

prof. dr hab. Antoni Szczurek  
Oddział Fizyki Jądrowej i Oddziaływań Silnych,  
Kierownik Zakładu Mechanizmu Reakcji Jądrowych  
i Oddziaływań Silnych (NZ21)

Kraków, 9 maja 2016

## Recenzja rozprawy doktorskiej pana Adama Szabelskiego

Przedstawiona do recenzji praca pana Adama Szabelskiego zatytułowana "The gluon contribution to the Sivers effect measurement at the COMPASS experiment" dotyczy badań efektów spinowych związanych z eksperymentami grupy badawczej COMPASS. Praca, będąca 150-cio stronnikiem opracowaniem, napisana jest w języku angielskim. W pracy poruszane jest wiele efektów badań grupy COMPASS. Główne badania Pana Szabelskiego koncentrują się jednak na wkładzie gluonowym do tak zwanej asymetrii Siversa.

Praca składa się z dziesięciu rozdziałów i trzech dodatków. Omówię teraz po krótku zawartość poszczególnych rozdziałów.

Rozdział pierwszy jest historycznym wprowadzeniem w badania spinowe przeprowadzane od lat dziewięćdziesiątych do chwili obecnej. Badania przeprowadzane w latach dziewięćdziesiątych doprowadziły do sformułowania tak zwanej zagadki spinowej. Badania głęboko-nieelastycznego rozpraszania w ramach podejścia kolinearnego pokazały, że wkład spinów kwarków do spinu protonu jest bardzo mały. Powszechnie oczekiwano znacznie większego wkładu. Wiadomo, że wszystkie wkłady, włączając spiny gluonów i kręty ruchu względnego kwarków i gluonów powinny dać (odtworzyć) spin  $1/2$ . W zasadzie do chwili obecnej zupełnie nie wiadomo, jak wyglądają poszczególne wkłady. Wobec oczywistego kryzysu, zaplanowano kilka konkretnych eksperymentów, które miały odpowiedzieć na pytanie jak wyglądają poszczególne wkłady. Szerokopojęty eksperyment COMPASS był i ciągle pozostaje wiodącym eksperymentem na tym polu.

Rozdział drugi poświęcono zagadnieniom teoretycznym związanym ze spolaryzowanym rozpraszaniem leptonów na spolaryzowanych protonach. Rozdział zawiera ogólne sformułowanie (zapis) przekroju czynnego przy pomocy tak zwanych funkcji struktury, zarówno dla rozpraszania niespolaryzowanych cząstek jak i dla przypadku rozpraszania z polaryzacją. Zestawiono eksperymentalne wartości funkcji struktury dla przypadku niespolaryzowanego i spolaryzowanego. Następne rozdziały poświęcone są modelowi partonowemu. Przedstawiono zarówno naiwny model partonowy jak i podejście uwzględniające ewolucję rozkładów partonów. Przedstawiono odpowiednie równania typu DGLAP. Po krótko pokazano również ogólniejsze podejście które uwzględni pędy poprzeczne wchodzących partonów. W tym przypadku używa się tak zwanych rozkładów TMD (zależnych od pędu poprzecznego). Wówczas liczba funkcji struktury znacząco wzrasta. Przedstawiono odpowiednie wzory na przekrój czynnny. W ostatnim rozdziale przedyskutowano efekt Siversa i pokazano, że związany jest on z krętem orbitalnym gluonów. Trochę brakuje powiązania efektu Siversa ze wzorami, wobec czego podrozdział 2.3.3 jest trochę mało pedagogiczny i trudny do zrozumienia dla postronnego czytelnika. Nie widzę wzoru w którym pojawia się funkcja Siversa zależna od  $x$  i  $k_T$  (pojawiała się na rysunku 2.9 a nie ma jej w żadnych wzorach). To co nazywa się efektem Siversa jest słabo zdefiniowane w pracy, co utrudnia dalsze jej zrozumienie.

Rozdział trzeci poświęcony jest aspektom teoretycznym rozkładu spinu. Zdefiniowano  $\Delta\Sigma$  tzn. ułamek spinu nukleonu niesiony przez spiny kwarków i antykwarków. Wyrażono moment funkcji spinowej  $g_1(x)$  przez tak zwane ładunki aksjalne. W tych rozważaniach używa się tak zwanej symetrii zapachowej  $SU(3)$  która jest (tylko) przybliżona. Rozważono również różnicę zerowych momentów dla protonu i neutronu co wiąże się z regułą sum Bjorkena. Autor powraca do równań DGLAP dla spolaryzowanych rozkładów partonów. Nie do końca rozumiem dlaczego zagadnienie

to rozważane jest w dwóch różnych rozdziałach. Moment spolaryzowanego rozkładu gluonów jest związany z wkładem gluonów do spinu protonu/neutronu. Właśnie badanie tego wkładu jest (było) przedmiotem badań grupy COMPASS. Autor omawia w jaki sposób badać ten wkład w procesach głębokonieelastycznego rozpraszania mionów stowarzyszonych z produkcją obiektów, które produkowane są w podprocesach inicjowanych przez gluony. Jednym z przykładów jest produkcja par  $c\bar{c}$ , innym produkcja par hadronów o "dużym" pędzie poprzecznym. W procesach tych fuzja fotonowo-gluonowa nie jest jedynym procesem. Autor dyskutuje dwa inne podprocesy. Trudność techniczna polega na wyłonieniu wkładu PGF spośród dwu pozostałych. Znacząca część pracy poświęcona jest właśnie tego typu zagadnieniom. Mierzac asymetrie spinowe przechodzi się do względnej polaryzacji gluonów. Oczywiście to ostatnie przejście jest bardzo skomplikowane, ale autor i grupa COMPASS są tu ekspertami którzy rozumieją te wszystkie komplikacje. Dla postronnego czytelnika jest to trudne. Autor rozważa różne przypadki związane z wielkością wirtualności fotonu czy też pędami poprzecznymi hadronów. Ostatecznie uzyskane polaryzacje rozkładu gluonów są moim zdaniem nieco zależne od przyjętego modelu (uproszczeń). Zwykle jest to później przedstawione jako niepewność systematyczna. Przy wynikach zamieszczonych w tekście nie zawsze podano zakres ułamka pędu podłużnego gluonu co jest pewnym niedopatrzeniem. Na rysunku 3.6 zestawiono polaryzacje podłużne gluonów dla różnych eksperymentów, nie tylko grupy COMPASS. Wszystkie te wyniki są moim zdaniem konsyistentne z zerem. Autor dla kompletu przedstawia również wynik globalnych dopasowań przeprowadzonych przez grupy teoretyków którzy uwzględnili nie tylko wyniki eksperymentalne grupy COMPASS ale również wyniki otrzymane na RHIC-u. Pokazano pasy niepewności. Podrozdział 3.3 poświęcony jest krętowi związanemu z kwarkami i gluonami. Przedstawiono wyniki tak zwanej asymetrii Siversa (niestety chyba znowu niezdefiniowanej w rozprawie, przynajmniej w pobliżu) dla produkcji dobrze zdefiniowanych cząstek (piony, kaony o dobrze określonych ładunkach). Niektóre z tych asymetrii dla tarczy protonowej wydają się różne od zera. Dla tarczy deuteronowej wszystkie wyniki wydają się konsyistentne z zerem. Autor przedstawił interesujące obliczenia na siatkach które wydają się tłumaczyć przynajmniej niektóre z zaobserwowanych efektów. Pokazano wkłady od kwarków up and down. Dla ekskluzywnej produkcji mezonów wektorowych wyniki eksperymentalne porównano również z wynikami uzyskanymi w modelu Goloskokova-Krolla. W rozdziale 3.4 dyskutowana jest asymetria lewo-prawo dla produkcji mezonów (głównie  $\pi^0$ ) dla rozpraszania spolaryzowanych protonów na niespolaryzowanych protonach. W tym kontekście dyskutowane jest wypełnienie pasa pozytywności. Na koniec krótko wspomniany jest przyszły eksperyment AFTER@LHC który zajmie się gluonowym efektem Siversa.

Rozdział czwarty opisuje aparaturę eksperymentalną używaną przez grupę badawczą COMPASS. Autor po krótko opisuje wiązkę, spolaryzowaną tarczę, spektrometr COMPASSa, system trygerujący, system akwizycji danych i bardzo krótko wspomina o analizie danych. W podrozdziale 4.2 skupia się na polaryzacji wiązki. Interesujący jest rysunek pokazujący zależność polaryzacji wiązki od pędu mionów dla ustalonej wartości pędu pierwotnej wiązki pionów. Autor wyjaśnia przyczyny fizyczne polaryzacji. Podrozdział 4.3 poświęcony jest polaryzacji tarczy. Omówiono podstawy fizyczne zwracając uwagę na różnice dla tarczy protonowej i deuteronowej. Trochę brakuje w tej sekcji liczb dotyczących efektywnej polaryzacji zarówno protonów jak i deuteronów. Spektrometr COMPASSa omówiony jest bardzo szczegółowo. Podano niektóre szczegóły związane z teleskopem wiązki, trakowaniem, kalorymetrami, filtrami mionów, detektorem Czerenkova. System trygerujący omówiony jest nieco bardziej szczegółowo. Omówiono poszczególne elementy jak i ich użycie w zależności od typu pomiaru. System akwizycji omówiono raczej pobieżnie przedstawiając tylko schemat ideowy architektury. W ostatnim podrozdziale rozdziału czwartego wspomniano jedynie o narzędziach użytych do analizy danych. Cały rozdział czwarty wydaje mi się pewnym standardem COMPASSa pokazywanym na zewnątrz.

Rozdział piąty i następne stanowią rzeczywisty wkład autora. Sam rozdział piąty dotyczy metod, głównie statystycznych, używanych do wyciągnięcia zarówno sygnału jak i tła jeśli chodzi o asymetrię. Pokazano tutaj jak asymetria powiązana jest z liczbą zdarzeń. Autor dyskutuje tak zwaną "raw asymmetry" czyli tą bezpośrednio zmierzoną, czynnik(i) rozmycia (w domyśle asymetrii). Oblicze-

nia czynnika rozmycia biorą pod uwagę czystość materiału tarczy, efekty jądrowe oraz poprawki radiacyjne w oparciu o pewien program. Efekt Siversa, czy lepiej powiedzieć asymetria Siversa, zależy od kontroli polaryzacji tarczy a nie zależy od polaryzacji wiązki. Podrozdział 5.3 poświęcony jest optymalizacji niepewności statystycznych. Przedyskutowano dwie metody: metodę ważoną oraz tak zwaną "Unbinned Maximum Likelihood". Obie metody opisane są od strony matematycznej. Autor wydaje się świetnie znać te metody a w szczególności wie jak użyć ich do celów związanych z jego dysertacją. Szczegółowo zaprezentowano następujące przypadki:

- a) przypadek ze znaną akceptancją,
- b) bardziej realistyczny przypadek z nieznaną akceptancją,
- c) realistyczny przypadek z asymetrią zarówno sygnału jak i tła, gdzie wyznacza się zarówno asymetrię sygnału i tła.

Rozdział piąty jest bardzo ogólny ale może być użyty w fizycznej sytuacji rozważanej w dysertacji.

Metodom wyciągania asymetrii gluonowych poświęcony jest rozdział szósty. Podrozdział 6.1 koncentruje się na produkcji powabu, tzn. par  $c\bar{c}$  a w zasadzie produkcji mezonów  $D$ , tzn. takich które zawierają kwarki lub antykwarki powabne. Wówczas dominującym procesem produkcji jest fuzja fotonowo-gluonowa. Polaryzacja gluonów ma więc istotny wpływ na spolaryzowane przekroje czynne. Eksperymentalnie wyznacza się podwójną asymetrię spinową. Przekrój czynny na hadrony (zarówno spolaryzowany jak i niespolaryzowany) jest splotem przekroju partonowego i spolaryzowanego lub niespolaryzowanego rozkładu gluonów oraz funkcji fragmentacji. Zakłada się że funkcje fragmentacji nie zależą od ustawienia spinu. Partonowa zdolność analizująca jest wyrażona poprzez stosunek przekroju spolaryzowanego (różnicę przekrojów dla różnych ustawień spinu) i przekrój dla przypadku niespolaryzowanego (średnią dla różnych ustawień spinu). Hadronowa asymetria jest średnią po rozkładach partonów. Rozsłupując relacje można dostać wynik na względną polaryzację gluonów. Asymetria dla mezonów ( $D^0$  jest najkorzystniejszym mezonem w tym kontekście) otrzymywana jest przez odjęcie ogromnego tła kombinatorycznego. Eksperymentalnie patrzy się na rozkład masy niezmienniczej pionu i kaonu. Mezon  $D^0$  lub odpowiednia antycząstka jest wówczas widziany jako rezonans w układzie pion-kaon, który znajduje się na dużym tle nierezonansowym. Opisano jak wyznaczyć asymetrię tła. W praktyce używa się metody wag. Zaprezentowano odpowiednie wzory. W końcu uzyskuje się układ równań z wieloma niewiadomymi. Asymetrie i polaryzację gluonów są w tym układzie niewiadomymi. Przedstawiono otrzymany wynik dla względnej polaryzacji gluonów w podejściu LO. Po krótko omówiono jak zmienia się sytuacji gdy uwzględniane są poprawki NLO. Przedstawiono wynik również w podejściu NLO. Wynik ten jest nieco inny, ale niepewność pomiarowa jest niestety bardzo duża tak że uzyskany wynik jest konsystentny z zerem. Dla kompletu pokazano również wynik fitu wykonanego przez grupy teoretyczne. Rozumiem że możliwe są dwa scenariusze i sytuacja wcale nie jest prosta. Podrozdziały 6.2 i 6.3 dotyczą dyskusji wyznaczania względnej polaryzacji gluonów dla metody opartej o pomiar par hadronów z dużym pędem poprzecznym. W zasadzie metoda jest podobna jak dla produkcji powabnych mezonów. Szczegółowo przedstawiono sformułowanie tego problemu od strony metody rachunkowej. Przedstawiony formalizm nie jest łatwy w percepcji. Na koniec pokazano wyniki uzyskane różnymi metodami. Uzyskane względne polaryzacje są raczej małe. Uzyskane wyniki dotyczą ułamków pędu podłużnego w stosunkowo wąskim zakresie w okolicy  $x \sim 0.1$ .

Rozdział siódmy poświęcony jest używanym metodom Monte Carlo jak i treningowi sieci neuronowych. Zauważyłem, że rozdział ten jest błędnie oznaczony jako ósmy na szczycie każdej strony. Do symulacji autor i współpracownicy używają programu LEPTO który został nieco zmodyfikowany tak aby opisać wyniki eksperymentalne grupy badawczej COMPASS. Nieco wyrywkowo wspomniano o samym generatorze. W następnych podrozdziałach przedstawiono jak można zapisać inkluzywny przekrój czynny na rozpraszanie leptonów na nukleonach, jakie procesy zostały uwzględnione w rozważaniach, w jaki sposób uwzględnia się hadronizację, tak zwany parton shower i symulację warunków eksperymentalnych wymieniając nazwy użytych programów bądź pakietów. Te opisy są raczej zdawkowe tak aby przybliżyć nieco używane pakiety napisane przez innych autorów. Trudno z nich jednak zrozumieć jakiegokolwiek szczegóły. Wyniki symulacji Monte Carlo porównano

w podrozdziale 7.7 z wynikami eksperymentalnymi dla tarczy deuteronowej i protonowej. Uzyskano dobry opis sześciu różnych rozkładów co wydaje się świadczyć o dobrym zrozumieniu mechanizmu reakcji. Dalsze rozważania polegają (muszą polegać) na dobrym zrozumieniu mechanizmu reakcji. Osobny podrozdział poświęcono specyficznym aspektom podejścia w ramach tak zwanych sieci neuronowych. Podejście tego typu wydaje się korzystne dla tak skomplikowanych analiz jak ta przedstawiona w rozprawie. Odnoszę wrażenie że autor porusza się tu swobodnie i kontroluje szczegóły metody. Chętnie bym usłyszał jakie było w tej materii zaangażowanie Pana Szabelskiego. Sieć neuronowa musi się nauczyć jak w warunkach rzeczywistych rozpoznawać trzy różne (modelowe) procesy (fuzję fotonowo-gluonową, mechanizm typu QCD-Compton, czy tak zwany wiodący proces) uwzględniane w analizie (i programie LEPTO). Poświęcono temu zagadnieniu osobny podrozdział. Przedstawiono rysunku uwiarygodniające metodę dla tarczy deuteronowej i protonowej. Z tytułu podrozdziału 7.11 odniosłem wrażenie, że zajmuje się on kwestią wyznaczenia ułamków pędu podłużnego. Nie udało mi się jednak zrozumieć jak rysunki 7.12 i 7.13 się z tą kwestią wiążą. Chętnie bym usłyszał wyjaśnienie podczas obrony. W zasadzie nie rozumiem też co to znaczy, że na rysunkach 7.14 i 7.15 punkty układają się w tak dziwny (nieskorelowany) sposób. Naiwnie myślałem, że powinny one być bardziej skorelowane. Według autora są dowodem uwiarygodniającym metodę. Nie mam pojęcia jak to widać. Również tutaj poproszę o wyjaśnienie.

Rozdział ósmy ma taki sam tytuł jak cała rozprawa. Należy więc przypuszczać że zawiera główne osiągnięcia autora. Już na samym wstępie autor stwierdza, że efekt końcowy jest zależny od modelu. Dla przykładu efekt końcowy jest zależny od hadronizacji która rozmywa kąty azymutalne. W literaturze dyskutowano dotychczas asymetrię Siversa (połączenie różnych efektów partonowych). Dotychczasowe wyniki grup COMPASS i HERMES zostały podsumowane na rysunku 8.1 dla dobrze określonych rodzajów mezonów ( $\pi^+$ ,  $\pi^-$ ,  $K^+$ ,  $K^-$ ,  $K^0$ ). Dla  $\pi^+$  i  $K^+$  efekt wydaje się być zdecydowanie różny od zera, a dokładniej mówiąc pozytywny. Przedstawiono zależności od  $x$ ,  $z$ , i pędu poprzecznego hadronu. Możliwe jest badanie rozkładów pojedynczych hadronów jak i par hadronów. Ten drugi pomiar wydaje się bardziej wpasowywać (wybierać) proces fuzji fotonowo-gluonowej. Zostało to potwierdzone przez badania Monte Carlo. W badaniach ogranicza się do  $z > 0.1$  aby ograniczyć się do obszaru fragmentacji prądowej ("current fragmentation region"). Te badania Monte Carlo podsumowane są na rysunku 8.2 gdzie przedstawione są korelacje kątów azymutalnych związanych z gluonem i hadronem lub kątem odpowiadającym obu hadronom. Przedstawiono wyniki dla różnych cięć kinematycznych. Nie rozumiem dlaczego w opisie rysunku przypadek (e) i (f) ma te same cięcia na pędy poprzeczne hadronów. Czym się więc różnią? Trochę brakuje też przypomnienia znaczenia odpowiednich kątów. Szczegółowo przedstawiono detale selekcji dwóch różnych próbek dla tarczy deuteronowej i protonowej. Zwrócono uwagę na pewne szczegóły dotyczące polaryzacji tarczy, werteksu oddziaływania, wiązki mionowej, identyfikacji cząstek i cięć kinematycznych. Podsumowaniem systematycznych badań związanych z nakładaniem kolejnych cięć jest bardzo interesująca tabela 8.1 (dla deuteronu) i 8.2 (dla protonu). Pokazano jak nakładanie kolejnych specyficznych cięć kinematycznych zmniejsza statystykę. Nawet po nałożeniu wszystkich cięć, a jest ich naprawdę wiele, statystyka jest ciągle duża. W rozdziale 8.2 zapisano wielokrotnie różniczkowy przekrój czynny dla rozważanej sytuacji poprzez wiele funkcji struktury dla procesu semiinkluzywnego. Szkoda, że nie ma odnośnika do literatury gdzie ten wzór pojawił się pierwszy raz (kto go pierwszy wyprowadził). Nie wszystkie wielkości w tym wzorze są zdefiniowane. Pokazano jak amplituda modulacji w kącie azymutalnym zależy od tak zwanej funkcji Siversa i funkcji fragmentacji do dwóch hadronów. W rozdziale 8.3 przedstawiono metodę z wagami którą używa się dla wyznaczenia przyczynku gluonowego do asymetrii Siversa. Autor dyskutuje zależność od kąta azymutalnego Siversa ( $\phi_{Siv} = \phi_{2h} - \phi_S$ ). Przyczynk Siversa przemnażany jest przez  $\sin(\phi_{Siv})$ . Na rysunku 8.3 przedstawiono zależność od kąta Siversa dla różnych przyczynków (LP, QCDC, PGF). Na oko nie widać przyczynku proporcjonalnego do sinusa. Przyczynki wszystkich (trzech) podprocesów dają wkład do asymetrii Siversa. Na pierwszy rzut oka wyciągnięcie jednego przyczynku wydaje się więcej niż trudne. Autor przekonuje jednak, że użyta metoda pozwala to jednak osiągnąć. Bez wykonania odpowiedniej analizy (samemu) nie potrafię tego jednak dostrzec. Podrozdział 8.4 poświęcony

jest zestawieniu wyników. Zarówno dla tarczy deuteronowej i protonowej uzyskano asymetrie dla różnych podprocesów oddzielnie. Uzyskane asymetrie są małe i niemal konsyistentne z zerem. W tym miejscu podano tylko błędy statystyczne. Uzyskano asymetrie dla  $\langle x_g \rangle \approx 0.15$  i  $\mu^2 \sim 3 \text{ GeV}^2$ . Specjalny podrozdział poświęcono interpretacji błędów statystycznych. Pokazano również pozadiagonalne elementy związane z korelacjami. Rozdział 8.5 poświęcony jest z kolei detalom metody największej wiarygodności, przynajmniej z tytułu. W wersji którą dostałem brak jednak jakiegokolwiek treści. Nie wiem o co chodzi? W następującej podsekcji dowiadujemy się, że wyniki uzyskane metodą największej wiarygodności są w zasadzie bardzo podobne do tych uzyskanych metodą wag. Pokazano to ładnie na rysunkach 8.7 i 8.8. Dla testu autor pokazuje również wyniki cząstkowe z różnych przedziałów czasowych. Nie widać żadnego niepokojącego trendu. Przyczynek gluonowy do asymetrii Siversa może też być badany w procesach z semiekskluzywną produkcją mezonu  $J/\psi$  (podrozdział 8.5). Patrzy się wówczas na przypadki typu  $2\mu^+1\mu^-$ . Asymetrię Siversa można wówczas dostać metodą podwójnego stosunku. Znowu szczegółowo omówiono selekcję zdarzeń. W tabelce 8.3 pokazano jak zmniejsza się statystyka nakładają stopniowo kolejne warunki kinematyczne. Autor pokazuje masy niezmiennicze mionów przeciwnego znaku. Przyczynek rezonansowy jest świetnie widoczny na ciągłym tle (typu Drella-Yana). Analizując tło na "lewo" i "prawo" od rezonansu można uwzględnić również asymetrię tła. Asymetria Siversa jest, podobnie jak poprzednio, (bezwymiarową) amplitudą przed członem z  $\sin\phi_{Siv}$ . Rozumiem, że w eksperymencie w zasadzie nie widać takiej modulacji na oko co świadczy, że jest ona bardzo mała. Na rysunku 8.11 pokazano asymetrię dla dwóch różnych wartości (przedziałów?) z. Błędy są jednak duże.

Rozdział dziewiąty dotyczy dyskusji błędów systematycznych. Tytuł rozdziału "Systematic studies" nie ma moim zdaniem sensu, powinno raczej być "Studies of systematic errors" czy coś takiego. Błędy systematyczne zależą w pewnym sensie od modelu użytego w skomplikowanych badaniach (zależnych od modelu) na przykład do treningu sieci neuronowych. Jak wynik końcowy zależy od detali modelu (programu Monte Carlo) pokazano na rysunku 9.1. W podpisie rysunku jest mowa o lewej (deuteron) i prawej (proton) stronie rysunku. W rzeczywistości jest jeden rysunek, nie wiem czy dla protonu czy dla deuteronu? Wygląda, że jednego rysunku brakuje. Proszę o wyjaśnienie. Prawdę powiedziawszy nie jest jasno powiedziane co to są "false asymmetries" (podrozdział 9.2). Dla autora sprawa wydaje się być jednak oczywista. Proszę o wyjaśnienie podczas obrony. Na rysunku 9.2 i 9.3 pokazano asymetrie Siversa dla różnych podprocesów w różnych przedziałach czasowych. Rozkład w  $A/dA$  (niezdefiniowane w tekście) jest wypikowany w zerze co wydaje się satysfakcjonować autora. W dalszej części rozdziału po krótko dyskutowany jest wpływ cięcia na pęd poprzeczny hadronów na wynik końcowy (mały), efekt poprawek radiacyjnych (mały), wpływ cięcia na wirtualność fotonu (umiarkowany) oraz wpływ binowania w  $x_{Bj}$  (umiarkowany). W podrozdziale "Systematics summary" (znowu nie podoba mi się tytuł) zestawiono (tabela 9.1) przyczynki do błędów systematycznych. Podsumowując, końcowe błędy systematyczne stanowią około 2/3 wartości błędów statystycznych.

Rozdział dziesiąty nazywa się "Wnioski", a w praktyce jest zestawieniem dwóch liczb dotyczących asymetrii Siversa związanej z podprocesem fuzji fotonowo-gluonowo dla tarczy deuteronowej i protonowej. Jeden prosty wniosek, że należy (można) poprawić statystykę, jest w porządku, ale to nie jest moim zdaniem w pełni satysfakcjonujące. Trochę brakuje mi przedstawienia wizji co robić w przyszłości aby rozwikłać zagadkę spinu nukleonu. Nie rozumiem o co chodzi w pojęciu "quark-gluon sea"?

Rozprawę zamykają trzy uzupełnienia. W Uzupełnieniu A zestawiono wzory na różniczkowe przekroje czynne na produkcję semiinkluzywną dwóch hadronów wyprowadzone przez grupę teoretyczną. Przedstawione przekroje czynne (sześć składników) rozwinięte są na fale parcjalne. Nie jestem pewien czy autor używa tych wzorów w praktyce? Uzupełnienie B jest natury technicznej i dotyczy przybliżenia asymetrii przez zależność liniową w  $x$ . Uzupełnienie C dotyczy ustawienia i justowania spektrometru. Przedstawiono szereg parametrów opisujących ustawienie, matematyczne zasady justowania oraz procedurę praktyczną. Przedstawiono rysunki kontrolne oraz kryteria jakości. Wydaje mi się, że autor był zaangażowany przynajmniej częściowo w to justowanie.

Przejdę teraz do całościowej oceny rozprawy doktorskiej. Tematyka rozprawy jest bardzo interesująca i o znaczeniu fundamentalnym. Samo zagadnienie jest trudne i nieco zawikłane dla postronnego czytelnika. Problemy techniczne rozwiązywane są fachowo przy użyciu nowoczesnych metod statystyki matematycznej. Wyniki końcowe są ważne i użyteczne do dalszych badań ilościowych polaryzacji gluonów. Trochę brakuje mi wyjaśnienia co dokładnie zostało zrobione przez doktoranta a co jest wynikiem działalności całej grupy badawczej. Rozprawa napisana jest dobrym językiem i uważnie. Znalazłem jednak trochę zwykłych pomyłek edytorskich, chętnie je udostępnię, które nie umniejszają jednak mojej bardzo dobrej oceny całej rozprawy. Praca zawiera ogromną liczbę wzorów. Częściowo wynika to z faktu że dotyczy trudnych i technicznie zaawansowanych problemów spinu. Czasami niektóre wielkości są niezdefiniowane co może utrudniać zrozumienie.

Podsumowując, praca jest bardzo dobra i dotyczy aktualnie rozwijanych zagadnień fizyki hadronów. Wydaje się, że autor dokonał dalszego postępu technicznego dotyczącego rozwikłania zagadki spinowej. Uważam, że praca spełnia wszystkie wymagania stawiane rozprawom doktorskim. Z całym przekonaniem wnoszę o dopuszczenie Pana Adama Szabelskiego do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Z poważaniem

