Experimentos importantes en la Historia de la Física

Mecánica. Fluidos

Prof. J Güémez
Departamento de Física Aplicada
Universidad de Cantabria

Facultad de Ciencias, enero 2019

Experimentos importantes en la historia de la física

Mecánica.

Johannes Kepler. Tercera ley de Kepler

Galileo Galilei. Caída de graves

Isaac Newton. Experimentos numéricos en gravitación

Edmond Halley. Aplicación leyes de Newton a cometas

Henry Cavendish. La constante de gravitación

Leon Foucault. El péndulo de Foucault

Fluidos.

Blas Pascal. Experimentos en altura

Daniel Bernoulli. Bolsa de Bernoulli

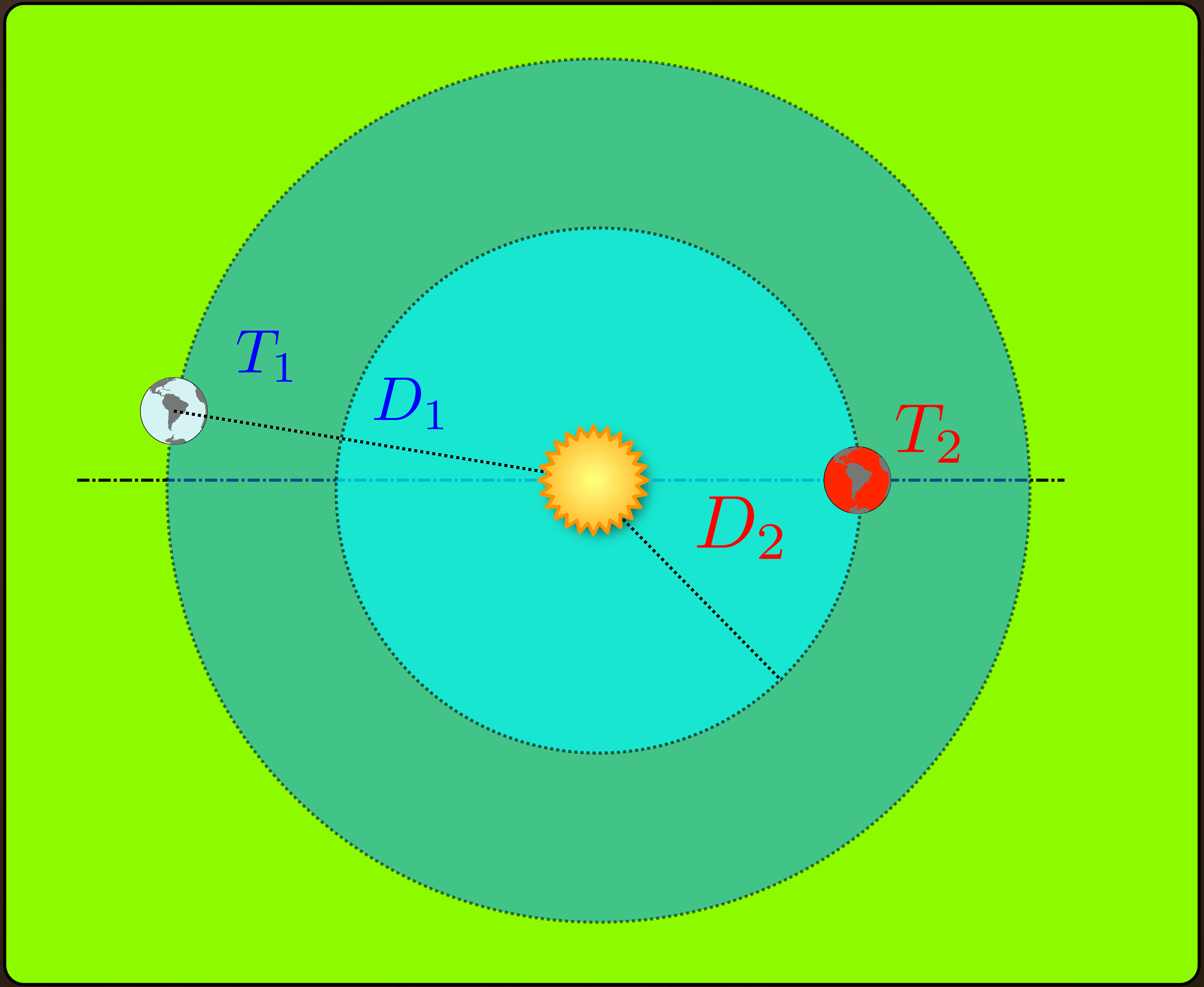
Mecánica. Astronomía

Johannes Kepler. 1571-1630

Tercera Ley de Kepler

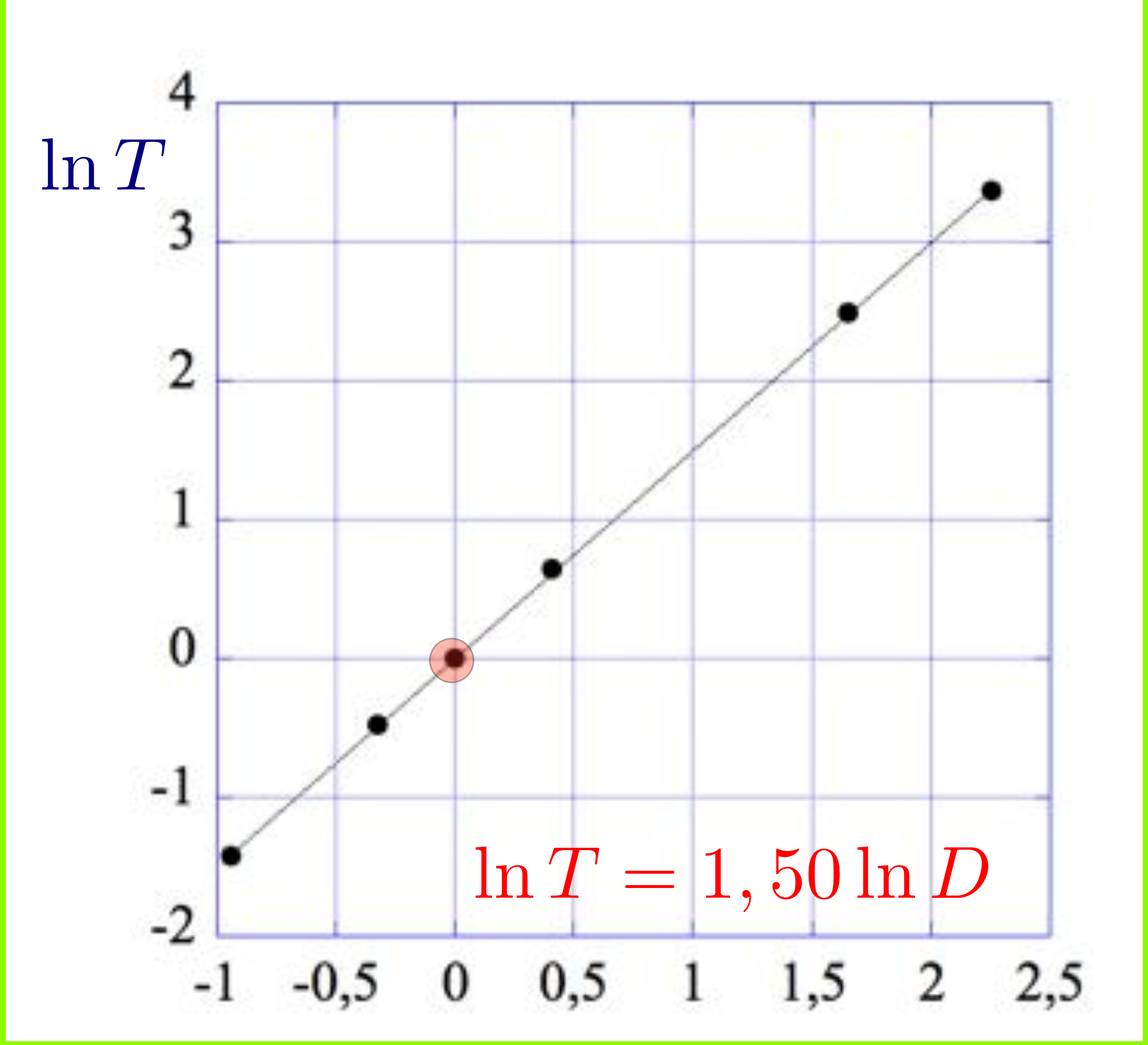
Para los planetas que orbitan alrededor del Sol, el cubo de su distancia media dividido por el cuadrado de su periodo es una constante.

$$\frac{D_1^3}{T_1^2} = \frac{D_2^3}{T_2^2} = \text{constante}$$



Tercera Ley de Kepler

T/a	D/UA
$0,24$	$0,39$
$0,62$	$0,72$
$1,00$	$1,00$
$1,90$	$1,50$
$12,00$	$5,20$
$29,00$	$9,50$



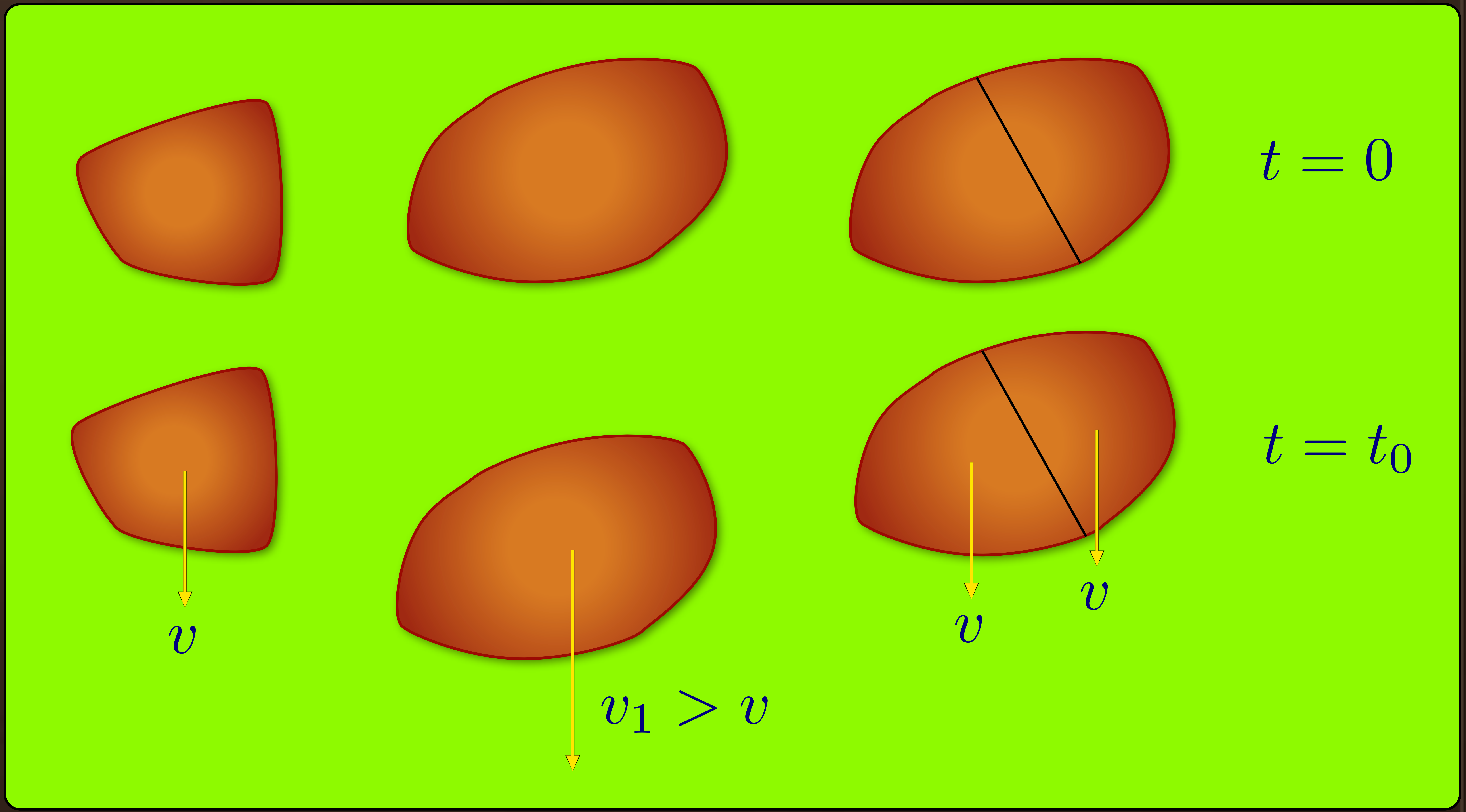
$$\frac{D^{1,5}}{T} = 1,00$$

$$\frac{D^3}{T^2} = 1,00$$

Galileo Galilei (1564-1642)

Caída de graves

De acuerdo con la descripción de Aristóteles, una piedra grande llega al suelo antes que una piedra pequeña si ambas son dejadas caer desde la misma altura. Pero Galileo razona que si la piedra grande se rompe en dos trozos pequeños no tiene sentido pensar que entonces va a caer más despacio. Concluye entonces que piedras grandes y pequeñas caen con la misma aceleración y llegan al suelo a la vez.

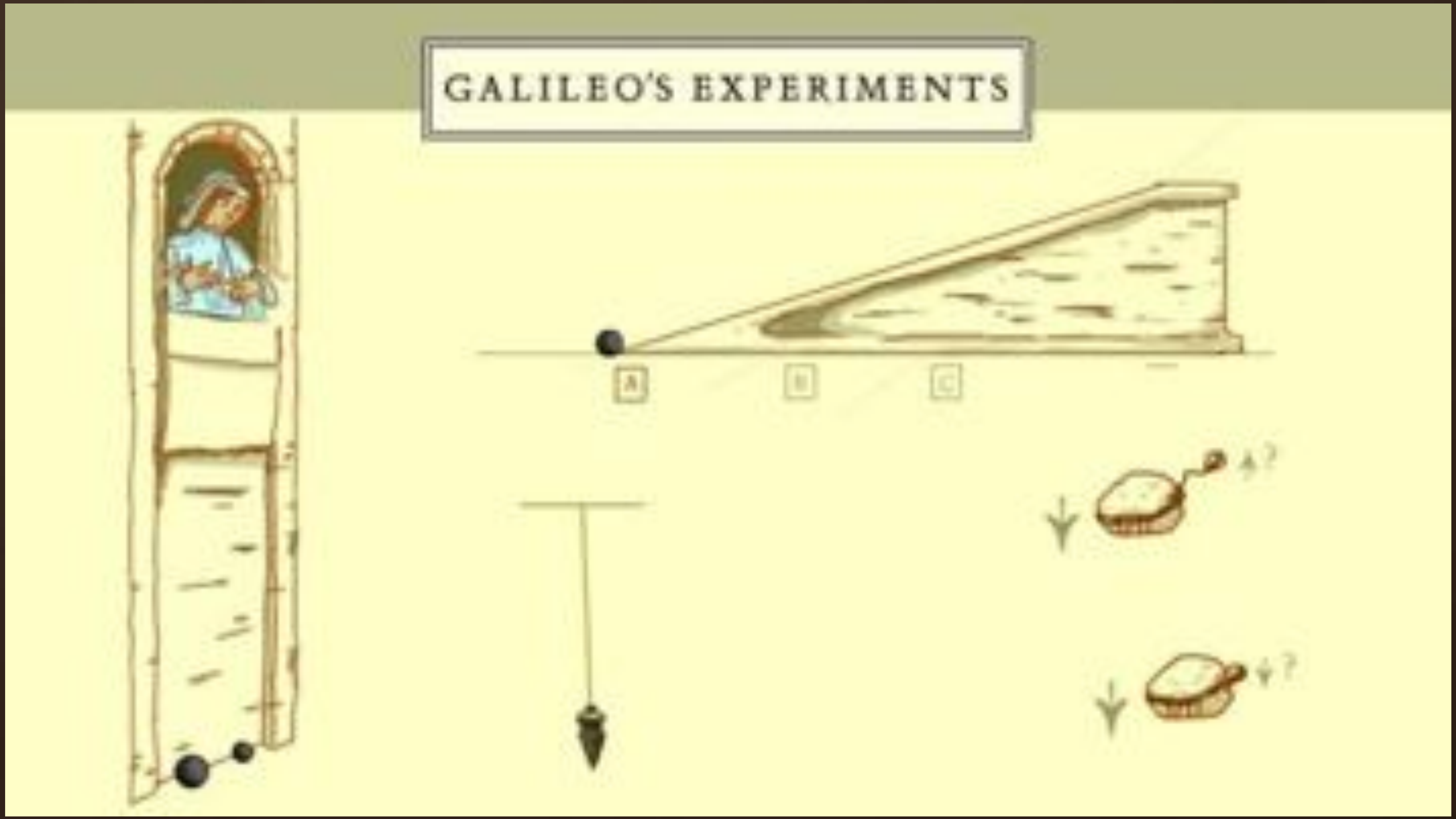


Caída de graves

Si una piedra pequeña es unida a una grande, el conjunto:

(a) cae más deprisa que la piedra grande, pues ahora es una piedra mayor;

(b) cae más despacio que la piedra grande sola, pues la piedra pequeña frena a la grande.



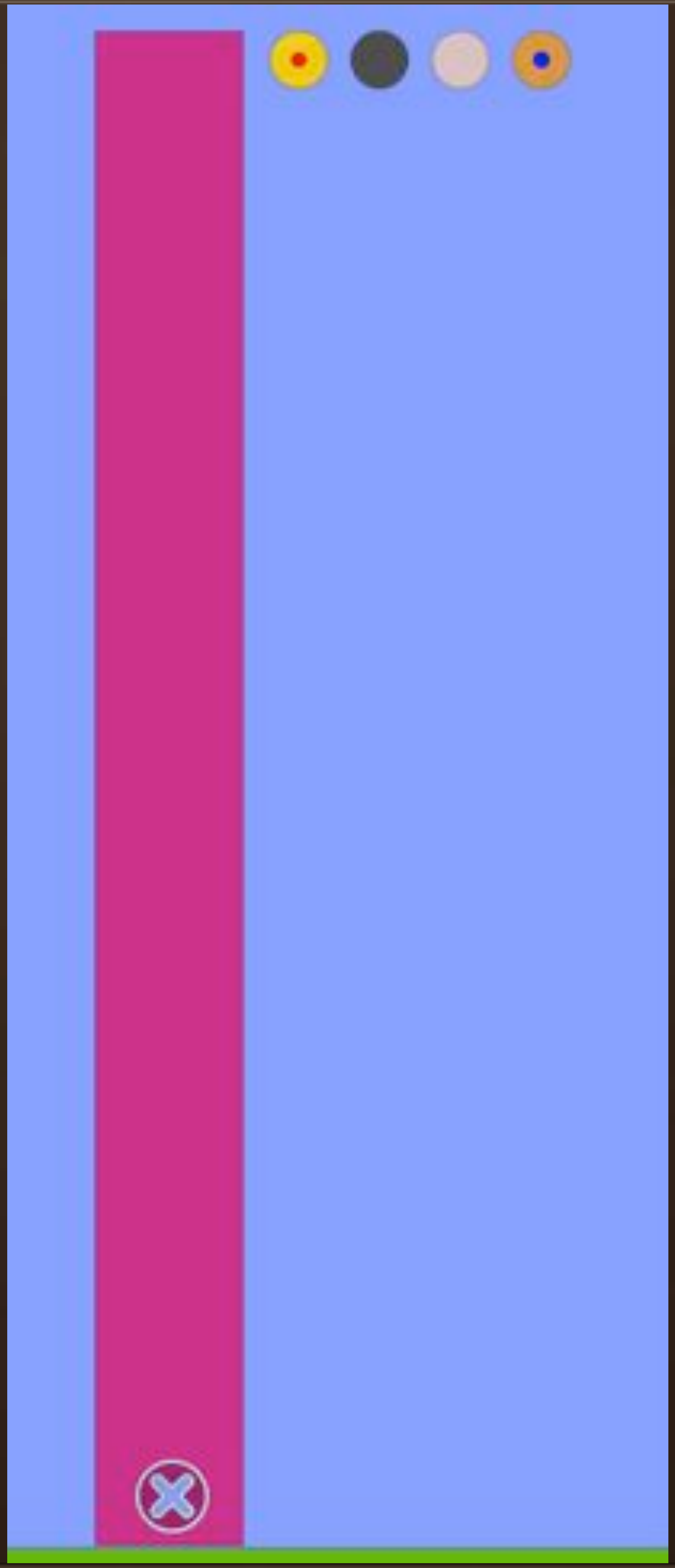
Galileo Galilei

Experimento de la Torre de Pisa.

Sin aire (sin rozamiento).

Los cuerpos llegan a la vez al suelo.

C G Adler, B L Coulter, *Galileo and the Tower of Pisa experiment*, American Journal of Physics **46** 199-201 (1978)

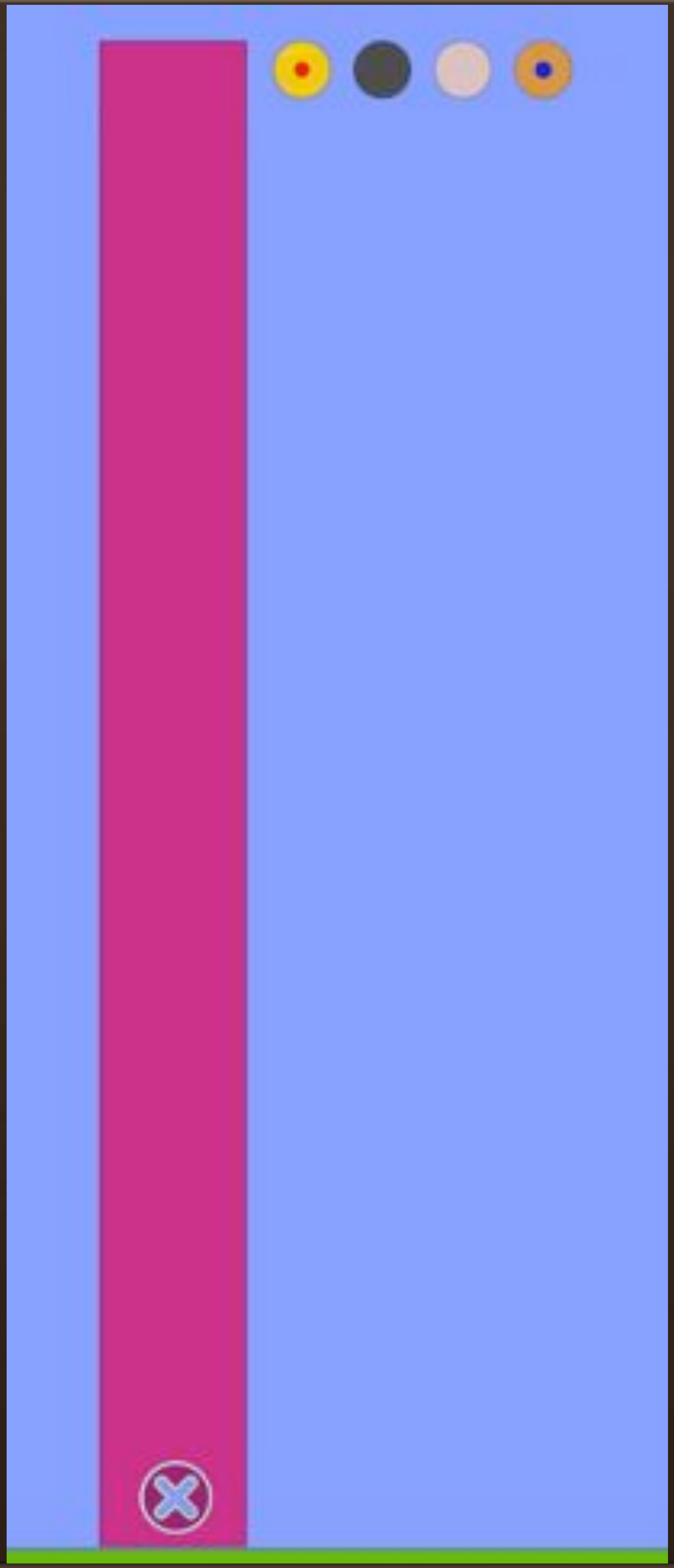


Galileo Galilei

Experimento de la Torre de Pisa.

Con aire (con rozamiento).

Los cuerpos no llegan a la vez al suelo, pero la diferencia es pequeña



El martillo y la pluma, en la Luna.

En 1971, el astronauta del Aplo 15 David Scott dejó caer una pluma y un martillo en la Luna para mostrar que los cuerpos pesados y los cuerpos ligeros caen igual (en ausencia de aire).

El martillo y la pluma, en la Luna.

$$g_{\mathrm{L}} = \frac{GM_{\mathrm{L}}}{R_{\mathrm{L}}^2}$$

$$g_{\mathrm{L}} = \frac{g}{6}$$

$$t = \sqrt{\frac{2h}{g_{\mathrm{L}}}}$$

$$h \approx 1,5 \text{ m}$$

$$t \approx 1,3 \text{ s}$$

$$(t_{\mathrm{T}} \approx 0,6 \text{ s})$$

'Lo que demuestra que las ideas del Sr. Galileo eran correctas'.

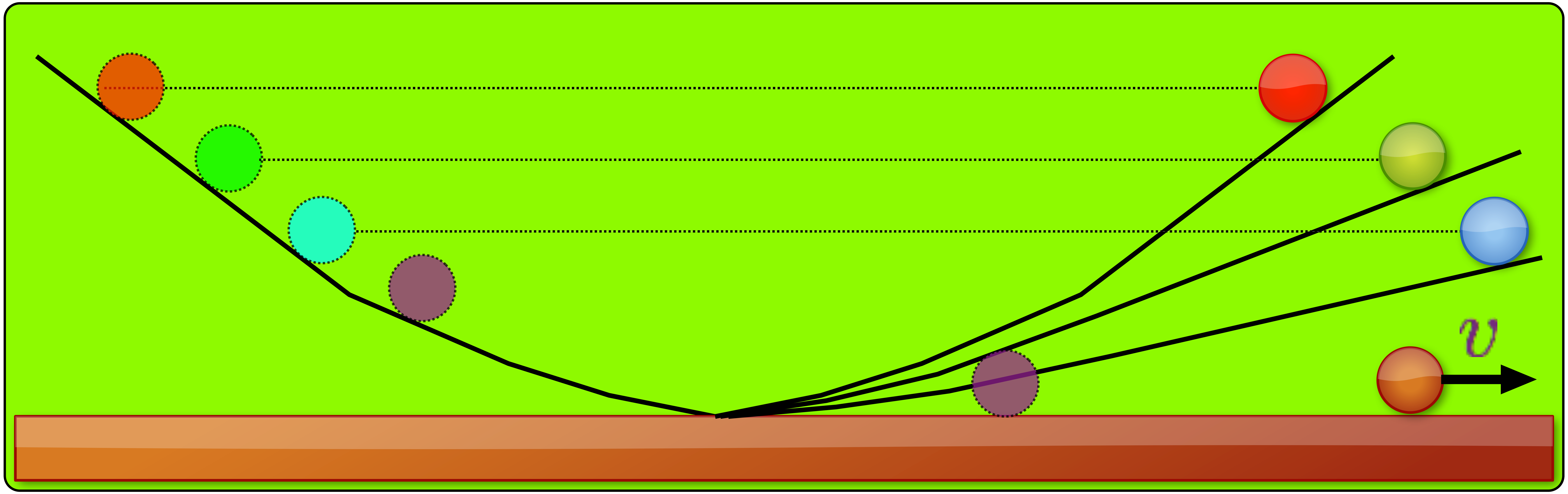
Galileo Galilei

Principio de inercia.

Inercia del reposo.

Un cuerpo mantiene su estado de reposo si sobre el mismo no actúa ninguna fuerza o la resultante vectorial de las fuerzas que actúan es cero.

Experimento mental



Carril de Galileo.
Demostración de Galileo del principio de inercia.

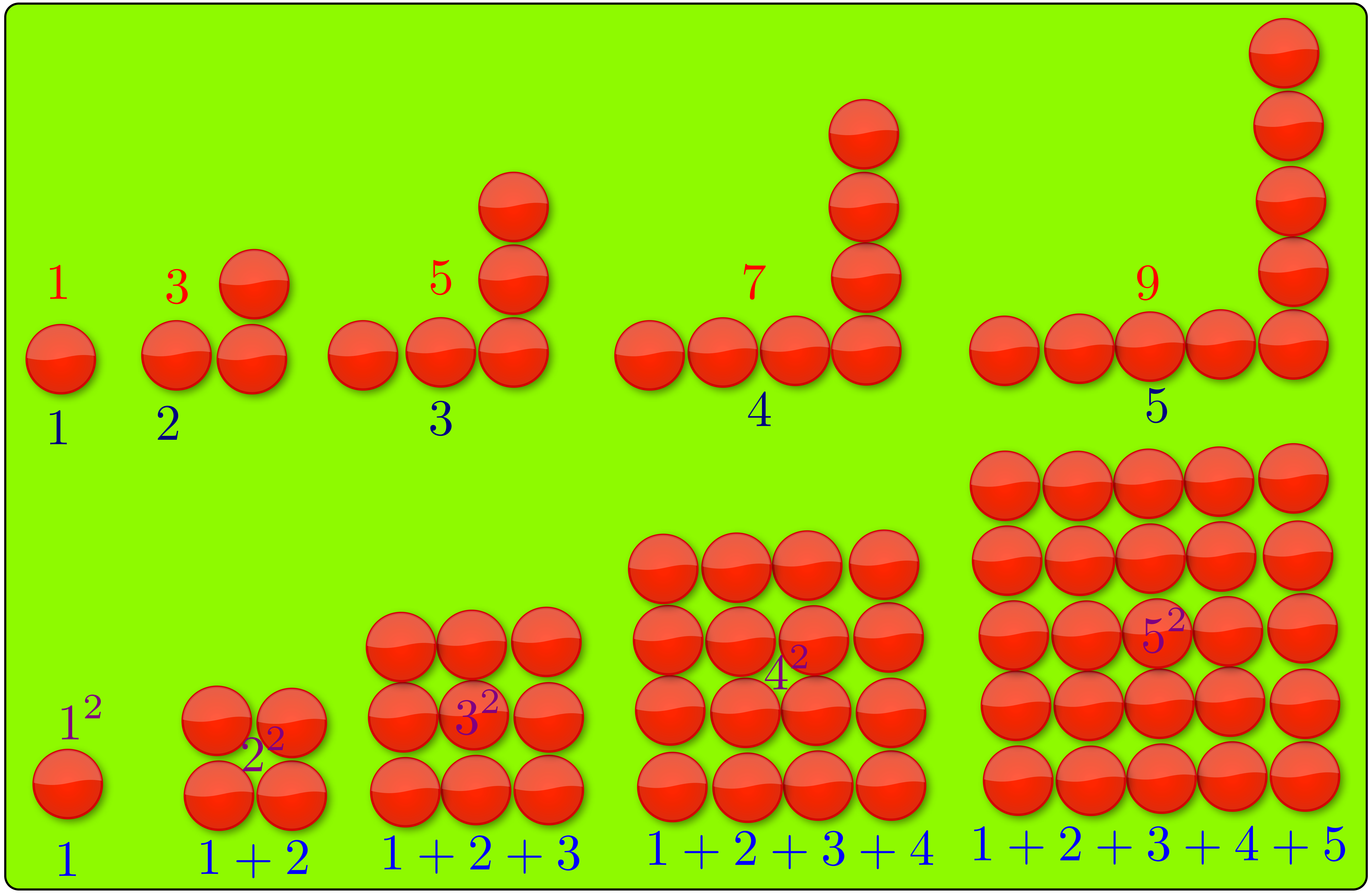
Rampa de Galileo

Caída ralentizada de graves

Caída de graves

$$s : 1 + 3 + 5 + 7 + 9 + 11 + 13 + 15 + 17$$
$$s_{\mathrm{A}} : 1 + 4 + 9 + 16 + 25 + 36 + 49 + 64 + 81$$

Los espacios recorridos en los sucesivos intervalos de tiempo (1, 2, 3, 4, 5, ...) varían como los números impares (1, 3, 5, 7, 9, ...),
y
los espacios recorridos acumulados varían como los cuadrados de los números enteros (1, 4, 9, 16, 25, ...)



Ley de caída de graves

$$s \propto t^2$$

$$t : 1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1$$

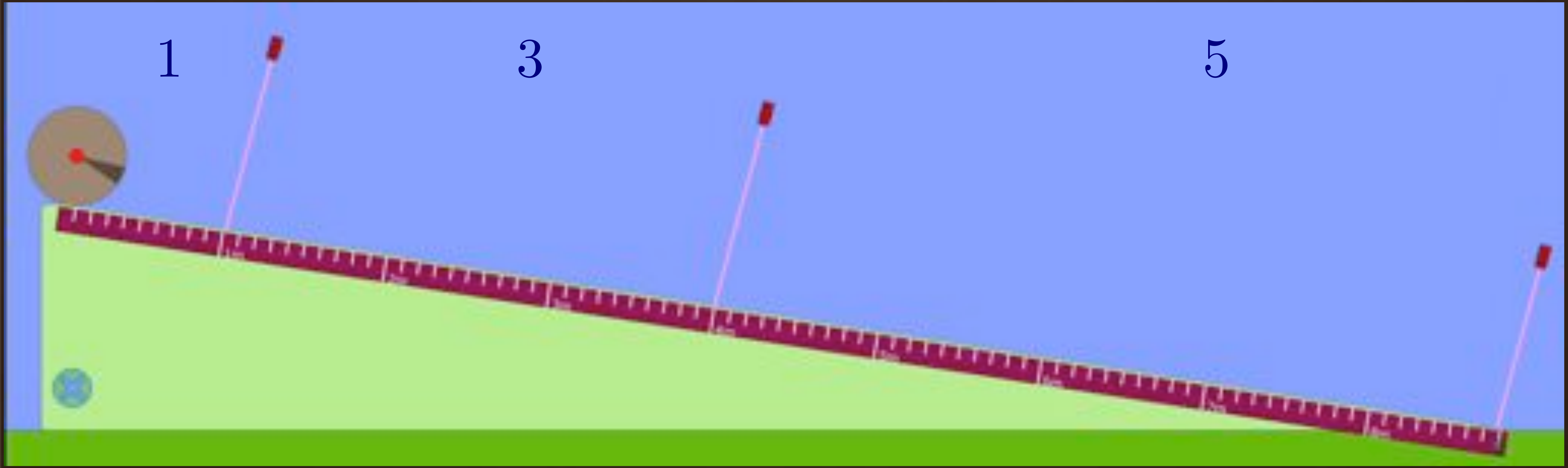
$$s : 1 + 3 + 5 + 7 + 9 + 11 + 13 + 15 + 17$$

Los espacios recorridos en cada segundo son proporcionales a la sucesión de números impares.

$$s_{\mathrm{A}} : 1 + 4 + 9 + 16 + 25 + 36 + 49 + 64 + 81$$

En caída de graves, los espacios recorridos acumulados son proporcionales al cuadrado del tiempo transcurrido.

Galileo Galilei



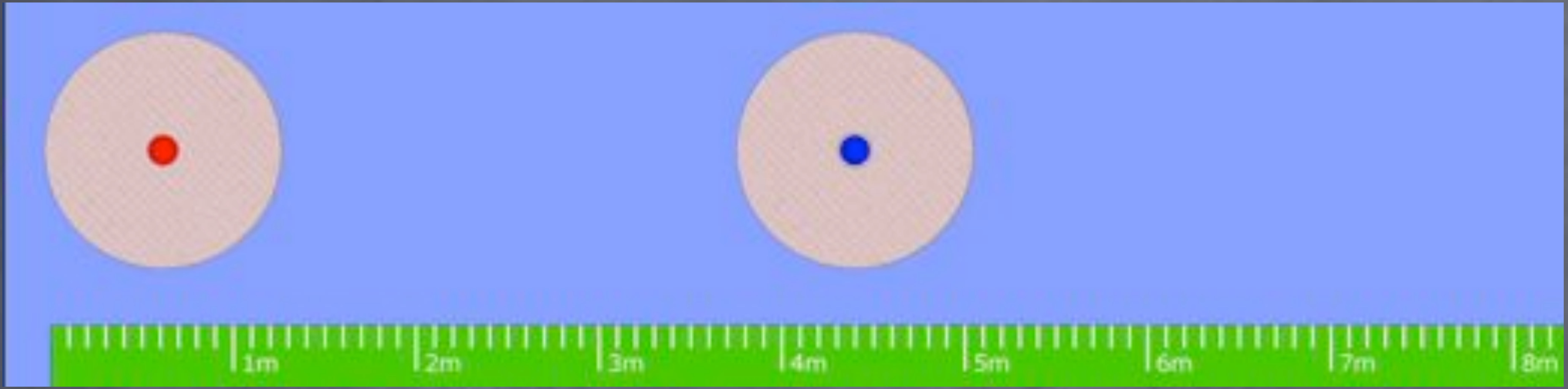
Experimento del descenso de una bola por un plano inclinado.

Principios de conservación

Principio de conservación del momento lineal
Principio de conservación de la energía cinética
Principio de conservación de la energía del universo
Principio de conservación del momento angular

Primer principio de la termodinámica
Segundo principio de la termodinámica

Colisiones elásticas

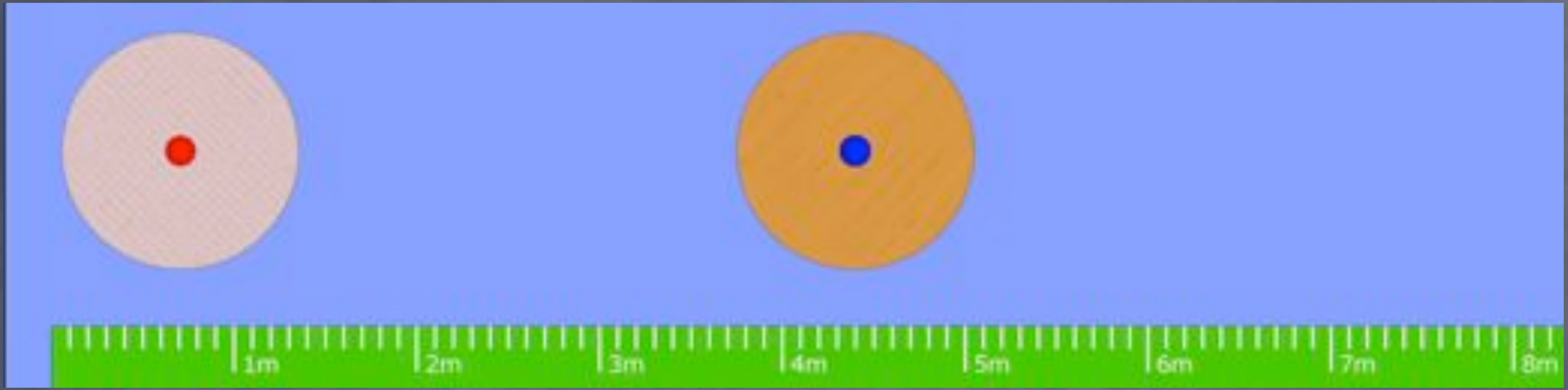


Cuerpo 1 igual a cuerpo 2. Cuerpo 2 en reposo

$$r = \frac{m_1}{m_2} = 1$$

Cuerpo 1 se detiene. Cuerpo 2 se mueve con la velocidad inicial del 1

Colisiones elásticas

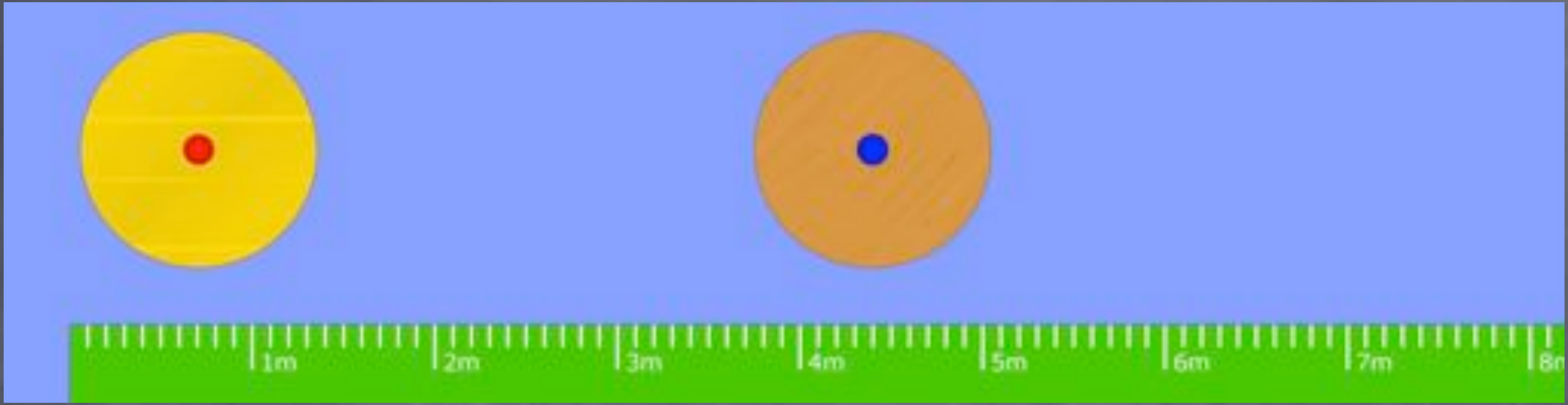


Cuerpo 1 más pesado que el cuerpo 2. Cuerpo 2 en reposo

$$r = \frac{m_1}{m_2} > 1$$

Cuerpo 1 no se detiene. Cuerpo 2 se mueve con velocidad final

Colisiones elásticas

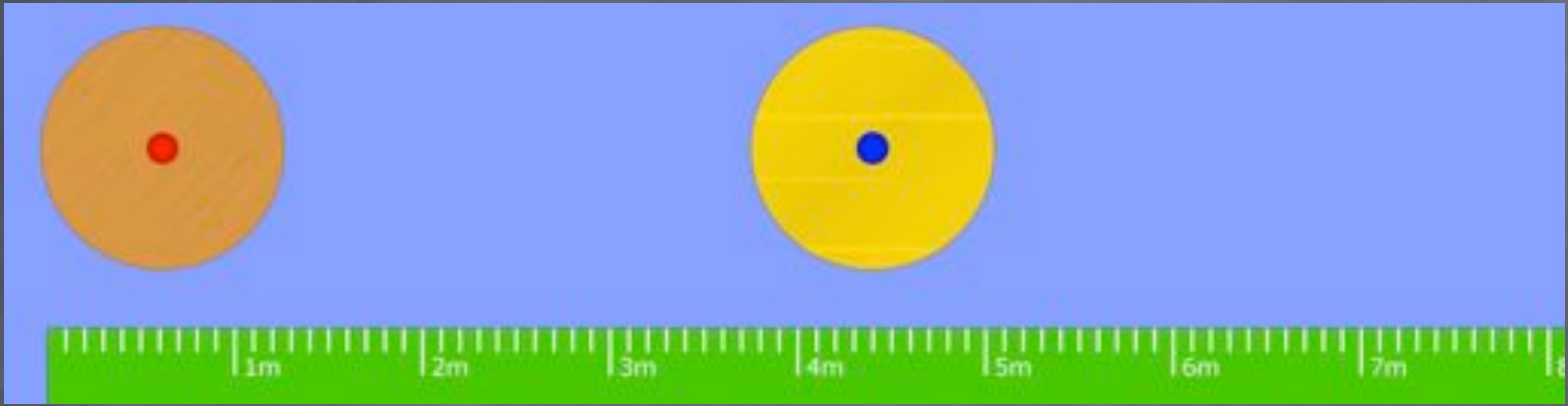


Cuerpo 1 mucho más pesado que el cuerpo 2. Cuerpo 2 en reposo

$$r = \frac{m_1}{m_2} = 20$$

Cuerpo 1 no se detiene. Cuerpo 2 se mueve con el doble de velocidad que el 1

Colisiones elásticas

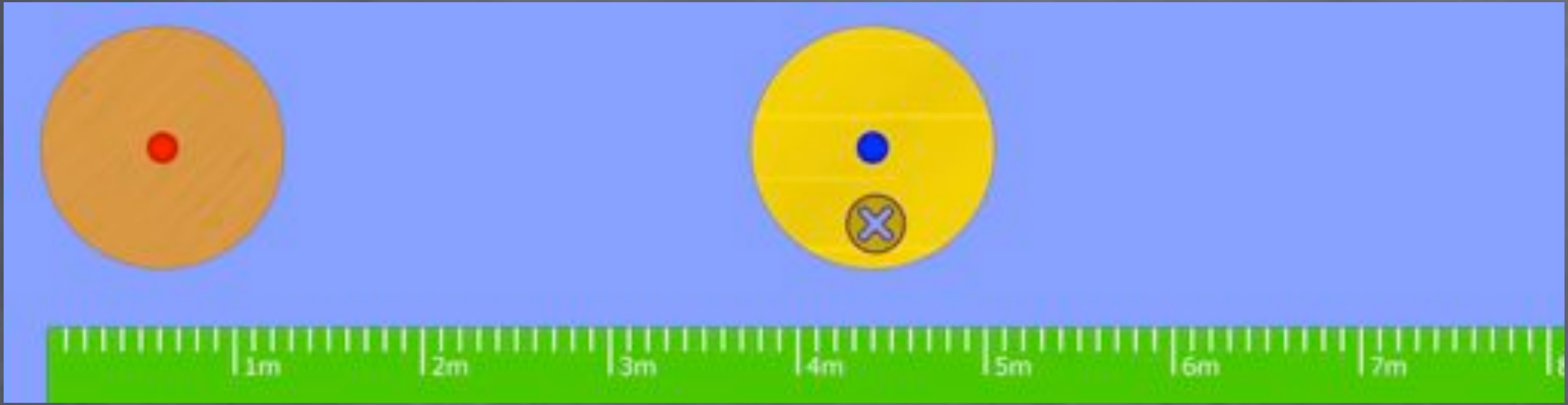


Cuerpo 1 menos pesado que el cuerpo 2. Cuerpo 2 en reposo

$$r = \frac{m_1}{m_2} < 1$$

Cuerpo 1 velocidad negativa. Cuerpo 2 se mueve con velocidad final

Colisiones elásticas



Cuerpo 2 es una pared.

$$r = \frac{m_1}{m_2} = 0$$

Cuerpo 1 invierte su velocidad

Explicación de los fenómenos

Colisiones

Colisiones elásticas

- Hay que asignar propiedades a los cuerpos
- En una colisión influye la masa del cuerpo que se lanza
- En una colisión influye la velocidad del cuerpo que se lanza
- Al cuerpo se le asocia un momento lineal

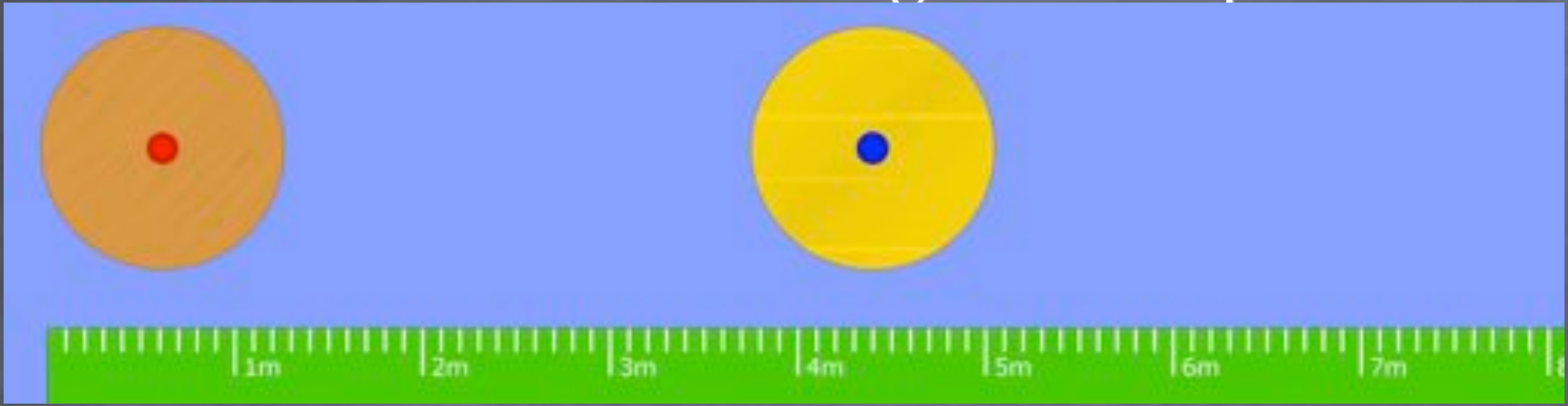
$$p = mv$$

Se lanza un cuerpo con velocidad inicial contra un cuerpo en reposo

$$r = \frac{m_1}{m_2}$$

$r = 1$	$\bar{v}_1 = 0$	$\bar{v}_2 = v$
$r = 2$	$\bar{v}_1 = \frac{1}{3}v$	$\bar{v}_2 = \frac{4}{3}v$
$r = 3$	$\bar{v}_1 = \frac{1}{2}v$	$\bar{v}_2 = \frac{3}{2}v$
$r = 10$	$\bar{v}_1 = \frac{9}{11}v$	$\bar{v}_2 = \frac{20}{11}v$
$r = \infty$	$\bar{v}_1 = v$	$\bar{v}_2 = 2v$

Colisión elástica bola ligera-bola pesada



Cuerpo 1 menos pesado que el cuerpo 2. Cuerpo 2 en reposo

$$r = \frac{m_1}{m_2} < 1$$

Cuerpo 1 velocidad negativa. Cuerpo 2 se mueve con velocidad final

Para que se conserve el momento lineal en un choque elástico entre un cuerpo ligero y uno más pesado en reposo, es necesario asignar signo a la velocidad, positivo o negativo.

La velocidad es una magnitud vectorial.

Al cuerpo se le asocia un momento lineal

$$\vec{p} = m\vec{v}$$

El momento lineal es una magnitud vectorial.

Se lanza un cuerpo con velocidad inicial contra un cuerpo en reposo

$r = \frac{1}{2}$	$\bar{v}_1 = -\frac{1}{3}v$	$\bar{v}_2 = \frac{2}{3}v$
$r = \frac{1}{3}$	$\bar{v}_1 = -\frac{1}{2}v$	$\bar{v}_2 = \frac{1}{2}v$
$r = \frac{1}{5}$	$\bar{v}_1 = -\frac{2}{3}v$	$\bar{v}_2 = \frac{1}{3}v$
$r = \frac{1}{10}$	$\bar{v}_1 = -\frac{9}{11}v$	$\bar{v}_2 = \frac{2}{11}v$
$r = 0$	$\bar{v}_1 = -v$	$\bar{v}_2 = 0$

$r = 2$	$\bar{v}_1 = \frac{1}{3}v$	$\bar{v}_2 = \frac{4}{3}v$
$2v$	$2\frac{1}{3}v + \frac{4}{3}v = 2v$	
$r = 10$	$\bar{v}_1 = \frac{9}{11}v$	$\bar{v}_2 = \frac{20}{11}v$
$10v$	$10\frac{9}{11}v + \frac{20}{11}v = 10v$	

Se comprueba numéricamente que se conserva el momento lineal.

El momento lineal inicial es igual al momento lineal final.

Se lanza un cuerpo con velocidad inicial contra un cuerpo en reposo

$$r = \frac{1}{3} \qquad \bar{v}_1 = -\frac{1}{2}v \qquad \bar{v}_2 = \frac{1}{2}v$$

$$\frac{1}{3}v \qquad -\frac{1}{3}\frac{1}{2}v + \frac{1}{2}v = \frac{1}{3}v$$

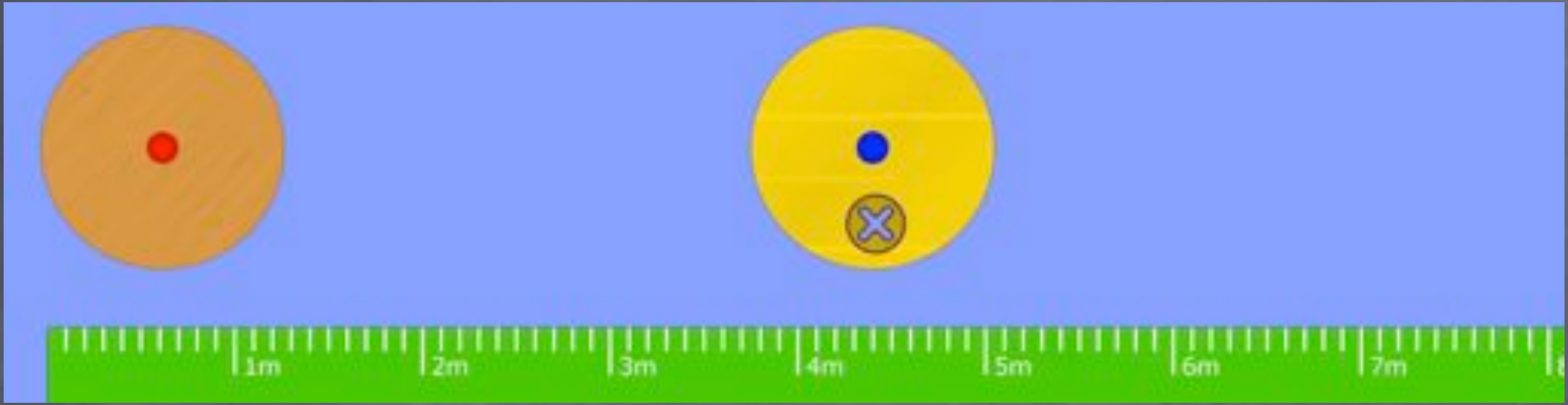
$$r = \frac{1}{10} \qquad \bar{v}_1 = -\frac{9}{11}v \qquad \bar{v}_2 = \frac{2}{11}v$$

$$\frac{1}{10}v \qquad -\frac{1}{10}\frac{9}{11}v + \frac{2}{11}v = \frac{1}{10}v$$

Se comprueba numéricamente que se conserva el momento lineal.

El momento lineal inicial es igual al momento lineal final.

Choque elástico bola-pared



Cuerpo 2 es una pared.

$$r = \frac{m_1}{m_2} = 0$$

Cuerpo 1 invierte su velocidad

Cuando un cuerpo ligero choca elásticamente contra una pared, su momento lineal varía

$$\Delta\vec{p} = -2m\vec{v}$$

Aparentemente, el momento lineal de la pared no varía. Por tanto, parece que no se conserva el momento lineal en este choque

Newton resuelve la contradicción admitiendo que el efecto de la pared sobre la bola es ejercer un impulso (fuerza por tiempo) sobre ella tal que

$$\vec{\bar{F}}\Delta t = \Delta\vec{p}$$

Hipótesis
Principio de conservación del momento lineal

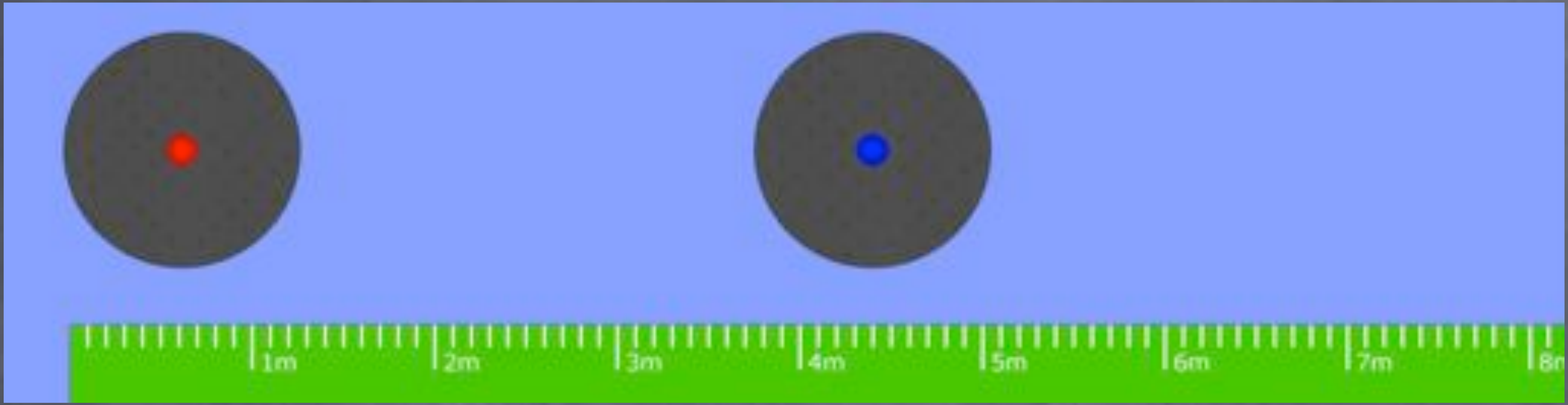
$$\vec{p} = m\vec{v}$$

$$m_1 v + 0 = m_1 \bar{v}_1 + m_2 \bar{v}_2$$

$$\sum_i \vec{p}_i = \sum_j \vec{p}_j$$

Capacidad explicativa (se explican las velocidades finales obtenidas), pero no predictiva (no se pueden obtener las velocidades finales)

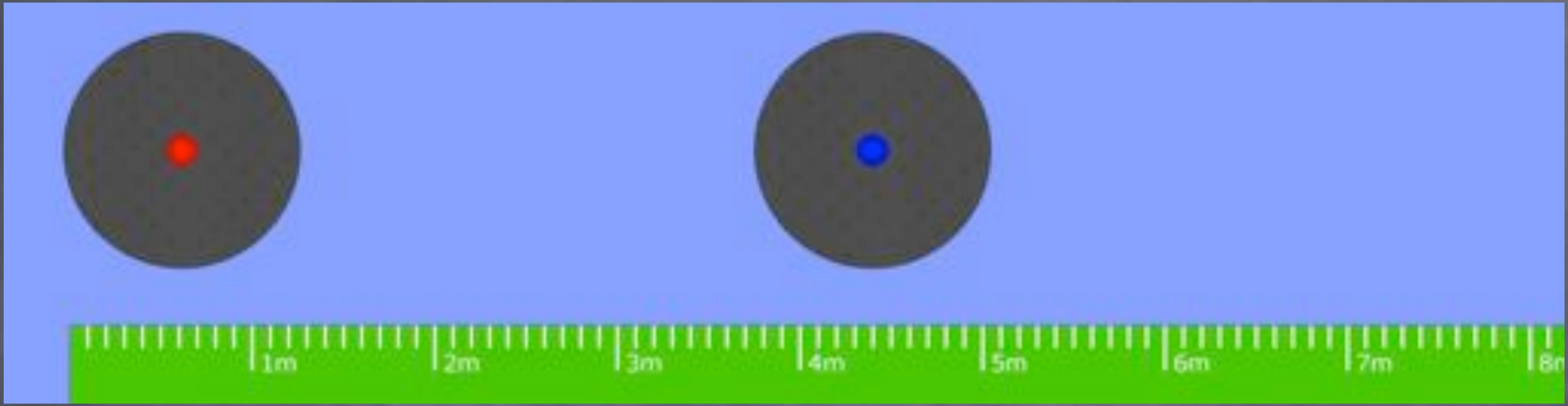
Colisiones inelásticas



Cuerpo 1 igual al cuerpo 2. Cuerpo 2 en reposo

El grupo se mueve con la mitad de la velocidad inicial

Colisiones inelásticas



Cuerpo 1 mucho menos pesado que el cuerpo 2.
Cuerpo 2 en reposo

El grupo se mueve con muy poca velocidad

Colisión inelástica

$$m_1 v + 0 = (m_1 + m_2)\bar{v}$$

$$\bar{v} = \frac{v}{1 + r^{-1}}$$

$r = 1$	$\bar{v} = \frac{1}{2}v$
$r = 3$	$\bar{v} = \frac{3}{4}v$
$r = \frac{1}{3}$	$\bar{v} = \frac{1}{4}v$

Capacidad explicativa y predictiva

Colisiones elásticas

Principio de conservación del momento lineal

$$\sum_i \vec{p}_i = \sum_j \vec{p}_j$$

Se necesita una hipótesis adicional para poder predecir las velocidades finales de los cuerpos.

Principio de conservación de la energía cinética

$$K = \frac{1}{2} m v^2$$

$$\sum_i K_i = \sum_j K_j$$

Christian Huygens

(La Haya, 1629-id., 1695) Matemático, astrónomo y físico holandés. Pronto demostró un gran talento para la mecánica y las matemáticas.

Huygens adquirió una pronta reputación en círculos europeos por sus publicaciones de matemáticas y por sus observaciones astronómicas. Destacan, sobre todo, el descubrimiento del mayor satélite de Saturno, Titán (1650), y la correcta descripción de los anillos de Saturno, que llevó a cabo en 1659.

En 1673 se publicó su famoso estudio sobre *El reloj de péndulo*, brillante análisis matemático de la dinámica pendular en el que se incluyeron las soluciones completas a problemas como el período de oscilación de un péndulo simple y las leyes de la fuerza centrífuga para un movimiento circular uniforme. Contemporáneo de Isaac Newton, su actitud mecanicista le impidió aceptar la idea de fuerzas que actúan a distancia.

El mayor logro de Huygens fue el desarrollo de la teoría ondulatoria de la luz, descrita ampliamente en el *Traité de la lumière* (1690), y que permitía explicar los fenómenos de la reflexión y refracción de la luz mejor que la teoría corpuscular de Newton.

Colisiones elásticas

Principio de conservación del momento lineal

$$\sum_i \vec{p}_i = \sum_j \vec{p}_j$$

Principio de conservación de la energía cinética

$$\sum_i K_i = \sum_j K_j$$

$$m_1 v + 0 = m_1 \bar{v}_1 + m_2 \bar{v}_2$$

$$\frac{1}{2} m_1 v^2 + 0 = \frac{1}{2} m_1 \bar{v}_1^2 + \frac{1}{2} m_2 \bar{v}_2^2$$

Colisiones elásticas

$$m_1 v + 0 = m_1 \bar{v}_1 + m_2 \bar{v}_2$$

$$\frac{1}{2} m_1 v^2 + 0 = \frac{1}{2} m_1 \bar{v}_1^2 + \frac{1}{2} m_2 \bar{v}_2^2$$

$$r = \frac{m_1}{m_2}$$

$$\bar{v}_1 = \frac{r-1}{r+1} v$$

$$\bar{v}_2 = \frac{2r}{r+1} v$$

Capacidad explicativa y predictiva

Colisiones elásticas. Principio de relatividad

$$m_1(v - V) + m_2(0 - V) = m_1(\bar{v}_1 - V) + m_2(\bar{v}_2 - V)$$
$$\downarrow$$
$$m_1 v + 0 = m_1\bar{v}_1 + m_2\bar{v}_2$$
$$+$$
$$-V(m_1 + m_2 = m_1 + m_2)$$

Capacidad explicativa y predictiva

Colisiones elásticas. Principio de relatividad

$$\frac{1}{2}m_1(v-V)^2+\frac{1}{2}m_2(0-V)^2=\frac{1}{2}m_1(\bar{v}_1-V)^2+\frac{1}{2}m_2(\bar{v}_2-V)^2$$

$$\downarrow$$

$$\frac{1}{2}m_1v^2+0=\frac{1}{2}m_1\bar{v}_1^2+\frac{1}{2}m_2\bar{v}_2^2$$

$$+$$

$$-V(m_1v+0=m_1\bar{v}_1+m_2\bar{v}_2)$$

$$+$$

$$\frac{1}{2}V^2(m_1+m_2=m_1+m_2)$$

Colisiones elásticas

$$\bar{v} = \frac{v}{1 + r^{-1}}$$

$$r = 3 \qquad \bar{v} = \frac{3}{4}v$$

$$K_i = \frac{3}{2}v^2 \qquad K_f = \frac{1}{2}4\frac{9}{16}v^2 = \frac{9}{8}v^2 \qquad \Delta K = -\frac{3}{8}v^2$$

$$r = \frac{1}{3} \qquad \bar{v} = \frac{1}{4}v$$

$$K_i = \frac{1}{6}v^2 \qquad K_f = \frac{1}{2}\frac{4}{3}\frac{1}{16}v^2 = \frac{1}{24}v^2 \qquad \Delta K = -\frac{1}{8}v^2$$

Colisiones inelásticas

$$\bar{v} = \frac{v}{1 + r^{-1}}$$

Capacidad predictiva pero no explicativa

Se conserva el momento lineal, pero se destruye energía cinética

Dos cuerpos unidos por un muelle

$$0 = m_{\mathrm{c}}\bar{v}_{\mathrm{c}} + m_{\mathrm{p}}\bar{v}_{\mathrm{p}}$$

$$0 \neq \frac{1}{2}m_{\mathrm{c}}\bar{v}_{\mathrm{c}}^2 + \frac{1}{2}m_{\mathrm{p}}\bar{v}_{\mathrm{p}}^2$$

Se conserva el momento lineal, pero se produce energía cinética

Lanzamiento de un proyectil por un cañón

$$0 = m_\mathrm{c}\bar{v}_\mathrm{c} + m_\mathrm{p}\bar{v}_\mathrm{p}$$

$$0 \neq \frac{1}{2}m_\mathrm{c}\bar{v}_\mathrm{c}^2 + \frac{1}{2}m_\mathrm{p}\bar{v}_\mathrm{p}^2$$

Se conserva el momento lineal, pero se produce energía cinética

Segunda ley de Newton

Cuando uno de los cuerpos que intervienen en la colisión tiene masa infinita,

$$\lim_{m_2 \to \infty, \bar{v}_2 \to 0} m_2 \bar{v}_2 = -F\Delta t$$

$$\lim_{m_2 \to \infty, \bar{v}_2 \to 0} \frac{1}{2} m_2 \bar{v}_2^2 = 0$$

$$\Delta \vec{p}_1 = \vec{F} \Delta t$$

Isaac Newton (1642-1727)