

☆ بسيطة

الفيزياء، البكالوريا، الفرع العلمي

فرضيتا أينشتاين وتمدد الزمن وتقلص الأطوال

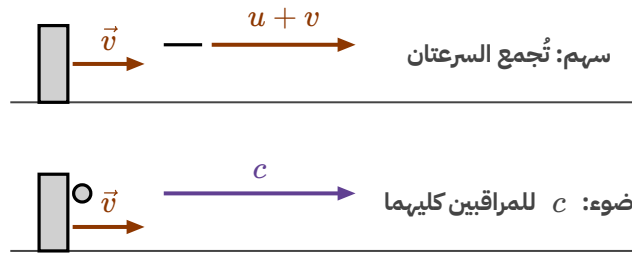
ثبات سرعة انتشار الضوء، ومعامل لورينتز، ومفارقة التوأمين، وتقلص الأطوال

الحركة والتحرك . الوحدة 1 . الدرس 5 (1 من 2)

درسنا حتى الآن حركاتٍ بطيئةً بالنسبة إلى سرعة الضوء. ونسأل في هذا الدرس: ماذا يحدث للزمن وللطول حين تقترب سرعة جسمٍ من سرعة الضوء؟ نتابع مع الكتاب في الصفحات 51 إلى 55: فرضيتا أينشتاين، ثم تمدد الزمن، ثم تقلص الأطوال، مع تطبيقَي الكتاب ومثالٍ من عندنا. وجاءت النسبيّة منذ 2020 في ثمانٍ من عشر أوراق امتحانٍ قرأناها، سؤالٍ اختياريٍّ من متعددٍ في كلّ مرّة.

فرضيتا أينشتاين

يسأل الكتاب في الصفحة 51 سؤالين: شخصٌ متحرّكٌ يطلق سهماً بجهة حركته، فهل تختلف سرعة السهم بالنسبة إليه عنها بالنسبة لمراقبٍ ساكنٍ على الطريق؟ وشخصٌ متحرّكٌ يضيء مصباحاً بجهة حركته، فهل تكون سرعة الضوء بالنسبة إليه هي نفسها بالنسبة لمراقبٍ ساكنٍ؟



في الميكانيك الكلاسيكيّ تُجمع سرعة السهم u وسرعة الشخص v عند المراقب الساكن، أمّا سرعة الضوء فهي c عند المراقبين كليهما. الرسم من عندنا على سؤالَي الكتاب، الصفحة 51.

تذكّر: «السرعة مفهومٌ نسبيّ يختلف باختلاف جملة المقارنة.» و«سرعة انتشار الضوء ثابتةٌ في الوسط نفسه مهما اختلفت سرعة المنبع الضوئيّ، أو سرعة المراقب.» الكتاب، الصفحة 51. ونقتصر في هذا الدرس على انتشار الضوء في الخلاء، كما في الفرضيّة الأولى بعدها.

وحاول العالمان مايكلسون ومورلي، كما في الكتاب، إثبات وجود الأثير بمقارنة سرعة شعاعٍ ضوئيٍّ يُطلق بجهة حركة الأرض حول الشمس بسرعة شعاعٍ معامدٍ له، فوجدا السرعة نفسها في جميع الحالات. ومن هنا الفرضيّة الأولى: سرعة انتشار الضوء في الخلاء هي نفسها في جميع جمل المقارنة، «وهذه هي الفرضيّة الأولى لأينشتاين»:

$$c = 3 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$$

تذكر: «القوانين الفيزيائية تبقى نفسها في جميع جمل المقارنة العطالية، وهي الفرضية الثانية لأينشتاين.» الكتاب، الصفحة 51. ويصل إليها الكتاب بسؤال: هل تختلف نتيجة تجربة النؤاس البسيط في مخبر المدرسة عنها في حافلة تسير بحركة مستقيمة منتظمة؟

انتبه: احفظ الترتيب كما في الكتاب، الصفحتان 51 و60: الفرضية الأولى ثبات سرعة انتشار الضوء في الخلاء، والثانية بقاء القوانين الفيزيائية نفسها في جميع جمل المقارنة العطالية.

وفي امتحان 2025 سؤال اختيار من متعدد عن ثبات سرعة انتشار الضوء مهما اختلفت سرعة المنبع الضوئي.

مراقب في مركبة فضائية يقترب في الخلاء من منبعٍ ضوئيٍّ بسرعة $0.5c$. بأي سرعة يقيس انتشار ضوء المنبع؟

كيف أبدأ؟ هل تُجمع سرعة الضوء مع سرعة المراقب كما تُجمع سرعة السهم؟

(أ) $1.5c$

(ب) c

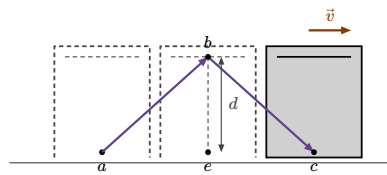
(ج) $0.5c$

ب. نعم: هذه الفرضية الأولى لأينشتاين في الكتاب، سرعة انتشار الضوء في الخلاء هي نفسها في جميع جمل المقارنة،

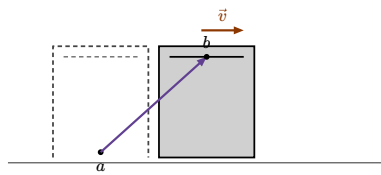
$$c = 3 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$$

تمدد الزمن

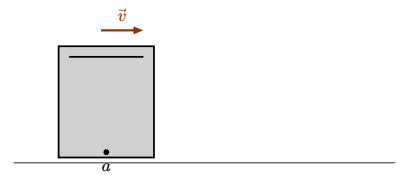
يتخيّل الكتاب في الصفحة 52 قطاراً يسير بسرعة ثابتة v ، وفي أرضه منبعٌ ضوئيٌّ، وفي سقفه مرآة على بُعد d منه. يرسل المنبع ومضةً تنعكس على المرآة وتعود. مراقبٌ في القطار يقيس زمن الذهاب والإياب t_0 ، ومراقبٌ ساكنٌ على الأرض يقيس للحدث نفسه الزمن t .



1. الانطلاق من a : يرسل المنبع الضوء من النقطة a ، والقطار يتحرك بسرعة v .
2. الانعكاس عند b : حين يبلغ الضوء المرآة عند b يكون القطار قد تقدّم، فالضوء عند المراقب الساكن يسير مائلاً.
3. العودة إلى c : يعود الضوء إلى المنبع عند c . المراقب في القطار يراه يصعد وينزل على خطٍّ واحد، فيقطع $2d$ ، والمراقب الساكن يراه يقطع $ab + bc$ ، وهي أطول.



1. الانطلاق من a : يرسل المنبع الضوء من النقطة a ، والقطار يتحرك بسرعة v .
2. الانعكاس عند b : حين يبلغ الضوء المرآة عند b يكون القطار قد تقدّم، فالضوء عند المراقب الساكن يسير مائلاً.
3. العودة إلى c : يعود الضوء إلى المنبع عند c . المراقب في القطار يراه يصعد وينزل على خطٍّ واحد، فيقطع $2d$ ، والمراقب الساكن يراه يقطع $ab + bc$ ، وهي أطول.



1. الانطلاق من a : يرسل المنبع الضوء من النقطة a ، والقطار يتحرك بسرعة v .
2. الانعكاس عند b : حين يبلغ الضوء المرآة عند b يكون القطار قد تقدّم، فالضوء عند المراقب الساكن يسير مائلاً.
3. العودة إلى c : يعود الضوء إلى المنبع عند c . المراقب في القطار يراه يصعد وينزل على خطٍّ واحد، فيقطع $2d$ ، والمراقب الساكن يراه يقطع $ab + bc$ ، وهي أطول.

القطار في ثلاث لحظات كما في الكتاب، الصفحة 52: d بُعد المرآة عن المنبع، و e النقطة تحت b في منتصف ac . الرسم من عندنا.

نتبع الكتاب، ونكتب الخطوة التي يقفز عنها: نظريّة فيثاغورث في المثلث القائم abe . وسرعة الضوء c واحدة عند المراقبين، بحسب الفرضيّة الأولى.

$$\frac{t}{t_0} = ?$$

1. المراقب في القطار الضوء يقطع $2d$ في الزمن t_0 :

$$c = \frac{2d}{t_0}$$

$$d = \frac{ct_0}{2}$$

2. المراقب الساكن الضوء يقطع $ab + bc = 2ab$ في الزمن t ، والمنبع ينتقل $ac = 2ae$ في الزمن نفسه:

$$ab = \frac{ct}{2}$$

$$ae = \frac{vt}{2}$$

3. نظريّة فيثاغورث في المثلث القائم abe . هذه الخطوة من عندنا، والكتاب يكتب نتيجتها مباشرة:

$$(ab)^2 = (ae)^2 + d^2$$

$$\frac{c^2 t^2}{4} = \frac{v^2 t^2}{4} + d^2$$

$$t = \frac{2d}{\sqrt{c^2 - v^2}}$$

4. النسبة ومن الخطوة الأولى $t_0 = \frac{2d}{c}$. نقسم، ثم نخرج c من تحت الجذر:

$$\frac{t}{t_0} = \frac{c}{\sqrt{c^2 - v^2}}$$

$$\frac{t}{t_0} = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

«ندعو النسبة: $\gamma = \frac{t}{t_0}$ معامل لورينتز». الكتاب، الصفحة 53. وهو أكبر من الواحد ما دامت v غير معدومة، فالزمن الذي يقيسه المراقب الساكن أطول:

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$t = \gamma t_0$$

تذكر: «يتمدد (يتباطأ) الزمن عند الحركة نسبياً.» الكتاب، الصفحة 53.

t_0 يقيسه المراقب الذي ترافقه الساعة، و t يقيسه كل مراقبٍ تتحرك الساعة بالنسبة إليه. ولم نجد استنتاج هذه العلاقة مطلوباً في أوراق الامتحان التي قرأناها من 2016 إلى 2026، أما $t = \gamma t_0$ فجاءت في الدورة الأولى 2022 سؤال اختيار من متعدد.

انتبه: لا تختار t_0 لأنه الأصغر بين أرقام السؤال. t_0 زمن المراقب الذي ترافقه الساعة، ولو وضعت الزمنين في غير موضعهما لخرج $1 < \gamma$ ، وهذا مستحيل.

ما قيمة معامل لورينتز لجسم يتحرك بسرعة $v = 0.6c$ ؟

كيف أبدأ؟ عوض $\frac{v^2}{c^2}$ في العلاقة، وتذكر أن γ أكبر من الواحد.

أ) $\gamma = 1.25$

ب) $\gamma = 0.8$

ج) $\gamma \approx 1.58$

أ. نعم: $\frac{v^2}{c^2} = 0.36$ ، و $\sqrt{1 - 0.36} = 0.8$ ، ف $\gamma = \frac{1}{0.8} = 1.25$.

من الكتاب: مفارقة التوأمين

تطبيق الكتاب، الصفحة 53: تويمان، أحدهما رائد فضاءٍ طار بسرعةٍ قريبةٍ من سرعة الضوء c $v = \frac{\sqrt{899}}{30}$ ، ودامت رحلته

1 year وفق الساعة التي يحملها. ما الزمن الذي انتظره أخوه على الأرض؟

$$t = \gamma t_0$$

1. الزمان $t_0 = 1 \text{ year}$ سجلته ساعة رائد الفضاء التي ترافقه، و t يسجله المراقب الخارجي، أي الأخ على الأرض.

$$t_0 = 1 \text{ year}$$

2. معامل لورينتز $\frac{v^2}{c^2} = \frac{899}{900}$ ، فتحت الجذر $\frac{1}{900}$:

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{899}{900}}}$$

$$\gamma = 30$$

3. الزمن على الأرض نعوض:

$$t = 30 \times 1 = 30 \text{ year}$$

انتظر الأخ على الأرض ثلاثين ضعفاً لما سجلته ساعة رائد الفضاء:

$$t = \gamma t_0$$

وفي الصفحة 54 طُبع حلّ هذا التطبيق صورةً فيها الحرف c مكان γ في أربعة أسطر، مثل $t = ct_0$. والصحيح $t = \gamma t_0$ ، والنتيجة 30 year صحيحة.

انتبه: ✖️ المفارقة ليست متناظرة: رائد الفضاء وحده يتسارع ويعود، فيغيّر جملة المقارنة، ولذلك هو الأصغر سنّاً عند العودة. ونحسب من جملة الأرض، وهي غير متسارعة، لأنّ النسبيّة الخاصّة تُطبّق في حالة انعدام التسارع، كما يذكر الكتاب في «أبحث أكثر»، الصفحة 62.

يقيس رائد فضاء في مركبته مدّة رحلته $t_0 = 2 \text{ year}$ ، ومعامل لورينتز لحركة المركبة $\gamma = 1.25$. ما مدّة الرحلة التي يقيسها مراقب على الأرض؟

| كيف أبدأ؟ أي المراقبين ترافقه الساعة؟ وهل الزمن عند الآخر أطول أم أقصر؟

(أ) $t = 1.6 \text{ year}$

(ب) $t = 2 \text{ year}$

(ج) $t = 2.5 \text{ year}$

ج. نعم: $t = \gamma t_0 = 1.25 \times 2 = 2.5 \text{ year}$.

تقلص الأطوال

نتبع الكتاب، الصفحة 54: مراقب في محطة على الأرض، وروبوت في مركبة فضائية تسير نحو الشمس بسرعة ثابتة v . كلٌّ منهما يقيس المسافة بين الأرض والشمس وزمن الرحلة.

$$L = ?$$

1. على الأرض المسافة L_0 ، وزمن الرحلة t :

$$L_0 = v t$$

2. في المركبة المسافة L ، وزمن الرحلة t_0 :

$$L = v t_0$$

3. القسمة نقسم العلاقتين، و $\gamma = \frac{t}{t_0}$:

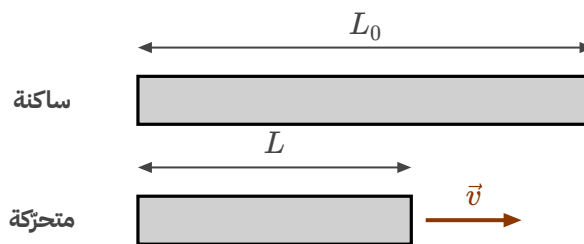
$$\frac{L_0}{L} = \frac{t}{t_0} = \gamma$$

$$L = \frac{L_0}{\gamma}$$

«يتقلص (ينكمش) الطول عند الحركة نسبياً.» الكتاب، الصفحة 54.

$$L = \frac{L_0}{\gamma}$$

ثمَّ ينقل الكتاب النتيجة إلى طول المركبة نفسها في منحى سرعتها: L_0 طولها عند المراقب فيها، و L طولها عند المراقب الأرضي. فانتبه: في المسافة كان L_0 عند الأرض، وفي طول المركبة صار L_0 عند المركبة. والقاعدة واحدة: L_0 هو الطول عند المراقب الساكن بالنسبة للشيء المقيس.



المركبة ساكنة طولها L_0 ، ومتحركة بسرعة $\vec{v}$ يقيسها المراقب الساكن أقصر، $L = \frac{L_0}{\gamma}$ ، في منحى الحركة وحده. الرسم من عندنا، بنسبة $\gamma = \frac{5}{3}$.

وفي الدورة الثانية 2022 سؤال اختيارٍ من متعدّد يعطي L_0 و L ويطلب γ .

انتبه: لا تضرب في γ : الطول المتحرك أقصر، $L = \frac{L_0}{\gamma}$. ولو ضربت لخرج أطول من الطول الساكن.

طول سارية وهي ساكنة $L_0 = 50 \text{ m}$ ، وتتحرك على امتداد طولها بسرعة معامل لورينتز لها $\gamma = 1.25$. ما طولها الذي يقيسه مراقب ساكن؟

| كيف أبدأ؟ الطول المتحرك أطول أم أقصر من الطول الساكن؟

(أ) $L = 62.5 \text{ m}$

(ب) $L = 50 \text{ m}$

(ج) $L = 40 \text{ m}$

ج. نعم: $L = \frac{L_0}{\gamma} = \frac{50}{1.25} = 40 \text{ m}$

من الكتاب: السارية والحجرة

تطبيق الكتاب، الصفحة 55: روبوت رياضي يحمل سارية أفقية طولها وهي ساكنة 15 m ، ويتحرك بسرعة أفقية $0.75 c$ نحو حجرة لها بابان، أمامي وخلفي، بينهما 10 m . هل تعبر السارية الحجرة بأمان إذا أغلق البابان معاً وفُتحا معاً بالنسبة لمراقب ساكن؟ نعد $\sqrt{0.4375} \approx 0.66$.

$$L = \frac{L_0}{\gamma}$$

1. معامل لورينتز يُختصر c^2 قبل الحساب:

$$\frac{v^2}{c^2} = \frac{(0.75 c)^2}{c^2} = 0.5625$$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{0.4375}} \approx \frac{1}{0.66}$$

2. طول السارية المتحركة نعوض:

$$L = 15 \times 0.66$$

$$L \approx 9.9 \text{ m} < 10 \text{ m}$$

السارية المتحركة أقصر من الحجرة عند المراقب الساكن، فتعبرها بأمان، كما في الكتاب:

$$L < 10 \text{ m}$$

انتبه: قزّب كما يقول السؤال، ولا تقزّب أكثر منه قبل النهاية. السؤال يعطي $\sqrt{0.4375} \approx 0.66$ ، فيخرج $L \approx 9.9 \text{ m}$. ولو قزّبت الجذر إلى 0.7 لخرج $L = 10.5 \text{ m}$ ، أطول من الحجرة، ولو قزّبت γ إلى 1.5 لخرج $L = 10 \text{ m}$ تماماً، فلا يمكن الحكم. والقيمة الأدق $\sqrt{0.4375} \approx 0.6614$ تعطي $L \approx 9.92 \text{ m}$.

يتحرّك جسمٌ بسرعة $v = 0.75 c$. ما قيمة $\frac{v^2}{c^2}$ ؟

كيف أبدأ؟ اكتب v بدلالة c ، ثم ربّع واختصر.

$$\frac{v^2}{c^2} = 0.5625 \quad (\text{أ})$$

$$\frac{v^2}{c^2} = 0.75 \quad (\text{ب})$$

$$\frac{v^2}{c^2} = 0.5625 c^2 \quad (\text{ج})$$

أ. نعم: $\frac{(0.75 c)^2}{c^2} = 0.75^2 = 0.5625$ ، ويُختصر c^2 .

مثالٌ محلول: مركبةٌ فضائيةٌ سريعة

مثالٌ من عندنا: مركبةٌ فضائيةٌ طولها وهي ساكنة 60 m تتحرّك بسرعة $v = 0.8 c$ بالنسبة للأرض، وتدوم رحلتها 6 year وفق ساعتها. احسب معامل لورينتز، ثم مدّة الرحلة وطول المركبة عند مراقبٍ على الأرض.

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

1. معامل لورينتز $\frac{v^2}{c^2} = 0.64$ ، فتحت الجذر 0.36 :

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{0.36}} = \frac{1}{0.6} = \frac{5}{3}$$

2. الزمن ساعة المركبة ترافقها، ف $t_0 = 6 \text{ year}$:

$$t = \gamma t_0 = \frac{5}{3} \times 6 = 10 \text{ year}$$

3. الطول $L_0 = 60 \text{ m}$ طولها عند من فيها:

$$L = \frac{L_0}{\gamma} = 60 \times \frac{3}{5} = 36 \text{ m}$$

الحركة النسبية تطيل الزمن وتقصّر الطول بالمعامل نفسه:

$$\begin{aligned} t &= \gamma t_0 \\ L &= \frac{L_0}{\gamma} \end{aligned}$$

يشاهد طاقم مركبة فضائية سريعة جداً تجربة تدوم عندهم $t_0 = 20 \text{ min}$ ، ويتابعها مراقب على الأرض. ما المدة التي يقيسها المراقب الأرضي؟

كيف أبدأ؟ عند أي المراقبين تكون الساعة ساكنة؟ و γ أكبر من الواحد.

(أ) أقل من 20 min

(ب) أكبر من 20 min

(ج) 20 min نفسها

ب. نعم: $t = \gamma t_0$ و $\gamma > 1$ ، فالمدة عند المراقب الأرضي أطول. وبهذا البناء جاء سؤال الدورة الأولى 2022.

المصدر: الفيزياء، الصفحات 50 إلى 55 من الطبعة الرسمية 2025 / 2026.