

Jedno z najważniejszych pytań w fizyce dotyczy podstawowej struktury materii. Od stuleci badacze i myśliciele zadawali pytania dotyczące podstawowych składników materii i ich wzajemnych oddziaływań. Aktualny stan wiedzy na temat oddziaływań elementarnych podsumowuje kwantowa teoria pola zwana Modelem Standardowym. Podstawowe składniki materii występujące w tej teorii to kwarki i leptony.

Oddziaływania pomiędzy tymi cząstkami materii są przenoszone przez cząstki pośredniczące. Model Standardowy opisuje trzy rodzaje oddziaływań: elektromagnetyczne, słabe i silne. Każde z nich jest przenoszone przez inne cząstki pośredniczące. Spośród wymienionych trzech oddziaływań najmocniejszymi są oddziaływania silne pomiędzy kwarkami, odpowiedzialne za wiązania nukleonów w jądrach. Elementarnymi, kwantowymi nośnikami oddziaływań silnych są cząstki zwane gluonami. Podstawowe oddziaływania pomiędzy kwarkami i gluonami są znane i opisane w ramach teorii budowy składników Modelu Standardowego zwanego chromodynamiką kwantową. Szczególnym cechem oddziaływań silnych jest fakt, że kwarki nigdy nie występują jako cząstki swobodne. Są one uwięzione w cząstkach złożonych zwanych hadronami. Obecny stan wiedzy dotyczy dynamiki oddziaływań silnych jest bardzo niekompletny ze względu na brak dokładnego zrozumienia uwięzienia kwarków i gluonów w hadronach.

Dostępna na obecnym etapie wiedzy narzędzia teoretyczne umożliwiają analizę ilościowo ograniczonego podzbioru procesów przy upraszczających założeniach. Wyniki prowadzonych do wiadomości badań teoretycznych wykazują, że przy ciężej wzrastającej energii zderzenia dwóch hadronów, takich jak protony, liczba wyprodukowanych cząstek rośnie dramatycznie. Można to powiązać ze wzrostem z energii liczby kwarków i gluonów wewnątrz zderzających się protonów. To zjawisko jest związane z podstawowymi własnościami gluonów, które wykazują tendencję do produkowania pochodnych gluonów. Ten proces ulega intensyfikacji wraz ze wzrostem energii i prowadzi do dominacji oddziaływań gluonów. Celem przedstawionego projektu jest opracowanie ulepszonych narzędzi opisu teoretycznego oddziaływań fundamentalnych w obszarze kinematycznym wysokich energii.

Projekt składa się z czterech uzupełniających się zadań, z których każde dotyczy różnych cech oddziaływań fundamentalnych. W pierwszej zadaniu projektu proponuje się przeprowadzenie szczegółowych badań wybranych procesów, które są szczególnie czułe na cechy dynamiki kwarków i gluonów, szczególnie tych związanych z rolami pędów poprzecznych. Na przykład, proponuje się zbadanie procesu w którym w wyniku zderzenia dwóch protonów wyprodukowany zostaje strumień cząstek z towarzyszącymi im innymi cząstkami. Analiza rozkładów kinetycznych tych dwóch wyprodukowanych obiektów pozwala na otrzymanie wartościowych informacji dotyczących rozkładów pędów składników cząstek elementarnych uczestniczących w zderzeniu.

Drugim zadaniem projektu jest zbadanie procesów, które są szczególnie czułe na wytworzone w trakcie zderzenia przy wysokich energiach gluony o dużej i rosnącej z energią gęstości. W tym zagadnieniu jest wyjątkiem czy ten wzrost gęstości gluonów będzie kontynuowany bez ograniczeń. Z teoretycznego punktu widzenia istnieją silne wskazania, że w pewnym momencie wystąpi mechanizm samoregulacji, oparty na odwrotnym procesie czyli rekombinacji gluonów przy wysokich energiach. Zjawisko to nosi nazwę saturacji gluonowej. Jeżeli dodatkowo jeden z uczestniczących w procesie zderzenia cząstek jest już do tego intensywnie procesie saturacji gluonów ulega wzmocnieniu. Celem proponowanych w tym kontekście badań jest opracowanie właściwego formalizmu teoretycznego który pozwoli uwzględnić saturację gluonów przy opisie wybranych procesów zderzenia protonu z jądrem. Ponadto, formalizm ten zostanie zastosowany do opisu procesów, w których proton pochodzący z promieni kosmicznych oddziałuje z jądrem atomowym atmosfery w wyniku czego wytworzony zostaje ciężki kwark. Kwark ten podlega następnie przekształceniu w hadron który w końcu rozpada się na bardzo wysokoenergetyczne neutrino - bardzo lekką cząstkę która może przelatywać niezaburzona bardzo duże odległości. Analiza procesów tego typu jest ważna przy pomiarach neutronów badanych w antarktycznym laboratorium neutronowym IceCube.

Trzecie zadanie projektu będzie poświęcone analizie procesów z oddziaływaniami wielopartonowymi. Kiedy energia zderzenia jest bardzo wysoka występujący w hadronie układ kwarkowo-gluonowy jest bardzo gęsty i bardzo prawdopodobnym staje się, że wiele kwarków i gluonów oddziałuje jednocześnie nie w trakcie tego samego zderzenia protonu uczestniczącego w rozpraszaniu. Jest to proces oddziaływań wielopartonowego. Celem badań jest opracowanie formalizmu teoretycznego opisu tego zderzenia wielopartonowe który uwzględni kinematykę partonów z pędami poprzecznymi w sposób bardziej dokładny oraz jest zgodny z ważnymi zasadami zachowania.

Celem czwartego zadania projektu będzie opracowanie efektywnych metod obliczenia procesów elementarnych z kwarkami i gluonami uwzględniających kinematykę partonów z pędami poprzecznymi w sposób dokładniejszy niż istniejący dotychczas oraz mających zastosowanie przy występowaniu dużej liczby cząstek. Tradycyjnie w trakcie obliczenia takich procesów elementarnych partonów przyjmuje się założenie, że przy zderzających się cząstkach elementarnych mają jedynie składowe skierowanie wzdłuż kierunku pędu pierwotnego hadronu. Założenie takie jest jednak niecisłe i powinno być poprawione szczególnie przy opisie procesów zachodzących przy wysokich energiach. Gluony występujące w takich warunkach kinematycznych mogą bowiem posiadać znaczne wartości składowych pędów poprzecznych do kierunku ruchu zderzających się cząstek. W tym zdaniu opracowany zostanie efektywny i zautomatyzowany program obliczeniowy procesów elementarnych bez upraszczających założeń, który jest bardziej odpowiedni do zastosowania przy analizie wysokoenergetycznych zderzeń hadronów.

Wszystkie proponowane w projekcie badania są silnie motywowane aktualnym i bogatym programem do wiadomości prowadzonych w Large Hadron Collider w CERNie, w Relativistic Heavy Ion Collider w Brookhaven National Laboratory oraz do wiadomości prowadzonych w Jefferson Laboratory. Wyniki przeprowadzonych obliczeń będą porównane z otrzymanymi w tych eksperymentach pomiarami. Opracowane zostaną ponadto przewidywania dla urządzeń planowanych w przyszłości takich jak Electron Ion Collider i Large Hadron-electron Collider. Proponowane w projekcie badania są te istotne przy analizie pomiarów strumieni wysokoenergetycznych neutronów badanych w laboratorium IceCube.