

Autoreferat

1 Sierpnia 2017

1 Curriculum Vitae

- **Dane osobowe:**

- Imię i nazwisko: Marcin Stolarski
- Data urodzenia: 22 12·1978 r.
- Miejsce urodzenia: Wołomin, Polska
- Narodowość: Polska
- Miejsce pracy:
Laboratorio de Instrumentacao e Fisica Experimental de Particulas
1600-078 Lisboa, Portugal, Av. Prof. Gamma Pinto 2
Tel: (+351) 217 973 880
Fax: (+351) 217 934 631
Email: mstolars@cern.ch

- **Edukacja**

- wrzesień 1993 - czerwiec 1997,
XLVI Liceum Ogólnokształcące im. Stefana Czarneckiego, Warszawa; matura z wyróżnieniem.
- październik 1997 - czerwiec 2002,
studia magisterskie na Uniwersytecie Warszawskim. Stopień magistra nauk fizycznych z wyróżnieniem. Tytuł pracy magisterskiej "Symulacje wielociałowych rozpadów mezonów D w doświadczeniu COMPASS w CERN"; opiekun prof. dr hab. Barbara Badełek.

- W15
- październik 2002 - czerwiec 2006,
studia doktoranckie w Zakładzie Cząstek i Oddziaływań Fundamentalnych, Instytutu Fizyki Doświadczalnej Uniwersytetu Warszawskiego. Stopień doktora nauk fizycznych. Tytuł pracy doktorskiej “Spin structure of the nucleon in low x and Q^2 range in COMPASS experiment at CERN”; opiekun prof. dr hab. Barbara Badełek (praca napisana w języku angielskim).

- **Zatrudnienie**

- czerwiec 2006 - grudzień 2006
umowa o dzieło, Wydział Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego
praca w CERN w doświadczeniu COMPASS
- luty 2007- wrzesień 2007
Post-doc, Instytut Fizyki Uniwersytetu we Freiburgu, Niemcy
praca w CERN w doświadczeniu COMPASS
- październik 2007- marzec 2010
Post-doc, CERN, (the European Organisation for Nuclear Research), Szwajcaria
- kwiecień 2010 - marzec 2016
Post-doc, na grantie z FCT, tj. portugalskiej fundacji na rzecz nauki i technologii;
praca w LIP (Laboratorio de Instrumentacao e Fisica Experimental de Particulas),
tj. głównym portugalskim centrum fizyki wysokich energii.
- kwiecień 2016 - obecnie, *Post-doc*, na grantie z LIP.

2 Osiągnięcia naukowe

- Od początku mojej kariery naukowej, moim głównym tematem zainteresowania jest spinowa struktura nukleonu. Większość mojej pracy naukowej była wykonana we współpracy COMPASS w CERN, przy eksperymencie Deep Inelastic Scattering. Poza doświadczeniami w zderzaczu RHIC, COMPASS jest obecnie jedynym miejscem, gdzie bada się spinową strukturę nukleonu w obszarze wysokich energii. Interesuję się także statystyką i jej aplikacją w fizyce, jak również nowymi metodami analizy danych.
- Jestem autorem jednej publikacji i współautorem 51 publikacji, opublikowanych w międzynarodowych czasopismach, tzw. peer review. Łącznie publikacje te były cytowane ponad 1900 razy (według bazy Web of Science). Lista 10 najważniejszych publikacji jest przedstawiona w sekcji 2.1 .
- Prezentowałem referaty na 15 międzynarodowych konferencjach związanych z fizyką wysokich energii, z czego na 5 z nich zostałem zaproszony przez organizatorów. Jestem także autorem 10 publikacji konferencyjnych.
- Jestem współautorem 12 not wewnętrznych współpracy COMPASS i autorem ponad 60 wystąpień na wewnętrznych zebraniach współpracy.

- We współpracy COMPASS, byłem odpowiedzialny za zarówno aspekty techniczne jak i dotyczące analizy danych, tj. między innymi:
 - W latach 2003-2004 byłem odpowiedzialny za alignment detektora COMPASS; w latach 2006-2007 byłem współ odpowiedzialny z utrzymanie tzw. elektroniki front-end, a także w latach 2008-2009 za utrzymanie zespołu detektorów typu dryfowego;
 - W 2007 r. byłem zastępcą koordynatora analizy doświadczenia COMPASS;
 - W 2009 r. zostałem najmłodszym koordynatorem analizy doświadczenia COMPASS; kierowałem analizą danych całej współpracy COMPASS podczas jednorocznego mandatu.
 - W 2017 r. zakończyłem drugą dwuletnią kadencję członka komitetu publikacji doświadczenia COMPASS tj., siedmioosobowego grona odpowiedzialnego za ocenę wszystkich naukowych materiałów (publikacji, publikacji konferencyjnych, slajdów) związanych z doświadczeniem COMPASS.

Wiecej informacji odnośnie mojej pracy w doświadczeniu COMPASS, znajduje się w sekcji 2.2 .

- Od czerwca 2017 r. jestem także członkiem współpracy ATLAS w CERN.
- W latach 2013-2016 byłem promotorem pomocniczym mgra Adama Szabelskiego, doktoranta w Narodowym Centrum Badań Jądrowych w Świerku. Praca doktorska pt.: “The gluon contribution to the Sivers effect measurement at the COMPASS experiment”, dotyczyła pomiaru asymetrii typu Siversa dla gluonów w doświadczeniu COMPASS.
- Trzy razy byłem członkiem lokalnego komitetu organizacyjnego konferencji “International Workshop of Hadron Structure and Spectroscopy”, oraz współorganizatorem sesji spinowej na “XXI International Workshop on Deep-Inelastic Scattering and Related Subjects.”, Marsylia 2013.

2.1 Lista 10 najważniejszych publikacji

- COMPASS Collaboration, “*Leading-order determination of the gluon polarisation from semi-inclusive deep inelastic scattering data*” Eur. Phys. J. C 77 (2017) 209 (4 cytacje)

Najbardziej precyzyjny wynik pomiaru polaryzacji gluonów w nukleonie w wiodącym rzędzie rachunku zaburzeń chromodynamiki kwantowej. Odegrałem wiodącą rolę w tym projekcie i jestem autorem korespondencyjnym tej publikacji. Detale odnośnie samej analizy jak i użytej metody zostały zebrane w monografii “*Direct Measurement of the Gluon Polarisation in the Nucleon Using the All- p_T Method*”

MS

at the COMPASS Experiment at CERN” opublikowanej przez Wydawnictwa Uniwersytetu Warszawskiego w Lipcu 2017.

- COMPASS Collaboration, “*Leading order determination of the gluon polarisation from DIS events with high- p_T hadron pairs*” Phys. Lett. B 718 (2013) 922 (26 cytacji)

Publikacja zawiera jedne z najbardziej precyzyjnych wyników pomiaru polaryzacji gluonów w nukleonie w wiodącym rzędzie rachunku zaburzeń chromodynamiki kwantowej. Po raz pierwszy polaryzacja gluonów została zmierzona w trzech przedziałach ułamka momentu nukleonu niesionego przez gluon. Odegrałem wiodącą rolę w tym projekcie i rozwinąłem metodę użycia sieci neuronowych w analizie i kierowałem grupą wykonującą analizę, w której było m.in. dwóch doktorantów.

- COMPASS Collaboration, “*Leading and Next-to-Leading Order Gluon Polarisation in the Nucleon and Longitudinal Double Spin Asymmetries from Open Charm Muoproduction*”, Phys. Rev. D 87 (2013) 052018 (24 cytacje)

Publikacja zawiera pierwszy bezpośredni światowy pomiar polaryzacji gluonów w nukleonie w drugim rzędzie rachunku zaburzeń chromodynamiki kwantowej (NLO QCD). Byłem współautorem metody użycia sieci neuronowych w analizie i wykonałem studia systematyki.

- M. Stolarski, Comment on “*Reevaluation of the parton distribution of strange quarks in the nucleon*”, Phys. Rev. D 92, (2015) 098101. (3 cytacje)

Wkład kwarków dziwnych do struktury nukleonu nie jest znany precyzyjnie. Jego wartość jest bardzo interesująca, co więcej w sektorze spinowym mamy do czynienia z tzw. “strange quark polarisation puzzle”, tj. dwie metody pomiaru polaryzacji kwarków dziwnych w nukleonie, dają sprzeczne rezultaty.

Byłem bardzo zainteresowany wynikiem współpracy HERMES, opublikowanej w PLB 446, 666, w której autorzy twierdzą, że ich rezultaty należy interpretować w taki sposób, że gęstość prawdopodobieństwa znalezienia kwarku dziwnego o danym ułamku pędu nukleonu niesionego przez ten kwark (tzw. zmienna x Bjorkena), ma kształt znacznie odbiegający od nie dziwnego morza kwarków lekkich. Ten rezultat został następnie potwierdzony w najnowszej publikacji HERMES Phys. Rev. D 89 (2014) 097101.

Po krytycznej analizie powyższych publikacji, zdecydowałem się napisać do nich komentarz. Zawiera on kilka przykładów dlaczego, w mojej opinii, konkluzje zaprezentowane w pracy Phys. Rev. D 89 (2014) 097101 są przedwczesne. Należy dodać, że ostateczne wyniki analizy współpracy COMPASS, Phys. Lett. B 764 (2017) 1 i Phys. Lett. B 767 (2017) 133 zaprzeczają wynikom HERMES.

- COMPASS Collaboration, “*Multiplicities of charged kaons from deep inelastic muon scattering off an isoscalar target*”, Phys. Lett. B 767 (2017) 133

Praca przedstawia precyzyjne pomiary krotności kaonów otrzymane w półinkluzywnej analizie przypadków głęboko nieelastycznego rozpraszania mionów na tarczy deuteronowej. Pomiary te są istotne dla wyznaczenia funkcji fragmentacji

kwarków. Otrzymane pomiary są niezgodne z wynikami doświadczenia HERMES.

- COMPASS Collaboration, “*Spin asymmetry A_1^d and the spin-dependent structure function g_1^d of the deuteron at low values of x and Q^2* ”, Phys. Lett. B 647 (2007) 330 (28 cytacji)

Bazą tej publikacji była moja praca doktorska. Otrzymane przeze mnie rezultaty spinowej funkcji struktury g_1 w obszarze małego x -Bjorkena i małego przekazu czteropędu Q^2 , są 10–20 razy bardziej precyzyjne w porównaniu do poprzednich pomiarów.

- COMPASS Collaboration, “*Quark Helicity Distributions from Longitudinal Spin Asymmetries in Muon-Proton and Muon-Deuteron Scattering*” Phys. Lett. B 693 (2010) 227 (94 cytacje);

COMPASS Collaboration, “*The spin-dependent structure function of the proton g_1^p and a Test of the Bjorken Sum Rule*” Phys. Lett. B 690 (2010) 466 (82 cytacje);

COMPASS Collaboration, “*The Deuteron Spin-dependent Structure Function g_1^d and its First Moment*”, Phys. Lett. B 647 (2007) 8 (200 cytacji)

Są to istotne publikacje dotyczące polaryzacji kwarków w nukleonie. Jestem członkiem grupy, która wykonała te analizy.

- COMPASS Collaboration, “*Measurement of the Collins and Sivers asymmetries on transversely polarised protons*”, Phys. Lett. B 692 (2010) 240 (120 cytacji);

Są to kluczowe pomiary współpracy COMPASS odnośnie poprzecznych efektów spinowych. Byłem promotorem pomocniczym doktoranta który wyznaczał asymetrię typu Siversa dla gluonów. Praca doktorska została obroniona w czerwcu 2016, publikacja została zaakceptowana w Phys. Lett. B.

2.2 Osiągnięcia naukowe w kontekście mojego uczestnictwa we współpracy COMPASS

Jestem członkiem współpracy COMPASS od 2001 r. Obecnie współpraca liczy około 200 fizyków z 12 krajów. COMPASS jest doświadczeniem fizyki wysokich energii przy akceleratorze Super Proton Synchrotron w CERN, Szwajcarii. Celem tego eksperymentu jest studiowanie (spinowej) struktury nukleonu i spektroskopii hadronów. W doświadczeniu użyte są wysokiej intensywności wiązki mionów i hadronów.

- W latach 2001-2002 używając generatora Monte-Carlo (MC) analizowałem wielociałowe rozpady mezonów D, w celu oszacowania ich użyteczności do pomiaru polaryzacji gluonów w nukleonie. Wyniki tych analiz wskazywały, że jeden z kanałów mogłoby zwiększyć tzw. “figure of merit” o około 10%. W latach późniejszych ten kanał rozpadu został włączony do analizy w doktoracie C. Franco (2011) z LIP, i w publikacji współpracy COMPASS Phys. Rev. D 87 (2013) 052018.

- W latach 2003-2004 byłem odpowiedzialny za trudne zadanie alignmentu spektrometru COMPASS. Aby wypełnić to zadanie, spędziłem łącznie 14 miesięcy w CERN. Zostałem ekspertem w tej dziedzinie i w późniejszych latach kilkakrotnie doradzałem młodszym kolegom odpowiedzialnym za alignment.
- W latach 2004-2006 analizowałem spinową strukturę deuteronu w obszarze małego x i małego Q^2 . Wyznaczone spinowe podłużne asymetrie na tarczy deuteronowej są zgodne z zerem. Wyniki zostały przedstawione w moim doktoracie, a także opublikowane w Phys. Lett. B. 647 (2007) 330. Obecnie analogiczna analiza jest wykonywana na tarczy protonowej i jest tematem doktoratu A.S. Nunes z LIP. Nieoficjalnie opiekuję się tą analizą. W przeciwieństwie do rezultatów otrzymanych dla tarczy deuteronowej, zmierzono dodatnią wartość asymetrii dla tarczy protonowej. Otrzymane wyniki były kilkakrotnie prezentowane na konferencjach międzynarodowych, publikacja jest w przygotowaniu.
- Po skończeniu doktoratu, następne 4 lata spędziłem w CERN pracując bezpośrednio przy eksperymencie COMPASS. W latach 2006-2007 byłem współodpowiedzialny za nadzorowanie i utrzymanie tzw. *front-end electronic readout*. W tym samym czasie w trakcie zbierania danych, wykonywałem także studia odnośnie jakości tychże danych. Studia te okazały się istotne ponieważ, min. zidentyfikowałem problem straty 50% przypadków w rejonie kinematycznym istotnym dla kilku analiz. Strata związana była z modyfikacjami trygera doświadczenia COMPASS, a usunięcie problemu było możliwe dla danych zbieranych w roku 2007 i późniejszych. Także w roku 2007 byłem zaangażowany we wstępne symulacje MC dla programu związanego z pomiarem *Generalised Parton Distribution*. W tym samym roku zostałem zastępcą koordynatora analizy doświadczenia COMPASS.
- W latach 2008-2009 byłem fellowem w CERN, odpowiedzialnym min. za utrzymanie systemu komór dryfowych w spektrometrze małych kątów. Ta praca wraz z poprzednią przy *front-end electronic readout*, dała mi pewną wiedzę odnośnie technicznych aspektów działania doświadczenia COMPASS.
- W tym samym czasie dołączyłem do grupy analizy zajmującej się pomiarem polaryzacji gluonów w nukleonie. Studia tej polaryzacji stały się moim głównym zajęciem badawczym na następne lata. W tym kontekście wprowadziłem zmodyfikowaną metodę użycia sieci neuronowych w analizie tego typu. Metoda ta pozwoliła na zwiększanie precyzji pomiaru, dzięki tak zwanemu ważeniu przypadków-po-przypadku. Dzięki temu w szczególności, niepewność statystyczna została zmniejszona o czynnik 3, w porównaniu do metody używanej poprzednio. Wyniki tej analizy zostały opublikowane w Phys Lett. B 718 (2013), 922, a także powstały także dwie prace doktorskie na ten temat.
W latach późniejszych wymyśliłem nowatorską metodę wyznaczenia polaryzacji gluonów w nukleonie, wykorzystując poprzednią optymalizację użycia sieci neuronowych w tego typu analizie. W nowej metodzie, zarówno niepewność statystyczna i systematyczna zostały zredukowane o czynnik większy niż 1.5. Głównym wynikiem tych studiów jest pomiar polaryzacji gluonów, który sugeruje

- dodatną polaryzację gluonów w nukleonie. Ta obserwacja pokrywa się z ostatnimi wynikami doświadczeń przeprowadzonych przy akceleratorze RHIC w USA.
- Rezultaty mojej pracy odnośnie polaryzacji gluonów w nukleonie, są tematem monografii **“Direct Measurement of the Gluon Polarisation in the Nucleon Using the All- p_T Method at the COMPASS Experiment at CERN”**, która jest podstawą do mojej habilitacji, oraz będzie pomocna dla studentów, którzy chcieliby przeprowadzić tego typu analizę w COMPASS lub innym doświadczeniu, np. przy przyszłym planowanym zdarzaczu EIC (Electron Ion Collider) w USA.
 - Metoda rozwinięta dla pomiarów polaryzacji gluonów w nukleonie, została także użyta przy studiach efektu Siversa dla gluonów przez doktoranta A. Szabelskiego z Narodowego Centrum Badań Jądrowych, którego byłem promotorem pomocniczym.
 - Na początku 2009 zostałem najmłodszym koordynatorem analizy doświadczenia COMPASS na jednoroczny mandat, jednomyślnie poparty przez COMPASS *group leader board*, tj. ciało zarządzające współpracą COMPASS. Grupa analizy obejmowała około 20 studentów i doktorantów i podobną liczbę bardziej doświadczonych naukowców zoorganizowanych w kilku podgrupach tematycznych. W czasie mojej koordynacji zakończono pięć prac magisterskich i pięć prac doktorskich.
 - W 2010 zacząłem staż podoktorski w LIP w Lizbonie. Poza studiami dotyczącymi polaryzacji gluonów, zajmowałem się również pomiarem krotności hadronów w reakcjach głęboko nieelastycznego rozpraszania mionów na nukleonach. Te pomiary są bardzo istotnym wkładem do wyznaczenia tak zwanych funkcji fragmentacji. Dla pionów, pomiary doświadczenia COMPASS zgadzają się z wynikami poprzednich eksperymentów. Jednakże w przypadku kaonów, zaobserwowane zostały znaczne różnice między oczekiwaniami bazującymi na istniejących funkcjach fragmentacji a pomiarem COMPASS. Dodatkowo, zarówno dla pionów jak i kaonów, wyniki doświadczenia COMPASS w znacznym stopniu zaprzeczają wynikom doświadczenia HERMES. Należy zwrócić uwagę, że pomiar HERMES odbywa się w innym obszarze kinematycznym, niż pomiar COMPASS. Sprzeczność między wstępnymi wynikami COMPASS i opublikowanymi wynikami HERMES, była zaczynkiem moich własnych analiz funkcji fragmentacji oraz napisania komentarza, odnośnie błędnej, według mnie, interpretacji wyników HERMES otrzymanych przez tę współpracę. Komentarz został opublikowany w PRD 92 (2015) 098101.
 - Uczestniczyłem w prawie wszystkich (10 z 11) pracach związanych ze zbieraniem danych przez doświadczenie COMPASS. Sześciokrotnie byłem tzw. koordynatorem tygodnia - osobą, która w CERN w czasie jednego tygodnia koordynuje pracami przy detektorze i przy zbieraniu danych.
 - W latach 2013-2017 przez dwie dwuletnie kadencje, byłem członkiem komitetu “pubcom”, siedmioosobowego ciała współpracy zajmującego się, min. ostateczną

UAS

oceną prac przed ich wysłaniem do publikacji, recenzjami materiałów konferencyjnych związanych z wynikami COMPASS takimi jak: abstrakty, slajdy, publikacje i publikacje konferencyjne.

3 Osiągnięcie naukowe

Osiągnięcie naukowe, które jest zaprezentowane jako podstawa do habilitacji to monografia:

**Direct Measurement
of the Gluon Polarisation in the Nucleon
Using the All- p_T Method
at the COMPASS Experiment at CERN**

opublikowana przez Wydawnictwa Uniwersytetu Warszawskiego w lipcu 2017.

3.1 Wstęp

Obecne zrozumienie wewnętrznej struktury nukleonu zawdzięczamy pionierskim pracom M. Gell-Manna [1] i G. Zweiga [2] z 1964. Autorzy zasugerowali, że nukleon jest zbudowany z 3 kwarków, podczas gdy mezony są zbudowane z pary kwark antykwark. Kwarki miały być punktowymi fermionami o spinie $1/2\hbar$ i ułamkowym ładunku elektrycznym ($\pm 1/3, \pm 2/3$).

Ten prosty model przewidywał i wyjaśniał szereg właściwości nukleonu, min. jego spin i anomalny moment magnetyczny [3]. Szczególnie to ostatnie przewidywanie jest istotne, ponieważ anomalny moment magnetyczny jest bezpośrednio powiązany z orientacją postulowanych kwarków w nukleonie. Główną wadą tego modelu był fakt, że pomimo wielu prób swobodne kwarki, nigdy nie zostały zaobserwowane doświadczalnie. W związku z tym, w połowie lat 60 były uważane za interesującą matematyczną reprezentację natury. Mimo to, jeszcze przed końcem owej dekady, w doświadczeniach przy akceleratorze SLAC w USA, pojawiły się pierwsze dowody na istnienie punktowych obiektów w nukleonie [4, 5]. Nawet wtedy, rzeczywiste istnienie kwarków nie zostało w pełni przyjęte przez całą społeczność fizyków wysokich energii. Sytuacja zmieniła się dopiero w 1974 r., wraz z obserwacją mezonów J/Ψ w anihilacji e^+e^- [6, 7]. Mezony te, zbudowane są z kwarku i antykwarku pięknego, który to został przewidziany przez teorię w 1970 r. [8].

Także w 1974 r., doświadczenie działające w SLAC po raz pierwszy badało głęboko nieelastyczne oddziaływania spolaryzowanej wiązki elektronów ze spolaryzowaną tarczą. Otrzymane rezultaty sugerowały, że w ramach dużych niepewności statystycznych kwarki istotnie są odpowiedzialne za spin nukleonu, [9, 10]. Dokładnie tak, jak było to przewidziane w prostym modelu Gell-Manna i Zweiga. Ponieważ model poprawnie przewidywał także wcześniej wspomniany anomalny moment magnetyczny nukleonów, ich struktura spinowa była uważana za raczej dogłębnie zrozumianą.

Dla znacznej części środowiska fizyków wysokich energii, rezultaty otrzymane przez doświadczenie EMC były niespodzianką. Mianowicie, oszacowana frakcja spinu protonu, za którą

MS

odpowiedzialne było *helicity* kwarków, $\Delta\Sigma$, została zmierzona jako $\Delta\Sigma = 0.12 \pm 0.10 \pm 0.14$, zamiast oczekiwanej jedynki. Następna generacja doświadczeń przeprowadzona w CERN (SMC) [11], DESY (HERMES) [12] i w JLAB [13, 14, 15] potwierdziła odkrycie EMC: polaryzacja kwarków w nukleonie ma wartość znacznie mniejszą niż oczekiwana.

Jednym z wyjaśnień rezultatu otrzymanego przez doświadczenie EMC jest możliwość, że polaryzacja gluonów ($\Delta g/g$) w nukleonie jest nie zerowa. Istniejące w latach 90 doświadczenia jak HERMES i SMC, wprowadziły ten pomiar na swoją listę zainteresowań. Część planowanych eksperymentów, za główny cel postawiła sobie pomiar polaryzacji gluonów w nukleonie.

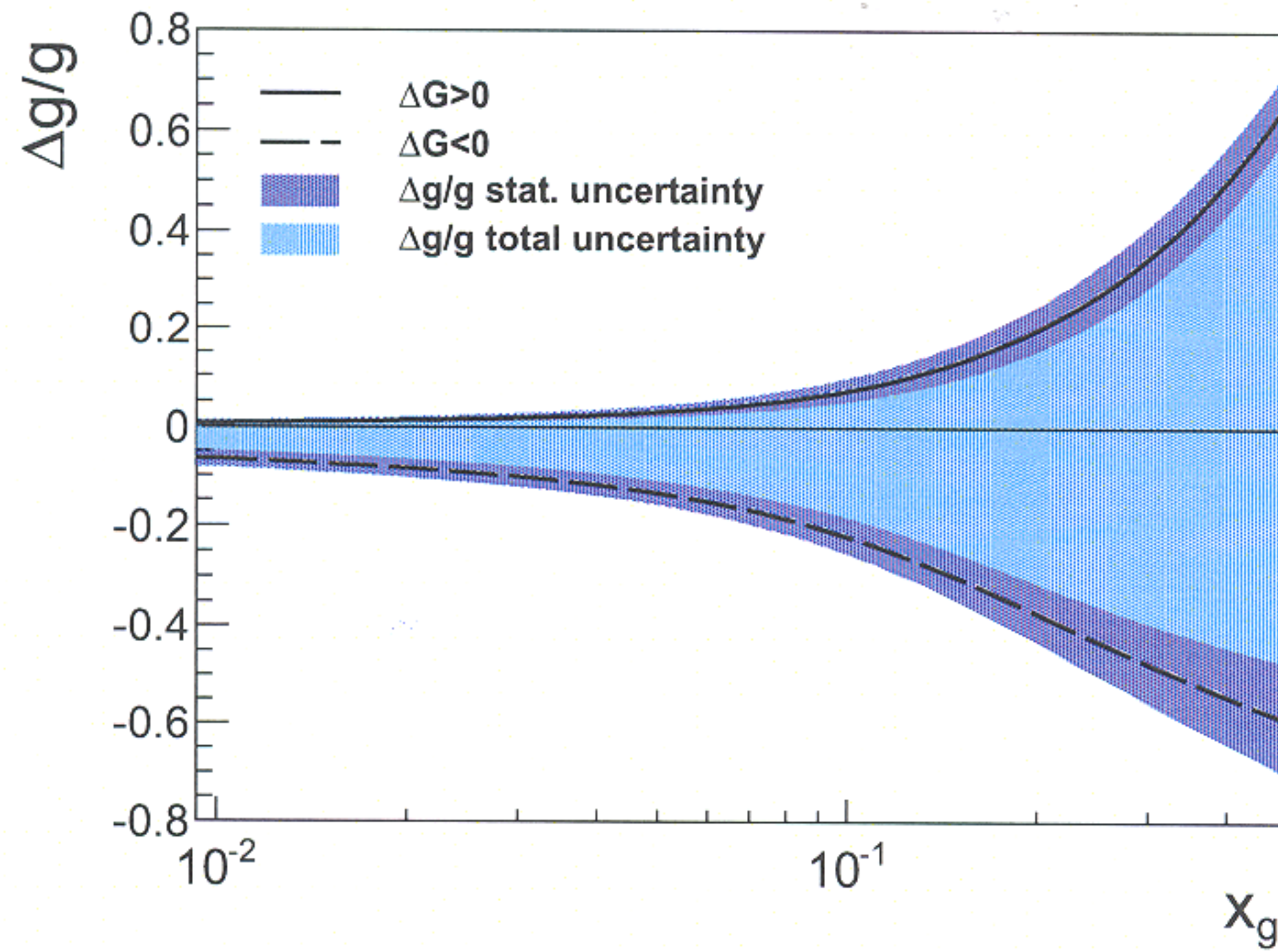
Common Muon Proton Apparatus for Structure and Spectroscopy (COMPASS) jest doświadczeniem w CERN przy akceleratorze SPS. Jest następcą doświadczeń SMC i EMC. Jego głównym celem, w czasie pierwszej fazy zbierania danych w latach 2002-2011, był pomiar polaryzacji gluonów w nukleonie. Międzynarodowa współpraca COMPASS liczy ok. 220 fizyków z 26 instytutów i 13 krajów. Doświadczenie zostało zatwierdzone w 1998 roku, pierwsze dane zostały zebrane w 2002 r. Jestem członkiem współpracy COMPASS od 2001 r.

3.2 Pomiar polaryzacji gluonów w doświadczeniu COMPASS

Niezależną od modelu metodą wyznaczenia polaryzacji gluonów w nukleonie, jest pomiar tak zwanego łamania skalowania spinowej funkcji struktury g_1 . Niestety, wszystkie wykonane do tej pory światowe pomiary tej wielkości, były przeprowadzone w ograniczonym obszarze kinematycznym, który jest dostępny w doświadczeniach z tarczą stacjonarną. W wyniku tego, wartość polaryzacji gluonów w nukleonie jest obarczona dużą niepewnością. Jako przykład, na Rysunku 1, zostały przedstawione wyniki $\Delta g/g$ w funkcji ułamka pędu nukleonu niesionego przez gluon, x_g . Wyniki te otrzymano z fitu wykonanego przez współpracę COMPASS [17], do którego użyto wszystkich dostępnych pomiarów g_1 w obszarze perturbacyjnym, to jest w obszarze, gdzie ma zastosowanie chromodynamika kwantowa.

Ograniczona precyzja wyznaczenia polaryzacji gluonów z fitów do spinowej funkcji struktury g_1 , była znana we współpracy COMPASS. W związku z tym, jako główną ideę wyznaczenia polaryzacji gluonów w nukleonie, wybrano pomiar spinowych asymetrii obserwowanych przy produkcji mezonów powabnych. Ze względu na dużą masę kwarku powabnego, nie występuje on w nukleonie. W wyniku tego, w wiodącym rzędzie rachunku zaburzeń, produkcja tych mezonów jest związana z tak zwaną fuzją fotonowo-gluonową (PGF). Przekrój czynny tego procesu zależy od polaryzacji gluonów w nukleonie. Studia mezonów powabnych, dostarczają zatem czystej próbki niezbędnej do pomiaru polaryzacji gluonów w nukleonie.

Główne studia $\Delta g/g$ zostały wykonane poprzez badanie rozpadu mezonu D^0 na $D^0 \rightarrow K\pi$. Duża masa kwarku powabnego powoduje, że z jednej strony mezony D^0 są czystą sygnaturą procesu PGF, z drugiej strony przekrój czynny na produkcję mezonu D^0 jest mały. Jednym z pierwszych moich zadań we współpracy COMPASS, były studia wielociałowego rozpadu mezonu D^0 , $D^0 \rightarrow K3\pi$. Celem badań, było sprawdzenie na danych MC oczekiwanych zysków z uwzględnienia tego kanału rozpadu w analizie. Otrzymany wynik sugerował około 10% wzrost *figure of merit*. Kanał ten został w późniejszym czasie włączony



Rysunek 1: Wyznaczona polaryzacja gluonów w ficie wykonanym przez współpracę COMPASS. W ficie użyto wszystkich dostępnych danych dla spinowej funkcji struktury g_1 . Rysunek na podstawie wyników opublikowanych w [17].

do analizy.

Mimo ogromnego wysiłku współpracy COMPASS, niepewność końcowego wyniku $\Delta g/g$ była na tyle duża, że nie pozwalała na ostateczne wnioski. Mianowicie wynik końcowego pomiaru w wiodącym rzędzie rachunku zaburzeń to $\Delta g/g = -0.06 \pm 0.21_{stat.} \pm 0.08_{syst.}$, przy twardej skali oddziaływania $\langle \mu^2 \rangle = 13 \text{ GeV}^2$ i średniej frakcji momentu nukleonu niesionej przez gluon $\langle x_g \rangle = 0.11$.

W związku z ograniczoną precyzją pomiaru $\Delta g/g$, jaką można otrzymać w obszarze kinematycznym doświadczenia COMPASS studiując mezony D^0 , poszukiwano innych metod wyznaczania $\Delta g/g$. Jedną z najbardziej obiecujących, było studiowanie przypadków z produkcją hadronów o dużym pędzie poprzecznym p_T , względem fotonu wirtualnego. Dla oddziaływania wiodącego rzędu w DIS (LP), pędy poprzeczne wyprodukowanych hadronów, są związane z pędem poprzecznym kwarków w nukleonie, wynikającym z zasady nieoznaczoności Heisenberga, a także z pędem poprzecznym, jaki hadron nabywa w trakcie procesu fragmentacji kwarku. Oba te przyczynki są raczej małe, w związku z czym, oczekiwany pęd poprzeczny hadronu z procesu podstawowego jest niewielki. Inna sytuacja ma miejsce w procesach wyższego rzędu, jak QCD Compton (QCDC) i wcześniej wspomnianej fuzji fotonowo-gluonowej. W tych przypadkach, pęd poprzeczny uzyskany w twardym procesie może być duży. Zatem wybierając hadrony z dużym p_T , otrzymuje się próbkę wzbogaconą o procesy wyższego rzędu, min. PGF, który jest czuły na polaryzację gluonów w nukleonie.

W 2007 r. dołączyłem do grupy analizy zajmującej się wyznaczaniem polaryzacji gluonów w nukleonie dla przypadków z produkcją hadronów o dużym pędzie poprzecznym. W tym czasie analiza trwała już od kilku lat, a wstępne wyniki były nawet zaprezentowane na międzynarodowych konferencjach. Z drugiej strony, był to też okres, kiedy zdano so-

bię sprawę, że w związku ze zwiększaniem się precyzji pomiaru $\Delta g/g$ używane dotychczas przybliżenia mogły zafałszować końcowy wynik. Aby do tego nie dopuścić, nowy formalizm został rozwinięty przez dr hab. K. Kurka. Jedną z Jego i prof. dr hab. E. Rondio sugestii, była możliwość użycia sieci neuronowych (NN) w celu odróżnienia sygnału (PGF) od procesów tła (LP i QCDC). Taka analiza przy użyciu sieci neuronowej została przeprowadzona w doświadczeniu SMC, w rozprawie doktorskiej mgr. K. Kowalik, której opiekunem naukowym była prof. E. Rondio. Wkrótce zostałem przeszkolony w użyciu sieci neuronowych i narzędzia NetMaker przez dr R. Suleja. Po kilku miesiącach znałem podstawy działania sieci neuronowych i co ważniejsze, zdałem sobie sprawę, że można usprawnić metodę ich użycia w analizie, tzn. na podstawie parametrów wejściowych (np. pęd poprzeczny i podłużny hadronu, itp.) sieć neuronowa budowała model, który na jej wyjściu zwracał liczbę z zakresu 0.05 – 0.95 lub 0 – 1. Większa wartość zwrócona przez sieć oznaczała, że dany przypadek jest bardziej prawdopodobnie typu PGF. Aby wyselekcjonować próbkę do analizy używano cięcia na wartości zwracanej przez sieć neuronową. Wartość cięcia została zoptymalizowana tak, aby zminimalizować błąd statystyczny otrzymanego wyniku $\Delta g/g$. Moim osiągnięciem było spostrzeżenie, że w pewnej konfiguracji sieci neuronowej, wartość zwracana na jej wyjściu będzie estymatorem prawdopodobieństwa, że przy zadanych parametrach wejściowych dany przypadek jest typu PGF.

Dostępność takiego estymatora pozwoliła na rozwinięcie formalizmu zaproponowanego przez dr hab. K. Kurka do formalizmu “ważonego”, gdzie przypadki które mają większe prawdopodobieństwo pochodzenia z PGF, są bardziej istotne w analizie (mają większą wagę), niż przypadki dla których to prawdopodobieństwo jest małe. Możliwość efektywnego oszacowania przypadek-po-przypadku prawdopodobieństwa, że dane zdarzenie pochodzi z procesu PGF, QCDC czy LP, jest kamieniem węgielnym nowej metody wyznaczenia $\Delta g/g$ opisanej w monografii.

W następnych miesiącach analizowałem dane COMPASS, używając zaproponowanej metody, we współpracy z L. Silvą i K. Klimaszewskim (w tamtym czasie doktorantami), odpowiednio z LIP w Lizbonie i Instytutu Problemów Jądrowych (obecnie NCBJ). Pierwsze cząstkowe rezultaty zostały publicznie przedstawione w roku 2008, na konferencji DIS.

W międzyczasie zostałem koordynatorem analizy doświadczenia COMPASS i po rocznym mandacie, zostałem osobą odpowiedzialną za wyżej zaprezentowaną analizę $\Delta g/g$. Wstępne wyniki zawierające analizę danych z lat 2002-2006, zostały zaprezentowane na konferencji SPIN 2010, przez L. Silvę, wyniki ostateczne zostały opublikowane w [16].

Analiza opublikowana w [16] jest poprawna i była znaczącym krokiem naprzód, w porównaniu do poprzednich metod. Mimo to, wraz z biegiem czasu i ze wzrostem doświadczenia stało się dla mnie oczywiste, że metoda analizy danych, może zostać jeszcze bardziej ulepszona. Między innymi, można było mniej polegać na założeniach i pomiarach zewnętrznych, a zamiast tego używać danych doświadczenia COMPASS. W efekcie część przyczynków do niepewności systematycznej obecnych w analizie, zostałyby wyeliminowane.

Główną ideą nowej metody, była rezygnacja z analizy jedynie hadronów o dużych pędach poprzecznych, zamiast tego analiza odbywała się w całym dostępnym spektrum p_T . W tej analizie przypadki z hadronami o małym p_T , są głównie związane z procesem podstawowym (LP), podczas gdy, dla dużych pędów poprzecznych procesy wyższego rzędu są nadal

dominujące. W zaproponowanej metodzie, wyznacza się jednocześnie asymetrię dla procesu podstawowego jak i polaryzację gluonu w nukleonie. Matematyczna strona metody opierająca się na zmodyfikowanym formalizmie rozwiniętym przez J. Pretza and J.-M. le Goffa [18], została po raz pierwszy zaprezentowana przeze mnie w wewnętrznej nocie COMPASS w 2011 r.

Wstępna analiza wykonana zaproponowaną metodą wskazywała, że nie tylko pewne niepewności systematyczne obecne w [16] zostały weeliminowane, jak tego oczekiwano, ale także ze względu na jednoczesne wyznaczania asymetrii w procesach LP i PGF, niepewności związane ze stabilnością spektrometru doświadczenia COMPASS zostały zredukowane. Także największa niepewność systematyczna występująca w analizie tego typu, związana z użyciem danych Monte Carlo, mogła zostać znacznie dokładniej przebadana.

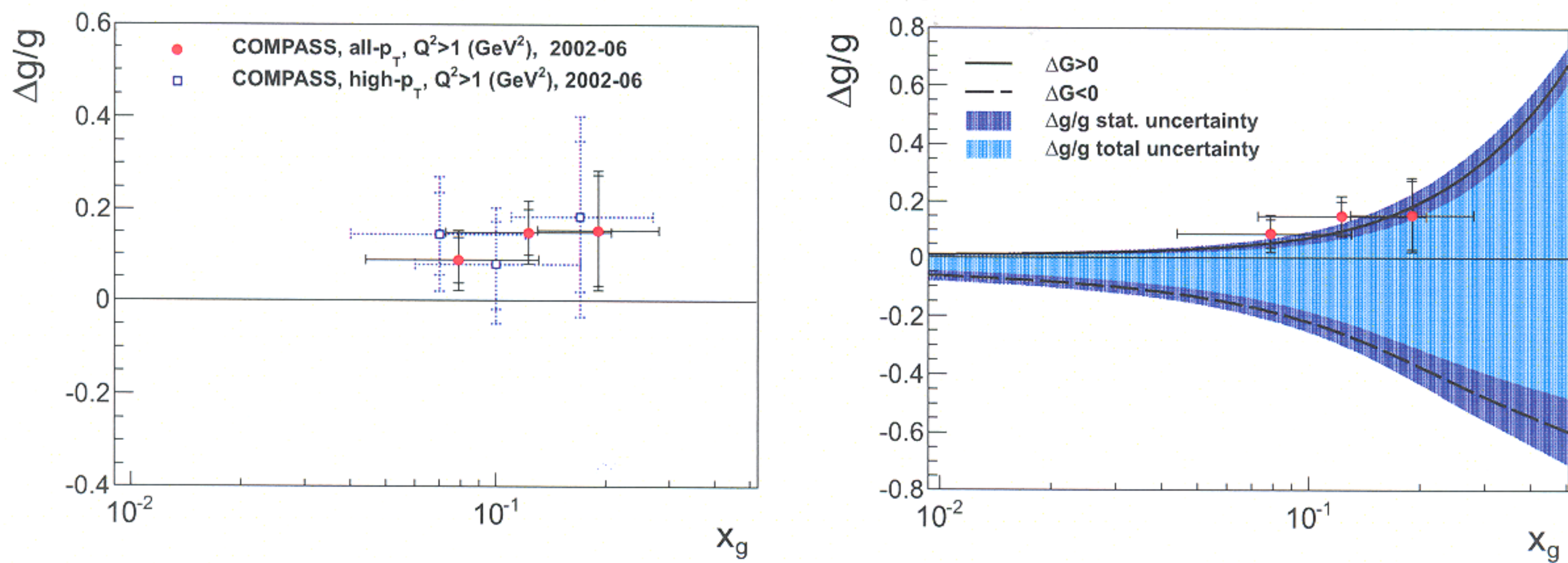
Zaproponowana metoda została zaakceptowana przez współpracę COMPASS. Rozpocząłem analizę danych współpracując głównie z dr K. Klimaszewskim i na początku z dr L. Silva. Byłem odpowiedzialny za tę analizę we współpracy COMPASS i uczestniczyłem w większości aspektów tej analizy, m.in. napisałem kody komputerowe do selekcji danych i obliczania asymetrii, przygotowałem sieci neuronowe na podstawie MC przygotowanego przez dr. K. Klimaszewskiego, wykonałem większość testów systematyki, otrzymałem wyniki końcowe i zająłem się ich interpretacją. Wstępne wyniki analizy, zostały po raz pierwszy publicznie zaprezentowane na międzynarodowej konferencji DIS 2014, która odbyła się w Warszawie, gdzie wygłosiłem osobiście referat przedstawiający otrzymane wyniki. Wyniki zostały niedawno opublikowane w *Eur. Phys. J. C* 77 (2017) 209. Otrzymany wynik $\Delta g/g = 0.113 \pm 0.038 \pm 0.036$, przy twardej skali procesu $\mu^2 = 3 \text{ GeV}/c^2$, i średnim ułamku pędu nukleonu niesionym przez gluon 0.10, sugeruje, że $\Delta g/g$ jest dodatnie w obszarze mierzonego x_g . Ta obserwacja zgadza się z wynikami fitów QCD, w których poza światowymi danymi g_1 użyto także danych ze spolaryzowanego zderzacza pp RHIC w USA.

Zaproponowana metoda pozwoliła na zmniejszenie o czynnik 1.6 niepewności statystycznej i o czynnik 1.8 niepewności systematycznej, w porównaniu do wcześniejszej metody, której wyniki zostały opublikowane w [16]. Porównanie wyników tych dwóch analiz w trzech binach x_g jest przedstawione na lewym panelu Rysunku 2. Otrzymane rezultaty są także zgodne z dodaniem ΔG otrzymanym z fitu współpracy COMPASS, do danych światowych funkcji struktury g_1 , co jest zaprezentowane na prawym panelu Rysunku 2.

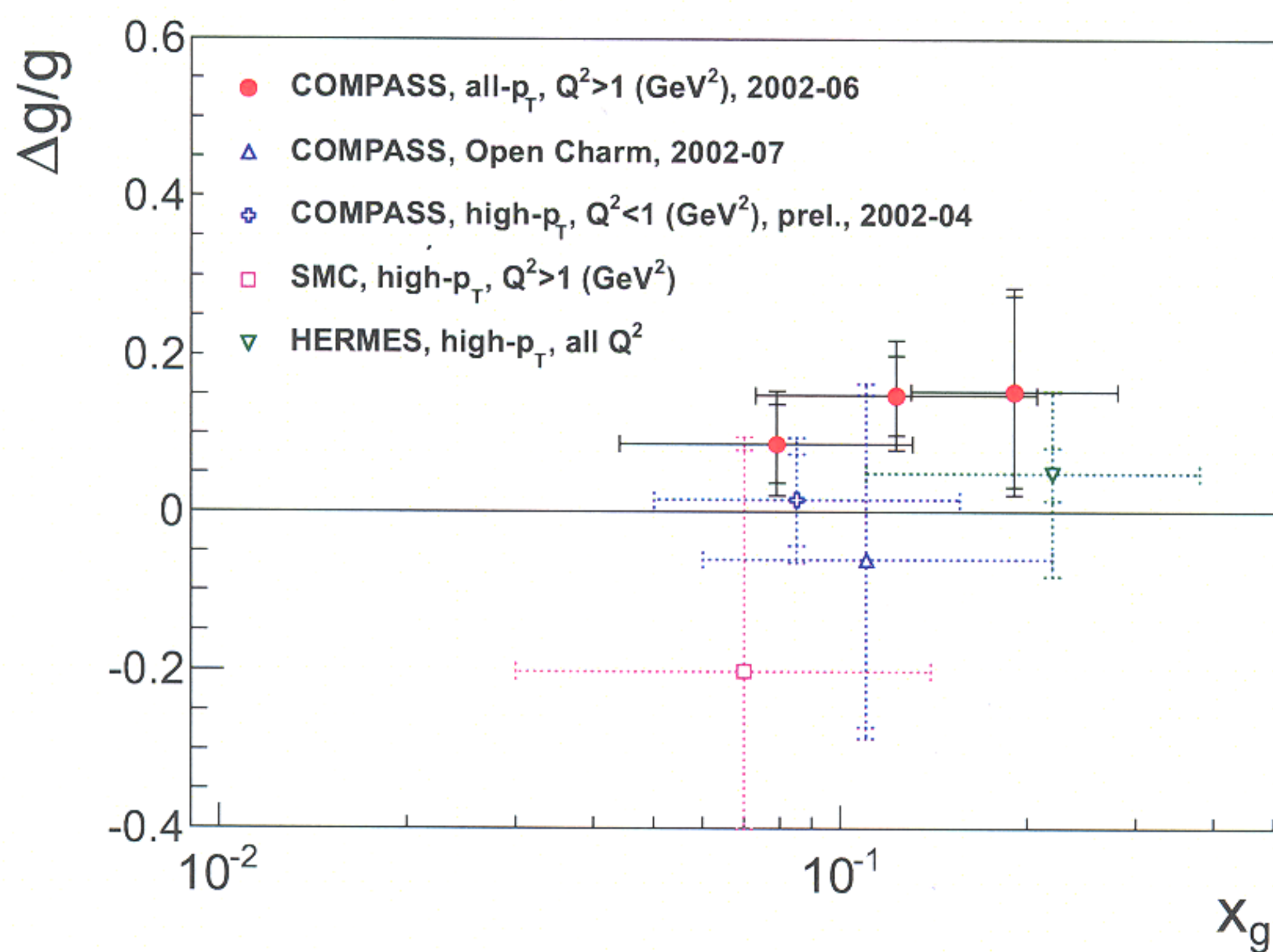
Na Rysunku 3, porównano otrzymane wyniki polaryzacji gluonu w wiodącym rzędzie chromodynamiki kwantowej, z wynikami poprzednich doświadczeń. Otrzymane rezultaty, są zgodne między sobą. Ze wszystkich zaprezentowanych analiz, rezultat otrzymany z użyciem zaproponowanej metody cechuje się najmniejszą całkowitą niepewnością.

Wypracowana metoda może zostać użyta w innych doświadczeniach np. w eksperymentach przy planowanym zderzacz EIC (Electron Ion Collider). Daje ona możliwość ważnego i interesującego testu mogącego porównać otrzymane wyniki polaryzacji gluonu zaproponowaną metodą z wynikami, które zostaną otrzymane ze studiów łamania skalowania spinowej funkcji struktury g_1 . Opracowana metoda jak i sama analiza są raczej skąplikowane, i to było z jednym z powodów dlaczego analiza została wykonana przez grupę doktorów fizyki a nie doktorantów. Ma to jednak ujemną stronę, a mianowicie metoda i sama analiza nie są dobrze udokumentowane, gdyż brakuje rozprawy doktorskiej na ten temat. W tym kontekście

MS



Rysunek 2: Lewy panel: Porównanie otrzymanego $\Delta g/g$ z rezultatem opublikowanym w [16]; Prawy panel: Porównanie otrzymanych wyników $\Delta g/g$ z rezultatami $\Delta g/g$ otrzymanymi z ficiu współpracy COMPASS, do danych świadowych g_1 [17]



Rysunek 3: Porównanie wyniku $\Delta g/g$ otrzymanego w trzech binach x_g z wynikami światowymi analiz z SMC [19], HERMES [20], i COMPASS [21, 22]. (Dla przejrzystości rysunku, nie dodano danych opublikowanych w [16], które to wcześniej były już dyskutowane.)

cie zdecydowałem się na napisanie monografii, która daje możliwość bardziej całościowego opisu metody i analizy danych, niż jest to możliwe w typowej publikacji.

Organizacja pracy jest następująca. W rozdziale pierwszym przedstawiony jest wstęp

do zagadnienia; rozdział drugi opisuje formalizm głęboko nieelastycznego oddziaływania, a także idee odnośnie pośrednich i bezpośrednich metod pomiaru polaryzacji gluonów; podsumowanie światowych wyników $\Delta g/g$ jest dyskutowane w rozdziale 3; rozdział 4 opisuje nową metodę wyznaczenia $\Delta g/g$; rozdział 5 zawiera skrótowy opis spektrometru doświadczenia COMPASS, a detale odnośnie selekcji danych są przedstawione w rozdziale 6; rozdział 7 jest dedykowany modelom Monte Carlo i ich parametryzacji przez sieci neuronowe, modele te są niezbędne, aby powiązać eksperymentalne obserwacje z polaryzacją gluonów w nukleonie; w rozdziale 8 przedstawiono studia systematyczne, a w rozdziale 9 przedstawiono wyniki końcowe, których część została zaprezentowana w tym autoreferacie; ostatni rozdział zawiera podsumowanie i krótko omawia perspektywy użycia zaproponowanej metody w innych doświadczeniach.

References

- [1] M. Gell-Mann, Phys.Lett. **8** (1964) 214.
- [2] G. Zweig (1964), In D. B. Lichtenberg (Ed.), S. P. Rosen, S. P. (Ed.) “Developments In The Quark Theory Of Hadrons, Vol. 1” (1964) 22.
- [3] D. H. Perkins “Introduction to High Energy Physics”, 4th edition Cambridge University Press, 2000.
- [4] E. D. Bloom *et al.*, Phys. Rev. Lett. **23** (1969) 930.
- [5] M. Breidenbach *et al.* Phys. Rev. Lett. **23** (1969) 935.
- [6] J. J. Aubert *et al.*, Phys. Rev.Lett. **33** (1974) 1404.
- [7] J. E. Augustin *et al.*, Phys. Rev.Lett. **33** (1974) 1406; Adv.Exp.Phys. 5 (1976) 141.
- [8] S. L. Glashow, J. Iliopoulos, and L. Maiani, Phys. Rev. D **2** (1970) 1285.
- [9] M. J. Alguard *et al.*, Phys. Rev. Lett. **37**, (1976) 1261.
- [10] M. J. Alguard, *et. al.* Phys. Rev. Lett. **41** (1978) 70.
- [11] SMC, B. Adeva *et al.*, Phys. Rev. D **58** (1998) 112001.
- [12] HERMES, A. Airapetian *et al.*, Phys. Lett. B **442** (1998) 484.
- [13] E142, P. L. Anthony *et al.*, Phys. Rev. D **54** (1996) 6620.
- [14] E143, K. Abe *et al.*, Phys. Rev. Lett. **75** (1995) 25.
- [15] E154, K. Abe *et al.*, Phys. Rev. Lett. **79** (1997) 26.
- [16] COMPASS, C. Adolph *et al.*, Phys. Lett. B **718** (2013) 922.

- [17] COMPASS, C. Adolph *et al.*, Phys. Lett. B **753** (2016) 18.
- [18] J. Pretz and J.-M. Le Goff, Nucl. Instrum. Meth. A **602** (2009) 594.
- [19] SMC, B. Adeva *et al.*, Phys. Rev. D **70** (2004) 012002.
- [20] HERMES, A. Airapetian *et al.*, JHEP **08** (2010) 130.
- [21] COMPASS, C. Adolph *et al.*, Phys. Rev. D **87** (2013) 052018.
- [22] COMPASS, E. S. Ageev *et al.*, Phys. Lett. B **633** (2005) 25.

U Stolorz,