



# Мастер-класс факультета физики НИУ ВШЭ: "Физика колебаний в лабораторном практикуме"

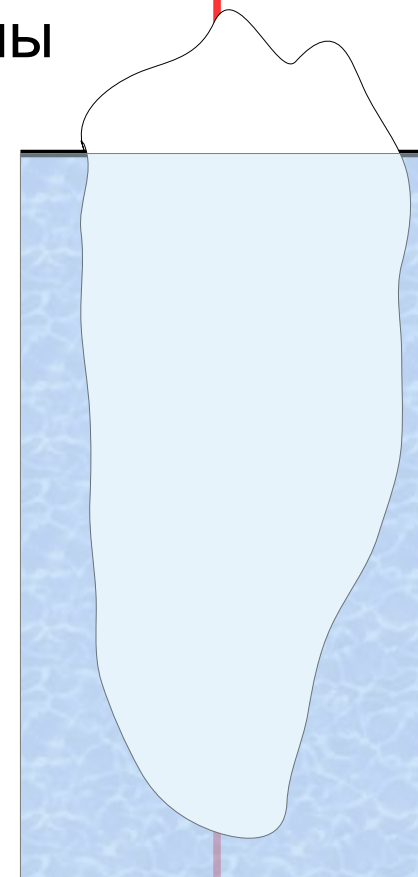
27.02.2021

# Колебания и волны в физике

- механика:  
колебания маятника, струны, мембраны

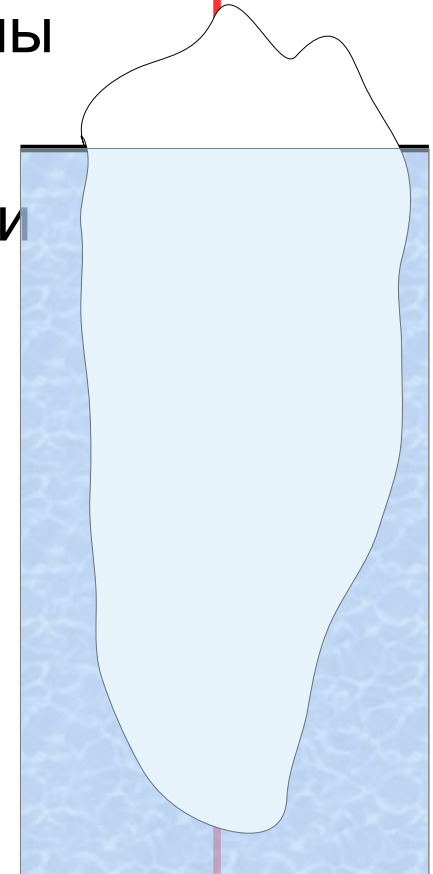
# Колебания и волны в физике

- механика:  
колебания маятника, струны, мембраны



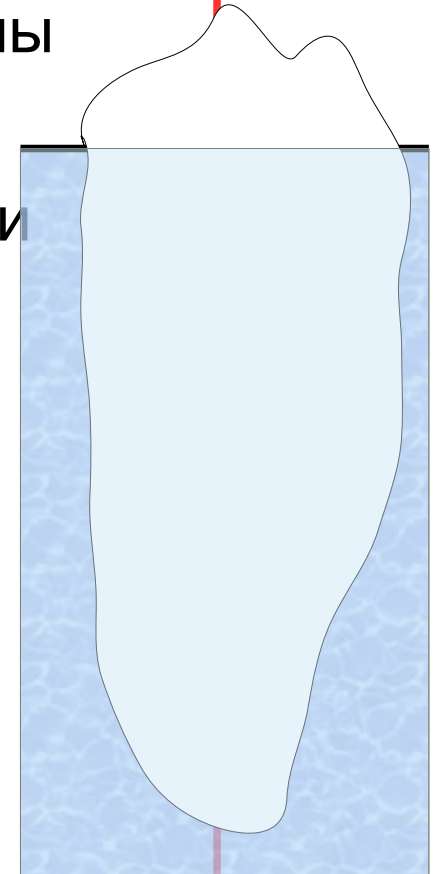
# Колебания и волны в физике

- механика:  
колебания маятника, струны, мембраны
- гидродинамика:  
звуковые волны, волны на поверхности  
жидкости



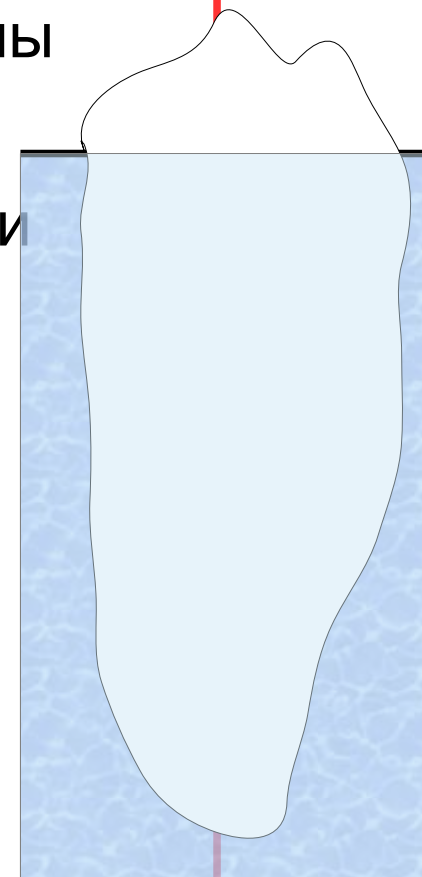
# Колебания и волны в физике

- механика:  
колебания маятника, струны, мембраны
- гидродинамика:  
звуковые волны, волны на поверхности жидкости
- электродинамика:  
радиоволны, дифракция и интерференция



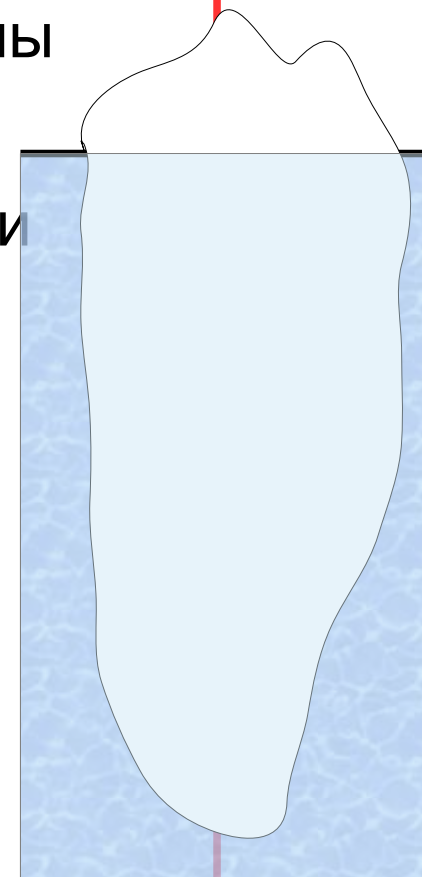
# Колебания и волны в физике

- механика:  
колебания маятника, струны, мембраны
- гидродинамика:  
звуковые волны, волны на поверхности жидкости
- электродинамика:  
радиоволны, дифракция и интерференция
- квантовая физика:  
волны де Бройля, дифракция частиц, осцилляции нейтрино



# Колебания и волны в физике

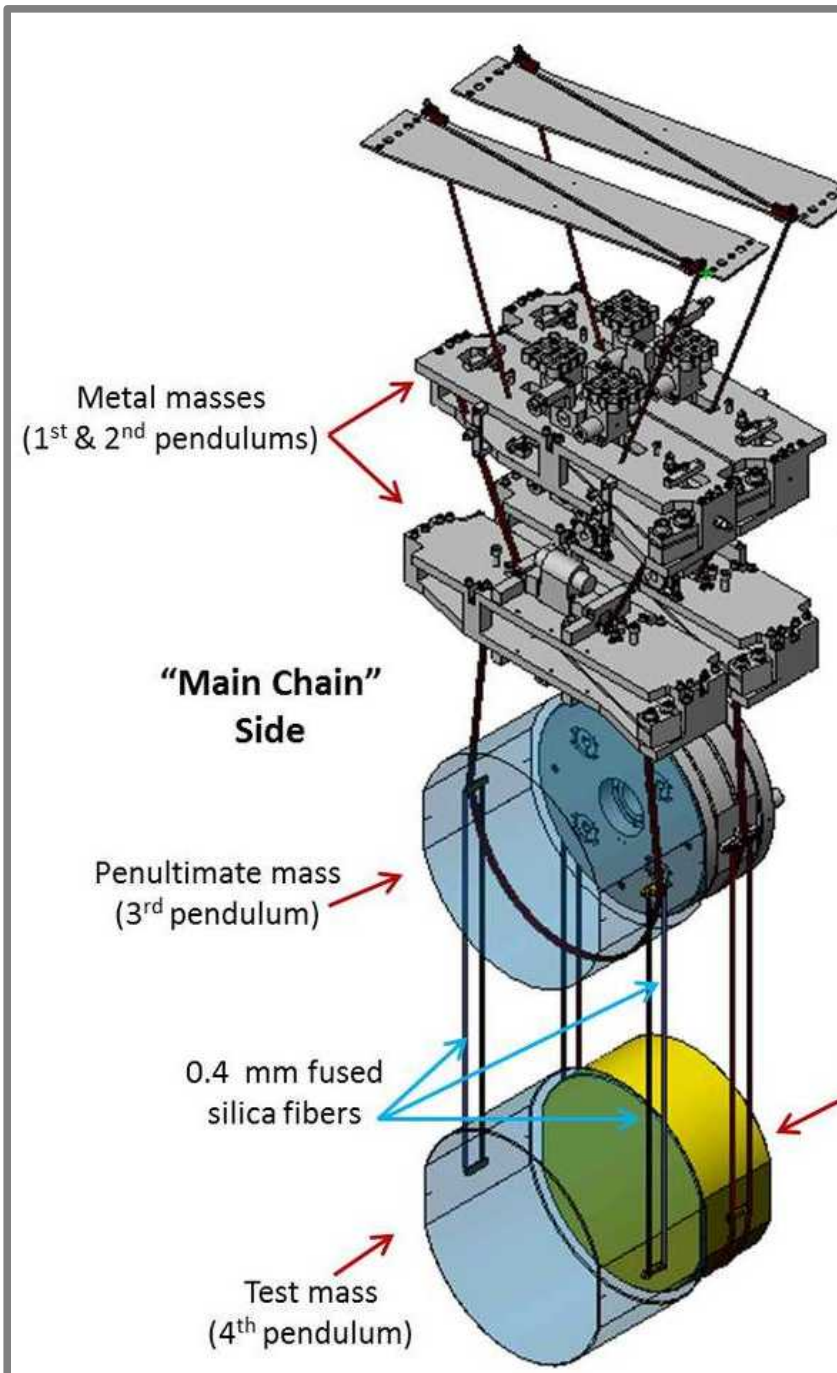
- механика:  
колебания маятника, струны, мембраны
- гидродинамика:  
звуковые волны, волны на поверхности жидкости
- электродинамика:  
радиоволны, дифракция и интерференция
- квантовая физика:  
волны де Бройля, дифракция частиц, осцилляции нейтрино
- астрофизика и космология:  
приливные волны, гравитационные волны



Маятник



# Маятник

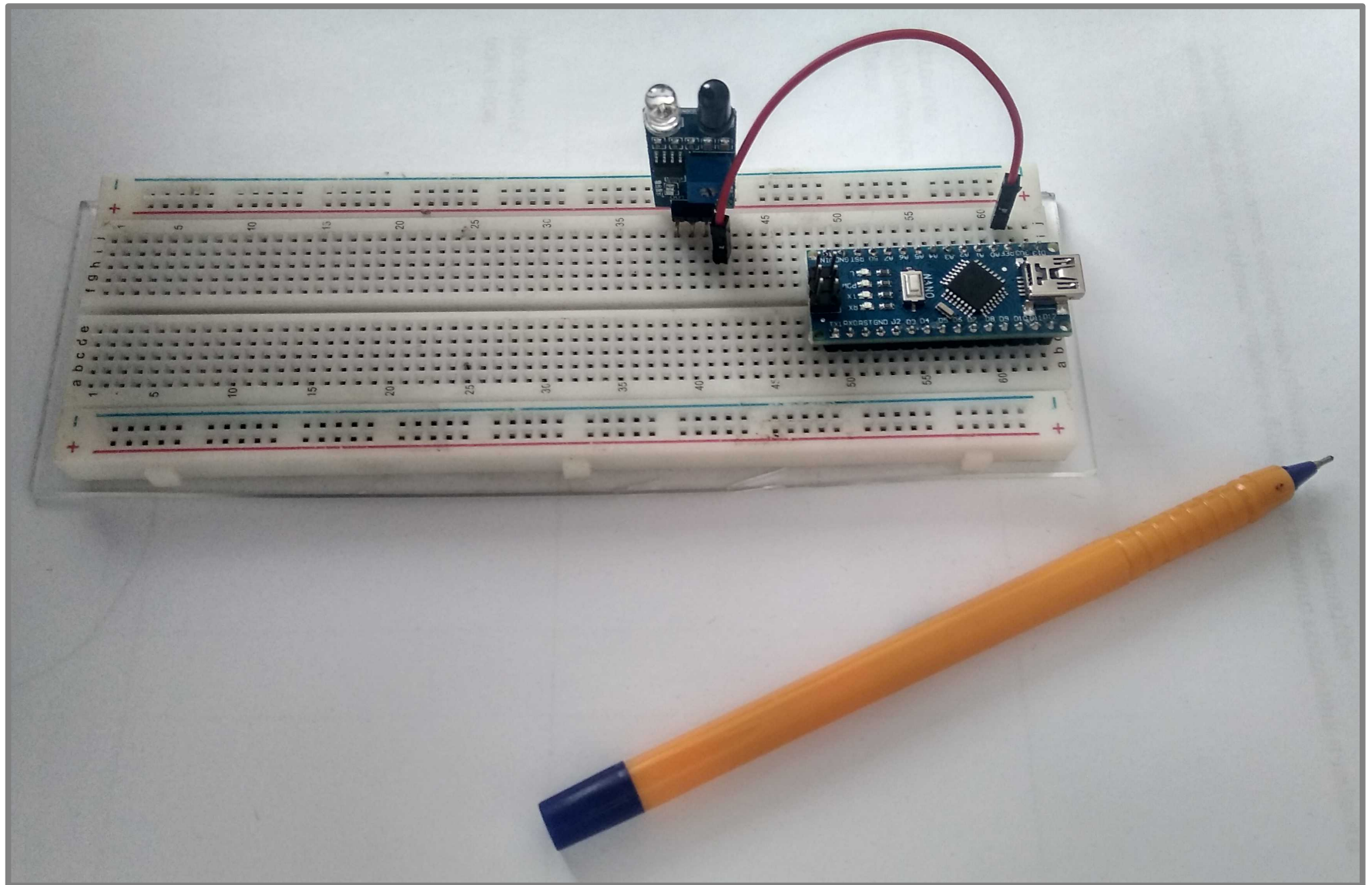


Маятник, используемый в детекторе  
гравитационных волн LIGO  
<https://www.ligo.caltech.edu/page/vibration-isolation>

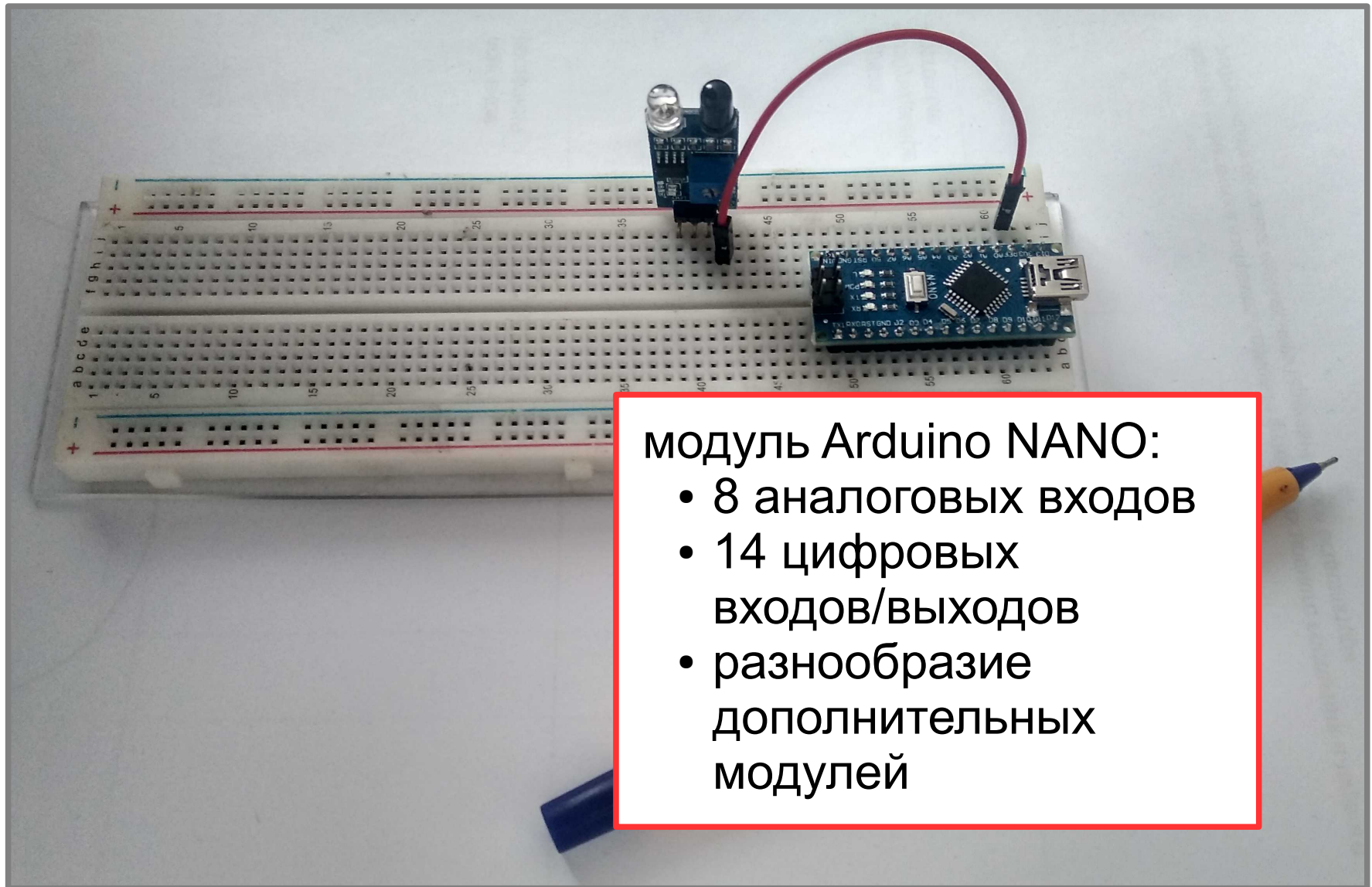
# Стенд для изучения колебаний



# Микроконтроллер Arduino для фиксации колебаний



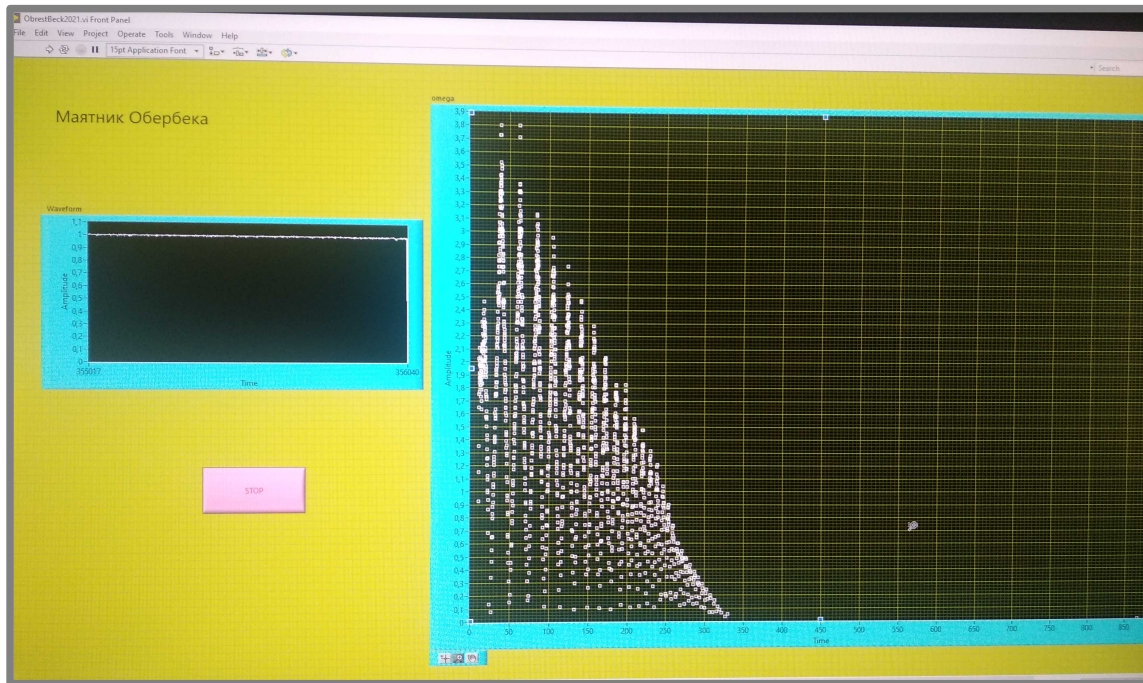
# Микроконтроллер Arduino для фиксации колебаний



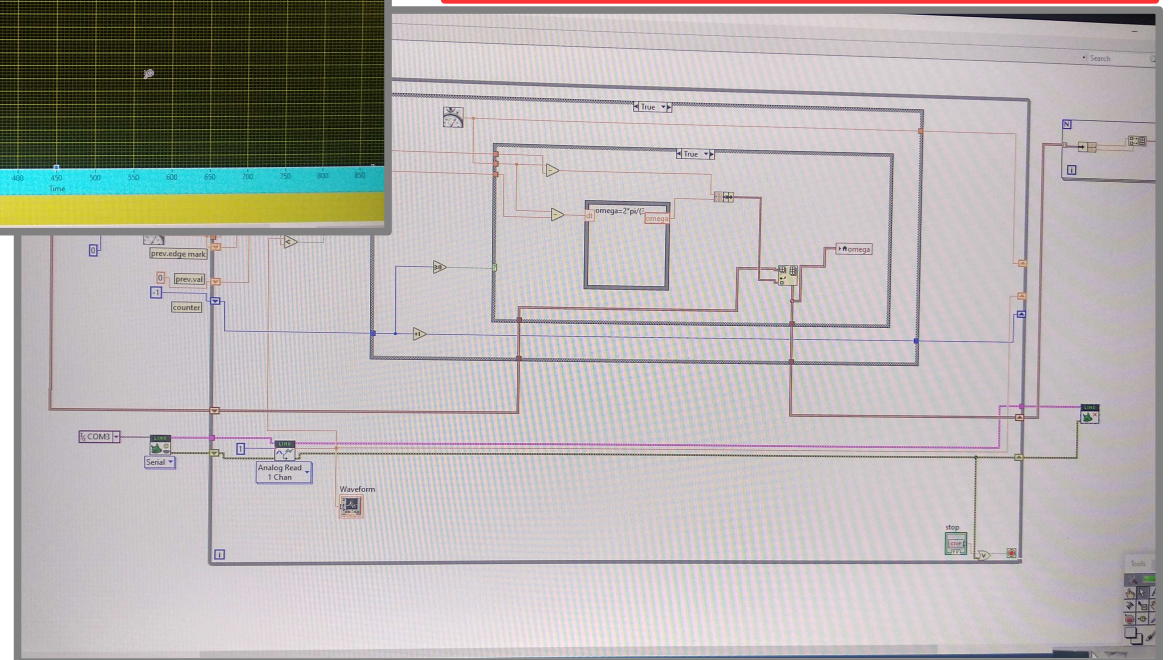
модуль Arduino NANO:

- 8 аналоговых входов
- 14 цифровых входов/выходов
- разнообразие дополнительных модулей

# Компьютеризованный сбор данных и их первичная обработка

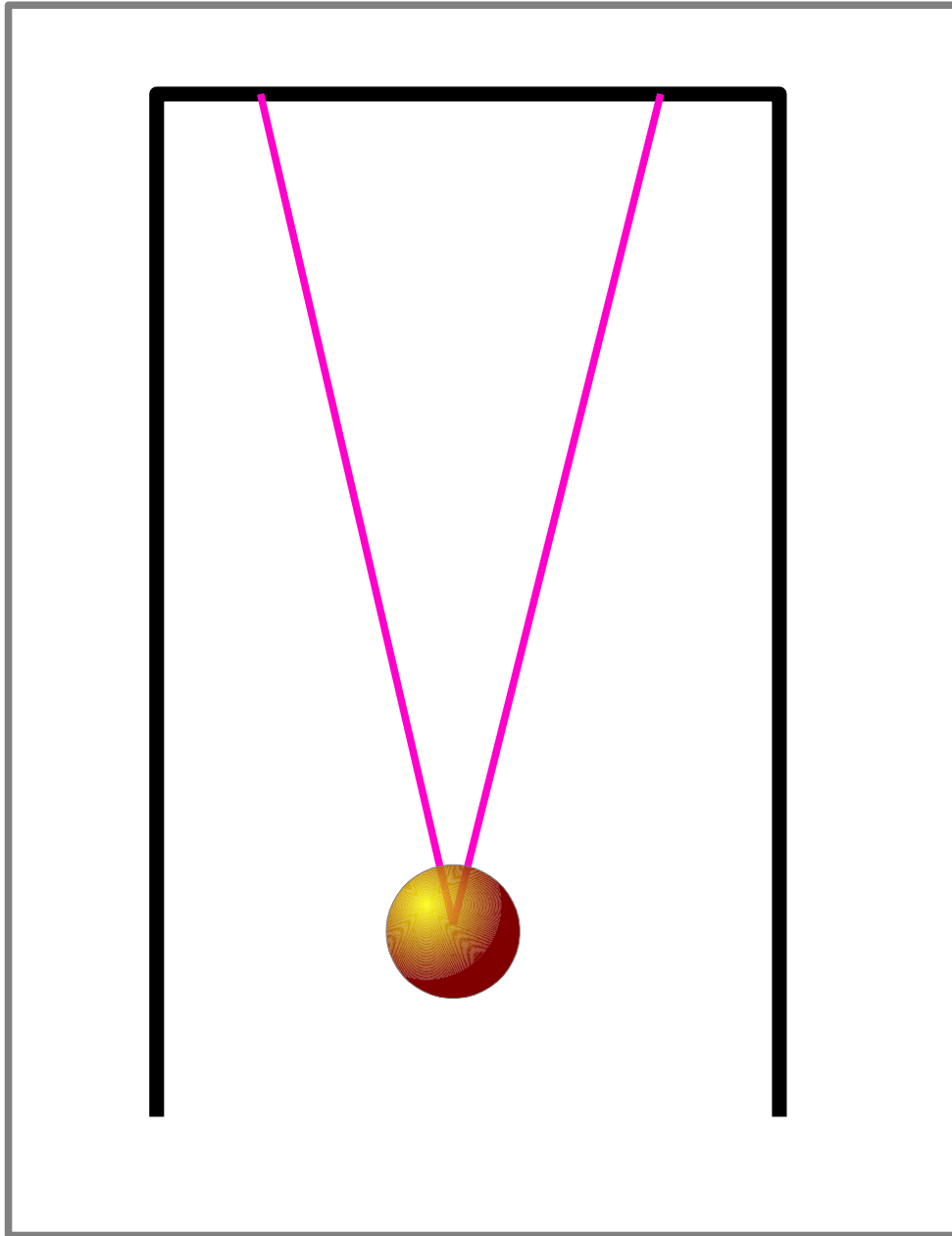


Мы используем среду LabView.  
Возможно использование любых языков программирования

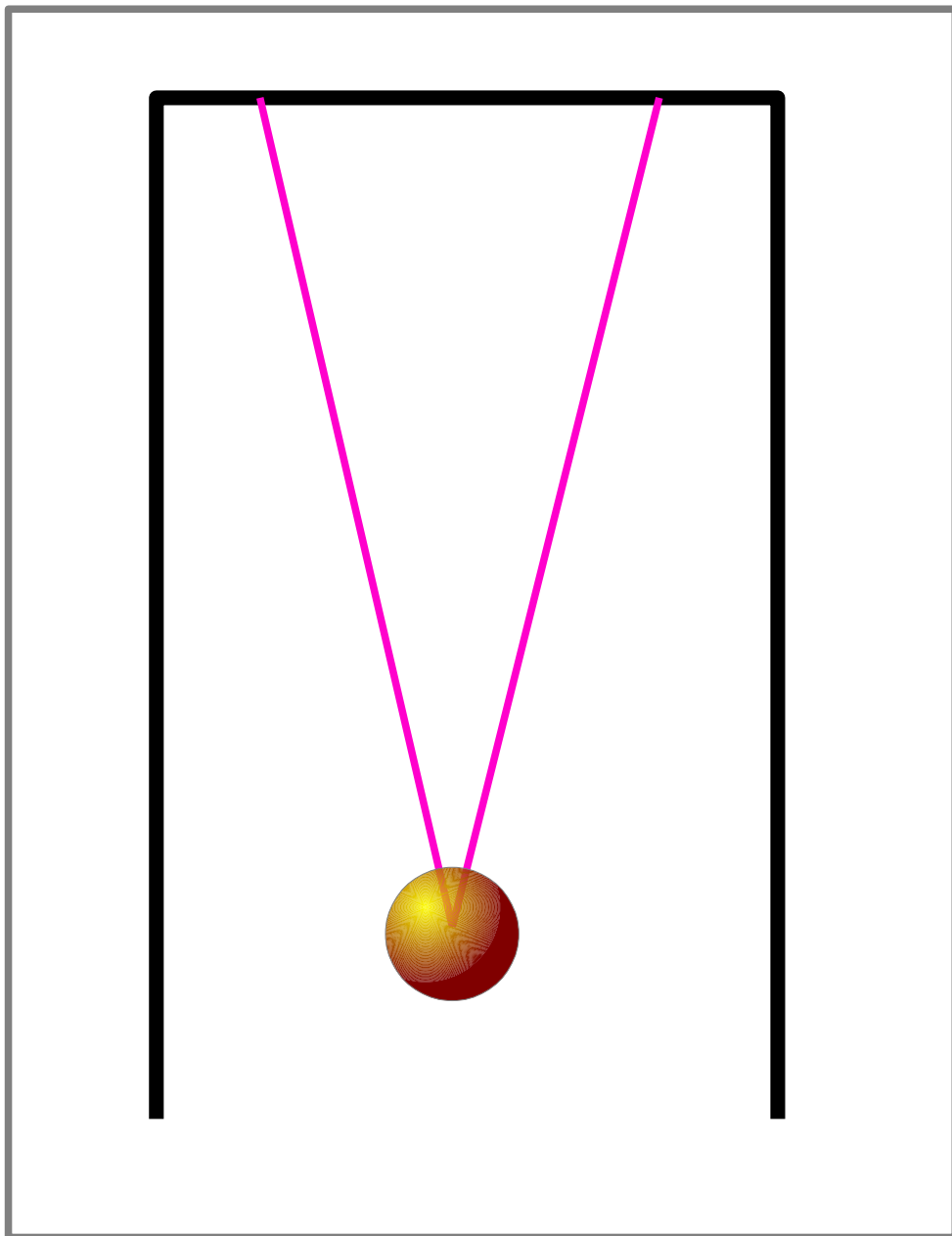




# Опыт 1: математический маятник



# Опыт 1: математический маятник

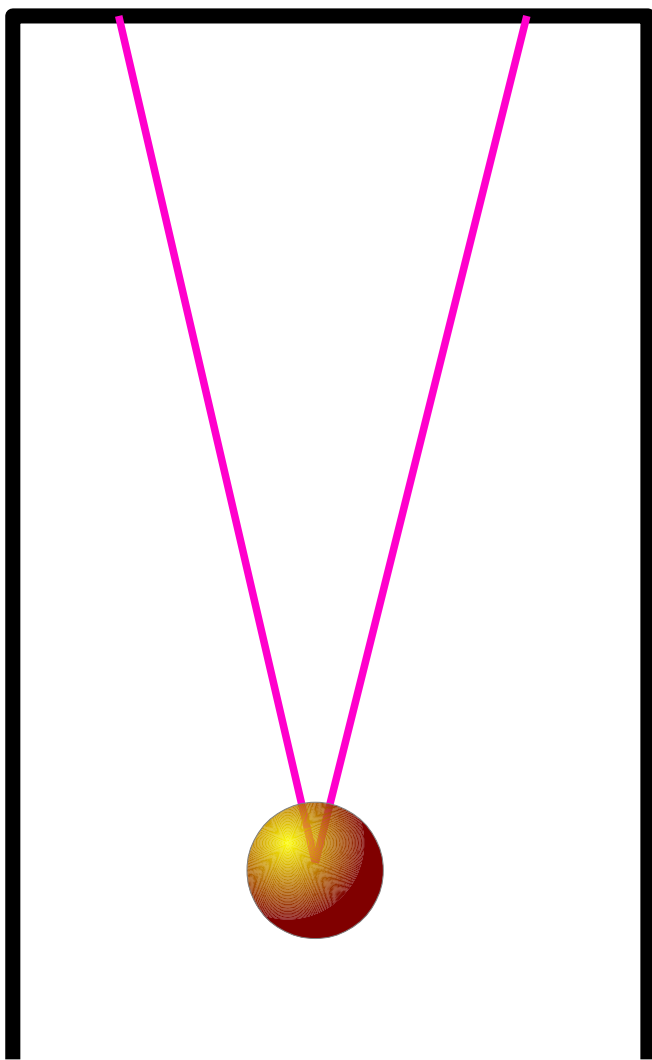


Несколько технических  
нюансов:

- V-образный скользящий  
подвес
- длину подвеса измерять  
не удобно
- возможны также  
колебания груза  
относительно точки  
подвеса

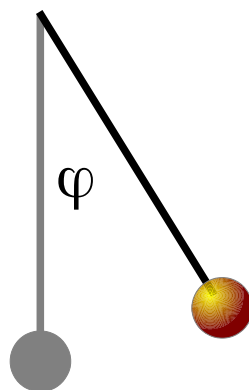


# Опыт 1: математический маятник



Несколько технических

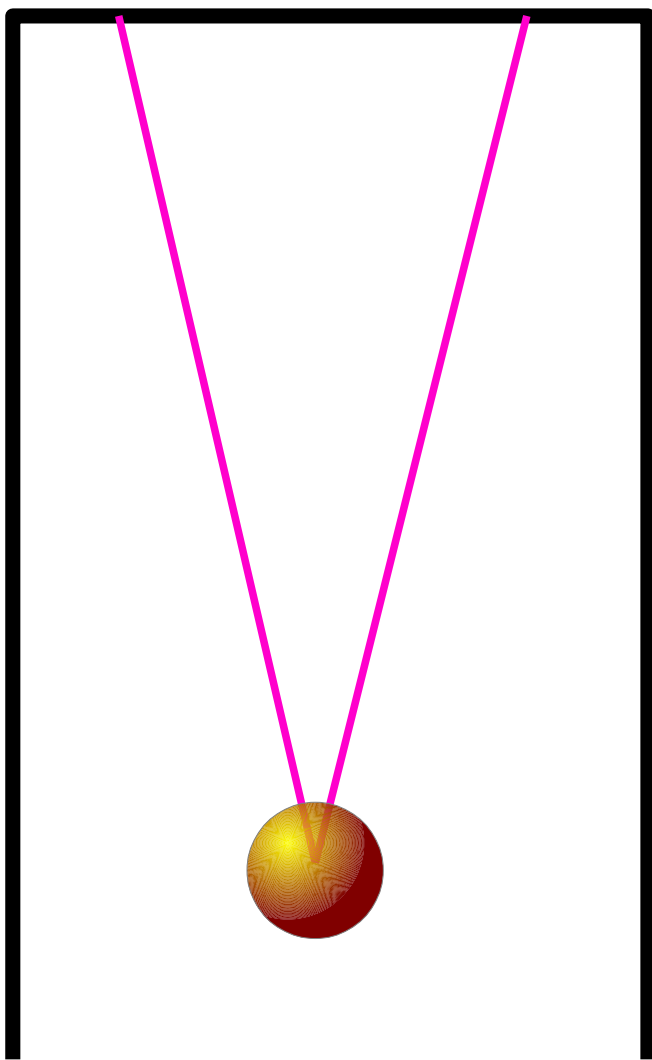
Маятник без затухания:



$$m g l (1 - \cos \varphi) + \frac{m V^2}{2} = const$$

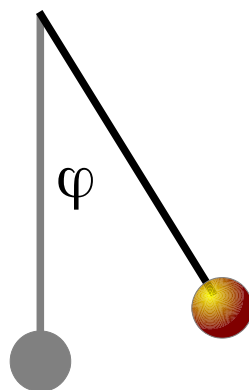
$$m g l (1 - \cos \varphi) + \frac{m l^2 \omega^2}{2} = const$$

# Опыт 1: математический маятник



Несколько технических

Маятник без затухания:

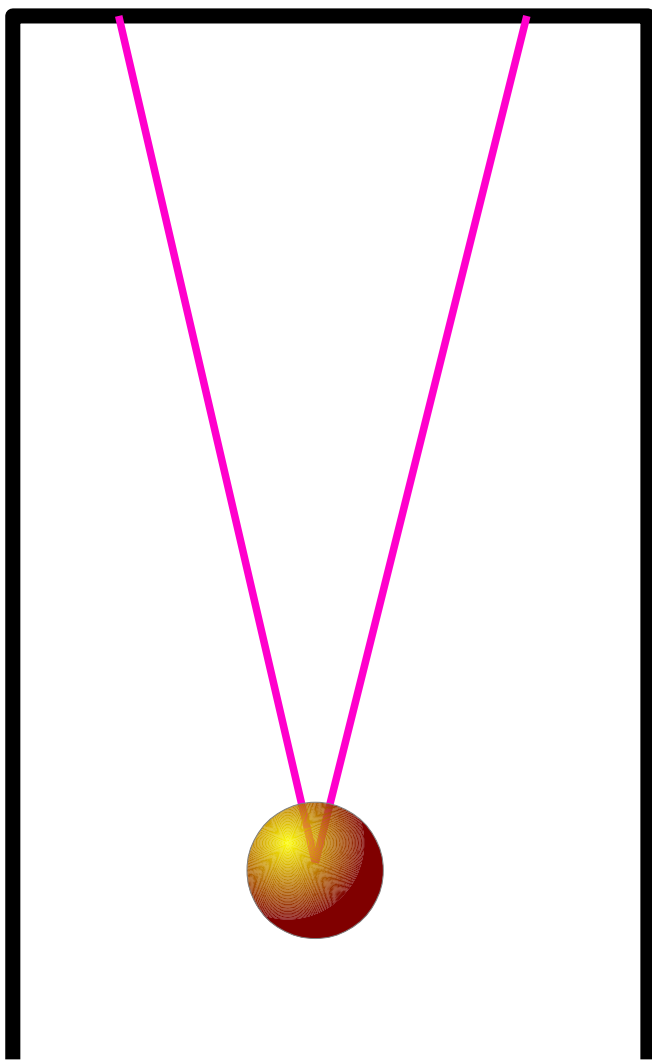


$$m g l (1 - \cos \varphi) + \frac{m V^2}{2} = const$$

$$m g l (1 - \cos \varphi) + \frac{m l^2 \omega^2}{2} = const$$

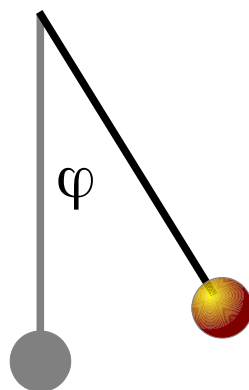
$$\frac{m g l}{2} \varphi^2 + \frac{m l^2}{2} (\dot{\varphi})^2 = const$$

# Опыт 1: математический маятник



Несколько технических

Маятник без затухания:



$$m g l (1 - \cos \varphi) + \frac{m V^2}{2} = const$$

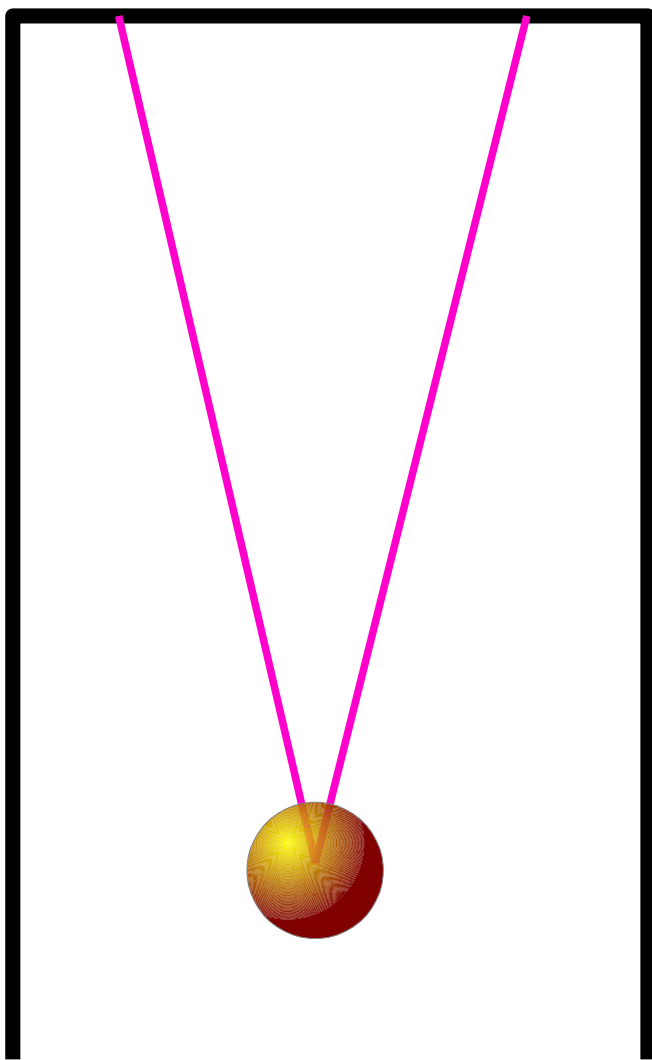
$$m g l (1 - \cos \varphi) + \frac{m l^2 \omega^2}{2} = const$$

$$\frac{m g l}{2} \varphi^2 + \frac{m l^2}{2} (\dot{\varphi})^2 = const$$

$$g \varphi \dot{\varphi} + l \dot{\varphi} \ddot{\varphi} = 0$$

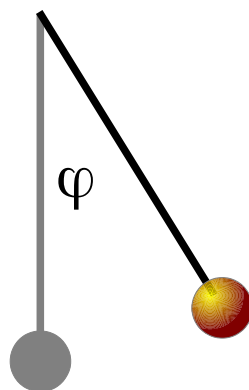
$$\ddot{\varphi} + \frac{g}{l} \varphi = 0$$

# Опыт 1: математический маятник



Несколько технических

Маятник без затухания:



$$m g l (1 - \cos \varphi) + \frac{m V^2}{2} = const$$

$$m g l (1 - \cos \varphi) + \frac{m l^2 \omega^2}{2} = const$$

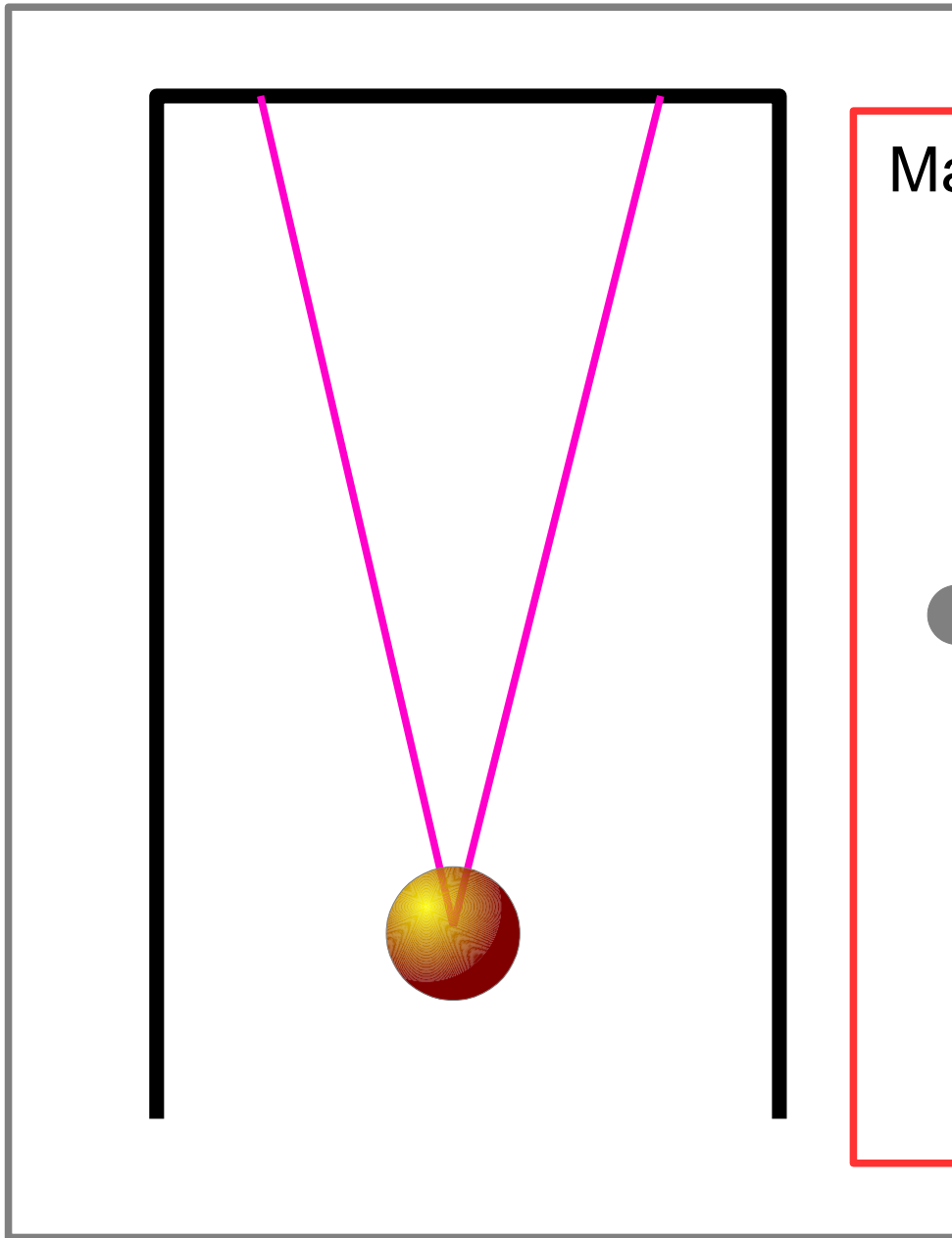
$$\frac{m g l}{2} \varphi^2 + \frac{m l^2}{2} (\dot{\varphi})^2 = const$$

$$g \varphi \dot{\varphi} + l \dot{\varphi} \ddot{\varphi} = 0$$

$$\ddot{\varphi} + \frac{g}{l} \varphi = 0$$

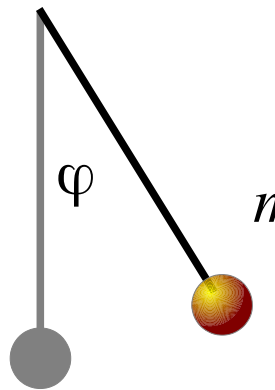
$$\omega_0 = \sqrt{\frac{g}{l}}$$

# Опыт 1: математический маятник



Неско

Маятник б



Затухающие колебания

$$m l \ddot{\varphi} = -\xi l \dot{\varphi} - m g \sin \varphi$$

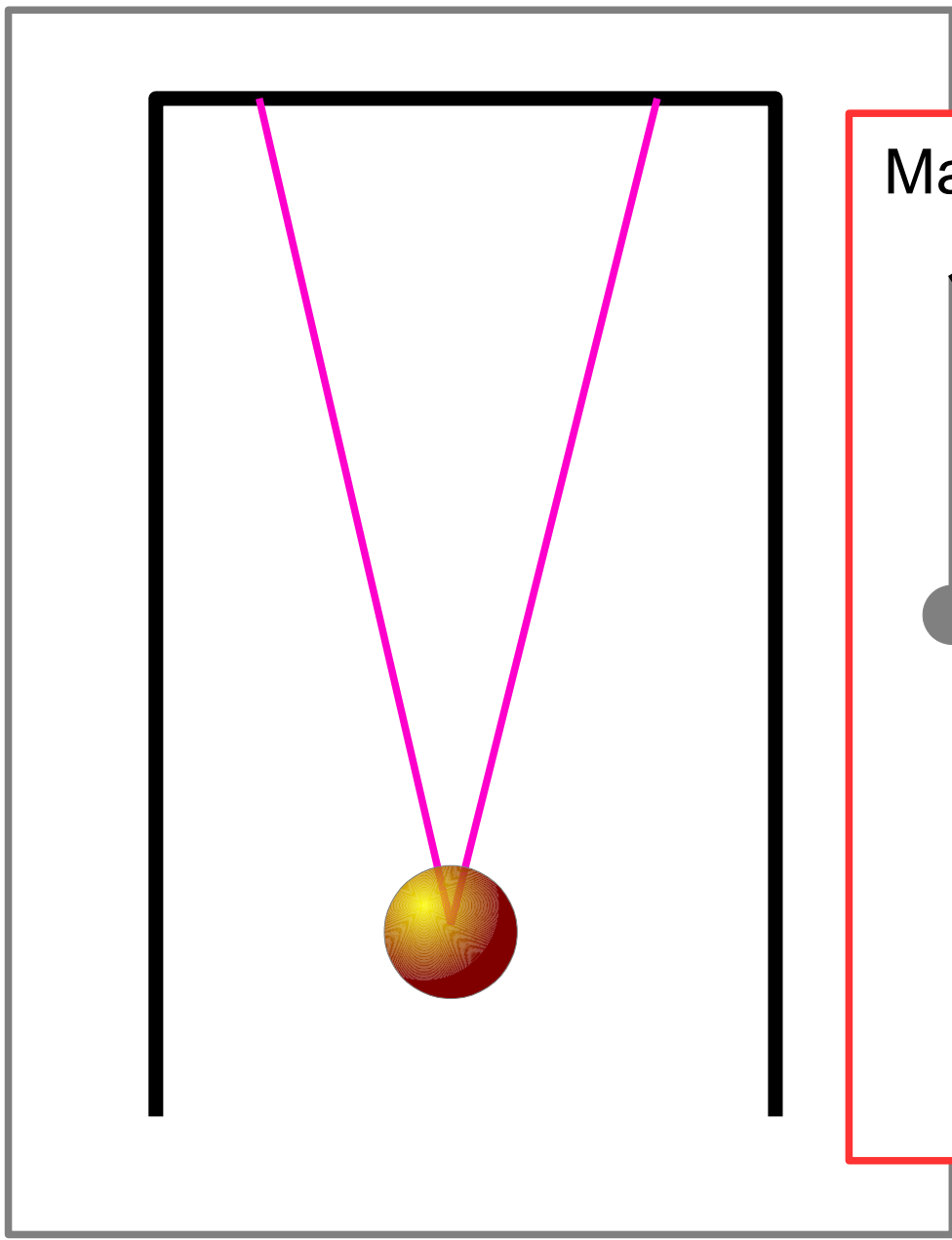
$$\ddot{\varphi} + 2\gamma \dot{\varphi} + \frac{g}{l} \varphi = 0$$

$$\gamma = \frac{\xi}{2m}$$

$$\ddot{\varphi} + \frac{g}{l} \varphi = 0$$

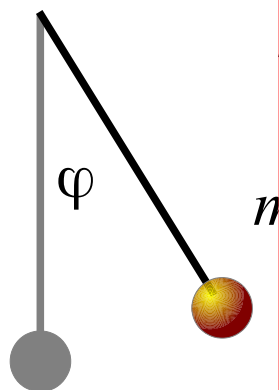
$$\omega_0 = \sqrt{\frac{g}{l}}$$

# Опыт 1: математический маятник



Несколько

Маятник б



Затухающие колебания

$$m l \ddot{\varphi} = -\xi l \dot{\varphi} - m g \sin \varphi$$

$$\ddot{\varphi} + 2 \gamma \dot{\varphi} + \frac{g}{l} \varphi = 0$$

$$\gamma = \frac{\xi}{2m}$$

для  $\omega_0 \gg \gamma$

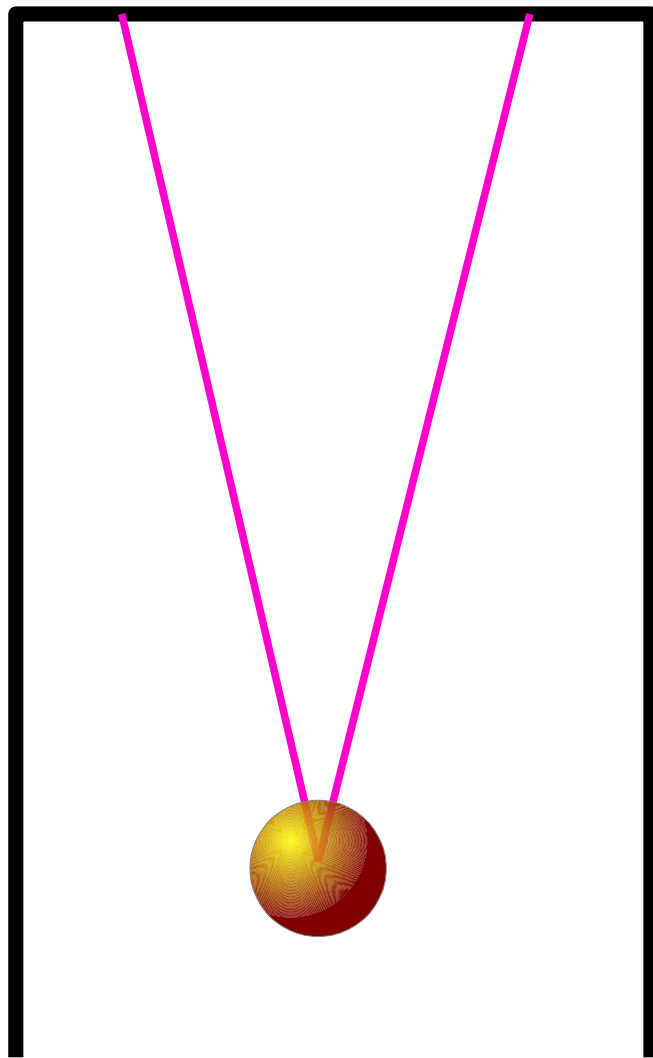
$$\varphi(t) = A e^{-\gamma t} \cos(\omega_0 t + \varphi_0)$$

$$\ddot{\varphi} + \frac{g}{l} \varphi = 0$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{g}{l}}$$

# Организация опыта

# Опыт 1: математический маятник

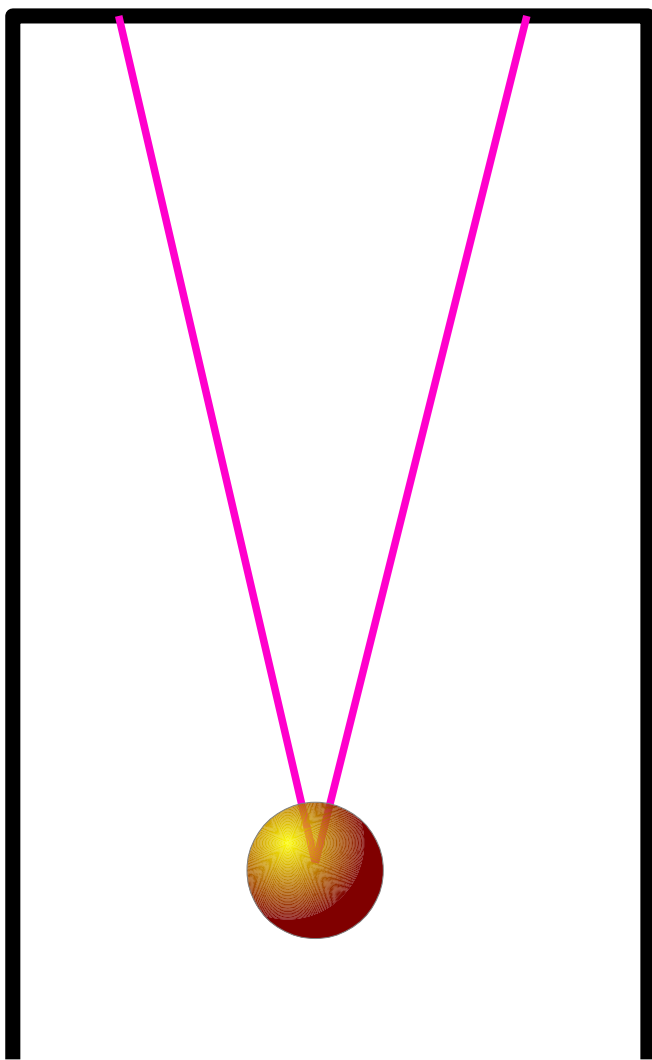


Определяем  $g$ ...

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{g}{l}}$$



# Опыт 1: математический маятник



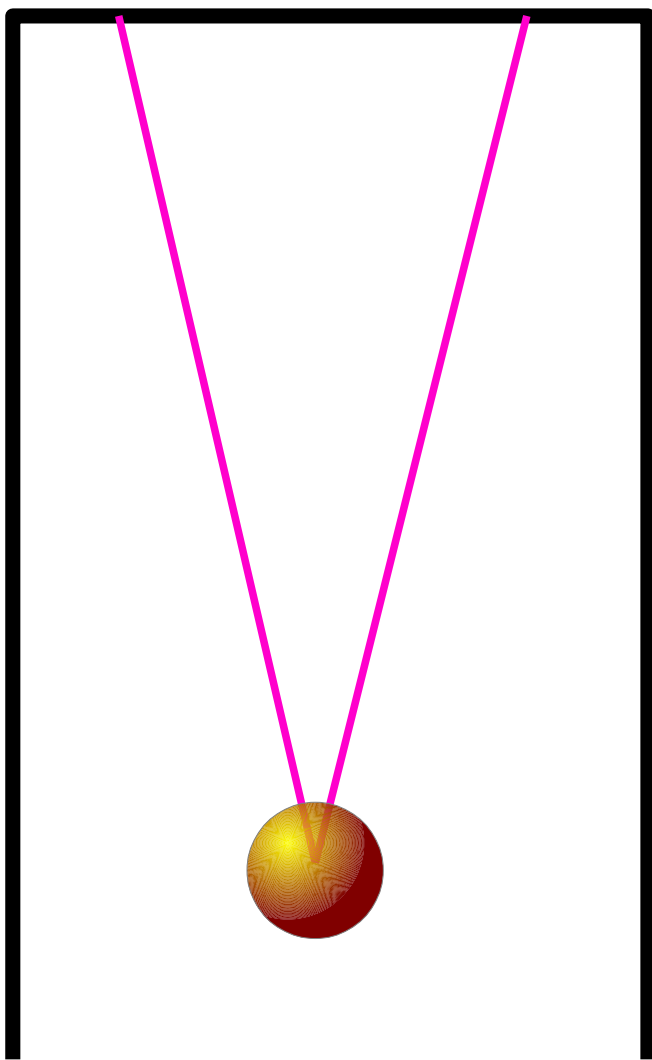
Определяем  $g$ ...

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$$

$$T^2 = \frac{4\pi^2}{g} l$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{g}{l}}$$

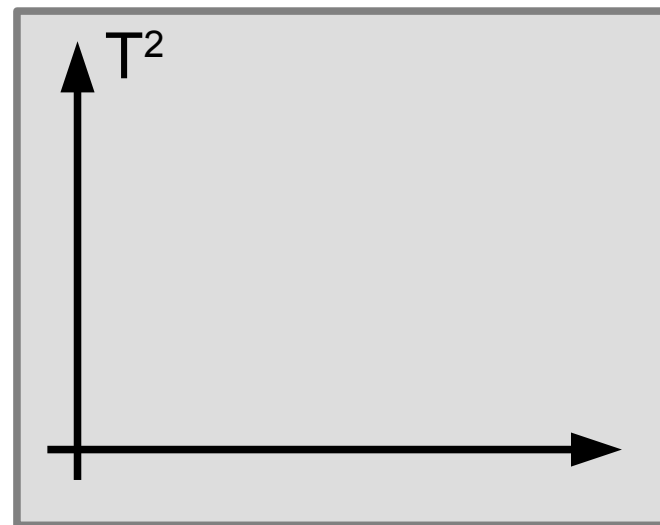
# Опыт 1: математический маятник



Определяем  $g$ ...

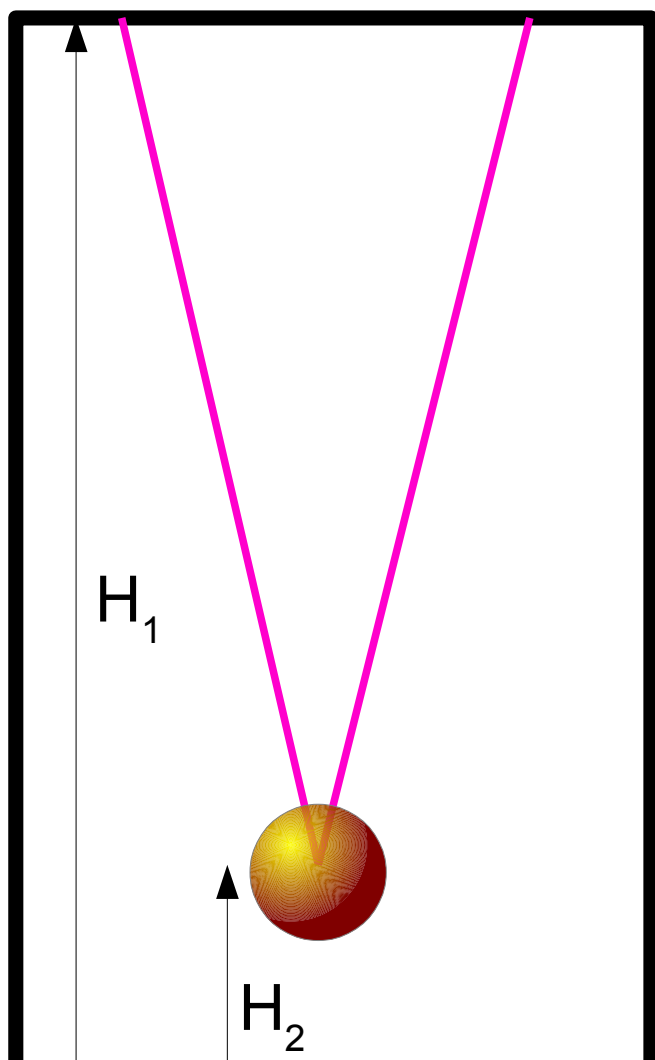
$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$$

$$T^2 = \frac{4\pi^2}{g}l$$



$$\omega_0 = \sqrt{\frac{g}{l}}$$

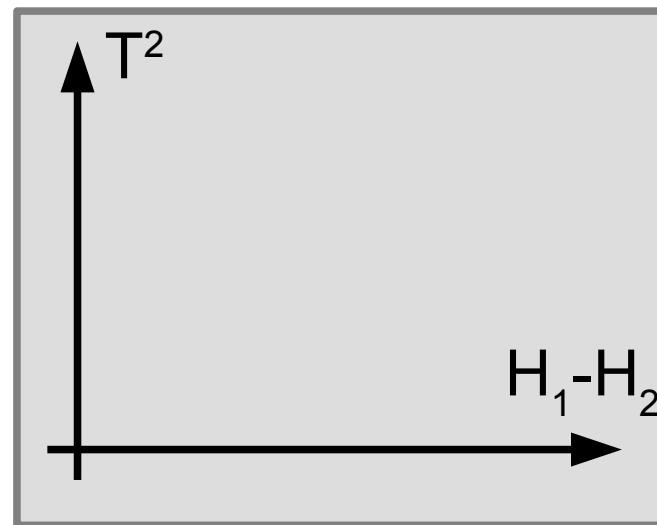
# Опыт 1: математический маятник



Определяем  $g$ ...

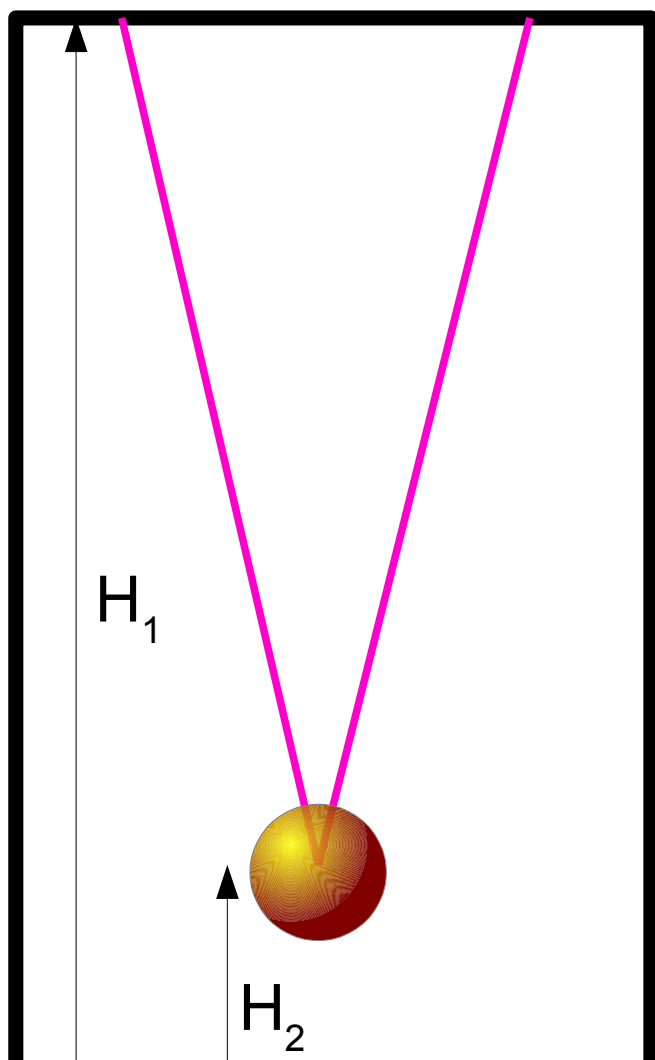
$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$$

$$T^2 = \frac{4\pi^2}{g} l$$



$$\omega_0 = \sqrt{\frac{g}{l}}$$

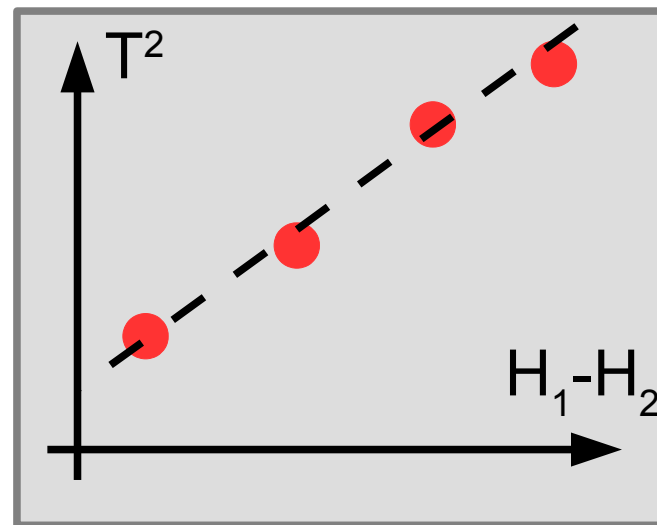
# Опыт 1: математический маятник



Определяем  $g$ ...

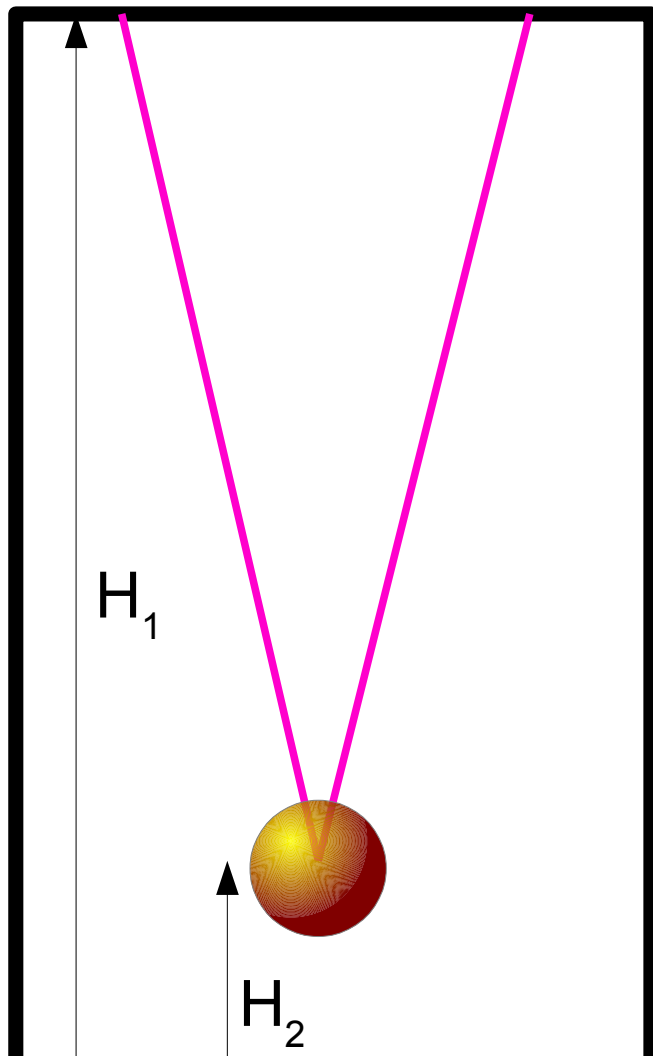
$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$$

$$T^2 = \frac{4\pi^2}{g} l$$



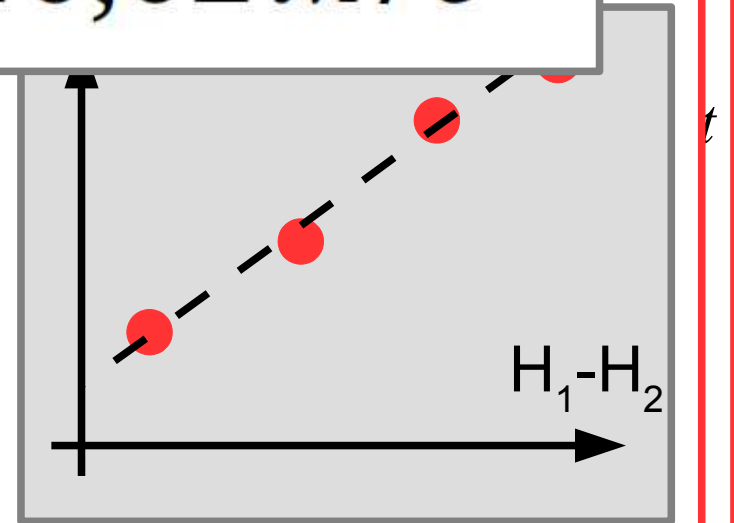
$$\omega_0 = \sqrt{\frac{g}{l}}$$

# Опыт 1: математический маятник



Определяем  $g$ ...

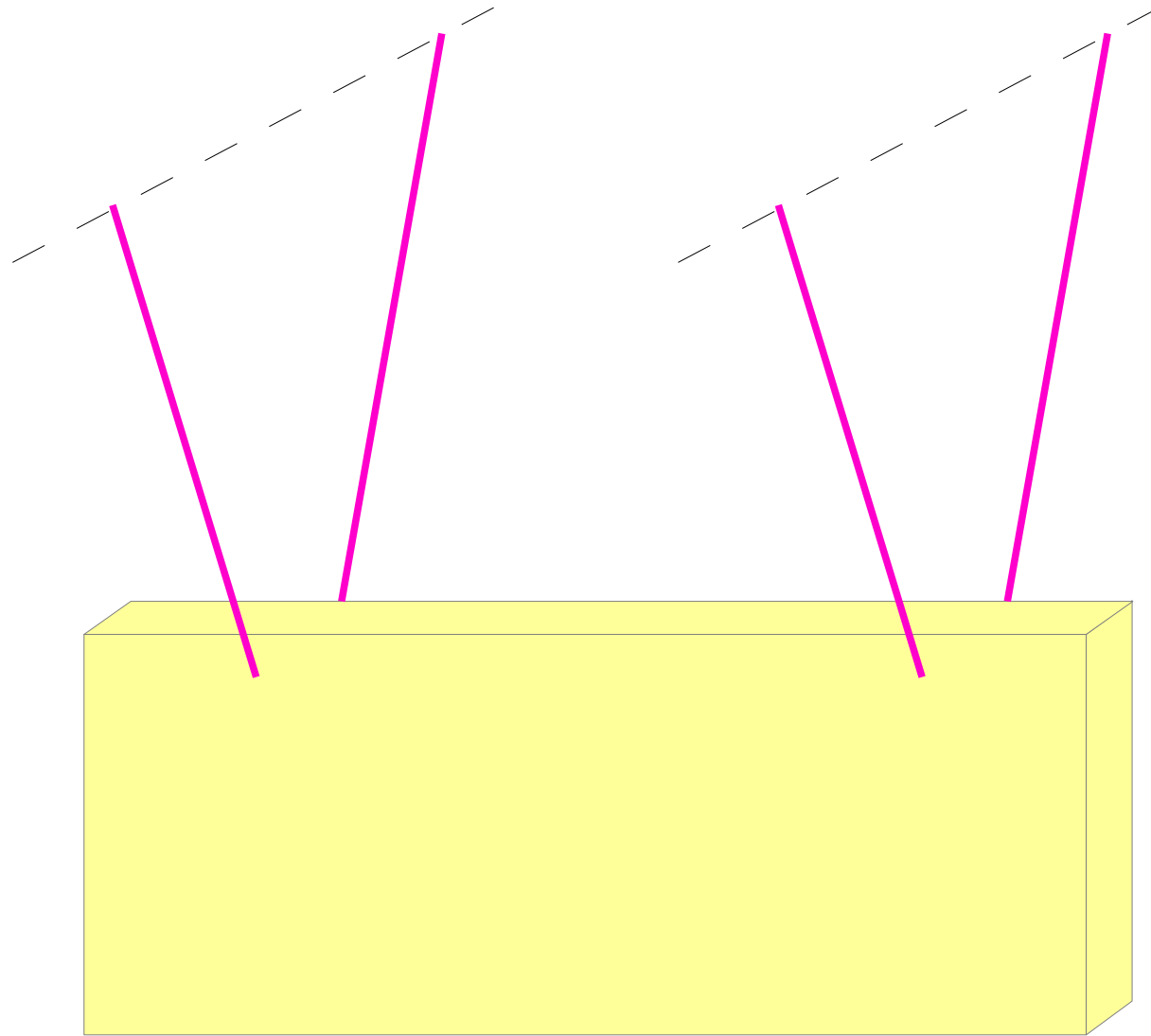
$$9,83 \pm 0,02 \text{ м/с}^2$$



$$\omega_0 = \sqrt{\frac{g}{l}}$$

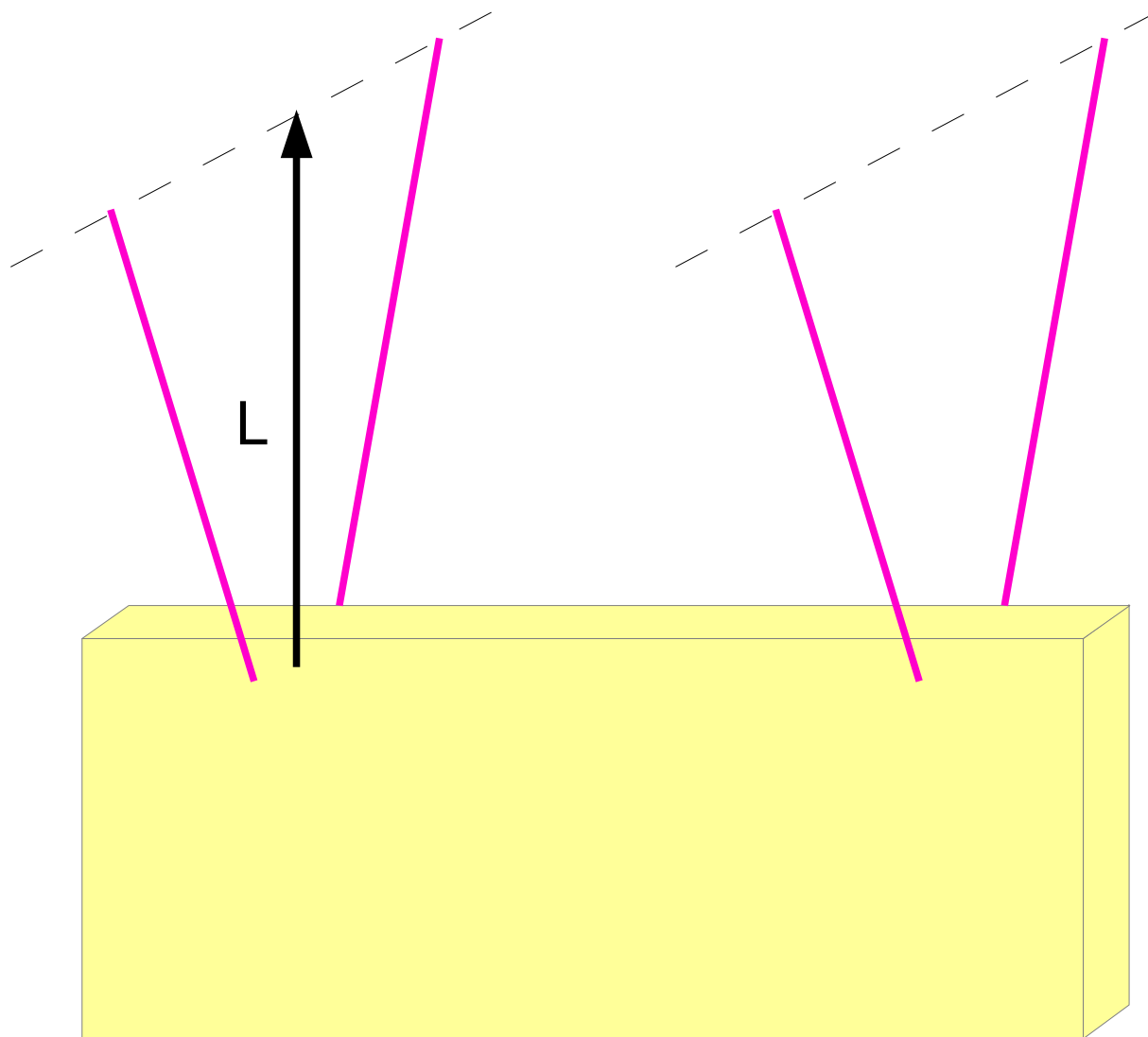


# Опыт 2: вынужденные колебания, резонанс



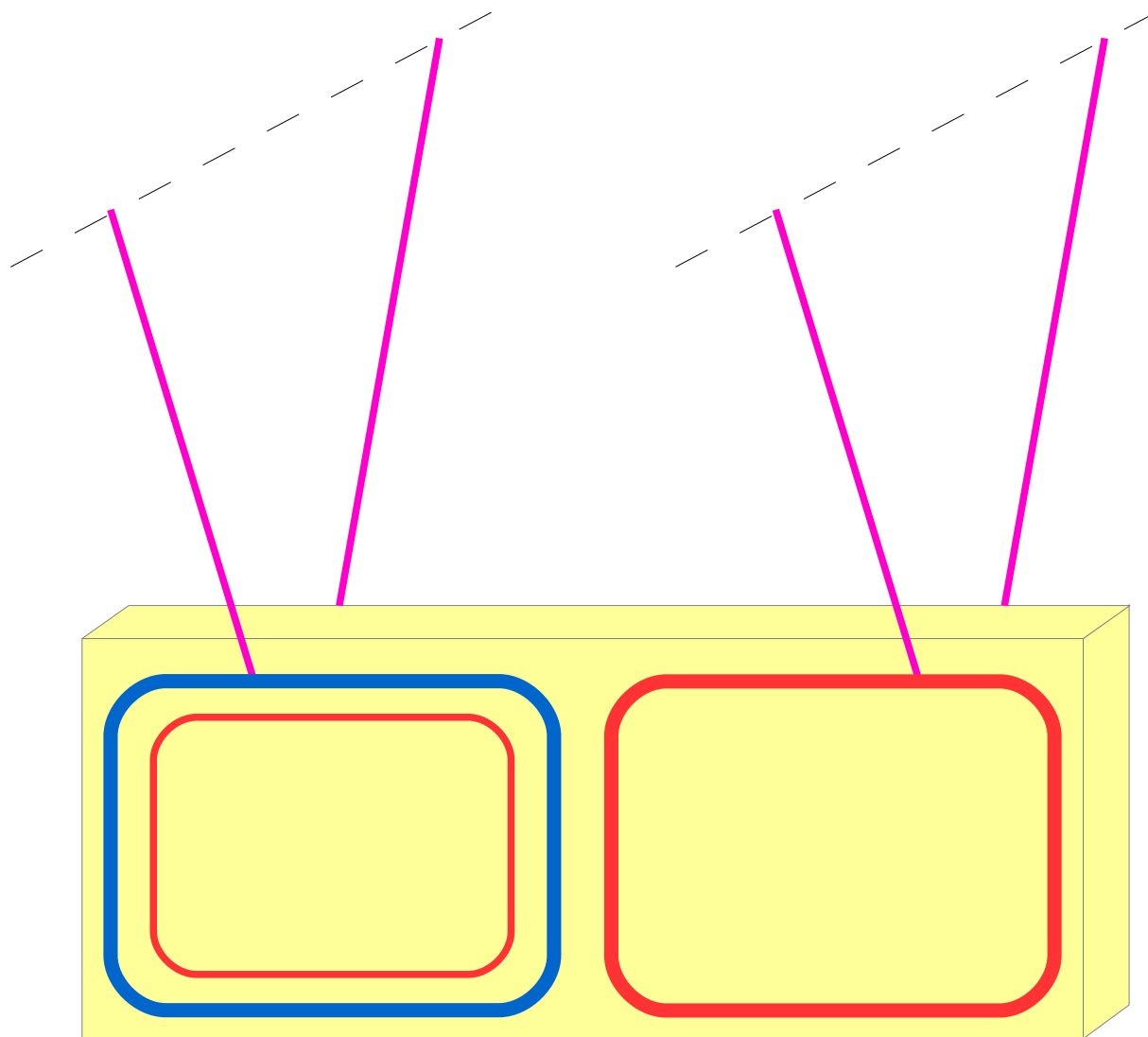
# Опыт 2: вынужденные колебания, резонанс

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}}$$



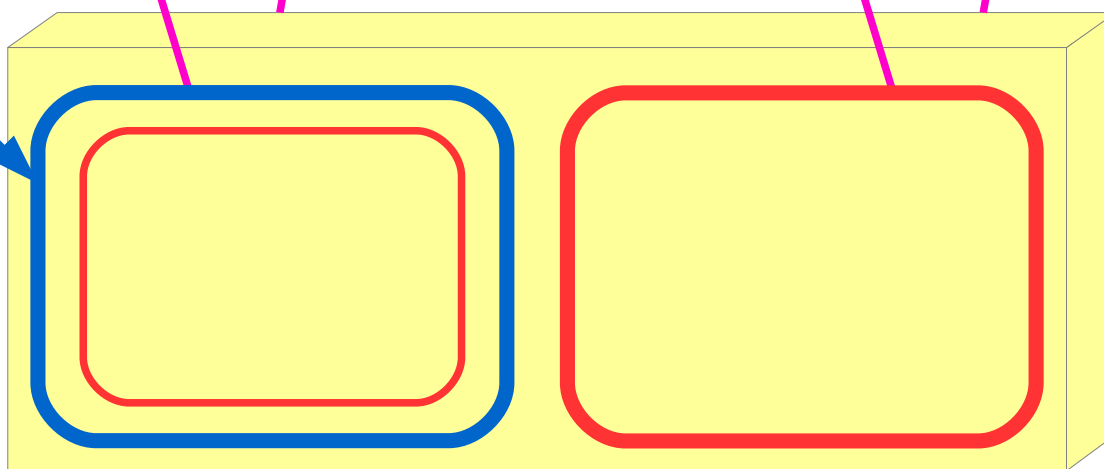


# Опыт 2: вынужденные колебания, резонанс



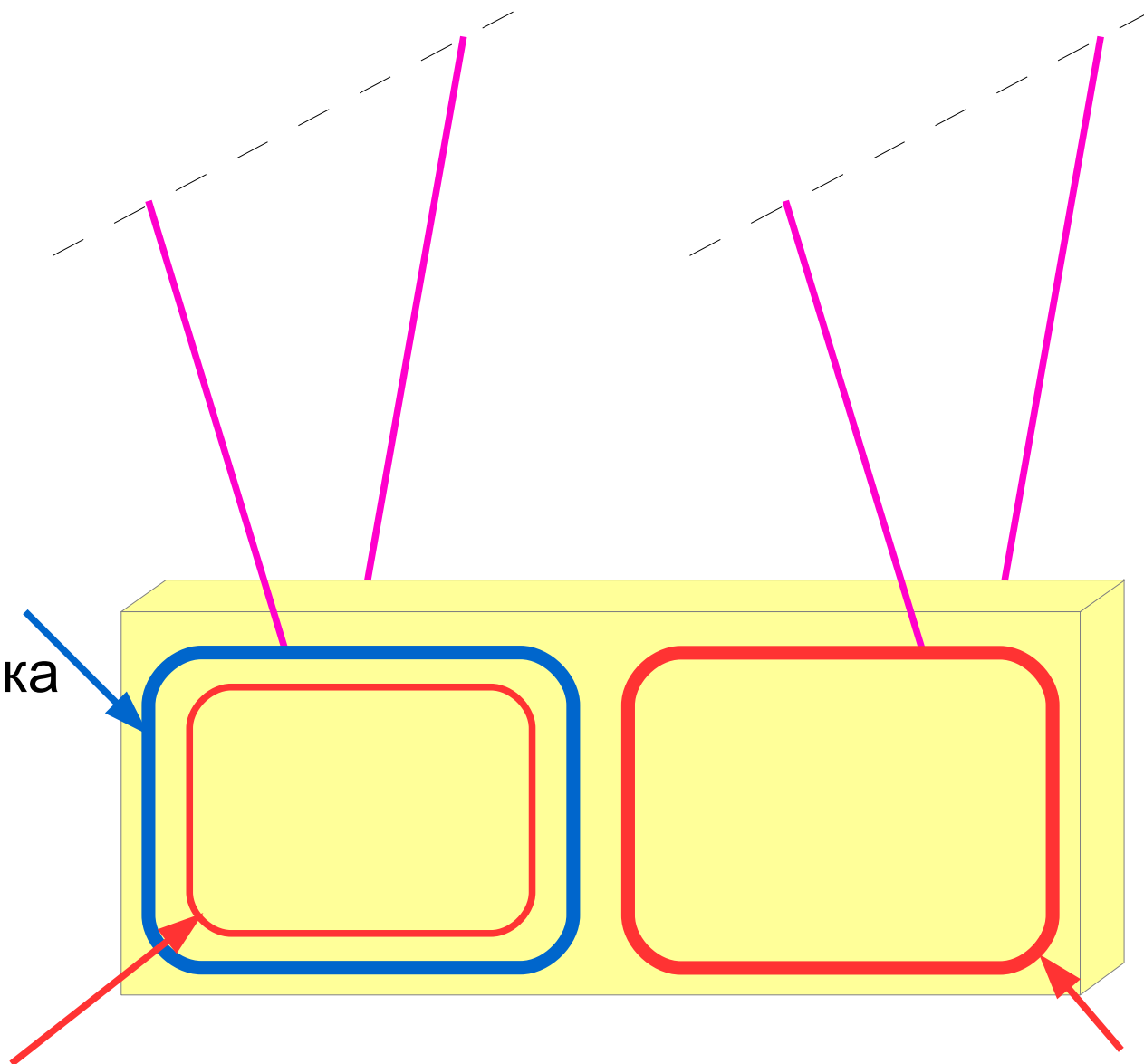
## Опыт 2: вынужденные колебания, резонанс

подключена  
через реле к  
источнику тока  
2А



# Опыт 2: вынужденные колебания, резонанс

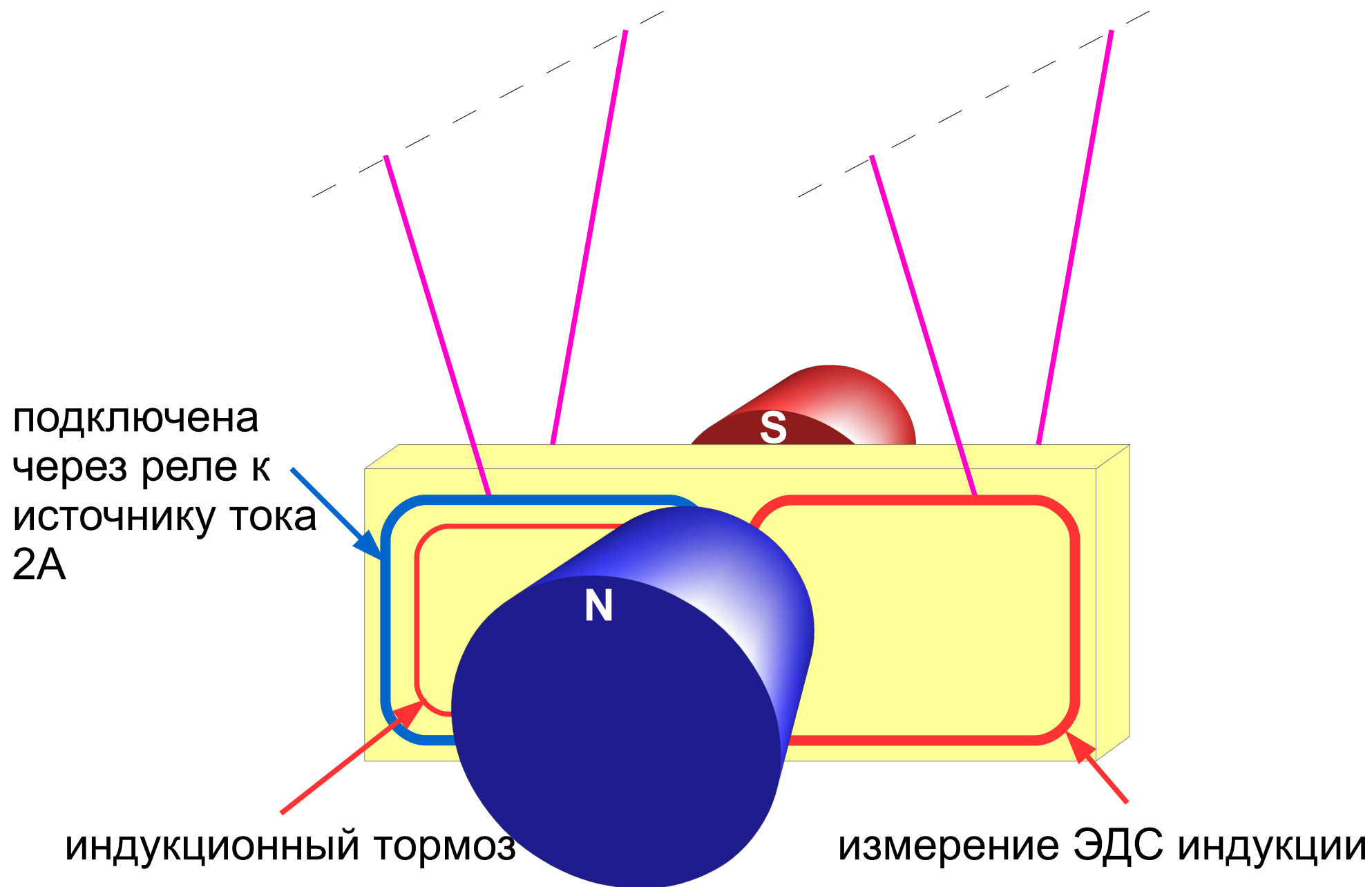
подключена  
через реле к  
источнику тока  
2А



индукционный тормоз

измерение ЭДС индукции

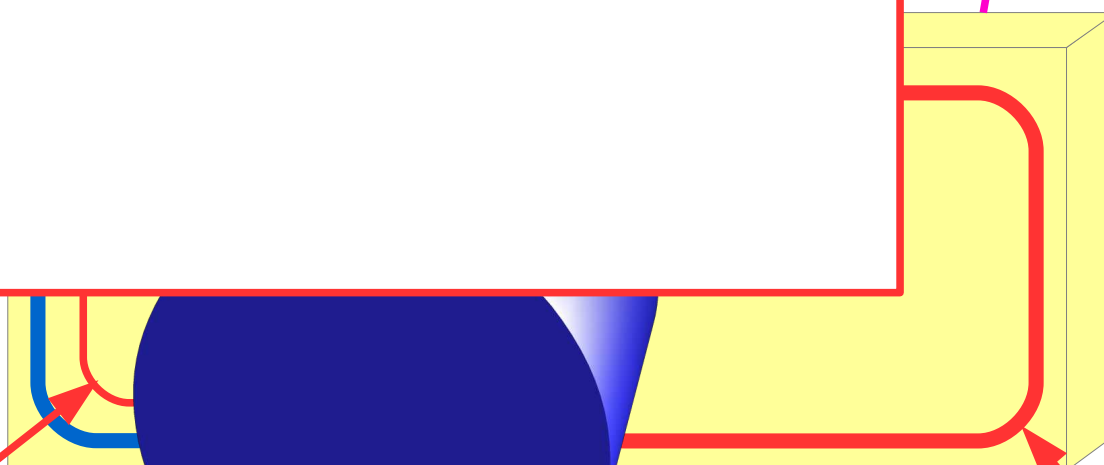
# Опыт 2: вынужденные колебания, резонанс



$$m l \ddot{\varphi} = -\xi l \dot{\varphi} - m g l \varphi + F(t)$$

ия, резонанс

п  
ч  
и  
2



индукционный тормоз

измерение ЭДС индукции

$$m l \ddot{\varphi} = -\xi l \dot{\varphi} - m g l \varphi + F(t)$$

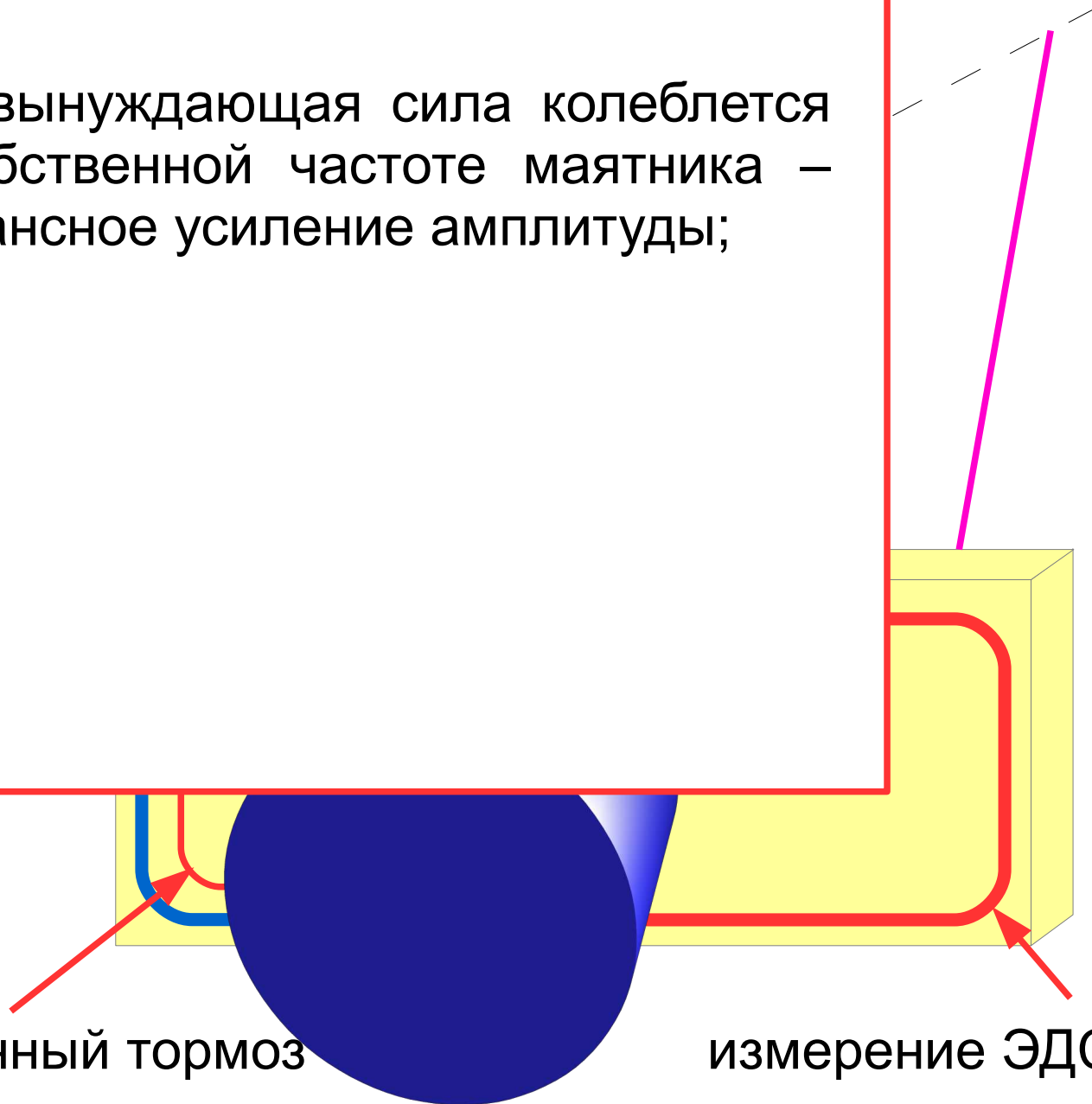
- Если вынуждающая сила колеблется на собственной частоте маятника – резонансное усиление амплитуды;

ия, резонанс

п  
ч  
и  
2

индукционный тормоз

измерение ЭДС индукции

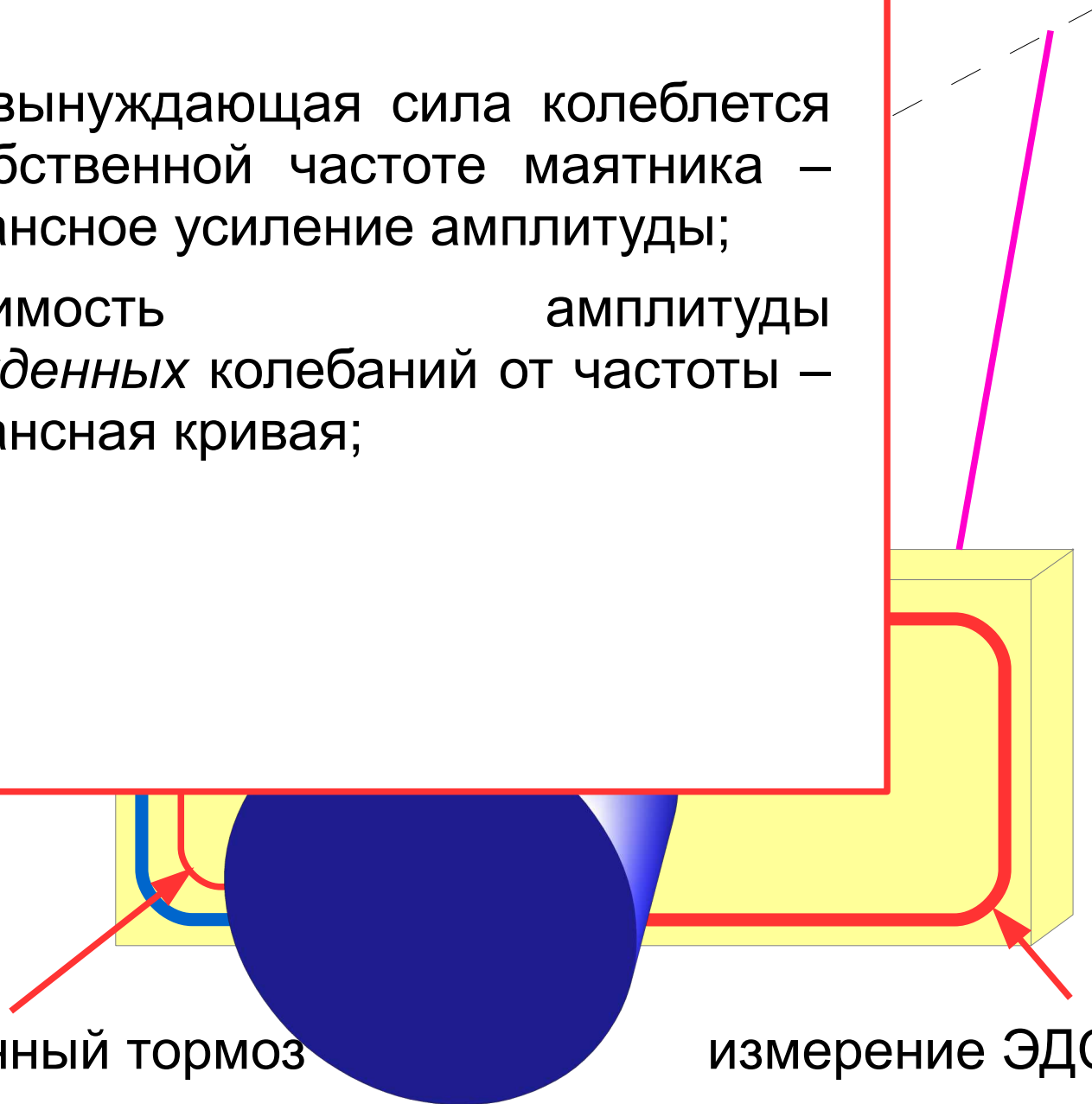


$$m l \ddot{\varphi} = -\xi l \dot{\varphi} - m g l \varphi + F(t)$$

- Если вынуждающая сила колеблется на собственной частоте маятника – резонансное усиление амплитуды;
- Зависимость амплитуды *вынужденных* колебаний от частоты – резонансная кривая;

ия, резонанс

п  
ч  
и  
2



индукционный тормоз

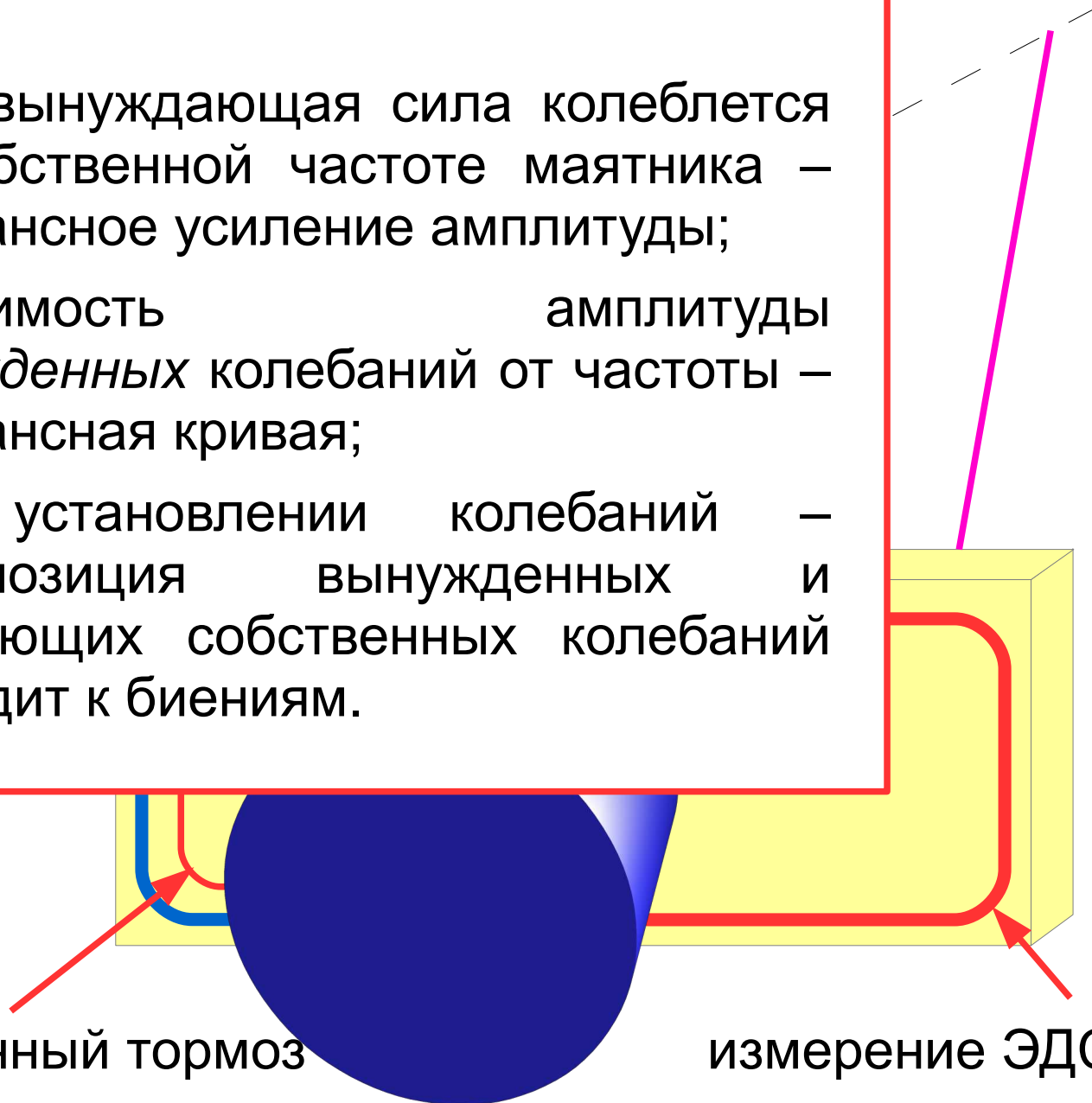
измерение ЭДС индукции

$$m l \ddot{\varphi} = -\xi l \dot{\varphi} - m g l \varphi + F(t)$$

ия, резонанс

- Если вынуждающая сила колеблется на собственной частоте маятника – резонансное усиление амплитуды;
- Зависимость амплитуды *вынужденных* колебаний от частоты – резонансная кривая;
- При установлении колебаний – суперпозиция вынужденных и затухающих собственных колебаний приводит к биениям.

п  
ч  
и  
2



индукционный тормоз

измерение ЭДС индукции



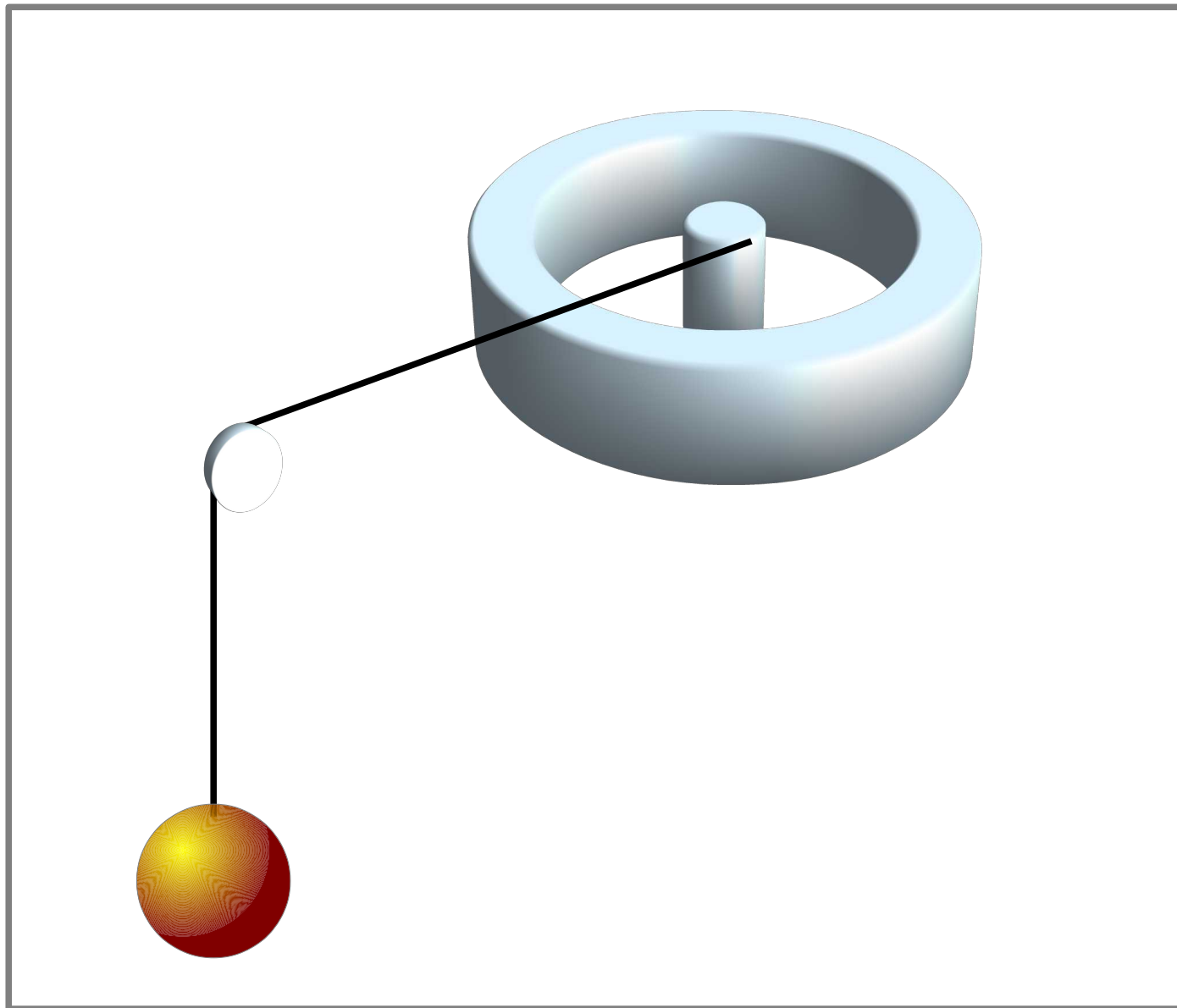
# Организация опыта

# Результаты

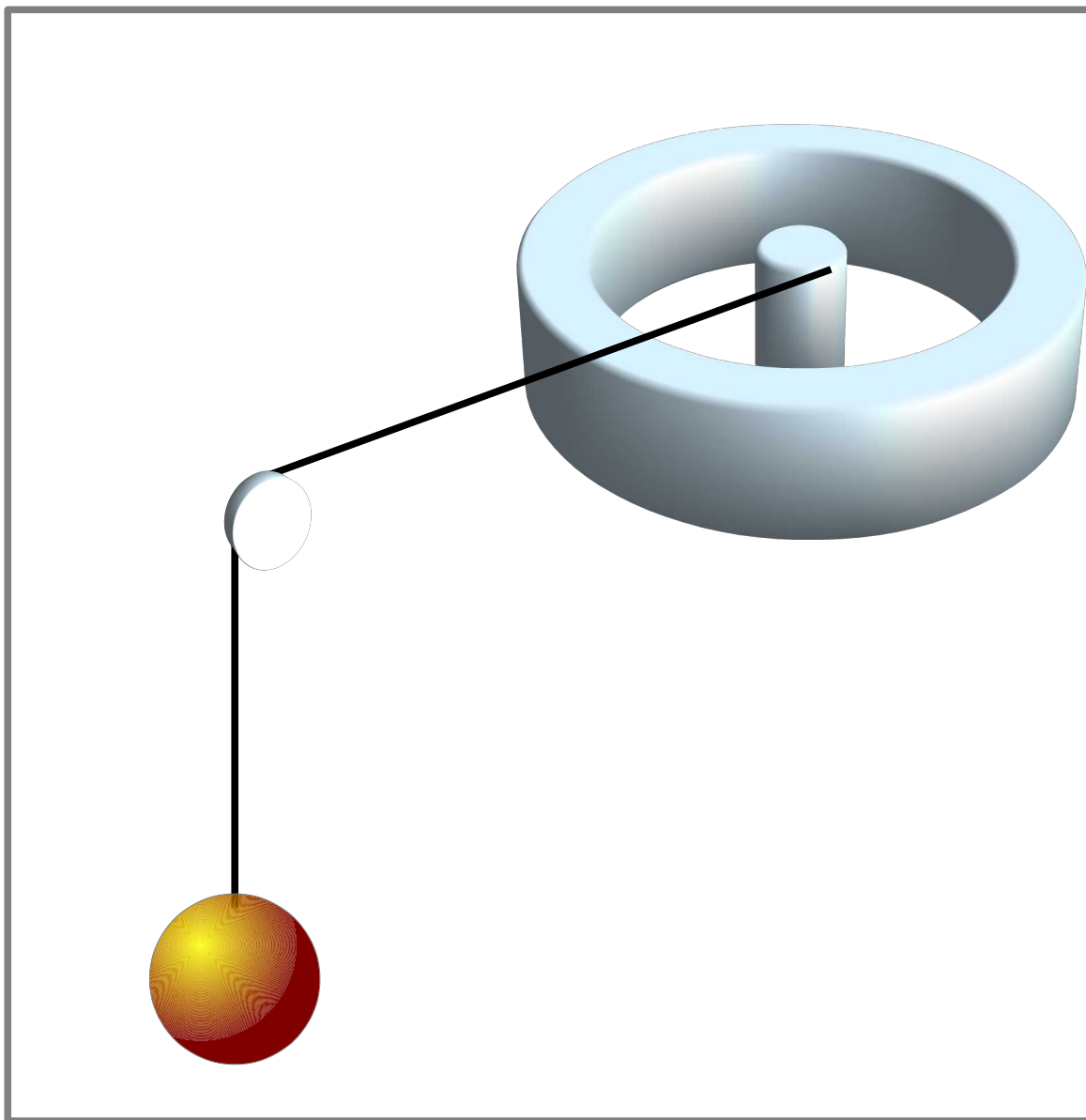
- Резонансные колебания большой амплитуды
- Биения при установлении вынужденных колебаний, измерение резонансной кривой
- Резонанс на кратных гармониках вынуждающей силы



# Опыт 3: Маятник Обербека



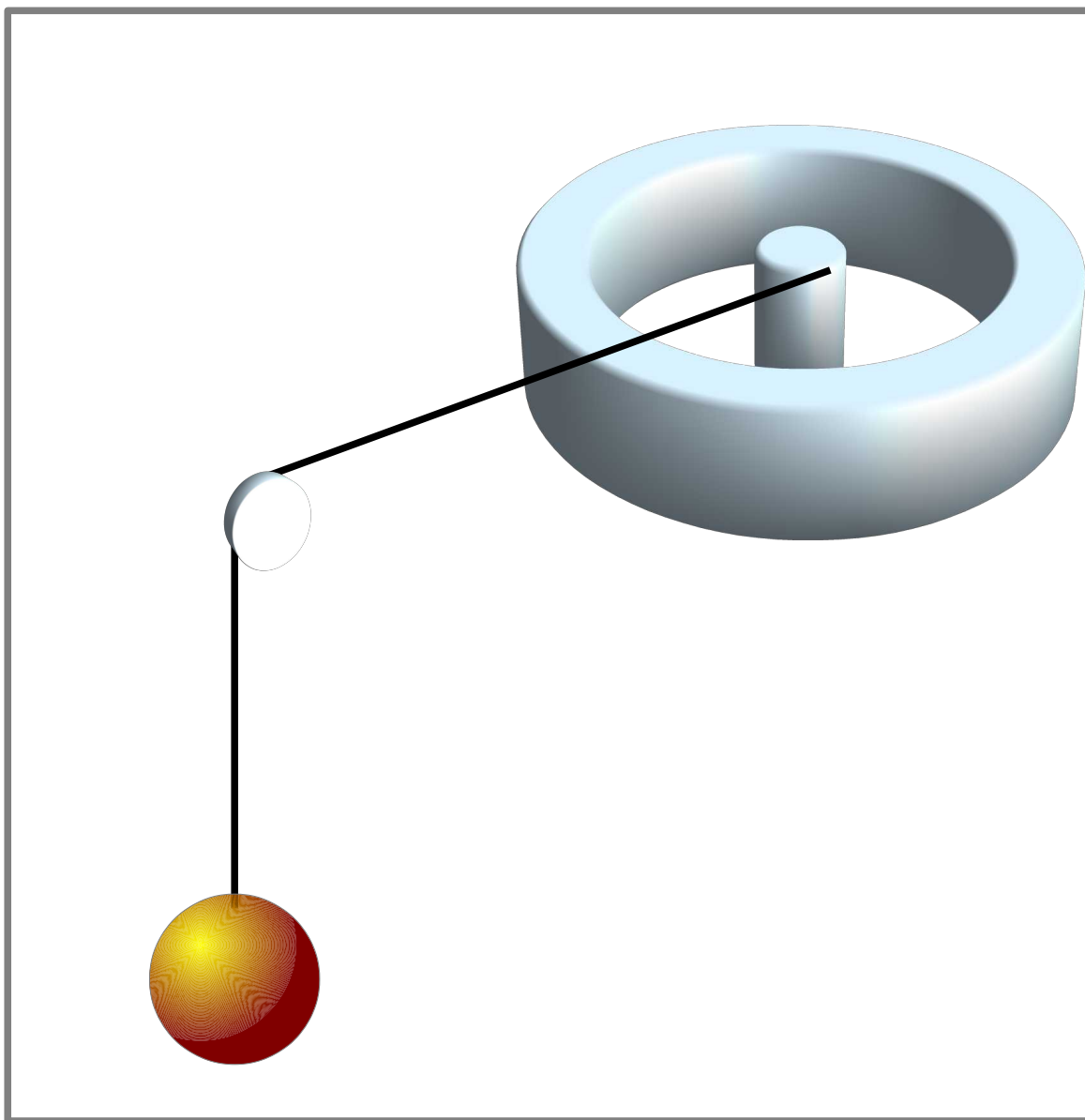
# Опыт 3: Маятник Обербека



груз идёт вниз

$$\begin{cases} I \dot{\omega} = T r - M_{mp} \\ m r \dot{\omega} = m g - T \end{cases}$$

## Опыт 3: Маятник Обербека



груз идёт вниз

$$\begin{cases} I \dot{\omega} = T r - M_{mp} \\ m r \dot{\omega} = m g - T \end{cases}$$

$$\dot{\omega} = \frac{m g r - M_{mp}}{I + m r^2}$$

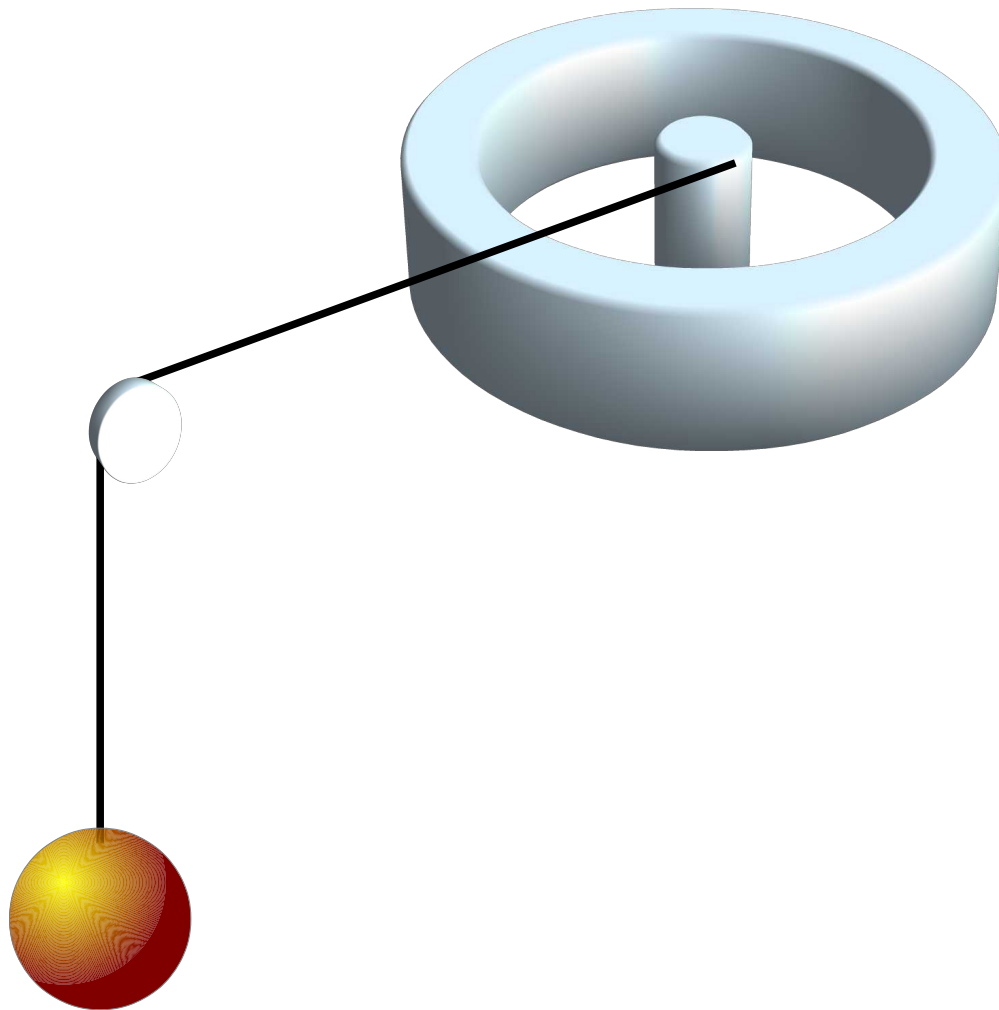
# Опыт 3: Маятник Обербека

груз идёт вниз

$$\begin{cases} I \dot{\omega} = T r - M_{mp} \\ m r \dot{\omega} = m g - T \end{cases}$$
$$\dot{\omega} = \frac{m g r - M_{mp}}{I + m r^2}$$

груз едет вверх

$$\begin{cases} I \dot{\omega} = -T r - M_{mp} \\ m r \dot{\omega} = m g - T \end{cases}$$



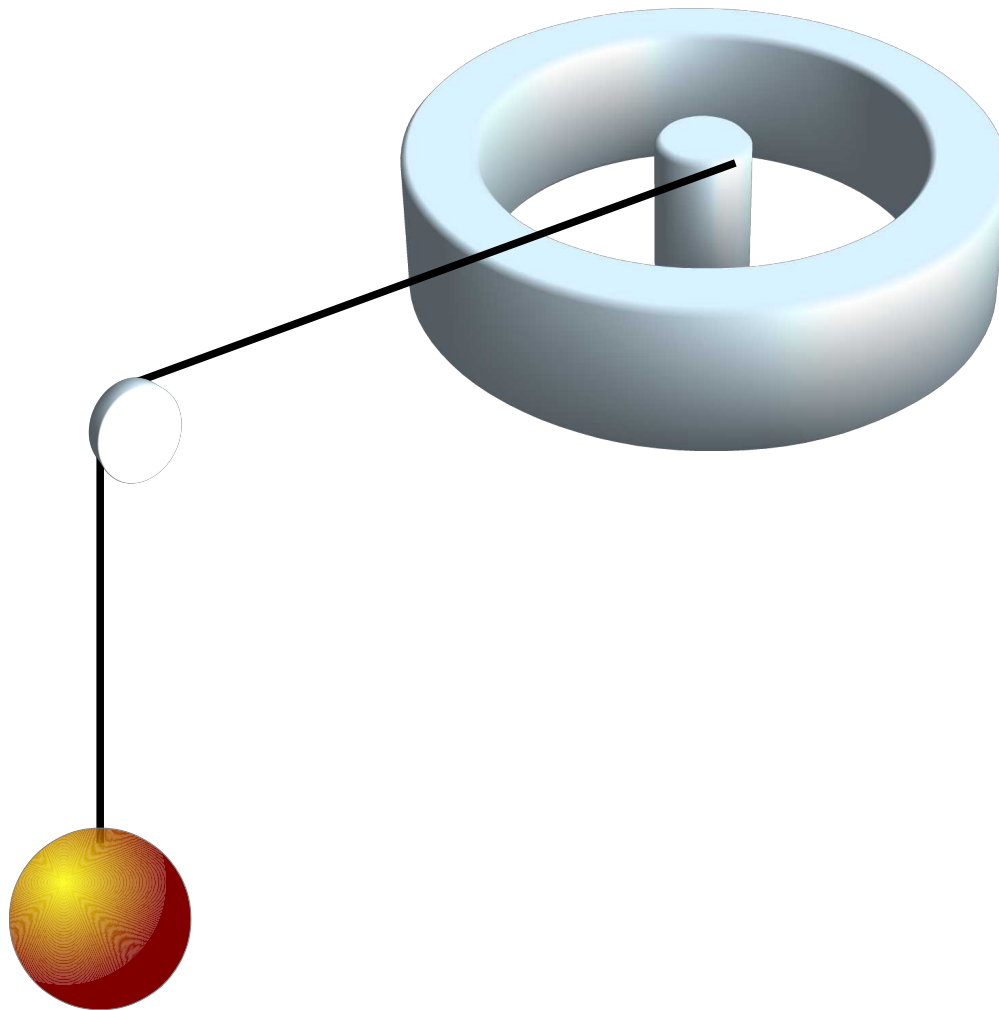
# Опыт 3: Маятник Обербека

груз идёт вниз

$$\begin{cases} I \dot{\omega} = T r - M_{mp} \\ m r \dot{\omega} = m g - T \end{cases}$$
$$\dot{\omega} = \frac{m g r - M_{mp}}{I + m r^2}$$

груз едет вверх

$$\begin{cases} I \dot{\omega} = -T r - M_{mp} \\ m r \dot{\omega} = m g - T \end{cases}$$
$$\dot{\omega} = -\frac{m g r + M_{mp}}{I - m r^2}$$





# Организация опыта

# Результаты

- Определение момента инерции колеса
- Определение влияния сил трения
- Возможен анализ вида потерь (вязкое или сухое трение)

Подводя итоги...

# Контакты и информация

- <https://physics.hse.ru/> сайт Факультета
- [facultyofphysics@hse.ru](mailto:facultyofphysics@hse.ru) Факультет физики  
НИУ ВШЭ
- [vglazkov@hse.ru](mailto:vglazkov@hse.ru) Глазков В.Н., академический  
руководитель ОП “Физика”
- день открытых дверей факультета 10 апреля  
2021