

SHORT THESIS FOR THE DEGREE OF DOCTOR OF PHILOSOPHY (PHD)
DOKTORI (PHD) ÉRTEKEZÉS TÉZISEI

Description of elementary particle collisions with high precision

Elemirész-ütközések nagy pontosságú leírása

Zoltán Tulipánt

Supervisor/Témavezető:

Dr. Gábor Somogyi



UNIVERSITY OF DEBRECEN
DOCTORAL SCHOOL IN PHYSICS

DEBRECENI EGYETEM
FIZIKAI TUDOMÁNYOK DOKTORI ISKOLÁJA

DEBRECEN, 2020

Prepared at

the Department of Experimental Physics of the University of Debrecen

Készült

a Debreceni Egyetem Kísérleti Fizika Tanszékén

Introduction

Precise theoretical predictions for energetic particle collisions provide an essential tool for testing the limits of the currently prevalent model of the subatomic world, the standard model of particle physics. The centerpiece of such tests is the Large Hadron Collider (LHC). Since LHC processes are initiated by nucleons, the strong interaction plays a crucial role in every event. Furthermore, at energies relevant at the LHC the strength of the strong interaction is nearly ten times greater than the strength of the electromagnetic interaction. As a consequence, the final state of every collision is dominantly composed of strongly interacting matter, thus a highly precise description of the strong interaction is necessary.

My work is focused on obtaining precise theoretical predictions to highly energetic particle collisions with the use of quantum chromodynamics (QCD), that is the quantum field theory of the strong interaction. The strength of the interaction is determined by the strong coupling α_S which depends on the collision energy. This behavior can be computed within the framework of QCD, however, to fully determine the numerical value of α_S , it must be measured at one fixed energy scale. This extraction of the coupling from measurement data is indispensable for obtaining theoretical predictions from QCD.

In order to describe particle collisions we compute QCD cross sections in perturbation theory as a series in α_S . The first term in the perturbative expansion with respect to the coupling (also called the fixed-order expansion) is called the Leading Order (LO) contribution. The subsequent terms are the first and second radiative corrections which we refer to as the Next-to-Leading Order (NLO) and Next-to-Next-to-Leading Order (NNLO) contributions respectively. These days in many situations, achieving satisfactory precision requires the calculation of the second radiative correction.

The fixed-order prediction, however, can break down in certain kinematical regions due to the presence of all-order effects associated with the emission of soft and/or collinear radiation. These effects typically manifest as a logarithmic enhancement for some values of the observable, spoiling the convergence of the fixed-order series in those regions. Predictions can still be obtained in such regions by another perturbative method, namely the resummation of logarithmic contributions. Such results are also computed on an order-by-order basis. The first term in this alternate perturbative expansion is called the Leading Logarithmic (LL) contribution and subsequent corrections are labelled Next-to-Leading Logarithmic (NLL), Next-to-Next-to-Leading Logarithmic (NNLL) and so on.

The most precise theoretical description of observables can be achieved by combining fixed-order and resummed results, thus producing predictions that are valid

in a wide kinematical range. Then, these results, supplemented with hadronization corrections, can be confronted with measurement data.

The strong coupling

The strong coupling α_S is one of the important parameters of the standard model. It is affected by renormalization which introduces a dependence of the coupling on energy scale referred to as the running of the coupling. One of the interesting characteristics of QCD is that the value of α_S decreases as the energy scale increases. This implies multiple important features. On one hand QCD possesses asymptotic freedom which means that at high energies the interaction weakens and quarks and gluons become the relevant degrees of freedom in high energy particle processes. On the other hand, as the strength of the interaction grows on low energy scales partons (i.e. quarks and gluons) become confined into hadrons. This is why only hadrons can be observed in particle experiments but a theory based on partons is capable of describing the outcome of highly energetic collisions.

The behavior of the strong coupling can be computed in perturbation theory, however, due to the reasons discussed above such a description is valid only at sufficiently high energies. Going towards low energies the perturbative running predicts that the coupling becomes infinite at some energy. This is the so-called the Landau pole which marks the point where the perturbative approach finally breaks down.

Although the scale dependence of the coupling can be computed within the frames of the standard model, it can be fully specified only if measured at some fixed energy scale. Typically, this scale is set to the mass of the Z -boson ($M_Z = 91.2$ GeV). The extraction of the precise value of $\alpha_S(M_Z)$ from measurement data is a significant task and relies on the precise theoretical description of measurements. As of 2019 the world average of the strong coupling is $\alpha_S(M_Z) = 0.1179 \pm 0.0010$ [1, 2].

Computing cross sections

The computation of accurate predictions in perturbative QCD is plagued by the appearance of divergent behavior in intermediate stages of the calculation. Even after renormalization, the components of the cross section contain singularities of infrared origin starting at NLO. The first radiative correction can be divided into real and virtual contributions. The real contribution contains an additional particle in the final state which integrated over the phase space gives rise to divergent behavior due to degenerate kinematical configurations. The virtual contribution also contains infrared

singularities in the form of loop integrals. This problem appears in every subsequent order of the perturbative series. However, according to the Kinoshita-Lee-Nauenberg theorem the infrared singularities of the loop integrals cancel the divergences of the phase space integrals order by order in the α_S expansion for observables that are inclusive enough.

Although each term in the series expansion is certainly finite for sufficiently inclusive observables, the computation of corrections is made progressively more difficult by the emergence of singularities in intermediate steps. At NNLO accuracy, the cross section has three major constituents. These are the double real, real-virtual and double virtual corrections. Each term in itself is divergent which makes direct numerical calculations unfeasible. In order to tackle this problem we reorganize the constituents into mathematically well-behaved finite terms using the so-called CoLoRFulNNLO (Completely local subtraction for fully differential predictions at NNLO) subtraction scheme [3–5]. This method has been fully worked out for processes that contain partons only in the final state and its capabilities were shown in the computation of the decay of Higgs boson into a pair of b-quarks [6], and three-jet production in electron-positron annihilation [5, 7].

The extension of the CoLoRFulNNLO scheme to hadron-initiated processes is an important step forward which, however, is a major effort as it requires the definition and integration of new counterterms.

Thesis points

The results described in my dissertation are organized into four points.

1. I have implemented the matching of NNLL resummed results and our NNLO fixed-order predictions of energy-energy correlation (EEC) for three-jet production in electron-positron annihilation in a `C++` program code. Previously, the observable was known only at NLO+NNLL precision in the literature thus I was able to provide the most accurate theoretical prediction of EEC [P1]. Furthermore, I assessed the impact of the NNLO correction on the extraction of $\alpha_S(M_Z)$ from measurement data by performing several fits of the NNLO+NNLL accurate prediction to measurement data using $\alpha_S(M_Z)$ as a fit parameter. These fits were based on the χ^2 method and I have incorporated the MINUIT2 software in my program to find the optimal value of $\alpha_S(M_Z)$. Although the effect of including the NNLO term on the central value is moderate, the obtained uncertainty is significantly decreased compared to the NLO+NNLL fit. Thus the NNLO correction is necessary for a precise determination of $\alpha_S(M_Z)$ based on this observable. I have also observed that the analytic hadronization model

used in this analysis is insufficient for completely describing non-perturbative contributions thus a better alternative is needed for a more detailed analysis. I have presented these results at the QCD at LHC 2017 conference.

2. Building on my previous results I performed a more extensive analysis of EEC which incorporated the use of modern Monte Carlo event generators for estimating non-perturbative effects [P2]. For the fits we used my original C++ framework. The obtained value of $\alpha_S(M_Z)$ was in agreement with the 2017 world average of $\alpha_S(M_Z)_{PDG2017} = 0.1181 \pm 0.0011$ that was available at the time of this work. The final value of the coupling we obtained is

$$\alpha_S(M_Z) = 0.11750 \pm 0.00287.$$

This is one of the most precise determinations of $\alpha_S(M_Z)$ so far among those based on the analysis of event shapes in electron-positron using Monte Carlo hadronization models. The significance of this achievement is underlined by the fact that it was included in the most recent world average of $\alpha_S(M_Z)_{PDG2019} = 0.1179 \pm 0.0010$ [1, 2] along with the result discussed in the following point. I have presented this result at the Loops and Legs in Quantum Field Theory 2018 conference [8].

3. Using the C++ framework developed for the extraction of $\alpha_S(M_Z)$ from measurement data based on EEC we performed a similar analysis using jet rates [P3]. The determination of the value of the strong coupling was based on two- and three-jet rates measured in electron-positron annihilation. The two-jet rate was computed at N³LO+NNLL accuracy while the three-jet rate was calculated at NNLO accuracy. The obtained value of

$$\alpha_S(M_Z) = 0.11881 \pm 0.00131$$

is also in agreement with both the 2017 world average and its updated value. Furthermore, it is the most accurate measurement of $\alpha_S(M_Z)$ so far from an analysis of jet rates in electron-positron collisions. This result along with the one based on EEC was also included in the calculation of the current world average which I repeat here: $\alpha_S(M_Z)_{PDG2019} = 0.1179 \pm 0.0010$.

4. I have also worked on developing the CoLoRFulNNLO subtraction scheme with the aim of extending its applicability to processes with hadronic initial states. We have constructed all the necessary subtraction terms with a consistent parametrization required to regularize the double real emission in hadron-initiated processes. We have performed a number of checks to verify that the regularized double real contribution of the cross section is finite [P4]. The analytic integration of these subtraction terms is an ongoing effort which once done will enable us to produce highly accurate physical predictions for LHC observables.

Bevezetés

A nagy energiájú részecskeütközések pontos elméleti leírása egy lényeges eszköz a szubatomi világ jelenleg uralkodó modelljének, a részecskefizika standard modelljének ellenőrzéséhez. E vizsgálatok fő kelléke a Nagy Hadronütköztető (Large Hadron Collider, röviden LHC). Tekintve, hogy az LHC nukleonokat ütköztet, az erős kölcsönhatás lényeges szerepet játszik minden eseménynél. Továbbá, az LHC-nál releváns energiákon az erős kölcsönhatás közel tízszer erősebb az elektromágneses kölcsönhatásnál. Mindezek következtében az összes ütközés végállapotát nagyrészt erősen kölcsönható anyag alkotja, ennél fogva az erős kölcsönhatás felettébb pontos leírása nélkülözhetetlen.

Munkám a nagyenergiás részecskeütközésekre vonatkozó, kvantum színdinamikával (quantum chromodynamics, röviden QCD), azaz az erős kölcsönhatás kvantumtérelméletével történő pontos elméleti jóslatok előállítására összpontosít. A kölcsönhatás erősségét az α_S erős csatolás határozza meg, amely függ az ütközési energiától. Ez a viselkedés kiszámolható a QCD keretein belül, azonban az α_S számszerű értékének meghatározásához a csatolást meg kell mérni egy rögzített energiaskálán. A csatolás mérési adatokból történő kinyerése nélkülözhetetlen ahhoz, hogy a QCD-vel elméleti jóslatokat állíthassunk elő.

Részecskeütközések leírására a QCD hatáskeresztmetszeteket perturbációs számítást használva α_S szerinti sorként számoljuk ki. A csatolás szerinti perturbatív sor (azaz a rögzített rendű kifejtés) első tagja a vezető rendű (Leading Order, röviden LO) járulék. Az ezt követő két tag az első és második sugárzási korrekció, amelyeket vezető renden túli első (Next-to-Leading Order, röviden NLO) és második (Next-to-Next-to-Leading Order, röviden NNLO) járuléknak nevezünk. Napjainkban a kielégítő pontosság eléréséhez sok esetben ki kell számolnunk a második sugárzási korrekciót is.

Ez a rögzített rendű jóslat azonban bizonyos kinematikai tartományokban elromlik a minden rendben jelen lévő, lágy és/vagy kollineáris sugárzáshoz kapcsolódó hatások miatt. Ezek a hatások jellemzően logaritmikus növekményként nyilvánulnak meg a mérhető mennyiség bizonyos értékeinél, ezzel elrontva a rögzített rendű kifejtés konvergenciáját a szóban forgó tartományokban. Ezekben a tartományokban továbbra is adhatunk jóslatot a hatáskeresztmetszetre egy másik perturbatív módszert, a logaritmikus járulékok felösszegzését használva. Ezeket az eredményeket szintén rendről rendre határozzuk meg. Ennek az alternatív perturbatív kifejtésnek az első elemét vezető logaritmikus (Leading Logarithmic, röviden LL) járuléknak nevezzük, a további tagokat pedig vezető logaritmikus renden túli első (Next-to-Leading Logarithmic, röviden NLL) és második (Next-to-Next-to-Leading Logarithmic, röviden NNLL) járuléknak hívjuk.

A mérhető mennyiségek legpontosabb elméleti leírása a rögzített rendű és felösszegezett eredmények kombinálásával érhető el, amely széles kinematikai tartományban érvényes jóslatot szolgáltat. Ezt követően a kapott eredményeket, hadronizációs korrekciók modellezésével kiegészítve, össze lehet hasonlítani a mérési adatokkal.

Az erős csatolás

Az α_S erős csatolás a standard modell egyik legfontosabb paramétere. Renormálás következtében a csatolás energiafüggővé válik, amire a csatolás futásaként hivatkozunk. A QCD egy érdekes jellegzetessége az α_S értékének az energiaskála növelésével történő csökkenése. Ez a viselkedés több lényeges következménnyel is jár. Egyrészt azzal, hogy a QCD egy aszimptotikusan szabad elmélet, tehát nagy energián a kölcsönhatás gyenge és a kvarkok és gluonok válnak a nagyenergiás részecske-ütközések szabadsági fokaiává. Másrészt, ahogy alacsony energiák felé haladva nő a kölcsönhatás erőssége, a partonok (azaz a kvarkok és gluonok) hadronokba záródnak be. Emiatt részecskefizikai kísérletekben csak hadronokat lehet észlelni, azonban egy partonokra épülő elmélet képes leírni a nagyenergiás ütközések kimenetelét.

Az erős csatolás viselkedése meghatározható perturbációszámítással, viszont a fent tárgyalt okokból kifolyólag egy ilyen leírás csak kellően nagy energián érvényes. Alacsony energiák felé haladva a perturbatív futás azt jósolja, hogy a csatolás egy bizonyos energián végtelen nagygyá válik. Ezt nevezzük Landau-pólusnak, amely azt az energiát jelöli, amin a perturbatív megközelítés teljesen elromlik.

Bár a csatolás skálafüggése kiszámolható a standard modell keretein belül, a teljes meghatározásához meg kell mérni egy rögzített energiaskálán. Ezt a skálát jellemzően a Z -bozon tömegéhez állítják ($M_Z = 91.2$ GeV). Az $\alpha_S(M_Z)$ pontos értékének mérési adatokból történő kinyerése lényeges feladat, amely a mérések pontos elméleti leírására támaszkodik. 2019-ben az erős csatolás világátlagos $\alpha_S(M_Z) = 0.1179 \pm 0.0010$ [1, 2].

Hatáskeresztmetszetek számítása

Perturbatív QCD-ben az elméleti jóslatok pontos számítását a köztes lépésekben megjelenő divergens viselkedés tovább nehezíti. A hatáskeresztmetszet elemei NLO-tól kezdve, még a renormálás elvégzését követően is, infravörös eredetű szingularitásokat tartalmaznak. Az NLO korrekció felosztható valós és virtuális járuléokra. A valós járulék egy további végállapotú részecskét tartalmaz. Ennek a fázistér feletti integrálja az elfajult kinematikai konfigurációk következtében divergens viselkedést

eredményez. A virtuális járulékok szintént tartalmaz infravörös szingularitásokat hurokintegrálok alakjában. Ez a probléma megjelenik a perturbatív sor minden további rendjében, azonban a Kinoshita-Lee-Nauenberg tétel értelmében a hurokintegrálok infravörös szingularitásai az α_S szerinti sorfejtésben rendről rendre kompenzálják a fázistérintegrálok divergens viselkedését olyan mennyiségek esetén, amelyek kellően inkluzívak.

Bár a sorfejtés egyes tagjai bizonyosan végesek kellően inkluzív mennyiségek esetén, a korrekciók számítását a köztes lépésekben feltűnő szingularitások fokozatosan nehezebbé teszik. NNLO pontosságnál a hatáskeresztmetszet három nagy alkotóelemre bontható. Ezek a duplán valós, valós-virtuális és duplán virtuális korrekciók. Az egyes tagok külön-külön divergenssek, ami a közvetlen numerikus számolásokat kivitelezhetetlenné teszi. A probléma kezelése céljából ezeket az alkotóelemeket az úgynevezett CoLoRFulNNLO levonási séma [3–5] segítségével átrendezzük matematikailag jól viselkedő, véges tagokká. Ez a módszer korábban teljesen ki lett dolgozva olyan folyamatokra, amelyek csak a végállapotban tartalmazznak partonokat, továbbá a séma hatékonysága meg lett mutatva a Higgs-bozon b-kvarkokra történő bomlásának [6] és az elektron-pozitron ütközésben történő három hadronzáró keletkezésének [5, 7] kiszámolásával.

A CoLoRFulNNLO séma hadronos kezdeti állapotú folyamatokra történő kiterjesztése egy lényeges előrelépés, azonban nagy erőfeszítést igényel, ugyanis új ellentagokat kell definiálni és integrálni.

Tézispontok

A disszertációmban tárgyalt eredményeket négy tézispontra osztottam fel.

1. Megvalósítottam az elektron-pozitron ütközésben történő három jet keletkezés energia-energia korrelációjára (EEC) vonatkozó NNLL pontosságú felösszegezt eredmények és NNLO pontosságú rögzített rendű jóslataink kombinálását C++ alapú programomban. Korábban ez a mennyiség a szakirodalomban csak NLO+NNLL pontossággal volt ismert, tehát az EEC-re az eddigi legpontosabb jóslatot adtam meg [P1]. Továbbá felmértem az NNLO korrekció hatását az $\alpha_S(M_Z)$ mérési adatokból történő kinyerésére azáltal, hogy az NNLO+NNLL pontosságú jóslatot mérési adatokhoz illesztettem az $\alpha_S(M_Z)$ -t illesztési paraméterként használva. Ezek az illesztések a χ^2 módszerre épültek és végrehajtásukhoz beépítettem a MINUIT2 szoftvert a programomba, hogy megtaláljam az $\alpha_S(M_Z)$ optimális értékét. Ámbár az NNLO tag figyelembevételének hatása a középértékre mérsékelte, a kapott bizonytalanság lényegesen csökkent az

NLO+NNLL pontosságú illesztés esetéhez képest. Ennélfogva az NNLO korrekció szükségesnek bizonyult az $\alpha_S(M_Z)$ EEC-re épülő pontos meghatározásához. Továbbá észrevettem, hogy az analízisben használt analitikus hadronizációs modell alkalmatlan a nemperturbatív járulékok teljes körű leírására, így egy részletes analízishez jobb alternatívára van szükség. Eredményeimet bemutattam a QCD at LHC 2017 konferencián.

2. Korábbi eredményeimre építve egy szélesebb körű analízist végeztem az EEC-n, amely a nemperturbatív hatások becslésére modern Monte-Carlo eseménygenerátorok használatát foglalta magába [P2]. Az illesztésekhez a korábban kifejlesztett C++ alapú keretrendszeremet használtuk. Az $\alpha_S(M_Z)$ -re kapott érték egyezést mutatott az akkoriban elérhető 2017-es, $\alpha_S(M_Z)_{PDG2017} = 0.1181 \pm 0.0011$ világszámmal. Az általunk a csatolásra kapott érték

$$\alpha_S(M_Z) = 0.11750 \pm 0.00287,$$

amely jelenleg a legpontosabb meghatározás az elektron-pozitron ütközésben mérhető eseményalakokon alapuló, Monte-Carlo hadronizációs modellezést alkalmazó mérések között. Az eredmény jelentőségét hangsúlyozza, hogy a következő pontban tárgyalt eredménnyel együtt bekerült a legutóbbi $\alpha_S(M_Z)_{PDG2019} = 0.1179 \pm 0.0010$ [1, 2] világszámmal. Eredményeimet bemutattam a Loops and Legs in Quantum Field Theory 2018 konferencián [8].

3. Az $\alpha_S(M_Z)$ EEC-n alapuló, mérési adatokból történő kinyerésére fejlesztett C++ keretrendszert felhasználva elvégeztünk egy hasonló, jet rátákra épülő vizsgálatot [P3]. Az erős csatolás értékének meghatározása elektron-pozitron ütközésben mért két és három jet rátán alapult. A két jet rátát N³LO+NNLL pontossággal, míg a három jet rátát NNLO+NNLL pontossággal számoltuk ki. A csatolásra kapott

$$\alpha_S(M_Z) = 0.11881 \pm 0.00131$$

érték szintén összhangban áll mind a 2017-es, mind az új világszámmal. Továbbá az analízisiünk az erős csatolás eddigi legpontosabb, jet rátákon alapuló meghatározása. Ez a munka és az EEC-re épülő eredmény részét képezte az aktuális $\alpha_S(M_Z)_{PDG2019} = 0.1179 \pm 0.0010$ világszám meghatározásának.

4. A továbbiakban a CoLoRFulNNLO levonási séma fejlesztésével foglalkoztam, aminek a célja a séma alkalmazhatóságának kiterjesztése hadronos kezdeti állapotú folyamatokra. Következetes paraméterezést használva, felépítettük a hadronos kezdeti állapotú folyamatok duplán valós járulékanak regularizációjához szükséges összes levonási tagot, majd számos ellenőrzést hajtottunk végre, hogy igazoljuk a hatáskeresztmetszet duplán valós járulékanak végességét [P4]. A levonási tagok analitikus integrálása egy folyamatban lévő munka, amely lehetővé fogja tenni az LHC-nál mérhető mennyiségek pontos előrejelzését.

Publications serving as the basis of this dissertation

Az értekezés alapjául szolgáló közlemények

- [P1] Z. Tulipánt, A. Kardos, G. Somogyi, „Energy–energy correlation in electron–positron annihilation at NNLL + NNLO accuracy,” *Eur. Phys. J.*, vol. C77, no. 11, p. 749, 2017.
- [P2] A. Kardos, S. Kluth, G. Somogyi, Z. Tulipánt, A. Verbytskyi, „Precise determination of $\alpha_S(M_Z)$ from a global fit of energy–energy correlation to NNLO+NNLL predictions,” *Eur. Phys. J.*, vol. C78, no. 6, p. 498, 2018.
- [P3] A. Verbytskyi, A. Banfi, A. Kardos, P. F. Monni, S. Kluth, G. Somogyi, Z. Szőr, Z. Trócsányi, Z. Tulipánt, G. Zanderighi, ”High precision determination of α_S from a global fit of jet rates”, *JHEP*, vol. 08, p. 129, 2019.
- [P4] A. Kardos, G. Bevilacqua, G. Somogyi, Z. Trócsányi, Z. Tulipánt, ”CoLoRFulNNLO for LHC processes”, *PoS*, vol. LL2018, p. 74, 2018.

Further references

További hivatkozások

- [1] M. Tanabashi et. al., Particle Data Group, "Review of Particle Physics and 2019 update", *Phys. Rev.*, vol. D98, no. 3, p. 030001, 2018.
- [2] P.A. Zyla et. al., Particle Data Group, "Review of Particle Physics", *Prog. Theor. Exp. Phys.* 2020 083C01, 2020.
- [3] G. Somogyi, Z. Trócsányi, V. Del Duca, "A subtraction scheme for computing QCD jet cross sections at NNLO: Regularization of doubly-real emissions", *JHEP*, vol. 01, p. 070, 2007.
- [4] G. Somogyi, Z. Trócsányi, "A subtraction scheme for computing QCD jet cross sections at NNLO: Regularization of real-virtual emission", *JHEP*, vol. 01, p. 052, 2007.
- [5] V. Del Duca, C. Duhr, A. Kardos, G. Somogyi, Z. Szőr, Z. Trócsányi, Z. Tulipánt, "Jet production in the CoLoRFulNNLO method: event shapes in electron-positron collisions", *Phys. Rev.*, vol. D94, no. 7, p. 074019, 2016.
- [6] V. Del Duca, C. Duhr, G. Somogyi, F. Tramontano, Z. Trócsányi, "Higgs boson decay into b-quarks at NNLO accuracy", *JHEP*, vol. 04, p. 036, 2015.
- [7] V. Del Duca, C. Duhr, A. Kardos, G. Somogyi, Z. Trócsányi, "Three-jet production in electron-positron collisions at next-to-next-to-leading order accuracy", *Phys. Rev. Lett.*, vol. 117, no.15, p. 152004, 2016.
- [8] Z. Tulipánt, A. Kardos, S. Kluth, G. Somogyi, A. Verbytskyi, "Precise determination of the strong coupling from energy-energy correlation", *PoS*, vol. LL2018, p. 030, 2018.



Registry number: DEENK/76/2020.PL
Subject: PhD Publikációs Lista

Candidate: Zoltán Tulipánt
Neptun ID: N0AQBB
Doctoral School: Doctoral School of Physics
MTMT ID: 10063363

List of publications related to the dissertation

Foreign language scientific articles in international journals (3)

1. Verbytskyi, A., Banfi, A., Kardos, Á., Monni, P. F., Kluth, S., Somogyi, G., Szőr, Z., Trócsányi, Z., **Tulipánt, Z.**, Zanderighi, G.: High precision determination of α_s from a global fit of jet rates.
J. High Energy Phys. 8, 1-31, 2019. ISSN: 1126-6708.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1007/JHEP08\(2019\)129](http://dx.doi.org/10.1007/JHEP08(2019)129)
IF: 5.833 (2018)
2. Kardos, Á., Kluth, S., Somogyi, G., **Tulipánt, Z.**, Verbytskyi, A.: Precise determination of $\alpha_s(M_Z)$ from a global fit of energy-energy correlation to NNLO+NNLL predictions.
Eur. Phys. J. C. 78 (6), 1-15, 2018. ISSN: 1434-6044.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1140/epjc/s10052-018-5963-1>
IF: 4.843
3. **Tulipánt, Z.**, Kardos, Á., Somogyi, G.: Energy-energy correlation in electron-positron annihilation at NNLL + NNLO accuracy.
Eur. Phys. J. C. 77 (11), 1-14, 2017. ISSN: 1434-6044.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1140/epjc/s10052-017-5320-9>
IF: 5.172

Foreign language conference proceedings (1)

4. Kardos, Á., Bevilacqua, G., Somogyi, G., Trócsányi, Z., **Tulipánt, Z.**: CoLoRFuNNLO for LHC processes.
Proc. Sci. 303, 1-8, 2018. EISSN: 1824-8039.
DOI: <https://doi.org/10.22323/1.303.0074>





List of other publications

Foreign language scientific articles in international journals (1)

5. Del Duca, V., Duhr, C., Kardos, Á., Somogyi, G., Szőr, Z., Trócsányi, Z., **Tulipánt, Z.**: Jet production in the CoLoRFuNNLO method: Event shapes in electron-positron collisions. *Phys. Rev. D.* 94 (7), 074019, 2016. ISSN: 2470-0010.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevD.94.074019>
IF: 4.568

Foreign language conference proceedings (5)

6. Somogyi, G., Kardos, Á., Kluth, S., Trócsányi, Z., **Tulipánt, Z.**, Verbytskyi, A.: Old and new observables for α_s from e^+e^- to hadrons.
Proc. Sci. 365, 1-8, 2019. EISSN: 1824-8039.
DOI: <https://doi.org/10.22323/1.365.0002>
7. Verbytskyi, A., Banfi, A., Kardos, Á., Kluth, S., Monni, P. F., Somogyi, G., Szőr, Z., Trócsányi, Z., **Tulipánt, Z.**, Zanderighi, G.: α_s from energy-energy correlations and jet rates in e^+e^- collisions.
Proc. Sci. 365, 1-8, 2019. EISSN: 1824-8039.
DOI: <https://doi.org/10.22323/1.365.0003>
8. Kardos, Á., Somogyi, G., **Tulipánt, Z.**: NNLO QCD calculations with CoLoRFuNNLO.
Proc. Sci. 290, 1-11, 2018. EISSN: 1824-8039.
DOI: <https://doi.org/10.22323/1.290.0018>
9. **Tulipánt, Z.**, Kardos, Á., Kluth, S., Somogyi, G., Verbytskyi, A.: Precise determination of the strong coupling from energy-energy correlation.
Proc. Sci. 303, 1-8, 2018. EISSN: 1824-8039.
DOI: <https://doi.org/10.22323/1.303.0030>





10. Verbytskyi, A., Banfi, A., Kardos, Á., Monni, P. F., Kluth, S., Somogyi, G., Szőr, Z., Trócsányi, Z.,
Tulipánt, Z., Zanderighi, G.: Precise determination of $\alpha_S(M_Z)$ from global fits of e+e- data to
NNLO+NNLL predictions.
Nucl. Part. Phys. Proc. 300-302, 87-92, 2018. ISSN: 2405-6014.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.nuclphysbps.2018.12.016>

Total IF of journals (all publications): 20,416

Total IF of journals (publications related to the dissertation): 15,848

The Candidate's publication data submitted to the iDEa Tudóstér have been validated by DEENK on
the basis of the Journal Citation Report (Impact Factor) database.

09 March, 2020





Nyilvántartási szám: DEENK/76/2020.PL
Tárgy: PhD Publikációs Lista

Jelölt: Tulipánt Zoltán
Neptun kód: N0AQBB
Doktori Iskola: Fizikai Tudományok Doktori Iskola
MTMT azonosító: 10063363

A PhD értekezés alapjául szolgáló közlemények

Idegen nyelvű tudományos közlemények külföldi folyóiratban (3)

1. Verbitskyi, A., Banfi, A., Kardos, Á., Monni, P. F., Kluth, S., Somogyi, G., Szőr, Z., Trócsányi, Z., **Tulipánt, Z.**, Zanderighi, G.: High precision determination of α_s from a global fit of jet rates.
J. High Energy Phys. 8, 1-31, 2019. ISSN: 1126-6708.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1007/JHEP08\(2019\)129](http://dx.doi.org/10.1007/JHEP08(2019)129)
IF: 5.833 (2018)
2. Kardos, Á., Kluth, S., Somogyi, G., **Tulipánt, Z.**, Verbitskyi, A.: Precise determination of $\alpha_s(M_Z)$ from a global fit of energy-energy correlation to NNLO+NNLL predictions.
Eur. Phys. J. C. 78 (6), 1-15, 2018. ISSN: 1434-6044.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1140/epjc/s10052-018-5963-1>
IF: 4.843
3. **Tulipánt, Z.**, Kardos, Á., Somogyi, G.: Energy-energy correlation in electron-positron annihilation at NNLL + NNLO accuracy.
Eur. Phys. J. C. 77 (11), 1-14, 2017. ISSN: 1434-6044.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1140/epjc/s10052-017-5320-9>
IF: 5.172

Idegen nyelvű konferencia közlemények (1)

4. Kardos, Á., Bevilacqua, G., Somogyi, G., Trócsányi, Z., **Tulipánt, Z.**: CoLoRFuNNLO for LHC processes.
Proc. Sci. 303, 1-8, 2018. EISSN: 1824-8039.
DOI: <https://doi.org/10.22323/1.303.0074>





További közlemények

Idegen nyelvű tudományos közlemények külföldi folyóiratban (1)

5. Del Duca, V., Duhr, C., Kardos, Á., Somogyi, G., Szőr, Z., Trócsányi, Z., **Tulipánt, Z.**: Jet production in the CoLoRFuNNLO method: Event shapes in electron-positron collisions. *Phys. Rev. D.* 94 (7), 074019, 2016. ISSN: 2470-0010.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevD.94.074019>
IF: 4.568

Idegen nyelvű konferencia közlemények (5)

6. Somogyi, G., Kardos, Á., Kluth, S., Trócsányi, Z., **Tulipánt, Z.**, Verbytskyi, A.: Old and new observables for α_s from e^+e^- to hadrons. *Proc. Sci.* 365, 1-8, 2019. EISSN: 1824-8039.
DOI: <https://doi.org/10.22323/1.365.0002>
7. Verbytskyi, A., Banfi, A., Kardos, Á., Kluth, S., Monni, P. F., Somogyi, G., Szőr, Z., Trócsányi, Z., **Tulipánt, Z.**, Zanderighi, G.: α_s from energy-energy correlations and jet rates in e^+e^- collisions. *Proc. Sci.* 365, 1-8, 2019. EISSN: 1824-8039.
DOI: <https://doi.org/10.22323/1.365.0003>
8. Kardos, Á., Somogyi, G., **Tulipánt, Z.**: NNLO QCD calculations with CoLoRFuNNLO. *Proc. Sci.* 290, 1-11, 2018. EISSN: 1824-8039.
DOI: <https://doi.org/10.22323/1.290.0018>
9. **Tulipánt, Z.**, Kardos, Á., Kluth, S., Somogyi, G., Verbytskyi, A.: Precise determination of the strong coupling from energy-energy correlation. *Proc. Sci.* 303, 1-8, 2018. EISSN: 1824-8039.
DOI: <https://doi.org/10.22323/1.303.0030>





10. Verbytskyi, A., Banfi, A., Kardos, Á., Monni, P. F., Kluth, S., Somogyi, G., Szőr, Z., Trócsányi, Z.,
Tulipánt, Z., Zanderighi, G.: Precise determination of $\alpha_S(M_Z)$ from global fits of e^+e^- data to
NNLO+NNLL predictions.

Nucl. Part. Phys. Proc. 300-302, 87-92, 2018. ISSN: 2405-6014.

DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.nuclphysbps.2018.12.016>

A közlő folyóiratok összesített impakt faktora: 20,416

**A közlő folyóiratok összesített impakt faktora (az értekezés alapjául szolgáló közleményekre):
15,848**

A DEENK a Jelölt által az iDEa Tudóstérbe feltöltött adatok bibliográfiai és tudományometriai
ellenőrzését a tudományos adatbázisok és a Journal Citation Reports Impact Factor lista alapján
elvégezte.

Debrecen, 2020.03.09.

