

Wydział Fizyki, Astronomii i Informatyki
Stosowanej
Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu
Grudziądzka 5/7
87-100 Toruń
za pośrednictwem:
Rady Doskonałości Naukowej
pl. Defilad 1
00-901 Warszawa
(Pałac Kultury i Nauki, p. XXIV, pok. 2401)

dr Karolina Słowik
Instytut Fizyki
Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu

Wniosek
z dnia 20 kwietnia 2011

o przeprowadzenie postępowania w sprawie nadania stopnia doktora habilitowanego w dziedzinie nauk ścisłych i przyrodniczych w dyscyplinie nauki fizyczne¹.

Określenie osiągnięcia naukowego będącego podstawą ubiegania się o nadanie stopnia doktora habilitowanego

Zastosowanie nanoanten do kontroli oddziaływań układów atomowych ze światłem w nanoskali

.....
Wnioskuje – na podstawie art. 221 ust. 10 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2018 r. poz. 1668 ze zm.) – aby komisja habilitacyjna podejmowała uchwałę w sprawie nadania stopnia doktora habilitowanego w głosowaniu ~~tajnym~~**jawnym**².

Zostałem poinformowany, że:

Administratorem w odniesieniu do danych osobowych pozyskanych w ramach postępowania w sprawie nadania stopnia doktora habilitowanego jest Przewodniczący Rady Doskonałości Naukowej z siedzibą w Warszawie (pl. Defilad 1, XXIV piętro, 00-901 Warszawa).

Kontakt za pośrednictwem e-mail: kancelaria@rdn.gov.pl , tel. 22 656 60 98 lub w siedzibie organu.

Dane osobowe będą przetwarzane w oparciu o przesłankę wskazaną w art. 6 ust. 1 lit.

c) Rozporządzenia UE 2016/679 z dnia z dnia 27 kwietnia 2016 r. w związku z art.

1 Klasyfikacja dziedzin i dyscyplin wg. rozporządzenia Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 20 września 2018 r. w sprawie dziedzin nauki i dyscyplin naukowych oraz dyscyplin w zakresie sztuki (Dz. U. z 2018 r. Poz. 1818).

2 * Niepotrzebne skreślić.

220 - 221 oraz art.232 – 240 ustawy z dnia 20 lipca 2018 roku - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, w celu przeprowadzenie postępowania o nadanie stopnia doktora habilitowanego oraz realizacji praw i obowiązków oraz środków odwoławczych przewidzianych w tym postępowaniu.

Szczegółowa informacja na temat przetwarzania danych osobowych w postępowaniu dostępna jest na stronie www.rdn.gov.pl/klauzula-informacyjna-rodo.html

Karolina Stane
.....
(podpis wnioskodawcy)

Załączniki:

1. Dane wnioskodawcy w językach polskim i angielskim.
2. Autoreferat w języku polskim i angielskim.
3. Odpis dyplomu doktorskiego.
4. Wykaz osiągnięć naukowych w językach polskim i angielskim.

Autoreferat

I. Imię i nazwisko: Karolina Maria Słowik

II. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe lub artystyczne

- 2012 r. stopień doktora nauk fizycznych
Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu (UMK)
rozprawa doktorska *Bramki logiczne dla światła rozchodzącego się i zatrzymanego w ośrodku atomów o konfiguracji trójnoga*
promotor: prof. dr hab. Andrzej Raczyński
- 2008 r. tytuł magistra fizyki, UMK
praca magisterska *Zatrzymywanie i uwalnianie fotonów w kontrolowanym optycznie ośrodku gazowym w konfiguracji energetycznej "trójnoga"*
pod kierunkiem prof. dr. hab. Andrzeja Raczyńskiego

III. Informacja o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych lub artystycznych

- od stycznia 2016 r.: adiunkt naukowo-dydaktyczny w Instytucie Fizyki UMK
- maj - październik 2015 r.: stanowisko naukowe (researcher position) w Karlsruhe Institute of Technology, Karlsruhe, Niemcy
- październik 2014 r. - grudzień 2015 r.: asystent naukowo - dydaktyczny w Instytucie Fizyki UMK
- sierpień 2012 - maj 2015 r.: stanowisko naukowe (researcher position), Friedrich-Schiller Universität, Jena, Niemcy

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

IV.1. Tytuł osiągnięcia:

Zastosowanie nanoanten do kontroli oddziaływań układów atomowych ze światłem w nanoskali

IV.2. Cele badawcze, wyniki i opis opartych na nich publikacji, wpływ na przyszłe badania

Osiągnięcie naukowe, które stanowi podstawę niniejszego wniosku, polega na uogólnieniu wybranych elementów teorii układów atomowych, oddziałujących ze światłem we wnękach rezonansowych, na przypadek ich nanoskopowych odpowiedników - nanoanten. Nanoanten to cząstki, na ogół metaliczne, które skupiają energię promieniowania świetlnego w nanoskopowych obszarach przestrzennych, analogicznie do ich makroskopowych odpowiedników, "dostrojonych" do częstotliwości radiowych. Ponieważ niebanalną rolę odgrywają w tym procesie wzbudzenia zwane polarytonami plazmonowymi, kierunek badań skupiony wokół ich oddziaływania z układami kwantowymi nazywamy *plazmoniką kwantową*.

Badania, których wyniki składają się na opisywane tu osiągnięcie habilitacyjne, rozpoczęłam na stażu podoktorskim w grupie prof. Falka Lederera na Uniwersytecie Friedricha Schillera w Jenie (Niemcy). Zakres działalności naukowej grupy obejmował obszar zagadnień optyki ciała stałego, w szczególności plazmoniki, które badano i opisywano na poziomie klasycznego elektromagnetyzmu. Dołączyłam do grupy jako specjalista w zakresie zagadnień optyki kwantowej i fizyki atomowej. Współpraca - w mojej ocenie pouczająca i rozwijająca dla każdej ze stron - pozwoliła nam wypracować i zastosować nowe ramy metodologiczne, oparte na teorii układów atomowych we wnęce rezonansowej, służące do badania problemów na szerokim styku wymienionych obszarów. Badania kontynuowaliśmy w Karlsruhe Institute of Technology w Niemczech, gdzie przeniosła się część grupy już pod opieką prof. Carstena Rockstuhla, i gdzie realizowałam kolejny staż podoktorski. Następnie, część badań dotycząca wyjścia poza przybliżenie elektryczne dipolowe, była realizowana częściowo we współpracy z grupą Carstena Rockstuhla, już po moim powrocie na Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu.

IV.2.1. Wstęp i motywacja badań

Wpływ nanocząstek na oddziaływania światła z układami atomowymi jest szczególnie silny gdy nanocząstki wykonane są z metalu, ze względu na obecność gazu "swobodnych" elektronów, których kolektywny ruch nosi nazwę rezonansów plazmonowych [R1]¹. Wzbu-

¹W dokumencie pojawiają się trzy rodzaje cytowań: referencje oznaczane przez R, np. [R1], dotyczą prac innych autorów; prace oznaczone literką H składają się na osiągnięcie habilitacyjne, a pozostałe prace habilitantki oznaczone są literką P

dzenia plazmonowe wiążą się z silną koncentracją przestrzenną energii elektromagnetycznej w obszarze tzw. pola bliskiego, tj. w odległości od powierzchni mniejszej niż długość fali elektromagnetycznej [R2]. W konsekwencji materia, która znajdzie się w obszarze koncentracji pola, silnie z nim oddziałuje [R3]. Bezprecedensowa siła oddziaływań sprawia, że zjawiska, znane z teorii i praktyki dotyczącej elektrodynamiki układów atomowych we wnękach rezonansowych, w pobliżu nanocząstek realizowane są w zupełnie innych warunkach: w nanoskali przestrzennej, w pikosekundowych skalach czasowych, z wykorzystaniem "otwartej wnęki" jaką stanowi nanocząstka, wreszcie - w oddziaływaniu z polami elektromagnetycznymi nie tylko silnymi, ale i o natężeniu szybko zmieniającym się w przestrzeni. Wśród wspomnianych ciekawych zjawisk można wymienić efekty związane z dużym natężeniem pola, np. modyfikację właściwości emisyjnych układów atomowych czy stałych ich oddziaływań między sobą, poprzez wymianę wirtualnych fotonów [R4, R5, R6], [H1]. Z kolei szybka zmienność natężenia pola elektromagnetycznego w przestrzeni pozwala uzyskać warunki, w których przybliżenie elektryczne dipolowe - stosowane niemal paradygmatycznie w analizie problemów optyki kwantowej - przestaje mieć zastosowanie, a konieczne staje się uwzględnienie poprawek wyższego rzędu multipolowości [R7, R8], [H2]. Poprawki te mają wpływ na zjawiska wymienione powyżej i nie jest to wpływ wyłącznie ilościowy. Przeciwnie: interferencja różnych multipolowych kanałów przejść może prowadzić do aktywności optycznej, w szczególności dichroizmu kołowego, który wymaga oddziaływań np. dipoli elektrycznych i magnetycznych [R9], [P1], a także do interferencyjnego wygaszenia emisji spontanicznej [H3]. Analiza wpływu ilościowego i jakościowego nanoanten na wymienione zjawiska, z wykorzystaniem skonstruowanych i zaadaptowanych do tego celu analitycznych i numerycznych ram metodologicznych, jest przedmiotem badań podstawowych, których wyniki składają się na moje osiągnięcie habilitacyjne.

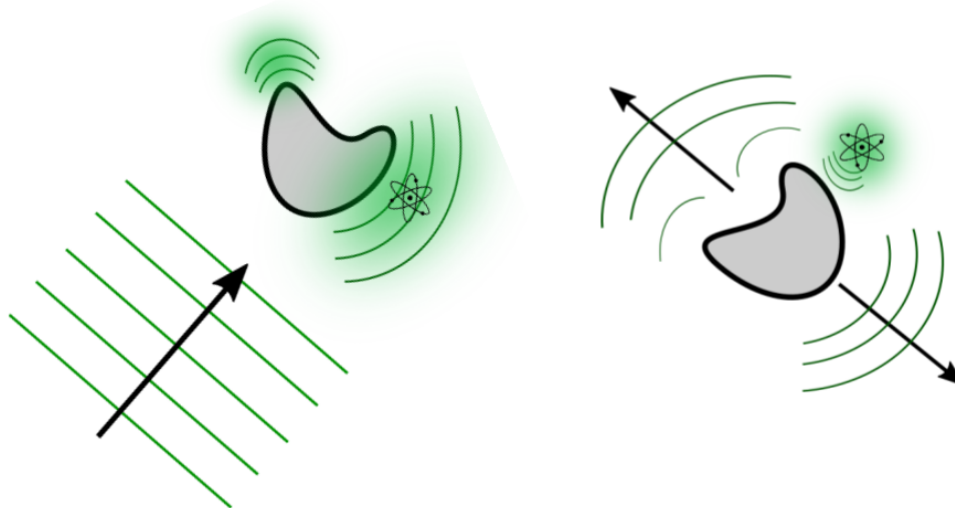
Praktyczną motywacją rozwoju plazmoniki kwantowej jest perspektywa przeniesienia eksperymentów kwantowo-optycznych z dużych stołów na mikroskopowe czipy, a w konsekwencji miniaturyzacji opartych na nich urządzeń optycznych [R10, R11, R12]. Nanocząstki w oddziaływaniu z układami atomowymi mogą stanowić elementy zintegrowanych układów fotonicznych, w szczególności źródła światła o nieklasycznych właściwościach statystycznych - nośnika informacji kwantowej [R13, R14], [H4, H5]. Nanocząstki mogą dostarczyć warunków do szybkiego - w skali pikosekund - adresowania pojedynczych molekuł czy kropek kwantowych, przetwarzania ich stanu, a tym samym informacji kwantowej w nim zapisanej [R12]. Nanocząstki mogą polepszać o wiele rzędów wielkości czułość sensorów molekuł [R15], [H6], w tym substancji szkodliwych, markerów chorób czy nawet wirusów. Mogą być wykorzystane w zastosowaniach spektroskopowych, do polepszenia czułości wykrywania i rozróżniania molekuł już przy ekstremalnie niskich koncentracjach [R16, R17],

do rozróżniania cząsteczek o przeciwnej skrętności [R18], [P1]– co ma znaczenie w medycynie i kosmetologii, a także do sterowania szerokością linii widmowej cząsteczki [R19]. Nanocząstki znajdują zastosowanie w mikroskopii, optoelektronice, do konwersji energii słonecznej, itd. [R20, R21]

Poniżej dokonam krótkiego wprowadzenia w fizyczne podstawy omawianych zjawisk: z jednej strony wzbudzenia plazmonowego, z drugiej: elektrodynamiki układów atomowych we rezonansowej wnęce optycznej. Dalej skomentuję warunki stosowalności przybliżenia elektrycznego dipolowego. Omówię następnie zawartość artykułów, które stanowią podstawę osiągnięcia habilitacyjnego.

Wzbudzenia plazmonowe Fizyczne podstawy efektu koncentracji energii pola w niewielkich obszarach przestrzennych oparte są na przemianie energii promieniowania w energię ruchu ładunków w objętości metalu i dalej w energię tzw. elektromagnetycznego pola bliższego wytwarzanego przez poruszający się ładunek - podobnie jak dzieje się to w makroskopowych antenach. Stąd ujarła się nazwa *nanoanteny* [R22, R23], używana w kontekście nanocząstek wykorzystywanych jako odbiorniki: do koncentracji pola, lub przeciwnie - jako nadajniki do przemiany zlokalizowanej energii elektromagnetycznej w promieniowanie.

Tradycyjnie, gdy antena działa w trybie nadajnika, prąd związany z ruchem ładunków



Rys.1 Lewa strona: Nanoantena (szary kolor) jako odbiornik, oświetlana rezonansową falą płaską koncentruje energię elektromagnetyczną w pobliżu swojej powierzchni. Układ atomowy umieszczony w obszarze wysokiego natężenia pola, oddziałuje z nim silniej niż oddziaływałby z falą płaską pod nieobecność nanoanteny.

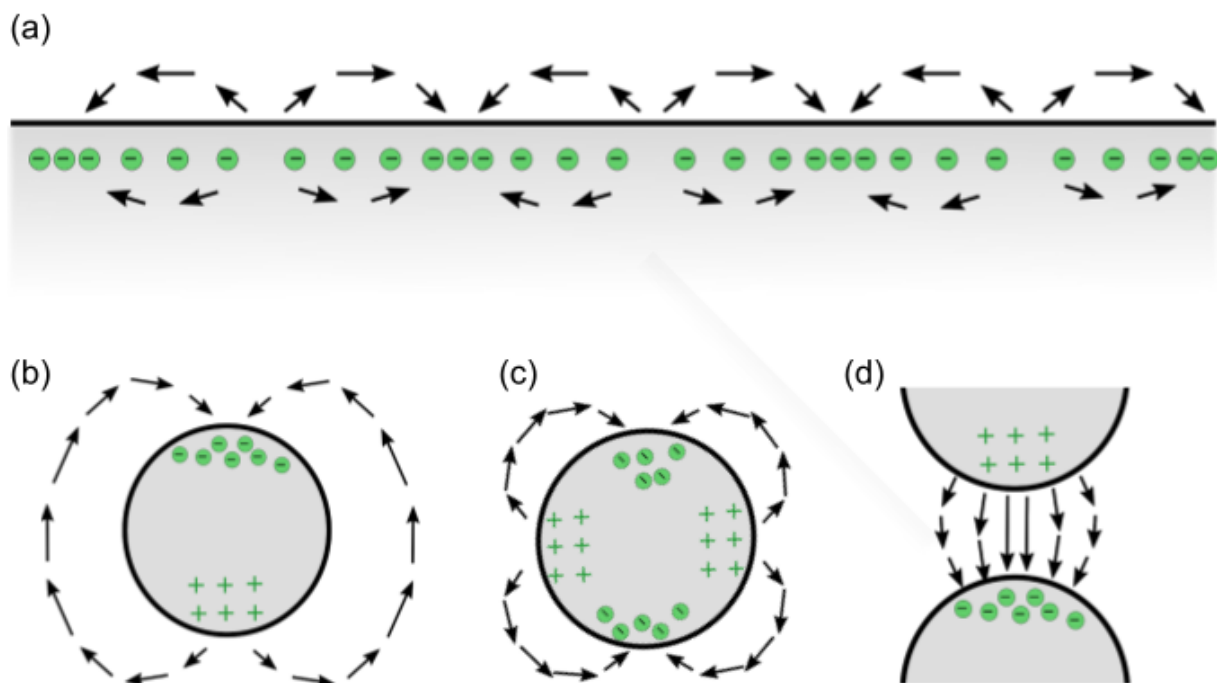
Prawa strona: nanoantena jako nadajnik, przetwarzający energię zlokalizowanego źródła (np. układu atomowego) na promieniowanie emitowane do pola dalekiego. Wydajność i kierunkowość emisji zależą od parametrów geometrycznych i materiałowych nanoanteny.

jest źródłem promieniowania. Gdy działa jak odbiornik, fala elektromagnetyczna pobudza ruch ładunków, który zwykle podlega pomiarom w obwodzie elektrycznym. W przypadku nanoanten i ich zastosowań istotnych dla tej pracy, przyczyną ruchu ładunków w trybie nadajnika zwykle jest drobny oscylator umieszczony w polu bliskim, np. klasyczny dipol lub jego kwantowy odpowiednik - układ atomowy z przejściem dipolowym między parą poziomów energetycznych. Przy zastosowaniu nanoanteny w trybie odbiornika, wykorzystujemy pole bliskie, silnie skoncentrowane na krańcach anteny, do pobudzania układu atomowego. Schemat działania nanoanteny jako mediatora między promieniowaniem a zlokalizowanym źródłem jest pokazany na rys. 1.

Odpowiedź optyczna zarówno makroskopowych anten, jak i ich odpowiedników w skali nano, ma charakter rezonansowy. W warunkach rezonansu wzbudzany jest kolektywny ruch chmury elektronowej w metalu, zwany rezonansem plazmonowym. Położenie spektralne rezonansu jest wypadkową kształtu nanoanteny, rozmiaru, właściwości materiałowych i otoczenia [R24].

Wzbudzeniom plazmonowym towarzyszy rezonansowo wzmocniona polaryzowalność, która opisuje indukowane w nanoantenie elektryczne i magnetyczne momenty multipolowe, a także odpowiadające im zwiększone przekroje czynne na absorpcję i rozpraszanie [R24]. Ponadto, wzbudzenia plazmonowe wiążą się z silnym wzmocnieniem pola elektromagnetycznego w najbliższym sąsiedztwie styku metal-otoczenie dielektryczne. Mówimy wówczas o powstaniu *powierzchniowych polarytonów plazmonowych* - w analogii do polarytonów znanych z teorii ciała stałego (hybrydowych kwazicząstek łączących elementy ekscytonów i pól elektromagnetycznych). Powierzchniowe polarytony plazmonowe to hybrydy złożone z plazmonu i pola elektromagnetycznego (rys. 2). Wzbudzenia propagują wzdłuż granicy metal - dielektryk (np. wzdłuż nanodrutu, rys. 2(a)), lub są zlokalizowane niczym fala stojąca, gdy ta granica ma charakter zamknięty [np. na powierzchni nanoanteny, rys. 2(b,c)][R1]. Szczególnie silne wzmocnienia pól towarzyszą polarytonom plazmonowym wytwarzanym w wąskich przestrzeniach pomiędzy sąsiadującymi nanoantenami (rys. 2(d)).

W dużym uproszczeniu, w przypadku makroskopowych anten warunek rezonansu sprowadza się do dopasowania częstotliwości ruchu chmury elektronowej, pobudzonej sinusoidalnie, i długości anteny w kierunku jej ruchu [R2]. Można stąd wywnioskować, że rozmiar anteny odpowiada, co do rzędu wielkości, długości fali elektromagnetycznej, dla której antena jest rezonansowa. Oddziaływania z układami atomowymi zachodzą w dziedzinie optycznej. Zgodnie z powyższym rozumowaniem, spodziewamy się rezonansu w tym przedziale widmowym dla anten rozmiarów rzędu setek nanometrów. Okazuje się jednak, że w przypadku nanoanten efekty materiałowe odgrywają zasadniczą rolę dla położenia re-



Rys.2 Powierzchniowy polaryton plazmowy to hybrydowe wzbudzenie, łączące kolektywny ruch chmury elektronowej i pole elektromagnetyczne ze składową podłużną.

(a) Polaryton może propagować wzdłuż powierzchni styku metalu i dielektryka, gdzie tworzą się lokalne zgęszczenia i rozrzedzenia chmury elektronowej. Odpowiada im rozkład pola elektrycznego zaznaczony przez strzałki układające się wzdłuż linii pola. Pole jest silne przy granicy ośrodków i zanika ewanescentnie w kierunku do niej prostopadłym [R1].

(b,c) Gdy granica ośrodków jest zamknięta powierzchnią, polaryton przyjmuje postać fali stojącej nazywanej zlokalizowanym polarytonem plazmowym. Na rysunku naszkicowano schemat rozkładu ładunków i pól dla rezonansu dipolowego (b) i kwadrupolowego (c).

(d) Polarytonom plazmowym wzbudzonym w sąsiadujących nanoantenach towarzyszą szczególnie silne wzmocnienia pól elektromagnetycznych w obszarze pomiędzy nanocząstkami.

zonansu, i przybliżenie rozmiaru długością fali daje poprawne oszacowanie rzędu wielkości, ale jest dość grube.

Wynik obrazujący wpływ właściwości optycznych materiału na położenie rezonansów plazmowych można otrzymać na podstawie teorii Mie. Opisuje ona odpowiedź optyczną obiektów sferycznych na oświetlenie falą płaską w kategorii indukowanych momentów multipolowych [R25], determinujących widma rozpraszania i absorpcji promieniowania przez nanosferę [R24]. Dla cząstki o promieniu a z materiału dyspersyjnego o względnej przenikalności elektrycznej $\epsilon_m(\omega)$ (wybieramy indeks m od angielskiego *material*), moment dipolowy \mathbf{d} indukowany przez falę płaską o częstotliwości ω i amplitudzie pola \mathbf{E} , wyraża się jako [R1]

$$\mathbf{d}(\omega) = \epsilon_0 \epsilon_m(\omega) \alpha(\omega) \mathbf{E}, \quad (1)$$

gdzie ϵ_0 to przenikalność elektryczna próżni, a funkcja $\alpha(\omega)$ nosi nazwę *polaryzowalności* i ma postać [R1]

$$\alpha(\omega) = 4\pi a^3 \frac{\epsilon_e - \epsilon_m(\omega)}{2\epsilon_e + \epsilon_m(\omega)}, \quad (2)$$

gdzie ϵ_e od angielskiego *environment* jest względną przenikalnością ośrodka. W typowych warunkach, ϵ_e zależy od ω powoli i pomijamy tę zależność w zapisie wzoru, ale ściśle rzecz biorąc powinniśmy uwzględnić zależność przenikalności ośrodka od częstotliwości $\epsilon_e = \epsilon_e(\omega)$.

Z równania (2) wynika, że rezonansową odpowiedź optyczną (wzbudzenie plazmonowe) uzyskamy, gdy

$$\text{Re}[2\epsilon_e + \epsilon_m(\omega)] = 0. \quad (3)$$

W szczególności w powietrzu, dla którego możemy przybliżyć $\epsilon_e \approx 1$, rezonans zachodzi dla $\text{Re}[\epsilon_m] \approx -2$. Ujemne wartości części rzeczywistej przenikalności elektrycznej są charakterystyczne dla metali, opisanych w dobrym przybliżeniu modelem Drudego $\epsilon_m \rightarrow \epsilon_{\text{Drude}}$, gdzie [R1]

$$\epsilon_{\text{Drude}}(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + i\gamma_p\omega}, \quad (4)$$

a ω_p i γ_p są stałymi zależnymi od materiału. Wartości $\epsilon_m \approx -2$ uzyskiwane są dla częstotliwości optycznych m.in. dla srebra i złota, a w bliskim ultrafiolecie dla aluminium [R23].

Zauważmy jednak, że położenie spektralne rezonansu opisane wzorem (3) nie zależy od rozmiaru sfery. Przybliżenie odpowiedzi optycznej nanosfery samym tylko członem dipolowym teorii Mie (1) jest słuszne dla nanocząstek o rozmiarach znacznie poniżej długości fali $a \ll \lambda = \frac{2\pi c}{\omega}$, gdzie c jest prędkością światła w próżni (ogólniej: w ośrodku o przenikalności elektrycznej ϵ_e). U jego podstaw stoi założenie, że wartość pola indukowanego wewnątrz sfery jest stała, a efekty retardacyjne nie grają roli (tzw. *przybliżenie elektrostatyczne*). W przypadku większych nanocząstek, o rozmiarach rzędu kilkudziesięciu nanometrów, te założenia nie są spełnione; kolejne człony multipolowe odgrywają rolę w opisie odpowiedzi optycznej nanocząstki, a odpowiednie współczynniki rozwinięcia zależą od jej rozmiaru, np. od promienia sfery w teorii Mie [R25]. W efekcie, położenie rezonansów kolejnych rzędów przesuwają się ku czerwieni w miarę wzrostu rozmiaru nanostruktury. Rezonanse w domenie optycznej otrzymujemy np. dla złotych kulek o rozmiarach rzędu kilkudziesięciu nanometrów.

Jeszcze ogólniej, położenie rezonansu w widmach rozpraszania czy absorpcji i rozkład przestrzenny rozproszonego przez nanocząstkę pola elektromagnetycznego zależą od jej kształtu i od charakteru pola wzbudzającego (np. fala płaska o zadanej polaryzacji, dipol o zadanej orientacji) [R24],[H7]. W ogólności, nie znamy analitycznych wyrażeń opisujących

te wielkości: znajduje się je rozwiązując numerycznie równania Maxwella. Takie podejście przyjęto w większości artykułów wchodzących w skład osiągnięcia. Typowo otrzymywano koncentrację pól w obszarach przestrzennych rozmiarów rzędu dziesięciu - kilku dziesiątek nanometrów, z towarzyszącym koncentracji lokalnym wzmocnieniem pola o około dwa rzędy wielkości. Na podstawie obliczonych widm rozpraszania i absorpcji oraz rozkładów pola dla zadanego rodzaju wzbudzenia, obliczano parametry wchodzące w skład równań dynamiki kwantowej, opisanych poniżej.

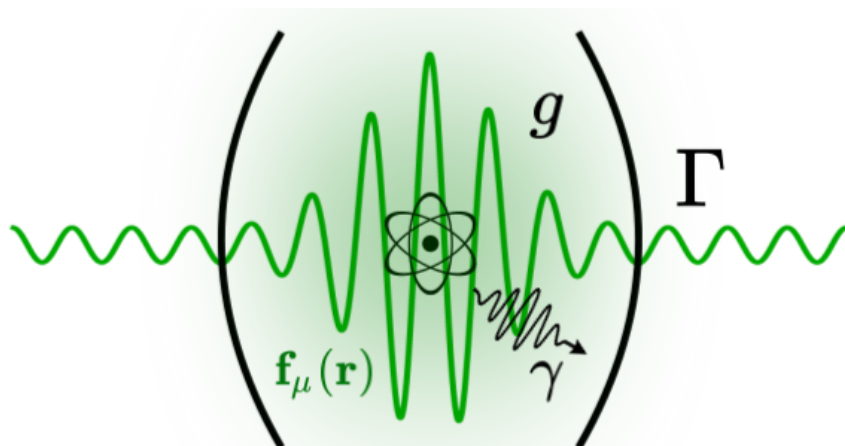
Układy atomowe we wnęce rezonansowej Przez *układ atomowy* będę rozumieć modelowy układ kwantowy o małej liczbie dyskretnych stanów energetycznych, zwykle dwu- lub trzystanowy. Ten prosty model może reprezentować atom, cząsteczkę, kropkę kwantową, defekt w ciele stałym, itd., przy założeniu że kolejne poziomy energetyczne tych układów są wystarczająco odstrojone, lub odpowiadające im stany własne są niedostępne z powodu reguł wyboru. W tym fragmencie zostaną przedstawione podstawy teorii układów atomowych we wnęce rezonansowej. Metodologia ta została wykorzystana w pracach składających się na osiągnięcie, do opisu dynamiki ich sprzężenia z polarytonami plazmonowymi². Klasa szczególnie interesujących problemów, zbadanych w ramach osiągnięcia, dotyczyła zagadnień, w których kwantowa natura światła odgrywa znaczącą rolę: zanalizowano kwantowe właściwości statystyczne pola emitowanego przez zaproponowane źródła [H4, H5], właściwości widmowe układu atom - pole w stanach ubranych [H6], zmiany właściwości emisyjnych układów atomowych pod wpływem oddziaływania z próżnią fotonową [H2], itd.

Wnęki rezonansowe wygodnie jest opisywać za pomocą szeregu modów własnych, tj. rozwiązań równania falowego bez źródła. Mody, indeksowane zestawem parametrów μ , ewoluują w sposób stacjonarny, z niezależną od czasu wektorową funkcją modową $\mathbf{f}_\mu(\mathbf{r})$ skupioną na obszarze wnęki. Funkcje modowe determinują operator natężenia pola elektrycznego

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = \sum_{\mu} \mathbf{f}_\mu(\mathbf{r}) (a_\mu + a_\mu^\dagger). \quad (5)$$

W powyższym równaniu a_μ i a_μ^\dagger to operatory anihilacji i kreacji fotonu pola, a funkcje modowe dla prostoty założono rzeczywiste, chociaż w ogólności nie muszą takie być (wówczas postać powyższego wzoru należy uogólnić tak żeby operator pola był hermitowski). W równaniu (5) funkcja modowa $\mathbf{f}_\mu(\mathbf{r})$ została tak unormowana, że odpowiada polu *pojedynczego fotonu* w modzie μ w punkcie przestrzeni \mathbf{r} . Spośród wielu modów wnęki, ten o częstotliwości bliskiej rezonansowi z częstotliwością przejścia kwantowego układu ato-

²W tekście wymiennie używam sformułowań "oddziaływanie ze światłem w otoczeniu nanoanten" i "oddziaływanie z powierzchniowymi polarytonami plazmonowymi", co jest uzasadnione ponieważ wymiana energii zachodzi między układami atomowymi a elektromagnetyczną częścią polarytonu.



Rys.3 Schemat makroskopowej wnęki rezonansowej z naszkicowaną zależnością przestrzenną składowej poprzecznej wybranego, rezonansowego z przejściem atomowym, modu pola $\mathbf{f}_\mu(\mathbf{r})$. Energia pola jest skoncentrowana wewnątrz wnęki, a w obszarze największego natężenia pola umieszczono układ atomowy. Stała oddziaływania tego układu i pola w wybranym modzie to g . Pole jest rozpraszane na częściowo przepuszczalnych zwierciadłach ze współczynnikiem Γ . Układ atomowy może podlegać emisji spontanicznej ze stałą γ . Uwaga: mody pola są dobrze określone jeśli współczynnik strat $\Gamma \ll \omega$, gdzie $\hbar\omega$ jest energią fotonu w modzie wnęki.

mowego oddziałuje z tym układem najsilniej. Jeśli pozostałe mody są odstrojone znacznie bardziej, uzasadnione jest przybliżenie pojedynczego modu.

Elementarny akt oddziaływania modu pola z dwupoziomowym układem atomowym sprowadza się do absorpcji lub emisji fotonu przez ten układ, z towarzyszącym temu odpowiednio wzbudzeniem lub de-ekscytacją. Zjawiska te są opisane hamiltonianem Jaynesa - Cummingsa [R4]

$$H_{JC} = \hbar g (|e\rangle\langle g| a + a^\dagger |g\rangle\langle e|), \quad (6)$$

gdzie \hbar to zredukowana stała Plancka, g oznacza stałą sprzężenia pojedynczego fotonu pola z przejściem atomowym, a operatory atomowe $|l\rangle\langle k|$ (ang. *flip operators*) opisują przejście układu kwantowego ze stanu $|k\rangle$ do stanu $|l\rangle$, przy czym $|g\rangle$ i $|e\rangle$ oznaczają podstawowy i wzbudzony stan układu atomowego. Ze względu na przybliżenie jednomodowe, pominięto indeks μ . Opis problemów z większą liczbą modów, układów atomowych, czy też stanów układu atomowego, wymaga prostego uogólnienia powyższego hamiltonianu, gdzie wkłady podobnej postaci należy wysumować. Energię oddziaływania zwykle wyraża się w przybliżeniu elektrycznym dipolowym jako $\hbar g = -\mathbf{f}(\mathbf{r}_0) \cdot \mathbf{d}_{eg}$, gdzie \mathbf{d}_{eg} jest elementem macierzowym operatora elektrycznego dipolowego momentu przejścia między stanami podstawowym i wzbudzonym, a \mathbf{r}_0 to położenie układu atomowego. W dalszej części tekstu przyjęto g jako rzeczywiste.

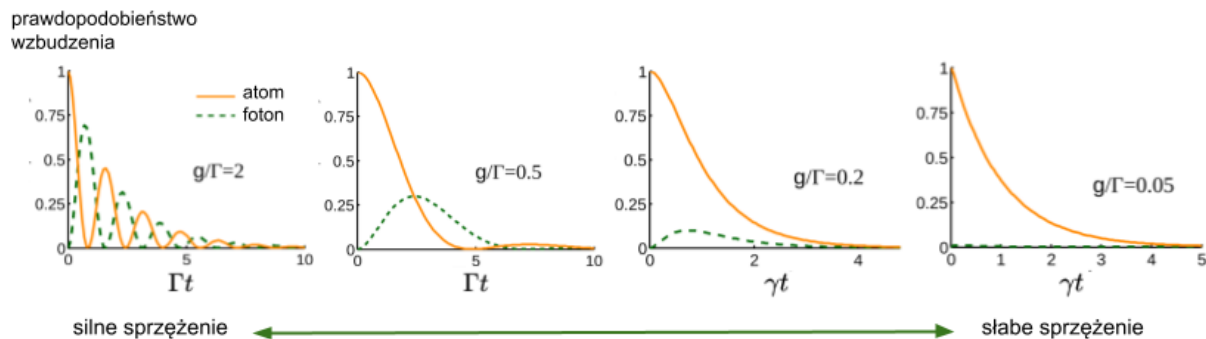
Poza wymianą energii między podukładami atomu i pola, w opisywanym problemie

obecne są procesy dyssypacyjne, takie jak rozpraszanie energii układu atomowego w procesie emisji spontanicznej czy pola na częściowo przepuszczających zwierciadłach, dekoherencja np. ze względu na zderzenia układu atomowego z atomami otoczenia, oddziaływanie defektu sieci krystalicznej z fononami, a nawet dekoherencja związana z pompowaniem optycznym [R26]. Wymienione efekty można uwzględnić w opisie ewolucji układu (atomu i kwantowego pola) za pomocą równania master [R4]

$$\dot{\rho} = -\frac{i}{\hbar} [H, \rho] + \mathcal{L}(\rho), \quad (7)$$

gdzie hamiltonian H zawiera część swobodną obu podukładów oraz ich oddziaływanie, w szczególności opisane modelem Jaynesa - Cummingsa (6). Człon Lindblada $\mathcal{L}(\rho)$ opisuje efekty dyssypacyjne, a jego szczegółowy opis jest dostępny m.in. w referencji [R4]. Wymienione procesy są schematycznie zaznaczone na rys. 3.

Silne i słabe sprzężenie "Straty" (wypromieniowanie) energii na zwierciadłach wnęki rezonansowej prowadzi do poszerzenia linii widmowych wnęki do skończonej szerokości, opisanej lorentzowskim profilem o szerokości połówkowej Γ [R4]. Podobnie, układ atomowy ma skończony czas życia stanu wzbudzonego γ^{-1} , związany ze współczynnikiem emisji spontanicznej γ . (W tym tekście wartość współczynnika emisji spontanicznej w próżni będzie oznaczana jako γ_0 , podczas gdy bardziej ogólny symbol γ dopuszcza modyfikację wartości współczynnika np. we wnękach rezonansowych lub w otoczeniu nanoanten.) W zależności od stosunku stałej oddziaływania g i współczynników strat, definiuje się tzw. silne (gdy $g > \Gamma, \gamma_0$) i słabe sprzężenie (w przeciwnym wypadku, tj. gdy współczynnik co najmniej jednego kanału strat przeważa nad stałą sprzężenia) [R4]. Typowa dynamika układu w warunkach silnego i słabego sprzężenia zilustrowana jest na rys. 4. W przypadku silnego sprzężenia, przeważająca wartość stałej oddziaływania g odpowiada za wielokrotne akty wymiany energii między podukładami, zanim dojdzie do jej rozproszenia do otoczenia. W warunkach słabego sprzężenia, energia początkowo wzbudzonego podukładu jest rozpraszana do otoczenia na tyle szybko, że nie zachodzi wymiana energii między podukładami atomowym i polowym. Uzyskanie warunków silnego sprzężenia wiąże się z efektem odpowiedzialnym za modyfikację widm układu, znanym pod różnymi nazwami: jako hybrydyzacja rezonansów pola i układu atomowego, czy też jako przejście układu w stan splątany pola i atomu, zwany w tym kontekście stanem ubranym. Charakterystyczne rozszczepienie Rabięgo w widmie absorpcji, czy tryplety Mollowa w widmie emisji [R27], sugerują potencjalne zastosowania zjawiska do detekcji molekuł czy defektów krystalicznych [R28],[H6]. Ponadto, wysokie tempo wymiany energii umożliwia szybkie adresowanie molekuł przez pole, zapisywanie w nich informacji kwantowej niesionej przez foton, przetwarzanie jej i równie szybki odczyt. Formacja ubranych stanów światła i materii, których



Rys.4 Ewolucja dwupoziomowego układu atomowego (atom) i modu pola (foton) w warunkach coraz słabszego sprzężenia. Podukłady wymieniają energię zgodnie z hamiltonianem Jaynesa - Cummingsa ze stałą sprzężenia g (6). Mod pola jest dysypatywny ze stratami opisanymi współczynnikiem Γ . Pominięto emisję spontaniczną układu atomowego $\gamma_0 = 0$. Pomarańczowa linia ciągła to prawdopodobieństwo obsadzenia stanu wzbudzonego układu atomowego. Przerywana linia zielona to wartość oczekiwana liczby fotonów w modzie pola.

W miarę osłabiania stałej sprzężenia g (lub równoważnie, w miarę wzrostu stałej dysypacji Γ) dynamika zmienia charakter: tłumione oscylacje Rabiego, widoczne w warunkach silnego sprzężenia, przechodzą stopniowo w eksponencjalny zanik prawdopodobieństwa obsadzenia stanu wzbudzonego atomu, z efektywną stałą zaniku $\gamma = \frac{4g^2}{\Gamma}$. Wynik opisany zanikiem eksponencjalnym, ze stałą determinowaną przez obecność słabo sprzężonej wnęki rezonansowej, jest ilustracją zjawiska Purcella.

energia zmienia się z każdym fotonem w układzie, może być wykorzystana do stworzenia przełączników optycznych ekstremalnie niskiej mocy. Warunki silnego sprzężenia wpływają też na szybkość reakcji chemicznych, wydajność rozpraszania Ramana czy też nieradiacyjnego transferu energii między molekułami we wnęcie [R29].

W warunkach słabego sprzężenia, charakterystycznym zjawiskiem jest efekt Purcella, w którym efektywny współczynnik emisji spontanicznej układu atomowego we wnęcie ulega modyfikacji w stosunku do próżni [R30]. Fizyczne podstawy tego zjawiska zostaną krótko objaśnione poniżej. W szczególności wysokie tempo, z jakim energia jest rozpraszana na zewnątrz układu, pozwala na wykorzystanie zjawiska, np. do generacji nieklasycznego światła: czas emisji fotonu ze wzbudzonego układu atomowego jest znacznie krótszy niż czas potrzebny do re-ekscytacji tego układu. To oznacza, że tylko jeden foton może być wygenerowany jednocześnie. Mechanizm generacji stanów jednofotonowych z wykorzystaniem dwupoziomowego układu atomowego jest znany, lecz w otoczeniu nanoanten zjawisko emisji przebiega w czasie rzędu pikosekund, a czasowe odstępy między kolejnymi fotonami mogą być regulowane natężeniem mechanizmu pompującego układ, np. w postaci wiązki laserowej. To pozwala uzyskać jasne, w sensie liczby fotonów na jednostkę czasu, źródła

fotonów "dobrej jakości", w sensie właściwości statystycznych [H4].

Zjawisko Purcella polega na modyfikacji współczynnika emisji spontanicznej w zależności od gęstości stanów fotonowych otoczenia. Emisja spontaniczna jest wynikiem oddziaływania układu atomowego z kontinuum modów elektromagnetycznych w stanie próżni. W wyniku tego oddziaływania wzbudzony układ atomowy oddaje energię do pola elektromagnetycznego, czemu towarzyszy ekponencjalny zanik populacji stanu wzbudzonego układu [R4]. Tempo zaniku opisane jest efektywną stałą emisji spontanicznej, która w przybliżeniu elektrycznym dipolowym ma postać

$$\gamma = \frac{\pi\omega_{eg}}{\hbar\epsilon_0} |\mathbf{d}_{eg}|^2 \varrho(\mathbf{r}_0, \omega_{eg}), \quad (8)$$

gdzie $\hbar\omega_{eg}$ jest energią przejścia kwantowego układu atomowego, a $\varrho(\mathbf{r}_0, \omega_{eg})$ opisuje lokalną gęstość stanów fotonowych w punkcie \mathbf{r}_0 i wokół częstości przejścia. Gęstość stanów zależy od parametrów otoczenia, może więc być modyfikowana obecnością ośrodków dyspersyjnych, wnęk rezonansowych, zwierciadeł czy nanoanten. W próżni wyrażenie (8) sprowadza się do wzoru Weisskopfa-Wignera [R4]. W słabo sprzężonej wnęce z modem o profilu Lorentza o połówkowej szerokości spektralnej Γ , dostrojonym rezonansowo do przejścia atomowego, zmodyfikowany współczynnik emisji spontanicznej ma postać $\gamma = \frac{4|g|^2}{\Gamma}$ (por. rys. 4). Wynik (8) wyprowadza się w przybliżeniu Markowa [R31], a równolegle otrzymuje się dodatkowy efekt modyfikacji częstotliwości przejścia atomowego w wyniku oddziaływania z polem w stanie próżni [R4], zwany przesunięciem Lamba w analogii do słynnego efektu [R32]. Podobnie jak współczynnik emisji spontanicznej, wartość przesunięcia Lamba zależy od otoczenia fotonowego, co otwiera możliwość przestrajania atomu poprzez zmianę parametrów wnęki [R33]. Problem daje się uogólnić poprzez uwzględnienie wielu układów atomowych zanurzonych w tym samym otoczeniu fotonowym. Wówczas, otrzymuje się w przybliżeniu Markowa dodatkowo elegancki wynik: efektywny hamiltonian opisujący oddziaływania dipol-dipol między układami atomowymi, oraz efektywny człon Lindblada odpowiadający zjawisku nadpromienistości (ang. *superradiance*) [R5], [H1, H2].

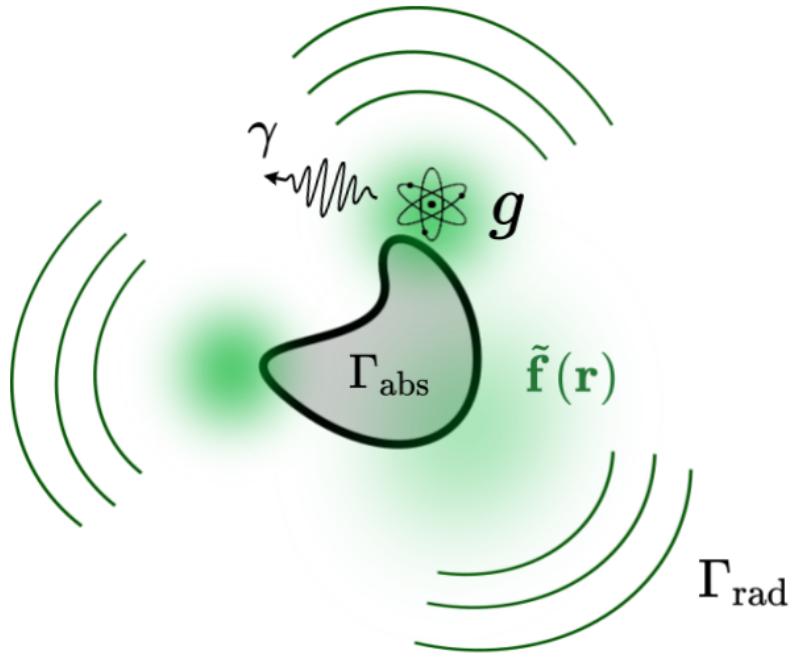
Nanownęki: analogie i różnice między wnękami rezonansowymi a nanoantenami Promieniowanie elektromagnetyczne we wnęce rezonansowej jest skwantowane - dozwolone są tylko mody pola, będące rozwiązaniami równania falowego bez źródeł, ze zdefiniowanymi warunkami brzegowymi opisującymi kształt wnęki. Jeśli to istotne, w równaniach można wziąć pod uwagę materiał wnęki czy ogólniej rezonatora (np. w kryształach fonicznych/mikrorezonatorze w formie dielektrycznego dysku, itd.). Analogicznie, można skwantować polarytomy plazmonowe na powierzchni nanoanten. Polarytomy opisane są przez równanie falowe, które wygodnie przepisać do domeny częstości. Równanie to zawiera

informacje o kształcie nanostruktury i zależności dyspersyjnej materiału, zakodowane w zależnej od położenia i częstotliwości funkcji przenikalności elektrycznej ośrodka $\epsilon(\mathbf{r}, \omega)$ [R34]

$$\nabla \times \nabla \times \tilde{\mathbf{f}}_\mu(\mathbf{r}) - \frac{\tilde{\omega}_\mu^2}{c^2} \epsilon(\mathbf{r}, \tilde{\omega}_\mu) \tilde{\mathbf{f}}_\mu(\mathbf{r}) = 0, \quad (9)$$

gdzie $\tilde{\mathbf{f}}_\mu(\mathbf{r})$ to funkcja modu³ o zespolonej częstości $\tilde{\omega} = \omega_\mu + i\Gamma_\mu$, której część rzeczywista ω_μ oznacza położenie spektralne modu (rezonans plazmonowy), a urojona Γ_μ opisuje straty (odpowiada współczynnikowi absorpcji i rozpraszania energii elektromagnetycznej w tym modzie). Straty są znaczne: energia elektromagnetyczna koncentruje się w pobliżu powierzchni metalicznej, ale ponieważ "wnęka" jest otwarta, brak fizycznych barier sprawia że współczynnik $\Gamma_{\mu,\text{rad}}$ rozpraszania do pola dalekiego (strat radiacyjnych) jest bardzo duży. Dodatkowo, istnieje jeszcze jeden mechanizm strat podobnego rzędu wielkości, związany z silną absorpcją w metalicznym materiale nanoanteny opisaną współczynnikiem $\Gamma_{\mu,\text{abs}}$, który w typowych, makroskopowych wnękach jest pomijalny. W przypadku nanoanten rozważanych w pracach wchodzących w skład osiągnięcia, typowe rzędy wielkości to $\omega_\mu \sim 10^{15} \frac{\text{rad}}{\text{s}}$, $\Gamma_\mu = \Gamma_{\mu,\text{abs}} + \Gamma_{\mu,\text{rad}} \sim 10^{13} - 10^{14} \frac{\text{rad}}{\text{s}}$. Dla porównania, w wysokiej jakości wnękach optycznych stosunek $Q = \frac{\omega_\mu}{\Gamma_\mu}$ sięga 10^{10} i więcej [R35]. Ze względu na obecność silnych mechanizmów dyssypacyjnych, procedura kwantyzacji rozwiązań równania falowego (9) jest nietrywialna. W typowych wnękach rezonansowych ten problem nie jest dotkliwy, ponieważ straty, wiele rzędów wielkości mniejsze niż częstość modu, można na etapie kwantyzacji pominąć. Otrzymuje się wówczas tzw. mody normalne - ortogonalne mody własne wnęki. W przypadku nanoanten mówi się raczej o *modach kwazinormalnych*, wymagających szczególnej procedury unormowania ze względu na bardzo silne rozpraszanie energii do pola dalekiego [R36]. Przykładowe metody kwantyzacji polarytonów plazmonowych opisano m.in. w artykule [R37], gdzie straty potraktowano fenomenologicznie, oraz w pracy [R34], gdzie dokonano pełnej kwantyzacji modów kwazinormalnych, z warunkami brzegowymi odpowiadającymi rozproszonemu promieniowaniu. Ostatecznie, odpowiedź optyczna danej nanostruktury daje się w bardzo dobrym przybliżeniu opisać niewielką liczbą (od jednego do kilku) skwantowanych, szerokich spektralnie modów lorentzowskich. Liczba eksperymentów demonstrujących kwantową naturę plazmonów jest jak do tej pory niewielka, ale warto przytoczyć doświadczenia demonstrujące, że transformacja foton – polaryton plazmonowy – foton zachowuje nieklasyczny charakter, tj. właściwości statystyczne, wyrażone za pomocą funkcji korelacji drugiego rzędu [R38], oraz splątanie polaryzacyjne [R39].

³Używam oznaczenia $\tilde{\mathbf{f}}_\mu(\mathbf{r})$, w analogii do oznaczenia funkcji modowych $\mathbf{f}_\mu(\mathbf{r})$ w tradycyjnej wnęcie. Jednak, jak opisano dalej, funkcje $\tilde{\mathbf{f}}_\mu(\mathbf{r})$ odpowiadają modom kwazinormalnym, a ich właściwości różnią się w szczegółach od właściwości standardowo unormowanych funkcji modowych.



Rys.5 Nanoantena w roli wnęki rezonansowej: kształt funkcji modowej opisuje zależność przestrzenną pola w danym modzie w otoczeniu nanoanteny. Jej wartość w punkcie, w którym zlokalizowany jest układ atomowy, decyduje o stałej sprzężenia g . Otwarty charakter "wnęki" wiąże się z typowo dużymi wartościami współczynników strat radiacyjnych Γ_{rad} , dodatkowo w metalicznym materiale nanoanteny zachodzi silna absorpcja opisana współczynnikiem Γ_{abs} . Układ atomowy podlega emisji spontanicznej ze współczynnikiem γ .

Tradycyjne wnęki rezonansowe służą przede wszystkim skupieniu energii promieniowania w pewnym obszarze przestrzennym. Nanoanteny skupiają energię w polu bliskim, dzięki czemu koncentracja w domenie optycznej następuje w obszarach rozmiaru od kilku do kilkudziesięciu nanometrów – znacznie poniżej długości fali. W tradycyjnych wnękach teoria przewiduje lorentzowskie widmo modów. W przypadku nanoanten przewidywane [R34] i obserwowane [R40] mody mają względnie szerokie profile Lorentza lub Fano, odpowiadające odpowiednio modom izolowanym i parom oddziałujących modów (oddziaływanie jest możliwe ze względu na ich kwazinormalny charakter i nakładanie się spektralne). Koncentracji przestrzennej pola odpowiada odpowiednie wzmocnienie jego natężenia. Z tego względu, stała oddziaływania pola elektromagnetycznego z materią zarówno w tradycyjnych wnękach, jak i w otoczeniu nanoanten, ulega zwiększeniu w stosunku do oddziaływania w "pustej" przestrzeni: jeśli możemy ograniczyć się do przybliżenia elektrycznego dipolowego, zwiększenie stałej oddziaływania jest proporcjonalne do wzmocnienia pola elektrycznego we wnęcie. Jednak przybliżenie to jest uzasadnione, gdy skala przestrzenna zmian pola elektromagnetycznego jest znacznie większa niż rozmiar układu atomowego.

Przy tak silnej koncentracji pola ten warunek może nie być spełniony, co może nieść ze sobą konieczność wyjścia poza przybliżenie elektryczne dipolowe w opisie oddziaływania materii ze światłem w otoczeniu niektórych nanoanten.

W makroskopowych wnękach stałe sprzężenia g ze wzoru (6) osiągają typowo wartości MHz, podczas gdy wokół nanoanten są rzędu od ułamków do dziesiątków THz, przewyższając nawet sprzężenia uzyskiwane we wnękach w kryształach fotonicznych [R41]. Pomimo rekordowych wartości stałej oddziaływania z materią, nanoanteny zwykle działają w reżimie słabego sprzężenia: w typowym przypadku współczynniki strat absorpcyjnych i radiacyjnych przewyższają duże wartości stałych sprzężenia. Zgodnie z wyrażeniem $\gamma = \frac{4|g|^2}{\Gamma}$, pozwala to uzyskać rekordowe wartości czynników Purcella $\frac{\gamma}{\gamma_0}$ wzmocnienia stałej emisji w stosunku do wartości γ_0 w próżni o nawet trzy rzędy wielkości [R19]. Duże wartości stałych sprzężenia i czynników Purcella wskazują na krótkie skale czasowe dynamiki układów atomowych w otoczeniu nanoanten, odpowiednio g^{-1} i γ^{-1} , rzędu nano- a nawet pikosekund, w porównaniu z mikrosekundami typowymi dla makroskopowych wnęk. Rys. 5 ilustruje schematycznie procesy składające się na opisaną w ramach osiągnięcia dynamikę układów atomowych w otoczeniu nanoanten, w analogii do dynamiki we wnęce rezonansowej na rys. 3.

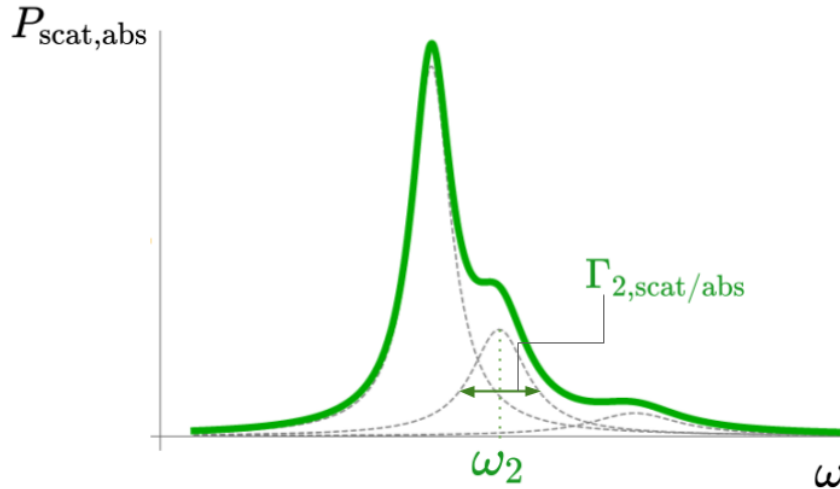
Powyższy opis analogii i różnic między tradycyjnymi wnękami rezonansowymi a nanoantenami kończy wstęp, wprowadzający w tematykę osiągnięcia habilitacyjnego. Poniżej przedstawię samo osiągnięcie i omówię w skrócie zawartość dziewięciu składających się na nie artykułów [H1-H9].

IV.2.2. Wyniki i opis opartych na nich publikacji

W pracach składających się na niniejsze osiągnięcie habilitacyjne, przenikają się omówione powyżej wątki. Z tego powodu, omówię prace nie chronologicznie, a w grupach tematycznych, dotyczących kolejno problemu osiągnięcia warunków silnego sprzężenia, źródeł nieklasycznego światła, problemu sterowania stanem kwantowym układu, oraz problemu poprawek wykraczających poza przybliżenie elektryczne dipolowe w opisie oddziaływania.

Ramy metodologiczne, które wypracowaliśmy do opisu oddziaływań układów atomowych z polem elektromagnetycznym w otoczeniu nanoanten, zostały podsumowane w pracy [P2]. Podejście składa się z kilku kroków

1. charakterystyka właściwości optycznych zadanej nanoanteny, determinowanych przez widma absorbowanej i rozpraszanej przez nią mocy oraz przez rozkłady pól elektromagnetycznych przy zadanym rodzaju wzbudzenia (np. oświetlenie falą płaską, modelu-



Rys.6 Szkic widma mocy rozpraszania lub absorpcji wielomodowej nanoanteny (zielona krzywa). Widmo daje się przedstawić za pomocą sumy trzech lorentzowskich rezonansów (każdy zaznaczony linią przerywaną). Zaznaczono położenie spektralne ω_2 środkowego z nich, oraz jego szerokość połówkową $\Gamma_{2,\text{scat/abs}}$. Metoda wyznaczenia stałych sprzężenia g_μ z układami atomowymi, w zależności od ich położenia względem nanoanteny i właściwości optycznych, jest bardziej złożona i została szczegółowo opisana w pracy [H7].

jącą promieniowanie laserowe, lub źródłem dipolowym, imitującym układ atomowy); dopasowanie widm nanoanteny krzywymi typu Lorentza i Fano,

2. wyznaczenie, na podstawie rozkładów pól oraz dopasowań, parametrów równania master (rys. 6): położenia rezonansów ω_μ , ich szerokości odpowiednio w widmie absorpcji $\Gamma_{\mu,\text{abs}}$ i rozpraszania $\Gamma_{\mu,\text{rad}}$ oraz stałej sprzężenia g_μ pojedynczego fotonu w danym modzie z wybranym przejściem w układzie atomowym,
3. rozwiązanie równania master z hamiltonianem zależnym od ω_μ i g_μ , oraz członem Lindblada zależnym od Γ_μ ; ten krok może uwzględniać rozważania o charakterze analitycznym, prowadzące do efektywnego opisu w mniejszej przestrzeni Hilberta, z wygodnym w interpretacji fizycznej zestawem parametrów.

Podejście to zostało wykorzystane w znacznej części prac, wchodzących w skład osiągnięcia. Stwierdzono na wybranych przykładach bardzo dobrą zgodność wyników z wynikami innych autorów, otrzymanymi metodą modów kwazinormalnych.

Obliczenia związane z charakteryzacją nanoanten opierają się o rozwiązanie klasycznego problemu rozpraszania i były wykonywane przez współautorów, przede wszystkim studentów Jakoba Straubela i Roberta Filtera. Sposób przetłumaczenia ich wyników na parametry równania master został wypracowany wspólnie i jest owocem dyskusji. Obliczenia analityczne i numeryczne, dotyczące dynamiki układów hybrydowych - z atomami



Rys.7 Schemat geometrii obrazujący czynniki sprzyjające osiągnięciu warunków silnego sprzężenia, dyskutowanych w pracy [H6]. Wzmocnienie pola jest silne w lukach między nanocząstkami. Wydłużony kształt nanocząstek powoduje silną koncentrację pola na końcach. Większa liczba układów atomowych pozwala koherentnie wzmocnić ich oddziaływanie z polem.

i skwantowanym polem elektromagnetycznym, były wykonane przeze mnie bądź pod moją opieką. W badania zawsze zaangażowani byli studenci różnych stopni, eksponowani, z racji wykonania znacznej części obliczeń, jako pierwsi autorzy prac - tę politykę przejęłam i wdrażam we współpracy ze studentami w Toruniu. Zgodnie ze zwyczajem przyjętym m.in. w środowisku optyków kwantowych, miejsce autora ostatniego, którym jestem w większości przedstawionych prac, przypada osobie koordynującej projekt i odpowiedzialnej merytorycznie za jego całość.

Silne sprzężenie Osiągnięcie warunków silnego sprzężenia układów atomowych z polem wokół nanoanten niesie ze sobą perspektywy miniaturyzacji urządzeń optycznych, tradycyjnie realizowanych w makroskopowych wnękach rezonansowych: sensorów o czułości nawet na poziomie pojedynczych molekuł, czułych przełączników optycznych w nanoskali, szybkich i precyzyjnych w przestrzeni platform do kontroli pojedynczych molekuł, i wielu innych. Ponadto, w wypadku nanoanten realizacja silnego sprzężenia wymaga stałych oddziaływania przekraczających ogromne stałe rozpraszania/absorpcji w metalu. W porównaniu z nimi, efekty wpływu temperatury na straty w układach atomowych nie są istotne. Niejako "za darmo" wymóg temperatur kriogenicznych, obowiązujący dla znakomitej większości innego rodzaju wnęk, tu przestaje być ważny. Badania w kierunku osiągnięcia silnego sprzężenia w otoczeniu nanoanten są więc silnie umotywowane, a praca [H6] stanowi wkład mój i moich współpracowników.

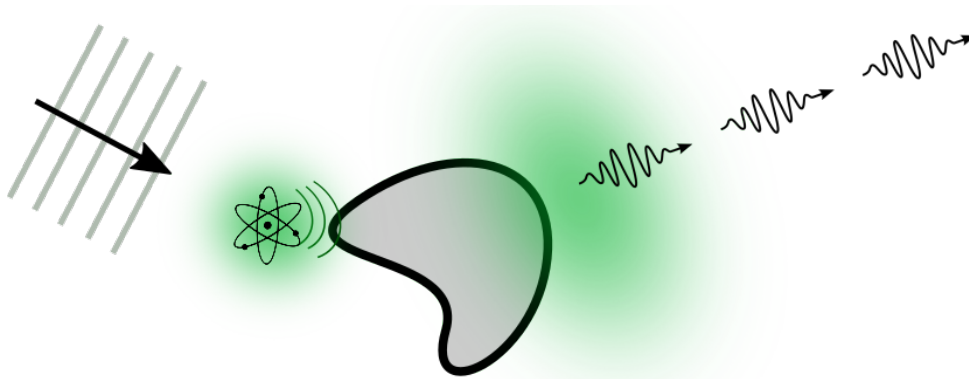
W pracy przestudiowano różne aspekty problemu. Zbadano dynamikę i widma układu w różnych warunkach i pokazano, że dla słabych pól pompujących adekwatny jest opis półklasyczny, nawet w warunkach silnego sprzężenia. Ważnym wynikiem było wypracowanie pierwszej wersji podejścia, opisanego w punktach na stronach 15/16 powyżej, stosowalnego do przypadków anten jednomodowych. W wyniku jego zastosowania, zidentyfikowano warunki geometryczne, sprzyjające osiągnięciu reżimu silnego sprzężenia:

- wykorzystanie jako nanoanten sąsiadujących nanostruktur z fizycznie realizowaną wnęką (odstępem) między ich metalicznymi powierzchniami; mała (rzędu nanometrów) odległość między nanocząstkami sprzyja wzmocnieniu pola,
- mały rozmiar struktury i wydłużony kształt, dzięki któremu pole jest koncentrowane w mniejszym obszarze przestrzennym i jeszcze silniej wzmacniane lokalnie,
- wykorzystanie efektów koherentnego wzmocnienia odpowiedzi większej liczby układów atomowych.

Najistotniejszy jest pierwszy z wymienionych warunków, który ma największy wpływ ilościowy na wzmocnienie pola elektrycznego i wartość stałej oddziaływania. W późniejszych pracach eksperymentalnych, opisujących demonstracje warunków silnego sprzężenia w otoczeniu nanoanten, wykorzystano podobne geometrie [R42, R43].

Źródła nieklasycznego światła Kolejnym rozważanym problemem była generacja światła nieklasycznego przez nanoskalowe źródła [H4, H5, H8]. W każdym z poniżej opisanych scenariuszy, generacja stanów światła o nieklasycznych właściwościach statystycznych wynika z obecności układu atomowego, który ze swej kwantowej natury emituje fotony pojedynczo. Nanoantena przyspiesza akty emisji, może też skracać odstęp czasowy między nimi, wpływając na jasność źródła (liczbę emitowanych fotonów na jednostkę czasu) oraz na jego właściwości statystyczne, mierzone funkcją korelacji drugiego rzędu. Antena nie tylko wzmacnia emisję, ale też pozwala na generację światła w dwóch modach i uzyskanie splątania w tym stopniu swobody [H8].

W pracy [H4] zaproponowano źródło pojedynczych fotonów oparte na pompowanym optycznie układzie dwupoziomowym. Szczegóły kształtu nanoanteny determinują położenie spektralne jej rezonansów. W pracy geometria została dobrana tak, by częstotliwość jej rezonansu plazmonowego pokryła się z częstotliwością linii emisyjnej układu atomowego, co służyło zwiększeniu wydajności źródła w sensie liczby fotonów emitowanych na jednostkę czasu. Ważnym spostrzeżeniem był balans (*trade-off*) między wydajnością emisji, a nieklasycznym charakterem światła, wyrażonym poprzez funkcję korelacji drugiego rzędu: gdy czas potrzebny do napompowania układu staje się porównywalny z czasem trwania aktu emisji, stan pola elektromagnetycznego w układzie może uzyskać istotne składowe dwu- i wielofotonowe. Te składowe podwyższają wartość funkcji korelacji, której niska wartość świadczy o pożądanym jednofotonowym charakterze. W pracy ponadto zbadano właściwości widmowe generowanego światła. Znalezione też rozwiązania analityczne stacjonarnego równania Heisenberga w przybliżeniu fali wirującej i Markowa, które okazały się bardzo dobrze odpowiadać wynikom numerycznym, uzyskanym bez tych przybliżeń.



Rys.8 Schemat działania układu atomowego, sprzężonego z nanoantena, jako źródła nieklasycznego światła. Układ atomowy oddaje jednocześnie tylko jeden kwant energii, co odbywa się z dużym prawdopodobieństwem poprzez kreację fotonu w modzie nanoanteny. Znaczna stała rozpraszania jest odpowiedzialna za wypromieniowanie fotonu w krótkiej skali czasowej Γ_{rad}^{-1} , z rozkładem kierunkowym determinowanym przez geometrię nanoanteny. Emisja nieklasycznego światła przy różnych sposobach wzbudzenia układu atomowego, schematach jego poziomów energetycznych oraz parametrach nanoanten, została scharakteryzowana w pracach [H4, H5, H8].

Pogłębiona analiza problemu została opisana w artykule [P3], gdzie scharakteryzowano właściwości emisji w reżimie silnego sprzężenia.

Rozszerzenie metody, rozwiniętej wstępnie w pracy [H6], na przypadek anten wielomodowych, pozwoliło uwzględnić ciekawsze scenariusze oddziaływań polarytonów plazmonowych z układami atomowymi. W artykule [H5] zbadano trójpoziomowy układ atomowy typu lambda, oddziałujący z polem wokół anteny dwumodowej. Parę rezonansów dopasowano polaryzacyjnie i dostrojono spektralnie do pary przejść w przykładowym układzie atomowym, który mógłby odpowiadać półprzewodnikowej kropce kwantowej. Zbadano zastosowanie układu jako źródła pojedynczych fotonów, w którym emisja z jednego z przejść byłaby wyzwalana "na żądanie", po oświetleniu układu impulsem dostrojonym do drugiego przejścia. Wydajność i właściwości kierunkowe takiego źródła zależą od geometrii nanoanteny. W pracy pokazano symulację przebiegu doświadczenia dla wybranego kształtu anteny i scharakteryzowano właściwości statystyczne emitowanego światła. Rozwinięto też efektywny opis analityczny, który pozwolił sformułować warunki wydajnej emisji fotonu i wyrazić je poprzez parametry ewentualnego układu doświadczalnego.

Z kolei w pracy [H8] zaproponowano wykorzystanie dwumodowego charakteru nanoanteny do generacji splątania. W rozważanym scenariuszu, pompowany układ atomowy emitował światło o nieklasycznych właściwościach statystycznych, którego stan w dobrym przybliżeniu dał się opisać jako superpozycja stanu próżni i stanów jednofotonowych. Ze względu na dwumodowy charakter widma nanoanteny i przekrycie spektralne obu mo-

dów, zaprojektowane na częstości emisji układu atomowego, emitowane fotony z podobnym prawdopodobieństwem wzbudzały każdy z dwóch modów nanoanteny. Następnie, z wydajnością odpowiadającą stosunkowi współczynników rozpraszania do dalekiego pola i absorpcji dla każdego z modów, energia elektromagnetyczna była wypromieniowywana na zewnątrz, przy czym stan pola odpowiadał splątaniu w stopniu swobody, związanym z liczbą fotonów w obu modach. Stopień splątania był bardzo duży ze względu na warunki słabego sprzężenia, tj. fakt, że tempo rozpraszania fotonów znacznie przewyższało tempo wymiany wzbudzeń układu atomowego i pola. Dzięki temu dopuszczany *a priori* wkład stanów wielofotonowych, który obniżyłby stopień splątania, okazał się nieistotny. W artykule zbadano szczegółowo jasność emisji i stopień splątania emitowanego światła w funkcji parametrów anteny. Przedyskutowano stabilność wyników przy przesuwaniu względnej pozycji układu atomowego i anteny. Scenariusz opisany w pracy jest przykładem, jak dysypacja energii, zwykle postrzegana jako element niepożądany, może zostać wykorzystana w sposób konstruktywny: nanoantena pełni w układzie rolę aktywnego "źródła" splątania.

Sterowanie właściwościami światła i układów atomowych Nanoanteny, charakteryzujące się wybraną symetrią przestrzenną, mogą być opisane w języku tzw. modów jasnych i ciemnych. Właściwościami rozróżniającymi te mody są wydajność ich wzbudzania za pomocą fal płaskich oraz wydajność emisji promieniowania [R44]. Mody ciemne są interesujące ze względu na długi czas życia, ale ich wadą jest utrudniony "dostęp" – trudno takie mody wzbudzić. W artykule [H7] zbadano nanoantenę, której widmo rozpraszania różniło się jakościowo przy wzbudzaniu z pola dalekiego falą płaską i przy wzbudzaniu źródłem dipolowym, umieszczonym w polu bliskim. W tym drugim wypadku widoczny był dodatkowy mod, ciemny, bo niedostępny w scenariuszu z falą płaską. Jasny mod był widoczny w obu widmach rozpraszania. W pracy wykorzystano obecność układu kwantowego do konwersji między wzbudzonym falą płaską jasnym modem, a przekrywającym się z nim spektralnie modem ciemnym: układ atomowy stał się nośnikiem oddziaływań między nimi. Zbadano właściwości emisyjne takiej hybrydowej struktury, w szczególności wydajność konwersji między modami.

W pracy [H1] zbadano wzbudzaną falą płaską antenę jednomodową, której rozproszone pole bliskie oddziaływało z parą układów atomowych. Scharakteryzowano dynamikę oddziaływania w szerokich zakresach parametrów, charakteryzujących układy atomowe, nanoantenę oraz wymianę energii między nimi. W przypadku słabego sprzężenia, można dokonać eliminacji adiabaticznej pola i wyprowadzić efektywne równanie Lindblada. Jego forma graficznie nie różni się od równania (7), lecz macierz gęstości opisuje po eliminacji wyłącznie układy atomowe, a hamiltonian i operator Lindblada przyjmują efektywną postać w mniejszej przestrzeni Hilberta. Przejście między wyjściowym a efektywnym ha-

miltonianem elegancko demonstruje, jak w warunkach przybliżenia adiabatyicznego pole bliskie nanoanteny staje się nośnikiem oddziaływań między układami atomowymi. Podobnie, sprzężenie obu układów atomowych ze wspólnym modem, charakteryzowanym wysokimi stratami, prowadzi do skorelowanej dyssypacji energii w tych układach w zjawisku nadpromienistości (ang. *superradiance*). W pracy zbadano warunki stosowalności przybliżenia adiabatyicznego, wyprowadzono efektywny obraz, który zanalizowano dodatkowo w wygodnej interpretacyjnie bazie Dickego [R45]. W tej bazie daje się znaleźć stan, którego współczynnik dekoherencji jest silnie ograniczony ze względu na właściwości symetrii układu. Ponieważ stan jest maksymalnie splątany, znalezienie warunków, w których znaczna część populacji układu się w nim znajdzie, skutkuje osiągnięciem znacznego stopnia splątania między układami atomowymi. Warunki takie można znaleźć w reżimie adiabatyicznym, jeśli złamać symetrię między parametrami układów atomowych. W ten sposób, ponownie, znaczne wartości współczynnika dyssypacji energii zostały przekute w zaletę i wykorzystane do osiągnięcia warunków adiabatyicznych, a w nich splątania między parą układów atomowych.

Wyjście poza przybliżenie dipolowe Kolejnym aspektem badań, składających się na osiągnięcie habilitacyjne, było wyjście poza przybliżenie elektryczne dipolowe w opisie oddziaływania światła z materią w otoczeniu nanoanten. Ten wątek badań realizowany był w ramach grantu Homing Fundacji na rzecz Nauki Polskiej. Dotyczy on sytuacji, w których silna lokalizacja energii elektromagnetycznej powoduje szybkie zmiany przestrzenne pola. Skala przestrzenna tych zmian jest porównywalna z rozmiarami układu atomowego, tj. odpowiada odległościom znacznie mniejszym niż długość fali świetlnej w domenie optycznej. Wówczas łamane jest założenie, leżące u podstaw przybliżenia elektrycznego dipolowego, stosowanego w hamiltonianie oddziaływania układów atomowych ze światłem. Mogą wtedy odgrywać rolę efekty związane ze zmianami przestrzennymi pola elektromagnetycznego i potencjału wektorowego, w szczególności z obecnością pola magnetycznego.

Wiele postaci hamiltonianu oddziaływania w takich warunkach zostało zaproponowanych, m.in. w oparciu o hamiltonian minimalnego sprzężenia [R27, R7], w formie oddziaływania pola z rozciągniętym przestrzennie dipolem [R46, R8], [P4], w oparciu o rozwinięcie multipolowe [R47], [H3, H2, H9]. Podczas gdy pierwsze dwa z wymienionych wymagają znajomości funkcji falowych układu, hamiltonian multipolowy wyraża się przez operatory momentów multipolowych przejścia i z tego względu jest wygodniejszy w zastosowaniach do wielu układów atomowych (cząsteczek, kropek kwantowych), dla których znalezienie funkcji falowych wymaga skomplikowanych obliczeń kwantowochemicznych.

Z tego powodu oraz ze względu na prostotę interpretacji, podejście, które przyjęto w pracach [H3, H2, H9], oparte było na rozwinięciu multipolowym. W rozwinięciu tym

uwzględniono trzy wiodące wyrazy w hamiltonianie oddziaływania: elektryczny dipolowy, magnetyczny dipolowy i elektryczny kwadrupolowy

$$H = -\mathbf{E}(\mathbf{r}_0) \cdot \mathbf{d} - \mathbf{B}(\mathbf{r}_0) \cdot \mathbf{m} - [\nabla \mathbf{E}(\mathbf{r}_0)] : \mathbf{Q}, \quad (10)$$

gdzie \mathbf{d} , \mathbf{m} , \mathbf{Q} to odpowiednio operatory momentu elektrycznego dipolowego, magnetycznego dipolowego i elektrycznego kwadrupolowego, a $\mathbf{E}(\mathbf{r}_0)$ i $\mathbf{B}(\mathbf{r}_0)$ to wektory pola elektrycznego i magnetycznego w położeniu układu atomowego \mathbf{r}_0 . Wielkość $[\nabla \mathbf{E}(\mathbf{r}_0)]_{jk} = \partial_j E_k(\mathbf{r}_0)$ jest elementem jk iloczynu diadycznego operatora różniczkowania i wektora pola, przy czym wartość pochodnej oblicza się w punkcie \mathbf{r}_0 . Symbol \cdot oznacza iloczyn skalarny wektorów, a iloczyn tensorów oznaczony dwukropkiem zdefiniowany jest jako $\mathbf{C} : \mathbf{D} = \sum_{jk} C_{jk} D_{kj}$. W próżni energia oddziaływania fali płaskiej z układem atomowym, charakteryzowanym momentami przejścia o wartości oczekiwanej równej jednej jednostce atomowej, związana z mechanizmem elektrycznym dipolowym, przewyższa kolejne rozważane człony o 2-3 rzędy wielkości. To oznacza, że współczynniki przejść, związane z mechanizmem elektrycznym dipolowym, skalujące się zgodnie ze złotą regułą Fermiego z kwadratem elementu przejścia, są silniejsze od pozostałych o około 5 rzędów wielkości. Potwierdza to zasadność przybliżenia elektrycznego dipolowego w próżni i makroskopowych wnękach. Jednakże pole bliskie w otoczeniu nanoanten, wzmocnione i skupione przestrzennie, może zmieniać i zmienia ten stosunek. Z przeprowadzonych oszacowań rzędów wielkości wynika, że uwzględnione człony mogą znacząco, w sposób zarówno ilościowy jak i jakościowy, modyfikować wyniki. Natomiast kolejne człony (magnetyczny kwadrupolowy, elektryczny oktopolowy, itd.) nie wnoszą w badanych przypadkach nowych poprawek jakościowych, a spodziewane poprawki ilościowe są niewielkie nawet w otoczeniu nanoanten.

Jedną z najciekawszych konsekwencji obecności kilku porównywalnie silnych mechanizmów przejścia w hamiltonianie jest możliwość ich interferencji. Temu tematowi poświęcono pracę [H3], w której zbadano współczynnik emisji spontanicznej, skalujący się z kwadratem elementu przejścia, co otwiera możliwość interferencji składających się na niego mechanizmów. Opisano w pracy praktyczną metodę obliczania wpływu obecności zadanej nanoanteny na współczynnik emisji spontanicznej, w oparciu o wyniki symulacji rozwiązań równań Maxwella. Jest to możliwe, ponieważ emisja spontaniczna zależy od gęstości stanów fotonowych, którą daje się wyznaczyć obliczając klasyczne wzmocnienie pola. Wypracowano metody obliczenia współczynnika emisji spontanicznej w sytuacji współistniejących multipolowych mechanizmów oddziaływania. Pokazano efekty interferencyjne w prawdopodobieństwie przejścia między stanami wybranej cząsteczki chemicznej dla przykładowej, odpowiednio dostrojonej nanoanteny, której rezonanse typu magnetycznego dipolowego i elektrycznego kwadrupolowego przekrywały się spektralnie ze sobą i przejściem kwantowym w cząsteczce. W szczególności znaleziono warunki dla interferencji destruktywnej,

w których współczynnik emisji spontanicznej ulega zmniejszeniu lub nawet całkowitemu wygaszeniu (z dokładnością do kolejnych, pominiętych w dyskusji rzędów multipolowych oddziaływania). Wykorzystanie interferencji do wygaszenia mechanizmów dyssypacji energii stanowi prosty koncepcyjnie krok o potencjalnie szerokich zastosowaniach we wszystkich dziedzinach fizyki atomowej, w których straty energii/szerokie rezonanse stanowią istotne ograniczenie, m.in. do przechowywania i przetwarzania informacji kwantowej, czy w spektroskopii. Praktyka wymaga jednak znacznego stopnia kontroli na etapie pozycjonowania i orientowania pojedynczych układów atomowych w sąsiedztwie nanoanten. Warto podkreślić, że we wcześniejszych pracach z dziedziny plazmoniki kwantowej dyskutowano z osobna przejścia elektryczne i magnetyczne różnych multipolowości, ale nie wskazywano na możliwość ich interferencji [R48, R7, R49].

Metoda obliczenia współczynnika emisji spontanicznej opisana w pracy [H3] jest praktyczna, jednak w kolejnych artykułach [H2, H9] podano metodę bardziej elegancką, umożliwiającą obliczenia do pewnego etapu analityczne. Podejście bazuje na formalizmie elektromagnetycznej funkcji Greena [R50]. W pracy [H2] zbadano efekty wynikające z oddziaływania układów atomowych z próżnią kwantową, o gęstości stanów modyfikowanej przez nanoanteny. Kwantowe pole elektromagnetyczne, towarzyszące fluktuacjom próżni w ośrodku dyspersyjnym (np. materiale nanoanteny), ma swoje źródło w tzw. polaryzacji szumu $\mathbf{P}_N(\mathbf{r}, \omega)$ i związanej z nią gęstości prądu $\mathbf{j}_N(\mathbf{r}, \omega) = -i\omega\mathbf{P}_N(\mathbf{r}, \omega)$ (ang. *noise polarization, noise current density*). Składowa pola o częstotliwości ω daje się wyrazić jako suma pól ze źródeł w całej domenie przestrzennej V [R50, R51]

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}, \omega) = i\mu_0\omega \int_V d^3\mathbf{r}' \mathbf{G}(\mathbf{r}, \mathbf{r}', \omega) \mathbf{j}_N(\mathbf{r}', \omega) \quad (11)$$

gdzie $\mu_0 = \frac{1}{c^2\epsilon_0}$ jest przenikalnością magnetyczną próżni, a $\mathbf{G}(\mathbf{r}, \mathbf{r}', \omega)$ jest elektromagnetycznym tensorem Greena, który jako rozwiązanie równania Helmholtza

$$\left[\nabla \times \nabla \times - \frac{\omega^2}{c^2} \epsilon(\mathbf{r}, \omega) \right] \mathbf{G}(\mathbf{r}, \mathbf{r}', \omega) = \mathbf{I} \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}') \quad (12)$$

z warunkiem brzegowym odpowiadającym rozproszonemu promieniowaniu [R27], niesie informacje o kształcie i właściwościach dyspersyjnych ośrodka. W równaniu powyżej \mathbf{I} jest jednostkową diadą $I_{mn} = \delta_{mn}$. Podobnie do (11) można wyrazić pole magnetyczne czy potencjał wektorowy. Narzucenie kanonicznych relacji kwantyzacji dla pola wymaga wyrażenia gęstości prądu jako liniowej funkcji operatorów $\mathbf{a}_\omega(\mathbf{r})$ anihilacji pola o częstotliwości ω , spełniających reguły komutacji $[a_{\omega,j}(\mathbf{r}), a_{\omega',k}^\dagger(\mathbf{r}')] = \delta_{jk} \delta(\omega - \omega') \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}')$, $[a_{\omega,j}(\mathbf{r}), a_{\omega',k}(\mathbf{r}')] = 0$, gdzie $j, k \in \{x, y, z\}$ odpowiadają składowym kierunkowym wektora gęstości prądu. Hamiltonian pola ma postać $H = \int d^3\mathbf{r} \int d\omega \hbar\omega \mathbf{a}_\omega^\dagger(\mathbf{r}) \mathbf{a}_\omega(\mathbf{r})$ [R52, R50]. Zarówno hamiltonian, jak i reguły komutacji, przywodzą na myśl pole swobodne, jednak należy pamiętać że pole

jest tu "ubrane" oddziaływaniem z ośrodkiem dyspersyjnym, opisanym funkcją przenikalności $\epsilon(\mathbf{r}, \omega)$. Skwantowane mody kwazinormalne, dyskutowane wyżej, można wyrazić jako superpozycje modów o określonej częstotliwości, tak jak standardowe paczki falowe wyraża się w optyce kwantowej jako superpozycje fal monochromatycznych.

Takie kwantowe pola zostały uwzględnione w hamiltonianie (10). Następnie, poprzez stosowne uogólnienie eliminacji adiabaticznej zmiennych polowych, wykorzystanej wcześniej w pracy [H1] czy artykułach innych autorów (m.in. [R6]), wyprowadzono wyrażenia na emisję spontaniczną, przesunięcie Lamba, oddziaływania multipol-multipol i kolektywną stałą dyssypacji energii (współczynnik nadpromienistości). W pracy [H2], wszystkie wyprowadzone wielkości uwzględniały mechanizmy oddziaływania elektryczny dipolowy, magnetyczny dipolowy i elektryczny kwadrupolowy. Uzyskane wyrażenia są zależne od elementów macierzowych operatorów momentów przejść, nie wymagają więc pełnej znajomości funkcji falowych w układzie (momenty mogą być wyznaczone mniejszym kosztem obliczeniowym w teorii funkcjonałów gęstości lub nawet znane z doświadczenia). Wykorzystanie metody opartej na funkcji Greena jest praktyczne: oprócz analitycznych wzorów dla prostych geometrii, jest dziś dostępnych wiele komercyjnych i otwartych platform obliczeniowych, które umożliwiają znalezienie jej dla układów o geometriach bardziej skomplikowanych, w tym nanoanten metalicznych i dielektrycznych dowolnych kształtów. W przykładach przytoczonych w publikacjach korzystano z otwartego toolboxa MNPBEM dla MATLAB [R53].

Kolejna praca [H9] zawiera uogólnienie opisu z [H2] na przypadek z zewnętrznym polem laserowym, którego obecność pozwala uzyskać splątanie między układami kwantowymi w mechanizmie znanym już z artykułu [H1]. Jako przykład zbadano przypadek nanoanteny sferycznej. Pokazano, że ze względu na różne znaki członów interferencyjnych w obecności oddziałujących z polem dipoli elektrycznych i magnetycznych, można spodziewać się asymetrii przestrzennej wyników.

Interferencja promieniowania dipoli elektrycznego i magnetycznego stoi u podstaw aktywności optycznej, w szczególności zjawiska dichroizmu kołowego, tj. różnicy we współczynniku absorpcji promieniowania spolaryzowanego prawo- i lewoskrętnie w ośrodku chiralnych układów atomowych. Absorpcja wyraża się w złotej regule Fermiego poprzez sumę członów czysto elektrycznego, czysto magnetycznego i interferencyjnego, o znaku determinowanym skrętnością układu atomowego oraz polaryzacją kołową pola [R54]. Stąd, różnica absorpcji składowych prawo- i lewoskrętnych wyraża się wyłącznie przez człon interferencyjny. Metodologię opisaną w artykule [H2] zastosowano do zbadania możliwości wykorzystania nanoanten do wzmocnienia tego członu [P1]. W szczególności można w tym przypadku wykorzystać nanoanteny dielektryczne, które, ze względu na znaczną

wartość przenikalności $\epsilon(\omega)$, silnie wzmacniają lokalne pola magnetyczne, co prowadzi do silniejszego dichroizmu i lepszego stosunku sygnału do szumu. W pracy [P5] przedyskutowano pokrewny temat modyfikacji emisji spontanicznej chiralnych molekuł w otoczeniu nanoanten metalicznych.

Podsumowanie W pracach składających się na opisywane osiągnięcie habilitacyjne zbadano szereg problemów dotyczących oddziaływania światła z układami atomowymi w otoczeniu nanoanten. Wypracowano dedykowane temu zagadnieniu ramy metodologiczne, oparte na teorii elektrodynamiki kwantowej we wnęce rezonansowej, ale dostosowane do szczególnych warunków silnej koncentracji przestrzennej pól. Zbadano oddziaływania w reżimach silnego i słabego sprzężenia. Wyprowadzono wyrażenia analityczne charakteryzujące właściwości optyczne układów atomowych, w tym w sytuacjach fizycznych wymagających wyjścia poza przybliżenie elektryczne dipolowe. Wskazano na możliwość interferencji kanałów multipolowych oddziaływań, która w odpowiednich warunkach może prowadzić do redukcji stałej emisji spontanicznej poniżej wartości odpowiadającej naturalnej szerokości linii. Omówiono zastosowania badanych układów w roli nanoskalowych źródeł nieklasycznego światła, przetworników optycznych, sensorów czy nośników oddziaływań. Wypracowana metodologia i wyniki wchodzące w skład osiągnięcia habilitacyjnego wpisują się w szeroki nurt badań w tym zakresie, dynamicznie prowadzonych na całym świecie. Stały się też inspiracją dla kolejnych projektów naukowych, w których aktualnie uczestniczę.

IV.2.3. Inne wątki i przyszłe badania

Badania nad właściwościami optycznymi nanoanten i dynamiką układów atomowych trwały kilka lat, podczas których zaangażowałam się w szereg pobocznych projektów. Niektóre z nich z czasem rozrosły się do niezależnych wątków badań. Po powrocie do Torunia poszerzyłam wachlarz tematyczny badanych zagadnień, zawsze jednak dotyczących oddziaływań światła z materią w rozmaitych scenariuszach.

Poniżej skomentuję krótko rozmaite wątki badań. W przypadku wątku zatytułowanego *Inne prace o nanoantenach*, swój wkład oceniam jako mniej istotny niż w przypadku artykułów zakwalifikowanych do osiągnięcia habilitacyjnego. Pozostałe wątki są względnie odległe tematycznie, dlatego nie zostały włączone do osiągnięcia.

Inne prace o nanoantenach Na ten wątek składają się dwa zakończone projekty:

- We współpracy z grupą prof. Sylwii Zielińskiej - Raczyńskiej z Uniwersytetu Technologiczno - Przyrodniczego w Bydgoszczy, badaliśmy możliwość przestrajania odpowiedzi optycznej nanoanten przez ubrane optycznie ośrodki atomowe [P6, P7]. Właściwości

optyczne takich ośrodków mogą być przestrajane za pomocą pola laserowego, co umożliwia m.in. zmianę położenia spektralnego rezonansu plazmonowego metodą optyczną [P6]. Przystrajalność krzywej dyspersyjnej pozwala też kontrolować prędkość propagacji i czas życia wzbudzeń plazmonowych [P7].

- Prace [P8, P9] dotyczą metody kwantyzacji pola elektromagnetycznego, skrojonej do opisu rezonatorów ze stratami natury radiacyjnej (np. nanoanten dielektrycznych) [P8] i absorpcyjnej (np. nanoanten metalicznych) [P9], w formalizmie typu *input - output*. Takie podejście odpowiada postępowaniu eksperymentalnemu. Ponieważ promieniowanie rozpraszane do pola dalekiego jest częścią układu, metoda umożliwia charakteryzację kierunkową i spektralną emisji na podstawie informacji o metodzie iluminacji, parametrach rezonatora i ewentualnego układu atomowego.

Fotoniczne układy scalone Ten kierunek badań łączy kilka projektów, które realizowałam z różnymi partnerami już po obronie doktoratu. Aktywny jest ostatni z wymienionych:

- Opracowałam wyniki eksperymentu prowadzonego w grupie prof. Wolframa Pernice'a w Karlsruhe Institute of Technology w Niemczech. Doświadczenie dotyczyło budowy mikroskalowych układów fotonicznych, na które składały się wzbudzane napięciem elektrycznym nanorurki węglowe w roli źródeł światła, falowody i detektory pojedynczych fotonów. Mechanizm wzbudzenia jest istotny z praktycznego punktu widzenia: standardowe pompowanie układu światłem rodzi konieczność oddzielenia słabego kwantowego sygnału od dominującego tła, podczas gdy w przypadku wzbudzenia elektrycznego nie ma tej potrzeby. Układ przygotowany w Karlsruhe był pierwszym tego rodzaju na świecie.

Wyniki, które analizowałam dotyczyły właściwości statystycznych światła emitowanego przez nanorurki węglowe: w doświadczeniu typu Hanbury - Brown - Twiss potwierdzono jego nieklasyczny charakter [P10].

- Współpraca z dr Norą Tischler z Uniwersytetu w Griffiths (Australia) zaowocowała pracą [P11], w której zaproponowano metodę implementacji dowolnych transformacji liniowych stanu kwantowego światła z wykorzystaniem prostych elementów optycznych (płytki światłodzielnące, płytki fazowe, elementy aktywne do parametrycznej konwersji częstości). Praca jest uogólnieniem artykułu [R55] dotyczącego wyłącznie transformacji unitarnych, który położył podwaliny pod szerokie spektrum prac teoretycznych i realizacji eksperymentalnych zagadnień optyki kwantowej. Podejście opisane w pracy [P11] nie wymaga transformacji unitarnych, pozwala więc uwzględnić straty i wzmocnienie sygnału, urządzenia o różnej liczbie portów wyjściowych i wejściowych, realizację miar operatorowych czy nietrywialnych bramek kwantowych.

- Współpraca z grupą dr. Norshamsuriego Ali (Uniwersytet w Perlis, Malezja) i dr. Piotra Kolenderskiego (UMK) ma na celu inżynierię falowodów fotonicznych do badań podstawowych (np. analiza kwantowych sił bezwładności [P12]) i stosowanych (elementy układów scalonych [P13], kolejne prace w przygotowaniu). W kolejnym kroku planowane są eksperymenty oparte na optymalizowanych obecnie geometriach. Trwają prace nad stworzeniem mikroskalowych dzielników wiązek, w których można spodziewać się rzadko badanych efektów interferencyjnych [P14].

Plazmonika w płatkach grafenowych Ten projekt został bezpośrednio zainspirowany badaniami wchodzącymi w skład osiągnięcia habilitacyjnego i - pomimo wyraźnie odrębnego charakteru - w wielu aspektach stanowi ich rozwinięcie.

Grafen domieszkowany nośnikami ładunku ma właściwości metaliczne, a więc można z nim wzbudzić rezonanse typu plazmonowego, zwykle w domenie mikrofal. Rezonanse te można przesunąć do domeny optycznej za pomocą silnego domieszkowania, lub poprzez wykorzystanie skończonych płatek grafenowych o rozmiarach rzędu kilku nanometrów [R56]. Wzbudzeniom plazmonowym w grafenie towarzyszy jeszcze silniejsze skupienie energii niż w metalach szlachetnych, w obszarach wielkości kilku nanometrów. Co jeszcze ciekawsze, odpowiedź optyczna jest przestrajalna przy pomocy napięcia służącego domieszkowaniu płatka lub z wykorzystaniem impulsów laserowych [R57, R58]. Przestrajalność jest cechą wyróżniającą nanoanteny grafenowe w stosunku do tradycyjnych, która rodzi możliwość realizacji przestrajalnej elektrodynamiki kwantowej. To zagadnienie jest przedmiotem badań realizowanych we współpracy z prof. Carstenem Rockstuhlem w ramach wspólnego grantu Beethoven 2 Narodowego Centrum Nauki i Deutsche Forschungsgemeinschaft.

Dla struktur tak małych, jak opisane wyżej, klasyczny opis przy pomocy funkcji przenikalności dielektrycznej myli się co do położenia rezonansów nawet o kilkaset nanometrów. Stąd potrzeba podejścia kwantowomechanicznego, rozwijanego we współpracy z prof. Andresem Ayuelą z Donostia International Physics Center i Centro de Fisica de Materiales w San Sebastian w Hiszpanii, specjalistą w dziedzinie właściwości elektronowych materiałów dwuwymiarowych, oraz z prof. Garnettem Bryantem z National Institute for Standards and Technology/University of Maryland Joint Quantum Institute. Podejście łączy metodę ciasnego wiązania do opisu właściwości elektronowych grafenu z opisem dynamiki "swobodnych" elektronów równaniem master, a w niektórych wątkach również z zagadnieniami optyki układów atomowych przyłączanych do grafenu jako defekty. Owocem współpracy są jak dotąd dwie publikacje, w których zaproponowano kryterium pozwalające stwierdzić w jakim stopniu rezonans w widmie nanopłatek ma charakter plazmonowy [P15, P16]. Kolejne prace są w przygotowaniu.

Ten kierunek badań oceniam jako niezwykle obiecujący. Obecnie prowadzone są pra-

ce porównujące mechanizmy oddziaływań nanoanten grafenowych z atomami oparte na wymianie elektronów lub na sprzężeniu optycznym. Badane są możliwości dynamicznego sterowania właściwościami sprzężonych układów za pomocą napięcia elektrycznego czy impulsów laserowych. Planowana jest rozbudowa kodów numerycznych aby uwzględnić inne materiały dwuwymiarowe, co wpisuje się w trendy badań dotyczących plazmoniki kwantowej prowadzonych na świecie [R59, R60, R61].

Plazmonowo wzmacniana spektroskopia ramanowska (*surface enhanced Raman spectroscopy, SERS*) W zjawisku rozpraszania ramanowskiego na cząsteczce część energii fotonu służy wzbudzeniu jej stanów, zazwyczaj wibracyjnych. Ponieważ konfiguracja stanów wibracyjnych jest charakterystyczna dla różnych cząsteczek chemicznych, pomiar zmiany energii fotonu w procesie rozpraszania (tzw. przesunięcia Ramana) może być podstawą wykrywania i identyfikacji molekuł. Zwykle jednak prawdopodobieństwo rozpraszania ramanowskiego fotonu na cząsteczce jest bardzo małe, pomiar wymaga więc dużych koncentracji molekuł lub silnych pól [R62]. W celu wzmocnienia pola wykorzystuje się nanocząstki metaliczne - mówi się wówczas o powierzchniowo wzmacnianej spektroskopii ramanowskiej SERS [R62]. W zależności od konkretnego scenariusza, lokalne wzmocnienie sygnału ramanowskiego sięga od kilku do kilkunastu rzędów wielkości [R63, R64, R65]. Bogactwo rozmaitych metod, technik, materiałów i zastosowań sprawia, że pomimo popularności zagadnienia, ciągle istnieje szerokie pole dla optymalizacji scenariuszy pomiarowych i geometrii nanostruktur, a nawet pytań natury podstawowej.

W ramach tego nurtu badań projektujemy nanostruktury do celów wzmocnienia sygnału w eksperymentach dr Karoliny Milenko (Sintef, Oslo), dr. Tobiasa Herr (lidera Ultrafast Microphotonics Group w Center for Free-Electron Laser Science, Deutsches Elektronen-Synchrotron DESY, Hamburg) i dr. Piotra Masłowskiego (UMK). Celem jest stworzenie czułych sensorów molekuł o wysokiej rozdzielczości przestrzennej i czasowej.

Ścisła współpraca z grupami doświadczalnymi sprawia, że ten projekt jest dla mnie szczególnie cenny i perspektywiczny, ponieważ pozwala wzbogacić i wykorzystać praktycznie doświadczenie zdobyte w ramach realizacji badań habilitacyjnych.

Oddziaływanie światła z układami polarnymi Układy polarne charakteryzują się trwałym momentem dipolowym, tj. niezerową wartością elementów macierzowych operatora elektrycznego momentu dipolowego, obliczanych w stanach własnych. W układach polarnych pod wpływem rezonansowego oświetlenia, oprócz oscylacji momentu dipolowego przejścia właściwych dla układu niepolarnego, zachodzą oscylacje trwałego momentu dipolowego z częstością Rabiego. Trwały moment dipolowy stanowi więc źródło promieniowania o tej częstości, przestrajalnej optycznie w domenie mikrofalowej bądź podczerwonej [R66]. Do

tej pory analizowano zjawisko w pojedynczych cząsteczkach (np. w pracach [R66],[P17]) i w kropkach kwantowych [R67].

Badania układów polarnych są realizowane w ramach grantu w konkursie SONATA NCN. Z jednej strony, zbadano problem propagacji impulsów świetlnych przez koherentne polarne ośrodki molekularne, ubrane polem elektromagnetycznym [P18, P19]. Tego rodzaju ośrodki są typowo wykorzystywane w wielu laboratoriach fizyki atomowej, molekularnej i optycznej, m.in. w laboratoriach w Toruniu. Scharakteryzowano generację i propagację takiego promieniowania przez ośrodek i pokazano, że w realistycznych warunkach oczekiwane natężenie sygnału może być znaczne [P18]. Wykorzystana metodyka obliczeniowa, oparta na równaniach Blocha - Maxwella, została rozwinięta na bazie doświadczeń zdobywanych przez mnie jeszcze w okresie studiów doktoranckich i wcześniejszych [P20, P21, P22, P23, P24]. Wątek badań propagacji sygnałów przez ubrane ośrodki atomowe jest kontynuowany we współpracy z prof. Szymonem Pustelnym z Uniwersytetu Jagiellońskiego. Obliczenia mają na celu wsparcie teoretyczne wybranych doświadczeń.

Z drugiej strony, nowa metoda opisu oddziaływania rozciągniętych przestrzennie układów atomowych ze światłem została niedawno zaproponowana w pracy [P4]. Zbadano wpływ rozciągłości przestrzennej układów kwantowych, w tym obecności trwałych momentów dipolowych, na wielkości takie jak współczynnik emisji spontanicznej czy przesunięcie Lamba [P4]. Scharakteryzowano warunki, w których człony hamiltonianu oddziaływania, związane z trwałymi momentami dipolowymi, mogą wносить istotny, nawet dominujący wkład w widmo emisji [P25]. Ten kierunek jest rozwijany we współpracy z grupą prof. Saveria Pascasio z Uniwersytetu Aldo Moro w Bari we Włoszech, a jednym z problemów planowanych do badania w przyszłości jest wykorzystanie nanostruktur do wzmocnienia słabych efektów wynikających z polarnego charakteru układów atomowych.

Podsumowanie Tematyka habilitacyjna, osnuta wokół wykorzystania nanoanten jako wnęk rezonansowych, stanowiła najważniejszy wątek moich badań po zakończeniu studiów doktoranckich. Z biegiem czasu, udało mi się wzbogacić zakres tematyczny zainteresowań naukowych i osiągnąć dość szerokie spektrum, co wynika z uniwersalności wykorzystywanych i rozwijanych podejść obliczeniowych. Wiele wątków badań prowadzonych obecnie stanowi kontynuację i uogólnienie nurtu badań składających się na osiągnięcie habilitacyjne.

Dzięki włączeniu od samego początku w prowadzone prace studentów, udało mi się stworzyć grupę młodych, zdolnych i zmotywowanych osób, z pomocą których badania będą kontynuowane. Stworzenie takiej grupy uważam za dodatkowe (ale zamierzone) osiągnięcie w ostatnich latach.

Bibliografia

H. Artykuły wchodzące w skład osiągnięcia

- [H1] Jiamin Hou, Karolina Słowik, Falk Lederer, and Carsten Rockstuhl. Dissipation-driven entanglement between qubits mediated by plasmonic nanoantennas. *Physical Review B*, 89(23):235413, 2014.
- [H2] Miriam Kosik, Oleksandr Burlayenko, Carsten Rockstuhl, Ivan Fernandez-Corbaton, and Karolina Słowik. Interaction of atomic systems with quantum vacuum beyond electric dipole approximation. *Scientific Reports*, 10(1):5879, 2020.
- [H3] Evgenia Rusak, Jakob Straubel, Piotr Gładysz, Mirko Göddel, Andrzej Kędziorski, Michael Kühn, Florian Weigend, Carsten Rockstuhl, and Karolina Słowik. Enhancement of and interference among higher order multipole transitions in molecules near a plasmonic nanoantenna. *Nature Communications*, 10(1):5775, 2019.
- [H4] Robert Filter, Karolina Słowik, Jakob Straubel, Falk Lederer, and Carsten Rockstuhl. Nanoantennas for ultrabright single photon sources. *Optics Letters*, 39(5):1246–1249, 2014.
- [H5] Jako Straubel, Robert Filter, Carsten Rockstuhl, and Karolina Słowik. Plasmonic nanoantenna based triggered single-photon source. *Physical Review B*, 93(19):195412, 2016.
- [H6] Karolina Słowik, Robert Filter, Jakob Straubel, Falk Lederer, and Carsten Rockstuhl. Strong coupling of optical nanoantennas and atomic systems. *Physical Review B*, 88(19):195414, 2013.
- [H7] Jakob Straubel, Robert Filter, Carsten Rockstuhl, and K Słowik. Efficient mode conversion in an optical nanoantenna mediated by quantum emitters. *Optics Letters*, 41(10):2294–2297, 2016.
- [H8] Jakob Straubel, Rafał Sarniak, Carsten Rockstuhl, and Karolina Słowik. Entangled light from bimodal optical nanoantennas. *Physical Review B*, 95(8):085421, 2017.
- [H9] Miriam Kosik and Karolina Słowik. Interaction and entanglement of a pair of quantum emitters near a nanoparticle: Analysis beyond electric-dipole approximation. *Entropy*, 22(2):135, 2020.

P. Inne artykuły habilitantki

- [P1] Karolina Słowik and Monika Kubek. Nanoparticles to enhance molecular circular dichroism. Optical Society of America, 2018, <https://doi.org/10.1364/IPRSN.2018.IM2B.3>.
- [P2] Karolina Słowik, Jakob Straubel, and Carsten Rockstuhl. Antennas for photons: light-matter coupling at nanoscale. In *2018 IEEE 7th International Conference on Photonics (ICP)*, pages 1–3. IEEE, 2018, <https://doi.org/10.1109/ICP.2018.8533212>.
- [P3] Karolina Słowik, Robert Filter, Jakob Straubel, Falk Lederer, and Carsten Rockstuhl. Coupling of quantum emitters and metallic nanoantennae for the generation of nonclassical light at high rates. *Physica Scripta*, 2014(T160):014037, 2014.
- [P4] Giovanni Scala, Francesco V Pepe, Paolo Facchi, Saverio Pascazio, and Karolina Słowik. Light interaction with extended quantum systems in dispersive media. *New Journal of Physics*, 22(12):123047, 2020.
- [P5] Karolina Słowik and Miriam Kosik. Spontaneous emission enhancement of handed molecules. Materiały konferencji META2020, przesuniętej na lipiec 2021.
- [P6] David Ziemkiewicz, Karolina Słowik, and S Zielińska-Raczyńska. Tunable narrowband plasmonic resonances in electromagnetically induced transparency media. *Journal of the Optical Society of America B*, 34(9):1981–1988, 2017.
- [P7] David Ziemkiewicz, Karolina Słowik, and Sylwia Zielińska-Raczyńska. Ultraslow long-living plasmons with electromagnetically induced transparency. *Optics Letters*, 43(3):490–493, 2018.
- [P8] Jens Oppermann, Jakob Straubel, Karolina Słowik, and Carsten Rockstuhl. Quantum description of radiative decay in optical cavities. *Physical Review A*, 97:013809, 2018.
- [P9] Jens Oppermann, Jakob Straubel, Karolina Słowik, and Carsten Rockstuhl. Second quantization of scattering modes of absorptive photonic nanostructures. arXiv preprint arXiv:1811.06757, 2018.

- [P10] Svetlana Khasminskaya, Felix Pyatkov, Karolina Słowik, Simone Ferrari, Oliver Kahl, Vadim Kovalyuk, Patrik Rath, Andreas Vetter, Frank Hennrich, Manfred M Kappes, et al. Fully integrated quantum photonic circuit with an electrically driven light source. *Nature Photonics*, 10(11):727–732, 2016.
- [P11] Nora Tischler, Carsten Rockstuhl, and Karolina Słowik. Quantum optical realization of arbitrary linear transformations allowing for loss and gain. *Physical Review X*, 8(2):021017, 2018.
- [P12] Andrzej Gajewski, Daniel Gustaw, Nor Roshidah Yusof, Norshamsuri Ali, Karolina Słowik, and Piotr Kolenderski. Waveguide platform for quantum anticentrifugal force. *Optics Letters*, 45(13):3373–3376, 2020.
- [P13] Roshidah Yusof, Norshamsuri Ali, Piotr Kolenderski, Karolina Słowik, and NAM Ahmad Hambali. Comparative studies of rib waveguide material for quantum communication application. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, volume 551, page 012018. IOP Publishing, 2019.
- [P14] Jakub Szlachetka, Andreas Vetter, Karolina Słowik, Carsten Rockstuhl, and Piotr Kolenderski. Nanostructural beam splitter (conference presentation). In *Metamaterials XII*, volume 11025, page 110250X. International Society for Optics and Photonics, 2019.
- [P15] Marvin M Müller, Miriam Kosik, Marta Pelc, Garnett W Bryant, Andrés Ayuela, Carsten Rockstuhl, and Karolina Słowik. Energy-based plasmonicity index to characterize optical resonances in nanostructures. *The Journal of Physical Chemistry C*, 124(44):24331–24343, 2020.
- [P16] Marvin M Müller, Miriam Kosik, Marta Pelc, Garnett W Bryant, Andrés Ayuela, Carsten Rockstuhl, and Karolina Słowik. From single-particle-like to interaction-mediated plasmonic resonances in graphene nano-antennas. *Journal of Applied Physics*, 129(9):093103, 2021.
- [P17] Michael Marthaler, Martin Koppenhöfer, Karolina Słowik, and Carsten Rockstuhl. Lasing at arbitrary frequencies with atoms with broken inversion symmetry and an engineered electromagnetic environment. *arXiv preprint arXiv:1601.01511*, 2016.
- [P18] Piotr Gładysz, Piotr Wcisło, and Karolina Słowik. Propagation of optically tunable coherent radiation in a gas of polar molecules. *Scientific Reports*, 10(1):17615, 2020.
- [P19] Piotr Gładysz and Karolina Słowik. Media of asymmetric atomic systems as low-frequency radiation sources. In *Terahertz Emitters, Receivers, and Applications XI*, volume 11499, page 114990G. International Society for Optics and Photonics, 2020.
- [P20] K Słowik, A Raczyński, J Zaremba, S Zielińska-Kaniasty, M Artoni, and GC La Rocca. Cross-kerr nonlinearities in an optically dressed periodic medium. *Physica Scripta*, 2011(T143):014022, 2011.
- [P21] K Słowik, A Raczyński, J Zaremba, S Zielińska-Kaniasty, M Artoni, and GC La Rocca. Cross-phase modulation and population redistribution in a periodic tripod medium. *Journal of Modern Optics*, 58(11):978–987, 2011.
- [P22] Karolina Słowik, Andrzej Raczynski, Jaroslaw Zaremba, Sylwia Zielinska-Kaniasty, Maurizio Artoni, and Giuseppe C La Rocca. Cross phase modulation in photonic crystals. In *Nonlinear Optics and Applications V*, volume 8071, page 807107. International Society for Optics and Photonics, 2011.
- [P23] K Słowik, A Raczyński, J Zaremba, and S Zielińska-Kaniasty. Light storage in a tripod medium as a basis for logical operations. *Optics Communications*, 285(9):2392–2396, 2012.
- [P24] A Raczyński, K Słowik, J Zaremba, and S Zielińska-Kaniasty. Controlling statistical properties of stored light. *Optics Communications*, 279(2):324–329, 2007.
- [P25] P. Facchi S. Pascazio F. Pepe G. Scala, K. Słowik. Beyond the Rabi model: light interactions with polar atomic systems in a cavity. *arXiv preprint arXiv:2103.11232*.

R. Referencje innych autorów

- [R1] Stefan Alexander Maier. *Plasmonics: fundamentals and applications*. Springer Science & Business Media, 2007.
- [R2] Constantine A Balanis. *Antenna theory: analysis and design*. John Wiley & Sons, 2016.
- [R3] Mark S Tame, KR McEnery, ŞK Özdemir, Jinhyoung Lee, Stefan A Maier, and MS Kim. Quantum plasmonics. *Nature Physics*, 9(6):329–340, 2013.

- [R4] Pierre Meystre and Murray Sargent. *Elements of quantum optics*. Springer Science & Business Media, 2007.
- [R5] Z Ficek and Ryszard Tanaś. Entangled states and collective nonclassical effects in two-atom systems. *Physics Reports*, 372(5):369–443, 2002.
- [R6] David Dzsotjan, Anders S Sørensen, and Michael Fleischhauer. Quantum emitters coupled to surface plasmons of a nanowire: A green’s function approach. *Physical Review B*, 82(7):075427, 2010.
- [R7] Nicholas Rivera, Ido Kaminer, Bo Zhen, John D Joannopoulos, and Marin Soljačić. Shrinking light to allow forbidden transitions on the atomic scale. *Science*, 353(6296):263–269, 2016.
- [R8] Tomáš Neuman, Ruben Esteban, David Casanova, Francisco J García-Vidal, and Javier Aizpurua. Coupling of molecular emitters and plasmonic cavities beyond the point-dipole approximation. *Nano Letters*, 18(4):2358–2364, 2018.
- [R9] Yunlong Zhou, Zhening Zhu, Wenxiao Huang, Wenjing Liu, Shaojue Wu, Xuefeng Liu, Yan Gao, Wei Zhang, and Zhiyong Tang. Optical coupling between chiral biomolecules and semiconductor nanoparticles: size-dependent circular dichroism absorption. *Angewandte Chemie*, 123(48):11658–11661, 2011.
- [R10] Rashid Zia, Jon A Schuller, Anu Chandran, and Mark L Brongersma. Plasmonics: the next chip-scale technology. *Materials Today*, 9(7-8):20–27, 2006.
- [R11] Nathalie P De Leon, Mikhail D Lukin, and Hongkun Park. Quantum plasmonic circuits. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 18(6):1781–1791, 2012.
- [R12] A Femius Koenderink, Andrea Alu, and Albert Polman. Nanophotonics: Shrinking light-based technology. *Science*, 348(6234):516–521, 2015.
- [R13] Stefan Schietinger, Michael Barth, Thomas Aichele, and Oliver Benson. Plasmon-enhanced single photon emission from a nanoassembled metal- diamond hybrid structure at room temperature. *Nano Letters*, 9(4):1694–1698, 2009.
- [R14] Ruben Esteban, TV Teperik, and Jean-Jacques Greffet. Optical patch antennas for single photon emission using surface plasmon resonances. *Physical Review Letters*, 104(2):026802, 2010.
- [R15] Chang Chen, Yi Li, Sarp Kerman, Pieter Neutens, Kherim Willems, Sven Cornelissen, Liesbet Lagae, Tim Stakenborg, and Pol Van Dorpe. High spatial resolution nanoslits for single-molecule nucleobase sensing. *Nature Communications*, 9(1):1733, 2018.
- [R16] Renhe Zhang, Yao Zhang, ZC Dong, S Jiang, C Zhang, LG Chen, L Zhang, Y Liao, J Aizpurua, Y ea Luo, et al. Chemical mapping of a single molecule by plasmon-enhanced raman scattering. *Nature*, 498(7452):82–86, 2013.
- [R17] Yu Zhang, Yu-Rong Zhen, Oara Neumann, Jared K Day, Peter Nordlander, and Naomi J Halas. Coherent anti-stokes raman scattering with single-molecule sensitivity using a plasmonic fano resonance. *Nature Communications*, 5(1):4424, 2014.
- [R18] Yang Zhao, Amir N Askarpour, Liuyang Sun, Jinwei Shi, Xiaoqin Li, and Andrea Alù. Chirality detection of enantiomers using twisted optical metamaterials. *Nature Communications*, 8(1):14180, 2017.
- [R19] Gleb M Akselrod, Christos Argyropoulos, Thang B Hoang, Cristian Ciraci, Chao Fang, Jiani Huang, David R Smith, and Maiken H Mikkelsen. Probing the mechanisms of large purcell enhancement in plasmonic nanoantennas. *Nature Photonics*, 8(11):835–840, 2014.
- [R20] Satoshi Kawata, Yasushi Inouye, and Prabhat Verma. Plasmonics for near-field nano-imaging and super-lensing. *Nature Photonics*, 3(7):388–394, 2009.
- [R21] Scott K Cushing and Nianqiang Wu. Progress and perspectives of plasmon-enhanced solar energy conversion. *The Journal of Physical Chemistry Letters*, 7(4):666–675, 2016.
- [R22] Lukas Novotny and Niek Van Hulst. Antennas for light. *Nature Photonics*, 5(2):83–90, 2011.
- [R23] Paolo Biagioni, Jer-Shing Huang, and Bert Hecht. Nanoantennas for visible and infrared radiation. *Reports on Progress in Physics*, 75(2):024402, 2012.
- [R24] Craig F Bohren and Donald R Huffman. *Absorption and scattering of light by small particles*. John Wiley & Sons, 2008.
- [R25] Qiang Fu and Wenbo Sun. Mie theory for light scattering by a spherical particle in an absorbing medium. *Applied Optics*, 40(9):1354–1361, 2001.

- [R26] Howard Carmichael. *An open systems approach to quantum optics: lectures presented at the Université Libre de Bruxelles, October 28 to November 4, 1991*, volume 18. Springer Science & Business Media, 2009.
- [R27] Werner Vogel and Dirk-Gunnar Welsch. *Quantum Optics*. John Wiley & Sons, 2006.
- [R28] Olalla Pérez-González, Javier Aizpurua, and Nerea Zabala. Optical transport and sensing in plexcitonic nanocavities. *Optics Express*, 21(13):15847–15858, 2013.
- [R29] DS Dovzhenko, SV Ryabchuk, Yu P Rakovich, and IR Nabiev. Light–matter interaction in the strong coupling regime: configurations, conditions, and applications. *Nanoscale*, 10(8):3589–3605, 2018.
- [R30] Alexander E Krasnok, Alexey P Slobozhanyuk, Constantin R Simovski, Sergei A Tretyakov, Alexander N Poddubny, Andrey E Miroshnichenko, Yuri S Kivshar, and Pavel A Belov. An antenna model for the purcell effect. *Scientific Reports*, 5(1):12956, 2015.
- [R31] Heinz-Peter Breuer, Francesco Petruccione, et al. *The theory of open quantum systems*. Oxford University Press on Demand, 2002.
- [R32] Willis E Lamb Jr and Robert C Retherford. Fine structure of the hydrogen atom by a microwave method. *Physical Review*, 72(3):241, 1947.
- [R33] Herbert Walther. The single atom maser and the quantum electrodynamics in a cavity. *Physica Scripta*, 1988(T23):165, 1988.
- [R34] Sebastian Franke, Stephen Hughes, Mohsen Kamandar Dezfouli, Philip Trøst Kristensen, Kurt Busch, Andreas Knorr, and Marten Richter. Quantization of quasinormal modes for open cavities and plasmonic cavity quantum electrodynamics. *Physical Review Letters*, 122(21):213901, 2019.
- [R35] J. Hofer, A. Schliesser, and T. J. Kippenberg. Cavity optomechanics with ultrahigh- q crystalline microresonators. *Physical Review A*, 82:031804, 2010.
- [R36] Philip Trøst Kristensen, Rong-Chun Ge, and Stephen Hughes. Normalization of quasinormal modes in leaky optical cavities and plasmonic resonators. *Physical Review A*, 92(5):053810, 2015.
- [R37] Edo Waks and Deepak Sridharan. Cavity qed treatment of interactions between a metal nanoparticle and a dipole emitter. *Physical Review A*, 82(4):043845, 2010.
- [R38] Reinier W Heeres, Leo P Kouwenhoven, and Valery Zwiller. Quantum interference in plasmonic circuits. *Nature Nanotechnology*, 8(10):719–722, 2013.
- [R39] E Altewischer, MP Van Exter, and JP Woerdman. Plasmon-assisted transmission of entangled photons. *Nature*, 418(6895):304–306, 2002.
- [R40] Niels Verellen, Fernando López-Tejeira, Ramón Paniagua-Domínguez, Dries Vercreyusse, Denitza Denkova, Liesbet Lagae, Pol Van Dorpe, Victor V Moshchalkov, and José A Sánchez-Gil. Mode parity-controlled fano-and lorentz-like line shapes arising in plasmonic nanorods. *Nano Letters*, 14(5):2322–2329, 2014.
- [R41] Jelena Vuckovic. Quantum optics and cavity qed with quantum dots in photonic crystals. *Quantum Optics and Nanophotonics. Edited by: C. Fabre, V. Sandoghdar, N. Treps, and LF Cugliandolo (Oxford University Press, Oxford, 2017)*, pages 365–406, 2014.
- [R42] Rohit Chikkaraddy, Bart De Nijs, Felix Benz, Steven J Barrow, Oren A Scherman, Edina Rosta, Angela Demetriadou, Peter Fox, Ortwin Hess, and Jeremy J Baumberg. Single-molecule strong coupling at room temperature in plasmonic nanocavities. *Nature*, 535(7610):127–130, 2016.
- [R43] Kotni Santhosh, Ora Bitton, Lev Chuntonov, and Gilad Haran. Vacuum rabi splitting in a plasmonic cavity at the single quantum emitter limit. *Nature Communications*, 7(1):ncomms11823, 2016.
- [R44] Kosmas Tsakmakidis. Plasmonic darkness. *Nature Materials*, 12(10):870–870, 2013.
- [R45] Barry M Garraway. The dicke model in quantum optics: Dicke model revisited. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 369(1939):1137–1155, 2011.
- [R46] Daniel A Steck. Quantum and atom optics, 2007. <http://atomoptics-nas.uoregon.edu/~dsteck/teaching/quantum-optics/> (accessed 20.02.2021.).
- [R47] LD Barron and CG Gray. The multipole interaction hamiltonian for time dependent fields. *Journal of Physics A: Mathematical, Nuclear and General*, 6(1):59, 1973.
- [R48] Sven M Hein and Harald Giessen. Tailoring magnetic dipole emission with plasmonic split-ring resonators. *Physical review letters*, 111(2):026803, 2013.

- [R49] Denis G Baranov, Roman S Savelev, Sergey V Li, Alexander E Krasnok, and Andrea Alù. Modifying magnetic dipole spontaneous emission with nanophotonic structures. *Laser & Photonics Reviews*, 11(3):1600268, 2017.
- [R50] T Gruner and D-G Welsch. Green-function approach to the radiation-field quantization for homogeneous and inhomogeneous kramers-kronig dielectrics. *Physical Review A*, 53(3):1818, 1996.
- [R51] Ho Trung Dung, Ludwig Knöll, and Dirk-Gunnar Welsch. Three-dimensional quantization of the electromagnetic field in dispersive and absorbing inhomogeneous dielectrics. *Physical Review A*, 57(5):3931, 1998.
- [R52] Reza Matloob, Rodney Loudon, Stephen M Barnett, and John Jeffers. Electromagnetic field quantization in absorbing dielectrics. *Physical Review A*, 52(6):4823, 1995.
- [R53] Ulrich Hohenester and Andreas Trügler. MNPBEM – A Matlab toolbox for the simulation of plasmonic nanoparticles. *Computer Physics Communications*, 183(2):370–381, 2012.
- [R54] David Parker Craig and Thiru Thirunamachandran. *Molecular quantum electrodynamics: an introduction to radiation-molecule interactions*. Courier Corporation, 1998.
- [R55] Michael Reck, Anton Zeilinger, Herbert J Bernstein, and Philip Bertani. Experimental realization of any discrete unitary operator. *Physical Review Letters*, 73(1):58, 1994.
- [R56] Sukosin Thongrattanasiri, Alejandro Manjavacas, and F Javier García de Abajo. Quantum finite-size effects in graphene plasmons. *ACS Nano*, 6(2):1766–1775, 2012.
- [R57] Zhe Fei, AS Rodin, Gregory O Andreev, W Bao, AS McLeod, M Wagner, LM Zhang, Zeng Zhao, M Thiemens, G Dominguez, et al. Gate-tuning of graphene plasmons revealed by infrared nano-imaging. *Nature*, 487(7405):82–85, 2012.
- [R58] Alex James Frenzel, Chun Hung Lui, Yong Cheol Shin, Jing Kong, and Nuh Gedik. Semiconducting-to-metallic photoconductivity crossover and temperature-dependent drude weight in graphene. *Physical Review Letters*, 113(5):056602, 2014.
- [R59] DN Basov, MM Fogler, and FJ García De Abajo. Polaritons in van der Waals materials. *Science*, 354(6309), 2016.
- [R60] Toan Trong Tran, Danqing Wang, Zai-Quan Xu, Ankun Yang, Milos Toth, Teri W Odom, and Igor Aharonovich. Deterministic coupling of quantum emitters in 2d materials to plasmonic nanocavity arrays. *Nano Letters*, 17(4):2634–2639, 2017.
- [R61] Chitrleema Chakraborty, Nick Vamivakas, and Dirk Englund. Advances in quantum light emission from 2d materials. *Nanophotonics*, 8(11):2017–2032, 2019.
- [R62] Eric C Le Ru and Pablo G Etchegoin. Single-molecule surface-enhanced raman spectroscopy. *Annual Review of Physical Chemistry*, 63:65–87, 2012.
- [R63] Joseph B Jackson and Naomi J Halas. Surface-enhanced raman scattering on tunable plasmonic nanoparticle substrates. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 101(52):17930–17935, 2004.
- [R64] Song-Yuan Ding, Jun Yi, Jian-Feng Li, Bin Ren, De-Yin Wu, Rajapandiyan Panneerselvam, and Zhong-Qun Tian. Nanostructure-based plasmon-enhanced raman spectroscopy for surface analysis of materials. *Nature Reviews Materials*, 1(6):1–16, 2016.
- [R65] Junqiao Wang, Jia Zhang, Yongzhi Tian, Chunzhen Fan, Kaijun Mu, Shu Chen, Pei Ding, and Erjun Liang. Theoretical investigation of a multi-resonance plasmonic substrate for enhanced coherent anti-stokes raman scattering. *Optics Express*, 25(1):497–507, 2017.
- [R66] OV Kibis, G Ya Slepyan, SA Maksimenko, and A Hoffmann. Matter coupling to strong electromagnetic fields in two-level quantum systems with broken inversion symmetry. *Physical Review Letters*, 102(2):023601, 2009.
- [R67] Igor Yu Chestnov, Vanik A Shahnazaryan, Alexander P Alodjants, and Ivan A Shelykh. Terahertz lasing in ensemble of asymmetric quantum dots. *ACS Photonics*, 4(11):2726–2737, 2017.

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

Moja zagraniczna aktywność naukowa wiąże się z pracą badawczą na uczelniach niemieckich:

- etat badawczy na Friedrich Schiller Universität w Jenie (grupa prof. F. Lederera), od 08.2012. przez 33 miesiące (w tym urlop macierzyński / rodzicielski),
- staż podoktorski w Karlsruhe Institute of Technology (grupa prof. C. Rockstuhl), od marca do listopada 2015.

Aktywność ta dotyczyła zarówno badań i artykułów składających się na osiągnięcie habilitacyjne omówione w punkcie IV.2.2, jak i innych badań omówionych w punkcie IV.2.3.

Ponadto, współpraca z grupami badawczymi z licznych ośrodków w kraju i za granicą wiąże się z wizytami naukowymi. Odbyłam dwumiesięczny staż w Scuola Normale Superiore w Pizie (przed uzyskaniem stopnia doktora), miesięczną wizytę w Karlsruhe w roku 2016, a także kilka krótkich wizyt w innych ośrodkach (Donostia International Physics Center, San Sebastian, Hiszpania; Norwegian University of Science and Technology (NTNU), Trondheim, Norwegia; Uniwersytet Jagielloński). Z wyjątkiem najnowszych, staże i wizyty naukowe zaowocowały już wspólnymi publikacjami i doniesieniami konferencyjnymi. We współpracy z grupami z NTNU i z ośrodka badawczego Sintef w Norwegii przygotowaliśmy wspólny wniosek grantowy pt. *Nanophotonic waveguides for On-chip surface-Enhanced Raman Scattering sensing (OnSERS)*. Trwają badania nad stworzeniem zminiaturyzowanych, zintegrowanych na chipach sensorów związków toksycznych, opartych na zjawisku powierzchniowo wzmocnionej spektroskopii ramanowskiej w światłowodach. Badania z grupą z Uniwersytetu Jagiellońskiego, dotyczące propagacji impulsów świetlnych przez ubrane ośrodki atomowe, również są w toku.

Lista naukowców spoza UMK, z którymi współpracowałam i współpracuję (w przypadku grup wymieniam liderów):

- grupa dr. Norshamsuriego Ali, University of Perlis, Malezja,
- prof. Maurizio Artoni, Brescia University, Włochy,
- grupa prof. Andresy Ayueli, Materials Physics Center i Donostia International Physics Center, San Sebastian, Hiszpania,
- prof. Garnett Bryant, Joint Quantum Institute, University of Maryland and National Institute of Standards and Technology, Maryland, USA,
- grupa dr. Tobiasa Herr, Center for Free-Electron Laser Science, Deutsches Elektronen-Synchrotron DESY, Hamburg, Niemcy,

- dr Karolina Milenko (wcześniej NTNU, obecnie: Sintef, Norwegia),
- grupa prof. Saveria Pascazio, Aldo Moro University, Bari, Włochy,
- grupa prof. Wolframa Pernice'a, Karlsruhe Institute of Technology (obecnie: University of Münster, Niemcy),
- grupa prof. Szymona Pustelnego, Uniwersytet Jagielloński, Kraków,
- prof. Giuseppe La Rocca, Scuola Normale Superiore, Piza, Włochy,
- grupa prof. Carstena Rockstuhl, Karlsruhe Institute of Technology, Karlsruhe, Niemcy,
- dr Nora Tischler, Griffith University, Brisbane, Australia,
- grupa doz. Floriana Weigenda, Karlsruhe Institute of Technology, Karlsruhe, Niemcy,
- grupa prof. Sylwii Zielińskiej - Raczyńskiej, Uniwersytet Technologiczno - Przyrodniczy, Bydgoszcz.

VI. Informacja o osiągnięciach dydaktycznych, organizacyjnych oraz popularyzujących naukę

VI.1. Dydaktyka

- Prowadzę zajęcia dydaktyczne na WFAiIS UMK:
 - od roku akademickiego 2020/2021: wykład i ćwiczenia przedmiotu *Quantum Optics 1* (30 h + 30 h; język wykładowy: angielski),
 - w roku akademickim 2018/19 *Pracownia fizyczna 1* (90 h),
 - w latach 2016/17 i 2017/18 fragmenty (10 h) wykładu ogólnouniwersyteckiego *Mechanika kwantowa dla niefizyków*
 - 2016/17 i 2017/18 *Konwersatorium optyki kwantowej* dla zaawansowanych studentów i doktorantów,
 - ćwiczenia z przedmiotów:
 - Analiza matematyczna 1* (2018/19, 2019/20),
 - Algebra 2* (2018/19, 2019/20, 2020/21),
 - Analiza matematyczna 2* (2015/16),
 - Podstawy fizyki* (dla matematyków, 2015/16),
 - Podstawy programowania* (2015/16),
- przed uzyskaniem stopnia doktora prowadziłam ćwiczenia:
- Fizyka kwantowa 1* (2009/10 i 2010/11),
 - Algebra liniowa* (2009/10 i 2010/11),
 - kurs wyrównawczy z fizyki* dla studentów 1. roku (2009/10),
 - Fizyka ogólna IV (termodynamika)* (2008/09),
 - Matematyka elementarna* (2008/09).

- Wspólnie z prof. Jarosławem Zarembą, przygotowałam materiały dydaktyczne w formie skryptu do kursu *Quantum Optics 1*, dedykowanego anglojęzycznemu kierunkowi studiów *Physics and Astronomy* na WFAiIS UMK.
- Współpracuję ze studentami na wszystkich etapach studiów. Opiekuję się pracami
 - doktorskimi na UMK:
 - * jestem promotorem pomocniczym w przewodzie doktorskim pana mgr. Andrzeja Gajewskiego, uczestnika studiów doktoranckich przy Wydziale Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej (WFAiIS) UMK,
 - * jestem promotorem pomocniczym pani mgr Miriam Kosik, uczestniczki studiów doktoranckich przy WFAiIS UMK,
 - * jestem opiekunem pomocniczym w projekcie mgr. Piotra Gładysza w szkole doktorskiej nauk Ścisłych i Przyrodniczych Academia Scientaris Thoruniensis (AST),
 - * jestem opiekunem pomocniczym w projekcie mgr. Saeida Izadshenasa w AST,
 - magisterskimi na UMK: byłam promotorką prac
 - * pani Miriam Kosik (2017),
 - * pana Karola Karpińskiego (2018),
 - * pani Moniki Kubek (2019),
 - * pana Piotra Gładysza (2019),
 - magisterską na Friedrich-Schiller-Universität w Jenie, Niemcy - byłam opiekunem pomocniczym pracy magisterskiej pani Jiamin Hou (2014),
 - licencjackimi i inżynierskimi: byłam promotorką
 - * pracy licencjackiej pana Piotra Gładysza (2017),
 - * pracy inżynierskiej pana Rafała Sarniaka (2019).
- W pracy naukowej regularnie współpracuję ze studentami również z innych grup i innych ośrodków.
- Studenci, nad którym sprawowałam i sprawuję opiekę naukową są laureatami nagród i wyróżnień na poziomie ogólnokrajowym, lokalnym oraz na konferencjach studenckich i doktoranckich:
 - stypendium Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego w latach akademickich 2017/2018 i 2018/2019 (Piotr Gładysz),

- wyróżnienie za najlepszą pracę magisterską z fizyki WFAiIS UMK w roku akademickim 2016/2017 (Miriam Kosik), najlepszą pracę licencjacką na WFAiIS UMK w roku akademickim 2016/2017 (Piotr Gładysz), wyróżnienie za pracę magisterską w roku akademickim 2018/2019 (Piotr Gładysz),
- nagroda dla najlepszego studenta WFAiIS UMK w roku akademickim 2017/2018 oraz najlepszego absolwenta WFAiIS UMK w roku akademickim 2018/2019 (Piotr Gładysz),
- nagroda za najlepszą prezentację konferencyjną podczas XVI Ogólnopolskiej Sesji Kół Naukowych Fizyków, Wrocław 2017 (Piotr Gładysz), II nagroda za najlepszą prezentację na konferencji International OSA Network of Students (Balvanyos, Rumunia, 25-28 lipca 2017 r., Miriam Kosik).
- Recenzowałam 4 prace inżynierskie i licencjackie na WFAiIS UMK.
- Od stycznia 2020 jestem opiekunem oddziału studenckiego koła naukowego SPIE na UMK w Toruniu.

VI.2. Popularyzacja

W ramach działalności popularyzatorskiej:

- Prowadziłam wykłady i warsztaty przy okazji:
 - Warsztatów Nauczycieli Nauk Przyrodniczych organizowanych przez Stowarzyszenie Wspólnota Polska (2019),
 - dni otwartych WFAiIS UMK w ramach akcji Dziewczyny do Ścisłych (2018),
 - Toruńskiej Nocy Naukowców (wykład *Cząstki w skali nano: witraże XXI wieku*, 2017),
 - przed uzyskaniem stopnia doktora brałam udział w licznych akcjach popularyzatorskich, w tym koordynowałam, współorganizowałam, współtworzyłam materiały pomocnicze i prowadziłam pokazy fizyczne dla setek uczniów szkół i przedszkoli (m.in. akcje edukacyjne *Back to School*, *Lekcje Pokazowe z fizyki*, *Regionalne Koła Fizyczne*, *Matematyczne*, *Informatyczne*), współorganizowałam konkurs *Sztuka widzenia* na zabawkę dla dzieci słabowidzących, promowałam WFAiIS UMK (incl. queensparkfont VECTOR program: Increasing the Efficiency of Technical Education and Development of key fields of study) .
- Jestem (współ)autorką artykułów popularnych:

- K. Słowik, *Światelko w tunelu*, ACADEMIA-Magazyn Polskiej Akademii Nauk, 40-43 (2016),
 - F. Pyatkov, S. Khasminskaya, V. Fütterling, R. Fechner, K. Słowik, S. Ferrari, O. Kahl i in. *Carbon Nanotubes as Exceptional Electrically Driven On-Chip Light Sources*, <http://www.2physics.com/2016/10/carbon-nanotubes-as-exceptional.html>
 - A. Buksztel, J. Korociński, K. Słowik, M. Pelc, D. Bukowska, A. Górską-Pukownik, *Fizyk, czarownica i stara szafa*, *Fizyka w Szkole* 2/2013, 22-25 (2013).
- Brałam udział w programie popularnym *Trójwymiar* Polskiego Radia Trójka, pod red. Arkadiusza Ekierta (data emisji: 15 marca 2017).

VI.3. Organizacja

- Koordynowałam program letnich staży studenckich przy WFAiS UMK *The Toruń Astrophysics / Physics Summer Programme* TAPS 2018 (druga edycja). Przy tej okazji, przygotowałam wniosek a następnie kierowałam grantem *V4TAPS: Increasing V4 Student Mobility within the Toruń Astrophysics / Physics Summer Programme* w ramach konkursu na Granty Strategiczne Funduszu Wyszehradzkiego. W programie stażowym uczestniczyło 23 studentów z Polski i zagranicy wybranych spośród ponad 60 zgłoszeń. Strona programu: http://www.home.umk.pl/astro_conf/taps/taps2018/index.html
- Koordynowałam lokalnie (na WFAiS UMK) spotkanie/webinar Photonics Online Meetup, styczeń 2020.
- Współorganizowałam wystawę zdjęć prezentującą 70-letnią historię fizyki na UMK (2016).
- Jestem członkiem komitetu organizacyjnego konferencji *QSCP 2020 – 25th International Workshop on Quantum Systems in Chemistry, Physics and Biology*. Konferencja była pierwotnie zaplanowana i przygotowana na czerwiec 2020 jednak z powodu sytuacji pandemicznej została odsunięta w czasie i obecnie planowana jest na czerwiec 2021.
- Prowadziłam sesje naukowe (*chair of the session*) na konferencjach Quantum Optics IX, Gdańsk (2017), IEEE 7th International Conference on Photonics, Langkawi, Malezja (2018).

VII. Inne informacje dotyczące kariery zawodowej

Od końca stycznia 2014 do końca lutego 2015 przebywałam na urlopie macierzyńskim i rodzicielskim.

Karoline Stouk

(podpis wnioskodawcy)

Summary of Professional Accomplishments

I. Name: Karolina Maria Słowik

II. Diplomas, degrees conferred in specific areas of science

- 2012, PhD in Physics
Nicolaus Copernicus University in Torun, Poland (NCU)
PhD dissertation *Logic gates for light propagating and stored in an atomic medium in the tripod energy configuration*
supervised by Prof Andrzej Raczyński
- 2008, Master's Degree in Physics, NCU
master thesis *Storage and releasing of photons in an optically dressed medium in the "tripod" energy configuration*
supervised by Prof Andrzej Raczyński

III. Information on employment in research institutes or faculties

- from January 2016
assistant professor at the Institute of Physics, NCU
- May - October 2015:
researcher position at the Karlsruhe Institute of Technology (KIT), Karlsruhe, Germany
- October 2014 - December 2015
research and teaching assistant at the Institute of Physics, NCU
- August 2012 - May 2015
researcher position, Friedrich-Schiller Universität, Jena, Germany

IV. Description of the achievements, set out in art. 219 para 1 point 2 of the Act

IV.1. Title of the achievement:

Application of nanoantennas for the control of light-matter interactions at the nanoscale

IV.2. Research objectives, results and description of publications based on them, impact on future research

The scientific achievement described in this document is a generalisation of selected elements of the theory of atomic systems in resonance cavities, whereby the cavities are replaced by their nanoscopic counterparts - nanoantennas. Nanoantennas are particles usually made of noble metals that concentrate the energy of electromagnetic radiation into nanoscopic spatial regions, analogously to macroscopic antennas "tuned" to radio frequencies. Since excitations called plasmon polaritons play a significant role in this process, the research direction focused on their interaction with quantum systems is referred to as *quantum plasmonics*.

The research, whose results constitute the achievement described here, was commenced during my postdoctoral fellowship in the group of Prof Falk Lederer at the Friedrich Schiller University in Jena (Germany). The group's expertise included the subject area of solid state optics, particularly plasmonics, which they studied and described at the level of classical electromagnetism. I joined the group as a specialist in the field of quantum optics and atomic physics. The cooperation - in my opinion, instructive and enlightening for both parties - allowed us to develop and apply a new methodological framework based on the theory of atomic systems in the resonance cavity, used to study problems at the interface of the fields mentioned above. We continued this research at the Karlsruhe Institute of Technology in Germany, where part of the group moved under the supervision of Prof Carsten Rockstuhl, and where I realised another postdoctoral fellowship. Finally, the research on interactions beyond the electric dipole approximation was carried out partly in cooperation with the group of Carsten Rockstuhl, after my return to the Nicolaus Copernicus University in Toruń.

IV.2.1. Introduction and research motivation

The influence of nanoparticles on interactions of light with atomic systems is particularly strong when the nanoparticles are made of metal, due to the presence of "free" electron

gas whose collective movement is referred to as a plasmonic resonance [R1]¹. Plasmonic excitations are associated with strong spatial confinement of electromagnetic energy in the area of the so-called near field, i.e. at a distance from the surface smaller than the electromagnetic wavelength [R2]. As a consequence, if atomic systems are positioned at the field hotspots, they interact with the field very strongly [R3]. The unprecedented strength of these interactions means that the phenomena known from the cavity quantum electrodynamics of atomic systems can be implemented near nanoparticles under unique conditions: in an "open cavity" that corresponds to a nanoparticle, spatially at the nanometre scale, at picosecond time scales, and finally - with electromagnetic fields, not just strong, but also rapidly changing in space. Among the mentioned interesting phenomena, one can list the effects related to high field intensity, e.g. modification of the emission properties of atomic systems or the strength of their interactions [R4, R5, R6], [H1]. On the other hand, the rapid spatial modulations of the electromagnetic field intensity provide conditions in which the electric dipole approximation - used almost paradigmatically in quantum optics - ceases to be applicable. Then, it becomes necessary to take into account the corrections that arise due to higher-order multipolar moments [R7, R8], [H2]. These corrections may have an impact on the phenomena mentioned above, which is not purely quantitative. On the contrary: the interference of various multipole transition channels can lead to optical activity, in particular circular dichroism, which originates through the interplay of, for example, electric and magnetic dipoles [R9], [C1], as well as to an interference-based suppression of spontaneous emission [H3]. The analysis of the quantitative and qualitative influence of nanoantennas on the phenomena mentioned above, using analytical and numerical methodology framework constructed and adapted for this purpose, is the subject of the fundamental research, the results of which contribute to my habilitation achievement.

The practical motivation for the development of quantum plasmonics is the perspective of transferring quantum-optical experiments from large optical tables to microscopic chips and, consequently, the miniaturisation of optical devices based on them [R10, R11, R12]. Nanoparticles interacting with atomic systems may constitute elements of integrated photonic circuits, in particular sources of light with nonclassical statistical properties, which may be used to carry quantum information [R13, R14], [H4, H5]. Nanoparticles may provide conditions for addressing single molecules or quantum dots at the picosecond timescale and processing their state and thus the quantum information stored in it [R12]. Nanoparticles can improve the sensitivity of molecule sensors [R15], [H6] by many orders of magnitude, including dangerous substances, disease markers or even viruses. They can be

¹There are three types of citations in the document: references marked with R, e.g. [R1], refer to works by other authors; works marked with the letter H make up the habilitation achievement, and the remaining works of the candidate are marked with the letter C

used in spectroscopic applications, to improve the sensitivity of the detection and discrimination of molecules already at extremely low concentrations [R16, R17], to distinguish molecules with opposite chiralities [R18], [C1] - which is important in medicine and cosmetology, as well as to control the spectral linewidths of molecules [R19]. Nanoparticles are used in microscopy, optoelectronics, solar energy conversion, etc. [R20, R21]

Below I provide a short introduction to the physical origins of the discussed phenomena: on the one hand plasmonic excitations, and on the other hand electrodynamics of atomic systems in resonant optical cavities. I will comment on the conditions of applicability of the electric dipole approximation. Finally, I will discuss the content of the articles that contribute to the habilitation achievement.

Plasmonic excitations The phenomenon of the field energy concentration in small spatial domains is related to the transformation of radiation energy into the energy of charge movement in the volume of the metal and further into the so-called energy of the electromagnetic near field, generated by the moving charge. The process is analogous to the one that occurs in macroscopic antennas. Hence, the term *nanoantennas* was coined [R22, R23], used in the context of nanoparticles operating as receivers: for field concentration, or on the contrary - as emitters for the conversion of localised electromagnetic energy into radiation (Fig. 1).

If a traditional antenna operates in emitter mode, the current corresponding to the movement of the free electrons in a metal is a source of radiation. When it acts as a receiver, an electromagnetic wave illuminating the structure stimulates the movement of charges that is normally measured in an electric circuit. In the case of nanoantennas and their applications relevant to this work, the cause of the movement of electrons in the emitter mode is usually a tiny oscillator positioned in the near field, e.g. a classical dipole or its quantum equivalent - an atomic system with a dipole transition between a pair of energy levels. When using a nanoantenna in the receiver mode, the near field, strongly concentrated at the ends of the antenna, is exploited to excite the atomic system. A diagram of a nanoantenna operation as a mediator between radiation and a localised source is shown in Fig. 1.

The optical response of both macroscopic antennas and their nanoscopic counterparts has a resonance character. Under resonance conditions, a collective movement of the electron cloud in the metal is induced, referred to as a plasmonic resonance. Its spectral position is determined by the nanoantenna shape, size, material properties and the environment [R24].

Plasmonic excitations are accompanied by resonantly enhanced polarisability, which describes the nanoantenna-induced multipolar electric and magnetic moments, as well

as the corresponding increased absorption and scattering cross-sections [R24]. Moreover, plasmonic excitations are associated with a strong amplification of the electromagnetic field near the metal surface. Then, *surface plasmon polaritons* are created - in analogy to polaritons known from solid-state theory: hybrid quasiparticles combining elements of excitons and electromagnetic fields. Surface plasmon polaritons are hybrids composed of a plasmon and an electromagnetic field (Fig. 2). The excitations propagate along the metal-dielectric interface [e.g. along a nanowire, Fig. 2(a)], or are localised in the form of a standing wave when the metal surface is closed [e.g. on the surface of a nanoantenna, Fig. 2(b, c)] [R1]. Particularly strong field enhancements accompany plasmon polaritons excited in narrow gaps between adjacent nanoantennas [Fig. 2(d)].

In a simplified picture, in the case of macroscopic antennas, the resonance condition is related to matching the frequency of sinusoidal oscillations of an excited electron cloud and the length of the antenna along the direction of its movement [R2]. Then, the length of the antenna corresponds to the order of magnitude of the electromagnetic wavelength for which the antenna is resonant. Interactions with atomic systems occur at the optical domain. According to the above reasoning, we expect resonances in the visible range for antennas with sizes of the order of hundreds of nanometres. However, it turns out that in the case of nanoantennas, the material effects play an essential role for the resonance

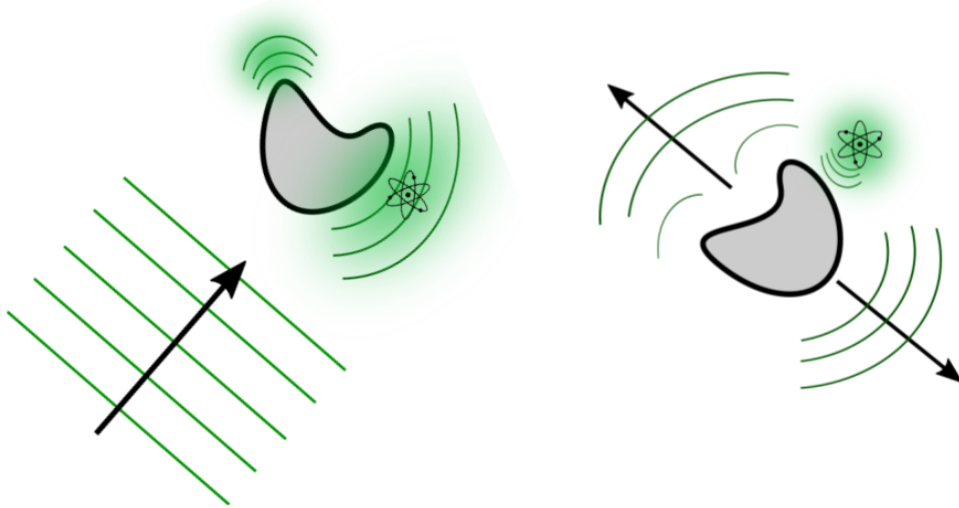


Fig.1 Left panel: Nanoantenna (in grey) as a receiver, illuminated by a resonant plane wave, concentrates electromagnetic energy near its surface. An atomic system positioned in the volume of high field intensity interacts with the field more strongly than it would interact with a plane wave in the absence of the nanoantenna.

Right panel: nanoantenna as an emitter that converts the energy of a localised source (e.g. an atomic system) into radiation emitted into the far field. The efficiency and directionality of the emission depends on the geometric and material parameters of the nanoantenna.

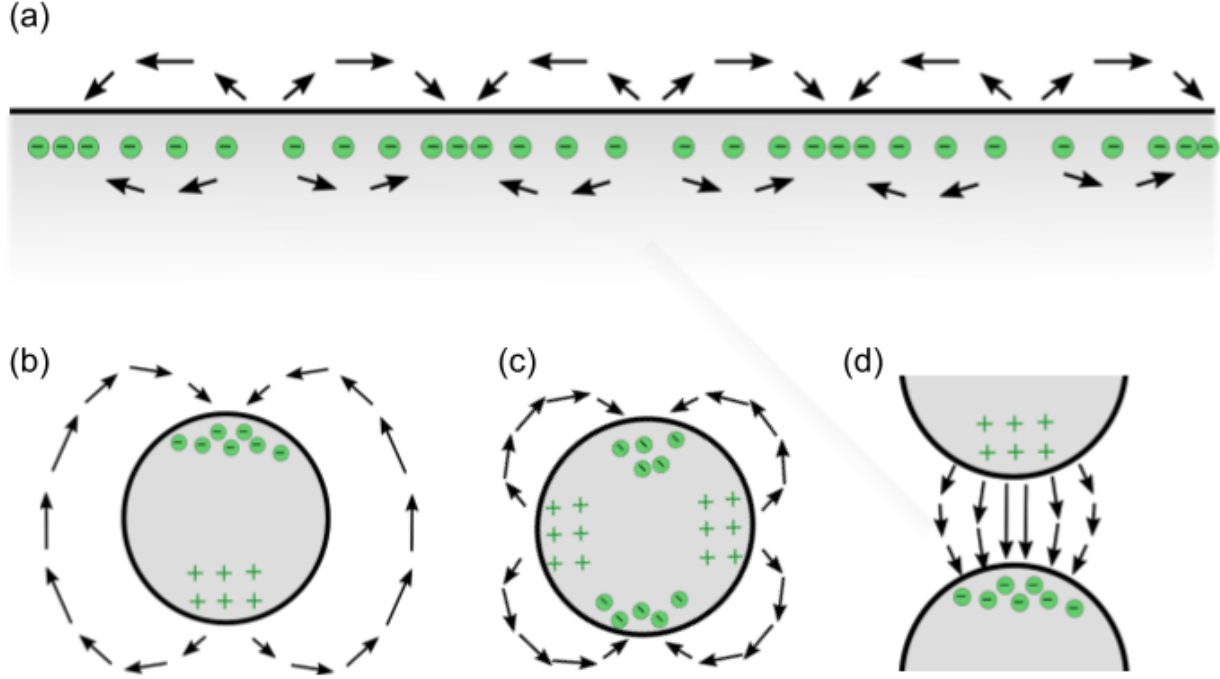


Fig.2 Surface plasmon polariton is a hybrid excitation, combining the collective movement of the electron cloud and the electromagnetic field with a longitudinal component.

(a) The polariton can propagate along the metal - dielectric interface, where local density peaks and dips of the electron cloud are formed. They correspond to the distribution of the electric field marked schematically with arrows arranged along the field lines. The field is strong at the interface and decays evanescently in the perpendicular direction [R1].

(b, c) When the media boundary makes a closed surface, the polariton takes the form of a standing wave, giving rise to a localised plasmon polariton. The figure shows a diagram of the distribution of charges and fields for a dipolar (b) and a quadrupolar (c) plasmonic resonance.

(d) Plasmon polaritons excited in adjacent nanoantennas correspond to particularly strong amplification of electromagnetic fields in the gap region between the nanoparticles.

position, and the estimation of the size by the wavelength leads to the correct order of magnitude but is relatively coarse.

A result illustrating the influence of the optical properties of the material on the location of plasmonic resonance can be obtained on the basis of the Mie theory. The theory describes the optical response of spherical objects to illumination with a plane wave, in terms of induced multipolar moments [R25], that determine the electromagnetic field scattering and absorption spectra by the nanosphere [R24]. For a particle with the radius a , made of a dispersive material with relative electric permittivity $\epsilon_m(\omega)$, the dipole moment \mathbf{d} induced by a plane wave with frequency ω and field of amplitude \mathbf{E} , is expressed as [R1]

$$\mathbf{d}(\omega) = \epsilon_0 \epsilon_m(\omega) \alpha(\omega) \mathbf{E}, \quad (1)$$

where ϵ_0 stands for the vacuum electric permittivity, $\alpha(\omega)$ is the *polarisability* function which takes the form [R1]

$$\alpha(\omega) = 4\pi a^3 \frac{\epsilon_e - \epsilon_m(\omega)}{2\epsilon_e + \epsilon_m(\omega)}, \quad (2)$$

with ϵ_e representing the relative permittivity of the medium. Typically, ϵ_e depends slowly on ω , hence, its frequency dependence is ignored in notation, but strictly speaking, it should be taken into account: $\epsilon_e = \epsilon_e(\omega)$.

Equation (2) implies that a plasmonic resonance is achieved if

$$\text{Re}[2\epsilon_e + \epsilon_m(\omega)] = 0. \quad (3)$$

In particular in air, for which one can approximate $\epsilon_e \approx 1$, the resonance occurs for $\text{Re}[\epsilon_m] \approx -2$. The negative values of the real part of the electric permittivity are characteristic for metals, described to a good approximation by the Drude model $\epsilon_m \rightarrow \epsilon_{\text{Drude}}$, where [R1]

$$\epsilon_{\text{Drude}}(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + i\gamma_p\omega}, \quad (4)$$

and ω_p and γ_p are material-dependent constants. The values of $\epsilon_m \approx -2$ are achieved in the visible range, e.g., by silver and gold, and in the near infrared by aluminum [R23].

Note, however, that the spectral position of the resonance described by equation (3) does not depend on the size of the sphere. The approximation of the nanosphere optical response with only the dipole term of the Mie theory (1) is correct for nanoparticles with sizes much smaller than the excitation wavelength $a \ll \lambda = \frac{2\pi c}{\omega}$, where c is the velocity of light in vacuum (more generally: in the medium with the electric permittivity ϵ_e). It is based on the assumption that the field induced inside the sphere is constant, and the retardation effects do not play any role (assumptions known as the *electrostatic approximation*). In the case of larger nanoparticles, with dimensions of several dozen nanometres, these assumptions are not met; multiple multipolar terms contribute to the optical response of the nanoparticle, and the respective expansion coefficients depend on the size of the nanoparticle, e.g. on the radius of the sphere in the Mie theory [R25]. As a result, the positions of the successive multipolar resonances are redshifted as the size of the nanostructure increases. Resonances in the optical domain are obtained, e.g., for gold spheres with a size of several dozen nanometres.

Even more generally, the position of the resonance in the scattering or absorption spectra, and the spatial distribution of the electromagnetic field scattered by the nanoparticle, depend on its shape and the type of illumination (e.g. plane wave with a given polarisation, dipole with a given orientation) [R24], [H7]. In general, analytical expressions for these quantities are not known: they are found numerically by solving Maxwell's equations.

This approach has been adopted in most articles included in the achievement described here. Typically, field concentration in spatial volumes of sizes of the order of up to a few tens of nanometres was found, with the corresponding local field enhancement of about two orders of magnitude. Based on the calculated scattering and absorption spectra and field distributions for a given illumination type, the parameters of the quantum dynamics equations described below were calculated.

Atomic systems in resonance cavities The term *atomic system* refers here to a model quantum system with a small number of discrete energy levels, usually two or three. This simple model can represent an atom, a molecule, a quantum dot, a solid-state defect, etc., assuming that other energy levels of these systems are sufficiently detuned or their corresponding eigenstates are unavailable due to selection rules. This section presents the basics of the theory of atomic systems in a resonant cavity. This methodology has been used in the works that contribute to the achievement, to describe the dynamics of the coupling of atomic systems with plasmon polaritons ². A class of particularly interesting problems, investigated as part of the achievement, concerns cases in which the quantum nature of light plays a significant role: the quantum statistical properties of the field emitted by the proposed sources were analysed [H4, H5], the spectral properties of the atom-field system in dressed states [H6] were investigated, changes in the emission properties of atomic systems under the influence of interaction with a photonic vacuum [H2], were characterised, etc.

Resonance cavities can be conveniently described in terms of eigenmodes, i.e. solutions of wave equation at the absence of sources. The modes, indexed with a set of parameters μ , evolve in the stationary manner, with the time-independent vectorial mode function $\mathbf{f}_\mu(\mathbf{r})$, confined in the cavity volume. The mode functions determine the electric field operator

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = \sum_{\mu} \mathbf{f}_\mu(\mathbf{r}) (a_\mu + a_\mu^\dagger). \quad (5)$$

In the above equation, a_μ and a_μ^\dagger are the photon annihilation and creation operators in the mode μ , and the mode functions were assumed real for simplicity, although in general, they can be complex (then, the form of the above formula should be generalised so that the field operator is Hermitian). In equation (5), the mode function $\mathbf{f}_\mu(\mathbf{r})$ has been normalised so that it corresponds to the *single-photon* field in the mode μ , evaluated at position \mathbf{r} . Among many cavity modes, the one with the frequency resonant (or almost resonant) with the transition frequency of the atomic system interacts with this system most strongly. If

²The phrases "interaction of atomic systems with light in the vicinity of nanoantennas" and "interaction of atomic systems with surface plasmonic polaritons", are interchanged in the text. This is justified because the energy exchange occurs between the atomic systems and the electromagnetic part of the polariton.

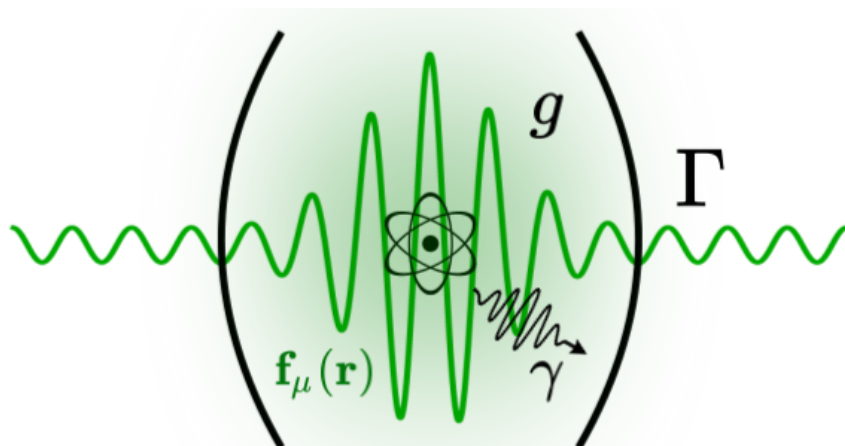


Fig.3 Scheme of a macroscopic resonance cavity. The spatial profile of the transverse component of a selected field mode $\mathbf{f}_\mu(\mathbf{r})$, resonant with the atomic transition, is sketched with the green line. The field energy is concentrated inside the cavity, and the atomic system is positioned in the area of the highest field strength. The interaction strength of the atomic system and the selected field mode is g . The field is scattered through the semi-transparent mirrors at a rate Γ . An atomic system can spontaneously emit photons at the rate γ . Note: the field modes are well defined if the loss rate $\Gamma \ll \omega$, where $\hbar\omega$ is the photon energy in the cavity mode.

the detuning of other modes is much larger, the single-mode approximation is justified.

The elementary act of interaction of a single field mode with a two-level atomic system describes the absorption or emission of a photon by this system, accompanied by its excitation or de-excitation, respectively. These phenomena are described by the Jaynes-Cummings Hamiltonian [R4]

$$H_{\text{JC}} = \hbar g (|e\rangle\langle g| a + a^\dagger |g\rangle\langle e|), \quad (6)$$

where \hbar is the reduced Planck constant, g stands for the coupling strength of a single photon with the atomic transition, and the atom flip operators $|l\rangle\langle k|$ describe the atomic transition from the state $|k\rangle$ to the state $|l\rangle$, with $|g\rangle$ and $|e\rangle$ corresponding to the ground and excited state, respectively. Due to the single-mode approximation, the index μ has been omitted. Description of problems with greater numbers of modes, atomic systems or active transitions requires a straightforward generalisation of the above formalism, where the corresponding contributions should be added. The coupling energy is usually expressed in the electric dipole approximation as $\hbar g = -\mathbf{f}(\mathbf{r}_0) \cdot \mathbf{d}_{eg}$, where \mathbf{d}_{eg} is the matrix element of the transition electric dipole moment operator, evaluated between the excited and ground states, and \mathbf{r}_0 represents the position of the atomic system. In the remaining part of the text, g is assumed to be positive.

Apart from the energy exchange between the atom and field subsystems, dissipative pro-

cesses may occur in the described problem, such as energy dissipation of the atomic system through the spontaneous emission process, the leakage of field energy on semi-transparent mirrors, decoherence induced by collisions of the atomic system with surrounding atoms, coupling of crystalline lattice defects with phonons, or even decoherence due to optical pumping [R26]. These effects can be captured in the master equation that describes the evolution of the system of the atoms and the quantum field [R4]

$$\dot{\rho} = -\frac{i}{\hbar} [H, \rho] + \mathcal{L}(\rho). \quad (7)$$

Here, the Hamiltonian H contains the free part, describing the evolution of uncoupled subsystems, and their interaction, in particular treated with the Jaynes-Cummings model (6). The Lindblad term $\mathcal{L}(\rho)$ accounts for the dissipation. Its detailed form and properties are discussed, e.g., in reference [R4]. The listed processes are schematically shown in Fig. 3.

Strong and weak coupling Radiation "loss" through the mirrors of the resonance cavity leads to broadening of the cavity spectral lines to a finite width, described by the Lorentzian profile with the full width at half maximum Γ [R4]. Similarly, an atomic system has a finite excited-state lifetime γ^{-1} related to the spontaneous emission rate γ . (Throughout the text, the spontaneous emission rate in free space is denoted as γ_0 , in contrast to the more general quantity γ that may be modified, e.g., by the presence of cavities or nanoantennas.) Depending on the ratio of the coupling strength g and the loss rates, strong (for $g > \Gamma, \gamma_0$) and weak coupling regimes (otherwise, i.e. if the rate of at least one loss channel outweighs the coupling constant) [R4]. Typical dynamics of systems in the strong and weak coupling regimes is shown in Fig. 4. In the case of strong coupling, the dominant value of the interaction constant g is responsible for multiple acts of energy exchange between subsystems before it is dissipated to the environment. Under weak coupling conditions, the energy of the initially excited subsystem is relatively quickly dissipated to the environment so that no energy exchange between the atomic and the field subsystems can occur. Strong coupling is associated with the modification of the spectra of the coupled system, known under various names in different communities: as hybridisation of field and atomic system resonances, or as the occurrence of an entangled state of the field and the atom, known in this context as a dressed state. The characteristic Rabi splitting in the absorption spectrum, or Mollow triplets in the emission spectrum [R27], suggest potential applications of the phenomenon for the detection of molecules or crystalline defects [R28], [H6]. Moreover, the energy exchange rate enables fast addressing of the molecules by the field, imprinting on them the quantum information carried by the photon, followed by equally fast processing and readout. The formation of dressed states of light and matter, whose energy varies with each additional photon, can be used to create extremely low-power

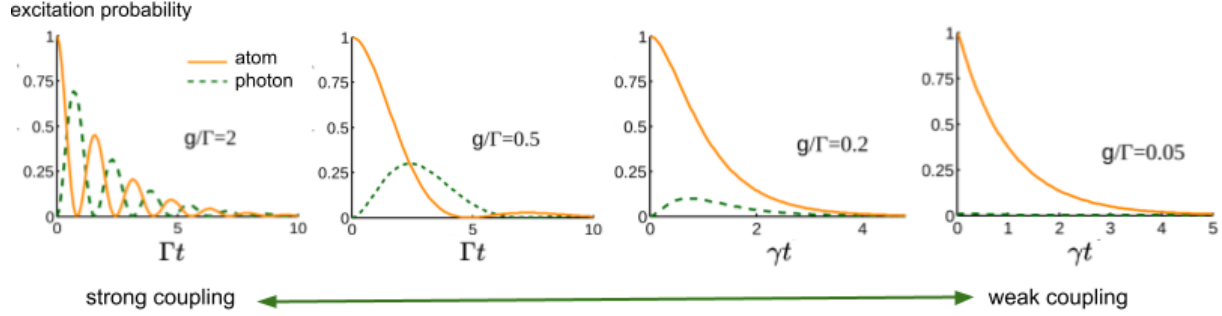


Fig.4 Evolution of a two-level atomic system (atom) and a field mode (photon) under conditions of decreasing coupling strength to dissipation rate ratio. The subsystems exchange energy according to the Jaynes-Cummings Hamiltonian with the coupling constant g (6). The dissipation rate of the field mode is Γ . Spontaneous emission of the atomic system $\gamma_0 = 0$ was neglected. The solid orange line is the occupation probability of the excited state of the atomic system. The dashed green line is the expectation value of the number of photons in the field mode.

As the coupling constant g decreases (or equivalently, as the dissipation rate Γ increases), the dynamics changes its character: the damped Rabi oscillations, visible in the conditions of strong coupling, gradually turn into an exponential decay of the excited state probability of the atom, with the effective decay rate $\gamma = \frac{4g^2}{\Gamma}$. The result described by exponential decay, with the rate determined by the presence of a weakly coupled resonance cavity, illustrates the Purcell effect.

optical switches. Strong coupling conditions affect the speed of chemical reactions, Raman scattering efficiency, and non-radiative energy transfer efficiency between molecules in the cavity [R29].

The characteristic phenomenon of the weak coupling regime is the Purcell effect, in which the effective spontaneous emission rate of the atomic system in the cavity is modified with respect to the free-space value [R30]. The physical basis of this phenomenon will be explained briefly below. In particular, the high rate at which the energy is dissipated outside the system allows the phenomenon to be exploited, for example, to generate nonclassical light: The time of photon emission from an excited atomic system becomes much shorter than the time needed to re-excite this system. This means that only one photon can be generated at a time. The mechanism of generating single-photon states with the use of a two-level atomic system has been known, but near nanoantennas, the emission occurs at picosecond timescales, and the time intervals between subsequent photons can be controlled by the intensity of the pump, e.g. in the form of a laser beam. This allows the obtainment of nonclassical light sources, bright in terms of the number of photons per unit time, and "of good quality" in terms of statistical properties, [H4].

Purcell effect refers to the modification of the spontaneous emission rate depending on the density of photonic states in the environment. Spontaneous emission results from the interaction of the atomic system with a continuum of electromagnetic modes in the vacuum state. As a result of this interaction, the energy of the excited atomic system is transferred to the electromagnetic field. This is accompanied by the exponential decay of the excited state population [R4]. The decay is quantitatively described by the spontaneous emission rate, whose form in the electric-dipole approximation reads as

$$\gamma = \frac{\pi\omega_{\text{eg}}}{\hbar\epsilon_0} |\mathbf{d}_{\text{eg}}|^2 \rho(\mathbf{r}_0, \omega_{\text{eg}}), \quad (8)$$

where $\hbar\omega_{\text{eg}}$ is the energy of the atomic transition, and $\rho(\mathbf{r}_0, \omega_{\text{eg}})$ describes the local density of photonic states at position \mathbf{r}_0 , around the transition frequency. The density of states depends on the environment so it can be modified in the dispersive media, resonance cavities, interfaces or nanoantennas. In vacuum, expression (8) simplifies to the Weisskopf-Wigner rate [R4]. In a weakly coupled cavity with a Lorentzian mode of full width at half maximum Γ , resonantly tuned to the atomic transition, the modified spontaneous emission rate is $\gamma = \frac{4|g|^2}{\Gamma}$ (see Fig. 4). The result (8) can be derived in the Markovian approximation [R31]. In parallel, an additional result is obtained of a frequency shift of the atomic transition due to the atomic interaction with the vacuum field [R4], referred to as Lamb shift in analogy to the famous [R32] effect. Like the spontaneous emission rate, the Lamb shift value depends on the photonic environment, which suggests the potential for tuning the atom by changing the cavity parameters [R33]. The problem can be further generalised by considering multiple atomic systems immersed in the same photonic environment. Then, an additional elegant result is obtained in the Markov approximation: an effective Hamiltonian can be derived that describes the dipole-dipole interactions between atomic systems and the effective Lindblad term corresponding to the phenomenon of superradiance [R5], [H1, H2].

Nanocavities: analogies and differences between macroscopic cavities and nanoantennas The electromagnetic radiation in a resonance cavity is quantised - only the field modes are allowed, which are solutions of the wave equation without sources, with boundary conditions that account for the shape of the cavity. If relevant, the equations can take into account the material of the cavity or resonator in general (e.g. in a photonic crystal / dielectric microdisk resonator, etc.). Likewise, plasmon polaritons at the nanoantenna surface can be quantised. The polaritons are described by the wave equation, conveniently expressed in the frequency domain. This equation contains information about the shape of the nanostructure and the dispersion of the material, accounted for in the position- and

frequency-dependent electric permittivity function of the medium $\epsilon(\mathbf{r}, \omega)$ [R34]

$$\nabla \times \nabla \times \tilde{\mathbf{f}}_\mu(\mathbf{r}) - \frac{\tilde{\omega}_\mu^2}{c^2} \epsilon(\mathbf{r}, \tilde{\omega}_\mu) \tilde{\mathbf{f}}_\mu(\mathbf{r}) = 0, \quad (9)$$

where $\tilde{\mathbf{f}}_\mu(\mathbf{r})$ is a mode function³ at the complex frequency $\tilde{\omega} = \omega_\mu + i\Gamma_\mu$, whose real part ω_μ is the spectral position of the mode (plasmonic resonance), while the imaginary part Γ_μ describes the loss (i.e. the electromagnetic energy absorption and scattering in the given mode). The losses are high: the electromagnetic field is confined close to the metal surface, but due to the "open" character of the cavity, the lack of physical barriers leads to a significant radiative loss rate $\Gamma_{\mu,\text{rad}}$, responsible for scattering into the far field. The absorptive loss mechanism in the metallic nanoantenna material is equally strong, with absorption rates $\Gamma_{\mu,\text{abs}}$ of the same order of magnitude as the scattering loss. In macroscopic cavities, on the contrary, absorption is negligible. For nanoantennas considered in the works contributing to the achievement, the typical orders of magnitude are $\omega_\mu \sim 10^{15} \frac{\text{rad}}{\text{s}}$, $\Gamma_\mu = \Gamma_{\mu,\text{abs}} + \Gamma_{\mu,\text{rad}} \sim 10^{13} - 10^{14} \frac{\text{rad}}{\text{s}}$. For comparison, in high-quality optical cavities, the ratio of $Q = \frac{\omega_\mu}{\Gamma_\mu}$ may exceed 10^{10} [R35]. Due to the presence of strong dissipative mechanisms, the quantisation procedure of the solutions of the wave equation (9) is non-trivial. In macroscopic cavities, this problem is not severe because losses are many orders of magnitude lower than mode frequencies and can be neglected in the quantisation. As a result, so-called normal modes are found - orthogonal eigenmodes of the cavity. In the case of nanoantennas, the lossy modes are called *quasinormal* and require a special normalisation procedure due to the strong energy dissipation into the far field [R36]. Example methods of quantisation of plasmon polaritons are described, e.g., in the article [R37], where losses are treated phenomenologically, and in the work [R34], where full quantisation of quasinormal modes is performed, with boundary condition corresponding to outcoupled radiation. Finally, the optical response of a given nanostructure can be very well approximated by a small number (from one to a few) of quantised, spectrally broad Lorentzian modes. The number of experiments demonstrating the quantum nature of plasmons is so far small, but it is worth to note the experiments showing that the transformation photon - plasmon polariton - photon retains the nonclassical properties: i.e. the statistics expressed in terms of the second-order correlation function [R38], and polarisation entanglement [R39].

Traditional cavities are used, most of all, for the purpose of concentration of field energy in a certain spatial region. Nanoantennas focus energy in the near field, so the confinement in the optical domain occurs in subwavelength volumes of sizes ranging from a few to a few tens of nanometres. In traditional cavities, the theory predicts the Lorentzian lineshapes.

³The symbol $\tilde{\mathbf{f}}_\mu(\mathbf{r})$ is used in analogy to $\mathbf{f}_\mu(\mathbf{r})$ which denotes the mode functions in traditional cavities. However, as described below, the functions $\tilde{\mathbf{f}}_\mu(\mathbf{r})$ correspond to quasinormal modes, and their properties differ in details from those of standard mode functions.

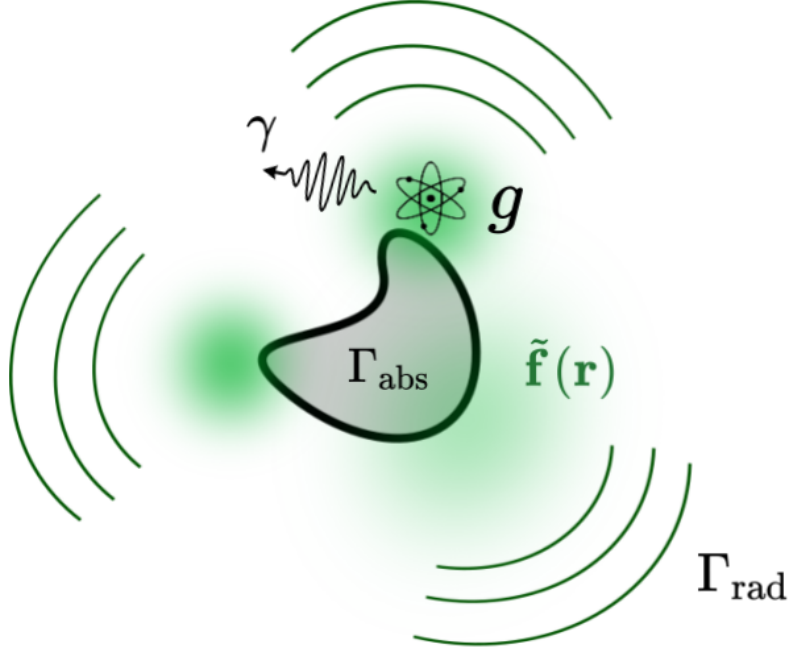


Fig.5 Nanoantenna as a resonance cavity: the shape of the mode function $\tilde{\mathbf{f}}_\mu(\mathbf{r})$ describes the spatial dependence of the field in a given mode in the nanoantenna's surroundings. Its value at the position of the atomic system determines the coupling strength g . The open character of the "cavity" is the reason for the typically high values of the radiation loss rates Γ_{rad} . Additionally, there is a strong absorption in the metallic material of the nanoantenna, described by the rate Γ_{abs} . The atomic system is subject to spontaneous emission at the rate γ .

In the case of nanoantennas, the predicted [R34] and observed [R40] modes have relatively broad Lorentzian or Fano profiles, corresponding to the isolated modes and pairs of interacting modes, respectively (the interaction is possible due to their quasi-normal character and the spectral overlap). The spatial field confinement is accompanied by the corresponding enhancement of its intensity. For this reason, the light-matter interaction strength, both in traditional cavities and in the vicinity of nanoantennas, is increased with respect to the free-space coupling: in the electric dipole approximation, the enhancement of the interaction strength is proportional to the electric field enhancement in the cavity. However, the approximation is justified when the spatial scale of electromagnetic field modulations is much larger than the size of the atomic system. With such strong field confinement, this condition may not be met, which may entail the necessity to go beyond the electric dipole approximation when describing the light - matter interaction in the vicinity of nanoantennas.

In macroscopic cavities the coupling strengths g from equation (6) are typically of the order of MHz, while near nanoantennas they reach from fractions to tens of THz, exce-

eding even the interaction strengths achieved in photonic crystal cavities [R41]. Despite the unprecedented values of the light-matter coupling strengths, nanoantennas usually operate in the weak coupling regime: in a typical case, the absorption and radiative scattering rates exceed the large values of the coupling constants. According to the expression $\gamma = \frac{4|g|^2}{\Gamma}$, the resulting Purcell factors $\frac{\gamma}{\gamma_0}$, i.e. the ratios of the spontaneous emission rates near the nanoantenna and in free space, reach impressive values of up to three orders of magnitude [R19]. Large coupling constants and Purcell factors indicate short timescales of the dynamics of atomic systems in the nanoantenna surroundings, g^{-1} and γ^{-1} , respectively, of the order of nano- and even picoseconds, compared to microseconds typical of macroscopic cavities. Figure 5 schematically illustrates the processes present in the dynamics of atomic systems in the vicinity of nanoantennas, in analogy to the dynamics in the resonance cavity shown in Fig. 3.

The above description of analogies and differences between traditional cavities and nanoantennas ends the introduction to the subject of the habilitation achievement. Below, I present the achievement itself and briefly discuss the content of the nine contributing articles [H1-H9].

IV.2.2. Results and description of publications based on them

The themes discussed above intertwine in the works that make up this habilitation achievement. For this reason, I will discuss the papers not chronologically, but in thematic groups, concerning the problem of achieving the conditions of strong coupling, the problem of sources of nonclassical light, the problem of controlling the quantum state of the system, and the problem of corrections beyond the electric dipole approximation in the description of light-matter coupling successively.

The methodological framework developed to describe the interactions of atomic systems with the electromagnetic field in the nanoantenna vicinity has been summarised in the article [C2]. The approach consists of several steps

1. characterisation of the optical properties of the given nanoantenna, determined by the absorbed and scattered power spectra, and by the electromagnetic field distribution for a given type of illumination (e.g. illumination with a plane wave representing a laser beam, or a dipole source - a model of an atomic system); fit of the nanoantenna spectra with Lorentz and Fano curves,
2. extraction of parameters of the master equation on the basis of field distributions and fitting parameters (Fig. 6): resonance frequencies ω_μ , their widths in the absorption

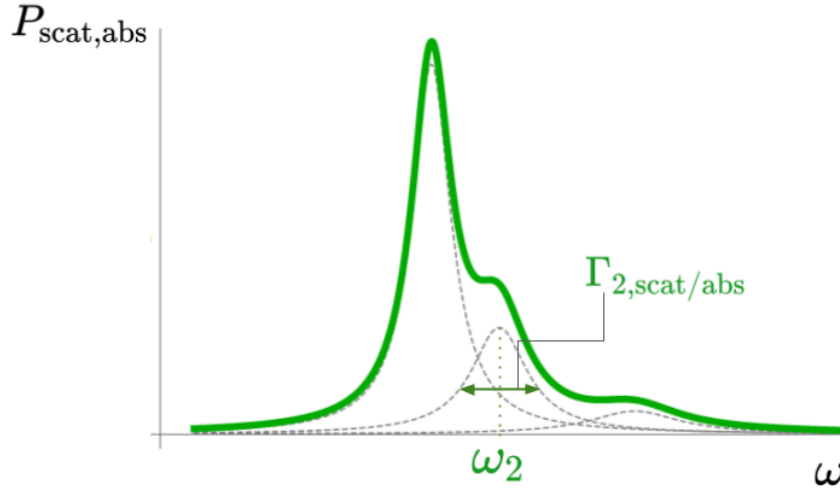


Fig.6 Sketch of the scattered or absorbed power spectrum of a multimode nanoantenna (green curve). The spectrum can be represented by a sum of three Lorentz resonances (each marked with a dashed line). The spectral position ω_2 of the middle one is marked, as well as its full width at half maximum $\Gamma_{2,\text{scat/abs}}$. The method to determine the g_μ coupling strengths, depending on the atomic system's optical properties and position with respect to the nanoantenna, is more complex and is described in detail in reference [H7].

$\Gamma_{\mu,\text{abs}}$ and scattering spectra $\Gamma_{\mu,\text{rad}}$, and the coupling constant g_μ of a single photon in the given mode μ with a selected transition in an atomic system, and

3. solving the master equation with the Hamiltonian dependent on ω_μ and g_μ , and the Lindblad term dependent on Γ_μ ; this step may include analytical considerations, leading to an effective description in a smaller Hilbert space, with a set of parameters with a simple physical interpretation.

This approach has been used in a large part of the works included in the achievement. Based on selected examples, very good agreement of the results according to the above method with those of the method of quasinormal modes was demonstrated.

The calculations related to the characterisation of nanoantennas are based on solutions of the classical scattering problem and were performed by my co-authors, most of all by the students Jakob Straubel and Robert Filter. The method of extracting from their results the parameters of the master equation was developed together and is a result of comprehensive discussions. Analytical and numerical calculations related to the dynamics of hybrid systems - with atoms and quantised electromagnetic field, were performed by myself or under my supervision. Students at various levels were always involved in this research and often performed large parts of calculations. Therefore, they have been exposed as the first authors of the resulting articles. I have adopted this policy and implement it in



Fig.7 Sketch of geometry favourable to achieve the conditions of strong coupling, as discussed in the article [H6]. The field enhancement is strong in the gaps between the nanoparticles. The elongated shape of the nanoparticles is responsible for the strong confinement of the field at the prolate endings. Multiple atomic systems can be used to coherently enhance their interaction with the field.

cooperation with students in Toruń. As customary, e.g., in the quantum optics community, the place of the last author, who I am in most of the presented works, traditionally belongs to the person who coordinates the project and is responsible for it in general.

Strong coupling Achieving the conditions of strong coupling of atomic systems with the field around nanoantennas brings the perspective of miniaturisation of optical devices, which are traditionally implemented in macroscopic resonance cavities: sensors with sensitivity even at the level of single molecules, sensitive optical switches at the nanoscale, fast and spatially precise platforms for state control of single molecules, and many others. Moreover, the realisation of strong coupling near nanoantennas requires the interaction strengths to overcome the enormous scattering / absorption rates of the antenna. In comparison, the temperature-induced decoherence in atomic systems is negligible (related loss rates are smaller by many orders of magnitude). As if "for free", the requirement of cryogenic temperatures, obligatory for the vast majority of other cavities, ceases to be critical here. Research towards achieving a strong coupling at the nanoantenna surroundings is therefore strongly motivated, and the work [H6] is the contribution of my colleagues and I.

The problem has been studied in the work from various perspectives. The dynamics and spectra of the system under various conditions were investigated and are discussed in the article. It is shown that for weak pumping fields, the semi-classical description is adequate, even under strong coupling conditions. An important result is the development of the first version of the approach, described in points on pages 15 and 16 above, applicable to the case of single-mode antennas. Application of the approach allowed us to identify the geometric conditions favourable to achieve the strong coupling regime:

- exploiting adjacent nanostructures with a physical gap between their metallic surfaces as a nanoantenna; small distance between nanoparticles favours field amplification,

- small size of the structure and a prolate nanoantenna shape result in field confinement into smaller volumes, accompanied by even stronger local field enhancement,
- coherent response of multiple atomic systems may be used to enhance the coupling strength further.

The first of the conditions mentioned above is the most important and has the greatest quantitative influence on the electric field enhancement and the value of the interaction strength. In later experimental works demonstrating the achievement of the strong coupling regime near nanoantennas, similar geometries have been used [R42, R43].

Nonclassical light sources Another problem under consideration was the generation of nonclassical light by nanoscaled sources [H4, H5, H8]. In each of the scenarios described below, the generation of light states with nonclassical statistical properties is due to the presence of an atomic system that, by its quantum nature, can emit one photon at a time. Nanoantennas reduce the timescale at which the emission occurs, and can shorten the time interval between the subsequent emission acts, influencing the brightness of the source (the number of photons emitted per unit time) and its statistical properties expressed in terms of the second-order correlation function. What is more, the nanoantenna itself may be a source of nonclassicality, e.g. enabling emission in one of two modes and generation of entanglement in the corresponding degree of freedom [H8].

In reference [H4], a single-photon source based on an optically pumped two-level system is proposed. The details of the nanoantenna shape determine the spectral position of its resonances. In this work, the geometry is selected so that the frequency of its plasmon resonance coincides with the frequency of the emission line of the atomic system. The purpose is to increase the efficiency of the source in terms of the number of photons emitted per time unit. An important observation is a trade-off between the emission efficiency and the nonclassical nature of light expressed by the second-order correlation function: when the time needed to pump the atomic system into its excited state becomes comparable to the duration of the emission act, the state of the electromagnetic field in the system can gain significant two- and multi-photon components. These components increase the zero-delay correlation function, the low value of which indicates the desired single-photon character. The work also investigates the spectral properties of the generated light. Analytical solutions of the stationary Heisenberg equation in the rotating wave and Markov approximations have been found, which are shown to correspond very well to the numerical results obtained without these approximations. An extension of the analysis of the problem is described in reference [C3], where the emission properties in the strong coupling regime are characterised.

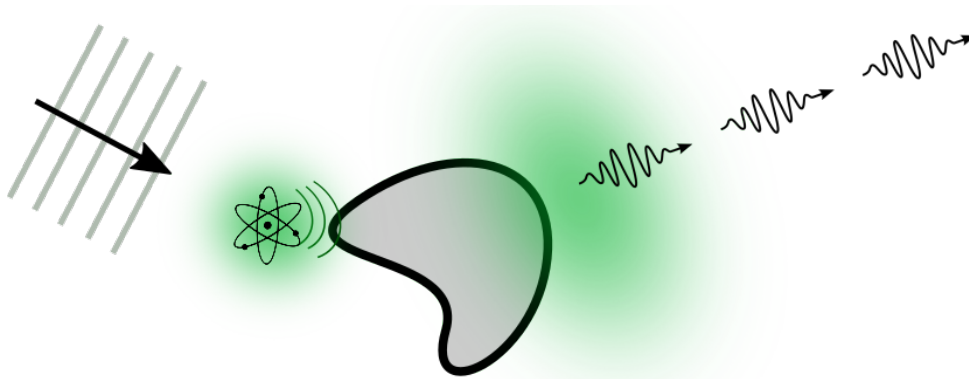


Fig.8 Sketch of the operation scheme of a nonclassical light source consisting of an atomic system coupled with a nanoantenna. The atomic system emits one energy quantum at a time, which is most likely done by creating a photon in the nanoantenna mode. A significant scattering rate is responsible for the photon emission in the short timescale Γ_{rad}^{-1} , with the directional distribution determined by the geometry of the nanoantenna. The emission of nonclassical light with various methods of excitation of the atomic system, different atomic energy level configurations, and set of parameters of the nanoantenna has been characterised in references [H4, H5, H8].

The extension of the method, initially developed in [H6], to the case of multimode antennas [H5, H7] allows more interesting scenarios of interactions between plasmon polaritons and atomic systems to be taken into account. The article [H5] examines the three-level lambda atomic system that interacts with the field around a two-mode antenna. A pair of resonances have been adjusted in polarisation and spectrally tuned to a pair of transitions in an example atomic system that could correspond to a semiconductor quantum dot. An application as a single-photon source is investigated, where the emission from one of the transitions would be triggered "on demand" after illuminating the system with a pulse tuned to the other transition. The efficiency and directionality of such a source depend on the geometry of the nanoantenna. The paper presents a simulation of an experiment for a selected antenna shape and characterises the statistical properties of the emitted light. An effective analytical description has additionally been developed, which has been used to formulate the conditions for efficient photon emission and express them through experimentally available parameters.

In the work [H8], bimodal nanoantennas have been proposed to generate entanglement in the emitted field. In the considered scenario, the pumped atomic system emits light with nonclassical statistical properties, the state of which, to a good approximation, can be described as a superposition of the absence of photons and single photons. Due to the bimodal character of the nanoantenna spectrum, and the spectral overlap of both modes designed at the emission frequencies of the atomic system, the emitted photons are equally likely to excite either of the nanoantenna modes. Then, with an efficiency corresponding

to the ratio of the far-field scattering and absorption coefficients for each of the modes, the electromagnetic energy is radiated out. The state of the emitted field is entangled in the degree of freedom associated with the number of photons in both modes. The degree of entanglement is high due to the operation at the weak coupling regime, i.e. the fact that the photon scattering rate is much higher than the exchange rate of the excitations of the atomic system and the field. As a result, the *a priori* allowed contribution of multi-photon states, which would lower the degree of entanglement, turns out to be insignificant. The article examines in detail the brightness of the emission and the degree of entanglement of the emitted light as functions of antenna parameters. The robustness of the results, when shifting the relative position of the atomic system and the antenna, is discussed. The scenario described in the paper is an example of how energy dissipation, usually perceived as a drawback, can be turned into something useful: the nanoantenna acts as an active "source" of entanglement in the system.

Controlling the state of light and atomic systems Nanoantennas characterised by certain spatial symmetries can be described in terms of the so-called bright and dark modes. The characteristics that distinguish them are the efficiency of excitation of these modes with plane waves and the efficiency of radiative emission [R44]. Dark modes are interesting because of their long lifetime, but their disadvantage is the difficulty to excite them. In reference [H7], a nanoantenna is investigated, the scattering spectrum of which differs qualitatively when excited from the far field with a plane wave and when excited with a dipole source positioned in the near field. In the latter case, an additional dark mode appears, that is not available in the plane wave scenario. A bright mode is present in both scattering spectra. In the paper, the presence of a quantum system in the nanoantenna vicinity is used to convert between a bright mode excited by a plane wave and a dark mode that overlapped it spectrally: the atomic system becomes the carrier of interactions between them. The emission properties of such a hybrid structure have been characterised, in particular the conversion efficiency between modes.

In reference [H1], a single-mode nanoantenna under a plane-wave illumination is proposed, whose scattered near field interacts with a pair of atomic systems. The interaction dynamics, in a wide range of parameters characterising atomic systems, nanoantenna and energy exchange between them, is discussed. It is shown that in the weak coupling regime, the adiabatic field elimination can be performed and the effective Lindblad equation can be derived. Its form does not differ graphically from equation (7), but after the field elimination, the density matrix describes only the atomic systems, and the Hamiltonian and Lindblad operators take an effective form in a smaller Hilbert space. The transition between the initial and the effective Hamiltonian elegantly demonstrates how, under adiabatic

approximation conditions, the near field of a nanoantenna becomes a carrier of interactions between the atomic systems. Similarly, the coupling of both atomic systems with a common lossy mode leads to collective energy dissipation in these systems in the phenomenon of superradiance. The study in the article identifies the conditions for the applicability of the adiabatic approximation and provides a derivation of the effective picture, additionally analysed and interpreted in the convenient Dicke basis [R45]. Among the states of this basis, it is possible to find one whose decoherence rate is strongly suppressed due to the symmetry properties of the system. Since the state is maximally entangled, conditions in which a significant fraction of the population of the system remains in this state correspond to a considerable degree of entanglement between atomic systems. As discussed in the article, such conditions can be found in the adiabatic regime if the symmetry between the atomic systems is broken. In this way, again, significant values of the energy dissipation rate have been turned into an advantage and used to achieve adiabatic conditions and stationary entanglement between the pair of atomic systems.

Beyond the electric dipole approximation Another aspect of the habilitation research was the investigation of the impact of terms beyond the electric dipole approximation in the light - matter interaction in the vicinity of nanoantennas. This part of the research was carried out under the Homing grant of the Foundation for Polish Science. It concerns situations in which the strong confinement of the electromagnetic energy leads to subwavelength spatial modulations of the field. The spatial scale of these modulations may be comparable to the size of the atomic systems. Then, the assumption underlying the electric dipole approximation in the Hamiltonian describing the light-matter coupling is broken. The effects associated with spatial modulations in the electromagnetic field and its vector potential, in particular, the presence of the magnetic field, may then play a role.

Many forms of the interaction Hamiltonian under such conditions have been proposed, e.g. based on the minimal coupling Hamiltonian [R27, R7], in the form of field interaction with a spatially extended dipole [R46, R8], [C4], based on the multipole expansion [R47], [H3, H2, H9]. While the first two of these require knowledge of the system's wave functions, the multipolar Hamiltonian is expressed by operators of multipole transition moments and is, therefore, more convenient to apply to many atomic systems (molecules, quantum dots), for which finding the wave functions requires complex quantum-chemical calculations.

For this reason and because of the simplicity of interpretation, the approach of the works [H3, H2, H9] is based on the multipolar expansion. Three leading terms are taken into account in the interaction Hamiltonian expansion: the electric dipole, the magnetic

dipole and the electric quadrupole

$$H = -\mathbf{E}(\mathbf{r}_0) \cdot \mathbf{d} - \mathbf{B}(\mathbf{r}_0) \cdot \mathbf{m} - [\nabla\mathbf{E}(\mathbf{r}_0)] : \mathbf{Q}, \quad (10)$$

where \mathbf{d} , \mathbf{m} , \mathbf{Q} respectively represent the electric dipole, magnetic dipole and electric quadrupole operators, while $\mathbf{E}(\mathbf{r}_0)$ and $\mathbf{B}(\mathbf{r}_0)$ are electric and magnetic field operators at the atomic system position \mathbf{r}_0 . The quantity $[\nabla\mathbf{E}(\mathbf{r}_0)]_{jk} = \partial_j E_k(\mathbf{r}_0)$ is the jk element of the dyadic product of the differentiation operator and the electric field vector, with the derivative evaluated at \mathbf{r}_0 . The dot symbol \cdot denotes the vector scalar product, while the double-dot dyadic product is defined as $\mathbf{C} : \mathbf{D} = \sum_{jk} C_{jk} D_{kj}$. In free space, the interaction energy of a plane wave with an atomic system, characterised by transition moments with expectation values of one atomic unit, related to the electric dipole mechanism, exceeds the other considered terms by 2-3 orders of magnitude. This means that the transition rates associated with the electric dipole mechanism, which - according to the Fermi golden rule - scale with the square of the transition element, exceed the terms from other multipoles by about 5 orders of magnitude. This confirms the validity of the electric dipole approximation in free space and macroscopic cavities. However, the near field in the vicinity of nanoantennas, enhanced and spatially confined, can change and changes this ratio. Estimates of orders of magnitude show that the included terms can significantly modify the results, both in the quantitative and qualitative manner. On the other hand, the higher-order, not included terms (magnetic quadrupole, electric octupole, etc.) do not bring new qualitative improvements in the studied cases, and the expected quantitative corrections are small, even in the vicinity of nanoantennas.

One of the most interesting consequences of the existence of several comparably strong transition mechanisms in the Hamiltonian is the possibility of their interference. This topic is discussed in reference [H3], with emphasis on the spontaneous emission rate which scales with the square of the transition element. The paper introduces a practical method of calculating the influence of a nanoantenna on this physical quantity, based on the results of simulations of solutions to Maxwell's equations. It is possible because the spontaneous emission depends on the density of photon states, which can be determined by calculating the classical field enhancement. A method of calculating the spontaneous emission rate in the situation of coexisting multipole interaction mechanisms has been developed and is discussed in the work. The interference effects in the transition probability between states of a selected chemical molecule are demonstrated for an example nanoantenna, whose magnetic dipole and electric quadrupole resonances are tuned to spectrally overlap with each other and with the corresponding molecular transition. In particular, the conditions for destructive interference have been found, in which the spontaneous emission rate is reduced or even completely suppressed (up to the influence of the subsequent multipolar

interaction orders, omitted in the discussion). The use of interference to suppress energy dissipation mechanisms is a conceptually simple step, with potentially broad applications in all areas of atomic physics where energy losses / broad linewidths constitute a significant limitation, e.g. for storing and processing quantum information or in spectroscopy. However, a practical application would require a considerable degree of control of positioning and orienting individual atomic systems in the vicinity of nanoantennas. It is worth noting that in prior works in the field of quantum plasmonics, the electric and magnetic transitions of different multipolar orders had been discussed individually, but the possibility of their interference had not been explicitly indicated [R48, R7, R49].

The method of calculating the spontaneous emission rate described in reference [H3] is practical, however, the following articles [H2, H9] provide a more elegant method, allowing for semi - analytical calculations. The approach is based on the electromagnetic Green's function formalism [R50]. The study in reference [H2] investigates the effects of the interaction of atomic systems with quantum vacuum, with a density of states modified by nanoantennas. The quantum electromagnetic field accompanying vacuum fluctuations in a dispersive medium (e.g. the nanoantenna material) has its source in the so-called noise polarisation $\mathbf{P}_N(\mathbf{r}, \omega)$ and the associated current density $\mathbf{j}_N(\mathbf{r}, \omega) = -i\omega\mathbf{P}_N(\mathbf{r}, \omega)$. The ω field component can be expressed as the sum of the fields from the sources in the entire spatial domain V [R50, R51]

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}, \omega) = i\mu_0\omega \int_V d^3\mathbf{r}' \mathbf{G}(\mathbf{r}, \mathbf{r}', \omega) \mathbf{j}_N(\mathbf{r}', \omega) \quad (11)$$

where $\mu_0 = \frac{1}{c^2\epsilon_0}$ is the vacuum magnetic permeability, and $\mathbf{G}(\mathbf{r}, \mathbf{r}', \omega)$ is the electromagnetic Green's tensor, that is the solution to the Helmholtz equation

$$\left[\nabla \times \nabla \times - \frac{\omega^2}{c^2} \epsilon(\mathbf{r}, \omega) \right] \mathbf{G}(\mathbf{r}, \mathbf{r}', \omega) = \mathbf{I} \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}') \quad (12)$$

with the radiation boundary condition [R27]. The Green's tensor carries the information on the shape and dispersive properties of the medium the nanoantenna is made of. In the above equation, \mathbf{I} is a unit dyadic $I_{mn} = \delta_{mn}$. The magnetic field and the vector potential can be expressed in a form similar to that of equation (11). Imposing canonical quantisation relations on the field requires the expression of the current density as a linear function of the annihilation operators $\mathbf{a}_\omega(\mathbf{r})$ corresponding to the frequency ω , fulfilling the commutation relations $[a_{\omega,j}(\mathbf{r}), a_{\omega',k}^\dagger(\mathbf{r}')] = \delta_{jk} \delta(\omega - \omega') \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}')$, $[a_{\omega,j}(\mathbf{r}), a_{\omega',k}(\mathbf{r}')] = 0$, where $j, k \in \{x, y, z\}$ refer to the components of the current vector. The field Hamiltonian takes the form $H = \int d^3\mathbf{r} \int d\omega \hbar\omega \mathbf{a}_\omega^\dagger(\mathbf{r}) \mathbf{a}_\omega(\mathbf{r})$ [R52, R50]. The forms of both the Hamiltonian and the commutation relations are similar to those of the free fields, but it should be noted that the field is "dressed" here by the interaction with the dispersive medium described by the

permittivity function $\epsilon(\mathbf{r}, \omega)$. The quantised quasinormal modes discussed above can be expressed as superpositions of modes at fixed frequencies, just as standard wave packets are expressed in quantum optics as monochromatic-wave superpositions.

Quantum fields of this form have been included in the Hamiltonian (10). Then, through an appropriate generalisation of the adiabatic elimination of field variables, previously used in reference [H1] or in articles by other authors (e.g. [R6]), the expressions for spontaneous emission, Lamb shift, multipole-multipole interactions and the collective decay (super-radiance) rates have been derived and are introduced in reference [H2]. All the derived quantities take into account the mechanisms of the electric dipole, magnetic dipole and electric quadrupole interaction. The obtained expressions depend on the transition matrix elements of the multipolar moment operators, so they do not require full knowledge of the wave functions in the system (the moments can be determined with a lower computational cost, e.g. through the density functional theory, or even found experimentally). The use of the method based on Green's function is practical: except for analytical formulas available for simple geometries, today, many commercial and open computing platforms are available that enable the function to be found for systems with more complex geometries, including metallic and dielectric nanoantennas of any shape. Calculations related to the examples discussed in the articles have been performed with the open MNPBEM toolbox for MATLAB [R53].

The article [H9] contains a generalisation of the description from [H2] to the case with an external laser field, the presence of which enables the generation of entanglement between quantum systems, in a mechanism already known from the article [H1]. An example of a spherical nanoantenna is examined. It is shown that due to the dependence of the signs of the interference terms of the electric and magnetic dipoles interacting with the field on the spatial positions of the atomic systems, one can expect spatial asymmetry of the results.

The interference of electric and magnetic dipole radiation is the physical origin of optical activity, in particular the phenomenon of circular dichroism, i.e. the difference in the absorption coefficient of right- and left-circularly polarised radiation in a medium of chiral atomic systems. Absorption is expressed in Fermi's golden rule through the sum of purely electric, purely magnetic and interference terms, where the sign of the latter is determined by the chirality of the atomic system and the circular polarisation of the field [R54]. Hence, the difference in the absorption of light with the right- and left-circular polarisation is expressed exclusively by the interference term. The methodology developed and introduced in the article [H2] has been used to investigate the possibility to enhance this term using nanoantennas [C1]. In particular, in this case, it is possible to use dielectric nanoantennas, which strongly enhance local magnetic fields due to the significant value of the permitti-

vity $\epsilon(\omega)$. This leads to stronger dichroism and improves the signal to noise ratio. In the following work [C5], a related topic of modification of the spontaneous emission rates of chiral molecules adjacent to metallic nanoantennas is discussed.

Summary In the works constituting the described habilitation achievement, a number of problems related to the interaction of light with atomic systems in the vicinity of nanoantennas were investigated. A methodological framework dedicated to this issue has been developed, based on the theory of quantum electrodynamics in a resonance cavity, but adapted to the specific conditions of the strong spatial confinement of fields. Interactions in the strong and weak coupling regimes were investigated. Analytical expressions characterising the optical properties of atomic systems were derived, in particular applicable to the case in which steps beyond the electric dipole approximation are required. The possibility of interference of multipolar interaction channels was indicated, which under appropriate conditions may lead to a reduction of the spontaneous emission rate below the value corresponding to the natural linewidth. Applications of the studied systems as nanoscaled sources of nonclassical light, optical switches, sensors and interaction carriers have been discussed. The developed methodology and results included in the habilitation achievement are part of a wide range of research in this field, active all over the world. They have also become an inspiration for further research projects in which I am currently involved.

IV.2.3. Other lines and future research

During the years of investigations of the optical properties of nanoantennas and their coupling to of atomic systems, I was involved in a number of side projects. Some of them developed into independent threads, especially after my return to Toruń. The investigations are always focused on the problem of light-matter interactions in various scenarios.

Below, I briefly comment on these research lines. In the case of the topic entitled *Other works on nanoantennas*, I find my contribution to be less important than in the case of articles qualified for the habilitation thesis. The remaining lines are relatively distant thematically, therefore they were not included in the habilitation achievement.

Other works on nanoantennas This line consists of two completed projects:

- In collaboration with the group of Prof Sylwia Zielińska-Raczyńska from the University of Technology and Life Sciences in Bydgoszcz, Poland, we investigated the possibility of tuning the optical response of nanoantennas by optically dressed atomic media [C6, C7]. The optical properties of such media can be modified using a laser

beam, which enables all-optical tuning of the position of spectral plasmon resonances [C6]. The tunability of the dispersion curve allows one to control the propagation speed and lifetime of plasmonic excitations [C7].

- References [C8, C9] concern the electromagnetic field quantisation method tailored to the description of resonators with radiative (e.g. dielectric nanoantennas) [C8] and absorptive losses (e.g. metallic nanoantennas) [C9]. The developed input - output formalism corresponds to the experimental procedure. As in this approach the far-field radiation is part of the system, the method enables directional and spectral characterisation of the emission based on information about the illumination method, resonator parameters and possible atomic systems.

Photonic integrated circuits This research thread combines several projects I have carried out with various partners as a postdoctoral researcher. The last of the listed projects is active:

- I processed the experimental results of the group of Prof Wolfram Pernice at the Karlsruhe Institute of Technology, Germany. The experiment concerned the construction of a microscaled photonic circuit, which consisted of electrically driven carbon nanotubes as light sources, integrated waveguides and single-photon detectors. The type of the drive is important from a practical point of view: the standard optical pumping would make it necessary to filter the weak quantum signal from the dominant background. The circuit prepared in Karlsruhe was the first of its kind in the world. The results that I analysed concerned the statistical properties of the emitted light from carbon nanotubes: in the Hanbury-Brown-Twiss experiment, its nonclassical character has been confirmed [C10].
- Collaboration with Dr Nora Tischler from the Griffiths University (Australia) resulted in a proposition of a method for the implementation of an arbitrary linear quantum state of light transformations using simple optical elements (beam splitters, phase shifting plates, active elements for parametric frequency conversion) [C11]. The work is a generalisation of the article [R55] concerning exclusively unitary transformations, which laid the foundations for a wide spectrum of theoretical works and implementation of experiments in quantum optics. The generalisation in reference [C11] does not require unitary transformations, so it allows one to take into account signal losses and amplification, devices with a different number of output and input ports, implementation of positive operator valued measures or nontrivial quantum gates.
- Cooperation with the group of Dr Norshamsuri Ali (University of Perlis, Malaysia)

and Dr Piotr Kolenderski (NCU) aims at engineering photonic waveguides for basic (e.g. for analysis of quantum fictitious forces [C12]) and applied research (elements of integrated circuits [C13], further work in preparation). In the next step, experiments are planned based on the optimised designs. Works are under way to create micro-scaled beam splitters, at which rarely studied interference effects can be expected [C14].

Plasmonics in graphene flakes This project has been directly inspired by the research included in the habilitation achievement and - despite its distinct character - in many aspects constitutes their continuation or extension.

Graphene doped with charge carriers has metallic properties, so it is possible to induce plasmonic resonances in this material, which usually occur in the microwave domain. These resonances can be shifted into the optical domain by means of strong doping or by using finite graphene flakes with sizes in the order of a few nanometres [R56]. Plasmonic excitations in graphene are accompanied by even stronger energy confinement than in noble metals, down to the size of several nanometres. What is even more interesting, the optical response is tunable with gate voltage used to control the doping of the flake or with temperature modulations achieved with illumination with laser pulses [R57, R58]. Tunability is a feature that distinguishes graphene nanoantennas from the traditional ones and enables the implementation of tunable quantum electrodynamics. This is the subject of research carried out in cooperation with Prof Carsten Rockstuhl under the joint Beethoven 2 grant of the National Science Centre, Poland and Deutsche Forschungsgemeinschaft.

For structures as small as a few nanometre-sized flakes, the classical description by means of the electric permittivity function leads to incorrect results: the spectral position of plasmonic resonances is misplaced even by several hundred nanometres. Hence, the need for a quantum mechanical approach, developed in collaboration with Prof Andres Ayuela from Donostia International Physics Center and Centro de Fisica de Materiales in San Sebastian, Spain, a specialist in the field of electronic properties of two-dimensional materials, and with Prof Garnett Bryant of the National Institute for Standards and Technology / University of Maryland Joint Quantum Institute. The approach combines the tight-binding method to describe the electronic properties of graphene with the description of the dynamics of "free" electrons using the master equation. Some particular problems additionally involve atomic systems attached to graphene as defects. The output of the cooperation has so far been two publications on a new criterion that allows the determination of to what extent a resonance in the nanoflake spectrum is plasmonic [C15, C16]. Further works are in preparation.

I consider this direction of research extremely promising. Currently, work is being con-

ducted to compare the mechanisms of interactions of graphene nanoantennas with atoms related to electron exchange or optical coupling. The possibilities of dynamic control of the properties of coupled systems by means of electric voltage or laser pulses are being investigated as well. Finally, it is planned to expand the numerical codes to include other two-dimensional materials, which is in line with the trends in research on quantum plasmonics conducted around the world [R59, R60, R61].

Surface enhanced Raman spectroscopy (SERS) The Raman scattering process is inelastic. Part of the energy of a photon scattered at a molecule is "absorbed" to excite a low-energy, usually vibrational state. Since the configuration of vibrational states is a unique fingerprint of different molecules, measuring the photon energy shift (called Raman shift) at the scattering act can be the basis for the detection and identification of molecules. Usually, however, the probability of a Raman process is very small, so the measurement requires large concentrations of molecules or strong fields [R62]. In order to enhance the field, metallic nanoparticles can be exploited - the technique is called surface-enhanced Raman spectroscopy [R62]. Depending on the specific scenario, the local enhancement of the Raman signal ranges from a few to over a dozen orders of magnitude [R63, R64, R65]. The wealth of various methods, techniques, materials and applications means that, despite the popularity of the issue, there is still a lot of room for optimisation of measurement scenarios and the geometry of nanostructures, and even some basic questions remain to be answered.

As part of this research line, we design nanostructures for signal enhancement in experiments of Dr Karolina Milenko (Sintef, Oslo), Dr Tobias Herr (leader of the Ultrafast Microphotonics Group at the Center for Free-Electron Laser Science, Deutsches Elektronen-Synchrotron DESY, Hamburg) and Dr Piotr Masłowski (NCU). The goal is to create sensitive molecule sensors with high spatial and temporal resolution.

Close cooperation with experimental groups makes me find this project particularly valuable and promising, because it allows me to develop and use in practice the experience gained in the postdoctoral years.

Light interactions with polar systems Polar systems are characterised by permanent dipole moments, i.e. non-zero matrix elements of the electric dipole moment operator, evaluated in the eigenstates. In polar systems subject to resonant illumination, apart from the oscillations of the transition dipole moment characteristic for a non-polar system, oscillations of the permanent dipole moment occur at the Rabi frequency. The permanent dipole moment thus becomes a source of radiation of this frequency, optically tunable in the microwave or infrared domain [R66]. So far, the phenomenon has been analysed in single molecules

(e.g. in references [R66], [C17]) and in quantum dots [R67].

My research on polar systems is carried out as part of the grant project awarded in the National Science Centre, Poland SONATA competition. On the one hand, the problem of propagation of light pulses through coherent polar molecular media dressed with electromagnetic fields has been investigated [C18, C19]. Such media are typically used in many atomic, molecular and optical physics laboratories, including the laboratories in Toruń. The generation and propagation of tunable low-frequency radiation through the medium has been characterised in reference [C18], where it has been shown that under realistic conditions, the expected signal intensity can be significant. The computational methodology, based on the Bloch-Maxwell equations, has been developed on the basis of the experience which I gained during my doctoral studies and before [C20, C21, C22, C23, C24]. The research on signal propagation through dressed atomic media continues in collaboration with Prof Szymon Pustelny from the Jagiellonian University in Cracow, Poland. The calculations provide theoretical support for selected experiments.

On the other hand, a new methodology framework to describe the coupling of spatially extended atomic systems with light has recently been developed and is described in reference [C4]. The influence of the spatial structure of quantum systems on quantities such as the spontaneous emission rate or the Lamb shift has been investigated and the results are described in the same work. The conditions under which the interaction Hamiltonian terms, related to permanent dipole moments, can make a significant, even dominant contribution to the emission spectrum are described in the recent work [C25]. This field of study is being developed in collaboration with the group of Prof Saverio Pascazio from the Aldo Moro University in Bari, Italy, and one of the problems for future investigations is the use of nanostructures to enhance the weak effects resulting from the polar nature of atomic systems.

Summary The subject of the achievement described here, related to the use of nanoantennas as resonance cavities, was the most important topic of my research after completing my doctoral studies. Over time, I managed to enrich the thematic scope of my scientific interests and achieve a fairly wide spectrum, which results from the universality of the computational approaches that have been used and developed. Many active research lines are a continuation or generalisation of the works contributing to the habilitation achievement.

Thanks to involving students in the works from the very beginning, I managed to create a group of young, talented and motivated people with the help of whom the research will be continued. I consider the creation of such a group an additional (but intended) achievement in recent years.

References

H. Articles included in the habilitation achievement

- [H1] Jiamin Hou, Karolina Słowik, Falk Lederer, and Carsten Rockstuhl. Dissipation-driven entanglement between qubits mediated by plasmonic nanoantennas. *Physical Review B*, 89(23):235413, 2014.
- [H2] Miriam Kosik, Oleksandr Burlayenko, Carsten Rockstuhl, Ivan Fernandez-Corbaton, and Karolina Słowik. Interaction of atomic systems with quantum vacuum beyond electric dipole approximation. *Scientific Reports*, 10(1):5879, 2020.
- [H3] Evgenia Rusak, Jakob Straubel, Piotr Gładysz, Mirko Göddel, Andrzej Kędziorski, Michael Kühn, Florian Weigend, Carsten Rockstuhl, and Karolina Słowik. Enhancement of and interference among higher order multipole transitions in molecules near a plasmonic nanoantenna. *Nature Communications*, 10(1):5775, 2019.
- [H4] Robert Filter, Karolina Słowik, Jakob Straubel, Falk Lederer, and Carsten Rockstuhl. Nanoantennas for ultrabright single photon sources. *Optics Letters*, 39(5):1246–1249, 2014.
- [H5] Jako Straubel, Robert Filter, Carsten Rockstuhl, and Karolina Słowik. Plasmonic nanoantenna based triggered single-photon source. *Physical Review B*, 93(19):195412, 2016.
- [H6] Karolina Słowik, Robert Filter, Jakob Straubel, Falk Lederer, and Carsten Rockstuhl. Strong coupling of optical nanoantennas and atomic systems. *Physical Review B*, 88(19):195414, 2013.
- [H7] Jakob Straubel, Robert Filter, Carsten Rockstuhl, and K Słowik. Efficient mode conversion in an optical nanoantenna mediated by quantum emitters. *Optics Letters*, 41(10):2294–2297, 2016.
- [H8] Jakob Straubel, Rafał Sarniak, Carsten Rockstuhl, and Karolina Słowik. Entangled light from bimodal optical nanoantennas. *Physical Review B*, 95(8):085421, 2017.
- [H9] Miriam Kosik and Karolina Słowik. Interaction and entanglement of a pair of quantum emitters near a nanoparticle: Analysis beyond electric-dipole approximation. *Entropy*, 22(2):135, 2020.

C. Other works by the candidate

- [C1] Karolina Słowik and Monika Kubek. Nanoparticles to enhance molecular circular dichroism. *Integrated Photonics Research, Silicon and Nanophotonics*, 2018, <https://doi.org/10.1364/IPRSN.2018.IM2B.3>.
- [C2] Karolina Słowik, Jakob Straubel, and Carsten Rockstuhl. Antennas for photons: light-matter coupling at nanoscale. In *2018 IEEE 7th International Conference on Photonics (ICP)*, pages 1–3. IEEE, 2018, <https://doi.org/10.1109/ICP.2018.8533212>.
- [C3] Karolina Słowik, Robert Filter, Jakob Straubel, Falk Lederer, and Carsten Rockstuhl. Coupling of quantum emitters and metallic nanoantennae for the generation of nonclassical light at high rates. *Physica Scripta*, 2014(T160):014037, 2014.
- [C4] Giovanni Scala, Francesco V Pepe, Paolo Facchi, Saverio Pascazio, and Karolina Słowik. Light interaction with extended quantum systems in dispersive media. *New Journal of Physics*, 22(12):123047, 2020.
- [C5] Karolina Słowik and Miriam Kosik. Spontaneous emission enhancement of handed molecules. META2020 conference materials, postponed until July 2021.
- [C6] David Ziemkiewicz, Karolina Słowik, and S Zielińska-Raczyńska. Tunable narrowband plasmonic resonances in electromagnetically induced transparency media. *Journal of the Optical Society of America B*, 34(9):1981–1988, 2017.
- [C7] David Ziemkiewicz, Karolina Słowik, and Sylwia Zielińska-Raczyńska. Ultraslow long-living plasmons with electromagnetically induced transparency. *Optics Letters*, 43(3):490–493, 2018.
- [C8] Jens Oppermann, Jakob Straubel, Karolina Słowik, and Carsten Rockstuhl. Quantum description of radiative decay in optical cavities. *Physical Review A*, 97:013809, 2018.
- [C9] Jens Oppermann, Jakob Straubel, Karolina Słowik, and Carsten Rockstuhl. Second quantization of scattering modes of absorptive photonic nanostructures. arXiv preprint arXiv:1811.06757, 2018.

- [C10] Svetlana Khasminskaya, Felix Pyatkov, Karolina Słowik, Simone Ferrari, Oliver Kahl, Vadim Kovalyuk, Patrik Rath, Andreas Vetter, Frank Hennrich, Manfred M Kappes, et al. Fully integrated quantum photonic circuit with an electrically driven light source. *Nature Photonics*, 10(11):727–732, 2016.
- [C11] Nora Tischler, Carsten Rockstuhl, and Karolina Słowik. Quantum optical realization of arbitrary linear transformations allowing for loss and gain. *Physical Review X*, 8(2):021017, 2018.
- [C12] Andrzej Gajewski, Daniel Gustaw, Nor Roshidah Yusof, Norshamsuri Ali, Karolina Słowik, and Piotr Kolenderski. Waveguide platform for quantum anticentrifugal force. *Optics Letters*, 45(13):3373–3376, 2020.
- [C13] Roshidah Yusof, Norshamsuri Ali, Piotr Kolenderski, Karolina Słowik, and NAM Ahmad Hambali. Comparative studies of rib waveguide material for quantum communication application. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, volume 551, page 012018. IOP Publishing, 2019.
- [C14] Jakub Szlachetka, Andreas Vetter, Karolina Słowik, Carsten Rockstuhl, and Piotr Kolenderski. Nanostructural beam splitter (conference presentation). In *Metamaterials XII*, volume 11025, page 110250X. International Society for Optics and Photonics, 2019.
- [C15] Marvin M Müller, Miriam Kosik, Marta Pelc, Garnett W Bryant, Andrés Ayuela, Carsten Rockstuhl, and Karolina Słowik. Energy-based plasmonicity index to characterize optical resonances in nanostructures. *The Journal of Physical Chemistry C*, 124(44):24331–24343, 2020.
- [C16] Marvin M Müller, Miriam Kosik, Marta Pelc, Garnett W Bryant, Andrés Ayuela, Carsten Rockstuhl, and Karolina Słowik. From single-particle-like to interaction-mediated plasmonic resonances in graphene nano-antennas. *Journal of Applied Physics*, 129(9):093103, 2021.
- [C17] Michael Marthaler, Martin Koppenhöfer, Karolina Słowik, and Carsten Rockstuhl. Lasing at arbitrary frequencies with atoms with broken inversion symmetry and an engineered electromagnetic environment. *arXiv preprint arXiv:1601.01511*, 2016.
- [C18] Piotr Gładysz, Piotr Wcisło, and Karolina Słowik. Propagation of optically tunable coherent radiation in a gas of polar molecules. *Scientific Reports*, 10(1):17615, 2020.
- [C19] Piotr Gładysz and Karolina Słowik. Media of asymmetric atomic systems as low-frequency radiation sources. In *Terahertz Emitters, Receivers, and Applications XI*, volume 11499, page 114990G. International Society for Optics and Photonics, 2020.
- [C20] K Słowik, A Raczyński, J Zaremba, S Zielińska-Kaniasty, M Artoni, and GC La Rocca. Cross-kerr nonlinearities in an optically dressed periodic medium. *Physica Scripta*, 2011(T143):014022, 2011.
- [C21] K Słowik, A Raczyński, J Zaremba, S Zielińska-Kaniasty, M Artoni, and GC La Rocca. Cross-phase modulation and population redistribution in a periodic tripod medium. *Journal of Modern Optics*, 58(11):978–987, 2011.
- [C22] Karolina Słowik, Andrzej Raczynski, Jaroslaw Zaremba, Sylwia Zielinska-Kaniasty, Maurizio Artoni, and Giuseppe C La Rocca. Cross phase modulation in photonic crystals. In *Nonlinear Optics and Applications V*, volume 8071, page 807107. International Society for Optics and Photonics, 2011.
- [C23] K Słowik, A Raczyński, J Zaremba, and S Zielińska-Kaniasty. Light storage in a tripod medium as a basis for logical operations. *Optics Communications*, 285(9):2392–2396, 2012.
- [C24] A Raczyński, K Słowik, J Zaremba, and S Zielińska-Kaniasty. Controlling statistical properties of stored light. *Optics Communications*, 279(2):324–329, 2007.
- [C25] P. Facchi S. Pascazio F. Pepe G. Scala, K. Słowik. Beyond the Rabi model: light interactions with polar atomic systems in a cavity. *arXiv preprint arXiv:2103.11232*.

R. References by other authors

- [R1] Stefan Alexander Maier. *Plasmonics: fundamentals and applications*. Springer Science & Business Media, 2007.
- [R2] Constantine A Balanis. *Antenna theory: analysis and design*. John Wiley & Sons, 2016.
- [R3] Mark S Tame, KR McEnery, ŞK Özdemir, Jinhyoung Lee, Stefan A Maier, and MS Kim. Quantum plasmonics. *Nature Physics*, 9(6):329–340, 2013.

- [R4] Pierre Meystre and Murray Sargent. *Elements of quantum optics*. Springer Science & Business Media, 2007.
- [R5] Z Ficek and Ryszard Tanaś. Entangled states and collective nonclassical effects in two-atom systems. *Physics Reports*, 372(5):369–443, 2002.
- [R6] David Dzsotjan, Anders S Sørensen, and Michael Fleischhauer. Quantum emitters coupled to surface plasmons of a nanowire: A green’s function approach. *Physical Review B*, 82(7):075427, 2010.
- [R7] Nicholas Rivera, Ido Kaminer, Bo Zhen, John D Joannopoulos, and Marin Soljačić. Shrinking light to allow forbidden transitions on the atomic scale. *Science*, 353(6296):263–269, 2016.
- [R8] Tomáš Neuman, Ruben Esteban, David Casanova, Francisco J García-Vidal, and Javier Aizpurua. Coupling of molecular emitters and plasmonic cavities beyond the point-dipole approximation. *Nano Letters*, 18(4):2358–2364, 2018.
- [R9] Yunlong Zhou, Zhening Zhu, Wenxiao Huang, Wenjing Liu, Shaojue Wu, Xuefeng Liu, Yan Gao, Wei Zhang, and Zhiyong Tang. Optical coupling between chiral biomolecules and semiconductor nanoparticles: size-dependent circular dichroism absorption. *Angewandte Chemie*, 123(48):11658–11661, 2011.
- [R10] Rashid Zia, Jon A Schuller, Anu Chandran, and Mark L Brongersma. Plasmonics: the next chip-scale technology. *Materials Today*, 9(7-8):20–27, 2006.
- [R11] Nathalie P De Leon, Mikhail D Lukin, and Hongkun Park. Quantum plasmonic circuits. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 18(6):1781–1791, 2012.
- [R12] A Femius Koenderink, Andrea Alu, and Albert Polman. Nanophotonics: Shrinking light-based technology. *Science*, 348(6234):516–521, 2015.
- [R13] Stefan Schietinger, Michael Barth, Thomas Aichele, and Oliver Benson. Plasmon-enhanced single photon emission from a nanoassembled metal- diamond hybrid structure at room temperature. *Nano Letters*, 9(4):1694–1698, 2009.
- [R14] Ruben Esteban, TV Teperik, and Jean-Jacques Greffet. Optical patch antennas for single photon emission using surface plasmon resonances. *Physical Review Letters*, 104(2):026802, 2010.
- [R15] Chang Chen, Yi Li, Sarp Kerman, Pieter Neutens, Kherim Willems, Sven Cornelissen, Liesbet Lagae, Tim Stakenborg, and Pol Van Dorpe. High spatial resolution nanoslits for single-molecule nucleobase sensing. *Nature Communications*, 9(1):1733, 2018.
- [R16] Renhe Zhang, Yao Zhang, ZC Dong, S Jiang, C Zhang, LG Chen, L Zhang, Y Liao, J Aizpurua, Y ea Luo, et al. Chemical mapping of a single molecule by plasmon-enhanced raman scattering. *Nature*, 498(7452):82–86, 2013.
- [R17] Yu Zhang, Yu-Rong Zhen, Oara Neumann, Jared K Day, Peter Nordlander, and Naomi J Halas. Coherent anti-stokes raman scattering with single-molecule sensitivity using a plasmonic fano resonance. *Nature Communications*, 5(1):4424, 2014.
- [R18] Yang Zhao, Amir N Askarpour, Liuyang Sun, Jinwei Shi, Xiaoqin Li, and Andrea Alù. Chirality detection of enantiomers using twisted optical metamaterials. *Nature Communications*, 8(1):14180, 2017.
- [R19] Gleb M Akselrod, Christos Argyropoulos, Thang B Hoang, Cristian Ciraci, Chao Fang, Jiani Huang, David R Smith, and Maiken H Mikkelsen. Probing the mechanisms of large purcell enhancement in plasmonic nanoantennas. *Nature Photonics*, 8(11):835–840, 2014.
- [R20] Satoshi Kawata, Yasushi Inouye, and Prabhat Verma. Plasmonics for near-field nano-imaging and super-lensing. *Nature Photonics*, 3(7):388–394, 2009.
- [R21] Scott K Cushing and Nianqiang Wu. Progress and perspectives of plasmon-enhanced solar energy conversion. *The Journal of Physical Chemistry Letters*, 7(4):666–675, 2016.
- [R22] Lukas Novotny and Niek Van Hulst. Antennas for light. *Nature Photonics*, 5(2):83–90, 2011.
- [R23] Paolo Biagioni, Jer-Shing Huang, and Bert Hecht. Nanoantennas for visible and infrared radiation. *Reports on Progress in Physics*, 75(2):024402, 2012.
- [R24] Craig F Bohren and Donald R Huffman. *Absorption and scattering of light by small particles*. John Wiley & Sons, 2008.
- [R25] Qiang Fu and Wenbo Sun. Mie theory for light scattering by a spherical particle in an absorbing medium. *Applied Optics*, 40(9):1354–1361, 2001.

- [R26] Howard Carmichael. *An open systems approach to quantum optics: lectures presented at the Université Libre de Bruxelles, October 28 to November 4, 1991*, volume 18. Springer Science & Business Media, 2009.
- [R27] Werner Vogel and Dirk-Gunnar Welsch. *Quantum Optics*. John Wiley & Sons, 2006.
- [R28] Olalla Pérez-González, Javier Aizpurua, and Nerea Zabala. Optical transport and sensing in plexcitonic nanocavities. *Optics Express*, 21(13):15847–15858, 2013.
- [R29] DS Dovzhenko, SV Ryabchuk, Yu P Rakovich, and IR Nabiev. Light–matter interaction in the strong coupling regime: configurations, conditions, and applications. *Nanoscale*, 10(8):3589–3605, 2018.
- [R30] Alexander E Krasnok, Alexey P Slobozhanyuk, Constantin R Simovski, Sergei A Tretyakov, Alexander N Poddubny, Andrey E Miroshnichenko, Yuri S Kivshar, and Pavel A Belov. An antenna model for the purcell effect. *Scientific Reports*, 5(1):12956, 2015.
- [R31] Heinz-Peter Breuer, Francesco Petruccione, et al. *The theory of open quantum systems*. Oxford University Press on Demand, 2002.
- [R32] Willis E Lamb Jr and Robert C Retherford. Fine structure of the hydrogen atom by a microwave method. *Physical Review*, 72(3):241, 1947.
- [R33] Herbert Walther. The single atom maser and the quantum electrodynamics in a cavity. *Physica Scripta*, 1988(T23):165, 1988.
- [R34] Sebastian Franke, Stephen Hughes, Mohsen Kamandar Dezfouli, Philip Trøst Kristensen, Kurt Busch, Andreas Knorr, and Marten Richter. Quantization of quasinormal modes for open cavities and plasmonic cavity quantum electrodynamics. *Physical Review Letters*, 122(21):213901, 2019.
- [R35] J. Hofer, A. Schliesser, and T. J. Kippenberg. Cavity optomechanics with ultrahigh- q crystalline microresonators. *Physical Review A*, 82:031804, 2010.
- [R36] Philip Trøst Kristensen, Rong-Chun Ge, and Stephen Hughes. Normalization of quasinormal modes in leaky optical cavities and plasmonic resonators. *Physical Review A*, 92(5):053810, 2015.
- [R37] Edo Waks and Deepak Sridharan. Cavity qed treatment of interactions between a metal nanoparticle and a dipole emitter. *Physical Review A*, 82(4):043845, 2010.
- [R38] Reinier W Heeres, Leo P Kouwenhoven, and Valery Zwiller. Quantum interference in plasmonic circuits. *Nature Nanotechnology*, 8(10):719–722, 2013.
- [R39] E Altewischer, MP Van Exter, and JP Woerdman. Plasmon-assisted transmission of entangled photons. *Nature*, 418(6895):304–306, 2002.
- [R40] Niels Verellen, Fernando López-Tejeira, Ramón Paniagua-Domínguez, Dries Vercreyusse, Denitza Denkova, Liesbet Lagae, Pol Van Dorpe, Victor V Moshchalkov, and José A Sánchez-Gil. Mode parity-controlled fano-and lorentz-like line shapes arising in plasmonic nanorods. *Nano Letters*, 14(5):2322–2329, 2014.
- [R41] Jelena Vuckovic. Quantum optics and cavity qed with quantum dots in photonic crystals. *Quantum Optics and Nanophotonics. Edited by: C. Fabre, V. Sandoghdar, N. Treps, and LF Cugliandolo (Oxford University Press, Oxford, 2017)*, pages 365–406, 2014.
- [R42] Rohit Chikkaraddy, Bart De Nijs, Felix Benz, Steven J Barrow, Oren A Scherman, Edina Rosta, Angela Demetriadou, Peter Fox, Ortwin Hess, and Jeremy J Baumberg. Single-molecule strong coupling at room temperature in plasmonic nanocavities. *Nature*, 535(7610):127–130, 2016.
- [R43] Kotni Santhosh, Ora Bitton, Lev Chuntonov, and Gilad Haran. Vacuum rabi splitting in a plasmonic cavity at the single quantum emitter limit. *Nature Communications*, 7(1):ncomms11823, 2016.
- [R44] Kosmas Tsakmakidis. Plasmonic darkness. *Nature Materials*, 12(10):870–870, 2013.
- [R45] Barry M Garraway. The dicke model in quantum optics: Dicke model revisited. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 369(1939):1137–1155, 2011.
- [R46] Daniel A Steck. Quantum and atom optics, 2007. <http://atomoptics-nas.uoregon.edu/~dsteck/teaching/quantum-optics/> (accessed 20.02.2021.).
- [R47] LD Barron and CG Gray. The multipole interaction hamiltonian for time dependent fields. *Journal of Physics A: Mathematical, Nuclear and General*, 6(1):59, 1973.
- [R48] Sven M Hein and Harald Giessen. Tailoring magnetic dipole emission with plasmonic split-ring resonators. *Physical review letters*, 111(2):026803, 2013.

- [R49] Denis G Baranov, Roman S Savelev, Sergey V Li, Alexander E Krasnok, and Andrea Alù. Modifying magnetic dipole spontaneous emission with nanophotonic structures. *Laser & Photonics Reviews*, 11(3):1600268, 2017.
- [R50] T Gruner and D-G Welsch. Green-function approach to the radiation-field quantization for homogeneous and inhomogeneous kramers-kronig dielectrics. *Physical Review A*, 53(3):1818, 1996.
- [R51] Ho Trung Dung, Ludwig Knöll, and Dirk-Gunnar Welsch. Three-dimensional quantization of the electromagnetic field in dispersive and absorbing inhomogeneous dielectrics. *Physical Review A*, 57(5):3931, 1998.
- [R52] Reza Matloob, Rodney Loudon, Stephen M Barnett, and John Jeffers. Electromagnetic field quantization in absorbing dielectrics. *Physical Review A*, 52(6):4823, 1995.
- [R53] Ulrich Hohenester and Andreas Trügler. MNPBEM – A Matlab toolbox for the simulation of plasmonic nanoparticles. *Computer Physics Communications*, 183(2):370–381, 2012.
- [R54] David Parker Craig and Thiru Thirunamachandran. *Molecular quantum electrodynamics: an introduction to radiation-molecule interactions*. Courier Corporation, 1998.
- [R55] Michael Reck, Anton Zeilinger, Herbert J Bernstein, and Philip Bertani. Experimental realization of any discrete unitary operator. *Physical Review Letters*, 73(1):58, 1994.
- [R56] Sukosin Thongrattanasiri, Alejandro Manjavacas, and F Javier García de Abajo. Quantum finite-size effects in graphene plasmons. *ACS Nano*, 6(2):1766–1775, 2012.
- [R57] Zhe Fei, AS Rodin, Gregory O Andreev, W Bao, AS McLeod, M Wagner, LM Zhang, Zeng Zhao, M Thiemens, G Dominguez, et al. Gate-tuning of graphene plasmons revealed by infrared nano-imaging. *Nature*, 487(7405):82–85, 2012.
- [R58] Alex James Frenzel, Chun Hung Lui, Yong Cheol Shin, Jing Kong, and Nuh Gedik. Semiconducting-to-metallic photoconductivity crossover and temperature-dependent drude weight in graphene. *Physical Review Letters*, 113(5):056602, 2014.
- [R59] DN Basov, MM Fogler, and FJ García De Abajo. Polaritons in van der Waals materials. *Science*, 354(6309), 2016.
- [R60] Toan Trong Tran, Danqing Wang, Zai-Quan Xu, Ankun Yang, Milos Toth, Teri W Odom, and Igor Aharonovich. Deterministic coupling of quantum emitters in 2d materials to plasmonic nanocavity arrays. *Nano Letters*, 17(4):2634–2639, 2017.
- [R61] Chitrleema Chakraborty, Nick Vamivakas, and Dirk Englund. Advances in quantum light emission from 2d materials. *Nanophotonics*, 8(11):2017–2032, 2019.
- [R62] Eric C Le Ru and Pablo G Etchegoin. Single-molecule surface-enhanced raman spectroscopy. *Annual Review of Physical Chemistry*, 63:65–87, 2012.
- [R63] Joseph B Jackson and Naomi J Halas. Surface-enhanced raman scattering on tunable plasmonic nanoparticle substrates. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 101(52):17930–17935, 2004.
- [R64] Song-Yuan Ding, Jun Yi, Jian-Feng Li, Bin Ren, De-Yin Wu, Rajapandiyan Panneerselvam, and Zhong-Qun Tian. Nanostructure-based plasmon-enhanced raman spectroscopy for surface analysis of materials. *Nature Reviews Materials*, 1(6):1–16, 2016.
- [R65] Junqiao Wang, Jia Zhang, Yongzhi Tian, Chunzhen Fan, Kaijun Mu, Shu Chen, Pei Ding, and Erjun Liang. Theoretical investigation of a multi-resonance plasmonic substrate for enhanced coherent anti-stokes raman scattering. *Optics Express*, 25(1):497–507, 2017.
- [R66] OV Kibis, G Ya Slepian, SA Maksimenko, and A Hoffmann. Matter coupling to strong electromagnetic fields in two-level quantum systems with broken inversion symmetry. *Physical Review Letters*, 102(2):023601, 2009.
- [R67] Igor Yu Chestnov, Vanik A Shahnazaryan, Alexander P Alodjants, and Ivan A Shelykh. Terahertz lasing in ensemble of asymmetric quantum dots. *ACS Photonics*, 4(11):2726–2737, 2017.

V. Presentation of significant scientific activity carried out at more than one university, scientific or cultural institution, especially at foreign institutions

My scientific activity abroad is related to research work at German universities:

- research position at the Friedrich Schiller Universität in Jena (Prof. Falk Lederer's group), from August 2012 for 33 months (including maternity / parental leave),
- postdoctoral fellowship at the Karlsruhe Institute of Technology (Prof. Carsten Rockstuhl's group), from March to November 2015.

This activity concerned research and articles that contribute to the habilitation achievement discussed in point IV.2.2 and parts of other research discussed in point IV.2.3.

Moreover, cooperation with research groups from numerous universities and research centres in the country and abroad involves research visits. I completed a two-month internship at the Scuola Normale Superiore in Pisa (before obtaining my PhD), a month-long visit to Karlsruhe in 2016, as well as several short visits to other institutions [Donostia International Physics Center, San Sebastian, Spain; Norwegian University of Science and Technology (NTNU), Trondheim, Norway; Jagiellonian University in Cracow, Poland]. Except for the most recent ones, my internships and scientific visits have already resulted in joint publications or conference reports. In cooperation with groups from NTNU and the Sintef research centre in Norway, we have prepared a joint grant application entitled *Nanophotonic waveguides for On-chip surface-Enhanced Raman Scattering sensing (OnSERS)*. Research is underway to create miniaturised, chip-integrated sensors of toxic compounds based on the phenomenon of surface-enhanced Raman spectroscopy in optical fibres. Research with the group from the Jagiellonian University on the propagation of light pulses through dressed atomic media is also underway.

List of scientists from outside the Nicolaus Copernicus University with whom I collaborated and collaborate (in the case of groups, only leaders are mentioned):

- group of Dr Norshamsuri Ali, University of Perlis, Malaysia,
- Prof Maurizio Artoni, Brescia University, Italy,
- group of Prof Andres Ayuela, Materials Physics Center and Donostia International Physics Center, San Sebastian, Spain,
- Prof Garnett Bryant, Joint Quantum Institute, the University of Maryland and National Institute of Standards and Technology, Maryland, USA,
- group of Dr Tobias Herr, Center for Free-Electron Laser Science, Deutsches Elektronen-Synchrotron DESY, Hamburg, Germany,
- Dr Karolina Milenko (previously Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway, currently: Sintef, Oslo, Norway),

- group of Prof Saverio Pascazio, Aldo Moro University, Bari, Italy,
- group of Prof Wolfram Pernice, Karlsruhe Institute of Technology (currently: University of Münster, Germany),
- group of Prof Szymon Pustelny, Jagiellonian University, Cracow, Poland,
- Prof Giuseppe La Rocca, Scuola Normale Superiore, Pisa, Italy,
- group of Prof Carsten Rockstuhl, Karlsruhe Institute of Technology, Karlsruhe, Germany,
- Dr Nora Tischler, Griffith University, Brisbane, Australia,
- group of doz. Florian Weigend, Karlsruhe Institute of Technology, Karlsruhe, Germany,
- group of Prof Sylwia Zielińska - Raczyńska, University of Technology and Life Sciences, Bydgoszcz, Poland.

VI. Presentation of teaching and organisational achievements as well as achievements in the popularisation of science

VI.1. Didactics

- I conduct classes at FPAI NCU:
 - from the academic year 2020/2021: *Quantum Optics 1* lecture and exercises (30 h + 30 h, language of instruction: English)
 - in the academic year 2018/19 *Physics laboratory 1* (90 h),
 - in the academic years 2016/17 and 2017/18 excerpts (10 h) from a general university lecture *Quantum mechanics for non-physicists*,
 - in 2016/17 and 2017/18 *Quantum optics seminar* for advanced undergraduate and PhD students.
 - Exercises in
 - Mathematical analysis 1* (2018/19, 2019/20),
 - Algebra 2* (2018/19, 2019/20, 2020/21),
 - Mathematical analysis 2* (2015/16),
 - Fundamentals of physics* (for students of mathematics, 2015/16),
 - Basic programming* (2015/16),

before obtaining the doctoral degree, I conducted exercise classes:

- Quantum physics 1* (2009/10 i 2010/11),
- Linear algebra* (2009/10 i 2010/11),
- physics compensatory classes* for 1st year students (2009/10),
- General physics IV (thermodynamics)* (2008/09),
- Elementary mathematics* (2008/09).

- Jointly with Prof Jarosław Zaremba, I have prepared teaching materials in the form of a script for the English-language *Quantum Optics 1* course, dedicated to the *Physics and Astronomy* field of study at the FPAI NCU.
- I collaborate scientifically with students at all stages of their studies.
 - I am the proposed assistant supervisor of doctoral students at NCU
 - * Mr Andrzej Gajewski, participant of doctoral studies at the FPAI NCU,
 - * Ms Miriam Kosik, participant of doctoral studies at the FPAI NCU,
 - * Mr Piotr Gładysz, a student of the Doctoral School of Science and Natural Sciences *Academia Scientiaris Thoruniensis* (AST),
 - * Mr Saeid Izadshenas at the AST,
 - master students at NCU: I was the supervisor of
 - * Ms Miriam Kosik (2017),
 - * Mr Karol Karpiński (2018),
 - * Ms Monika Kubek (2019),
 - * Mr Piotr Gładysz (2019),
 - a master thesis at the Friedrich-Schiller-Universität in Jena, Germany - I was the assistant supervisor of the thesis of Ms Jiamin Hou (2014),
 - bachelor and bachelor of engineering students: I was the supervisor of
 - * Mr Piotr Gładysz (2017),
 - * Mr Rafał Sarniak (2019).
- The students under my supervision have been awarded at the national and local level, as well as at student conferences:
 - scholarship of the Minister of Science and Higher Education in the academic years 2017/2018 and 2018/2019 (Piotr Gładysz),
 - distinction for an outstanding master thesis in physics at the FPAI NCU in the academic year 2016/2017 (Miriam Kosik), the best bachelor thesis at the FPAI NCU in the academic year 2016/2017 (Piotr Gładysz), a distinction for the best master thesis at the FPAI NCU in the academic year 2018/2019 (Piotr Gładysz),
 - award for the best FPAI NCU student in the 2017/2018 academic year and the best FPAI NCU graduate in the 2018/2019 academic year (Piotr Gładysz),
 - award for the best conference presentation during the 16th National Session of Physicists' Scientific Student Chapters, Wrocław, Poland 2017 (Piotr Gładysz),

2nd award for the best presentation at the International OSA Network of Students conference (Balvanyos, Romania, July 25-28, 2017, Miriam Kosik).

- In my research work, I regularly collaborate with students from other groups and research institutes.
- I have reviewed 4 bachelor / bachelor of engineering theses at FPAI NCU.
- Since January 2020, I have been the advisor of the local SPIE student chapter at the NCU.

VI.2. Popularisation of science

- I have given popular lectures and conducted general public workshops on the occasions of:
 - Natural Sciences Teachers Workshop organised by the Polish Community Association (*Stowarzyszenie Wspólnota Polska*) (2019),
 - FPAI NCU open days for the *Girls go Science!* campaign (2018),
 - Toruń Scientists' Night (lecture *Nano-scaled particles: stained glass of the 21st century*, 2017),
 - Before obtaining the PhD degree, I used to participate in numerous science outreach campaigns. My input included coordination, co-organisation, preparation parts of materials and conducting science workshops for hundreds of school students, pupils, and kindergarten children (e.g. educational campaigns *Back to School*, *Physics Demonstration Lessons*, *Regional Physical, Mathematical and IT Circles*), as well as co-organisation of a competition *The Art of Seeing* for a toy project for visually impaired children, and promotion of the Faculty (incl. the *WEKTOR programme: Increasing the Efficiency of Technical Education and Development of key fields of study*) .
- I am a (co-)author of popular articles:
 - K. Słowik, *Tiny yet powerful: carbon tubes for quantum light*, ACADEMIA-Magazine of Polish Academy of Sciences, 40-43 (2016),
 - F. Pyatkov, S. Khasminskaya, V. Fütterling, R. Fechner, K. Słowik, S. Ferrari, O. Kahl i in. *Carbon Nanotubes as Exceptional Electrically Driven On-Chip Light Sources*, <http://www.2physics.com/2016/10/carbon-nanotubes-as-exceptional.html>
 - A. Buksztel, J. Korociński, K. Słowik, M. Pelc, D. Bukowska, A. Górską-Pukownik, *Fizyk, czarownica i stara szafa*, *Fizyka w Szkole* 2/2013, 22-25 (2013)
translation: *The physicist, the witch and the wardrobe*, *Physics at School* magazine.

- I participated in the popular radio program *Trójwymiar* (Eng. "Three-dimensionality") of the Polish Radio Trójka, edited by Arkadiusz Ekiert (broadcast date: 15th March 2017).

VI.3. Organisation

- I coordinated the summer student internship programme at FPAI NCU *The Toruń Astrophysics/Physics Summer Program TAPS 2018* (second edition). On this occasion, I prepared an application and then managed the *V4TAPS: Increasing V4 Student Mobility within the Torun Astrophysics/Physics Summer Program* grant as a part of the Strategic Grants competition for the Visegrad Fund.
23 students from Poland and abroad, selected from over 60 applications, carried out their internships within the programme. Programme webpage:
http://www.home.umk.pl/astro_conf/taps/taps2018/index.html
- I coordinated the Photonics Online Meetup webinar locally at FPAI NCU, January 2020.
- I co-organised a photo exhibition presenting the 70-year history of physics at the Nicolaus Copernicus University (2016).
- I am a member of the organizing committee of the *QSCP 2020 - 25th International Workshop on Quantum Systems in Chemistry, Physics and Biology*. The conference was originally planned and prepared for June 2020, but due to the pandemic situation, it was postponed and is currently scheduled for June 2021.
- I chaired the scientific sessions at the following conferences
Quantum Optics IX, Gdańsk, Poland (2017),
IEEE 7th International Conference on Photonics (ICP), Langkawi, Malaysia (2018).

VII. Other relevant information

From the end of January 2014 to the end of February 2015, I was on maternity and parental leave.

Kardine Stouk

(Applicant's signature)

Wykaz osiągnięć naukowych stanowiących znaczny wkład w rozwój określonej dyscypliny

Imiona i nazwisko habilitantki: Karolina Maria Słowik

Informacje naukometryczne:

ResearcherID: B-9402-2017

ORCID: 0000-0003-1314-7004

Google Scholar: oqNU7OoAAAAJ

Indeks Hirscha: 9 (Google Scholar), 8 (Web of Science)

całkowita liczba cytowań: 406 (Google Scholar), 295 (Web of Science)

całkowita liczba cytowań bez autocytowań: 358 (Google Scholar), 266 (Web of Science)

całkowita liczba punktów Ministerstwa: 1690, w tym:

publikacje po roku 2018 (skala do 200 pkt.): 1090 punktów

publikacje do roku 2018 (skala do 50 pkt.): 600 punktów

Pełen wykaz artykułów habilitantki publikowanych w czasopismach naukowych jest sumą artykułów wymienionych w punkcie I.1, składających się na osiągnięcie habilitacyjne, oraz pozostałych artykułów wymienionych w punkcie II.1.

I. Informacja o osiągnięciach naukowych, o których mowa w art. 219 ust. 1. pkt 2 Ustawy

Tytuł osiągnięcia: *Zastosowanie nanoanten do kontroli oddziaływań układów atomowych ze światłem w nanoskali*

I.1. Cykl powiązanych tematycznie artykułów naukowych, zgodnie z art. 219 ust. 1. pkt 2b Ustawy

Poniżej artykuły wchodzące w skład osiągnięcia habilitacyjnego wymienione są chronologicznie. W tekście Autoreferatu omówiono prace w grupach tematycznych, a wynikające z tekstu numerowanie [H1-H9] nie jest zgodne z uszeregowaniem chronologicznym poniżej. Dla ułatwienia przy każdym tytule poniżej podano numer odnośnika z Autoreferatu.

Informacja o wskaźniku Impact Factor na podstawie bazy Expertus UMK¹ / Web of Science. Gwiazdką przy nazwisku oznaczono publikacje, w których habilitantka jest autorem korespondencyjnym. W pracach 1 i 2 nie wskazano autora korespondencyjnego.

1. [H6] *Strong coupling of optical nanoantennas and atomic systems*

K. Słowik, R. Filter, J. Straubel, F. Lederer, C. Rockstuhl

Physical Review B 88 (19), 195414 (2013)

impact factor czasopisma: 3.664

liczba punktów na liście Ministerstwa: 35 (140)

liczba cytowań: 48 (GS), 40 (WoS)

Praca jest poświęcona badaniu warunków silnego sprzężenia między układami atomowymi a polem elektromagnetycznym rozpraszonym przez nanoantennę metaliczną i łączy wiele aspektów problemu. Zaprojektowano w niej przykładową geometrię nanoanteny z wąską przerwą między jej elementami, w której zachodzi silna koncentracja pól elektromagnetycznych. Umieszczenie układów atomowych w tym obszarze przestrzennym może prowadzić do uzyskania siły sprzężenia przekraczającej stałe rozpraszania/absorpcji energii elektromagnetycznej. Opracowano metodę teoretyczną obliczenia, na podstawie wyników symulacji odpowiedzi optycznej nanoanteny, parametrów równań kwantowych opisujących sprzężony układ, przy założeniu przybliżenia pojedynczego rezonansu. Scharakteryzowano dynamikę układów kwantowych dla różnych warunków realizacji ewentualnego eksperymentu oraz modyfikację widma w zależności od parametrów problemu. Wreszcie, pokazano, że w szczególnych warunkach słabych pól pompujących, adekwatny jest opis półklasyczny, nawet w warunkach silnego sprzężenia.

Ciekawostka: jeden z rysunków pracy został wybrany przez Edytora do prezentacji na stronie głównej Physical Review B

<https://journals.aps.org/prb/kaleidoscope/November2013>

Mój wkład w tę pracę to:

- Zdefiniowanie problemu. Udział w dyskusjach merytorycznych nad wszystkimi aspektami problemu. Wkład w wypracowanie metody wyznaczenia parametrów równań kwantowych na podstawie symulacji klasycznych.
- Całość opisu kwantowego, implementacja kodów i wykonanie symulacji. Modele i obliczenia dynamiki układu, badanie widm, badanie warunków stosowalności przybliżenia półklasycznego.
- Przygotowanie pierwszej wersji artykułu.

¹UMK - Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu

2. [H1] *Dissipation-driven entanglement between qubits mediated by plasmonic nanoantennas*

J. Hou, **K. Słowik**, F. Lederer, C. Rockstuhl

Physical Review B 89, 235413 (2014)

impact factor czasopisma: 3.736

liczba punktów na liście Ministerstwa: 35 (140)

liczba cytowań: 45 (GS), 30 (WoS)

Praca dotyczy schematu generacji splątania między parą układów atomowych, dla których nanoantena, a dokładniej rozpraszane przez nią pole elektromagnetyczne, stanowi nośnik oddziaływań. W pracy przestudiowano dynamikę układu, w szczególności w reżimie adiabatycznym, w którym opis daje się szczególnie uprościć poprzez wprowadzenie efektywnych parametrów i bazy Dickego, znanej z problemu nadpromienistości. Ważnym wynikiem pracy jest znalezienie warunków, w których stan pary układów atomowych adiabaticznie zmierza ku stanowi w pełni splątanemu (ciemnemu stanowi układu), z ograniczeniem wynikającym z czasu życia stanu ciemnego. Wynik ten jest w dużej mierze niezależny od szczegółowych parametrów samej nanostruktury, natomiast wymaga pewnej asymetrii między układami atomowymi tworzącymi splątaną parę.

Mój wkład w tę pracę to:

- Pomysł, inicjacja i zaplanowanie badań, dobór metod analitycznych i numerycznych.
- Zasadnicza część wyprowadzeń analitycznych, eliminacja adiabaticzna. Implementacja znacznych części kodu, testy zakresu stosowalności przybliżenia adiabaticznego. Dyskusje merytoryczne i analiza mechanizmów fizycznych generacji splątania w układzie.
- Opieka merytoryczna nad studentką (J. Hou).
- Przygotowanie pierwszej wersji artykułu.

3. [H4] *Nanoantennas for ultrabright single photon sources*

R. Filter, **K. Słowik**, J. Straubel, F. Lederer, C. Rockstuhl

Optics Letters 39 (5), 1246-1249 (2014)

impact factor czasopisma: 3.292

liczba punktów na liście Ministerstwa: 40 (140)

liczba cytowań: 30 (GS), 21 (WoS)

Praca stanowi propozycję źródła pojedynczych fotonów opartego na pompowanym optycznie układzie dwupoziomowym. Emisja ze wzbudzonego układu zachodzi szybko dzięki obecności nanoanteny, której rezonansowa odpowiedź optyczna jest zaprojektowana tak by pokryć się z linią emisyjną układu atomowego. W pracy zbadano spodziewaną wydajność emisji, właściwości statystyczne i widmowe generowanego światła. Ważnym wynikiem jest balans (*trade-off*) między wydajnością emisji a nieklasycznym charakterem światła, wyrażonym poprzez funkcję korelacji drugiego rzędu. Znaleziono też rozwiązania analityczne stacjonarnego

równania Heisenberga w sytuacji odpowiadającej przybliżeniom fali wirującej i Markowa, które w przypadku badanego układu są w dobrej zgodności z dokładnymi rozwiązaniami uzyskanymi numerycznie, poprzez całkowanie równania Lindblada bez tych przybliżeń.

Mój wkład w tę pracę to:

- Udział w dyskusjach merytorycznych nad wszystkimi aspektami problemu.
- Całość opisu kwantowego: opis analityczny za pomocą równania Heisenberga i równania Lindblada, implementacja kodu i numeryczne rozwiązanie równania Lindblada. Charakteryzacja wydajności emisji, właściwości statystycznych i widma emisji.
- Redakcja ostatecznej wersji artykułu.

4. [H5] *Plasmonic nanoantenna based triggered single-photon source*

J. Straubel, R. Filter, C. Rockstuhl, **K. Słowik***

Physical Review B 93 (19), 195412 (2016)

impact factor czasopisma: 3.836

liczba punktów na liście Ministerstwa: 35 (140)

liczba cytowań: 20 (GS), 16 (WoS)

W artykule zaproponowano schemat zminiaturyzowanego źródła pojedynczych fotonów, które - w odróżnieniu od opisanego wyżej w punkcie 3. - generowałyby fotony "na żądanie", po uprzednim oświetleniu impulsem elektromagnetycznym. Propozycja jest oparta na układzie atomowym o konfiguracji poziomów energetycznych typu *lambda*, tj. o trzech aktywnych poziomach. Układ ten stanowi źródło fotonów, generowanych w modzie sprzężonym z jednym z przejść kwantowych, a jego wydajność i właściwości kierunkowe zależą od geometrii nanoanteny. W pracy pokazano symulację przebiegu doświadczenia dla wybranego kształtu anteny i scharakteryzowano właściwości statystyczne emitowanego światła. Ponadto, uproszczony opis efektywny w przybliżeniu Markowa pozwolił wyprowadzić warunki wydajnej emisji fotonu i wyrazić je poprzez parametry ewentualnego układu doświadczalnego.

Mój wkład w tę pracę to:

- Pomysł, inicjacja badań i udział w dyskusjach merytorycznych, dotyczących wszystkich aspektów pracy.
- Całość opisu kwantowego: opis teoretyczny dynamiki układu kwantowego, obliczenia analityczne prowadzące do opisu efektywnego, wyprowadzenie warunków wydajnej emisji. Implementacja kodu i przeprowadzenie obliczeń numerycznych dotyczących dynamiki układu, porównanie wyników uzyskanych w ramach opisu pełnego i efektywnego, obliczenia dotyczące właściwości statystycznych emitowanego światła.
- Przygotowanie pierwszej wersji manuskryptu.

5. [H7] *Efficient mode conversion in an optical nanoantenna mediated by quantum emitters*

J. Straubel, R. Filter, C. Rockstuhl, **K. Słowik***

Optics Letters 41 (10), 2294-2297 (2016)

impact factor czasopisma: 3.416

liczba punktów na liście Ministerstwa: 35 (140)

liczba cytowań: 2 (GS), 1 (WoS)

Właściwości optyczne nanoanten charakteryzowane są w języku modów jasnych (aktywnych emisyjnie i absorpcyjnie) i ciemnych (o słabej emisji i absorpcji). Mody ciemne są interesujące ze względu na długi czas życia, ale ich wadą jest utrudniony "dostęp" - trudno takie mody wzbudzić. W pracy scharakteryzowano nanoantennę, której odpowiedź optyczna w zadanym zakresie spektralnym ma dwa rezonanse, z których tylko jeden daje się wzbudzić za pomocą odpowiednio spolaryzowanej fali płaskiej. Drugi rezonans okazuje się być dostępny przy wzbudzeniu za pomocą zlokalizowanego źródła dipolowego. Pokazano zasadniczy wpływ obecności układu atomowego na właściwości emisyjne poprzez indukowaną konwersję promieniowania między modami.

Mój wkład w tę pracę to:

- Dyskusje merytoryczne, udział w sformułowaniu koncepcji pracy.
- Opis teoretyczny stanu układu kwantowego: układu atomowego i światła rozproszonego przez antenę. Implementacja kodu i przeprowadzenie obliczeń numerycznych dotyczących stanu układu, liczby rozpraszanych fotonów i wydajności konwersji.
- Przygotowanie pierwszej wersji manuskryptu.

6. [H8] *Entangled light from bimodal optical nanoantennas*

J. Straubel, R. Sarniak, C. Rockstuhl, **K. Słowik***

Physical Review B 95 (8), 085421 (2017)

impact factor czasopisma: 3.813

liczba punktów na liście Ministerstwa: 35 (140)

liczba cytowań: 9 (GS), 6 (WoS)

Artykuł zawiera propozycję źródła splątanego światła, opartego na oddziaływaniu dwumodowej nanoanteny z pompowanym optycznie układem atomowym. Nanoantena nie jest tu - jak we wcześniejszych pracach - jedynie "pasywnym" elementem służącym wzmocnieniu sygnału. Przeciwnie, jej dwumodowy charakter stanowi w opisanym scenariuszu źródło nieklasyczości w układzie, a wysoka wartość współczynników absorpcji i rozpraszania światła przez antenę - zwykle rozumiana jako wada i źródło strat - tu pozwala poprawić statystykę kwantową poprzez eliminację prawdopodobieństwa emisji większych liczb fotonów jednocześnie.

Mój wkład w tę pracę to:

- Pomysł wykorzystania nanoanteny dwumodowej do generacji i modyfikacji nieklasycznych stanów światła.

- Teoria i szczegółowe zaplanowanie scenariusza obliczeń kwantowych: opis stanu kwantowego światła, jego oddziaływania z układem atomowym, stopnia splątania, itd.
- Udział w dyskusjach dotyczących metod charakteryzacji modowej nanoanten.
- Przygotowanie pierwszej wersji artykułu.
- Koordynacja prac zespołu, w szczególności opieka nad studentem (R. Sarniak) zaangażowanym w projekt.

7. [H3] *Enhancement of and interference among higher order multipole transitions in molecules near a plasmonic nanoantenna*

E. Rusak, J. Straubel, P. Gładysz, M. Göddel, A. Kędzierski, M. Kühn, F. Weigend, C. Rockstuhl, **K. Słowik***

Nature Communications 10(1), 1-8 (2019)

impact factor czasopisma: 12.121

liczba punktów na liście Ministerstwa: 200

liczba cytowań: 12 (GS), 6 (WoS)

To chronologicznie pierwszy z serii artykułów dotyczących wyjścia poza przybliżenie elektryczne dipolowe w opisie oddziaływania światła z materią w sąsiedztwie nanostruktur metalicznych czy dielektrycznych. W pracy zbadano wpływ zmodyfikowanego otoczenia fotonowego na współczynnik emisji spontanicznej. Metodologia była w pełni oparta na obliczeniach numerycznych wzmocnienia poszczególnych składowych pól elektromagnetycznych rozpraszanych przez nanostrukturę oświetlaną różnymi źródłami multipolowymi. Obliczenia te są równoważne znalezieniu gęstości stanów fotonowych dla różnych multipoli i ich superpozycji. Najważniejszym wynikiem pracy jest zauważenie że spójna superpozycja źródeł multipolowych, jaką może stanowić zorientowana w przestrzeni cząsteczka, może prowadzić do interferencji oddziaływań z otoczeniem fotonowym w kilku kanałach odpowiadających poszczególnym źródłom. W szczególności otwiera to możliwość obniżenia poprzez interferencję współczynnika emisji spontanicznej, z potencjalnymi zastosowaniami w informacji kwantowej czy spektroskopii.

Mój wkład w tę pracę to:

- Pomysł wyjścia poza przybliżenie dipolowe i opracowanie szczegółów metody teoretycznej.
- Zarządzanie całością projektu, koordynacja prac.
- Opieka merytoryczna nad studentami zaangażowanymi w projekt: E. Rusak, M. Göddel, P. Gładysz.
- Implementacja kodu i wykonanie obliczeń prawdopodobieństw przejścia w oparciu o dane dotyczące wzmocnienia pól i momentów multipolowych.
- Analiza wyników i selekcję danych.
- Przygotowanie pierwszej wersji artykułu, poprawki, korespondencja z wydawnictwem.

- Zarządzanie projektem grantowym, w ramach którego finansowana była część badań.

8. [H2] *Interaction of atomic systems with quantum vacuum beyond electric dipole approximation*

M. Kosik, O. Burlayenko, C. Rockstuhl, I. Fernandez-Corbaton, **K. Słowik***

Scientific Reports 10(1), 1-12 (2020)

impact factor czasopisma: 3.998

liczba punktów na liście Ministerstwa: 140

liczba cytowań: 3 (GS), 1 (WoS)

W pracy podano metodę opisu analitycznego oddziaływania układów atomowych ze światłem, wychodząc poza popularne przybliżenie elektryczne dipolowe. Rozwinięty w pracy formalizm umożliwia charakteryzację właściwości emisyjnych (stała emisji spontanicznej, przesunięcie Lamba) układów atomowych. Właściwości te w ogólności zależą od otoczenia i zmieniają się np. we wnęce rezonansowej, w obecności nanostruktur, czy na styku różnych powierzchni. Właściwości otoczenia fotonowego uwzględnione są w pracy za pomocą elektromagnetycznej funkcji Greena, która znana jest analitycznie dla względnie prostych geometrii. Dodatkowo, obliczono ją numerycznie dla przykładowych geometrii. Do charakteryzacji właściwości emisyjnych układu potrzebnych jest zaledwie kilka jego parametrów (momenty przejścia), co upraszcza obliczenia zarówno w stosunku do metod innych autorów opartych na funkcjach falowych, jak i w stosunku do numerycznej metody zastosowanej w pracy wymienionej w punkcie I.1.7.

Mój wkład w tę pracę to:

- Pomysł, inicjacja i zaplanowanie badań, wybór metody analitycznej.
- Zasadnicza część wyprowadzeń analitycznych: zastosowanie otrzymanych wzorów do obliczeń analitycznych dla przykładu próżni.
- Koordynacja prac zespołu oraz prowadzenie prac studentów (M. Kosik, O. Burlayenko).
- Przygotowanie znacznego fragmentu pierwszej wersji artykułu (poza częścią numeryczną); redakcja ostatecznej wersji.
- Zarządzanie projektem grantowym, w ramach którego finansowana była część badań.

9. [H9] *Interaction and Entanglement of a Pair of Quantum Emitters near a Nanoparticle: Analysis beyond Electric-Dipole Approximation*

M. Kosik, **K. Słowik***

Entropy 22(2), 135 (2020)

impact factor czasopisma: 2.494

liczba punktów na liście Ministerstwa: 100

liczba cytowań: 1 (GS, WoS)

Artykuł stanowi kontynuację pracy z punktu I.1.8. Tym razem nacisk położono na wpływ otoczenia fotonowego, np. nanoanten metalicznych, na zjawiska kolektywne: oddziaływania multipol-multipol i kolektywne tłumienie (nadpromienistość). Wynikiem oddziaływań może być splątanie układów atomowych. Teoria przedstawiona w artykule jest ogólna, a jako szczególny przykład zbadano parę identycznych układów dwupoziomowych w sąsiedztwie srebrnej nanosfery, dla których obliczono natężenie oddziaływań i prawdopodobieństwa przejść kolektywnych na jednostkę czasu, oraz stopień splątania w stanie stacjonarnym. Dla wybranych orientacji ich momentów multipolowych przejścia stwierdzono nie tylko znaczny wpływ ilościowy poprawek ponad przybliżenie elektryczne dipolowe, ale przede wszystkim zmiany jakościowe, związane z łamaniem symetrii przestrzennej wyników, głównie w rezultacie uwzględnienia oddziaływań magnetycznych.

Metodologia tej pracy łączy formalizm z artykułu I.1.8, poszerzony o uwzględnienie oddziaływań z zewnętrzną wiązką laserową, niezbędną do osiągnięcia splątania, oraz o metodę obliczeń stopnia splątania pary układów opisaną w pracy I.1.2, a opartą na pracach innych autorów.

II. Informacja o aktywności naukowej

II.1. Wykaz artykułów opublikowanych w czasopismach naukowych, niewymienionych w punkcie I.1

Gwiazdką przy nazwisku oznaczono publikacje, w których habilitantka jest autorem korespondencyjnym.

1. [P10] *Fully integrated quantum photonic circuit with an electrically driven light source*
S. Khasminskaya, F. Pyatkov, **K. Słowik**, S. Ferrari, O. Kahl, V. Kovalyuk, P. Rath, A. Vetter, F. Hennrich, M. M. Kappes, G. Gol'Tsman, A. Korneev, C. Rockstuhl, R. Krupke, W. H.P. Pernice
Nature Photonics 10 (11), 727-732 (2016)
impact factor czasopisma: 37.852
liczba punktów na liście Ministerstwa: 50 (200)
liczba cytowań: 166 (GS), 128 (WoS)

Przedmiotem artykułu jest pierwszy zminiaturyzowany na chipie fotoniczny układ scalony, złożony ze źródła nieklasycznego światła sterowanego elektrycznie, falowodu i detektora pojedynczych fotonów. W roli źródła światła wykorzystano nanorurki węglowe podłączone do elektrod, którymi były wzbudzane i w konsekwencji emitowały światło, prowadzone falowodami do zintegrowanych detektorów.

Mój wkład w tę pracę to:

- Obróbka wybranych wyników doświadczalnych: analiza właściwości statystycznych emitowanego z nanorurek światła, potwierdzenie jego nieklasycznego charakteru.
- Przygotowanie opisu odpowiednich fragmentów artykułu i materiałów uzupełniających. Redakcja pozostałych części artykułu.
- Udział w wybranych dyskusjach merytorycznych.

2. [P3] *Coupling of quantum emitters and metallic nanoantennae for the generation of nonclassical light at high rates*

K. Słowik*, R. Filter, J. Straubel, F. Lederer, C. Rockstuhl

Physica Scripta 2014 (T160), 014037 (2014)

impact factor czasopisma: 1.126

liczba punktów na liście Ministerstwa: 25 (40)

liczba cytowań: 0

Artykuł zawiera rozszerzenie i pogłębioną analizę problemu generacji nieklasycznego światła badanego w pracy w punkcie I.1.3, dla konkretnej geometrii nanoanteny. W szczególności zbadano charakterystykę emisji w reżimie silnego sprzężenia, w którym zmianie ulegają właściwości statystyczne emitowanego światła (odstępstwa od jednofotonowego charakteru emisji) i znacznie modyfikowane jest widmo emisji.

Mój wkład w tę pracę to:

- Koncepcja i udział w dyskusjach merytorycznych.
- Przeprowadzenie obliczeń kwantowych i analizę wyników.
- Napisanie pierwszej wersji pracy.

3. [P6] *Tunable narrowband plasmonic resonances in electromagnetically induced transparency media*

D. Ziemkiewicz, **K. Słowik***, S. Zielińska-Raczyńska

Journal of the Optical Society of America B 34 (9), 1981-1988 (2017)

impact factor czasopisma: 2.048

liczba punktów na liście Ministerstwa: 35 (70)

liczba cytowań: 3 (GS), 2 (WoS)

Właściwości optyczne nanostruktur metalicznych mogą silnie zależeć od właściwości dyspersyjnych ich dielektrycznego otoczenia. Z kolei profil dyspersyjny wybranych gazów atomowych, w których realizuje się zjawisko elektromagnetycznie wymuszonej przezroczystości, może być sterowany optycznie. W pracy zaproponowano metodę przestrajania pozycji spektralnej rezonansów plazmonowych opartą na oddziaływaniach z ubranymi optycznie gazami atomowymi.

Mój wkład w tę pracę to:

- Udział w wypracowaniu koncepcji.
- Dyskusje nad wszystkimi aspektami problemu.
- Edycja artykułu.
- Zarządzanie projektem grantowym, w ramach którego finansowana była część badań.

4. [P7] *Ultraslow long-living plasmons with electromagnetically induced transparency*

D. Ziemkiewicz, **K. Słowik**, S. Zielińska-Raczyńska

Optics letters 43 (3), 490-493 (2018)

impact factor czasopisma: 3.866

liczba punktów na liście Ministerstwa: 45 (140)

liczba cytowań: 8 (GS, WoS)

W pracy zaproponowano metodę sterowania prędkością propagacji powierzchniowych polarytonów plazmonowych, opartą na zjawisku elektromagnetycznie wymuszonej przezroczystości i spowalniania światła w ubranych gazach atomowych. Zbadano polarytony wytwarzane na styku cienkiej metalowej warstwy i szklanej podstawy z jednej strony, oraz optycznie ubranego ośrodka z drugiej strony. Otrzymano wartości prędkości grupowej propagacji polarytonu, mniejsze nawet o dwa rzędy wielkości od prędkości światła w próżni, i proporcjonalne wydłużenie czasu życia polarytonu. Mechanizm odpowiedzialny za oba zjawiska polega na wytworzeniu specyficznego rodzaju "superpolarytonu": część elektromagnetyczna polarytonu plazmonowego tworzy polaryton z optycznie ubranymi atomami ośrodka atomowego. Wówczas część energii pola przenoszona jest do atomów ośrodka i przechowywana w postaci spójności atomowej, co jest odpowiedzialne zarówno za redukcję prędkości propagacji jak i za zmniejszenie absorpcji pola w metalu i odpowiednio wydłużony czas życia polarytonu.

Mój wkład w tę pracę to:

- Dyskusje nad wszystkimi aspektami problemu.
- Edycja artykułu.
- Zarządzanie projektem grantowym, w ramach którego finansowana była część badań.

5. [P8] *Quantum description of radiative decay in optical cavities*

J. Oppermann, J. Straubel, **K. Słowik**, and C. Rockstuhl

Physical Review A 013809 (2018)

impact factor czasopisma: 2.907

liczba punktów na liście Ministerstwa: 35 (140)

liczba cytowań: 2 (GS, WoS)

W teoretycznym opisie elektrodynamiki atomu we wnęce rezonansowej często problem dysypacji energii w układzie albo jest pomijalny, albo jest opisany modelem Lindblada, zgodnie z którym rozpraszana energia jest transferowana z układu do otoczenia, którego stan nie jest przedmiotem opisu. W sytuacji eksperymentalnej jednak radiacyjny mechanizm dyssypacji

ma istotne znaczenie: jest odpowiedzialny za wypromieniowane z wnętrza pole elektromagnetyczne, które jest bezpośrednim przedmiotem doświadczenia. Jego stan niesie informację o stanie atomu i pola we wnętrzu. W pracy rozwinięto metodę opisu problemu, w której informacja o stanie wypromieniowanego pola (rozkład spektralny i kierunkowy, polaryzacja) jest naturalnie dostępna poprzez relacje typu *input-output*.

Mój wkład w tę pracę to:

- Dyskusje nad wszystkimi aspektami problemu.
- Edycja tekstu artykułu.
- Zarządzanie projektem grantowym, w ramach którego finansowana była część badań.

6. [P11] *Quantum optical realization of arbitrary linear transformations allowing for loss and gain*

N. Tischler, C. Rockstuhl, **K. Słowik***

Physical Review X 8 (2), 021017 (2018)

impact factor czasopisma: 12.211

liczba punktów na liście Ministerstwa: 45 (200)

liczba cytowań: 17 (GS), 10 (WoS)

W optyce kwantowej stosuje się kodowanie informacji w postaci wyboru ścieżki, którą porusza się foton. Transformacje stanu fotonu odbywają się z wykorzystaniem prostych elementów optycznych, a służą implementacji interferometrów, bramek logicznych, miar operatorowych, itd. W literaturze znane są metody reprezentacji dowolnej transformacji unitarnej w sposób odpowiadający serii płytek światłodzielących i elementów fazowych. Jednakże transformacje unitarne to tylko wąska klasa możliwych transformacji stanu fotonu. W rzeczywistości każdy element optyczny zbudowany jest z materiałów dyspersyjnych, w których zachodzą straty. W laboratoriach wykorzystuje się złącza o różnej liczbie wejść i wyjść. Wzmacniacze wykorzystują elementy aktywne, w których generowane są fotony np. w procesie parametrycznego podziału częstotliwości. W pracy opisano nową metodę reprezentacji dowolnej transformacji liniowej, niekoniecznie unitarnej i niekoniecznie zachowującej liczbę fotonów, jako serii bazowych elementów optycznych: płytek światłodzielących, elementów fazowych i elementów aktywnych. Omówiono przykładowe zastosowania do realizacji dodatnich miar operatorowych czy projektowania probabilistycznych protokołów kwantowych.

Mój wkład w tę pracę to:

- Udział w wyborze tematu badawczego i wypracowaniu koncepcji.
- Udział w opracowaniu metody stanowiącej główny wynik artykułu.
- Rozwiązanie i opisanie przykładów i jednego z zastosowań.
- Edycję tekstu artykułu.
- Zarządzanie projektem grantowym, w ramach którego finansowana była część badań.

7. [P18] *Propagation of optically tunable coherent radiation in a gas of polar molecules*

P. Gładysz, P. Weisło, **K. Słowik**

Scientific Reports 10, 17615 (2020)

impact factor czasopisma: 3.998

liczba punktów na liście Ministerstwa: 140

liczba cytowań: 2 (GS), 0 (WoS)

Asymetria przestrzenna układów atomowych przekłada się na trwały elektryczny moment dipolowy rozkładu ładunków w ich stanach własnych. W opisie oddziaływania ze światłem centralną rolę odgrywa dipolowy moment przejścia między stanami, podczas gdy moment trwały zwykle jest pomijany. Jednakże trwały moment dipolowy również jest istotny: jeśli oddziaływanie ze światłem indukuje periodyczne przejścia między parą stanów o różnych trwałych momentach dipolowych, w układzie zachodzą oscylacje momentu dipolowego dwojakiego rodzaju: 1) momentu przejścia, z częstością odpowiadającą różnicy energii stanów własnych, oraz 2) trwałego momentu dipolowego, z częstością odpowiadającą częstości przejść. Te ostatnie są źródłem promieniowania o częstości przejść, która jest sterowalna optycznie i wypada zwykle w domenie mikrofalowej. W pracy rozwinięto opis teoretyczny propagacji impulsu mikrofalowego generowanego w optycznie ubranym ośrodku cząsteczek charakteryzowanych trwałym momentem dipolowym. Opis łączy równanie propagacji z równaniami Blocha ewolucji ośrodka i stanowi uogólnienie znanego układu równań Blocha - Maxwella, z koniecznym wyjściem poza tradycyjne przybliżenie wolnozmiennnej obwiedni oraz uogólnieniem przybliżenia fali wirującej. Z wykorzystaniem rozwiniętych narzędzi teoretycznych i numerycznych potwierdzono powstawanie spójnego impulsu promieniowania i możliwości optycznego sterowania jego parametrami. Zaproponowano ośrodek cząsteczkowy spolaryzowany stałym polem elektrycznym, w którym można spodziewać się powstawania impulsu.

Mój wkład w tę pracę to:

- Określenie tematu badań i formalizmu. Nakreślenie schematu wyprowadzeń analitycznych, wybór metod i przybliżeń.
- Opieka merytoryczna nad doktorantem zaangażowanym w projekt.
- Dyskusje merytoryczne dotyczące wszystkich aspektów problemu.
- Edycja artykułu.
- Zarządzanie projektem grantowym, w ramach którego finansowana była część badań.

8. [P12] *Waveguide platform for quantum anticentrifugal force*

A. Gajewski, D. Gustaw, N. R. Yusof, N. Ali, **K. Słowik**, P. Kolenderski

Optics Letters 45, 3373-3376 (2020)

impact factor czasopisma (2019): 3.714

liczba punktów na liście Ministerstwa: 140

liczba cytowań: 2 (GS), 0 (WoS)

Propagacja promieniowania przez falowody jest zwykle opisywana w języku modów. Gdy falowód się zakrzywia, mody własne ulegają odkształceniu. Zachowanie to wynika z równań Maxwella uzupełnionych o równania materiałowe, a analityczne rozwiązania dają się znaleźć w oparciu o przybliżenie paraksjalne i równanie Helmholtza. Formalna analogia między równaniem Helmholtza, opisującym zakrzywiony cylindrycznie falowód, a równaniem Schrödingera cząstki w polu o symetrii cylindrycznej pozwala na identyfikację odpowiadających sobie elementów tych równań i odpowiednich rozwiązań. W szczególności wspomniane równanie Schrödingera zawiera człon, zwany potencjałem dośrodkowym, związanym z kwantową siłą dośrodkową działającą na cząstkę, która w zależności od modu może różnić się zwrotem. Analogicznie, środek ciężkości modów elektromagnetycznych przesuwa się ku wewnętrznemu lub zewnętrznemu brzegowi falowodu w zależności od liczb kwantowych charakteryzujących mod. W pracy znaleziono rozwiązania analityczne równania Helmholtza oraz odpowiadające im rozwiązania numeryczne równań Maxwella dla realistycznych projektów falowodów, jako prototypowych układów klasycznych do badania analogonu kwantowych sił dośrodkowych.

Mój wkład w tę pracę to:

- Opieka merytoryczną nad doktorantem zaangażowanym w projekt (A. Gajewski).
- Dyskusje merytoryczne nad wszystkimi aspektami projektu.
- Edycja artykułu.
- Zarządzanie projektem grantowym, w ramach którego finansowana była część badań.

9. [P4] *Light interaction with extended quantum systems in dispersive media*

G. Scala, F.V. Pepe, P. Facchi, S. Pascazio, **K. Słowik**

New Journal of Physics, 22, 123047 (2020)

liczba punktów na liście Ministerstwa: 140

impact factor czasopisma: 3.539

liczba cytowań: 1 (GS), 0 (WoS)

Praca dotyczy problemu oddziaływań ze światłem układów kwantowych rozciągniętych w przestrzeni, dla których przybliżenie elektrycznego dipola punktowego nie jest uzasadnione. Struktura przestrzenna układu jest wzięta pod uwagę za pomocą funkcji falowych, co pozwala uniknąć znanego z literatury problemu rozbieżności wyników. Wpływ efektów strukturalnych na wielkości takie jak współczynnik emisji spontanicznej, przesunięcie Lamba czy siła oddziaływania z polem elektromagnetycznym, jest zwykle bardzo niewielki, lecz może się ujawnić w otoczeniu ośrodków dyspersyjnych, w tym nanostruktur. W pracy rozwinięto teorię oddziaływań światła z materią bez przybliżenia dipola punktowego i w oparciu o elektromagnetyczne funkcje Greena, które zdają sprawę ze struktury i właściwości dyspersyjnych ośrodka. Zbadano wybrane układy kwantowe cechowane asymetrią przestrzenną: atom wodoru w stałym polu elektromagnetycznym i asymetryczną kropkę kwantową.

Mój wkład w tę pracę to:

- Pomysł, określenie kierunku badań.

- Dyskusje merytoryczne nad wszystkimi aspektami projektu. Opieka merytoryczna nad doktorantem zaangażowanym w projekt (G. Scala), w szczególności w czasie jego wielomiesięcznych staży w Toruniu.
- Obliczenia analityczne, implementacja kodu i obliczenia numeryczne dotyczące atomu wodoru.
- Edycja artykułu.
- Zarządzanie projektem grantowym, w ramach którego finansowana była część badań.

10. [P15] *Energy-Based Plasmonicity Index to Characterize Optical Resonances in Nanostructures*

M. M. Müller, M. Kosik, M. Pelc, G. W. Bryant, A. Ayuela, C. Rockstuhl, K. Słowik
 The Journal of Physical Chemistry C 124 (44), 24331-24343 (2020)

impact factor czasopisma: 4.189

liczba punktów na liście Ministerstwa: 140

liczba cytowań: 1 (GS, WoS)

Praca dotyczy fundamentalnego zagadnienia na styku optyki molekularnej i nanofotoniki - pytania o naturę wzbudzeń plazmonowych w małych nanocząstkach / dużych cząsteczkach chemicznych zbudowanych z kilkuset atomów. Odpowiedź optyczna takich cząsteczek zawiera rezonanse o charakterze jednocząstkowym i o charakterze kolektywnym, w których istotną rolę odgrywają oddziaływania międzyelektronowe. Odpowiedź na pytanie jak je rozróżnić nie jest jednak ciągle jasna, a różne kryteria mogą być czułe na różne przejawy zjawiska wzbudzenia plazmonowego. W pracy zdefiniowano miarę stopnia plazmoniczności (kolektywności) rezonansu, opartą na dynamice stanu układu w przestrzeni energii, i zastosowano ją do wybranych układów: łańcuchów atomów, poliacydenów, nanoanten grafenowych. Nowa miara daje dla tych układów wyniki jakościowo zgodne z wynikami uzyskanymi w ramach wybranych i dobrze znanych metod, np. metody skalowania oddziaływań Coulomba, jednakże wymaga znacznie mniejszej ilości obliczeń.

Mój wkład w tę pracę to:

- Zdefiniowanie kierunku badań: dynamika ruchu elektronów nanoanten grafenowych poddanych oddziaływaniu ze światłem. Wybór metody badawczej.
- Koordynacja prac partnerów.
- Udział w dyskusjach merytorycznych, dotyczących wszystkich aspektów projektu. Nadzór merytoryczny nad aspektami dotyczącymi dynamiki układu i opisu sprzężenia z polem elektromagnetycznym. Opieka merytoryczna nad zaangażowanymi doktorantami (M.M. Müller, M. Kosik).
- Napisanie wstępnych wersji fragmentów kodu (równanie dynamiki układu).
- Edycja artykułu.
- Zarządzanie projektem grantowym, w ramach którego finansowana była część badań.

11. [P16] *From single-particle-like to interaction-mediated plasmonic resonances in graphene nanoantennas*

M. M. Müller, M. Kosik, M. Pelc, G. W. Bryant, A. Ayuela, C. Rockstuhl, K. Słowik
Journal of Applied Physics 129, 093103 (2021)

zaproszony artykuł w specjalnym wydaniu J. Appl. Phys. na temat *Plasmonics: Enabling Functionalities with Novel Materials*

impact factor czasopisma: 2.328

liczba punktów na liście Ministerstwa: 70

liczba cytowań: 0

W pracy zastosowano do szeregu rezonansów w odpowiedzi optycznej nanoanteny grafenowej "miarę plazmoniczności" EPI (*energy based plasmonicity index*), zdefiniowaną w artykule w punkcie II.1.10. Pozwala to na dokonanie charakterystyki rezonansów poprzez określenie względnego wkładu zjawisk jednoelektronowych i kolektywnych, związanych z oddziaływaniami kulombowskimi między elektronami. Pokazano, że takie kryterium nie jest równoznaczne z kryterium opartym na badaniu dynamiki ruchu elektronów, w szczególności charakteru oscylacji przestrzennych. Oba kryteria mogą różnie charakteryzować ten sam rezonans, co wskazuje na złożoność pojęcia plazmonu w mikroskopowych układach.

Mój wkład w tę pracę to:

- Zdefiniowanie tematu pracy: badanie porównawcze właściwości rezonansów optycznych nanoanten grafenowych.
- Koordynacja prac partnerów.
- Udział w dyskusjach merytorycznych, dotyczących wszystkich aspektów projektu. Nadzór merytoryczny nad aspektami dotyczącymi dynamiki układu i opisu sprzężenia z polem elektromagnetycznym. Opieka merytoryczna nad zaangażowanymi doktorantami (M. Kosik, M. Müller).
- Napisanie wstępnych wersji fragmentów kodu (równanie dynamiki układu).
- Edycja artykułu.
- Zarządzanie projektem grantowym, w ramach którego finansowana była część badań.

Przed uzyskaniem stopnia doktora:

12. [P23] *Light storage in a tripod medium as a basis for logical operations*

K. Słowik, A. Raczyński, J. Zaremba, S. Zielińska-Kaniasty

Optics Communications 285 (9), 2392-2396 (2012)

impact factor czasopisma: 1.148

liczba punktów na liście Ministerstwa: 30 (70)

liczba cytowań: 15 (GS), 11 (WoS)

13. [P21] *Cross-phase modulation and population redistribution in a periodic tripod medium*
K. Słowik, A. Raczyński, J. Zaremba, S. Zielińska-Kaniasty, M. Artoni, G.C. LaRocca
Journal of Modern Optics 58 (11), 978-987 (2011)
impact factor czasopisma: 1.170
liczba punktów na liście Ministerstwa: 25 (40)
liczba cytowań: 2 (GS, WoS)
14. [P20] *Cross-Kerr nonlinearities in an optically dressed periodic medium*
K. Słowik, A. Raczyński, J. Zaremba, S. Zielińska-Kaniasty, M. Artoni, G.C. LaRocca
Physica Scripta 2011 (T143), 014022 (2011)
impact factor czasopisma: 1.204
liczba punktów na liście Ministerstwa: 25 (40)
liczba cytowań: 3 (GS), 2 (WoS)
15. [P24] *Controlling statistical properties of stored light*
A. Raczyński, **K. Słowik**, J. Zaremba, S. Zielińska-Kaniasty
Optics Communications 279 (2), 324-329 (2007)
impact factor czasopisma: 1.148
liczba punktów na liście Ministerstwa: 30 (70)
liczba cytowań: 10 (GS), 8 (WoS)

II.2. Preprinty (materiały niepublikowane)

1. *Beyond the Rabi model: light interactions with polar atomic systems in a cavity*
G. Scala, **K. Słowik**, P. Facchi, S. Pascazio, F. V. Pepe
arXiv preprint arXiv:2103.11232, w recenzji
2. *Spontaneous emission enhancement of handed molecules*
K. Słowik, M. Kosik
materiały konferencji META2020, przeniesionej ze względów pandemicznych na 2021
3. *Second Quantization of Scattering Modes of Absorptive Photonic Nanostructures*
J. Oppermann, J. Straubel, **K. Słowik**, C. Rockstuhl
arXiv preprint arXiv:1811.06757

4. *Lasing at arbitrary frequencies with atoms with broken inversion symmetry and an engineered electromagnetic environment*

M. Marthaler, M. Koppenhöfer, **K. Słowik**, C. Rockstuhl

arXiv preprint arXiv:1601.01511

liczba cytowań: 3 (GS)

II.3. Recenzowane materiały konferencyjne

1. *Nanoparticles to enhance molecular circular dichroism*

M. Kubek, **K. Słowik**

Advanced Photonics, Optical Society of America, Zurych, Szwajcaria, 2018

DOI: 10.1364/IPRSN.2018.IM2B.3

[https://www.osapublishing.org/](https://www.osapublishing.org/abstract.cfm?URI=IPRSN-2018-IM2B.3)

[abstract.cfm?URI=IPRSN-2018-IM2B.3](https://www.osapublishing.org/abstract.cfm?URI=IPRSN-2018-IM2B.3)

liczba punktów na liście Ministerstwa: 5

liczba cytowań: 0

Materiał zawiera krótki opis badań nad różnicą w stałych absorpcji dla światła spolaryzowanego kołowo prawo- i lewoskrętnie (prawdopodobieństwa absorpcji promieniowania na jednostkę czasu) przez cząsteczki o zadanej skrętności, związanej z ustaloną orientacją elektrycznego i magnetycznego momentu dipolowego przejścia. Różnice absorpcji dla różnych skrętności światła mogą być rozumiane jako wynik interferencji kanałów przejść kwantowych, związanych z elementem elektrycznego i magnetycznego momentu dipolowego przejścia oddziałującym z polem. Badania były prowadzone w kontekście wzmocnienia efektu i poprawy stosunku sygnału do szumu w obecności nanostruktur, wzmacniających lokalne pola magnetyczne, elektryczne, i modyfikujących ich stosunek.

Mój wkład w tę pracę to:

- Pomysł, inicjację i zaplanowanie badań.
- Opieka merytoryczną nad studentką zaangażowaną w projekt.
- Selekcja wyników, napisanie pierwszej wersji pracy.

2. *Antennas for photons: light-matter coupling at nanoscale*

K. Słowik, J. Straubel, C. Rockstuhl

2018 IEEE 7th International Conference on Photonics (ICP), Langkawi, Malezja (2018)

DOI: 10.1109/ICP.2018.8533212

liczba punktów na liście Ministerstwa: 20

liczba cytowań: 0

Artykuł zawiera podsumowanie ram metodologicznych, wypracowanych do opisu oddziaływań układów atomowych z polem elektromagnetycznym, rozpraszonym przez nanoanteny.

Mój wkład w tę pracę to:

- Odpowiedzialność za część merytoryczną dotyczącą dynamiki układu kwantowego.
- Udział w dyskusjach, dotyczących sposobu wyznaczania parametrów równań dynamiki na podstawie właściwości optycznych nanoanten.
- Napisanie pierwszej wersji artykułu.

3. *Comparative Studies of Rib Waveguide Material for Quantum Communication Application*

R. Yusof, N. Ali, P. Kolenderski, K. Slowik, N. Ahmad Hambali

IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 551 (2019) 012018

doi:10.1088/1757-899X/551/1/012018

liczba punktów na liście Ministerstwa: 20

liczba cytowań: 1 (GS)

Praca o charakterze inżynierskim: projekt falowodu o rozmiarach w skali mikronów, optymalizacja materiałów (krzem lub niobian litu na podstawie szklanej) i rozmiarów celem uzyskania struktury jednomodowej. Porównanie przewidywanych rozmiarów modu i zakresu częstotliwości, dla których falowód ma jednomodowy charakter.

Mój wkład w tę pracę to dyskusje merytoryczne i redakcja tekstu materiału.

4. *Nanostructured control of interactions of quantum emitters beyond electric dipole approximation*

M. Kosik, O. Burlayenko, K. Słowik

European Quantum Electronics Conference OSA 2019, 2019 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe & European, 2019, 1, 1

doi:10.1109/CLEOE-EQEC.2019.8871846

Abstrakt wprowadzający w problem wyjścia poza przybliżenie elektryczne dipolowe przy opisie oddziaływania światła z materią.

Mój wkład w badania, których wyniki były prezentowane, objął zainicjowanie kierunku badań, wykonanie zasadniczych fragmentów obliczeń analitycznych, opieka merytoryczna nad zaangażowanymi studentami (M. Kosik, O. Burlayenko), redakcja tekstu.

5. *Enhancing Two-Photon Emission from Epitaxially Grown Quantum Dots with Nano-antennas*

A. Gajewski, K. Słowik, J. Straubel, C. Rockstuhl

Frontiers in Optics / Laser Science, OSA Technical Digest (Optical Society of America, 2018), Waszyngton, USA, paper FW6C.4.

doi:10.1364/FIO.2018.FW6C.4

liczba punktów na liście Ministerstwa: 5

Rozszerzony abstrakt z wybranymi wynikami prac dotyczących projektu nanostruktury łączącej elementy metaliczne i dielektryczne, o odpowiedzi optycznej charakteryzowanej rezonansami typu elektrycznego i magnetycznego dipolowego. Ich interferencja prowadzi do kierunkowej emisji światła. Celem projektu była propozycja anteny, której symetryczna budowa umożliwiłaby wspieranie emisji, niezależnie od polaryzacji promieniowania, której szczególnym zastosowaniem mogłoby być wzmocnienie emisji par splątanych z bi-ekscytonowych kropek kwantowych.

Uwaga: z przyczyn losowych materiał nie został ostatecznie zaprezentowany na konferencji.

Mój wkład w tę pracę to opieka merytoryczna nad doktorantem.

6. *Media of asymmetric atomic systems as low-frequency radiation sources*

P. Gładysz, K. Słowik

SPIE Optics + Photonics, San Diego, USA, 2020 (wirtualna)

Proceedings Volume 11499, Terahertz Emitters, Receivers, and Applications XI; 114990G (2020)

doi:10.1117/12.2567963

liczba cytowań: 0

Materiał konferencyjny w formie prezentacji, podsumowującej wyniki prac nad problemem propagacji impulsów świetlnych przez ubrane optycznie ośrodki cząsteczek charakteryzowanych trwałym momentem dipolowym.

Mój wkład w badania, których wyniki były prezentowane objął zainicjowanie kierunku prac, nakreślenie schematu metody analitycznej i opiekę merytoryczną nad doktorantem.

Materiał konferencyjny zaprezentowany przez mgr. Piotra Gładysza.

7. *Nanostructural beam splitter*

Jakub Szlachetka, Andreas Vetter, Karolina Słowik, Carsten Rockstuhl, Piotr Kolen-
derski

SPIE Optics + Optoelectronics, 2019, Praga, Czechy

Proceedings Volume 11025, Metamaterials XII; 110250X (2019)

doi:10.1117/12.2520858

liczba cytowań: 0

Materiał konferencyjny w formie prezentacji, podsumowującej etap badań nad przygotowa-
niem mikroskopowej płytki światłodziеляjącej w oparciu o metapowierzchnię: tablicę złotych
nanostruktur.

Mój wkład w prace, których wyniki były prezentowane to wybór szczegółowego kierunku ba-
dań, koordynacja projektu, obliczenia analityczne dotyczące statystyki liczb fotonów po prze-
jściu przez płytkę ze stratami absorpcyjnymi, konsultacje merytoryczne dotyczące wszystkich
aspektów problemu.

Materiał konferencyjny prezentowany przez mgr. Jakuba Szlachetkę.

Przed uzyskaniem stopnia doktora:

8. *Cross phase modulation in photonic crystals*

K. Słowik, A. Raczynski, J. Zaremba, S. Zielinska-Kaniasty, M. Artoni, G.C. LaRocca
Nonlinear Optics and Applications V 8071, 807107 (2011)

SPIE Proceedings

impact factor czasopisma: 0.56

liczba punktów Ministerstwa: 10

II.4. Artykuły popularne i promocyjne

1. *Carbon Nanotubes as Exceptional Electrically Driven On-Chip Light Sources*

F. Pyatkov, S. Khasminskaya, V. Fütterling, R. Fechner, **K. Słowik**, S. Ferrari, O.
Kahl, V. Kovalyuk, P. Rath, A. Vetter, B. S. Flavel, F. Hennrich, M. M. Kappes, G.
N. Gol'tsman, A. Korneev, C. Rockstuhl, R. Krupke, W.H.P. Pernice

<http://www.2physics.com/2016/10/>

[carbon-nanotubes-as-exceptional.html](http://www.2physics.com/2016/10/carbon-nanotubes-as-exceptional.html)

Rok publikacji: 2016

2. *Światelko w tunelu* (wersja polska)
Tiny yet powerful: carbon tubes for quantum light (wersja angielska)

K. Słowik

ACADEMIA-Magazyn Polskiej Akademii Nauk, 40-43 (2016)

Przed uzyskaniem stopnia doktora:

3. *Fizyk, czarownica i stara szafa*

A. Buksztel, J. Korociński, **K. Słowik**, M. Pelc, D. Bukowska, A. Górską-Pukownik
Fizyka w Szkole 2/2013, 22-25 (2013)

II.5. Informacja o wystąpieniach na krajowych lub międzynarodowych konferencjach naukowych

Na poniższej liście uwzględniono tylko doniesienia (w formie wykładów na zaproszenie, referatów, plakatów) prezentowane przez habilitantkę.

Wykłady na zaproszenie:

1. Quantum Optics X, planowane na wrzesień 2021 w Toruniu
K. Słowik
2. IEEE 8th International Conference on Photonics, Kota Bharu, Malezja, 2020 (wirtualna)
Plasmonics with graphene flakes: a quantum-mechanical approach
M. Kosik, M. Müller, M. Pelc, C. Rockstuhl, A. Ayuela, **K. Słowik**
3. Current trends in open and nonequilibrium quantum optical systems, Max Planck Institute for Science of Light, Erlangen, Niemcy, lipiec 2018
Quantum optical realization of arbitrary linear transformations allowing for loss and gain
N. Tischler, C. Rockstuhl, **K. Słowik**
4. IEEE 7th International Conference on Photonics, Langkawi, Malezja, kwiecień 2018
Antennas for photons: light-matter coupling at nanoscale
K. Słowik, J. Straubel, C. Rockstuhl

Przed uzyskaniem stopnia doktora:

5. Quantum Technologies Conference, Toruń, sierpień/wrzesień 2010
Nonlinear phase shifts in a periodically dressed tripod atomic medium
K. Słowik

Referaty:

1. META2020, Warszawa, planowane na lipiec 2021 (przesunięte z roku 2020)
Spontaneous emission enhancement of handed molecules
K. Słowik, M. Kosik
2. IV International Conference on Ultrafast Optical Science "UltrafastLight-2020", Moskwa, Rosja, wrzesień - październik 2020
Laser-induced electron dynamics in graphene nanoflakes
K. Słowik, M. Kosik, M. Müller, C. Rockstuhl, M. Pelc, A. Ayuela, G. Bryant
3. Nanolight, Benasque, Hiszpania, marzec 2020
Quantum plasmonics with adatoms at graphene flakes
M. Kosik, M. Müller, M. Pelc, A. Ayuela, C. Rockstuhl, **K. Słowik**
4. Warsztaty naukowe Fotony - Kwanty - Atomy (FOKA) 2, Iława, luty 2019
Fotony, atomy, kwanty w kontekście "nano"
K. Słowik
5. Advanced Photonics (kongres Optical Society of America), Zurych, Szwajcaria, lipiec 2018
Asymmetric molecules in nanostructured environments
K. Słowik, M. Kubek
6. 50th Anniversary European Group on Atomic Systems (EGAS) conference, Kraków, lipiec 2018
Spontaneous emission beyond dipole approximation in nanoscopic environments
K. Słowik, M. Kosik
7. Nanolight, Benasque, Hiszpania, marzec 2018
Nanoantennas for light-matter coupling in multiple parallel channels
J. Straubel, E. Rusak, P. Gładysz, M. Kubek, C. Rockstuhl, **K. Słowik**
8. Quantum Optics IX, Gdańsk, wrzesień 2017
Quantum optical realization of arbitrary linear transformations allowing for loss and gain
K. Słowik, N. Tischler

9. Warsztaty naukowe Fotony - Kwanty - Atomy (FOKA), Kazimierz Dolny, wrzesień 2017
"Nanofotony", atomy i kwanty
K. Słowik
10. International Meeting on Atomic and Molecular Physics and Chemistry, Toruń, czerwiec 2017
Optical nanoantennas for tailored light - matter coupling
K. Słowik, J. Straubel , R. Sarniak , R. Filter , J. Hou , E. Rusak , F. Lederer , C. Rockstuhl
11. META'16, the 7th International Conference on Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics, Malaga, Hiszpania, lipiec 2016
Nanoantennas for a control of higher-multipolar molecular transitions
K. Słowik, E. Rusak , M. Göddel , J. Straubel , M. Kühn , F. Weigend , and C. Rockstuhl
12. 22nd Central European Workshop on Quantum Optics, Warszawa, lipiec 2015
Engineering quantum states of light with multimodal plasmonic nanoantennas
K. Słowik, J. Straubel, R. Filter, R. Sarniak, C. Rockstuhl
13. The 7th International Congress on Advanced Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics, Bordeaux, Francja, wrzesień 2013
Designing optical properties of hybrid nanosystems
K. Słowik, R. Filter, J. Straubel, C. Rockstuhl, F. Lederer
14. 20th Central European Workshop on Quantum Optics, Sztokholm, Szwecja, czerwiec 2013
A fully quantum description of hybrid nanosystems
K. Słowik, R. Filter, J. Straubel, C. Rockstuhl, F. Lederer

Przed uzyskaniem stopnia doktora:

14. SPIE Optics + Optoelectronics, Praga, Czechy, kwiecień 2011
Cross Kerr Effect in Photonic Crystals
K. Słowik
15. OPTO Meeting for Young Researchers & VIth International SPIE Students' Chapters Meeting, Toruń, maj 2011
Transforming qubits carried by light stored in a tripod medium
K. Słowik
16. OPTO Meeting for Young Researchers & V International SPIE Students' Chapters Meeting, Toruń, maj 2010
Nonlinear effects in a simultaneous propagation of two pulses in a periodically dressed atomic medium in the tripod configuration
K. Słowik

Plakaty:

1. Conference on Lasers & Electro-optics (CLEO) Europe, Monachium, Niemcy, czerwiec 2019
Nanostructured control of interactions of quantum emitters beyond electric dipole approximation
M. Kosik, O. Burlayenko, **K. Słowik**
2. 51st Symposium on Mathematical Physics, Toruń, czerwiec 2019
Tailoring properties of atomic systems using photonic environment: analysis beyond electric dipole approximation
M. Kosik, O. Burlayenko, **K. Słowik**
3. European Conference on Atomic and Molecular Physics (ECAMP) 13, Florencja, Włochy, kwiecień 2019
Manipulating emission properties and interactions of atomic systems when electric dipole approximation does not hold
K. Słowik, M. Kosik
oraz *Arbitrary Linear Transformations of Bosonic Modes with Simple Optical Elements*
N. Tischler, C. Rockstuhl, **K. Słowik**
4. Quantum Nanophotonics, Benasque, Hiszpania, marzec 2019
Manipulating emission rates and interactions of quantum emitters beyond electric dipole approximation
M. Kosik, **K. Słowik**
5. Humboldt Kolleg: Controlling quantum matter: From ultracold atoms to solids, Wilno, Litwa, lipiec 2018
Spontaneous emission beyond electric dipole approximation
K. Słowik, M. Kosik
6. 50th Symposium on Mathematical Physics, Toruń, czerwiec 2018
Quantum optical realization of arbitrary linear transformations
N. Tischler, C. Rockstuhl, **K. Słowik**
7. 2nd Interdisciplinary FNP Conference, Warszawa, listopad 2017
Nanoantennas to control light-matter interactions
K. Słowik, A. Gajewski, P. Gładysz, M. Kosik, M. Kubek, E. Rusak, J. Straubel, F. Weigend, C. Rockstuhl
8. Quantum Nanophotonics, Ascona, Szwajcaria, sierpień 2017
Nanoantennas to drive interference of molecular transition pathways
K. Słowik, J. Straubel, E. Rusak, A. Gajewski, M. Kosik, M. Kubek, F. Weigend, C. Rockstuhl

9. META'16, the 7th International Conference on Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics, Malaga, Hiszpania, lipiec 2016
Multimodal nanoantennas for engineering quantum light
K. Słowik, J. Straubel , R. Sarniak , R. Filter, C. Rockstuhl

Przed uzyskaniem stopnia doktora:

10. 18th Central European Workshops on Quantum Optics, Madryt, Hiszpania, czerwiec 2011
On qubit gates operating on stored light
K. Słowik
11. 10th European Conference on Atoms, Molecules and Photons (ECAMP), Salamanka, Hiszpania, lipiec 2010
Nonlinear effects in a simultaneous propagation of two pulses in a periodically dressed atomic medium in the tripod configuration
K. Słowik, M. Artoni, G. La Rocca, A. Raczyński, J. Zaremba, S. Zielińska-Kaniasty
12. Central European Workshop on Quantum Optics, St. Andrews, Szkocja, Wielka Brytania, lipiec 2010
Nonlinear effects in a simultaneous propagation of two pulses in a periodically dressed atomic medium in the tripod configuration
K. Słowik, M. Artoni, G. La Rocca, A. Raczyński, J. Zaremba, S. Zielińska-Kaniasty

Referaty na zaproszenie wygłoszone w innych ośrodkach naukowych:

1. Centre for Quantum Dynamics, Griffiths University, Brisbane, Australia, maj 2020
Quantum plasmonics of graphene nanoflakes with adatoms
M. Müller, C. Rockstuhl, M. Pelc, A. Ayuela, M. Kosik, **K. Słowik**
2. Donostia International Physics Center, San Sebastian, Hiszpania, styczeń 2020
Manipulating emission rates and interactions of quantum emitters beyond electric dipole approximation
K. Słowik, M. Kosik
3. Instytut Fizyki Polskiej Akademii Nauk, seminarium fizyki teoretycznej, marzec 2018
Nanoantennas & atoms: quantum aspects of nanooptics
K. Słowik
4. Zakład Optyki Atomowej, Wydział Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej, Uniwersytet Jagielloński, Kraków, październik 2017
Nanoantennas and atoms: quantum aspects of nanooptics
K. Słowik

5. Zakład Optyki, Wydział Fizyki, Uniwersytet Warszawski, Warszawa, grudzień 2017
Quantum optical realization of arbitrary linear transformations in 5 easy steps
K. Słowik, N. Tischler
6. Wydział Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej UMK, październik 2013
wykład na otwarcie roku akademickiego, byłam w tym czasie zatrudniona na uniwersytecie w Jenie, Niemcy
Kwantowa nanooptyka - oddziaływanie nanoanten z układami atomowymi
K. Słowik
7. Zakład Fizyki, Instytut Matematyki i Fizyki, Uniwersytet Technologiczno - Przyrodniczy w Bydgoszczy, listopad 2016
Nanoanteny i atomy: kwantowe oblicze nanooptyki
K. Słowik

Przed uzyskaniem stopnia doktora:

7. Modern Optics Group, Humboldt Universität, Berlin, Niemcy, marzec 2012
Processing qubits encoded in stored photons
K. Słowik
8. Arbeitsgruppe Falk Lederer, Friedrich Schiller Universität, Jena, Niemcy, kwiecień 2012
Light propagation and storage in tripod-configuration media
K. Słowik
9. Arbeitsgruppe Theoretische Physik III: Quantendynamik und -kontrolle, Universität Kassel, Niemcy, kwiecień 2012
Qubit state processing via light storage in a tripod medium
K. Słowik
10. Theory Division, Max-Planck-Institut für Quantenoptik, Garching, Niemcy, kwiecień 2012
Processing qubits encoded in stored photons
K. Słowik
11. Theory Group of Fundamental Processes in Quantum Physics, Zentrum für Optische Quantentechnologien, Hamburg, Niemcy, kwiecień 2012
Light propagation and storage in tripod-configuration media
K. Słowik

II.6. Udział w komitetach organizacyjnych i naukowych konferencji

1. Komitet organizacyjny konferencji *QSCP 2020 – 25th International Workshop on Quantum Systems in Chemistry, Physics and Biology* zaplanowana w Toruniu w czerwcu

2021 (przesunięte z roku 2020)

2. Organizacja warsztatów *Nanophotonics in Toruń*, oryginalnie planowane na wrzesień 2020 w Toruniu, przeniesione ze względów pandemicznych na rok 2022

II.7. Udział w pracach zespołów badawczych realizujących projekty finansowane w drodze konkursów krajowych lub zagranicznych

W funkcji kierownika:

1. *DAEMoN: Dynamika Asymetrycznych Emiterów kwantowych sterowana za pomocą Nanostruktur*, konkurs SONATA 14, Narodowe Centrum Nauki
Partner grantu: prof. S. Pascasio, Uniwersytet Aldo Moro w Bari, Włochy
od 1 października 2019, 36 miesięcy, w toku realizacji
2. *GRASP: Grafenowe Plazmony Powierzchniowe dla Sterowalnej Kwantowej Elektrodynamiki*, konkurs w ramach wspólnego programu Narodowego Centrum Nauki (BEETHOVEN 2) i Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG), Niemcy
kierownik po stronie niemieckiej: prof. Carsten Rockstuhl, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe, Niemcy
od 1 czerwca 2018, 36 miesięcy, przedłużony, w toku realizacji
3. *HEIMaT: High Enhancement and Interference of Molecular Transitions (Nanoantennas for higher-multipole light-matter coupling)*, konkurs HOMING, Fundacja na rzecz Nauki Polskiej
1 październik 2016-30 listopad 2018, projekt zrealizowany
4. *Light-matter interactions in nanooptical systems beyond dipole approximation*, program wykonawczy Deutscher Akademischer Austauschdienst (DAAD) i Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego (program wymiany akademickiej między Polską a Niemcami), kierownik po stronie niemieckiej: prof. Carsten Rockstuhl, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe, Niemcy
1 styczeń 2017 - 31 grudzień 2018, projekt zrealizowany
5. *Nanoantennas for controlling the enhancement and interference of molecular transitions due to multipole-multipole coupling with light*, konkurs POLONEZ 1, Narodowe Centrum Nauki - rezygnacja przed rozpoczęciem realizacji z powodu konfliktu z grantem *HEIMaT*

W funkcji współwykonawcy:

1. *Entanglement Bell's state teleportation mechanism quantum key distribution utilizing twin-field-technique for critical data protection*,

kierownik: dr Norshamsuri Ali, Uniwersytet w Perlis, Malezja
konkurs Ministerstwa Szkolnictwa Wyższego Malezji
od 1 listopada 2020, 24 miesiące, w toku realizacji

2. *MIODEQ: Miniaturowe zintegrowane układy optyczne do badania efektów kwantowych*, kierownik: dr Piotr Kolenderski, Instytut Fizyki, Wydział Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej, Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu
konkurs SONATA 12, Narodowe Centrum Nauki
od 1 października 2017, 36 miesięcy, w toku realizacji (projekt przedłużony)
3. *Nanostrukturierte plasmonische Reflektoren für Dünnschicht Solarzellen (SolanNano)*, kierownik: prof. Carsten Rockstuhl, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe, Niemcy, konkurs Bundesministerium für Bildung und Forschung
zaangażowanie habilitantki między 1 maja a 30 listopada 2015, projekt zrealizowany
4. *Infrarot – Optische Nanostrukturen für die Photovoltaik*, konkurs Bundesministerium für Bildung und Forschung, kierownik: prof. Thomas Pertsch, Friedrich Schiller Universität, Jena, Niemcy
zaangażowanie habilitantki między 1 stycznia 2014 a 6 maja 2015, projekt zrealizowany
5. *NanoSun2: Design und Herstellung nanostrukturierter Schichtsysteme zur Optimierung des Wirkungsgrades*, konkurs Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG), Niemcy, kierownik: prof. Carsten Rockstuhl, Friedrich Schiller Universität, Jena, Niemcy
zaangażowanie habilitantki między 1 sierpnia 2012 a 31 grudnia 2013, projekt zrealizowany

Inne:

1. *Nanoantennas for generation of nonclassical light*, stypendium podoktorskie w ramach projektu WZROST UMK (Europejski Fundusz Społeczny), zob. punkt II.9.1
1 marzec - 30 listopada 2015, projekt zrealizowany
2. *Propagacja impulsów świetlnych w optycznie ubranych ośrodkach atomowych*, stypendium w ramach Zintegrowanego Programu Operacyjnego Rozwoju Regionalnego UE (przed obroną doktoratu)
1 czerwiec - 30 listopada 2009, projekt zrealizowany

II.8. Członkostwo w międzynarodowych lub krajowych organizacjach i towarzystwach naukowych wraz z informacją o pełnionych funkcjach

Jestem członkiem kilku organizacji i towarzystw, w których nie pełnię aktualnie szczególnych funkcji. Przed uzyskaniem stopnia doktora pełniłam funkcje sekretarza i prezesa lokalnego oddziału koła naukowego, jak szczegółowo wymieniono poniżej.

Aktywne członkostwa:

1. American Chemical Society,
2. SPIE, opiekun studenckiego koła naukowego Wydziale Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej Uniwersytetu Mikołaja Kopernika w Toruniu (WFAiIS UMK),
3. Klub Stypendystów Fundacji na rzecz Nauki Polskiej,
4. Polskie Towarzystwo Fizyczne.

Nieaktywne (przed uzyskaniem stopnia doktora):

1. członek koła naukowego SPIE przy WFAiIS UMK, prezes (2011/2012), sekretarz (2010/2011),
2. członek koła naukowego Optical Society of America przy WFAiIS UMK (2009-2012).

II.9. Informacja o odbytych stażach w instytucjach naukowych, w tym zagranicznych, z podaniem miejsca, terminu, czasu trwania stażu i jego charakteru

1. Staż podoktorski w Karlsruhe Institute of Technology, Karlsruhe, Niemcy, Instytut Teorii Ciała Stałego, grupa prof. Carstena Rockstuhla
marzec 2015 - listopad 2015
2. Staż podoktorski w Friedrich-Schiller-Universität, Jena, Niemcy, Instytut Teorii i Optyki Ciała Stałego, grupa prof. Falka Lederera
sierpień 2012 - maj 2015 (w tym 13 miesięcy urlopu macierzyńskiego/rodzicielskiego)
3. Staż naukowy w Scuola Normale Superiore (SNS), Piza, Włochy
współpraca z prof. Giuseppem La Rocca (SNS) i prof. Maurizioem Artoni (European

Laboratory for Non-Linear Spectroscopy LENS, Florencja, Włochy)
październik - listopad 2009 (przed uzyskaniem stopnia doktora)

4. Krótkie wizyty naukowe:

- 1 miesiąc (maj 2016) w Karlsruhe Institute of Technology, współpraca z grupą prof. Carstena Rockstuhla,
- 1 tydzień (październik 2018) w Karlsruhe Institute of Technology, współpraca z grupą prof. Carstena Rockstuhla,
- 1 tydzień (styczeń 2019) w Donostia International Physics Center, San Sebastian, Hiszpania, referat seminaryjny i współpraca z grupą prof. Andresa Ayueli,
- 1 tydzień (sierpień 2019) w Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norwegia, współpraca z dr Karoliną Milenko,
- 1 tydzień (listopad 2019) na Uniwersytecie Jagiellońskim, współpraca z prof. Szymonem Pustelnym.

II.10. Informacja o recenzowanych pracach naukowych lub artystycznych, w szczególności publikowanych w czasopismach międzynarodowych

Wśród artykułów z moim udziałem autorskim, wszystkie wymienione w punktach I.1, II.1 i II.3 były recenzowane. Spośród nich, prace w I.1 i II.1 ukazały się w czasopismach międzynarodowych, a prace w II.3 stanowią materiały konferencji międzynarodowych.

Recenzowałam artykuły dla czasopism międzynarodowych i materiały konferencyjne:

ACS Photonics,
Chinese Optics Letters,
Computer Physics Communications,
Entropy,
European Physical Journal Plus,
Journal of the Optical Society of America B,
Nanophotonics,
Open Systems & Information Dynamics,
Optica,
Optics Communications,
Optics Letters,

Physica B: Condensed Matter,
Physical Review Applied,
Results in Optics,
Scientific Reports,

materiały konferencji

International Conference on Optics, Photonics and Lasers OPAL' 2018, Barcelona, Hiszpania,

International Conference on Physics, Mathematics and Statistics, Szanghaj, Chiny (2018).

II.11. Informacja o udziale w zespołach badawczych, realizujących projekty inne niż określone w pkt. II.7

Realizuję liczne projekty badawcze we współpracy z grupami w Polsce i na świecie. Nie wszystkie z nich są formalizowane w formie grantów. Nie licząc projektów grantowych, aktywnie współpracuję m.in. z

- grupą prof. Carstena Rockstuhla, Karlsruhe Institute of Technology - nieprzerwanie od czasu zakończenia studiów doktoranckich. Realizowaliśmy wspólnie 2 granty, lecz współpraca wykracza poza tematykę projektów grantowych, wiąże się z regularną wymianą studentów i licznymi wspólnymi pracami naukowymi,
- prof. Andresem Ayuelą z Donostia International Physics Center, San Sebastian, Hiszpania - aktywnie od stycznia 2019, współpraca dotyczy optyki nanostruktur dwuwymiarowych, opublikowaliśmy do tej pory dwie wspólne prace (II.1.10 i II.1.11) i przygotowujemy kolejne; w część prac w tym temacie włączył się też prof. Garnett Bryant z Joint Quantum Institute, University of Maryland i National Institute of Standards & Technology, Maryland, USA,
- dr Karolina Milenko (instytut Sintef, Oslo, Norwegia, wcześniej Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norwegia) w ramach kierowanych przez nią badań nad wykorzystaniem zjawiska powierzchniowo wzmacnianej spektroskopii Ramana do zwiększenia czułości wykrywania szkodliwych substancji w pożywieniu, jestem wymieniona jako partner w jej wniosku grantowym *Nanophotonic waveguides for On-chip surface-Enhanced Raman Scattering sensing (OnSERS)*, współpraca wiąże się z realizacją wymiany osobowej,

- grupą dr. Tobiasza Herra z Center for Free-Electron Laser Science, Deutsches Elektronen-Synchrotron DESY w Hamburgu i dr. hab. Piotra Masłowskiego (UMK) w ramach badań nad wykorzystaniem wzmocnienia plazmonowego do zastosowań spektroskopowych,
- prof. Szymonem Pustelnym z Uniwersytetu Jagiellońskiego - współpraca od 2018 r., wiąże się z wymianą akademicką i dotyczy wsparcia teoretycznego dla eksperymentów prowadzonych w grupie prof. Pustelnego.

Ponadto, po obronie doktoratu

- w latach 2015-2016 opracowałam część danych eksperymentalnych grupy prof. Wolframa Pernice'a, dotyczących zintegrowanych układów fonicznych, a w szczególności dokonałam charakterystyki nanorurek węglowych jako źródeł światła; współpraca zaowocowała publikacją w prestiżowym Nature Photonics (II.1.1),
- od 2015 do 2018 r. prowadziłam badania we współpracy z dr Norą Tischler z Griffiths University, Brisbane na temat przetwarzania stanów kwantowych światła, których wyniki opublikowano w czasopiśmie Physical Review X (II.1.6);
- wspólnie z grupą prof. Sylwii Zielińskiej - Raczyńskiej badałam możliwości sterowania właściwościami optycznymi nanostruktur poprzez wykorzystanie ubranych optycznie ośrodków atomowych (publikacje w Optics Letters i Journal of Optical Society of America B, II.1.3 i II.1.4).

II.12. Informacja o uczestnictwie w zespołach oceniających wnioski o finansowanie badań, wnioski o przyznanie nagród naukowych, wnioski w innych konkursach mających charakter naukowy lub dydaktyczny

1. Wykonałam recenzję dla Narodowego Centrum Nauki (konkurs Preludium, 2015 rok).
2. Byłam członkiem Komisji Konkursowej w sprawie przyznania stypendiów w konkursie „Jubileuszowe stypendium FAJ” dla studentów Wydziału Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej UMK w Toruniu.

II.13. Inne

1. Nagrody:

- stypendium Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego dla wybitnych młodych naukowców (przyznane w 2019 r. na 3 lata),
- Nagrody Rektora UMK
 - II stopnia za indywidualne osiągnięcie naukowe w roku 2017,
 - wyróżnienie za indywidualne osiągnięcia w roku 2018,
 - III stopnia za indywidualne osiągnięcie naukowe w roku 2019,
 - III stopnia za zespołowe osiągnięcie naukowe w roku 2020.

2. Współpracuję naukowo ze studentami na wszystkich etapach studiów.

- Opiekuję się pracami
 - doktorskimi na UMK:
 - * jestem promotorem pomocniczym w przewodzie doktorskim pana mgr. Andrzeja Gajewskiego, uczestnika studiów doktoranckich przy WFAiIS UMK,
 - * jestem promotorem pomocniczym pani mgr Miriam Kosik, uczestniczki studiów doktoranckich przy WFAiIS UMK,
 - * jestem opiekunem pomocniczym w projekcie mgr. Piotra Gładysza w szkole doktorskiej nauk Ścisłych i Przyrodniczych *Academia Scientiaris Thoruniensis* (AST),
 - * jestem opiekunem pomocniczym w projekcie mgr. Saeida Izadshenasa w AST.
 - magisterskimi na UMK: byłam promotorką prac
 - pani Miriam Kosik (2017),
 - pana Karola Karpińskiego (2018),
 - pani Moniki Kubek (2019),
 - pana Piotra Gładysza (2019),
 - magisterską na Friedrich-Schiller-Universität w Jenie, Niemcy - byłam opiekunem pomocniczym pracy magisterskiej pani Jiamin Hou (2014)

- licencjackimi i inżynierskimi: byłam promotorką pracy licencjackiej pana Piotra Gładysza (2017), pracy inżynierskiej pana Rafała Sarniaka (2019).
- Studenci pod moją opieką byli wielokrotnie wyróżniani na poziomie ogólnokrajowym, lokalnym oraz na konferencjach studenckich i doktoranckich:
 - stypendium Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego w latach akademickich 2017/2018 i 2018/2019 (Piotr Gładysz),
 - wyróżnienie za najlepszą pracę magisterską z fizyki WFAiS UMK w roku akademickim 2016/2017 (Miriam Kosik), nagroda za najlepszą pracę licencjacką na WFAiS UMK w roku akademickim 2016/2017 (Piotr Gładysz), wyróżnienie za pracę magisterską w roku akademickim 2018/2019 (Piotr Gładysz),
 - nagroda dla najlepszego studenta WFAiS UMK w roku akademickim 2017/2018 oraz najlepszego absolwenta WFAiS UMK w roku akademickim 2018/2019 (Piotr Gładysz),
 - nagroda za najlepszą prezentację konferencyjną podczas XVI Ogólnopolskiej Sesji Kół Naukowych Fizyków, Wrocław 2017 (Piotr Gładysz), II nagroda za najlepszą prezentację na konferencji International OSA Network of Students (Balványos, Rumunia, 25-28 lipca 2017 r., Miriam Kosik).
- W pracy naukowej regularnie współpracuję ze studentami również z innych grup i innych ośrodków.

Karolina Stojak

(podpis wnioskodawcy)

List of scientific achievements which present a major contribution to the development of a specific discipline

Name of the candidate: Karolina Maria Słowik

Scientometric information:

ResearcherID: B-9402-2017

ORCID: 0000-0003-1314-7004

Google Scholar: oqNU7OoAAAAJ

Hirsch index: 9 (Google Scholar), 8 (Web of Science)

total number of citations: 406 (Google Scholar), 295 (Web of Science)

total number of citations excluding self-citations:

358 (Google Scholar), 266 (Web of Science)

total number of points by the Ministry¹: 1690, including:

publications after 2018 (range 0 - 200 points per publication): 1090 points

publications until 2018 (range 0 - 50 points per publication): 600 points

The full list of the candidate's articles in scientific journals includes the articles listed in section I.1, which contribute to the habilitation achievement, and other articles in section II.1.

I. Information on scientific achievements set out in art. 219 para 1. point 2 of the Act

Title of contribution: *Application of nanoantennas for the control of light-matter interactions at the nanoscale*

I.1. Cycle of scientific articles related thematically, pursuant to art. 219 para 1. point 2b of the Act

The articles included in the habilitation achievement are listed chronologically below. In the text of the Summary of Professional Accomplishments, works were discussed in thematic

¹Ministry of Science and Higher Education, Poland (until 2020), Ministry of Education and Science, Poland (from 2021)

groups, and the resulting numbering [H1-H9] is not consistent with the chronological order. For convenience, the reference number from the Summary is given next to each title below.

The information on the Impact Factor is based on the NCU² Expertus basis / Web of Science. Publications in which the candidate is the corresponding author are marked with an asterisk next to her surname. In articles 1 and 2, the corresponding author has not been indicated.

1. [H6] *Strong coupling of optical nanoantennas and atomic systems*

K. Słowik, R. Filter, J. Straubel, F. Lederer, C. Rockstuhl

Physical Review B 88 (19), 195414 (2013)

journal impact factor: 3.664

number of Ministry points: 35 (140)

number of citations: 48 (GS), 40 (WoS)

The work is devoted to the study of the conditions of strong coupling between atomic systems and the electromagnetic field scattered by a metallic nanoantenna and combines many aspects of the problem. An example nanoantenna geometry was engineered with a narrow gap between its elements, that supports a strong concentration of electromagnetic fields. Atomic systems positioned in the spatial regions of the electric field hot-spots are coupled to the field with a strength exceeding the electromagnetic energy scattering / absorption rates. A theoretical method was developed to calculate the parameters of quantum dynamics equations of the coupled system, based on the simulated optical response of the nanoantenna and assuming a single resonance approximation. The dynamics of the quantum systems, for various conditions of the possible experiment, were characterised. The corresponding absorption spectra of the coupled system were found. Finally, it was shown that for weak pumping fields, a semi-classical description is adequate, even under strong coupling conditions.

One of the figures was selected by the Physical Review B Editor to be displayed on the front page of the journal web site "Kaleidoscope"

<https://journals.aps.org/prb/kaleidoscope/November2013>

My contribution to this work includes:

- Defining the problem. Participation in discussions on all aspects of the problem. Contribution to the development of the method for determining the parameters of quantum equations on the basis of classical simulations.
- The entire quantum description, code implementation and related simulations. Models and calculations of the dynamics of the system, study of the spectra, study of the conditions of applicability of the semi-classical approximation.

²Nicolaus Copernicus University in Torun, Poland

- Preparation of the first version of the article manuscript.

2. [H1] *Dissipation-driven entanglement between qubits mediated by plasmonic nanoantennas*

J. Hou, **K. Słowik**, F. Lederer, C. Rockstuhl

Physical Review B 89, 235413 (2014)

journal impact factor: 3.736

number of Ministry points: 35 (140)

number of citations: 45 (GS), 30 (WoS)

The work discusses the scheme for entanglement generation between a pair of atomic systems, for which the electromagnetic field scattered by the nanoantenna is the carrier of interactions. The dynamics of the system has been comprehensively discussed, in particular, in the adiabatic regime, in which the description can be simplified by introducing effective parameters and the Dicke basis, known from the superradiance problem. An important result of the work is the determination of the conditions in which the state of a pair of atomic systems adiabatically tends towards a fully entangled state (that is the dark state of the system), with the efficiency limited by the lifetime of the dark state. This result is largely independent of the specific parameters of the nanoantenna but requires a certain asymmetry between the atomic systems that make the entangled pair.

My contribution to this work includes:

- The idea, initiation and planning of research, selection of analytical and numerical methods.
- The main part of the analytical derivations, adiabatic elimination. Implementation of large parts of the code, testing the applicability range of the adiabatic approximation. Discussions and analysis of the physical mechanisms of the generation of entanglement in the system.
- Supervision of the master student involved in research (Jiamin Hou).
- Preparation of the first version of the article.

3. [H4] *Nanoantennas for ultrabright single-photon sources*

R. Filter, **K. Słowik**, J. Straubel, F. Lederer, C. Rockstuhl

Optics Letters 39 (5), 1246-1249 (2014)

journal impact factor: 3.292

number of Ministry points: 40 (140)

number of citations: 30 (GS), 21 (WoS)

The work is a proposal for a single-photon source based on an optically pumped two-level system. The emission from the excited system occurs at short time scales due to the presence of a nanoantenna, whose resonant optical response is designed to spectrally match the emission

line of the atomic system. The study characterised the expected emission efficiency, statistical and spectral properties of the generated light. An important result is a trade-off between the emission efficiency and the degree of non-classical nature of light, expressed by the second-order correlation function. Analytical solutions to the stationary Heisenberg equation were found using the rotating wave and Markovian approximations. In a broad range of parameter space, the approximate analytical solutions agree very well with the exact solutions obtained numerically by integrating the Lindblad equation without approximations.

My contribution to this work includes:

- Discussions on all aspects of the problem, contribution to the main idea.
- The entire quantum description: analytical description using the Heisenberg and the Lindblad equations, code implementation and numerical integration of the Lindblad equation. Characterisation of the emission efficiency, statistical properties and emission spectra.
- Editing the final version of the article.

4. [H5] *Plasmonic nanoantenna based triggered single-photon source*

J. Straubel, R. Filter, C. Rockstuhl, **K. Słowik***

Physical Review B 93 (19), 195412 (2016)

journal impact factor: 3.836

number of Ministry points: 35 (140)

number of citations: 20 (GS), 16 (WoS)

A scheme for a miniaturised single-photon source has been proposed in the article, which - unlike the one described above in point 3 - would generate photons on demand, triggered by illumination with an electromagnetic pulse. The proposal is based on the atomic system in the lambda configuration of three active energy levels. This setup is a source of photons generated as the atomic system undergoes one of its quantum transitions. Its efficiency and directional properties depend on the geometry of the nanoantenna. The paper presents a simulation of the course of the experiment for a selected antenna shape and characterises the statistical properties of the emitted light. Moreover, a simplified description applicable in the Markovian approximation, allowed us to derive the conditions of efficient photon emission and express them in terms of the parameters of a possible experimental system.

My contribution to this work includes:

- Idea, research initiation and participation in discussions on all aspects of the work.
- Entire quantum description: theoretical description of the dynamics of a quantum system, analytical calculations leading to the effective picture, derivation of the conditions for efficient emission. Code implementation and numerical calculations regarding the dynamics of the system, comparison of the results in the full and effective pictures, calculations regarding the statistical properties of the emitted light.

- Preparation of the first version of the manuscript.

5. [H7] *Efficient mode conversion in an optical nanoantenna mediated by quantum emitters*

J. Straubel, R. Filter, C. Rockstuhl, **K. Słowik***

Optics Letters 41 (10), 2294-2297 (2016)

journal impact factor: 3.416

number of Ministry points: 35 (140)

number of citations: 2 (GS), 1 (WoS)

The optical properties of nanoantennas are characterised in terms of bright (with strong emission and absorption) and dark (low in emission and absorption) modes. Dark modes are interesting because of their long lifetimes, but their disadvantage is the limited "access" - such modes are difficult to excite. The paper characterises a nanoantenna that supports two resonances in a given spectral range, only one of which can be excited with an appropriately polarised plane wave. The other resonance can only be excited with a localised dipole source. It was shown that the presence of an atomic system may fundamentally modify the emission properties, through the induced conversion between the antenna modes.

My contribution to this work includes:

- Discussions, contribution to the formulation of the concept of work.
- Full quantum calculations: Calculation of the stationary quantum state of the atomic system and light scattered by the antenna. Code implementation and numerical simulations of the number of scattered photons and conversion efficiency.
- Preparation of the first version of the manuscript.

6. [H8] *Entangled light from bimodal optical nanoantennas*

J. Straubel, R. Sarniak, C. Rockstuhl, **K. Słowik***

Physical Review B 95 (8), 085421 (2017)

journal impact factor: 3.813

number of Ministry points: 35 (140)

number of citations: 9 (GS), 6 (WoS)

The article proposes a source of entangled light based on the interaction of a two-mode nanoantenna with an optically pumped atomic system. The nanoantenna is not - as in previous works - only a "passive" element used to amplify the signal. On the contrary, in the described scenario, its two-mode character is a source of nonclassicality in the system, and the high light absorption and scattering rates by the antenna, usually understood as a detrimental source of loss, here allow to improve quantum statistics by eliminating the probability of emitting higher numbers of photons simultaneously.

My contribution to this work includes:

- The idea of using a two-mode nanoantenna to generate and modify non-classical states of light.
- Theory and detailed planning of the quantum calculations: description of the quantum state of light, its interaction with the atomic system, the degree of entanglement, etc.
- Participation in discussions on characterisation methods for nanoantenna modes.
- Preparation of the first version of the article.
- Coordination of the work of the team, supervision of the student (R. Sarniak) involved in the project.

7. [H3] *Enhancement of and interference among higher order multipole transitions in molecules near a plasmonic nanoantenna*

E. Rusak, J. Straubel, P. Gładysz, M. Göddel, A. Kędziorski, M. Kühn, F. Weigend, C. Rockstuhl, **K. Słowik***

Nature Communications 10(1), 1-8 (2019)

journal impact factor: 12.121

number of Ministry points: 200

number of citations: 12 (GS), 6 (WoS)

This is chronologically the first in a series of articles on corrections beyond the electric dipole approximation in the description of light-matter interactions at the vicinity of metallic or dielectric nanostructures. The study characterised the influence of the modified photonic environment on the spontaneous emission rate. The methodology was fully based on numerical calculations of the amplification of different components of electromagnetic fields scattered by the nanoantenna illuminated by multipolar sources. These calculations are equivalent to finding the density of photon states for different multipoles and their superposition. As the most important result, the study revealed that a coherent superposition of multipolar sources, which may represent a molecule, may lead to interference of interactions with the photonic environment in several channels, corresponding to individual sources. In particular, this opens up the possibility of reducing the spontaneous emission rate through interference, with potential applications in quantum information science or spectroscopy.

My contribution to this work includes:

- Idea to drop the electric dipole approximation, the theoretical method.
- Management of the entire project, work coordination.
- Supervision of students involved in the project: E. Rusak, M. Göddel, P. Gładysz.
- Code implementation and calculation of transition probabilities based on data on the field enhancement and values of multipolar transition moments.
- Results analysis and data selection.
- Preparation of the first version of the article, corrections, correspondence with the publisher.

- Managing the grant project within which the research was done.

8. [H2] *Interaction of atomic systems with quantum vacuum beyond electric dipole approximation*

M. Kosik, O. Burlayenko, C. Rockstuhl, I. Fernandez-Corbaton, **K. Słowik**★
 Scientific Reports 10(1), 1-12 (2020)

journal impact factor: 3.998

number of Ministry points: 140

number of citations: 3 (GS), 1 (WoS)

The paper presents a semi-analytical approach to describe the interaction of atomic systems with light, that includes contributions beyond the common electric dipole approximation. The approximation is well justified, when the spatial size-scale, on which the electromagnetic-field changes occur, significantly exceeds the size of the atomic system. Thus, the electric dipole approximation does not apply to large-size atomic systems (e.g. quantum dots), or in the vicinity of metallic or dielectric nanostructures that strongly focus electromagnetic radiation, even to subwavelength spatial domains. The formalism developed in the work enables the characterisation of the emission properties (spontaneous emission rate, Lamb shift) of atomic systems. These properties, in general, depend on the environment and are modified, for example, in an optical cavity, in presence of nanostructures, or at an interface between different media. In the developed approach, the properties of the photonic environment are taken into account by means of the electromagnetic Green's tensor, which is known analytically for relatively simple geometries. The tensor has been calculated numerically for exemplary geometries. In the developed approach, the characterisation of the emission properties of the system is based on a few parameters, i.e. values of transition moment elements, which simplifies the calculations both in relation to the methods of other authors based on wave functions and in relation to the numerical method used in the work mentioned in point I.1.7.

My contribution to this work includes:

- The idea, initiation and planning of research, selection of the analytical method.
- The main part of analytical derivations: application of obtained formulas for analytical calculations for the example of vacuum.
- Coordination of the work of the team and supervision of the work of the involved students (M. Kosik, O. Burlayenko).
- Preparation of the main part of the first version of the article (except for the numerical sections); edition of the final version.
- Managing the grant project within which the research was done.

9. [H9]*Interaction and Entanglement of a Pair of Quantum Emitters near a Nanoparticle: Analysis beyond Electric-Dipole Approximation*

M. Kosik, **K. Słowik***

Entropy 22(2), 135 (2020)

journal impact factor: 2.494

number of Ministry points: 100

number of citations: 1 (GS, WoS)

The article is a continuation of the work from point I.1.8. This time, the emphasis was put on the influence of the photonic environment, e.g. modified by metallic nanoantennas, on collective phenomena: multipole-multipole interactions and collective decay (superradiance). The interactions may result in the entanglement of atomic systems. The theory presented in the article is general, and as a specific example, a pair of identical two-level systems in the vicinity of a silver nanosphere were investigated, for which the intensity of interactions, the probability of collective transition rates, and the degree of entanglement in the steady state were calculated. For the selected orientations of their multipole transition moments, not only a significant quantitative impact of corrections over the electric dipole approximation was demonstrated, but also qualitative changes related to breaking the spatial symmetry of the results, mainly due to the magnetic interactions.

The methodology of this work combines the formalism from article I.1.8, extended to include interactions with an external laser beam necessary to achieve entanglement, and the method of calculating the degree of entanglement of a pair of systems described in work I.1.2, based on works of other authors.

My contribution to this work includes:

- Concept of the works, extension of the methodology.
- Supervision of the doctoral student, a significant contribution to the interpretation of the results.
- Preparation of the first version of the article and subsequent corrections.
- Managing the grant project within which the research was done.

II. Information on scientific activity

II.1. List of articles published in scientific journals, not mentioned in section I.1

The asterisk next to the surname marks the articles in which the candidate is the corresponding author.

1. [C10] *Fully integrated quantum photonic circuit with an electrically driven light source*
S. Khasminskaya, F. Pyatkov, **K. Słowik**, S. Ferrari, O. Kahl, V. Kovalyuk, P. Rath, A. Vetter, F. Hennrich, M. M. Kappes, G. Gol'Tsman, A. Korneev, C. Rockstuhl, R. Krupke, W. H.P. Pernice

Nature Photonics 10 (11), 727-732 (2016)

journal impact factor: 37.852

number of Ministry points: 50 (200)

number of citations: 166 (GS), 128 (WoS)

The subject of this article is the first photonic circuit integrated on a chip, consisting of an electrically controlled source of nonclassical light, a waveguide and a single-photon detector. Electrically-driven carbon nanotubes were used as sources of photons, that were next guided to integrated superconducting detectors.

My contribution to this work includes:

- Processing of selected results: analysis of statistical properties of light emitted from the nanotubes, confirmation of its nonclassical character.
- Preparation of the description of the relevant parts of the article and supplementary materials. Contributions to the remaining parts of the article.
- Participation in selected discussions.

2. [C3] *Coupling of quantum emitters and metallic nanoantennae for the generation of nonclassical light at high rates*

K. Słowik*, R. Filter, J. Straubel, F. Lederer, C. Rockstuhl

Physica Scripta 2014 (T160), 014037 (2014)

journal impact factor: 1.126

number of Ministry points: 25 (40)

number of citations: 0

The article contains an extension and an in-depth analysis of the problem of nonclassical light generation by a specific nanoantenna. In particular, the emission characteristics were investigated in the strong coupling regime, in which the statistical properties of the emitted light are changed (there are deviations from the single-photon nature of the emission). The emission spectrum is significantly modified as well, due to the formation of light-matter dressed states.

My contribution to this work includes:

- Concept and participation in discussions.
- Quantum dynamics calculations and results analysis.
- Preparation of the first version of the work.

3. [C6] *Tunable narrowband plasmonic resonances in electromagnetically induced transparency media*

D. Ziemkiewicz, **K. Słowik***, S. Zielińska-Raczyńska

Journal of the Optical Society of America B 34 (9), 1981-1988 (2017)

journal impact factor: 2.048

number of Ministry points: 35 (70)

number of citations: 3 (GS), 2 (WoS)

The optical response of metallic nanostructures may strongly depend on the dispersion properties of their dielectric environment. What is more, it is possible to optically control the dispersion profile of selected atomic gases. A particular example is the phenomenon of electromagnetically induced transparency. The paper proposes a method of tuning the spectral position of plasmonic resonances based on their interactions with optically dressed atomic gases.

My contribution to this work includes:

- Contribution to the concept.
- Participation in discussions on all aspects of the problem.
- Manuscript edition.
- Managing the grant project within which the research was done.

4. [C7] *Ultraslow long-living plasmons with electromagnetically induced transparency*

D. Ziemkiewicz, **K. Słowik***, S. Zielińska-Raczyńska

Optics letters 43 (3), 490-493 (2018)

journal impact factor: 3.866

number of Ministry points: 45 (140)

number of citations: 8 (GS, WoS)

The paper proposes a method of controlling the velocity of surface plasmon polaritons propagation, based on the phenomena of electromagnetically induced transparency and a light slowdown in optically dressed atomic gases. The polaritons produced at the interface of a thin metal layer and a glass substrate on one side, and an optically dressed medium on the other side, were investigated. The obtained values of the group velocity of polariton propagation were smaller by even two orders of magnitude than the velocity of light in vacuum, and the polariton lifetime was found to be correspondingly increased. The mechanism responsible for both phenomena is the generation of a specific type of "superpolariton": the electromagnetic part of the plasmonic polariton forms a polariton with optically dressed atoms of the medium. Then, a part of the field energy is transferred to the atoms of the medium and stored in the form of atomic coherence, which is responsible for the reduction of the propagation speed, the suppression of the field absorption in the metal, and the correspondingly extended polariton lifetime.

My contribution to this work includes:

- Discussions on all aspects of the problem.
- Manuscript edition.
- Managing the grant project within which the research was done.

5. [C8] *Quantum description of radiative decay in optical cavities*

J. Oppermann, J. Straubel, **K. Słowik**, and C. Rockstuhl

Physical Review A 013809 (2018)

journal impact factor: 2.907

number of Ministry points: 35 (140)

number of citations: 2 (GS, WoS)

In cavity quantum electrodynamics, it is usually assumed that the system either has negligible losses, or the losses are described by the Lindblad model. According to this model, losses correspond to the transfer of energy to the environment, the state of which is not the subject of the description. In the experimental situation, however, the radiation "losses", i.e., the electromagnetic field radiated from the cavity, is the subject of the experiment, and its state carries information about the state of the atom and the field in the cavity. The work provides a description method, in which information about the state of the radiated field (spectral and directional distribution, polarisation) is naturally available through *input-output* relations.

My contribution to this work includes:

- Discussions on all aspects of the problem.
- Edition of the article text.
- Managing the grant project within which the research was done.

6. [C11] *Quantum optical realization of arbitrary linear transformations allowing for loss and gain*

N. Tischler, C. Rockstuhl, **K. Słowik**★

Physical Review X 8 (2), 021017 (2018)

journal impact factor: 12.211

number of Ministry points: 45 (200)

number of citations: 17 (GS), 10 (WoS)

In quantum optics, information can be encoded in the path, which a photon follows. Transformations of the photon state can be implemented with simple optical elements, beam splitters and phase-shifting plates. They are building blocks of interferometers, logic gates, etc.: In literature, a representation of an arbitrary unitary transformation with a sequence of such basic elements is known. However, unitary transformations are only a narrow class of possible photon state transformations. In fact, every optical element is made of dispersive materials

which are lossy. In laboratories, junctions with a different number of inputs and outputs are used. Amplifiers are based on active elements in which photons are generated, e.g., in the process of parametric frequency division. The work provides a new method of decomposing an arbitrary linear transformation, not necessarily unitary and not necessarily preserving the number of photons, in a series of basic optical elements: beam splitters, phase shifters and active elements. Example applications for the implementation of positive operator-valued measures, or the design of probabilistic quantum protocols were discussed.

My contribution to this work includes:

- Contribution to the choice of research topic and development of the concept.
- Participation in the development of the method constituting the main result of the article.
- Solution and description of an example and one of the applications.
- Edition of the article text.
- Managing the grant project within which the research was done.

7. [C18] *Propagation of optically tunable coherent radiation in a gas of polar molecules*

P. Gładysz, P. Weisło, **K. Słowik**

Scientific Reports 10, 17615 (2020)

journal impact factor: 3.998

number of Ministry points: 140

number of citations: 2 (GS), 0 (WoS)

The spatial asymmetry of atomic systems corresponds to a nonzero permanent electric dipole moment element, related to the distribution of charges in the eigenstate. In the description of the interaction with light, the electric dipole moment of transition between a pair of states plays the main role, while the permanent moment is usually neglected. However, the permanent dipole moment, if nonzero, is also important: if the interaction with light induces periodic transitions between a pair of states with different values of the permanent dipole moment, there are two types of dipole moment oscillations in the system: 1) those that origin at the transition moment, with a frequency corresponding to the energy difference of the eigenstates, and 2) those induced by the permanent dipole, with a frequency corresponding to the Rabi frequency of transitions. The latter are a source of radiation with the frequency of transitions, which is optically controllable and usually belongs to the microwave domain. The paper develops a theoretical description of propagation of a microwave pulse, generated in an optically dressed medium of molecules, characterised by a permanent dipole moment. The description combines the propagation equation with the Bloch equations of the medium evolution and is a generalisation of the familiar system of Bloch-Maxwell equations. The necessary extensions involve dropping the traditionally made approximation of the slowly-varying envelope and the generalisation of the rotating wave approximation. Using the developed theoretical and numerical tools, the formation of a coherent radiation pulse, and the possibility of its optical

control, were confirmed. A molecular medium, polarised with a constant electric field, has been proposed, in which the microwave pulse generation can be expected.

My contribution to this work includes:

- Selection of the research topic and the proper formalism. Outline of the analytical derivations, selection of methods and approximations.
- Supervision of the PhD student involved in the project.
- Discussions on all aspects of the problem.
- Article edition.
- Managing the grant project within which the research was done.

8. [C12] *Waveguide platform for quantum anticentrifugal force*

A. Gajewski, D. Gustaw, N. R. Yusof, N. Ali, **K. Słowik**, P. Kolenderski

Optics Letters 45, 3373-3376 (2020)

journal impact factor (2019): 3.714

number of Ministry points: 140

number of citations: 2 (GS), 0 (WoS)

Propagation of electromagnetic field in waveguides is usually described in terms of modes. If the waveguide is bent, the eigenmodes are distorted. This behaviour is a consequence of Maxwell's equations supplemented with constitutive relations. The application of the paraxial approximation leads to the analytically solvable Helmholtz equation. The formal analogy between the Helmholtz equation for a cylindrically-symmetric bent waveguide, and the Schrödinger equation for a particle in a cylindrically-symmetric potential, allows for the identification of corresponding elements in these problems and of the corresponding solutions. In particular, the mentioned Schrödinger equation includes the term called centrifugal potential, associated with a fictitious quantum centrifugal force, acting on a particle. Likewise, the centres of the electromagnetic modes shift towards the inner or outer edge of the waveguide depending on the quantum numbers that characterise the mode. Analytical solutions to the Helmholtz equation, and the corresponding numerical solutions of Maxwell's equations, were found and discussed in the article for realistic waveguide designs, proposed as prototype classical systems for studying analogues of quantum fictitious forces.

My contribution to this work includes:

- Supervision over the doctoral student involved in the project (A. Gajewski).
- Discussions on all aspects of the project.
- Edition of the article.
- Managing the grant project within which the research was done.

9. [C4] *Light interaction with extended quantum systems in dispersive media*

G. Scala, F.V. Pepe, P. Facchi, S. Pascazio, **K. Słowik**

New Journal of Physics, 22, 123047 (2020)

number of Ministry points: 140

journal impact factor: 3.539

number of citations: 1 (GS), 0 (WoS)

The work concerns the problem of interactions of spatially extended quantum systems with light, for which the approximation of a point electric dipole is not justified. The spatial structure of the system is taken into account by means of wavefunctions, allowing one to avoid the problem of divergence, known from the literature. The influence of the atomic system's spatial structure on quantities such as the spontaneous emission rate, Lamb shift or the interaction strength with the electromagnetic field is usually very small, but it can potentially be enhanced in the vicinity of dispersive media, including nanostructures. The paper developed the theory of interactions of light with matter without the approximation of the point dipole and on the basis of electromagnetic Green's functions. These functions carry the information on the structure and dispersive properties of the medium. Selected quantum systems, characterised by spatial asymmetry, were investigated: a hydrogen atom in a constant electromagnetic field and an asymmetric quantum dot.

My contribution to this work includes:

- Formulation of the idea and definition of the research direction.
- Discussions on all aspects of the problem. Supervision of the doctoral student (G. Scala) involved in the project, in particular during his internships in Toruń.
- Analytical calculations, code implementation, and numerical calculations for the hydrogen atom.
- Article edition.
- Managing the grant project within which the research was done.

10. [C15] *Energy-Based Plasmonicity Index to Characterize Optical Resonances in Nanostructures*

M. M. Müller, M. Kosik, M. Pelc, G. W. Bryant, A. Ayuela, C. Rockstuhl, K. Słowik

The Journal of Physical Chemistry C 124 (44), 24331-24343 (2020)

journal impact factor: 4.189

number of Ministry points: 140

number of citations: 1 (GS, WoS)

The work concerns the fundamental issue at the interface between molecular optics and nanophotonics - questions about the nature of plasmonic excitations in nanoparticles or chemical molecules composed of several hundred atoms. The optical response of such molecules contains resonances of single-particle or of collective character, in which interactions between

electrons play an important role. However, the answer to the question of how to distinguish them is still not clear, and different criteria may correspond to different manifestations of the phenomenon of plasmonic excitations. The paper defines the measure of the degree of plasmonicity, or collectivity, of resonance, based on the dynamics of the state of the system in the energy space. It is applied to selected systems: atom chains, polyacenes, graphene nanoantennas. The new measure gives results for these systems, qualitatively consistent with results obtained within selected and well-known methods, e.g. the method of scaling the Coulomb interactions, but requires much smaller computational effort.

My contribution to this work includes:

- Defining the direction of research: dynamics of the electrons in graphene nanoantennas subject to illumination. Choosing the proper calculation methods.
- Coordination of collaboration among the partners.
- Participation in discussions on all aspects of the project. Supervision of works on aspects related to the dynamics of the system and description of coupling with the electromagnetic field. Supervision over the involved PhD students.
- Implementation of code fragments.
- Article edition.
- Managing the grant project within which the research was done.

11. [C16] *From single-particle-like to interaction-mediated plasmonic resonances in graphene nanoantennas*

M. M. Müller, M. Kosik, M. Pelc, G. W. Bryant, A. Ayuela, C. Rockstuhl, K. Słowik
Journal of Applied Physics 129, 093103 (2021)

invited article in the Journal of Applied Physics special issue *Plasmonics: Enabling Functionalities with Novel Materials*

journal impact factor: 2.328

number of Ministry points: 70

number of citations: 0

In this work, the EPI (*energy based plasmonicity index*), defined in the article in point II.1.10, has been applied to a series of resonances found in the optical response of graphene nanoantennas. The resonances were characterised by the relative contribution of single-electron and collective phenomena, related to the Coulomb interactions between electrons. It has been shown, that such a criterion is not equivalent to a criterion based on the study of the dynamics of electronic motion, in particular, on the character of spatial oscillations. Both criteria may characterise the same resonance differently, which indicates the complexity of the concept of a plasmon in microscopic systems.

My contribution to this work includes:

- Defining the direction of research: comparison of properties of optical resonances in graphene nanoantennas.
- Coordination of collaboration of the partners.
- Participation in discussions on all aspects of the project. Supervision of works on aspects related to the dynamics of the system and description of coupling with the electromagnetic field. Supervision over the involved PhD students.
- Implementation of code fragments.
- Article edition.
- Managing the grant project within which the research was done.

Before obtaining the doctoral degree:

- [C23] *Light storage in a tripod medium as a basis for logical operations*
K. Słowik, A. Raczyński, J. Zaremba, S. Zielińska-Kaniasty
 Optics Communications 285 (9), 2392-2396 (2012)
 journal impact factor: 1.148
 number of Ministry points: 30 (70)
 number of citations: 15 (GS), 11 (WoS)
- [C21] *Cross-phase modulation and population redistribution in a periodic tripod medium*
K. Słowik, A. Raczyński, J. Zaremba, S. Zielińska-Kaniasty, M. Artoni, G.C. LaRocca
 Journal of Modern Optics 58 (11), 978-987 (2011)
 journal impact factor: 1.170
 number of Ministry points: 25 (40)
 number of citations: 2 (GS, WoS)
- [C20] *Cross-Kerr nonlinearities in an optically dressed periodic medium*
K. Słowik, A. Raczyński, J. Zaremba, S. Zielińska-Kaniasty, M. Artoni, G.C. LaRocca
 Physica Scripta 2011 (T143), 014022 (2011)
 journal impact factor: 1.204
 number of Ministry points: 25 (40)
 number of citations: 3 (GS), 2 (WoS)

15. [C24] *Controlling statistical properties of stored light*
A. Raczyński, K. Słowik, J. Zaremba, S. Zielińska-Kaniasty
Optics Communications 279 (2), 324-329 (2007)
journal impact factor: 1.148
number of Ministry points: 30 (70)
number of citations: 10 (GS), 8 (WoS)

II.2. Preprints (unpublished material)

1. *Beyond the Rabi model: light interactions with polar atomic systems in a cavity*
G. Scala, **K. Słowik**, P. Facchi, S. Pascazio, F. V. Pepe
arXiv preprint arXiv:2103.11232, under review
2. *Spontaneous emission enhancement of handed molecules*
K. Słowik, M. Kosik
materials of the META2020 conference, postponed to the year 2021 for pandemic reasons
3. *Second Quantization of Scattering Modes of Absorptive Photonic Nanostructures*
J. Oppermann, J. Straubel, **K. Słowik**, C. Rockstuhl
arXiv preprint arXiv:1811.06757
4. *Lasing at arbitrary frequencies with atoms with broken inversion symmetry and an engineered electromagnetic environment*
M. Marthaler, M. Koppenhöfer, **K. Słowik**, C. Rockstuhl
arXiv preprint arXiv:1601.01511
number of citations: 3 (GS)

II.3. Peer-reviewed conference materials

1. *Nanoparticles to enhance molecular circular dichroism*
M. Kubek, **K. Słowik**
Advanced Photonics, Optical Society of America, Zürich, Switzerland, 2018
DOI: 10.1364/IPRSN.2018.IM2B.3
<https://www.osapublishing.org/abstract.cfm?URI=IPRSN-2018-IM2B.3>

number of Ministry points: 5

number of citations: 0

The material contains a brief description of research on the difference in the absorption rates for right- and left-circularly polarised light, by molecules with a given chirality, related to the relative orientation of the electric and magnetic dipole moments of a transition. Absorption differences for different circular polarisations of light can be understood as a result of interference of quantum transition channels, related to the electric and magnetic transition dipole moments interacting with the field. The results are discussed in the context of enhancing the effect and improving the signal-to-noise ratio in presence of nanostructures, boosting local magnetic and electric fields, and modifying their ratio.

My contribution to this work includes:

- Idea, initiation and planning of research.
- Supervision of the student involved in the project.
- Selection of results, writing the first version of the manuscript.

2. *Antennas for photons: light-matter coupling at nanoscale*

K. Słowik, J. Straubel, C. Rockstuhl

2018 IEEE 7th International Conference on Photonics (ICP), Langkawi, Malaysia (2018)

DOI: 10.1109/ICP.2018.8533212

number of Ministry points: 20

number of citations: 0

The article summarises the methodological framework, developed to describe the interactions of atomic systems with the electromagnetic field, scattered by nanoantennas.

My contribution to this work includes:

- Work on the aspects related to the dynamics of the quantum systems.
- Participation in discussions on the method of determining the parameters of the dynamics equations, based on the optical properties of nanoantennas.
- Writing the first version of the article.

3. *Comparative Studies of Rib Waveguide Material for Quantum Communication Application*

R. Yusof, N. Ali, P. Kolenderski, K. Slowik, N. Ahmad Hambali

IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 551 (2019) 012018

doi:10.1088/1757-899X/551/1/012018

number of Ministry points: 20

number of citations: 1 (GS)

Engineering work on micron-sized waveguide design. Optimisation of materials (silicon or lithium niobate on glass base) and sizes was performed to achieve a single-mode structure. Comparison of the predicted mode sizes and the frequency range for which the waveguide has a single-mode character.

My contribution to this work includes participation in discussions and editing the text of the material.

4. *Nanostructured control of interactions of quantum emitters beyond electric dipole approximation*

M. Kosik, O. Burlayenko, K. Słowik

European Quantum Electronics Conference OSA 2019, 2019 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe & European, 2019, 1, 1

doi:10.1109/CLEOE-EQEC.2019.8871846

An abstract introducing the problem of including terms beyond the electric dipole approximation in the description of light-matter interactions.

My contribution to the research, the results of which were here presented, included initiating the research direction, performing the main fragments of analytical calculations, supervision over the students involved (M. Kosik, O. Burlayenko), editing the text.

5. *Enhancing Two-Photon Emission from Epitaxially Grown Quantum Dots with Nano-antennas*

A. Gajewski, K. Słowik, J. Straubel, C. Rockstuhl

Frontiers in Optics / Laser Science, OSA Technical Digest (Optical Society of America, 2018), paper FW6C.4.

doi:10.1364/FIO.2018.FW6C.4

number of Ministry points: 5

Extended abstract with selected results of work on the design of a nanostructure, combining metallic and dielectric elements, with an optical response characterised by electric and magnetic dipole resonances. Their interference leads to directional light emission. The aim of the project was to propose an antenna, whose symmetric structure would support the emission of radiation regardless of its polarisation, a particular application of which could be to enhance the emission of entangled pairs from bi-excitonic quantum dots.

Note: due to reasons independent of the authors, the material has not eventually been presented at the conference.

My contribution is the supervision of the doctoral student.

6. *Media of asymmetric atomic systems as low-frequency radiation sources*

P. Gładysz, K. Słowik

SPIE Optics + Photonics, San Diego, USA, 2020 (online)

Proceedings Volume 11499, Terahertz Emitters, Receivers, and Applications XI; 114990G (2020)

doi:10.1117/12.2567963

number of citations: 0

Conference material in the form of a presentation summarising the results of work on the problem of propagation of light pulses by optically dressed media of molecules characterised by a permanent dipole moment.

My contribution to the research, the results of which were presented, included initiating the research and defining its direction, outlining the analytical method and supervising the doctoral student.

The material was presented by Piotr Gładysz.

7. *Nanostructural beam splitter*

Jakub Szlachetka, Andreas Vetter, Karolina Słowik, Carsten Rockstuhl, Piotr Kolen-derski

SPIE Optics + Optoelectronics, 2019, Prague, Czech Republic

Proceedings Volume 11025, Metamaterials XII; 110250X (2019)

doi:10.1117/12.2520858

number of citations: 0

Conference material in the form of a presentation, summarising the state of research on the preparation of a microscopic beam-splitting plate, based on a meta-surface made of gold nanostructures.

My contribution to the work, the results of which were presented, was the selection of the re-search direction, project coordination, analytical calculations of the photon number statistics after a passage through the absorptive plate, and consultations on all aspects of the problem.

The material has been presented by Jakub Szlachetka.

Before obtaining the doctoral degree:

8. *Cross phase modulation in photonic crystals*

K. Słowik, A. Raczynski, J. Zaremba, S. Zielinska-Kaniasty, M. Artoni, G.C. LaRocca
Nonlinear Optics and Applications V 8071, 807107 (2011)

SPIE Proceedings

journal impact factor: 0.56
number of Ministry points: 10

II.4. Popular and promotion articles

1. *Carbon Nanotubes as Exceptional Electrically Driven On-Chip Light Sources*
F. Pyatkov, S. Khasminskaya, V. Fütterling, R. Fechner, **K. Słowik**, S. Ferrari, O. Kahl, V. Kovalyuk, P. Rath, A. Vetter, B. S. Flavel, F. Hennrich, M. M. Kappes, G. N. Gol'tsman, A. Korneev, C. Rockstuhl, R. Krupke, W.H.P. Pernice
<http://www.2physics.com/2016/10/carbon-nanotubes-as-exceptional.html>
Publication year: 2016
2. *Światelko w tunelu* (Polish version)
Tiny yet powerful: carbon tubes for quantum light (English version)
K. Słowik
ACADEMIA-Magazine of Polish Academy of Sciences, 40-43 (2016)
Before obtaining the doctoral degree:
3. *Fizyk, czarownica i stara szafa* (*The physicist, the witch and the wardrobe*)
A. Buksztel, J. Korociński, **K. Słowik**, M. Pelc, D. Bukowska, A. Górską-Pukownik
Fizyka w Szkole ("Physics at School" journal) 2/2013, 22-25 (2013)

II.5. Presentations given at national or international scientific conferences

The list below includes only conference contributions (in the form of invited lectures, oral and poster presentations), presented by the candidate.

Invited lectures:

1. Quantum Optics X, planned in September 2021 in Toruń, Poland
K. Słowik
2. IEEE 8th International Conference on Photonics, Kota Bharu, Malaysia, 2020 (online)
Plasmonics with graphene flakes: a quantum-mechanical approach
M. Kosik, M. Müller, M. Pelc, C. Rockstuhl, A. Ayuela, **K. Słowik**

3. Current trends in open and nonequilibrium quantum optical systems, Max Planck Institute for Science of Light, Erlangen, Germany, July 2018
Quantum optical realization of arbitrary linear transformations allowing for loss and gain
N. Tischler, C. Rockstuhl, **K. Słowik**
4. IEEE 7th International Conference on Photonics, Langkawi, Malaysia, April 2018
Antennas for photons: light-matter coupling at nanoscale
K. Słowik, J. Straubel, C. Rockstuhl

Before obtaining the doctoral degree:

5. Quantum Technologies Conference, Toruń, Poland, August/September 2010
Nonlinear phase shifts in a periodically dressed tripod atomic medium
K. Słowik

Oral presentations:

1. META2020, Warsaw, Poland, planned in July 2021 (postponed from the 2020)
Spontaneous emission enhancement of handed molecules
K. Słowik, M. Kosik
2. IV International Conference on Ultrafast Optical Science “UltrafastLight-2020”, Moscow, Russia, September - October 2020
Laser-induced electron dynamics in graphene nanoflakes
K. Słowik, M. Kosik, M. Müller, C. Rockstuhl, M. Pelc, A. Ayuela, G. Bryant
3. Nanolight, Benasque, Spain, March 2020
Quantum plasmonics with adatoms at graphene flakes
M. Kosik, M. Müller, M. Pelc, A. Ayuela, C. Rockstuhl, **K. Słowik**
4. Fotony - Kwanty - Atomy (FOKA workshop) 2, Łąwa, Poland, February 2019
Fotony, atomy, kwanty w kontekście "nano" (Photons, atoms, quanta in the "nano" context)
K. Słowik
5. Advanced Photonics (congress of the Optical Society of America), Zürich, Switzerland, July 2018
Asymmetric molecules in nanostructured environments
K. Słowik, M. Kubek
6. 50th Anniversary European Group on Atomic Systems (EGAS) conference, Cracow, Poland, July 2018
Spontaneous emission beyond dipole approximation in nanoscopic environments
K. Słowik, M. Kosik

7. Nanolight, Benasque, Spain, March 2018
Nanoantennas for light-matter coupling in multiple parallel channels
J. Straubel, E. Rusak, P. Gładysz, M. Kubek, C. Rockstuhl, **K. Słowik**
8. Quantum Optics IX, Gdańsk, Poland, September 2017
Quantum optical realization of arbitrary linear transformations allowing for loss and gain
K. Słowik, N. Tischler
9. Fotony - Kwanty - Atomy (FOKA workshop), Kazimierz Dolny, Poland, September 2017
"Nanofotony", atomy i kwanty, ("Nano-photons", atoms and quanta)
K. Słowik
10. International Meeting on Atomic and Molecular Physics and Chemistry, Toruń, Poland, June 2017
Optical nanoantennas for tailored light - matter coupling
K. Słowik, J. Straubel, R. Sarniak, R. Filter, J. Hou, E. Rusak, F. Lederer, C. Rockstuhl
11. META'16, the 7th International Conference on Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics, Malaga, Spain, July 2016
Nanoantennas for a control of higher-multipolar molecular transitions
K. Słowik, E. Rusak, M. Göddel, J. Straubel, M. Kühn, F. Weigend, and C. Rockstuhl
12. 22nd Central European Workshop on Quantum Optics, Warsaw, Poland, July 2015
Engineering quantum states of light with multimodal plasmonic nanoantennas
K. Słowik, J. Straubel, R. Filter, R. Sarniak, C. Rockstuhl
13. The 7th International Congress on Advanced Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics, Bordeaux, France, September 2013
Designing optical properties of hybrid nanosystems
K. Słowik, R. Filter, J. Straubel, C. Rockstuhl, F. Lederer
14. 20th Central European Workshop on Quantum Optics, Stockholm, Sweden, June 2013
A fully quantum description of hybrid nanosystems
K. Słowik, R. Filter, J. Straubel, C. Rockstuhl, F. Lederer

Before obtaining the doctoral degree:

14. SPIE Optics + Optoelectronics, Prague, Czech Republic, April 2011
Cross Kerr Effect in Photonic Crystals
K. Słowik
15. OPTO Meeting for Young Researchers & VIth International SPIE Students' Chapters Meeting, Toruń, Poland, May 2011

Transforming qubits carried by light stored in a tripod medium

K. Słowik

16. OPTO Meeting for Young Researchers & V International SPIE Students' Chapters Meeting, Toruń, Poland, May 2010

Nonlinear effects in a simultaneous propagation of two pulses in a periodically dressed atomic medium in the tripod configuration

K. Słowik

Poster presentations:

1. Conference on Lasers & Electro-optics (CLEO) Europe, Munich, Germany, June 2019
Nanostructured control of interactions of quantum emitters beyond electric dipole approximation

M. Kosik, O. Burlayenko, **K. Słowik**

2. 51st Symposium on Mathematical Physics, Toruń, Poland, June 2019
Tailoring properties of atomic systems using photonic environment: analysis beyond electric dipole approximation

M. Kosik, O. Burlayenko, **K. Słowik**

3. European Conference on Atomic and Molecular Physics (ECAMP) 13, Florence, Italy, April 2019

Manipulating emission properties and interactions of atomic systems when electric dipole approximation does not hold

K. Słowik, M. Kosik

and *Arbitrary Linear Transformations of Bosonic Modes with Simple Optical Elements*

N. Tischler, C. Rockstuhl, **K. Słowik**

4. Quantum Nanophotonics, Benasque, Spain, March 2019
Manipulating emission rates and interactions of quantum emitters beyond electric dipole approximation

M. Kosik, **K. Słowik**

5. Humboldt Kolleg: Controlling quantum matter: From ultracold atoms to solids, Vilnius, Lithuania, July 2018

Spontaneous emission beyond electric dipole approximation

K. Słowik, M. Kosik

6. 50th Symposium on Mathematical Physics, Toruń, Poland, June 2018

Quantum optical realization of arbitrary linear transformations

N. Tischler, C. Rockstuhl, **K. Słowik**

7. 2nd Interdisciplinary FNP Conference, Warsaw, Poland, November 2017

Nanoantennas to control light-matter interactions

K. Słowik, A. Gajewski, P. Gładysz, M. Kosik, M. Kubek, E. Rusak, J. Straubel, F. Weigend, C. Rockstuhl

8. Quantum Nanophotonics, Ascona, Switzerland, August 2017
Nanoantennas to drive interference of molecular transition pathways
K. Słowik, J. Straubel, E. Rusak, A. Gajewski, M. Kosik, M. Kubek, F. Weigend, C. Rockstuhl
9. META'16, the 7th International Conference on Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics, Malaga, Spain, July 2016
Multimodal nanoantennas for engineering quantum light
K. Słowik, J. Straubel, R. Sarniak, R. Filter, C. Rockstuhl

Before obtaining the doctoral degree:

10. 18th Central European Workshops on Quantum Optics, Madrid, Spain, June 2011
On qubit gates operating on stored light
K. Słowik
11. 10th European Conference on Atoms, Molecules and Photons (ECAMP), Salamanca, Spain, July 2010
Nonlinear effects in a simultaneous propagation of two pulses in a periodically dressed atomic medium in the tripod configuration
K. Słowik, M. Artoni, G. La Rocca, A. Raczyński, J. Zaremba, S. Zielińska-Kaniasty
12. Central European Workshop on Quantum Optics, St. Andrews, Scotland, United Kingdom, July 2010
Nonlinear effects in a simultaneous propagation of two pulses in a periodically dressed atomic medium in the tripod configuration
K. Słowik, M. Artoni, G. La Rocca, A. Raczyński, J. Zaremba, S. Zielińska-Kaniasty

Invited seminars:

1. Centre for Quantum Dynamics, Griffiths University, Brisbane, Australia, May 2020
Quantum plasmonics of graphene nanoflakes with adatoms
M. Müller, C. Rockstuhl, M. Pelc, A. Ayuela, M. Kosik, **K. Słowik**
2. Donostia International Physics Center, San Sebastian, Spain, January 2020
Manipulating emission rates and interactions of quantum emitters beyond electric dipole approximation
K. Słowik, M. Kosik
3. Institute of Physics, Polish Academy of Sciences, theoretical physics seminar, March 2018
Nanoantennas & atoms: quantum aspects of nanooptics
K. Słowik

4. Atomic Optics Department, Faculty of Physics, Astronomy and Applied Computer Science, Jagiellonian University, Cracow, October 2017
Nanoantennas and atoms: quantum aspects of nanooptics
K. Słowik
5. Division of Optics, Faculty of Physics, University of Warsaw, Warsaw, Poland, December 2017
Quantum optical realization of arbitrary linear transformations in 5 easy steps
K. Słowik, N. Tischler
6. Faculty of Physics, Astronomy and Informatics, NCU, October 2013
lecture for the opening of the academic year, at that time I was employed at the university of Jena, Germany
Quantum nanooptics - interaction of nanoantennas with atomic systems
K. Słowik
7. Physics Division, Institute of Mathematics and Physics, University of Technology and Life Sciences in Bydgoszcz, Poland, November 2016
Nanoantennas and atoms: quantum aspects of nano-optics
K. Słowik

Before obtaining the doctoral degree:

7. Modern Optics Group, Humboldt Universität, Berlin, Germany, March 2012
Processing qubits encoded in stored photons
K. Słowik
8. Arbeitsgruppe Falk Lederer, Friedrich Schiller Universität, Jena, Germany, April 2012
Light propagation and storage in tripod-configuration media
K. Słowik
9. Arbeitsgruppe Theoretische Physik III: Quantendynamik und -kontrolle, Universität Kassel, Germany, April 2012
Qubit state processing via light storage in a tripod medium
K. Słowik
10. Theory Division, Max-Planck-Institut für Quantenoptik, Garching, Germany, April 2012
Processing qubits encoded in stored photons
K. Słowik
11. Theory Group of Fundamental Processes in Quantum Physics, Zentrum für Optische Quantentechnologien, Hamburg, Germany, April 2012
Light propagation and storage in tripod-configuration media
K. Słowik

II.6. Participation in organizational and scientific committees at conferences

1. Organizing Committee of the conference *QSCP 2020 – 25th International Workshop on Quantum Systems in Chemistry, Physics and Biology* planned in Toruń, Poland in June 2021 (postponed from 2020)
2. Organisation of the workshop *Nanophotonics in Toruń*, originally planned for September 2020 in Toruń, postponed for pandemic reasons to the year 2022

II.7. Participation in the works of research teams realising projects financed through national and international competitions

Function: principal investigator

1. *DAEMoN: Dynamics of Asymmetric quantum Emitters Manipulated with Nanostructures*, competition SONATA 14, National Science Centre, Poland
Project partner: prof. Saverio Pascazio, Aldo Moro University, Bari, Italy
from 1st October 2019, 36 months, in progress
2. *GRASP: Graphene Surface Plasmons for Tunable Cavity Quantum Electrodynamics*, Polish-German Funding Initiative of the National Science Centre, Poland (BEETHOVEN 2 competition) and the Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG), Germany
principal investigator in the German side: prof. Carsten Rockstuhl, Karlsruhe Institute of Technology, Karlsruhe, Germany
from 1st June 2018, 36 months, prolonged, in progress
3. *HEIMaT: High Enhancement and Interference of Molecular Transitions (Nanoantennas for higher-multipole light-matter coupling)*, HOMING competition, Foundation for Polish Science
from 1st October 2016 to 30th November 2018, completed
4. *Light-matter interactions in nanooptical systems beyond dipole approximation*, executive programme of the Deutscher Akademischer Austauschdienst (DAAD) and the Ministry of Science and Higher Education, Poland (academic exchange programme between Poland and Germany), principal investigator on the German side: prof. Carsten Rockstuhl, Karlsruhe Institute of Technology, Karlsruhe, Germany
1st January 2017 - 31st December 2018, completed
5. *Nanoantennas for controlling the enhancement and interference of molecular transitions due to multipole-multipole coupling with light*, POLONEZ 1 competition, National Science Centre, Poland - resignation prior to the commencement of implementation due to the conflict with the *HEIMaT* project

Function: co-investigator

1. *Entanglement Bell's state teleportation mechanism quantum key distribution utilizing twin-field-technique for critical data protection*,
principal investigator: Dr Norshamsuri Ali, University of Perlis, Malaysia
competition of the Ministry of Higher Education, Malaysia
from 1st November 2020, 24 months, in progress
2. *MIODEQ: Miniaturised Integrated Optical Devices for Experiments on light and plasmonic Quanta*,
principal investigator: Dr Piotr Kolenderski, Institute of Physics, Faculty of Physics, Astronomy and Informatics, Nicolaus Copernicus University in Torun, Poland
SONATA 12 competition, National Science Centre, Poland
from 1st October 2017, 36 months, prolonged, in progress
3. *Nanostrukturierte plasmonische Reflektoren für Dünnschicht Solarzellen (SolanNano)*,
principal investigator: prof. Carsten Rockstuhl, Karlsruhe Institut of Technology, Karlsruhe, Germany, competition of the Bundesministerium für Bildung und Forschung
candidate's involvement from 1st May until 30th November 2015, completed
4. *Infrarot – Optische Nanostrukturen für die Photovoltaik*, competition of the Bundesministerium für Bildung und Forschung, principal investigator: prof. Thomas Pertsch, Friedrich Schiller Universität, Jena, Germany
candidate's involvement from 1st January 2014 until 6th May 2015, completed
5. *NanoSun2: Design und Herstellung nanostrukturierter Schichtsysteme zur Optimierung des Wirkungsgrades*, competition of the Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG), Germany, principal investigator: prof. Carsten Rockstuhl, Friedrich Schiller Universität, Jena, Germany
candidate's involvement from 1st August 2012 until 31st December 2013, completed

Others:

1. *Nanoantennas for generation of nonclassical light*, postdoctoral stipend within the WZROST project at NCU (European Social Fund), see section II.9.1
1st March - 30th November 2015, completed
2. *Propagation and processing of light pulses in optically dressed atomic media*, scholarship within the European Union Integrated Operational Programme for Regional Growth (before obtaining the doctoral degree)
1st June - 30th November 2009, completed

II.8. Membership in international or national organizations and scientific societies

I am a member of several organisations and societies in which I do not currently hold any special functions. Before obtaining the doctoral degree, I was an officer of a local student chapter, as described below.

Active memberships:

1. American Chemical Society,
2. SPIE, advisor of the student chapter at the Faculty of Physics, Astronomy and Informatics (FPAI), Nicolaus Copernicus University in Torun, Poland,
3. Association of the Foundation for Polish Science Scholars,
4. Polish Physical Society.

Inactive (before obtaining the doctoral degree):

1. member of the local SPIE student chapter at the FPAI NCU, president (2011/2012), secretary (2010/2011),
2. member of the local Optical Society of America student chapter at the FPAI NCU (2009-2012).

II.9. Information on internships completed in scientific institutions

1. Postdoctoral fellowship at the Karlsruhe Institute of Technology, Karlsruhe, Germany, Institute of Theoretical Solid State Physics, group of prof. Carsten Rockstuhl
March 2015 - November 2015
2. Postdoctoral internship at the Friedrich-Schiller-Universität, Jena, Germany, Institute of Solid State Physics and Condensed Matter Theory, group of prof. Falk Lederer
August 2012 - May 2015 (including 13 months of maternity / parental leave)
3. Research internship at Scuola Normale Superiore (SNS), Pisa, Italy
collaboration with prof. Giuseppe La Rocca (SNS) and prof. Maurizio Artoni (Euro-

pean Laboratory for Non-Linear Spectroscopy LENS, Florence, Italy)
October - November 2009 (before obtaining the doctoral degree)

4. Short scientific visits:

- 1 month (May 2016) at the Karlsruhe Institute of Technology, collaboration with prof. Carsten Rockstuhl's group,
- 1 week (in October 2018) at the Karlsruhe Institute of Technology, collaboration with prof. Carsten Rockstuhl's group,
- 1 week (in January 2019) in Donostia International Physics Center, San Sebastian, Spain, seminar talk and collaboration with the group of prof. Andres Ayuela,
- 1 week (in August 2019) at the Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway, collaboration with Dr Karolina Milenko,
- 1 week (in November 2019) at the Jagiellonian University, Cracow, Poland, collaboration with prof. Szymon Pustelny.

II.10. Information on scientific or artistic works reviewed, in particular, those published in international journals

Among the articles with my author contribution, all of the works listed in points I.1, II.1 and II.3 were peer-reviewed. Among them, the articles in I.1 and II.1 were published in international journals, and works in II.3 are materials of international conferences.

I reviewed works for the following journals and the following conference materials:

ACS Photonics,
Chinese Optics Letters,
Computer Physics Communications,
Entropy,
European Physical Journal Plus,
Journal of the Optical Society of America B,
Nanophotonics,
Open Systems & Information Dynamics,
Optica,
Optics Communications,

Optics Letters,
Physica B: Condensed Matter,
Physical Review Applied,
Results in Optics,
Scientific Reports, article article conference materials:
International Conference on Optics, Photonics and Lasers OPAL'2018, Barcelona, Spain,
International Conference on Physics, Mathematics and Statistics, Shanghai, China 2018.

II.11. Information on participation in research teams realizing projects other than those defined in section II.7

I participate in numerous research projects in collaboration with groups in and outside Poland. Not all of them are formalised as grant projects. Apart from the official grant, I actively collaborate with

- the group of prof. Carsten Rockstuhl, Karlsruhe Institute of Technology - continuously since the end of my doctoral studies. We carried out two grant projects together, but the cooperation goes beyond the subject of grants, involves a frequent exchange of students and numerous joint research works,
- prof. Andres Ayuela from Donostia International Physics Center, San Sebastian, Spain - active since January 2019, the collaboration concerns the optics of two-dimensional nanostructures, so far we have published two joint papers (II.1.10 and II.1.11) and others are in preparation; parts of the works in this subject are performed in cooperation with prof. Garnett Bryant of the Joint Quantum Institute of the University of Maryland and National Institute of Standards & Technology, Maryland, USA,
- Dr Karolina Milenko (Sintef institute, Oslo, Norway, previously: Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway), theory support of her experiments on surface-enhanced Raman spectroscopy, with the goal to increase the sensitivity of detection of dangerous substances in food, I am listed as a partner in her grant application *Nanophotonic waveguides for On-chip surface-Enhanced Raman Scattering sensing (OnSERS)*, the cooperation involves academic exchange,
- the group of Dr Tobias Herr of the Center for Free-Electron Laser Science, Deutsches Elektronen-Synchrotron DESY in Hamburg, Germany and Dr hab. Piotr Masłowski

(NCU), as part of research on the use of plasmonic enhancement for spectroscopic applications,

- prof. Szymon Pustelny of the Jagiellonian University, Cracow, Poland - cooperation active since 2018, involves academic exchange and concerns theory support for experiments carried out in the group of prof. Pustelny.

Additionally, after obtaining the doctoral degree:

- in 2015-2016, I processed selected experimental data of the group of prof. Wolfram Pernice, concerning integrated photonic circuits; in particular, I have characterised the properties of carbon nanotubes as light sources; the cooperation resulted in a publication in the prestigious Nature Photonics (II.1.1),
- from 2015 to 2018, I collaborated with Dr Nora Tischler from the Griffiths University, Brisbane, Australia, on the processing of quantum states of light, the results of which were published in the Physical Review X journal (II.1.6),
- together with the group of prof. Sylwia Zielińska-Raczyńska, I investigated the possibilities of controlling the optical response of nanostructures through the use of optically dressed atomic media (two publications in Optics Letters and the Journal of Optical Society of America B, II.1.3 and II.1.4).

II.12. Information on membership in the teams assessing applications for financing of research projects, applications for scientific awards, applications in other competitions of scientific or didactic character

1. I made a review for the National Science Centre, Poland (Preludium competition, 2015).
2. I was a member of the Competition Committee for the award of scholarships in the competition "Jubilee FAJ³ Scholarship" for students of the Faculty of Physics and Astronomy and Informatics, NCU, Toruń.

II.13. Others

³Aleksander Jabłoński Foundation by the FPAI NCU

1. Awards:


- scholarship of the Minister of Science and Higher Education for outstanding young scientists (awarded in 2019 for 3 years),
- NCU Rector Awards
 - II degree for individual scientific achievements in 2017,
 - distinction for individual achievements in 2018,
 - III degree for individual scientific achievements in 2019,
 - III degree for team scientific achievements in 2020.

2. I collaborate scientifically with students at all stages of their studies.

- I supervise
 - doctoral students at NCU: I am the proposed assistant supervisor of Mr Andrzej Gajewski, PhD student at the FPAI NCU, Ms Miriam Kosik, PhD student at the FPAI NCU, Mr Piotr Gładysz, a student of the Doctoral School of Science and Natural Sciences *Academia Scientaris Thoruniensis* (AST), Mr Saeid Izadshenas at the AST,
 - master students at NCU: I was the supervisor of Ms Miriam Kosik (2017), Mr Karol Karpiński (2018), Ms Monika Kubek (2019), Mr Piotr Gładysz (2019), a master thesis at the Friedrich-Schiller-Universität in Jena, Germany - I was the assistant supervisor of the thesis of Ms Jiamin Hou (2014),
 - bachelor and bachelor of engineering students: I was the supervisor of Mr Piotr Gładysz (2017), Mr Rafał Sarniak (2019).
- The students under my supervision have been awarded at the national and local level, as well as at student conferences:
 - scholarship of the Minister of Science and Higher Education in the academic years 2017/2018 and 2018/2019 (Piotr Gładysz),
 - distinction for an outstanding master thesis in physics at the FPAI NCU in the academic year 2016/2017 (Miriam Kosik), the best bachelor thesis at the

FPAI NCU in the academic year 2016/2017 (Piotr Gładysz), distinction for the best master thesis at the FPAI NCU in the academic year 2018/2019 (Piotr Gładysz),

- award for the best FPAI NCU student in the 2017/2018 academic year and the best FPAI NCU graduate in the 2018/2019 academic year (Piotr Gładysz),
 - award for the best conference presentation during the 16th National Session of Physicists' Scientific Student Chapters, Wrocław, Poland 2017 (Piotr Gładysz), 2nd award for the best presentation at the International OSA Network of Students conference (Balványos, Romania, July 25-28, 2017, Miriam Kosik)
- In my research work, I regularly collaborate with students from other groups and research institutes.



(Applicant's signature)