


1 Imię i nazwisko

Marek Lewicki

2 Posiadane dyplomy i stopnie naukowe

- 2012: Magister Fizyki na Uniwersytecie Warszawskim
Niskoenergetyczne implikacje wysokich energii granicznych warunki w SSM
Opiekun: prof. Zygmunt Lalak[†]
- 2016: Doktorat na Uniwersytecie Warszawskim
Aspekty łamania symetrii elektroslabej w świetle nowych danych z LHC
Opiekun: prof. Zygmunt Lalak[†]

3 Informacja o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych

2016-2017	University of Adelaide Postdoctoral researcher	 THE UNIVERSITY of ADELAIDE
2017-2020	King's College London Postdoctoral researcher	
2020-teraz	Uniwersytet Warszawski Adiunkt badawczy	

4 Omówienie osiągnięć, o których mowa w art. 219 ust. 1 pkt. 2 Ustawy

4.1 Tytuł osiągnięcia naukowego

Cykl publikacji pod tytułem:

Eksperymentalne sygnatury kosmologicznych przemian fazowych

[†]Zygmunt.Lalak@fuw.edu.pl



4.2 Lista publikacji wchodzących w skład osiągnięcia:

- [H1] Marek Lewicki and Ville Vaskonen. Gravitational waves from colliding vacuum bubbles in gauge theories. *Eur. Phys. J. C*, 81(5):437, 2021. [arXiv:2012.07826](#), [doi:10.1140/epjc/s10052-021-09232-3](#)
- [H2] John Ellis, Marek Lewicki, and Ville Vaskonen. Updated predictions for gravitational waves produced in a strongly supercooled phase transition. *JCAP*, 11:020, 2020. [arXiv:2007.15586](#), [doi:10.1088/1475-7516/2020/11/020](#)
- [H3] Marek Lewicki and Ville Vaskonen. Gravitational wave spectra from strongly supercooled phase transitions. *Eur. Phys. J. C*, 80(11):1003, 2020. [arXiv:2007.04967](#), [doi:10.1140/epjc/s10052-020-08589-1](#)
- [H4] John Ellis, Marek Lewicki, and José Miguel No. Gravitational waves from first-order cosmological phase transitions: lifetime of the sound wave source. *JCAP*, 07:050, 2020. [arXiv:2003.07360](#), [doi:10.1088/1475-7516/2020/07/050](#)
- [H5] Marek Lewicki and Ville Vaskonen. On bubble collisions in strongly supercooled phase transitions. *Phys. Dark Univ.*, 30:100672, 2020. [arXiv:1912.00997](#), [doi:10.1016/j.dark.2020.100672](#)
- [H6] John Ellis, Marek Lewicki, José Miguel No, and Ville Vaskonen. Gravitational wave energy budget in strongly supercooled phase transitions. *JCAP*, 06:024, 2019. [arXiv:1903.09642](#), [doi:10.1088/1475-7516/2019/06/024](#)
- [H7] John Ellis, Marek Lewicki, and José Miguel No. On the Maximal Strength of a First-Order Electroweak Phase Transition and its Gravitational Wave Signal. *JCAP*, 04:003, 2019. [arXiv:1809.08242](#), [doi:10.1088/1475-7516/2019/04/003](#)

4.3 Wstęp

Model Standardowy fizyki cząstek elementarnych stanowi podstawę aktualnego zrozumienia interakcji cząstek elementarnych. Jednak pomimo przytłaczającego sukcesu fenomenologicznego, którego kulminacją było odkrycie bozonu Higgsa [40, 41], nie ma wątpliwości, że potrzebna jest nowa fizyka poza SM, aby wyjaśnić kluczowe obserwowane zjawiska, takie jak istnienie ciemnej materii czy mechanizm powstania asymetrii barionowej. LHC osiągnął już zaplanowaną maksymalną energię, i z każdym nowym przeanalizowanym zbiorem danych staje się coraz mniej prawdopodobne, że LHC po prostu wskaże nam jasny kierunek poprzez bezpośrednie odkrycie

cząstek spoza SM. W tej sytuacji naturalne jest zwrócenie się do źródła obserwacji, które mieliśmy nadzieję wyjaśnić za pomocą eksperymentów akceleratorowych, czyli do związku między fizyką cząstek elementarnych a kosmologią.

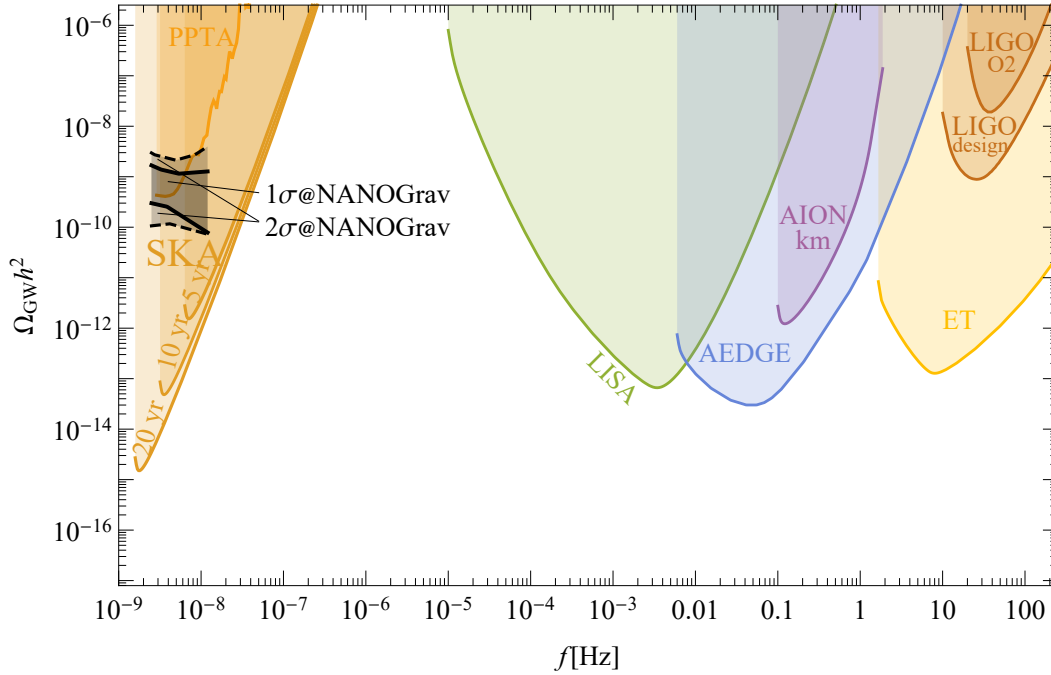
Jednocześnie jesteśmy świadkami początków nowej ery w astrofizyce i kosmologii dzięki eksperymentom LIGO i VIRGO. Począwszy oczywiście od pierwszego wykrycia fal grawitacyjnych (GW) ze zderzenia dwóch czarnych dziur [42], odkrycia już ukoronowanego Nagrodą Nobla w dziedzinie fizyki. Po tym sukcesie nastąpiło wiele innych podobnych wydarzeń [43, 44, 45, 46, 47] oraz obserwacja zderzenia dwóch gwiazd neutronowych [48]. Obecnie większość naszej wiedzy o wczesnym Wszechświecie opiera się na danych pochodzących z analizy mikrofalowego promieniowania tła, które powstało, gdy fotony przestały oddziaływać z większością zawartości wszechświata gdy ta przeszła rekombinację. Miało to miejsce, gdy Wszechświat miał kilkaset tysięcy lat. Jednak fale grawitacyjne są sprzężone bardzo słabo i zasadniczo swobodnie się się przemieszczają od momentu ich wytworzenia, co może pozwolić nam obserwować zjawiska zachodzące znacznie wcześniej niż standardowe techniki fotonowe. Tak więc, mimo że wszystkie obserwowane dotychczas dzięki falam grawitacyjnym zdarzenia mają charakter astrofizyczny i miały miejsce bardzo niedawno w skalach kosmologicznych, wyraźnie potwierdzają, że otwiera się właśnie przed nami nowe bezprecedensowe okno obserwacyjne na wczesny Wszechświat.

W nadchodzących latach planowanych jest wiele nowych eksperymentów poszukujących fal grawitacyjnych, które znacznie poprawią nasz obecny zasięg pod względem czułości i zasięgu częstotliwości. Przede wszystkim oczywiście LISA [49], która została już zatwierdzona do finansowania przez Europejską Agencję Kosmiczną i ma wystartować w 2034 roku. Inne nadchodzące zaawansowane projekty to Teleskop Einsteina (ET) [50] i Square Kilometer Array (SKA) [50]. Dwa kolejne godne uwagi eksperymenty które mają wykorzystać technik interferometrii zimnych atomów do sondowania fal grawitacyjnych to AION [10] i AEDGE [51]. Byłem mocno zaangażowany w obie te projekty jako jeden z głównych autorów ich propozycji (tzw. white paper).

Rysunek. 1 obrazuje czułości detektorów przy użyciu gęstości fal grawitacyjnych, która jest najczęściej stosowaną miarą w kosmologii. Uwzględniamy czułość planowanych przyszłych detektorów wraz z aktualnie działającymi LIGO [52, 53, 54, 55] oraz eksperymentami opartymi na badaniu sygnałów z pulsarów PPTA [56] oraz EPTA [57]. Szary obszar pokazuje sygnały mogące wyjaśnić niedawne doniesienia o możliwej obecności stochastycznego tła fal grawitacyjnych płynące z kolejnego eksperymentu wykorzystującego pomiar czasu sygnałów z pulsarów, kolaboracji NANOGrav [58]. Przy tak optymistycznych perspektywach nowych danych kluczowym zadaniem dla społeczności fizyków teoretycznych staje się właściwe modelowanie potencjalnych źródeł fal grawitacyjnych i ustalenie, jakie informacje o wczesnym Wszechświecie będą dzięki nim w naszym zasięgu. Nadrzędnym celem prezentowanej serii artykułów było właśnie otwarcie nowej możliwości uchwycenia wydarzeń zachodzących w ciągu kilku sekund po Wielkim Wybuchu poprzez poszerzenie naszego rozumienia fizyki kosmologicznych przejść fazowych (PT).

4.4 Dynamika przejść fazowych

Zazwyczaj w modelach przewidujących przemianę fazową pierwszego rodzaju pole skalarne jest stabilizowane w lokalnym minimum potencjału przez poprawki termiczne do potencjału. Wraz z rozszerzaniem się i ochładzaniem Wszechświata poprawki te maleją i pojawia się globalne minimum. W końcu bariera między minimami staje się na tyle mała, że pole może przez nią tunelować. Przejście rozpoczyna się gdy pole przenika przez barierę na małych obszarach, tworząc



Rysunek 1: Czulości eksperymentów omówionych Sekcji 4.3. Sygnały wewnątrz czarnych mogą stanowić potencjalne wyjaśnienie ostatnich danych z kolaboracji NANOGrav [58] z zaznaczonym prawdopodobieństwem.

bąble zawierające globalną próżnię. Bąble te następnie rosną i zderzają się, aż cały Wszechświat przejdzie do globalnego minimum.

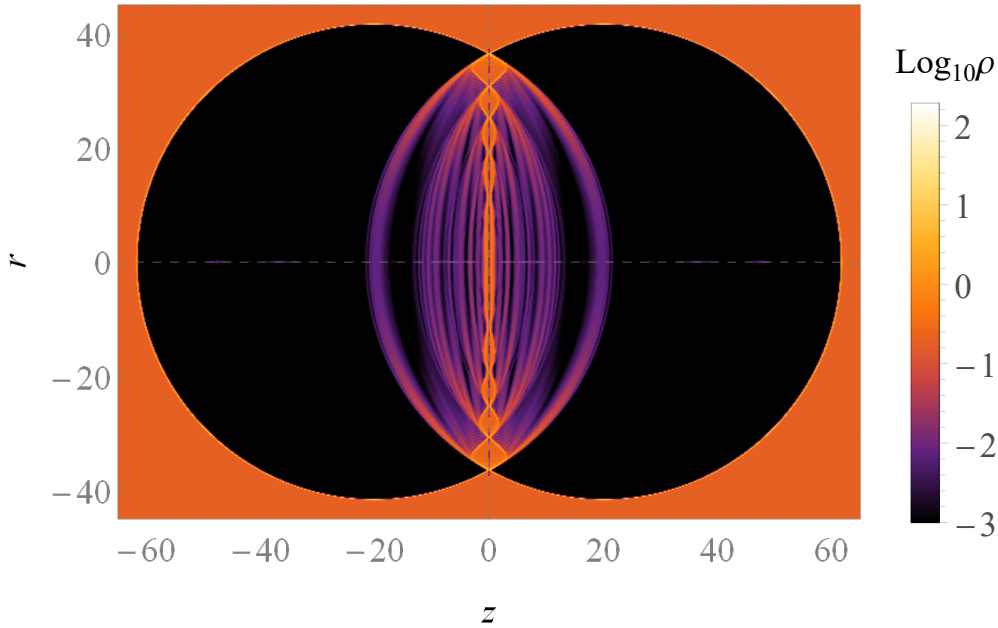
Rys. 2 pokazuje logarytmiczną gęstość energii w zderzeniu dwóch bąbli. Niezerowa gęstość energii na zewnątrz bąbli to po prostu energia lokalnego minimum, która w miarę ich wzrostu przekształcana jest w coraz bardziej energetyczną ścianę. Podczas nukleacji i wzrostu bąbli ich sferyczna symetria uniemożliwia jakąkolwiek produkcję fal grawitacyjnych więc cała produkcja przypada na końcowe momenty przejścia, gdy bąble się zderzają [59]. Proces nukleacji jest dość dobrze poznany i został opisany w wielu modelach fizyki cząstek elementarnych, aby znaleźć szybkość pojawiania się bąbli, która z kolei daje przybliżoną temperaturę przejścia i średni rozmiar bąbli w momencie zderzenia. Jednocześnie znacznie gorzej zrozumiana jest ostatnia część procesu transformacji i produkcja fal grawitacyjnych, która właśnie jest motywem przewodnim opisywanej serii artykułów.

Podstawowym parametrem opisującym przemianę fazową jest tzw. siła przemiany

$$\alpha = \frac{\Delta V}{\rho_R} \quad (1)$$

czyli stosunek gęstości energii próżni danej przez różnicę pomiędzy minimami pomiędzy którymi zachodzi przejście do gęstości energii plazmy wypełniającej wszechświat przed przemianą. Kolejnym typowym parametrem opisującym skalę czasową przemiany jest β powiązana z szerokością rozpadu fałszywej próżni przez

$$\Gamma \propto e^{\beta t} \quad (2)$$



Rysunek 2: Dwu wymiarowe cięcie przez zderzenie dwóch bąbli pokazujące logarytmiczną gęstość energii.

i wyrażana zwykle w odniesieniu do parametru Hubble’a w czasie przemiany jako β/H . Całkowita gęstość fal grawitacyjnych rośnie wraz z gęstością energii próżni biorącej udział w przemianie. Maleje natomiast wraz z prędkością przemiany ponieważ odpowiada ona mniejszemu czasowi aktywności źródła. Dla wszystkich źródeł mamy więc

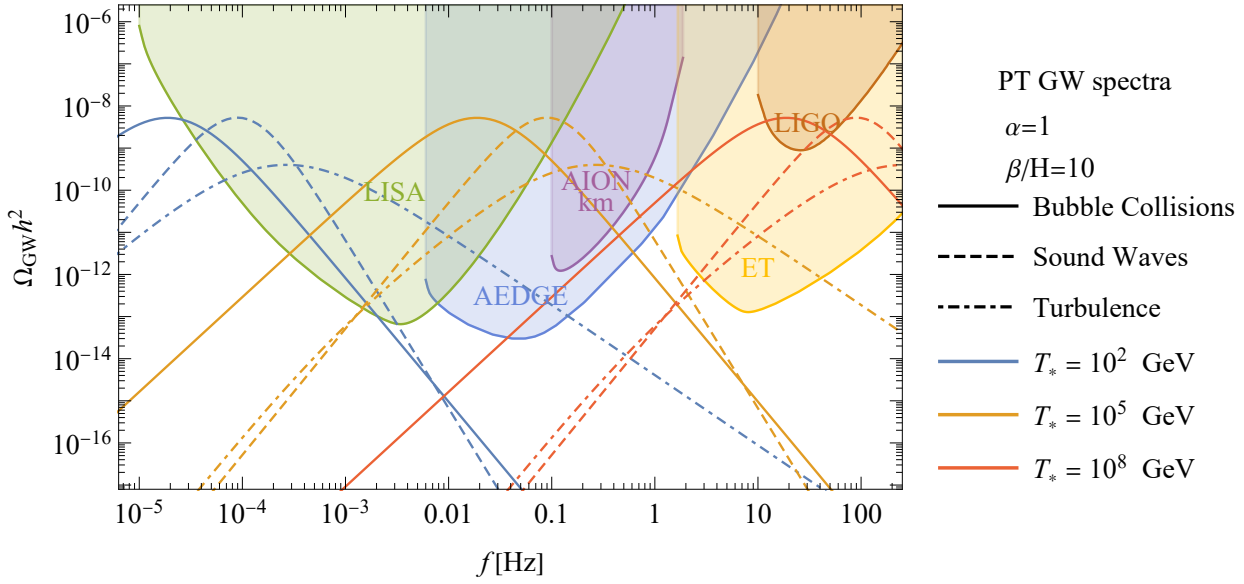
$$\Omega_{GW} \propto \left(\kappa_n \frac{\alpha}{\alpha + 1} \right)^2 \left(\frac{\beta}{H} \right)^{-a_n}, \quad (3)$$

gdzie konkretne wartości efektywności κ_n i potęgi a_n zależą od tego który mechanizm produkcji dominuje w danej przemianie. To prowadzi nas do kluczowego problemu budżetu energetycznego różnych potencjalnych źródeł, który omówimy w następnej sekcji.

4.5 Budżet energetyczny kosmologicznej przemiany fazowej pierwszego rodzaju

Odpowiednio silne przemiany fazowe mogą wytwarzać potencjalnie obserwowalne stochastyczne tła fal grawitacyjnych, a takie sygnały dałyby bardzo interesujące perspektywy obserwacji przyszłym eksperymentom. Jednak ta dziedzina badań ewoluuje bardzo szybko a szczegóły dotyczące modelowania źródeł są w tym momencie nadal niepewne. Aby to zilustrować, omówmy bardzo popularny w środowisku przegląd zrealizowany przez kosmologiczną grupę będącą częścią kolaboracji LISA z 2015 [60], który podsumował stan wiedzy sprzed sześciu lat. Wskazano tam na trzy główne mechanizmy produkcji fal grawitacyjnych

1. Kolizje ścian bąbli [61, 62]
2. Fale akustyczne [63, 64]



Rysunek 3: Przykładowe spektra fal grawitacyjnych ze wszystkich możliwych źródeł aktywnych podczas przemiany pierwszego rodzaju o sile $\alpha = 1$ i skali czasowej $\beta/H = 10$ zachodzącej w temperaturach $T_* = 10^2$ GeV, 10^5 GeV lub 10^8 GeV.

3. Turbulencje w plazmie [65, 66]

Pierwszy z tych wkładów może być duży, jeśli znaczna część energii uwalnianej z próżni w miarę wzrostu bąbli zostanie wykorzystana do przyspieszenia i wyostrenia profilu pola. Jeśli tarcie otaczającej plazmy zatrzyma przyspieszenie ściany, energia będzie przekazywana do powłoki plazmowej, którą tworzy wokół siebie bąbel efektem przypominającym działanie pługu śnieżnego. Dominują wtedy dwa kolejne źródła związane z plazmą a ich wzajemna relacja jest nadal niepewna. Turbulencje mogą być długotrwałym źródłem, ale ich wytworzenie z fal akustycznych nie jest jeszcze dobrze zrozumiane [67, 65].

Wyprowadzenie parametrów opisujących ilość energii w każdym ze źródeł jest również kluczowe dla możliwego rozróżnienia modeli w których zachodzi przemiana. Widma wytwarzane przez każde ze źródeł są inne i pozwoliłyby nam zidentyfikować dominujące źródło tylko na podstawie sygnału fal grawitacyjnych co z kolei mogłoby zawęzić możliwy zestaw odpowiedzialnych za produkcję modeli. Przykłady widm ze wszystkich źródeł jednocześnie zilustrowane są na rys. 3.

4.5.1 Kolizje Ścian Bąbli

Nowe obliczenia prędkości ściany bąbli [68, 69] wykazały, że tarcie, z którym otaczająca plazma działa na ściany, zostało w przeszłości poważnie niedoszacowane. Problem wynikał z faktu, że starsze obliczenia uwzględniające jedynie wiodący wkład w rozwinięciu perturbacyjnym [70] dawały jednie stały wkład do tarcia proporcjonalny do zmiany mas cząstek po przejściu przez ścianę bąbla. Podczas gdy nowsze obliczenia wykazały, że wkłady wyższego rzędu choć początkowo mniejsze rosną wraz z prędkością ściany.

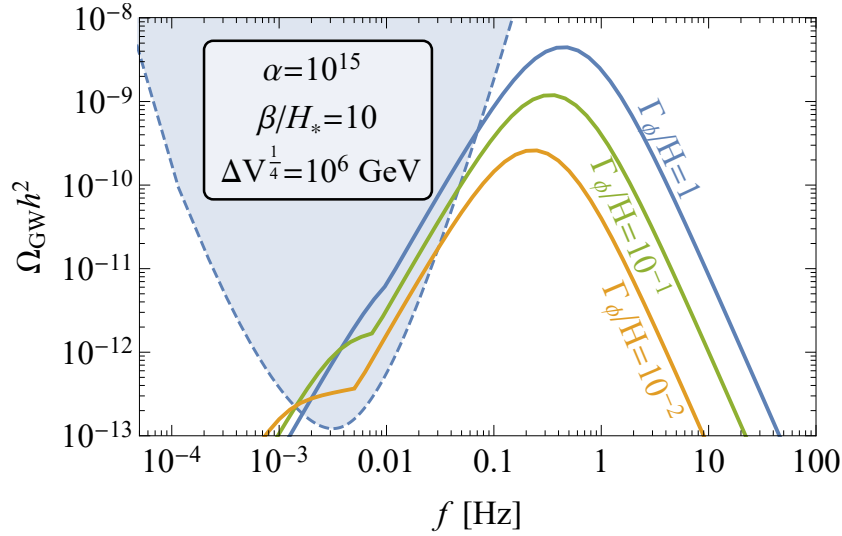
W rezultacie jedynym sposobem zmagazynowania znacznej ilości energii w ścianie bąbla jest zmniejszenie tarcia poprzez znaczne zmniejszenie gęstości otaczającej plazmy na skutek

ekspansji zanim rozpocznie się nukleacja bąbli. Jednak znaczące przechłodzenie przemiany nie jest łatwe do zrealizowania we wszystkich typach modeli. W typowych rozszerzeniach SM o potencjale wielomianowym wszystkie wyrazy występujące w potencjale muszą być tego samego rzędu, aby otrzymać dwa minima z barierą między nimi. Jeśli bariera jest generowana wyłącznie przez efekty termiczne to szybko zniknie i nie jest możliwy do osiągnięcia znaczący poziom rozrzedzenia plazmy. Zweryfikowaliśmy ten fakt w H4 przy użyciu uproszczonych pół-analitycznych obliczeń szybkości tunelowania, które pozwoliły nam obszernie przeskanować całą przestrzeń parametrów tego prostego modelu.

W rezultacie jedyne potencjały wielomianowe mogące wstrzymać przemianę odpowiednio długo muszą przewidywać istnienie bariery także w zerowej temperaturze. Jak pokazaliśmy w H7 modele takie prowadzą generycznie do problemów z perkolacją i zakończeniem przemiany. Jest to związane z faktem, iż wraz z rozrzedzaniem plazmy energia pola skalarnego uwięzionego w minimum potencjału dominuje ekspansję i prowadzi do eksponencjalnego rozszerzania wszechświata. W takich warunkach nawet bąbel rosnący z prędkością bliską prędkości światła osiągnie jedynie skończony rozmiar we współrzędnych konformalnych. Część wszechświata która nie przeszła jeszcze przemiany rozszerza się eksponencjalnie a więc prędkość nukleacji bąbli musi rosnać aby nadgonić tempo rozszerzania się fizycznego obszaru fałszywej próżni. Jednak w związku z istnieniem bariery w zerowej temperaturze szybkość nukleacji bąbli dąży jedynie do pewnej skończonej wartości.

W rezultacie otrzymujemy prosty podział na dwie klasy modeli względem dopuszczalnego przechłodzenia. Jak już ustaliliśmy w klasycznych potencjałach wielomianowych przechłodzenie jest niemożliwe. Okazuje się jednak, iż w potencjałach gdzie symetria łamana jest przez efekty kwantowe barier znikają w zerowej temperaturze jednak globalne minimum generowane jest przez poprawki logarytmiczne i ta hierarchia pozwala aby przemiana była istotnie przechłodzona jednak kończyła się gdy bariera osiągnie dość małe rozmiary [71, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 81, 82]. W pracy H6 przeprowadziliśmy pierwszy rachunek pokazujący jak dokładnie obliczyć efektywność produkcji fal grawitacyjnych w pochodzących ze zderzeń bąbli w tak silnej przechłodzonej przemianie. Pozwoliło nam to po raz pierwszy dokładnie pokazać, iż w istotnej części przestrzeni parametrów tego typu modeli produkcja fal grawitacyjnych odbywa się właśnie poprzez zderzenia bąbli a nie efekty związane z plazmą.

Niedługo potem wykazano, że nie tylko wyższe rzędy w teorii perturbacji miały znaczący wpływ na tarcie wytwarzane przez plazmę, ale także resumację emisji miękkich bozonów cechowania [69]. Rezultatem była jeszcze silniejsza zależność siły tarcia działającej na bąbel od prędkości. W H2 zaktualizowaliśmy nasze obliczenia budżetu energetycznego, aby uwzględnić ten efekt. Przeprowadziliśmy również pełny skan przestrzeni parametrów najprostszego rozszerzenia modelu standardowego o symetrię $U(1)_{B-L}$ posiadającego klasyczną niezmienniczość ze względu na skalowanie. Pokazując, że pomimo tego nowego efektu znaczna część przestrzeni parametrów modelu nadal przewidywała sygnał wytwarzane głównie przez zderzenia bardzo energetycznych bąbli. W tym artykule omówiliśmy również nowy efekt związany z faktem, że bardzo powolny zanik pola po zakończeniu przemiany może prowadzić do krótkiego okresu przypominającego dominację materii, ponieważ gęstość energii jest zdominowana przez pole oscylujące wokół globalnego minimum potencjału. Mechanizm ten wytwarza również charakterystyczne spektrum stochastycznego tła fal grawitacyjnych. Z punktu widzenia skal super-horyzontalnych nasze przejście jest zawsze efektywnie źródłem białego szumu, ponieważ nie jest skorelowane w takich długościach fali. Prowadzi to do charakterystycznego nachylenia widma f^3 przy niskich



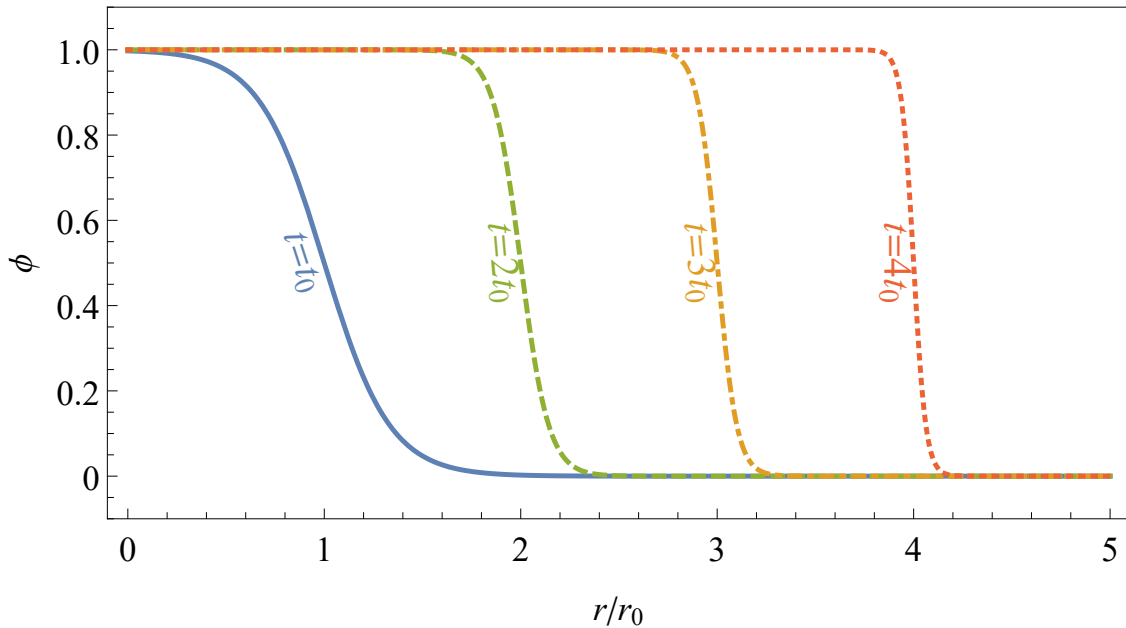
Rysunek 4: Spektra fal grawitacyjnych wyprodukowanych przez przechłodzoną przemianę fazową o siel i charakterystycznej skali czasowej $\alpha = 10^{15}$, $\beta/H = 10$ i skali energii ustalonej przez różnicę pomiędzy minimami potencjału $\Delta V^{1/4} = 10^6$ GeV. Rozpad pola po przemianie opisuje szerokość Γ_ϕ . Pokazujemy rozpady poczynając od szybkich $\Gamma_\phi/H = 1$ aż do trwających istotnie dłużej niż czas Hubble'a $\Gamma_\phi/H = 10^{-2}$.

częstotliwościach odpowiadających tak dużym skalom, pod warunkiem, że skale te wchodzą pod horyzont w ekspansji zdominowanej przez promieniowanie. Nasz krótki okres dominacji materii zamiast tego wytwarza mniej strome spektrum f^1 przy niskich częstotliwościach, zapewniając bardzo wyraźną sygnaturę eksperymentalną. Przykład widma powstającego dzięki temu mechanizmowi pokazujemy na Rys. 4.

4.5.2 Fale akustyczne i turbulencje w plazmie

W pracy H7 pokazaliśmy, że źródło fal grawitacyjnych jakim są fale akustyczne w plazmie generowane przez przemianę fazową nie jest aktywne przez pełny czas Hubble'a, jak wcześniej zakładano [64]. Okres fal dźwiękowych definiowany jest przez liniowy przepływ powłok plazmowych rozchodzących się po zderzeniu bąbli próżniowych bez interakcji między nimi. Uniemożliwiłoby to wytwarzanie turbulencji, a stary współczynnik efektywności przypisywany turbulencjom był po prostu małym ułamkiem energii, który odpowiadał numerycznemu błędowi pojawiającemu się w symulacjach na sieci [63, 60], który początkowo mógł zostać przekształcony w przepływ turbulentny. Fale dźwiękowe stoją za produkcją maximum spektrum więc ma to istotny wpływ na ostateczny sygnał fal grawitacyjnych i oznacza, że jego siła jest tłumiona w porównaniu z poprzednimi prognozami, zwykle o więcej niż rząd wielkości. Zaproponowane przez nas nowe szacunki amplitudy sygnału fal grawitacyjnych z przemiany fazowej zostały powszechnie zaakceptowane w środowisku i są obecnie stosowanym standardem [83].

Jednocześnie wkład turbulencji powinien zostać odpowiednio zwiększony, co omówiliśmy w H6. Starsze szacunki zakładały, że przepływ liniowy będzie trwał, dopóki tarcie Hubble'a nie wyeliminuje źródła w postaci fal dźwiękowych. Zamiast tego przepływ szybko staje się nieliniowy, co sygnalizuje koniec okresu fal dźwiękowych i umożliwia wczesną produkcję turbulencji.



Rysunek 5: *Ewolucja w czasie profilu pola odpowiadającego rosnącemu bąblowi próżni jako funkcja współrzędnej radialnej r przeskalowanej do rozmiaru początkowego r_0*

Wczesny początek nieliniowości umożliwia rozwój turbulencji, podczas gdy większość energii jest nadal magazynowana w energii kinetycznej płynu, a jej udział w całkowitym budżecie energii może być tak duży, jak fal dźwiękowych [64]. Nasze szacunki w H6 oparte na tym spostrzeżeniu wykazały, że w rezultacie turbulencje mogą być źródłem GW równie ważnych jak fale dźwiękowe.

4.6 Obliczenie kształtu spektrum fal grawitacyjnych w bardzo silnej przemianie

W pracach H5, H3 i H1 skupiliśmy się na dokładnym obliczeniu spektrum fal grawitacyjnych produkowanych przez bardzo silne przemiany, w których można pominąć dynamikę plazmy. Najbardziej oczywistym sposobem obliczenia widma byłaby symulacja numeryczna na sieci. W ostatnich latach nastąpił znaczny postęp na tym froncie [84, 85], jednak podejście to napotyka jeden podstawowy problem. Po nukleacji bąble zawierające globalną próżnię powiększają się, jednocześnie gromadząc energię uzyskaną z konwersji próżni w wyostrzającym profilu pola odpowiadającym ściance bąbla. Zilustrowaliśmy ten efekt na rys. 5 pokazujący po lewej stronie przykładowy potencjał, a po prawej bąbel globalnej próżni rosnący w tle rozpadającej się próżni lokalnej. Bąbel taki jest sferycznie symetrycznym profilem pola w funkcji zwykłej współrzędnej radialnej r . W miarę wzrostu, do opisu bąbla potrzebna jest też coraz większa siatka. Co gorsza, sieć musi również stawać się coraz gęstsza aby prawidłowo opisać coraz bardziej stromą ścianę. W realistycznych modelach bąble zawsze rosną o wiele rzędów wielkości, zanim się zderzą, co sprawia, że bezpośrednie symulacje na sieci w istotnych fizycznie przypadkach stają się zadaniem niezwykle trudnym.

Zastosowana przez nas alternatywa wykorzystuje modelowanie źródeł fal, co pozwala nam stworzyć pełny obraz przemiany w skali kosmologicznej. Praktyczne obliczenia przebiegałyby podobnie do obliczeń na sieci z przypadkową nukleacją bąbli, jednak zamiast śledzić ewolucje

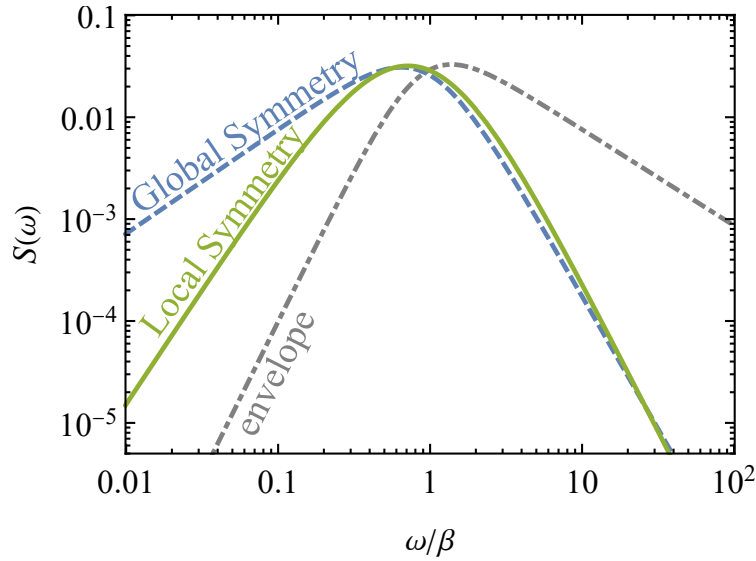
poła, modelujemy ewolucję bąbli w sposób przybliżony. Uwalnia nas to od problemu z rozdzielczością sieci i pozwala odtworzyć nawet wyjątkowo ostre cechy, pod warunkiem, że umiemy dość dokładnie modelować ich zachowanie.

Uproszczone modelowanie stosowane w literaturze opiera się na przybliżeniu cienkiej ściany opisującym powierzchnię bąbla jako sferę o zerowej szerokości i dużej gęstości energii powierzchniowej. W symulacji 3D możemy wtedy, zamiast śledzić ewolucję pola, po prostu posługiwać się sferami rosnącymi zgodnie z prostą receptą analityczną. To uproszczenie sprawia, że obliczenia są znacznie mniej czasochłonne i jesteśmy w stanie dobrze opisać bardzo silne przejście gdzie występują bardzo ostre profile pola. Jednak wadą jest oczywiście to, że wynik zależy w dużej mierze od przyjętych założeń dotyczących procesów odpowiedzialnych za produkcję GW w przejściu fazowym [86, 87]. Najszerzej stosowane przybliżenie zakłada, że ściany po prostu znikają po zderzeniu [61, 62]. W H5 przeprowadziliśmy uproszczone symulacje na sieci par pęcherzyków wykorzystując dodatkową symetrię cylindryczną problemu. Symulacje te są znacznie mniej wymagające niż symulacje w pełnym 3D, co pozwala na warunki bliższe przypadkom mającym znaczenie fizyczne. Co najważniejsze, symulacje pozwoliły nam na modelowanie zachowania pola również po zderzeniu. W pracach H3 i H1 pokazaliśmy że propagacja gradientów pola także po zderzeniu ma kluczowy wpływ na produkowane spektrum fal grawitacyjnych. Główną różnicą pomiędzy H3 i H1 był model użyty w uproszczonych symulacjach na sieci. W H3 modelowaliśmy wyłącznie skalar co odpowiada modelowi z globalną symetrią podczas gdy w H1 uwzględniliśmy także bozony cechowania aby opisać łamanie symetrii lokalnej. Rezultatem było inne tempo dyssypacji energii gradientów po kolizji, odpowiednio $E \propto r^{-2}$ i $E \propto r^{-3}$ w opisanych przypadkach.

Rys. 6 pokazuje dla porównania spektra w obu przypadkach wraz z tym wynikającym z natychmiastowego znikania ścian po kolizji. Po pierwsze, włączenie gradientów propagujących się po zderzeniu sprawiło, że źródło stało się bardziej gładkie w małych skalach, ze względu na usunięcie ostrych kształtów, które pojawiły się na przykład, gdy dwa bąble połączyły się po usunięciu już zderzanej części ściany. To spowodowało, że powstałe widmo spada znacznie bardziej stromo przy wysokich częstotliwościach. W rezultacie nachylenie widma zmienia się od f^{-1} w przybliżeniu znikających ścian do f^{-3} . Po drugie, nachylenie nowego widma jest mniejsze przy niskich częstotliwościach, ponieważ propagujące się gradienty rozszerzają się po zderzeniu i zapewniają dodatkowe źródła energii na bardzo dużych skalach. Zgodnie z oczekiwaniami, nachylenie zależy od tego, jak szybko rozprasza się energia propagujących się gradientów pola. W przypadku złamania globalnej symetrii nachylenie przy niskich częstotliwościach wynosi f^1 , podczas gdy w przypadku łamania symetrii lokalnej szybsze rozpraszanie energii prowadzi do bardziej stromego nachylenia $f^{2.2}$. Ta różnica pozwoliłaby nam odkryć pewne informacje o modelu fizyki cząstek powodującym przemianę tylko na podstawie kształtu widma jej fal grawitacyjnych. Należy również zauważyć, że oba znalezione widma znacznie różnią się od starszego przybliżenia znikających ścian.

Kolejną kluczową cechą prac H3 i H1 jest wykorzystanie realistycznych potencjałów. Zwyczaj w symulacjach na sieci jest się ograniczonym do użycia najprostszych możliwych potencjałów wielomianowych ze względu na czas obliczeń [84, 85]. Jednak w modelach zdolnych do wytwarzania sygnału głównie poprzez zderzenia bąbli potrzebne jest ekstremalne przechłdzenie, które wymaga potencjału logarytmicznego H6.

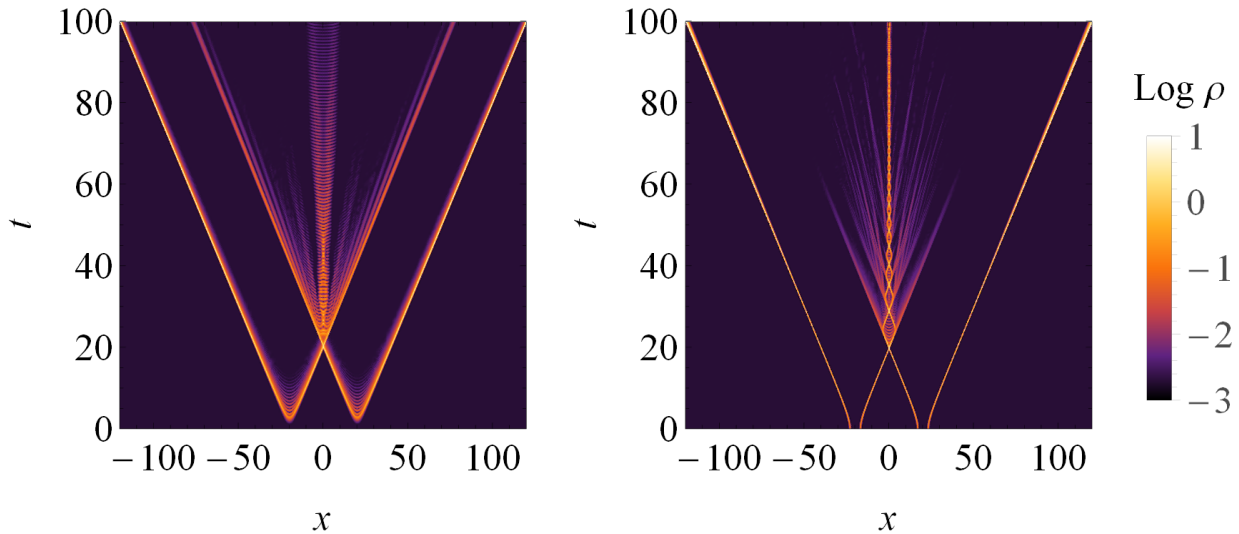
Pokażemy znaczenie wyboru potencjału na przykładzie jednego kluczowego efektu, który ma znaczący wpływ na wyniki, zwanego *pułapkowaniem próżni*. Jest to zjawisko wyrzucania pola



Rysunek 6: Widma wytwarzane przez bardzo silne przejścia fazowe w przypadku złamania globalnej symetrii $U(1)$, złamania lokalnej symetrii $U(1)$ i prostego przybliżenia w którym ściany po prostu znikają po zderzeniu.

z powrotem do początkowej próżni przez siłę zderzenia ścian pęcherzyków [88]. Jest to typowe zjawisko w przypadku wielomianowych potencjałów i rzeczywiście było opisywane w najnowszych symulacjach, które skupiały się na prostych wielomianowych modelach [84, 85]. Jednak w przypadku realistycznych potencjałów umożliwiających przechłodzone przemiany bariera jest niewielka i nie może mieć miejsca takie pułapkowanie próżni. Ilustrujemy wpływ tego efektu na rys. 7, który pokazuje ewolucję gęstości energii na osi łączącej centra dwóch zderzających się bąbli w dwóch reprezentatywnych przykładach. Zewnętrzne jasne linie na obu wykresach odpowiadają zewnętrznym ścianom dwóch bąbli, które nigdy się nie zderzają, zamiast tego po prostu się propagują i stają się bardziej energetyczne w miarę upływu czasu. Najbardziej interesują nas dwie wewnętrzne linie, które są ścianami zderzającymi się w $x = 0$ w czasie $t \approx 20$. Prawy panel pokazuje przypadek potencjału wielomianowego, w którym występuje pułapkowanie próżniowe, w wyniku czego widzimy znaczną ilość energii pozostającej w punkcie zderzenia. Po lewej stronie pokazujemy przypadek złamania symetrii przez kwantowe poprawki logarytmiczne. Tutaj bariera jest znikoma i zgodnie z oczekiwaniami nie dochodzi do pułapkowania, co, jak widzimy, prowadzi do rozchodzenia się większości energii w postaci gradientów pola po zderzeniu.

Wynik ten jest kluczowy dla obliczenia widma GW wykonanego w H3 i H1. W tym celu wykorzystaliśmy symulację 3D przybliżającą bąble i gradienty rozchodzące się po ich zderzeniu po prostu jako sfery śledząc jedynie czas zderzenia, aby następnie odpowiednio skalować energię w czasie. Gdyby miało miejsce pułapkowanie, bardziej właściwe byłoby założenie, że energia zderzanych ścian jest uwięziona w jednym miejscu po zderzeniu, co miałoby decydujący wpływ na część widma o niskiej częstotliwości, ponieważ powstająca wielkoskalowa struktura źródeł byłaby zupełnie inna.



Rysunek 7: Lewy panel: Ewolucja gęstości energii na osi łączącej środki dwóch zderzających się bąbli w potencjale charakteryzującym się łamaniem symetrii przez logarytmiczne poprawki kwantowe. Prawy panel: Podobna ewolucja gęstości energii w modelu z potencjałem wielomianowym, w którym występuje pułapowanie w fałszywej próżni i co za tym idzie znaczna ilość energii jest skoncentrowana w punkcie zderzenia po zderzeniu.

4.7 Konkluzje

Opisany cykl artykułów koncentrował się na dynamice przejść fazowych pierwszego rodzaju. Zaczęliśmy od obliczenia budżetu energetycznego, aby przewidzieć, które mechanizmy będą stanowić dominujące źródło fal grawitacyjnych w danym modelu. Nasze wyniki zmieniły poprzednie szacunki o rzędy wielkości, wpływając na wszystkie kolejne wyniki w literaturze. W przypadku wyjątkowo silnych przejść fazowych podaliśmy pierwsze wiarygodne oszacowanie udziału zderzeń ścian bąbli w budżecie energetycznym wyraźnie identyfikując modele które mogłyby wytworzyć taki sygnał. Następnie przeprowadziliśmy nową i ulepszoną kalkulację widma wytwarzanego przez zderzenia ścian bąbli, ponownie poprawiając istotnie poprzednie rezultaty i pokazując nowe możliwości identyfikacji dodatkowych cech modelu cząstek stojącego za przemianą wyłącznie w oparciu o widmo fal grawitacyjnych.

Ten kierunek badań będzie miał istotne konsekwencje dla naszej zdolności wydobywania informacji o wczesnym wszechświecie z sygnałów w postaci fal grawitacyjnych. Stanie się to kluczowe w nadchodzącej dekadzie, gdy LISA zostanie wystrzelona w 2034 roku, a Teleskop Einsteina właśnie umieszczony na [Mapie drogowej Europejskiego Forum Strategii ds. Infrastruktur Badawczych](#) będzie mógł rozpocząć działanie w podobnych ramach czasowych. Przyszłe znaczenie całego tego wysiłku najlepiej chyba podsumowują niedawne zalecenia komitetu Europejskiej Agencji Kosmicznej dotyczące przyszłej generacji eksperymentów, które mają być realizowane w jej programie ramowym [Voyage 2050](#). Zgodnie z nimi jedna z trzech z spośród największych realizowanych w latach pięćdziesiątych XXI wieku misji, ma być poświęcona badaniu wczesnego Wszechświata, prawdopodobnie za pośrednictwem nowego eksperymentu poszukującego fal grawitacyjnych.

5 Informacja o wykazywaniu się istotną aktywnością naukową albo artystyczną realizowaną w więcej niż jednej uczelni, instytucji naukowej lub instytucji kultury, w szczególności zagranicznej

Większość prac opisanych w głównym osiągnięciu została wykonana podczas mojego stażu podoktorskiego w King's College London. Publikacje O1-O17 z listy innych prac nieuwzględnionych w głównych osiągnięciach wymienionych w rozdz. 5.4 i opisanych bardziej szczegółowo poniżej zostało również opracowanych podczas mojego stażu podoktorskiego w King's College London i University of Adelaide. Wszystkie te prace były również prowadzone we współpracy międzynarodowej z wyjątkiem O10, O13 i O15 zrealizowanych ze współpracownikami z Warszawy. Natomiast prace O18-O33 z listy Sec. 5.4 zostały ukończone podczas mojego doktoratu.

5.1 Fenomenologia kosmologicznych przemian fazowych

W ostatnich latach badania fenomenologiczne modeli przewidujących przemianę fazową pierwszego rodzaju stały się bardzo popularnym tematem w literaturze, co obrazują niedawne prace przeglądowe [60, 83]. Moje badania nad tym tematem rozpoczęły się w podobny sposób od O17, gdzie bardzo szczegółowo opisaliśmy fenomenologię prawdopodobnie najprostszego rozszerzenia SM poprzez dodanie jednego dodatkowego neutralnego skalaru. Naszym celem była weryfikacja czy model może wspierać silną przemianę fazową i jednocześnie zapewniać kandydata na ciemną materię. Wynik był negatywny, ponieważ przejście fazowe wymaga znacznej modyfikacji potencjału i silnego sprzężenia między nowym skalarzem a bozonem Higgsa, co z kolei prowadzi do anihilacji i zmniejszonej gęstości skalarnej ciemnej materii. Sprawdziliśmy też, że nawet okres niestandardowej ekspansji, który miał wpływ na wymrożenie ciemnej materii, nie mógł rozwiązać tego problemu. W O11 sprawdziliśmy, że proste rozszerzenie modelu o dodatkowe fermiony sprzężone z nowym skalarzem i pełniącym rolę ciemnej materii wystarczyło do rozwiązania problemu. Przeprowadziliśmy globalne skanowanie przestrzeni parametrów i zeweryfikowaliśmy, że duża część przestrzeni parametrów zapewnia przemianę pierwszego rodzaju, zapewniając jednocześnie realistycznego kandydata na ciemną materię.

Jak opisaliśmy w rozdz. 4, nasze wyniki w H7 wykazały, że znaczna ilość energii uwolnionej w trakcie przemiany może zostać wykorzystana do wytworzenia turbulencji w plazmie. Oprócz wytworzenia charakterystycznego widma fal grawitacyjnych powiązanego z turbulencjami o amplitudzie tego samego rzędu co widmo z fal dźwiękowych, rozwój silnych turbulencji miałby też inne interesujące implikacje fenomenologiczne.

Po pierwsze, może wytworzyć pierwotne pole magnetyczne [89] wyjaśniające bardzo słabe pola obserwowane w przestrzeniach międzygalaktycznych [90, 91, 92, 93, 94]. Zbadaliśmy tę możliwość w O9 pokazując, że pola magnetyczne z przejścia fazowego pierwszego rodzaju mogą rzeczywiście wytworzyć pole wystarczająco silne, aby wyjaśnić obecne obserwacje. Przestrzeń parametrów spełniająca te ograniczenia jest dosyć duża pod warunkiem, że pole magnetyczne ma znaczną składową o określonej skrętności. Skrętność jest zachowana w późniejszej ewolucji plazmy i prowadzi z czasem do znacznie wolniejszego zaniku energii pola magnetycznego [95].

Po drugie, turbulencje o określonej skrętności wytworzyłyby kołowo spolaryzowane widmo fal grawitacyjnych [96, 97] dające wyraźny sygnał tego mechanizmu produkcji. Wykrycie pola-

ryzacji spektrum w eksperymencie planarnym, takim jak LISA, jest trudne, ponieważ nie można odróżnić spolaryzowanej fali nadchodzącej z danego kierunku od fali o przeciwnej polaryzacji nadchodzącej z przeciwnego kierunku [98]. Dla tła stochastycznego docierającego ze wszystkich stron jednocześnie oznacza to, że do detekcji musimy wykorzystać anizotropię sygnału związanego z ruchem satelity. Jest to jednak efekt wyższego rzędu, co sprawia, że czułość na polaryzację jest kilka rzędów wielkości mniejsza niż samo wykrycie tła. W pracy O3 zbadaliśmy ten problem i ponownie wykazaliśmy, że LISA może wykryć polaryzację takiego tła pochodzącego z przemiany fazowej, pod warunkiem, że tylko przemiana jest wystarczająco silna, a znaczna część turbulencji ma określoną skrętność.

5.2 Struny kosmiczne

Jeden z ważnych kierunków badań, które prowadziłem w ciągu ostatnich kilku lat, dotyczy strun kosmicznych. Są to defekty topologiczne, które powstałyby we wczesnym wszechświecie, gdyby została złamana symetria z podgrupą $U(1)$ (patrz O6, aby zapoznać się z obszernym przeglądem). Kluczowym aspektem, na którym się skupiłem, były sygnały fal grawitacyjnych, które byłyby wytwarzane przez całą historię wszechświata, gdy kosmiczna sieć strun ewoluje wraz ekspansją wszechświata.

W O14 i O12 zaproponowaliśmy nowatorską metodę badania historii ekspansji za pomocą jej wpływu na widmio fal grawitacyjnych wytwarzane przez struny kosmiczne. Te defekty topologiczne są długotrwałym źródłem, które generycznie wytwarza szerokie i płaskie spektrum, w którym wszystkie zmiany są wynikiem kosmologicznej ekspansji. Pokazaliśmy, że efekt ten można wykorzystać do zbadania ekspansji w czasie znacznie przed tym o którym możemy wnioskować na podstawie obecnie znanych danych. Pomysł ten został później wykorzystany w różnych konkretnych modelach w celu sprawdzenia obszaru ich przestrzeni parametrów który można by badać w przyszłych eksperymentów poszukujących fal grawitacyjnych [99, 100].

Ref. O4 jest ostatnim artykułem z tej serii i doprowadza ten pomysł do granic możliwości. Tutaj pokazujemy, że nawet sieć strun kosmicznych rozrzedzonych przez inflację może do dziś odbudować swoją gęstość i wytworzyć nowy charakterystyczny sygnał tego scenariusza, w którym tło stochastyczne jest stłumione, ale sieć można wykryć dzięki wytwarzanym niedawno silnym impulsom fal grawitacyjnych. Sygnał ten występuje również w bardziej standardowych modelach strun, które nie są rozrzedzone, jednak w przeciwieństwie do naszego przypadku, impulsy zawsze byłyby znacznie słabszą sondą niż tło stochastyczne i na pewno nie byłyby widoczne, gdyby tło było poza naszym zasięgiem.

Niedawno w pracy O1 zbadaliśmy nieregularności raportowane w danych zebranych przez kolaborację NANOGrav [101], które mogą być prekursorem pierwszego odkrycia stochastycznego tła fal grawitacyjnych. Pokazaliśmy, że kosmiczne struny zapewniają bardzo dobre dopasowanie do danych i udowodniliśmy, że przyszłe eksperymenty z pewnością zweryfikują tę możliwość. Ten artykuł zyskał szczególną renomę jako sugestia redaktora Physical Review Letters i wzbudził zainteresowanie także wydawnictw popularnonaukowych. Ta interpretacja została również zbadana w [102, 103, 104]. Ref [103] w szczególności sprawdza, że kosmiczne struny najlepiej pasują do zbioru danych spośród rozważanych źródeł, podczas gdy [104] zbadał wpływ niepewności w teoretycznym modelowaniu strun na końcowe dopasowanie.

5.3 Udział w wysiłkach eksperymentalnych

Byłem również aktywnie zaangażowany w współpracę ze społecznością eksperymentalistów pracujących nad badaniem fal grawitacyjnych. Od 2018 roku jestem aktywnym członkiem grupy roboczej przy eksperymencie LISA ds. kosmologii. Uczestniczyłem w przeglądzie fizyki strun kosmicznych wytworzonym w tej grupie roboczej O6 gdzie odpowiadałem za opisanie wpływu ekspansji Wszechświata na struny. Od tego czasu moje zaangażowanie w LISA rośnie i obecnie koordynuję prace nad dwoma rozdziałami nadchodzącej pracy przeglądowej kosmologicznej grupy roboczej LISA dotyczącymi przejść fazowych i strun kosmicznych.

Biorę również udział w projektach AION i AEDGE, których celem jest realizacja nowatorskich eksperymentów poszukujących fal grawitacyjnych z wykorzystaniem interferometrii atomowej w szczególności do badania pasma częstotliwości pomiędzy czułościami LISA i Teleskopu Einsteina.

Odegrałem ważną rolę w pisaniu pracy będącej podstawą AION O5 działając jako koordynator sekcji dotyczącej fal grawitacyjnych, która jest kluczową częścią celu naukowego kolaboracji. AION to naziemna implementacja obserwatorium opartego na interferometrze atomowym. Dzięki tym wysiłkom udało się już pozyskać fundusze na początkową fazę eksperymentu, a prototyp jest właśnie montowany w Oksfordzie.

Podobną rolę przyjąłem podczas pisania pracy będącej podstawą AEDGE O7. To wdrożenie tej samej technologii na satelicie, które zaproponowaliśmy Europejskiej Agencji Kosmicznej jako misję na dużą skalę w ramach Voyage 2050. Badanie wczesnego Wszechświata za pomocą sygnałów GW było kluczową częścią naszej propozycji. Jak już wspomnieliśmy, ostatnie wyniki tego konkursu w formie zaleceń komitetu wyższego szczebla, który zaleca poświęcenie jednej z trzech misji na dużą skalę które mają być realizowane w latach pięćdziesiątych XXI wieku na nową sondę wczesnego Wszechświata. Jako jeden z możliwych wyników wymienia się nowy eksperyment poszukujący fal grawitacyjnych działający właśnie w paśmie pomiędzy LISA i Teleskopem Einsteina. Samo AEDGE zostało wymienione z powodu braku gotowości technologicznej wynikającej z ciągłego rozwoju niezbędnej technologii zimnych atomów, jednak kolaboracja jest obecnie w kontakcie z dyrektorem naukowym ESA w celu opracowania mapy drogowej w kierunku akceptowalnego poziomu gotowości technologicznej.

5.4 Lista publikacji nie uwzględnionych w dokonaniu opisanym w sekcji 4

- [O1] John Ellis and Marek Lewicki. Cosmic String Interpretation of NANOGrav Pulsar Timing Data. *Phys. Rev. Lett.*, 126(4):041304, 2021. [arXiv:2009.06555](https://arxiv.org/abs/2009.06555), [doi:10.1103/PhysRevLett.126.041304](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.126.041304)
- [O2] Rouzbeh Allahverdi et al. The First Three Seconds: a Review of Possible Expansion Histories of the Early Universe. 6 2020. [arXiv:2006.16182](https://arxiv.org/abs/2006.16182), [doi:10.21105/astro.2006.16182](https://doi.org/10.21105/astro.2006.16182)
- [O3] John Ellis, Malcolm Fairbairn, Marek Lewicki, Ville Vaskonen, and Alastair Wickens. Detecting circular polarisation in the stochastic gravitational-wave background from a first-order cosmological phase transition. *JCAP*, 10:032, 2020. [arXiv:2005.05278](https://arxiv.org/abs/2005.05278), [doi:10.1088/1475-7516/2020/10/032](https://doi.org/10.1088/1475-7516/2020/10/032)

- [O4] Yanou Cui, Marek Lewicki, and David E. Morrissey. Gravitational Wave Bursts as Harbingers of Cosmic Strings Diluted by Inflation. *Phys. Rev. Lett.*, 125(21):211302, 2020. [arXiv:1912.08832](#), [doi:10.1103/PhysRevLett.125.211302](#)
- [O5] L. Badurina et al. AION: An Atom Interferometer Observatory and Network. *JCAP*, 05:011, 2020. [arXiv:1911.11755](#), [doi:10.1088/1475-7516/2020/05/011](#)
- [O6] Pierre Auclair et al. Probing the gravitational wave background from cosmic strings with LISA. *JCAP*, 04:034, 2020. [arXiv:1909.00819](#), [doi:10.1088/1475-7516/2020/04/034](#)
- [O7] Yousef Abou El-Neaj et al. AEDGE: Atomic Experiment for Dark Matter and Gravity Exploration in Space. *EPJ Quant. Technol.*, 7:6, 2020. [arXiv:1908.00802](#), [doi:10.1140/epjqt/s40507-020-0080-0](#)
- [O8] Luc Darmé, Joerg Jaeckel, and Marek Lewicki. Generalized escape paths for dynamical tunneling in QFT. *Phys. Rev. D*, 100(9):096012, 2019. [arXiv:1907.04865](#), [doi:10.1103/PhysRevD.100.096012](#)
- [O9] John Ellis, Malcolm Fairbairn, Marek Lewicki, Ville Vaskonen, and Alastair Wickens. Intergalactic Magnetic Fields from First-Order Phase Transitions. *JCAP*, 09:019, 2019. [arXiv:1907.04315](#), [doi:10.1088/1475-7516/2019/09/019](#)
- [O10] Tomasz Krajewski, Zygmunt Lalak, Marek Lewicki, and Paweł Olszewski. Higgs domain walls in the thermal background. *Phys. Dark Univ.*, 26:100347, 2019. [arXiv:1902.05560](#), [doi:10.1016/j.dark.2019.100347](#)
- [O11] Ankit Beniwal, Marek Lewicki, Martin White, and Anthony G. Williams. Gravitational waves and electroweak baryogenesis in a global study of the extended scalar singlet model. *JHEP*, 02:183, 2019. [arXiv:1810.02380](#), [doi:10.1007/JHEP02\(2019\)183](#)
- [O12] Yanou Cui, Marek Lewicki, David E. Morrissey, and James D. Wells. Probing the pre-BBN universe with gravitational waves from cosmic strings. *JHEP*, 01:081, 2019. [arXiv:1808.08968](#), [doi:10.1007/JHEP01\(2019\)081](#)
- [O13] Michal Artymowski, Olga Czerwinska, Zygmunt Lalak, and Marek Lewicki. Gravitational wave signals and cosmological consequences of gravitational reheating. *JCAP*, 04:046, 2018. [arXiv:1711.08473](#), [doi:10.1088/1475-7516/2018/04/046](#)
- [O14] Yanou Cui, Marek Lewicki, David E. Morrissey, and James D. Wells. Cosmic Archaeology with Gravitational Waves from Cosmic Strings. *Phys. Rev. D*, 97(12):123505, 2018. [arXiv:1711.03104](#), [doi:10.1103/PhysRevD.97.123505](#)
- [O15] Tomasz Krajewski, Zygmunt Lalak, Marek Lewicki, and Paweł Olszewski. Domain walls in the extensions of the Standard Model. *JCAP*, 05:007, 2018. [arXiv:1709.10100](#), [doi:10.1088/1475-7516/2018/05/007](#)
- [O16] Luc Darmé, Joerg Jaeckel, and Marek Lewicki. Towards the fate of the oscillating false vacuum. *Phys. Rev. D*, 96(5):056001, 2017. [arXiv:1704.06445](#), [doi:10.1103/PhysRevD.96.056001](#)

- [O17] Ankit Beniwal, Marek Lewicki, James D. Wells, Martin White, and Anthony G. Williams. Gravitational wave, collider and dark matter signals from a scalar singlet electroweak baryogenesis. *JHEP*, 08:108, 2017. [arXiv:1702.06124](#), [doi:10.1007/JHEP08\(2017\)108](#)
- [O18] Michał Artymowski, Marek Lewicki, and James D. Wells. Gravitational wave and collider implications of electroweak baryogenesis aided by non-standard cosmology. *JHEP*, 03:066, 2017. [arXiv:1609.07143](#), [doi:10.1007/JHEP03\(2017\)066](#)
- [O19] Tomasz Krajewski, Zygmunt Lalak, Marek Lewicki, and Paweł Olszewski. Domain walls and gravitational waves in the Standard Model. *JCAP*, 12:036, 2016. [arXiv:1608.05719](#), [doi:10.1088/1475-7516/2016/12/036](#)
- [O20] Michał Artymowski, Zygmunt Lalak, and Marek Lewicki. Multi-phase induced inflation in theories with non-minimal coupling to gravity. *JCAP*, 01:011, 2017. [arXiv:1607.01803](#), [doi:10.1088/1475-7516/2017/01/011](#)
- [O21] Olga Czerwińska, Zygmunt Lalak, Marek Lewicki, and Paweł Olszewski. The impact of non-minimally coupled gravity on vacuum stability. *JHEP*, 10:004, 2016. [arXiv:1606.07808](#), [doi:10.1007/JHEP10\(2016\)004](#)
- [O22] Zygmunt Lalak, Marek Lewicki, and Paweł Olszewski. Gauge fixing and renormalization scale independence of tunneling rate in Abelian Higgs model and in the standard model. *Phys. Rev. D*, 94(8):085028, 2016. [arXiv:1605.06713](#), [doi:10.1103/PhysRevD.94.085028](#)
- [O23] Michał Artymowski, Zygmunt Lalak, and Marek Lewicki. Implications of extreme flatness in a general $f(R)$ theory. *Phys. Lett. B*, 760:432–437, 2016. [arXiv:1604.02470](#), [doi:10.1016/j.physletb.2016.07.027](#)
- [O24] Marek Lewicki, Tanja Rindler-Daller, and James D. Wells. Enabling Electroweak Baryogenesis through Dark Matter. *JHEP*, 06:055, 2016. [arXiv:1601.01681](#), [doi:10.1007/JHEP06\(2016\)055](#)
- [O25] Michał Artymowski, Zygmunt Lalak, and Marek Lewicki. Saddle point inflation from higher order corrections to Higgs/Starobinsky inflation. *Phys. Rev. D*, 93(4):043514, 2016. [arXiv:1509.00031](#), [doi:10.1103/PhysRevD.93.043514](#)
- [O26] Michał Artymowski, Zygmunt Lalak, and Marek Lewicki. Saddle point inflation from $f(R)$ theory. *Phys. Lett. B*, 750:595–600, 2015. [arXiv:1508.05150](#), [doi:10.1016/j.physletb.2015.09.076](#)
- [O27] Zygmunt Lalak, Marek Lewicki, Moritz McGarrie, and Paweł Olszewski. Features of electroweak symmetry breaking in five dimensional SUSY models. *JHEP*, 11:137, 2015. [arXiv:1508.05105](#), [doi:10.1007/JHEP11\(2015\)137](#)
- [O28] Zygmunt Lalak, Marek Lewicki, and James D. Wells. Higgs boson mass and high-luminosity LHC probes of supersymmetry with vectorlike top quark. *Phys. Rev. D*, 91(9):095022, 2015. [arXiv:1502.05702](#), [doi:10.1103/PhysRevD.91.095022](#)

- [O29] Michal Artymowski, Zygmunt Lalak, and Marek Lewicki. Inflationary scenarios in Starobinsky model with higher order corrections. *JCAP*, 06:032, 2015. [arXiv:1502.01371](#), [doi:10.1088/1475-7516/2015/06/032](#)
- [O30] Michal Artymowski, Zygmunt Lalak, and Marek Lewicki. Inflation and dark energy from the Brans-Dicke theory. *JCAP*, 06:031, 2015. [arXiv:1412.8075](#), [doi:10.1088/1475-7516/2015/06/031](#)
- [O31] Marcin Badziak, Zygmunt Lalak, Marek Lewicki, Marek Olechowski, and Stefan Pokorski. Upper bounds on sparticle masses from muon $g - 2$ and the Higgs mass and the complementarity of future colliders. *JHEP*, 03:003, 2015. [arXiv:1411.1450](#), [doi:10.1007/JHEP03\(2015\)003](#)
- [O32] Zygmunt Lalak, Marek Lewicki, and Paweł Olszewski. Higher-order scalar interactions and SM vacuum stability. *JHEP*, 05:119, 2014. [arXiv:1402.3826](#), [doi:10.1007/JHEP05\(2014\)119](#)
- [O33] Zygmunt Lalak and Marek Lewicki. Fine-tuning in GGM and the 126 GeV Higgs particle. *JHEP*, 05:125, 2013. [arXiv:1302.6546](#), [doi:10.1007/JHEP05\(2013\)125](#)

5.5 Dane Bibliometryczne

Web of Science:

Publikacje: 41
 Cytowania: 945
 Cytowania bez autocytowań: 826
 indeks h: 17

Inspire: <https://inspirehep.net/authors/1259434>

Publikacje: 41
 Cytowania: 1,525
 Cytowania bez autocytowań: 1,220
 indeks h: 20

6 Pozostałe osiągnięcia

6.1 Granty

1. NAWA Polskie Powroty 2020 (1.12.2020-30.11.2024).
 Kierownik projektu.
 Tytuł: *Auscultation of the Universe: search for new physics through primordial gravitational waves*.
 Numer grantu: [PPN/PPO/2020/1/00013](#).
 Fundusze: 2 031 997 PLN.
2. NCN SONATA (24.07.2019-23.07.2023)
 Kierownik projektu.

Tytuł: *Exploring the early universe with gravitational waves.*

Numer grantu: 2018/31/D/ST2/02048

Fundusze: 1 059 600 PLN.

3. Iuventus plus (21.10.2016-21.10.2018)

Kierownik projektu.

Tytuł: *Phase transitions in the early Universe and their consequences for baryon asymmetry in the context of new data from the LHC.*

Numer grantu: 0431/IP3/2016/74.

Fundusze: 140 000 PLN.

4. NCN ETIUDA (1.10.2015-30.09.2016)

Kierownik projektu.

Tytuł: *Aspects of electroweak symmetry breaking in light of new data from the LHC.*

Numer grantu: 2015/16/T/ST2/0052,

Fundusze: 71 270 PLN.

5. NCN PRELUDIUM (24.02.2015-12.02.2017).

Kierownik projektu.

Tytuł: *Precision corrections to expected lifetime of vacuum in the Standard Model and its extensions.*

Numer grantu: 2014/13/N/ST2/02712,

Fundusze: 99 320 PLN.

6.2 Nagrody

- 2015/2016 [Stypendium ministra](#) nauki i szkolnictwa wyższego za wybitne osiągnięcia.

6.3 Dydaktyka i opieka nad studentami

Pełniłem dotychczas rolę promotora jednego magistranta. Magister Mateusz Zych obronił pracę i uzyskał tytuł we wrześniu 2021 po czym rozpoczął studia doktoranckie na wydziale fizyki, a ja pełnię rolę promotora pomocniczego.

W trakcie doktoratu prowadziłem także ćwiczenia z następujących przedmiotów

2012/2013	Mechanika klasyczna 1100-2AF13
	Elektrodynamika 1100-3005
2013/2014	Analiza matematyczna 1100-1INZ21

6.4 Działalność organizacyjna

- 2021 – 2023 Członek rady naukowej dyscypliny fizyka na wydziale fizyki UW
- 2019 – 2020 Organizacja seminariów z teorii oddziaływań elementarnych i kosmologii w King's College London.

- 12-16 VII 2021 Konferencja [Gravitational Wave Probes of Physics Beyond Standard Model](#)

6.5 Seminaria i wystąpienia konferencyjne

- 2013 *Fine-tuning in GGM and the 126 GeV Higgs particle*, [Seminarium teorii oddziaływań elementarnych i kosmologii](#), Instytut Fizyki Teoretycznej, Wydział Fizyki, UW , 17 III 2013, Warszawa
- Fine-tuning in GGM and the 126 GeV Higgs particle*, [SUSY 2013](#), 26—31 VIII 2013, ICTP Triest, Włochy
- Naturalness in General Gauge Mediation* [SCALARS 2013](#), 12 – 16 IX 2013, Warszawa
- 2014 *Higher-order scalar interactions and SM vacuum stability* [Seminarium teorii oddziaływań elementarnych i kosmologii](#), Instytut Fizyki Teoretycznej, Wydział Fizyki, UW, 11 III 2014, Warszawa
- Lifetime of the electroweak vacuum in the presence of nonrenormalizable operators* The 20th International Symposium on Particles, Strings and Cosmology, [PASCOS 2014](#), 22 - 27 VI 2014, Warszawa
- Higher-order scalar interactions and SM vacuum stability* [SUSY 2014](#), 21 - 26 VII 2014, Manchester, Wielka Brytania
- 2015 *Standard Model vacuum stability in the presence of gauge invariant nonrenormalizable operators* [Planck 2015](#), 25-29 V 2015, Ioannina, Grecja
- Constraining new physics with SM effective potential* [55. Cracow school of theoretical physics](#), 20-28 VI 2015, Zakopane, Polska
- Vacuum stability in the Standard Model and its extensions* [Astroparticle physics in Poland](#), 11-13 V 2015, Warsaw, Poland
- Constraining new physics with the Standard Model effective potential* [HEP seminar](#), 15 XII 2015, Argonne national laboratory, USA
- 2016 *Enabling Electroweak Baryogenesis through Dark Matter* [Seminar for Theoretical Particles Physics and Cosmology](#), Institute of Theoretical Physics, Faculty of Physics, University of Warsaw, 12 IV 2016, Warsaw, Poland
- Enabling Electroweak Baryogenesis through Dark Matter* [HEP seminar](#), 10 V 2016, Kraków, Polska,
- Enabling Electroweak Baryogenesis through Dark Matter* "Collider Physics" 2nd Symposium of the Division for Physics of Fundamental Interactions of the Polish Physical Society , 14 V 2016, Katowice, Polska,

- Enabling Electroweak Baryogenesis through Dark Matter* [Planck 2016](#), 23-27 V 2016, Valencja, Hiszpania
- Enabling Electroweak Baryogenesis through Dark Matter* [The 28th Rencontres de Blois 2016](#) , 29 V 2016 - 3 VI 2016, Blois, Francja
- 2017 *Electroweak baryogenesis aided by non-standard cosmology*, University of Adelaide HEP seminar, 9 XI 2016, Adelajda, Australia
- Gravitational wave, collider and dark matter signals of a singlet scalar electroweak baryogenesis* , [CoEPP Annual Workshop](#), 23 II 2017, Adelajda, Australia
- Gravitational wave, collider and dark matter signals of a singlet scalar electroweak baryogenesis*, University of Sydney HEP seminar, 16 III 2017, Sydney, Australia
- Gravitational wave, collider and dark matter signals of a singlet scalar electroweak baryogenesis*, Melbourne University HEP seminar, 6 IV 2017, Melberrn, Australia
- Gravitational wave, collider and dark matter signals of a singlet scalar electroweak baryogenesis*, PLANCK 2017, 24 V 2017, Warszawa, Polska
- Gravitational wave, collider and dark matter signals of a singlet scalar electroweak baryogenesis*, PASCOS 2017, 20 X 2017, Madryt, Hiszpania
- Gravitational wave, collider and dark matter signals of a singlet scalar electroweak baryogenesis*, Kings College London HEP seminar, 8 XI 2017, Londyn, Wielka Brytania
- Gravitational wave, collider and dark matter signals of a singlet scalar electroweak baryogenesis*, Scalars 2017, 2 XII 2017, Warszawa, Polska
- 2018 *Cosmic Archaeology with Gravitational Wave Signals from Cosmic Strings*, University of Warsaw HEP seminar, 8 III 2018, Warsaw, Poland
- Cosmic Archaeology with Gravitational Waves from Cosmic Strings*, DAMTP-Cavendish HEP seminar, 25 V 2018, Cambrydge, Wielka Brytania
- Cosmic Archaeology with Gravitational Waves from Cosmic Strings*, [String Pheno 2018](#), 2-6 VII 2018, Warszawa, Polska
- On the Maximal Strength of a First-Order Electroweak Phase Transition and its Gravitational Wave Signal*, University of Sussex Theoretical Particle Physics seminar, 25 X 2018, Sussex, UK
- On the Maximal Strength of a First-Order Electroweak Phase Transition and its Gravitational Wave Signal*, Bilbao Early Universe Cosmology Seminar, 14 XI 2018, Bilbao, Hiszpania
- On the Maximal Strength of a First-Order Electroweak Phase Transition and its Gravitational Wave Signal*, HPP Meeting at NIKHEF, 30 XI 2018, Amsterdam, Holandia

- 2019 *On the Maximal Strength of a First-Order Electroweak Phase Transition and its Gravitational Wave Signal*, [6th LISA Cosmology Working Group meeting](#), 14-18 I 2019, IFT, Madryt , Hiszpania
- Cosmic Archaeology with Gravitational Wave Signals from Cosmic Strings*, [6th LISA Cosmology Working Group meeting](#), 14-18 I 2019, IFT, Madryt , Hiszpania
- On the Maximal Strength of a First-Order Electroweak Phase Transition and its Gravitational Wave Signal*, [Winter Mini Workshop on Gravity and Cosmology](#), 21-23 January 2019, Faculty of Physics, University of Warsaw, Warsaw , Poland
- Primordial gravitational waves*, [First AION Workshop](#), 25-26 III 2019, CERN, Genewa , Szwajcaria
- Gravitational wave energy budget in strongly supercooled phase transitions*, [PLANCK 2019](#), 3-7 VII 2019, Granda , Hiszpania
- Gravitational wave energy budget in strongly supercooled phase transitions*, [Beyond General Relativity, Beyond Cosmological Standard Model](#), 1-5 VII 2019, Faculty of Physics, University of Warsaw, Warsaw , Poland
- AEDGE: Gravitational Waves*, [AEDGE workshop](#), 22-23 VII 2019, CERN, Genewa , Szwajcaria
- Gravitational wave energy budget in strongly supercooled phase transitions*, [7th LISA Cosmology Working Group meeting](#), 23-27 IX 2019, Padova, Italy
- Gravitational wave energy budget in strongly supercooled phase transitions*, [Theory Institute in Particle Physics and Cosmology](#), 9-19 X 2019, CERN, Genewa , Szwajcaria
- 2020 *Cosmic Archaeology with Gravitational Wave Signals from Cosmic Strings*, [From Inflation to Hot Big Bang](#), 30 I 2020, KITP Santa Barbara , USA
- Gravitational waves from first order phase transitions*, [Cosmology Seminar](#), 30 VI 2020, NTUA, Ateny , Grecja
- Cosmic String Interpretation of NANOGrav Pulsar Timing Data*, [HEP Seminar](#), 11 XII 2020, University of Southampton , UK
- 2021 *Cosmic String Interpretation of NANOGrav Pulsar Timing Data and its impact on Cosmic Archaeology with Gravitational Waves*, [APC Theory Seminar](#), 20 IV 2021, Paryż, Francja
- Cosmic String Interpretation of NANOGrav Pulsar Timing Data and its impact on Cosmic Archaeology with Gravitational Waves*, [Theory Seminar](#) , 20 V 2021, TU Drezno, Niemcy
- AION and AEDGE: Gravitational physics with atom interferometry* [16th Marcel Grossmann Meeting](#), 7 VII 2021, Konferencja Virtualna

Gravitational waves from bubble collisions in first order phase transitions, [Gravitational Wave Probes of Physics Beyond Standard Model](#), 13 VII 2021, Warszawa, Polska

Gravitational waves from bubble collisions in first order phase transitions, [SUSY 2021](#), 24 VIII 2021, Szanghaj, Chiny

Bibliografia

- [1] Marek Lewicki and Ville Vaskonen. Gravitational waves from colliding vacuum bubbles in gauge theories. *Eur. Phys. J. C*, 81(5):437, 2021. [arXiv:2012.07826](#), [doi:10.1140/epjc/s10052-021-09232-3](#).
- [2] John Ellis and Marek Lewicki. Cosmic String Interpretation of NANOGrav Pulsar Timing Data. *Phys. Rev. Lett.*, 126(4):041304, 2021. [arXiv:2009.06555](#), [doi:10.1103/PhysRevLett.126.041304](#).
- [3] John Ellis, Marek Lewicki, and Ville Vaskonen. Updated predictions for gravitational waves produced in a strongly supercooled phase transition. *JCAP*, 11:020, 2020. [arXiv:2007.15586](#), [doi:10.1088/1475-7516/2020/11/020](#).
- [4] Marek Lewicki and Ville Vaskonen. Gravitational wave spectra from strongly supercooled phase transitions. *Eur. Phys. J. C*, 80(11):1003, 2020. [arXiv:2007.04967](#), [doi:10.1140/epjc/s10052-020-08589-1](#).
- [5] Rouzbeh Allahverdi et al. The First Three Seconds: a Review of Possible Expansion Histories of the Early Universe. 6 2020. [arXiv:2006.16182](#), [doi:10.21105/astro.2006.16182](#).
- [6] John Ellis, Malcolm Fairbairn, Marek Lewicki, Ville Vaskonen, and Alastair Wickens. Detecting circular polarisation in the stochastic gravitational-wave background from a first-order cosmological phase transition. *JCAP*, 10:032, 2020. [arXiv:2005.05278](#), [doi:10.1088/1475-7516/2020/10/032](#).
- [7] John Ellis, Marek Lewicki, and José Miguel No. Gravitational waves from first-order cosmological phase transitions: lifetime of the sound wave source. *JCAP*, 07:050, 2020. [arXiv:2003.07360](#), [doi:10.1088/1475-7516/2020/07/050](#).
- [8] Yanou Cui, Marek Lewicki, and David E. Morrissey. Gravitational Wave Bursts as Harbingers of Cosmic Strings Diluted by Inflation. *Phys. Rev. Lett.*, 125(21):211302, 2020. [arXiv:1912.08832](#), [doi:10.1103/PhysRevLett.125.211302](#).
- [9] Marek Lewicki and Ville Vaskonen. On bubble collisions in strongly supercooled phase transitions. *Phys. Dark Univ.*, 30:100672, 2020. [arXiv:1912.00997](#), [doi:10.1016/j.dark.2020.100672](#).
- [10] L. Badurina et al. AION: An Atom Interferometer Observatory and Network. *JCAP*, 05:011, 2020. [arXiv:1911.11755](#), [doi:10.1088/1475-7516/2020/05/011](#).

- [11] Pierre Auclair et al. Probing the gravitational wave background from cosmic strings with LISA. *JCAP*, 04:034, 2020. [arXiv:1909.00819](#), [doi:10.1088/1475-7516/2020/04/034](#).
- [12] Luc Darmé, Joerg Jaeckel, and Marek Lewicki. Generalized escape paths for dynamical tunneling in QFT. *Phys. Rev. D*, 100(9):096012, 2019. [arXiv:1907.04865](#), [doi:10.1103/PhysRevD.100.096012](#).
- [13] John Ellis, Malcolm Fairbairn, Marek Lewicki, Ville Vaskonen, and Alastair Wickens. Intergalactic Magnetic Fields from First-Order Phase Transitions. *JCAP*, 09:019, 2019. [arXiv:1907.04315](#), [doi:10.1088/1475-7516/2019/09/019](#).
- [14] John Ellis, Marek Lewicki, José Miguel No, and Ville Vaskonen. Gravitational wave energy budget in strongly supercooled phase transitions. *JCAP*, 06:024, 2019. [arXiv:1903.09642](#), [doi:10.1088/1475-7516/2019/06/024](#).
- [15] Tomasz Krajewski, Zygmunt Lalak, Marek Lewicki, and Paweł Olszewski. Higgs domain walls in the thermal background. *Phys. Dark Univ.*, 26:100347, 2019. [arXiv:1902.05560](#), [doi:10.1016/j.dark.2019.100347](#).
- [16] Ankit Beniwal, Marek Lewicki, Martin White, and Anthony G. Williams. Gravitational waves and electroweak baryogenesis in a global study of the extended scalar singlet model. *JHEP*, 02:183, 2019. [arXiv:1810.02380](#), [doi:10.1007/JHEP02\(2019\)183](#).
- [17] John Ellis, Marek Lewicki, and José Miguel No. On the Maximal Strength of a First-Order Electroweak Phase Transition and its Gravitational Wave Signal. *JCAP*, 04:003, 2019. [arXiv:1809.08242](#), [doi:10.1088/1475-7516/2019/04/003](#).
- [18] Yanou Cui, Marek Lewicki, David E. Morrissey, and James D. Wells. Probing the pre-BBN universe with gravitational waves from cosmic strings. *JHEP*, 01:081, 2019. [arXiv:1808.08968](#), [doi:10.1007/JHEP01\(2019\)081](#).
- [19] Michal Artymowski, Olga Czerwinska, Zygmunt Lalak, and Marek Lewicki. Gravitational wave signals and cosmological consequences of gravitational reheating. *JCAP*, 04:046, 2018. [arXiv:1711.08473](#), [doi:10.1088/1475-7516/2018/04/046](#).
- [20] Yanou Cui, Marek Lewicki, David E. Morrissey, and James D. Wells. Cosmic Archaeology with Gravitational Waves from Cosmic Strings. *Phys. Rev. D*, 97(12):123505, 2018. [arXiv:1711.03104](#), [doi:10.1103/PhysRevD.97.123505](#).
- [21] Tomasz Krajewski, Zygmunt Lalak, Marek Lewicki, and Paweł Olszewski. Domain walls in the extensions of the Standard Model. *JCAP*, 05:007, 2018. [arXiv:1709.10100](#), [doi:10.1088/1475-7516/2018/05/007](#).
- [22] Luc Darmé, Joerg Jaeckel, and Marek Lewicki. Towards the fate of the oscillating false vacuum. *Phys. Rev. D*, 96(5):056001, 2017. [arXiv:1704.06445](#), [doi:10.1103/PhysRevD.96.056001](#).
- [23] Ankit Beniwal, Marek Lewicki, James D. Wells, Martin White, and Anthony G. Williams. Gravitational wave, collider and dark matter signals from a scalar singlet electroweak baryogenesis. *JHEP*, 08:108, 2017. [arXiv:1702.06124](#), [doi:10.1007/JHEP08\(2017\)108](#).

- [24] Michał Artymowski, Marek Lewicki, and James D. Wells. Gravitational wave and collider implications of electroweak baryogenesis aided by non-standard cosmology. *JHEP*, 03:066, 2017. [arXiv:1609.07143](#), [doi:10.1007/JHEP03\(2017\)066](#).
- [25] Tomasz Krajewski, Zygmunt Lalak, Marek Lewicki, and Paweł Olszewski. Domain walls and gravitational waves in the Standard Model. *JCAP*, 12:036, 2016. [arXiv:1608.05719](#), [doi:10.1088/1475-7516/2016/12/036](#).
- [26] Michał Artymowski, Zygmunt Lalak, and Marek Lewicki. Multi-phase induced inflation in theories with non-minimal coupling to gravity. *JCAP*, 01:011, 2017. [arXiv:1607.01803](#), [doi:10.1088/1475-7516/2017/01/011](#).
- [27] Olga Czerwińska, Zygmunt Lalak, Marek Lewicki, and Paweł Olszewski. The impact of non-minimally coupled gravity on vacuum stability. *JHEP*, 10:004, 2016. [arXiv:1606.07808](#), [doi:10.1007/JHEP10\(2016\)004](#).
- [28] Zygmunt Lalak, Marek Lewicki, and Paweł Olszewski. Gauge fixing and renormalization scale independence of tunneling rate in Abelian Higgs model and in the standard model. *Phys. Rev. D*, 94(8):085028, 2016. [arXiv:1605.06713](#), [doi:10.1103/PhysRevD.94.085028](#).
- [29] Michał Artymowski, Zygmunt Lalak, and Marek Lewicki. Implications of extreme flatness in a general $f(R)$ theory. *Phys. Lett. B*, 760:432–437, 2016. [arXiv:1604.02470](#), [doi:10.1016/j.physletb.2016.07.027](#).
- [30] Marek Lewicki, Tanja Rindler-Daller, and James D. Wells. Enabling Electroweak Baryogenesis through Dark Matter. *JHEP*, 06:055, 2016. [arXiv:1601.01681](#), [doi:10.1007/JHEP06\(2016\)055](#).
- [31] Michał Artymowski, Zygmunt Lalak, and Marek Lewicki. Saddle point inflation from higher order corrections to Higgs/Starobinsky inflation. *Phys. Rev. D*, 93(4):043514, 2016. [arXiv:1509.00031](#), [doi:10.1103/PhysRevD.93.043514](#).
- [32] Zygmunt Lalak, Marek Lewicki, Moritz McGarrie, and Paweł Olszewski. Features of electroweak symmetry breaking in five dimensional SUSY models. *JHEP*, 11:137, 2015. [arXiv:1508.05105](#), [doi:10.1007/JHEP11\(2015\)137](#).
- [33] Michał Artymowski, Zygmunt Lalak, and Marek Lewicki. Saddle point inflation from $f(R)$ theory. *Phys. Lett. B*, 750:595–600, 2015. [arXiv:1508.05150](#), [doi:10.1016/j.physletb.2015.09.076](#).
- [34] Zygmunt Lalak, Marek Lewicki, and James D. Wells. Higgs boson mass and high-luminosity LHC probes of supersymmetry with vectorlike top quark. *Phys. Rev. D*, 91(9):095022, 2015. [arXiv:1502.05702](#), [doi:10.1103/PhysRevD.91.095022](#).
- [35] Michał Artymowski, Zygmunt Lalak, and Marek Lewicki. Inflationary scenarios in Starobinsky model with higher order corrections. *JCAP*, 06:032, 2015. [arXiv:1502.01371](#), [doi:10.1088/1475-7516/2015/06/032](#).

- [36] Michal Artymowski, Zygmunt Lalak, and Marek Lewicki. Inflation and dark energy from the Brans-Dicke theory. *JCAP*, 06:031, 2015. [arXiv:1412.8075](#), [doi:10.1088/1475-7516/2015/06/031](#).
- [37] Marcin Badziak, Zygmunt Lalak, Marek Lewicki, Marek Olechowski, and Stefan Pokorski. Upper bounds on sparticle masses from muon $g - 2$ and the Higgs mass and the complementarity of future colliders. *JHEP*, 03:003, 2015. [arXiv:1411.1450](#), [doi:10.1007/JHEP03\(2015\)003](#).
- [38] Zygmunt Lalak, Marek Lewicki, and Paweł Olszewski. Higher-order scalar interactions and SM vacuum stability. *JHEP*, 05:119, 2014. [arXiv:1402.3826](#), [doi:10.1007/JHEP05\(2014\)119](#).
- [39] Zygmunt Lalak and Marek Lewicki. Fine-tuning in GGM and the 126 GeV Higgs particle. *JHEP*, 05:125, 2013. [arXiv:1302.6546](#), [doi:10.1007/JHEP05\(2013\)125](#).
- [40] Georges 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. B*, 716:1–29, 2012. [arXiv:1207.7214](#), [doi:10.1016/j.physletb.2012.08.020](#).
- [41] Serguei Chatrchyan et al. Observation of a New Boson at a Mass of 125 GeV with the CMS Experiment at the LHC. *Phys. Lett. B*, 716:30–61, 2012. [arXiv:1207.7235](#), [doi:10.1016/j.physletb.2012.08.021](#).
- [42] B. P. Abbott et al. Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger. *Phys. Rev. Lett.*, 116(6):061102, 2016. [arXiv:1602.03837](#), [doi:10.1103/PhysRevLett.116.061102](#).
- [43] Benjamin P. Abbott et al. GW170104: Observation of a 50-Solar-Mass Binary Black Hole Coalescence at Redshift 0.2. *Phys. Rev. Lett.*, 118(22):221101, 2017. [Erratum: *Phys.Rev.Lett.* 121, 129901 (2018)]. [arXiv:1706.01812](#), [doi:10.1103/PhysRevLett.118.221101](#).
- [44] B. P. Abbott et al. GW170814: A Three-Detector Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Coalescence. *Phys. Rev. Lett.*, 119(14):141101, 2017. [arXiv:1709.09660](#), [doi:10.1103/PhysRevLett.119.141101](#).
- [45] B. P. Abbott et al. GW170608: Observation of a 19-solar-mass Binary Black Hole Coalescence. *Astrophys. J. Lett.*, 851:L35, 2017. [arXiv:1711.05578](#), [doi:10.3847/2041-8213/aa9f0c](#).
- [46] R. Abbott et al. GW190814: Gravitational Waves from the Coalescence of a 23 Solar Mass Black Hole with a 2.6 Solar Mass Compact Object. *Astrophys. J. Lett.*, 896(2):L44, 2020. [arXiv:2006.12611](#), [doi:10.3847/2041-8213/ab960f](#).
- [47] R. Abbott et al. GW190521: A Binary Black Hole Merger with a Total Mass of $150M_{\odot}$. *Phys. Rev. Lett.*, 125(10):101102, 2020. [arXiv:2009.01075](#), [doi:10.1103/PhysRevLett.125.101102](#).

- [48] B. P. Abbott et al. GW170817: Observation of Gravitational Waves from a Binary Neutron Star Inspiral. *Phys. Rev. Lett.*, 119(16):161101, 2017. [arXiv:1710.05832](#), [doi:10.1103/PhysRevLett.119.161101](#).
- [49] Pau Amaro-Seoane et al. Laser Interferometer Space Antenna. 2 2017. [arXiv:1702.00786](#).
- [50] Gemma Janssen et al. Gravitational wave astronomy with the SKA. *PoS*, AASKA14:037, 2015. [arXiv:1501.00127](#), [doi:10.22323/1.215.0037](#).
- [51] Yousef Abou El-Neaj et al. AEDGE: Atomic Experiment for Dark Matter and Gravity Exploration in Space. *EPJ Quant. Technol.*, 7:6, 2020. [arXiv:1908.00802](#), [doi:10.1140/epjqt/s40507-020-0080-0](#).
- [52] J. Aasi et al. Advanced LIGO. *Class. Quant. Grav.*, 32:074001, 2015. [arXiv:1411.4547](#), [doi:10.1088/0264-9381/32/7/074001](#).
- [53] Eric Thrane and Joseph D. Romano. Sensitivity curves for searches for gravitational-wave backgrounds. *Phys. Rev. D*, 88(12):124032, 2013. [arXiv:1310.5300](#), [doi:10.1103/PhysRevD.88.124032](#).
- [54] B. P. Abbott et al. GW150914: Implications for the stochastic gravitational wave background from binary black holes. *Phys. Rev. Lett.*, 116(13):131102, 2016. [arXiv:1602.03847](#), [doi:10.1103/PhysRevLett.116.131102](#).
- [55] B. P. Abbott et al. Search for the isotropic stochastic background using data from Advanced LIGO’s second observing run. *Phys. Rev. D*, 100(6):061101, 2019. [arXiv:1903.02886](#), [doi:10.1103/PhysRevD.100.061101](#).
- [56] R. M. Shannon et al. Gravitational waves from binary supermassive black holes missing in pulsar observations. *Science*, 349(6255):1522–1525, 2015. [arXiv:1509.07320](#), [doi:10.1126/science.aab1910](#).
- [57] L. Lentati et al. European Pulsar Timing Array Limits On An Isotropic Stochastic Gravitational-Wave Background. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 453(3):2576–2598, 2015. [arXiv:1504.03692](#), [doi:10.1093/mnras/stv1538](#).
- [58] Zaven Arzoumanian et al. The NANOGrav 12.5 yr Data Set: Search for an Isotropic Stochastic Gravitational-wave Background. *Astrophys. J. Lett.*, 905(2):L34, 2020. [arXiv:2009.04496](#), [doi:10.3847/2041-8213/abd401](#).
- [59] Edward Witten. Cosmic Separation of Phases. *Phys. Rev. D*, 30:272–285, 1984. [doi:10.1103/PhysRevD.30.272](#).
- [60] Chiara Caprini et al. Science with the space-based interferometer eLISA. II: Gravitational waves from cosmological phase transitions. *JCAP*, 04:001, 2016. [arXiv:1512.06239](#), [doi:10.1088/1475-7516/2016/04/001](#).

- [61] Arthur Kosowsky and Michael S. Turner. Gravitational radiation from colliding vacuum bubbles: envelope approximation to many bubble collisions. *Phys. Rev. D*, 47:4372–4391, 1993. [arXiv:astro-ph/9211004](#), [doi:10.1103/PhysRevD.47.4372](#).
- [62] Stephan J. Huber and Thomas Konstandin. Gravitational Wave Production by Collisions: More Bubbles. *JCAP*, 09:022, 2008. [arXiv:0806.1828](#), [doi:10.1088/1475-7516/2008/09/022](#).
- [63] Mark Hindmarsh, Stephan J. Huber, Kari Rummukainen, and David J. Weir. Numerical simulations of acoustically generated gravitational waves at a first order phase transition. *Phys. Rev. D*, 92(12):123009, 2015. [arXiv:1504.03291](#), [doi:10.1103/PhysRevD.92.123009](#).
- [64] Mark Hindmarsh, Stephan J. Huber, Kari Rummukainen, and David J. Weir. Shape of the acoustic gravitational wave power spectrum from a first order phase transition. *Phys. Rev. D*, 96(10):103520, 2017. [Erratum: *Phys.Rev.D* 101, 089902 (2020)]. [arXiv:1704.05871](#), [doi:10.1103/PhysRevD.96.103520](#).
- [65] Chiara Caprini, Ruth Durrer, and Geraldine Servant. The stochastic gravitational wave background from turbulence and magnetic fields generated by a first-order phase transition. *JCAP*, 12:024, 2009. [arXiv:0909.0622](#), [doi:10.1088/1475-7516/2009/12/024](#).
- [66] Pierre Binétruy, Alejandro Bohe, Chiara Caprini, and Jean-Francois Dufaux. Cosmological Backgrounds of Gravitational Waves and eLISA/NGO: Phase Transitions, Cosmic Strings and Other Sources. *JCAP*, 06:027, 2012. [arXiv:1201.0983](#), [doi:10.1088/1475-7516/2012/06/027](#).
- [67] Grigol Gogoberidze, Tina Kahniashvili, and Arthur Kosowsky. The Spectrum of Gravitational Radiation from Primordial Turbulence. *Phys. Rev. D*, 76:083002, 2007. [arXiv:0705.1733](#), [doi:10.1103/PhysRevD.76.083002](#).
- [68] Dietrich Bodeker and Guy D. Moore. Electroweak Bubble Wall Speed Limit. *JCAP*, 05:025, 2017. [arXiv:1703.08215](#), [doi:10.1088/1475-7516/2017/05/025](#).
- [69] Stefan Höche, Jonathan Kozaczuk, Andrew J. Long, Jessica Turner, and Yikun Wang. Towards an all-orders calculation of the electroweak bubble wall velocity. *JCAP*, 03:009, 2021. [arXiv:2007.10343](#), [doi:10.1088/1475-7516/2021/03/009](#).
- [70] Dietrich Bodeker and Guy D. Moore. Can electroweak bubble walls run away? *JCAP*, 05:009, 2009. [arXiv:0903.4099](#), [doi:10.1088/1475-7516/2009/05/009](#).
- [71] Paolo Creminelli, Alberto Nicolis, and Riccardo Rattazzi. Holography and the electroweak phase transition. *JHEP*, 03:051, 2002. [arXiv:hep-th/0107141](#), [doi:10.1088/1126-6708/2002/03/051](#).
- [72] Lisa Randall and Geraldine Servant. Gravitational waves from warped spacetime. *JHEP*, 05:054, 2007. [arXiv:hep-ph/0607158](#), [doi:10.1088/1126-6708/2007/05/054](#).

- [73] Germano Nardini, Mariano Quiros, and Andrea Wulzer. A Confining Strong First-Order Electroweak Phase Transition. *JHEP*, 09:077, 2007. [arXiv:0706.3388](#), [doi:10.1088/1126-6708/2007/09/077](#).
- [74] Babiker Hassanain, John March-Russell, and Martin Schvellinger. Warped Deformed Throats have Faster (Electroweak) Phase Transitions. *JHEP*, 10:089, 2007. [arXiv:0708.2060](#), [doi:10.1088/1126-6708/2007/10/089](#).
- [75] Thomas Konstandin, Germano Nardini, and Mariano Quiros. Gravitational Backreaction Effects on the Holographic Phase Transition. *Phys. Rev. D*, 82:083513, 2010. [arXiv:1007.1468](#), [doi:10.1103/PhysRevD.82.083513](#).
- [76] Benedict von Harling and Geraldine Servant. QCD-induced Electroweak Phase Transition. *JHEP*, 01:159, 2018. [arXiv:1711.11554](#), [doi:10.1007/JHEP01\(2018\)159](#).
- [77] Thomas Konstandin and Geraldine Servant. Cosmological Consequences of Nearly Conformal Dynamics at the TeV scale. *JCAP*, 12:009, 2011. [arXiv:1104.4791](#), [doi:10.1088/1475-7516/2011/12/009](#).
- [78] Giuliano Panico and Andrea Wulzer. *The Composite Nambu-Goldstone Higgs*, volume 913. Springer, 2016. [arXiv:1506.01961](#), [doi:10.1007/978-3-319-22617-0](#).
- [79] Barry M. Dillon, Basem Kamal El-Menoufi, Stephan J. Huber, and Jonathan P. Manuel. Rapid holographic phase transition with brane-localized curvature. *Phys. Rev. D*, 98(8):086005, 2018. [arXiv:1708.02953](#), [doi:10.1103/PhysRevD.98.086005](#).
- [80] Pietro Baratella, Alex Pomarol, and Fabrizio Rompineve. The Supercooled Universe. *JHEP*, 03:100, 2019. [arXiv:1812.06996](#), [doi:10.1007/JHEP03\(2019\)100](#).
- [81] Luca Marzola, Antonio Racioppi, and Ville Vaskonen. Phase transition and gravitational wave phenomenology of scalar conformal extensions of the Standard Model. *Eur. Phys. J. C*, 77(7):484, 2017. [arXiv:1704.01034](#), [doi:10.1140/epjc/s10052-017-4996-1](#).
- [82] Carlo Marzo, Luca Marzola, and Ville Vaskonen. Phase transition and vacuum stability in the classically conformal B–L model. *Eur. Phys. J. C*, 79(7):601, 2019. [arXiv:1811.11169](#), [doi:10.1140/epjc/s10052-019-7076-x](#).
- [83] Chiara Caprini et al. Detecting gravitational waves from cosmological phase transitions with LISA: an update. *JCAP*, 03:024, 2020. [arXiv:1910.13125](#), [doi:10.1088/1475-7516/2020/03/024](#).
- [84] Daniel Cutting, Mark Hindmarsh, and David J. Weir. Gravitational waves from vacuum first-order phase transitions: from the envelope to the lattice. *Phys. Rev. D*, 97(12):123513, 2018. [arXiv:1802.05712](#), [doi:10.1103/PhysRevD.97.123513](#).
- [85] Daniel Cutting, Elba Granados Escartin, Mark Hindmarsh, and David J. Weir. Gravitational waves from vacuum first order phase transitions II: from thin to thick walls. *Phys. Rev. D*, 103(2):023531, 2021. [arXiv:2005.13537](#), [doi:10.1103/PhysRevD.103.023531](#).

- [86] Ryusuke Jinno and Masahiro Takimoto. Gravitational waves from bubble dynamics: Beyond the Envelope. *JCAP*, 01:060, 2019. [arXiv:1707.03111](#), [doi:10.1088/1475-7516/2019/01/060](#).
- [87] Thomas Konstandin. Gravitational radiation from a bulk flow model. *JCAP*, 03:047, 2018. [arXiv:1712.06869](#), [doi:10.1088/1475-7516/2018/03/047](#).
- [88] Ryusuke Jinno, Thomas Konstandin, and Masahiro Takimoto. Relativistic bubble collisions—a closer look. *JCAP*, 09:035, 2019. [arXiv:1906.02588](#), [doi:10.1088/1475-7516/2019/09/035](#).
- [89] Ruth Durrer and Andrii Neronov. Cosmological Magnetic Fields: Their Generation, Evolution and Observation. *Astron. Astrophys. Rev.*, 21:62, 2013. [arXiv:1303.7121](#), [doi:10.1007/s00159-013-0062-7](#).
- [90] Shin’ichiro Ando and Alexander Kusenko. Evidence for Gamma-Ray Halos Around Active Galactic Nuclei and the First Measurement of Intergalactic Magnetic Fields. *Astrophys. J. Lett.*, 722:L39, 2010. [arXiv:1005.1924](#), [doi:10.1088/2041-8205/722/1/L39](#).
- [91] A. Neronov and I. Vovk. Evidence for strong extragalactic magnetic fields from Fermi observations of TeV blazars. *Science*, 328:73–75, 2010. [arXiv:1006.3504](#), [doi:10.1126/science.1184192](#).
- [92] Warren Essey, Shin’ichiro Ando, and Alexander Kusenko. Determination of intergalactic magnetic fields from gamma ray data. *Astropart. Phys.*, 35:135–139, 2011. [arXiv:1012.5313](#), [doi:10.1016/j.astropartphys.2011.06.010](#).
- [93] Wenlei Chen, James H. Buckley, and Francesc Ferrer. Search for GeV γ -Ray Pair Halos Around Low Redshift Blazars. *Phys. Rev. Lett.*, 115:211103, 2015. [arXiv:1410.7717](#), [doi:10.1103/PhysRevLett.115.211103](#).
- [94] M. Ackermann et al. The Search for Spatial Extension in High-latitude Sources Detected by the *Fermi* Large Area Telescope. *Astrophys. J. Suppl.*, 237(2):32, 2018. [arXiv:1804.08035](#), [doi:10.3847/1538-4365/aacdf7](#).
- [95] Axel Brandenburg, Tina Kahniashvili, Sayan Mandal, Alberto Roper Pol, Alexander G. Tevzadze, and Tanmay Vachaspati. Evolution of hydromagnetic turbulence from the electroweak phase transition. *Phys. Rev. D*, 96(12):123528, 2017. [arXiv:1711.03804](#), [doi:10.1103/PhysRevD.96.123528](#).
- [96] Tina Kahniashvili, Grigol Gogoberidze, and Bharat Ratra. Polarized cosmological gravitational waves from primordial helical turbulence. *Phys. Rev. Lett.*, 95:151301, 2005. [arXiv:astro-ph/0505628](#), [doi:10.1103/PhysRevLett.95.151301](#).
- [97] Leonard Kisslinger and Tina Kahniashvili. Polarized Gravitational Waves from Cosmological Phase Transitions. *Phys. Rev. D*, 92(4):043006, 2015. [arXiv:1505.03680](#), [doi:10.1103/PhysRevD.92.043006](#).

- [98] Valerie Domcke, Juan Garcia-Bellido, Marco Peloso, Mauro Pieroni, Angelo Ricciardone, Lorenzo Sorbo, and Gianmassimo Tasinato. Measuring the net circular polarization of the stochastic gravitational wave background with interferometers. *JCAP*, 05:028, 2020. [arXiv:1910.08052](#), [doi:10.1088/1475-7516/2020/05/028](#).
- [99] Yann Gouttenoire, Géraldine Servant, and Peera Simakachorn. Beyond the Standard Models with Cosmic Strings. *JCAP*, 07:032, 2020. [arXiv:1912.02569](#), [doi:10.1088/1475-7516/2020/07/032](#).
- [100] Yann Gouttenoire, Géraldine Servant, and Peera Simakachorn. BSM with Cosmic Strings: Heavy, up to EeV mass, Unstable Particles. *JCAP*, 07:016, 2020. [arXiv:1912.03245](#), [doi:10.1088/1475-7516/2020/07/016](#).
- [101] Zaven Arzoumanian et al. The NANOGrav 12.5 yr Data Set: Search for an Isotropic Stochastic Gravitational-wave Background. *Astrophys. J. Lett.*, 905(2):L34, 2020. [arXiv:2009.04496](#), [doi:10.3847/2041-8213/abd401](#).
- [102] Simone Blasi, Vedran Brdar, and Kai Schmitz. Has NANOGrav found first evidence for cosmic strings? *Phys. Rev. Lett.*, 126(4):041305, 2021. [arXiv:2009.06607](#), [doi:10.1103/PhysRevLett.126.041305](#).
- [103] Ligong Bian, Rong-Gen Cai, Jing Liu, Xing-Yu Yang, and Ruiyu Zhou. Evidence for different gravitational-wave sources in the NANOGrav dataset. *Phys. Rev. D*, 103(8):L081301, 2021. [arXiv:2009.13893](#), [doi:10.1103/PhysRevD.103.L081301](#).
- [104] Jose J. Blanco-Pillado, Ken D. Olum, and Jeremy M. Wachter. Comparison of cosmic string and superstring models to NANOGrav 12.5-year results. *Phys. Rev. D*, 103(10):103512, 2021. [arXiv:2102.08194](#), [doi:10.1103/PhysRevD.103.103512](#).