

論文内容の要旨

論文題目： Measurement of Jet Cross Sections in $D^{*\pm}$
Photoproduction at HERA
(HERA での $D^{*\pm}$ メソン光生成過程における
ジェット断面積の測定)

氏名： 河野 能知

高エネルギーでのハドロン・ハドロン散乱は、ハドロンの構成粒子であるクォークやグルーオン（パートン）間の散乱と考えることができる。断面積は、ハドロン中のパートン分布と摂動的量子色力学（pQCD）によるパートン間の散乱過程を用いて計算することができる。実際に様々な粒子を用いた散乱（ $p\bar{p}$ 、 ep 、 πN 、 \dots ）を pQCD に基づいて理解することができる。ハドロン・ハドロン散乱による重いクォーク（ c および b クォーク）の生成も pQCD の枠組みで記述できると考えられている。

近年 Tevatron における重心系エネルギー 2 TeV での $p\bar{p}$ 衝突実験において B 中間子の生成断面積の測定値が理論の予言値を 2-3 倍上回るという結果が得られてきた。また、LEP における $e^+e^- \rightarrow e^+e^-b\bar{b}$ という反応においても実験値が理論を 2-3 倍上回っている。一方、 c クォーク生成においては、LEP の測定では理論の不定性が依然大きい誤差の範囲内で一致するという結果が得られている。

c クォーク生成過程の研究は電子・陽子衝突においても現在精力的に行われている。電子・陽子散乱において交換される 4 元運動量移行 (Q^2) の小さい領域 ($Q^2 \simeq 0$) での $D^{*\pm}$ メソンの生成過程において、LEP や Tevatron での実験と同様に実験データが理論を上回るという結果が得られている。 Q^2 が小さい領域では、電子から放出された光子がほとんど質量殻上にあるので、この反応は電子からの光子のフラックスと光子・陽子散乱の断面積によって記述することができ、光生成過程と呼ばれている。高エネルギーにおいて光子はハドロ的に振る舞うことがこれまでに知ら

れている。そのため、光生成過程もハドロン・ハドロン散乱と同じ枠組みで記述することができる。ZEUS 実験における測定では、 D^* の横方向運動量 (p_T) が低く、かつ擬ラピディティ (η) の大きいところ (光子・陽子系における陽子の進行方向) において特に測定した断面積が大きくなっている。また、ZEUS 実験における D^* を含む 2 ジェット事象の角分布の解析により c クォークの光生成過程の中で、光子が $c\bar{c}$ に分解して起こる反応が重要な部分を占めるということを示唆した。

pQCD は様々のところで成功を収めているが、ハドロン散乱における重いクォークの生成では、以上のように実験と理論の不一致が観測されている。本解析では、 D^* の生成と同時にジェットを測定することで pQCD が記述するパートンと観測量との対応を良くできると考え、 D^* 光生成事象におけるジェットの断面積を測定した。測定はインクルーシブに行った、すなわちジェットが一つ以上ある事象の断面積を測定した。ジェットを測定することで D^* 以外の粒子の分布についても調べることができ、特に理論・実験の不一致が観測されている前方で観測する擬ラピディティ領域を広げることができる。ジェットの横方向エネルギー E_T^{jet} および擬ラピディティ η^{jet} に対する微分断面積を求めた。

ZEUS 実験は、1998 年から 2000 年までの間、(陽) 電子ビーム 27.5 GeV、陽子ビーム 920 GeV で運転を行ってきた。この間に ZEUS 測定器で取得された e^-p 、 e^+p 衝突データは合わせて 78.6 pb^{-1} であり、それを用いて解析を行った。まず、光生成事象を選別するために衝突後に散乱電子が主測定器で観測されないということを要求し、 $Q^2 < 1 \text{ GeV}^2$ 、 $130 < W < 280 \text{ GeV}$ という運動学的領域で測定を行った。 D^* は中央飛跡検出器 (CTD) で測定された荷電粒子の飛跡から $D^* \rightarrow D^0\pi_s \rightarrow K\pi\pi_s$ という崩壊モードを用いて、 D^0 の不変質量 ($m(D^0)$) と、 D^* と D^0 の質量差 (Δm) を求めて同定して、 $p_T(D^*) > 3 \text{ GeV}/c$ かつ $|\eta(D^*)| < 1.5$ という領域にあるものを選んだ。ここで、 $p_T(D^*)$ は D^* の横方向運動量である。これらの事象についてジェットを k_T アルゴリズムにより再構成し、 $E_T^{jet} > 6 \text{ GeV}$ 、 $-1.5 < \eta^{jet} < 2.4$ に一つ以上のジェットがあるものを選んで 4891 ± 113 事象を観測した。得られた Δm 分布を図 1 に示す。これらの事象に対してインクルーシブなジェットの微分断面積、 $d\sigma/dE_T^{jet}$ 、 $d\sigma/d\eta^{jet}$ を測定した。

測定した断面積を摂動の 2 次までの効果を取り入れた NLO QCD 計算に基づく予言と比較するため、FMNR と呼ばれるプログラムを用いて実験と同じ運動学的領域における理論予言値を計算した。この結果はパートンレベルで行われており、実験で測定した断面積はハドロン化の後の量である。ハドロン化による影響は、MC シミュレーションにより見積もった。具体的には、イベントジェネレーター HERWIG を使ってパートンレベルでの断面積とハドロンレベルでの断面積の比を取り、それを NLO QCD 計算により得られた断面積に掛けた。ハドロンレベルのジェットとパートンレベルのジェットの相関を調べると、ハドロンレベルのジェットの擬ラピディティがパートンレベルに比べて前方にシフトしていることがわかった。それにより、ハドロン化の効果を考慮すると、擬ラピディティの負の領域で断面積が減り、正の領域で若干増える。

測定されたデータを NLO QCD 計算によるハドロンレベルでの断面積と比較し考察を行った。図 2 に示すのは、 $d\sigma/dE_T^{jet}$ の測定値と NLO QCD の比較である。データ (黒点)、パートンレベ

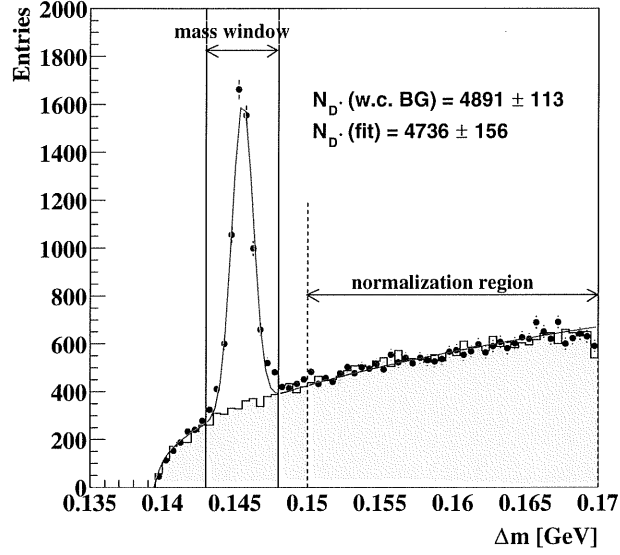


図 1: 全ての事象選別を行った後の Δm 分布。

ルでの NLO QCD による予言値 (細い実線)、ハドロン化後の NLO QCD による予言値 (太い実線)、上限 (破線) と下限 (点線) を示してある。同様に、図 3 に $d\sigma/d\eta^{jet}$ の結果を示してある。図に示してある理論曲線の不定性は、計算における繰り込みのスケールと c クォークの質量を変化させて得られたものである。理論の不定性が大きいので極端な場合 ($\mu_R = 0.5\mu$, $m_c = 1.5 \text{ GeV}/c^2$) を取ればデータに近づくが全ての領域で測定値が理論の予言値を上回っている。

E_T^{jet} の低い領域での $d\sigma/d\eta^{jet}$ (図 3 (b)) の理論値は、ハドロン化の効果により分布が変わり、この効果を入れた後、分布の形は NLO QCD によりほぼ記述できていることがわかる。 $E_T^{jet} > 9 \text{ GeV}$ ではハドロン化の効果はそれほど大きくない (図 3 (c))。また、 D^* の測定では見られなかった、より前方 ($\eta^{jet} > 1.5$) でのジェット生成に関しても断面積の絶対値を除いて、NLO QCD によりほぼ記述できることがわかった。

断面積の分布の形は基本的に理論・実験で合うが、最も高い E_T^{jet} においてデータが理論の中心値の約 3 倍大きくなっている。この領域に寄与する事象における D^* の変数の分布を図 4 に示す。図 4 (c) からわかるように、 $p_T(D^*)/E_T^{jet}$ の分布は MC による分布の予想とは異なり、 $p_T(D^*)/E_T^{jet} < 0.5$ にピークする形になっている。これは、2 次的なチャーム生成からの寄与が存在する可能性があることを示唆している。これが具体的にどのような過程から来るか等の詳細を調べるには、さらなる解析とより高い統計のデータが必要である。また、図 4 から D^* 生成断面積で観測されていた超過の一部は E_T^{jet} の高い領域の事象から来ていると考えられる。

以上述べたように、本論文では初めて D^* 生成事象でのインクルーシブなジェット断面積を測定した。これまでの研究で測定した D^* 生成断面積と同様に、ジェット断面積においてもデータが理

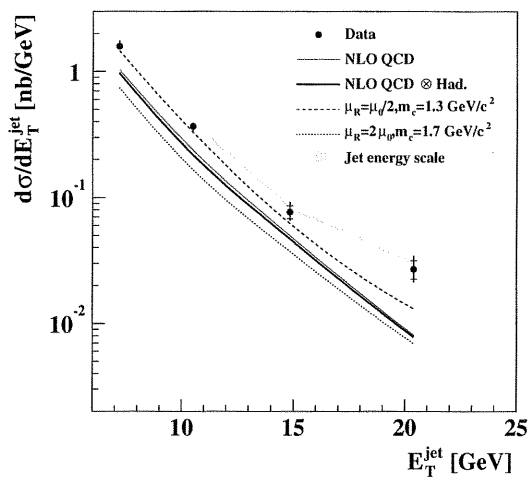


図 2: 微分断面積 $d\sigma/dE_T^{jet}$ の NLO QCD 計算との比較。黒点がデータ、細かい実線がパートンレベルでの NLO QCD、太い実線がハドロン化後の NLO QCD、破線が NLO QCD の上限、点線が NLO QCD の下限をそれぞれ表す。データ点を通る黄色いバンドはハドロンのエネルギースケールの不定性からくる系統誤差。

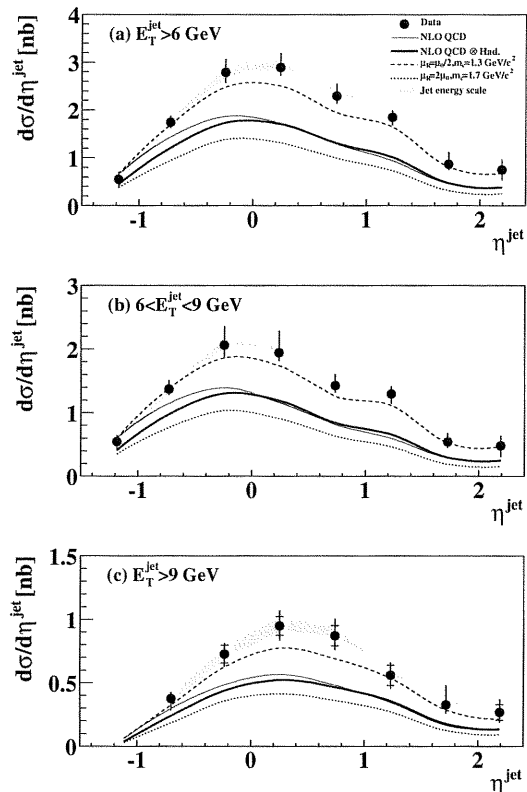


図 3: 微分断面積 $d\sigma/d\eta^{jet}$ の NLO QCD 計算との比較。点や線の意味は図 2 と同じ。

論計算を上回るが、 D^* 生成断面積で見られた低い p_T かつ前方でデータが著しく大きくなるという傾向は、ジェット断面積においては観測されなかった。これは D^* 生成断面積では、ハドロン化の効果により D^* が前方に引きずられることが影響していたものと考えられる。ジェットを測定することで、 D^* 生成事象において広い擬ラピディティ領域にわたる粒子生成を捕え、測定した領域で分布の形は NLO QCD により記述できることを明らかにした。また、 E_T^{jet} の高い領域で測定値に超過が観測されたが、これは HERA での光生成過程において 2 次的なチャーム生成が存在する可能性を示唆している。

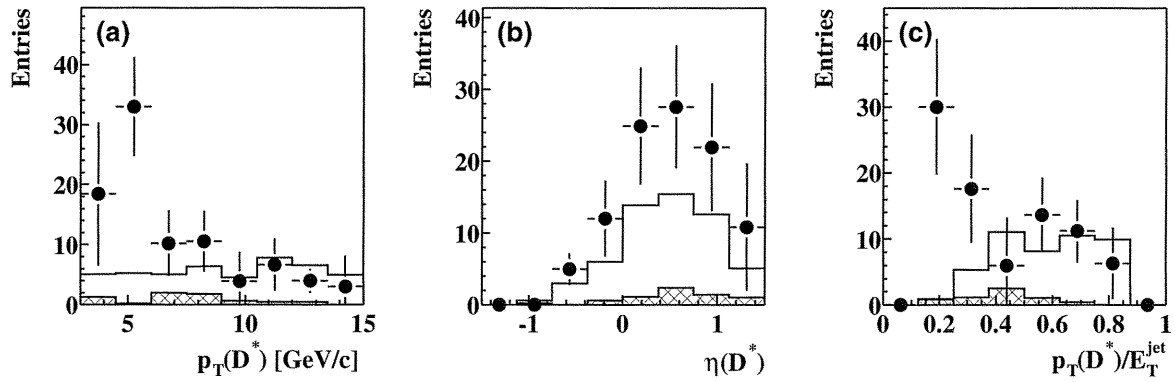


図 4: 最も高い E_T^{jet} のビンにおける D^* variables for events having a jet in the highest E_T^{jet} bin. (a) $p_T(D^*)$, (b) $\eta(D^*)$ と (c) $p_T(D^*)/E_T^{jet}$ 。データ (黒点)、HERWIG (c+b) (実線) と HERWIG (b) (斜線)。