

## OPTYKA NIELINIOWA I KWANTOWA W POZNANIU<sup>1</sup>

Ryszard Tanaś

*Zakład Optyki Nieliniowej, Instytut Fizyki, Uniwersytet im. Adama Mickiewicza,  
Umultowska 85, 61-614 Poznań*

„Znów dokonuje się w fizyce przewrót: tym razem optyka odsłania nam nowe oblicze. A chociaż była już dawno piękna i niemal doskonała, ukazuje nam się teraz jeszcze piękniejsza i doskonalsza, a zarazem potężniejsza.” — napisał Profesor Arkadiusz Piekara w 1966 roku, a więc 30 lat temu, w Przedmowie do pierwszego wydania swojej książki „Nowe oblicze optyki” [1]. Lata 60-te, po uruchomieniu w 1960 r. pierwszego lasera, były okresem burzliwego rozwoju optyki nieliniowej — nowego działu optyki opisującego bogactwo zjawisk jakie ukazały się oczom badaczy kiedy rzucili światło lasera na ośrodek złożony z atomów czy molekuł. Atomy bądź molekuly pod wpływem silnych pól elektrycznego i magnetycznego o częstościach optycznych podlegają nieliniowej polaryzacji ujawniając nieznanne w optyce liniowej własności. Nieliniowa odpowiedź ośrodka na przyłożone z zewnątrz pole elektryczne była przedmiotem zainteresowania Profesora Piekary już w okresie międzywojennym, kiedy to pracując w Rydzynie odkrył efekt odwrotnego nasycenia dielektrycznego. Badania te kontynuował po wojnie już jako profesor Uniwersytetu Poznańskiego. W 1956 r. A. D. Buckingham [2] przedstawił teorię zjawiska orientacji molekuł w silnym polu elektrycznym fali świetlnej. W przypadku pola optycznego, o częstościach rzędu  $10^{15}$  Hz, trwałe momenty dipolowe molekuł nie nadążają za zmianami pola i mechanizmem, który może prowadzić do orientacji molekuł w takich polach jest oddziaływanie pola z indukowanym w molekule momentem dipolowym. Teoria tego zjawiska została jeszcze w latach 50-tych, a więc zanim powstały pierwsze lasery, rozwinięta przez Piekarę i Kielicha, ucznia Piekary, rozpoczynającego wówczas swoją pracę badawczą w dziedzinie optyki nieliniowej. Tak więc optyka nieliniowa powstała w Poznaniu jeszcze przed pojawieniem się pierwszego lasera, a następnie stała się jedną ze specjalności poznańskich.

Kiedy zaczęły powstawać pierwsze masery i lasery, Profesor Piekara postanowił, że w Poznaniu powinny zostać zbudowane takie urządzenia. Miały one stanowić nowoczesną bazę do prowadzenia badań eksperymentalnych w dziedzinie radiospektroskopii i optyki nieliniowej. Prace nad skonstruowaniem masera rozpoczęły się w 1960 r., a kierował nimi Profesor (obecnie) Jan Stankowski, zaś prace nad konstrukcją lasera rozpoczęły się w 1962 r. pod kierunkiem Profesora (obecnie) Franciszka Kaczmarka. Prace te zakończyły się pełnym sukcesem — zarówno masery jak i lasery zostały w ośrodku poznańskim uruchomione — pierwszy laser 5 grudnia 1963 r., zaś pierwszy maser 2 stycznia 1964 r. Ich powstanie miało swoją dramaturgię. Bliższe szczegóły zmagających do ich powstania można znaleźć w publikacji „W ćwierćwiecze odkrycia lasera” [3] i nie będę ich tutaj przytaczał. Dość powiedzieć, że ośrodek poznański stał się czołowym w Polsce ośrodkiem w dziedzinie radiospektroskopii i elektroniki kwantowej. Tutaj powstały podręczniki „Wstęp do elektroniki kwantowej” autorstwa Jana Stankowskiego i Andrzeja Graji [4] oraz „Wstęp do fizyki laserów” napisany przez Franciszka Kaczmarka [5]. W

---

<sup>1</sup>Nauka, 1997, Nr 3, str. 156

1964 r. została w Poznaniu zorganizowana pierwsza konferencja REK (Radiospektroskopia i Elektronika Kwantowa). Konferencje REK odbywały się co dwa lata, dopóki nie rozdzieliły się tematycznie na RAMIS (Radiospektroskopia) i EKON (Elektronika Kwantowa i Optyka Nieliniowa). Pierwsza konferencja EKON poświęcona elektronice kwantowej i optyce nieliniowej odbyła się w 1974 r., a przewodniczącym jej Komitetu Organizacyjnego był Profesor Stanisław Kielich. Kalendarium tych konferencji można znaleźć w [3]. Ostatnia konferencja EKON odbyła się w 1980 r., kolejna, w roku 1982, nie doszła do skutku z powodu stanu wojennego w Polsce. Także w następnych latach konferencja EKON nie została reaktywowana. Jak się wydaje jej tradycyjna formuła nieco się przeżyła i wymagałaby modyfikacji, tym niemniej, trochę żal, że tradycja konferencji EKON w Poznaniu nie została podtrzymana. Badania w dziedzinie elektroniki kwantowej i optyki nieliniowej były jednak i są nadal kontynuowane.

W tym krótkim szkicu chciałbym napisać kilka słów o prowadzonych w Poznaniu badaniach w dziedzinie optyki nieliniowej i kwantowej, w szczególności zaś, o badaniach prowadzonych przez Profesora Stanisława Kielicha i Jego uczniów. Zacznę od tego, że obecnie w Instytucie Fizyki UAM badania w dziedzinie optyki nieliniowej prowadzone są w kilku zakładach: Zakładzie Elektroniki Kwantowej kierowanym przez Profesora Franciszka Kaczmarka, Zakładzie Optyki kierowanym przez Profesora Mariana Surmę, Zakładzie Biofizyki Molekularnej kierowanym przez Profesora Andrzeja Dobka oraz w Zakładzie Optyki Nieliniowej kierowanym w przeszłości przez Profesora Stanisława Kielicha, a obecnie przez piszącego te słowa. Mam zaszczyt zaliczać siebie do grona uczniów Profesora Kielicha, pracowałem z Nim ponad ćwierć wieku, miałem możliwość i szczęście uczestniczyć w badaniach naukowych w dziedzinie, która rozwijała się w zawrotnym tempie, a mimo to mieliśmy świadomość, że nie odstawiamy od czołówki, a czasem wręcz, że jesteśmy w czołówce. Dawało to dużą satysfakcję i radość z tworzenia czegoś nowego. O niektórych z tych badań chciałbym tutaj pokrótce napisać. Ze względu na objętość tego szkicu, nie jestem w stanie przedstawić szczegółowo wszystkich rezultatów uzyskanych w ciągu tych z górą 30-tu lat badań. Więcej szczegółów można znaleźć w cytowanej już książce Profesora Piekary [1] oraz w książce Profesora Kielicha [6], jak również w wydanym niedawno trzypięciotomowym opracowaniu zbiorowym, pod redakcją M. Evansa i S. Kielicha, „Modern Nonlinear Optics” [7], którego pierwszy tom zawiera kilka artykułów przeglądowych prezentujących osiągnięcia „poznańskiej szkoły” optyki nieliniowej. Tutaj wspomnę niektóre tylko rezultaty, mające, według mojej oceny, istotny wpływ na kształtowanie się naszej wiedzy na temat nieliniowych zjawisk optycznych.

Jak wspomniałem na początku, optyka nieliniowa zaczęła się w Poznaniu jeszcze przed powstaniem pierwszych laserów, a stało się to za sprawą Profesora Piekary, którego zainteresowania nieliniowym efektem dielektrycznym, czy jak się wtedy mówiło — nasyceniem dielektrycznym, przeniosły się w sposób niemal naturalny ze stałych w czasie (lub wolnozmiennych, o częstościach radiowych) pól elektrycznych na pola o częstościach optycznych. Kiedy, w 1956 r., pojawiła się praca Buckinghama [2] wskazująca na możliwość reorientacji molekuł w polach optycznych, Profesor Piekara natychmiast rozszerzył tematykę prowadzonych w Poznaniu badań, włączając w nie pola optyczne. W tym czasie nie istniały jeszcze odpowiednio silne źródła światła — lasery, które pozwoliłyby obserwować

doświadczalnie takie nieliniowe oddziaływanie światła z atomami. Zaczęto więc od teorii. Zagadnieniem tym zajął się młody asystent Profesora Piekary, który ukończył studia w 1955 r., wtedy magister Stanisław Kielich. Pierwsze prace Kielicha (głównie wspólne z Piekarą, niektóre także z Chełkowskim, ale również i samodzielne) dotyczyły nasycenia dielektrycznego, efektu Kerra, czy też efektu Cottona-Moutona w cieczach dielektrycznych. Do teoretycznego opisu cieczy złożonych z molekuł polarnych stosowano klasyczną fizykę statystyczną, która pozwalała powiązać makroskopowe własności (molarne stałe dla wymienionych efektów) z własnościami indywidualnych molekuł, takimi jak polaryzowalność, trwały moment elektryczny czy też hiperpolaryzowalność. Co więcej, fizyka statystyczna pozwalała uwzględnić, bardzo istotne w cieczach, oddziaływania międzymolekularne. Taki opis dawał możliwość wyodrębnienia poszczególnych wkładów do badanych efektów, a więc wskazania mechanizmów molekularnych odpowiedzialnych za obserwowany przebieg zjawiska dla konkretnej cieczy (zwykle roztworu molekuł o określonych własnościach, np. posiadających trwały moment elektryczny, w rozpuszczalniku niedipolowym). Pierwsze prace Piekary i Kielicha, w których pojawia się silne pole optyczne jako jeden z czynników powodujących orientację molekuł w cieczach dielektrycznych ukazały się w 1958 r. [8, 9]. Bardziej szczegółowy opis tego mechanizmu znajduje się w pracy [10]. Prace te można uznać za pierwsze prace z optyki nieliniowej w Poznaniu. Od tego czasu pola optyczne stały się trwałym elementem w badaniach poznańskich.

Zjawiskiem, które przez wiele lat stanowiło przedmiot zainteresowania Kielicha, a później także Jego uczniów, było rozpraszanie światła. W 1960 r. Kielich przedstawił [11] ogólną statystyczno-molekularną teorię rozpraszania światła przez ośrodki izotropowe złożone z polarnych i anizotropowych molekuł. W swojej teorii Kielich rozdziela wyraźnie części izotropową i anizotropową w świetle rozproszonym pokazując, że część anizotropowa zależy od korelacji kątowych pomiędzy anizotropowymi molekułami. Tak jak i w efektach nasyceniowych, także w rozpraszaniu światła głównym motywem badań jest uzyskanie informacji o ośrodku (o własnościach molekuł z których się składa i o oddziaływaniach pomiędzy nimi) na podstawie makroskopowych pomiarów, w tym przypadku pomiarów światła rozproszonego przez ośrodek. Pierwsze prace dotyczą, z punktu widzenia współczesnej klasyfikacji nieliniowych zjawisk optycznych, liniowego rozpraszania Rayleigha i w tym sensie nie można ich zaliczyć do optyki nieliniowej. Wprawdzie w 1963 r. ukazała się praca „On non-linear light scattering in gases” [12], ale chodziło w niej o liniowe, z punktu widzenia pola optycznego, rozpraszanie światła przez ośrodek poddany działaniu silnego stałego pola elektrycznego lub magnetycznego. Ten nurt był kontynuowany w późniejszych pracach. Prace te były dobrym punktem startowym do rozwijanej później teorii nieliniowego rozpraszania światła. W 1964 r. Kielich publikuje pracę „Light scattering by an intense light beam” [13], w której przedstawia teorię nieliniowego, z punktu widzenia pola optycznego, rozpraszania światła. W pracy tej pojawiają się składowe światła rozproszonego na częstości podwojonej i potrojonej w stosunku do częstości silnego światła padającego. Prace dotyczące wieloharmonicznego rozpraszania światła należały do pionierskich prac w tej dziedzinie. Eksperymentalnie dwuharmoniczne rozpraszanie światła zostało zaobserwowane w kilku cieczach przez Terhune’a i in. [14] w roku 1965. Były to ciecze, których molekuły nie posiadały środka symetrii, co oznacza,

że nawet pojedyncza molekula może być dipolem oscylującym z częstością podwojoną w stosunku do częstości światła padającego. Dla molekuł centrosymetrycznych nie jest to możliwe, zatem taki mechanizm nie mógł prowadzić do rozpraszania dwuharmonicznego w cieczach, których molekuly posiadają środek symetrii. W 1967 r. Kielich pokazuje [15], że także w cieczach o sferycznie symetrycznych molekułach może pojawić się rozpraszanie dwuharmoniczne wywołane oddziaływaniami międzymolekularnymi. Takie rozpraszanie zostało później nazwane rozpraszaniem kooperatywnym i Kielich wspólnie z fizykami francuskimi z Bordeaux [16] odkrywa doświadczalnie w 1971 r. ten rodzaj rozpraszania światła. Reorientacja molekuł cieczy w silnym polu elektrycznym lub optycznym zmienia w istotny sposób własności światła rozproszonego przez tak uporządkowane molekuly. W 1970 r. Kielich podaje teorię takich zmian spowodowanych nasyceniem optycznym, tzn. reorientacją anizotropowych molekuł w silnym polu optycznym [17], a dla opisu orientacji molekuł w takim polu wprowadza uogólnione funkcje Langevina, które niektórzy badacze nazywają obecnie funkcjami Langevina-Kielicha. Teoria ta dobrze opisywała rozpraszanie światła przez roztwory makromolekuł oraz cząstek koloidalnych poddanych działaniu silnych, tak stałych jak i optycznych pól orientujących. Kielich pokazał, że z badań nasycenia optycznego można uzyskać nie tylko wartość ale i znak anizotropii optycznej molekuł. Badania rozpraszania światła były później rozszerzone przez Kielicha i Jego uczniów M. Kozierowskiego (patrz np. [18]), T. Bancewicza i Z. Ożgę (patrz np. [19]) na badania rozpraszania wieloharmonicznego oraz na badania własności spektralnych światła rozproszonego nieliniowo, tzn. dla rozpraszania hiperrelejowskiego i hiperramanowskiego.

Zjawisko optycznej reorientacji molekuł, będące przedmiotem zainteresowania badaczy poznańskich od samego początku badań w dziedzinie optyki nieliniowej, może być przyczyną anizotropii elektrycznej i magnetycznej ośrodka, który w nieobecności pola optycznego jest izotropowy. Anizotropia taka prowadzi do pojawienia się tzw. efektów odwrotnych (odwrotny efekt Kerra, odwrotny efekt Faradaya, czy odwrotny efekt Cottona-Moutona) polegających na odwróceniu roli pól mierzących i polaryzujących ośrodek. Polami mierzącymi stają się stałe lub wolnozmiennie (słabe) pola elektryczne bądź magnetyczne, zaś pole optyczne przejmuje rolę silnego pola polaryzującego ośrodek w sposób nieliniowy. Statystyczną teorię anizotropii elektrycznej wywołanej w ośrodku izotropowym przez silną wiązkę laserową podał Kielich w 1967 r. [20]. W tym samym roku powstaje termodynamiczna teoria anizotropii elektrycznej i magnetycznej uwzględniająca wkłady pochodzące od optykostrykcji i efektu optykokalorycznego [21], zaś w 1969 r. powstaje statystyczno-molekularna teoria nieliniowych efektów magnetooptycznych w koloidach [22]. W tym też roku Kielich wskazał [23] na możliwość nieliniowej zmiany aktywności optycznej w cieczach. W 1971 r. Vlasov i Zaitsev [24] zaobserwowali taką zmianę aktywności optycznej. Orientacja molekuł w polach optycznych jest także jednym z mechanizmów optycznego efektu Kerra, który polega na wywołaniu dwójłomności ośrodka poprzez silne pole optyczne. Ogólniej można powiedzieć, że współczynnik załamania ośrodka jest nieliniową funkcją intensywności światła polaryzującego ośrodek. Taka nieliniowa zależność współczynnika załamania od intensywności światła prowadzi do samoogniskowania i autokolimacji światła. Problemem tym zajmował się Profesor Piekara, co szczegółowo opisał w swojej książce [1], w której omawia różne mechanizmy

fizyczne dające wkład do tego zjawiska. Piekara zwraca uwagę na wkład pochodzący od korelacji radialnych molekuł. Okazało się bowiem, że oprócz wkładów pochodzących od reorientacji oraz deformacji może się pojawić wkład pochodzący od korelacji radialnych molekuł, który jest różny od zera także dla molekuł o symetrii sferycznej. Korelacje radialne zostały wprowadzone przez Kielicha już w 1960 r. [11], a ich wkład do nieliniowej części współczynnika załamania został szczegółowo przedyskutowany przez Kielicha i Woźniaka [25].

Ośrodek izotropowy, taki jak gaz czy ciecz, staje się anizotropowy jeśli zostanie poddany działaniu pola elektrycznego bądź magnetycznego. Wymuszona polem zewnętrznym anizotropia ośrodka pozwala zaobserwować w takim ośrodku zjawiska, które w ośrodkach izotropowych nie mogą zachodzić. Takim zjawiskiem jest np. generacja drugiej harmonicznej. Kielich przedstawił [26] statystyczno-molekularną teorię tego zjawiska w cieczach poddanych działaniu stałego pola elektrycznego. Jeśli pola mierzące lub polaryzujące nie są stałe w czasie to procesy reorientacji molekularnej trzeba opisywać uwzględniając ich kinetykę. Wynik działania pola zależy od tego czy molekuły nadążają za zmianami pola, czy nie. Innymi słowy mamy tu do czynienia z procesami relaksacyjnymi. Relaksacyjną teorię optycznie indukowanej dwójłomności opracowuje Kielich w 1966 r. [27]. Teoria relaksacyjna nieliniowych procesów optycznych jest później rozwijana przez Kielicha, B. Kasproicz-Kielich, W. Alexiewicza i J. Bucherta (patrz np. [28]). Kielich wspólnie z Zawodnym opracowali teorię zjawisk nieliniowych w namagnesowanych kryształach i ciałach izotropowych [29] (patrz także [30]). Obok ośrodków izotropowych, takich jak gazy i ciecze przedmiotem badań stają się także kryształy, których symetria pozwala na zastosowanie teorii grup do znajdowania niezerowych i niezależnych składowych tensorów nieliniowych podatności.

W początkowej fazie rozwoju optyki nieliniowej, nieliniowe procesy optyczne stanowiły źródło nowej informacji o ośrodku nieliniowym. Silne pola optyczne polaryzujące ośrodek traktowano klasycznie i zmiany własności samych pól spowodowane nieliniowym oddziaływaniem z ośrodkiem na ogół nie były przedmiotem zainteresowania. W szczególności, ze względu na ogromną liczbę fotonów z jaką mamy do czynienia w silnych wiązkach laserowych, zwykle przyjmowano, że kwantowy charakter pola nie ma istotnego znaczenia w opisie zjawisk nieliniowych. W latach 70-tych zaczyna się jednak intensywnie rozwijać optyka kwantowa, która bada własności samego światła, uwzględniając jego kwantową, ziarnistą strukturę. Okazuje się, że nieliniowe przekształcenie światła w procesach nieliniowych zmienia w sposób zasadniczy jego własności. Mogą się wtedy ujawnić nieklasyczne własności światła. Przedmiotem badań stają się statystyczne własności światła opisywane funkcjami korelacji pola wyższych rzędów, które wyznacza się z pomiarów korelacji intensywności oraz statystyki fotonów. Ten nurt badań dociera także do Poznania. Pierwszą pracą z dziedziny statystyki fotonów jest praca „On nonlinear optical activity and photon statistics” opublikowana w 1974 r. [31] przez piszącego te słowa, która niestety została niemal całkowicie zapomniana. W pracy tej została zaproponowana przybliżona metoda obliczania funkcji korelacji kwantowego pola rozchodzącego się w ośrodku nieliniowym, przy pomocy której pokazano, że w zjawisku nieliniowej aktywności optycznej może pojawić się antykorelacja fotonów. Metoda ta, zwana czasem „metodą

krótkich dróg optycznych” (czy „metodą krótkich czasów” dla ewolucji w czasie) była później wielokrotnie stosowana do obliczeń funkcji korelacji kwantowego pola w innych procesach nieliniowych. Wspólnie z Kozierowskim tą metodą pokazaliśmy po raz pierwszy [32] możliwość rozgrupowania fotonów (photon antibunching) w zjawisku generacji drugiej harmonicznej, a następnie wspólnie z Kielichem uogólniliśmy ten wynik na wyższe harmoniczne [33]. Wyniki te spotkały się z dużym uznaniem w świecie. Dość wspomnieć, że w nowej, podstawowej w dziedzinie optyki książce Mandela i Wolfa [34] autorzy pisząc o kwantowych efektach w generacji drugiej harmonicznej użyli sformułowania „We shall largely adopt the approach of Kielich and his collaborators (Kozierowski and Tanas, 1977; Kielich, Kozierowski and Tanas, 1978)”. Antykorelacja fotonów, czy też subpoissonowski charakter statystyki fotonów świadczą jednoznacznie o kwantowym charakterze pola i stąd wynikało duże zainteresowanie tymi zjawiskami. Istotne dla otrzymania tych nieklasycznych efektów jest nieliniowe przekształcenie pola, jakie ma miejsce w procesach nieliniowych. W ten sposób tradycyjna optyka nieliniowa przekształciła się w nieliniową optykę kwantową. Okazało się, że niemal każde zjawisko nieliniowe może być źródłem pola o nieklasycznych własnościach. Poszukiwania tych nieklasycznych własności były przez pewien czas ważnym nurtem naszych badań, w którym uczestniczyli, oprócz wymienionych wyżej, także Z. Ficek i P. Szlachetka.

Innym ciekawym problemem dotyczącym kwantowej natury pola, którym zajęliśmy się w Poznaniu, był problem możliwości wytwarzania oraz badanie własności stanów ściśnionych (albo ściśniętych) pola (angielski termin *squeezed states*). Termin ten, w oryginale angielskim, oznacza ściskanie fluktuacji próżni fotonowej. Innymi słowy chodzi tutaj o redukcję szumów kwantowych pola poniżej poziomu wyznaczanego przez stan próżni fotonowej. Możliwość zredukowania szumu kwantowego jest bardzo obiecująca z punktu widzenia komunikacji optycznej i zwiększenia czułości przyrządów optycznych, stąd też duże zainteresowanie tą tematyką. Podobnie jak w przypadku antykorelacji fotonów, stany ściśnione pola pojawiają się w wielu procesach nieliniowych. W naszej grupie badaliśmy m. in. generację harmonicznych [35], fluorescencję rezonansową [36] oraz propagację światła w ośrodku kerrowskim [37]. W tym ostatnim przypadku przericzyliśmy jakby pomost pomiędzy pionierskimi badaniami dotyczącymi optycznego efektu Kerra, które rozpoczęły optykę nieliniową w Poznaniu, i współczesną optyką kwantową. Światło rozchodzące się w ośrodku kerrowskim z zależnym od intensywności współczynnikiem załamania można opisać bardzo prostym modelem oscylatora anharmonicznego, który daje się ściśle rozwiązać i prowadzi do stanów ściśniętych pola o bardzo ciekawych własnościach [38], które stały się później przedmiotem intensywnych badań. Warto tu może wspomnieć, że model ten przewiduje duży stopień redukcji szumu kwantowego ( $\sim 98\%$ ), a więc silnie nieklasyczny stan pola, przy dużej liczbie fotonów w wiązce światła, co kłóci się z potocznym mniemaniem, że pola o dużej liczbie fotonów mogą być opisane klasycznie. Poznańskie wyniki dotyczące antykorelacji fotonów i stanów ściśnionych pola spotkały się z dużym uznaniem w świecie. Nasz artykuł przeglądowy na ten temat został zamieszczony w specjalnym tomie *Optica Acta* wydanym z okazji 25-lecia lasera [39].

Pisząc o *squeezingu* pozwolę sobie na osobistą dygresję. Otóż, w 1982 r. odbywała się w Rydzynie międzynarodowa konferencja — European Optical Conference, na której

mieliśmy (wspólny z Profesorem Kielichem) referat na temat stanów ścięzionych pola. Na tejże konferencji referat miał także Profesor Piekara. Kiedy przyjechałem do Rydzyny, bo to ja miałem wygłosić nasz referat, koledzy zaraz donieśli mi, że pytał o mnie Profesor Piekara. Po krótkich poszukiwaniach odnalazłem Profesora w parku otaczającym pałac w Rydzynie, podszedłem do Niego i zapytałem o powód dla którego mnie poszukiwał. Na to Profesor: „Proszę Pana, Pan ma tutaj referat na temat squeezingu, czy mogłby mi Pan wyjaśnić co to jest ten squeezing? Tylko, proszę, niech Pan nie pisze żadnych wzorów!” Znaleźliśmy ławkę w parku, siedliśmy, i przez pół godziny, a może więcej, siedziałem na ławce, w parku w Rydzynie, oko w oko z Profesorem Piekarą, i usiłowałem jak mogłem, bez pisania wzorów, wyjaśnić Profesorowi „co to jest ten squeezing”. Nie trudno sobie wyobrazić jakie na mnie, wtedy jeszcze doktorze, wrażenie zrobiła ta rozmowa, właśnie w Rydzynie, i właśnie z Profesorem Piekarą! Odniosłem wtedy wrażenie, że oto znowu „optyka odsłania nam nowe oblicze”.

Statystyka fotonów oraz stany ścięzione pola stanowiły i nadal stanowią ważne pole zainteresowań naszej grupy. Zainteresowania te w ostatnich latach zostały rozszerzone na inne problemy optyki kwantowej, takie jak: indukowana laserem autojonizacja [40], dudnienia kwantowe [41], możliwość wytwarzania stanów kwantowych pola będących superpozycją makroskopowo rozróżnialnych stanów koherentnych (czyli tzw. kotów Schrödingera) [42], kolektywne zaniki i odradzania się oscylacji Rabiego [43], modele Jaynesa-Cummingsa [44], klasyczna i kwantowa analiza chaosu w dynamice nieliniowej [45] oraz możliwość wytwarzania stanów jednofotonowych [46]. W ostatnich latach wiele uwagi poświęciliśmy kwantowemu opisowi fazy pól optycznych wytwarzanych w nieliniowych procesach optycznych. Kwantowy opis fazy jest w dalszym ciągu sprawą kontrowersyjną, chociaż w ostatnich latach problem ten był przedmiotem intensywnych badań i wiele niejasności zostało już wyjaśnionych. Do badań tych udało nam się aktywnie i z powodzeniem włączyć. Z tematyki tej napisaliśmy około 30 prac, które spotkały się z dużym uznaniem w świecie, a których wyników nie sposób tutaj nawet pobieżnie omówić. Wyrazem uznania naszych osiągnięć w tej dziedzinie była prośba o napisanie artykułu przeglądowego na ten temat do prestiżowego *Progress in Optics* [47], w którym przedstawiliśmy głównie nasze, ale nie tylko, wyniki dotyczące kwantowego opisu fazy pól optycznych wytwarzanych w procesach nieliniowych.

Obecnie, obok badań z dziedziny optyki kwantowej, prowadzi się nadal w Zakładzie Optyki Nieliniowej badania w dziedzinie tradycyjnie rozumianej optyki nieliniowej, które są kontynuacją badań rozpoczętych przez Profesora Kielicha. Rozwijana jest teoria relaksacji dielektrycznej [48], bada się efekty nieliniowe w cieczech aktywnych optycznie [49] oraz widma rozpraszania światła [50]. Wymieniłem tu tylko przykładowo kilka prac z ostatnich lat. Przegląd wcześniejszych wyników można znaleźć w pracach opublikowanych w [7].

Jak już wspominałem, Zakład Optyki Nieliniowej nie jest jedynym zakładem, w którym prowadzi się badania w dziedzinie optyki nieliniowej i kwantowej. Nie czuję się jednak kompetentny do szczegółowego omawiania wyników uzyskanych przez Kolegów z innych zakładów. Wspomnę tylko może o znakomitych pracach Profesora Parzyńskiego i Doktora Wójcika z Zakładu Elektroniki Kwantowej (np. [51]) oraz o wydanych przez UAM

książkach napisanych przez Profesorów Kaczmarka i Parzyńskiego [52, 53].

Objętość tego szkicu nie pozwala na szersze omawianie wyników, które zostały uzyskane na przestrzeni już prawie 40-tu lat rozwoju optyki nieliniowej w Poznaniu (sam tylko spis publikacji przekraczałby objętość tego szkicu). Z konieczności więc musiałem dokonać drastycznej selekcji koncentrując uwagę na sprawach według mnie najistotniejszych, chociaż jednocześnie starałem się dać możliwie pełny przekrój problematyki optycznej uprawianej przez te lata w Poznaniu. Jako uczeń Profesora Stanisława Kielicha i wnuk naukowy Profesora Arkadiusza Piekary, jak to określił sam Profesor Piekara, chciałem choćby pobieżnie naszkicować drogę, jaką przeszła poznańska optyka nieliniowa od pierwszych prac z roku 1958 do dnia dzisiejszego.

## Literatura

- [1] A H Piekara. *Nowe oblicze optyki*. PWN, Warszawa, 1968.
- [2] A D Buckingham. *Proc. Phys. Soc. B*, 69:344, 1956.
- [3] F Kaczmarek, editor. *W ćwierćwiecze lasera*. Number 55 in Fizyka. Wydawnictwo Naukowe UAM, Poznań, 1987.
- [4] J Stankowski and A Graja. *Wstęp do elektroniki kwantowej*. Wyd. Kom. i Łączn., Warszawa, 1972.
- [5] F Kaczmarek. *Wstęp do fizyki laserów*. PWN, Warszawa, 1978.
- [6] S Kielich. *Molekularna optyka nieliniowa*. PWN, Warszawa, 1977.
- [7] M Evans and S Kielich, editors. *Modern Nonlinear Optics*, volume 85 of *Advances in Chemical Physics*. Wiley, New York, 1993.
- [8] A Piekara and S Kielich. Theory of orientational effects and related phenomena in dielectric liquids. *J. Chem. Phys.*, 29:1297, 1958.
- [9] A Piekara and S Kielich. Sur quelques phénomènes d'orientation moléculaire dus aux champs électrique et magnétique. *Archives des Sciences*, 11:304, 1958. (C.R. du 7-e Colloque Ampère, Paris, 1958).
- [10] S Kielich and A Piekara. A statistical molecular theory of electric, magnetic and optical saturation phenomena in isotropic dielectric and diamagnetic media. *Acta Phys. Pol.*, 18:439, 1959.
- [11] S Kielich. A molecular theory of light scattering in gases and liquids. *Acta Phys. Pol.*, 19:149, 1960.
- [12] S Kielich. On non-linear light scattering in gases. *Acta Phys. Pol.*, 23:321, 1963.



- [13] S Kielich. Light scattering by an intense light beam. *Acta Phys. Pol.*, 25:85, 1964.
- [14] R W Terhune, P D Maker, and C M Savage. *Phys. Rev. Lett.*, 14:681, 1965.
- [15] S Kielich. On three-photon light scattering in atomic fluids. *Acta Phys. Pol.*, 32:297, 1967.
- [16] S Kielich, J R Lalanne, and F B Martin. Double-photon elastic light scattering by liquids having centrosymmetric molecules. *Phys. Rev. Lett.*, 26:1295, 1971.
- [17] S Kielich. Changes in Rayleigh scattering of light caused by laser optical saturation. *Acta Phys. Pol. A*, 37:719, 1970.
- [18] M Kozierowski. Polarization properties of hyper-Rayleigh and hyper-Ramanscatterings. In Evans and Kielich [7], page 127.
- [19] T Bancewicz and Z Ożgo. Hyper-Rayleigh and hyper-Raman rotational and vibrational spectroscopy. In Evans and Kielich [7], page 89.
- [20] S Kielich. Statistical theory of the electrical anisotropy induced in an isotropic medium by an intense light beam. *Physica*, 34:365, 1967.
- [21] S Kielich. Electric and magnetic anisotropy induced in nonabsorbing media by an intense laser beam. *Acta Phys. Pol.*, 32:405, 1967.
- [22] S Kielich. Nonlinear magneto-optics of colloids. *J. Colloid and Interface Sci.*, 30:159, 1969.
- [23] S Kielich. Nonlinear optical activity in liquids. *Acta Phys. Pol.*, 35:861, 1969.
- [24] D V Vlasov and V P Zaitsev. *JETP Lett.*, 14:112, 1971.
- [25] S Kielich and S Woźniak. Influence of statistical fluctuational processes on higher order nonlinear refractive index of simple fluids. *Acta Phys. Pol. A*, 39:233, 1971.
- [26] S Kielich. DC electric field-induced optical second harmonic generation by interacting multipolar molecules. *Chem. Phys. Lett.*, 2:569, 1968.
- [27] S Kielich. Optically induced birefringence. *Acta Phys. Pol.*, 30:683, 1966.
- [28] W Alexiewicz and B Kasproicz-Kielich. Relaxation theory of nonlinear processes in the Smoluchowski rotational diffusion approximation. In Evans and Kielich [7], page 1.
- [29] S Kielich and R Zawodny. Optical nonlinear phenomena in magnetized crystals and isotropic bodies. *Acta Phys. Pol. A*, 43:579, 1973.
- [30] R Zawodny. Nonlinear magneto-optics of magnetically ordered crystals. In Evans and Kielich [7], page 307.

- [31] R Tanaś. On nonlinear optical activity and photon statistics. *Optik*, 40:109, 1974.
- [32] M Kozierowski and R Tanaś. Quantum fluctuations in second-harmonic light generation. *Opt. Commun.*, 21:229, 1977.
- [33] S Kielich, M Kozierowski, and R Tanaś. Antibunching in light harmonics generation from field quantisation. In L Mandel and E Wolf, editors, *Coherence and Quantum Optics IV*, page 511. Plenum, New York, 1978.
- [34] L Mandel and E Wolf. *Optical Coherence and Quantum Optics*. Cambridge University Press, New York, 1995.
- [35] M Kozierowski and S Kielich. Squeezed states in harmonic generation of laser beam. *Phys. Lett. A*, 94:213, 1983.
- [36] Z Ficek, R Tanaś, and S Kielich. Squeezed states in resonance fluorescence of two interacting atoms. *Opt. Commun.*, 46:23, 1983.
- [37] R Tanaś and S Kielich. Self-squeezing of light propagating through nonlinear optically isotropic media. *Opt. Commun.*, 45:351, 1983.
- [38] R Tanaś. Squeezed states of an anharmonic oscillator. In L Mandel and E Wolf, editors, *Coherence and Quantum Optics V*, page 645. Plenum, New York, 1984.
- [39] S Kielich, M Kozierowski, and R Tanaś. Photon antibunching and squeezing. Two nontrivial effects of the nonlinear interaction of laser light with matter. *Optica Acta*, 32:1023, 1985.
- [40] W Leoński, R Tanaś, and S Kielich. Laser -induced autoionization from a double fano system. *J. Opt. Soc. Am. B*, 4:72, 1987.
- [41] Z Ficek, R Tanaś, and S Kielich. Quantum beats in intensity correlations of spontaneous emission from two nonidentical atoms. *J. Mod. Opt.*, 35:81, 1988.
- [42] A Miranowicz, R Tanaś, and S Kielich. Generation of discrete superpositions of coherent states in the anharmonic oscillator model. *Quantum Opt.*, 2:253, 1990.
- [43] M Kozierowski, S M Chumakov, J Światłowski, and A A Mamedov. Collective collapses and revivals in spontaneous emission of a partially inverted system of two-level atoms in an ideal cavity field. *Phys. Rev. A*, 46:7220, 1992.
- [44] M Kozierowski. The one- and two-photon jaynes-cummings models as a source of a sub-Poissonian fields by chaotic pumping. *Phys. Rev. A*, 47:723, 1993.
- [45] P Szlachetka, K Grygiel, and J Bajer. Chaos and order in a kicked anharmonic oscillator: Classical and quantum analysis. *Phys. Rev. E*, 48:101, 1993.

- [46] W Leoński and R Tanaś. Possibility of producing the one-photon state in a kicked cavity with a nonlinear Kerr medium. *Phys. Rev. A*, 49:R20, 1994.
- [47] R Tanaś, A Miranowicz, and Ts Gantsog. Quantum phase properties of nonlinear optical phenomena. In E Wolf, editor, *Progress in Optics*, volume 35, page 355. Elsevier, Amsterdam, 1996.
- [48] W Alexiewicz and H Derdowska-Zimpel. Time dependent behaviour of third-order electric polarisation in A.C. reorienting field in molecular liquids. *Physica A*, 214:9, 1995.
- [49] S Woźniak and G Wagnière. Non-resonant optical rectification in optically active liquids. *Opt. Commun.*, 114:131, 1995.
- [50] T Bancewicz. Multipole electric field light scattering by computer. *Chem. Phys. Lett.*, 244:305, 1995.
- [51] A Wójcik and R Parzyński. Rydberg-atom stabilization against photoionization: An analytically solvable model with resonance. *Phys. Rev. A*, 50:2475, 1994.
- [52] F Kaczmarek and R Parzyński. *Laser Physics. Part I: Introduction to quantum optics*. Wydawnictwo Naukowe UAM, Poznań, 1990.
- [53] F Kaczmarek. *Laser Physics. Part II: Quantum electronics*. Wydawnictwo Naukowe UAM, Poznań, 1994.