

Fundamentalne pytania, które pojawiają się w fizyce od samych jej początków, pozostają wciąż w niezminionej formie:

- Jakie są elementarne składniki materii?
- Jakie siły występują pomiędzy nimi?

Przy obecnym stanie wiedzy rozróżnia się cztery oddziaływania fundamentalne: silne, słabe, elektromagnetyczne oraz grawitacyjne. Pierwsze trzy z nich udało się zunifikować w tzw. Modelu Standardowym, który wymienia także zestaw elementarnych składników materii. Są nimi: kwarki, leptony, gluony, fotony oraz bozony.

Jednak wiedza dotycząca podstawowych składników oraz oddziaływań nie wystarczy, aby przewidzieć zachowanie układu wielu takich składników. Zadajemy kolejne, bardziej złożone pytania dotyczące zachowania materii w skali makroskopowej:

- W jakich stanach może występować materia?
- W jaki sposób odbywają się przejścia pomiędzy tymi stanami?

Materia którą znamy z życia codziennego istnieje w stanie, w którym kwarki i gluony występują jedynie związane wewnątrz hadronów. Co wiemy o materii w warunkach ekstremalnych? Modele kosmologiczne przewidują, że w pierwszych mikrosekundach (10^{-12} s do 10^{-6} s) od Wielkiego Wybuchu, kiedy temperatura przekraczała bilion Kelvinów, materia istniała w stanie zupy złożonej z niezwiązanych kwarków i gluonów. Po tym czasie nastąpiło pierwsze w historii Wszechświata przejście fazowe – hadronizacja – spontaniczne związanie kwarków i gluonów w cząstki takie jak protony, neutrony, czy piony. Zidentyfikowanie sygnatur kosmicznych tego wydarzenia jest jednak niezmiernie trudne, jeśli nie niemożliwe.

Kolejnym przykładem materii w warunkach ekstremalnych jest rdzeń gwiazd neutronowych. Szacunki gęstości w centrum gwiazdy przewyższają gęstość nukleonów, co sugeruje, że materia w tych warunkach również istnieje w stanie plazmy kwarkowo-gluonowej. Jednak możliwości studiowania takich obiektów są także mocno ograniczone.

Aby badać materię w warunkach ekstremalnych potrzebujemy zatem metody, aby stworzyć ją w sposób kontrolowany w laboratorium. Badania zderzeń ciężkich jonów dostarczają nam takiej możliwości. Zderzenia takie tworzą kroplę plazmy oddziałującej silnie – tzw. *kula ognia* (ang. *fireball*) – istniejącą jedynie około 10^{-22} s. W naturalny sposób możemy oczekiwać, że zwiększając energię zderzenia zwiększamy także gęstość energii plazmy. Poszukujemy więc anomalii w produkcji hadronów w zależności od energii zderzeń, które mogłyby sugerować obecność przemian pomiędzy fazami materii oddziałującej silnie.

Model statystyczny wczesnej fazy przewiduje trzy główne anomalie, powstające na skutek przejścia pomiędzy fazą hadronową, a fazą plazmy kwarkowo-gluonowej (odwrotnością opisanego wcześniej spontanicznego związania kwarków we wczesnym Wszechświecie). Są nimi następujące zależności obserwowalne od energii zderzeń:

- przegięcie (*kink*) – zwiększona produkcja entropii w fazie kwarkowej,
- róg (*horn*) – zmniejszona produkcja dziwności w fazie kwarkowej,
- stopień (*step*) – wypłaszczenie w zależności temperatury od energii zderzenia.

Wyżej wymienione sygnatury zostały zaobserwowane w zderzeniach Pb+Pb, a co najważniejsze – wszystkie przy tej samej energii kolizji.

Podobnie jak przemiany fazowe wody zachodzą w różnych temperaturach przy różnym ciśnieniu, tak samo spodziewamy się, że przemiany fazowe silnie oddziałującej materii będą zależeć od dwóch zmiennych termodynamicznych: temperatury oraz gęstości barionowej. Oprócz możliwości manipulowania energią wiązki jonów, możemy zmieniać także wielkość zderzanych cząstek, zmieniając tym samym temperaturę i gęstość barionową powstającego *fireball'a*.

Właśnie do takich badań stworzony został eksperyment NA61/SHINE, jako jedyny na Świecie badający przemianę fazową nie tylko w zależności od energii zderzanych jonów, ale także od ich wielkości – skanując tym samym znacznie większy obszar przestrzeni fazowej silnie oddziałującej materii. Kolaboracja NA61 przeprowadza zderzenia następujących układów (w kolejności od najmniejszego): p+p (referencyjne), Be+Be, Ar+Sc, Xe+La oraz Pb+Pb.

Moje badania dotyczą najciekawszego z wymienionych układów – Ar+Sc. Nazywam go najciekawszym, ponieważ pierwsze uzyskane wyniki wskazują na istnienie kolejnego przejścia fazowego silnie oddziałującej materii. Wyraźne podobieństwo do układu Pb+Pb sugeruje obecność progu perkolacji (lub tzw. *onset of fireball*). Ar+Sc ma być najmniejszym z badanych układów, w którym zderzane nukleony tworzą kroplę plazmy kwarkowo-gluonowej, a nie izolowane systemy N+N, jak np. w przypadku Be+Be. Taki wniosek rzuca nowe światło na proces ewolucji hydrodynamicznej plazmy oraz sugeruje równowagę termodynamiczną osiąganą nawet w tak niewielkich układach.