

素粒子物理の最前線 —LEPからLHCへ—

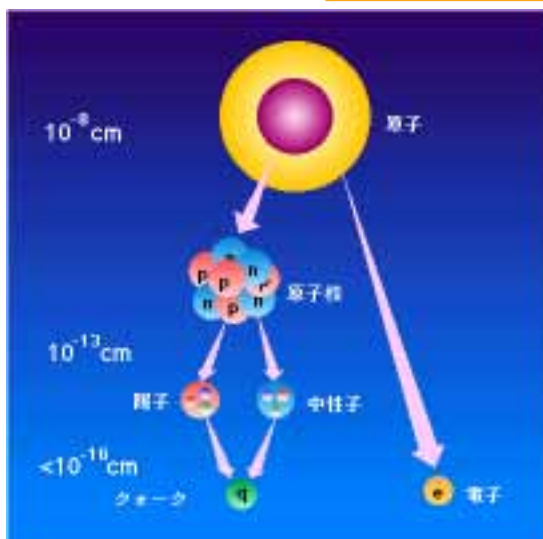


世界最高エネルギーの衝突型加速器による素粒子物理の研究

東京大学素粒子物理国際研究センター
<http://www.icepp.s.u-tokyo.ac.jp>

2002年9月

素粒子物理学とは



物質の「階層」構造

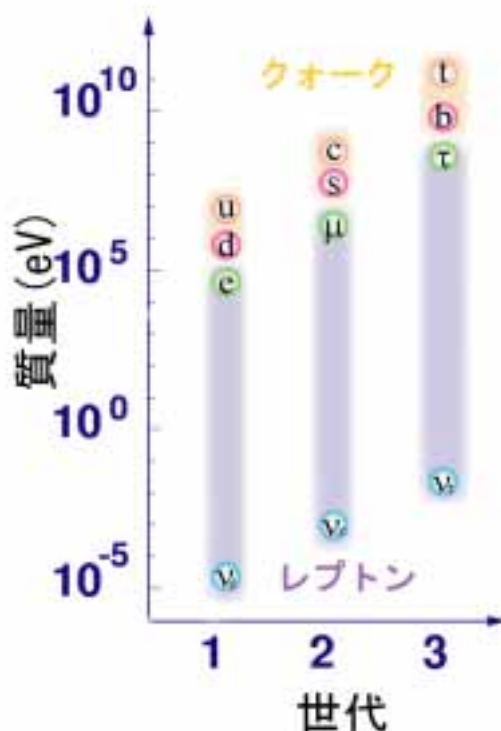
自然界の物質は原子がたくさん集まってできています。その原子は電子と原子核から構成されています。原子核はまた陽子と中性子から成り、更に陽子や中性子はクォークと呼ばれる粒子3個から成ることまで知られています。

では、このような「階層」構造は一体どこまで続くのでしょうか？

素粒子の「世代」構造

陽子や中性子を構成するクォークにはupとdownの2種類があります。電子(e-)とニュートリノ(ν)は共にレプトンと呼ばれます。我々の世界の殆どは全てこれらクォークとレプトンでつくられているのです。ところがさらに高いエネルギーでの素粒子の反応を調べたところ、このようなクォークとレプトンの組が、他にも2組存在することが明らかになりました(右図)。どの組も粒子の重さ(質量)が違っているだけで性質は全く同じです。これらの組は素粒子の世代と呼ばれています。

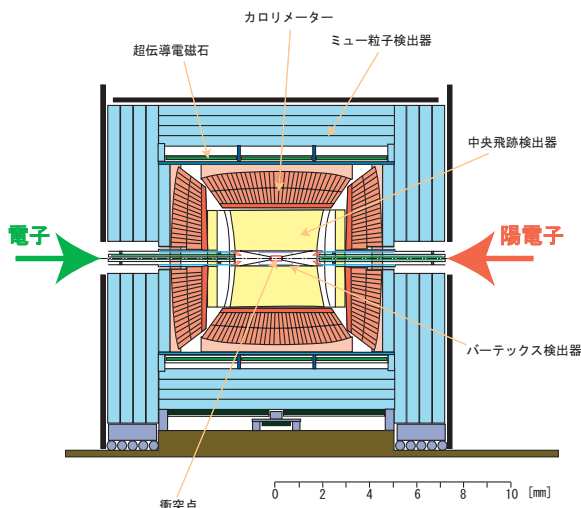
このような「世代」構造はどこまで続くのでしょうか？
なぜこのような「世代」構造があるのでしょうか？



素粒子に働く力の法則

クォークやレプトンは互いに光子(γ)やグルーオン(g)、ZやWと呼ばれるゲージ粒子をキャッチボールすることで力を伝え合うことがわかっています。これらの力は電磁気力、強い力、弱い力と呼ばれています。

なぜこのような3つの力が存在するのでしょうか？



極微の世界を探る加速器実験

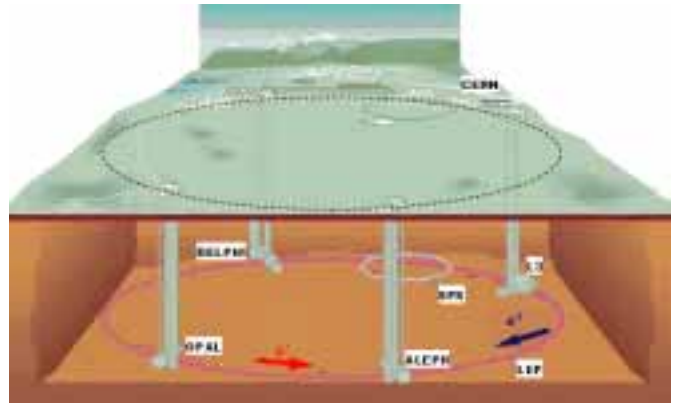
これらの疑問の答えを探るべく様々な実験が行なわれてきました。最先端の装置は衝突型加速器(コライダー)と呼ばれるもので、電子や陽子を加速して正面衝突させ、衝突点を囲む測定器によって生成された粒子を測定します(左図)。

より重い素粒子を創り出すためにはより高い衝突エネルギーをもつ加速器が必要になります。

LEP と OPAL 実験

スイス、ジュネーヴ郊外にあるヨーロッパ素粒子物理研究所 **CERN**（セルン）は、世界中から研究者が集まって素粒子物理の研究を行なっている国際的な研究所です。ヨーロッパ 20ヶ国が加盟し、日本、アメリカなどもオブザーバー国となっています。

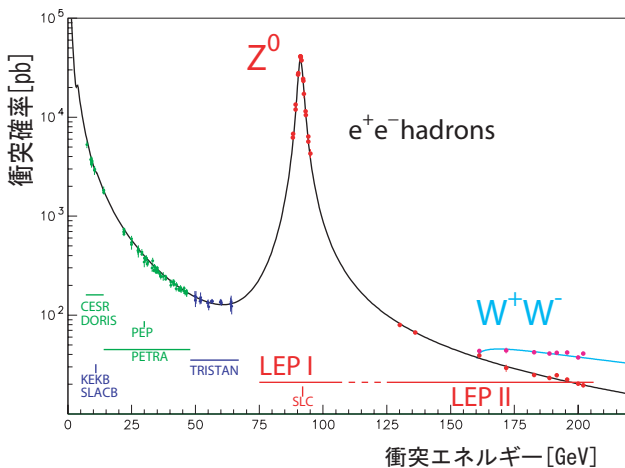
LEP は、CERN に建設された電子・陽電子(e^+e^-)コライダーです。スイスとフランスの国境にまたがって、地下 50-150m に掘られた周囲約 27km のドーナツ型のトンネルの中に設置されていました（右図）。この加速器では、電子と陽電子（電子の反粒子）を互いに逆回りに走らせ、円周上の 4 個所で正面衝突をさせて実験が行われました。



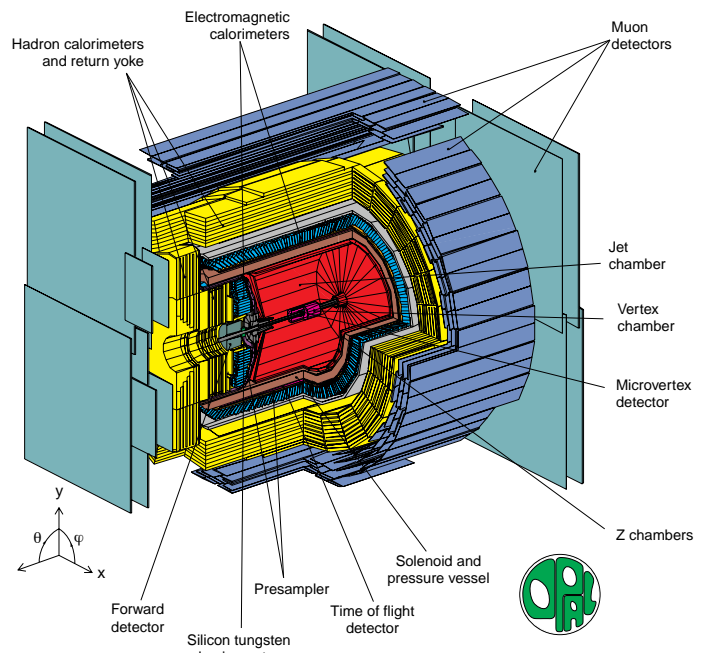
LEP の模式図（提供：CERN）

OPAL は LEP で行われた 4 実験のうちの一つで、9 ヵ国、33 研究機関からなる国際協同実験です。東京大学を中心とするグループは OPAL の中核として実験の提案段階から測定器の設計、建設、そして物理の解析で重要な役割を果たしてきました。

OPAL 測定器(Omni Purpose Apparatus for LEP、右図)は直径約 12m、長さ約 12m の円筒形で、電子・陽電子衝突反応で生成された各種の粒子を検出し、その種類、エネルギー、方向などを精度良く測るための色々な検出器を組み合わせて構成されており、これらは衝突点を取り囲むように配置されていました。東京大学のグループは、このうち最も重要な構成要素の一つである電磁カロリメータと呼ばれる検出器を建設しました。



図は、電子・陽電子の衝突反応の起こる頻度を、衝突エネルギーを横軸にとって表示したものです。陽電子は電子の反粒子であるため、両者が衝突すると共に消滅し、そのエネルギーによって新しい粒子が創り出されます。中央の高い「山」はそこで大量の Z 粒子が生成されていることを示し、右側の水色の「丘」では W 粒子がペアで生成されています。LEP の測定結果が赤と紫色の点で示されています。



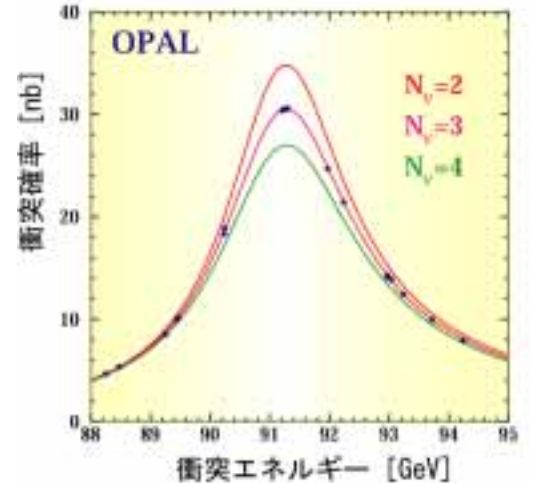
OPAL 測定器。一部を切り取って断面や内部が分かるようにしてある。

LEP は 1989 年に完成し、直ちに重要な物理成果を生み始めました。1995 年秋からは新しい超伝導加速装置を多量に導入してエネルギーを増し、第 2 段階である LEP2 が行われてきました。LEP2 は 2000 年までデータ収集を続け、エネルギーフロンティアの e^+e^- コライダーとして前人未到の世界最高エネルギー 210GeV を達成し、自然のなぞを解き明かす貴重なデータを豊富にもたらしました。詳細なデータ解析は現在も精力的に行われています。

エネルギーフロンティアの物理(LEPからLHCへ)

素粒子の「世代数」の決定

LEPが始まる前には3世代の素粒子が存在することは知られていましたが、この世代構造がさらに続くかどうかはわかっていませんでした。LEPでのZ粒子の生成・崩壊の精密な研究により、ニュートリノには3種類しか無い、つまり世代数も3であることがわかりました(右上図)。



Z粒子の生成頻度をエネルギーを変えながら測定した。データは「世代」数が3の理論予想と見事に一致した。

「標準理論」の確立

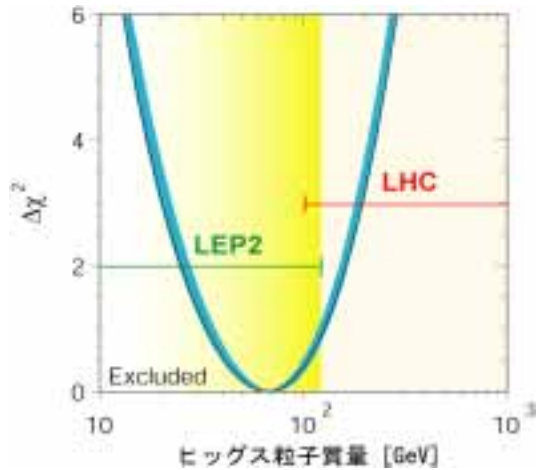
LEPの精密な実験結果と理論計算との比較から当時未発見であったトップクォークの質量を予言することができました。後にトップクォークはアメリカのTevatron加速器の実験で発見され予言通りの質量であることが確認されました。

LEP2ではZ粒子の仲間であるW粒子についても詳しく調べられました。

このようにして素粒子の「標準理論」が確立してきました。

質量の起源・ヒッグス粒子

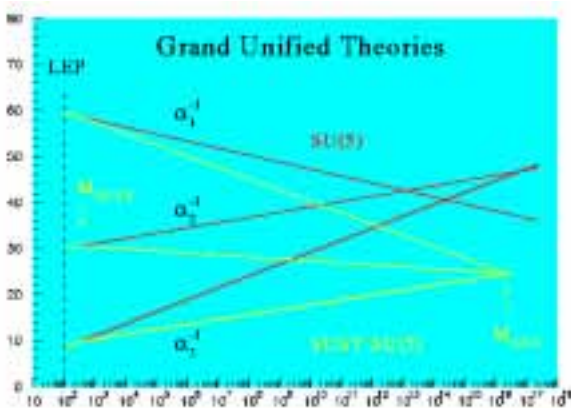
現在の素粒子理論では全ての基本粒子にはもともとは重さ(質量)が無くヒッグス機構により重さが生じるとされています。真空は単なる空の器ではなくヒッグス粒子が満ちており、素粒子はヒッグス粒子と反応することで重さを持つと考えられるのです。



ヒッグス粒子質量に対する制限。黄色い部分は既にLEP2での探索により排除されている。LEP2とLHCで探索できる質量範囲が図に示されている。

十分に高いエネルギーの加速器があれば、真空中からヒッグス粒子をたたき出せるはずですが。LEPの実験結果から、ヒッグス粒子の質量は114GeVから200GeV(陽子の約120倍から210倍)の範囲にありそうだということがわかりました(右図の青い曲線)。

力の強さを表すパラメータ



エネルギースケール (GeV)

素粒子の間に働く3つの力(電磁気力、強い力、弱い力)の強さを表すパラメータはエネルギーに依存します。この値をLEPの実験データに基づいて「超対称性理論」に従って計算したところ、非常に高いエネルギーでこれら3つの力の強さが同じになることがわかりました。

超対称性 (Supersymmetry: SUSY)

標準理論は大変成功していますが、究極の理解への一つのステップでしかないと考えられています。標準理論を越える最も有望な理論は「超対称性理論」と呼ばれるもので非常に高いエネルギーで全ての力を統一できる可能性があり、LEPでのデータもこれを示唆しています(左図)。LEPではこの理論で予言される「超対称性粒子」の探索がさかに行なわれました。

LEP2に続く将来の実験で、超対称性粒子を発見し超対称性理論を確立できれば、我々は非常に温度(エネルギー)の高かった頃の宇宙初期の理解に大きな一歩を記すこととなります。

ヒッグス粒子や超対称性粒子などの未発見の粒子の探索には今までの加速器よりも高い衝突エネルギーが必要となります。電子・陽電子よりも高いエネルギーまで加速できる陽子同士を正面衝突させることにより、これを実現しようとするのがLHC計画です。

LHC と ATLAS 実験

LHC 加速器

LHC 加速器は LEP のトンネルに新しく建設中の加速器で、陽子を 7TeV まで加速して、実験地点で正面衝突させます。この高エネルギーの陽子をリングの軌道に沿って曲げるためには強力な電磁石が使用されます。LHC 加速器では 8.4 テスラの強力な磁場を作り出す長さ 14.2m の超伝導磁石を 1232 台並べて使用します (右図)。

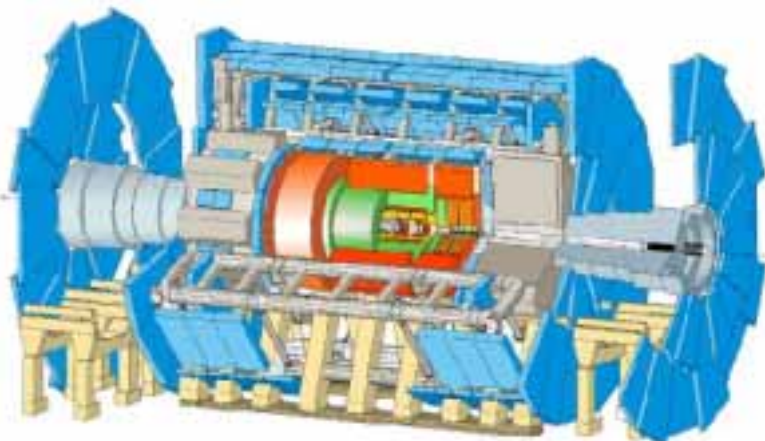


トンネル内に設置される LHC 加速器電磁石 (提供: CERN)

ATLAS 測定器

ATLAS 実験は LHC で計画されている 4 つの実験のうちの 1 つで正面衝突した陽子同士の素粒子反応を詳しく調べるのが目的です。

ATLAS 測定器 (左図) は、高さ 22m、全長 46m、重量 7000 トンの巨大な検出器で、日本を初めとする世界 35 カ国からの約 1800 名の研究者によって建設が進んでいます。



ATLAS 測定器

ATLAS 実験でも活躍する素粒子物理国際研究センター

本センターは 1992 年に ATLAS 実験グループが結成された当初から実験に参加して、様々な検出器の研究開発や設計、建設を推進してきました。同時に、OPAL 実験の成果をもとにして、ATLAS 実験での物理の検討や、膨大なデータを解析するための計算機システムの構築へ向けての研究を ATLAS 日本グループの中心となって進めています。

ATLAS 実験で収集されるデータ量は年間 数ペタバイトにも上ります。これら膨大なデータを解析するために数千台のコンピュータからなる地域解析センターを建設し、世界各国の地域解析センターとギガビットクラスの高速度ネットワークで結ぶことを計画しています。

このため、CERN が中心となって開発を進めている「LHC 実験のためのコンピューティンググリッド」という最新の技術を導入する全く新しい試みを始めようとしています (右図)。

コンピューティンググリッド技術を利用すれば、世界中のコンピュータをネットワークを介して相互に結び、仮想的な超高性能コンピュータを形成することが可能になります。

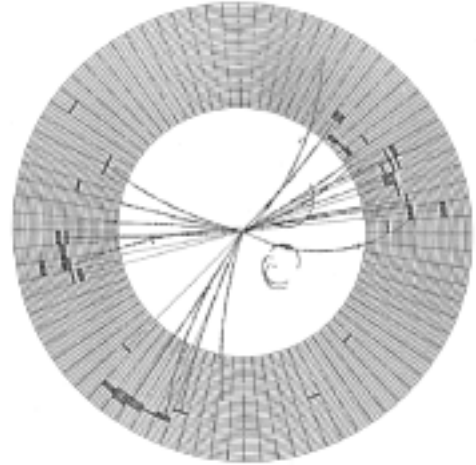


LHC コンピューティンググリッド概念図

東京大学素粒子物理国際研究センターの歩み

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の計画は1970年代に遡り、その頃ドイツのハンブルク市にある DESY 研究所(Deutsches Elektronen SYNchrotron)に建設中だった e^+e^- コライダー DORIS を用いた実験計画(DASP)への参加に始まります。続いて同じく DESY 研究所に建設された当時世界最高エネルギーの PETRA を用いた JADE 実験、そして、CERN の現在世界最高エネルギー e^+e^- コライダー LEP の OPAL へと続き、「精密測定と新現象の発見の両方に優れている」 e^+e^- 衝突実験で成果をあげてきました。

1972		DESYとの共同研究を提案
1973	東京大学理学部高エネルギー物理学実験施設	DORIS完成、DASP実験
1974	新粒子 P_c の発見、レプトンの確認	PETRA建設承認
1975	チャーム粒子の研究	JADEグループ発足
1976	東京大学理学部素粒子物理国際協力施設	
1977		
1978		PETRA完成
1979	グルーオンの発見	JADE測定器完成
1980	量子電磁気学(QED)の検証	
1981	量子色力学(QCD)の検証	
1982	トップクォークの探索	OPAL実験計画提出
1983	超対称性粒子など新粒子の探索	
1984	東京大学理学部素粒子物理国際センター	OPAL測定器建設開始
1985		
1986		
1987		
1988		
1989	素粒子は3世代	LEP完成、OPAL完成、実験開始
1990	Z粒子の精密測定	
1991	標準理論の精密検証	
1992	トップクォーク質量の予言	ATLASグループ発足
1993	大統一理論の手がかり	
1994	東京大学素粒子物理国際研究センター	LHC計画承認
1995		
1996	W粒子の精密測定	LEP2開始、ATLAS実験承認
1997	標準理論の精密検証	
1998	ヒッグス粒子の探索	
1999	超対称性粒子などの新粒子の探索	
2000		LEP2データ収集終了
2001	LHC実験部門新設	



JADE：クォーク対とグルーオンが生成されて3つのジェットとして観測された事象（グルーオンの直接観測）



OPAL：東京大学のグループが製作した電磁カロリメータ（提供：CERN）

21世紀のエネルギーフロンティア

標準理論を越える次のステップへ進むために素粒子物理は次世代のエネルギーフロンティアをめざした加速器を考えています。CERN における次期計画である LHC には日本の多くの大学、研究機関が加速器の建設や ATLAS 実験に参加しており、2007 年からの実験開始をめざして準備を進めています。



液体キセノンガンマ線検出器

一方、これまでの成果を見ても素粒子反応の素過程を直接的に観測できる e^+e^- コライダーの重要性は明らかです。LEP2 より格段に高いエネルギーの e^+e^- コライダーを実現するために、LEP のような円形の加速器で問題となるシンクロトロン放射によるエネルギー損失のない直線型の e^+e^- コライダー（リニアコライダー）の開発が進められています。

また、こういった加速器開発と並んで次世代の実験で要求される厳しい条件を満足する高性能検出器の開発も活発に行われています（左図）。

これらの計画が実現すれば「圧倒的に高いエネルギー」の pp コライダーと「発見と精密測定」の e^+e^- コライダーは、両者の特徴を生かして21世紀の素粒子物理を切り開くことでしょう。