



Measurement of Forward Rapidity Jets Identification Performance in Proton-Proton Collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV by Using Monte Carlo Simulation

Deniz SUNAR ÇERÇİ^{1,*}, Servet TAYMAZ¹, Salim ÇERÇİ¹

¹Adiyaman University, Faculty of Arts and Sciences, Department of Physics, 02040 Adiyaman, Turkey, dsunar@adiyaman.edu.tr

servet@kembayindirosgeb.com.tr, scerci@adiyaman.edu.tr

Abstract

Proton-proton collision occurs from the parton-parton interactions where the partons are inside the protons and carry color charge. As a result of the parton interactions the high-energy colored final state particles are produced. These particles reveal the jets by losing their color charge. In this study, jets in the forward region were investigated by using PYTHIA6 and HERWIG++ Monte Carlo event generators at the center of mass energy of 8 TeV in proton-proton beam collisions. The jet energy resolution and the jet response were obtained for the jets located in the forward rapidity of $3.2 < |y| < 4.7$. In this study, the anti- k_T jet algorithm with jet cone radius $R = 0.7$ was used.

Keywords: Jets, Forward Rapidity, Jet Resolution, Jet Response.

Monte Carlo Benzetimi Kullanılarak $\sqrt{s} = 8$ TeV'deki Proton-Proton Etkileşmelerinde İleri Rapiditedeki Jetleri Belirleme Performansının Ölçülmesi

Özet

Proton-proton çarpışması, protonlar içinde bulunan ve renk yükü taşıyan

* Corresponding Author

partonların birbirleriyle etkileşmesinden oluşur. Bu parton etkileşmeleri sonucunda yüksek enerjili renkli son durum parçacıkları üretilir. Bu parçacıklar taşıdıkları renk yükünü kaybederek kararlı parçacıkların oluşturduğu jetleri ortaya çıkarır. Bu çalışmada, PYTHIA6 ve HERWIG++ Monte Carlo olay üreteçleri kullanılarak 8 TeV'lik kütle merkezi enerjisinde çarpıştırılan proton-proton hüzmelerinin etkileşmesi sonucu ileri bölgede oluşan jetler araştırılmıştır. İleri rapidite bölgesi $3.2 < |y| < 4.7$ 'de yer alan jetlerin enerji çözünürlüğü ve jet yanıtı elde edilmiştir. Bu çalışmada $R = 0.7$ jet koni yarıçapına sahip anti- k_T jet algoritması kullanılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Jetler, İleri Rapidite, Jet Çözünürlüğü, Jet Yanıtı.

1. Giriş

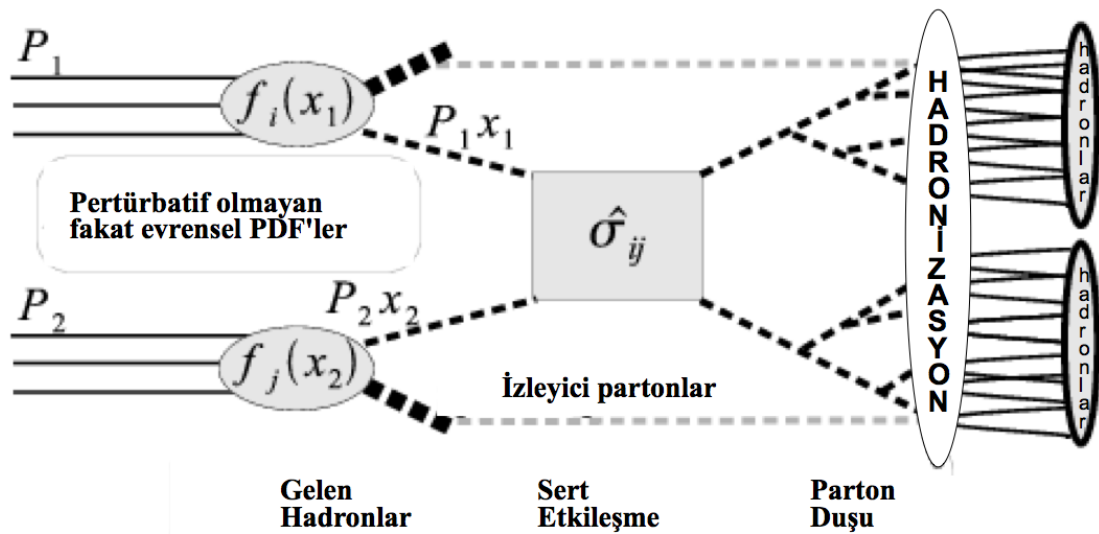
Yüksek enerjili hadron-hadron etkileşmelerinin saçılmasından gelen kuarklar veya gluonlar Kuantum Renk Dinamiği (KRD)n'deki renk yükü hapsinden dolayı doğrudan algıta gözlenemezler. Bu parçacıklar hadronların birbirine paralel olan akımlar şeklinde görünen jetler aracılığıyla kendilerini gösterir. Jetler etkileşmeden çıkan orijinal partonlarla ilişkilendirilerek hadron çarpıştırıcılarında pertürbatif KRD'yi test etmek üzere kullanılır.

CERN'deki Büyük Hadron Çarpıştırıcısı (BHÇ)'nda jet ölçümü, daha önceki çarpıştırıcı deneylerinin erişemediği oldukça geniş bir kinematik aralık olan yani daha yüksek dik momentum p_T ve daha büyük rapidite y bölgesinde gerçekleşmektedir. Jet ölçümü BHÇ'deki CMS ve ATLAS deneylerinde $\sqrt{s} = 2.76, 7, 8$ ve 13 TeV'deki farklı kütle merkezi enerjilerinde gerçekleştirilmiştir [1-6]. Benzer ölçümler daha düşük enerjili diğer hadron çarpıştırıcılarında da yapılmıştır [7-10]. İleri jet üretimi proton içindeki partonun yapısı ve dinamik evrimi hakkında önemli bilgi içermektedir. Özellikle düşük momentum kesrinin olduğu bir bölgedeki gluon yoğunluğuna dair bilgi sağlar. Öyle ki p_{parton} parton momentumu ve p_{hadron} ise hadron momentumu olmak üzere $x = \frac{p_{parton}}{p_{hadron}} < 10^{-2}$ şeklinde ifade edilir. Bjorken- x sert saçılmadaki parton tarafından taşınan dik proton momentumunun kesri olarak tanımlanabilir. Yüksek mertebeli etkileşmelerin tam hesaplamaları oldukça karmaşıktır. Bu nedenle pertürbatif yaklaşım metotlarını kullanmak zorunlu hale gelir. Günümüze kadar tam pertürbatif

hesaplamalar ancak güçlü etkileşme sabiti α_s^2 mertebesine kadar yapılabilmektedir. Başlangıç durum gluon yayılımını *parton merdivenleri* ile tanımlanabilirler. α_s 'deki perturbatif seri açılımı, Bjorken- x ve sert saçılma ölçeği Q^2 'nin farklı kinematik bölgelerinde oldukça önemli bir belirginliğe sahip x ve Q^2 'ye bağlı $\alpha_s(\ln 1/x)$ ve $\alpha_s(\ln Q^2)$ şeklinde terimler içermektedir. Bu terimleri farklı ele alan DGLAP [11-13], BFKL [14,15] ve CCFM [16,17] olarak adlandırılan üç farklı parton gelişim denklemi bulunmaktadır.

2. Materyal ve Metot

Bir deneyin temel hedeflerinden biri kuramsal modelleri test etmek ve olayın fizliğini anlamaya dair daha iyi bir anlayış, katkısı sağlamaktır. Fenomonolojik modellerle birlikte kuramsal hesaplamalar analitik olarak çözülemeyecek kadar karmaşıktır. Monte Carlo (MC) olay üreticileri, algıcın sınırlı olan geometrik kabulünü düzeltmek ve algıcın kinematik değişkenler üzerindeki çözünürlük etkilerini anlamak için kullanılır. Ayrıca, mükemmel bir algıç tarafından gözlenebilecek olan model olayları ayrıntılı bir şekilde incelemek için kullanılır. Ancak bir olay üretim sürecini tek seferde düzenlemek oldukça karmaşık olduğundan, bu süreç çeşitli adımlara bölünmektedir. Bir MC olay üreticinde takip edilen bu adımlar bir proton-proton etkileşmesi için şematik olarak Şekil 1' de gösterilmektedir.



Şekil 1. Bir MC olay üreticisindeki proton-proton etkileşmesinin şematik gösterimi

Bu çalışmada yüksek enerji fiziği olaylarında partonlar arasındaki sert etkileşmeleri üretmek için birincil merteye (LO) matris elemanını kullanan iki farklı PYTHIA6 [18] ve HERWIG++ [19] MC olay üreteçleri kullanılmıştır. PYTHIA bir kuark-karşıtkuark çifti arasındaki renkli akıyı tanımlayan Lund Sicim Modelini kullanır. Bu modele göre, kuark ve karşıtkuark ($q\bar{q}$) birbirinden ayrıldıkça, sicimdeki potansiyel enerji artar. Bu enerji hafif bir kuark-karşıtkuark çiftinin kütesini aştığında, yeni bir kuark-karşıtkuark ($q'\bar{q}'$) çifti oluşur. Böylece, sicim daha kısa iki sicime ayrılarak iki renk-teklisi durumlarını $q'\bar{q}$ ve $q\bar{q}'$ meydana getirir. Eğer aynı sicime bağlı yeni $q\bar{q}$ çiftlerinin bağlı momentumu yeterli ise sicim yeniden kırılabilir. HERWIG ise küme modelini kullanılır. Küme modelinde gluonların kuark-karşıtkuark veya dikuark-karşıtdikuark çiftlerine pertürbatif olmayan bir şekilde bölünmeleriyle başlar. Ardından, komşu kuark ve karşıtkuarklar renk-teklisi veya kümeler halinde gruplanırlar. MC olay üreteçleri, temel olarak algıcın tüm malzemesi ve herhangi bir rahatsız edici kuvvet alanı olmaksızın vakumda gerçekleşen olayları ürettiğinden, gerçek olayları açıkça taklit edebilmek için yeterli değildir. İşte algıç benzetimleri bu noktada işin içine dahil edilir. Algıç benzetimi, algıç ve çevresindeki tüm koşulları ve bunların etkilerini üretilen olaylara eklediğinden son derece ayrıntılı ve zorlu bir hesaplama gerektirir. Güçlü manyetik alan, algıç elektroniklerindeki gürültü, elektronik kabloların etkileri gibi çeşitli algıç etkileri algıç benzetiminde göz önünde bulundurulur. Bunun yanı sıra, algıç benzetimi tüm alt algıçlardaki etkileri de içine alır. Algıç benzetiminde çarpışan hüzmelerin konumu ve şiddeti de modellenmektedir. Bu çalışmada algıç benzetimi GEANT4 [20] benzetim platformu kullanılarak yapılmıştır.

2.1. Jet Yapılandırılması

Bir jet algoritmasının rolü jetlere ait parçacıkları (ya deneysel olarak yeniden yapılandırarak ya da MC benzetiminden) tanımlamak ve enerjileri ile momentumlarını toplayan bir formalizm sağlamaktır. Ayrıca, hem deneysel hem de kuramsal bağlamda olay topolojisine bakmaksızın jetlerin yeniden yapılandırılmasına tutarlı bir metot sağlamaktır. Her jet algoritması genellikle “yapı taşları” olarak isimlendirilen nesnelere jetler içerisine gruplandırır. Bu yapı taşları kalorimetre enerji kümeleri gibi deneysel

nesneler veya partonlar ya da hadronlar gibi kuramsal nesneler olabilir. Jet algoritması hangi parçacığın belli bir jete ait olduğunu tanımlamalı ve ardından jetin belli yapı taşlarının kinematiklerini yeniden yapılandırmak için bir metot uygulamalıdır. İdeal bir jet algoritması kuramsal olarak iyi anlaşılmalı ve yumuşak yayının etkilerine (kızılötesi güvenli) duyarlı olmamalıdır. Sonuç olarak, jet ölçümleri, $\eta - \phi$ uzayındaki belli bir bölgede (segment) yayılan enerjinin toplamını ölçmek için kalorimetrelerden gelen bilgilere odaklanırlar. İdeal bir jet algoritması, yeniden yapılandırılan parçacıkların yerine bu kalorimetre segmentleri girdi olarak kullanıldığında da fonksiyonel olmalıdır. Enerjisi E ve momentumu $\mathbf{p} = (p_x, p_y, p_z)$ olan bir jetin rapiditesi ve dik momentumu

$$y = \frac{1}{2} \ln(E + p_z / E - p_z) \quad (1)$$

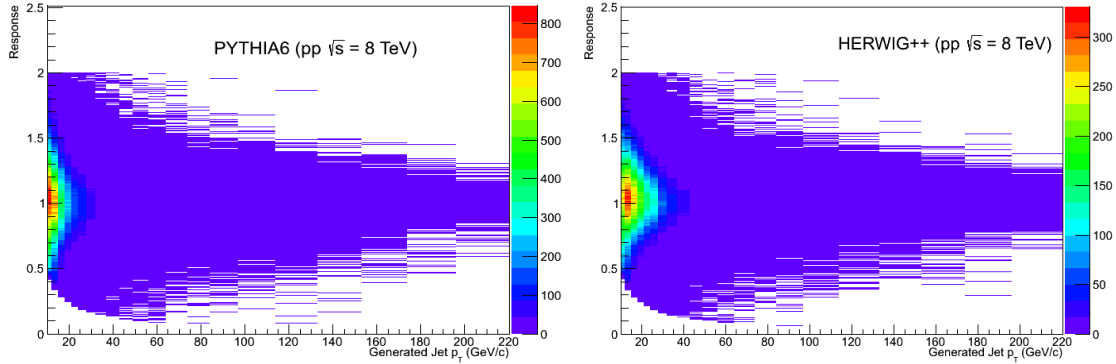
$$p_T = (p_x^2 + p_y^2)^{1/2} \quad (2)$$

şeklinde ifade edilir. Bu çalışmada $R = 0.7$ jet koni yarıçapına sahip anti- k_T parçacık akısı (PF) [21] jet algoritması kullanılmıştır.

3. Sonuçlar ve Tartışma

Jet yapılandırma performansını ölçmek üzere genellikle jet yanıtı ve çözünürlük olmak üzere iki değişken kullanılır. Jet yanıtı değişkeni, yapılandırılan detektör kulelerinde yapılandırılan jetler (DedJet) ile eşleştiği hadronların oluşturduğu jetler (GenJet)'in momentumları oranı $R = \frac{p_T^{DedJet}}{p_T^{GenJet}}$ olarak tanımlanır. Jet yanıtı üreteçteki bilgilere ulaştığından ancak MC seviyesinde tanımlanabilen bir değişkendir. Bu değişkenin ortalama değeri belli bir jetin yapılandırma stratejisine verdiği yanıtın tahminidir. Jet yanıtı; bir jetin enerji ölçeğinin kalibrasyonunda birincil bir katkıya sahip olup jetler içerisindeki hadronlara kalorimetrenin verdiği yanıtın bir ölçüsüdür. Koni yarıçapı $R = 0.7$ olan PF algoritması için PYTHIA ve HERWIG++ MC olay üreteçleriyle elde edilen her bir jet yanıtının GenJet'lerin dik momentumu p_T 'ye göre dağılım grafikleri Şekil 2'de gösterilmektedir. Bu grafiklerde her iki MC modeli için p_T 'nin düşük olduğu bölgelerde jet yanıtının 1'den uzaklaştığı görülmektedir. Aslında

bu beklenen bir durumdur. Çünkü detektörde ölçülen jetin enerji çözünürlüğü düşük p_T değerlerinde daha yüksektir. Bu çalışmada toplam 18 tane dik momentum aralığı kullanılmıştır. Kullanılan her bir p_T aralığı Çizelge 1’de listelenmiştir. Jetlerin yanıtı Gauss fonksiyonuna benzer bir dağılım göstermektedir. Analizde kullanılan her bir p_T aralığı için bu dağılımlar elde edilmiştir.



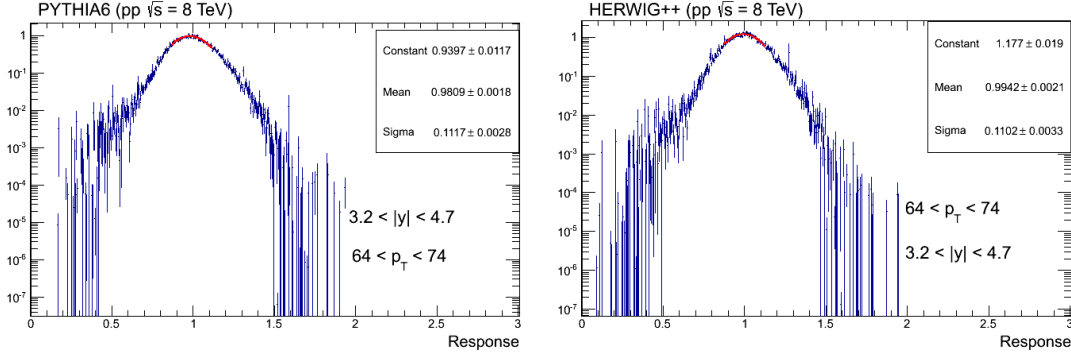
Şekil 2. Koni yarıçapı $R = 0.7$ olan PF algoritması için PYTHIA6 (soldaki) ve HERWIG++ (sağdaki)’da elde edilen jet yanıtının GenJet p_T ’ye göre dağılımlarının iki boyutlu gösterimi

Tablo 1. Jet yanıtı çalışmasında kullanılan GenJet’lerin p_T aralık değerleri

p_T [GeV/c] (düşük değerlere sahip)									
10 -15	18- 21	21- 24	24- 28	32 -37	37- 43	43- 49	49- 56	56- 64	64- 74
p_T [GeV/c] (yüksek değerlere sahip)									
74- 84	84- 97	97- 114	114-133	133-153	153- 174	174- 196	196- 220		

Jet yanıtı Şekil 3’te PYTHIA6 ve HERWIG++ MC modelleri için sadece $64 < p_T < 74$ GeV/c aralığında gösterilmektedir. DedJet’lerin dik momentum p_T , rapidite y , psüdorapidite η ve azimut açısı ϕ gibi ölçülen değerleri bunlara karşılık gelen GenJet değerlerinden sapmaktadır. Böyle sapmalar kalorimetrenin önünde yer alan aktif

olmayan malzemenin ve düşük enerjili parçacıkların bir sonucudur. Jet ölçümünün çözünürlüğü ya doğrudan iyi tanımlı bir ölçümden elde edilen veriyle ya da dolaylı olarak simülasyon yardımıyla elde edilebilir. Şekil 3'te gösterilen jet yanıt histogramları, ortalama civarında merkezlenmiş $\pm 1\sigma$ aralık içerisindeki bir Gauss fonksiyonu ile uydurulmuştur.



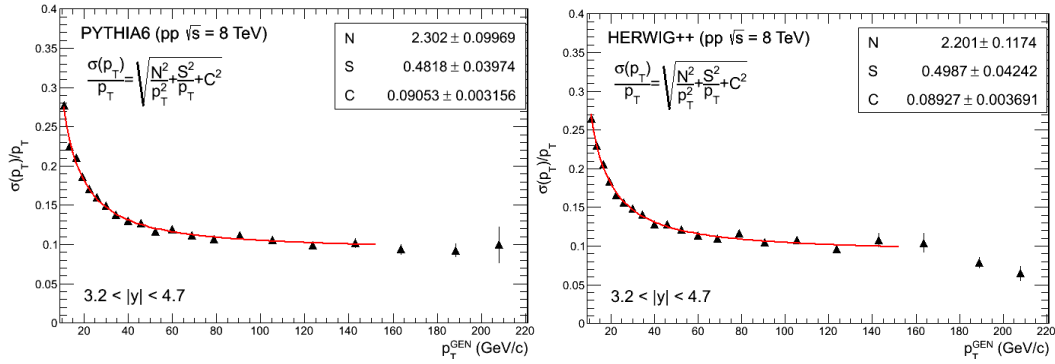
Şekil 3. PYTHIA6 (soldaki) ve HERWIG++ (sağdaki) MC modelleri için jet yanıt dağılımlarının $64 < p_T < 74$ GeV/c aralığındaki Gauss fiti

Yalnızca jet koni yarıçapının $\Delta R = (\Delta\eta^2 + \Delta\phi^2)^{1/2} < 0.2$ olduğu bölge içinde üretilmiş GenJet'leri ile onunla eşleşen yeniden yapılandırılmış DedJet'leri göz önüne alınmıştır. Çözünürlük eğrileri

$$f(p_T) = \sqrt{\left(\frac{N}{p_T^{g_{\text{eff}}}}\right)^2 + \left(\frac{S}{\sqrt{p_T^{g_{\text{eff}}}}}\right)^2} + c^2 \quad (3)$$

şeklinde bir forma sahip olan bir fonksiyona uyarlanmıştır. Burada N , S ve C Şekil 4'teki grafiklerin içinde gösterilen fit fonksiyonu parametreleridir. Eşitliğin sağ tarafındaki ilk terim enerjiden bağımsız olan dalgalanmaların stokastik kaynaklarını (örneğin elektronik gürültü, yığından gelen katkılar) içine almaktadır. İkinci terim istatistiksel tüm kaynakları kapsar. Sonuncusu ise enerjinin sabit bir kesri olan algıç etkilerine bağlı sabit bir terimdir. Şekil 4, jet enerji çözünürlüğünün GenJet p_T ' nin bir fonksiyonu olarak PYTHIA6 ve HERWIG++ MC modelleri için göstermektedir. Elde edilen p_T çözünürlükleri p_T ' nin düşük olduğu değerlerde ~ 12 GeV/c'de PYTHIA6 için %28 iken HERWIG++ için %26 civarındadır. Daha büyük $p_T > 100$ GeV/c değerlerinde

ise çözünürlük hem PYTHIA6 hem de HERWIG++ için $\sim 10\%$ 'a doğru bir azalma göstermektedir. Jet enerji çözünürlüğü için Gauss modeli uygun olmasına rağmen, bu model tüm dağılımın özellikle kuyruk kısımlarını tanımlamakta pek başarılı olamamaktadır. Özellikle kuyruk kısımlarını tanımlamak üzere farklı fonksiyonlar örneğin kristal top fonksiyonu (crystal ball function) kullanılabilir.



Şekil 4. Jet enerji çözünürlüğünün GenJet p_T 'nin bir fonksiyonu olarak PYTHIA6 (soldaki) ve HERWIG++ (sağdaki) MC modelleri için gösterimi. Çözünürlükler N , S ve C uydurma parametrelerine sahip (3) denklemi kullanılarak elde edilen fonksiyona fit edilmiştir.

Jet p_T spektrumunun dik bir şekilde azalan bir doğaya sahip olmasından ötürü, çözünürlüğün kuyruk kısımlarında pek doğru modellenememesi sistematik bir hata olarak jet enerji ölçümlerinde göz önüne alınır.

Teşekkür

Bu çalışma Adıyaman Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Birimi (ADYUBAP) tarafından desteklenen FEFBAP/2014-0005 proje kapsamında alınan sunucu kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Kaynaklar

- [1] Khachatryan, V., et al., [CMS Collaboration], *Eur. Phys. J.*, **C76(5)**, 265, 2016.
- [2] Aad, G., et al., [ATLAS Collaboration], *Eur. Phys. J.*, **C73**, 2509, 2013.

- doi:10.1140/epjc/s10052-013-2509-4, arXiv:1304.4739.
- [3] Chatrchyan, S., et al., [CMS Collaboration], *Phys. Rev. Lett.*, **107**, 132001, 2011. doi:10.1103/PhysRevLett.107.132001, arXiv:1106.0208.
- [4] Aad, G., et al., [ATLAS Collaboration], *Eur. Phys. J.*, **C71**, 1512, 2011. doi:10.1140/epjc/s10052-010-1512-2, arXiv:1009.5908.
- [5] CMS Collaboration, Measurement of Low p_T jet cross sections in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV, *CMS Physics Analysis Summary CMS-PAS-FSQ-12-031*, 2012.
- [6] Khachatryan, V., et al., [CMS Collaboration], Measurement of the double-differential inclusive jet cross section in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV, submitted to EPJC, CMS-PAS-SMP-15-007, CERN-EP-2016-104.
- [7] Arnison, G., et al., [UA1 Collaboration], *Phys. Lett.*, **B132**, 214, 1983. doi:10.1016/0370-2693(83)90254-X.
- [8] Banner, M., et al., [UA2 Collaboration], *Phys. Lett.*, **B118**, 203, 1982. doi:10.1016/0370-2693(82)90629-3.
- [9] Abulencia, A., et al., [CDF Collaboration], Measurement of the inclusive jet cross section using the k_T algorithm in pp-bar collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV with the CDF II Detector, arXiv:hep-ex/0701051. [Erratum: *Phys. Rev. D* **75** (2007) 119901]. doi:10.1103/PhysRevD.75.092006,10.1103/PhysRevD.75.119901.
- [10] Abazov, V. M., et al., [D0 Collaboration], *Phys. Rev. Lett.* **101**, 062001, 2008. doi:10.1103/PhysRevLett.101.062001, arXiv:0802.2400.
- [11] Gribov, V. N., Lipatov, L. N., *Sov. J. Nucl. Phys.*, **15**, 438–450, 1972.
- [12] Dokshitzer, Y. L., *Sov. Phys. JETP*, **46**, 641–653, 1977.
- [13] Altarelli, G., Parisi, G., *Nucl. Phys.*, **B126**, 298, 1977.
- [14] Balitsky, I. I., Lipatov, L.N., *Sov. J. Nucl. Phys.*, **28**, 822–829, 1978.

- [15] Kuraev, E. A., Lipatov, L. N., Fadin, F. S., *Sov. Phys. JETP*, **45**, 199–204, 1977.
- [16] Ciafaloni, M., *Nucl. Phys.*, **B296**, 49, 1988.
- [17] Catani, S., Fiorani, F., Marchesini, M., *Phys. Lett.*, **B234**, 339, 1990.
- [18] Sjostrand, T., Mrenna, S., Skands, P., PYTHIA 6.4 Physics and Manual, JHEP 05, 026, arXiv:hep-ph/0603175, 2006.
- [19] Bahr, M., et al., Herwig++ Physics and Manual, *Eur. Phys. J.*, **C58**, 639, 2008. doi:10.1140/epjc/s10052-008-0798-9, 2008.
- [20] Agostinelli, S., et al., *Nucl. Instrum. Meth. A*, **506**, 250–303, 2003. doi:10.1016/S0168-9002(03)01368-8
- [21] Cacciari, M., Salam, G. P., Soyez, G., The anti- k_t jet clustering algorithm, JHEP 04 063, 2008.