

Prof. dr hab. inż. Piotr MALECKI

Instytut Fizyki Jądrowej PAN
Oddział Fizyki i Astrofizyki Cząstek
ul. Radzikowskiego 152
31-342 – Kraków
tel: (48 12) 662 8010



Kraków, 12 września 2015

RECENZJA rozprawy doktorskiej mgr inż. Jakuba Moronia:

Development of novel low-power, submicron CMOS technology based, readout system for luminosity detector in future linear collider”.

Uwagi wstępne

Mgr inż. Jakub Moron przedstawi do recenzji 184-stronicową rozprawę, której tytuł wskazuje na, niewątpliwie, centralny temat pracy, ale która się do tego tematu zdecydowanie nie ogranicza. Doktorant wchodzi w skład dużej międzynarodowej współpracy zwanej FCAL, którą, z kolei, współtworzy zespół wielu uniwersytetów i instytucji naukowych z całego świata przygotowujących projekt i budowę przyszłego liniowego zderzacza e+e- oraz projekty programów badań i systemów detekcyjnych dla takiej maszyny. Akronim FCAL rozwija się na „Forward Calorimetry” i niejako wskazuje na wagę, jaką w przyszłych instalacjach detektorowych przykłada się do kalorymetrii, wymagającej olbrzymich postępów zarówno w rozdzielczości czasowej, przestrzennej jak i energetycznej przy rekonstrukcji kaskad. Trzeba też podkreślić, że nie może tu być mowy o jakiejś ograniczonej „techniczności” prac FCAL. Przeciwnie, czasochłonny, iteracyjny proces badań i rozwoju kolejnych prototypów wiąże się ściśle z programem fizycznym przyszłych badań, który współtworzą projektanci i konstruktorzy elementów detektorów. Prace współczesnego fizyka eksperymentatora, biorącego udział w wielkich projektach fizyki cząstek, zwanej też fizyką wysokich energii, można z pewnością traktować jako prace interdyscyplinarne. Nie inaczej jest w przypadku Jakuba Moronia, który prezentuje nie tylko wybitne umiejętności projektowania obwodów scalonych, ale też głęboką znajomość fizyki cząstek, fizyki detektorów, programowania, rekonstrukcji przypadków, analizy danych etc.

Teza i cel pracy

Może to dobrze, że nie mamy tu klasycznego sformułowania tezy pracy, bo jej wyjątkowo obszerna tematyka mogłaby zostać zubożona, przez podkreślenie wybranej części. Piszę świadomie „obszerna tematyka” pomimo, że praca

skupia się w znacznej swej części na rozwoju pomiarów świetlności przyszłego liniowego zderzacza $e+e-$ przy pomocy „kalorymetru świetlności” - LumiCal. Sam Autor podsumowuje swój wieloletni wkład w program współpracy FCAL wyliczając:

- budowa prototypu wielo-płaszczyznowego kalorymetru
- badania prototypu na wiązce T9 synchrotronu PS w CERN
- tworzenie oprogramowania dla analizy zebranych danych
- opracowanie nowatorskiej metody odtwarzania amplitudy sygnału z danych cyfrowych
- rekonstrukcje i symulacje kaskad
- prototyp nowego układu odczytu w technologii 130nm CMOS
- prototyp unikalnego przetwornika analogowo-cyfrowego

Ostatni punkt lub dwa z tej listy to wystarczający temat dla bardzo dobrej pracy doktorskiej. Zwłaszcza, że zaprojektowane, wykonane i przetestowane obwody potwierdziły swoją wysoką wydajność i parametry przekraczające wstępne wymagania.

Cała zaś lista, wraz z jej zakresem tematycznym, wskazuje na wybitny wkład Jakuba Moronia w prace Kolaboracji.

Układ i zawartość rozdziałów

Rozprawa mgr inż. Jakuba Moronia składa się z trzech rozdziałów, krótkiego podsumowania, dwóch dodatków (Appendix A i Appendix B) uzupełniających dane z pomiarów prototypów, których reprezentatywne próbki zawarte są w rozdziale 3. Spis pozycji bibliograficznych zawiera 106 tytułów. Jest też praktyczny spis akronimów używanych w tekście, spisy rysunków i tabel.

Blisko 40-stronicowy rozdział pierwszy „Future Linear Colliders and High Energy Physics (HEP) experiments” po krótkim, ale świetnym wprowadzeniu w fizykę liniowych zderzaczy, krótkim opisie projektów maszyn ILC oraz CLIC poświęca nieco więcej uwagi zasadniczym koncepcjom i głównym elementom planowanych systemów detekcyjnych.

Rozdział ten jest tak skonstruowany, że kolejne jego sekcje poświęcone są coraz to bardziej szczegółowym tematom zmierzającym ogólnie poprzez kalorymetrię, teorię rozwoju kaskad w kalorymetrach elektromagnetycznych do rozwiązań dedykowanych dla pomiarów kalorymetrycznych w obszarach „do przodu”, pod małymi kątami w stosunku do kierunku wiązek, obszarach związanych głównie z pomiarami świetlności. Od bardzo dobrego wprowadzenia w „principia” pomiarów świetlności przechodzimy do bardzo już szczegółowej, kompetentnej dyskusji „zastanego” w kolaboracji FCAL przez Autora prototypu modułu sensora wraz z elektroniką odczytu, zbudowanego jeszcze w „zabytkowej” technologii CMOS 350nm.

Począwszy od sekcji 1.4 „Development of the LumiCal readout system” możemy za Autorem śledzić detale rozwiązań tego prototypu, w tym jego części analogowej złożonej z przedwzmacniacza i układu formującego, a następnie części cyfrowej z ADC, z którego dane przetwarza znajdujące się na module

FPGA. Ten szczegółowy opis jest niezbędnym i bardzo dobrze spełniającym dwie role: przygotowuje do budowy wielo-płaszczyznowego modułu, który jest przedmiotem ważnych testów LumiCal relacjonowanych w rozdziale 2. Pozwoli także na pełniejsze zrozumienie zmian (i sukcesów) wprowadzanych przez Doktoranta w nowym projekcie modułów odczytu LumiCal w technologii 130nm CMOS.

W rozdziale drugim mamy do czynienia z zupełnie inną odłogą pracy. Jest to w gruncie rzeczy opis dosyć kompletnego eksperymentu. Celem jest „test of principle” koncepcji detektora świetlności spełniającego wymagania wielkiej dokładności tych pomiarów. Wiadomo, że błąd pomiaru świetlności propaguje się do błędów pomiarów wszystkich wielkości mających naturę przekroju czynnego. Od eksperymentów przy zderzaczach liniowych oczekuje się, że będą to eksperymenty wielkiej precyzji, tak więc wyzwanie dla pomiarów świetlności jest tu oczywiste. Ponadto, wśród wymagań bardzo ważne, bo rzutujące na budowę, granulację, liczbę kanałów etc są te, które dotyczą maksymalnej izolacji kaskad i ich identyfikacji.

Zestaw testowy nie był szczególnie imponujący: na jedenaście płyt absorbera wolframowego dysponowano zaledwie czterema kompletnymi modułami z krzemowymi sensorami i pierwotną wersją modułów odczytu (CMOS 350nm). Stanowisko pomiarowe na wiązce T9 przy PS w CERNie zostało ponadto wyposażone w dosyć prymitywny, 4-ro płaszczyznowy „tracker”, dwa liczniki Czerenkowa i parę płaszczyzn scyntylatorów pozwalających zestawić system wyzwalania. Prototypowe płyty LumiCal umieszczono w specjalnej konstrukcji mającej zapewnić stabilne pozycjonowanie płyt absorbera i modułów.

Lektura tego rozdziału zdumiewa w tej sytuacji bogactwem wyników, wartościowych pomiarów, wnikliwością analiz, które można rzeczywiście uznać za potwierdzenie koncepcji takiej konstrukcji kalorymetru elektromagnetycznego jako właściwego instrumentu pomiaru świetlności dla ILC. Nie waham się także bardzo wysoko ocenić wkładu J. Moronia we wszystkie etapy przygotowań, a następnie analiz zebranych materiałów. Mamy tu właściwie replikę wszystkich podstawowych etapów eksperymentu fizyki wysokich energii: zestawienie aparatury, systemu wyzwalania i akwizycji danych, wstępne pomiary, „nowoczesne” powiązanie rekonstrukcji trajektorii torów z precyzyjnym pozycjonowaniem detektorów, redukcja tła etc.

Jednakże poza taką „standardową” analizą wartość osobna tego rozdziału tkwi w szczegółowej analizie pracy analogowej i cyfrowej części modułów odczytu. Zaliczam tu z pewnością znakomitą analizę prowadzącą do - zwykle nietatwej - redukcji, czy stłumienia efektów sygnałów współbieżnych. Wydaje mi się, że jeszcze większym osiągnięciem jest opracowanie i wdrożenie niecodziennej metody odwiktywania kształtu sygnału wejściowego pozwalającej uniknąć złożoności obliczeniowej, która byłaby nieunikniona przy dopasowywaniu jakiegoś teoretycznego kształtu wejściowego impulsu na podstawie danych z próbkowania.

Cały ten 45 stronicowy rozdział 2, uzupełniony dalszymi 14-stronicowymi szczegółami w Dodatku A, pełni jeszcze jedną ważną rolę: jest niezbywalnym przygotowaniem do przyszłego projektu.

Rozdział trzeci poświęcony jest centralnemu tematowi pracy p. mgr inż. Jakuba Moronia: projektom nowych układów odczytu LumiCal (różniących się nieco wersjom) wykonanych w technologii CMOS 130nm. Technologiczny postęp wyrażany pobieżnie skracaniem kanału tranzystora prowadzi do pożądanej miniaturyzacji układów, ale przede wszystkim do znacznego zmniejszenia mocy, potęgowanego dodatkowo przez towarzyszące mniejszym wymiarom tranzystorów, mniejsze ich napięcia pracy. Jednak towarzyszy temu wyraźne 4 - 7 krotne zmniejszenie wzmocnienia, co trzeba kompensować układowo. Projekt nowej części analogowej elektroniki odczytu dla przyszłego LumiCal opracowany, wdrożony i przetestowany przez Doktoranta składa się, podobnie jak poprzedni CMOS350 nm, z układów wzmacniania i formowania impulsu. Są to jednak układy kompletnie przekonstruowane. Obliczenia modelowe i symulacje przepustowości (czy może raczej wykresów Bode) potwierdzają założenia projektowe. Ważniejsze, że wszystkie kluczowe parametry wykonanych 8-kanałowych układów części analogowej odpowiadają projektowi i symulacjom, a ich rozrzut technologiczny jest zarówno w ramach tolerancji, jak i stabilny w czasie.

Sądzę, że zdecydowaną kulminacją osiągnięć Jakuba Moronia przedstawianych w tej pracy doktorskiej jest niewątpliwie jego oryginalna konstrukcja przetworników analogowo cyfrowych. Autor przyjął dla swych 10-bitowych przetworników bardzo powszechnie stosowaną metodę konwersji zwaną metodą kolejnych przybliżeń (Successive Approximation metod). W tym jeszcze nic oryginalnego. Natomiast konstrukcja konwertera DAC, jak wiadomo niezbędnego w tej metodzie, zbudowanego na drabince kondensatorowej oraz zastosowanie sprytnego schematu przełączania DAC dla poszczególnych etapów aproksymacji pozwoliło na fenomenalne oszczędności energii przełączania. To nie jest koniec innowacji. Nie ma potrzeby przepisywania tu całych fragmentów rozprawy. Może więc wspomnę jeszcze kolejny element tego ADC: komparator. Tradycyjnie jest to jedyny element, ADC o stałym poborze mocy. Tu, J. Moroń zaprojektował komparator dynamiczny.

Pomijam pozytywne testy części cyfrowej, potwierdzające doskonałą liniowość kanałów ADC, czy bardzo dobre charakterystyki częstotliwościowe. Miarą sukcesu Doktoranta niech będzie porównanie mocy pobieranej przez kanał cyfrowego ASIC przy 40 MHz częstotliwości próbkowania sygnału, która dla nowego układu wynosi 0,74 mW, podczas, gdy w układzie poprzednim wynosiła 16 mW !

Uwagi krytyczne

Niepokoje się nieco moim brakiem uwag krytycznych. Wyjątkowo staranna redakcja rozprawy odbiera recenzentowi wszelkie okazje do wytknięcia literówek czy błędów składniowych. Angielski nie jest moim językiem rodzinnym więc ta pochwała nie jest bardzo znacząca, niemniej z recenzenckiego obowiązku przyznaję, że nie zauważyłem żadnego błędu językowego.

Może jedynym zauważonym brakiem w trakcie lektury rozprawy wydawało mi się prawie pełne opuszczenie dyskusji wpływu głębokości kalorymetru na jego energetyczną zdolność rozdzielczą. Przy dosyć przecież szczegółowej dyskusji

podstaw kalorymetrii, przy zrozumiałym podkreśleniu znaczenia rozdzielczości kątowej stwierdzenie takie, jak np.: „...and almost all the energy of the primary particle is absorbed in the detector ...” jest zbyt powierzchowne. Ogólnie, poza jedyną chyba wzmianką podającą mimochodem wartość 5% energetycznej zdolności rozdzielczej, nie ma w ogóle dyskusji tej jednej z podstawowych wielkości charakteryzującej jakość kalorymetru. Ta uwaga nie ma jednak żadnego istotnego wpływu na moją ocenę pracy i rozprawy.

Podsumowanie recenzji

Rozprawa doktorska i praca, którą przedstawił mgr inż. Jakub Moron opisuje zaprojektowane przez niego zbudowane i przetestowane 8-mio kanałowe układy scalone, analogowe i cyfrowe, przeznaczone dla odczytu krzemowych sensorów elektromagnetycznego kalorymetru próbkującego przeznaczonego do pomiarów świetlności przyszłego liniowego zderzacza e^+e^- . Projekt tych układów zawiera oryginalne autorskie rozwiązania, znacząco poprawiające zdolności pomiarowe kalorymetru. Ta centralna tematyka pracy wzbogacona jest o analizę danych zebranych przy testach prototypu LumCal. Potwierdzają one praktycznie koncepcje dużej międzynarodowej współpracy FCAL w zakresie pomiarów świetlności

- ☐ Oceniam rozprawę przedstawioną przez mgr inż. Jakuba Moronia jako bardzo
- ☐ dobrą. Stwierdzam z pełnym przekonaniem, że w formie i treści spełnia wszelkie
- ☐ wymagania stawiane pracom doktorskim. Wnoszę o dopuszczenie jej do
- ☐ publicznej obrony. Ponadto, wobec wyjątkowych wartości tej pracy stawiam
- ☐ wniosek o jej wyróżnienie, dołączając dla tego wniosku krótkie uzasadnienie.

