
Nierównowagowe kondensaty Bosego–Einsteina polarytonów ekscytonowych w mikrownękach półprzewodnikowych

Barbara Piętka

Wydział Fizyki, Uniwersytet Warszawski

Polarytony ekscytonowe to kwazicząstki cieszące się ostatnio dużym zainteresowaniem w świecie naukowym. Wynika to z obserwacji ciekawych efektów kolektywnych tych cząstek, takich jak możliwość utworzenia kondensatu Bosego–Einsteina, laserowanie polarytonowe, czy nadciekłość. Polarytony ekscytonowe powstają w wyniku sprzężenia dwóch elementów: fotonów i cząstek materialnych, ekscytonów. Polarytony dziedziczą szczególne właściwości z obu swych komponentów. Składnik fotonowy, pochodzący od fotonów zlokalizowanych zwykle we wnękach optycznych, stanowi o krótkim czasie życia polarytonów i ich małej masie. Ekscytony, czyli wzbudzenia półprzewodnika w postaci coulombowsko sprzężonych par elektron-dziura, stanowią składnik materialny polarytonów, który odpowiada za ich wzajemne oddziaływanie.

Prace naukowe koncentrują się na zjawiskach, które zachodzą w gazie polarytonów ekscytonowych, kiedy układ ten jest bardzo silnie pobudzany nierezonansową lub rezonansową wiązką promieniowania. Dzięki temu można osiągnąć duże gęstości polarytonów w jednym ze stanów podstawowych i doprowadzić gaz polarytonów do przejścia fazowego do stanu nierównowagowego kondensatu Bosego–Einsteina. Taki stan pokazuje bardzo ciekawe właściwości, które dotychczas były obserwowane głównie w gazach zimnych atomów. Można obserwować takie zjawiska koherentne jak korelacje dalekiego zasięgu, wiry kwantowe, czy oscylacje Josephsona. Przy rezonansowym pobudzeniu układu koherentną wiązką promieniowania można wymusić stan nadciekły i badać zjawiska z reżimu hydrodynamiki kwantowej, gdzie kreowane są propagujące się wiry kwantowe. Ponadto polarytony ekscytonowe, dziedzicząc część swoich charakterystyk od ekscytonu, posiadają spin. Właściwości spinowe kondensatów polarytonowych do dziś nie są szeroko badane ze względu na małe rozszczenie Zeemana polarytonów. Na Uniwersytecie Warszawskim pokazaliśmy, że użycie półprzewodników półmagnetycznych do zmodyfikowania części ekscytono-

wej polarytonu prowadzi do obserwacji gigantycznego efektu Zeemana, nie blokując przy tym możliwości wytworzenia nierównowagowego kondensatu półmagnetycznych polarytonów. Nasze badania nad nowym typem polarytonów o silnych właściwościach magnetycznych otwierają drogę do badania spinorowych kondensatów polarytonowych, wyjątkowych wśród gazów bozonowych.

Podstawy zjawiska kondensacji i pierwsze osiągnięcia

Polarytony ekscytonowe (zwane dalej polarytonami), są to kwazicząstki powstałe w wyniku silnego sprzężenia fotonów z ekscytonami [1]. Silne sprzężenie realizuje się poprzez umieszczenie półprzewodnikowej studni kwantowej w maksimum rozkładu pola elektrycznego w mikrownęce półprzewodnikowej. W tym celu mikrownęki półprzewodnikowe projektuje się tak, aby uzyskać dużą amplitudę fali elektromagnetycznej w ściśle określonym miejscu. Najczęściej wytwarza się strukturę złożoną z dwóch lusterek Bragga oddzielonych warstwą stanowiącą wnękę rezonansową, przy czym energie fotonów we wnęce dostrojone są do częstości przejścia ekscytonu w studni kwantowej. W wyniku sprzężenia (tzw. oscylacje Rabiego) zamiast modu fotonowego i rezonansu ekscytonowego, otrzymuje się dwa nowe mody: górny i dolny polaryton, o właściwościach obu swoich komponentów [1]. Polarytony dziedziczą małą masę efektywną od części fotonowej (9 rzędów wielkości mniejszą od masy atomów) i możliwość oddziaływań od składnika ekscytonowego.

W 2006 roku J. Kasprzak, M. Richard wraz ze współpracownikami [2] pokazali, że polarytony w reżimie dużych gęstości przechodzą do nowego stanu kwantowego: kondensatu Bosego–Einsteina (BEC) [3]. Ten szczególnie stan kwantowy przewidziany został przez Alberta Einsteina w latach 1924-25 zainspirowanego pracami Satyendry Natah Bosego pracującego nad statystycznymi własnościami fotonów. Einstein rozszerzył prace Bosego na wszystkie bozony i pokazał, że moż-

liwe jest makroskopowe obsadzenie pojedynczego stanu kwantowego i całkowita nierozróżnialność cząstek w niskich temperaturach. Dalej, w 1938 roku, korzystając z tych prac, Fritz London udowodnił, że zaobserwowane wówczas zjawisko nadciekłości helu jest bezpośrednio związane z kondensacją Bosego–Einsteina. Na eksperymentalne potwierdzenie istnienia przejścia fazowego gazu bozonów w niskiej temperaturze, należało poczekać aż do 1995 roku, kiedy to Carl Wieman i Eric Cornell oraz niezależnie Wolfgang Ketterle, wykorzystując techniki chłodzenia laserowego, zademonstrowali redukcję rozkładu prędkości atomów i makroskopowe obsadzenie pojedynczego stanu kwantowego. Przez bardzo długi czas obserwacja tej degeneracji kwantowej była zarezerwowana dla gazu atomów w bardzo niskich temperaturach, rzędu nanokelwinów.

Kondensacja polarytonów ekscytonowych, która obecnie jest obserwowana również w temperaturze pokojowej [4, 5], otworzyła ogromne możliwości badania tego szczególnego stanu kwantowego. Rozpoczęto studiowanie fundamentalnych zjawisk kwantowych jak określenie rodzaju korelacji dalekiego zasięgu [6] czy natury przejścia fazowego (BEC – BKT [7]) [8]. W 2009 roku A. Amo ze współpracownikami [9] pokazał, że polarytony wykazują nadciekłość, czego bezpośrednią konsekwencją są wiry kwantowe i pół-wiry kwantowe [10, 11], czy jak później pokazano, również ciemnie i jasne solitony [12, 13]. Badania w tej tematyce rozpoczęliśmy w grupie prof. Benoit Deveaud na Ecole Polytechnique w Lozannie, w Szwajcarii, kiedy zjawisko nierównowagowej kondensacji polarytonów, istnienie korelacji dalekiego zasięgu oraz nadciekłość zostały już zademonstrowane, natomiast nie były znane czasy budowania spójności fazowej, mechanizmy rządzące propagacją wirów kwantowych, czy inne zjawiska koherentne jak np. oscylacje Josephsona. Również część spinowa funkcji falowej polarytonów i ich właściwości magnetyczne nie były jeszcze w ogóle analizowane. Istnienie stanów wzbudzonych polarytonów oraz potencjalne możliwości manipulowania tymi stanami nie były nawet rozważane. Dzięki długiej tradycji badań nad półprzewodnikami półmagnetycznymi w Polsce oraz nowo rozwiniętej technologii wzrostu mikrowętek półprzewodnikowych na Uniwersytecie Warszawskim rozwój badań nad magnetycznymi właściwościami polarytonów stał się możliwy również w Warszawie.

Stan wiedzy przed pojawieniem się tej tematyki w Polsce

Obserwowana degeneracja kwantowa w gazie polarytonów ekscytonowych [2, 14, 15, 16, 17] jest bezpośrednią konsekwencją bozonowego charakteru polarytonów

i pojawia się dla dużych koncentracji, w reżimie nieliniowych oddziaływań polaryton-polaryton, gdzie stymulacja bozonowa do stanu końcowego dominuje nad stratami cząstek wynikającymi z ich rekombinacji promienistej. Nierównowagowy charakter kondensatu polarytonów odróżnia go od stabilnej natury kondensatów atomowych. Również typ samego przejścia fazowego nie jest taki sam jak w przypadku idealnego kondensatu Bosego–Einsteina ze względu na jego skończony rozmiar oraz to, że korelacje dalekiego zasięgu znikają wraz z odległością. Pomimo tego, określenie „kondensat” w odniesieniu do przejścia fazowego obserwowanego w gazie polarytonów zostało przyjęte w literaturze, jako że jest opisywane tymi samymi modelami teoretycznymi (np. równaniem Grossa – Pitaevskiego) z uwzględnieniem strat i zewnętrznego zasilania.

Idealny kondensat Bosego–Einsteina określony jest poprzez istnienie makroskopowej funkcji falowej [18]. Definiuje ją istnienie korelacji dalekiego zasięgu (ang. off-diagonal long range order, OLDRO), rozciągających się na cały układ fizyczny. Koncept ten został wprowadzony przez Penrose’a i Onsagera w 1956 roku, którzy uznali też, że to właśnie funkcja korelacji pełni rolę parametru uporządkowania w przypadku kondensatów atomowych. Pojawienie się niezerowej wartości funkcji korelacji przestrzennych jest zatem najważniejszym dowodem na obserwację przejścia fazowego. Pierwszym pytaniem, które zadaliśmy sobie, kiedy zaczęliśmy badać kondensaty polarytonów, było: jak szybko korelacje dalekiego zasięgu są budowane podczas przejścia fazowego? Należy również zwrócić uwagę, że badania nad dynamiką formowania się spójności fazowej są niezwykle trudne do przeprowadzenia w gazach zimnych atomów, gdzie na ten problem zwrócono uwagę dopiero w 2007 roku [19, 20]. Pokazaliśmy [22], że początek ustanawiania korelacji fazy pomiędzy punktami kondensatu oddzielonymi o $8,5 \mu\text{m}$ zachodzi w czasie kilku pikosekund, dużo szybciej niż oczekiwano, czyli równocześnie z początkiem rozpraszania stymulowanego. Dynamika całego procesu zależy od gęstości cząstek. W reżimie niskich gęstości, tj. gęstości progowych, proces ustalania koherencji fazowej zachodzi wolno, adiabaticznie wraz ze wzrostem populacji. Gdy układ jest szybko przeprowadzany przez przejście fazowe, koherencja dalekiego zasięgu jest ustalona znacznie wolniej, niż buduje się populacja. Pokazuje to, że system potrzebuje trochę czasu (w naszym przypadku kilka pikosekund) aby zbudować porządek dalekiego zasięgu. Pokazaliśmy zatem, że prędkość tworzenia fazy w kondensacie polarytonowym jest tak samo duża lub nawet większa od prędkości propagacji oddziaływań zadanej przez prędkość dźwięku w tym układzie. Oznacza to, że jest to proces znacznie szybszy niż w przypadku układów zimnych atomów.

Problem budowania korelacji dalekiego zasięgu jest również ciekawy w przypadku systemów charakteryzujących się dużym nieporządkiem przestrzennym. Zostało przewidziane, że w przypadku układu charakteryzującego się niejednorodnym rozkładem potencjału lokalizującego cząstki, przejście fazowe nie następuje do stanu kondensatu, ale do stanu izolatora, tzw. Bose-Glass (BG) [21, 23, 24]. Stan BG charakteryzuje się zanikającą fazą nadciekłą i wykładniczym zanikiem korelacji dalekiego zasięgu wraz z odległością. Można by zatem oczekiwać, że w takim przypadku będziemy mieli od czynienia z defragmentacją kondensatu na mniejsze, nie związane ze sobą kondensaty. W pracy [25] badaliśmy korelacje przestrzenne w jednowymiarowym, niejednorodnym kondensacie polarytonów. Pokazaliśmy, że pomimo silnej lokalizacji cząstek w minimach potencjału, funkcja korelacji rozciąga się na cały kondensat. Zanik wartości funkcji korelacji wraz z odległością nie jest monotoniczny, a jego wartość jest ściśle związana z gęstością i fluktuacją gęstości polarytonów w danym minimum potencjału. Wyniki te potwierdziły jeszcze raz nierównowagowy charakter kondensatów polarytonowych.

Wiedząc zatem, że silnie niejednorodny przestrzennie kondensat polarytonów może zachowywać duże wartości funkcji korelacji dalekiego zasięgu, oraz dzięki badaniom, które pokazały, że możliwe jest również uzyskanie wielu różnych współoddziałujących kondensatów [26], zredukowaliśmy rozważany układ fizyczny do jeszcze prostszego. Zajęliśmy się badaniem kondensatu zlokalizowanego jedynie w dwóch minimach potencjału. Bariera oddzielająca oba kondensaty oraz gęstość polarytonów w każdym z minimów ustanawiała efektywną wartość stałej sprzężenia pomiędzy nimi. Otrzymaliśmy w ten sposób polarytonowy odpowiednik bozonowego złącza Josephsona. Efekt Josephsona jest jednym z bardziej zaskakujących przejawów kwantowych efektów kolektywnych materii, gdyż pozwala na przepływ prądu przez złącze bez dyssypacji, co byłoby niemożliwe w czysto klasycznym świecie. Tradycyjne złącze Josephsona powstaje przez oddzielenie od siebie dwóch nadprzewodników cienką warstwą izolatora. Bozonowe złącze Josephsona jest to układ dwóch kondensatów bozonowych oddzielonych barierą potencjału. Takie złącze zostało zrealizowane w kondensatach zimnych atomów [27, 28]. W pracy [30] pokazaliśmy, że efekt Josephsona można zaobserwować również w przypadku kondensatów polarytonowych. Badając rozkład w czasie gęstości polarytonów w obu pułapkach oraz wzajemne relacje fazowe między nimi, pokazaliśmy istnienie koherentnych i periodycznych oscylacji gęstości polarytonów pomiędzy minimami potencjału. Towarzyszące temu oscylacje fazy

modulo 2π pokazują, że jest to zmiennoprądowy proces Josephsona.

W czasie, kiedy prowadziliśmy wspomniane badania, społeczność naukowa dużo dyskutowała na temat natury samego przejścia fazowego obserwowanego w gazie polarytonów. Już sama geometria zakazywała istnienia idealnego kondensatu Bosego – Einsteina. Polarytony są systemem dwuwymiarowym, gdyż powstają w płaszczyźnie wyznaczonej przez półprzewodnikową studnię kwantową, ponadto mają skończone rozmiary ze względu na rozmiar plamki lasera pobudzającego. Oczekiwano zatem, że przejście fazowe w tym systemie jest raczej typu Berezinski-Kosterlitz-Thoules (BKT) do fazy nadciekłej. W przypadku oddziałującego dwuwymiarowego gazu bozonowego faza nadciekła może powstawać przez łączenie się w pary wirów o przeciwnych ładunkach. W pracy [31] badaliśmy dynamikę formowania się spontanicznie powstających wirów kwantowych podczas przejścia fazowego w gazie polarytonów. Jak dotychczas wirowość w gazie polarytonów została potwierdzona jedynie w przypadku wirów zlokalizowanych na niejednorodnościach potencjału [29] czy wymuszonych zewnętrznym promieniowaniem [32, 33]. Dynamika spontanicznie kreowanych wirów pozostawała nieznana. Badając czasowo rozdzielone interferogramy o wysokiej rozdzielczości przestrzennej, pokazaliśmy [31], że spontanicznie kreowane wiry podążają zawsze tą samą ścieżką wyznaczaną przez nieporządek. Ten schemat powstawania wirów sugerował, że to mechanizm Kibble’a-Zurka [34, 35, 36] w układach nierównowagowych jest odpowiedzialny za formowanie się parametru porządku lokalnie, w sposób domenowy. Koherencja fazy byłaby budowana przez połączenia się domen o różnych fazach, przez co w stanie końcowym, o koherencji rozciągającej się na cały układ, mogłyby pozostawać liczne defekty topologiczne. Ta teoria nie została jednak potwierdzona [37].

Wiry mogą pojawiać się również w systemie polarytonów w jeszcze inny, dość wyjątkowy sposób: kiedy gaz przechodzi ze stanu nadciekłego do klasycznego, na granicy załamania się nadciekłości. W przypadku nadciekłego helu i zimnych gazów atomowych zostały one określone jako kwantowy odpowiednik turbulencji w płynach klasycznych. Kiedy polarytony w stanie nadciekłym zderzają się z przeszkodą, w cieniu przeszkody nukleują się parami wiry kwantowe, które dalej unoszone są przez płynącą ciecz [38]. Był to eksperyment bardzo szczególny, gdyż jako pierwszy pozwolił na rozważania z zakresu hydrodynamiki kwantowej w zdegenerowanych gazach polarytonowych. Polarytony w stanie nadciekłym zostały w tym eksperymencie wytworzone poprzez pobudzenie rezonansową wiązką lasera, podobnie jak w pracy A. Amo et al. [9], i, dalej już pro-

pagując się swobodnie, napotykały na swojej drodze defekt. W zależności od prędkości nadciekłych polarytonów v (zadanej przez kąt padania lasera pompującego) względem prędkości dźwięku w tym układzie c_s (zadanej przez stałą oddziaływań polaryton – polaryton oraz gęstość polarytonów), pokazaliśmy reżim typowo nadciekły (kiedy defekt jest omijany), reżim gazu w stanie klasycznym (gdzie obserwuje się liczne rozproszenia na defekcie) oraz graniczną sytuację, kiedy w cieczy generowane są wzbudzenia w postaci wirów kwantowych. Ta sytuacja jest osiągnięta dla $v/c_s \approx 1$, kiedy to prędkość cieczy osiąga prędkość dźwięku. Przedstawione tu badania pokazały jaki ogromny potencjał mają polarytony ekscytonowe w badaniach nad powstawaniem turbulencji w gazach kwantowych.

Spinowe właściwości polarytonów ekscytonowych – rozwój tematyki na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego

Dotychczas w badaniach nie były uwzględniane właściwości spinowe polarytonów. Ekscytony optycznie aktywne, z degeneracją całkowitego momentu pędu ± 1 (zwanego dalej „spinem”) sprzęgają się ze światłem, tworząc polarytony o dwóch orientacjach spinowych. Z punktu widzenia struktury spinowej, polarytony są zatem złożonymi bozonami o wartości pseudospinu równej $1/2$ [39], co jest nietypowe pośród gazów bozono- wych. W literaturze problem spinu polarytonów nie był szeroko rozważany ze względu na trudności eksperymentalne i spodziewane małe wartości rozszczepienia Zeemana polarytonów. Perspektywy były jednak bardzo ciekawe. W pracy teoretycznej Y. G. Rubo wraz ze współpracownikami [40], wykazał podobieństwo kondensatów polarytonowych do nadprzewodników, gdyż przewidział wypychanie zewnętrznego pola magnetycznego z wnętrza materiału (efekt Meissnera) oraz tłumienie nadciekłości przez pole magnetyczne. Zbadanie tego zagadnienia stało się jednym z celów naszej pracy na Uniwersytecie Warszawskim.

W pierwszej kolejności należało zatem zbadać wartość rozszczepienia Zeemana polarytonów i pokazać, czy polem magnetycznym można doprowadzić do energetycznego rozdzielania obu komponentów spinowych. Zajęliśmy się badaniami struktur opartych o materiały półprzewodnikowe z grup III-V, głównie GaInAs ze względu na to, że kondensaty polarytonowe w tych materiałach mają najdłuższe czasy życia [41], są najbardziej jednorodny [42] i wykazują propagację nadciekłych polarytonów na rekordowe odległości $150 \mu\text{m}$ [43]. Bardzo szczegółowo zbadaliśmy zachowanie polarytonów w reżimie liniowym (bez kondensatu) w zewnętrznym polu magnetycznym aż do 14 T. Tak wysokie pole magnetyczne osiągalne jest w National Laboratory of High

Magnetic Fields w Grenoble we Francji, od wielu lat współpracującego z Uniwersytetem Warszawskim. Pokazaliśmy, jak zmieniają się energie polarytonów i jak ta zmiana wpływa na zawartość składnika ekscytonowego w polarytonie (odpowiedzialnego za efekt Zeemana i oddziaływania polaryton-polaryton). Ponadto wykazaliśmy zwiększenie energii sprzężenia (energii Rabiego) pomiędzy ekscytonem i fotonem w polu magnetycznym. Efekt Zeemana polarytonów okazał się jednak bardzo niewielki, rzędu $100 \mu\text{eV}$, co aż do 14 T było porównywalne z szerokością linii.

Tym samym stało się jasne, że aby obserwować wszystkie ciekawe efekty kolektywne związane ze spinem w zdegenerowanym gazie polarytonów należy zająć się innym materiałem, gdzie efekty spinowe będą większe. W tym samym czasie na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego dr hab. Wojciech Pacuski wraz z zespołem zaczął wytwarzać struktury mikrowętek półprzewodnikowych, wprowadzając do studni kwantowych jony manganu. Nowatorskim podejściem było wykreowanie nowego typu polarytonów ekscytonowych (tzw. polarytonów półmagnetycznych) przez wprowadzenie do układu oddziaływań magnetycznych poprzez oddziaływanie wymiany $s, p - d$ między ekscytonowym składnikiem w polarytonie i momentami magnetycznymi atomów umieszczonych wewnątrz studni kwantowych. Struktura wnęki oraz zwierciadła Bragga nie zawierały jonów magnetycznych. W związku z tym oddziaływanie wymiany wpływa na polarytony tylko przez ich składnik ekscytonowy, natomiast ani jony Mn, ani zewnętrzne pole magnetyczne nie wpływają na fotony wnękowe. Pokazaliśmy gigantyczny efekt Zeemana występujący w takich strukturach [44]. Już w polu magnetycznym 5 T zaobserwowaliśmy rozdzielanie obu komponentów spinowych dolnego polarytonu, co było znaczącym osiągnięciem w badaniach nad magnetoptycznymi własnościami polarytonów.

Następny przełom nastąpił, kiedy w mikrowętkach półmagnetycznych wytwarzanych na UW zaobserwowaliśmy nierównowagową kondensację polarytonów. W warunkach silnego, impulsowego, nierezonansowego pobudzenia polarytony makroskopowo obsadzały pojedynczy stan kwantowy [45]. Wpływ oddziaływań polaryton-polaryton oraz polaryton-rezerwuar ekscytonowy był widoczny w zmianie energii polarytonów wraz ze zwiększaniem obsadzenia.

Fizyka w przypadku kondensatu polarytonów półmagnetycznych jest znacznie bogatsza i różni się od przypadku bozonów nieposiadających spinu. Oddziaływania pomiędzy polarytonami odpowiedzialne za szereg nieliniowych efektów (kondensacja, nadciekłość), zależą od spinu [39, 43, 46, 47]. Jest to spowodowane

faktem, że polarytony z równoległymi spinami odpychają się, a polarytony ze spinami antyrównoległymi się przyciągają. Badania skupione obecnie na analizie efektów spinowych w kondensatach półmagnetycznych polarytonów otwierają drogę do wielu ciekawych zjawisk. Pole magnetyczne wprowadza brak równowagi między obsadzeniem stanów o obu orientacjach spinowych poprzez tendencję do porządkowania spinów. Ponadto, pole magnetyczne wpływa na warunki krytyczne do osiągnięcia kondensacji [48]. Warto wspomnieć, że przez długi czas brak możliwości strojenia oddziaływań był uznawany za główną wadę kondensatów polarytonowych w porównaniu do kondensatów atomowych. Teraz chcieliśmy wykazać, że jest to także możliwe w przypadku kondensatów polarytonowych. Pokazaliśmy [49], że w przypadku kondensatu polarytonów, zewnętrzne pole magnetyczne może być ekranowane poprzez oddziaływania, podobnie jak w spinowym efekcie Meissnera [40]. Ponadto polarytony mogą mieć właściwości paramagnetyczne, ferromagnetyczne lub diamagnetyczne w zależności od warunków zewnętrznych [46, 50], nad czym obecnie pracujemy.

W specjalnie dedykowanym laboratorium na Uniwersytecie Warszawskim, wraz z dr. hab. Jackiem Szczytko i zespołem zbudowaliśmy interferometr, który przy sprzężeniu z układem pracującym w silnym polu magnetycznym pozwoli nam eksplorować bogactwo wirów kwantowych w tych spinorowych cieczach, tzw. półwiry kwantowe o różnej orientacji ładunku i polaryzacji [10, 11, 51], zjawisko, które nie występuje w gazach zimnych atomów.

Warto wspomnieć również, że oprócz ciekawych właściwości spinowych, polarytony posiadają bogatą strukturę stanów wzbudzonych. Ponieważ część funkcji falowej jest dziedziczona od ekscytonu, należy się spodziewać, że polarytony powinny posiadać identyczne stany wzbudzone. W studni kwantowej struktura stanów energetycznych ekscytonów jest analogiczna do dwu-wymiarowego atomu wodoru ze stanami kolejno $1s$, $2s$, $2p$, $3s$, $3p$, $3d$, ... Stanami optycznie aktywnymi są ekscytony o symetrii funkcji falowej w płaszczyźnie studni kwantowej typu s . Oprócz stanu podstawowego ekscytonu $1s$, silne sprzężenie ekscyton-foton można zaobserwować również w stanie $2s$ (oraz $3s$) [52]. Eksperyment przeprowadziliśmy w silnym polu magnetycznym dzięki czemu rozdzieliliśmy stan $2s$ od energetycznie bliższych [53, 54] stanów $2p$, co pozwoliło na obserwację rozszczepienia linii rezonansu fotonowego na dwie składowe polarytonowe. Również energia sprzężenia ekscyton – foton (energia Rabięgo) w stanie $1s$ oraz $2s$ znacznie rośnie w polu magnetycznym, co ma bezpośredni związek ze wzrostem siły oscylatora ekscytonu w polu magnetycznym [53, 54, 55].

Pokazanie istnienia drabinki stanów wzbudzonych polarytonów ekscytonowych pozwoliło nam na zaprojektowanie dużo bardziej skomplikowanego eksperymentu. Różnica energetyczna pomiędzy stanem $1s$ a $2p$ polarytonu wynosi $6,5 \pm 0,5$ meV, co odpowiada długości fali fotonu z zakresu promieniowania THz, $191 \mu\text{m}$. Zaprojektowany eksperyment polegał na jednoczesnym kreowaniu polarytonów ekscytonowych w stanie podstawowym ekscytonu, czyli ekscytonów $1s$ silnie sprzężonych z fotonami mikrownęki, z zakresu promieniowania NIR, oraz podświetleniu układu silną i koherentną wiązką promieniowania THz o energii dostrojonej do przejścia $1s$ - $2p$ ekscytonu. Takie rezonansowe promieniowanie THz doprowadzi do dodatkowego silnego sprzężenia fotonów THz z rezonansem ekscytonowym $1s$ - $2p$. Eksperyment ten przeprowadziliśmy w laboratorium Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf, HZDR, w Dreźnie w Niemczech, gdzie jest dostępny laser na swobodnych elektronach (FEL) o silnej (rzędu kilkuset mW) i wąskiej spektralnie ($0,03$ meV) wiązce promieniowania. Istotnie pokazaliśmy [56], że ekscyton może być silnie sprzężony z dwoma fotonami o różnej energii NIR i THz. Natura tego sprzężenia jest inna, dla polarytonów są to oscylacje Rabięgo próżni, dla sprzężenia z promieniowaniem THz, zwykłe oscylacje Rabięgo. Pokazaliśmy zatem istnienie podwójnie ubranych stanów kwantowych. Stany zachowują charakter bozonowy. Kondensacja podwójnie ubranych polarytonów będzie zatem szczególnie interesująca, ponieważ stany te charakteryzują się dużym momentem dipolowym (ze względu na domieszkę stanów $2p$). To może prowadzić do zupełnie nowych zjawisk jak np. super-ciało-stałe (ang. supersolidity) [57].

W odniesieniu do przyszłych możliwych zastosowań, zdolność do tworzenia kondensatu w strukturach półprzewodnikowych otwiera drogę do budowy nowych urządzeń optoelektronicznych w szybko rozwijającej się dziedzinie łączącej wiedzę opto-elektroniczną z polarytonami, tzw. polarytroniką [58].

Perspektywy – w poszukiwaniu nowych materiałów do obserwacji silnego sprzężenia światło – materia

Obecnie poszukuje się alternatywnych sposobów na realizację polarytonów ekscytonowych i dąży do łatwej konstrukcji wnęki i obserwacji silnych własności nieliniowych w temperaturze pokojowej. Na szczególną uwagę zasługują wyniki otrzymane na związkach organicznych umieszczonych we wnękach zbudowanych na bazie materiałów dielektrycznych [59], białkach [60], nanorurkach węglowych [61], czy ostatnio bardzo obiecujących materiałach perowskitowych [62].

Szczególnie intensywnie badane są w ostatnich latach właściwości dwuwymiarowych płatków dichalko-

genków metali przejściowych (ang. transition metal dichalcogenides, TMDs) takich jak MoS_2 , MoSe_2 , WS_2 and WSe_2 . Materiały te mają budowę bardzo przypominającą grafen, jednak w przeciwieństwie do niego posiadają przerwę energetyczną, co pozwala myśleć o wykorzystaniu ich do budowy tranzystorów lub diod LED. Ekscytony w tych materiałach są tak silnie związane, że są stabilne w temperaturze pokojowej. Dodatkowo struktura pasmowa tych związków pozwala na selektywne optyczne wzbudzenie ekscytonów do jednej z dwóch różnych dolin w przestrzeni Brillouina, co potencjalnie może służyć do zapisu, a następnie odczytu informacji.

Wiele grup badawczych doniosło już o obserwacji reżimu silnego sprzężenia ekscytonów w monowarstwach TMD z fotonami w różnego rodzaju płaskich wnękach optycznych: dielektrycznych [63, 64, 65], metalicznych [66], czy półprzewodnikowo-metalicznych [67]. Najlepsze jakościowo monowarstwy uzyskujemy na Uniwersytecie Warszawskim w grupie dr. Karola Nogajewskiego i prof. Marka Potemskiego metodą eksfoliacji [68], choć szczególnie obiecujących wyników można również oczekiwać po warstwach hodowanych MBE w grupie dr. hab. Wojciecha Pacuskiego, ze względu na jednorodne pokrycie luster jednakowym materiałem. Kondensaty polarytonów ekscytonowych oraz stany nadciekłe w układach zbudowanych na monowarstwach TMDs będą szczególnie interesujące z powodów połączenia efektów kolektywnych z własnościami optycznymi wynikającymi z istnienia charakterystycznych dolin w strukturze pasmowej TMDs. Ponadto możliwość łączenia monowarstw z innymi materiałami dwuwymiarowymi, takimi jak grafen lub heksagonalny azotek boru (h-BN) w stosach o różnych funkcjonalnościach [69], takich jak tranzystory [70] lub diody emitujące pojedyncze fotony [71], otwiera możliwości budowania nowych urządzeń optoelektronicznych.

Podsumowując, podstawowe aspekty fizyczne związane z fizyką polarytonów i ich potencjał aplikacyjny, nadaje tej dziedzinie fizyki półprzewodników wyjątkowe znaczenie a także interdyscyplinarny charakter. Dlatego fizyka polarytonów jest przedmiotem zainteresowania społeczności naukowych zajmujących się półprzewodnikami, gazami atomowymi i optyką kwantową.

Literatura

- [1] C. Weisbuch, M. Nishioka, A. Ishikawa, Y. Arakawa, Observation of the coupled exciton-photon mode splitting in a semiconductor quantum microcavity, *Phys. Rev. Lett.* 69, 3314 (1992)
- [2] J. Kasprzak, M. Richard, S. Kundermann, A. Baas, P. Jeambrun, J. M. J. Keeling, F. M. Marchetti, M. H. Szymańska, R. André, J. L. Staehli, V. Savona, P. B. Littlewood, B. Deveaud, Le Si Dang, Bose–Einstein condensation of exciton polaritons, *Nature* 443, 409 (2006)
- [3] L. P. Pitaevskii, S. Stringari, „Bose–Einstein condensation” (Oxford: Clarendon Press, 2003)
- [4] S. Christopoulos, G. Baldassarri, Höger von Högersthal, A. J. D. Grundy, P. G. Lagoudakis, A. V. Kavokin, J. J. Baumberg, G. Christmann, R. Butté, E. Feltn, J.-F. Carlin, and N. Grandjean. Room-temperature polariton lasing in semiconductor microcavities. *Phys. Rev. Lett.* 98, 126405 (2007)
- [5] J. J. Baumberg, A. V. Kavokin, S. Christopoulos, A. J. D. Grundy, R. Butté, G. Christmann, D. D. Solnyshkov, G. Malpuech, G. Baldassarri Höger von Högersthal, E. Feltn, J.-F. Carlin, and N. Grandjean, Spontaneous polarization buildup in a room-temperature polariton laser. *Phys. Rev. Lett.* 101, 136409 (2008).
- [6] D. Sarchi and V. Savona, Long-range order in the Bose–Einstein condensation of polaritons *Phys. Rev. B* 75, 115326 (2007)
- [7] BKT – przejście fazowe typu Berezinski – Kosterlitz – Thoules. A. Posazhennikova, Weakly interacting, dilute Bose gases in 2D, *Rev. Mod. Phys.* 78, 1111 (2006).]
- [8] M. H. Szymańska, J. Keeling, P. B. Littlewood, Nonequilibrium quantum condensation in an incoherently pumped dissipative system, *Phys. Rev. Lett.* 96, 230602 (2006) oraz G. Roumpos, Y. Yamamoto (2012) The Berezinskii–Kosterlitz–Thouless Phase Transition in Exciton–Polariton Condensates. In: Timofeev V., Sanvitto D. (eds) *Exciton Polaritons in Microcavities*. Springer Series in Solid-State Sciences, vol 172. Springer, Berlin, Heidelberg.
- [9] A. Amo, J. Lefrere, S. Pigeon, C. Adrados, C. Ciuti, I. Carusotto, R. Houdre, E. Giacobino, A. Bramati, Superfluidity of polaritons in semiconductor microcavities, *Nature Phys.* 5, 805 (2009)
- [10] K. G. Lagoudakis, T. Ostatnický, A. V. Kavokin, Y. G. Rubo, R. André, B. Deveaud-Plédran, Observation of half-quantum vortices in an exciton-polariton condensate. *Science* 326, 974, (2009)
- [11] F. Manni, K. G. Lagoudakis, T. C.H Liew, R. André, V. Savona, B. Deveaud, Dissociation dynamics of singly charged vortices into half-quantum vortex pairs, *Nat. Comm.* 3, 1309, (2012)
- [12] A. Amo, S. Pigeon, D. Sanvitto, V. G. Sala, R. Hivet, I. Carusotto, F. Pisanello, G. Leménager, R. Houdré, E Giacobino, C. Ciuti, A. Bramati, Polariton Superfluids Reveal Quantum Hydrodynamic Solitons, *Science* 332, 1167 (2011)

- [13] P. M. Walker, L. Tinkler, B. Royall, D. V. Skryabin, I. Farrer, D. A. Ritchie, M. S. Skolnick, D. N. Krizhanovskii, Dark Solitons in High Velocity Waveguide Polariton Fluids *Phys. Rev. Lett.* 119, 097403 (2017)
- [14] H. Deng, G. Weihs, Ch. Santori, J. Bloch, Y. Yamamoto, Condensation of semiconductor microcavity exciton polaritons, *Science* 298, 199 (2002).
- [15] T. Guillet, M. Mexis, J. Levrat, G. Rossbach, C. Brimont, T. Bretagnon, B. Gil, R. Butté, N. Grandjean, L. Orosz, F. Réveret, J. Leymarie, J. Zúñiga-Pérez, M. Leroux, F. Semond, and S. Bouchoule, Polariton lasing in a hybrid bulk ZnO microcavity, *Appl. Phys. Lett.* 99, 161104 (2011).
- [16] S. Christopoulos, G. Baldassarri Höger von Högersthal, A. J. D. Grundy, P. Lagoudakis, A. V. Kavokin, J. J. Baumberg, G. Christmann, R. Butté, E. Feltn, J.-F. Carlin, and N. Grandjean, Room-temperature polariton lasing in microcavities, *Phys. Rev. Lett.* 98, 126405 (2007)
- [17] J. J. Baumberg, A. V. Kavokin, S. Christopoulos, A. J. D. Grundy, R. Butté, G. Christmann, D. D. Solnyshkov, G. Malpuech, G. Baldassarri Höger von Högersthal, E. Feltn, J.-F. Carlin, and N. Grandjean, Spontaneous polarization buildup in a room-temperature polariton laser. *Phys. Rev. Lett.* 101, 136409 (2008)
- [18] W. Ketterle, Nobel Lecture, When atoms behave as waves: Bose–Einstein condensation and the atom laser, December 8, 2001.
- [19] S. Ritter, A. Öttl, T. Donner, T. Bourdel, M. Köhl, and T. Esslinger, Observing the Formation of Long-Range Order during Bose–Einstein Condensation, *Phys. Rev. Lett.* 98, 090402 (2007)
- [20] M. Hugbart, J. A. Retter, A. F. Varón, P. Bouyer, A. Aspect, M. J. Davis, Population and phase coherence during the growth of an elongated Bose–Einstein condensate, *Phys. Rev. A* 75, 011602(R) (2007)
- [21] M. P. A. Fisher, P. B. Weichman, G. Grinstein, and D. S. Fisher, Boson localization and the superfluid-insulator transition, *Phys. Rev. B* 40, 546 (1989)
- [22] G. Nardin, K. G. Lagoudakis, M. Wouters, M. Richard, A. Baas, R. André, Le Si Dang, B. Pietka, B. Deveaud-Plédran, Dynamics of long-range ordering in an exciton-polariton condensate. *Phys. Rev. Lett.* 103, 256402 (2009)
- [23] L. Fontanesi, M. Wouters, and V. Savona, Superfluid to Bose-Glass Transition in a 1D Weakly Interacting Bose Gas, *Phys. Rev. Lett.* 103, 030403 (2009).
- [24] G. Malpuech, D. D. Solnyshkov, H. Ouerdane, M. M. Glazov, and I. Shelykh, Bose glass and superfluid phases of cavity polaritons, *Phys. Rev. Lett.* 98, 206402 (2007)
- [25] F. Manni, K. G. Lagoudakis, B. Pietka, L. Fontanesi, M. Wouters, V. Savona, R. André, B. Deveaud-Plédran, Polariton condensation in a one-dimensional disordered potential. *Phys. Rev. Lett.* 106, 176401 (2011)
- [26] D. N. Krizhanovskii, K. G. Lagoudakis, M. Wouters, B. Pietka, R. A. Bradley, K. Guda, D. M. Whittaker, M. S. Skolnick, B. Deveaud-Plédran, M. Richard, R. André, Le Si Dang, Coexisting Non-Equilibrium Condensates with Long-Range Spatial Coherence in Semiconductor Microcavities, *Phys. Rev. B* 80, 045317 (2009)
- [27] F. S. Cataliotti, S. Burger, C. Fort, P. Maddaloni, F. Minardi, A. Trombettoni, A. Smerzi, M. Inguscio, Josephson junction arrays with Bose–Einstein condensates, *Science* 293, 843 (2001)
- [28] R. Gati, M. Albiez, J. Fölling, B. Hemmerling, M. K. Oberthaler, Realization of a single Josephson junction for Bose–Einstein condensates, *Appl. Phys. B* 82, 207 (2006)
- [29] K. G. Lagoudakis, M. Wouters, M. Richard, A. Baas, I. Carusotto, R. André, Le Si Dang, B. Deveaud-Plédran, Quantized vortices in an exciton-polariton condensate, *Nature Phys.* 4, 706 (2008)
- [30] K. G. Lagoudakis, B. Pietka, M. Wouters, R. André, B. Deveaud-Plédran, Coherent oscillations in an exciton-polariton Josephson junction. *Phys. Rev. Lett.* 105, 120403 (2010)
- [31] K. G. Lagoudakis, F. Manni, B. Pietka, M. Wouters, T. C. H. Liew, V. Savona, A. V. Kavokin, R. André, B. Deveaud-Plédran, Probing the dynamics of spontaneous quantum vortices in polariton superfluids. *Phys. Rev. Lett.* 106, 115301 (2011)
- [32] D. Sanvitto, F. M. Marchetti, M. H. Szymańska, G. Tosi, M. Baudisch, F. P. Laussy, D. N. Krizhanovskii, M. S. Skolnick, L. Marrucci, A. Lemaître, J. Bloch, C. Tejedor, L. Viña, Persistent currents and quantized vortices in a polariton superfluid, *Nature Phys.* 6, 527 (2010)
- [33] D. N. Krizhanovskii, D. M. Whittaker, R. A. Bradley, K. Guda, D. Sarkar, D. Sanvitto, L. Vina, E. Cerda, P. Santos, K. Biermann, R. Hey, and M. S. Skolnick, Effect of Interactions on Vortices in a Nonequilibrium Polariton Condensate, *Phys. Rev. Lett.* 104, 126402 (2010)
- [34] T. W. B. Kibble, Topology of Cosmic Domains and Strings, *J. Phys. A* 9, 1387 (1976).
- [35] W. H. Zurek, Cosmological experiments in superfluid helium?, *Nature (London)* 317, 505 (1985)
- [36] W. H. Zurek, Cosmological experiments in condensed matter systems, *Physics Reports-Review Section of Physics Letters*, 276(4):177–221, 1996.

- [37] M. Matuszewski, E. Witkowska, Universality in nonequilibrium condensation of exciton-polaritons, *Phys. Rev. B* 89, 155318 (Apr 2014)
- [38] G. Nardin, G. Grosso, Y. Léger, B. Pietka, F. Morier-Genoud, B. Deveaud-Plédran, Hydrodynamic nucleation of quantized vortex pairs in a polariton quantum fluid. *Nature Physics* 7, 635 (2011)
- [39] Spin effects in exciton-polariton condensates, A. Kavokin in *Exciton polaritons in microcavities* by D. Sanvitto and V. Timofeev, Springer Series in Solid-State Sciences 172 (2012)
- [40] Y. G. Rubo, A. V. Kavokin, I. A. Shelykh, Suppression of superfluidity of exciton-polaritons by magnetic field, *Phys. Lett. A* 358, 227 (2006).
- [41] Yongbao Sun, P. Wen, Y. Yoon, G. Liu, M. Steger, L. N. Pfeiffer, K. West, D. W. Snoke, K. A. Nelson, Bose–Einstein Condensation of Long-Lifetime Polaritons in Thermal Equilibrium, *Phys. Rev. Lett.* 118, 016602 (2017)
- [42] E. Wertz, A. Amo, D. D. Solnyshkov, L. Ferrier, T. C. H. Liew, D. Sanvitto, P. Senellart, I. Sagnes, A. Lemaître, A. V. Kavokin, G. Malpuech, J. Bloch, Propagation and Amplification Dynamics of 1D Polariton Condensates, *Phys. Rev. Lett.* 109, 216404 (2012)
- [43] E. Wertz, L. Ferrier, D. D. Solnyshkov, R. Johne, D. Sanvitto, A. Lemaître, I. Sagnes, R. Grousson, A. V. Kavokin, P. Senellart, G. Malpuech, J. Bloch, Spontaneous formation and optical manipulation of extended polariton condensates, *Nature Phys.* 6, 860 (2010)
- [44] R. Mirek, M. Król, K. Lekenta, J.-G. Rousset, M. Nawrocki, M. Kulczykowski, M. Matuszewski, J. Szczytko, W. Pacuski, B. Piętka, Angular dependence of giant Zeeman effect for semi-magnetic cavity polaritons. *Phys. Rev. B* 95, 085429 (2017)
- [45] J.-G. Rousset, B. Piętka, M. Król, R. Mirek, K. Lekenta, J. Szczytko, J. Borysiuk, J. Suffczyński, T. Kazimierzczuk, M. Goryca, T. Smoleński, P. Kossacki, M. Nawrocki, W. Pacuski, Strong coupling and polariton lasing in Te based microcavities embedding (Cd,Zn)Te quantum wells. *Appl. Phys. Lett.* 107, 201109 (2015)
- [46] Y. Zhang, B. Zou, Diamagnetism of microcavity polaritons induced by spin-dependent polariton–polariton interactions, *Phys. Lett. A* 376, 3332 (2012)
- [47] M. Vladimirova, S. Cronenberger, D. Scalbert, K. V. Kavokin, A. Miard, A. Lemaître, J. Bloch, D. Solnyshkov, G. Malpuech, and A. V. Kavokin, Polariton–polariton interaction constants in microcavities, *Phys. Rev. B* 82, 075301 (2010)
- [48] J.-G. Rousset, B. Piętka, M. Król, R. Mirek, K. Lekenta, J. Szczytko, W. Pacuski, M. Nawrocki, Magnetic field effect on the lasing threshold of a semimagnetic polariton condensate. *Phys. Rev. B* 96, 125403 (2017)
- [49] M. Król, R. Mirek, K. Lekenta, J.-G. Rousset, M. Nawrocki, M. Matuszewski, J. Szczytko, W. Pacuski, B. Piętka, Spin polarized semimagnetic exciton-polariton condensate in magnetic field. *Scientific Reports* 8, 6694 (2018)
- [50] H. Ohadi, A. Dreismann, Y. G. Rubo, F. Pinsker, Y. del Valle-Inclan Redondo, S. I. Tsintzos, Z. Hatzopoulos, P. G. Savvidis, and J. J. Baumberg., Spontaneous spin bifurcations and ferromagnetic phase transitions in a spinor exciton-polariton condensate, *Physical Review X* 5 (3), 031002 (2015)
- [51] M. T. Solano, Y. Rubo, Half-quantum vortices in exciton–polariton condensates in applied magnetic field, *Superlattices and Microstructures* 49, 318 (2011)
- [52] B. Piętka, M. R. Molas, N. Bobrovska, M. Król, R. Mirek, K. Lekenta, P. Stępnicki, F. Morier-Genoud, J. Szczytko, B. Deveaud, M. Matuszewski, M. Potemski, 2s exciton polariton revealed in external magnetic field. *Phys. Rev. B* 96, 081402(R) (2017)
- [53] P. Stępnicki, B. Piętka, F. Morier-Genoud, B. Deveaud, M. Matuszewski, Analytical method for determining quantum well excitons properties in a magnetic field, *Phys. Rev. B* 91, 195302 (2015)
- [54] P. Zięba, B. Piętka, I. Tralle, J. Łusakowski, Exciton binding energy and oscillator strength in a shallow QW in an external magnetic field, *Acta Physica Polonica A* 128, 237 (2015).
- [55] B. Piętka, D. Zygmunt, M. Król, M. R. Molas, A. A. L. Nicolet, F. Morier-Genoud, J. Szczytko, J. Łusakowski, P. Zięba, I. Tralle, P. Stępnicki, M. Matuszewski, M. Potemski, B. Deveaud, Magnetic field tuning of exciton-polaritons in a semiconductor microcavity. *Phys. Rev. B* 91, 075309 (2015)
- [56] B. Piętka, N. Bobrovska, D. Stephan, M. Teich, M. Król, S. Winnerl, A. Pashkin, R. Mirek, K. Lekenta, F. Morier-Genoud, H. Schneider, B. Deveaud, M. Helm, M. Matuszewski, J. Szczytko, Doubly dressed bosons: exciton polaritons in a strong terahertz field. *Phys. Rev. Lett.* 119, 077403 (2017)
- [57] K. Góral, L. Santos, and M. Lewenstein, Quantum Phases of Dipolar Bosons in Optical Lattices, *Phys. Rev. Lett.* 88, 170406 (2002)
- [58] B. Deveaud-Plédran, Polaritronics in view. *Nature* 453, 297 (2008).

- [59] S. Kena-Cohen, S. R. Forrest, Room-temperature polariton lasing in an organic single-crystal microcavity, *Nature Photonics* 4, 371 (2010)
- [60] C. P. Dietrich, A. Steude, L. TROPF, M. Schubert, N. M. Kronenberg, K. Ostermann, S. Hofling, M. C. Gather, An exciton-polariton laser based on biologically produced fluorescent protein, *Sci. Adv.* 2, 1 (2016)
- [61] A. Graf, M. Held, Y. Zakharko, L. TROPF, M. C. Gather, J. Zaumseil, Electrical pumping and tuning of exciton-polaritons in carbon nanotube microcavities, *Nat. Mater.* 16, 911 (2017)
- [62] R. Su, C. Diederichs, J. Wang, T. C. H. Liew, J. Zhao, S. Liu, W. Xu, Z. Chen, Q. Xiong, Room-Temperature Polariton Lasing in All-Inorganic Perovskite Nanoplatelets, *Nano Lett.* 17, 3982 (2017)
- [63] X. Liu, T. Galfsky, Z. Sun, F. Xia, E.-C. Lin, Y.-H. Lee, S. Kena-Cohen, and V. M. Menon, *Nat. Photonics* 9, 30 (2014).
- [64] S. Dufferwiel, T. P. Lyons, D. D. Solnyshkov, A. A. P. Trichet, A. Catanzaro, F. Withers, G. Malpuech, J. M. Smith, K. S. Novoselov, M. S. Skolnick, D. N. Krizhanovskii, and A. I. Tartakovskii, *Nat. Commun.* 9, 4797 (2018).
- [65] L. C. Flatten, D. M. Coles, Z. He, D. G. Lidzey, R. A. Taylor, J. H. Warner, and J. M. Smith, *Nat. Commun.* 8, 14097 (2017).
- [66] Z. Sun, J. Gu, A. Ghazaryan, Z. Shotan, C. R. Conside, M. Dollar, B. Chakraborty, X. Liu, P. Ghaemi, S. Kena-Cohen, and V. M. Menon, *Nat. Photonics* 11, 491 (2017).
- [67] M. Waldherr, N. Lundt, M. Klaas, S. Betzold, M. Wurdack, V. Baumann, E. Estrecho, A. Nalotov, E. Cherotchenko, H. Cai, E. A. Ostrovskaya, A. V. Kavokin, S. Tongay, S. Klemmt, S. Hofling, and C. Schneider, *Nat. Commun.* 9, 3286 (2018).
- [68] M. Król, K. Lekenta, R. Mirek, K. Łempicka, D. Stephan, K. Nogajewski, M. Molas, A. Babiński, M. Potemski, J. Szczytko, B. Piętka, Valley polarization of exciton-polaritons in monolayer WSe₂ in a tunable microcavity, to appear in *Nanoscale* (2019)
- [69] A. K. Geim, I. V. Grigorieva, Van der Waals heterostructures. *Nature* 499, 419 (2013).
- [70] L. Britnell, et al. Field-E ect Tunneling Transistor Based on Vertical Graphene Heterostructures. *Science* 335, 947–950 (2012).
- [71] C. Palacios-Berraquero, et al. Atomically thin quantum light-emitting diodes. *Nat. Commun.* 7, 12978 (2016).