

# Faradayovy vlny

**Jaroslav Adam**

České vysoké učení technické v Praze

7. Října, 2022

Turnaj mladých fyziků 2022

# Podstata Faradayových vln

- Jedná se o stojaté příčné vlny na tekutině rozpořhobované ve vertikálním směru
- Specifický vzor vlnění závisí na povaze tekutiny, její viskozitě, povrchovém napětí a hustotě
- Vzor rovněž závisí na velikosti povrchu a hloubce tekutiny a na amplitudě a frekvenci vertikálních vibrací
- Příklad vpravo znázorňuje vlnění vybuzené na povrchu olivového oleje
- První pozorování provedl Michael Faraday v roce 1831
- Dnes tento jev nachází uplatnění v nelineární dynamice a v přesných rezonátorech



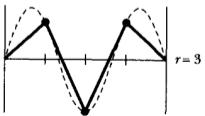
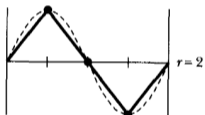
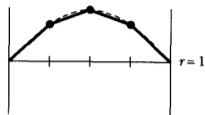
<https://www.physics.utoronto.ca/~phy326/far/far.pdf>

# Stojaté vlny v jednom rozměru

- Stojatá vlna vznikne rozpohybováním napnuté struny (např. na kytáře)
- Oba konce jsou pevně uchycené; výchylka se pohybuje k jednomu z konců kde se odrazí
- Stabilní vibrace (módy) nastávají na násobcích základní frekvence
- Pokud strunu zjednodušíme na skupinu  $n$  závaží na pružinách, frekvence  $\omega_r$  módů  $r$  jsou:

$$\omega_r \sim \sin\left(\frac{r\pi}{2(n+1)}\right)$$

- Příklad pro  $n = 3$  (závaží) a  $r = 1, 2, 3$  (módy) je na obrázku vpravo



# Faradayovy vlny jako stojaté vlnění ve dvou rozměrech

- Výška hladiny tekutiny  $z(x, y)$  je funkcí pozice  $x$  a  $y$  ve vodorovné rovině (funkce dvou proměnných)
- Kmitání hladiny na dané pozici se řídí rovnicí pro  $z(x, y)$ :

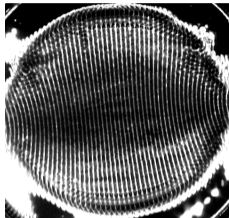
$$z'' + 2\mu z' + \omega_0^2 [1 + \Gamma \cos(\omega t)] z = 0$$

- $\mu$  je koeficient útlumu, souvisí s viskozitou tekutiny,  $\omega_0$  je frekvence vibrací na dané pozici na povrchu tekutiny
- Budící síla která tekutinu rozkmitává má amplitudu určenou přes  $\Gamma$  a úhlovou frekvenci  $\omega$
- Součástí rovnice jsou okrajové podmínky zohledňující tvar nádoby s tekutinou a její hloubku
- Úloha je zpravidla řešitelná pouze numericky
- Pro specifické kombinace  $\Gamma$  a  $\omega$  nastane rezonance, kdy  $z(x, y)$  roste exponenciálně s časem
- Oblasti hodnot  $\Gamma$  a  $\omega$  které vedou k rezonanci se nazývají *rezonanční jazyky*
- Rezonanční jazyky jsou analogie módů stojatého vlnění v jednom rozměru

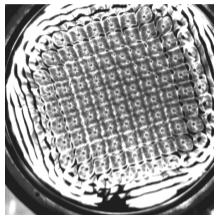
<https://www.physics.utoronto.ca/~phy326/far/far.pdf>

# Jednotlivé vzory Faradayových vln

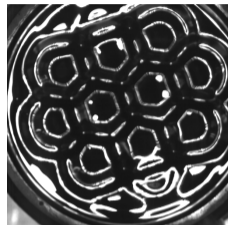
Pruhový



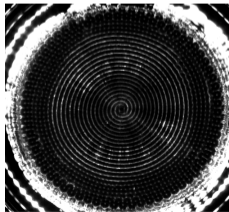
Čtvercový



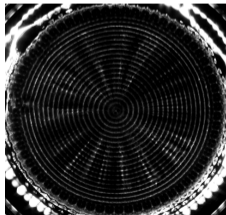
Hexagonální



Spirální



Kruhový



# Aparatura pro tvorbu Faradayových vln

- Experiment uvede nádobu s tekutinou do vertikálních vibrací
- Frekvence i amplituda budicí síly spojitě měnitelná pro vybuzení jednotlivých vzorů
- Příklad na obrázku: (1) generátor budicí síly, (2) nádoba s tekutinou, (3) digitální fotoaparát, (4) stroboskop
- Typický rozsah frekvencí je 10 – 30 Hz



# Faradayovy vlny na vodním povrchu

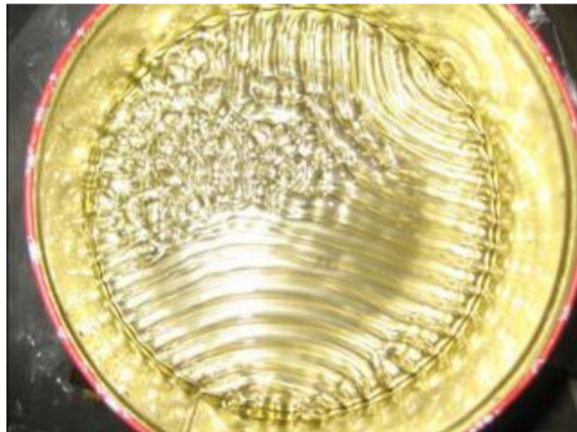
- Nízká viskozita vody vede k nezávislosti na okrajích nádoby (limit nekonečného povrchu) a zanedbatelnému útlumu ( $\mu = 0$ )
- Příklad ukazuje stabilní vzor pro budící frekvenci 20 Hz a hloubku vody 1.2 cm



<https://www.physics.utoronto.ca/~phy326/far/far.pdf>

# Faradayovy vlny na vrstvě oleje

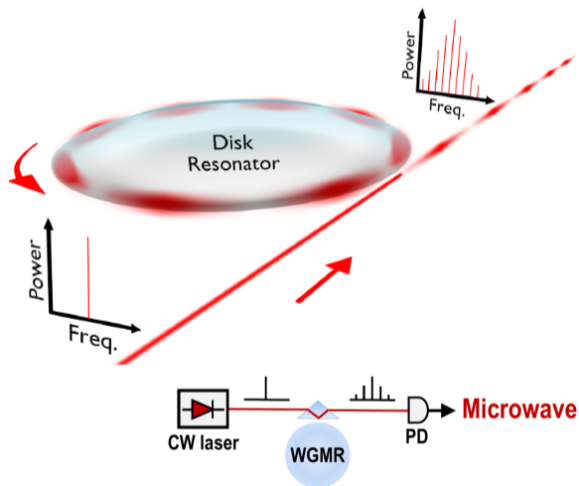
- Olej splňuje limit velké viskozity a nekonečné hloubky tekutiny, útlum je  $\mu \neq 0$
- Příklad ukazuje pruhový vzor s výraznou chaotickou oblastí





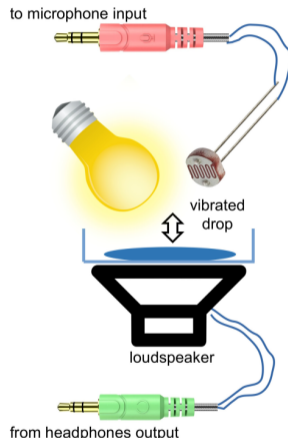
# Současná aplikace ve frekvenčních rezonátorech

- Frekvenční rezonátor (frequency comb) dovoluje vytvořit vlnění s přesně určenou frekvencí a modulací
- Strukturu neznámého vzorku lze zjistit podle jeho frekvenční odezvy
- Pro medicínské a sonarové aplikace nelze optické nebo radiofrekvenční vlny použít kvůli velkému útlumu
- Faradayovy vlny jsou vhodný kandidát pro frekvenční rezonátor v medicíně a sonarových měřeních



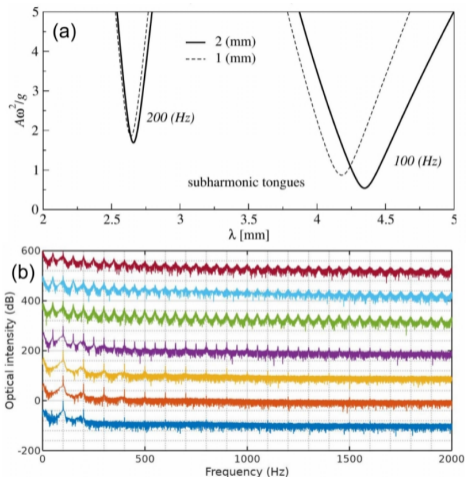
# Elektronický záznam Faradayových vln

- Elektronické zpracování vyhodnotí frekvenční spektrum Faradayových vln, provedeno v rámci studie o frekvenčních rezonátorech
- Faradayovy vlny jsou v kapce tekutiny vybuzeny rozkmitáváním reproduktorem
- Aktuální výšku povrchu osvětlené hladiny snímá fotorezistor
- Signál z fotorezistoru odpovídá vlnění na hladině tekutiny
- Osciloskop slouží k vyhodnocení signálu, příklad ukazuje jeho časový průběh



# Frekvenční spektrum Faradayových vln

- Pozorování ukázalo dva rezonanční jazyky (oblasti budící amplitudy a vlnové délky  $\lambda$  které vedou k rezonanci)
- Frekvenční spektra udávají vyšší harmonické frekvence na násobcích frekvence budící síly (násobky 100 Hz)
- Vyšší harmonické frekvence jsou důsledkem nelineárního chování použité tekutiny (etanol)



# Závěr

- Faradayovy vlny jsou stojaté příčné vlnění na povrchu tekutiny, která je vystavena vibracím ve svislém směru
- Pestrá škála různých vzorů vlnění je dána širokým rozsahem možných okrajových podmínek a vlastností tekutin
- Využití se nachází v základní dynamice tekutin, medicíně a sonarových měřeních