、データの質のチェック結果などに対して LEP ヒッグス ワーキング・グループのなかでは情報をすべて公開していた。他の実験の結果にはすぐに懐疑的になれるので、問題点や怪しい点を議論し、結果に対して常に批判的な見方をし続けられるのも良い点であった。

4.1 解析の流れ

各実験での解析の流れはほぼ同じ。まずはイベントの選択方法を定める。十分な量のシミュレーションと、データに同じ選択をかける。シグナルとバックグラウンドの予想から適当な「重み」を選択されたイベント毎につけて、すべてのイベントの重みを足し、データを表す一つの「値」を作る。これをシミュレーション・データにおいても行なう。シミュレーションを用いれば、シグナルが存在する場合、存在しない場合でそれぞれどれぐらいの頻度でこの値以上/以下であることが起こり得るかが計算できる。データで得られた最終的な「値」と、このシミュレーションの「値」の予想分布からシグナルが存在する場合、存在しない場合の確率が決まる。このように書くと確率計算の部分が複雑であるように思われるかも知れない。実際よく質問されることの一つ多いのが、この確率の計算方法と、その結果の意味についてである。重複している部分が大きいので、少し後にもう一度整理して説明する。

4.2 バックグラウンド事象、および 事象選択

バックグラウンドとなるのは主に $q\bar{q}$ 過程、そして、W ボソン対生成と Z ボソン対生成を含む 4-fermion 過程である。これらの断面積は図5に見えるように現在の焦点となっている 115 GeV 付近のヒッグスの生成に比べまだ2、3桁高いが、運動学的なカットで $q\bar{q}$ 生成は簡単に1桁以上減らすことができる。

残るバックグラウンドは高いエネルギーのグルーオンを複数放射した $q\bar{q}$ 過程と、W および Z ボソン対生成である。このうち最も多いのは W 対生成である。W 対生成は今年データだけでも各実験で3000イベント以上の生成がある。一方シグナルは、100%の効率で4実験足しても高々40イベント程度である。しかし、W は b-quark には直接崩壊しない(小林・益川行列による混合は無視できる程度)ため b-quark tagging により

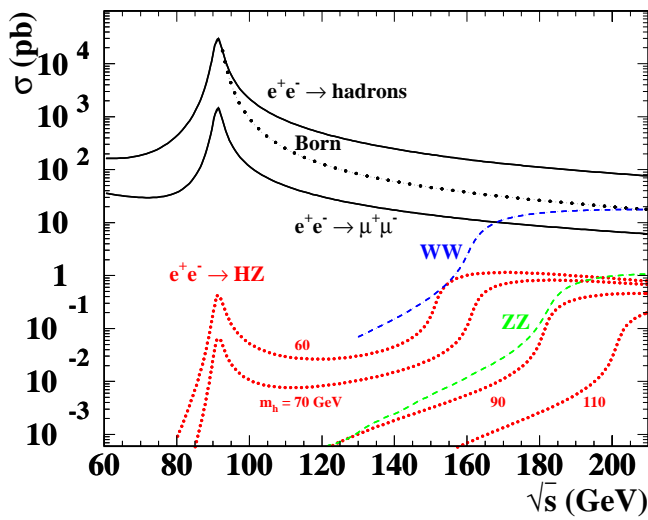


図 5: バックグラウンドとなる標準理論過程といくつかの質量の標準理論ヒッグス生成の断面積

強烈に抑制できる。この b-tagging はヒッグス探索の非常に重要なアイテムであるので次の章に分けて説明する。もし b-tagging が完全であれば、W 対生成事象は W の崩壊で生じたクォークがグルーオンを出し、そのグルーオンが b-quark 対になる gluon splitting event、および小林・益川行列による混合を除くとすべて除去できることになる。 $q\bar{q}$ 過程も、Z ボソン対生成も b-tagging で更に減らされる。もちろん 実際の実験では b-tagging は b-quark とそれ以外を完全に分離するには至らないが、それでも、シグナルの選択効率を 50% 程度保持しつつ、W 対生成で残っているものを 1/100 程度に押さえ、残るバックグラウンド・イベントの 80% 以上が b-quark を含むぐらいまで純度を上げることは比較的容易である。更にグルーオンを伴う $q\bar{q}$ を押さえるために、4-ferion と 2-ferion 過程の違いをジェット・エネルギーの分布などで絞り込む。これでもまだバックグラウンドの総量はシグナルに比べ 10 倍程度あるが、ヒッグスの質量を再構成し、その質量付近だけを見ることによりバックグラウンドは更に 1/3-1/5 程度まで減ることになる。紙面の都合上、詳しいことは省いたため、このように書くともとも簡単であるように思われるかも知れないが、ここに至るまでの道筋は長い年月かかって各実験で積み重ねた、正に限界に挑んだ地道な努力があることは銘記しておく必要がある。LEP-I から今に至るまでに得られた測定器およびバックグラウンドとなる物理の理解、物理と測定器両面からのモンテカルロ・シミュレーションのチューニングなどはも

ちろんのことである。更にすべての基本となるイベントの再構成法、ジェット・エネルギー測定、b-tagging や lepton-tagging、質量再構成のための kinematic fitting の入力等の基本解析ツールのアップグレード等々。ヒッグスの解析の真髄は、これら根本的なところでの努力がほとんどであり、最後のイベント・セレクションなどは、誰がやっても測定器および基本ツールの性能が同じであれば同じような結果が得られるだけである。ヒッグスの解析は現在 Artificial Neural Network(ANN) や likelihood などを使っているものが大半を占めるため、この傾向は更に強くなっている。

バックグラウンドの状況、およびヒッグス・シグナルの捕捉効率は、それぞれの探索モードでかなり違う。4 ジェット・モードはシグナルの約 50% を担うが、似たようなバックグラウンドが多いため event-selection の段階で解析によるロスは大きい。実験毎に違うが選択効率は 40 から 50% 程度であり、この段階では、再構成された質量分布で範囲を限っても、まだバックグラウンドの方がシグナルより 3-5 倍程度ある。ニュートリノ・モードでは、もともと似たイベント・トポロジーを持つバックグラウンド・イベントはかなり減る。ニュートリノへの崩壊を伴う Z ボソン対生成を除くと次の二つがほとんどである。1) W 対生成で一方の W が $W \rightarrow l\nu$ 崩壊し、その荷電 lepton が beam-pipe に逃げたりジェットと重なったりしたもの、2) ジェットの方がわずかに歪めて再構成された $q\bar{q}$ 生成過程。このニュートリノ・モードでは、選択効率は 50-60% で S/N は 4 ジェットより良い程度まで行ける。ただし、このモードの受け持つシグナルは 4 ジェットの約 2/7 である。 τ ・モードは 4 つのモードのうち最も難しいと言えよう。もともと τ をきれいに同定することは τ の 3-prong 崩壊などを除けば消去法になる。つまり、高いエネルギーの電子、 μ オンでなく、ジェットにも近くないトラックと、あってもわずかな τ だけが存在するものが τ と同定されることになる。更に運動学的再構成も τ の崩壊で出るニュートリノがあるため簡単ではない。このため十分な S/N を得るためにはかなりシグナルをも削らないといけないうので、選択効率は約 20-30% と他のモードと比べかなり悪いため、感度は 4 モードで最も低くなる。レプトン・モードはレプトンをきれいに同定した後は、既に Z ボソン対生成がバックグラウンドのほ

とんどすべてになる。軽い b-tagging で更にこのバックグラウンドを減らしてもシグナル検出効率 $H^0 Z^0 \rightarrow b\bar{b}l^+l^-$ に対して 60-80% である。ただし全シグナル生成の 5% しかないため感度は限られる。

4つのモードを総合すると、感度の順は4ジェット、ニュートリノ、レプトン、 τ であり、4ジェットだけの場合とその他の3つのモードを合わせた場合がほぼ同じ感度となる。このことがヒッグスの兆候を調べる時に重要となる。

では、各実験の間の感度の差はどうなっているかというと、以下のようになる。4実験の各測定器はもともと狙った物理に応じてそれぞれに特長を持つ。たとえば OPAL は missing-energy を漏らさず測れるように測定器のアクセプタンスを beam-pipe ぎりぎりまで持たせ、hermeticity も申し分ない。電磁カロリメータには鉛ガラスを用いている。ヒッグスではニュートリノ・モードとレプトン・モードに特に威力を発揮する。

ALEPH は超電導磁石による高い磁場と、エネルギー分解能よりも位置分解能を重視したカロリメータにより、ジェットに対するエネルギー分解能を追求しており、4ジェット・モードでのヒッグス探索は LEP で最も感度が高い。DELPHI は、名前の由来から察することができるように粒子識別に特長があると言えよう。4実験で最も贅沢な3層からなる Si-micro vertex 測定器を持つ。この vertex 測定器の性能だけから言えば最も高性能な b-tagging ができることになる。L3 は、 μ オン測定器のもつ大きいサイズが見た目での最大の特長であるが、カロリメータ系に焦点を絞った測定器とも言える。BGO を用いた電磁カロリメータは LEP のなかで最高のエネルギー分解能を誇る。ただし、現在の状況では b-tagging の性能が他の実験と比べると少し悪いので、標準理論ヒッグスに関しては総合感度がわずかながら低い。これだけいろいろな特長がありながら、実際の感度は測定器の間にさほど違いはない。これはひとつにはモードの間の得手、不得手が補完されていることもある。特に ALEPH、DELPHI、OPAL の間の違いはほとんどなく、違いが生じる部分は、解析に使用したデータの量と、最後の信頼度や確率を計算する部分での手法の違いによる部分が多い。

この4実験が同程度の感度を持つということも今年のヒッグス兆候を考える上で重要なアイテムとなる。

4.3 b-quark tagging

b-tagging にはいろいろな方法があるが、特に重要なのは、生じた B-meson など b-hadron が長い寿命を持つことを利用した lifetime tagging である。Si-micro vertex 測定器のヒットから b-hadron が有限の lifetime を持って崩壊したことを再構成することになる。B-factory で b-hadron physics に精通されている方が多い最近ではもはや言う必要もないだろう。バックグラウンドの性質がかなり違うため、必要とされる b-tagging の性質は違う。B-factory と主に違う点は、以下のようなものである。

- b-hadron の運動量はイベント毎、ジェット毎にかなり違う。高エネルギーで b-hadron が boost され、secondary vertex は事象の生成ポイント (primary vertex) から mean life で数 mm。生じる b-hadron は、初めは大抵 excited state である。
- boost が大きいので崩壊で生じた粒子は互いに狭い角度しか持たず、b-hadron の飛行方向での vertex 位置精度を悪化させるとともに測定器のヒットとトラックとの正しい association も難しくする。
- string からの fragmentation やグルーオン放射などにより b-hadron から以外のトラックが付近に沢山ある。
- 逆に、十分な数のトラックが primary vertex から生じるためイベント毎に primary vertex を同定し、そこと secondary vertex との差をジェット毎に調べられるため、4ジェット事象でもどれが b-quark から来たもので、どれがそうでないかが分かる。これは、4ジェットでジェットをヒッグスから来たものと Z から来たものとを分けるときに重要な助けとなる。

ヒッグス探索においては、b-tagging の直前では W 対生成が圧倒的なバックグラウンドである。このうちの特に $W \rightarrow c\bar{s}$ で生じる c-quark が最も b-quark に近いバックグラウンド源となる。ここから生じた c-hadron も boost が強いので飛んだ距離だけでは b-hadron との見分けは付け難い。更に狭い角度に沢山のトラックが密集することが vertex の再構成を邪魔する。特にイベント毎に b-hadron がどの粒子であったかを同定したり、その崩壊を一つずつ追い掛けることは b-tagging

OPAL

効率を犠牲にすればできるが、ヒッグス探索に必要な効率は得られない。よって、b-hadronが $b \rightarrow c \rightarrow s$ というようにカスケード崩壊する様子などに対応する vertex の状態、たとえば荷電粒子数、トラックの impact parameter 情報、vertex mass、などを用いて、総合的に判断することになる。この目的のために LEP の各実験では event-selection 同様、各実験の特長を生かした Neural Network や likelihood による情報の組合せを用いている。これには、b-hadron が semi-leptonic 崩壊した場合出てくる high- p_t lepton tagging など、lifetime 以外の情報も含まれる。

このように言うと、複数の情報を複雑に組み合わせて大丈夫なのかと心配になるかもしれない。実際、我々もこの b-tagging には細心の注意を払って測定器の状態、LEP の運転状況を取り入れたチェックとデータの補正を丹念に行なわないといけない。ここで重要なのがコントロール・サンプルである Z^0 質量での calibration ランである。今年も 4 回に分けて 91.2 GeV でのランが行なわれ、4 実験各々で 4 pb^{-1} を越えるデータが集められている。 Z^0 ランでは断面積が圧倒的に大きいため、これだけで十分な量のジェット事象、レプトン事象などが集められる。図 6 に OPAL での Z^0 ランの結果を示す。b-quark ジェットに対する b-tagging の性能チェックは、まずイベントを 2 つのジェットに分け、反対側のジェットに対して b-tagging を行なう。得られたサンプルは純度が 98% 以上のバイアスがほとんどない b-quark ジェットとなる。これに対して b-tagging を行ない、そのアウトプットを見れば tagging の効率をデータだけから取り出すことができる。更にモンテカルロと比べることでどれくらい正しくシミュレーションが行なわれているか、どこまで系統誤差があるかも分かる。この手法は、反対側のジェットに対して anti-tagging を行なえば udsc ジェットに対しても結論を得られる。ただし、この場合は 2 つのジェットの間の相関 (hemisphere correlation) が強いので注意が必要である。 Z^0 ランで得られた補正などは high-energy ランに反映される。

ヒッグスの生成を探索する high-energy ランではジェットの統計量が限られることと、複数の物理過程が共存するため Z^0 ランほどは精度よく確かめることはできない。更にヒッグスがサンプルに入るような物理過程

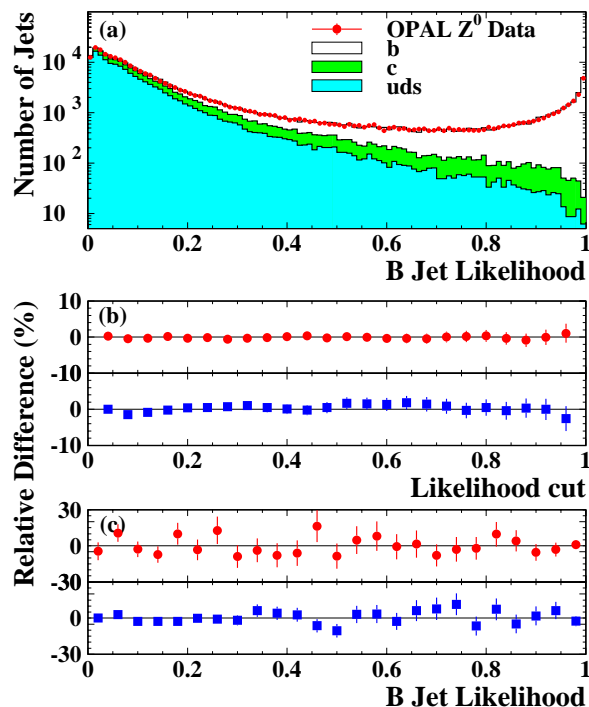


図 6: 今年取られた $\sqrt{s} = 91.2 \text{ GeV}$ データでの OPAL b-tagging の結果。(a) すべてのジェットに対して (b と c) シミュレーションとの比較。丸 (四角) は反対側のジェットが b-flavour (light-flavour) であると認定されたジェットに対して。(b) は b-tagging の値の大きい方から積分したときのシミュレーションからのずれ。(c) はそれぞれの bin でのずれを示す。縦線で示しているのは統計誤差。

を選択すると、データチェックにバイアスが生じる。LEP の 4 実験では、コントロールサンプルとして、よく $e^+e^- \rightarrow q\bar{q} + \gamma$ イベントと、 $W^+W^- \rightarrow l\nu q\bar{q}$ イベントを使う。高いエネルギーの γ を捕まえる、または r が beampipe に逃げたと考えられるイベントを選べばヒッグスや W 対生成、Z 対生成の混ざらない $q\bar{q}$ サンプルを得ることは容易にできる。このときは、生じる 2 ジェットは同じ quark flavour から来るわけだから Z^0 ランと同じ手法が使える。 $W^+W^- \rightarrow l\nu q\bar{q}$ イベントは、W の質量測定で使うような手法で純度 95% 以上のサンプルが取り出せる。このトポロジーもヒッグスでは生成されないものであり、更に b-quark が直接はほとんど含まれない純度の極めて高い light flavour サンプルとなる。図 7 に ALEPH で得られた結果を示す。統計精度は Z^0 ランよりは悪いが、このようにシミュレーションと良く合っていることを確かめることができる。もちろん、その他の系統誤差も丹念に調

べ尽くされる。特に OPAL はこの点に関し保守的で、b-tagging だけに関しても、測定器の resolution やヒットの efficiency から来るものだけでなく、b-hadron の物理、たとえば b-hadron 崩壊の荷電粒子数からくる系統誤差や fragmentation から来るもの、b-hadron や c-hadron の lifetime によるものなど、各々を調べあげている。

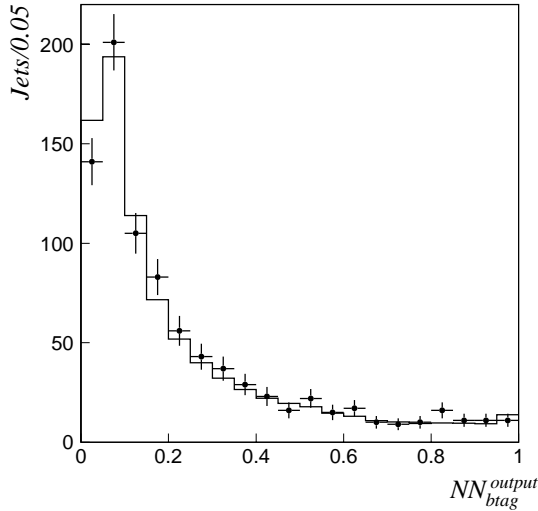


図 7: 今年取られた high-energy ランでの ALEPH b-tagging の結果 [5]。WW \rightarrow $l\bar{\nu}q\bar{q}$ イベントに対するもの。

4.4 質量の同定法とバイアス

質量の再構成は b-tagging と並んでヒッグス探索の重要事項である。ヒッグスが b-quark 対に崩壊するとジェットが複数できる。原理的にはこのジェットらの invariant mass を計算すればヒッグスの質量となる。しかしジェットのエネギーの測定精度からは質量分解能で約 10 GeV 程度までしか精度良く決められない。そこで、ほぼすべての探索モードにおいて、質量は kinematic fitting を用いて得ることになる。これは、測定されたジェットやレプトンのエネルギー・運動量と、更にエネルギー、運動量の保存といった拘束条件を課して fitting を行なうだけの、W の質量測定でお馴染みの標準的な手法である。始状態が完全に決まっているため、強い拘束条件を付けることができる。この場合、ジェットのエネギー精度よりも方向の測定精度の方が重要である。この方向精度は大きい測定器を持つ LEP の 4 実験では十分よい。更に拘束条件として Z^0 に相当する質量を用いる場合もある。4 ジェット・モードでは 2 つのジェット、ニュートリノ・モードでは missing-

mass、レプトン・モードではレプトン対の不変質量がこれに当たる。この kinematic fitting により、質量分解能を 2-5 GeV にすることができる。

ヒッグスの候補事象の質量自体は W 質量測定の際のようにシミュレーションを用いてわずかなバイアスを補正しないとイケない。シミュレーションがデータとどれだけあっているかを確かめることが系統誤差を考える上での鍵となる。これは、ヒッグス生成と似たようなイベント・トポロジーを持つコントロール・サンプルがあれば可能だ。統計量の多いサンプルとしてまずチェックすべきは W 対生成である。図 8 に OPAL で得られた W

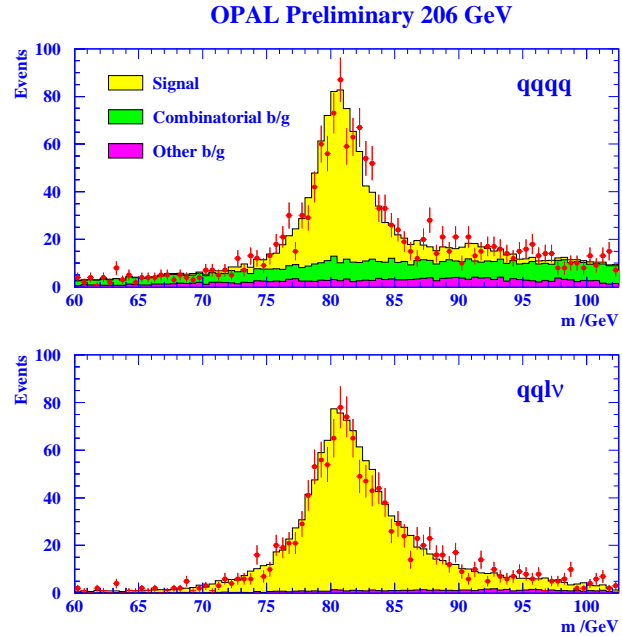


図 8: OPAL での再構成された W ボソンの質量分布

の質量再構成の結果を示す。シミュレーションはデータのルミノシティに相当するように合わせてある。イベントの数も質量分布もよく一致していることが分かる。W の質量が LEP で数十 MeV で決定されていることから分かるようにバイアスに対する系統誤差はヒッグス探索においては問題にならない。Z 対生成も統計が限られてはいるがクロスチェックという意味で用いられる。

図 9 にヒッグスの解析で実際に得られた質量分布を示す。3 つのプロットは下に行くほどイベント選択に強いカットがかけられている。このカットは定義がかなり曖昧で、実験間でも違いがあるため単に弱いカット、強いカットとして見るのが正しい。この定義の違い、および解析手法の違いのおかげで時々数字が変わったり、実験間の感度の違いを直接表していると誤解を受けてしまっ

たなど問題も多い図ではあるが、まず重要な情報として、統計の十分ある、バックグラウンドがほとんどである弱いカット（一番上）ではデータはバックグラウンド（およびバックグラウンドとシグナルを足したもの）を良く再現している。系統的な問題が質量測定にあればここに見える。強くカットを掛けて行くとバックグラウンドは急激に減り、シグナルもかなり失われているのがわかる。一番下の図では全体的に高い質量でバックグラウンドからの超過が見えて来ているが、カットがきつ過ぎるため統計精度は悪く、このままではシグナルから来ているかどうかははっきりしない。次章では実際に行なう確率計算に基づくシグナル探索について説明する。

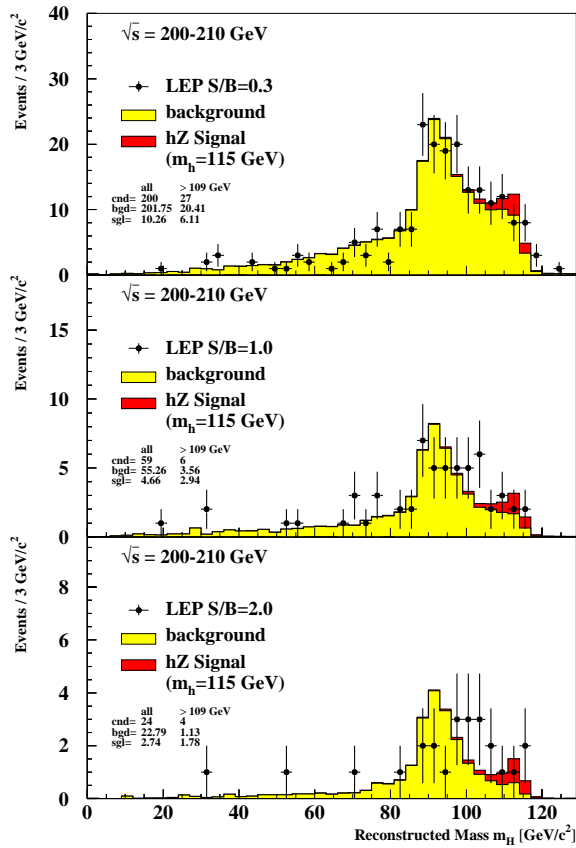


図 9: LEP 全体のヒッグス候補イベントの再構成された質量分布。3つの図は下に行くほど強いカットが掛けられている。ヒストグラムはシミュレーションの予想。薄い方がバックグラウンド。濃いのは 115 GeV のヒッグスシグナルの予想。

4.5 確率計算

ここまでの解析とこの後の最終結論に対応する確率上の議論をする流れは以下ようになる。

1. イベントの選択方法を、実験データの質などを調べ

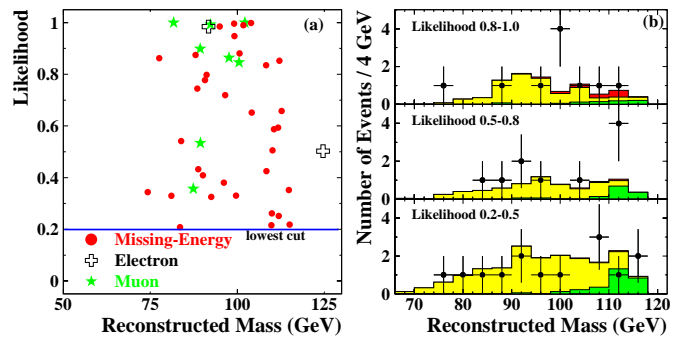


図 10: (a) OPAL 実験でのニュートリノ・モードとレプトン・モードでの選ばせたイベントに対する最終選択 likelihood と質量の scatter plot. (b) ニュートリノ・モードで、likelihood 領域を限った場合の質量分布。ヒストグラムはシミュレーションの結果。点で表わされるのがデータ。ヒストグラムは下の方から順に $q\bar{q}$ 過程、4-ferion 過程（最も薄いもの）、そして 115 GeV 標準理論ヒッグスが存在するときの予想（最も濃いもの）。シミュレーションは今年のすべての衝突エネルギーの平均。

ることを除き、データを見ずに決める。

2. データの質に合うように補正をした最新のシミュレーションからの予想ヒストグラムを作る。この予想分布は質量分布とその他の b-tagging などの情報から作る「シグナルらしさ」に対応する値との 2 次元で作られることが多い。ALEPH、L3 などは、この「シグナルらしさ」にイベント選択で用いた Neural Network output を用いるモードが多い。OPAL は likelihood を用いる。DELPHI はモードによりこれらを取り混ぜて使用している。各 1 次元または 2 次元の分布は細かい bin に分けられ、それぞれの bin で予めシグナルとバックグラウンドの平均量を推定しておく。この量は重要である。もし候補事象がその bin に見つかった場合、そのイベントには、この bin でのシグナル/バックグラウンド比 (s_i/b_i) を基に「重み」が付けられ、最終的な確率計算の時に用いられる。図 10(a) に OPAL 実験で選ばれたニュートリノ・モードとレプトン・モードで選択されたイベントの、likelihood と質量の 2 次元上分布を示している。これを likelihood の値で bin に分けると (b) 図のようになる。Likelihood が高いところにシグナルが集まり、バックグラウンドが減っている様子が分かるだろう。この bin を細かく取り、質量方向にも細かく分けて、それぞれの bin での local s/b を定義するわけである。実際は細かくし過ぎるとシミュレーションの統計

が足りなくなるので、分布をまずフィット (smoothing) しておいてその値を使うことになる。更に言えば、シグナル断面積が電子・陽電子の重心エネルギーで急激に変わることから、重心エネルギーも細かく分けられ、それぞれのエネルギー bin で上記の分布は用意しないといけない。各 bin にはシミュレーションの統計や、様々な系統誤差を含めた誤差も与えられる。この系統誤差は実験・モード間で違いはあるが、バックグラウンドに関しては約 5-30% 程度であり、シグナルの予想に関しては 2-5% 程度と見積もられる。

3. 実際のデータにイベント選択を掛ける。

4. 得られた候補イベントの分布とシミュレーションの予想を比べる。イベントが、どの bin に対応するかが決まるので、そのイベントに予め決めていた「重み」が決まる。

5. この「重み」を用いて、すべてのモードの候補イベントを足し合わせ、データに対し一つの「値」を得る。この作業をシミュレーション・データにも行なう。シミュレーション・データでは実際のデータと同じ積分ルミノシティに対応する「実験」を数限りなく繰り返し行なえる。シミュレーションで得られた平均分布を元に、新たにモンテカルロを振ってみればよい。この段階で各 bin に与えられた系統誤差も含めることができる。このモンテカルロ「実験」を、シグナルがある場合、ない場合、それぞれで多数回行なう。こうすると、図 11 のように、シグナルが存在する場合、存在しない場合での、最終的な「値」の予想「分布」(確率予想分布)ができる。

実際にこのモンテカルロを際限なく行なうのは、モード毎、エネルギー毎に細かい bin に分けられた分布でサイコロを振るわけだから、効率が悪い。これは、各 bin のなかの予想平均シグナル、バックグラウンド数から Poisson 確率を基に計算してもよい。このように、数値的にもう少し早く、正確にこのモンテカルロ「実験」を行なえるよう様々な工夫が開発された。

最終的に、このシミュレーションからの「値」の確率予想分布とデータの「値」を比べれば、シグナルが存在する確からしさ、存在しない確からしさ、バックグラウンドとの整合性が決まることになる。上記の 1. から 5. のプロセスは、いろいろな質量のヒッグスをシグナルとして、繰り返し行なわれる。イベント選択はヒッグスの

質量に依らず一つである場合がほとんどであるが、L3 では各質量毎に選択を変える解析を実際に行なっている。

以上で問題なのは、各イベントに与えられた「重み」である。これは、原理的には何でもよい。単にその組み合わせ方の感度が高いか低いかの問題で、結果はどれも正しい。この「重み」を常に 1 とすれば、それは即見つかったイベント数だけで考えるいわゆる“counting experiment”になる。もし、データが沢山あれば、たとえば質量分布の狭い範囲だけの数を勘定することで十分な結果が得られる。この場合、質量以外の情報や、質量分布のテールにあるイベントの情報は失われるが、分かり易い。質量分布など多数の人に馴染みの深い実験結果と、確率計算結果の関係も一目瞭然となる。JLC の様にヒッグスが大量に作られる時には是非こうするべきであろう。しかし、counting experiment を行なうには LEP のデータ量は少な過ぎる。すべての実験を合わせても、115 GeV ヒッグスは高々 40 イベント程度しか生成されず、更に選択効率を掛けると、各実験で、バックグラウンド 50 に対しシグナルが 4 イベント程度しかない。counting experiment を行なうためには更に強いカットが必要で、そうするとシグナルが減り過ぎて感度をなくすことになる。

適当な重みは何が良いか。たとえば、各 i 番目の bin での、シグナルとバックグラウンドの平均数量比 (s_i/b_i) を使って $1 + s_i/b_i$ の自然対数、 $\ln(1 + s_i/b_i)$ 、を「重み」としてもよい [1]。これが、よく LEP combined で用いられている方法で、LEP の発表で何度か見ておられる方も多いであろう。各 i 番目の bin に見えたイベント数を n_i 、全 bin の数を N 、とすると、各イベントに「重み」である $\ln(1 + s_i/b_i)$ を掛けて足した値は $\sum_{i=1}^N n_i \cdot \ln(1 + s_i/b_i)$ である。これは、ちょうど

$$\ln \frac{\prod_{i=1}^N \frac{\exp(-(s_i+b_i))(s_i+b_i)^{n_i}}{n_i!}}{\prod_{i=1}^N \frac{\exp(-b_i)(b_i)^{n_i}}{n_i!}} + \sum_{i=1}^N s_i \quad (1)$$

になる。上の式で自然対数の分子、分母のそれぞれが、シグナルが存在する (signal+background) 場合と、存在しない (background-only) 場合での各 bin での Poisson 確率の掛け算となっていることが分かるだろう。つまりは、それぞれの場合での likelihood (\mathcal{L}) になっている。上の式の第 2 項は選択効率を含めた全シグナル・カウント ($S_{tot} \equiv \sum_{i=1}^N s_i$) であるから、式の自然対数の項

を $\ln Q$ と書けば、 $\ln Q = \sum_{i=1}^N n_i \cdot \ln(1+s_i/b_i) - S_{tot}$ 、 $Q \equiv \mathcal{L}(\text{signal} + \text{background})/\mathcal{L}(\text{background-only})$ 、となる。この「重み」を使ったものが、likelihood ratio とされるのはこのためである。このように、「重み」を使ったイベントの足し算で最終的に、データでの観測を表す「値」 Q が得られた。我々はこの Q を使って $-2\ln Q$ で結果を示すことが多い。

これ以外の「重み」の付け方 (test-statistics) もある。例えば OPAL などでは伝統的に違う「重み」を付けて結果を出している。これは、それぞれの実験で得られた結果や誤差を入れ易いようしたり、計算のスピードを考慮したりした結果であって、どれも正しい結果である。このため、LEP ワーキンググループで出した各々の実験の結果と、実験毎に発表する値が違っていたりすることがあるが、どれも正しく、その違いもわずかである。

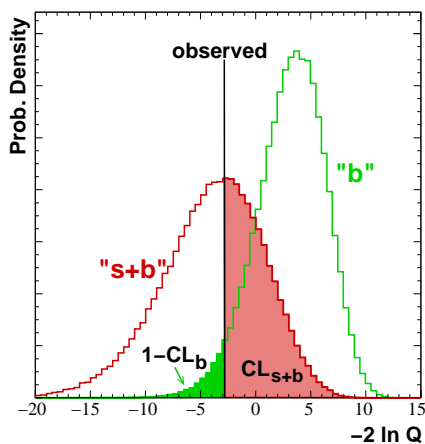


図 11: 確率計算の結果に用いられる分布と用語説明

図 11 に示してあるのが、これから結果に対して用いられる様々な量を表している。2つのヒストグラムは、それぞれシグナルが存在する場合、「 $s+b$ 」、とバックグラウンドだけしかない場合、「 b 」、での最終の「値」のシミュレーションから計算された予想確率分布である。この図はテストされるべき質量のヒッグス毎に作られる。データで見られた「値」はこの図では「observed」と書いた線で示している。データのラインが左側に行けば行くほどバックグラウンドからの超過を表す。この図では、 CL_b はバックグラウンドだけの場合のヒストグラムで、データに見られた最終の「値」の右側を積分した分、 $1 - CL_b$ は左側を積分した分、となる。バックグラウンドからの超過と言う意味では $1 - CL_b$ がよく使われる。0 に近い値がデータからの超過を表し、逆に 1 に近ければ、データがバックグラウンドの予想より

も減少していることを示す。つまり、 $1 - CL_b$ はデータと予想されるバックグラウンドとを比べた量で、バックグラウンドだけだとした場合、どれぐらいの確率で、データで実際に見られたような超過現象が起こるかを示した数値である。当然のことながら、定義から分かるように、バックグラウンドだけだとしたら、 CL_b の平均値は 0.5 になる。シグナルが存在する場合、最もよく実験で観測されるのは「 $s+b$ 」ヒストグラムのピークの位置に対応する。ここにデータが観測値を持てば、今テストしている質量のシグナルとの整合性は最高だということになる。LEP で質量の下限値を出す時によく使われるのは、この図の CL_{s+b} を CL_b で割った値で、これは CL_s と呼ばれる。この CL_s が 0.05 であるシグナルの質量が、95%CL での質量下限値を与える。

この図 11 をいろいろな質量を仮定したヒッグス・シグナルで作り、一度に見せると図 12 のように示すこともできる。実線で示したものが実データでの観測ラインで、それぞれの質量のヒッグスを仮定して得られたデータでの「値」を繋いだものである。2種の濃淡に分けられたバンドの中心はバックグラウンドだけである場合のヒストグラムの最頻値を繋いだもの、バンドはその広がりを 1σ 、 2σ の領域として示している。バックグラウンドだけだとしたとき、データで観測された超過（減少）がどれぐらいの確率で見られ得るかは、実線がこの中心ラインからどれぐらい下（上）に行っているかでわかる。点線で示しているのが、シグナルが存在した場合の確率分布のピーク位置を繋いだものである。よって、実線（データ）と点線（シグナル予想ライン）の交わっているところが最もデータと仮定した質量のシグナルが整合性のあるヒッグス質量となる。

様々な質量に対する $1 - CL_b$ を、仮定した質量の関数として示すと、どの質量でもっとも激しく超過が見られたかを簡単に見ることができる。図 13 に示すようになる。結果の説明は後の章でまとめてするが、この図では実曲線でデータを示し、点線の各点は、仮定するシグナルの質量を横軸にとった値にした場合に、見られるべき超過量の最頻値を示している。図 11 ではデータとシグナルの最大確率が重なってしまっているため説明し難いが、図 13 の点線の示す値は、図 11 のヒストグラム「 $s+b$ 」でシグナルの最大確率であるピークの部分でカットした場合のヒストグラム「 b 」の左側積分の値である。

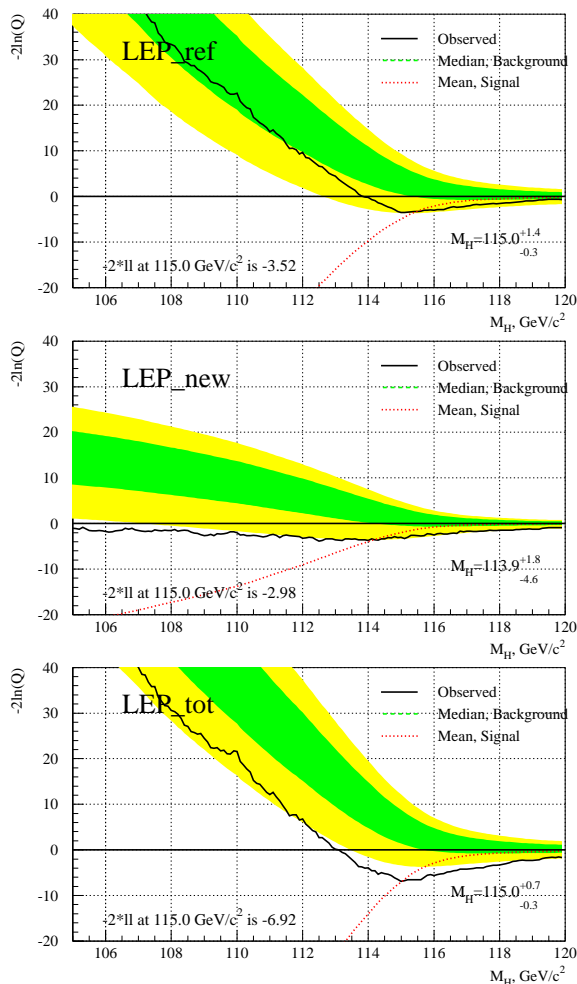


図 12: 3つのデータセットでヒッグスの質量の関数としての $-2\ln Q$ (本文参照) テストの結果: 上は9月5日の発表に使われたデータ、下は11月3日の発表に使われた全データ、真中の図はその間に取られたデータのみでのもの。実線で示したものがlikelihood ratio法によるデータの「値」である $-2\ln Q$ 。2種の濃淡で示す領域は、バックグラウンドだけだった場合に期待される 1σ , 2σ 領域。下に向かう点線はそれぞれの質量のヒッグスが存在した場合に期待される $-2\ln Q$ 分布の最頻値。

図13から分かるように、例えば112 GeVの標準理論ヒッグスが存在すれば 5σ 以上のバックグラウンドからの超過として discovery ができるほど、LEPデータの平均感度があることも分かる。感度は質量が上がると急激に下がって行くことも分かるであろう。

5 結果

さて、結果を説明する準備がようやく整ったところで、早速データを見てみよう。いくつかは既に説明のために使ったものである。

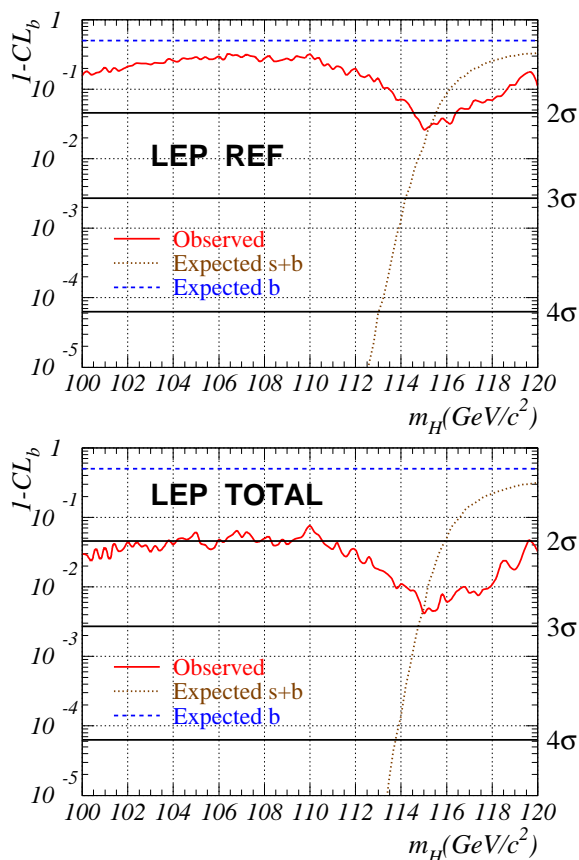


図 13: ヒッグス質量の関数としての $1 - CL_b$ テストの結果: 上は9月5日の発表に使われたデータ、下は11月3日の発表に使われた全データでのもの。

5.1 9月に見られたバックグラウンドからの超過現象

まず兆候を見る上で重要なのがバックグラウンドからの超過を示す $1 - CL_b$ の結果である。歴史を追って説明することにする。

先に見せた図13の上プロットを見て頂きたい。9月5日の発表に用いたデータ(ただし11月までに行なった再解析の後の結果)で既に、バックグラウンドだけだとしたら約3% (片側積分での 2.2σ) の確率でしか起こらない超過現象が115 GeV付近で見えている。この値が何であるかは上で述べたが、この数字の意味するところの解釈には注意が必要である。図でも分かるように、我々は広い範囲の質量のヒッグスに対しテストを行なっている。よって、バックグラウンドだけだったとしてもこのような現象がどこかに見つかる可能性 (anywhere effect) も考えないといけない。よって、この一つの質量での「3%の確率でしか起こらない」という結果から、「97%の確率でシグナルが存在する」としてしまるのは明らかに間違いである。この anywhere effect の見積

もりは、どれぐらいの相関がテストする質量の間であるかを調べることで推定できるが、テストする領域や方法にもよるため、なかなかきちんと数値化できないところである。簡単なモンテカルロを行なって、得られた $1 - CL_b$ の値を大体 2、3 倍するのが良いということになっている。これで、9 月 5 日までのデータの実際の significance は 5–10% で起こる現象でしかなくなる。更に、我々はヒッグス以外にも様々な粒子を LEP で探索しており、この膨大な母数の解析のどれかに 2.2σ の効果が見られることまで考えに入れば、まさに意味のない数字となる。

更にこの超過には様々な「問題点」があった。ここでまとめておく。9 月 5 日までのデータの「兆候」は

- 4 つの探索モードを合わせた結果を実験毎に見ると、ほとんどの超過現象は、ALEPH からのものであった [5]。それ以外の実験は 115 GeV 付近では、ほぼバックグラウンドだけに一致、またはわずかに減少傾向にあった。
- ALEPH の超過は 115 GeV 付近にヒッグスが存在するとしても「多過ぎ」た。シグナルが存在するとしても、ALEPH の観測は 2.5σ 程度でしか起きない、とても「ラッキー」な現象と言える。
- 4 つの実験結果を探索モード毎に見ると、超過現象は 4 ジェット・モードでのみ見られた。4 ジェット・モードはジェットの組合せ方で質量が変わるなどの点でなかなか難しいモードである。
- バックグラウンドの推定が甘い。特に超過が激しい ALEPH の 4 ジェットの結果は主に 3 つのイベントが高い「重み」を持ったということだけから来ていた。これは、そのイベントに対応する bin の推定 S/N が非常に高いことを意味するが、バックグラウンドや質量分解能、b-tagging の性能などから直観する値と比べ高過ぎるように感じられた。

5.2 9 月から 11 月までの動き

このように問題がいろいろあった結果であるが、我々が 9 月 5 日の段階で「兆候」かもしれないと思ったのは、LEP 4 実験を合わせたデータで見られた超過の量がシグナルが存在するとした場合の超過の量とよく合っていること、それ以外は、今までに分かっている

実験結果や理論が軽いヒッグスを示唆しているということだけが主な理由である。LEP-I などで得られた電弱パラメータの精密測定からヒッグスが軽い (χ^2 の最小値は約 70 GeV で、95% CL でも約 200 GeV より軽い。[4] 参照) ということが「分かって」いる。そして LEP データの示唆する SUSY GUT で期待が高まる超対称性理論では少なくとも一つのヒッグスはやはり軽くないといけない、ということである。たとえば最小 SUSY (MSSM) では、パラメータの上では最も軽いヒッグスは 140 GeV ぐらいまで上限を延ばせるが、120 GeV 程度まででないとかかなり危うくなる。

あとは、これ以降 11 月までのデータで、この超過が順調に育っていくこと、4 モード中 4 ジェット以外でも超過が見られていくこと、4 つの実験でそれぞれに超過が見られていくこと、をただひたすら願っただけである。解析の面ではバックグラウンドの推定をきちんと再吟味し「重み」に対する理解を深めることも要求された。

実際には 9 月 5 日の LEPC での発表時点では、この超過は 2.2σ でなく 2.6σ と発表されたが、その後、10 月末までに ALEPH [5] はもちろん他の実験でもバックグラウンドの推定の詳細なやり直しを行ない、各実験でのデータ補正、DELPHI が解析方法を変えたこと、などもあって数字が変わった。更に LEP でこの何 σ と言う時の定義も変わったことも加わり、この数字の変化がさまざまな混乱の原因になってしまったことは事実である。

9 月 5 日の発表のあと、9 月、10 月の各実験内の忙しさは大変なものであった。9 月末には LEP の定常運転のエネルギーが上がり、ほとんどのデータが 206 GeV を越えるものとなった。このためヒッグス生成の期待される頻度もぐんと上った。実験グループだけでなく、LEP 加速器チームに与えられたプレッシャーは大変なものであったと思う。改めてお礼を言いたい。

新しいデータの情報は LEP ワーキンググループ内で常時アップデートされた。イベントの候補が見つかるたびにグループ内で公表し、詳細な情報を吟味する。実験毎の結果のまとめが急ピッチで行なわれ、まず、OPAL のニュートリノ・モードに超過が開始された。OPAL データでは最も大きい超過は 107–109 GeV 付近にあったが、115 GeV 付近も 1σ を越えてきた [6]。しかし、

いわゆる golden-event は見つからない。OPAL、DELPHIではデータの calibration もどんどん進められた。そうこうしているうちに、DELPHIではバックグラウンドの推定で、ALEPHとは逆に、かなりバックグラウンドを多く見積もり過ぎてたことが分かった。推定をやり直した結果、DELPHIの4 ジェット・モードのひとつのイベントが、高い「重み」を持つことになった。実験の間のバランスが悪いという問題はなくなりつつあったため、期待が膨らんで行った。しかしその後すぐに、detector calibrationを進めた結果、DELPHIのこのイベントの secondary vertex に加わっていたトラックが、primary vertex から来ているとした方が良いと判定されることになった。結果、b-taggingの値が低くなり、シグナルらしさが悪くなることが判明し、かなりショックを受けた。まだその段階ではLEP combinedの計算は行なわれておらず、各実験の中間報告だけが続き、イライラが募っていった。10月半ばも過ぎ、そろそろLEP全体でのcombined resultsのための計算を始めないといけないという時に、L3から朗報が舞い込んできた。L3のニュートリノ・モードでとてもきれいな候補が見つかったのである[7]。このイベントはすぐに皆で議論された。ほとんど反対方向に向かう二つのジェットで質量は114.4 GeV、よくb-taggingされ、質量欠損はほぼ Z^0 の質量。運動量がぴったりバランスした2光子 $\gamma\gamma$ がbeam pipeに逃げた $b\bar{b}\gamma\gamma$ 過程でなければ、正にヒッグスシグナルとしか思えない事象である。それでもまだ最終的にLEP全体を合わせた結果を見るまでは、LEP内部での雰囲気はかなり懐疑的なものであった。

さて、10月末について蓋が開けられLEP全体のcombined resultsを計算する時が来た。結果は11月3日にLEPCミーティングで発表されたものである。さっそく見てみよう。

5.3 候補イベント

まず、各イベントに与えられた「重み」 $\ln(1 + s/b)$ がどのように分布しているかを見てみる。図14に115 GeV ヒッグスに対する s/b のイベント分布を示す。この上のプロットは $\log_{10}(s/b)$ を横軸、イベント数を縦にとったもの。データは点で、空のヒストグラムはバックグラウンドの平均予想分布、斜線で塗られたヒストグラ

ムは115 GeV ヒッグスの予想分布。下の2つのプロットは上図を右側 (high-purity side) から足していったもの。横軸をシグナルの期待される平均イベント数、縦軸に足されたイベント数を取っている。実線のカーブがバックグラウンドしかない時の予想ライン。その上の点線が115 GeV 標準理論ヒッグスが存在するとしたときの予想ラインである。データ点が、シグナルが存在する時の予想ラインを良くフォローしている様子が見える。ただし、下のプロットの各点に与えられているエラーは互いに相関を持っていることに注意。

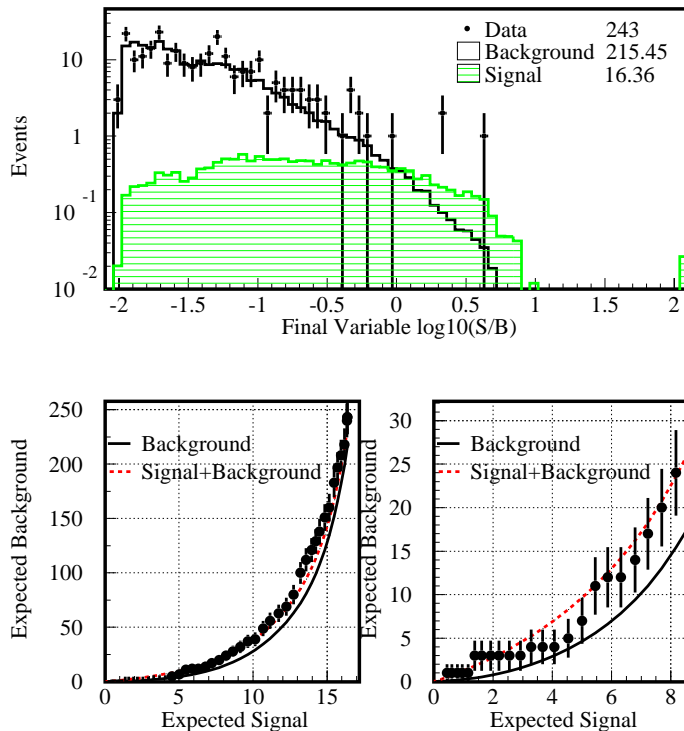


図 14: 115 GeV ヒッグスに対する、選択されたイベントの持つ s/b 分布: 下のプロットは上の図を右側 (high-purity side) から積分した結果。本文参照

各実験で選択されることが期待されるヒッグスイベントの数は115 GeV に対しては約4 イベント。図14の上のプロットに数字が見られるように選択された全データ数は243 イベント、バックグラウンドから平均的に期待されるのは約215 イベント、シグナルは約16 イベントである。各実験で得られたヒッグス候補イベントのうち高い「重み」を持つものを4つずつ挙げると表1のようになる。

候補	データ	モード	質量 (GeV)	\sqrt{s} (GeV)	重み
ALEPH					
1	Ref.	4 ジェット	114	206.7	1.7
2	Ref.	4 ジェット	112	206.7	1.2
3	Ref.	4 ジェット	110	206.7	0.6
4	Ref.	レプトン (eeH)	118	205.3	0.5
DELPHI					
1	Ref.	4 ジェット	97	206.7	0.4
2	Ref.	4 ジェット	114	206.7	0.3
3	New.	レプトン (eeH)	112	205.4	0.2
4	New.	4 ジェット	110	206.7	0.2
L3					
1	New.	ニュートリノ	114	206.6	1.1
2	New.	ニュートリノ	114	208.2	0.4
3	New.	4 ジェット	115	206.7	0.4
4	Ref.	ニュートリノ	111	208.4	0.2
OPAL					
1	New.	4 ジェット	111	206.6	0.5
2	Ref.	4 ジェット	113	205.4	0.4
3	New.	ニュートリノ	104	205.4	0.3
4	New.	ニュートリノ	112	206.4	0.2

表 1: 各実験で得られたヒッグス候補事象のトップ4イベント。「データ」のRef. は9月5日までの解析に使われたデータの中の候補、New. はその後のデータで得られたもの。「重み」はそのイベントに与えられた115 GeV ヒッグスに対する重み、 $\ln(1 + s/b)$ 。OPALの第一候補イベントは10月末のデータのもので、今回の結果には含まれていない。

5.4 3つのデータセットでのそれぞれの結果

図12では、データを9月5日までの分(Ref)、これとは独立なその後のデータ(New)、2つを合わせた全部(Tot)の3つのセットにして、それぞれの結果を見ることができる。9月5日以降のデータでも予想バックグラウンドからの超過が見られる。この新しいデータの統計量は少ないためシグナルとバックグラウンドの分離は少ない。新しいデータでの超過の主な原因は、表1の候補イベントのデータセットからも予想できるようにL3とOPALで見られた超過による。ALEPHの新しいデータには高い「重み」をもつイベントがなかったため、シグナルが多過ぎた状態から比較的多いだけの状態になり、バランスが取れてきていることも予想がつくであろう。後に説明する。

図13に戻って バックグラウンドからの超過がどのよ

うに育ったかを $1 - CL_b$ に見てみよう。9月5日までのデータでは $1 - CL_b$ の最小値は115 GeVにあり、その点での確率は3%であったことを思い出して頂きたい。図13の下のプロットが11月3日発表のデータセット全部での結果である。やはり最小値は115 GeVにあり、バックグラウンドだけであった場合、その点での観測値である $-2 \ln Q$ が見られる確率、つまりは $1 - CL_b$ 、は約0.4%と一桁近く小さくなっている。これを片側積分でのsignificanceに直せば約 2.9σ となる。

この115 GeVでの $1 - CL_b$ のsignificanceを、今年行なわれた4回のLEP combinedのデータセット毎に示した図が一番初めにお見せした図1だったわけである。図1の線は115 GeVの標準理論ヒッグスが存在したとした場合に予想される $1 - CL_b$ の平均(最頻値でなく、単純平均)を取ったものである。

もう一度、図12に戻る。この図では115 GeV付近がよく分からないだろう。そこで、115 GeVの点だけで図12の3つのプロットを輪切りにしてみる。こうすれば、結果のための用語説明に使った図11のように、バックグラウンドだけだった場合、115 GeVシグナルが存在する場合、それぞれでの予想確率分布と、実際にデータで得られた最終の値 $-2 \ln Q$ がどこに見えたかをはっきり示すことができる。図15が結果である。この図では図11とは逆に右へ行くほどバックグラウンドからの超過がデータで見られたことを示すように横軸を $\ln Q$ に取っている。図11で説明したとき同様、データで得られた結果は縦線で示している値である。それぞれのプロットでの2つの曲線は、左側のものがバックグラウンドだけとした場合期待される $\ln Q$ の確率分布、右側の曲線は115 GeVの標準理論ヒッグスが存在したとした場合の確率分布である。前にも説明したように、それぞれの曲線は、シミュレーション結果を用いてデータと同じサイズのモンテカルロ「実験」を多数回行って得られる。使用されたデータと同じルミノシティで、実験を何回も行なったとしたら見えるであろう $\ln Q$ の分布に対応する。2つの曲線のピーク間の距離が、シグナルの存在兆候をバックグラウンドから見分ける平均感度を示しているとも言える。

図15の上2つのプロットで分かるように、独立した2つのデータセットそれぞれで、データはシグナルが存在するとした場合を好んでいることが見て取れるであ

LEP results at 115GeV/c²

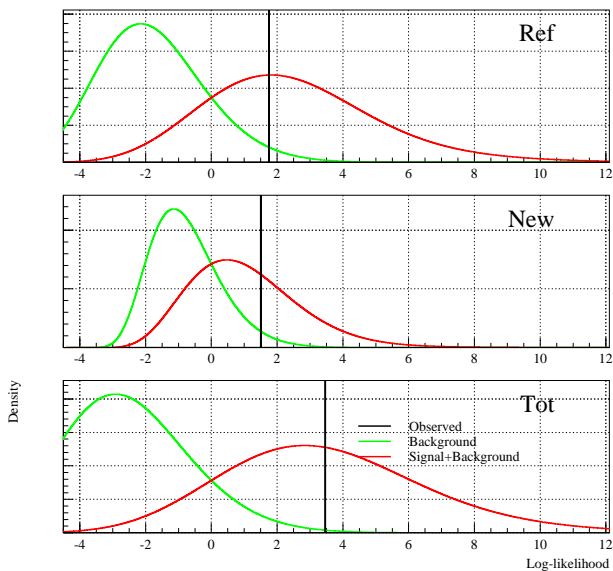


図 15: 9月5日までのデータ (Ref)、それ以降 (New)、合わせたもの (Tot) の3つのデータセットでの最終値 $\ln Q$ 。横軸に $\ln Q$ 、データで得られた結果は縦線で示す。2つの曲線は薄い (左側) ものがバックグラウンドだけとした場合期待される $\ln Q$ の確率分布。濃い (右側) 曲線は 115 GeV の標準理論ヒッグスが存在するとした場合の確率分布。

ろう。下の全データを合わせた結果でも、観測された「値」はちょうどシグナルが存在するとした場合の予想最頻値の真上に来ている。ちょっと出来過ぎだという感じもするくらいである。質量 115 GeV という値自身が、データと予想確率分布が良く合う点を見て選ばれたのであるから、これは当然の結果だと思われるかも知れない。しかし実際には、115 GeV という質量はデータがバックグラウンドから最も超過している点を選んだわけで、これがシグナルの予想とぴったり重なる保証は何もない。言ってみれば、バックグラウンドらしくもシグナルらしくもない観測がなされる可能性が沢山あるわけで、事実、大抵の新粒子探索ではバックグラウンドからの超過があっても期待されるシグナル量より高過ぎたり低過ぎたりするものである。つまり、バックグラウンドからの超過から見た質量の推定値とシグナルとの整合性から見た質量推定値は完全なる一致を見たわけだ。

この、バックグラウンドからの超過、シグナルとの合い方の両面がよく合っているという結果、そして、独立な2つの部分データサンプルでもその傾向が出ていること、この2つの結果は今回の「兆候」の意味合いをかなり強めている。

5.5 4つの実験、4つの探索モードでの結果

では、実験毎の結果はどのように見えているであろうか。図 16に4つの実験それぞれで見えた 115 GeV における結果を示す。図 15と同じようにして結果を吟味できる。図から分かるように、ALEPH はシグナルの予想の最頻値に比べ少し多い兆候が見られている。バックグラウンドだけで説明しようとする、この確率は 0.2% 程度となる。DELPHI の観測値はバックグラウンドだけの場合の最頻値に近く、超過は見られていない。しかし、単独の実験での感度は、図 16 と図 15を比べればはつきりするようになりかなり低いので、シグナルがいるとした場合との整合性もある。L3 の結果を見ると感度が他の実験に比べ若干低いことはあるが、シグナルがある場合を好んでいる。最後に OPAL であるが、これは観測値がちょうどシグナルの予想最頻値に一致している。ただし、バックグラウンドだけだとしても観測された結果とは整合性がある。図から分かるように単独実験の平均感度はこれぐらいしかないのである。前にも述べたが ALEPH、DELPHI、OPAL のシグナルに対する平均感度は非常に似ていることも図から見てとれるだろう。OPAL がわずかに低く見えるのは、LEP combined のために使用したデータのルミノシティが低いことが主な原因である。以上のように実験の間のバランスが悪いと言う 9月5日までの結果と違い、高いエネルギーでデータを溜めた結果、4つの実験の内3つでシグナルを示唆する結果が得られた。この事実も大変心強い。

では、9月5日まででは、4ジェット・モードでのみ兆候が見られたという問題はどうなったであろうか。4ジェットは確かに最大の分岐比を受け持つため初めに兆候が見られるのは当然と言えるが、以前に書いたように、4ジェットと、他の3つのモードを合わせたものでは同じくらいの感度を持つ。データを溜めれば、他のモードにも兆候が見えて欲しいところである。図 17にモード毎の結果を示す。4ジェット・モードの結果 (左下) はデータ量が増えても確かにシグナルを強く示唆している。観測値はシグナルが存在するとした時の最頻値に近く、バックグラウンドとの整合性はかなり低いのが見えるだろう。9月5日の段階では、この観測値がシグナルの最頻値よりかなり右側 (多過ぎ) にあったため問題視されていたが、データを溜めた結果、よりシグナルとも整合性が取れて来ている。次に感度があるニュー

Experiments results at $115\text{GeV}/c^2$

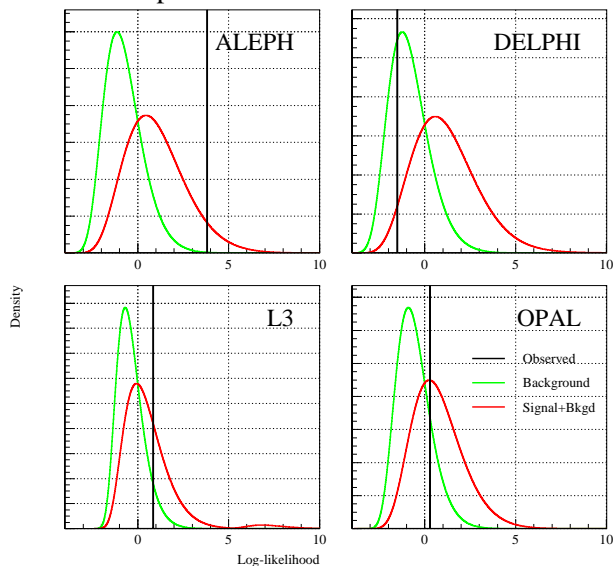


図 16: 4 実験それぞれの結果

トリノ・モード (右上) ではどうか。これ以前には兆候が見えなかったのが、シグナルサイドに観測値が動いている。これは主に L3 と OPAL で得られたイベントが要因である。観測値は 4 ジェット同様、シグナルの最頻値近くに見えている。バックグラウンドだけとする場合との整合性は悪いが 10% 近い確率で起こり得る現象とも言える。その他の 2 つのモード、 τ ・モード (右下) とレプトン・モード (左上) の結果でも、わずかであるがシグナルを好む様子が見える。ただし、これらのモード、特に τ ・モードは感度が低過ぎて、バックグラウンド、シグナル、ともに整合性がある。以上から分かるように、4 つの独立した探索モードのうち、兆候の見られる可能性が高い 2 つのモード、4 ジェットとニュートリノ、ではシグナルと整合性が高く、バックグラウンドとの整合性がかなり悪い、更に残りの 2 つのモードでもわずかにではあるがシグナルがある方を好むという期待通りの結果を得られた。この事実も、前に述べた結果と同様、「兆候」の意義を極めて高くしている。

5.6 シグナルとの更なる整合性

では、115 GeV 以外のテスト質量で見える結果はどうなっているか、ということも考えないといけないだろう。図 12 の下のプロットが最も分かり易いだろう。いろいろな質量でテストした結果、115 GeV 付近で最も強くバックグラウンドからずれ、更にシグナルの予想と

LEP results at $115\text{GeV}/c^2$

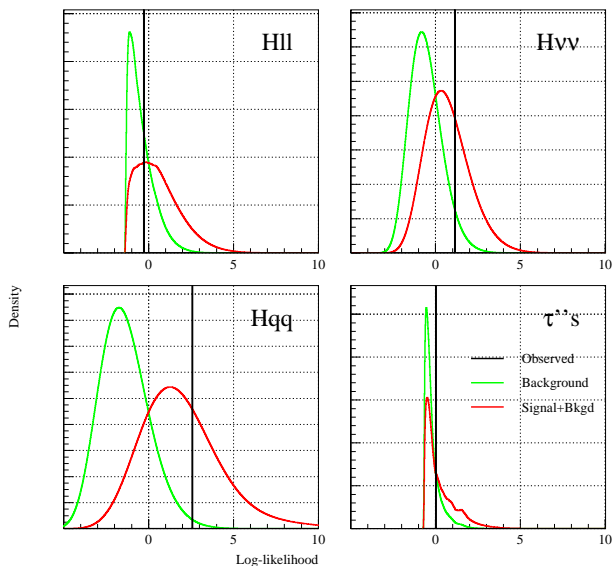


図 17: 探索チャンネル毎の結果。(左上) レプトン・モード、(右上) ニュートリノ・モード (左下) 4 ジェット・モード、そして (右下) τ ・モード

もここでぴたりと一致したことは先に述べた通りである。しかし、それ以外の質量も、シグナルとの整合性は悪いがバックグラウンドからの超過は 2σ 程度あるではないか、というのが疑問点として残る。これを正確に調べるには、「115 GeV にヒッグスが存在する」とした場合に、115 GeV 「以外」の質量で 観測予想値がどうずれるか、を考えないといけない。つまり、今まで考えてきたバックグラウンドの代わりに、「バックグラウンド + 115 GeV シグナル」を考えればよい。この研究はまだ始まって間もなく、現在、4 実験のシグナル推定値を用いて結果を出そうとしている最中であるため、今回は最終結果を示すことができない。しかし、感度が LEP 4 実験の平均に近い DELPHI の予想シグナルを 4 倍して LEP の 115 GeV シグナルの代用とした場合の結果が作られている。図 18 がその結果である。図 12 とは違い、バンドはそれぞれの仮定した質量のシグナルに対する分布の方についているが、それ以外は同じである。実データでの観測値は曲がりくねった実線で示されている。一番上に延びている点線がバックグラウンドだけの場合の推定最頻値、その下の曲線は 117.5 GeV のヒッグスが存在したとした場合。その下の曲線が 115 GeV ヒッグスを仮定したときの最頻値曲線である。更に下に 112.5 GeV に対する予想がある。これを見ると、115 GeV ヒッグスがあるとすると、データに見られた他の

テスト質量での超過もよく説明できることが分かる。逆にその他の質量のヒッグスを考えると、データを再現することが難しいことも分かるだろう。

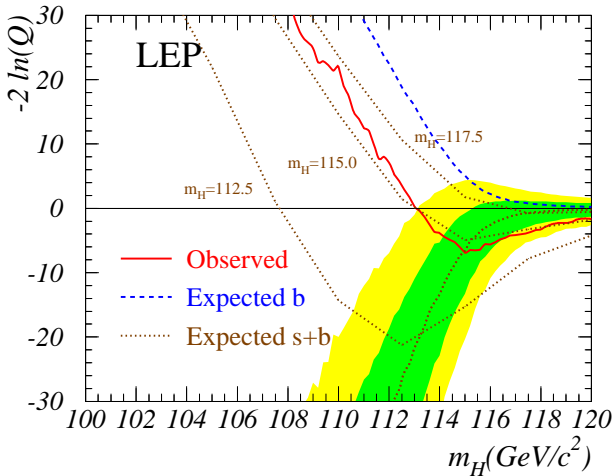


図 18: 115 GeV 以外の点での超過と 115 GeV シグナルとの整合性 (本文参照)

5.7 結果のまとめ、質量の推定値、棄却質量領域

今までの結果をここでまとめる。「兆候」を支える要因は以下の通りである。

- 質量 115 GeV において最もバックグラウンドからの超過が大きく、バックグラウンドだけとした場合、この質量だけで考えれば 0.4% ($\sim 2.9\sigma$) の確率でしか起こらない現象。
- この超過の量はちょうど標準理論ヒッグスが 115 GeV に存在する場合の予想とぴったり合う。
- データを 9 月 5 日まで、その後と分けて見ても、どちらも 115 GeV 付近のヒッグスにおいてシグナルの兆候が見られる。
- 4 実験中の 3 つの実験でシグナルを示唆する結果が得られた。DELPHI だけはバックグラウンドの予想の方に近いが、シグナルが存在するとしても問題はない。
- 4 つの独立した探索モードの内、兆候の見られる可能性が高い 2 つのモード、4 ジェットとニュートリノに強い兆候が見られる。更に残りの 2 つのモードでもわずかにではあるがシグナルがある方を好む結果となっている。

- 115 GeV 「以外」の質量でのテスト結果は、115 GeV にシグナルが存在するとした場合よく再現する。逆に、バックグラウンドのみは言うまでもなく、それ以外の離れた質量のヒッグスを考えてもデータの再現は難しい。

このように、「兆候」は単なる 2.9σ という数字以上の重大性を持っている。

以上のようなデータとシミュレーションからの推定値との整合性を考えて、我々はヒッグスの質量を「測る」ことができる。基本的には標準理論ヒッグスを考える限り断面積が分かれば質量が決まる。特にこの質量領域のヒッグスは断面積が質量の関数として急激に変わるため、その推定値の誤差は小さくなる。標準理論ヒッグスを仮定して、データと予想の整合性から求められたヒッグスの質量は $115.0^{+1.3}_{-0.9}$ GeV である。この誤差には現在の推定値に対する理解がまだ十分でないことを考慮して、 2σ に対応するエラーを付けてある。質量の下限値は 95% の信頼度で 113.5 GeV である。

一言付け加えておくと、これらの結果は標準理論のヒッグスに対するものである。SUSY ヒッグスでも、この質量領域では多くのパラメータ領域で最も軽いヒッグスが標準理論「的」である場合も存在する。しかし、一般的には断面積は低くなる (たとえば MSSM では $\sin^2(\alpha-\beta)$ の分だけ) ので、この場合、もっともデータとの整合性が良くなる質量は 115 GeV より更に低い質量のところ、と言うことになる。ただしこの場合、バックグラウンドからの超過とシグナルとの整合性という両面でぴたりと合う質量が存在するかは、これからの研究で明らかにされなければならないところである。

6 来年走っていれば。。

LEP は 20 世紀で運転を終了することとなってしまったので、今更「来年走っていれば」どうなっていたかを考えるのはつまらないが、話しを完結させるために一応触れておく。

115 GeV 領域のヒッグスは、ビーム衝突エネルギーがたとえ数百 MeV であっても上がれば、生成率が急激に上がる。たとえば 206.5 GeV 付近で定常的に走った今年の最後の状態を 208 GeV に上げられれば 2 倍近くの断面積で生成することができる。既に設計値を越えている LEP のエネルギーであるが、LEP 加速器チーム

は、上に述べたヒッグスの「兆候」を受けて、来年どうやったら更にエネルギーを上げることができるか、検討を進めた。結果、クライストロンに余裕を残したままの状態でも 208.2 GeV での定常ランができる、という結論を得た。この増強は、今年度調子が悪かった加速空洞の修理、試作段階で作った超電導加速空洞を導入することや、軌道半径を更に微増するなどで行なう予定であった。

実験サイドでも、測定器をカバーするだけの人員が不足して来る、測定器もかなり老朽化して来ている、など問題があったが、ヒッグスの「兆候」が出た以上、これらの問題を考慮しても是非実験継続をすべきである、とすべての実験から強い要求が出された。

来年走っていたら、もし標準理論ヒッグスが「測定」された 115 GeV 付近の質量に存在すれば、どれくらいの感度で見られるか、を示したのが図 19 である。この様子は図 15 を見ると分かるようにシグナルとバックグラウンドからの確率分布がデータのサイズに応じて離れていくこと、そして、高いエネルギーで走ることから来るシグナル生成の増大から予想が付くだろう。115 GeV であれば 5σ 以上のバックグラウンドからの超過が見込まれ、21 世紀始めの年にヒッグス「発見」を宣言できる可能性があったのであるが。。。返す返すも残念である。

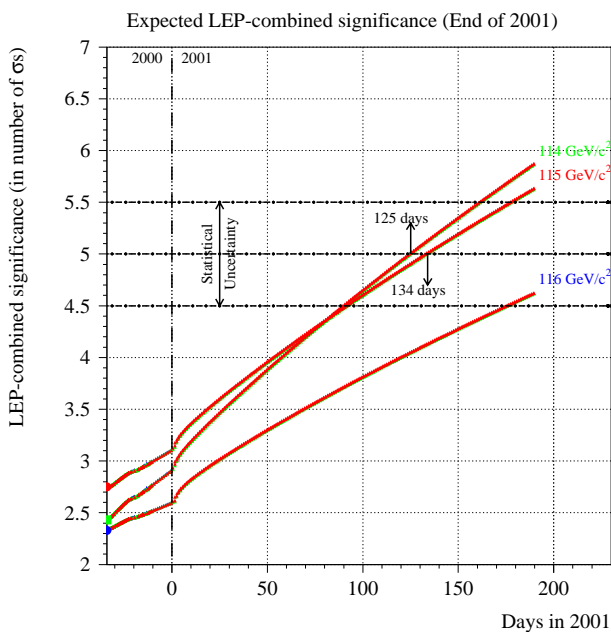


図 19: 来年 (2001 年) に LEP が運転されていた場合の significance evolution 予想図。

7 CERN の決定の経緯

既に解体が始まってしまった今現在、どういふ経緯でこの決定がなされたかを論じるのは虚しくなるだけなので、止めたいところであるが、一応短くお伝えすることにする。

前にも伝えた通り、LEP は 11 月 2 日朝に今年の運転を終了した。11 月 3 日の発表会の後すぐに、closed session である LEP 委員会が招集された。これは LEP の物理と結果から LEP の立場でどうすることが最善かを議論する場である。当然のことながら、LEPC 委員の多数は延長に強い意欲を示した。にもかかわらず、聞いたところでは、残念ながら少数の他の実験にも参加する委員が他の実験に与える影響をあまりにも強調し運転延長への反対を主張した。議長 (M. Spiro) が LEP の物理と実験結果からの議論としてまとめようと試みたが、どうしても收拾がつかず、LEPC としては延長へ正式な recommendation は出さず、LEPC の上の議論の場である Research Board での決定に任せようという [8]、非常に重大なミスを行ってしまった。LEP の観測結果と加速器の可能性だけから判断すべき場であるはずなのだが。これは LEPC としては責任を放棄するという意味を意味し、オフィシャルな文書を重視する欧米社会では、本来やってはならないことであった。このニュースを受け、我々はきちんとした再議論を求めたが、LEPC はこの要求に答えることなくそのまま終ってしまった。これが、あとあとまで響くことになる。

11 月 7 日には、Research Board が開かれた [9]。これは CERN のすべてのプロジェクトに対して計画を立案する CERN の内部委員会としては最も上に位置するものである。ここには LEP だけでなく、もちろん LHC や SPS/PS 実験、ニュートリノファクトリーなども議論される場である。この会議に科学的な見地で臨んでもらおうと、我々も LEP ヒッグス ワーキンググループとして結果のまとめを文書にして提出した。LEP 延長の議論に一日費やされたが、議論はまったく半々に分かれたと聞く。特に、ヒッグスの発見の可能性という高エネルギー・素粒子物理にとっても将来計画にとっても正に素晴らしいチャンスを取り逃がしていいものか、また、これが SUSY ヒッグスであって、もしあるパラメータ領域にあれば LHC では見えないではないか、という意見と、LHC のスケジュールに影響を与えるかもしれ

ない危機、Tevatronとの関係、などが主な議論の焦点だったという。まったく科学的でない議論であるが、LEPでの「兆候」の示すヒッグスの質量が115 GeVよりわずかに重く、しかも運が悪ければ、来年4～5 σ に達しない場合もあるではないか、そうならどうなるか、CERNの信用は落ちてしまうのでは、などということを所長は心配していたと聞く。所長の立場であれば、誰でも考えることかもしれない。遂に、長い議論の末でもまとまらず、LEPCからのrecommendationがないということもあり、結論無し、所長に一任する異例の事態となった。

これを受けて、所長が取った方策が最も理解に苦しむところである。所長はいきなりPress release[10]で「LEPの終了」を「宣言」した。にもかかわらず、ここでは12月半ばのCERN Councilで正式に決める、としている。更に、これにもかかわらず所長は、LHCのスケジュールに与える影響を考慮して早めに決着を着けようと、11月17日に緊急Councilを開催。一カ月ぐらいなぜ待てなかったのか疑問も多いがいろいろ事情もあったのであろう。ここでも結論は出ず、よって、これを持って最終的に所長の提案通りLEPは終了、という事態になったことは冒頭でお伝えした通りである。所長も大変苦しい決断であったことと思う。既に終わってしまったのであるから、将来に目を向けるべきだろう。

8 終りに

シグナルを支持する数々の「兆候」はあるが、統計のふらつきや、研究し尽くされなかった系統的な問題などから超過に見えただけ、という可能性ももちろんある。たとえば系統的問題としては、バックグラウンドを40%ほど増やせば超過をかなり説明できる。今までのLEPでの標準理論過程の研究から、この40%という量は現実的ではない。しかし、これからもバックグラウンドに対する理解を今まで以上に深めるため研究を続けねばならない。統計のふらつきに関しては、2.9 σ という数字だけからすれば簡単に起こり得る数字であることも確かである。ただし、それ以外の整合性をも考えると、これがもし本物でなければ我々は随分と運が悪かったと言わねばならないだろう。

もし、115 GeV付近に標準理論的なヒッグスが存在するならば、まず第一に、TevatronのRun2でも今か

ら3-4年で兆候が見えるはずである。Tevatronだけでは5 σ に到達するには2007年近くまで待たねばならないが、LEPの結果と合わせれば、ここ数年で「発見」を宣言できる可能性がある。大変心強いことである。もし仮にLEPのヒッグスがSUSYヒッグスであっても、TevatronでWからのヒッグス放射を捉えるメイン・モードを考えれば、LEPで生成されたヒッグスは、Tevatronでも必ず標準理論で予想されると同等な量で生成される。Tevatronの $p\bar{p}$ ビーム衝突強度が計画通りアップグレードされることを願っている。

次はLHCでの発見の可能性が挙げられる。LHCでは軽いヒッグスだけでなく、更に上の重いヒッグスや超対称性粒子の大発見の期待が高い。LEPでの「兆候」が本物であれば、これはSUSYがある可能性を更に示唆している。LHCでの115 GeV領域のヒッグス探索はバックグラウンドの関係から他の質量領域に比べ厳しいところではある。それでも、ヒッグスがSUSYのものでそのパラメータが意地悪なところにある、というようなことがなければ、高いミノシティでの定常運転が始まれば1-2年で5 σ に到達できる予定である。LHCの現在のスケジュールでは、2005年後半にsingle beamによるテストをした後、2006年に数fb⁻¹でのlow luminosity runを、そして2007年から本格的なhigh luminosity runが始まる予定である。2007年には超対称性粒子や重いヒッグスの候補が見られるかも知れない。結果が今から非常に楽しみである。

ヒッグスの本当の研究は発見の後にあることは皆様よくご存知の通りである。リニアコライダーがその最も良い候補であることは間違いないだろう。ヒッグスの兆候がTevatronでも見え始めたら、JLCにとっても素晴らしいことになる。一番最初のエネルギーをどこに設定すべきかが決まるからである。もちろん今は、LEPの「兆候」がどうであろうと、現在の500 GeVまでを第一期、その上を第二期とする計画に基づき、軽いヒッグスとSUSYに「決着」をつけるためにもとにかく最速の建設を目指さねばならない。もしエネルギーが250 GeVで良いとなれば、計画を3期に分けて250 GeVまで、500 GeVまで、その上というようにステップを踏むことも考えられる。とにかく早く建設し、実験を開始することが21世紀の素粒子物理にとって素晴らしい未来をもたらすだろう。JLCで10⁵を越えるヒッグス・

イベントの研究が早く始められることを強く願っている。

今回のLEPのヒッグスの兆候では随分と苦勞も多かったが、非常に exciting で楽しい毎日であった。今後、まずは研究者の関心の高まりを受けて、最終論文を待たずして、今年12月中に全データを用いたLEP 4実験合わせた結果をLetterに投稿する予定である。しかし、これで解析が終わったわけではない。常に批判的な目で結果を吟味し、データの質を向上させ、バックグラウンドの理解も深めねばならない。更に優れた解析方法と最終 data calibration を使用し、2001年中に最終の full paper をまとめる予定である。

参考文献

- [1] *Search for Higgs bosons: Preliminary combined results using LEP data collected at energies up to 202 GeV*, ALEPH, DELPHI, L3, OPAL Collaborations, the LEP working group for Higgs boson searches, CERN-EP/2000-055.
- [2] S. Weinberg, Phys. Rev. Lett. **19** (1967) 1264; *Elementary Particle Theory*, A. Salam, ed. N. Svartholm (Almquist and Wiksells, Stockholm, 1968), 367.
- [3] P.W. Higgs, Phys. Lett. **12** (1964) 132; F. Englert and R. Brout, Phys. Rev. Lett. **13** (1964) 321; G.S. Guralnik, C.R. Hagen, and T.W.B. Kibble, Phys. Rev. Lett. **13** (1964) 585.
- [4] 「New Energy Record of LEP 2000」 川本辰男、高エネルギーニュース、19-1 (2000)、22.
- [5] *Observation of an Excess in the Search for the Standard Model Higgs Boson at ALEPH*, ALEPH Collaboration, R. Barate *et al.*, CERN-EP/2000-138, to be published in Phys. Lett. **B**.
- [6] *Search for the Standard Model Higgs Boson in e^+e^- Collisions at $\sqrt{s} \approx 192 - 209$ GeV*, OPAL Collaboration, G. Abbiendi *et al.*, to be submitted to Phys. Lett. **B**.

- [7] *Higgs Candidates in e^+e^- Interactions at $\sqrt{s}=206.6$ GeV*, L3 Collaboration, M. Acciarri *et al.*, CERN-EP/2000-140, to be published in Phys. Lett. **B**.
- [8] LEPC Minutes:
<http://committees.web.cern.ch/Committees/LEPC/datesLEPCminutes.html>
- [9] Research Board Minutes:
<http://committees.web.cern.ch/Committees/RB/datesRBMinutes>
- [10] CERN Press Release:
<http://press.web.cern.ch/Press/Releases00/PR14.00ELEPstop.html>