

## IT-технологиялар, энергетика, автоматтандыру және есептеу техникасы.

DOI: <https://www.doi.org/10.53002/140>

### GROUP QUARKS AND STANDARD MODEL

*\*Shayakhmetova G. A., Temirkhanova D. N., Karipbaeva A. R.*

*Karaganda Industrial University, Temirtau, Kazakhstan*

*\* Correspondent's E-mail: [omarovadin701@gmail.com](mailto:omarovadin701@gmail.com)*

#### Author information:

**Shayakhmetova G. A.**, Karaganda Industrial University, 101400, Republic Avenue, 30, Temirtau, Karaganda region, Kazakhstan, e-mail: [temirkhanova-2020@mail.ru](mailto:temirkhanova-2020@mail.ru)

**Temirkhanova D. N.**, Karaganda Industrial University, 101400, Republic Avenue, 30, Temirtau, Karaganda region, Kazakhstan, e-mail: [omarovadin701@gmail.com](mailto:omarovadin701@gmail.com)

**Karipbaeva A. R.**, Karaganda Industrial University, 101400, Republic Avenue, 30, Temirtau, Karaganda region, Kazakhstan, e-mail: [temirkhanova-2020@mail.ru](mailto:temirkhanova-2020@mail.ru)

**Abstract** — The article discusses the theoretical foundations of the physics of the top quark as the most massive elementary particle of the Standard Model. The processes of top quark generation and decay are analyzed within the framework of the Standard Model and its possible extensions. Special attention is paid to anomalous top-quark interactions, which can serve as indicators of new physics beyond the Standard Model. The Lagrangians of standard and anomalous interactions based on the effective field theory (SMEFT) approach, which allows describing possible deviations from the predictions of the Standard Model in a model-independent form, are considered. The main mechanisms of top-quark formation at modern hadron colliders, including pair and single generation, as well as the role of higher-order perturbation theory in improving the accuracy of theoretical calculations, are analyzed. It is shown that the high sensitivity of the characteristics of the top quark to new physical effects makes it an important tool for verifying the fundamental provisions of the Standard Model and searching for new interactions. The results obtained confirm the prospects of using effective field theory to study anomalous connections at the Wtb vertex and evaluate constraints on the parameters of new physics based on current and future experiments at the LHC, FCC, and ILC colliders.

**Keywords** — top quark, Standard Model, new physics, effective field theory (SMEFT), anomalous interactions, Lagrangian, Wtb vertex, quantum chromodynamics, top quark decay, Large Hadron Collider (LHC).

### ТОП КВАРКТАР ЖӘНЕ СТАНДАРТТЫ МОДЕЛЬ

*\*Шаяхметова Г. А., Темірханова Д. Н., Карипбаева А. Р.*

*Қарағанды индустриялық университеті, Теміртау, Қазақстан*

*\*Корреспондент E-mail: [omarovadin701@gmail.com](mailto:omarovadin701@gmail.com)*

#### Авторлар туралы ақпарат:

**Шаяхметова Г. А.**, Қарағанды индустриялық университеті, 101400, Республика даңғылы, 30, Теміртау, Қарағанды облысы, Қазақстан, e-mail: [temirkhanova-2020@mail.ru](mailto:temirkhanova-2020@mail.ru)

**Темірханова Д. Н.**, Қарағанды индустриялық университеті, 101400, Республика даңғылы, 30, Теміртау, Қарағанды облысы, Қазақстан, e-mail: [omarovadin701@gmail.com](mailto:omarovadin701@gmail.com)

**Карипбаева А. Р.**, Қарағанды индустриялық университеті, 101400, Республика даңғылы, 30, Теміртау, Қарағанды облысы, Қазақстан, e-mail: [temirkhanova-2020@mail.ru](mailto:temirkhanova-2020@mail.ru)

**Абстракт** — Мақалада стандартты модельдің ең массивті элементар бөлшегі ретінде топ-кварк физикасының теориялық негіздері қарастырылады. Стандартты модель және оның ықтимал кеңеюі аясында топ-кварктың туу және ыдырау процестеріне талдау жасалды. Стандартты модельден тыс жаңа физиканың индикаторы бола алатын жоғарғы кварктың аномальды өзара әрекеттесуіне ерекше назар аударылады. Өрістің тиімді теориясының (SMEFT) тәсіліне негізделген стандартты және қалыптан тыс өзара әрекеттесулердің лагранждары қарастырылады, бұл стандартты модель болжамдарынан ықтимал ауытқуларды модельдік тәуелсіз түрде сипаттауға мүмкіндік береді. Қазіргі заманғы адрон коллайдерлерінде топ-кварктардың пайда болуының негізгі механизмдері, соның ішінде жұптасқан және жалғыз туылу, сондай-ақ теориялық есептеулердің дәлдігін арттырудағы бұзылу теориясының жоғары

реттерінің рөлі талданды. Топ-кварк сипаттамаларының Жаңа физикалық әсерлерге жоғары сезімталдығы оны стандартты модельдің іргелі позицияларын тексеру және жаңа өзара әрекеттесулерді табу үшін маңызды құралға айналдыратыны көрсетілген. Нәтижелер  $Wtb$  шыңындағы қалыптан тыс байланыстарды зерттеу және LHC, FCC және ILC коллайдерлеріндегі заманауи және болашақ эксперименттерге сәйкес жаңа физика параметрлерінің шектеулерін бағалау үшін тиімді өріс теориясын қолдану перспективасын қолдайды.

**Кілт сөздер** — жоғарғы кварк, стандартты модель, жаңа физика, тиімді өріс теориясы (SMEFT), аномальды өзара әрекеттесу, Лагранж,  $Wtb$  шыңы, кванттық хромодинамика, жоғарғы кварктың ыдырауы, Үлкен адрон коллайдері (LHC).

## ГРУППА КВАРКИ И СТАНДАРТНАЯ МОДЕЛЬ

*\*Шаяхметова Г. А., Темірханова Д. Н., Карипбаева А. Р.*

*Карагандинский индустриальный университет, Темиртау, Казахстан*

*\* E-mail корреспондента: [omarovadin701@gmail.com](mailto:omarovadin701@gmail.com)*

### Информация об авторах:

Шаяхметова Г. А., Карагандинский индустриальный университет, 101400, проспект Республики, 30, Темиртау, Карагандинская область, Казахстан, e-mail: [temirkhanova-2020@mail.ru](mailto:temirkhanova-2020@mail.ru)

Темірханова Д. Н., Карагандинский индустриальный университет, 101400, проспект Республики, 30, Темиртау, Карагандинская область, Казахстан, e-mail: [omarovadin701@gmail.com](mailto:omarovadin701@gmail.com)

Карипбаева А. Р., Карагандинский индустриальный университет, 101400, проспект Республики, 30, Темиртау, Карагандинская область, Казахстан, e-mail: [temirkhanova-2020@mail.ru](mailto:temirkhanova-2020@mail.ru)

**Аннотация** — В статье рассмотрены теоретические основы физики топ-кварка как наиболее массивной элементарной частицы Стандартной модели. Проведен анализ процессов рождения и распада топ-кварка в рамках Стандартной модели и ее возможных расширений. Особое внимание уделено аномальным взаимодействиям топ-кварка, которые могут служить индикаторами новой физики за пределами Стандартной модели. Рассмотрены лагранжианы стандартных и аномальных взаимодействий, основанные на подходе эффективной теории поля (SMEFT), позволяющем описывать возможные отклонения от предсказаний Стандартной модели в модельно-независимой форме. Проанализированы основные механизмы образования топ-кварков на современных адронных коллайдерах, включая парное и одиночное рождение, а также роль высших порядков теории возмущений в повышении точности теоретических расчетов. Показано, что высокая чувствительность характеристик топ-кварка к новым физическим эффектам делает его важным инструментом для проверки фундаментальных положений Стандартной модели и поиска новых взаимодействий. Полученные результаты подтверждают перспективность применения эффективной теории поля для исследования аномальных связей в вершине  $Wtb$  и оценки ограничений на параметры новой физики по данным современных и будущих экспериментов на коллайдерах LHC, FCC и ILC.

**Ключевые слова** — топ-кварк, Стандартная модель, новая физика, эффективная теория поля (SMEFT), аномальные взаимодействия, лагранжиан, вершина  $Wtb$ , квантовая хромодинамика, распад топ-кварка, Большой адронный коллайдер (LHC).

### НЕГІЗГІ ЕРЕЖЕЛЕР

Жоғарғы кварктың ауытқуын өлшеуіш инварианттық бағалау SM мәнінен ені әртүрлі кинематикалық түрде алынады аймақтар. Қос резонансты аймақтағы жоғарғы кварк өндірісінің көлденең қимасы  $\delta$ -ға ең сезімтал екені көрсетілген. параметр, ол тек жоғарғы кварк енін өзгертеді. Резонанстық емес аймақтағы сенімді көлденең қимасы бар амплитудалық алымдағы  $Wtb$  муфтасының модификациясы арқылы  $\epsilon$  параметріне сезімталдық. Бір резонанстық аймақтың екі параметрге де салыстырмалы сезімталдығы бар өйткені  $\delta$  параметрі жоғарғы кварк енін өзгертеді және  $\epsilon$  параметрі жоғарғы кварк енін де,  $Wtb$  муфтасын да өзгертеді.

тәуелділігінің елеулі айырмашылығы  $\epsilon$  бойынша DR, SR және NR аймақтарындағы сенімді көлденең қималар және  $\delta$  параметрлері осы зерттеудің негізгі бақылауларының бірі болып табылады.

Бұл факт  $\delta$  және  $\epsilon$  үшін біріктірілген шектеулерді қоюға мүмкіндік береді параметрлерді бір уақытта және алу үшін осы шектеулерді пайдалану жоғарғы кварк еніндегі шектеулер. Қол жеткізуге болатын шектеулер модельден тәуелсіз жолмен жоғарғы кварк ені бар сәйкес 23%-дан 12%-ға дейін бағаланады эксперименттік дәлдік 10%-дан 5%-ға дейін. Бұл нәтижелер барлық дәлсіздіктер болған кезде оңайлатылған тәсіл арқылы алынады болжамды жалпы жүйелілікке кодталған белгісіздік. Адронизация сияқты барлық әсерлерді

егжей-тегжейлі зерттеу және фрагментация, детекторлық жауап, сонымен қатар фонның әсері ағымның ауқымынан тыс тек негізгі ой көрсетілген кезде жеңілдетілген зерттеу. Жоғарыда аталған әсерлердің егжей-тегжейлері кейінге қалдырылды келесі нақтырақ талдау.

Топ кварк - барлық дерлік СМ кеңейтімдерінің негізгі элементі. Біз  $t$ -кваркты зерттеу жаңа

ашылуларға әкелетін және зат тереңдігі құрылымын түсінуде жаңа қадам жасауға мүмкіндік беретін портал бола береді деп күтеміз. Бұл сонымен қатар Әлемнің құрылымын түсінудің сапалы жаңа деңгейін білдіреді, өйткені ол дүниеге келгеннен кейінгі алғашқы сәтте Әлемде әртүрлі процестер, атап айтқанда,  $t$ -кваркпен байланысты процестер жүреді.

1. Топ-кварктың каналдарындағы әртүрлі аномальды әрекеттесулерін сипаттау үшін тиімді өріс теориясының формализміне негізделген әмбебап тәсілді меңгеру.

2. Аномальды өзара әрекеттесу тиімді лагранжиан қолдана отырып, модельден тәуелсіз түрде сипаттау мүмкіндігін зерттеу.

3. СМ өлшеу тобына қатысты өлшемсіз-инвариантты болатын SMEFT әдісті меңгеру және оны зерттеулерге қолдану.

## КІРІСПЕ

Зерттеу тақырыбының өзектілігі: бұл зерттеу жобасы модельдік-тәуелсіз және өлшеуіш-инвариантты әдіс аясында  $t$ -кварк ыдырауын зерттеуге арналған. Біздің болжамдарымыз қолданыстағы және жоспарланған LHC коллайдеріндегі CMS және ATLAS коллаборацияларымен жүргізілетін және болашақта ЦЕРН-дегі FCC жобасындағы, сонымен қатар болашақтағы ILC сызықтық электрон-позитрондық коллайдеріндегі тәжірибелермен тығыз байланысты болады.

Жұмыстың мақсаты: мүмкін болатын қарапайым емес өзара әрекеттесулерді ескере отырып, үшінші буын кварктарының, соның ішінде топ-кварктың қасиеттерін зерттеу.

Жұмыстың міндеттері: жоғары энергияда ыдыраудың енін және ыдыраудың басқа да сипаттамаларын есептеу, сонымен қатар әртүрлі қалыптан тыс параметрлерде энергия мен бұрыштан тәуелді кинематикалық таралуларды сипаттау жобаның негізгі мәселесі болып табылады. Ол үшін келесідей жұмыстар жоспарланған:

–қалыптан тыс үлестерін ескере отырып топ-кварктың  $t \rightarrow Wb$  енін есептеу;

–SMEFT тәсілінде 6 өлшемді базисті қалыптан тыс оператор коэффициенттерінен  $t$ -кварк әсерлесу параметрлерінің аналитикалық тәуелділігін қорытындылау;

Зерттеу нысаны: топ-кварк және оның ыдыраулары.

Зерттеу пәні: кванттық хромодинамика негізінде топ-кварк және оның ыдырауларын зерттеу.

Зерттеудің теориялық және практикалық маңыздылығы: Соңғы онжылдықтағы электро әлсіз әсерлесулердегі (ЭӘ) және кванттық хромодинамикадағы (КХД) пертурбативті есептеулердегі прогресстерді мойындаған жөн. Бұл жаңа сатылы әдістер мен компьютерлік алгоритмдерді көп деңгейлі түзетулердің арқасында мүмкін болды. Бүгінгі таңда теориялық есептеулердің дәлдігі көбінесе эксперименттік өлшеулердің дәлдігінен кем болмайды және екі бағытта одан әрі ілгерілеу күтілуде.

СМ болжамдары элементар бөлшектер физикасының көптеген эксперименттік нәтижелерімен сәйкес келетіндігін атап өткен жөн.

Сирек ыдырау, атап айтқанда, бейтарап токтардың иісінің өзгеруіне байланысты, физикаға СМ-ден тыс әсерлерді зерттеуге мүмкіндік береді.

Ең ерекше кварк болып  $t$ -кварк саналады, ол Тэватрон үдеткішінде, D0 және CDF коллобациясында ашылған. Топ кварк барлық белгілі элементар бөлшектердің ең үлкен массасына ие, эмпирикалық тұрғыдан оның бірінші және екінші буын кварктарымен әлсіз араласатындығы белгілі.

$t$ -кварк ыдырауын зерттеу заманауи бөлшектер физикасының негізгі бағыты болып табылады. Жалпы, адрондар кварктар мен глюондардан тұрады - кванттық хромодинамиканың негізгі еркіндік дәрежелері.  $t$ -кварк бар адрондар табиғатта өмір сүре алмайды, өйткені  $t$ -кварктың өмір сүруі уақыты түссіз байланыстырылған күйлердің пайда болу уақытына қарағанда әлдеқайда қысқа. Адрондар  $t$ -кварктың ыдырау өнімдерімен түзілуі мүмкін.  $t$  кварктың фундаменталды әрекеттесулерінің құрылымын зерттеу үлкен қызығушылық тудырады, өйткені адронизация эффектілері оларға қатыспайды.

Алайда, адрондардың сандық сипаттамасы және олардың өзара әрекеттестігі кванттық хромодинамиканың бұзылу теориясы аясынан шығып кетеді және жаңа сандық әдістерді қолдануды талап етеді.

Жаңа физиканың (ЖФ) ең айқын көріністерінің бірі иісін өзгертетін бейтарап токтармен

процестерде t-кварктың аномальды өзара әрекеттесуін байқауға болады. СМ-де мұндай процестер ыдырау ықтималдығы өте төмен цикл диаграммаларының үлесін ескере отырып жүреді, бұл олардың тәжірибелік бақылау мүмкіндігін айтарлықтай қиындатады.

СМ-дің әр түрлі кеңеюі осындай өзара әрекеттесудің едәуір айтарлықтай болжайды, бұл ЖФ іздеуді келешегін айқын етеді.

## МАТЕРИАЛДАР МЕН ӘДІСТЕР

1.1 СМ шеңберіндегі топ-кварктардың өзара әрекеттесуіндегі лагранжианы

Өрістің кванттық теориясының формализмі шеңберінде, ал Стандартты модель дегеніміз өрістің кванттық теориясы, -кварктардың өзара әрекеттесуінің барлық ережелері (өзара әрекеттесу шырдары және сәйкес Фейнман ережелері) Лагранж немесе жай Лагранжиан деп аталатын функциясынан алынған. Мысалы, -кварктардың глюонмен өзара әрекеттесуі және -өзара әрекеттесуі келесі өрнектермен сипатталады:

$$L_{SM}(tgt) = \bar{\psi}_t \hat{O}_g^{\mu,a} \psi_t G_{a,\mu}; \quad \hat{O}_g = g_s t^a \gamma^\mu \quad (1)$$

$$L_{SM}(tWq) = \bar{\psi}_q \hat{O}_W \psi_t; \quad (2)$$

$$\hat{O}_W = \frac{e}{2\sqrt{2} \sin \theta_W} V_{tb} \gamma^\mu (1 - \gamma^5) W_\mu \frac{e}{2\sqrt{2} \sin \theta_W} = M_W \sqrt{\frac{G_F}{2}}$$

(3) өрнекте t -кварктың фермиондық өрісінің сол жақ компоненті ғана өзара әрекеттесуге қатысатындығына сәйкес келетін матрица  $(1 - \gamma^5)$  екеніне тағы назар аударыңыз. t -кварктың СМ шеңберіндегі өзара әрекеттесуінің лагранжианы келесі түрге ие (қараңыз [1, 19]):

$$L_{SM} = -\frac{y_t}{\sqrt{2}} \bar{t} t H - g_s \bar{t} \gamma^\mu t^a t G_\mu^a - \frac{g}{\sqrt{2}} \sum_{q=d,s,b} \frac{V_{tq}}{2} \bar{t} (1 - \gamma_5) q W_\mu^+ - Q_t e \bar{t} \gamma^\mu t A_\mu - \frac{g}{2 \cos \theta_W} \bar{t} \gamma^\mu \left[ \left( \frac{1}{2} - 2Q_t \sin^2 \theta_W \right) - \frac{1}{2} \gamma_5 \right] t Z_\mu + h.c.$$

Мұндағы  $g_s, e$  және  $g$  күшті, электромагниттік және әлсіз өзара әрекеттесудің тұрақтылығы,  $Q_1 = +2/3$

$$y_t = \sqrt{2} \frac{m_t}{v_{ew}}, v_{ew} \approx 246 \text{ ГэВ} \quad (4)$$

мұндағы - электрлік әлсіздік шкаласы – Хиггс өрісінің вакуумдық орташа мәні.

1.2 Топ-кварктардың аномальдық өзара әрекеттесуіндегі лагранжианы

Қазіргі уақытта Жаңа Физиканың қай түрі (ЖФ - Стандартты модельден тыс жаңа физика) стандартты модельдің болжамдарынан ауытқуы үшін жауап беретіні белгісіз. СМ кеңеюінің әртүрлі сценарийлері (мысалы, SUSY) -кварктың түзілуі мен ыдырауының жаңа тетіктерін болжауға алып келеді. Осылайша, жаңа тетіктердің эксперименталды ашылуы немесе сирек процестердің күшеюі СМ шеңберінен тыс физиканың бар екенін көрсетеді.

СМ кеңеюінің көптеген сценарийлері -кварк секторында өзара әрекеттесу типтері мен параметрлерінің өзіндік жиынтығымен (байланыстырушы тұрақтылықтар, жаңа объектілер массалары) әр түрлі болжамдарға әкеледі. Алайда, көбінесе әртүрлі сценарийлер бірдей немесе өте ұқсас эффекттерді болжайды, бірдей соңғы күйдегі процестерге немесе, олар айтқандай, қолтаңбаларға әкеледі. Мұндай сценарийлер саны өте көп!

t-кварктардың әртүрлі аномальды өзара әрекеттесулерін сипаттау үшін тиімді өріс теориясының формализміне негізделген әмбебап тәсіл [2] кеңінен қолданылады. Мұндай аптада -кварктардың аномальды өзара әрекеттесулері тиімді (феноменологиялық) лагранжды қолдану арқылы модельге тәуелді емес түрде сипатталады [1, 11, 7]. Бұл Лагранж СМ калибрлі тобына қатысты инвариантты болуы керек (әйтпесе, енгізілген аномальды өзара іс-қимылдар заманауи дәлдік өлшемдерімен қарама-қайшылықтарға әкеліп соқтырады) және ЖФ шкаласының бұрынғыдан да жоғары күштерімен басылатын өлшемдердің ұлғаюымен біркатар терминдерден тұрады, олар қолданыстағы шектеулерден туындайтындай, айтарлықтай үлкен болуы керек электрлік әлсіздік шкаласы - Хиггстің вакуумдық орташа өрісі  $v_{ew} = 246 \text{ ГэВ}$

$$L = L_{SM} + \sum_i \frac{c_i^{(6)}}{\Lambda^2} O_i^{(6)} + \sum_i \frac{c_i^{(8)}}{\Lambda^2} O_i^{(8)} + \dots \quad (5)$$

Тиімді Лагранждың шарттары  $O_i^{(N)}$  инвариантты операторлардың көбейтіндісінен және сәйкес  $c_i^{(N)}$  коэффициенттерінен тұрады. Жоғарғы кварктың басқа СМ нөлдерімен өзара әрекеттесуіне ықпал ететін ең төменгі 6 өлшемді операторлардың толық жиынтығы шолуда келтірілген [22]. Бұл

операторлар жиынтығы Варшава деп аталатын базаға сәйкес келеді [23].

Тиімді нөлдік теорияның (EFT) шеңберінде жалпы өлшеуіштен және Лоренцтің инвариантты кеңеюінен туындайтын аномальды  $t$ -кварк өзара әрекеттесулерінің лагранжианы, бірақ өздігінен симметрия бұзылғаннан кейінгі операторлар келесі түрде ұсынылуы мүмкін:

$$L_{EFT} = L_{SM} + k_4 \bar{\psi}_q \hat{O}^{(4)} \psi_t + \frac{k_5}{\Lambda} \bar{\psi}_q \hat{O}^{(5)} \psi_t + \frac{k_6}{\Lambda^2} \bar{\psi}_q \hat{O}^{(6)} \psi_t + \dots \quad (6)$$

мұнда  $\Lambda$  - ЖФ масштабты параметрі,  $k \cdot v_{ew}^2 / \Lambda^2$  шынайы үлкендігі бар аномальды тұрақтылар.

Тиімді өлшемді-инварианттық Лагранждарды салу мәселесі алдыңғы жұмыстарда да зерттелген (мысалы, қараңыз [2U, 24, 25, 1]). Тарихи себептерге байланысты эксперименттік мәліметтерді талдауда келесі формадағы унитарлық калибрдегі тиімді Лагранжиан кеңінен қолданылады:

$$\left. \begin{aligned} L_{anom} = & -\frac{1}{\sqrt{2}} \sum_{q=u,c,t} \bar{t} (v_{tq}^H + \gamma_5 a_{tq}^H) q H \\ & - \frac{g}{\sqrt{2}} \bar{t} \gamma^\mu (f_V^L P_L + f_V^R P_R) b W_\mu^+ \\ & - \frac{g}{2 \cos \vartheta_W} \sum_{q=u,c,t} \bar{t} \gamma^\mu (v_{tq}^Z - a_{tq}^Z \gamma_5) q Z_\mu \\ & - g_s \sum_{q=u,c,t} \frac{k_{tq}^g}{\Lambda} \bar{t} \sigma^{\mu\nu} t^a (f_{tq}^g + i h_{tq}^g \gamma_5) q G_{\mu\nu}^a \\ & - \frac{g}{\sqrt{2}} \bar{t} \frac{\sigma^{\mu\nu} \partial_\nu W_\mu^+}{M_W} (f_T^L P_L + f_T^R P_R) b \\ & - e \sum_{q=u,c,t} \frac{k_{tq}^\gamma}{\Lambda} \bar{t} \sigma^{\mu\nu} (f_{tq}^\gamma + i h_{tq}^\gamma \gamma_5) q A_{\mu\nu} \\ & - \frac{g}{2 \cos \vartheta_W} \sum_{q=u,c,t} \frac{k_{tq}^Z}{\Lambda} \bar{t} \sigma^{\mu\nu} (f_{tq}^Z + i h_{tq}^Z \gamma_5) q Z_{\mu\nu} \end{aligned} \right\} + h.c. \quad (7)$$

мұндағы  $g$  - әлсіз изоспиннің өлшеуіш тобының байланыс константасы  $SU(2)_L$ .  $P_{L,R} = (1 \pm \gamma_5)/2$ ,  $\sigma_{\mu\nu} = i/2(\gamma_\mu \gamma_\nu - \gamma_\nu \gamma_\mu)$  өріс кернеулігі тензорлары әдеттегідей анықталады ( $G_{\mu\nu}^a = \partial_\mu G_\nu^a - \partial_\nu G_\mu^a$ , ...);  $\Lambda$  - бірнеше физикалық деңгейдегі жаңа физиканың масштабы; аномалиялық тұрақтылар, әдетте, нақты сандар деп қабылданады, ал «салыстырмалы» тұрақтылар  $f$  және  $h$  жалпы

жағдайда нормаланған күрделі сандар ретінде қарастырылады:

$$|f|/2 + |h|/2 = 1$$

Еске салайық, Стандартты модель шеңберінде Лагранжиан (b) -дан параметрлердің мәні келесідей:

$$\left. \begin{aligned} v_{tt}^H &= y_t = \sqrt{2} \frac{m_t}{v_{ew}}, a_{tt}^H = 0, a_{tt}^H = 0, \\ v_{tq}^H &= a_{tq}^H = 0, & q \neq t \\ f_V^L &= \frac{V_{tq}}{2} & f_V^R = f_T^L = f_T^R = 0 \\ v_{tt}^Z &= \frac{1}{2} - 2Q_t \sin^2 \vartheta_W, & a_{tt}^Z = \frac{1}{2} \\ v_{tq}^Z &= a_{tq}^Z = 0, & q \neq t \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Бұл тәсілде эксперимент нәтижелері тиімді Лагранждың сәйкес мүшелеріне қарайтын аномальды байланыс константаларының мәндеріне шектеулер түрінде беріледі. Бірқатар жағдайларда алынған шектеулер белгілі бір сирек кездесетін  $t$ -кварк ыдырауының ықтималдылық шектері арқылы қайта көрсетіледі.

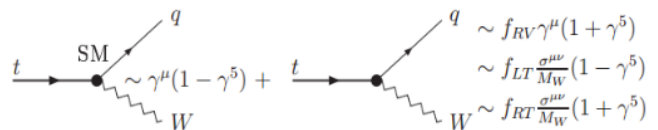
Жоғарыда айтылғандарды түсіндіру үшін  $tWb$  шыңындағы осындай аномальды өзара әрекеттесудің типтік (және өте перспективалы) мысалын қарастырайық (3-суретті қараңыз).

СМ-де мұндай шың «сол жақ»  $t$ -кварктың өзара әрекеттесуін сипаттайды және формасына ие:

$$L_{SM} = \bar{\varphi}_q \hat{O}_{SM} \psi_t;$$

$$\hat{O}_{SM} = \frac{e}{2\sqrt{2} \sin \vartheta_W} V_{tq} \gamma^\mu (1 - \gamma^5);$$

$$\frac{e}{2\sqrt{2} \sin \vartheta_W} = M_W \sqrt{\frac{G_F}{\sqrt{2}}}$$



### Сурет 1. $tWb$ шыңындағы аномальды өзара әрекеттесу

Осындай өзара әрекеттесу үшін Жаңа Физика өзін «дұрыс» токлар ( $\sim (1 + \gamma 5)$ ) және осы шыңдағы аномальды магниттік және электрлік моменттердің қатысуымен көрсете алады. СМ ықтимал ауытқуларын модельден тәуелсіз тәсілмен барлық мүмкін Лоренц-инвариантты құрылымдар түрінде тиімді Лагранжианда кезінде  $TWb$  өзара әрекеттесуін енгізуге болады.

$TWb$  шыңындағы ауытқулар 6 өлшемді инвариантты операторлар жиынтығымен сипатталады.

$$O_{\phi q}^{(3,3+3)} = \frac{i}{2} \left[ \phi' (\tau^I D_\mu - \overleftarrow{D}_\mu \tau^I) \phi \right] (\bar{q}_{L3} \gamma^\mu \tau^I q_{L3}),$$

$$O_{\phi\phi}^{33} = (\bar{q}_{L3} \sigma^{\mu\nu} \tau^I b_R) \phi W_{\mu\nu}^I,$$

$$O_{\phi\phi}^{33} = i(\phi' D_\mu \phi)(\bar{t}_R \gamma^\mu b_R),$$

$$O_{uW}^{33} = (\bar{q}_{L3} \sigma^{\mu\nu} \tau^I t_R) \phi W_{\mu\nu}^I, \quad (9)$$

мұндағы  $g_{L3}$   $t$  және  $b$  үшінші кварктардың солақай әлсіз изодоблетін білдіреді. Симметриялықтың өздігінен бұзылуынан кейін бұл операторлар жоғарыда келтірілген Лагранждың бөлігі болып табылатын келесі формадағы тиімді Лагранжианға [5] әкеледі:

$$L = \frac{g}{\sqrt{2}} \bar{b} \gamma^\mu (f_V^L P_L + f_V^R P_R) t W_\mu^- + \frac{g}{\sqrt{2}} \bar{b} \frac{\sigma^{\mu\nu}}{2M_W} (f_T^L P_L + f_T^R P_R) t W_{\mu\nu}^- + h.c. \dots \quad (10)$$

$$\text{мұнда } W_{\mu\nu}^- = \partial_\mu W_\nu^- - \partial_\nu W_\mu^- \text{ тең.}$$

$$C_{\phi q}^{(3,3+3)}, C_{\phi\phi}^{33}, C_{dW}^{33}, C_{uW}^{33} \text{ операторындағы}$$

коэффициент (10) келесідей түрде лагранжиандағы аномальдық тұрақтылармен байланысты(11):

$$f_V^L = V_{tb} + C_{\phi q}^{(3,3+3)} \frac{v^2}{\Lambda^2}, \quad f_V^R = \sqrt{2} C_{\phi\phi}^{33} \frac{v^2}{\Lambda^2},$$

$$f_T^L = \sqrt{2} C_{dW}^{33} \frac{v^2}{\Lambda^2}, \quad f_T^R = \sqrt{2} C_{uW}^{33} \frac{v^2}{\Lambda^2}$$

Бұл қатынастар эксперименттік мәліметтерді талдаудан алынған аномальды тұрақтылардағы шектеулерді  $f_V^L$ ,  $f_V^R$ ,  $f_T^L$ ,  $f_T^R$  өлшегіш-инвариантты операторлар үшін коэффициенттердің мүмкін мәндерінің шектеріне аударуға мүмкіндік береді.

### НӘТИЖЕЛЕР ЖӘНЕ ТАЛҚЫЛАУ

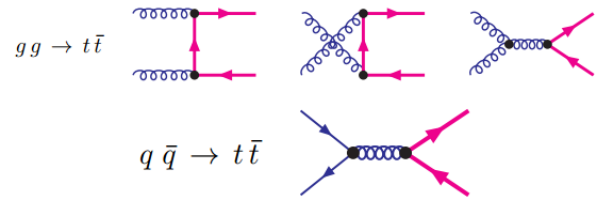
Топ-кварктардың түзілуінің негізгі механизмдері  $t$ -кварктың NLO-дағы есептелген толық еніне жақындатқанда [5]:

$$\Gamma_t = \frac{G_F m_t^3}{8\pi\sqrt{2}} \left(1 - \frac{M_W^2}{m_t^2}\right) \left(1 + 2 \frac{M_W^2}{m_t^2}\right) \left[1 - \frac{2\alpha_s}{3\pi} \left(\frac{2\pi^2}{3} - \frac{5}{2}\right)\right] \quad (10)$$

СМ шеңберінде  $t$ -кварк өндірісінің адрондық өзара әрекеттесулердегі сәйкес қималары бойынша негізгі механизмдері глюон-глюондық және кварк-антикварктық аннигиляция болып табылады, бұл  $t\bar{t}$  жұбының пайда болуына әкеледі (4-суретті қараңыз):

$$gg \rightarrow t\bar{t} \quad (11)$$

$$q\bar{q} \rightarrow t\bar{t} \quad (12)$$



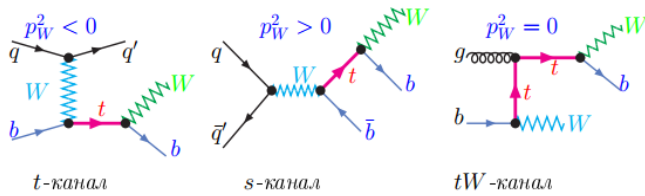
Сурет 2.  $t\bar{t}$  - кварктардың пайда болуын сипаттайтын диаграммалар.

Келесі, көлденең қимасы бойынша, электрлік әлсіз («жалғыз»)  $t$ -кварк өндірісінің процестері. Бұл процестер, әдетте, процеске қатысатын виртуалды  $W$ -бозонының 4 импульсінің квадрат шамасына сәйкес жіктеледі (5-суретті қараңыз):

$$qb \rightarrow tq', p_W^2 < 0: t\text{-канал} \quad (13)$$

$$q\bar{q}' \rightarrow t\bar{b}, p_W^2 > 0: s\text{-канал} \quad (14)$$

$$gb \rightarrow tW, p_W^2 = M_W^2: tW\text{-канал} \quad (15)$$



Сурет 3. Электрәлсіз (бір ретті) түзілу процесін сипаттайтын диаграммалар.

Тербеліс теориясының жоғары реттерінің рөлі - кварк түзілу процестерін кейінгі ыдырау процестерін зерттеуде жетекші (Борн) жақындатуға дейінгі тербеліс теориясының күшті және электрлік әлсіз түзетулерінің теориялық есептеулері өте маңызды рөл атқаратынын атап өткен жөн. Түзетулерді есептеудің күрделілігі әрбір жуықтаған сайын өте тез өседі және іс жүзінде көбінесе NLO және NNLO деңгейлерімен шектеледі. Сапалы түрде NLO жуықтауы Борн үлесін және бір контурлы амплитудалардың интерференциясын және глюонның қосымша өрісі немесе амплитуда квадратын соңғы немесе бастапқы күйінде қамтиды. Түзетулерге арналған төлем әр түрлі кинематикалық аймақтардағы жалпы өндіріс қималарын ғана өзгертпейді (fiducial cross section), сонымен қатар сезімтал реакция өнімдерінің үлестірілу формасын біршама өзгертеді. Әрдайым жоғарырақ бұйрықтарды ескеру нәтиженің теориялық дәлдігін жоғарылатуы, масштабтардың тәуелділігін айтарлықтай төмендетуі өте маңызды (ренормализация масштабы және факторизация масштабы), бұл міндетті түрде бұзылу теориясын қолдана отырып есептеулерде пайда болады.

Тербеліс теориясының ретінің жоғарылауымен көлденең қималар мен үлестірімдерді есептеу нәтижелері осы ренормализация/факторизация шкалаларындағы өзгерістерге едәуір тұрақтанады, бұл түзетулердің есептеулері өте маңызды, әсіресе іздеу үшін стандартты үлгіден тыс әсерлер үшін. Егер біз СМ болжамдарынан ауытқуларды табуға тырысатын болсақ, және бүгінгі күні мұндай ауытқулар өте аз екендігі қазірдің өзінде анық болса, онда біз СМ болжамдарын мүмкіндігінше дәл білуіміз керек. Күшті өзара әрекеттесуге арналған NNLO түзетулерін есептеу бойынша соңғы нәтижелер және t-кварктарды жұп өндіруге арналған электрлік әлсіз NLO түзетулер сілтемелерде келтірілген. Арнайы зерттеу шкалаларды таңдауға дейінгі есептеу нәтижелерінің тұрақтылығын жақсарту үшін кинематикалық айнымалыларға тәуелді «динамикалық шкалаларды» (dynamic scales)

қолдануға болатындығын көрсетті. Алайда, бұл жағдайда КХД түзетулерін есептеу кезінде әртүрлі кинематикалық үлестірулер динамикалық шкалалардың әртүрлі таңдауына қатысты тұрақты болады. Факторизацияның ренормализациясының динамикалық шкаласын, және -кварктарының көлденең массаларының көбейтіндісінің геометриялық орташа мәнін осындай таңдау NLO КХД түзетуінің есептеуінде өндіріс пен ыдырау процесіне жасалған. -кварктар, олардың жаппай қабығындағы және сыртындағы процестерге қатысады, сонымен қатар барлық кедергілердің үлесі. Бұл есептеулер -кварктардың түзілуіне және ыдырауына бір уақытта түзетулер енгізу теориялық болжамдардың дәлдігін едәуір жақсартып алады деген бақылауларды растады. NNLO КХД түзетулерін каналды бір жоғарғы кваркты өндірудің жетекші механизмі есептелген. Белгіленгендей, NNLO КХД түзетулерінің -кварктық ыдырау еніне есептеулері келтірілген.

Жетекші қалпына келтірілуін ескере отырып және жетекші логарифмдік жұмсақ түзетулерден (NNL және NNLL) және кейбір жағдайларда NNLO КХД түзетулерін ескере отырып, NLO түзетулерін есептеу кезінде сирек кездесетін процестерге түзетулер енгізілді, онда жұбы кварктар W бозондарының сүйемелдеуімен өндіріледі, Z бозоны сипаттайды, Хиггс бозоны сипатталады. Барлық есептеулерде есептер дәлдігінің едәуір жақсаруы мазасыздық теориясы атап өтілді. Теорияға сәйкес, процестердің көлденең қималары үшін нәтижелер ренормализация және факторизация масштабындағы ауытқуларға байланысты тұрақты болып келеді.

### ҚОРЫТЫНДЫ

Топ-кварк басқа кварктардан айтарлықтай ерекшеленеді, сондықтан бөлшектер физикасында ерекше рөл атқарады. t -кварк - бұл ең массивті кварк ғана емес, жалпы Стандартты модельдегі ең массивтік бөлшек. Кварктың үлкен массасы оның өмір сүру уақыты вакуумнан кварк-антикварк күйлерін құруға және адрондар түзуге кеткен уақыттан әлдеқайда аз болатындығына әкеледі. Сондықтан, бір жағынан, табиғатта t -кварк бар адрондар жоқ, ал екінші жағынан, адрондалу әсерімен бүркемеленбеген t -кварктың іргелі қасиеттерін зерттеудің ерекше мүмкіндігі бар. t -кварк пен өндіріс көлемінің үлкен қималарын қамтитын әр түрлі процестердің сипаттамаларын болжаудағы өте жоғары теориялық дәлдік оны Стандартты модельді тексеруге, сонымен қатар эффектілерді Стандартты модельден тыс іздеуге

арналған бірегей зертхана етеді. LHC-де жұмысының бірінші және екінші сессияларындағы тәжірибелерде  $t$ -кварк массасы, жұптық және дара өндіріс қималары, араластыру параметрі  $V_{tb}$ , әр түрлі үлестірулер мен спиндік корреляциялар, үлесі басым процестерге арналған қималар вирондық кварктардың, мысалы, бозонның өндірісі жеткілікті жоғары дәлдікпен өлшенді, глюон-глюонды біріктірудегі жылу, Юкана-Хиггс-Бозе байланыстырушы тұрақтылары және басқалар асқан дәлдікпен өлшеніп қойған.

Авторлар мүдделер қақтығысының жоқ екенін мәлімдейді.

**Авторлық құқық © 2026 автор(лар)ға тиесілі.** Бұл мақала [Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) (CC BY-SA 4.0) лицензиясы бойынша ашық қолжетімді болып табылады. Лицензия түпнұсқа еңбекке тиісті түрде сілтеме жасалған жағдайда, кез келген ортада пайдалануға, таратуға және қайта жариялауға рұқсат береді. Туынды материалдар осы лицензияның дәл осындай шарттарымен таратылуы тиіс.

## ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

- [1] M. Beneke et al., «Top quark physics», in «Standard model physics (and more) at the LHC», G. Altarelli and M. L. Mangano eds., Geneva, Switzerland: CERN (2000), p. 419-529; arXiv:hep-ph/0003033
- [2] S. Abachi et al. [D0 Collaboration], «Observation of the top quark», Phys. Rev. Lett. 74, 2632 (1995), doi:10.1103/PhysRevLett.74.2632, [hep-ex/9503003]
- [3] F. Abe et al. [CDF Collaboration], «Observation of top quark production in collisions», Phys. Rev. Lett. 74, 2626 (1995), doi:10.1103/PhysRevLett.74.2626, [hep-ex/9503002].
- [4] E.E. Boos, O. Brandt, D. Denisov, S.P. Denisov, P. Grannis, «The top quark (20 years after the discovery)», Phys. Usp. 58 1133-1158 (2015)
- [5] C. Patrignani et al. (Particle Data Group), Chin. Phys. C, 40, 100001 (2016) and 2017 update.
- [6] N. Cabibbo, «Unitary symmetry and leptonic decays», Phys. Rev. Lett. 10, 531 (1963).
- [7] M. Kobayashi and T. Maskawa, «CP-violation in the renormalizable theory of weak interaction», Prog. Theor. Phys. 49, 652 (1973).
- [8] LHC Top Working Group <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/LHCPhysics/LHCTopWGSummaryPlots>
- [9] W. Buchmuller and D. Wyler, «Effective Lagrangian Analysis of New Interactions and Flavor Conservation», Nucl. Phys. B 268 (1986) 621, doi:10.1016/0550-3213(86)90262-2
- [10] J.A. Aguilar-Saavedra, «A Minimal set of top anomalous couplings», Nucl. Phys. B 812 (2009) 181, doi:10.1016/j.nuclphysb.2008.12.012, [arXiv:0811.3842 [hep-ph]].
- [11] J. A. Aguilar-Saavedra et al., «Interpreting top-quark LHC measurements in the standard-model effective field theory», arXiv:1802.07237 [hep-ph].