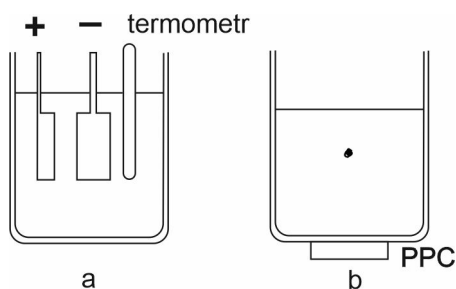


Sonoluminescencja

Wojciech Winiarczyk

Wstęp

W marcu roku 1989 w auli Uniwersytetu Stanu Utah w Salt Lake City, w obecności kamer telewizyjnych i prasy miało miejsce niezwykle wydarzenie. Dwaj chemicy, Martin Fleischmann i Stanley Pons, ogłosili rozwiązanie problemu kontrolowanej syntezy jądrowej. Sensacyjne odkrycie wydawało się tym bardziej zdumiewające, że dokonano go przy pomocy bardzo prostej aparatury. Jej główny element przedstawiono na rys. 1a. W zlewce wypełnionej ciężką wodą znajdują się platynowa anoda i wykonana z palladu katoda. Pallad jest w stanie pochłoniąć bardzo duże ilości deuteru. Uznano więc, że w jego objętości mogą powstać warunki, w których dwa atomy deuteru na tyle się do siebie zbliżą, że nastąpi synteza ich jąder, o której świadczyć miało wydzielające się ciepło. Bardzo szybko okazało się jednak, że weryfikacja przedstawionych przez Fleischmanna i Ponsa wyników jest niemożliwa. Sensacyjne odkrycie okazało się w najlepszym razie pomyłką. Jeżeli się o tym doświadczeniu jeszcze pamięta to dlatego, żeby przypominać, jak łatwo można się ośmieszyć, gdy presja odniesienia sukcesu każe zapomnieć o rzetelności naukowej [1].



Rys. 1. Zlewka a) wypełniona ciężką wodą, w której w czasie elektrolizy miała zachodzić reakcja syntezy termojądrowej. Zlewka b) wypełniona wodą, w której lewitujący w polu fali ultradźwiękowej pęcherzyk gazu emituje niebiesko-białe światło; PPC – przetwornik piezoceramiczny. Ciemny punkt przedstawia położenie świecącego bąbelka

Kiedy zanikało zainteresowanie zimną fuzją Fleischmanna i Ponsa – bo do takiej grupy eksperymentów można było ich doświadczenie zaliczyć – pojawiły się doniesienia o innym doświadczeniu wykonywanym w zlewce, które, według niektórych badaczy, mogło podtrzymać nadzieje na realizację w prosty sposób

kontrolowanej syntezy jądrowej. Tym razem zamiast organizować konferencje prasowe, przystąpiono do badań. Badania te trwają do dzisiaj.

Schemat doświadczenia o którym mowa przedstawiono na rys. 1b. W zlewce wypełnionej wodą wytwarza się przy pomocy przetwornika piezoelektrycznego stojącą falę ultradźwiękową. Przygotowując odpowiednio wodę i dobierając parametry fali, można osiągnąć warunki, w których pojawia się w zlewce świecący pęcherzyk gazu. Ponieważ przyczyną obserwowanego świecenia jest fala dźwiękowa, zjawisko nazywa się sonoluminescencją. Prace teoretyczne pozwalały sądzić, że w pęcherzyku gaz osiąga temperaturę rzędu 10^8 K. Wiadomość ta spowodowała, że zjawiskiem sonoluminescencji zainteresowało się wielu badaczy.

Zaobserwowanie sonoluminescencji jest stosunkowo proste [2]. Znacznie trudniejsze jest jej badanie. Wynika to z faktu, że średnica świecącego obszaru jest mniejsza niż $1 \mu\text{m}$, impulsy światła są bardzo krótkie, a w niektórych przypadkach najsilniejsza część ultrafioletowego widma pochłaniana jest przez ciecz, w której prowadzone jest doświadczenie.

W niniejszym artykule przedstawione zostaną: historia badań sonoluminescencji, podstawowe elementy układów doświadczalnych, krótki przegląd otrzymanych przy ich pomocy najważniejszych wyników, informacje o powstałych na ich podstawie modelach teoretycznych próbujących zjawisko sonoluminescencji opisać oraz wyniki eksperymentów, w których próbowano otrzymać sonofuzję.

Historia badań sonoluminescencji

W roku 1934 H. Frenzel i H. Schultes zauważyli, że woda destylowana poddana działaniu ultradźwięków o częstotliwości 500 kHz świeci [3]. Świecenie to było bardzo słabe; jego rejestracja wymagała dziewięćdziesięciminutowego naświetlania płyty fotograficznej. W wodzie odgazowanej świecenia nie obserwowano. Według przypuszczenia autorów obserwowane przez nich zjawisko miało podobny charakter jak luminescencja, mogąca się pojawić przy pocieraniu się o siebie dwu przedmiotów (niem. *der Reibungselektrizitat*). Uznali oni, że ruch pęcherzyków powietrza w wodzie, następujący w wyniku oddziaływania z ultradźwiękami, prowadzi do ich elektryzacji, mikrowyładowań i luminescencji. W kolejnych pracach poświęconych temu zjawisku, zostało ono nazwane sonoluminescencją i następnie powiązane ze zjawiskiem powstawania w cieczach kawitacji.

Powstanie kawitacji (łac. *cavum*) w cieczy polega na formowaniu się w jej objętości „pustych” przestrzeni nazywanych pęcherzykami, bąbelkami lub bańkami, które wypełnione są gazami i parami cieczy. Przyczyny powstawania kawitacji mogą być różne; jeżeli wywołuje je zmiana ciśnienia spowodowana działaniem na ciecz fali akustycznej, to mamy do czynienia z kawitacjami akustycznymi.

Jednym z pierwszych, który badał zjawiska kawitacji w wodzie, był O. Reynolds, próbujący wyjaśnić przyczynę powstawania dźwięków pochodzących z pozostawionego na gorącej płycie czajnika, w którym gotuje się woda. Czajnik taki „mruczy”, a od czasu do czasu mruczenie to zmienia się w dźwięk o sile

wystrzału. W roku 1917 w pracy będącej kontynuacją rozważań Reynoldsa, Lord Rayleigh przedstawił teoretyczny opis zapadania się bańki kawitacyjnej w wodzie [4]. Praca ta nie przewidywała zjawiska sonoluminescencji, ale była podstawą do stworzenia hydrodynamicznego równania różniczkowego opisującego zachowanie się pęcherzyka gazu w cieczy poddanej działaniu zmiennego w czasie ciśnienia zewnętrznego.

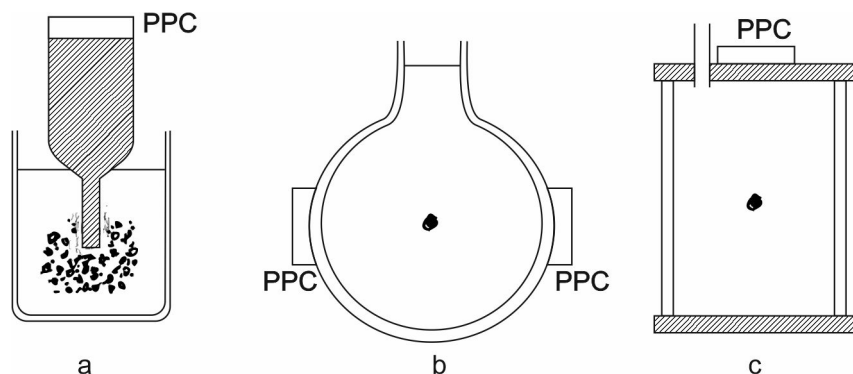
Badana w latach 1934-1990 sonoluminescencja miała zawsze charakter objętościowy – pochodziła od miriady świecących punkcików wypełniających objętość o zmieniającym się w czasie kształcie [5, 6]. Tego rodzaju sonoluminescencja określana jest jako sonoluminescencja wielobąbelkowa – MBSL (*multiple-bubble sonoluminescence*). Powstawanie i zapadanie się poszczególnych pęcherzyków jest całkowicie przypadkowe, a śledzenie historii jednego z nich wydawało się niemożliwe. Historia taka jest zresztą bardzo krótka. Pęcherzyk w czasie zapadania się ulega destrukcji. Głównym źródłem informacji o MBSL jest jej widmo. Jego poznanie pozwoliło na zaproponowanie kilku modeli teoretycznych opisujących różne parametry MBSL [5]. Przełom w badaniach sonoluminescencji nastąpił pod koniec lat 90. zeszłego wieku. D. F. Gaitan w swojej pracy doktorskiej [7] podał warunki, w jakich możliwa jest obserwacja pojedynczego, lewitującego w środku rezonatora akustycznego pęcherzyka gazu, który emituje światło. Sonoluminescencja tego rodzaju nazwana została sonoluminescencją jednobąbelkową – SBSL (*single-bubble sonoluminescence*). Kiedy następnie S. J. Putterman i jego grupa odkryli bardzo ciekawe cechy SBSL, jej badanie podjęto w wielu laboratoriach. W ciągu ostatnich trzydziestu lat ukazało się kilka tysięcy publikacji poświęconych temu zjawisku. Wyniki prac poświęconych zjawisku kawitacji i MBSL zebrano w kilku opublikowanych przed rokiem 1990 artykułach przeglądowych [5,6,8], a artykuły [9, 10, 11] omawiają wyniki badań uzyskane dla SBSL.

Szczególnie dużo informacji o sonoluminescencji można znaleźć w artykule [12]. Artykuł ten jest spisem 309 prac poświęconych różnym jej aspektom. Prace podzielono na kilkanaście sekcji, a opis każdej pracy, poza autorami i tytułem, zawiera także jej skrócony abstrakt.

Techniki doświadczalne

Najczęściej stosowane kształty rezonatorów akustycznych, w których obserwowana i badana jest sonoluminescencja, przedstawiono na rys. 2. Rezonatorów, takich jak na rys. 2a, używa się w badaniach MBSL. Stosowane do jej badania częstotliwości fal akustycznych są zawarte w przedziale 1 Hz–10 MHz, a ciśnienia akustyczne mają wartości rzędu kilkudziesięciu barów. Doświadczenia z SBSL wykonuje się najczęściej z ultradźwiękami, których częstotliwości zawarte są w zakresie 20 kHz – 40 kHz, a ciśnienia akustyczne nie są większe niż kilka barów. Prędkość fali dźwiękowej w wodzie wynosi 1500 m/s, a więc dla częstotliwości fali akustycznej 25 kHz długość podstawowej fali rezonansowej jest równa

6 cm. Rezonator sferyczny (rys. 2b) o takiej średnicy ma pojemność ok. 100 ml. Podobne są wymiary i objętości rezonatorów o kształtach, jak na rys. 2c.



Rys. 2. Rezonatory akustyczne używane do badania sonoluminescencji wielobąbelkowej a) i jednobąbelkowej b) i c). Ciemne punkty przedstawiają położenie świecących bąbelków

Fale ultradźwiękowe wytwarzane są w tych rezonatorach przy pomocy przetworników piezoceramicznych. Aby otrzymać potrzebne do badań wartości ciśnienia akustycznego, muszą być one zasilane napięciami o amplitudzie wynoszącej kilkaset woltów. Odpowiedni układ elektroniczny przedstawiony został w pracy [2]. Wykorzystuje się w nim omawiany na wykładach fizyki ogólnej rezonans napięć w obwodzie RLC.

Jasność świecenia SBSL w sposób kluczowy zależy od przygotowania cieczy, w której chcemy ją obserwować. Przygotowanie cieczy polega na nasyceniu jej odpowiednią ilością gazu. Najprostsza technika polega na jej gotowaniu w celu usunięcia z niej powietrza, a następnie chłodzeniu w szczelnie zamkniętym naczyniu, w czasie którego rozpuści się w niej wymagana ilość powietrza [2]. Bardziej zaawansowany układ pozwala na lepsze odgazowanie cieczy (co uzyskuje się przy pomocy mechanicznej pompy próżniowej), a następnie rozpuszczenie w odgazowanej cieczy wybranego gazu w odpowiedniej ilości [9].

Widma SBSL bada się przy pomocy standardowych spektrografów, małej lub średniej zdolności rozdzielczej. Rezonator akustyczny umieszczony jest zwykle na stoliku pozwalającym zmieniać jego pozycję w stosunku do szczeliny spektrografu [9].

Do wyznaczenia zależności czasowych impulsów świetlnych SBSL wykorzystuje się szybkie fotonowielacze, testowane przy pomocy odpowiednio krótkich impulsów laserowych. Jednak dokładniejsze okazały się pomiary wykonane przy użyciu techniki T-C SPC (*time-correlated single photon counting*) [13].

Aby zbadać, jak wymiary pęcherzyka SBSL zmieniają się w czasie, oświetla się go wiązką laserową i bada rozproszone na nim światło (rozpraszanie typu Mie) [7, 9].

Kształt oscylującego pęcherzyka można obserwować, wykorzystując technikę stroboskopową.

Równanie Rayleigha-Plesseta

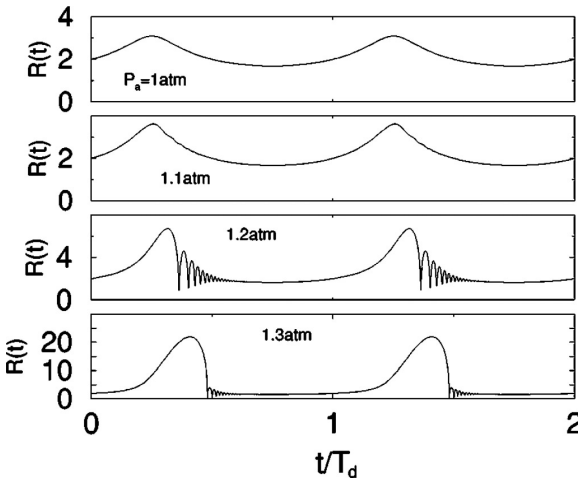
W badaniach sonoluminescencji podstawowe znaczenie ma równanie opisujące zachowanie się w czasie pęcherzyka gazu (o promieniu $R(t)$) w cieczy poddanej działaniu zewnętrznego ciśnienia. Prace nad takim równaniem rozpoczął Rayleigh, a następnie zajęli się nim Plesset i inni badacze, wprowadzając do niego kolejne poprawki [10]. Równanie to od nazwiska pierwszych jego badaczy nazywa się równaniem Rayleigha-Plesseta (równanie R-P) i najczęściej podawane jest w następującej postaci:

$$\rho(R\ddot{R} + \frac{3}{2}\dot{R}^2) = (p_g(R, t) - P_0 - P(t)) - 4\eta\frac{\dot{R}}{R} - 2\frac{\sigma}{R} + \frac{R}{c}\frac{d}{dt}p_g(R, t)$$

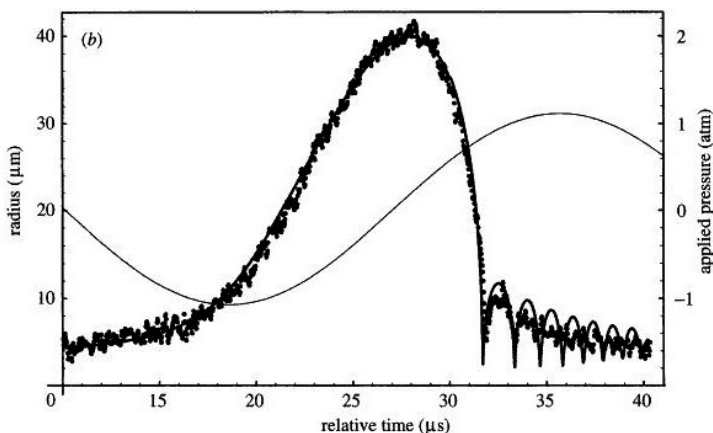
Lewa strona opisuje inercję środowiska ciekłego, a prawa przyłożone ciśnienie zewnętrzne i właściwości cieczy: P_0 – ciśnienie hydrostatyczne, $P(t)$ – ciśnienie fali akustycznej, $p_g(R, t)$ – ciśnienie wewnątrz pęcherzyka, η – współczynnik lepkości cieczy, σ – współczynnik napięcia powierzchniowego cieczy, c – szybkość głosu w cieczy, ρ – gęstość cieczy, \dot{R} oznacza pierwszą, a \ddot{R} drugą pochodną po czasie funkcji R .

Równanie R-P wyprowadza, się przyjmując następujące założenia: w czasie oscylacji pęcherzyk zachowuje swój sferyczny kształt, a występujące w czasie jego ruchów prędkości i przyspieszenia są odpowiednio małe. Przez 99,5% okresu zmian ciśnienia akustycznego założenia te są bardzo dobrze spełniane. Tylko dla czasów, gdy pęcherzyk zbliża się do swej minimalnej wielkości (okres kilkudziesięciu ns) są na pewno łamane. Mimo to równanie R-P wydaje się dobrze opisywać wyniki doświadczalne dla całego okresu $P(t)$.

Równanie R-P rozwiązuje się numerycznie. Przykładowe jego rozwiązania dla kilku wartości ciśnień akustycznych przedstawiono na rys. 3. W miarę wzrostu ciśnienia zmienia się charakter rozwiązań. Kształty prawie sinusoidalne dla ciśnień 1 at i 1,1 at, dla wyższych ciśnień przechodzą w kształty silnie nieliniowe. Porównanie rozwiązania numerycznego z wynikami doświadczalnymi przedstawia rys. 4. Zgodność jest bardzo dobra.



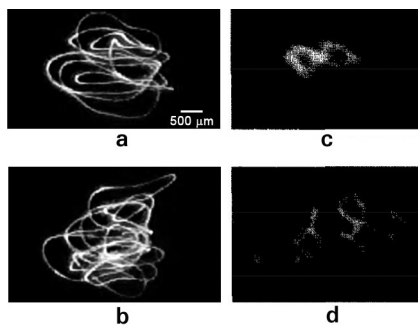
Rys. 3. Przykłady rozwiązania równania R-P dla kilku wartości ciśnienia akustycznego; T_d – okres zmian ciśnienia akustycznego; $R(t)$ podane w μm [10]



Rys. 4. Porównanie zmierzonych wartości promienia pęcherzyka (punkty) z rozwiązaniami równania R-P (linia ciągła). Błysk światła obserwuje się po 32 μs od rozpoczęcia cyklu. Cienką linią zaznaczono zmiany ciśnienia akustycznego [10]

Środowisko sonoluminescencji

Możliwość uzyskania jasnej SBSL zależy od częstotliwości i amplitudy ciśnienia akustycznego, temperatury i rodzaju cieczy, w której jest obserwowana, a także od rodzaju i ilości gazu w niej rozpuszczonego. W pierwszych latach badania SBSL jedyną cieczą używaną do doświadczeń była woda, a gazem w niej rozpuszczanym powietrze [9]. Obecnie obserwuje się SBSL w bardzo wielu cieczach. Można je podzielić na dwie grupy w zależności od wartości ich oporu właściwego [11]. W grupie słabo przewodzącej prąd znajdują się: woda destylowana, olej silikonowy, etanol, propanol, aceton. Do grupy dobrze przewodzącej prąd zaliczają się: wodne roztwory chlorków i azotków ziem rzadkich oraz roztwory $\text{Fe}(\text{CO})_5$, $\text{Cr}(\text{CO})_6$ w oktanolu. Wymienione ciecze to tylko niektóre przykłady z obszernej ich listy.



Rys. 5. Tory „tańczącego” pęcherzyka SBSL obserwowane w kwasie fosforowym nasyconym argonem (a, b) [14] i w 3 molowym roztworze soli kuchennej w wodzie (c, d) [15]

Szczególny rodzaj SBSL otrzymano w kwasach siarkowymi fosforowym oraz w wodnym roztworze NaCl. Świecący pęcherzyk nie lewituje w jednym miejscu rezonatora, lecz się przemieszcza. Jego ruch określa się jako translacyjny, albo mówi się, że pęcherzyk „tańczy”. Przykłady takiego zachowania pęcherzyka przedstawione zostały na rys. 5 [14, 15]. Tory ruchu tworzą krzywe zamknięte lub otwarte. Na rys. 5d widać, że ruch po pewnym torze się kończy i następnie rozpoczyna wzdłuż innego.

Jak wyżej wspomniano, jako gazu rozpuszczonego w cieczy używano najczęściej

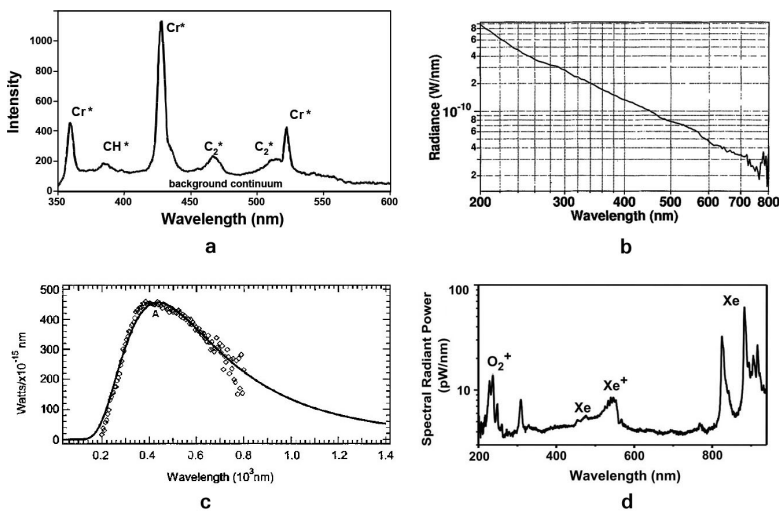
powietrza. Okazało się, że składnikiem powietrza decydującym o efektywności SBSL jest zawarty w powietrzu w ilości ok. 1% argon. W mieszaninie tlenu i azotu zjawiska SBSL nie obserwowano, albo świecenie było bardzo słabe. Obecność rozpuszczonego w cieczy gazu szlachetnego okazała się warunkiem bardzo sprzyjającym silnej SBSL. Najsilniejsze świecenie uzyskuje się przy użyciu ksenonu i kryptonu [9].

SBSL bardzo silnie zależy od temperatury cieczy. Prawie zawsze jej jasność wzrasta przy obniżaniu temperatury. W niektórych przypadkach obniżenie temperatury cieczy z 20°C do -10°C powoduje, że jasność SBSL wzrasta o dwa rzędy wielkości.

Widma sonoluminescencji

Kilka przykładów widm sonoluminescencji przedstawiono na rys. 6. Widma MBSL mają strukturę związaną z poszerzonymi liniami atomowymi i jonowymi, a także z przejściami rotacyjno-oscylacyjnymi cząsteczek gazu wypełniającego pęcherzyk (rys. 6a). Pierwsze obserwowane widma SBSL były widmami gładkimi, bez jakiegokolwiek struktury. Monotonicznie wznosiły się od podczerwieni do ultrafioletu. Widmo przedstawione na rys. 6b pozwoliło szacować temperaturę w pęcherzyku na 10^5 K.

Obecnie w wielu eksperymentach obserwuje się także dla SBSL widma wykazujące strukturę, która pozwala wyznaczyć temperaturę wewnątrz pęcherzyka SBSL (rys. 6d). Widmo jak na rys. 6c jest bardzo podobne do widma ciała doskonale czarnego. Na podstawie widm tego rodzaju ocenia się temperatury w pęcherzyku na 10^4 K.



Rys. 6. Przykłady różnych widm sonoluminescencji: a) widmo MBSL w roztworze karbonylku chromu w oleju silikonowym (E. B. Flint, K. S. Suslick (1991)); b) widmo SBSL w wodzie nasyconej helmem [9]; c) widmo SBSL w wodzie nasyconej wodorem (Vazquez G. et al. (1997)); d) widmo SBSL w kwasie siarkowym nasyconego ksenonem (D. J. Flanningan, K. S. Suslick (2005))

Zależności czasowe impulsów świetlnych SBSL

Pierwsze pomiary czasu trwania impulsów świetlnych SBSL przeprowadzone przy pomocy fotopowielaczy wskazywały, że czas ten jest nie większy niż 50 ps. Mierzono także odległość czasową między kolejnymi impulsami, która okazała się stała z dokładnością kilkudziesięciu ps.

Dokładniejsze badania szerokości impulsów SBSL, przeprowadzone przy wykorzystaniu techniki T-C SPC wykazały jednak, że impulsy te są dłuższe, niż początkowo uważano. Przyjmuje się, że ich szerokości połówkowe zawarte są między 50 ps i 300 ps, w zależności od warunków doświadczenia. Dla „tańczącej” SBSL są one szczególnie duże i wynoszą kilka ns. W wielu obecnie prowadzonych doświadczeniach także odległości czasowe między kolejnymi impulsami świetlnymi nie są tak stałe, jak pierwotnie sądzono. Okazało się, że zależą one od warunków doświadczalnych. Większość pomiarów wskazuje na to, że emisja światła następuje, kiedy wielkość pęcherzyka osiąga swoje pierwsze minimum [9], ale w niektórych eksperymentach emisję światła obserwowano nawet 130 ns wcześniej.

Innym typem zależności czasowej jest zależność jasności SBSL od czasu, jaki upływa od chwili rozpoczęcia obserwacji. Po rozpoczęciu świecenia jego natężenie rośnie, aby po kilku sekundach osiągnąć stały poziom [9]. Efekt ten tłumaczy się zmianami, jakie zachodzą w składzie gazu wypełniającego pęcherzyk. Początkowo pęcherzyk zawiera gazy, które wdyfundowały do jego objętości z objętości cieczy, a także pary cieczy. W czasie pierwszych kilku sekund ilość gazu szlachetnego w pęcherzyku nie zmienia się. Inne składniki atmosfery pęcherzyka ulegają dyfuzji do objętości cieczy albo kondensacji na jego powierzchni. Proces ten, prowadzący do wzrostu ilości procentowej gazy szlachetnego w objętości pęcherzyka, nazywa się rektyfikacją gazu szlachetnego.

Modele teoretyczne opisujące SBSL

Modeli teoretycznych próbujących opisać SBSL powstało kilkadziesiąt. Część z nich opiera się na modelach powstałych w celu opisania MBSL, część opracowano w ciągu ostatnich trzydziestu lat [9, 10, 11].

Wszystkie te modele można podzielić w następujący sposób:

- modele grzania quasiadiabaticznego,
- modele z falą uderzeniową,
- modele z polem elektrycznym,
- modele kwantowe.

Każdy z tych modeli powinien wyjaśniać takie cechy SBSL jak: procesy elementarne prowadzące do emisji światła, charakter obserwowanego widma, zależności czasowe impulsów świetlnych SBSL oraz opisywać temperaturę i ciśnienie wewnątrz pęcherzyka gazu. Wszystkie modele SBSL przyjmują, że dynamika pęcherzyka gazu jest dobrze opisywana przez równanie R-P. Różnice między nimi wynikają ze sposobu, w jaki opisują procesy zachodzące we wnętrzu pęche-

rzyka i warstwie cieczy tuż przy jego powierzchni. Wśród procesów elementarnych, które zachodzą w pęcherzyku, najczęściej rozważa się atomowe i jonowe rekombinacje, emisyjny wychwyty jonowy, atomowe i jonowe promieniowanie hamowania (*Bremsstrahlung*) oraz uwzględnia się reakcje chemiczne mogące nastąpić we wnętrzu pęcherzyka.

W modelu grzania quasiadiabaticznego zakłada się, że cykl zmian temperatury we wnętrzu pęcherzyka składa się z dwóch etapów. Grzanie pęcherzyka rozpoczyna się, gdy ciśnienie akustyczne w rezonatorze zaczyna maleć (rys. 4). Jego promień zaczyna wtedy rosnać, osiąga wartość maksymalną, a następnie maleje. Czas trwania tych procesów to kilkadziesiąt μs . W tym czasie temperatura wewnątrz pęcherzyka jest stała. Kilkadziesiąt ns przed osiągnięciem wielkości minimalnej pęcherzyk zaczyna kurczyć się tak szybko, że grzanie jego wnętrza z izotermicznego zmienia się w adiabaticzne. W pęcherzyku powstaje plazma, a w wyniku rekombinacji jej składników i procesów typu *Bremsstrahlung* emitowane jest światło. Aby wyjaśnić powstawanie widm, bardzo podobnych do widm emitowanych przez ciało doskonale czarne (rys. 6c), przyjmuje się, że emisja następuje z powierzchni całkowicie nieprzezroczystego dla promieniowania rdzenia. W innych wersjach tego modelu gorący rdzeń jest całkowicie dla promieniowania przezroczysty i emisja światła następuje z całej jego objętości. W omawianym modelu osiągnane we wnętrzu pęcherzyka temperatury szacuje się na rzędu 10^4 K. Trudności tego modelu polegają na tym, że przewiduje on zależność czasu trwania impulsu świetlnego od długości fali emitowanego światła. W eksperymentach zależności takiej się nie obserwuje.

Model, w którym zakłada się powstanie we wnętrzu pęcherzyka zbieżnej do centrum fali uderzeniowej, był bardzo popularny w pierwszych latach badania SBSL. Wynikało to z faktu, że mierzone wtedy czasy trwania impulsów świetlnych były mniejsze niż 50 ps, co dobrze się zgadzało z przewidywaniami tego modelu. Fala uderzeniowa powoduje powstanie w pęcherzyku gorącego centrum o objętości równej kilku procentom minimalnej objętości pęcherzyka. Przyjmując, że głównym procesem emisji światła jest *Bremsstrahlung*, widma jak na rys. 6b pozwalają oszacować temperaturę we wnętrzu pęcherzyka na 10^5 K. Z chwilą, gdy pojawiły się prace, z których wynikało, że czasy trwania impulsów świetlnych SBSL mogą być dłuższe niż 50 ps, zainteresowanie modelami z falą uderzeniową zmalało, ale nie zanikło całkowicie. Wciąż są one obiektem badań naukowców zajmujących się sonofuzją.

Kilka modeli SBSL próbuje wyjaśnić emisję światła jako wynik procesów związanych z powstawaniem w układzie ciecz-pęcherzyk gazu pól elektrycznych [11]. W pewnych modelach pola te pojawiają się w wyniku deformacji kształtu pęcherzyka gazu, która powoduje uformowanie się w jego wnętrzu naładowanej mikrokropelki cieczy. Powstające między mikrokropelką i cieczą pole elektryczne ma niewielką wartość, ale jego gradient może być znaczny. W innym modelu źródłem pola elektrycznego w pęcherzyku jest efekt fleksoelektryczny. Efekt ten polega na powstawaniu polaryzacji objętościowej w obszarach, w których istnieje

je gradient ciśnienia. Pojawienie się w pęcherzyku gradientu pola elektrycznego prowadzi do powstawania mikrowyładowań, które zachodzą zarówno w gazie, jak i w cieczy. Mikrowyładowania te prowadzą do emisji światła. Obszar świecenia w modelach tego typu może być większy od obszaru zajmowanego przez pęcherzyk.

Pierwszy model kwantowy SBSL został zaproponowany przez J. Schwingera, który zjawisko sonoluminescencji powiązał z efektem Casimira. Pomysł Schwingera został następnie rozwinięty w pracach C. Eberlein [10, 11]. Z dyskusji, jaka się rozwinęła w związku z tym modelem, wynikało, że aby jego wyniki pokrywały się z wynikami uzyskanymi w badaniach SBSL, prędkości kurczenia się pęcherzyka powinny mieć wartości nadświetlne. Spowodowało to, że zmniejszyło się zainteresowanie wytłumaczenia SBSL przy pomocy aparatu obliczeniowego elektrodynamiki kwantowej.

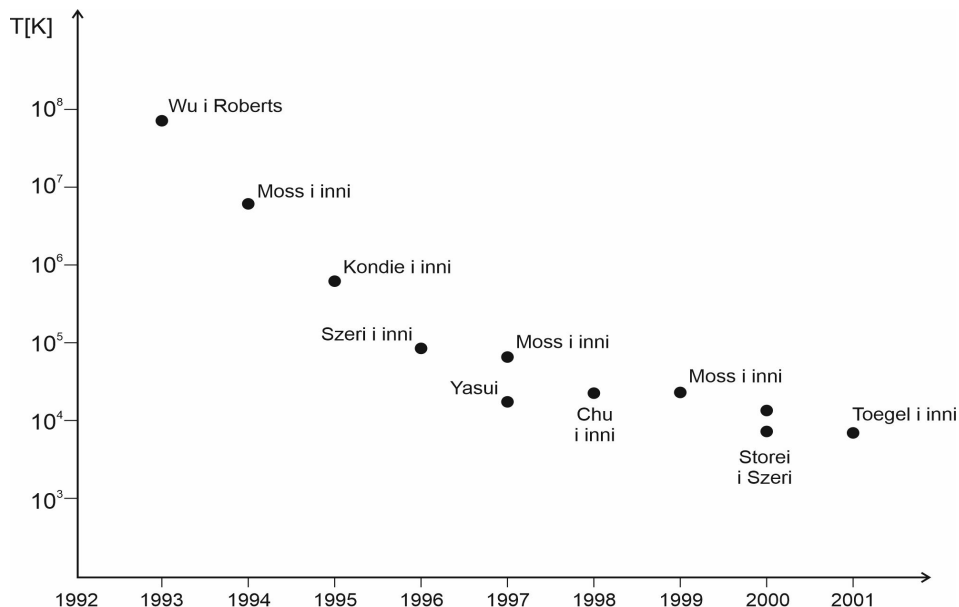
W pracy [16] przedstawiony został model kwantowego grzania gazu pęcherzyka SBSL. Przyjmuje się w nim, że w czasie silnej kompresji pęcherzyka, ruch atomów znajdujących się w jego wnętrzu są skwantowane. Ruch atomów opisuje się przy pomocy fononów. Założenie istnienia w pęcherzyku pola elektrycznego o dużym gradiencie i uwzględnienie jego roli w oddziaływaniach między fononami i stanami wzbudzonymi atomów prowadzi do wzrostu liczby fononów, czyli grzania gazu. Dodatkowym wynikiem modelu jest wskazanie na możliwość zwiększenia temperatury gazu pęcherzyka przez oświetlenie go wiązką laserową o odpowiedniej częstotliwości.

Sonofuzja

Panujące wśród badaczy opinie na temat możliwości osiągnięcia w doświadczeniach z SBSL warunków sprzyjających syntezie jądrowej dobrze odzwierciedla rys. 7 [17]. Przedstawiono na nim wyniki obliczeń temperatur w pęcherzyku uzyskane w pracach publikowanych w kolejnych latach. Temperatury te systematycznie spadały, aby w roku 2000 osiągnąć wartość około 10^4 K. Prowadzone w tych latach prace doświadczone wykonywane w układach: ciężka woda i wodor, ciężka woda i gazowy deuter oraz zwykła woda i gazowy deuter nie dawały zachęcających rezultatów.

W roku 2002 grupa kierowana przez R. Taleyarkhana opublikowała pracę cytowaną w [11, 12], w której donosiła o rejestracji znaczącej liczby neutronów o energiach mniejszych niż 2,45 MeV, będących według nich dowodem zajścia reakcji syntezy jąder atomów deuteru. Reakcja taka przebiega jednym z dwóch możliwych kanałów. W jednym kanale jej wynikiem jest powstanie atomu trytu i protonu, a w drugim – powstanie atomu helu i neutronu o energii 2,45 MeV. Dlatego pojawienie się neutronów o odpowiedniej energii jest zawsze silnym dowodem świadczącym o zajściu reakcji syntezy jądrowej. W swoim doświadczeniu grupa Taleyarkhana obserwowała SBSL w deuteryzowanym acetonie (C_3D_6O). W celu wytworzenia pęcherzyka gazu na rezonator skierowano strumień neutronów o energii 14 MeV pochodzących z zewnętrznego źródła. Pęcherzyki gazu

wytworzone w taki sposób są większe niż wytworzone innymi metodami. Spodziewano się, że duży pęcherzyk kurcząc się, bardziej rozgrzeje gaz w swoim wnętrzu niż pęcherzyk mały. W omawianej pracy stwierdzono, że zarejestrowany strumień niskoenergetycznych neutronów jest znacząco silniejszy od sygnału tła. Publikacja grupy Taleyarkhana wywołała falę krytyki, która została wzmocniona przez negatywne wyniki innych grup badaczy próbujących to doświadczenie powtórzyć. Odpowiadając na krytykę Taleyarkhan i współpracownicy podkreślali, że w eksperymencie kontrolnym wykonanym z użyciem C_3H_6O neutronów nie zaobserwowano.



Rys. 7. Wyniki obliczeń temperatury we wnętrzu pęcherzyka SBSL pochodzące z prac różnych autorów [17]

Obecnie uważa się, że wyniki grupy Taleyarkhana nie są wiarygodne, ale nie odrzuca się *a priori* możliwości uzyskania sonofuzji w nieznanym nam obecnie układzie parametrów doświadczalnych. Oprócz poszukiwań jakiejś szczególnie sprzyjającej sonofuzji cieczy, zwrócono uwagę na możliwość zbadania zależności efektywności SBSL od wielkości ciśnienia hydrostatycznego. W kilku pracach cytowanych w [11] opisano rezonatory sferyczne przeznaczone do pracy z ciśnieniami o wartości kilkuset barów. Wyników doświadczeń z użyciem tych rezonatorów jak dotąd nie opublikowano. Inny kierunek prac nad sonofuzją to zastosowanie w eksperymentach z SBSL silnej wiązki laserowej. W pracy teoretycznej opisującej taki eksperyment [18], oszacowana w środku pęcherzyka temperatura ma wartość 10^7 K.

Zakończenie

Sonoluminescencja, a szczególnie sonoluminescencja jednobąbelkowa jest zjawiskiem intrygującym. Badania prowadzone w ciągu ostatnich 30 lat przyniosły odkrycie jej bardzo ciekawych charakterystyk, ale nie udało się stworzyć modelu teoretycznego zadowalająco ją opisującego ją w sposób zadowalający. W jednej z prac poświęconych SBSL pojawiła się następująca uwaga: gdyby w latach poprzedzających odkrycie SBSL pojawił się ktoś, kto na podstawie doświadczeń z MBSL przewidywałby, że możliwa jest obserwacja pojedynczego pęcherzyka gazu, który po gwałtownej kompresji emituje błysk światła, a następnie cykl ten powtarzany jest kilka miliardów razy, to należałoby natychmiast zwołać konsylium, które znalazłoby możliwie niedokuczliwą dla pacjenta kurację. Wydaje się, że właśnie ta cecha SBSL, a więc nierozpadanie się pęcherzyka mimo olbrzymich prędkości i akceleracji, obok wprost egzotycznych wartości temperatur i ciśnień, jakie pojawiają się w jego wnętrzu, powoduje, że zainteresowanie sonoluminescencją, mimo upływu czasu, nie maleje. SBSL jest czasami nazywana „the star in a jar”¹. Można mieć nadzieję, że gwiazda ta w przyszłości zaskoczy nas swą nieodkrytą jeszcze jasnością.

Spis literatury

- [1] S. Mrówczyński, K. A. Wróblewski, *Wiedza i Życie*, 3, 20 (1995).
- [2] R. A. Hiller, B. P. Barber, *Świat Nauki*, Kwiecień 1995.
- [3] H. Frenzel, H. Schultes, *Z. Phys. Chem., Abt. B* 27, 421 (1934).
- [4] L. Rayleigh, *Philos. Mag.*, 34, 94 (1917).
- [5] A. J. Walton, G.T.Reynolds, *Adv. Phys.*, 33, 595 (1984).
- [6] R. D. Finch, *Ultrasonics*, April-June (1963).
- [7] D. F. Gaitan, Thesis, Univ. Mississippi (1990).
- [8] R. E. Apfel *Meth. Exper. Phys.*, 19, 355 (1981).
- [9] B. P. Barber, R. A. Hiller, R. Lofstedt, S. J .Putterman, K. R. Weninger, *Phys. Rep.*, 281, 65 (1997).
- [10] M. P. Brenner, S. Hilgenfeldt, D. Lohse, *Rev. Mod. Phys.*, 74, 425 (2002).
- [11] V. A. Borisenok, *Acoust. Phys.*, 61, 308 (2015).
- [12] L. A. Crum, *J. Acoust. Soc. Amer.*, 138, 2181 (2015).
- [13] B. Gompf, R. Gunther, G. Nick, R. Pecha, W. Eisenmenger, *Phys. Rev. Lett.*, 79, 1405 (1997).
- [14] H. Xu, K. Suslick *Phys. Rev. Lett.*, 104, 244301 (2010).
- [15] W. Winiarczyk, K. Musioł, *Opt. Com.*, 172, 93 (1999).
- [16] A. Kurcz, A. Capolupo, A. Beige, *New J. Phys.*, 11 053001 (2009).
- [17] F. R. Young, *Sonoluminescence*, CRC Press (2005).
- [18] R. Sadighi-Bonabi, M. Cheshlaghi, *AIP Advances* 6, 035218 (2016).

¹ Z ang.: „gwiazda w słoiku”