

Univerza v Ljubljani  
Fakulteta za *matematiko in fiziko*



**Ali lahko stoletje star poskus razkrije  
skrite lastnosti vode?  
(SEMINAR)**

**Avtor:** Nick Štorgel

**Mentor:** prof. dr. Rudolf Podgornik

Marec, 2011

## **Povzetek**

Interakcija med tekočinami in elektromagnetnimi polji lahko privede do fenomenoloških pojavov, ki kljubujejo intuiciji. Prav gotovo je eden izmed njih tako imenovani vodni most: po vzpostavitvi visoke napetostne razlike se med dvema steklenima čašama spontano oblikuje vodna povezava. Tudi če vodni čaši razmaknemo do nekaj centimetrov narazen, vodni most presenetljivo kljubuje težnosti. Seminar predstavi nekaj ključnih lastnosti vode potrebnih za razumevanje mostu in opiše fenomen s pogleda elektrodinamike in kvantne teorije polja. V nadaljevanju se loti razprave o stabilnosti mostu, njegovih lastnostih in ne nazadnje o samem eksperimentu.

## **Abstract**

The interaction between liquids and electromagnetic fields can lead to phenomenon that defies intuition. Most certainly one of such is so-called floating water bridge: after applying a high voltage, a watery connection is formed spontaneously between two glass beakers. Surprisingly, the connection defies gravity even though the beakers are separated a few centimetres apart. Seminar presents some key properties of water required to understand the bridge and describes the phenomenon from the viewpoint of electrodynamics and quantum field theory. Hereafter undertakes discussion about the experiment, the stability of the bridge and its properties.

## **Kazalo**

1.	Uvod .....	4
2.	Interakcija vode z elektromagnetnim poljem .....	4
2.1.	Dielektroforeza in elektropray .....	4
2.2.	Kvantno mehanski pogled.....	6
3.	Poskus z vodnim mostom .....	7
3.1.	Tvorba mostu in prva opažanja.....	7
3.2.	Lastnosti mostu .....	11
4.	Zaključek .....	13
5.	Viri in literatura .....	14

# 1. Uvod

Voda je nedvomno ena najpomembnejših snovi, kar jih poznamo. Čeprav je prisotna povsod, predstavlja eno najbolj raziskanih, a hkrati tudi najslabše razumljenih snovi. Do sedaj je bilo že mnogo poskusov, da bi izmerili oziroma izračunali sestavo tekoče vode pod nivojem velikosti molekule  $H_2O$ , kot jo poznamo, kar pa je vse prej kot lahko izvedljivo. Problem predstavlja predvsem vodikova vez, ki je odgovorna za nekatere znane anomalije, kot je na primer manjša gostota tekoče vode od njene trdne oblike (ledu) in podobno. Zadnja leta so v ospredju študije interakcije vode z električnim poljem, na primer v kontekstu z elektrorazpršilnim-ionizacijskim masnim spektrometrom (ESI-MS). Znotraj raziskav so opaženi nenavadni pojavi, kot je tudi vodni most. Čeprav je poskus enostaven (potrebna je zgolj deionizirana voda in vir visoke napetosti), je za znanstveno srenjo zanimiv, saj vsebuje nekatere moderne znanstvene fenomene; na primer brez elektrolitski prenos naboja ali pojav nano mehurčkov. Prvi zapisi o eksperimentu datirajo vse v leto 1893, ko je angleški inženir Lord Armstrong prvi predstavil tako imenovani tekoči vodni most v svoji javni razpravi. Od tedaj se je podobnih poskusov zvrstilo še mnogo, predvsem z namenom, da bi razkrili morebitne "skrite" lastnosti vode.

## 2. Interakcija vode z elektromagnetnim poljem

Interakcija vode z magnetnimi oziroma električnimi polji je razkrila mnoge zanimive poglede na njeno naravo. Njena povezava z električnimi polji je iz leta v leto bolj raziskana, predvsem na račun pomembnosti nekaterih metod, kot so "electrospinning", "electrowetting" in "electrospray", ki se uporabljajo predvsem v masni spektrometriji. V prihodnje znanstveniki upajo, da bi z zgoraj navedenimi metodami lahko uspeli celo ustvariti oz. izvleči posamezne nanocevke, kar bi bilo za razvoj nanotehnologije izjemnega pomena. Trenutno lahko namreč ustvarijo zgolj cele skupke, vendar so zaradi različnih lastnosti nanocevk (npr. prevodnost) zgolj nekatere uporabne za nadaljnjo uporabo.

### 2.1. Dielektroforeza in elektrospray

Dejstvo, da lahko z visoko enosmerno napetostjo povzročimo curek, je znan elektrohidrodinamski pojav imenovan dielektroforeza, ki je definirana kot gibanje nenabitih delcev v nehomogenem električnem polju. Pohl je leta 1978 fenomenološko opredelil dielektroforezo kot (vir: [2]):

- dielektroforezna sila deluje le v nehomogenem polju,
- sila ni odvisna od smeri električnega polja in jo lahko opazimo tako v enosmernem kot izmeničnem polju,
- sila vleče delce v smeri naraščanja polja, kadar je dielektričnost delcev večja od dielektričnosti okolice ("pozitivna dielektroforeza"),
- sila vleče delce v smeri pojemanja polja, kadar je dielektričnost delcev manjša od dielektričnosti okolice ("negativna dielektroforeza"),
- dielektroforezo opazimo pri delcih velikosti 1-1000  $\mu m$ ; pri manjših delcih prevlada Brownovo gibanje, pri večjih pa težnost.

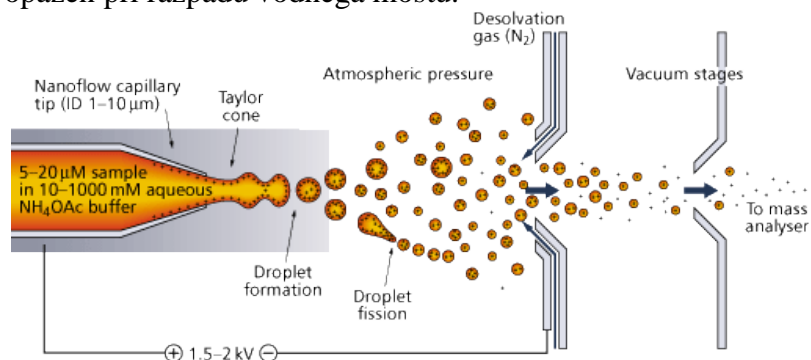
Ali lahko stoletje star poskus razkrije skrite lastnosti vode?

Kapljice, se da v grobem aproksimirati s homogenimi kroglicami, za katere se časovno povprečna dielektroforezna sila zapiše kot

$$\langle F_{DEP} \rangle = 2\pi r^3 \varepsilon_m \operatorname{Re} \left\{ \frac{\varepsilon_p^* - \varepsilon_m^*}{\varepsilon_p^* + 2\varepsilon_m^*} \right\} \bar{\nabla} |\bar{E}|^2 \quad (1)$$

kjer je  $r$  radij kroglice,  $\mathbf{E}$  povprečno električno polje in  $\varepsilon^*$  frekvenčno odvisna kompleksna dielektrična funkcija, definirana kot:  $\varepsilon^* = \varepsilon - i\sigma/\omega$ ; tu so  $\varepsilon$  dielektričnost,  $\sigma$  prevodnost,  $\omega$  kotna frekvenca polja in  $i$  imaginarna enota. V enačbi (1) indeks  $p$  označuje kroglico, indeks  $m$  pa medij v katerem se nahaja. Iz zgornje zveze je razvidno, da je edina frekvenčna odvisnost skrita v frekvenčno odvisni dielektrični funkciji  $\varepsilon_m$  in v izrazu v zavrtih oklepajih, ki je znan pod imenom Clausius-Mosottijev koeficient. Leta 1955 je Sumoto opazil, da se dielektrična tekočina, ki je izpostavljena dovolj visoki napetosti vzpenja po elektrodi. Pohl je predvideval, da je pojav posledica dielektroforezne sile, ki v neenakomernem polju povzročijo gibanje tekočine. Sledeč Maxwellovi razpravi o elektrodinamiki in Landauovi ter Lifshitzovi teoriji hidrodinamike tekočin v električnem polju delujejo na tekočino tlačne sile v pravokotni smeri in napetostne sile v prečni smeri glede na smer električnega polja. Te napetosti je možno smatrati kot termodinamski vzrok za stabilnost vodnega mostu.

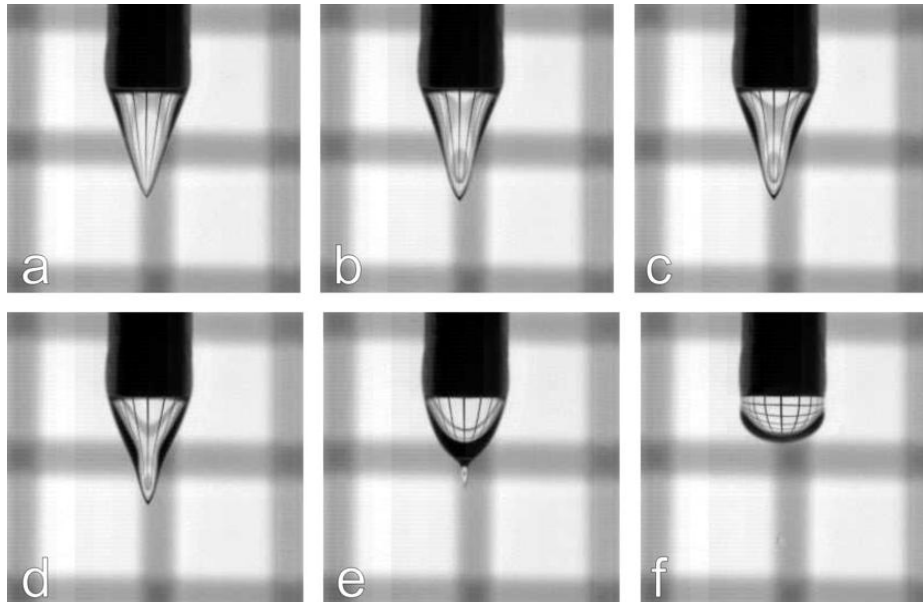
Z vidika elektropraya je možno most interpretirati kot vodni curek stožčaste oblike, čigar razpad preprečujejo električne sile, ki delujejo nanj. Ravno take curke namreč opazimo pri uporabi elektropraya (slika 2). Pri tem procesu tekočino počasi črpajo skozi lijak, na konici katerega se oblikuje kapljica. Ob vzpostavitvi visoke napetosti se na površini kroglic inducira naboj. Kot posledica električne sile se kapljica izoblikuje v stožčasto obliko, kar poznamo pod imenom Taylorjev stožec. Površinski naboj se nato pospeši v smeri konice kapljice in tako dobimo curek z veliko gostoto naboja. Ob nasičenju curek razpade na več manjših kapljic. Podoben efekt je opazen pri razpadu vodnega mostu.



**Slika 1:** Slika prikazuje uporabo "elektropraya" v namen masne spektrometrije. Lepo je viden postopek od nastajanja Taylorjevega stožca do nastajanja manjših kapljic. (vir: [3])

Oblika Taylorjevega stožca je posledica ravnovesja sil, ki delujejo na kapljico: tlaka, površinske napetosti, električne sile, tekočinske inercije in viskoznosti. Hartman je predstavil numerični model, s katerim je lahko precej natančno določil obliko stožca in curka, tok skozi stožec ter površinsko porazdelitev naboja. Po Hartmanu ima vsaka tekočina minimalen pretok, pod katerim curek ni stabilen in se zaradi osnosimetričnih kapilarnih nestabilnosti razblini. Pri višjih pretokih se električni tok skozi curek povečuje in z njim tudi površinska gostota naboja. Do prekinitve curka pride tako tudi nad določeno mejo za gostoto naboja, kar povzročijo stranske in azimutalne nestabilnosti curka, ki so najverjetneje odgovorne tudi za vibracije vodnega mostu.

Ali lahko stoletje star poskus razkrije skrite lastnosti vode?



**Slika 2:** Na slikah je prikazan stožec (a) in nastajanje kapljice (b-f) v vodnem elektroprayu. Konica se nahaja 1,5 cm od nasprotno elektrode na potencialu 4,5 kV. Notranji in zunanji premer lija sta 0,84 oz. 1,27 mm. Slike so narejene v razmaku 2 ms, izmerjen pretok pa znaša 2 mL/h. (vir: [1])

## 2.2. Kvantno mehanski pogled

V okviru teorije superfluidnih tekočin je Landau predlagal model, v katerem se zdi, kot da je tekočina sestavljena iz dveh faz: koherentne (s komponentami, ki oscilirajo v fazi; superfluidi se obnašajo kot bi bili mešanica dveh komponent – navadne komponente, ki ima vse lastnosti običajne tekočine in superfluidne komponente, ki ima ničelno viskoznost in neskončno toplotno prevodnost) in nekoherentne (z neodvisnimi komponentami kot v plinih). Ta model se uporablja kot osnova za razmišljanje o urejanju vode v močnih zunanjih poljih. Med fazama ni ostro določene meje, zaradi česar je opazovanje faz precej oteženo. V kolikor je opazovanje daljše od periode oscilacij med fazama, bi dobili kot rezultat povprečje stanj, kar daje navidezno homogeno sliko tekočine. V teoriji bi tako z dovolj kratkim opazovanjem lahko zaznali koherentne skupke, kar bi predstavljalo nekakšen dokaz za obstoj dveh faz. Šele pred nedavnim sta v podporo modela izšla dva članka (*The inhomogeneous structure of water at ambient conditions* in *Domains in aqueous solutions: theory and experimental evidence*). V prvem je predstavljen dokaz za obstoj dveh faz, z drugačno gostoto in ureditvijo, medtem, ko je v drugem predstavljeno obsežnejše poročilo o obstoju večjih skupkov v vodi. Dve fazi sta tako:

- koherentna faza, ki jo sestavljajo tako imenovane koherentne domene (v nadaljevanju KD), kjer vse molekule vode oscilirajo v fazi in
- nekoherentna faza, ki jo sestavljajo molekule ujete v medprostoru koherentnih domen.

V primeru vodnega mostu, zunanje polje povzroči urejenost KD v super domene. Pojav je analogen urejenosti domen ob postavitvi feromagnetnih snovi v zunanje magnetno polje, kjer se mikroskopska urejenost kaže v makroskopskih lastnostih. Po poročanju avtorjev prav te super domene pripomorejo k stabilnosti mostu. O modelu se na veliko razpravlja, a je trenutno zgolj na stopnji domnevanj. Iz tega vidika je vreden omembe, a kaj več o njem tu ne bo govora. Glede vodnega mostu, upajo, da bi z modelom lahko razložili nekaj njegovih lastnosti: pojav makroskopskih vrtincev, asimetrije v naraščanju vode, stabilnost mostu zaradi super domen, pojav mikro in nano mehurčkov (omeniti je potrebno, da ne gre za mehurčke v

Ali lahko stoletje star poskus razkrije skrite lastnosti vode?

običajnem pomenu – v tekočini ujet zrak, temveč za nekakšne domene, o katerih se ne ve veliko) in s tem optične lastnosti. Omeniti je potrebno, da pojav kot tak ni omejen zgolj na vodo, vendar je opazen tudi pri ostalih snoveh, za katere je značilna vodikova vez (na primer metanol). Čeprav se formacija in napetosti razlikujejo od snovi do snovi, gre v osnovi za enake pojave.

### 3. Poskus z vodnim mostom

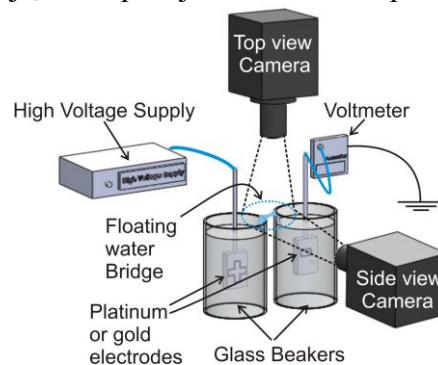
Kot že rečeno se je prvi s pojavom vodnega mostu srečal Lord Armstrong leta 1893. V njegovem govoru pred Newcastle Literary and Philosophical Society je opisal poskus kot [5]:

*»Amongst other experiments I hit upon a very remarkable one. Taking two wine-glasses filled to the brim with chemically pure water, I connected the two glasses by a cotton thread coiled up in one glass, and having its shorter end dipped into the other glass. On turning on the current, the coiled thread was rapidly drawn out of the glass containing it, and the whole thread deposited in the other, leaving, for a few seconds, a rope of water suspended between the lips of the two glasses. This effect I attributed at that time to the existence of two water currents flowing in opposite directions and representing opposite electric currents, of which the one flowed within the other and carried the cotton with it. It required the full power of the machine to produce this effect, but, unfortunately when it went to London, and was fitted up in the lecture-room, I could not get the full power on account of the difficulty of effecting as good insulation in a room as in the outside air. I therefore failed in getting this result, after announcing that I could do it, and I daresay I got the credit of romancing.«*

O nadaljnjih raziskavah vodnega mostu kar 104 leta ni bilo nobenega zapisa, dokler glas ni dosegel prof. Uhliga iz ETH v Zurichu, ki je objavil posnetek poskusa na spletu. Za razliko od Armstronga, ki je poskus izvedel s tanko bombažno nitko, je Uhlig ustvaril most brez nje. Leta 2007 je bil nato objavljen članek z eksperimentom v reviji Journal of Phisycs D: Applied Physics (vir: [6]) in nedavno leta 2010 še dva obsežnejša članka: prvi od istega avtorja kot leta 2007 (vir: [1]), drugi na univerzi v Twenteju (vir: [7]), v katerem je opisan elektrokapilarni in težnostni vpliv na stabilnost mostu.

#### 3.1. Tvorba mostu in prva opažanja

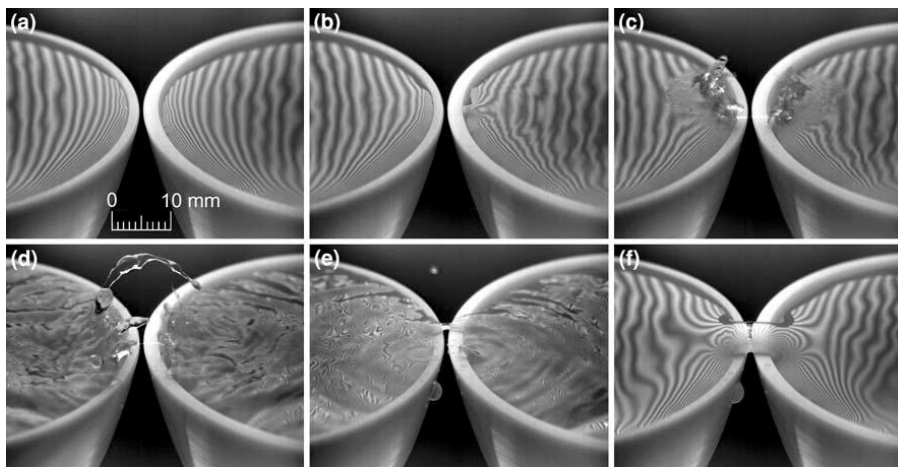
Sama zasnova poskusa je pravzaprav zelo enostavna. Za izvedbo poskusa sta potrebni dve čaši, ki ju skoraj do vrha napolnimo z vodo. V čaši, ki ju postavimo čim bližje vsaksebi, vstavimo elektrodi (najbolje iz platine ali zlata za zmanjšanje verjetnosti za potek reakcij na elektrodah in korozije). Eno priključimo na vir napetosti, drugo ozemljimo kot je prikazano:



Slika 3: Postavitev poskusa. (vir: [7])

Ali lahko stoletje star poskus razkrije skrite lastnosti vode?

Ob višanju napetosti se vodna gladina dviguje proti sosednji čaši, dokler pri približno 15 kV ne pričnejo iz čaše "brizgati" majhni curki vode. S časoma dva curka ustvarita povezavo, ki se stabilizira s povečevanjem premera mostu, dokler ne doseže ravnovesnega stanja. Tako doseže premer tudi do nekaj milimetrov. Ob večanju razdalje med čašama se vodni most hkrati daljša in tanjša, do neke kritične dolžine (približno 2 cm pri zgornji napetosti), pri kateri se vodni most zaradi prej omenjenih kapilarnih nestabilnosti, pod vplivom površinske napetosti razblini v kapljice. Uničenje mostu je možno doseči tudi z zmanjšanjem napetosti, s čimer je porušeno ravnotežje med električno silo in površinsko napetostjo ter težnostjo. Celoten proces, se da primerjati s tvorbo Taylorjevega stožca. Vodni most tako v znanstveni stroki interpretirajo kot posledico interakcije dveh nasprotujočih si stožčastih curkov, ki so v elektrohidrodinamiki običajno začetek nastajanja kapljic. Kot že omenjeno, ta fenomenološki pojav ni opazen le pri vodi in je očitno odvisen od nekaterih lastnosti tekočine, predvsem od dielektričnosti  $\epsilon$ , površinske napetosti  $\gamma$ , viskoznosti  $\eta$  in gostote  $\rho$ , vendar o tem nekoliko več v nadaljevanju.

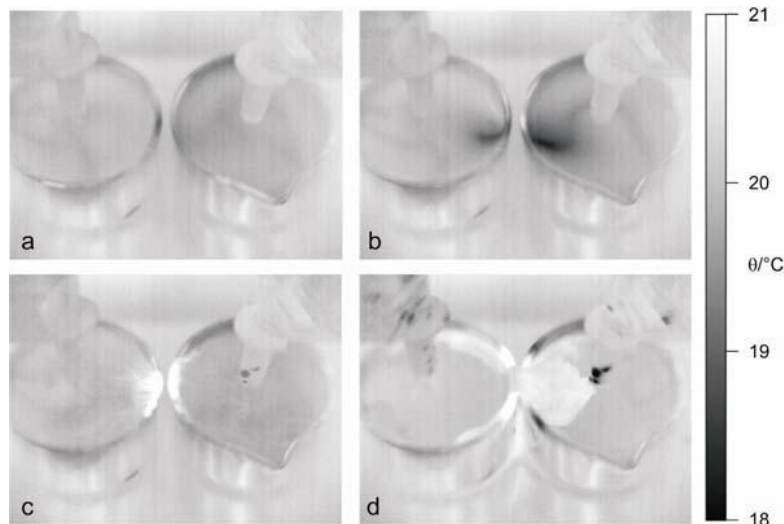


**Slika 4:** Nastanek mostu med dvema teflonskima čašama. Po vzpostavitvi napetosti in pričetku dvigovanja vode (b) se pojavijo curki (c in d). Nato se vzpostavi vodna povezava (e), ki se nato stabilizira v vodni most (f). (Vir: [1])

Opazovanja so med drugim pokazala, da vzpostavitev vodne povezave spremlja asimetrija: v čaši, ki je priključena na vir visoke napetosti, se voda dvigne višje in tvori masivnejše curke kot voda v čaši z ozemljeno elektrodo. Poleg asimetrije so pred nastankom mostu opazili še dva zanimiva pojava, in sicer: pojav vrtincev okrog elektrod in hlajenje vode vzdolž povezave med elektrodama (slika 5). Prvi pojav pripisujejo formaciji makroskopskega elektronskega vrtinca (elektroni se v zunanem polju pospešijo), drugega zlomu simetrije sistema, zaradi prisotnosti druge čaše.



Ali lahko stoletje star poskus razkrije skrite lastnosti vode?



**Slika 5:** Temperaturna vizualizacija stvaritve mostu. Ob vzpostavitvi napetosti se najprej pojavijo vrtinci (a), nato opazimo hlajenje vode vzdolž linije med elektrodama (b). S prvimi iskrami in curki se voda prične segrevati, vrtinci počasi izginjajo (c), dokler se končno ne ustvari most (d). Časovni interval med slikami je približno 1 s, temperaturna skala je preračunana za emisivnost vode (0,96). Na slikah (c) in (d) opazimo na elektrodah črne pike, ki so zgolj razpršene vodne kapljice. Izmerili so kotno hitrost  $1^\circ/\text{s}$ . (vir: [4])

Kot je razvidno iz slike 5, se po vzpostavitvi povezave most začne segrevati. Izmerjena začetna površinska temperatura je bila  $20^\circ\text{C}$  (vir: [6]), ki je v pol ure narasla na  $60^\circ\text{C}$ . Naraščanje temperature je posledica električnega toka, ki teče skozi most, kar privede do tako imenovanega Joulovega gretja, kjer se toplotni tok  $Q$  pokorava zvezi  $Q \propto I^2 R$ . Tu sta  $I$  električni tok in  $R$  upornost vode. Izkaže se, da se teorija in rezultati poskusa ujemajo. Avtor namreč navaja, da so izmerili tok  $0,5 \text{ mA}$ , ki ustreza prej omenjeni napetosti  $15 \text{ kV}$  in teoretični upornosti vode  $18 \text{ M}\Omega$  na centimeter dolžine. Ključno pri tem je, da je bil zaznan transport naboja in s tem seveda mase, brez pojava elektrolize. Zaradi povečevanja temperature mostu, postajajo domene vedno bolj neurejene, kar pripelje do dodatne nestabilnosti mostu. S časoma bi se tako most moral porušiti sam od sebe, kar so, po poročanju avtorjev, tudi potrdili (od vzpostavitve povezave do sesutja mostu je poteklo okrog  $45 \text{ min}$ ).

Pred ogledom rezultatov je smotrno najprej definirati nekaj količin, ki so uporabljene v nadaljnjih izrazih. Izkaže se, da je smiselno vpeljati geometrijsko povprečje premera mostu pri stranskem pogledu ( $s$  – side view) in pri pogledu z vrha ( $t$  – top view):  $D_m = \sqrt{d_s d_t}$ . Prostornina mostu se nato izračuna kot  $V = \pi D_m^2 l / 4$ , kjer  $l$  predstavlja dolžino mostu, merjeno med robovoma čaš. Definirati je potrebno še razmerje mostu kot razmerje med njegovo dolžino in povprečnim premerom  $\Lambda = l / D_m$ . Za električno polje je v grobem približku možno reči, da velja znana zveza  $E_t = U / l$ , kjer je  $U$  napetost, vzpostavljena med čašama na razdalji  $l$ . Pri majhnih dolžinah mostu bi bilo dejansko polje manjše, vendar to na opazanja pri eksperimentu ne vpliva. Na podlagi navedenega, se da sedaj vpeljati nekaj brezdimenzijskih parametrov:

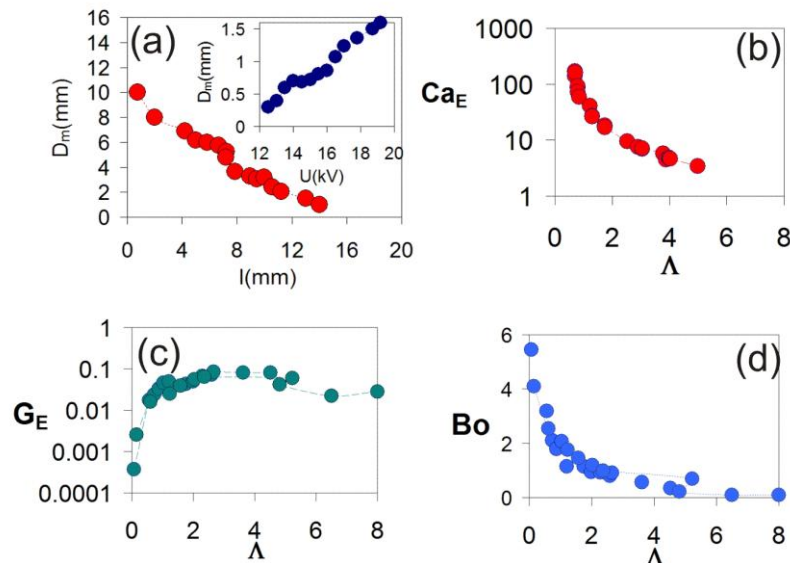
$$Ca = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon E_t^2 D_m}{\gamma} \quad (2)$$

$$Bo = \frac{\rho g V^{2/3}}{\gamma} \quad (3)$$

Ali lahko stoteletje star poskus razkrije skrite lastnosti vode?

$$G_E = \frac{\rho g V^{1/3}}{\epsilon_0 \epsilon E_t^2} = \left( \frac{4}{\pi \Lambda} \right)^{1/3} \frac{Bo}{Ca} \quad (4)$$

Tu smo vpeljali elektrokapilarno število  $Ca$  kot razmerje med električno in kapilarno energijo (površinska napetost);  $Bo$  predstavlja Bondovo število, ki je definirano kot razmerje med gravitacijsko in kapilarno energijo; in naposled še  $G_E$  kot razmerje med gravitacijsko in električno energijo. Tako definirana števila, pravzaprav merijo pomembnost posameznih sil na stabilnost (oz. nestabilnost). Na sliki 6 so prikazani rezultati meritev, ki so objavljeni v članku *Building water bridges in air* (vir: [7]). Iz a) grafa je razvidno, da povprečen premer z večanjem razdalje pri konstantni napetosti linearno pada, hkrati pa se pri obrnjenem poskusu, kjer pri konstantni razdalji večamo napetost, premer povečuje.



**Slika 6:** Meritve pri različnih konfiguracijah čaš: a) na primarnem grafu je prikazana odvisnost premera mostu od njegove dolžine merjeno pri konstantni napetosti 15 kV, notranji graf prikazuje odvisnost premera od napetosti merjeno pri konstantni dolžini mostu 14 mm; b) elektrokapilarno število kot funkcija razmerja mostu (graf je v logaritemski skali); c) razmerje med gravitacijsko in električno silo kot funkcija razmerja mostu (graf je v logaritemski skali); d) Bondovo število v odvisnosti od razmerja mostu. V skrajnih točkah vseh grafov se je most zrušil. (Vir: [7])

Na preostalih grafih (od b) do d)) so prikazane meritve brezdimenzijskih števil v odvisnosti od prej definirane razmerja za vodni most  $\Lambda$ . Kot je razvidno iz slike b) se elektrokapilarno število zmanjšuje, dokler ne doseže vrednosti nekoliko večje od ena. Očitno je pri majhnih razmerjih (ta ustrezajo majhnim dolžinam mostu) prevladujoča električna sila, pri večanju razmika med čašama pa postaja površinska napetost vse pomembnejša, dokler ni pri mejni točki skoraj enakovredna električni sili. Podobno analizo je možno opraviti še za preostala grafa. Na kratko povzeto, velja, da je spočetka električna sila prevladujoča, medtem, ko sta učinka gravitacije in površinske napetosti zanemarljiva. Pri večanju razdalje med čašama se sile nekoliko uravnotežijo, čeprav meritve kažejo, da gravitacija še vedno ostaja vsaj en velikostni razred manjša. Na podlagi povedanega so zaključili, da je ključno pri celotnem procesu torej elektrokapilarno število, ki je med drugim odvisno od dielektričnosti (za vodo znaša okrog 81) in površinske napetosti (za čisto vodo okrog 70 mN/m) snovi.

### 3.2. Lastnosti mostu

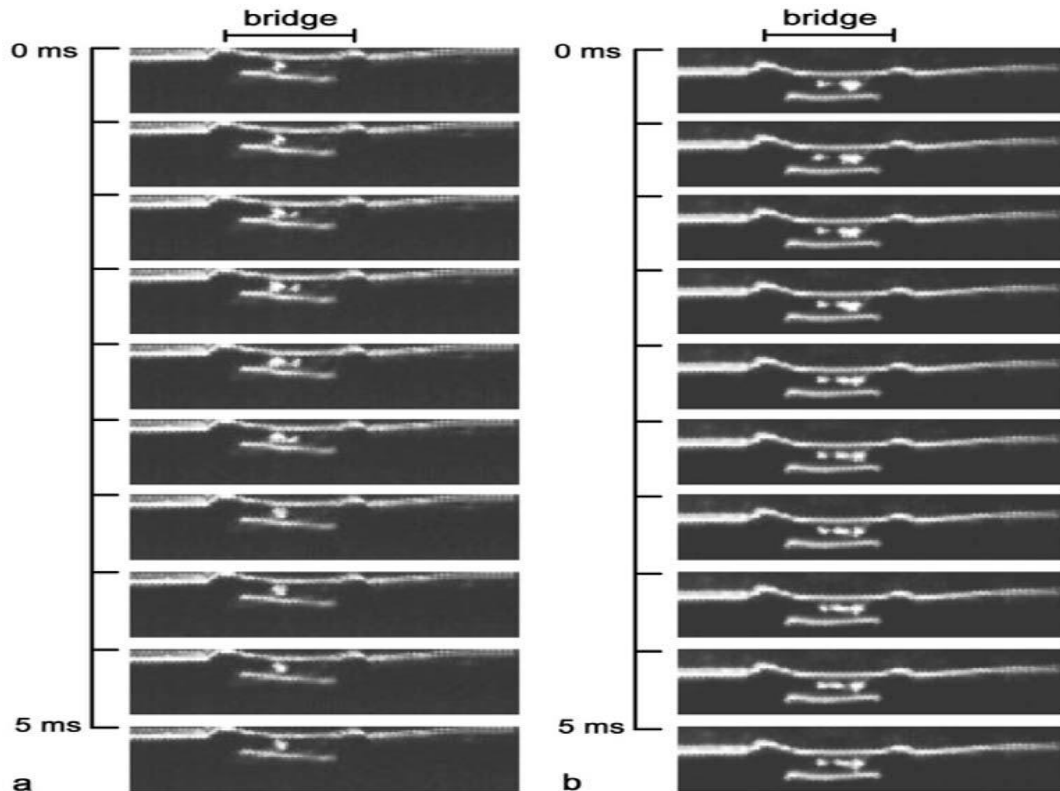
Najopaznejša lastnost mostu je nedvomno njegova stabilnost, ki daje občutek, da most kljubuje težnosti. Widom je pokazal (vir: [8]), da sile, ki so odgovorne za stabilnost mostu izvirajo iz Maxwellovega napetostnega tenzorja v dielektričnih polarnih tekočinah. Tenzor se v vodnem mostu zapiše kot

$$P_{ij} = P g_{ij} - \frac{\epsilon}{4\pi} E_i E_j, \quad (5)$$

kjer je  $P_{ij}$  napetostni tenzor,  $P$  tlak,  $E$  električna poljska jakost in  $\epsilon$  dielektričnost vode. Od tod so avtorji zgornjega članka izpeljali obliko mostu: verižnico, kar se ujema z opažanji. Še več, izpostavili so, da je v polarnih tekočinah napetost posledica dolgih urejenih verig koherentnih dipolarnih domen z nizko entropijo, kar je v skladu z Landaouvim modelom. Na podlagi njihovega dela, je Del Giudice podrobneje analiziral te domene in podal kvalitativne razlage na nekaj nepojasnjenih pojavov: helikoidno gibanje v zunanjih plasteh, povezanost med prenosom naboja in mase, nastanek mikro in nano mehurčkov in na nek način proti intuitivno temperaturno odvisnost stabilnosti mostu (izkazalo se je, da je most lažje vzpostaviti pri temperaturi vrelišča vode, kot pri vodi z ledom). Za namen meritev hitrosti pretoka so v vodo dodali delce in sledili njihovemu gibanju. Opazili so, da delci v zunanjih plasteh krožijo v smeri urinega kazalca gledano proti katodi. Po poročanju avtorja (vir: [1]) so z laserjevim Dopplerjevim anemometrom izmerili povprečno tangencialno hitrost na sredini mostu 0,3 m/s, medtem ko je bila pri aksialni hitrosti opažena sprememba med  $\pm 0,2$  m/s v odvisnosti od glavne smeri pretoka mase v zunanjih plasteh. Poleg tega, je Armstrong zasledil gibanje tekočine v obe smeri, čeprav je šlo v večini primerov za gibanje od anode k katodi. Tok je povezal s prenosom naboja in dejal, da se zdi, kot bi negativni tok tekkel po notranjosti mostu, pozitivni tok pa po površini. Trditve, vsaj do sedaj, še niso potrdili; so pa že poročali o dvosmernem mehanizmu prenosa naboja oziroma mase, ki se kaže kot zankast vzorec v toku. Samo naravo brez elektrolitskega pretoka naboja povezujejo znanstveniki z nabitimi kapljicami v "elektrosprayu", kjer prav tako pride do gibanja kapljic v električnem polju.

Glede optičnih lastnosti mostu je že Lord Armstrong opazil majhna migetanja pod svetlobo. Fuchs je ta migetanja interpretiral (vir: [6]) kot fluktuacije gostote, ki so jih zaznali pri opazovanju z laserjem z metodo resastih projekcij (glej sliko 7), s katero so sposobni zaznati optične nehomogenosti. Ker je lokalna struktura vodnega mostu enaka kot pri vodi v čašah, so fluktuacije pripisali mikro in nano mehurčkom. Poleg fluktuacij gostote poročajo tudi o povečanju gostote v smeri od roba čaš proti sredini mostu. Glede na gostoto vode pri sobni temperaturi so zaznali povečanje gostote za 7% na sredini. Možna razlaga bi bila, da je povečanje gostote posledica razporeditve molekul vode v visoko urejene mikrostrukture. Omeniti je potrebno, da za enkrat hipoteza še ni bila potrjena.

Ali lahko stoletje star poskus razkrije skrite lastnosti vode?



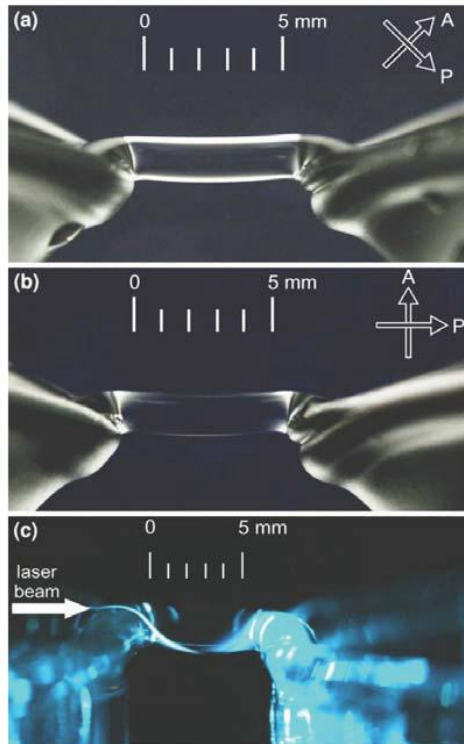
**Slika 7:** Gradienti gostote v vodnem mostu, posneti s kamero s frekvenco 10 kHz. Slika (a) prikazuje eno strukturo, ki je značilna za mlad most (5 min po vzpostavitvi povezave), na sliki (b) je razvidno več struktur (30 min po vzpostavitvi povezave). Na slikah je dolžina mostu približno 10 mm. (vir: [6])

Med drugim je rotirajoča plast razkrila polarizacijski optični efekt, ki je prikazan na sliki 8. Domnevali so, da bi ta pojav lahko bil povzročen zaradi pojava dvojnega loma v zunanjih plasteh, ki je poznan kot elektrooptični Kerrov pojav; ta opisuje kvadratno zvezo med razliko lomnih količnikov in električnim poljem:

$$\Delta n = \lambda K E^2. \quad (6)$$

Toda zaradi majhne Kerrove konstante  $K$  za vodo, ki znaša  $9,4 \cdot 10^{-14} \text{ m/V}^2$ , je visokonapetostno električno polje, ki ga dobimo pri vodnem mostu prešibko, da bi ta pojav opazili. Naslednja možna razlaga je povezana z odbojem na mejni plasti (med zrakom in vodo). Da bi preverili hipotezo, so po navedbah avtorja laserski žarek usmerili v most iz strani (slika 8). Pot žarka je potekala po notranji strani površine mostu in sicer v obliki vijačnice; podobno opazimo pri potovanju svetlobe skozi optično vlakno, v katerem se lomni količnik spreminja s polmerom. Močno sipanje je bilo opazno zgolj v zunanjih plasteh, kar je v prid hipotezi.

Ali lahko stoletje star poskus razkrije skrite lastnosti vode?



**Slika 8:** Vodni most med dvema pravokotno prekrizanimi polarizatorjema. P prikazuje smer polarizatorja, A smer analizatorja. Na sliki (c) je prikazan fokusiran laserski snop pri potovanju skozi most. Opazen je podoben pojav kot pri optičnih vlaknih. (vir: [1])

## 4. Zaključek

Voda je dokaj dobro poznana snov, toda še zmeraj nas preseneča s svojimi anomalijami in svojevrstnimi pojavi, kakršen je vodni most. Njegovo začetno stanje (kapilarni most iz dveh kapljic stožčaste oblike) je bilo že precej temeljito preučeno, njegovo končno stanje (makroskopski vrteči se cylinder s posebnimi optičnimi lastnostmi) pa predstavlja dodatne možnosti za nadaljnji študij interakcij vode z elektromagnetnimi polji. Precej zanimiv problem predstavlja tudi prenos naboja in mase. Do odkritja je namreč veljalo, da se naboj v vodi lahko prenaša zgolj preko elektrolize, česar pri vodnem mostu ni opaziti. Posledično se poraja vprašanje o naravi prenosa naboja, kar je nedvomno vredno dodatne razprave. Na kratko povedano, o procesu vodnega mostu je znanega že precej. Formacija tekočih curkov in kapilarnega mostu sta sicer na prvi pogled fenomena, ki pa sta precej dobro znana pojava za polarizabilne tekočine. Brez dvoma je tako študija vodnega mostu pripeljala do novih odkritij o vodi – tako mikroskopskih kot makroskopskih, toda mnoga opažanja so lahko že sedaj razložena, za tiste, o katerih za enkrat še tečejo razprave pa obstaja kar nekaj uveljavljenih teorij. S tega vidika bi lahko rekli, da je Armstrongov poskus res razkril "skrite" lastnosti vode, toda zgolj dejstva, ne mitov.

## 5. Viri in literatura

- 1) Fuchs, Elmar C. *Can a Century Old Experiment Reveal Hidden Properties of Water?. Water.* **2010**, 2 (381-410)
- 2) Pohl, H. A. *Dielectrophoresis.* Cambridge: Cambridge University Press. **1978**
- 3) <http://www.rsc.org/chemistryworld/Issues/2003/February/together.asp>
- 4) Del Giudice, E.; Fuchs E. C.; Vitiello, G. *Collective molecular dynamics of a floating water bridge. Water (Seattle)* **2010**, 2 (69-82)
- 5) Armstrong, Lord W. *The Electrical Engineer.* **1893** (154-155)
- 6) Fuchs, E. C.; Woisetschläger J.; Gatterer, K.; Maier, E.; Pecnik, R.; Holler G.; Eisenkölbl, H. *The floating water bridge. J. Phys.-D-Appl. Phys.* **2007**, 40 (6112-6114)
- 7) Alvaro, G. Marin; Detlef, Lohse. *Building water bridges in air: Electrohydrodynamics of the Floating Water Bridge.* **2010**
- 8) Widom, A.; Swain, J.; Silverberg J.; Sivasubramanian, S.; Srivastava, Y. N. *Theory of the Maxwell pressure tensor and the tension in a water bridge. Phys. Rev. E.* **2009**, 80