

Badanie diagramu fazowego silnie oddziałującej materii

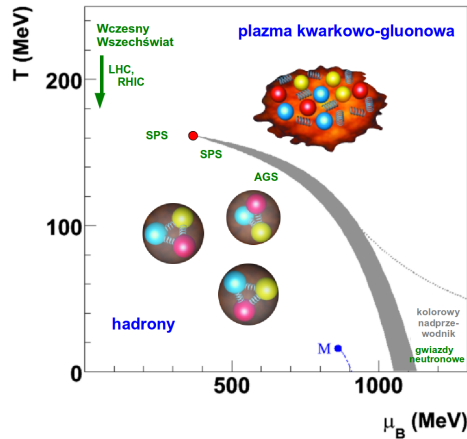
K. Grebieszko

*Wydział Fizyki,
Politechnika Warszawska,
ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa*

Zgodnie z Modelem Wielkiego Wybuchu jednym z etapów ewolucji Wszechświata było powstanie plazmy kwarkowo-gluonowej (*quark-gluon plasma*, QGP), czyli stanu o wysokiej gęstości energii, w którym kwarki i gluony nie są „uwięzione” wewnątrz hadronów. W kolejnych etapach ewolucji, w miarę stygnięcia i rozszerzania się Wszechświata, kwarki łączyły się w hadrony, te dalej w atomy, cząsteczki, aż do gromad galaktyk znanych nam obecnie. Stan QGP staramy się uzyskać w laboratoriach zderzając ciężkie jony np. ołowiu, złota przy wysokich energiach (jony przyspieszane są do prędkości bliskiej prędkości światła). Tworząc taki „uwolniony” stan QGP próbujemy zatem odtworzyć warunki jakie istniały zaraz po Wielkim Wybuchu, zrozumieć ewolucję wczesnego Wszechświata oraz naturę oddziaływań silnych między kwarkami i gluonami.

Z ogromnej energii zderzenia mogą produkować się nowe kwarki (nie tylko u i d , ale i cięższe np. s , c). Już od pierwszych chwil po zderzeniu trwa ekspansja i układ dosłownie rozpryskuje się na wszystkie strony. Kolejnym etapem jest łączenie się swobodnych kwarków w hadrony (tzw. hadronizacja) – nie tylko w protony i neutrony, ale głównie w lekkie piony (mezony π), kaony (mezony K), etc. Dalej trwa ekspansja i ochładzanie, aż na zakończenie ustaną oddziaływania między wyprodukowanymi hadronami. Moment ten nazywamy wymrożeniem. Ściślej, wyróżnia się dwa wymrożenia: chemiczne, kiedy ustala się skład kwarkowy produkowanych cząstek i późniejsze termiczne, kiedy ustają oddziaływania elastyczne (koniec wymiany pędów) między produktami reakcji. W detektorach obserwujemy cząstki już po etapie wymrożenia termicznego. To czy w trakcie zderzenia ciężkich jonów materia jądrowa przeszła w stan QGP wnioskujemy pośrednio poprzez badanie cząstek w stanie końcowym (piony, kaony, protony, etc.). Ich ilości, względne stosunki produkcji, charakterystyki kinematyczne (np. rozkłady pędowe, kątowe, energie) niosą informacje o stanie początkowym – czy w bardzo wczesnej fazie powstała QGP, czy nie. Zderzenia ciężkich jonów przy wysokich energiach są obecnie badane w kilku ośrodkach na świecie. Przykładami akceleratorów są: *Super Proton Synchrotron* (SPS) w CERN, *Relativistic Heavy Ion Collider* (RHIC) w BNL oraz *Large Hadron Collider* (LHC) w CERN.

Diagram fazowy silnie oddziałującej materii (Rysunek 1) najczęściej przedstawiany jest przy użyciu temperatury T oraz barionowego potencjału chemicznego μ_B . Diagram ten, w przeciwieństwie do np. diagramu fazowego wody, jest dość słabo poznany i jego własności dopiero muszą zostać odkryte. Oprócz normalnej materii jądrowej ($T \approx 0$ MeV $\mu_B \approx 940$ MeV) na diagramie mamy obszar gazu hadronowego i plazmy



Rysunek 1: Schematyczny diagram fazowy silnie oddziałującej materii (punkt krytyczny – czerwona kropka, gruba szara linia – przejście fazowe pierwszego rodzaju)

kwarkowo-gluonowej. Uważa się, że dla dużych wartości μ_B przejście fazowe między QGP a gazem złożonym z hadronów jest pierwszego rodzaju i kończy się w punkcie krytycznym (CP), w którym mamy przejście drugiego rodzaju. Za punktem krytycznym (w stronę małych wartości μ_B) mamy do czynienia z gwałtownym, ale ciągłym przejściem (QGP \leftrightarrow hadrony) zwanym „cross-over”. Niestety zarówno położenie linii przejścia I rodzaju, jak i położenie CP nie są obecnie dokładnie znane (istnieje całe spektrum przewidywań dotyczących zarówno samego istnienia, jak i położenia hipotetycznego punktu krytycznego).

Jednym z elementów badania diagramu fazowego silnie oddziałującej materii jest wyznaczenie granicy energetycznej (minimalna energia zderzenia), przy której następuje przejście do QGP. Analizy takie były wykonywane przy użyciu zderzeń Pb+Pb oraz Au+Au w eksperymentach przy akceleratorze SPS oraz RHIC. Badano m.in. zależność od energii zderzenia produkcji cząstek dziwnych (zawierających kwark s) w stosunku do niedziwnych (zawierających jedynie kwarki u i d), tłumienie tzw. jetów hadronowych („spray” hadronów powstały w wyniku hadronizacji kwarka lub gluonu), przepływy anizotropowe. Wyniki SPS (eksperyment NA49) oraz RHIC (eksperyment STAR) pokazują, że taka granica energetyczna (*onset of deconfinement*) odpowiada pośrednim energiom dostępnym w SPS. W skali makroskopowej można to porównać do znalezienia temperatury wrzenia wody. Kolejnym etapem w badaniach (eksperyment NA61/SHINE) jest sprawdzanie, czy dla mniejszych systemów (Be+Be, Ar+Sc, Xe+La), przy podobnych energiach zderzenia, również istnieje możliwość przejścia do QGP.

Kolejnym, wspomnianym już wyżej, aspektem badania diagramu fazowego jest poszukiwanie punktu krytycznego. Przewidywania teoretyczne pokazują, że jeśli system wymraża w okolicy punktu krytycznego to możemy spodziewać się zwiększonych fluktuacji gęstości w systemie, które to fluktuacje będą przekładać się na fluktuacje różnych charakterystyk, produkowanych w zderzeniach cząstek np. średniego pędu poprzecznego (składowa pędu prostopadła do osi wiązki), energii czy krotności różnego

typu cząstek (liczba cząstek na oddziaływanie). Oddzielną, rozwijaną obecnie prężnie klasą analiz jest badanie efektów intermitencyjnych (lokalne „zgęstki”, miara fluktuacji gęstości, analog krytycznej opalescencji) w pędzie poprzecznym produkowanych w zderzeniach protonów. Zgodnie z niektórymi modelami po diagramie fazowym materii jądrowej można poruszać się zmieniając zarówno energię zderzenia (większa energia to mniejsze wartości μ_B), jak i rozmiar zderzanego systemu (większy rozmiar to niższa temperatura wymrożenia chemicznego). Badanie różnych systemów (Be+Be, Ar+Sc, Xe+La, Pb+Pb/Au+Au) może więc pozwolić na dużo dokładniejszy skan diagramu fazowego.

Wreszcie, analiza produkcji krótkożyciowych rezonansów przyczynia się do głębszego zrozumienia ewolucji wysokoenergetycznego zderzenia ciężkojonowego. W szczególności badanie mezonów K^* w zderzeniach jądrowych oraz elementarnych (np. p+p) pozwala na oszacowanie czasu pomiędzy dwoma wymrożeniami (chemicznym i termicznym) w zderzeniach jądrowych (są to wielkości na poziomie kilku fm/c, czyli rzędu 10^{-23} s).

W prezentacji pokazane będą wyniki z akceleratorów SPS oraz RHIC dotyczące wyznaczania energii uwolnienia, poszukiwania położenia punktu krytycznego oraz oszacowywania czasu pomiędzy wymrożeniami.