



Kraków, 9 czerwca 2021

## GEM upraszcza wewnętrzną budowę protonów oraz przebieg zderzeń z ich udziałem

We wnętrzu każdego protonu bądź neutronu znajdują się trzy kwarki związane gluonami. Dotychczas często zakładano, że dwa z nich tworzą trwałą parę: dikwark. Teraz wydaje się jednak, że żywot dikwarków w fizyce dobiega końca. To jeden z wniosków płynących z nowego modelu zderzeń protonów z protonami bądź jądrami atomowymi, w którym uwzględniono oddziaływania gluonów z morzem wirtualnych kwarków i antykwarków.

W fizyce pojawienie się nowego modelu teoretycznego nierzadko oznacza kłopoty dla starych koncepcji. Nie inaczej jest w przypadku opisu zderzeń protonów z protonami bądź jądrami atomowymi, zaproponowanego przez naukowców z Instytutu Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk (IFJ PAN) w Krakowie. W najnowszym modelu niebagatelną rolę odgrywają interakcje gluonów emitowanych przez jeden proton z morzem wirtualnych kwarków i antykwarków, pojawiających się i znikających wewnątrz drugiego protonu bądź neutronu.

Gluony są nośnikami oddziaływania silnego, jednego z czterech fundamentalnych oddziaływań przyrody. Wiąże ono kwarki w zlepki, na przykład w protony i neutrony. Pod wieloma względami oddziaływanie silne różni się od pozostałych. Na przykład nie słabnie ono, lecz rośnie wraz z odległością między cząstkami. Co więcej, w przeciwieństwie do fotonów gluony przenoszą pewien ładunek (malowniczo nazywany kolorem) i mogą oddziaływać między sobą.

Dominująca część reakcji jądrowych – w tym większość zderzeń protonów z protonami bądź jądrami atomowymi – to procesy, w których cząstki jedynie się „muskają” wymieniając gluony. Zderzenia tego typu są nazywane przez fizyków miękkimi i sprawiają im niemały kłopot, gdyż opisująca je teoria nie jest policzalna z zasad pierwszych. Z konieczności wszystkie dzisiejsze modele procesów miękkich są więc mniej lub bardziej fenomenologiczne.

*„Sami początkowo chcieliśmy tylko sprawdzić, jak dotychczasowe narzędzie, znane jako Dualny Model Partonów, radzi sobie z bardziej precyzyjnymi danymi eksperymentalnymi dotyczącymi zderzeń protonu z protonem oraz protonu z jądrem węgla”, wspomina prof. dr hab. Marek Jeżabek (IFJ PAN). „Błyskawicznie się okazało, że nie idzie mu najlepiej. Postanowiliśmy więc na bazie starożytnego modelu, rozwijanego od ponad czterech dekad, spróbować stworzyć coś z jednej strony dokładniejszego, z drugiej bliższego naturze opisywanych zjawisk”.*

Zbudowany w IFJ PAN Model Wymiany Gluonów (Gluon Exchange Model, GEM) także ma charakter fenomenologiczny. Bazuje jednak nie na analogiach do innych zjawisk fizycznych, lecz opiera się bezpośrednio na istnieniu kwarków i gluonów oraz na ich fundamentalnych własnościach. Co więcej, GEM bierze pod uwagę istnienie w protonach i neutronach nie tylko trójek kwarków głównych (walencyjnych), ale także morza ciągle powstających i anihilujących par wirtualnych kwarków i antykwarków. Ponadto uwzględniono w nim ograniczenia wynikające z zasady zachowania liczby barionowej. W uproszczeniu mówi ona, że liczba barionów (czyli m.in. protonów i neu-

tronów) istniejących przed i po zakończeniu oddziaływania musi pozostać niezmienną. Ponieważ każdy z kwarków przenosi liczbę barionową (równą  $1/3$ ), zasada ta pozwala lepiej wnioskować, co się dzieje z kwarkami i wymienianymi między nimi gluonami.

*„GEM pozwolił nam zbadać nowe scenariusze przebiegu zdarzeń z udziałem protonów i neutronów”, podkreśla dr hab. Andrzej Rybicki (IFJ PAN) i przechodzi do szczegółów: „Wyobraźmy sobie na przykład, że w trakcie miękkiego zderzenia proton-proton jeden z nich emituje gluon, który trafia w drugi, lecz nie w jego kwark walencyjny, a w jakiś przez ułamek chwili istniejący kwark z wirtualnego morza. Gdy taki gluon zostanie zaabsorbowany, tworzące parę kwark morski i antykwark morski przestają być wirtualne i się materializują w inne cząstki w pewnych stanach końcowych. Zwróćmy uwagę, że w tym scenariuszu nowe cząstki powstają mimo faktu, że kwarki walencyjne jednego z protonów pozostały nietknięte”.*

Krakowski model gluonowy prowadzi do ciekawych spostrzeżeń, z których dwa są szczególnie godne uwagi. Pierwsze dotyczy pochodzenia protonów dyfrakcyjnych, obserwowanych w zderzeniach protonów. Są to szybkie protony, które wybiegają z miejsca kolizji pod niewielkimi kątami. Dotychczas sądzono, że nie mogą się one produkować w procesach związanych z wymianą koloru i że za ich powstawanie odpowiada inny mechanizm fizyczny. Teraz się okazuje, że obecność protonów dyfrakcyjnych można doskonale wytłumaczyć właśnie oddziaływaniem gluonu wyemitowanego przez jeden proton z kwarkami morskimi drugiego protonu.

Nie mniej ciekawe jest kolejne spostrzeżenie. Wcześniej przy opisie zderzeń miękkich przyjmowano, że dwa spośród trzech kwarków walencyjnych protonu czy neutronu są ze sobą związane tak trwale, że tworzą „molekułę” nazywaną dikwarkiem. Istnienie dikwarku było hipotezą, za którą nie wszyscy fizycy oddaliby bezkrytycznie głowę, niemniej koncept był szeroko stosowany – co teraz zapewne się zmieni. Model GEM skonfrontowano bowiem z danymi eksperymentalnymi opisującymi sytuację, w której proton zderza się z jądrem węgla oddziałując po drodze z dwoma lub więcej protonami/neutronami. Okazało się, że aby pozostać w zgodzie z pomiarami, w ramach nowego modelu w przynajmniej połowie przypadków trzeba założyć dezintegrację dikwarku.

*„Wiele zatem wskazuje, że dikwark w protonie czy neutronie nie jest obiektem mocno związanym. W szczególności może być tak, że dikwark istnieje tylko efektywnie, jako przypadkowa konfiguracja dwóch kwarków tworzących tak zwany kolorowy antytryplet – i gdy tylko może, natychmiast się rozlatuje”,* mówi dr Rybicki.

Krakowski model wymiany gluonów – „nasz klejnot”, jak mówią z przymrużeniem oka obaj autorzy wykorzystując grę słów w języku angielskim (wyraz „gem” można bowiem tłumaczyć jako „klejnot” bądź „cacko”) – w prostszy i bardziej spójny sposób wyjaśnia szerszą klasę zjawisk niż dotychczasowe narzędzia opisu zderzeń miękkich. Obecne wyniki, zaprezentowane w artykule opublikowanym na łamach czasopisma „*Physics Letters B*”, mają ciekawe implikacje dla zjawisk anihilacji materii z antymaterią, w których mogłoby dochodzić do anihilacji antyprotonu na więcej niż jednym protonie/neutronie w jądrze atomowym. Dlatego autorzy przedstawili już pierwsze, wstępne propozycje dotyczące przeprowadzenia nowych pomiarów w CERN z użyciem wiązki antyprotonów.

*Instytut Fizyki Jądrowej im. Henryka Niewodniczańskiego Polskiej Akademii Nauk (IFJ PAN) w Krakowie prowadzi badania podstawowe i aplikacyjne w obszarze fizyki oraz nauk pokrewnych. Główna część działalności naukowej Instytutu koncentruje się na badaniu struktury materii, w tym własności oddziaływań fundamentalnych od skali kosmicznej po cząstki elementarne. Częścią Instytutu jest nowoczesne Centrum Cyklotronowe Bronowice, unikalny w skali europejskiej ośrodek, obok badań naukowych zajmujący się terapią protonową nowotworów. IFJ PAN prowadzi też cztery akredytowane laboratoria badawcze i pomiarowe. Wyniki badań – obejmujących fizykę i astrofizykę cząstek, fizykę jądrową i oddziaływań silnych, fizykę fazy skondensowanej materii, fizykę medyczną, inżynierię nanomateriałów, geofizykę, biologię radiacyjną i środowiskową, radiochemię, dozymetrię oraz fizykę i ochronę środowiska – są każdego roku przedstawiane w ponad 600 artykułach publikowanych w recenzowanych wysoko punktowanych czasopismach naukowych. Corocznie Instytut jest organizatorem lub współorganizatorem wielu międzynarodowych i krajowych konferencji naukowych oraz szeregu seminariów i innych spotkań naukowych. IFJ PAN jest członkiem Krakowskiego Konsorcjum Naukowego „Materia-Energia-Przyszłość”, któremu, na lata 2012-2017, nadany został status Krajowego Naukowego Ośrodka Wiodącego (KNOW). Wiele projektów i przedsięwzięć realizowanych przez Instytut jest wpisanych na Polską Mapę Infrastruktury Badawczej (PMIB). Instytut zatrudnia ponad pół tysiąca pracowników. Komisja Europejska przyznała IFJ PAN prestiżowe wyróżnienie „HR Excellence in Research” jako instytucji stosującej zasady „Europejskiej Karty Naukowca” i „Kodeksu Postępowania przy rekrutacji pracowników naukowych”. W klasyfikacji MNiSW Instytut został zaliczony do najwyższej kategorii naukowej A+ w grupie nauk ścisłych i inżynierskich.*

## **KONTAKT:**

prof. dr hab. **Marek Jeżabek**  
Instytut Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk  
tel.: +48 12 6628421  
email: [marek.jezabek@ifj.edu.pl](mailto:marek.jezabek@ifj.edu.pl)

dr hab. **Andrzej Rybicki**  
Instytut Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk  
tel.: +48 12 6628447  
email: [andrzej.rybicki@ifj.edu.pl](mailto:andrzej.rybicki@ifj.edu.pl)

## **PUBLIKACJE NAUKOWE:**

„The Gluon Exchange Model for diffractive and inelastic collisions”  
M. Jeżabek, A. Rybicki  
*Physics Letters B*, 816, 136200 (2021)  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physletb.2021.136200>

## **POWIĄZANE STRONY WWW:**

<http://www.ifj.edu.pl/>  
Strona Instytutu Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk.

<http://press.ifj.edu.pl/>  
Serwis prasowy Instytutu Fizyki Jądrowej PAN.

## **MATERIAŁY GRAFICZNE:**

**IFJ210609b\_fot01s.jpg**

**HR:** [http://press.ifj.edu.pl/news/2021/06/09/IFJ210609b\\_fot01.jpg](http://press.ifj.edu.pl/news/2021/06/09/IFJ210609b_fot01.jpg)

Gdy proton zderza się z innym protonem, gluon wyemitowany przez kwark walencyjny jednego protonu może wejść w interakcję z kwarkiem wirtualnej pary z morza wewnątrz drugiego protonu. Zgodnie z modelem GEM, rezultatem takiego oddziaływania będzie szybki proton o nienaruszonej strukturze kwarków walencyjnych oraz inne cząstki, utworzone w procesach zachodzących w obszarze oddziaływania umownie zaznaczonym na biało. (Źródło: IFJ PAN)

**IFJ210609b\_fot02s.jpg**

**HR:** [http://press.ifj.edu.pl/news/2021/06/09/IFJ210609b\\_fot02.jpg](http://press.ifj.edu.pl/news/2021/06/09/IFJ210609b_fot02.jpg)

Jeden z wariantów zderzenia protonu z dwoma protonami/neutronami w jądrze węgla według modelu GEM. Dwa kwarki walencyjne jednego protonu wymieniają gluony z kwarkami walencyjnymi w dwóch protonach/neutronach jądra węgla. Trójka kwarków nadlatującego protonu przestaje być kolorowo obojętna. Kwarki te, widoczne po prawej na czerwono, muszą następnie wylapać cząstki z obszaru oddziaływania (zaznaczonego na biało), co skutkuje produkcją cząstek wtórnych. (Źródło: IFJ PAN)