

論文内容の要旨

論文題目

Measurement of Strong Coupling Constant using Radiative Hadronic Events in e^+e^- Collision at LEP

(電子陽電子衝突反応における光子を伴うハドロン事象を用いた
強い相互作用結合定数の測定)

氏名 戸谷 大介

この研究では欧州素粒子原子核研究所 (CERN) の電子陽電子衝突型加速器 LEP を用いて行なわれた OPAL 実験のデータを用いて、25GeV から 205GeV の実効的重心系エネルギーでの量子色力学 QCD の結合定数 α_s の測定を行なった。

QCD 結合定数 α_s

QCD は強い相互作用による反応を記述する量子場の理論である。カラーと呼ばれる QCD の荷量を持つクォークの間をグルーオンと呼ばれる質量を持たないゲージ粒子が媒介する描像で反応が記述される。この研究で測定した結合定数 α_s はクォークとグルーオンの結合の強さを表わす QCD の基本定数である。QCD は、非可換群カラー SU(3) に基づく量子場の理論であるために、近距離または高いエネルギースケールでは結合定数が小さくなるという漸近的自由性を持っている。同じ量子場の理論である量子電磁力学 (QED) とは異なり、遠距離または低いエネルギースケールでは、結合定数が大きいため結合定数についての摂動展開による計算が不可能である。しかしこの漸近的自由性により摂動論的な計算 (摂動論的 QCD) が可能になる。この漸近的自由性による結合定数の変化は PEP, PETRA, TRISTAN, SLD, LEP といった様々な重心系エネルギーにおける加速器を用いた結合定数の測定によって確認されている。

LEP 加速器と OPAL 検出器

LEP 加速器は 1993 年から 1995 年の間に重心系エネルギーを Z^0 粒子の質量 (91GeV) に合せて運転された (LEP1)。LEP1 期間中、OPAL 実験において約 30 万回の Z^0 粒子生成事象を観測した。このデータを用いて、 Z^0 粒子の質量や全崩壊幅などを精密に測定し、電弱相互作用の標準理論に対する厳しい検証を行なった。また 1996 年から 2000 年までの間、W 粒子の質量などの測定を目的として、W 粒子の対生成の閾値エネルギー直前の 161GeV から約 210GeV までの重心系エネルギーで LEP が運転された (LEP2)。

OPAL (Omni-Purpose Apparatus for LEP) 検出器は電子陽電子衝突反応で生じる全ての種類の事象を効率良く精度良く再構成することを目的とした汎用型検出器である。OPAL 検出器は大きく分けて中央飛跡検出器、ソレノイド磁石、電磁カロリメーター、ハドロン・カロリメーター、ミューオン検出器、前方検出器から構成される。中央飛跡検出器は 0.435T のソレノイド磁石中に配置されたドリフト・チェンバーと衝突点付近に配置されたシリコン・バーテックス検出器から構成される。荷電粒子の運動量はこの中央飛跡検出器で測定される。電子または光子のエネルギーは鉛ガラス・チェレンコフ検出器などからなる電磁カ

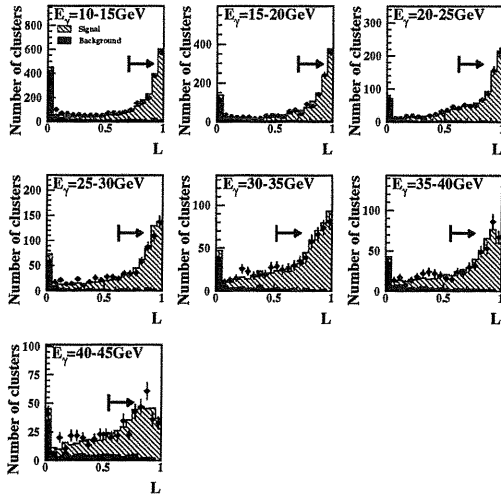


図 1: ハドロン事象中の高いエネルギーを持つ光子の likelihood 分布

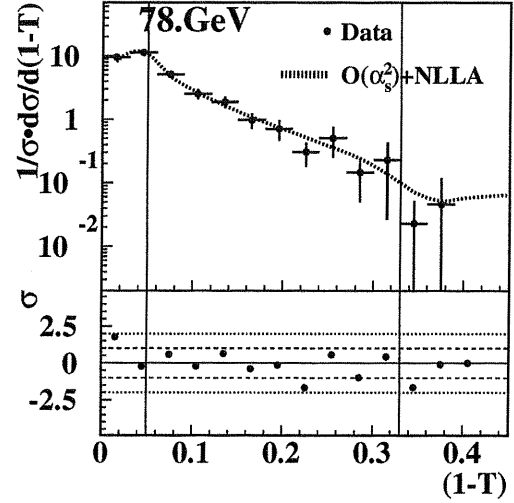


図 2: 事象形態変数スラストの分布とそれにフィットされた理論計算

ロリーメーターによって測定される。ハドロンのエネルギーはサンドイッチ状に重ねられた鉄とガス・チェンバーから構成されるハドロン・カロリメーターを用いて測定される。

事象形態変数による α_s の決定

この研究では反応で生成したクォークやグルーオンの放出方向などのボロジカルな特徴を表わす事象形態変数と呼ばれる量を用いて α_s を決定した。このような事象形態変数の例としてはスラスト T が挙げられる。 T は次の式で定義される。

$$T = \max_{\vec{n}} \left(\frac{\sum_i |\vec{p}_i \cdot \vec{n}|}{\sum_i |\vec{p}_i|} \right)$$

ここで \vec{p}_i は i 番目の終状態の粒子の運動量ベクトルで括弧の中の値が最大になるように \vec{n} が決められる。このスラスト T は終状態の粒子がどれだけある軸方向にそろっているかを示す変数で、クォーク対の他に高いエネルギーのグルーオンを放出してる事象 (3 ジェット事象) の割合によって、異なる分布になる。実験的に観測されるのはそれらのクォークやグルーオンから転化した (ハドロン化) 多数のハドロンとその崩壊生成粒子である。それらの粒子の運動量とエネルギーから事象形態変数を計算し、摂動論的 QCD による分布を α_s を自由パラメータとしてフィットすることで α_s を決定する。この研究では α_s の二次の行列要素と NLLA (Next-to-Leading Log Approximation) の計算が得られている 6 つの事象形態変数から α_s を求めた。

光子を伴うハドロン事象を用いた α_s の測定

通常このような測定は高エネルギー光子を含まないハドロン事象を用いて行なわれる。電子 Z^0 粒子生成前や生成直後のクォークによって放出された光子が QCD の過程と干渉しないことを仮定すると、高エネルギーの光子を伴うハドロン事象を用いて低い実効的重心系エネルギーでの結合定数の測定が可能である。この研究では 25 GeV から 78 GeV の実効重心系エネルギーにおける α_s を LEP1 のクォーク対生成事象 (またはハドロン事象) のうちの高いエネルギーの光子を伴う事象を用いて測定した。

このような高いエネルギーの光子のバックグラウンド事象はハドロン化によって生じる中性パイ中間子である。中性パイ中間子は二つの光子に崩壊するが、パイ中間子の運動量が大きくなると二つの光子による電磁カロリメーターの信号 (クラスター) が重なるために、この解析で必要とする単独の光子との区別が難し

くなる。まずハドロン事象として選別されたデータに含まれる高いエネルギーのクラスターのうち荷電ハドロンから孤立したものが選別された。その孤立したクラスターに対して、ジェットに対してなす角やクラスターの形についての変数を含む likelihood を用いて高いエネルギーを持つ光子の選別を行なった。(図 1)

選別された事象中の中性パイ中間子の割合は、データの likelihood の分布を MC による高いエネルギーを持つ光子とバックグラウンドの分布でフィットして求めた。またこれとは独立にアイソスピン対称性を用いてデータ中の荷電ハドロンの生成頻度から中性パイ中間子の生成頻度を求めることも行なった。

選別された事象の事象形態変数の分布から、予想されるバックグラウンドの分布を引き、検出器による事象形態変数への効果を修正する。修正後の分布を摂動論的 QCD による分布を α_s を自由パラメータとしてフィットすることで α_s を決定した。

LEP2 における α_s の測定

LEP2 のデータを用いて $E_{CM} = 189\text{GeV} - 205\text{GeV}$ における α_s を測定した。LEP2 では W^\pm がハドロンに崩壊している W^+W^- 生成反応が主要なバックグラウンド事象となっている。 α_s の測定に使う事象の選別は次のようにしておこなわれた。まずハドロン事象として選別された事象に対して力学的最尤法によるジェットのフィッティングから $\sqrt{s'}$ を決め、 $\sqrt{s} - \sqrt{s'}$ が小さい事象を選別する。さらに QCD の行列要素や W 粒子対のハドロンへの崩壊やハドロンとレプトンへの崩壊の行列要素を用いて、 W^+W^- の生成過程などのバックグラウンド事象を除いた。選別された後は LEP1 の解析と同様の手順で事象形態変数のフィッティングを行ない、6つの事象形態変数と6つのエネルギーについての α_s の値が得られた。

α_s のエネルギースケール依存性と $\alpha_s(M_Z)$

この解析において広いエネルギーの範囲に渡って測定された α_s を用いて、 α_s の繰り込み群方程式の解のフィッティングから QCD の基本定数の $\Lambda_{\overline{MS}}^{(5)}$ を決定した。LEP1 と LEP2 の各エネルギー・サンプル毎に6つの事象形態変数についての結果を平均し、そのエネルギー依存性から得られた $\Lambda_{\overline{MS}}^{(5)}$ は

$$\Lambda_{\overline{MS}}^{(5)} = 0.2242 \pm 0.031(\text{stat.} + \text{expt.} + \text{hadr.})_{-0.048}^{+0.072}(\text{scale.}) \text{ GeV.}$$

である。事象形態変数ごとのエネルギー依存性のフィットの結果を図 3 に示す。

また他の実験との比較のために各エネルギー・サンプルで事象形態変数について平均した結果を $\alpha_s(M_Z)$ に焼き直し、全エネルギー・サンプルについて平均した値が

$$\alpha_s(M_Z) = 0.1193 \pm 0.0017(\text{stat.})_{-0.0046}^{+0.0055}(\text{syst.}). \quad (1)$$

である。事象形態変数ごとに全エネルギー・サンプルについて平均した値を図 4 に示す。この値は PDG(Particle Data Group) による α_s の全測定の平均値 0.1171 ± 0.0014 や事象形態変数を用いた全測定の平均値 0.121 ± 0.007 と誤差の範囲内で一致している(図 5)。

まとめ

この研究では欧州素粒子原子核研究所(CERN)の電子陽電子衝突型加速器 LEP を用いて行なわれた OPAL 実験のデータを用いて、25GeV から 205GeV の実効的重心系エネルギーでの量子色力学 QCD の結合定数 α_s の測定を行なった。これは OPAL 実験として初めての、光子を伴うハドロン事象を用いる手法による α_s の測定である。この手法によって広いエネルギー領域にわたって α_s を測定できた。これは電子陽電子反応での α_s の測定で調べられていない過程における α_s の測定を、一般的な手法を用いて行った興味深い研究である。

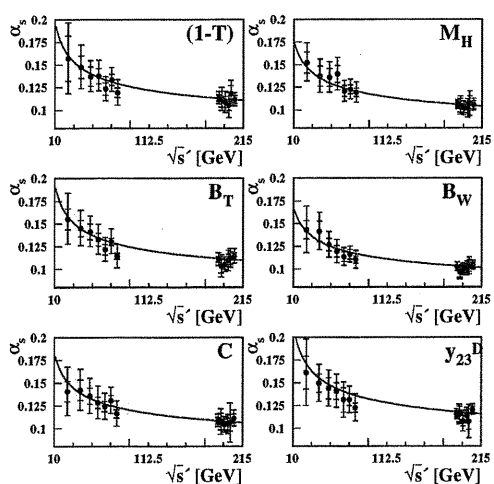


図 3: 事象形態変数ごとのエネルギー依存性のフィット

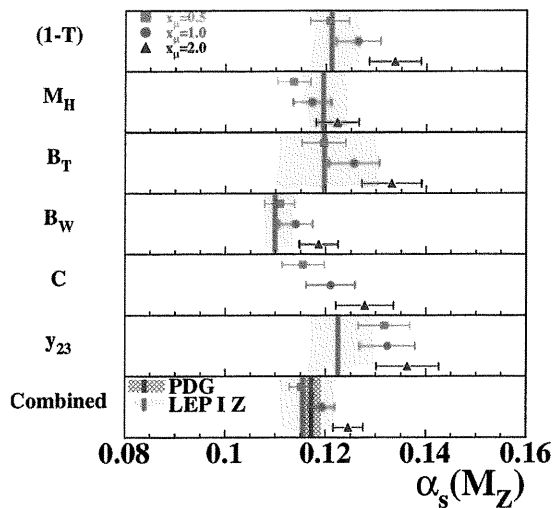


図 4: LEP1 の光子を伴うハドロン事象の解析と LEP2 の解析から得られた全エネルギー・サンプルの $\alpha_s(M_Z)$ の平均値

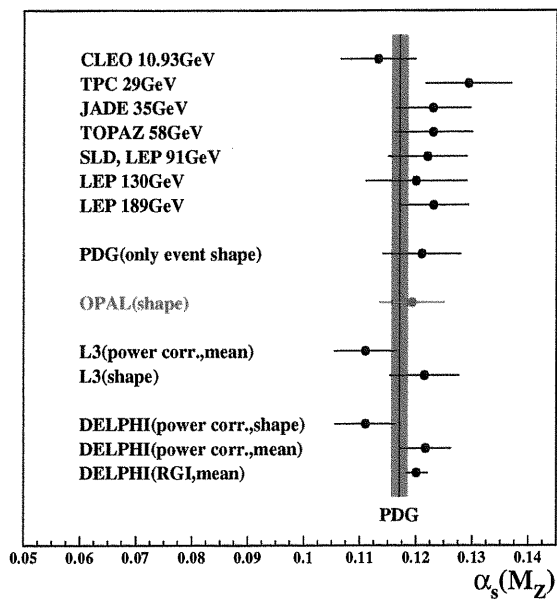


図 5: PDG による平均値と他の事象形態変数を用いた測定との比較