

平成 28 年 6 月 21 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2015

課題番号：26800135

研究課題名(和文) Resummation of nonglobal logarithms in Higgs production

研究課題名(英文) Resummation of nonglobal logarithms in Higgs production

研究代表者

八田 佳孝 (Hatta, Yoshitaka)

京都大学・基礎物理学研究所・准教授

研究者番号：00512534

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,000,000円

研究成果の概要(和文)：QCDの輻射補正には赤外発散に由来する大きな対数が出現し、ナイーブな結合定数による展開は多くの場合破綻する。それらの対数は結合定数のすべての次数で再足し上げ(resummation)することが必要である。本研究ではHemisphere jet massと呼ばれる観測量に対するnon-global logのresummationを実行した。Nonglobal logは観測領域に制限をかけた場合に出現するソフトグルオンの放出に由来する対数である。通常カラーの数が大きい近似が用いられるが、我々は有限のカラー数の場合に世界で初めてこの観測量に対するresummationを成功させた。

研究成果の概要(英文)：Naive perturbative expansion in QCD often breaks down due to large logarithms originating from infrared divergences. These logarithms must be resummed to all orders. In this research, we performed the resummation of the so-called nonglobal logarithms for hemisphere jet mass distribution in electron-positron annihilation including finite- $N_c$  effects. The nonglobal logarithms originate from the soft gluon emissions, and only arise when the measurement is restricted to a part of the phase space. Before our work, this resummation has only been carried out in the large- $N_c$  approximation or in fixed-order perturbation theory. We have for the first time succeeded in carrying out the resummation for the physical value of the color, namely,  $N_c=3$ . Our result shows that the finite- $N_c$  effects is sizable, especially when the shape variable becomes small.

研究分野：高エネルギー量子色力学

キーワード：Quantum Chromodynamics perturbation theory resummation nonglobal logarithms

## 1. 研究開始当初の背景

量子色力学(QCD)の輻射補正を摂動的に計算すると、赤外発散に由来する大きな対数が摂動の各次数で出現し、結合定数の小ささを大きな対数が打ち消すためにナイーブな摂動展開は多くの場合破綻する。赤外発散には2種類あり、コリニアール(進行方向と同じ方向)なグルオンの放出と、ソフト(非常にエネルギーが低い)なグルオンの放出に伴って対数項が現れることが知られている。それらの対数は結合定数のすべての次数で再足し上げ(resummation)を行わなければ物理的にまともな結果を出すことができない。近年では resummation の手法は飛躍的に発展し、一般の event shape と呼ばれる電子、ハドロン衝突における観測量に対しては next-to-next-to-leading order までの精度で計算を行うことが可能になった。しかしながら 2001 年に Dasgupta と Salam によって指摘された non-global logarithm (NGL) に関しては、resummation が主要対数近似(leading logarithmic approximation)ですら非常に難しいことが知られていた。NGL は観測を行う立体角(位相空間)に制限を課した際に発生する対数のことで、測定される領域に放出されるジェットのエネルギーに制限を課した(jet veto)断面積の計算などに現れる。コライダー実験においては検出器をすべての立体角に置くことは実際不可能である。また、ヒッグス粒子の生成に伴う jet veto の断面積からヒッグスとクォークや電弱ボソンの結合定数に関する情報を引き出せるという示唆も Forshaw らによってなされている。このように NGL は現象論に重要であるにもかかわらず、その resummation は Dasgupta と Salam の論文以降 10 年以上にわたって、カラーの数が無限大という近似を用いた場合にしか行われてこなかった。

## 2. 研究の目的

有限のカラーの数(つまり  $N_c=3$ )の場合の NGL の再足し上げは、Weigert により方向性が示された。しかしながら彼の方法には数値計算上の原理的な問題点があり、2013 年に八田-植田らはそれを改良して、有限  $N_c$  での resummation の最初の数値計算を行った。しかし、その計算は interjet energy flow という電子陽電子消滅における1つの特定の観測量に対して行われたのみであり、他の観測量やハドロン衝突への応用はまだなされていなかった。本研究では電子陽電子消滅における Hemisphere jet mass distribution と呼ばれる観測量に注目する。これは2ジェットイベントにおいて、片方のジェットを含む半球内に含まれる粒子の不変質量がある決まった値以下になる確率分布であり、Dasgupta-Salam によって NGL を持つ観測

量として最初に考えられたものである。彼らはカラーの数が無限大という近似のもとでモンテカルロシミュレーションを用いて NGL の resummation を行った。今回の我々の研究の目的は、有限のカラー数でこの resummation を実行することである。

## 3. 研究の方法

有限カラー数での NGL の resummation は Weigert や八田-植田の先行研究により、次のようにすればよいことが分かっている: Hemisphere jet mass の確率分布は複雑な非線形方程式を満たすがそれはフォッカー-プランク方程式の形、つまり2階の微分演算子を含む虚時間シュレディンガー方程式の形に書き直すことができる。そして、フォッカー-プランク方程式はランジュバン方程式と等価であることが知られている。したがって、対応するランジュバン方程式、つまりランダムウォークの問題を解けばよいのであるが、今の場合にはランダムウォークを起こすのは質点ではなく  $SU(3)$  行列になる。これはジェットの伝播がアイコナル近似を用いてウィルソンラインで表されるからである。したがって、ランジュバン方程式は

$$U(+)=e^A U(-) e^B \quad (1)$$

のように、ウィルソンラインを表す行列  $U$  に対して各時刻で左右からランダムな  $SU(3)$  行列  $e^A, e^B$  が作用する形になる。ここで「時刻」は半球の不変質量の逆数の対数である。これにより、Hemisphere jet mass の確率分布  $P$  は

$$P = \langle \text{Tr}[U_R(-) U_L(+)] \rangle / N_c \quad (2)$$

で与えられる。ここで  $R, L$  は2つのジェットの方向であり、 $\langle \dots \rangle$  は  $A, B$  に含まれるランダムなノイズに関する平均を表す。

$P$  に現れる対数はコリニアールかつソフトなグルオンに起因するスダコフ対数と、ソフトなグルオンのみに起因する NGL があり、八田らが開発した数値計算手法を用いると両方の対数を同時に足しあげることが原理的には可能である。しかしながら interjet energy flow の場合と異なり、Hemisphere jet mass の場合には片方のジェットが観測領域に含まれるため、スダコフ対数が発散してしまう。(確率分布の対応する部分はゼロになってしまう。) スダコフ対数は理論上よくわかっている部分であるが、数値計算上は NGL と一緒に生成されるので、八田-植田の数値計算手法をそのまま適用すると  $P$  がゼロになってしまう。2つの対数をいかにして分離して、NGL のみの寄与を引き出せるかがこの研究の最大の難所であった。

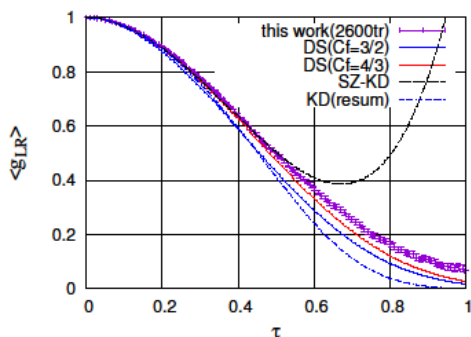
#### 4. 研究成果

ランダムウォークの発展方程式の中からスタコフ対数に相当する寄与をコンシステントに (NGL を正しく残しつつ) 取り除くためにあらゆる方法を試みてみたが、非常に難しいことが分かった。(1)式の指数関数の形で書かれた行列を2次まで展開すると、

$$e^A = 1 + A + A^2/2 + \dots$$

となり、2次の項にスタコフ対数の発散が含まれることが分かった。よってこの2次の項を無視して  $e^A = 1 + A$  と近似すれば一見うまくスタコフ対数を取り除けるように思える。しかしながら行列を展開して特定の項を引き算することにより、もはやその行列が群 SU(3) に属さなくなってしまう。そのため数値計算が非常に不安定になり、時間がある程度経過するとゼロになったり発散したりしてうまくいかなかった。

多くの試行錯誤の末、我々がたどり着いた解決法は驚くほど簡単なものだった。展開の2次の項を取り除いた後に残る1次の項は NGL に寄与すると思われていたが、実はある角度積分が恒等的にゼロになることが分かり、それに基づいて、その1次の項が NGL を出さないことを摂動のすべての次数で証明することができた。つまり、A の一部で、スタコフ対数に関係する部分を単純に削除するだけでよかったのである。こうして得られた改良されたランダムウォークを、基礎物理学研究所のスーパーコンピュータを用いてシミュレーションを行った。(2)式のランダムウォークに関する平均操作では、統計誤差を小さくするために、結局 2600 個のランダムウォークを生成した。また、時間のステップ刻み(1)式)や格子間隔に結果が依存しないようにさまざまな格子間隔で計算を行った。これらすべての計算には半年近くの時間を要し、また、投稿の際のレフェリーとのやりとりにも半年近くを費やした。最終的に得られた結果の図を下に載せる。



縦軸の  $g$  は  $P$  からスタコフ対数の効果を除いた、純粋に NGL の効果を表す量であり、これが求めたかったものである。グルオンの放出により不変質量が小さい確率は小さくなるため、 $g$  は右下がりの関数となる。紫の線が今回の我々の結果であり、青い実線が 2001 年に Dasgupta-Salam によってモンテカルロシミュレーションにより得られたカラーの数  $N_c$  が無限大の場合の結果である。今回の我々の計算によって、実に 14 年ぶりに本質的な発展があったわけである。ナイーブには有限  $N_c$  の効果は  $1/N_c^2$  程度、つまり  $N_c=3$  であるから 10 パーセント程度と見積もられるが、の大きいところでは 50 パーセントかそれ以上に  $g$  を押し上げる効果があることが分かった。したがって有限カラー数の効果は非常に重要である。これは八田・植田の先行研究では見られなかった現象であり、NGL に対する有限  $N_c$  の効果は観測量によって大きく違う可能性があることが示唆される。図の赤線は Dasgupta-Salam の結果に、予想される有限  $N_c$  の効果を手で入れたものであり、これはいくつかの論文で実際の断面積の評価などに使われていた。我々の結果は、この改良がの大きいところで不十分であったことを示している。また、黒い線は他のグループの先行研究によって得られた、有限次数までの摂動計算の結果である。Schwartz-Zhu らによって得られた 5 ループ、ラーゼ  $N_c$  の結果と、Khelifa-Kerfa, Delenda によって得られた 4 ループ、有限  $N_c$  の結果を組み合わせると  $g$  が 0.5 以下では我々の結果に非常に近いが、0.5 を超えると急速に増大し、理論上の上限  $g=1$  を超えてしまうという非物理的な結果となっている。その原因として考えられるのは NGL の摂動展開は非常に収束性が悪いということで、例えば 4 ループまでの結果(を少し改良したもの)をプロットすると図の青の点線のようにの大きいところで全然違う振る舞いをする。我々が行ったように、すべての次数で足しあげることが必須であることがわかる。

以上の結果は論文としてまとめられ、査読付き雑誌 Physics Letters B に掲載された。

今後はこの結果を、ハドロン衝突に応用していきたいと考えている。電子陽電子消滅の場合と異なり、始状態にハドロンがあるため、始状態からのグルオンの放射も考慮する必要がある。この場合には(2)式のように2つのウィルソンラインの積ではなく、グルオングルオン散乱の場合には最大 8 つのウィルソンラインの積が必要になり、数値計算が非常に大変になることが予想される。 $N_c$  が無限大の場合には八田らが以前に  $P$  を計算して LHC の ATLAS 実験が測定した jet veto 断面積との比較を行っているが、これに対する有限

$N_c$  の効果は興味深い問題である。また、LHC でのヒッグスの生成の際に、中心ラピディティ付近にある閾値以上の運動量を持ったジェットが現れない jet veto 断面積を計算し、その閾値依存性を調べることでヒッグスと他の粒子の結合定数に関する知見を得ることができる。この計算にも NGL が現れるが、有限  $N_c$  かつすべての次数で resummation を行うことまだできていない。我々の開発した手法はこれらの問題に適用可能であり、今後機会があれば取り組んでいきたいと考えている。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 1 件)

萩原慶一、八田佳孝、植田高寛、  
Hemisphere jet mass distribution at finite  $N_c$   
Physics Letters B756(2016)254-258 査読有  
DOI: [10.1016/j.physletb.2016.03.028](https://doi.org/10.1016/j.physletb.2016.03.028)

〔学会発表〕(計 1 件)

萩原慶一、八田佳孝、植田高寛、  
Hemisphere jet mass に対する nonglobal logarithm の再足し上げ  
日本物理学会第 71 回年次大会 東北学院大学

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

取得状況(計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

#### 6. 研究組織

(1)研究代表者

八田 佳孝 (Hatta, Yoshitaka)

