

Prof. Antoni Szczurek
Institute of Nuclear Physics (PAN)
ul. Radzikowskiego 152
31-345 Kraków

Recenzja rozprawy doktorskiej Ghanshyambhaia Khatri zatytułowana: Investigation of Deuteron Disintegration

Rozprawa napisana jest w języku angielskim. Praca poświęcona jest badaniom eksperymentalnym reakcji zachodzących w zderzenia deuteron-deuteron przy energii wiązki 160 GeV. Badania wykonano z użyciem detektora BINA w KVI Groningen. Autor wykonał kalibrację energetyczną, identyfikację cząstek oraz rekonstrukcję śladów cząstek naładowanych. Zidentyfikowane zostały kanał dwuciałowy $d + d \rightarrow d + d$ (elastyczne rozpraszanie), oraz niektóre kanały trzyciałowe w tym w szczególności $d + d \rightarrow d + p + n$. Ten ostatni był szczególnie badany dla produkcji do przodu. Uzyskano cenne wyniki różniczkowych przekrojów czynnych. Wyniki porównano z nieco uproszczonymi obliczeniami reakcji czteronukleonowych wykonanymi przez grupę teoretyczną.

Praca składa się z siedmiu rozdziałów:

- 1) Wstępu
- 2) Podstaw teoretycznych
- 3) Eksperymentu
- 4) Analizy danych
- 5) Wyników i dyskusji
- 6) Podsumowania, wniosków i perspektyw
- 7) Trzech załączników

Wstęp dotyczy rozwoju historycznego badań procesów kilku-nukleonowych. Autor krótko wspomina zagadnienie układów związanych. Praca koncentruje się jednak na zagadnieniach rozproszeniowych w podejściu związanym z używaniem realistycznych potencjałów nukleon-nukleon. Autor nawiązuje do oddziaływań nukleon-nukleon i wspomina dwa podejścia używane obecnie w literaturze:

- (a) model wymiany mezonów i
- (b) model w ramach perturbacyjnego podejścia chiralnego.

Autor przypomina, że w układach trójnukleonowych pojawia się istotnie nowy element - oddziaływanie trójnukleonowe nieredukowalne do oddziaływań dwunukleonowych. Krótko wspomniane są badania rozproszeniowe w systemie

trójnukleonowym i ostatni postęp, który się dokonał w tej dziedzinie. Następnym krokiem który można wykonać w ramach określonego szerokiego programu badawczego są badania systemu (systemów) czteronukleonowego. W swojej pracy autor rozważa tego typu procesy w zderzeniach deuteron-deuteron. Bardzo interesujące jest zestawienie istniejących światowych danych dotyczących rozpraszania elastycznego deuteron-deuteron.

Rozdział drugi nominalnie dotyczy podstaw teoretycznych związanych z rozważanymi procesami. W gruncie rzeczy jest to raczej dalsze rozwinięcie wstępu. Wspomniane są niektóre metody teoretyczne stosowane w zagadnieniach procesów trójnukleonowych. Przedstawiono niektóre zagadnienia klasyfikacji oddziaływań nukleon-nukleon według rzędów perturbacyjnego przybliżenia chiralnego, aż do rzędu N^3LO . Autor wspomina, że w tego typu podejściu wykonanie obliczeń dla energii wyższych niż próg na procesy typu break-up nie jest dotychczas możliwy ze względów technicznych (duża liczba fal parcjalnych). Szkoda że autor nie zamieścił choćby szkicu metody Faddeeva-Yakubowskiego, która stosuje się przynajmniej nominalnie do opisu tego typu procesów. Autor koncentruje się na kinematyce tego typu procesów. Rozważa wszystkie kanały nukleonowe, których dla zderzeń deuteron-deuteron jest pięć. Następnie dyskutuje różne zależności kinematyczne dla elastycznego rozpraszania deuteron-deuteron i trzyciałowego break-up'u $dd \rightarrow dpn$. Pokazano różne zależności (krzywe) kinematyczne dla różnych konfiguracji kątowych. Ponadto rozważany jest kanał końcowy związany z reakcją transferu neutronu: $d + d \rightarrow p + {}^3H$.

Kolejny (trzeci) rozdział dotyczy detali eksperymentalnych związanych z infrastrukturą eksperymentalną i używaną aparaturą. Bardzo krótko opisany jest cyklotron AGOR znajdujący się w KVI Groningen. Więcej miejsca poświęcono detektorowi BINA ukończonemu w roku 2004, a który obecnie znajduje się w Instytucie Fizyki Jądrowej w Krakowie. Detektor ten składa się z tak zwanej przedniej ściany oraz tak zwanej tylnej kuli, czy inaczej kuli detektorowej mierzącej czastki w kierunku wstecznym. Opisano szczegóły przedniej ściany na którą składają się wielodrutowa komora proporcjonalna oraz teleskop typu $\Delta E - E$. Szczegółowo (skład i geometria) opisano te części przedniej ściany. Detektor $\Delta E - E$ (hodoskop) składa się ze scyntylatorów. Każdy ze scyntylatorów wyposażony jest w fotopowielacze. Tak zwana tylna kula może mierzyć czastki w zakresie kąta polarnego od 40° do 165° i w niemal pełnym zakresie kąta azymutalnego. Opisano poszczególne moduły koncentrując się raczej na geometrii. Przedstawiono niektóre informacje techniczne związane z użytymi scyntylatorami oraz omówiono ogólny schemat elektroniczny. Pewną uwagę poświęcono systemowi trygerowania. Krótki podrozdział poświęcony jest systemowi tarczy. W trakcie omawianych eksperymentów użyte zostały różne typy tarcz. Ze zrozumiałych względów bardziej dokładnie omówiono szczegóły związane z tarczą ciekłą w tym z procedurą jej napełniania i chłodzenia. Monitorowi intensywności wiązki poświęcono w zasadzie jeden dłuższy akapit.

Rozdział czwarty, stanowiący objętościowo największą część pracy, dotyczy analizy danych eksperymentalnych. Wydaje się, że autor brał czynny udział w analizie danych, ale chętnie bym usłyszał w trakcie obrony, które fragmenty analizy były wykonane przez pana Khatriego a które przez innych członków grupy badawczej. Pan Khatri zaczyna od opisu całego procesu analizy danych. Sekcja 4.2 dotyczy wstępnej analizy danych oraz wyboru zdarzeń, Na rysunku 4.1 pokazano na przykład jak ustawiona była bramka czasowa, tak aby zredukować tak zwane koincydencje przypadkowe. Ślady rekonstruowane były dla każdego zdarzenia włączając wielodrutowe komory proporcjonalne oraz hodoskop typu $\Delta E - E$. Na rysunku pokazano liczbę zliczeń w funkcji kąta azymutalnego odzwierciedlającą segmentację detektora. Pokazano również przykładową odpowiedź komory drutowej, Identyfikacja cząstek stanowi zawsze jeden z najważniejszych elementów danego pomiaru konkretnej reakcji. Pokazano kilka przykładów dwuwymiarowych widm typu $\Delta E - E$. Selekcja cząstek odbywała się poprzez nałożenie tak zwanych graficznych cięć zwanych często żargonowo bramkami typu banana.

Podrozdział 4.4 poświęcono kalibracji energetycznej zarówno ściany jak i kuli. Przedyskutowano jak sygnał świetlny jest konwertowany na sygnał elektroniczny. Szczegółowo opisano procedurę kalibracji. Pokazano szereg pomocniczych rysunków kalibracyjnych. W wielu przypadkach zademonstrowano obecność efektów nieliniowych. Krzywe kalibracyjne sparametryzowano przy pomocy prostych zależności potęgowych. Każdy segment przedniej ściany wymagał osobnej kalibracji. Występujące nieliniowości w dużej mierze wynikają z konieczności uwzględnienia zależnych od toru cząstki strat energii. Krzywe tłumaczące zakumulowaną energię z energią w punkcie zderzenia zależą nieco od kąta, co ładnie zilustrowano na przykładzie deuteronów na rysunku 4.10. Świetnie widać z niego dolną minimalną energię deuteronów, dla których pomiar energii jest możliwy. Wykonanie kalibracji umożliwia przedstawienie kinematyki trójciałowej (linii na diagramach dwuwymiarowych). Przykładowe kinematyki pokazano na rysunku 4.11. Tylko 55 ze 149 elementów kuli zostało użyte w wykonanym eksperymencie. W przypadku kuli identyfikacja była utrudniona ponieważ użyto wyłącznie grubych scyntylatorów. W pracy nie znalazłem wytłumaczenia dlaczego zaistniała taka sytuacja. Czy chodzi o błąd projektu? czy jakies uszkodzenia? W przypadku kuli kalibracja oparta była o elastyczne rozpraszanie. W wielu przypadkach należało uwzględnić koincydencje typu ściana-kula. Inną słabością kuli był brak dobrej izolacji światła pomiędzy sąsiednimi elementami. Omówiono wstępną procedurę kalibracji jak i tak zwaną w pracy metodę klasteryzacji. Przez klaster autor rozumie pewną grupę elementów kuli. Takiemu klastrowi przypisuje się efektywne kąty polarne i azymutalne. W całym rozważaniu uwzględnia się również czynnik osłabienia wynikający ze straty światła na granicy elementów kuli. W końcu wyznacza się energię związaną z takim klastrem, która jest związana z energią pierwotną cząstki. Elastyczne rozpraszanie

$d + d$ zostało użyte jako punkt odniesienia dla procesów break-up'u. Autor szacuje że energetyczna zdolność rozdzielcza metody wynosi 10-20%. Całość procedury zilustrowana jest przykładami.

Z punktu widzenia fizyki bardzo istotna jest dobra dyskryminacja różnych kanałów reakcji. Elastyczne rozpraszanie może być łatwo rozróżnione przez nałożenie warunków koplanarności. W przypadku geometrii typu "quasi-free" należy również nałożyć warunek na względne kąty azymutalne naładowanych cząstek (w tym przypadku protonu i deuteronu). Autor omawia również co jest możliwe do uzyskania w przypadku reakcji transferu neutronu lub protonu. Chodzi o kanały końcowe $p + {}^3\text{H}$ czy $n + {}^3\text{He}$. Bardzo proszę o wyjaśnienie tego zagadnienia podczas publicznej obrony. Wydajność detektorów (wielodrutowej komory drutowej, ΔE oraz E) omawiana jest w rozdziale 4.6. Przedstawiono dwuwymiarowe mapy wydajności w funkcji kąta polarnego i azymutalnego. Wydajność komory drutowej określana jest iloczynem wydajności poszczególnych płaszczyzn. Podano również dokładności wyznaczenia wydajności. Przedstawione wydajności są raczej wysokie, z wyjątkiem dużych kątów polarnych kuli co wynika z faktu, że deuterony dla dużych kątów rozproszeń mają małe energie, często poniżej progu. W przypadku kuli widać ślady cienia tarczy oraz ślady zepsutych elementów. Podrozdziały 4.7 i 4.8 rozważają odpowiednio analizę elastycznego rozpraszania jak i reakcji break-up'u. W przypadku elastycznego rozpraszania rozważane są jedynie koincydencje ściana-kula. Rozumiem, że tylko takie przypadki są możliwe kinematycznie? Elastyczne rozpraszanie korygowane było o tło pochodzące od procesu break-up'u $dd \rightarrow dpn$ zakładając prostą parametryzację tła. Nie jest jasne, że tak prosta parametryzacja jest wystarczająca i nie widzę oszacowania jak to założenie wpływa na dokładność wyznaczenia przekroju czynnego. Pewną słabością eksperymentu był brak możliwości wyznaczenia prądu wiązki. Zamiast tego posłużono się względną normalizacją do stosunkowo dobrze znanych (z innych eksperymentów) danych rozpraszania elastycznego zakładając skalowania z energią różniczkowego przekroju czynnego dla małych kątów rozproszeń, czy małych t (zmienna Mandelstama). Efekt skalowania jest interesujący ale użyteczne byłoby wyjaśnienie pochodzenia tego efektu. W przypadku reakcji break-up'u wyjaśniono jak definiuje się punkt $S = 0$ (położenie na kinematyce trójciałowej. Pokazano przykładowe rozmycie kinematyki w kierunku prostopadłym do kinematyki. Na koniec przedstawiono wzory jak skorygować zmierzone wielkości różniczkowych przekrojów czynnych o wydajności pomiaru protonu i deuteronu i tak zwany czynnik skalowania. W ostatnim podrozdziale dyskutowane są źródła niepewności, czyli wszystkie czynniki wpływające na niedokładność wyznaczenia różniczkowych przekrojów czynnych. Pan Khatri skupia się na reakcji break-up'u. Poruszane są takie zagadnienia jak identyfikacja cząstek, absolutna normalizacja, rekonstrukcja kąta rozproszania, odjęcie tła, kalibracja energetyczna czy skończone rozmiary kątowe sektorów. Wszystkie te czynniki ilustrowane są przykładami. Na koniec

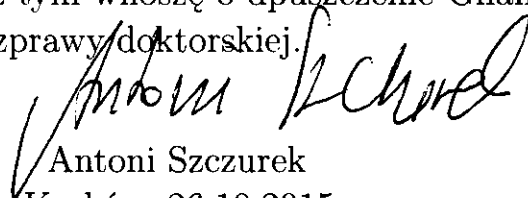
przedstawiono zestawienie procentowe wszystkich tych niepewności. Pojedyncze czynniki dają niepewność pomiarową poniżej 5 %. Sumaryczna niepewność oszacowana została na ponad 10 %.

Rozdział piąty dotyczy podsumowania uzyskanych wyników. Rozdział ten uzupełniony został załącznikiem C w którym zamieszczono, rozumiem wszystkie, uzyskane rozkłady różniczkowe w funkcji długości łuku dla różnych wartości kątów związanych z geometrią detektora BINA. Uzyskane wyniki porównano ze wstępnymi obliczeniami tego typu reakcji wykonanymi przez A. Deltuvę. Te pierwsze wyniki wykonane są z bardzo ograniczoną (prawdopodobnie niewystarczającą) liczbą fal parcjalnych. W chwili obecnej uwzględnienie pełnej liczby fal parcjalnych jest niemożliwe. Pokazano, że użycie większej liczby członów (trochę jest to słabo wyjaśnione w pracy) w obliczeniach poprawia zgodność z wynikami eksperymentalnymi. Na razie zgodność jest raczej słaba i wyciągnięcie interesujących wniosków fizycznych w zasadzie nie jest możliwe. Ale z całą pewnością jest to ważny i obiecujący kierunek.

Stosunkowo krótkie podsumowanie zamyka pracę. W zasadzie nie przedstawiono dalszych perspektyw. Mam nadzieję że doktorant przedstawi je podczas obrony rozprawy doktorskiej.

Do pracy dołączono trzy załączniki: pierwszy związany z geometrią detektora BINA, w drugim przedstawiono jak wyliczać eksperymentalne przekroje czynne z liczby zliczeń uwzględniając wydajności detektorów, a w trzecim załączniku zestawiono wszystkie uzyskane wyniki.

Przedstawiona praca zawiera interesujące nowe wyniki związane z badaniem reakcji w układach czterech nukleonów. Uzyskana baza danych stanowi cenne źródło danych które mogą i z pewnością będą użyte do studiów teoretycznych w ramach mikroskopowego podejścia opartego o równania Faddeeva-Yakubovskiego i realistyczne potencjały nukleon-nukleon. Autor wykazał się starannością w opracowaniu danych eksperymentalnych. Praca napisana jest zwięźle i dobrym językiem. W moim przekonaniu spełnia wszystkie wymagania stawiane pracą doktorską. W związku z tym wnoszę o dopuszczenie Ghanshyambhaia Khatri do publicznej obrony rozprawy doktorskiej.


Antoni Szczurek
Kraków, 26.10.2015