



No. 5 Filling up a Bottle

当**垂直**的水柱进入瓶子时，可能会产生声音，并且**随着瓶子被填充**，声音的特性会改变。探究此系统的相关参数，如水柱的速度与尺寸，瓶子的**大小与形状或水温**等对声音的影响。

When a **vertical water jet** enters a bottle, sound may be produced, and, **as the bottle is filled up**, the properties of the sound may change. Investigate how relevant parameters of the system such as **speed** and **dimensions** of the jet, **size** and **shape** of the bottle or water temperature affect the sound.



上海科技大学
ShanghaiTech University

- 实验装置及现象
- 理论分析
- 实验验证
- 讨论

1

2

报告纲要



上海科技大学
ShanghaiTech University

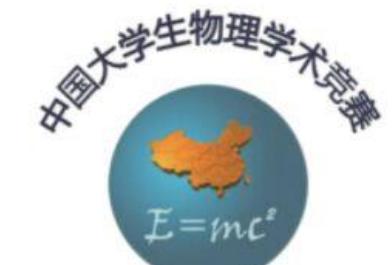
第一部分

1

3

实验装置及现象

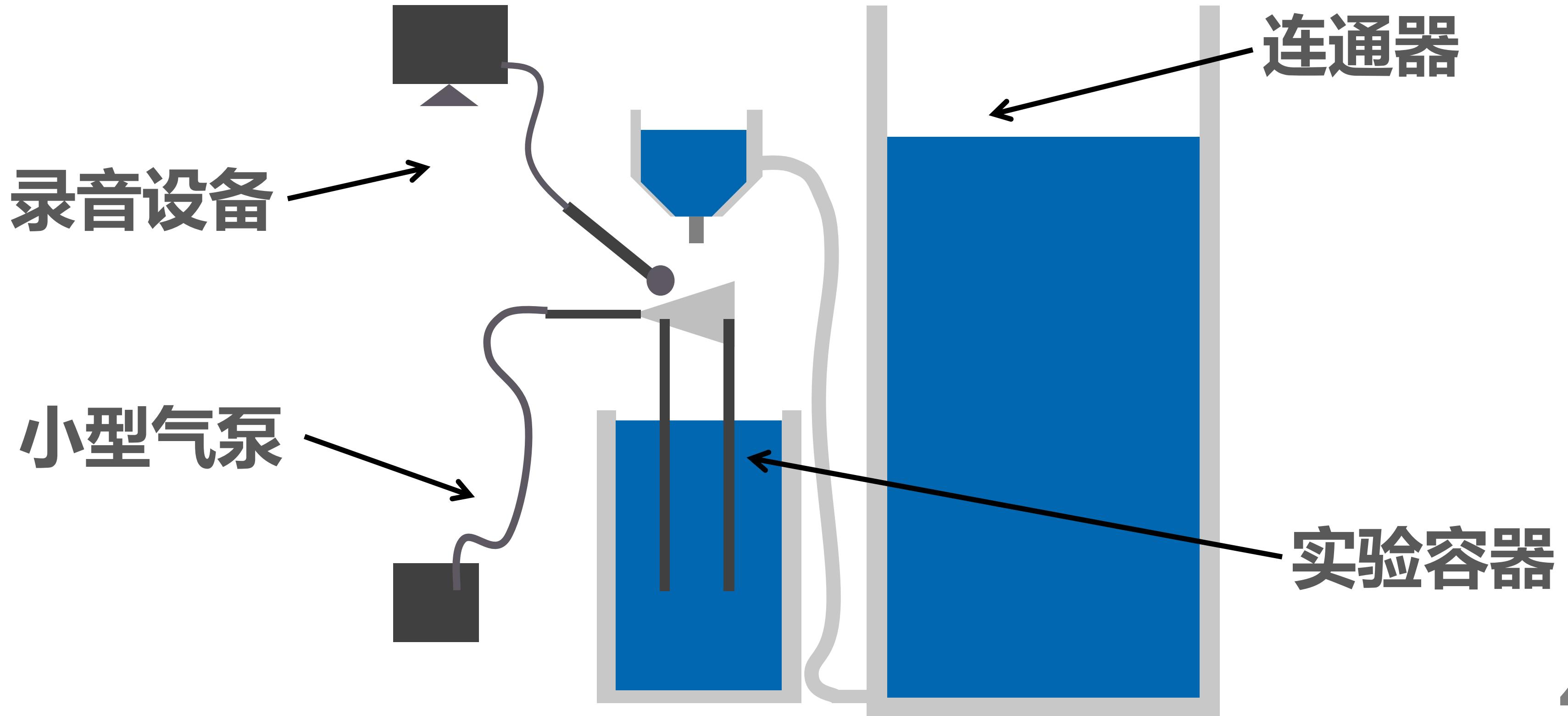
实验装置



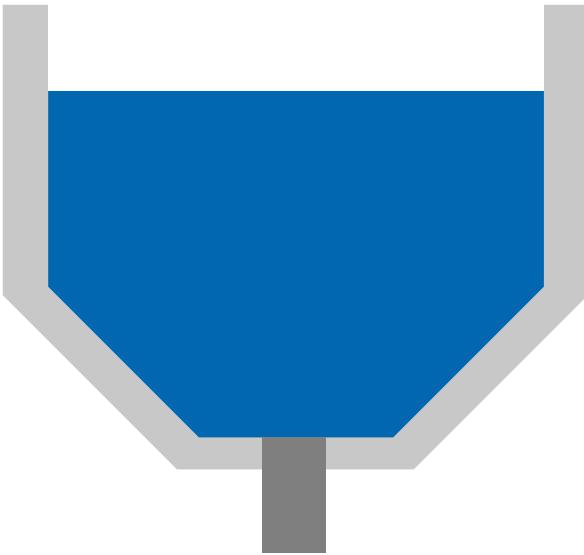
CUPT



上海科技大学
ShanghaiTech University



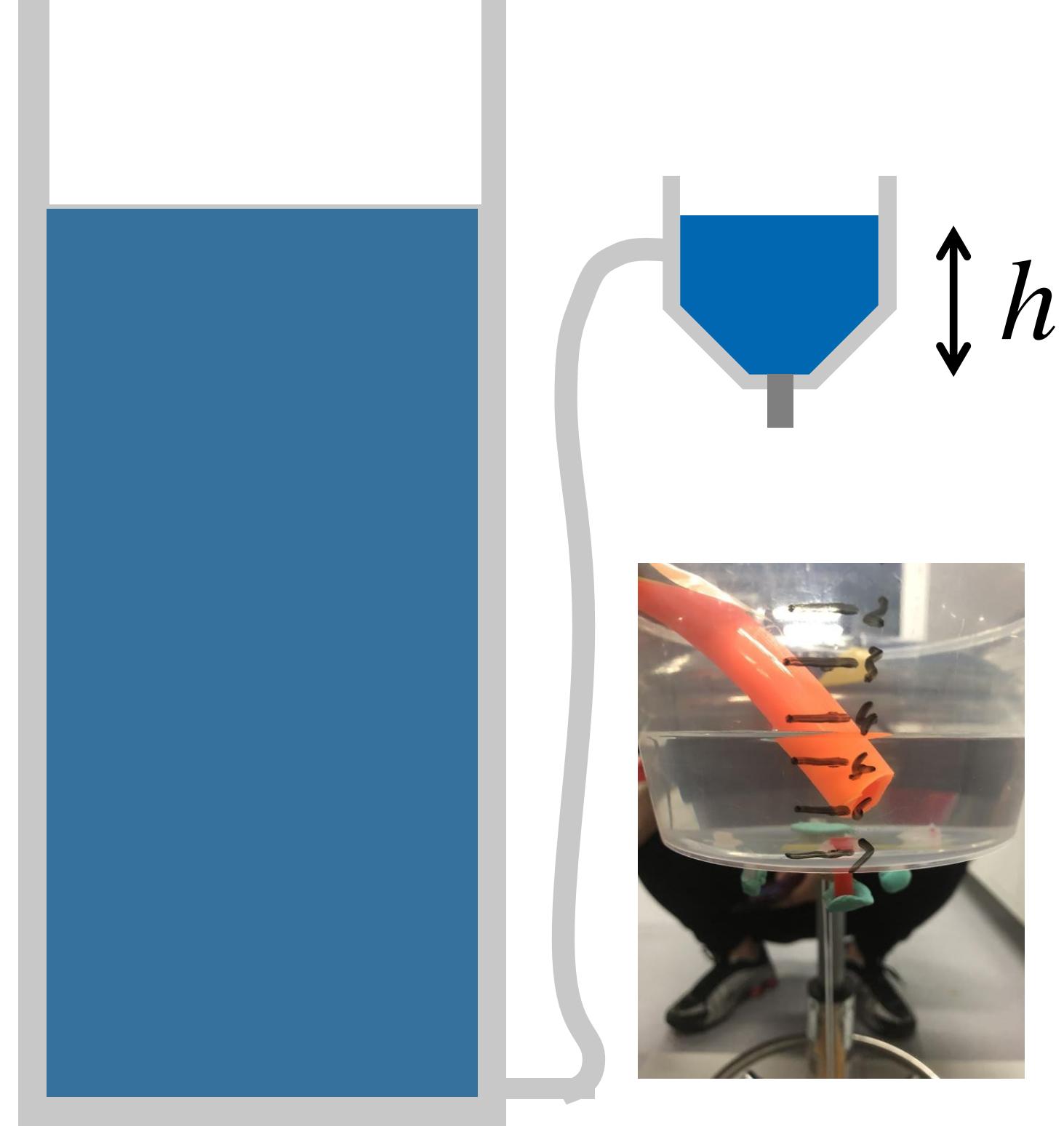
实验装置—管径



上海科技大学
ShanghaiTech University

d/mm	S/mm ²
3.75	11.04
4.69	17.28
5.94	27.71
6.76	35.81
8.88	61.93

实验装置—流速



连通器：出水器+容水器

容水器：稳定液面高度

出水器：控制流出速度

$$v^2 = 2gh \rightarrow 0 \sim 1.5 \text{ m/s}$$

实验装置—容器



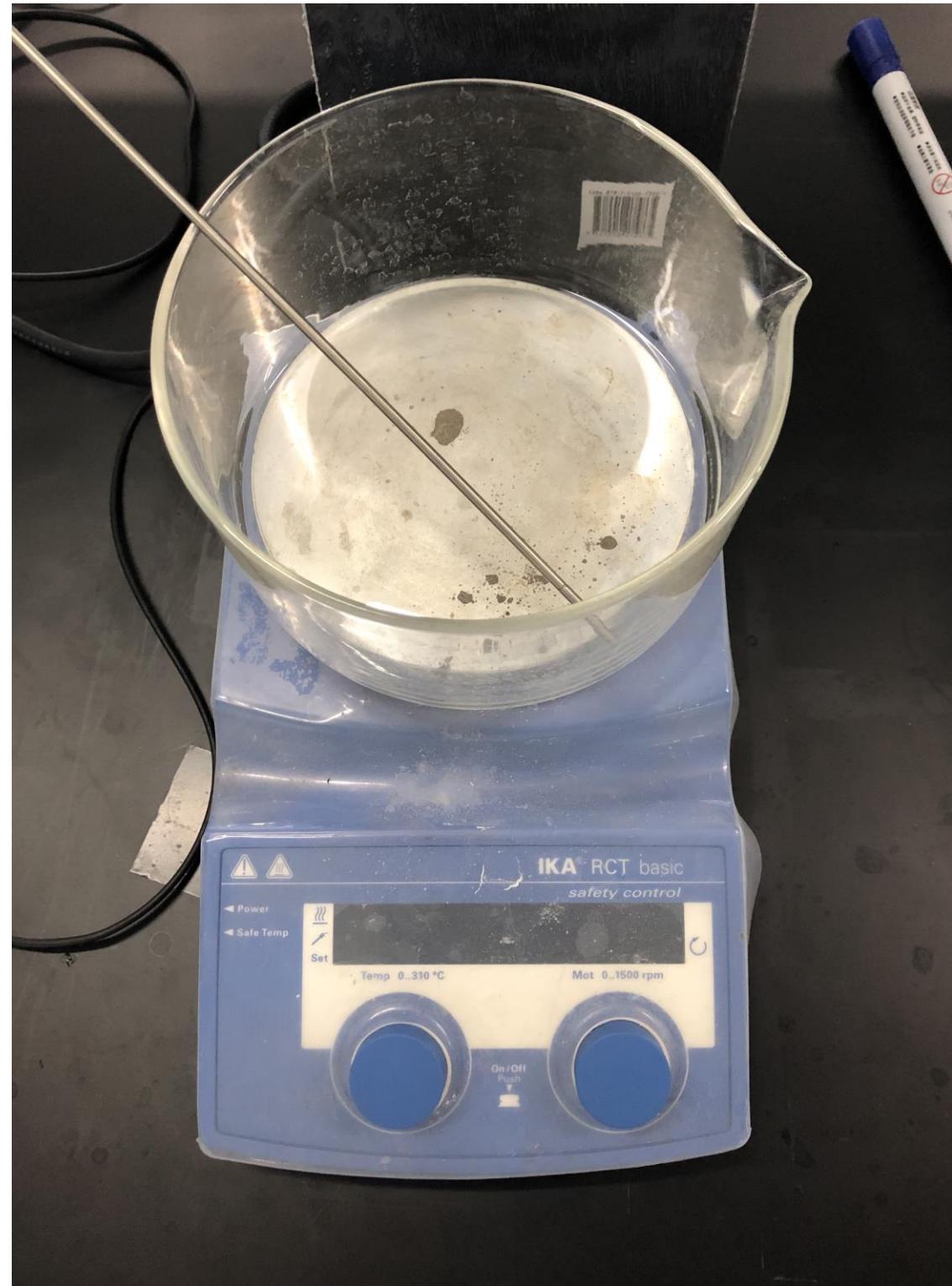
上海科技大学
ShanghaiTech University

容器种类	高度 (cm)	直径/边长(cm)
量筒10ml	12.50	1.360
量筒25ml	14.15	1.880
量筒50ml	18.20	2.200
量筒100ml	23.40	2.720
量筒250ml	29.00	3.880
方小	15.00	4.00
方中	15.00	5.00
方大	14.00	7.00
方长	21.50	4.20
三角	21.50	4.20
圆	21.50	4.00

实验装置—温度



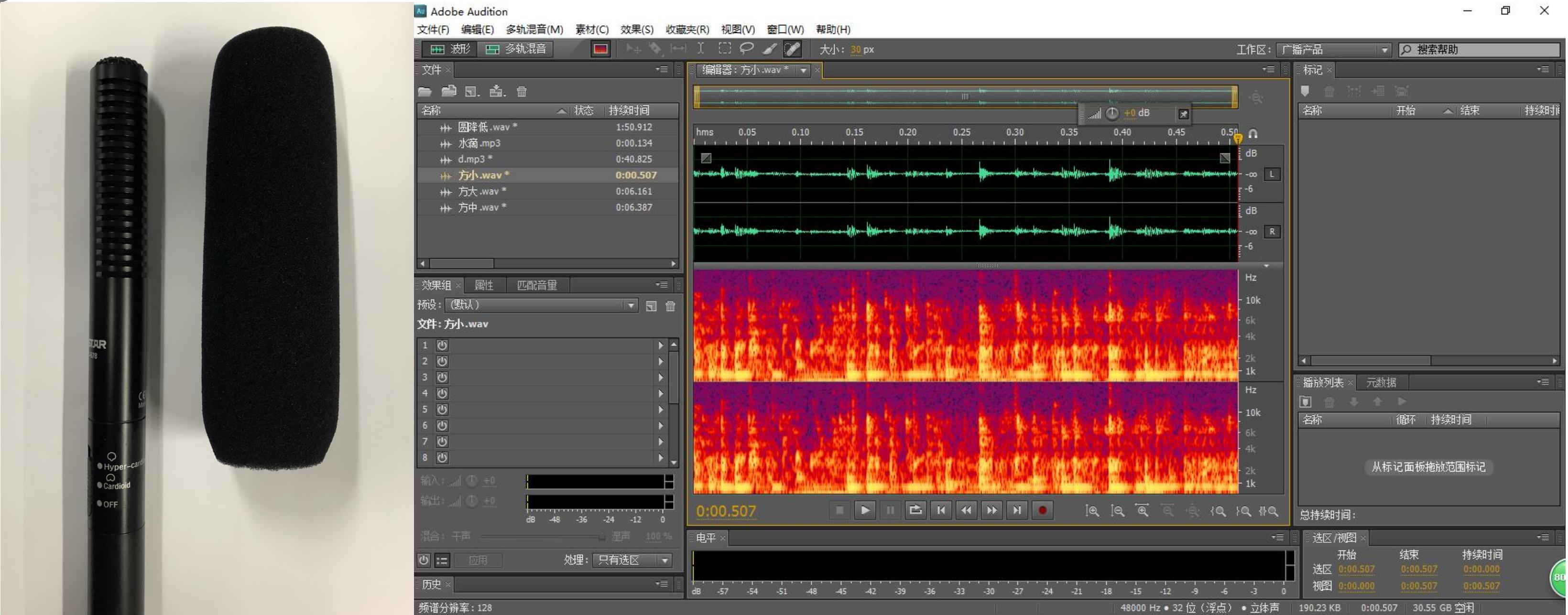
上海科技大学
ShanghaiTech University



实验装置—录音及分析

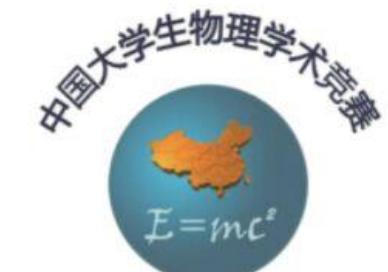


上海科技大学
ShanghaiTech University



定向收音---> Au/Matlab音频分析

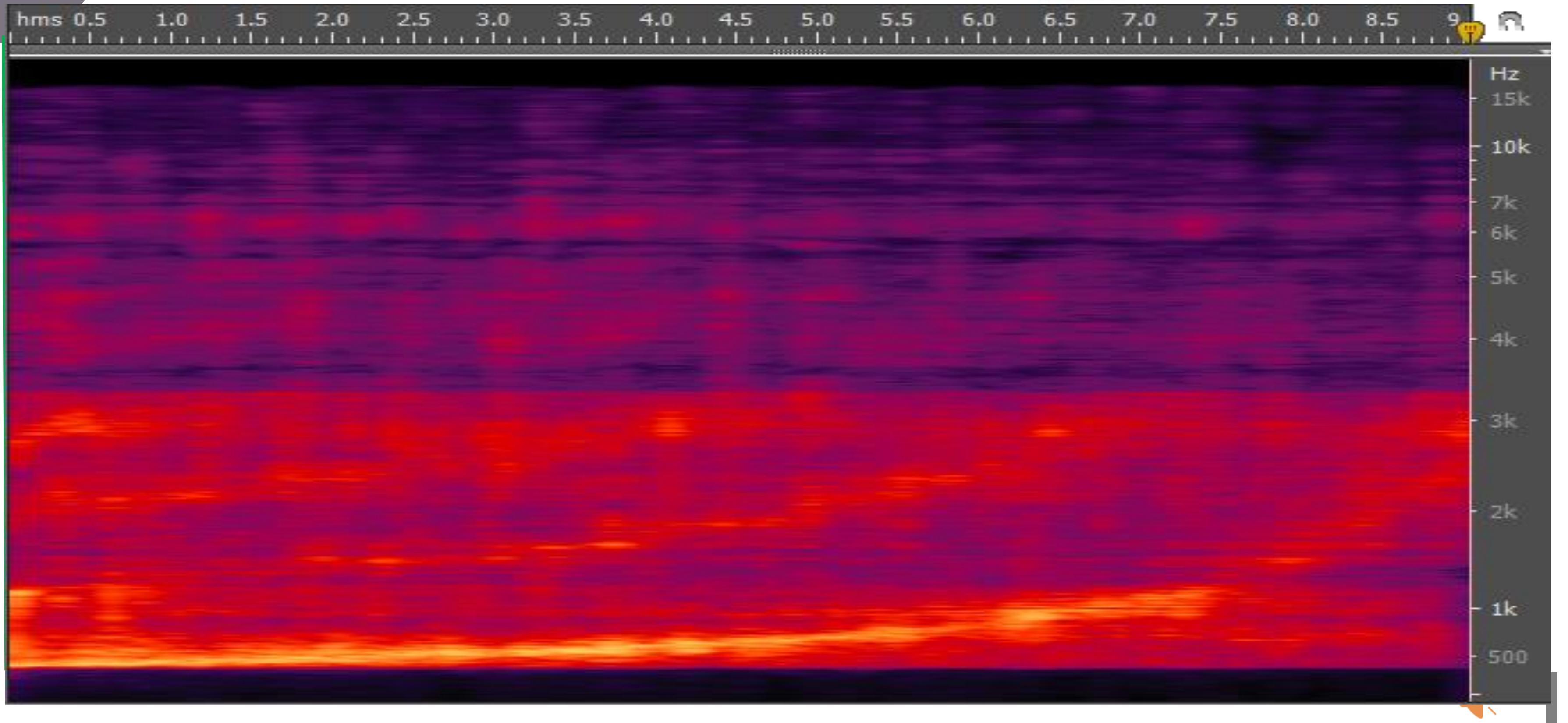
预实验



CUPT



上海科技大学
ShanghaiTech University



预实验

中国大学生物理学术竞赛



CUPT



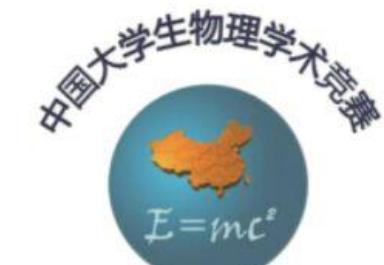
上海科技大学
ShanghaiTech University

验证谐振腔作用对时频图亮线形态的影响

间歇性填水
停水时吹气
引起空气柱谐振
观察时频图曲线变化



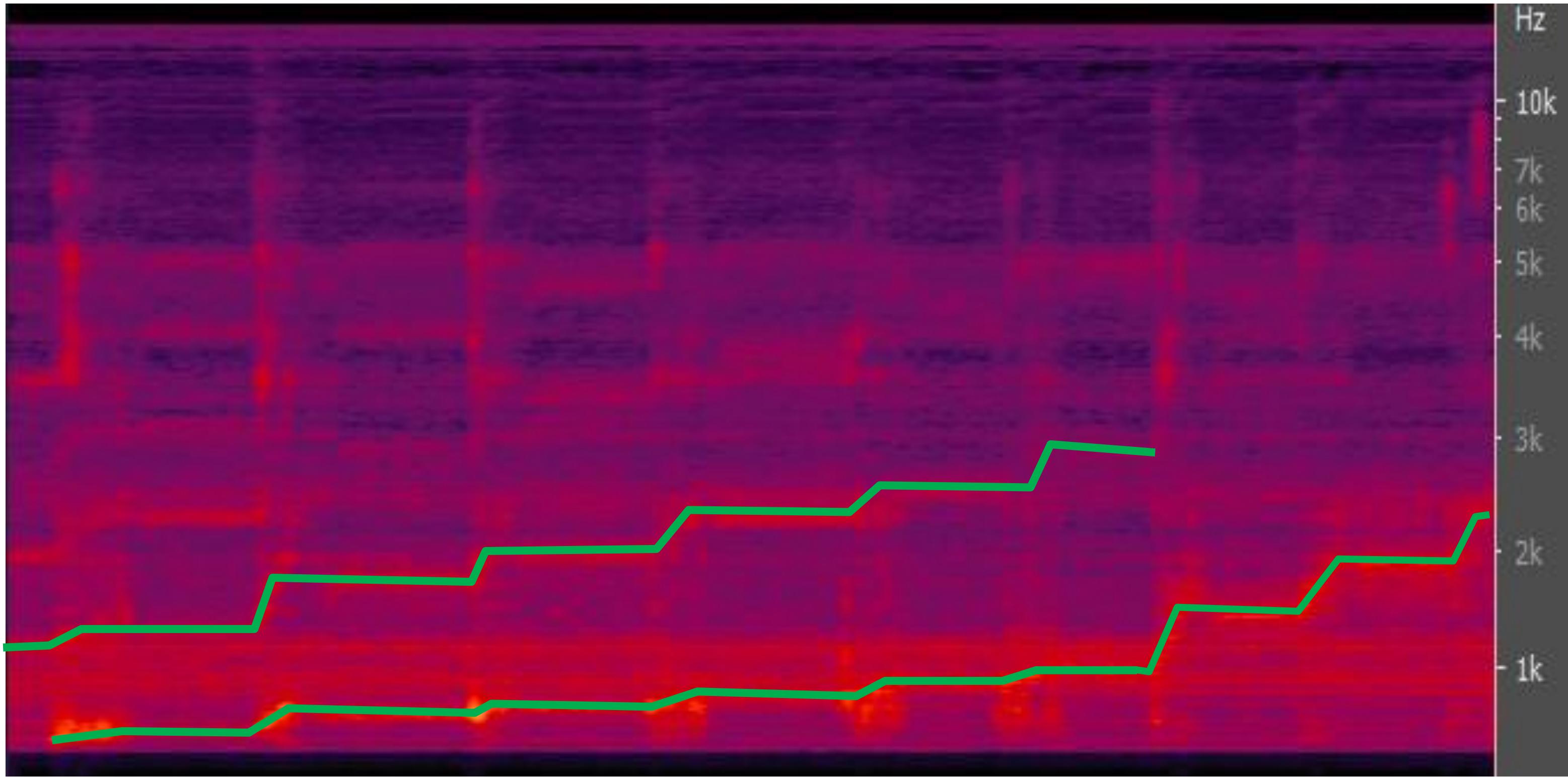
预实验



CUPT

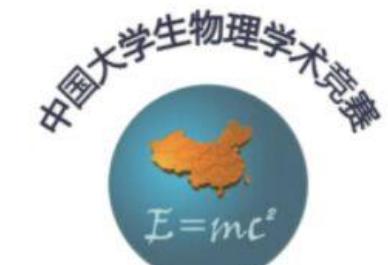


上海科技大学
ShanghaiTech University



12

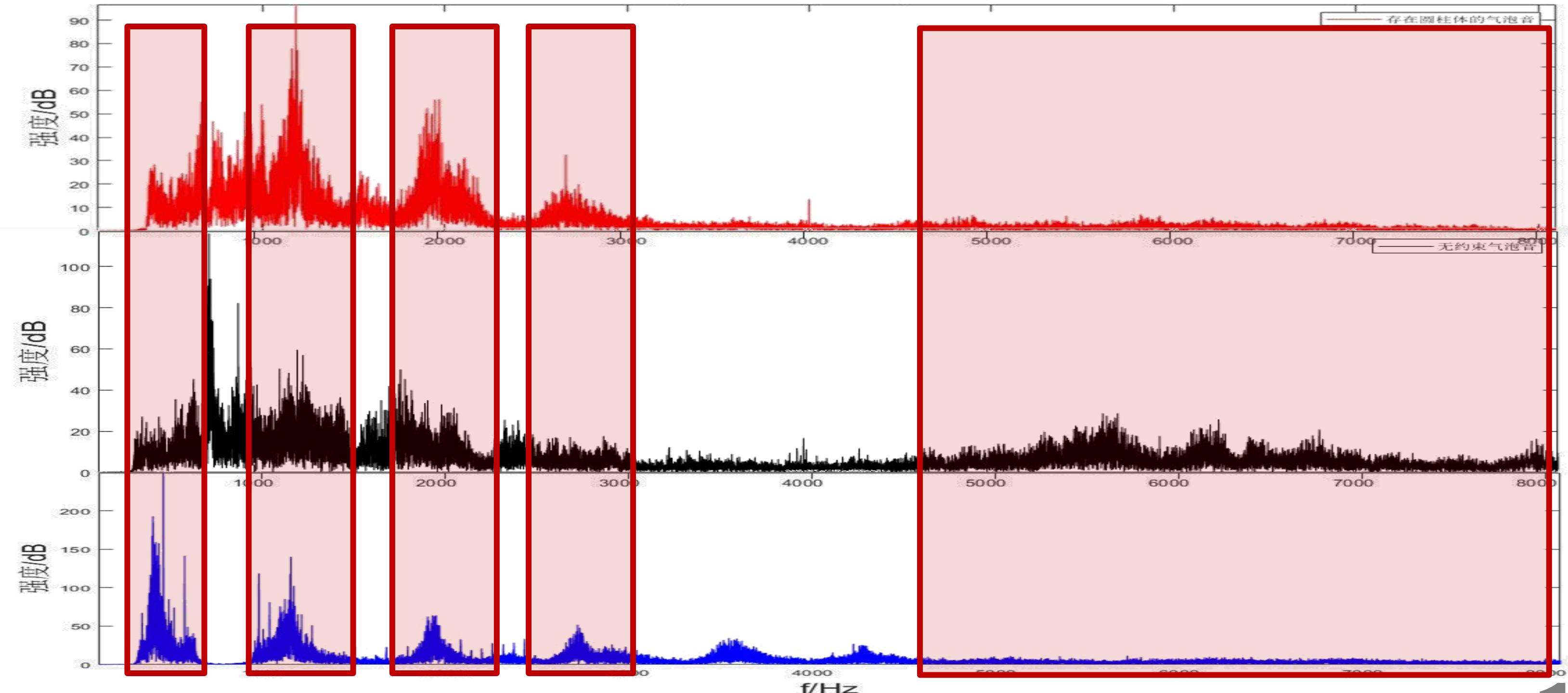
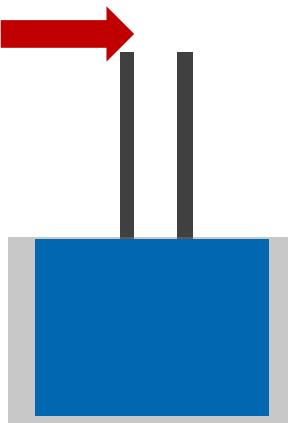
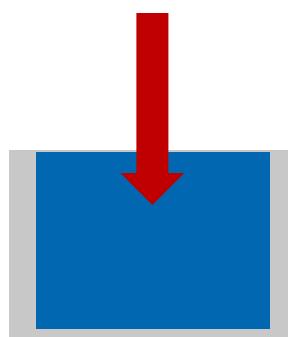
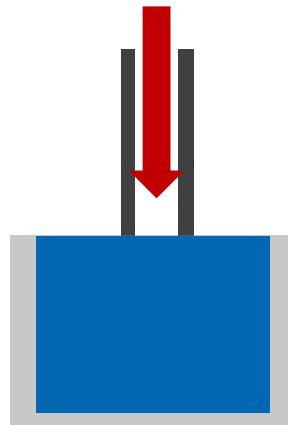
预实验



CUPT



上海科技大学
ShanghaiTech University



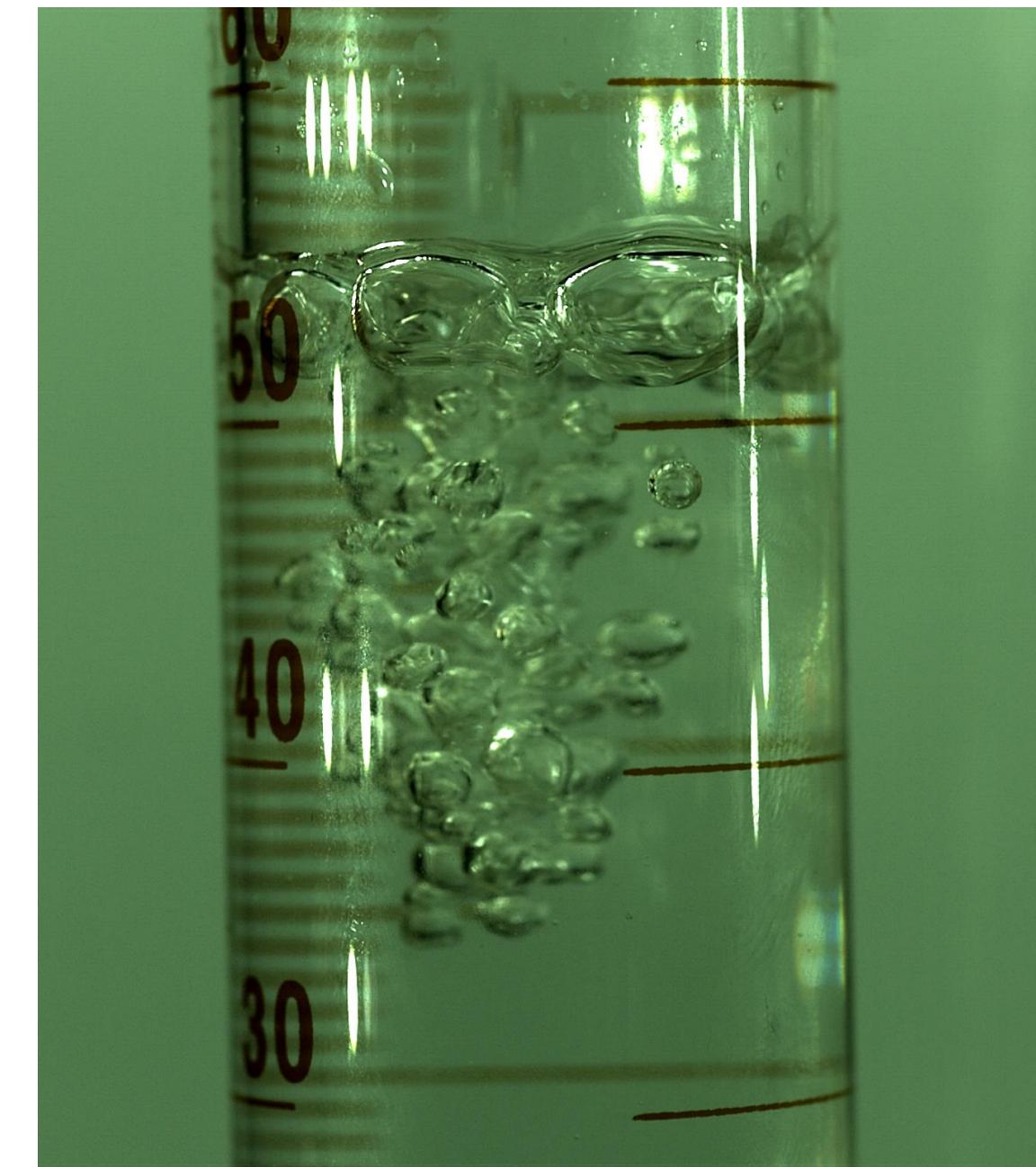
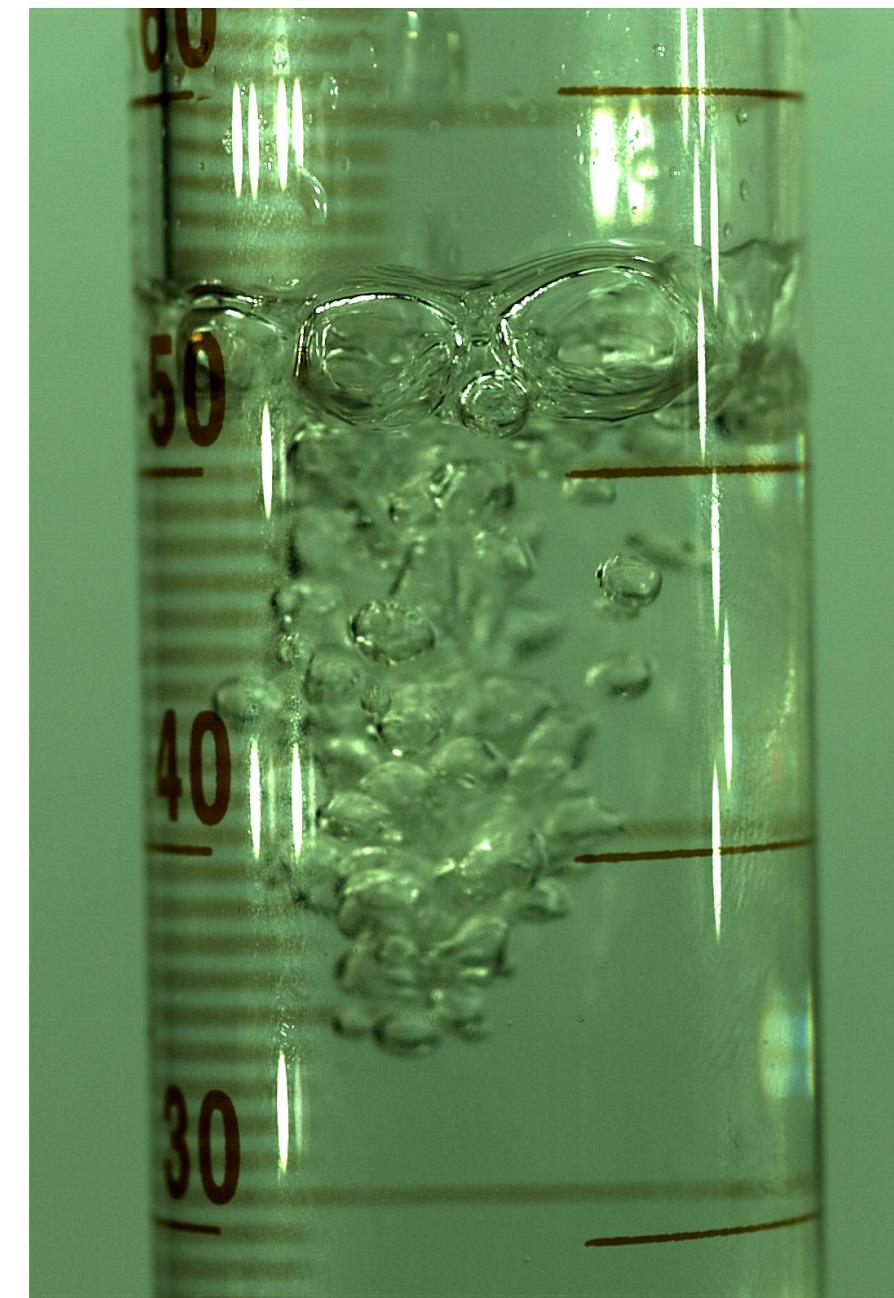
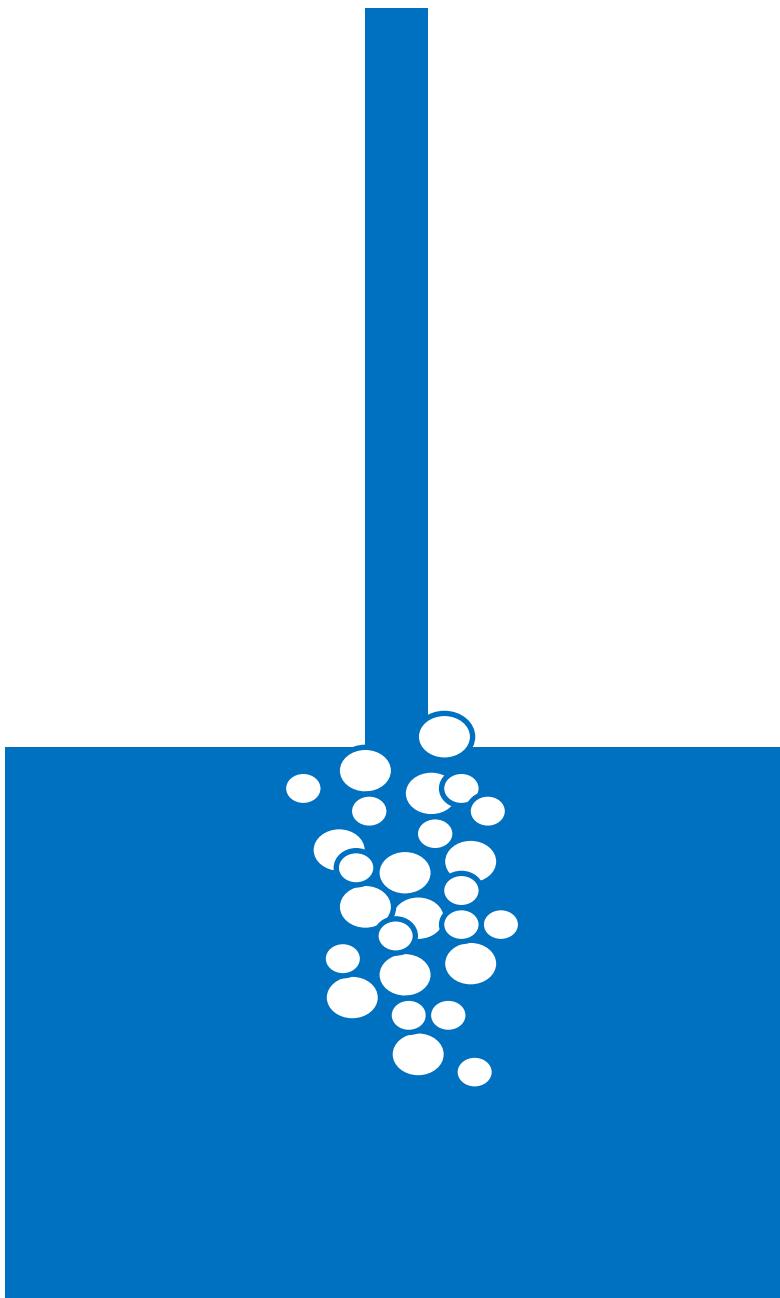
预实验结论



上海科技大学
ShanghaiTech University

1. 声源：水撞击水面产生气泡串发声，引起空气振动
2. 空气柱对气泡串的声音筛选放大
3. 谐振腔是导致时频图亮线形态的主要原因

气泡串定性实验



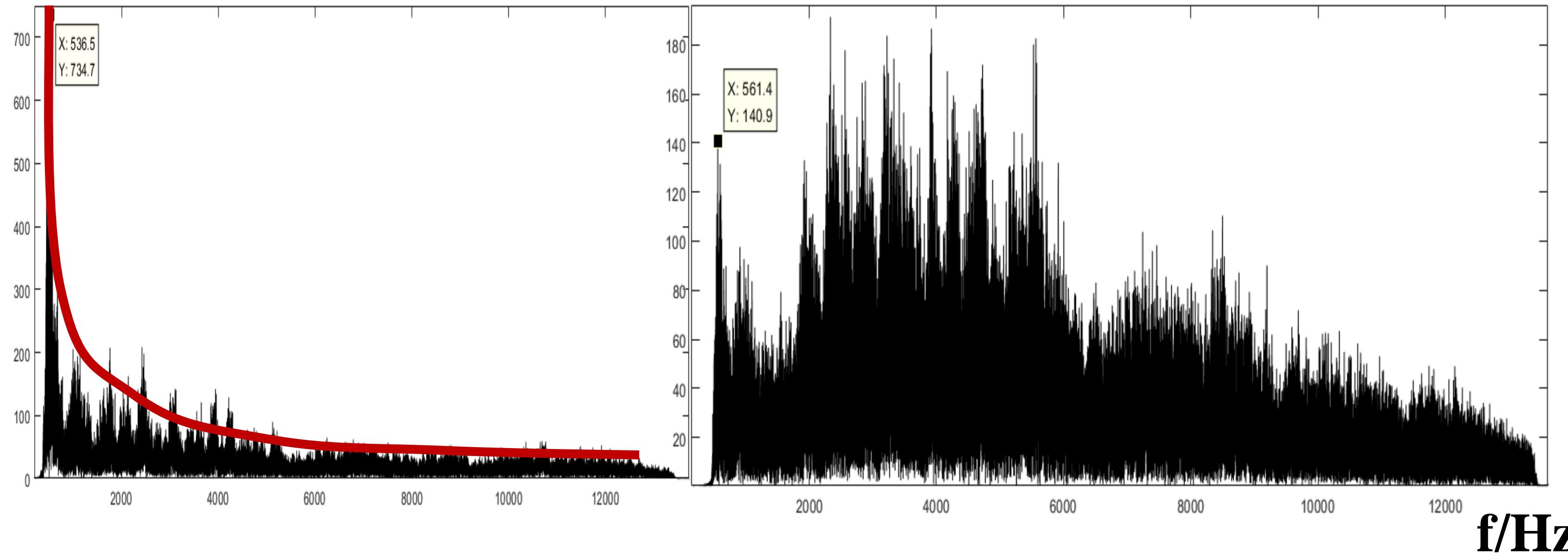
上海科技大学
ShanghaiTech University

气泡串与流速--频域



上海科技大学
ShanghaiTech University

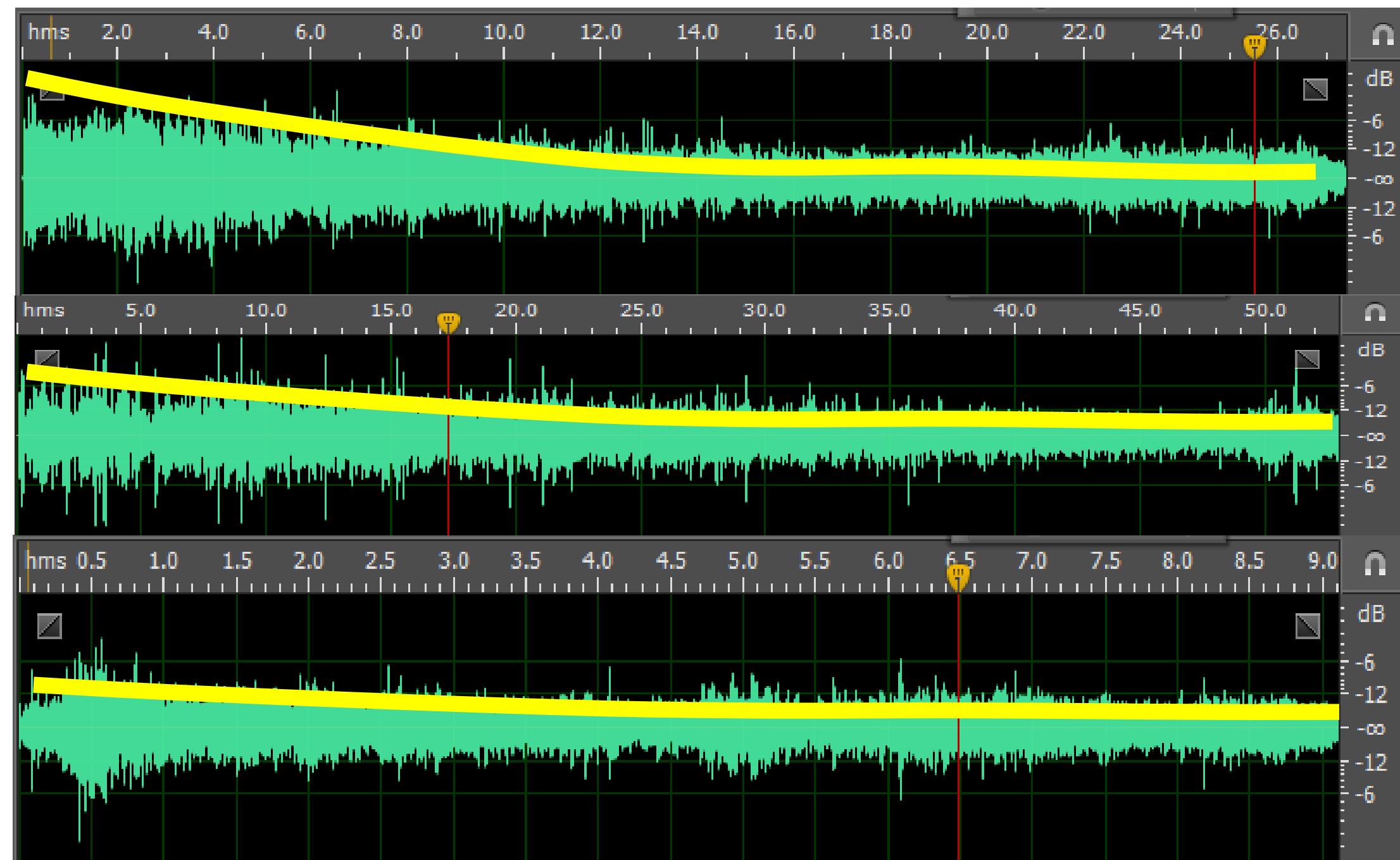
强度/dB



流速越大，峰频先降后增，且高频部分突然增加

气泡串与流速--时域

流速



上海科技大学
ShanghaiTech University

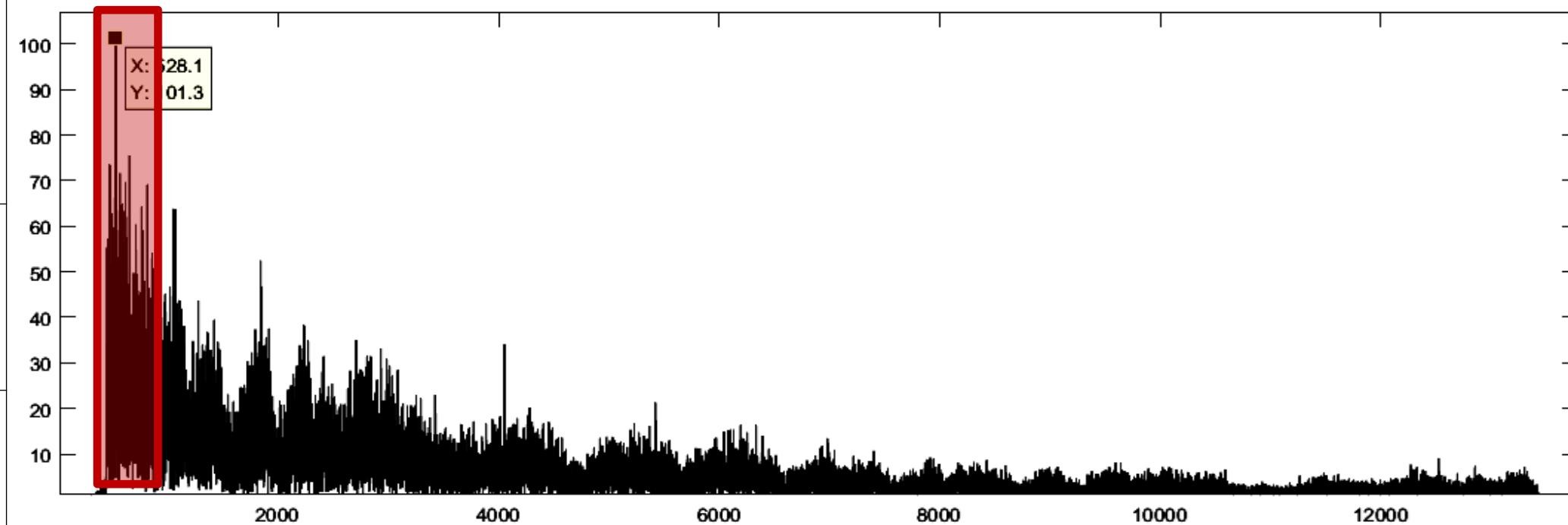
流速越大，
时域上总体
振幅变化幅
度越小

气泡串与边界



上海科技大学
ShanghaiTech University

容器种类	高度 (cm)	直径/边长 (cm)
量筒10ml	12.50	1.360
量筒25ml	14.15	1.880
量筒50ml	18.20	2.200
量筒100ml	23.40	2.720



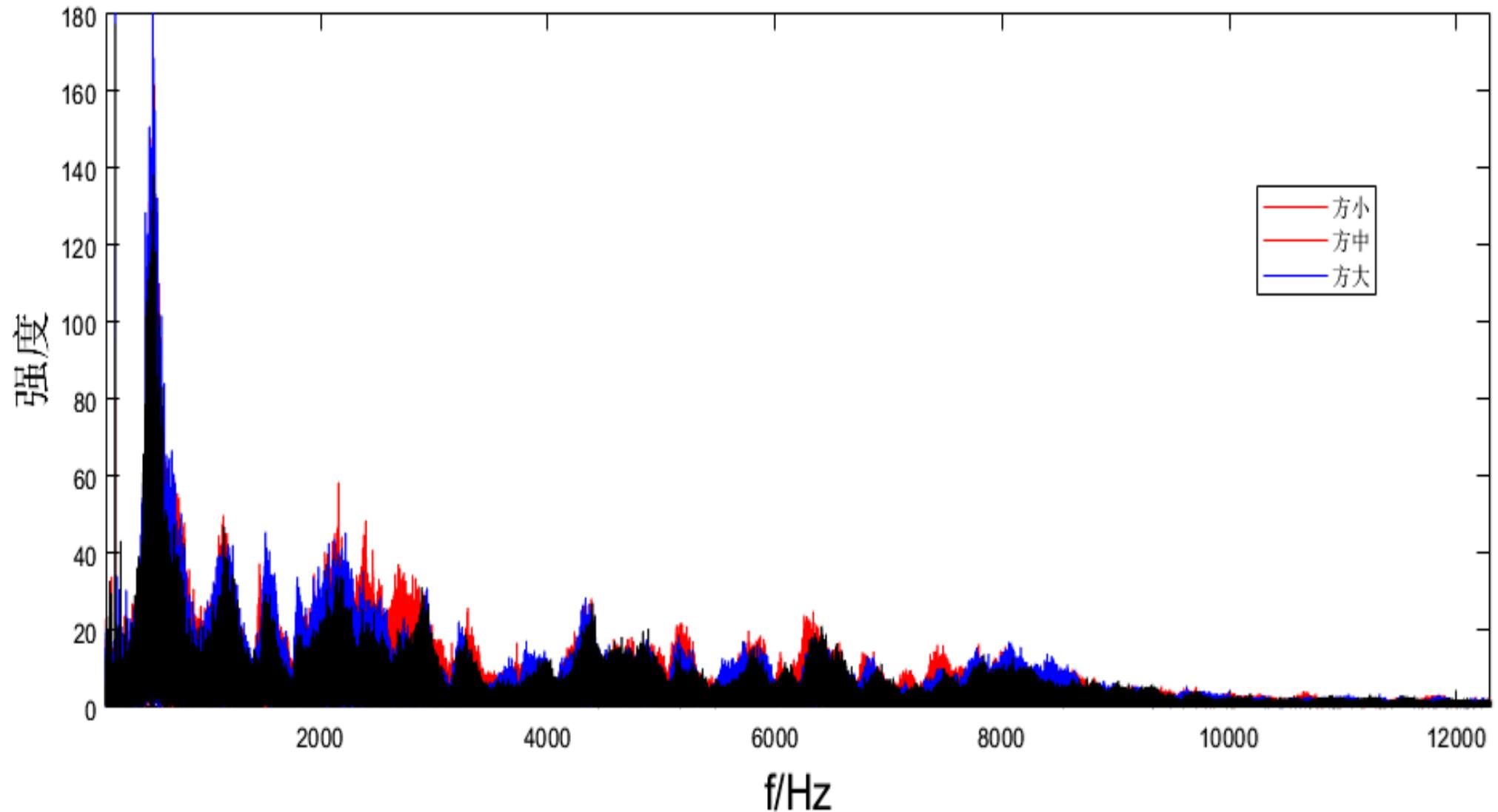
量筒直径增大，峰频数值升高

气泡串与边界



上海科技大学
ShanghaiTech University

方小	15.00	4.00
方中	15.00	5.00
方大	14.00	7.00



容器尺度过大，峰频数值不变

气泡串与温度



上海科技大学
ShanghaiTech University

26°C

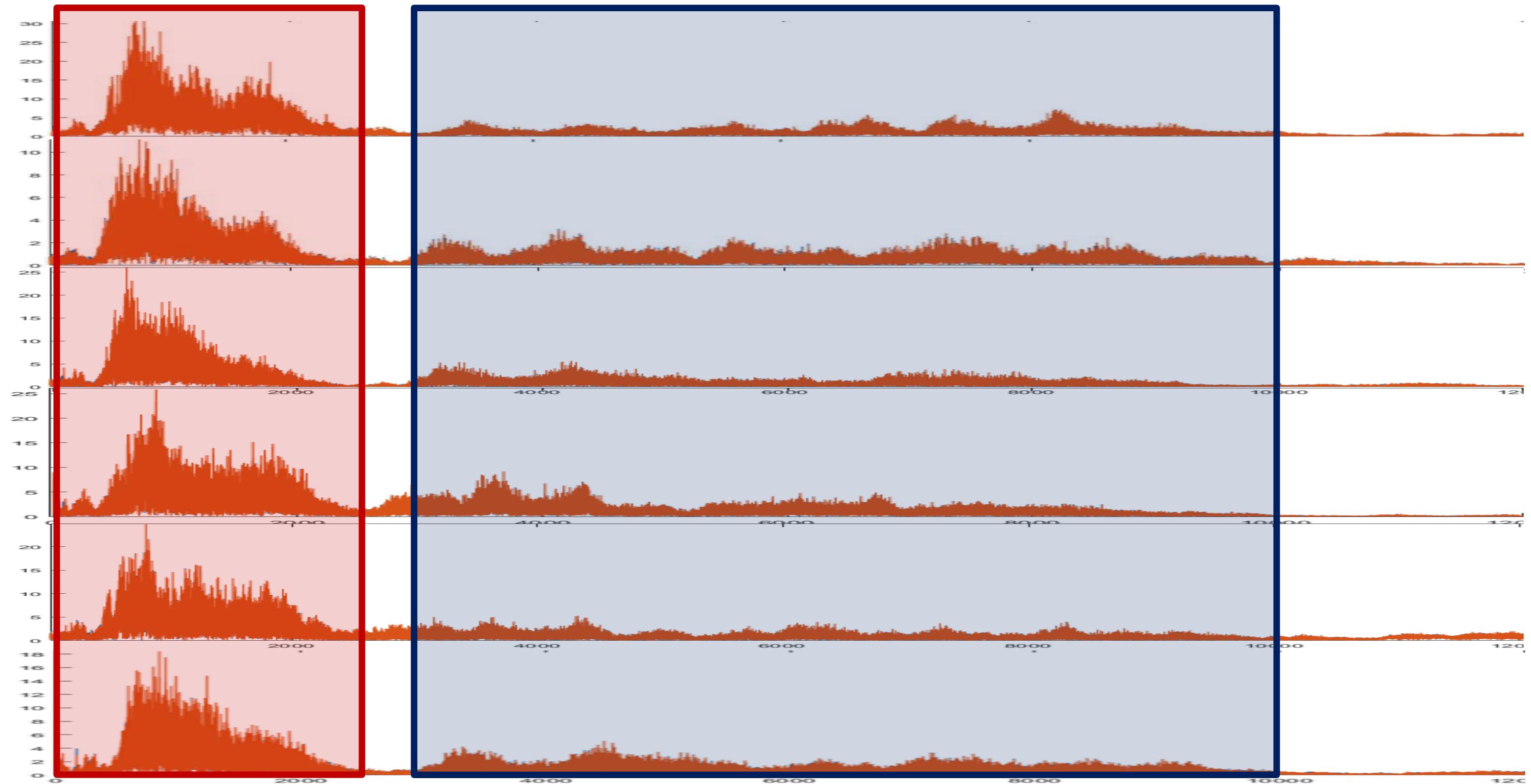
30°C

40°C

45°C

50°C

60°C



气泡串与管径



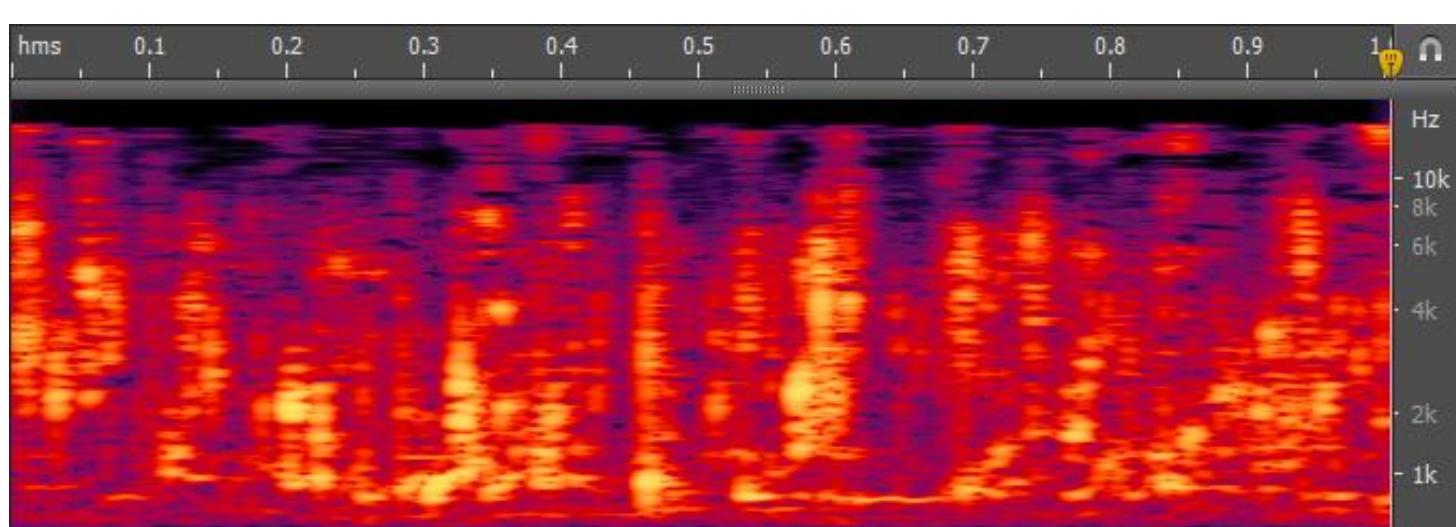
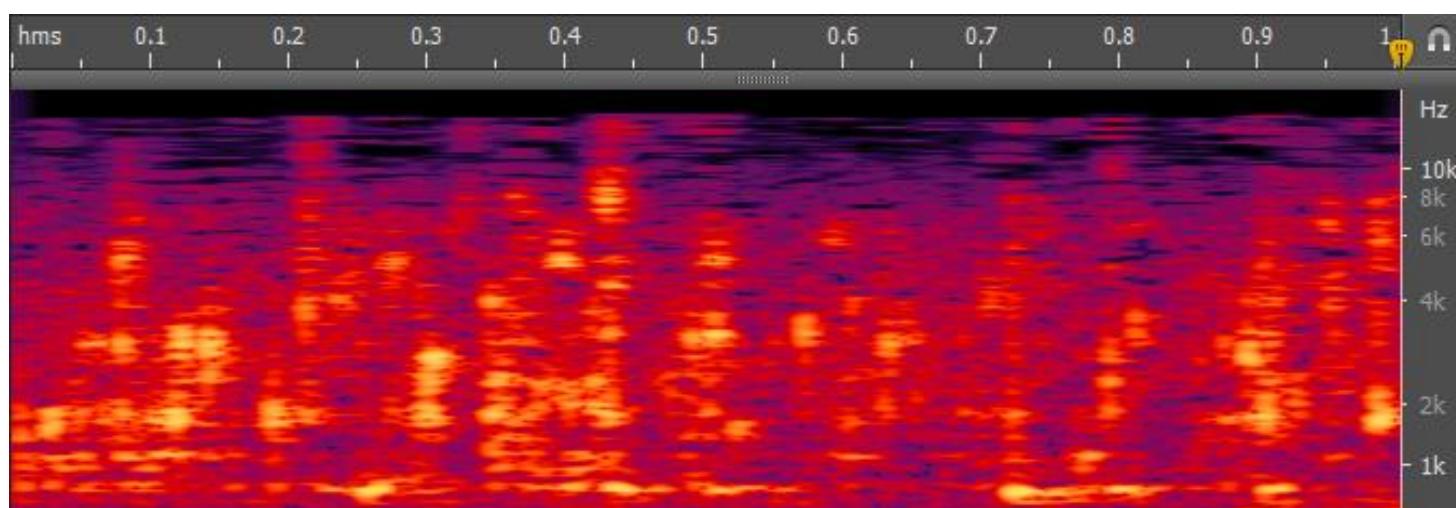
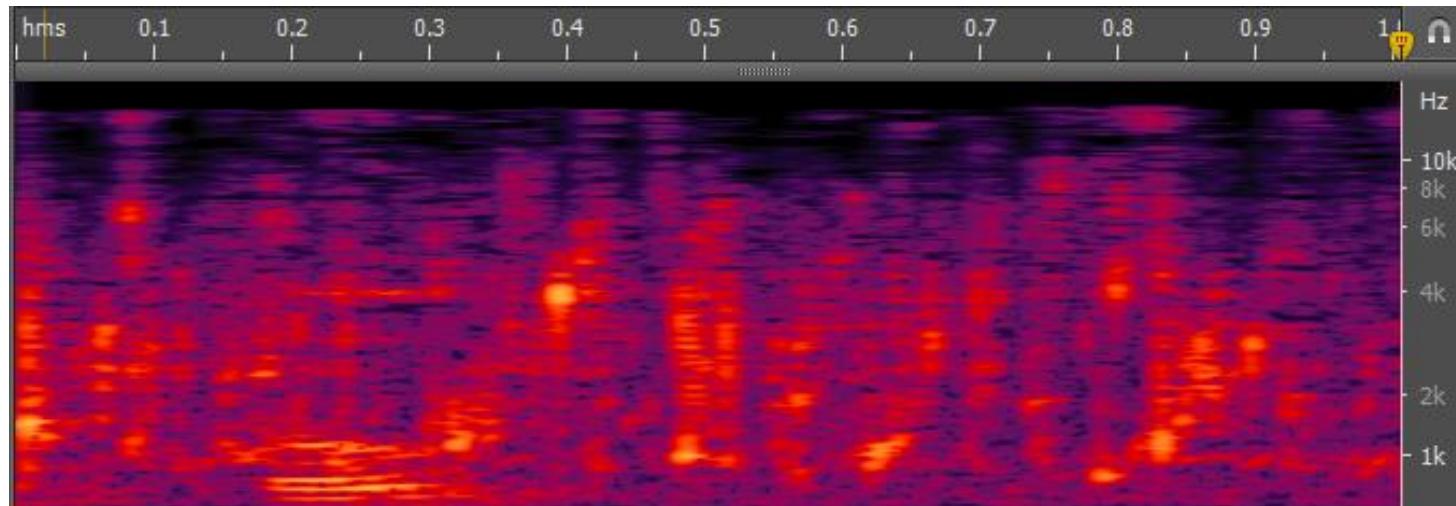
上海科技大学
ShanghaiTech University

S/mm²

11.04

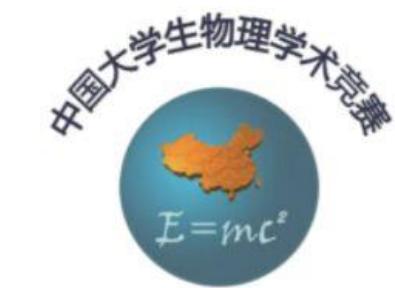
27.71

61.93



管径越大，时
频图上单位时
间内亮点个数
越多，可简单
表征气泡串声
音的音色

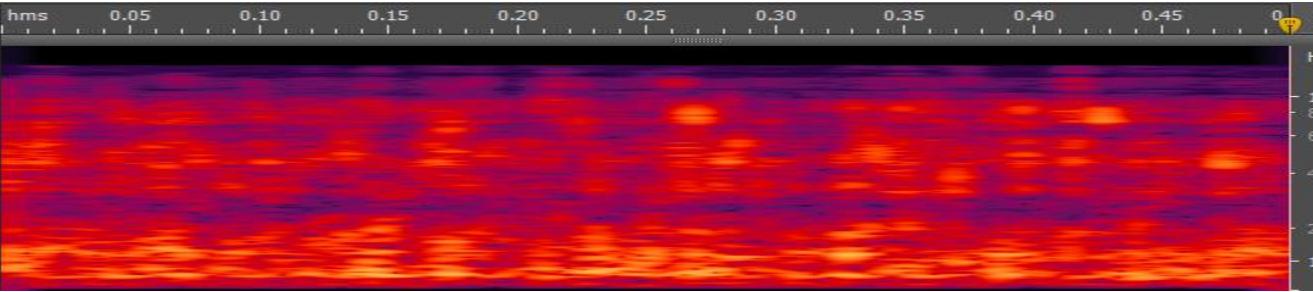
气泡串与流速



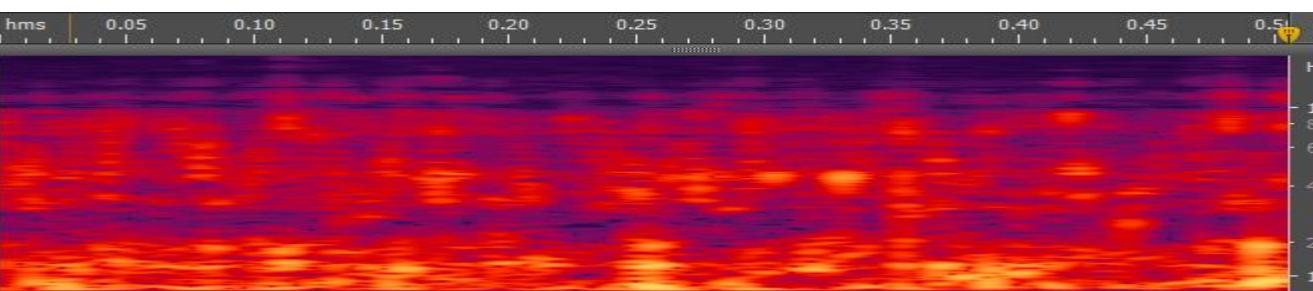
上海科技大学
ShanghaiTech University

$v/\text{ml} \cdot \text{s}^{-1}$

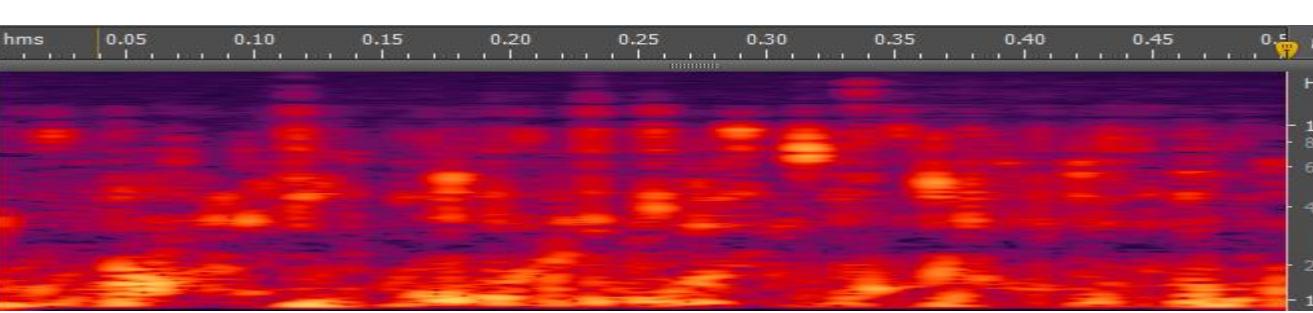
4.476



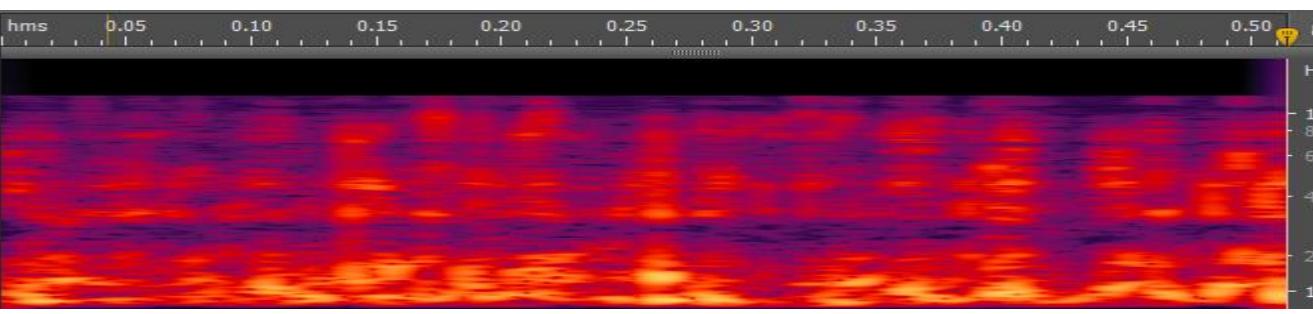
2.778



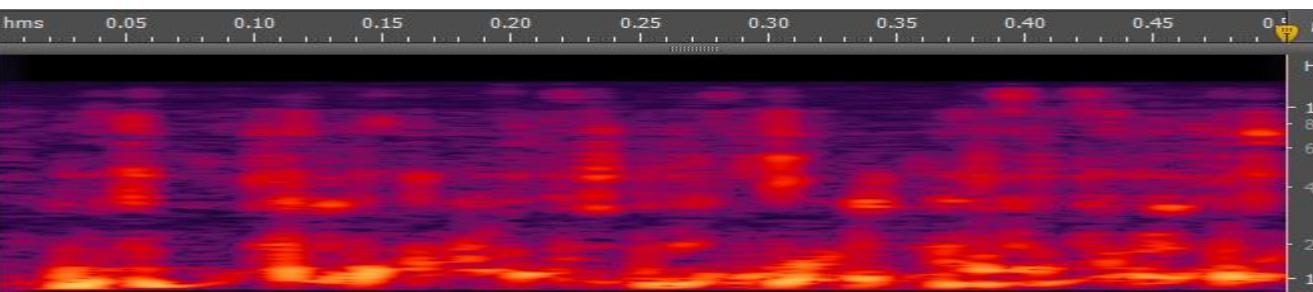
1.896



1.726



1.135



流速越大，时
频图上单位时
间内的亮斑个
数越多，且音
形由分离过渡
到连续

小结



上海科技大学
ShanghaiTech University

- 1.介绍了实验方法、装置和相关变量的控制：管径，流速，温度，容器等；
- 2.通过预实验确定了谐振腔的作用；
- 3.定性研究了对气泡串声音的FFT图像，并给出了温度、边界、管径、流速的影响

第二部分

理论分析

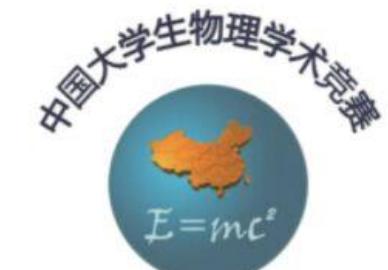
1

26



上海科技大学
ShanghaiTech University

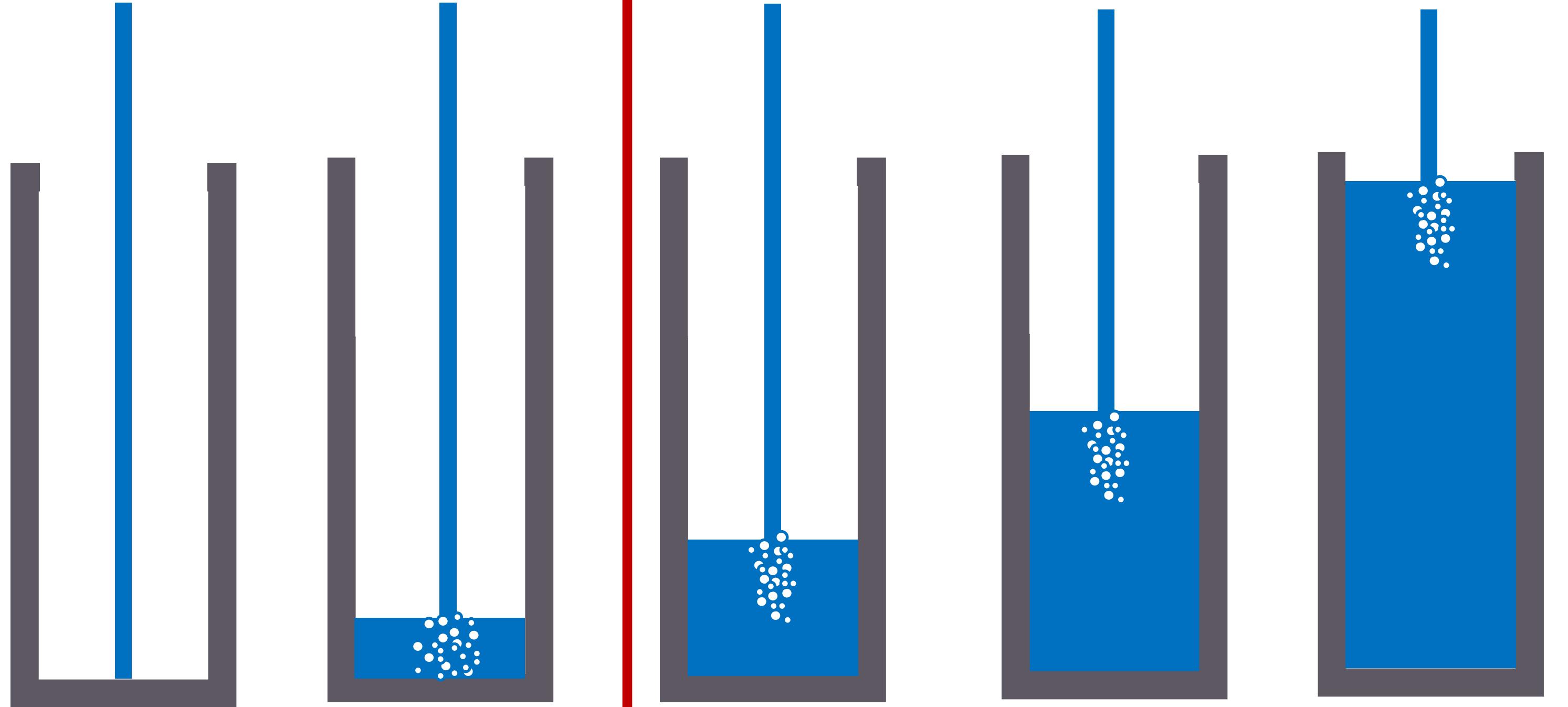
气泡串



CUPT



上海科技大学
ShanghaiTech University



理论前提



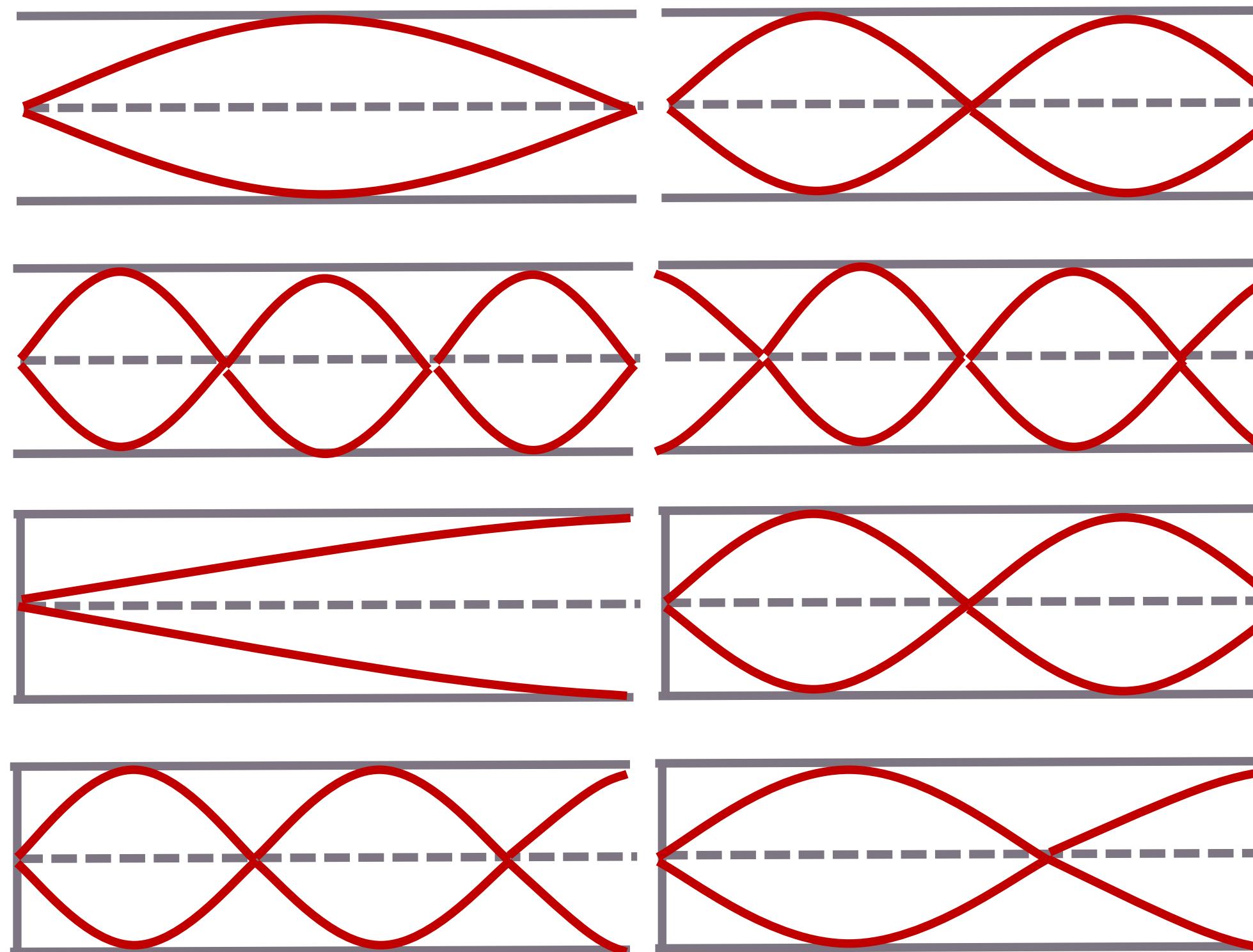
上海科技大学
ShanghaiTech University

- 1.不考虑容器中没有水或气泡串撞击瓶底的情况
- 2.谐振腔边界几何性质足够理想，刚性足够大，
长度均匀
- 3.单个气泡不同发声机制理解气泡串声音特点

谐振腔——圆柱



上海科技大学
ShanghaiTech University



$$f = \frac{n \nu}{2 L} \quad f = \frac{n \nu}{2(L+0.8d)}, n \in N^*$$

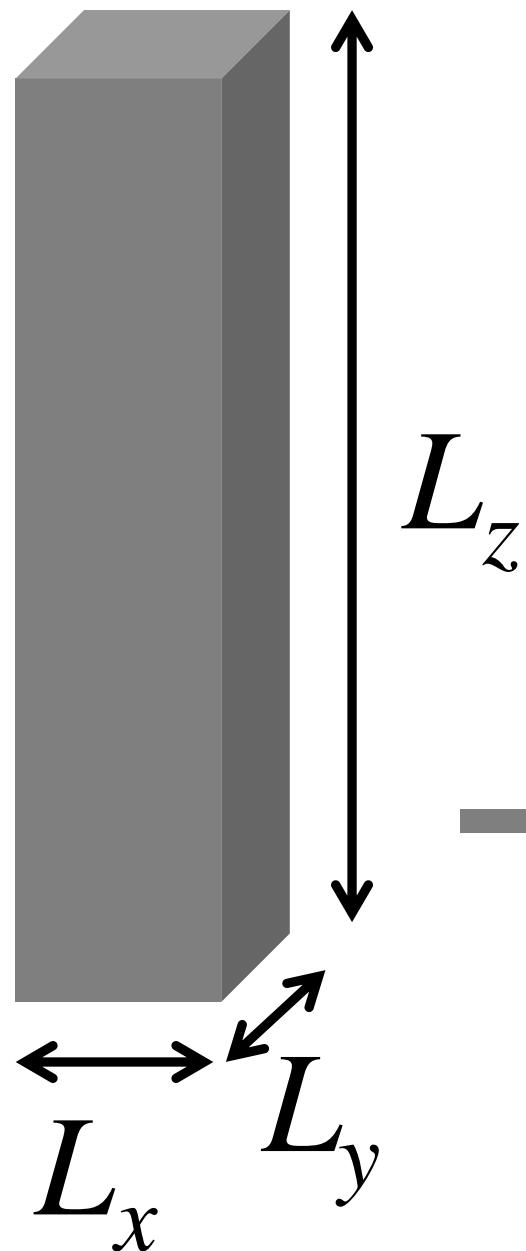
$$f = \frac{n \nu}{4 L} \quad f = \frac{n \nu}{4(L+0.4d)}, n \in N^*$$

谐振腔——其他



上海科技大学
ShanghaiTech University

长方形：



封闭:
$$f = \frac{\nu}{2} \sqrt{\left(\frac{l}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{m}{L_y}\right)^2 + \left(\frac{n}{L_z}\right)^2}, l, n, m \in N^*$$

一端开口:
$$f = \frac{\nu}{4} \sqrt{\left(\frac{l}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{m}{L_y}\right)^2 + \left(\frac{n}{L_z}\right)^2}, l, n, m \in N^*$$

谐振腔——填充过程



上海科技大学
ShanghaiTech University

管径: d 流速: v 声速: v_c 温度: T

容器体积: V 容器面积: S 时间: t

$$v_c = 331.45 + 0.61(T - 273)$$

$$L(t) = \frac{4V - \pi d^2 v \rho t}{4S}$$

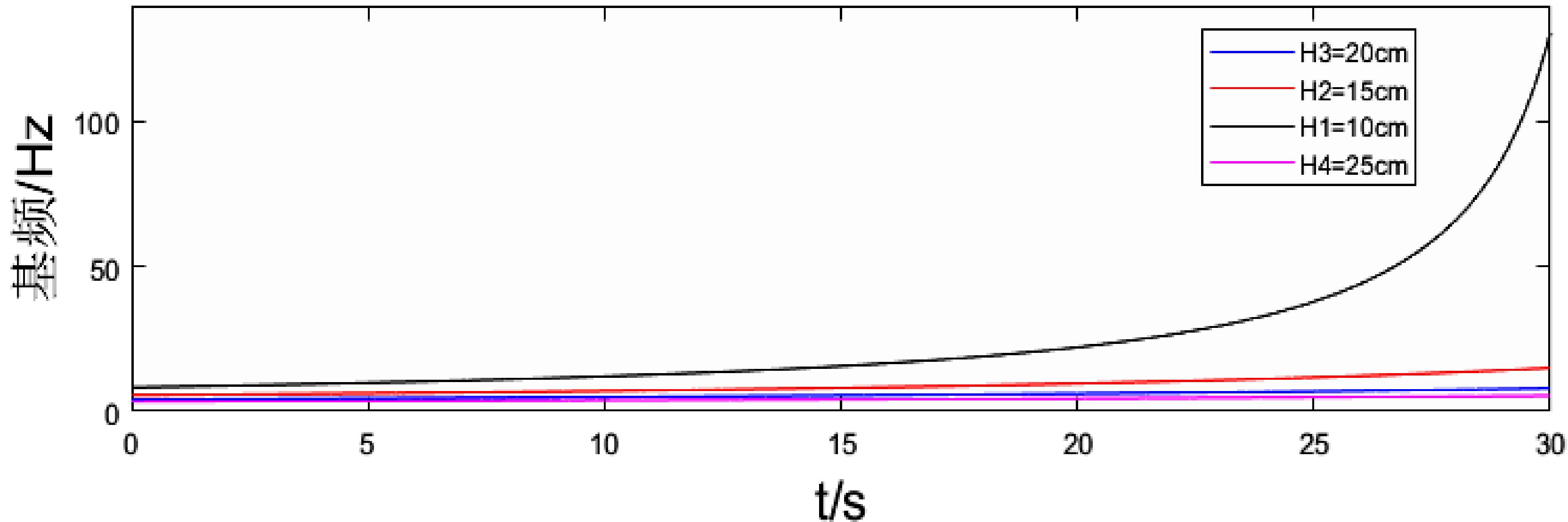
$$f(t) = \frac{n v_c}{4(L(t) + 0.4d)} = n S \frac{331.45 + 0.61(T - 273)}{4V - \pi d^2 v \rho t + 1.6dS}$$

谐振腔——填充过程



上海科技大学
ShanghaiTech University

不同深度圆柱容器填充时谐振频率变化

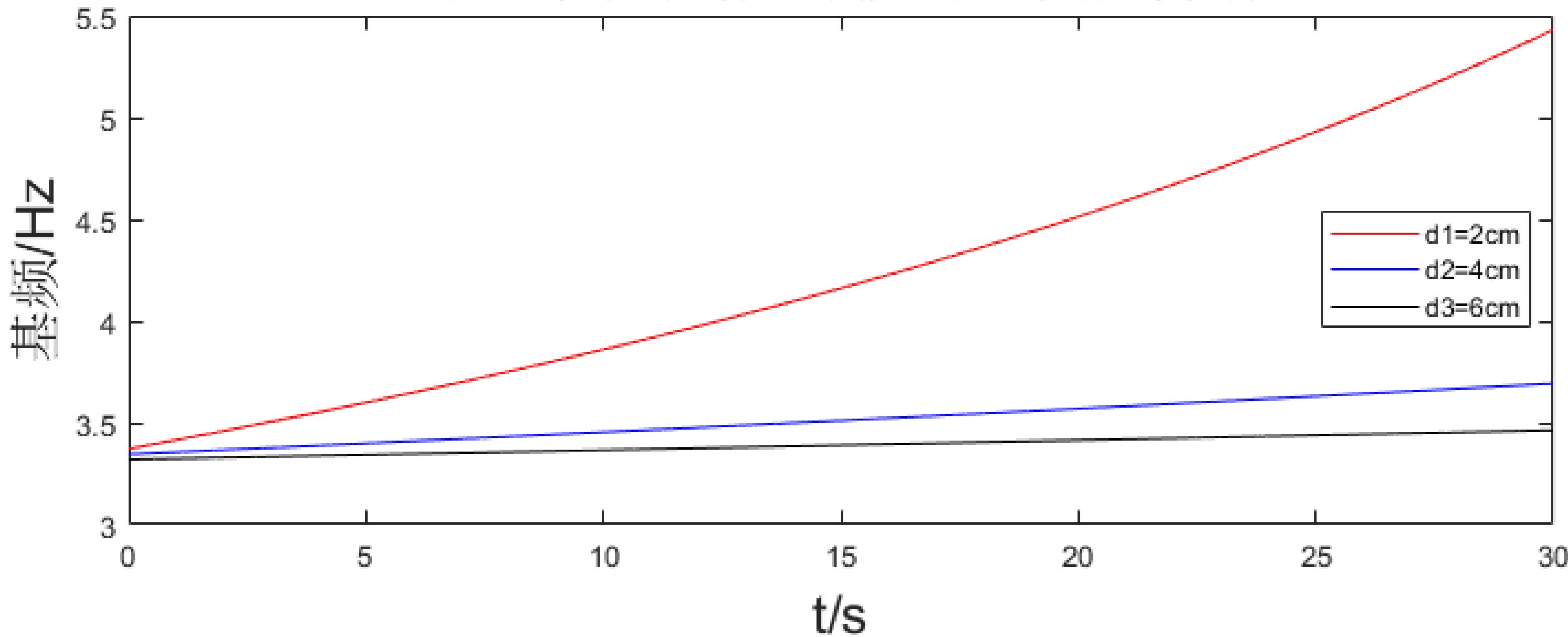


谐振腔——填充过程



上海科技大学
ShanghaiTech University

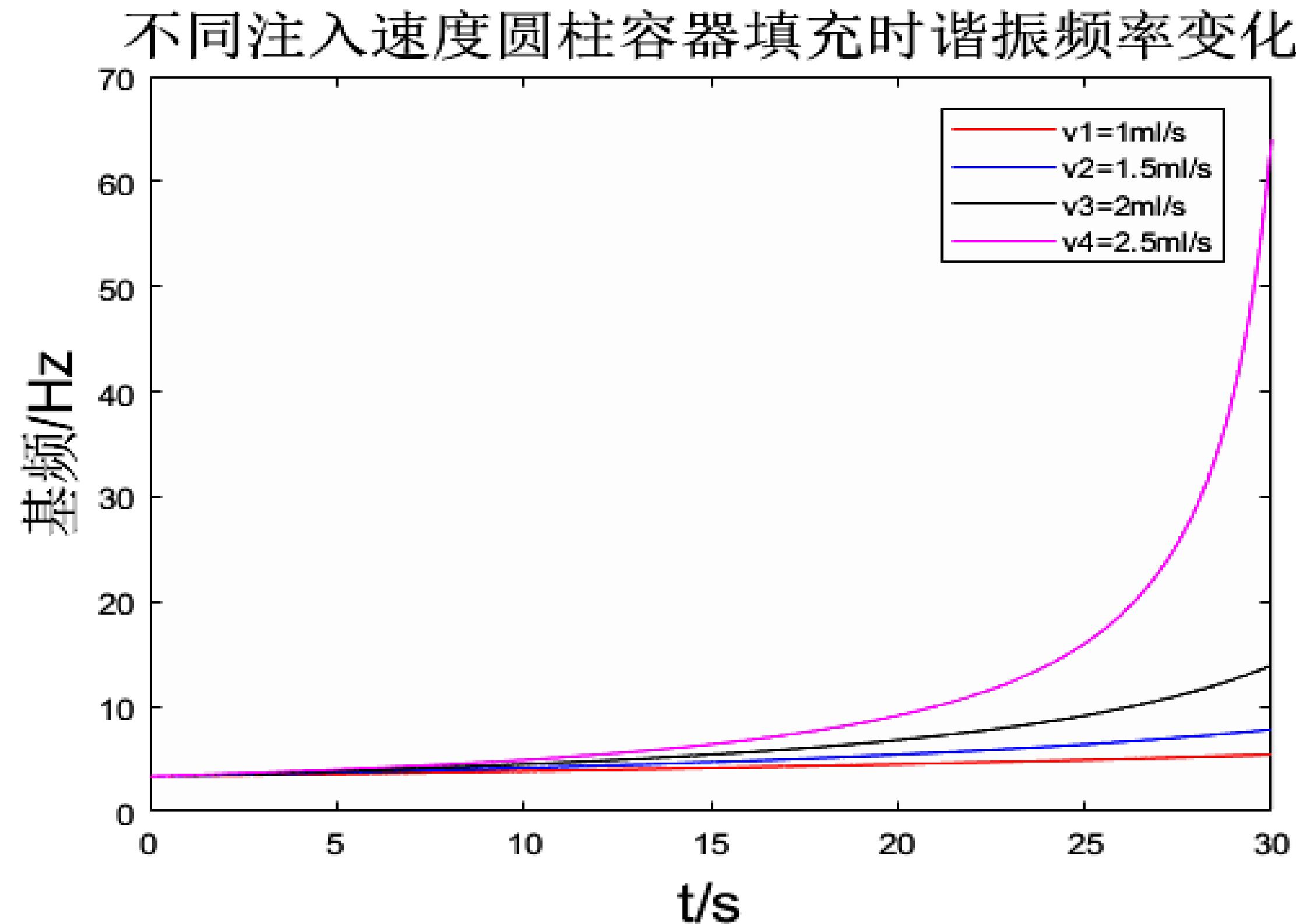
不同直径圆柱容器填充时谐振频率变化



谐振腔——填充过程



上海科技大学
ShanghaiTech University

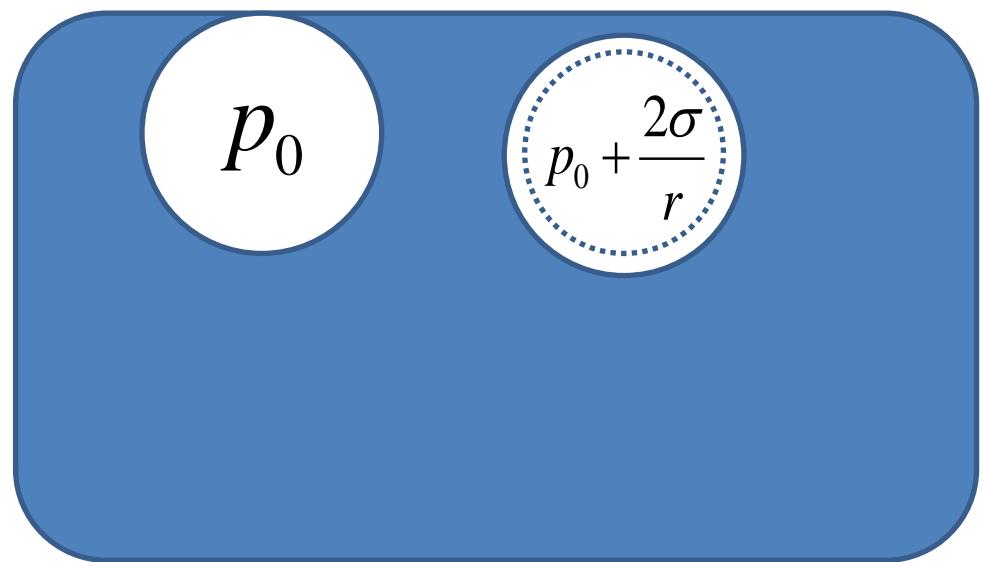


发声原因

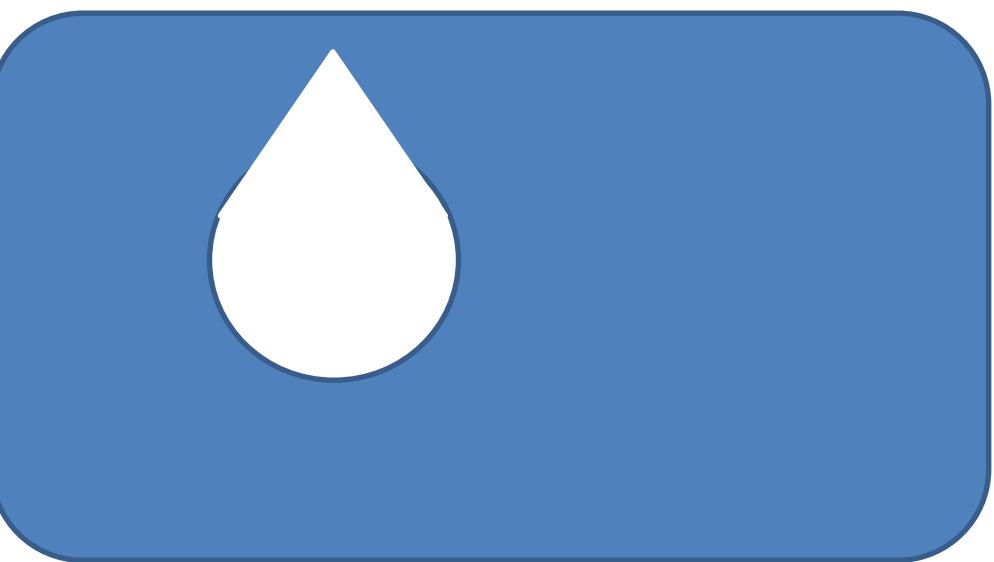


上海科技大学
ShanghaiTech University

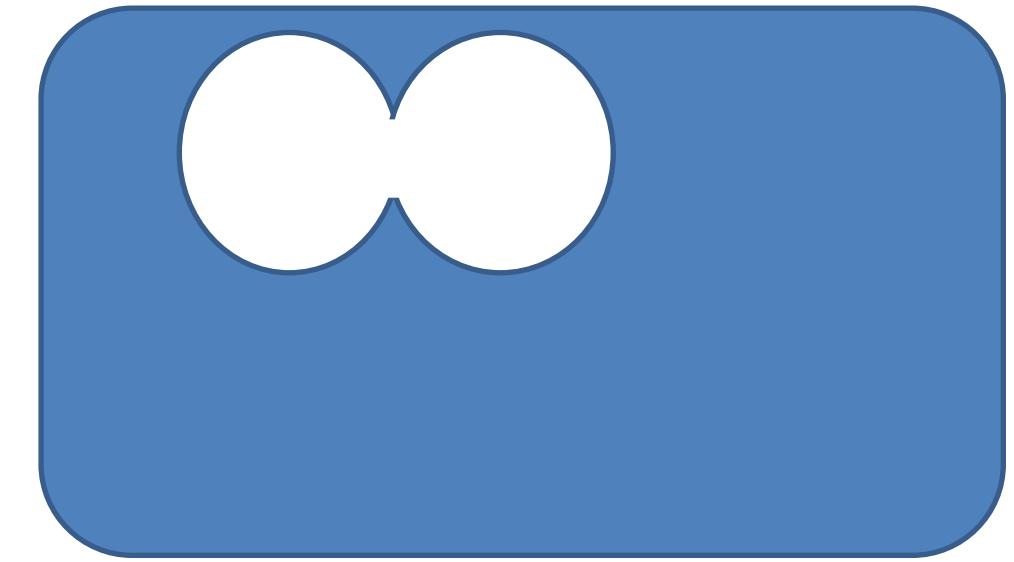
1. 闭口瞬间压力差



2. 闭口时形状不规则



3. 气泡的合并、分裂。



4. 气泡滴入



5. 气泡破裂

气泡振动

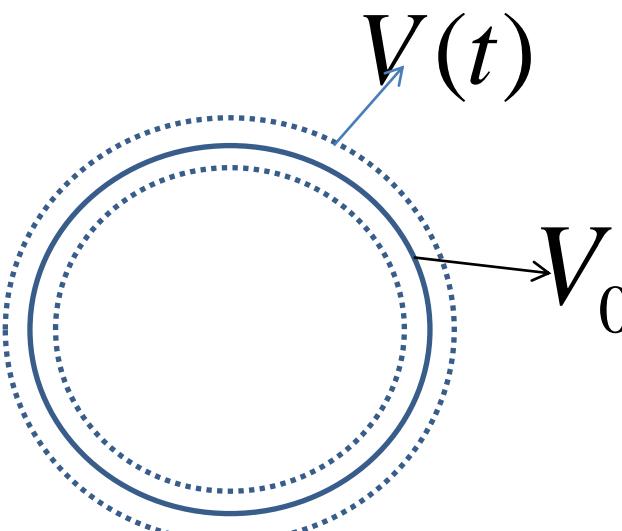


上海科技大学
ShanghaiTech University

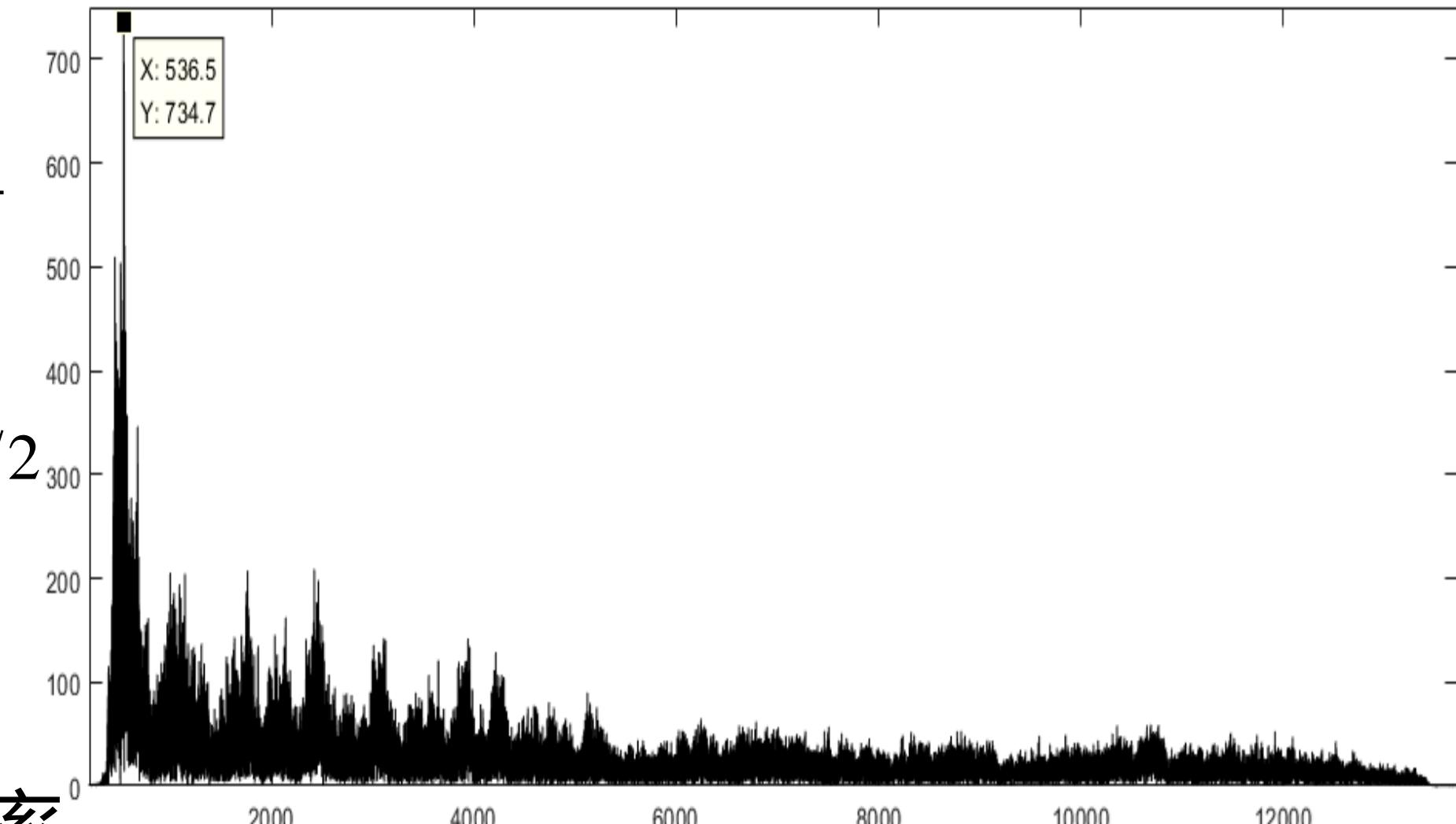
$$m\ddot{v} + \alpha\dot{v} + \kappa v = P_{(t)} \quad v = V_{(t)} - V_0$$

$$\kappa = -\frac{dp}{dv}, \quad P_0 V_0^\gamma = P_{(t)} V_{(t)}^\gamma \quad \kappa = \frac{\gamma P_0}{V_0}$$

$$\frac{1}{2} m \dot{v}^2 = W_f \quad \nu = \frac{1}{2\pi a} \left(\frac{2\kappa P_0}{\rho} \right)^{1/2}$$



半径为5mm时，频率
为532.6Hz



第三部分

实验验证

1

37



上海科技大学
ShanghaiTech University

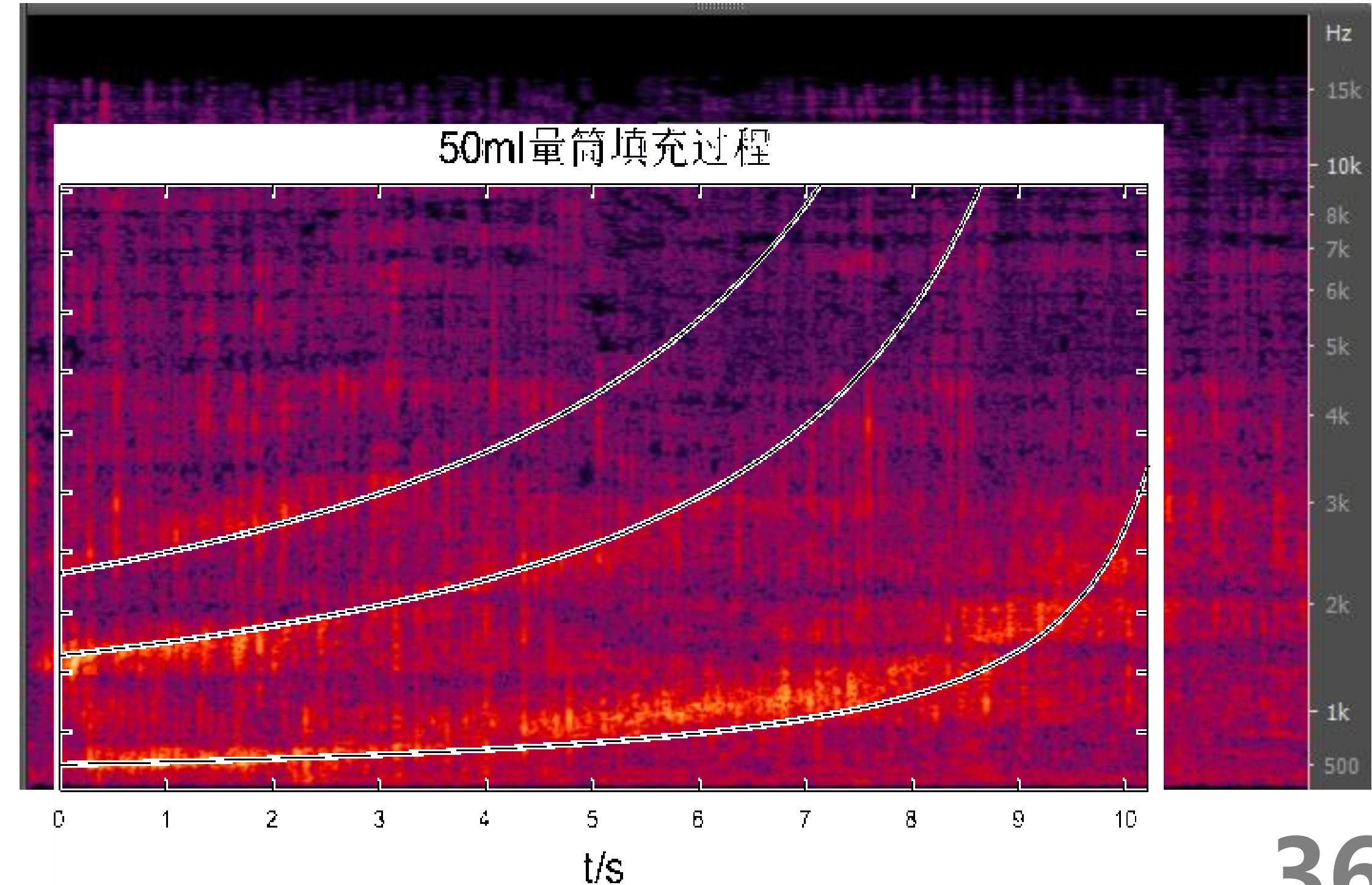
不同容器同流速



上海科技大学
ShanghaiTech University

容器种类	高度 (cm)	直径 (cm)
量筒50ml	18.20	2.200

$$v = 6.50 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$$



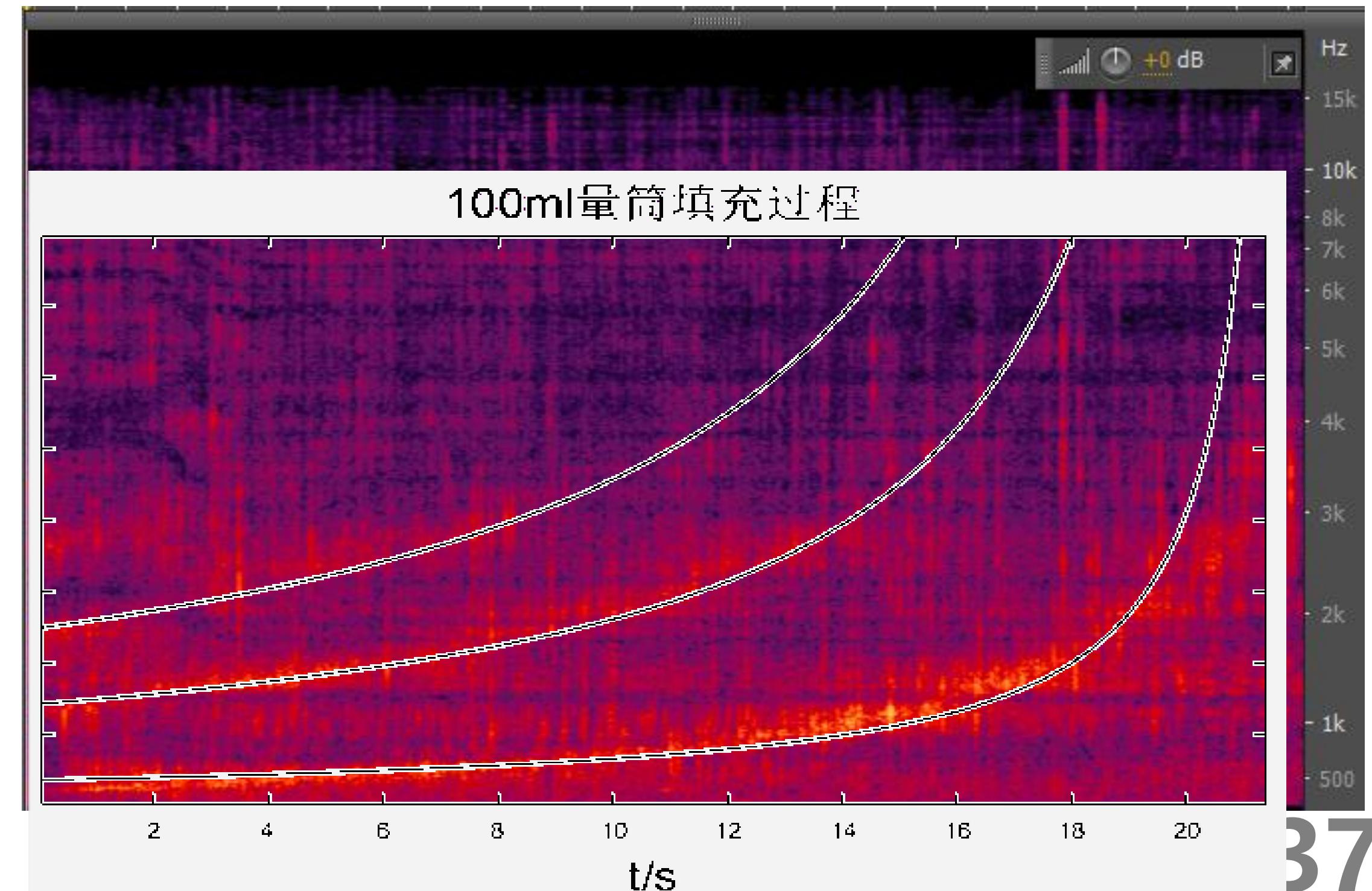
不同容器同流速



上海科技大学
ShanghaiTech University

容器种类	高度 (cm)	直径 (cm)
量筒100ml	23.40	2.720

$$v = 6.50 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$$



不同容器同流变

250ml量筒填充过程

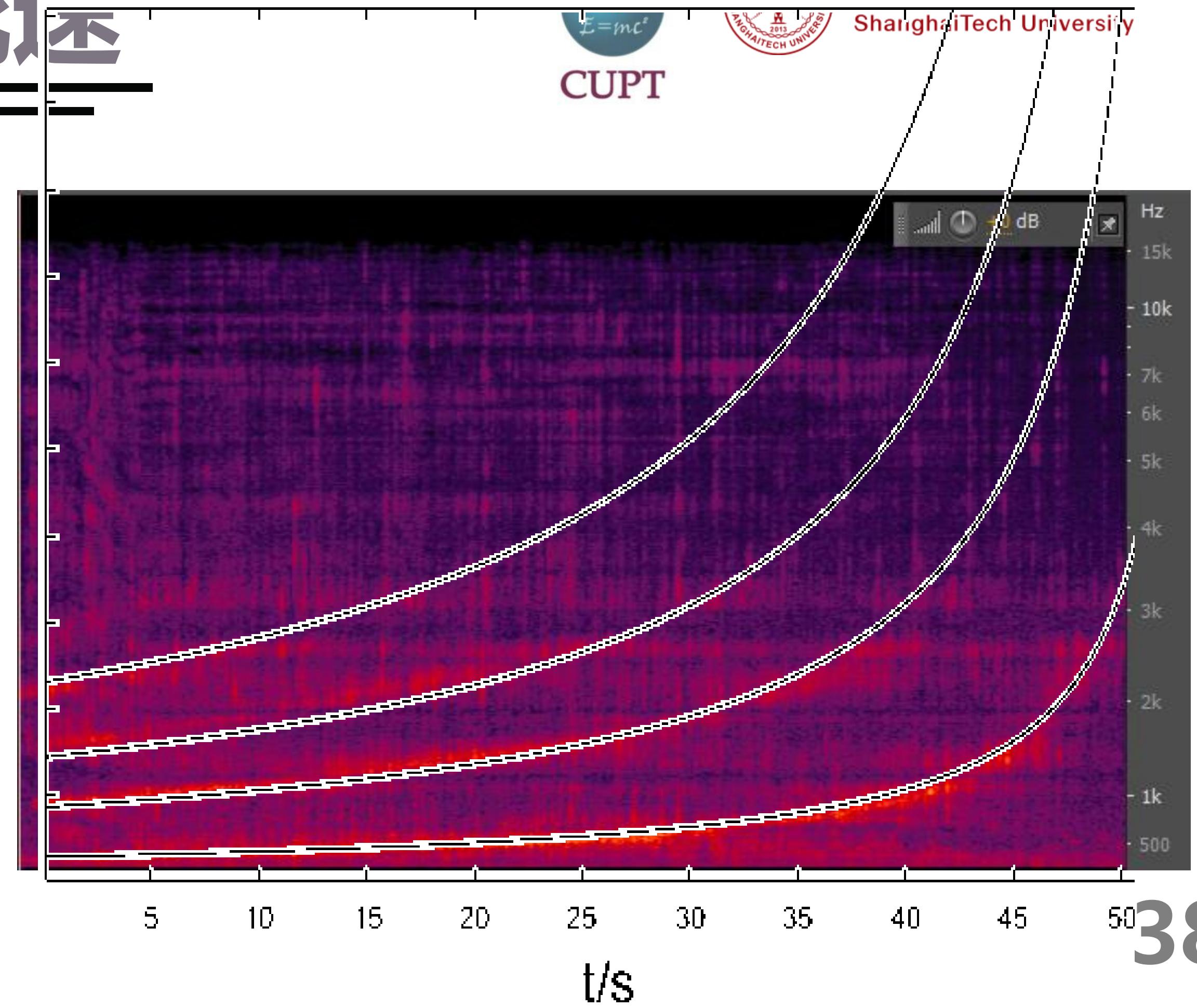


ShanghaiTech University

CUPT

容器种类	高度 (cm)	直径 (cm)
量筒250ml	29.00	3.880

$$v = 6.50 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$$



38

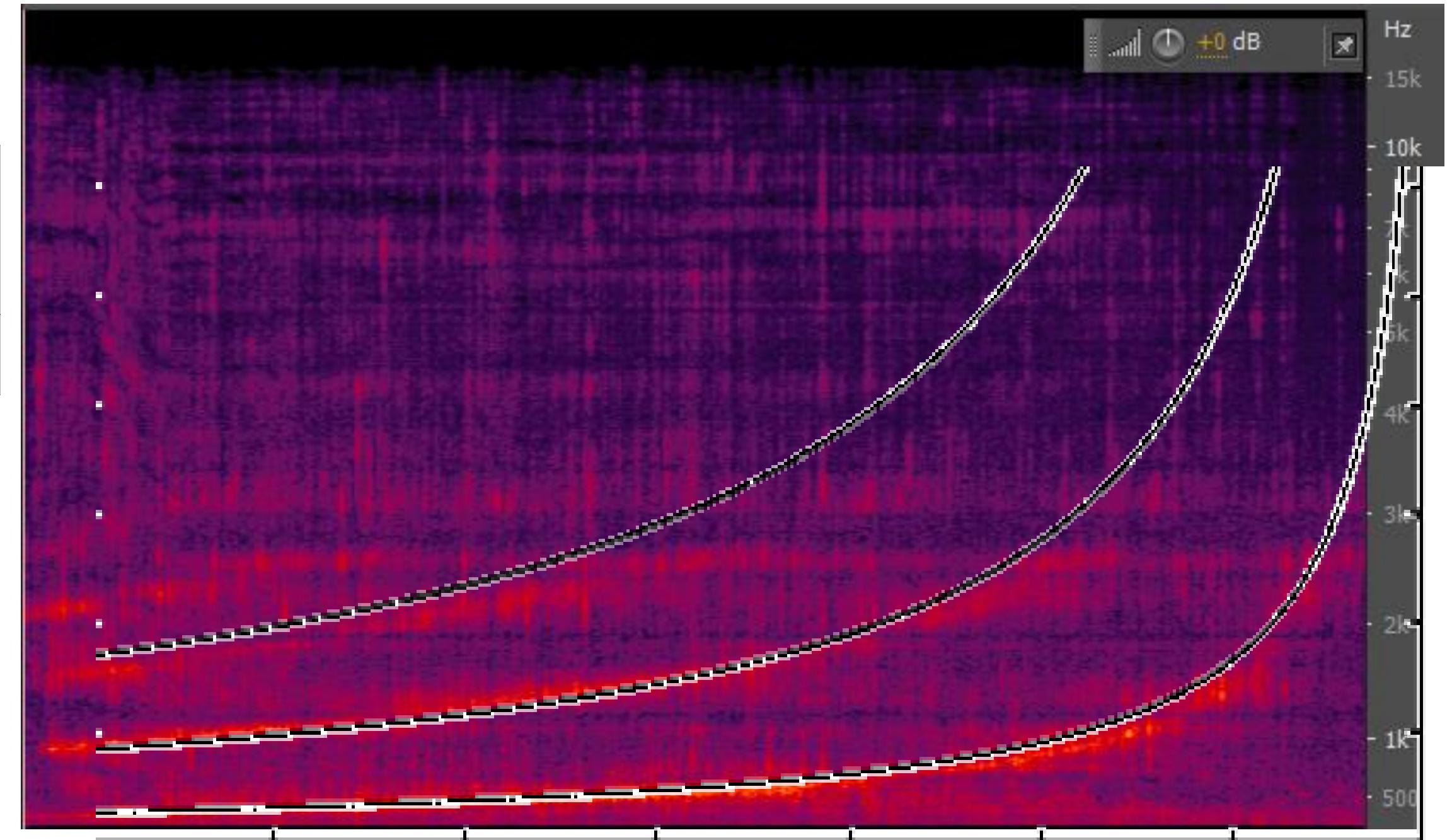
不同流速同容器



上海科技大学
ShanghaiTech University

容器种类	高度 (cm)	直径 (cm)
量筒250ml	29.00	3.880

$$v = 2.28 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$$



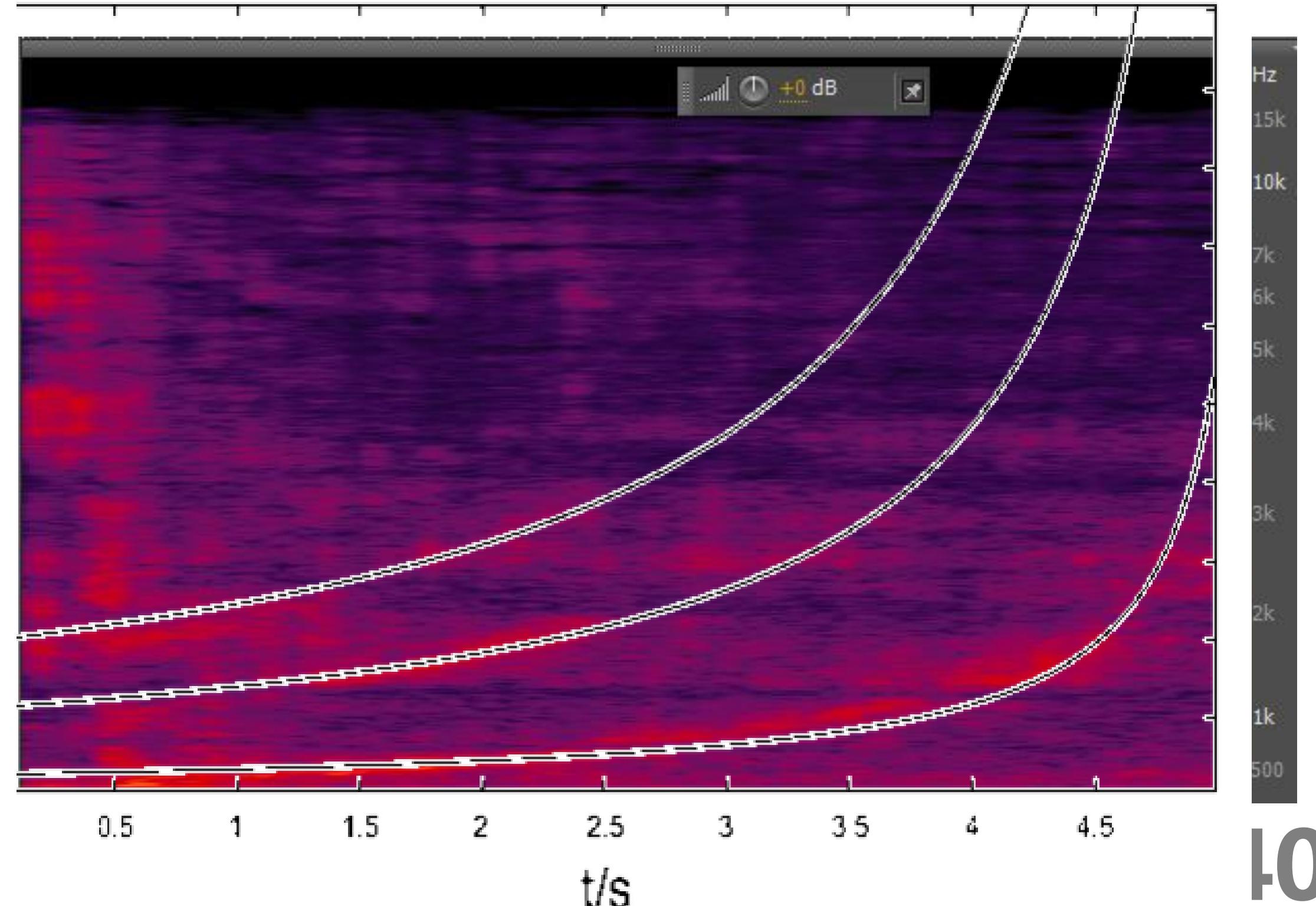
不同流速同容器



上海科技大学
ShanghaiTech University

容器种类	高度 (cm)	直径 (cm)
量筒250ml	29.00	3.880

$$v = 6.85 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$$



第四部分 讨论

1

43



上海科技大学
ShanghaiTech University

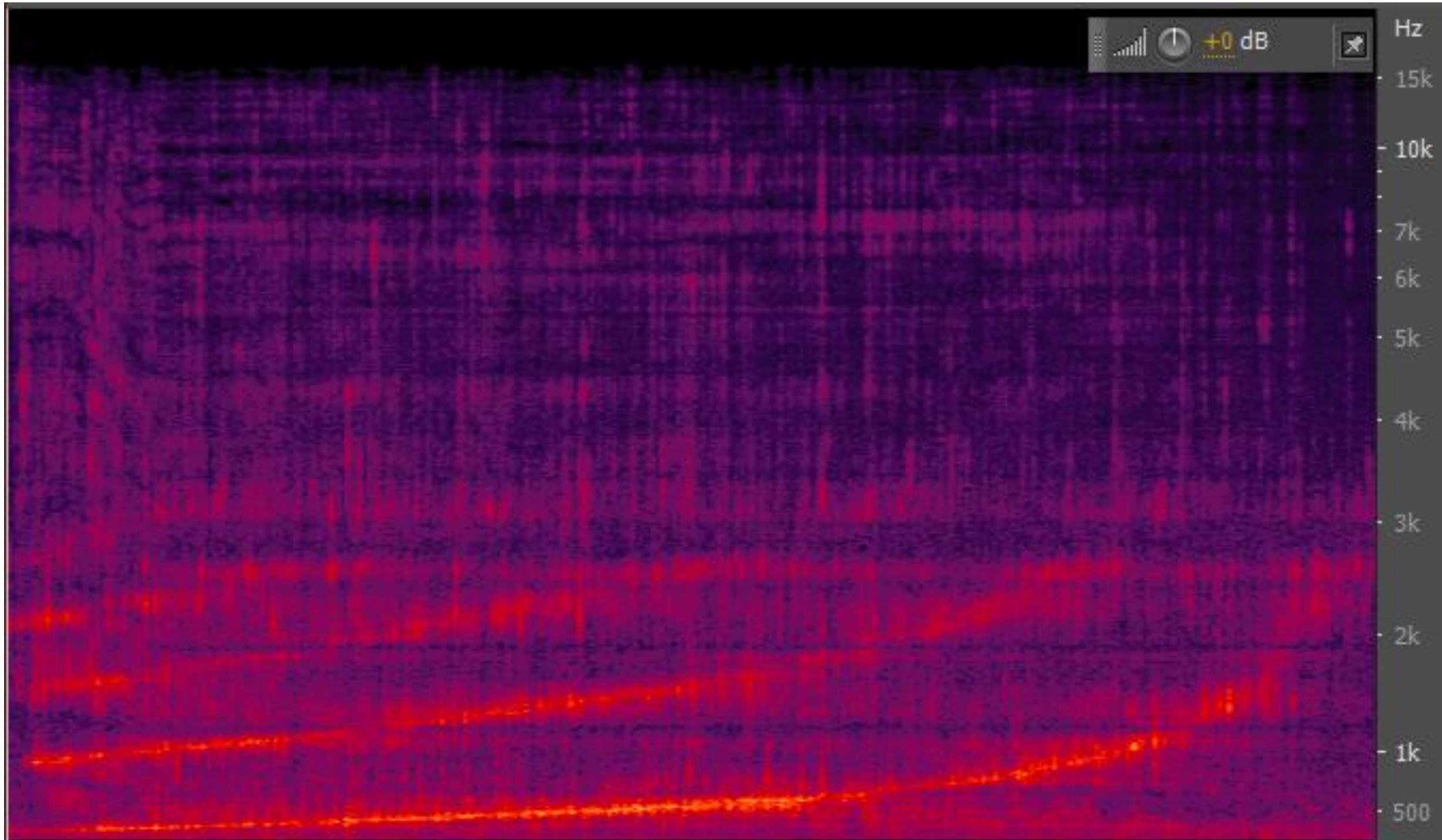
响度的衰减



CUPT



上海科技大学
ShanghaiTech University



水面晃动及气泡



上海科技大学
ShanghaiTech University

1. 流速较小时水面3-5cm左右的晃动，气泡数量较多，影响视线的形态；
2. 水流较小连续时无气泡串

参考文献



上海科技大学
ShanghaiTech University

- 1.I. Lupea. Considerations on the Helmholtz resonator simulation and experiment. Proc. Romanian Acad. A 13, 2, 118-124 (2012)
- 2.A. Rona. The acoustic resonance of rectangular and cylindrical cavities. J. Algorithms & Comput. Tech. 1, 3, 329-356 (2007)
- 3.G. J. Franz. Splashes as sources of sound in liquids. J. Acoust. Soc. Am. 31, 8, 1080-1096 (1959)
- 4.M. Minnaert. On musical air-bubbles and the sounds of running water. Phil. Mag. Ser. 7, 16, 104, 235-248 (1933)
- 5.K. W. Frizzell and R. E. A. Arndt. Noise generation of air bubbles in water: An experimental study of creation and splitting (US Dptm Navy, 1987)

谢谢



1

47

上海科技大学
ShanghaiTech University