

氏 名 坂木 泰仁

学位(専攻分野) 博士(理学)

学位記番号 総研大甲第 1828 号

学位授与の日付 平成28年3月24日

学位授与の要件 高エネルギー加速器科学研究科 素粒子原子核専攻
学位規則第6条第1項該当

学位論文題目 Understanding QCD jet substructure and its simulation

論文審査委員 主 査 教授 橋本 省二
教授 野尻 美保子
教授 北野 龍一郎
教授 熊野 俊三
教授 花垣 和則
助教 遠藤 基 東京大学大学院

論文内容の要旨
Summary of thesis contents

In the high-energy physics experiments such as those at the Large Hadron Collider (LHC), many scattering processes of elementary particles occur with several jets of hadrons in the final state. The jet is understood as a set of daughter particles of initial high-energy quark or gluon fragmented immediately after it is created in the elementary process. Once they become sufficiently low energy, the fragments finally make hadrons. Therefore, a jet consists of many collimated hadrons in the final state. A single bunch of hadrons is identified as a jet when they distribute in a cone with a vertex at the interaction point. The series of processes to produce the jet is a result of the strong interaction, and should be understood using Quantum Chromodynamics (QCD), the fundamental theory of strong interaction. In fact, one can predict that the jets originated from an initial gluon are wider in shape than those of quarks as an initial particle, since the color degrees of freedom of gluon is larger and the associated jet tends to fragment more frequently. Such mechanism for the formation of the jets are implemented in the Monte Carlo simulators and widely used in the experimental analyses assuming some models of the fragmentation and hadronization, but more detailed understanding has become relevant as a lot of experimental data are accumulated and their analysis becomes more elaborated. This is the reason why the studies on the substructure of jets have been extensively performed in recent years. The jet substructure may contain the information of its initial particle, and thus its study is important for the test of the Standard Model and the search for the physics beyond the Standard Model at LHC.

In this thesis, we show that the detailed information on softer reconstructed jets (associated jets) around a primary hard jet provides a useful set of information to discriminate between the jets of light-quark origin and gluon origin. Without such information, one can not efficiently distinguish the elementary processes including light quarks from those of gluons.

In particular, such analysis is relevant when one adopts a small radius parameter for the reconstruction of the hadronic jets. We calculate the probability of having an associated jet as a function of the primary jet transverse momentum p_T , radius, the minimum associated jet p_T and the association radius up to next-to-double logarithmic accuracy (NDLA). We compare the predictions with the results from the standard Monte Carlo (MC) generators such as Herwig++, Pythia6 and Pythia8. We demonstrate the improvement of the quark-gluon discrimination by using the associated jet rate variable with the help of a multivariate analysis. The associated jet rates are found to be only mildly sensitive to the choice of parton shower and hadronization algorithms, as well as to the effects of initial state radiation and underlying events. In addition, the number of kt subjets and of an anti-kt jet is found to be an observable that leads to a rather uniform prediction across different MC's, in agreement with predictions at NDLA, compared to the number of charged tracks observable, which is often utilized in the experimental analyses.

One of the problems in the studies of jet substructure is that the predictions of jet

(別紙様式 2)
(Separate Form 2)

substructure are different among the MC event generators. The difference may be accounted for by the details of the parton shower algorithm implemented in the MC event generators. For the leading logarithmic parton shower, even though the evolution variable plays the core role among other variables, the choice of that variable is not unique. We examine the dependence of the jet substructure on the evolution variable by developing a parton shower generator that interpolates between different evolution variables using a single parameter α . Jet shape variables and associated jet rates for quark and gluon jets are used to demonstrate the α -dependence of the jet substructure. We find that angular ordered shower predicts wider jets, while relative transverse momentum (p_T) ordered shower predicts narrower jets. This is in qualitative agreement with the missing phase space of p_T ordered showers. Such difference can be reduced by tuning other parameters of the shower algorithm, especially in the low energy region, while the difference tends to increase for high-energy jets.

坂木氏の論文は、ハドロン・ジェット現象を記述するパートン・シャワーの構造に関するものである。論文の前半では、クォークを起源とするジェットをグルーオン起源のものから分離する方法について、先行研究を発展させた。後半では、パートン・シャワーのモデルによってジェット構造に対する予言が異なることに注目して、その起源をパートン・シャワーの発展変数と、量子コヒーレンスの取り込み方にあると考え、数値計算で実証した。

クォークとグルーオンのパートン・シャワーでは、色荷の違いのためグルーオンのほうがより多く分岐し、幅の広いジェットを作ることが知られている。ジェットを同定する円錐サイズを固定すると、パートン・シャワーがこの円錐より外まで発展する確率はグルーオンのほうが高い。坂木氏は、ジェット周りの比較的ソフトなハドロンの違いを表す随伴ジェット数という量を定義し、クォークとグルーオン・ジェットの随伴ジェット数の違いを、標準的モンテカルロソフトウェアである Herwig++ や Pythia 6, 8 など幅広い運動量レンジにわたって比較するとともに、QCD 計算との比較を行った。また、多変量解析に随伴ジェット数を導入することでクォークとグルーオン・ジェットの分離を改善できることを示した。この研究は、円錐サイズを大きく取らなくてもジェットの分離を安定的に行えることを示しており、今後、新物理の感度向上等に利用できる可能性をもつ重要な研究である。

博士論文の後半は坂木氏の単著の研究に基づいている。一般にパートン・シャワーの発展は、スケール変数が単調に増加、あるいは減少するクォークあるいはグルーオンの放射過程として記述されるが、このスケール変数の定義は角度順序シャワー、 p_T 順序シャワー、仮想度順序シャワーなど、モデルによって異なる。 p_T あるいは仮想度順序シャワーでは、量子コヒーレンスを満たすために角度順序も合わせて課す必要があり、このために QCD の予言と比べて放出が少なくなることが指摘されていた。坂木氏は様々なシャワー・アルゴリズムを一つの変数で記述する一般化シャワー・アルゴリズムを考案し、それ以外の生成条件を同一にすることで、この効果が実際に存在することを示した。この結果は、 p_T 順序シャワーではジェットの性質の一部が再現できない可能性をしめしており、LHC 実験データを再現するパートンシャワーモデルを追求する上で重要である。

以上のように、坂木氏の論文は LHC 実験において重要となるジェットの性質について、従来とは異なる視点で解析を行う手法を提案するもので、十分な学術的価値をもつ。学位論文はすでに査読付きの学術誌に掲載された論文に基づいており、そのうちの一つは坂木氏の単著によるものである。これらのことから、坂木氏の論文は、博士の学位に値するものと判断した。