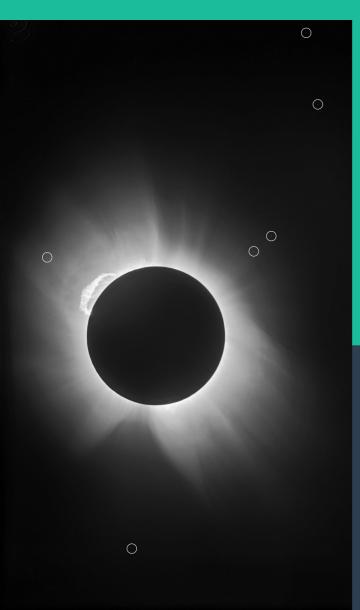
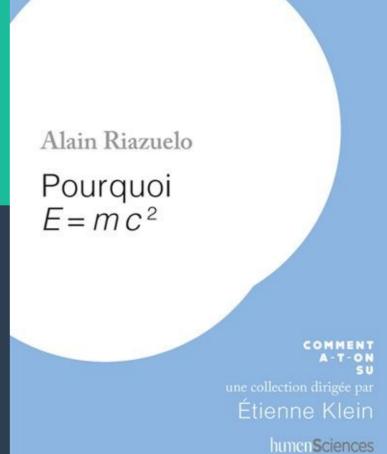
# Pourquoi $E = m c^2$

#### Une brève histoire de la relativité



Alain Riazuelo
Institut d'astrophysique
de Paris
riazuelo@iap.fr

Montgeron, le 15 janvier 2022

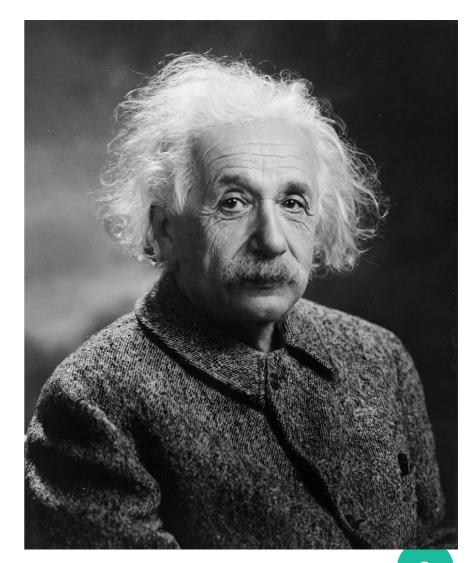


# Vous le reconnaissez?



# Et là, vous le reconnaissez?

- On va s'intéresser au jeune Albert
   Einstein (1879-1955)...
- ... qui a fait ses plus grandes découvertes entre 25 et 36 ans...
- Et ça en fait beaucoup!
- (et du coup je ne vais pas parler de tout)



#### En 1905, Einstein va publier quatre articles...

6. Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt; von A. Einstein.

Zwischen den theoretischen Vorstellungen, welche sich die Physiker über die Gase und andere ponderable Körper gebildet haben, und der Maxwellschen Theorie der elektromagnetischen Prozesse im sogenannten leeren Raume besteht ein tiefgreifender formaler Unterschied. Während wir uns

3. Zur Elektrodynamik bewegter Körper; von A. Einstein.

Daß die Elektrodynamik Maxwells — wie dieselbe gegenwärtig aufgefaßt zu werden pflegt — in ihrer Anwendung auf bewegte Körper zu Asymmetrien führt, welche den Phänomenen nicht anzuhaften scheinen, ist bekannt. Man denke z. B. an die elektrodynamische Wechselwirkung zwischen einem Magneten und einem Leiter. Das beobachtbare Phänomen hängt hier nur ab von der Relativbewegung von Leiter und Magnet, während nach der üblichen Auffassung die beiden Fälle, daß

5. Über die von der molekularkinetischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen; von A. Einstein.

In dieser Arbeit soll gezeigt werden, daß nach der molekularkinetischen Theorie der Wärme in Flüssigkeiten suspendierte Körper von mikroskopisch sichtbarer Größe infolge der Molekularbewegung der Wärme Bewegungen von solcher Größe ausführen müssen, daß diese Bewegungen leicht mit dem

13. Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig? von A. Einstein.

Die Resultate einer jüngst in diesen Annalen von mir publizierten elektrodynamischen Untersuchung<sup>1</sup>) führen zu einer sehr interessanten Folgerung, die hier abgeleitet werden soll.

Ich legte dort die Maxwell-Hertzschen Gleichungen für den leeren Raum nebst dem Maxwellschen Ausdruck für die elektromagnetische Energie des Raumes zugrunde und außerdem das Prinzip:

• ... qui seront autant de révolutions

• 17 mars → 9 juin

6. Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt; von A. Einstein.

Zwischen den theoretischen Vorstellungen, welche sich die Physiker über die Gase und andere ponderable Körper gebildet haben, und der Maxwellschen Theorie der elektromagnetischen Prozesse im sogenannten leeren Raume besteht ein tiefgreifender formaler Unterschied. Während wir uns

 « Sur un point de vue heuristique au sujet de la production et la transformation de la lumière » → La lumière n'est pas ce qu'on croyait avoir compris qu'elle était

#### • 11 mai → 18 juillet

5. Über die von der molekularkinetischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen; von A. Einstein.

In dieser Arbeit soll gezeigt werden, daß nach der molekularkinetischen Theorie der Wärme in Flüssigkeiten suspendierte Körper von mikroskopisch sichtbarer Größe infolge der Molekularbewegung der Wärme Bewegungen von solcher Größe ausführen müssen, daß diese Bewegungen leicht mit dem

 « Au sujet du mouvement de particules en suspension dans des liquides stationnaires tels que prédits par la théorie cinétique de la chaleur » → La nature de la matière

• 30 juin → 26 septembre

3. Zur Elektrodynamik bewegter Körper; von A. Einstein.

Daß die Elektrodynamik Maxwells — wie dieselbe gegenwärtig aufgefaßt zu werden pflegt — in ihrer Anwendung auf bewegte Körper zu Asymmetrien führt, welche den Phänomenen nicht anzuhaften scheinen, ist bekannt. Man denke z. B. an die elektrodynamische Wechselwirkung zwischen einem Magneten und einem Leiter. Das beobachtbare Phänomen hängt hier nur ab von der Relativbewegung von Leiter und Magnet, während nach der üblichen Auffassung die beiden Fälle, daß

« Sur l'électrodynamique des corps en mouvement » →
 L'espace et le temps ne sont pas (du tout) ce qu'on imaginait

#### • 27 septembre → 21 novembre

13. Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig?
von A. Einstein.

Die Resultate einer jüngst in diesen Annalen von mir publizierten elektrodynamischen Untersuchung<sup>1</sup>) führen zu einer sehr interessanten Folgerung, die hier abgeleitet werden soll.

Ich legte dort die Maxwell-Hertzschen Gleichungen für den leeren Raum nebst dem Maxwellschen Ausdruck für die elektromagnetische Energie des Raumes zugrunde und außerdem das Prinzip:

- « L'inertie d'un corps dépend-elle de son contenu en énergie ? »
  - → Il existe une relation entre masse (m) et énergie (E) :  $E = m c^2$ !

# Le mystère

- En 1905, Einstein fête ses 26 ans
- Il n'a jusqu'ici pas ébloui par son talent
- Au point qu'il a échoué à trouver un poste à l'université
- Il gagne sa vie en travaillant au Bureau Fédéral des Brevets à Berne (Suisse)
- Et fait un peu de science... sur son temps libre!

# Le mystère

- En 1905, Einstein fête ses 26 ans
- Il n'a jusqu'ici pas ébloui par son talent
- Au point qu'il a échoué à trouver un poste à l'université
- Il gagne sa vie en travaillant au Bureau Fédéral des Brevets à Berne (Suisse)
- Et fait un peu de science... sur son temps libre!

→ Par quel miracle a-t-il accompli tant de choses en si peu de temps ?

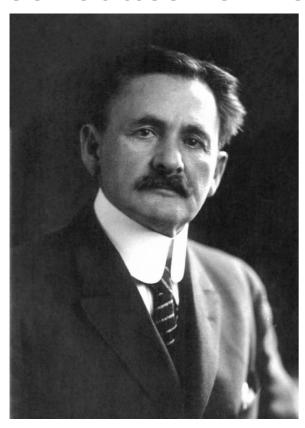
# Vous avez dit relativité?

• C'est évident...

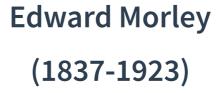
Mais est-ce bien vrai ??



• Entre 1881 et 1887, deux scientifiques américains sont allés vérifier



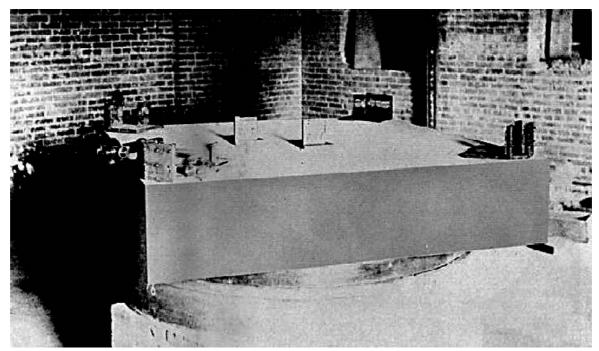
Albert Michelson (1852-1931)





# L'échec le plus fructueux de l'histoire des sciences

- Et ça ne marche pas... « Tout se passe comme si » la lumière se déplace <u>toujours</u> (= quel que soit le mouvement d'un observateur par rapport à la source de lumière) à 299 792 458 m/s
- ... ce qui est absurde! (enfin, apparemment)



# L'explication « naturelle » (accrochez vos ceintures...)

- De même que le son s'appuie sur un milieu, l'air pour se propager, la lumière s'appuie sur quelque chose : l'éther
- La lumière se déplace « naturellement » par rapport à l'éther à 299 792 458 m/s
- Un objet se déplaçant par rapport à l'éther se déplacera à une vitesse différente par rapport à la lumière
- MAIS...
- Un objet se déplaçant par rapport à l'éther va être déformé par la traversée de celui-ci, en l'occurrence <u>comprimé dans la direction de son déplacement</u>
- Cette compression fausse notre évaluation des distances, et donc des vitesses
- « Par miracle » la déformation en question est <u>exactement</u> celle qui fait que notre perception (faussée) de la vitesse de la lumière par rapport à l'objet est à nouveau de 299 792 458 m/s

#### **Retour en 1905...**

- Einstein : on a invoqué l'existence de l'éther en tant que support de propagation de la lumière...
- ... mais pour rendre compte des observations, on a dû conférer à l'éther des propriétés qui le rendent indétectable par construction
- Mais alors, à quoi bon invoquer l'existence de quelque chose d'indétectable ??
  - → L'éther est une hypothèse intestable, donc inutile

# Le premier coup de génie (Einstein, 1905)

- L'éther n'existe pas
- Le fait que la vitesse de déplacement de la lumière n'est pas un phénomène que l'on va expliquer à partir de lois connues
- C'est un <u>fait</u>, qui ne nécessite pas d'explication, mais qui révèle quelque chose sur la nature du monde
- Et on va chercher à déterminer cette nature-là, à partir de ce fait

# Il n'y a peut-être pas d'éther, mais que se passe-t-il alors ?

- Un train passe devant un quai à 100 km/h
- Un voyageur se déplace vers l'avant du train à 5 km/h
- Un chef de gare va donc (?) voir passer le voyageur à 105 km/h...
- SAUF si le temps ne s'écoule pas au même rythme pour tout le monde!
- Dans cette hypothèse, est-il possible de voir si de telles différences d'écoulement du temps permettent de rendre compte que la lumière se déplace toujours à 299 792 458 m/s?

### Le temps est relatif!

#### **OUI !!!**

- Il existe un <u>unique</u> jeu d'équations décrivant les différences d'écoulement du temps d'un observateur à l'autre et rendant compte de l'invariance de la vitesse de la lumière
- La perception de l'espace est également fonction du mouvement de celui qui mesure les distances
- Le temps et l'espace sont <u>relatifs</u>, les deux changent en fonction de la trajectoire de qui les mesure...
- ... mais il est une chose qui ne change pas : la vitesse à laquelle on voit passer la lumière !

## L'espace-temps

 L'espace en lui-même, le temps en lui-même, sont condamnés à s'évanouir tels de simples ombres, et seule une sorte d'union des deux préserve une réalité indépendante

H. Minkowski, 1908

# Une évidence pour les physiciens

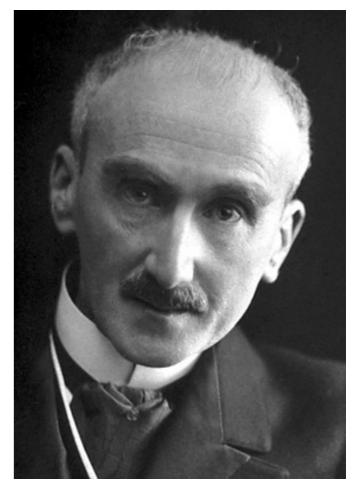
 L'exemple le plus célèbre de la relativité : les jumeaux de Langevin



Paul Langevin (1872-1946)

## Une acceptation difficile par d'autres

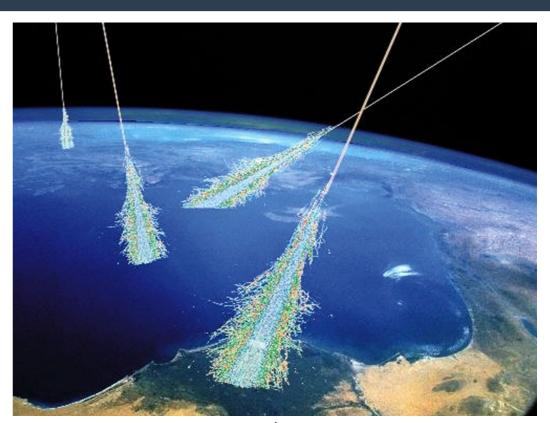
- Le temps était jusqu'ici un concept pour les philosophes
- Mais plus maintenant...
- ... et c'est mal vécu par certains



Henri Bergson (1859-1941)

# La confirmation : expérience de Rossi et Hall (1941)

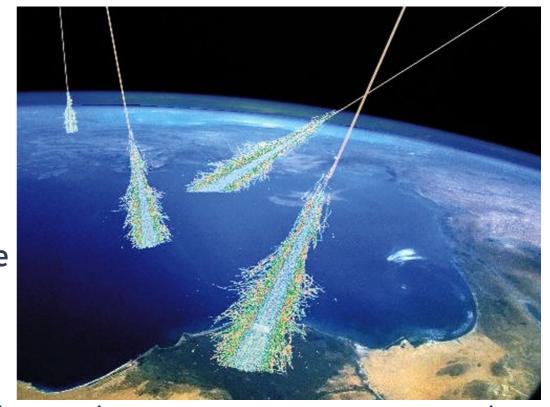
- La haute atmosphère est frappée en permanence par des particules de haute énergie, les rayons cosmiques
- Ceux-ci produisent diverses particules, dont les muons qui se déplacent comme les rayons cosmiques à des vitesses proches de celles de la lumière



- Les muons sont des particules instables, d'une durée de vie moyenne de 2,2 microsecondes...
- ... ce qui, à la vitesse de la lumière, ne devrait leur permettre de parcourir seulement 660 mètres, MAIS...

# La confirmation : expérience de Rossi et Hall (1941)

 Du point de vue d'un Terrien, le muon se déplace très vite, son « horloge interne » est ralentie.
 Ses 2,2 millionièmes de secondes s'allongent suffisamment pour lui donner le temps de traverser l'atmosphère terrestre et atteindre le sol



- Du point de vu du muon, l'atmosphère se déplace vers lui, elle est comprimée en épaisseur et fait moins de 660 m. Le muon a donc le temps de la traverser.
- Ce sont deux moyens d'expliquer que les muons peuvent traverser l'atmosphère avant de se désintégrer

#### $E = m c^2$

- Avec les lois de la relativité, Einstein trouve la nouvelle (= meilleure) description des phénomènes cinématiques, comme par exemple les collisions
- Et il trouve un résultat étonnant : si un objet émet un photon sans masse, alors la masse de l'objet diminue !
- La variation de la masse, m, est liée à l'énergie E du photon émis via une relation étonnamment simple :

$$E = m c^2$$

 C'est un résultat inattendu, trouvé complètement par hasard



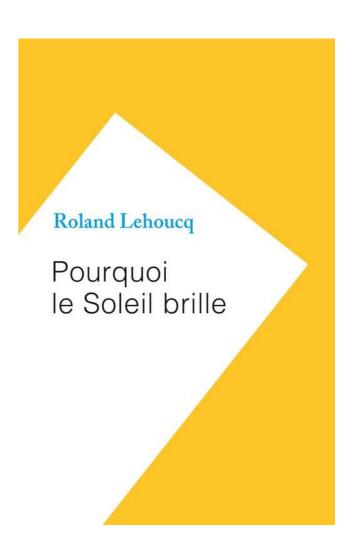
#### $E = m c^2$

- « La masse d'un corps est une mesure de son énergie ; si son énergie change de E, sa masse change de la même façon de E / c² »
- Ce n'est pas E = m c² qui est écrit,
   mais m = E / c² (mais c'est pareil)
- Prédiction à ce stade, à vérifier avec des corps « dont le contenu en énergie varie à un très haut degré », soit des phénomènes radioactifs



# $E = m c^2$ , à quoi ça sert?

- De la masse, c'est beaucoup d'énergie!
- Gaz naturel: 50 MJ / kg
- $E = m c^2$ : environ 100 milliards de MJ / kg, soit 2 milliards de fois plus que le gaz naturel!
- Application : la source d'énergie des étoiles
  - Si le Soleil brille grâce à des réactions chimiques, il peut briller 10 000 ans
  - (Via divers autres processus physiques : 100 millions d'années)
  - Avec des réactions nucléaires, il peut briller des milliards de fois plus longtemps!



#### L'autre relativité

- Jusqu'ici, le plus grand édifice de la physique était la gravitation universelle d'Isaac Newton
- Elle expliquait le mouvement des astres, déterminée par la connaissance des <u>distances</u> entre les astres, à un <u>même</u> instant
- Mais ces notions n'ont plus cours avec la relativité!



Isaac Newton (1642-1727)

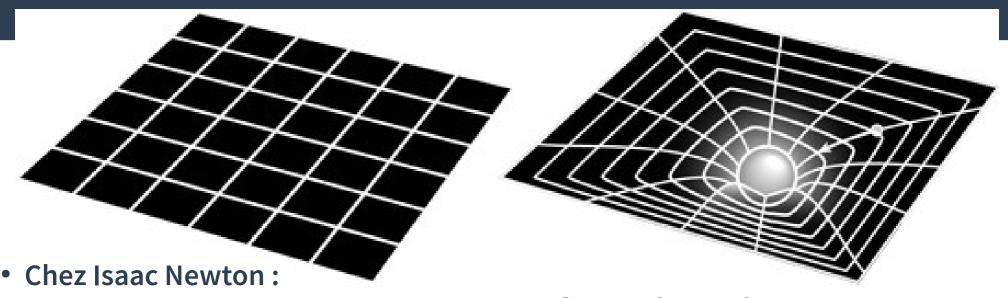
# Le plus grand coup de génie (Einstein, 1907)

- Qu'est-ce que la gravité ?
  - Une <u>force</u> qui agit dans l'espace ? (Newton, 1687)
  - Une <u>manifestation</u>
     <u>d'une propriété</u> de l'espace! (Einstein,
     1907)



- La « force centrifuge » a une origine géométrique (ce qu'on ressent quand on change de direction)
- Or la sensation de la force centrifuge est la même que celle de la pesanteur (si ce n'est la direction et l'intensité)
- Donc, peut-être, la gravité a une origine géométrique!

# L'espace-temps est « courbé »



- L'espace est « plat » (= non déformé)
- Les trajectoires sont « courbées » par la force de gravitation

#### • Chez Einstein:

- L'espace est « courbé »
- Les trajectoires sont les plus
   « rectilignes » possibles dans un espace courbé

#### Chez Einstein :

- La matière dicte à l'espace comment il doit se courber
- L'espace courbé dit à la matière comment elle doit s'y déplacer

# De l'idée de génie aux calculs

#### Pour Einstein, il faut :

- Identifier quels outils
   mathématiques décrivent la
   « géométrie » de l'espace →
   collaboration avec Marcel
   Grossmann, ancien camarade
   devenu mathématicien
- Déterminer comment on se déplace dans un espace courbé (facile)
- Déterminer comment la distribution de matière déforme l'espace (très difficile)



Marcel Grossmann (1878-1936)

# Hésitation et erreur stratégique

- Début 1915, Einstein et Grossmann ont compris comment procéder. Einstein travaille seul désormais...
- ... Mais Einstein n'est pas encore sûr de son coup
- Il sollicite l'imprimatur du plus grand mathématicien de son époque, auquel il soumet ses réflexions
- <u>Mauvaise idée</u>! Hilbert est tellement enthousiaste qu'il se met à approfondir des idées d'Einstein, et est à deux doigts de le devancer!



David Hilbert (1862-1943)

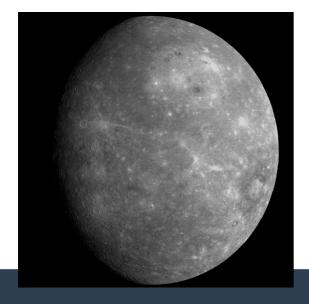
## Le sprint final

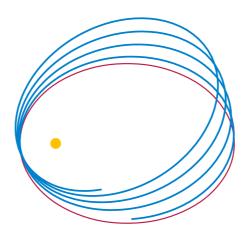
#### Qui remporte la course ?

- Hilbert est le premier à envoyer les bonnes équations à une revue scientifique
- Mais il le fait après qu'Einstein ait trouvé ces équations
- Sans que l'on sache lequel des deux les avait trouvées en premier
- Mais surtout, Einstein est <u>le seul</u> à confronter ses équations au test décisif, l'anomalie du mouvement de Mercure

# Le Verrier et l'anomalie du mouvement de Mercure (1/2)

- « Nulle planète n'a demandé aux astronomes plus de soins et de peines que Mercure, et ne leur a donné en récompense, tant de contrariétés » (1845)
- « Les incertitudes de nos Tables astronomiques méritent de fixer toute notre attention. Sans doute, elles sont peu considérables [...] mais en revanche elles existent partout, et leur petitesse ne nous oblige pas à les négliger. [...] Tout écart décèle une cause inconnue, et peut devenir la source d'une découverte. »







**Urbain Le Verrier (1811-1877)** 

# Le Verrier et l'anomalie du mouvement de Mercure (2/2)

- L'anomalie du mouvement de Mercure pourrait s'expliquer par la présence d'une planète « intramercurienne » dont Le Verrier détermine les propriétés...
- ... et dont il encourage la recherche à partir de 1859
- Mais la planète ne sera jamais trouvée

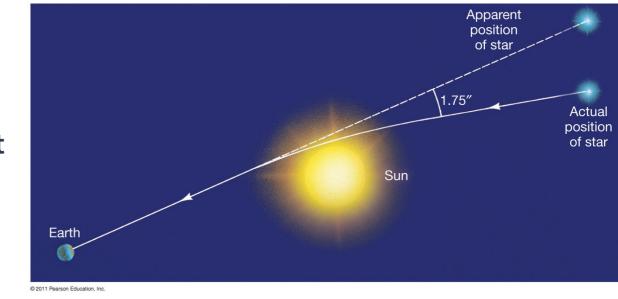
- En 1915 Einstein comprend que les corrections induites par sa théorie en devenir sont faibles mais plus importants au voisinage du Soleil
- Il ressent « la plus grande émotion de sa vie » en réalisant que les écarts de sa théorie à la théorie de Newton explique <u>parfaitement</u> l'anomalie trouvée par Le Verrier



Urbain Le Verrier (1811-1877)

## Experimentum crucis (1/3)

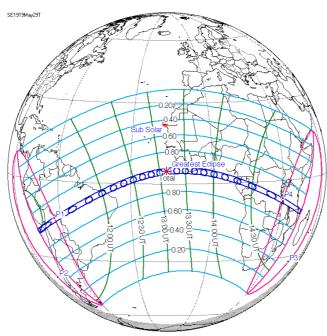
- Newton : les objets s'attirent du fait qu'ils ont une masse. Qu'en est-il de la lumière ?
- Einstein: les objets se déplacent dans un espace déformé. Quelle que soit leur nature, ils vont sentir cette déformation

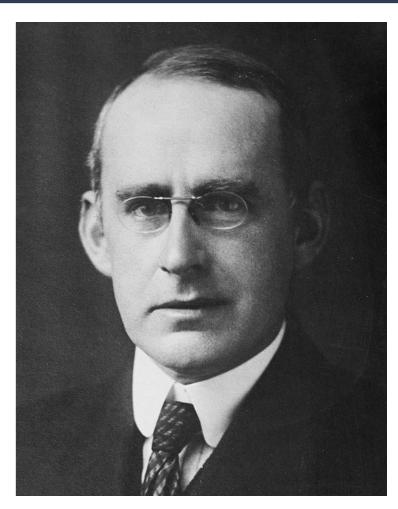


- La matière dévie la lumière
- Quand le Soleil passe devant une étoile, cela va altérer la position des étoiles
- Impossible à remarquer en plein jour, SAUF lors d'une éclipse de Soleil
- Mais toutes les tentatives de 1912, 1914, 1916, 1918 échouent

# Experimentum crucis (2/3)

- Avant même la fin de la première guerre mondiale, l'Anglais Arthur Eddington, pacifiste convaincu, souhaite que la science puisse aider à la reconstitution des peuples
- Quoi de plus symbolique qu'un savant anglais donne raison à un scientifique allemand de naissance contre Isaac Newton?
- Eddington est le chef d'une expédition visant à effectuer le test lors de l'éclipse du 29 mai 1919, au Brésil et dans le golfe de Guinée
- Une des éclipses les plus longues du siècle (6 min 50 s!)
- Et en prime avec un amas d'étoile derrière le Soleil : l'amas des Hyades
- Seul souci : visible uniquement en zone équatoriale

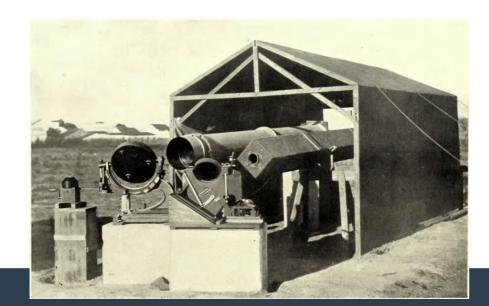




Arthur Eddington (1882-1944)

## Experimentum crucis (3/3)

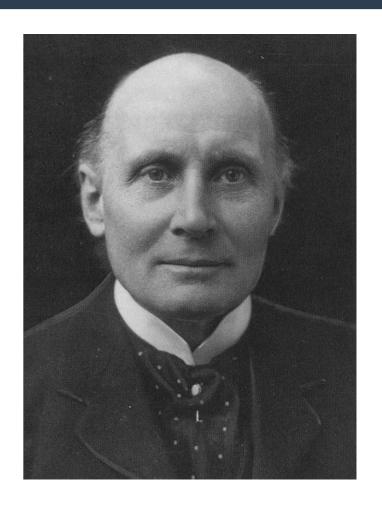
- Deux expéditions sont montées : une sur la côte Atlantique du Brésil, l'autre sur l'archipel de Sao Tomé et Principe dans le golfe de Guinée
- Moyens financiers limités, et conditions plutôt précaires...
- ... Et pas mal d'imprévus
- Au point que la réussite ne tient plus à grand-chose





# La consécration : annonce des résultats par Eddington à la *Royal Society* en novembre 1919

« L'atmosphère d'intense émotion fut exactement celle du drame grec. Nous formions le chœur qui commente les décrets du destin, tels qu'ils sont révélés par le cours de l'événement suprême. Il y avait une valeur de drame dans le très scénique, très traditionnel cérémonial avec, en arrière-plan, le portrait de Newton pour nous rappeler que la plus grande généralisation de la Science, venait, après plus de deux siècles, de recevoir sa première atteinte. Nul intérêt personnel ne se trouvait en jeu : c'est une grande aventure de la pensée qui venait d'aborder heureusement au rivage. »



Alfred Whitehead (1861-1947)

#### Et Einstein devint un dieu

- Les résultats d'Eddington sont repris (discrètement) par le Times le lendemain...
- Et surtout par le New York Times quelques jours plus tard
- À partir de ce moment-là, Einstein acquiert une célébrité mondiale...
- Exemples lors de sa visite à Paris en 1922
  - « un événement sensationnel que, par snobisme, les intellectuels de la capitale ne voulaient pas manquer »
  - « L'engouement de la foule pour une théorie qu'elle ne comprend manifestement pas s'est répandu comme la peste à travers Paris »
  - La venue d'Einstein à Paris « a ranimé et porté à son paroxysme la curiosité du public pour le savant et pour son œuvre ».

# REVOLUTION IN SCIENCE.

# NEW THEORY OF THE UNIVERSE.

#### NEWTONIAN IDEAS OVERTHROWN.

Yesterday afternoon in the rooms of the Royal Society, at a joint session of the Royal and Astronomical Societies, the results obtained by British observers of the total solar eclipse of May 29 were discussed.

The greatest possible interest had been aroused in scientific circles by the hope that rival theories of a fundamental physical problem would be put to the test, and there was a very large attendance of astronomers and physicists. It was generally accepted that the observations were decisive in the verifying of the prediction of the famous physicist, Einstein, stated by the President of the Royal Society as being the most remarkable scientific event since the discovery of the predicted existence of the planet Neptune. But there was different around the scientific event since the discovery of the predicted existence of the planet Neptune. But there was different around the scientific event since the discovery of the predicted existence of the planet Neptune. But there was different around the scientific event since the discovery of the predicted existence of the planet Neptune.

\* \* \*

#### LIGHTS ALL ASKEW ( IN THE HEAVENS

Men of Science More or Less
Agog Over Results of Eclipse
Observations.

#### **EINSTEIN THEORY TRIUMPHS**

Stars Not Where They Seemed or Were Calculated to be, but Nobody Need Worry.

#### A BOOK FOR 12 WISE MEN

No More in All the World Could Comprehend It, Said Einstein When His Daring Publishers Accepted It.

Special Cable to THE NEW YORK TIMES.
LONDON, Nov. 9.—Efforts made to put in words intelligible to the non-scientific public the Einstein theory of light proved by the celipse expedition so far have not been very successful. The new theory was discussed at a recent meeting of the Royal Society and Royal Astronomical Society, Sir Joseph Thomson. President of the Royal Society, declares it is not possible to put Einstein's theory into really intelligible words, set at the same time Thomson adds:

# Ce n'est pas $E = m c^2$ qui a rendu Einstein immortel

- · Mais quelque chose de beaucoup plus compliqué...
- ... Tellement compliqué qu'on (= l'Histoire) a préféré garder  $E = m c^2$
- Vous voulez voir pourquoi?

# Les équations d'Einstein, ça ressemble à ça

$$R_{ab} - \frac{1}{2} R g_{ab} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{ab}$$

Sachant que...

$$R_{ab} = R^{u}_{aub},$$

$$R = g^{uv}R_{uv},$$

$$R^{a}_{bcd} = \partial_{c}\Gamma^{a}_{bd} - \partial_{d}\Gamma^{a}_{bc} + \Gamma^{a}_{cu}\Gamma^{u}_{bd} - \Gamma^{a}_{dv}\Gamma^{v}_{bc}$$

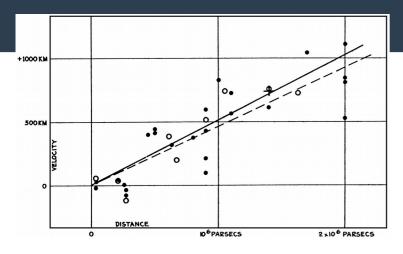
$$\Gamma^{a}_{bc} = g^{au}\Gamma_{ubc},$$

$$\Gamma_{abc} = \frac{1}{2}(\partial_{b}g_{ac} + \partial_{c}g_{ab} - \partial_{a}g_{bc}),$$

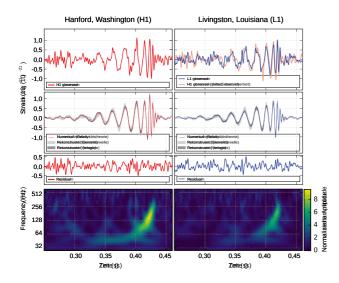
$$g^{ab} = (g_{ab})^{-1},$$

$$T^{ab} = \frac{\delta S_{mat}}{\delta g_{ab}}$$

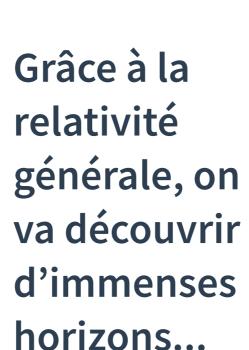
## Place au spectacle!

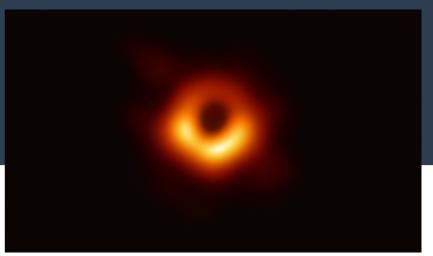


L'expansion de l'Univers

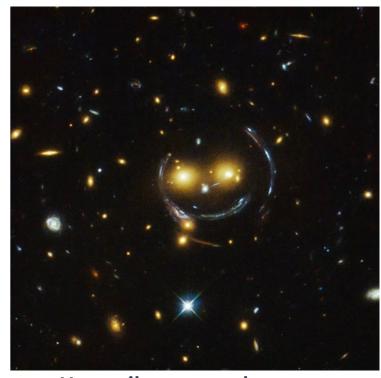


Les ondes gravitationnelles





Les trous noirs



Un outil pour sonder l'Univers

• ... Mais c'est une longue histoire

Merci de votre attention! Alain Riazuelo

Pourquoi  $E = m c^2$ 

comment A-T-ON une collection dirigée par Étienne Klein

humanSciences