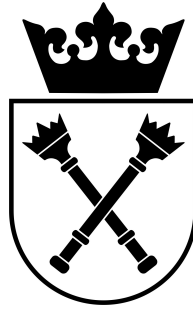


DOCTORAL DISSERTATION  
PREPARED IN THE INSTITUTE OF PHYSICS  
OF THE JAGIELLONIAN UNIVERSITY  
SUBMITTED TO THE FACULTY OF PHYSICS,  
ASTRONOMY AND APPLIED COMPUTER SCIENCE  
OF THE JAGIELLONIAN UNIVERSITY



# Hyperons @ HADES

Supervised by:  
prof. dr hab. Piotr Salabura

Cracow, 2020



Wydział Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej  
Uniwersytet Jagielloński

## Oświadczenie

Ja niżej podpisany Krzysztof Nowakowski (nr indeksu: 1078309), doktorant Wydziału Fizyki Astronomii i Informatyki Stosowanej Uniwersytetu Jagiellońskiego, oświadczam, że przedłożona przeze mnie rozprawa doktorska pt. „Hyperons by HADES” jest oryginalna i przedstawia wyniki badań wykonanych przeze mnie osobiście, pod kierunkiem prof. dr. hab. Piotra Salabury. Pracę napisałem samodzielnie.

Oświadczam, że moja rozprawa doktorska została opracowana zgodnie z Ustawą o prawie autorskim i prawach pokrewnych z dnia 4 lutego 1994 r. (Dziennik Ustaw 1994 nr 24 poz. 83 wraz z późniejszymi zmianami).

Jestem świadom, że niezgodność niniejszego oświadczenia z prawdą ujawniona w dowolnym czasie, niezależnie od skutków prawnych wynikających z ww. ustawy, może spowodować unieważnienie stopnia nabytego na podstawie tej rozprawy.

Kraków, dnia .....

.....



*Jakis mądry cytat*

Autor „Zrodlo”

*Ten sam cytat po angielsku*

Autor, “Zrodlo”  
Translation by Tlumacz



# *Abstract*

This work concerned two experimental searches for the violation of fundamental discrete symmetries in physical systems originating from electron-positron interactions.

The first study was a direct test of the symmetry under reversal in time in transitions of neutral K mesons, performed with quantum-entangled neutral kaon pairs produced in the  $e^+e^- \rightarrow \phi \rightarrow$  process. Data collected by the KLOE experiment operating at the DAΦNE collider in 2004–2005 were studied to select events of the  $\rightarrow \pi e \nu$   $3\pi^0$  and  $\rightarrow \pi^+\pi^-\pi e \nu$  processes and compare their rates. For the  $\rightarrow 3\pi^0$  decay involving only neutral particles, a dedicated reconstruction technique based on trilateration was devised. Rates of each process identified by two time-ordered neutral kaon decays, determined as a function of a difference between kaon decays, were used to measure the asymptotic level of two T-violation sensitive ratios of double kaon decay rates, yielding the values of  $R_2 = 1.020 \pm 0.017_{stat} \pm 0.035_{syst}$  and  $R_4 = 0.990 \pm 0.017_{stat} \pm 0.039_{syst}$ . In agreement with expectation based on the size of the dataset used, these results do not reach the sensitivity needed to probe T violation. However, this measurement proves that the required reconstruction and analysis of the data is feasible and prospects exist for a statistically significant test of the T symmetry with a larger dataset collected by the KLOE-2 experiment is certain systematic effects are eliminated.

The second part of this work comprised a demonstration of the feasibility of using the J-PET detector to search for non-vanishing angular correlations in the decays of ortho-positronium atoms, the lightest purely leptonic systems decaying into photons. The trilateration based reconstruction method prepared for  $\rightarrow 3\pi^0$  decay at KLOE was adapted to the ortho-positronium annihilations into three photons. Its performance was validated using Monte Carlo simulations proving it may be applied to determination of spin direction of positrons forming the positronium atoms, thus allowing for control of their polarization in the experiment. Moreover, the feasibility of identification of  $3\gamma$  events as well as reconstruction of their origin points was demonstrated using a test measurement performed with the J-PET detector.





## Streszczenie

Niniejsza praca dotyczyła dwóch eksperymentów poszukujących łamania podstawowych symetrii dyskretnych w układach powstających w oddziaływaniach elektron-pozyton.

Pierwszym z rozważanych eksperymentów był bezpośredni test symetrii względem odwrócenia w czasie w przejściach w układzie neutralnych mezonów K, przy pomocy kwantowo splątanych par neutralnych kaonów wytworzonych w procesie  $e^+e^- \rightarrow \phi \rightarrow$ . Dane zebrane przez eksperyment KLOE prowadzący pomiary na zderzaczu DAΦNE w latach 2004–2005 zostały przeanalizowane w celu identyfikacji zdarzeń procesów  $\rightarrow \pi e \nu$   $3\pi^0$  i  $\rightarrow \pi^+\pi^- \pi e \nu$  oraz w celu porównania ich krotności. Na potrzeby identyfikacji zawierającego wyłącznie neutralne cząstki rozpadu  $\rightarrow 3\pi^0$  została opracowana dedykowana technika rekonstrukcji oparta na trilateracji. Krotności obserwacji każdego z badanych procesów, wyrażone w funkcji różnicy czasów własnych rozpadów obydwu kaonów, zostały wykorzystane do wyznaczenia asymptotycznego poziomu dwóch stosunków krotności podwójnych rozpadów kaonów neutralnych, wrażliwych na efekty łamania symetrii T. Otrzymane wartości  $R_2 = 1.020 \pm 0.017_{stat} \pm 0.035_{syst}$  oraz  $R_4 = 0.990 \pm 0.017_{stat} \pm 0.039_{syst}$ , zgodnie z przewidywaniami na podstawie rozmiaru użytej próbki danych, nie osiągają dokładności wymaganej do pomiaru stopnia łamania symetrii T. Przeprowadzony pomiar dowodzi jednak, że niezbędna rekonstrukcja oraz analiza danych jest wykonalna i istnieje możliwość przeprowadzenia znaczącego statystycznie testu symetrii T przy użyciu większego zbioru danych zebranego przez eksperyment KLOE-2, pod warunkiem usunięcia niektórych źródeł niepewności systematycznej.

Druga część niniejszej pracy polegała na wykazaniu możliwości użycia detektora J-PET do poszukiwania niezerowych korelacji kątowych w rozpadach atomów orto-pozytonium, najlżejszych całkowicie leptonowych układów ulegających rozpadowi na fotony. Oparta na trilateracji metoda rekonstrukcji przygotowana dla rozpadów  $\rightarrow 3\pi^0$  została zaadaptowana do przypadku anihilacji atomów orto-pozytonium na trzy fotony. Weryfikacja jej skuteczności przy pomocy symulacji Monte Carlo wykazała, że może ona zostać wykorzystana do wyznaczenia kierunku spinu pozytonów tworzących orto-pozytonium, tym samym pozwalając na kontrolę ich polaryzacji w eksperymencie. Możliwość identyfikacji anihilacji na trzy fotony oraz rekonstrukcji punktów anihilacji została ponadto wykazana przy pomocy próbnego pomiaru przeprowadzonego przy pomocy detektora J-PET.



# Contents

<b>Abstract</b>	<b>vii</b>
<b>1 Neural networks</b>	<b>1</b>
1.1 History of an artificial neural networks . . . . .	1
1.2 Experimental searches for T violation . . . . .	1
1.3 The system of neutral K mesons . . . . .	1
1.4 Test of T symmetry in oscillations of neutral kaons . . . . .	1
1.5 Tests of T symmetry in neutral meson transitions between flavour and CP eigenstates . . . . .	1
<b>Appendices</b>	<b>3</b>
A The data-driven approach for a neural network training	3
<b>Acknowledgements</b>	<b>5</b>
<b>Bibliography</b>	<b>7</b>



# Chapter 1

## Neural networks

ka

1.1 History of an artificial neural networks

1.2 Experimental searches for T violation

1.3 The system of neutral K mesons

1.4 Test of T symmetry in oscillations of neutral kaons

1.5 Tests of T symmetry in neutral meson transitions between flavour and CP eigenstates



## Appendix A

# The data-driven approach for a neural network training

The original paper by Metodiev, Nachman and Thaler [?] shows the idea of a data-driven analysis in details. Here I want to introduce main concepts, necessary to understand how the proposed method helps in the above analysis.





# Acknowledgements

*During the years of my doctoral studies I had the luck to meet a number of great people, without whom this Thesis would never have been created. I would like to thank every one of them for their support, inspiration and friendship.*

*I would like to express my deepest gratitude to prof. Paweł Moskal for the opportunity to work in his research group, for his supervision over the preparation of this Thesis, and — above all — for his contagious passion for science.*

*The second person without whom this work would not be possible is dr Eryk Czerwiński. I am greatly indebted to Eryk for his guidance in all my research for the past six years and, perhaps even more importantly, for introducing me to virtually all aspects of academic life.*

*I would like to extend my special thanks to prof. Antonio Di Domenico, for giving me the possibility to work on the fascinating subject of direct symmetry tests with neutral kaons at KLOE and KLOE-2, and for his careful supervision on my analysis.*

*I am grateful to prof. Bogusław Kamys for the opportunity to work in the Department of Nuclear Physics of the Jagiellonian University and to prof. Lucjan Jarczyk for all his comments on my work, always motivating me to improve my research and presentation skills.*

*The time of my work in the Kraków subgroup of KLOE was exceptional thanks my Colleagues Daria Kisielewska, Krzysztof Kacprzak, dr Wojciech Krzemień and dr Michał Silarski. Thank you for the great and inspiring atmosphere and countless help you gave me during these years.*

*I would like to thank prof. Filippo Ceradini, dr Erika De Lucia, dr Antonio De Santis, dr Paolo Gauzzi and dr Enrico Graziani for sharing their expertise in working with the KLOE data and for their suggestions which helped me overcome several dead ends in my work. I am also indebted to prof. Wojciech Wiślicki for his helpful advice on statistics.*

*Moreover, my frequent visits in the Laboratories of Frascati would not be the same without the great people I met there and their hospitality, especially dr Elena Perez del Rio, dr Marcin Berłowski, dr Paolo Fermani, dr Gianfranco Morello and all my Colleagues from KLOE.*

*No less do I owe to my Colleagues from J-PET with whom I have worked on the second part of this Thesis. I would like to especially thank dr Magdalena Skurzok, Monika Pawlik-Niedźwiecka, dr Grzegorz Korcyl, Szymon Niedźwiecki and dr Sushil Sharma for providing me with building blocks for the calibration and analysis of J-PET data based on their great efforts.*

*Great thanks also to my officemate Krzysztof Nowakowski, for motivating me when it was time to write, and for saving my sanity with conversations about everything but science when it was time to take a break.*

*As so many others things in my life, this Thesis would never come to life without the continuous support of my wife Kasia, whom I would like to thank for her patience and unwavering belief that I will finish writing some day. I also owe great thanks to my son Andrzej, for bringing a completely new quality to my life in my last PhD student years, and for his unstoppable will to help me in writing of this text, even if by typing randomly on daddy's keyboard.*

*Na koniec dziękuję Wam, Mamo i Tato, za wiarę we mnie i za całą pomoc w dotarciu do tego momentu.*

*This work was supported by the Polish National Science Centre through Projects No. 2014/14/E/ST2/00262 and 2016/21/N/ST2/01727.*

# Bibliography



# Bibliography