

Krzysztof Piotr Rolbiecki

1 Dyplomy i stopnie naukowe

- 22 września 2008 r., doktor nauk fizycznych w zakresie fizyki, Uniwersytet Warszawski, (z wyróżnieniem)
Tytuł rozprawy: *Poprawki pętlowe w modelu supersymetrycznym z uwzględnieniem faz CP*
Promotor: prof. dr hab. Jan Kalinowski
Recenzenci: prof. dr hab. Marek Zrałek (UŚ), dr hab. Janusz Rosiek (UW)
- 2 września 2003 r., magister fizyki teoretycznej, Uniwersytet Warszawski
Tytuł pracy: *Badanie sektora gaugin minimalnego modelu supersymetrycznego*
Promotor: prof. dr hab. Jan Kalinowski
Recenzent: dr hab. Janusz Rosiek (UW)

2 Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu

- 10.2014 – obecnie Adiunkt, Instytut Fizyki Teoretycznej, Wydział Fizyki, Uniwersytet Warszawski
- 10.2012 – 01.2016 Staż podoktorski, Instituto de Física Teórica, Universidad Autónoma de Madrid i Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Madryt, Hiszpania
- 10.2010 – 09.2012 Staż podoktorski (wissenschaftlicher Mitarbeiter), Deutsches Elektronen-Synchrotron DESY, Hamburg, Niemcy
- 10.2008 – 09.2010 Staż podoktorski (Experienced Researcher) w ramach europejskiej sieci naukowej HEPTools, Institute for Particle Physics Phenomenology, Durham University, Durham, Wielka Brytania

3 Sylwetka kandydata

Ukończyłem studia magisterskie w zakresie fizyki teoretycznej w 2003 roku na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego pod kierunkiem prof. Jana Kalinowskiego. Następnie, również na Uniwersytecie Warszawskim w Instytucie Fizyki Teoretycznej pod kierunkiem prof. Kalinowskiego, podjąłem studia doktoranckie, które ukończyłem w roku 2008 broniąc rozprawy

doktorskiej pod tytułem "Poprawki pętlowe w modelu supersymetrycznym z uwzględnieniem faz CP". Moją specjalizacją jest fizyka cząstek elementarnych. Od października 2008 do stycznia 2016 roku przebywałem na trzech stażach podoktorskich kolejno w Institute for Particle Physics Phenomenology w Durham, w DESY w Hamburgu i na Universidad Autónoma de Madrid. Od lutego 2014 roku (z przerwą na dokończenie stażu w Madrycie) jestem zatrudniony jako adiunkt w Instytucie Fizyki Teoretycznej UW.

Jestem ekspertem w zakresie fizyki cząstek elementarnych w obecnych i przyszłych zderzaczach wielkich energii. Początkowo przedmiotem moich zainteresowań była fizyka modeli supersymetrycznych w planowanym liniowym zderzaczach elektronów. Temu tematowi poświęcone były moja praca magisterska i doktorat oraz publikacje przed uzyskaniem stopnia doktora. W czasie stażu w Durham rozpocząłem badania w zakresie fizyki poza modelem standardowym – supersymetria, modele z dodatkowymi wymiarami, modele kompozytowe, wektorowe fermiony – w Wielkim Zderzaczach Hadronów (Large Hadron Collider – LHC). Obecnie jest to główny kierunek moich badań, ale w dalszym ciągu zajmuję się fizyką w kolajderach leptonowych. Interesuję się również fizyką w planowanych akceleratorach, takich jak LHC wysokiej świetności i przyszłe zderzacze hadronów.

Jestem współautorem programu komputerowego **CheckMATE** wykorzystywanego w fizyce wielkich energii do porównywania przewidywań modeli teoretycznych z wynikami uzyskanymi w LHC. Kolaboracja **CheckMATE** obejmuje kilka ośrodków w Niemczech, Francji i RPA. Moje zainteresowania obejmują również zastosowanie technik sztucznej inteligencji w fizyce cząstek. Jestem członkiem dwóch kolaboracji, które zajmują się tym problemem: BSM-AI i iDark. Uczestniczą w nich naukowcy z Niemiec, Hiszpanii, Holandii i RPA.

W ciągu swojej kariery opublikowałem 34 artykuły w periodykach naukowych (sumaryczny impact factor: 167), z tego cztery przed uzyskaniem stopnia doktora. Według wyszukiwarki INSPIRE¹ moje prace były cytowane ponad 1400 razy, a indeks Hirscha wynosi 20. Miałem ponad 50 wystąpień konferencyjnych i zaproszonych seminariów. Aktywnie biorę udział w organizacji międzynarodowych konferencji naukowych; obecnie jestem sekretarzem naukowym konferencji Planck 2017. Jestem również recenzentem w dwóch wiodących czasopismach: *Journal of High Energy Physics* i *European Physical Journal C*. Od roku 2016 prowadzę zajęcia dydaktyczne na Wydziale Fizyki, jednak moje wcześniejsze doświadczenia obejmują tutoring na Uniwersytecie w Durham i zajęcia na szkole letniej dla doktorantów w Hiszpanii. Obecnie jestem także kierownikiem grantu SONATA z Narodowego Centrum Nauki.

4 Osiągnięcie naukowe: Fizyka skwarków top w LHC

4.1 Cykl publikacji powiązanych tematycznie

- [1] **K. Rolbiecki**, J. Tattersall and G. Moortgat-Pick, *Towards measuring the stop mixing angle at the LHC*, Eur. Phys. J. **C71** (2011) 1517 [arXiv:0909.3196 [hep-ph]].
IF: 3.631, cytowania: 29, wkład: 80%
- [2] G. Moortgat-Pick, **K. Rolbiecki**, J. Tattersall, *Momentum reconstruction at the LHC for probing CP-violation in the stop sector*, Phys. Rev. **D83** (2011) 115012 [arXiv:1008.2206]

¹<http://tinyurl.com/rolbiecki-inspire>

[hep-ph]].

IF: 4.558, cytowania: 15, wkład: 60%

- [3] **K. Rolbiecki** and K. Sakurai, *Light stops emerging in WW cross section measurements?*, JHEP **1309** (2013) 004 [arXiv:1303.5696 [hep-ph]].

IF: 6.220, cytowania: 38, wkład: 70%

- [4] J. S. Kim, **K. Rolbiecki**, K. Sakurai and J. Tattersall, *'Stop' that ambulance! New physics at the LHC?*, JHEP **1412** (2014) 010 [arXiv:1406.0858 [hep-ph]].

IF: 6.111, cytowania: 48, wkład: 60%

- [5] **K. Rolbiecki** and J. Tattersall, *Refining light stop exclusion limits with W^+W^- cross sections*, Phys. Lett. **B750** (2015) 247 [arXiv:1505.05523 [hep-ph]].

IF: 4.787, cytowania: 14, wkład: 80%

- [6] J. S. Kim, **K. Rolbiecki**, R. Ruiz, J. Tattersall and T. Weber, *Prospects for natural SUSY*, Phys. Rev. **D94** (2016) 095013 [arXiv:1606.06738 [hep-ph]].

IF: 4.506, cytowania: 8, wkład: 45%

Sumaryczny IF: 29.8

4.2 Wprowadzenie

Model standardowy fizyki cząstek elementarnych i kosmologiczny model standardowy zapewniają bardzo dokładny i zgodny z doświadczeniem opis wielu zjawisk. Z drugiej strony, obydwa modele mają istotne i od dawna znane braki, które są argumentem za tym, że żadna z tych teorii nie jest ostateczna. Wystarczy tu wymienić problem ciemnej materii i stałej kosmologicznej, problemy hierarchii i naturalności, nieznanne mechanizmy inflacji i bariogenezy. Poszukiwanie fizyki, która odpowiadałaby na te pytania, jest jednym z głównych zadań stojących przed eksperymentami ATLAS [7] i CMS [8] działającymi przy Wielkim Zderzaczu Hadronów (Large Hadron Collider – LHC). Trwająca obecnie druga część eksperymentu, z energią w środku masy 13 TeV, może przynieść rozwiązanie przynajmniej części z tych zagadek.

Spośród licznych modeli próbujących odpowiedzieć na niedostatki modelu standardowego fizyki cząstek elementarnych, ważne miejsce zajmuje supersymetria (artykuł przeglądowy [9]). Modele supersymetryczne postulują rozszerzenie zwykłej symetrii czasoprzestrzeni o przekształcenia wiążące cząstki o różnych spinach. Tym samym, każda cząstka modelu standardowego otrzymuje supersymetrycznego partnera o takich samych liczbach kwantowych i spinie różniącym się o $1/2$. Ponieważ nie obserwujemy takich cząstek w otaczającym nas świecie, należy założyć, że supersymetria, o ile istnieje, musi być złamana, tak aby supersymetryczni partnerzy mieli masy znacznie większe od cząstek modelu standardowego.

Na pierwszy rzut oka taka konstrukcja może się wydawać bardzo rozrzutna, gdyż wymaga więcej niż podwojenia spektrum i dużej liczby nowych parametrów. Okazuje się jednak, że jeśli dokładnie zdefiniujemy mechanizm łamania supersymetrii, mamy w rzeczywistości jedynie kilka wolnych parametrów. Jednocześnie możliwe staje się wyjaśnienie mechanizmu łamania symetrii elektroslabej w modelu standardowym przez mechanizm Higgsa, tzw. radiacyjne łamanie symetrii elektroslabej. Dodatkowo, nowe cząstki supersymetryczne stabilizują masę bozonu

Higgosa, która w modelu standardowym ma “nienaturalnie” małą wartość, tzw. problem naturalności. Najlżejsza cząstka supersymetryczna okazuje się również być dobrym kandydatem na ciemną materię. W bardziej specyficznych modelach można też wyjaśnić mechanizmy inflacji i bariogenezy.

Te atrakcyjne cechy supersymetrii sprawiły, że od swojego powstania w latach 70. XX wieku stała się ona jednym z najpopularniejszych modeli rozszerzających model standardowy. Jej poszukiwania w akceleratorach LEP i Tevatron nie przyniosły pozytywnych rezultatów, jednak największe nadzieje pokładane są w działającym obecnie LHC [10, 11]. O miejscu supersymetrii we współczesnej fizyce cząstek elementarnych świadczy to, że dwa największe eksperymenty, ATLAS i CMS, mają dedykowane grupy robocze dla jej poszukiwań.

Ważną rolę w modelu supersymetrycznym odgrywają supersymetryczni partnerzy kwarków top i gluonów z modelu standardowego, nazywane odpowiednio skwarkami top, \tilde{t} , i gluinami, \tilde{g} . Są one w dużym stopniu odpowiedzialne za mechanizm radiacyjnego łamania symetrii elektroslabej, który umożliwia nadanie masy cząstkom modelu standardowego poprzez mechanizm Higgosa. Odkrycie bozonu Higgosa o masie 125 GeV [12, 13] dodatkowo motywuje poszukiwania skwarków top w kontekście problemu małej hierarchii.

W minimalnym modelu supersymetrycznym występują dwa skwarki top, \tilde{t}_L i \tilde{t}_R , które są partnerami kwarków t_L i t_R , należącymi odpowiednio do reprezentacji $(\mathbf{3}, \mathbf{2}, \frac{1}{6})$ i $(\mathbf{3}, \mathbf{1}, \frac{2}{3})$ grupy cechowania modelu standardowego $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$. Po złamaniu symetrii elektroslabej mieszają się one i dają dwa stany własne macierzy masy zgodnie z przepisem:

$$\begin{pmatrix} \tilde{t}_1 \\ \tilde{t}_2 \end{pmatrix} = \mathcal{R}_{\tilde{t}} \begin{pmatrix} \tilde{t}_L \\ \tilde{t}_R \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta_{\tilde{t}} & \sin \theta_{\tilde{t}} e^{-i\phi_{\tilde{t}}} \\ -\sin \theta_{\tilde{t}} e^{i\phi_{\tilde{t}}} & \cos \theta_{\tilde{t}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tilde{t}_L \\ \tilde{t}_R \end{pmatrix}, \quad (1)$$

gdzie $\mathcal{R}_{\tilde{t}}$ jest pewną macierzą unitarną, a kąty mieszania $\cos \theta_{\tilde{t}}$ i $\phi_{\tilde{t}}$ są wyznaczone przez podstawowe parametry modelu supersymetrycznego; zobacz na przykład [1]. Ze względu na ich duże znaczenie fenomenologiczne, między innymi duże poprawki radiacyjne do masy bozonu Higgosa, skwarki top są częstym tematem prac teoretycznych oraz obiektem intensywnych poszukiwań doświadczalnych w LHC [14, 15].

Przedstawiony tu cykl sześciu publikacji wpisuje się w fenomenologiczny nurt badań nad poszukiwaniami skwarków top w LHC. Pierwsze dwie prace zawierają przykłady analizy potencjalnych sygnałów i możliwości odtworzenia na ich podstawie niektórych parametrów modelu supersymetrycznego. Kolejne dwie prace poświęcone są analizie anomalii pojawiających się w wynikach eksperymentów ATLAS i CMS. Ostatnie dwie prace zawierają propozycje nowych i przyszłych ograniczeń na produkcję skwarków top i gluin, które mogą być wyprowadzone z już uzyskanych i przewidywanych wyników, a nie były wzięte pod uwagę przez kolaboracje eksperymentalne.

4.3 Omówienie wyników

Pierwsze dwie prace wchodzące w skład cyklu, [1] i [2], powstały w okresie przed uruchomieniem LHC. Ich celem było zaproponowanie metod pomiaru parametrów definiujących sektor supersymetrycznych partnerów kwarku top, w szczególności kątów mieszania $\cos \theta_{\tilde{t}}$ i fazy łamiącej symetrię CP $\phi_{\tilde{t}}$ zdefiniowanych w równaniu (1). W pracy [1] zaproponowana metoda pomiaru

opiera się na zmianach w częstotliwościach rozpadu skwarku top na różne stany końcowe,

$$\tilde{t}_1 \rightarrow \tilde{\chi}_i^+ b, \quad \tilde{t}_1 \rightarrow \tilde{\chi}_j^0 t, \quad (2)$$

w zależności od wartości kąta mieszania i fazy zespolonej. Współczynniki rozpadu mogą silnie zależeć od tych wartości i tym samym prowadzić do różnych sygnałów doświadczalnych. Aby uniezależnić się od, zwykle trudnego do przeprowadzenia, pomiaru całkowitego przekroju czynnego na produkcję skwarków top, zaproponowaliśmy pomiary względnych częstotliwości różnych rozpadów. Praca analizowała kilka realistycznych scenariuszy określonych przez własności sektora chargin i neutralin (supersymetrycznych partnerów bozonów elektroślabych i Higgsa). Szacowana końcowa dokładność mogła osiągać, w zależności od scenariusza, 10% wartości kąta mieszania.

W kolejnej pracy [2] podaliśmy metodę mierzenia fazy zespolonej ϕ_i pojawiającej się w macierzy mieszania supersymetrycznych partnerów kwarku top, równanie (1). Metoda ta opiera się na pomiarze iloczynów mieszanych pędów w kaskadowych rozpadach skwarków top. Dzięki korelacjom spinowym, iloczyny mieszane są czułe na fazy zespolone, które mogą być obecne w macierzy mieszania i sprzężeniach skwarków top. Iloczyny mieszane były wcześniej wielokrotnie analizowane jako metoda poszukiwania łamania symetrii CP w liniowym kolajderze e^+e^- , International Linear Collider. W pracy [16] po raz pierwszy zastosowaliśmy ją w LHC w realistycznej symulacji Monte Carlo. Praca [2] jest rozwinięciem tej idei i zastosowaniem w sektorze skwarków top. Pomiar iloczynów mieszanych wymaga zrekonstruowania układu środka masy dla całego procesu produkcji skwarków top, ponieważ w tym układzie odniesienia asymetrie iloczynów mieszanych są maksymalne. Aby to osiągnąć zastosowaliśmy metodę rekonstrukcji kinematycznej całego łańcucha rozpadów. Dzięki rozwiązaniu układu równań kinematycznych możliwe staje się obliczenie pędów cząstek pośrednich i pomiar asymetrii w iloczynie mieszanym. Scenariusze, dla których nasza analiza była przeprowadzona, są już co prawda wykluczone, ale metoda może znaleźć zastosowanie także w przyszłych zderzaczach hadronowych z energiami w środku masy 33 TeV lub 100 TeV.

Motywacją kolejnej pracy [3] była zaobserwowana w 2012 roku w LHC niezgodność między pomiarem przekroju czynnego na produkcję pary bozonów $pp \rightarrow W^+W^-$ [17, 18] a przewidywaniami teoretycznymi w modelu standardowym. Pomiar był przeprowadzony w stanie końcowym z dwoma leptonami i brakującą energią poprzeczną. Zaproponowaliśmy, że rozbieżność może zostać wyjaśniona przez dodatkowy sygnał pochodzący od produkcji lekkich skwarków top. W zaproponowanym modelu skwarki rozpadałyby się w następujący sposób:

$$\tilde{t}_1 \rightarrow \tilde{\chi}_1^\pm b \rightarrow \tilde{\chi}_1^0 W^{(*)} b \rightarrow \tilde{\chi}_1^0 \ell \nu_\ell b, \quad (3)$$

przy czym bozony W byłyby na powłóce masy lub prawie na powłóce masy. Drugim kluczowym elementem było założenie, że różnica mas między skwarkiem top \tilde{t}_1 a charginem $\tilde{\chi}_1^\pm$ jest mała, rzędu 10 GeV. Dzięki temu, dodatkowy sygnał imitowałby stan końcowy taki sam jak w produkcji par bozonów W , z niezbyt dużym wkładem do brakującej energii poprzecznej od najlżejszych neutralin będących także produktem rozpadu. Zgodnie z naszymi symulacjami Monte Carlo, preferowana masa skwarków top wynosiłaby około 200 GeV. Ponieważ pomiar tego przekroju czynnego jest obciążony stosunkowo dużymi niepewnościami teoretycznymi, zaproponowaliśmy jednocześnie obserwabłę kinematyczną niezmienniczą ze względu na pchnięcia

lorentzowskie w kierunku wyznaczonym przez wiązki protonów [19]:

$$\cos \theta_{\ell\ell}^* = \tanh \left(\frac{\Delta\eta_{\ell\ell}}{2} \right), \quad \Delta\eta_{\ell\ell} = \eta_{\ell_1} - \eta_{\ell_2}, \quad (4)$$

gdzie $\Delta\eta_{\ell\ell}$ jest różnicą pospieszności dwóch leptonów ℓ_1 i ℓ_2 . Zastosowanie $\cos \theta_{\ell\ell}^*$ znacznie ułatwiłoby odróżnienie produkcji bozonów W od produkcji skwarków top zwiększając czułość pomiaru.

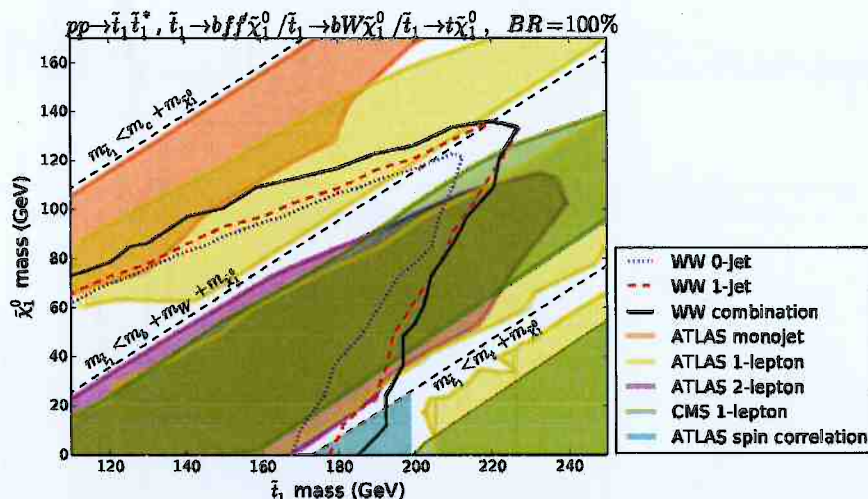
Ten pomysł był kontynuowany w kolejnej pracy [4]. Do analizy zostały włączone nowe pomiary przekroju czynnego na produkcję W^+W^- przy większej energii w środku masy, $\sqrt{s} = 8$ TeV, a także pomiary innych przekrojów czynnych na produkcję cząstek modelu standardowego i bezpośrednie ograniczenia eksperymentalne na produkcję różnych cząstek supersymetrycznych. W sumie wzięliśmy pod uwagę 12 różnych analiz z eksperymentów ATLAS i CMS. Zostały one zaimplementowane w programie **CheckMATE**, a następnie przeprowadzono skan w przestrzeni parametrów modelu wyznaczonej przez masy różnych cząstek. Dzięki temu zidentyfikowaliśmy masy cząstek najlepiej pasujące do wyników doświadczalnych: $m_{\tilde{t}} = 200 \pm 30$ GeV i $m_{\tilde{\chi}_1^0} = 140 \pm 20$ GeV. Oprócz rozbieżności w produkcji par W^+W^- można było w ten sposób wyjaśnić również kilka innych niezgodności, w tym w kanale produkcji trzech leptonów i brakującej energii poprzecznej. Obydwie prace dyskutujące wkłady od skwarków top do pomiaru przekroju czynnego $pp \rightarrow W^+W^-$ rozpoczęły szerszą dyskusję na temat innych możliwych wyjaśnień tej rozbieżności [20–22]. Zostały one uwzględnione w kolejnych wynikach doświadczalnych [23, 24], uprawdopodobniając hipotezę, że niezgodności można najprawdopodobniej wyjaśnić bez odwoływania się do nowej fizyki.

Wykorzystując te doświadczenia i argumenty o dodatkowych poprawkach radiacyjnych do produkcji W^+W^- w modelu standardowym, w kolejnej pracy [5] zaproponowaliśmy wykorzystanie pomiaru tego przekroju czynnego do wyprowadzenia nowych ograniczeń na produkcję skwarków top. Pomiary te okazały się szczególnie czułe w obszarze parametrów, gdzie masa skwarku top wynosi mniej niż 200 GeV; patrz Rysunek 1. W szczególności, nasze ograniczenie jako jedyne pozwalało wykluczyć skwarki top wzdłuż linii, na której masa skwarku top jest w przybliżeniu równa sumie mas bozonu W i najlżejszego neutralina, $m_{\tilde{t}} \approx m_{\tilde{\chi}_1^0} + m_W + m_b$. Zakładając rozpad:

$$\tilde{t}_1 \rightarrow b W \tilde{\chi}_1^0 \quad \text{lub} \quad \tilde{t}_1 \rightarrow b f f' \tilde{\chi}_1^0, \quad (5)$$

miar przekroju czynnego W^+W^- pozwala wykluczyć skwarki top lżejsze niż 220 GeV przy masie najlżejszego neutralina około 130 GeV. To ograniczenie jest cytowane w najnowszym przeglądzie Particle Data Group [25].

Tematem pracy [6] są aktualne i przyszłe ograniczenia na model naturalnej supersymetrii [31]. Zakłada on, że jedyne lekkimi cząstkami w modelu są cząstki kontrolujące masę bozonu Higgsa i poprawki radiacyjne wyznaczające skalę łamania symetrii elektroslabej: higgsina, skwarki top i gluino. Model ten znajduje się obecnie w kręgu zainteresowań fenomenologów, ze względu na swój minimalizm, przy jednoczesnym zapewnieniu prawidłowego radiacyjnego łamania symetrii elektroslabej. Obecne ograniczenia na ten model zostały oszacowane za pomocą analiz eksperymentu ATLAS poszukujących skwarków top i gluin przy energii w środku masy $\sqrt{s} = 13$ TeV i całkowitej świetlności rzędu 3 fb^{-1} . Następnie wykonano ich ekstrapolację na wyższe scałkowane świetlności: 20–3000 fb^{-1} . Uzyskane wyniki pokazują, że na

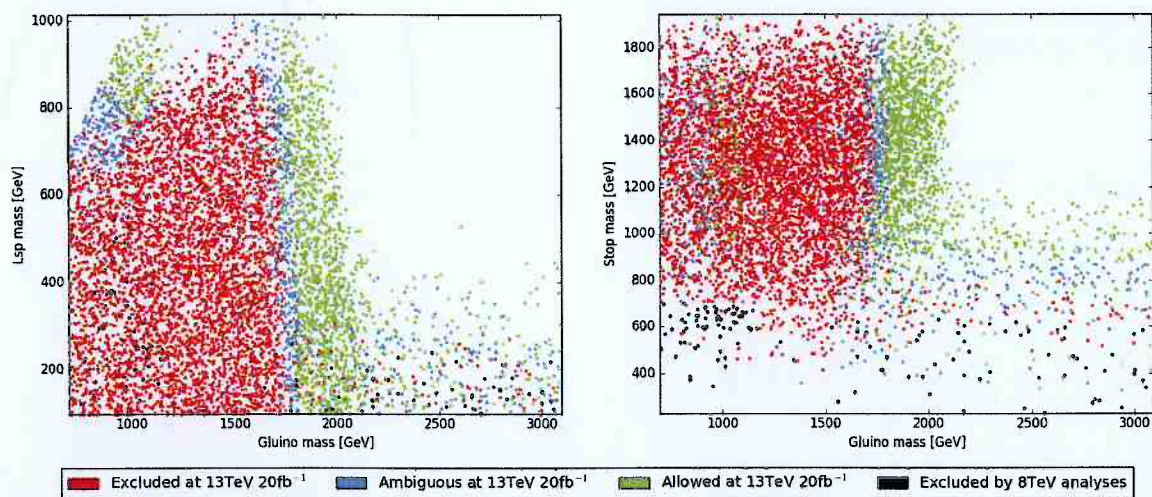


Rysunek 1: Porównanie wykluczeń w płaszczyźnie $m_{\tilde{t}_1} - m_{\tilde{\chi}_1^0}$ uzyskanych w pracy [5] (linie niebieska przerywana – 0 dżetów; czerwona przerywana – 1 dżet; czarna – kombinacja) z wynikami ATLAS i CMS: ATLAS mono-dżet [26], ATLAS 1 lepton [27], ATLAS 2 leptony [28], CMS 1 lepton [29], ATLAS korelacje spinowe [30]. Za [5].

zakończenie ostatniej fazy eksperymentów w LHC można oczekiwać wykluczenia skwarków top do mas 1500 GeV, natomiast gluin do 2500 GeV. Najważniejszym wynikiem otrzymanym w pracy są oczekiwane możliwości odkrycia cząstek supersymetrycznych w tym modelu na poziomie istotności 5σ przy całkowitej świetlności rzędu 3000 fb^{-1} . Porównanie możliwych zakresów wykluczenia cząstek supersymetrycznych pokazuje, że wyniki na podstawie danych zebranych w 2016 roku obejmą zdecydowaną większość przestrzeni parametrów możliwej do odkrycia przy energii w środku masy 14 TeV; patrz Rysunek 2. Wynika to z tego, że wykluczenie na poziomie ufności 95% postępuje dużo szybciej, niż zgromadzenie danych wymaganych do potwierdzenia odkrycia na poziomie 5σ . Jeśli więc poszukiwania supersymetrii w LHC mają się zakończyć powodzeniem, pierwsze sygnały niezgodności oczekiwań teoretycznych z wynikami eksperymentów powinny być widoczne już w danych z 2016 roku, a najpóźniej z 2017 roku. Ten wniosek może być nieco osłabiony, jeśli przyjmie się optymistyczne założenia co do wielkości niepewności eksperymentalnych w przyszłości. Niemniej jednak brak jakichkolwiek sygnałów supersymetrii w bliskiej przyszłości, sugeruje małe szanse jej odkrycia w LHC w ogóle.

4.4 Podsumowanie

Przedstawiony tu cykl publikacji wpisuje się w ważny nurt badań nad modelami supersymetrycznymi w LHC. Starłem się w nim zawrzeć różne aspekty tych poszukiwań, poczynając od propozycji technik wyznaczania parametrów sektora skwarków top do wyprowadzania ograniczeń na ich produkcję w obecnych i przyszłych eksperymentach. Ze względu na szczególną rolę skwarków top w konstrukcji modelu, ten temat będzie z pewnością jednym z głównych zadań zarówno poszukiwań doświadczalnych jak i intensywnych analiz teoretycznych. Moim zamiarem w najbliższej przyszłości jest rozwijanie idei poruszonych w cyklu, w szczególności w ramach kolaboracji CheckMATE [32–34] i SUSY-AI [35, 36].



Rysunek 2: Punkty w przestrzeni parametrów dla modelu naturalnej supersymetrii, które mogą być odkryte przy energii $\sqrt{s} = 14$ TeV i świetlności $\mathcal{L} = 3000$ fb $^{-1}$ zakładając liniową propagację niepewności doświadczalnych. Kolory oznaczają odpowiednio: czerwony – prawdopodobne wykluczenie przy $\sqrt{s} = 13$ TeV i $\mathcal{L} = 20$ fb $^{-1}$; niebieski – niepewny status przy $\sqrt{s} = 13$ TeV i $\mathcal{L} = 20$ fb $^{-1}$; czarny – wykluczone przy $\sqrt{s} = 8$ TeV; zielony – prawdopodobne odkrycie na zakończenie fazy wysokiej świetlności. Lewy panel: $m_{\tilde{g}}-m_{\tilde{\chi}_1^0}$; Prawy panel: $m_{\tilde{g}}-m_{\tilde{\chi}_1^+}$. Za [6].

5 Pozostałe osiągnięcia naukowo-badawcze

5.1 Dane bibliometryczne

Według Web of Science

Liczba opublikowanych artykułów: 34

Cytowania: 343

Cytowania bez autocytowań: 300

Indeks Hirscha: 12

Według Inspire

Źródło: <http://tinyurl.com/rolbiecki-inspire>

Liczba artykułów: 35

(w tym 2 w recenzji i 4 przed uzyskaniem stopnia doktora)

Inne teksty naukowe: 20 (w tym 6 recenzowanych doniesień konferencyjnych)

Cytowania: 1413

Sumaryczny Impact Factor: 166.6

Punkty MNiSW: 1293

Indeks Hirscha: 20

5.2 Omówienie

Mój pozostały dorobek można podzielić na kilka powiązanych tematycznie kategorii, które omówię w osobnych ustępach.

Programy narzędziowe

Jestem współautorem programu narzędziowego **CheckMATE** [32–34], który służy do porównywania przewidywań modeli nowej fizyki z dostępnymi danymi z LHC, tzw. *recasting*. Program ma budowę modułową, co umożliwia łatwe i wygodne dodawanie nowych analiz. Opiera się na szybkim symulatorze odpowiedzi detektora **Delphes 3** [37], którego parametry zostały przez nas dokładnie dostrojone, aby uzyskać jak najlepszą zgodność z eksperymentami ATLAS i CMS. Nowa wersja ma wbudowany interfejs do dwóch popularnych programów Monte Carlo: **Pythia 8** [38] i **MadGraph 5** [39], dzięki czemu cały proces wymaga tylko minimalnej ingerencji użytkownika. Program jest bardzo popularny w społeczności fenomenologów.

Drugi projekt, **SUSY-AI** [35, 36], dotyczy zastosowań metod uczenia maszynowego (sztucznej inteligencji) do analizy modeli supersymetrycznych na podstawie danych z LHC [10]. Umożliwia on ocenę w przeciągu ułamka sekundy, czy dany punkt w przestrzeni parametrów modelu jest wykluczony. Dla porównania, w niektórych przypadkach **CheckMATE** potrzebuje aż kilkudziesięciu minut. Ceną za szybkość jest oczywiście mniejsza dokładność, która mimo wszystko wynosi ponad 95%. Program może znajdować zastosowanie, kiedy szukamy zestawu parametrów teoretycznych najlepiej dopasowanego do danych doświadczalnych w wielowymiarowej przestrzeni parametrów i wymagana jest analiza tysięcy a nawet milionów punktów w krótkim czasie.

Poszukiwania nowej fizyki w LHC

Tematem pracy [6] wchodzącej w skład cyklu habilitacyjnego była naturalna supersymetria. Tę koncepcję z bardziej teoretycznego punktu widzenia badałem w dwóch innych swoich pracach. W [40] analizowaliśmy naturalność różnych scenariuszy w ogólnym minimalnym modelu supersymetrycznym. Analiza była przeprowadzona przy wykorzystaniu powszechnie używanej miary naturalności [41]. Nowością w pracy było wykorzystanie dwupętlowych równań grupy renormalizacji i staranne uwzględnienie wymagań na uzyskanie odpowiedniej masy bozonu Higgsa. Wyniki zostały również skonfrontowane z rezultatami bezpośrednich poszukiwań w LHC. Kontynuacja znalazła się w pracy [42], gdzie analiza dotyczyła jednego z modeli supersymetrycznych o rozszerzonym spektrum cząstek.

Ważnym tematem badań fenomenologicznych w ostatnich latach był tak zwany *recasting*. Polega on na znajdowaniu ograniczeń na modele, które nie zostały bezpośrednio uwzględnione w pracach eksperymentalnych. Wykorzystuje się przy tym już istniejące dane, jednak w zupełnie nowym kontekście; przykładem jest wymieniony wcześniej program **CheckMATE**. W jednej z moich prac [43] skupiliśmy się na ograniczeniach na model, w którym różnice w masach cząstek są małe, w związku z czym są one trudne do zaobserwowania w LHC. Zaproponowaliśmy do tego wykorzystanie procesów z leptonami w stanach końcowych. W drugiej pracy [44] zajęliśmy się ograniczeniami na model, w którym dozwolone są rozpady najbliższej cząstki supersymetrycznej. Również w tym przypadku standardowe poszukiwania mogą zawodzić, jednak, jak

pokazaliśmy, dzięki szerokiemu programowi badań w LHC, także na takie modele można wykonać silne ograniczenia.

W kontekście poszukiwań nowej fizyki w LHC, za interesującą uważam pracę, w której zaproponowaliśmy metodę odróżnienia spinów nowych cząstek [19]. Porównanie rozkładów kątowych w różnych stanach końcowych może ujawnić, czy mamy do czynienia z produkcją cząstek supersymetrycznych, czy też cząstek Kaluzy-Kleina, które są wzbudzeniami cząstek modelu standardowego i posiadają taki sam spin.

W grudniu 2015 roku eksperymenty ATLAS i CMS ogłosiły, że w jednym z pomiarów spektrum par fotonów zaobserwowano nadwyżkę przypadków w porównaniu do przewidywań modelu standardowego. Ponieważ wyniki obydwu eksperymentów wskazywały na podobną masę rezonansu, 750 GeV, wywołało to masę spekulacji teoretycznych. Byłem współautorem kilku prac poświęconych interpretacji tych przypadków, zaczynając od ogólnej analizy zgodności wyników przy różnych energiach w środku masy [45], po analizę modeli, które mogłyby rozwiązać zagadkę rezonansu [46–49]. Wprawdzie kolejne pomiary ostatecznie nie potwierdziły istnienia nowej cząstki [50, 51], ale z pewnością był to jeden z bardziej ekscytujących i intensywnych okresów mojej pracy naukowej. W szczególności znacznie poszerzyłem swoją wiedzę na temat modeli niesupersymetrycznych.

Supersymetria w kolajderach e^+e^-

Wśród prac dotyczących fizyki w kolajderach leptonowych za godny wyróżnienia uważam artykuł o poszukiwaniu lekkich, zdegenerowanych masowo higgsin [52]. Celem pracy było zbadanie potencjału międzynarodowego kolajdera liniowego (International Linear Collider – ILC) do obserwacji tych cząstek, a także określenie dokładności pomiaru mas, kątów mieszania i parametrów modelu supersymetrycznego. Praca ta powstała w ścisłej współpracy z grupą eksperymentalną z Hamburga. Nasze wyniki pokazały, że dokładność wyznaczenia mas może być lepsza niż 1%. Dzięki temu możliwe jest dopasowanie wartości parametrów modelu supersymetrycznego w zakresie wielkości kilku TeV, które w innym wypadku nie byłyby dostępne eksperymentalnie. Inne aspekty obserwacji cząstek o zdegenerowanych masach zostały również poruszone w późniejszej pracy [53].

Przedmiotem moich zainteresowań było również łamanie symetrii CP (parzystości kombinowanej) i jej eksperymentalne sygnatury w ILC. Łamanie symetrii CP w modelu supersymetrycznym może wyjaśniać obserwowaną asymetrię barionową we wszechświecie. W pierwszych dwóch pracach [54, 55] (przed doktoratem) na ten temat analizowaliśmy trójciałowe rozpady neutralin, w których efekty łamania CP można zaobserwować w iloczynach mieszanych pędów i spinów. Inną metodą eksperymentalną jest porównywanie przekrojów czynnych w pewnych procesach produkcji chargin [56] (przed doktoratem). Zaproponowane metody mają tę zaletę, że zaobserwowana niezerowa wartość asymetrii w obserwacjach natychmiast implikuje istnienie zespolonych faz w sprzężeniach, co jest równoważne łamaniu symetrii CP niezależnie od wartości innych parametrów. Szczegółowa analiza eksperymentalnych aspektów pomiaru takiej asymetrii została przedstawiona w pracy [57].

Pozostałe prace na temat supersymetrii w ILC dotyczą poszukiwań nowych cząstek oddziałujących elektroslabo. Dzięki wysokiej precyzji pomiarów w tej maszynie, pozwala ona na odkrycie cząstek niemożliwych do zaobserwowania w LHC [58, 59]. Precyzyjne pomiary pozwa-

lają również na odróżnienie sektorów elektroślabych różnych modeli supersymetrycznych [60] i pokazują synergię między pomiarami z LHC i ILC.

Jestem również współautorem dwóch prac przeglądowych na temat supersymetrii. W pierwszej z nich [61] (przed doktoratem) zaproponowana została konwencja określająca metody obliczeń poprawek radiacyjnych. Jej celem było umożliwienie łatwych porównań pomiędzy wynikami numerycznymi otrzymanymi przez różne grupy. Drugi artykuł [62] omawia ogólne aspekty poszukiwań supersymetrii w kolajderach e^+e^- oraz precyzyjne pomiary parametrów modelu standardowego. Jego celem jest podsumowanie dotychczasowych badań w związku z możliwą ostateczną decyzją w sprawie budowy tej maszyny.

Literatura

- [1] K. Rolbiecki, J. Tattersall, and G. Moortgat-Pick, *Towards Measuring the Stop Mixing Angle at the LHC*, Eur. Phys. J. **C71** (2011) 1517, [arXiv:0909.3196].
- [2] G. Moortgat-Pick, K. Rolbiecki, and J. Tattersall, *Momentum reconstruction at the LHC for probing CP-violation in the stop sector*, Phys. Rev. **D83** (2011) 115012, [arXiv:1008.2206].
- [3] K. Rolbiecki and K. Sakurai, *Light stops emerging in WW cross section measurements?*, JHEP **09** (2013) 004, [arXiv:1303.5696].
- [4] J. S. Kim, K. Rolbiecki, K. Sakurai, and J. Tattersall, *'Stop' that ambulance! New physics at the LHC?*, JHEP **12** (2014) 010, [arXiv:1406.0858].
- [5] K. Rolbiecki and J. Tattersall, *Refining light stop exclusion limits with W^+W^- cross sections*, Phys. Lett. **B750** (2015) 247–251, [arXiv:1505.05523].
- [6] J. S. Kim, K. Rolbiecki, R. Ruiz, J. Tattersall, and T. Weber, *Prospects for natural SUSY*, Phys. Rev. **D94** (2016), no. 9 095013, [arXiv:1606.06738].
- [7] **ATLAS** Collaboration, G. Aad et al., *The ATLAS Experiment at the CERN Large Hadron Collider*, JINST **3** (2008) S08003.
- [8] **CMS** Collaboration, S. Chatrchyan et al., *The CMS Experiment at the CERN LHC*, JINST **3** (2008) S08004.
- [9] S. P. Martin, *A Supersymmetry primer*, hep-ph/9709356. [Adv. Ser. Direct. High Energy Phys. 18, 1 (1998)].
- [10] **ATLAS** Collaboration, G. Aad et al., *Summary of the ATLAS experiment's sensitivity to supersymmetry after LHC Run 1 – interpreted in the phenomenological MSSM*, JHEP **10** (2015) 134, [arXiv:1508.06608].
- [11] **CMS** Collaboration, V. Khachatryan et al., *Phenomenological MSSM interpretation of CMS searches in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ and 8 TeV*, JHEP **10** (2016) 129, [arXiv:1606.03577].
- [12] **ATLAS** Collaboration, G. Aad et al., *Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC*, Phys. Lett. **B716** (2012) 1–29, [arXiv:1207.7214].

- [13] **CMS** Collaboration, S. Chatrchyan et al., *Observation of a new boson at a mass of 125 GeV with the CMS experiment at the LHC*, Phys. Lett. **B716** (2012) 30–61, [arXiv:1207.7235].
- [14] **ATLAS** Collaboration, G. Aad et al., *ATLAS Run 1 searches for direct pair production of third-generation squarks at the Large Hadron Collider*, Eur. Phys. J. **C75** (2015), no. 10 510, [arXiv:1506.08616]. [Erratum: Eur. Phys. J. **C76**, no. 3, 153 (2016)].
- [15] **CMS** Collaboration, A. M. Sirunyan et al., *Searches for pair production of third-generation squarks in $\sqrt{s} = 13$ TeV pp collisions*, arXiv:1612.03877.
- [16] G. Moortgat-Pick, K. Rolbiecki, J. Tattersall, and P. Wienemann, *Probing CP Violation with and without Momentum Reconstruction at the LHC*, JHEP **01** (2010) 004, [arXiv:0908.2631].
- [17] **ATLAS** Collaboration, G. Aad et al., *Measurement of W^+W^- production in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector and limits on anomalous WWZ and WW γ couplings*, Phys. Rev. **D87** (2013), no. 11 112001, [arXiv:1210.2979]. [Erratum: Phys. Rev. **D88**, no. 7, 079906 (2013)].
- [18] **CMS** Collaboration, S. Chatrchyan et al., *Measurement of W^+W^- and ZZ production cross sections in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV*, Phys. Lett. **B721** (2013) 190–211, [arXiv:1301.4698].
- [19] G. Moortgat-Pick, K. Rolbiecki, and J. Tattersall, *Early spin determination at the LHC?*, Phys. Lett. **B699** (2011) 158–163, [arXiv:1102.0293].
- [20] T. Gehrmann, M. Grazzini, S. Kallweit, P. Maierhöfer, A. von Manteuffel, S. Pozzorini, D. Rathlev, and L. Tancredi, *W^+W^- Production at Hadron Colliders in Next to Next to Leading Order QCD*, Phys. Rev. Lett. **113** (2014), no. 21 212001, [arXiv:1408.5243].
- [21] P. Jaiswal and T. Okui, *Explanation of the WW excess at the LHC by jet-veto resummation*, Phys. Rev. **D90** (2014), no. 7 073009, [arXiv:1407.4537].
- [22] P. Meade, H. Ramani, and M. Zeng, *Transverse momentum resummation effects in W^+W^- measurements*, Phys. Rev. **D90** (2014), no. 11 114006, [arXiv:1407.4481].
- [23] **CMS** Collaboration, V. Khachatryan et al., *Measurement of the W^+W^- cross section in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV and limits on anomalous gauge couplings*, Eur. Phys. J. **C76** (2016), no. 7 401, [arXiv:1507.03268].
- [24] **ATLAS** Collaboration, G. Aad et al., *Measurement of total and differential W^+W^- production cross sections in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector and limits on anomalous triple-gauge-boson couplings*, JHEP **09** (2016) 029, [arXiv:1603.01702].
- [25] **Particle Data Group** Collaboration, C. Patrignani et al., *Review of Particle Physics*, Chin. Phys. **C40** (2016), no. 10 100001.
- [26] **ATLAS** Collaboration, G. Aad et al., *Search for pair-produced third-generation squarks decaying via charm quarks or in compressed supersymmetric scenarios in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector*, Phys. Rev. **D90** (2014), no. 5 052008, [arXiv:1407.0608].
- [27] **ATLAS** Collaboration, G. Aad et al., *Search for top squark pair production in final states with one isolated lepton, jets, and missing transverse momentum in $\sqrt{s} = 8$ TeV pp collisions with the ATLAS detector*, JHEP **11** (2014) 118, [arXiv:1407.0583].

- [28] **ATLAS** Collaboration, G. Aad et al., *Search for direct top-squark pair production in final states with two leptons in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector*, JHEP **06** (2014) 124, [arXiv:1403.4853].
- [29] **CMS** Collaboration, S. Chatrchyan et al., *Search for top-squark pair production in the single-lepton final state in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV*, Eur. Phys. J. **C73** (2013), no. 12 2677, [arXiv:1308.1586].
- [30] **ATLAS** Collaboration, G. Aad et al., *Measurement of Spin Correlation in Top-Antitop Quark Events and Search for Top Squark Pair Production in pp Collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV Using the ATLAS Detector*, Phys. Rev. Lett. **114** (2015), no. 14 142001, [arXiv:1412.4742].
- [31] M. Papucci, J. T. Ruderman, and A. Weiler, *Natural SUSY Endures*, JHEP **09** (2012) 035, [arXiv:1110.6926].
- [32] J. S. Kim, D. Schmeier, J. Tattersall, and K. Rolbiecki, *A framework to create customised LHC analyses within CheckMATE*, Comput. Phys. Commun. **196** (2015) 535–562, [arXiv:1503.01123].
- [33] D. Dercks, N. Desai, J. S. Kim, K. Rolbiecki, J. Tattersall, and T. Weber, *CheckMATE 2: From the model to the limit*, arXiv:1611.09856.
- [34] CheckMATE <http://checkmate.hepforge.org/>.
- [35] S. Caron, J. S. Kim, K. Rolbiecki, R. Ruiz de Austri, and B. Stienen, *The BSM-AI project: SUSY-AI - Generalizing LHC limits on Supersymmetry with Machine Learning*, arXiv:1605.02797.
- [36] BSM-AI <http://www.susy-ai.org/>.
- [37] **DELPHES 3** Collaboration, J. de Favereau, C. Delaere, P. Demin, A. Giammanco, V. Lemaitre, A. Mertens, and M. Selvaggi, *DELPHES 3, A modular framework for fast simulation of a generic collider experiment*, JHEP **02** (2014) 057, [arXiv:1307.6346].
- [38] T. Sjöstrand, S. Ask, J. R. Christiansen, R. Corke, N. Desai, P. Ilten, S. Mrenna, S. Prestel, C. O. Rasmussen, and P. Z. Skands, *An Introduction to PYTHIA 8.2*, Comput. Phys. Commun. **191** (2015) 159–177, [arXiv:1410.3012].
- [39] J. Alwall, R. Frederix, S. Frixione, V. Hirschi, F. Maltoni, O. Mattelaer, H. S. Shao, T. Stelzer, P. Torrielli, and M. Zaro, *The automated computation of tree-level and next-to-leading order differential cross sections, and their matching to parton shower simulations*, JHEP **07** (2014) 079, [arXiv:1405.0301].
- [40] J. A. Casas, J. M. Moreno, S. Robles, K. Rolbiecki, and B. Zaldivar, *What is a Natural SUSY scenario?*, JHEP **06** (2015) 070, [arXiv:1407.6966].
- [41] R. Barbieri and G. F. Giudice, *Upper Bounds on Supersymmetric Particle Masses*, Nucl. Phys. **B306** (1988) 63–76.
- [42] J. A. Casas, J. M. Moreno, S. Robles, and K. Rolbiecki, *Reducing the fine-tuning of gauge-mediated SUSY breaking*, Eur. Phys. J. **C76** (2016), no. 8 450, [arXiv:1602.06892].

- [43] K. Rolbiecki and K. Sakurai, *Constraining compressed supersymmetry using leptonic signatures*, JHEP 10 (2012) 071, [arXiv:1206.6767].
- [44] M. Asano, K. Rolbiecki, and K. Sakurai, *Can R-parity violation hide vanilla supersymmetry at the LHC?*, JHEP 01 (2013) 128, [arXiv:1209.5778].
- [45] J. S. Kim, K. Rolbiecki, and R. Ruiz de Austri, *Model-independent combination of diphoton constraints at 750 GeV*, Eur. Phys. J. C76 (2016), no. 5 251, [arXiv:1512.06797].
- [46] J. S. Kim, J. Reuter, K. Rolbiecki, and R. Ruiz de Austri, *A resonance without resonance: scrutinizing the diphoton excess at 750 GeV*, Phys. Lett. B755 (2016) 403–408, [arXiv:1512.06083].
- [47] F. Domingo, S. Heinemeyer, J. S. Kim, and K. Rolbiecki, *The NMSSM lives: with the 750 GeV diphoton excess*, Eur. Phys. J. C76 (2016), no. 5 249, [arXiv:1602.07691].
- [48] V. De Romeri, J. S. Kim, V. Martín-Lozano, K. Rolbiecki, and R. Ruiz de Austri, *Confronting dark matter with the diphoton excess from a parent resonance decay*, Eur. Phys. J. C76 (2016), no. 5 262, [arXiv:1603.04479].
- [49] A. Biekötter, J. L. Hewett, J. S. Kim, M. Kraemer, T. G. Rizzo, K. Rolbiecki, J. Tattersall, and T. Weber, *Complementarity of Resonant Scalar, Vector-Like Quark and Superpartner Searches in Elucidating New Phenomena*, Int. J. Mod. Phys. A32 (2017), no. 05 1750032, [arXiv:1608.01312].
- [50] ATLAS Collaboration, *Search for scalar diphoton resonances with 15.4 fb⁻¹ of data collected at $\sqrt{s} = 13$ TeV in 2015 and 2016 with the ATLAS detector*, Tech. Rep. ATLAS-CONF-2016-059, CERN, Geneva, Aug, 2016.
- [51] CMS Collaboration, V. Khachatryan et al., *Search for high-mass diphoton resonances in proton-proton collisions at 13 TeV and combination with 8 TeV search*, Phys. Lett. B767 (2017) 147–170, [arXiv:1609.02507].
- [52] M. Berggren, F. Brümmer, J. List, G. Moortgat-Pick, T. Robens, K. Rolbiecki, and H. Sert, *Tackling light higgsinos at the ILC*, Eur. Phys. J. C73 (2013), no. 12 2660, [arXiv:1307.3566].
- [53] S. Y. Choi, T. Han, J. Kalinowski, K. Rolbiecki, and X. Wang, *Characterizing invisible electroweak particles through single-photon processes at high energy e^+e^- colliders*, Phys. Rev. D92 (2015), no. 9 095006, [arXiv:1503.08538].
- [54] S. Y. Choi, B. C. Chung, J. Kalinowski, Y. G. Kim, and K. Rolbiecki, *Analysis of the neutralino system in three-body leptonic decays of neutralinos*, Eur. Phys. J. C46 (2006) 511–520, [hep-ph/0504122].
- [55] J. Kalinowski and K. Rolbiecki, *CP violation in the chargino/neutralino sector of the MSSM*, Acta Phys. Polon. B39 (2008) 1585–1592, [arXiv:0804.0549].
- [56] K. Rolbiecki and J. Kalinowski, *CP violation at one loop in the polarization-independent chargino production in e^+e^- collisions*, Phys. Rev. D76 (2007) 115006, [arXiv:0709.2994].

- [57] O. Kittel, G. Moortgat-Pick, K. Rolbiecki, P. Schade, and M. Terwort, *Measurement of CP asymmetries in neutralino production at the ILC*, Eur. Phys. J. **C72** (2012) 1854, [arXiv:1108.3220].
- [58] K. Desch, J. Kalinowski, G. Moortgat-Pick, K. Rolbiecki, and W. J. Stirling, *Combined LHC/ILC analysis of a SUSY scenario with heavy sfermions*, JHEP **12** (2006) 007, [hep-ph/0607104].
- [59] J. Kalinowski, W. Kilian, J. Reuter, T. Robens, and K. Rolbiecki, *Pinning down the Invisible Sneutrino*, JHEP **10** (2008) 090, [arXiv:0809.3997].
- [60] G. Moortgat-Pick, S. Porto, and K. Rolbiecki, *Neutralinos betray their singlino nature at the ILC*, JHEP **09** (2014) 002, [arXiv:1406.7701].
- [61] J. A. Aguilar-Saavedra et al., *Supersymmetry parameter analysis: SPA convention and project*, Eur. Phys. J. **C46** (2006) 43–60, [hep-ph/0511344].
- [62] A. Arbey et al., *Physics at the e^+e^- Linear Collider*, Eur. Phys. J. **C75** (2015), no. 8 371, [arXiv:1504.01726].

K. Rolbiecki