

Recenzja pracy doktorskiej mgr Juhi Raj
pt. „Test of T, P and CP Symmetry in the decay of ortho-Positronium
using the J-PET detector”

Jedną z najważniejszych własności praw opisujących zjawiska fizyczne są tzw. symetrie. Poddając prawa opisujące zjawiska fizyczne pewnym transformacjom możemy stwierdzić niezmienniczość tych praw względem dokonanej transformacji, czyli symetrię tych praw. Badania symetrii przyczyniły się do zrozumienia fundamentalnych oddziaływań i odgrywają zasadniczą rolę w fizyce cząstek. Z podstawowych założeń fundamentalnych wynika tzw. twierdzenie CPT: niezmienniczość względem trzech połączonych transformacji, sprzężenia ładunkowego C, odbicia przestrzennego P i odwrócenia czasu T jest zawsze spełniona. Przy odbiciach przestrzennych funkcja falowa nie ulega zmianie (parzystość dodatnia) lub też może zmieniać swój znak (parzystość ujemna). W procesach symetrycznych względem odbić przestrzennych całkowita parzystość układu nie powinna ulegać zmianie.

Od wielu lat prowadzone są intensywne badania eksperymentalne związane z testowaniem symetrii dla różnych oddziaływań i różnych układów fizycznych. Okazuje się, że Świat słabych oddziaływań nie jest zawsze symetryczny względem transformacji. Konsekwencją symetrii trzech kolejnych symetrii CPT w konkretnym przypadku jest oczekiwanie, że naruszenie symetrii względem jednej z nich, musi prowadzić równocześnie do niespełnienia niezmienniczości względem dwóch pozostałych transformacji. Niezmienniczość względem połączonych transformacji CP powinna potwierdzać symetrię względem odwrócenia czasu T.

Celem pracy doktorskiej Pani mgr Juhi Raj było przeprowadzenie analizy badania czułości testu symetrii T, P i CP w obszarze naładowanych leptonów, wykorzystując dodatkowo znakomite możliwości nowego detektora diagnostycznego *Jagiellonian Positron Emission Tomography* (J-PET), także w podstawowych badaniach symetrii rozpadu orto-Positronium.

Praca doktorska mgr Juhi Raj powstała w ramach Studiów Doktoranckich w Zakładzie Fizyki Jądrowej, Instytutu Fizyki im. Mariana Smoluchowskiego, na Wydziale Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej Uniwersytetu Jagiellońskiego w Krakowie, we współpracy dużego projektu J-PET, kierowanego przez prof. Pawła Moskała. Muszę tu na początku mojej opinii zaznaczyć, że idea możliwości badania dyskretnej symetrii w rozpadzie atomu Positronium, jako czystego układu leptonów z wykorzystaniem detektora J-PET została przedstawiona w pracy P. Moskal, et al. „Potential of the J-PET Detector for Studies of Discrete Symmetries in Decays of the Positronium Atom – A Purely Leptonic System” *Acta Physica Polonica B*, 47(2):509, 2016, którą doktorantka wymienia jako pierwszą w spisie literatury w swojej pracy doktorskiej. Pani mgr Juhi Raj, wykorzystując detektor J-PET przeprowadziła bardzo starannie badania testu symetrii transformacji odwrócenia czasu T, parzystości lewo-prawo P i CT w rozpadzie orto-Positronium, w czterech cyklach pomiarowych

w latach 2017-2020, zbierając z dużą statystyką dane eksperymentalne przez okres 122 dni, które poddała wnikliwej selekcji i zaawansowanej analizie teoretycznej.

Układ rozprawy doktorskiej Pani mgr Juhi Raj jest prawidłowy zarówno w części opisowej, gdzie zebrano w sposób wyczerpujący wiedzę teoretyczną związaną z dyskretnymi transformacjami symetrii oraz eksperymentalną, dotyczącą budowy układu detekcyjnego, pomiarów, jak i analizy wyników eksperymentalnych. Wszystkie informacje i stwierdzenia przedstawione są jasno i krótko z wykorzystaniem bardzo dobrze dobranych odnośników do publikacji. Praca doktorska mgr Juhi Raj jest napisana w j. angielskim, zawiera 61 stron, składa się ze wstępu, 6 zasadniczych rozdziałów wraz z podsumowaniem wyników oraz spisem literatury (96 pozycji).

Pierwszy rozdział (*Introduction*) związany jest z opisem fundamentalnej koncepcji niezmienniczości praw natury względem sprzężenia ładunkowego (C), parzystości (P) i odwrócenia czasu (T). W rozdziale tym autorka omawia i dyskutuje pierwsze przypadki niezachowania symetrii w słabych oddziaływaniach,

W rozdziale 2. (*Discrete Symmetry Transformation*) autorka przedstawiła teoretyczne podstawy symetrii P, C i T oraz zasady CPT i CP. Doktorantka przedstawiła również możliwości eksperymentalnych poszukiwań dyskretnych symetrii w związanym układzie ($e^+ e^-$) tzw. Positronium, które poprzez anihilację e^+ i e^- rozpadają się najczęściej na 2 lub 3 fotony γ , w zależności od jego stanu kwantowego. Positronium tzw. o-Ps, rozpada się poprzez nieparzystą liczbę fotonów γ , lub tzw. p-Ps rozpada się poprzez parzystą liczbę fotonów γ .

Positronium o-Ps jest czystym leptonowym stanem, którego własności opisane są poprzez elektrodynamikę kwantową i jego anihilacja poprzez 3 fotony γ , może być znakomitym testem dyskretnych symetrii, poprzez badanie korelacji pędu fotonów γ .

W ostatnim podrozdziale 2.5 „*P, T i CP symmetry measurement with J-PET*” autorka pracy jasno pokazuje różnice i zalety badania symetrii przy pomocy różnych systemów detekcji kwantów γ i badania różnych operatorów przedstawionych w Tabeli 2.1 jako: $\vec{S} \cdot \vec{k}_1$,

$\vec{S} \cdot (\vec{k}_1 \times \vec{k}_2)$, $(\vec{S} \cdot \vec{k}_1) \cdot (\vec{S} \cdot (\vec{k}_1 \times \vec{k}_2))$, gdzie $(\vec{k}_i)$ pędu fotonów, $(\vec{S})$ spin Positronium.

W prezentowanej pracy doktorskiej wykorzystano możliwość rejestrowania fotonu γ' , pochodzącego z Comptonowskiego rozpraszania pierwotnego anihilacyjnego fotonu γ w scyntylatorach tomografu J-PET. (Rys.2,1). Detektor J-PET pozwala na rejestrację fotonów pierwotnych γ oraz fotonów wtórnych γ' w rozpadzie $o\text{-Ps} \rightarrow 3\gamma + \gamma'$ i badać własności operatorów przedstawionych w Tabeli 2.2 jako: $\vec{\epsilon}_i \cdot \vec{k}_j$, gdzie $(\vec{\epsilon})$ liniowa polaryzacja pierwotnych fotonów anihilacji $\vec{\epsilon}_i = \vec{k}_i \times \vec{k}_i'$, $(\vec{k}_i$ i $\vec{k}_i'$ wektory pędu fotonów γ przed i po rozproszeniu w scyntylatorze detektora).

W rozdziale 3. „*Jagiellonian-Positron Emission Tomograph (J-PET)*” doktorantka przedstawiła szczegóły budowy detektora złożonego z 192 pasków plastikowych scyntylatorów (EJ-230), o rozmiarach $500 \times 19 \times 7 \text{ mm}^3$, rozmieszczonych kołowo pozwalających na pomiar polaryzacji pierwotnych fotonów anihilacyjnych powstałych w rozpadzie atomów Positronium w centrum detektora J-PET. Każdy koniec scyntylatora jest optycznie połączony z fotopowielaczem (PMT) rejestrującym światło powstałe w czasie oddziaływania anihilacyjnych kwantów γ w scyntylatorach plastikowych. W pomiarach badania symetrii wykorzystano system analizy do rekonstrukcji obrazowania tomograficznego oraz systemu do kalibracji czasowej impulsów światła w fotopowielaczach. Praktycznie wykorzystano cały układ detektora J-PET, łącznie z systemem akwizycji danych Data Acquisition System (DAQ) oraz odpowiednio zmodyfikowanym triggerem. System akwizycji danych został dobrze opisany i zademonstrowany na Rys 3.2. W rozdziale 3.3 autorka pracy opisała budowę i geometrię urządzenia ze źródłem pozytonów ^{22}Na (β^+) zamkniętym w środku, w polimerze XAD-4 (Rys. 3.3). Pozytrony emitowane ze źródła ^{22}Na ($^{22}\text{Na} \rightarrow ^{22}\text{Na}^* + e^+ + \nu_e$) oddziałują z elektronami

otoczki wykonanej z polimeru XAD-4 tworząc atom orto Positronium (o-Ps), które rozpada się na trzy fotony γ . Jednocześnie wzbudzone $^{22}\text{Na}^*$ emituje kwant γ o energii 1274 keV. Podczas pomiarów w tzw. „sorce holder” utrzymywano ciśnienie ok. 1.2 Pa i w czasie 122 dni zebrano ok. 100 TB surowych danych bez selekcji sygnałów. Cały układ eksperymentalny był testowany przy pomocy specjalnie stworzonego systemu symulacji J-PET-Geant4. Dane pomiarowe do testowania symetrii T, P i CP w sektorze naładowanych leptonów zostały uzyskane w czterech oddzielnych eksperymentach R1 i R2, przy aktywności $^{22}\text{Na}^*$ odpowiednio 5 MBq oraz R3 i R4 przy aktywności 1 MBq. Dla tych czterech eksperymentu w okresie odpowiednio 6, 30, 46 i 40 dni zebrano dane dla 47 597, 313 563, 251 257 i 157 277 przypadków, jako kandydatów anihilacji o-Ps z rozpadem na 3γ (Tabl .3.1),

W obszernym Rozdziale 4. „*Signal Selection and Experimental Conditions*” pokazano działania związane z kolejnymi selekcjami impulsów aby z dużej liczby przypadków wybrać tylko te pożądane do testów symetrii. Pierszą preselekcją było wybranie czterech najbliższych γ oddziaływań w oknie czasowym 200 ns. Schemat takiej sytuacji pokazano na rys. 4.1i 4.8. Zastosowanie okna czasowego zmniejszyło liczbę eksperymentalnych danych 10^3 razy. graniczono eksperymentalnie obszar aktywnych scyntylacji do obszaru $|Z_{\text{HIT}}| < 23\text{cm}$. (rys. 4.3) oraz ograniczono również eksperymentalnie udział tła przez redukcję promieniowania kosmicznego (rys. 4.4). Wszystkie redukcje i selekcje były sprawdzane przez znormalizowane wyniki simulacji Monte Carlo (MC). Końcowym etapem selekcji danych pomiarowych była korelacja fotonów anihilacyjnych z wtórnym fotonem γ' i rekonstrukcja kierunku jego pędu. Ostateczne wyniki badania nieparzystego operatora symetrii dla każdej z czterech serii pomiarowych łącznie ze statystyczną niepewnością oraz średnią ważoną z tych pomiarów $\langle O \rangle_{\text{J-PET}} = 0.0005 \pm 0.0007_{\text{Stat}}$, zestawiono w Tabeli 4.4 i wizualnie na rys. 4.18.

Rozdział 5. “*Systematic Uncertainties*” zawiera obszerną dyskusję systematycznych niepewności w kolejnych kryteriach zastosowanych selekcji w analizie danych pomiarowych na wartości operatora dyskretnej symetrii. Ostatecznie doktorantka stwierdza, że systematyczny błąd ze względu na osiągniętą wysoką statystykę nie wpływa na istotność ostatecznego wyniku.

W ostatnim Rozdziale 6. “*Summary and Discussions*” zestawiono znakomity wynik eksperymentu J-PET z wynikiem pracy z Uniwersytetu w Tokio przez T. Yamazaki et al. z roku 2010. Wyniki uzyskano dla operatorów zestawionych w Tablicy 6.1. zestawiono wraz z błędami na rys. 6.1. Wynik T. Yamazaki et al. uzyskano przy statystyce 7.3×10^6 , a wynik eksperymentu J-PET uzyskano przy statystyce 24×10^6 .

W pracy doktorskiej nie znalazłem błędów i pomyłek. Poza nielicznymi stwierdzeniami żargonowymi nie znalazłem istotnych błędów redakcyjnych. Badania zostały przeprowadzone prawidłowo, doktorantka wykazała się dużą wiedzą eksperymentalną oraz dużą samodzielnością i starannością w opisie przeprowadzonego eksperymentu. Dużo miejsca doktorantka poświęciła zaawansowanej analizie danych pomiarowych i obszernej analizie selekcji zdarzeń oraz możliwych źródeł błędów systematycznych i błędów statystycznych.

Muszę dodać, że doktorantka mgr Juhi Raj od kilku lat pracuje w grupie Prof. P. Moskala i zajmuje się tematyką badania dyskretnej symetrii w rozpadzie tzw. atomu *Positronium* (czystego systemu leptonowego) z wykorzystaniem detektora scyntylacyjnego Tomografu J-PET. Jest współautorem w 11-tu publikacjach, w tym jednej znakomitej publikacji w *Nature Communications*, 12(1), 2021. W pięciu publikacjach jest wymieniona jako pierwszy autor oraz wygłosiła kilka referatów na specjalistycznych konferencjach. Wyniki pracy doktorskiej mgr Juhi Raj są już częściowo opublikowane i cieszą się dużym uznaniem.

Podsumowując stwierdzam, że rozprawę doktorską oceniam bardzo wysoko. Zagadnienia, którymi zajmuje się doktorantka dotyczą bardzo interesującej, potrzebnej tematyki badawczej testowania transformacji symetrii, uprawianej jedynie w renomowanych laboratoriach fizyki jądrowej i cząstek.

Uważam, że cel pracy został osiągnięty, wyniki badań są znakomicie przedstawione i przedyskutowane. Autorka uzyskała bogaty i rzetelny materiał eksperymentalny w wyniku którego otrzymała wynik symetrii z istotnością 7×10^{-4} .

Stwierdzam że, praca doktorska spełnia wymogi ustawowe i stawiam wniosek o dopuszczenie Pani mgr Juhi Raj do dalszych etapów przewodu doktorskiego.



Wiktor Zipper