

Abstract of PhD Thesis
Egyetemi doktori (PhD) értekezés tézisei

Higher-order radiative corrections for jet production in QCD perturbation theory

Magasabb rendű sugárzási korrekciók jet keletkezéshez a QCD perturbációs számítás elméletében

Zoltán Szőr

Supervisor/Témavezető
Prof. Dr. Zoltán Trócsányi



University of Debrecen
PhD School in Physics
Debreceni Egyetem
Fizikai Tudományok Doktori Iskolája

Debrecen, 2017

Prepared at

the Department of Experimental Physics of the University of Debrecen
and in the Particle Physics Research Group of the Hungarian Academy
of Sciences.

Készült

a Debreceni Egyetem Kísérleti Fizika Tanszékén és
a Magyar Tudományos Akadémia Részecskefizikai Kutatócsoportjában.

1 Introduction

Quantum chromodynamics (QCD) is the quantum field theory of the strong interaction. The theory has a local non-Abelian $SU(N_c)$ gauge symmetry with $N_c = 3$ colors. The quarks, the fermionic particles of the theory interact with colored gauge bosons, named gluons. Due to the non-Abelian nature of QCD gluons interact with themselves in contrast with photons, the gauge bosons of electromagnetic interaction. As a consequence the gluon self-interaction in the theory leads to asymptotic freedom: as we go to higher and higher energies the coupling of the theory α_S becomes smaller and smaller.

Unfortunately in nature quarks and gluons (collectively called partons) cannot be observed directly, they are bound in composite particles named hadrons. Furthermore in particle collision detectors measure energetic collections of hadrons traveling nearly the same direction. This collimated group of hadrons is what we call jets.

The production of hadronic jets is a common feature of collider experiments, and they are important for various reasons: they can be used to measure the fundamental parameters of the standard model and test the model itself, they can signal new physics and therefore their production rate predicted by the standard model serves as an important background estimate for new physics.

In high energy physics measurable predictions are made in perturbation theory. Based on the asymptotic freedom of QCD, cross sections can be calculated as a series of α_S . Due to the rather large value of the strong coupling, for example $\alpha_S(91.2 \text{ GeV}) = 0.118$, higher order corrections are necessary to quantitatively describe processes involving jets. Nevertheless the computation of higher order radiative correction is hampered by the presence of ultraviolet and infrared singularities. Ultraviolet divergences can be removed by renormalization systematically in every order of perturbation theory renormalizing only a finite set of parameters. According the Kinoshita-Lee-Nauenberg theorem, QCD cross sections are finite for any infrared safe observables, which are insensitive to the inclusion of soft and collinear radiation. However separate pieces at intermediate steps of calculations still have infrared divergences and there is no general systematic method of removing them in every order of perturbation theory similarly to renormalization. Presently the calculation of next-to-leading order corrections in QCD is possible using automated computer programs which provide high flexibility and wide range of processes.

The current state of the art in perturbation theory is the calculation of next-to-next-to-leading order (NNLO) corrections, for which various solutions have been proposed during the past 15 years, but there are no automated tools yet similarly to the case of NLO calculations.

One possible solution is the so-called CoLoRFulNNLO subtraction method. In CoLoRFulNNLO the infrared divergences of squared matrix elements are regularized by local subtraction terms, that are based on the universal infrared factorization properties of QCD matrix elements. The subtraction terms are constructed such that they match the singularity structure of the squared matrix elements in d -dimensions in the infrared limits. Presently the CoLoRFulNNLO subtraction scheme is worked out completely for processes involving colored partons in the final state only, and it was used to obtain Higgs decay into massless $b\bar{b}$ pair and three-jet production in e^+e^- annihilation at NNLO accuracy.

2 Motivation

The production of three jets in electron-positron collisions provides a clean laboratory environment to test QCD, because colored particles are present in the final state only, and at leading order of perturbation theory the three-jet production rate is proportional to α_S . Event shape variables and jet rates in three-jet final states are still one of the most precise tools to measure the fundamental coupling α_S of QCD. Indeed they have been used extensively in the analysis of LEP and LEP2 data to extract the value of α_S . The precision of the determination of α_S depends on the accuracy of both the experimental measurement and the theoretical prediction. The enhanced analysis tools and precise data of experiments require accurate theoretical input as well. Hence the calculation of numerically precise higher order corrections in perturbation theory is necessary. The CoLoRFulNNLO subtraction scheme is capable to calculate differential cross sections at NNLO accuracy, as mentioned above.

However in order to compute differential cross section at NNLO accuracy with the CoLoRFulNNLO method, apart of many other important tasks, the subtracted counterterms has to be integrated over the factorized unresolved phase spaces. The integration of the pole parts of the subtraction terms was performed analytically, however the finite part, due to its complexity, is hard to obtain in fully analytical form. Hence the corresponding integrals has to be calculated numer-

ically. This job includes the evaluation of involved integrals in large numbers with numerical methods, which requires the automation of the whole process.

Besides event shape variables the measurement of α_S is often based on the analysis of three-jet rate. In perturbation theory in the first approximation jets are modeled by partons, each final state jet is represented by a parton carrying the total momentum of its corresponding jet. As we include higher-order corrections we address a couple of more partons to the jets, but the number of partons is still at $\mathcal{O}(1)$. However there are kinematic regions where this approximation fails, because dominant contributions come from soft-collinear emissions. These contributions can be included with resummation of logarithmic terms in all order of perturbation theory or parton shower. The matching of parton shower with NNLO calculations has not yet been understood, but the resummation of next-to-double logarithms is available for jet rates since many years.

Although NNLO accurate predictions matched with next-to-double logarithmic (NDL) accurate resummation for the $k_\perp$ algorithm were used at various energy scales in α_S measurements, the $\sqrt{Q^2} = 91.2$ GeV center-of-mass energy was not included, and no matched predictions has been published yet for the three-jet rate at this scale. Besides there are also three different variates for the three-jet rate resummation with the $k_\perp$ algorithm, which were not compared before, and it would require clarification. Also the resummation for general inclusive $k_\perp$ algorithm at NDL accuracy is available in the literature and can be exploited to make matched predictions for this algorithm for the first time.

Finally it is a natural step to extend the CoLoRFulNNLO subtraction scheme for hadron initiated processes, since currently large amount of data is produced in proton-proton collisions at the LHC collider.

3 Results

My results in calculation of NNLO cross sections in QCD using the CoLoRFulNNLO subtraction scheme can be summarized in the following points:

1. I developed and implemented a `python` and `Mathematica` framework based on the program `SecDec` to manage calculations of integrated subtraction terms numerically in large numbers in a fully automated way. I used my automated tools to compute master integrals numerically required for the $\mathbf{I}_1^{(0)}$, $\mathbf{I}_{1,1}^{(0,0)}$, $\mathbf{I}_1^{(1)}$ and $\mathbf{I}_2^{(0)}$ color insertion operators appearing in the CoLoRFulNNLO method. Using the results of the master integrals I computed these operators for the three-jet kinematics and fit the results using logarithmic and polynomial functions. I implemented the resulting functions into the `MCCSM` code. Finally we applied our subtraction method to calculate event shape observables for three-jet production in e^+e^- annihilation [R1].
2. I calculated the three-jet rate in e^+e^- collision at NNLO accuracy using the $k_\perp$ jet clustering algorithm at $\sqrt{Q^2} = 91.2$ GeV center-of-mass energy [R2, R3] and matched it with resummation. I matched my fixed order results with resummation at NDL accuracy available in the literature using the R -matching scheme. I compared three different resummations, all three formally NDL accurate but different in subleading terms beyond NDL accuracy therefore different numerically. I showed that even incomplete subleading logarithms have an important effect in matched results. I also showed that although including the cusp anomalous dimension (K -term) into the resummation improves the matched physical prediction at NLO+NDL accuracy, this effect comes from an unphysical numerical behavior. It is also confirmed by matched predictions using NNLO fixed-order results. The predictions at NNLO+NDL accuracy provides better description of the data measured by the OPAL experiment compared to pure fixed-order prediction, however inclusion of further resummed logarithmic terms would be still necessary, and using the log R -matching scheme would probably also improve the results.
3. I also calculated the three-jet rate at NNLO accuracy using two different versions of the anti- $k_\perp$ algorithm adapted for e^+e^- colliders [R3] and also matched it with resummation. I calculated

the fully resummed prediction for the general inclusive $k_{\perp}$ algorithm using two different energy cuts and I made matched predictions for three-jet rate for the first time using these algorithms. I calculated and provided an approximate analytic formula for the resummed prediction, which resums all NDL type logarithms but do not include any further subleading logarithmic terms. Using this resummed result in matching, I showed that subleading logarithms have an important effect in matched prediction similarly to the $k_{\perp}$ algorithm.

4. In the work of extension of the CoLoRFulNNLO method to hadron colliders, I defined the single-unresolved one-loop subtraction term for the real-virtual squared matrix element with $m + 1$ partons, which regularizes both the initial and final state single-unresolved singularities. The subtraction term is based on the factorization properties of one-loop QCD squared amplitudes in the infrared limits. The splitting kernels present in the initial-final collinear subtraction terms are obtained from the final state splitting kernels using the crossing relation. For this purpose I performed analytic continuation for the final state splitting kernel in order to use them in the initial state kinematics. The subtraction terms are defined over the whole phase space using phase space mappings. For the soft limit I introduced a new phase space mapping for the CoLoRFulNNLO method, which can be used in Drell-Yan processes as well. I checked the defined counterterms numerically in deeply inelastic scattering and I showed that they match the squared matrix element in the possible infrared limits.

1. Bevezetés

A kvantum-színdinamika (QCD) az erős kölcsönhatás kvantum-térelmélete. Az elmélet lokális nem-ábeli $SU(N_c)$ mértékszimetriával rendelkezik, ahol N_c a színek számát jelöli. Az elmélet a színes fermionok, a kvarkok kölcsönhatását írja le, melyet a szintén szintöltéssel rendelkező mértékbozonok, a gluonok közvetítenek. A kvantum-elektrodinamika mértékbozonjaival, a fotonokkal ellentétben a gluonok egymással is kölcsönhatnak, ami az elmélet aszimptotikus szabadságához vezet. Ez azt jelenti, hogy ahogyan egyre magasabb és magasabb ütközési energiákra lépünk, az elmélet csatolása egyre kisebbé válik.

A természetben azonban nem figyelhetőek meg szabad kvarkok és gluonok (együttes nevükön partonok), csak kötött részecskeállapotban találhatók meg, melyeket hadronoknak nevezünk, továbbá az ütközési kísérletekben a hadronok energikus, közel párhuzamos záporát, az úgynevezett jeketet figyelhetjük meg.

A hadronikus jetek keletkezése az ütközési kísérletek általános sajátossága és vizsgálatuk fontos, mivel: a jetek felhasználhatók a standard modell paramétereinek a mérésére és a modell tesztelésére; a jetek új fizikára utaló nyomot tartalmazhatnak, emiatt a standard modell típusú folyamatokban való keltésük fontos háttérbecslésként szolgál az új fizika kereséséhez.

Mérhető mennyiségekre a nagy energiás fizikában a perturbációs számítás elméletében tehetünk jóslatokat. A QCD aszimptotikus szabadsága miatt a hatáskeresztmetszet kiszámolható az α_S csatolás Taylor-soraként. Azonban az erős csatolás még nagy energiákon sem túl kicsi, például $\alpha_S(91.2 \text{ GeV}) = 0.118$, ezért a magasabb rendű sugárzási korrekciók ismerete elengedhetetlen hadronos folyamatok kvantitatív leírásához. Ellenben ezen sugárzási korrekciók számítása bonyolult a számolás során megjelenő ultraibolya és infravörös szingularitások miatt. Az ultraibolya divergenciák renormálás segítségével szisztematikusan eltávolíthatóak a perturbációs számítás minden rendjében véges számú paraméter újranormálásával. A Kinoshita-Lee-Nauenberg tétel kimondja, hogy a hatáskeresztmetszet QCD-ben véges minden infravörös véges mennyiségre, azaz olyan mennyiségekre, amelyek érzéketlenek lágy és kollineáris sugárzás jelenlétére. Ezzel szemben a tétel nem biztosítja a számolás közbeni lépéseiben megjelenő egyes járulékok végeségét, és sajnos nincsen egy, a renormáláshoz hasonló általános módszer, amellyel szisztematikusan eltávolíthatóak lennének az infravörös divergenciák a perturbációs számítás minden rendjében. Az első (NLO)

sugárzási korrekciók automatizált számítása már több éve elérhető különböző szoftverek formájában, melyek segítségével a részecskefizikai folyamatok egy széles skálája könnyen kiszámolható.

A jelenlegi kutatási frontvonal a QCD perturbációs számításban a második (NNLO) sugárzási korrekciók meghatározása, melyre több megoldás is született az elmúlt 15 évben, azonban még egyik sem képes az NLO korrekciók számításához hasonló fokú automatizációra.

Az egyik lehetséges megoldás az úgynevezett CoLoRFulNNLO levonási séma. A módszer alapja az infravörös divergens mátrixelemnégyzet levonással való regularizálása. A levonási tagok a QCD mátrixelemek univerzális faktorizációs tulajdonságain alapulnak, és az infravörös határértékekben való viselkedésük d -dimenzióban megegyezik az eredeti mátrixelemével. A CoLoRFulNNLO módszer jelenleg csak olyan részecskefizikai folyamatokra alkalmazható, amelyek csak a végállapotban tartalmazznak szintöltött részecskéket. A módszert felhasználtuk például Higgs-bozon tömegnélküli b -kvarkpárra való bomlásának, vagy három jet elektron-pozitron szétsugárzásban való keletkezésének NNLO pontosságú meghatározására.

2. Motiváció

Az elektron-pozitron ütköztetésekben keletkező három jetes események tiszta laboratóriumi körülményeket kínálnak a QCD elméletének kísérleti ellenőrzésére, mivel csak a végállapotban találhatóak szintöltéssel rendelkező részecskék. Emellett a három jetes események gyakorisága már a perturbációs számítás vezető rendjében arányos az α_S csatolással. Az ebben a folyamatban mért alakváltozó és jet hányad mennyiségek még a mai napig az egyik legpontosabb eszközöknek számítanak az erős csatolás mérésére. A csatolás meghatározásának pontossága függ a kísérleti mérés és az elméleti jóslat pontosságától egyaránt. Az elmúlt években megnőtt kísérleti precizitás megköveteli a hasonlóan pontos elméleti számításokat. A CoLoRFulNNLO módszerrel lehetőségünk nyílik differenciális hatáskeresztmetszetek NNLO pontosságú kiszámítására.

A CoLoRFulNNLO módszerben azonban, több más fontos feladat mellett, szükség van az úgynevezett integrált levonási tagok ismeretére. Ezen tagok pólusegyütthatói már ismertek analitikusan, viszont a véges rész teljesen analitikus módon történő kiszámítása nehéz a kifejezés bonyolultsága miatt, így az ehhez kapcsolódó integrálokat nume-

rikusan kell elvégezni. Ez a feladat több száz bonyolult integrál, nagy számú pontban numerikus módszerekkel történő meghatározását igényli, amely miatt az egész folyamat teljes fokú automatizálása szükséges.

Az alakváltozó mennyiségek mellett az α_S csatolás mérése gyakran az úgynevezett három jet hányad vizsgálatán alapszik. A perturbációszámítás vezető rendjében a jeteket partonok segítségével modellezzük, minden jethez egy-egy partont rendelünk. Magasabb rendű sugárzási korrekciók figyelembevételével újabb partonokat rendelünk az egyes jetekhez, azonban az egy jetben jelenlévő partonok száma még mindig nagyságrendileg $\mathcal{O}(1)$. Bizonyos kinematikai tartományokban ez a közelítés nem megfelelő, mivel a domináns járulék újabb és újabb lágy-kollineáris partonok kibocsátásából származik. Ez a viselkedés figyelembe vehető az ezekhez a tartományokhoz kapcsolódó logaritmikus tagok minden rendben történő felösszegzésével, vagy parton záporok alkalmazásával. A parton zápor NNLO pontosságú rögzített rendű számolással való illesztése jelenleg még nem megoldott, azonban az úgynevezett dupla logaritmus melletti (NDL) tagok felösszegzése több éve ismert jet hányad esetén.

A szélesebb kinematikai tartományon érvényes jóslat a rögzített rendű és a felösszegzett számítás illesztésével kapható meg. Habár fellelhető az α_S mérésére felhasznált NNLO+NDL pontosságú illesztett eredmény a $k_\perp$ jet algoritmusra a szakirodalomban, a $\sqrt{Q^2} = 91.2$ GeV ütköztetési energiára még nincs ilyen pontosságú közölt számítás a három jet hányadra. Emellett többféle típusú, formálisan azonos pontossággal rendelkező felösszegzett jóslat is ismert, viszont ezek korábban még nem kerültek összehasonlításra. A $k_\perp$ jet algoritmus mellett az úgynevezett általános inkluzív $k_\perp$ algoritmus esetén is adott NDL pontosságú felösszegzett eredmény, amely felhasználható rögzített rendű számolásokkal való illesztésre először a szakirodalomban.

A mai, új részecskefizikai eredmények döntő része, az LHC proton-proton ütköztetőhöz kapcsolódik, ami szükségessé teszi a CoLoRFulNNLO módszer ilyen típusú folyamatokra való kiterjesztését.

3. Eredmények

Az NNLO pontosságú QCD hatáskeresztmetszetek területén a CoLoR-FulNNLO módszer alkalmazásával elért eredményeim a következő pontokban foglalhatóak össze:

1. Az integrált levonási tagok numerikus módon, nagy számban történő számítására és a folyamat kezelésére létrehoztam egy `python` és `Mathematica` nyelveneken írt automatizált rendszert, amely a `SecDec` programot használja alapul. A kifejlesztett automatizált eszköz segítségével numerikusan kiszámoltam az $\mathbf{I}_1^{(0)}$, az $\mathbf{I}_{1,1}^{(0,0)}$, az $\mathbf{I}_1^{(1)}$ és az $\mathbf{I}_2^{(0)}$ szintén ható operátorokhoz szükséges mester integrálokat. A mester integrálok eredményeit felhasználva, kiszámítottam a fent említett operátorokat három jet végállapot esetén, és a numerikus eredményeket logaritmikus és polinom függvényekkel illesztettem meg. A kapott függvényt implementáltam az `MCCSM` Monte Carlo programba. Végül a kész levonási módszerrel alakváltozó mennyiségekre NNLO pontosságú jóslatokat tettünk e^+e^- ütközésben keletkező három jet esetén [**R1**].
2. A $k_\perp$ jet algoritmust használva NNLO pontosságú jóslatot tettem a három jet hányadra $\sqrt{Q^2} = 91.2$ GeV ütköztetési energián. A kapott eredményt illesztettem NDL pontosságú felösszegzett jóslattal az úgynevezett R -illesztési sémát felhasználva [**R2**, **R3**]. Összehasonlítottam három, formálisan azonos felösszegzett számítást, amelyek NDL pontosságon túli logaritmikus tagokban térnek el. Megmutattam, hogy ezek a logaritmikus tagok nem elhanyagolható módon befolyásolják a kapott illesztett eredményeket. Emellett megmutattam, hogy habár az úgynevezett K -tag figyelembevétele a felösszegzésben javít az NLO+NDL típusú illesztett eredményen, ez valójában egy véletlen numerikus összjáték eredménye, amelyet az NNLO+NDL típusú illesztett eredmények is alátámasztanak. Az NNLO+NDL illesztett eredmény jobban leírja a kísérleti adatokat, mint a rögzített rendű NNLO számolás, azonban további logaritmikus tagok felösszegzése még szükséges lenne, és az úgynevezett log R -illesztési séma használata is javíthat az eredményeken.
3. Az anti- $k_\perp$ jet algoritmus e^+e^- ütköztetőkre adaptált két különböző verzióját használva kiszámoltam a három jet hányadot ezen algoritmusokra is és felösszegzett eredményekhez illesztettem őket

[R3]. Kiszámítottam a teljes felösszegzett eredményt két különböző energia vágást alkalmazva és ezeket illesztettem rögzített rendű számolásokkal. Megadtam egy analitikus közelítő képletet a felösszegzett jóslatra, amely kizárólag csak az NDL típusú logaritmusokat tartalmazza. Ezt a felösszegzett alakot felhasználva az illesztésben megmutattam, hogy ebben az esetben is jelentős eltérést okoznak az éppen jelen lévő vagy hiányzó NDL pontosságon túli tagok, hasonlóan a $k_{\perp}$ algoritmus esetéhez.

4. A CoLoRFulNNLO módszer hadron-hadron ütközésekre történő kiterjesztésében is részt véve definiáltam az egyszerűen feloldatlan egyhurok levonási tagot, amely az $m + 1$ partonos egyhurok mátrixelemnégyzet kezdeti és végállapotú infravörös szingularitásait egyaránt regularizálja. A levonási tag az egyhurok mátrixelemnégyzet infravörös faktorizációs tulajdonságain alapszik, amely impulzus leképezések segítségével kiterjeszthetőek az egész fázistérre. A kezdeti-végállapotú kollineáris levonási tagban jelen lévő Altarelli-Parisi függvények megkaphatóak a végállapotú Altarelli-Parisi függvényekből a keresztezési összefüggés segítségével. Hogy ezt alkalmazhassam, analitikusan elfolytattam a végállapotú Altarelli-Parisi függvények kifejezéseit, így azok használhatóak kezdeti állapotú kinematikában is. A lágy levonási tag számára bevezettem egy új impulzus leképezést a CoLoRFulNNLO módszerben, amely alkalmazható Drell-Yan folyamatok számolásánál is. A definiált levonási tagokat mélyen rugalmatlan szórás folyamatán teszteltem le numerikusan, és megmutattam, hogy az egyes ellentagok infravörös viselkedése azonos az eredeti mátrixelemnégyzetével.

Publications on the results of the present thesis/Jelen dolgozat eredményeire vonatkozó közlemények

- [R1] V. Del Duca, C. Duhr, A. Kardos, G. Somogyi, Z. Szőr, Z. Trócsányi and Z. Tulipánt, “Jet production in the CoLoRFulNNLO method: event shapes in electron-positron collisions”, Phys. Rev. **D94**, 074019 (2016) arXiv:1606.03453 [hep-ph].
- [R2] G. Somogyi, A. Kardos, Z. Szőr, and Z. Trócsányi, “Higher order corrections in the CoLoRFulNNLO framework”, Accepted for publication in Acta Physica Polonica B, arXiv:1706.01688 [hep-ph]
- [R3] G. Somogyi, A. Kardos, Z. Szőr, and Z. Trócsányi, “Higher-order corrections for three-jet rate in e^+e^- annihilation using the (anti-) $k_\perp$ algorithm”, In preparation.
- [Poster] A. Kardos, G. Somogyi, and Z. Szőr, “Three-jet rate in electron-positron annihilation”, 12th Central European Seminar on Particle Physics and Quantum Field Theory 2016



Nyilvántartási szám: DEENK/193/2017.PL
Tárgy: PhD Publikációs Lista

Jelölt: Szőr Zoltán
Neptun kód: E6POXU
Doktori Iskola: Fizikai Tudományok Doktori Iskola
MTMT azonosító: 10060233

A PhD értekezés alapjául szolgáló közlemények

Idegen nyelvű tudományos közlemények külföldi folyóiratban (1)

1. Del Duca, V., Duhr, C., Kardos, Á., Somogyi, G., **Szőr, Z.**, Trócsányi, Z., Tulipánt, Z.: Jet production in the CoLoRFulNNLO 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 (1)

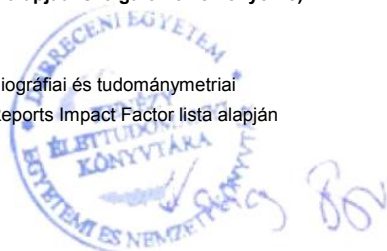
2. Kardos, Á., Somogyi, G., **Szőr, Z.**, Trócsányi, Z.: Higher order corrections in the CoLoRFulNNLO framework. *Acta Phys. Pol. B.* [Accepted by publisher], [12], 2017. ISSN: 0587-4254.
IF: 0.904 (2016)

A közlő folyóiratok összesített impakt faktora: 5,472

A közlő folyóiratok összesített impakt faktora (az értekezés alapjául szolgáló közleményekre): 5,472

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

Debrecen, 2017.06.26.





Registry number:
Subject:

DEENK/193/2017.PL
PhD Publikációs Lista

Candidate: Zoltán Szőr
Neptun ID: E6POXU
Doctoral School: Doctoral School of Physics
MTMT ID: 10060233

List of publications related to the dissertation

Foreign language scientific articles in international journals (1)

1. Del Duca, V., Duhr, C., Kardos, Á., Somogyi, G., **Szőr, Z.**, Trócsányi, Z., Tulipánt, Z.: Jet production in the CoLoRfulNNLO 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 (1)

2. Kardos, Á., Somogyi, G., **Szőr, Z.**, Trócsányi, Z.: Higher order corrections in the CoLoRfulNNLO framework. *Acta Phys. Pol. B. [Accepted by publisher]*, [12], 2017. ISSN: 0587-4254.
IF: 0.904 (2016)

Total IF of journals (all publications): 5,472

Total IF of journals (publications related to the dissertation): 5,472

The Candidate's publication data submitted to the iDEa Tudóster have been validated by DEENK on the basis of Web of Science, Scopus and Journal Citation Report (Impact Factor) databases.

26 June, 2017

