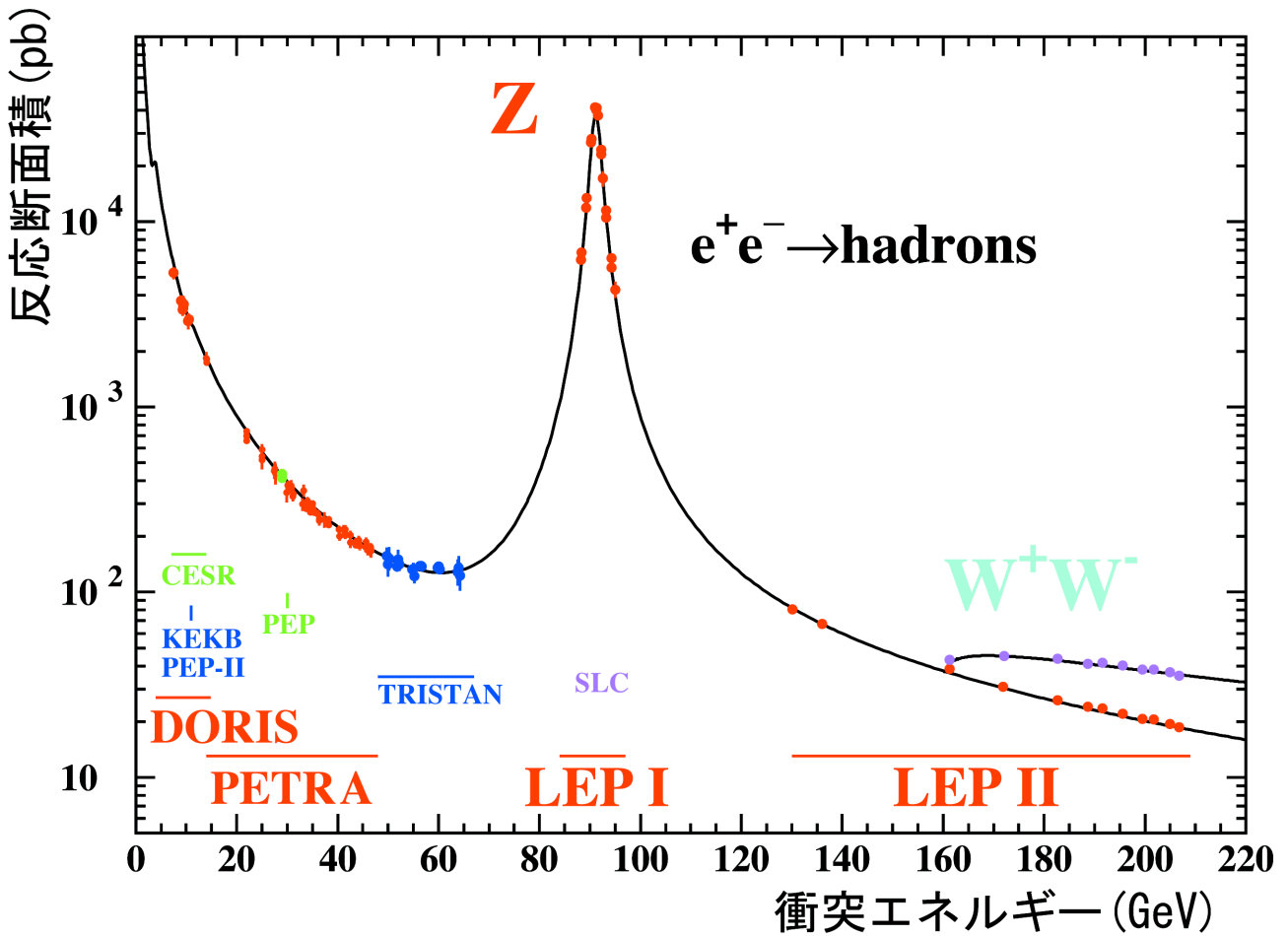


東京大学

素粒子物理国際研究センターの研究の歩み

～LHC 実験が拓く 21 世紀の素粒子物理学像～



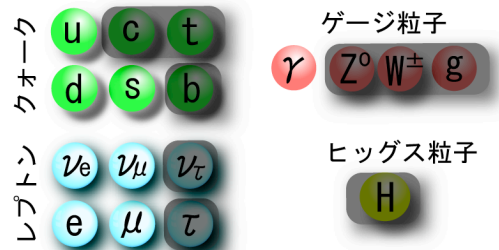
(図：エネルギーフロンティアを駆け抜けてきた素粒子物理国際研究センターが、これまで研究を行ってきたエネルギー領域：
赤色の点と W 粒子の対生成を示す紫色の点が、本センターにより研究・測定された点を示している。)

平成16年6月

東京大学素粒子物理国際研究センターとその前身は、創設からこれまでの約30年間、電子(e^-)陽電子(e^+)衝突装置(コライダー)を用いたエネルギーフロンティアの素粒子物理研究を行ってきた。一方、素粒子物理学もこの30年急速な進歩を遂げてきた。これに果たした電子・陽電子衝突型実験の貢献は計りしれないものである。素粒子物理国際研究センターの研究の歩みは、素粒子物理学の発展の歴史そのものと言って過言でない。ここに、素粒子物理学の歴史と共にこの30年の歩みを顧み、21世紀の新しい素粒子物理学を俯瞰する。

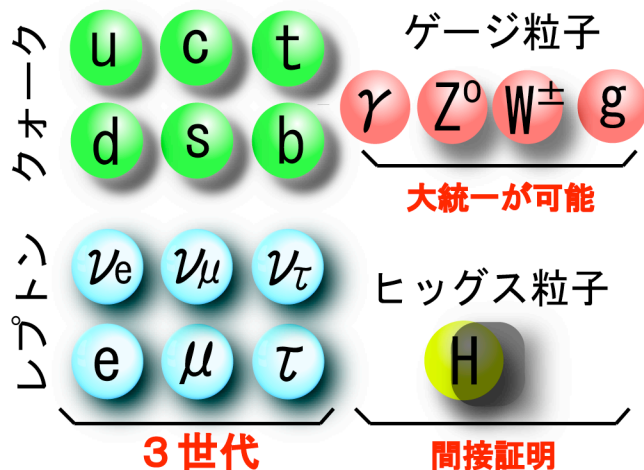
当センターの前身である「高エネルギー物理学実験施設」が設立された頃は、素粒子物理学は急激な発展を遂げる前であった。右図は、標準モデルで登場する粒子を示したものであるが、その半分にも満たない粒子しか明確に発見されていなかった。(黒く影をつけた粒子はまだ明確に発見・理解されていなかった。) 力を伝搬するゲージ粒子に対する理論的な研究も道なかばの状態であった。

センターが発足した頃の素粒子に対する理解



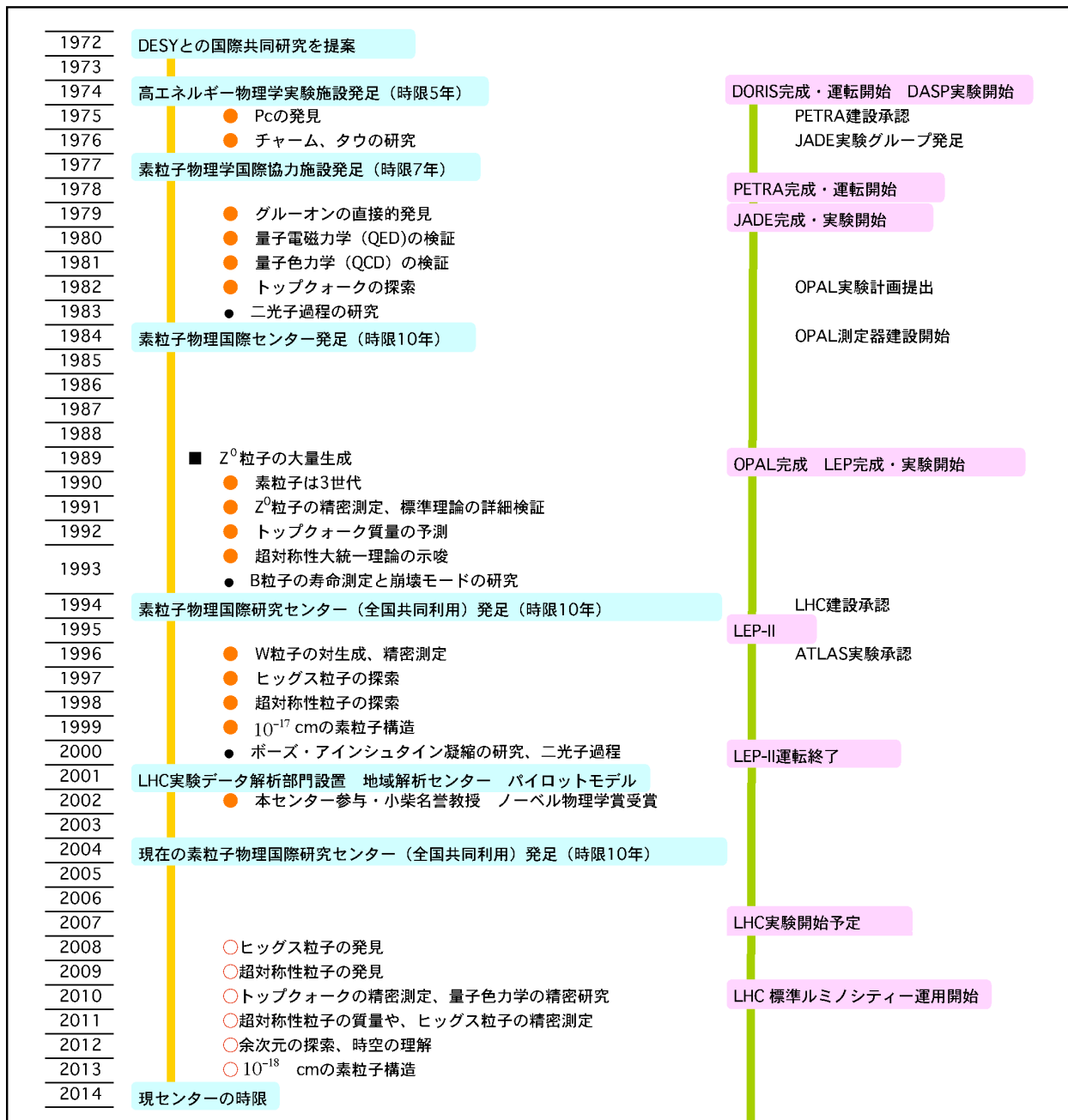
当センターは表紙のグラフに示した様に、エネルギーフロンティアでの研究を一貫して行ってきた。DASP 実験、JADE 実験、OPAL 実験を経て、素粒子物理学に対する理解は、右図に示す様に飛躍的な進歩を遂げた。標準モデルは非常に高い精度で検証され、ゲージ粒子に対する理解が著しく進んだ。これと同時に、

現在の標準モデルに対する理解



(1) 素粒子の世代が3であること、
 (2) 力が統一される可能性、(3) 質量の起原に関する示唆、(4) 超対称性粒子の存在の示唆など多くの知見が得られた。しかし、これらは同時に新しい謎を生むこととなった。これら素粒子物理学の発展の歴史を追いながら、当センターがその発展に果たしてきた寄与をまとめ、2007年実験開始予定のLHC/ATLAS実験の成果と歴史的意義についてまとめる。

この年表は、センターの歴史をまとめたものである。赤い丸で示した項目は、当センターが大きな寄与をした重要な物理成果を示している。黒い丸はそれ以外の物理成果である。2007年のLHC実験開始以降は予定である。白抜き赤丸は、LHC実験で期待されている物理成果であり、21世紀の新しい素粒子物理学を拓く重要な成果が期待されている。



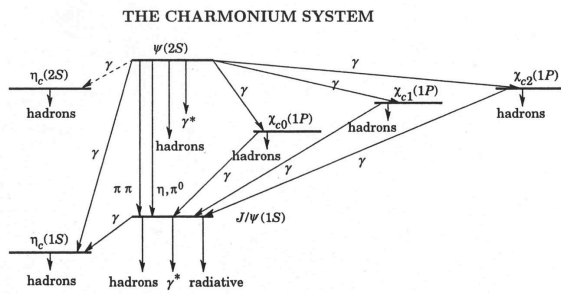
1. DORIS での DASP 実験

e^+e^- コライダーを用いて素粒子の基本構造を探ろうという、東京大学理学部の計画は昭和 47 年(1972 年)に遡る。小柴昌俊教授は、西ドイツ(当時)のハンブルグ市にある DESY 研究所に建設中だった e^+e^- コライダー-DORIS を用いた DASP 実験計画に計画段階から参加した。これは我が国の高エネルギー物理で初めての外国での実験へ、グループとしての参加であった。この当時、まだよく理解されていなかった e^+e^- コライダー実験の有する意義(新粒子発見とその詳細な研究の両方に適している)を見抜いていたという意味で、パイオニア的実験であった。

昭和 49 年(1974 年)には、この計画の国内根拠地として理学部附属の高エネルギー物理学実験施設が5カ年の期限で設置され、測定器の設計を始め、電磁シャワーカウンターの製作、比例計数箱の開発・製作、ソフトウェアの作成等に当たった(右図)。

DASP 実験は、チャーム粒子発見直後に実験を開始し、

- 新粒子 χ_c (χ_c) の発見



- $J^{PC} = 0^{-+}$ 1^{-} 0^{++} 1^{++} 2^{++}
- タウ粒子の確認 (1995 年 パールがノーベル物理学賞受賞)
- チャーム粒子の崩壊過程の研究 (1976 年 リヒターとティンがノーベル物理学賞受賞)

など数多くの成果をあげた。東大グループの製作した電磁シャワーカウンターは実験を遂行する上で不可欠であり、また当グループは解析においても中心的役割を果たした。これらの成果により、第2世代の素粒子が出揃い、第3世代の素粒子が初めて登場した。(赤く囲んだ粒子が DASP 実験で詳しく研究された)

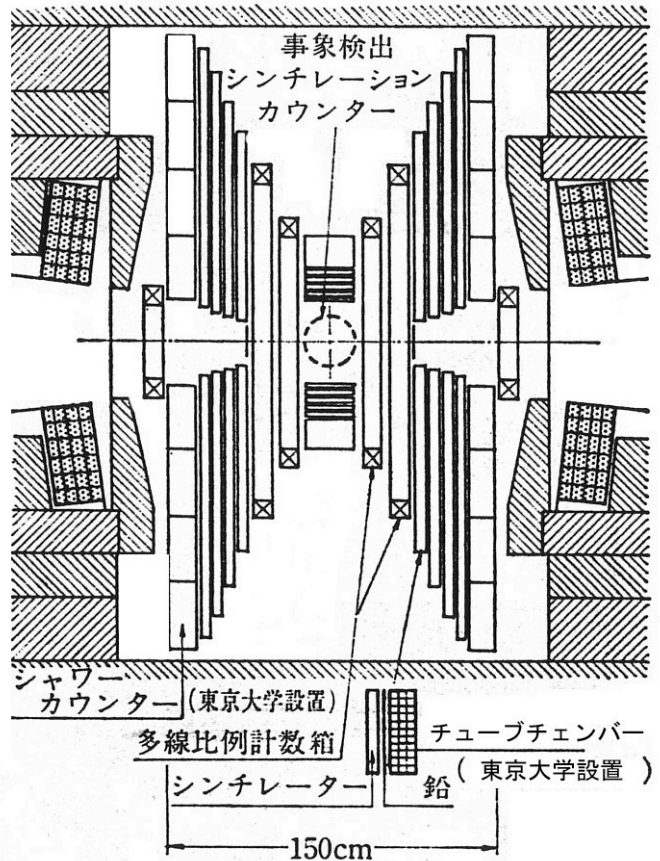
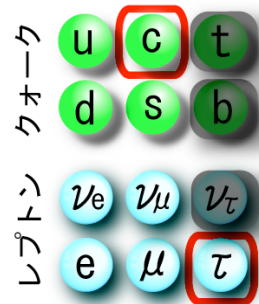
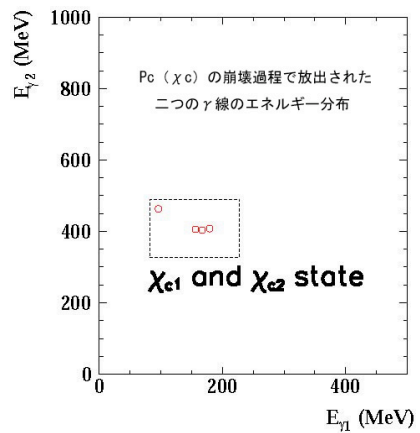


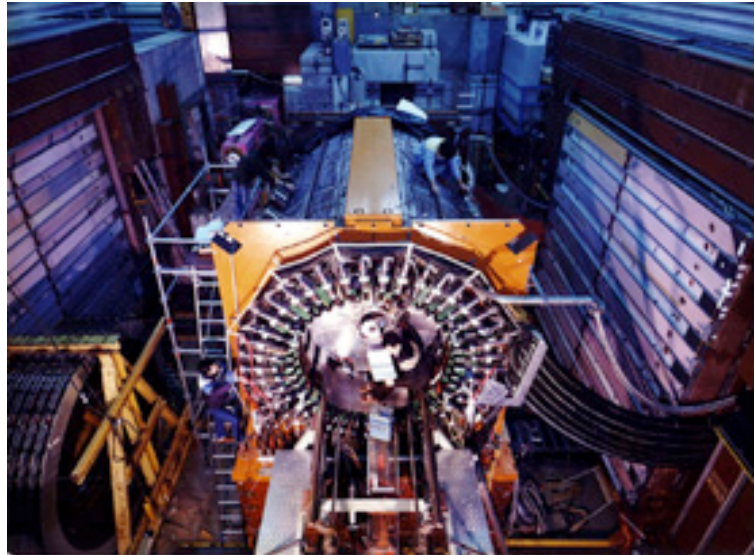
図 : DASP 検出器の断面図 (中心部)



2. PETRA での JADE 実験

DESY では DORIS に引き続いて、更にエネルギーの高い e^+e^- コライダー PETRA の建設を 1975 年に開始した。東大グループは、DORIS における DASP 実験を続ける一方、PETRA での実験の提案、設計を行い、国際協同実験 JADE グループを結成した。

昭和 52 年度(1977 年)には PETRA を使った国際協同実験 JADE が 7 年の事業として認められた。測定器の建設に東大グループは主として電磁シャワー検出装置を担当した(右の写真)。この鉛ガラスカウンターは予想通りの高性能で長期間安定に渡り安定的に動作し、中央飛跡検出装置と合まって、物理解析の中心的役割を果たした。JADE は 1979 年に実験を開始し、5 年間の実験で、以下のような多くの成果を出した。東大グループは、測定器の設計段階から物理解析に至るまで JADE グループ内で主導的役割を果たした。



JADE は 1979 年に実験を開始し、5 年間の実験で、以下のような多くの成果を出した。東大グループは、測定器の設計段階から物理解析に至るまで JADE グループ内で主導的役割を果たした。

- ・ グルーオンの発見 (欧州物理学会特別賞 受賞: 右図)
- ・ 量子電磁力学(QED)の精密検証
- ・ 量子色力学(QCD)の確立
- ・ トップクォーク、超対称性粒子など各種新粒子の探索

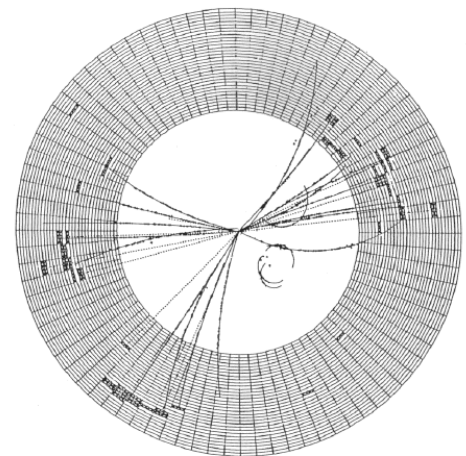
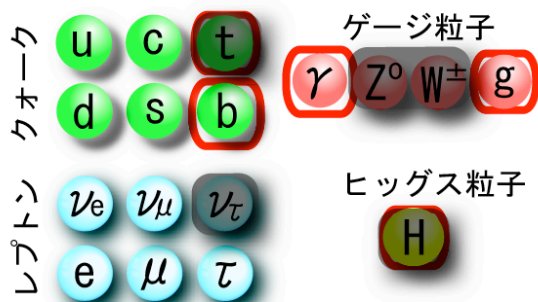


図: グルーオンが放出されて3ジェットになった事象

上図に示す粒子が JADE 実験では精力的に研究され、特に量子色力学の実験的な基礎がこの JADE 実験で確立された。(第 3 世代のボトム粒子は、JADE 実験開始直前の 1977 年に米国で発見され、1 章で述べた DORIS や JADE 等で詳しく研究された。)

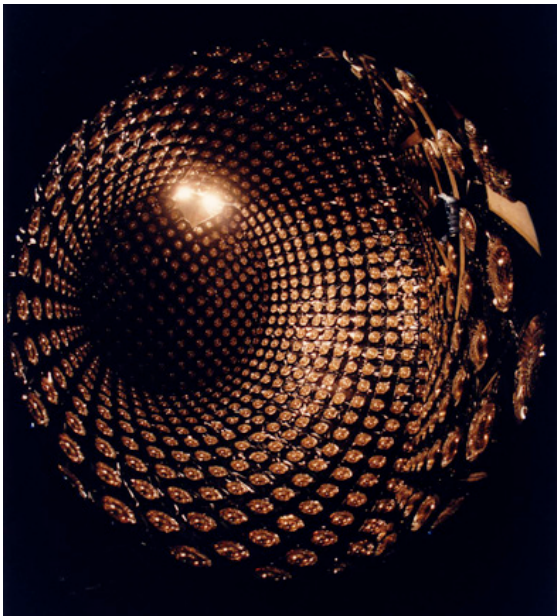
更に重要なことは、JADE 実験での経験は、上述した物理成果のみならず、下記の二つの大きな実験を成功に導く礎となった。

(1) TRISTAN 実験

JADE 実験で育った多くの人材が後に KEK の TRISTAN 実験に参加し、JADE での経験を生かしたことが、TRISTAN の成功に貢献した。(大型の電子・陽電子衝突実験の経験は当時国内には全く無かった。)

(2) KAMIOKANDE 実験

JADE 実験が安定して動き出した頃、小柴教授は陽子崩壊の観測を目指した KAMIOKANDE 実験を立ち上げた(右の写真：小柴教授と 20 インチ光電子増倍管)。



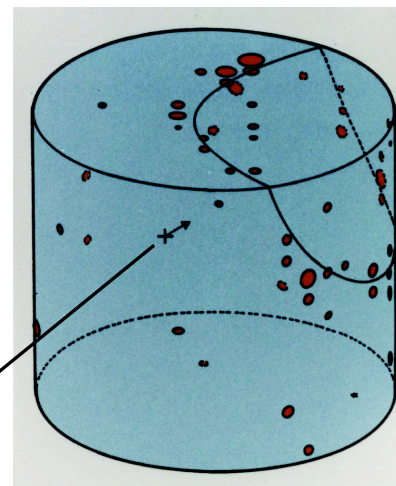
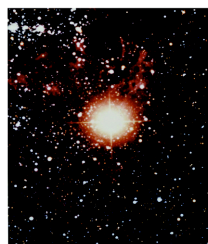
この実験装置には約 1000 本の光電子増倍管(写真：左下)が用いられたが、これは JADE 実験の電磁シャワー検出器に用いられた約 3000 本の光電子増倍管の開発研

究や運転経験が多いに役立ち、その後 KAMIOKANDE による超新星爆発からのニュートリノの検出にもつながるものであった(右図)。神岡実験は、宇宙線実験に高エネルギーで培った技術とシステム、精度を持ち込んで成功した典型的な例であると言ってよい。

ニュートリノ天体物理学のフロンティアに対する功績として

2002 年ノーベル物理学賞が授与された。

超新星1987A ν



図：17万光年の彼方から飛来したニュートリノを Kamiokande 検出器が捉えた。

3. LEP での OPAL 実験

LEP は CERN の加速器として 1982 年に建設が開始され、1989 年に完成した世界最高エネルギーの e^+e^- コライダーである。衝突エネルギーは約 91GeV であり、弱い力を伝える Z^0 粒子の質量にほぼ等しく、 Z^0 粒子を大量に生成するのに適している。

東京大学のグループは、DASP、JADE での経験を活かし、LEP での実験を提案、国際協同実験 OPAL チームを結成した。東大グループは OPAL 測定器（右上図）のうち最重要部分の一つである電磁カロリメータを担当

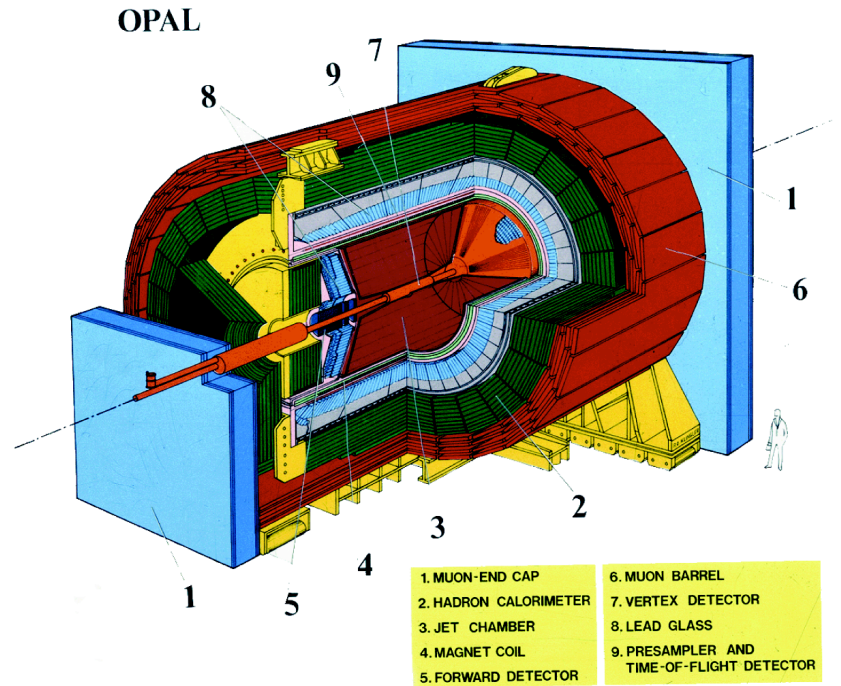
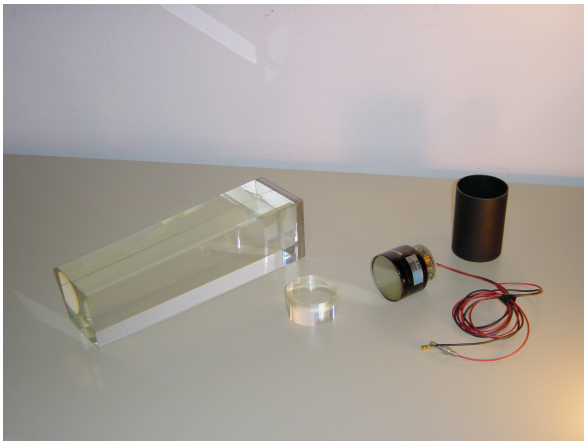
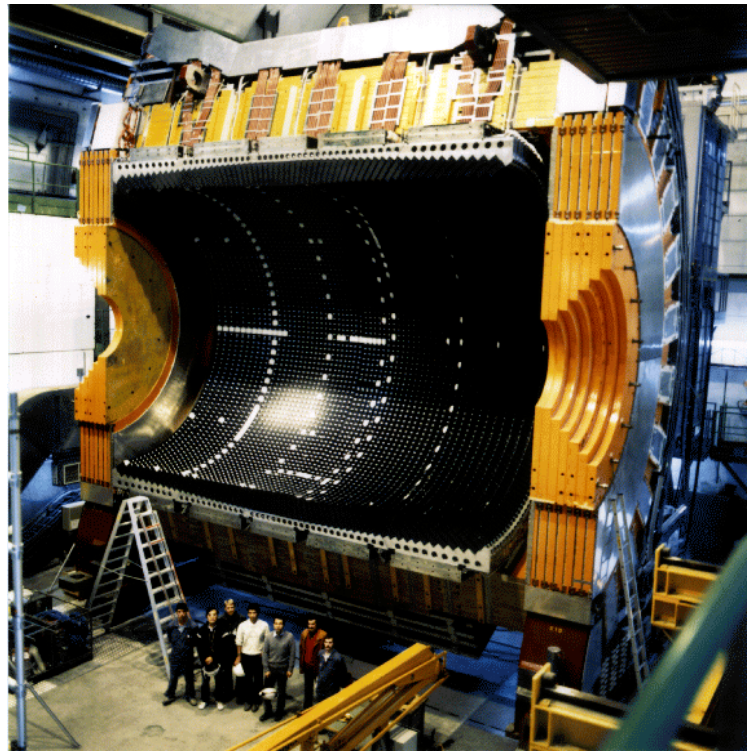


図 OPAL 検出器（8が東京大学が製作、保守した電磁カロリメータ）

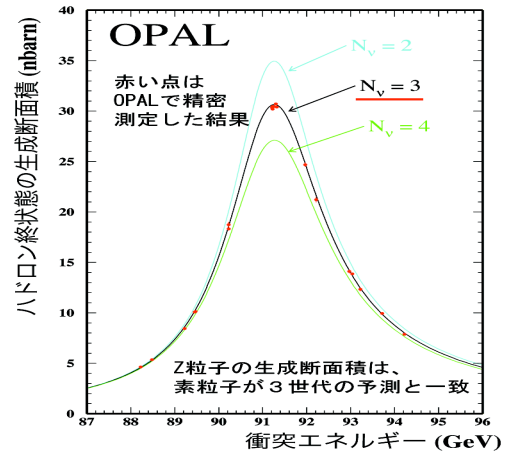


した。これは約 10,000 本の鉛ガラスカウンター（写真：（左上）カウンター1本の構成（右）組み上げた状態）からなる検出器であり、ここでも JADE 実験の経験を十分に活かして改良を加えた結果、非常に高性能の検出器となり、実験データの質の高さに大きく貢献した。OPAL 実験は全部で約 400 万個の Z^0 粒子生成事象を捉え、革命と呼ぶに値するほどの高い精度で標準モデルの研究を行った。

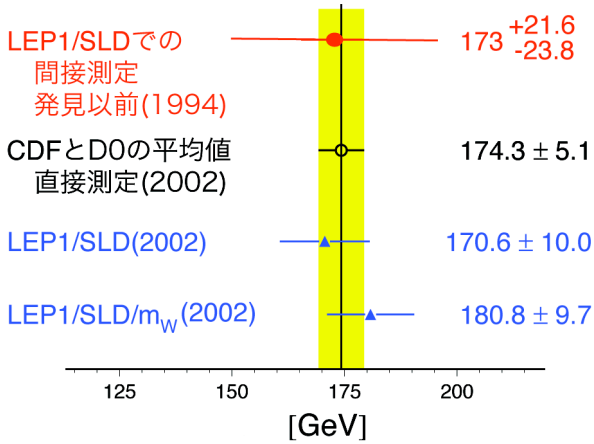


数々の研究成果のうち、特に重要な物理結果を以下に列挙する。

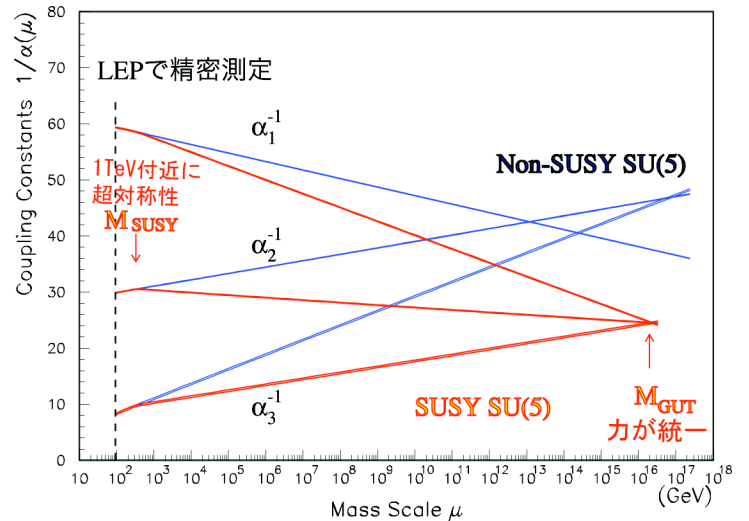
- 素粒子の世代数を3と決定 (右図)
- Z^0 粒子の性質の精密測定
- 標準モデルの詳細な検証 (1999年ト・フーフトとベルトマンがノーベル物理学賞受賞)
ゲージ原理の正しさの証明
- トップクォーク質量の予測 (左下図) トップクォークの輻射補正を通して、トップクォークの存在と質量を予言 (1994年に直接発見される以前に)
- ヒッグス粒子の探索
- 超対称性大統一理論の示唆 (右下図)



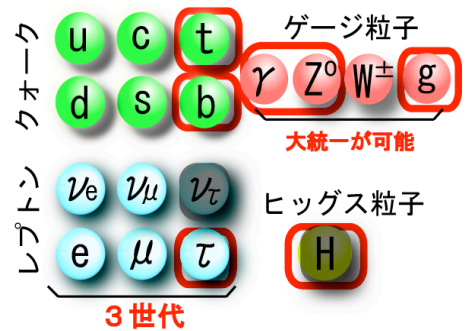
図：トップクォークの質量



力の大統一の可能性 (超対称性粒子の示唆)



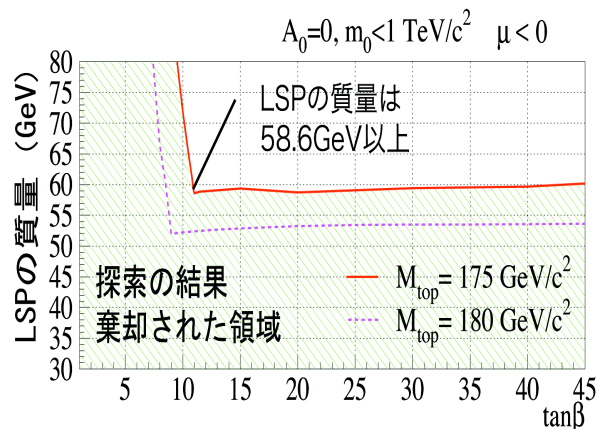
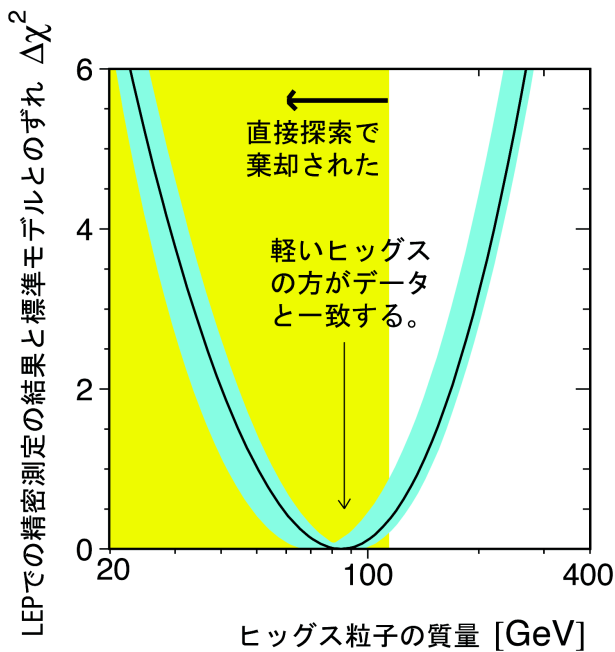
LEP でのゲージ粒子の性質や第3世代の素粒子の研究を通して、右図に示す様に我々の素粒子物理学に対する知識は飛躍的に進歩した。(赤い枠で囲んだ粒子についての研究が行われた。トップクォークに関しては、間接的な研究であったが、上図に示す様に、その質量を正確に予言していた。)



4. LEP-II での OPAL 実験

LEP 加速器に超伝導加速空洞を導入することにより、衝突エネルギーを約2倍にまで高める計画 (LEP-II) が 1995 年からスタートした。LEP-II では W 粒子の対生成が可能になるほか、ヒッグス粒子や超対称性粒子などの新粒子がこれまでの約2倍のエネルギー領域で探索が可能となった。LEP-II は毎年エネルギーの増強を続け、最終的には衝突エネルギー209GeV にまで到達し、2000 年 11 月をもってその運転を終了した。これまでに得られた主な成果は次のようなものである。

- W 粒子の性質の精密測定
- W 粒子生成を通しての標準モデルの詳細検証
- ヒッグス粒子の直接的および間接的探索を通しての質量領域の限定 (左下図)
- 超対称性粒子の質量下限を決定し、宇宙の進化で重要な役割を果たす暗黒物質に制限を与えた (右下図は、一番軽い超対称性粒子 (LSP) の質量の下限を示す)



これらのいずれの解析にも東大グループを中心とする日本の研究者は主導的な役割を果たした。また東大グループが責任を負っていた電磁カロリメータは、LEP および LEP-II を通しての全実験期間(12 年)、約 10,000 本すべての鉛ガラスカウンターが1本も欠けることなく動き続け、実験データの質の高さに大きな貢献をし、高い評価を受けた。これは、日本の産業技術の高さを国の内外に示すものである。

5. LHC での ATLAS 実験と地域解析センター

本センター及びその前身は首尾一貫して、エネルギーフロンティアでの素粒子物理最先端の研究を行ってきた。これまでの約 30 年の間に、チャームクォークやタウ粒子の研究、グルーオンの発見、 Z^0 粒子や W 粒子の詳細研究などを通し、「**素粒子の標準モデルの確立**」という素粒子物理研究のメインストリームに大きな貢献を行うことができた。しかしながら、この研究はこれで終わったわけではなく、

1. 素粒子の世代数は 3 と確定したが、**何故 3 世代なのか?**
2. 標準モデルは高い精度で確立できたが、肝心の**ヒッグス粒子が未発見**
3. LEP で強く示唆された**超対称性が LEP-II では未発見**

など、より深淵で本質的な問題が見えてきた。

現在の素粒子物理学に対する理解



CERN は LEP-II の次の計画として、ヒッグス粒子の探索を中心に据え、超対称性など標準モデルを超える現象を探る為、LHC の建設を進めている (2007 年実験開始予定)。LHC トンネル (右下航空写真: 円周 27km

■ トップクォークの研究

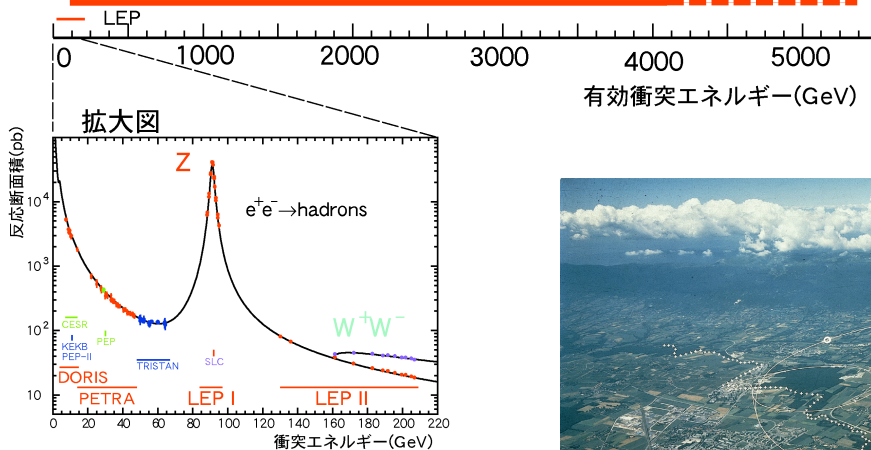
■ ブラックホール、余次元

■ 超対称性

■ ヒッグス

LHC

の地下トンネル: LEP トンネル再利用) に、8.4T の強力な超伝導マグネットを配置して、7TeV に加速した陽子と陽子を衝突させる実験である。衝突エネルギーは 14TeV であるが、陽子同士との衝突である

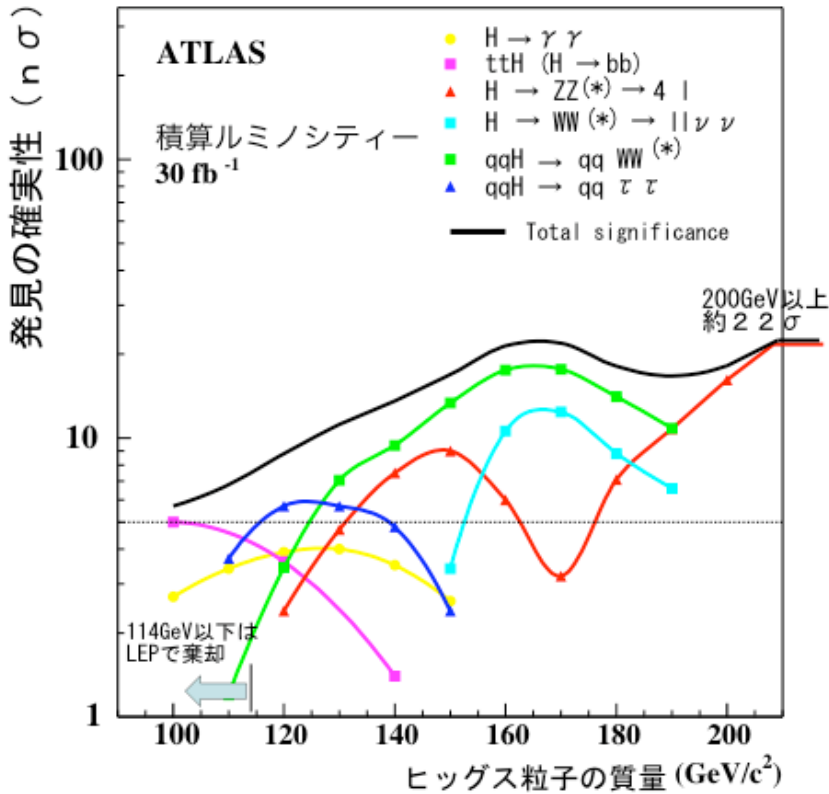
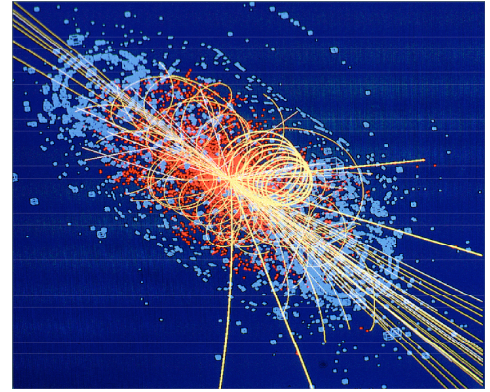


ため、実効的な衝突エネルギーはおおよそ 2 ~ 4TeV である。これは、上図に示すように、**LEP-II の約 10~20 倍のエネルギーに相当するものである。**



期待される数多い成果のうち、極めて重要なものを4つここにまとめる。

- (1) 理論が予測する全ての領域で**ヒッグス粒子の確実な発見**が可能である。(右写真は、ヒッグス粒子が生成した事象の予想図)



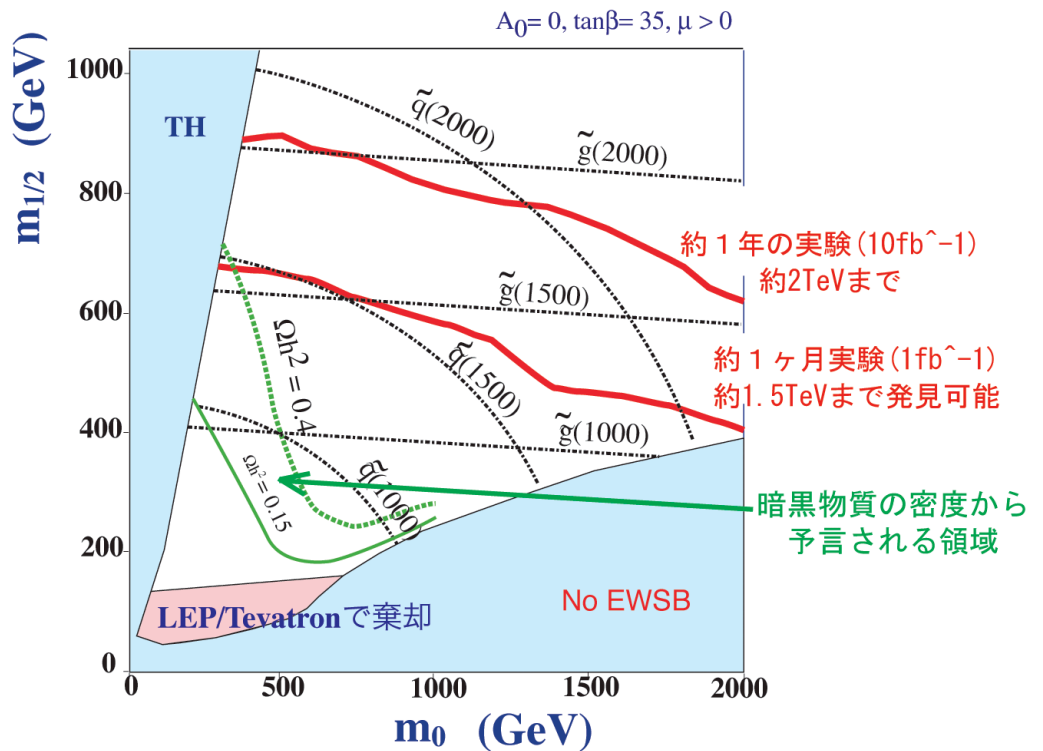
左図は、約3年間の実験でどれだけの確度(標準偏差で規格化)で発見が可能であるかを、質量の関数として表している。約3年の実験で、 8σ 以上の確度での発見が可能である。

また発見されたヒッグス粒子の性質の詳細な測定から、質量の起源や真空の構造などの理解が得られる。

ヒッグス粒子を発見し、自発的対称性の破れが質量の起源であることを示すことは、ゲージ原理の正当性の最終決定であると同時に、対称性の破れによる相転移が宇宙に進化に重要な役割を果たすことを示すものである。

- (2) **超対称性粒子を数 TeV までの領域を完全にカバー出来る。**

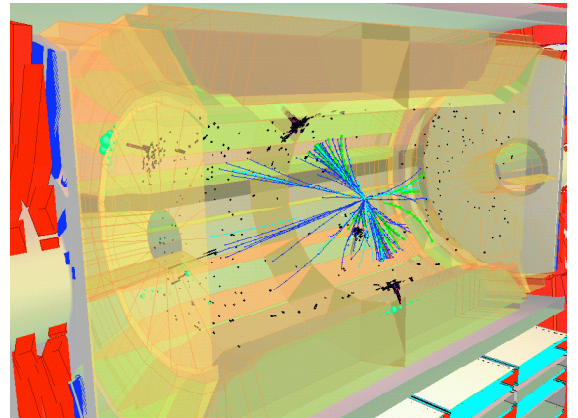
右図は、超対称性粒子の発見能力を示す。グルイーノとスカラークォークの質量が、1 TeV 以下の場合、1ヶ月未満の実験で確実な発見が可能であり、2 TeV の場合でも、約1年の実験で発見が可能である。最終的に 2.5 TeV まで発見能力がある。第



3章に示したように、また、理論の「自然さ」という点からも超対称性粒子は数 TeV 以下の領域に存在すると考えられている。

超対称性粒子は、宇宙の重要な構成要素である「**暗黒物質**」の最有力候補である。上図の緑線で囲まれた領域が、暗黒物質の密度から予測される領域であり、LHC 実験はこの領域をカバーしている。超対称性粒子の発見とその研究は、宇宙の歴史と宇宙の将来を予測する上で重要な役割を果たす。この様に LHC 実験の成果は、素粒子物理学ばかりでなく、**宇宙物理学**にも大きな成果をもたらす。

(3) 量子重力や隠れた高次元空間の効果が見える可能性もあり、極小のブラックホールが生成、観測されるかもしれない。(右図は、ブラックホールが生成され、ホーキング輻射で崩壊した時の予想図) LHC では、高次元が 6TeV より低いエネルギーに対応する空間にコンパクト化されている場合は発見が可能である。

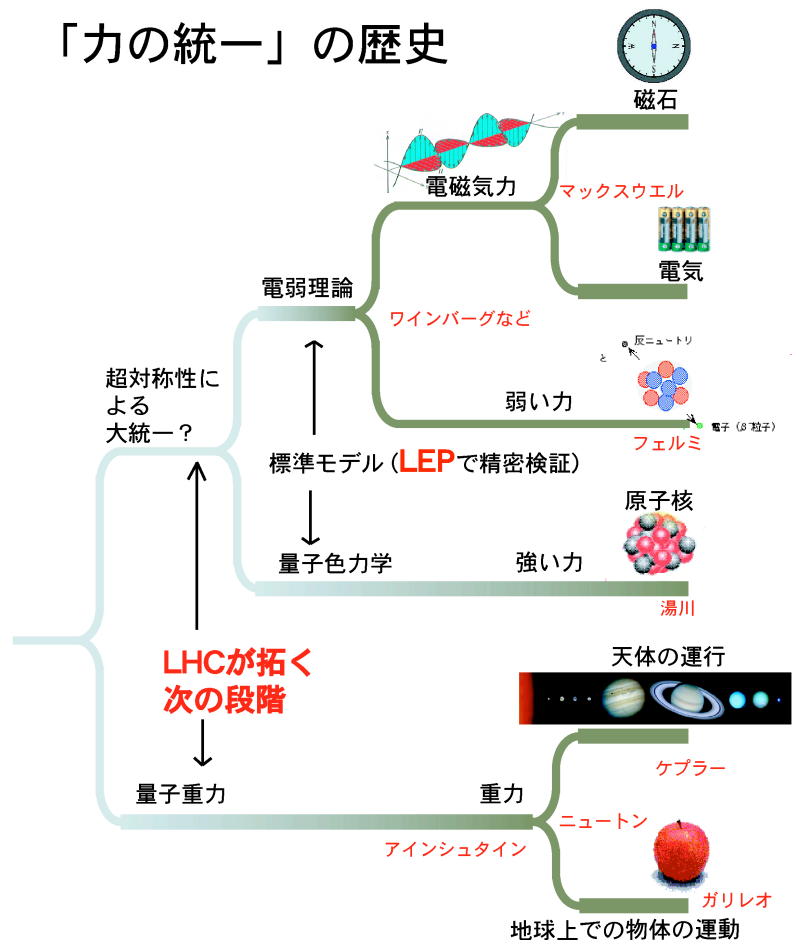


(4) トップクォークの詳細な研究が可能。年間、 10^7 個以上の豊富なトップクォークが生成される。この豊富なサンプルを用いて、質量を 1GeV 以下の精度で決定することが可能である。また稀崩壊現象を 10^{-4} 程度の感度で探索・測定が可能である。

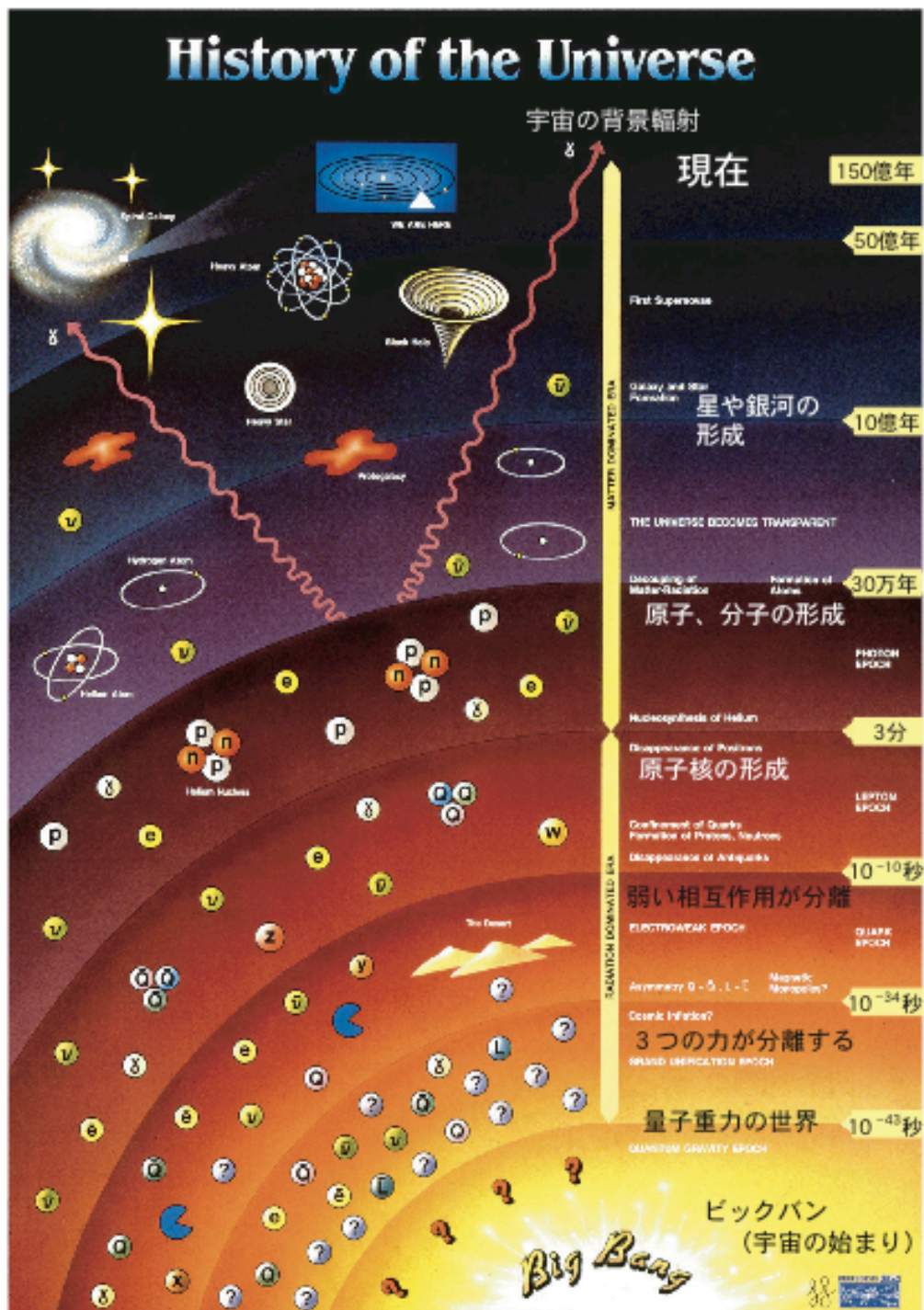
など、非常に重要な成果が期待される。

物理学とは、「**自然の統一的な理解**」を進める学問であり、右図に示す様に、これまで別々なものと思われてきたものを統一的に理解してきた。そして、その度に**新しい自然観を開拓してきた**。例えば、「木からリンゴが落ちる現象」と「天体の運行」が統一され重力が見いだされた。ま

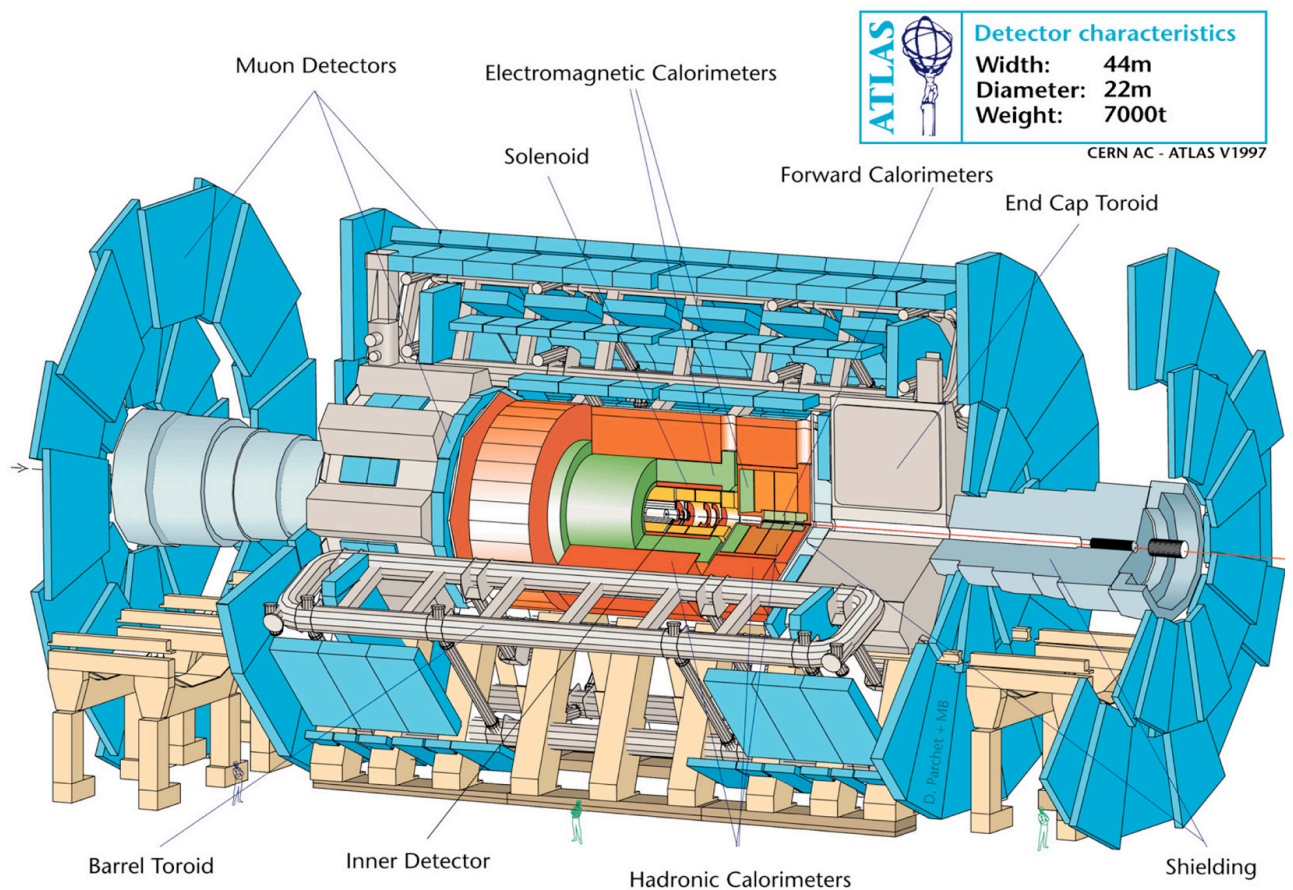
「力の統一」の歴史



た、古くから知られていた電気の力と磁石の力は、電磁気力として統一された。この電磁気力が我々の生活に大きな豊かさをもたらしたことは言うまでもない。第3、4章で述べた様に、LEP 実験に於いて、電磁気力と弱い力を统一的に理解すること、並びに、強い力の研究を行い、多くの成果を得た。これらの結果は、自発的対称性の破れ（ヒッグス粒子）が質量の起源であることと、超対称性による大統一を強く示唆している。上図に示す様に、ヒッグス粒子の発見、超対称性粒子の発見と力の大統一、及び量子重力効果と隠れた高次



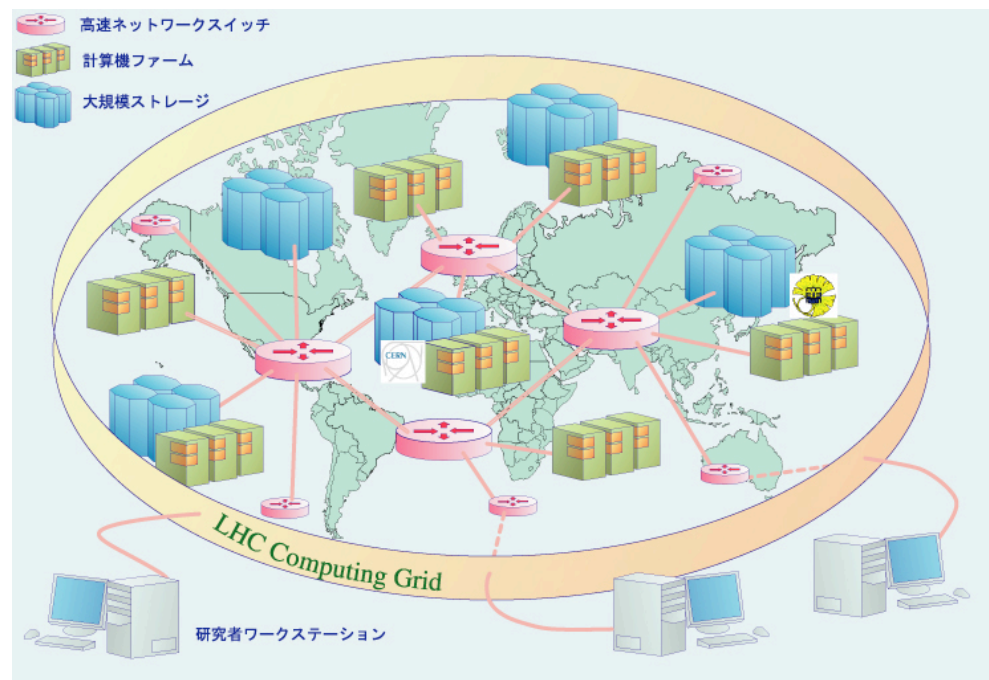
元の発見は、我々の自然に対する理解を大いに進めるものであり、LHC 実験に対する期待は極めて大きい。右図が示す様に、より高いエネルギーでの物理を理解することは、宇宙を遡ることになる。LHC がもたらす成果は、ビッグバン直後 10^{-38} 秒後の自然の法則の理解に繋がるものである。



本センターでは、こうした研究の流れを見据え、これまでの本センターの研究を更に発展すべく、LHC における ATLAS 実験(上図)のための準備、開発研究をその初期から LEP 実験と併行して進めてきた。その結果、陽子・陽子衝突型実験では最も重要な役割をする検出器の一つであるミュオントリガーチェンバーの建設を、日本グループとイスラエルグループが共同で行うことになった。本センターでは、これまでミュオントリガーチェンバーおよび関連エレクトロニクスの開発研究を全国の共同研究者の中心となって進めてきている。

アトラス実験で収集されるデータは年間1ペタバイトと言う膨大なものであり、従来の計算機システムでは対応が不可能である。

世界中の参加各国が「地域解析センター」を立ち上げ、高速ネットワークでこれらをつなぎ、大きな



一つの計算機として用いて、解析に必要な計算機資源を賅う計画である。(LHC computing GRID 計画)これは、最新の IT 技術(GRID)を用いて世界中に分散した計算機を統合し、膨大なサイズのデータを解析するシステム(上図)である。

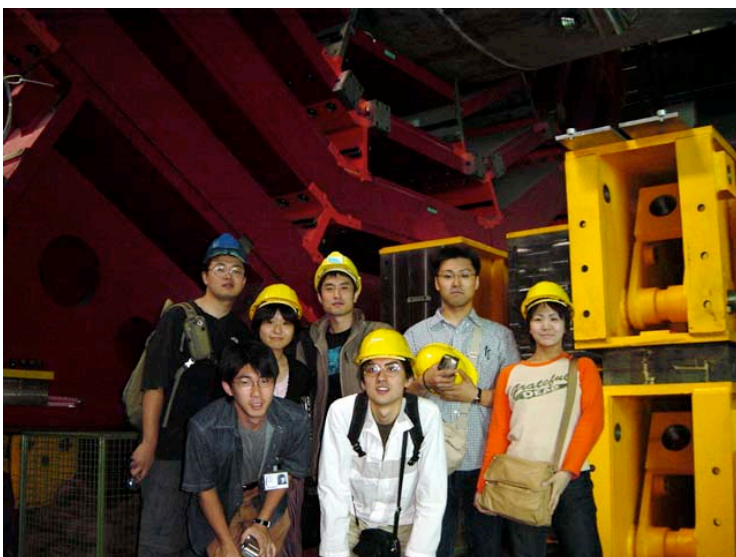
本センターは、日本の地域解析センターを担う計画であり、平成 13 年度(2001 年)に、本センター内に LHC 実験データ解析部門を新設し、地域解析センターパイロットモデル計算機ファームを導入(写真右)し、それを用いた様々な開発研究を押し進めている。

この計算機資源と、これまで培ってきた多くの経験と実績を基に、ATLAS 実験での物理解析の準備を進めている。

これらの物理解析の準備と並んで、LHC 実験で活躍する人材を育成する為、合宿形式の「学校」をアトラス実験に参加している日本国内の 15 研究機関と共同で開催している。夏は CERN の本センター分室(写真下)で 3~4 週間、冬は本センター(写真右)で 1 週間程度の期間で開催されている。



大学院生対象の研究・教育活動(本センターにて)
写真中央右は、CERN・研究部長 キャッシュモア氏



CERN での夏の学校の様子
CMS 検出器の見学

略語の説明

DESY = Deutsches Elektronen-Synchrotron (ドイツ電子シンクロトロン ハンブルグにあるドイツの素粒子物理学研究所)

DORIS = Doppel-Ring-Speichers (二重リング貯蔵型電子陽電子衝突装置)

DASP = Double-Arm Spectrometer (双腕スペクトロメーター)

PETRA = Positronen-Elektronen Tandem Ring Anlage (電子陽電子タンDEM型衝突装置)

JADE = Japan-Deutschland-England (日本ードイツー英国の頭文字をとってつけた実験グループ名)

CERN = Conseil Europeen pour la Recherche Nucleaire (欧州原子核研究機構、ジュネーブにあるヨーロッパの素粒子物理学研究所)

LEP = Large Electron Positron collider (CERN で建設された大型電子陽電子衝突装置)

OPAL = Omni-Purpose Apparatus for LEP (LEP を用いた国際協同実験の一つ、日本が参加)

LHC = Large Hadron Collider (CERN で建設中の大型陽子陽子衝突装置)

ATLAS = A Troidal LHC Apparatus (超伝導トロイダルマグネットを用いた LHC 用汎用測定器)