

# ФИЗИКА



*Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің хабаршысы. Физика. Астрономия сериясы, 2021, том 135, №2, 8-16 беттер*  
*<http://bulphysast.enu.kz>, E-mail: [vest\\_phys@enu.kz](mailto:vest_phys@enu.kz)*

**ХҒТАР: 29.15.19**

А.А. Адай, А.Г. Алибаева, А.Н. Базарова, С.Б. Жарасова

*Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Нұр-Сұлтан, Қазақстан*  
*(E-mail: [alibayeva.aidana@gmail.com](mailto:alibayeva.aidana@gmail.com))*

## **Редже моделінде серпімді рр-шашырау**

**Аннотация:** жоғары энергиялы ядролық физикада Редже теориясынан гөрі, нуклондардың өзара әсерлесуінің неғұрлым қисынды теориялық моделін табу қиын. Өз кезегінде, Редже теориясы амплитуданың параметрленуіне өте тәуелді. Соңғы онжылдықтарда әртүрлі энергия диапазоңдарында бірнеше параметрлеу ұсынылды. Олардың бірі он жыл бұрын 3-тен 50 ГэВ дейінгі диапазоңдағы серпімді нуклон-нуклон шашырауының спиральды амплитудасы үшін алынған. Бұл диапазоң ерекше қызығушылық тудырады, өйткені ол өткен жылы Біріккен ядролық зерттеулер институтында (Ресей Федерациясы) Нуклотрон үдеткіші негізінде іске қосылған NICA (Nuclotron based ion collider facility) үдеткіш кешені энергиясының жоғарғы шегін қамтиды. Сонымен, Редже теориясы NICA коллаидерінің ғылыми зерттеулеріне теориялық қолдау көрсетуге көмектеседі. Алайда, ғылыми ортада өзіне тән феноменологиялық сипатқа байланысты бұл теорияға сенімсіздік бар. Сондықтан Редже теориясының кемшіліктерін ескере отырып, осы теорияның NN-амплитудасының аталған параметрлеуін қосымша сынаудың қажеті бар. Бұл мақсатпен осы параметрлеуде 9 ГэВ/с сәуленің импульсі кезінде серпімді рр-шашырауының инвариантты дифференциалдық қимасы мұнда ұсынылып тұрған мақаламызда есептелді; есептеудің нәтижесін қолданыстағы эксперименттік деректермен салыстыру амплитуда параметрлерінің кейбір өзгеруін болжау кезінде қанағаттанарлық сәйкестікті көрсетті.

**Түйін сөздер:** Редже, серпімді рр-шашырау, дифференциалдық қима, спиральдік NN-амплитудалар, жоғары энергия, мезон алмасу теориясы.

DOI: <https://doi.org/10.32523/2616-6836-2021-135-2-8-16>

Түсті: 09.03.2021 /Жарияланымға рұқсат етілді: 15.05.2021

**Кіріспе.** БЯЗИ-да (Бірлескен ядролық зерттеулер институты) NICA/SPD (Nuclotron based Ion Collider facility and Spin Physics Detector) жобасы шеңберінде бұрын қол жетімді емес эксперименттік параметрлер мен шарттарының бөлшектер физикасы саласында зерттеу жүргізу үшін жедел кешен құрылуда. Жоба 2011 жылы басталды. Бұл жоба БЯЗИ ғылыми бағдарламасының бөлігі болып табылады. Жоба аясында іргелі эксперименталды зерттеулер ғылымның әртүрлі салаларында, соның ішінде өзара әрекеттесетін бөлшектердің жоғары және орта энергия ауқымында спин физикасы бойынша жүргізілетін болады. Жоба аясындағы іргелі эксперименттік зерттеулерге өзара әрекеттесетін бөлшектердің жоғары және орта энергиясы саласындағы спиндік физика саласы кіреді [1, 2]. NICA/SPD жобасының аясында құрылған қазіргі заманғы үдеткіш кешені бөлшектердің спиндік физика саласындағы әлемдік

деңгейдегі зерттеу бағдарламасының ұзақ мерзімді орындалуын қамтамасыз етеді. Үдеткіш кешені алдыңғы қатарлы параметрлері бар зарядталған бөлшектер шоғырын пайдалануға негізделген көптеген зерттеу бағдарламаларын жүзеге асыру кезіндегі икемділігі арқасында әлемдегі басқа үдеткіш қондырғыларымен салыстырғанда бірегей болып табылады. Жобаның негізгі мақсаты-массалық жүйе орталығындағы 11 ГэВ/н-ға дейінгі энергия соқтығысуындағы күшті әсер ететін материяны зерттеу болып табылады.

Осы мақалада ұсынылған жұмысты NICA/SPD жобасына теориялық қолдау ретінде қарастыруға болады. Осы мақсатта мұндай энергияларда мүмкін болатын жалғыз әдіс - Глаубер теориясы қолданылады. Оған тиісті NN амплитудасы қажет болуы мүмкін, оны тек Редже теориясы жоғары энергиямен қамтамасыз ете алады. Бірақ бұл теорияның белгілі кемшілігі бар – феноменологиялық сипатқа ие және әр жағдайда мұқият қолдануды қажет етеді. Мақаланың мақсаты – Редже амплитудаларын қайта сынап алу. Сол үшін мақаланың міндеттері – бұл амплитудаларды формализмнің ең оңтайлы заманауи параметрлерінен қалпына келтіру, серпімді рр-шашыраудың дифференциалдық қимасын Редже бойынша есептеп алу және оны белгілі тәжірибелік мәліметтермен салыстыру.

### ПИОН АЛМАСУ ТЕОРИЯСЫ

Редже теориясы-алмасу күштерінің теориясы. Ядролық физикада тарихи тұрғыдан алғашқы осындай теория Юкава теориясы болды. Ол пи-мезон (пион) деп аталатын бөлшек алмасу түрінде төмен энергиядағы адрондардың өзара күшті әсерлесуін білдіреді.

Пион - күшті әсерлесудің кванты. Бұл пион-пиондық шашыраудың адрондарға қатысты кез-келген реакция механизмдеріне әсері өте маңызды болуы мүмкін дегенді білдіреді.

Егер протон массасы  $m_\pi = 140$  МэВ болатын  $\pi$ -мезонды шығарса, оның массасы  $m_\pi$  мөлшерге төмендеуі керек сияқты. Содан кейін протон мүлдем басқа бөлшекке айналуы керек! Керісінше: егер нейтрон мұндай  $\pi$ -мезонды сіңірсе, онда оның массасы 140 МэВ - қа артуы керек, содан кейін ол мүлдем басқа бөлшекке айналуы керек. Алайда, шын мәнінде, нақты мезонды іске қосатын протон бірдей массадағы нейтронға айналады және керісінше:  $\pi$ -мезонды сіңіретін нейтрон протонға айналады.

Энергия үшін Гейзенберг анықталмағандығы:

$$\Delta E \Delta t \geq \hbar \quad (1)$$

Бұл өте қысқа  $t$  уақыт ішінде мүмкін екенін білдіреді.  $m \approx E/c^2$  – бөлшектің массасы. Осылайша, нуклондардың пиондарды тууы және жұтып алуы энергияның сақталу заңын бұзбайды, себебі энергия мен уақыт үшін анықталмағандықпен кілісім орнатылған.

Егер  $m$  массасы бар аралық бөлшек туылса, онда энергияның анықталмағандығы  $\Delta E \approx mc^2$  болуы керек, сондықтан мұндай бөлшектің өмір сүру ұзақтығы  $\Delta t \approx \hbar/\Delta E = \hbar/mc^2$  болады, ал бөлшектің өтетін жолы  $l = c\Delta t \approx \hbar/mc = \lambda c$  болады. Демек, бұл өзара байланыстың массасы  $m$  болатын бөлшектің алмасуы, әсер ету радиусы комптонның толқын ұзындығының реті болуы  $\lambda c = \hbar/mc$  тиіс.

Егер  $n$  – бірден пайда болған мезондар саны болса, онда аралық күйлер энергиясы  $nmc^2$ , ал әсерлесу радиусы  $\lambda = c/n$  тең, яғни  $n$  есе қысқа болады. Осылайша бір пиондық алмасуға жауап беретін әсерлесудің ( $n = 1$ ) ең үлкен радиусы бар ( $\sim 1.4$  фм) және ол бірпиондық алмасудың потенциалы (OPEP – One-Pion Exchange Potential) деп аталады.

Шын мәнінде, пион скаляр емес псевдоскаляр, өйткені оның ішкі толқындық функциясы теріс (ішкі) жұп болып келеді, бұл оның кварктік құрылымымен байланысты. Бұл айнадағы кеңістіктік шағылысулар кезінде пионның толқындық функциясы белгісін өзгертеді. Сонымен қатар, эксперименталды түрде үш түрлі пион табылды: екі зарядталған  $\pi^+$  және  $\pi^-$  және бір бейтарап  $\pi^0$ . Бұл үш пион изотоптық спині бар  $\tau = 1$ , үш проекциясы бар бөлшекке сәйкес келеді  $\tau_{+1} = +1$ ,  $\tau_0 = 0$ ,  $\tau_{-1} = -1$ . Яғни, пион - изовектор (изотоптық кеңістіктегі вектор).

Бұл пион мен нуклонның өзара әрекеттесу потенциалына тек  $g$  өзара әрекеттесу константасы ғана емес (яғни «заряд»), сонымен қатар изоспин  $\tau$  және спин операторлары  $\sigma$  да кіреді:

$$\psi(\tau, \tau, \sigma) = g^2(\tau \cdot \sigma) \frac{e^{-\mu_{12}}}{\mu_{12}} \quad (2)$$

Онда, дұрыс Юкава потенциалы мынаған тең:

$$V = \frac{1f^2}{3\hbar c} m_\pi c^2 (\tau_1 \tau_2) (\sigma_1 \sigma_2) \frac{e^{-\mu r_{12}}}{\mu r_{12}} \quad (3)$$

мұндағы,  $\mu = \frac{m_\pi c}{\hbar} = 0.7^{-1}$ ,  $\frac{f^2}{\hbar c} = 0.081 \pm 0.002$ - бұл пионның байланысының псевдоскалярлық тұрақтысы деп аталады.

Оператордың болуына байланысты (1-ші жол 2-ші жол) пионды сәулелендіру немесе сіңіру кезінде нуклон (р-де- толқын) айналады. Содан кейін екі жақты жүйенің айналуымен тығыз байланысты жаңа өзара әрекеттесу күші пайда болады.

### РЕДЖИОН АЛМАСУ ТЕОРИЯСЫ

Кванттық физикада реджеон теориясы бұрыштық моментке байланысты шашыраудың аналитикалық қасиеттерін зерттеу болып табылады, онда бұрыштық момент  $\hbar$ -ге көбейтілген бүтін санмен шектелмейді, бірақ кез-келген күрделі мәнді қабылдауға рұқсат етіледі. Релятивистік емес теорияны Туллио Редже 1959 жылы жасаған. Редже полюстерінің қарапайым мысалы – Кулон потенциалын кванттық механикалық түсіндіру, яки электронның протонға байлануын немесе протоннан шашырауын кванттық механикалық түсіндіру. Электронның протонмен байланысының энергиясы теріс, ал шашырау кезінде энергия оң болады. Байланыс энергиясының формуласы белгілі өрнек болып табылады [3]

$$E \rightarrow E_N = -\frac{2m'\pi^2 e^4}{\hbar^2 N^2 (4\pi\epsilon_0)^2} = -\frac{13,6eV}{N^2} \quad (4)$$

$$m' = \frac{mM}{M+m} \quad (5)$$

мұндағы  $N = 1,2,3,\dots$ ,  $\hbar$  - Планк тұрақтысы, ал  $\epsilon_0$  - вакуумның диэлектрик тұрақтысы. Кванттық механикадағы негізгі кванттық саны (Шредингердің радиалды теңдеуін шешу арқылы) ретінде анықталады, мұндағы радиалды кванттық сан және орбиталық бұрыштық моменттің кванттық саны. Жоғарыдағы теңдеуді шешу үшін теңдеуді аламыз [3]

$$l \rightarrow l(E) = -n + g(E) \quad (6)$$

$$g(E) = -1 + i \frac{\pi e^2}{4\pi\epsilon_0 \hbar} \left(\frac{2m'}{E}\right)^{1/2} \quad (7)$$

Бұл өрнек  $E$ -нің комплекстік функциясы деп саналады, ол Редженің траекториясы деп аталатын жолды комплекстік жазықта сипатталады. Осылайша, осы қарастыруда орбиталық момент күрделі мәндерді қабылдай алады. Редженің траекториясын көптеген басқа потенциалдар үшін, атап айтқанда Юкава потенциалы үшін алуға болады. Редженің траекториялары шашырау амплитудасының полюстері немесе  $S$ -матрицасы ретінде пайда болады. Жоғарыда қарастырылған кулондық потенциал жағдайында бұл  $S$  матрицасы кванттық механика бойынша кез-келген оқулыққа жүгіну арқылы тексеруге болатын келесі өрнекпен берілген [3]:

$$S = \frac{\Gamma(l - g(E))}{\Gamma(l + g(E))} e^{-i\pi l} \quad (8)$$

мұндағы  $g(x)$  - гамма функциясы, факториалды жалпылау  $(x-1)!$ . Бұл гамма функциясы –  $x=-n$ ,  $n=0,1,2,\dots$  - де қарапайым полюстері бар оның аргументінің мероморфты функциясы. Сонымен,  $s$  өрнегі (алымдағы гамма функциясы) Редже траекториялары үшін жоғарыда келтірілген өрнек арқылы берілген нүктелерде полюстерге ие. Демек, Редже полюсінің атауы. Теорияның негізгі нәтижесі-ықтимал шашырау үшін шашырау амплитудасы шашырау энергиясы өзгерген кезде, өзгертін дәреже ретінде шашырау бұрышының косинус функциясы ретінде өседі [3]:

$$A(z) \propto z^{l(E^2)} \quad (9)$$

мұндағы  $l(E^2)E$  энергиясымен байланысты ықтимал күйдің бұрыштық моментінің бүтін емес мәні. Ол Шредингердің радиалды теңдеуін шешу арқылы анықталады және толқындық функциялардың энергиясын әртүрлі бұрыштық моментпен, бірақ радиалды қозудың бірдей санымен біркелкі интерполяциялайды. Траектория функциясы - бұл функция  $s = E^2$ , ол релятивистік жалпылау үшін керек.  $L(s)$  өрнегі Редженің траекториясының функциясы ретінде белгілі және бүтін сан болған кезде, бөлшектер осы бұрыштық моментпен нақты байланысқан күй түзеді. Асимптотика  $z$  бірліктен әлдеқайда үлкен болған кезде қолданылады, бұл релятивистік емес шашырау үшін физикалық шек емес.

Коп ұзамай Стэнли Мандельстам салыстырмалылық теориясында үлкен формальды шек физикалық шекке – үлкен  $t$  шегіне жақын екенін байқады. Үлкен дегеніміз-қиылысқан арнадағы үлкен энергия, онда кіретін бөлшектердің бірінде энергия импульсі болады, бұл оны энергияға қарсы шығатын бөлшекке айналдырады. Бұл байқау Редженің теориясын математикалық қызығушылықтан физикалық теорияға айналдырды: ол үлкен энергиядағы бөлшек-бөлшек дисперсиясы үшін шашырау амплитудасының төмендеу жылдамдығын анықтайтын функцияны байланысты күйлердің энергиясын анықтайтын функциямен бірдей болуын талап етеді. Бұрыштық моменттің функциясы ретінде бөлшекке қарсы бөлшек жүйесі болады. Қосқышын талап еткен ауыстыру Мандельстам айнымалы  $s$  болады, бұл энергия квадраты.  $t$  – берілген импульстің квадраты, ол бірдей бөлшектердің серпінді жұмсаи соқтығысуы үшін шашырату бұрышының косинусын алып тастағанда  $s$ -ге тең болады. Қиылысқан арнадағы қатынас [4]

$$A(z) \propto s^{l(t)} \quad (10)$$

бұл амплитудада әр түрлі сәйкес бұрыштардағы энергияға байланысты әр түрлі қуаттың төмендеуі болады, мұнда сәйкес бұрыштар бірдей  $t$  мәні бар бұрыштар болып табылады, ол қуат заңын анықтайтын функция резонанстар пайда болатын энергияны интерполяциялайтын функция деп болжайды. Редже теориясымен шашырауды нәтижелі сипаттауға болатын бұрыштар ауқымы үлкен энергияларда сәуле сызығының айналасындағы тар конуска қысылады.

**Зерттеу әдісі.** pp-шашырауды белгілі бір рұқсат етілген кванттық сандар жиынтығымен анықталатын Редже траекториялардың алмасуына байланысты шашырауын қарастырайық. Редже формализм шеңберінде  $\varphi_a(a = 1, \dots, 5)$  спиральдық амплитудалары әр алмасу траекториясы үшін келесідей параметрленуі мүмкін [5]:

$$\varphi_{ai}(s, t) = \pi \beta_{ai}(t) \frac{\zeta_i(s, t)}{\Gamma(\alpha(t))} \quad (11)$$

Мұндағы  $\beta_{ai}$  - бұл шың функциясының туындысы, ал  $\Gamma$  шашырау аймағында Редже таратқыш полюстерін басу үшін енгізілген  $\Gamma$  -функциясын білдіреді. Спиральдың толық амплитудасы кірістіру траекториялары бойынша сйкес қосындымен беріледі. Сонымен қатар,  $\zeta_i$  - бұл Редже таратушысы [5]

$$\zeta_i(t, s) = \frac{1 + S_i \exp[-i\pi\alpha_i(t)]}{\sin[\pi\alpha_i(t)]} \left[ \frac{s}{s_0} \right]^{\alpha(t)} \quad (12)$$

бұл  $S_i$  траекторияның ізі және  $S_0 = 1$   $GeV^2$  масштабтау коэффициенті.  $i$ -ші Редже траекториясы,  $\alpha_i t$  сызықтық функциясы ретінде қарастырылады [5],  $\alpha_i(t) = \alpha_i^0 + \alpha_i' t$  мұндағы  $\alpha_i^0$  көлбеуі және  $\alpha_i^0$  қиылысу нүктесі деректерді орналастыру арқылы анықталады немесе басқа реакцияларды талдаудан алынған.

Алмасу траекториясының  $S_i$  ізі келесідей анықталады [6, 7, 8]  $S = (-1)^J$

J-Редже траекториясында жатқан бөлшектің жұптылығы мен спині.

$\beta_{ai}$  теңдеу функциясының құрылымы бөлшектердің алмасуымен әдеттегі Фейнман диаграммасына ұқсас өзара әрекеттесу шыңдарындағы бөлшектердің кванттық сандарымен анықталады.  $\beta_{ai}$  функциясының жалпы түрі [6]

$$\beta_{ai}(t) = c_{ai} F_{ai}(t) \left[ \frac{-t}{4m_N^2} \right]^{\frac{|\lambda_1' - \lambda_1|}{2}} \left[ \frac{-t}{4m_N^2} \right]^{\frac{|\lambda_2' - \lambda_2|}{2}} \quad (13)$$

мұндағы  $c_{ai}$  тұрақты, ал  $F_{ai}$  жалпы форм-факторы болып табылады. Соңғысы үшін біз экспоненциалды функцияны аламыз, сондықтан біздің жағдайда  $\beta_{ai}$  параметрленеді [5].

$$\beta_{1i}(t) = c_{1i} \exp(b_{1i}t) \quad (14)$$

$$\beta_{2i}(t) = c_{2i} \exp(b_{2i}t) \frac{-t}{4m_N^2} \quad (15)$$

$$\beta_{3i}(t) = c_{3i} \exp(b_{3i}t) \quad (16)$$

$$\beta_{4i}(t) = c_{4i} \exp(b_{4i}t) \frac{-t}{4m_N^2} \quad (17)$$

$$\beta_{5i}(t) = c_{5i} \exp(b_{5i}t) \left[ \frac{-t}{4m_N^2} \right]^{1/2} \quad (18)$$

Асимптотикалық шекте, яғни үлкен және кіші  $|t|$  үшін спиральды амплитудалар мынандай қасиетті көрсетеді [9, 10]

$$\varphi_{1i} = \varphi_{3i} \text{ және } \varphi_{2i} = -\varphi_{4i}$$

Бұл әр траектория үшін бос параметрлер санын алтыға дейін азайтуға мүмкіндік береді.

Енді pp шашырауына ықпал ететін траекторияларды нақтылайық. Жоғары қуат кезінде адрон-адрон шашырауында померон алмасуы басым болады. Біз мұнда бір-померонды Редже полюсін қарастырамыз, ол үшін параметрлерді аламыз [11, 12, 13]

$$\alpha_\rho(t) = 1.08 + 0.25t. \quad (19)$$

$\rho$  және  $\omega$  траекториялары біздің пиондар зарядының алмасуы [14] және бейтарап пионның фотопродукциясы [15] туралы дүниежүзілік талдауымыздан алынған. Бұл талдаулар дифференциалдық қималарға арналған эксперименттік нәтижелерді, сондай-ақ жалғыз және қос поляризацияны қамтитынын ескеріңіз. Бұдан алынатыны

$$\alpha_\rho(t) = 0.53 + 0.8t \quad (20)$$

$$\alpha_\omega(t) = 0.64 + 0.8t \quad (21)$$

$f_2$  және  $a_2$  траекториялары үшін қосымшадағы мәнін қабылдаймыз [16]:

$$\alpha_{f_2}(t) = 0.71 + 0.83t \quad (22)$$

$$\alpha_{a_2}(t) = 0.45 + 0.91t \quad (23)$$

Кесте 1 - Модель параметрлері.  $c_{ai}$  тұрақтылары  $GeV \cdot \sqrt{mb}$ , ал  $b_{ai}$   $GeV^{-2}$  -де берілген [5]

	i	$c_{1i}$	$c_{2i}$	$c_{5i}$
P	1	$-10.9 \pm 2.3$	$524 \pm 41$	$-0.98 \pm 0.15$
$f_2$	2	$-19.0 \pm 1.3$	$-1699 \pm 170$	$322 \pm 4$
$\omega$	3	$11.7 \pm 1.2$	$376 \pm 47$	$-26.5 \pm 11.2$
$\rho$	4	$2.6 \pm 0.3$	$-216 \pm 60$	$50.3 \pm 7.1$
$a_2$	5	$-2.8 \pm 0.2$	$1314 \pm 390$	$107.5 \pm 12.1$

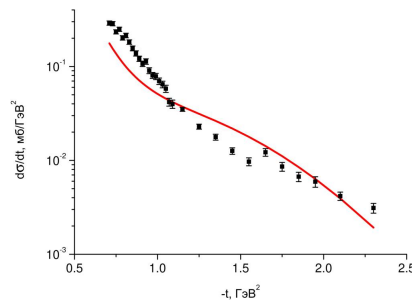
	i	$b_{1i}$	$b_{2i}$	$b_{5i}$
P	1	$3.8 \pm 0.14$	$7.45 \pm 0.42$	$2.67 \pm 0.25$
$f_2$	2	$18.5 \pm 6.1$	$4.2 \pm 0.9$	$21.7 \pm 3.2$
$\omega$	3	$0.28 \pm 0.05$	$0.12 \pm 0.04$	$0.0016 \pm 0.00003$
$\rho$	4	$36 \pm 8$	$0.0007 \pm 0.0003$	$0.14 \pm 0.03$
$a_2$	5	$0.57 \pm 0.06$	$1.66 \pm 0.23$	$1.42 \pm 0.13$

Соңында, спиральдың амплитудасы дифференциалдық қима өрнекпен анықталатын етіп қалыпқа келтіріледі [5]

$$\frac{d\sigma}{dt} = \frac{1}{64\pi q^2 s} \frac{1}{2} [|\varphi_1|^2 + |\varphi_2|^2 + |\varphi_3|^2 + |\varphi_4|^2 + 4|\varphi_5|^2] \quad (24)$$

**Нәтижелер/талқылау.** Жоғарыда сипатталған формализмді кестеден параметрлеумен қолдана отырып, серімді pp шашырауының инвариантты дифференциалдық қимасы 9 ГэВ/с шоқтың импульсі кезінде -0,71-ден -2,3 ГэВ<sup>2</sup>-ге дейінгі диапазонда берілген 4-импульс квадратының функциясы ретінде есептелген. Бұл шарттар параметрлеу кезінде [5] мәлімделген шарттарға сәйкес келеді. Суретте есептеу нәтижесі үлгі ретінде алынған [17] эксперименттік деректерімен салыстырылады. Логарифмдік шкала бойынша көрсетілген диапазонда екі қисықтың бір-біріне жақын екенін және кейбір нүктелерде эксперименттік қателік шеңберінде өте жақсы сәйкестік бар екенін көрсетеді.

Егер Кестеде көрсетілген параметрлеу қателері ескерілсе, сәйкестік артады. Бірақ бұл қателіктерді толық есепке алу олардың саны мен (11) формуланың күрделілігіне байланысты өте қиын. Сонымен қатар, Кестеден көріп отырғанымыздай, көптеген параметрлер энергияның [5] едәуір кең диапазонында параметрлеу нәтижесінде үлкен қателіктер жібереді. Сондықтан, барлық параметрлердің қателіктерін толық бірлескен түрде есепке алу, әлбетте, ол үлкен амплитудалық қателікке (11), демек, қимаға әкелуі керек. Бұл эстетикалық себептерге байланысты Суреттегі параметрлеу қатесін көрсетуден бас тартуға мәжбүр етеді. Алайда, дәл осы себеп осындай үлкен қателіктер шегінде қисықтардың сәйкес келуі, толық болатындығына сенімді болуға мүмкіндік береді.



Сурет 1 – Тоғыз ГэВ/с шоқтың импульсі кезіндегі серімді pp шашырауының инвариантты дифференциалдық қимасы. Тұтас қисық - осы есептеудің нәтижесі; квадраттар - эксперименттік мәліметтер [17]

Дифференциалдық қималардың сәйкес келуі тиісті амплитудалардың сәйкес келуін білдіреді. Жалпылай, бұл жұмыс Кестеде көрсетілген параметрлермен Редже түріндегі [5] формализмін жоғары энергияларда және 2,5 ГэВ<sup>2</sup>-ге дейін берілген 4-импульстің квадратында NN амплитудасын алуға болатынын растайды.

**Қорытынды.** Бір жыл бұрын Ресейде NICA заманауи үдеткіш кешені іске қосылды. NICA энергиясының жоғарғы шегі 12 ГэВ-қа жетеді. NICA ғылыми-зерттеу жобаларын негіздеу үшін қажетті теориялық материалдың жеткілікті мөлшері қажет. Тиісті есептеулер нуклон-нуклонмен өзара әсерлесудің қолайлы модельдерін қажет етеді. 12 ГэВ аймағында іс жүзінде мұндай жалғыз модель бар. Бұл Редже теориясы. Нуклонаралық күштерді сипаттауда бірыңғай тәсіл болмағандықтан, Редже теориясы, басқалары сияқты, феноменологиялық және параметрік сипатқа ие. Бұл осы теорияларды қолдануда белгілі шектеулер мен сақтықты тудырады.

Бұл жұмыс Редже теориясын қосымша тексеруге шақырылды. Ол үшін 9 ГэВ/с шоқтың импульсі кезінде серімді NN шашырауы мен [5]-тен спиральды амплитудалардың параметрленуі таңдалды. Энергияны таңдау қолда бар эксперименттік деректерге [17] байланысты болды. Осы жұмыста осы жағдайларда инвариантты дифференциалдық қима есептеліп және экспериментпен [17] салыстыру жүргізілді. Салыстыру жалпы сәйкестікті көрсетті.

Осы жұмыстың нәтижесі: [5]–те параметрленген Редже теориясын 9 ГэВ-қа жақын энергия кезінде серпимді NN-шашырауды есептеу үшін қолдануға болады – деп қорытынды жасауға мүмкіндік береді.

### Әдебиеттер тізімі

- 1 Butenko A.V., Donets E.E., Donets E.D., Govorov A.I., Kobets V.V., Monchinsky V.A., Meshkov I.N., Sidorin A.O., Trubnikov G.V., Fimushkin V.V., Belov A., Belyaev O.K., Maltsev A.P., Budanov Yu.A., Zvonarev I.A., Kapin V.V. Injector complex of the NICA facility // Proceedings of RuPAC, Protvino, Russia. - 2010. – P. 71-73.
- 2 Ангелов А., Ангелов В., Елисеев А.В., Мешков И.Н., Михайлов В.А., Сидорин А.О., Топилин Н.Д., Трубников Г.В., Тузиков А.В. Каналы транспортировки пучка в проекте NICA // Письма в ЭЧАЯ. – 2012. – Т. 9. - № 4-5(174-175). – С. 586-590.
- 3 Harald J.W. Muller-Kirsten: Introduction to Quantum Mechanics: Schrodinger Equation and Path Integral, 2nd ed. - Singapore: World Scientific, 2012. – 395-414 p.
- 4 Gribov V.N. The Theory of Complex Angular Momenta. - Cambridge:Cambridge University press, 2003. – 310 p.
- 5 Sibirtsev A., Haidenbauer J., Hammer H.-W., Krewald S. and Meissner U.-G. Proton-proton scattering above 3 GeV/c // The European Physical Journal A. – 2010. – V. 45. – P. 357–372.
- 6 Irving A.C., Worden R.P. Regge phenomenology // Physics Reports. – 1977. – V. 34. - № 3. – P.117-231.
- 7 Collins P.D.B. An Introduction to Regge Theory and High Energy Physics. – Cambridge: Cambridge University Press, 1977. – 460 p.
- 8 Collins P.D.B., Martin A.D. Hadron reaction mechanisms // Reports on Progress in Physics. – 1982. – V. 45. - № 4. – P. 335.
- 9 Sharp D.H., Wagner W.G. Asymptotic Behavior of Nucleon-Nucleon Scattering // Phys. Rev. - 1963. -V. 131. - № 5. – P. 2226.
- 10 Itzykson C., Jacob M. Polarization effects in proton-proton high-energy scattering // IL Nuovo Cimento. – 1963. – V. 28. - № 2. - P. 250–262.
- 11 Donnachie A., Landshoff P.V. pp and p $\bar{p}$  elastic scattering // Nuclear Physics B. - 1984. – V. 231. - № 2. – P. 189–204.
- 12 Donnachie A., Landshoff P.V. Dynamics of elastic scattering // Nuclear Physics B. - 1986. – V. 267. - № 3–4. – P. 690–701.
- 13 Donnachie A., Landshoff P.V. Total Cross Sections // Physics Letters B. - 1992. – V. 296. - № 1-2. – P. 227–232.
- 14 Huang F., Sibirtsev A., Krewald S., Hanhart C., Haidenbauer J., Meissner Ulf-G. Pion-nucleon charge exchange amplitudes above 2 GeV // The European Physical Journal A. - 2009. – V. 40. – P. 77–87.
- 15 Sibirtsev A., Haidenbauer J., Krewald S., Meissner U.-G., Thomas A.W. Neutral pion photoproduction at high energies // The European Physical Journal A. – 2009. – V. 41. – P. 71–84.
- 16 Anisovich A.V., Anisovich V.V., Sarantsev A.V. Systematics of  $q\bar{q}$  states in the  $(n, M^2)$  and  $(J, M^2)$  planes // Physical Review D. – 2000. – V. 62. - P. 051502(R).
- 17 Baglin C., Briandet P., Fleury P., De Rosny G., Carlson P.J., Johansson K.E., D’almeida B., Lehmann P., Richard F., Treille D., Eide A., Lundby A., Navarro-Savoy A., Staurset L., Gracco V. Elastic scattering of 10 GeV/c  $\pi^+$  and  $K^+$  mesons and of 9 GeV/c protons on protons // Nuclear Physics B. – 1975. – V. 98. - № 3. – P. 365–400.

А.А. Адай, А.Г. Алибаева, А.Н. Базарова, С.Б. Жарасова

*Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, Нур-Султан, Казахстан*

#### Упругое pp-рассеяние в модели Редже

**Аннотация.** В ядерной физике высоких энергий трудно найти более состоятельную теоретическую модель взаимодействий нуклонов, чем теория Редже. В свою очередь теория Редже сильно зависит от параметризации амплитуды. За последние десятилетия было предложено несколько параметризаций в разных диапазонах энергий. Одна из них была получена десять лет назад для спиральных амплитуд упругого нуклон-нуклонного рассеяния в диапазоне от 3 до 50 ГэВ. Этот диапазон представляет особый интерес, поскольку охватывает верхнюю границу энергий ускорительного комплекса NICA (Nuclotron based ion collider facility), запущенного в прошлом году на базе ускорителя "Нуклотрон" в Объединенном институте ядерных исследований (Российская Федерация). Таким образом, теория Редже может помочь в оказании теоретической поддержки научным исследованиям на коллайдере NICA. Однако, в научной среде есть некоторое недоверие к этой теории, связанное с присущим ей феноменологическим характером. Поэтому, учитывая недостатки теории Редже, существует необходимость дополнительно протестировать указанную параметризацию NN-амплитуд этой теории. С этой целью в настоящей работе при данной параметризации посчитано инвариантное дифференциальное сечение упругого pp-рассеяния при импульсе пучка 9 ГэВ/с; сравнение результата расчета с существующими экспериментальными данными показало удовлетворительное совпадение при предположении некоторой вариации параметров амплитуд.

**Ключевые слова:** теория Редже, упругое pp-рассеяние, дифференциальное сечение, спиральные NN-амплитуды, высокие энергии, теория обмена мезонами.

A.A. Aday, A.G. Alibayeva, A.N. Bazarova, S.B. Zharassova

L.N. Gumilyov Eurasian National University, Nur-Sultan, Kazakhstan

### Elastic pp scattering within Regge model

**Abstract.** In high-energy nuclear physics, it is difficult to find a more consistent theoretical model of nucleon interactions than the Regge theory. In turn, the Regge theory strongly depends on the parameterization of the amplitude. Over the past decades, several parameterizations have been proposed in different energy ranges. One of them was obtained ten years ago for helicity amplitudes of elastic nucleon-nucleon scattering in the range from 3 to 50 GeV. This range is of particular interest since it covers the upper energy limit of the NICA (Nuclotron based ion collider facility) accelerator complex launched last year at the Nuclotron accelerator at the Joint Institute for Nuclear Research (Russian Federation). Thus, Regge theory can provide theoretical support for scientific research at the NICA collider. However, in the scientific community there is some distrust of this theory, associated with its inherent phenomenological nature. For this reason, taking into account the uncertainties of Regge theory, we additionally tested the above parameterization of the NN-amplitudes in this theory. For this purpose, using this parameterization, we calculated the invariant differential cross section for elastic pp scattering at a beam momentum of 9 GeV/c; comparison between the result of the calculation and the existing experimental data showed satisfactory agreement under the assumption of some variation in the amplitude parameters.

**Keywords:** Regge theory, Elastic pp-scattering, Differential cross section, Helicity NN-amplitudes, High energy, Meson exchange theory.

## References

- 1 Butenko A.V., Donets E.E., Donets E.D., Govorov A.I., Kobets V.V., Monchinsky V.A., Meshkov I.N., Sidorin A.O., Trubnikov G.V., Fimushkin V.V., Belov A., Belyaev O.K., Maltsev A.P., Budanov Yu.A., Zvonarev I.A., Kapin V.V. Injector complex of the NICA facility, Proceedings of RuPAC, Protvino, Russia, 71-73 (2010).
- 2 Angelov A., Angelov V., Eliseev A.V., Meshkov I.N., Mihajlov V.A., Sidorin A.O., Topilin N.D., Trubnikov G.V., Tuzikov A.V. Kanaly transportirovki puchka v proekte NICA, Pis'ma v ECHAYA [Beam transport channels in the NICA project, JETP Letters], 9, 586-590 (2012).
- 3 Harald J.W. Muller-Kirsten: Introduction to Quantum Mechanics: Schrodinger Equation and Path Integral, 2nd ed. (Singapore: World Scientific, 2012, 395-414 p.).
- 4 Gribov V. The Theory of Complex Angular Momenta (Cambridge: Cambridge University press, 2003, 310 p.).
- 5 Sibirtsev A., Haidenbauer J., Hammer H.-W., Krewald S. and Meissner U.-G. Proton-proton scattering above 3 GeV/c, The European Physical Journal A, 45, 357-372 (2010).
- 6 Irving A.C., Worden R.P. Regge phenomenology, Physics Reports, 3(34), 117-231 (1977).
- 7 Collins P.D.B. An Introduction to Regge Theory and High Energy Physics (Cambridge: Cambridge University Press, 1977, 460 p.).
- 8 Collins P.D.B., Martin A.D. Hadron reaction mechanisms, Reports on Progress in Physics, 4(45), 335 (1982).
- 9 Sharp D.H., Wagner W.G. Asymptotic Behavior of Nucleon-Nucleon Scattering, Phys. Rev, 5(131), 2226 (1963).
- 10 Itzykson C., Jacob M. Polarization effects in proton-proton high-energy scattering, IL Nuovo Cimento, 28(2), 250-262 (1963).
- 11 Donnachie A., Landshoff P.V. pp and p  $\bar{p}$  elastic scattering, Nuclear Physics B, 2(231), 189-204 (1984).
- 12 Donnachie A., Landshoff P.V. Dynamics of elastic scattering, Nuclear Physics B, 3-4(267), 690-701 (1986).
- 13 Donnachie A., Landshoff P.V. Total Cross Sections, Physics Letters B, 1-2(296), 227-232 (1992).
- 14 Huang F., Sibirtsev A., Krewald S., Hanhart C., Haidenbauer J., Meissner Ulf-G. Pion-nucleon charge exchange amplitudes above 2 GeV, The European Physical Journal A, 40, 77-87 (2009).
- 15 Sibirtsev A., Haidenbauer J., Krewald S., Meissner U.-G., Thomas A.W. Neutral pion photoproduction at high energies, The European Physical Journal A, 41, 71-84 (2009).
- 16 Anisovich A.V., Anisovich V.V., Sarantsev A.V. Systematics of  $q\bar{q}$  states in the  $(n, M^2)$  and  $(J, M^2)$  planes, Physical Review D, 62, 051502(R) (2000).
- 17 Baglin C., Briandet P., Fleury P., De Rosny G., Carlson P.J., Johansson K.E., D'Almeida B., Lehmann P., Richard F., Treille D., Eide A., Lundby A., Navarro-Savoy A., Staurset L., Gracco V. Elastic scattering of 10 GeV/c  $\pi^+$  and  $K^+$  mesons and of 9 GeV/c protons on protons, Nuclear Physics B, 3(98), 365-400 (1975).

### Авторлар туралы мәлімет:

Адай А.А. - негізгі автор, «Ядролық физика» мамандығы бойынша 2 курс магистранты, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Нұр-Сұлтан, Қазақстан.

Алибаева А.Г. - «Ядролық физика» мамандығы бойынша 3 курс докторанты, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Нұр-Сұлтан, Қазақстан.

Базарова А. Н. - «Ядролық физика» мамандығы бойынша 2 курс докторанты, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Нұр-Сұлтан, Қазақстан.

Жарасова С.Б. - «Ядролық физика» мамандығы бойынша 2 курс магистранты, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Нұр-Сұлтан, Қазақстан.

Адай А.А. - **The main author**, the 2<sup>nd</sup> year master's student in Nuclear Physics, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Nur-Sultan, Kazakhstan.



*Alibayeva A.G.* - the 3<sup>rd</sup> year Ph.D student in Nuclear Physics, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Nur-Sultan, Kazakhstan.

*Bazarova A.N.* - the 2<sup>nd</sup> year Ph.D student in Nuclear physics, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Nur-Sultan, Kazakhstan.

*Zharassova S.B.* - the 2<sup>nd</sup> year master's student in Nuclear Physics, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Nur-Sultan, Kazakhstan.