

POJAVI Z MEHURČKI

Janez Strnad

Fakulteta za matematiko in fiziko Univerze v Ljubljani

Povzetek – Mehurčki so značilni za več pojavov v kapljevini. Članek najprej omeni nekaj takih pojavov. Nato nekoliko podrobneje opiše tri od njih, ki jim je skupna implozija mehurčkov: segrevanje vode pri srednji temperaturi, kavitacijo in sonoluminiscenco. Kaže, da so pojavi v tem vrstnem redu vse manj znani.

Abstract – Bubbles are characteristic for some phenomena in liquids. In the article first a few of these phenomena are mentioned. Then three of them, for which the implosion of bubbles is common, are described somewhat more in detail: heating of water at intermediate temperature, cavitation, and sonoluminescence. Apparently, in this order the phenomena are less and less known.

UVOD

V fiziki pogosto naletimo na mehurčke [1]. Najprej pomislimo na *mehurčno celico*. V kapljevini, denimo v tekočem vodiku, so nenadno zmanjšali tlak, da se je temperatura povišala nad vrelišče. Elektroni in ioni, ki so jih na poti po kapljevini sproščali hitri nabiti delci, so delovali kot jedra, na katerih so se izločili prvi mehurčki pare. Na fotografiji so se pred temnim ozadjem pokazale sledi delcev kot nizi mehurčkov. Pri reakcijah med delci iz pospeševalnika in vodikovimi jedri so nastali in razpadli delci. Tako so odkrili več dotlej neznanih kratkoživih delcev. Danes mehurčnih celic ne uporabljajo več. Nadomestile so jih naprave z množicami napetih žičk v plinu, s katerih je mogoče podatke neposredno zajeti z računalnikom. Donald Glaser, ki si je leta 1952 zamislil mehurčno celico, je leta 1960 za svoje odkritje dobil Nobelovo nagrado.

V kapljevini, prenasičeni z raztopljenim plinom, na primer v segreti vodi iz pipe ali v pivu, ščepec soli, peska ali prahu povzroči nastanek dodatnih mehurčkov. Ob tem se zmanjša frekvenca osnovnega tona, ki ga slišimo, ko valjasto posodo s kapljevino udarjamo s kakim predmetom. To je *pojav vročega napitka*. Lastna frekvenca stebrička kapljevine se zmanjša, ker je sorazmerna s hitrostjo zvoka. Hitrost zvoka v kapljevini z mehurčki je približno tolikšna kot hitrost zvoka v plinu. Frank S. Crawford je ugotovil, da se frekvenca zaradi mehurčkov v vodi zmanjša do osemkrat [2].

Crawford je tudi raziskal, ali bi pivo v odprti steklenici lahko uporabili za zaznavanje hitrih nabitih delcev. Ali bi opazili dodatne mehurčke, ki bi jih v kapljevini povzročili taki delci? Kot sodelavec Lawrenceovega laboratorija in kalifornijske univerze v Berkeleyju je

imel dostop do najmočnejših izvirov delcev. Pivo je izpostavil sevanju γ iz šibkega izvira s kobaltom ^{60}Co . Potem je uporabil močnejši izvir sevanja γ in nazadnje še najmočnejšega. V nobenem primeru ni opazil dodatnih mehurčkov. Enako je poskusil še z delci α z veliko energijo, nato z ioni železa in naposled z ioni urana. Dodatnih mehurčkov ni opazil v nobenem primeru. Po tem je sklepal, da s pivom ni mogoče zaznavati hitrih nabitih delcev. Sklep ne preseneti. V vodni raztopini soli se raztopi veliko manj plina kot v čisti vodi. Pivo je šibek elektrolit, v katerem je precej ionov. Hitri nabiti delci ne povečajo znatno gostote ionov. Le pri zelo močnem obsevanju lahko nastane nekaj dodatnih mehurčkov, ko se poviša temperatura v obsevanem delu kapljavine.

Z zmanjšanjem vzgona v mehurčkih pri izbruhu metana z morskega dna so poskušali pojasniti, zakaj so se, na primer v Bermudskem trikotniku, nenadoma potopile ladje [3].

Zadnje čase so priljubljeni poskusi, pri katerih pena mehurčkov brizgne visoko v zrak. Srednješolci in študenti so delali take poskuse in poročali o njih v revijah, na televiziji in na spletu. Najbolj so se obnesle gazirane pijače kot kokakola ali kokta. Posebno učinkovite so pijače te vrste, ki imajo majhno površinsko napetost, ker so oslajene z umetnim sladilom namesto s sladkorjem. Steklenico pijače odmašijo, vanjo vržejo bombone in jo zamašijo z zamaškom z nekajmilimetrsko okroglo odprtino. Namesto bombonov je mogoče uporabiti pesek ali prah. Na hrapavem površju bombonov ali drugih dodatkov se burno razvijajo mehurčki ogljikovega dioksida in tvorijo peno, ki brizga iz steklenice [4].

Tu bomo opisali tri druge pojave, pri katerih sodelujejo mehurčki. Pri vseh zasledimo sunkovito sesedanje, *implozijo* mehurčkov. Implozijo je leta 1917 podrobneje raziskal lord Rayleigh v članku *O tlaku, ki se razvije v kapljavini med implozijo krogelne votline*. Ko mehurčki implodirajo, se v bližnji steni pojavijo udarni valovi (valovna čela), ki pri segrevanju vode odnesejo manj energije, pri kavitaciji več in pri sonoluminiscenci še več.

ŠUMENJE V VODI PRED VRETJEM

Med segrevanjem vode v posodi za čaj nastane značilen zvok. Pri srednji temperaturi se pojavi šumenje, ki preneha, ko voda zavre. Prav po tem prehodu od šumenja k brbotanju vemo, da je voda zavrela, če je ne opazujemo naravnost.

Osborne Reynolds je leta 1901 raziskoval, ali pri segrevanju vode nastane enak šum kot pri toku skozi ožino v odprti cevi. Pozneje je William Henry Bragg v nizu poljudnih predavanj na londonski Kraljevi ustanovi ugotovil, da »so zvoki kotlička zelo zanimivi ... majhni mehurčki pare se sesedejo, kar se zgodi zelo hitro, tako da strani mehurčka udarita druga ob drugo z ostrim pokom. Udarec je tako trd, kot da bi jeklo udarilo ob jeklo. Tako se pojavi iz kotlička šum, kot da bi ga zadevala nešteta kladičca.« Lord Rayleigh se je zavedal zvokov, ki se pojavijo pri segrevanju vode, a jih v knjigi o zvoku ni obdelal. V zadnjem času raziskujejo v glavnem mehurčke, ki se pojavijo pri segrevanju vode v jedrskem reaktorju in povzročajo naključne spremembe nevtronskega toka.

Zvoke pri stacionarnem segrevanju vode v majhni posodi sta raziskala Samer Aljishi

in Jakub Tatarkiewicz [5], [6]. Uporabila sta grelna ploščo, posodo, brezžični mikrofoni, spektralni analizator in pisalni instrument. Poskuse sta delala s kovinskim čajnikom, enolitrsko in dvolitrsko stekleno čašo ter litrsko kovinsko valjasto posodo. Uporabila sta vodo iz pipe, ki sta jo pred poskusom pol ure vreli in s tem iz nje izgnala večji del raztopljenega zraka, ter z destilirano vodo. Merila sta temperaturo pod gladino, ne pa odvisnosti temperature od višine.

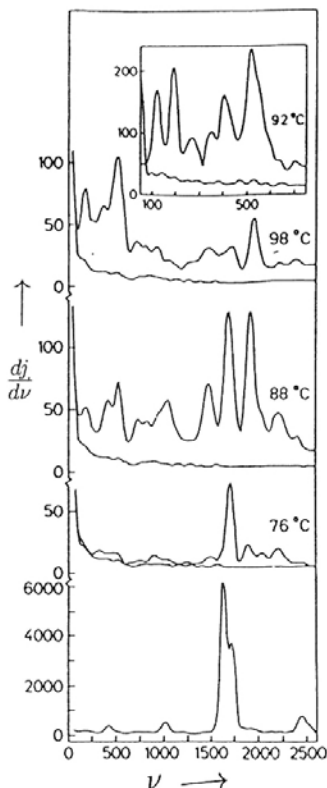
Razmere so bile najpreglednejše pri segrevanju litra vode v dvolitrski stekleni čaši z višino 23 cm in s premerom 11,3 cm. Pri tem sta lahko najbolj opazovala odvisnost sprememb od višine vodnega stolpca. Pri temperaturi pod 85 °C je v spektru prevladoval vrh pri frekvenci 1685 Hz. Z naraščajočo temperaturo je postal izrazitejši vrh pri frekvenci okoli 1920 Hz. Nad temperaturo 92 °C so vrhovi pri teh velikih frekvencah oslabei, pojavili pa so se novi pri manjših frekvencah 130, 190, 410 in 515 Hz. Ko sta udarjala po dnu čaše s plastičnim merilom, se je pojavil vrh pri približno 1650 Hz in šibkejši vrhovi pri 410, 100 in 2390 Hz. Pri segrevanju destilirane vode so se pri temperaturi nad 98 °C pri frekvencah 130, 200, 530 in 1680 Hz pojavili veliko manj izraziti vrhovi (slika 1).

Pri segrevanju vode se na začetku toplota prenaša s konvekcijo, pri kateri ne nastaja zvok. Pri srednjih temperaturah nastajajo mehurčki na jedrih. Najprej začnejo pri temperaturi okoli 40 °C nastajati mehurčki zraka na neravnostih na steni čaše in se dvigajo, ne da bi povzročali zvok. Pri temperaturi okoli 70 °C se pojavijo mehurčki pare na dnu čaše. Ti za razliko od mehurčkov zraka nastajajo sunkovito. Zvok se pojavi ob imploziji, ko zidejo v hladnejši predel vode in se para sunkovito utekočini. Pri imploziji mehurčkov nastajajo udarni valovi, ki zbudijo vrhove pri veliki frekvenci. Pri še višji temperaturi nastajajo mehurčki pare, se združujejo in potujejo do gladine. Vrhove pri temperaturi nad 90 °C po vsej verjetnosti zbuja pokanje mehurčkov na gladini. Ko voda zavre, se pojavijo veliki mehurčki pare po vsej prostornini vode.

Udarni valovi, ki so nastali pri imploziji mehurčkov, so zbudili resonanco pri lastnih nihanjih vode in posode. Vrh pri frekvenci okoli 1850 Hz je ustrežal lastni frekvenci nihanja čaše. Resonanco pri tej frekvenci je verjetno zbujalo nihanje mehurčkov ob steni čaše, preden so implodirali. Vrh pri frekvenci okoli 1910 Hz je ustrežal radialnemu lastnemu nihanju čaše. Na te vrhove ni vplivala višina vode v čaši. Vrh pri frekvenci 510 Hz, ki se je pojavil pri visoki temperaturi, pa je bil odvisen od višine vode. Spustil se je k 368 Hz pri 0,2 litra vode in povzpel do okoli 860 Hz pri 1,6 litra vode. Po tem je mogoče sklepati, da je ustrežal resonanci pri lastni frekvenci zračnega stolpca nad vodo. Primerjali so ga z nihanjem stolpca zraka v orgelski piščali. Frekvenca se je nekoliko spreminjala, ker robni pogoj na vrhu čaše ni bil natančno določen. Ko je nekaj vode povrelo in se je zmanjšala višina vode v čaši, se je ustrezna frekvenca zmanjšala. To je bila lastna frekvenca stolpca vode v posodi. Zaradi večje hitrosti zvoka v vodi je lastna frekvenca večja, okoli 3850 Hz. Zaradi mehurčkov pri pojavu vročega napitka pa se je frekvenca izdatno zmanjšala. Na vrhove pri visoki temperaturi na območju frekvenc od 130 do 190 Hz nista vplivali ne višina vode ne oblika posode. Bili pa so izrazitejši pri večji prostornini vode, zato so verjetno

povezani s frekvenco pri pokanju večjih mehurčkov pare ob gladini.

Omenili smo, da je bil zvok pri segrevanju destilirane vode šibkejši kot pri vodi iz pipe. To so pojasnili s trdnimi ostanki ob dnu posode. Ti so preostali, ko je voda iz pipe izparela, in delovali kot dodatna jedra. Podobno je bil zvok šibkejši, če so vodo med segrevanjem mešali.



Slika 1. Spektri zvoka pri merjenjih z litrom vode iz pipe v dvolitrski posodi. Na vodoravno os je nanesena frekvenca ν hertzih, na navpično pa spektralna gostota $dj/d\nu$ v poljubnih enotah. Najnižji diagram kaže vrhove, ki ustrezajo resonancam posode, najvišji pa podrobnejši spekter na frekvenčnem območju od 100 do 550 Hz. Na teh dveh diagramih je enota na navpični osi spremenjena. Diagrami med njima kažejo spektre med segrevanjem vode pri različnih temperaturah. Pod vsakim spektrom je narisano ozadje, to je šum, ki se je pojavil, ko vode niso segrevali. Ta šum je zelo velik pri zelo majhni frekvenci [4].

KAVITACIJA

Tlak v toku kapljevine je odvisen od hitrosti. O tem priča Bernoullijeva enačba, ki v stacionarnem toku povezuje točko s tlakom p_0 in hitrostjo v_0 s točko s tlakom p in hitrostjo v :

$$p_0 + \frac{1}{2} \rho v_0^2 = p + \frac{1}{2} \rho v^2, \quad p = p_0 + \frac{1}{2} \rho (v_0^2 - v^2) \quad (1)$$

Enačba dobro velja za dve točki na vodoravni tokovnici, približno pa tudi za točki z majhno višinsko razliko. Pri dovolj veliki hitrosti postane tlak manjši od izparilnega tlaka, to je nasičenega parnega tlaka pri tisti temperaturi. To se primeri v vodnem toku okoli vrtečih se delov turbin in sesalnih črpalk ter ladijskih vijakov. Tam nastanejo mehurčki zraka ali vodne pare. To je kavitacija [6]. Mehurčki nastanejo zaradi zmanjšanja tlaka, medtem ko pri segrevanju nastanejo zaradi povišane temperature. Mehurčki pri kavitaciji implodirajo, ko zaidejo v predel z manjšo hitrostjo in večjim tlakom, podobno kot pri segrevanju mehurčki implodirajo, ko zaidejo v predel z nižjo temperaturo.

Pri kavitaciji so udarni valovi zaradi implozij mehurčkov močnejši kot pri segrevanju vode. Kavitacija je večinoma škodljiva. Zaradi nje se zmanjša izkoristek turbin in pogona z vijaki. Udarni valovi povzročijo v kovini mehanične napetosti in lahko pripeljejo do utrujenosti kovine. Mehurčki praskajo dele naprav, ki se zaradi tega prej obrabijo (slika 2).



Slika 2. Vijačnici mehurčkov, ki so nastali pri kavitaciji v vodi na konicah vrtečega se vijaka [6].

Kavitacijo sta leta 1895 opazila John I. Thornycroft in S. W. Barnaby, ko je vijak njune podmornice v razmeroma kratkem času postal naguban. Izumitelj parne turbine Charles Parsons je z jahto dosegel borih 19 vozlov (35,2 km/h) namesto načrtovanih 40 vozlov (74,1 km/h). Pri svojih računih ni upošteval kavitacije. Dandanes se kavitaciji pri strojih kolikor mogoče izognejo.

Kavitacijo zasledimo v naravi. Pojavi se v toku vode na mestih, na katerih se smer toka močno spremeni, na primer v slapovih. Kozice iz družine alpheidae dosežejo le velikost 3 do 5 cm. Ene od klešč so veliko večje od drugih. Ko kozica velike klešče sunkovito zapre, nastane močan pok. Pogosto navedejo, da pri tem jakost zvoka preseže jakost zvoka motorjev velikega reakcijskega letala, a traja manj kot tisočino sekunde. Tlak

je povečan za do 0,8 bara. Nastane curek mehurčkov, ki potujejo z nadzvočno hitrostjo. Mehurčki implodirajo in ubijejo manjše živali, večje pa omamijo. Podobno lovijo plen kozice iz rodu stomatopoda, le da so te večje, do 30 cm in več, in nimajo asimetričnih klešč. Do kavitacije lahko pride v ceveh – ksilemu, po katerih drevesa črpajo vodo in rudninske snovi po deblih navzgor. To se primeri zaradi suše ali mraza. Drevo je zmožno ukrepov, s katerimi se do določene mere izogne nevšečnostim.

V zvoku, ki ga opišemo kot ravno valovanje, tlak niha okoli navadnega zračnega tlaka p_0 z amplitudo $\delta p \omega s_0 = cp$. Pri tem je c hitrost zvoka v vodi, p gostota vode, ω krožna frekvenca in s_0 amplituda delov vode. V zvoku z dovolj veliko jakostjo $j + 1/2 c p \omega^2 s_0^2$ lahko tlak:

$$p = p_0 - \delta p = p_0 - c p \omega s_0 = p_0 - \sqrt{2pcj} \quad (2)$$

postane manjši od izparilnega tlaka. Pri tem nismo upoštevali površinske napetosti γ , ki v mehurčku s polmerom R tlak poveča za $2\gamma/R$. Pri majhnih mehurčkih zapisana ocena ne velja.

Ocenimo mejni tlak v majhnih mehurčkih s polmerom R v kapljevini s površinsko napetostjo γ , pri katerih ne moremo spregledati prispevka tlaka $2\gamma/R$ zaradi površinske napetosti. Tlak plina v mehurčku je enak $p = P + 2\gamma/R$, če je P tlak v kapljevini. Vzemimo, da so spremembe dovolj počasne in potekajo kvazistatično okoli ravnovesnega tlaka $p_0 = P_0 + 2\gamma/R_0$. Pri tem je P_0 konstantni tlak v kapljevini in R_0 polmer mehurčka pri tem tlaku. V majhnem mehurčku se toplota hitro izmenja in lahko vzamemo, da je sprememba izotermna: $p = p_0 V_0/V = p_0 R_0^3/R^3$. Tako dobimo za tlak v kapljevini: $P = p - 2\gamma/R = p_0 R_0^3/R^3 - 2\gamma/R = (P_0 + 2\gamma/R_0) R_0^3/R^3 - 2\gamma/R = A/R^3 - 2\gamma/R$. Vpeljali smo konstanto $A = (P_0 + 2\gamma/R_0) R_0^3$. Tlak v kapljevini je povezan s polmerom mehurčka. V minimumu velja $dP/dR = -2A/R_{kr}^4 + 2\gamma/R_{kr}^2 = 0$. Kritični polmer in kritični tlak v kapljevini sta:

$$R_{kr} = \sqrt{3A/2\gamma}, \quad P_{kr} = -\sqrt{32\gamma^3/27A} = -4\gamma/(\sqrt{27}R_0).$$

Nazadnje smo v imenovalcu postavili $A \approx 2\gamma/R_0^2$, ker je pri majhnih mehurčkih tlak v kapljevini P_0 veliko manjši od tlaka zaradi površinske napetosti $2\gamma/R_0$. Tako smo dobili Blakov tlak:

$$P_s = P_0 - P_{kr} = P_0 + 0,77\gamma/R_0.$$

To mejo je postavil F. G. Blake leta 1949. Do kavitacije pride, če tlak v plinu preseže Blakovo mejo. Privzeli smo, da so spremembe počasne. Pri hitrih spremembah je treba uporabiti bolj zapletene račune [7].

V zvoku ali ultrazvoku se pri kavitaciji v vodi pojavijo mehurčki, ki s frekvenco zvoka ali ultrazvoka naraščajo in se zmanjšujejo. Tako vrsto kavitacije je mogoče izkoristiti. Z ultrazvokom na primer v vodi čistijo površje kovinskih teles in leč. Nadzorovana kavitacija pospeši kemijske reakcije. Pri kavitaciji nastajajo prosti radikali, kar pripelje do reakcij, ki jih drugače ni mogoče sprožiti.

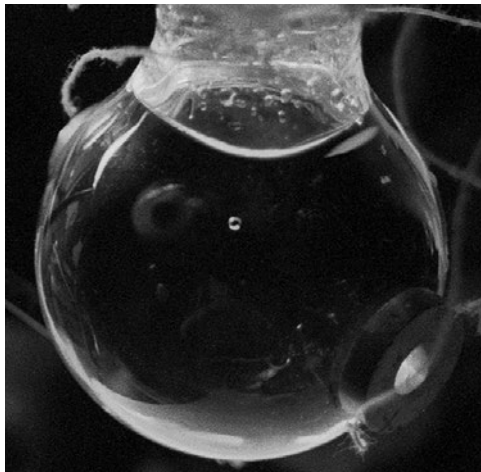
Leta 2002 je Rusi Taleyarkhan s sodelavci na univerzi Purdue v Lafayetteu v ameriški zvezni državi Indiana v reviji Science objavil, da je uspelo z mehurčki zlivati jedra težkega vodika. Vest je zbudila precej zanimanja in dvomov. Leta 2005 dva neodvisna raziskovalca, eden od njiju je bil Seth Putterman [8], nista mogla ponoviti poskusa. Pozneje so na univerzi Purdue Taleyarkhanu odvzeli profesorski naslov, češ da njegovo raziskovanje ni bilo pošteno. Vendar še do danes niso čisto potihnile razprave o »mehurčnem zlivanju«.

SONOLUMINISCENCA

Leta 1947 sta H. Frenzel in H. Schultes raziskovala možnost, da bi z ultrazvokom ugotavljala ladje in podmornice v morju. Mimogrede sta z ultrazvokom obsevala razvijalec, v katerega sta dala osvetljen fotografski film. Zanimalo ju je, ali je tako mogoče pospešiti razvijanje. Na filmu sta opazila drobne bliske. Pokazalo se je, da so mehurčki ob imploziji sevali svetlobo. Pojav je dobil ime *sonoluminiscenca*. Podoben poskus sta leto prej naredila N. Marinesco in J. J. Trillat [8], [9].

Pojav, pri katerem je udeleženi več mehurčkov, *večmehurčna sonoluminiscenca*, je zelo zapleten in ga je težko raziskovati. Leta 1989 pa sta Felipe Gaitan in Lawrence Crum v stoječem ultrazvočnem valovanju opazovala *enomehurčno sonoluminiscenco*. Pri tej osamljen mehurček seva svetlobo ob vsakem stiskanju. Ta pojav je bil bolj pregleden. Bliski so zelo kratkotrajni, trajajo od 35 do nekaj sto pikosekund (10^{-12} s). Mehurček seva svetlobo, ko je zelo majhen, s polmerom okoli $1\mu m$. Izsevani energijski tok doseže od 1 do 10 mW (slika 2).

Temperaturo v implodirajočem mehurčku je težko meriti. Nekaj časa so mislili, da doseže do 200 tisoč kelvinov. Na to so sklepali, ker so argonovi mehurčki v žveplovega monoksida in argona, ki naj bi ustrezale vzbuditveni energiji do 18 elektronvoltov. Sredi mehurčka bi v tem primeru med implozijo nastala zelo vroča plazma.



Slika 3: Mehurčki, ki pri sonoluminiscenci sevajo svetlobo, so zelo majhni in bliski zelo šibki [9].

Pozneje niso mogli potrditi tolikšne temperature. Ugotovili pa so, da je temperatura v mehurčku dovolj visoka, da se tali jeklo. S spektroskopskimi merjenji so se prepričali, da temperatura doseže vsaj 2300 do 5800 K. Sonoluminiscenco živahno raziskujejo.

Opisanih pojavov z izjemo pojava vročega napitka ne moremo pokazati v šoli. S pripovedovanjem o njih pa lahko učitelj pritegne pozornost srednješolcev in pokaže, kako so deli fizike med seboj povezani in kako koristno jih je poznati.

VIRI:

- [1] J. Strnad, *Mehurčki*, Presek **19** (1991/92) 22–27; *Dvigajoči se mehurčki*, Obzor-nik mat. fiz. **39** (1992) 85–89.
- [2] J. Strnad, *Ladja in mehurčki*, Presek **30** (2002/03) 232–236; *Ladja in mehur*, Presek **31** (2003/04) 354–357.
- [3] G. Planinšič, J. Strnad, *Gejzir v steklenici*, Naravoslovna solnica **13** (2009) 10–13 (3).
- [4] S. Aljishi, J. Tatarkiewicz, *Why does heating water in a kettle produce sound?*, Am. J. Phys. **59** (1991) 628–612.
- [5] J. Strnad, *Šumenje vode v kotličku*, Presek **20** (1992/93) 92–95.
- [6] *Cavitation*, <http://en.wikipedia.org/wiki/Cavitation>.
- [7] A. Harkin, A. Nadim, T. J. Kaper, *On acoustic cavitation of slightly subcritical bubbles*, Physics of Fluids **11** (1999) 274–287.
- [8] S. J. Putterman, *Sonoluminescence: sound into light*, Scientific American **272** (1995) 32–37 (2); J. S. Putterman, K. R. Weninger, *Sonoluminescence: how bubbles turn sound into light*, Annual Review of Fluid Mechanics **32** (2000) 445–476.
- [9] *Sonoluminescence*, <http://en.wikipedia.org/wiki/Sonoluminescence>.