

UNIVERZA V LJUBLJANI
FAKULTETA ZA MATEMATIKO IN FIZIKO
ODDELEK ZA FIZIKO

Gregor Kladnik

SEMINARSKA NALOGA

Sonofuzija – sanje ali resničnost?

MENTOR: prof. dr. Rudi Podgornik

Ljubljana, februar 2007

Povzetek

Sonoluminescenca je pojav pri katerem s pomočjo ultrazvočnih valov povzročimo nastanek in implozijo mehurčkov v tekočini, pri čemer je implozija tako silovita, da za kratek čas nastane svetlobni blisk.

Čeprav je od odkritja pojava minilo že več kot sedem desetletij, znanstvenikom še ni uspelo postaviti zadovoljive teorije, ki bi opisala pojav. Ena izmed najbolj kontroverznih teorij v zadnjih letih je postala t. i. *sonofuzija*, predvsem po zaslugi skupine znanstvenikov okoli R. P. Taleyarkhana, ki od leta 2002 trdi, da je s svojimi poskusi dokazala potek fuzijskih reakcij tekom sonoluminescence.

V pričujoči seminarski nalogi bomo predstavili delo Taleyarkhanove skupine ter odzive znanstvenikov na njihove rezultate.

Kazalo

Povzetek	2
1 Uvod	4
2 Pojav sonoluminescence	5
2.1 Udarni valovi v mehurčku	7
3 Na poti k <i>sonofuziji</i>	9
3.1 Postavitev eksperimenta	10
3.2 Rezultati meritev	11
3.2.1 Interna revizija na ORNL	12
3.2.2 “Neodvisna” potrditev rezultatov	13
3.2.3 Izboljšanje merilnega postopka	13
3.3 Možna uporaba	15
4 Zaključek	16
Literatura	17

1 Uvod

Ko se je proti koncu 20. stoletja že zdelo, da bo delo znanstvenikov pripe-
ljalo do enotne teorije sonoluminescence,^[1–3] je znanstvene kroge leta 2002
pretresel članek v reviji Science.^[4]

Znanstveniki so na Oak Ridge National Laboratory (ORNL) prvi uspeli
ustvariti takšne pogoje za pojav sonoluminescence, ki bi naj po njihovih
meritvah sodeč povzročili nastanek plazme ter fuzijskih procesov. Do tega
trenutka je v širši znanstveni javnosti obveljalo mnenje, da se ob imploziji
nastalih mehurčkov ustvari temperatura reda velikosti $T \approx 10^4 K$. Takšno
temperaturo so napovedovali precej zapleteni modeli, ki so upoštevali številne
parametre. To je tudi eden izmed glavnih težav pri ovrednotenju in iskanju
ustreznih modelov sonoluminescence – veliko število parametrov, ki vplivajo
na potek pojava. Sami hidrodinamični procesi nastanka in implozije me-
hurčkov so precej natančno znani že od raziskav lorda Rayleigha v začetku
20. stoletja in kasnejših dopolnitev Plesseta v sedemdesetih letih 20. stole-
tja.^[5] Težava je nastopila pri razlagi nastanka precej kratkih (red nekaj deset
pikosekund) svetlobnih bliskov in precej težavnih meritev. Šele po nekaj letih
razvoja merilnih sistemov, so lahko znanstveniki pričeli dodobra preverjati
napovedi in zahteve številnih teorij nastanka teh bliskov. Na koncu se je
večina znanstvenikov strinjala s sicer nepopolno vendar najverjetnejšo teorijo,
ki je poleg fizikalnih procesov vključevala tudi kemijske reakcije. Primerjava
spektrov svetlobnih bliskov z napovedmi modelov je podala najverjetnejši
vzrok za nastanek svetlobnih bliskov – zavorno sevanje elektronov v bližini
ionov oziroma atomov.^[1,5]

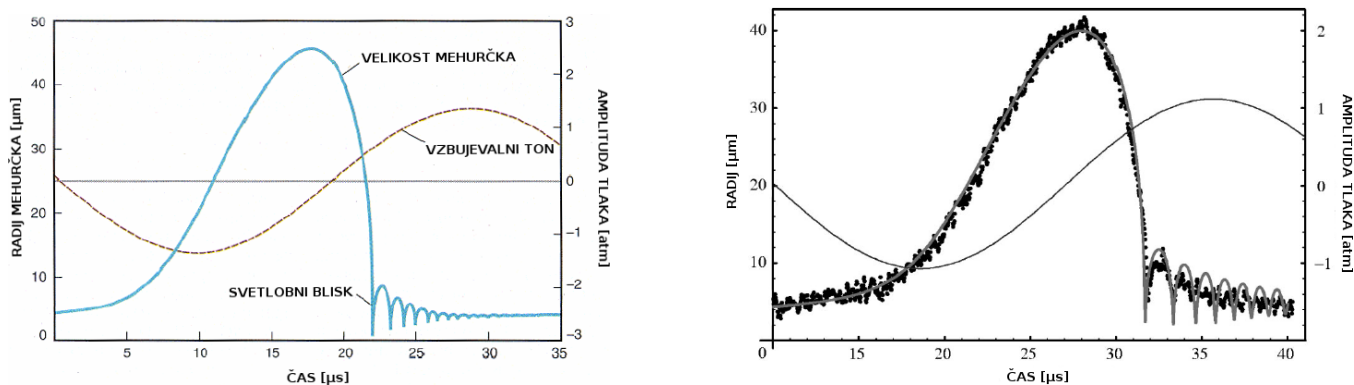
Skupina okoli R. P. Taleyarkhana na ORNL pa je ubrala drugačno pot. Na-
mesto običajne tekočine (voda) so uporabili degaziran aceton, ki so mu vo-
dikove atome zamenjali z devterijem. Dolgo je že bilo namreč znano, da je
sonoluminescenco težje doseči v močno degaziranih tekočinah. Mehurčki na-
stali v “običajnih” tekočinah implodirajo pri veliko nižjem (vzbujevalnem)
tlaku, kot v degaziranih tekočinah. Zaradi nelinearnosti Rayleigh-Plessetove
enačbe, ki opisuje spremembo radija mehurčka v času, je namreč majhna
sprememba (povečanje) maksimalnega radija mehurčka pomenilo za več re-
dov velikosti silnejšo implozijo in s tem večjo središčno temperaturo. Za
doseg pogojev sprožitve fuzijskih reakcij, bi tako središčne temperature ob
koncu implozije morale doseči temperature reda $10^7 K$.

2 Pojav sonoluminescence

Že leta 1934 sta H. Frenzel in H. Schultes z Univerze Köln odkrila sonoluminescenco v vodi vzbujani z zvočnimi valovi. Raziskave je vzpodbudilo odkritje, da lahko zvočni valovi delujejo kot katalizator v nekaterih kemijskih reakcijah. Glavni problem pri nadaljnjih raziskavah je bil, da so nastajali številni mehurčki (oblaki mehurčkov), ki so rasli in nato implodirali ter izsevali svetlobo nenapovedljivo in nesinhrono (večmehurčna sonoluminescenco).

Trajalo je vse do devetdesetih let prejšnjega stoletja, ko sta D. F. Gaitan in L. A. Crum izumila metodo, ki je omogočala nastanek in ujetje le enega mehurčka v deloma degazirani tekočini. S tem so bile omogočene raziskave, ki jih prejšnja narava problema ni omogočala.

Sama postavitev eksperimenta je precej enostavna in poceni: v stekleni posodi običajno valjaste oblike, kakršne pogosto najdemo v kemiji, napolnjeni z vodo iz ene strani s piezoelektrikom in zunanji generatorjem sinusne napetosti proizvajajo zvočno valovanje. Tipično so frekvence nad 20kHz ter amplituda okoli 110dB . S pomočjo žičke v tekočini, ki jo električni tok za kratek čas močno segreje, uparijo okoliško tekočino in nastane mehurček iz pare. Preden se para v mehurčku kondenzira se napolni s plinom raztopljenim v tekočini (običajno zrak, lahko tudi drugi umetno dodani plini), ter se ujame v antivozlu zvočnega valovanja, kjer se sile na mehurček izničijo. Sprva je radij tako nastalega mehurčka nekaj mikrometrov. Zvočno valovanje povzroči, da se najprej radij mehurčku močno poveča (za faktor okoli 10), nato pa hitro implodira. Ob koncu implozije v primernih pogojih izseva sonoluminescentni blisk svetlobe, slika (1).



Slika 1: (levo) Shematski prikaz enega cikla enomehurčne sonoluminescence. Potek radija mehurčka v odvisnosti od časa ter potek zvočnega vala. Ko mehurček doseže najmanjši radij izseva blisk svetlobe. Nato sledi še nekaj nihajev, nakar se radij ustali in mehurček je znova pripravljen na nov cikel. (desno) Primerjava dejanskih meritev radija mehurčka (točke) z napovedmi teorije Rayleigh-Plessetove enačbe.^[1, 5]

Analize kažejo, da so bliski svetlobe izredno kratkotrajni, med nekaj deset in nekaj sto pikosekund, odvisno od mešanice raztopljenega plina v tekočini. Radij mehurčka merijo s pomočjo laserja s katerim posvetijo na mehurček. Intenziteta svetlobe sipane na mehurčku je odvisna od kvadrata radija mehurčka (Mie-jevo sipanje). Meritve so podale za začetni radij mehurčka nekaj mikrometrov, nakar se zaradi poteka tlaka v tekočini radij poveča do okoli $50\mu\text{m}$ – razpenjanje traja vse do trenutka, ko tlak doseže pozitivno vrednost (kompresija).

Dinamiko mehurčka precej dobro opiše Rayleigh-Plessetova enačba^[5]

$$R\ddot{R} + \frac{3}{2}\dot{R}^2 = \frac{1}{\rho} \left(p_g - P_0 - P(t) - 4\eta\frac{\dot{R}}{R} - \frac{2\sigma}{R} \right), \quad (1)$$

kjer je R radij mehurčka, ρ gostota tekočine, p_g tlak plina v mehurčku, $P_0 + P(t)$ tlak v tekočini pri čemer je $P(t) = \Delta P \sin \omega t$ tlak zaradi vzbujevanja z zvokom, η viskoznost ter σ površinska napetost na meji med plinom in tekočino (mehurček). Leva stran enačbe je bila znana že Lordu Rayleighu leta 1917. Pri tem je raziskoval poškodbe na propelerjih ladij zaradi kavitacije. Kavitacija je spontani nastanek mehurčkov zaradi nižjega tlaka v tekočini ter nenadna implozija le-teh. Implozije številnih takšnih mehurčkov so lahko tako silovite, da poškodujejo dele ladij, predvsem propelerje. Pri svoji izpeljavi si je Rayleigh predstavljal kolaps mehurčka, pri čemer je zanemaril viskoznost, površinsko napetost in tlak plina. Za rezultat je dobil $R\ddot{R} + 3/2\dot{R}^2 = 0$, ki je analitično rešljiv z rešitvijo $R(t) = R_0[(t_* - t)/t_*]^{2/5}$. Očitno je hitrost implozije v takšnem močno poenostavljenem primeru divergentna, ko se čas t približuje celotnemu času implozije t_* . Rayleigh je trdil, da je ravno ta singularnost vzrok za poškodbe zaradi kavitacije.

V popolnejši obliki (1), kjer se upoštevajo zanemarjeni parametri, do takšne singularnosti ne more priti. Kljub temu se radij mehurčka zmanjša na tolikšno vrednost, da se že zaradi adiabatnega segrevanja

$$TV^{\kappa-1} = \textit{konst.} \quad \Rightarrow \quad Tr^{3(\kappa-1)} = \textit{konst.}$$

$$T_k = T_0 \left(\frac{r_0}{r_k} \right)^{3(\kappa-1)}, \quad \kappa = \frac{5}{3} \text{ za idealni plin,} \quad (2)$$

temperatura v njem poviša na $T_k \sim 10^4 K$. Dodatno segrevanje omogočajo udarni valovi, ki nastanejo zaradi nadzvočne hitrosti kolapsa sten mehurčka. Poleg Rayleigh-Plessetove enačbe (1) obstajajo še druge dopolnjene, ki skušajo še boljše opisati opazovano dinamiko ujetega mehurčka. Pri teh enačbah je pomembno, da so nelinearne diferencialne enačbe, za katere je značilna velika odvisnost rešitev od (začetnih) pogojev. Tako že relativno majhno povečanje amplitude zvoka povzroči precej silnejšo implozijo mehurčka ter posledično višjo končno temperaturo in večjo gostoto.^[4]

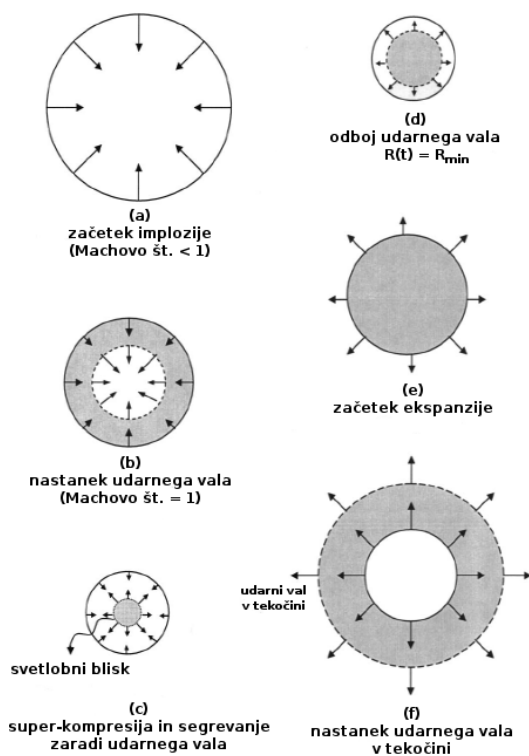
2.1 Udarni valovi v mehurčku

Raziskovalci sonoluminescence in sonokemije so v preteklosti oblake mehurčkov povezali s t.i. vročimi točkami, ki naj bi nastale znotraj vsakega mehurčka. V tem (zastarelem) modelu je energija, fokusirana zaradi kolapsa mehurčka, povzročila disociacijo molekul, ki so oddajale svetlobo, ko so se rekombinirale.

Ta teorija ni uspela razložiti izmerjenih spektrov, ki so kazali na središčno temperaturo najmanj nekaj desettisoč Kelvinov. V teoriji je možno takšne in še višje temperature doseči, če je kolaps tako hiter in simetričen, da ustvari sferični udarni val v notranjosti mehurčka. Medtem ko se implodirani udarni val z radijem R_u fokusira, se njegova amplituda in hitrost večata. Za takšen primer je rešitev hidrodinamskih enačb oblike

$$R_u(t) = At^b, \quad (3)$$

kjer je A konstanta, čas t merjen od trenutka največjega ojačanja pri $R_u = 0$ in b je 0.7 za zrak.



Slika 2: Shematski prikaz poteka implozije (ekspanzije) in nastanka udarnega vala v mehurčku ter kasnejše nastanek udarnega vala v okoliški tekočini.^[6]

Vsakemu udarnemu valu lahko pripišemo ustrezno Machovo število M . Le-to predstavlja razmerje med hitrostjo udarnega vala v in hitrostjo zvoka c v okoliškem mediju

$$M = \frac{v}{c}. \quad (4)$$

Temperatura za udarno fronto je višja kot pred njo; razmerje teh temperatur je sorazmerno kvadratu Machovega števila.

Za implodirajoči zračni mehurček, se Machovo število približuje neskončnosti, ko se udarna fronta približuje goriščni točki, kar pomeni, da lahko pride do izjemnega povečanja temperature. Še več, ko udarni val doseže središče mehurčka in se prične gibati radialno navzven (eksplozivno), se molekule, ki so bile še trenutek prej za fronto, nahajajo pred njo. Že vroče molekule udarni val zadene še enkrat in jih še dodatno segreje za faktor sorazmernemu kvadratu Machovega števila.

Temperature, ki so dosegljive s takšnim matematičnim modelom so torej izjemno visoke. V realnih pogojih so omejene s stabilnostjo udarne fronte. V modelu z udarnim valom in sonoluminescenco ostane udarna fronta sferična vse do radija približno $0.1\mu m$. Če bi ostala stabilna vsaj do radija okoli $10nm$, bi to majhno območje doseglo zadostne temperature za začetek fuzijskih reakcij.^[1,7]

Delo Taleyarkhanove skupine močno sloni na rezultatih numeričnih simulacij z njihovo *HYDRO* numerično metodo, kjer so upoštevali ravno takšno segrevanje zaradi udarnih valov. Numerične napovedi so za dane pogoje dovoljevale doseganje zadostno visokih temperatur. Problem pri takšnih numeričnih metodah je odvisnost poteka pojava sonoluminescence od številnih parametrov, ki jih je (za zdaj) nemogoče vse upoštevati.^[4-6]

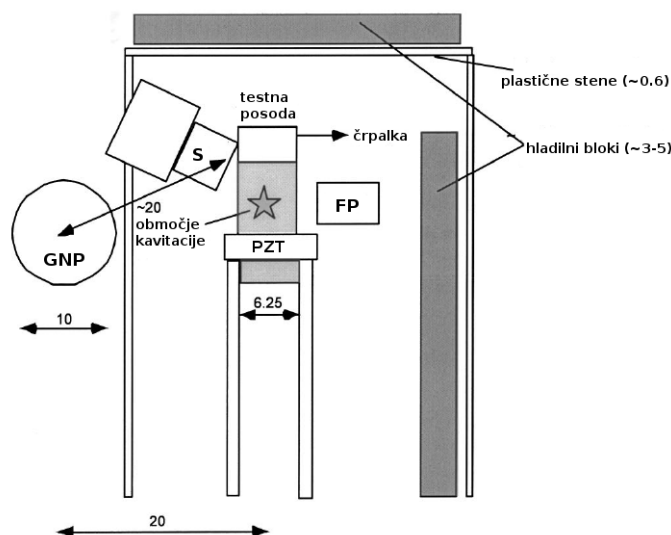
3 Na poti k sonofuziji

Cilj ORNL eksperimentov je bil doseči povečanje maksimalne temperature v središču mehurčka vsaj za dva reda velikosti (tj. na okoli $10^8 K$) v primerjavi z običajnimi eksperimenti, torej ustvariti zadostne pogoje za termonuklearno fuzijo.^[4,6,8] Da bi dosegli te pogoje, so morali temeljno spremeniti eksperimentalno tehniko, ki bi omogočala večkratno povečanje kinetične energije tekočine pospešene proti središču mehurčka, s čimer bi se močno povečal efekt celotne kompresije udarnega vala. Natančneje:

1. Uporabljena je bila za velikostni red večja amplituda stoječega valovanja: namesto običajnih 1-1.5bar pri enomehurčni sonoluminescenci (EMSL), so merili z zvočnim valovanjem z amplitudo 15bar in več. Za uporabo takšnih amplitud so se morali najprej znebiti dveh težav. Prva je bila najti testno tekočino, ki jo je možno uporabiti pri teh pogojih ($\Delta P \sim -15bar$) preden nastopi kavitacija, ki so jo želeli nadzorovano inducirati v pravem trenutku. Drugič, ustvariti in fokusirati zvočno polje znotraj majhnega območja testne tekočine.
2. V nasprotju z EMSL, so v fuzijskih eksperimentih uporabili kavitacijske mehurčke iz pare okoliške tekočine. Za parne mehurčke je ublažitev implozije zaradi večanja tlaka stisnjene pare najmanjša. Kondenzacija pare na površini mehurčka med implozijo omogoči, da ostane tlak pare skorajda konstanten do zadnjega dela kolapsa. To precej zmanjša ublažitev in poveča končni (največji) tlak, gostoto in temperaturo.^[9]
3. Testna tekočina uporabljena v ORNL je bila dobro degazirana organska tekočina D-aceton (C_3D_6O). Vsaka molekula D-acetona vsebuje šest jeder devterija, ki lahko v ustreznih pogojih z zadostno visoko temperaturo in gostoto reagirajo s termonuklearno fuzijsko reakcijo. Aceton je tudi zelo stabilen za kavitacijo, kar pomeni, da tudi pri višjih tlačnih amplitudah ne pride do prezgodnje kavitacije. Zaradi relativno velike molekularne mase M ($M = 64$ za D-aceton) in majhnega adiabatnega eksponenta γ (npr. $\gamma = 1.125$ za pare acetona) je hitrost zvoka v pari dokaj majhna, kar za določene hitrosti implozije privede do močnejših udarnih valov kot v nekaterih drugih potencialno zanimivih plinih in parah. Poleg tega manjša vrednost γ pomeni tudi večjo maksimalno kompresijo v udarnem valu znotraj mehurčka $(\gamma + 1)/(\gamma - 1)$.^[9]

3.1 Postavitev eksperimenta

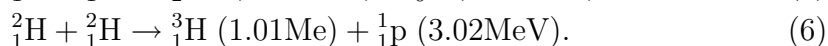
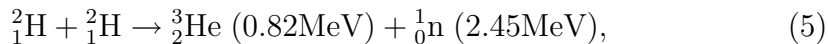
V eksperimentalni postavitvi, slika (3), je bila testna tekočina v približno cilindrični stekleni posodi in akustično vzbujana s svinec-cirkonij-titan (PZT) piezoelektrikom. Za detekcijo nevtronov in gama žarkov je bil uporabljen ali plastični ali tekočinski scintilacijski detektor (S). Svetloba je bila detektirana in signal ojačan z fotopomnoževalko (FP). Posebno vezje je znanstvenikom omogočalo ločiti nevtrone od gama žarkov, ki jih je detektiral scintilator. Sistem je bilo možno uporabiti v stanju, kjer so bili vsi dogodki v scintilatorju povzročeni zaradi hitrih nevtronov ali gama žarkov.



Slika 3: Skica tipične postavitve eksperimenta Taleyarkhanove skupine iz leta 2002. Vse dimenzije so v centimetrih. Pomen kratic: S - tekočinski scintilator, GNP - generator nevtronskih pulzov, PZT - piezokristal, FP - fotopomnoževalka.^[4]

V eksperimentalnem zaporedju dogodkov so nevtroni iz GNP inducirali nastanek parnih mehurčkov v tekočini v trenutku, ko je bila presežena meja za kavitacijo zaradi vzbujanja z zvočnim poljem. Mehurčki pare so se nato pričeli večati, dokler se je tlak v tekočini večal do pozitivne vrednosti. V drugi polovici zvočnega cikla je kompresija povzročila kolaps mehurčkov. Če je bila implozija dovolj silovita, je mehurček izseval sonoluminescentni blisk svetlobe, ki so ga zaznali s fotopomnoževalko (FP). V teoriji, če je tekočina sestavljena iz devterijevih (D) ali tricijevih (T) atomov in so pogoji zadostni za D-D (ali D-T) fuzijo, se emitirajo nevtroni in gama žarki, ki jih lahko zaznamo s scintilacijskim detektorjem. Natančneje fuzija D-D ima dva pri-

bližno enako verjetna poteka



Pri tem se protoni hitro absorbirajo v okoliški tekočini in jih ni možno zaznati. Tudi helijev izotop ni enostavno dokazati. Nasprotno se nastali nevtroni ne absorbirajo in jih je možno zaznati tudi izven eksperimentalnega območja (s scintilatorjem). Tricij se raztoplja v okoliški tekočini in razpade z razpolovnim časom $\tau_{1/2} = 12.232a$ kot

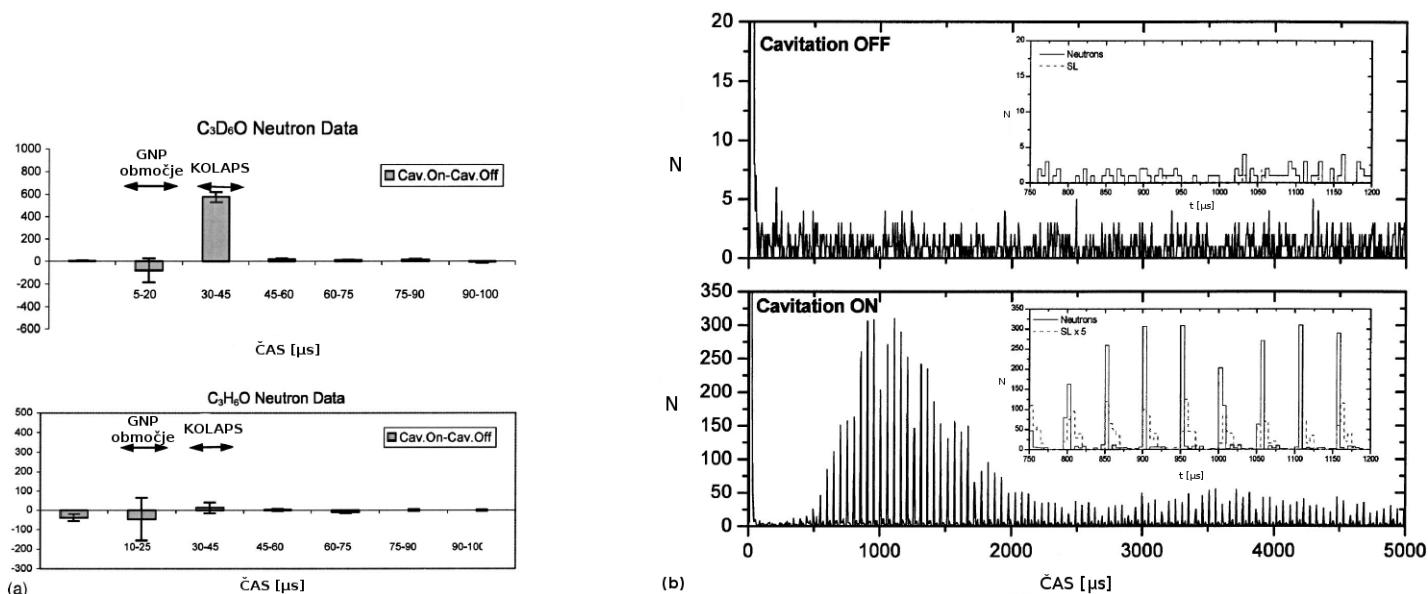


in ga je možno posredno zaznati preko svojih razpadnih produktov (elektron v scintilatorju). V ta namen se po dolgotrajni kavitaciji (več ur) odvzame vzorec uporabljene tekočine in s pomočjo scintilatorja določi navzočnost razpadnih produktov.

3.2 Rezultati meritev

Postopek meritev Taleyarkhanove skupine iz leta 2004 se prav nič ne razlikuje od njihovih meritev izpred dveh let prej. Uporabili so le novejšo in natančnejše merilne instrumente, zato tukaj podajmo njihove rezultate le iz leta 2004.

Primerjali so meritve s testno in kontrolno tekočino pri sobni ter pri temperaturi 0°C . Ugotovili so, da do fuzijskih reakcij prihaja le pri ohlajenem D-acetonu, kar so teoretično tudi uspešno razložili.^[6] Na sliki (4)(a) vidimo primerjavo razlike emitiranih nevtronov eksperimentov z in brez kavitacije (sonoluminescence) v testni in kontrolni tekočini. Opazimo lahko očitno razliko ter statistično pomembno odstopanje pri testni tekočini. Pri tem so pogoje brez kavitacije dosegli enostavno tako, da so spremenili fazo med najnižjim tlakom v tekočini (največje razpenjanje) ter pulzom hitrih nevtronov. Zaradi tega nevtroni niso uspešno inducirali nastanek parnih mehurčkov potrebnih za sonoluminescenco. Zanimivi so tudi rezultati predstavljeni na sliki (4)(b), ki prikazujejo časovno korelacijo med sonoluminescenčnimi bliski svetlobe ter zaznanimi nevtroni za eksperiment brez ter z kavitacijo. Generator nevtronskih pulzov je deloval s frekvenco 200MHz , kar pomeni da grafa predstavljata rezultate enega inducirane cikla. Več približno enako razmaknjenih vrhov ustreza posameznim periodičnim kolapsom oblaka mehurčka. Razlage oblike grafa v njihovem članku ne najdemo, vendar je bil konsistenten s tistim iz članka iz leta 2002.



Slika 4: (a) Primerjava razlike emitiranih nevtronov eksperimentov z in brez kavitacije v testni tekočini D-aceton (zgoraj) ter kontrolni tekočini acetonu (spodaj). (b) Primerjava časovne korelacije emitiranih nevtronov in bliskov svetlobe zaradi sonoluminescence brez in z kavitacijo. Uporabljena tekočina je bila ohlajeni ($0^{\circ}C$) D-aceton, generator nevtronskih pulzov je v obeh primerih deloval s frekvenco $200Hz$.

Meritve razpadnih produktov tricija v vzorcu tekočine so kazale na povečano vrednost vsebnosti tricija v testni tekočini, ki so jo izpostavljali večurni (12h) kavitaciji. Iz obeh meritev, direktne meritve nastalih nevtronov ter meritve tricija, so lahko izračunali število nastalih (emitiranih) nevtronov na sekundo v njihovem eksperimentu. Dobili so, znotraj merilne napake, skladni vrednosti med $\sim 1 \times 10^5 n/s$ in $\sim 4 \times 10^5 n/s$.

Poleg tega so merili tudi energijski spekter nastalih nevtronov, ki je kazal na to, da je pri kavitaciji naraslo število nevtronov z energijo manjšo od $2.5MeV$ za 60%, višje energijskih pa zanemarljivo malo (znotraj 1σ).

3.2.1 Interna revizija na ORNL

Preden je Taleyarkhanova skupina smela objaviti svoj prvi članek o uspešno izvedenem poskusu s sonofuzijo leta 2002, je na ORNL bilo izvedeno interno preverjanje, ki je vključevalo ponovitev eksperimenta s strani dveh drugih raziskovalcev, M. J. Saltmarsh-a in D. Shapira-e. Eksperiment je potekal na *isti* postavitvi, uporabila sta le večji in bolj občutljiv scintilator ter drugačno vezje za štetje dogodkov. Kljub temu, da je eksperiment nadzoroval sam Taleyarkhan, raziskovalca nista uspela ponoviti njegovih rezultatov.^[10] Še

več, ugotovila sta, da se rezultati koincidenčnih meritev (svetlobnega bliska in emitiranih nevtronov) sklada s pričakovanimi vrednostmi naključnih koincidenč. S tem se je pričelo obdobje izmenjave komentarjev številnih znanstvenikov na rezultate Taleyarkhanovega članka in njegovih odgovorov.^[10–14] Svoje pomisleke so javno v obliki članka izrazili tudi ocenjevalci revije *Science*, ki se niso strinjali z objavo članka.^[15] Zapisali so, da rezultati Taleyarkhana ne dokazujejo niti ne zavračajo možnosti, da so opazili sonofuzijske procese in da njihov članek še ni bil zrel za objavo.

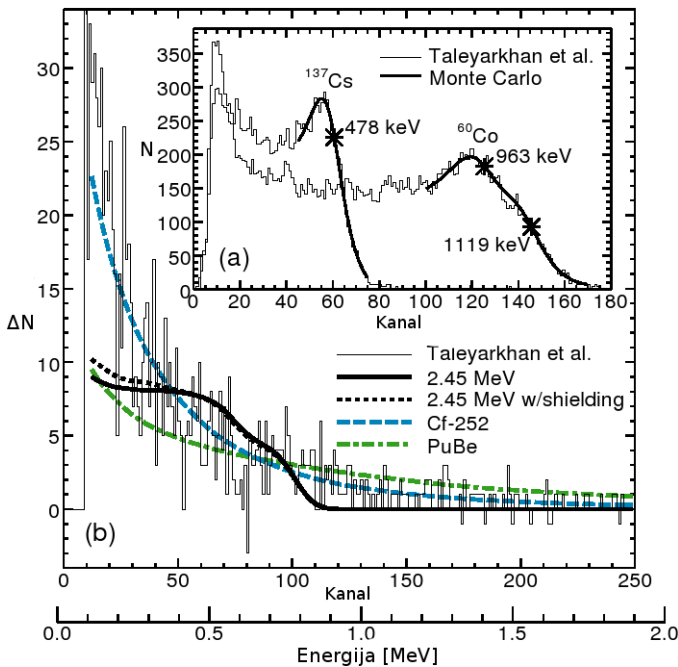
3.2.2 “Neodvisna” potrditev rezultatov

Prva potrditev rezultatov je prišla od majhne skupine dveh znanstvenikov Y. Xu-ja in A. Butt-a, ki sta ponovila eksperiment s pomočjo Taleyarkhana samega.^[16] Uporabila sta skorajda nespremenjeno eksperimentalno postavitev, s to razliko, da je njun sevalec hitrih nevtronov bil naravni izvor PuBe. Opazila sta nekoliko manjše število nastalih mehurčkov in posledično tudi manjše vrednosti nastalih nevtronov. Kljub temu so njuni rezultati kazali na statistično pomembne razlike števila izsevanih nevtronov v testni tekočini (D-aceton) z in brez kavitacije ter v kontrolni tekočini (navadni aceton). Navidezna potrditev fuzijskih reakcij pri pojavu sonoluminescence je večinoma naletela na gluha ušesa. Predvsem zaradi dveh vzrokov: prvi je bil ta, da je pri eksperimentih sodeloval tudi Taleyarkhan, še več, oba avtorja sta bila člana Taleyarkhanovega laboratorija na univerzi Purdue. Še večje kontroverze je sprožila novica dveh znanstvenikov z iste univerze, ki sta sprva raziskovala na Taleyarkhanovi postavitvi.^[17] Nekega dne je Taleyarkhan prenesel vso opremo iz laboratorijev univerze v svoje laboratorije ter z njima ni bil več pripravljen deliti svojih prejšnjih rezultatov. To je onemogočilo raziskavo s strani drugih raziskovalcev te univerze. Ta skrivnostnost je sprožila ogorčenje med tamkajšnjimi znanstveniki in metala slabo luč na rezultate Xu-ja in Butt-a. Kasneje je A. Butt, ki ni aktivno sodeloval pri opravljenih eksperimentih, brez javne obrazložitve zapustil Taleyarkhanovo raziskovalno skupino.

3.2.3 Izboljšanje merilnega postopka

V začetku leta 2006 je Taleyarkhanova skupina objavila članek o novem sonofuzijskem eksperimentu, kjer so uporabili drugačne in več različnih merilnih sistemov, drugačno testno tekočino ter drugače inducirano kavitacijo.^[8] S tem člankom so želeli odgovoriti na pomisleke o uporabi hitrih nevtronov za nastanek mehurčkov ter uporabo D-acetona kot testno tekočino. V ta namen so uporabili zmes več tekočin: D-benzena (C_6D_6), D-acetona (C_3D_6O) in

C_2Cl_4 , ki je delovalo kot organsko topilo. Eksperimentirali so tudi z uporabo težke vode (D_2O) vendar niso bili uspešni. Ti eksperimenti niso potrebovali zunanjih nevtronov, temveč so v testno tekočino vmešali uranovo sol uranov nitrid (UN). Naključni radioaktivni razpad raztopljenega urana (99.3% $U-238$) (večinoma $\sim 4MeV$ alfa delci) je povzročil nastanek gruč mehurčkov. Rezultati novega eksperimenta so potrdile njihove prejšnje – znova so pokazali statistično pomembno povečanje števila zaznanih nevtronov. Nekaj mesecev kasneje, septembra 2006, je B. Naranjo iz Puttermanove skupine napisal kratek komentar k članku, kjer je z numerično simulacijo (Monte Carlo) preveril najnovejše rezultate Taleyarkhana, slika (5).^[18]



	χ^2	Z
2.45MeV	653	5.9
2.45MeV w/shielding	637	5.5
Cf-252	432	-0.45
PuBe	621	5.9

Slika 5: Rezultati numerične simulacije in primerjava z rezultati meritev Taleyarkhana. Najbolje prilegajoče se krivulje za privzeti izvor nevtronskega sevanja: zlitje devterija ($2.45MeV$), kalifornij Cf-252 in PuBe. Rezultatom meritev se najbolj prilega krivulja za Cf-252, napaka je tudi manjša od 1σ , medtem ko so napake pri drugih možnih izvori večje od 5σ .

S svojo analizo je pokazal, da je zelo verjetno, da predstavljeni rezultati meritev ustrezajo razpadu elementa kaifornija Cf-252 in ne zlitju devteronov. Zanimivo je, da je v že omenjenem članku Xu-ja in Butt-a v njuni skici postavitev eksperimenta kot uporabljen naravni vir hitrih nevtronov poleg PuBe vrisan ravno še kalifornij Cf-252,^[16] kar kaže na to, da je v Taleyarkhanovem laboratoriju bil na voljo tudi ta element.

3.3 Možna uporaba

Hitro po objavi prvega članka o eksperimentalni potrditvi sonofuzije, so se pričele pojavljati raziskave kako bi lahko ta pojav izkoristili. Tako je npr. T. Ohta napisal serijo člankov^[19,20] v katerih se je sistematsko lotil raziskave pogojev za sprožitev sonofuzijskih reakcij. V enem izmed člankov je izračunal efektivnost sonofuzijskih reakcij ter koliko devterija bi potrebovali za pokritje energijskih zahtev na človeka v celem letu.^[20] Avtor ugotavlja, da je dobljena moč iz sonofuzijskih reakcij premajhna, da bi jih lahko uporabljali kot nov izvir energije. Tukaj je predvsem problem manjšega števila hkrati implodirajočih mehurčkov ter diskretnost pojava (enkrat na cikel). Možno rešitev problema so nakazali M. Sato in sodelavci v članku iz leta 2005.^[21] Predlagali so uporabo večmehurčne sonoluminescence, saj bi se s tem povečalo število fuzijskih reakcij zaradi večjega števila mehurčkov. Tukaj je potrebno omeniti osnovni problem – znano je, da se pojav večmehurčne sonoluminescence razlikuje od enomehurčne; predvsem dosežene temperature so pri večmehurčni sonoluminescenci znatno nižje, kar predstavlja praktično nepremostljivo oviro do večmehurčne sonofuzije.^[5] Sonofuzijo bi lahko uporabili tudi kot nov vir hitrih nevtronov, v prid govori predvsem majhna cena postavitve ter znana energija emitiranih nevtronov (2.45MeV in manj). Vse te (in še druge) možne uporabe sonofuzije so le hipotetična razmišljanja avtorjev člankov, saj do danes sonofuzija eksperimentalno še ni bila (zadovoljivo) dokazana.

4 Zaključek

Teorija, da bi pri zadostnih pogojih pri pojavu sonoluminescence ustvarili fuzijske reakcije med znanstveniki ni kontroverzna.^[7] Taleyarkhanova skupina je edina, ki sedaj že štiri leta trdi, da ji je ravno to tudi eksperimentalno uspelo.^[4, 6–9, 16, 22] Njihovi rezultati so precej dvomljivi in med drugimi znanstveniki ne uživajo odobravanja.^[10–12, 15, 17, 18, 23, 24] Glavni očitki drugih skupin so neponovljivost rezultatov,^[10] pretežno slaba (neznanstvena) obdelava dobljenih meritev in nekritična interpretacija rezultatov, v zadnjem času pa tudi nenavadno skrivnostno obnašanje R. P. Taleyarkhana, ki svojim kolegom z Univerze Purdue ne dovoli vpogleda v rezultate meritev.^[17] Kljub temu gredo raziskave tako v teoriji kakor eksperimentih naprej. Zaenkrat vse kaže na to, da tudi pri tako izjemnih pogojih, kot jih je v svojih eksperimentih uporabljala Taleyarkhanova skupina, pri pojavu sonoluminescence *ne* pride do fuzijskih reakcij. Seveda ne smemo *a priori* zavrniti Taleyarkhanovih rezultatov, vendar dokler eksperiment ne bo uspešno ponovljen od drugih neodvisnih skupin, njegovi rezultati v širšem znanstvenem krogu ne bodo uveljavljeni. Za boljše razumevanje efektov, ki otežujejo doseg pogojev za fuzijo bodo potrebne še nadaljne raziskave, predvsem pri razvoju novih, popolnejših teorij in numeričnih modelov.

Literatura

- [1] S. J. Putterman, *Sci. Amer.* , 32 (1995).
- [2] S. J. Putterman, *Phys. World*, 38 (1998).
- [3] S. J. Putterman, *Phys. World*, 18 (1999).
- [4] R. P. Taleyarkhan *et al.*, *Science* **295**, 1868 (2002).
- [5] M. P. Brenner, S. Hilgenfeldt, D. Lohse, *Rev. Mod. Phys.* **74**, 425 (2002).
- [6] R. P. Taleyarkhan *et al.*, *Phys. Rev. E* **69**, 036109 (2004).
- [7] R. I. Nigmatulin *et al.*, *Phys. of Fluids* **17**, 107106 (2005).
- [8] R. P. Taleyarkhan *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **96**, 034301 (2006).
- [9] R. Nigmatulin, *Nuclear Engineering and Design* **235**, 1079 (2005).
- [10] M. J. Saltmarsh, D. Shapira, *Science* **297**, 1603 (2002).
- [11] A. Galonsky, *Science* **297**, 1645 (2002).
- [12] C. Seife, *Science* **295**, 1808 (2002).
- [13] D. Shapira, M. J. Saltmarsh, “Comments on the possible observation of d-d fusion in sonoluminescence” (2002) (<http://www.ornl.org/slsite>).
- [14] R. P. Taleyarkhan *et al.*, “Comments on the Shapira and Saltmarsh report”, *Science* **297**, 1645 (2002).
- [15] S. J. Putterman, L. A. Crum, K. Suslick, “Comments on Evidence for Nuclear Emissions During Acoustic Cavitation”, preprint arXiv:cond-mat/0204065 (2002).
- [16] Y. Xu, A. Butt, *Nuclear Engineering and Design* **235**, 1317 (2005).
- [17] E. S. Reich, “Is bubble fusion simply hot air?”, *Nature news*060306-2 (2006).
- [18] B. Naranjo, “Comment on Nuclear Emissions During Self-Nucleated Acoustic Cavitation”, preprint arXiv:physics/0603060 (2006).
- [19] T. Ohta, *Int J Hydrogen Energy* **28**, 1011 (2003).
- [20] T. Ohta, *Int J Hydrogen Energy* **29**, 1553 (2004).

- [21] M. Sato *et al.*, preprint arXiv:physics/0508191 (2005).
- [22] R. T. Lahey *et al.*, “Sonofusion - Fact or Fiction?”, NURETH-11 Proceedings, (2005).
- [23] L. A. Crum, “Sonoluminescence and acoustic inertial confinement fusion”, Fifth International Symposium on Cavitation (cav2003), (2003).
- [24] D. J. Flannigan, K. S. Suslick, *Nature* **434**, 52, (2005).
- [25] R. P. Taleyarkhan *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **96**, 179903 (2006).
- [26] D. Sharp, *Lancet* **359**, 908 (2002).
- [27] W. K. Tse, P. T. Leung, arXiv:cond-mat/0606359 preprint (2006).