ملحق
2

قياس الحركة

راقب غاليليو كرة بقطر بوصة تتسارع وهي تتدحرج على سطح خشب مائل من ستة أقدام. وقد قام بوضع علامات لمسار الكرة بينما كان يدندن بانتظام نغما معينا. ثم قام بقياس المسافات بأزمنة متساوية. استخدم المسافة الأولى كوحدة مسافة، فوجد أن المسافات المقطوعة بثمن أزمنة متساوية تتبع النظام التالي: 1، 3، 5، 7، 9، 11، 13، 15.

لاحظ غاليليو بُعَيْد هذه التجربة أن مجموع الأرقام المتتالية يساوي مربع الزمن المقطوع من البداية. فمجاميع الأرقام هي 1، 4 (أي 3+1)، 9 (1+3+5)، 16 (1+3+5+7)، 25 (1+3+5+7+9)، 36، 49، 64، وكلها مربعات الأرقام من 1 إلى 8. أي أن المسافات التي

قطعتها الكرة من حال الثبات تتناسب مع مربع الأزمنة.

ومع أنه يمكن لدندنته بانتظام أن تشير نوعا ما لأزمنة متساوية، إلا أنه لا يمكن بواسطتها قياس أزمنة متغايرة، فصمم غاليليو ساعة مائية تقيس الزمن لأقرب 1/ 100 من الثانية. إذ قام بعملية جمع كمية الماء المتدفق فترات معينة، فيسمح بتدفق الماء ثم يوقفه، ثم قام بوزن كمية الماء المتدفق.

الزمن من نقطة البداية	المسافة بوحدة زمنية	المسافة من نقطة البداية
0	0	0
1	1	1
2	3	4
3	5	9
4	7	16
5	8	25
6	11	36
7	13	49
8	15	64

استخدم غاليليو معيار «حبة» لقياس وزن الماء، إذ تساوي الحبة الواحدة 1/ 480 أونصة، كما استخدم لسرعة تدفق الماء وحدة زمنية تقارب 1/ 100 من الثانية، واستخدم وحدة تقارب 1 مم لقياس المسافة. حوّلنا وحداته في هذه الأمثلة المأخوذة من مذكراته إلى ثوان وأمتار.

قام غاليليو أولا بقياس زمن بندول متأرجح. استخدم بندولين متماثلين لذلك، وبرهن أن دورة تأرجح كاملة (روحة وغدوة) تستغرق ذات الزمن. إن الزمن اللازم من وقت التأرجح لحين كان البندول عموديا هو ربع الوقت اللازم لدورة تأرجح كاملة.

استخدم غاليليو ساعته المائية لقياس زمن تأرجح بندولات ذات أطوال متفاوتة. يمكن أنه قاس أزمنة تأرجح دورات عديدة كاملة ثم حسب زمن ربع الدورة، إذ أن ايقاف السعة وتشغيلها بدقة يتطلب مهارة كبيرة. وجد غاليليو أن ربع دورة لبندول من 0,818 مترا تستغرق 0,45 ثانية، ومن 1,636 مترا تستغرق 0,64 ثانية.

طول البندول (م)	زمن ربع دورة (ثانية)	مربع الزمن	الزمن2/ الطول
0,818	0,45	0,203	4,03
1,636	0,64	0,410	3,99
[3,272]	[0,90]	[0,810]	[4,04]

يستغرق بندولا بضعف الطول زمنا أطول بـ $\sqrt{2}$ لإكمال ربع دورة، أي أنه يلزم لأربعة أضعاف الطول للحصول على ضعف المسافة. إن الأرقام الموجودة في أسفل الجدول أعلاه أرقام محسوبة رياضيا وليست مأخوذة بالقياس. نرى أن الطول هو ضعف طول الحقل أعلى منه والزمن هو $\sqrt{2}$ من الزمن أعلى منه. ونرى بذلك أن بندولا ذي طول بأربعة أضعاف طول الأول يستغرق ضعف المدة. يبين العمود الرابع أنه ولكل

بندول، إذا قسَّمنا الطول على مربع الزمن، نحصل على نفس النتيجة تقريبا.

أي أنه وبعبارة أخرى، تكون علاقة زمن دورة البندول متناسبة مع جذر الطول، أو أن الطول يتناسب مع مربع الزمن. وبالنسبة للسطح المائل، يتغير الطول مع مربع الزمن.

انصرف غاليليو بعد ذلك لقياس أزمنة السقوط العمودي. بات إيقاف وتشغيل الساعة المائية صعبا لمسافات أكثر من مترين. ولما أظهرت عدة قياسات تناسب المسافات مع مربع الأزمنة، قاس غاليليو تساقط الأجسام حسب ما استنتجه في البندول. فوجد أن زمن سقوط جسم لمسافة تساوي طول البندول، أن الزمن يقارب لـ 0,900 مرة ($0.900 = 2\sqrt{2}/\pi$ واستخدام π بسبب أن مسار البندول على شكل قوس دائرة).

يمكن التأكد من عمل غاليليو باستخدام المعادلات الموجودة في مناهج الفيزياء. تبين المعادلة التالية طريقة حساب الزمن ز لربع دورة من بندول طوله ط:

$$t = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{d}{g}}$$

حيث تكون g تساوي 9,8 م/ ث2 وهي قيمة تسارع الجاذبية.

يمكن تطبيق هذه المعادلة على أرقام الجدول.

لتساقط حر عمودي، تكون المعادلة كالتالي (م للمسافة و ز للزمن):

$$d = \frac{g}{2}\ t^2$$

ويمكن إعادة صياغة هذه المعادلة لحساب الزمن فتصبح:

$$t = \sqrt{\frac{2d}{g}}$$

أما إذا سقط جسم ما لمسافة تساوي طول البندول، فتصبح المعادلة كالآتي:

$$\frac{t}{T} = \frac{\sqrt{\frac{2d}{g}}}{\frac{\pi}{2}\sqrt{\frac{d}{g}}} = \frac{\sqrt{2}}{\pi/2} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi}$$

مثل غاليليو هذا الرقم بمذكراته بـ 942/ 850. تستطيع أن تحسب الأرقام بآلتك الحاسبة لتجد أن حسابات غاليليو تختلف عن القيمة النظرية الحديثة بأقل من 0,23 بالمئة.

وكاختبار أخير للعلاقات التي كان يطورها، قام غاليليو بتجربتين كبيرتين. استغرق بندول طوله 9,25 مترا 53.1 ثانية لربع دورة، وسقط جسم في 3,05 ثانية لمسافة 45,25 مترا.

تجد أن غاليليو كان يمثل نتائجه كنسب، فلم يستخدم الجبر أبدا ولم يمثل العلاقات كمعادلات مثل ما هو

أعلاه. لكنك تستطيع استخدام المعادلات لترى قرب نتائجه من الحسابات الحديثة.

وحيث أن غاليليو استخدم النسب بدلا من المعادلات، لذلك لم يعط أبدا قيمة لـ g وهي قيمة تسارع الجاذبية. توضِّح هذه القياسات والحسابات أوائل نتائج غاليليو التي استخرجها من علمه الجديد عن الحركة.