

Instytut Fizyki Jądrowej PAN
31-342 Kraków
ul. Radzikowskiego 152
oraz
Instytut Fizyki Uniwersytetu Jana Kochanowskiego
25-406 Kielce
ul. Świętokrzyska 15

Recenzja pracy doktorskiej pani mgr Katarzyny Deji
pt. "Parton's energy loss in unstable quark-gluon plasma"

1. Ogólna charakterystyka pracy

Praca doktorska pani mgr Katarzyny Deji dotyczy teoretycznego opisu zjawiska strat energii szybkiego partonu poruszającego się w niestabilnej plazmie kwarkowo-gluonowej. Badany proces jest ważny ze względu na fizyczną interpretację produkcji wysokoenergetycznych cząstek powstałych w relatywistycznych zderzeniach jąder atomowych (ciężkich jonów), a także w bardziej elementarnych procesach wysokich energii takich jak zderzenia proton-proton, proton-jądro lub deuteron-jądro. Tłumienie produkcji wysokoenergetycznych cząstek (dżetów) przemawia za powstaniem gęstego i gorącego ośrodka hamującego ich propagację, najprawdopodobniej właśnie plazmy kwarkowo-gluonowej.

Spektakularnym procesem obserwowanym eksperymentalnie w tego typu badaniach jest emisja pojedynczych dżetów z materii powstałej w wyniku zderzeń ciężkich jonów. Tłumaczy się to różną długością przebytych w ośrodku dróg, które pokonują dwa początkowo wyprodukowane i poruszające się w przeciwnych kierunkach wysokoenergetyczne partony (wynik grupy STAR na akceleratorze RHIC jest zaprezentowany na Rys. 1.5 w rozprawie).

Większość rachunków teoretycznych opisujących straty energii partonów w ośrodku zakłada, że tym ośrodkiem jest plazma kwarkowo-gluonowa w stanie lokalnej równowagi termodynamicznej. W swojej pracy doktorskiej pani mgr Deja odchodzi od tego popularnego przybliżenia i rozpatruje anizotropową plazmę kwarkowo-gluonową, która wykazuje niestabilność ze względu na formację modów kolektywnych. Na istnienie takiego typu niestabilności po raz pierwszy zwrócił uwagę promotor pracy prof. Stanisław Mrówczyński.

Głównym celem pracy jest zbadanie w jakim stopniu na tłumienie wpływa fakt niestabilności plazmy. Okazuje się, że straty energii w plazmie niestabilnej mogą być znacznie wyższe od tych, które cechują plazmę równowagową. Jednakże, pani mgr Deja pokazuje, iż efekt ten zależy istotnie od warunków początkowych i może przekształcić się w przyspieszanie cząstek w miejsce ich tłumienia przy odpowiednio dobranych wartościach pól początkowych w plazmie. Praca zatem kończy się konkluzją, że przyszłe bardziej realistyczne rachunki będą wymagały dokonania odpowiednich uśrednień po początkowych konfiguracjach pól.

2. Omówienie kolejnych rozdziałów

Praca składa się z czterech rozdziałów i czterech dodatków. Napisana jest po angielsku.

Rozdział pierwszy stanowi wprowadzenie do tematyki rozprawy. Omówione są w nim kolejno: koncepcja plazmy kwarkowo-gluonowej, lagranżjan chromodynamiki kwantowej wraz ze zjawiskami asymptotycznej swobody i uwięzienia koloru, główne eksperymenty ciężkojonowe na przestrzeni ostatnich kilkudziesięciu lat, wyniki doświadczalne dotyczące tzw. przepływu kolektywnego oraz tłumienia dżetów, oraz wpływ niestabilności w plazmie anizotropowej na termalizację układu. W ostatnim podrozdziale rozdziału pierwszego, autorka wyznacza główny cel pracy jakim jest zbadanie oddziaływania wysokoenergetycznego partonu z anizotropową plazmą, w której tenże parton się porusza.

Dyskutując koncepcje związane z pojęciem plazmy kwarkowo-gluonowej, pani mgr Deja odnosi się do oświadczenia profesorów U. Heinza i M. Jacoba z roku 2000, stwierdzającego, że eksperymenty cernowskie odkryły nowy stan materii. To oświadczenie było i ciągle jest przez wiele osób traktowane jako przedwczesna deklaracja o odkryciu w CERN-ie plazmy kwarkowo-gluonowej. Chyba właściwsza wydaje się być konkluzja, że to dopiero eksperymenty przeprowadzone na zderzaczu RHIC zidentyfikowały pojawienie się nowej fazy materii utożsamionej z plazmą kwarkowo-gluonową. Stało się to dzięki m.in. sukcesom relatywistycznej hydrodynamiki w ilościowym opisie zderzeń ciężkich jonów. Zależność wyników hydrodynamicznych od postaci równania stanu i wartości współczynników kinetycznych (takich jak np. lepkość) pozwala na określenie tychże charakterystyk plazmy. Mam także drobną uwagę do tej części tekstu – w dyskusji o Wczesnym Wszechświecie czas 10 milisekund powinien być zapewne zamieniony na 10 mikrosekund.

Dyskutując współczynniki przepływu kolektywnego, autorka wprowadza współczynnik v_0 jako przepływ radialny. Wyraz z $n=0$ we wzorze (1.4.1) nie zależy od kąta i można go zaabsorbować w rozkład pędu poprzecznego dN/dp_T . Z tego powodu, zwykle się go nie uwzględnia. Eksperymentalnie rzecz biorąc, przepływ radialny manifestuje się w zależności widm pędu poprzecznego od masy cząstek – im większa masa tym mniejsze nachylenie widma.

Rozdział drugi podaje szerokie omówienie modów kolektywnych w plazmie kwarkowo-gluonowej. Jest to najdłuższy rozdział pracy obejmujący 74 strony rozprawy.

Początkowo, w Rozdziale 2.1, podana jest metoda algebraiczna znajdowania biegunów propagatora. Kluczowy w tym przypadku jest rozkład tensora polaryzacji w bazie czterech tensorów A, B, C i D, które mnożą funkcje alpha, beta, gamma i delta. Te ostatnie zależą od częstości omega oraz wektora falowego k. W Rozdziale 2.2 odtworzone są wyniki dla plazmy izotropowej, w tym przypadku funkcje gamma i delta są równe zero, a użycie funkcji alpha i beta prowadzi do podręcznikowych wyników.

W Rozdziale 2.3 omówiony jest układ dwustrumieniowy. W Rozdziale 2.4 omówiony jest przypadek gdy rozkład partonów wprowadzony jest jako przeskalowanie rozkładu izotropowego. Taki anizotropowy rozkład nazywamy zwykle rozkładem Romatschke-Stricklanda (dalej rozkład RS). Definiują go dwa parametry: typowa skala pędów poprzecznych oraz parametr anizotropii w przestrzeni pędów oznaczany powszechnie jako ksi. W granicy gdy ksi dąży do zera odtwarzamy rozkład izotropowy. Gdy ten ostatni jest rozkładem równowagowym, skala pędów poprzecznych staje się równoważna temperaturze układu.

Rozkład RS wprowadzony w pracy zależy także od kierunku anizotropii, który jest zdefiniowany jednostkowym wektorem n . Zwykle wybieramy go jako wektor równoległy do osi wiązki $n=(0,0,1)$. W tym kontekście wprowadza się rozkłady typu „prolate” i „oblate”. Rozkład typu „prolate” jest wydłużony w kierunku wektora n (zwykle wzdłuż osi wiązki), a rozkład typu „oblate” jest spłaszczony w kierunku n .

W Rozdziale 2.5 przedyskutowany jest przypadek gdy parametr anizotropii jest mały. W tej granicy wiele wyników można otrzymać w sposób analityczny. W szczególności w rozwinięciu liniowym w δ wypada wkład od członu δ i bieguny propagatora określone są przez trzy równania dyspersyjne. Określają one tzw. mody A, B i C, dyskutowane odpowiednio w rozdziałach 2.5.1, 2.5.2 i 2.5.3.

Rozdział 2.6 omawia skończoną anizotropię. W tym przypadku równania dyspersyjne muszą być rozwiązane numerycznie. Okazuje się jednak, że widmo wzbudzeń ma taką samą strukturę jak to otrzymane wcześniej w przypadku małej anizotropii.

Rozdziały 2.7 i 2.8 omawiają przypadki bardzo silnej anizotropii, kiedy rozkład jest typu „extreme prolate” lub „extreme oblate”. W tych przypadkach funkcje rozkładu dane są funkcjami delta Diraca i współczynniki α , β , γ oraz δ dają się wyrazić poprzez względnie proste wyrażenia algebraiczne. Również relacje dyspersyjne daje się rozwiązać analitycznie.

W Rozdziale 2.9 przedstawiona jest analiza Nyquista równań dyspersyjnych. Analiza ta pozwala na wyznaczenie liczby rozwiązań danego równania bez potrzeby jego rozwiązywania.

Rozdział trzeci pracy stanowi zasadniczą część rozprawy doktorskiej, w której obliczone są zderzeniowe straty energii szybkiego partonu w anizotropowej plazmie. W rachunkach wykorzystane są widma kolektywnych wzbudzeń przedyskutowane w Rozdziale 2. Podstawą podejścia są równania Wonga połączone z klasycznymi równaniami Yanga-Millsa. Takie podejście jest równoważne przybliżeniu „hard loops” w QCD.

Głównym wynikiem otrzymanym w pracy jest fakt, że parton może nie tylko stracić energię ale także ją zyskać przy przechodzeniu przez niestabilną plazmę. Ponadto strata lub zysk energii rosną wykładniczo w czasie, co podkreśla rolę niestabilnych modów. Klasyczny charakter rachunków wymaga jednak wprowadzenia obciążenia w przestrzeni kolektywnych pędów, co wprowadza logarytmiczną zależność od skali tego obciążenia.

Główną częścią rozdziału trzeciego jest rozdział 3.1 gdzie przedstawione są podstawowe równania modelu. Składają się na nie równania Wonga oraz zlinearyzowane równania Yanga-Millsa, czyli w gruncie rzeczy równania Maxwella w ośrodku scharakteryzowanym przenikalnością elektryczną. Dzięki odpowiedniemu wyborowi wycechowania i założeniu, iż parton porusza się w przybliżeniu ze stałą prędkością, dwa z trzech równań Wonga stają się trywialne, a trzecie definiuje poszukiwaną stratę energii partonu. Problem sprowadzony zatem zostaje do rozwiązania równań Maxwella.

Badany proces fizyczny odpowiada fizycznej sytuacji kiedy w chwili $t=0$ parton zaczyna oddziaływać z anizotropową plazmą. W chwilach wcześniejszych prądy i pola są równe zero. Aby uwzględnić ten warunek początkowy w rachunkach stosowana jest jednostronna transformata Fouriera. Prowadzi to do zapisu równań Maxwella w postaci algebraicznej dla współczynników w rozkładzie Fouriera, równania (3.1.16) – (3.1.19).

Rozdział 3.2 przedstawia wyniki dla przypadku równowagowego, odtworzone są w nim rezultaty znane z wcześniejszej literatury. W rozdziale 3.3 omówione są warunki początkowe, określane jako skorelowane i nieskorelowane. W tym przypadku zastanawia mnie wybrana przez autorkę postać warunków skorelowanych. W jakim stopniu mają one fizyczne uzasadnienie – nie do końca wydaje mi się to jasno przedstawione. Czy nie lepiej by było rozpatrzyć konfiguracje pól znane choćby z tzw. teorii kolorowego kondensatu gluonowego (początkowe pola chromoelektryczne i chromomagnetyczne są równoległe do wiązki). Efekt samoodziaływań partonu przedstawiony jest w rozdziale 3.4.

Główne wyniki oryginalne zawierają rozdziały 3.5–3.7. Ze względu na komplikację wzorów końcowych, autorka głównie koncentruje się na plazmie, której rozkład pędowy jest bardzo wąski w pędach podłużnych (konfiguracja „extreme oblate”) lub pędach poprzecznych (konfiguracja „extreme prolate”). W pracy wspomina się, że realistyczny rozkład początkowy jest typu „prolate”. Wydaje mi się to nie do końca zgodne z przewidywaniami różnych modeli mikroskopowych, które przewidują, że początkowe konfiguracje partonów w obszarze centralnym zderzenia mają charakter „oblate”.

Końcowy **Rozdział czwarty** pracy zawiera konkluzje i przedstawia perspektywę wykonania dalszych rachunków.

3. Podsumowanie

Praca doktorska Pani mgr Katarzyny Deji ma jasną logiczną konstrukcję. Zawiera nowe i oryginalne rezultaty, które zostały już wcześniej opublikowane w renomowanych czasopismach (m. in. dwa artykuły opublikowane w Phys. Rev. C). Praca jest napisana starannie po angielsku, chociaż miejscami mam wątpliwości co do użytej angielskiej terminologii. Na przykład: wektor D w literaturze angielskiej określa się jako „electric displacement field” raczej niż „electric induction”, stąd zresztą literka D w nazwie tej wielkości. W kontekście przenikalności elektrycznej używa się raczej słowa „permittivity”, a nie „permeability” (dla przenikalności magnetycznej używamy z kolei słówka „permeability”).

Te i zamieszczone wyżej drobne krytyczne uwagi nie wpływają jednak na moją bardzo pozytywną opinię o pracy doktorskiej pani mgr Katarzyny Deji. Uważam, że praca spełnia jak najbardziej wymogi stawiane pracom doktorskim i powinna być dopuszczona do publicznej obrony.

Wojciech Florkowski