

dr hab Andrzej Bożek prof. Instytutu
Particle Physics and Astrophysics Department
Instytut Fizyki Jądrowej PAN
ul Radzikowskiego 152, Kraków

Kraków, 1 października 2023

**Recenzja rozprawy doktorskiej pani mgr inż. Aleksandry Molendy zatytułowanej:
CMOS Technologies in Detector Readout Systems of Modern Particle Physics
Experiments**

Przedmiotem recenzji jest praca dotycząca badań nad rozwojem odczytu i analizy sygnału w technologii CMOS, w szczególnym zastosowaniu do odczytu detektorów słomkowych.

Praca jest zwięzła i skupia się na dwóch głównych obszarach: pomiarach dla współpracy Panda i Hades oraz zaangażowaniu autorki w projektowanie i testowanie układów ASIC. Autorka brała udział w kilku różnych projektach, na różnych etapach zaawansowania. Poczynając od etapu projektowania dedykowanych układów CMOS, ich testowanie i optymalizację układów ASIC dla odczytu kalorymetru w eksperymencie CMS, po testowanie całego systemu odczytu i udział w zbieraniu danych w eksperymentach PANDA oraz HADES.

Praca składa się z pięciu głównych segmentów: wstępu, trzech rozdziałów i podsumowania. Liczy w sumie 108 stron, co jest wystarczającą liczbą do przedstawienia tematyki pracy. Jest też długa lista ponad 100 rysunków, lista tablic, akronimów i appendix.

We wstępie autorka jasno określa cel pracy, którym jest rozwój zaawansowanych układów odczytu detektorów. Autorka w sposób przekonujący przedstawia motywację do podjęcia takiego tematu badań oraz wprowadza czytelnika w ideę układów Application-Specific Integrated circuit (ASIC).

Opisuje również obecny stan wiedzy w fizyce cząstek elementarnych. Opis modelu standardowego jest, jak na tematykę pracy, wystarczający. Aczkolwiek nie jestem przekonany, że obecnie bariony są zbudowane tylko z kwarków pierwszej generacji. Brakuje mi trochę rozbudowy części dotyczącej QCD. Oddziaływania silne są istotną częścią eksperymentów w których autorka brała udział.

Autorka opisuje szczegółowo eksperymenty CMS na LHC, HADES oraz PANDA oraz i programy naukowe.

Są to eksperymenty bardzo różnej specyfice:

- przy bardzo wysokich energiach, nastawionych na obserwację produkcji nowej fizyki wprost (CMS),
- w niskoenergetycznej anihilacji proton-antyproton, mającej na celu produkowanie cząstek powabnych, w rozpadach których można badać efekty nowej fizyki w oddziaływaniach silnych oraz słabych w rzadkich procesach przy niskich energiach, tzw. intensity frontier,
- w eksperymencie na stałej tarczy HADES, nastawionym na fizykę QCD w niskim zakresie energii.

Wspólną cechą eksperymentów PANDA i HADES jest fakt użycia detektorów słomkowych. Słomkowe detektory śladowe były rozwijane przez grupę z UJ, zaś grupa z AGH była zaangażowana w system odczytu oparty o dedykowany układ. CMS planuje użyć detektorów krzemowych do odczytu energii w nowym kalorymetrze.

Dedykowany układ ASIC zawiera część analogową służącą do odczytu sygnałów z detektora oraz ich wzmacnianiu, część odpowiedzialną za konwersję sygnału analogowego na cyfrowy, oraz część cyfrową, w której przygotowywane i formowane są paczki danych do odczytu przez układ akwizycji danych. Układ ten zastępuje kilka innych układów lub osobnych kart, z których każda wykonuje jedno z tych zadań.

W drugim rozdziale, merytorycznym rozdziale autorka skupia się na pracach które wykonywała dla współprac Panda i Hades. Jednym z kluczowych wymagań dla systemu odczytu detektorów słomkowych była zdolność identyfikacji cząstek za pomocą pomiaru czasu, przez który sygnał utrzymuje się powyżej ustalonego progu - nazywanego TOT (Time Over Threshold). Czas ten jest proporcjonalny do ilości zdeponowanego ładunku w przypadku cząstek o niskiej energii. Znaczącą korzyścią tej metody, patrząc z perspektywy systemu akwizycji danych, jest fakt, że nie musimy próbować całego sygnału analogowego. Wystarczy rejestrować jedną wartość, co znacząco zmniejsza wymagane pasmo odczytu. Jednakże metoda ta wymaga bardzo precyzyjnej kontroli poziomu tła oraz możliwości regulacji progu wyzwalania i czasu narastania w przedwzmacniaczu.

Dedykowany układ o nazwie PASTTREC został zaprojektowany aby podołać odczytowi w obu eksperymentach. Autorka przygotowała stanowisko testowe umożliwiające przetestowanie 5000 potrzebnych płytek PASTTREC.

Przygotowane stanowisko pozwalało na testowanie równoległe 16 płytek (w 8 tzw. FEB). W podrozdziale 2.3 autorka szczegółowo opisuje stanowisko testowe. Stanowisko wymagało zaprojektowania dodatkowego układu który pozwalałby na wstrzykiwanie sygnału testowego równocześnie do wszystkich testowanych płytek.

Pani Molenda opisuje dość szczegółowo i w sposób wystarczający przeprowadzone testy. Przy testach TOT sygnalizuje, że otrzymane wyniki nie odpowiadają sygnałowi rzeczywistej cząstki przechodzącej przez słomkę. Dla czytelnika jest oczywiste, że chciałby się dowiedzieć, na czym polega ta różnica. Autorka proponuje wyjaśnienia, ale warto by było zobaczyć kształt wstrzykiwanego sygnału w stosunku do symulowanego (lub rzeczywistie odczytanego po próbkowaniu) sygnału ze słomki. Mamy jedynie wykresy z rysunku 2.15. Czy obserwowany rozrzut pomiędzy kanałami na rysunku 2.15 był spodziewany? Kształt wszystkich kanałów wygląda bardzo podobnie z dokładnością do czynnika skalującego. Chętnie dowiedziałbym się, jak planowana jest kalibracja układu o takiej liczbie kanałów, jeśli nie można polegać na wstrzykiwanym sygnale testowym.

Bardzo interesujące są wyniki opisane w podrozdziale 2.4 Pokazują na dobre zrozumienie układu i jego stabilność. Mam uwagę do tabel w tym rozdziale, np. 2.4 widząc 4 przecinku po przecinku ma się tendencje do traktowania ich jako cyfr znaczących w tym wypadku chyba tak nie jest. Problemem jest chyba założenie jakie zrobiła autorka że rozkład wyników jest gausowski. W rzeczywistości mamy tu do czynienia ze złożeniem kilku rozkładów normalnych jak można zaobserwować na rysunkach 2.2 czy 2.21. Szkoda że problem zasygnalizowany w ostatnim akapicie nie został przedyskutowany głębiej.

W następnym podrozdziale Autorka opisuje pomiary elektroniki podłączonej do detektora słomkowego i napromieniowanego radioaktywnym źródłem ^{56}Fe .

Autorka badała dwie linie w spektrum ^{56}Fe na podstawie których szacowano wydajność jak i prawdopodobieństwo misidentyfikacji, gdzie ogon drugiej linii znajdował się pod pierwszą. Tutaj mam pytanie średnie szerokość rozkładów była traktowana jako średnia arytmetyczna. Później, np. w tabeli 27 widać że dla niektórych parametrów ustawienia detektora, stosunek szerokości tych dwóch linii nie był stabilny. Mogło by to sugerować że rozdzielczości przy 2.9 keV i 5.9 keV są różne, niezależne. Oznaczało by to że należało by użyć sumy rozdzielczości w kwadracie jako miary odległości peaków.

Czy procedura poprawy "baseline" została gdzieś wyjaśniona? Mam wrażenie że dodało by to pracy gdyby czytelnik rozumiałby dlaczego automatyczna procedura kalibracji nie wystarcza i istnieje po-

trzeba ręcznej poprawy. Jeżeli porównamy rysunki 2.33 z rysunkiem 2,34 widać że problem nie został rozwiązany i nie można każdej linii przybliżyć pojedynczym rozkładem gaussa. Czy nie można tego rozkładu traktować jako złożenia dwóch gaussów wynikającego z geometrii słomek jak autorka tu słusznie zauważyła. Jak się ma fakt że ma przesłaniania dco drugiego kanału do założenia że ładunek zdeponowany w słomce odpowiada cząstce mip?

Autorka słusznie zauważa że końcowa kalibracja powinna być wykonana w eksperymencie na wiązce cząstek. Sugeruje jednak niski poziom wyzwalania i wysokiego napięcia w detektorze. Detektor już działa na wiązce być może jakieś wyniki na temat identyfikacji są dostępne i publiczne ?

Detektor słomkowy w HADES został zintegrowany w 2020 roku z resztą układu eksperymentalnego. Przeszedł testy na wiązce i bierze udział w zbieraniu danych od 2022 roku.

W 2022 roku autorka brała udział w rzeczywistym zbieraniu danych na detektorze. Pani Molenda opisuje system monitorowania akwizycją danych całego detektora HADES ale przede wszystkim detektora słomkowego STS. Rozumiem że monitorowane parametry wynikały z doświadczeń zebranych w testach opisanych wcześniej, więc były też częścią pracy. Pokazane rozkłady wskazują jednoznacznie że detektor działa dobrze jak na pierwszy miesiąc pracy.

W kolejnym, trzecim, rozdziale pani Molenda przedstawia swoje zaangażowanie w projektowanie i testowanie specjalizowanych układów ASIC przeznaczonych do odczytu kalorymetru w korkach eksperymentu CMS. Zajmujemy się tu układem HGCROC, który jest owocem współpracy między francuskimi laboratoriami a AGH. Nowe wyzwania związane z fazą wysokiej luminacji LHC obejmują m.in. odporność na promieniowanie oraz potrzebę obsługi dużej częstości danych przy jednocześnie wysokiej granulacji. Wkładem zespołu z AGH jest istniejący 10-bitowy konwerter ADC oraz rozwijany układ TDC do dokładnych pomiarów czasowych, pozwalający na pracę w warunkach dużej częstości zdarzeń. Głównym zadaniem autorki było projektowanie tego nowatorskiego układu.

Na początku rozdziału 3.1 autorka opisuje szczegółowo układ który zaprojektowała. Opis jest bardzo zwięzły i treściwy. Widać wyraźnie wiedzę i doświadczenie pani Molendy w tym zakresie. Od części 3.1.4 przedstawia nam symulacje wykonane dla tak zaprojektowanego układu. Otrzymane wyniki dla rozdzielczości są w moim przekonaniu bardzo dobre, od 12 ps przy najmniejszej stałej czasowej. Mam za mało danych aby ocenić czy moc wydzielana na jeden kanał jest wystarczająco niska do założeń detektora. Rozumiem że wyniki symulacji są wartością wejściową do ewentualnego zdefiniowania ewentualnych zastosowań. Autorka wyznaczyła liniowy zakres pracy układu TDC niestety opis jest trochę zbyt zdawkowy.

Autorka zaprojektowała 8 kanałowy prototypowy układ TDC wraz z częścią cyfrową dostarczoną przez dr Świątek. Jednak system do ewaluacji układu jeszcze nie został przygotowany.

W części 3.2 pani Molenda opisuje badania układu HGCROC, 72 kanałowego systemu odczytu do kalorymetru CMS. chodziło przede wszystkim o optymalizacje układy ADC który jest wykonany podobnie do układu TDC który był symulowany wcześniej. Układ wskazuje na większą nieliniowość niż można się było spodziewać. wynika to prawdopodobnie z faktu interakcji z układem testowym. Zewnętrzny układ DAC może interferować z badanym zestawem.

W podsumowującym rozdziale pani Molenda krótko przedstawia cele pracy oraz osiągnięcia. Chciałbym podkreślić, że ten rozdział jest bardzo dobrze skonstruowany, układający w logiczną całość treść całej rozprawy. Warto docenić jasne przedstawienie kolejnych etapów pracy pani Aleksandry. Z podsumowanych też jasno wynika, że największy wkład autorki skupiał się na tematyce opisanej w drugiej i trzeciej części rozprawy. Szczególnie cenię podsumowanie w formie punktów na zakończenie rozdziału. Co do sugestii, chętnie zobaczyłbym kilka zdań dotyczących przyszłych perspektyw zastosowania przedstawionych rozwiązań. Zwłaszcza że w poprzednich rozdziałach autorka wspominała o potencjalnym wykorzystaniu tych technologii w przyszłości.

Mam kilka uwag dotyczących edycji tekstu, które jednak nie wpływają na zrozumienie rozprawy:

- lista skrótów jest długa, często użyteczna w czytaniu rozprawy, niestety czasami indeks odwołań się nie zgadza, np. LSB czy DSP są w tekście wielokrotnie używane a wskazywane tylko raz,
- skróty eksperymentów i nie tylko (ASIC) są rozwijane wielokrotnie, np. PANDA na stronie 1,4 i 8 w jednym rozdziale,
- wybór Wikipedii jako jedyne źródła referencji do MS jest dość nowoczesnym podejściem. Praca zyskała by i gdyby drugi akapit pierwszego rozdziału miał referencje do, nawet prostego, opisu modelu standardowego,
- także referencje do eksperymentów, współprac eksperymentalnych, rozszerzyłbym o publikacje w stylu czasopisma NIM,
- kolejność cytowań w bibliografii nie zgadza się z kolejnością występowania w tekście. Kolejność w tekście idzie 1,2,3,14,4,... . Ogólnie referencje występującej w opisach rysunków mają niższą numerację niż w samym tekście pracy,
- Appendix zyskałby na kilku zdaniach wstępu. Numeracja appendixu powinna być wyzerowana i zaczynać się od A and nie D.

Niezwykle istotne jest podkreślenie, że pani Molenda nie ograniczała się tylko do teoretycznego badania tematyki, ale aktywnie uczestniczyła w kluczowych etapach wielu projektów. Jej zaangażowanie w różnych fazach projektów, od projektowania po zbieranie danych, pokazuje jej praktyczne podejście i zdolność do pracy w zespołach badawczych.

Rozprawa doktorska dowodzi, że autorka zdobyła doświadczenie w operowaniu warsztatem doświadczalnym, jaki modelowym z dziedziny. Wydaje mi się że są one wartościowe i pomagają posunąć naszą wiedzę w kierunku przygotowania lepiej skrojonego systemu odczytu dla zastosowań eksperymentalnych. Mam również nadzieje że pani Molenda jak i grupa dalej rozwija prace nad tego typu układach w kierunkach zasygnalizowanych w konkluzjach pracy.

Praca pani mgr inż. Aleksandry Molendy jest znaczącym wkładem w dziedzinę projektowania systemu odczytu detektorów cząstek bazując na układach ASIC. Pokazuje że można zaprojektować dedykowane układy o dużej granulacji kanałów i pasujące do zapotrzebowania (pomiar czasu, trigger, FIFO i kompresja sygnału) w oparciu o technologie CMOS. Jest to szczególnie ważne w obecnych czasach gdzie detektory mają ogromną liczbę kanałów odczytu.

Reasumując stwierdzam, że przedłożona praca spełnia wszelkie wymogi stawiane rozprawom doktorskim i wnioskuję o dopuszczenie pani mgr inż. Aleksandry Molendy do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

z poważaniem



dr hab Andrzej Bożek prof. IFJ PAN