AZƏRBAYCAN RESPUBLİKASI

Əlyazması hüququnda

NICA SPD TƏCRÜBƏ ŞƏRAİTİNDƏ BİRBAŞA FOTONLARIN ALINMASI PROSESİNİN TƏSVİRİ

İxtisas: 2212.01 – Nəzəri fizika

Elm sahəsi: Fizika

İddiaçı: Möhsün Rasim oğlu Əlizadə

Fəlsəfə doktoru elmi dərəcəsi almaq üçün təqdim edilmiş dissertasiyanın

AVTOREFERATI

Bakı - 2025

Dissertasiya işi Azərbaycan Respublikası Elm və Təhsil Nazirliyi Bakı Dövlət Universitetinin Nəzəri fizika kafedrasında və Rusiya, Dubna şəhəri, Birləşmiş Nüvə Tədqiqatları İnstitutunun N.N.Boqolyubov adına Nəzəri Fizika Laboratoriyasında yerinə yetirilmişdir.

Elmi rəhbərlər:

fizika elmləri doktoru, dosent Azər İnşalla oğlu Əhmədov

fizika-riyaziyyat elmləri doktoru, Rusiya EA-nın professoru Andrey Borisoviç Arbuzov



fizika elmləri doktoru, professor Mirteymur Mirkazım oğlu Mirabutalıbov

fizika-riyaziyyat elmləri doktoru, professor Mais Kazım oğlu Süleymanov

fizika-riyaziyyat elmləri namizədi, dosent Bəhram İsak oğlu Mehdiyev

Azərbaycan Respublikasının Prezidenti yanında Ali Attestasiya Komissiyasının Bakı Dövlət Universitetinin nəzdində fəaliyyət göstərən ED 2.19 Dissertasiya şurası

Dissertaşiya şurasının sədri:

fizika elmləri doktoru, dosent Hüseyn Mikayıl oğlu Məmmədov

Dissertasiya şurasının elmi katibi:

Aller

Elmi seminarın sədri:

fizika üzrə fəlsəfə doktoru	
Sahla Nabi qızı Hacıyeva	
Azerbaycan Respublikaenic Elm ve Tuhal Naziriyi BAKI DÖVLƏT UNİVERSİTETİ p.h.ş. Minleny of Science and Education of the Republic of Azerbaijan Baku State Universityi Baki doktoru, Tizika riyaziyyat Elmistri doktoru, Şərhəddin Quhaddin Ağlı Bodu	professor Illayev
Instant using editron; (Jrec. JN "JB" 03 "120 20	

İŞİN ÜMUMİ XARAKTERİSTİKASI

Mövzunun aktuallığı və işlənmə dərəcəsi. Birbaşa fotonlar yüksək enerjili adron və nüvə qarşılıqlı təsirlərinin öyrənilməsində xüsusi rol oynayır. Rəng neytral olmaları səbəbindən, onlar yalnız sıx adron mühitində deyil, həm də kvark-qlüon plazmasında (KQP) böyük sərbəst yol uzunluğuna malikdirlər. Bu, onların qarşılıqlı təsir zonasından dəyişilmədən çıxmasını və aşkarlanmasını təmin edir. Birbaşa fotonların yaranma proseslərinin öyrənilməsi adronların qlü– on komponentinin müəyyənləşdirilməsi üçün vacibdir, çünki fotonlar sərt altproseslərlə bağlı informasiya daşıyır.¹

Birbaşa fotonların yaranma prosesləri əvvəllər Böyük Adron Kollayderi (BAK, CERN) və Amerika Tevatronunda proton-proton, ağır ion (p-Au, p-Pb, Au-Au, Pb-Pb) toqquşmalarında araşdırıl– mışdır. Bir çox nəzəri və eksperimental işlər proseslərin diferensial kəsiyinin (DK) kinematik parametrlərdən: toqquşan protonların enerjisi (\sqrt{s}), birbaşa fotonların eninə impulsu (p_T), səpilmə buca– ğının kosinusu ($Cos(\theta)$), yüyürüklük (y) və x_T parametrindən asılılığı ilə bağlıdır².

Lakin BAK və Tevatrondakı yüksək enerjili toqquşmalar çoxsaylı əlavə zərrəciklərin, o cümlədən termal fotonlarının yaranmasına səbəb olur, bu da birbaşa fotonların DK dəqiq təyinini çətinləşdirir³. Bu, toqquşan nuklonların dinamik strukturu və parton paylanma funksiyasının (PPF) təyinini məhdudlaşdırır. Bu baxımdan NICA kollayderində planlaşdırılan eksperimentlər böyük üstünlüyə malikdir– lər, çünki ağır ionların toqquşma enerjisi ($\sqrt{s}=10$ GeV) əlavə zərrə–

¹ Aad, G. on behalf of the ATLAS Collaboration Measurements of the inclusive and differential production cross sections of a top-quark-antiquark pair in association with a Z boson at \sqrt{s} =13 TeV with the ATLAS detector // Eur. J. Phys. C, – 2021. Aug; v. 81. – p. 1-43.

² Saimpert, M. on behalf of the ATLAS Collaboration Measurement of the inclusive photon and photon+jet production cross-sections at \sqrt{s} = 7 TeV with the ATLAS detector and constraints to PDFs // The XXIII International Workshop on Deep Inelastic Scattering and Related Subjects, – Dallas: Texas, USA, – 2015. – p. 1-8.

³ Adare, A. on behalf of the PHENIX Collaboration Observation of direct-photon collective flow in $\sqrt{s_{NN}}=200$ GeV Au–Au Collisions // Phys. Rev. Lett., – 2012, v. 109, p. 122302-1-7.

ciklərin sayını azaldır. 10 GeV enerji həmçinin perturbativ QCD (pQCD) və bağlı hallar fizikası arasındakı boşluğu doldurur, kvarkın tutulub saxlanılması və faza keçidlərinin təbiətini anlamağa kömək edir⁴.

Tədqiqatın obyekti və predmeti. Tədqiqat obyekti NICA enerjilərində proton-proton toqquşmalarında yaranan birbaşa fotonlardır. DK-in kinematik parametrlərdən: toqquşan protonların enerjisi (\sqrt{s}), eninə impuls (p_T), səpilmə bucağının kosinusu ($Cos(\theta)$), sürətlilik (y) və x_T parametrindən asılılığı dissertasiya işinin predmetini təşkil edir.

Tədqiqatın məqsədi və vəzifələri. Dissertasiya işinin məqsədi NICA enerjilərində birbaşa fotonların Kompton kvark-qlüon səpilməsi $qg \rightarrow q\gamma$, kvark-antikvark cütlüyünün annihilyasiyası $q\bar{q} \rightarrow g\gamma$ tormozlanma şualanması $qq \rightarrow qq\gamma$ altproseslərində yaranmasını tədqiq etməklə dominant prosesi təyin etmək və toqquşan protonların uzununa polyarlaşmasının birbaşa fotonların yaranmasının DK-nə təsirini öyrənməkdir.

Məqsədə çatmaq üçün bu məsələlər həll edilmişdir:

1. Kompton kvark-qlüon səpilməsi, kvark-antikvark cütlüyünün annihilyasiyası altproseslərinin DK-in toqquşan protonların polyar– laşması olmadan və uzununa polyarlaşması nəzərə alınmaqla həyə– canlanmanın aparıcı tərtibində hesablanması;

2. Kompton kvark-qlüon səpilməsi və kvark-antikvark cütlüyü– nün annihilyasiya altproseslərinin DK-in toqquşan protonların pol– yarlaşması olmadan və uzununa polyarlaşması nəzərə alınmaqla hə– yəcanlanmanın növbəti aparıcı tərtibində hesablanması;

3. Kompton kvark-qlüon səpilməsi və kvark-antikvark cütlüyü– nün annihilyasiyası altproseslərinə radiasiya düzəlişlərinin əlavə– lərinin hesablanması;

4. Proton-antiproton toqquşmasında birbaşa fotonların yaranmasının DK-in toqquşan zərrəciklərin polyarlaşması olmadan və uzununa polyarlaşması nəzərə alınmaqla hesablanması.

Tədqiqat metodları. İşin görülməsi zamanı Feynman diaqramı texnikası və kvant sahəsi nəzəriyyəsinin metodları istifadə olunmuş-

⁴ NICA physics: [Electronic resource] / URL: https://nica.jinr.ru/physics.php.

dur. FeynArt proqramından istifadə etməklə proseslərin Feynman diaqramları qurulmuş, FeynCalc proqramında matrisa elementləri və onların kvadratı hesablanmış, Mathmetica-10 mühitində DK-in qiymətləndirməsi aparılmışdır, Origin 8.5 proqramında qrafiklər qurulmuş və Adobe Photoshop 8 proqramında redaktə edilmişdir.

Müdafiəyə çıxarılan əsas müddəalar:

1. Toqquşan protonların enerjisi \sqrt{s} artdıqca, birbaşa fotonların yaranması prosesinin ümumi DK-də Kompton kvark-qlüon səpilməsi altprosesinin payı azalır. Bununla belə, bu altproses NICA enerji-lərində də dominant proses olaraq qalır;

2. Toqquşan protonların uzununa polyarlaşmasının nəzərə alınması DK-in prosesin kinematik parametrlərindən asılılıqlarının xarakterini dəyişmir. Polyarlaşma Kompton kvark-qlüon səpilməsi, kvark-antikvark cütlüyünün annihilyasiyası və tormozlanma şüalanması altproseslərinin DK-nə müxtəlif cür təsir göstərir;

3. Toqquşan protonların yüksək enerjilərində həyəcanlanmanın növbəti aparıcı tərtibində aparılan hesablamaların nəticələri əhəmiy– yətlidir. Toqquşan protonların uzununa polyarlaşması həyəcanlan– manın növbəti aparıcı tərtibində hesablanmış birbaşa fotonların yaranmasının DK-nə əhəmiyyətli dərəcədə təsir edir;

4. Kompton kvark-qlüon səpilməsi altprosesinə radiasiya düzəliş– lərinin əlavələri, kvark-antikvark cütlüyünün annihilyasiyası altprosesinə olan radiasiya düzəlişlərinin əlavələrində daha böyükdür;

5. Birbaşa fotonların proton-antiproton toqquşmasında yaranmasının DK-yi birbaşa fotonların proton-proton toqquşmasında yaranmasının DK-dən daha böyükdür. $\sqrt{s}=10$ GeV enerjilərində də protonantiproton və proton-proton toqquşmalarını eyni hesab etmək olar.

Tədqiqatın elmi yeniliyi:

1. NICA enerjilərində proton-proton toqquşmalarında birbaşa fotonların yaranması Kompton kvark-qlüon $qg \rightarrow q\gamma$ səpilməsi, kvarkantikvark cütlüyünün $q\bar{q} \rightarrow g\gamma$ annihilyasiyası və kvarkların $qq \rightarrow qq\gamma$ tormozlanma şualanması altproseslərinin DK-yi toqquşan protonların polyarlaşması olmadan və uzununa polyarlaşması nəzərə alınmaqla həyəcanlanmanın aparıcı və növbəti aparıcı tərtibində müəyyən edilmişdir;

2. Birbaşa foton yaranmasının Kompton kvark-qlüon səpilməsi və

kvark-antikvark cütlüyünün annihilyasiyası altproseslərinə radiasiya düzəlişlərinin əlavələri hesablanmışdır;

3. Proton-antiproton toqquşmalarında birbaşa fotonların yaranmasının DK-yi və dəniz, valent kvarkların DK-yə payı müəyyən edilmişdir.

Tədqiqatın nəzəri və praktik əhəmiyyəti. NICA enerjilərində BAK və Tevatron üçün alınmış PPF-dan istifadə etmək mümkündür. Protonların uzununa polyarlaşmasının nəzərə alınması DK-in kinematik parametrlərdən asılılıqlarının xarakterini dəyişmir.

Dissertasiya nəticələri aşağı enerjili proton-proton toqquşmalarında birbaşa fotonların yaranmasını təsvir etmək üçün, xüsusilə ilə də NICA planlaşdırılan eksperimentlər üçün istifadə edilə bilər. Nəticələr protonların strukturunu öyrənmək, yeni kinematik intervalda (x, Q^2) PPF-a məhdudiyyətlər qoymaq və Monte-Karlo modelində sistematik qeyri-müəyyənlikləri azaltmaq üçün də faydalıdır.

Aprobasiyası və tətbiqi. Dissertasiyanın işinin materialları Bakı Dövlət Universitetinin Nəzəri fizika kafedrasının seminarlarında; *respublika elmi konfranslarında*, o cümlədən:

–Ümummilli Lider Heydər Əliyevin anadan olmasının 99-cu il– dönümünə həsr olunmuş Gənc Tədqiqatçıların VI Beynəlxalq Elmi Konfransı, Bakı Mühəndislik Universiteti, – Bakı: – Aprel 29-30, – 2022;

–Magistrantların və gənc tədqiqatçıların "ŞUŞA İLİ"-nə həsr olunmuş "Fizika və Astronomiya Problemləri" adlı XXII Ümumres– publika elmi konfransı, Azərbaycan Respublikası Təhsil Nazirliyi, Bakı Dövlət Universiteti, – Bakı: – May 20, – 2022;

–Doktorantların və gənc tədqiqatçıların XXV Respublika elmi konfransı, Bakı Mühəndislik Universiteti, – Bakı: – Noyabr 23-24, – 2022:

–Ümummilli Lider Heydər Əliyevin anadan olmasının 100 illik yubileyinə həsr olunmuş "Fizika və Astronomiyanın Problemləri" mövzusunda Magistrantların və Gənc Tədqiqatçıların XXIII Respub– lika elmi konfransı, – Bakı: – May 25, – 2023;

beynəlxalq konfranslarda:

-2-ci Beynəlxalq Elm və Texnologiya Konfransı, Bakı Mühəndislik Universiteti, Azərbaycan, - Bakı: - 26-27 Noyabr, - 2021; -7-ci Beynəlxalq MTP-2021 konfransı, Fizika üzrə Müasir Trendlər, Bakı Dövlət Universiteti, - Bakı: - 15-17 Dekabr, - 2021;

–Nüvə-2022: Əsas problemlər və tətbiqlər" LXXII Beynəlxalq Konfransı, – Rusiya: Moskva: – 11-16 İyul, – 2022;

-Gənc Alim və Mütəxəssislərin XXVI Beynəlxalq Elmi Konfransı, AYSS-2022, - Moskva: Dubna: - 24-28 Oktyabr, - 2022;

–21-ci Elementar zərrəciklər fizikası üzrə Lomonosov konfransı, Moskva Dövlət Universiteti, – Rusiya: Moskva:, – 24-30 Avqust, – 2023;

-8-ci Beynəlxalq MTP-2023 konfransı, Fizikada Müasir Trendlər, Bakı Dövlət Universiteti, - Bakı: -15-17 Dekabr, -2023;

–V Beynəlxalq Tətbiqi Statistika Konqresi, UYİK-2024, – Türkiyə: İstanbul: – 21-23 May, – 2024;

–Kompüter elmləri və qravitasiya üzrə Beynəlxalq konfrans, – Bakı: – 19-23 Avqust, – 2024 elmi məruzə edilmiş və müzakirə olunmuşdur.

Nəşrlər. Dissertasiya materialları əsasında 21 elmi iş çap olunmuşdur, onlardan 6 məqalə Azərbaycan Respublikası Ali Attestasiya Komissiyasının tövsiyə etdiyi yerli dövri nəşrlərdə, 2 məqalə SCOPUS və Web of Science verilənləri bazalarında indeksləndirilmiş jurnallarda dərc olunmuşdur. 4 məqalə respublika və 2 məqalə beynəlxalq konfransların materiallarında SCOPUS, Web of Science verilənlər bazalarında indeksləndirilmiş jurnallarda dərc olunmuşdur. 7 tezis respublika və beynəlxalq konfransların toplusunda çap olunmuşdur.

Dissertasiya işinin yerinə yetirildiyi təşkilatın adı. Dissertasiya işi Bakı Dövlət Universitetinin Nəzəri fizika kafedrasında və Dubna şəhəri, Rusiya, Birləşmiş Nüvə Tədqiqatları İnstitutu N.N.Boqolyu– bov adına Nəzəri fizika laboratoriyasında aparılmışdır.

Dissertasiyanın struktur bölmələrinin ayrılıqda həcmi qeyd olunmaqla dissertasiyanın işarə ilə ümumi həcmi. Dissertasiya işi "Giriş", 5 fəsil, "Nəticə", "İstifadə edilmiş ədəbiyyat siyahısı" və "İxtisarlar və şərti işarələrin siyahısı"ndan ibarətdir. 2 cədvəl və 283 şəkil və 172 adda mənbənin daxil olduğu ədəbiyyat siyahısı ilə birlikdə işin ümumi həcmi 241 səhifəni əhatə edir. Dissertasiya işinin işarə ilə götürülmüş ümumi həcmi (mətndə boşluqlar, rəqəmlər, cəd– vəllər, qrafiklər, biblioqrafiyalar istisna olmaqla) 210552 simvoldan (o cümlədən, Giriş – 14651, I fəsil – 59836, II fəsil – 51991, III fəsil – 35447, IV fəsil – 45031, V fəsil – 22870, Nəticələr – 3596 simvol).

Müəllifin şəxsi töhfəsi. Müəllif birbaşa fotonların yaranması altprosesləri: kvark-qlüon kompton səpilməsi və kvark-antikvark annilyasiyası üçün DK aparıcı və növbəti aparıcı tərtibdə hesabla– mışdır. DK-yin \sqrt{s} , p_T , $Cos(\theta)$, y, x_T -dən asılılığını müəyyən etmiş və müqayisə etmişdir. Altproseslərə radiasiya düzəlişlərinin əlavə– lərinin və proton-antiproton toqquşmaları üçün DK hesablamışdır. Məsələlərin qoyuluşunda, hesablamalarda, nəticələrin müzakirəsində və məqalələrin hazırlanmasında iştirak etmişdir.

İŞİN MƏZMUNU

Girişdə işin aktuallığı əsaslandırılıb, məqsəd və vəzifələri, elmi yeniliyi, müdafiəyə çıxarılan əsas müddəalar, nəticələrin aprobasiyası və nəşrlər haqqında məlumatlar verilib.

Birinci fəsildə birbaşa fotonların yaranma altproseslərinin: Kompton kvark-qlüon səpilməsinin $qg \rightarrow q\gamma$, kvark-antikvark cütünün annihilyasiyası $q\bar{q} \rightarrow g\gamma$, tormozlanma şualanması $qq \rightarrow qq\gamma$ BAK və Tevatrondakı nəzəri və eksperimental tədqiqatlarına dair ədəbiyyata baxılmışdır. NICA-dakı, xüsusilə polyarlaşmış protonlarla aparılacaq eksperimentlərin üstünlükləri göstərilmişdir. Faza keçidinin, KQP adronlaşmasının tipi və temperaturunun müəyyən edilməsinin imkanı qeyd edilmişdir. Bu fəsildə Feynman diaqramları, kvant sahə nəzəriyyəsi metodları və birbaşa fotonların yaranması tədqiqində istifadə olunan proqramlar (Mathematica, FeynArts, FeynCalc) haqqında məlumat verilmişdir.

İkinci fəsildə NICA enerjilərində proton-proton toqquşmasında birbaşa fotonların Kompton kvark-qlüon səpilməsi $qg \rightarrow q\gamma$, kvarkantikvark cütlüyünün annihilyasiyası $q\bar{q} \rightarrow g\gamma$ və tormozlanma şualanması $qq \rightarrow qq\gamma$ altproseslərində yranmasının DK-yi həyəcanlanmanın aparıcı tərtibində toqquşan protonların polyarlaşması olmadan və uzununa polyarlaşması olmaqla hesablanmışdır.

1. Kompton kvark-qlüon səpilməsi $qg \rightarrow q\gamma$ altprosesinin toqquşan protonların polyarlaşması olmadan DK-yi.

Şəkil 1(a,b)-də birbaşa fotonların proton-proton toqquşması Kom-

pton kvark-qlüonun səpilməsi $qg \rightarrow q\gamma$ altprosesində yaranmasının Feynman diaqramları göstərilmişdir.



Şəkil 1 (a, b).

Kompton səpilməsi altprosesi üçün Mandelştam invariantları aşağıdakı kimidir:

 $\hat{s} = (k_1 + p_1)^2, \hat{t} = (k_1 - k_2)^2 \text{ va } \hat{u} = (p_1 - k_2)^2.$ Matrisa elementinin kvadrati^{5,6}:

$$|\bar{M}|^2 = -\frac{16\pi^2 \alpha \alpha_s}{3} \cdot \frac{\hat{u}^2 + \hat{s}^2}{\hat{u}\hat{s}}.$$

və altprosesin DK-yi bu düsturla hesablanır:

$$\frac{d\hat{\sigma}(qg \to q\gamma)}{d\hat{t}} = \frac{1}{16\pi\hat{s}^2} |\bar{M}|^2.$$

Hesablamaları parton səviyyəsindən adron səviyyəsinə keçirtmək üçün CT14QED, $G_{q_1/h_1}(x_1)^7$ PPF-sı istifadə edilir. Adron səviyyəsin– də DK-lər bu ifadələr ilə hesablanacaqdır:

$$d\sigma = \int (-t) G_{q_1/h_1}(x_1) G_{q_2/h_2}(x_2) dx_1 dx_2 \frac{d\hat{\sigma}}{d\hat{t}} dy$$

⁵ Ализаде М.Р., Исследование подпроцессов qg \rightarrow qү и q $\bar{q} \rightarrow$ gү рождения прямых фотонов при протон-протонном столкновении / А.И.Ахмедов, А.Б.Арбузов // Azərbaycan Milli Elmlər Akademiyasının Xəbərləri, Fizika və Astronomiya, – Bakı: – 2021. N 5, – с.11-19.

⁶ Alizada M.R., Prompt photons production in proton-proton collision at high energies / A.I.Ahmadov, A.B.Arbuzov // Proceedings of the 7th International conference MTP-2021, Modern Trends in Physics, Baku State University, Baku, Azerbaijan December 15-17, – Bakı: – 2021. v. 1, – p.142-145.

⁷ Sampaio dos Santos, G. The color dipole picture for prompt photon production in pp and pPb collisions at the CERN-LHC / G. Sampaio dos Santos, G. Gil da Silveira, M.V.T. Machado // Eur. Phys. J. C, - 2020. v. 80, n. 9, - p. 812-1-13.

$$\frac{d\sigma}{dy} = \int (-t)G_{q_1/h_1}(x_1)G_{q_2/h_2}(x_2)dx_1dx_2\frac{d\hat{\sigma}}{d\hat{t}}.$$
(1)

$$\frac{d\sigma}{dp_T^2} = \int \left(\frac{-t}{2p_T^2}\right)G_{q_1/h_1}(x_1)G_{q_2/h_2}(x_2)dx_1dx_2\frac{d\hat{\sigma}}{d\hat{t}}$$

Şəkil 2(a,b,c,ç,d)-də Kompton kvark-quon səpilməsi altprosesinin kəsiyinin kinemtaik parametrlərdən asılılıqları göstərilmişdir⁵.



Şəkil 2(a)-dan göründüyü kimi, \sqrt{s} artarkən tam kəsik artır, \sqrt{s} = 4.6 GeV-da maksimuma çatır və sonra azalır. Bu, zərrəciklərin qarşılıqlı təsir müddətinin sürətin (enerjinin) artarkən azalması ilə izah olunur, bu da pQCD-nin proqnozları ilə uzlaşır.

Şəkil 2(b) göstərir ki, p_T artarkən DK sürətlə azalır. Bu, fotonların daha çox kiçik bucaqlarda şüalanması ehtimalının yüksək olması ilə bağlıdır, bu da kiçik p_T qiymətlərinə uyğundur. Yüksək p_T də fotonların yaranması güclü əlaqə sabiti (α_s) və PPF tərəfindən azaldılır. pQCD-də sərt səpilmənin ehtimalı ötürülən impulsun (bu halda p_T) artımı ilə azalır, bu da tez azalmanı izah edir.

DK-yin $Cos(\theta)$ -dən asılılığı (şəkil 2(c)) sıfır ətrafında simmetrikdir, $Cos(\theta)\approx\pm0.95$ -də maksimuma və $Cos(\theta)=0$ -da minimuma çatır. Yüyürükdən (y) asılılıq (şəkil 2(d)) də simmetrikdir: maksimumlar müsbət və mənfi y qiymətlərində müşahidə olunur, minimum isə y = 0-da alınır. Bu, kvark və qlüonun eyni uzununa impulsu olduğu zaman prosesin daha az ehtimallı olduğunu göstərir, bu da kvark və fotonun bərabər və əks sürətliliyə malik olması deməkdir.

 x_T -dən asılılıq (şəkil 2(e)) x_T artımı ilə kəskin azalmanı göstərir, bu da aşağı x_T -də altprosesin daha çox ehtimallı olduğunu göstərir. Aşağı x_T -də foton kiçik eninə impuls alır, bu da altprosesin böyük hissəsinin son kvark tərəfindən daşındığı anlamına gəlir. Yüksək x_T də foton böyük hissəni alır, bu da altprosesin daha az ehtimallı olmasını izah edir. Bu, pKXD-nın kvark və qlüounların kiçik nisbi impulsda daha güclü qarşılıqlı təsir etdiyi proqnozuna uyğundur.

2. Kvark-antikvark cütlüyünün $q\bar{q} \rightarrow g\gamma$ annihilyasiyası altprosesinin toqquşan protonların polyarlaşması olmadan DK-yi.

Şəkil 3(a,b) birbaşa fotonların proton-proton toqquşması kvarkantikvark cütlüyünün annihilyasiyası altprosesində yaranmasının Feynman diaqramları göstərilmişdir.

Altproses üçün Mandelştam invariantları aşağıdakılardır: $\hat{s} = (p_1 + p_2)^2$, $\hat{t} = (p_1 - k_1)^2$ və $\hat{u} = (p_2 - k_1)^2$. Matrisa elementinin modulunun kvadratı aşağıdakı kimidir:

$$|\bar{M}|^2 = \frac{128\pi^2 \alpha \alpha_s}{9} \cdot \frac{\hat{u}^2 + \hat{t}^2}{\hat{u}\hat{t}}.$$

Altprosesin DK-yi ifadəsi⁵



Şəkil 3(a, b).

$$\frac{d\sigma_{AT}}{dt} = \frac{1}{16\pi\sqrt{s[s - (m_1 + m_2)^2] \cdot [s - (m_1 - m_2)^2]}} |\bar{M}|^2$$
idir

kimidir.

Şəkil 4(a,b,c,c,d)-də kvark-antikvark cütlüyünün annihilyasiyası altprosesinin kəsiyinin kinematik parametrlərindən asılılıqları göstərilmişdir.

Şəkil 4(a)-dan göründüyü kimi, aşağı enerjilərdə tam kəsik \sqrt{s} artımı ilə sürətlə artır, $\sqrt{s} = 5.2$ GeV-da maksimuma çatır və sonra yavas-yavas azalır. Bu, asağı enerjilərdə kvark və antikvarkin kiçik nisbi sürəti olması ilə izah olunur, bu da qlüon və fotonun yaranması ehtimalını artırır. Yüksək enerjilərdə kəsik KXD-in α_s -i tərəfindən azaldılır.

 p_T -dən asılılıq (şəkil 4(b)) p_T artımı ilə eksponensial azalmanı göstərir. Bu, kvark və antikvarkın PPF-nin azalması ilə bağlıdır. Həmcinin, kvarkın fotonla fragmentasiya funksiyası (FF) də təsir edir.

 $\cos(\theta)$ -dən asılılıq (şəkil 4(c)) sıfır ətrafında simmetrikdir, $|Cos(\theta)| \approx 1$ -də maksimuma çatır. Bu, fotonun düz və ya əks istiqamətdə yaranmasının daha ehtimallı olduğunu göstərir. Yüyürüklükdən (y) asılılıq (şəkil 4(d)) $y = \pm 2$ -də maksimumlarla simmetrik səkildədir, bu da qlüon və fotonun bərabər və əks sürətliliyə malik olduğunu göstərir.

 x_T -dən asılılıq (şəkil 4(e)) x_T artımı ilə kəskin azalmanı göstərir, bu da prosesin kiçik eninə impulsda daha çox ehtimallı olduğunu göstərir.

3. Tormozlanma şualanması $qq \rightarrow qq\gamma$ altprosesinin toqquşan protonların polyarlaşması olmadan DK-yi.



Şəkil 4 (a, b, c, ç, d).

Şəkil 5(a,b,c,ç,d,e,ə,f,g,ğ,h,x,ı,i)-də birbaşa fotonların proton-proton toqquşması tormozlanma şualanması altprosesində yaranmasının Feynman diaqramları göstərilmişdir.



d

f

(Lgg

q

h

q

q







g

q

q

q

N





q



Altproses $q(p_1) + q(p_2) \rightarrow q(p_3) + q(p_4) + \gamma(k_1)$ üçün Mandelştam invariantları aşağıdakı kimidir^{8,9}:

$$\begin{split} \hat{s} &= (p_1 + p_2)^2 = (k_1 + p_3 + p_4)^2, \\ \hat{t} &= (p_1 - k_1)^2 = (p_4 + p_3 - p_2)^2, \\ \hat{u} &= (p_2 - k_1)^2 = (p_4 + p_3 - p_1)^2, \\ \hat{q}_1 &= (p_1 - p_3)^2 = (k_1 + p_4 - p_2)^2, \\ \hat{q}_2 &= (p_2 - p_4)^2 = (k_1 + p_3 - p_1)^2, \\ \hat{s}_1 &= (p_4 + p_3)^2 = (p_1 + p_2 - k_1)^2, \\ \hat{t}_1 &= (p_1 - p_4)^2 = (k_1 + p_1 - p_2)^2, \\ \hat{u}_1 &= (p_2 - p_3)^2 = (k_1 + p_4 - p_1)^2, \\ \hat{q}_3 &= (p_3 + k_1)^2 = (p_1 + p_2 - p_1)^2, \\ \hat{q}_4 &= (p_4 + k_1)^2 = (p_1 + p_2 - p_3)^2. \end{split}$$

Başlanğıc zərrəciklərin spininə görə ortalamış matris elementinin modulinin kvadratı tapılmış və parton səviyyəsində DK aşağıdakı ifadə ilə hesablanmışdır:

$$\frac{d\hat{\sigma}(qq \to qq\gamma)}{d\hat{t}} = \frac{\hat{s}_1}{16\pi\hat{s}^4} |\bar{M}|^2.$$

Şəkil 6(a,b,c,ç,d)-də tormozlanma şualanması altprosesinin kəsiyinin kinematik parametrlərindən asılılıqları göstərilmişdir¹⁰.

Şəkil 6(a)-dan görünür ki, toqquşan protonların enerjisi artdıqca tormozlanma şüalanması prosesinin DK-yi artır. Yüksək enerjilərdə protonun daxilindəki partonlar yüksək sürətə malikdir və onların kəskin tormozlanması əhəmiyyətli şüalanma ilə nəticələnir.

Aşağı enerjilərdə ($\sqrt{s} < 3$ GeV) yumşaq tormozlanma şüalanması üstünlük təşkil edir, burada foton kvarkın kiçik bir hissəsini daşıyır. Orta enerjilər intervalında ($3 < \sqrt{s} < 7$ GeV) şüalanma kollienar tormozlanma şüalanması hesabına güclənir.

⁸ Alizada M.R., Ahmadov A.I., Arbuzov A.B. Prompt photon production in the bremsstrahlung at NICA energies // Journal of Physics & Space Sciences, Baku State University: – Bakı: – 2024. v 1 (2), p. 43-49.

⁹ Alizada M.R. Prompt photon production in bremsstrahlung from quark gluon plasma at $\sqrt{s}=10$ GeV energies // Вестник Московского Государственного Университета, – Москва: – 2024 v. 79, Suppl.1, S39-S41.



Yüksək enerjilərdə ($\sqrt{s} > 7$ GeV) DK "ölü konus" effekti səbəbindən sürətlə azalır.

Şəkil 6(b)-də fotonun eninə impulsu (p_T) -dən asılılıq göstərilir. DK p_T artıqca sürətlə azalır, çünki yüksək enerjili fotonun yaranması ehtimalı azdır. p_T kinematik hədd olan $p_T = \sqrt{s/2}$ -yə yaxınlaşdıqda DK sıfra yaxınlaşır, çünki fotonların şüalanması kinematik olaraq qadağandır. Səpilmə bucağının kosinusundan asılılıq (şəkil 6(c)) simmetrik zəng formalı əyridir. Bu, kvarkların düz bucaq altında səpildiyi halda $(Cos(\theta) = 0)$ foton yaranması ehtimalının minimum, eyni və ya əks istiqamətdə hərəkət etdikdə isə maksimum olduğunu göstərir.

Eyni xarakter yüyürükdən y asılılıq üçün də müşahidə olunur (şəkil 6(d)).

DK-in x_T -dən asılılığı (şəkil 6(e)) onun x_T artıqca sürətlə azaldığını göstərir. Bu, yüksək eninə impulslu foton yaranması ehtimalının aşağı eninə impulslu olduğundan xeyli az olduğunu göstərir. Bu, yaranan birbaşa fotonların eninə impulsundan asılılığına uyğundur.

4. Kompton kvark-qlüon səpilməsi $qg \rightarrow q\gamma$ altprosesinin toqquşan protonların uzununa polyarlaşması olmaqla DK-yi.

Başlanğıc kvark və qlüonun (fotonun) uzununa polyarlaşması və 4-ölçülü spinorların hasili, 4-ölçülü polyarlaşma vektorları, uyğun olaraq bu şəkildə götülülşüşdür¹⁰:

$$U(p_1)\bar{U}(p_1) = \frac{1}{2}(1 - \lambda_1\gamma_5)(\hat{p}_1 + m_1)$$
(2)

burada λ_1 и λ_2 toqquşan zərrəciklərin spirallığı, m_1 , m_2 kvark və antikvarkın kütləsi, \hat{p}_1 , \hat{p}_2 kvark və antikvarkın impulsudur.

Başlanğıc qlüonun (fotonun) polyarlaşma nəzərə almaq üçün başlanğıc zərrəciklərin 4-ölçülü vektorları bu şəkildə yazılmışdır:

$$\hat{e}^{\lambda_2}(k_1) = \frac{(1+\lambda_2\gamma^5)\hat{k}_2\hat{q}\hat{k}_1 + (1-\lambda_2\gamma^5)\hat{k}_1\hat{q}\hat{k}_2}{4\sqrt{(k_1k_2)(k_1q)(k_2q)}},$$
(3)

burada λ_2 başlanğıc qlüonun (fotonun) spirallığı.

Toqquşan zərrəciklərin uzununa polyarlaşması nəzərə alınmaqla, son zərrəciklərin spinlərinə görə ortalanması ilə alınmış matrisa elementinin kvadratının modulu və DK üçün aşağıdakı ifadələr alınmışdır:

$$|\bar{M}|^2 = -\frac{8\alpha_E\alpha_s e_q^2}{9} \left(\frac{\hat{s}}{\hat{u}} \left(1 - 2\lambda_1\lambda_2 + \lambda_2^2 \right) + \frac{\hat{u}}{\hat{s}} \left(1 + 2\lambda_1\lambda_2 + \lambda_2^2 \right) \right)$$

¹⁰ Ji, Z. Measurement of direct photon cross section and double helicity asymmetry at \sqrt{s} = 510 GeV in \vec{p} + \vec{p} collisions at PHENIX // JPS Conf. Proc., – 2022. v. 37, – p. 251901-1-8.

$$\begin{aligned} \frac{d\hat{\sigma}_{POL}(qg \to q\gamma)}{d\hat{t}} = \\ &= -\frac{\alpha_s \alpha_e e_q^2}{18\pi \hat{s}^2} \left(\frac{\hat{s}}{\hat{u}} \left(1 - 2\lambda_1 \lambda_2 + \lambda_2^2\right) + \frac{\hat{u}}{\hat{s}} \left(1 + 2\lambda_1 \lambda_2 + \lambda_2^2\right)\right). \end{aligned}$$

Toqquşan protonların uzununa polyarlaşması nəzərə alınmaqla prosesin adron səviyyəsində ikili spin asimmetriyası bu düsturla ifadə edilir¹¹:

$$A_{LL} = \frac{\sigma^{\uparrow\uparrow} - \sigma^{\uparrow\downarrow}}{\sigma^{\uparrow\uparrow} + \sigma^{\uparrow\downarrow}},\tag{4}$$

burada $\sigma^{\uparrow\uparrow}$ və $\sigma^{\uparrow\downarrow}$ – uyğun olaraq toqquşan protonların polyarlaşması eyni və əks istiqamətdə olduğu halda proseslərin kəsiyidir.

Parton səviyyəsində Kompton kvark-qlüon səpilməsi $qg \rightarrow q\gamma$ altprosesinin ikili spin asimmetriya üçün aşağıdakı ifadə alınmışdır:

$$\hat{A}_{LL} = \frac{2\lambda_1\lambda_2(\hat{u}^2 - \hat{s}^2)}{(\lambda_2^2 + 1)(\hat{u}^2 + \hat{s}^2)}$$
(5)

Bu ifadədən göründüyü kimi, prosesin ikili spin asimmetriyası həm zərrəciklərin spirallığından, həm də partonların kinematik parametr–lərindən asılıdır.

Şəkil 7(a,b,c,ç,d) $qg \rightarrow q\gamma$ prosesinin ikili spin asimmetriyasının kinematik parametrlərdən polyarlaşma dərəcələri P₁, P₂=0.9, -0.9 (əyri 1) və P₁=P₂=±0.9 (əyri 2) olan halda və polyarlaşma dərəcələri P₁, P₂-dən üçölçülü \sqrt{s} =10 GeV-də hesablanmış asılılıqları gös-tərilmişdir¹².

¹¹ Kanazawa, Y. A_{LT} in the polarized Drell-Yan process at RHIC and HERA energies / Y. Kanazawa, Y. Koike, N. Nishiyama // Phys. Lett. B, – 1998. v. 430, – p. 195–202.

¹² Ализаде М.Р., Ахмедов А.И., Арбузов А.Б. Вклад подпроцесса КЭД Комптоновского рассеяния в рождение прямых фотонов в столкновениях продольно поляризованных протонов при энергиях NICA // Письма в ЭЧАЯ, – Москва: Дубна: – 2025. т.22, в.1, – с.6-17.



Şəkil 7(a)-dan göründüyü kimi, hər iki əyri yüksək enerjilərdə sıfıra yaxınlaşır, bu da yüksək enerjilərdə uzununa polayrlaşmanın DK-yə kiçik təsirini göstərir.

 A_{LL} -nin p_T və x_T -dən asılılığı (şəkil 7(b) və 7(d)) göstərir ki, $P_1, P_2 = 0.9, -0.9$ üçün asimmetriya artır və doyma qiymətinə çatır, $P_1 = P_2 = \pm 0.9$ üçün isə azalır.

Üçölçülü qrafik (şəkil 7(e)) göstərir ki, maksimum asimmetriya

 P_1 və P_2 -nin əks qiymətlərində olur. Bu, əks istiqamətli polyarlaşmanın spin effektlərini gücləndirdiyi nəzəriyyəni təsdiqləyir.

5. Kvark-antikvark cütlüyünün $q\bar{q} \rightarrow g\gamma$ annihilyasiyası altprosesinin toqquşan protonların uzununa polyarlaşması olmaqla DK-yi.

Toqquşan protonaların uzununa polyarlaşması və son zərrəciklərin spininə görə ortalanması nəzərə alınmaqla matrisa elementinin modulunun kvadratı və DK üçün aşağıdakı ifadələr alınmışdır:

$$|\bar{\mathbf{M}}|^2 = \frac{8\alpha_e\alpha_s e_q^2}{9} \frac{(\hat{\mathbf{u}}^2 + \hat{\mathbf{t}}^2)}{\hat{\mathbf{t}}\hat{\mathbf{u}}} (1 - \lambda_1 \lambda_2)$$

və

$$\frac{d\hat{\sigma}_{POL}(q\bar{q}\to g\gamma)}{d\hat{t}} = \frac{1}{16\pi\hat{s}^2} |\bar{M}|^2.$$

Parton səviyyəsində kvark-antikvark cütlüyünün annihilyasiyası altprosesinin ikili spin asimmetriası üçün bu ifadə alınmışdır:

$$\hat{A}_{LL} = -\lambda_1 \lambda_2.$$

6. Tormozlanma şualanması $qq \rightarrow qq\gamma$ altprosesinin toqquşan protonların uzununa polyarlaşması olmaqla DK-yi.

Bu prosesin Feynman diaqramları, matrisa elementləri və Mandelştam invariantları toqquşan protonların polyarlaşması olmadığı halda olduğu kimidir.

Kvarkların uzununa polyarlaşmasını nəzərə almaq üçün 4-ölçülü spinorların hasili üçün (2) ifadəsindən istifadə olunmuşdur.

Tam kəsiyin toqquşan protonların enerjiləri cəmindən asılılığı polyarlaşmanın təsirinin bütün enerji intervallarında eyni olduğunun göstərdi.

DK-in birbaşa fotonların eninə impulsu p_T -dən asılılığı onu göstərir ki, polyarlaşmanın təsiri eninə impulsun kiçik qiymətlərində böyükdür, lakin p_T artdıqca bu təsir azalır.

Qeyd etmək olar ki, birbaşa fotonların yaranma prosesinin DK 50%-dən çoxu kvark-qlüon kompton səpilməsi $(qg \rightarrow q\gamma)$ altprosesindən, təxminən 40%-i kvark-antikvark cütünün anilasiyasından $(q\bar{q} \rightarrow g\gamma)$ və 0.03%-dən azı isə tormozlanma şüalanmasından $(qq \rightarrow qq\gamma)$ ibarətdir. NICA enerjilərində də kompton səpilməsi altprosesi üstünlük təşkil edir.

Toqquşan protonların polyarlaşması P_1P_2 işarəsindən asılı olaraq DK gücləndiri və ya zəiflədir. Müsbət P_1P_2 qiymətlərində tormoz– lanma şüalanmasının DK-ni artır, kvark-antikvark anilasiyasının DKni isə azalır. Mənfi P_1P_2 qiymətlərində əks effekt müşahidə olunur.

Kiçik p_T qiymətlərində polyarlaşmaya kompton səpilməsi ($qg \rightarrow q\gamma$) və kvark-antikvark annihilasiyası ($q\bar{q} \rightarrow g\gamma$) üçün əhəmiyyət– lidir. Tormozlanma şüalanması ($qq \rightarrow qq\gamma$) üçün isə bu təsir böyük p_T qiymətlərində daha aydın görünür.

Tormozlanma şüalanması elektromaqnit prosesdir, burada foton zərrəciklərin elektrik sahəsi ilə qarşılıqlı təsirdə olur. Kvarkantikvark annihilyasıyası isə güclü prosesdir, rəng yükü ilə bağlıdır. Tormozlanma şüalanmasında polyarlaşma effekti interferensiyadan, annihilasiyada isə bucaq momentinin saxlanmasından irəli gəlir.

Yüksək enerjilərdə polyarlaşmanın təsiri güclənir, çünki relyativistik protonlar foton və qlüon sahələrinə daha həssas olur. Kiçik p_T qiymətlərində polyarlaşmanın təsiri maksimumdur, p_T artıqca bu təsir zəifləyir.

Üçüncü fəsil Kompton kvark-qlüon səpilməsi və kvark-antikvark cütlüyünün annihilyasiyası altproseslərinə bir ilgəkli Feynman diaqramlarının əlavəsinin tədqiqinə həsr edilmişdir.

1. Kompton kvark-qlüon səpilməsi $qg \rightarrow q\gamma$ altprosesinin toqquşan protonların polyarlaşması olmadan DK-yi.

Altprosesin matrisa elementinin kvadratı və DK-yi parton səviyyəsində aşağıdakı kimi müəyyən edilmişdi¹³

$$|\bar{M}|^2 = \frac{0.0012\alpha_e \alpha_s^3 e_q^2 (\hat{s}^3 + \hat{s}^2 \hat{u} + \hat{s} \hat{u}^2 + \hat{u}^3)}{\hat{u}^2 (\hat{s} + \hat{u})}$$

və

$$\frac{d\hat{\sigma}_{NLO}(qg \to q\gamma)}{d\hat{t}} = \frac{1}{16\pi\hat{s}^2}|\bar{M}|^2.$$

Şəkil 8(a,b,c,ç) $R = d\sigma_{NAT}(qg \to q\gamma)/d\sigma_{AT}(qg \to q\gamma)$ -in kine–

¹³ Ализаде М.Р., Дифференциальное сечение рождения прямых фотонов в протон-протон столкновении с учетом одно-петлевого в, клада на самоэнергию фотона в КХД / А.И.Ахмедов, А.Б.Арбузов // Proceedings of the 2nd International Science and Technology Conference, Baku Engineering University,

⁻ Baku: Azerbaijan, November 26-27, - Bakı: - 2021. - p.212-216.



matik parametrlərdən $\sqrt{s}=10$ GeV-də hesablanmış asılılıqları göstərilmişdir.

Şəkil 8(a)-dan görünür ki, kiçik \sqrt{s} qiymətlərində NAT ilə hesablanmış DK AT-dən çox kiçikdir, lakin yüksək \sqrt{s} qiymətlərində onlar bir-birinə yaxınlaşırlar. Bu, xüsusən yüksək enerjilərdə dəqiq hesablamalar üçün AT düzəlişlərinin əhəmiyyətini göstərir.

Şəkil 8(b)-dən görünür ki, $R p_T = 1$ GeV/c olduqda maksimuma (6.5%) çatır və p_T artıqca azalır. Kiçik və böyük p_T qiymətlərində AT və NAT arasındakı fərq kiçikdir.

NAT düzəlişləri mərkəzdə ($\cos(\theta)=0$) daha əhəmiyyətlidir və düz və əks istiqamətlərdə (yüksək mütləq $\cos(\theta)$ qiymətlərində) daha az önəmlidir.

R-in kinematik parametrlərdən asılılığı göstərir ki, yüksək tərtibəi hədlər prosesin təsvirində, xüsusən yüksək parton enerjilərində, mühüm rol oynayır, bu da pQCD-nin proqnozlarına uyğundur.

2. Kvark-antikvark cütlüyünün $q\bar{q} \rightarrow g\gamma$ annihilyasiyası altprose– sinin toqquşan protonların polyarlaşması olmadan DK-yi.

Bu altprosesin ölçülü nizamlamadan istifadə edərək hesablanmış və başlanğıc protonların spinlərinə görə ortalanmış bir ilgəkli Feynman diaqramlarının əlavəsinin matris elementinin modulunun kvadratı və DK-yi tapılmışdır.

Şəkil 9-da $R = d\sigma_{NAT}(q\bar{q} \rightarrow g\gamma)/d\sigma_{AT}(q\bar{q} \rightarrow g\gamma)$ -in toqquşan protonların enerjiləri cəmindən \sqrt{s} və birbaşa fotonların eninə impulsundan p_T asılılıqları göstərilmişdir.



Şəkil 9 (a, b).

Şəkil 9(a)-dan görünür ki, R qiyməti \sqrt{s} artıqca artır, bu da yüksək enerjilərdə NAT hesablamalarının əhəmiyyətini təsdiqləyir.

Şəkil 9(b)-dən görünür ki, böyük p_T qiymətlərində NAT düzə-lişlərinin payı 30%-ə çatır.

AT və NAT hesablamalarının müqayisəsi göstərir ki, AT-in payı $\alpha_s \alpha$ -ya, NAT-in payı isə $\alpha_s^2 \alpha$ -ya mütənasibdir. NAT hesablamaları əlavə Feynman diaqramlarını və yüksək tərtibli əlavələri nəzərə alır, bu da prosesin daha dəqiq təsvirinə səbəb olur. İnterferensiya həddi $\alpha_s^2 \alpha \log(s/M^2)$ -yə mütənasibdir, burada *M* renormallaşma miqyası–dır.

Kiçik x_T qiymətlərində kəsik artır, bu da NAT hesablamaların daha önəmli olduğunu göstərir.

3. Kompton kvark-qlüon səpilməsi $qg \rightarrow q\gamma$ altprosesinin toqquşan protonların uzununa polyarlaşması olmaqla DK-yi. Matrisa elementi və Mandelştam invariantları polyarlaşma olmayan hald oluğu kimidir. Başlanğıc zərrəciklərin uzununa polyarlaşmasını (2)-də kimi nəzərə alınıb və zərrəciklərin spinlərinə görə ortalamaqla və ölçülü requlyarizasiya aparmaqla $qg \rightarrow q\gamma$ altprosesi üçün bir ilgəkli Feynman diaqramının matrisa elementinin modulunun kvadratı üçün bu ifadəni alınır:

$$|\bar{M}|^2 = -\frac{8\alpha_e \alpha_s e_q^2}{9} \left(\frac{\hat{s}}{\hat{u}} \left(1 - 2\lambda_1 \lambda_2 + \lambda_2^2 \right) + \frac{\hat{u}}{\hat{s}} \left(1 + 2\lambda_1 \lambda_2 + \lambda_2^2 \right) \right).$$

Altproses $qg \rightarrow q\gamma$ üçün parton səviyyəsində NAT-də protonların polyarlaşması nəzərə alınmaqla DK bu şəklidədir:

$$\frac{d\hat{\sigma}_{NAT}(qg \to q\gamma)}{d\hat{t}} = \frac{1}{16\pi\hat{s}^2} |\bar{M}|^2.$$

Adron səviyyəsində DK-yi hesablamaq üçün NAT üçün polyarlanmış PPF nəzərə almaq lazımdır (2).

Şəkil 10(*a*,*b*)-də $R = d\sigma_{NAT_POL}(qg \rightarrow q\gamma)/d\sigma_{NAT}(qg \rightarrow q\gamma)$ -in toqquşan protonlrın enerjisi cəmindən \sqrt{s} və birbaşa fotonların eninə impulsundan p_T asılılıqları göstərilmişdir.



Şəkil 10(a)-dan görünür ki, yüksək enerjilərdə polyarlaşmanın NAT-ya təsiri əhəmiyyətli olur. AT və NAT-in müqayisəsi göstərir ki, polyarlaşma NAT-ə daha çox təsir göstərir (şəkil 8 və 10). Bunun izahı 3.2 bölməsində verilmişdir.

4. Kvark-antikvark cütlüyünün annihilyasiyası $q\bar{q} \rightarrow g\gamma$ altprosesinin toqquşan protonların eninə polyarlaşması olmaqla DK-yi.

Birbaşa fotonların yaranması prosesində $q\bar{q} \rightarrow g\gamma$ altprosesinin Mandelştam invariantları və matrisa elementləri NAT hesablamala– rında polyarlaşma olmadığı halda olduğu kimi qalır. Başlanğıc pro– tonların polyarlaşmasını nəzərə alaraq (2), ölçülü requlyarizasiya aparmaqla $q\bar{q} \rightarrow g\gamma$ altprosesi üçün bir ilgəkli Feynman diaqramının matrisa elementinin modulunun kvadratı üçün bu ifadəni alırıq:

$$\begin{split} |\bar{M}|^2 &= -(\alpha_s e^2 e_q^2 (1 - \lambda_1 \lambda_2) (\alpha_s^2 (0.0004 \hat{s}^2 + 0.0008 \hat{s} \hat{t} + 0.0008 \hat{t}^2) + 0.001 \alpha_s \hat{s}^2 \hat{t}^2 + 0.0006 \hat{s}^4 \hat{t}^2) / (\hat{t} (\hat{s} + \hat{t})) \end{split}$$

 $q\bar{q} \rightarrow g\gamma$ altprosesinin DK-yi, protonların polyarlaşması nəzərə alaraq, parton səviyyəsində NAT-də aşağıdakı kimi hesablanır:

$$\frac{d\hat{\sigma}_{NAT}(q\bar{q}\to g\gamma)}{d\hat{t}} = \frac{1}{16\pi\hat{s}^2}|\bar{M}|^2.$$

Şəkil 11(a,b)-də $R = d\sigma_{NAT}(q\bar{q} \rightarrow g\gamma)/d\sigma_{AT}(q\bar{q} \rightarrow g\gamma)$ -in toqquşan protonların enerjiləri cəmindən və birbaşa fotonların eninə impulsu p_T -dən $\sqrt{s} = 10$ GeV-də qurulmuş asılılıqları göstərilmişdir.

Şəkil 11(a)-dan görünür ki, R qiyməti \sqrt{s} artıqca artır, bu da yüksək enerjilərdə NAT-in əhəmiyyətini təsdiqləyir.

Şəkil 11(b)-dən görünür ki, böyük p_T qiymətlərində NAT payı 30%-ə çatır.

Bunların izahı 3.2 bölməsində verilmişdir.



Şəkil 11 (a, b).

Dördüncü fəsil Kompton kvark-qlüon səpilməsinə altprosesinə 1. $qg \rightarrow qg\gamma$, 2. $qg \rightarrow q\gamma\gamma$, 3. $q\gamma \rightarrow qg\gamma$, 4. $g\gamma \rightarrow q\bar{q}\gamma$, 5. $q\gamma \rightarrow q\gamma$ radiasiya düzəlişlərinin, kvark-antikvar cütlüyünün annihilyasiyası altprosesinə $q\bar{q} \rightarrow g\gamma\gamma$, $q\bar{q} \rightarrow gg\gamma$ və $q\bar{q} \rightarrow q\bar{q}\gamma$ radiasiya düzəliş– lərinin əlavələrinin tədqiqinə həsr olunub¹⁴.

1.Protonların polyarlaşması olmadan kvark-qlüon $qg \rightarrow g\gamma$ altprosesinə radiasiya düzəlişləri.

Bu altproseslərin: $qg \rightarrow qg\gamma$, $qg \rightarrow q\gamma$, $q\gamma \rightarrow qg\gamma$, $g\gamma \rightarrow q\bar{q}\gamma$ və $q\gamma \rightarrow q\gamma$ matrisa elementlərinin modulunun kvadratı tapılmışdır ^{15,16}. Bu altproseslərin DK-yi bu ifadə ilə hesablanmışdır:

$$\frac{d\hat{\sigma}}{d\hat{t}} = \frac{\hat{s}_1}{16\pi^2 \hat{s}^4} |\bar{M}|^2 \tag{6}$$

Adron səviyyəsi üçün DK-in ifadəsini (6), (1) və (2) ifadələrindən istifadə etməklə almaq olar.

 $2.q\bar{q} \rightarrow g\gamma$ altprosesinə protonların polyarlaşması olmaqla radiasiya düzəlişləri.

Bu altproseslərin: $q\bar{q} \rightarrow g\gamma\gamma$, $q\bar{q} \rightarrow gg\gamma$ və $q\bar{q} \rightarrow q\bar{q}\gamma$ matrisa elementlərinin modulunun kvadratı hesablanmışdır.

Bu proseseslərin parton səviyyəsində DK-yi (6) kimi hesablanır, və hadron səviyyəsində DK-in ifadəsini almaq üçün (1) və (2) ifadələrindən istifadə olunur.

Şəkil 12(a,b)-də kvark-qlüon Kompton səpilməsinə və kvarkantiquark cütlüyünün annihilyasiya proseslərinə radiasiya düzəlişlərinin əlavələrinin DK-in fotonun eninə impulsu p_T -ən asılılığı göstərilmişdir.

Kompton kvark-qlüon səpilməsinə radiasiya düzəlişlərinin əlavələri aşağıdakı münasibətləri ödəyir:

¹⁴ Alizada M.R., Ahmadov A.I. Radiation correction to Compton scattering of kvarkqlüon and annihilation of kvark-antikuark pair processes of prompt photon production in proton-proton collisions at high energies // Azərbaycan Milli Elmlər Akademiyasının Xəbərləri, Fizika və Astronomiya, – Bakı: – 2023. N 2, – c.3-10.

¹⁵ Ализаде М.Р., Ахмедов А.И., Арбузов А.Б. Рождение прямых фотонов в подпроцессах qg → qγ и qγ → qγ Комптоновского рассеяния в протон-протонных столкновениях при энергиях NICA // Письма в ЭЧАЯ, Москва: – Дуна: – 2024. т.21, в.2, – с.85-89.

¹⁶ Ализаде М.Р., Ахмедов А.И., Арбузов А.Б. Рождение прямых фотонов в подпроцессах qg → qγ и qγ → qγ Комптоновского рассеяния в протонпротонных столкновениях при энергиях NICA // Письма в ЭЧАЯ, Москва: – Дуна: – 2024. т.21, в.2, – с.85-89.



Şəkil 12 (a, b).

Kvark-antiquark cütlüyünün annihilyasiyasına radiasiya düzəlişlərinin əlavələri aşağıdakı münasibətləri ödəyir:

$$\frac{d\sigma(q\bar{q} \to gg\gamma)}{dp_T^2} > \frac{d\sigma(q\bar{q} \to g\gamma\gamma)}{dp_T^2} > \frac{d\sigma(q\bar{q} \to q\bar{q}\gamma)}{dp_T^2}$$

3. Kompton kvark-qlüon səpilməsi $qg \rightarrow q\gamma$ altprosesinə toqquşan protonların uzununa polyarlaşması olmaqla radiasiya düzəlişlərinin əlavəsi.

Kvark-qlüon prosesinin $q\gamma \rightarrow q\gamma$ matrisa elementinin modulunun kvadratı üçün ifadə toqquşan protonların spinlərinə görə ortalanması nəzərə alınmaqla aşağıdakı kimi olacaq:

$$|\bar{M}|^{2} = -\frac{8e^{2}e_{q}^{2}}{27} \left(\frac{\hat{s}}{\hat{u}} \left(1 - 2\lambda_{1}\lambda_{2} + \lambda_{2}^{2} \right) + \frac{\hat{u}}{\hat{s}} \left(1 + 2\lambda_{1}\lambda_{2} + \lambda_{2}^{2} \right) \right).$$

Toqquşan protonların polyarlaşması nəzərə alınmaqla parton səviyyəsində $q\gamma \rightarrow q\gamma$ prosesinin DK-yi budur:

$$rac{d\hat{\sigma}_{POL}(q\gamma
ightarrow q\gamma)}{d\hat{t}}=-rac{\pilpha_e^2e_q^2}{4\hat{s}^2e^2}|ar{M}|^2.$$

Parton səviyyəsində polyarlaşma nəzərə alınmaqla və alınmadan hesablanmış, DK-lər arasında əlaqə bu şəkildədir:

$$\frac{d\hat{\sigma}_{\text{pol}}}{d\hat{t}} = \frac{\left(\hat{s}^2(1-2\lambda_1\lambda_2+\lambda_2^2)+\hat{u}^2(1+2\lambda_1\lambda_2+\lambda_2^2)\right)}{(\hat{s}^2+\hat{u}^2)}\frac{d\hat{\sigma}}{d\hat{t}}.$$

Parton səviyyəsində $q\gamma \rightarrow q\gamma$ prosesi üçün ikili spin asimmetriyası (5)-də kimi hesablanır.

DK-lər üçün (1), (2) formulalarından istifadə edərək, adron səviy–yəsində ikili spin asimmetriya üçün bu ifadəni alarıq:

$$A_{LL} = P_1 P_2 \frac{\int \Delta G_{r_1/h_1}(x_1) \Delta G_{r_2/h_2}(x_2) \hat{A}_{LL} d\hat{\sigma}_{\text{unpol.}} dx_1 dx_2}{\int G_{r_1/h_1}(x_1) G_{r_2/h_2}(x_2) d\hat{\sigma}_{unpol.} dx_1 dx_2}$$

burada P_1 və P_2 toqquşan protonların polyarlaşma dərəcəsi, $\Delta G_{r_i/h_i}(x) = G_{r_i/h_i}^{\uparrow}(x) - G_{r_i/h_i}^{\downarrow}(x) -$ müxtəlif polyarlaşma istiqamət– ləri üçün PPF-nın fərqi, $G_{r/h}(x) = G_{r/h}^{\uparrow}(x) + G_{r/h}^{\downarrow}(x) -$ PPF-nın cəmi $d\hat{\sigma}_{pol.}$ – spin istiqamətinə bağlı polyarlaşma olunmuş və, $d\hat{\sigma}_{unpol.}$ – polyarlaşma olunmamış parton kəsiyi ifadə edir.

Şəkil 13(a,b,ç,c,d)-də $qg \rightarrow q\gamma$ və $q\gamma \rightarrow q\gamma$ proseslərinin ikili spin asimmetriyasının kinematik parametrlərdən asılılıqları göstərilmişdir. Asılıqlar P_1 , $P_2 = 0.9$, -0.9 (müvafiq olaraq, 1 və 2 əyriləri) və $P_1 = P_2 = 0.9$ (müvafiq olaraq, 1' və 1' əyriləri) halları üçün hesablanmışdır. Üçölçülü qrafikdə $qg \rightarrow q\gamma$ və $q\gamma \rightarrow q\gamma$ proseslərinin ikili spin asimmetriyasının protonların polyarlaşma dərəcələri P_1 və P_2 -dən asılılıqları verilmişdir ($\sqrt{s} = 10 \text{ GeV}$)¹³.

Şəkil 13(a)-dan görünür ki, $P_1, P_2 = 0.9, -0.9$ halında asimmetriya \sqrt{s} artıqca artır, $P_1 = P_2 = \pm 0.9$ halında isə azalır.





Şəkil 13 (a, b, ç, c, d).

Asimmetriyanın p_T və x_T -dən asılılığı göstərir ki, $P_1, P_2 = 0.9, -0.9$ halında bu parametrlər artıqca asimmetriya azalır, $P_1 = P_2 = \pm 0.9$ halında isə artır.

Üçölçülü qrafik (şəkil 13(e)) göstərir ki, maksimum asimmetriya P_1 və P_2 əks işarəli olduqda müşahidə olunur. Bu, nəzəri proqnozlara uyğundur, çünki əks istiqamətli polyarlaşma spin effektlərini güc-ləndirir.

4. Kvark-antiquark cütlüyünün annihilyasiya altprosesinə $qg \rightarrow g\gamma$ toqquşan protonların uzununa polyarlaşması olmaqla radiasiya düzəlişlərinin əlavəsi.

Şəkil 14-də, $q\bar{q} \rightarrow gg\gamma$, $q\bar{q} \rightarrow g\gamma\gamma$ və $q\bar{q} \rightarrow \gamma\gamma$ altproseslərinin ikili spin asimmetriyanın A_{LL} toqquşan protonların polyarlaşma dərəcələrinin hasilindən asılılığı göstərilmişdir.

Göründüyü kimi, P_1P_2 -nin artması ilə A_{LL} azalır.



Şəkil 15(a,b,c,ç)-də, $q\bar{q} \rightarrow q\bar{q}\gamma$ altprosesinin ikili spin asimmetriyasının A_{LL} toqquşan protonların enerjiləri cəmindən \sqrt{s} asılılığı toqquşan protonların polyarlaşma dərəcələrinin hasilinin $P_1P_2 =$ 0.81 və -0.81 qiymətlərində uyğun olaraq 1 və 1' əyriləri (a), ikili spin asimmetriysının A_{LL} -in fotonun eninə impulsundan p_T asılılığı toqquşan protonların polyarlaşma dərəcələrinin hasilinin $P_1P_2 =$ -0.81 və 0.81 qiymətlərində uyğun olaraq 1 və 1' əyriləri və həmçinin $P_1P_2 =$ -0.25 və 0.25 qiymətlərində uyğun olaraq 2 və 2' əyriləri (b), ikili spin asimmetriysının A_{LL} -in yüyürüklük y və x_T -dən olan asılılıqları $P_1P_2 =$ 0.81 və $P_1P_2 =$ -0.81 olduqda uyğun olaraq 1 və 1' əyriləri göstərilmişdir.

Şəkil 15(a)-dan görünür ki, polyarlaşma aşağı enerjilərdə böyük təsir göstərir. $\sqrt{s} = 5.5$ GeV olduqda polyarlaşma nəzərə alınmadan və nəzərə alınmaqla hesablanmış DK-lər üst-üstə düşür, lakin p_T artıqca $P_1P_2 < 0$ halında kəsik azalır, $P_1P_2 > 0$ halında isə artır.

İkili spin asimmetriya p_T artıqca $P_1P_2 < 0$ halında artır, $P_1P_2 > 0$ halında azalır və müəyyən p_T -də doymaya çatır (şəkil 15(b)). Doyma qiyməti və $p_T |P_1P_2|$ -nin artması ilə artır.

Şəkil 15(c)-dən görünür ki, $A_{LL} \ y \in [-2,0]$ intervalında $P_1P_2 < 0$ halında artır (əyri 1), $P_1P_2 > 0$ halında azalır (əyri 1'). y = 0 olduqda $P_1P_2 < 0$ halında maksimum, $P_1P_2 > 0$ halında minimum qiymət alır.

Şəkil 15(d)-də x_T artıqca A_{LL} azalır (əyri 1) və ya artır (əyri 1'). $qg \rightarrow q\gamma$ altprosesi üçün A_{LL} başlanğıc zərrəciklərin polyarlaşma– sından zəif asılıdır. A_{LL} -nin maksimumu P_1 və P_2 əks işarəli olduqda müşahidə olunur.



Şəkil 15 (a, b, ç, c).

Beləliklə, Kompoton səpilməsi $qg \rightarrow q\gamma$ üçün radiasiya düzəliş– lərinin payı kvark-antikvark cütlüyünün annihilyasiyası $q\bar{q} \rightarrow g\gamma$ üçün olan düzəlişlərdən daha əhəmiyyətlidir.

Beşinci fəsil birbaşa fotonların proton-antiproton toqquşmasında yaranmasının tədqiqinə həsr olunmuşdur.

Proton-proton toqquşmalarında Kompton səpilməsi altprosesi üçün bu proseslərin olması mümkündür: 1. $u_vg \rightarrow u_v\gamma$, 2. $u_sg \rightarrow u_s\gamma$, 3. $\bar{u}_sg \rightarrow \bar{u}_s\gamma$, 4. $d_vg \rightarrow d_v\gamma$, 5. $d_sg \rightarrow d_s\gamma$ və 6. $\bar{d}_sg \rightarrow \bar{d}_s\gamma$. Kvarq-antikvark cütlüyünün annihilyasiya altprosesinə gəldikdə isə, bu proseslər mümkündür: 1. $u_v\bar{u}_s \rightarrow g\gamma$, 2. $d_v\bar{d}_s \rightarrow g\gamma$, 3. $u_s\bar{u}_s \rightarrow g\gamma$ və 4. $d_s\bar{d}_s \rightarrow g\gamma$, burada u_v, d_v – valent, u_s, d_s – dəniz kvarkla–rıdır.

Proton-antiproton toqquşması zamanı altproseslər, proton-proton toqquşmasında olduğu kimi, Kompton səpilməsı $qg \rightarrow q\gamma$ və kvark-

antikvark cütlüyünün annihilyasiyası $q\bar{q} \rightarrow g\gamma$ altproseslərindən ibarətdir. Proton-antiproton toqquşmasında Kompton səpilməsi alt– prosesində bu altproseslərin baş verməsi mümkündür: 1. $u_vg \rightarrow u_v\gamma$, 2. $\bar{u}_vg \rightarrow \bar{u}_v\gamma$, 3. $u_sg \rightarrow u_s\gamma$, 4. $\bar{u}_sg \rightarrow \bar{u}_s\gamma$, 5. $d_vg \rightarrow d_v\gamma$, 6. $\bar{d}_vg \rightarrow \bar{d}_v\gamma$, 7. $d_sg \rightarrow d_s\gamma$ və 8. $\bar{d}_sg \rightarrow \bar{d}_s\gamma$. Kvarq-antiquark cütlüyü annihilyasiyası altprosesində isə bu altproseslər ola bilər: 1. $u_v\bar{u}_v \rightarrow g\gamma$, 2. $u_s\bar{u}_s \rightarrow g\gamma$, 3. $u_v\bar{u}_s \rightarrow g\gamma$, 4. $u_s\bar{u}_v \rightarrow g\gamma$, 5. $d_v\bar{d}_v \rightarrow$ $g\gamma$, 6. $d_s\bar{d}_s \rightarrow g\gamma$, 7. $d_v\bar{d}_s \rightarrow g\gamma$ və 8. $d_s\bar{d}_v \rightarrow g\gamma$.

1.Proton-antiproton toqquşmasının toqquşan proton və antiprotonun polyarlaşması olmadan DK-yi.

Şəkil 16(a,b,ç,c,d)-də proton-antiproton $p\bar{p} \rightarrow \gamma X$ toqquşmasında birbaşa fotonların yaranmasının kəsiyinin kinematik parametrlərdən asılılıqları göstərilmişdir¹⁷.

Şəkil 16(a)-dan göründüyü kimi, $p\bar{p} \rightarrow \gamma X$ prosesinin tam kəsiyi– nin \sqrt{s} -dən asılılığı $pp \rightarrow \gamma X$ prosesindən yüksəkdir (şəkil 2(a), şəkil 4(a), şəkil 6(a)). Bu, proton və antiprotonun kvark tərkibinin fərqi ilə izah olunur.

Şəkil 16(b)-dən görünür ki, p_T artıqca DK azalır. Kiçik p_T -li fotonların qeyd olunma ehtimalı böyük p_T -li fotonlardan çoxdur.

DK-in səpilmə bucağının kosinusundan ($\cos\theta$) və yüyürüklüyündən (y) asılılığı $\cos\theta = y = 0$ nöqtəsinə nisbətən simmetrikdir. DK-in



¹⁷ Alizada M.R. Prompt photon production in proton-proton and proton-antiproton collisions // Doktorantların və gənc tədqiqatçıların XXV Respublika elmi konfransı, Bakı: – 2022, 23-24 noyabr, s.67-71.



Şəkil 16 (a, b, c, ç, d).

maksimum qiyməti $\cos\theta$ və y intervalının sərhədlərinə yaxın alınır (şəkil 16(c,d)).

DK-in x_T -dən asılılığı p_T -dən asılılığına oxşardır.

Şəkil 17(a,b)-də $R = d\sigma(p\bar{p} \rightarrow \gamma X)/d\sigma(pp \rightarrow \gamma X)$ -dən \sqrt{s} -dən (a) və p_T -dan (b) asılılığı göstərilir ($\sqrt{s} = 10$ GeV).



Şəkil 17(a)-dan görünür ki, $R \sqrt{s}$ artıqca azalır və asimptotik olaraq 1,66-a yaxınlaşır. Məlumdur ki, BAK və Tevatron enerjilərində R = 1-dir, yəni yüksək enerjilərdə proton-proton və protonantiproton toqquşmaları arasında fərq yoxdur. NICA enerjilərində də $pp \rightarrow \gamma X$ və $p\bar{p} \rightarrow \gamma X$ proseslərini eyni hesab etmək olar.

2.Proton-antiproton toqquşmasının başlanğıc proton və antipotonun uzununa polyarlaşması olmaqla DK-yi.

Feynman diaqramları, Mandelştam invariantları və matrisa elementləri bu proses üçün də dəyişməz qalır. Protonun polyrlaşması (2) və (3)-də göstərildiyi kimidir.

Antiprotonun uzununa polyarlaşması aşağıdakı kimi nəzərə alınır:

$$v(p_2)\bar{v}(p_2) = \frac{1}{2}\hat{p}_2(1+\gamma_5\lambda_2),$$

burada λ_2 başlanğıc antikvarkın spirallığıdır.

Şəkil 18(a,b,ç,c,d)-də, proton və antiprotonların polyarlaşmasını nəzərə alaraq $p\bar{p} \rightarrow \gamma X$ prosesinin tam kəsiyinin P₁, P₂=0.9, -0.9 (əyri 1) və P₁=P₂= ±0.9 (əyri 2) olan hallarda toqquşan zərrəciklərin enerjiləri cəmindən \sqrt{s} (a), DK-in birbaşa fotonların eninə impulsu p_T (b), səpilmə bucağının kosinusu (c), yüyürüklüyü y (d) və x_T (e) -dən $\sqrt{s} = 10$ GeV-də hesablanmış asılılıqlar verilmişdir.

Şəkil 18(a)-dən göründüyü kimi, kiçik enerjilərdə uzununa polyarlaşma, birbaşa fotonların proton-proton toqquşmalarında yaranma prosesinə böyük təsir göstərir. Böyük enerjilərdə isə uzununa polyarlaşmanın proton-proton $pp \rightarrow \gamma X$ və proton-antiproton $p\bar{p} \rightarrow \gamma X$ toqqquşmalarına təsiri demək olar ki, eynidir.

Kvark-antikvark cütlüyünün annihilyasiyası altprosesinin DK-yi P_1P_2 hasilinin işarəsindən asılı olaraq artır və ya azalır. İkili spin asimmetriyası A_{LL} P_1P_2 -dən xətti asılıdır və P_1 və P_2 işarələrinin dəyişməsinə nisbətən simmetrikdir: $A_{LL}(-P_1, P_2) = A_{LL}(P_1, -P_2)$. Bu münasibət, həm proton-proton, həm də proton-antiproton toqquş-maları üçün doğrudur.



Şəkil 18 (a, b, ç, c, d).

NƏTİCƏ

- 1. Proton-proton toqquşmasında birbaşa fotonların yaranması əsasən Kompton kvark-qlüon səpilməsi $qg \rightarrow q\gamma$, kvark-antikvark cütlüyünün annihilyasiyası $q\bar{q} \rightarrow g\gamma$ və tormozlanma şualanmsı $qq \rightarrow qq\gamma$ altproseslərində baş verir. Kompton kvark-qlüon səpilməsi, kvark-antikvark cütlüyünün annihilyasiyası və tormozlanma şüalanması altproseslərinin DK-yi birbaşa foton yaranması prosesinin ümumi DK-in uyğun olaraq 50%-dən çoxunu, təxminən 43%-ni və 0,03%-dən çoxunu təşkil edir. Kompton kvark-qlüon səpilməsi $qg \rightarrow q\gamma$ altprosesi dominant altprosesdir. Bu onu göstərir ki, NICA enerjilərində də, BAK və Tevatron enerjilərində olduğu kimi protonda qlüonlar çoxluq təşkil edir.
- 2. Proton-proton toqquşmasında birbaşa fotonların yaranması Kompton kvark-qlüon səpilməsi, kvark-antikvark cütlüyünün annihilyasiyası və tormozlanma şualanması altproseslərinin kəsiyi kinematik parametrlərdən asılılığı bu şəkildədir: tam kəsik toqquşan zərrəciklərin enerjisinin artması ilə artır, DK fotonların eninə impulsunun artması ilə azalır və fotonların zərrəciklərin toqquşma oxuna yaxın bucaqlarda (16 və 164 dərəcə) yaranması böyük ehtimallıdır.
- Toqquşan zərrəciklərin uzununa polyarlaşması Kompton kvark-3. qlüon səpilməsi, kvark-antikvark cütlüyünün annihilasiyası və tormozlanma sualanması altproseslərinin DK-in kinematik parametrlərdən asılılıqlarının davranışını dəyişmir. Toqquşan zərrəciklərin uzununa polyalaşması Kompton kvark-qlüon səpilməsi, kvark-antikvark cütlüyünün annihilyasiyası və tormozlanma şualanması altproseslərinin DK-in qiymətinə müxtəlif cür təsir göstərir. Toqquşan zərrəciklərin polyarlaşması eyni istiqaməti olarsa Kompton kvark-qlüon səpilməsi və kvark-antikvark cütlüyünün annihilyasiyası altproseslərinin DK-yi azalır, tormozlanma sualanması altprosesinin DK-yi isə artır. Toqquşan zərrəciklərin polyarlaşması əsasən kvark-antikvark cütlüyünün annihilyasiyası altprosesinə böyük təsir göstərir. Protonun polvarlasmasının prosesin DK-yə təsiri parton spinlərinin garsılıqlı

təsiri ilə əlaqədardir.

- 4. Kompton kvark-qlüon səpilməsi və kvark-antikvark cütlüyünün annihilyasiyası üçün növbəti aparıcı tərtibdə hesablanan DK-lər aparıcı tərtibdə aparılan hesablamaların müvafiq olaraq təxminən 15% və 30%-ni təşkil edir. Toqquşan protonların uzununa polyarlaşması növbəti aparıcı tərtibdə hesablanmalara daha çox təsir göstərir. Növbəti aparıcı tərtibdə aparılan hesablamaların prosesin kəsiyinə verdiyi pay toqquşan protonların yüksək enerjilərində daha əhəmiyyətlidir.
- 5. Kvark-qlüon səpilməsi altprosesinə radiasiya düzəlişlərinin payı altprosesin təqribən 30%-ni, kvark-antikvark cütlüyünün anni– hilyasiyasına radiasiya düzəlişlərinin payı isə bu altprosesin təqribən 5%-ni təşkil edir. Kvarkın güclü qarşılıqlı təsir kvantı qlüon ilə qarşılıqlı təsiri kvarkın elektrik sahəsinin kvantı foton ilə qarşılıqlı təsirindən güclü olduğunu göstərir.
- 6. Birbaşa fotonların proton-antiproton toqquşması prosesində yaranmasının DK-yi onların proton-proton toqquşması prosesin– dən yaranmasının DK-dən daha böyükdür. NICA enerjilərində proton-antiproton və proton-proton toqquşması proseslərinin DK-in nisbəti 1,66-dır ki, bu da NICA enerjilərində protonproton və proton-antiproton toqquşmalarını eyni hesab etməyə imkan verir. Yüksək enerjilərdə dəniz kvarklarının proton-anti– proton toqquşmasının DK-nə təsiri azalır. Toqquşan zərrəcik– lərin uzununa polyarlaşması proton-antiproton toqquşması prosesinin DK-nə böyük təsir edir.
- 7. Keyfiyyətcə altproseslərin DK-in kinematik parametrlərdən asılılıqları BAK, Tevatron-un eksperimental nəticələrinə uyğundur. NICA enerjiləri üçün DK-in hesablamalarında CT14QED parton paylama funksiyasından istifadəsi müsbət nəticələr verir. Bununla belə, seçimin düzgünlüyünü tam təsdiqləmək üçün nəzəri hesablamaların NICA-nın təcrübi nəticələri ilə müqayisəsi tələb olunur.

Dissertasiya işinin mövzusu üzrə dərc olunmuş elmi işlər:

- 1. Ализаде, М.Р. Исследование подпроцессов $qg \rightarrow q\gamma$ и $q\bar{q} \rightarrow g\gamma$ рождения прямых фотонов при протон-протонном столкновении / А.И.Ахмедов, А.Б.Арбузов // Bakı: Аzər-baycan Milli Elmlər Akademiyasının Xəbərləri, Fizika və Astronomiya, 2021. N 5, с. 11-19.
- Ализаде, М.Р. Дифференциальное сечение рождения прямых фотонов в протон-протон столкновении с учетом однопетлевого в, клада на самоэнергию фотона в КХД / А.И.Ахмедов, А.Б.Арбузов // Proceedings of the 2nd International Science and Technology Conference, Baku Engineering University, – Baku: – November 26-27, – 2021, – p. 212-216.
- Alizada, M.R. Prompt photons production in proton-proton collision at high energies / A.I.Ahmadov, A.B.Arbuzov // Abstract book of the 7th International conference MTP-2021, Modern Trends in Physics, Baku State University, Azerbaijan, – Baku: – December 15-17, – 2021, – p. 22-23.
- Alizada, M.R. Prompt photons production in proton-proton collision at high energies / A.I.Ahmadov, A.B.Arbuzov // – Proceedings of the 7th International conference MTP-2021, Mo– dern Trends in Physics, Baku State University, Azerbaijan, – Bakı: – December 15-17, – 2021, 1, – p. 142-145.
- Alizada, M.R. Study of polarization effects in prompt photon production / A.I.Ahmadov, A.B.Arbuzov // Azərbaycan Milli Elmlər Akademiyasının Xəbərləri, Fizika və Astronomiya, – Bakı: – 2022. N 2, – c.9-16.
- 6. Ализаде, М.Р. Рождение прямых фотонов при протон-протон столкновении в энергиях NICA $\sqrt{s} = 10$ GeV // Azərbaycan Respublikası Təhsil Nazirliyi, Bakı Dövlət Universiteti Magistrantların və gənc tədqiqatçıların "ŞUŞA İLİ" nə həsr olunmuş "Fizika və Astronomiya Problemləri" adlı XXII Ümumrespublika elmi konfransı, – Bakı: – May 20, – 2022. – p. 13-14.
- 7. Ализаде, М.Р., Рождение фотонов в процессах $\pi^+\pi^- \to \gamma \rho^0$, $\rho^0 \to \pi^+\pi^-\gamma$ Ümummilli Lider Heydər Əliyevin anadan

olmasının 99-cu il dönümünə həsr olunmuş Gənc Tədqiqatçıların VI Beynəlxalq Elmi Konfransı 29-30 Aprel 2022 Bakı Mühən– dislik Universiteti, Xırdalan/Azərbaycan Dövlət Gömrük Komi– təsinin Akademiyası, Sabunçu/Azərbaycan, – Bakı: – 2022. – s. 41-45.

- 8. Alizada, M.R. Thermal photons production in proton-proton collision at high energies // LXXII Международной конференции "Ядро-2022: Фундаментальные вопросы и приложения", – Москва: – 2022, – Июль 11-16, – р. 225.
- 9. Alizada M.R. Prompt photon production in proton-proton and proton-antiproton collisions // Doktorantların və gənc tədqiqatçıların XXV Respublika elmi konfransı, – Bakı: – 2022, Noyabr 23-24, – s.67-71.
- Alizada, M.R., Ahmadov, A.I. Thermal photons production in proton-proton collisions at high energies. Part I. Differential cross-sections of processes, calculated without and taking into account formfactor of mesons // – Bakı: Azerbaijan Journal of Physics "Fizika", – 2023. XIX(1), Section En, – p. 3-12.
- Alizada, M.R., Ahmadov, A.I. Thermal photons production in proton-proton collisions at high energies. Part II. Determination of dominant process of production of thermal photons // – Bakı: Azerbaijan Journal of Physics "Fizika", – 2023. XIX(1), Section En, – p.29-37.
- 12. Alizada, M.R., Ahmadov, A.I. Radiation correction to Compton scattering of kvark-qlüon and annihilation of kvark-antikuark pair processes of prompt photon production in proton-proton collisions at high energies // – Bakı: Azərbaycan Milli Elmlər Akademiyasının Xəbərləri, Fizika və Astronomiya, – 2023. 2, – c. 3-10.
- **13.** Alizada, M.R. Thermal photons production in $\pi^+\pi^- \rightarrow \gamma \rho^0$, $\pi^{\pm}\rho^0 \rightarrow \gamma \pi^{\pm}$ and $\pi^+\pi^- \rightarrow \gamma \gamma p$ processes // Москва: Известия РАН, Серия физическая, 2023. 87(9), p.1226-1231.
- 14. Ализаде, М.Р. Рождение пямых фотонов в квант хромодинамическом и электродинамичсеком комптоновских рассеяниях // Magistrantların və gənc tədqiqatçıların "HEYDƏR

ƏLİYEV İLİ"–nə həsr olunmuş Fizika və astronomiya problem– ləri adlı XXIII Ümumrespublika Elmi konfransı, BDU, Bakı: – May 25, – 2023, – s. 5-6.

- 15. AlIzada, M. Effect of polarozation of colliding protons on the differential cross-section of the sub-properss of production of prompt photon in Compton scattering of quark-gluon, annihila-tion of quark-antiquark pair // VII International scientific conference of young researcher, Bakı: 2023, April 27-28, p.84-86.
- 16. Alizada, M.R. Prompt photon production in bremsstrahlung from quark gluon plasma at $\sqrt{s}=10$ GeV energies // 21st Lomonosov Conference on Elementary Particle Physics, Moscow State Uni-versity, – MockBa: August 24-30, – 2023. [Electronic resource] / URL:https://lomcon.ru/?page_id=1156, https://lomcon.ru/files/21LomCon/%d0%9f%d1%80%d0%b5% d0%b7%d0%b5%d0%bd%d1%82%d0%b0%d1%86%d0%b8% d0%b8/25.08 B/(8)ALIZADA MR PRSNTN.pdf.
- Alizada, M.R., Ahmadov, A.I., Arbuzov, A.B. Prompt photon production in bremsstrahlung at NICA energies // 8-th International conference MTP 2023, Modern Trends in Physics, - Baku: - November 30 - december 1, - 2023, - p. 65-66.
- Alizada, M.R., Ahmadov, A.I., Arbuzov, A.B. Prompt photon production in the bremsstrahlung at NICA energies // – Bakı: Journal of Physics & Space Sciences, Baku State University: – 2024. 1(2), – p. 43-49.
- 19. Ализаде, М.Р., Ахмедов, А.И., Арбузов, А.Б. Рождение прямых фотонов в подпроцессах qg → qγ и qγ → qγ Комптоновского рассеяния в протон-протонных столкновениях при энергиях NICA // – Москва: Дубна: Письма в ЭЧАЯ, – 2024. 21(2), – с.85-89.
- **20.** Alizada, M.R. Prompt photon production in bremsstrahlung from quark gluon plasma at $\sqrt{s}=10$ GeV energies // Москва: Вестник Московского Государственного Университета, 2024 79(Suppl.1), S39-S41.
- 21. Ализаде, М.Р., Ахмедов, А.И., Арбузов, А.Б. Вклад подпро-

цесса КЭД Комптоновского рассеяния в рождение прямых фотонов в столкновениях продольно поляризованных протонов при энергиях NICA // – Москва: Дубна: Письма в ЭЧАЯ, – 2025. 22(1), – с.6-17.

Allohsun

Dissertasiyanın müdafiəsi <u>29</u> aprel 2025-ci il tarixində saat 15³⁰-da Bakı Dövlət Universitetinin nəzdində fəaliyyət göstərən ED 2.19 Dissertasiya şurasının iclasında keçiriləcək.

Ünvan: Az 1148, Bakı şəhəri, akad. Z. Xəlilov küçəsi, 33, Bakı Dövlət Universiteti.

Dissertasiya ilə Bakı Dövlət Universitetinin Elmi kitabxanasında tanış olmaq mümkündür.

Dissertasiya və avtoreferatın elektron versiyaları Bakı Dövlət Universitetinin rəsmi internet saytında yerləşdirilmişdir.

Avtoreferat <u>18</u> mart **2025-ci il** tarixində zəruri ünvanlara göndərilmişdir.

 Çapa imzalanıb:
 27.02.2025

 Kağızın formatı:
 A5 (60×90 1/16)

 Həcm:
 39983 işarə

 Tiraj:
 30 nüsxə