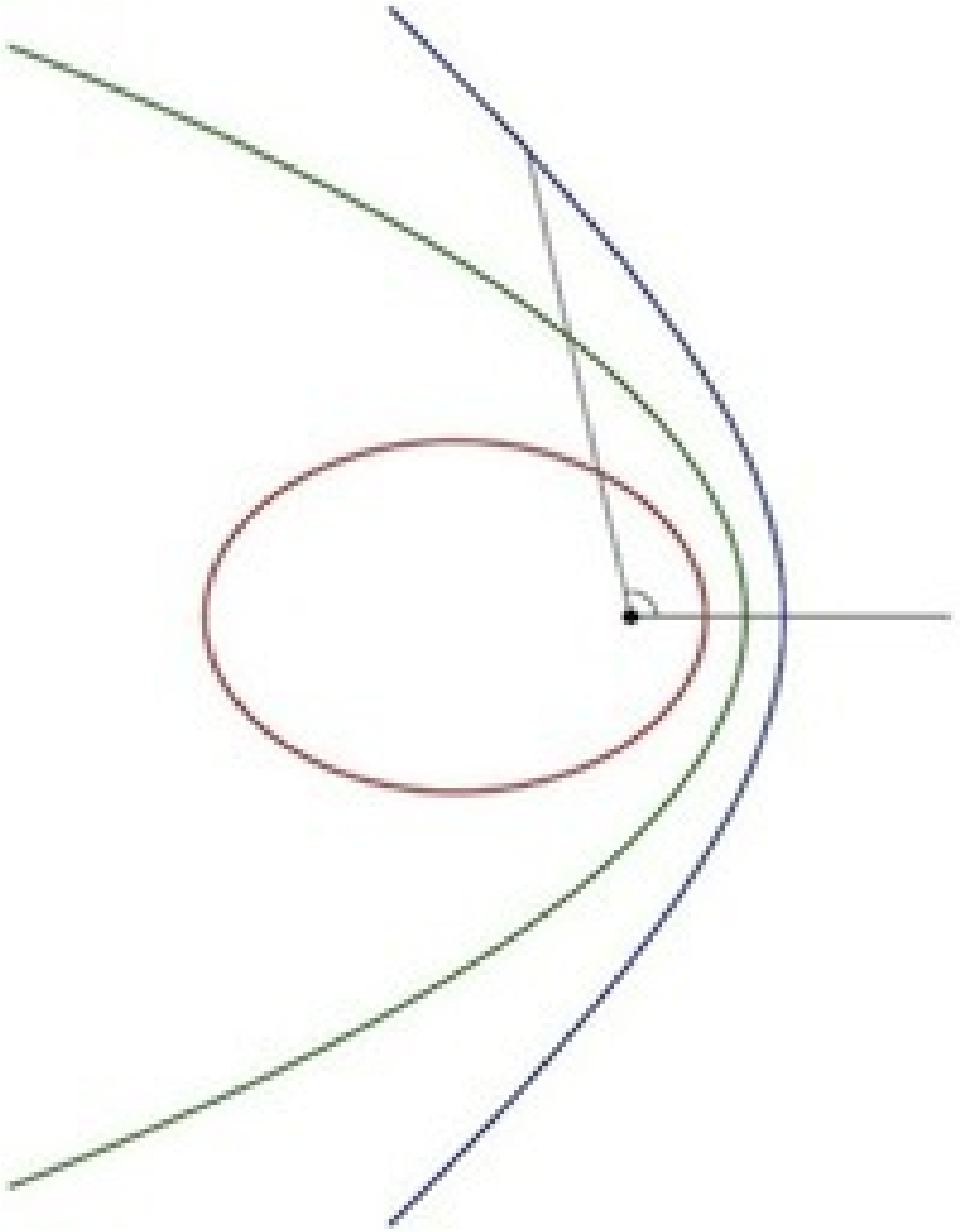
وزن الضوء

هل للضوء وزن؟ يعتقد نيوتن ذلك، فقد دعم النظرية الجسيمية للضوء (**corpuscular theory of light**)، حيث اعتبره مكوناً من جسيمات صغيرة جداً، لكن لها وزنٌ محدود. استنتج نيوتن أن مثل هذه الجسيمات ستتأثر بحقل الجاذبية. إذاً، وباستخدام قوانين الحركة، نستطيع حساب مقدار حرف الجاذبية لشعاع ضوئي.

- **المسارات المنحنية**

إنها حقيقة مفاجئة تلك التي تقول أنّ حركة جسم ما حول جسم آخر فائق الكتلة كالشمس ستكون مستقلة عن كتلة الجسم. وبالنظر إلى قوانين نيوتن، ستكون تلك الحركة خاضعة للمعادلة التالية:



رسم توضيحي للمسارات الخاصة بالكويكب.

$$\ {m a = \frac{G M m}{r^2}\$$

حيث m هي كتلة الجسم، وa قيمة التسارع، وM كتلة الشمس، وr المسافة (تُقاس هذه المسافة بين مركزي الشمس والجسم)، وG ثابت الجاذبية العام لنيوتن. يُمكننا اختصار الكتلة m من جانبي المعادلة، ومن ثمَّ لا تعتمد حركة الجسم على كتلته.

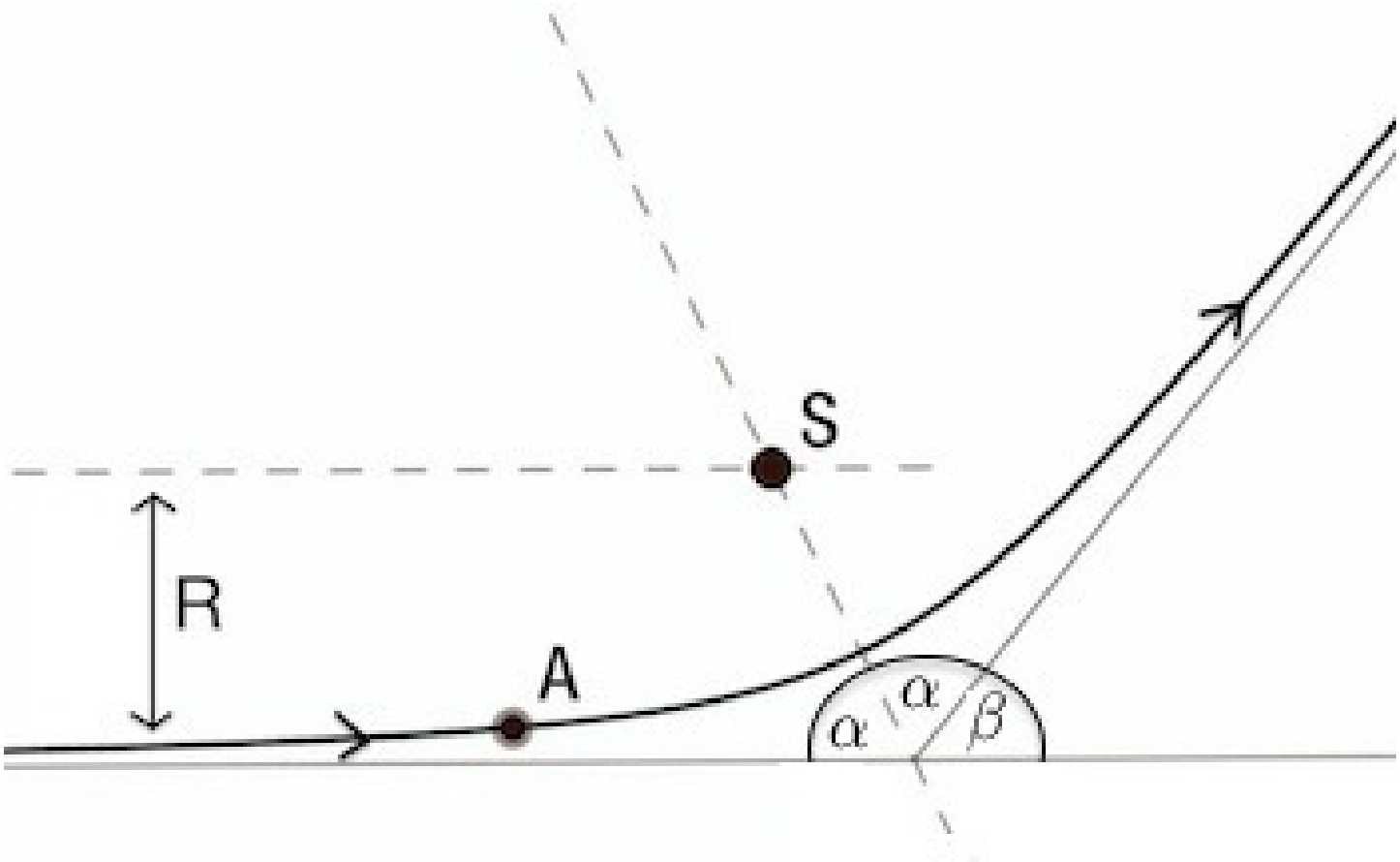
دعنا نبدأ بافتراض وجود كويكب يقترب من الشمس انطلاقاً من مسافة بعيدة جداً. وبالاعتماد على قوانين نيوتن، نستنتج أنه باستطاعتنا القول أنّه إذا كانت الطاقة الحركية للكويكب صغيرة، فإنه سيُؤسر من قبل جاذبية الشمس وسيتحرك على مدارٍ إهليجي حولها، ليعود دوماً إلى نقطة انطلق منها.

سنفترض أن هذا الكويكب يقترب من الشمس بطاقة عالية، ولذلك سيخضع لمدارٍ على شكل قطع مكافئ، ليعبر بالقرب من الشمس، ولا يعود أبداً. يتمتع هذا المدار بالمعادلة التالية:

$$\frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} = 1\$$

حيث x وy الإحداثيات التي تُشير إلى موقع الكويكب في المستوي الذي يحتوي مساره (المدار الذي يأخذ شكل قطع مكافئ) والشمس. الأعداد الحقيقية a وb تُعرف بالمحورين الرئيسي والثانوي، وتُعرف هذه القيم شكل القطع المكافئ.

عندما يكون الكويكب بعيداً عن الشمس، سيتحرك بسرعة V على طول المسار القريب جداً من المستقيم (الخط المقارب للقطع المكافئ) كما هو موضح على شكل خط أفقي في الصورة إلى اليسار.



مسار الكويكب أثناء عبوره بالشمس.

سنرمز إلى المسافات الأقصر بـ R أي البعد عن الخط الأفقي المار بالشمس. وستكون الطاقة الحركية للكويكب (لواحدة الكتلة) معطاة بالصيغة المألوفة التالية:$$\E = \frac{1}{2} V^2$$

كمية الحركة الزاوية هي كمية الحركة الخطية mV مضروبة بالمسافة العمودية عن الشمس R. وعندما يكون الكويكب موجود عند

مسافة بعيدة عن الشمس، ستكون القيمة \(L = RmV\)، أو لواحدة الكتلة كالتالي: \(L = RV\).

مع اقتراب الكويكب من الشمس، ينحني مساره جراء الحقل الثقالي للشمس، ويتغير كلٌ من سرعته وكمية حركته، لكن كمية حركته الزاوية تبقى محفوظة. يُمكن التعبير عن الكميات E وL بدلالة بارامترات هندسية، والمحاور الرئيسية والثانوية a وb للمدار ذو الشكل القطع المكافئ:

$$L^2 = \frac{G M b^2}{a}$$

و

$$E = \frac{G M}{2 a}$$

(أثبت صحة العلاقتين السابقتين 🙂 وأخبرنا في تعليق)

يُمكننا استخدام تلك التعابير لاستنتاج مقدار الانحراف في مسار الكويكب والناجم عن الشمس، أي الزاوية (\(\beta\)) في الشكل في الأعلى. وبالاعتماد على هندسة القطع المكافئ، ستكون زاوية النصف (\(\alpha\)) لمدار ذو الشكل القطع المكافئ معطاة بالعلاقة:

$$\tan \alpha = \frac{b}{a}$$

يُمكننا الآن أن نُعيد ترتيب المعادلات ونجمعها معاً لنجد العلاقة التالية:

$$\tan \alpha = \frac{b}{a} = \frac{R V^2}{G M}$$

ونجد أن زاوية الانحراف \(\beta = \pi - 2 \alpha\)، ووصلنا إلى تلك القيمة بفضل المتطابقة المثلثية التالية \(\tan (\pi /2 - \theta) =\cot (\theta) = 1/\tan (\theta)\)

$$\tan \left(\frac{\beta }{2}\right) = \frac{1}{\tan \alpha}$$

ويُمكننا كتابة العلاقة السابقة بالشكل التالي:

$$\tan \left(\frac{\beta }{2}\right) = \frac{a}{b} = \frac{G M}{R V^2}$$

نعرف أن (ظل) الزوايا الصغيرة مساوٍ تقريباً للزاوية نفسها. ولأن (\(\frac{\beta }{2}\)) صغيرة جداً، يُمكننا استبدالها بالظل، ليكون لدينا

$$\beta = \frac{2 G M}{R V^2}$$

الآن أصبح لدينا صيغة لانحراف الكويكب جراء قوة جاذبية الشمس.

لاحظ أن كتلة الكويكب لا تؤثر على مساره أبداً. وزاوية الانحراف (\(\beta\)) هي نفسها بالنسبة لكل الأجسام التي تملك نفس قيم R وV. حسناً، إذا ما كان للضوء كتلة كما اعتقد نيوتن، ولدينا V=c وهي سرعة الضوء، يُمكننا حينها أن نستخلص مقدار انحراف أشعة الضوء عن الشمس:

$$\beta = \frac{2 G M}{R c^2}$$

وبافتراض أن شعاع الضوء يمر قريباً من الشمس، يُمكننا اعتبار أن R هي نصف قطر الشمس. وباستخدام جملة الواحدات الدولية حيث: \(G=6.67*10^{-11}\)، وكتلة الشمس \(M=2*10^{30}\)، ونصف قطرها \(R=7*10^8\) وسرعة الضوء هي \(c=3*10^8\)، نجد أن:

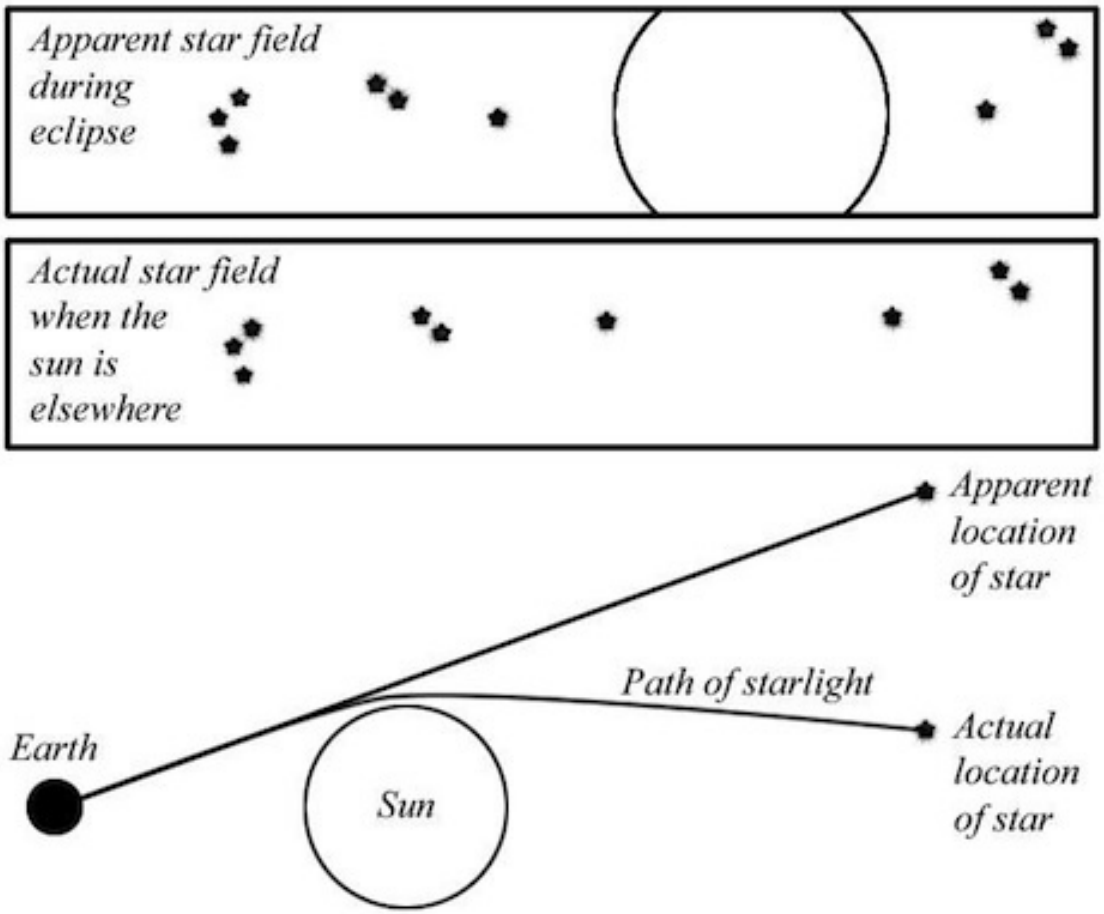
$$\beta \approx 0.423 \times 10^{-5} \mbox{radians} = 0.87 \mbox{arc seconds}$$

ولذلك فإن نظرية نيوتن في الجاذبية تتنبأ أن مسار الضوء المار بالقرب من الشمس سينحني بزاوية تصل إلى 0.87 ثانية قوسية.

- **وضع الأمر تحت الاختبار**

أكّدت سلسلة من الأرصاد التي تمّ إجراؤها في مايو/أيار عام 1919 أن الضوء المار بالقرب من الشمس ينحرف جراء جاذبية الأخيرة. ونتيجةً لذلك، يظهر نجمٌ، يكون قريباً من حافة الشمس، أبعد بقليل في السماء عن الشمس مقارنةً مع الموقع الذي سيحتله لو كانت الشمس غير موجودة.

هذا المفعول قابل لرصد أثناء الكسوف الكلي، إذ يُقارن مُصوري السماء الصور الخاصة بالمنطقة نفسها عندما كانت الشمس موجودة فيها، وبين تلك عند الكسوف الكلي، وبذلك يُمكننا معرفة الاختلاف في الموقع الظاهري للنجوم.



المسار الفعلي للضوء القادم من نجم بعيد أثناء انحنائه جراء المرور بالقرب من الشمس.

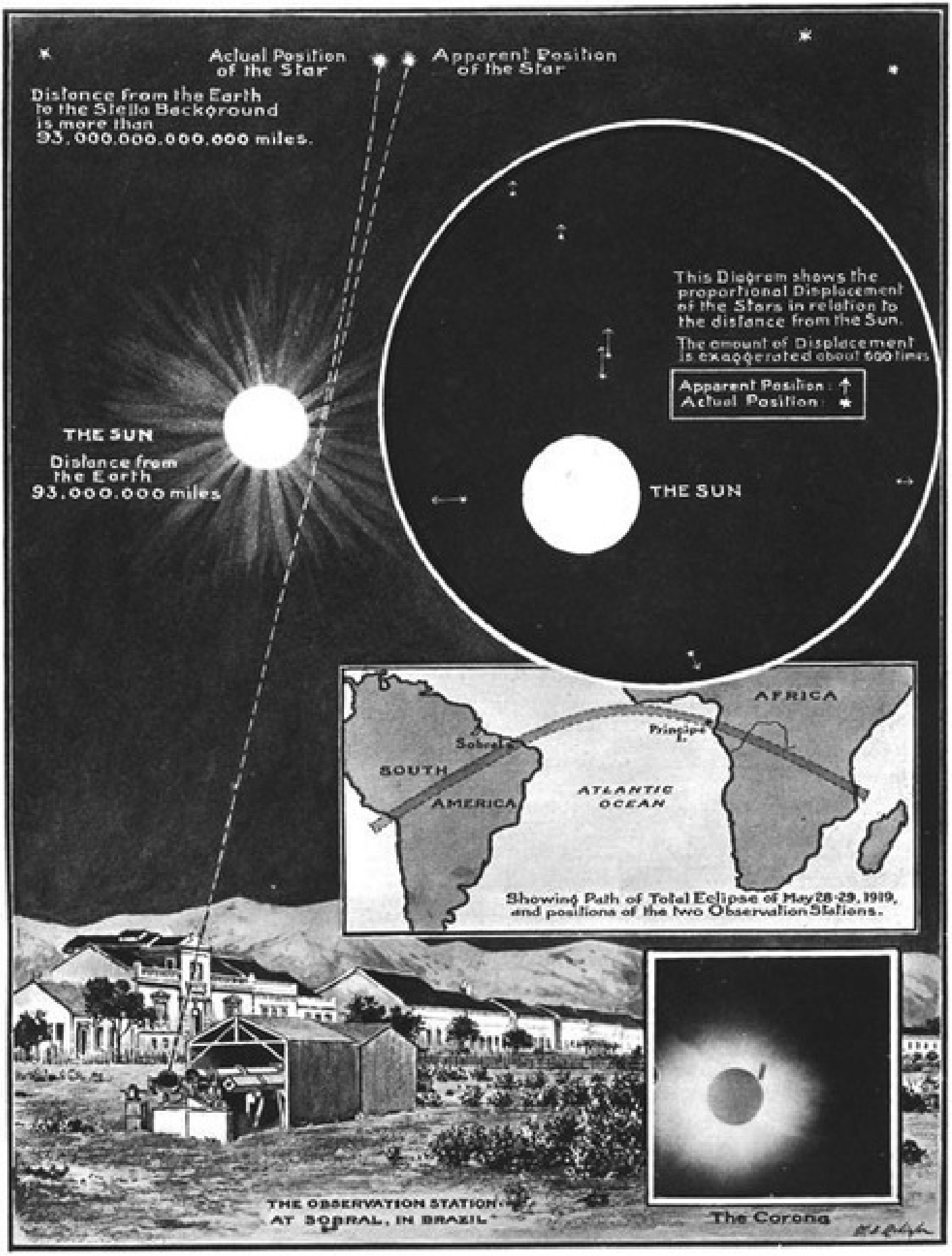
اكتشف ألبرت اينشتاين النسبية العامة، وتنبأت نظريتها أيضاً أن الشمس ستحرف مسار الضوء. ووفقاً لذلك وعندما كانت نظريته غير مقبولة من قبل قطاع واسع، فإن تشوه الزمكان جراء وجود الشمس فائقة الكتلة يُعطي زاوية انحراف هي:

$$\beta = \frac{4 G M}{R c^2} \approx 0.847 \times 10^{-5} \mbox{radians} = 1.75 \mbox{arc seconds}$$

وهي ضعف قيمة الانحراف القادمة من قوانين نيوتن. وعلى الرغم من كونها زاوية صغيرة، إلا أنه كان بالإمكان قياسها بالتقنيات الموجودة في مجال علم الفلك في تلك الفترة، وجُهز المسرح لاختبار النظريتين.
مضت بعثتان من بريطانيا إحداهما إلى جزيرة برانسيب في افريقيا، والأخرى إلى سوبرال في شمال البرازيل لرصد مسار الكسوف الكلي. وصف السير ارثر ادنيغتون، الذي كان موجوداً في البعثة السابقة، تلك المراقبات والاستنتاجات (يُمكنك القراءة عنها في هذا الرابط).

أعطت مراقبات جزيرة برانسيب قيمة للانحراف وصلت إلى 1.61 +/- 0.3 ثانية قوسية لتتوافق بشكلٍ ممتاز مع تنبؤ اينشتاين، وقدّمت نتائج سوبرال تأكيداً أقوى.

لا يُمكن التوفيق بين نتائج برانسيب وسوبرال وبين نظرية نيوتن، وتبع ذلك ثورة علمية. وقذفت تلك التجربة باينشتاين إلى عالم الشهرة، ولا يزال منذ ذلك الوقت أيقونة العلوم.


Actual Position of the Star
Apparent Position of the Star
Distance from the Earth to the Stella Background is more than 93,000,000,000,000 miles.
THE SUN
Distance from the Earth 93,000,000 miles
This Diagram shows the proportional Displacement of the Stars in relation to the distance from the Sun.
The amount of Displacement is exaggerated about 500 times
Apparent Position
Actual Position
THE SUN
AFRICA
SOUTH AMERICA
ATLANTIC OCEAN
Showing Path of Total Eclipse of May 28-29, 1919, and positions of the two Observation Stations.
THE OBSERVATION STATION AT SOBRAL, IN BRAZIL
The Corona

رسم توضيحي لحملة تغطية الكسوف الحاصل في لندن في 22 نوفمبر. London News

- التاريخ: 2015-05-27
- التصنيف: أسئلة كُبرى

#الضوء #نيوتن #اينشتاين #النسبية العامة #فيزياء نيوتن

المصادر

- كامبردج
- مصدر الصورة

المساهمون

- ترجمة
  - همام بيطار
- تصميم
  - حسن بسيوني
- نشر
  - همام بيطار