

Election Round 2

Vacuum Bazooka

CUPT2017 Reporter.ZYX



西安交通大学
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY



物理试验班
P.H.E.C

Vacuum Bazooka

实验前准备
(寻找切入点)

第一次实验
(初步建立模型)

第二次实验
(修正模型)

拓展性实验
(寻找其它参量&验证模型通用性)

And.More

基本原理

小球被吸入管道后，依靠气压差加速。

当速度达到最大后（即到达三岔口的位置后），
小球凭借自己积累的动能，继续前进，飞出管道。

由于两侧管道不等长，且较短的一侧（出口侧）
被轻小物体堵住，所以小球可以在飞出后保留大部分动能。

其中，气压差是小球的能量来源，而管道的合理
设计则保证了小球在飞出后保有尽可能大的动能。



实验成功的必要条件

1、管道内壁与小球应该存在适当的空隙。

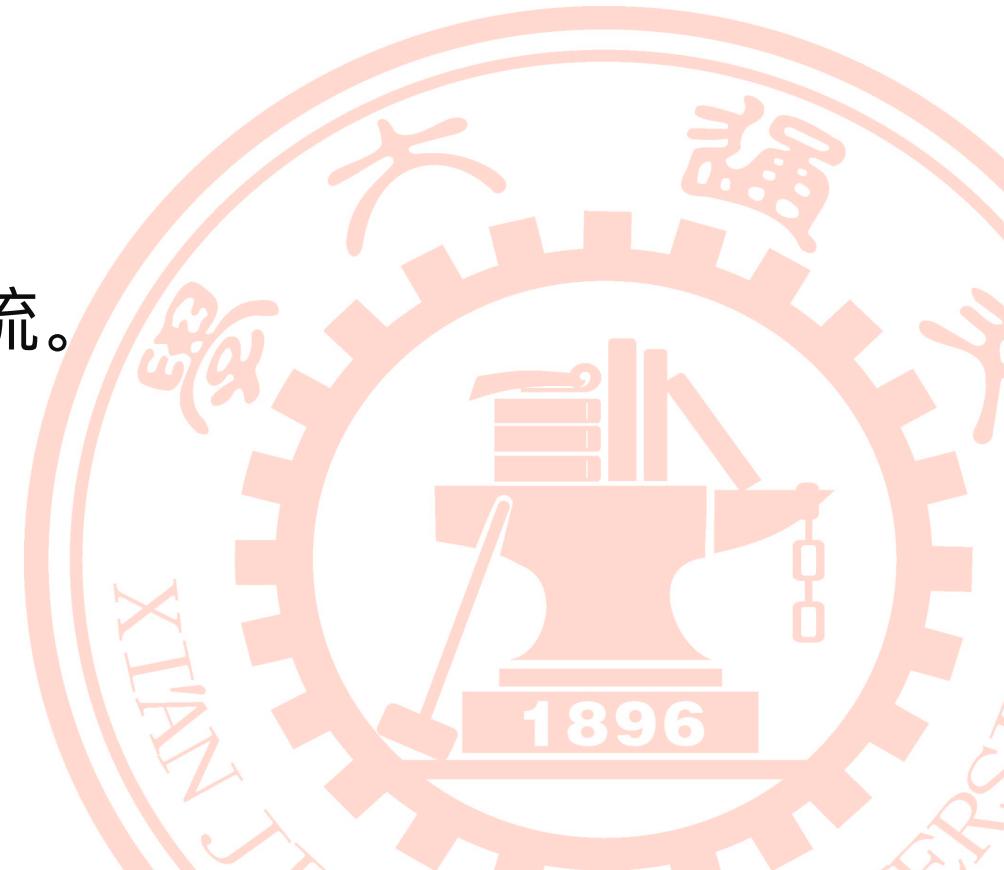
2、小球的质量不能太轻，也不能太重。

太轻则无法存储足够的动能；太重则难以充分加速。

3、管道出口侧必须有合适的轻小物体阻挡气流。

(否则加速效果大大降低)

4、选取合适动力源



初步思考

理论部分

管道内部各点在稳定状态下的气压分布情况

出入口气流状态（是否混沌）

快速变化的气压导致气体的热力学状态变化（不可忽略）

炮弹理论最大速度与声速的关系

球体与内管缝隙的最优值，以及缝隙内气流的流动状态。

粗糙表面与光滑表面在流体力学上的差异。

球体是否在气流中自旋。

实验部分

影响实验结果的变量：

吸力（即管内空气流速）

球体表面积与质量的比例

球体与管道内壁的空隙大小
(即管道内径与球直径之比)

球体表面粗糙程度

两侧管道的长度

需要屏蔽的干扰因素：

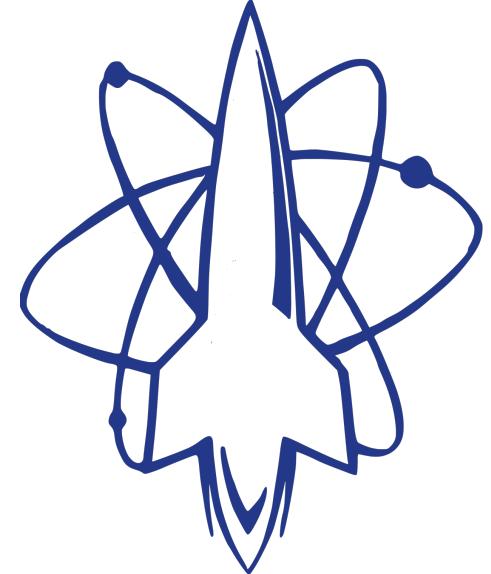
测量误差

外界气压变化

小球进入管口的初速度

第一次实验

理论准备
器材搭建
实验过程
数据处理



西安交通大学
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY



物理试验班
P.H.E.C

理论准备

首先，从理想情况入手：

不考虑紊流以及紊流导致的小球自旋

不考虑高速运动过程中管道内气体的热力学变化

不考虑小球与管道的空隙中的气流的影响

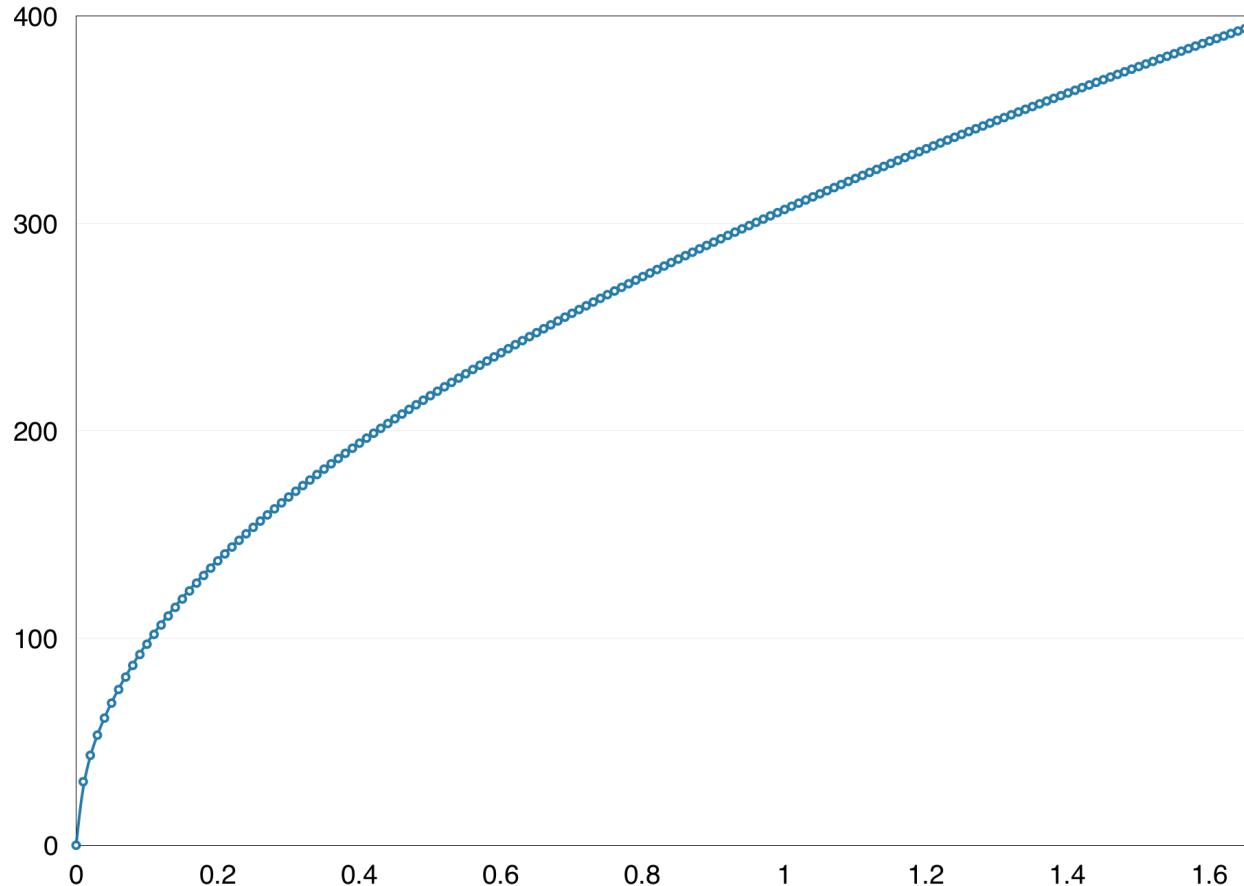
认为气压差传播的速度为声速（取340m/s）

认为管道每个截面内的气压平均分布

认为吸尘器（或其它动力源）提供的气压差恒定不变

可初步建立小球的运动模型

理论准备



最简模型：

认为小球两侧压力差恒定
则：

$$F = (P_2 - P_1)S$$

则：

$$v = \sqrt{\frac{2S \cdot (P_2 - P_1)}{x}}$$

代入乒乓球的数据：

$$D = 0.0004m$$

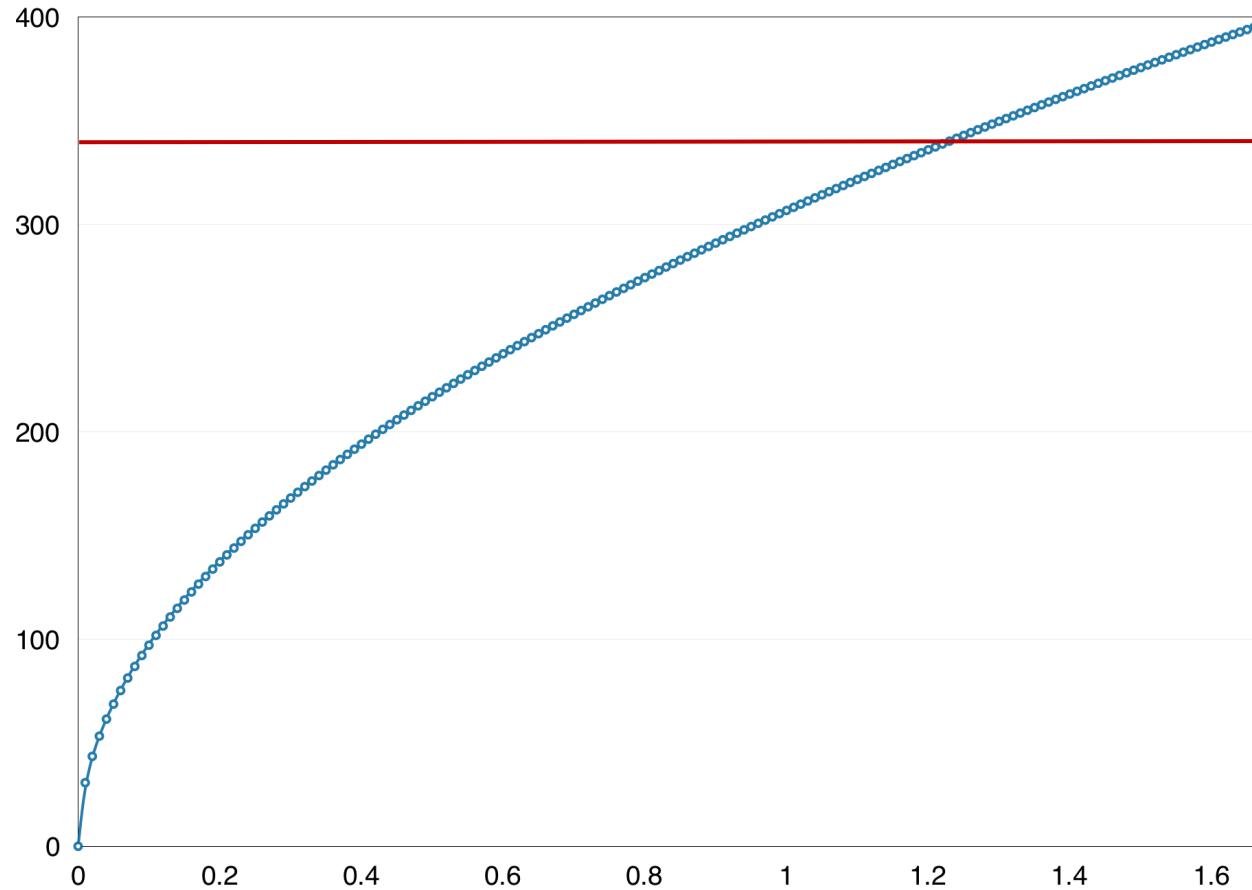
$$S = 0.001257m^2$$

$$m = 0.0027kg$$

即可作出速率-位移曲线

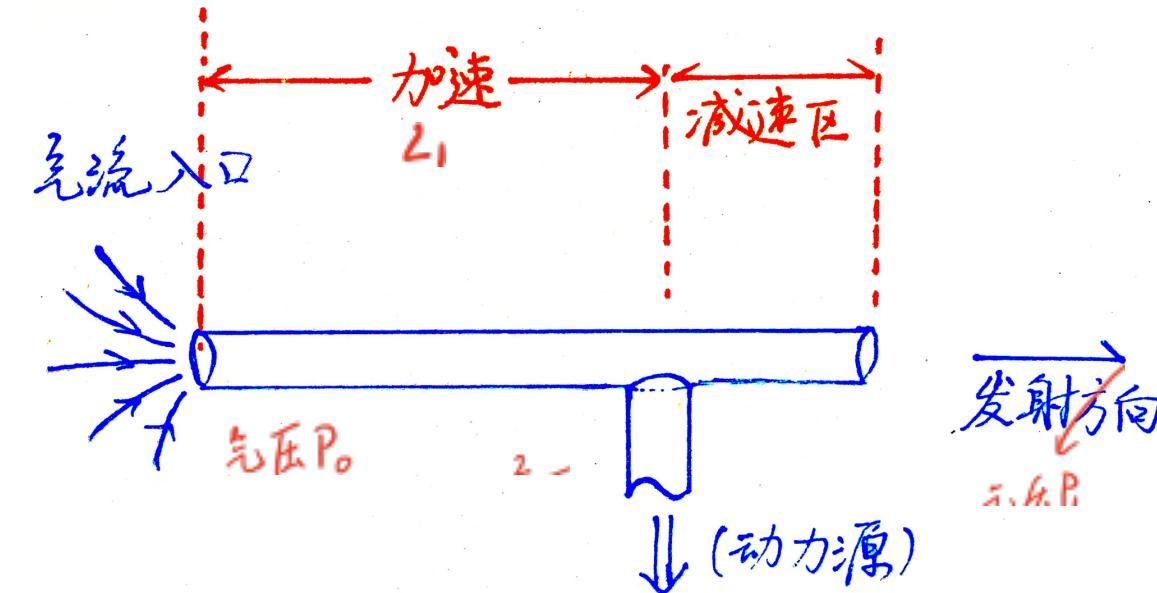
理论准备

第一次实验 ➤



340m/s
缺陷
这套模型预测的小球的速度可以无限增大，甚至可以超越声速。

理论准备



更改考虑方向：

当小球进入管道后，气压不但推动了小球，也推动了小球到管口这一段空气柱——它们共同加速。

写出运动状态方程：

$$(P_2 - P_1)S = \frac{d[(m + m')v]}{dt}$$

其中， m' 是空气柱质量关于x的函数：

$$m' = \rho Sx$$

据此，可以求得微分方程的解函数

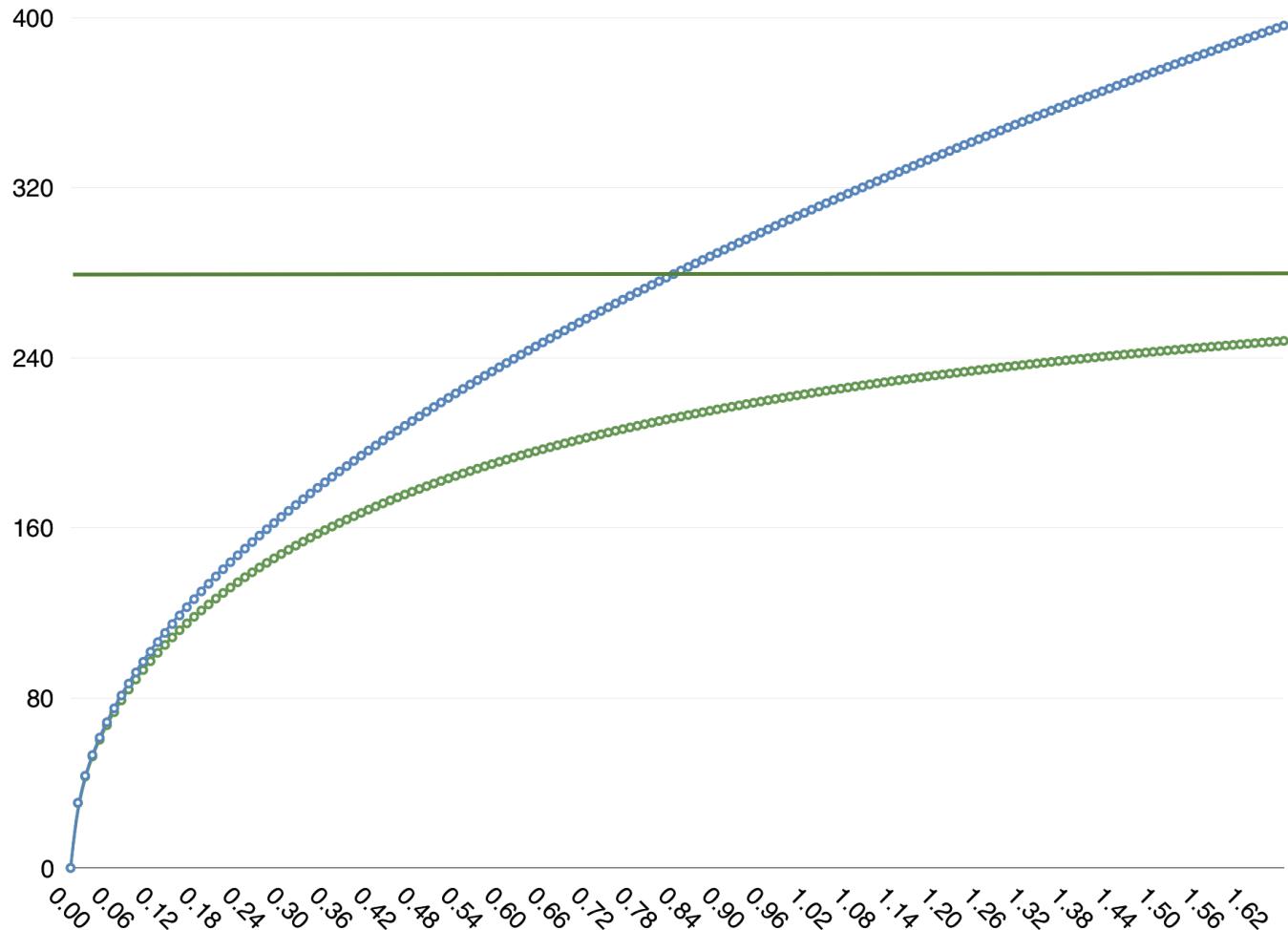
由此得出的解函数：

$$V = \sqrt{(P_2 - P_1)S \cdot \frac{(\rho Sx + 2m) \cdot x}{(\rho Sx + m)^2}}$$

理论准备

第一次实验

$$V = \sqrt{(P_2 - P_1)S \cdot \frac{(\rho Sx + 2m) \cdot x}{(\rho Sx + m)^2}}$$



理论极限速率

289.5m/s

参考常数：

$\rho^{293K, 101KPa} = 1.205kg/m^3$

$S^{typical\ PPB} = 12.566cm^2$

$m^{typical\ PPB} = 0.0027kg$

第一次实验

器材搭建 & 实验过程

器材搭建

主要器材

有机玻璃管和木板

碳纤维薄片（用于堵住出口）

大功率隧道电机

乒乓球

以及其他必要部件

测量方法

摄像机逐帧分析法：

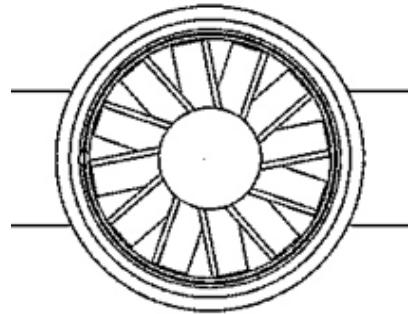
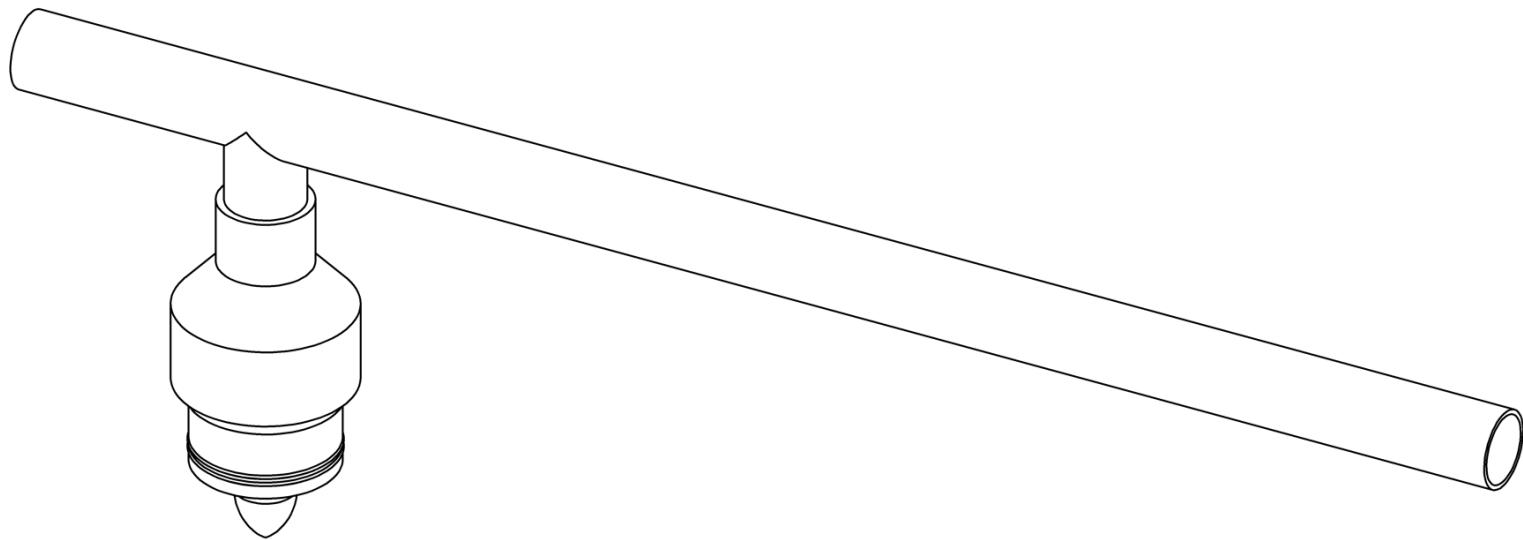
摄像机录像的帧率是固定的，它本身就是比较优秀的计时工具。本次实验采用帧率为120fps的摄像系统，可以对小球的状态进行连续追踪。

同时，在透明管道上标注刻度，方便通过摄制的画面直接读取数据。

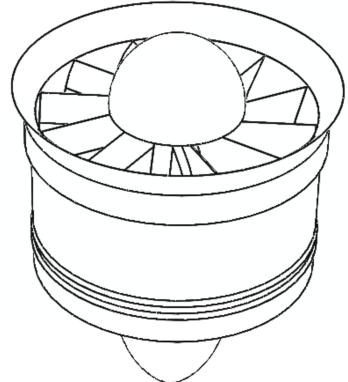
另外，采用两束不同颜色的烟雾，对气流状态进行动态采集。

第一次实验▶

器材搭建



涵道电机-动力源



器材搭建



选用涵道电机的原因

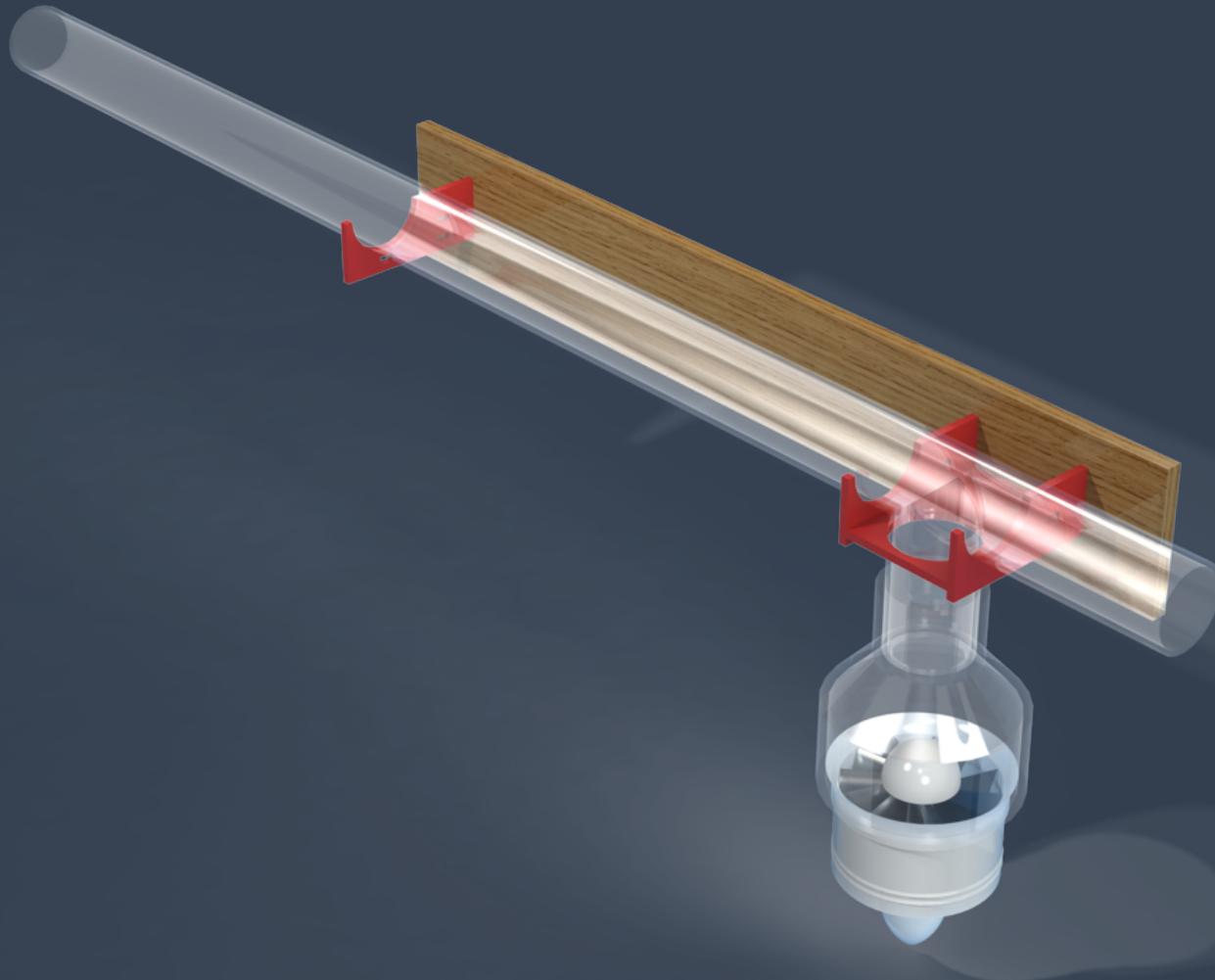
功率很大，可以制造近似真空的环境

吸力可控，可以方便地调节气压差

与吸尘器的实验原理相同

第一次实验▶

器材搭建



第一次实验▶

器材搭建



第一次实验 ➤

实验过程

多次实验 & 屏蔽干扰



$x=0$

$t=0$



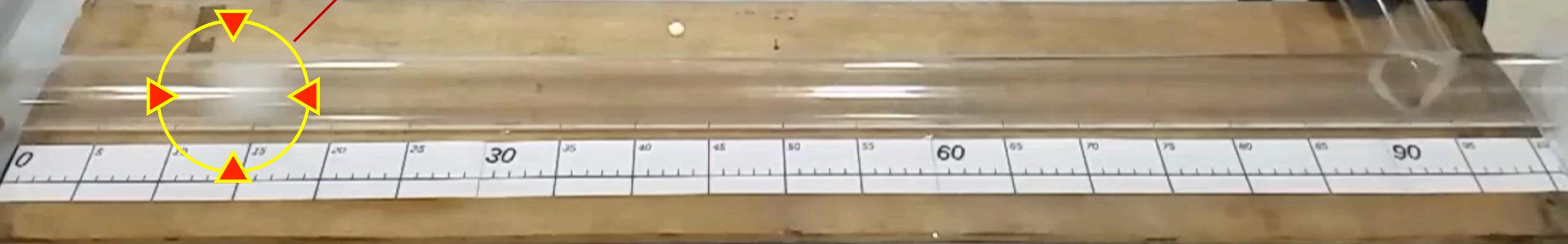
$X=3$
 $t=0.03$



$X=5$

$t=0.07$

$X=15$
 $t=0.13$

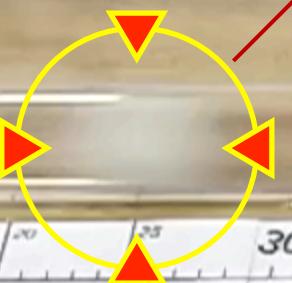


$X=20$

$t=0.17$



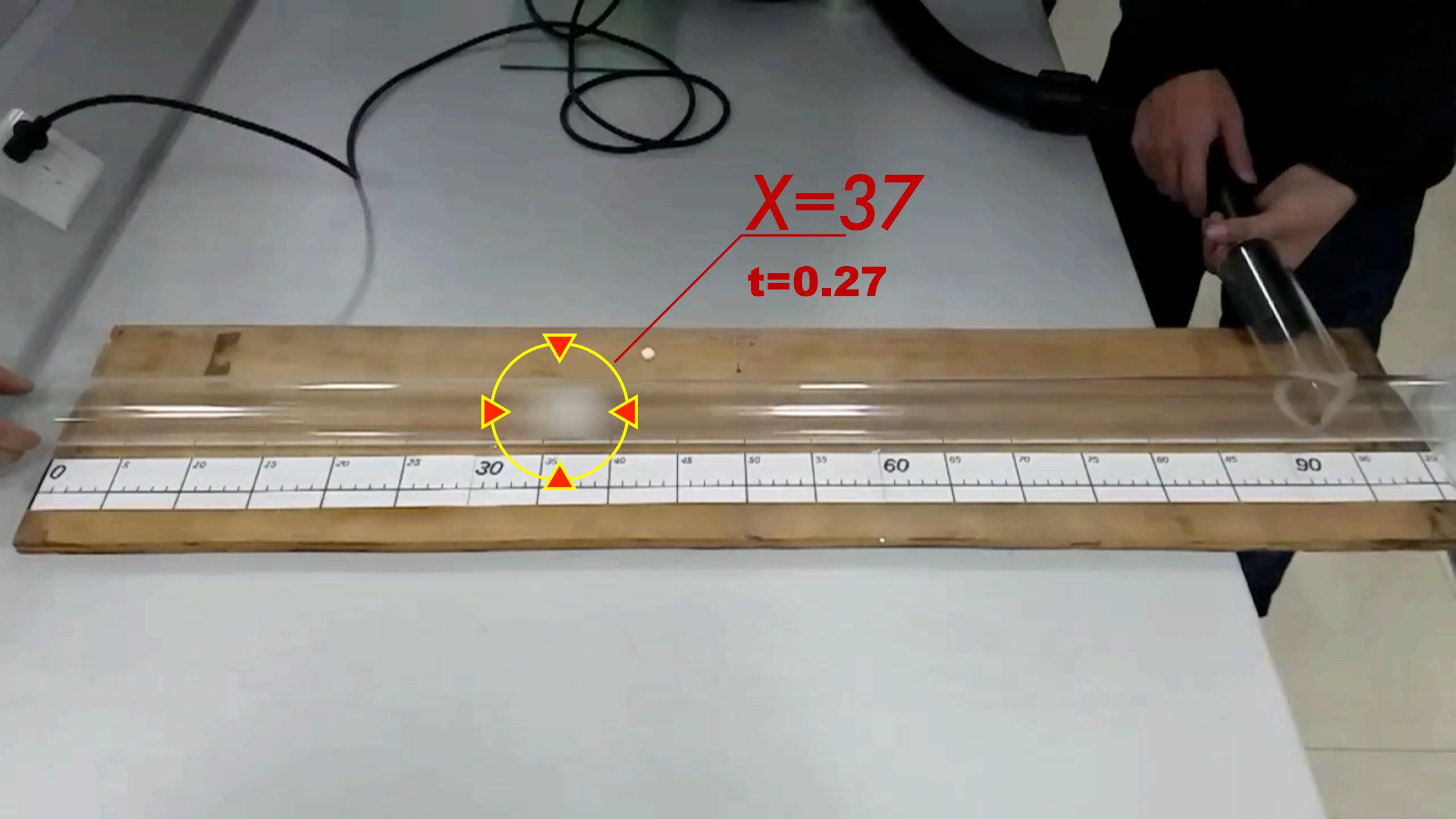
$X=25$
 $t=0.2$



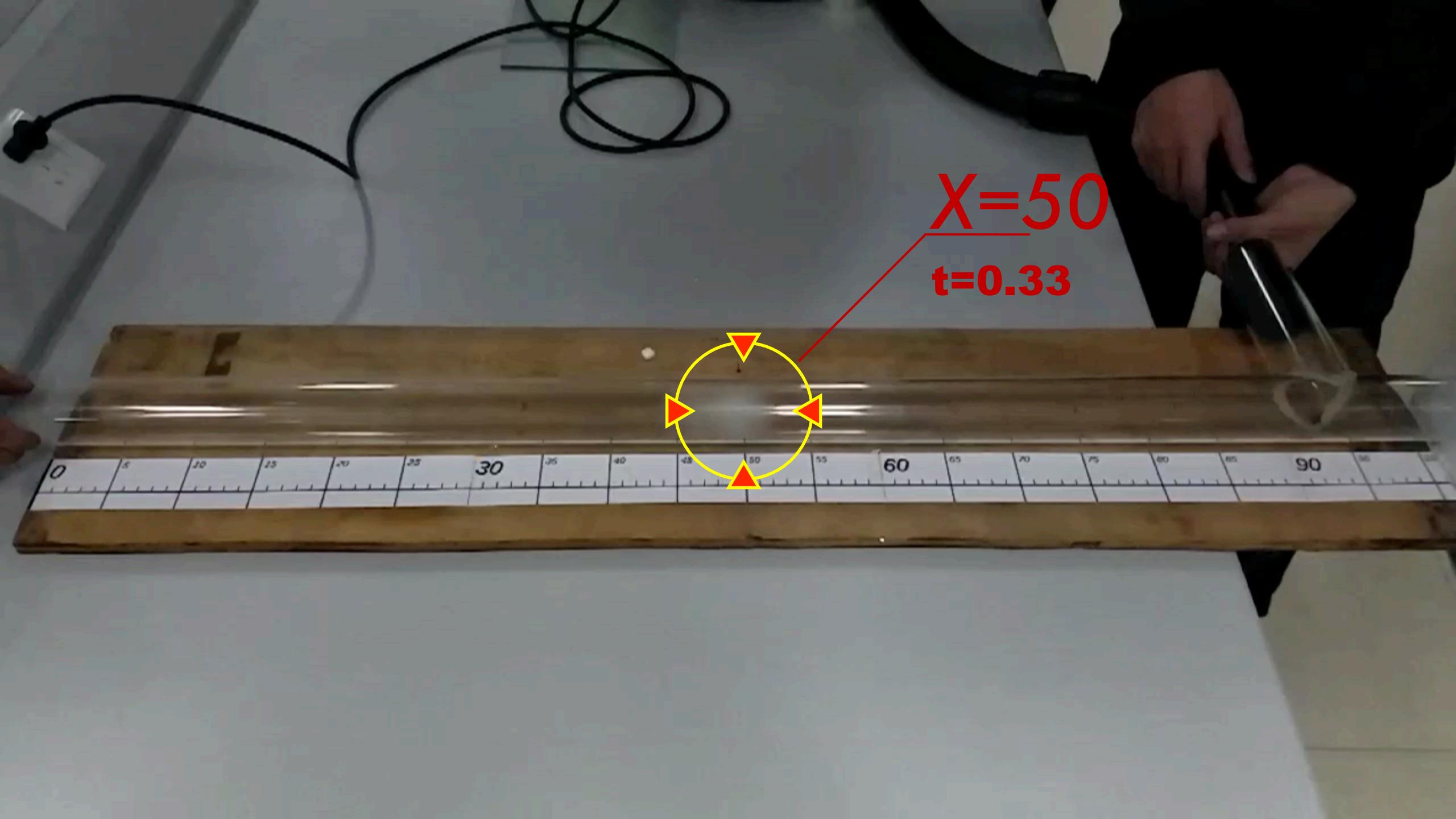
0 5 10 15 20 25 30 35 40 45 50 55 60 65 70 75 80 85 90 95 100

$X=29$
 $t=0.23$





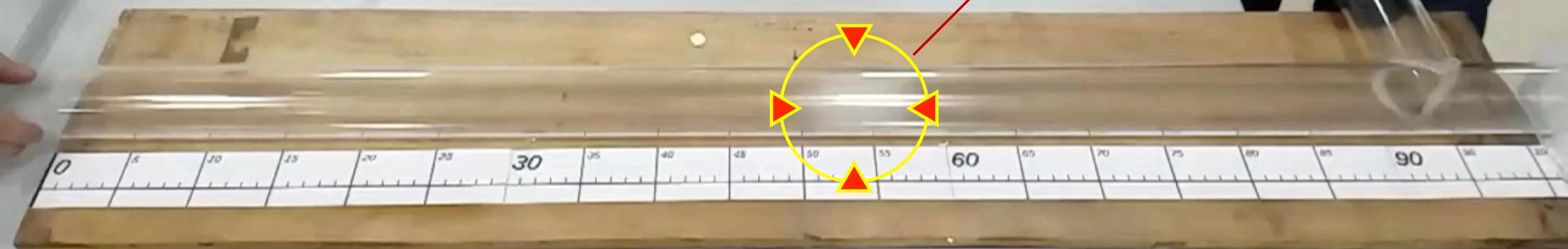
$X=37$
 $t=0.27$

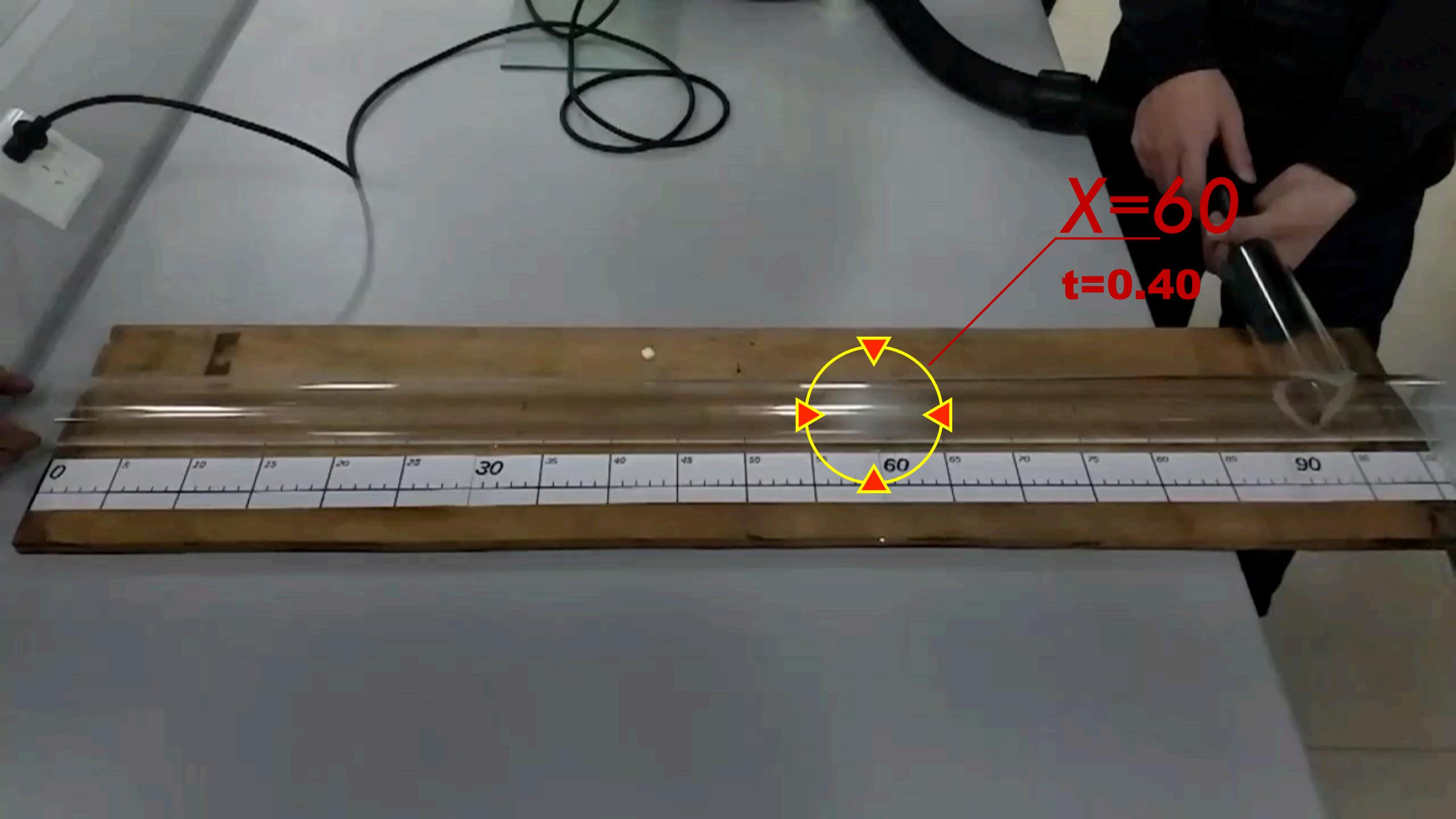


$X=50$
 $t=0.33$

0 5 10 15 20 25 30 35 40 45 50 55 60 65 70 75 80 85 90

$X=53.5$
 $t=0.37$

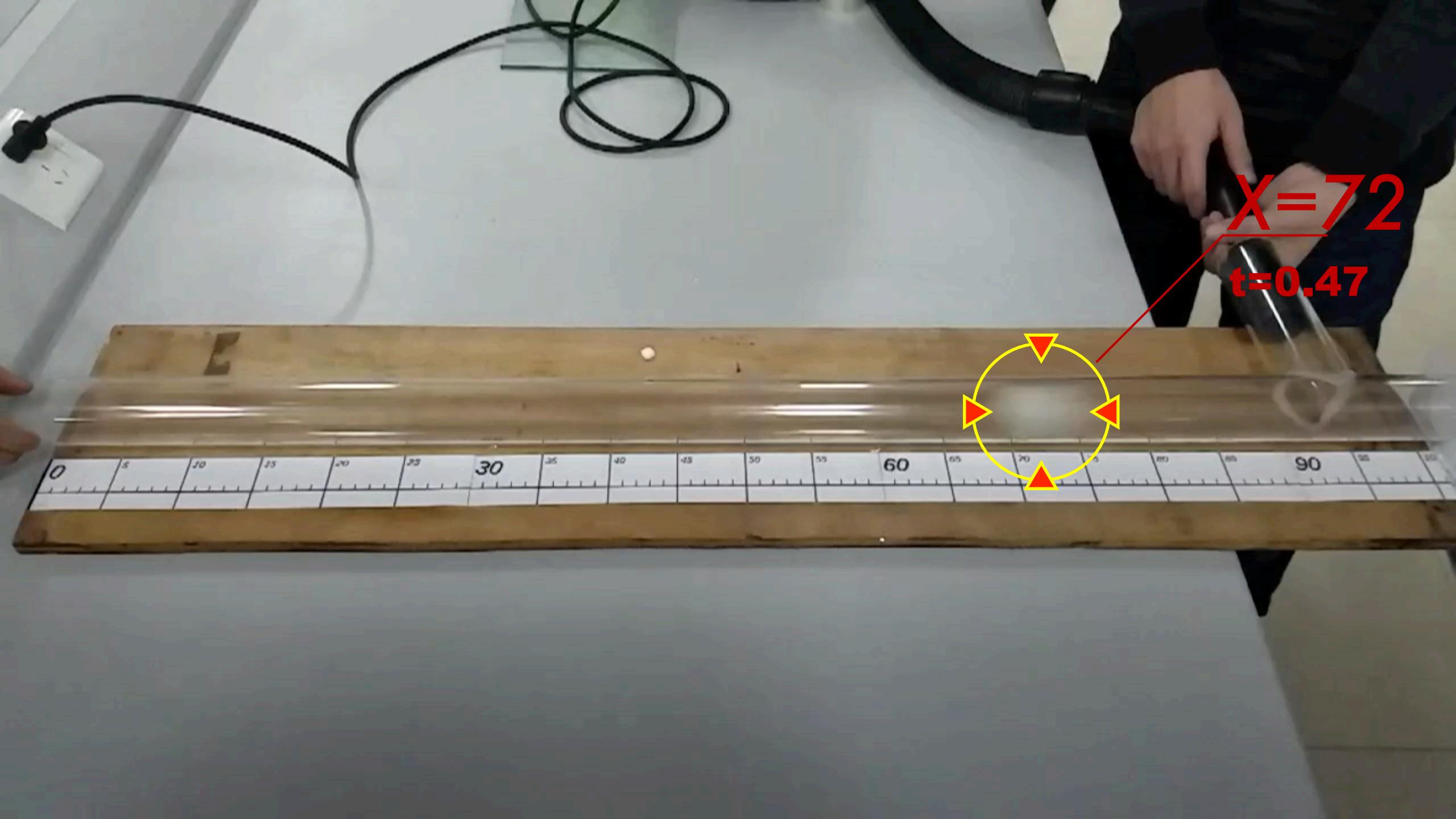




$X=60$
 $t=0.40$

$X=67.5$
 $t=0.43$

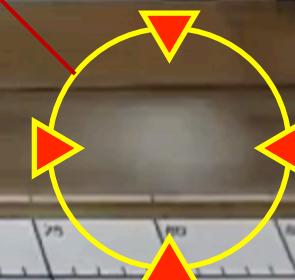




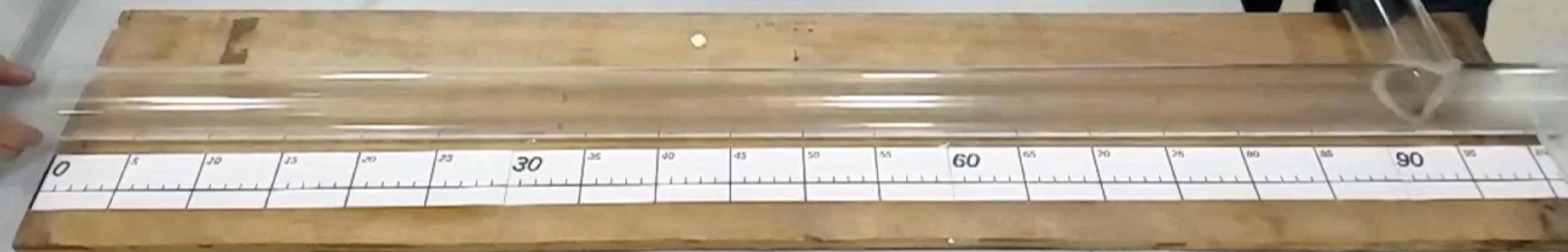
$X=72$
 $t=0.47$



$$\begin{matrix} X=81 \\ t=0.50 \end{matrix}$$





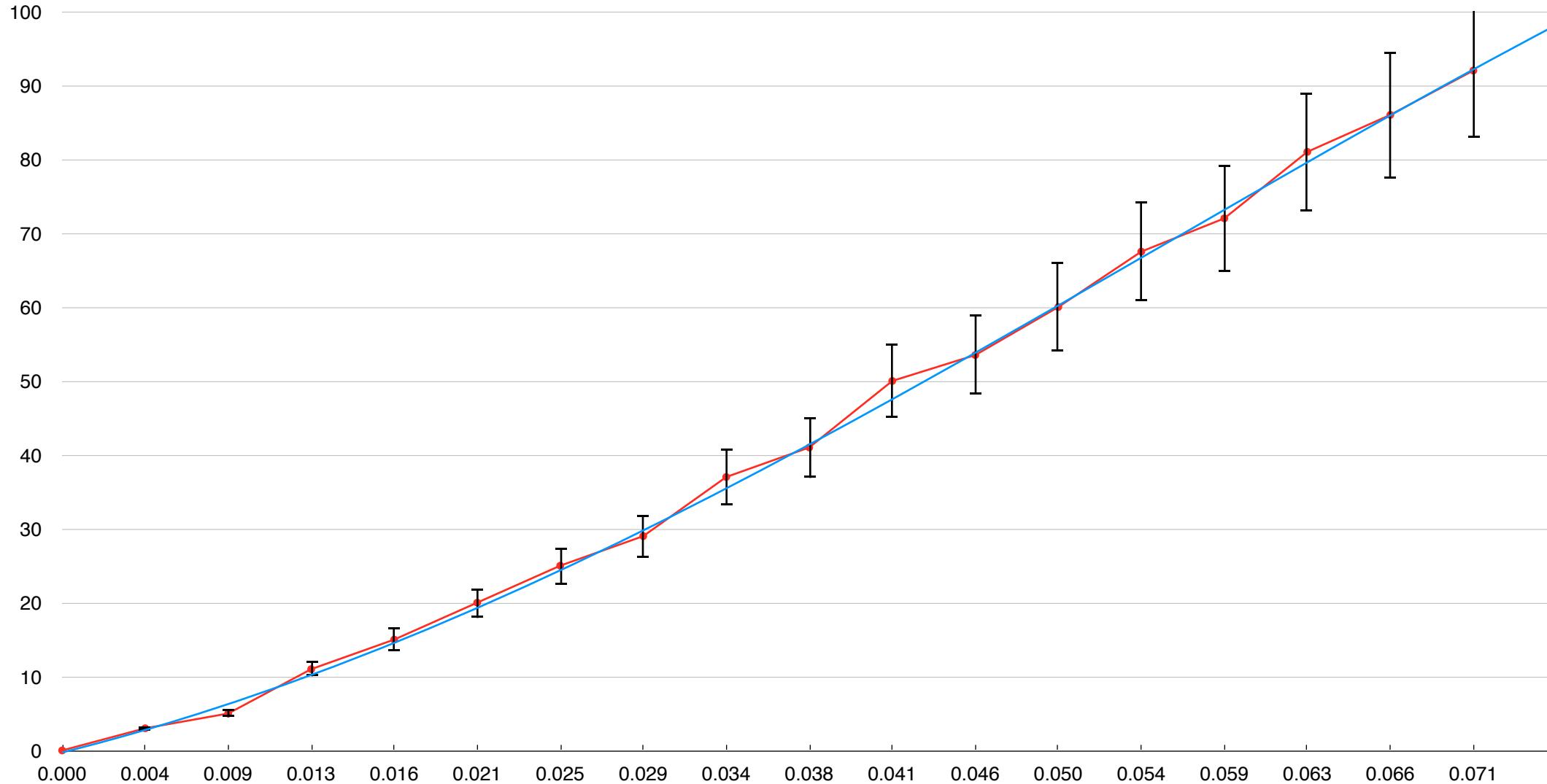


数据处理

第一次实验 ➤

Position/cm

拟合

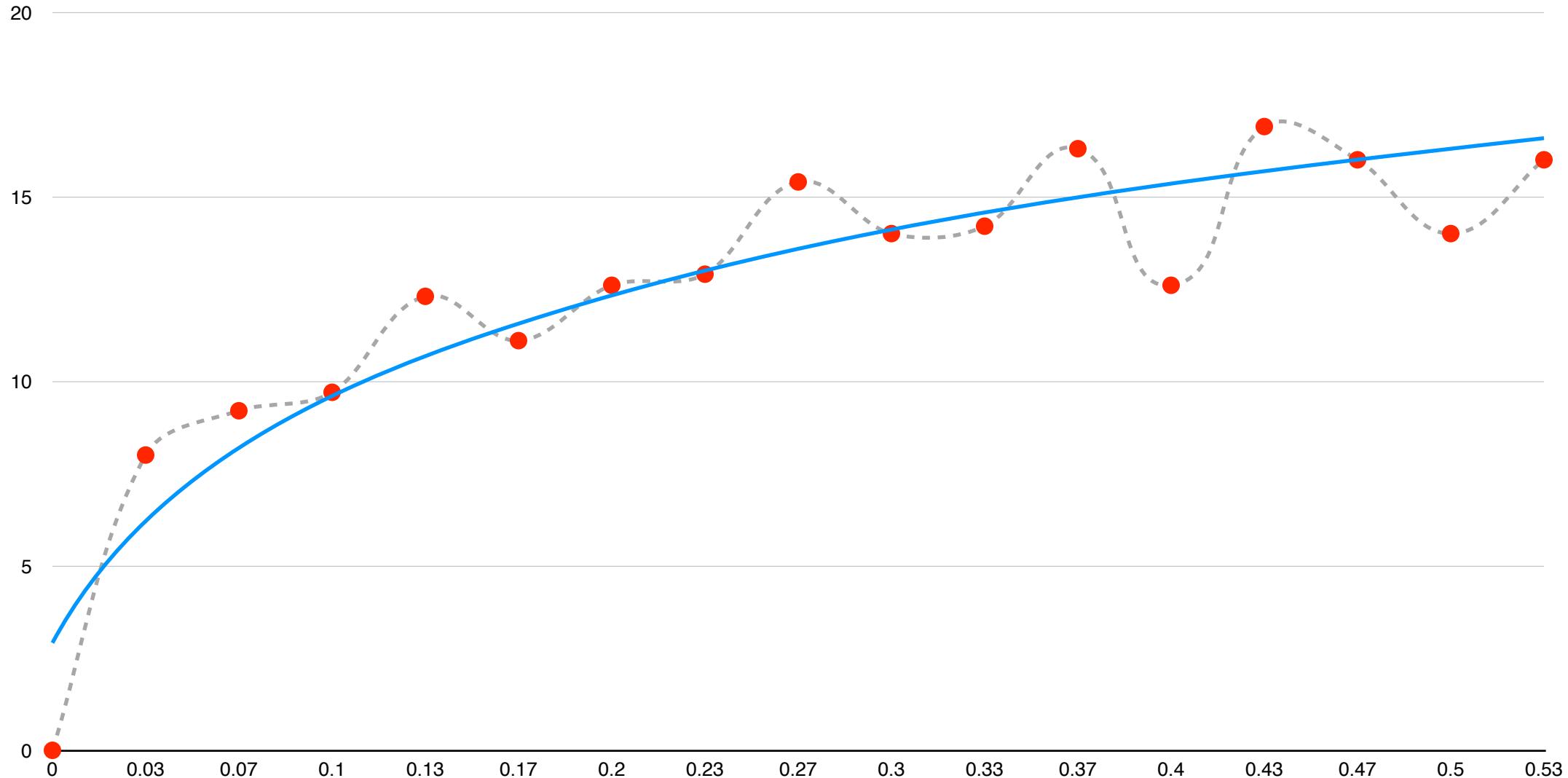


实验测得的位移—时间关系

第一次实验

v

拟合

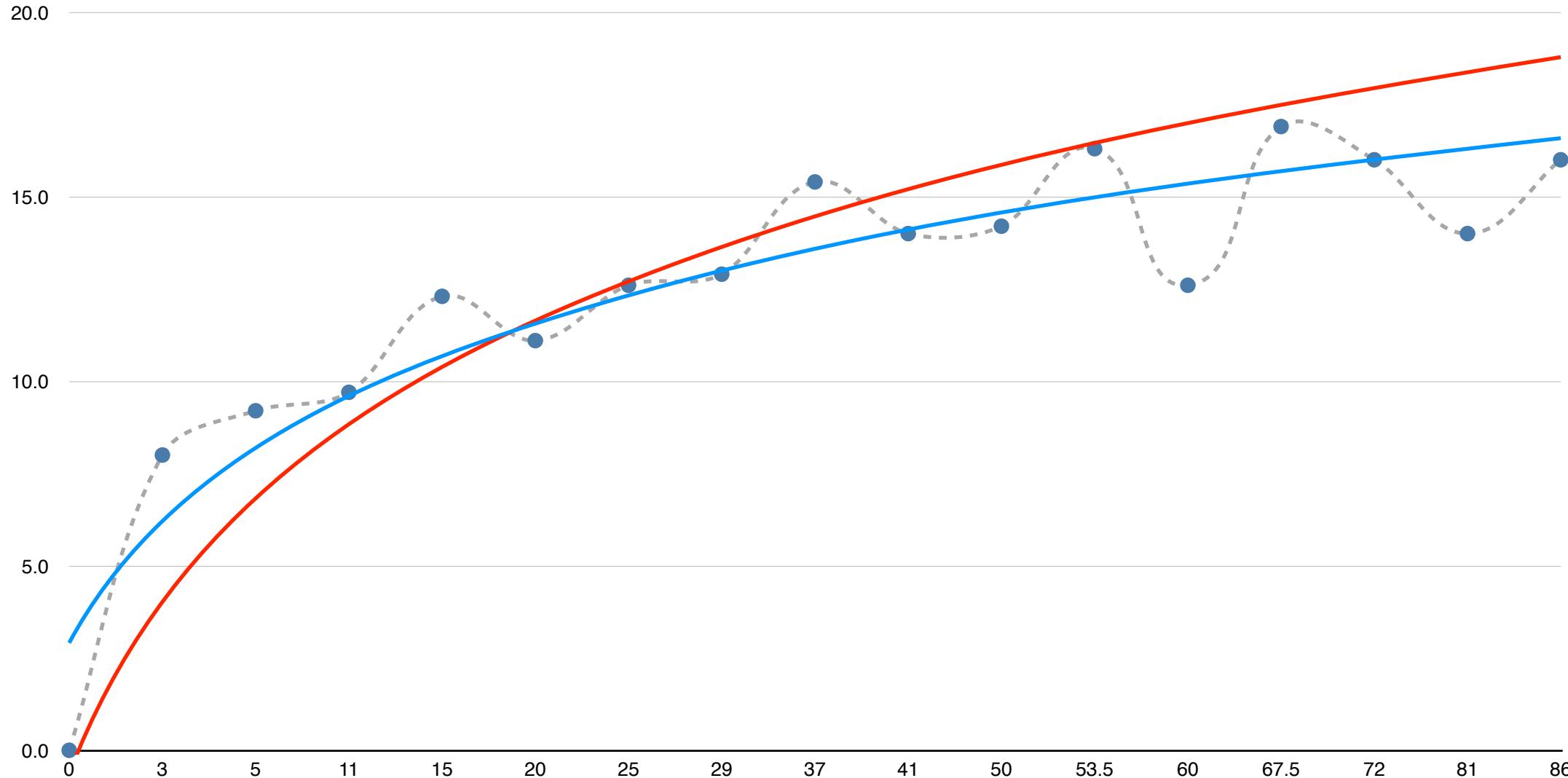


实验测得的速度一时间关系

第一次实验

● v

— 计算结果



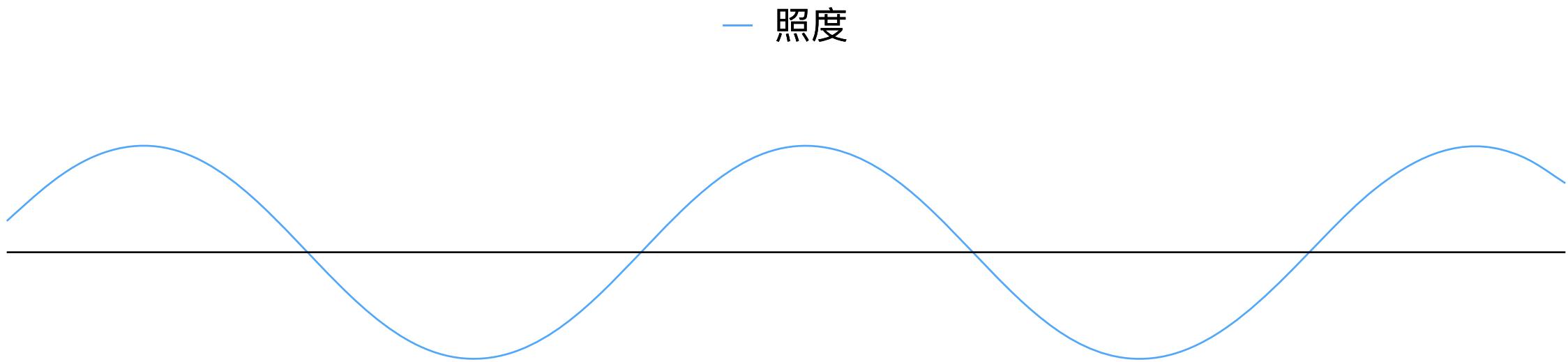
实验结果和计算结果的对比

测量正负偏差较大的原因分析：

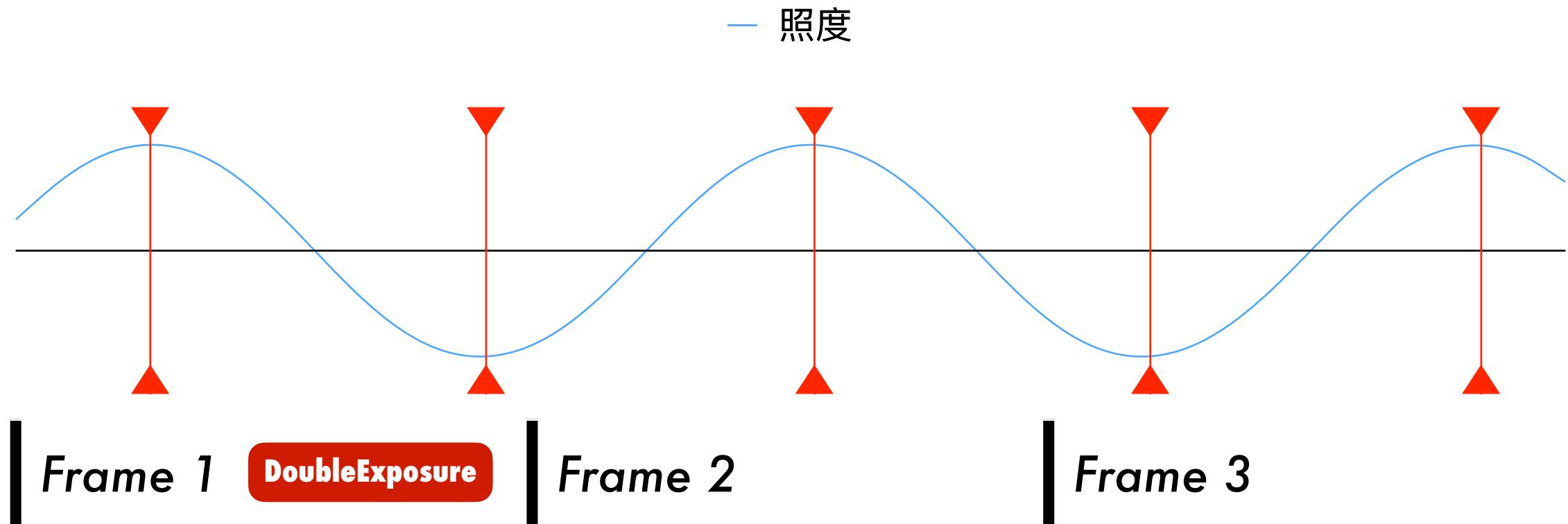


日光灯频闪

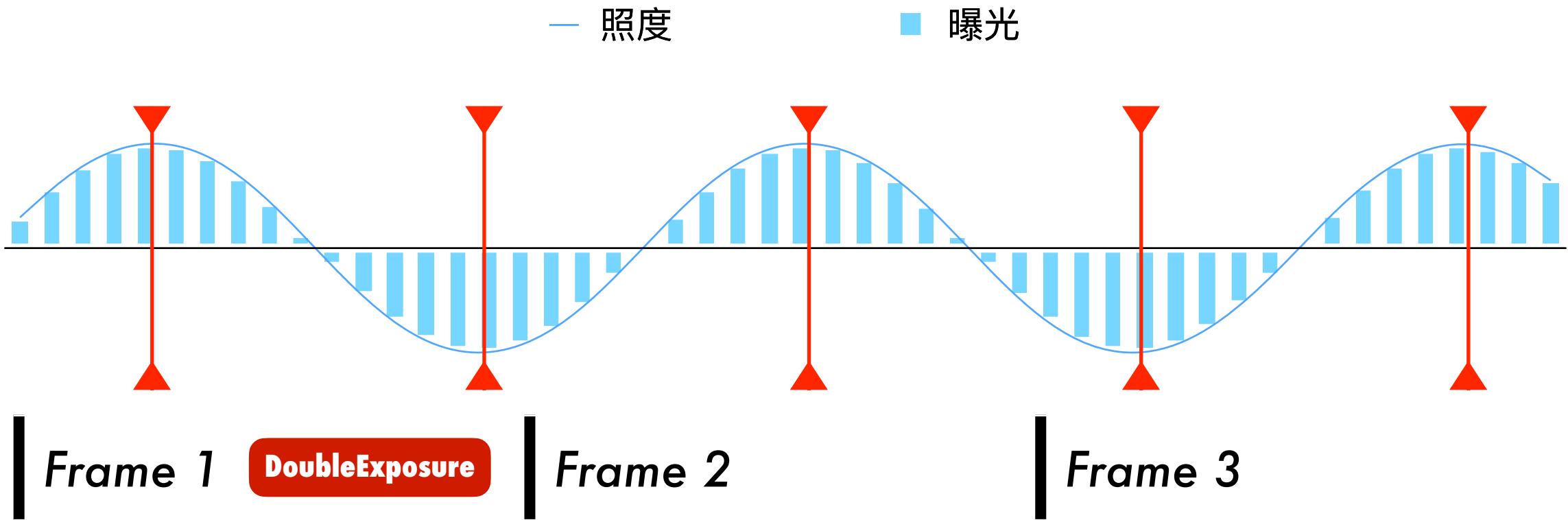
测量正负偏差较大的原因分析：



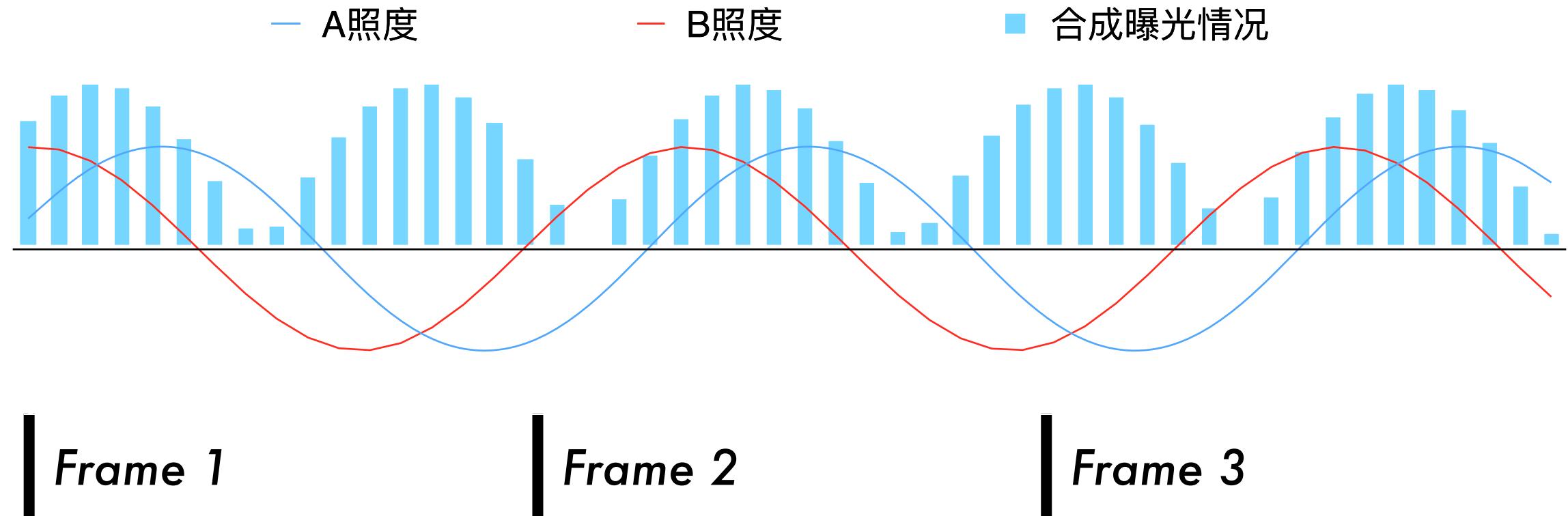
测量正负偏差较大的原因分析：



测量正负偏差较大的原因分析：

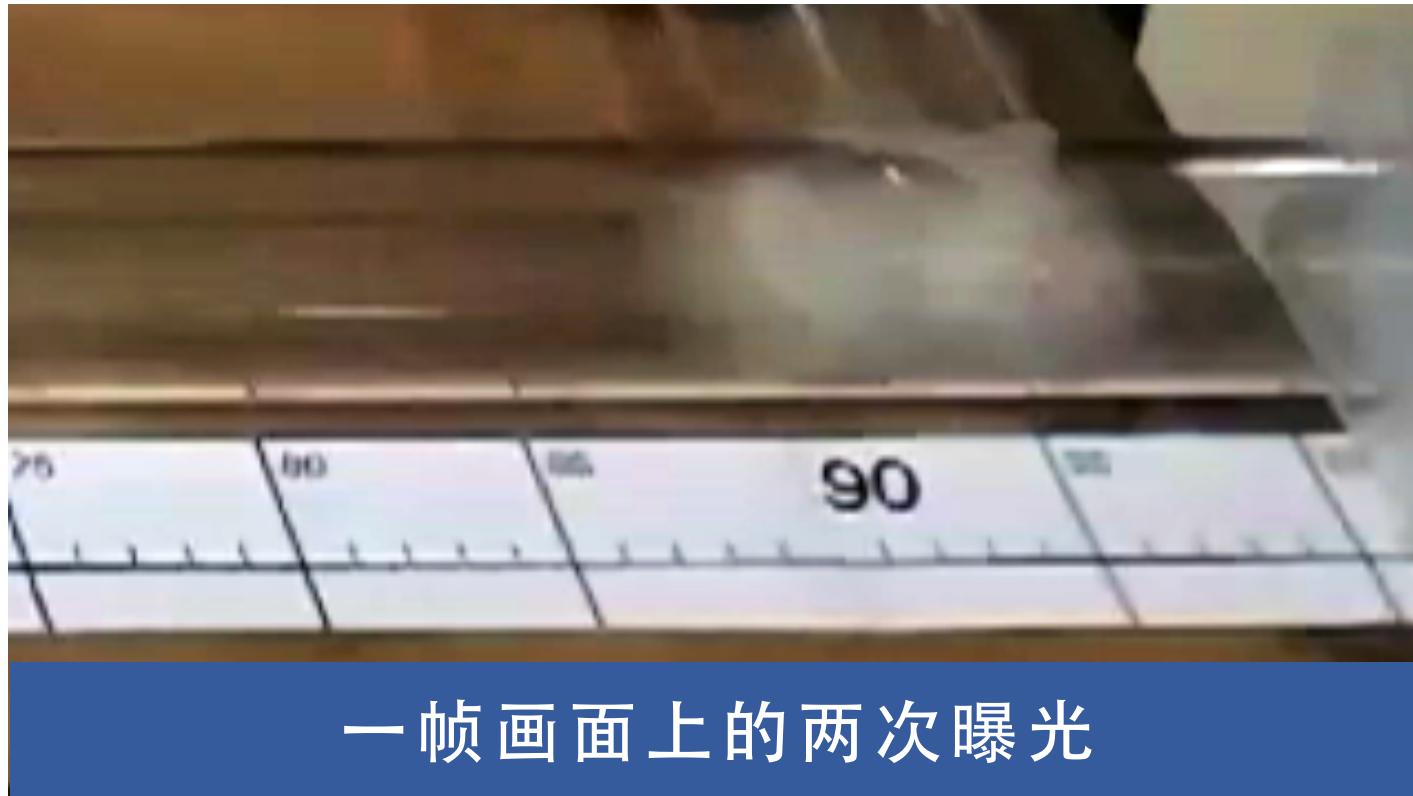


测量正负偏差较大的原因分析：



日光灯频闪导致曝光时间不是等间距的

测量正负偏差较大的原因分析：



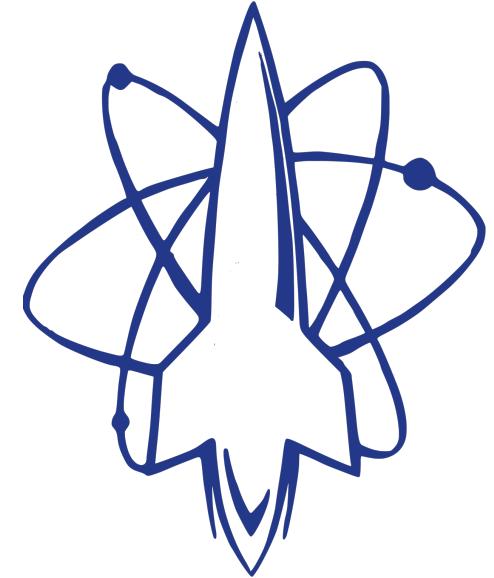
日光灯频闪导致曝光时间不是等间距的

改进方案

使用频闪频率远高于摄像机帧率的光源

第二次实验

器材搭建
实验过程
数据处理



西安交通大学
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY



物理试验班
P.H.E.C

器材搭建

第二次实验



使用了便携LED探照灯

器材搭建



LED光源特点

频闪频率高，与相机帧率差距足够大

单光源发光，频闪效应不会因叠加而放大

亮度足够，适合高速摄像

第一次实验▶

实验过程

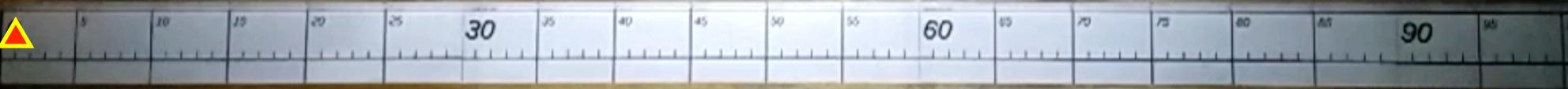
实验过程

$V=0.0\text{m/s}$



00:00:00.00

$V=2.7\text{m/s}$



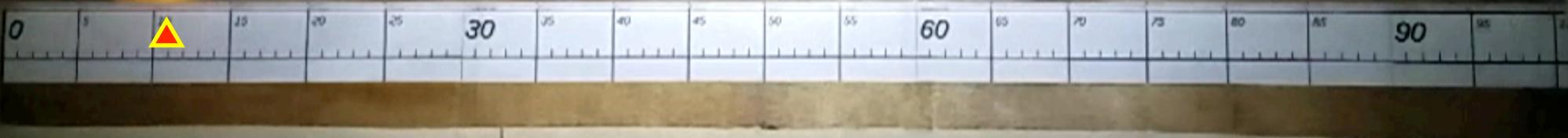
00:00:00.03

$V=8.0\text{m/s}$



00:00:00.10

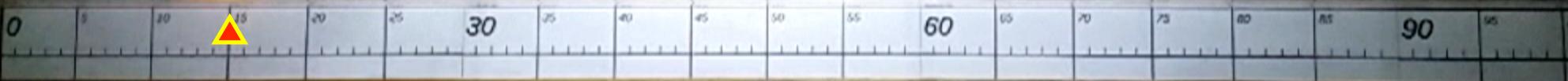
$$V=9.8 \text{ m/s}$$



00:00:00.13

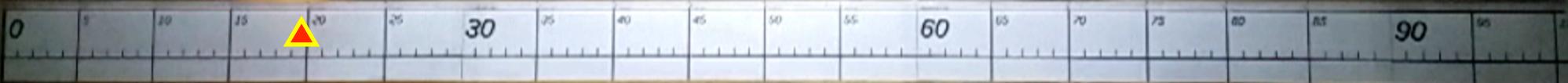


$V=10.5\text{m/s}$



00:00:00.17

$$V=10.9 \text{ m/s}$$



00:00:00.20

$$V=11.7 \text{ m/s}$$



00:00:00.23

$$V=12.7 \text{ m/s}$$



00:00:00.27



$V=13.3\text{m/s}$

A photograph showing a person's lower body and hands on a wooden floor. A ruler is placed horizontally across the floor, marked from 0 to 100 cm. Two yellow triangles mark specific points on the ruler: one at 30 cm and another at 25 cm, with a red line connecting them. The text $V=13.3\text{m/s}$ is overlaid in red at the top right.



00:00:00.30



$$V=10.8 \text{ m/s}$$

00:00:00.37



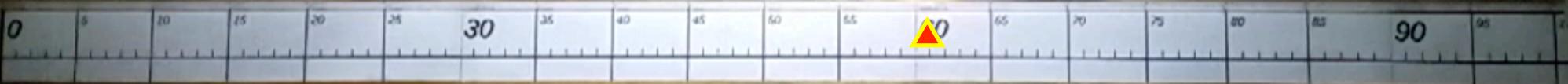
A photograph of a person running on a track. A ruler is placed horizontally on the ground in front of the runner, with markings from 0 to 100. Two yellow triangles mark specific points on the ruler: one at approximately 48 and another at approximately 50. A red arrow points from the text above to the triangle at 50. Red text in the upper right corner reads $V=11.6\text{m/s}$.

$$V=11.6\text{m/s}$$

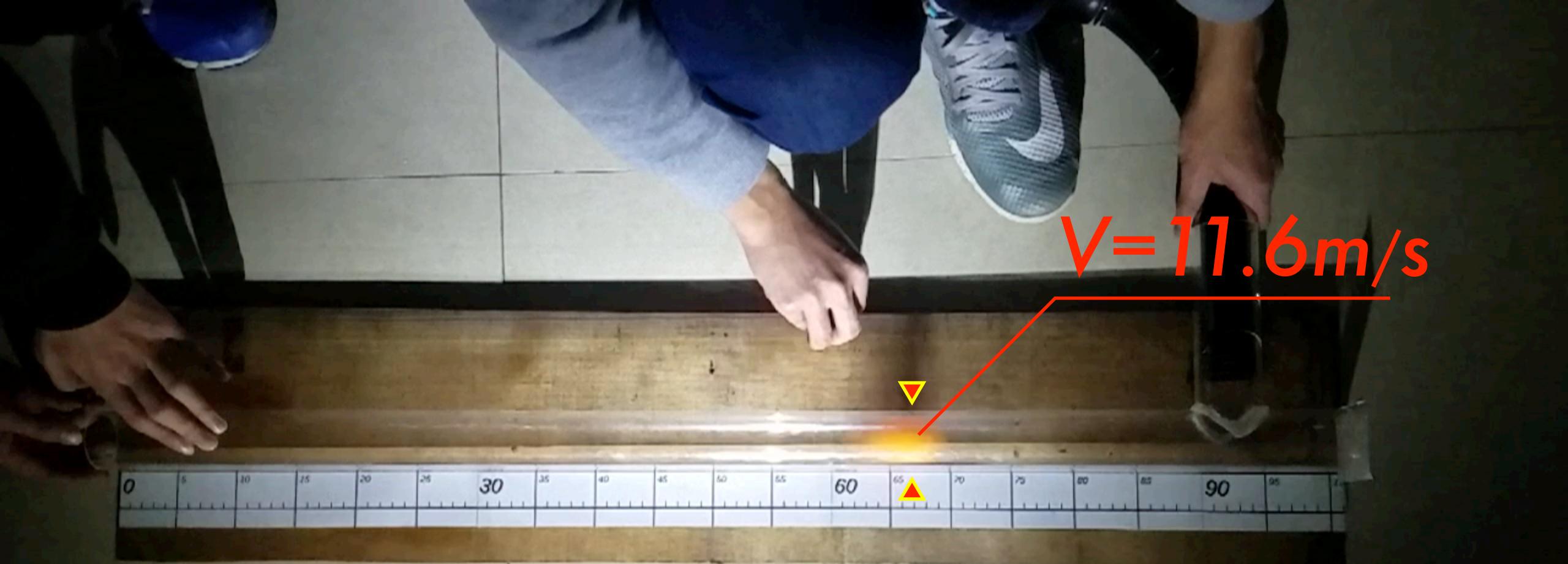


00:00:00.40

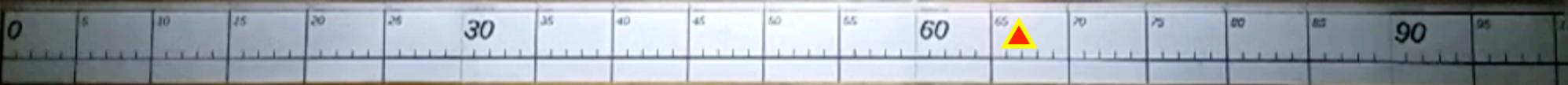
$$V=11.6 \text{ m/s}$$



00:00:00.50



$V=11.6\text{m/s}$



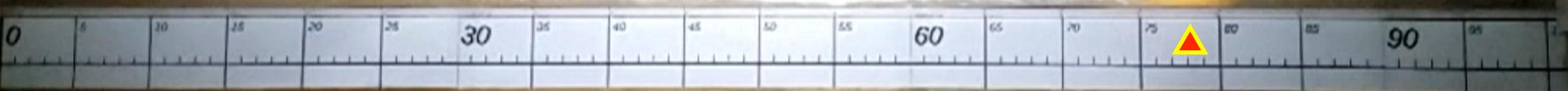
00:00:00.52

$$V=12.8 \text{ m/s}$$



00:00:00.55

$$V=15.2 \text{ m/s}$$



00:00:00.58

$$V=13.7 \text{ m/s}$$



00:00:00.62

A photograph showing a person's lower body and hands on a grey starting block. A wooden block is placed on top of the starting block. A metal ruler is positioned horizontally across the top of the wooden block. The ruler has markings from 0 to 90 in increments of 5. Two yellow triangles point to the '90' marking on the ruler. The background shows a grey wall with a white cross mark.

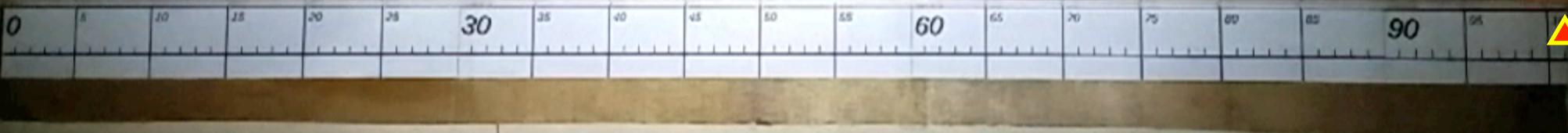
0 5 10 15 20 25 30 35 40 45 50 55 60 65 70 75 80 85 90 95

00:00:00.65

A photograph showing a person's legs and hands resting on a light-colored wooden bench. A metal ruler is placed horizontally on the bench, with markings from 0 to 100 visible. Two yellow triangles point to specific marks on the ruler: one at approximately 88 and another at approximately 92.

0 5 10 15 20 25 30 35 40 45 50 55 60 65 70 75 80 85 90 95

00:00:00.68



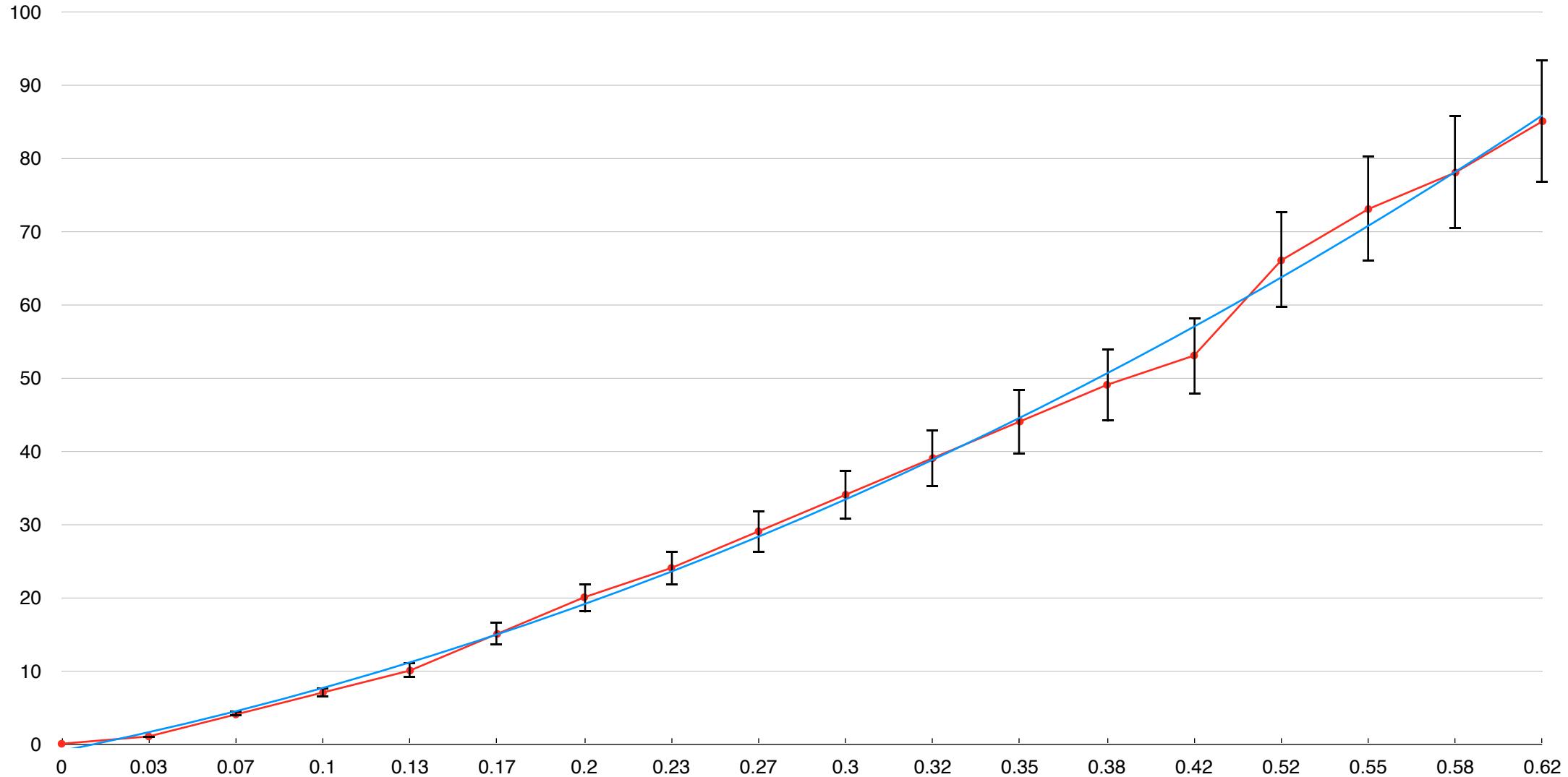
00:00:00.70

数据处理

第二次实验

Position/cm

拟合

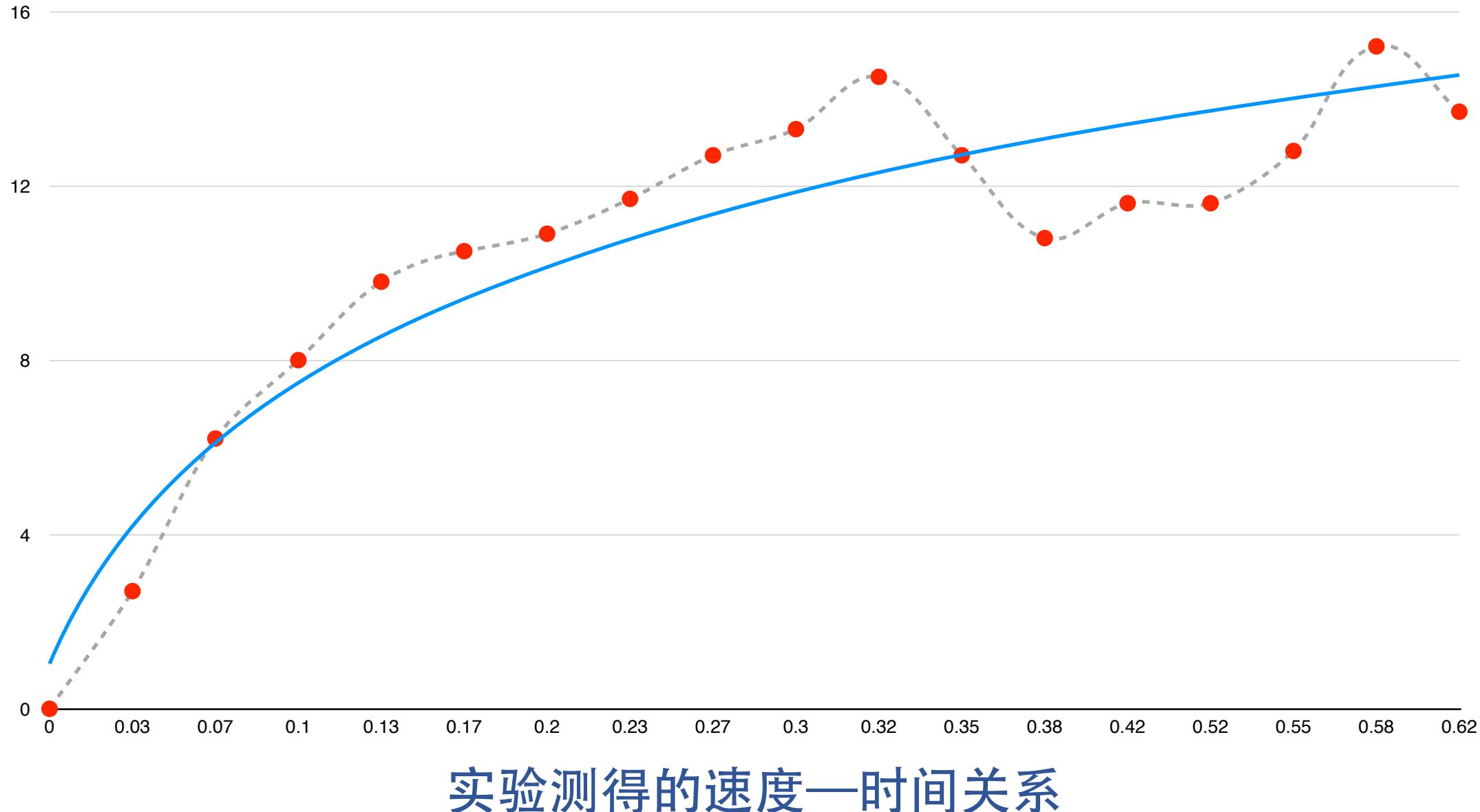


实验测得的位移一时间关系

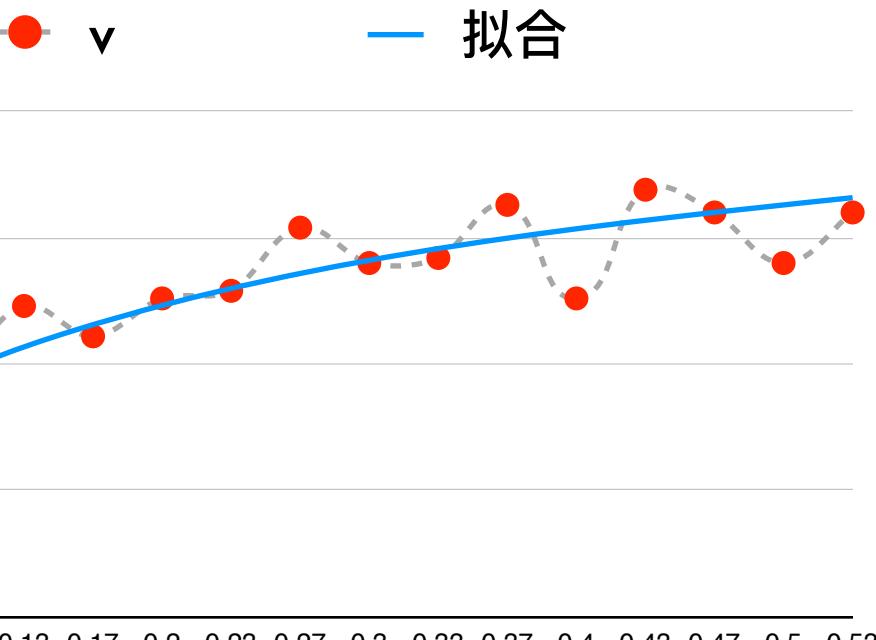
第二次实验

● v

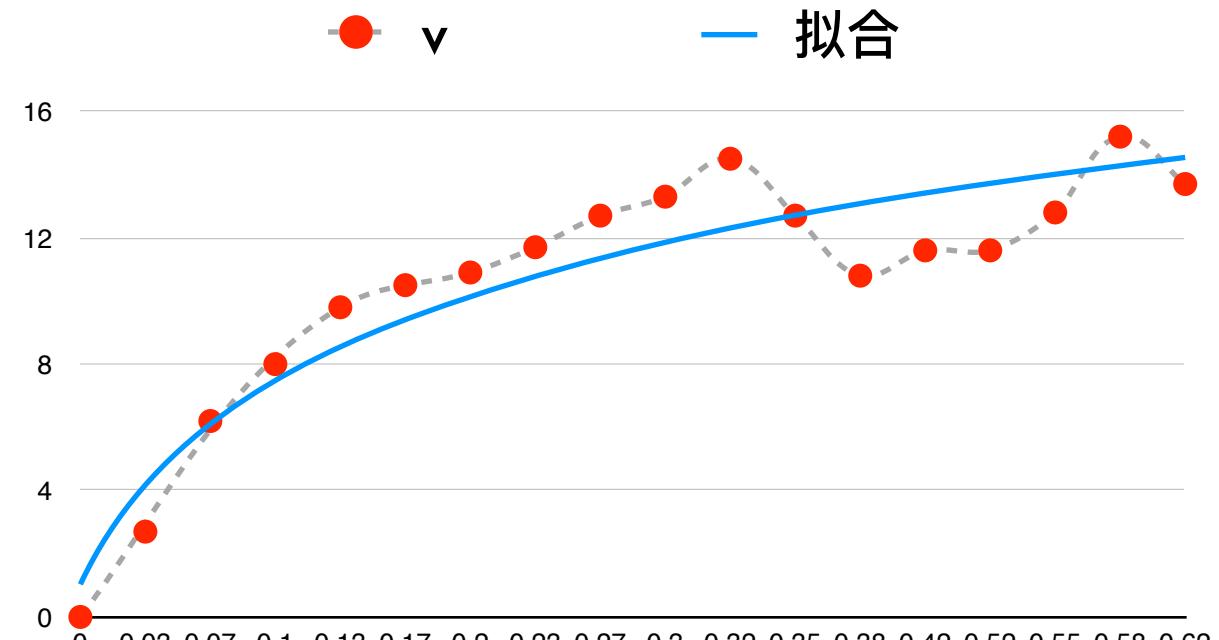
— 拟合



第二次实验



第一次实验

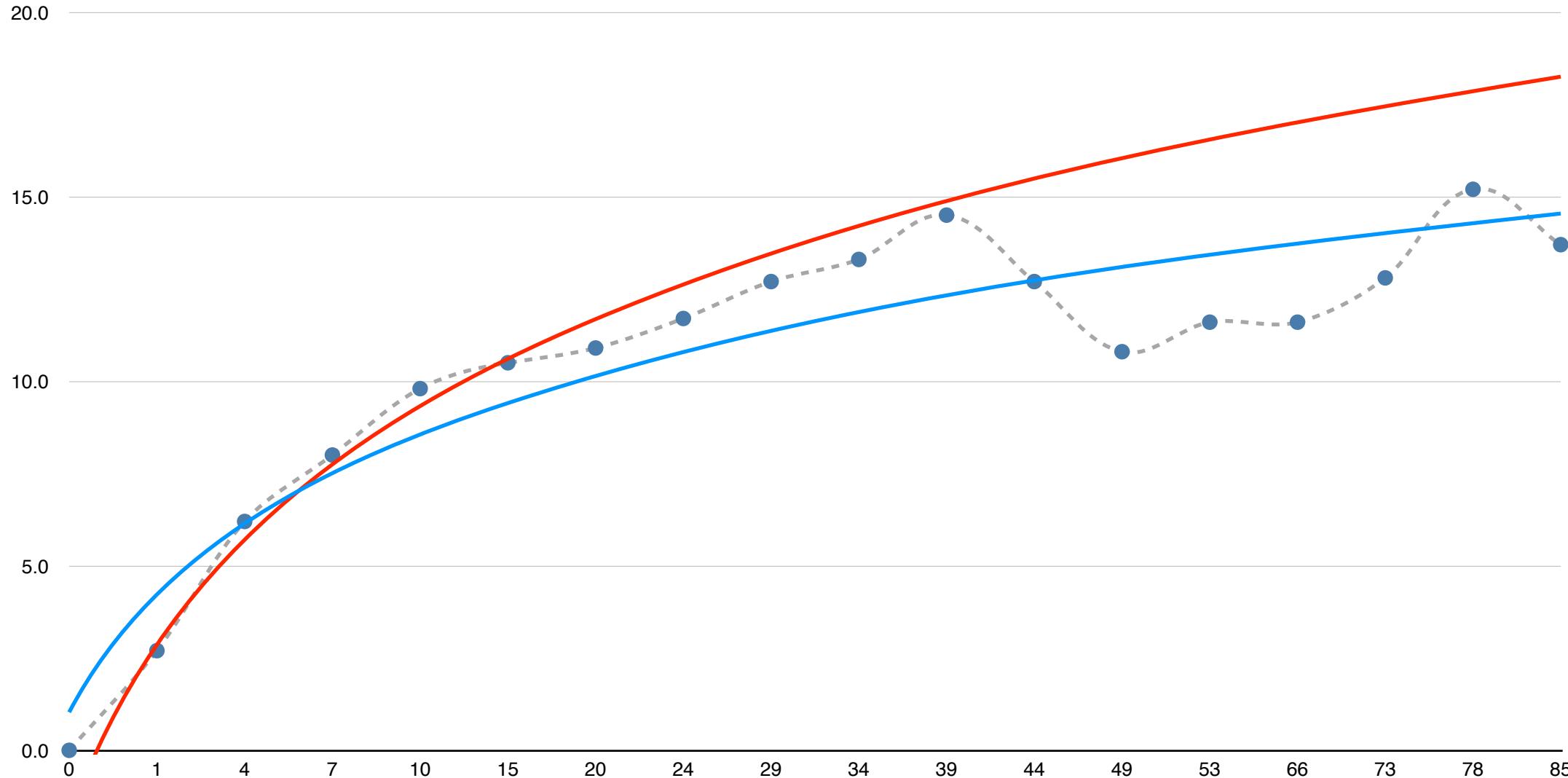


第二次实验

第二次实验

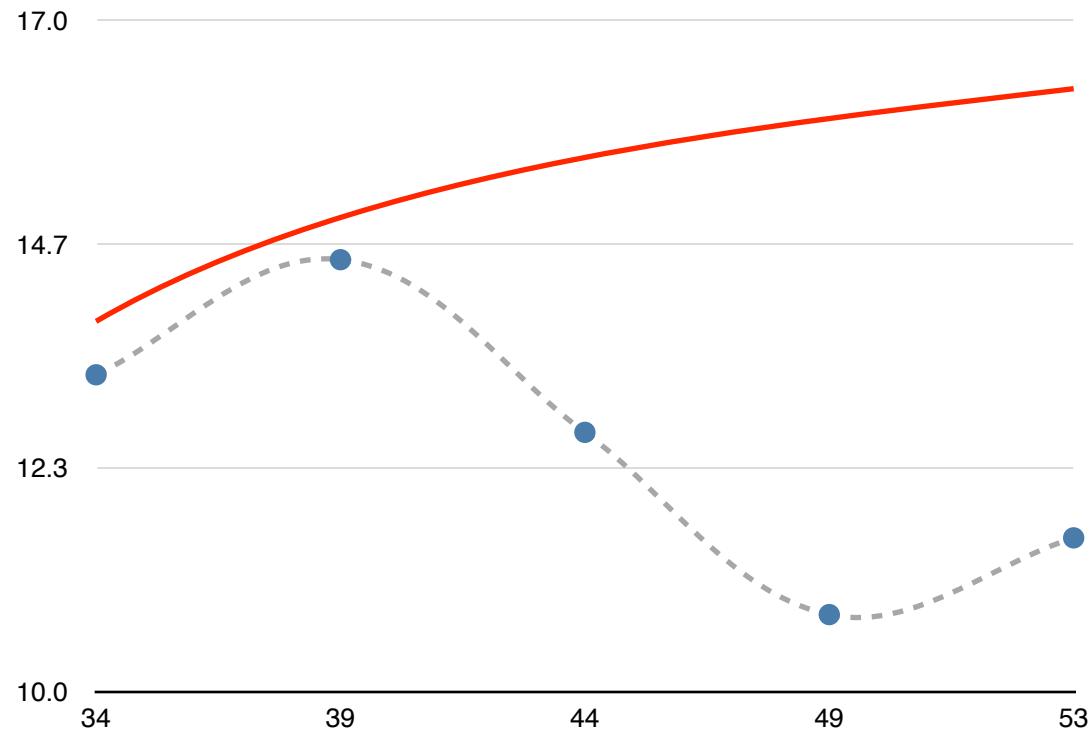
-● v

— 计算结果



实验结果和计算结果的对比

速度突然减慢的原因探究：



猜测：

可能是乒乓球和管壁的碰撞导致了速度突然减慢。

探究方案

使用柱状炮弹探究碰撞影响速度的可能性





06

50

00

50

00

50

00

50

00

50

00

50

00

50

00

50

00

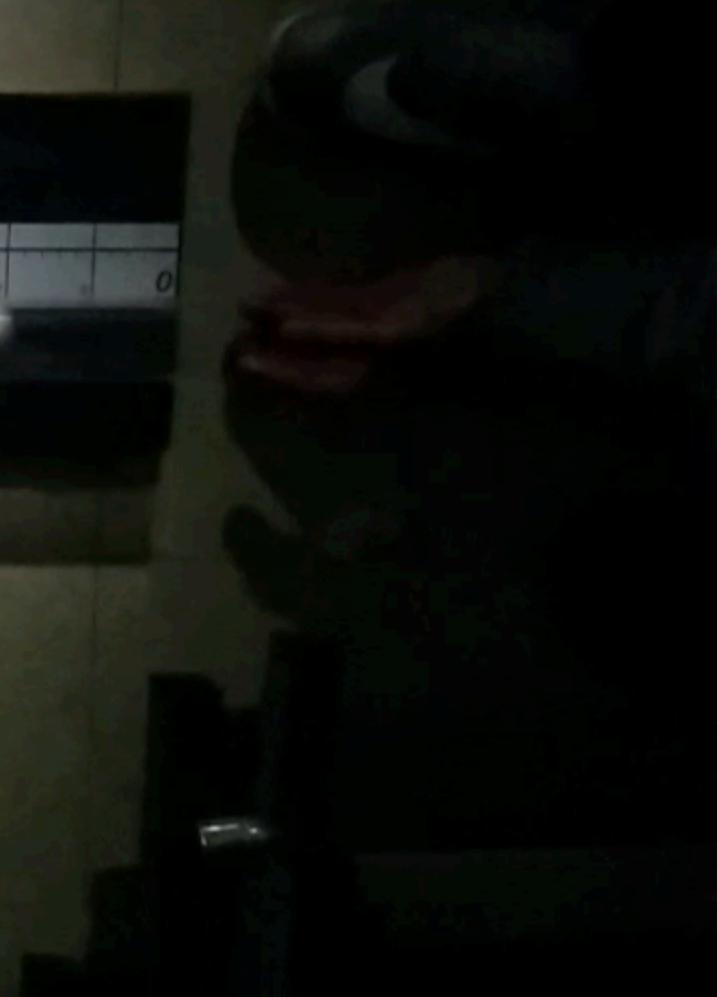
50

00



















06 09 30



06

09

30

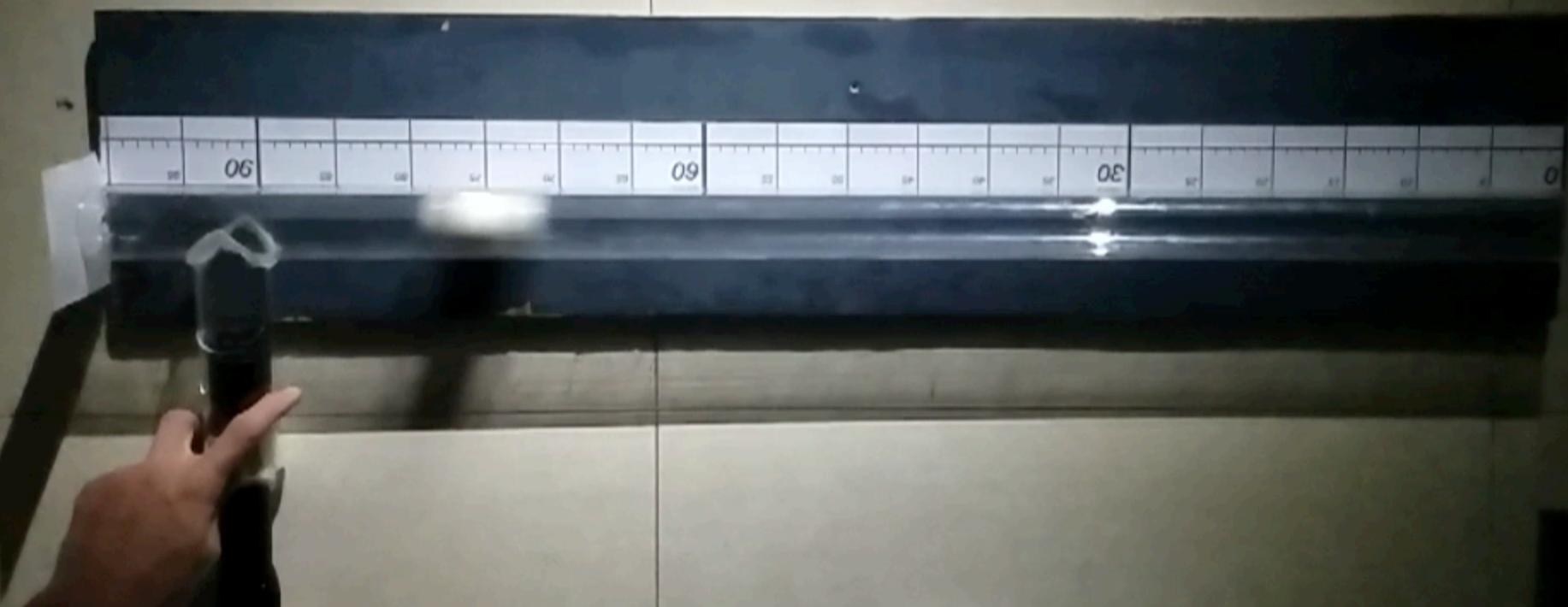
0





















06

09

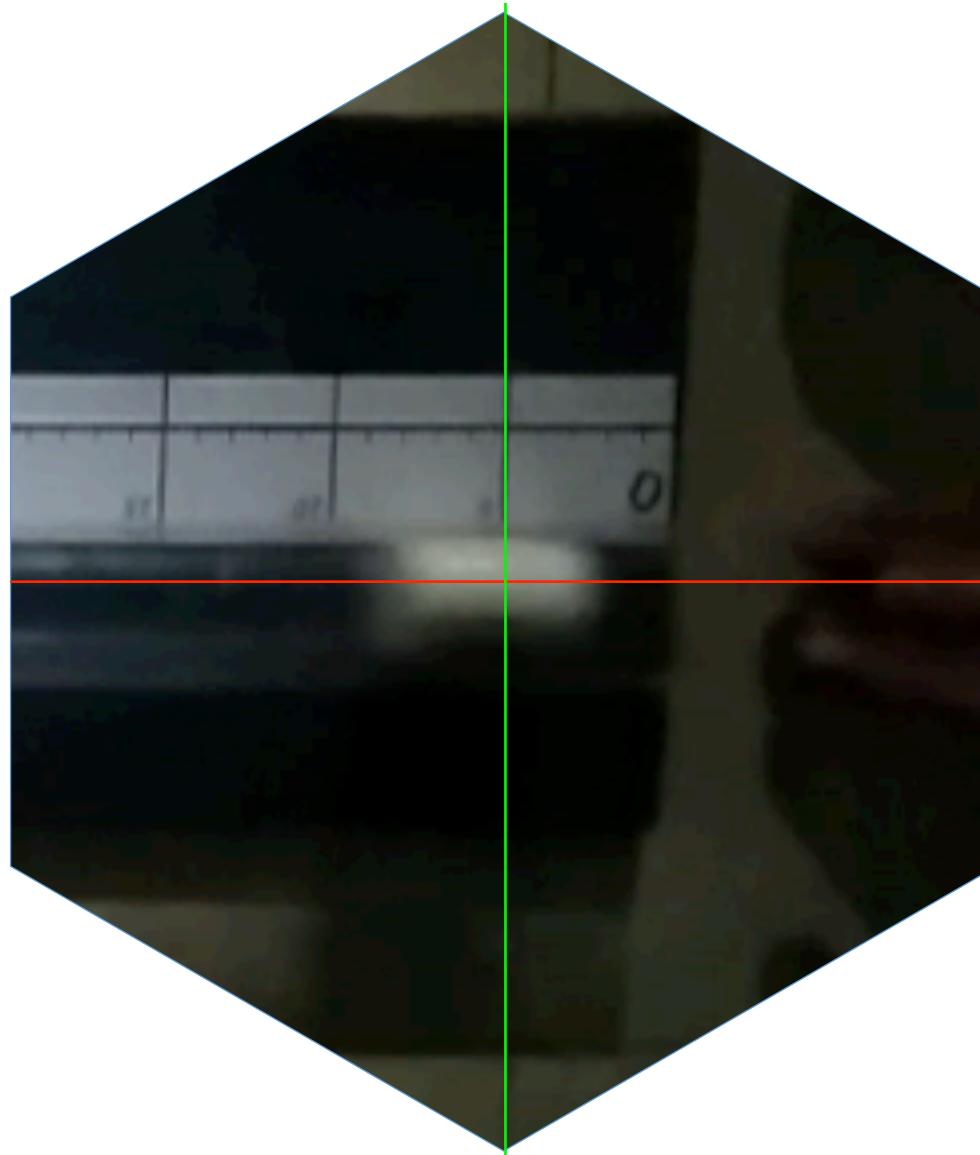
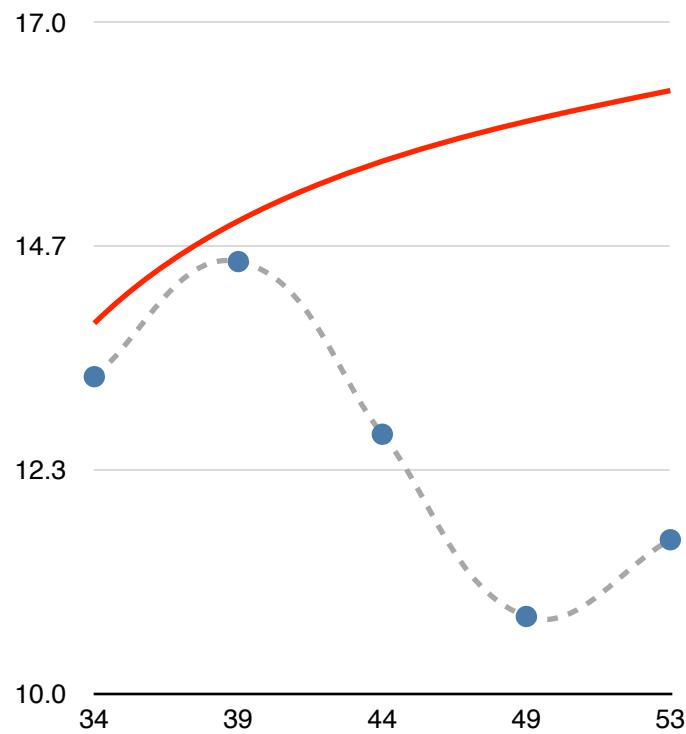
30

0

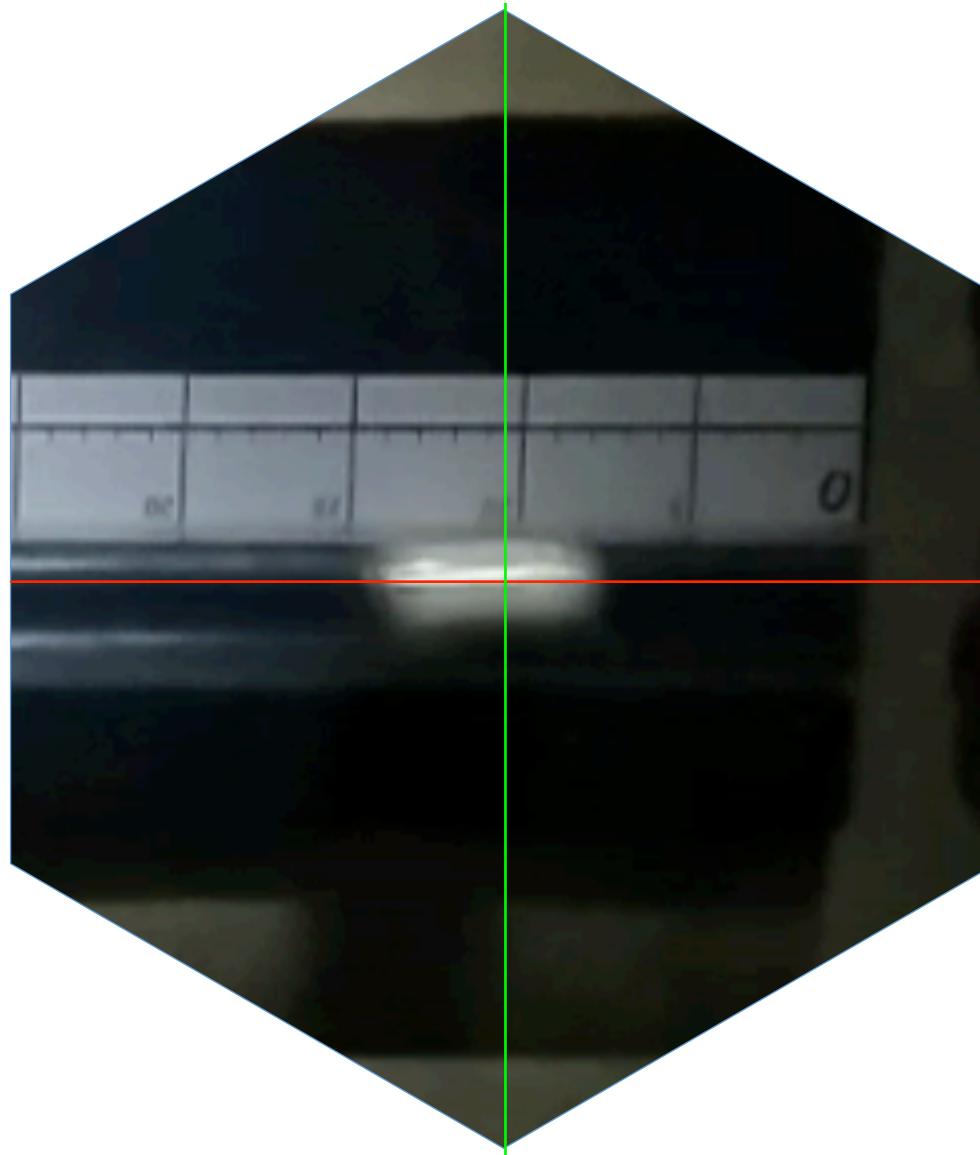
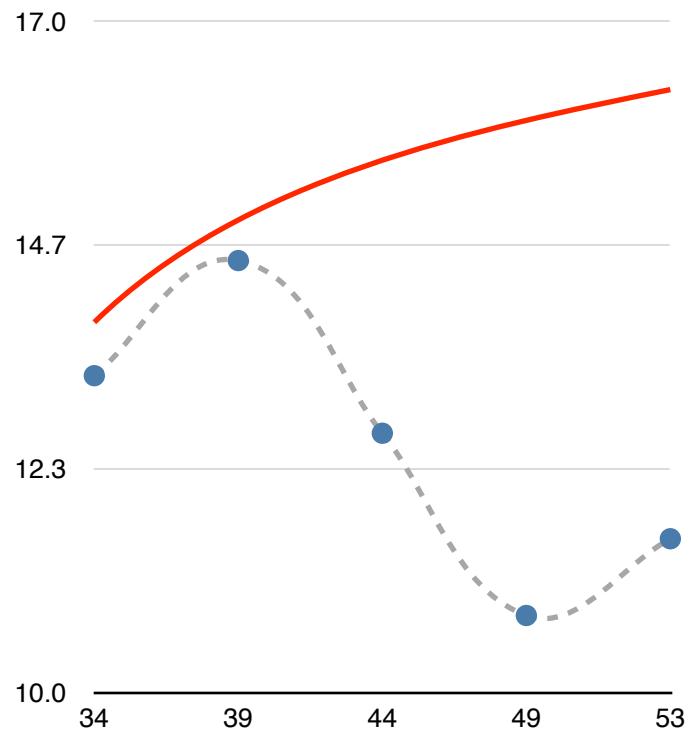


聚焦回放

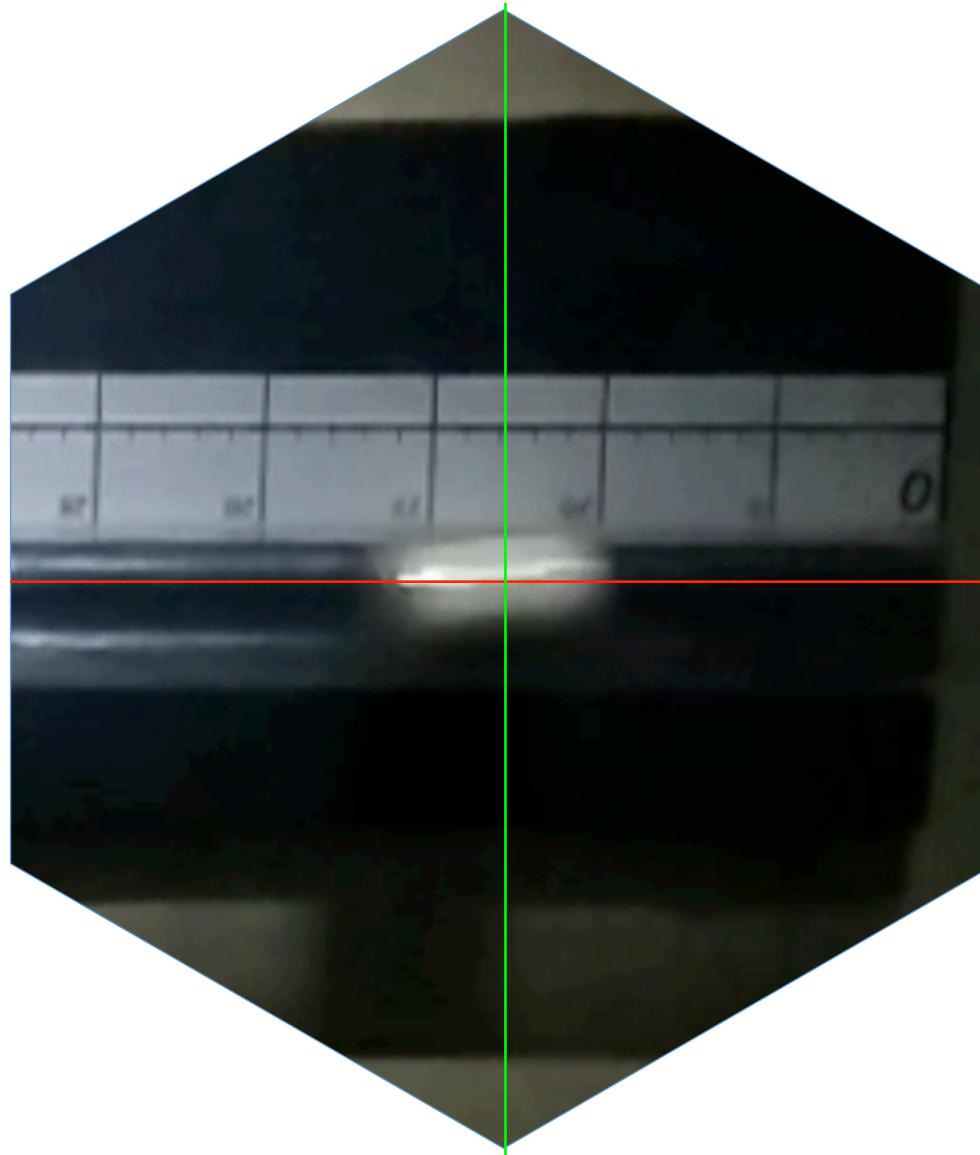
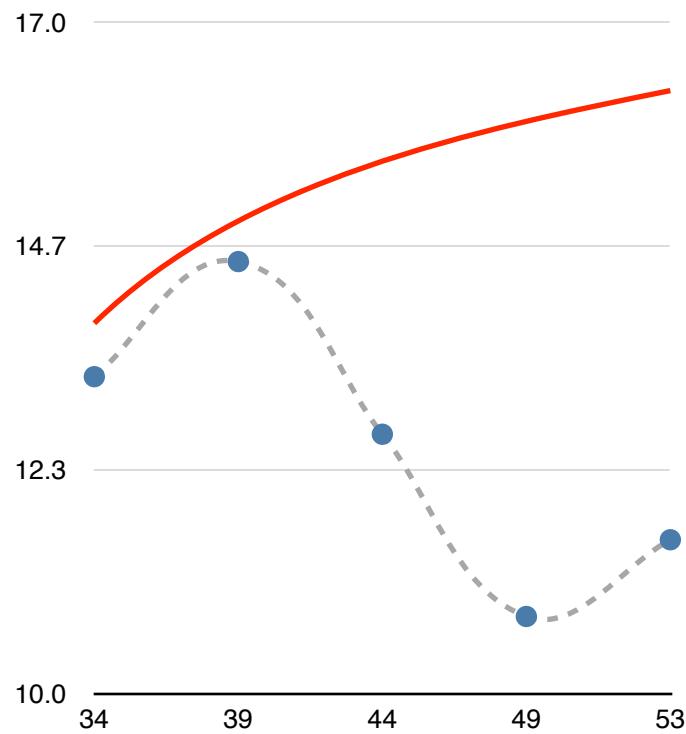
聚焦回放



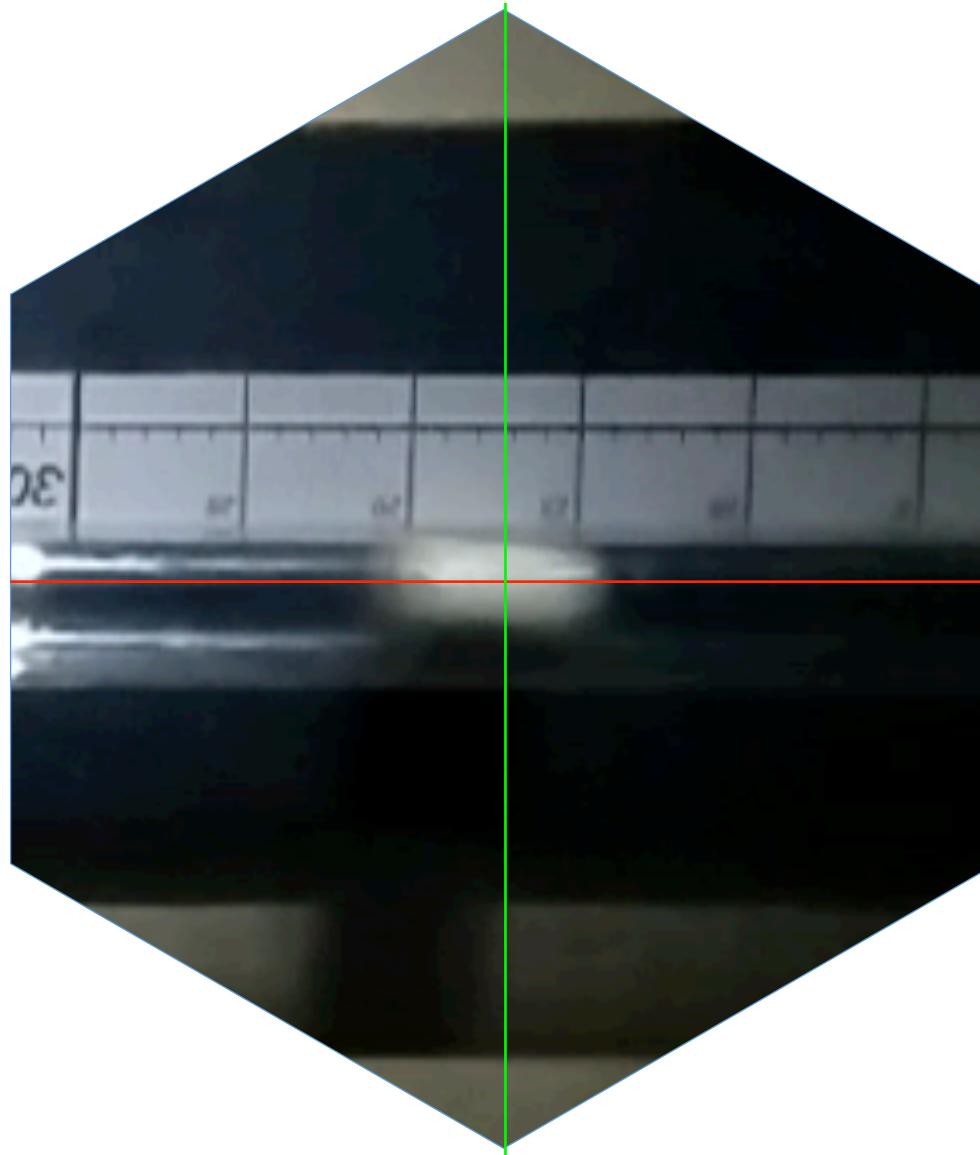
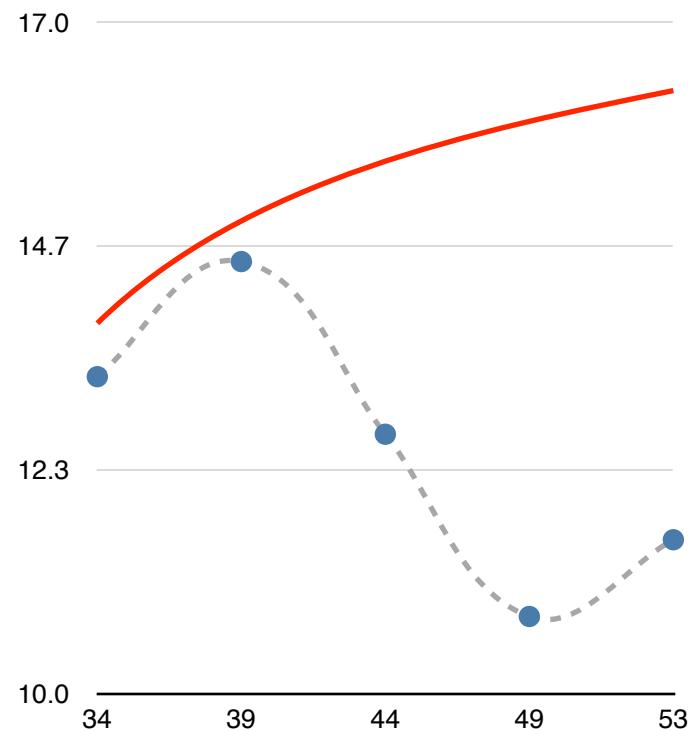
聚焦回放



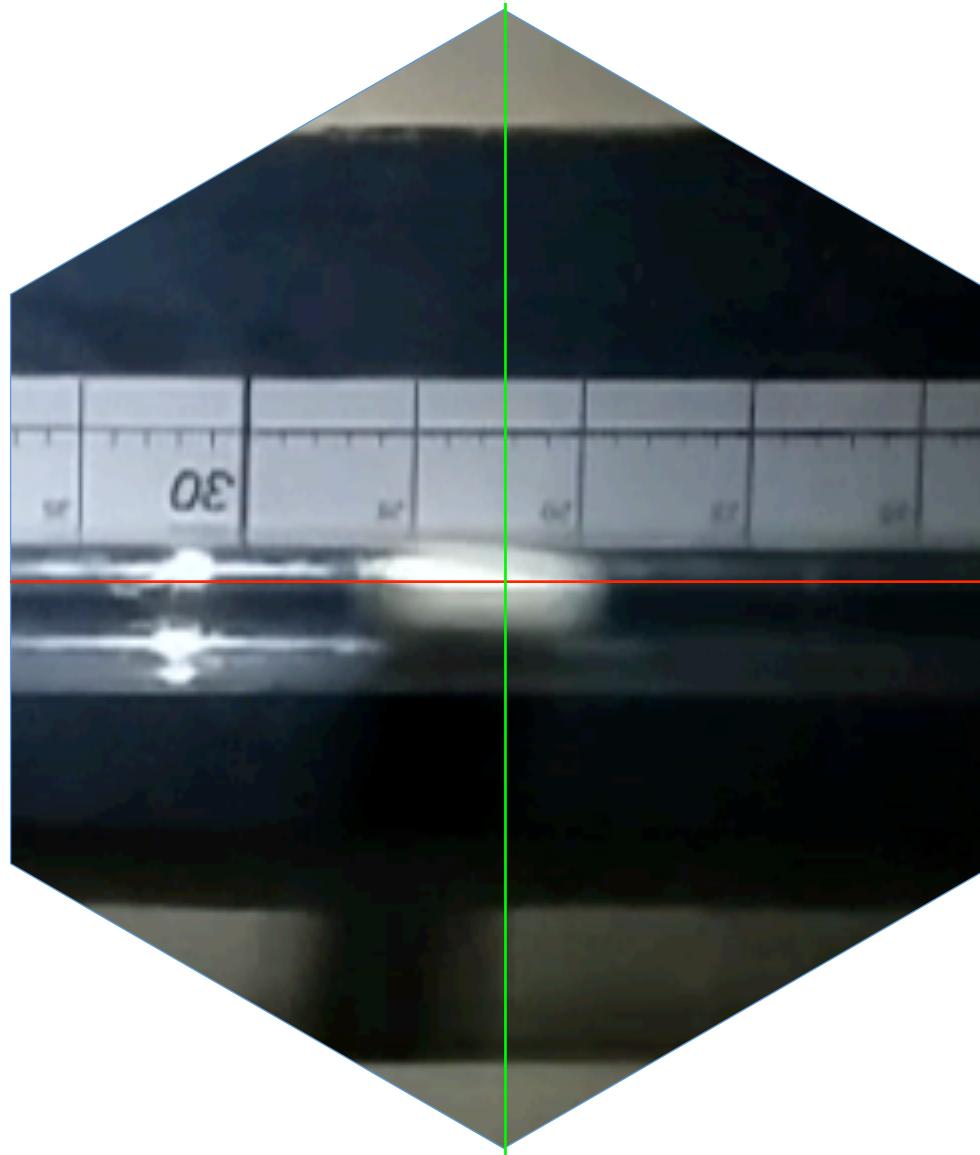
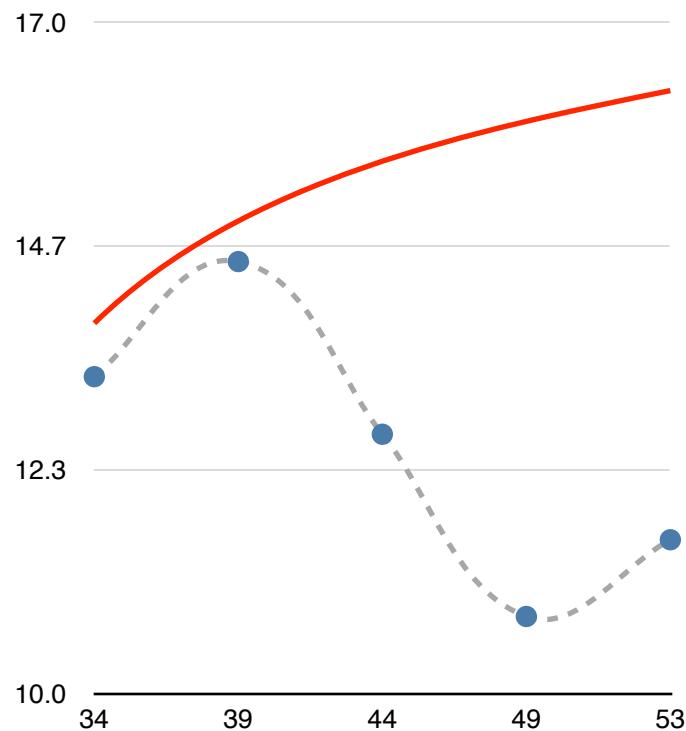
聚焦回放



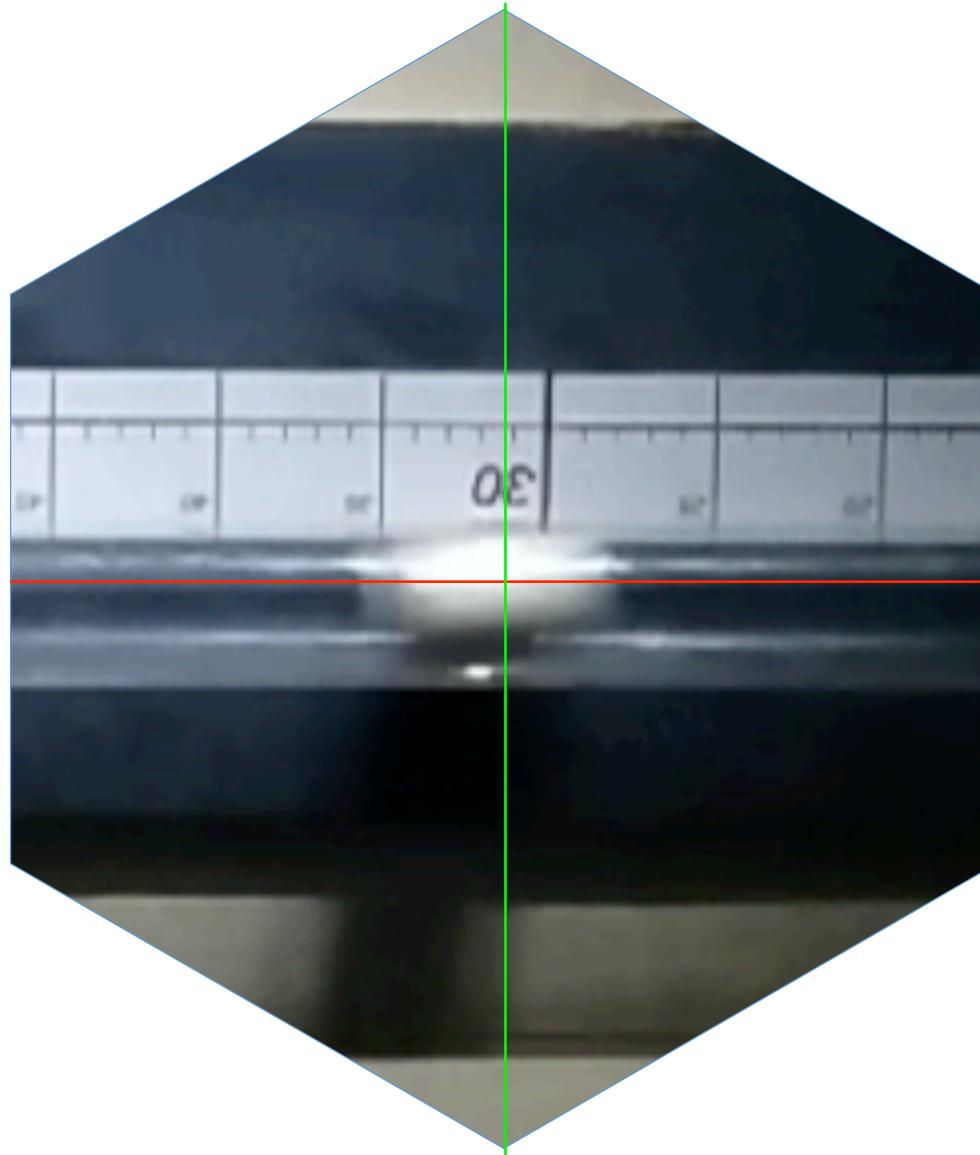
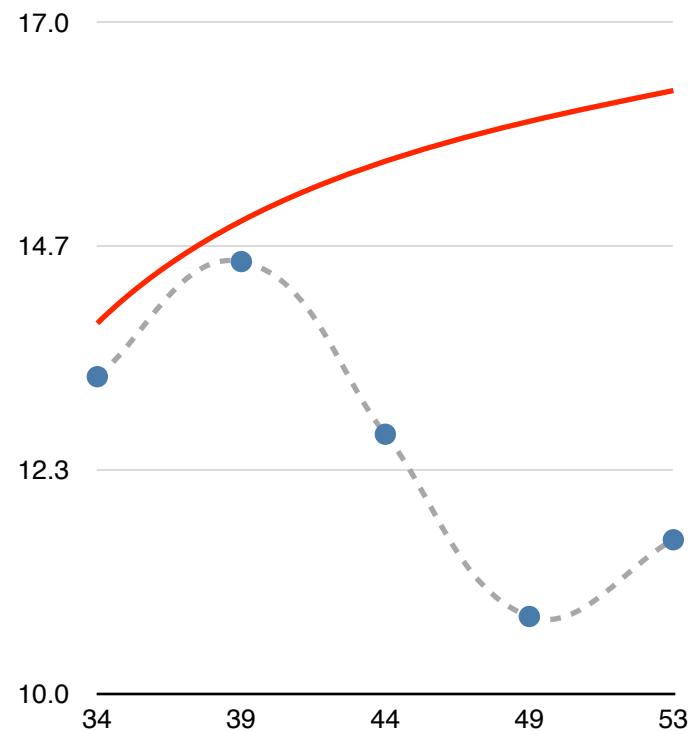
聚焦回放



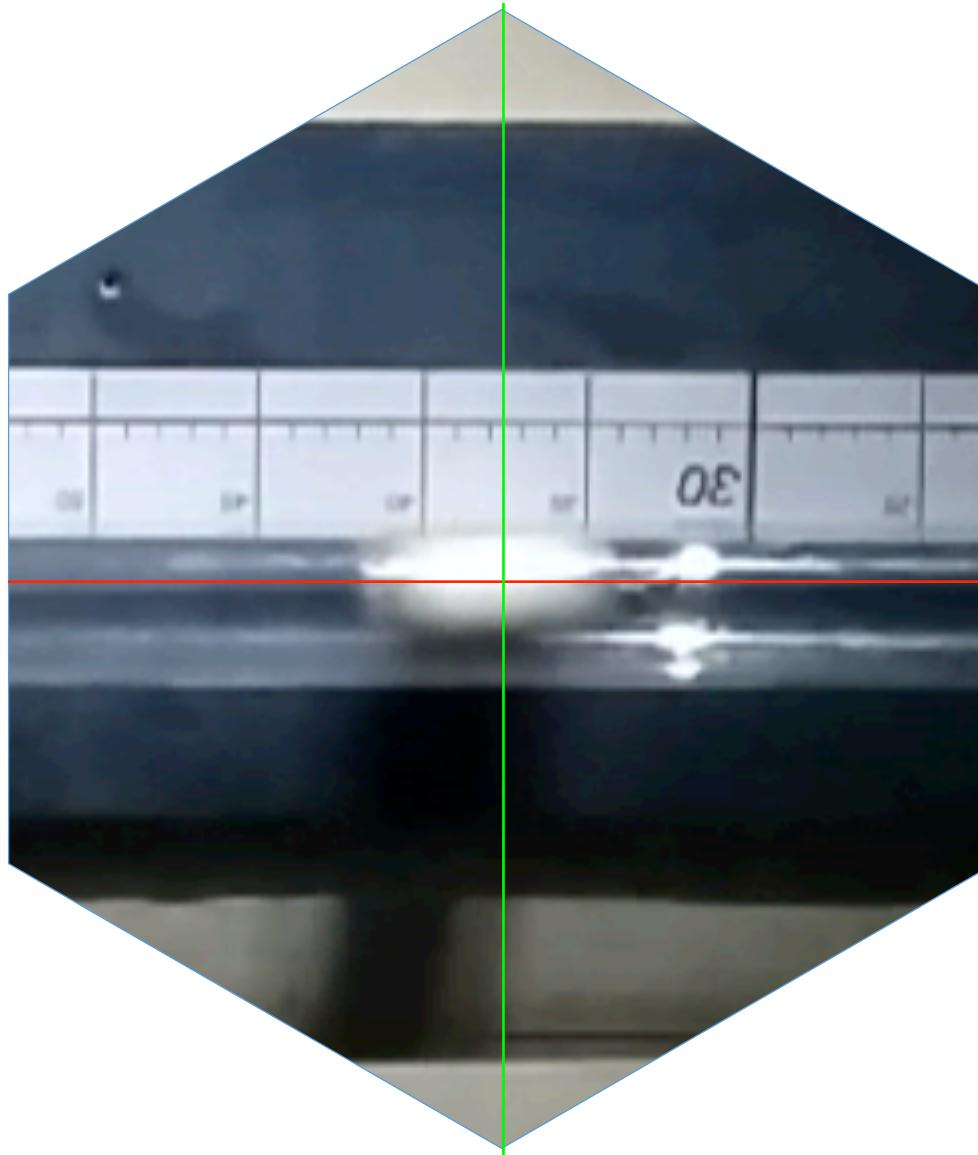
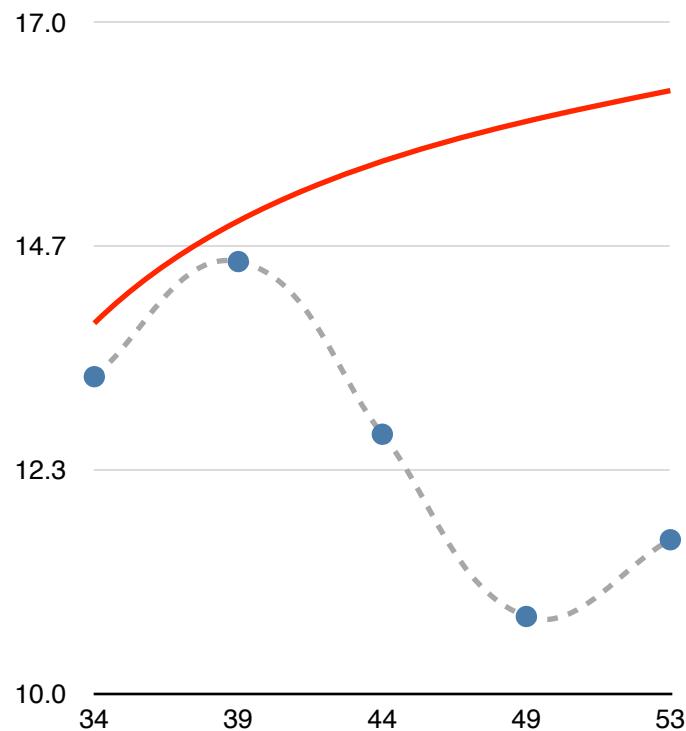
聚焦回放



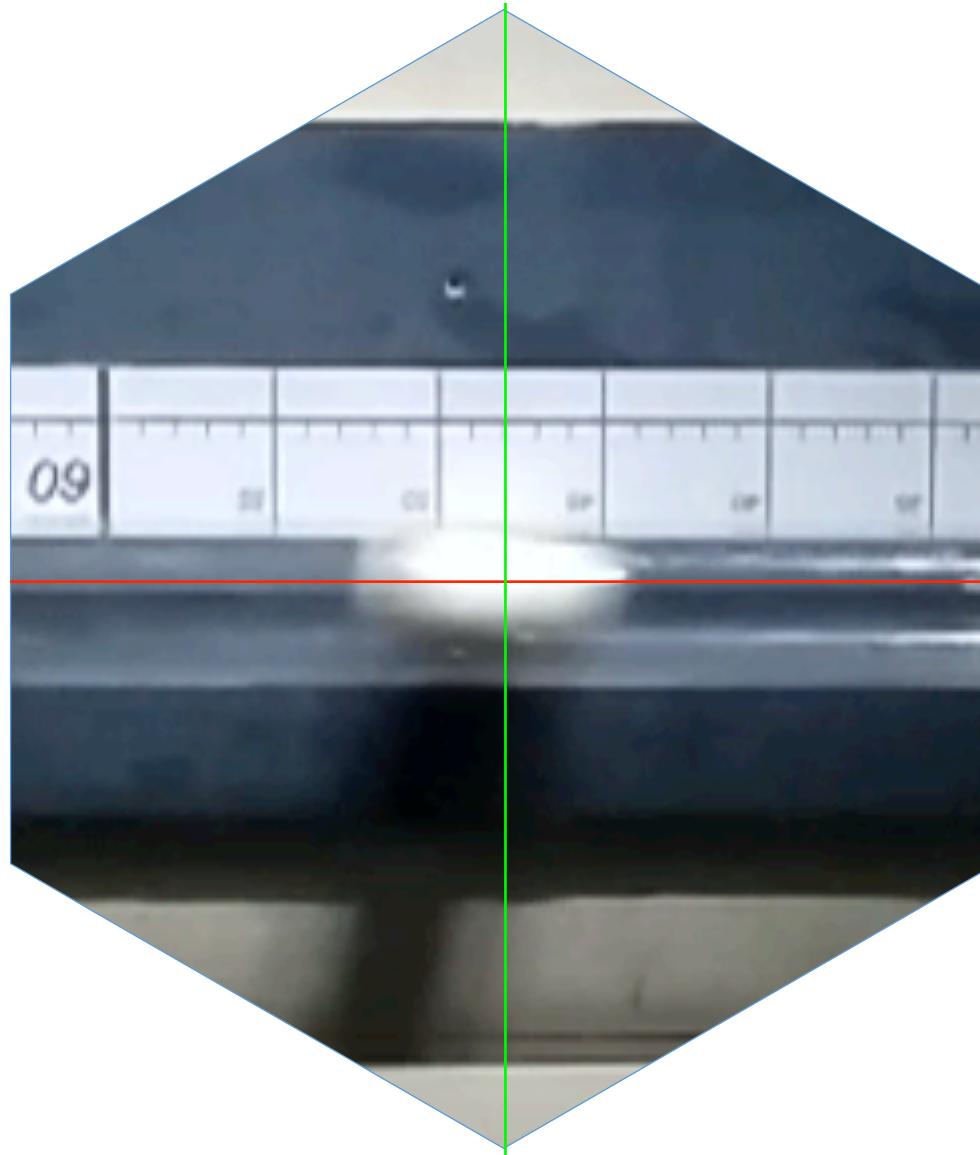
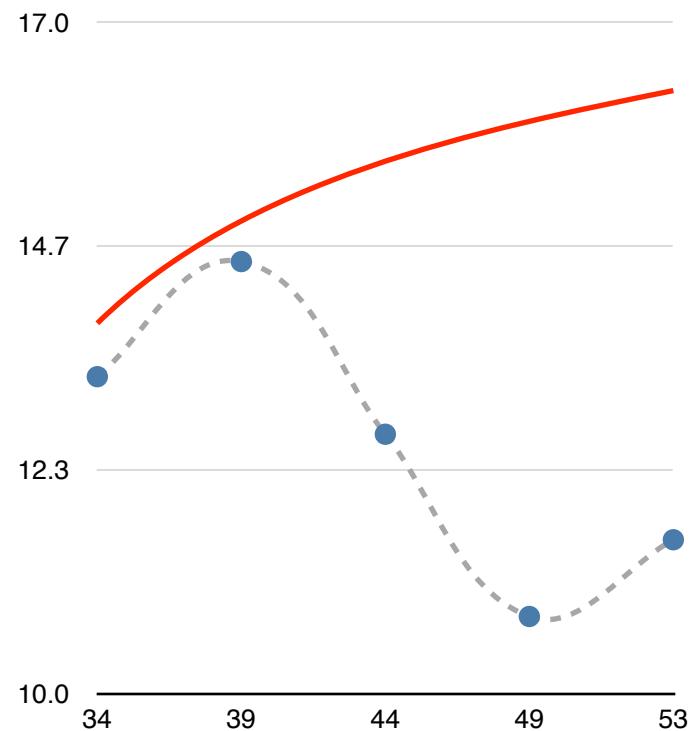
聚焦回放



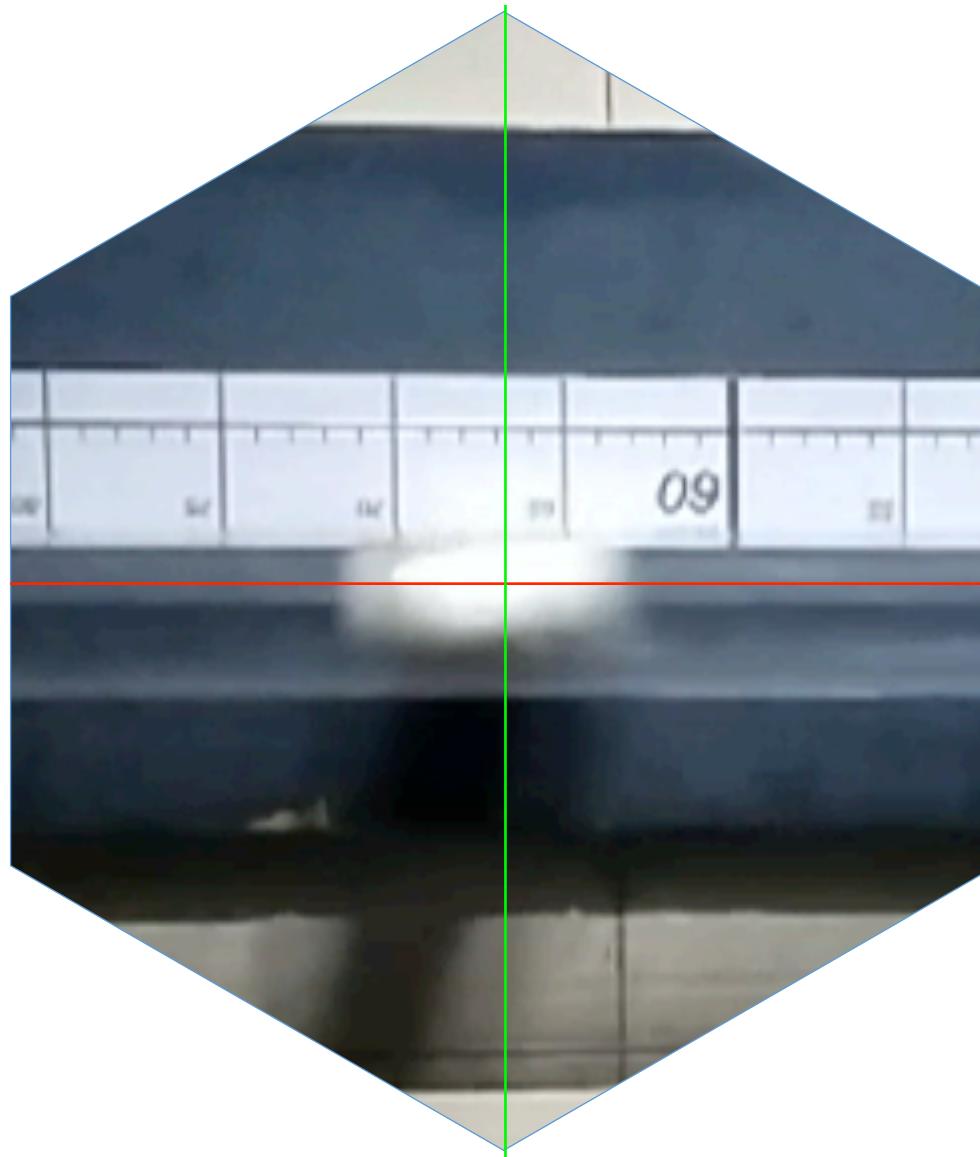
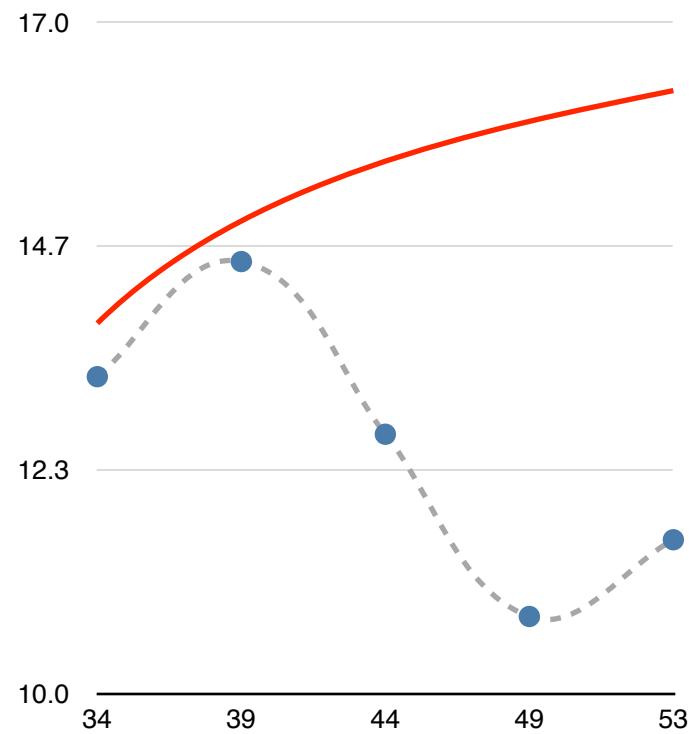
聚焦回放



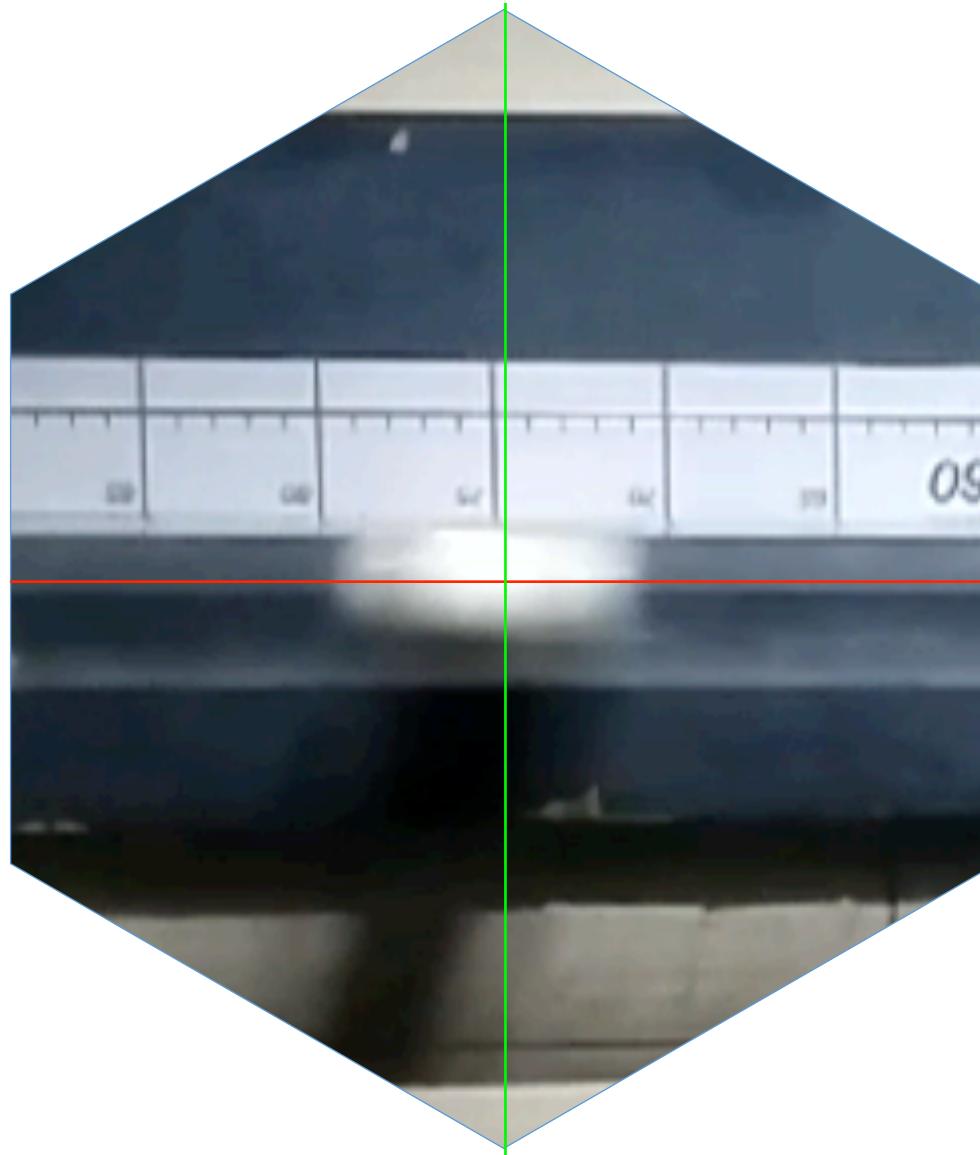
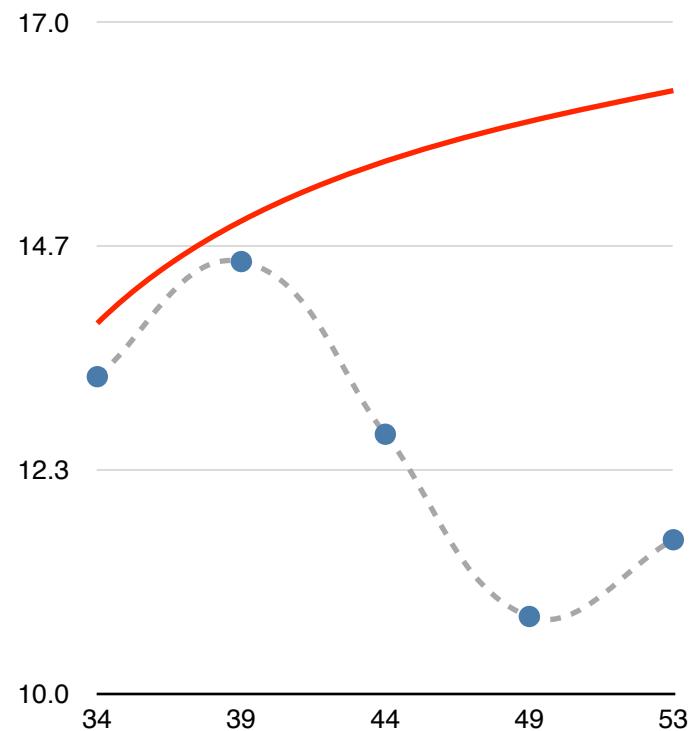
聚焦回放



聚焦回放



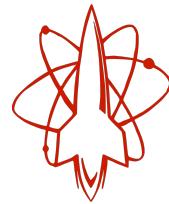
聚焦回放



AND.More



西安交通大学
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY



物理试验班
P. H. E. C

Presented By Z.Y.X