

# Relatywistyczne zderzenia ciężkich jonów jako narzędzie w badaniu diagramu fazowego silnie oddziałującej materii

Katarzyna Grebieszko

6 grudnia 2022

## Streszczenie

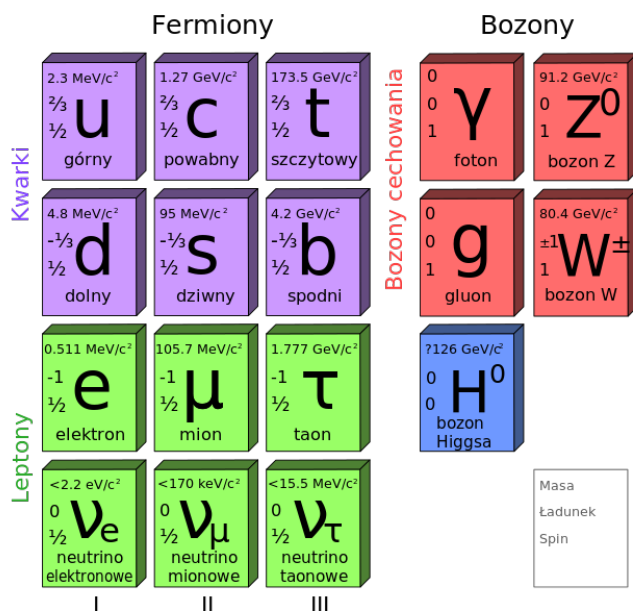
W dokumencie pokazane są podstawowe cele badania zderzeń ciężkich relatywistycznych jonów. W szczególności opisany jest diagram fazowy oraz omówione są plany poszukiwania punktu krytycznego silnie oddziałującej materii.

## 1 Cząstki elementarne i oddziaływania

Od setek a nawet tysięcy lat zastanawiamy się skąd pochodzimy, jaki był nasz początek, jakie są podstawowe składniki materii z której się składamy, wreszcie jakie są mechanizmy oddziaływań między tymi składnikami. Zgodnie z Modelem Wielkiego Wybuchu Wszechświat pojawił się około 14 mld lat temu w wyniku ekspansji zapoczątkowanej gigantyczną eksplozją. Model zakłada, że jednym z etapów ewolucji Wszechświata było powstanie czegoś na kształt "zupy" (plazmy) kwarkowo-gluonowej (*Quark-Gluon Plasma, QGP*). Etap QGP trwał aż do około kilku mikrosekund po Wielkim Wybuchu. W kolejnych etapach w miarę stygnięcia i rozszerzania się Wszechświata podstawowe składniki materii, kwarki, łączyły się w tzw. hadrony (np. protony i neutrony), te dalej w atomy, cząsteczki, wreszcie galaktyki i gromady galaktyk znane nam obecnie.

Zgodnie z aktualną wiedzą podstawowymi cegiełkami budującymi materię we Wszechświecie (zob. Rys. 1) są kwarki o ułamkowych ładunkach elektrycznych ( $u, d, c, s, t, b$ ), naładowane leptony (elektron, mion, taon), neutrino (elektronowe, mionowe, taonowe) oraz cząstki przenoszące oddziaływania czyli foton (przenosi oddziaływania elektromagnetyczne), bozony  $W^+$ ,  $W^-$  i  $Z^0$  (przenoszą oddziaływania słabe), gluony (przenoszą oddziaływania silne) oraz postulowany grawiton (przenosiłby oddziaływania grawitacyjne). Do listy należałoby dodać również odkryty niedawno bozon Higgsa, bo masy cząstek elementarnych (bozonów  $W$  i  $Z$ , kwarków, leptonów) generowane są poprzez ich oddziaływanie z polem Higgsa. Wszystkie kwarki, leptony naładowane oraz neutrino mają swoje antycząstki o tej samej masie, ale przeciwnym ładunku elektrycznym. Najsilniejszym rodzajem oddziaływania w przyrodzie jest oddziaływanie silne, które poprzez ciągłą wymianę gluonów łączy ze sobą kwarki w hadrony, czyli mezony (pary kwark i antykwark), bariony (trzy kwarki np. proton  $[uud]$  lub neutron  $[ddu]$ ) oraz antybariony (trzy antykwarki).

Efekty tzw. resztkowego oddziaływania silnego widoczne są również na poziomie całych jąder atomowych, które w większości przypadków nie rozpadają się mimo, że składają się z wielu protonów. Dzieje się tak dlatego, że elektromagnetyczne odpychanie między dodatnio naładowanymi protonami jest znacznie słabsze niż przyciągające oddziaływanie silne między kwarkami.

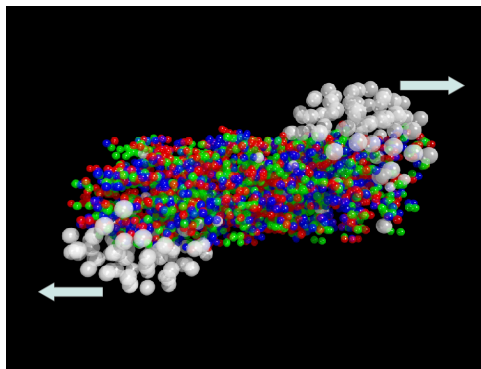


Rysunek 1: Lista aktualnie nam znanych cząstek elementarnych budujących materię [1].

## 2 Plazma kwarkowo-gluonowa

Oddziaływanie między kwarkami (antykwarłkami) jest tak silne, że nie można z barionu lub mezonu "wyrwać" pojedynczego kwarka; to jak próba odcięcia jednego bieguna od magnesu. Efekt ten jest nazywany "uwięzieniem". Istnieją jednak warunki przy których kwarki i gluony zachowują się jak niemal "uwolnione" i ich duże ilości mogą swobodnie poruszać się w obszarze, który znacznie przekracza obszar zajmowany przez pojedynczy proton czy neutron. Stan ten to wspomniana wyżej plazma kwarkowo-gluonowa, którą próbujemy uzyskać w zderzeniach ciężkich jonów (czyli samych jąder atomowych bez elektronów) np. *Pb*, *Au* przy wysokich energiach. Jony przyspieszane są do prędkości bliskiej prędkości światła! Tworząc QGP w laboratoriach próbujemy zatem odtworzyć warunki jakie istniały zaraz po Wielkim Wybuchu, zrozumieć ewolucję wczesnego Wszechświata oraz naturę oddziaływań silnych między kwarkami. Makroskopową analogią naszych eksperymentów byłoby np. rzucanie o siebie kostek lodu (przyspieszonych do ogromnych prędkości) tak, żeby uzyskać nowy stan skupienia czyli wodę (roztopione kostki lodu). QGP jest więc takim nowym stanem skupienia ale materii jądrowej. Rysunek 2 pokazuje schemat powstawania QGP w zderzeniach jądrowych. Szare, duże kulki to nukleony (czyli protony i neutrony) w zderzanych jądrach atomowych a małe kuleczki to kwarki. Z ogromnej energii zderzenia (zgodnie ze wzorem  $E = mc^2$ ) mogą produkować się nowe

kwarki (nie tylko  $u$  i  $d$ , ale i dużo cięższe  $s$ ,  $c$ , a nawet  $t$ , których to kwarków nie było ani w zderzanych protonach ani w neutronach). Już od pierwszych chwil po zderzeniu trwa ekspansja i układ dosłownie rozpryskuje się na wszystkie strony. Kolejny etap w czasie trwania ekspansji to łączenie się swobodnych kwarków w hadrony (tzw. hadronizacja) – już nie tylko w protony i neutrony, ale głównie w lekkie piony (mezony  $\pi$ ), kaony (mezony  $K$ ), etc. Dalej trwa ekspansja i ochładzanie aż na zakończenie ustają oddziaływania między wyprodukowanymi hadronami. Moment ten nazywamy wymrożeniem. Ścisłej, wyróżnia się dwa wymrożenia: chemiczne, kiedy ustają oddziaływania nieelastyczne między wyprodukowanymi cząstkami (ustalenie składu kwarkowego) 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.). Konkretnie 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. Jest to więc proces poszlakowy! Bezpośrednio QGP nie obserwujemy bo nie można "złapać" pojedynczych kwarków. Również bardzo krótkie czasy życia QGP rzędu kilku fm/ $c$ , czyli rzędu  $10^{-23}$  s i bardzo małe rozmiary plazmy rzędu  $10^{-15}$ – $10^{-14}$  m wymykałyby się jakimkolwiek dostępnym dzisiaj przyrządom pomiarowym.



Rysunek 2: Symulacja zderzenia jądro+jądro z produkcją QGP w modelu UrQMD.

### 3 Eksperymenty zderzeń jonowych

Zderzenia ciężkich jonów przy wysokich energiach są obecnie badane w kilku ośrodkach na świecie. Przykładami akceleratorów są:

1. [Super Proton Synchrotron](#) (6.2 km obwodu) w Europejskiej Organizacji Badań Jądrowych ([CERN](#)) pod Genewą (na granicy szwajcarsko-francuskiej),
2. [Relativistic Heavy Ion Collider](#) (3.8 km obwodu) w Brookhaven National Laboratory ([BNL](#)) w Brookhaven,
3. [Large Hadron Collider](#) (27 km obwodu) w [CERN](#) pod Genewą.

Przy każdym z tych akceleratorów istnieje po kilka detektorów, czyli tzw. eksperymentów. Przy SPS był to np. NA49 [2] oraz jego aktualny następca NA61/SHINE [3]. NA49 i NA61/SHINE to tzw. eksperymenty na stacjonarnej tarczy, czyli wiązka np. ołowiu jest rozpędzana do prędkości maksymalnie 0.99998 prędkości światła (to przy najwyższych energiach SPS bo najniższe energie SPS odpowiadają prędkości wiązki około  $0.997c$ ) i zderzana ze spoczywającą tarczą. W zderzeniu  $Pb + Pb$  przy najwyższej energii SPS produkuje się do 1500 naładowanych cząstek. Temperatury QGP osiąganey w zderzeniach przy współcześnie działających akceleratorach (od najwyższych energii SPS do energii LHC) to około 230–600 MeV, czyli przynajmniej 5 rzędów więcej niż temperatura wnętrza Słońca ( $T = 170 \text{ MeV} \approx 2 \cdot 10^{12} \text{ K} \approx 130\,000 \cdot T[\text{jądro Słońca}]$ ). Osiągane gęstości energii  $\varepsilon$  to rzędu 3 GeV/fm<sup>3</sup> (SPS) – 20 razy gęstość normalnej materii jądrowej,  $\varepsilon > 5 \text{ GeV/fm}^3$  (RHIC) oraz  $\varepsilon > 15 \text{ GeV/fm}^3$  (LHC). Dla porównania wartości dla materii jądrowej w "stanie spoczynku" to  $T \approx 0 \text{ MeV}$ ,  $\varepsilon \approx 0.16 \text{ GeV/fm}^3$ .

Eksperyment NA49 zasłynął znalezieniem granicy energetycznej (minimalna energia zderzenia) przy której następuje przejście do QGP, badając zderzenia ciężkich jonów ołowiu. Analizowano m.in. zależność od energii produkcji cząstek zawierających kwark  $s$  ("dziwny"). Energia graniczna odpowiada pośrednim energiom dostępnym w akceleratorze SPS czyli około 7.6 GeV na parę zderzanych nukleonów w układzie środka masy ( $1 \text{ eV} = 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ ,  $1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV}$ ) – zob. pracę przeglądową [4]. W skali makroskopowej odkrycie to można porównać do znalezienia temperatury wrzenia wody. Z kolei RHIC (najwyższe energie) i LHC badają głównie obszar "czystej" QGP, czyli makroskopową analogię pary wodnej (tworzona tam QGP ma początkowo bardzo wysokie temperatury). Wreszcie, poniżej energii 7.6 GeV przejście w stan QGP w ogóle nie jest możliwe i system (zarówno stan tuż po zderzeniu jak i w czasie wymrożenia) pozostaje wyłącznie w obszarze hadronów (zob. też Rys. 4). Celem naszych badań w eksperymencie NA61/SHINE jest m.in. sprawdzanie czy dla mniejszych systemów ( $Be + Be$ ,  $Ar + Sc$ ,  $Xe + La$ ), przy podobnych energiach zderzenia, również istnieje możliwość przejścia do QGP.

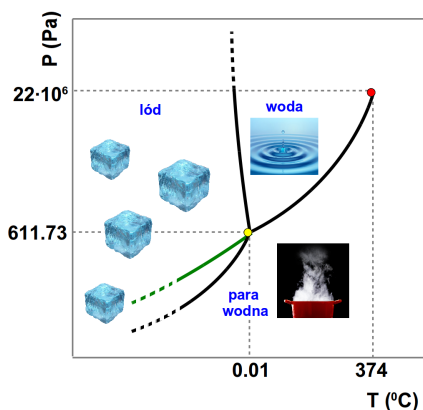
## 4 Diagram fazowy materii jądrowej

### 4.1 Rodzaje przejść na diagramie materii jądrowej

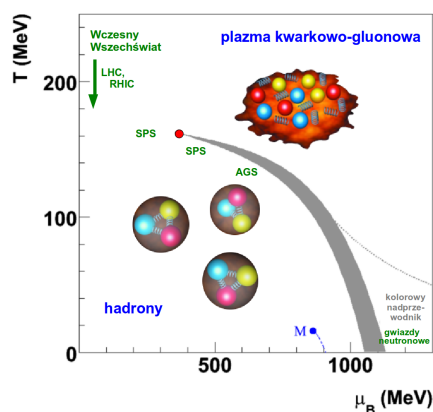
Dla każdej substancji można wykreślać jej diagram fazowy. W przypadku wody jest on zwykle przedstawiany jako zależność ciśnienia od temperatury (Rys. 3). Diagram fazowy silnie oddziałującej materii (Rys. 4) najczęściej przedstawiany jest przy użyciu temperatury  $T$  oraz barionowego potencjału chemicznego  $\mu_B$ , czyli zmiennej termodynamicznej mówiącej o tym jak zmieni się energia systemu jeśli dodamy lub odejmiemy jeden barion. Normalna materia jądrowa ma  $T \approx 0 \text{ MeV}$  oraz  $\mu_B \approx 940 \text{ MeV}$ .

Diagram fazowy wody jest bardzo dobrze poznany. Ciągłe czarne linie oznaczają przejścia fazowe pierwszego rodzaju (dla tych przejść mamy skokową zmianę m.in. entropii, gęstości energii, etc.). Ciekawą cechą diagramu fazowego wody jest istnienie punktu krytycznego (CP). Wzdłuż linii koegzystencji faz zbliżając się do CP gęstość wody spada a pary wzrasta. W i powyżej punktu krytycznego nie da się odróżnić wody od pary. Diagram fazowy materii silnie oddziałującej, w przeciwieństwie do diagramu fazowego wody,

jest dość słabo poznany i jego własności dopiero muszą zostać odkryte. Większość teoretyków uważa, że dla dużych wartości  $\mu_B$  przejście fazowe między QGP a gazem złożonym z hadronów jest pierwszego rodzaju (gruba szara linia na Rys. 4), które to przejście kończy się w punkcie krytycznym (CP). W samym CP przejście jest drugiego rodzaju. Przy przejściach fazowych I rodzaju obserwujemy skokową (nieciągłość) zmianę niektórych parametrów układu np. entropia, gęstość energii. Za punktem krytycznym (w stronę małych wartości  $\mu_B$ ) 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 dokładnie znane (na rysunku pokazano jedynie przykładowe teoretyczne oszacowanie; w praktyce istnieje całe spektrum przewidywań dotyczących zarówno samego istnienia jak i położenia hipotetycznego punktu krytycznego).



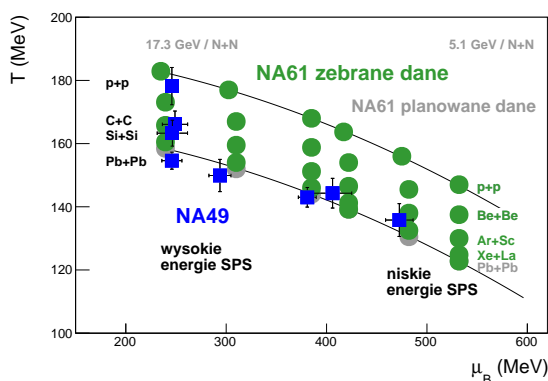
Rysunek 3: Diagram fazowy dla wody w zakresie niskich ciśnień (punkt potrójny – żółty, punkt krytyczny – czerwony, linia zielona odpowiada wodzie przechłodzonej).



Rysunek 4: Schematyczny diagram fazowy silnie oddziałującej materii (punkt krytyczny – czerwony, gruba szara linia – przejście fazowe pierwszego rodzaju).

## 4.2 Poszukiwanie punktu krytycznego

Na szczęście punktu krytycznego można poszukiwać również eksperymentalnie i jest to jedno z głównych zadań eksperymentu NA61/SHINE. Jego poprzednik, eksperyment NA49, pokazał, że po diagramie fazowym można poruszać się bądź zmieniając energię zderzenia jądro+jądro bądź rozmiar zderzanych jąder. Rysunek 5 pokazuje punkty wymrożeń chemicznych uzyskane w eksperymencie NA49 i oczekiwane w NA61. Temperatur tych nie należy mylić z temperaturami układu tuż po zderzeniu (w szczególności może być to QGP), które są



Rysunek 5: Oszacowane (NA49) oraz oczekiwane (NA61, koła) punkty wymrożenia chemicznego.

wyższe (ciągła ekspansja i ochładzanie się systemu). Wzrost energii zderzenia powoduje przesuwanie się w kierunku mniejszych wartości  $\mu_B$ , a wzrost liczby masowej prowadzi do niższych temperatur wymrożenia chemicznego. Teoretycy przewidują, 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), kąta azymutalnego (kątem emisji w kierunku prostopadłym do osi wiązki), energii czy krotności różnego typu cząstek (liczba cząstek na oddziaływanie). Takie zwiększone fluktuacje w średnich pędach poprzecznych oraz w krotnościach cząstek zaobserwowano w eksperymencie NA49 w oddziaływaniach  $Si + Si$  oraz  $C + C$  przy najwyższej energii akceleratora SPS (17.3 GeV na parę zderzanych nukleonów w układzie środka masy) [5]. Ten ciekawy wynik, wymagający oczywiście dodatkowych weryfikacji, stanowił silną motywację dla programu jonowego eksperymentu NA61/SHINE, który zgodnie z Rys. 5 pokrywa dość szeroki obszar diagramu fazowego materii jądrowej poprzez zderzenia  $p + p$ ,  $Be + Be$ ,  $Ar + Sc$ ,  $Xe + La$  oraz  $Pb + Pb$  w dużym zakresie energii. Jest to pierwszy w historii dwuwymiarowy (energia i rozmiar systemu) skan diagramu fazowego. Maksimum od fluktuacji różnych obserwabli, widziane dla tej samej energii i dla tego samego systemu, być może pozwoli na odkrycie punktu krytycznego materii jądrowej i z pewnością będzie krokiem milowym w badaniu diagramu fazowego silnie oddziałującej materii.

## Literatura

- [1] [http://pl.wikipedia.org/wiki/Model\\_standardowy](http://pl.wikipedia.org/wiki/Model_standardowy) (dostęp: 31.08.2022).
- [2] <http://na49info.web.cern.ch/na49info> (dostęp: 31.08.2022).
- [3] <http://shine.web.cern.ch> (dostęp: 31.08.2022).
- [4] M. Gaździcki, M. Gorenstein, P. Seyboth, Acta Phys. Polon. B 42, 307 (2011).
- [5] K. Grebieszko (dla Kolab. NA49), Nucl. Phys. A 830, 547c (2009) oraz referencje tam podane;  
K. Grebieszko (dla Kolab. NA49 i NA61/SHINE), PoS, EPS-HEP, 030 (2009).

*Prof. dr hab. Katarzyna Grebieszko, zatrudniona na Wydziale Fizyki Politechniki Warszawskiej, Zakład Fizyki Jądrowej, Pracownia Reakcji Ciężkich Jonów. Uczestniczka eksperymentów NA49 i NA61/SHINE w CERN, koordynatorka analiz w programie jonowym eksperymentu NA61/SHINE.*

## Spis treści

<b>1</b>	<b>Cząstki elementarne i oddziaływania</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Plazma kwarkowo-gluonowa</b>	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>Eksperymenty zderzeń jonowych</b>	<b>3</b>
<b>4</b>	<b>Diagram fazowy materii jądrowej</b>	<b>4</b>
4.1	Rodzaje przejść na diagramie materii jądrowej . . . . .	4
4.2	Poszukiwanie punktu krytycznego . . . . .	5

## Spis rysunków

1	Cząstki elementarne . . . . .	2
2	Symulacja zderzenia jądro+jądro . . . . .	3
3	Diagram fazowy wody . . . . .	5
4	Diagram fazowy silnie-oddziałującej materii . . . . .	5
5	Punkty wymrożenia chemicznego . . . . .	5