

Recenzja pracy doktorskiej pana mgr. Łukasza Juchnowskiego
pt. „Quantum kinetic approach to particle production in time dependent external fields”

1. Ogólna charakterystyka rozprawy

Przedstawiona mi do recenzji praca doktorska dotyczy fizyki silnych pól i koncentruje się na zjawisku ich rozpadu na pary cząstka-antycząstka. W przypadku elektrodynamiki kwantowej proces rozpadu silnego stałego pola elektrycznego na pary elektron-pozyton określa się mianem mechanizmu Schwingera. Julian Schwinger wyprowadził wzór na tempo produkcji par dla takiej konfiguracji pola w swojej słynnej pracy z 1951 r. Wcześniejszą pracę na pokrewny temat napisali Werner Heisenberg i jego doktorant Hans Heinrich Euler w r. 1936.

Szerzej rozumiany mechanizm Schwingera zajmuje istotne miejsce w fenomenologii oddziaływań silnych gdyż służy do interpretacji zjawiska uwięzienia kwarków — dodając energię do układu kwark-antycząstka zwiększamy energię pola chromoelektrycznego pomiędzy kwarkami co prowadzi do produkcji nowych par kwark-antycząstka. W wyniku tej produkcji początkowe pole jest ekranowane i w efekcie powstają nowe hadrony, zamiast rozdzielenia początkowego kwarka od antycząstka.

W oryginalnym kontekście elektrodynamicznym zjawisko Schwingera nie było jeszcze obserwowane gdyż wymaga wcześniejszej kreacji niezwykle silnych pól elektrycznych (o wartościach ok. 10^{18} V/m). Niemniej jednak, rodzą się obecnie nadzieje, że rozwój technik laserowych doprowadzi koniec końców do obserwacji tego zjawiska (Autor rozprawy wspomina tu o skali czasowej rzędu 20 lat). Procesem, który może ułatwić produkcję par w silnych polach jest łączenie silnych wolnozmiennych pól elektrycznych ze słabszymi polami ale za to szybko zmieniającymi się w czasie. Mówimy w tym przypadku o tzw. „dynamicznie wspomaganym” mechanizmie Schwingera (ang. *dynamically assisted Schwinger mechanism*).

Praca doktorska Pana Juchnowskiego, napisana pod kierunkiem prof. dr. hab. Davida Blaschke, dotyczy właśnie takich wspomaganých konfiguracji pól. Oparta jest na czterech wcześniej opublikowanych publikacjach, liczy sobie razem 77 stron i zredagowana jest w języku angielskim. Składają się na nią cztery rozdziały oraz lista referencji. Główny tekst poprzedzają streszczenia po polsku i angielsku oraz informacje o wcześniejszych publikacjach Autora. Rozdziały 1 i 4 stanowią odpowiednio wprowadzenie i podsumowanie rozprawy. Główne wyniki są zaprezentowane w Rozdziałach 2 i 3.

2. Omówienie wyników przedstawionych w Rozdziale 2

Rozdział 2 pracy stanowi jej centralną część. Mam tu na myśli wyprowadzenie równań (2.64) i (2.74), które stanowią podstawę matematycznego formalizmu służącego w rozprawie do opisu produkcji par, a także przedstawienie ich numerycznych rozwiązań. Wzór (2.64) opisuje przypadek fermionów, czyli można go bezpośrednio używać do opisu par elektron-pozyton, natomiast wzór (2.74) opisuje produkcję par bozonów, będzie zastosowany dopiero w Rozdziale 3.2.

W Rozdziale 2.3 rozpoczyna się dyskusja członu źródła występującego po prawej stronie w równaniu kinetycznym (2.99). Po pierwsze Autor pokazuje, że równanie to może być zapisane jako układ trzech wzajemnie sprzężonych zwyczajnych równań różniczkowych. Ułatwia to numeryczne znajdowanie rozwiązań, gdyż równanie wyjściowe jest równaniem różniczkowo-całkowym

z silnie oscylującym wyrażeniem podcałkowym. W kolejnych krokach diskutowana jest granica małych gęstości oraz granica markowowska procesu produkcji par. Ta pierwsza odpowiada sytuacji gdy funkcja rozkładu par $f(t)$ jest bardzo mała, natomiast ta druga opisuje przypadek gdy można zaniedbać w obliczeniach pochodnej $df(t)/dt$ wpływ od wartości funkcji $f(t)$ w chwilach wcześniejszych.

W ten sposób Autor rozprawy dochodzi do prezentacji swoich pierwszych wyników numerycznych. Otrzymane są one dla dwóch różnych profili czasowych impulsu elektrycznego, zdefiniowanych funkcjami $A(t)$ i $E(t)$ (składowa podłużna potencjału wektorowego pola i odpowiadające mu podłużne pole elektryczne). Pierwszy profil, równanie (2.141), jest wyznaczony przez odwrotność kwadratu funkcji kosinus hiperboliczny (w kwadracie) i nazywany jest profilem Eckerta-Sautera (dalej w skrócie ES). Drugi profil, zdefiniowany przez równania (2.142) i (2.143), jest profilem gaussowskim, modulowanym funkcją kosinus (dalej w skrócie GEH). Zespół wyników przedstawiony jest graficznie na Rysunkach 2.1–2.5. Każdy z tych rysunków przedstawia parę rezultatów — ukazane są za każdym razem dwa zestawy wyników otrzymanych dla obu wyżej wspomnianych profili, ES po lewej stronie, a GEH po prawej.

Na Rysunkach 2.1 i 2.2 widzimy wyniki uzyskane dla pola elektrycznego scharakteryzowanego skalą $0.02E_0$, gdzie E_0 jest polem krytycznym. W tym przypadku wyniki uzyskane w sposób dokładny zgadzają się bardzo dobrze z tymi uzyskanymi w przybliżeniu małej gęstości lub w przybliżeniu markowowskim. Małe różnice pomiędzy tego typu wynikami pojawiają się gdy pole jest scharakteryzowane parametrem $0.2E_0$, czyli dziesięciokrotnie wyższym, pokazują to Rysunki 2.3 i 2.4. Istotne różnice widać gdy pole scharakteryzowane jest skalą E_0 , co ilustruje Rys. 2.5.

Wyniki przedstawione na Rysunkach 2.1–2.5 pokazują, że końcowa produkcja par rośnie naturalnie z wartością pola elektrycznego. W tym kontekście interesujące jest aby zauważyć, że ilość par może nie tylko rosnąć ale także maleć z czasem. Fizycznym wyjaśnieniem tego efektu jest to, że w formalizmie użytym przez Autora mamy do czynienia z kwazicząstkami (wprowadzonymi przez transformację Bogolubowa) pojawiającymi się w układzie pierwotnych elektronów oddziałujących elektromagnetycznie. Tylko gdy ilość kwazicząstek osiąga stałą wartość w czasie, przy zanikającym polu $E(t)$, możemy mówić o produkcji rzeczywistych par elektron-pozyton. Tego typu proces jest pokrótce scharakteryzowany przez Autora w punktach 5 i 9 dotyczących opisu Rysunków 2.1–2.5 (strona 34 rozprawy, gdzie mowa o plazmie QEPP i plazmie REPP, a także o roli zależności czasowej w relacji dyspersyjnej (2.135)).

Moim zdaniem szkoda, że wyżej wspomniany, fizyczny aspekt produkcji cząstek poprzez wcześniejszą formację kwazi-cząstek nie został bardziej szczegółowo omówiony w rozprawie doktorskiej. Być może jest to przedyskutowane w innych publikacjach, chociaż wyniki przedstawione na Rysunkach 2.1–2.5 sprawiają wrażenie pierwszych zaprezentowanych w rozprawie oryginalnych wyników Autora, zatem zasługują na szersze omówienie. Trochę w tym kierunku podąża dyskusja w Rozdziale 2.3.4, lecz prezentacja wyników na Rys. 2.6 i 2.7 nie jest dla mnie do końca jasna. Jak np. wyznaczona jest stała $I(\infty)$ wprowadzona w równaniu (2.150)? Czy poprzez jej dopasowanie do wyników numerycznych?

Rozdział 2.3.5 zawiera ciekawą dyskusję dotyczącą produkcji entropii w rozpatrywanym zagadnieniu. Fakt, że początkowo mamy do czynienia wyłącznie z polem a na końcu z polem i cząstkami sugeruje, że entropia stanu końcowego jest większa od entropii stanu początkowego (przyjmując, że entropia pola elektrycznego wynosi zero i stosując wzór Boltzmanna (2.160) do cząstek). To zachowanie jest oczywiście zgodne z naszymi oczekiwaniami i zgodne ze stwierdzeniem (2.162). W pewnym sensie można na tym skończyć dyskusję produkcji entropii i tak czyni Autor na koniec Rozdziału 2.3.5.

Co się dzieje jednak w trakcie rozpatrywanego procesu? Jeśli ilość cząstek w ustalonej objętości w pewnej chwili zaczyna maleć to entropia powinna także maleć. Czy zatem entropia rozpatrywanego układu na pewnych etapach jego ewolucji maleje? Autor rozprawy pod koniec

przedostatniego rozdziału na stronie 42 przyznaje, że istotnie można oczekiwać, że twierdzenie H-Boltzmana nie stosuje się w analizowanym przypadku gdyż badane procesy są niemarkowowskie. Ten argument jest jednak nie do końca dla mnie przekonujący gdyż dla słabych pól działa przybliżenie markowowskie, a entropia i tak maleje w pewnych momentach. Mimo przedstawienia w Rozdziale 2.3.5 różnych odnośnię do prac analizujących produkcję entropii w trakcie produkcji cząstek, które wykazują na możliwość łamania twierdzenie H-Boltzmana, odnoszę wrażenie, że rozpatrywany model zawiera jakieś elementarne uproszczenie, które do tego dopuszcza. Być może jest to zaniedbanie sprzężenia zwrotnego pomiędzy polem i cząstkami. A może jest to konsekwencją faktu, że badany układ nie jest izolowany?

Rozdział 2.3.6 przedstawia interpretację procesu produkcji cząstek w polu elektrycznym jako przejścia fazowego. Wprowadzony jest zależny od czasu parametr porządku $\xi(t)$ wyrażony przez jeden z zależnych od czasu współczynników Bogolubowa, równanie (2.165). Wyniki przedstawione na Rys. 2.9 pokazują, że parameter ξ rośnie z czasem (w sposób przypominający funkcję skokową Heaviside'a) i proces produkcji cząstek może być istotnie interpretowany jako przejście fazowe. To zachowanie nasuwa oczywiście skojarzenia ze wzrostem entropii, chociaż fakt ten pozostaje w pracy bez komentarza. W każdym razie wprowadzenie funkcji $\xi(t)$ jest bardzo interesujące i jeśli jest to oryginalny pomysł Autora to zasługuje On na słowa uznania.

3. Omówienie wyników przedstawionych w Rozdziale 3

W Rozdziale 3 Autor dyskutuje specyficznie dobrane profile czasowe pola elektrycznego, które mogą prowadzić do wzmocnienia produkcji cząstek bez konieczności istotnego zwiększania maksymalnej wartości pola elektrycznego. Numeryczne rachunki zostały wykonane dla trzech konfiguracji: i) profilu będącego złożeniem Gaussa i funkcji kosinus, z parametrami E_0 , ω i τ , ii) ponownie profilu będącego złożeniem Gaussa i funkcji kosinus ale z przeskalowanymi parametrami E_0 i ω , które były użyte wcześniej, oraz iii) dla pola będącego sumą tych dwóch ostatnich. Dobór skalujących parametrów, $k_E < 1$ i $k_\omega > 1$, sprawia, że tą ostatnią kombinację określa Autor jako sumę silnej składowej pola elektrycznego o małej częstości i słabej składowej o dużej częstości.

Wyniki pokazane na Rys. 3.2 pokazują, że układ z superpozycją dwóch oscylujących wkładów może prowadzić do zwiększonej produkcji cząstek. W tym przypadku $k_E = 0.25$, więc maksimum superpozycji dwóch pól ma w przybliżeniu tą samą wartość co pierwsza składowa, natomiast efekt produkcji cząstek wzrasta o dwa rzędy wielkości. Dużą rolę odgrywa tutaj zwiększenie częstości, gdyż $k_\omega = 10$. W tym przypadku proces produkcji par może być interpretowany jako proces wielofotonowy. Staje się on bardzo efektywny gdy częstości fotonów są duże.

Rozdział 3.2 rozprawy przenosi nas do zagadnień produkcji par cząstek, które są bozonami. Przedyskutowany jest oddziałujący układ cząstek sigma i pionów — równania kinetyczne (3.13) i (3.16). W układzie tym występuje pole skalarne, które nadaje cząstkom sigma zależną od temperatury masę. Pole skalarne może się także rozpadać produkując cząstki sigma. W tym miejscu wykorzystany jest formalizm znany nam już z poprzednich rozdziałów. Przedstawiony model służy do zbadania zjawiska nadwyżki w produkcji pionów o małych pędach poprzecznych — efekt zaobserwowany w relatywistycznych zderzeniach ciężkich jonów i czekający ciągle na przekonujące wyjaśnienie. Okazuje się, że zaproponowany schemat faktycznie prowadzi do nadwyżki w produkcji miękkich pionów.

Uzyskanie efektu nadwyżki pionów w wyżej wspomnianym modelu sugeruje, że warto go rozwinąć i uczynić bardziej realistycznym (np. przez dodanie innych cząstek i rezonansów). W tym kontekście przypomina mi się jednak trudność związana z faktem, że mezon sigma nie powinien występować w termodynamicznym opisie zderzeń ciężkich jonów. Na ten fakt wskazują prace odwołujące się do rozwinięcia wirialnego. Czy jest zatem faktycznie możliwe aby w pewien konsekwentny sposób uwzględnić sigmę w opisie zderzeń? Czy obecnie trwają jakieś prace nad tym zagadnieniem?

Koniec Rozdziału 3 zawiera dyskusję dot. charakteru widm cząstek wyprodukowanych wskutek mechanizmu Schwingera. Wspomniane są wcześniej uzyskane w literaturze wyniki wskazujące, że to widma ma charakter termalny. Efekt ten może tłumaczyć przyspieszoną termalizację cząstek wyprodukowanych w zderzeniach ciężkich jonów.

4. Uwagi krytyczne

Pewnym brakiem rozprawy jest dla mnie fakt, iż przy jej analizie nie jest całkiem jasne co jest oryginalnym osiągnięciem Autora, a co jest już dobrze znanym faktem wziętym z literatury. Wątpliwości te w dużym stopniu wyjaśnia deklaracja o udziale Autora w publikacjach będących podstawą rozprawy, ale zawsze byłoby lepiej gdyby oryginalność uzyskanych wyników była za każdym razem podkreślona bezpośrednio w tekście. Jako przykład dam tutaj parametr porządku ξ . Czy pomysł jego użycia był już wcześniej zaproponowany w literaturze? Jeśli nie to warto było ten fakt podkreślić w tekście.

Jeśli chodzi o ogólną strukturę rozprawy to muszę przyznać, że nie za bardzo przekonywujące jest dla mnie umieszczenie fizycznej dyskusji wielu rezultatów w podrozdziałach podrozdziału 2.3. Uważam, że podrozdział 2.3 powinien być potraktowany jako dodatkowy rozdział rozprawy, a zawarta w nim dyskusja fizycznych wniosków znacznie rozszerzona. Przykładem są tu np. zjawiska powiązane ze wzrostem entropii i przejściem fazowym. Brakuje mi tu bardziej konkretnych wniosków, chociaż zdaję sobie sprawę, że jest to tematyka wychodząca za główny temat rozprawy.

Praca zawiera także trochę mankamentów natury redakcyjnej: Nie do końca jasny jest dla mnie opis Rysunków 2.1–2.5. Trzeba się domyślać, który kolor zakrywa który, przez co z czterech wymienionych kolorów widoczne są tylko dwa, tak jest np. w przypadku Rys. 2.1. Fragmenty Rysunków 2.6 i 2.7 nie są w ogóle widoczne (w wersji drukowanej). Użyty rozmiar linii nie pozwala na dobre rozróżnienie linii kreskowej od punktowo-kreskowej, a także na identyfikację tej ostatniej. Pojawiają się też odnośniki do złych równań, np. do równania (2.125) ponad równaniem (2.20) lub do równania (2.119) poniżej (2.24). Dodam też, że nie za bardzo przekonuje mnie użycie kreski do oznaczenia wielkości wektorowych, gdyż koliduje to z oznaczeniem sprzężenia zespolonego np. w równaniu (2.3); Autor powraca do użycia strzałek w równaniu (3.11).

5. Podsumowanie

Ponieważ moje zastrzeżenia mają w gruncie rzeczy charakter redakcyjny, nie wpływają one na moją ogólną pozytywną ocenę rozprawy doktorskiej p. mgr. Łukasza Juchnowskiego. Biorąc pod uwagę szereg nowych i ciekawych rezultatów teoretycznych przedstawionych w rozprawie (w szczególności znalezienie nowych rozwiązań równań kinetycznych przedstawiających rozpad silnych pól) mogę stwierdzić, że praca w zupełności spełnia kryteria pracy doktorskiej określone w ustawie o stopniach naukowych. Muszę także dodać, że po raz pierwszy miałem sposobność przyrzeć się bliżej formalizmowi opartemu na równaniu kinetycznym (2.99) i chciałbym przyznać, że daje ono sposobność przeprowadzenia wielu interesujących analiz teoretycznych. Interesująca też jest ogólna tematyka rozprawy, która łączy zagadnienia z zakresu oddziaływań silnych i elektrodynamiki kwantowej.

W podsumowaniu stwierdzam, że przedstawiona mi praca powinna być dopuszczona do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Wojciech Florkowski